

วงจรรอกำลังไฮบริดเพื่อลดทอนฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์
เหนี่ยวนำเฟสเดียว

นายศุภกร วิศวกรรมธร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

**A HYBRID POWER FILTER FOR HARMONIC
MITIGATION IN A SINGLE-PHASE
INDUCTION MOTOR DRIVE**

Soupagorn Visawaphatradhanadhorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

วจนรกรองกำล้งไฮบริดเพื่อลดทอนฮาร์มอณิกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์
เหนียวนำเฟสเดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไต้)

ประธานกรรมการ

(ศ. น.ท. ดร.สรารุฒิ สุจิตจร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.กองพล อารีรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชุกิจ ลิ้มปีจันงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภกร วิศวภัทรชนนร : วงจรกรองกำลังไฮบริดเพื่อลดทอนฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อน
มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (A HYBRID POWER FILTER FOR HARMONIC
MITIGATION IN A SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร, 116 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีวงจรกรองกำลังไฮบริดเพื่อลดทอนฮาร์มอนิกในกระแสของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ใช้อินเวอร์เตอร์ทางการค้า โดยมีเป้าหมายของการปรับปรุงฮาร์มอนิกให้ได้ตาม IEEE Std 519-1992 ที่พิกัดทำงานของมอเตอร์ การออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟใช้วิธีการสร้างแผนภาพคอนทัวร์ วงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกได้กว่า 80% ในขณะที่การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธี SWFA สามารถคำนวณหากระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องและมีความเร็วสูง วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกให้เหลืออยู่เพียง 2.9% เท่านั้น และมี PF เท่ากับ 1.00 อาจสรุปได้ว่าวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถลดทอนฮาร์มอนิกได้มากกว่า 90% นอกจากนี้ยังพบว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟสามารถลดพิกัดกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้เกือบถึง 80% อีกด้วย



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SOUPAGORN VISAWAPHATRADHANADHORN : A HYBRID POWER
FILTER FOR HARMONIC MITIGATION IN A SINGLE-PHASE
INDUCTION MOTOR DRIVE. THESIS ADVISOR :
PROF. WNG. CMDR. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D., 116 PP.

HARMONIC/HYBRID POWER FILTER/CONTOUR-BASED METHOD/SLIDING
WINDOW FOURIER ANALYSIS/AC DRIVE

This thesis is concerned with the development of a hybrid power filter technology to suppress the harmonic current in a single-phase induction motor drive via a commercial inverter. The works are aimed to improve the harmonics to be complied with the IEEE Std 519-1992 when the motor is working at its rated. The passive power filter is designed via the contour method. The developed filter can reduce the harmonic current by more than 80%. The SWFA method of harmonic identification rapidly provides very accurate compensating currents. The developed active power filter can further reduce the harmonic current to 2.9%, while the input power factor is 1. To sum up, the developed hybrid power filter can effectively reduce the harmonic by more than 90%, and the passive power filter can reduce the required power ratings of the active power filter by more than 80%.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 ทัศนวิสัยวรรณกรรม.....	3
1.7.1 การกำจัดสาร്മอนิกด้วยวงจรถองกำลังพาสซีฟ.....	4
1.7.2 การกำจัดสาร്മอนิกด้วยวงจรถองกำลังแอกทีฟ.....	5
1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสาร്മอนิก.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 ความหมายของสาร്മอนิก.....	8
2.3 แหล่งกำเนิดและผลเสียของสาร്മอนิก.....	11
2.3.1 แหล่งกำเนิดสาร്മอนิก.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2	ผลเสียที่เกิดจากฮาร์มอนิก.....	12
2.4	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสและแรงดัน.....	14
2.5	แนวทางการกำจัดฮาร์มอนิก	16
2.5.1	วงจรกรองกำลังพาสซีฟ.....	17
2.5.2	วงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	19
2.5.3	วงจรกรองกำลังไฮบริด	20
3	ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบปรับความเร็วได้.....	21
3.1	บทนำ.....	21
3.2	การทดสอบลักษณะสมบัติทางธรรมชาติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	21
3.3	วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	22
3.4	การทดสอบและหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	30
3.4.1	การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวด.....	30
3.4.2	การทดสอบบล็อกโรเตอร์	30
3.4.3	การทดสอบสภาวะไร้โหลด.....	30
3.4.4	การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบ.....	31
3.4.4.1	การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบ บล็อกโรเตอร์โดยเปิดวงจรของขดลวดช่วย.....	31
3.4.4.2	การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบ บล็อกโรเตอร์โดยเปิดวงจรของขดลวดหลัก.....	33
3.4.4.3	การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบ สภาวะไร้โหลดโดยเปิดวงจรของขดลวดช่วย.....	33
3.5	การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์ ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	36
3.6	สรุป.....	41
4	วงจรกรองกำลังไฮบริด	42
4.1	บทนำ.....	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	การออกแบบวงจรรองกำลังพาสซีฟด้วยวิธีแผนภาพคอนทัวร์.....	42
4.3	การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์วินโดว์เลื่อนสำหรับ วงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	54
4.4	การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังไฮบริด	57
4.5	สรุป.....	63
5	ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ.....	64
5.1	บทนำ.....	64
5.2	การตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า.....	64
5.3	การตรวจวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้า.....	70
5.4	การ์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	74
5.5	วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก	78
5.6	วงจรรองกำลังพาสซีฟ.....	80
5.7	ซอฟต์แวร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก	80
5.8	วงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	82
6	ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกและอภิปรายผล	85
6.1	บทนำ.....	85
6.2	ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบปรับความเร็วได้.....	85
6.2.1	ผลการทดสอบวงจรรองกำลังไฮบริด ณ จุดปฏิบัติงาน ของมอเตอร์.....	86
6.2.2	ผลการทดสอบวงจรรองกำลังไฮบริดที่ค่าโหลด และความเร็วรอบต่างๆ ของมอเตอร์.....	90
6.3	สรุป.....	93
7	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	95
7.1	สรุป.....	95
7.2	ข้อเสนอแนะ	98

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	99
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า.....	102
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....	105
ประวัติผู้เขียน	116



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบจำหน่ายทั่วไปพิกัดแรงดันตั้งแต่ 120 โวลต์ ถึง 69,000 โวลต์ (IEEE Std 519-1992).....15
2.2	ข้อกำหนดของแรงดันฮาร์มอนิกในสภาวะการทำงานปกติ (IEEE Std 519-1992)16
3.1	ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวด30
3.2	ผลการทดสอบบล็อกโรเตอร์และทดสอบสภาวะไร้โหลด31
3.3	พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว Mitsubishi SP-KR ½ hp 200V _{rms} /50Hz.....35
3.4	ระดับสัญญาณอาร์เอ็มเอสของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก อันดับที่ 1 ถึง 31 ที่พิกัดโหลด38
3.5	ระดับกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกจากการใช้อินเวอร์เตอร์ที่พิกัดโหลด38
4.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรรอกำลังพาสซีฟจากการจำลองสถานการณ์.....53
5.1	รายละเอียดพอร์ตรับข้อมูลแอนะล็อก P5 และ P9 ของ eZdsp™ F281275
5.2	รายละเอียดพอร์ตไอโอ P7 ของ eZdsp™ F2812.....76
5.3	รายละเอียดพอร์ตไอโอ P4 และ P8 ของ eZdsp™ F2812.....76
5.4	ขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 และรหัสควบคุมซึ่งออกแบบตาม ตารางความจริง (truth table) ของ DAC71279
6.1	เปรียบเทียบกระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้าและตัวประกอบกำลัง ก่อนและหลังใช้ วงจรรอกำลังแบบต่าง ๆ (วัดที่จุด PCC โดย FLUKE 434).....89
6.2	ผลการทดสอบวงจรรอกำลังไฮบริดที่ระดับโหลดและความเร็วรอบต่าง ๆ.....92

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนาน 18
2.2	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองแบบเลือกกรองความถี่เดียวชนิดขนาน 18
2.3	ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองแบบเลือกกรองความถี่เดียวชนิดอนุกรม 19
2.4	วงจรกรองกำลังแอกทีฟ 20
2.5	วงจรกรองกำลังไฮบริด 20
3.1	การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบลักษณะสมบัติทางธรรมชาติของมอเตอร์ เหนี่ยวนำเฟสเดียว 21
3.2	วงจรสมมูลแบบสองขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 23
3.3	วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 25
3.4	วงจรสมมูลโดยประมาณขณะทำการทดสอบบล็อกโรเตอร์ ขณะเปิดวงจรขดลวดช่วย 31
3.5	วงจรสมมูลของการทดสอบสถานะไร้โหลดโดยเปิดวงจรของขดลวดช่วย 34
3.6	กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกับความเร็วรอบมอเตอร์ จากการทดสอบและคำนวณ 35
3.7	ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัด ณ จุดต่อร่วม (PCC) 36
3.8	สัญญาณกระแส และแรงดันที่ป้อนให้กับชุดขับเคลื่อน ณ จุดต่อร่วม $220.6V_{rms}/4.66A_{rms}$ 37
3.9	ตัวประกอบกำลัง ณ จุดต่อร่วมที่ค่าโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์ 39
3.10	ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม ณ จุดต่อร่วม ที่ค่าโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์ 39
3.11	ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม ณ จุดต่อร่วม ที่ค่าโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์ 40
4.1	โครงสร้างวงจรกรองกำลังพาสซีฟต่อขนานแบบทั่วไป 43
4.2	โครงสร้างวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ 43
4.3	แบบจำลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเมื่อติดตั้ง วงจรกรองกำลังพาสซีฟในโปรแกรม PSIM TM 44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	แบบจำลอง SIMULINK สำหรับใช้ส่งข้อมูลจาก PSIM™ ไปยัง MATLAB™44
4.5	โปรแกรมสั่งการจำลองสถานการณ์และประมวลผลข้อมูลที่เกี่ยวข้อง46
4.6	แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมการจำลองสถานการณ์และประมวลผล ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง47
4.7	แผนภาพคอนทัวร์ของค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม THD _I (%)48
4.8	แผนภาพคอนทัวร์ของค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม THD _V (%)48
4.9	แผนภาพคอนทัวร์ของค่าตัวประกอบกำลัง PF49
4.10	แผนภาพคอนทัวร์ของแรงดันดีซีบัสของอินเวอร์เตอร์ V _{DC} (V)49
4.11	แผนภาพคอนทัวร์แสดงขอบเขตของ THD _I ที่สามารถเลือก ได้ตามเงื่อนไขของ PF และ V _{DC} 51
4.12	แผนภาพคอนทัวร์แสดงพื้นที่ที่สามารถเลือกพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด51
4.13	ลักษณะสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการจำลองสถานการณ์ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง ทำการกรองด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟในกรณีที่ 6 (L _f = 105mH และ C _f = 10μF)54
4.14	แผนภาพแทนกระบวนการคำนวณสัมประสิทธิ์ A ₁ และ B ₁ ในแต่ละรอบ การชักตัวอย่าง56
4.15	แบบจำลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเมื่อติดตั้ง วงจรกรองกำลังไฮบริดในโปรแกรม PSIM™58
4.16	รายละเอียดโปรแกรมภาษาซี สร้างเป็น DLL Block ใช้งานกับ PSIM™ (ก) การคำนวณตามอัลกอริทึม SWFA (ข) การคำนวณค่า RMS ที่อาศัยผลการคำนวณแบบจุดต่อจุด60
4.17	สัญญาณกระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (I _p) กระแสชดเชยฮาร์มอนิก (I _{C2}) และกระแสแหล่งจ่าย (I _s) จำลองด้วย PSIM (มาตราส่วน 5A/DIV)61
4.18	แผนภาพเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากการจำลองสถานการณ์ก่อน และหลังใช้วงจรกรองแบบต่าง ๆ กับ IEEE Std 519-1992 สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังต่ำที่มี I _{sc} / I _L < 2062

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	สัญญาณกระแสไหลเข้าวงจรรอกกำลังพาสซีฟ (I_p) และกระแสชดเชย ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (I_{c2}) (ก) ก่อนติดตั้ง (ข) หลังติดตั้ง วงจรรอกกำลังพาสซีฟ 62
5.1	อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า LEM LTS 15-NP 64
5.2	สัญญาณที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (Ch1:8A/DIV และ Ch2:5A/DIV) 65
5.3	กราฟลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า LEM LTS 15-NP 66
5.4	วงจรปรุงแต่งสัญญาณสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส 66
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของวงจร ปรุงแต่งสัญญาณ 67
5.6	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรุงแต่งสัญญาณเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จาก โพรบวัดกระแส (Ch1: $4\sqrt{2}$ A/DIV และ Ch2:5A/DIV) 69
5.7	สัญญาณที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (Ch1:100V/DIV และ Ch2:5V/DIV) 70
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตรวจวัดกับแรงดันเอาต์พุตของวงจร ปรุงแต่งสัญญาณ 71
5.9	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรุงแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดปริมาณ แรงดันไฟฟ้า (Ch1:200V/DIV และ Ch2:207.42V/DIV) 74
5.10	การจัดเรียงพินของพอร์ตรับข้อมูลแอนะล็อก P5 และ P9 ของ eZdsp™ F2812 75
5.11	การจัดเรียงพินของพอร์ตไอโอ P4 P7 และ P8 ของ eZdsp™ F2812 77
5.12	การเชื่อมต่อพอร์ตไอโอของการ์ด DSP กับไอซี DAC712 79
5.13	ฮาร์ดแวร์ของวงจรรอกกำลังพาสซีฟ (ก) ตัวเหนี่ยวนำ และ (ข) ตัวเก็บประจุ 80
5.14	แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี SWFA บนการ์ด DSP 81

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15	อัตราขยาย (เดซิเบล) ของวงจรถยายกำลัง.....83
5.16	มุมเฟส (องศา) ของวงจรถยายกำลัง.....83
5.17	วงจรถยายกำลังที่ใช้เป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟในงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....84
6.1	ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ.....86
6.2	สัญญาณกระแสของแหล่งจ่าย (I_S) ก่อนการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังใด ๆ.....87
6.3	สัญญาณกระแสของแหล่งจ่าย (I_S) หลังการชดเชยด้วยวงจ กรองกำลังพาสซีฟ87
6.4	สัญญาณกระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (I_p) กระแสชดเชย ฮาร์มอนิก (I_{C2}) และกระแสแหล่งจ่าย (I_S) หลังการชดเชยด้วย วงจรกรองกำลังไฮบริด.....88
6.5	แผนภาพเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกก่อนและหลังใช้วงจรกรองกำลัง แบบต่าง ๆ กับ IEEE Std 519-1992 สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังต่ำ ที่มี $I_{sc} / I_L < 20$88
6.6	สัญญาณกระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (I_p) กระแสชดเชย ฮาร์มอนิก (I_{C2}) และกระแสแหล่งจ่าย (I_S) ที่ระดับโหลด และความเร็วรอบต่าง ๆ ของมอเตอร์.....91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องให้ความสนใจเพราะหากไฟฟ้ามีคุณภาพต่ำย่อมหมายถึง การใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ อาจทำงานอย่างไม่ถูกต้องหรือเสียหายได้ ทุกวันนี้ปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้ายิ่งทวีความรุนแรงเนื่องจากการใช้สวิตชิงพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (switching power converter) กันมากทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือนที่มีการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่ออำนวยความสะดวกซึ่งพ่วงเอาพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์ไว้ในตัว

ปัจจุบันอุตสาหกรรมขนาดเล็กและกลางในประเทศไทย มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวกันมาก เพราะสามารถใช้กับไฟฟ้า 220 V_{rms}/50 Hz ได้สะดวก การใช้งานมักควบคู่กับอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็ว อินเวอร์เตอร์เป็นพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งสร้างปัญหาทางฮาร์มอนิกหากไม่ได้รับการดูแลอย่างถูกต้อง อีกทั้งไม่ได้ช่วยให้มอเตอร์และชุดขับเคลื่อนมีค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้นเท่าใดนัก หมายถึงระบบขับเคลื่อนมีค่าตัวประกอบกำลังประมาณ 0.8 หรือต่ำกว่า ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลให้คุณภาพไฟฟ้าในระบบต่ำลง ดังนั้นเทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าซึ่งจะวัดด้วยปริมาณฮาร์มอนิกและค่าตัวประกอบกำลังที่จุดต่อรวมหรือ (PCC) จึงมีความสำคัญ งานวิจัยนี้จึงเป็น โครงการที่ค้นคว้าและศึกษาวิจัยเกี่ยวกับค่าตัวประกอบกำลังและฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น อันเป็นผลมาจากการใช้อินเวอร์เตอร์ทางการค้า เพื่อขับเคลื่อนเหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบให้ปรับความเร็วได้ ซึ่งจะมุ่งเน้นการพัฒนา นวัตกรรมต้นแบบในการกำจัดฮาร์มอนิกให้ได้ตามมาตรฐานสากล คือ IEEE Std 519-1992 โดยในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวงจรกรองกำลังพาสซีฟและวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อนำมาใช้ร่วมกันในการกำจัดฮาร์มอนิก หรือเรียกโดยรวมว่าวงจรกรองกำลังไฮบริด เพื่อให้ได้คุณภาพไฟฟ้าที่ดีที่สุดหรืออยู่ใน IEEE Std 519-1992 ซึ่งจะเป็นการลดการพึ่งพาการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศตลอดจนเตรียมความพร้อมสำหรับปัญหาที่จะเกิดขึ้นในระยะปานกลางและระยะยาวเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษารายละเอียดการเกิดฮาร์มอนิกและปริมาณฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ใช้อินเวอร์เตอร์ทางการค้า
- 2) เพื่อศึกษารายละเอียดด้านตัวประกอบกำลังในระบบขับเคลื่อนดังกล่าว
- 3) เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีต้นแบบ วงจรกรองกำลังไฮบริดสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกทั้งแรงดันและกระแสให้ได้ตาม IEEE Std 519-1992

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) การคำนวณใด ๆ ที่มีความซับซ้อนในงานวิจัยนี้จะอาศัยโปรแกรม MATLAB™ เป็นเครื่องมือในการคำนวณ
- 2) การจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวแปลงผันและวงจรส่วนอื่น ๆ จะใช้โปรแกรม PSIM™ และโปรแกรม MATLAB™
- 3) การทดสอบการทำงานของต้นแบบวงจรกรองกำลังไฮบริดที่สร้างขึ้นจะทดสอบกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วย PWM อินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบ พิกัดไม่เกิน $5 A_{rms}$
- 4) การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ จะใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟร่วมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟ
- 5) การคำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมจะอ้างอิงรูปคลื่นแรงดันและกระแสจริงที่บันทึกไว้ได้ด้วยออสซิลโลสโคป โดยจะคำนวณ %THD_v และ %TDD ตลอดจนคำนวณค่าตัวประกอบกำลังอย่างสอดคล้องกัน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ดำเนินการทดสอบระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (1/2 hp) โดยใช้ชุดขับเคลื่อนที่มีขายตามท้องตลาด (FRECON F002i-2x) เพื่อตรวจวัดผลกระทบทางด้านฮาร์มอนิก และตัวประกอบกำลัง ขณะที่มีมอเตอร์รับโหลดต่าง ๆ กัน ในย่าน 50-110%
- 2) ดำเนินการแก้ไขปัญหาเบื้องต้นด้วยการออกแบบและติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนานและอาจเพิ่มเติมวิธีการอื่นที่เห็นว่าเหมาะสม โดยพิจารณาที่จุดปฏิบัติการ 100% โหลด
- 3) พัฒนางจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ให้ใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟเพื่อควบคุมฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันที่ PCC ให้ได้ตาม IEEE Std 519-1992 สำหรับสภาวะ

โหลดที่ 100% ซึ่งมีแนวทางการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีตามที่ปรากฏในงานวิจัยของ กองพล อารีรักษ์ (2549)

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1) สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องในเรื่องการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟและวงจรกรองกำลังพาสซีฟ
- 2) ดำเนินการศึกษาลักษณะฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยการทดสอบและวัดกับระบบจริง
- 3) ดำเนินการศึกษาและออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟและแอกทีฟโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้กรองฮาร์มอนิกที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ได้ทำการศึกษาเบื้องต้น
- 4) ดำเนินการสร้างวงจรกรองกำลังตามที่ได้ออกแบบไว้
- 5) ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของวงจรกรองกำลังพาสซีฟและแอกทีฟ
- 6) ดำเนินการแก้ไขปรับปรุงคุณสมบัติของวงจรกรองกำลังพาสซีฟและแอกทีฟ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ต้นแบบของวงจรกรองกำลังไฮบริดเพื่อใช้ในการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบที่มีการใช้อินเวอร์เตอร์ทางการค้า ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียว
- 2) เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีทางการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแบบไฮบริดเพื่อการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียว
- 3) ได้เผยแพร่ผลงานวิจัยในระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.7 ทัศนวิสัยวรรณกรรม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเป็นการพัฒนาวงจรกรองกำลังไฮบริด เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนแบบปรับความเร็วได้ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ทางการค้า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย มาตรฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก ตลอดจนผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณบดีนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้แก่ ฐานข้อมูล IEEE และ IEE เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์มอนิก

ในวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งเป็นสองแนวทางของการพัฒนาเทคโนโลยี คือ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟ และการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.7.1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟ

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟในงานวิจัยนี้จะเน้นที่วงจรกรอง LC เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดจากวงจรเรียงกระแสเฟสเดียว ที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุเพื่อลดแรงดันกระแสเพื่อทางด้านเอาต์พุตดีซี วงจรประเภทนี้มักพบในอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน เช่น ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวแบบปรับความเร็วได้ ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในงานวิจัยนี้ ดังเช่น วงจรกรอง LC ในงานวิจัยของ Moo, Cheng, and Guo (1997) ได้นำเสนอการหาค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดโดยการนำวงจรสมมูลของระบบเมื่อมีการใส่วงจรกรอง LC มาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทำการจำลองสถานการณ์เพื่อสร้างแผนภาพคอนทัวร์ของตัวประกอบกำลัง ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม และค่าแรงดันดีซีเอาต์พุต เมื่อมีการแปรผันค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ ทำให้สามารถเห็นภาพรวมของคุณภาพไฟฟ้าของระบบในมุมมองกว้าง และสามารถระบุพารามิเตอร์ของวงจรกรองที่ทำให้คุณภาพไฟฟ้าออกมาดีที่สุดได้ รูปแบบของวงจรกรองประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำหนึ่งตัวต่ออนุกรมกับวงจรเรียงกระแส และตัวเก็บประจุหนึ่งตัวต่อขนานกับวงจรเรียงกระแสหลังตัวเหนี่ยวนำ งานวิจัยของ Ji and Wang (1998) ได้นำเสนอวงจรกรอง LC แบบใหม่สำหรับวงจรเรียงกระแสเฟสเดียว วงจรกรองมีลักษณะเป็นโครงข่าย LC เรโซแนนซ์ขนาน ซึ่งต่ออนุกรมกับวงจรเรียงกระแส และมีตัวเก็บประจุอีกหนึ่งตัวต่อขนานกับวงจรเรียงกระแสหลังโครงข่ายเรโซแนนซ์ดังกล่าว ซึ่งได้ถูกออกแบบให้จำกัดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่สาม ส่วนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานหน้าวงจรเรียงกระแสได้รับการออกแบบเพื่อชดเชยกำลังรีแอกทีฟและยังสามารถซึมซับกำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน (distortion power) ของระบบได้อีกด้วย ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสดีขึ้น งานวิจัยของ Chen (2003) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบวงจรกรอง LC แบบใหม่โดยอาศัยจินตคณิตอัลกอริทึม (GA) ช่วยในการระบุค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่นเดียวกับวิธีการของ Moo แต่จะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาก ในขณะที่ได้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองที่ทำให้คุณภาพไฟฟ้าใกล้เคียงค่าที่ดีที่สุดเช่นเดียวกัน โดยวงจรกรองมีรูปแบบเช่นเดียวกันกับวิธีการของ Moo คือการใช้ตัวเหนี่ยวนำหนึ่งตัวต่ออนุกรมกับวงจรเรียงกระแส และตัวเก็บประจุหนึ่งตัวต่อขนานกับวงจรเรียงกระแสหลังตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้รูปแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟเช่นเดียวกับวิธีการของ Moo และ Chen และจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์สร้างแผนภาพคอนทัวร์เพื่อใช้เลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองที่เหมาะสม

1.7.2 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

Sasaki and Machida (1971) เสนอวิธีการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง โดยใช้วิธีการชดเชยฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ในทางปฏิบัติทำได้โดยการฉีดกระแสฮาร์มอนิกที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อหักล้างกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการแปลงผันกำลังไฟฟ้างกล่าว ซึ่งแตกต่างจากวิธีการใช้วงจรกรองแบบทั่วไป ถือเป็นแนวคิดริเริ่มของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ในเวลาต่อมาวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้มีพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง ทั้งรูปแบบทางโครงสร้างและหลักการควบคุมการจ่ายกระแสชดเชยฮาร์มอนิก รวมถึงวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก (harmonic identification) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญและจำเป็นสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ในการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกมีหลายวิธีด้วยกัน ดังต่อไปนี้

ในงานวิจัยของ Furuhashi, Okuma, and Uchikawa (1990) ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power) หรือวิธี PQ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก โดยในงานวิจัยนี้ได้นิยามความหมายทางกายภาพของกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งขึ้นใหม่ด้วยในงานวิจัยของ Lin, Chen, and Huang (1992) ได้เสนออัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD (synchronous detection) ในการคำนวณหากระแสชดเชยฮาร์มอนิก ซึ่งมีทั้งหมดสามรูปแบบ คือ รูปแบบกำลังไฟฟ้าเท่ากัน (equal power) รูปแบบกระแสเท่ากัน (equal current) และรูปแบบความต้านทานเท่ากัน (equal resistance) ซึ่งต่อมาในปี 1994 ผู้วิจัยคณะเดิมได้ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD คำนวณหากระแสชดเชยฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบสามเฟสแบบไม่สมดุลด้วย และในงานวิจัยของ Chen, Lin, and Huang (1994) ได้เสนออัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งในการหากระแสชดเชยโดยพิจารณาระบบสามเฟสแบบไม่สมดุลเช่นกัน ซึ่งต่อมา Peng, Ott, and Adams (1998) ได้ใช้วิธีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งในรูปทั่วไป (generalized instantaneous reactive power) ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ซึ่งวิธีนี้ไม่ต้องอาศัยการแปลงเมตริกซ์ ในงานวิจัยของ Takeda, Ikeda, Teramoto, and Aritsuka (1998) ได้เสนออัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ โดยการแปลงกระแสโพลสามเฟสให้อยู่บนแกน D และ Q (d-q orthogonal coordinates) แล้วจึงใช้วงจรกรองผ่านสูง (high-pass filter) แยกองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิก เพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงชดเชยฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิก และชดเชยกำลังรีแอกทีฟของระบบได้เป็นอย่างดี งานวิจัยของ EL-Habrouk and Darwish (2001) ได้เสนออัลกอริทึม SWFA (sliding window Fourier analysis) สำหรับการคำนวณการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบเวลาจริง ซึ่งสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ได้รวดเร็ว

กว่าวิธี FFT (fast Fourier transform) มาก โดยคำนวณเฉพาะองค์ประกอบมูลฐาน และหักลบกับกระแสไหลดทั้งหมดทำให้ได้กระแสชดเชยอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ในงานวิจัยของ Chang, Chen, and Chu (2002) ได้เสนออัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีโครงอ้างอิง abc (a-b-c reference frame) การคำนวณกระแสชดเชยฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ค่อนข้างง่าย แต่ผลเสียประการหนึ่งของวิธีนี้ คือเมื่อคลื่นแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกจะมีความคลาดเคลื่อนสูงตามไปด้วย ต่อมาในงานวิจัยของ Sujitjorn, S., Areerak, K-L., and Kulworawanichpong, T. (2007) ได้นำเสนออัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF (DQ axis with Fourier) โดยวิธีนี้ได้ผสานข้อดีของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ และ SWFA เข้าไว้ด้วยกันทำให้ได้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่ดีที่สุด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึม SWFA ซึ่งมีความเร็วในการคำนวณสูงและความคลาดเคลื่อนต่ำ ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกตามแนวทางของ EL-Habrouk and Darwish ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยทฤษฎีอนุกรมฟูรีเยร์ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และทฤษฎีเกี่ยวกับอัลกอริทึม SWFA ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4

1.8 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บทและ 2 ภาคผนวก **บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน ปรัชญา วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมถึงเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2 นำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก อธิบายความหมายของฮาร์มอนิก นิยามของฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ แหล่งกำเนิดและผลเสียของฮาร์มอนิก วิธีการกำจัดฮาร์มอนิก รวมถึงข้อกำหนดและมาตรฐานฮาร์มอนิก ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบปรับความเร็วได้โดยประกอบด้วย วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว การทดสอบลักษณะสมบัติทางธรรมชาติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว การทดสอบและหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว และผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

บทที่ 4 นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วยการออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟ การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (SWFA) ในวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด

บทที่ 5 นำเสนอ โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบวงจรกรองที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้า การเชื่อมต่อกับ DSP กับอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรแปลงสัญญาณ และการเชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกกับการ์ด DSP ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่นำมาใช้สร้าง วงจรกรองกำลังพาสซีฟ ซอฟต์แวร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกและโครงสร้างของวงจร กรองกำลังแอกทีฟ ตลอดจนผลตอบสนองทางความถี่

บทที่ 6 นำเสนอผลการกำจัดฮาร์มอนิกโดยการทดสอบวงจรกรองกำลังไฮบริดที่พัฒนาขึ้น กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบปรับความเร็วได้

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า

ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา



บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

2.1 บทนำ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้า มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการทำความเข้าใจความหมายที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกและคุณภาพไฟฟ้า รวมถึงต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและผลเสียของฮาร์มอนิกเมื่อเกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีเบื้องต้น นิยาม ความหมายและข้อกำหนดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก แหล่งกำเนิดและผลเสียของฮาร์มอนิก ตลอดจนแนวทางในการกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับงานวิจัยนี้

2.2 ความหมายของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า คือ รูปคลื่นสัญญาณของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของคลื่นสัญญาณความถี่มูลฐาน เช่น ระบบไฟฟ้าของประเทศไทยมีความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz ฮาร์มอนิกอันดับที่สองมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่มูลฐาน คือ 100 Hz ฮาร์มอนิกอันดับที่ห้ามีความถี่เป็นห้าเท่าของความถี่มูลฐาน คือ 250 Hz เป็นต้น โดยปกติคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายมาจากผู้ผลิต (การไฟฟ้าฯ) จะมีรูปสัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์ เมื่อเกิดฮาร์มอนิกขึ้นในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้า จะทำให้สัญญาณกระแสหรือแรงดันไฟฟ้านั้นมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์เนื่องมาจากผลรวมของคลื่นสัญญาณไฟฟ้ามูลฐาน 50 Hz กับฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ สาเหตุของการเกิดฮาร์มอนิกนั้นมักเกิดจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์หรือโหลดไม่เป็นเชิงเส้นในระบบ

ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกนั้น ได้นำทฤษฎีอนุกรมฟูรีเยร์มาประยุกต์ใช้ โดยทั่วไปสัญญาณที่มีลักษณะเป็นรายคาบใด ๆ สามารถเขียนแทนด้วยอนุกรมตรีโกณมิติ สามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (2.1) ดังนี้ (De La Rosa, 2006; Enrique and Manuel, 2001)

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_1 t) + b_h \sin(h\omega_1 t)] \quad (2.1)$$

เมื่อ $f(t)$ หมายถึง ฟังก์ชันที่มีลักษณะเป็นรายคาบใด ๆ ซึ่งอาจแทนด้วยสัญญาณของกระแสหรือแรงดัน สมการที่ (2.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (2.2)

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [c_h \sin(h\omega_1 t + \phi_h)] \quad (2.2)$$

โดยที่ $\omega_1 = 2\pi f_1$, $c_0 = \frac{a_0}{2}$, $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$, $\phi_h = \tan^{-1}(\frac{a_h}{b_h})$ และสามารถหาค่า a_0, a_h, b_h

ได้จากสมการที่ (2.3) ถึง (2.5) ตามลำดับ

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.3)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_1 t) dt \quad (2.4)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_1 t) dt \quad (2.5)$$

โดยที่ h คือ อันดับของฮาร์มอนิก $h = 1, 2, 3, \dots, \infty$

c_0 คือ องค์ประกอบของสัญญาณคิซี

c_h คือ ขนาดของฮาร์มอนิกอันดับที่ h

ϕ_h คือ มุมเฟสของฮาร์มอนิกอันดับที่ h (เรเดียน)

f_1 คือ ความถี่มูลฐานของสัญญาณ (เฮิรตซ์)

T คือ คาบของสัญญาณที่ความถี่มูลฐาน (วินาที)

ขนาดอาร์เอ็มเอสของฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.6) และค่าอาร์เอ็มเอสของฟังก์ชัน $f(t)$ สามารถเขียนอยู่ในเทอมขององค์ประกอบของฮาร์มอนิกทุกอันดับ ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$c_{h(rms)} = \sqrt{\frac{a_h^2 + b_h^2}{\sqrt{2}}} \quad (2.6)$$

$$F_{(rms)} = \sqrt{\left(c_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h^2 \right)} \quad (2.7)$$

นอกจากนี้ยังมีฮาร์มอนิกแบบอื่น ๆ อีกดังนี้ (Arrillaga and Watson, 2003)

อินเตอร์ฮาร์มอนิก (interharmonic) คือ ส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของสัญญาณความถี่มูลฐาน เนื่องจากคาบของเวลาไม่เท่ากัน ในทุกคาบ ซึ่งจะพบได้ในโหลดประเภทเตาหลอมแบบอาร์ค

คาแรคเตอร์สติกฮาร์มอนิก (characteristic harmonic) คือ ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าหรือสวิตชิงพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมักใช้อุปกรณ์สวิตซ์สารกึ่งตัวนำ โดยจะมีอันดับของฮาร์มอนิกเป็นไปตามสมการที่ (2.8)

$$h = kp \pm 1 \quad (2.8)$$

โดยที่ h คือ อันดับของฮาร์มอนิก

k คือ เลขจำนวนเต็มบวกใด ๆ 1,2,3,....

นั่นคาแรคเตอร์สติกฮาร์มอนิก (non-characteristic harmonic) คือ ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า หรือสวิตชิงพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์ โดยที่อันดับของฮาร์มอนิกจะไม่เป็นไปตามสมการที่ (2.8)

ทริเพลนฮาร์มอนิก (tripplen harmonic) คือ กลุ่มของฮาร์มอนิกที่มีอันดับที่หารด้วยเลขสามลงตัว เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 6 และ 9 เป็นต้น จัดอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ (zero sequence) ซึ่งในระบบสามเฟสสี่สาย ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้จะไหลรวมอยู่ในสายนิวตรอน

2.3 แหล่งกำเนิดและผลเสียของฮาร์มอนิก

2.3.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าสาเหตุของการเกิดฮาร์มอนิกนั้นมักเกิดจากอุปกรณ์หรือโหลดไม่เป็นเชิงเส้น กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้จะมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่สำคัญในปัจจุบันมีดังนี้ (Arrillaga and Watson, 2003)

- อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน ตัวเหนี่ยวนำ และหม้อแปลงไฟฟ้า โดยภายใต้สภาวะการทำงานปกติจะไม่ทำให้เกิดปัญหาทางด้านฮาร์มอนิก แต่ในสภาวะการทำงานผิดปกติชั่วขณะจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังได้ เช่น ในสภาวะที่เกิดแรงดันเกิน เป็นต้น

- เตาหลอมแบบอาร์ค (arc furnace) ตัวอย่างอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ เตาหลอมไฟฟ้าและเครื่องเชื่อมไฟฟ้า โดยฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ประเภทนี้มีลักษณะที่ไม่สามารถคาดเดาได้ เนื่องจากกระแสของโหลดประเภทนี้ไม่เป็นรายคาบ และจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพบว่าอันดับของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดประเภทนี้ประกอบไปด้วย อันดับที่เป็นจำนวนเต็ม (harmonic) และอันดับที่ไม่เป็นจำนวนเต็ม (interharmonic) โดยเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับต่ำเริ่มตั้งแต่อันดับ 2 ถึง 7 จะพบมากในโหลดเตาหลอม

- ตัวชดเชยวาร์แบบสถิต (static VAR compensator) อุปกรณ์ประเภทนี้ทำหน้าที่ชดเชยกำลังรีแอกทีฟปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบ โดยอาศัยการสวิตช์ของเอสซีอาร์เพื่อจ่ายกำลังรีแอกทีฟชดเชยให้กับระบบ การสวิตช์ของเอสซีอาร์เป็นตัวการสำคัญในการเกิดฮาร์มอนิกและมักพบฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7

- ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (cycloconverter) อุปกรณ์ประเภทนี้เป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ อาศัยการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีความซับซ้อน โดยจะเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนความถี่ของไซโคลคอนเวอร์เตอร์

- แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซิง (switching mode power supplies) อุปกรณ์ประเภทนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม เช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เครื่องสำรองไฟ อุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์ ซึ่งภายในมักประกอบด้วยตัวเก็บประจุ กระแสทางด้านอินพุตของอุปกรณ์ประเภทนี้จะไม่ต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดฮาร์มอนิกของกระแสปริมาณมาก

- ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพีดีดับลิวเอ็ม (pulse width modulated drive) อุปกรณ์ประเภทนี้ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส และใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ในการลดแรงดันกระแสเพื่อทางด้านดิซีเอาต์พุต กระแสจะไหลผ่านไดโอดที่ต่อเมื่อแรงดันทางด้านอินพุตมีค่าสูงกว่าแรงดัน

ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งทำให้กระแสทางคานอินพุตมีความไม่ต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดฮาร์มอนิกของกระแสปริมาณมาก

2.3.2 ผลเสียที่เกิดจากฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกเมื่อเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าใดแล้วย่อมเกิดผลกระทบในทางลบกับระบบไฟฟ้านั้น นอกจากนั้นยังสามารถแพร่กระจายผลกระทบดังกล่าวไปยังระบบของผู้จำหน่าย (การไฟฟ้าฯ) รวมถึงระบบที่อยู่ข้างเคียงได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้ผลกระทบอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกจึงมีความสำคัญยิ่งที่ต้องหาทางแก้ไข โดยปัญหาที่สำคัญที่เกิดจากฮาร์มอนิกมีดังต่อไปนี้ (สุทธิชัย เปรมฤดีปริษาชาล, 2544)

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า

- ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์มอนิกเนื่องจากผลของเรโซแนนซ์อนุกรมและขนาน
- ทำให้การผลิต (generation) การส่ง (transmission) และการใช้ (utilization) กำลัง

ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพลดลง

- ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ เป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง
- ทำให้โรงจักรไฟฟ้าทำงานผิดพลาด

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลงไฟฟ้า

- กระแสฮาร์มอนิกทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (stray flux loss) มีค่าเพิ่มขึ้น
- แรงดันฮาร์มอนิกทำให้กำลังสูญเสียกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current-loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) เพิ่มขึ้น
- ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ (ที่ความถี่ฮาร์มอนิก) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับตัวเก็บประจุของสาย (line capacitor)

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

- ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าร้อนกว่าปกติ
- มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเมื่อมีการใช้แหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์จะสร้างคลื่นความหนาแน่นแม่เหล็ก (flux density wave) ออกมาทำให้เกิดการแผ่รังสีคลื่นสัญญาณรบกวนอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีแหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์
- คู่ของฮาร์มอนิก (harmonics pair) เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 มีศักยภาพทำให้เกิดการสั้นเชิงกล รวมถึงทำให้เกิดแรงบิดเรโซแนนซ์ด้วย

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อชุดตัวเก็บประจุ

- ทำให้เกิดความร้อนความเครียดไดอิเล็กทริก (dielectric stress) กับตัวเก็บประจุอย่างมาก และความผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันทำให้เกิดกำลังสูญเสียในตัวเก็บประจุ
- ตัวเก็บประจุอาจเกิดความเสียหายเนื่องจากทำงานเกินพิกัดกำลัง
- อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุอาจเปลี่ยนไป สามารถทำให้เกิดเรโซแนนซ์ในระบบ

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อฟิวส์

- กระแสฮาร์มอนิกจะก่อให้เกิดความร้อนอย่างมากในตัวฟิวส์ ทำให้ลักษณะสมบัติทางเวลา-กระแสของฟิวส์เปลี่ยนไปอย่างมาก เวลาในการหลอมละลายของฟิวส์อาจลดลงจนเกิดการทำงานผิดพลาดของฟิวส์

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อรีเลย์

- ฮาร์มอนิกมีแนวโน้มทำให้รีเลย์มีการทำงานช้าลง และมีค่าเริ่ม (pickup value) ที่สูงแทนที่จะทำงานได้อย่างรวดเร็ว
- ฮาร์มอนิกทำให้แรงบิดทำงานของรีเลย์กลับทิศทาง
- ฮาร์มอนิกทำให้อิมพีแดนซ์รีเลย์ชนิดคานสมดุล (balanced beam impedance-relay) วัดระยะที่เกิดฟอลต์ผิดพลาดมากเกินไป (overreach) หรือน้อยเกินไป (underreach)
- ฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (overcurrent and overvoltage relays) มีลักษณะสมบัติการทำงานเปลี่ยนแปลงไป

