

การปรับแต่งคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก

นาย ชูชาติ วุฒิเนตรเนติรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-533-289-5

**TUNING THE QUALITY OF ELECTRICAL POWER SYSTEM  
VIA HARMONIC FILTERS**

**Mr. Chuchard Wuttinatenatiruk**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering Program in Electrical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

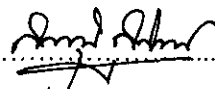
**Academic Year 2003**

**ISBN 974-533-289-5**

การปรับแต่งคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรรองฮาร์มอนิก  
TUNING THE QUALITY OF ELECTRICAL POWER SYSTEM  
VIA HARMONIC FILTERS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



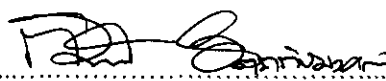
(รองศาสตราจารย์ น.ท.ดร.สราวุฒิ สุจิตจร)

ประธานกรรมการ



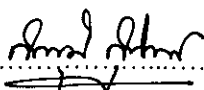
(อาจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริไธย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิติติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ น.ท.ดร.สราวุฒิ สุจิตจร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วรพงษ์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชูชาติ วุฒิเนตรเนติรักษ์ : การปรับแต่งคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรรองฮาร์มอนิก

(TUNING THE QUALITY OF ELECTRICAL POWER SYSTEM VIA HARMONIC FILTERS) อาจารย์ที่ปรึกษา: ดร.อนันต์ อุ่นศิริไทย์, 294 หน้า, ISBN 974-533-289-5

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาใช้งานมากยิ่งขึ้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง โดยจะส่งผลกระทบทำให้กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์เหล่านี้มีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ปกติ ซึ่งเรียกลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ว่าเกิดความเพี้ยนฮาร์มอนิก ดังนั้นถ้ามีอุปกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังมาก จะทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าลดต่ำลง และอุปกรณ์ที่มีความไวต่อสิ่งรบกวนนี้ อาจเกิดข้อผิดพลาดในการทำงานได้ นอกจากนี้กระแสฮาร์มอนิกบางส่วนจะไหลกลับเข้าไปในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมอื่นที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบดังกล่าวได้

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองผลของวงจรรองแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุสำหรับใช้กำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยข้อจำกัดของประสิทธิภาพของวงจรรองนี้ขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมสวิตซ์ตัวเก็บประจุ จึงได้เสนอเทคนิคการควบคุมสวิตซ์ตัวเก็บประจุโดยปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม งานวิจัยนี้ได้ให้การทบทวนวิธีดำเนินงานตามหลักการค้นหาแบบตาบ และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม อธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล ผลจากการจำลองระบบ วัตถุประสงค์ของโปรแกรมจำลองผลเพื่อการออกแบบวงจรรองที่มีประสิทธิภาพ และเพื่อวิเคราะห์กระแสในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวงจรรองแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุนี้สามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกได้ตามต้องการ และเป็นทางเลือกใหม่ในการลดขั้นตอนการคำนวณและเพิ่มความสามารถของวงจรรองแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา 2546.....

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

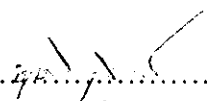

**CHUCHARD WUTTINATENATIRUK : TUNING THE  
QUALITY OF ELECTRICAL POWER SYSTEM VIA  
HARMONIC FILTERS. THESIS ADVISOR : ANANT  
OONSIVILAI, Ph.D. 294 PP. ISBN 974-533-289-5**

HARMONIC /SWITCHED CAPACITOR FILTERS /TABU SEARCH  
/ARTIFICIAL INTELLIGENCE

To date, most industrial plants in Thailand increasingly employ power electronic devices. Such devices possess highly nonlinear characteristic. The characteristic makes the current flowing through the devices distorted from sinusoidal waveform. This is commonly known as harmonic distortion. The more nonlinear power electronic devices are the less power quality in power systems. This causes the error during the operating process. Moreover, some harmonic currents flow back into the distribution system and other neighbor industrial plants. It can degrade the system quality.

This research presents the simulation of the capacitor-switched filter to eliminate the harmonic current in power system. The limitation of the filter's efficiency depends on the capacitor-switched controlled technique of which the control sequence can be generated by artificial intelligent (AI) methods, i.e., Tabu search (TS) and genetic algorithm (GA). The review of the TS and the GA methods is presented. The details of program simulation and its results are discussed. The aims of simulation program are to design an effective filter and analyze the current in power system. The capacitor-switched filter obtained from the design can reduce the expected harmonic current. The proposed algorithm is an alternative method to decrease the steps of calculation and increase the effectiveness of the capacitor-switched filter.

School of Electrical Engineering  
Academic Year 2003

Student's Signature.....  
Advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และ ด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- อาจารย์ ดร.อนันท์ อุ่นศิริไทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งกำลังใจ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

- รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร รองศาสตราจารย์ ไพบุลย์ ไชยนิล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัดถกกิจมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว และ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

- คุณประพล จาระตะคุ และ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

- สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย และในการเผยแพร่ผลงานวิจัย

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เฉชา พวงดาวเรือง และคุณชัชชัย กุลรวรานิชพงษ์ ที่ช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ คุณวิชัย ศรีสุรภักดิ์ ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งกำลังใจ ในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ชูชาติ วุฒิเนตรเนตรภักดิ์

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	5
1.3 ขอบเขตของเรื่อง.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	8
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ .....	8
<b>2 ทฤษฎีการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก .....</b>	<b>10</b>
2.1 บทนำ.....	10
2.2 ตำแหน่งการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก .....	13
2.2.1 การตรวจวัดกระแสด้านโหลด.....	13
2.2.2 การตรวจวัดกระแสด้านแหล่งจ่าย.....	14
2.3 วิธีการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกแบบต่างๆ.....	15
2.3.1 การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ .....	16
2.3.2 การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีวงจรรองบนแกนหมุน.....	20
2.3.2.1 การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.2	การตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับ.....	22
2.3.3	การตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกด้วยวิธีวิเคราะห์สเปกตรัม.....	24
2.4	การสร้างกระแสชดเชยเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบ.....	25
2.5	สรุป.....	28
<b>3</b>	<b>การตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิก.....</b>	<b>29</b>
3.1	บทนำ.....	29
3.2	การตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก.....	29
3.3	การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกด้วยอนุกรมฟูรีเยร์.....	30
3.4	การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกด้วยการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว.....	40
3.4.1	หลักในการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณเต็มหน่วย.....	41
3.4.2	หลักการในการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว.....	44
3.5	สรุป.....	48
<b>4</b>	<b>วงจรกรองฮาร์โมนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ.....</b>	<b>50</b>
4.1	บทนำ.....	50
4.2	การวิเคราะห์วงจรกรองฮาร์โมนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผล.....	50
4.3	การหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยการค้นหาแบบเกรเดียนต์.....	57
4.4	การสั่งการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์โมนิก.....	59
4.5	สรุป.....	60
<b>5</b>	<b>การค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์.....</b>	<b>62</b>
5.1	บทนำ.....	62
5.2	การค้นหาแบบตามู.....	62
5.2.1	องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตามู.....	63
5.2.2	หลักการทํางานของวิธีการค้นหาแบบตามู.....	64
5.3	การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบตามูเพื่อการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก.....	67



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4 การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบตาบอดเพื่อการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ ที่เหมาะสมที่สุด.....	73
5.5 การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม.....	84
5.5.1 หลักการของจินเนติกอัลกอริทึม.....	84
5.5.2 ขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม.....	86
5.5.3 ความหมายและคำสั่งที่ใช้ในการทำงานแต่ละขั้นตอนของ จินเนติกอัลกอริทึม.....	87
5.6 การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการวิเคราะห์ กระแสฮาร์มอนิก.....	91
5.6.1 การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสม.....	92
5.6.2 การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสม.....	94
5.6.3 การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม.....	94
5.6.4 การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม.....	95
5.6.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม.....	97
5.6.6 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่เหมาะสม.....	98
5.7 การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บ ประจุที่เหมาะสมที่สุด.....	99
5.7.1 การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสม.....	101
5.7.2 การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสม.....	102
5.7.3 การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม.....	103
5.7.4 การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม.....	104
5.7.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม.....	105
5.7.6 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่เหมาะสม.....	106
5.5 สรุป.....	109
6 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ.....	110

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

6.1	บทนำ.....	110
6.2	ผลการทดสอบการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก .....	110
6.3	ผลการทดสอบการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก.....	113
6.4	ผลการทดสอบการสร้างกระแสชดเชยของวงจรกรองฮาร์มอนิก แบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ.....	119
6.5	สรุป .....	148
7	สรุปและข้อเสนอแนะ .....	149
7.1	บทนำ.....	149
7.2	สรุป .....	149
7.3	ข้อเสนอแนะ .....	151
	เอกสารอ้างอิง.....	152
	<b>ภาคผนวก</b>	
	ภาคผนวก ก โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้ในการควบคุมตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก.....	156
	ภาคผนวก ข โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วย วิธีการค้นหาแบบตาม.....	159
	ภาคผนวก ค โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วย วิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม .....	173
	ภาคผนวก ง โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วย วิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว.....	178
	ภาคผนวก จ โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม.....	181
	ภาคผนวก ฉ โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม.....	193
	ภาคผนวก ช โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์.....	201

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ช	โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานรวมของโปรแกรม การควบคุมชุดตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก การหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสม และสั่งการทำงาน ของสวิตช์ตัวเก็บประจุ .....210
ภาคผนวก ฉ	แสดงรายละเอียดข้อมูลต่างๆ ของชุดตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก.....213
ภาคผนวก ชฎ	มาตรฐานและการตรวจวัดฮาร์โมนิก .....238
ภาคผนวก ชฏ	การวิเคราะห์วงจรกรองฮาร์โมนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผล .....242
ภาคผนวก ชฒ	ตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส .....249
ภาคผนวก ชณ	การแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส .....260
ภาคผนวก ชด	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....268
ประวัติผู้เขียน.....	294

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ชนิดและคุณสมบัติของสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้าที่ทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าต่ำลง .....	1
1.2 จี๊ดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ ณ จุดต่อร่วม .....	7
3.1 การทำบิตรีเวิร์ส .....	47
5.1 ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงานของการทำงานแบบตามู .....	64
5.2 ความหมายของคำศัพท์และคำเริ่มต้นของการค้นหาแบบตามูในการค้นหา พารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ .....	69
5.3 การเปรียบเทียบการหาค่า frequency_max และ restriction_period ที่เหมาะสม ในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยการค้นหาแบบตามู .....	70
5.4 การเปรียบเทียบการหาค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ที่เหมาะสม ในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยการค้นหาแบบตามู.....	71
5.5 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด ของการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุด้วยการค้นหาแบบตามู.....	73
5.6 ความหมายของคำศัพท์และคำเริ่มต้นของการค้นหาแบบตามูในการค้นหา รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ .....	78
5.7 การเปรียบเทียบจำนวนรอบที่เหมาะสมที่สุดของการหารูปแบบ การสวิตช์ตัวเก็บประจุด้วยการค้นหาแบบตามู.....	78
5.8 การเปรียบเทียบการหาค่า frequency_max และ restriction_period ที่เหมาะสม ในการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุด้วยการค้นหาแบบตามูโดยพิจารณาจาก ค่าความคลาดเคลื่อน .....	79
5.9 คำเริ่มต้นของพารามิเตอร์ในการค้นหาแบบตามู .....	83
5.10 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสมของการวิเคราะห์ กระแสฮาร์มอนิก .....	93
5.11 ผลการทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมของการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก .....	94

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.12 ผลการทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมของการวิเคราะห์ กระแสฮาร์โมนิก .....	95
5.13 ผลการทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม (GGAP)ของการ วิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก .....	96
5.14 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมของการ วิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก .....	97
5.15 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่เหมาะสมของการ วิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก .....	98
5.16 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสม ของการหารูปแบบการสวิตช์ ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด.....	101
5.17 ผลการทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมของการหารูปแบบ การสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด.....	102
5.18 ผลการทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมของการหารูปแบบ การสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด.....	103
5.19 ผลการทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม (GGAP) ของการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด.....	104
5.20 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม ของการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด.....	105
5.21 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่เหมาะสม ของการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด.....	106
5.22 ค่าตัวแปรของเงินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	108
6.1 ผลการทดสอบชุดตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิก ณ ฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ.....	113
6.2 เปรียบเทียบการหาค้นหาค่าตอบของการค้นหาแบบตาบูลและการค้นหาแบบเงินเนติก อัลกอริทึมกับเครื่อง Power Harmonic Analyzer .....	115

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.3	เปรียบเทียบการหาค้นหาคำตอบของการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตาม และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม .....117
6.4	เปรียบเทียบการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธี การค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตาม และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม....133
6.5	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน PRC-PQG-01/1998 ( $I_h A_{rms}$ ) .....136
6.6	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน IEEE Std 519-1992 ( $\%I_h$ )..... 137
6.7	เปรียบเทียบคุณสมบัติการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิก ของสัญญาณตัวอย่างที่ 4 และสัญญาณตัวอย่างที่ 5 ด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตาม และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม.....138
ญ.1	ค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกตาม IEEE Std. 519-1992 .....239
ญ.2	ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ ที่จุดต่อรวม* ตาม PRC-PQC-01/1998 .....241

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	วงจรมุมลหนึ่งเฟสของวงจรกรองแบบพาสซีฟ.....4
1.2	วงจรมุมลหนึ่งเฟสของวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน .....4
1.3	วงจรกรองแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ.....5
2.1	วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานชนิด VSI .....10
2.2	วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานชนิด CSI .....11
2.3	วงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม.....12
2.4	วงจรกรองแอกทีฟแบบเงื่อนไขคุณภาพกำลังรวม.....12
2.5	แผนภูมิการทำงานของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ.....13
2.6	วงจรมุมล 1 เฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจวัดกระแสด้านโหลด.....13
2.7	บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจวัดกระแสด้านโหลด .....14
2.8	วงจรมุมล 1 เฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจวัดกระแสด้านแหล่งจ่าย..... 15
2.9	บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจวัดกระแสด้านแหล่งจ่าย .....16
2.10	แผนภาพแสดงการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ..19
2.11	เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz.....21
2.12	แผนภาพแสดงการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับโดยใช้วิธีการบนแกนหมุน.....21
2.13	เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิง ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ $h\omega$ .....22
2.14	แผนภาพแสดงการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ $h$ โดยใช้วงจรกรองบนแกนหมุน .....23
2.15	การเชื่อมต่อวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ.....25
2.16	แผนภาพแสดงการควบคุมกระแสชดเชย .....27
2.17	รูปแบบการสับสวิตช์ของสวิตช์ $Sw_1, Sw_2$ .....27
3.1	แผนภาพแสดงการทำงานของชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก.....30
3.2	ฟังก์ชันรายคาบ .....31
3.3	(a) ฟังก์ชันโคไซน์และไซน์คาบ $2\pi$ .....32
	(b) สัญญาณไซน์ที่ฮาร์มอนิก $n = 1, 2, 3$ .....32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	สัญญาณไซน์ชอยด์ของการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณไซน์ชอยด์ต่อเนื่อง .....42
3.5	วิธีการคำนวณฟาสท์ฟูรีเยร์ 8 จุด .....46
4.1	การเชื่อมต่อวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ.....51
4.2	วงจรมวลของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุในการวิเคราะห์ขยายผล.....51
4.3	รูปแบบการสับสวิตช์ $Sw_1, Sw_2$ .....51
4.4	แผนภาพแสดงการทำงานของชุดสั่งการสวิตช์ตัวเก็บประจุ.....60
5.1	กระบวนการทำงานของการค้นหาแบบตามู.....65
5.2	ลักษณะของพื้นที่ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ .....65
5.3	แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมที่อาศัยหลักการของวิธีการค้นหาแบบตามู.....66
5.4	แผนภาพแสดงอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบการทำงาน ของการค้นหาแบบตามูในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก .....71
5.5	อัลกอริทึมย่อยในส่วนการหาขนาดของ $step\_size$ ในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก .....72
5.6	รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ .....74
5.7	แผนภาพอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบการทำงาน ของการค้นหาแบบตามูในการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ.....81
5.8	อัลกอริทึมย่อยในส่วนการหาขนาดของ $step\_size$ ในการหารูปแบบ การสวิตช์ตัวเก็บประจุ.....82
5.9	วัฏจักรการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม.....85
6.1	เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณกับ สัญญาณที่ตรวจจับได้จากชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก .....111
6.2	เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 และ 3 ที่สร้างขึ้นจากเครื่อง กำเนิดสัญญาณกับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก .....111
6.3	เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 1, 3 และ 5 ที่สร้างขึ้นจากเครื่อง กำเนิดสัญญาณกับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก.....112



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.4	เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 1, 3, 5 และ 7 ที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากชุดตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก.....112
6.5	สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer (Fluke 41B) ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....113
6.6	เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer กับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม กรณีไม่มีสัญญาณรบกวนขา ..... 114
6.7	เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer(PHA) กับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูรีเยร์-แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม กรณีมีสัญญาณรบกวนขา โดยมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน(SNR) เท่ากับ 12.....116
6.8	เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer กับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม กรณีมีสัญญาณรบกวนขา โดยมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน(SNR) เท่ากับ 25 .....116
6.9	เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer กับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม กรณีมีสัญญาณรบกวนขา โดยมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน(SNR) เท่ากับ 50 .....117
6.10	สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 1 จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer (Fluke 41B) ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี .....121
6.11	สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิก โดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ .....121

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12	สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....122
6.13	สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม.....122
6.14	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 1 ก่อนการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิก .....123
6.15	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 1 หลังการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์.....123
6.16	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 1 หลังการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....124
6.17	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 1 หลังการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม .....124
6.18	สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer (Fluke 41B) ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....125
6.19	สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์.....125
6.20	สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....126
6.21	สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม .....126
6.22	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 ก่อนการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิก .....127
6.23	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 หลังการชดเชยด้วยวงจรรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์.....127

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.24	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 2 หลังการชดเชยด้วย วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....128
6.25	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 2 หลังการชดเชยด้วย วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม .....128
6.26	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer (Fluke 41B) ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี .....129
6.27	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 ก่อนและหลังการชดเชยด้วย วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์.....129
6.28	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 ก่อนและหลังการชดเชยด้วย วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....130
6.29	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 ก่อนและหลังการชดเชยด้วย วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม .....130
6.30	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 ก่อนการชดเชยด้วย วงจรรองฮาร์มอนิก .....131
6.31	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 หลังการชดเชยด้วย วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์.....131
6.32	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 หลังการชดเชยด้วย วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....132
6.33	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 หลังการชดเชยด้วย วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม .....132
6.34	รูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรรองฮาร์มอนิกเพื่อชดเชยสัญญาณกระแส ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู .....134
6.35	รูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรรองฮาร์มอนิกเพื่อชดเชยสัญญาณกระแส ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 2 ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู .....135

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.36	รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกเพื่อชดเชยสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู.....135
6.37	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 จากการจำลองผลตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส.....140
6.38	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์.....140
6.39	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....141
6.40	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม .....141
6.41	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 ก่อนการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก .....142
6.42	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ .....142
6.43	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....143
6.44	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม .....143
6.45	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 จากการจำลองผลตัวควบคุมการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส .....144
6.46	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์.....144
6.47	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....145

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.48	สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม .....145
6.49	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 ก่อนการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิก .....146
6.50	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ .....146
6.51	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบดาบ.....147
6.52	สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึม .....147
ฎ.1	วงจรควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟส .....250
ฎ.2	วงจรควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟส โดยมีแคโทดร่วม .....251
ฎ.3	วงจรควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟส โดยมีไทรสเตอร์ 1 ตัว .....252
ฎ.4	วงจรควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟส โดยมีโหลดแบบอาร์แอล .....254
ฎ.5	รูปคลื่นสัญญาณแรงดันขาเข้าของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส .....258
ฎ.6	รูปคลื่นสัญญาณกระแสโหลดของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส.....258
ฎ.7	รูปคลื่นสัญญาณกระแสโหลดของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงฮาร์มอนิกลำดับที่ 19 .....259
ฐ.1	วงจรแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส .....262
ฐ.2	รูปคลื่นสัญญาณแรงดันขาเข้าของวงจรควบคุมการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส .....266
ฐ.3	รูปคลื่นสัญญาณกระแสโหลดของวงจรควบคุมการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส .....266
ฐ.4	รูปคลื่นสัญญาณกระแสโหลดของวงจรควบคุมการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงฮาร์มอนิกลำดับที่ 19 .....267

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการมุ่งเน้นที่จะทำให้ระบบไฟฟ้ามีความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องโดยมีความเชื่อถือได้และเสถียรภาพสูง อย่างไรก็ตามการที่ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้และเสถียรภาพสูงนั้นยังไม่เพียงพอซึ่งต้องพิจารณาถึงประเด็นที่ลดลงไปกว่านั้นอีกก็คือคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power quality) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรบกวนในระบบไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ การทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ การเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้า และพฤติกรรมของโหลดในระบบไฟฟ้าบางชนิด เป็นต้น โดยลักษณะของสิ่งรบกวนที่ทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าต่ำลงลงแสดงได้ดังตารางที่ 1.1 (IEEE Std 1159-1995)

ตารางที่ 1.1 ชนิดและคุณสมบัติของสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้าที่ทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าต่ำลง

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 ms rise	50 ns -1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Medium frequency	5-500 kHz	20 $\mu$ s	0-8 pu
1.2.3 High frequency	0.5-5 MHz	5 $\mu$ s	0-4 pu
2.0 Short duration variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Sag		0.5-30 cycles	0.1-0.9 pu

ตารางที่ 1.1 ชนิดและคุณสมบัติของสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้าที่ทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าต่ำลง (ต่อ)

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical magnitude
2.1.2 Swell		0.5-30 cycles	1.1-1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		0.5 cycles-3 s	< 0.1
2.2.2 Sag		30 cycles-3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles-3 s	1.1-1.4 pu
2.3 Temporary			
2.2.1 Interruption		3 s-1 min	< 0.1
2.2.2 Sag		3 s-1 min	0.1-0.9 pu
2.2.3 Swell		3 s-1 min	1.1-1.2 pu
3.0 Long duration variations			
3.1 Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8-0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1-1.2 pu
4.0 Voltage imbalance		Steady state	0.5-2%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		Steady state	0-0.1%
5.2 Harmonics	0-100 <sup>th</sup> H	Steady state	0-20%
5.3 Interharmonics	0-6 kHz	Steady state	0-2%
5.4 Notching		Steady state	
5.5 Noise	Broad-band	Steady state	0-1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	Intermittent	0.1-7%
7.0 Power frequency variations		< 10 s	

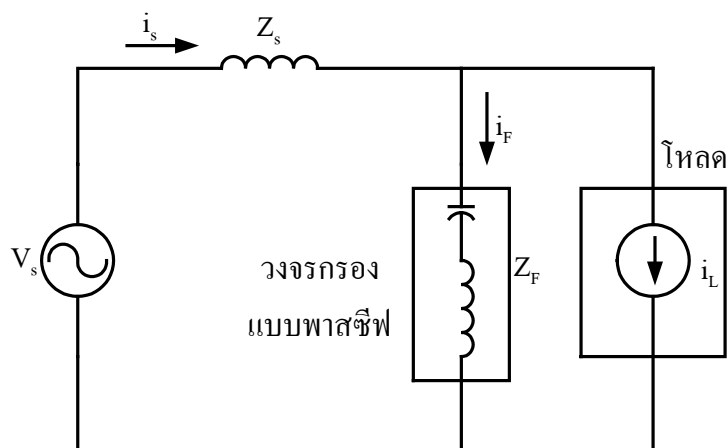
โดยในที่นี้จะพิจารณาสี่รบกวนในระบบไฟฟ้าที่ทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าต่ำลงคือ ฮาร์โมนิก ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยกำลังพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาใช้งานมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า ตัวเรียงกระแส และ ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม

กระบวนการผลิตให้มีคุณภาพและได้ปริมาณตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ การใช้อุปกรณ์ดังกล่าวนับว่าเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมให้เจริญก้าวหน้าขึ้นมาอีกระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์เหล่านี้มีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ จึงส่งผลกระทบต่อให้รูปคลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากปกติ กล่าวคือ มีความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่มูลฐานรวมอยู่ในรูปคลื่นปกตินี้ด้วย ซึ่งเรียกลักษณะนี้ว่า เกิดความเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic distortion) ดังนั้นถ้ามีอุปกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังมาก จะทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าลดต่ำลง หรือการจ่ายไฟฟ้ามีมลภาวะมากขึ้นนั่นเอง อุปกรณ์ที่มีความไวต่อสิ่งรบกวนนี้ จึงอาจทำงานผิดพลาดได้ นอกจากนี้ กระแสฮาร์มอนิกบางส่วนจะไหลกลับเข้าไปในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมอื่นที่อยู่ข้างเคียง ตามหลักทฤษฎีของกระแสแบ่งไหล ซึ่งจะมีค่าน้อยเพียงใดขึ้นกับสัดส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ของส่วนนั้นๆ

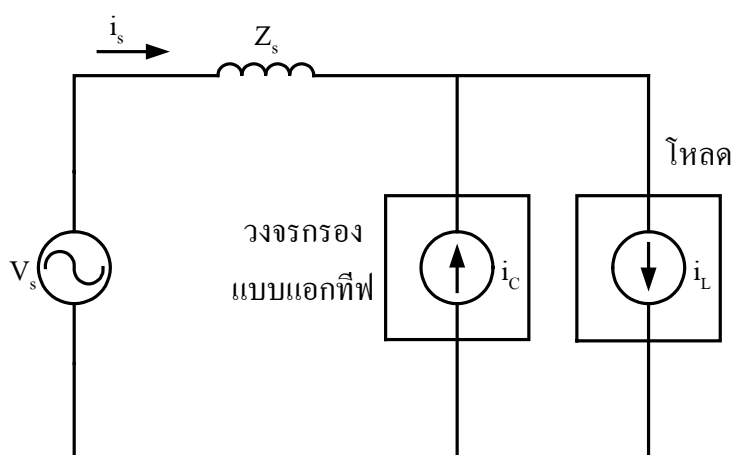
สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาของฮาร์มอนิกที่ผ่านมา ได้มีการนำเอาวงจรกรองแบบพาสซีฟ (Passive filter) เข้ามาติดตั้งซึ่งแบ่งประเภทออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ วงจรกรองพาสซีฟแบบจูน และวงจรกรองพาสซีฟแบบดีจูน ทั้งนี้เนื่องจากชุดกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่กำหนด ทำให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านชุดกรองฮาร์มอนิกลงกราวด์แทนที่จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ชุดกรองฮาร์มอนิกดังกล่าวยังสามารถช่วยปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบให้เหมาะสม ซึ่งสามารถเขียนแสดงเป็นวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ ดังรูปที่ 1.1 แต่การใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ ได้แก่

1. ลักษณะสมบัติการกรองของวงจรกรองแบบพาสซีฟขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลัง ( $Z_s$ ) ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้หาก โครงสร้างของระบบกำลังมีการเปลี่ยนแปลง
2. วงจรกรองจะมีผลของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานกับ  $Z_s$  เมื่อมองจากทางด้านโหลดซึ่งเมื่อถูกกระตุ้นด้วยกระแสฮาร์มอนิกจากโหลด ก็อาจจะส่งผลให้เกิดกระแสปริมาณสูงไหลระหว่างแหล่งจ่าย กับวงจรกรองแบบพาสซีฟได้ นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดแรงดันสูงตกคร่อมโหลดและทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบเสียหายได้อีกเช่นกัน
3. อาจเกิดกระแสเกินค่าพิกัดไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ในกรณีที่แรงดันจากแหล่งจ่ายมีส่วนของฮาร์มอนิกปะปนเข้ามาด้วย





รูปที่ 1.1 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองแบบพาสซีฟ

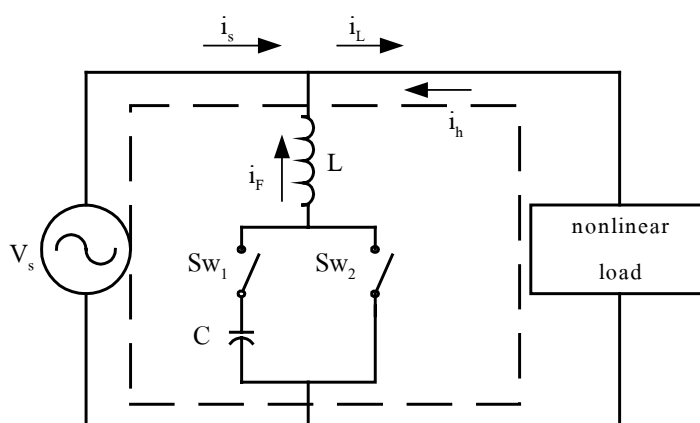


รูปที่ 1.2 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองแอคทีฟแบบขนาน

จากข้อจำกัดของวงจรกรองแบบพาสซีฟดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนานำเอาวงจรกรองแบบแอคทีฟ (Active filter) เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ดังรูปที่ 1.2 โดยวงจรกรองแบบแอคทีฟจะต่อขนานกับโหลด และจะทำตัวเสมือนเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ทำหน้าที่ในการผลิตกระแสในส่วนของฮาร์มอนิก ขึ้นมาหักล้างกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลด ทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายมีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้วงจรกรองแบบแอคทีฟอย่างเดียวจะทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีขนาด kVA สูง และราคาแพง จากเหตุผลดังกล่าวจึงนำไปสู่การพัฒนาวงจรกรองแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

(Switched Capacitor Filters: SCF) โดยข้อจำกัดของประสิทธิภาพของวงจรกรองขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมสวิตช์ตัวเก็บประจุ

จากข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีการนำเสนอเทคนิคการควบคุมสวิตช์ตัวเก็บประจุโดยปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เพื่อให้เป็นทางเลือกใหม่ในการลดขั้นตอนการคำนวณและเพิ่มความสามารถของวงจรกรองแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ



รูปที่ 1.3 วงจรกรองแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดและผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ที่ใช้วิเคราะห์และกรองฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง
3. เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมในการควบคุมการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองสำหรับลดกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่ำในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานของ IEEE std. 519-1992 และ PRC-PQG-01/1998 (ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม กฟผ. กฟภ. กฟน.) เป็นต้น
4. เพื่อเพิ่มคุณภาพของระบบไฟฟ้า
5. เพื่อการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์กระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบจะพิจารณาฮาร์มอนิกอันดับต่ำกว่า 19 ลงมา

2. พิจารณากระแสฮาร์โมนิกที่มีค่าสูงกว่า 0.04 A (0.00002 pu) เทียบกับกระแสสูงสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (2000 A) เท่านั้น
3. ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นของระบบไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้นๆ

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองวงจรกรองแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์
2. แบบจำลองวงจรกรองแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุที่พัฒนาขึ้นต้องสามารถกำจัดฮาร์โมนิกอันดับที่ต่ำกว่า 19 ซึ่งเกิดจากการปรับโหลดตามที่ต้องการได้ โดยจะส่งผลให้กระแสฮาร์โมนิกในระบบกำลังในอันดับที่เลือกกำจัด เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน PRC-PQG-01/1998 ดังตารางที่ 1.2

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ดำเนินการตรวจวัดและเก็บข้อมูลฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการจัดเก็บ ณ อาคารวิชาการ ด้วยเครื่อง Power harmonics analyzer (Fluke 41B)
2. ดำเนินการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกจากข้อมูลที่ได้ ในขั้นตอนที่ 1
3. ดำเนินการศึกษาวิธีการกรองฮาร์โมนิกแบบพาสซีฟและแอคทีฟ
4. ดำเนินการศึกษาวิธีการวิเคราะห์และการตรวจวัดฮาร์โมนิก ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะวิเคราะห์ผลของกระแสฮาร์โมนิกในรูปของอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series) โดยพิจารณาฮาร์โมนิกอันดับที่ 0 ถึงอันดับที่ 19
5. ดำเนินการศึกษาวงจรกรองแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ หลักการพื้นฐานในการสวิตช์ตัวเก็บประจุ
6. ดำเนินการพัฒนาอัลกอริทึมในการสวิตช์ตัวเก็บประจุโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม
7. ดำเนินการจำลองระบบพร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น
8. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.2 ชีตจำกัดกระแสฮาร์โมนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ ณ จุดต่อร่วม\*

ระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วม(kV)	กำลังปรากฏลัดวงจร จร(MVA)**	อันดับฮาร์โมนิกและชีตจำกัดของกระแส ( $A_{rms}$ )																	
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.4	10	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11,12,22 and 24	100	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
33	500	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
69	500	8.5	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 and above	1000	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

หมายเหตุ:

- \* : ขอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับชีตจำกัดกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ
- \*\* : หากค่ากำลังปรากฏลัดวงจรต่ำสุด ณ จุดต่อร่วมมีค่าแตกต่างจากค่ากำลังปรากฏลัดวงจรที่ระบุในตารางมาก ขอมให้ปรับค่ากระแสฮาร์โมนิกที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบด้วยสมการที่ (1-1)

$$i_h = i_{hp} * \frac{MVA1}{MVA} \tag{1-1}$$

$i_h$            กระแสฮาร์โมนิก(A) ลำดับที่ h ที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบ เมื่อค่ากำลังปรากฏลัดวงจรต่ำสุด ณ จุดต่อร่วมมีค่าไม่เท่ากับค่ากำลังปรากฏลัดวงจรที่ระบุในตาราง

$i_{hp}$            กระแสฮาร์โมนิก(A) ลำดับที่ h ที่กำหนดในตาราง

MVA1       ค่ากำลังปรากฏลัดวงจรต่ำสุด ณ จุดต่อร่วมมีค่าไม่เท่ากับค่ากำลังปรากฏลัดวงจรที่ระบุในตาราง

MVA       ค่ากำลังปรากฏลัดวงจรที่ระบุในตาราง

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

2. สามารถปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้นได้ในเชิงทฤษฎี
3. สามารถนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ประโยชน์ทางด้านกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า
4. พัฒนาเทคนิคการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่ดีกว่าการสวิตซ์ตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรกรองฮาร์มอนิก
5. ผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาสามารถที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้

## 1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท และ 14 ภาคผนวก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก โดยเริ่มตั้งแต่ตำแหน่งการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก วิธีการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกวิธีต่างๆ และการสร้างกระแสชดเชยให้กับระบบ

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก โดยอธิบายถึงการออกแบบและการทำงานของชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกและการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีอนุกรมฟูริเยร์ และวิธีการแปลงฟาสท์ฟูริเยร์

บทที่ 4 กล่าวถึงวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ โดยอธิบายถึงการออกแบบและการทำงานของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ มาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก และการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก

บทที่ 6 เป็นการแสดงผลการทดสอบวิธีการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก และวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

บทที่ 7 เป็นการสรุปและให้ข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้ในการควบคุมชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

ภาคผนวก ข โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม

ภาคผนวก ค โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

ภาคผนวก ง โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว

ภาคผนวก จ โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู

ภาคผนวก ฉ โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

ภาคผนวก ช โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์

ภาคผนวก ซ โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานรวมของโปรแกรมการควบคุมชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก การหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสม และสั่งการทำงานของสวิตช์ตัวเก็บประจุ

ภาคผนวก ฌ แสดงรายละเอียดข้อมูลต่างๆ ของชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

ภาคผนวก ญ มาตรฐานและการตรวจวัดฮาร์มอนิก

ภาคผนวก ฎ การวิเคราะห์ห้วงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผล

ภาคผนวก ฏ ตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส

ภาคผนวก ฐ การแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส

ภาคผนวก ท บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

## บทที่ 2

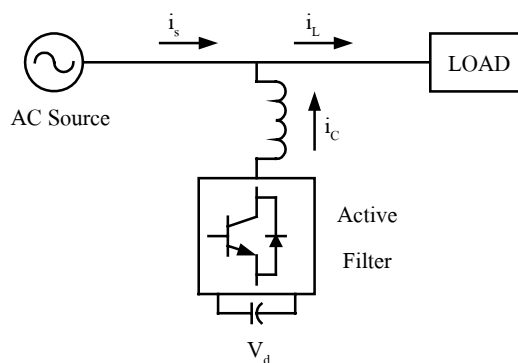
### ทฤษฎีการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

#### 2.1 บทนำ

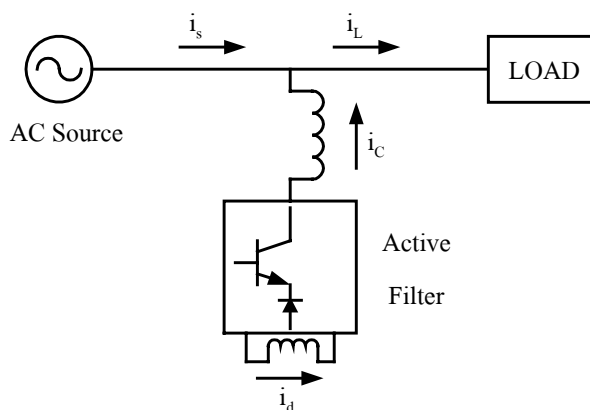
วงจรกรองแอกทีฟสามารถทำหน้าที่ได้หลายอย่างขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของวงจรกรองแอกทีฟเพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพกำลังของระบบไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบที่จุดเชื่อมต่อร่วมเพื่อที่จะหักล้างกับกระแสผิดเพี้ยนของแหล่งจ่าย นอกจากนี้วงจรกรองแอกทีฟยังมีรูปแบบอื่นเช่น วงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม และวงจรกรองแอกทีฟแบบรวม วงจรกรองแอกทีฟสามารถจำแนกออกได้หลายชนิด และมีลักษณะที่ชัดเจนในแต่ละชนิดซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก

การจำแนกวงจรกรองแอกทีฟตามชนิดเครื่องแปลงผันกำลัง

เครื่องแปลงผันกำลังสามารถพิจารณาได้สองชนิดหลักคือ อินเวอร์เตอร์ใช้แหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage-Source Inverter: VSI) และอินเวอร์เตอร์ใช้แหล่งกำเนิดกระแส (Current-Source Inverter: CSI) วงจรกรองแอกทีฟนี้จึงมีชื่อว่า วงจรกรองแอกทีฟชนิด VSI (VSI-type active filters) และวงจรกรองแอกทีฟชนิด CSI (CSI-type active filters) วงจรกรองแอกทีฟชนิด VSI เกิดจากตัวเก็บประจุที่รับแรงดันกระแสตรง ขณะที่วงจรกรองแอกทีฟชนิด CSI เกิดจากตัวเหนี่ยวนำที่รับกระแสกระแสตรง ซึ่งวงจรกรองแอกทีฟชนิด VSI เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีขนาดเล็ก ราคาถูก และสามารถติดตั้งเพิ่มเติมได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองแอกทีฟชนิด CSI (Ghausi and Laker,1981).



รูปที่ 2.1 วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานชนิด VSI



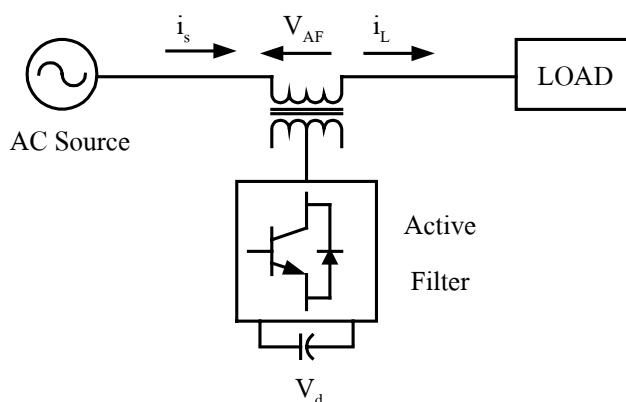
รูปที่ 2.2 วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานชนิด CSI

การจำแนกวงจรกรองแอกทีฟตามโทโพโลยี (Topology)

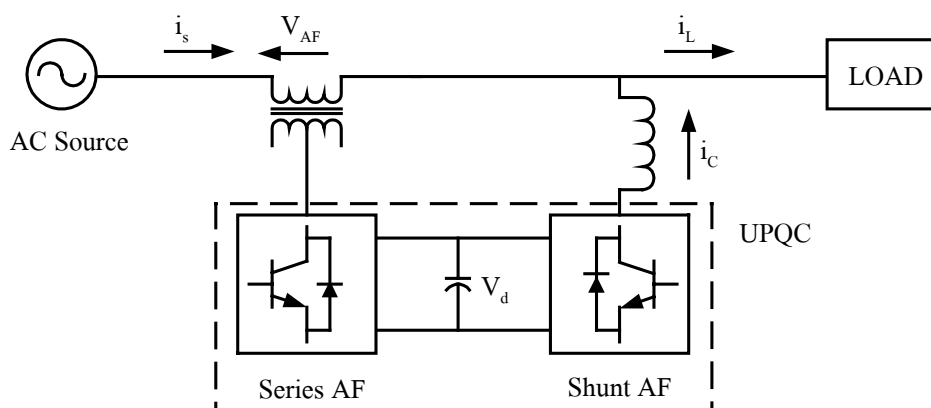
โดยสามารถจำแนกวงจรกรองแอกทีฟได้ 3 ชนิดคือ วงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน (Shunt active filter) วงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม (Series active filter) และวงจรกรองแอกทีฟแบบเงื่อนไขคุณภาพกำลังรวม (Unified power quality conditioner) โดยอันสุดท้ายเป็นการรวมกันของ 2 ชนิดแรก ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 รูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 ตามลำดับ

วงจรกรองแอกทีฟสามารถใช้ในการกรองกระแสฮาร์มอนิก ทำให้กำลังรีแอกทีฟน้อยที่สุด และทำให้กระแส 3 เฟสเกิดสมดุล โดยการฉีดกระแสชดเชยให้มีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสตรงข้ามกันของส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกและส่วนประกอบแอสรีแอกทีฟที่ต้องการ โดยโหลดไม่เชิงเส้น ณ จุดเชื่อมต่อ โดยผลที่ได้นี้ทำให้กระแส ณ จุดเชื่อมต่อมีรูปคลื่นเป็นไซน์ชอยด์ และมีเฟสตรงกับแหล่งจ่ายแรงดัน วงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม ปกติแล้วจะต่ออนุกรมระหว่างแหล่งจ่ายกระแสสลับกับโหลดผ่านทางหม้อแปลงจัดภาวะเข้าคู่ วงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรมทำหน้าที่จัดสมดุลและควบคุมแรงดันที่ขั้วต่อ โหลด โดยชดเชยแรงดันตก (Voltage sags) แรงดันสเวลล์ (Voltage swell) และปิดกั้นแรงดันฮาร์มอนิกจากระบบ วงจรกรองแอกทีฟแบบเงื่อนไขคุณภาพกำลังรวม เป็นการรวมคุณสมบัติเด่นของวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานและวงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสียคือ ราคาสูง และมีการควบคุมอุปกรณ์ โขลิตสเตรตจำนวนมากและซับซ้อนยุ่งยาก





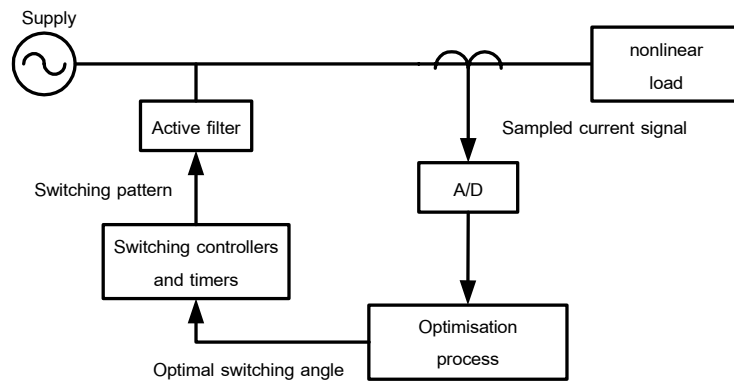
รูปที่ 2.3 วงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม



รูปที่ 2.4 วงจรกรองแอกทีฟแบบเงื่อนไขคุณภาพกำลังรวม

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาถึงผลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นและการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก จากคุณสมบัติของวงจรกรองแอกทีฟชนิดต่างๆ ข้างต้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานชนิด VSI ในการพิจารณาและเรียกวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานชนิด VSI สั้นๆ ว่าวงจรกรองแอกทีฟ โดยมีโครงสร้างการทำงานดังรูปที่ 2.5 วงจรกรองแอกทีฟจะทำการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกจากระบบเข้ามาเพื่อคำนวณหาค่ากระแสที่ต้องชดเชย จากนั้นจะสร้างกระแสชดเชยตามค่าที่คำนวณได้และจ่ายกลับเข้าไปในระบบ เพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิก ทำให้รูปคลื่นกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียงไซน์มากขึ้น จากหลักการดังกล่าวจะพบว่าวงจรกรองแอกทีฟจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนได้แก่

1. วิธีการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก
2. การสร้างกระแสชดเชยเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบ



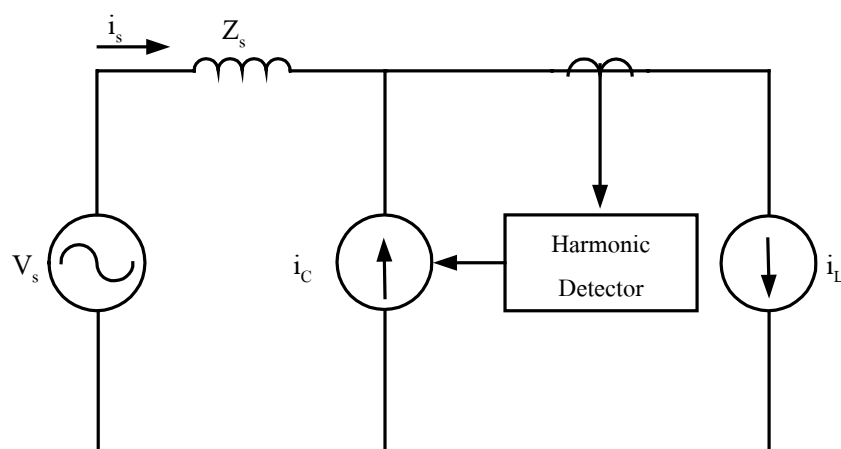
รูปที่ 2.5 แผนภูมิการทำงานของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

## 2.2 ตำแหน่งการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก

วงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยทั่วไป จะทำการตรวจวัดกระแสเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าฮาร์มอนิกได้ในสองลักษณะคือ

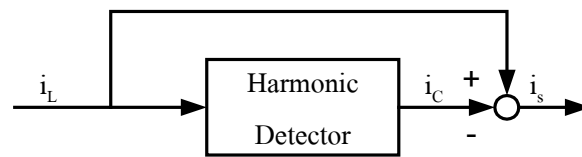
### 2.2.1 การตรวจวัดกระแสด้านโหลด

การตรวจวัดกระแสในลักษณะนี้มีวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในกรณีที่โหลดมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแสหรือมีอิมพีแดนซ์สูง การทำงานของวงจรกรองจะมีลักษณะเป็นแบบวงรอบเปิดดังแสดงตามรูปที่ 2.7 ซึ่งในกรณีเช่นนี้เราสามารถคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดจากกระแสโหลด และสามารถใช้เป็นคำสั่งกระแสชดเชยได้โดยตรง การตรวจวัดในลักษณะนี้ทำให้วงจรกรองแอกทีฟประพาศิตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแส (Peng, Kohata and Akagi, 1992)



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจวัดกระแสด้านโหลด

โดยที่	$V_s$	คือ แรงดันแหล่งจ่าย (โวลต์)
	$Z_s$	คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (โอห์ม)
	$i_s$	คือ กระแสแหล่งจ่าย (แอมแปร์)
	$i_L$	คือ กระแสโหลด (แอมแปร์)
	$i_C$	คือ กระแสชดเชยที่จ่ายโดยวงจรรอกำลังแอกทีฟ (แอมแปร์)



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ตรวจวัดกระแสด้านโหลด

### 2.2.2 การตรวจวัดกระแสด้านแหล่งจ่าย

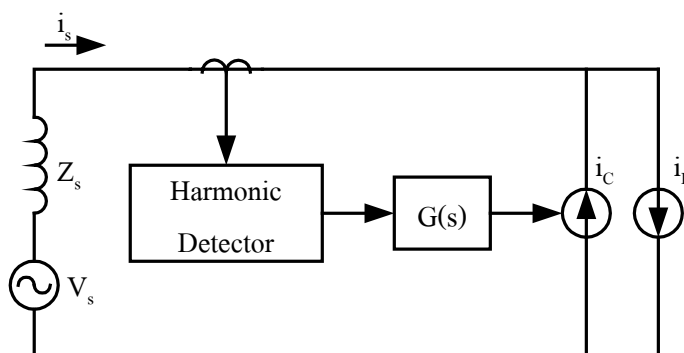
การตรวจวัดกระแสลักษณะนี้ วงจรรอกำลังจะอาศัยการป้อนกลับ เพื่อควบคุมกระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายให้มีค่าน้อยที่สุด โดยมีวงจรมูลดรูปที่ 2.8 และมีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบปิดดังรูปที่ 2.9 ในกรณีนี้คำสั่งกระแสชดเชยจะไม่ได้มาจากกระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายโดยตรง แต่จะมีการคูณฟังก์ชันควบคุมเข้ากับกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้แล้วจึงใช้เป็นคำสั่งกระแสชดเชยเพื่อจ่ายออกไป โดยมีเป้าหมายการควบคุมเพื่อทำให้กระแสฮาร์มอนิกด้านแหล่งจ่ายในอันดับที่ต้องการกำจัดมีค่าต่ำ

ฟังก์ชันควบคุม  $G(s)$  สามารถเลือกได้หลากหลายแบบซึ่งจะให้ผลแตกต่างกันไป โดยทำให้วงจรรอกำลังแอกทีฟประพฤติตัวเป็นอิมพีแดนซ์เสมือนที่มีค่าแปรตามความถี่ในลักษณะต่างๆ กัน (สรรคัทธิพงษ์ โฆษิตเกษม, 2539) อาทิเช่น

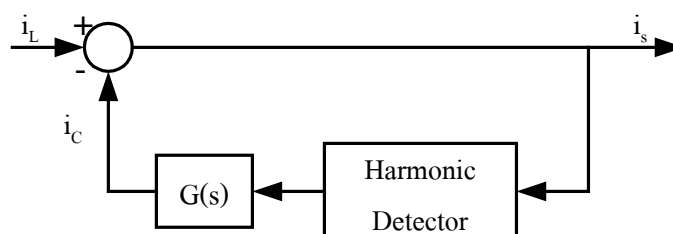
1.  $G(s) = k$  เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่ วงจรรอกำลังจะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวหน่วงนำที่ความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด

2.  $G(s) = \frac{kTs}{1+Ts}$  เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่ และ  $T$  เป็นค่าคงที่ทางเวลา วงจรรอกำลังจะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวหน่วงนำอนุกรมกับความต้านทานและมีลักษณะเฟสล้าหน้าที่ความถี่ที่ต้องการกำจัด

การออกแบบฟังก์ชันควบคุมที่เหมาะสมจะทำให้วงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลตามต้องการ



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจวัดกระแสด้านแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจวัดกระแสด้านแหล่งจ่าย

### 2.3 วิธีการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกแบบต่างๆ

สัญญาณกระแสรายคาบสามารถแยกออกเป็นผลรวมของกระแสองค์ประกอบความถี่มูลฐานกับกระแสองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ซึ่งมีค่าความถี่เป็นจำนวนเท่า(อันดับ)ที่ลงตัวของความถี่มูลฐานซึ่งมีค่าได้ไปจนถึงอนันต์ วงจรกรองกำลังแอกทีฟจะต้องสามารถทำการตรวจวัดแยกเอาสัญญาณฮาร์มอนิกที่ต้องการออกมา เพื่อทำการสร้างกระแสชดเชยไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกในองค์ประกอบนั้นๆ

ในกรณีที่ระบบเป็นแบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งกระแส 3 เฟส ไม่เป็นอิสระจากกัน เราอาจพิจารณาตรวจวัดฮาร์มอนิกแยกกันทีละเฟส หรืออาจพิจารณาตรวจวัดฮาร์มอนิกจากสเปซเวกเตอร์ 2 เฟส ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้แสดงภาพรวมของกระแส 3 เฟสก็ได้ กระแสในรูปสเปซเวกเตอร์นี้ก็สามารถแยกออกได้เป็นผลรวมขององค์ประกอบมูลฐานกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่างๆ ได้เช่นกัน ดังแสดงตามสมการที่ (2-1)

$$\vec{i}(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} i_h \cdot e^{jh\omega t} \quad (2-1)$$

โดยที่	$\vec{i}(t)$	คือสเปซเวกเตอร์กระแส
	$i_h$	คือขนาดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ $h$
	$h$	คืออันดับของฮาร์มอนิก
	$\omega$	คือความถี่มูลฐาน

โดยส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical component) ของกระแส 3 เฟสกับกระแสสเปซเวกเตอร์ จะมีความสัมพันธ์กันคือ

- กระแสลำดับศูนย์ กรณีระบบ 3 เฟส 3 สายจะไม่มีกระแสลำดับศูนย์นี้
- กระแสลำดับบวก เมื่อแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์จะกลายเป็นเวกเตอร์ขนาดคงที่ หมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับพจน์  $I_h \cdot e^{jh\omega t}$  เมื่อ  $h$  มีค่าเป็นบวกนั่นเอง
- กระแสลำดับลบ เมื่อแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์จะกลายเป็นเวกเตอร์ขนาดคงที่ หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับพจน์  $I_h \cdot e^{-jh\omega t}$  เมื่อ  $h$  มีค่าเป็นลบนั่นเอง

การพิจารณากระแส 3 เฟสเป็นสเปซเวกเตอร์นี้ทำให้เราสามารถพัฒนาวิธีการตรวจวัดฮาร์มอนิก แบบใหม่โดยพิจารณาจากสเปซเวกเตอร์ได้ โดยสามารถตรวจวัดโดยแยกแยะทั้งความถี่และลำดับ ซึ่งมีประโยชน์ในการเลือกตรวจวัดและกำจัดเฉพาะบางอันดับของฮาร์มอนิกและบางลำดับ เมื่อระบบมีฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับและบางลำดับ ตัวอย่างเช่น ระบบ 3 เฟส 3 สาย สมดุลโดยทั่วไป ซึ่งมีฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 5 ลำดับลบ อันดับ 7 ลำดับบวก อันดับ 11 ลำดับลบ อันดับ 13 ลำดับบวก เช่นนี้เรื่อยไป เราสามารถพัฒนาวิธีการตรวจวัดฮาร์มอนิกแบบใหม่ได้จากมุมมองนี้ อาทิเช่นการตรวจวัดเฉพาะฮาร์มอนิก อันดับ 5 ลำดับลบและฮาร์มอนิกอันดับ 7 ลำดับบวก โดยใช้วงจรกรองผ่านแถบ (สรรคัธิพงษ์ โฆษิตเกษม, 2539) และการปรับปรุงการทำ Recursive DFT (สันต์ ศรีธรรมจักร, 2541)

วิธีการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกที่นิยมกันทั่วไปได้แก่ วิธีการซึ่งอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (Instantaneous reactive power) (Akagi, Kanazawa and Nabae, 1983) และวิธีการหมุนแกนอ้างอิง

### 2.3.1 การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ

โดยทั่วไปวิธีการนี้จะใช้ตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งจะให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกถูกต้องเมื่อแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นแรงดันเป็นไซน์และมีความสมดุล มิฉะนั้นจะเกิดความผิดพลาดได้ นอกจากนี้การตรวจวัดฮาร์มอนิกวิธีนี้ยังเหมาะสมเฉพาะกับวงจรกรอง

กำลังแอกทีฟที่ซดเซอร์มอนิกทุกอันดับ เนื่องจากกระแสเซอร์มอนิกที่คำนวณได้จะประกอบไปด้วยเซอร์มอนิกทุกอันดับปนกันอยู่โดยไม่สามารถแยกตรวจวัดเฉพาะอันดับที่ต้องการได้

ขั้นตอนในการคำนวณหากระแสเซอร์มอนิก เริ่มจากการแปลงกระแสและแรงดัน 3 เฟส บนแกน  $u$   $v$  และ  $w$  ไปสู่ระบบสเปซเวกเตอร์บนแกน  $\alpha - \beta$  ซึ่งสามารถเขียนเมตริกซ์การแปลงได้ดังสมการที่ (2-2) และ (2-3) ตามลำดับ

$$\vec{i} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

โดยที่ " $\vec{\bullet}$ " แสดงถึงปริมาณสเปซเวกเตอร์  $(\bullet)_\alpha$  และ  $(\bullet)_\beta$  คือองค์ประกอบของสเปซเวกเตอร์บนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ตามลำดับ จากนั้นเราจะนำกระแสและแรงดันที่เป็นสเปซเวกเตอร์มาหาลำดับขณะใดๆ (Instantaneous power) โดยที่  $p$  คือกำลังงานจริงขณะใดๆ ของระบบ 3 เฟสที่จ่ายจากแหล่งจ่ายไปสู่โหลด มีค่าเท่ากับผลคูณสเกลล่า (Dot product) ของ  $\vec{e}$  กับ  $\vec{i}$  ตามสมการที่ (2-4) ส่วน  $q$  คือกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (Instantaneous reactive power) เป็นกำลังที่ถ่ายทอดกันเองระหว่างเฟสทั้ง 3 ของแหล่งจ่ายโดยไม่ทำให้เกิดกำลังสุทธิไปสู่โหลด มีค่าเท่ากับขนาดของผลคูณเวกเตอร์ (Cross product) ของ  $\vec{e}$  กับ  $\vec{i}$  ตามสมการที่ (2-5)

$$p = \vec{e} \cdot \vec{i} \quad (2-4)$$

$$q = \|\vec{e} \times \vec{i}\| \quad (2-5)$$

จากสมการที่ (2-4) และ (2-5) เราสามารถแสดงค่ากำลังงานจริงขณะใดๆ  $p$  และค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ  $q$  ของระบบ 3 เฟสในรูปเมตริกซ์ได้ ดังสมการที่ (2-6) และ (2-7)

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

สมการที่ (2-6) เหมาะสำหรับใช้กับแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วนสมการที่ (2-7) จะใช้กับแหล่งจ่ายกระแส จากสมการที่ (2-6) เมื่อดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ไม่เป็นศูนย์ เราสามารถคำนวณค่ากระแสจากค่ากำลังงานขณะใดๆ ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

ค่ากำลังงานจริงขณะใดๆ  $p$  และค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ  $q$  มีองค์ประกอบทั้งที่เป็นไฟตรงและไฟสลับดังต่อไปนี้ (Aredes and Watanabe, 1995)

- องค์ประกอบไฟตรง เกิดจากกระแสที่มีความถี่และลำดับตรงกับแรงดัน ตัวอย่างเช่น กระแสความถี่มูลฐานลำดับบวก กับแรงดันความถี่มูลฐานลำดับบวกเหมือนกัน หรือ กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ลำดับลบ กับแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ลำดับลบ เป็นต้น
- องค์ประกอบไฟสลับ เกิดจากกระแสที่มีความถี่หรือลำดับไม่ตรงกับแรงดัน

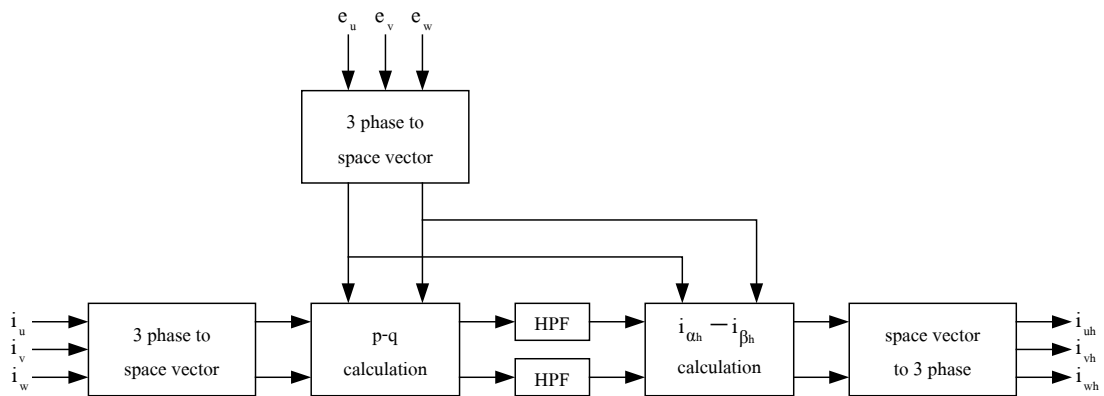
ดังนั้นในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายสมดุลและไม่มีฮาร์มอนิก องค์ประกอบไฟตรงของ  $p$  และ  $q$  จะเกิดเฉพาะจากกระแสความถี่มูลฐานลำดับบวกเท่านั้น และองค์ประกอบไฟสลับของ  $p$  และ  $q$  จะเกิดมาจากกระแสความถี่มูลฐานลำดับลบ (ในกรณีที่โหลดสมดุล) หรือเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกเท่านั้น ในกรณีหลังนี้เราสามารถตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกได้โดยกรองแยกเอาองค์ประกอบไฟสลับออกมาด้วยวงจรกรองผ่านสูงซึ่งเมื่อนำองค์ประกอบนี้ไปแปลงกลับเป็นกระแสโดยใช้สมการที่ (2-9) ก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกในรูปของสเปซเวกเตอร์

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

โดยที่  $i_{\alpha h}$  และ  $i_{\beta h}$  คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ตามลำดับ ค่ากระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปซเวกเตอร์สามารถนำไปแปลงกลับเป็นกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสตามสมการที่ (2-10)

$$\begin{bmatrix} i_{uh} \\ i_{vh} \\ i_{wh} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

โดยที่  $i_{uh}$ ,  $i_{vh}$  และ  $i_{wh}$  คือค่าของกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสของเฟส  $u$ ,  $v$  และ  $w$  ตามลำดับ หลักการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ

ในกรณีที่โหลดมีความไม่สมดุล เราจะต้องมีหลักการเพิ่มเติมในการกำจัดกระแสความถี่มูลฐานลำดับลบออกไปซึ่งจะไม่ขอกกล่าวถึงในที่นี้ ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีนี้ยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการคือ

- แรงดันแหล่งจ่ายต้องมีความสมดุล



- เมื่อมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำในระบบ การกรองแยกเอาองค์ประกอบเหล่านั้นออกมากองค์ประกอบความถี่มูลฐานจะทำได้ยาก
- ไม่สามารถแยกตรวจจับเฉพาะบางฮาร์มอนิกได้

### 2.3.2 การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีวงจรกรองบนแกนหมุน

การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีการนี้เราสามารถที่จะตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก ทุกอันดับหรือตรวจวัดเฉพาะอันดับที่ต้องการก็ได้

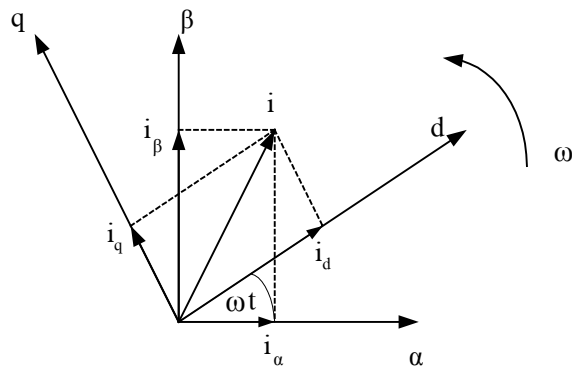
#### 2.3.2.1 การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ

การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้มีหลักการสำคัญคือต้องกรองเอาสัญญาณกระแสความถี่มูลฐานทิ้งไปและเก็บเอาไว้เฉพาะสัญญาณกระแสฮาร์มอนิก โดยจะเริ่มจากแปลงกระแส 3 เฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์ จากนั้นจะทำการแปลงสเปซเวกเตอร์บนแกน  $\alpha - \beta$  ไปอยู่บนแกนหมุน  $d - q$  ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานค้นแสดงในรูปที่ 2.11 การแปลงเวกเตอร์กระแสไปอยู่บนแกนหมุน  $d - q$  ที่ความถี่ 50 Hz สามารถทำได้โดยการคูณเวกเตอร์กระแสด้วย  $e^{-j\omega t}$  เมื่อ  $\omega$  คือค่าความถี่มูลฐานเป็น rad/s เราสามารถเขียนสมการการแปลงให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2-11)

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

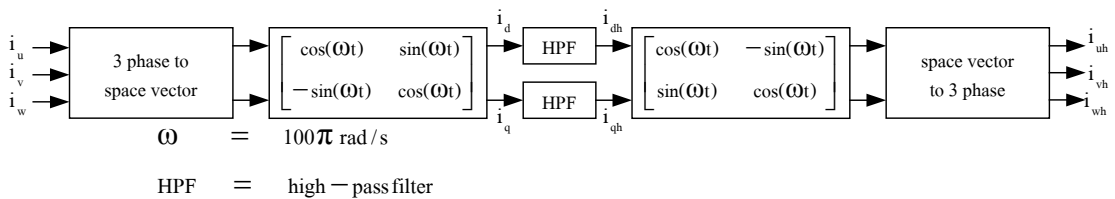
โดยที่  $i_d$  และ  $i_q$  คือองค์ประกอบของกระแสบนแกนหมุน  $d$  และ  $q$  ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานตามลำดับ บนแกนหมุน  $d - q$  กระแสความถี่มูลฐานอันดับบวกจะกลายมาเป็นสัญญาณกระแสตรงส่วนกระแสฮาร์มอนิกอื่นๆ จะกลายเป็นสัญญาณกระแสสลับ เราสามารถกรองแยกเอาเฉพาะสัญญาณกระแสสลับออกมาได้โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง จากนั้นจึงทำการแปลงกระแสบนแกน  $d - q$  กลับไปเป็นกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกน  $\alpha - \beta$  โดยการคูณด้วย  $e^{j\omega t}$  ซึ่งสามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ (2-12)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$



รูปที่ 2.11 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz

โดยที่  $i_{dh}$  และ  $i_{qh}$  คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน  $d$  และ  $q$  ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานตามลำดับ จากกระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปซเวกเตอร์เมื่อทำการแปลงกลับมาเป็นกระแสในระบบ 3 เฟสก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกตามต้องการ ในกรณีที่โหลดมีกระแสความถี่มูลฐานลำดับลบบ่อยด้วยเราก็คงต้องใช้หลักการนี้เพื่อกรองเอาสัญญาณกระแสความถี่มูลฐานอันดับลบทิ้งไป โดยจะใช้การแปลงไปอยู่บนแกนหมุนของกระแสความถี่มูลฐานอันดับลบแทนแล้วจึงกรองเอากระแสองค์ประกอบมูลฐานอันดับลบซึ่งจะเป็นกระแสตรงบนแกนหมุนทิ้งไป ขั้นตอนการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกในกรณีที่กระแสไม่มีองค์ประกอบความถี่มูลฐานอันดับลบแสดงโดยสรุปเป็นเป็นภาพดังรูปที่ 2.12 (สรรคธิพงษ์ โฆษิตเกษม, 2539)



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับโดยใช้วิธีการบนแกนหมุน

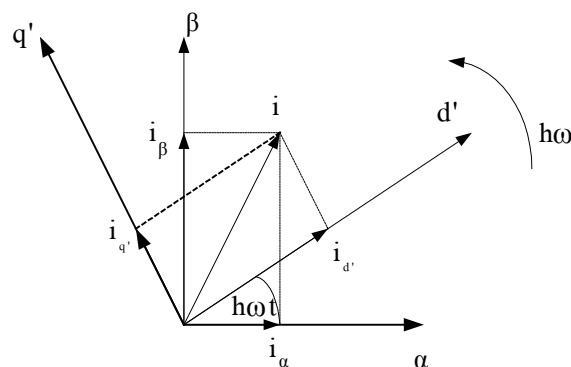
โดยวิธีการนี้จะเห็นได้ว่าเรายังคงสามารถวัดฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องแม้ว่าแรงดันด้านแหล่งจ่ายจะมีฮาร์มอนิกหรือมีความไม่สมดุล อย่างไรก็ตามก็ตีความถี่ของระบบไฟฟ้าอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยเสมอ ดังนั้นการเปลี่ยนแกนให้ได้ความถี่ตรงกับความถี่มูลฐานของระบบจริงย่อมต้องมีความผิดพลาดเกิดขึ้นซึ่งการตรวจวัดก็จะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้โดยมีค่าน้อยขึ้นอยู่กับความผิดพลาดของความถี่ในการเปลี่ยนแปลงแกนและคุณลักษณะการกรองของวงจร

กรองผ่านสูงที่ใช้ยิ่งวงจรถูกกรองผ่านสูงมีการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายและเฟสมากในย่านความถี่ต่ำ ความคลาดเคลื่อนเมื่อความถี่ผิดเพี้ยนก็จะมาก ในกรณีเช่นนี้อาจต้องมีการทำเฟสล็อกคูลเพื่อให้ความถี่การแปลงแกนมีความถูกต้องมากขึ้น

การตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกด้วยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ ซึ่งใช้แรงดันเป็นตัวคูณในการหาค่า  $p$  และ  $q$  นั้น ในความเป็นจริงแล้วก็จะมีความคล้ายคลึงกับการแปลงแกนนั่นเองเพียงแต่ใช้แรงดันโดยตรงแทนที่จะใช้  $e^{j\omega t}$  ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดปัญหาความถี่การแปลงแกนไม่ตรงกับความถี่ระบบกำลังแต่ก็จะมีปัญหาอื่นแทนดังได้กล่าวมาแล้ว การตรวจวัดฮาร์โมนิก ด้วยวิธีการหมุนแกนในกรณีที่ระบบมีฮาร์โมนิกอันดับต่ำป็นอยู่ก็ยังคงมีปัญหาเช่นเดียวกับการใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ คือการกรองแยกกระแสฮาร์โมนิกอันดับต่ำเหล่านั้นออกจากกระแสองค์ประกอบความถี่มูลฐานจะทำได้ยาก

### 2.3.2.2 การตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับ (Nanaumi, Kuramoti and Yano, 1996; Saleem nia and Saadate, 1996)

ในการตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกเฉพาะอันดับกระทำได้โดยแปลงกระแสใน 3 เฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์ จากนั้นจะแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสไปอยู่บนแกนหมุนที่ความถี่ฮาร์โมนิกอันดับและลำดับที่ต้องการตรวจวัดโดยการคูณด้วย  $e^{-jh\omega t}$  เมื่อ  $h$  คืออันดับและลำดับ ของฮาร์โมนิกที่ต้องการตรวจวัด (ยกตัวอย่างเช่น  $h = -5$  หมายถึงฮาร์โมนิกที่ 5 ลำดับลบ) และ  $\omega$  คือค่าความถี่มูลฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยสมการการแปลงแกนหมุนที่อยู่ในรูปเมตริกซ์แสดงได้ดังสมการที่ (2-13)



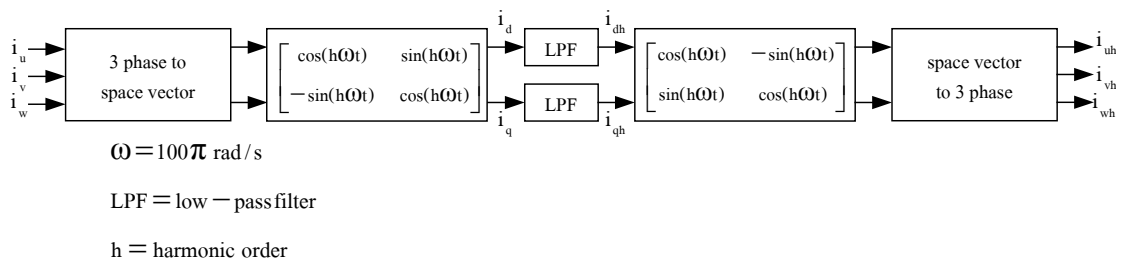
รูปที่ 2.13 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิง ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่  $h\omega$

$$\begin{bmatrix} i_{d'} \\ i_{q'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & \sin(h\omega t) \\ -\sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

โดยที่  $i_{d'}$  และ  $i_{q'}$  คือองค์ประกอบของกระแสบนแกนหมุน  $d'$  และ  $q'$  ขององค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่  $h$  ตามลำดับ เมื่อทำการแปลงแกนแล้วกระแสฮาร์โมนิกที่มีอันดับและลำดับเดียวกับแกนหมุนจะกลายเป็นสัญญาณกระแสตรงซึ่งเราจะกรองเอาสัญญาณส่วนนี้เก็บเอาไว้โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำ ส่วนกระแสฮาร์โมนิกอื่นๆ รวมทั้งกระแสความถี่มูลฐานจะกลายเป็นองค์ประกอบกระแสสลับบนแกนหมุนนี้และจะถูกกรองทิ้งไป จากนั้นจึงทำการแปลงกระแสฮาร์โมนิกที่กรองเก็บไว้ได้ในรูปกระแสตรงกลับมาอยู่บนแกนนิ่งโดยใช้สมการที่ (2-14)

$$\begin{bmatrix} i_{d'h} \\ i_{q'h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & -\sin(h\omega t) \\ \sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d'} \\ i_{q'} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

โดยที่  $i_{d'h}$  และ  $i_{q'h}$  คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์โมนิกบนแกนหมุน  $d'$  และ  $q'$  ขององค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่  $h$  ตามลำดับ จากนั้นทำการแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสฮาร์โมนิกไปเป็นกระแสฮาร์โมนิกในระบบ 3 เฟสก็จะได้กระแสฮาร์โมนิกในอันดับและลำดับที่ต้องการ หลักการคำนวณค่ากระแสฮาร์โมนิกตามที่กล่าวมาสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.14 การตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิก โดยวิธีนี้ก็ยังคงมีปัญหาในการกรองแยกเอาความถี่ฮาร์โมนิกที่อยู่ใกล้กันออกมาได้ยากเช่นเดียวกับวิธีการตรวจวัดโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ และวิธีการแปลงแกนหมุนแบบตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกทุกอันดับ



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงการตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่  $h$  โดยใช้วงจรกรองบนแกนหมุน

### 2.3.3 การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีวิเคราะห์สเปกตรัม

การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกอาจทำได้โดยการนำกระแสมาวิเคราะห์หาสเปกตรัมโดยตรงด้วยการทำ DFT (Discrete Fourier Transform) ซึ่งนิยมใช้เทคนิคการคำนวณด้วยการทำ FFT (Fast Fourier Transform) (Bernard and Trochain, 1996) หรืออาจใช้เทคนิคอื่นๆ อย่างเช่น การคำนวณโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Neural Network, GA: Genetic Algorithm)(Qi-Wen, Feng, Guo-Hong and Jing-Ping, 2000) ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมโดยทั่วไปจะได้เป็นขนาดและเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการ จากนั้นจะนำข้อมูลขนาดและเฟสของกระแสฮาร์มอนิกนี้ไปสร้างเป็นกระแสจริงเพื่อใช้จ่ายเป็นกระแสชดเชย ในการสร้างกระแสชดเชยจะต้องมีการทำเฟสล็อกกลุ่มเพื่อทำให้กระแสที่สร้างได้มีความถี่ตรงกับระบบไฟฟ้ากำลังที่วงจรรองกำลังแอกทีฟต่ออยู่ด้วย รายละเอียดของการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีนี้จะขอก้าวต่อไปในบทที่ 3 การวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการทำ FFT มีข้อดี และข้อด้อยคือ

#### ข้อดี

- ให้ค่าการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ของทุกสเปกตรัมอย่างแม่นยำ สามารถแยกแยะกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่ใกล้กันได้ดี

#### ข้อด้อย

- มีการคำนวณมากและยุ่งยาก
- หากมีสัญญาณรบกวน ในชุดตรวจวัดจะทำให้ค่าที่ได้จาก FFT มีความผิดพลาด

การวิเคราะห์สเปกตรัมโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ มีคุณลักษณะคล้ายกับการทำ FFT เพียงแต่เปลี่ยนวิธีการคำนวณมาใช้ในการคำนวณด้วยวิธีของปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งสามารถให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำ

จากข้อดีข้อด้อยของวิธีการตรวจวัดฮาร์มอนิกดังที่ได้กล่าวมา ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกวิธีการตรวจวัดอีกวิธีหนึ่งซึ่งเรียกว่าวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมโดยใช้การค้นหาแบบตาบูลู (Tabu search) ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดต่อไปในบทที่ 5 โดยวิธีการค้นหาแบบตาบูลูมีคุณลักษณะที่ดีกว่าวิธีก่อนๆ คือ

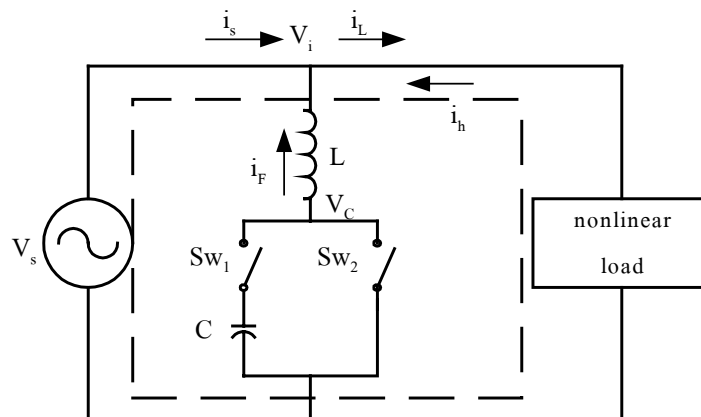
- ทำการคำนวณสเปกตรัมโดยเลือกทำเฉพาะบางความถี่ได้
- มีการคำนวณที่ไม่มากและไม่ยุ่งยากซับซ้อน
- สามารถนำไปใช้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟทั้งแบบที่กำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับหรือเฉพาะบางอันดับได้
- ตัวตรวจวัดที่ได้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อการวิเคราะห์ได้

## 2.4 การสร้างกระแสชดเชยเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบ

การสร้างกระแสชดเชยให้กับระบบนั้นได้มาจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยการต่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟพิกานกับระบบ จะสร้างสัญญาณกระแสชดเชย  $i_F$  ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2-15) และการเชื่อมต่อง่ายรูปที่ 2.15

$$i_s = i_L - i_F = i_1 + i_h - i_F \quad (2-15)$$

โดยที่	$i_s$	คือกระแสของแหล่งจ่าย
	$i_L$	คือกระแสโหลด
	$i_1$	คือกระแสองค์ประกอบพื้นฐาน(ฮาร์มอนิกอันดับที่หนึ่ง)
	$i_h$	คือกระแสองค์ประกอบฮาร์มอนิก(ฮาร์มอนิกอันดับที่สองขึ้นไป)
	$i_F$	คือกระแสชดเชย
	$V_s, V_i$	คือแรงดันของแหล่งจ่าย
	$V_C$	คือแรงดันของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.15 การเชื่อมต่อวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ

โดยทั่วไปแล้ววงจรกรองกำลังแอกทีฟจะอาศัยแหล่งกำเนิดแรงดันและแหล่งกำเนิดกระแสไฟตรงเลี้ยงวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยการใช้เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) ควบคุมสัญญาณกระแสชดเชย โดยสัญญาณกระแสชดเชยนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงดันกระแสตรง หรือแหล่งกำเนิดกระแส การที่จะสร้างสัญญาณกระแสชดเชยตามที่

ต้องการจะต้องอาศัยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจำนวนมาก ซึ่งไม่เพียงแต่มีราคาแพงเท่านั้นยังมีขนาดใหญ่มากด้วย พลังงานที่ต้องการในการรักษาระดับความคงที่ของแรงดันกระแสตรงได้รับมาจากแหล่งกำเนิดผ่านทางวงจรอินเวอร์เตอร์พร้อมทั้งถูกจำกัดจากความสามารถของวงจรกรองแอกทีฟเอง โดยการย้ายสวิตช์ตัวเก็บประจุต้องใช้กระแสและแรงดันของแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรกรองแอกทีฟสูง(Koozehkani, Mehta and Darwish, 1996) เพื่อเป็นการลดขนาดและความถี่ในการสวิตช์ของวงจรกรองแอกทีฟลงจึงได้มีการพัฒนาวงจรกรองแอกทีฟแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุขึ้น โดยมีหลักการดังนี้

วงจรกรองแอกทีฟแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุจะสร้างสัญญาณกระแสชดเชยโดยการควบคุมอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของกระแสชดเชย โดยให้เหมาะสมกับรูปแบบการสวิตช์ในรูปแบบที่ 2.12 ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสภายในตัวเหนี่ยวนำถูกควบคุมดังนี้

- กรณีสวิตช์  $Sw_2$  ปิด  $Sw_1$  เปิด ตัวเหนี่ยวนำต่อลงกราวด์

กำหนดให้แรงดันขาเข้าคงที่ตลอดช่วงคาบการสวิตช์ อนุพันธ์อันดับสองของกระแสชดเชยจากวงจรสมมูลมีค่าเป็นศูนย์ ค่ากระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่จุด  $V_i$  จะมีค่าเป็นบวกและแรงดันไฟฟ้าจุด  $V_c$  จะเป็นศูนย์ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2-16) และ (2-17)

$$\frac{di_F}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (2-16)$$

$$\frac{d^2 i_F}{dt^2} = 0 \quad (2-17)$$

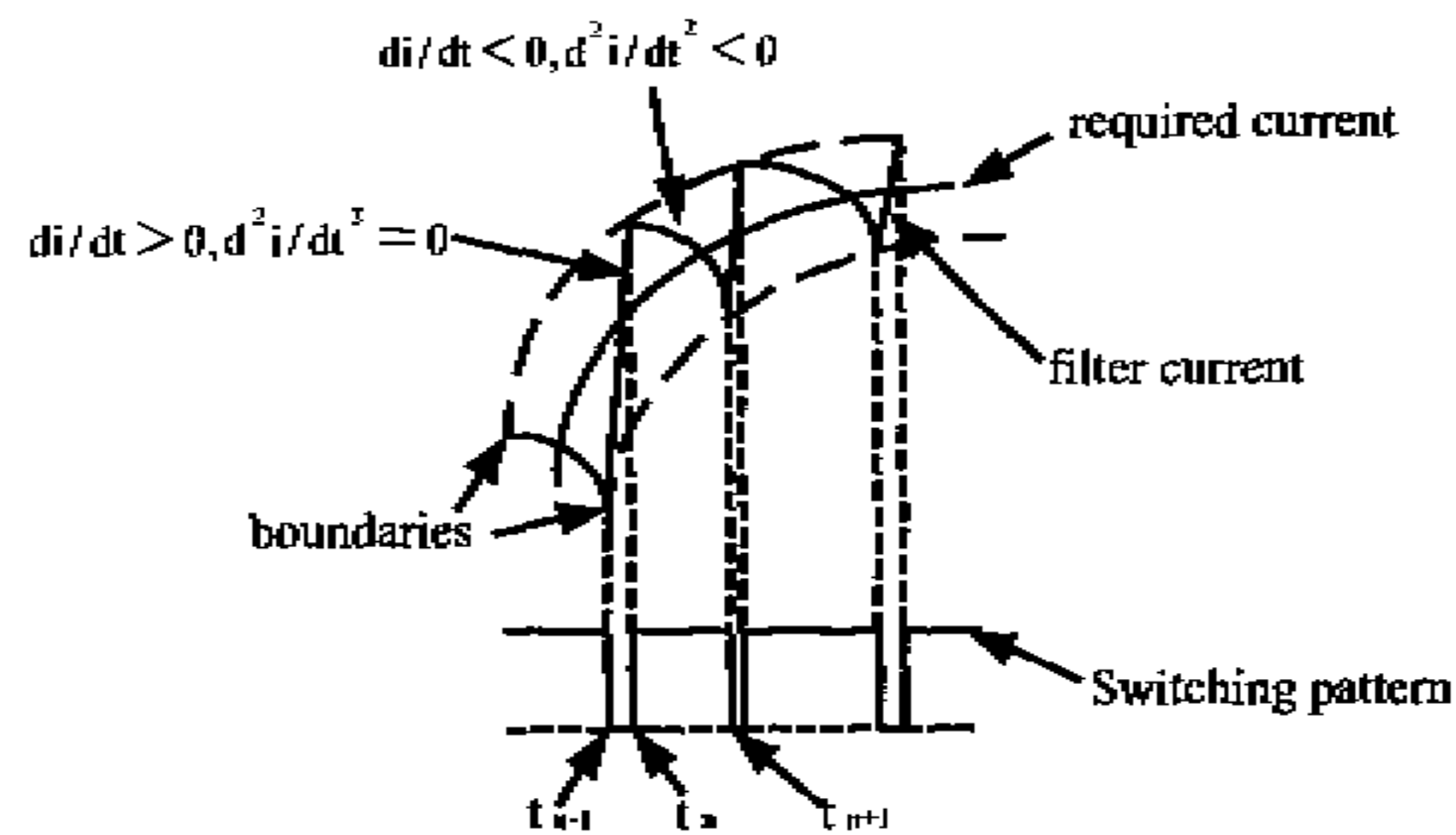
- กรณีสวิตช์  $Sw_2$  เปิด  $Sw_1$  ปิด ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ

ค่ากระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะลดลง ซึ่งจะมีผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ จุด  $V_c$  สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด  $V_i$  ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2-18) และ (2-19)

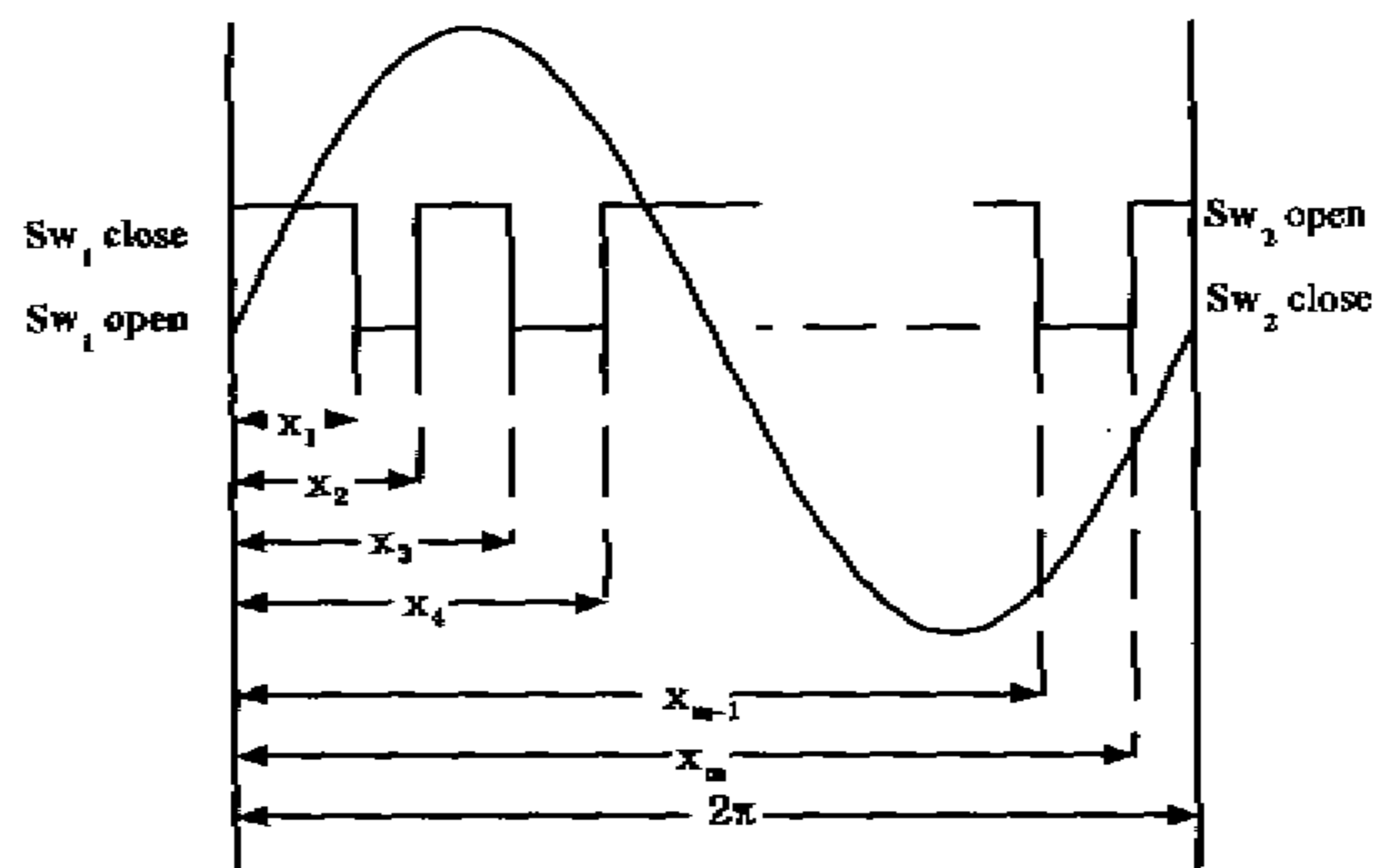
$$\frac{di_F}{dt} = \frac{V_i - V_c}{L} \quad (2-18)$$

$$\frac{d^2 i_F}{dt^2} = \frac{1}{L} \frac{d(V_i - V_c)}{dt} = -\frac{1}{L} \frac{dV_c}{dt} = -\frac{i_F}{LC} \quad (2-19)$$

จากสมการที่ (2-16) ถึง (2-19) แสดงถึงลักษณะทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชย โดยสามารถควบคุมจากการปรับรูปแบบของการสวิตช์ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 แผนภาพการควบคุมกระแสชดเชย



รูปที่ 2.17 รูปแบบการสับสวิตช์ของสวิตช์  $Sw_1, Sw_2$

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุโดยอาศัยการพิจารณาจากการควบคุมอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของกระแสชดเชย ซึ่งมีการคำนวณยุ่งยากและใช้เวลานาน จึงได้มีการวิเคราะห์วงจรกรองแอกทีฟแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุในรูปของการวิเคราะห์ขยายผล (Extended analysis) (Welsh, Mehta and Darwish, 2000) ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4 และบทที่ 5



## 2.5 สรุป

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นในบทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอถึงทฤษฎีการกำจัดกระแสฮาร์โมนิก ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (วงจรกรองฮาร์โมนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ) โดยเป็นภาพรวมกว้างๆ ของการกำจัดฮาร์โมนิก ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกด้วยวิธีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ วิธีวงจรกรองบนแกนหมุน และวิธีวิเคราะห์สเปกตรัม จากข้อดีข้อเสียที่กล่าวไว้ข้างต้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมในการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก ซึ่งจะกล่าวถึงโดยละเอียดอีกครั้งในบทที่ 3 และบทที่ 5 และการสร้างกระแสชดเชยกระแสฮาร์โมนิกโดยการวิเคราะห์การควบคุมอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของกระแสชดเชย และการวิเคราะห์ขยายผล โดยการวิเคราะห์ขยายผลจะอธิบายอย่างละเอียดในบทที่ 4 และบทที่ 5

## บทที่ 3

### การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก

#### 3.1 บทนำ

ในการตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง ที่ทำกันในปัจจุบันส่วนใหญ่จะพิจารณาเพียงสัญญาณไซน์ซออยด์ (Sinusoid) จากความถี่มูลฐานเท่านั้น ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงในระบบยังมีความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานปะปนอยู่ ส่งผลให้สัญญาณไม่เป็นรูปไซน์ซออยด์ ซึ่งแสดงว่าการตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้กันอยู่ โดยพิจารณาเพียงสัญญาณที่เกิดจากความถี่มูลฐานนั้นไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริงในระบบไฟฟ้าได้ทั้งหมด งานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทนี้จึงเสนอแนวทางการตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานปะปน โดยจะกล่าวถึงวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ และการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว

#### 3.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ในส่วนของตำแหน่งการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้พิจารณตำแหน่งการตรวจวัดกระแสด้านโหลด โดยมีการออกแบบชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้านโหลดดังแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.1 ในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

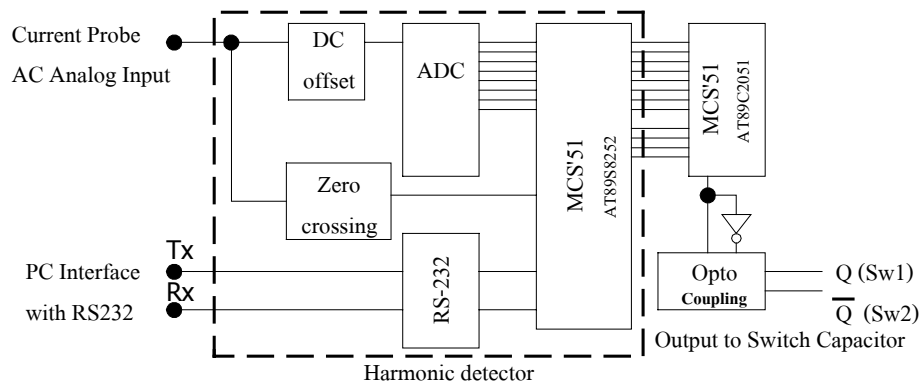
สัญญาณขาเข้าจากโพรบวัดกระแส (Current probe) โดยทำการรับสัญญาณกระแสสลับแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสลับ โพรบวัดกระแสสามารถตรวจวัดสัญญาณกระแสได้สูงสุด 3000 แอมแปร์ ส่งสัญญาณขาออกเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุด 3 โวลต์ โพรบวัดกระแสส่งสัญญาณไปสู่สองส่วนคือ DC offset และ Zero crossing