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

- มิเตอร์และเครื่องวัดต่าง ๆ ก่อนการเริ่มใช้ต้องทำการปรับแต่งที่กระแสไฟฟ้าสลับรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่มูลฐาน ดังนั้นถ้ามีมิเตอร์มาใช้กับระบบที่มีฮาร์มอนิกค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาดหรือกรณีที่เกิดเรโซแนนซ์ในระบบเป็นผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกค่าสูงในวงจรทำให้มิเตอร์ประเภทงานเหนี่ยวนำ (induction disk) เช่น มิเตอร์วัดค่า-ชั่วโมง (watt-hour meter) ทำงานผิดพลาด

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสื่อสาร

- ฮาร์มอนิกก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร ทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำก่อให้เกิดความรำคาญ เช่น มีเสียงรบกวนในระบบโทรศัพท์ แต่สัญญาณรบกวนระดับสูงจะทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจทำให้เกิดการสูญเสียข่าวสารที่ส่งไปหรือทำให้ระบบสื่อสารใช้การไม่ได้

2.4 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสและแรงดัน

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมใช้บอกระดับความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดฮาร์มอนิกโดยเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่าง ค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของส่วนประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ กับค่าส่วนประกอบที่ความถี่มูลฐานหรือที่ฮาร์มอนิกอันดับหนึ่ง โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของค่าความเพี้ยนดังกล่าว สามารถแยกเป็นค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (total harmonic current distortion, THD_I) และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (total harmonic voltage distortion, THD_V) ดังในสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.9)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.10)$$

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2.11)$$

- โดยที่ V_h คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h
 I_h คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h
 V_1 คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน
 I_1 คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสที่ความถี่มูลฐาน
 I_L คือ ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสโหลดรวมที่ความถี่มูลฐาน (ได้จากการวัดภายใน 15 ถึง 30 นาที แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย)

ระดับความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดฮาร์มอนิกยังสามารถแสดงในรูปของ ค่าความเพี้ยนกระแสตามความต้องการ โหลดรวม (total demand distortion, TDD) การคำนวณค่าความเพี้ยนกระแส

ตามความต้องการโหลดรวมจะคำนวณตามสมการที่ (2.11) โดยที่ I_L ในสมการที่ (2.11) คือค่ากระแสโหลดที่ความถี่มูลฐานรวมตามความต้องการสูงสุดของผู้ใช้ (วัดค่าเฉลี่ยของกระแสโหลดรวมตามความต้องการสูงสุดของระบบภายใน 15 ถึง 30 นาที) นอกจากดัชนีบ่งบอกระดับความรุนแรงของการเกิดฮาร์โมนิกยังมีข้อกำหนดและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาร์โมนิกดังนี้

ในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องกำหนดปริมาณฮาร์โมนิกที่ยอมรับได้ของกระแสและแรงดัน เนื่องจากเราไม่สามารถกำจัดกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกให้หมดไปจากระบบไฟฟ้าได้โดยสมบูรณ์ ด้วยเหตุผลทางด้านค่าใช้จ่ายที่จะสูงมากเกินไปจนความจำเป็น การกำหนดเป้าหมายของคุณภาพพลังงานไฟฟ้าควรให้เป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติที่ได้รับการยอมรับ ซึ่งในปัจจุบันมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับมาตรฐานหนึ่ง คือ IEEE Std 519-1992 ซึ่งจะใช้เป็นมาตรฐานเป้าหมายของงานวิจัยนี้ IEEE ได้แบ่งเป็นมาตรฐานกระแสฮาร์โมนิก และมาตรฐานแรงดันฮาร์โมนิก ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ (IEEE Std 519-1992a; 1993b; Hoevenaars, LeDoux, and Colosino, 2003; Blooming and Carnovale, 2007)

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์โมนิกสำหรับระบบจำหน่ายทั่วไปพิกัดแรงดันตั้งแต่ 120 โวลต์ ถึง 69,000 โวลต์ (IEEE Std 519-1992)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percentage of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	< 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
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above						
Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed						
*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L						
where I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC						
I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC						

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดของแรงดันฮาร์มอนิกในสภาวะการทำงานปกติ (IEEE Std 519-1992)

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE : High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is and HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for user.

2.5 แนวทางการกำจัดฮาร์มอนิก

ถ้าสามารถจำกัดให้ภายในระบบไฟฟ้า ณ จุดใดจุดหนึ่ง หรือทั้งระบบมีการสร้างฮาร์มอนิกออกมาไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด นั่นหมายถึงคุณภาพไฟฟ้าโดยรวมด้านฮาร์มอนิกภายในระบบดีขึ้น ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น เกิดการสูญเสียในระบบน้อยลง ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพและไม่ผิดพลาด สามารถลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานและค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้ วิธีการกำจัดหรือแก้ปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้านั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีการพื้นฐานในการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิก ได้แก่

- 1) เพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- 2) ทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ที่ต้องการไหลไปยังเส้นทางอื่นไม่ให้ไหลไปที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- 3) ใช้วิธีการผสมทั้งสองวิธีข้างต้น
- 4) สร้างกระแสฮาร์มอนิกขึ้นมาหักล้างกันในระบบ

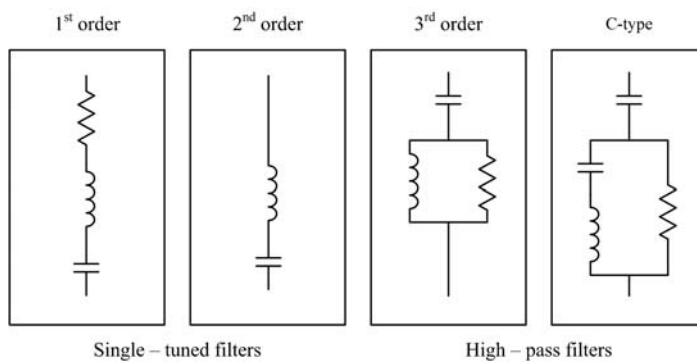
อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะติดตั้งอุปกรณ์ลดทอนฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สร้างกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละตัว หรือจะติดตั้งที่สวิตช์หลักของอาคารก็จะส่งผลดีต่อระบบไฟฟ้าของผู้จำหน่ายและระบบข้างเคียงเช่นเดียวกันทั้งสองกรณี แต่จะให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมากกับระบบไฟฟ้าของผู้ใช้หรือภายในอาคาร ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับระบบไฟฟ้าภายในอาคาร จึงควรติดตั้งอุปกรณ์ลดทอนกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก ในตำแหน่งที่ใกล้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สร้างกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกให้มากที่สุด เนื่องจากการติดตั้งวิธีนี้ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สร้างกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกต้องการพลังงานฮาร์มอนิกและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่ำสุด กระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบจะมีความเพี้ยนน้อยที่สุด ส่งผลให้คุณภาพพลังงานไฟฟ้าโดยรวมของระบบไฟฟ้าภายในอาคารของผู้ใช้และระบบของผู้จำหน่ายหรือระบบข้างเคียงมีคุณภาพดีที่สุด

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกวิธีการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด (hybrid power filter, HPF) ซึ่งเป็นการผสมผสานวงจรกรองทั้งแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ เพื่อควบคุมกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกให้อยู่ในข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกมากกว่าการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟเพียงอย่างเดียว โดยมีต้นทุนค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนักหากเทียบกับการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเพียงอย่างเดียว

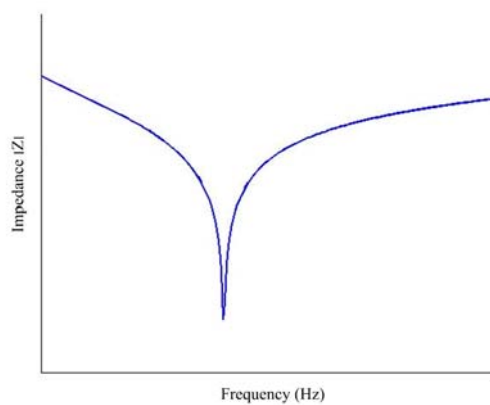
2.5.1 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ

วงจรกรองกำลังพาสซีฟเป็นวงจรกรองที่ใช้อย่างแพร่หลายในการลดทอนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยส่วนใหญ่เป็นวงจรกรองแบบเลือกกรองความถี่เดียว (single-tuned filter) วงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน (band-pass filter) และวงจรกรองแบบบล็อกแถบความถี่ (band-stop filter) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งวงจรกรองทั้งสองแบบมีทั้งแบบขนานและอนุกรม โดยเฉพาะวงจรกรองแบบขนานมักจะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม (De La Rosa, 2006) วงจรกรองชนิดนี้มีลักษณะเฉพาะคือ มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมากเฉพาะที่ความถี่เลือกกรอง (tuning frequency) ซึ่งทำให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านวงจรกรองนี้โดยไม่ไหลกลับไปยังแหล่งจ่าย โดยมีผลตอบสนองทางความถี่แสดงดังรูปที่ 2.2 ในทางกลับกันวงจรกรองแบบเลือกกรองความถี่เดียวชนิดอนุกรมจะมีลักษณะเฉพาะคือ มีค่าอิมพีแดนซ์สูงมากเฉพาะที่ความถี่เลือกกรองเพื่อทำการปิดกั้นกระแสฮาร์มอนิกไม่ให้ไหลกลับสู่แหล่งจ่าย โดยมีผลตอบสนองทางความถี่แสดงดังรูปที่ 2.3

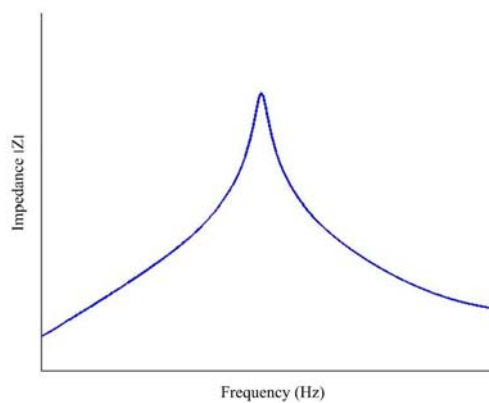
โดยทั่วไปจะใช้วงจรกรองแบบเลือกกรองความถี่เดียวอันดับต่าง ๆ ร่วมกัน เช่น ใช้วงจรกรองแบบเลือกกรองความถี่เดียว อันดับที่ 5 และ 7 ร่วมกับวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่านหรือบล็อกแถบความถี่ ซึ่งข้อควรพิจารณาในการเลือกใช้งานทั้งสองแบบ คือการใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟชนิดขนานนั้นอาจทำให้เกิดกระแสเกินในระบบได้หากมีฮาร์มอนิกเป็นปริมาณมาก ส่วนวงจรกรองกำลังพาสซีฟชนิดอนุกรมอาจทำให้แรงดันตกไม่เพียงพอต่อค่าพิคคของโหลดเนื่องจากรวมกับโหลดตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบอย่างรอบคอบก่อนการสร้างและนำไปใช้งาน (Peng Su and Farquharson, 1999)



รูปที่ 2.1 วงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบขนาน

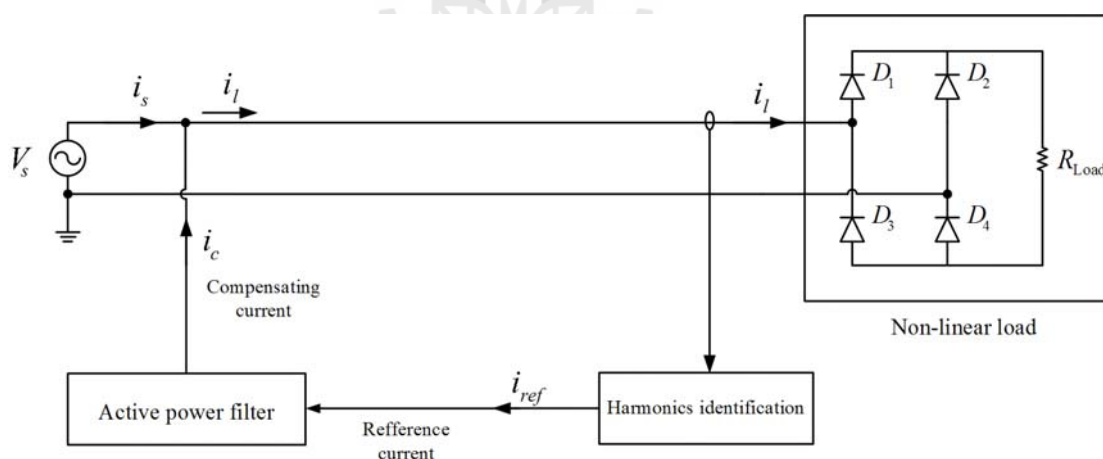


รูปที่ 2.2 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองแบบเลือกกรองความถี่เดียวชนิดขนาน



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองแบบเลือกกรองความถี่เดียวชนิดอนุกรม

หลักการทํางานของวงจรกรองพาสซีฟชนิดเลือกกรองความถี่เดียวจะใช้หลักการทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกรอง โดยใช้การเชื่อมต่อของอุปกรณ์รีแอกทีฟคือตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ วงจรกรองพาสซีฟชนิดขนานใช้หลักการเรโซแนนซ์อนุกรม (series resonance) เพื่อทำให้วงจรกรองมีอิมพีแดนซ์ต่ำสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ส่วนวงจรกรองพาสซีฟชนิดอนุกรมใช้หลักการเรโซแนนซ์ขนาน (parallel resonance) เพื่อทำให้วงจรกรองมีอิมพีแดนซ์สูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรกรองกำลังพาสซีฟมีความง่ายในการออกแบบและมีต้นทุนในการสร้างต่ำ แต่ข้อเสียของวงจรกรองประเภทนี้ก็มีอยู่หลายประการ เช่น ประสิทธิภาพในการกรองฮาร์มอนิกขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของโหลด ซึ่งถ้าโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ฮาร์มอนิกของระบบเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ประสิทธิผลในการกำจัดฮาร์มอนิกไม่เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ นอกจากนี้อาจเกิดสถานะเรโซแนนซ์ในระบบ เนื่องจากวงจรกรองประเภทนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์พาสซีฟประเภทตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมาต่อรวมกัน ซึ่งอุปกรณ์พาสซีฟเหล่านี้อาจเรโซแนนซ์กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายหรือตัวเก็บประจุในคาปาซิเตอร์แบงค์ได้ จากข้อเสียดังกล่าวจึงได้มีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแทนวงจรกรองกำลังพาสซีฟ



รูปที่ 2.4 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

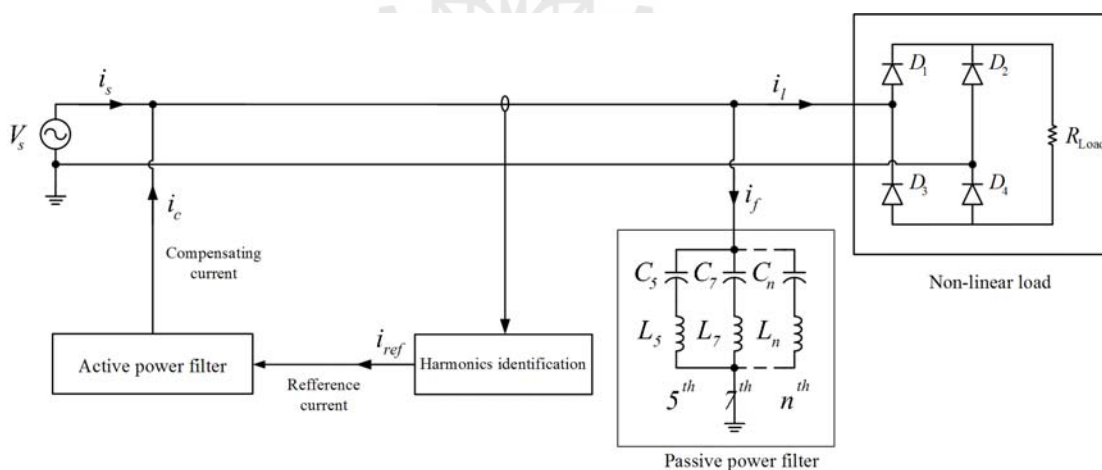
2.5.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีคอนเวอร์เตอร์ในปัจจุบันมีโครงสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์หรืออาจเป็นวงจรขยายกำลังแบบหลายระยะดังแสดงในรูปที่ 2.4 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ ใช้วิธีสร้างกระแสฮาร์มอนิกที่มีลำดับและปริมาณเท่ากับฮาร์มอนิกที่เป็น

ปัญหาในระบบแต่ให้กลับเฟสกันและจ่ายกระแสที่สร้างขึ้นนั้นเข้าไปหักล้างกระแสฮาร์มอนิกในระบบ วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีความยืดหยุ่นสูงกว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ คือสามารถเลือกกรองฮาร์มอนิกลำดับใดก็ได้ตั้งแต่ลำดับที่ 2 ถึง 50 และยังกรองได้ถึง 15-20 ลำดับพร้อม ๆ กัน และประสิทธิภาพในการกรองไม่ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย แต่ปัญหาของการใช้วงจรกรองกำลังชนิดนี้ คือมีต้นทุนที่สูงกว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟมาก โดยเฉพาะที่พิกัดกำลังสูง (Singh, AL-Haddad, and Chandra, 1999; EL-Habrouk, Darwish, and Mehta, 2000; Chen and Xie, 2004; Pakdel, Khoshoei, and Nezhad, 2007) ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกอย่างรอบคอบก่อนการออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยให้มีต้นทุนที่เหมาะสม

2.5.3 วงจรกรองกำลังไฮบริด

ด้วยข้อดีของวงจรกรองกำลังพาสซีฟและแอกทีฟข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟร่วมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟ เรียกโดยรวมว่าวงจรกรองกำลังไฮบริด (hybrid power filter) ดังรูปที่ 2.5 ในการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อประสิทธิภาพในการกรองฮาร์มอนิกที่ดีและต้นทุนไม่สูงจนเกินไป



รูปที่ 2.5 วงจรกรองกำลังไฮบริด

บทที่ 3

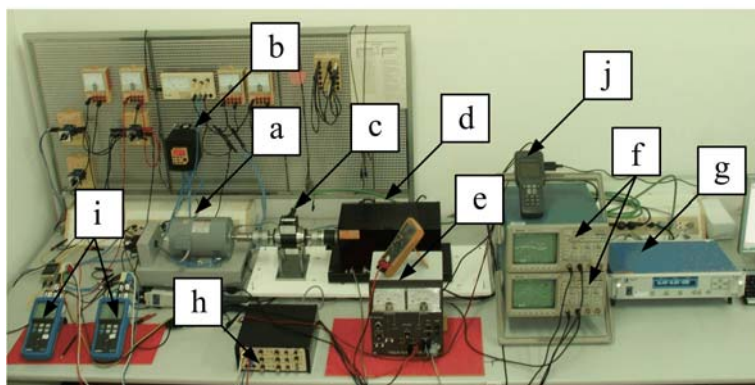
ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบปรับความเร็วได้

3.1 บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลางในประเทศไทยมีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวกันมาก เพราะสามารถใช้กับระบบไฟฟ้า 220 V_{rms}/50 Hz ได้สะดวก การใช้งานมักจะใช้งานควบคู่กับอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็วรอบ อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สร้างปัญหาทางฮาร์มอนิกทำให้ตัวประกอบกำลังของระบบต่ำอย่างเห็นได้ชัด ระบบขับเคลื่อนดังกล่าวจึงถูกเลือกมาใช้ในการประยุกต์การแก้ปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับ วงจรสมมูลและลักษณะสมบัติทางธรรมชาติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ตลอดจนผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ดังกล่าว

3.2 การทดสอบลักษณะสมบัติทางธรรมชาติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ในการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับผลกระทบของฮาร์มอนิก ที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์เพื่อขับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจำเป็นต้องทราบพิกัดการทำงานของมอเตอร์ เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ค่าตัวประกอบกำลังและฮาร์มอนิกที่งานการทำงานต่าง ๆ ของมอเตอร์ได้ โดยการทดสอบลักษณะสมบัติของมอเตอร์จะทดสอบหาความสัมพันธ์ของแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบลักษณะสมบัติทางธรรมชาติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ซึ่งมีอุปกรณ์สำคัญดังต่อไปนี้

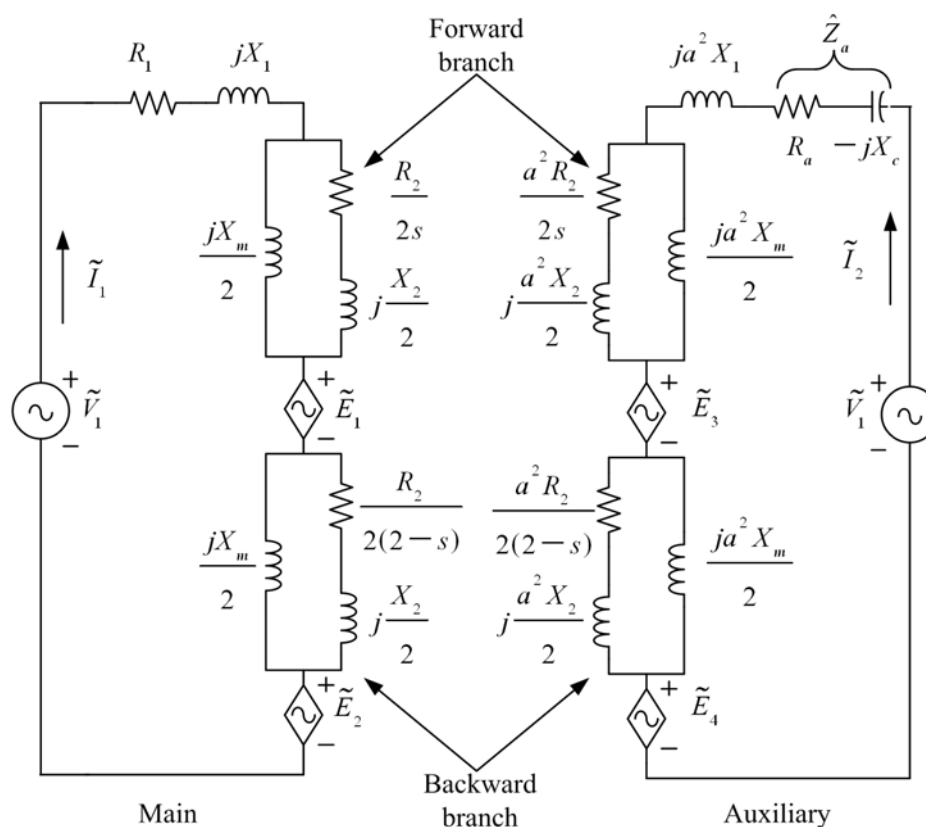
- a คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบสี่โพล พิกัด $220 V_{\text{rms}}$, 50 Hz, $5 A_{\text{rms}}$, 1/2 hp
- b คือ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม พิกัด 2 hp, $7 A_{\text{rms}}$
- c คือ เครื่องวัดแรงบิด พิกัด 100 Nm, 4,000 rpm
- d คือ เครื่องสร้างแรงบิดทางกล พิกัด 25 Nm, $220 V_{\text{rms}}$, 50 Hz
- e คือ อุปกรณ์ควบคุมเครื่องสร้างแรงบิดทางกล
- f คือ ดิจิตอลออสซิลอสโคปสำหรับวัดรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน พิกัด 200 MHz, 100 MS/s, $220 V_{\text{rms}}$, 50 Hz
- g คือ อุปกรณ์แสดงผลการวัด กำลัง แรงบิด และความเร็วรอบ ของเครื่องวัดแรงบิด
- h คือ สวิตช์แยกโคคสัญญาณ (isolating amplifier switch) พิกัดสูงสุด $400 V_{\text{AC}}$
- i คือ เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าและตัวประกอบกำลัง พิกัด $600 V_{\text{rms}}$, $10 A_{\text{rms}}$
- j คือ เครื่องวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าและฮาร์โมนิก พิกัด $600 V_{\text{rms}}$, $1,000 A_{\text{rms}}$

เมื่อทำการเชื่อมต่อมอเตอร์เข้ากับเครื่องวัดแรงบิดและโหลดแล้ว จึงทำการทดลองขับมอเตอร์ที่แรงดันพิกัดของมอเตอร์ คือ $220 V_{\text{rms}}/50 \text{ Hz}$ หลังจากนั้นทำการจ่ายโหลดให้แก่มอเตอร์ ในระหว่างการทดสอบนี้ใช้คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ประมวลผลของเครื่องวัดแรงบิด เก็บค่าแรงบิดและความเร็วรอบ ณ เวลาต่าง ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป (Magtrol, 2001)

3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

นอกจากจะทำการทดสอบจริงกับระบบ ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาลักษณะสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดี่ยวนี้ด้วย เพื่อเปรียบเทียบผลในการคำนวณใช้วงจรสมมูลในสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Guru and Hiziroglu, 2001; Chapman, 2005) เนื่องจากการทดสอบหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองดังกล่าวทำได้ง่าย และสามารถใช้ได้ภายในขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยมอเตอร์มีวงจรสมมูลดังแผนภาพในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีองค์ประกอบต่อไปนี้

- \tilde{V}_1 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่มอเตอร์ (V)
- \tilde{I}_1 คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในขดลวดหลัก (A)
- \tilde{I}_2 คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในขดลวดช่วย (A)
- R_1 คือ ความต้านทานของขดลวดหลัก (Ω)
- R_2 คือ ความต้านทานของโรเตอร์อ้างอิงจากขดลวดหลักขณะโรเตอร์หยุดนิ่ง (Ω)
- R_a คือ ความต้านทานของขดลวดช่วย (Ω)



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลแบบสองขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

- a คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบเอฟเฟกทีฟของขดลวดช่วยกับขดลวดหลัก
- X_1 คือ รีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดหลัก (Ω)
- X_2 คือ รีแอกแตนซ์รั่วไหลของโรเตอร์อ้างอิงจากขดลวดหลัก (Ω)
- X_m คือ แมกนีไทเซชันรีแอกแตนซ์ของมอเตอร์อ้างอิงจากขดลวดหลัก (Ω)
- X_c คือ รีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุช่วย (Ω)
- \hat{Z}_a คือ อิมพีแดนซ์ซึ่งเกิดจากความต้านทานของขดลวดช่วยร่วมกับรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุช่วย (Ω)
- \tilde{E}_1 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกึ่งฟอว์เวิร์ด ของขดลวดหลัก เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าของขดลวดช่วย (V)
- \tilde{E}_2 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกึ่งแบคเวิร์ด ของขดลวดหลัก เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลังของขดลวดช่วย (V)
- \tilde{E}_3 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกึ่งฟอว์เวิร์ด ของขดลวดช่วย เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าของขดลวดหลัก (V)

- \tilde{E}_4 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกึ่งแบคเวอร์ค ของขดลวดช่วย เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลังของขดลวดหลัก (V)
- s คือ สลิปของมอเตอร์

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ของขดลวดช่วยหาได้จากขดลวดหลัก โดยเขียนให้อยู่ในเทอมของ a จากวงจรสมมูลหากต้องการวิเคราะห์สปีดเฟสมอเตอร์ สามารถแทนค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์สตาร์ท $-jX_c$ ด้วยการลัดวงจร โดยจะได้ $\hat{Z}_a = R_a$ ส่วนคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์จะได้ $\hat{Z}_a = R_a - jX_c$ ฟลัวร์เวิร์คและแบคเวอร์ค อิมพีแดนซ์ของขดลวดหลัก (\hat{Z}_f และ \hat{Z}_b ตามลำดับ) สามารถเขียนแสดงได้ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.1) และ (3.2)

$$\hat{Z}_f = R_f + jX_f = 0.5 \frac{jX_m [R_2/s + jX_2]}{R_2/s + j(X_2 + X_m)} \quad (3.1)$$

$$\hat{Z}_b = R_b + jX_b = 0.5 \frac{jX_m [R_2/(2-s) + jX_2]}{R_2/(2-s) + j(X_2 + X_m)} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ใหม่ดังรูปที่ 3.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลักสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

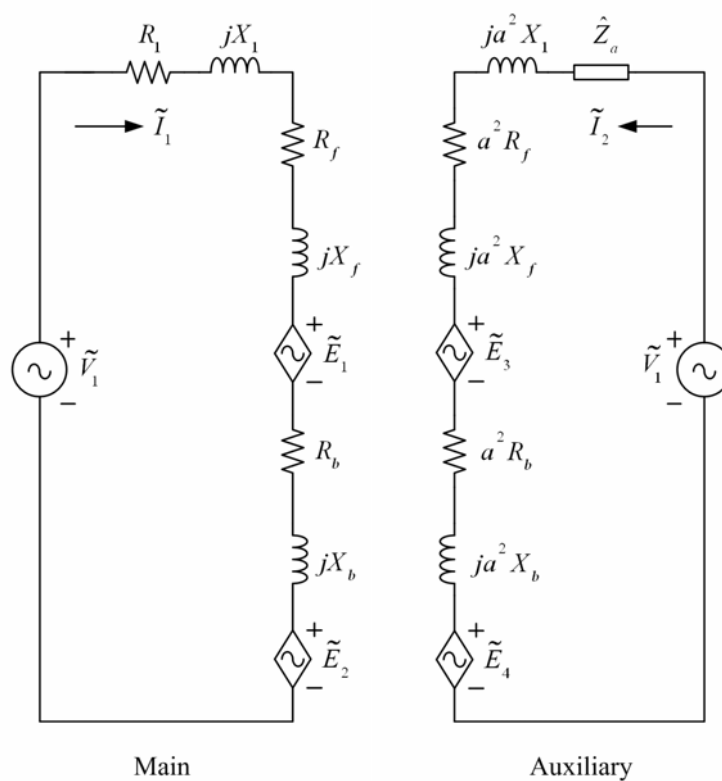
$$\hat{E}_{fm} = \tilde{I}_1 \hat{Z}_f \quad (3.3)$$

$$\hat{E}_{bm} = \tilde{I}_1 \hat{Z}_b \quad (3.4)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดช่วยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\hat{E}_{ja} = \tilde{I}_2 a^2 \hat{Z}_f \quad (3.5)$$

$$\hat{E}_{ba} = \tilde{I}_2 a^2 \hat{Z}_b \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

เมื่อขดลวดช่วยวางตัวทำมุมหน้าขดลวดหลักอยู่ 90° ทางไฟฟ้า จึงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลักที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าของขดลวดช่วยตามหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าของขดลวดช่วยอยู่ 90° ด้วยซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดหลักจะเท่ากับ $1/a$ เท่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดช่วย ดังนั้น

$$\tilde{E}_1 = -j \frac{1}{a} \tilde{E}_{fa} = -ja \tilde{I}_2 \hat{Z}_f \quad (3.7)$$

ในทางกลับกันแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหลักที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลังของขดลวดช่วยจะนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลังของขดลวดช่วยอยู่ 90° ดังนั้น

$$\tilde{E}_2 = j \frac{1}{a} \tilde{E}_{ba} = ja \tilde{I}_2 \hat{Z}_b \quad (3.8)$$

$$\tilde{E}_3 = ja \tilde{I}_1 \hat{Z}_f \quad (3.9)$$

$$\tilde{E}_4 = -ja \tilde{I}_1 \hat{Z}_b \quad (3.10)$$

จากการประยุกต์ใช้กฎแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ Kirchhoff ในวงจรสมมูลตามรูปที่ 3.3 จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_1 (R_1 + X_1) + \tilde{E}_{fm} + \tilde{E}_{bm} + \tilde{E}_1 + \tilde{E}_2 \quad (3.11)$$

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_2 (\tilde{Z}_a + ja^2 X_1) + \tilde{E}_{fa} + \tilde{E}_{ba} + \tilde{E}_3 + \tilde{E}_4 \quad (3.12)$$

แทนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งหมดลงในสมการที่ (3.11) และ (3.12) จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าในรูปอย่างง่าย ดังนี้

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_1 \hat{Z}_{11} + \tilde{I}_2 \hat{Z}_{12} \quad (3.13)$$

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_1 \hat{Z}_{21} + \tilde{I}_2 \hat{Z}_{22} \quad (3.14)$$

โดยที่ $\hat{Z}_{11} = R_1 + jX_1 + \hat{Z}_f + \hat{Z}_b$ (3.15)

$$\hat{Z}_{12} = -ja[\hat{Z}_f - \hat{Z}_b] \quad (3.16)$$

$$\hat{Z}_{21} = ja[\hat{Z}_f - \hat{Z}_b] \quad (3.17)$$

$$\hat{Z}_{22} = \hat{Z}_a + a^2[\hat{Z}_f + \hat{Z}_b + jX_1] \quad (3.18)$$

จะได้สมการกระแสของขดลวดหลักและขดลวดช่วย ดังนี้

$$\tilde{I}_1 = \frac{\hat{V}_1[\hat{Z}_{22} - \hat{Z}_{12}]}{\hat{Z}_{11}\hat{Z}_{22} - \hat{Z}_{12}\hat{Z}_{21}} \quad (3.19)$$

$$\tilde{I}_2 = \frac{\hat{V}_1[\hat{Z}_{11} - \hat{Z}_{21}]}{\hat{Z}_{11}\hat{Z}_{22} - \hat{Z}_{12}\hat{Z}_{21}} \quad (3.20)$$

โดยที่กระแสในสาย \tilde{I}_L มีค่าเท่ากับ

$$\tilde{I}_L = \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 \quad (3.21)$$

และกำลังที่จ่ายให้แก่มอเตอร์มีค่าเท่ากับ

$$P_{in} = \text{Re}[\tilde{V}_1 \tilde{I}_L^*] = \tilde{V}_1 \tilde{I}_L \cos \theta \quad (3.22)$$

กำลังสูญเสียในขดลวดทั้งสอง (stator copper losses) มีค่าเท่ากับ

$$P_{scl} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_a \quad (3.23)$$

กำลังที่กระจายในช่องว่างอากาศ (air-gap power) สามารถหาได้จากการนำกำลังที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ลบออกด้วยกำลังสูญเสียในขดลวดทั้งสอง โดยที่สามารถเขียนแยกเป็นกำลังในช่องว่างอากาศที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสอง ดังนี้

1) กำลังในช่องว่างอากาศที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า (P_{agf})

$$\text{ของขดลวดหลัก } P_{agfm} = \text{Re} \left[(\tilde{E}_{fm} + \tilde{E}_1) \tilde{I}_1^* \right] \quad (3.24)$$

$$\text{ของขดลวดช่วย } P_{agfa} = \text{Re} \left[(\tilde{E}_{fa} + \tilde{E}_3) \tilde{I}_2^* \right] \quad (3.25)$$

$$P_{agf} = P_{agfm} + P_{agfa} \quad (3.26)$$

2) กำลังในช่องว่างอากาศที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหลัง (P_{agb})

$$\text{ของขดลวดหลัก } P_{agbm} = \text{Re} \left[(\tilde{E}_{bm} + \tilde{E}_2) \tilde{I}_1^* \right] \quad (3.27)$$

$$\text{ของขดลวดช่วย } P_{agba} = \text{Re} \left[(\tilde{E}_{ba} + \tilde{E}_4) \tilde{I}_2^* \right] \quad (3.28)$$

$$P_{agb} = P_{agbm} + P_{agba} \quad (3.29)$$

3) กำลังในช่องว่างอากาศ (P_{ag}) รวมทั้งหมคมมีค่าเท่ากับ

$$P_{ag} = P_{agf} - P_{agb} = P_{in} - P_{scl} \quad (3.30)$$

ซึ่ง P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ กำลังแปลงผันจากไฟฟ้าไปเป็นกำลังทางกล (P_{conv})

$$P_{conv} = (1-s)P_{ag} \quad (3.31)$$

แรงบิดเหนี่ยวนำ (torque induce, τ_{ind}) คำนวณได้จาก

$$\tau_{ind} = \frac{P_{ag}}{\omega_{sync}} \quad (3.32)$$

ซึ่ง ω_{sync} คือ อัตราเร็วซิงโครไนต์ (rad/s) กำลังเอาต์พุตของมอเตอร์ (P_{out}) คำนวณได้จาก

$$P_{out} = P_{in} - P_{scl} - P_{rcl} - P_{f\&w} - P_{core} - P_{stray} \quad (3.33)$$

โดยที่ P_{rcl} คือ กำลังสูญเสียในโรเตอร์ (rotor copper loss)

$P_{f\&w}$ คือ กำลังสูญเสียที่เกิดจากแรงต้านอากาศและความเสียดของเพลลา (friction and windage losses)

P_{core} คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss)

P_{stray} คือ กำลังสูญเสียอื่น ๆ นอกเหนือจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น (stray losses or miscellaneous losses)

และสุดท้ายแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ (shaft torque, τ_s) คำนวณได้จาก

$$\tau_s = \frac{P_{out}}{\omega_m} \quad (3.34)$$

ซึ่ง ω_m คือ อัตราเร็วมอเตอร์ (rad/s) จากการวิเคราะห์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่ผ่านมา จุดประสงค์หลักเป็นการคำนวณหาแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ ณ ความเร็วขณะใด ๆ ของมอเตอร์ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับลักษณะสมบัติทางธรรมชาติของมอเตอร์ (torque-speed characteristic) ที่วัดได้จริง โดยก่อนการคำนวณจำเป็นจะต้องทราบพารามิเตอร์ภายในวงจรสมมูลทั้งหมดก่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์

3.4 การทดสอบและหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

การทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์จะทดสอบด้วยวิธีการบล็อกโรเตอร์ (blocked-rotor test) และทดสอบสภาวะไร้โหลด (no-load test) โดยมีวิธีการทดสอบและคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.4.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวด

การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดช่วย R_a และขดลวดหลัก R_1 (DC-test) ทำได้โดยป้อนแรงดันกระแสตรงให้แก่ขดลวดช่วยและขดลวดหลัก โดยทดสอบแยกกันแล้วทำการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านและแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดนั้น แล้วจึงคำนวณหาความต้านทานจากกฎของโอห์ม $R = V_{DC} / I_{DC}$ ซึ่งได้ผลการทดสอบดัง ตารางที่ 3.1

3.4.2 การทดสอบบล็อกโรเตอร์

การทดสอบบล็อกโรเตอร์ คือการทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่ขดลวดขดใดขดหนึ่งในขณะที่ขดลวดอีกขดอยู่ในสภาวะเปิดวงจร จนกระแสที่ไหลในขดลวดนั้นเพิ่มค่าขึ้นถึงกระแสพิคค โดยที่โรเตอร์ของมอเตอร์ต้องอยู่ในสภาวะหยุดนิ่งขณะทำการวัด แล้วจึงวัดค่ากระแส (I_b) แรงดัน (V_b) และกำลังไฟฟ้าจริง (P_b) ที่จ่ายให้แก่ขดลวด ซึ่งต้องทำแยกกันระหว่างขดลวดหลักและขดลวดช่วย ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.2

3.4.3 การทดสอบสภาวะไร้โหลด

การทดสอบสภาวะไร้โหลด คือการทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ที่แรงดันพิคคแล้วจึงทำการวัดค่ากระแส (I_{nl}) แรงดัน (V_{nl}) และกำลังไฟฟ้าจริง (P_{nl}) ที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวด

DC-Test	Voltage (V_{DC})*	Current (A_{DC})	$R=V/I$ (Ω)
Main winding R_1	5	1.328	3.765
	10	2.655	3.766
	average resistance (\bar{R}_1)		3.766
Auxiliary winding R_a	5	0.453	11.038
	10	0.904	11.060
	20	1.790	11.170
	average resistance (\bar{R}_a)		11.090

หมายเหตุ : ไม่สามารถทดสอบที่ระดับแรงดัน 20V_{DC} ได้เนื่องจากขีดจำกัดทางกระแสของแหล่งจ่าย

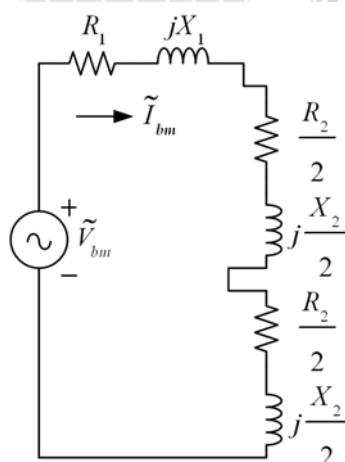
ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบบล็อกโรเตอร์และทดสอบสภาวะไร้โหลด

AC-Test	Voltage (V_{rms})	Current (A_{rms})	Power (W)
No-load test	With auxiliary winding open		
	220.0	3.9	170.0
Blocked-rotor test	68.3	5.0	220.0
Blocked-rotor test	With main winding open		
	55.4	3.0	142.5

3.4.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบ

3.4.4.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบบล็อกโรเตอร์โดยเปิดวงจรของขดลวดช่วย

การทดสอบบล็อกโรเตอร์โดยเปิดวงจรของขดลวดช่วย ขณะทำการทดสอบโรเตอร์จะต้องหยุดนิ่งทำให้สลิปเท่ากับ 1 แทนค่าสลิปลงในความสัมพันธ์วงจรสมมูลตามรูปที่ 3.2 จะได้วงจรสมมูลขณะทดสอบดังรูปที่ 3.4 ขณะทำการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรโรเตอร์มีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแมกนีไทเซชันรีแอกแตนซ์มาก ๆ จึงสามารถประมาณวงจรสมมูลโดยตัดค่าแมกนีไทเซชันรีแอกแตนซ์ดังกล่าวออกไป



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลโดยประมาณขณะทำการทดสอบบล็อกโรเตอร์ ขณะเปิดวงจรขดลวดช่วย

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.4 จะได้

$$Z_{bm} = \frac{V_{bm}}{I_{bm}} = \frac{68.3}{5} = 13.66 \Omega \quad (3.35)$$

ความต้านทานรวมของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$R_{bm} = \frac{P_{bm}}{I_{bm}^2} = \frac{220}{5^2} = 8.8 \Omega \quad (3.36)$$