DC offset ทำหน้าที่ยกระดับสัญญาณแรงดันกระแสสลับ (กระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้) เพื่อให้สัญญาณอยู่ในระนาบบวกทั้งหมด จากนั้นทำการปรับอัตราขยายสัญญาณให้มีค่ายอดของสัญญาณไม่เกิน 5 โวลต์ แล้วจึงส่งสัญญาณต่อไปยัง เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ (A/D converter)

เอ/ดี คอนเวอร์เตอร์ (A/D converter : Analog to Digital Converter) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดันที่ได้จาก DC offset ซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกแปลงไปเป็นสัญญาณดิจิทัล ใช้อัตราการซีกตัวอย่าง (Sampling rate) 6.4 kHz (128 จุด ใน 1 ลูกคลื่นสัญญาณ 50 Hz) จากนั้นส่งสัญญาณดิจิทัลเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์

Zero crossing ทำหน้าที่หาจุดตัดระนาบศูนย์โดยจุดนี้ต้องเป็นจุดเริ่มต้นของลูกคลื่นบวกด้วย เพื่อใช้ในการบ่งบอกถึงตำแหน่งเริ่มต้นการบันทึกสัญญาณกระแส โดย Zero crossing จะส่งตำแหน่งจุดตัดระนาบศูนย์ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป

MCU (ไมโครคอนโทรลเลอร์: MCS'51 เบอร์ AT89S8252) รับข้อมูลจาก A/D และ Zero crossing เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของสัญญาณที่ต้องการและทำการแปลงค่าขนาดของสัญญาณกลับคืน โดยพิจารณาจากอัตราขยายของ DC offset และอัตราการแปลงสัญญาณของโพรบวัดกระแส และทำการส่งข้อมูลของกระแสที่ได้จริงผ่านทาง RS-232 ซึ่งเป็นทางเข้าออกแบบอนุกรม (Serial port) เข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์กระแสที่ตรวจจับได้ต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการทำงานของชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

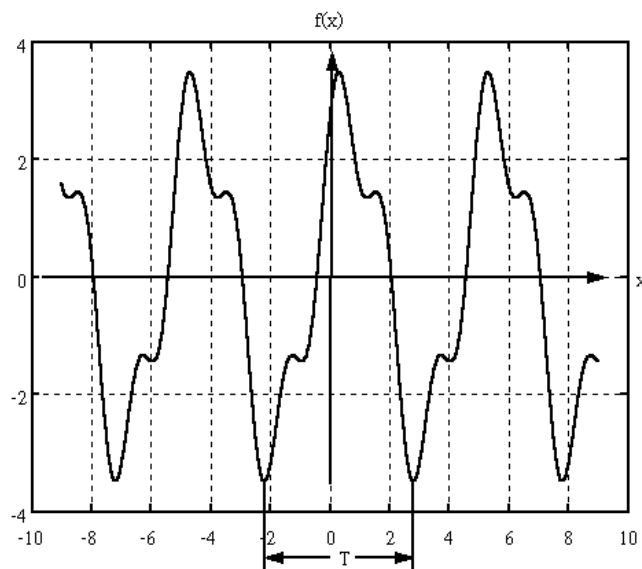
### 3.3 การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยอนุกรมฟูริเยร์

อนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) (Bolton,1995)(Arsoy, Halpin, Liu and Paulo,1999) ฟังก์ชันต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปัญหาทางวิศวกรรมที่พบเห็นอยู่เสมอมักจะเป็นฟังก์ชันรายคาบ (Periodic Function) ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแทนให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันคาบของสัญญาณไซน์และโคไซน์ ในทางปฏิบัติสัญญาณทั้งสองนี้จะมีความสำคัญมาก และในแต่ละเทอมของอนุกรม (Series) ของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ เกิดขึ้นจากความคิดของนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Joseph Fourier ดังนั้น เพื่อเป็นเกียรติแก่เขาจึงเรียกฟังก์ชันดังกล่าวนี้ว่าอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier

Series) อนุกรมฟูรีเยร์เสมือนเป็นเครื่องมืออันดับหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาต่างๆ เช่น แก้สมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation) หรือสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation)

ฟังก์ชันรายคาบ จะพิจารณาจากฟังก์ชันใดๆ โดยที่ฟังก์ชัน  $f(x)$  นั้นๆ จะเรียกเป็นฟังก์ชันรายคาบก็ต่อเมื่อคาบครบรอบ  $T$  ถ้า  $T$  เป็นค่าจริงใดๆ และไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น  $T$  คือคาบของฟังก์ชัน  $f(x)$  เช่น  $\sin(x)$  และ  $\cos(x)$  มีคาบครบรอบเท่ากับ  $2\pi$  ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงรูปกราฟในช่วงความยาว  $T$  (คาบครบรอบเท่ากับ  $T$ )

$$f(x+T) = f(x) \quad , \quad \text{ตลอดทุกค่าของ } x \quad (3-1)$$



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันรายคาบ

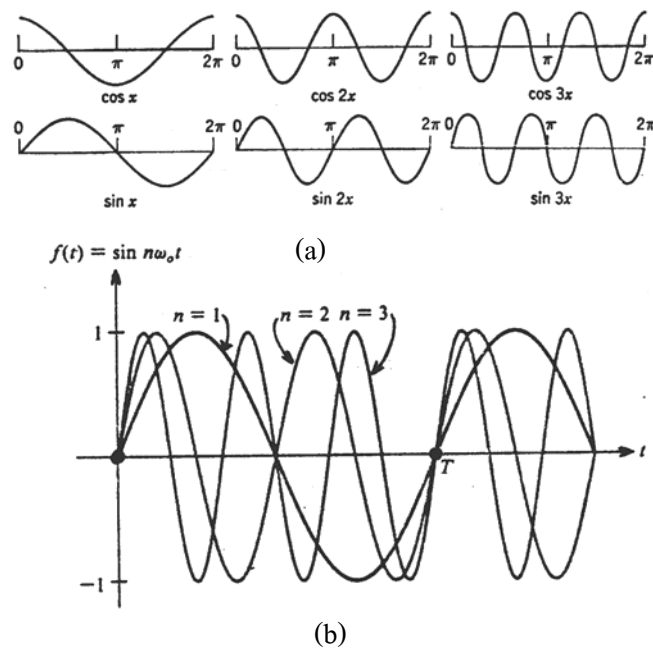
จะเห็นได้ว่า สัญญาณมีคาบครบรอบเท่ากับ  $T$  และเกิดขึ้นซ้ำๆ กันทุกๆ ค่าของ  $T$  ดังนั้น ถ้า  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็ม จะได้ว่า

$$f(x+nT) = f(x) \quad , \quad \text{ตลอดทุกค่าของ } x \quad (3-2)$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันต่างๆ ที่มีคาบ  $2\pi$  ในเทอมของฟังก์ชันง่ายๆ เช่น  $1$ ,  $\cos(x)$ ,  $\sin(x)$ ,  $\cos(2x)$ ,  $\sin(2x)$ , ...,  $\cos(nx)$ ,  $\sin(nx)$ , ... ซึ่งมีคาบเป็น  $2\pi$  ดังรูปที่ 3.3(a) และอนุกรมจะเกิดขึ้นในรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (3-3)

$$\begin{aligned}
 & a_0 + a_1 \cos(x) + b_1 \sin(x) + a_2 \cos(2x) + b_2 \sin(2x) + \dots \\
 & + a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) + \dots
 \end{aligned}
 \tag{3-3}$$

เมื่อ  $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$  เป็นค่าคงที่อนุกรมในสมการที่ (3-3) เรียกว่า อนุกรมตรีโกณมิติ (Trigonometric series) และ  $a_n, b_n$  เป็นสัมประสิทธิ์ของอนุกรม และสัญญาณไซน์ที่ฮาร์มอนิก  $n=1, 2, 3$  แสดงดังรูปที่ 3.3(b)



รูปที่ 3.3 (a) ฟังก์ชันโคไซน์และไซน์คาบ  $2\pi$

(b) สัญญาณไซน์ที่ฮาร์มอนิก  $n = 1, 2, 3$

จะเห็นได้ว่า  $\sin(nx)$  และ  $\cos(nx)$  มีค่าต่างๆ ตลอดช่วงทั้งหมด  $(x_0, x_0 + T)$  ซึ่งเมื่อ  $n=0$  ค่า  $\sin(nx)=0$  แต่  $\cos(nx)=1$  เพราะฉะนั้นถ้า  $f(x)$  เป็นฟังก์ชันใดๆ จึงสามารถแทนให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดช่วง  $(x_0, x_0 + T)$  ได้ดังสมการที่ (3-4)

$$\begin{aligned}
 f(x) = & \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(x) + a_2 \cos(2x) + \dots + a_n \cos(nx) + \dots \\
 & + b_1 \sin(x) + b_2 \sin(2x) + \dots + b_n \sin(nx) + \dots
 \end{aligned}
 \tag{3-4}$$

โดยที่  $x_0 < x < x_0 + T$  จากสมการที่ (3-4) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมได้ดังสมการที่ (3-5)

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)) \quad (3-5)$$

โดยที่  $x_0 < x < x_0 + T$  และสมการที่ (3-5) คืออนุกรมฟูรีเยร์ของฟังก์ชัน  $f(x)$  ในรูปตรีโกณมิติ (อนุกรมฟูรีเยร์ตรีโกณมิติ: Trigonometric fourier series) ค่าคงที่  $a_0$  กับตัวสัมประสิทธิ์  $a_n$  และ  $b_n$  สามารถหาได้โดยทำการอินทิเกรตสมการที่ (3-5) ทั้งสองข้างตลอดช่วง  $(x_0, x_0 + T)$

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x) dx &= \int_{x_0}^{x_0+T} \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)) \right] dx \\ \int_{x_0}^{x_0+T} f(x) dx &= \frac{a_0}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} dx + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \begin{aligned} &a_n \int_{x_0}^{x_0+T} \cos(nx) dx \\ &+ b_n \int_{x_0}^{x_0+T} \sin(nx) dx \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (3-6)$$

เนื่องจากเทอมโคไซน์และไซน์ของสมการที่ (3-6) มีค่าเป็นศูนย์ที่ทุกค่าของ  $n = 1, 2, 3, \dots$  ดังนั้น

$$\int_{x_0}^{x_0+T} f(x) dx = \frac{a_0}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} dx = \frac{a_0 T}{2}$$

ฉะนั้น 
$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x) dx \quad (3-7)$$

สำหรับการหาค่า  $a_1, a_2, \dots, a_n$  สามารถหาได้โดยการคูณสมการที่ (3-5) ด้วย  $\cos(mx)$  ซึ่ง  $m$  เป็นจำนวนเต็มบวกคงที่ (Fixed positive integer) และอินทิเกรตตลอดช่วง  $(x_0, x_0 + T)$

$$\int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \cos(mx) dx = \int_{x_0}^{x_0+T} \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \begin{aligned} &a_n \cos(nx) \\ &+ b_n \sin(nx) \end{aligned} \right) \right] \cos(mx) dx$$

$$\int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \cos(mx) dx = \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_0}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \cos(mx) dx \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \int_{x_0}^{x_0+T} \cos(nx) \cos(mx) dx \right. \\ \left. + b_n \int_{x_0}^{x_0+T} \sin(nx) \cos(mx) dx \right) \end{array} \right\} \quad (3-8)$$

ในเทอมของ  $\frac{a_0}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \cos(mx) dx$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และจากสูตร

$$\cos(x) \cdot \cos(y) = \frac{1}{2} [\cos(x+y) + \cos(x-y)] \quad (3-9)$$

ดังนั้นในเทอมที่ 2 ทางขวามือในสมการที่ (3-8) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ (3-9) ได้คือ

$$\int_{x_0}^{x_0+T} \cos(nx) \cos(mx) dx = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \cos((n+m)x) dx \\ + \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \cos((n-m)x) dx \end{array} \right\} \quad (3-10)$$

$$= 0 \quad \text{เมื่อ } m \neq n$$

ถ้า  $m = n$  จะได้  $\int_{x_0}^{x_0+T} \cos(nx) \cos(mx) dx = \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \cos(2nx) dx = \frac{T}{2}$  (3-11)

และจากสูตร  $\sin(x) \cdot \cos(y) = \frac{1}{2} [\sin(x+y) + \sin(x-y)]$  (3-12)

ดังนั้นเทอมที่ 3 ในสมการที่ (3-8) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (3-12) ได้คือ

$$\int_{x_0}^{x_0+T} \sin(nx) \cos(mx) dx = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \sin((n+m)x) dx \\ + \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \sin((n-m)x) dx \end{array} \right\} \quad (3-13)$$

$$= 0 \text{ เมื่อ } m = n \text{ และ } m \neq n$$

แทนค่าสมการที่ (3-11) และสมการที่ (3-13) ลงในสมการที่ (3-8) จะได้

$$\int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \cos(mx) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \frac{T}{2} \right), \quad m = n \quad (3-14)$$

ฉะนั้น 
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \cos(nx) dx, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3-15)$$

สำหรับการหาค่า  $b_1, b_2, \dots, b_n$  สามารถหาได้โดยการคูณสมการที่ (3-5) ด้วย  $\sin(mx)$  และอินทิเกรตตลอดช่วง  $(x_0, x_0 + T)$

$$\int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \sin(mx) dx = \int_{x_0}^{x_0+T} \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \begin{array}{l} a_n \cos(nx) \\ + b_n \sin(nx) \end{array} \right) \right] \sin(mx) dx$$

$$\int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \sin(mx) dx = \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_0}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \sin(mx) dx \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \begin{array}{l} a_n \int_{x_0}^{x_0+T} \cos(nx) \sin(mx) dx \\ + b_n \int_{x_0}^{x_0+T} \sin(nx) \sin(mx) dx \end{array} \right) \end{array} \right\} \quad (3-16)$$

จากการอินทิเกรตเทอมแรกและเทอมที่สองด้านขวาของสมการที่ (3-16) มีค่าเป็นศูนย์ที่ทุกๆ ค่าของ  $n = 1, 2, \dots$  ซึ่งเหลือเฉพาะเทอมที่สาม ดังนั้นจากสูตร

$$\sin(x) \cdot \sin(y) = \frac{1}{2} [\cos(x-y) - \cos(x+y)]$$



สามารถคำนวณหาเทอมที่สามของสมการที่ (3-16) ได้คือ

$$\int_{x_0}^{x_0+T} \sin(nx)\sin(mx)dx = \begin{cases} \frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \cos((n-m)x)dx \\ -\frac{1}{2} \int_{x_0}^{x_0+T} \cos((n+m)x)dx \end{cases} \quad (3-17)$$

$$= \begin{cases} 0, & m \neq n \\ \frac{T}{2}, & m = n \end{cases}$$

แทนค่าสมการที่ (3-17) ลงในสมการที่ (3-16) จะได้

$$\int_{x_0}^{x_0+T} f(x)\sin(mx)dx = \sum_{n=1}^{\infty} \left( b_n \frac{T}{2} \right), \quad m = n$$

ฉะนั้น

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x)\sin(nx)dx, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3-18)$$

จากสมการที่ (3-7), (3-15) และ (3-18) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (3-19) ได้คือ

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x)dx \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x)\cos(nx)dx \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x)\sin(nx)dx \end{aligned} \quad (3-19)$$

เมื่อพิจารณา ฟังก์ชันคาบครบรอบ  $f(x)$  ใดๆ ที่มีคาบเท่ากับ  $2\pi$   $\left( T = \frac{2\pi}{\omega}, x = \frac{2\pi t}{T} = \omega t \right)$  จากสมการที่ (3-5) และ (3-19) จะได้

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (3-20)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dx \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) dt \end{aligned} \quad (3-21)$$

โดยสมการที่ (3-19) และ (3-21) เรียกว่า สูตรออยเลอร์ (Euler formula) ซึ่งสามารถหาอนุกรมฟูรีเยร์ได้จากสมการที่ (3-5) และ (3-20) ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในสมการดังกล่าวจะคำนวณได้จากสมการที่ (3-19) และ (3-21) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้นี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ (Fourier coefficient) ของ  $f(x)$

ในการนำอนุกรมฟูรีเยร์ไปใช้งานส่วนใหญ่แล้ว เพื่อความง่ายและสะดวกเมื่อทำการแทนอนุกรมฟูรีเยร์ให้อยู่ในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน (Complex exponential)  $e^{\pm jn\omega t}$  ดังนั้นจากสมการ (3-18) เทอมของโคไซน์และไซน์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเอกซ์โพเนนเชียลได้จาก

$$\begin{aligned} \cos(n\omega t) &= \frac{1}{2} (e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}) \\ \sin(n\omega t) &= \frac{1}{2j} (e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}) \end{aligned} \quad (3-22)$$

แทนสมการที่ (3-22) ในสมการที่ (3-20) ได้คือ

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \begin{aligned} &a_n \frac{1}{2} (e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}) \\ &+ b_n \frac{1}{2j} (e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}) \end{aligned} \right] \quad (3-23)$$

แทน  $\frac{1}{j} = -j$  ในสมการที่ (3-23) จะได้

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{a_n - jb_n}{2} e^{jn\omega t} + \frac{a_n + jb_n}{2} e^{-jn\omega t} \right] \quad (3-24)$$

จากสมการที่ (3-24) แทนค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ ( $a_0, a_n, b_n$ ) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน (Complex coefficients:  $c_0, c_n, c_{-n}$ ) เป็นไปดังสมการที่ (3-25)

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{a_0}{2} \\ c_n &= \frac{a_n - jb_n}{2} \\ c_{-n} &= \frac{a_n + jb_n}{2} \end{aligned} \quad (3-25)$$

โดย  $c_{-n}$  เป็นสังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของ  $c_n$  ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการที่ (3-26)

$$\begin{aligned} f(t) &= c_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} c_n e^{jn\omega t} + \sum_{n=1}^{n=\infty} c_{-n} e^{-jn\omega t} \\ &= c_0 e^0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} c_n e^{jn\omega t} + \sum_{n=-1}^{n=-\infty} c_n e^{jn\omega t} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c_n e^{jn\omega t} \end{aligned} \quad (3-26)$$

โดยสมการที่ (3-26) เรียกว่ารูปแบบเชิงซ้อน (Complex form) ของอนุกรมฟูรีเยร์ของ  $f(t)$  หรือเรียกว่าอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (Complex fourier series) ของ  $f(t)$  สัมประสิทธิ์ของ  $c_n$  สามารถคำนวณได้จากเทอมของ  $a_n, b_n$  จาก

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_n &= \frac{1}{2}(a_n - jb_n) \\
&= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt - j \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt \\
&= \frac{1}{T} \left\{ \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) [\cos(n\omega t) - j \sin(n\omega t)] dt \right\} \\
&= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jn\omega t} dt, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots
\end{aligned} \tag{3-27}$$

จะได้

การกระจายอนุกรมฟูริเยร์ของฟังก์ชันคาบนั้นจะเห็นได้ว่า ฟังก์ชันจะอยู่ในเทอมของส่วนประกอบของความถี่ต่างๆ ซึ่งฟังก์ชันคาบที่มีคาบเท่ากับ  $T$  จะมีส่วนประกอบของความถี่เชิงมุม  $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots, n\omega$  ดังนั้นฟังก์ชันคาบ  $f(t)$  ก็จะอยู่ภายในสเปกตรัม (Spectrum) ของความถี่เหล่านี้ ถ้ากำหนด  $f(t)$  ใดๆ ก็สามารถหาสเปกตรัมได้ในทางกลับกัน ถ้าทราบสเปกตรัมก็จะสามารถหาฟังก์ชันคาบได้ เพราะฉะนั้นจึงกำหนดฟังก์ชันคาบ  $f(t)$  ได้ 2 วิธีคือ โดเมนเวลา (Time domain) ซึ่งแสดงอยู่ในฟังก์ชันของเวลา และ โดเมนความถี่ (Frequency domain) ซึ่งจะกำหนดได้จากส่วนประกอบของความถี่ต่างๆ ทั้งนี้สเปกตรัมจะเกิดขึ้นที่  $\omega = \omega_0, 2\omega_0, \dots$  ดังนั้นสเปกตรัมจะเป็นเส้นโค้งที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะเกิดขึ้นตามค่าดิครีต (Discrete value) ของ  $\omega$  (คือ  $\omega_0, 2\omega_0, \dots$ ) ดังนั้นจึงเรียกว่า ดิครีตสเปกตรัม (Discrete spectrum) หรือสเปกตรัมเชิงเส้น (Line spectrum) อาจแสดงสเปกตรัมได้ด้วยเส้นกราฟ โดยกำหนดให้แนวนอนเป็นค่า  $\omega$  และแนวตั้งเป็นความสูง (Amplitude) ที่เป็นสัดส่วนกับส่วนประกอบของความถี่ต่างๆ

เราสามารถใช้ออนุกรมเอกซ์โพเนนเชียลหรืออนุกรมตรีโกณแสดงสเปกตรัมได้ แต่การใช้รูปแบบของเอกซ์โพเนนเชียลจะแสดงความหมายได้ดี โดย  $c_n$  เป็นปริมาณเชิงซ้อน จึงสามารถนำมาใช้อธิบายถึงแอมพลิจูดและเฟสสเปกตรัม ซึ่งแอมพลิจูดสเปกตรัม (Amplitude spectrum) ของฟังก์ชันคาบ  $f(t)$  จะได้จากการกำหนดขนาดของ  $c_n$  ในแกน  $y$  กับความถี่เชิงมุม (Angular frequency) ในแกน  $x$  และเฟสสเปกตรัม (Phase spectrum) ของ  $f(t)$  จะได้จากการกำหนดมุม (Phase angle)  $\theta_n$  ของ  $c_n$  ในแกน  $y$  กับค่าความถี่เชิงมุมในแกน  $x$  ถ้า  $c_n$  เป็นเลขจำนวนจริง  $c_{-n}$  ก็เป็นเลขจำนวนจริงด้วย แล้ว  $c_n = c_{-n}$  แอมพลิจูดหรือแอมกนิจูดสเปกตรัมจะสมมาตรรอบแกนตั้ง หรือกล่าวได้ว่าเป็นฟังก์ชันคู่ ถ้า  $c_n$  เป็นปริมาณเชิงซ้อนจะได้ดังสมการที่ (3-28)

$$\begin{aligned} c_n &= |c_n| e^{j\theta_n} \\ c_{-n} &= |c_n| e^{-j\theta_n} \end{aligned} \quad (3-28)$$

โดยเฟสของ  $c_n$  คือ  $\theta_n$  และเฟสของ  $c_{-n}$  คือ  $\theta_{-n}$  ดังนั้นเฟสสเปกตรัมจะไม่สมมาตร (เป็นฟังก์ชันคี่) รอบแกนแนวนอน

### 3.4 การวิเคราะห์กระแสร่มอนิกด้วยการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว

การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ในการพิจารณาสัญญาณรายคาบซึ่งประกอบด้วยสัญญาณไซน์ซอซอด์ที่มีความถี่มูลฐาน และสัญญาณไซน์ซอซอด์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน ซึ่งมีขนาด และมุมเฟสต่างกัน สามารถพิจารณาโดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier transform) ดังนั้นการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังจึงอาศัยวิธีการเดียวกัน (Miller and Dewe, 1993)

การแปลงฟูรีเยร์สัญญาณเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform, DFT) มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในงานด้านการวิเคราะห์สัญญาณเชิงตัวเลข (Digital Signal Processing, DSP) เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่เป็น สัญญาณเวลาเต็มหน่วย (Discrete time) ซึ่งเป็นการแปลงสัญญาณเต็มหน่วยในลักษณะเวลา ไปเป็นสัญญาณเต็มหน่วยในลักษณะของความถี่ (Discrete frequency) ในการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณที่เป็นแบบเต็มหน่วยโดยตรงนั้น มีขั้นตอนในการคำนวณเป็นจำนวนมาก จึงได้มีการเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณในการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณ ที่มีลักษณะเป็นสัญญาณเต็มหน่วย เรียกว่าการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว โดยจะสามารถลดขั้นตอนที่จำเป็นในการคำนวณลงได้ (Timothy, 1991)

พิจารณาจำนวนการคำนวณ (Number of operations) โดยกำหนดให้  $m(r)$  คือ จำนวนการคูณ จำนวนเชิงซ้อน และ  $a(r)$  คือ จำนวนการบวกจำนวนเชิงซ้อน โดยที่จำนวนจุดตัวอย่าง  $(N)$  เท่ากับ  $2^r$  ( $r$  เป็นจำนวนเต็ม)

ผลของการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณเต็มหน่วย จะได้จำนวนการทำงานดังสมการที่ (3-29)

$$m(r) = 2^r \cdot 2^r = N^2 \quad (3-29)$$

และ 
$$a(r) = 2^r \cdot (2^r - 1) = N(N-1) \quad (3-30)$$

ผลการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว ได้จำนวนการทำงาน

$$\begin{aligned}
 m(r) &= \frac{1}{2} 2^r \log_2 2^r \\
 &= \frac{1}{2} N \log_2 N \\
 &= \frac{1}{2} N \cdot r \quad , r > 1
 \end{aligned} \tag{3-31}$$

$$\begin{aligned}
 a(r) &= 2^r \log_2 2^r \\
 \text{และ} \quad &= N \log_2 N \\
 &= N \cdot r \quad , r > 1
 \end{aligned} \tag{3-32}$$

สำหรับการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วในขั้นพื้นฐาน สามารถแบ่งชนิดของการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วได้เป็น 2 แบบ คือ

1. การคำนวณในลักษณะของความถี่ (Decimation-In-Frequency, DIF)
2. การคำนวณในลักษณะของเวลา (Decimation-In-Time, DIT)

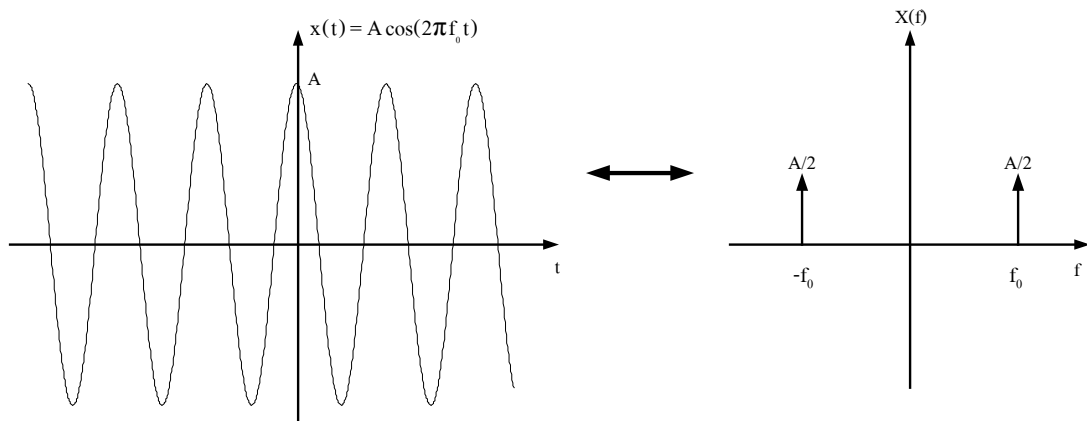
#### 3.4.1 หลักในการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณเติมหน่วย

พิจารณาการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณต่อเนื่อง (Analog signal,  $x(t)$ ) หาได้จาก

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp[-j\omega t] dt \tag{3-33}$$

โดยที่  $X(\omega)$  คือ ฟังก์ชันของความถี่  
 $x(t)$  คือ ฟังก์ชันของเวลา

ผลจากสมการที่ (3-33) แสดงการแปลงฟังก์ชันของเวลามาเป็นฟังก์ชันของความถี่ โดยที่  $f_0$  คือความถี่มูลฐานของสัญญาณ (ไซน์ซอซด์) ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นลักษณะการแปลงฟูรีเยร์ของสัญญาณต่อเนื่อง



รูปที่ 3.4 สัญญาณไซน์ซอซอดของการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณไซน์ซอซอดต่อเนื่อง

หลักการในการแปลงฟูรีเยร์ด้วยพีซีนั้น ไม่สามารถใช้สัญญาณต่อเนื่องได้ จึงจำเป็นต้องทำการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณเต็มหน่วย ที่ได้จากสัญญาณต่อเนื่อง ให้อยู่ในลักษณะสัญญาณที่เป็นจุดตัวอย่าง (Sampled signal,  $x(nT)$ ) ดังนั้น จากผลดังกล่าวจึงสามารถเปลี่ยนแปลงสมการ (3-33) ให้อยู่ในรูปสมการของผลรวมของสัญญาณที่เป็นจุดตัวอย่าง ดังนี้

$$X(k) = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=-1}^{\infty} x(n) W_N^{nk} \right] ; k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-34)$$

พิจารณาสมการ (3-34) เวลาที่ใช้มีระยะเวลายาวนานมาก ดังนั้นการทำงานจริงต้องมีการกำหนดเวลาที่แน่นอน โดยที่ลักษณะการกำหนดช่วงเวลากการแปลงฟูรีเยร์ โดยอาศัยหลักการของวินโดว์ (Window) ดังนั้นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจึงมีค่าเท่าเดิมทุกค่า แต่เวลาที่ใส่จะลดลงเหลือเพียง “0” ถึง “(N-1)T” ดังสมการ (3-35)

$$X(k) = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \right] ; k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-35)$$

หรือ

$$X(k) = \frac{1}{N} \left[ x(0) + x(1)W_N^k + x(2)W_N^{2k} + \dots + x(N-1)W_N^{(N-1)k} \right]$$

กรณี  $N = 4$  แสดงผลของสมการ (3-35) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 X(0) &= \frac{1}{4} [x_0(0)W^0 + x_0(1)W^0 + x_0(2)W^0 + x_0(3)W^0] \\
 X(1) &= \frac{1}{4} [x_0(0)W^0 + x_0(1)W^1 + x_0(2)W^2 + x_0(3)W^3] \\
 X(2) &= \frac{1}{4} [x_0(0)W^0 + x_0(1)W^2 + x_0(2)W^4 + x_0(3)W^6] \\
 X(3) &= \frac{1}{4} [x_0(0)W^0 + x_0(1)W^3 + x_0(2)W^6 + x_0(3)W^9]
 \end{aligned} \tag{3-36}$$

แสดงผลของสมการ (3-36) ในรูปเมตริกซ์ดังสมการ (3-37)

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \tag{3-37}$$

โดยที่  $x(nT)$  เขียนแทนด้วย  $x(n)$   
 $W_N$  คือ ค่าทวิคูณแฟกเตอร์ (Twiddle factor) =  $e^{-j2\pi/N}$   
 $T$  คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดตัวอย่าง (Sampling period)  
 $N$  คือ จำนวนจุดตัวอย่าง

พิจารณาสมการ (3-35) เนื่องจาก  $W_N$  และ  $X(k)$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นในการคำนวณเมตริกซ์ ต้องคูณจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด  $N^2$  ครั้ง และเกิดการบวกจำนวนเชิงซ้อนเป็นจำนวน  $N(N-1)$  ครั้ง

ผลการแปลงค่าจากฟังก์ชันเวลาไปเป็นฟังก์ชันความถี่ แสดงดังสมการที่ (3-38)

$$x(nT) \leftrightarrow \frac{1}{|n|} * \left( \frac{f}{n} \right) \tag{3-38}$$



### 3.4.2 หลักการในการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว

การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว คือ แนวคิดในการคำนวณหาค่าจากสมการ (3-35) โดยใช้ประโยชน์จากการที่ค่าทวีคูณแฟกเตอร์มีความสมมาตรดังสมการที่ (3-39)

$$W_N^k = W_N^{k+N} = -W_N^{k+N/2} \quad (3-39)$$

การแปลงด้วย FFT สามารถลดจำนวนขั้นตอนในการคำนวณตัวเลขจำนวนเชิงซ้อนได้ โดยการกระจายการแปลงฟูรีเยร์สัญญาณเต็มหน่วย  $N$  จุด ออกเป็นการแปลงแบบ DFT ที่มีจำนวนจุดน้อยกว่าเรียงลำดับกันไป โดยที่จำนวนจุด (Radix) หมายถึงจำนวนจุดของสัญญาณที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการแปลงแบบ DFT ซึ่งการสร้างแนวคิดในการแปลงด้วย FFT แบบสัญญาณที่ละ 2 จุด จะแสดงต่อไป

พิจารณาสัญญาณเต็มหน่วย  $x(n)$  ที่มีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด  $N$  จุด สามารถแยกจำนวนตัวอย่างทั้งหมดออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กันได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 ได้แก่  $x(0), x(1), x(2), \dots, x(N/2-1)$

ส่วนที่ 2 ได้แก่  $x(N/2), x(N/2+1), x(N/2+2), \dots, x(N-1)$

สามารถเขียนให้อยู่ในลักษณะเดียวกับสมการ (3-35) ได้โดยแยกออกเป็น 2 ส่วนได้เช่นกัน ดังนี้

$$X(k) = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=0}^{M-1} x(n) W_N^{nk} + \sum_{n=M}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \right], \quad M = N/2 \quad (3-40)$$

กำหนดให้  $n = n + N/2 = n + M$  แทนลงในพจน์สุดท้ายของสมการ (3-39) ได้ว่า

$$X(k) = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=0}^{M-1} x(n) W_N^{nk} + \sum_{n=0}^{M-1} x(n+M) W_N^{nk} W_N^{kM} \right] \quad (3-41)$$

เมื่อแทนค่า  $W_N^{kM} = e^{-j\pi k} = (-1)^k$  ในสมการ (3-41) จะได้ว่า

$$X(k) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{n=0}^{M-1} [x(n) + (-1)^k x(n+M)] W_N^{nk} \right\} \quad (3-42)$$

เนื่องจาก  $(-1)^k$  เท่ากับ “1” สำหรับ  $k$  ที่เป็นเลขจำนวนเต็มคู่ และเท่ากับ “-1” สำหรับ  $k$  ที่เป็นเลขจำนวนเต็มคี่ จึงสามารถแยกสมการที่ (3-42) ออกเป็น 2 สมการดังนี้

$$X(k) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{n=0}^{M-1} [x(n) + x(n+M)] W_N^{nk} \right\}, \quad k = \text{จำนวนคี่} \quad (3-43)$$

และ

$$X(k) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{n=0}^{M-1} [x(n) - x(n+M)] W_N^{nk} \right\}, \quad k = \text{จำนวนคู่} \quad (3-44)$$

พิจารณาสมการ (3-43) ซึ่งเป็นสมการสำหรับ  $k$  ที่เป็นเลขคู่ จะกำหนดให้  $k = 2k$  จะได้

$$X(2k) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{n=0}^{M-1} [x(n) - x(n+M)] W_N^{2nk} \right\}, \quad k = 0, 1, \dots, N/2-1 \quad (3-45)$$

พิจารณาสมการ (3-44) ซึ่งเป็นสมการสำหรับ  $k$  ที่เป็นเลขคี่ กำหนดให้  $k = 2k+1$  จะได้

$$X(2k+1) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{n=0}^{M-1} [x(n) - x(n+M)] W_N^n W_M^{2nk} \right\}, \quad (3-46)$$

$$k = 0, 1, \dots, N/2-1$$

กำหนดให้

$$a(n) = x(n) + x(n+M) \quad (3-47)$$

$$b(n) = x(n) - x(n+M), \quad n = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3-48)$$

เนื่องจากผลรวมของ  $X(2k)$  และ  $X(2k+1)$  คือ การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว  $N$  จุด ฉะนั้น

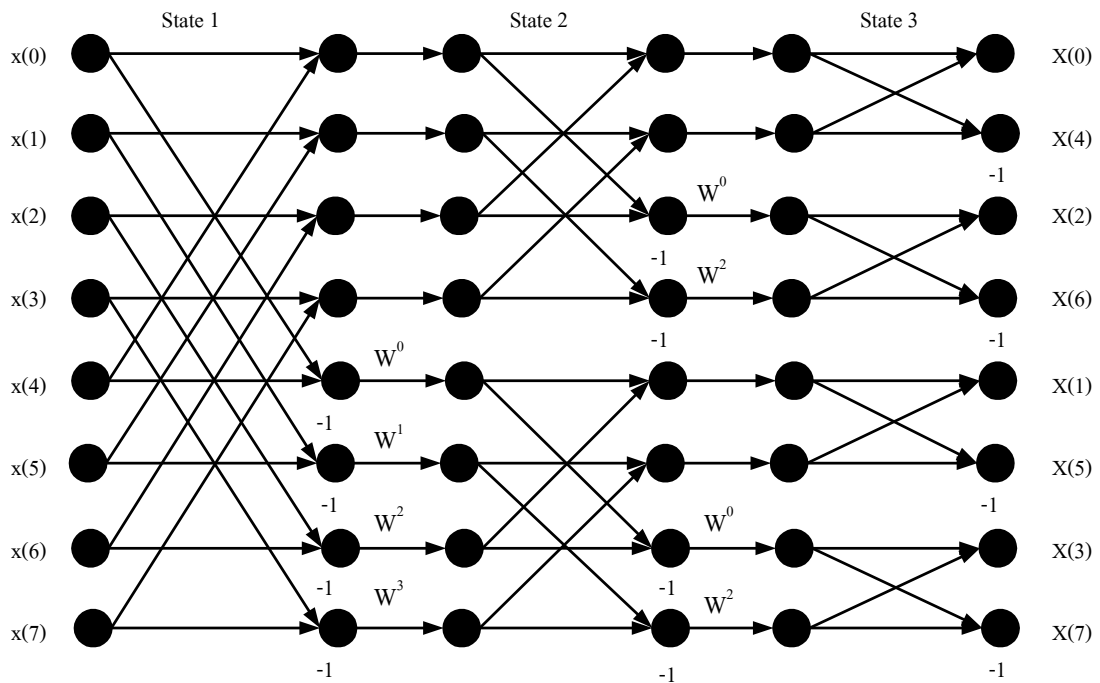
$$X(k) = X(2k) + X(2k+1)$$

เมื่อแทนค่า  $X(2k)$  และ  $X(2k+1)$  จะได้  $X(k)$  ดังนี้

$$X(k) = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=0}^{M-1} a(n)W_M^{nk} + \sum_{m=0}^{M-1} b(m)W_M^{nk} \right] \quad (3-49)$$

โดยที่  $W_N^{2nk} = W_M^{nk}$  แสดงผลของสมการ (3-49) ด้วยลักษณะกราฟการไหล (Flow graph) ดังรูปที่

### 3.5



รูปที่ 3.5 วิธีการคำนวณฟูริเยร์แบบเร็ว 8 จุด

หลังจากคำนวณในขั้นตอนสุดท้ายแล้ว จะสังเกตได้ว่าการเรียงลำดับของค่าที่ได้จากการคำนวณเรียงไม่เป็นไปตามลำดับเช่นเดียวกับค่าที่นำมาคำนวณ ซึ่งการเรียงลำดับเช่นนี้เรียกว่า สแครมเบิ้ล (Scrambled) จึงจำเป็นต้องมีการทำ บิตรีเวิร์ส (Bit-reverse) เพื่อให้การเรียงลำดับของค่าที่ได้จากการคำนวณมีการเรียงเช่นเดียวกับค่าที่นำมาคำนวณ โดยจะใช้หลักการสวอปปี้ง (Swapping) การเรียงลำดับของเลขฐาน 2 ที่ใช้บอกตำแหน่งของหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูล โดยการสลับกันระหว่างบิตแรกและบิตสุดท้าย จะใช้ในกรณีที่ตำแหน่งของหน่วยความจำกำหนดด้วยเลขฐาน 2 ขนาด 3 บิต แต่ในกรณีที่ตำแหน่งของหน่วยความจำกำหนดด้วยเลขฐาน 2 ขนาด 5 บิต จะทำการสลับกันระหว่างบิตที่ 1 กับบิตที่ 5 และบิตที่ 2 กับบิตที่ 4

ตารางที่ 3.1 การทำบิตรีเวิร์ส

จำนวนบิต	บิต	บิตรีเวิร์ส	ตัวอย่าง
3 บิต	3 2 1	1 2 3	011 → 110
5 บิต	5 4 3 2 1	1 2 3 4 5	11010 → 01011

ข้อกำหนดของตำแหน่งหน่วยความจำที่จะทำการสวอปบิต ต้องมีตำแหน่งหน่วยความจำเดียวกัน กล่าวคือตำแหน่งหน่วยความจำของค่า  $x(n)$  และ  $X(n)$  (เมื่อ  $n = 0, 1, 2, \dots$ ) ต้องมีตำแหน่งหน่วยความจำเท่ากัน

การแปลงสัญญาณด้วย FFT มีข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

1. ช่วงห่างของความถี่ (Interval frequency,  $f_0$ ) มีค่าเท่ากับ  $1/NT$  โดยที่  $N$  คือจำนวนจุดตัวอย่าง และ  $T$  คือช่วงระยะห่างของเวลาระหว่างจุดตัวอย่าง

2. ผลที่เกิดขึ้นในแต่ละความถี่ ( $0, f_0, 2f_0, 3f_0, \dots, Nf_0/2$ ) เป็นเซลล์คำตอบ (Resolution cell) ของ FFT

3. ค่าที่ได้ในแต่ละเซลล์คำตอบ อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นจึงสามารถปรับค่าที่ได้นี้ให้อยู่ในรูปของขนาดและมุมเฟส เช่นเดียวกันการแปลงจากรูปแบบมุมฉาก (Rectangular form) มาเป็นรูปแบบเชิงขั้ว (Polar form) ในการแปลงจำนวนเชิงซ้อน

$$X(f) = \text{Re}(f) + j\text{Im}(f) = |X(f)|e^{j\theta(f)} \quad (3-50)$$

โดยที่  $\text{Re}(f)$  คือส่วนจริงจากการแปลงด้วย FFT

$\text{Im}(f)$  คือส่วนจินตภาพจากการแปลงด้วย FFT

$|X(f)|$  คือขนาดหรือสเปกตรัมของการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3-51)

$$|X(f)| = \sqrt{\text{Re}^2(f) + \text{Im}^2(f)} \quad (3-51)$$

$\theta(f)$  คือมุมเฟสของการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3-52)

$$\theta(f) = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}(f)}{\text{Re}(f)} \right] \quad (3-52)$$

ขีดจำกัดการใช้งานของ FFT จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ทำให้ทราบถึงความสามารถในการแปลงสัญญาณของ FFT ซึ่งคำนวณได้เร็วกว่า DFT เป็นผลให้มีการใช้ FFT อย่างกว้างขวาง แต่การแปลงสัญญาณแบบ FFT ก็มีขีดจำกัดในการแปลงอยู่บ้างดังนี้ (Ghausi and Laker, 1981)

1. จำนวนจุดตัวอย่าง (Samples) การกำหนดจุดตัวอย่างเป็นขั้นตอนแรกในการพิจารณา FFT โดยจำนวนจุดตัวอย่างต้องเท่ากับ  $2^i$  ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดไว้ 128 จุด หรือ  $2^7$  จุด จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้ว จำนวนจุดตัวอย่างจะเป็นตัวกำหนดช่วงห่างของความถี่ที่จะได้จากการแปลงด้วย FFT กรณีที่มีจุดตัวอย่างเป็นจำนวนมากทำให้เวลาที่ใช้ในการแปลงก็จะมากด้วย (พิจารณาที่ความถี่ในการซัดตัวอย่างเท่ากัน)

2. การเคลือบแฝง (Aliasing) ตามหลักการของไนควิสต์ (Nyquist) นั้น กล่าวว่าการถี่แซมเปิ้ล ต้องมากกว่า 2 เท่า ของความถี่ที่ต้องการจะทำการแปลงสัญญาณไม่เช่นนั้นจะเกิดการเคลือบแฝงได้ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้สนใจความถี่ฮาร์โมนิกสูงสุดที่ 19 (950 Hz) เพราะฉะนั้นในการเลือกความถี่แซมเปิ้ลจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1.9 kHz ซึ่งในทางปฏิบัติจริงนั้น มักจะเลือกความถี่ในการซัดตัวอย่างมากกว่าความถี่ลำดับฮาร์โมนิกที่ 19 ถึง 4 เท่า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ความถี่ในการซัดตัวอย่างเท่ากับ 6400 Hz ซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้องตามหลักการทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ ถ้าความถี่ในการซัดตัวอย่างมีค่าน้อยกว่า 2 เท่า ของความถี่ที่สนใจ ผลที่ได้จากการแปลงด้วย FFT ที่ความถี่นั้นจะเกิดการผิดพลาด ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเคลือบแฝง

3. เวลาทั้งหมดที่ใช้เก็บข้อมูล พิจารณาจากจำนวนจุดตัวอย่างที่เกิดขึ้น 128 จุด ดังนั้นเวลาที่ใช้ทั้งหมดในการเก็บข้อมูล เท่ากับ เวลาของความถี่ในการซัดตัวอย่างคูณกับ 128

กรณีที่เวลาทั้งหมดทำให้ข้อมูล 128 จุด ไม่ครบคาบ จะเป็นผลให้การแปลงสัญญาณด้วย FFT เกิดความผิดพลาดได้ เพราะฉะนั้นการแก้ไขกระทำได้โดยเปลี่ยนความถี่ในการซัดตัวอย่างให้ มีเวลาของความถี่ในการซัดตัวอย่างคูณด้วย 128 ได้ครบคาบพอดี ซึ่งความถี่ที่ปรับปรุงนี้ต้องคำนึงถึงผลของการเกิดการเคลือบแฝงด้วย

### 3.5 สรุป

การตรวจวัดกระแสฮาร์โมนิกนั้นได้แบ่งออกเป็น การตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก ซึ่งการตรวจจับกระแสฮาร์โมนิกนั้นอาศัยวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกซึ่งได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น เมื่อได้สัญญาณของกระแสฮาร์โมนิกแล้วจึงส่งต่อไปยังส่วนของการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก ซึ่งการวิเคราะห์นี้แบ่งการวิเคราะห์ได้ 2 วิธีคือวิธีการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ และวิธีการวิเคราะห์ด้วยฟูริเยร์แบบเร็ว โดยวิธีการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์นั้นให้ผลของคำตอบที่ถูกต้องสูงแต่มีวิธีการคำนวณที่ซับซ้อนยุ่งยากใช้เวลาในการ

คำนวณนาน ส่วนวิธีการวิเคราะห์ด้วยฟูรีเยร์แบบเร็วใช้เวลาในการคำนวณน้อย มีวิธีการคำนวณที่ซับซ้อนยุ่งยากน้อยกว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ แต่ความถูกต้องต่ำโดยถูกจำกัดด้วยขีดจำกัดการใช้งานของการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วดังที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งเป็นการประยุกต์จากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ ซึ่งจะได้กล่าวในบทที่ 5 และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของวิธีฟูรีเยร์แบบเร็วและวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในบทที่ 6 หัวข้อ 6.3 ต่อไป

## บทที่ 4

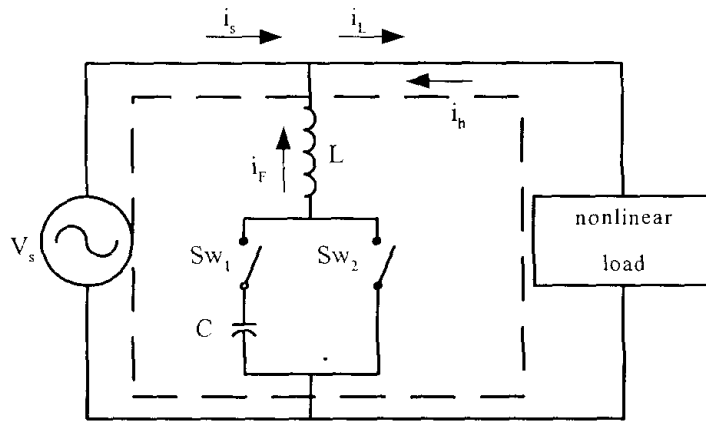
### วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ

#### 4.1 บทนำ

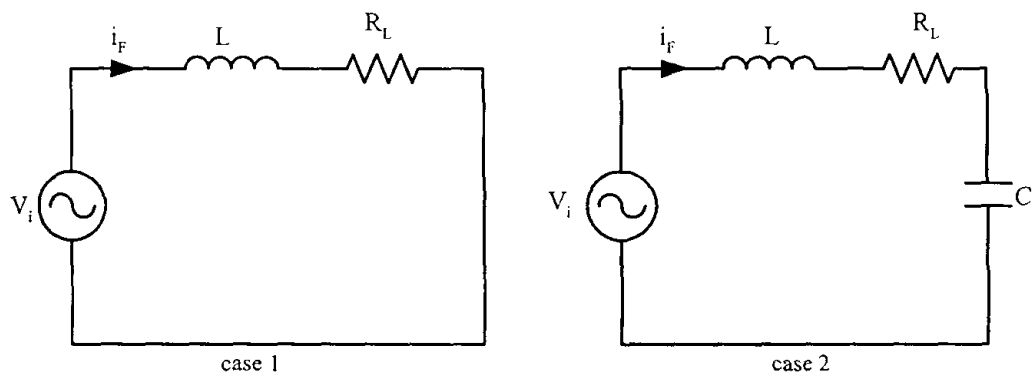
การพิจารณาวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุนั้นจะพิจารณาถึงลักษณะการสวิตช์ของตัวเก็บประจุเพื่อสร้างสัญญาณกระแสชดเชยมาหักล้างกับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกของระบบในรูปของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ โดยลักษณะรูปแบบการสวิตช์ในหนึ่งคาบสัญญาณนั้นแต่ละรูปแบบจะให้ค่าสัญญาณกระแสชดเชยไม่เท่ากัน ฉะนั้นจึงต้องอาศัยการวิเคราะห์วงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผล เพื่อทำการหาค่าของกระแสชดเชยที่ได้สร้างขึ้นตามลักษณะรูปแบบการสวิตช์ที่เกิดขึ้นในหนึ่งคาบสัญญาณ ในส่วนของการหารูปแบบการสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างกระแสชดเชยนั้นอาศัยเทคนิคการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยการตั้งเดิม (Conventional optimization technique) โดยใช้การค้นหาแบบเกรเดียนต์ (Gradient search) พัฒนาโดย Fletcher และ Reeves (Luenberger, D.G., 1973) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทนี้

#### 4.2 การวิเคราะห์วงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผล

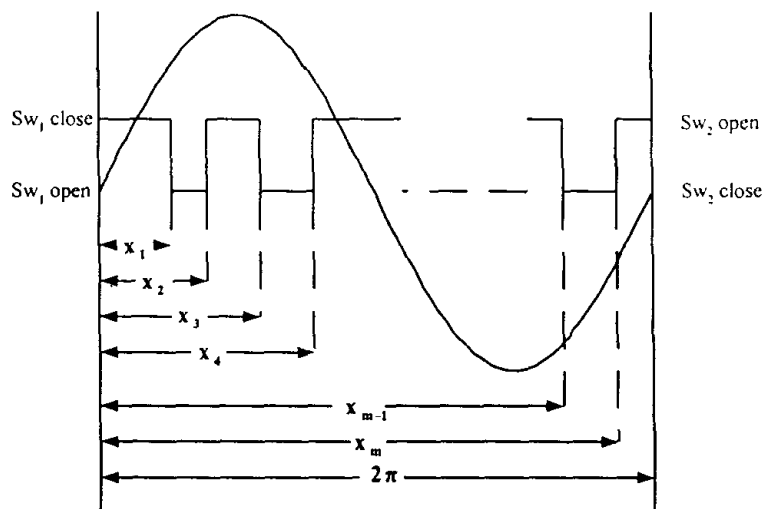
การวิเคราะห์วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุในรูปของการวิเคราะห์ขยายผล(Extended analysis) (Welsh, M., Mehta, P. and Darwish, M.K., 2000) นั้นวิเคราะห์จากรูปแบบการสับสวิตช์ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 สวิตช์  $Sw_2$  ปิด  $Sw_1$  เปิด และกรณีที่ 2 สวิตช์  $Sw_2$  เปิด  $Sw_1$  ปิด โดยช่วงเวลา  $x_0$  ถึง  $x_1$  สวิตช์ทำงานในกรณีที่ 2 ช่วงเวลา  $x_1$  ถึง  $x_2$  สวิตช์ทำงานในกรณีที่ 1 สลับกันไปเรื่อยๆ จนถึงเวลา  $x_{m+1}$  ซึ่งครบคาบพอดี โดยในการวิเคราะห์จะแยกวงจรกรองฮาร์มอนิกเป็นวงจรเชิงเส้น 2 วงจรทำงานสลับกัน เพื่อสร้างกระแสชดเชยความถี่ไม่เชิงเส้น ดังรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 การเชื่อมต่อวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุในการวิเคราะห์ขยายผล



รูปที่ 4.3 รูปแบบการสับสวิตช์  $Sw_1, Sw_2$



กำหนดให้  $v_i(t) = V_{\max} \sin(\omega t)$  (4-1)

$$i_F(t) = \frac{v_i(t)}{Z(t)} \quad (4-2)$$

โดยที่	$v_i(t)$	คือแรงดันของแหล่งจ่าย
	$V_{\max}$	คือขนาดของแรงดันสูงสุด
	$i_F(t)$	คือกระแสชดเชยของวงจรกรองฮาร์มอนิก
	$Z(t)$	คืออิมพีแดนซ์ของวงจรกรองฮาร์มอนิก

**กรณีที่ 1** สวิตช์  $Sw_2$  ปิด  $Sw_1$  เปิด ตัวเหนี่ยวนำต่อลงกราวด์ สามารถหากระแสชดเชยดังสมการที่ (4-3)

$$i_F(t) = \frac{V_{\max}}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(\omega t + \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R_L}\right)\right) \quad (4-3)$$

โดยที่	$R_L$	คือความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ
	$L$	คือขนาดตัวเหนี่ยวนำ
	$\omega$	คือความเร็วเชิงมุม

เมื่อพิจารณากระแสชดเชยในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์โดยกำหนดให้  $x = \omega t$  ได้ดังนี้

$$i_F(x) = \frac{V_{\max}}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(x + \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R_L}\right)\right) \quad (4-4)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์มีค่าดังสมการที่ (4-5) และ (4-6)

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_F(x) \sin(nx) dx \quad (4-5)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_F(x) \cos(nx) dx \quad (4-6)$$

แทนค่าสมการที่ (4-4) ลงในสมการที่ (4-5) และ (4-6) จัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (4-7) และ (4-8) โดยแสดงความสัมพันธ์ไว้ในภาคผนวก ก

$$A_n^I = K_1 \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} \right) \Big|_{x_1}^{x_2} \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} \right) \Big|_{x_3}^{x_4} \\ & + \dots \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} \right) \Big|_{x_{m-1}}^{x_m} \end{aligned} \right. \quad (4-7)$$

$$B_n^I = K_1 \left\{ \begin{aligned} & \left( -\frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \Big|_{x_1}^{x_2} \\ & + \left( -\frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \Big|_{x_3}^{x_4} \\ & + \dots \\ & + \left( -\frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \Big|_{x_{m-1}}^{x_m} \end{aligned} \right. \quad (4-8)$$

โดยที่  $A_n^I, B_n^I$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ของกระแสชดเชยในการสวิตซ์กรณี 1

$$K_1 = \frac{V_{\max}}{2\pi \sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \quad \text{และ} \quad \gamma_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R_L} \right)$$

กรณีที่ 2 สวิตช์  $Sw_2$  เปิด  $Sw_1$  ปิด ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ สามารถหาสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ได้จาก

$$i_F(t) = \frac{V_{\max} \omega C}{\sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{(1 - \omega^2 LC)} \right) \right) \quad (4-9)$$

โดยที่  $C$  คือขนาดของตัวเก็บประจุ เมื่อพิจารณากระแสซายในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์โดยกำหนดให้  $x = \omega t$  ได้ดังสมการที่ (4-10)

$$i_F(x) = \frac{V_{\max} \omega C}{\sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \sin \left( x + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{(1 - \omega^2 LC)} \right) \right) \quad (4-10)$$

แทนค่าสมการที่ (4-10) ลงในสมการที่ (4-5) และ (4-6) ได้ดังสมการที่ (4-11) และ (4-12) โดยแสดงความสัมพันธ์ไว้ในภาคผนวก ก

$$A_n^{\text{II}} = K_2 \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1 - n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1 + n} \right) \Big|_{x_0}^{x_1} \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1 - n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1 + n} \right) \Big|_{x_2}^{x_3} \\ & + \dots \\ & \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1 - n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1 + n} \right) \Big|_{x_m}^{x_{m+1}} \end{aligned} \right. \quad (4-11)$$

$$B_n^{\text{II}} = K_2 \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \Big|_{x_0}^{x_1} \\ & + \left( \frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \Big|_{x_2}^{x_3} \\ & + \dots \\ & + \left( \frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \Big|_{x_m}^{x_{m+1}} \end{aligned} \right\} \quad (4-12)$$

โดยที่  $A_n^{\text{II}}, B_n^{\text{II}}$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสชดเชยในการสวิตช์กรณี 2

$$K_2 = \frac{V_{\max} \omega C}{2\pi \sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \quad \text{และ} \quad \gamma_2 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{1 - \omega^2 LC} \right)$$

จาก  $A_n = A_n^{\text{I}} + A_n^{\text{II}} \quad (4-13)$

$$B_n = B_n^{\text{I}} + B_n^{\text{II}} \quad (4-14)$$

นำสมการที่ (4-9) และ (4-11) แทนลงในสมการที่ (4-13) ได้ดังสมการที่ (4-15)

$$A_n = \left\{ \begin{array}{l}
\left. \left\{ \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} \right) \right|_{x_1}^{x_2} \right. \\
+ \left. \left\{ \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} \right) \right|_{x_3}^{x_4} \right. \\
+ \dots \\
+ \left. \left\{ \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} \right) \right|_{x_{m-1}}^{x_m} \right. \\
+ K_1 \left. \right\} \\
+ \left. \left\{ \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} \right) \right|_{x_0}^{x_1} \right. \\
+ \left. \left\{ \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} \right) \right|_{x_2}^{x_3} \right. \\
+ \dots \\
+ \left. \left\{ \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} \right) \right|_{x_m}^{x_{m+1}} \right. \\
+ K_2 \left. \right\} \right\} \quad (4-15)$$

นำสมการที่ (4-10) และ (4-12) แทนลงในสมการที่ (4-14) ได้ดังสมการที่ (4-16)

$$\mathbf{B}_n = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \left( \frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \right\}_{x_1}^{x_2} \\ + \left\{ \left( \frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \right\}_{x_3}^{x_4} \\ + \dots \\ + \left\{ \left( \frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \right\}_{x_{m-1}}^{x_m} \end{array} \right\} \\
+ \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \left( \frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \right\}_{x_0}^{x_1} \\ + \left\{ \left( \frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \right\}_{x_2}^{x_3} \\ + \dots \\ + \left\{ \left( \frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \right\}_{x_m}^{x_{m+1}} \end{array} \right\}$$

(4-16)

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์จากการสวิตช์ตัวเก็บประจุแล้ว นำไปใช้ในการหารูปแบบการสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสชดเชยหักล้างกับสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสฮาร์มอนิกได้พอดี ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

#### 4.3 การหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยการค้นหาแบบเกรเดียนต์

ในการวัดผลของวงจรกรองฮาร์มอนิกนั้นสามารถวัดได้จากค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion: THD) ซึ่งสามารถแทนด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function: J) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (4-17)

$$J = \sum_{n=2}^{19} (A_n - X_n)^2 + (B_n - Y_n)^2 \quad (4-17)$$

โดยที่  $A_n, B_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสชดเชยจากวงจรกรองฮาร์มอนิก  
 $X_n, Y_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลด  
 $n$  คือค่าอันดับของฮาร์มอนิก

อย่างไรก็ตามการหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดนั้นหาได้จากการสวิตช์ตัวเก็บประจุให้เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะสร้างกระแสชดเชยให้มีค่าเท่ากับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น โดยการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดนั้นสามารถหาได้จากกระบวนการต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของรูปแบบการสวิตช์ ( $x_1, x_2, \dots, x_m$ ) ซึ่งได้จากการสุ่ม
- 2) คำนวณหาค่า  $A_n, B_n$  จากสมการที่ (4-15) และ (4-16)
- 3) หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากสมการที่ (4-17) หาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันค่า เทียบกับ  $x_i$  ได้ดังนี้

$$\frac{dJ}{dx_i} = \sum_{n=2}^{19} 2(A_n - X_n) \frac{dA_n}{dx_i} + 2(B_n - Y_n) \frac{dB_n}{dx_i}, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4-18)$$

ค่าเกรเดียนต์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์หาได้จาก

$$G = \left[ \frac{dJ}{dx_1}, \frac{dJ}{dx_2}, \dots, \frac{dJ}{dx_m} \right] \quad (4-19)$$

4) ใช้กระบวนการทิศทางสังยุค (Conjugate direction method) (Luenberger, D.G.,1973; Welsh, M., Mehta, P. and Darwish, M.K.,2000) ในการหาค่าน้อยที่สุดของฟังก์ชันค่า และค่าที่เหมาะสมที่สุดของการสวิตช์ตัวเก็บประจุ ( $x_1, x_2, \dots, x_m$ ) ตามกระบวนการต่อไปนี้

a) กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของฟังก์ชันส่วนเพิ่ม (Increment function,  $d^0$ ) มีค่าเท่ากับค่า  $G^0$  โดย  $G^0$  เป็นค่าเริ่มต้นของ  $G$

b) กำหนดให้ค่า  $\beta$  มีค่าน้อยๆ (-0.0001 ถึง 0.0001)

c) หาค่ารูปแบบการสับสวิตช์ตัวเก็บประจุใหม่ได้ดังสมการที่ (4-20)

$$x_i = x_i^0 + \beta d^0 \quad (4-20)$$

d) หาค่า  $A_n, B_n$  ใหม่จากการแทนค่าที่ได้มาจากสมการที่ (4-20) ลงในสมการที่ (4-15) และ (4-16)

e) หาค่า  $J$  ใหม่จากสมการที่ (4-17)

f) ปรับค่า  $\beta$  ให้ได้ค่า  $J$  ที่น้อยที่สุดโดยพิจารณา  $\beta$  ทั้งบวกและลบ

g) หาค่า  $G$  ที่ได้มาจาก  $J_{\min}$

h) หาค่าฟังก์ชันส่วนเพิ่ม  $d$  จากสมการที่ (4-21)

$$d = -G^0 + \frac{\langle G, G \rangle}{\langle G^0, G^0 \rangle} \quad (4-21)$$

โดยที่

$$\langle G, G \rangle = \sum_{i=1}^m G_i^2$$

$$G_i = \frac{dJ}{dx_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

i) แทนค่า  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0$  ด้วยค่า  $x_1, x_2, \dots, x_m$  ที่ได้มาจาก  $J_{\min}$

j) แทนค่า  $d^0$  และ  $G^0$  ด้วยค่า  $d$  และ  $G$  ที่ได้มาจาก  $J_{\min}$

k) กลับไปทำซ้ำในขั้นตอน c)

ในขั้นตอน f) นั้นจะต้องใช้การค้นหาแบบเชิงเส้น (Linear search) โดยมีข้อกำหนดดังสมการที่ (4-22) และ (4-23)

$$x_{i-1} < x_i < x_{i+1} \quad (4-22)$$

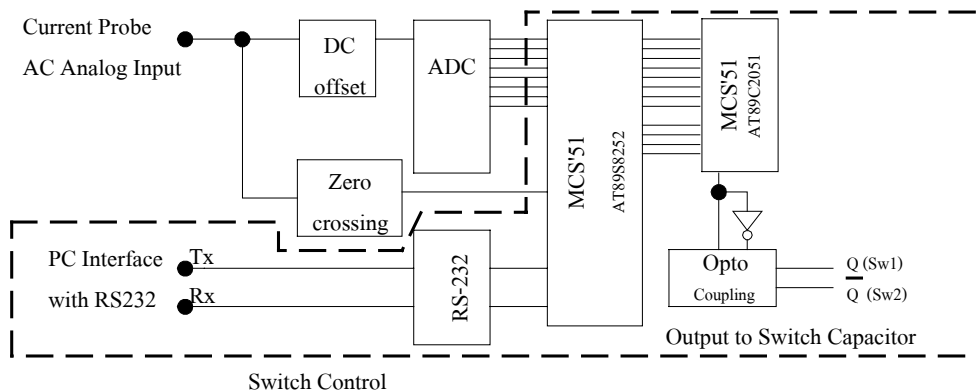
และ  $x_m < 0.02$  ,  $m$  เป็นเลขคู่ (4-23)

#### 4.4 การตั้งการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิก

ลักษณะการตั้งการสวิตซ์ตัวเก็บประจุนั้นจะมีการตั้งการทำงานในรูปของดิจิทัลจากรูปแบบการสับสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่ได้นั้น เป็นการหาช่วงเวลาในการสวิตซ์จึงต้องมีการแปลง



รูปแบบการสับสวิตช์ให้อยู่ในรูปของดิจิทัล เพื่อสั่งการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สั่งการสวิตช์ต่อไป โดยในการแปลงรูปแบบการสวิตช์นั้นจะพิจารณาช่วงเวลาการสับสวิตช์ที่น้อยที่สุด ซึ่งได้จากการกำหนดขอบเขตเริ่มต้นของการหารูปแบบการสวิตช์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดค่าให้ช่วงเวลาการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่น้อยที่สุด มีค่าไม่ต่ำกว่า 20 ไมโครวินาที(เนื่องจากความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS'51 AT89C2051 สามารถทำงานได้เร็วที่สุด 17 ไมโครวินาที) และการส่งสัญญาณคำสั่งการสับสวิตช์ตัวเก็บประจุไปสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะใช้อัตราการซีกตัวอย่าง 51.2 kHz (1024 จุด ใน 1 ลูกคลื่นสัญญาณ 50 Hz) โดยมีลักษณะการสั่งการสวิตช์จากคอมพิวเตอร์ส่งรูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุในรูปของดิจิทัลการผ่าน RS-232 ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 1 (AT89S8252) เพื่อนำรูปแบบการสวิตช์มารวมกับข้อมูลที่ได้จาก Zero crossing (เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นการสั่งสวิตช์) แล้วส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 2 (AT89C2051) เพื่อสั่งการสวิตช์ต่อไปโดยผ่าน Opto coupling เพื่อแยกกราวด์ของวงจรสวิตช์กับวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์ออกจากกัน(ป้องกันการรบกวนของสัญญาณ) โดยมีการทำงานดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงการทำงานของชุดสั่งการสวิตช์ตัวเก็บประจุ

#### 4.5 สรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 4 นี้ ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ห้วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุด้วยวิธีการวิเคราะห์ห้ขยายผล เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ของกระแสชดเชยจากวงจรกรองฮาร์มอนิกในรูปแบบการสวิตช์ใดๆ ในหนึ่งคาบสัญญาณ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ห้ขยายผลนั้นจะนำไปใช้ในการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยการค้นหาแบบเกรเดียนต์

โดยผลการทดสอบการทำงานและอภิปรายผลปรากฏในบทที่ 6 หัวข้อ 6.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการดังกล่าวข้างต้นนั้นมีการคำนวณที่ยุ่งยาก ซับซ้อนและคำตอบที่เหมาะสมที่สุดถูกจำกัดด้วยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะได้อีกต่อไปในบทที่ 5

## บทที่ 5

### การค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์

#### 5.1 บทนำ

ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence :AI) (ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์, 2542) เป็นแขนงวิชาที่มุ่งเน้นในด้านการทำความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการทำให้คอมพิวเตอร์สามารถแสดงความสามารถออกมาได้ เช่น การคิด การหาเหตุผล การรับรู้ หรือการกระทำ เป็นต้น โดยอาศัยการจำลองผลอย่างชาญฉลาด โดยระยะแรกมักทำการวิจัยเรื่องที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ (Robotics) การมองเห็น (Vision sensing) การหาเหตุผล (Reasoning) การเขียนโปรแกรม (Programming) สถาปัตยกรรม (Architecture) และการออกแบบระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system design) เป็นต้น ในปี ค.ศ. 1963 นิวเวลล์ (Newell) ได้ทำการค้นคว้าเพื่อหาวิธีการออกแบบระบบการแก้ปัญหา (Problem solving system) สำหรับคอมพิวเตอร์ขึ้น หลังจากนั้นเทคนิคต่างๆ ทางด้านปัญญาประดิษฐ์ก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา อาทิ เช่น ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system) ระบบฟัซซี่ (Fuzzy system) ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithms) การโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary programming) Simulated Annealing (SA) การค้นหาแบบตาบอด (Tabu search) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ และการค้นหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ โดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบตาบอด และการค้นหาแบบจีเนติกอัลกอริทึม ซึ่งจัดได้ว่าเป็นขบวนการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพในเชิงปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่ง แล้วยังได้มีการยอมรับถึงขั้นตอนในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่ไม่ยุ่งยาก (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2542)

#### 5.2 การค้นหาแบบตาบอด

การค้นหาแบบตาบอดเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์วิธีการหนึ่ง ที่นำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาสำหรับงานที่ต้องการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) วิธีการดังกล่าวได้รับการนำเสนอโดย Glover F. ในปี ค.ศ. 1977 และได้รับการอธิบายไว้อีกครั้งใน (Bland, 1991) จากนั้นเป็นต้นมาการค้นหาแบบตาบอดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบ

วงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimum) และดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้ความเป็นวงกว้าง (Near global optimum) (Mantawy, Abdel-Magid and Selim, 1998; Bland and Dawson, 1991) ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการค้นหาระหว่างการโปรแกรมกำลังสองตามลำดับ (Sequential quadratic programming) การโปรแกรมวิวัฒนาการ (Evolutionary programming) และการค้นหาแบบตาบ (Kulworawanichpong and Sujitjorn, 2002) กับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไขไม่เป็นเชิงเส้น พบว่าวิธีการค้นหาแบบตาบมีสมรรถนะการค้นหาคำตอบวงกว้าง (Global solution) ที่เหมาะที่สุด ทั้งด้านความแม่นยำของคำตอบที่พบและความเร็วในการค้นหา อีกทั้งผู้ใช้สามารถออกแบบการเคลื่อนย้ายและเงื่อนไขต่างๆ ของการค้นหาแบบตาบ ให้มีความเหมาะสมกับระบบหรือปัญหามากที่สุด จากคุณสมบัติต่างๆ ของการค้นหาแบบตาบที่กล่าวมา จึงได้นำเสนอหลักการและวิธีการค้นหาแบบตาบ การประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาบเพื่อการวิเคราะห์การตรวจวัดกระแสสารมอนิก และการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด

หลักการของการค้นหาแบบตาบได้แบ่งการอธิบายออกเป็น 2 หัวข้อที่สำคัญ ดังนี้

### 5.2.1 องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบ

การค้นหาแบบตาบเป็นวิธีการที่นำมาประยุกต์เกี่ยวกับการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (Combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบที่แตกต่างจากวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ คือ มีเกณฑ์ความเป็นตาบ (Tabu list criteria) และมีเกณฑ์ความปรารถนา (Aspiration criteria) ซึ่ง

- เกณฑ์ความเป็นตาบ เป็นส่วนที่คอยเก็บข้อมูลของคำตอบในอดีตของกระบวนการค้นหานี้ๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาคำตอบว่าจะมีทิศทางไปทางใด หลักการออกแบบเกณฑ์ความเป็นตาบ จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละชนิด แต่หลักการที่เป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบเกณฑ์ความเป็นตาบ คือ เงื่อนไขของความถี่ (Frequency) หรือเงื่อนไขของความคงอยู่ (Recency)

- เกณฑ์ความปรารถนา เป็นเงื่อนไขที่จะใช้ในบางครั้งที่จำเป็นจะต้องเลือกคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ความเป็นตาบ งานบางชนิดที่ปัญหาไม่ซับซ้อน ไม่จำเป็นต้องพึ่งส่วนนี้อาศัยเพียง เกณฑ์ความเป็นตาบอย่างเดียวก็เพียงพอที่จะค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้

## 5.2.2 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบอด

ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน

ตารางที่ 5.1 ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบอด

คำศัพท์	ความหมาย
$S_0$	ค่าเริ่มต้นในการค้นหาแต่ละครั้ง
$S_{neighborhood}$	ค่าใกล้เคียง $S_0$ ที่ได้จากการเคลื่อนย้ายไปเท่ากับ $step\_size$ (Search space)
$S_{best}$	ค่าใกล้เคียงที่เป็นคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น
$S_{ans}$	ค่าใกล้เคียงที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่เป็นวงกว้าง (Global optimal)
n	จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ
cost	ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้มาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)
best_error	ค่าความคลาดเคลื่อนที่ดีที่สุดของ $S_0$
neighborhood_error	ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าใกล้เคียง $S_0$ ( $S_{neighborhood}$ )
neighborhood_best_error	ค่าความคลาดเคลื่อนที่ดีที่สุดของค่าใกล้เคียง $S_0$ ( $S_{best}$ )
ans_error	ค่าความคลาดเคลื่อนที่ดีที่สุดของ $S_{ans}$
step_size	ขอบเขตการเคลื่อนที่ของคำตอบในแต่ละรอบของการทำงาน
value_move	ขอบเขตการสุ่มของ $step\_size$ ในแต่ละรอบการทำงาน

### หลักการทำงาน

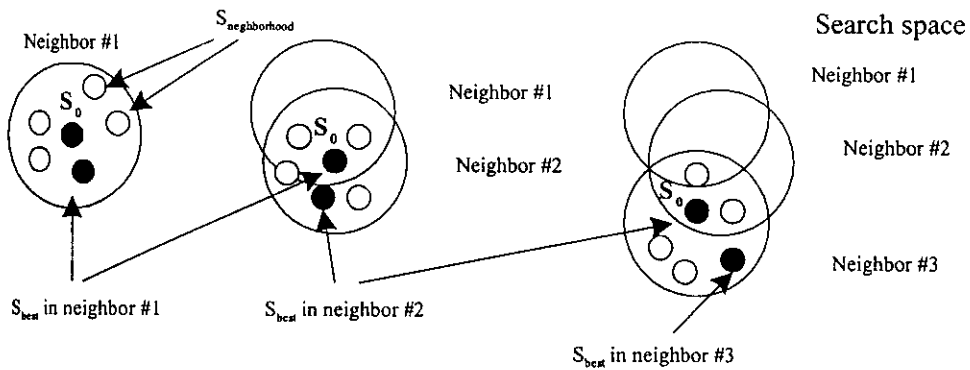
ขั้นตอนที่ 1 โหลดข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ได้จากชุดตรวจจับกระแส (รายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3) ขั้นตอนการทำงานแสดงด้วยแผนภูมิภาพ ดังรูปที่ 5.3 ในส่วนของขั้นตอนการ Load Data

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่า  $S_0$  ซึ่งเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังรูปที่ 5.1 และ รูปที่ 5.2 โดยหาค่าเริ่มต้น  $S_0$  จากการสุ่มคำตอบ จากนั้นเริ่มต้นจากคำตอบที่มีอยู่ โดยกำหนดให้คำตอบที่มีอยู่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด  $S_{ans} = S_{best} = S_0$  และ  $neighborhood\_best\_error = best\_error = ans\_error$  ซึ่ง

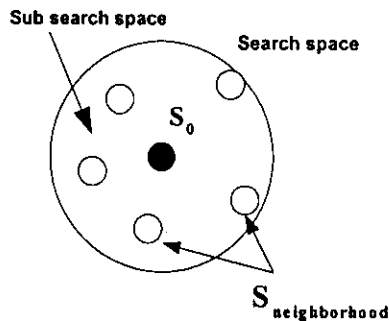
ค่าดังกล่าวได้จากฟังก์ชันตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยการค้นหาคำตอบจะเข้าไปเรื่อยๆ จนได้ค่า cost น้อยที่สุดตามที่ได้กำหนด cost ไว้ก่อนล่วงหน้า

ขั้นตอนที่ 3 จาก  $S_0$  ดำเนินการเคลื่อนย้ายโดยมีขอบเขตของ search space ขึ้นอยู่กับ  $step\_size$  โดยค่าของ  $step\_size$  จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า  $cost$  ที่ได้ โดยค่าใกล้เคียงค่าของ  $S_0$  นั่นคือ  $S_{neighborhood}$  โดย  $S_{neighborhood}$  ต้องไม่อยู่ใน tabu list จากนั้นทำการคำนวณหาค่า  $cost$  ของสมาชิกแต่ละตัวของ  $S_{neighborhood}$  เลือกสมาชิกที่ให้ค่า  $cost$  ที่ดีที่สุด ( $neighborhood\_best\_error$ ) เรียกว่า  $S_{best}$  หากไม่มีค่า  $S_{neighborhood}$  ที่ไม่อยู่ใน tabu list ให้ทำการเคลื่อนย้ายค่าของ tabu list

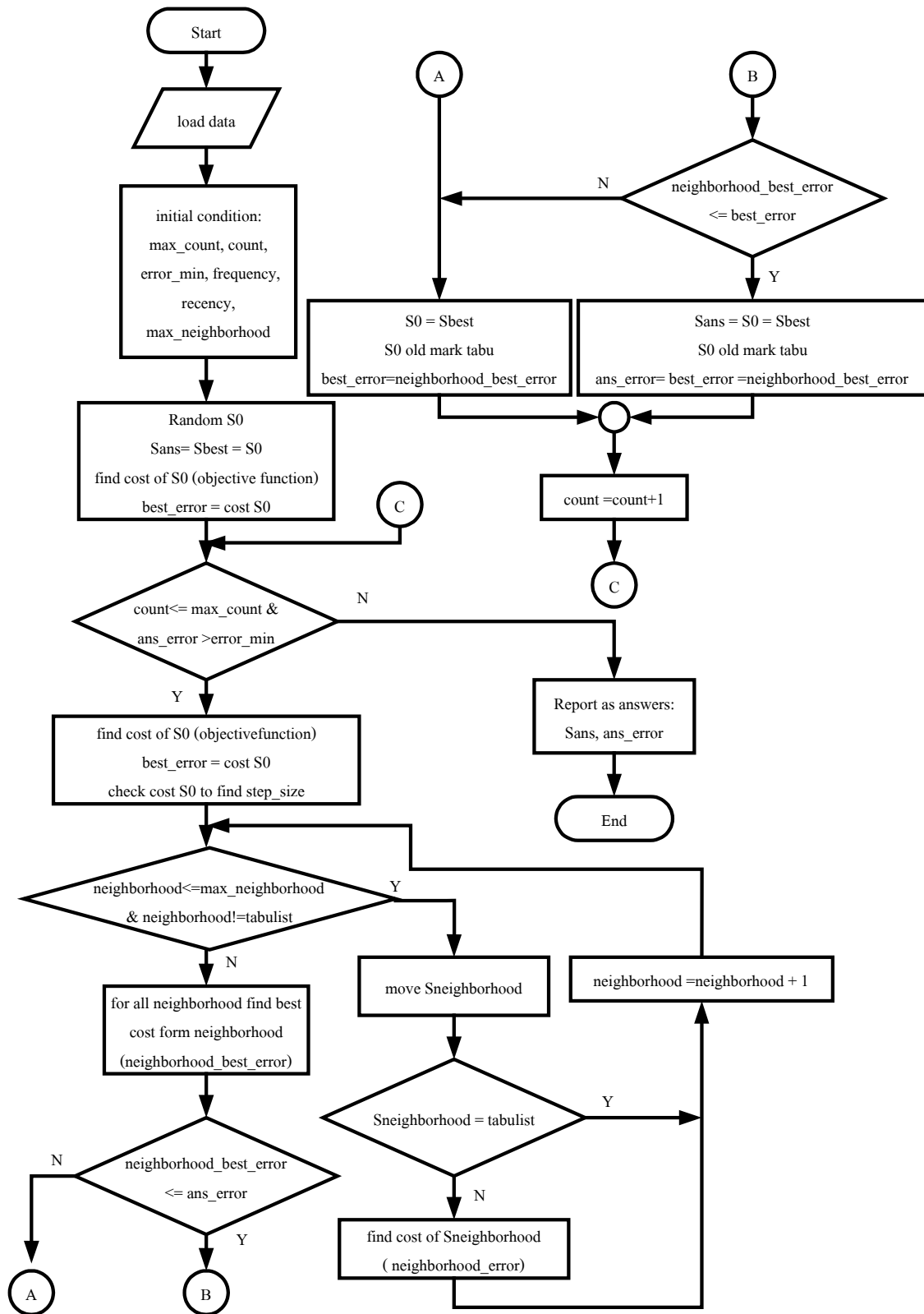
ขั้นตอนที่ 4 ถ้าค่า  $cost$  ของ  $S_{best}$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $cost$  ของ  $S_0$  ( $best\_error$ ) และค่า  $cost$  ของ  $S_{best}$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $cost$  ของ  $S_{ans}$  ( $ans\_error$ ) กำหนดให้  $S_{ans} = S_{best}$  และ  $ans\_error = best\_error = neighborhood\_best\_error$  ถ้าไม่สามารถหามหาชิกตัวใดของ  $S_{neighborhood}$  ที่ให้ค่า  $cost$  น้อยกว่าค่า  $cost$  ของ  $S_{ans}$  และ  $S_0$  ให้ไปทำขั้นตอนที่ 6 เพื่อหลีกเลี่ยงการล๊อคของคำตอบเฉพาะถิ่น



รูปที่ 5.1 กระบวนการทำงานของการค้นหาแบบตาบ



รูปที่ 5.2 ลักษณะของพื้นที่ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ



รูปที่ 5.3 แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมที่อาศัยหลักการของวิธีการค้นหาแบบตามู

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้  $S_0 = S_{best}$  และทำการเก็บค่า  $S_0$  เดิมไว้ใน tabu list เป็นการย้ายค่าคำตอบไปสู่คำตอบที่ดีกว่าคำตอบเดิม

ขั้นตอนที่ 6 กำหนดให้  $S_0 = S_{best}$  และทำการเก็บค่า  $S_0$  เดิมไว้ใน tabu list เป็นการย้ายค่าคำตอบไปสู่คำตอบที่แย่กว่า เพื่อหลีกเลี่ยงการล้นของคำตอบเฉพาะถิ่น

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการยุติการค้นหา ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขให้หยุดการค้นหา และคำตอบของการค้นหาล่าสุดจะถือว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่เมื่อตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ไปเริ่มทำในขั้นตอนที่ 3 ใหม่

จากการทำงานดังกล่าวจะสังเกตได้ว่ามีลักษณะการค้นหาค่าใกล้เคียงกับวิธีการค้นหาค่าใกล้เคียง (Neighborhood search) แต่การค้นหาคำตอบด้วยวิธีดังกล่าวจะให้คำตอบที่เป็นคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local) ไม่สามารถหลุดออกจากการล้นของคำตอบได้ แต่วิธีการค้นหาคำตอบที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยหลักการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอด เพราะฉะนั้นเมื่อทำการค้นหาคำตอบจึงสามารถค้นหาคำตอบได้รวดเร็วและหลุดออกจากการล้นของคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ดี จนกระทั่งทำการค้นหาคำตอบไปเรื่อยๆ จะได้คำตอบที่ใกล้คำตอบวงกว้าง (Near global solution)

### 5.3 การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบตาบอดเพื่อการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงวิธีการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกและการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก โดยวิธีการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ และการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว สิ่งที่ต้องการคือค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ ฉะนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาวิธีการค้นหาแบบตาบอดมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ โดยมีหลักการดังนี้

จากกระแสฮาร์มอนิกที่ทำการตรวจจับได้อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา ฉะนั้นในการค้นหาแบบตาบอดจะอาศัยหลักการสร้างกระแสที่มีขนาดและมุมเฟสเท่ากับกระแสฮาร์มอนิกจริงที่ได้จากการตรวจจับโดยอาศัยทฤษฎีของอนุกรมฟูรีเยร์จะได้ว่า

$$i_{\text{harmonic}}(t) = i_{\text{tabu}}(t) = \frac{A_0}{2} + \left[ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t) \right] \quad (5-1)$$

โดยที่  $i_{\text{harmonic}}(t)$  ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้โดยแปรตามเวลา

$i_{\text{tabu}}(t)$  ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการค้นหาแบบตาบอดโดยแปรตามเวลา



$\frac{A_0}{2}$	ค่าดีซี
$A_n$	ค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\cos(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชัน $i_{\text{tabu}}(t)$ ณ ฮาร์โมนิกอันดับที่ $n$
$B_n$	ค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\sin(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชัน $i_{\text{tabu}}(t)$ ณ ฮาร์โมนิกอันดับที่ $n$
$n$	ค่าอันดับของฮาร์โมนิก โดยอันดับของฮาร์โมนิกมีค่าตั้งแต่ $n = 0$ ถึง $n = \infty$ ในงานวิจัยนี้พิจารณาค่า $n$ ถึงอันดับที่ 19 (คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, 2541) โดย $n = 0$ แสดงถึงไฟฟ้ากระแสตรง

ในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการการค้นหาแบบตามของกระแสเทียบกับกระแสฮาร์โมนิกที่ตรวจจับได้โดยอาศัยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดว่าค่ากระแสที่ได้จากการค้นหาแบบตามนั้นดีหรือไม่ดี (มีค่าใกล้เคียงกับกระแสที่ตรวจจับได้) ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง  $i_{\text{harmonic}}$  กับ  $i_{\text{tabu}}$  โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนแบบผลรวมกำลังสอง (Sum-square-error) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-2)

$$\text{objective function} = \text{error} = \sum_{m=1}^{128} (i_{\text{harmonic}}(m) - i_{\text{tabu}}(m))^2 \quad (5-2)$$

โดยที่ $m$	ค่าลำดับของจุดข้อมูลได้จากการตรวจจับกระแส (A/D) มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 128 โดย $m = 1$ คือ เวลา = 0.00015625 sec, $m = 128$ คือ เวลา = 0.02 sec พิจารณาเพียง 1 ลูกคลื่นสัญญาณ (1 คาบ)
$i_{\text{harmonic}}(m)$	ค่ากระแสที่ได้จากการตรวจจับจริงในข้อมูลลำดับที่ $m$
$i_{\text{tabu}}(m)$	ค่ากระแสที่ได้จากการค้นหาแบบตาม ในข้อมูลลำดับที่ $m$

ขั้นตอนเริ่มต้นของการค้นหาพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์ ( $A_0, A_n, B_n, n = 1, 2, \dots, 19$ ) คือการกำหนดค่าเริ่มต้น ให้กับการค้นหาแบบตาม โดยมีการกำหนดค่าต่างๆ และอธิบายความหมายคำศัพท์เพิ่มเติม ดังตารางที่ 5.2

ในการกำหนดค่า frequency\_max และ restriction\_period ที่เหมาะสมนั้นได้มาจากการทดสอบหาค่า frequency\_max และ restriction\_period ที่มีเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบน้อยที่สุด ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ frequency\_max = 10 ครั้ง และ restriction\_period = 100 ครั้ง โดยใช้เวลาในการค้นหาเฉลี่ย 90 วินาที ในส่วนของการกำหนดค่าของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด นั้นขึ้นอยู่กับเวลาในการค้นหาคำตอบและความถูกต้องที่ยอมรับได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อน

ต่ำสุด ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ค่า 0.01 เนื่องจากให้ค่าความถูกต้องที่สูงและใช้เวลาไม่มาก (90 วินาที) โดยแสดงผลการทดสอบเวลาเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.2 ความหมายของคำศัพท์และค่าเริ่มต้นของการค้นหาแบบตามูในการค้นหาพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์

คำศัพท์	ความหมาย
move	เป็นการเคลื่อนที่ตำแหน่งจากตำแหน่งปัจจุบัน ( $S_0$ ) ไปรอบๆ ใน neighborhood ของ $S_0$
Search space	คือตำแหน่ง ( $A_0, A_1, \dots, A_{19}, B_1, \dots, B_{19}$ ) ทั้งหมด
$S_0[A_0, A_1, \dots, A_{19}, B_1, \dots, B_{19}]$	คือค่าคำตอบจุดหนึ่งบน Search space
neighborhood_size = 78	จำนวนสมาชิกข้างเคียง $S_0$ ( $S_{neighborhood}$ )
count_max = 5000 รอบ	จำนวนรอบสูงสุดที่ใช้ในการค้นหา
max_hamonic = 19	ฮาร์โมนิกที่พิจารณาสูงสุด
frequency_max = 10 ครั้ง	ถ้าการเคลื่อนที่ใดถูกใช้บ่อยเกิน frequency_max แล้วให้ตั้งค่าการเคลื่อนที่นั้นเป็น tabu (เงื่อนไขการตั้งค่าความเป็น tabu)
restriction_period = 100 ครั้ง	ถ้าการเคลื่อนที่ใดถูกตั้งค่าเป็น tabu นานเกินกว่า restriction_period แล้วให้ทำการ reset ค่าความเป็น tabu นั้นออกไป (เงื่อนไขการคงค่าความเป็น tabu)
tabu_list_length = 78	ความยาวของ tabu list
tabu_list [78][3]	เป็น list เมตริกซ์ ขนาด 78x3 ใช้เก็บสถานะความเป็น tabu ของแต่ละการเคลื่อนที่ รวมไปถึงข้อมูลของ recency และ frequency ในคอลัมน์ที่ 2 และ 3
error_min = 0.01	เป็นการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อน (error) ต่ำสุดที่ใช้ตรวจสอบการจบการค้นหาคำตอบของตามู

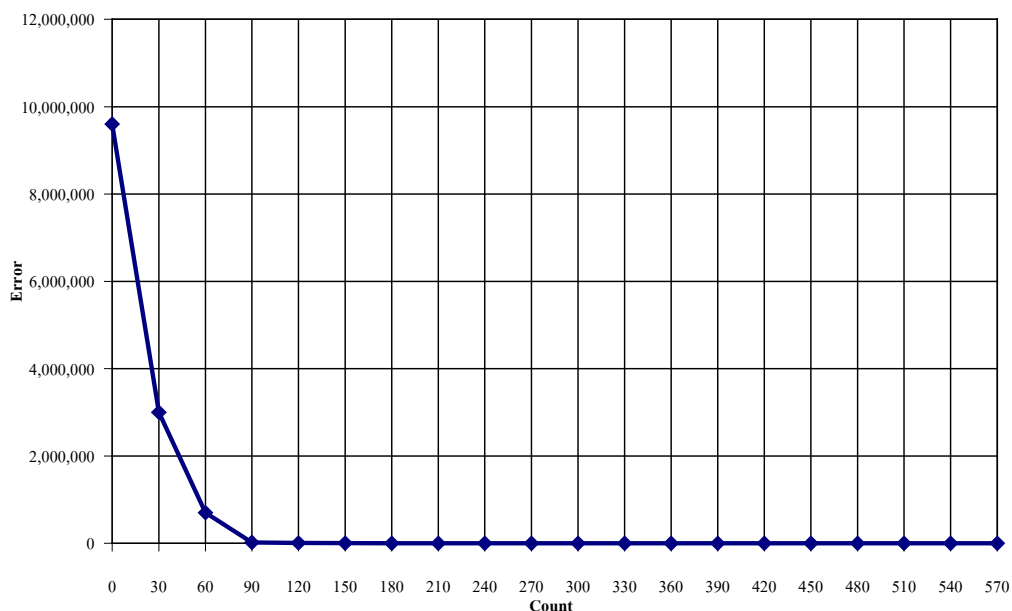
ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบการหาค่า frequency\_max และ restriction\_period ที่เหมาะสมใน  
การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยการค้นหาแบบตาม

Frequency max (ครั้ง)	Restriction period (ครั้ง)	Error = 0.01		Frequency max (ครั้ง)	Restriction Period (ครั้ง)	Error = 0.01	
		Count (ครั้ง)	Time (sec)			Count (ครั้ง)	Time (sec)
10	10	890	162	100	10	785	142
	20	857	134		50	799	119
	30	836	121		100	815	111
	40	763	116		150	836	107
	50	759	106		200	790	99
	100	682	90		250	813	105
	150	717	97		300	729	104
	200	678	100		350	784	111
	250	669	97		400	804	107
	300	704	103		450	721	102
	400	746	106	500	785	108	
50	10	763	138	150	10	815	147
	50	823	121		50	843	124
	100	839	112		100	788	107
	150	792	103		150	805	104
	200	820	107		200	700	93
	250	754	104		250	805	103
	300	735	101		300	769	106
	350	732	104		350	735	102
	400	747	105		400	773	105
	450	819	109		450	716	101
	500	749	104	500	818	110	