ค่ารีแอกแตนซ์รวมของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$X_{bm} = \sqrt{(Z_{bm}^2 - R_{bm}^2)} = \sqrt{(13.66^2 - 8.8^2)} = 10.45 \Omega \quad (3.37)$$

จากวงจรสมมูลการทดสอบบล็อกโรเตอร์จะได้

$$R_{bm} = R_1 + R_2 \quad (3.38)$$

$$X_{bm} = X_1 + X_2 \quad (3.39)$$

ดังนั้นค่าความต้านทานของโรเตอร์อ้างอิงไปยังขดลวดหลัก R_2 จะมีค่าเท่ากับ

$$R_2 = R_{bm} - R_1 = 8.8 - 3.766 = 5.034 \Omega \quad (3.40)$$

และรีแอกแตนซ์ X_1, X_2 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{bm}}{2} = \frac{10.45}{2} = 5.225 \Omega \quad (3.41)$$

3.4.4.2 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบบล็อกโรเตอร์โดยเปิดวงจรของขดลวดหลัก

การทดสอบบล็อกโรเตอร์โดยเปิดวงจรของขดลวดหลัก ให้ผลที่สามารถนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกันกับการทดสอบบล็อกโรเตอร์โดยเปิดวงจรของขดลวดช่วยความต้านทานรวมของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$R_{ba} = \frac{P_{ba}}{I_{ba}^2} = \frac{142.5}{3^2} = 15.83 \Omega \quad (3.42)$$

ค่าความต้านทานของโรเตอร์อ้างอิงไปยังขดลวดช่วย R_{2a} จะมีค่าเท่ากับ

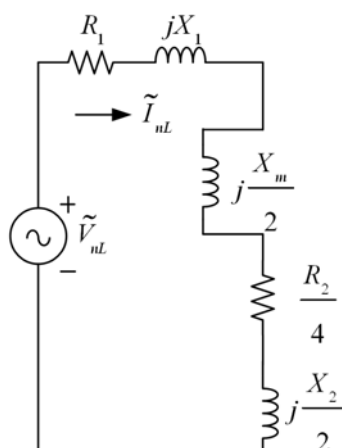
$$R_{2a} = R_{ba} - R_a = 15.83 - 11.09 = 4.74 \Omega \quad (3.43)$$

เมื่อทราบค่าความต้านทานของโรเตอร์อ้างอิงไปยังขดลวดช่วย R_{2a} และขดลวดหลัก R_2 ทำให้สามารถหาค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบเฟล็กที่ฟของขดลวดช่วยกับขดลวดหลัก a -ratio ได้ดังนี้

$$a = \sqrt{\frac{R_{2a}}{R_2}} = \sqrt{\frac{4.74}{5.034}} = 0.97 \approx 1 \quad (3.44)$$

3.4.4.3 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบสภาวะไร้โหลดโดยเปิดวงจรของขดลวดช่วย

การทดสอบสภาวะไร้โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะทำงานด้วยขดลวดหลักเพียงขดลวดเดียวในขณะที่มอเตอร์ไม่มีโหลด ความเร็วของมอเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัสมาก จนสามารถประมาณค่าสลิปของมอเตอร์ขณะนั้นให้มีค่าเป็น 0 ได้และเมื่อแทนค่าสลิปในสภาวะไร้โหลดลงในวงจรสมมูลในรูปที่ 3.2 จะได้วงจรสมมูลขณะทดสอบดังรูปที่ 3.5 ในการทดสอบสภาวะไร้โหลดสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากวงจรสมมูล ได้ดังนี้



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของการทดสอบสถานะไร้โหลดโดยเปิดวงจรของขดลวดช่วย

ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรขณะทำการทดสอบ

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{I_{nl}} = \frac{220}{3.9} = 56.41 \, \Omega \quad (3.45)$$

ค่าความต้านทานรวมของวงจรขณะทำการทดสอบ

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{I_{nl}^2} = \frac{170}{3.9^2} = 11.177 \, \Omega \quad (3.46)$$

ค่ารีแอกแตนซ์รวมของวงจรขณะทำการทดสอบ

$$X_{nl} = \sqrt{(Z_{nl}^2 - R_{nl}^2)} = \sqrt{(56.41^2 - 11.177^2)} = 55.29 \, \Omega \quad (3.47)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.5

$$X_{nl} = X_1 + 0.5X_m + 0.5X_2 \quad (3.48)$$

เมื่อทราบว่า $X_1 = X_2 = 0.5X_{bm}$ จะได้ $X_{nl} = 0.75X_{bm} + 0.5X_m$ ดังนั้นจะได้แมกนีไทเซชันรีแอกแตนซ์เท่ากับ

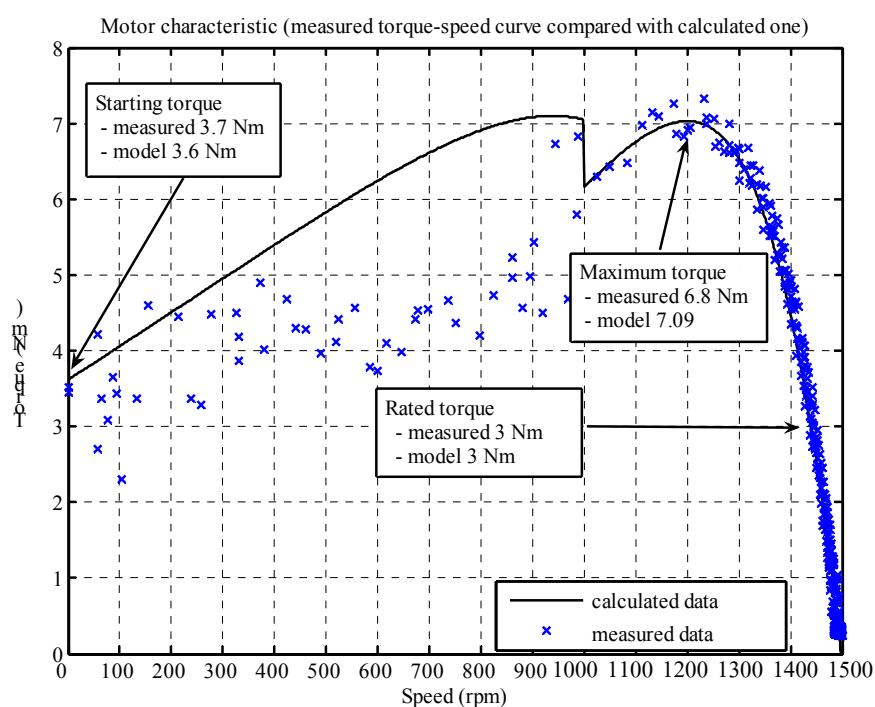
$$X_m = 2X_{nl} - 1.5X_{bm} = 2(55.29) - 1.5(10.45) = 94.905\Omega \quad (3.49)$$

ในลำดับสุดท้ายจะได้พารามิเตอร์ที่จำเป็นทั้งหมดตามวงจรสมมูลในรูปที่ 3.2 เพื่อใช้คำนวณหาลักษณะสมบัติทางธรรมชาติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว Mitsubishi SP-KR ½ hp 200V_{rms}/50Hz

Parameters	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$R_a(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	a
Values	3.766	5.034	11.09	5.225	5.225	94.9	0.97

นำข้อมูลลักษณะสมบัติทางธรรมชาติของมอเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจริงในหัวข้อที่ 3.2 มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้โดยใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 3.6

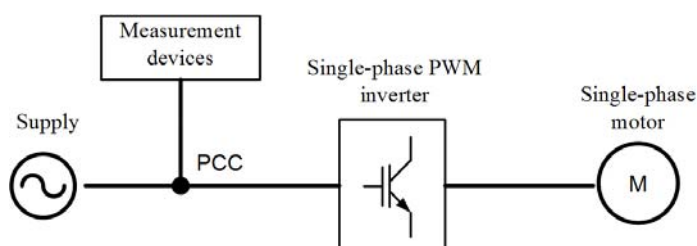


รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกับความเร็วรอบมอเตอร์ จากการทดสอบและคำนวณ

จะเห็นได้ว่าผลจากการคำนวณและการทดสอบจริงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและให้ข้อมูลที่ สำคัญ คือแรงบิดขณะสตาร์ท แรงบิดสูงสุดและแรงบิดพิคคมีค่าใกล้เคียงกัน โดยแรงบิดขณะ สตาร์ทคำนวณได้ 3.6 Nm วัดจริงได้ 3.7 Nm แรงบิดสูงสุดคำนวณได้ 7.09 Nm วัดจริงได้ 6.8 Nm และสุดท้ายแรงบิดพิคควัดที่กระแสพิคคมอเตอร์ $5 A_{rms}/220 V_{rms}/50 Hz$ มีค่าเท่ากับ 3Nm ในขณะที่ การคำนวณจะได้ 3 Nm ที่ $4.78 A_{rms}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันจึงใช้ 3 Nm เป็นพิคคของมอเตอร์ จากรูปที่ 3.6 ในย่านการทำงานของมอเตอร์ที่ความเร็ว 1,300 ถึง 1,500 rpm จะเห็นได้ว่าค่าความชันของกราฟ แรงบิดและความเร็วมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเป็นย่านการทำงานที่อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้ แต่จะให้ค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจนในย่านความเร็วต่ำ เนื่องจากในความเป็นจริงย่อมมีกำลังไฟฟ้า สูญเสียเกิดขึ้นขณะมอเตอร์ทำงาน และจะเกิดกำลังสูญเสียในขดลวดเพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์มีการ ทำงานแบบใช้ทั้งขดลวดช่วยสตาร์ท และขดลวดหลัก กำลังสูญเสียดังกล่าวมีความไม่เป็นเชิงเส้น โดยทั่วไปกำลังสูญเสียของมอเตอร์จะระบุขณะมอเตอร์ทำงานที่พิคคในสภาวะอยู่ตัวเท่านั้น โดยกำลังสูญเสียของมอเตอร์จะน้อยเมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ในย่านพิคคเนื่องมาจากการออกแบบของ ผู้ผลิต แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณจึงให้ผลแตกต่างจากการทดสอบจริงในบางช่วงของ อัตราเร็วรอบการหมุน จากการทดสอบทำให้สามารถระบุค่าพิคคแรงบิดของมอเตอร์ได้ โดยที่พิคค จะคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์โหลดที่ 3 Nm ในการศึกษาวิจัยนี้ยังได้ทำการทดสอบระบบเพื่อเก็บข้อมูลของ ผลกระทบจากฮาร์มอนิกที่ 110 100 80 50 และ 30 เปอร์เซ็นต์โหลดโดยมอเตอร์จะทำงานอยู่ใน ช่วงความเร็วรอบ 1,300 ถึง 1,450 rpm

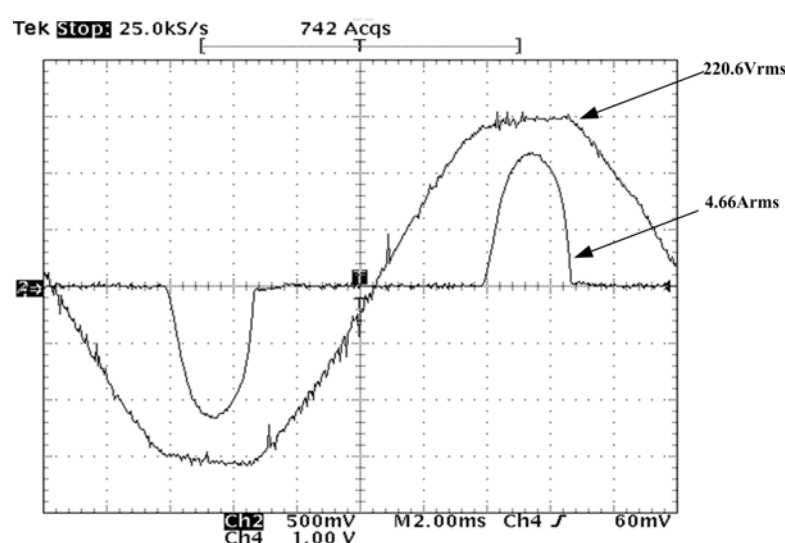
3.5 การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็ว รอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกได้ทำการวัดค่าตัวประกอบกำลัง ค่าความเพี้ยนแรงดัน ฮาร์มอนิกรวม (THD_v) และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_i) โดยได้ทำการทดสอบ วัด ณ จุดต่อร่วมหน้าอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัด ณ จุดต่อร่วม (PCC)

จากผลการทดสอบพบว่าสัญญาณกระแสและแรงดันที่จุดต่อร่วมที่ผิดปกติการทำงานของมอเตอร์ มีลักษณะดังรูปที่ 3.8 วัดโดยออสซิลโลสโคป Tektronic TDS 420A ระดับสัญญาณอาร์เอ็มเอสของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก อันดับที่ 1 ถึง 31 (เป็นอันดับเลขคี่ ส่วนฮาร์มอนิกอันดับเลขคู่มีปริมาณน้อยมากไม่สามารถวัดได้) วัดโดยเครื่องวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิก Fluke 41B สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 ค่าตัวประกอบกำลัง ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม ณ จุดต่อร่วมที่ค่าโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์ แสดงในรูปที่ 3.9 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 สัญญาณกระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับชุดขับเคลื่อน ณ จุดต่อร่วม 220.6 V_{rms}/4.66 A_{rms}

ค่ากระแสและแรงดันอาร์เอ็มเอสในตารางที่ 3.4 สามารถนำไปคำนวณหาค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_I) ตามสมการที่ (2.9) และ (2.10) แต่ข้อกำหนดระดับกระแสฮาร์มอนิกตาม IEEE Std 519-1992 จะถูกกำหนดโดยระดับกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ (individual harmonic current limits) และค่าความเพี้ยนกระแสตามความต้องการโหลดรวม (total demand distortion, TDD) โดยการคำนวณค่า TDD นั้นคำนวณตามสมการที่ (2.11) โดยจะใช้ค่ากระแสพิกัดโหลดที่ความถี่มูลฐานเฉลี่ย I_L ซึ่งวัดได้ 3 A_{rms} แทนลงในสมการที่ (2.11) ส่วนข้อกำหนดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตาม IEEE Std 519-1992 จะถูกกำหนดโดยระดับแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ (individual harmonic voltage limits) และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) ซึ่งระดับกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก ได้ผลคำนวณดังตารางที่ 3.5

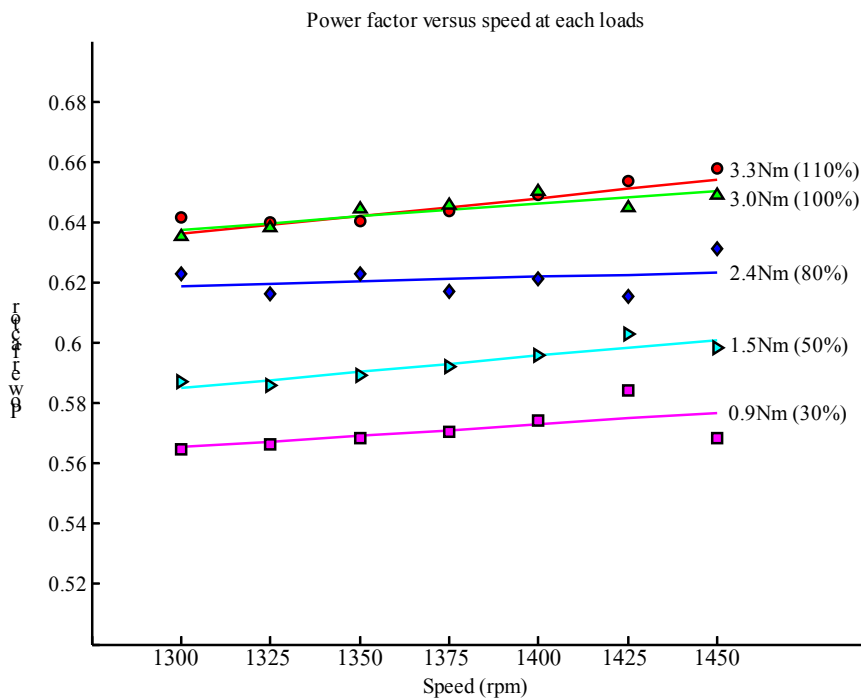
ตารางที่ 3.4 ระดับสัญญาณอาร์เอ็มเอสของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก อันดับที่ 1 ถึง 31 ที่พิกัดโหลด

Harmonic order	1	3	5	7	9	11	13	15
Voltage (Vrms)	222.3125	3.1719	6.4688	3.0938	0.7969	0.5469	1.0313	0.0625
Current (Arms)	3.0869	2.5919	1.7881	0.9469	0.3319	0.2356	0.2369	0.0850
Harmonic order	17	19	21	23	25	27	29	31
Voltage (Vrms)	0.5313	0.1563	0.2500	0.1719	0.0938	0.1406	0.1094	0.0625
Current (Arms)	0.1056	0.2156	0.2069	0.1081	0.0000	0.0881	0.0001	0.0475

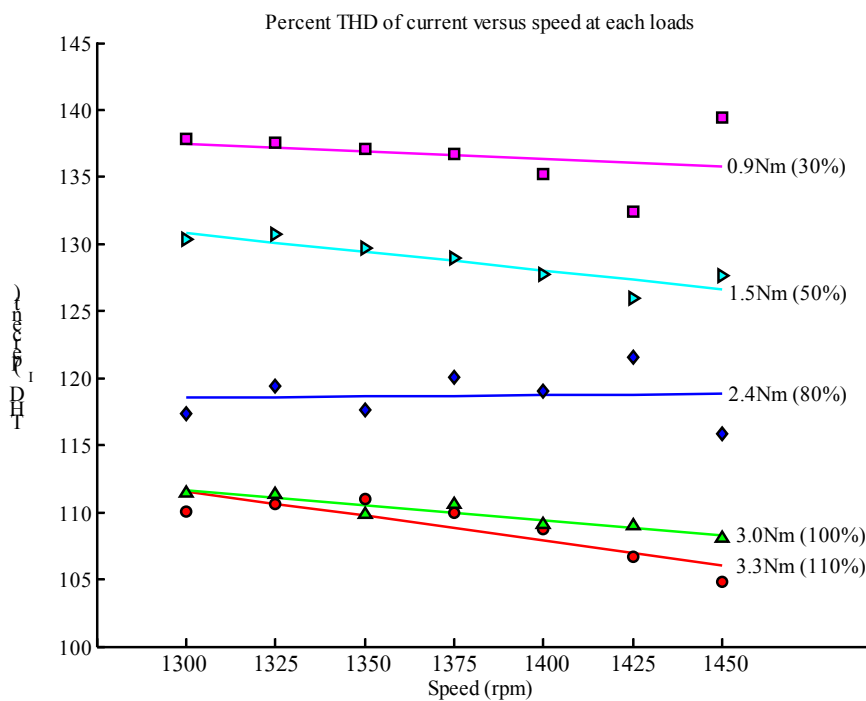
ตารางที่ 3.5 ระดับกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกจากการใช้อินเวอร์เตอร์ที่พิกัดโหลด

Harmonic current distortion (for $I_{sc}/I_L < 20$)															
Individual harmonic order (Odd harmonic)	Individual current distortion in percent of I_L														
	<11				$11 \leq h < 17$			$17 \leq h < 23$			$23 \leq h < 35$				
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
System	83.96	57.93	30.67	10.75	7.633	7.673	2.754	3.422	6.985	6.702	3.503	0.001	2.855	0.003	1.539
IEEE Std. 519-1992	4				2			1.5			0.6				
Total demand distortion in percent of I_L (TDD)															
System	111.37														
IEEE Std. 519-1992	5														
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above															
I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC															
I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC															
Harmonic voltage distortion (for power system 69kV and below)															
Individual harmonic order (Odd harmonic)	Individual voltage distortion in percent of V_1														
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
	System	1.427	2.910	1.392	0.358	0.246	0.464	0.028	0.239	0.070	0.112	0.077	0.042	0.063	0.049
IEEE Std. 519-1992	3														
Total harmonic voltage distortion in percent of V_1 (THD _v)															
System	3.59														
IEEE Std. 519-1992	5														
V_1 = fundamental frequency voltage at PCC															

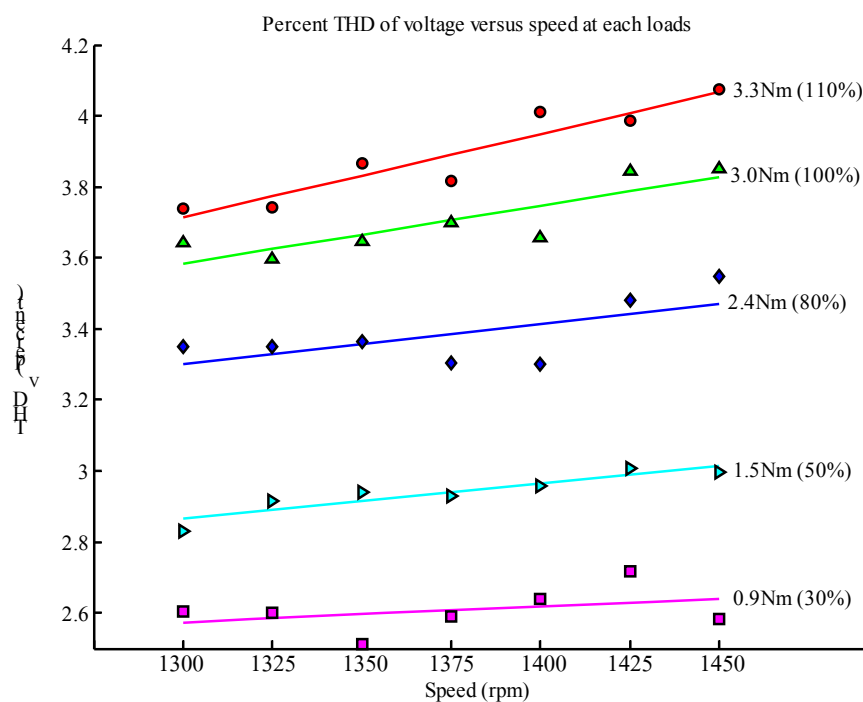
จากผลการวัดที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 พบว่าค่าตัวประกอบกำลัง ณ จุดต่อรวมที่พิกัดของมอเตอร์ 3 Nm (100 เปอร์เซ็นต์โหลด) ความเร็วรอบ 1,443 rpm มีค่าเท่ากับ 0.65 ล้าหลัง ซึ่งถือว่าต่ำ และจากผลการวัดโดยเครื่องวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิก ในรูปที่ 3.10 และ 3.11 พบว่าค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม ณ จุดต่อรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์ทำงานในย่านต่ำกว่าพิกัดโหลด 3 Nm ส่วนค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม ณ จุดต่อรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่อมอเตอร์ทำงานในย่านต่ำกว่าพิกัดโหลด 3 Nm (100%)



รูปที่ 3.9 ตัวประกอบกำลัง ณ จุดต่อร่วม ที่ค่าโหลดต่างๆ ของมอเตอร์



รูปที่ 3.10 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวม ณ จุดต่อร่วม ที่ค่าโหลดต่างๆ ของมอเตอร์



รูปที่ 3.11 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม ณ จุดต่อร่วม ที่ค่าโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์

เป็นที่น่าสังเกตว่าผลการคำนวณความเพี้ยนกระแสตามความต้องการโหลดรวม (TDD) ในตารางที่ 3.5 ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_I) ณ พิกัดโหลด 3 Nm ที่ได้จากการวัดในรูปที่ 3.10 เนื่องจากการพิจารณาระบบให้จุดต่อร่วมของระบบต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเพียงตัวเดียวโดยไม่มีโหลดอื่นต่อพ่วงอยู่ด้วย ดังรูปที่ 3.7 ดังนั้นกระแสโหลดที่มีความถี่มูลฐาน I_1 จึงมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสพิกัดโหลดที่มีความถี่มูลฐานเฉลี่ย I_L โดยระดับกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับในตารางที่ 3.5 เมื่อแบ่งเป็นย่าน ๆ ตาม IEEE Std 519-1992 พบว่าทุกย่านมีระดับกระแสฮาร์มอนิกสูงกว่ามาตรฐาน มีเพียงอันดับที่ 25 และ 29 เท่านั้นที่ต่ำกว่ามาตรฐาน จากทั้งหมด 31 อันดับ ที่สามารถวัดและคำนวณได้ นอกจากนั้นค่าความเพี้ยนกระแสตามความต้องการโหลดรวม (TDD) ของระบบมีค่าสูงกว่ามาตรฐานถึง 106.37% ส่วนระดับแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับในตารางที่ 3.5 มีค่าต่ำกว่า 3% ตามมาตรฐานทุกอันดับ โดยอันดับที่ 5 มีค่าสูงสุด คือ 2.91% ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) มีค่าต่ำกว่า 5% ตามมาตรฐาน คือ มีค่าเท่ากับ 3.59% จะเห็นได้ว่าระดับแรงดันฮาร์มอนิกทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ IEEE Std 519-1992

3.6 สรุป

ผลการวัดและคำนวณข้างต้นแสดงชัดเจนว่า ระบบได้ก่อกำเนิดสัญญาณฮาร์มอนิกของกระแสในปริมาณมากอีกทั้งค่าตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าต่ำและยิ่งมอเตอร์ทำงานที่โหลดต่ำกว่าพิกัด ระบบจะก่อกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยการติดตั้งอุปกรณ์กรองกระแสฮาร์มอนิกให้ลดลงจนอยู่ในเกณฑ์ IEEE Std 519-1992 เพื่อให้ไม่ให้อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบถูกรบกวนการทำงานจนเกิดการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการชำรุดเสียหายและเป็นการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า เพื่อประหยัดพลังงานภายในระบบของผู้ใช้และของประเทศ



บทที่ 4

วงจรกรองกำลังไฮบริด

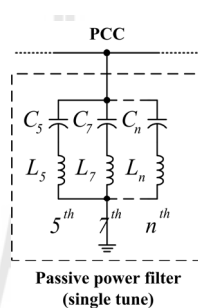
4.1 บทนำ

วงจรกรองกำลังไฮบริดเป็นแนวทางที่ผสมผสานข้อดีของวงจรกรองกำลังพาสซีฟและวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้าไว้ด้วยกัน วงจรกรองกำลังพาสซีฟถูกนำมาใช้เพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกบางส่วนและลดพิกัดกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ทำให้ต้นทุนในการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่ำลงและยังคงประสิทธิภาพที่ดีในการกรองกระแสฮาร์มอนิก เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟสำหรับลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวด้วยวิธีแผนภาพคอนทัวร์ และการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด โดยมีเป้าหมายในการลดระดับกระแสฮาร์มอนิกให้เป็นไปตามข้อกำหนด IEEE Std 519-1992

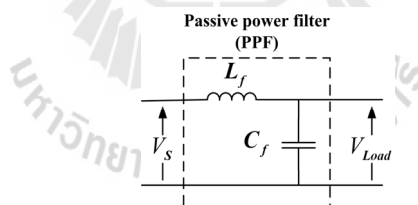
4.2 การออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟด้วยวิธีแผนภาพคอนทัวร์

วงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรกรองที่ใช้กำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากวงจรเรียงกระแส โดยเฉพาะ วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปจะติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟแบบเลือกกรองความถี่เดียว (single tune filter) มากกว่าหนึ่งวงจร แต่ละวงจรทำการจูนความถี่ในการกรองฮาร์มอนิกที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.1 ดังนั้นหากต้องการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกหลาย ๆ อันดับพร้อมกัน ต้องใช้อุปกรณ์รีแอกทีฟจำนวนมากขึ้นด้วย อีกทั้งต้องระมัดระวังปัญหาที่อาจเกิดจากเรโซแนนซ์ แต่วงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีโครงสร้างที่เรียบง่ายประกอบด้วยอุปกรณ์รีแอกทีฟจำนวนสองตัว คือ ตัวเหนี่ยวนำหนึ่งตัวและตัวเก็บประจุหนึ่งตัวซึ่งสามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกได้หลายอันดับพร้อม ๆ กัน และสร้างได้ง่ายมีความน่าเชื่อถือสูง โดยเฉพาะเมื่อออกแบบสำหรับโหลดที่มีพิกัดกำลังคงที่ (Moo, Cheng, and Guo, 1997) โครงสร้างของวงจรกรองดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.2 การออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีแผนภาพคอนทัวร์ (Moo, Cheng, and Guo, 1997) ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลเชิงเลขที่เป็นผลของการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม PSIMTM ร่วมกับ MATLABTM แผนภาพต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีแผนภาพคอนทัวร์ของ

ตัวประกอบกำลัง (PF) ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_I) ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) และค่าแรงดันดีซีบัสของอินเวอร์เตอร์ (V_{DC}) แผนภาพคอนทอร์นเหล่านี้สอดคล้องกับค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f และค่าตัวเก็บประจุ C_f ที่ผันแปรไป ทั้งนี้จุดปฏิบัติงานของระบบจะต้องถูกกำหนดไว้ก่อน ผลการจำลองสถานการณ์จึงจะสะท้อนภาพรวมด้านคุณภาพไฟฟ้าของระบบเพื่อใช้ประโยชน์ในการระบุพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟได้อย่างเหมาะสม ในการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนด้วยโปรแกรม PSIMTM ร่วมกับ MATLABTM นั้น มีแผนภาพเพื่อการจำลองสถานการณ์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และ 4.4

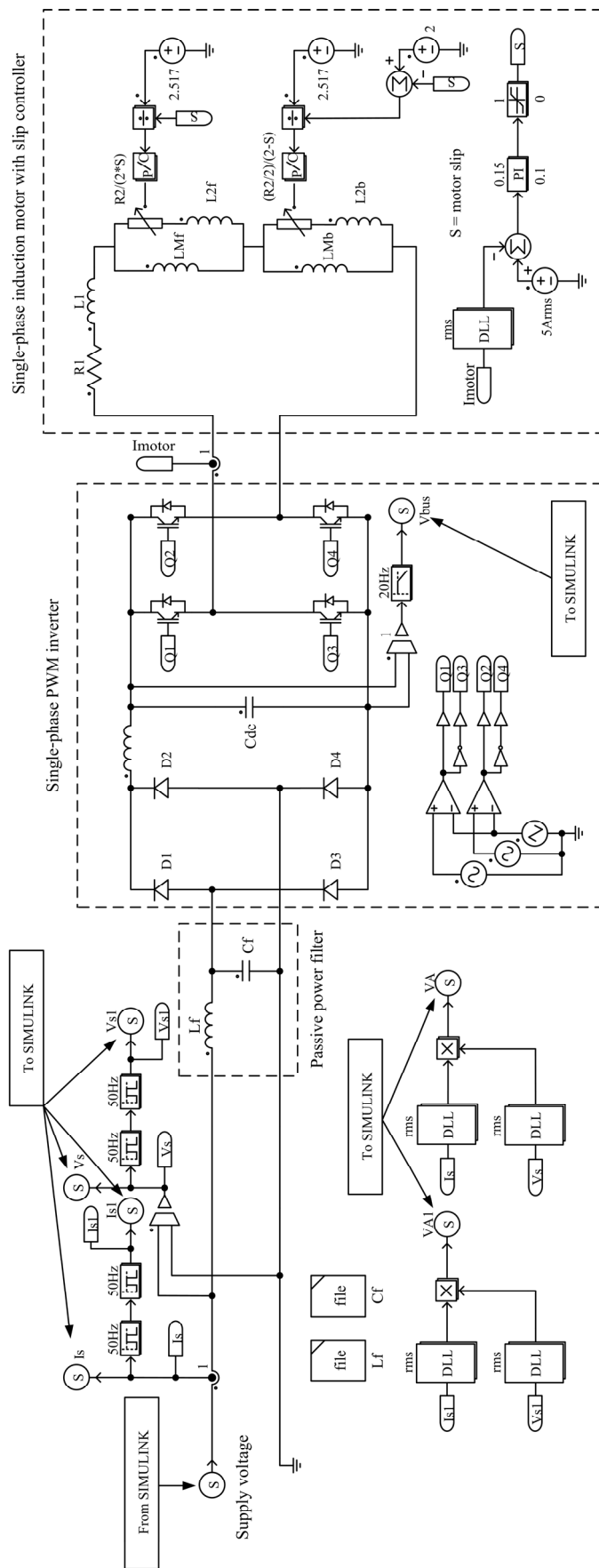


รูปที่ 4.1 โครงสร้างวงจรกรองกำลังพาสซีฟต่อขนานแบบทั่วไป

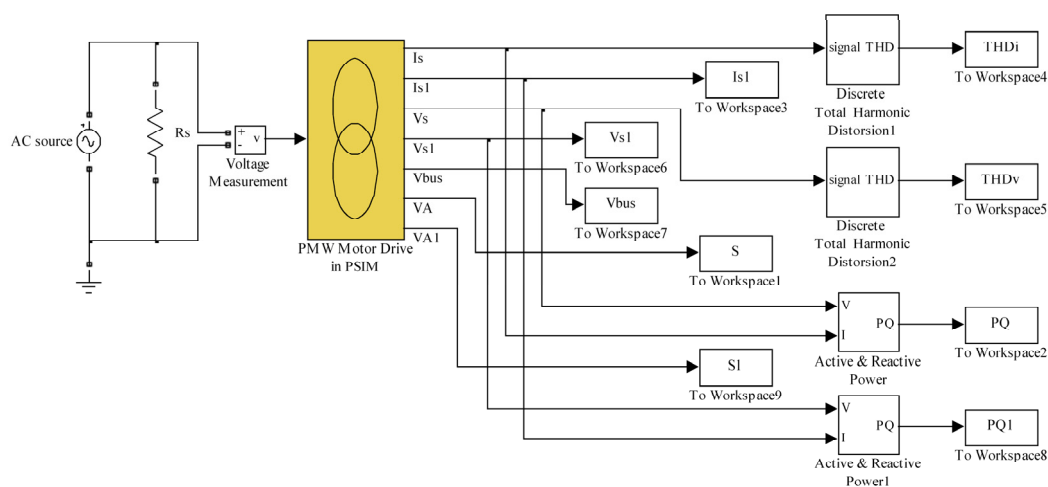


รูปที่ 4.2 โครงสร้างวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

แบบจำลองของระบบในรูปที่ 4.3 ประกอบด้วยพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียว วงจรกรองกำลังพาสซีฟและแบบจำลองในสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวพร้อมด้วยตัวควบคุมสลิป เพื่อควบคุมให้กระแสมอเตอร์มีค่าคงที่ ณ จุดปฏิบัติงาน ($5A_{rms}$) ข้อมูลเชิงเลขจากผลการจำลองสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แผนภาพคอนทอร์น ถูกส่งไปยัง MATLABTM โดยส่งผ่านทางแบบจำลอง SIMULINK ดังรูปที่ 4.4 เพื่อนำข้อมูลเชิงเลขดังกล่าวไปทำการประมวลผลต่อโดย MATLABTM ด้วยโปรแกรม m-file แสดงดังรูปที่ 4.5 และแผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.3 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟในโปรแกรม PSIM



รูปที่ 4.4 แบบจำลอง SIMULINK สำหรับใช้ส่งข้อมูลจาก PSIMTM ไปยัง MATLABTM

แบบจำลองและการทดสอบจริงใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบ 4 โพล พิกัด 220 V/5 A_{rms}/1440 rpm ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม ความถี่สวิตชิงของอินเวอร์เตอร์ในแบบจำลองและการทดสอบจริงกำหนดไว้ที่ 1 kHz ลักษณะสมบัติทางธรรมชาติ วงจรสมมูลและพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังกล่าวนำเสนอไว้ในบทที่ 3 ในการจำลองสถานการณ์และการทดสอบจริงได้กำหนดจุดปฏิบัติงานของมอเตอร์ไว้ที่ 5 A_{rms}/3 Nm (full load) โดยจ่ายอินพุต 220 V_{rms}/50 Hz จากอินเวอร์เตอร์ให้แก่มอเตอร์แล้วปรับโหลดตามจุดปฏิบัติงานดังกล่าว เนื่องจาก L_f ต่ออนุกรมกับระบบจึงมีแรงดันจากแหล่งจ่ายส่วนหนึ่งตกคร่อม L_f ยิ่ง L_f มีขนาดใหญ่แรงดันที่ตกคร่อมก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันที่จ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์ลดลงจนอาจทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถจ่ายกระแสที่พิกัด 5 A_{rms} ให้มอเตอร์ได้ ดังนั้นจึงต้องกำหนดขอบเขตของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ จากการจำลองสถานการณ์เบื้องต้นพบว่าค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f สูงสุดที่ระบบยังคงจ่ายกระแส 5 A_{rms} ให้มอเตอร์ได้คือ 250 mH ส่วนขอบเขตของตัวเก็บประจุ C_f สามารถกำหนดได้อย่างอิสระแต่ไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไปเพราะ C_f ขนาดใหญ่อาจทำให้เกิดการดิงกระแสจากแหล่งจ่ายมากขึ้นและทำให้ตัวประกอบกำลังเป็นแบบล้าหน้า ในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ 20 μF ในขอบเขตดังกล่าวไม่เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ของแหล่งจ่าย (50 Hz) โดยความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาได้จาก $f = 1/(2\pi\sqrt{L_f C_f})$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Lend=125;
Cend=40;
tend=0.3;
j=1;k=1;Lf=0;Cf=0;
for j=j:1:Lend;
    Lf=Lf+2e-3

    for k=1:1:Cend;
        Cf=Cf+0.5e-6

        fid1 = fopen('Lf.txt','w');
        fprintf(fid1,'Lf=%5.10f\n',Lf);
        fclose(fid1);
        fid2 = fopen('Cf.txt','w');
        fprintf(fid2,'Cf=%5.10f\n',Cf);
        fclose(fid2);
        pause(4);

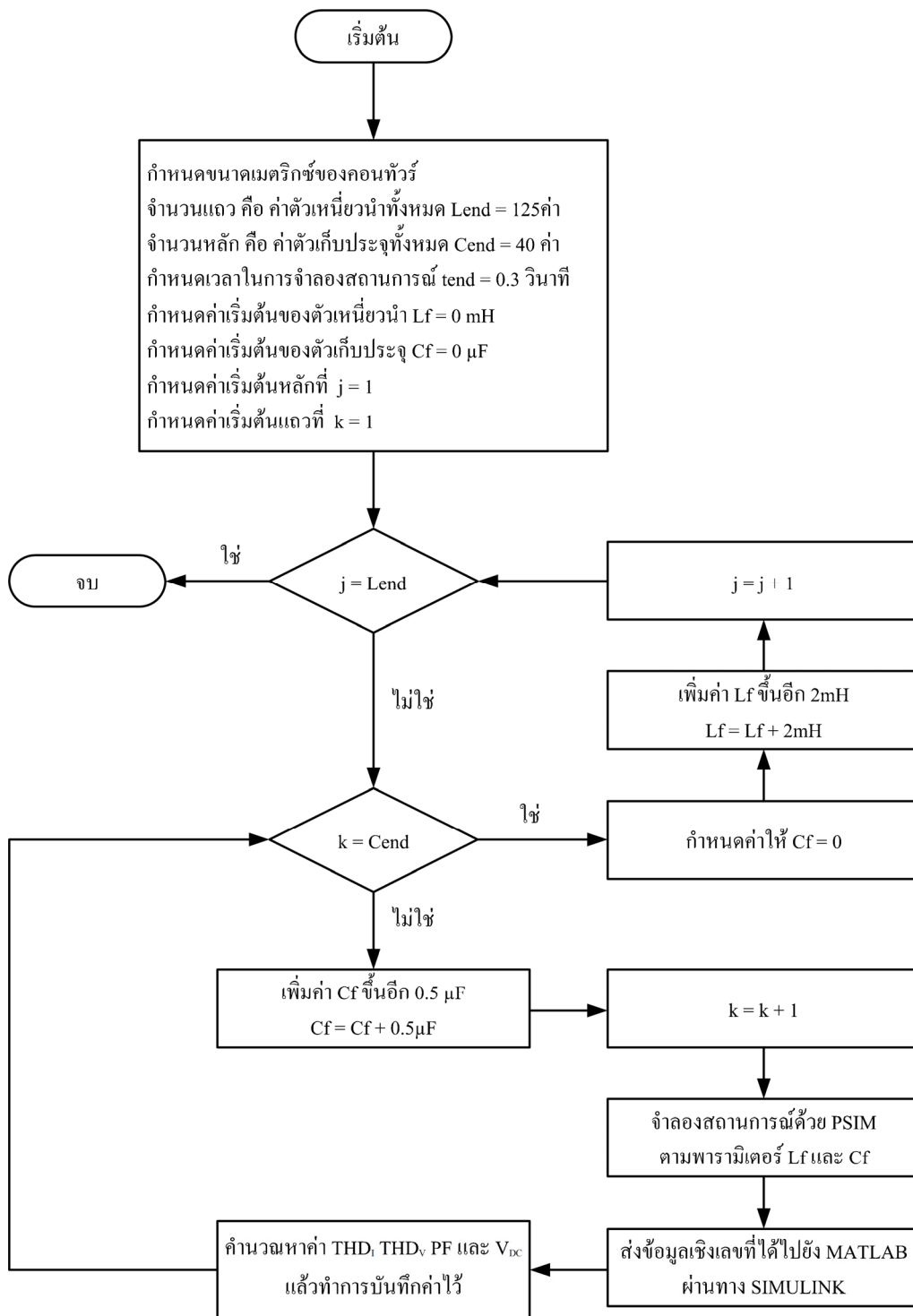
        sim('drive',[0 tend]);
        [m,n]=size(Is1);
        a=m-100;

        dpf=sqrt(1./(1+(THDi).^2));
        pf1=PQ1(:,1)/(S1);
        pf=dpf.*pf1;
        Q=PQ(:,2);
        if mean(Q(a:m))< 0
            pf=-1*pf;
        end
        PF(j,k)=mean(pf(a:m));
        THDI(j,k)=mean(THDi(a:m))*100;
        THDV(j,k)=mean(THDv(a:m))*100;
        VDC(j,k)=mean(Vbus(a:m));