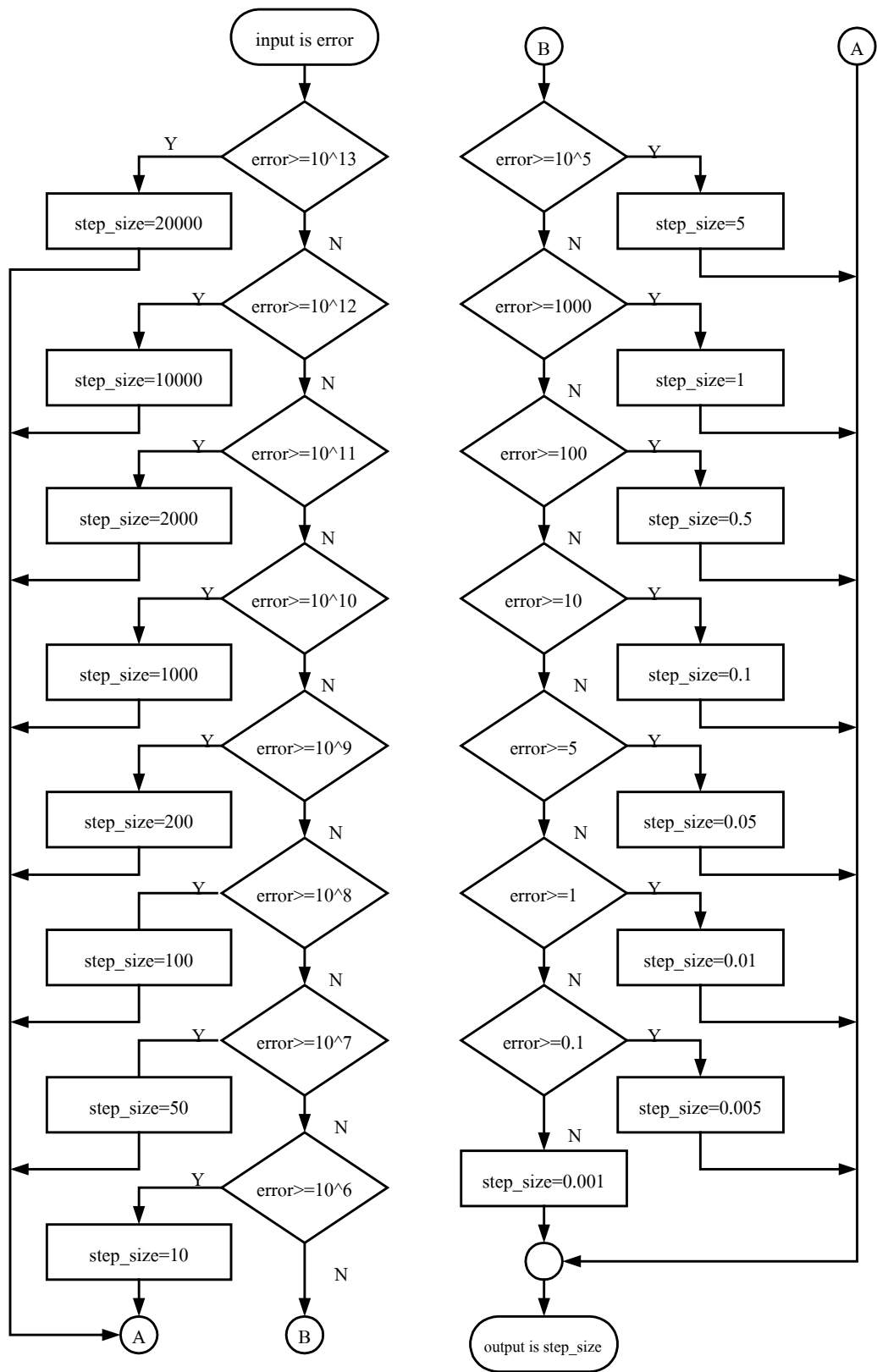
ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบการหาค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยการค้นหาแบบตาม

ความคลาดเคลื่อนต่ำสุด(error_min)	เวลา (วินาที)					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	
1	63	67	72	65	62	66
0.1	74	75	78	77	76	76
0.01	87	97	74	83	109	90
0.001	110	109	119	115	106	112

การกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ของคำตอบไปสู่ค่าใกล้เคียงแต่ละครั้งนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของ step\_size โดย step\_size จะมีการเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดรูปแบบการหาขนาดของ step\_size ของการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 5.5 และได้แสดงแผนภาพอัตราความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบการทำงานของการค้นหาแบบตามในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนภาพแสดงอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบการทำงานของการค้นหาแบบตามในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 5.5 อัลกอริทึมย่อยในส่วนการหาขนาดของ step\_size ในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก

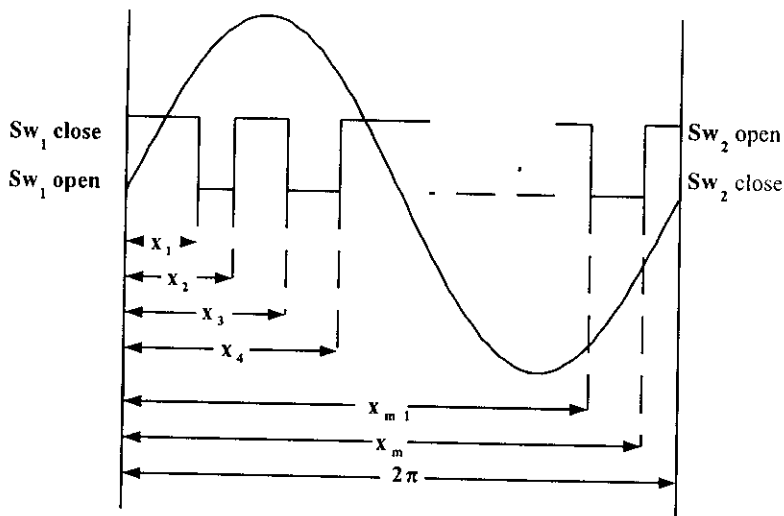
## 5.4 การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบตามูเพื่อการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด

ในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบคือ ขนาดของตัวเก็บประจุ ขนาดของแรงดันที่จ่ายให้วงจรกรองฮาร์มอนิก และรูปแบบการเปิดปิดสวิตซ์ (Mehta, Darwish and Thomson, 1988, 1990; Welsh, Mehta and Darwish, 2000) ขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันและขนาดตัวเก็บประจุจะบ่งบอกถึงขนาดของกระแสที่สามารถสร้างขึ้นมากล้ากับกระแสฮาร์มอนิก ดังสมการที่ (5-3) และสมการที่ (5-4) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 3000 ไมโครฟารัด (160 kVAR) ตัวเหนี่ยวนำขนาด 0.4 มิลลิเฮนรี ความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำ 1.7 โอห์ม ขนาดของแรงดันแหล่งจ่าย  $230 V_{rms}$  ( $325 V_{max}$ ) ในส่วนของรูปแบบการเปิดปิดสวิตซ์นั้นกำหนดให้มีการเปิดปิดสวิตซ์ทั้งหมด 51 ครั้งเนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้จากการทดสอบดังตารางที่ 5.5 โดยในการเปิดปิดแต่ละครั้งจะทำการเปิดปิด ณ มุม  $x_0, x_1, \dots, x_m, x_{m+1}$  โดย  $x_0 = 0, x_{m+1} = 2\pi$ ,  $m$  เป็นเลขคู่ ดังรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดของการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุด้วยการค้นหาแบบตามู

จำนวน ครั้งใน การสวิตซ์	จำนวนรอบการทำงาน = 500 รอบ							
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
	Error	Time(sec)	Error	Time(sec)	Error	Time(sec)	Error	Time(sec)
11	2483.32	20	2482.79	20	2483.59	20	2483.23	19
25	450.75	68	458.07	68	449.13	68	452.65	68
31	443.41	100	389.35	101	463.82	100	432.20	100.33
51	61.52	250	140.80	250	61.23	247	87.85	249
71	142.903	478	142.90	481	142.90	479	142.90	479.33
91*	351.18	834	85.08	749	344.55	795	260.27	792.66

\*ในการสวิตซ์จำนวน 91 ครั้งใช้เวลาทั้งสิ้น 792.66 วินาทีซึ่งเกินมาตรฐาน (คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, 2541)



รูปที่ 5.6 รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 5.6 สามารถแสดงกระแสชดเชยที่ได้จากการสวิตช์ตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ (5-3) และ (5-4)

กรณีที่ 1 สวิตช์  $Sw_2$  ปิด  $Sw_1$  เปิด ตัวเหนี่ยวนำต่อลงกราวด์

$$i_F(x) = \frac{V_{\max}}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \sin \left( x + \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R_L} \right) \right) \quad (5-3)$$

กรณีที่ 2 สวิตช์  $Sw_2$  เปิด  $Sw_1$  ปิด ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ

$$i_F(t) = \frac{V_{\max} \omega C}{\sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \sin \left( x + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{(1 - \omega^2 LC)} \right) \right) \quad (5-4)$$

จากบทที่ 4 การวิเคราะห์ห้วงวงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผลนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ของกระแสชดเชยดังสมการที่ (5-5) และ (5-6)

$$A_n = \left\{ \left[ \left. \begin{aligned} & \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} \right) \Big|_{x_1}^{x_2} \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} \right) \Big|_{x_3}^{x_4} \\ & + \dots \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} \right) \Big|_{x_{m-1}}^{x_m} \end{aligned} \right\} + \left[ \left. \begin{aligned} & \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} \right) \Big|_{x_0}^{x_1} \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} \right) \Big|_{x_2}^{x_3} \\ & + \dots \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} \right) \Big|_{x_m}^{x_{m+1}} \end{aligned} \right\} \right] \quad (5-5)$$

โดยที่

$$K_1 = \frac{V_{\max}}{2\pi \sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\gamma_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R_L} \right)$$

$$K_2 = \frac{V_{\max} \omega C}{2\pi \sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}}$$



$$\gamma_2 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{1 - \omega^2 LC} \right)$$

$$B_n = \left\{ \left[ \left\{ \left( \frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \right|_{x_1}^{x_2} \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left( \frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \right|_{x_3}^{x_4} \right. \right. \\ \left. \left. + \dots \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left( \frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \right|_{x_{m-1}}^{x_m} \right. \right. \right\} \\ \left. \left. \left. + K_2 \left\{ \left( \frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \right|_{x_0}^{x_1} \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left( \frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \right|_{x_2}^{x_3} \right. \right. \\ \left. \left. + \dots \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left( \frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \right|_{x_m}^{x_{m+1}} \right. \right. \right\} \right\} \quad (5-6)$$

การวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ของรูปแบบการสับสวิตช์  $x_1, \dots, x_m$  จะได้ค่า  $A_n, B_n$  ( $n = 2, \dots, 19$ ) ดังนั้นในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุนั้นจะต้องหาค่า  $x_1, \dots, x_m$  ที่ทำให้ได้ค่า  $A_n, B_n$  ( $n = 2, \dots, 19$ ) หักล้างกับ  $A_n, B_n$  ( $n = 2, \dots, 19$ ) ของกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้ การหาค่า  $x_1, \dots, x_m$  นั้นหาได้จากการค้นหาแบบตาบู่ โดยเริ่มต้นจากการสุ่มค่าเริ่มต้น  $S_0 = x_1, \dots, x_m$  จากนั้นนำค่าที่ได้จากการสุ่มแทนลงในสมการที่ (5-5) และ (5-6) เพื่อหา  $A_n, B_n$  ของ

ง      ว      ง      จ      ร      ก      ร      อ      ง

ฮาร์มอนิก นำค่า  $A_n, B_n$  ที่ได้จากการจำลองผลคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน โดยเปรียบเทียบกับ  $A_n, B_n$  ที่ตรวจวัดได้จริง (ค่าความคลาดเคลื่อน : Objective function) ดังสมการที่ (5-7)

$$\text{Objective function} = \text{Error} = \sum_{n=2}^{19} \left( \begin{array}{l} (A_n \text{ real} - A_n \text{ sim})^2 \\ + (B_n \text{ real} - B_n \text{ sim})^2 \end{array} \right) \quad (5-7)$$

โดยที่	$A_n \text{ real}$	คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\cos(not)$ ของอนุกรมฟังก์ชันของกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้ ณ ฮาร์มอนิกอันดับที่ $n$
	$B_n \text{ real}$	คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\sin(not)$ ของอนุกรมฟังก์ชันของกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้ ณ ฮาร์มอนิกอันดับที่ $n$
	$A_n \text{ sim}$	คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\cos(not)$ ของอนุกรมฟังก์ชันของกระแสชดเชยที่ได้จากการค้นหาแบบตามู ณ ฮาร์มอนิกอันดับที่ $n$
	$B_n \text{ sim}$	คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\sin(not)$ ของอนุกรมฟังก์ชันของกระแสชดเชยที่ได้จากการค้นหาแบบตามู ณ ฮาร์มอนิกอันดับที่ $n$

ขั้นตอนเริ่มต้นของการค้นหาแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ ( $x_1, \dots, x_m$ ) จะต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับการค้นหาแบบตามู โดยมีการกำหนดค่าต่างๆ ดังตารางที่ 5.6 ในการหาคำตอบของการค้นหาแบบตามูนั้นจำนวนรอบของการค้นหาเป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่ง จึงได้มีการทดสอบหาจำนวนรอบการทำงานของการค้นหาแบบตามูที่เหมาะสมที่สุดซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.7 โดยจำนวนรอบการทำงานของการค้นหาแบบตามูที่เหมาะสมที่สุดคือ 500 รอบ โดยเมื่อเทียบแล้วจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ในส่วนของการหาค่า frequency\_max และ restriction\_period ที่เหมาะสมนั้นสามารถหาได้จากการทดสอบการหาค่า frequency\_max และ restriction\_period ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตัวกำหนด ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.8 โดยค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ frequency\_max = 60 ครั้ง และ restriction\_period = 60 ครั้ง โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อน 60.08

ตารางที่ 5.6 ความหมายของคำศัพท์และค่าเริ่มต้นของการค้นหาแบบตาบในการค้นหาแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

คำศัพท์	ความหมาย
Search space	คือตำแหน่ง $(x_1, x_2, \dots, x_{50})$ ทั้งหมด
$S_0[x_1, x_2, \dots, x_{50}]$	คือค่าคำตอบจุดหนึ่งบน Search space
neighborhood_size = 102	จำนวนสมาชิกข้างเคียง $S_0$ ( $S_{\text{neighborhood}}$ )
count_max = 500 รอบ	จำนวนรอบสูงสุดที่ใช้ในการพิจารณา
frequency_max = 60 ครั้ง	ถ้าการเคลื่อนที่ใดถูกใช้บ่อยเกิน frequency_max แล้วให้ตั้งค่าการเคลื่อนที่นั้นเป็น tabu
restriction_period = 60 ครั้ง	ถ้าการเคลื่อนที่ใดถูกตั้งค่าเป็น tabu นานเกินกว่า restriction_period แล้วให้ทำการ reset ค่าความเป็น tabu นั้นออกไป
tabu_list_length = 102	ความยาวของ tabu list
tabu_list [102][3]	เป็น list เมตริกซ์ ขนาด 102x3 ใช้เก็บสถานะความเป็น tabu ของแต่ละการเคลื่อนที่ รวมไปถึงข้อมูลของ recency และ frequency ในคอลัมน์ที่ 2 และ 3

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบจำนวนรอบที่เหมาะสมที่สุดของการหาแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุด้วยการค้นหาแบบตาบ

จำนวนรอบในการสวิตซ์ 51 ครั้ง	จำนวนรอบการทำงานของการค้นหาแบบตาบ							
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
	Error	Time(sec)	Error	Time(sec)	Error	Time(sec)	Error	Time(sec)
100	419.50	50	402.75	49	414.59	50	412.28	49.66
300	130.52	147	134.48	148	165.30	149	143.43	148
500	61.39	255	143.14	255	61.09	254	88.54	254.66
700	140.49	363	56.96	360	140.49	359	112.65	360.66
900	142.83	480	142.83	480	56.96	477	114.21	479
1100	142.86	532	56.96	596	57.02	598	85.61	575.33

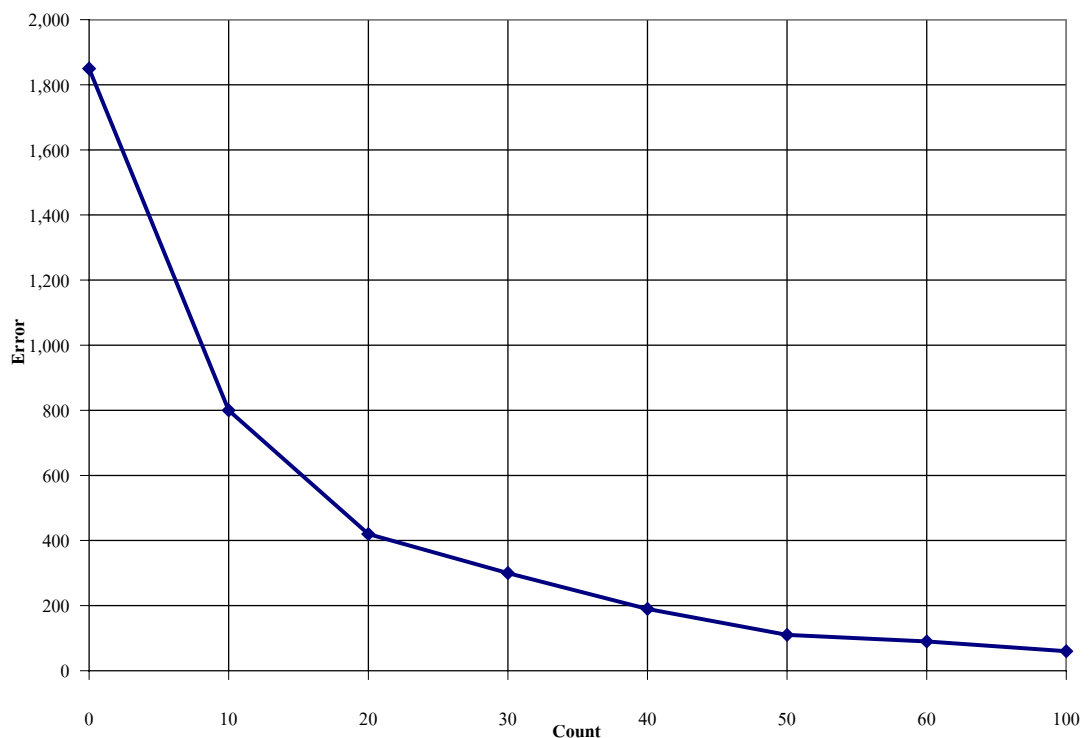
ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่า frequency\_max และ restriction\_period ที่เหมาะสมในการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุด้วยการค้นหาแบบตามูโดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อน

frequency max (ครั้ง)	restriction period (ครั้ง)							
	20	40	60	80	100	120	140	160
10	143.09	142.37	88.43	143.01	62.58	60.94	87.95	89.41
20	88.22	60.60	92.19	61.50	143.08	60.54	60.91	88.47
30	87.78	60.23	63.78	60.20	87.38	115.47	89.27	143.13
40	89.38	89.08	142.29	62.87	115.04	89.91	115.66	91.62
50	89.86	60.52	143.06	61.39	143.06	60.87	116.93	87.82
60	61.05	88.88	60.08	89.92	114.75	62.93	60.49	87.73
70	115.77	91.65	89.98	60.36	88.58	115.83	60.35	60.83
80	114.80	89.56	61.31	87.58	88.16	88.02	88.39	141.49
90	116.08	69.47	60.62	88.77	87.75	60.24	115.69	89.06
100	62.57	142.25	88.97	115.70	63.14	60.68	60.53	115.88
110	60.64	115.87	87.81	88.68	63.10	60.67	91.67	90.68
120	114.79	88.60	89.39	117.42	88.98	88.55	62.85	143.12
130	60.68	88.26	115.78	114.11	89.07	114.44	88.27	116.91
140	87.98	88.66	87.97	88.02	141.02	89.92	142.52	61.02
150	61.80	143.12	60.59	144.02	61.34	89.21	60.27	115.78
160	60.91	114.85	118.22	87.26	116.02	89.92	89.94	114.49
170	60.57	63.01	88.36	63.26	143.09	61.36	60.51	143.07
180	116.64	87.24	87.85	88.61	88.17	61.05	88.16	142.05
190	62.28	89.52	115.05	87.08	62.19	117.33	115.36	90.29
200	113.92	61.73	116.28	88.85	115.69	88.33	62.13	115.16
210	89.76	143.14	115.66	87.97	144.01	60.68	89.57	61.56
220	143.02	114.76	60.72	87.20	88.30	60.64	116.21	61.24
230	61.39	115.39	115.74	62.55	89.39	60.12	88.08	61.50
240	88.16	62.17	117.04	61.39	60.58	115.62	117.08	61.17
250	88.64	115.78	87.91	87.83	62.83	115.74	61.02	89.04
260	62.67	87.77	60.67	114.99	115.55	90.00	60.69	62.38
270	117.28	88.55	60.86	86.24	90.07	115.43	87.29	87.43
280	88.35	61.34	142.26	142.26	88.94	60.69	115.06	117.53
290	88.55	114.20	62.52	114.84	88.17	117.29	88.06	115.73
300	143.11	114.23	61.50	114.69	61.06	60.60	69.41	89.64

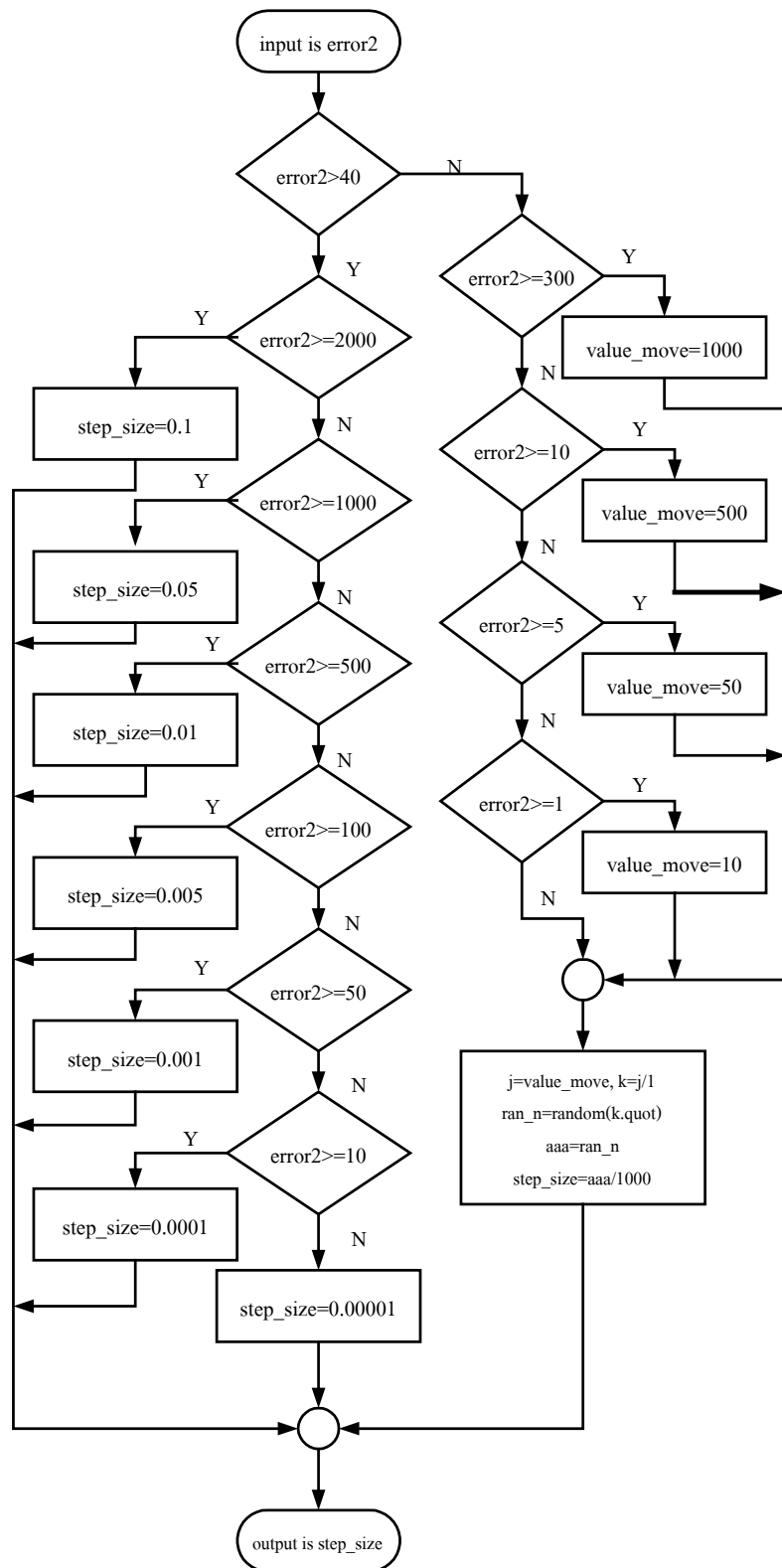
ตารางที่ 5.8 (ต่อ)

frequency max (ครั้ง)	restriction period (ครั้ง)						
	180	200	220	240	260	280	300
10	61.51	61.15	88.45	62.59	87.54	61.62	60.86
20	61.35	115.96	60.86	115.87	88.36	60.64	61.33
30	60.72	115.51	115.56	116.27	60.41	87.30	60.88
40	142.64	61.35	87.74	88.89	88.66	87.79	62.59
50	142.21	88.17	115.94	115.21	116.90	141.46	143.09
60	115.69	114.74	62.14	90.60	88.26	62.15	143.08
70	62.52	60.73	88.02	60.86	141.47	89.28	115.55
80	67.01	63.05	89.23	61.31	89.29	61.05	115.01
90	116.02	116.54	60.57	88.11	115.01	88.56	61.75
100	60.85	61.17	87.46	114.74	88.48	87.25	88.52
110	87.23	62.57	89.85	116.02	88.56	88.23	61.86
120	143.03	115.05	115.99	115.20	88.63	61.68	61.37
130	61.07	115.26	63.81	61.71	115.68	63.42	89.99
140	61.46	88.21	65.02	141.45	62.01	66.24	90.02
150	62.76	61.18	87.99	88.42	89.87	88.20	90.57
160	117.46	115.86	88.12	88.56	143.03	61.09	115.33
170	87.89	142.35	115.89	60.65	88.34	88.51	86.96
180	116.47	87.34	115.20	88.65	87.75	141.51	63.42
190	60.63	117.20	114.67	60.26	88.85	62.37	115.88
200	60.68	89.51	60.19	88.88	62.35	88.28	88.36
210	87.79	60.78	88.24	88.14	61.16	91.29	60.33
220	115.62	115.71	114.26	61.14	115.17	88.37	89.06
230	117.66	60.80	61.60	115.74	60.21	89.14	88.66
240	88.24	141.73	60.97	61.09	143.15	64.26	116.65
250	60.69	87.78	60.60	115.54	88.58	115.20	64.09
260	143.04	60.54	88.56	89.79	60.61	88.47	67.69
270	60.29	143.09	61.56	88.54	88.64	143.13	61.11
280	114.91	60.79	88.11	60.58	62.54	143.08	88.77
290	114.11	92.04	61.70	116.15	90.60	87.91	61.16
300	62.28	88.27	88.50	62.30	61.12	88.45	60.65

ในการกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ของค่าตอบไปสู่ค่าใกล้เคียงแต่ละครั้งนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของ `step_size` โดยในส่วนของ การหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ นั้น `step_size` จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น หลังจากได้ค่าความคลาดเคลื่อนแล้วจะทำการเปรียบเทียบเพื่อหาขอบเขตของ `step_size` จากนั้นทำการสุ่มค่า `step_size` ภายในใต้ของเขตที่ได้จากค่าความคลาดเคลื่อน ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่แต่ละครั้งจะมี `step_size` แตกต่างกันไป โดยแสดงการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อการเคลื่อนที่แต่ละครั้ง ดังรูปที่ 5.7 และแผนภาพแสดงอัลกอริทึมของการหาขนาด `step_size` ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 แผนภาพอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนต่อจำนวนรอบการทำงานของการค้นหาแบบตามูในการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ



รูปที่ 5.8 อัลกอริทึมย่อยในส่วนการหาขนาดของ step\_size ในการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

ผลของค่าเริ่มต้นต่างๆ ของพารามิเตอร์ที่กำหนดใช้ในการค้นหาแบบตาบอดในส่วนของการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก และการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.9 โดยแสดงผลการทดสอบและอภิปรายผลการค้นหาแบบตาบอดเพื่อการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกในบทที่ 6 หัวข้อ 6.3 และการค้นหาแบบตาบอดเพื่อการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในบทที่ 6 หัวข้อ 6.4

ตารางที่ 5.9 ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ในการค้นหาแบบตาบอด

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก	
Search space	$A_0, A_1, \dots, A_{19}, B_1, \dots, B_{19}$
Neighborhood_size	78
Count_max	5000
Max_harmonic	19
frequency_max	10
restriction_period	100
tabu_list_length	78
tabu_list	เมตริกซ์ขนาด 78x3
error_min	0.01
การหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ	
Search space	$X_1, X_2, \dots, X_{50}$
Switch max	51
Neighborhood_size	102
Count_max	100
frequency_max	60
restriction_period	60
tabu_list_length	102
tabu_list	เมตริกซ์ขนาด 102x3
error_min	60



## 5.5 การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

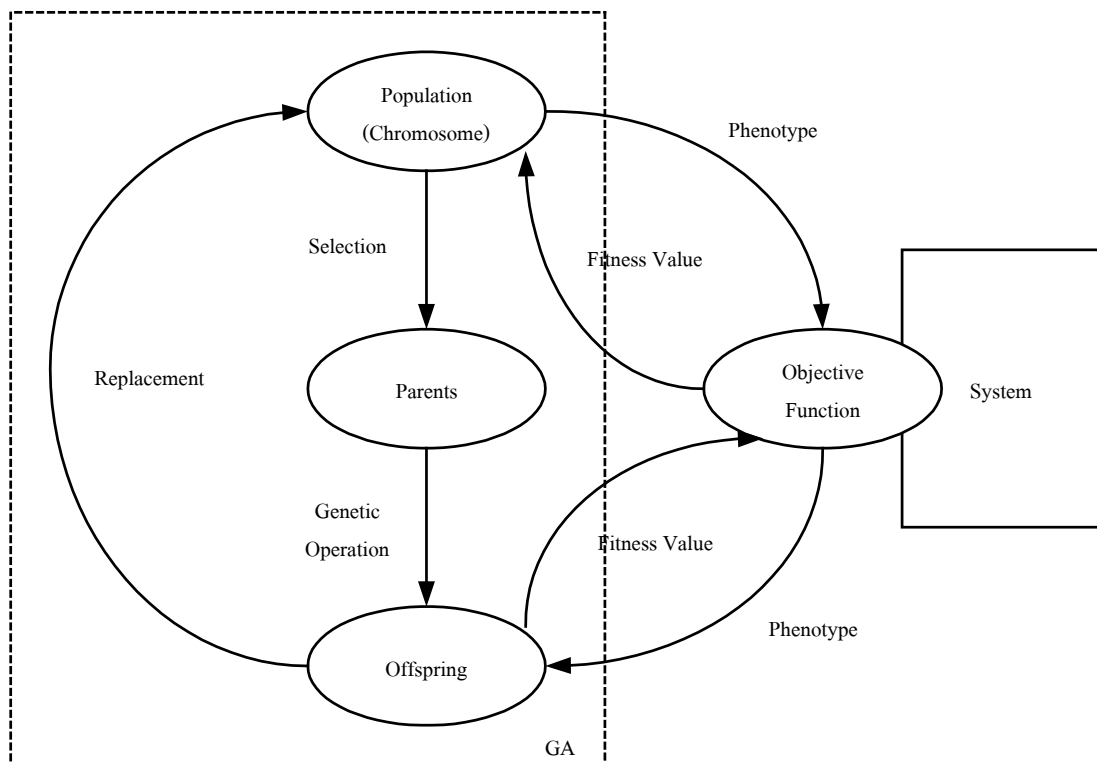
จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm: GA) (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2545) เป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์วิธีการหนึ่ง ที่นำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาสำหรับงานที่ต้องการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด วิธีการดังกล่าวได้ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 60 โดยจำลองเอาแนวคิดของการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยามาใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ จินเนติกอัลกอริทึมได้รับความนิยมโดยการเผยแพร่ของ John Holland ในหนังสือชื่อ “Adaptation in Natural and Artificial System” ซึ่งตีพิมพ์เป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1975 จากนั้นเป็นต้นมา จินเนติกอัลกอริทึมเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากจินเนติกอัลกอริทึมถือว่าเป็นวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงผสมผสาน (Combinatorial optimization method) แบบปัญญาประดิษฐ์ที่มีความสามารถในการค้นหาคำตอบอย่างชาญฉลาดและลดความยุ่งยากในขั้นตอนต่าง ๆ ของการค้นหา ปัจจุบันจึงเห็นได้ว่าการนำเอาจินเนติกอัลกอริทึมไปใช้ในเกือบทุกสาขาวิชา เช่น การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ระบบควบคุม การสื่อสารและโทรคมนาคม อิเล็กทรอนิกส์ ไฟฟ้ากำลัง คอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ต การแพทย์ และอื่นๆ อีกมากมาย

### 5.5.1 หลักการของจินเนติกอัลกอริทึม

หลักการของจินเนติกอัลกอริทึมได้แบ่งการทำงานออกเป็น 3 กระบวนการที่สำคัญดังต่อไปนี้

- การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) เป็นขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด โครโมโซมที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวกำเนิดสายพันธุ์เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยจะทำการคัดเลือกโครโมโซมโดยการพิจารณาที่ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ดังนั้น โครโมโซมไหนมีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อมหมายถึงการเป็นโครโมโซมที่ดีและมีโอกาสที่จะให้ลูกหลาน (Offspring) ในจำนวนที่มากกว่าได้ ย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะมีเพิ่มมากยิ่งขึ้นด้วย ขั้นตอนในการคัดเลือกสายพันธุ์ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ได้แก่ การกำหนดค่าโอกาสในการถูกคัดเลือกเพื่อเป็นตัวกำเนิดสายพันธุ์ให้กับโครโมโซม และการแปลงค่าโอกาสไปเป็นจำนวนของโครโมโซมลูกหลาน โครโมโซมที่มีโอกาสในการถูกคัดเลือกสูงจะให้จำนวนของโครโมโซมลูกหลานที่สูงด้วย วิธีการกำหนดโอกาสในการถูกคัดเลือกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่ว ๆ ไป เช่น วิธีการแบ่งเป็นสัดส่วน (Proportionate) วิธีของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann) วิธีการจัดอันดับ (Ranking) และวิธีจัดการแข่งขัน (Tournament) ฯลฯ สำหรับการแปลงค่าโอกาสหรือที่เรียกว่าการชักตัวอย่าง (Sampling) จะใช้วิธีของวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel Sampling: RWS) หรือวิธีการแบบการสุ่มครอบจักรวาล (Stochastic Universal Sampling: SUS)

- ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation) คือกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์ เป็นขั้นตอนการสร้างลูกหลานซึ่งได้จากการรวมพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์ เพื่อให้ได้ลูกหลานที่มีส่วนผสมผสานมาจากพ่อแม่หรือได้จากการแปรผันยีนของพ่อแม่เพื่อให้ได้ลูกหลานสายพันธุ์ใหม่เกิดขึ้น ซึ่งมีความคาดหวังโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นมานั้นจะได้รับส่วนดีของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์โดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์นี้ โดยปกติทั่วไปปฏิบัติการทางสายพันธุ์จะมีอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ คือ การทำครอสโอเวอร์ (Crossover) และการทำมิวเทชัน (Mutation) โดยวิธีการทำครอสโอเวอร์มีได้หลายแบบเช่น การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดี่ยว (Single-point crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (Multiple-point crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอ (Uniform crossover) เป็นต้น



รูปที่ 5.9 วัฏจักรการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม

- การแทนที่ (Replacement) เป็นขั้นตอนหลังจากที่ได้โครโมโซมลูกหลานเรียบร้อยแล้ว และจำเป็นการนำโครโมโซมใหม่ไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่า จุดประสงค์ในการแทนที่นั้นค่อนข้างชัดเจน กล่าวคือการนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อนจะทำให้ประชากรรุ่นใหม่ประกอบด้วยโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ดีกว่าอันเนื่องมาจากการได้

- สืบสายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้วในการคัดเลือกกว่าโครโมโซมไหนจะถูกแทนที่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational genetic algorithm) และการแทนที่ประชากรแบบคงตัว (Steady-state genetic algorithm)

จินเนติกอัลกอริทึมมีการจำลองวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบธรรมชาติ กล่าวคือ กระบวนการภายในของจินเนติกอัลกอริทึม ทำให้คำตอบของระบบที่มีอยู่เกิดวิวัฒนาการในตัวเอง อันนำไปสู่การปรับตัวให้กลายเป็นคำตอบที่ดีกว่าและดีที่สุดได้ โดยมีรายละเอียดขององค์ประกอบวัฏจักรการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม ดังรูปที่ 5.9

จากรูปที่ 5.9 องค์ประกอบวัฏจักรการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ประชากร (Population) ประกอบไปด้วยกลุ่มของโครโมโซม (Chromosome) ซึ่งเป็นตัวแทนของคำตอบในระบบที่ต้องการค้นหา

ต้นกำเนิดสายพันธุ์ (Parents) กลุ่มประชากรที่ถูกคัดเลือกเพื่อเป็นตัวแทนในการให้กำเนิดสายพันธุ์ใหม่ในรุ่นถัดไป (Next generation) ประชากรกลุ่มนี้เปรียบเสมือนเป็นพ่อแม่ สำหรับใช้ในการสืบทอดสายพันธุ์ให้ลูกหลานต่อไป

สายพันธุ์ใหม่ (Offspring) หรือ “ลูกหลาน” เป็นประชากรกลุ่มใหม่ที่ได้รับการถ่ายทอดสายพันธุ์มาจากพ่อแม่โดยคาดหวังที่จะได้รับสายพันธุ์ที่ดีที่สุดเพื่อถ่ายทอดต่อกันในประชากรรุ่นถัดไป

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) เป็นกระบวนการสำหรับการประเมินผลคำตอบของระบบว่าดีหรือไม่ดีแค่ไหน โครโมโซมที่นำไปประเมินค่าด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะต้องอยู่ในรูปแบบที่ระบบเข้าใจ ซึ่งอยู่ในรูปของฟีโนไทป์ (Phenotype) หลังจากการประเมินค่าผลคำตอบของระบบแล้ว (การประเมินค่าคำตอบของระบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานแต่ละงาน) จะส่งค่าความเหมาะสม (Fitness value) เพื่อนำไปเป็นเครื่องมือสำหรับตัดสินใจคัดเลือกโครโมโซมที่ดีเพื่อใช้ในการสืบสายพันธุ์ในรุ่นถัดไป โดยค่าความเหมาะสมดังกล่าวที่ให้กับโครโมโซมแต่ละตัวจะมีการเปรียบเทียบกันเองในกลุ่มประชากร

### 5.5.2 ขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม

การทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างประชากรเริ่มต้น โดยปกติจะใช้วิธีการสุ่ม (Random)

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินค่าโครโมโซมของกลุ่มประชากรทั้งหมด ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากระบบไม่สามารถเข้าใจค่าของโครโมโซมภายในจินเนติกอัลกอริทึม ดังนั้นโครโมโซมจะต้องผ่านการถอดรหัสก่อนที่จะนำไปทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยังจินเนติกอัลกอริทึม

ขั้นตอนที่ 4 ใช้ค่าความเหมาะสมทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มเพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ซึ่งจะใช้เป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้กับรุ่นถัดไป

ขั้นตอนที่ 5 นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลานด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์โครโมโซมที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือโครโมโซมลูกหลาน

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลานโดยใช้ขั้นตอนเดียวกับขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 7 โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยลูกหลานที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 ประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ

ขั้นตอนที่ 8 เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ

### 5.5.3 ความหมายและคำสั่งที่ใช้ในการทำงานแต่ละขั้นตอนของจินเนติกอัลกอริทึม

การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งในโปรแกรม MATLAB ค่าเริ่มต้นที่ต้องการกำหนดในอันดับแรกมีอยู่ 5 ค่าด้วยกันคือ (Chipperfield, Fleming, Pohlheim and Fonseca, 1994)

NIND	คือจำนวนโครโมโซมเริ่มต้น
MAXGEN	คือจำนวนรอบการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม
NVAR	คือจำนวนค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทำการค้นหา
PRECI	คือความยาว(บิต)ของพารามิเตอร์แต่ละตัว(ความละเอียดของพารามิเตอร์)
GGAP	คือร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์

จากนั้นทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของประชากรได้จาก

$$\text{Chrom} = \text{crtbp}(\text{NIND}, \text{LIND})$$

เมื่อ	Chrom	คือกลุ่มของโครโมโซมเริ่มต้น ส่วนย่อยของโครโมโซม(ยีน)ที่ได้จากคำสั่งนี้จะเป็นลักษณะของบิต ฉะนั้น โครโมโซมที่ได้จะมีลักษณะเป็นไบนารี (Binary) ซึ่งจำนวนโครโมโซมจะมีค่าเท่ากับ NIND
	LIND	คือความยาวของโครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมจากประชากรเริ่มต้นจะมีความยาวเท่ากัน โดยความยาวของโครโมโซมจะขึ้นอยู่กับจำนวนและความละเอียดของพารามิเตอร์

จากหลักการของจินเนติกอัลกอริทึมต้องมีการเข้ารหัสและถอดรหัสจากเลขไบนารีเป็นเลขฐานสิบ ซึ่งเรียกว่าฟิโนไทป์ เพื่อส่งค่าไปในส่วนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อประเมินค่าความเหมาะสม เหตุผลที่ต้องถอดรหัสเพื่อเปลี่ยนเลขไบนารีเป็นเลขฐานสิบ เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่เข้าใจระบบตัวเลขที่เป็นไบนารีได้ โดยรูปแบบของฟิโนไทป์ คือเลขฐานสิบ ซึ่งการถอดรหัสดังกล่าวจะใช้คำสั่งของโปรแกรม MATLAB ดังนี้

$$\text{Phen} = \text{bs2rv}(\text{Chrom}, \text{FieldD})$$

เมื่อ Phen คือรูปแบบฟิโนไทป์ที่จะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์  
FieldD คือรูปแบบของการกำหนดค่าในการถอดรหัสจากโครโมโซมที่เป็นไบนารีเป็นรูปแบบฟิโนไทป์ที่เป็นเลขฐานสิบ โดยการกำหนดรูปแบบของ FieldD จะมีโครงสร้างการกำหนดรูปแบบดังนี้

$$\text{FieldD} = \begin{bmatrix} \text{length} \\ \text{lower limit} \\ \text{upper limit} \\ \text{code} \\ \text{scale} \\ \text{lower bound} \\ \text{upper bound} \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

โดยที่ length คือโครงสร้างสำหรับกำหนดความยาวในแต่ละโครโมโซมซึ่งกำหนดจากจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา และความละเอียดของพารามิเตอร์แต่ละตัว  
lower limit คือขอบเขตของค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพารามิเตอร์ที่ค้นหา  
upper limit คือขอบเขตของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพารามิเตอร์ที่ค้นหา  
code คือโครงสร้างสำหรับการเลือกเข้ารหัส โดยมีให้เลือกการเข้ารหัส 2 แบบ คือ ถ้า code เป็น ศูนย์ หมายถึงการเข้ารหัสแบบไบนารีมาตรฐาน (Standard binary) และถ้า code เป็นหนึ่ง หมายถึงการเข้ารหัสแบบรหัสเกรย์ (Gray code)

- scale คือ โครงสร้างสำหรับการเลือกเทคนิคสเกลค่า โดยมีเทคนิคให้เลือกอยู่ 2 แบบคือ ถ้า scale เป็นศูนย์ หมายถึงการสเกลเชิงเลขคณิต(Arithmetic scaling) และ ถ้า scale เป็นหนึ่ง หมายถึงการสเกลเชิงลอการิทึม(Logarithmic scaling)
- lower bound คือการกำหนดรูปแบบว่าจะนำค่าขอบเขตต่ำสุดไปร่วมพิจารณาด้วยหรือไม่ โดยที่ lower bound เป็นศูนย์ หมายถึงต้องการพิจารณาค่าตอบที่ค่าขอบเขตต่ำสุด ถ้า lower bound เป็นหนึ่ง หมายถึงไม่ต้องการพิจารณาค่าตอบที่ค่าขอบเขตต่ำสุด
- upper bound คือการกำหนดรูปแบบว่าจะนำค่าขอบเขตสูงสุดไปร่วมพิจารณาด้วยหรือไม่ โดยการกำหนดค่าเช่นเดียวกับกรณี lower bound

การประเมินผลคำตอบของระบบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และการหาค่าความเหมาะสมส่งกลับไปเพื่อใช้ในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดสำหรับการขยายพันธุ์ โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นได้มีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากกระบวนการทางจินเนติก อัลกอริทึมกับข้อมูลจริงที่ได้จากการตรวจจับ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเรียกว่า ค่าการประมาณ (Objective value) โดยจะนำไปคำนวณค่าความเหมาะสม โดยการหาค่าความเหมาะสมนั้นมีหลายวิธีเช่น วิธีการแบ่งสัดส่วน (Proportionate), วิธีของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann), วิธีแข่งขัน (Tournament) และวิธีการจัดอันดับ (Ranking selection) โดยตัวอย่างคำสั่งการหาค่าความเหมาะสมแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\text{FitnV} = \text{ranking}(\text{error})$$

เมื่อ	FitnV	คือค่าความเหมาะสมที่ได้จากวิธีการจัดอันดับ
	error	คือค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในการใช้ค่าความเหมาะสมที่ได้เพื่อคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยการคัดเลือกดังกล่าวมิให้เลือกอยู่ 2 วิธีคือ วิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel Sampling: rws) และวิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล (Stochastic Universal Sampling: sus) โดยตัวอย่างการหาต้นกำเนิดสายพันธุ์แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\text{SelCh} = \text{select}(\text{'sus'}, \text{Chrom}, \text{FitnV}, \text{GGAP})$$

เมื่อ SelCh คือต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ได้จากการคัดเลือกเพื่อเตรียมที่จะสร้างลูกหลานด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ต่อไป

sus คือการกำหนดการใช้วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล

การนำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลานด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การทำครอสโอเวอร์และการทำมิวเทชัน โดยการทำครอสโอเวอร์มีหลายแบบด้วยกันคือ การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (Multiple-point crossover), การทำครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอ (Uniform crossover), การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด (Double-point crossover), การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (Single-point crossover) และการทำครอสโอเวอร์แบบสับที่ (Shuffle crossover) เป็นต้น โดยมีคำสั่งการใช้งานดังต่อไปนี้

$$\text{SelCh1} = \text{recombine}(\text{'xovsp'}, \text{SelCh}, \text{Pc})$$

เมื่อ SelCh1 คือโครโมโซมหลังจากการทำครอสโอเวอร์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์

xovsp คือการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว

Pc คือความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์

ในส่วนของกระบวนการทำมิวเทชันนั้น มีคำสั่งการใช้งานดังต่อไปนี้

$$\text{SelCh2} = \text{mut}(\text{SelCh1}, \text{Pm})$$

เมื่อ SelCh2 คือโครโมโซมลูกหลานที่ได้จากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์

Pm คือความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชัน

จากนั้นคำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน โดยโครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมลูกหลานเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยกระบวนการแทนที่จะพิจารณาจากค่าความเหมาะสม ซึ่งมีรูปแบบคำสั่งการใช้งานดังต่อไปนี้

$$[\text{Chrom error}] = \text{reins}(\text{Chrom}, \text{SelCh2}, 1, 1, \text{error}, \text{error1})$$

เมื่อ	error	คือค่าการประเมิน (Objective value) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการคำนวณโครโมโซมต้นกำเนิด
	error1	คือค่าการประเมิน ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการคำนวณโครโมโซมลูกหลาน
	Chrom	คือโครโมโซมต้นกำเนิดใหม่ที่ได้จากการแทนที่ของโครโมโซมต้นกำเนิดเดิมกับโครโมโซมลูกหลาน

## 5.6 การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก

การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกนั้นสามารถแทนขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึมได้โดยมีการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (5-10) และสมการที่ (5-11)

$$i_{GA}(m) = \frac{A_{0,GA}}{2} + \sum_1^{19} (A_{n,GA} \cos(n\omega t) + B_{n,GA} \sin(n\omega t)) \quad (5-10)$$

โดยที่	m	คือลำดับข้อมูล ณ เวลา t
	$A_{n,GA}, B_{n,GA}$	คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ ที่ได้จากการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ในอันดับฮาร์มอนิกที่ n

$$\text{objective function} = \text{error} = \sum_{m=1}^{128} (i_{\text{harmonic}}(m) - i_{GA}(m))^2 \quad (5-11)$$

โดยที่	$i_{\text{harmonic}}(m)$	ค่ากระแสที่ได้จากการตรวจจับจริงในข้อมูลลำดับที่ m
	$i_{GA}(m)$	ค่ากระแสที่ได้จากการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมในข้อมูลลำดับที่ m

ค่าเริ่มต้นของกระบวนการทางจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก มีค่าดังต่อไปนี้คือ

NIND = ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 5.6.1

MAXGEN = 1500 รอบ





ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสมของการวิเคราะห์  
กระแสน้ำมือนิก

ก) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 20 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	150.78	144.89	71.18	219.59	129.48	143.18
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	495	489	485	487	493	489.8

ข) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 40 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	64.59	72.65	99.61	50.21	40.64	65.54
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	484	493	464	500	491	486.4

ค) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 60 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	55.96	66.26	59.39	46.48	176.78	80.97
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	457	493	497	497	482	485.2

ง) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 80 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	43.50	46.29	54.78	170.17	28.03	68.55
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	487	491	447	500	481	481.2

จ) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 100 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	32.51	53.10	51.87	187.44	39.14	72.81
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	488	487	497	498	467	487.4

### 5.6.2 การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการทดสอบ 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มกรอบจักรวาล และวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.11 จากการทดสอบสังเกตได้ว่าการคัดเลือกด้วยวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต มีจำนวนรอบการทำงานและค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มกรอบจักรวาล ฉะนั้นการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ของเงินเนติกอัลกอริทึมด้วยวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมของการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก

ก) วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มกรอบจักรวาล (SUS)

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	57.38	106.84	93.71	85.02	109.80	90.55
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	497	498	481	500	472	489.6

ข) วิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต (RWS)

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	66.35	97.15	83.02	90.74	63.09	80.07
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	474	487	495	498	497	490.2

### 5.6.3 การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ชนิดด้วยกัน คือ การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว, การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด, การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด และการทำครอสโอเวอร์แบบสลับที่ ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ดังตารางที่ 5.12 จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าการทำครอสโอเวอร์แบบสลับที่ใช้จำนวนรอบการทำงานและให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ฉะนั้นการทำครอสโอเวอร์แบบสลับที่จึงเหมาะสมสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมของการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก

ก) การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	204.93	193.85	77.57	126.95	202.41	161.14
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	482	481	498	500	500	492.2

ข) การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	100.23	82.58	155.70	95.41	103.10	107.40
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	497	489	481	468	488	484.6

ค) การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	828.38	219.40	126.12	68.26	69.88	262.40
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	499	490	493	472	496	490

ง) การทำครอสโอเวอร์แบบสลับที่

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	162.98	74.97	34.42	44.27	65.00	76.33
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	498	448	482	483	480	478.2

#### 5.6.4 การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้น (GGAP) ที่เหมาะสม สำหรับนายวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ค่าด้วยกันคือ GGAP = 0.5, GGAP = 0.6, GGAP = 0.7, GGAP = 0.8 และ GGAP = 0.9 ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 5.13 จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ 0.6 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ฉะนั้นร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีค่าเท่ากับ 0.6 จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม (GGAP) ของ  
การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก

ก) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.5

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	73.20	51.30	68.77	57.25	53.68	60.84
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	493	489	484	491	500	491.4

ข) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.6

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	36.05	49.53	74.73	35.04	36.15	46.30
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	472	492	489	490	493	487.2

ค) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.7

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	56.18	64.36	44.98	64.66	52.61	56.56
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	489	495	485	467	492	485.6

ง) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.8

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	65.11	52.24	29.13	40.44	67.71	50.93
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	490	471	422	470	488	468.2

จ) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.9

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	204.48	63.88	212.77	68.27	210.98	152.08
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	497	477	495	482	493	488.8

### 5.6.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ค่า คือ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 5.14 จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์มีค่าเท่ากับ 0.7 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ฉะนั้นค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์มีค่าเท่ากับ 0.7 จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.14 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมของการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก

ก) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.5

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	43.41	135.23	83.81	32.48	198.05	98.60
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	498	499	500	490	500	497.4

ข) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.6

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	43.41	75.57	83.81	32.48	61.09	59.28
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	498	500	500	490	487	495

ค) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	30.26	42.55	44.92	32.48	35.49	37.14
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	480	497	488	490	499	490.8

ง) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.8

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	68.67	47.57	67.23	36.46	34.15	50.82
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	494	482	500	497	490	492.6

จ) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.9

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	68.67	39.23	60.90	36.46	34.15	47.88
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	494	499	492	497	490	494.4

### 5.6.6 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ค่า คือ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 5.15 จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันมีค่าเท่ากับ 0.02 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ฉะนั้นค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันมีค่าเท่ากับ 0.02 จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.15 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็น ในการทำมิวเทชันที่เหมาะสมของ  
การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก

ก) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.01

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	0.68	9.22	0.80	9.21	7.85	5.55
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	493	492	489	493	498	493

ข) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.02

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	5.11	3.24	5.49	8.62	4.18	5.33
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	479	497	482	493	494	489

ค) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.03

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	16.77	14.76	10.90	23.24	9.56	15.05
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	495	499	461	478	474	481.4

ง) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.04

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	11.86	20.39	15.83	13.76	32.18	18.81
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	453	472	493	486	411	463

จ) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.05

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	28.17	39.56	31.73	15.87	33.57	29.78
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	444	421	403	419	486	434.6

## 5.7 การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด

การประยุกต์วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด นั้นสามารถแทนขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึมได้โดยมีการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (5-12) และสมการที่ (5-13)

$$x_{i,new} = x_{i,old} + \text{step\_x}, \quad x_{i-1,new} \leq x_{i,new} \leq x_{i+1,old} \quad (5-12)$$

โดยที่  $x_i$  คือค่าเวลาที่ใช้ในการเปิดปิดสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

จากนั้นนำค่า  $x_i$  ที่ได้นำไปแทนค่าในสมการที่ (5-5) และสมการที่ (5-6) จะได้ค่าของ  $A_{n,GA}$  และ  $B_{n,GA}$  จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ (5-13) เพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่อไป

$$\text{Objective function} = \text{Error} = \sum_{n=2}^{19} \left( \begin{aligned} & \left( A_n^{\text{real}} - A_{n,GA} \right)^2 \\ & + \left( B_n^{\text{real}} - B_{n,GA} \right)^2 \end{aligned} \right) \quad (5-13)$$

โดยที่  $A_n^{\text{real}}$  คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า  $\cos(n\omega t)$  ของอนุกรมฟังก์ชันของกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้ ณ ฮาร์มอนิกอันดับที่  $n$



$B_{n,real}$	คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\sin(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชันของกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้ ณ ฮาร์มอนิกอันดับที่ $n$
$A_{n,GA}$	คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\cos(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชันของกระแสชดเชยที่ได้จากการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ณ ฮาร์มอนิกอันดับที่ $n$
$B_{n,GA}$	คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า $\sin(n\omega t)$ ของอนุกรมฟังก์ชันของกระแสชดเชยที่ได้จากการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ณ ฮาร์มอนิกอันดับที่ $n$

ค่าเริ่มต้นของกระบวนการทางจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการหาารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดมีค่าดังต่อไปนี้คือ

NIND = ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 5.7.1

MAXGEN = 1500 รอบ

NVAR =  $50(x_1, x_2, \dots, x_{49}, x_{50})$

GGAP = ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 5.7.4

Pc = ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 5.7.5

Pm = ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 5.7.6

length = 10

LIND = NVAR \* length

PRECI = [10 10 ... 10]

Lower limit = [-0.01 -0.01 ... -0.01]

Upper limit = [0.01 0.01 ... 0.01]

Code = [0 0 ... 0] (การเข้ารหัสแบบไบนารีมาตรฐาน)

Scale = [0 0 ... 0] (การสเกลเชิงเลขคณิต)

Lower bound = [1 1 ... 1] (ต้องการพิจารณาคำตอบที่ค่าขอบเขตต่ำสุด)

Upper bound = [1 1 ... 1] (ต้องการพิจารณาคำตอบที่ค่าของเขตสูงสุด)

วิธีการคัดเลือกโครโมโซมเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ = ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่

### 5.7.2

ชนิดของการทำครอสโอเวอร์ = ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 5.7.3

ในการเลือกค่าเริ่มต้นที่ใช้ในจินเนติกอัลกอริทึมนี้ควรทำการเลือกค่า NIND, GGAP, Pc, Pm, วิธีการคัดเลือกโครโมโซมเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ และชนิดการทำครอสโอเวอร์ ให้เหมาะสมกับการนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก โดยมีการทดสอบดังต่อไปนี้

### 5.7.1 การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้น (NIND) ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ค่าด้วยกัน คือ NIND = 20, NIND = 40, NIND = 60, NIND = 80 และ NIND = 100 ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 5.16 จากผลการทดลองสังเกตได้หาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 60 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ฉะนั้นแสดงได้ว่าค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 60 โครโมโซมมีความเหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนประชากรเริ่มต้นค่าอื่นๆ

ตารางที่ 5.16 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสมของการหารูปแบบการสวิตซ์ ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด

ก) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 20 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	47.22	32.85	33.27	48.34	50.09	42.35
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	416.00	2095.00	1420.00	2441.00	173.00	1309.00

ข) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 40 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	19.48	52.15	47.27	34.51	24.78	35.64
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	2348.00	506.00	50.00	57.00	486.00	689.40

ค) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 60 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	22.99	11.99	12.67	14.12	12.67	14.89
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	196.00	411.00	311.00	794.00	311.00	404.60

ง) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 80 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	7.36	18.73	21.42	11.33	14.36	14.64
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	136.00	29.00	28.00	388.00	244.00	165.00

จ) จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 100 โครโมโซม

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	10.39	9.17	10.68	9.17	7.35	9.35
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	272.00	43.00	49.00	43.00	296.00	140.60

### 5.7.2 การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการทดสอบ 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล และวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.17 จากการทดสอบสังเกตได้ว่าวิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล และวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต มีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน แต่วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาลมีจำนวนรอบการทำงานน้อยกว่าวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ตจึงใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า ฉะนั้นการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ของจินเนติกอัลกอริทึมด้วยวิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการค้นหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.17 ผลการทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมของการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด

ก) วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล (SUS)

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	9.40	23.97	15.89	13.84	16.10	15.84
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	53.00	22.00	466.00	90.00	182.00	162.60

ข) วิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต (RWS)

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	12.67	10.06	13.84	14.87	21.23	14.53
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	311.00	286.00	750.00	263.00	1061.00	534.20

### 5.7.3 การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ชนิดด้วยกัน คือ การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว, การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด, การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด และการทำครอสโอเวอร์แบบสลัปที่ ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ดังตารางที่ 5.18 จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าการทำครอสโอเวอร์แบบสองจุดใช้จำนวนรอบการทำงานและให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ฉะนั้นการทำครอสโอเวอร์แบบสองจุดจึงเหมาะสมสำหรับการค้นหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.18 ผลการทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมของการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด

ก) การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	23.44	12.89	21.80	15.34	17.04	18.10
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	21.00	1318.00	18.00	560.00	41.00	391.60

ข) การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	18.31	11.80	14.23	16.45	7.35	13.63
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	103.00	845.00	61.00	16.00	327.00	270.40

ค) การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	19.59	13.63	16.25	12.13	15.86	15.49
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	85.00	25.00	950.00	339.00	214.00	322.60

ง) การทำครอสโอเวอร์แบบสลัปที่

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	9.40	23.97	15.89	13.84	16.10	15.84
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	53.00	22.00	466.00	90.00	182.00	162.60

#### 5.7.4 การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้น (GGAP) ที่เหมาะสม สำหรับนายวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ค่าด้วยกันคือ GGAP = 0.5, GGAP = 0.6, GGAP = 0.7, GGAP = 0.8 และ GGAP = 0.9 ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 5.19 จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ 0.8 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ฉะนั้นร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีค่าเท่ากับ 0.8 จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการค้นหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.19 ผลการทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม (GGAP) ของการหา รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด

ก) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.5

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	20.86	15.31	16.25	20.95	16.89	18.05
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	821.00	680.00	1423.00	38.00	385.00	669.40

ข) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.6

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	16.28	8.52	8.62	16.44	16.52	13.28
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	991.00	216.00	1411.00	818.00	205.00	728.20

ค) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.7

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	18.13	17.82	15.41	12.40	12.26	15.20
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	273.00	1479.00	769.00	664.00	55.00	648.00

ง) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.8

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	12.42	30.19	6.06	5.48	5.67	11.96
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	122.00	25.00	119.00	179.00	802.00	249.40

จ) ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์เท่ากับ 0.9

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	3.80	3.40	4.53	3.61	3.62	3.79
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	360.00	827.00	154.00	417.00	651.00	481.80

### 5.7.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ค่า คือ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 5.20 จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์มีค่าเท่ากับ 0.9 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าน้อยที่สุดเล็กน้อย แต่ให้จำนวนรอบการทำงานน้อยที่สุด ฉะนั้นค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์มีค่าเท่ากับ 0.9 จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการค้นหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.20 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมของการหา  
รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด

ก) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.5

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	11.66	4.34	4.87	4.91	6.75	6.50
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	159.00	1452.00	499.00	1047.00	644.00	760.20

ข) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.6

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	26.92	44.42	8.20	62.05	8.06	15.50
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	844.00	844.00	1179.00	118.00	123.00	621.60

ค) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	12.42	30.19	7.13	4.17	7.61	12.30
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	122.00	25.00	120.00	1282.00	208.00	351.40

ง) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.8

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	18.73	27.50	5.25	18.73	27.50	19.54
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	289.00	39.00	220.00	289.00	39.00	175.20

จ) ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.9

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	11.93	6.22	6.99	8.06	9.53	8.55
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	85.00	478.00	202.00	60.00	83.00	181.60

### 5.7.6 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ค่า คือ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09 และ 0.1 ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 5.21 จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันมีค่าเท่ากับ 0.06 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนและจำนวนรอบการทำงานที่น้อยกว่าค่าอื่นๆ ฉะนั้นค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันมีค่าเท่ากับ 0.06 จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการค้นหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.21 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่เหมาะสมของการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด

ก) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.01

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	15.32	13.32	9.20	19.30	11.15	13.66
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	79.00	114.00	234.00	856.00	518.00	360.20

ข) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.02

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	7.79	18.03	11.48	3.51	10.31	10.22
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	112.00	65.00	115.00	1252.00	1497.00	608.20

ค) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.03

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	19.02	7.13	11.77	5.05	5.10	9.61
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	533.00	754.00	119.00	321.00	569.00	459.20

ง) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.04

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	3.58	3.32	24.76	3.89	3.40	7.79
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	536.00	1338.00	20.00	1370.00	388.00	730.40

จ) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.05

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	2.89	4.51	4.67	11.20	4.43	5.54
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	1171.00	265.00	920.00	27.00	104.00	497.40

ฉ) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.06

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	3.46	5.45	5.20	4.63	3.46	4.44
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	495.00	72.00	555.00	1141.00	495.00	551.60

ช) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.07

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	7.88	15.44	7.88	15.44	3.56	10.04
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	194.00	27.00	194.00	27.00	1254.00	339.20

ซ) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.08

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	7.15	4.08	4.00	5.32	7.15	5.54
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	103.00	366.00	1313.00	179.00	103.00	412.80



ฉ) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.09

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	3.40	5.42	4.69	8.98	8.87	6.27
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	1414.00	319.00	415.00	18.00	43.00	441.80

ญ) ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันเท่ากับ 0.1

ค่าที่ทดสอบ/ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด	3.85	5.46	4.83	3.77	3.38	4.26
จำนวนรอบการทำงาน(รอบ)	540.00	1376.00	982.00	1370.00	488.00	951.20

ค่าตัวแปรต่างๆ ของพารามิเตอร์ที่กำหนดให้จินเนติกอัลกอริทึมในการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก และการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.22

ตารางที่ 5.22 ค่าตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึม	ค่าของตัวแปรจินเนติกอัลกอริทึมที่ได้จากการทดสอบ
การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก	
- ค่าจำนวนประชากรเริ่มต้น (NIND)	40
- ค่าจำนวนพารามิเตอร์ที่ค้นหา (NVAR)	39
- วิธีการคัดเลือกสายพันธุ์	วิธีการชักตัวอย่างของวงรูเล็ท (RWS)
- ชนิดของการทำครอสโอเวอร์	การทำครอสโอเวอร์แบบสลับที่ (Shuffle Crossover)
- ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ (GGAP)	0.6
- ค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์	0.7
- ค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชัน	0.02
- จำนวนรอบสูงสุดในการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม (MAXGEN)	1500 รอบ
การหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ	
- ค่าจำนวนประชากรเริ่มต้น (NIND)	60

ตารางที่ 5.22 (ต่อ)

ตัวแปรของเงินเนติกอัลกอริทึม	ค่าของตัวแปรเงินเนติกอัลกอริทึมที่ได้จากการทดสอบ
- ค่าจำนวนพารามิเตอร์ที่ค้นหา (NVAR) - วิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ - ชนิดของการทำครอสโอเวอร์	50 วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่ม กรอบจักรวาล (SUS) การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด (Double-Point Crossover)
- ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ (GGAP)	0.8
- ค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์	0.9
- ค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชัน	0.05
- จำนวนรอบสูงสุดในการทำงานของเงิน- เนติกอัลกอริทึม (MAXGEN)	1500 รอบ

ในการค้นหาค่าตัวแปรของเงินเนติกอัลกอริทึมที่เหมาะสมที่สุดดังตารางที่ 5.22 นั้น ได้มีการสังเกตแนวโน้มของค่าความคลาดเคลื่อนตลอดเวลา ซึ่งพบว่าเมื่อจำนวนรอบการทำงานของเงินเนติกอัลกอริทึมสูงขึ้นเรื่อยๆ กล่าวคือจำนวนรอบการทำงานสูงขึ้นเกินกว่าประมาณ 700 รอบ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จะเริ่มคงที่มีการแกว่งเล็กน้อย ดังนั้นจึงได้กำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการทำงานของเงินเนติกอัลกอริทึมที่เหมาะสมที่สุดไว้ที่ 1500 รอบ ซึ่งจะได้แสดงผลการทดสอบและอภิปรายผลการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการวิเคราะห์กระแสมอนิกในบทที่ 6 หัวข้อ 6.3 และการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในบทที่ 6 หัวข้อ 6.4

## 5.8 สรุป

ในบทที่ 5 นี้ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตามู และการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึมเพื่อการวิเคราะห์กระแสมอนิกและ การหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด พร้อมทั้งทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของการค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบเงินเนติกอัลกอริทึมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.9 และตารางที่ 5.22 ซึ่งผลที่ได้นี้จะนำไปใช้ทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีการต่างๆ ต่อไป

## บทที่ 6

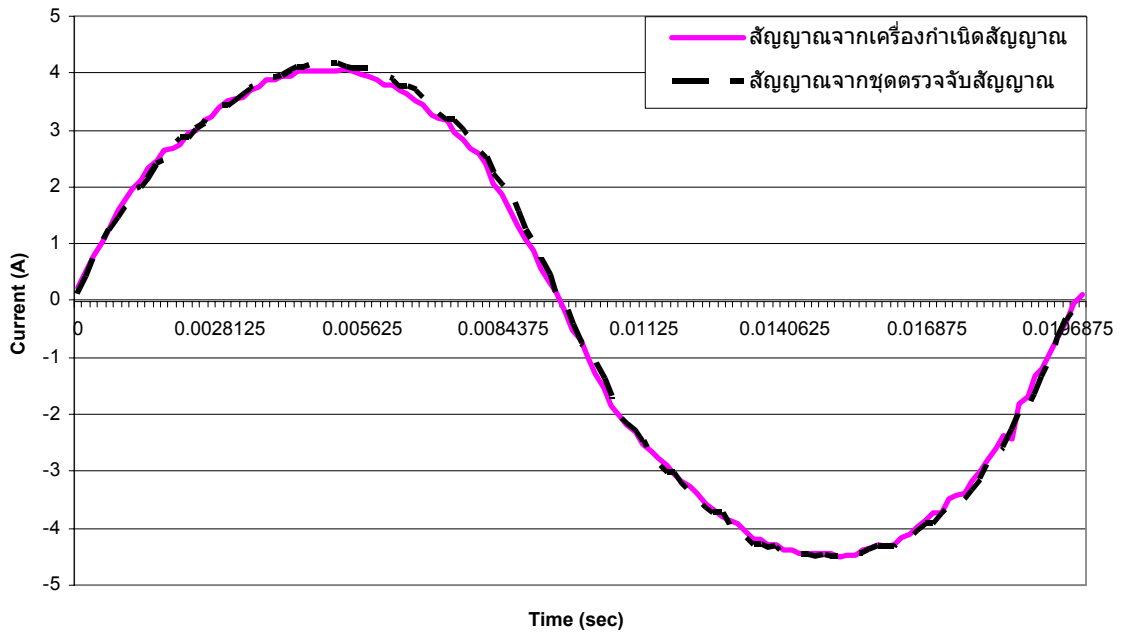
### ผลการทดสอบการทำงานของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ

#### 6.1 บทนำ

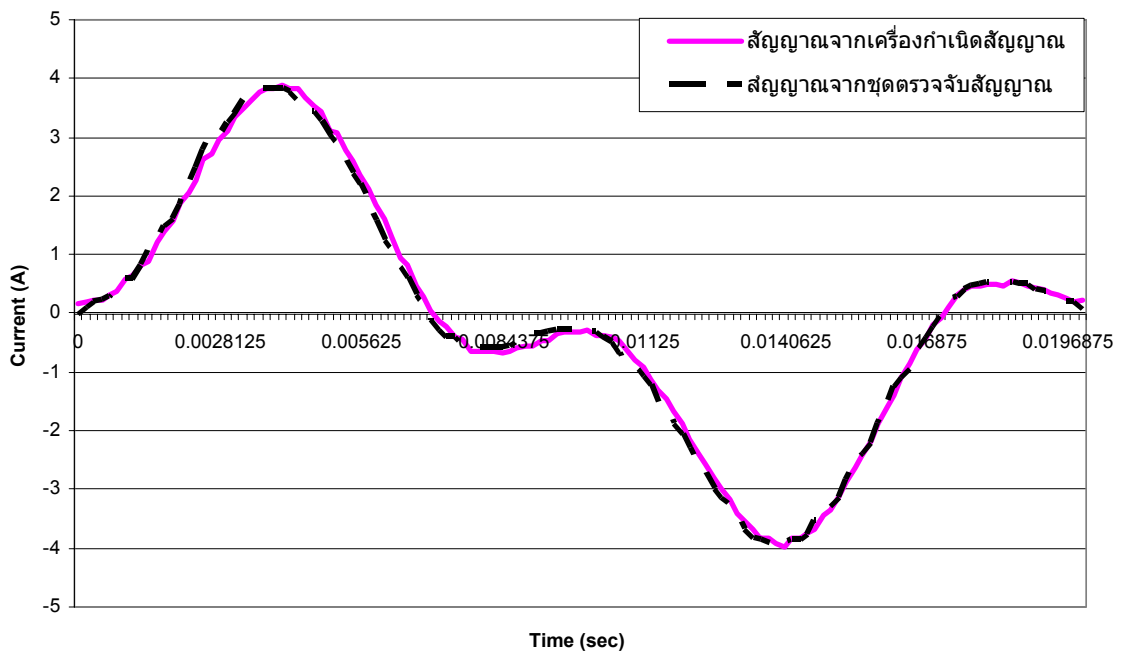
การทดสอบผลการทำงานของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนคือการทดสอบชุดอุปกรณ์ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก การทดสอบการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก และการทดสอบการสร้างกระแสชดเชย โดยในการทดสอบชุดอุปกรณ์ตรวจจับกระแสนั้นจะอาศัยการสร้างสัญญาณกระแสขึ้นมา เพื่อทดสอบว่าชุดอุปกรณ์ตรวจจับกระแสสามารถตรวจจับกระแสได้ตรงตามสัญญาณที่สร้างขึ้นมาหรือไม่ ในส่วนของการตรวจสอบการวิเคราะห์สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกนั้นจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วิเคราะห์ได้กับสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับและวิเคราะห์โดยเครื่อง Power Harmonic Analyzer จากนั้นทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของการวิเคราะห์ระหว่างการค้นหาแบบตาม การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม และการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนขาเข้ามาปะปน และไม่มีสัญญาณรบกวนขาเข้ามาปะปนกับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิก ส่วนของการทดสอบการสร้างกระแสชดเชยได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ 3 วิธีคือ วิธีการทางเทคนิคดั้งเดิม วิธีการค้นหาแบบตาม และวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ผลของการเปรียบเทียบแสดงดังหัวข้อถัดไป

#### 6.2 ผลการทดสอบการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

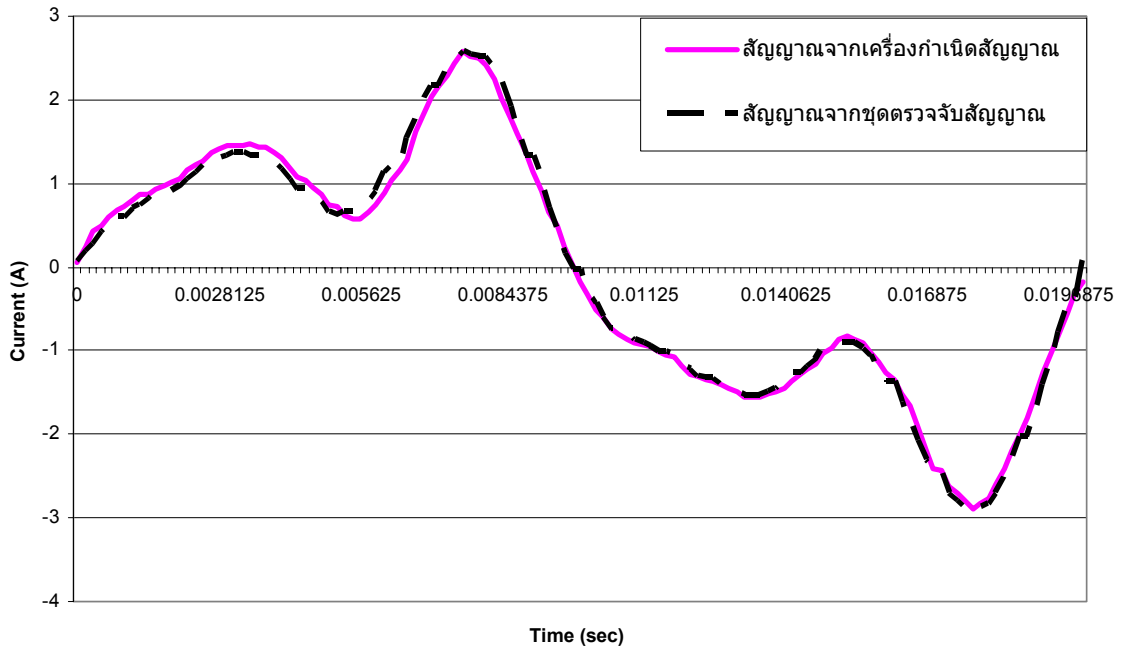
การทดสอบชุดตรวจจับกระแสจะอาศัยการจำลองสัญญาณกระแสขึ้น โดยในการตรวจวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้านั้นจะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสคือ โพรบวัดกระแสซึ่งส่งสัญญาณขาออกเป็นแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3 โวลต์ จึงใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Function generator) ในการทดสอบโดยสามารถสร้างสัญญาณความถี่สูงสุดถึง 2 MHz ให้ชุดตรวจจับกระแส โดยแบ่งการทดสอบเป็นดังตารางที่ 6.1 และได้รูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.4 ชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกนั้นสามารถตรวจจับสัญญาณกระแสที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณได้โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก เมื่อแสดงในรูปคลื่นสัญญาณจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณของกระแสฮาร์มอนิกที่สร้างขึ้นกับรูปคลื่นสัญญาณที่ตรวจจับได้นั้นซ้อนทับกันสนิท



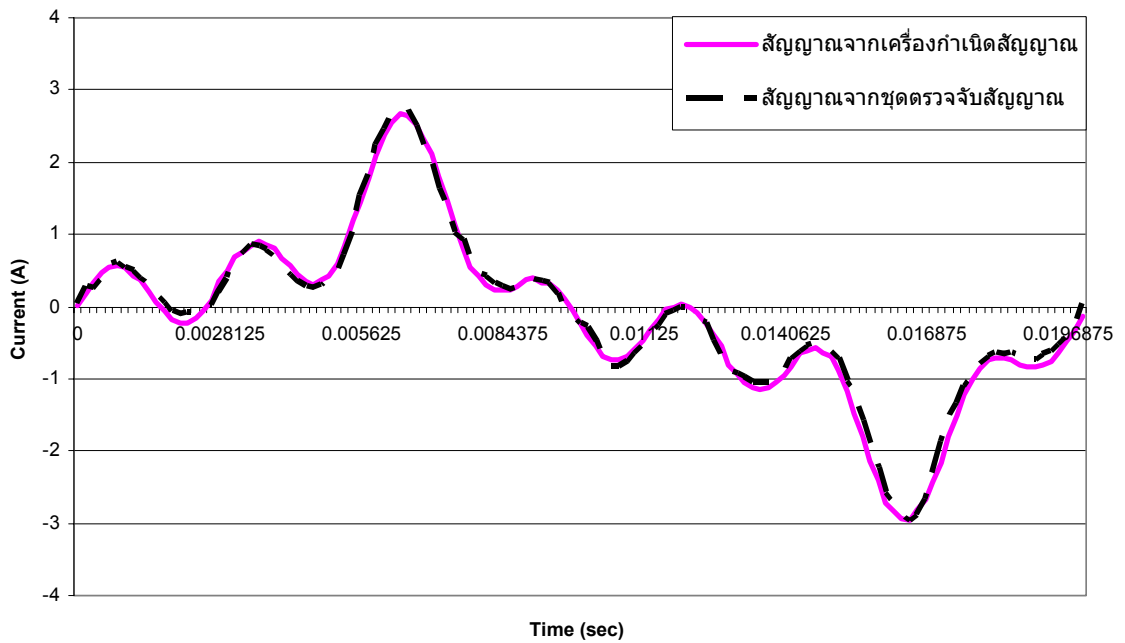
รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 และ 3 ที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 1, 3 และ 5 ที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก



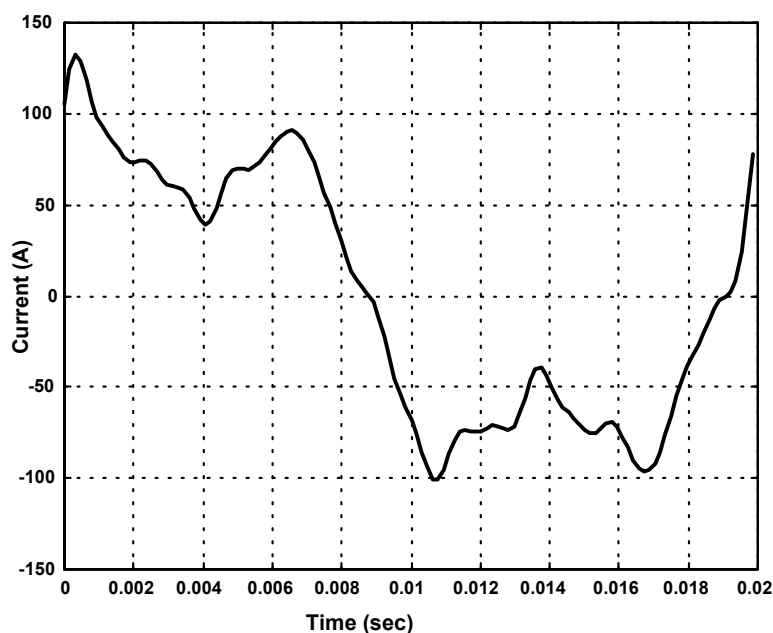
รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 1, 3, 5 และ 7 ที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบชุดตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิก ณ ฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ

สัญญาณทดสอบ	ค่าความคลาดเคลื่อน
เฉพาะฮาร์โมนิกอันดับที่ 1	0.012756
ฮาร์โมนิกอันดับที่ 1 และ 3	0.01458
ฮาร์โมนิกอันดับที่ 1, 3 และ 5	0.01025
ฮาร์โมนิกอันดับที่ 1, 3, 5, 7	0.010407

### 6.3 ผลการทดสอบการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก

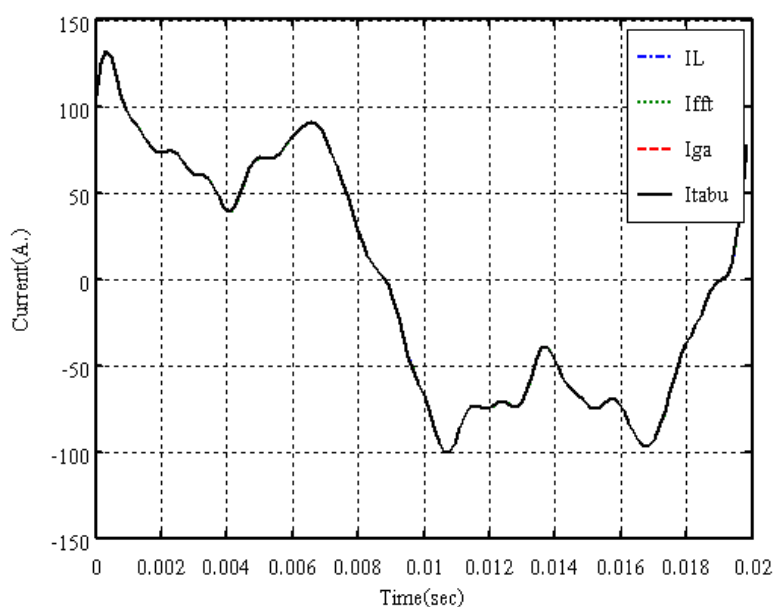
การทดสอบการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกนั้น ได้ทำการทดสอบจากกระแสที่ตรวจจับ ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างเดือนมิถุนายน ถึงเดือนกรกฎาคม 2544 โดยนำตัวอย่างรูปคลื่นกระแสของวันที่ 28 มิถุนายน 2544 ดังรูปที่ 6.5 มาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยการค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของ



รูปที่ 6.5 สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer (Fluke 41B) ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ของฟังก์ชันกระแสดังตารางที่ 6.2 จะสังเกตได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่อง Power Harmonic Analyzer มากโดยวิธีการค้นหาแบบตามูมีค่าคลาดเคลื่อน 0.000156

และการค้นหาแบบจินตคณิตอัลกอริทึมมีค่าความคลาดเคลื่อน 0.599073 โดยการค้นหาแบบตามูจะได้อค่าที่ถูกต้องมากกว่าวิธีการค้นหาแบบจินตคณิตอัลกอริทึมเล็กน้อยแต่เวลาที่ใช้ในการค้นหาแบบตามูนั้นจะใช้เวลาน้อยกว่าการค้นหาแบบจินตคณิตอัลกอริทึม 84.18% เมื่อทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ลงในสมการอนุกรมฟูริเยร์ให้อยู่ในรูปของสัญญาณกระแส รูปสัญญาณกระแสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการค้นหาแบบตามู การค้นหาแบบจินตคณิตอัลกอริทึม กับรูปสัญญาณกระแสที่ได้จากเครื่อง Power Harmonic Analyzer จะซ้อนทับกันสนิทดังรูปที่ 6.6

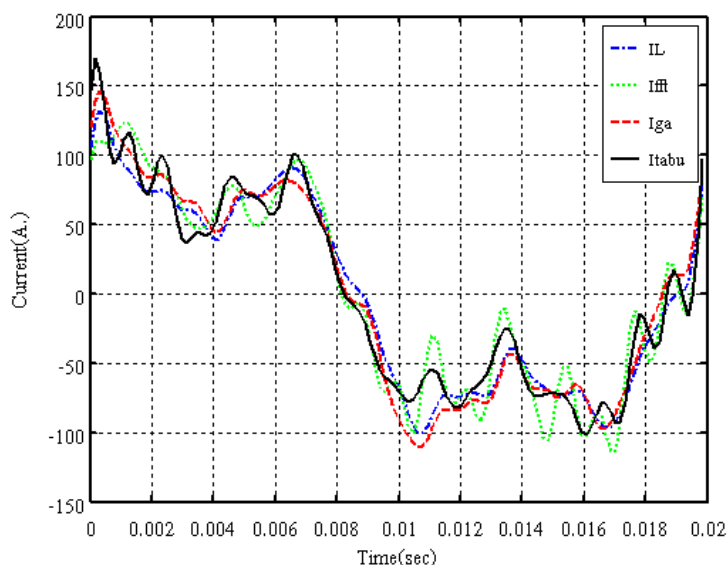


รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer กับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินตคณิตอัลกอริทึม กรณีไม่มีสัญญาณรบกวนขาว

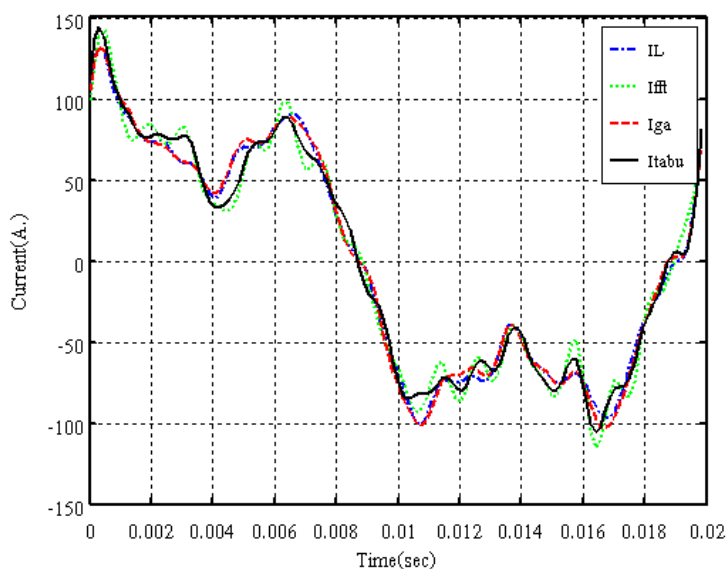
ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบการหาค้นหาคำตอบของการค้นหาแบบตามูและการค้นหาแบบจินเนติก  
อัลกอริทึมกับเครื่อง Power Harmonic Analyzer

อันดับของ ฮาร์มอนิก	ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ของฟังก์ชันสัญญาณกระแส					
	Power Harmonic Analyzer ( $A_{peak}$ )		การค้นหาแบบตามู ( $A_{peak}$ )		การค้นหาแบบจินเนติก อัลกอริทึม ( $A_{peak}$ )	
	$A_n$	$B_n$	$A_n$	$B_n$	$A_n$	$B_n$
0	0	0	0	0	0.0782	0
1	37.507	80.435	37.509	80.431	37.5367	80.5474
2	2.360	2.914	2.362	2.915	2.5122	2.8152
3	35.688	15.889	35.69	15.887	35.7283	16.0802
4	3.074	3.536	3.073	3.532	3.0987	3.5191
5	2.067	2.743	2.069	2.746	2.346	2.6393
6	2.759	1.467	2.761	1.466	2.4438	1.4174
7	3.593	6.222	3.595	6.223	3.4702	6.2072
8	0.596	3.383	0.595	3.382	0.6843	3.3627
9	5.468	9.470	5.467	9.468	5.6696	9.3353
10	2.972	0.966	2.973	0.964	3.1281	0.9189
11	0.450	0.434	0.451	0.436	0.6452	0.4301
12	2.210	2.210	2.212	2.211	2.131	2.1701
13	1.188	2.547	1.19	2.544	1.1241	2.5024
14	0.477	2.454	0.48	2.455	0.6452	2.4242
15	0.178	0.918	0.177	0.919	0.2737	0.9677
16	2.789	0.342	2.79	0.339	2.4927	0.2933
17	0.268	0.155	0.271	0.156	0.3128	0.2053
18	1.530	2.357	1.532	2.355	1.5249	2.4145
19	0.257	0.173	0.255	0.171	0.1466	0.2444
Error(Sum-square)			0.000156		0.599073	
Search Time			3.15 min		20.32 min	

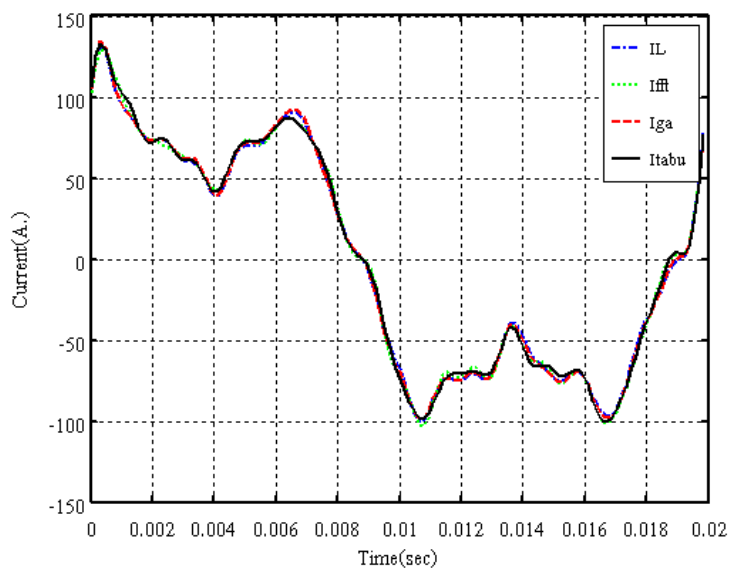




รูปที่ 6.7 เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer(PHA) กับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม กรณีมีสัญญาณรบกวนขาว โดยมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน(SNR) เท่ากับ 12



รูปที่ 6.8 เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer กับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม กรณีมีสัญญาณรบกวนขาว โดยมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 25



รูปที่ 6.9 เปรียบเทียบสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer กับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม กรณีมีสัญญาณรบกวนขาว โดยมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เท่ากับ 50

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบการหาค้นหาคำตอบของการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

Case	Method	*Error
No white noise	FFT	1.7013e-027
	Tabu	7.6495e-005***
	GA	0.599073
Add white noise 1 : **SNR = 12 dB	FFT	383.1617
	Tabu	278.6452
	GA	90.3046
Add white noise 2 : SNR = 25 dB	FFT	119.9537
	Tabu	65.4750
	GA	10.9522
Add white noise 3 : SNR = 50 dB	FFT	10.6431
	Tabu	9.6644
	GA	10.0513

$$* \text{Error} = \frac{\sum_{m=1}^{128} \left( (i_{L \text{ real}(m)} - i_{L \text{ method}})^2 \right)}{128} \quad (6-1)$$

Method คือการจำลองแบบด้วยกระบวนการ FFT, Tabu และ GA

\*\*SNR คืออัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณรบกวน

$$\text{SNR} = 10 * \log \left( \frac{\sum_{m=1}^{128} (i_{L \text{ real}(m)})^2}{\sum_{m=1}^{128} (i_{L \text{ noise}(m)} - i_{L \text{ real}(m)})^2} \right) \quad (6-2)$$

$i_{L \text{ noise}}$  คือค่ากระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงรวมกับสัญญาณกระแสรบกวน

\*\*\* ค่าคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากเงื่อนไขยุติการค้นหาค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู โดยค่าเงื่อนไขยุติการค้นหาคือ ค่าความคลาดเคลื่อน < 0.01

เมื่อทำการทดสอบการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกในกรณีที่ไม่มี และมีสัญญาณรบกวนขาวเข้ามารบกวนในระบบ โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกที่ใช้โดยทั่วไปคือการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ซึ่งผลการทดสอบมีค่าดังตารางที่ 6.3 จากผลการทดสอบจะสังเกตได้ว่าในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนขาวมารบกวนระบบการวิเคราะห์ทั้ง 3 แบบคือการวิเคราะห์โดยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีไม่มีสัญญาณรบกวนขาว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมมีความสามารถใกล้เคียงกับการแปลงฟูริเยร์แบบเร็วดังรูปที่ 6.6 ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนขาวเกิดขึ้นนั้นจากการทดสอบจะสังเกตได้ว่าการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม และการค้นหาแบบตามูให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการแปลงฟูริเยร์แบบเร็วตามลำดับ ดังตารางที่ 6.3 และรูปที่ 6.7 ถึงรูปที่ 6.9 อันเนื่องมาจากการแปลงฟูริเยร์แบบเร็วนั้นจะพยายามจำลองผลของสัญญาณรบกวนทำให้คำตอบถูกเบี่ยงเบนไปกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น แต่ในการค้นหาแบบตามู และจินเนติกอัลกอริทึมนั้นถูกบังคับไว้ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทำให้การเบี่ยงเบนของคำตอบอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนขาวน้อยกว่าการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนขาวในระบบ

นั้นการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมให้ผลที่ถูกต้องมากกว่าวิธีกาแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว

## 6.4 ผลการทดสอบการสร้างกระแสชดเชยของวงจรกรองฮาร์โมนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

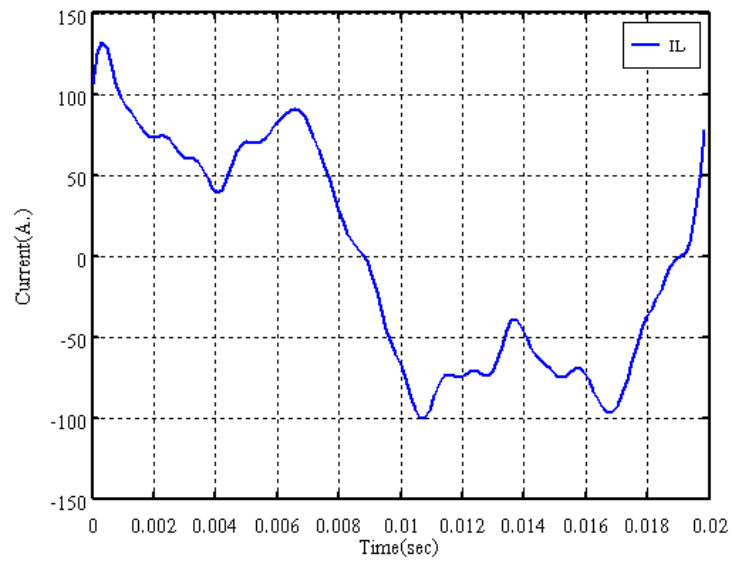
การทดสอบการสร้างกระแสชดเชยของวงจรกรองฮาร์โมนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุนั้นได้ทำการทดสอบจากกระแสที่ตรวจจับ ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างเดือนมิถุนายน ถึงเดือนกรกฎาคม 2544 โดยนำตัวอย่างรูปคลื่นกระแสของวันดังกล่าวมาใช้ในการทดสอบด้วยกัน 3 ตัวอย่างดังรูปที่ 6.10 รูปที่ 6.18 และรูปที่ 6.26 โดยในการทดสอบการสร้างกระแสชดเชยนั้นจะอาศัยการหารูปแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ วิธีการค้นหาแบบตามู และวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม จากการทดสอบสังเกตได้ดังต่อไปนี้

กรณีสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 1 มีค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม (THD<sub>T</sub>: Total Harmonic Distortion) เท่ากับ 51.69 % เมื่อทำการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์นั้นจะสังเกตได้ว่าสัญญาณกระแสภายหลังจากการชดเชยเกือบทับกันสนิทกับสัญญาณกระแสมูลฐานดังรูปที่ 6.11 โดยแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกหลังการชดเชยดังรูปที่ 6.15 และค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมลดลงเหลือเพียง 4.26 % ในส่วนของการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามูนั้นจะสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสภายหลังจากการชดเชยเกิดการบิดเบี้ยวเล็กน้อยจากสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกมูลฐานดังรูปที่ 6.12 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกหลังการชดเชยจะสังเกตเห็นฮาร์โมนิกอันดับที่ 2, 5 และ 10 เล็กน้อยดังรูปที่ 6.16 เมื่อเทียบกับสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกก่อนการชดเชย และค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมลดลงเหลือเพียง 6.03 % ในส่วนของการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมนั้นจะสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสภายหลังจากการชดเชยเกิดการบิดเบี้ยวอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกมูลฐานแต่ยังคงราบเรียบกว่าสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกก่อนการชดเชยดังรูปที่ 6.13 และแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกหลังการชดเชยดังรูปที่ 6.17 ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมลดลงเหลือ 16.74 %

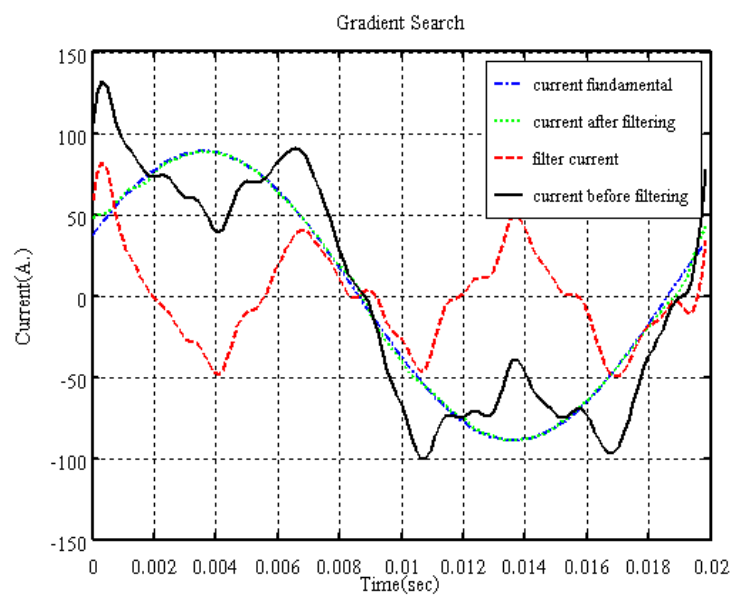
กรณีสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 มีค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมเท่ากับ 11.13 % เมื่อทำการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์จะสังเกตได้ว่าสัญญาณกระแสภายหลังจากการชดเชยนั้นทับกันสนิทกับสัญญาณกระแสมูลฐานดังรูปที่ 6.19 โดย

แสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกหลังการชดเชยดังรูปที่ 6.23 และค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมลดลงเหลือเพียง 0.25 % ในส่วนของการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู่นั้นจะสังเกตได้ว่าสัญญาณกระแสภายหลังจากการชดเชยทับกันสนิทกับสัญญาณกระแสมูลฐานดังรูปที่ 6.20 โดยแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกหลังการชดเชยดังรูปที่ 6.24 และค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมลดลงเหลือเพียง 0.55 % ในส่วนของการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมนี้ จะสังเกตได้ว่าสัญญาณกระแสภายหลังจากการชดเชยเกือบทับกันสนิทกับสัญญาณกระแสมูลฐานดังรูปที่ 6.21 โดยแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกหลังการชดเชยดังรูปที่ 6.25 และค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมลดลงเหลือเพียง 2.94 %

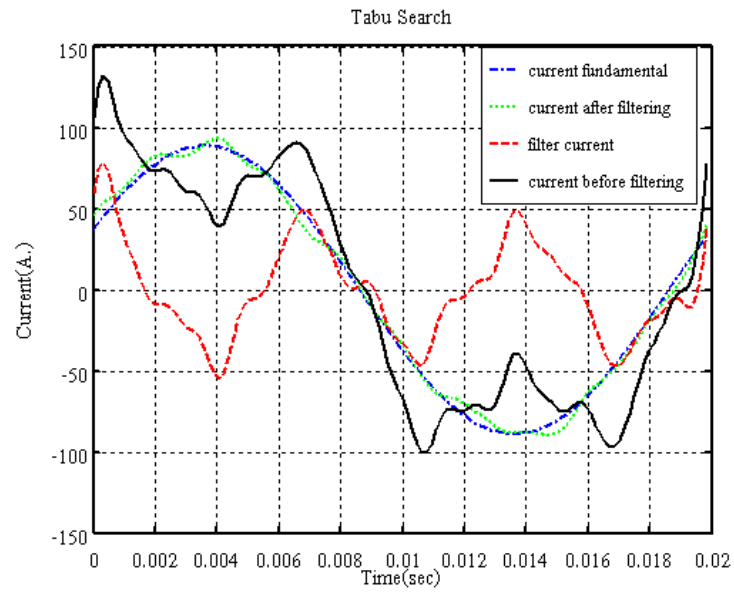
กรณีสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 3 มีค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมเท่ากับ 51.30 % โดยในการทดสอบนี้ได้ทำการเปลี่ยนค่าเริ่มต้นของรูปแบบการสวิตซ์ของการค้นหาทั้ง 3 วิธีซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้ เมื่อทำการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์นั้นจะสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสภายหลังจากการชดเชยเกิดการบิดเบี้ยวอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกมูลฐานแต่ยังคงราบเรียบกว่าสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกก่อนการชดเชยดังรูปที่ 6.27 และแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกหลังการชดเชยดังรูปที่ 6.31 ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมลดลงเหลือ 18.19 % ในส่วนของการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตามู่นั้นจะสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสภายหลังจากการชดเชยเกิดการบิดเบี้ยวเล็กน้อยจากสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกมูลฐานดังรูปที่ 6.28 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกหลังการชดเชยจะสังเกตเห็นฮาร์โมนิกอันดับที่ 4 และ 11 เล็กน้อยดังรูปที่ 6.32 เมื่อเทียบกับสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกก่อนการชดเชย และค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมลดลงเหลือเพียง 6.19 % ในส่วนของการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมนี้ จะสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสภายหลังจากการชดเชยเกิดการบิดเบี้ยวอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกมูลฐานแต่ยังคงราบเรียบกว่าสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกก่อนการชดเชยดังรูปที่ 6.29 และแสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกหลังการชดเชยดังรูปที่ 6.33 ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมลดลงเหลือ 20.60 %



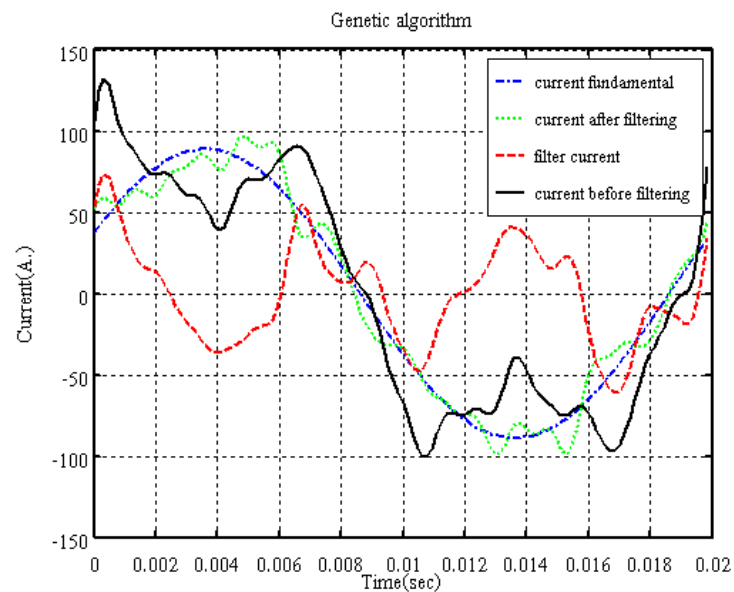
รูปที่ 6.10 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer (Fluke 41B) ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



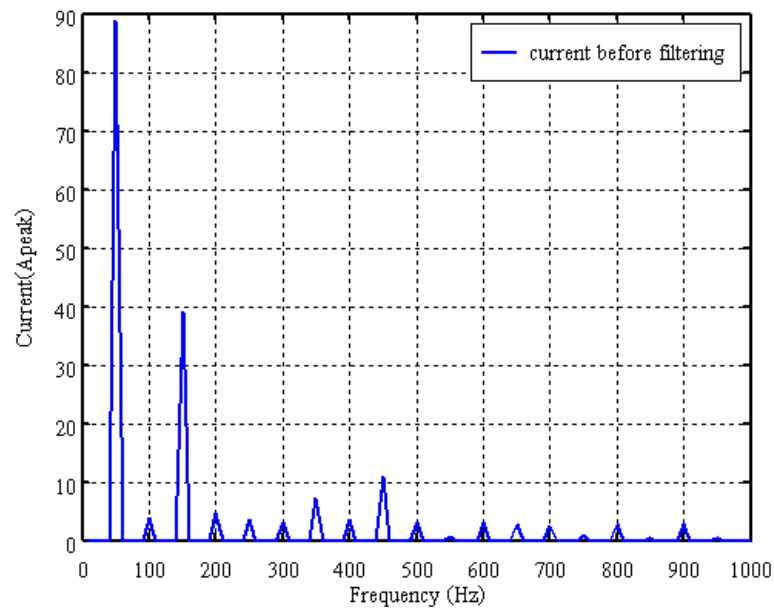
รูปที่ 6.11 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์



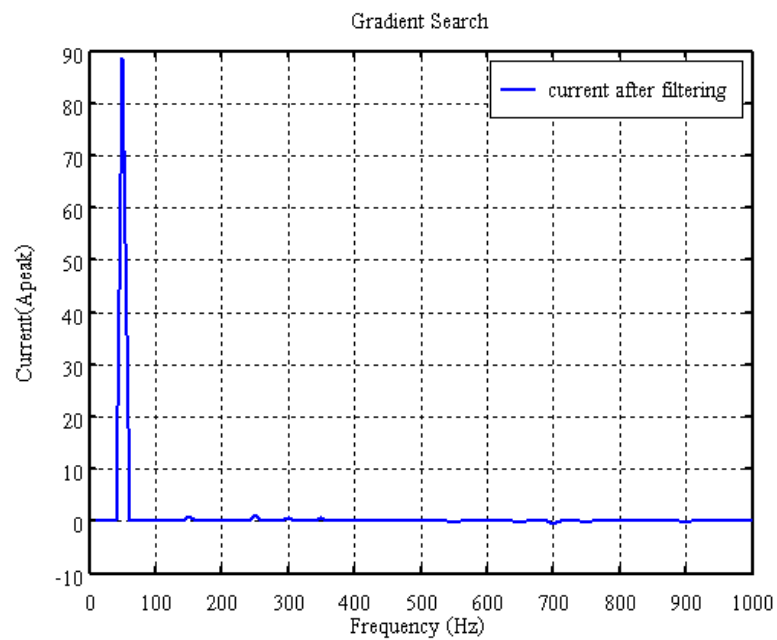
รูปที่ 6.12 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบตายนู



รูปที่ 6.13 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

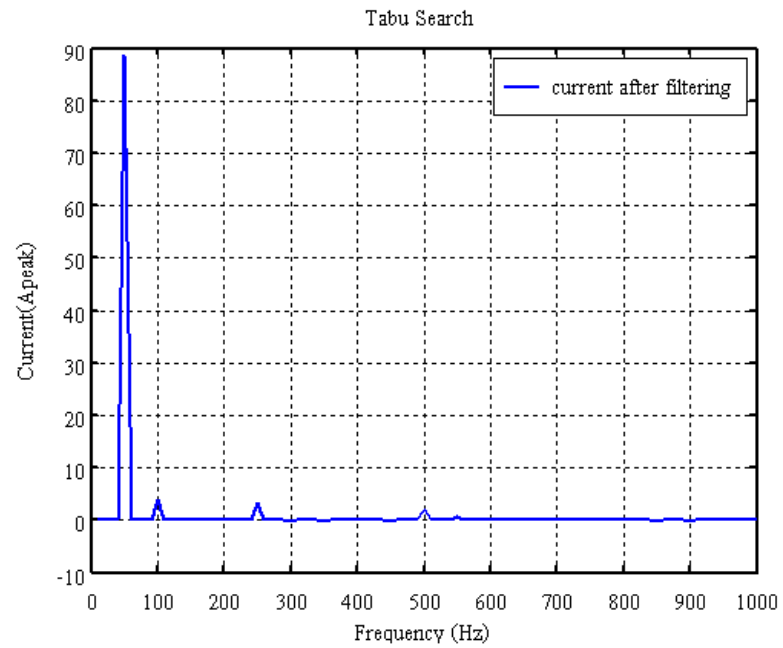


รูปที่ 6.14 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 ก่อนการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิก

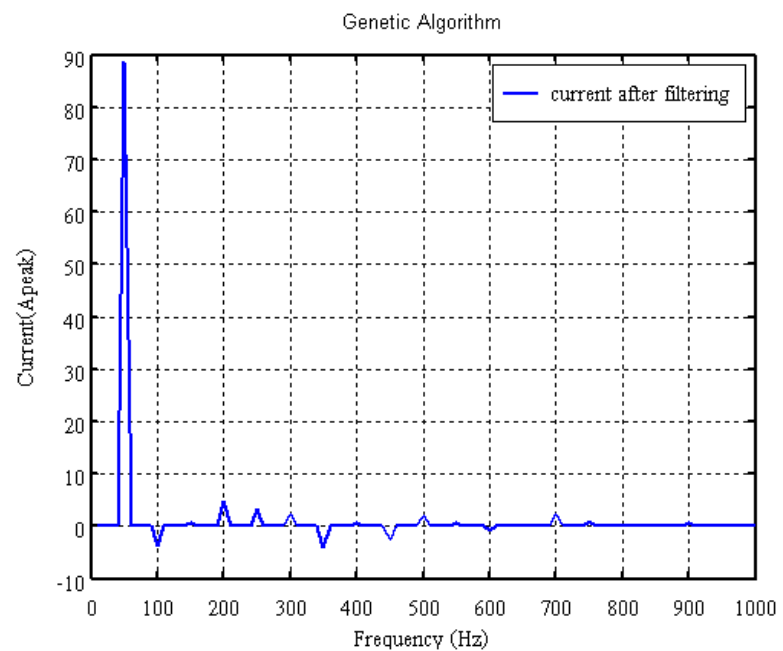


รูปที่ 6.15 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์

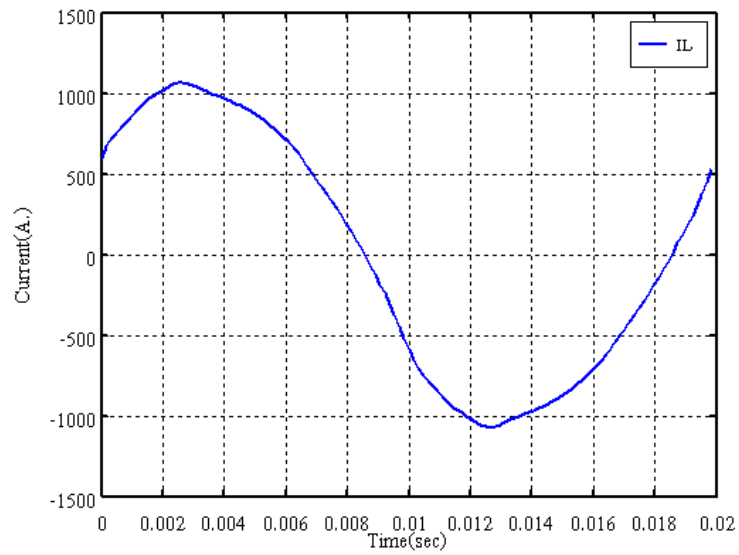




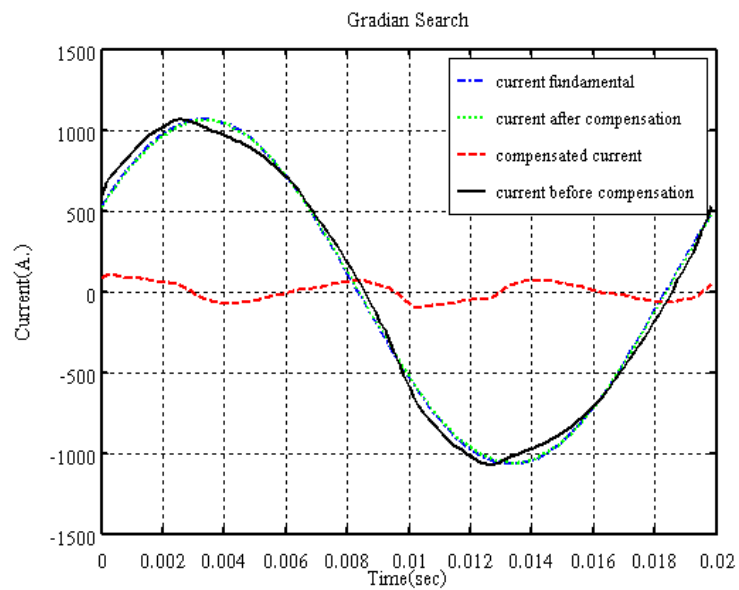
รูปที่ 6.16 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 หลังการชดเชยด้วย  
วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่



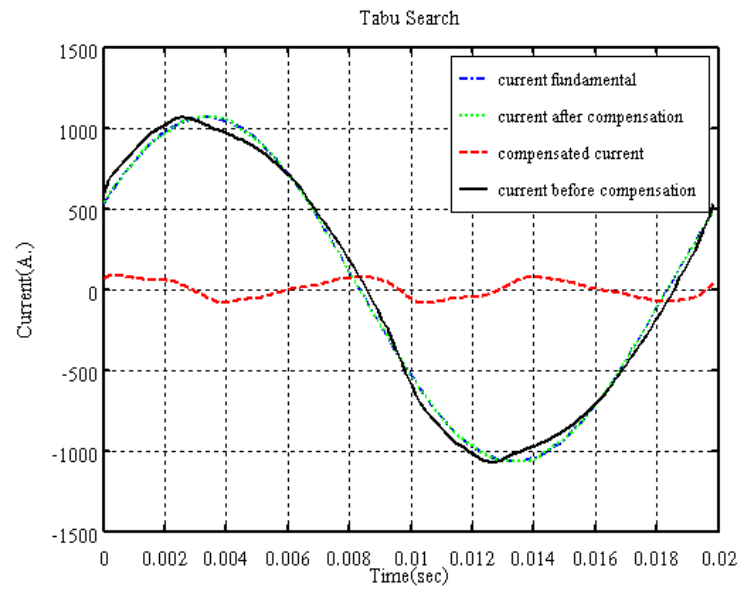
รูปที่ 6.17 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 หลังการชดเชยด้วย  
วงจรรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม



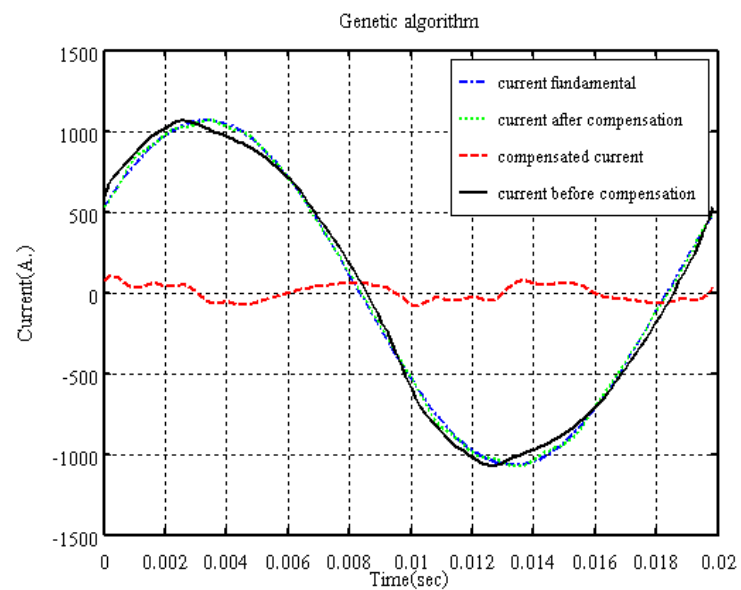
รูปที่ 6.18 สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer (Fluke 41B) ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



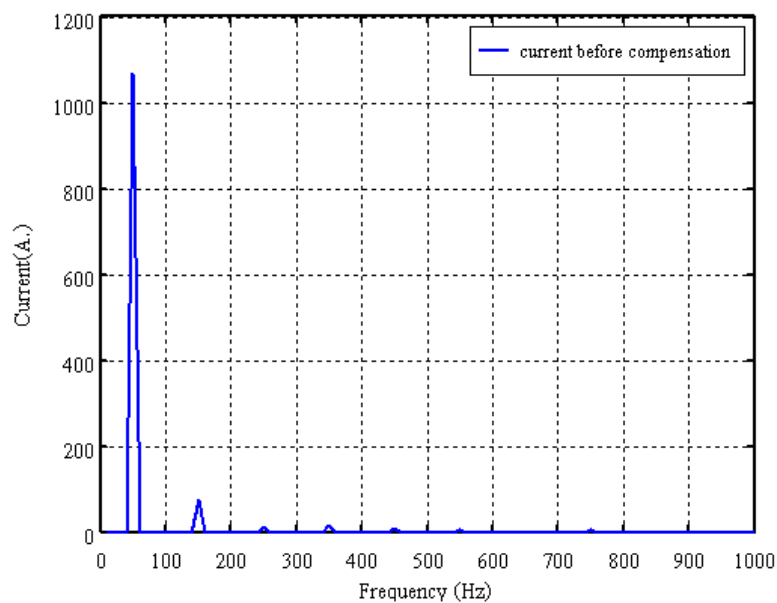
รูปที่ 6.19 สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิก โดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์



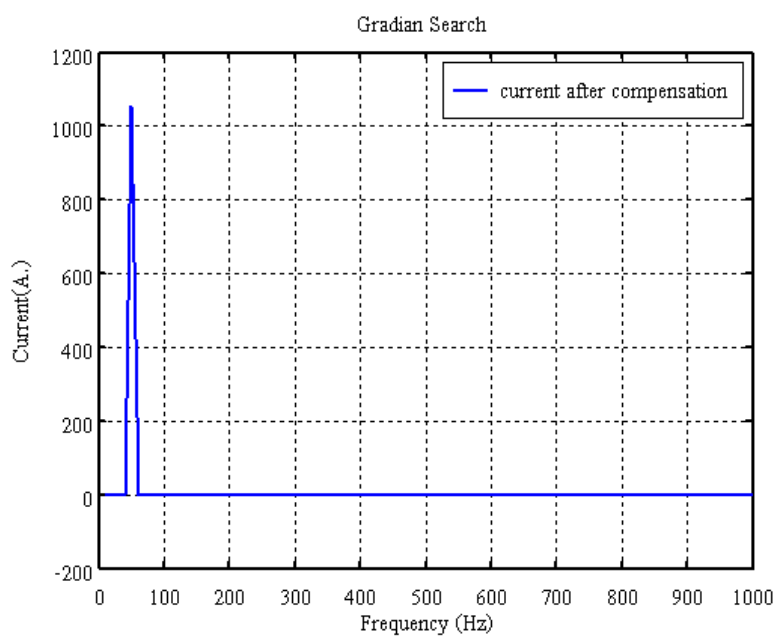
รูปที่ 6.20 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่



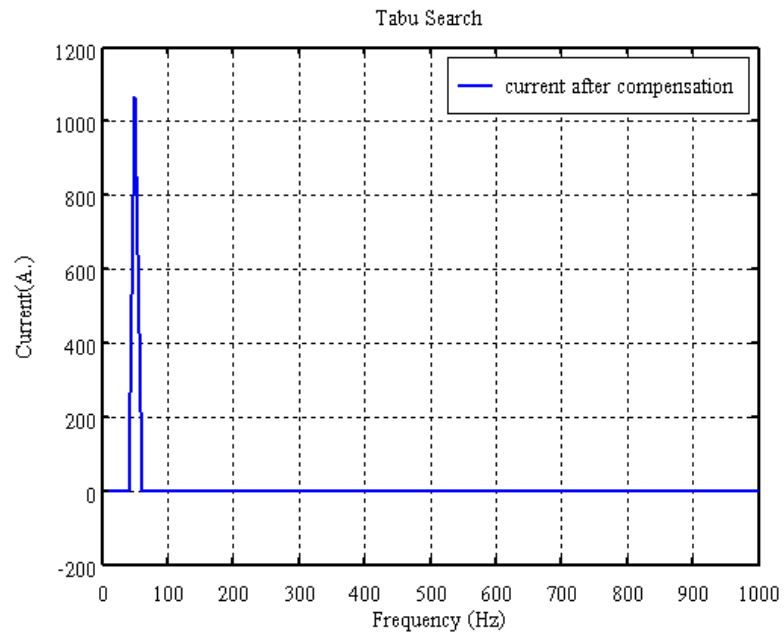
รูปที่ 6.21 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 2 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม



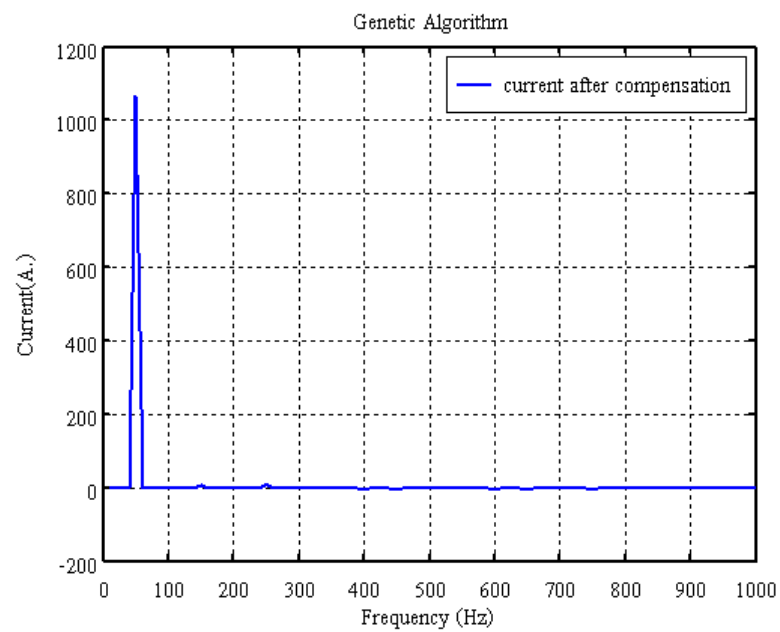
รูปที่ 6.22 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 2 ก่อนการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิก



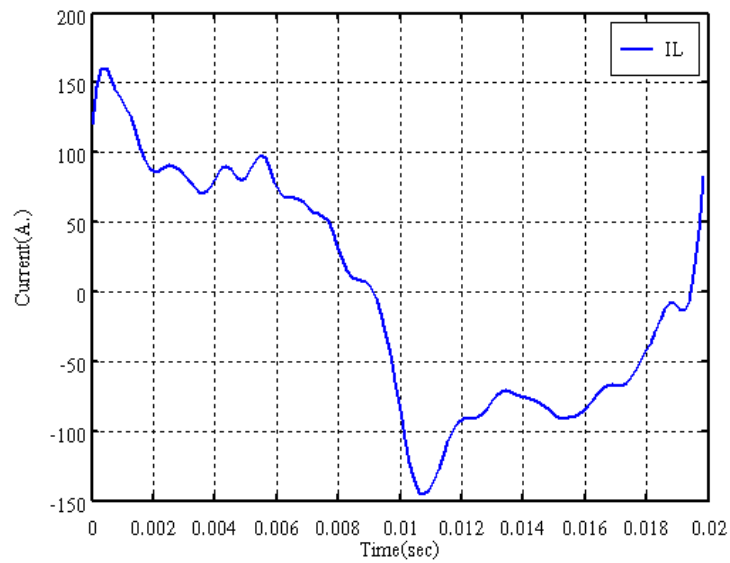
รูปที่ 6.23 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 2 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์



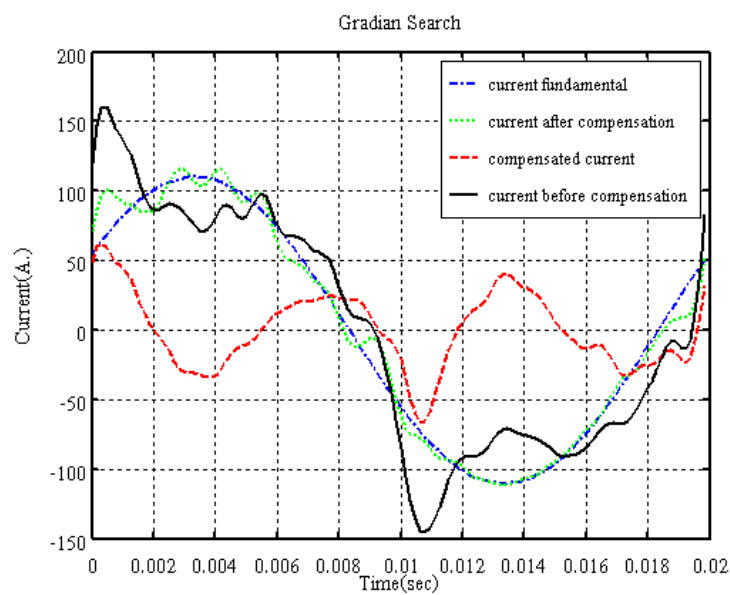
รูปที่ 6.24 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 2 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่



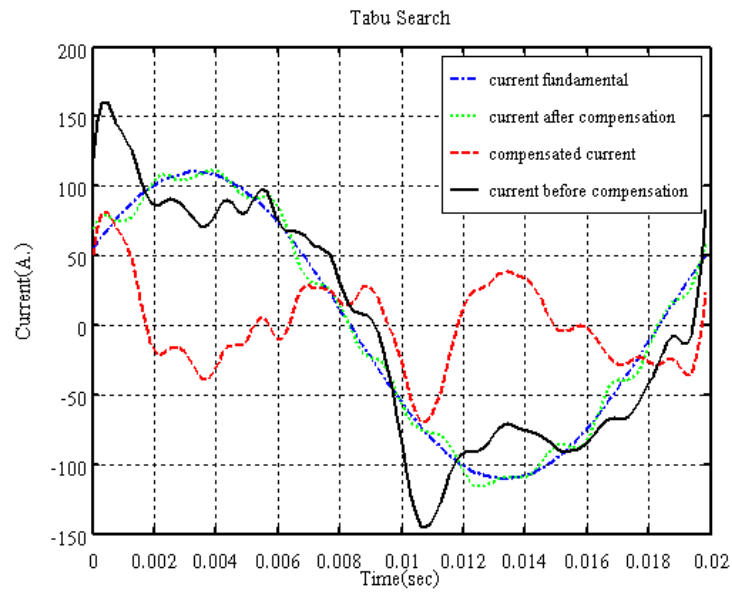
รูปที่ 6.25 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 2 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม



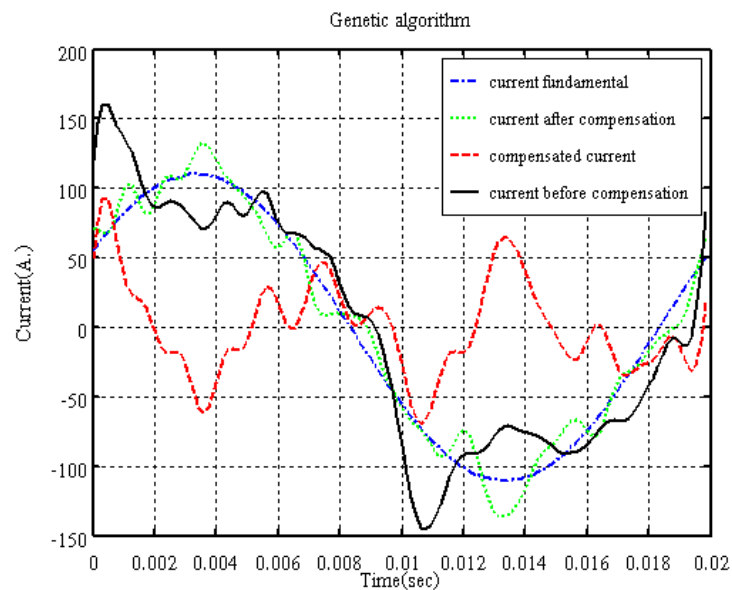
รูปที่ 6.26 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง Power Harmonics Analyzer (Fluke 41B) ณ อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



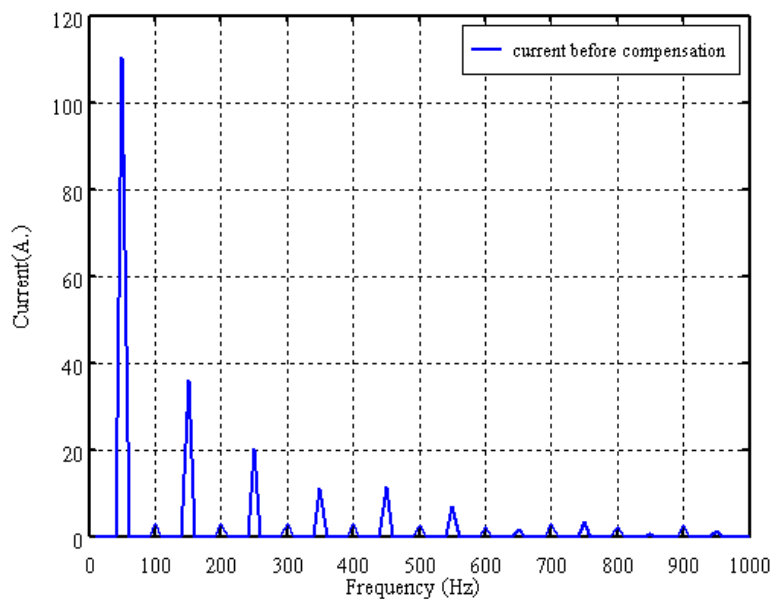
รูปที่ 6.27 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์



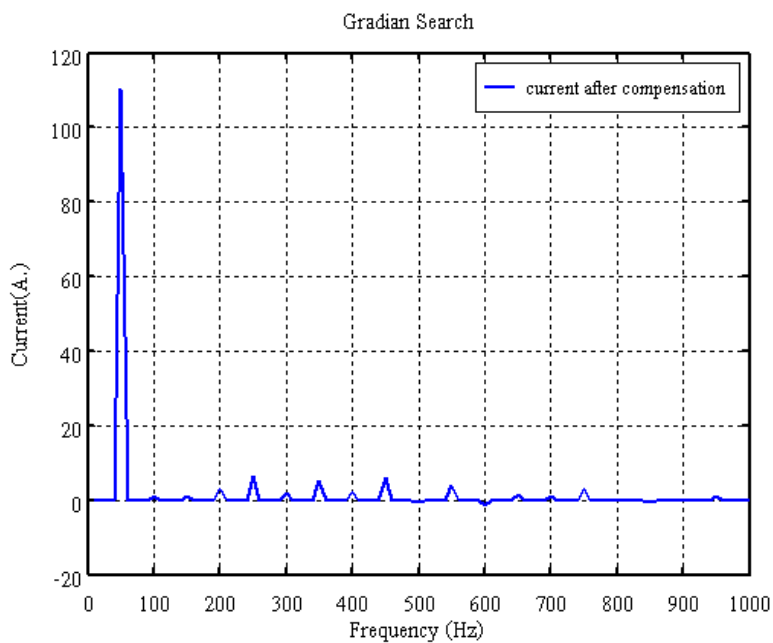
รูปที่ 6.28 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบตราบานู



รูปที่ 6.29 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

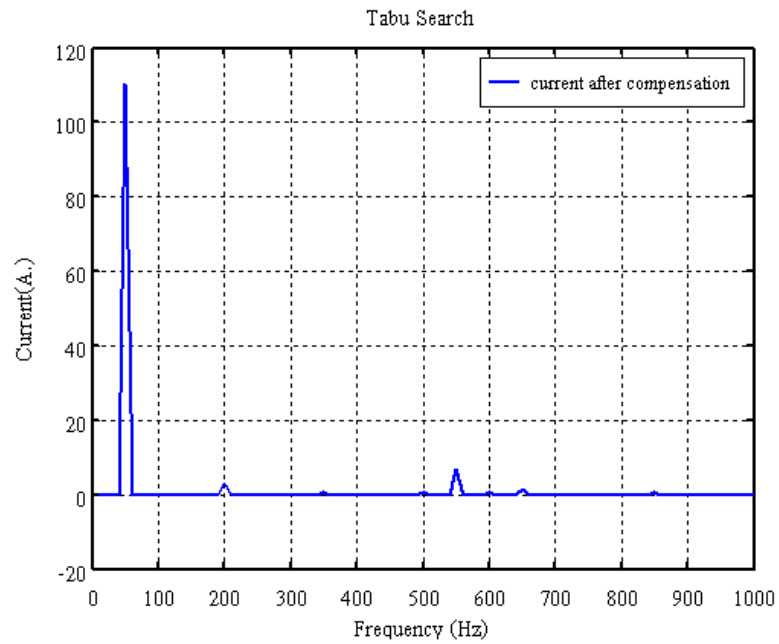


รูปที่ 6.30 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 ก่อนการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิก

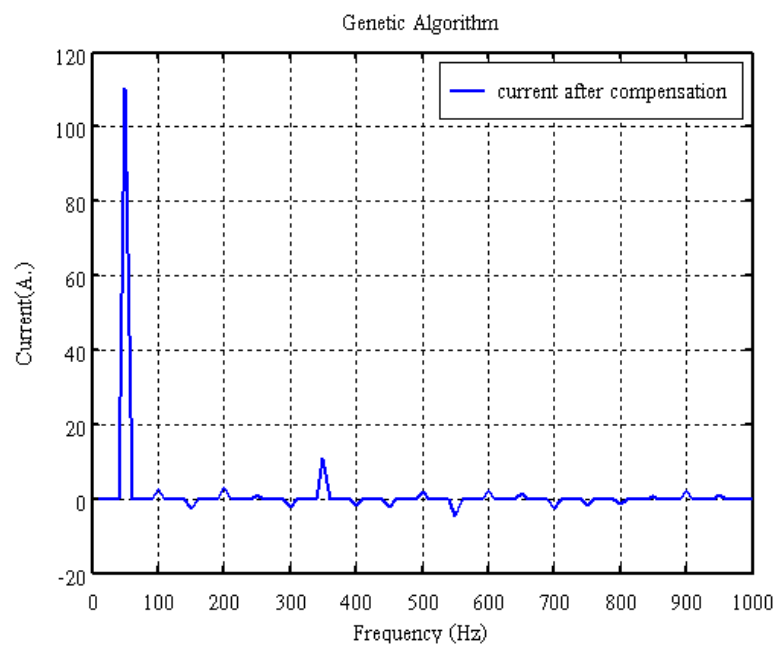


รูปที่ 6.31 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์





รูปที่ 6.32 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบดาบ



รูปที่ 6.33 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 3 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตาม และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

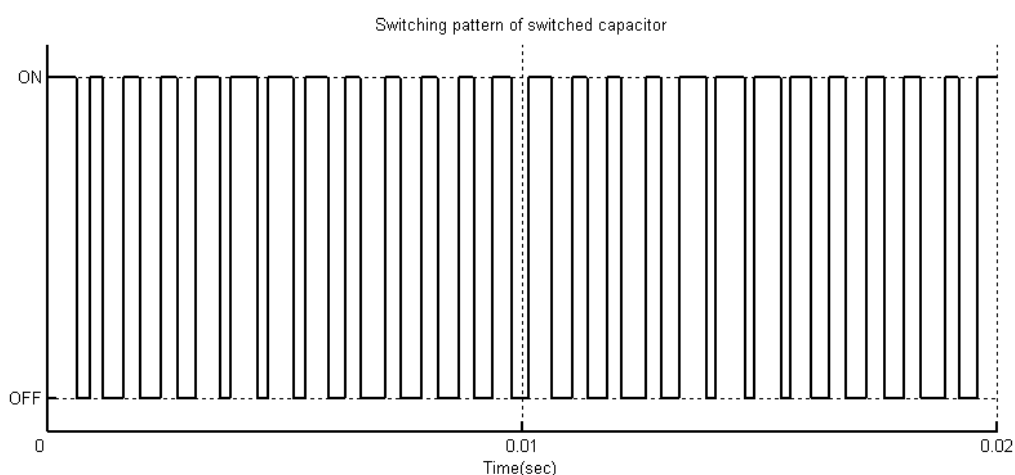
ตัวชี้วัด	สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบ		
			เกรเดียนต์	ตาม	จินเนติกอัลกอริทึม
THD <sub>1</sub> (%)	ตัวอย่างที่ 1	51.69	4.29	6.03	16.74
	ตัวอย่างที่ 2	11.13	0.25	0.55	2.94
	ตัวอย่างที่ 3*	51.30	18.19	6.19	20.60
I(A <sub>rms</sub> )	ตัวอย่างที่ 1	69.62	62.80	62.89	63.53
	ตัวอย่างที่ 2	756.82	750.38	754.83	747.52
	ตัวอย่างที่ 3*	84.36	78.59	78.25	78.99
เวลาที่ใช้ในการประมวลผล			4.18 นาที	4.16 นาที	155 นาที

\* มีการเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นของรูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ ของการค้นหาทั้ง 3 วิธี

จากตารางที่ 6.4 เมื่อพิจารณาค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณกระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาต่างๆ นั้นจะสังเกตได้ว่า ในกรณีใช้วิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ จะให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่น้อยกว่าวิธีการค้นหาแบบตาม และวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1 และ 2 แต่ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 ให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมสูงขึ้น เนื่องจากได้มีการปรับค่าเริ่มต้นของรูปแบบการสวิตช์ จะเห็นได้ว่าการค้นหาแบบเกรเดียนต์ มีการกำหนดค่าเริ่มต้นของรูปแบบการสวิตช์ที่ใกล้เคียงคำตอบ จึงให้ค่าคำตอบที่ถูกต้องสูงแต่ถ้ากำหนดค่าเริ่มต้นของรูปแบบการสวิตช์ที่ไม่เหมาะสมแล้วจะให้ค่าคำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนสูงเช่นกัน หรือกล่าวได้ว่าการค้นหาแบบเกรเดียนต์นั้นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดถูกจำกัดด้วยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น ในกรณีใช้วิธีการค้นหาแบบตามจะให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมสูงกว่าการค้นหาแบบเกรเดียนต์เล็กน้อยในสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวอย่างที่ 1 และ 2 แต่ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวอย่างที่ 3 การค้นหาแบบตามให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมต่ำสุด จึงกล่าวได้ว่าวิธีการค้นหาแบบตามให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีการแบบเกรเดียนต์ ในกรณีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมนั้นจะให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่สูงกว่าวิธีการค้นหาอื่นๆ แต่วิธีการค้นหาแบบจินเนติกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นของรูปแบบการสวิตช์ โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นของรูป

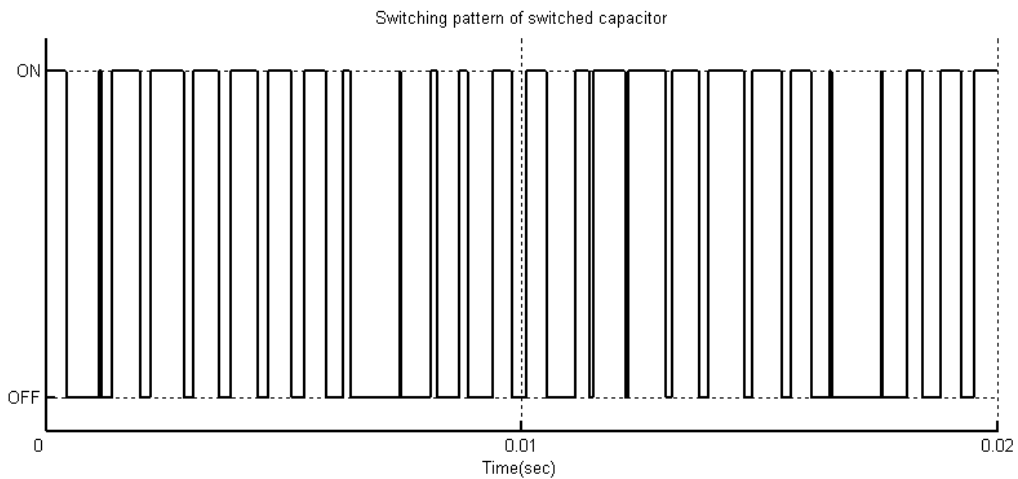
แบบการสวิตช์ การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมยังคงให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกใกล้เคียงค่าเดิม จึงกล่าวได้ว่าวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมจะไม่ถูกจำกัดด้วยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น แต่สามารถเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดวงกว้างได้ เนื่องจากการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากจึงไม่เหมาะกับการค้นหาที่มีพารามิเตอร์หลายๆ ตัว พิจารณาค่ากระแสอาร์เอ็มเอส เมื่อมีการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาทั้ง 3 แบบ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสของระบบจะมีค่าลดลง จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นดังตารางที่ 6.4 จึงสรุปได้ว่าวิธีที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุในการสร้างกระแสชดเชยของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุนั้นคือวิธีการค้นหาแบบตามู ซึ่งได้แสดงรูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเพื่อชดเชยสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 6.34, 6.35 และ 6.36 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลของสัญญาณตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุเปรียบเทียบกับมาตรฐาน PRC-PQG-01/1998 และมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเทียบกับมาตรฐาน PRC-PQG-01/1998 สัญญาณตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างก่อนการชดเชยมีค่ากระแสฮาร์มอนิกเกินกว่ามาตรฐานแต่เมื่อทำการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ โดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมแล้ว ค่ากระแสฮาร์มอนิกของสัญญาณตัวอย่างทั้ง 3 มีค่าลดลงต่ำกว่ามาตรฐานดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.5 เมื่อเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 จะสังเกตได้ว่าในการค้นหาทั้ง 3 แบบนั้นยังไม่สามารถที่จะสร้างกระแสชดเชยเพื่อกำจัด

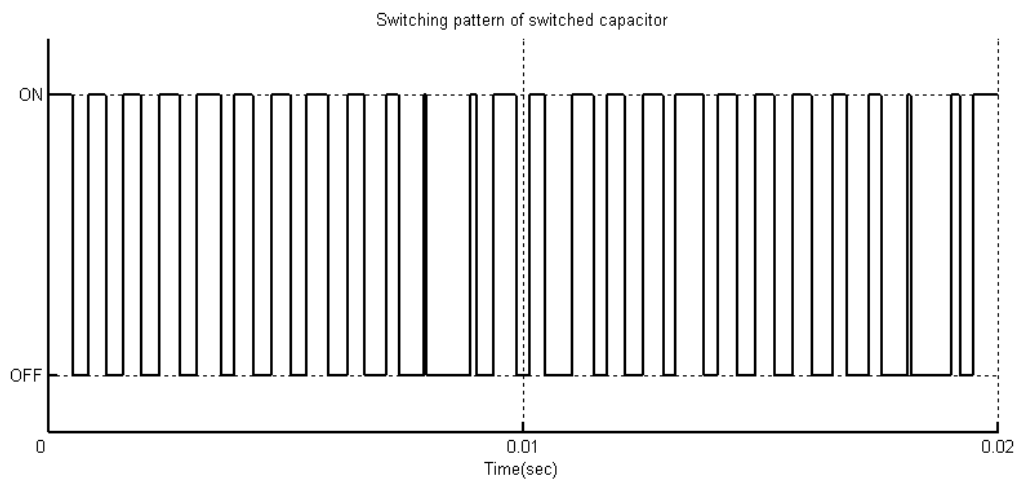


รูปที่ 6.34 รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกเพื่อชดเชยสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู

กระแสฮาร์โมนิกให้ต่ำกว่ามาตรฐานในทุกอันดับฮาร์โมนิกได้เหลือเพียงฮาร์โมนิกอันดับคู่บางอันดับเท่านั้น เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วการค้นหาทั้ง 3 แบบสามารถกำจัดฮาร์โมนิกได้ตามมาตรฐานที่กำหนด ดังตารางที่ 6.6



รูปที่ 6.35 รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์โมนิกเพื่อชดเชยสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 2 ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม



รูปที่ 6.36 รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์โมนิกเพื่อชดเชยสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกตัวอย่างที่ 3 ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน PRC-PQG-01/1998 ( $I_h A_{rms}$ )

ลำดับฮาร์โมนิก		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
PRC-PQG-01/1998 (PCC=0.4 kV)		-	48.00	34.00	22.00	56.00	11.00	40.00	9.00	8.00	7.00	19.00	6.00	16.00	5.00	5.00	5.00	6.00	4.00	6.00
สัญญาณ ฮาร์โมนิก ตัวอย่างที่ 1	ก่อนชดเชย	88.75	3.75	39.07	4.69	3.43	3.12	7.18	3.44	10.94	3.13	0.63	3.13	2.81	2.50	0.94	2.81	0.31	2.81	0.31
	หลังชดเชยด้วย GS	88.75	0.21	1.04	0.49	1.23	0.57	0.76	0.50	0.37	0.49	-0.25	0.19	-0.32	-0.49	-0.25	0.19	0.10	-0.22	0.22
	หลังชดเชยด้วย TS	88.75	3.75	0.06	0.02	3.43	-0.09	-0.07	-0.02	-0.07	2.28	0.63	-0.01	0.14	-0.03	0.00	-0.01	-0.08	-0.09	0.31
	หลังชดเชยด้วย GA	88.75	-3.62	0.79	4.69	3.43	2.32	-3.98	0.71	-2.48	2.03	0.63	-0.73	0.23	2.50	0.94	0.38	0.31	0.71	0.31
สัญญาณ ฮาร์โมนิก ตัวอย่างที่ 2	ก่อนชดเชย	1067.50	0.62	74.06	1.56	12.81	0.31	14.06	0.62	10.00	0.93	4.37	0.93	3.12	0.93	4.06	0.31	3.12	0.62	1.25
	หลังชดเชยด้วย GS	1067.50	0.04	0.07	0.05	0.33	0.02	0.31	0.11	0.53	-0.06	0.20	-0.04	0.50	-0.03	0.39	-0.03	-0.18	-0.11	0.02
	หลังชดเชยด้วย TS	1067.50	-0.03	0.09	0.07	0.03	0.31	0.29	-0.01	0.04	-0.01	0.10	0.51	0.04	0.03	3.42	-0.02	1.54	0.04	-0.03
	หลังชดเชยด้วย GA	1067.50	-2.37	8.46	-1.14	12.81	0.31	1.09	-3.92	-3.88	0.93	-2.27	-5.87	-3.80	-0.26	-5.71	-1.55	-2.22	0.62	0.70
สัญญาณ ฮาร์โมนิก ตัวอย่างที่ 3	ก่อนชดเชย	110.31	2.81	35.93	3.13	20.00	3.13	10.94	2.81	11.25	2.50	6.88	2.19	1.56	3.12	3.44	2.19	0.63	2.50	1.25
	หลังชดเชยด้วย GS	110.31	1.22	1.12	3.13	6.42	2.07	5.21	2.42	5.92	-0.69	3.93	-1.39	1.33	0.97	2.95	0.46	-0.59	0.15	1.25
	หลังชดเชยด้วย TS	110.31	0.05	0.01	3.13	0.01	0.01	0.63	0.00	0.05	0.57	6.88	0.48	1.56	0.01	0.00	0.01	0.48	-0.04	0.13
	หลังชดเชยด้วย GA	110.31	2.81	-2.74	3.13	0.96	-2.28	10.94	-1.65	-2.15	1.81	-4.53	2.19	1.56	-2.42	-1.94	-1.17	0.63	2.50	1.25

PRC-PQG-01/1998: ข้อกำหนดคกฏเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม กฟผ. กฟภ. กฟน.

GS: การค้นหาแบบเกรเดียนต์ (Gradient search)

TS: การค้นหาแบบตาบู่ (Tabu search)

GA: การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm)

$I_{sc}$ : กระแสลัดวงจรที่จุดต่อร่วม (PCC: Point of Common Coupling)

$I_L$ : ค่ากระแสที่วัดในช่วงผู้ใช้ไฟฟ้ามีความต้องการใช้พลังงานสูงสุดในเวลา 15 นาที

$I_h$ : กระแสฮาร์โมนิกในแต่ละอันดับ (Individual harmonic current distortion)

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ( $\%I_h/I_1$ )

ลำดับฮาร์โมนิก		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
IEEE Std 519-1992 ( $50 < I_{sc}/I_L < 100$ )		-	2.50	10.00	2.50	10.00	2.50	10.00	2.50	10.00	2.50	4.50	1.13	4.50	1.13	4.50	1.13	4.00	1.00	4.00
สัญญาณ ฮาร์โมนิก ตัวอย่างที่ 1	ก่อนชดเชย	100.00	4.23	44.02	5.28	3.87	3.52	8.10	3.87	12.32	3.52	0.70	3.52	3.17	2.82	1.05	3.17	0.35	3.17	0.35
	หลังชดเชยด้วย GS	100.00	0.23	1.17	0.55	1.39	0.65	0.86	0.57	0.42	0.55	-0.28	0.22	-0.36	-0.55	-0.28	0.21	0.11	-0.25	0.25
	หลังชดเชยด้วย TS	100.00	4.23	0.07	0.02	3.87	-0.10	-0.08	-0.03	-0.07	2.57	0.70	-0.01	0.16	-0.03	0.00	-0.01	-0.09	-0.10	0.35
	หลังชดเชยด้วย GA	100.00	-4.08	0.88	5.28	3.87	2.61	-4.49	0.80	-2.79	2.28	0.70	-0.82	0.25	2.82	1.05	0.43	0.35	0.80	0.35
สัญญาณ ฮาร์โมนิก ตัวอย่างที่ 2	ก่อนชดเชย	100.00	0.06	6.94	0.15	1.20	0.03	1.32	0.06	0.94	0.09	0.41	0.09	0.29	0.09	0.38	0.03	0.29	0.06	0.12
	หลังชดเชยด้วย GS	100.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.05	-0.01	0.02	0.00	0.05	0.00	0.04	0.00	-0.02	-0.01	0.00
	หลังชดเชยด้วย TS	100.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.32	0.00	0.14	0.00	0.00
	หลังชดเชยด้วย GA	100.00	-0.22	0.79	-0.11	1.20	0.03	0.10	-0.37	-0.36	0.09	-0.21	-0.55	-0.36	-0.02	-0.53	-0.14	-0.21	0.06	0.07
สัญญาณ ฮาร์โมนิก ตัวอย่างที่ 3	ก่อนชดเชย	100.00	2.55	32.58	2.83	18.13	2.83	9.91	2.55	10.20	2.27	6.23	1.99	1.41	2.83	3.11	1.99	0.57	2.27	1.13
	หลังชดเชยด้วย GS	100.00	1.11	1.01	2.83	5.82	1.88	4.72	2.20	5.37	-0.63	3.56	-1.26	1.20	0.88	2.68	0.42	-0.54	0.13	1.13
	หลังชดเชยด้วย TS	100.00	0.04	0.01	2.83	0.01	0.01	0.57	0.00	0.04	0.52	6.23	0.44	1.41	0.01	0.00	0.00	0.43	-0.04	0.12
	หลังชดเชยด้วย GA	100.00	2.55	-2.49	2.83	0.87	-2.07	9.91	-1.50	-1.95	1.64	-4.11	1.99	1.41	-2.20	-1.76	-1.06	0.57	2.27	1.13

GS: การค้นหาแบบเกรเดียนต์ (Gradient search)

TS: การค้นหาแบบตราบู (Tabu search)

GA: การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm)

$I_{sc}$ : กระแสลัดวงจรที่จุดต่อร่วม (PCC: Point of Common Coupling)

$I_L$ : ค่ากระแสที่วัดในช่วงผู้ใช้ไฟฟ้ามีความต้องการใช้พลังงานสูงสุดในเวลา 15 นาที

$I_h$ : กระแสฮาร์โมนิกในแต่ละอันดับ (Individual harmonic current distortion)

$I_1$ : กระแสฮาร์โมนิกในอันดับที่ 1

จากการทดสอบการสร้างกระแสชดเชยของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุของสัญญาณตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่างนั้นเป็นโหลดที่ได้จากการตรวจวัดของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อนำวงจรกรองฮาร์มอนิกมาใช้ชดเชยความเพี้ยนฮาร์มอนิกกับโหลดประเภทเครื่องแปลงผันกำลัง โดยจำลองผลสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์แปลงผันกำลัง 2 ชนิดคือ สัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟสเป็นสัญญาณตัวอย่างที่ 4 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก) และสัญญาณที่ได้จากการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟสเป็นสัญญาณตัวอย่างที่ 5 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข) ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 6.7 และรูปที่ 6.37 ถึงรูปที่ 6.52

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกของสัญญาณตัวอย่างที่ 4 และสัญญาณตัวอย่างที่ 5 ด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตาบ และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

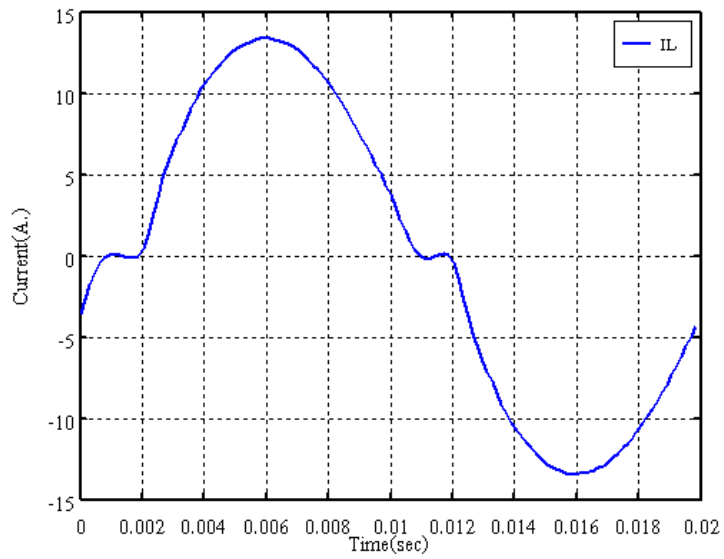
ตัวชี้วัด	สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบ		
			เกรเดียนต์	ตาบ	จินเนติกอัลกอริทึม
THD <sub>I</sub> (%)	ตัวอย่างที่ 4	11.1724	7.4025	1.18765	6.10761
	ตัวอย่างที่ 5	167.9	31.77	6.21	8.38
I (A <sub>rms</sub> )	ตัวอย่างที่ 4	9.15263	9.44569	9.05538	9.1475
	ตัวอย่างที่ 5	8.42211 A <sub>rms</sub> (5.4 A <sub>DC</sub> )	5.575 (A <sub>DC</sub> )	5.432 (A <sub>DC</sub> )	5.436 (A <sub>DC</sub> )
VA (volt-amp)	ตัวอย่างที่ 4	189.698	195.772	187.682	189.592
	ตัวอย่างที่ 5	228.093	150.986	147.115	147.236
HF (%)	ตัวอย่างที่ 4	11.11724	27.9928	9.44394	10.6525
	ตัวอย่างที่ 5	118.749	23.678	5.10734	6.52942
PF	ตัวอย่างที่ 4 (0.95102)*	0.945179	0.915853	0.955329	0.945709
	ตัวอย่างที่ 5 (0.7071)*	0.4554	0.6881	0.7062	0.7056

\* ค่าตัวประกอบกำลังสูงสุดในกรณีที่ไม่มีฮาร์มอนิก (มีเพียงองค์ประกอบมูลฐานของกระแส)

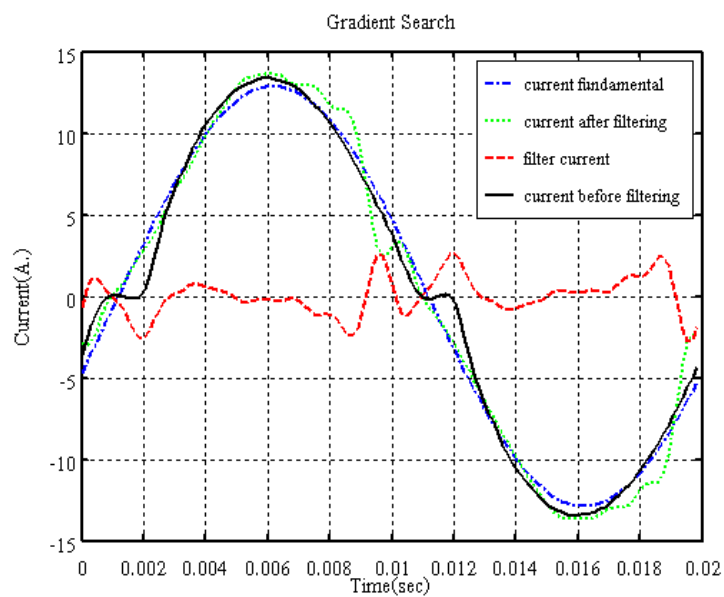
จากตารางที่ 6.7 เมื่อพิจารณาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของสัญญาณในสัญญาณตัวอย่างที่ 4 และสัญญาณตัวอย่างที่ 5 แล้วโดยสัญญาณตัวอย่างที่ 4 เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่มีความถี่มูลฐานเป็น 50 เฮิรตซ์ และสัญญาณตัวอย่างที่ 5 เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสที่เป็นกระแสดรงจากตารางการค้นหาแบบตามูจะทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกโดยให้ค่าความเพี้ยนน้อยที่สุดคือ 1.18765% ในสัญญาณตัวอย่างที่ 4 และ 6.21% ในสัญญาณตัวอย่างที่ 5 เมื่อพิจารณาถึงกระแสอาร์เอ็มเอสในสัญญาณตัวอย่างที่ 4 การค้นหาแบบตามูจะมีค่ากระแสที่น้อยที่สุดคือ  $9.05538 A_{DC}$  ในส่วนสัญญาณตัวอย่างที่ 5 กระแสสัญญาณที่ได้จากการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกแล้วนั้นเป็นกระแสไฟตรง โดยค่ากระแสที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับกระแสไฟตรงของสัญญาณก่อนการชดเชย ในส่วนของค่าโวลต์-แอมแปร์นั้นแสดงถึงค่ากำลังที่โหลดใช้งานโดยในสัญญาณตัวอย่างที่ 4 จะให้ค่าใกล้เคียงกับค่าโวลต์-แอมแปร์ของสัญญาณก่อนการชดเชยทั้ง 3 วิธี ในส่วนของสัญญาณตัวอย่างที่ 5 นั้นการชดเชยทั้ง 3 วิธีให้ค่าโวลต์-แอมแปร์ที่น้อยกว่าค่าโวลต์-แอมแปร์ของสัญญาณก่อนการชดเชยอันเนื่องมาจาก การชดเชยกระแสฮาร์มอนิกทำให้กระแสฮาร์มอนิกลดลงส่งผลให้กระแสโวลต์ลดลงจึงทำให้ค่าโวลต์-แอมแปร์ลดลง ในส่วนของค่าตัวประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Factor: HF)(แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.ฐ.) นั้นเมื่อทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูจะให้ค่าตัวประกอบฮาร์มอนิกลดลงมากที่สุด ในส่วนของค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor: PF)(แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.ฐ.) นั้นจะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกแล้วจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงกับค่าตัวประกอบกำลังในกรณีที่ไม่มีฮาร์มอนิก

ในรูปที่ 6.37 และรูปที่ 6.45 แสดงถึงสัญญาณกระแสตัวอย่างที่ 4 และ 5 ตามลำดับก่อนการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ส่วนในรูปที่ 6.38 ถึงรูปที่ 6.40 และรูปที่ 6.46 ถึงรูปที่ 6.48 แสดงถึงรูปสัญญาณกระแสก่อนและหลังการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตามู และจินเนติกอัลกอริทึม ในส่วนรูปที่ 6.41 ถึงรูปที่ 6.44 และรูปที่ 6.49 ถึงรูปที่ 6.52 แสดงสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสก่อนและหลังการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตามู และจินเนติกอัลกอริทึม

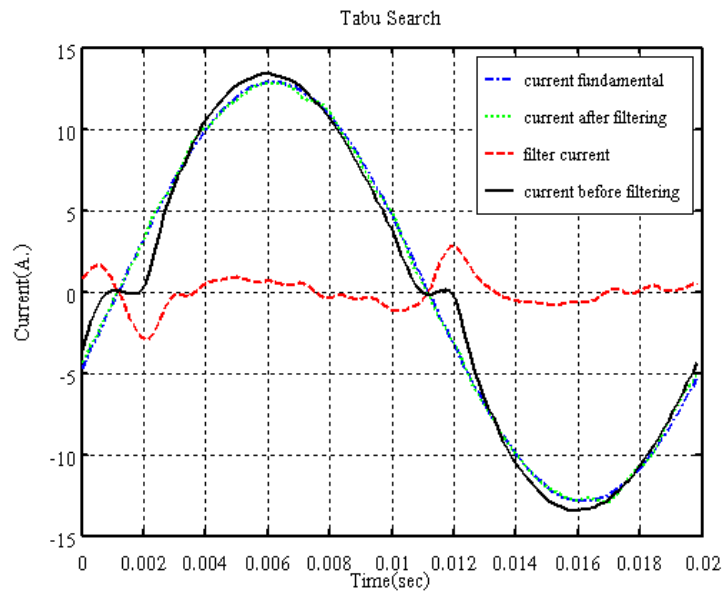




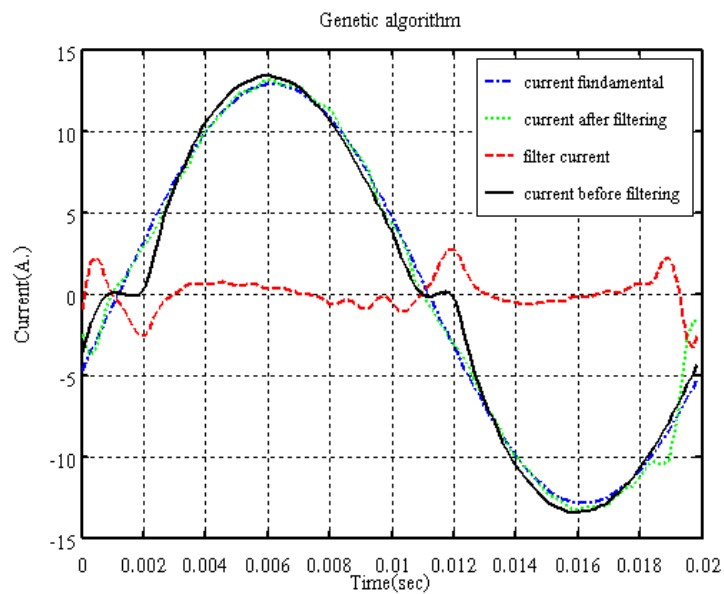
รูปที่ 6.37 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 จากการจำลองผลตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส



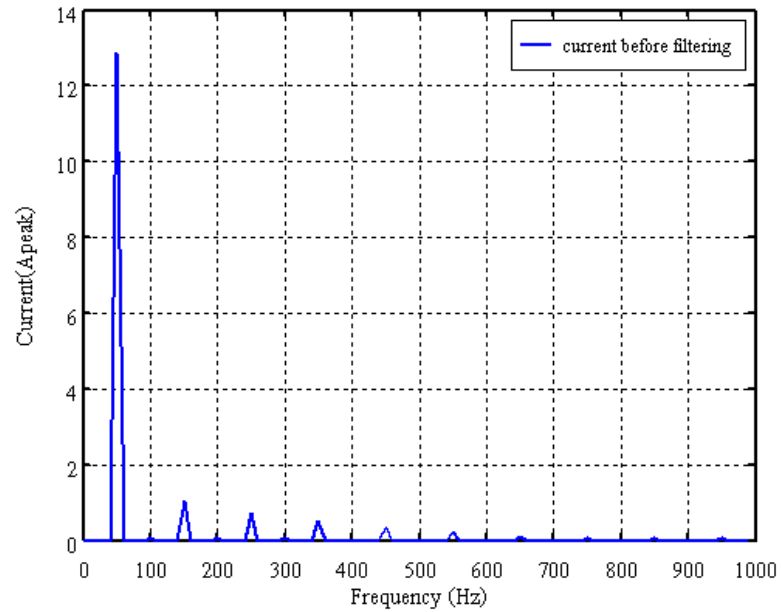
รูปที่ 6.38 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์



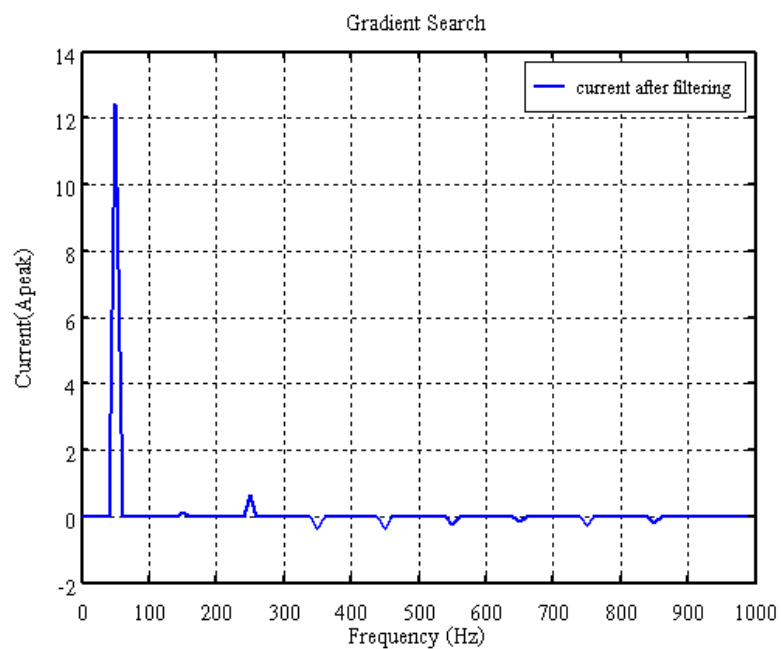
รูปที่ 6.39 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่



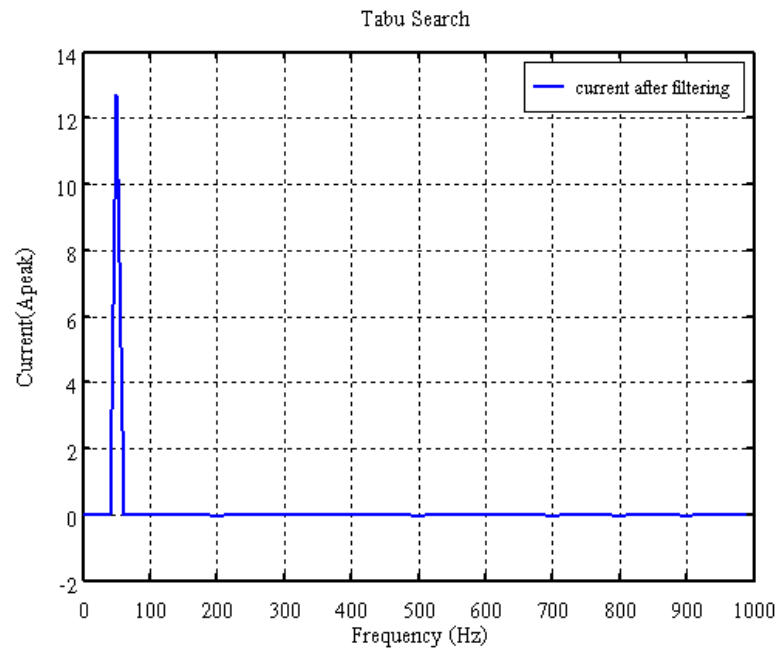
รูปที่ 6.40 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม



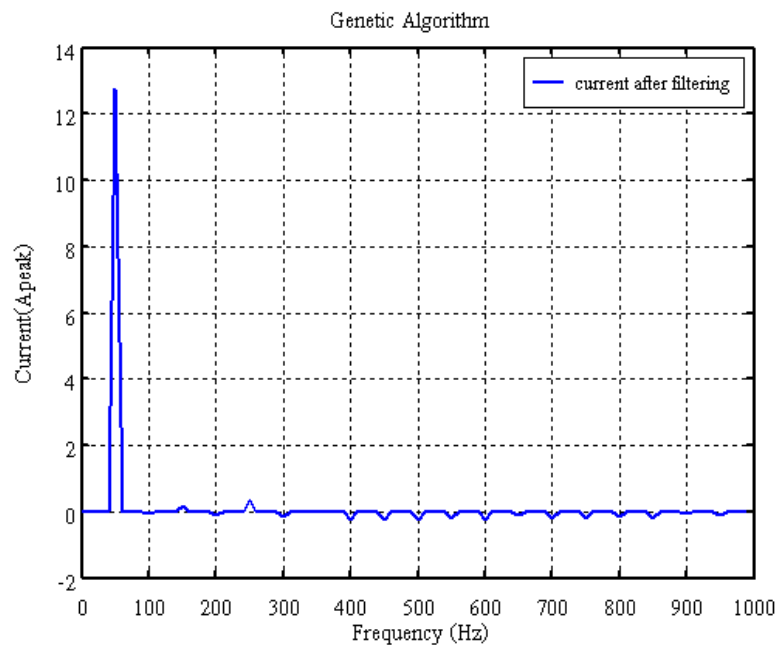
รูปที่ 6.41 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 ก่อนการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิก



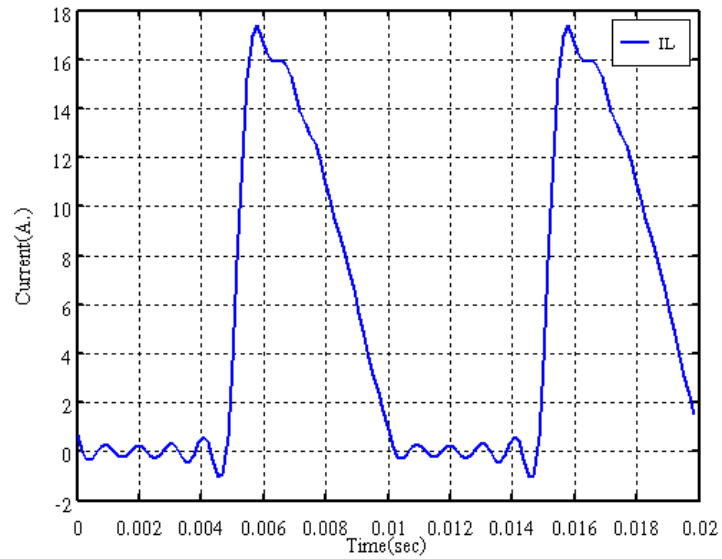
รูปที่ 6.42 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์



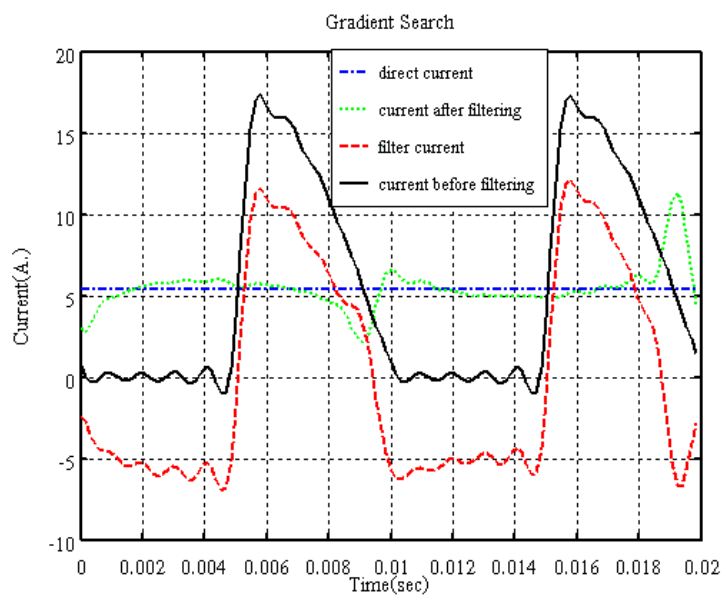
รูปที่ 6.43 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่



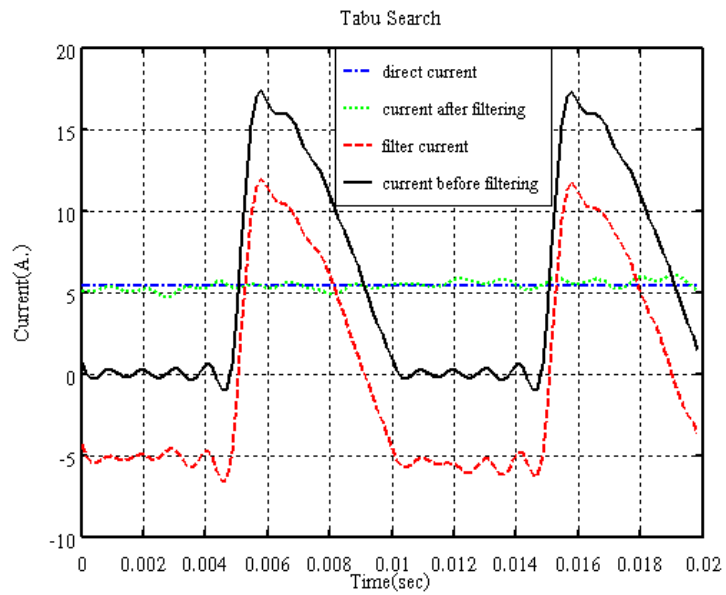
รูปที่ 6.44 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม



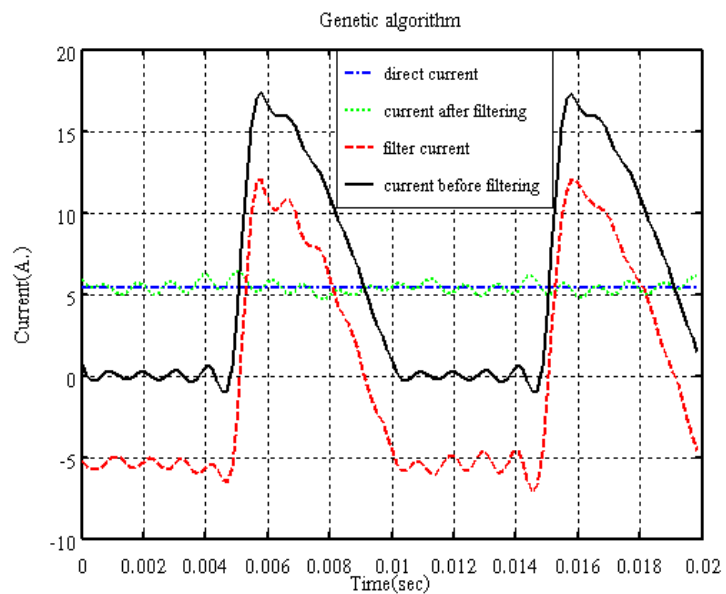
รูปที่ 6.45 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 จากการจำลองผลตัวควบคุมการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส



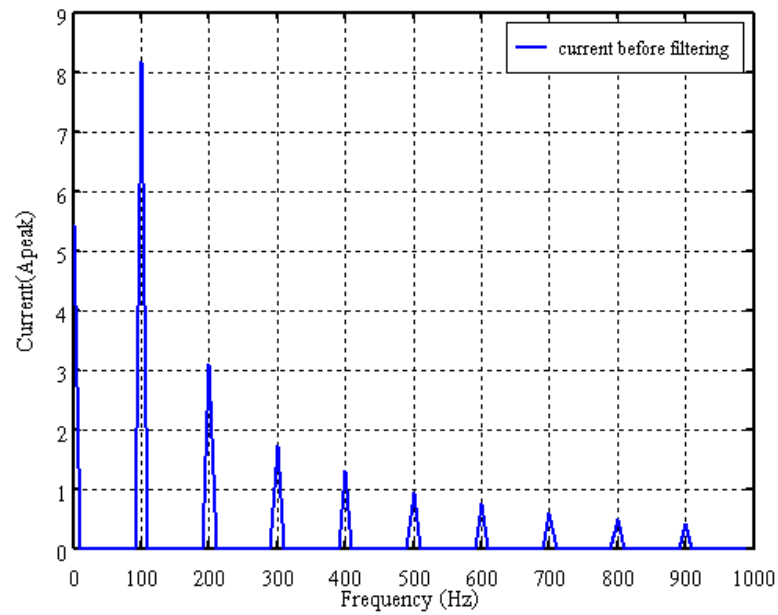
รูปที่ 6.46 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์



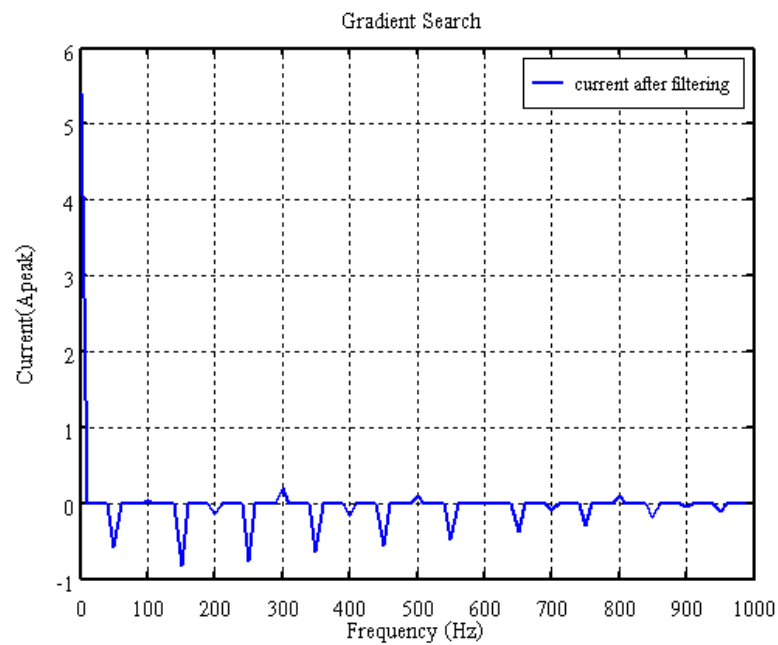
รูปที่ 6.47 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบตราบู



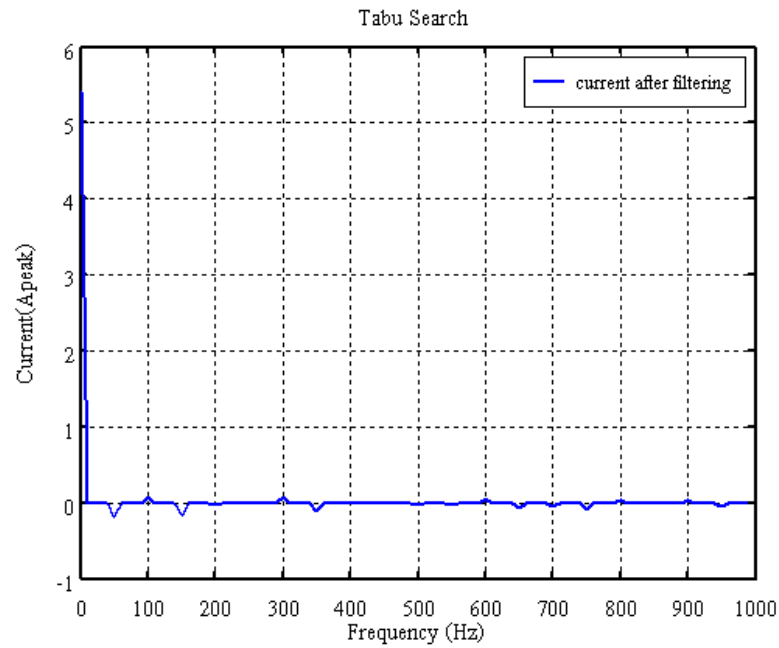
รูปที่ 6.48 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิก โดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม



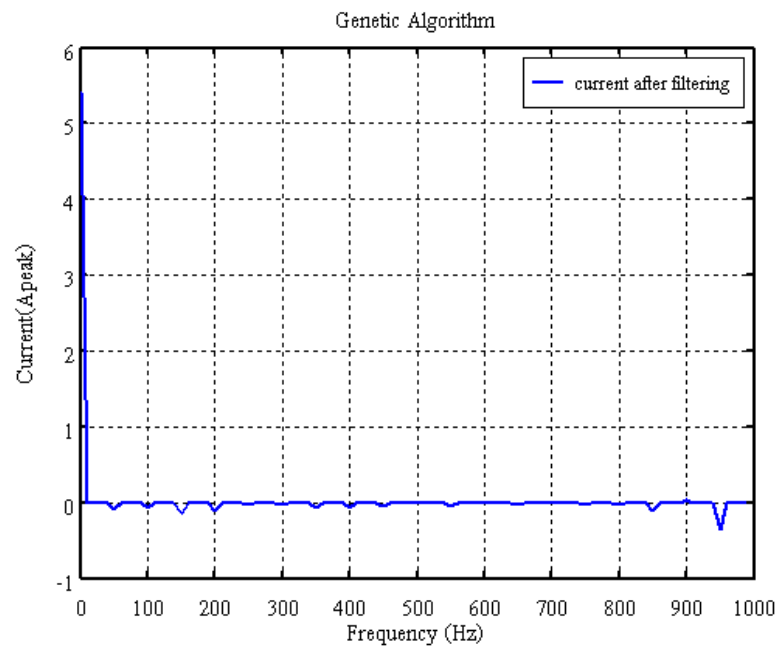
รูปที่ 6.49 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 ก่อนการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิก



รูปที่ 6.50 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์



รูปที่ 6.51 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่



รูปที่ 6.52 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 5 หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองฮาร์มอนิกโดยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม



## 6.9 สรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นในวิทยานิพนธ์ปีที่ 6 นี้ ได้นำเสนอผลการทดสอบการตรวจจับกระแสน้ำมือนิก โดยจำลองสัญญาณกระแสน้ำมือนิกขึ้น เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากชุดตรวจจับกระแสน้ำมือนิกกับสัญญาณกระแสน้ำมือนิกที่สร้างขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชุดตรวจจับกระแสน้ำมือนิกสามารถตรวจจับกระแสน้ำมือนิกได้ถูกต้อง ในส่วนของการทดสอบการวิเคราะห์กระแสน้ำมือนิกนั้น ได้ทำการทดสอบการวิเคราะห์กระแสน้ำมือนิกในกรณีที่ไม่มีและมีสัญญาณรบกวนขาเข้ามารบกวนในระบบด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตาม และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าในกรณีไม่มีสัญญาณรบกวนขาเข้ามารบกวนในระบบ การวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธีนั้นให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก จึงสามารถนำวิธีการวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธี มาใช้ในการวิเคราะห์ได้ แต่ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนขาเข้ามารบกวนระบบ การวิเคราะห์ด้วยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม และการค้นหาแบบตาม ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ฉะนั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม และการค้นหาแบบตาม จึงเหมาะกับการวิเคราะห์สัญญาณกระแสน้ำมือนิกในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนขาเข้ามารบกวนในระบบ ในส่วนสุดท้ายคือการทดสอบการสร้างกระแสน้ำมือนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ โดยในการทดสอบนั้นใช้วิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตาม และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ในการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรองฮาร์มอนิกเพื่อสร้างกระแสน้ำมือนิก ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการค้นหาแบบตามเป็นวิธีที่ดีที่สุดจากวิธีที่ทำการทดสอบ ซึ่งสามารถสร้างกระแสน้ำมือนิกโดยให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณกระแสหลังการชดเชยน้อยกว่าวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ และวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ในกรณีที่รูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุเริ่มต้นของการค้นหาที่มีการเปลี่ยนแปลง

## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการปรับแต่งคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก และการสร้างกระแสชดเชยของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ โดยในส่วนของ การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกนั้นได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของอนุกรมฟูริเยร์ ในส่วนการสร้างกระแสชดเชยของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุนั้นอาศัยการวิเคราะห์ห้วงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผล โดยในการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุเพื่อสร้างกระแสชดเชย ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการค้นหา 3 แบบคือ การค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม เมื่อได้รูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุจากการค้นหาแล้ว นำไปสั่งการสวิตซ์ตัวเก็บประจุต่อไป

#### 7.2 สรุป

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งไว้ทุกประการ มีผลการวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรม ดังนี้ การตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกนั้นสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้ถูกต้องแม่นยำ และการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม โดยค่าความคลาดเคลื่อนรวมเฉลี่ย  $1.70e-27$   $7.64e-5$  และ  $0.599$  ตามลำดับ ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนขาวเข้ามารบกวนในระบบค่าความคลาดเคลื่อนรวมเฉลี่ยเท่ากับ  $119.95$   $65.47$  และ  $10.95$  ตามลำดับ โดยการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึมจะใช้เวลาในการค้นหามากกว่าอีก 2 วิธีมาก เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนและเวลาในการค้นหาจะพบว่า วิธีที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกนั้นคือวิธีการค้นหาแบบตามู ส่วนวิธีอื่นก็ยังมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 หัวข้อ 6.3 ในส่วนของการสร้างกระแสชดเชยของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ ใช้

การหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์ การค้นหาแบบตามู และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม โดยได้ทำการทดสอบกับสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากระบบจริงและสัญญาณที่ได้จากการจำลองผลขึ้น สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดจริงให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกลดลงจาก 51.3 % เหลือเพียง 18.19 % 6.19 % และ 20.60 % ตามลำดับ และความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกลดลงจาก 11.13 % เหลือเพียง 0.25 % 0.55 % และ 2.94 % ตามลำดับ โดยทั้ง 3 วิธีสามารถลดกระแสไฟฟ้าของระบบลงได้จาก 84.36 A เหลือ 78.59 A 78.25 A และ 78.99 A ตามลำดับ และลดกระแสไฟฟ้าของระบบลงได้จาก 756.82 A เหลือ 750.38 A 754.83 A และ 747.52 A ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการลดลงของความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก และเวลาที่ใช้ในการประมวลผล จะพบว่า วิธีที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุนั้นคือ วิธีการค้นหาแบบตามู ส่วนสัญญาณที่ได้จากการจำลองผลของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟสและตัวแปรผันแบบกึ่ง 1 เฟสให้ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกลดลงจาก 11.17% เหลือเพียง 7.4025% 1.18765% และ 6.10761% ตามลำดับ และความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกลดลงจาก 167.9%(เทียบกับกระแสตรง) เหลือเพียง 31.77% 6.21% และ 8.38% ตามลำดับ ผลของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟสและตัวแปรผันแบบกึ่ง 1 เฟสให้ค่ากระแสลดลงจาก 9.15263 A เหลือ 9.05538 A กรณีของการค้นหาแบบตามู และกระแสที่ลดลงจาก 8.42211 A<sub>rms</sub> ให้เหลือเพียงองค์ประกอบกระแสตรงเพียงอย่างเดียว 5.4 A<sub>DC</sub> ซึ่งทั้ง 3 วิธีให้ค่ากระแสตรงมีค่า 5.575 A<sub>DC</sub> 5.432 A<sub>DC</sub> และ 5.436 A<sub>DC</sub> ตามลำดับอีกทั้งให้ค่าโวลต์-แอมแปร์ลดลงจาก 189.698 VA เป็น 187.682 VA ในกรณีของการค้นหาแบบตามูและค่าโวลต์-แอมแปร์ลดลงจาก 228.093 เหลือเพียง 150.986 VA 147.115 VA และ 147.236 VA ตามลำดับ ค่าตัวประกอบฮาร์มอนิกของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟสและตัวแปรผันแบบกึ่ง 1 เฟสลดลงจาก 11.11724% เหลือเพียง 9.44394% ในกรณีการค้นหาแบบตามู และค่าตัวประกอบฮาร์มอนิกลดลงจาก 118.749% เหลือเพียง 23.678% 5.10734% และ 6.52942% ตามลำดับ ในส่วนของค่าตัวประกอบกำลังของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟสและตัวแปรผันแบบกึ่ง 1 เฟสนั้นให้ค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.945179 เป็น 0.955329 ในกรณีการค้นหาแบบตามู โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวประกอบกำลังในกรณีที่ไม่มีฮาร์มอนิกคือ 0.95102 และให้ค่าตัวประกอบกำลังเพิ่มขึ้นจาก 0.4554 เป็น 0.6881 0.7062 และ 0.7056 ตามลำดับ โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวประกอบกำลังในกรณีที่ไม่มีฮาร์มอนิกคือ 0.7071 จากผลการทดสอบสัญญาณที่ได้จำลองผลขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูนั้นเหมาะสมกว่าวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์และการค้นหาแบบจินเนติกในสัญญาณที่จำลองผลขึ้นมาซึ่งได้แสดงผลไว้ในบทที่ 6 หัวข้อ 6.4

### 7.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในการนำวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก และการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ นั้น ต้องอาศัยการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการประมวลผลนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาและความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ Pentium III 733 MHz RAM 256 Mbytes HD 60 Gbytes หากมีการใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูงกว่า จะทำให้การประมวลผลเร็วขึ้น และหากนำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ไปทำงานบนไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรงแล้วจะยิ่งทำให้การทำงานในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก และการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุเร็วขึ้น

2. ในการนำวิธีการค้นหาแบบตาบ และการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม เพื่อใช้ในการหา รูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ นั้นยังให้ผลของค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกสูง แต่ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกนี้ยังอยู่ในพิสัยที่ยอมรับได้ (ตามมาตรฐานของข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับ ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม กฟผ. กฟภ. กฟน.) ฉะนั้นจึงควรมีการปรับปรุงพัฒนา โปรแกรมการค้นหาให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

3. ในการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก และการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ นั้นได้มีการพิจารณาถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 19 เป็นผลให้จำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นมีจำนวนพจน์มาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการประมวลผลมาก ซึ่งในธุรกิจ และอุตสาหกรรมบางประเภทไม่มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาฮาร์มอนิกถึงอันดับที่ 19 อาจพิจารณาเพียงฮาร์มอนิกอันดับที่ 9 ก็เพียงพอ ซึ่งจะทำให้เวลาที่ใช้ในการประมวลผลเร็วขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า. (2541). ข้อกำหนดคกฏเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม. กฟผ. กฟภ. กฟน.
- เจนวิทย์ เหลืองอร่าม และ ปิยวิทย์ เหลืองอร่าม. (2543). การเขียนโปรแกรมสำหรับ Applications ด้วย C/C++. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเกชั่น.
- ชนิดชัย กุลรวรานิชพงษ์. (2542). การทำงานที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้การตัดสวิตช์แบบฟิวส์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สรรค์ธิพงษ์ โหมยิตเกษม. (2539). วงจรกรองกำลังแอกทีฟขนานแบบไฮบริดสำหรับกำจัดฮาร์มอนิก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สันต์ ศรีธรรม์ธำรง. (2541). วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยรีเฟอร์ซีฟดิเอฟที. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2545). จีนเนติกอัลกอริทึม ตอนที่ 1. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 9(1): 69-83.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2545). จีนเนติกอัลกอริทึม ตอนที่ 2 กรณีศึกษา: การค้นหาสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 9(2): 139-146.
- Akagi, H., Kanazawa, Y., and Nabae, A. (1983). Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuit. **Proceedings of IPEC-Tokyo.** :1375-1386.
- Aredes, M., and Watanabe, E.H. (1995). New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters. **IEEE Transactions on Power Delivery.** 10(3):1649-1656.
- Arrillaga, J., Bradley, D.A. and Bodger, P.S. (1985). **Power System Harmonics.** New York: John Willey & Sons, Inc.
- Arsoy, A., Halpin, S.M., Liu, Y., and Paulo, F.R. (1999). Modeling and simulation of power system harmonics [CD-ROM]. **Task Force on Harmonics Modeling and Simulation Harmonic Working Group Transmission & Distribution Committee IEEE Power Engineering Society.**

- Barton, T.H. (1994). **Rectifiers, Cycloconverters, and AC Controllers**. New York: Oxford University Press Inc.
- Bernard, S., and Trochain, G. (1996). Second generation of high power active harmonic conditioner based on the current injection mode. **ICHQP Conf. Rec., Oct 16-18,1996**. :225-234.
- Bland, J.A., and Dawson, G.P. (1991). Tabu search and design optimization. **IEEE Trans. Industrial Electronics**. 23(3): 195-201.
- Bolton, W. (1995). **Fourier series**. Malaysia: Longman scientific & technical.
- Bradley, D.A. (1995). **Power Electronics**. London: Chapman & Hill.
- Chipperfield, A., Fleming, P., Pohlheim, H. and Fonseca, C. (1994). **Genetic Algorithm TOOLBOX For Use with MATLAB**. Department of automatic control and systems engineering. University of Sheffield.
- Darwish, Mos., Darwish, Moh., Mehta, P., and Jimenez, G. (1996). A novel technique for variable-capacitor filter: Part I A.C. current harmonic control. **Power Electronics Congress, 1996. Technical Proceedings. CIEP '96., V IEEE International**. :194-199.
- Darwish, Moh., and Mehta, P. (1990). Switched-capacitor technique for power electronic applications. **Power Electronics Specialists Conference, 1990. PESC'90 Record., 21<sup>st</sup> Annual IEEE**. :698-704.
- Erickson, R.W. (1997). **Fundamentals of power electronics**. New York: Chapman & Hill.
- Ghausi, M.S., and Laker, K.R. (1981). **Modern filter design, Active RC and Switched Capacitor**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
- Glover, F. (1993). **Tabu Search, in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems**. C.R. Reeves ed., John Willey & Sons, Inc.
- Goody, R.W. (1998). **MicroSim<sup>TM</sup> PSpice for Windows Volum I: DC, AC, and Devices & Circuits**. New Jersey: Prentice-Hill, Inc.
- IEEE Standard 519-1992. (1993). IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. **IEEE**. New York: IEEE.
- IEEE Standard 1159-1995. (1995). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. **IEEE**. New York: IEEE

- Koozehkani, Z.D., Mehta, P., and Darwish, Moh. (1996). An active filter for retrofit applications. **Power Electronics and Variable-Speed Drives, 23-25 September 1996, International Conference, Nottingham, UK:** 150-155
- Kulworawanichpong, T., and Sujitjorn, S. (2002). Optimal power flow using tabu search. **IEEE Power Engineering Review.** 22(6):37-40.
- Luenberger, D.G. (1973). **Introduction to linear and non-linear programming.** Addison-Wesley.
- Mantawy, A.H., Abdel-Magid, Y.L., and Selim, S.Z. (1998). Unit commitment by tabu search. **Proc. IEE Generation, Transmission, and Distribution.** 145(1): 56-64.
- Mehta, P., Darwish, Moh., and Thomson, T. (1990). Switched-capacitor filters. **IEEE Transaction on power electronics.** 5(3) : 331-336.
- Mehta, P., Darwish, Moh., and Thomson, T. (1988). Variable characteristic filters. **Power Electronics and Variable-Speed Drives, Third International Conference on.** : 424-427.
- Miller, J.V.A. and Dewe, M.B. (1993). The application of multi-rate digital singaling techniques to the measurement of power system harmonic levels. **IEEE Transaction on Power Delivery.** 8(2) : 531-538.
- Nanaumi, N., Kuramoti, S., and Yano, M. (1996). Comparison of versatile harmonics current compensation and specific harmonic number current compensation. **Conf. Rec. of Japan IAS.** :407-410.
- Peng, F.Z. (2001). Harmonic sources and filtering approaches. **IEEE Industry Applications Magazine.** 7(4):18-25.
- Peng, F.Z., Kohata, M., and Akagi, H. (1992). Compensation characteristic of shunt active and series active filters. **Chinese-Japanese Power Electronics Conference.** :381-387.
- Philip, T.K. (1998). **Elements of power electronics.** New York: Oxford University Press.
- Qi-Wen, Y., Feng, L., Guo-Hong, Z., and Jing-Ping, J. (2000). The application of computational intelligence to fourier transformation. **IEEE Conf. Electronics, Circuits and Systems 2000.** :178-181.
- Rashid, M.H. (1988). **Power Electronics Circuits, Devices, and Applications.** New Jersey: Printice-Hall, Inc.

- Seed, V.V. (2000). **Advanced digital signal processing and noise reduction**. New York: John Willey & Sons, Inc.
- Salem nia, A., and Saadate, S. (1996). Digital control active filter suppressing particular harmonic: numerical simulation and experimentation. **Proceedings of ICHQP-Las Vegas**. :632-636.
- Timothy, A.G. (1991). Harmonic power flow determination using the fast fourier transform. **IEEE Transaction on Power Delivery**. 6(2):530-535.
- Welsh, M., Mehta, P., and Darwish, Moh. (2000). Genetic algorithm and extended analysis optimization techniques for switched capacitor active filter — Comparative study. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**. 147(1) : 21-26.
- Yousin, T., and Wu, A.Y. (2001). Harmonics and system natural frequencies. **Cement Industry Technical Conference, IEEE-IAS/PCA 2001**. :51-58.



ภาคผนวก ก

โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้ในการควบคุมตรวจจับกระแสน้ำมือนิก

```

#####
// โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้ในการควบคุมตรวจสอบกระแสฮาร์โมนิก
// โดย ชุชาติ วุฒิเนตรเนตริรักษ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

#include <dos.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <time.h>

#define COM1 0x03F8
#define Ask_Command 0x01 // Ask Command is 01H
#define Switch_Command 0x02 // Data for Switch Command is 02H

void Serial_Init(void);
void Data_Condition(int xData[130]);
void Data_Save(int xData[130]);
void Measure_Vpp(int xData[130]);
int Serial_DataIn(int xData[130]);
int SData[130];
main(void)
{
    int jj;
    Serial_Init(); // เรียกฟังก์ชัน Serial_Init
    do
    {
        printf("=====\n");
        printf("= Just Moment for transfer data =\n");
        printf("=====\n");
        jj = Serial_DataIn(SData); // รับข้อมูลจากพอร์ตอนุกรม
        printf(" #Data input =%3d Byte\n",jj);
        if (jj==129) // ตรวจสอบการรับข้อมูลว่าครบหรือไม่
        {
            Data_Condition(SData); // ฟังก์ชัน Swap ข้อมูล
            Data_Save(SData); // ฟังก์ชันบันทึกข้อมูลลงไฟล์
            Measure_Vpp(SData); // ฟังก์ชันแสดงผลของข้อมูลที่ได้รับ
        }
        else printf("\n= Rx End of time =\n"); // แสดงกรณีรับข้อมูลไม่ครบ
    } while (!(jj==129)||(jj==129)); // ตรวจสอบการรับข้อมูลว่าครบหรือไม่
    delay(2000); // รอเวลาเพื่อการแสดงผลก่อนจบโปรแกรม
}

void Serial_Init(void) // ฟังก์ชันทำหน้าที่กำหนดค่าเริ่มต้นของพอร์ตอนุกรม
{
    outport(COM1+1,0x00); //Turn off Interrupts
    outport(COM1+3,0x80); //SET DLAB ON
    outport(COM1+0,0x0c); //Set Baud rate 9,600 BPS (Divisor Latch Low Byte)
    outport(COM1+1,0x00); //Set Baud rate (Divisor Latch High Byte)
    outport(COM1+3,0x03); //8 Bits, No parity, 1 Stop Bit
}

int Serial_DataIn(int xData[130])
{
    char in;
    int Temp,ii = 1;
    clock_t t_start, t_sec;
    t_start = clock(); // เริ่มนับเวลาในการรับข้อมูล
    outport(COM1,Ask_Command); // เริ่มการรับข้อมูล
}

```

```

do
{
    in = inport(COM1+5);
    if (in&1)
    {
        xData[ii] = inport(COM1)& 0x00ff; // รับข้อมูลจากพอร์ตอนุกรมไปไว้ในตัวแปร xData
        ii++;
    }
    t_sec = (clock()-t_start)/CLK_TCK; // คำนวณเวลาในการรับข้อมูล
} while((ii!=129)&(t_sec<0.75)); // ตรวจสอบเงื่อนไขการรับข้อมูลครบหรือไม่ และเวลาในการรับข้อมูล
return(ii);
}

void Data_Condition(int xData[130]) // ฟังก์ชัน Swap ข้อมูลเพื่อจำแนกข้อมูลที่มีเครื่องหมายลบ
{
    int ii;
    for(ii=1; ii<=128; ii++)
    {
        if ((xData[ii]>>7)==1) xData[ii]=xData[ii]|0xf80;
        xData[ii] = xData[ii]*2;
    }
}

void Measure_Vpp(int xData[130]) // ฟังก์ชันแสดงผลของข้อมูลที่รับจากพอร์ตอนุกรม
{
    int ii,min,max;
    min = 0xffff;
    max = 0;
    for(ii=1; ii<=128; ii++)
    {
        if (xData[ii]<min) min = xData[ii];
        if (xData[ii]>max) max = xData[ii];
    }
    printf(" #Data Max = %6.3f\n",max*5.0/255.0);
    printf(" #Data Min = %6.3f\n",min*5.0/255.0);
    printf(" #Data Vpp = %6.3f\n", (max-min)*5.0/255.0);
    printf(" #Data RMS = %6.3f\n", (max-min)*0.707/2*5/255);
}

void Data_Save(int xData[130]) // บันทึกข้อมูลที่ี้กลงในไฟล์ dataI.dat
{
    int jj;
    double aaa[128];
    for(jj=1; jj<=128; jj++)
    {
        aaa[jj-1]=xData[jj]*5.0/255.0;
    }
    FILE *fp1;
    fp1=fopen("dataI.dat","wb"); // เปิดไฟล์ชื่อ dataI.dat เป็นชนิดไบนารี
    if (fp1== NULL) fprintf(stderr, "Cannot open input file.\n"); // ตรวจสอบว่าเปิดไฟล์ได้หรือไม่
    fwrite(&aaa,sizeof(double),128,fp1); // เขียนข้อมูลลงไฟล์
    fclose(fp1); // ปิดไฟล์
    printf("\n\n= Write File Complete =\n\n");
}

```

ภาคผนวก ข

โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม

```

#####
// โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม
// โดย ชูชาติ วุฒินทรเนติรักษ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

#####          กำหนดเลขเดอริไฟล์          #####
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include <dos.h>
#include <iostream.h>
#include <fstream.h>
#include <stdlib.h>
#####          กำหนดฟังก์ชันที่ใช้งานในโปรแกรม          #####
void SearchParameter(int,char);          // ฟังก์ชัน SearchParameter ใช้ในการค้นหาสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ (A, B)
double find_step_size(double);          // ฟังก์ชัน find_step_size ใช้ในการหาขนาดของการเคลื่อนที่
#####          กำหนดค่าตัวแปรคงที่          #####
const int fix_round=3;          // จำนวนครั้งการทำงาน
const int fix_AB=20;          // ขนาดของตัวแปรสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ (A, B)
const int fix_G=128;          // ขนาดของตัวแปรข้อมูลกระแส
const float step_t=0.02/128;          // ตำแหน่งจุดข้อมูลที่พิจารณา
const float end_loop=0.02-step_t;          // ตำแหน่งสุดท้ายของการพิจารณาจุดข้อมูลกระแส
const int size_AB=20;          // ขนาดของตัวแปรฮาร์มอนิก
const int size_x=128;          // ขนาดของตัวแปรข้อมูลกระแส
const int count_max=2000;          // จำนวนรอบการทำงานในหนึ่งครั้ง
const int max_harmonic=19;          // ฮาร์มอนิกสูงสุดที่พิจารณา
const int frequency_max=50;          // ค่าเงื่อนไขความถี่ที่ใช้ในการพิจารณาเกณฑ์ความเป็นคาบ
const int restriction_period=150;          // ค่าเงื่อนไขความถี่ที่ใช้ในการพิจารณาเกณฑ์ความเป็นคาบ
const int max_clear_tabu=5;          // จำนวนครั้งสูงสุดในการ clear tabu
const int neighborhood_size=78;          // ค่าใกล้เคียงค่าตอบที่เป็นไปได้
const int tabu_list_length=78;          // ขนาดของตารางเก็บสถานะความเป็นคาบ
#####          โปรแกรมหลัก          #####
void main()
{ void clrscr(void);          // ล้างหน่วยความจำเดิม
  #####          กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร #####
  int round=0,ant=0;
  char type;
  while(ant<1)          // ตรวจสอบการจบโปรแกรม
  { round++;          // เพิ่มจำนวนครั้งการทำงาน
    type='I';
    SearchParameter(round,type);          // เรียกฟังก์ชัน SearchParameter
    cout<<"input the ant( >0 is end)="; cin>>ant;          // สอบถามการทำงานต่อเนื่อง
  }
}
#####          ฟังก์ชัน SearchParameter          #####
void SearchParameter(int round,char type)
{ //กำหนดค่าชนิดของตัวแปร และค่าเริ่มต้น
  int n, i, count, count_best, di_re, j, m, d, f=50, direction, count_ans=0;

```

```

double t,w;
time_t timer; // กำหนดให้มีการนับเวลา
div_t aaa; // กำหนดตัวแปรใช้ในการหาร
int tabu_list[78][3], ran_X, ran_Y, ran_gg0, ran_gg1, gg0, gg1, go_x0, time1, time2, time_ans=0;
double G1[fix_AB], G0[fix_AB], G0_na[fix_AB], G1_na[fix_AB], G0_best[fix_AB], G1_best[fix_AB];
double step_size, G0_old[fix_AB], G1_old[fix_AB], G0_new[fix_AB], G1_new[fix_AB], fun_m[fix_AB];
double fun[fix_G], G[fix_G], G_na[fix_G], low_limit, error_min, err, error_na, error, error_best, pi=M_PI
double fun0[fix_G], A[fix_AB], B[fix_AB], G0_ans[fix_AB], G1_ans[fix_AB], alpha[fix_AB];
if(type=='I'){ error_min=0.01; low_limit=0.04; }
if(type=='V'){ error_min=0.5; low_limit=0.03; }
div_t ran_G0,ran_G1;
randomize(); // ให้มีการสุ่มโดยไม่ซ้ำค่าเดิม
for(n=0;n<=19;n++)
{ G0[n]=0; G1[n]=0; G0_old[n]=0; G1_old[n]=0; G0_na[n]=0; G1_na[n]=0; G0_best[n]=0; G1_best[n]=0; G0_ans[n]=0; G1_ans[n]=0; G0_new[n];
  G1_new[n];
}
w=2*pi*f;
for(i=0;i<=tabu_list_length;i++) { for(n=0;n<=2;n++) { tabu_list[i][n]=0; } } // ทำการเคลียร์ค่าใน tabu list
if(type=='I')
{ FILE *fp_fun; // โหลดข้อมูลกระแสดจากไฟล์ dataI.dat
  fp_fun=fopen("dataI.dat","rb");
  fread(&fun0,sizeof(double),fix_G,fp_fun);
  fclose(fp_fun);
}
else if(type=='V')
{ FILE *fp_fun; // โหลดข้อมูลแรงดันไฟฟ้าจากไฟล์ dataV.dat
  fp_fun=fopen("dataV.dat","rb");
  fread(&fun0,sizeof(double),fix_G,fp_fun);
  fclose(fp_fun);
}

if(round<=1) // ถ้าโปรแกรมทำงานครั้งแรกให้ทำการสุ่มค่าเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์อนุกรม
{ for (n=0;n<=max_harmonic;n++) // ฟังก์ชันของคำตอบ โดย  $a_n = a_1/n$ 
  { if(n==0)
    { if(type=='I') { ran_X=random(30000); } // ทำการสุ่มค่าตั้งแต่ 1 ถึง 30000
      if(type=='V') { ran_X=random(60000); } // ทำการสุ่มค่าตั้งแต่ 1 ถึง 60000
      ran_G0=div(ran_X,1); ran_gg0=ran_G0.quot/1; // ทำให้เป็นทศนิยม 2 ตำแหน่ง
      G0[n]=ran_gg0/100.0; G0_old[n]=G0[n];
    }
    else if(n==1)
    { if(type=='I') { ran_X=random(60000); ran_Y=random(60000); } // ทำการสุ่มค่าตั้งแต่ 1 ถึง 60000
      if(type=='V') { ran_X=random(60000); ran_Y=random(60000); } // ทำการสุ่มค่าตั้งแต่ 1 ถึง 60000
      ran_G0=div(ran_X,1); ran_G1=div(ran_Y,1); // ทำการหารด้วย 1
      ran_gg0=ran_G0.quot/1; ran_gg1=ran_G1.quot/1; // ทำให้เป็นจำนวนเต็ม
      G0[n]=ran_gg0/100.0; G1[n]=ran_gg1/100.0; // ทำให้เป็นทศนิยม 2 ตำแหน่ง
      G0_old[n]=G0[n]; G1_old[n]=G1[n];
    }
    else
    { gg0=(G0[1]/n)*100; gg1=(G1[1]/n)*100;
      G0[n]=gg0/100.0; G1[n]=gg1/100.0; // ทำให้เป็นทศนิยม 2 ตำแหน่ง
    }
  }
}

```

```

        G0_old[n]=G0[n];      G1_old[n]=G1[n];
    }
    // แสดงผลค่าที่ได้จากการสุ่ม
    if(type=='T') { cout<<"Imx["<<n<<"]tis "<<G0_old[n]<<" \t Imy["<<n<<"]tis "<<G1_old[n]; }
    if(type=='V') { cout<<"Vmx["<<n<<"]tis "<<G0_old[n]<<" \t Vmy["<<n<<"]tis "<<G1_old[n]; }
    cout<<endl;
}
}
// กรณีทำงานมากกว่า 1 ครั้งให้โหนดค่าเริ่มต้น
else
{
    if(type=='T')
    {
        FILE *fpA,*fpB; // โหนดข้อมูลของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสไฟฟ้าที่เก็บไว้ใน
        fpA=fopen("data_A.dat","rb"); // ไฟล์ data_A.dat และ data_B.dat ไปไว้ที่ตัวแปร G0 และ G1
        fread(&G0,sizeof(double),fix_AB,fpA);
        fclose(fpA);
        fpB=fopen("data_B.dat","rb");
        fread(&G1,sizeof(double),fix_AB,fpB);
        fclose(fpB);
    }
    if(type=='V')
    {
        FILE *fpC,*fpD; // โหนดข้อมูลของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของแรงดันไฟฟ้าที่เก็บไว้ใน
        fpC=fopen("data_C.dat","rb"); // ไฟล์ data_C.dat และ data_D.dat ไปไว้ที่ตัวแปร G0 และ G1
        fread(&G0,sizeof(double),fix_AB,fpC);
        fclose(fpC); //Close file
        fpD=fopen("data_D.dat","rb");
        fread(&G1,sizeof(double),fix_AB,fpD);
        fclose(fpD);
    }
    for (n=0;n<=max_harmonic+1;n++) // แสดงสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ค่าเริ่มต้น
    {
        if(n==0) { G0_old[n]=G0[n]; }
        else { G0_old[n]=G0[n]; G1_old[n]=G1[n]; }
        if(type=='T') { cout<<"Imx["<<n<<"]tis "<<G0_old[n]<<" \t Imy["<<n<<"]tis "<<G1_old[n]; }
        if(type=='V') { cout<<"Vmx["<<n<<"]tis "<<G0_old[n]<<" \t Vmy["<<n<<"]tis "<<G1_old[n]; }
        cout<<endl;
    }
}
time1=time(&timer); // กำหนดเวลาเริ่มต้นทำการค้นหา
##### ฟังก์ชันวัดอุปสงค์ #####
m=0;
for (t=0;t<=end_loop;t+=step_t)
{
    fun[m]=fun0[m];
    for (n=1;n<=max_harmonic;n++)
    {
        if(G0[0]<0.011) { G0[0]=0; }
        if(n==1) { G[m]=G0[0]; }
        if(G0[n]<0.011) { G0[n]=0; }
        if(G1[n]<0.011) { G1[n]=0; }
        G[m]=G[m]+G0[n]*cos(n*w*t)+G1[n]*sin(n*w*t);
    }
    m++;
}

```

```

}
// หาค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณจริงกับสัญญาณที่ได้จากค่าคำตอบเริ่มต้นแบบผลรวมกำลังสอง
for (m=0;m<=fix_G-1;m++)
{
err=fun[m]-G[m];
if(m==0) { error=0; }
error=error+(err*err);
}
#####
error_best=error;
cout<<"The error start is "<<error<<endl;
for (n=0;n<=max_harmonic;n++)
{
G0_best[n]=G0[n]; G1_best[n]=G1[n];
G0_ans[n]=G0[n]; G1_ans[n]=G1[n];
}
count=1; // เริ่มการทำงานรอบแรก
while (count<=count_max && error>error_min) // ตรวจสอบสถานะหยุดการทำงานของฟังก์ชัน
{
for (n=0;n<=tabu_list_length;n++) // ตั้งสถานะความเป็นตามูเริ่มต้น
{
if ((tabu_list[n][1]==1) && (count-tabu_list[n][2] >= restriction_period)) { tabu_list[n][1] = 0; tabu_list[n][2] = 0; }
for (n=0;n<=max_harmonic;n++) { G0_na[n]=G0[n]; G1_na[n]=G1[n]; }
direction=0;
##### ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ #####
m=0;
for (t=0;t<=end_loop;t+=step_t) // กำหนดค่าต่ำสุดของกระแสและแรงดันที่เป็นไปได้
{
for (n=1;n<=max_harmonic;n++)
{
if(G0[0]<0.011) { G0[0]=0; }
if(n==1) { G[m]=G0[0]; }
if(G0[n]<0.011) { G0[n]=0; }
if(G1[n]<0.011) { G1[n]=0; }
G[m]=G[m]+G0[n]*cos(n*w*t)+G1[n]*sin(n*w*t); // หาจุดข้อมูลบนรูปคลื่นสัญญาณ
}
m++;
}
}
for (m=0;m<=fix_G-1;m++) // หาค่าความคลาดเคลื่อนแบบผลรวมกำลังสอง
{
err=fun[m]-G[m];
if(m==0) { error=0; }
error=error+(err*err);
}
#####
step_size=find_step_size(error); // เรียกฟังก์ชัน find_step_size เพื่อหาค่า step_size
for (i=1;i<=neighborhood_size;i++) // หาค่าคำตอบใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน
{
for (n=0;n<=max_harmonic;n++)
{
G0_na[n]=G0[n]; G1_na[n]=G1[n]; }
switch (i) // ทำการเคลื่อนที่ไปค่าใกล้เคียงกับคำตอบปัจจุบัน
{
case 1: G0_na[0]=G0[0]+step_size; break;
case 2: G0_na[1]=G0[1]+step_size; break;
case 3: G0_na[2]=G0[2]+step_size; break;
case 4: G0_na[3]=G0[3]+step_size; break;
case 5: G0_na[4]=G0[4]+step_size; break;
case 6: G0_na[5]=G0[5]+step_size; break;
}
}
}

```



```

case 7:    G0_na[6]=G0[6]+step_size; break;
case 8:    G0_na[7]=G0[7]+step_size; break;
case 9:    G0_na[8]=G0[8]+step_size; break;
case 10:   G0_na[9]=G0[9]+step_size; break;
case 11:   G0_na[10]=G0[10]+step_size; break;
case 12:   G0_na[11]=G0[11]+step_size; break;
case 13:   G0_na[12]=G0[12]+step_size; break;
case 14:   G0_na[13]=G0[13]+step_size; break;
case 15:   G0_na[14]=G0[14]+step_size; break;
case 16:   G0_na[15]=G0[15]+step_size; break;
case 17:   G0_na[16]=G0[16]+step_size; break;
case 18:   G0_na[17]=G0[17]+step_size; break;
case 19:   G0_na[18]=G0[18]+step_size; break;
case 20:   G0_na[19]=G0[19]+step_size; break;
case 21:   G1_na[1]=G1[1]+step_size; break;
case 22:   G1_na[2]=G1[2]+step_size; break;
case 23:   G1_na[3]=G1[3]+step_size; break;
case 24:   G1_na[4]=G1[4]+step_size; break;
case 25:   G1_na[5]=G1[5]+step_size; break;
case 26:   G1_na[6]=G1[6]+step_size; break;
case 27:   G1_na[7]=G1[7]+step_size; break;
case 28:   G1_na[8]=G1[8]+step_size; break;
case 29:   G1_na[9]=G1[9]+step_size; break;
case 30:   G1_na[10]=G1[10]+step_size; break;
case 31:   G1_na[11]=G1[11]+step_size; break;
case 32:   G1_na[12]=G1[12]+step_size; break;
case 33:   G1_na[13]=G1[13]+step_size; break;
case 34:   G1_na[14]=G1[14]+step_size; break;
case 35:   G1_na[15]=G1[15]+step_size; break;
case 36:   G1_na[16]=G1[16]+step_size; break;
case 37:   G1_na[17]=G1[17]+step_size; break;
case 38:   G1_na[18]=G1[18]+step_size; break;
case 39:   G1_na[19]=G1[19]+step_size; break;
case 40:   if(G0[0]-step_size<0){break;} else {G0_na[0]=G0[0]-step_size; break;}
case 41:   if(G0[1]-step_size<0){break;} else {G0_na[1]=G0[1]-step_size; break;}
case 42:   if(G0[2]-step_size<0){break;} else {G0_na[2]=G0[2]-step_size; break;}
case 43:   if(G0[3]-step_size<0){break;} else {G0_na[3]=G0[3]-step_size; break;}
case 44:   if(G0[4]-step_size<0){break;} else {G0_na[4]=G0[4]-step_size; break;}
case 45:   if(G0[5]-step_size<0){break;} else {G0_na[5]=G0[5]-step_size; break;}
case 46:   if(G0[6]-step_size<0){break;} else {G0_na[6]=G0[6]-step_size; break;}
case 47:   if(G0[7]-step_size<0){break;} else {G0_na[7]=G0[7]-step_size; break;}
case 48:   if(G0[8]-step_size<0){break;} else {G0_na[8]=G0[8]-step_size; break;}
case 49:   if(G0[9]-step_size<0){break;} else {G0_na[9]=G0[9]-step_size; break;}
case 50:   if(G0[10]-step_size<0){break;} else {G0_na[10]=G0[10]-step_size; break;}
case 51:   if(G0[11]-step_size<0){break;} else {G0_na[11]=G0[11]-step_size; break;}
case 52:   if(G0[12]-step_size<0){break;} else {G0_na[12]=G0[12]-step_size; break;}
case 53:   if(G0[13]-step_size<0){break;} else {G0_na[13]=G0[13]-step_size; break;}
case 54:   if(G0[14]-step_size<0){break;} else {G0_na[14]=G0[14]-step_size; break;}
case 55:   if(G0[15]-step_size<0){break;} else {G0_na[15]=G0[15]-step_size; break;}

```

```

case 56:   if(G0[16]-step_size<0){break;} else {G0_na[16]=G0[16]-step_size; break;}
case 57:   if(G0[17]-step_size<0){break;} else {G0_na[17]=G0[17]-step_size; break;}
case 58:   if(G0[18]-step_size<0){break;} else {G0_na[18]=G0[18]-step_size; break;}
case 59:   if(G0[19]-step_size<0){break;} else {G0_na[19]=G0[19]-step_size; break;}
case 60:   if(G1[1]-step_size<0){break;} else {G1_na[1]=G1[1]-step_size; break;}
case 61:   if(G1[2]-step_size<0){break;} else {G1_na[2]=G1[2]-step_size; break;}
case 62:   if(G1[3]-step_size<0){break;} else {G1_na[3]=G1[3]-step_size; break;}
case 63:   if(G1[4]-step_size<0){break;} else {G1_na[4]=G1[4]-step_size; break;}
case 64:   if(G1[5]-step_size<0){break;} else {G1_na[5]=G1[5]-step_size; break;}
case 65:   if(G1[6]-step_size<0){break;} else {G1_na[6]=G1[6]-step_size; break;}
case 66:   if(G1[7]-step_size<0){break;} else {G1_na[7]=G1[7]-step_size; break;}
case 67:   if(G1[8]-step_size<0){break;} else {G1_na[8]=G1[8]-step_size; break;}
case 68:   if(G1[9]-step_size<0){break;} else {G1_na[9]=G1[9]-step_size; break;}
case 69:   if(G1[10]-step_size<0){break;} else {G1_na[10]=G1[10]-step_size; break;}
case 70:   if(G1[11]-step_size<0){break;} else {G1_na[11]=G1[11]-step_size; break;}
case 71:   if(G1[12]-step_size<0){break;} else {G1_na[12]=G1[12]-step_size; break;}
case 72:   if(G1[13]-step_size<0){break;} else {G1_na[13]=G1[13]-step_size; break;}
case 73:   if(G1[14]-step_size<0){break;} else {G1_na[14]=G1[14]-step_size; break;}
case 74:   if(G1[15]-step_size<0){break;} else {G1_na[15]=G1[15]-step_size; break;}
case 75:   if(G1[16]-step_size<0){break;} else {G1_na[16]=G1[16]-step_size; break;}
case 76:   if(G1[17]-step_size<0){break;} else {G1_na[17]=G1[17]-step_size; break;}
case 77:   if(G1[18]-step_size<0){break;} else {G1_na[18]=G1[18]-step_size; break;}
case 78:   if(G1[19]-step_size<0){break;} else {G1_na[19]=G1[19]-step_size; break;}
}
if (tabu_list[i][1]!=1) // ถ้าทิศทางการเคลื่อนที่ในตารางตามไม่ถูกห้าม (Mark tabu)
{ m=0;
  for (t=0;t<=end_loop;t+=step_t) // ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ว่าน้อยกว่าค่าขอบเขตล่างให้มีค่าเท่ากับศูนย์
  { for (n=1;n<=max_harmonic;n++)
    { if(G0_na[0]<low_limit) { G0_na[0]=0; }
      if(n==1) { G_na[m]=G0_na[0]; }
      if(G0_na[n]<low_limit) { G0_na[n]=0; }
      if(G1_na[n]<low_limit) { G1_na[n]=0; }
      G_na[m]=G_na[m]+G0_na[n]*cos(n*w*t)+G1_na[n]*sin(n*w*t); // หาจุดข้อมูลรูปคลื่นสัญญาณ
    }
    m++;
  }
  for (m=0;m<=fix_G-1;m++) // หาค่าความคลาดเคลื่อนแบบผลรวมกำลังสอง
  { if(m==0) { error_na=0; }
    err=fun[m]-G_na[m];
    error_na=error_na+(err*err);
  }
  if (error>=error_na) // ตรวจสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบปัจจุบัน
  { error=error_na; // แทนค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด และค่าคำตอบ ลงในค่าความคลาดเคลื่อนและ
    for (n=0;n<=max_harmonic;n++) { G0_best[n]=G0_na[n]; G1_best[n]=G1_na[n]; } // ค่าตอบดีที่สุด
    count_best=count;
    if(error_best>=error) // ตรวจสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบดีที่สุด
    { error_best=error; // แทนค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด และค่าคำตอบ ลงในค่าความคลาดเคลื่อนและ
      for(n=0;n<=max_harmonic;n++) { G0_ans[n]=G0_best[n]; G1_ans[n]=G1_best[n]; } // ค่าตอบดีที่สุด
      count_ans=count_best;

```

```

        if(round<2) { time2=time(&timer); } // ตรวจสอบเงื่อนไขเวลาหยุดการทำงาน
        else { time2=time1; }
    }
    direction=;
}
}
}
// ตรวจสอบคำตอบที่ได้ใหม่ต้องไม่ใช่คำตอบเดิม
if(G0_best[0]!=G0[0]||G0_best[1]!=G0[1]||G0_best[2]!=G0[2]||G0_best[3]!=G0[3]||G0_best[4]!=G0[4]||G0_best[5]!=G0[5]||G0_best[6]!=G0[6]||G0_
best[7]!=G0[7]||G0_best[8]!=G0[8]||G0_best[9]!=G0[9]||G0_best[10]!=G0[10]||G0_best[11]!=G0[11]||G0_best[12]!=G0[12]||G0_best[13]!=G0[13]||
G0_best[14]!=G0[14]||G0_best[15]!=G0[15]||G0_best[16]!=G0[16]||G0_best[17]!=G0[17]||G0_best[18]!=G0[18]||G0_best[19]!=G0[19]||G1_best[1]
=G1[1]||G1_best[2]!=G1[2]||G1_best[3]!=G1[3]||G1_best[4]!=G1[4]||G1_best[5]!=G1[5]||G1_best[6]!=G1[6]||G1_best[7]!=G1[7]||G1_best[8]!=G1[8
]||G1_best[9]!=G1[9]||G1_best[10]!=G1[10]||G1_best[11]!=G1[11]||G1_best[12]!=G1[12]||G1_best[13]!=G1[13]||G1_best[14]!=G1[14]||G1_best[15]
=G1[15]||G1_best[16]!=G1[16]||G1_best[17]!=G1[17]||G1_best[18]!=G1[18]||G1_best[19]!=G1[19])
{ // เพิ่มค่าในตารางเก็บสถานะความเป็นตาบ พร้อมทั้งกำหนดสถานะความเป็นตาบในทิศทางที่เดินผ่านมา
    tabu_list[direction][3]=tabu_list[direction][3]+1;
    if (tabu_list[direction][3] > frequency_max)
    { tabu_list[direction][1]=1; // exceed frequency, this move is then tabu
      tabu_list[direction][2]=count; // recency
      tabu_list[direction][3]=0; // clear frequency
    }
    if(direction>39) { di_re=direction-39; }
    else { di_re=direction+39; }
    if (tabu_list[di_re][1] == 0)
    { tabu_list[di_re][1]=1; // กำหนดสถานะความเป็นตาบในทิศทางที่เดินผ่านมา
      tabu_list[di_re][2]=count; // กำหนดสถานะความคงอยู่ด้วยจำนวนการเคลื่อนที่
      tabu_list[di_re][3]=0; // ตั้งสถานะความถี่ในการเคลื่อนที่
    }
    for (n=0;n<=max_harmonic;n++)
    { G0[n]=G0_best[n]; G1[n]=G1_best[n]; } // กำหนดให้คำตอบที่ดีที่สุดเป็นคำตอบเริ่มต้นของรอบต่อไป
    if(count%30==0) // แสดงผลของการค้นหาคำตอบ
    { if(type=='I')
      { cout<<"Still searching, "<<count<<" moves so far!"<<endl;
        cout<<"Current error is "<<error<<endl;
        go_x0=0;
      }
      if(type=='V')
      { cout<<"Still searching, "<<count<<" moves so far!"<<endl;
        cout<<"Voltage error is "<<error<<endl;
        go_x0=0;
      }
    }
}
else // ถ้าคำตอบใกล้เคียงไม่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน และไม่ถูกห้ามจากสถานะความเป็นตาบ ให้
{ direction = 0; // ทำการหาคำตอบที่ดีที่สุดใหม่ถ้าใกล้เคียงคำตอบ
  m=0, d=0;
  for (t=0;t<=end_loop;t+=step_t) // ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ถ้ามีน้อยกว่าค่าขอบเขตล่างให้มีค่าเท่ากับศูนย์
  { for (n=1;n<=max_harmonic;n++)
    { if(G0[0]<low_limit) { G0[0]=0; }

```

```

    if(n==1) { G[m]=G0[0]; }
    if(G0[n]<low_limit) { G0[n]=0; }
    if(G1[n]<low_limit) { G1[n]=0; }
    G[m]=G[m]+G0[n]*cos(n*w*t)+G1[n]*sin(n*w*t); // หาคัดข้อมูลบนรูปคลื่นสัญญาณ
}
m++;
}
for (m=0;m<=fix_G-1;m++) // หาค่าความคลาดเคลื่อนแบบผลรวมกำลังสอง
{
    err=fun[m]-G[m];
    if(m==0){error=0;}
    error=error+(err*err);
}
// ตรวจสอบค่าใกล้เคียงค่าตอบปัจจุบัน ที่ไม่ถูกห้ามในสถานะความเป็นคาบ เพื่อหาค่าที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
for (i=1;i<=neighborhood_size;i++)
{
    for (n=0;n<=max_harmonic;n++)
    {
        G0_na[n]=G0[n];
        G1_na[n]=G1[n];
    }
    step_size=find_step_size(error); // เรียกฟังก์ชันในการหาขนาดของการเคลื่อนที่
    switch (i)
    {
        case 1: G0_na[0]=G0[0]+step_size; break;
        case 2: G0_na[1]=G0[1]+step_size; break;
        case 3: G0_na[2]=G0[2]+step_size; break;
        case 4: G0_na[3]=G0[3]+step_size; break;
        case 5: G0_na[4]=G0[4]+step_size; break;
        case 6: G0_na[5]=G0[5]+step_size; break;
        case 7: G0_na[6]=G0[6]+step_size; break;
        case 8: G0_na[7]=G0[7]+step_size; break;
        case 9: G0_na[8]=G0[8]+step_size; break;
        case 10: G0_na[9]=G0[9]+step_size; break;
        case 11: G0_na[10]=G0[10]+step_size; break;
        case 12: G0_na[11]=G0[11]+step_size; break;
        case 13: G0_na[12]=G0[12]+step_size; break;
        case 14: G0_na[13]=G0[13]+step_size; break;
        case 15: G0_na[14]=G0[14]+step_size; break;
        case 16: G0_na[15]=G0[15]+step_size; break;
        case 17: G0_na[16]=G0[16]+step_size; break;
        case 18: G0_na[17]=G0[17]+step_size; break;
        case 19: G0_na[18]=G0[18]+step_size; break;
        case 20: G0_na[19]=G0[19]+step_size; break;
        case 21: G1_na[1]=G1[1]+step_size; break;
        case 22: G1_na[2]=G1[2]+step_size; break;
        case 23: G1_na[3]=G1[3]+step_size; break;
        case 24: G1_na[4]=G1[4]+step_size; break;
        case 25: G1_na[5]=G1[5]+step_size; break;
        case 26: G1_na[6]=G1[6]+step_size; break;
        case 27: G1_na[7]=G1[7]+step_size; break;
        case 28: G1_na[8]=G1[8]+step_size; break;
        case 29: G1_na[9]=G1[9]+step_size; break;
    }
}

```

```

case 30: G1_na[10]=G1[10]+step_size; break;
case 31: G1_na[11]=G1[11]+step_size; break;
case 32: G1_na[12]=G1[12]+step_size; break;
case 33: G1_na[13]=G1[13]+step_size; break;
case 34: G1_na[14]=G1[14]+step_size; break;
case 35: G1_na[15]=G1[15]+step_size; break;
case 36: G1_na[16]=G1[16]+step_size; break;
case 37: G1_na[17]=G1[17]+step_size; break;
case 38: G1_na[18]=G1[18]+step_size; break;
case 39: G1_na[19]=G1[19]+step_size; break;
case 40: if(G0[0]-step_size<0){break;} else {G0_na[0]=G0[0]-step_size; break;}
case 41: if(G0[1]-step_size<0){break;} else {G0_na[1]=G0[1]-step_size; break;}
case 42: if(G0[2]-step_size<0){break;} else {G0_na[2]=G0[2]-step_size; break;}
case 43: if(G0[3]-step_size<0){break;} else {G0_na[3]=G0[3]-step_size; break;}
case 44: if(G0[4]-step_size<0){break;} else {G0_na[4]=G0[4]-step_size; break;}
case 45: if(G0[5]-step_size<0){break;} else {G0_na[5]=G0[5]-step_size; break;}
case 46: if(G0[6]-step_size<0){break;} else {G0_na[6]=G0[6]-step_size; break;}
case 47: if(G0[7]-step_size<0){break;} else {G0_na[7]=G0[7]-step_size; break;}
case 48: if(G0[8]-step_size<0){break;} else {G0_na[8]=G0[8]-step_size; break;}
case 49: if(G0[9]-step_size<0){break;} else {G0_na[9]=G0[9]-step_size; break;}
case 50: if(G0[10]-step_size<0){break;} else {G0_na[10]=G0[10]-step_size; break;}
case 51: if(G0[11]-step_size<0){break;} else {G0_na[11]=G0[11]-step_size; break;}
case 52: if(G0[12]-step_size<0){break;} else {G0_na[12]=G0[12]-step_size; break;}
case 53: if(G0[13]-step_size<0){break;} else {G0_na[13]=G0[13]-step_size; break;}
case 54: if(G0[14]-step_size<0){break;} else {G0_na[14]=G0[14]-step_size; break;}
case 55: if(G0[15]-step_size<0){break;} else {G0_na[15]=G0[15]-step_size; break;}
case 56: if(G0[16]-step_size<0){break;} else {G0_na[16]=G0[16]-step_size; break;}
case 57: if(G0[17]-step_size<0){break;} else {G0_na[17]=G0[17]-step_size; break;}
case 58: if(G0[18]-step_size<0){break;} else {G0_na[18]=G0[18]-step_size; break;}
case 59: if(G0[19]-step_size<0){break;} else {G0_na[19]=G0[19]-step_size; break;}
case 60: if(G1[1]-step_size<0){break;} else {G1_na[1]=G1[1]-step_size; break;}
case 61: if(G1[2]-step_size<0){break;} else {G1_na[2]=G1[2]-step_size; break;}
case 62: if(G1[3]-step_size<0){break;} else {G1_na[3]=G1[3]-step_size; break;}
case 63: if(G1[4]-step_size<0){break;} else {G1_na[4]=G1[4]-step_size; break;}
case 64: if(G1[5]-step_size<0){break;} else {G1_na[5]=G1[5]-step_size; break;}
case 65: if(G1[6]-step_size<0){break;} else {G1_na[6]=G1[6]-step_size; break;}
case 66: if(G1[7]-step_size<0){break;} else {G1_na[7]=G1[7]-step_size; break;}
case 67: if(G1[8]-step_size<0){break;} else {G1_na[8]=G1[8]-step_size; break;}
case 68: if(G1[9]-step_size<0){break;} else {G1_na[9]=G1[9]-step_size; break;}
case 69: if(G1[10]-step_size<0){break;} else {G1_na[10]=G1[10]-step_size; break;}
case 70: if(G1[11]-step_size<0){break;} else {G1_na[11]=G1[11]-step_size; break;}
case 71: if(G1[12]-step_size<0){break;} else {G1_na[12]=G1[12]-step_size; break;}
case 72: if(G1[13]-step_size<0){break;} else {G1_na[13]=G1[13]-step_size; break;}
case 73: if(G1[14]-step_size<0){break;} else {G1_na[14]=G1[14]-step_size; break;}
case 74: if(G1[15]-step_size<0){break;} else {G1_na[15]=G1[15]-step_size; break;}
case 75: if(G1[16]-step_size<0){break;} else {G1_na[16]=G1[16]-step_size; break;}
case 76: if(G1[17]-step_size<0){break;} else {G1_na[17]=G1[17]-step_size; break;}
case 77: if(G1[18]-step_size<0){break;} else {G1_na[18]=G1[18]-step_size; break;}
case 78: if(G1[19]-step_size<0){break;} else {G1_na[19]=G1[19]-step_size; break;}

```

```

}
if (tabu_list[i][1]!=1) // ถ้าทิศทางเคลื่อนที่ในตารางตามไม่ถูกห้าม (Mark tabu)
{
d=d+1; j=0;
for (t=0;t<=end_loop;t+=step_t) // ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ถ้าน้อยกว่าค่าขอบเขตล่างให้มีค่าเท่ากับศูนย์
{
for (n=1;n<=max_harmonic;n++)
{
if(G0_na[0]<low_limit) { G0_na[0]=0; }
if(n==1) { G_na[j]=G0_na[0]; }
if(G0_na[n]<low_limit) { G0_na[n]=0; }
if(G1_na[n]<low_limit) { G1_na[n]=0; }
G_na[j]=G_na[j]+G0_na[n]*cos(n*w*t)+G1_na[n]*sin(n*w*t); // หากจุดข้อมูลบนรูปคลื่นสัญญาณ
}
j++;
}
for (m=0;m<=fix_G-1;m++) // หากค่าความคลาดเคลื่อนแบบผลรวมกำลังสอง
{
if(m==0) { error_na=0; }
err=fun[m]-G_na[m];
error_na=error_na+(err*err);
}
if(d==1) // กำหนดให้ทิศทางใกล้เคียงค่าตอบแรกคือค่าตอบที่น้อยที่สุด เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ
{
error=error_na; // กับทิศทางอื่นๆ ของค่าตอบปัจจุบัน
for (n=0;n<=max_harmonic;n++) { G0_best[n]=G0_na[n]; G1_best[n]=G1_na[n]; }
}
if (error>=error_na) // ตรวจสอบหากค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของค่าใกล้เคียงค่าตอบปัจจุบัน
{
error=error_na;
for (n=0;n<=max_harmonic;n++) { G0_best[n]=G0_na[n]; G1_best[n]=G1_na[n]; }
count_best=count;
if (error_best>=error)
{
error_best=error;
for (n=0;n<=max_harmonic;n++) { G0_ans[n]=G0_best[n]; G1_ans[n]=G1_best[n]; }
count_ans=count_best;
time2=time(&timer);
}
direction=i;
}
}
}
// ตรวจสอบคำตอบที่ได้ใหม่ต้องไม่ใช่คำตอบเดิม
if(G0_best[0]!=G0[0]||G0_best[1]!=G0[1]||G0_best[2]!=G0[2]||G0_best[3]!=G0[3]||G0_best[4]!=G0[4]||G0_best[5]!=G0[5]||G0_best[6]!=G0[6]||
G0_best[7]!=G0[7]||G0_best[8]!=G0[8]||G0_best[9]!=G0[9]||G0_best[10]!=G0[10]||G0_best[11]!=G0[11]||G0_best[12]!=G0[12]||G0_best[13]!=G
0[13]||G0_best[14]!=G0[14]||G0_best[15]!=G0[15]||G0_best[16]!=G0[16]||G0_best[17]!=G0[17]||G0_best[18]!=G0[18]||G0_best[19]!=G0[19]||G
1_best[1]!=G1[1]||G1_best[2]!=G1[2]||G1_best[3]!=G1[3]||G1_best[4]!=G1[4]||G1_best[5]!=G1[5]||G1_best[6]!=G1[6]||G1_best[7]!=G1[7]||G1_b
est[8]!=G1[8]||G1_best[9]!=G1[9]||G1_best[10]!=G1[10]||G1_best[11]!=G1[11]||G1_best[12]!=G1[12]||G1_best[13]!=G1[13]||G1_best[14]!=G1[
14]||G1_best[15]!=G1[15]||G1_best[16]!=G1[16]||G1_best[17]!=G1[17]||G1_best[18]!=G1[18]||G1_best[19]!=G1[19])
{
// เพิ่มค่าในตารางเก็บสถานะความเป็นตาบ พร้อมทั้งกำหนดสถานะความเป็นตาบในทิศทางที่เดินผ่านมา
tabu_list[direction][3]=tabu_list[direction][3]+1;
if (tabu_list[direction][3] > frequency_max) // ถ้าสถานะความถี่ของตาบมีค่ามากกว่าความถี่สูงสุดที่กำหนด
{
tabu_list[direction][1]=1; // กำหนดสถานะความเป็นตาบแก่ทิศทางที่เคลื่อนที่มา
tabu_list[direction][2]=count; // กำหนดสถานะความถี่ของตาบในทิศทางที่เคลื่อนที่มา
tabu_list[direction][3]=0; // ล้างสถานะความถี่ของตาบ
}
}
}

```

```

}
if(direction>39) { di_re=direction-39; }
else { di_re=direction+39; }
if(tabu_list[di_re,1] == 0) // ถ้าทิศทางที่เคลื่อนที่ด้านหลังไม่ถูกห้ามด้วยสถานะความเป็นตาบอด
{ tabu_list[di_re][1]=1; // กำหนดให้ทิศทางด้านหลังมีสถานะความเป็นตาบอด
  tabu_list[di_re][2]=count; // กำหนดสถานะความคงอยู่ของตาบอดในทิศทางการเคลื่อนที่ด้านหลัง
  tabu_list[di_re][3]=0; // สถานะความถี่ของตาบอดในทิศทางการเคลื่อนที่ด้านหลัง
}
for (n=0;n<=max_harmonic;n++) { G0[n]=G0_best[n]; G1[n]=G1_best[n]; } // กำหนดให้ค่าตอบที่ดีที่สุดเป็นค่าตอบเริ่มต้นของรอบต่อไป
if(count%30==0) // แสดงผลของการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดที่เทียบกับค่าตอบปัจจุบัน
{ if(type=='I')
  { cout<<"Still searching, just not a better solution after "<<count<<" moves!"<<endl;
    cout<<"Current error is "<<error<<endl;
    cout<<"Current best error is "<<error_best<<" count is "<<count_ans<<endl;
    go_x0=0;
  }
  if(type=='V')
  { cout<<"Still searching, just not a better solution after "<<count<<" moves!"<<endl;
    cout<<"Voltage error is "<<error<<endl;
    cout<<"Voltage best error is "<<error_best<<" count is "<<count_ans<< endl;
    go_x0=0;
  }
}
}
else
{ if(count%30==0) // แสดงผลของการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดของค่าใกล้เคียงค่าตอบปัจจุบัน
  { cout<<"Just not a better solution after "<<count<<" moves!"<<endl;
    cout<<"Cannot move...all tabu! Reset tabu list!"<<endl;
    go_x0=go_x0+1;
    cout<<"G0x0 = "<<go_x0<<endl;
    if(go_x0>=max_clear_tabu)
    { for (n=0;n<=max_harmonic;n++) { G0[n]=G0_old[n]; G1[n]=G1_old[n]; }
      cout<<"G0x0*** = "<<go_x0<<endl;
      go_x0=0;
    }
  }
}
for (i=1;i<=tabu_list_length;i++) // ล้างสถานะความเป็นตาบอดในตารางสถานะความเป็นตาบอด
{ tabu_list[i][1] = 0;
  tabu_list[i][2] = 0;
}
}
}
count++; // เพิ่มจำนวนรอบการทำงาน
}
if(time2<time1) { time2=time1; } // กำหนดเวลาสิ้นสุดโปรแกรม
// แสดงผลการค้นหาค่าตอบในรูปแบบของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์
time_ans=time2-time1; cout<<"#####"<<endl;
cout<<"Anser X,Y is:"<<endl;;
for(n=0;n<=max_harmonic;n++)

```

```

{ A[n]=G0_ans[n]; B[n]=G1_ans[n];
  if(type=='I') { cout<<"Imx["<<n<<"]="<<A[n]<<" \t Imy["<<n<<"]="<<B[n]<<endl; }
  if(type=='V') { cout<<"Vmx["<<n<<"]="<<A[n]<<" \t Vmy["<<n<<"]="<<B[n]<<endl; }
}

cout<<"error is "<<error_best<<" counter is "<<count_ans<<endl;
aaa=div(time_ans,60);
cout<<" time to use run program is "<<aaa.quot<<"min. "<<aaa.rem<<" sec."<<endl;
cout<<"#####<<endl;

for(n=0;n<=19;n++)
{ if(n==0) { fun_m[0]=A[0];alpha[0]=0; }
  else
  { fun_m[n]=pow((pow(A[n],2)+pow(B[n],2)),0.5);
    if(A[n]==0&&B[n]==0) { alpha[n]=0; }
    else if(B[n]<0.000001) { alpha[n]=atan(A[n]/ 0.000001)*360/(2*pi); }
    else { alpha[n]=(atan(A[n]/B[n])*360/(2*pi)); }
  }
}

if(type=='I')
{ FILE *fp1,*fp2; // บันทึกข้อมูลสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสลงในไฟล์ data_A.dat และ data_B.dat
  fp1=fopen("data_A.dat","wb");
  fwrite(&A,sizeof(double),20,fp1);
  fclose(fp1);
  fp2=fopen("data_B.dat","wb");
  fwrite(&B,sizeof(double),20,fp2);
  fclose(fp2);
}

if(type=='V')
{ FILE *fp1,*fp2; // บันทึกข้อมูลสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของแรงคั่นลงในไฟล์ data_C.dat และ data_D.dat
  fp1=fopen("data_C.dat","wb");
  fwrite(&A,sizeof(double),20,fp1);
  fclose(fp1);
  fp2=fopen("data_D.dat","wb");
  fwrite(&B,sizeof(double),20,fp2);
  fclose(fp2);
}
}

#####
#####          ฟังก์ชัน find_step_size          #####
// ตรวจสอบเงื่อนไข error แล้วส่งค่า step_size กลับ
double find_step_size(double error)
{ float step_size;
  if(error>=pow(10,13)){step_size=20000;}
  else if(error>=pow(10,12)){step_size=10000;}
  else if(error>=pow(10,11)){step_size=2000;}
  else if(error>=pow(10,10)){step_size=1000;}
  else if(error>=pow(10,9)){step_size=200;}
  else if(error>=pow(10,8)){step_size=100;}
  else if(error>=pow(10,7)){step_size=50;}
  else if(error>=pow(10,6)){step_size=10;}
}

```



```
else if(error>=pow(10,5)){step_size=5;}
else if(error>=pow(10,3)){step_size=1;}
else if(error>=pow(10,2)){step_size=0.5;}
else if(error>=10){step_size=0.1;}
else if(error>=5){step_size=0.05;}
else if(error>=1){step_size=0.01;}
else if(error>=0.1){step_size=0.005;}
else {step_size=0.001;}
return(step_size);
}
#####
```

ภาคผนวก ค

โปรแกรมการ MATLAB ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก  
ด้วยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม



```

lowerbound; % กำหนดรูปแบบว่าจะนำค่าของเขตต่ำสุด(lower limit) ไปร่วมพิจารณาด้วยหรือไม่ โดย
% 0 = ไม่ต้องการพิจารณาค่าขอบเขตต่ำสุด 1= ต้องการพิจารณาค่าขอบที่ต่ำ
% ขอบเขตต่ำสุด
upperbound;]; % กำหนดรูปแบบว่าจะนำค่าของเขตสูงสุด(upper limit) ไปร่วมพิจารณา
% ด้วยหรือไม่ โดย 0 = ไม่ต้องการพิจารณาค่าขอบเขตสูงสุด 1=ต้องการพิจารณา
% ค่าขอบที่ต่ำขอบเขตสูงสุด
s_preci=sum(preci); % s_preci คือความยาวของโครโมโซม
Chrom = crtbp(NIND,s_preci); % สร้างประชากรเริ่มต้นให้กับ GA Chrom คือกลุ่มของโครโมโซมเริ่มต้น ได้จากการสุ่ม
gen = 0;
pop = bs2rv(Chrom,FieldD); % โครโมโซมถูกถอดรหัสให้เป็นรูปแบบฟีโนไทป์ เลขฐานสิบ
% pop รูปแบบฟีโนไทป์ที่ถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
% FieldD รูปแบบของการกำหนดค่าในการถอดรหัสจากโครโมโซมที่เป็นไบนารีเป็น
% รูปแบบฟีโนไทป์ที่เป็นเลขฐานสิบ

for u=1:NIND
    A0=pop(u,1);    A1=pop(u,2);    A2=pop(u,3);    A3=pop(u,4);    A4=pop(u,5);    A5=pop(u,6);
    A6=pop(u,7);    A7=pop(u,8);    A8=pop(u,9);    A9=pop(u,10);   A10=pop(u,11);  A11=pop(u,12);
    A12=pop(u,13);  A13=pop(u,14);  A14=pop(u,15);  A15=pop(u,16);  A16=pop(u,17);  A17=pop(u,18);
    A18=pop(u,19);  A19=pop(u,20);  B1=pop(u,21);   B2=pop(u,22);   B3=pop(u,23);   B4=pop(u,24);
    B5=pop(u,25);   B6=pop(u,26);   B7=pop(u,27);   B8=pop(u,28);   B9=pop(u,29);   B10=pop(u,30);
    B11=pop(u,31);  B12=pop(u,32);  B13=pop(u,33);  B14=pop(u,34);  B15=pop(u,35);  B16=pop(u,36);
    B17=pop(u,37);  B18=pop(u,38);  B19=pop(u,39);
    error(u,1)=objective_fourier(A0,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A11,A12,A13,A14,A15,A16,A17,A18,A19,B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B10,
    B11,B12,B13,B14,B15,B16,B17,B18,B19);
end
while gen<MAXGEN & error_min>error_end, % วงรอบการทำงานของเงินเด็กอัลกอริทึม
    FitnV = ranking(error); % การคำนวณค่าความเหมาะสม โดยใช้วิธีการจัดอันดับ(Ranking selection)
    % ค่า error ที่ได้เรียกว่า ค่าการประมาณ(objective value)
    % จะนำไปคำนวณค่าความเหมาะสม โดยใช้วิธีการจัดอันดับ(Ranking selection)
    % FitnV คือค่าความเหมาะสมที่ได้จากวิธีการจัดอันดับ
    % ใช้ค่าความเหมาะสมข้างต้น เพื่อคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์
    % ด้วยวิธีการชักตัวของวงล้อรูเล็ต(roulette wheel sampling)
    SelCh = select(sel0,Chrom,FitnV,GGAP); % การทำครอสโอเวอร์ ด้วยวิธี การทำครอสโอเวอร์แบบสลับที่ (shuffle crossover)
    SelCh1 = recomb(recom,SelCh,PC); % SelCh1 โครโมโซมหลังจากการทำครอสโอเวอร์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์ SelCh
    % PC ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์
    SelCh2 = mut(SelCh1,Pm); % การทำมิวเทชัน
    % SelCh2 คือ โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์
    pop1 = bs2rv(SelCh2,FieldD); % โครโมโซมถูกถอดรหัสให้เป็นรูปแบบฟีโนไทป์ เลขฐานสิบ
    % pop1 รูปแบบฟีโนไทป์ที่ถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
    % FieldD รูปแบบของการกำหนดค่าในการถอดรหัสจากโครโมโซมที่เป็นไบนารีเป็น
    % รูปแบบฟีโนไทป์ที่เป็นเลขฐานสิบ

for u=1:size(SelCh2,1)
    A0=pop1(u,1);    A1=pop1(u,2);    A2=pop1(u,3);    A3=pop1(u,4);    A4=pop1(u,5);
    A5=pop1(u,6);    A6=pop1(u,7);    A7=pop1(u,8);    A8=pop1(u,9);    A9=pop1(u,10);
    A10=pop1(u,11);  A11=pop1(u,12);  A12=pop1(u,13);  A13=pop1(u,14);  A14=pop1(u,15);
    A15=pop1(u,16);  A16=pop1(u,17);  A17=pop1(u,18);  A18=pop1(u,19);  A19=pop1(u,20);
    B1=pop1(u,21);   B2=pop1(u,22);   B3=pop1(u,23);   B4=pop1(u,24);   B5=pop1(u,25);
    B6=pop1(u,26);   B7=pop1(u,27);   B8=pop1(u,28);   B9=pop1(u,29);   B10=pop1(u,30);
    B11=pop1(u,31);  B12=pop1(u,32);  B13=pop1(u,33);  B14=pop1(u,34);  B15=pop1(u,35);
    B16=pop1(u,36);  B17=pop1(u,37);  B18=pop1(u,38);  B19=pop1(u,39);

```

```

error1(u,1)=objective_fourier(A0,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A11,A12,A13,A14,A15,A16,A17,A18,A19,B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B
8,B9,B10,B11,B12,B13,B14,B15,B16,B17,B18,B19);

end
gen = gen+1; % เพิ่มจำนวนรอบการทำงาน
[error_min,index]=min(error1); % หาค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
best_sol=pop1(index,:); % เก็บค่าตอบที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดใน best_sol
if(error_min<error_ans) % ตรวจสอบค่าความผิดพลาดของคำตอบใหม่เทียบกับคำตอบเดิมที่ดีที่สุดหากคำตอบ
    error_ans=error_min; % ใหม่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าคำตอบเดิมแทนคำตอบใหม่ในคำตอบที่ดีที่สุด
    gen_ans=gen;
    sol_ans=best_sol;
    time2=clock;
    gen_error(1)=gen_ans;
    gen_error(2)=error_ans;
    fp_sol=fopen('d:\thesis\program\GeneticSCF\so1_ans.dat','wb'); % บันทึกคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในไฟล์ชื่อ so1_ans.dat
    fwrite(fp_sol,sol_ans,'double');
    fclose(fp_sol);
    fp_gen_err=fopen('d:\thesis\program\GeneticSCF\gen_error.dat','wb'); % บันทึกรอบการทำงาน และค่าความคลาดเคลื่อนที่ดีที่สุดไว้ในไฟล์ชื่อ
    fwrite(fp_gen_err,gen_error,'double'); % gen_error.dat
    fclose(fp_gen_err);
end
if(mod(gen,1000)==0) % แสดงผลของค่าความคลาดเคลื่อน และค่าความคลาดเคลื่อนดีที่สุดในทุกๆ 1000 รอบ
    sprintf('the gen is %d, the error is %g',gen,error_min)
    sprintf('gen ans is %d and error minimum is %f', gen_ans, error_ans)
end
% โครโมโซมเดิมจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมลูกหลานที่ได้จาก SelCh2 ซึ่งประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอน
% การแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ
[Chrom error] = reins(Chrom,SelCh2,1,1,error,error1);
end % ย้อนกลับขึ้นไปตรวจสอบเงื่อนไขของการจบโปรแกรม
% แสดงผลของค่าความคลาดเคลื่อน จำนวนรอบ คำตอบ เวลาที่ใช้ในการคำนวณที่ได้จากค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
sprintf('error anser is %f,error_ans)
sprintf('error minimum is %f,error_ans)
sprintf('gen ans is %d,gen_ans)
time_ans=time2-time1;
sprintf('time use is %f,time_ans)
fpp=fopen('d:\thesis\program\GeneticSCF\data1.dat','rb'); % เปิดไฟล์ data1.dat ซึ่งเป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลของสัญญาณกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ใน
[II,count]=fread(fpp,128,'double'); % การเปรียบเทียบกับคำตอบ
fclose(fpp);
step_t=0.02/128;
num_plot=128;
w=2*pi*50;
m=1;
erroraa=0;
for(t=0:step_t:0.02-step_t) % คำนวณหาค่ารูปสัญญาณกระแสที่ได้จากคำตอบของเงินเนติกอัลกอริทึม
    for(n=1:1:19)
        if(n==1)
            iLL(m)=sol_ans(1)/2;
        end
        iLL(m)=iLL(m)+sol_ans(n+1)*cos(n*w*t)+sol_ans(n+20)*sin(n*w*t);
    end
end

```



ภาคผนวก ง

โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก  
ด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว

```

#####
// โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว
// โดย ชูชาติ วุฒินทรเนตรรักษ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

clear all;
fp1=fopen('e:\thesis\program\TabuSCF\data1.dat','rb');
[III,count]=fread(fp1,128,'double');
fclose(fp1);
w=2*pi*50;
num_plot=128;
step_t=0.02/num_plot; % ตำแหน่งจุดข้อมูลที่พิจารณา
endstep=0.02-step_t; % ตำแหน่งสุดท้ายของการพิจารณาจุดข้อมูลกระแส
num=1:1:num_plot;
t=0:step_t:endstep;
fs = 5000; % ความถี่ในการชักตัวอย่าง (sampling frequency)
N = num_plot/2; % จำนวนของฮาร์มอนิกที่พิจารณา
n=2*N;
for(m=1:1:num_plot)
    fn_n(m)=III(m); % กำหนดให้สัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้แทนในฟังก์ชัน fn_n
end
Fn = fft(fn_n); % แปลงค่าฟูรีเยร์แบบเร็วของฟังก์ชัน fn_n ไปเก็บไว้ในฟังก์ชัน Fn
Fn=[conj(Fn(N+1)) Fn(N+2:end) Fn(1:N+1)];
Fn=Fn/n;
an=2*real(Fn(N+1:end)); % ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์
bn=-2*imag(Fn(N+1:end)); % ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์
idx=0:19; % กำหนดค่าฮาร์มอนิกที่พิจารณา
abFn=abs(2*Fn); % คำนวณหาค่าแอมพลิจูด
abf=abFn(N+1:N+20); % พิจารณาช่วงข้อมูลใน ฮาร์มอนิกที่ 0 ถึง 19
figure:1 % แสดงผลของ fit ในรูปของสัญญาณสเปกตรัม
hold on;
stem(idx,abf)
hold off;
xlabel('Harmonic index(n)');
title('Spectrum line');
ylabel('magnitude');
grid;
m=1; error_fit=0; a00=an(1); % กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร
for(t=0:step_t:endstep) % หาค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณรูปคลื่นกระแสที่ได้จาก fit เปรียบเทียบกับ
    for(n=1:1:19) % สัญญาณรูปคลื่นที่ตรวจวัดได้
        if(n==1)
            iLs(m)=a00/2;
        end
        iLs(m)=iLs(m)+an(n+1)*cos(n*w*t)+bn(n+1)*sin(n*w*t); % คำนวณหาสัญญาณรูปคลื่นของกระแสจากผลที่ได้จาก fit ( an, bn )
    end
    error_fit=error_fit+(III(m)-iLs(m))^2; % หาค่าความคลาดเคลื่อนแบบผลรวมกำลังสอง
    m=m+1;
end
end

```



```
fprintf('the error fit from current is = %g \n',error_fit) % แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อนของ fit
num=1:1:num_plot;
t=0:step_t:0.02-step_t;
figure:2 % แสดงรูปสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้กับสัญญาณกระแส
plot(t,II(num),t,iLs(num)); % ที่ได้จาก fit
legend('IL','ILsim');
grid;
```

ภาคผนวก จ

โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด  
ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอด

```

#####
// โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม
// โดย ชูชาติ วุฒินทรเนติรักษ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

#####      กำหนดแฮดเดอร์ไฟล์      #####
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include <dos.h>
#include <iostream.h>
#include <fstream.h>
#include <stdlib.h>
#include <process.h>

#####      กำหนดฟังก์ชันที่ใช้งานในโปรแกรม      #####
void clear_all_tabu(int*int);           // ฟังก์ชันยกเลิกสถานะความเป็นตาบู่ทั้งตารางสถานะความเป็นตาบู่
double find_error(double*,int);       // ฟังก์ชันหาความคลาดเคลื่อน
void write_data(double*,int,int,int);  // ฟังก์ชันเก็บผลการคำนวณในรูปแบบของ dat ไฟล์
double find_step_sizeSCF(double);     // ฟังก์ชันการหาขนาดของการเคลื่อนที่
void SearchSCF(void);                 // ฟังก์ชัน ในการค้นหารูปแบบการสับสวิตซ์ตัวเก็บประจุในวงจรกรองฮาร์มอนิก

#####      กำหนดค่าตัวแปรคงที่      #####
const int fix_round=1; // round for find SCF           // จำนวนครั้งการทำงานของโปรแกรม
const int fix_AB=20;   // ขนาดของตัวแปรสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ // ขนาดของตัวแปรสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์
const int fix_G=128;   // ขนาดของตัวแปรข้อมูลกระแส // ตำแหน่งจุดข้อมูลที่พิจารณา
const double step_t=0.02/128; // ตำแหน่งสุดท้ายของการพิจารณาจุดข้อมูลกระแส // ขนาดของตัวแปรสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์
const double end_loop=0.02-step_t; // ขนาดของตัวแปรข้อมูลกระแส // จำนวนรอบการทำงานในหนึ่งครั้งการทำงานของโปรแกรม
const int size_AB=20;   // ฮาร์มอนิกสูงสุดที่พิจารณา // จำนวนรอบที่ที่ต้องการแสดงผลในแต่ละครั้ง
const int size_x=128;   // จำนวนรอบการพิจารณาจุดข้อมูลกระแส // ขนาดของแรงดันสูงสุด (Vpeak)
const int count_max=500; // ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่พิจารณา // จำนวนครั้งในการพิจารณายกเลิกสถานะความเป็นตาบู่ทั้งตารางสถานะความเป็นตาบู่
const int max_harmonic=19; // ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรกรองฮาร์มอนิก // ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรองฮาร์มอนิก
const int roundShow=40; // ความต้านของของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรองฮาร์มอนิก // ความเร็วเชิงมุม
const int Vm=325;
const double error_min=10;
const int max_clear_tabu=3;
const double C=3000*pow(10,-6);
const double L=0.4*pow(10,-3);
const double RL=1.7;
const double pi=M_PI;
const double w=2*pi*50;
const double k1=pow(RL,2)+pow(w*L,2);
const double k2=pow(w*RL*C,2)+pow(1-w*w*L*C,2);
const double fixCase2=Vm/(2*pi*sqrt(k1));
const double fixCase2In=atan(w*L/RL);
const double fixCase1=Vm*w*C/(2*pi*sqrt(k2));
const double fixCase1In=pi/2+atan(w*RL*C/(1-w*w*L*C));
const int max_step=50; // จำนวนครั้งในการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ-1

#####      โปรแกรมหลัก      #####

```

```

void main()
{ void clrscr(void); // ยกเลิกหน่วยความจำเดิมทั้งหมด
  double ant=0;
  while(ant<1) // ตรวจสอบการจบโปรแกรม
  { SearchSCF(); // เรียกฟังก์ชันการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิก
    cout<<"input the number(0 is continual)="; cin>>ant; // สอบถามการทำงานต่อเนื่อง
  }
}

##### ฟังก์ชัน SearchSCF (ฟังก์ชันการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิก) #####
void SearchSCF(void)
{ // กำหนดชนิดของตัวแปร และค่าเริ่มต้น
  void clrscr(void);
  time_t timer; // กำหนดให้มีการนับเวลา
  int count, count_best, count_ans=0, time_ans, i, n, k, time1, time2, eee_n, direction, di_re, d, di;
  int go_x0=0, go_x1=0, go_x2=0, roundSCF=1;
  double A[size_AB], B[size_AB], A_best[size_AB], B_best[size_AB], A_na[size_AB], B_na[size_AB], A_ans[size_AB], B_ans[size_AB];
  double x_best[size_x], x_na[size_x], x_ans[size_x], x[size_x], x0[size_x], x_Old[size_x], xb1, xb2, XX[size_AB], Y[size_AB], eee, eee_min=1;
  double step_size, error_na, error, error_best, e_round, error_round[fix_round+1], x_round[fix_round+1][size_x];
  double count_round[fix_round+1], time_round[fix_round+1];

  // read data X[n] in data_A.dat
  FILE *fpA, *fpB; // โหลดข้อมูลพารามิเตอร์อนุกรมฟูริเยร์จากไฟล์ data_A.dat และ data_B.dat ไปไว้ที่ตัว
  fpA=fopen("data_A.dat","rb"); //แปร XX และ Y ตามลำดับ
  fread(&XX,sizeof(double),size_AB,fpA);
  fclose(fpA);
  fpB=fopen("data_B.dat","rb");
  fread(&Y,sizeof(double),size_AB,fpB);
  fclose(fpB);
  // กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
  for(n=0;n<=max_harmonic;n++)
  { A[n]=0; B[n]=0; A_best[n]=0; B_best[n]=0; A_na[n]=0; B_na[n]=0; A_ans[n]=0; B_ans[n]=0; }
  for(n=0;n<=fix_round+1;n++)
  { for(i=0;i<=size_x;i++) { x_round[n][i]=0; }
    error_round[n]=9999;
    count_round[n]=0;
  }
  error_best=9999;
  while(error_best>10&&roundSCF<=fix_round) // ตรวจสอบสถานะหยุดการทำงานของฟังก์ชัน โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนและ
  // จำนวนครั้งการทำงาน
  { max_step1=max_step+1;
    cout<<endl<<"max_step = "<<max_step1<<endl;
    for(i=0;i<=max_step+1;i++) // กำหนดค่าเริ่มต้นของรูปแบบการสวิตซ์
    { x[i]=(2*pi*i)/(max_step+1);
      x_Old[i]=x[i]; // เก็บค่าตอบเริ่มต้นโปรแกรมไว้ในตัวแปร x_Old
      x0[i]=x[i];
    }
    // กำหนดขนาดของค่าใกล้เคียงคำตอบ (neighborhood) ที่ใช้ในการค้นหา
    int neighborhood_size=(max_step+1)*2;
    // indicate max_step*2 posible moves of the max_step*2 neighborhood
    // กำหนดลักษณะและขนาดของตารางสถานะความเป็นคาบ

```



```

i=0;
for (n=1;n<=max_step;n++) // ตรวจสอบคำตอบใหม่กับคำตอบเดิมว่าไม่เป็นตัวเดียวกัน
{
  xb1=x_best[n];
  xb2=x[n];
  if(xb1!=xb2) { i=i+1; }
}
if(i>0) // กรณีคำตอบใหม่ไม่ใช่ตัวเดียวกับคำตอบเดิม
{
  tabu_list[direction][2]=tabu_list[direction][2]+1; // เพิ่มค่าความถี่ในทิศทางที่เคลื่อนที่จากคำตอบเดิมมายังคำตอบใหม่
  if(tabu_list[direction][2]>frequency_max) // ตรวจสอบสถานะความเป็นคาบของค่าความถี่
  {
    tabu_list[direction][0]=1; // ให้สถานะความเป็นคาบแก่ทิศทางที่เคลื่อนที่จากคำตอบเดิมมายังคำตอบใหม่
    tabu_list[direction][1]=1; // ให้ค่าความคงอยู่เป็น 1
    tabu_list[direction][2]=0; // ให้ค่าความถี่เป็น 0
  }
}
if(direction>(max_step+1)){di_re=direction-(max_step+1);} // ย้ายการพิจารณาทิศการเคลื่อนที่จากคำตอบเดิมไปคำตอบใหม่เป็นทิศการ-
else {di_re=direction+(max_step+1);} // เคลื่อนที่จากคำตอบใหม่ไปสู่คำตอบเดิม
if(tabu_list[di_re][0]==0) // กรณีทิศทางเคลื่อนที่จากคำตอบใหม่ได้คำตอบเดิมมีสถานะไม่เป็นคาบ
{
  tabu_list[di_re][0]=1; // ให้สถานะความเป็นคาบแก่ทิศทางจากคำตอบใหม่ไปสู่คำตอบเดิม
  tabu_list[di_re][1]=1; // ให้ค่าความคงอยู่เป็น 1
  tabu_list[di_re][2]=0; // ให้ค่าความถี่เป็น 0
}
for (n=0;n<=max_step+1;n++) { x[n]=x_best[n]; }
if(count%roundShow==0) // แสดงผลของค่าความคลาดเคลื่อนที่ดีที่สุด และรอบในการค้นหา ณ รอบปัจจุบัน
{
  cout<<"still searching, "<<count<<" moves so far!"<<endl;
  cout<<"The error is "<<error<<endl;
  go_x0=0; // ให้ค่าจำนวนครั้งของการไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นศูนย์
  go_x2=0; // ให้ค่าจำนวนครั้งของการแทนคำตอบย้อนกลับเป็นศูนย์
  go_x1=go_x1+1; // เพิ่มค่าจำนวนครั้งของการแสดงผล
  if(go_x1>=max_clear_tabu) // กรณีที่จำนวนครั้งของการแสดงผลครบตามที่กำหนด(max_clear_tabu) ทำการเก็บค่า-
  {
    for (n=0;n<=max_step+1;n++) { x0[n]=x_best[n]; } // คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีที่หาคำตอบไม่ได้จึงวนย้อนกลับ
    go_x1=0; // ให้ค่าจำนวนครั้งของการแสดงผลเป็นศูนย์
  }
}
}
else // กรณีที่คำตอบเดิมกับคำตอบใหม่เป็นตัวเดียวกัน (กล่าวคือไม่มีค่าใกล้เคียงที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าคำตอบเดิม
{
  direction=0; d=0;
  error=find_error(x,max_step); // เรียกฟังก์ชันหาค่าความคลาดเคลื่อน
  for(k=1;k<=neighborhood_size-1;k++)
  {
    for(n=0;n<=max_step+1;n++) { x_na[n]=x[n]; }
    step_size=find_step_sizeSCF(error); // เรียกฟังก์ชันหาขนาดการเคลื่อนที่
    if(k<=max_step) { if(x_na[k]+step_size<=x_na[k+1]) { x_na[k]=x_na[k]+step_size; } } // ตรวจสอบค่าใกล้เคียงคำตอบ -
    else if(k>=max_step+2&&k<neighborhood_size) // x(k-1)<x(m)<x(k+1) โดยที่ m = k + step_size
    {
      if(x_na[k-(max_step+1)]-step_size>=x_na[k-(max_step+1)-1]) { x_na[k-(max_step+1)]=x_na[k-(max_step+1)]-step_size; }
    }
  }
  if(tabu_list[k][0]!=1&&k!=max_step+1&&k!=neighborhood_size) // ตรวจสอบค่าใกล้เคียงคำตอบต้องไม่มีสถานะความเป็นคาบ
  {
    d=d+1; // d = ทิศทางของค่าใกล้เคียงคำตอบ
    error_na=find_error(x_na,max_step); // หาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าใกล้เคียงคำตอบ
    if(d==1) // ถ้าทิศทางของค่าใกล้เคียงคำตอบเป็นทิศที่ 1
    {
      error=error_na;
      for(n=0;n<=max_step+1;n++) { x_best[n]=x_na[n]; } // กำหนดให้ค่าใกล้เคียงนั้นเป็นคำตอบใหม่
    }
  }
}

```

```

tabu_list[k][2]=tabu_list[k][2]+1; // เพิ่มค่าความถี่ในทิศทางที่เคลื่อนที่จากคำตอบเดิมมายังคำตอบใหม่
if(tabu_list[k][2]>frequency_max) // ตรวจสอบสถานะความเป็นตาบของค่าความถี่
{ tabu_list[k][0]=1; // ให้สถานะความเป็นตาบแก่ทิศทางที่เคลื่อนที่จากคำตอบเดิมมายังคำตอบใหม่
  tabu_list[k][1]=1; // ให้ค่าความถี่อยู่เป็น 1
  tabu_list[k][2]=0; // ให้ค่าความถี่เป็น 0
}
if(k>(max_step+1)) { di=k-(max_step+1); } // ย้ายการพิจารณาทิศทางเคลื่อนที่จากคำตอบเดิมไปคำตอบใหม่เป็นทิศทาง-
else { di=k+(max_step+1); } // เคลื่อนที่จากคำตอบใหม่ไปสู่คำตอบเดิม
if(tabu_list[di][0]==0) // กรณีทิศทางเคลื่อนที่จากคำตอบใหม่ได้คำตอบเดิมมีสถานะไม่เป็นตาบ
{ tabu_list[di][0]=1; // ให้สถานะความเป็นตาบแก่ทิศทางจากคำตอบใหม่ไปสู่คำตอบเดิม
  tabu_list[di][1]=1; // ให้ค่าความถี่อยู่เป็น 1
  tabu_list[di][2]=0; // ให้ค่าความถี่เป็น 0
}
}
}
if(error>=error_na) // หากค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบมากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าใกล้เคียง-
{ error=error_na; // คำตอบให้ค่าใกล้เคียงคำตอบเป็นคำตอบใหม่ และเก็บค่าจำนวนรอบและค่าความ-
  for(n=0;n<=max_step+1;n++) { x_best[n]=x_na[n]; } // คลาดเคลื่อนไว้เป็นคำตอบ
  count_best=count;
  if(error_best>=error) // ตรวจสอบคำตอบที่ดีที่สุด หากค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าค่า-
  { error_best=error; // ความคลาดเคลื่อนของคำตอบปัจจุบันให้คำตอบปัจจุบันเป็นคำตอบที่ดีที่สุด และเก็บค่า-
    for(n=0;n<=max_step+1;n++) { x_ans[n]=x_best[n]; } // จำนวนรอบและค่าความคลาดเคลื่อนไว้เป็นคำตอบที่ดีที่สุด
    time2=time(&timer); // บันทึกเวลาที่เจอคำตอบ
    count_ans=count_best;
  }
  direction=k;
}
}
}
i=0;
for (n=1;n<=max_step;n++) // ตรวจสอบคำตอบใหม่กับคำตอบเดิมว่าไม่เป็นตัวเดียวกัน
{ xb1=x_best[n];
  xb2=x[n];
  if(xb1!=xb2) { i=i+1; }
}
if(i>0) // กรณีคำตอบใหม่ไม่ใช่ตัวเดียวกับคำตอบเดิม
{ tabu_list[direction][2]=tabu_list[direction][2]+1; // เพิ่มค่าความถี่ในทิศทางที่เคลื่อนที่จากคำตอบเดิมมายังคำตอบใหม่
  if(tabu_list[direction][2]>frequency_max) // ตรวจสอบสถานะความเป็นตาบของค่าความถี่
  { tabu_list[direction][0]=1; // ให้สถานะความเป็นตาบแก่ทิศทางที่เคลื่อนที่จากคำตอบเดิมมายังคำตอบใหม่
    tabu_list[direction][1]=1; // ให้ค่าความถี่อยู่เป็น 1
    tabu_list[direction][2]=0; // ให้ค่าความถี่เป็น 0
  }
  if(direction>(max_step+1)) { di_re=direction-(max_step+1); } // ย้ายการพิจารณาทิศทางเคลื่อนที่จากคำตอบเดิมไปคำตอบใหม่เป็นทิศทาง-
  else { di_re=direction+max_step+1; } // เคลื่อนที่จากคำตอบใหม่ไปสู่คำตอบเดิม
  if(tabu_list[di_re][0]==0) // กรณีทิศทางเคลื่อนที่จากคำตอบใหม่ได้คำตอบเดิมมีสถานะไม่เป็นตาบ
  { tabu_list[di_re][0]=1; // ให้สถานะความเป็นตาบแก่ทิศทางจากคำตอบใหม่ไปสู่คำตอบเดิม
    tabu_list[di_re][1]=1; // ให้ค่าความถี่อยู่เป็น 1
    tabu_list[di_re][2]=0; // ให้ค่าความถี่เป็น 0
  }
}
for (n=0;n<=max_step+1;n++) { x[n]=x_best[n]; }

```

```

if(count%roundShow==0) // แสดงผลของค่าความคลาดเคลื่อน และรอบในการค้นหา ณ รอบปัจจุบัน รอบที่เป็นคำตอบ และรอบ-
{ cout<<"still searching,just not a better solution after "<<count<<" moves!"<<endl; // ที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด
cout<<"The error is "<<error<<endl;
cout<<"The best error is "<<error_best<<" count is "<<count_ans<<endl;
go_x0=0; // ให้ค่าจำนวนครั้งของการไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นศูนย์
go_x2=0; // ให้ค่าจำนวนครั้งของการแทนคำตอบย้อนกลับเป็นศูนย์
go_x1=go_x1+1; // เพิ่มค่าจำนวนครั้งของการแสดงผล
if(go_x1>=max_clear_tabu) // กรณีที่จำนวนครั้งของการแสดงผลครบตามที่กำหนด(max_clear_tabu) ทำการเก็บค่า -
{ for (n=0;n<=max_step+1;n++) { x0[n]=x_best[n]; } // ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีที่หาคำตอบไม่ได้ต้องงวนย้อนกลับ
go_x1=0; // ให้ค่าจำนวนครั้งของการแสดงผลเป็นศูนย์
}
}
else // กรณีที่ค่าใกล้เคียงมีสถานะความเป็นตาบอดทั้งหมดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
{ if(count%roundShow==0) // ให้แสดงข้อความไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
{ cout<<"Just not a better solution after "<<count<<" move!"<<endl;
cout<<"Cannot move...all tabu! Reset tabu list!"<<endl;
go_x0=go_x0+1; // เพิ่มค่าจำนวนครั้งของการไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
if(go_x0>=max_clear_tabu) // กรณีที่จำนวนครั้งของการไม่สามารถเคลื่อนที่ได้มากกว่าค่าที่กำหนด(max_clear_tabu)-
{ for (n=0;n<=max_step+1;n++) { x[n]=x0[n]; } // ทำการแทนคำตอบที่เก็บไว้ใช้ย้อนกลับแทนในคำตอบปัจจุบัน
cout<<"G0x0*** = "<<go_x0<<endl;
go_x0=0; // ให้ค่าจำนวนครั้งของการไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นศูนย์
go_x2=go_x2+1; // เพิ่มค่าจำนวนครั้งของการแทนคำตอบย้อนกลับ
if(go_x2>=2) // ถ้าจำนวนครั้งของการแทนคำตอบย้อนกลับเป็น 2 ให้แทนคำตอบด้วยค่าคำตอบ-
{ for (n=0;n<=max_step+1;n++) { x[n]=x_Old[n]; } // เริ่มต้นของโปรแกรม
go_x2=0; // ให้ค่าจำนวนครั้งของการแทนคำตอบย้อนกลับเป็นศูนย์
}
}
}
clear_all_tabu(*tabu_list,size_tabu_list); // เรียกฟังก์ชันยกเลิกสถานะความเป็นตาบอดทั้งตารางสถานะความเป็นตาบอด
}
}
count++; // เพิ่มจำนวนรอบการทำงาน
// เพิ่มค่าความคงอยู่ให้กับทิศทางที่เป็นตาบอด
for (n=1;n<=neighborhood_size;n++) { if(tabu_list[n][0]==1) { tabu_list[n][1]=tabu_list[n][1]+1; } }
}
count_round[roundSCF]=count_ans; // เก็บค่ารอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในตัวแปร count_round
error_round[roundSCF]=error_best; // เก็บค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในตัวแปร error_round
for(n=0;n<=max_step+1;n++) { x_round[roundSCF][n]=x_ans[n]; } // เก็บค่าคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในตัวแปร x_round
// แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อนและรอบการทำงานของคำตอบที่ดีที่สุด ในครั้งการทำงานที่ roundSCF
cout<<"round ="<<roundSCF<<" error_best = "<<error_best<<" count = "<<count_ans<<endl;
time_round[roundSCF]=time2-time1; // เก็บค่าเวลาที่ใช้ในการทำงานในครั้งการทำงานที่ roundSCF
cout<<"time use = "<<time_round[roundSCF]<<endl; // แสดงผลเวลาที่ใช้ในการทำงานในครั้งการทำงานที่ roundSCF
roundSCF++; // เพิ่มค่าจำนวนครั้งการทำงาน
}
e_round=99999;
for(n=1;n<=roundSCF;n++) // ตรวจสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจากการทำงานแต่ละครั้ง เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเป็นคำตอบ
{ if(error_round[n]<e_round)
{ e_round=error_round[n];
}
}

```



```

    for(i=0;i<=size_x;i++) { x_ans[i]=x_round[n][i]; }
    count_ans=count_round[n];
    time_ans=time_round[n];
}
}
for(n=0;n<=max_step+1;n++) // ตรวจสอบหาช่องว่างน้อยที่สุดของการสวิทช์แต่ละครั้งของตัวเก็บประจุ
{ if(n<=max_step)
  { eee=x[n+1]-x[n];
    if(eee_min>=eee)
    { eee_min=eee;
      eee_n=n;
    }
  }
}
write_data(x_ans,max_step,time_ans,count_ans); // ฟังก์ชันเก็บผลการคำนวณในรูปแบบของ dat ไฟล์
}
##### ฟังก์ชันยกเลิกสถานะความเป็นคาบที่ตรงสถานะความเป็นคาบ #####
void clear_all_tabu(int *tabulist1,int sizetabulist)
{ int i;
  for(i=0;i<=sizetabulist;i++) { *(tabulist1+i)=0; } // กำหนดให้ค่าภายในตารางสถานะความเป็นคาบเป็นศูนย์
}
##### ฟังก์ชันการหาค่าความคลาดเคลื่อน #####
double find_error(double *x1,int max_step)
{ // กำหนดชนิดและขนาดของตัวแปร
  double A1[size_AB], B1[size_AB], sumA1, sumB1, AX1, BY1, error1, XX[size_AB], Y[size_AB], x[size_x];
  int n,i;
  div_t k3; // กำหนดชนิดของตัวแปรที่ใช้ในการหาร
  FILE *fpA,*fpB; // โหลดข้อมูลพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์จากไฟล์ data_A.dat และ data_B.dat
  fpA=fopen("data_A.dat","rb");
  fread(&XX,sizeof(double),size_AB,fpA);
  fclose(fpA);
  fpB=fopen("data_B.dat","rb");
  fread(&Y,sizeof(double),size_AB,fpB);
  fclose(fpB);
  // กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ
  XX[1]=0; Y[1]=0; // กำหนดให้ฮาร์มอนิกที่ 1 เป็น 0
  for(n=0;n<=max_harmonic;n++) { A1[n]=0; B1[n]=0; }
  for(i=0;i<=size_x;i++) { x[i]=0; }
  for(i=0;i<=max_step+1;i++) { x[i]=*(x1+i); }
  for(n=1;n<=max_harmonic;n++) // คำนวณหาพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์จากรูปแบบการสวิทช์ตัวเก็บประจุ
  { sumA1=0;
    sumB1=0;
    if(n==1)
    { for(i=1;i<=max_step+1;i++)
      { k3=div(i,2);
        if(k3.rem==1)
        { sumA1=sumA1+fixCase1*(-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)+sin(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n);
          sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n);
        }
      }
    }
  }
}

```

```

else
{
    sumA1=sumA1+fixCase2*(-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i])/(1+n)+sin(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1])/(1+n));
    sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i])/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1])/(1+n));
}
}
}
else
{
    for(i=1;i<=max_step+1;i++)
    {
        k3=div(i,2);
        if(k3.rem==1)
        {
            sumA1=sumA1+fixCase1*(sin(x[i]+fixCase1In-n*x[i])/(1-n)-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i])/(1+n)-sin(x[i-1]+fixCase1In-n*x[i-1])/(1-n)+
            sin(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1])/(1+n));
            sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i])/(1+n)-cos(x[i]+fixCase1In-n*x[i])/(1-n)+cos(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1])/(1+n)+
            cos(x[i-1]+fixCase1In-n*x[i-1])/(1-n));
        }
        else
        {
            sumA1=sumA1+fixCase2*(sin(x[i]+fixCase2In-n*x[i])/(1-n)-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i])/(1+n)-sin(x[i-1]+fixCase2In-n*x[i-1])/(1-n)+
            sin(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1])/(1+n));
            sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i])/(1+n)-cos(x[i]+fixCase2In-n*x[i])/(1-n)+cos(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1])/(1+n)+
            cos(x[i-1]+fixCase2In-n*x[i-1])/(1-n));
        }
    }
}
A1[n]=sumA1;
B1[n]=sumB1;
if(A1[n]<=pow(10,-5)) { A1[n]=0; }
if(B1[n]<=pow(10,-5)) { B1[n]=0; }
//cout<<"A["<<n<<"] = "<<A1[n]<<" B["<<n<<"] = "<<B1[n]<<endl;
}
error1=0;
for(n=1;n<=max_harmonic;n++) // หาค่าความคลาดเคลื่อนแบบผลรวมกำลังสอง
{
    AX1=A1[n]-XX[n];BY1=B1[n]-Y[n];
    error1=error1+pow(AX1,2)+pow(BY1,2);
}
return(error1); // ส่งค่าความคลาดเคลื่อนกลับสู่ฟังก์ชันการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
}
// ##### ฟังก์ชันเก็บผลการคำนวณในรูปแบบของ dat ไฟล์ #####
void write_data(double *x1,int max_step,int time_ans,int count)
{
    // กำหนดชนิดของตัวแปรในฟังก์ชัน
    double A1[size_AB], B1[size_AB], sumA1, sumB1, AX1, BY1, x[size_x], error1, XX[size_AB], Y[size_AB];
    int n,i;
    div_t aaa,k3; // กำหนดชนิดของตัวแปรที่ใช้ในการหาร
    FILE *fpA,*fpB; // โหลดข้อมูลพารามิเตอร์อื่น ๆ จากไฟล์ data_A.dat และ data_B.dat
    fpA=fopen("data_A.dat","rb");
    fread(&XX,sizeof(double),size_AB,fpA);
    fclose(fpA);
    fpB=fopen("data_B.dat","rb");
    fread(&Y,sizeof(double),size_AB,fpB);
    fclose(fpB);
}