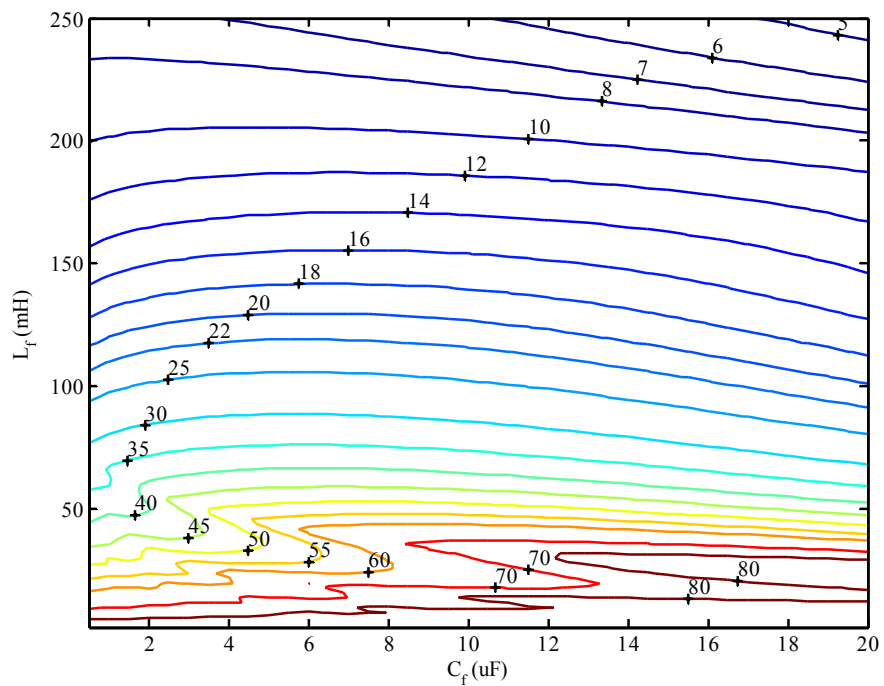
        Y(j,k)=Lf;
        X(j,k)=Cf;
        save('simresult','THDI','THDV','PF','VDC','X','Y')
    end
    Cf=0;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

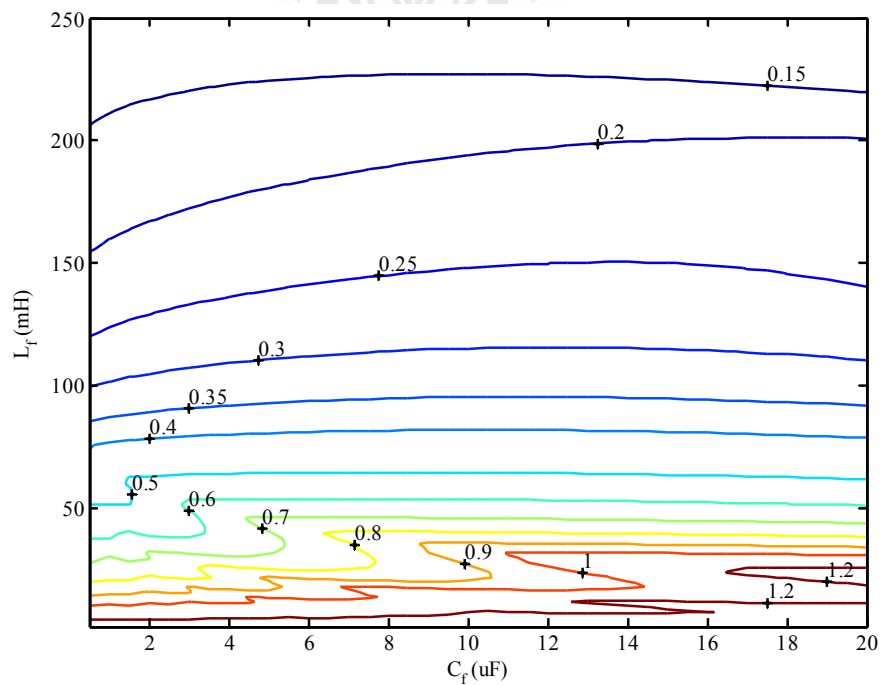
รูปที่ 4.5 โปรแกรมสั่งการจำลองสถานการณ์และประมวลผลข้อมูลที่เกี่ยวข้อง



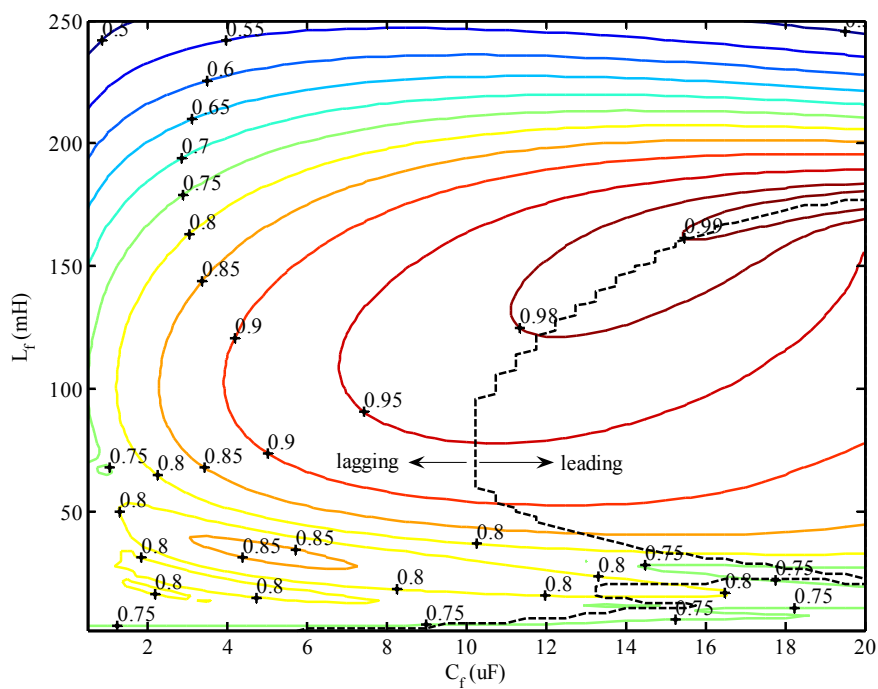
รูปที่ 4.6 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมการจำลองสถานการณ์ และประมวลผลข้อมูลที่เกี่ยวข้อง



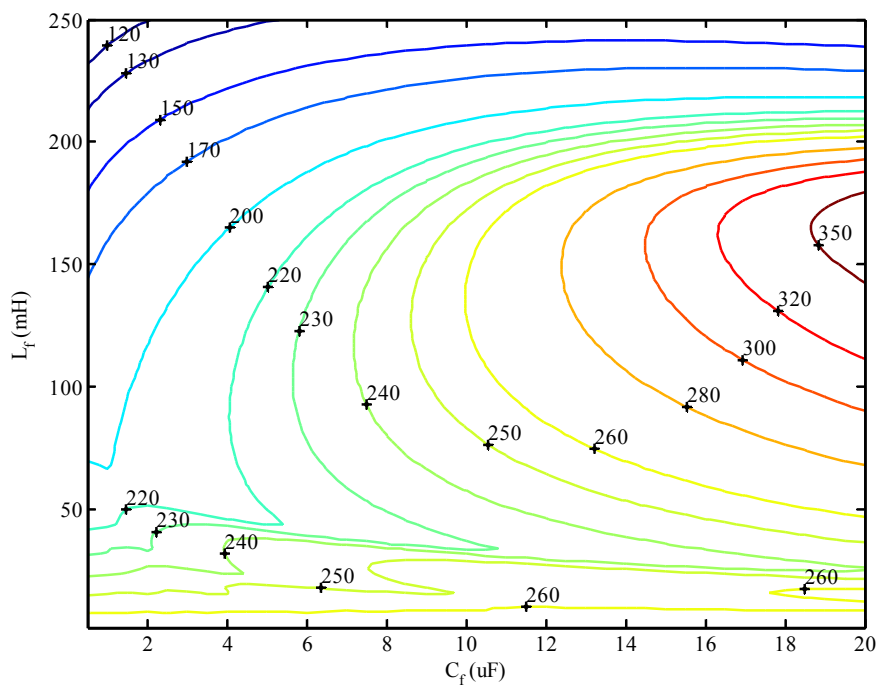
รูปที่ 4.7 แผนภาพคอนทัวร์ของค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม THD_1 (%)



รูปที่ 4.8 แผนภาพคอนทัวร์ของค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม THD_V (%)



รูปที่ 4.9 แผนภาพคอนทัวร์ของค่าตัวประกอบกำลัง PF

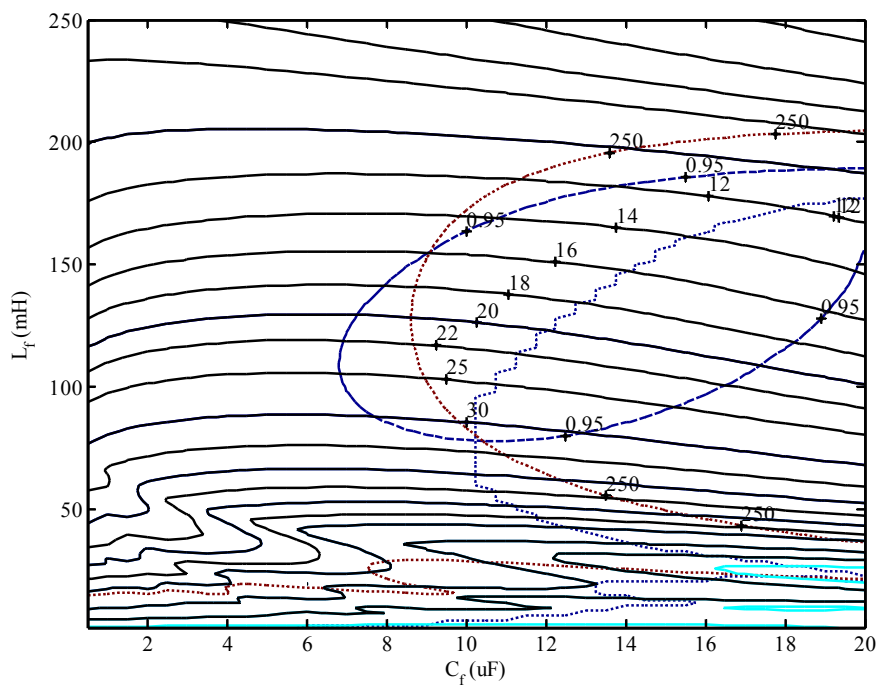


รูปที่ 4.10 แผนภาพคอนทัวร์ของแรงดันดีซีบัสของอินเวอร์เตอร์ V_{DC} (V)

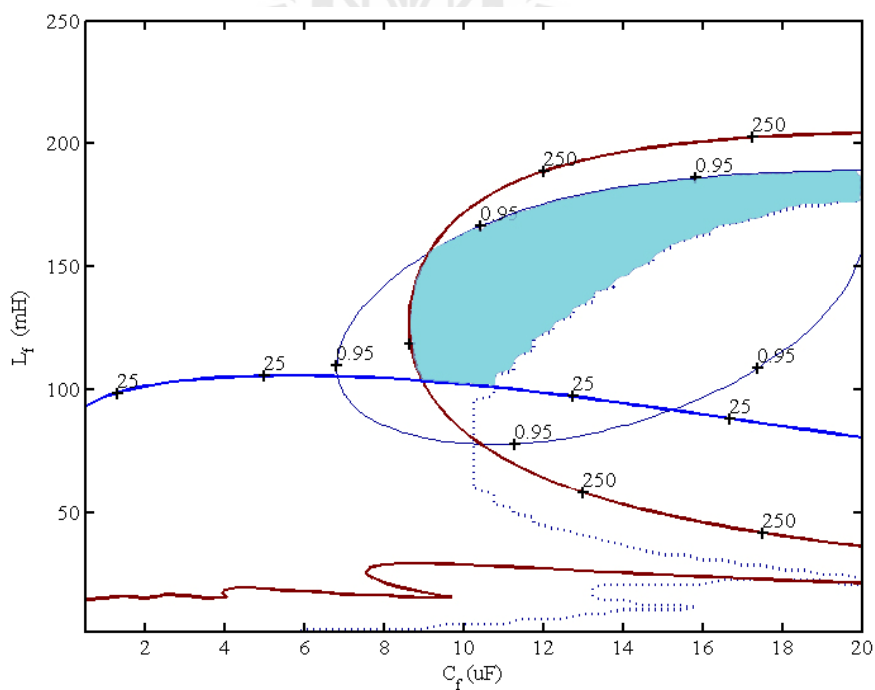
การดำเนินงานด้วยโปรแกรม PSIM™ ได้กำหนดค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f ให้เพิ่มขึ้นทีละ 2 mH จาก 0 mH จนถึง 250 mH รวมทั้งสิ้น 125 ค่า ส่วนค่าตัวเก็บประจุ C_f กำหนดให้เพิ่มขึ้นทีละ $0.5\ \mu\text{F}$ จาก $0\ \mu\text{F}$ จนถึง $20\ \mu\text{F}$ รวมทั้งสิ้น 40 ค่า เมื่อทำการจำลองสถานการณ์จนครบทุกค่า L_f และ C_f จะได้ข้อมูลเชิงเลขของปัจจัยที่ต้องการศึกษาแต่ละปัจจัยเป็นเมตริกซ์ขนาด 125×40 ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปสร้างขึ้นเป็นแผนภาพคอนทัวร์ ซึ่งประกอบด้วยแผนภาพคอนทัวร์ของค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวม (THD_I) ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวม (THD_V) ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) และค่าแรงดันดีซีบัสของอินเวอร์เตอร์ (V_{DC}) เมื่อมีการแปรผันค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุภายในขอบเขตที่กำหนด ณ จุดปฏิบัติงานแสดงดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.10 ตามลำดับ

จากแผนภาพคอนทัวร์ของ THD_I รูปที่ 4.7 และ THD_V รูปที่ 4.8 พบว่ายิ่งตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ค่า THD_I และ THD_V มีค่าลดลงแต่ผลเสียประการหนึ่งของตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ คือ ทำให้เกิดแรงดันตกที่ดีซีบัสของอินเวอร์เตอร์ แสดงดังแผนภาพคอนทัวร์ของ V_{DC} ในรูปที่ 4.10 ส่วนตัวเก็บประจุจะช่วยชดเชยกำลังรีแอกทีฟทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าสูงขึ้น จากแผนภาพคอนทัวร์ของ PF และ V_{DC} ในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของ PF และ V_{DC} มีค่าสูงขึ้นเมื่อตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ผลเสียประการหนึ่งของการใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ คือ ทำให้กระแสอาร์เอ็มเอสของระบบสูงขึ้นและทำให้ตัวเหนี่ยวนำ L_f ต้องรับกระแสอาร์เอ็มเอสที่สูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งหมายถึงกำลังสูญเสียจะเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้อาจทำให้ค่า PF ของระบบกลายเป็นแบบล้าหน้าในบางกรณีอีกด้วย ในแผนภาพคอนทัวร์ของ PF เส้นประถูกใช้เพื่อแบ่งระหว่างตัวประกอบกำลังแบบล้าหน้าและล้าหลัง ดังนั้นควรเลือก L_f และ C_f ที่มีขนาดเหมาะสมกันและมีขนาดเล็ก คือ ทำให้ได้คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยรวมที่ดีไม่เกิดเรโซแนนซ์กับแหล่งจ่ายเกิดกำลังสูญเสียย่อย ราคาถูกและทำให้พิกัดกระแสและแรงดันของระบบต้องไม่เกินขีดจำกัดหรือข้อกำหนดของอุปกรณ์ป้องกันของอินเวอร์เตอร์

การเลือกค่า L_f และ C_f อาจพิจารณาค่า V_{DC} และ PF เป็นหลักโดยพิจารณาค่า THD_I และ THD_V รองลงมา เนื่องจากค่า THD_I และ THD_V สามารถแก้ไขให้ดีขึ้นได้ด้วยวงจรกรองกำลังรีแอกทีฟ แต่การทำงานของอินเวอร์เตอร์ต้องพึ่งพา V_{DC} ในระดับที่เหมาะสม หาก V_{DC} มีค่าน้อยเกินไปอินเวอร์เตอร์จะไม่สามารถทำงานต่อไปได้ จากคู่มือและผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์พบว่าค่า V_{DC} ณ จุดปฏิบัติงานไม่ควรต่ำกว่า 250 V และจะต้องไม่สูงเกิน 120% ของ V_{DC} ปกติ ในขณะที่ค่าตัวประกอบกำลังไม่ควรเป็นแบบล้าหน้า เนื่องจากกำลังรีแอกทีฟส่วนเกินอาจไหลเข้าสู่ระบบข้างเคียงทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าของระบบข้างเคียงได้



รูปที่ 4.11 แผนภาพคอนทัวร์แสดงขอบเขตของ THD_1 ที่สามารถเลือกได้ตามเงื่อนไขของ PF และ V_{DC}



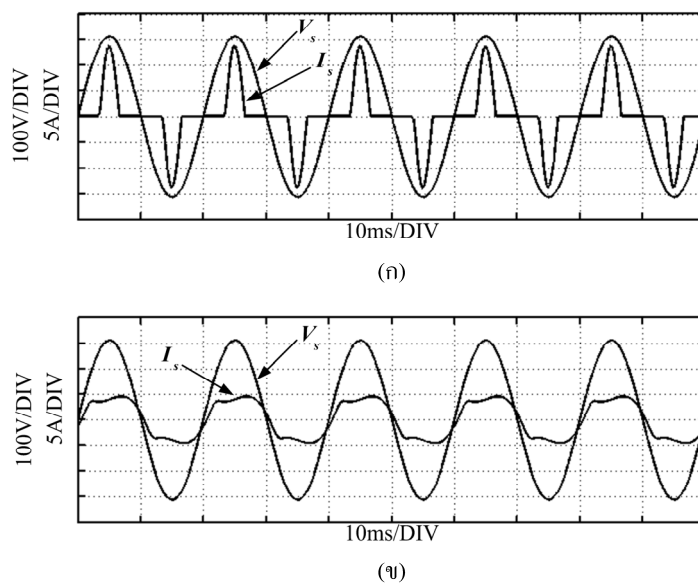
รูปที่ 4.12 แผนภาพคอนทัวร์แสดงพื้นที่ที่สามารถเลือกพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด

เนื่องจากวงจรกรองกำลังพาสซีฟทำหน้าที่ลดทอนกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยตัวประกอบกำลังเป็นหลัก ซึ่งข้อกำหนดค่าตัวประกอบกำลังของการไฟฟ้าสำหรับสถานประกอบการขนาดกลางและขนาดใหญ่ต้องไม่ต่ำกว่า 0.85 งานวิจัยนี้จึงกำหนดคุณสมบัติให้วงจรกรองกำลังพาสซีฟต้องสามารถชดเชยตัวประกอบกำลังได้ไม่ต่ำกว่า 0.95 และเป็นแบบล้าหลัง ในขณะที่ V_{DC} ต้องไม่ต่ำกว่า 250 V ณ จุดปฏิบัติงาน ด้วยเงื่อนไขทั้งสองทำให้สามารถเลือกค่า THD_1 ได้ในช่วงประมาณ 12 ถึง 30% ดังรูปที่ 4.11 เพื่อความเหมาะสมงานวิจัยนี้จึงกำหนดคุณสมบัติของวงจรกรองกำลังพาสซีฟให้สามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกโดย THD_1 ต้องไม่สูงเกิน 25% เนื่องจากค่า THD_1 ที่ 30% มีค่าอยู่ชิดกับขอบเขตของค่าตัวประกอบกำลัง 0.95 และแรงดันดีซี 250 V มากเกินไป