```

```

// กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรในฟังก์ชัน
for(n=0;n<=max_harmonic;n++) { A1[n]=0; B1[n]=0; }
for(i=0;i<=size_x;i++) { x[i]=0; }
for(i=0;i<=max_step+1;i++) { x[i]=*(x1+i); }
for(n=1;n<=max_harmonic;n++) // คำนวณหาพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์จากรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของค่าคอม
{ sumA1=0;
  sumB1=0;
  if(n==1)
  { for(i=1;i<=max_step+1;i++)
    { k3=div(i,2);
      if(k3.rem==1)
      { sumA1=sumA1+fixCase1*(-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)+sin(*(x1+i-1)+fixCase1In+n*(x1+i-1))/(1+n);
        sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)+cos(*(x1+i-1)+fixCase1In+n*(x1+i-1))/(1+n);
      }
      else
      { sumA1=sumA1+fixCase2*(-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)+sin(*(x1+i-1)+fixCase2In+n*(x1+i-1))/(1+n);
        sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)+cos(*(x1+i-1)+fixCase2In+n*(x1+i-1))/(1+n);
      }
    }
  }
  else
  { for(i=1;i<=max_step+1;i++)
    { k3=div(i,2);
      if(k3.rem==1)
      { sumA1=sumA1+fixCase1*(sin(x[i]+fixCase1In-n*x[i]))/(1-n)-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)-sin(x[i-1]+fixCase1In-n*x[i-1]))/(1-n)+
        sin(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n);
        sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)-cos(x[i]+fixCase1In-n*x[i]))/(1-n)+cos(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n)+
        cos(x[i-1]+fixCase1In-n*x[i-1]))/(1-n);
      }
      else
      { sumA1=sumA1+fixCase2*(sin(x[i]+fixCase2In-n*x[i]))/(1-n)-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)-sin(x[i-1]+fixCase2In-n*x[i-1]))/(1-n)+
        sin(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n);
        sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)-cos(x[i]+fixCase2In-n*x[i]))/(1-n)+cos(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n)+
        cos(x[i-1]+fixCase2In-n*x[i-1]))/(1-n);
      }
    }
  }
  A1[n]=sumA1;
  B1[n]=sumB1;
  if(A1[n]<=pow(10,-6)) { A1[n]=0; } // ตรวจสอบขอบเขตค่าสุดท้ายที่ใช้ในการพิจารณาพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์
  if(B1[n]<=pow(10,-6)) { B1[n]=0; } // ตรวจสอบขอบเขตค่าสุดท้ายที่ใช้ในการพิจารณาพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์
}
error1=0;
for(n=2;n<=max_harmonic;n++) // หากค่าความคลาดเคลื่อนแบบผลรวมกำลังสอง
{ AX1=A1[n]-XX[n];BY1=B1[n]-Y[n];
  error1=error1+pow(AX1,2)+pow(BY1,2);
}
FILE *fp_data1; // บันทึกค่าพารามิเตอร์ A ของอนุกรมฟูรีเยร์ที่ได้จากรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของ-
fp_data1=fopen("data_test2_1_A.dat","wb"); // ค่าคอมไว้ในไฟล์ data_test2_1_A.dat

```

```

fwrite(&A1,sizeof(double),20,fp_data1);
fclose(fp_data1);
FILE *fp_data2; // บันทึกค่าพารามิเตอร์ B ของอนุกรมฟูรีเยร์ที่ได้จากรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของ-
fp_data2=fopen("data_test2_1_B.dat","wb"); // ค่าตอบไว้ในไฟล์ data_test2_1_B.dat
fwrite(&B1,sizeof(double),20,fp_data2);
fclose(fp_data2);
FILE *fp_data3; // บันทึกค่าพารามิเตอร์ XX ของอนุกรมฟูรีเยร์ที่ได้ที่ได้โหลดมาจากคอนตันโปรแกรม-
fp_data3=fopen("data_test2_1_X.dat","wb"); // ไว้ในไฟล์ data_test2_1_X.dat
fwrite(&XX,sizeof(double),20,fp_data3);
fclose(fp_data3);
FILE *fp_data4; // บันทึกค่าพารามิเตอร์ Y ของอนุกรมฟูรีเยร์ที่ได้ที่ได้โหลดมาจากคอนตันโปรแกรม-
fp_data4=fopen("data_test2_1_Y.dat","wb"); // ไว้ในไฟล์ data_test2_1_Y.dat
fwrite(&Y,sizeof(double),20,fp_data4);
fclose(fp_data4);
FILE *fp_data5; // บันทึกรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุไว้ในไฟล์ data_test2_1_step.dat
fp_data5=fopen("data_test2_1_step.dat","wb");
fwrite(&x,sizeof(double),101,fp_data5);
fclose(fp_data5);
for(n=0;n<=max_harmonic;n++) // แสดงผลของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ได้จากรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บ-
{ cout<<" A["<n<<" = "<<A1[n]<<" \t XX["<n<<"] = "<<XX[n]; // ประจุของค่าตอบ
  cout<<"\t B["<n<<" = "<<B1[n]<<"\t Y["<n<<"] = "<<Y[n]<<endl;
}
aaa=div(time_ans,60);
cout<<" time to use run program is "<<aaa.quot<<"min. "<<aaa.rem<<" sec."<<endl; // แสดงเวลาที่ใช้ในการทำงานของโปรแกรม
cout<<" error ans = "<<error1<<endl; // แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของค่าตอบ
cout<<" C is = "<<C*pow(10,6)<<" microfarad"<<endl; // แสดงขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้
cout<<" count ans = "<<count<<endl; // แสดงจำนวนรอบของค่าตอบ
for(i=0;i<=max_step+1;i++) { cout<<" x["<i<<"] is "<<x[i]<<endl; } // แสดงผลค่าตอบของรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
}
// ##### ฟังก์ชันหาขนาดของการเคลื่อนที่ #####
double find_step_sizeSCF(double error2)
{ int ran_n; // กำหนดชนิดของตัวแปรเป็นจำนวนเต็ม
  double step_size,aaa,value_move,j; // กำหนดชนิดของตัวแปรเป็นจำนวนจริง
  div_t k; // กำหนดชนิดของตัวแปรที่ใช้ในการหาร
  if(error2>40) // กรณีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 40 จะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อกำหนด-
  { if(error2>2000) { step_size=0.1; } // ขนาดของการเคลื่อนที่แบบคงที่
    else if(error2>1000) { step_size=0.05; }
    else if(error2>500) { step_size=0.01; }
    else if(error2>100) { step_size=0.005; }
    else if(error2>50) { step_size=0.001; }
    else if(error2>10) { step_size=0.0001; }
    else { step_size=0.00001; }
  }
  else // กรณีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเท่ากับ 40 จะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อ-
  { if(error2>=30) { value_move=1000; } // กำหนดขนาดการเคลื่อนที่แบบสุ่ม
    else if(error2>=10) { value_move=500; }
    else if(error2>=5) { value_move=50; }
    else if(error2>=1) { value_move=10; }
    else { value_move=1; }
  }
}

```

```
j=value_move;
k=div(j,1);
randomize();
ran_n=random(k,quot);
aaa=ran_n;
step_size=aaa/100000;
}
return (step_size);
}
```

// ทำเป็นจำนวนเต็มด้วยการหารด้วย 1  
// กำหนดให้ทำการสุ่มแบบไม่ซ้ำค่าเดิม  
// ทำการสุ่มค่า

ภาคผนวก จ

โปรแกรมการ MATLAB ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุ  
ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม

```

#####
// โปรแกรมการ MATLAB ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบ
// จินเนติกอัลกอริทึม
// โดย ชูชาติ วุฒิเนตรเนตริภักย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

clear all;
error_end=0.01;
error_min=9999999;
error_ans=9999999;

Lind=50; % ความยาวของโครโมโซม (จำนวนตัวแปร)
NIND = 60; % จำนวนประชากรเริ่มต้น Number of individuals
MAXGEN = 1500; % จำนวนรอบการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม
NVAR = 50; % จำนวนค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการค้นหา Number of variables
GGAP = 0.8; % ร้อยละของการคัดเลือกลูกข่ายพันธุ์ Generation gap
PC = 0.9; % ความน่าจะเป็นของการ คrossover Probability of crossover
Pm=0.06; % ความน่าจะเป็นของการมิวเตชัน Probability of Mutation
length = 10; % ความละเอียดของพารามิเตอร์แต่ละตัว
sell0='sus'; % sell0 = ชนิดของตัวแปรเป็นคู่ ,
% 'sus' = วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเพิ่มคู่ครอบจักรวาล
recom='xovdp'; % recombination :crossover operators ชนิดการทำ crossover
% 'xovdp'=double-point crossover

% แสดงผลของการกำหนดค่าเริ่มต้นพารามิเตอร์ของจินเนติกอัลกอริทึม
sprintf('crossover operators is xovdp = double-point crossover')
sprintf('Probability of crossover is = %f',PC)
sprintf('Type Select is = %s',sell0)
sprintf('NIND is %d',NIND)
sprintf('GGAP is = %f',GGAP)
sprintf('The Percent Mutation is = %f',Pm)
time1=clock;

sprintf('The length is = %f',length) % ความละเอียดของพารามิเตอร์แต่ละตัว Precision of variables =length;
for (i=1:1:NVAR+1) % กำหนดค่าเริ่มต้นของคำตอบ
    x(i)=(2*pi*i)/(NVAR+1);
end
x0=x;
for n=1:1:NVAR
    preci(n)=length;
    upperlimit(n)=0.01;
    lowerlimit(n)=-0.01;
    code(n)=0;
    scale(n)=0;
    lowerbound(n)=1;
    upperbound(n)=1;
end
FieldD =[    preci; % length เป็นโครงสร้างสำหรับกำหนดความยาวในแต่ละโครโมโซม
            lowerlimit; % ขอบเขตค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการค้นหา
            upperlimit; % ขอบเขตค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการค้นหา
            code; % โครงสร้างสำหรับการเลือกรหัสที่ใช้ (matlab)มี 2 แบบคือ

```

```

% 0 = การเข้ารหัสแบบไบนารีมาตรฐาน (standard binary),
% 1 = การเข้ารหัสแบบรหัสเกรย์ (Gray code)
scale; % โครงสร้างสำหรับเลือกเทคนิคการสเกลค่าในช่วงขอบเขตต่ำสุดที่
% เป็นไปได้และขอบเขตสูงสุดที่เป็นไปได้มี 2 แบบ
% 0 = การสเกลเชิงเลขคณิต (arithmetic scaling)
% 1 = การสเกลเชิงลอการิทึม (logarithmic scaling)
lowerbound; % กำหนดรูปแบบว่าจะนำค่าของเขตต่ำสุด(lower limit) ไปร่วมพิจารณาด้วยหรือไม่ โดย
% 0 = ไม่ต้องการพิจารณาค่าตอบที่ค่าขอบเขตต่ำสุด 1= ต้องการพิจารณาค่าตอบที่ค่า
% ขอบเขตต่ำสุด
upperbound;]; % กำหนดรูปแบบว่าจะนำค่าของเขตสูงสุด (upper limit) ไปร่วมพิจารณา
% ด้วยหรือไม่ โดย 0 = ไม่ต้องการพิจารณาค่าตอบที่ค่าขอบเขตสูงสุด 1=ต้องการพิจารณา
% ค่าตอบที่ค่าขอบเขตสูงสุด
s_preci=sum(preci); % s_preci คือความยาวของโครโมโซม
Chrom = crtbp(NIND,s_preci); % สร้างประชากรเริ่มต้นให้กับ GA Chrom คือกลุ่มของโครโมโซมเริ่มต้น ได้จากการสุ่ม
gen = 0; % Counter
pop = bs2rv(Chrom,FieldD); % โครโมโซมถูกถอดรหัสให้เป็นรูปแบบฟีโนไทป์ เลขฐานสิบ
% pop รูปแบบฟีโนไทป์ที่ถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
% FieldD รูปแบบของการกำหนดค่าในการถอดรหัสจากโครโมโซมที่เป็นไบนารีเป็น
% รูปแบบฟีโนไทป์ที่เป็นเลขฐานสิบ

for u=1:NIND
for z=1:NVAR
xx(z)=pop(u,z);
if z==1
if (x0(z)+xx(z)<x0(z+1))&(x0(z)+xx(z)>0)
x(z)=x0(z)+xx(z); % กรณีเป็นไปตามเงื่อนไขของคำตอบคำนวณหาคำตอบใหม่
else
x(z)=x0(z); % กรณีไม่เป็นไปตามเงื่อนไขให้คำตอบใหม่เท่ากับคำตอบเดิม
end
elseif z>1
if (x0(z)+xx(z)<x0(z+1))&(x0(z)+xx(z)>x0(z-1))&(x0(z)+xx(z)>0)
x(z)=x0(z)+xx(z); % กรณีเป็นไปตามเงื่อนไขของคำตอบคำนวณหาคำตอบใหม่
else
x(z)=x0(z); % กรณีไม่เป็นไปตามเงื่อนไขให้คำตอบใหม่เท่ากับคำตอบเดิม
end
end
end
x(NVAR+1)=2*pi; % กำหนดจุดการสวิตช์สุดท้ายคงที่
x0(NVAR+1)=2*pi; % กำหนดจุดการสวิตช์สุดท้ายคงที่
if (x(1)>0)
for z=2:1:NVAR
if (x(z-1)<x(z))&(x(z)<x(z+1))
error(u,1)=objective_SCF(x); % หาค่าความคลาดเคลื่อนจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์
else
error(u,1)=999999; % กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนกรณีไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของคำตอบ
end
end
else
error(u,1)=999999; % กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนกรณีไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของคำตอบ
end
end

```



```

end
[error_min,index]=min(error); % หาค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
xx=pop(index,:); % เก็บตัวแปรเพิ่มที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในตัวแปร xx
for z=1:NVAR % เก็บคำตอบที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในตัวแปร best_sol
    best_sol(z)=x(z)+xx(z);
end
if error_min<error_ans % ตรวจสอบค่าความผิดพลาดของคำตอบใหม่เทียบกับคำตอบเดิมที่ดีที่สุดหากคำตอบ
    error_ans=error_min; % ใหม่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าคำตอบเดิมแทนคำตอบใหม่ในคำตอบที่ดีที่สุด
    gen_ans=gen;
    sol_ans2=best_sol;
    x0=best_sol; % กำหนดให้คำตอบใหม่ที่ได้เป็นคำตอบเริ่มต้น
    x=best_sol; % กำหนดให้คำตอบใหม่ที่ได้เป็นคำตอบปัจจุบัน
    time2=clock; % บันทึกเวลาที่เจอคำตอบไว้ในตัวแปร time2
    gen_error2(1)=gen_ans;
    gen_error2(2)=error_ans;
end
while (gen<MAXGEN) & (error_min>error_end) % วงรอบการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม
    FitnV = ranking(error); % การคำนวณค่าความเหมาะสม โดยใช้วิธีการจัดอันดับ(Ranking selection)
    % ค่า error ที่ได้เรียกว่า ค่าการประมาณ (objective value)
    % จะนำไปคำนวณค่าความเหมาะสม โดยใช้วิธีการจัดอันดับ(Ranking selection)
    % FitnV คือค่าความเหมาะสมที่ได้จากวิธีการจัดอันดับ
    % ใช้ค่าความเหมาะสมข้างต้น เพื่อคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์
    % ด้วยวิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล
    % (stochastic universal sampling:sus)
    SelCh = select(sell0,Chrom,FitnV,GGAP); % การทำครอสโอเวอร์ ด้วยวิธี การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด (double-point crossover)
    SelCh1 = recomb('xovsp',SelCh,PC); % SelCh1 โครโมโซมหลังจากการทำครอสโอเวอร์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์ SelCh
    % PC ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์
    SelCh2 = mut(SelCh1,Pm); % การทำมิวเทชัน
    % SelCh2 คือ โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์
    x0(NVAR+1)=2*pi; % กำหนดจุดการสุ่มค่าสุดท้ายคงที่
    pop1 = bs2rv(SelCh2,FieldD); % โครโมโซมถูกถอดรหัสให้เป็นรูปแบบฟีนไทป์ เลขฐานสิบ
    % pop1 รูปแบบฟีนไทป์ที่ถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
    % FieldD รูปแบบของการกำหนดค่าในการถอดรหัสจากโครโมโซมที่เป็นไบนารีเป็น
    % รูปแบบฟีนไทป์ที่เป็นเลขฐานสิบ
    for u=1:size(SelCh2,1) % ตรวจสอบเงื่อนไขของคำตอบในกรณีบวกค่าตัวแปรเพิ่ม(xx)ในคำตอบ(x)
        x(NVAR+1)=2*pi; % กำหนดจุดการสุ่มค่าสุดท้ายคงที่
        for z=1:NVAR
            xx(z)=pop1(u,z); % เก็บค่าของตัวแปรเพิ่มที่ได้จาก pop1 ไว้ในตัวแปร xx
            if z==1
                if (x0(z)+xx(z)<x0(z+1))&(x0(z)+xx(z)>0)
                    x(z)=x0(z)+xx(z); % กรณีเป็นไปตามเงื่อนไขของคำตอบคำนวณหาคำตอบใหม่
                else
                    x(z)=x0(z); % กรณีไม่เป็นไปตามเงื่อนไขให้คำตอบใหม่เท่ากับคำตอบเดิม
                end
            elseif z>1
                if (x0(z)+xx(z)<x0(z+1))&(x0(z)+xx(z)>x0(z-1))&(x0(z)+xx(z)>0)
                    x(z)=x0(z)+xx(z); % กรณีเป็นไปตามเงื่อนไขของคำตอบคำนวณหาคำตอบใหม่
                else
                    x(z)=x0(z); % กรณีไม่เป็นไปตามเงื่อนไขให้คำตอบใหม่เท่ากับคำตอบเดิม
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
x(NVAR+1)=2*pi; % กำหนดจุดการสวิตซ์สุดท้ายคงที่
x0(NVAR+1)=2*pi; % กำหนดจุดการสวิตซ์สุดท้ายคงที่
if( x(1)>0)
    for z=2:1:NVAR
        if (x(z-1)<x(z))&(x(z)<x(z+1)) % ตรวจสอบเงื่อนไขของคำตอบ x(i-1)<x(i)<x(i+1)
            error1(u,1)=objective_SCF(x); % ค้นหาค่าความคลาดเคลื่อนจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์
        else
            error1(u,1)=9999999; % กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนกรณีไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของคำตอบ
        end
    end
end
else
    error1(u,1)=9999999; % กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนกรณีไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของคำตอบ
end
end
gen = gen+1; % เพิ่มจำนวนรอบการทำงาน
[error_min,index]=min(error1); % หาค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
xx=pop1(index,:); % เก็บตัวแปรเพิ่มที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในตัวแปร xx
for z=1:NVAR % เก็บคำตอบที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในตัวแปร best_sol
    best_sol(z)=x(z)+xx(z);
end
if error_min<error_ans % ตรวจสอบค่าความผิดพลาดของคำตอบใหม่เทียบกับคำตอบเดิมที่ดีที่สุดหากคำตอบ
    error_ans=error_min; % ใหม่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าคำตอบเดิมแทนคำตอบใหม่ในคำตอบที่ดีที่สุด
    gen_ans=gen;
    sol_ans2=best_sol;
    x0=best_sol; % กำหนดให้คำตอบใหม่ที่ได้เป็นคำตอบเริ่มต้น
    x=best_sol; % กำหนดให้คำตอบใหม่ที่ได้เป็นคำตอบปัจจุบัน
    time2=clock; % บันทึกเวลาที่เจอคำตอบไว้ในตัวแปร time2
    gen_error2(1)=gen_ans;
    gen_error2(2)=error_ans;
end
if mod(gen,500)==0 % แสดงผลของของค่าความคลาดเคลื่อน และค่าความคลาดเคลื่อนที่ดีที่สุดทุกๆ 500 รอบ
    sprintf('the gen is %d, the error is %g',gen,error_min)
    sprintf('gen ans is %d and error minimum is %f',gen_error2(1),gen_error2(2))
end
% โครโมโซมเดิมจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมลูกหลานที่ได้จาก SelCh2 ซึ่งประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอน
% การแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ
[Chrom error]=reins(Chrom,SelCh2,1,1,error,error1);
end % ย้อนกลับขึ้นไปตรวจสอบเงื่อนไขของการจบโปรแกรม
for i=1:1:52 % จัดรูปแบบคำตอบของรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
    if i==1
        sol_ans3(i)=0;
    elseif i==52
        sol_ans3(i)=2*pi;
    else
        sol_ans3(i)=sol_ans2(i-1);
    end
end

```

```

end
fp_sol=fopen('d:\thesis\program\TestSCF\GA_step.dat','wb'); %บันทึกรูปแบบการสวิตซ์ของคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในไฟล์ชื่อ GA_step.dat
fwrite(fp_sol,sol_ans3,'double');
fclose(fp_sol);
fp_gen_err=fopen('d:\thesis\program\TestSCF\GA_gen_error.dat','wb'); %บันทึกจำนวนรอบ และค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบที่ดีที่สุดไว้
fwrite(fp_gen_err,gen_error2,'double'); % ในไฟล์ GA_gen_error.dat
fclose(fp_gen_err);
% แสดงผลของการรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุด้วยการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม
sprintf('answer sol is %f',sol_ans3); % แสดงรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
sprintf('error anser is %f',error_ans) % แสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากรูปแบบการสวิตซ์
sprintf('gen ans is %d',gen_ans) % แสดงจำนวนรอบที่พบคำตอบ
time_ans=time2-time1; % คำนวณเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ
sprintf('time use is %f',time_ans) % แสดงเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ
sprintf('##### the end of program #####')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ##### ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ #####
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function error=objective_SCF(x)
% กำหนดค่าของตัวแปร
Vm=325;
max_step=50;
C=3000*10^-6;
L=0.4*10^-3;
RL=1.7;
w=2*pi*50;
k1=RL^2+(w*L)^2;
k2=(w*RL*C)^2+(1-w*w*L*C)^2;
fixCase2=Vm/(2*pi*sqrt(k1));
fixCase2ln=atan(w*L/RL);
fixCase1=Vm*w*C/(2*pi*sqrt(k2));
fixCase1ln=pi/2+atan(w*RL*C/(1-w*w*L*C));
max_harmonic=19;
A0=0;
for(n=1:max_harmonic)
A(n)=0;
B(n)=0;
end
end
fp_sol=fopen('d:\thesis\program\GeneticSCF\sol_ans.dat','rb'); % อ่านข้อมูลพารามิเตอร์อนุกรมฟูริเยร์จากไฟล์ sol_ans.dat
[AB,count]=fread(fp_sol,39,'double');
fclose(fp_sol);
for jj=1:1:20 % แทนค่าพารามิเตอร์อนุกรมฟูริเยร์ของกระแสฮาร์มอนิกลงในตัวแปร XX, Y
if jj==1
AA0=AB(1);
else
XX(jj-1)=AB(jj);
Y(jj-1)=AB(jj+19);
end
end
end
XX(1)=0; Y(1)=0;

```

```

%find a(n) and b(n)
for n=1:1:max_harmonic % คำนวณหาค่าพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์ (A, B) จากรูปแบบการสวิตช์ (x)
    sumA1=0;
    sumB1=0;
    if n==1
        for i=1:1:max_step+1
            if i==1
                sumA1=sumA1+fixCase1*(-sin(x(i)+fixCase1In+n*x(i))/(1+n)+sin(0+fixCase1In+n*0)/(1+n));
                sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x(i)+fixCase1In+n*x(i))/(1+n)+cos(0+fixCase1In+n*0)/(1+n));
            else
                k3=mod(i,2);
                if k3==1
                    sumA1=sumA1+fixCase1*(-sin(x(i)+fixCase1In+n*x(i))/(1+n)+sin(x(i-1)+fixCase1In+n*x(i-1))/(1+n));
                    sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x(i)+fixCase1In+n*x(i))/(1+n)+cos(x(i-1)+fixCase1In+n*x(i-1))/(1+n));
                else
                    sumA1=sumA1+fixCase2*(-sin(x(i)+fixCase2In+n*x(i))/(1+n)+sin(x(i-1)+fixCase2In+n*x(i-1))/(1+n));
                    sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x(i)+fixCase2In+n*x(i))/(1+n)+cos(x(i-1)+fixCase2In+n*x(i-1))/(1+n));
                end
            end
        end
    else
        for i=1:1:max_step+1
            if i==1
                sumA1 = sumA1+fixCase1*(sin(x(i)+fixCase1In-n*x(i))/(1-n)-sin(x(i)+fixCase1In+n*x(i))/(1+n)-
                    sin(0+fixCase1In-n*0)/(1-n)+sin(0+fixCase1In+n*0)/(1+n));
                sumB1 = sumB1+fixCase1*(-cos(x(i)+fixCase1In+n*x(i))/(1+n)-cos(x(i)+fixCase1In-n*x(i))/(1-n)+
                    cos(0+fixCase1In+n*0)/(1+n)+cos(0+fixCase1In-n*0)/(1-n));
            else
                k3=mod(i,2);
                if k3==1
                    sumA1 = sumA1+fixCase1*(sin(x(i)+fixCase1In-n*x(i))/(1-n)-sin(x(i)+fixCase1In+n*x(i))/(1+n)-sin(x(i-1)+
                        fixCase1In-n*x(i-1))/(1-n)+sin(x(i-1)+fixCase1In+n*x(i-1))/(1+n));
                    sumB1 = sumB1+fixCase1*(-cos(x(i)+fixCase1In+n*x(i))/(1+n)-cos(x(i)+fixCase1In-n*x(i))/(1-n)+cos(x(i-1)+
                        fixCase1In+n*x(i-1))/(1+n)+cos(x(i-1)+fixCase1In-n*x(i-1))/(1-n));
                else
                    sumA1 = sumA1+fixCase2*(sin(x(i)+fixCase2In-n*x(i))/(1-n)-sin(x(i)+fixCase2In+n*x(i))/(1+n)-sin(x(i-1)+
                        fixCase2In-n*x(i-1))/(1-n)+sin(x(i-1)+fixCase2In+n*x(i-1))/(1+n));
                    sumB1 = sumB1+fixCase2*(-cos(x(i)+fixCase2In+n*x(i))/(1+n)-cos(x(i)+fixCase2In-n*x(i))/(1-n)+cos(x(i-1)+
                        fixCase2In+n*x(i-1))/(1+n)+cos(x(i-1)+fixCase2In-n*x(i-1))/(1-n));
                end
            end
        end
    end
    A(n)=sumA1;
    B(n)=sumB1;
    if A(n)<=10^-5 % ตรวจสอบขอบเขตต่ำสุดของพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์
        A(n)=0;
    end
    if B(n)<=10^-5 % ตรวจสอบขอบเขตต่ำสุดของพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์

```



ภาคผนวก ข

โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด  
ด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์

```

#####
// โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบเกรเดียนต์
// โดย ชูชาติ วุฒินทรเนติรักษ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####

#####          กำหนดเซคเตอร์ไฟล์          #####

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include <dos.h>
#include <iostream.h>
#include <fstream.h>
#include <stdlib.h>

#####          กำหนดค่าตัวแปรคงที่          #####

const int fix_AB=20;          // ขนาดของตัวแปรสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์
const int fix_G=128;          // ขนาดของตัวแปรข้อมูลกระแส
const int size_AB=20;          // ขนาดของตัวแปรสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์
const int size_x=128;          // ขนาดของตัวแปรข้อมูลกระแส
const int max_harmonic=19;     // ฮาร์มอนิกสูงสุดที่พิจารณา
const int roundShow=40;       // จำนวนรอบที่ต้องการแสดงผลในแต่ละครั้ง
const int Vm=325;              // ขนาดของแรงดันสูงสุด ( $V_{peak}$ )
const double error_min=0.1;    // ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่พิจารณา
const double C=3000*pow(10,-6); // ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรกรองฮาร์มอนิก
const double L=0.4*pow(10,-3); // ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรองฮาร์มอนิก
const double RL=1.7;           // ความต้านของของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรองฮาร์มอนิก
const double pi=M_PI;
const int f=50;                 // ความถี่มูลฐาน
const double w=2*pi*f;          // ความเร็วเชิงมุม
const double k1=pow(RL,2)+pow(w*L,2);
const double k2=pow(w*RL*C,2)+pow(1-w*L*C,2);
const double fixCase2=Vm/(2*pi*sqrt(k1));
const double fixCase2In=atan(w*L/RL);
const double fixCase1=Vm*w*C/(2*pi*sqrt(k2));
const double fixCase1In=pi/2+atan(w*RL*C/(1-w*L*C));
const int Switch_step=51;       // จำนวนครั้งในการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

#####          โปรแกรมหลัก          #####

void main()
{ void clrscr(void);           // ยกเลิกหน่วยความจำเดิมทั้งหมด
  time_t timer;                // กำหนดให้มีการนับเวลา
  div_t k3,aaa;                 // กำหนดชนิดของตัวแปรที่ใช้ในการหาร
  // กำหนดชนิดของตัวแปร และค่าเริ่มต้น
  int round, round_max=500, round_ans=0, time_ans, i, n,time1, time2, max_step, ran_step;
  double A[size_AB], B[size_AB], A_best[size_AB], B_best[size_AB], A_ans[size_AB], B_ans[size_AB], XX[size_AB], Y[size_AB];
  double x_best[size_x], x_ans[size_x], x[size_x], x0[size_x], G[size_x], G0[size_x], d[size_x], d0[size_x];
  double dAdx[size_AB][size_x], dBdx[size_AB][size_x], dJdx[size_x], sumA1, sumB1, beta, GG0, GG, error, error_best;
  FILE *fpA,*fpB;              // โหลดข้อมูลพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์จากไฟล์ data_A.dat และ data_B.dat ไปไว้ที่ตัว
  fpA=fopen("data_A.dat","rb"); // แปร XX และ Y ตามลำดับ
  fread(&XX,sizeof(double),size_AB,fpA);

```

```

fclose(fpA);
fpB=fopen("data_B.dat","rb");
fread(&Y,sizeof(double),size_AB,fpB);
fclose(fpB);
// กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
for(n=0;n<=max_harmonic;n++) { A[n]=0; B[n]=0; A_best[n]=0; B_best[n]=0; A_ans[n]=0; B_ans[n]=0; }
error_ans=9999;
ran_step=Switch_step;
max_step=ran_step;
cout<<endl<<"max_step = "<<max_step<<endl; // แสดงจำนวนครั้งในการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
for(i=0;i<=max_step;i++) { x[i]=(2*pi*i)/(max_step); } // กำหนดรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุเริ่มต้น

for(n=1;n<=max_harmonic;n++) // คำนวณหาพารามิเตอร์ A, B ของอนุกรมฟูรีเยร์จากรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
{ sumA1=0;
  sumB1=0;
  if(n==1) // กรณีฮาร์โมนิกที่ 1
  { for(i=1;i<=max_step+1;i++)
    { k3=div(i,2);
      if(k3.rem==1)
      { sumA1=sumA1+fixCase1*(-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)+sin(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n);
        sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n);
      }
      else
      { sumA1=sumA1+fixCase2*(-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)+sin(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n);
        sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n);
      }
    }
  }
  else // กรณีฮาร์โมนิกมากกว่า 1
  { for(i=1;i<=max_step+1;i++)
    { k3=div(i,2);
      if(k3.rem==1)
      { sumA1=sumA1+fixCase1*(sin(x[i]+fixCase1In-n*x[i]))/(1-n)-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)-sin(x[i-1]+fixCase1In-n*x[i-1]))/(1-n)+
        sin(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n);
        sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)-cos(x[i]+fixCase1In-n*x[i]))/(1-n)+cos(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n)+
        cos(x[i-1]+fixCase1In-n*x[i-1]))/(1-n);
      }
      else
      { sumA1=sumA1+fixCase2*(sin(x[i]+fixCase2In-n*x[i]))/(1-n)-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)-sin(x[i-1]+fixCase2In-n*x[i-1]))/(1-n)+
        sin(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n);
        sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)-cos(x[i]+fixCase2In-n*x[i]))/(1-n)+cos(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n)+
        cos(x[i-1]+fixCase2In-n*x[i-1]))/(1-n);
      }
    }
  }
}
A[n]=sumA1;
B[n]=sumB1;
if(A[n]<=pow(10,-5)) {A[n]=0;} // ตรวจสอบขอบเขตค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ที่ได้จากรูปแบบการสับสวิตซ์
if(B[n]<=pow(10,-5)) {B[n]=0;}

```



```

}
// ##### หากค่าอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เทียบกับค่ารูปแบบการสวิตช์ (x) dAdx[n][i], dBdx[n][i] #####
for(n=2;n<=max_harmonic;n++)
{
for(i=0;i<=max_step;i++)
{
if(i==0)
{
dAdx[n][i]=fixCase1*pow(-1,i+1)*(cos(x[i]+fixCase1*ln(-n*x[i]))-cos(x[i]+fixCase1*ln(n*x[i])));
dBdx[n][i]=fixCase1*pow(-1,i+2)*(-sin(x[i]+fixCase1*ln(-n*x[i]))-sin(x[i]+fixCase1*ln(n*x[i])));
}
else if(i==max_step)
{
dAdx[n][i]=fixCase1*pow(-1,i+1)*(cos(x[i]+fixCase1*ln(-n*x[i]))-cos(x[i]+fixCase1*ln(n*x[i])));
dBdx[n][i]=fixCase1*pow(-1,i+2)*(-sin(x[i]+fixCase1*ln(-n*x[i]))-sin(x[i]+fixCase1*ln(n*x[i])));
}
else
{
dAdx[n][i]=fixCase2*pow(-1,i)*(cos(x[i]+fixCase2*ln(-n*x[i]))-cos(x[i]+fixCase2*ln(n*x[i])))+fixCase1*pow(-1,i+1)*(cos(x[i]+
fixCase1*ln(-n*x[i]))-cos(x[i]+fixCase1*ln(n*x[i])));
dBdx[n][i]=fixCase2*pow(-1,i+1)*(-sin(x[i]+fixCase2*ln(-n*x[i]))-sin(x[i]+fixCase2*ln(n*x[i])))+fixCase1*pow(-1,i+2)*(-sin(x[i]+
fixCase1*ln(-n*x[i]))-sin(x[i]+fixCase1*ln(n*x[i])));
}
}
}
// ##### หากค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันค่า(J) เทียบกับค่ารูปแบบการสวิตช์ (x) และค่าเกรเดียนต์ของฟังก์ชันค่า → dJdx[i] and G[i] #####
for(i=0;i<=max_step;i++)
{
dJdx[i]=0;
for(n=2;n<=max_harmonic;n++) { dJdx[i]=dJdx[i]+2*(A[n]-XX[n])*dAdx[n][i]+2*(B[n]-Y[n])*dBdx[n][i]; }
G[i]=dJdx[i];
}
// ##### กำหนดค่าเริ่มต้นของค่าเกรเดียนต์(G) และฟังก์ชันส่วนเพิ่ม(increment function, d) #####
for(i=0;i<=max_step;i++)
{
G0[i]=G[i];
d0[i]=G0[i];
}
round=0; // กำหนดค่าเริ่มต้นของรอบการทำงาน
time1=time(&timer); // กำหนดเวลาเริ่มต้นทำการค้นหา
for(i=0;i<=max_step;i++) { x0[i]=x[i]; }
while(error_ans>error_min&&round<=round_max) // ตรวจสอบเงื่อนไขการจบโปรแกรมจากจำนวนรอบการทำงานและค่าความคลาดเคลื่อน
{
round=round+1; // เริ่มนับรอบการทำงาน
beta=0.000001; // กำหนดค่า beta เริ่มต้นน้อยๆ
// ##### คำนวณหาค่ารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุใหม่(x) จากค่า beta, d #####
x0[0]=0;
d0[0]=0;
for(i=1;i<=max_step-1;i++)
{
if(x0[i]+beta*d0[i]<x0[i+1]+beta*d0[i+1]&&x0[i]+beta*d0[i]>x0[i-1]+beta*d0[i-1]) { x[i]=x0[i]+beta*d0[i]; }
else { x[i]=x0[i]; }
}
// ##### เมื่อได้รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุใหม่ นำไปหาค่าพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ (A, B) #####
for(n=1;n<=max_harmonic;n++)
{
sumA1=0;
sumB1=0;
if(n==1)

```

```

{ for(i=1;i<=max_step+1;i++)
  { k3=div(i,2);
    if(k3.rem==1)
      { sumA1=sumA1+fixCase1*(-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i])/(1+n)+sin(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1])/(1+n));
        sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i])/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1])/(1+n));
      }
    else
      { sumA1=sumA1+fixCase2*(-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i])/(1+n)+sin(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1])/(1+n));
        sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i])/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1])/(1+n));
      }
  }
}
else
{ for(i=1;i<=max_step+1;i++)
  { k3=div(i,2);
    if(k3.rem==1)
      { sumA1=sumA1+fixCase1*(sin(x[i]+fixCase1In-n*x[i])/(1-n)-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i])/(1+n)-sin(x[i-1]+fixCase1In-n*x[i-1])/(1-n)+
        sin(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1])/(1+n));
        sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i])/(1+n)-cos(x[i]+fixCase1In-n*x[i])/(1-n)+cos(x[i-1]+
        fixCase1In+n*x[i-1])/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase1In-n*x[i-1])/(1-n));
      }
    else
      { sumA1=sumA1+fixCase2*(sin(x[i]+fixCase2In-n*x[i])/(1-n)-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i])/(1+n)-sin(x[i-1]+fixCase2In-n*x[i-1])/(1-n)+
        sin(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1])/(1+n));
        sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i])/(1+n)-cos(x[i]+fixCase2In-n*x[i])/(1-n)+cos(x[i-1]+
        fixCase2In+n*x[i-1])/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase2In-n*x[i-1])/(1-n));
      }
  }
}
A[n]=sumA1;
B[n]=sumB1;
if(A[n]<=pow(10,-5)) {A[n]=0;}
if(B[n]<=pow(10,-5)) {B[n]=0;}
}
// ##### เมื่อได้ค่า A, B แล้วนำไปคำนวณหาค่าฟังก์ชันค่า (J, ค่าความคลาดเคลื่อน: error) #####
error=0;
for(n=2;n<=max_harmonic;n++) { error=error+(A[n]-XX[n])*(A[n]-XX[n])+(B[n]-Y[n])*(B[n]-Y[n]); }
if(error<error_ans) // ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของ x ใหม่มีน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ
{ error_ans=error; // ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของ x ใหม่เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ
  for(i=0;i<=max_step;i++) // ให้ค่า x ใหม่ เป็นคำตอบ และเก็บคำตอบเป็นค่าเริ่มต้น
  { x_ans[i]=x[i];
    x0[i]=x[i];
  }
  for(n=2;n<=max_harmonic;n++) // เก็บค่า A, B ของ x ใหม่เป็นค่า A, B ของคำตอบ
  { A_ans[n]=A[n];
    B_ans[n]=B[n];
  }
  round_ans=round; // เก็บค่ารอบการทำงานของ x ใหม่เป็นรอบของคำตอบ
}
}

```

```

// ##### ทำการปรับค่า beta จาก -0.0001 ถึง +0.0001 เพื่อหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุใหม่ที่ทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด #####
error_best=9999999;
for(beta=-0.0001;beta<=0.0001;beta=beta+0.000001)
{ // ##### คำนวณหาค่ารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุใหม่(x) จากค่า beta, d #####
  for(i=1;i<=max_step-1;i++)
  { if(x0[i]+beta*d0[i]<x0[i+1]+beta*d0[i+1]&& x0[i]+beta*d0[i]>x0[i-1]+beta*d0[i-1]) { x[i]=x0[i]+beta*d0[i]; }
    else { x[i]=x0[i]; }
  }
  ##### เมื่อได้รูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุใหม่ให้นำไปหาค่าพารามิเตอร์ของอนุกรมฟูรีเยร์ (A, B) #####
  for(n=1;n<=max_harmonic;n++)
  { sumA1=0;
    sumB1=0;
    if(n==1)
    { for(i=1;i<=max_step+1;i++)
      { k3=div(i,2);
        if(k3.rem==1)
        { sumA1=sumA1+fixCase1*(-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)+sin(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n);
          sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n);
        }
        else
        { sumA1=sumA1+fixCase2*(-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)+sin(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n);
          sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n);
        }
      }
    }
    else
    { for(i=1;i<=max_step+1;i++)
      { k3=div(i,2);
        if(k3.rem==1)
        { sumA1=sumA1+fixCase1*(sin(x[i]+fixCase1In-n*x[i]))/(1-n)-sin(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)-sin(x[i-1]+
          fixCase1In-n*x[i-1]))/(1-n)+sin(x[i-1]+fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n);
          sumB1=sumB1+fixCase1*(-cos(x[i]+fixCase1In+n*x[i]))/(1+n)-cos(x[i]+fixCase1In-n*x[i]))/(1-n)+cos(x[i-1]+
          fixCase1In+n*x[i-1]))/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase1In-n*x[i-1]))/(1-n);
        }
        else
        { sumA1=sumA1+fixCase2*(sin(x[i]+fixCase2In-n*x[i]))/(1-n)-sin(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)-sin(x[i-1]+
          fixCase2In-n*x[i-1]))/(1-n)+sin(x[i-1]+fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n);
          sumB1=sumB1+fixCase2*(-cos(x[i]+fixCase2In+n*x[i]))/(1+n)-cos(x[i]+fixCase2In-n*x[i]))/(1-n)+cos(x[i-1]+
          fixCase2In+n*x[i-1]))/(1+n)+cos(x[i-1]+fixCase2In-n*x[i-1]))/(1-n);
        }
      }
    }
  }
  A[n]=sumA1;
  B[n]=sumB1;
  if(A[n]<=pow(10,-5)) {A[n]=0;}
  if(B[n]<=pow(10,-5)) {B[n]=0;}
}
##### เมื่อได้ค่า A, B แล้วนำไปคำนวณหาค่าฟังก์ชันค่า (J, ค่าความคลาดเคลื่อน: error) #####
error=0;

```

```

for(n=2;n<=max_harmonic;n++) { error=error+(A[n]-XX[n])*(A[n]-XX[n])+(B[n]-Y[n])*(B[n]-Y[n]); } // หาค่าความคลาดเคลื่อน
if(error<error_best) // ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของ x ใหม่ น้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ x_best (ค่าคำตอบ
// ที่ดีที่สุดในช่วง beta)
{ error_best=error; // ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของ x ใหม่ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของ x_best
for(i=0;i<=max_step;i++) { x_best[i]=x[i]; } // ให้ค่า x ใหม่ เป็น x_best
for(n=2;n<=max_harmonic;n++) // ให้ค่า A, B ของ x ใหม่ เป็น ค่า A, B ของ x_best
{ A_best[n]=A[n];
B_best[n]=B[n];
}
if(error<error_ans) // ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของ x ใหม่ น้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ
{ error_ans=error; // ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของ x ใหม่ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ
round_ans=round; // ให้ค่ารอบการทำงานของ x ใหม่ เป็นค่ารอบการทำงานของคำตอบ
for(i=0;i<=max_step;i++) { x_ans[i]=x[i]; } // ให้ค่า x ใหม่ เป็นคำตอบ
for(n=2;n<=max_harmonic;n++) // ให้ค่า A, B ของ x ใหม่ เป็น ค่า A, B ของ x คำตอบ
{ A_ans[n]=A[n];
B_ans[n]=B[n];
}
}
}
}
for(i=0;i<=max_step;i++) { x[i]=x_best[i]; } // ให้ค่า x_best เป็น x คำเริ่มต้นรอบการทำงานใหม่
for(n=2;n<=max_harmonic;n++) // ให้ค่า A, B ของ x_best เป็น A, B ของ x รอบการทำงานใหม่
{ A[n]=A_best[n];
B[n]=B_best[n];
}
// ##### หากค่าอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เทียบกับค่ารูปแบบการสวิตซ์ (x) dAdx[n][i], dBdx[n][i] #####
for(n=2;n<=max_harmonic;n++)
{ for(i=0;i<=max_step;i++)
{ if(i==0)
{ dAdx[n][i]=fixCase1*pow(-1,i+1)*(cos(x[i]+fixCase1In-(n*x[i]))-cos(x[i]+fixCase1In+(n*x[i])));
dBdx[n][i]=fixCase1*pow(-1,i+2)*(-sin(x[i]+fixCase1In+(n*x[i]))-sin(x[i]+fixCase1In-(n*x[i])));
}
else if(i==max_step)
{ dAdx[n][i]=fixCase1*pow(-1,i+1)*(cos(x[i]+fixCase1In-(n*x[i]))-cos(x[i]+fixCase1In+(n*x[i])));
dBdx[n][i]=fixCase1*pow(-1,i+2)*(-sin(x[i]+fixCase1In+(n*x[i]))-sin(x[i]+fixCase1In-(n*x[i])));
}
else
{ dAdx[n][i]=fixCase2*pow(-1,i)*(cos(x[i]+fixCase2In-(n*x[i]))-cos(x[i]+fixCase2In+(n*x[i])))+
fixCase1*pow(-1,i+1)*(cos(x[i]+fixCase1In-(n*x[i]))-cos(x[i]+fixCase1In+(n*x[i])));
dBdx[n][i]=fixCase2*pow(-1,i+1)*(-sin(x[i]+fixCase2In+(n*x[i]))-sin(x[i]+fixCase2In-(n*x[i])))+
fixCase1*pow(-1,i+2)*(-sin(x[i]+fixCase1In+(n*x[i]))-sin(x[i]+fixCase1In-(n*x[i])));
}
}
}
}
// ##### หากค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันค่า(J) เทียบกับค่ารูปแบบการสวิตซ์ (x) และค่าเกรเดียนต์ของฟังก์ชันค่า → dJdx[i] and G[i] #####
for(i=0;i<=max_step;i++)
{ dJdx[i]=0;
for(n=2;n<=max_harmonic;n++) { dJdx[i]=dJdx[i]+2*(A[n]-XX[n])*dAdx[n][i]+2*(B[n]-Y[n])*dBdx[n][i]; }
G[i]=dJdx[i];
}

```

```

}
// ##### คำนวณหาค่าฟังก์ชันส่วนเพิ่ม(d) #####
GG0=0; GG=0;
for(i=0;i<=max_step;i++)
{ GG0=GG0+G0[i]*G0[i];
  GG=GG+G[i]*G[i];
}
for(i=0;i<=max_step;i++) { d[i]=-G0[i]+(GG/GG0); } // หาค่าฟังก์ชันส่วนเพิ่ม
for(i=0;i<=max_step;i++) // กำหนดค่าเกรเดียนต์, ค่าฟังก์ชันส่วนเพิ่ม, และรูปแบบการสวิตช์ เป็นค่าเริ่มต้นของ-
{ G0[i]=G[i]; // รอบการทำงานใหม่
  d0[i]=d[i];
  x0[i]=x[i];
}
if(round%roundShow==0) // แสดงผลการคำนวณตามรอบการทำงานที่กำหนด(roundShow)
{ cout<<"the round is "<<round<<" The error is "<<error<<endl; // แสดงรอบการทำงานและค่าความคลาดเคลื่อนปัจจุบัน
  cout<<"The error best is "<<error_best<<endl; // แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของ x_best(ค่า x ที่ดีที่สุดในช่วง beta)
  cout<<"The error ans is "<<error_ans<<" round ans is "<<round_ans<<endl; // แสดงค่าความคลาดเคลื่อนและรอบการทำงานของคำตอบ
}
}
time2=time(&timer); // บันทึกเวลาเมื่อสิ้นสุดการค้นหาคำตอบ
time_ans=time2-time1; // คำนวณเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ
cout<<endl;
cout<<"The error ans is "<<error_ans<<" round ans is "<<round_ans<<endl; // แสดงค่าความคลาดเคลื่อนและรอบการทำงานของคำตอบ
cout<<"The time use is "<<time_ans<<endl; // แสดงเวลาที่ใช้ในการค้นหา
cout<<"anser x[i] is "<<endl; // แสดงรูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของคำตอบ
for(i=0;i<=max_step;i++) { cout<<"x("<<i<<")="<<x_ans[i]<<";"<<endl; }
for(n=0;n<=19;n++) // แสดงค่าพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์ของคำตอบ
{ cout<<" A["<<n<<"] = "<<A_ans[n]<<" XX["<<n<<"] = "<<XX[n]<<" B["<<n<<"] = "<<B_ans[n]<<" Y["<<n<<"] = "<<Y[n]<<endl;
}
FILE *fp_data1; // บันทึกค่าพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์ของคำตอบ (A) ไว้ในไฟล์ data_test3_1_A.dat
fp_data1=fopen("data_test3_1_A.dat","wb");
fwrite(&A_ans,sizeof(double),20,fp_data1);
fclose(fp_data1);
FILE *fp_data2; // บันทึกค่าพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์ของคำตอบ (B) ไว้ในไฟล์ data_test3_1_B.dat
fp_data2=fopen("data_test3_1_B.dat","wb");
fwrite(&B_ans,sizeof(double),20,fp_data2);
fclose(fp_data2);
FILE *fp_data3; // บันทึกค่าพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์อ้างอิงเริ่มต้น (XX) ไว้ในไฟล์ data3_1_X.dat
fp_data3=fopen("data_test3_1_X.dat","wb");
fwrite(&XX,sizeof(double),20,fp_data3);
fclose(fp_data3);
FILE *fp_data4; // บันทึกค่าพารามิเตอร์อนุกรมฟูรีเยร์อ้างอิงเริ่มต้น (Y) ไว้ในไฟล์ data3_1_Y.dat
fp_data4=fopen("data_test3_1_Y.dat","wb");
fwrite(&Y,sizeof(double),20,fp_data4);
fclose(fp_data4);
FILE *fp_data5; // บันทึกรูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของคำตอบไว้ในไฟล์ data_test3_1_step.dat
fp_data5=fopen("data_test3_1_step.dat","wb");
fwrite(&x_ans,sizeof(double),101,fp_data5);
fclose(fp_data5);

```

```
aaa=div(time_ans,60); // คำนวณเวลาในรูปของนาฬิกา และวินาที
cout<<" time to use run program is "<<aaa.quot<<"min. "<<aaa.rem<<" sec."<<endl; // แสดงผลเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ
cout<<" error ans = "<<error_ans<<endl; // แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ
cout<<" C is = "<<C*pow(10,6)<<" microfarad"<<endl; // แสดงขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการสวิตช์
getch();
}
```

## ภาคผนวก ซ

โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานรวมของโปรแกรมการควบคุมชุด  
ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิก การหารูปแบบการสวิตช์ตัว  
เก็บประจุที่เหมาะสม และสั่งการทำงานของสวิตช์ตัวเก็บประจุ

```

#####
// โปรแกรมภาษาซี ที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานรวมของโปรแกรมการควบคุมชุดตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก
การวิเคราะห์
// กระแสฮาร์โมนิก และการหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสม
// โดย ชูชาติ วุฒิเนตรเนติรักษ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####
#####          กำหนดแฮดเดอร์ไฟล์          #####
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include <dos.h>
#include <iostream.h>
#include <fstream.h>
#include <stdlib.h>
#include <process.h>          // ใช้สำหรับ load file .exe ด้วยคำสั่ง system
void main()
{
    clrscr();
    double fix_G=128,aaa[128],fun0[128],A[20],B[20],IC[128];
    double w,t,step_t;
    int jj,ct,ct1,ch,count1 l=1,m,n;
    w=2*M_PI*50;
    step_t=0.02/128;
    do          // ป้อนอัตราส่วนเทียบของโพรบวัดกระแส
    {
        cout<<"===== "<<endl;
        cout<<" Input the rate of current prob ="<<endl;
        cout<<"===== "<<endl;
        cout<<" 1. 3000 A (1mV/A)  ="<<endl;
        cout<<" 2. 300 A (10mV/A)  ="<<endl;
        cout<<" 3. 30 A (100mV/A)  ="<<endl;
        cout<<"===== "<<endl;
        cout<<" Input number (1,2,3) =>";
        cin>>ct;          // รับค่าอัตราส่วนเทียบของโพรบวัดกระแส
    }while ((ct!=1)&(ct!=2)&(ct!=3));
    do
    {
        system("inputcurrent.exe");          // เรียกโปรแกรมรับค่าข้อมูลจากชุดตรวจจับกระแสเข้าสู่คอมพิวเตอร์
        FILE *fp_fun;
        fp_fun=fopen("dataI.dat","rb");          // เปิดไฟล์ข้อมูลที่ได้รับจากชุดตรวจจับกระแส
        if (fp_fun== NULL)          // ตรวจสอบการเปิดไฟล์
            fprintf(stderr, "Cannot open input file.\n");
        fread(&fun0,sizeof(double),fix_G,fp_fun);          // นำข้อมูลในไฟล์ไปเก็บไว้ในตัวแปร fun0
        fclose(fp_fun);          // ปิดไฟล์
        if(ct==1){ct1=1000;}
        else if(ct==2){ ct1=100;}
        else if(ct==3){ ct1=10;}
    }
}

```



```

for(jj=0;jj<=127;jj++) // นำอัตราส่วนเทียบของโพรบวัดกระแสคูณกับข้อมูล
{
    aaa[jj]=fun0[jj]*ct1;
}

if(count11>1) // กรณีทำงานมากกว่ารอบแรกให้นำกระแสขดเชยก่อนหน้ามาบวกกับกระแสที่ตรวจวัด-
{
    FILE *fpA, *fpB; // ได้ใหม่เป็นกระแสรอมอนิกจริง โดยกระแสที่ขดเชยไว้ก่อนเก็บไว้ในรูปของ-
    fpA=fopen("data_test2_1_A.dat", "rb"); // สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ในไฟล์ data_test2_1_A.dat และ data_test2_1_B.dat
    if (fpA== NULL)
        fprintf(stderr, "Cannot open input file data_test2_1_A.dat \n");
    fread(&A,sizeof(double),20,fpA);//Read to file
    fclose(fpA); //Close file
    fpB=fopen("data_test2_1_B.dat", "rb");
    if (fpB== NULL)
        fprintf(stderr, "Cannot open input file data_test2_1_B.dat \n");
    fread(&B,sizeof(double),20,fpB);
    fclose(fpB);
    m=0;
    for(t=0;t<=0.02-step_t;t=t+step_t) // คำนวณหากระแสขดเชยก่อนหน้า
    {
        IC[m]=0;
        for(n=1;n<=19;n++)
        {
            IC[m]=IC[m]+A[n]*cos(n*w*t)+B[n]*sin(n*w*t);
        }
        m=m+1;
    }
    for(jj=0;jj<=127;jj++) // บวกค่ากระแสที่ตรวจจับได้กับกระแสขดเชยก่อนหน้า
    {
        aaa[jj]=aaa[jj]+IC[jj];
    }
}

FILE *fp1;
fp1=fopen("dataI.dat", "wb"); // บันทึกค่ากระแสที่ตรวจจับได้หลังการบวกกระแสขดเชย
if (fp1== NULL)
    fprintf(stderr, "Cannot open input file dataI.dat \n");
fwrite(&aaa,sizeof(double),128,fp1); //Write to file
fclose(fp1); //Close file
printf("\n\n= Write File Complete =\n\n"); // แสดงผลการเขียนข้อมูลลงไฟล์สมบูรณ์
system("tabucurrent.exe"); // เรียก โปรแกรมวิเคราะห์กระแสรอมอนิก
system("tabuSCF.exe"); // เรียก โปรแกรมหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุ
printf("\n= Press Any Key To Continue (Q=Quit) =\n\n");
ch = getch();
count11=count11+1; // เพื่อรอบการทำงาน
}

while (!((ch=='Q')||(ch=='q'))); // ตรวจสอบการจบโปรแกรมหรือทำงานต่อ
}

```

ภาคผนวก ฅ

รายละเอียดข้อมูลต่างๆ ของชุดตรวจจับกระแสฮาร์โมนิก

## โพรบวัดกระแสไฟฟ้า

### **LEM Current Probe Type LEM~flex RR3020**

**Description** : The LEM~flex RR3020 is an AC current probe utilising Rogowski principle. The flexible and lightweight measuring head enables quick and easy installation in hard to reach areas. The LEM~flex RR3020 is designed for use with multimeters, recorders and data loggers.

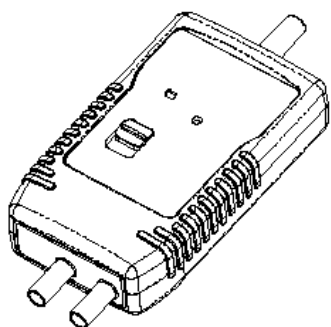
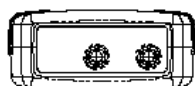
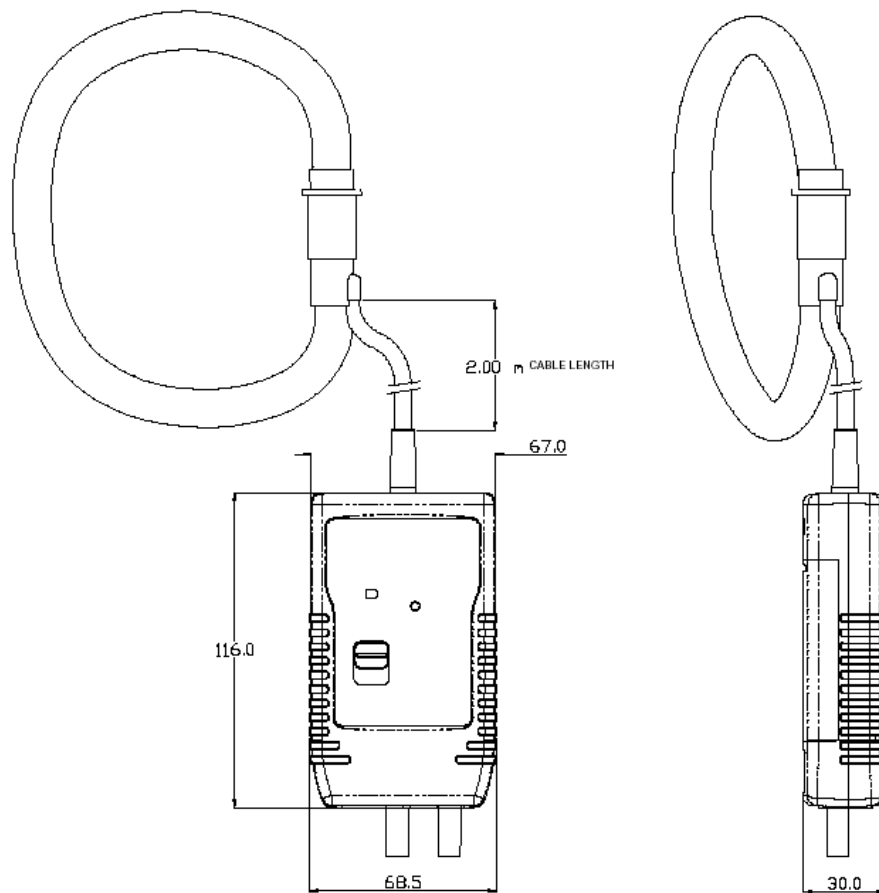
Measuring ranges	30A/300A/3000A
Output sensitivity	100mV/10mV/1mV/A (AC coupled)
Accuracy (at 25°C)	± 1 % of range
Frequency range	10Hz to 20kHz (-1dB)
Phase error	± 1° (45 to 65 Hz), ±10° (at 20kHz)
Linearity	± 0.2% of reading from 10% to 100% of range
Position sensitivity	± 2% of range, cable >25mm (1") from coupling
External field	± 1% with cable > 200mm (8") from head
Minimum load	100kΩ for specified accuracy
Noise level	8mV rms (0.26% of range) in 30A range 2mV rms (0.07% of range) in 300A and 3000A ranges
Operating temperature	0°C to 70°C (32°F to 158°F) Electronics
Storage temperature	-20°C to + 70°C (-4°F to 158°F) Electronics
Gain variation	± 0.08%/ °C
Power supply	2 x AA MN1500 LR6 batteries or equivalent
Battery life	200 hours typical
Low battery indication	RED LED
Safety	BS EN 61010-1: 1993, 600V CAT III Pol. Deg 2
EMC	EN61326: 1998
Enclosure	IP5X, Flame retardant UL94 -V0 rated
Material	Valox 357 X
Output connections	4mm safety plugs
Weight	0.19 kg (0.4lb)

#### **Measuring Head**

Cable length	610mm (24 inches), double insulated
Cable diameter	14.3mm (0.562 inches)
Bend radius	38.1mm (1.5 inches) minimum
Connecting cable	2m (78.7 inches) long, double insulated
Material	TPE rubber, Polypropylene, UL94 -V0 rated
Operating temperature	-20°C to +90°C (-4°F to 194°F) Head
Storage temperature	-40°C to +105°C (-40°F to 221°F) Head
Safety	BS EN 61010-1 : 1993, 600V CAT III Pol. Deg 2
Weight	0.18kg (0.4 lb)
Dimensions	See drawing overleaf

# LEM-FLEX RR 3020

ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS  
UNLESS OTHERWISE STATED



## ไอซี ADC0804



November 1999

### ADC0801/ADC0802/ADC0803/ADC0804/ADC0805 8-Bit $\mu$ P Compatible A/D Converters

#### General Description

The ADC0801, ADC0802, ADC0803, ADC0804 and ADC0805 are CMOS 8-bit successive approximation A/D converters that use a differential potentiometric ladder—similar to the 256R products. These converters are designed to allow operation with the NSC800 and INS8080A derivative control bus with TRI-STATE output latches directly driving the data bus. These A/Ds appear like memory locations or I/O ports to the microprocessor and no interfacing logic is needed.

Differential analog voltage inputs allow increasing the common-mode rejection and offsetting the analog zero input voltage value. In addition, the voltage reference input can be adjusted to allow encoding any smaller analog voltage span to the full 8 bits of resolution.

#### Features

- Compatible with 8080  $\mu$ P derivatives—no interfacing logic needed - access time - 135 ns
- Easy interface to all microprocessors, or operates "stand alone"

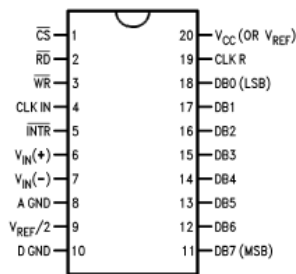
- Differential analog voltage inputs
- Logic inputs and outputs meet both MOS and TTL voltage level specifications
- Works with 2.5V (LM336) voltage reference
- On-chip clock generator
- 0V to 5V analog input voltage range with single 5V supply
- No zero adjust required
- 0.3" standard width 20-pin DIP package
- 20-pin molded chip carrier or small outline package
- Operates ratiometrically or with 5  $V_{DC}$ , 2.5  $V_{DC}$ , or analog span adjusted voltage reference

#### Key Specifications

- Resolution 8 bits
- Total error  $\pm 1/4$  LSB,  $\pm 1/2$  LSB and  $\pm 1$  LSB
- Conversion time 100  $\mu$ s

#### Connection Diagram

ADC080X  
Dual-In-Line and Small Outline (SO) Packages



DS006671-30

See Ordering Information

#### Ordering Information

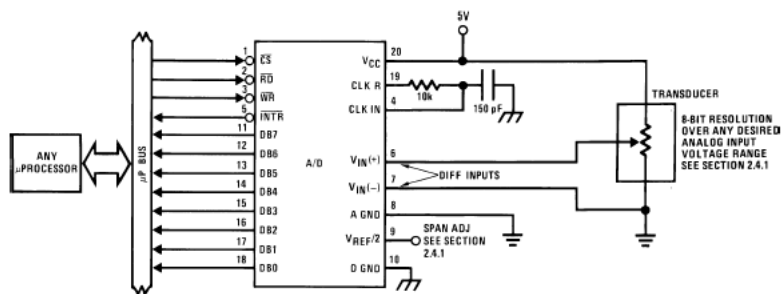
TEMP RANGE		0°C TO 70°C	0°C TO 70°C	-40°C TO +85°C
ERROR	$\pm 1/4$ Bit Adjusted	ADC0802LCWM	ADC0804LCN	ADC0801LCN
	$\pm 1/2$ Bit Unadjusted			ADC0802LCN
	$\pm 1/2$ Bit Adjusted			ADC0803LCN
	$\pm 1$ Bit Unadjusted			ADC0805LCN/ADC0804LCJ
PACKAGE OUTLINE		M20B—Small Outline	N20A—Molded DIP	

Z-80® is a registered trademark of Zilog Corp.

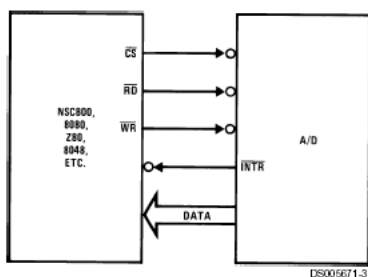
ADC0801/ADC0802/ADC0803/ADC0804/ADC0805 8-Bit  $\mu$ P Compatible A/D Converters

ADC0801/ADC0802/ADC0803/ADC0804/ADC0805

### Typical Applications



### 8080 Interface



### Error Specification (Includes Full-Scale, Zero Error, and Non-Linearity)

Part Number	Full-Scale Adjusted	$V_{REF/2}=2.500 V_{DC}$ (No Adjustments)	$V_{REF/2}$ =No Connection (No Adjustments)
ADC0801	$\pm 1/4$ LSB		
ADC0802		$\pm 1/2$ LSB	
ADC0803	$\pm 1/2$ LSB		
ADC0804		$\pm 1$ LSB	
ADC0805			$\pm 1$ LSB

**Absolute Maximum Ratings** (Notes 1, 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage ( $V_{CC}$ ) (Note 3)	6.5V
Voltage	
Logic Control Inputs	-0.3V to +18V
At Other Input and Outputs	-0.3V to ( $V_{CC}+0.3V$ )
Lead Temp. (Soldering, 10 seconds)	
Dual-In-Line Package (plastic)	260°C
Dual-In-Line Package (ceramic)	300°C
Surface Mount Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C

Infrared (15 seconds)	220°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Package Dissipation at $T_A=25^\circ\text{C}$	875 mW
ESD Susceptibility (Note 10)	800V

**Operating Ratings** (Notes 1, 2)

Temperature Range	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$
ADC0804LCJ	-40°C $\leq T_A \leq$ +85°C
ADC0801/02/03/05LCN	-40°C $\leq T_A \leq$ +85°C
ADC0804LCN	0°C $\leq T_A \leq$ +70°C
ADC0802/04LCWM	0°C $\leq T_A \leq$ +70°C
Range of $V_{CC}$	4.5 $V_{DC}$ to 6.3 $V_{DC}$

**Electrical Characteristics**

The following specifications apply for  $V_{CC}=5 V_{DC}$ ,  $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$  and  $f_{CLK}=640$  kHz unless otherwise specified.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
ADC0801: Total Adjusted Error (Note 8)	With Full-Scale Adj. (See Section 2.5.2)			$\pm 1/4$	LSB
ADC0802: Total Unadjusted Error (Note 8)	$V_{REF}/2=2.500 V_{DC}$			$\pm 1/2$	LSB
ADC0803: Total Adjusted Error (Note 8)	With Full-Scale Adj. (See Section 2.5.2)			$\pm 1/2$	LSB
ADC0804: Total Unadjusted Error (Note 8)	$V_{REF}/2=2.500 V_{DC}$			$\pm 1$	LSB
ADC0805: Total Unadjusted Error (Note 8)	$V_{REF}/2$ -No Connection			$\pm 1$	LSB
$V_{REF}/2$ Input Resistance (Pin 9)	ADC0801/02/03/05 ADC0804 (Note 9)	2.5 0.75	8.0 1.1		k $\Omega$ k $\Omega$
Analog Input Voltage Range	(Note 4) $V(+)$ or $V(-)$	Gnd-0.05		$V_{CC}+0.05$	$V_{DC}$
DC Common-Mode Error	Over Analog Input Voltage Range		$\pm 1/16$	$\pm 1/2$	LSB
Power Supply Sensitivity	$V_{CC}=5 V_{DC} \pm 10\%$ Over Allowed $V_{IN}(+)$ and $V_{IN}(-)$ Voltage Range (Note 4)		$\pm 1/16$	$\pm 1/2$	LSB

**AC Electrical Characteristics**

The following specifications apply for  $V_{CC}=5 V_{DC}$  and  $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$  unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
$T_C$	Conversion Time	$f_{CLK}=640$ kHz (Note 6)	103		114	$\mu\text{s}$
$T_C$	Conversion Time	(Notes 5, 6)	66		73	$1/f_{CLK}$
$f_{CLK}$	Clock Frequency	$V_{CC}=5V$ , (Note 5)	100	640	1460	kHz
	Clock Duty Cycle		40		60	%
CR	Conversion Rate in Free-Running Mode	$\overline{INTR}$ tied to $\overline{WR}$ with $\overline{CS}=0 V_{DC}$ , $f_{CLK}=640$ kHz	8770		9708	conv/s
$t_{W(\overline{WR})L}$	Width of $\overline{WR}$ Input (Start Pulse Width)	$\overline{CS}=0 V_{DC}$ (Note 7)	100			ns
$t_{ACC}$	Access Time (Delay from Falling Edge of $\overline{RD}$ to Output Data Valid)	$C_L=100$ pF		135	200	ns
$t_{1H}, t_{0H}$	TRI-STATE Control (Delay from Rising Edge of $\overline{RD}$ to Hi-Z State)	$C_L=10$ pF, $R_L=10k$ (See TRI-STATE Test Circuits)		125	200	ns
$t_{WI}, t_{RI}$	Delay from Falling Edge of $\overline{WR}$ or $\overline{RD}$ to Reset of $\overline{INTR}$			300	450	ns
$C_{IN}$	Input Capacitance of Logic Control Inputs			5	7.5	pF

ADC0801/ADC0802/ADC0803/ADC0804/ADC0805

**AC Electrical Characteristics** (Continued)The following specifications apply for  $V_{CC}=5 V_{DC}$  and  $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$  unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
$C_{OUT}$	TRI-STATE Output Capacitance (Data Buffers)			5	7.5	pF
<b>CONTROL INPUTS</b> [Note: CLK IN (Pin 4) is the input of a Schmitt trigger circuit and is therefore specified separately]						
$V_{IN(1)}$	Logical "1" Input Voltage (Except Pin 4 CLK IN)	$V_{CC}=5.25 V_{DC}$	2.0		15	$V_{DC}$
$V_{IN(0)}$	Logical "0" Input Voltage (Except Pin 4 CLK IN)	$V_{CC}=4.75 V_{DC}$			0.8	$V_{DC}$
$I_{IN(1)}$	Logical "1" Input Current (All Inputs)	$V_{IN}=5 V_{DC}$		0.005	1	$\mu A_{DC}$
$I_{IN(0)}$	Logical "0" Input Current (All Inputs)	$V_{IN}=0 V_{DC}$	-1	-0.005		$\mu A_{DC}$
<b>CLOCK IN AND CLOCK R</b>						
$V_{T+}$	CLK IN (Pin 4) Positive Going Threshold Voltage		2.7	3.1	3.5	$V_{DC}$
$V_{T-}$	CLK IN (Pin 4) Negative Going Threshold Voltage		1.5	1.8	2.1	$V_{DC}$
$V_H$	CLK IN (Pin 4) Hysteresis ( $V_{T+}$ )-(V <sub>T-</sub> )		0.6	1.3	2.0	$V_{DC}$
$V_{OUT(0)}$	Logical "0" CLK R Output Voltage	$I_O=360 \mu A$ $V_{CC}=4.75 V_{DC}$			0.4	$V_{DC}$
$V_{OUT(1)}$	Logical "1" CLK R Output Voltage	$I_O=-360 \mu A$ $V_{CC}=4.75 V_{DC}$	2.4			$V_{DC}$
<b>DATA OUTPUTS AND INTR</b>						
$V_{OUT(0)}$	Logical "0" Output Voltage Data Outputs INTR Output	$I_{OUT}=1.6 mA, V_{CC}=4.75 V_{DC}$ $I_{OUT}=1.0 mA, V_{CC}=4.75 V_{DC}$			0.4 0.4	$V_{DC}$ $V_{DC}$
$V_{OUT(1)}$	Logical "1" Output Voltage	$I_O=-360 \mu A, V_{CC}=4.75 V_{DC}$	2.4			$V_{DC}$
$V_{OUT(1)}$	Logical "1" Output Voltage	$I_O=-10 \mu A, V_{CC}=4.75 V_{DC}$	4.5			$V_{DC}$
$I_{OUT}$	TRI-STATE Disabled Output Leakage (All Data Buffers)	$V_{OUT}=0 V_{DC}$ $V_{OUT}=5 V_{DC}$	-3		3	$\mu A_{DC}$ $\mu A_{DC}$
$I_{SOURCE}$		$V_{OUT}$ Short to Gnd, $T_A=25^\circ C$	4.5	6		$mA_{DC}$
$I_{SINK}$		$V_{OUT}$ Short to $V_{CC}$ , $T_A=25^\circ C$	9.0	16		$mA_{DC}$
<b>POWER SUPPLY</b>						
$I_{CC}$	Supply Current (Includes Ladder Current)  ADC0801/02/03/04LCJ/05 ADC0804LCN/LCWM	$f_{CLK}=640 kHz$ , $V_{REF}/2=NC, T_A=25^\circ C$ and $\overline{CS}=5V$				
				1.1 1.9	1.8 2.5	mA mA

**Note 1:** Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its specified operating conditions.

**Note 2:** All voltages are measured with respect to Gnd, unless otherwise specified. The separate A Gnd point should always be wired to the D Gnd.

**Note 3:** A zener diode exists, internally, from  $V_{CC}$  to Gnd and has a typical breakdown voltage of  $7 V_{DC}$ .

**Note 4:** For  $V_{IN(-)} \geq V_{IN(+)}$  the digital output code will be 0000 0000. Two on-chip diodes are tied to each analog input (see block diagram) which will forward conduct for analog input voltages one diode drop below ground or one diode drop greater than the  $V_{CC}$  supply. Be careful, during testing at low  $V_{CC}$  levels (4.5V), as high level analog inputs (5V) can cause this input diode to conduct—especially at elevated temperatures, and cause errors for analog inputs near full-scale. The spec allows 50 mV forward bias of either diode. This means that as long as the analog  $V_{IN}$  does not exceed the supply voltage by more than 50 mV, the output code will be correct. To achieve an absolute  $0 V_{DC}$  to  $5 V_{DC}$  input voltage range will therefore require a minimum supply voltage of  $4.950 V_{DC}$  over temperature variations, initial tolerance and loading.

**Note 5:** Accuracy is guaranteed at  $f_{CLK} = 640 kHz$ . At higher clock frequencies accuracy can degrade. For lower clock frequencies, the duty cycle limits can be extended so long as the minimum clock high time interval or minimum clock low time interval is no less than 275 ns.

**Note 6:** With an asynchronous start pulse, up to 8 clock periods may be required before the internal clock phases are proper to start the conversion process. The start request is internally latched, see Figure 4 and section 2.0.



## AC Electrical Characteristics (Continued)

Note 7: The  $\overline{CS}$  input is assumed to bracket the  $\overline{WR}$  strobe input and therefore timing is dependent on the  $\overline{WR}$  pulse width. An arbitrarily wide pulse width will hold the converter in a reset mode and the start of conversion is initiated by the low to high transition of the  $\overline{WR}$  pulse (see timing diagrams).

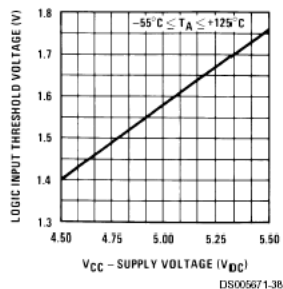
Note 8: None of these A/Ds requires a zero adjust (see section 2.5.1). To obtain zero code at other analog input voltages see section 2.5 and Figure 7.

Note 9: The  $V_{REF/2}$  pin is the center point of a two-resistor divider connected from  $V_{CC}$  to ground. In all versions of the ADC0801, ADC0802, ADC0803, and ADC0805, and in the ADC0804LCJ, each resistor is typically 16 k $\Omega$ . In all versions of the ADC0804 except the ADC0804LCJ, each resistor is typically 2.2 k $\Omega$ .

Note 10: Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 k $\Omega$  resistor.

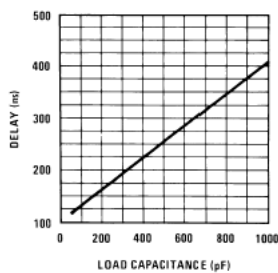
## Typical Performance Characteristics

Logic Input Threshold Voltage vs. Supply Voltage



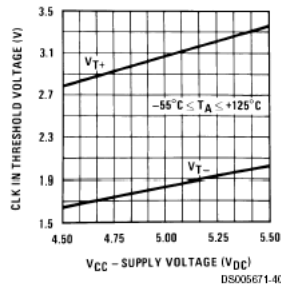
DS005671-38

Delay From Falling Edge of RD to Output Data Valid vs. Load Capacitance



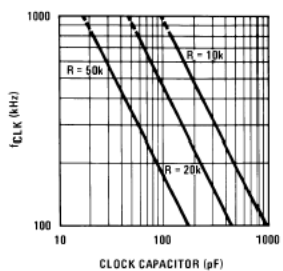
DS005671-39

CLK IN Schmitt Trip Levels vs. Supply Voltage



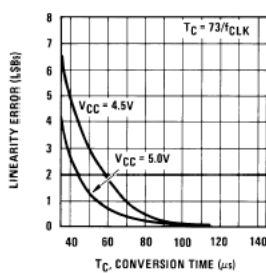
DS005671-40

fCLK vs. Clock Capacitor



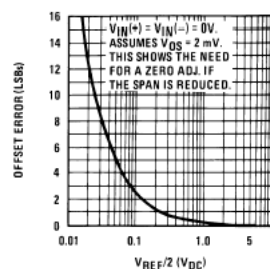
DS005671-41

Full-Scale Error vs Conversion Time



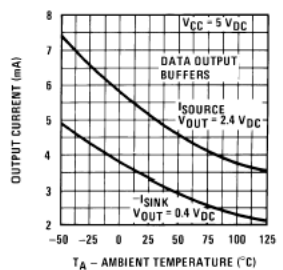
DS005671-42

Effect of Unadjusted Offset Error vs. VREF/2 Voltage



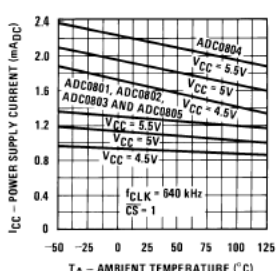
DS005671-43

Output Current vs Temperature



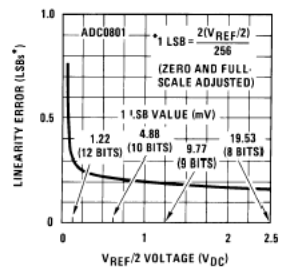
DS005671-44

Power Supply Current vs Temperature (Note 9)



DS005671-45

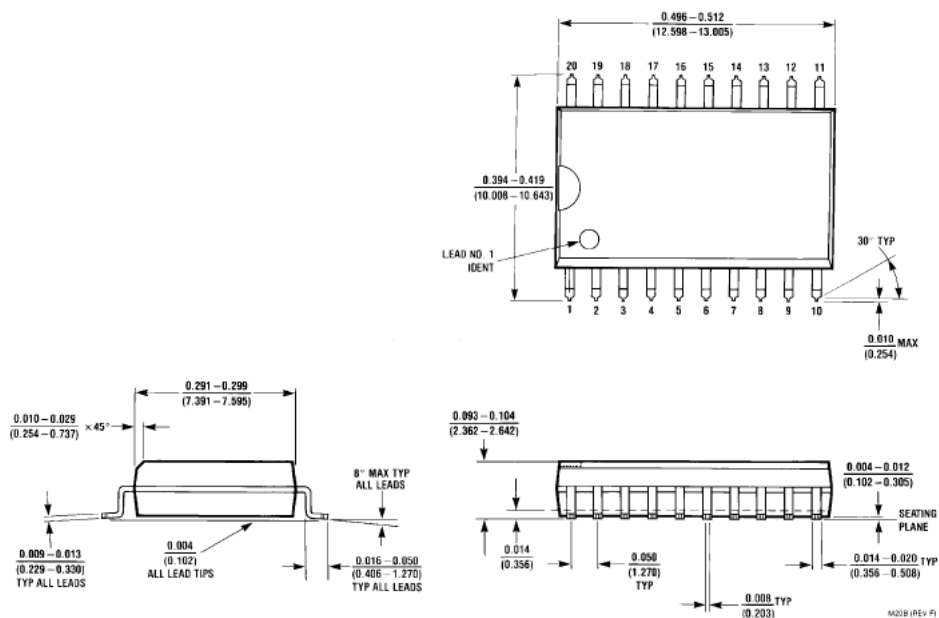
Linearity Error at Low VREF/2 Voltages



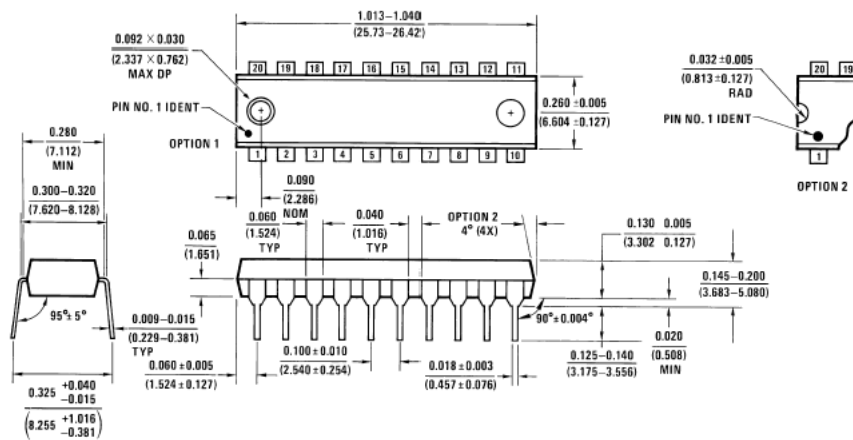
DS005671-46

ADC0801/ADC0802/ADC0803/ADC0804/ADC0805

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted



**SO Package (M)**  
 Order Number ADC0802LCWM or ADC0804LCWM  
 NS Package Number M20B



**Molded Dual-In-Line Package (N)**  
 Order Number ADC0801LCN, ADC0802LCN,  
 ADC0803LCN, ADC0804LCN or ADC0805LCN  
 NS Package Number N20A

# ไอซี NE5532

Philips Semiconductors

Product specification

## Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SE5532/5532A

### DESCRIPTION

The 5532 is a dual high-performance low noise operational amplifier. Compared to most of the standard operational amplifiers, such as the 1458, it shows better noise performance, improved output drive capability and considerably higher small-signal and power bandwidths.

This makes the device especially suitable for application in high-quality and professional audio equipment, instrumentation and control circuits, and telephone channel amplifiers. The op amp is internally compensated for gains equal to one. If very low noise is of prime importance, it is recommended that the 5532A version be used because it has guaranteed noise voltage specifications.

### FEATURES

- Small-signal bandwidth: 10MHz
- Output drive capability: 600Ω, 10V<sub>RMS</sub>
- Input noise voltage: 5nV/√Hz (typical)
- DC voltage gain: 50000
- AC voltage gain: 2200 at 10kHz
- Power bandwidth: 140kHz
- Slew rate: 9V/μs
- Large supply voltage range: ±3 to ±20V
- Compensated for unity gain

### PIN CONFIGURATIONS

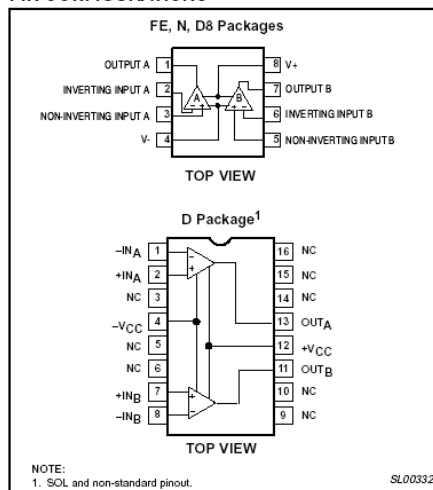


Figure 1. Pin Configurations

### ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to 70°C	NE5532N	SOT97-1
8-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0 to 70°C	NE5532FE	0580A
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to 70°C	NE5532AN	SOT97-1
8-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0 to 70°C	NE5532AF	0580A
8-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE5532FE	0580A
8-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE5532AF	0580A
8-Pin Small Outline Package (SO)	0 to 70°C	NE5532AD8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	-55°C to +125°C	SE5532AD8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	0 to 70°C	NE5532D8	SOT96-1
8-Pin Small Outline Package (SO)	-55°C to +125°C	SE5532D8	SOT96-1
16-Pin Plastic Small Outline Large (SOL) Package	0 to 70°C	NE5532D	SOT162-1
16-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	SE5532N	SOT38-4

## Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SE5532/5532A

### EQUIVALENT SCHEMATIC (EACH AMPLIFIER)

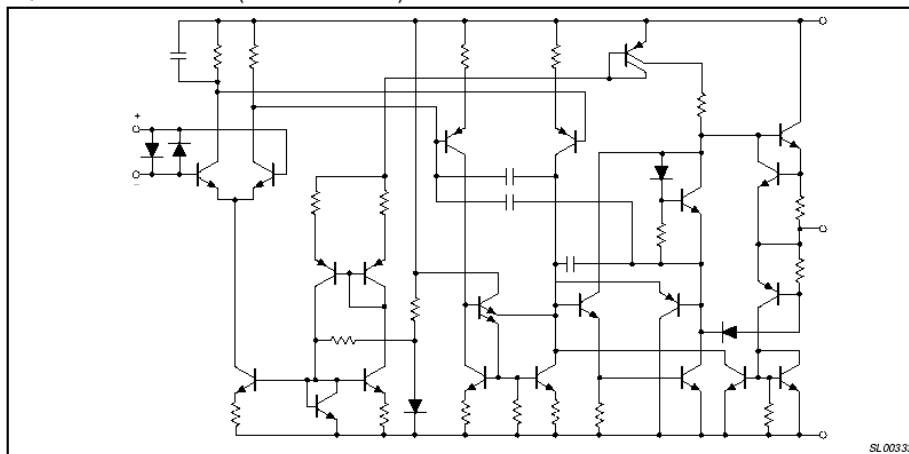


Figure 2. Equivalent Schematic (Each Amplifier)

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SYMBOL	PARAMETER	RATING	UNIT
V <sub>S</sub>	Supply voltage	±22	V
V <sub>IN</sub>	Input voltage	±V <sub>SUPPLY</sub>	V
V <sub>DIFF</sub>	Differential input voltage <sup>1</sup>	±0.5	V
T <sub>A</sub>	Operating temperature range NE5532/A SE5532/A	0 to 70 -55 to +125	°C
T <sub>STG</sub>	Storage temperature	-65 to +150	°C
T <sub>J</sub>	Junction temperature	150	°C
P <sub>D</sub>	Maximum power dissipation, T <sub>A</sub> =25°C (still-air) <sup>2</sup> 8 N package 8 FE package 16 D package	1200 1000 1200	mW
T <sub>SOLD</sub>	Lead soldering temperature (10sec max)	300	°C

#### NOTES:

- Diodes protect the inputs against over-voltage. Therefore, unless current-limiting resistors are used, large currents will flow if the differential input voltage exceeds 0.6V. Maximum current should be limited to ±10mA.
- Thermal resistances of the above packages are as follows:  
N package at 100°C/W  
F package at 135°C/W  
D package at 105°C/W

Internally-compensated dual low noise operational  
amplifier

NE/SE5532/5532A

## DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

 $T_A=25^\circ\text{C}$   $V_S=\pm 15\text{V}$ , unless otherwise specified. 1, 2, 3

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	SE5532/5532A			NE5532/5532A			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
$V_{OS}$	Offset voltage	Over temperature		0.5	2		0.5	4	mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$				5	3		5	5	mV/ $^\circ\text{C}$
$I_{OS}$	Offset current	Over temperature			100		10	150	nA
$\Delta I_{OS}/\Delta T$				200	200		200	200	nA/ $^\circ\text{C}$
$I_B$	Input current	Over temperature		200	400		200	800	nA
$\Delta I_B/\Delta T$				5	700		5	1000	nA/ $^\circ\text{C}$
$I_{CC}$	Supply current	Over temperature		8	10.5		8	16	mA
									mA
$V_{CM}$	Common-mode input range		$\pm 12$	$\pm 13$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
CMRR	Common-mode rejection ratio		80	100		70	100		dB
PSRR	Power supply rejection ratio			10	50		10	100	$\mu\text{V/V}$
$A_{VOL}$	Large-signal voltage gain	$R_L \geq 2\text{k}\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{V}$ Over temperature	50	100		25	100		V/mV
		$R_L \geq 600\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{V}$ Over temperature	40	50		15	50		V/mV
		$R_L \geq 2\text{k}\Omega$ Over temperature	20			10			V/mV
$V_{OUT}$	Output swing	$R_L \geq 600\Omega$ Over temperature	$\pm 12$	$\pm 13$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
		$R_L \geq 600\Omega$ , $V_S = \pm 18\text{V}$ Over temperature	$\pm 10$	$\pm 12$		$\pm 10$	$\pm 12$		
		$R_L \geq 600\Omega$ , $V_S = \pm 18\text{V}$ Over temperature	$\pm 15$	$\pm 16$		$\pm 15$	$\pm 16$		
		$R_L \geq 2\text{k}\Omega$ Over temperature	$\pm 12$	$\pm 14$		$\pm 12$	$\pm 14$		
		$R_L \geq 2\text{k}\Omega$ Over temperature	$\pm 13$	$\pm 13.5$		$\pm 13$	$\pm 13.5$		
$R_{IN}$	Input resistance		30	300		30	300		k $\Omega$
$I_{SC}$	Output short circuit current		10	38	60	10	38	60	mA

## NOTES:

- Diodes protect the inputs against overvoltage. Therefore, unless current-limiting resistors are used, large currents will flow if the differential input voltage exceeds 0.6V. Maximum current should be limited to  $\pm 10\text{mA}$ .
- For operation at elevated temperature, derate packages based on the package thermal resistance.
- Output may be shorted to ground at  $V_S = \pm 15\text{V}$ .  $T_A = 25^\circ\text{C}$  Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure dissipation rating is not exceeded.

## AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

 $T_A=25^\circ\text{C}$   $V_S=\pm 15\text{V}$ , unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	NE/SE5532/5532A			UNIT
			Min	Typ	Max	
$R_{OUT}$	Output resistance	$A_V=30\text{dB}$ Closed-loop $f=10\text{kHz}$ , $R_L=600\Omega$		0.3		$\Omega$
	Overshoot	Voltage-follower $V_{IN}=100\text{mV}_{p-p}$ $C_L=100\text{pF}$ , $R_L=600\Omega$		10		%
$A_V$	Gain	$f=10\text{kHz}$		2.2		V/mV
GBW	Gain bandwidth product	$C_L=100\text{pF}$ , $R_L=600\Omega$		10		MHz
SR	Slew rate			9		V/ $\mu\text{s}$
	Power bandwidth	$V_{OUT} = \pm 10\text{V}$		140		kHz
		$V_{OUT} = \pm 14\text{V}$ , $R_L=600\Omega$ , $V_{CC} = \pm 18\text{V}$		100		kHz

Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SE5532/5532A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

T<sub>A</sub>=25°C V<sub>S</sub>=±15V, unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	NE/SE5532			NE/SE5532A			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V <sub>NOISE</sub>	Input noise voltage	f <sub>O</sub> =30Hz		8		8	12	nV/√Hz	
		f <sub>O</sub> =1kHz		5		5	6	nV/√Hz	
I <sub>NOISE</sub>	Input noise current	f <sub>O</sub> =30Hz		2.7		2.7		pA/√Hz	
		f <sub>O</sub> =1kHz		0.7		0.7		pA/√Hz	
	Channel separation	f=1kHz, R <sub>S</sub> =5kΩ		110		110		dB	

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

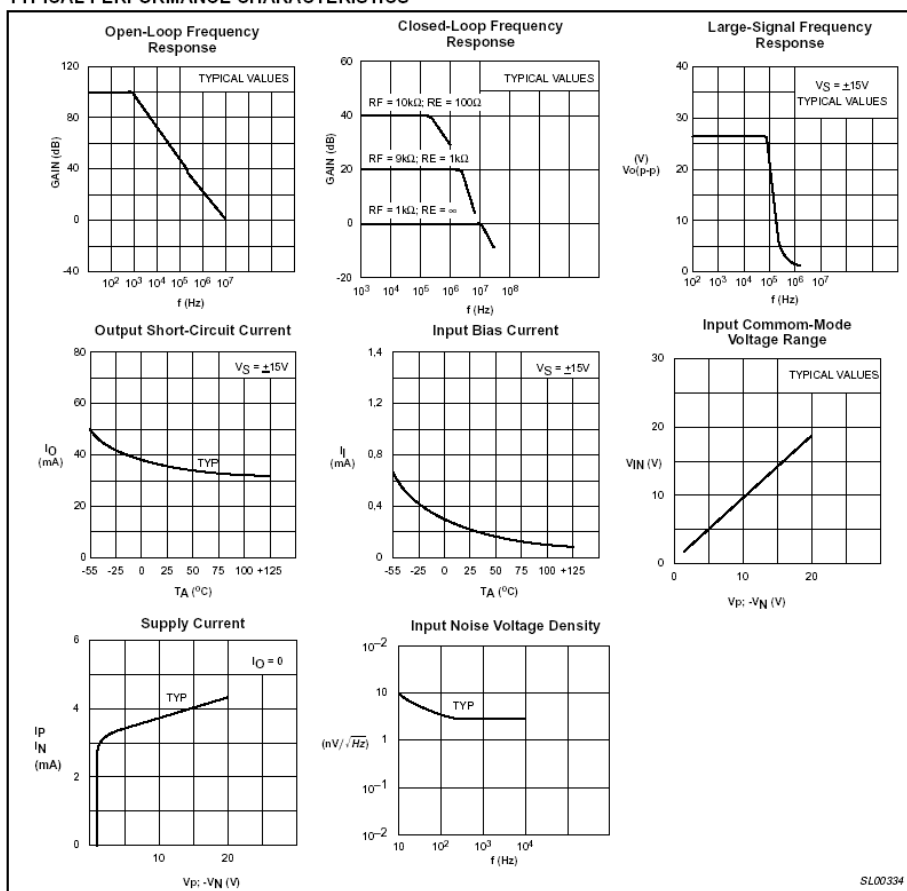


Figure 3. Typical Performance Characteristics

## Internally-compensated dual low noise operational amplifier

NE/SE5532/5532A

### TEST CIRCUITS

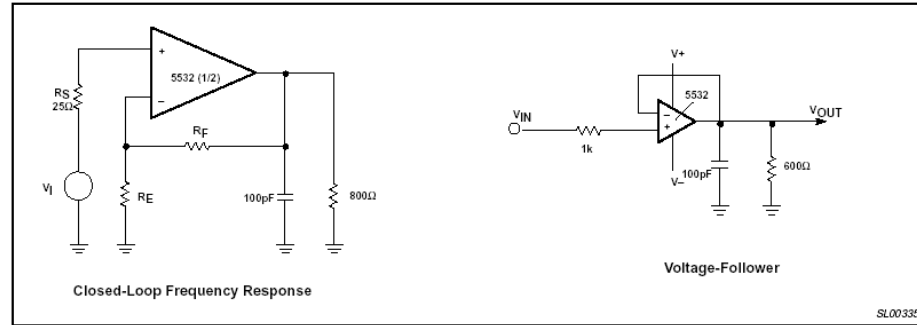


Figure 4. Test Circuits

## ไอซี AT89C2051

### Features

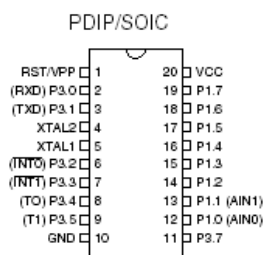
- Compatible with MCS-51™ Products
- 2K Bytes of Reprogrammable Flash Memory
  - Endurance: 1,000 Write/Erase Cycles
- 2.7V to 6V Operating Range
- Fully Static Operation: 0 Hz to 24 MHz
- Two-level Program Memory Lock
- 128 x 8-bit Internal RAM
- 15 Programmable I/O Lines
- Two 16-bit Timer/Counters
- Six Interrupt Sources
- Programmable Serial UART Channel
- Direct LED Drive Outputs
- On-chip Analog Comparator
- Low-power Idle and Power-down Modes

### Description

The AT89C2051 is a low-voltage, high-performance CMOS 8-bit microcomputer with 2K bytes of Flash programmable and erasable read only memory (PEROM). The device is manufactured using Atmel's high-density nonvolatile memory technology and is compatible with the industry-standard MCS-51 instruction set. By combining a versatile 8-bit CPU with Flash on a monolithic chip, the Atmel AT89C2051 is a powerful microcomputer which provides a highly-flexible and cost-effective solution to many embedded control applications.

The AT89C2051 provides the following standard features: 2K bytes of Flash, 128 bytes of RAM, 15 I/O lines, two 16-bit timer/counters, a five vector two-level interrupt architecture, a full duplex serial port, a precision analog comparator, on-chip oscillator and clock circuitry. In addition, the AT89C2051 is designed with static logic for operation down to zero frequency and supports two software selectable power saving modes. The Idle Mode stops the CPU while allowing the RAM, timer/counters, serial port and interrupt system to continue functioning. The power-down mode saves the RAM contents but freezes the oscillator disabling all other chip functions until the next hardware reset.

### Pin Configuration



**8-bit  
Microcontroller  
with 2K Bytes  
Flash**

**AT89C2051**

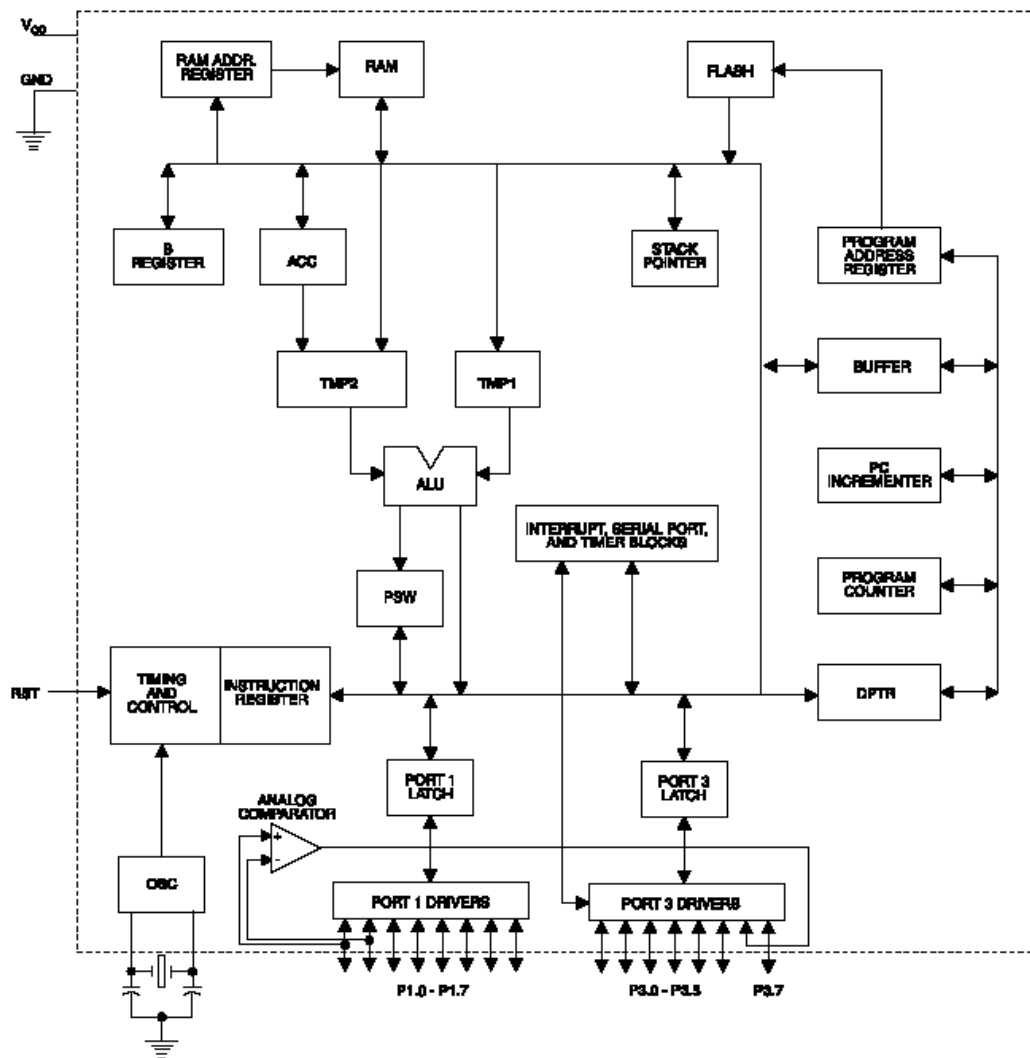
Rev. 0368E-02/00







Block Diagram



## AT89C2051

### Pin Description

#### VCC

Supply voltage.

#### GND

Ground.

#### Port 1

Port 1 is an 8-bit bi-directional I/O port. Port pins P1.2 to P1.7 provide internal pullups. P1.0 and P1.1 require external pullups. P1.0 and P1.1 also serve as the positive input (AIN0) and the negative input (AIN1), respectively, of the on-chip precision analog comparator. The Port 1 output buffers can sink 20 mA and can drive LED displays directly. When 1s are written to Port 1 pins, they can be used as inputs. When pins P1.2 to P1.7 are used as inputs and are externally pulled low, they will source current ( $I_{IL}$ ) because of the internal pullups.

Port 1 also receives code data during Flash programming and verification.

#### Port 3

Port 3 pins P3.0 to P3.5, P3.7 are seven bi-directional I/O pins with internal pullups. P3.6 is hard-wired as an input to the output of the on-chip comparator and is not accessible as a general purpose I/O pin. The Port 3 output buffers can sink 20 mA. When 1s are written to Port 3 pins they are pulled high by the internal pullups and can be used as inputs. As inputs, Port 3 pins that are externally being pulled low will source current ( $I_{IL}$ ) because of the pullups.

Port 3 also serves the functions of various special features of the AT89C2051 as listed below:

Port Pin	Alternate Functions
P3.0	RXD (serial input port)
P3.1	TXD (serial output port)
P3.2	$\overline{\text{INT0}}$ (external interrupt 0)
P3.3	$\overline{\text{INT1}}$ (external interrupt 1)
P3.4	T0 (timer 0 external input)
P3.5	T1 (timer 1 external input)

Port 3 also receives some control signals for Flash programming and verification.

#### RST

Reset input. All I/O pins are reset to 1s as soon as RST goes high. Holding the RST pin high for two machine cycles while the oscillator is running resets the device.

Each machine cycle takes 12 oscillator or clock cycles.

#### XTAL1

Input to the inverting oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

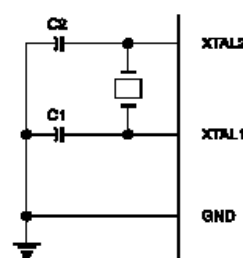
#### XTAL2

Output from the inverting oscillator amplifier.

### Oscillator Characteristics

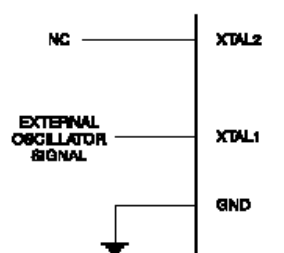
XTAL1 and XTAL2 are the input and output, respectively, of an inverting amplifier which can be configured for use as an on-chip oscillator, as shown in Figure 1. Either a quartz crystal or ceramic resonator may be used. To drive the device from an external clock source, XTAL2 should be left unconnected while XTAL1 is driven as shown in Figure 2. There are no requirements on the duty cycle of the external clock signal, since the input to the internal clocking circuitry is through a divide-by-two flip-flop, but minimum and maximum voltage high and low time specifications must be observed.

Figure 1. Oscillator Connections



Note: C1, C2 = 30 pF ± 10 pF for Crystals  
= 40 pF ± 10 pF for Ceramic Resonators

Figure 2. External Clock Drive Configuration





## Special Function Registers

A map of the on-chip memory area called the Special Function Register (SFR) space is shown in the table below.

Note that not all of the addresses are occupied, and unoccupied addresses may not be implemented on the chip. Read accesses to these addresses will in general return

random data, and write accesses will have an indeterminate effect.

User software should not write 1s to these unlisted locations, since they may be used in future products to invoke new features. In that case, the reset or inactive values of the new bits will always be 0.

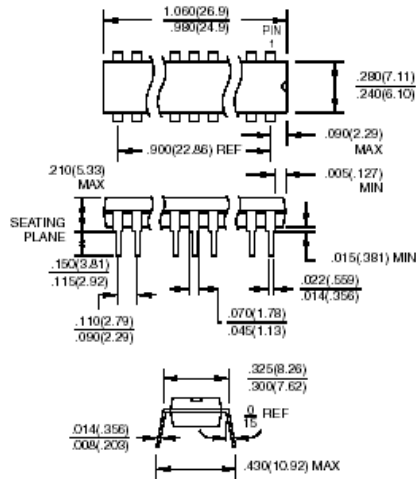
**Table 1.** AT89C2051 SFR Map and Reset Values

0F8H								0FFH
0F0H	B 00000000							0F7H
0E8H								0EFH
0E0H	ACC 00000000							0E7H
0D8H								0DFH
0D0H	PSW 00000000							0D7H
0C8H								0CFH
0C0H								0C7H
0B8H	IP XXX00000							0BFH
0B0H	P3 11111111							0B7H
0A8H	IE 0XX00000							0AFH
0A0H								0A7H
98H	SCON 00000000	SBUF XXXXXXXX						9FH
90H	P1 11111111							97H
88H	TCON 00000000	TMOD 00000000	TL0 00000000	TL1 00000000	TH0 00000000	TH1 00000000		8FH
80H		SP 00000111	DPL 00000000	DPH 00000000			PCON 0XXX0000	87H

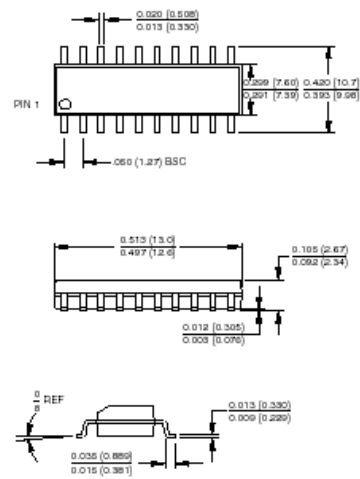


**Packaging Information**

**20P3**, 20-lead, 0.300" Wide, Plastic Dual Inline Package (PDIP)  
 Dimensions in Inches and (Millimeters)  
 JEDEC STANDARD MS-001 AD



**20S**, 20-lead, 0.300" Wide, Plastic Gull Wing Small Outline (SOIC)  
 Dimensions in Inches and (Millimeters)



## ไอซี AT89S8252

### Features

- Compatible with MCS-51™ Products
- 8K Bytes of In-System Reprogrammable Downloadable Flash Memory
  - SPI Serial Interface for Program Downloading
  - Endurance: 1,000 Write/Erase Cycles
- 2K Bytes EEPROM
  - Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles
- 4V to 6V Operating Range
- Fully Static Operation: 0 Hz to 24 MHz
- Three-level Program Memory Lock
- 256 x 8-bit Internal RAM
- 32 Programmable I/O Lines
- Three 16-bit Timer/Counters
- Nine Interrupt Sources
- Programmable UART Serial Channel
- SPI Serial Interface
- Low-power Idle and Power-down Modes
- Interrupt Recovery From Power-down
- Programmable Watchdog Timer
- Dual Data Pointer
- Power-off Flag

### Description

The AT89S8252 is a low-power, high-performance CMOS 8-bit microcomputer with 8K bytes of downloadable Flash programmable and erasable read only memory and 2K bytes of EEPROM. The device is manufactured using Atmel's high-density nonvolatile memory technology and is compatible with the industry-standard 80C51 instruction set and pinout. The on-chip downloadable Flash allows the program memory to be reprogrammed in-system through an SPI serial interface or by a conventional nonvolatile memory programmer. By combining a versatile 8-bit CPU with downloadable Flash on a monolithic chip, the Atmel AT89S8252 is a powerful microcomputer which provides a highly-flexible and cost-effective solution to many embedded control applications.

The AT89S8252 provides the following standard features: 8K bytes of downloadable Flash, 2K bytes of EEPROM, 256 bytes of RAM, 32 I/O lines, programmable watchdog timer, two data pointers, three 16-bit timer/counters, a six-vector two-level interrupt architecture, a full duplex serial port, on-chip oscillator, and clock circuitry. In addition, the AT89S8252 is designed with static logic for operation down to zero frequency and supports two software selectable power saving modes. The Idle Mode stops the CPU while allowing the RAM, timer/counters, serial port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the RAM contents but freezes the oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or hardware reset.

The downloadable Flash can be changed a single byte at a time and is accessible through the SPI serial interface. Holding RESET active forces the SPI bus into a serial programming interface and allows the program memory to be written to or read from unless Lock Bit 2 has been activated.



**8-bit  
Microcontroller  
with 8K Bytes  
Flash**

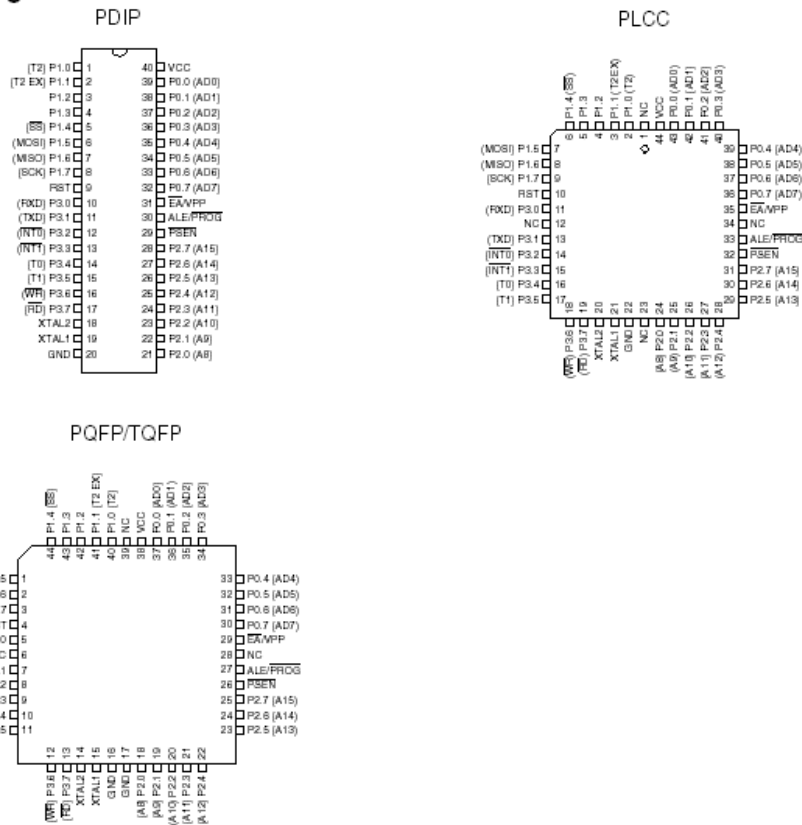
**AT89S8252**

Rev. 0401E-02/00





## Pin Configurations



## Pin Description

**VCC**  
Supply voltage.

**GND**  
Ground.

**Port 0**  
Port 0 is an 8-bit open drain bi-directional I/O port. As an output port, each pin can sink eight TTL inputs. When 1s are written to port 0 pins, the pins can be used as high-impedance inputs.  
Port 0 can also be configured to be the multiplexed low-order address/data bus during accesses to external

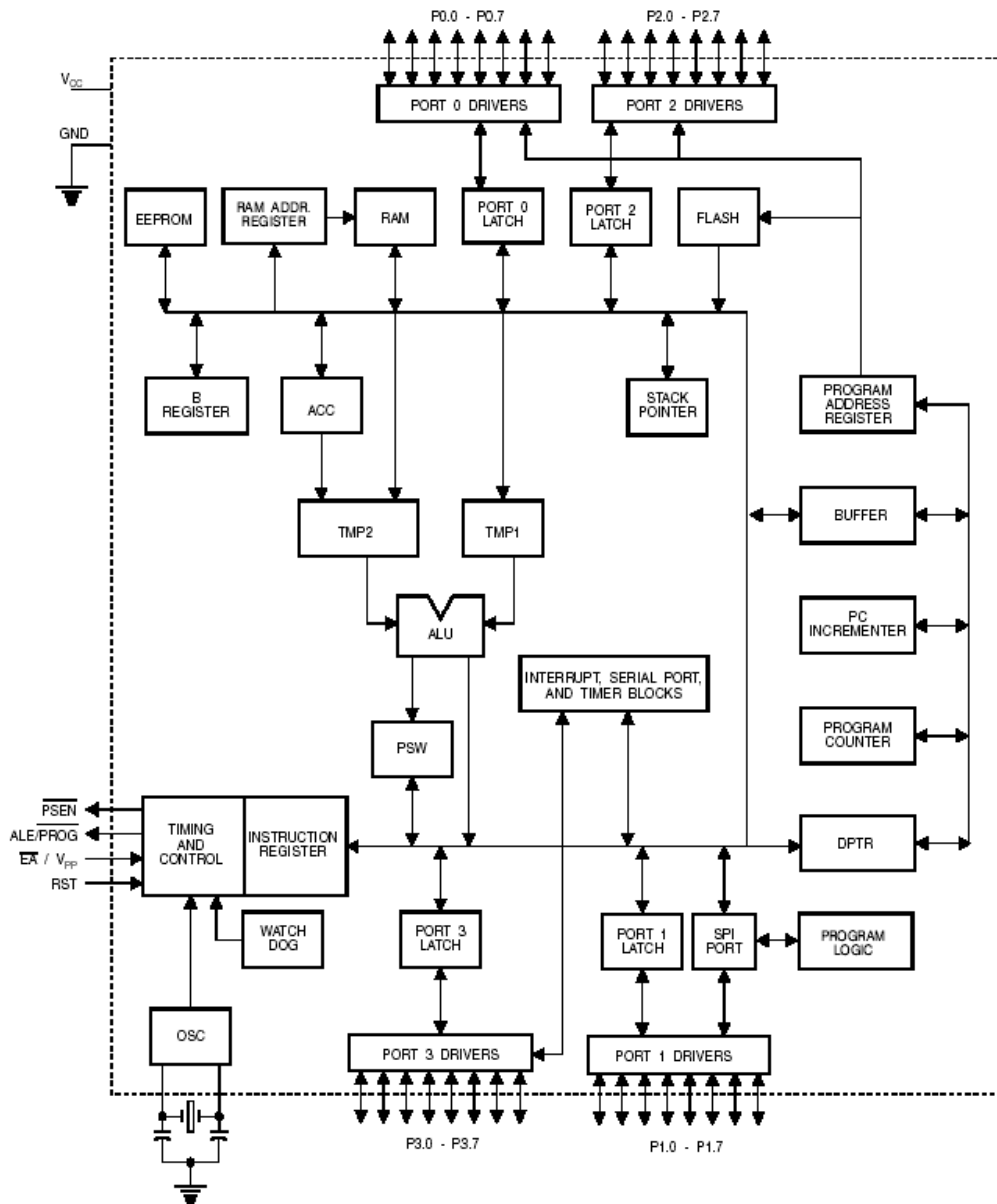
program and data memory. In this mode, P0 has internal pullups.

Port 0 also receives the code bytes during Flash programming and outputs the code bytes during program verification. External pullups are required during program verification.

**Port 1**  
Port 1 is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pullups. The Port 1 output buffers can sink/source four TTL inputs. When 1s are written to Port 1 pins, they are pulled high by the internal pullups and can be used as inputs. As inputs, Port 1 pins that are externally being pulled low will source current ( $I_{IL}$ ) because of the internal pullups.

**AT89S8252**

**Block Diagram**





Some Port 1 pins provide additional functions. P1.0 and P1.1 can be configured to be the timer/counter 2 external count input (P1.0/T2) and the timer/counter 2 trigger input (P1.1/T2EX), respectively.

### Pin Description

Furthermore, P1.4, P1.5, P1.6, and P1.7 can be configured as the SPI slave port select, data input/output and shift clock input/output pins as shown in the following table.

Port Pin	Alternate Functions
P1.0	T2 (external count input to Timer/Counter 2), clock-out
P1.1	T2EX (Timer/Counter 2 capture/reload trigger and direction control)
P1.4	$\overline{SS}$ (Slave port select input)
P1.5	MOSI (Master data output, slave data input pin for SPI channel)
P1.6	MISO (Master data input, slave data output pin for SPI channel)
P1.7	SCK (Master clock output, slave clock input pin for SPI channel)

Port 1 also receives the low-order address bytes during Flash programming and verification.

#### Port 2

Port 2 is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pullups. The Port 2 output buffers can sink/source four TTL inputs. When 1s are written to Port 2 pins, they are pulled high by the internal pullups and can be used as inputs. As inputs, Port 2 pins that are externally being pulled low will source current ( $I_{IL}$ ) because of the internal pullups.

Port 2 emits the high-order address byte during fetches from external program memory and during accesses to external data memory that use 16-bit addresses (MOVX @ DPTR). In this application, Port 2 uses strong internal pullups when emitting 1s. During accesses to external data memory that use 8-bit addresses (MOVX @ RI), Port 2 emits the contents of the P2 Special Function Register.

Port 2 also receives the high-order address bits and some control signals during Flash programming and verification.

#### Port 3

Port 3 is an 8 bit bi-directional I/O port with internal pullups. The Port 3 output buffers can sink/source four TTL inputs. When 1s are written to Port 3 pins, they are pulled high by the internal pullups and can be used as inputs. As inputs,

Port 3 pins that are externally being pulled low will source current ( $I_{IL}$ ) because of the pullups.

Port 3 also serves the functions of various special features of the AT89S8252, as shown in the following table.

Port 3 also receives some control signals for Flash programming and verification.

Port Pin	Alternate Functions
P3.0	RXD (serial input port)
P3.1	TXD (serial output port)
P3.2	$\overline{INT0}$ (external interrupt 0)
P3.3	$\overline{INT1}$ (external interrupt 1)
P3.4	T0 (timer 0 external input)
P3.5	T1 (timer 1 external input)
P3.6	$\overline{WR}$ (external data memory write strobe)
P3.7	$\overline{RD}$ (external data memory read strobe)

#### RST

Reset input. A high on this pin for two machine cycles while the oscillator is running resets the device.

#### ALE/PROG

Address Latch Enable is an output pulse for latching the low byte of the address during accesses to external memory. This pin is also the program pulse input (PROG) during Flash programming.

In normal operation, ALE is emitted at a constant rate of 1/6 the oscillator frequency and may be used for external timing or clocking purposes. Note, however, that one ALE pulse is skipped during each access to external data memory.

If desired, ALE operation can be disabled by setting bit 0 of SFR location 8EH. With the bit set, ALE is active only during a MOVX or MOVC instruction. Otherwise, the pin is weakly pulled high. Setting the ALE-disable bit has no effect if the microcontroller is in external execution mode.

#### PSEN

Program Store Enable is the read strobe to external program memory.

When the AT89S8252 is executing code from external program memory, PSEN is activated twice each machine cycle, except that two PSEN activations are skipped during each access to external data memory.

#### $\overline{EA}/VPP$

External Access Enable.  $\overline{EA}$  must be strapped to GND in order to enable the device to fetch code from external pro-



## AT89S8252

gram memory locations starting at 0000H up to FFFFH. Note, however, that if lock bit 1 is programmed,  $\overline{EA}$  will be internally latched on reset.

$\overline{EA}$  should be strapped to  $V_{CC}$  for internal program executions. This pin also receives the 12-volt programming enable voltage ( $V_{PP}$ ) during Flash programming when 12-volt programming is selected.

### XTAL1

Input to the inverting oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

### XTAL2

Output from the inverting oscillator amplifier.

**Table 1.** AT89S8252 SFR Map and Reset Values

0F8H									0FFH
0F0H	B 00000000								0F7H
0E8H									0EFH
0E0H	ACC 00000000								0E7H
0D8H									0DFH
0D0H	PSW 00000000					SPCR 000001XX			0D7H
0C8H	T2CON 00000000	T2MOD XXXXXX00	RCAP2L 00000000	RCAP2H 00000000	TL2 00000000	TH2 00000000			0CFH
0C0H									0C7H
0B8H	IP XX000000								0BFH
0B0H	P3 11111111								0B7H
0A8H	IE 0X000000		SPSR 00XXXXXX						0AFH
0A0H	P2 11111111								0A7H
98H	SCON 00000000	SBUF XXXXXXXX							9FH
90H	P1 11111111						WMCON 00000010		97H
88H	TCON 00000000	TMOD 00000000	TL0 00000000	TL1 00000000	TH0 00000000	TH1 00000000			8FH
80H	P0 11111111	SP 00000111	DP0L 00000000	DP0H 00000000	DP1L 00000000	DP1H 00000000	SPDR XXXXXXXX	PCON 0XXX0000	87H



**AT89S8252**

**Packaging Information**

<p><b>44A</b>, 44-lead, Thin (1.0 mm) Plastic Gull Wing Quad Flatpack (TQFP)                  Dimensions in Millimeters and (Inches)*                  JEDEC STANDARD MS-026 ACB</p> <p>Controlling dimension: millimeters</p>	<p><b>44J</b>, 44-lead, Plastic J-leaded Chip Carrier (PLCC)                  Dimensions in Inches and (Millimeters)                  JEDEC STANDARD MS-018 AC</p> <p>Controlling dimension: millimeters</p>
<p><b>40P6</b>, 40-lead, 0.600" Wide, Plastic Dual Inline Package (PDIP)                  Dimensions in Inches and (Millimeters)</p> <p>Controlling dimension: millimeters</p>	<p><b>44Q</b>, 44-lead, Plastic Quad Flat Package (PQFP)                  Dimensions in Millimeters and (Inches)*                  JEDEC STANDARD MS-022 AB</p> <p>Controlling dimension: millimeters</p>



ภาคผนวก ๑.

มาตรฐานและการตรวจวัดฮาร์โมนิก

### มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

จะพิจารณากระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากผู้ใช้ไฟฟ้าว่าส่วนที่ป้อนเข้าสู่ระบบว่ามีค่าเท่าใดด้วยการกำหนดค่าจำกัดกระแสผิดเพี้ยนโดยใช้ดัชนีชี้วัด 2 ตัว คือ ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Demand Distortion: TDD) และ กระแสฮาร์โมนิกในแต่ละอันดับ (Individual harmonic current distortion:  $I_h$ ) ค่าจำกัดจะแบ่งตามระดับแรงดัน และขนาดของกระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ต่อกระแสในช่วงที่มีความต้องการสูงสุด ( $I_L$ ) ดังตาราง ญ.1

ตารางที่ ญ.1 ค่าจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกตาม IEEE Std. 519-1992

$V_n \leq 69\text{kV}$						
$I_{sc}/I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$						
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161\text{kV}$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

\*: อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดกำลังไฟฟ้าจะถูกจำกัดให้อยู่ในค่ากระแสฮาร์โมนิกเหล่านี้โดยไม่คำนึงถึงค่า

$I_{sc}/I_L$  จริง

หมายเหตุ

- $I_{sc}$  เป็นค่ากระแสลัดวงจรที่จุดต่อร่วม (PCC) ปกติจะใช้กระแสลัดวงจรในกรณีเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส เพราะถือเป็นกรณีรุนแรงที่สุด

- $I_L$  เป็นค่ากระแสที่วัดในช่วงผู้ใช้ไฟฟ้ามีความต้องการใช้พลังงานสูงสุดในเวลา 15 หรือ 30 นาที แต่ถ้าข้อมูลไม่เพียงพอ  $I_L$  คำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของกระแสคิดย้อนหลังในรอบ 1 ปี (คิดจากบิลค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า) ในกรณีผู้ใช้ไฟฟ้ายาวใหม่ จะประมาณกระแส  $I_L$  โดยการทำนายลักษณะโหลดล่วงหน้า (Predicted load profiles)
- ค่าในตารางที่ ๓.๑ เป็นค่าจำกัดของฮาร์มอนิกที่เป็นอันดับที่ส่วนค่าจำกัดของอันดับคู่จะใช้ค่าเป็นร้อยละ 25 ของค่าจำกัดอันดับคี่ที่อยู่เหนือขึ้นไป โดยทั่วไปแล้วจะไม่พิจารณาฮาร์มอนิกอันดับคู่ เว้นแต่ผู้ใช้ไฟฟ้ามีชุดกรองฮาร์มอนิก หรือคาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ซึ่งอาจทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ ขยายกระแสฮาร์มอนิกคู่ให้มีค่ามากขึ้น
- กระแสผิบนี้นี้ไม่มีผลของส่วนประกอบไฟตรง (dc offset not allowed)
- นิยามของ TDD คือ

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (\text{๓-1})$$

เมื่อ  $I_h$  = ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h (ค่า rms)

h = อันดับฮาร์มอนิก

$I_L$  = ขนาดของกระแสในช่วงความต้องการสูงสุด

- ถ้าโหลดที่กำหนดฮาร์มอนิกประกอบด้วย คอนเวอเตอร์ ที่มีจำนวนพัลส์ (q) มากกว่า 6 พัลส์ ค่าจำกัดในตารางให้เพิ่มขึ้นได้ด้วยตัวประกอบการคูณ  $\sqrt{q/6}$
- ฮาร์มอนิกที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกเฉพาะตัว (Non-characteristic harmonic) ให้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 25 ของค่าจำกัดในตารางที่ ๓.๑

จากตารางค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 พบว่า จะยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปล่อยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบได้มากหรือน้อยขึ้นกับระบบและขนาดของโหลด เช่นถ้าผู้ใช้ไฟฟ้ามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระบบจะยอมให้มีค่าจำกัดได้สูงกว่าผู้ใช้ไฟขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับระบบ

**มาตรฐานข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม  
(PRC-PQC-01/1998)**

ตารางที่ ๒.2 ชีตจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ ที่จุดต่อร่วม\* ตาม PRC-PQC-01/1998

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	MVA <sub>sc</sub> ** Base	อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดของกระแส (A rms)																	
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.4	10	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11, 12, 22 and 24	100	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
33	500	11	7	5	9	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
69	500	8.5	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 and above	1000	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

\* : ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ

\*\* : หากค่า MVA<sub>sc</sub> ต่ำสุด ณ จุดต่อร่วมมีค่าแตกต่างจากค่า MVA<sub>sc</sub> Base ที่ระบุในตารางมากรยอมให้ปรับค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบด้วยสมการที่ (๒-2)

$$i_h = i_{hp} * \frac{MVA_{sc1}}{MVA_{sc(Base)}} \quad (๒-2)$$

$i_h$  กระแสฮาร์มอนิก(A) ลำดับที่ h ที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบ เมื่อค่า MVA<sub>sc</sub> เป็น MVA<sub>sc1</sub>

$i_{hp}$  กระแสฮาร์มอนิก(A) ลำดับที่ h ที่กำหนดในตารางที่ ๒.2

MVA<sub>sc1</sub> ค่า MVA<sub>sc</sub> ต่ำสุด ณ จุดต่อร่วมมีค่าไม่เท่ากับค่า MVA<sub>sc</sub> Base

MVA<sub>sc(Base)</sub> ค่า MVA<sub>sc</sub> Base สำหรับค่ากระแสฮาร์มอนิกตามตารางที่ ๒.2

## ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์วงจรกรองสาร์โมนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผล

### การวิเคราะห์วงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผล

การวิเคราะห์วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุด้วยวิธีการวิเคราะห์ขยายผล จะพิจารณาจากสัญญาณกระแสในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ โดยการวิเคราะห์นั้นจะพิจารณาจากรูปแบบการสับสวิตช์ของตัวเก็บประจุซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

**กรณีที่ 1** สวิตช์  $Sw_2$  ปิด  $Sw_1$  เปิด ตัวเหนี่ยวนำต่อลง

เมื่อพิจารณากระแสชดเชยในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (กฎ-1)

$$i_F(x) = \frac{V_{\max}}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(x + \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R_L}\right)\right) \quad (\text{กฎ-1})$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์มีค่าดังสมการที่ (กฎ-2) และ (กฎ-3)

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_F(x) \sin(nx) dx \quad (\text{กฎ-2})$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_F(x) \cos(nx) dx \quad (\text{กฎ-3})$$

แทนค่าสมการที่ (กฎ-1) ลงในสมการที่ (กฎ-2) และ (กฎ-3) จะได้

$$A_n^I = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{V_{\max}}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(x + \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R_L}\right)\right) \sin(nx) dx \quad (\text{กฎ-4})$$

$$B_n^I = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{V_{\max}}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(x + \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R_L}\right)\right) \cos(nx) dx \quad (\text{กฎ-5})$$

โดยที่  $A_n^I, B_n^I$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสชดเชยในการสวิตช์กรณีที่ 1

$$\text{จาก} \quad \cos(a + b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b) \quad (\text{กฎ-6})$$



$$\cos(a - b) = \cos(a)\cos(b) + \sin(a)\sin(b) \quad (\text{กฎ-7})$$

โดยที่  $a, b$  คือจำนวนจริงใดๆ

สมการที่ (กฎ-7) ลบ สมการที่ (กฎ-6) ได้ดังสมการที่ (กฎ-8)

$$2\sin(a)\sin(b) = \cos(a - b) - \cos(a + b)$$

หรือ

$$\sin(a)\sin(b) = \frac{1}{2}(\cos(a - b) - \cos(a + b)) \quad (\text{กฎ-8})$$

จาก

$$\sin(a + b) = \sin(a)\cos(b) + \cos(a)\sin(b) \quad (\text{กฎ-9})$$

$$\sin(a - b) = \sin(a)\cos(b) - \cos(a)\sin(b) \quad (\text{กฎ-10})$$

สมการที่ (กฎ-9) บวกสมการที่ (กฎ-10) ได้ดังสมการที่ (กฎ-11)

$$2\sin(a)\cos(b) = \sin(a + b) + \sin(a - b)$$

หรือ

$$\sin(a)\cos(b) = \frac{1}{2}(\sin(a + b) + \sin(a - b)) \quad (\text{กฎ-11})$$

จากสมการที่ (กฎ-4) และ (กฎ-5) จัดรูปใหม่ตามสมการที่ (กฎ-8) และ (กฎ-11) ได้ดังสมการที่ (กฎ-12) และ (4-13)

$$A_n^I = K_1 \int_0^{2\pi} \cos(x + \gamma_1 - nx) - \cos(x + \gamma_1 + nx) dx \quad (\text{กฎ-12})$$

$$B_n^I = K_1 \int_0^{2\pi} \sin(x + \gamma_1 + nx) + \sin(x + \gamma_1 - nx) dx \quad (\text{กฎ-13})$$

โดยที่ 
$$K_1 = \frac{V_{\max}}{2\pi \sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\gamma_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R_L} \right)$$

จากสมการที่ (กฎ-12) และ (กฎ-13) เมื่อทำการอินทิเกรตในช่วง 0 ถึง  $2\pi$  จะได้ดังสมการที่ (กฎ-14) และ (กฎ-15)

$$A_n^1 = K_1 \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1 - n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1 + n} \right) \Bigg|_0^{2\pi} \quad (\text{กฎ-14})$$

$$B_n^1 = K_1 \left( -\frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1 + n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1 - n} \right) \Bigg|_0^{2\pi} \quad (\text{กฎ-15})$$

จากสมการที่ (กฎ-14) และ (กฎ-15) แทนค่า  $x$  ด้วยช่วงเวลาการสวิตช์จากรูปที่ 4.3 ได้ดังสมการที่ (กฎ-16) และ (กฎ-17)

$$A_n^1 = K_1 \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1 - n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1 + n} \right) \Bigg|_{x_1}^{x_2} \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1 - n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1 + n} \right) \Bigg|_{x_3}^{x_4} \\ & + \dots \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_1 - nx)}{1 - n} - \frac{\sin(x + \gamma_1 + nx)}{1 + n} \right) \Bigg|_{x_{m-1}}^{x_m} \end{aligned} \right\} \quad (\text{กฎ-16})$$

$$B_n^I = K_1 \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \Big|_{x_1}^{x_2} \\ & + \left( \frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \Big|_{x_3}^{x_4} \\ & + \dots \\ & + \left( \frac{\cos(x + \gamma_1 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_1 - nx)}{1-n} \right) \Big|_{x_{m-1}}^{x_m} \end{aligned} \right\} \quad (\text{กฎ-17})$$

กรณีที่ 2 สวิตช์  $Sw_2$  เปิด  $Sw_1$  ปิด ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ สามารถหาสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ได้จาก

$$i_F(t) = \frac{V_{\max} \omega C}{\sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{(1 - \omega^2 LC)} \right) \right) \quad (\text{กฎ-18})$$

โดยที่  $C$  คือขนาดของตัวเก็บประจุ เมื่อพิจารณากระแสชดเชยในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์โดยกำหนดให้  $x = \omega t$  ได้ดังสมการที่ (กฎ-19)

$$i_F(x) = \frac{V_{\max} \omega C}{\sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \sin \left( x + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{(1 - \omega^2 LC)} \right) \right) \quad (\text{กฎ-19})$$

แทนค่าสมการที่ (กฎ-19) ลงในสมการที่ (กฎ-2) และ (กฎ-3) ได้ดังสมการที่ (กฎ-20) และ (กฎ-21)

$$A_n^{\text{II}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \left( \frac{V_{\max} \omega C}{\sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \right) * \sin \left( x + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{1 - \omega^2 LC} \right) \right) \sin(nx) \, dx \quad (\text{กฎ-20})$$

$$B_n^{\text{II}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \left( \frac{V_{\max} \omega C}{\sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \right) * \sin \left( x + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{1 - \omega^2 LC} \right) \right) \cos(nx) \, dx \quad (\text{กฎ-21})$$

โดยที่  $A_n^{\text{II}}$ ,  $B_n^{\text{II}}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกฟูรีเยร์ของกระแสชดเชยในการสวิตซ์กรณีที่มี 2 จัดรูปสมการที่ (กฎ-20) และ (กฎ-21) ได้ดังสมการที่ (กฎ-22) และ (กฎ-23)

$$A_n^{\text{II}} = K_2 \int_0^{2\pi} (\cos(x + \gamma_2 - nx) - \cos(x + \gamma_2 + nx)) \, dx \quad (\text{กฎ-22})$$

$$B_n^{\text{II}} = K_2 \int_0^{2\pi} (\sin(x + \gamma_2 + nx) + \sin(x + \gamma_2 - nx)) \, dx \quad (\text{กฎ-23})$$

โดยที่

$$K_2 = \frac{V_{\max} \omega C}{2\pi \sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}}$$

$$\gamma_2 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\omega R_L C}{1 - \omega^2 LC} \right)$$

จากสมการที่ (กฎ-22) และ (กฎ-23) เมื่อทำการอินทิเกรตในช่วง 0 ถึง  $2\pi$  จะได้ดังสมการที่ (กฎ-24) และ (กฎ-25)

$$A_n^{\text{II}} = K_2 \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1 - n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1 + n} \right) \Bigg|_0^{2\pi} \quad (\text{กฎ-24})$$

$$B_n^{\text{II}} = K_2 \left( -\frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \Bigg|_0^{2\pi} \quad (\text{กฎ-25})$$

จากสมการที่ (กฎ-24) และ (กฎ-25) แทนค่า  $x$  ด้วยช่วงเวลาการสวิตช์จากรูปที่ 4.3 ได้ดังสมการที่ (กฎ-26) และ (กฎ-27)

$$A_n^{\text{II}} = K_2 \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} \right) \Bigg|_{x_0}^{x_1} \\ & + \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} \right) \Bigg|_{x_2}^{x_3} \\ & + \dots \\ & \left( \frac{\sin(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} - \frac{\sin(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} \right) \Bigg|_{x_m}^{x_{m+1}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{กฎ-26})$$

$$B_n^{\text{II}} = K_2 \left\{ \begin{aligned} & \left( -\frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \Bigg|_{x_0}^{x_1} \\ & + \left( -\frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \Bigg|_{x_2}^{x_3} \\ & + \dots \\ & + \left( -\frac{\cos(x + \gamma_2 + nx)}{1+n} - \frac{\cos(x + \gamma_2 - nx)}{1-n} \right) \Bigg|_{x_m}^{x_{m+1}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{กฎ-27})$$

ภาคผนวก ก

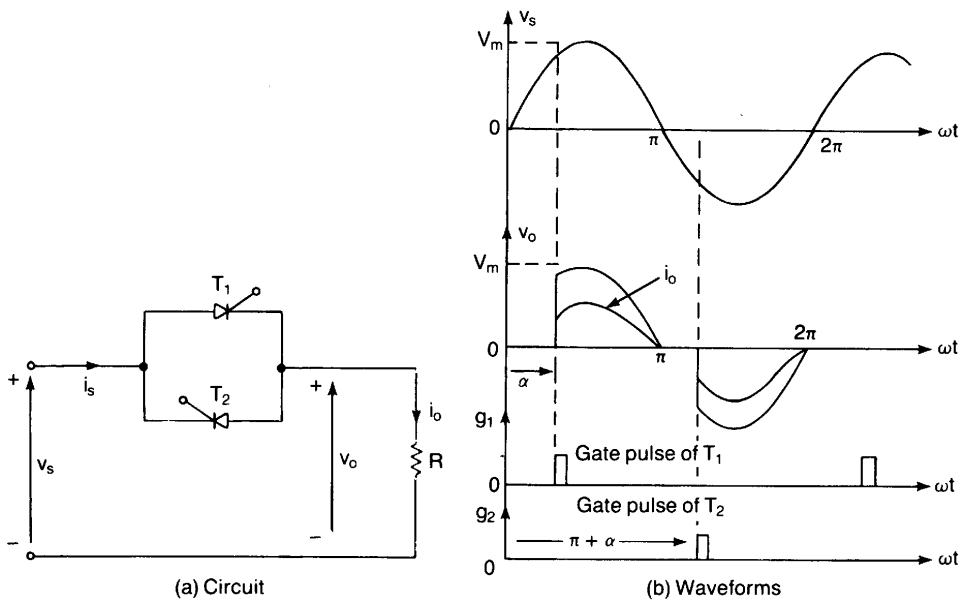
ตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส

**ตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส (Barton, 1994; Bradley, 1995; Rashid, 1998)**

**ตัวควบคุมแรงดันสองทิศทาง 1 เฟส ต่อกับโหลดแบบความต้านทาน**

การป้องกันปัญหาเกี่ยวกับองค์ประกอบกระแสตรงที่ปนอยู่กับกระแสขาออกสามารถที่จะป้องกันได้โดยใช้การควบคุมสองทิศทาง และตัวควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟส ต่อกับโหลดแบบความต้านทานซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ฎ.1a ในช่วงครึ่งคลื่นด้านบวกของสัญญาณแรงดันขาเข้า กำลังที่ไหลสามารถควบคุมได้โดยการแปรผันมุมประวิงของไทรสเตอร์ T1 และไทรสเตอร์ T2 จะควบคุมกำลังที่ไหลในช่วงครึ่งคลื่นด้านลบของแรงดันขาเข้า การล้นพัลส์ของ T1 และ T2 จะทำงานห่างกัน 180 องศา รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันขาเข้า แรงดันขาออก และสัญญาณเกตของ T1 และ T2 แสดงในรูปที่ ฎ.1b

ถ้า  $v_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega t$  เป็นแรงดันขาเข้าและมุมประวิงของไทรสเตอร์ T1 และ T2 มีค่าเป็น  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$  แรงดันขาออกอาร์เอ็มเอสสามารถหาได้จาก

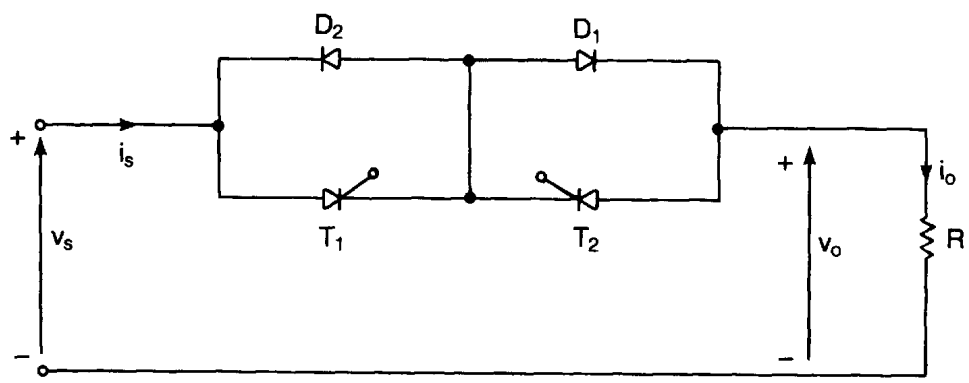


รูปที่ ฎ.1 วงจรควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟส

$$\begin{aligned}
 V_o &= \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \left[ \frac{4V_s^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}
 \tag{กฏ-1}$$

โดย  $\alpha$  สามารถแปรผันจาก 0 ถึง  $\pi$   $V_o$  สามารถแปรผันจาก  $V_s$  ถึง 0

ในรูปที่ กฏ.1a วงจรเกิดของไทรสเตอร์  $T_1$  และ  $T_2$  จำเป็นต้องแยกกัน สามารถที่จะใช้แคโทดของ  $T_1$  และ  $T_2$  ร่วมกันได้โดยไดโอด 2 ตัวโดยแสดงไว้ดังรูปที่ กฏ.2 ไทรสเตอร์  $T_1$  และไดโอด  $D_1$  จะทำงานพร้อมกันตลอดช่วงครึ่งคลื่นด้านบวก และไทรสเตอร์  $T_2$  และไดโอด  $D_2$  จะทำงานพร้อมกันตลอดช่วงครึ่งคลื่นด้านลบ โดยการทำงานจะทำงานแยกกันเพียงอย่างเดียว แต่ทำให้สิ้นเปลืองไดโอดกำลัง 2 ตัว กำหนดให้อุปกรณ์กำลังทำงานที่เวลาเดียวกัน ความสูญเสียในการทำงานของอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพจะลดลง

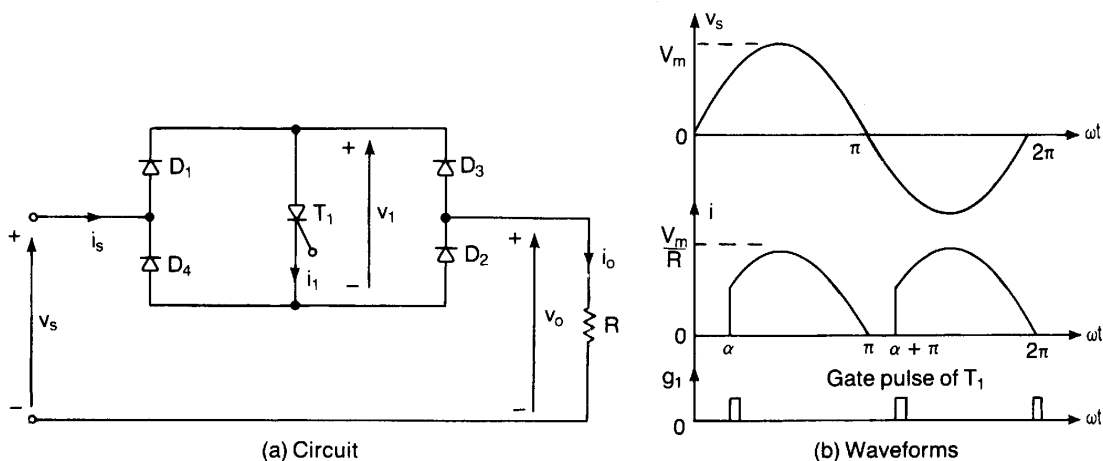


รูปที่ กฏ.2 วงจรควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟส โดยมีแคโทดร่วม

เครื่องควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟสสามารถทำเป็นเครื่องมือได้ด้วยไทรสเตอร์ 1 ตัว และไดโอด 4 ตัว แสดงได้ดังรูปที่ กฏ.3 ไดโอด 4 ตัวประพุดิตัวเป็นตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ แรงดันคร่อมไทรสเตอร์  $T_1$  และกระแสมีทิศทางเดียวเสมอ ด้วยโหลดแบบความต้านทาน กระแสไทรสเตอร์จะลดลงเป็น 0 เนื่องจากการสับเปลี่ยนแบบธรรมชาติในทุกๆ ช่วงครึ่งคลื่น แสดงได้ดัง



รูปที่ ๓.3b อย่างไรก็ตามถ้ามีตัวความเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ในวงจร ไทริสเตอร์  $T_1$  อาจจะไม่ปิดในหลายๆ ครั้งคลื่นของแรงดันขาเข้าและอาจส่งผลให้สูญเสียการควบคุม อุปกรณ์กำลังจะทำงานที่เวลาเดียวกันและประสิทธิภาพจะลดลงด้วย ตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์และไทริสเตอร์ (หรือทรานซิสเตอร์) จะทำงานเป็นสวิตช์ 2 ทิศทาง



รูปที่ ๓.3 วงจรควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟส โดยมีไทริสเตอร์ 1 ตัว

กระแสอาร์เอ็มเอสและกำลังขาออกของโหลดหาได้จาก

$$I_o = \frac{V_o}{R} \tag{๓-2}$$

$$P_o = I_o^2 R \tag{๓-3}$$

เมื่อกระแสขาเข้ามีค่าเท่ากับกระแสโหลด โวลต์-แอมป์ขาเข้าหาได้จาก

$$VA = V_s I_s = V_s I_o \tag{๓-4}$$

ตัวประกอบกำลังขาเข้าหาได้จาก

$$PF = \frac{P_o}{VA} = \frac{V_o}{V_s} = \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{กฎ-5})$$

กระแสเฉลี่ยของไทรสเตอร์หาได้จาก

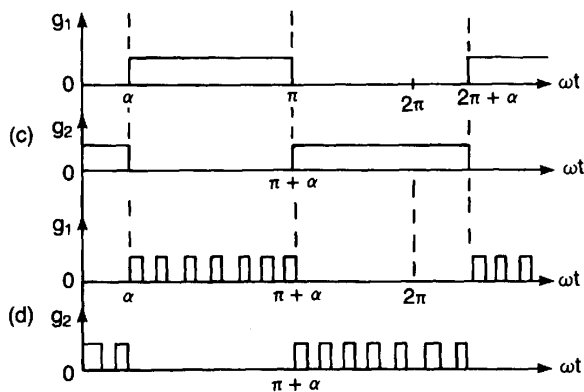
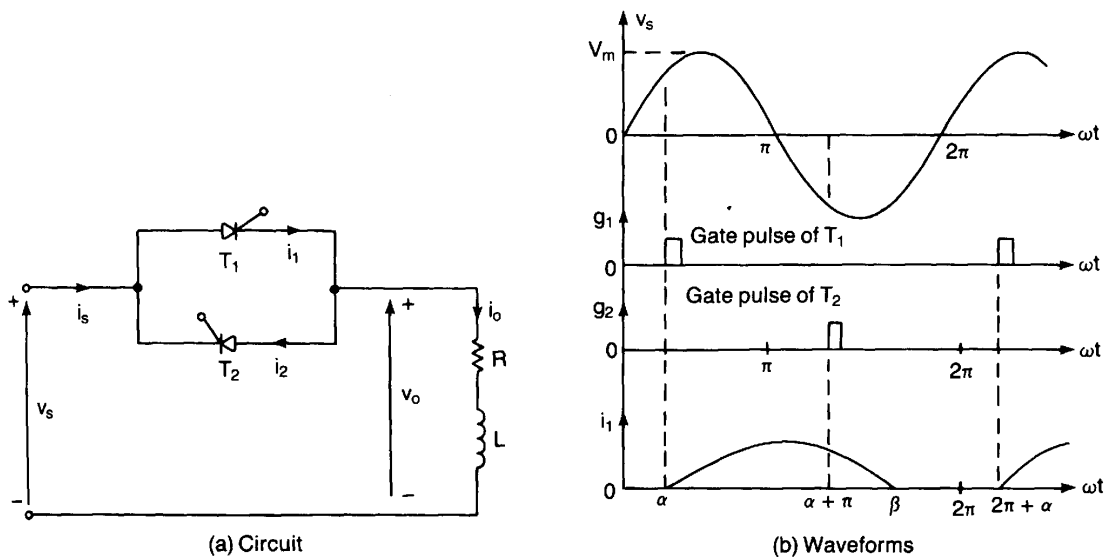
$$\begin{aligned} I_A &= \frac{1}{2\pi R} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} V_s \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2} V_s}{2\pi R} (\cos \alpha + 1) \end{aligned} \quad (\text{กฎ-6})$$

กระแสอาร์เอ็มเอสของไทรสเตอร์หาได้จาก

$$\begin{aligned} I_R &= \left[ \frac{1}{2\pi R^2} \int_{\alpha}^{\pi} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[ \frac{2V_s^2}{4\pi R^2} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{V_s}{\sqrt{2}R} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (\text{กฎ-6})$$

### ตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส ต่อกับโหลดแบบความเหนี่ยวนำ

จากตัวควบคุมแรงดันสองทิศทาง 1 เฟส ต่อกับโหลดแบบความต้านทาน แต่ในทางปฏิบัติ โหลดส่วนมากเป็นความเหนี่ยวนำ ตัวควบคุมแบบเต็มคลื่นต่อกับโหลดอาร์แอล แสดงในรูป กฎ.4a กำหนดให้ไทรสเตอร์  $T_1$  นำกระแสในช่วงครึ่งคลื่นบวก และเป็นพาหะของกระแสโหลด กำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำอยู่ในวงจร กระแสของไทรสเตอร์  $T_1$  อาจจะไม่ลดลงเป็น 0 ที่  $\omega t = \pi$  เมื่อแรงดันขาเข้าเริ่มเป็นลบ ไทรสเตอร์  $T_1$  จะทำงานจนกระทั่งกระแส  $i_1$  ลดลงเป็น 0 ที่  $\omega t = \beta$  มุมนำของไทรสเตอร์  $T_1$  เป็น  $\delta = \beta - \alpha$  และขึ้นอยู่กับมุมประวิง ( $\alpha$ ) และมุมของตัวประกอบกำลังของโหลด ( $\theta$ ) รูปคลื่นของกระแสไทรสเตอร์ เกิดพัลส์ และแรงดันขาเข้าแสดงในรูปที่ กฎ.4b



รูปที่ ๓.4 วงจรควบคุมแบบเต็มคลื่น 1 เฟส โดยมีโหลดแบบอาร์แอล

ถ้า  $v_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega t$  เป็นแรงดันขาเข้าและมุมประหวังของไทรสเตอร์  $T_1$  เป็น  $\alpha$  กระแสไทรสเตอร์  $i_1$  สามารถหาได้จาก

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri = \sqrt{2}V_s \sin \omega t \tag{๓-7}$$

สามารถจัดรูปสมการ (๓-7)ใหม่ได้ดังนี้

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \sin(\omega t - \theta) + A_1 e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \tag{๓-8}$$

ที่อิมพีแดนซ์ของโหลด  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$  และมุมของโหลด  $\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right)$  ค่าคงที่  $A_1$  สามารถหาได้จากค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่  $\omega t = \alpha, i_1 = 0$  ดังสมการที่ (กฎ-9)

$$A_1 = -\frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega}\right)} \quad (\text{กฎ-9})$$

แทนค่า  $A_1$  ลงในสมการกระแสทรานซิสเตอร์ (กฎ-8) ได้ดังสมการที่ (กฎ-10)

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega} - t\right)} \right] \quad (\text{กฎ-10})$$

มุม  $\beta$  เมื่อกระแส  $i_1$  ลดลงเป็น 0 และทรานซิสเตอร์  $T_1$  ปิด สามารถหาได้จากเงื่อนไข  $i_1(\omega t = \beta) = 0$  ในสมการที่ (กฎ-10) และมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha - \beta}{\omega}\right)} \quad (\text{กฎ-11})$$

มุม  $\beta$  ซึ่งรู้จักในชื่อมุมดับ สามารถหาได้จากสมการเหลือ และกระบวนการวนซ้ำของคำตอบ ถ้ารู้ค่าของ  $\beta$  มุมนำ ( $\delta$ ) ของทรานซิสเตอร์  $T_1$  สามารถหาได้จาก

$$\delta = \beta - \alpha \quad (\text{กฎ-12})$$

แรงดันอาร์เอ็มเอสหาได้จาก

$$\begin{aligned}
V_o &= \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} 2V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= \left[ \frac{4V_s^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\beta} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \beta - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{ก-13}$$

กระแสอาร์เอ็มเอสของไทรสเตอร์สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned}
I_R &= \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_1^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= \frac{V_s}{Z} \left[ \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \left\{ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha - t}{\omega}\right)} \right\}^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{ก-14}$$

และกระแสอาร์เอ็มเอสขาออกสามารถหาได้จากการรวมกันของกระแสอาร์เอ็มเอสของไทรสเตอร์แต่ละตัว

$$I_o = (I_R^2 + I_R^2)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2}I_R \tag{ก-15}$$

ค่าเฉลี่ยของกระแสไทรสเตอร์สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned}
I_A &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_1 d(\omega t) \\
&= \frac{\sqrt{2}V_s}{2\pi Z} \int_{\alpha}^{\beta} \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha - t}{\omega}\right)} \right] d(\omega t)
\end{aligned} \tag{ก-16}$$

ในทางปฏิบัติสัญญาณเกิดหรือเป็นเกตพัลส์ของไทรสเตอร์ทั้งสองที่เป็นพัลส์ไม่เหมาะสมกับ โหลดแบบความเหนี่ยวนำ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ ๓.4b เมื่อไทรสเตอร์  $T_2$  นำกระแสที่  $\omega t = \pi + \alpha$  ไทรสเตอร์  $T_1$  ยังคงทำงานเนื่องจากพลังงานสะสมในโหลดความเหนี่ยวนำ โดยเวลาที่กระแสของไทรสเตอร์  $T_1$  จะลดลงเป็น 0 และ  $T_1$  หยุดนำกระแสที่  $\omega t = \beta = \alpha + \delta$  เกตพัลส์ของไทรสเตอร์  $T_2$  ได้สิ้นสุดแล้ว ดังนั้น  $T_2$  จะไม่สามารถนำกระแส จากผลข้างต้นไทรสเตอร์  $T_1$  จะทำงานเพียงตัวเดียว ทำให้รูปสัญญาณของแรงดันและกระแสขาออกไม่สมมาตร ปัญหานี้แก้ไขได้โดยใช้สัญญาณเกตพัลส์แบบต่อเนื่องตลอดระยะเวลาในช่วงของ  $(\pi - \alpha)$  ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ๓.4c นั่นคือทันทีที่กระแสของ  $T_1$  ลดลงเป็น 0 ไทรสเตอร์  $T_2$  เปิดด้วยเกตพัลส์ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ ๓.4c อย่างไรก็ตามเกตพัลส์แบบต่อเนื่องทำให้เกิดความสูญเสียในขณะที่ไทรสเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์และต้องการหม้อแปลงสำหรับแยกโคจรขนาดใหญ่สำหรับวงจรเกต เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในทางปฏิบัติจึงใช้ขบวนพัลส์เป็นช่วงสั้นๆ ดังรูปที่ ๓.4d

สมการที่ (๓-10) นั้นแสดงถึงแรงดันโหลดและกระแสโหลดจะเป็นรูปคลื่นไซน์ซอซอด์ถ้ามุมประวิง  $\alpha$  มีค่าน้อยกว่ามุมโหลด  $\theta$  แต่ถ้า  $\alpha$  มีค่ามากกว่า  $\theta$  กระแสโหลดจะไม่ต่อเนื่องและไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ซอซอด์

#### ข้อสังเกต

1. จากสมการที่ (๓-14) ถ้า  $\alpha = 0$

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\beta - \alpha) = 0$$

และ

$$\beta - \alpha = \delta = \pi$$

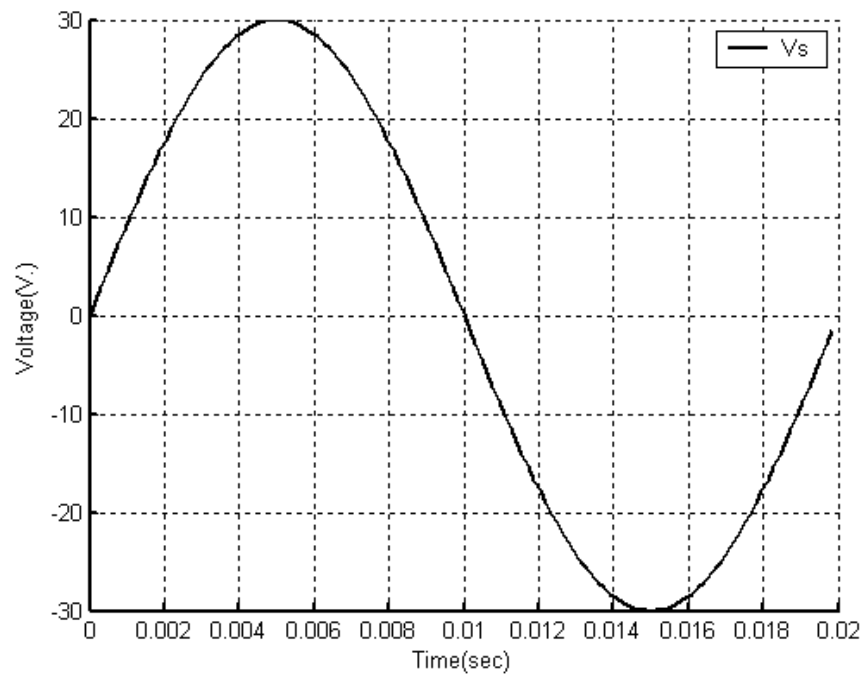
2. เมื่อมุมนำ  $\delta$  น้อยกว่า  $\pi$  มุมประวิง  $\alpha$  จะมากกว่า  $\theta$  และอัตราการควบคุมของมุมประวิงเป็น

$$\theta \leq \alpha \leq \pi$$

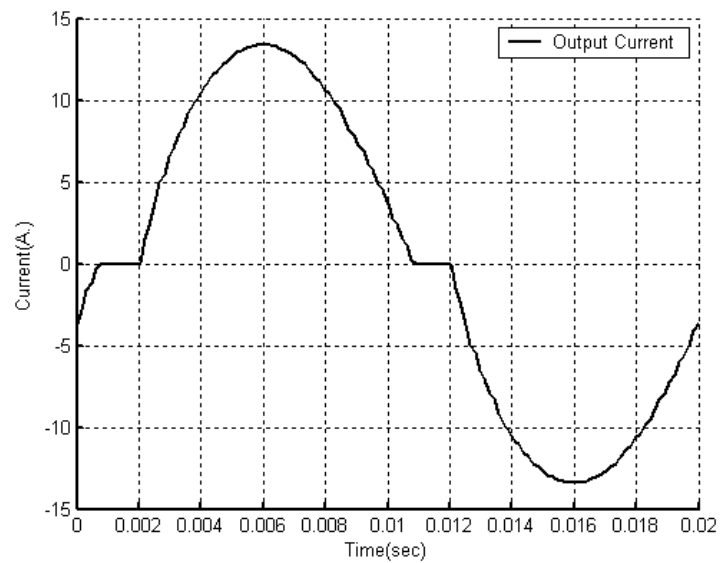
3. ถ้า  $\alpha \leq \theta$  และเกตพัลส์ของไทรสเตอร์มีช่วงเวลายาว กระแสโหลดจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตาม  $\alpha$  และไทรสเตอร์ทั้ง 2 อาจทำงานพร้อมกัน โดยที่ไทรสเตอร์  $T_1$  จะเปิดที่  $\omega t = \theta$  และไทรสเตอร์  $T_2$  จะเปิดที่  $\omega t = \pi + \theta$

#### ตัวอย่างสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ

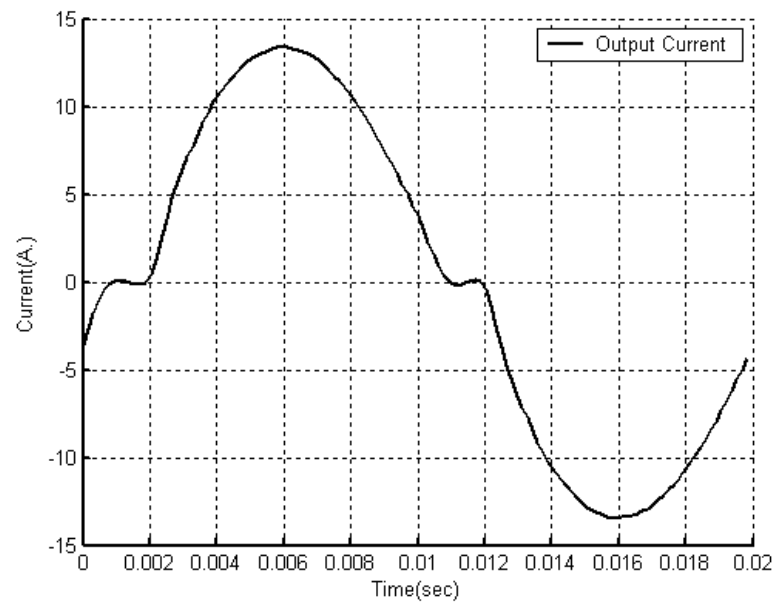
เมื่อกำหนดให้มีแหล่งจ่ายแรงดัน 30 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ ณ พิกัดโหลดแทนด้วยความต้านทาน 1.68 โอห์ม ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ 2 มิลลิเฮนรี่ ถูกควบคุมด้วยวงจรควบคุมแรงดันกระแสสลับ 1 เฟส มุมประวิง 36 องศา ฉะนั้นได้รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันขาเข้าและกระแสโหลดดังรูปที่ ๓.5 รูปที่ ๓.6 และรูปที่ ๓.6



รูปที่ ๕.5 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันขาเข้าของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส



รูปที่ ๕.6 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไหลคของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส



รูปที่ ๗.7 รูปคลื่นสัญญาณกระแสโวลตของตัวควบคุมแรงดันกระแสสลับสองทิศทาง 1 เฟส เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงฮาร์โมนิกลำดับที่



ภาคผนวก ฐ

การแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส

### การแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส (Rashid, 1988)

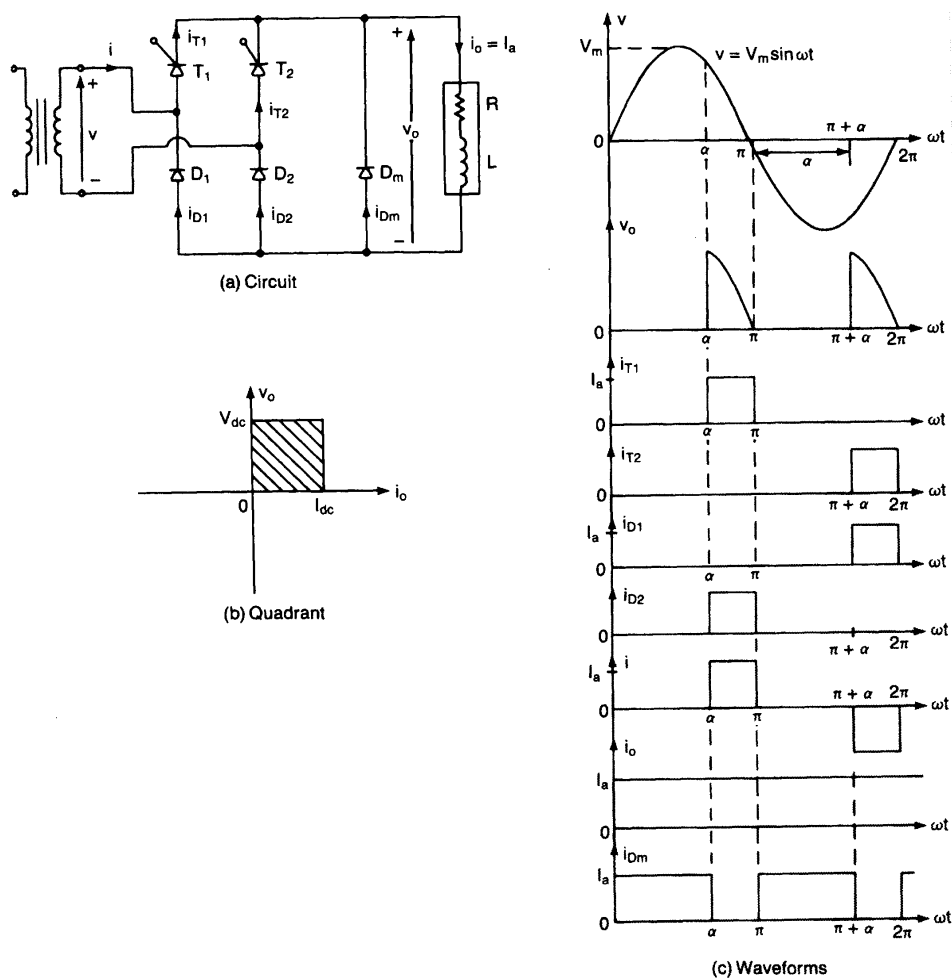
การแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส เป็นการควบคุมในช่วงครึ่งคลื่นด้านบวกผสมกับครึ่งคลื่นด้านลบของแรงดันขาเข้าให้เป็นแรงดันขาออก โดยกำหนดให้มีโหลดเป็นโหลดอาร์แอล และค่าความเหนี่ยวนำของโหลดมีค่าสูงพอที่จะจ่ายกระแส (เกิดจากพลังงานที่สะสมในตัวเอง) ให้กับโหลดจนทำให้กระแสที่โหลดมีความต่อเนื่อง หรือกระแสที่โหลดไหลอย่างต่อเนื่อง การแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส มีลักษณะดังรูปที่ ฐ.1a จากรูป ฐ.1 ระหว่างครึ่งคลื่นด้านบวกของรูปคลื่นแรงดันขาเข้าของไทรสเตอร์  $T_1$  ได้รับการไบแอสตรง และนำกระแสที่  $\omega t = \alpha$  โหลดจึงได้รับแรงดันขาเข้าโดยผ่านไทรสเตอร์  $T_1$  และไดโอด  $D_2$  ระหว่างช่วงเวลา  $\alpha \leq \omega t \leq \pi$  ระหว่างครึ่งคลื่นด้านลบของแรงดันขาเข้า ไดโอดหมุนเปล่า ( $D_m$ ) ได้รับการไบแอสตรงที่  $\pi \leq \omega t \leq (\pi + \alpha)$  จึงนำกระแส แล้วสร้างกระแสต่อเนื่องไปยังโหลด ดังนั้นกระแสที่โหลดจึงได้รับการถ่ายโอนจาก  $T_1$  และ  $D_2$  มายัง  $D_m$  (ขณะที่  $T_1$  กับ  $D_2$  ปิด) หลังจากนั้น  $T_2$  จะได้รับไบแอสตรง และนำกระแสที่  $\omega t = \pi + \alpha$  ซึ่ง จะไบแอสกลับ  $D_m$  ให้ปิดส่งผลให้โหลดได้รับแรงดันขาเข้าโดยผ่าน  $T_2$  และ  $D_1$

จากรูป ฐ.1b แสดงคุณลักษณะแรงดันและกระแสของโหลด สังเกตว่าการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟสจะทำงานได้ควอแตรนต์เดียว นั่นคือจะให้แรงดันขาออกและกระแสขาออกเป็นบวก ส่วนรูปที่ ฐ.1c แสดงรูปคลื่นของแรงดันขาเข้า แรงดันขาออก กระแสขาออก และกระแสที่ไหลผ่าน  $T_1$   $T_2$   $D_1$  และ  $D_2$  การแปลงผันประเภทนี้มีค่าตัวประกอบกำลังที่ดีกว่าการแปลงผันแบบครึ่งคลื่น 1 เฟส เนื่องจาก  $D_m$  จะทำให้กระแสที่โหลดไหลอย่างต่อเนื่อง และใช้ได้กับงานที่มีกำลังไฟฟ้าสูง ประมาณ 15 kW ค่าแรงดันขาออกเฉลี่ยสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} \\ &= \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \end{aligned} \quad (\text{ฐ-1})$$

และ  $V_{dc}$  สามารถผันแปรได้จาก  $\frac{2V_m}{\pi}$  ไปสู่ 0 โดยการผันแปร  $\alpha$  จาก 0 ถึง  $\pi$  โดยค่ามากที่สุดของค่าแรงดันขาออกเฉลี่ยเป็น  $V_{dm} = \frac{2V_m}{\pi}$  และสภาวะปกติของค่าแรงดันขาออกเฉลี่ยหาได้จาก

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = 0.5(1 + \cos \alpha) \quad (\text{ฐ-2})$$



รูปที่ ๑.๑ วงจรแปลงผันแบบกึ่ง ๑ เฟส

ค่าของแรงดันอาร์เอ็มเอสหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}
 \tag{๑-3}$$

จากรูปคลื่นกระแสขาเข้าที่แสดงในรูปที่ ๑.๑c และกระแสขาเข้าชั่วขณะสามารถแสดงอยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังนี้

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (\text{ฐ-4})$$

โดยที่

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} i(t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} I_a d(\omega t) - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I_a d(\omega t) \right] = 0 \quad (\text{ฐ-5})$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} i(t) \cos n\omega t d(\omega t) \\ &= \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} I_a \cos n\omega t d(\omega t) - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I_a \cos n\omega t d(\omega t) \right] \\ &= -\frac{2I_a}{n\pi} \sin n\alpha \quad \text{for } n = 1, 3, 5, \dots \\ &= 0 \quad \text{for } n = 2, 4, 6, \dots \end{aligned} \quad (\text{ฐ-6})$$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} i(t) \sin n\omega t d(\omega t) \\ &= \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} I_a \sin n\omega t d(\omega t) - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I_a \sin n\omega t d(\omega t) \right] \\ &= \frac{2I_a}{n\pi} (1 + \cos n\alpha) \quad \text{for } n = 1, 3, 5, \dots \\ &= 0 \quad \text{for } n = 2, 4, 6, \dots \end{aligned} \quad (\text{ฐ-7})$$

เมื่อ  $I_{dc} = 0$  สามารถเขียนสมการที่ (ฐ-4) ได้ใหม่ดังนี้

$$i(t) = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (\text{ฐ-8})$$

โดยที่

$$\phi = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n} = -\frac{n\alpha}{2} \quad (\text{ฐ-9})$$

ค่าอาร์เอ็มเอสของฮาร์โมนิกลำดับที่  $n$  ของกระแสขาเข้าหาได้จาก

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_n^2 + b_n^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{2\sqrt{2}}{n\pi} \cos \frac{n\alpha}{2} \quad (\text{ฐ-10})$$

จากสมการที่ (ฐ-10) สามารถหาค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสมูลฐานได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{2\sqrt{2}I_a}{\pi} \cos \frac{\alpha}{2} \quad (\text{ฐ-11})$$

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสขาเข้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ฐ-10) โดย

$$I_s = \left( \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{ฐ-12})$$

ค่า  $I_s$  สามารถหาได้โดยตรงจาก

$$I_s = \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_a^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = I_a \left( 1 - \frac{\alpha}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{ฐ-13})$$

ค่าตัวประกอบฮาร์โมนิก(harmonic factor) ของกระแสขาเข้าหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{HF} &= \left( \frac{I_s^2 - I_1^2}{I_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \left[ \left( \frac{I_s}{I_1} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[ \frac{\pi(\pi - \alpha)}{4(1 + \cos \alpha)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (\text{ฐ-14})$$

ถ้า  $\phi$  เป็นมุมระหว่างองค์ประกอบมูลฐานของกระแสขาเข้าและแรงดัน โดยเรียก  $\phi$  ว่ามุมกระจัด(Displacement angle) และค่าตัวประกอบการกระจัด(Displacement factor) หาได้จาก

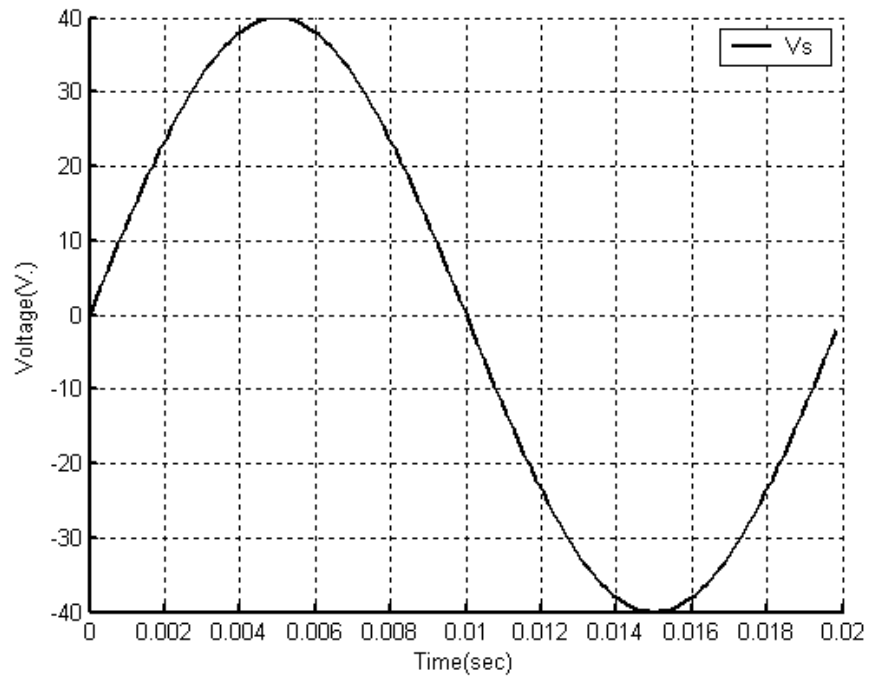
$$DF = \cos\phi_1 = \cos\frac{\alpha}{2} \quad (\text{ฐ-15})$$

เมื่อ  $I_1$  เป็นองค์ประกอบมูลฐานของกระแสอาร์เอ็มเอสขาเข้า ฉะนั้นตัวประกอบกำลังสามารถหาได้จาก

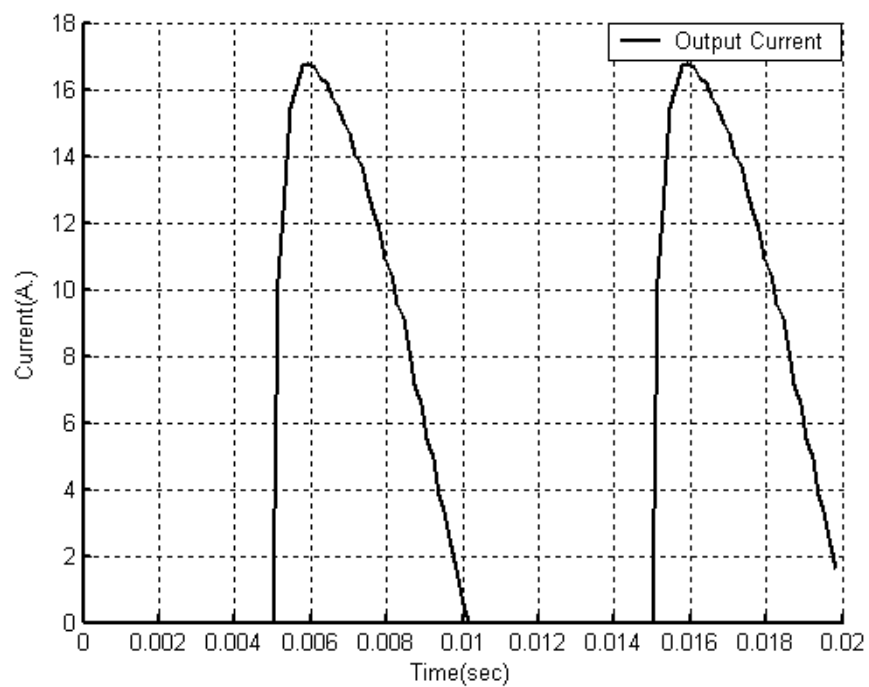
$$\begin{aligned} PF &= \frac{V_s I_1}{V_s I_s} \cos\phi = \frac{I_1}{I_s} \cos\phi \\ &= \frac{I_1}{I_s} \cos\frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{2}(1 + \cos\alpha)}{[\pi(\pi - \alpha)]^{\frac{1}{2}}} \end{aligned} \quad (\text{ฐ-16})$$

#### ตัวอย่างสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ

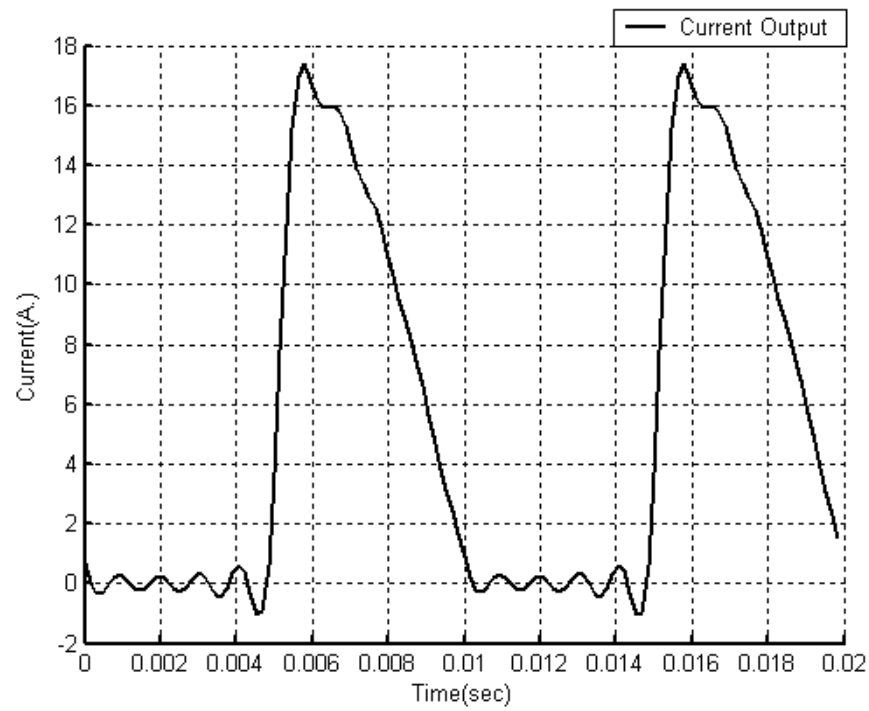
เมื่อกำหนดให้มีแหล่งจ่ายแรงดัน 40 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ณ พิกัดโหลดแทนด้วยความต้านทาน 1.68 โอห์ม ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ 0.5 มิลลิเฮนรี่ ถูกควบคุมด้วยวงจรควบคุมการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส มุมประวิง 90 องศา ฉะนั้นได้รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันขาเข้าและกระแสโหลดดังรูปที่ ฐ.2 รูปที่ ฐ.3 และรูปที่ ฐ.4



รูปที่ ๓.๒ รูปคลื่นสัญญาณแรงดันขาเข้าของวงจรควบคุมการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส



รูปที่ ๓.๓ รูปคลื่นสัญญาณกระแสไหลคของวงจรควบคุมการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส



รูปที่ ๓.๔ รูปคลื่นสัญญาณกระแสโหลดของวงจรควบคุมการแปลงผันแบบกึ่ง 1 เฟส เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงฮาร์มอนิกลำดับที่ 19



ภาคผนวก ท.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “การปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยการจำลองผล” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 243-244, 18-19 กรกฎาคม 2545 (ตามหนังสือตอบรับที่ ทม 5145/ว.6 ลงวันที่ 26 มีนาคม 2545 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)
2. “การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตามู” ตีพิมพ์ในวารสารเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่ 10 ฉบับที่ 4 ประจำเดือนตุลาคม-ธันวาคม 2546 (ตามหนังสือตอบรับที่ ศธ 5621/37 ลงวันที่ 13 สิงหาคม 2546 จากสำนักงานวารสารเทคโนโลยีสุรนารี สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)
3. “การประยุกต์การค้นหาแบบตามูเพื่อการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า EECON-26, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 263-268, 6-7 พฤศจิกายน 2546 ณ โรงแรมโกลเด้นแลนด์ ชะอำ จ.เพชรบุรี (ตามหนังสือตอบรับที่ EECON-08 ลงวันที่ 6 ตุลาคม 2546 จากคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ EECON-26)

ที่ ทม 5145/จ ๖



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี  
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

๒๖ มีนาคม 2545

เรื่อง แจ้งผลการพิจารณาบทความคัดย่องานวิจัย เพื่อนำเสนอในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3  
เรียน นายชูชาติ วุฒินทรเนติรักษ์

สิ่งที่ส่งมาด้วย 1. รูปแบบการจัดทำบทความเพื่อตีพิมพ์ในสื่อรวมบทความวิชาการ (Proceeding)  
2. แบบแสดงความจำนงเข้าร่วมการประชุม

ตามที่ท่านได้ส่งบทความคัดย่องานวิจัย เพื่อนำเสนอในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 18 – 19 กรกฎาคม 2545 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นั้น  
คณะอนุกรรมการฝ่ายวิชาการจัดการประชุมฯ ขอแจ้งผลการพิจารณา ดังนี้

ผลงานวิจัยของ นายชูชาติ วุฒินทรเนติรักษ์ เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพและระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจร  
รองฮาร์มอนิกส์โดยการจำลองผล ได้รับการพิจารณาให้นำเสนอในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับ  
บัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 18 – 19 กรกฎาคม 2545 ณ มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีสุรนารี โดยจัดอยู่ในกลุ่มสาขาวิจัยด้าน วิศวกรรมศาสตร์

ทั้งนี้ ในการพิจารณาจัดกลุ่มการนำเสนอเป็นแบบบรรยายหรือโปสเตอร์ นั้น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
จะแจ้งให้ท่านทราบโดยเร็วต่อไป และขอให้ท่านจัดทำต้นฉบับบทความเพื่อตีพิมพ์ในสื่อรวมบทความวิชาการ (Proceeding) ของ  
การประชุมครั้งนี้ สำหรับเผยแพร่ในการประชุม และเพื่ออ้างอิงทางวิชาการ ซึ่งสามารถเลือกใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ โดย  
ขอให้จัดส่งต้นฉบับภายในวันที่ 15 มิถุนายน 2545 รายละเอียดการจัดทำและการจัดส่งบทความ ปรากฏตามเอกสารสิ่งที่ส่งมา  
ด้วย 1.

อนึ่ง หากท่านยังไม่ได้ลงทะเบียนหรือชำระค่าลงทะเบียนขอความกรุณาดำเนินการด้วย เพื่อให้การเตรียมการ  
ประชุมสามารถดำเนินการไปได้ด้วยความเรียบร้อยและทราบจำนวนผู้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยที่แน่นอน รายละเอียดการลง  
ทะเบียนแจ้งไว้แล้วในเอกสารสิ่งที่ส่งมาด้วย 2. หรือที่ Web Site : [http:// www.sut.ac.th/gradresearch3](http://www.sut.ac.th/gradresearch3)

จึงเรียนมาเพื่อทราบ และ โปรดจัดทำต้นฉบับบทความเพื่อตีพิมพ์ ดังที่เรียนไว้ข้างต้นด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. กฤษณะ สาคริก)

รองอธิการบดีฝ่ายวางแผน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประธานคณะอนุกรรมการฝ่ายวิชาการ

การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3

คณะอนุกรรมการฝ่ายวิชาการฯ  
โทรศัพท์ (044) 224052-3, 224057  
โทรสาร (044) 224050

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 223000 โทรสาร (044) 224070

**S U R A N A R E E U N I V E R S I T Y O F T E C H N O L O G Y**

111 UNIVERSITY AVENUE, SUB DISTRICT SURANAREE, MUANG DISTRICT, NAKHON RATCHASIMA 30000, THAILAND Tel. (044) 223000 Fax. (044) 224070

ชื่อบทความ :	การปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยการจำลองผล Tuning Quality of Electrical Power System with Harmonic Filter by Simulation
กลุ่มสาขาวิจัย :	วิศวกรรมศาสตร์
ผู้แต่ง :	ชูชาติ วุฒินทรเนตรวิรักษ์ และ อนันท์ อุ่นศิริไฉย
สถาบันการศึกษา :	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ :	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา
อีเมลล์ :	chuchard@hotmail.com โทรศัพท์ : 09-7770980 โทรสาร : 0-4422-3394

#### บทนำ

ปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังมีการใช้งานโหลดที่มีลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง ด้วยคุณสมบัติของโหลดประเภทนี้ทำให้รูปสัญญาณของไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนเกิดขึ้น ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลกลับเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า จึงทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังลดต่ำลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีคุณลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นโดยวิธีการวิเคราะห์ความเพี้ยนโดยการใช้ทฤษฎีฟูริเยร์ (Fourier Theorem) ในรูปแบบของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อน ซึ่งสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนด้วยวิธีการค้นหาแบบตราบ (Tabu Search: TS) [3] จากสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนส่งผลให้ทราบถึงสัญญาณฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ออกแบบวงจรกรองสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวเก็บประจุปรับค่าได้ (Variable Capacitor Filter: VCF) การหาขนาดตัวเก็บประจุของ VCF โดยวิธี TS เพื่อตัดสินใจสั่งการสวิตช์เลือกขนาดตัวเก็บประจุให้เหมาะสมในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้ข้างต้น พร้อมทั้งเฝ้าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณฮาร์มอนิกเพื่อปรับขนาดตัวเก็บประจุของ VCF ให้เหมาะสม ผลการทดสอบระบบที่ได้เมื่อมีการปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกจะส่งผลให้ความเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้าลดลงอย่างมาก ตลอดจนช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในวงจรเดียวกัน เพื่อให้ได้ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีคุณภาพสูง

#### ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้หรืออุปกรณ์และวิธีการ

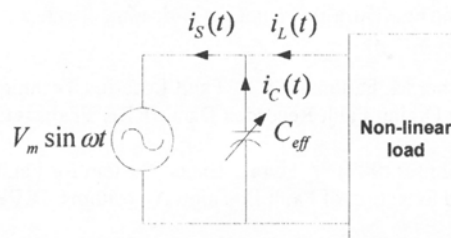
ระเบียบวิธีวิจัยในบทความนี้แบ่งการจำลองผลออกเป็น การค้นหาพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธี TS และการวิเคราะห์ออกแบบ VCF โดยใช้วิธี TS

ผลของฮาร์มอนิก ทำให้รูปคลื่นสัญญาณภายในระบบไม่เป็นไซน์ซายด์อย่างแท้จริง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ทางอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series) ว่าสัญญาณรูปร่างในระบบที่เปลี่ยนไปสามารถแทนได้ด้วยผลรวมของสัญญาณไซน์ซายด์ ที่มีความถี่ต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน [1] ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$i_L(t) = A_1 \sin(\omega t) + B_1 \cos(\omega t) + \left[ \sum_{k=3}^{\infty} A_k \sin(k\omega t) + B_k \cos(k\omega t) \right] \quad (1)$$

$$i_L(t) = i_S(t) + i_{\text{Harmonic}}(t) \quad (2)$$

$$i_S(t) = i_L(t) - i_C(t) \quad (3)$$



รูปที่ 1 วงจรกรองแบบคาปาซิเตอร์ปรับค่าได้

จากนั้นทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์  $A_k, B_k$  ของสมการที่ 1 โดยใช้วิธี TS เมื่อได้ค่า  $A_k, B_k$  แล้วนำไปหาขนาดของคาปาซิเตอร์ในส่วนของ VCF ต่อไป

ในส่วนของ VCF เป็นการรวมกันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและสวิตช์ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุจะสามารถกำหนดได้จากรูปแบบการสับสวิตช์ ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุแทนด้วย  $C_{\text{eff}}$  แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดย VCF จะฉีดกระแสในรูปคลื่นต่างๆ เข้าสู่ระบบแหล่งจ่าย ในทิศทางตรงข้ามเฟสกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในทางอุดมคติกระแส

ฮาร์มอนิกที่ผลิตโดย VFC และกระแสฮาร์มอนิกที่ผลิตจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะถูกหักล้างในแต่ละฮาร์มอนิก [2] ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของ VCF หาได้จาก

กำหนดให้กระแสใน  $C_{eff}$  เขียนได้ดังนี้

$$i_c(t) = \sum_{k=3}^{\infty} C_{eff} \frac{dv_c(t)}{dt} \tag{4}$$

จากรูปที่ 1 จะได้ว่า  $v_c = v_s = V_m \sin(\omega t)$  และ  $\frac{dv_c(t)}{dt} = \omega V_m \cos(\omega t)$  แทนลงในสมการที่ 4 จะได้

$$i_c(t) = \omega V_m \sum_{k=3}^{\infty} C_{eff,k} k \cos(k\omega t) \tag{5}$$

$$i_{c,k}(t) = \omega V_m C_{eff,k} k \cos(k\omega t)$$

จากสมการที่ 2 และ 3 จะได้

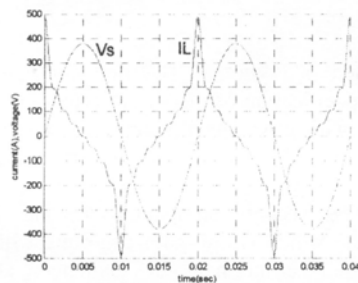
$$i_{Harmonic}(t) = i_c(t)$$

$$A_k \sin(k\omega t) + B_k \cos(k\omega t) = \omega V_m C_{eff,k} k \cos(k\omega t) \tag{6}$$

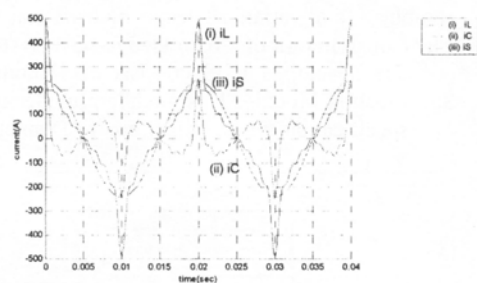
จากนั้นทำการค้นหาพารามิเตอร์ของ  $C_{eff,k}$  ในสมการที่ 6 โดยใช้วิธี TS

**ผลการวิจัย**

ในการวิจัยนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์รูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดันเมื่อนำรูปคลื่นสัญญาณไปหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธี TS ได้ดังภาพที่ 2 โดยแรงดันมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 0.00011% กระแสมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 0.00992 % จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ของแรงดันและกระแสไปหาพารามิเตอร์ของ VCF กระแสที่ VCF สร้างขึ้นมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 0.04444% จากกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น กระแสของระบบจะถูกใช้ลดลงจากเดิม 8.9177 % (16.7526 Arms) ดังรูปที่ 3.



รูปที่ 2 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดันที่ได้จาก TS



รูปที่ 3 (i) รูปคลื่นสัญญาณกระแสก่อนผ่าน VCF  
(ii) รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ VCF สร้างขึ้น  
(iii) รูปคลื่นสัญญาณกระแสหลังผ่าน VCF

**อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ**

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าจะสามารถนำ TS มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและหาพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุปรับค่าได้ ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในงานวิจัยนี้พิจารณาตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ซึ่งมีราคาสูงหากนำเทคนิคการสวิตซ์ตัวเก็บประจุแทนตัวเก็บประจุปรับค่าได้ โดยจะมีความซับซ้อนมากขึ้นและสามารถลดต้นทุนของวงจรกรองสัญญาณฮาร์มอนิกซึ่งจะมีการพัฒนาต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

1. Arrillaga, J., Bradley, D.A. and Bodger, P.S. (1985). **Power System Harmonics**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
2. Darwish, Mohamed, Darwish, Mostafa, Mehta, P. and Jimenez, G. (1996). A novel technique for variable-capacitor filter: Part I A.C. current harmonic control. **Power Electronics Congress, 1996. Technical Proceedings. CIEP'96., V IEEE International**. :194 -199.
3. Glover, F. (1993). **Tabu Search, in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems**. C.R. Reeves ed., John Wiley & Sons, Inc.

คำสำคัญ: ฮาร์มอนิก วงจรกรองสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวเก็บประจุปรับค่าได้ การค้นหาแบบตาม



บันทึกข้อความ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หน่วยงาน..... สำนักงานวารสารเทคโนโลยีสุรนารี สถาบันวิจัยและพัฒนา โทร.4756

ที่..... ศธ 5621/ ๖๗

วันที่..... 13 สิงหาคม 2546

เรื่อง..... กำหนดการตีพิมพ์และเผยแพร่วารสารเทคโนโลยีสุรนารี

เรียน อาจารย์ ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความ เรื่อง การออกแบบวงจรฮาร์มอนิกด้วยการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาม เพื่อดำเนินการจัดพิมพ์ในวารสารเทคโนโลยีสุรนารี นั้น สำนักงานวารสารเทคโนโลยีสุรนารีขอแจ้งให้ทราบว่า บทความดังกล่าวจะลงตีพิมพ์ในวารสารเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่ 10 ฉบับที่ 4 ประจำเดือนตุลาคม - ธันวาคม 2546 โดยมีกำหนดตีพิมพ์และเผยแพร่ภายในเดือนมกราคม 2547 นี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและหวังว่าวารสารเทคโนโลยีสุรนารีคงได้ตีพิมพ์บทความของท่านอีกในโอกาสต่อ ๆ ไป

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ อรรถจารุสิทธิ์)  
บรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีสุรนารี

## การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาบู่

ชชาติ วุฒินทรเนตริรักษ์<sup>1</sup> และ อนันท์ อุ่นศิริไย<sup>2</sup>

Wuttinatenatiruk,C.<sup>1</sup> and Oonsivilai,A.<sup>2</sup>(2003). Harmonic Filter Design via Tabu Search Application.

### Abstract

This article presents mathematical modelling and distortion analysis of harmonic current measurement based on exponential complex Fourier series. The corresponding Fourier coefficients obtained in this research were characterised by applying an intelligent optimisation method. A switched capacitor type online harmonic-filter, was designed by selecting appropriate switching pattern of the filter bank that well eliminates harmonic components of the current in a certain period of time. In this paper, Tabu Search (TS) method was used as a main optimisation sub-routine in both harmonic signal modelling and switching pattern design. The proposed method was tested with practical harmonic signals measured from an academic building category. From the satisfactory results, it reveals that the harmonic current was remarkably eliminated.

Key words: A.I., Tabu Search, Switched Capacitor Filter, Harmonic

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของการวัดกระแสฮาร์มอนิกที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) เซึ่งซ้อนแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดอย่างชาญฉลาดในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ พร้อมทั้งเสนอวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ (Switched Capacitor Filter: SCF) ซึ่งออกแบบได้จากการเลือกแบบรูปการสวิตช์ชุดวงจรกรองให้เหมาะสมเพื่อกำจัดองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกในช่วงเวลาหนึ่ง บทความนี้ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแบบจำลองสัญญาณกระแสฮาร์มอนิก และการออกแบบแบบรูปการสวิตช์ บทความนี้ได้้นำวิธีการที่เสนอไปทดสอบกับสัญญาณฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้จริง จากผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ โดยสามารถตรวจวัดและกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจพบได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ: เอ.ไอ., การค้นหาแบบตาบู่, วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ, ฮาร์มอนิก

### บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการนำ และชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ เป็นต้น เพื่อเพิ่ม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาใช้งานมากยิ่งขึ้น ประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการผลิตให้มี อาทิเช่น เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า ตัวเรียงกระแส คุณภาพและได้ปริมาณตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

<sup>1</sup> นักศึกษา ระดับปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000.

<sup>2</sup> Ph.D., อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000.

การใช้อุปกรณ์ดังกล่าวนับว่าเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมให้เจริญก้าวหน้าขึ้นมาอีกระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้มีคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อให้รูปคลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากปกติ กล่าวคือ มีความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่มูลฐานรวมอยู่ในรูปคลื่นปกตินี้ด้วย เรียกคุณลักษณะนี้ว่าเกิดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic Distortion) ดังนั้นหากมีอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังมาก จะทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) ลดต่ำลง หรือการจ่ายไฟฟ้ามีมลภาวะมากขึ้นนั่นเอง อุปกรณ์ที่มีความไวต่อสิ่งรบกวนนี้ อาจทำงานผิดพลาดได้ นอกจากนี้ กระแสฮาร์มอนิกบางส่วนจะไหลกลับเข้าไปในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมอื่นที่อยู่ข้างเคียง [1]

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยทฤษฎีฟูรีเยร์วิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาแบบตาบ และวิธีการออกแบบแบบรูปการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ พร้อมทั้งเฝ้าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณฮาร์มอนิกเพื่อปรับแบบรูปการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุให้เหมาะสม ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพการทำงานชุดวงจรกรองฮาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 1 ผลการทดสอบในการตรวจวัดกระแส

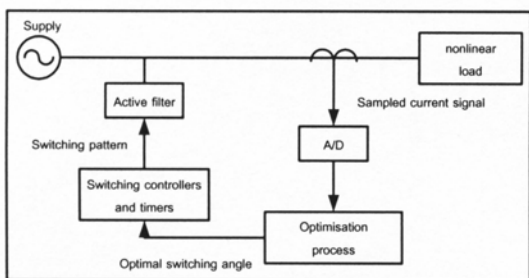


Figure 1. Block diagram of experimental setup

ฮาร์มอนิกที่ทำการตรวจวัดได้มีความถูกต้องสูง การปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรกรองฮาร์มอนิกทำให้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟาลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในวงจรเดียวกัน และทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณภาพสูงขึ้นอีกด้วย

**อุปกรณ์และวิธีการ**

**การหาสัมประสิทธิ์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธีการแปลงฟูรีเยร์**

การแปลงฟูรีเยร์และอนุกรมฟูรีเยร์เป็นคณิตศาสตร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณใน โดเมนความถี่ เนื่องจากการแปลงฟูรีเยร์และอนุกรมฟูรีเยร์จะมีสัญญาณไซน์และโคไซน์เป็นองค์ประกอบซึ่งสัญญาณทั้งสองนี้เป็นสัญญาณพื้นฐานสำหรับใช้วิเคราะห์สัญญาณใดๆ ดังนั้นจึงนิยมนำการแปลงฟูรีเยร์มาใช้ในการประมวลผลสัญญาณ

การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วยหรือการแปลงฟูรีเยร์ดิครีต (Discrete Fourier Transform: DFT) สามารถแปลงสัญญาณซึ่งอยู่ในโดเมนเวลาไปเป็นสัญญาณที่อยู่ในโดเมนความถี่ การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วยนี้มีวิธีการในการคำนวณที่ซับซ้อนมีจำนวนครั้งในการคำนวณมาก และใช้เวลาในการคำนวณมาก เพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาวิธีการแปลงให้เร็วขึ้น ซึ่งเรียกว่าการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ซึ่งทำให้การคำนวณ DFT ใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง  $N \log_2 N$  ครั้งเท่านั้น ( $N =$  จำนวนข้อมูล) หรือทำให้จำนวนครั้งในการคูณตัวเลขลดลงไปถึง  $N/(\log_2 N)$  เท่า [2] การแปลงฟูรีเยร์อย่างเร็ว นั้นมีการคำนวณคล้ายกับการแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วยแต่การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วจะมีวิธีการจัดแบ่งข้อมูลแล้วทำการคำนวณซึ่งจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจะต้องเป็นค่า  $2^n$  โดยที่  $n$  เป็นจำนวนเต็มบวก ซึ่งทำให้การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วลดเวลาในการคำนวณลงซึ่งมีกระบวนการในการคำนวณเป็นดังนี้



$$f(m) \xrightarrow{\text{transform}} F(k)$$

$$F(k) = \sum_{m=0}^{N-1} f(m) e^{-j2\pi mk/N} \quad (1)$$

โดยที่  $k = 0, 1, \dots, N-1$

$f(m)$  คือฟังก์ชันของเวลา  
 $F(k)$  คือฟังก์ชันของความถี่  
 $m, k$  คือเลขจำนวนเต็มบวก  
 $N$  คือจำนวนข้อมูล

เมื่อทำการแปลงกลับ

$$f(m) \xleftarrow{\text{transform}} F(k)$$

$$f(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j2\pi mk/N} \quad (2)$$

โดยที่  $m = 0, 1, \dots, N-1$

จากอนุกรมฟูรีเยร์แบบตรีโกณมิติ

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)) \quad (3)$$

โดยที่

$A_0$  คือค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของฟังก์ชันคาบ  $f(t)$  ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 0  
 $A_n, B_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของฟังก์ชันคาบ  $f(t)$  ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$   
 $n$  คือค่าลำดับของฮาร์มอนิก โดยลำดับของฮาร์มอนิกมีค่าตั้งแต่  $n = 0$  ถึง  $n = \infty$   
 $\omega$  คือความถี่เชิงมุม  
 $t$  คือเวลา

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ของอนุกรมฟูรีเยร์แล้วสามารถหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (complex fourier series) ได้ดังสมการที่ (4)

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega t} \quad (4)$$

โดยที่  $F_0 = \frac{A_0}{2}$

$$F_n = F_{-n} = \frac{1}{2} (A_n - jB_n)$$

$$A_n = 2 \operatorname{Re}\{F_n\}$$

$$B_n = -2 \operatorname{Im}\{F_n\}$$

$F_0$  คือสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนของไฟฟ้ากระแสตรง (ฮาร์มอนิกอันดับ 0)

$F_n$  คือสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนของฮาร์มอนิกอันดับที่  $n$

$\operatorname{Re}\{F_n\}$  คือส่วนจริงของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน

$\operatorname{Im}\{F_n\}$  คือส่วนจินตภาพของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน

**หลักการทํางานของวิธีการค้นหาแบบตาบู่**

การค้นหาแบบตาบู่ (TS) เป็นวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยสามารถแก้ปัญหาการถูกกีดกันด้วยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (local optimum) ได้ ทำให้มั่นใจได้ว่าคำตอบที่ได้ใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสมที่สุด [3] องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู่ที่แตกต่างจากวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ คือ มีเกณฑ์ความเป็นตาบู่ (tabu list criteria) และมีเกณฑ์ความปรารถนา (aspiration criteria) ซึ่ง

- เกณฑ์ความเป็นตาบู่ เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลของคำตอบในอดีตของกระบวนการค้นหานี้ๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาคำตอบว่าจะมีทิศทางไปทางใด หลักการออกแบบเกณฑ์ความเป็นตาบู่ จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละชนิด
- เกณฑ์ความปรารถนา เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในบางครั้งที่ไม่จำเป็นต้องเลือกคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ความเป็นตาบู่ งานบางชนิดที่ปัญหาไม่ซับซ้อนไม่จำเป็นต้องพึ่ง

ส่วนนี้ก็ได้ เหนือกว่าความเป็นตาบอดอย่างเดียวก็น่าจะเพียงพอที่จะค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้

- ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน

$S_0$  คือค่าเริ่มต้นในการค้นหาแต่ละครั้ง

$S_{neighborhood}$  คือค่าใกล้เคียง  $S_0$  ที่ได้จากการเคลื่อนย้ายไปเท่ากับ  $step\_size$  (search space)

$S_{best}$  คือค่าใกล้เคียงที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น

$S_{ans}$  คือค่าใกล้เคียงที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในวงกว้าง (global optimal)

$n$  คือจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ

$cost$  คือค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้มาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

$step\_size$  คือขอบเขตของการทำงานแต่ละรอบ

$value\_move$  คือขอบเขตการสุ่มของ  $step\_size$  ในการทำงานแต่ละรอบ

- ขั้นตอนการค้นหาด้วยวิธี TS

**ขั้นตอนที่ 1** รับข้อมูลกระแสไฟฟ้าจากชุดตรวจวัดกระแส

**ขั้นตอนที่ 2** กำหนดค่า  $S_0$  ซึ่งเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังรูปที่ 2 และ 3 โดยหาค่าเริ่มต้น  $S_0$  จากการสุ่มคำตอบ จากนั้นเริ่มต้นจากคำตอบที่มีอยู่ โดย

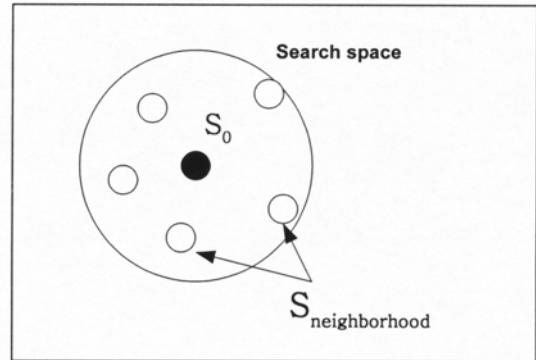


Figure 3. Search space

กำหนดให้คำตอบที่มีอยู่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด  $S_{ans} = S_{best} = S_0$  และค่า  $cost$  ของ  $S_{best}$  ให้เป็น  $best\_error$  ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากฟังก์ชันตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การค้นหาคำตอบจะทำไปเรื่อยๆ จนได้ค่า  $cost$  น้อยที่สุดตามที่ได้กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า

**ขั้นตอนที่ 3** จาก  $S_0$  ดำเนินการเคลื่อนย้ายโดยมีขอบเขตของ search space ขึ้นอยู่กับ  $step\_size$  โดยค่าของ  $step\_size$  จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า  $cost$  ที่ได้ โดยค่าใกล้เคียงค่าของ  $S_0$  นั่นคือ  $S_{neighborhood}$  จากนั้นทำการคำนวณหาค่า  $cost$  ของสมาชิกแต่ละตัวของ  $S_{neighborhood}$  เลือกสมาชิกที่ให้ค่า  $cost$  ที่ดีที่สุดเรียกว่า  $S_{best}$

**ขั้นตอนที่ 4** ถ้าค่า  $cost$  ของ  $S_{best}$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $cost$  ของ  $S_{ans}$  กำหนดให้  $S_{ans} = S_{best}$  ถ้าไม่สามารถหาสมาชิกตัวใดของ  $S_{neighborhood}$  ที่ให้ค่า  $cost$  ดีกว่าค่า  $cost$  ของ  $S_0$  ให้ไปทำขั้นตอนที่ 6 เพื่อหลีกเลี่ยงการล๊อคของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น

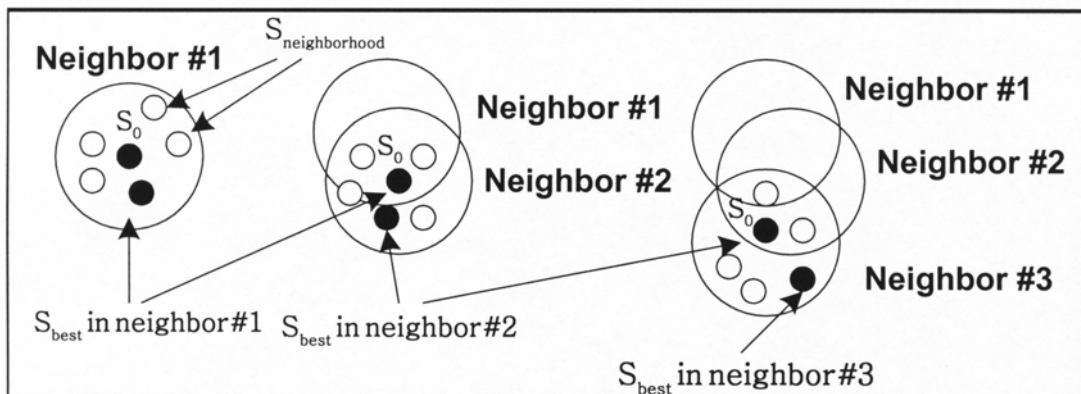


Figure 2. Searching procedures of the conventional TS method.

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้  $S_0 = S_{best}$

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า  $S_{best}$  ไม่อยู่ใน tabu list ให้เก็บค่า  $S_{best}$  ไว้ใน tabu list

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการยุติการค้นหา ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขให้หยุดการค้นหาและคำตอบของการค้นหารอบล่าสุดจะถือว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในวงกว้าง แต่เมื่อตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ไปเริ่มทำในขั้นตอนที่ 2 ใหม่

**การหาสัมประสิทธิ์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธีตาม**

จากรูปที่ 1 รับข้อมูลกระแสไฟฟ้าของระบบจากตัวแปลงกระแส ผ่านตัวแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลคอลเพื่อนำไปประมวลผลข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์จากคอมพิวเตอร์ ในการพิจารณาเวลาในการแปลงสัญญาณนั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถของไอซี (IC: Integrated Circuit) ในงานวิจัยนี้พิจารณาเวลาในการเก็บข้อมูล 128 จุด ต่อ 20 ms (1 cycle ของ 50 Hz) โดยผลของฮาร์มอนิก ทำให้รูปคลื่นสัญญาณภายในระบบไม่เป็นไซน์ชอยด์อย่างแท้จริงดังรูปที่ 4 สามารถวิเคราะห์ทางอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series) ได้ว่าสัญญาณรูปร่างในระบบที่เปลี่ยนไปสามารถแทนได้ด้วยผลรวมของสัญญาณไซน์ชอยด์ ที่มีความถี่ต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน [4, 5] ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$i(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)) \tag{5}$$

โดยที่

$i(t)$  คือค่าของฟังก์ชันของกระแสที่แปรตามเวลา

$\frac{A_0}{2}$  คือค่าของฟังก์ชันของไฟฟ้ากระแสตรง

$A_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า  $\cos(n\omega t)$  ของอนุกรมฟังก์ชัน  $i(t)$  ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$

$B_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์หน้า  $\sin(n\omega t)$  ของอนุกรมฟังก์ชัน  $i(t)$  ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$

$n$  คือค่าลำดับของฮาร์มอนิก โดยมีค่าตั้งแต่ 0

ถึง  $\infty$  ในงานวิจัยนี้พิจารณาค่า  $n$  ถึงลำดับที่

19 [6] โดย  $n = 0$  แสดงถึงไฟฟ้ากระแสตรง

ในการนำอนุกรมฟูรีเยร์ไปใช้งานนั้นเพื่อความง่ายและสะดวกในการใช้งานและทำความเข้าใจ สามารถแทนสมการที่ (5) อยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$i(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \tag{6}$$

โดยที่  $c_0 = \frac{A_0}{2}$

$$c_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left( \frac{A_n}{B_n} \right)$$

$c_n$  คือค่าขนาดของ  $i(t)$  ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$  (ขนาดของฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$ )

$\varphi_n$  คือเฟสของ  $i(t)$  ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$

สมการที่ (6) สามารถแสดงในรูปของเชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (7)

$$i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega t} \tag{7}$$

โดยที่  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \alpha$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i(t) e^{-jn\omega t} dt$$

$T$  คือคาบของฟังก์ชัน  $i(t)$

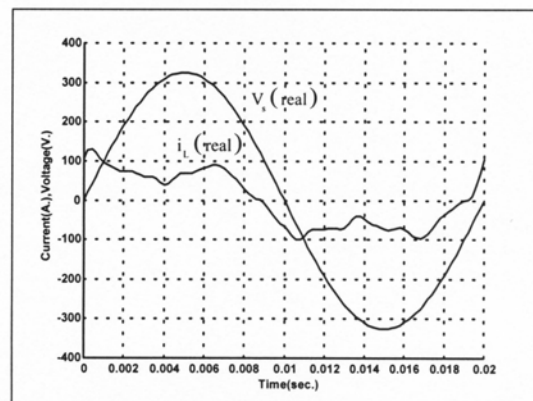


Figure 4. Current and Voltage waveform of system from an academic building category.

ขั้นตอนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธีตาม นั้นเริ่มจากการสุ่มค่า  $S_0 = \{A_0, A_n, B_n\}$  ( $n = 1, \dots, 19$ ) (ขอบเขตการสุ่ม  $A_0, A_1, B_1$  อยู่ในช่วง  $[0, 300]$  โดย 300 คือขนาดของกระแสอาร์เอ็มเอสเฉลี่ยของระบบที่วัดได้ ส่วนค่าอื่นๆ ได้จาก  $A_n = \frac{A_1}{n}, B_n = \frac{B_1}{n}$ ) จากนั้นนำค่าที่ได้จากการสุ่มแทนลงในสมการที่ (5) เพื่อหากระแสที่ได้จากการจำลองแบบ นำค่ากระแสที่ได้จากการจำลองแบบคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยเปรียบเทียบกระแสที่ตรวจวัดได้จริง (หาค่า  $cost$  : objective function) ดังสมการที่ (8)

$$Cost = error = \sum_{m=1}^{128} (i_L \text{ real}(m) - i_L \text{ sim}(m))^2 \quad (8)$$

โดยที่  $m$  คือค่าลำดับของจุดข้อมูลได้จาก A/D มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 128 โดย  $m = 1$  คือ เวลา = 0.000156 วินาที,  $m = 128$  คือ เวลา = 0.02 วินาที พิจารณาเพียง 1 ลูกคลื่นสัญญาณ

$i_L \text{ real}(m)$  คือค่ากระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงในข้อมูลลำดับที่  $m$

$i_L \text{ sim}(m)$  คือค่ากระแสที่ได้จากการจำลองแบบในข้อมูลลำดับที่  $m$

ดำเนินการตามหลักการทำงานของการค้นหาแบบตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นโดยมีรูปแบบการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของ  $step\_size$  โดย  $step\_size$  จะเปลี่ยนไปขึ้นกับค่า  $cost$  ที่เกิดขึ้น เพื่อให้การเคลื่อนที่ของการค้นหาแบบตามมีความเร็วขึ้นและได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยในกรณีที่  $cost$  มีค่ามากการเคลื่อนที่จะกว้าง ( $step\_size$  จะมีค่ามาก) เมื่อ  $cost$  น้อยลงการเคลื่อนที่ก็จะแคบลงดังรูปที่ 5. จากการค้นหาแบบตามจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูริเยร์ ( $A_0, A_n, B_n$  เมื่อ  $n = 1, 2, \dots, 19$ ) เพื่อนำไปเป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุต่อไป

การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยการหาแบบรูปการสวิตช์ตัวเก็บประจุด้วยการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาม

ในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบคือขนาดของตัวเก็บประจุ, ขนาดของแรงดันที่จ่ายให้วงจรกรองฮาร์มอนิก, และรูปแบบการเปิดปิดสวิตช์โดยตัวเก็บประจุ [7, 8] ขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันนั้นจะบ่งบอกถึงขนาดของกระแสที่สามารถสร้างขึ้นมากหักล้างฮาร์มอนิกดังสมการที่ (9) และ (10) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 3000 ไมโครฟารัด (160 kVAR) ขนาดของแรงดันแหล่งจ่าย 230 V<sub>rms</sub> ในส่วนของรูปแบบการเปิดปิดสวิตช์นั้นกำหนดให้มีการเปิดปิดสวิตช์ทั้งหมด 51 ครั้งเนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้จากการทดสอบดังตารางที่ 2 โดยในการเปิดปิดแต่ละครั้งจะทำการเปิดปิดสวิตช์  $Sw_1$  และ  $Sw_2$  สลับกันไปโดยทำมุม  $x_0, x_1, \dots, x_{m+1}$  ( $m = 50, x_0 = 0, x_{m+1} = 2\pi$ ) ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7

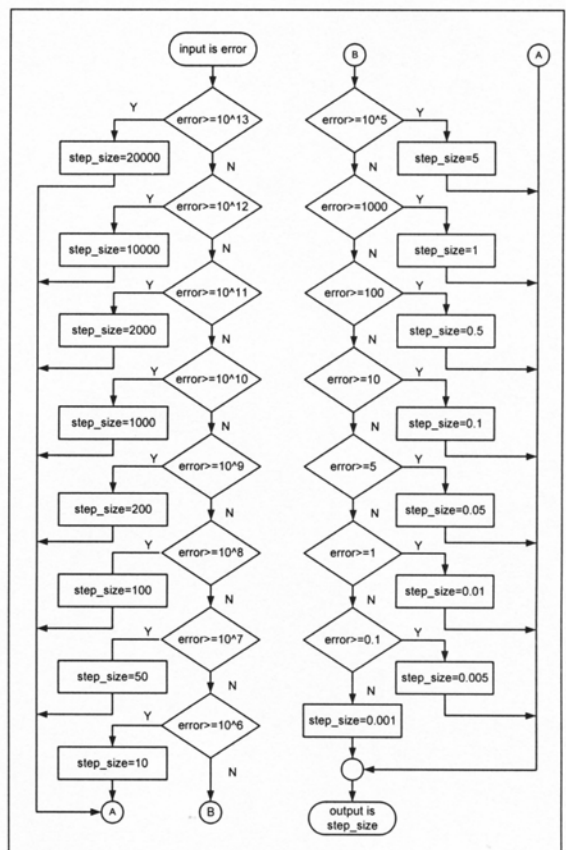


Figure 5. Sub algorithm for step size

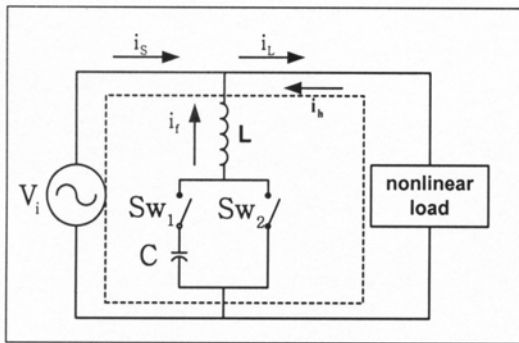


Figure 6. Switched-Capacitor Filter

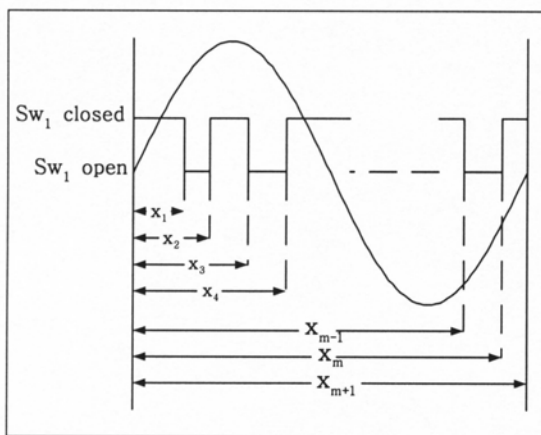


Figure 7. Switching pattern for  $S_1$

- โดยที่  $i_s$  คือกระแสจากระบบส่งจ่าย
- $i_h$  คือกระแสฮาร์มอนิก
- $i_r$  คือกระแสชดเชย
- $Sw_1, Sw_2$  คือสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสร้างกระแสชดเชย
- $V_i$  คือแรงดันไฟฟ้าของระบบส่งจ่าย
- $C$  คือตัวเก็บประจุในวงจรกรองฮาร์มอนิก
- $L$  คือตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองฮาร์มอนิก

ในการหาค่าของ  $x_1, \dots, x_m$  ( $m = 50$ ) สามารถหาได้จาก การวิเคราะห์สมการอนุกรมฟูรีเยร์ดังนี้

$$v(t) = V_{\max} \sin(\omega t) \tag{9}$$

โดยที่  $V_{\max}$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของรูปคลื่น (peak)

$$i_r(t) = C \frac{dv}{dt} \tag{10}$$

จากสมการที่ (9) และ (10) ได้ตั้งสมการที่ (11)

$$i_r(t) = CV_{\max} \omega \cos(\omega t) \tag{11}$$

จากสมการที่ (5) นำมาเขียนใหม่โดยกำหนดให้

$x = \omega t$  ได้ตั้งสมการที่ (12)

$$i_r(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(nx) + B_n \sin(nx)) \tag{12}$$

จากสมการที่ (12) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรม

ฟูรีเยร์ได้ตั้งสมการที่ (13)

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_r(x) dx \\ A_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_r(x) \cos(nx) dx \\ B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_r(x) \sin(nx) dx \\ n &= 1, 2, \dots, 19 \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

แทนค่าสมการที่ (11) ลงในสมการที่ (13) โดยพิจารณาเฉพาะ  $n \geq 2$  จะได้

$$\left. \begin{aligned} A_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} CV_{\max} \omega \cos(x) \cos(nx) dx \\ B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} CV_{\max} \omega \cos(x) \sin(nx) dx \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

เมื่อพิจารณาถึงแบบรูปการสวิตช์ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ตั้งสมการที่ (15) และ (16)

$$A_n = \frac{CV_{\max} \omega}{\pi} \left[ \begin{aligned} &\int_0^{x_1} \cos(x) \cos(nx) dx \\ &+ \int_{x_2}^{x_3} \cos(x) \cos(nx) dx \\ &+ \dots \\ &+ \int_{x_m}^{x_{m+1}} \cos(x) \cos(nx) dx \end{aligned} \right] \tag{15}$$

$$B_n = \frac{CV_{max} \omega}{\pi} \left[ \begin{aligned} &\int_0^{x_1} \cos(x) \sin(nx) dx \\ &+ \int_{x_2}^{x_3} \cos(x) \sin(nx) dx \\ &+ \dots \\ &+ \int_{x_m}^{x_{m+1}} \cos(x) \sin(nx) dx \end{aligned} \right] \quad (16)$$

โดยที่ m เป็นเลขคู่, จากทฤษฎีตรีโกณมิติ

$$\left. \begin{aligned} \cos(x) \cos(nx) &= \frac{1}{2} [\cos(x+nx) + \cos(x-nx)] \\ \cos(x) \sin(nx) &= \frac{1}{2} [\sin(x+nx) - \sin(x-nx)] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

แทนสมการที่ (17) ลงในสมการที่ (15) และ (16) ได้  
 ดังสมการที่ (18)

$$\left. \begin{aligned} A_n &= \frac{CV_{max} \omega}{2\pi} \left[ \begin{aligned} &\int_0^{x_1} (\cos(x+nx) + \cos(x-nx)) dx \\ &+ \int_{x_2}^{x_3} (\cos(x+nx) + \cos(x-nx)) dx \\ &+ \dots \\ &+ \int_{x_m}^{x_{m+1}} (\cos(x+nx) + \cos(x-nx)) dx \end{aligned} \right] \\ B_n &= \frac{CV_{max} \omega}{2\pi} \left[ \begin{aligned} &\int_0^{x_1} (\sin(x+nx) - \sin(x-nx)) dx \\ &+ \int_{x_2}^{x_3} (\sin(x+nx) - \sin(x-nx)) dx \\ &+ \dots \\ &+ \int_{x_m}^{x_{m+1}} (\sin(x+nx) - \sin(x-nx)) dx \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

จากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ของแบบรูปการ  
 สับสวิตซ์  $x_1, \dots, x_m$  จะได้ค่า  $A_n, B_n$  ( $n = 2, \dots, 19$ )  
 ดังนั้นในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบ  
 สวิตซ์ตัวเก็บประจุนั้นจะต้องหาค่า  $x_1, \dots, x_m$  ที่ให้ได้  
 ค่า  $A_n, B_n$  ( $n = 2, \dots, 19$ ) หักล้างกับ  $A_n, B_n$   
 ( $n = 2, \dots, 19$ ) ของระบบดังสมการที่ (19) ในการหาค่า  
 $x_1, \dots, x_m$  นั้นหาได้จากการค้นหาแบบตาบู่ โดยการ  
 กำหนดให้สุ่มค่าเริ่มต้น  $S_0 = x_1, \dots, x_m$  จากนั้นนำ  
 ค่าที่ได้จากการสุ่มแทนลงในสมการที่ (18) เพื่อหา  
 $A_n, B_n$  ของวงจรกรองฮาร์มอนิก นำค่า  $A_n, B_n$  ที่ได้

จากการจำลองผลคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนโดย  
 เปรียบเทียบกับ  $A_n, B_n$  ที่ตรวจวัดได้จริง (หาค่า cost :  
 objective function) ดังสมการที่ (19)

$$Cost = Error = \sum_{n=2}^{19} \left( \begin{aligned} &(A_{n,real} - A_{n,sim})^2 \\ &+ (B_{n,real} - B_{n,sim})^2 \end{aligned} \right) \quad (19)$$

โดยที่  $A_{n,real}$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์หน้า  
 $\cos(n\omega t)$  ของอนุกรมฟังก์ชัน  
 กระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริง ณ  
 ฮาร์มอนิกลำดับที่ n

$B_{n,real}$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์หน้า  
 $\sin(n\omega t)$  ของอนุกรมฟังก์ชัน  
 กระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริง ณ  
 ฮาร์มอนิกลำดับที่ n

$A_{n,sim}$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์หน้า  
 $\cos(n\omega t)$  ของอนุกรมฟังก์ชัน  
 กระแสที่ได้จากการจำลองแบบ ณ  
 ฮาร์มอนิกลำดับที่ n

$B_{n,sim}$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์หน้า  
 $\sin(n\omega t)$  ของอนุกรมฟังก์ชัน  
 กระแสที่ได้จากการจำลองแบบ ณ  
 ฮาร์มอนิกลำดับที่ n

โดยมีรูปแบบการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของ  
 step\_size ซึ่งค่าของ step\_size หาได้จากการสุ่มช่วง  
 value\_move ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากค่า error เพื่อให้การ  
 เคลื่อนที่ของการค้นหาแบบตาบู่มีความเร็วขึ้นและได้  
 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยในกรณีที่มีค่ามากการ  
 เคลื่อนที่ก็จะกว้าง (step\_size มีค่ามาก) เมื่อ cost น้อยลง  
 การเคลื่อนที่ก็จะแคบลงดังรูปที่ 8. ดำเนินการตาม  
 หลักการทำงานของการค้นหาแบบตาบู่ที่ได้กล่าวไว้  
 ข้างต้นจะได้รูปแบบการสับสวิตซ์  $x_1, \dots, x_m$  ของ  
 วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

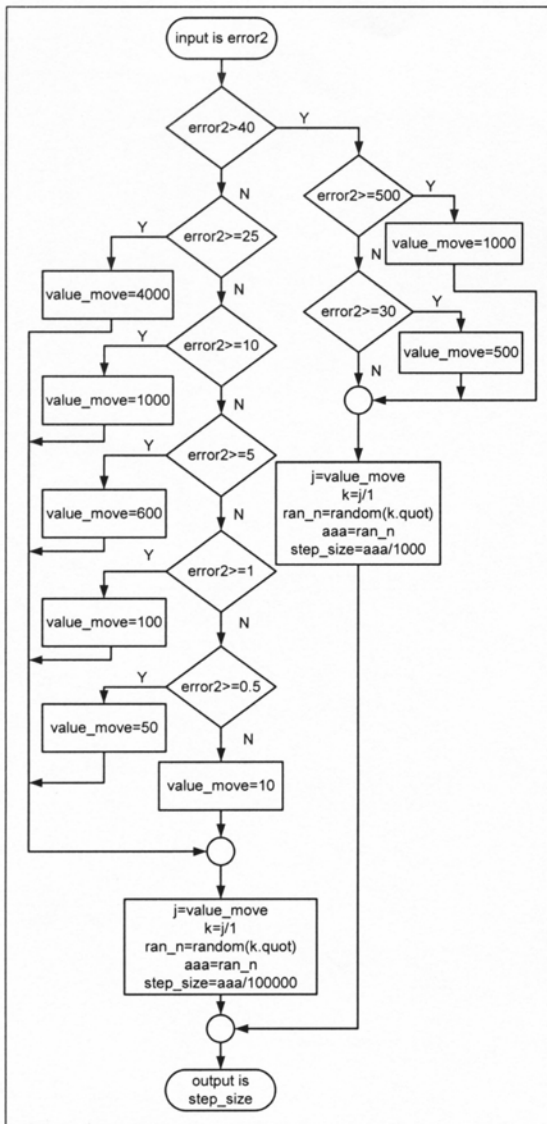


Figure 8. Sub algorithm for step size

**ผลการทดสอบและวิจารณ์**

เมื่อทำการทดสอบตรวจวัดระบบที่มีฮาร์มอนิกในลำดับที่ 1 ถึง 19 โดยปราศจากสัญญาณรบกวน(white noise: Uniformly distributed random number [9, 10]) และกรณีสัญญาณรบกวน (โดยมี SNR: signal-to-noise ratio = 12 db, 25 dB, 50 dB) โดยทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธี FFT และวิธีการค้นหาแบบตามผังตารางที่ 1 ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน จะเห็นได้ว่าวิธีการค้นหาแบบตามผังตารางมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกับวิธี FFT โดยสามารถหาค่าได้ใกล้เคียงค่าจริงจากระบบผังรูปที่ 9 เมื่อนำสัญญาณกระแสที่ได้จาก

**Table 1. Performance comparison of various search methods.**

Case	Method	*Error
No white noise	FFT	4.210E-27
	Tabu	0.000152***
Add white noise1: **SNR = 12 dB	FFT	769.709
	Tabu	473.538
Add white noise2: SNR = 25 dB	FFT	217.323
	Tabu	133.966
Add white noise 3: SNR = 50 dB	FFT	17.869
	Tabu	13.6634

$$* \text{Error} = \sum_{n=0}^{19} \left( \begin{aligned} & \left( A_n \text{ real} - A_n \text{ method} \right)^2 \\ & + \left( B_n \text{ real} - B_n \text{ method} \right)^2 \end{aligned} \right)$$

$A_n \text{ method}$ ,  $B_n \text{ method}$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ ของอนุกรมฟังก์ชันกระแสที่ได้จากการจำลองแบบด้วยกระบวนการ FFT และ Tabu ณ ฮาร์มอนิกลำดับที่ n

\*\*SNR (signal-to-noise ratio) คืออัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณรบกวน มีหน่วยเป็น dB (เดซิเบล) โดยที่

$$\text{SNR} = 10 \log \left( \frac{\sum_{m=1}^{128} (i_L \text{ real}(m))^2}{\sum_{m=1}^{128} (i_L \text{ noise}(m) - i_L \text{ real}(m))^2} \right)$$

$i_L \text{ noise}(m)$  คือค่ากระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงในข้อมูลลำดับที่ m รวมกับสัญญาณรบกวน

\*\*\* ค่าคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากเงื่อนไขยุติการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตามผัง โดยค่าเงื่อนไขยุติการค้นหาคือ  $\text{cost} < 0.01$

FFT และการค้นหาแบบตามผังเปรียบเทียบับรูปคลื่นสัญญาณกระแสจริงของระบบจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าของระบบจริงกับรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จาก FFT และการค้นหาแบบตามผังซ้อนทับกันสนิทผังรูปที่ 10 ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนผังตารางที่ 1 และรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 19 จะเห็น

ได้ว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนจะทำให้การตรวจวัดด้วยวิธี FFT มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอันเนื่องจากการทำงานของ FFT จะพยายามจำลองแบบของสัญญาณรบกวนทำให้ค่าฮาร์มอนิกที่วิเคราะห์ได้เกิดการคลาดเคลื่อนขึ้น แต่ในส่วนของการค้นหาแบบ Tabu จะถูกจำกัดการวิเคราะห์ไว้ด้วยรูปสัญญาณไซน์, โคไซน์และความถี่ที่ใช้พิจารณา (950 Hz = ฮาร์มอนิกอันดับที่ 19) ทำให้ไม่สามารถจำลองสัญญาณรบกวนที่เป็นลักษณะของ Uniformly distributed random number ได้ทั้งหมด หรือกล่าวได้ว่าสัญญาณรบกวนมีผลต่อการตรวจวัดด้วยวิธี FFT มากกว่าวิธีการตรวจวัดด้วยการค้นหาแบบตาบู (สัญญาณรบกวนมากค่าของ SNR จะน้อยน้อย)

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ได้จากการค้นหาแบบตาบูมาทำการออกแบบหาแบบรูปการสวิตซ์ตัวเก็บประจุโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูโดยทำการทดสอบหาจำนวนครั้งในการสวิตซ์เปิดปิดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมซึ่งผลที่ได้คือตารางที่ 2 ซึ่งค่าเหมาะสมที่สุดคือ 51 ครั้งโดยให้ค่าผิดพลาดน้อยสุดและเวลาที่ใช้ไม่เกินช่วงเวลาการตรวจวัดซ้ำ(เวลาการตรวจวัด+เวลาการออกแบบสร้างกระแสชดเชย<15 นาที) ตามมาตรฐานของ [6] จากรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสหลังจากผ่านวงจรกรอง มีค่าใกล้เคียง

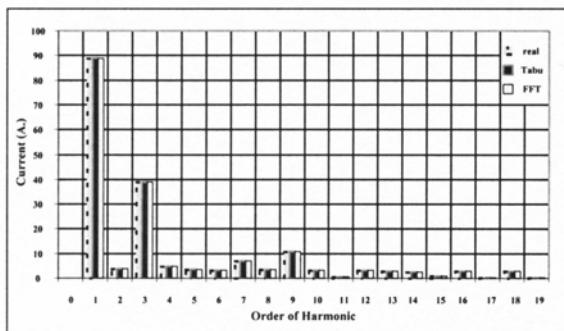


Figure 9. Harmonic current spectrum of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (No White Noise)

(เกือบทับสนิท)กับรูปคลื่นของกระแสที่ปราศจากฮาร์มอนิกเมื่อพิจารณาในรูปของสเปกตรัมความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกจากรูปที่ 21 และ 22 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสหลังจากผ่านวงจรกรองฮาร์มอนิกนั้นฮาร์มอนิกในลำดับที่ 2 ถึง 19 จะหายไปอันเนื่องมาจากการหักล้างกันของกระแสฮาร์มอนิกกับกระแสของวงจรกรองซึ่งผลที่ได้จะเหลือเพียงฮาร์มอนิกในลำดับที่ 6 เล็กน้อยเท่านั้น

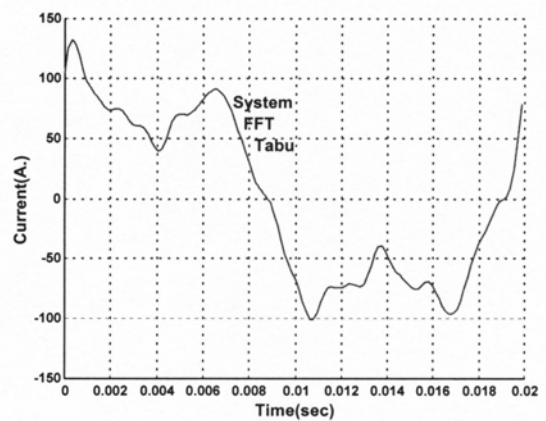


Figure 10. Harmonic current waveform of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (No White Noise)

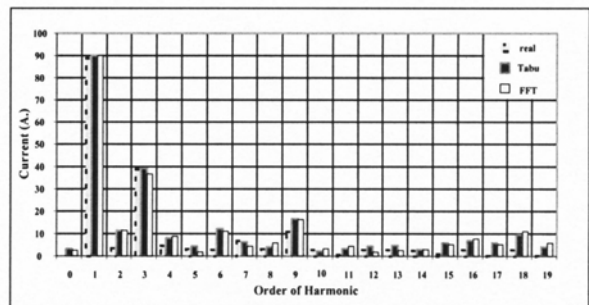


Figure 11. Harmonic current spectrum of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (White Noise: SNR = 12 dB)



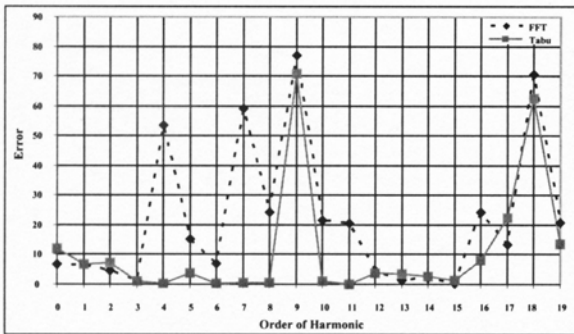


Figure 12. Error harmonic current of Parameter A ( $\text{Error} = (A_n\text{real}-A_n\text{method})^2$ ) between Tabu search and FFT (Add White Noise1: SNR = 12 dB)

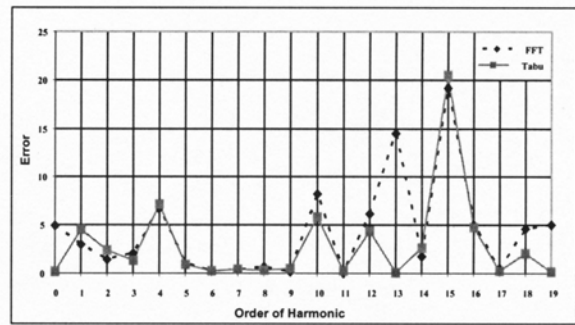


Figure 15. Error harmonic current of Parameter A ( $\text{Error} = (A_n\text{real}-A_n\text{method})^2$ ) between Tabu search and FFT (Add White Noise2: SNR = 25 dB)

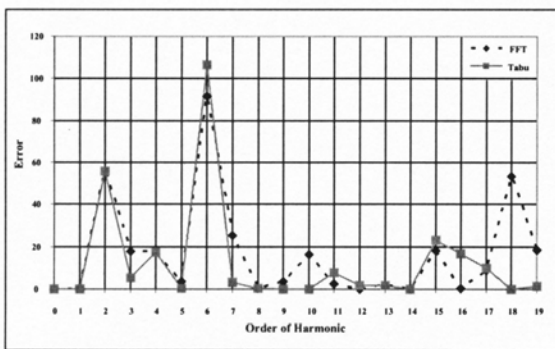


Figure 13. Error harmonic current of Parameter B ( $\text{Error} = (B_n\text{real}-B_n\text{method})^2$ ) between Tabu search and FFT (Add White Noise1: SNR = 12 dB)

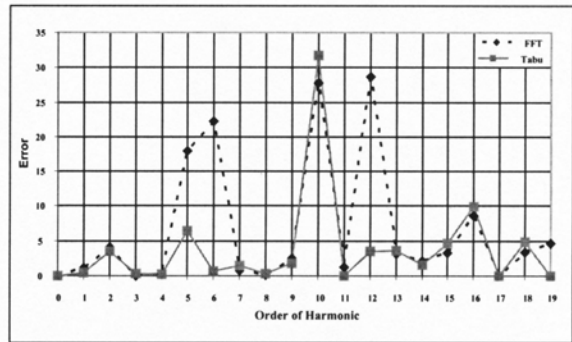


Figure 16. Error harmonic current of Parameter B ( $\text{Error} = (B_n\text{real}-B_n\text{method})^2$ ) between Tabu search and FFT (Add White Noise2: SNR = 25 dB)

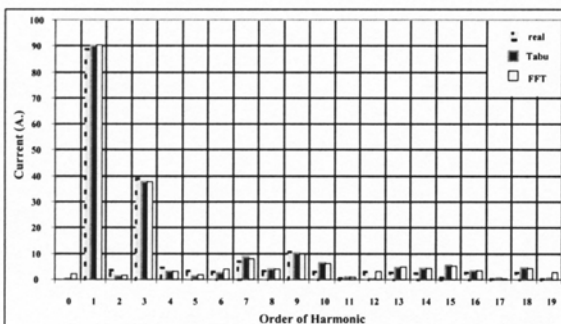


Figure 14. Harmonic current spectrum of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (White Noise2: SNR = 25 dB)

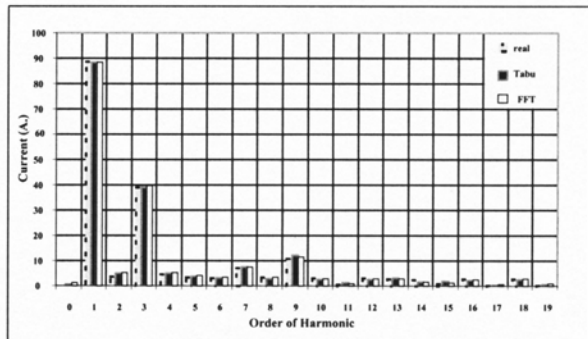


Figure 17. Harmonic current spectrum of the system between real current and simulation current from Tabu search and FFT (White Noise3: SNR = 50 dB)

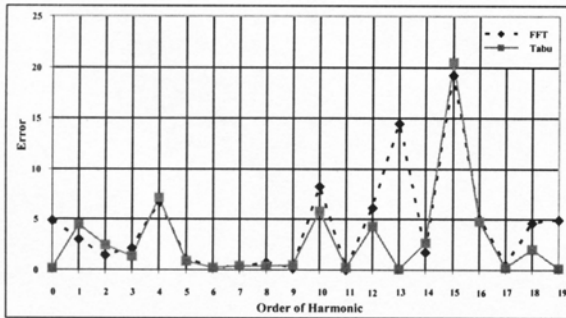


Figure 18. Error harmonic current of Parameter A ( $\text{Error} = (A_n^{\text{real}} - A_n^{\text{method}})^2$ ) between Tabu search and FFT (Add White Noise3: SNR = 50 dB)

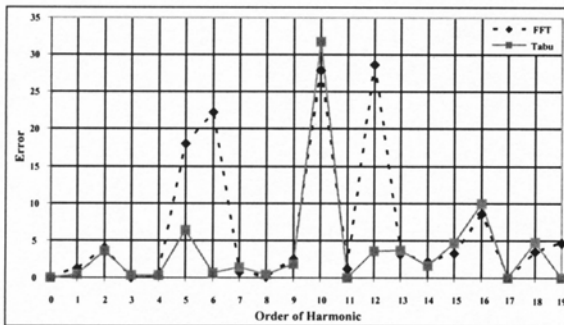


Figure 19. Error harmonic current of Parameter B ( $\text{Error} = (B_n^{\text{real}} - B_n^{\text{method}})^2$ ) between Tabu search and FFT (Add White Noise3: SNR = 50 dB)

Table 2. Performance comparison number of switching of 1 period .

No. of Switching	error	time(sec)
11	621.57	9.67
31	283.57	116.33
51	73.85	256.33
71	76.39	329.33
91*	67.50	862

\*ในการสวิตช์จำนวน 91 ครั้งใช้เวลาทั้งสิ้น 862 วินาที ซึ่งเกินมาตรฐานของ [6] โดยกำหนดไว้ที่ 15 นาที ในการทำการวัดซ้ำอีกครั้ง (เวลาการตรวจวัด+เวลาการออกแบบสร้างกระแสชดเชย<15 นาที)

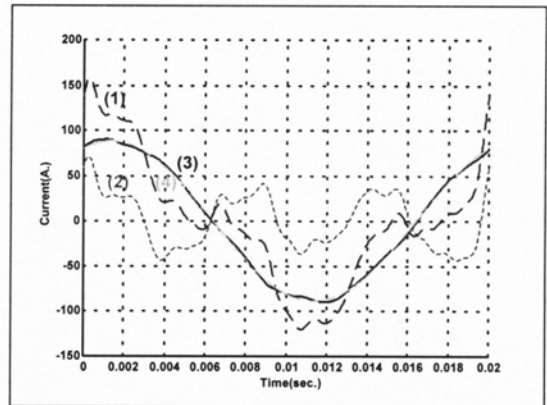


Figure 20. Current waveforms of system from an academic building category.

- (1) Current before compensation
- (2) Compensated current
- (3) Current after compensation
- (4) Ideal current

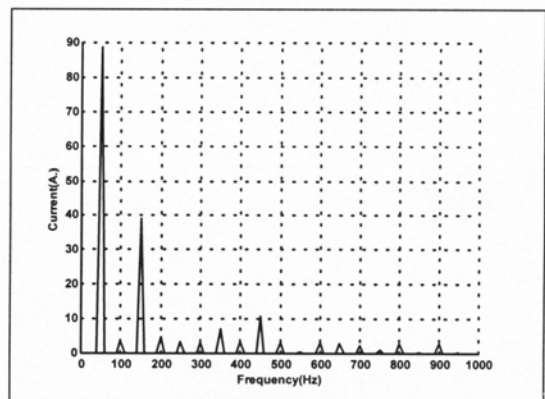


Figure 21. Harmonic current spectrum of the system before compensation

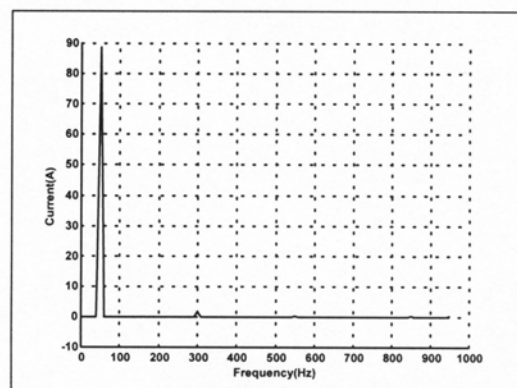


Figure 22. Harmonic current spectrum of the system after compensation

## สรุป

จากผลการทดสอบการตรวจวัดฮาร์มอนิกโดยทำการเปรียบเทียบวิธี FFT กับวิธีการค้นหาแบบตามูสรุปได้ว่าในการตรวจวัดสัญญาณที่ไม่มี white noise นั้นวิธีการตรวจวัดแบบ FFT และวิธีการค้นหาแบบตามูนั้นเหมาะสำหรับการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งจะได้ค่าที่ถูกต้องสูงดังตารางที่ 1 รูปที่ 9 และ รูปที่ 10 ในส่วนของการตรวจวัดสัญญาณที่มี white noise ประปนอยู่นั้นการตรวจวัดโดยวิธีการค้นหาแบบตามูสามารถให้ค่าการตรวจวัดที่ถูกต้องมากกว่าวิธีการตรวจวัดแบบ FFT ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 19 และจากผลการทดสอบการหารูปแบบการทำงานของสวิตช์ด้วยการค้นหาแบบตามู พบว่าสามารถลดความผิดเพี้ยนเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิก (THD<sub>T</sub> : Total Harmonic Distortion) จากเดิม 48.03% เหลือเพียง 0.45% ส่งผลให้ค่ากระแสของระบบลดลง 9.9570% ( $6.9429 A_{rms}$ ) จาก  $69.7285 A_{rms}$  เหลือเพียง  $62.7856 A_{rms}$  ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการค้นหาแบบตามูสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกได้จริง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Arsoy, A., Halpin, S.M., Liu, Y., Paulo, F.R. (1999). Modeling and simulation of power system harmonics [CD-ROM]. Task Force on Harmonics Modeling and Simulation Harmonic Working Group Transmission & Distribution Committee IEEE Power Engineering Society.
- [2] Timothy, A.G. (1991). Harmonic power flow determination using the fast fourier transform. IEEE Transaction on Power Delivery 6(2) : 530-535.
- [3] Glover, F. (1993). Tabu Search, in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. C.R. Reeves ed., John Willey & Sons, Inc.
- [4] Arrillaga, J., Bradley, D.A. and Bodger, P.S. (1985). Power System Harmonics. New York: John Willey & Sons, Inc.
- [5] Qi-Wen, Y., Feng, L., Guo-Hong, Z. and Jing-Ping, J. (2000). The application of computational intelligence to fourier transformation. IEEE Conf. Electronics, Circuits and Systems 2000.(pp.178-181)
- [6] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า. (2541). ข้อกำหนดคกฏเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม. กฟผ. กฟภ. กฟน.
- [7] Mehta, P., Darwish, M. and Thomson, T. (1990). Switched-Capacitor Filters. IEEE Transaction on power electronics. 5(3) : 331-336.
- [8] Welsh, M., Mehta, P., and Darwish, M.K. (2000). Genetic algorithm and extended analysis optimization techniques for switched capacitor active filter – Comparative study. IEE Proceedings - Electric Power Applications. 147(1) : 21-26.
- [9] Seed, V.V. (2000). Advanced digital signal processing and noise reduction. New York: John Willey & Sons, Inc.
- [10] Sidney, C.B., James, H.M., Alan, V.O., Thomas, W.S. and Hans, W.S. (1994). Computer-Based Exercises for Signal Processing Using MATLAB. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26  
The 26<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-26)  
6-7 พฤศจิกายน 2546 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



EECON-08

แบบตอบรับการตีพิมพ์บทความ EECON-26

หมายเลขบทความเดิม

PW 403

หมายเลขบทความอ้างอิงใหม่

PW46

6 ตุลาคม 2546

เรียน คุณชชาติ วุฒินทรเนตรินทร์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเพื่อเข้าร่วมการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 ในหัวข้อเรื่อง  
(ไทย) การประยุกต์การค้นหาแบบตาบู่เพื่อการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิชต์ตัวเก็บประจุ  
(อังกฤษ) The Application of Tabu Search to Design Switched-Capacitor Harmonic Filter

คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ EECON-26 ฝ่ายพิจารณาบทความ ได้รับเอกสารต่างๆ ของท่านครบถ้วนเรียบร้อยแล้ว และได้ดำเนินการตีพิมพ์บทความของท่านในหนังสือการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 และ CD-ROM แล้ว พร้อมนี้ได้จัดส่งใบเสร็จรับเงินค่าลงทะเบียนและรายละเอียดกำหนดการประชุม มาด้วยแล้ว

คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ EECON-26 ขอขอบคุณท่านที่ได้ให้ความสนใจเข้าร่วมกิจกรรมในครั้งนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความร่วมมือจากท่านอีกในอนาคตต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูทธ อัครเอกฉาลิน)

ประธานคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ EECON-26

ในการนำเสนอบทความ คณะกรรมการฯ ได้จัดเตรียมคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์นำเสนอความเป็นเครื่องฉายข้ามศีรษะ และดิจิทัลโปรเจคเตอร์ (ใช้ควบคู่กับ Powerpoint XP โดยกำหนดรูปแบบอักษร ภาษาไทยเป็น Angsana New และภาษาอังกฤษ Times New Roman และกำหนดให้ใช้เวลาบรรยาย 15 นาที ตอบซักถาม 5 นาที รวม 20 นาที

## การประยุกต์การค้นหาแบบตามูเพื่อการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

### The application of Tabu search to design switched-capacitor harmonic filter

ชูชาติ วุฒินทรเนตรรักษ์ และ อนันท์ อุ่นศิริไธย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-4401 โทรสาร 0-4422-4220 E-mail: chuchard@hotmail.com, anant@ccs.sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของการวัดกระแสฮาร์มอนิกที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดอย่างชาญฉลาดในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ พร้อมทั้งวิเคราะห์วงจรงกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ (Switched Capacitor Filter: SCF) ด้วยการวิเคราะห์ขยายผล (extended analysis) โดยพิจารณาผลของตัวเหนี่ยวนำในการออกแบบรูปแบบการสวิตซ์ชุดวงจรงกรองให้เหมาะสมเพื่อกำจัดองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกในช่วงเวลาหนึ่ง บทความนี้ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแบบจำลองสัญญาณกระแสฮาร์มอนิก และการออกแบบรูปแบบการสวิตซ์ บทความนี้ได้นำวิธีการที่เสนอไปทดสอบกับสัญญาณฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้จริงจากผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ โดยสามารถตรวจวัดและกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจพบได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์, การค้นหาแบบตามู, วงจรงกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ, ฮาร์มอนิก

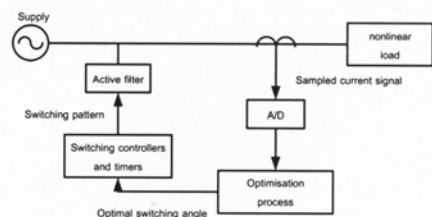
#### Abstract

This article presents mathematical model and distortion analysis of harmonic current measurement based on exponential complex Fourier series. The corresponding Fourier coefficients obtained in this research were characterised by applying an intelligent optimisation method. An analysis of a switched capacitor type online harmonic-filter uses the extended analysis. With the result of an inductor from the extended analysis, the appropriate switching pattern of the filter bank is designed to reduce harmonic components of current in a certain period of time. In this article, Tabu Search (TS) method was used as a main optimisation sub-routine in both harmonic signal modelling and switching pattern design. The proposed method was tested with practical harmonic signals measured from an academic building category. From the satisfactory results, it reveals that the harmonic current was remarkably eliminated.

Keywords: artificial intelligent, tabu search, switched capacitor filter, harmonic

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาใช้งานมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า ตัวเรียงกระแส และชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ เป็นต้น เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้มีคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปกล่าวคือ มีความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่มูลฐานรวมอยู่ในรูปคลื่นปกตินี้ด้วย เรียกคุณลักษณะนี้ว่าเกิดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (harmonic distortion) ดังนั้นหากมีอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังมาก จะทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้า (power quality) ลดต่ำลง นอกจากนี้กระแสฮาร์มอนิกบางส่วนจะไหลกลับเข้าไปในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมที่อยู่ข้างเคียง [1] ในงานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยทฤษฎีฟูรีเยร์วิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเปรียบเทียบกับวิธีการค้นหาแบบตามู และทำการวิเคราะห์วงจรงกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุด้วยการวิเคราะห์ขยายผล โดยพิจารณาผลของตัวเหนี่ยวนำเพื่อทำการออกแบบรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุด้วยวิธีการค้นหาแบบตามู พร้อมทั้งเฝ้าตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณฮาร์มอนิกเพื่อปรับรูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุของวงจรงกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุให้เหมาะสม ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพการทำงานชุดวงจรงกรองฮาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 1 ผลการทดสอบในการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกที่ทำการตรวจวัดได้มีความถูกต้องสูง การปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวงจรงกรองฮาร์มอนิกทำให้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้าลดลงอย่างมาก นอกจากนั้นยังสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในวงจรงเดียวกัน และทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณภาพสูงขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 1 การทำงานของวงจรงกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตซ์ตัวเก็บประจุ

**2. การหาสัมประสิทธิ์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแส ด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว**

การแปลงฟูริเยร์และอนุกรมฟูริเยร์เป็นคณิตศาสตร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ ดังนั้นจึงนิยมนำการแปลงฟูริเยร์มาใช้ในการประมวลผลสัญญาณ การแปลงฟูริเยร์เพิ่มหน่วยหรือการแปลงฟูริเยร์คิสดรีต (Discrete Fourier Transform: DFT) เป็นการแปลงสัญญาณในโดเมนเวลาไปเป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ ซึ่งมีวิธีการในการคำนวณที่ซับซ้อนมีจำนวนครั้งในการคำนวณมากและใช้เวลานานในการคำนวณมาก จึงได้มีการพัฒนาวิธีการแปลงให้เร็วขึ้น ซึ่งเรียกว่า การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ซึ่งทำให้มีการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง  $N \log_2 N$  ครั้งเท่านั้น ( $N =$  จำนวนข้อมูล) หรือจำนวนครั้งการคูณตัวเลขลดลงไปถึง  $N/(\log_2 N)$  เท่า [2] การแปลงฟูริเยร์อย่างเร็วนี้มีการคำนวณคล้ายกับการแปลงฟูริเยร์แบบเต็มหน่วยแต่จะมีวิธีการจัดแบ่งข้อมูลแล้วทำการคำนวณซึ่งจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจะต้องเป็นค่า  $2^n$  โดยที่  $n$  เป็นจำนวนเต็มบวก ซึ่งทำให้ลดเวลาในการคำนวณลง โดยมีกระบวนการในการคำนวณเป็นดังนี้

$$f(m) \xrightarrow{\text{transform}} F(k), F(k) = \sum_{m=0}^{N-1} f(m) e^{-\frac{j2\pi mk}{N}} \quad (1)$$

$$f(m) \xleftarrow{\text{transform}} F(k), f(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{\frac{j2\pi mk}{N}} \quad (2)$$

โดยที่  $f(m)$  คือฟังก์ชันของเวลา,  $F(k)$  คือฟังก์ชันของความถี่,  $m$  และ  $k$  เป็นเลขจำนวนเต็มบวก จากอนุกรมฟูริเยร์แบบตรีโกณมิติ

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)) \quad (3)$$

โดยที่  $n$  คือลำดับของฮาร์มอนิก,  $A_0, A_n, B_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ของฟังก์ชันคาบ  $f(t)$  เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ของอนุกรมฟูริเยร์แล้วสามารถหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ในรูปของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex fourier series) ได้ดังสมการที่ (4)

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega t} \quad (4)$$

$$F_0 = \frac{A_0}{2} \quad (5)$$

$$F_n = F_{-n} = \frac{1}{2} (A_n - jB_n) \quad (6)$$

$$A_n = 2\text{Re}\{F_n\} \quad (7)$$

$$B_n = -2\text{Im}\{F_n\} \quad (8)$$

โดยที่  $F_0$  และ  $F_n$  คือสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน  $\text{Re}\{F_n\}$  และ  $\text{Im}\{F_n\}$  คือส่วนจริงและส่วนจินตภาพของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน

**3. วิธีการค้นหาแบบตาบอด**

**3.1 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบอด**

การค้นหาแบบตาบอด (TS) เป็นวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถแก้ปัญหาการถูกบล็อกด้วยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (local optimum) ทำให้คำตอบที่ได้ใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสมที่สุด [3] ขั้นตอนการค้นหาด้วยวิธี TS

กำหนดให้  $S_0$  คือค่าเริ่มต้นในการค้นหาแต่ละครั้ง,  $S_{\text{neighborhood}}$  คือค่าใกล้เคียง  $S_0$  ที่ได้จากการเคลื่อนย้ายไปเท่ากับ  $\text{step\_size}$  (search space),  $S_{\text{best}}$  คือค่าใกล้เคียงที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น,  $S_{\text{ans}}$  คือค่าใกล้เคียงที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในวงกว้าง (global optimal),  $\text{cost}$  คือค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้มาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function),  $\text{step\_size}$  คือขอบเขตของการทำงานแต่ละรอบ และ  $\text{value\_move}$  คือขอบเขตการสุ่มของ  $\text{step\_size}$  ในการทำงานแต่ละรอบ

**ขั้นตอนที่ 1** รับข้อมูลกระแสไฟฟ้าจากชุดตรวจวัดกระแส  
**ขั้นตอนที่ 2** กำหนดค่า  $S_0$  ซึ่งเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังรูปที่ 2 โดยหาค่าเริ่มต้น  $S_0$  จากการสุ่มคำตอบ จากนั้นกำหนดให้คำตอบที่มีอยู่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด  $S_{\text{ans}} = S_{\text{best}} = S_0$  และค่า  $\text{cost}$  ของ  $S_{\text{best}}$  ให้เป็น  $\text{best\_error}$  ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การค้นหาคำตอบจะเข้าไปเรื่อยๆ จนได้ค่า  $\text{cost}$  น้อยที่สุดตามที่กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า

**ขั้นตอนที่ 3** จาก  $S_0$  ดำเนินการเคลื่อนย้ายโดยมีขอบเขตของ search space ขึ้นอยู่กับ  $\text{step\_size}$  โดยค่าของ  $\text{step\_size}$  จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า  $\text{cost}$  ที่ได้ โดยค่าใกล้เคียงค่าของ  $S_0$  นั้นคือ  $S_{\text{neighborhood}}$  จากนั้นทำการคำนวณหาค่า  $\text{cost}$  ของสมาชิกแต่ละตัวของ  $S_{\text{neighborhood}}$  เลือกสมาชิกที่ให้ค่า  $\text{cost}$  ที่ดีที่สุดเรียกว่า  $S_{\text{best}}$

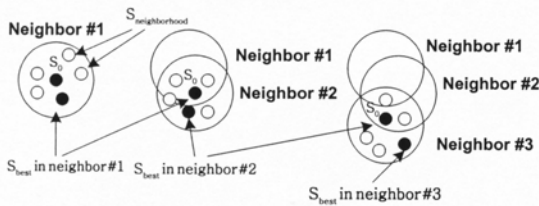
**ขั้นตอนที่ 4** ถ้าค่า  $\text{cost}$  ของ  $S_{\text{best}}$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $\text{cost}$  ของ  $S_{\text{ans}}$  กำหนดให้  $S_{\text{ans}} = S_{\text{best}}$  ถ้าไม่สามารถหาสมาชิกตัวใดของ  $S_{\text{neighborhood}}$

ที่ให้ค่า cost ดีกว่าค่า cost ของ  $S_0$  ให้ไปทำขั้นตอนที่ 6 เพื่อหลีกเลี่ยงการลื่นไถลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้  $S_0 = S_{best}$

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า  $S_{best}$  ไม่อยู่ใน tabu list ให้เก็บค่า  $S_{best}$  ไว้ใน tabu list

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการยุติการค้นหา ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขให้หยุดการค้นหาและคำตอบของการค้นหารอบล่าสุดจะถือว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในวงกว้าง แต่เมื่อตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ไปเริ่มทำในขั้นตอนที่ 2 ใหม่



รูปที่ 2 กระบวนการทำงานของการค้นหาแบบตาบู่

3.2 การหาสัมประสิทธิ์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธีตาบู่

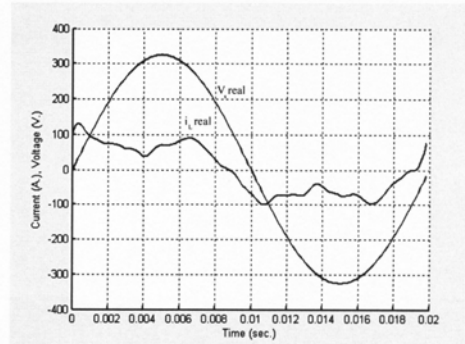
จากรูปที่ 1 รับข้อมูลกระแสไฟฟ้าของระบบจากตัวแปลงกระแส ผ่านตัวแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อนำไปประมวลผลข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์จากคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้พิจารณาเวลาในการเก็บข้อมูล 128 จุด ต่อ 20 ms (1 cycle ของ 50 Hz) โดยผลของฮาร์มอนิก ทำให้รูปคลื่นสัญญาณกระแสของระบบ ไม่เป็นไซน์ซวยอย่างแท้จริงดังรูปที่ 3 สามารถวิเคราะห์ทางอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series) ได้โดยแทนด้วยผลรวมของสัญญาณไซน์ซวยที่มีความถี่ต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน [4-5] ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (9)

$$i(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)) \tag{9}$$

โดยที่  $i(t)$  คือค่าของฟังก์ชันของกระแสที่แปรตามเวลา ขั้นตอนการค้นหาพารามิเตอร์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธีตาบู่เริ่มจากการสุ่มค่า  $S_0 = \{A_0, A_n, B_n\}$  ( $n = 1, \dots, 19$ ) จากนั้นนำค่าที่ได้จากการสุ่มแทนลงในสมการที่ (3) เพื่อหากระแสที่ได้จากการจำลองแบบ นำค่ากระแสที่ได้จากการจำลองแบบคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยเปรียบเทียบกระแสที่ตรวจวัดได้จริง (หาค่า cost : objective function) ดังสมการที่ (10)

$$Cost = error = \sum_{m=1}^{128} (i_L real(m) - i_L sim(m))^2 \tag{10}$$

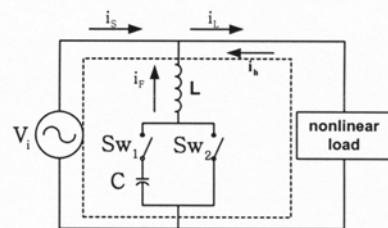
โดยที่  $i_L real$  คือค่ากระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริง,  $i_L sim$  คือค่ากระแสที่ได้จากการจำลองแบบ จากนั้นดำเนินการตามหลักการทำงานของการค้นหาแบบตาบู่ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จากการค้นหาแบบตาบู่จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูริเยร์ ( $A_0, A_n, B_n$  เมื่อ  $n = 1, 2, \dots, 19$ ) เพื่อนำไปเป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุต่อไป



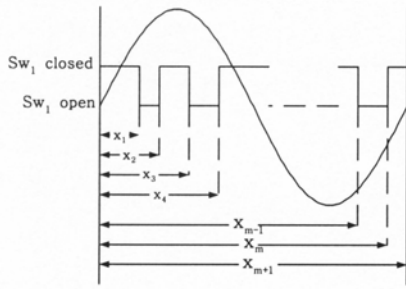
รูปที่ 3 รูปสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดจริง

4. การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยการหารูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุด้วยการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาบู่

ในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบคือ ขนาดของตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ, ขนาดของแรงดันที่จ่ายให้วงจรกรองฮาร์มอนิก, และรูปแบบการเปิดปิดสวิตช์ โดยตัวเก็บประจุ [6-7] ขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันนั้นจะบ่งบอกถึงขนาดของกระแสที่สามารถสร้างขึ้นมาจากแหล่งฮาร์มอนิกคั้งสมการที่ (11) และ (12) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 3,000 ไมโครฟารัด (160 kVAR) ตัวเหนี่ยวนำขนาด 0.4 มิลลิเฮนรี่ ขนาดของแรงดันแหล่งจ่าย 230 V<sub>rms</sub> ในส่วนของรูปแบบการเปิดปิดสวิตช์นั้นกำหนดให้มีการเปิดปิดสวิตช์ทั้งหมด 51 ครั้งเนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้จากการทดสอบดังตารางที่ 3 โดยในการเปิดปิดแต่ละครั้งจะทำการเปิดปิดสวิตช์ Sw<sub>1</sub> และ Sw<sub>2</sub> สลับกันไปโดยทำมุม  $x_0, x_1, \dots, x_{m+1}$  ( $m = 50, x_0 = 0, x_{m+1} = 2\pi$ ) ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 การเชื่อมต่อวงจรกรองฮาร์มอนิกเข้ากับระบบ



รูปที่ 5 รูปแบบการสวิตช์ตัวเก็บประจุของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ

โดยที่  $i_s, i_h, i_f$  คือกระแสจากระบบส่งจ่าย, กระแสฮาร์มอนิก และกระแสชดเชย,  $Sw_1$  และ  $Sw_2$  คือสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมการสร้างกระแสชดเชย,  $V_i$  คือแรงดันไฟฟ้าของระบบส่งจ่าย จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 สามารถวิเคราะห์วงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยการวิเคราะห์ขยายผลเพื่อใช้ในการหาค่าของ  $x_1, \dots, x_m$  ( $m = 50$ ) ได้ดังนี้

กรณีที่ 1 สวิตช์  $Sw_2$  ปิด  $Sw_1$  เปิด ตัวเหนี่ยวนำต่อลงกราวด์

$$i_f(t) = \frac{V_{max}}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \sin\left(x + \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R_L}\right)\right) \quad (11)$$

กรณีที่ 2 สวิตช์  $Sw_2$  เปิด  $Sw_1$  ปิด ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ

$$i_f(t) = \frac{V_{max} \omega C}{\sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}} \sin\left(x + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\omega R_L C}{1 - \omega^2 LC}\right)\right) \quad (12)$$

โดยที่  $V_{max}$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของรูปคลื่น และ  $x = \omega t$  จากสมการที่ (11) และ (12) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังสมการที่ (13) และ (14)

$$A_n = \left\{ \begin{aligned} &K_1 \left\{ \left( \frac{\sin(x+\gamma_1-nx)}{1-n} \cdot \frac{\sin(x+\gamma_1+nx)}{1+n} \right)_{x_1}^{x_2} + \left( \frac{\sin(x+\gamma_1-nx)}{1-n} \cdot \frac{\sin(x+\gamma_1+nx)}{1+n} \right)_{x_3}^{x_4} + \dots + \left( \frac{\sin(x+\gamma_1-nx)}{1-n} \cdot \frac{\sin(x+\gamma_1+nx)}{1+n} \right)_{x_{m-1}}^{x_m} \right\} \\ &+ K_2 \left\{ \left( \frac{\sin(x+\gamma_2-nx)}{1-n} \cdot \frac{\sin(x+\gamma_2+nx)}{1+n} \right)_{x_0}^{x_1} + \left( \frac{\sin(x+\gamma_2-nx)}{1-n} \cdot \frac{\sin(x+\gamma_2+nx)}{1+n} \right)_{x_2}^{x_3} + \dots + \left( \frac{\sin(x+\gamma_2-nx)}{1-n} \cdot \frac{\sin(x+\gamma_2+nx)}{1+n} \right)_{x_{m-1}}^{x_m} \right\} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$B_n = \left\{ \begin{aligned} &K_1 \left\{ \left( \frac{\cos(x+\gamma_1+nx)}{1+n} \cdot \frac{\cos(x+\gamma_1-nx)}{1-n} \right)_{x_1}^{x_2} + \left( \frac{\cos(x+\gamma_1+nx)}{1+n} \cdot \frac{\cos(x+\gamma_1-nx)}{1-n} \right)_{x_3}^{x_4} + \dots + \left( \frac{\cos(x+\gamma_1+nx)}{1+n} \cdot \frac{\cos(x+\gamma_1-nx)}{1-n} \right)_{x_{m-1}}^{x_m} \right\} \\ &+ K_2 \left\{ \left( \frac{\cos(x+\gamma_2+nx)}{1+n} \cdot \frac{\cos(x+\gamma_2-nx)}{1-n} \right)_{x_0}^{x_1} + \left( \frac{\cos(x+\gamma_2+nx)}{1+n} \cdot \frac{\cos(x+\gamma_2-nx)}{1-n} \right)_{x_2}^{x_3} + \dots + \left( \frac{\cos(x+\gamma_2+nx)}{1+n} \cdot \frac{\cos(x+\gamma_2-nx)}{1-n} \right)_{x_{m-1}}^{x_m} \right\} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

โดยที่

$$K_1 = \frac{V_{max}}{2\pi\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}}, K_2 = \frac{V_{max} \omega C}{2\pi\sqrt{(\omega R_L C)^2 + (1 - \omega^2 LC)^2}}, \gamma_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R_L}\right), \gamma_2 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\omega R_L C}{1 - \omega^2 LC}\right)$$

จากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ของรูปแบบการสับสวิตช์  $x_1, \dots, x_m$  จะได้อ่า  $A_n, B_n$  ดังนั้นในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุนั้นจะต้องหาค่า  $x_1, \dots, x_m$  ที่ให้ได้อ่า  $A_n, B_n$  ทัดลั้งกับ  $A_n, B_n$  ของระบบดังสมการที่ (15) ในการหาค่า  $x_1, \dots, x_m$  นั้นหาได้จากกรค้นหาแบบตาญ โดยการกำหนดให้สุมค่าเริ่มต้น  $S_0 = x_1, \dots, x_m$  จากนั้นนำค่าที่ได้จากการสุมแทนลงในสมการที่ (13) และ (14) นำค่า  $A_n, B_n$  ที่ได้จากการจำลองผลคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยเปรียบเทียบับ  $A_n, B_n$  ที่ตรวจวัดได้จริง (หาค่า cost : objective function) ดังสมการที่ (15)

$$Cost = Error = \sum_{n=2}^{19} \left( (A_n^{real} - A_n^{sim})^2 + (B_n^{real} - B_n^{sim})^2 \right) \quad (15)$$

โดยที่  $A_n^{real}, B_n^{real}$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์อนุกรมฟังก์ชันกระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริง,  $A_n^{sim}, B_n^{sim}$  คือค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์อนุกรมฟังก์ชันกระแสที่ได้จากการจำลองแบบ จากนั้นดำเนินการตามหลักการทํางานของการค้นหาแบบตาญที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจะได้รูปแบบการสับสวิตช์  $x_1, \dots, x_m$  ของวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบสวิตช์ตัวเก็บประจุ

### 5. ผลการทดสอบและวิจารณ์

เมื่อทำการทดสอบตรวจวัดระบบที่มีฮาร์มอนิกในลำดับที่ 1 ถึง 19 โดยปราศจากสัญญาณรบกวนขาว(white noise: uniformly distributed random number [8-9]) และกรณีสัญญาณรบกวน โดยทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนของกระแสด้วยวิธี FFT และวิธีการค้นหาแบบตาญดังตารางที่ 1 ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนจะเห็นได้ว่าวิธีการค้นหาแบบตาญมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกับวิธี FFT โดยสามารถหาค่าได้ใกล้เคียงค่าจริงจากระบบ เมื่อนำสัญญาณกระแสที่ได้จาก FFT และการค้นหาแบบตาญเปรียบเทียบกับรูปสัญญาณกระแสจริงของระบบจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณ



กระแสไฟฟ้าซ้อนทับกันสนิทดังรูปที่ 6 ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวนดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนจะทำให้การตรวจวัดด้วยวิธี FFT มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการทำงานของ FFT จะพยายามจำลองแบบของสัญญาณรบกวนทำให้ค่าฮาร์มอนิกที่วิเคราะห์ได้เกิดการคลาดเคลื่อนขึ้น แต่ในส่วนของการค้นหาแบบคาบ จะถูกจำกัดการวิเคราะห์ไว้ด้วยรูปสัญญาณไซน์, โคไซน์และความถี่ที่ใช้พิจารณา (950 Hz = ฮาร์มอนิกอันดับที่ 19) ทำให้ไม่สามารถจำลองสัญญาณรบกวนที่เป็นลักษณะของจำนวนสุ่มที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอได้ทั้งหมด หรือกล่าวได้ว่าสัญญาณรบกวนขาวมีผลต่อการตรวจวัดด้วยวิธี FFT มากกว่าวิธีการตรวจวัดด้วยการค้นหาแบบคาบ (สัญญาณรบกวนขาวมาก ค่าของ SNR จะน้อย) เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ที่ได้จากการค้นหาแบบคาบมาทำการออกแบบหารูปแบบการสวิตซ์ตัวเก็บประจุโดยใช้วิธีการค้นหาแบบคาบโดยการทดสอบหาจำนวนครั้งในการสวิตซ์เปิดปิดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมซึ่งผลที่ได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งค่าเหมาะสมที่สุดคือ 51 ครั้ง โดยให้ค่าผิดพลาดน้อยสุดและเวลาที่ใช้ไม่เกินช่วงเวลาการตรวจวัดซ้ำ(เวลาการตรวจวัด+เวลาการออกแบบสร้างกระแสชดเชย<15 นาที่) ตามมาตรฐานของ [10] จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสหลังจากผ่านวงจรกรองมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นของกระแสที่ปราศจากฮาร์มอนิกเมื่อพิจารณาในรูปของสเปกตรัมความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกจากรูปที่ 8 และ 9 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสหลังจากผ่านวงจรกรองฮาร์มอนิกนั้นฮาร์มอนิกในลำดับที่ 2 ถึง 19 จะลดลงอย่างมากเนื่องมาจากการหักล้างกันของกระแสฮาร์มอนิก กับกระแสของวงจรกรองซึ่งผลที่ได้จะเหลือฮาร์มอนิกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบสมรรถนะของกระบวนการค้นหา

Case	Method	*Error
No white noise	FFT	4.210E-27
	Tabu	0.000152***
Add white noise 1: **SNR = 12 dB	FFT	769.709
	Tabu	473.538
Add white noise 2: SNR = 25 dB	FFT	217.323
	Tabu	133.966
Add white noise 3: SNR = 50 dB	FFT	17.869
	Tabu	13.6634

$$* Error = \sum_{n=0}^{19} \left( (A_n^{real} - A_n^{method})^2 + (B_n^{real} - B_n^{method})^2 \right)$$

method คือการจำลองแบบด้วยกระบวนการ FFT และ Tabu

\*\*SNR คืออัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณรบกวน

$$SNR = 10 * \log \left( \frac{\sum_{m=1}^{128} (i_L^{real}(m))^2}{\sum_{m=1}^{128} (i_L^{noise}(m) - i_L^{real}(m))^2} \right) \quad (16)$$

$i_{Lnoise}$  คือค่ากระแสที่ได้จากการตรวจวัดจริงรวมกับสัญญาณรบกวน

\*\*\* ค่าคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากเงื่อนไขยุติการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบคาบ โดยค่าเงื่อนไขยุติการค้นหาคือ  $cost < 0.01$

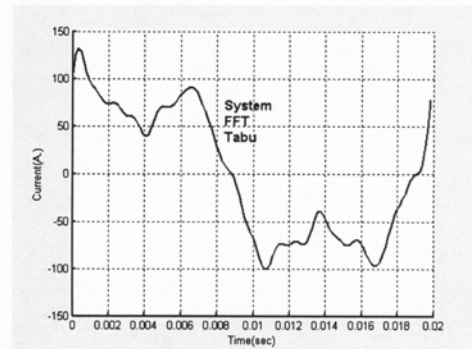
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของจำนวนการสวิตซ์ในหนึ่งคาบสัญญาณ

No. of Switching	error	time(sec)
11	621.57	9.67
31	283.57	116.33
51	73.85	256.33
71	76.39	329.33
91*	67.50	862

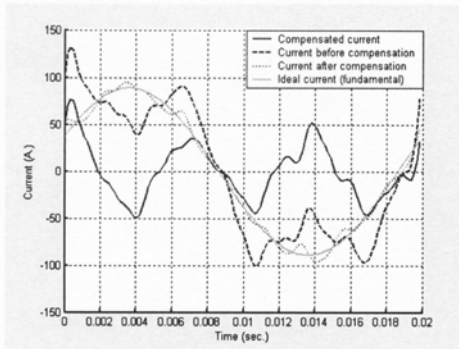
\*ในการสวิตซ์จำนวน 91 ครั้งใช้เวลาเกินมาตรฐานของ [10]

### 6. สรุป

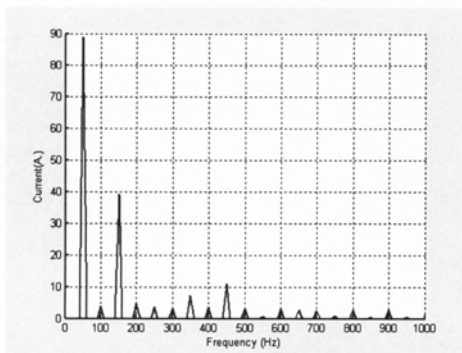
จากผลการทดสอบการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก โดยวิธี FFT กับวิธีการค้นหาแบบคาบสรุปได้ว่า ในการตรวจวัดสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวนขาวนั้น วิธีการตรวจวัดแบบ FFT และวิธีการค้นหาแบบคาบสามารถตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิก ที่ให้ค่าความถูกต้องสูงดังแสดงในตารางที่ 2 ในส่วนของการตรวจวัดสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนขาวปะปนอยู่นั้น การตรวจวัดโดยวิธีการค้นหาแบบคาบสามารถให้การตรวจวัดที่ถูกต้องมากกว่าวิธีการตรวจวัดแบบ FFT ดังแสดงในตารางที่ 2 และจากผลการทดสอบการหารูปแบบการทำงานของสวิตซ์ตัวเก็บประจุซึ่งได้จากวิธีการวิเคราะห์ขยายผลด้วยการค้นหาแบบคาบพบว่าสามารถลดความคิดเฟื้อนเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิก(THD<sub>T</sub> : Total Harmonic Distortion) จากเดิม 48.04% เหลือเพียง 3.52% ส่งผลให้ค่ากระแสของระบบลดลง 9.519% (6.6276 A<sub>rms</sub>) จาก 69.6231 A<sub>rms</sub> เหลือเพียง 62.9955 A<sub>rms</sub> ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการค้นหาแบบคาบสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกได้จริง



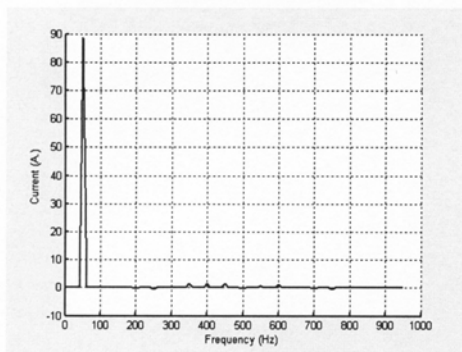
รูปที่ 6 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสไฟฟ้าเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวนขาว



รูปที่ 7 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการชดเชย



รูปที่ 8 สเปกตรัมความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกก่อนการชดเชย



รูปที่ 9 สเปกตรัมความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกหลังการชดเชย

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Arsoy, S.M. Halpin, Y. Liu and F.R. Paulo, "Modeling and simulation of power system harmonics," [CD-ROM]. *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation Harmonic Working Group Transmission & Distribution Committee IEEE Power Engineering Society*. 1999.

[2] A.G. Timothy, "Harmonic power flow determination using the fast fourier transform," *IEEE Transaction on Power Delivery.*, vol. 6(2), pp. 530-535,1991.

[3] F. Glover, "Tabu Search, in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems," C.R. Reeves ed., *John Willey & Sons, Inc.*, 1993.

[4] J. Arrillaga, D.A. Bradley, and P.S. Bodger, "Power System Harmonics," *New York: John Willey & Sons, Inc.*, 1985.

[5] Y. Qi-Wen, L. Feng, Z. Guo-Hong, and J. Jing-Ping, "The application of computational intelligence to fourier transformation," *IEEE Conf. Electronics, Circuits and Systems 2000.*, pp.178-181, 2000.

[6] P. Mehta, M. Darwish and T. Thomson, "Switched-Capacitor Filters," *IEEE Transaction on power electronics.*, vol. 5(3), pp. 331-336, 1990.

[7] M. Welsh, P. Mehta and M.K. Darwish, "Genetic algorithm and extended analysis optimization techniques for switched capacitor active filter – Comparative study," *IEE Proceedings - Electric Power Applications.*, vol. 147(1), pp. 21-26, 2000.

[8] V.V. Seed, "Advanced digital signal processing and noise reduction," *New York: John Willey & Sons, Inc.*, 2000.

[9] C.B. Sidney, H.M. James, V.O. Alan, W.S. Thomas and W.S. Hans, "Computer-Based Exercises for Signal Processing Using MATLAB," *New Jersey: Prentice-Hell, Inc.*, 1994.

[10] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม. กพผ. กพภ. กพน., 2541.



การประยุกต์เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์

ชูชาติ วุฒินทรเนติรักษ์ B.Eng. (EE) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2542 ปัจจุบันกำลังศึกษา M.Eng. (EE) ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ การอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า การบริหารจัดการคุณภาพระบบไฟฟ้ากำลัง การควบคุมระบบไฟฟ้า



ดร.อนันต์ อุ่นศิริไฉย B.Eng. (EE) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ.2529 M.Eng. (EE) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปี พ.ศ. 2535 Ph.D. (Electrical & Computer Engineering) จาก Dalhousie University ประเทศแคนาดา ในปี พ.ศ. 2543 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการเทคโนโลยีและอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ การประยุกต์เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์กับปัญหาทางวิศวกรรมไฟฟ้า การประมวลผลสัญญาณการหาค่าเหมาะที่สุด ระบบไฟฟ้ากำลัง

## ประวัติผู้เขียน

นายชูชาติ วุฒิเนตรเนตรรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 กันยายน พ.ศ. 2520 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดราชบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2542 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยที่ปรึกษาในโครงการเร่งรัดปรับปรุงประสิทธิภาพอุตสาหกรรมขนาดกลาง และขนาดย่อม เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นเวลา 1 ปี และทำงานในตำแหน่งอาจารย์พิเศษ สอนวิชาปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นเวลา 4 ปี ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโทได้รับเงินอุดหนุนจากกองทุนวิจัยและพัฒนาเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2545 จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 3 บทความ