จากเงื่อนไขทั้งสามข้างต้นสามารถสร้างพื้นที่ในการเลือกพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟได้ดังรูปที่ 4.12 ส่วนที่แรเงา คือ พื้นที่ที่สามารถเลือกพารามิเตอร์ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นควรเลือกพารามิเตอร์ที่มีขนาดพอเหมาะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเหนี่ยวนำ L_f จะต้องเพื่อการอิมิตัวทางแม่เหล็กด้วย ภายในพื้นที่ดังกล่าวค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f และค่าตัวเก็บประจุ C_f ถูกเลือกมาทำการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการกรองอีกครั้งรวมทั้งสิ้น 13 กรณี แสดงดังตารางที่ 4.1 จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 13 กรณี จะเห็นได้ว่ากรณีที่ 5 ให้ประสิทธิภาพในการกรองตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดและมีขนาดเล็กที่สุด แต่ขนาดของ V_{DC} อยู่ชิดกับขอบเขตของเงื่อนไขที่ 250 V มากเกินไป ผู้วิจัยจึงเลือกใช้พารามิเตอร์ในกรณีที่ 6 ($L_f = 105 \text{ mH}$ และ $C_f = 10 \text{ } \mu\text{F}$) ซึ่งให้ค่า PF และค่า V_{DC} ที่สูงกว่าและตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด ลักษณะสัญญาณกระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการกรองด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟในกรณีที่ 6 แสดงดังรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากรูปที่ 4.13 (ข) พบว่าตัวเหนี่ยวนำ L_f ทำให้ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกลดลง ส่งผลให้ค่ายอดกระแสแหล่งจ่าย (I_s) ลดลง ส่วนตัวเก็บประจุ C_f มีผลทำให้เกิดการไหลอย่างต่อเนื่องของกระแสแหล่งจ่าย โดยกระแสแหล่งจ่ายจะมีค่าเป็นศูนย์ก็ต่อเมื่อ $\omega t = n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) เท่านั้น อย่างไรก็ตามอาจมีกรณีอื่น ๆ ที่ให้ผลการกรองที่ดีกว่าบ้างเล็กน้อยแต่จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำ L_f ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียมากขึ้น และมีราคาที่สูงจึงควรหลีกเลี่ยง ฮาร์มอนิกที่เหลือจากการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟทั้งหมดจะทำการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟจนอยู่ในข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 ต่อไป

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพผลของวงจรกรองกำลังพาสซีฟจากการจำลองสถานการณ์

ผลการจำลอง สถานการณ์ กรณีที่	พารามิเตอร์ของวงจร กรองกำลังพาสซีฟ		ค่าความเพี้ยนกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกรวม ค่าตัวประกอบกำลังและค่าแรงดันดีซีเอาต์พุต ของอินเวอร์เตอร์			
	L_f	C_f	% THD_I	% THD_V	PF	$V_{DC} (V)$
1	ไม่ติดตั้งวงจรกรอง		122.3	1.806	0.610 (lagging)	288
2	100 mH	9 μF	25.944	0.336	0.965 (lagging)	249.38
3	100 mH	10 μF	25.624	0.337	0.968 (lagging)	254.99
4	100 mH	12 μF	24.723	0.337	0.969 (leading)	265.89
5	105 mH	9 μF	24.661	0.322	0.966 (lagging)	250.31
6	105 mH	10 μF	24.370	0.324	0.971 (lagging)	256.22
7	105 mH	12 μF	24.723	0.324	0.969 (leading)	265.89
8	110 mH	9 μF	23.499	0.310	0.967 (lagging)	251.12
9	110 mH	10 μF	23.226	0.312	0.965 (lagging)	257.32
10	110 mH	12 μF	22.435	0.312	0.975 (leading)	269.39
11	120 mH	9 μF	21.458	0.290	0.968 (lagging)	252.34
12	120 mH	10 μF	21.214	0.291	0.974 (lagging)	259.04
13	120 mH	12 μF	20.544	0.292	0.979 (leading)	272.37



รูปที่ 4.13 ลักษณะสัญญาณกระแสไฟฟ้าจากการจำลองสถานการณ์ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง ทำการกรองด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟในกรณีที่ 6 ($L_f = 105mH$ และ $C_f = 10\mu F$)

4.3 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (sliding window Fourier analysis, SWFA) (EL-Habrouk and Darwish, 2001) กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ อัลกอริทึม SWFA มีความเร็วในการคำนวณสูงและความคลาดเคลื่อนในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกต่ำ ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ง่าย วงจรกรองกำลังไฮบริดแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของวงจรกรองกำลังพาสซีฟและส่วนของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เหลือจากการกรองด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟ รายละเอียดเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA มีดังต่อไปนี้

เมื่อสัญญาณ $f(t)$ เป็นสัญญาณในเวลาต่อเนื่องใด ๆ และ มีความถี่เชิงมุม ω_1 เรเดียน/วินาที และมีคาบเวลาเป็น T วินาที สามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (4.1) ตามทฤษฎีฟูรีเยร์

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_1 t) + B_h \sin(h\omega_1 t)] \quad (4.1)$$

$$\text{โดยที่ } A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4.2)$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_1 t) dt \quad (4.3)$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_1 t) dt \quad (4.4)$$

ในการคำนวณองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA จะดำเนินการคำนวณเฉพาะองค์ประกอบกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (ω_1) โดยเขียนสมการที่ (4.1) (4.3) และ (4.4) ให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานเวลาไม่ต่อเนื่อง ได้ดังสมการที่ (4.5) ถึง (4.7) ตามลำดับ

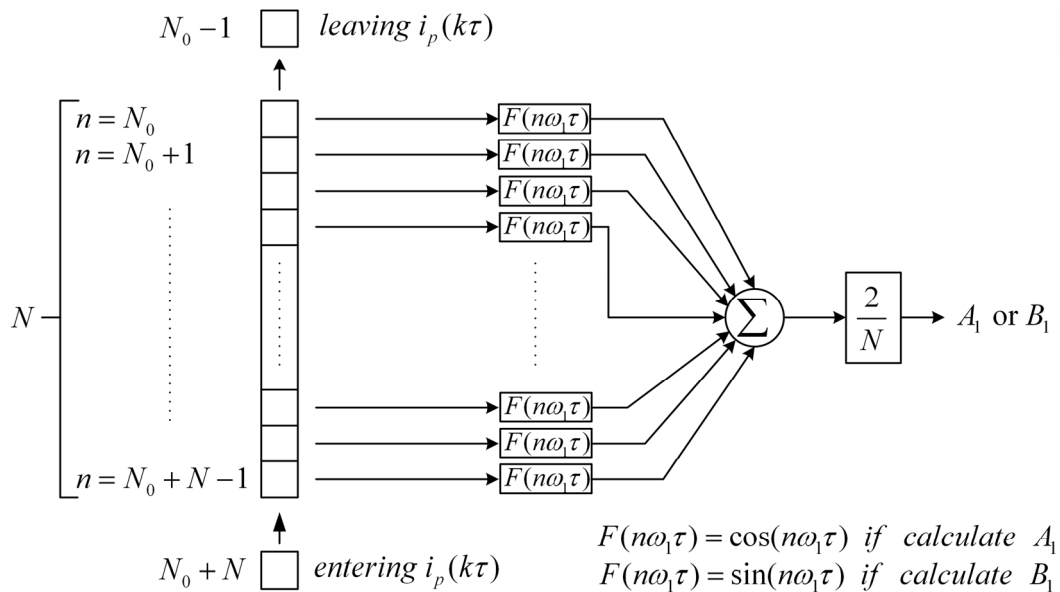
$$i_1(k\tau) = A_1 \cos(\omega_1 k\tau) + B_1 \sin(\omega_1 k\tau) \quad (4.5)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(n\tau) \cos(n\omega_1 \tau) \quad (4.6)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(n\tau) \sin(n\omega_1 \tau) \quad (4.7)$$

ในการคำนวณได้กำหนดช่วงเวลาการซัดตัวอย่างเท่ากับ τ วินาที ซึ่งจะซัดตัวอย่างกระแสที่ไหลเข้าวงจรรองรับกำลังพาสซีฟ ($i_p(t)$) เพื่อใช้ในการคำนวณทั้งหมด N ตัวอย่าง โดยจุดเริ่มซัดตัวอย่าง คือ N_0 เพื่อความเหมาะสมและรวดเร็วในการคำนวณในขั้นแรกจะรับข้อมูลของสัญญาณกระแส $i_p(t)$ จำนวนหนึ่งคาบเท่ากับ T วินาที ($T = 20$ ms สำหรับระบบไฟฟ้า 50 Hz) ซึ่งมีทั้งหมด N ตัวอย่าง หลังจากนั้นคำนวณสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 ตามสมการที่ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ ข้อมูลในคาบแรกนี้จะถูกเก็บไว้ในตัวแปรชนิดแถวลำดับในภาษาซี ซึ่งมีสมาชิกทั้งหมด N สมาชิกกระแสฮาร์มอนิกยังไม่ถูกคำนวณในขณะนี้ ขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนตั้งค่า

สัมประสิทธิ์เริ่มต้น คือ $A_1^{(old)}$ และ $B_1^{(old)}$ ในคาบต่อไปค่าสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 จะถูกคำนวณใหม่โดยรับตัวอย่างข้อมูลค่าใหม่มาหนึ่งตัวอย่างและลบข้อมูลตัวที่เก่าที่สุดออกไปหนึ่งตัวอย่างเพื่อปรับปรุงข้อมูลและทำให้จำนวนสมาชิกในตัวแปรชนิดแถวลำดับมีค่าคงเดิมตามความกว้างของวินโดว์เลื่อน คือ เท่ากับ N กระบวนการนี้สามารถแทนได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แผนภาพแทนกระบวนการคำนวณสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 ในแต่ละรอบการซีกตัวอย่าง

จากนั้นคำนวณสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 ค่าใหม่ คือ $A_1^{(new)}$ และ $B_1^{(new)}$ โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.8) และ (4.9) ตามลำดับ แล้วจึงคำนวณกระแสฮาร์มอนิกรวมทุกอันดับ ณ เวลาปัจจุบัน ($i_h(k\tau)$) โดยการนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน ณ เวลาปัจจุบัน ($i_1(k\tau)$) ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (4.5) ไปลบออกจากค่ากระแสที่ไหลเข้าวงจรรอกกำลังพาสซีฟ ณ เวลาปัจจุบัน ($i_p(k\tau)$) ที่รับมาจากตัวตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า ดังที่แสดงด้วยสมการที่ (4.10) จากกระบวนการข้างต้นจะเห็นได้ว่าการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกเกิดขึ้นทุกรอบของการรับข้อมูลกระแสไหลเข้าวงจรรอกกำลังพาสซีฟ ($i_p(k\tau)$) โดยมีช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะห่างกัน τ วินาที

$$\begin{aligned}
 A_1^{(new)} = & A_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{ i[(N_0 + N)\tau] \cos[(N_0 + N)\omega_1\tau] \dots \\
 & - i[(N_0 - 1)\tau] \cos[(N_0 - 1)\omega_1\tau] \}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

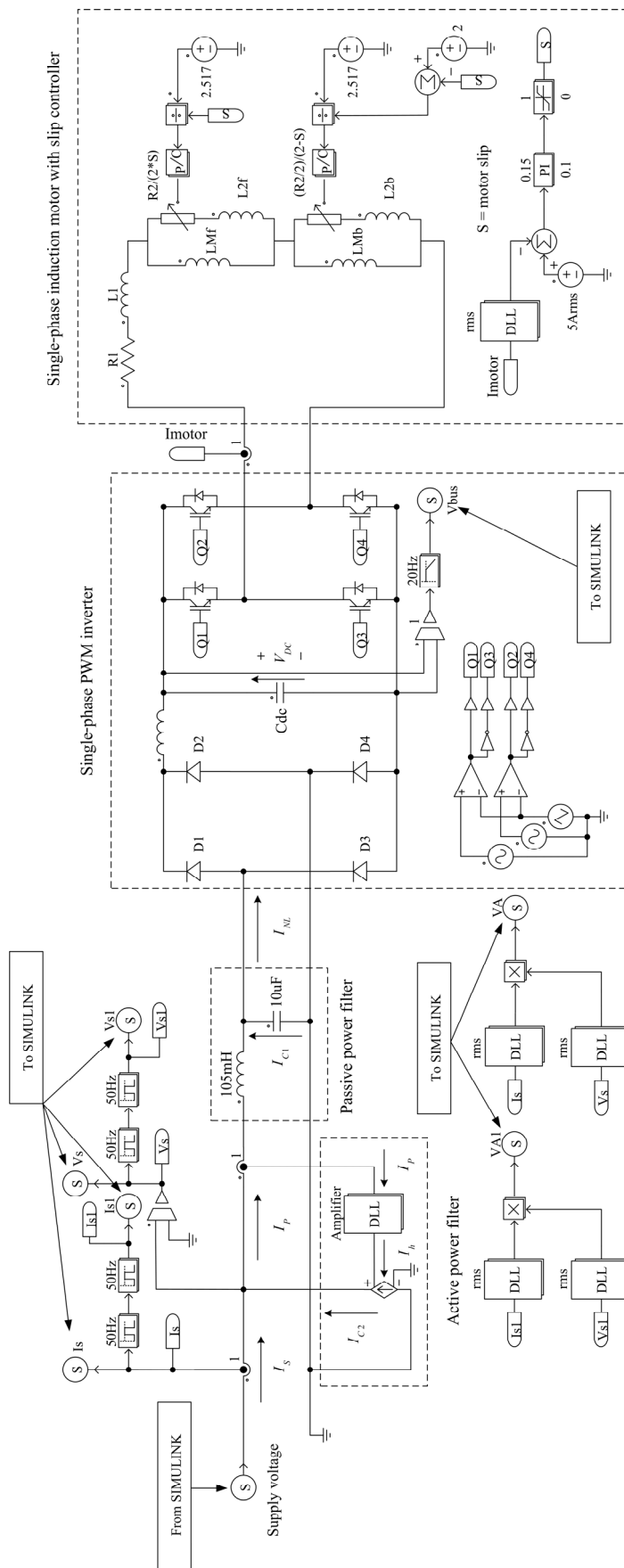
$$B_1^{(new)} = B_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{ i[(N_0 + N)\tau] \sin[(N_0 + N)\omega_1 \tau] \dots - i[(N_0 - 1)\tau] \sin[(N_0 - 1)\omega_1 \tau] \} \quad (4.9)$$

$$i_h(k\tau) = i_p(k\tau) - i_1(k\tau) \quad (4.10)$$

โดยที่ $k = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$ และ $\tau = \frac{T}{N}$

4.4 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด

การจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โปรแกรม PSIM™ ดำเนินงานตามแบบจำลองในรูปที่ 4.15 กระแสที่ไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (I_p) จะถูกส่งผ่านไปยัง DLL block หนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตที่ชื่อ Amplifier ซึ่งภายในบล็อกดังกล่าว กระแส I_p ได้ถูกนำมาคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่เหลือจากการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟทั้งหมดของระบบ (I_h) ตามอัลกอริทึม SWFA ซึ่งเขียนขึ้นด้วยภาษาซีเป็น DLL block แสดงดังรูปที่ 4.16 (ก) และโปรแกรมการคำนวณค่า RMS แสดงดังรูปที่ 4.16 (ข) จากนั้นกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดของระบบได้ถูกส่งไปยังแหล่งจ่ายกระแสสมบูรณ์เพื่อสร้างกระแสชดเชยฮาร์มอนิก (I_{c2}) และฉีดกระแสดังกล่าวเข้าสู่ระบบ ณ จุดต่อร่วม (PCC) โปรแกรม DLL block ถูกเขียนขึ้นโดยกำหนดคาบเวลาในการจำลองสถานการณ์ (simulation time step) เท่ากับ $5\mu s$ ดังนั้นภายในหนึ่งคาบ จึงมีข้อมูล 4,000 ตัวอย่างของสัญญาณจากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้า 50 Hz เพื่อใช้จำลองสถานการณ์ ข้อมูลสัญญาณกระแสที่ไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (I_p) กระแสชดเชยจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (I_{c2}) และกระแสแหล่งจ่าย (I_s) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริดแสดงดังรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าในคาบแรกของการรับสัญญาณกระแส I_p ซึ่งเป็นขั้นตอนการตั้งค่าเริ่มต้น (initialization) ขั้นตอนนี้จึงยังไม่มีกรคำนวณกระแสชดเชย I_{c2} ดังนั้นกระแสชดเชยจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงเวลา 0 ถึง 20 ms หลังจาก 20 ms เป็นต้นไป



รูปที่ 4.15 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเมื่อติดตั้งวงจรกรองกำลังไฮบริดในโปรแกรม PSIM™

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
#include <math.h>
__declspec(dllexport) void simuser (t, delt, input, output)
double t, delt;
double *input, *output;
{
static int      k=0, h=0, l, in=0, N=4000;
static double   Ad[4000], co[4000], si[4000];
static double   And=0, Bnd=0, A1d=0, B1d=0, iUref=0, iU1=0, iUh=0, Tperiod=0;
if (t >= 0)
{
Tperiod=1./50.;
if (t >= h*Tperiod)
{
h=h+1.;
l=h-1.;
}
in=abs((l*N)-k);
if ((k>=0)&(k<N))
{
co[k]=cos(314.159*t);
si[k]=sin(314.159*t);
Ad[k]=input[0];
And=And+co[k]*Ad[k];
Bnd=Bnd+si[k]*Ad[k];
iUref=0;
}
if (k>=N)
{
And=And-co[in]*Ad[in];
Bnd=Bnd-si[in]*Ad[in];
Ad[in]=input[0];
And=And+co[in]*Ad[in];
Bnd=Bnd+si[in]*Ad[in];
A1d=2*And/N;
B1d=2*Bnd/N;
iU1=co[in]*A1d+si[in]*B1d;
iUh=input[0]-iU1;
iUref=iUh;
}
k=k+1;
}
output[0]=iUref;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////

```

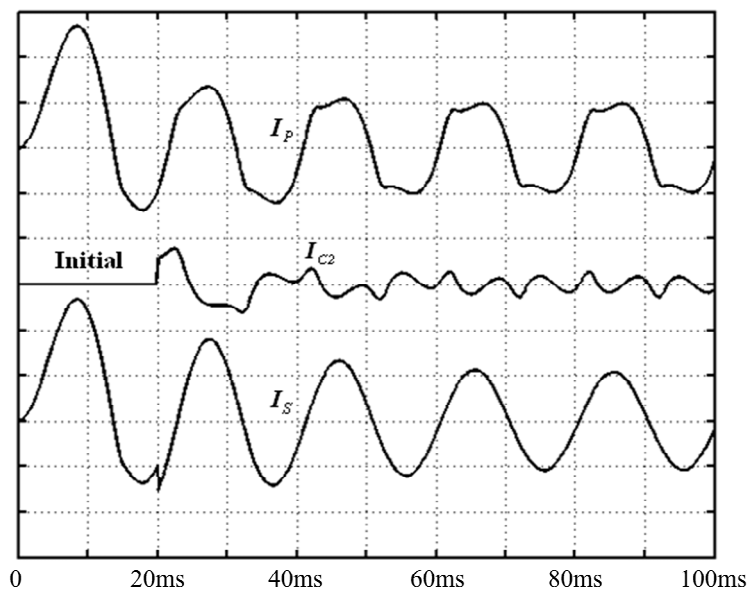
```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
#include <math.h>
__declspec(dllexport) void simuser (t, delt, input, output)
double t, delt;
double *input, *output;
{
static      int k=0, h=0, l, in=0, N;
static double Ad[1000000], sum=0, RMS=0, Tperiod=0;
if (t >= 0)
    {
    Tperiod=1./50.;
    N=Tperiod/delt;
    if (t >= h*Tperiod)
        {
        h=h+1.;
        l=h-1.;
        }
    in=abs((l*N)-k);
    if ((k>=0)&(k<N))
        {
        Ad[k]=input[0];
        sum=sum+Ad[k]*Ad[k];
        RMS=0;
        }
    if (k>=N)
        {
        sum=sum-Ad[in]*Ad[in];
        Ad[in]=input[0];
        sum=sum+Ad[in]*Ad[in];
        RMS=sqrt(sum/N);
        }
    k=k+1;
    }
    output[0]=RMS;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////

```

(๗)

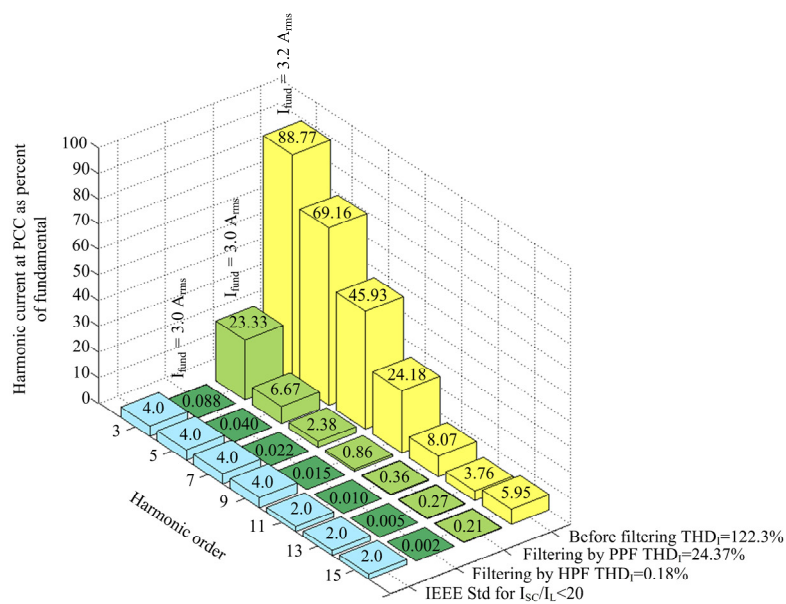
รูปที่ 4.16 รายละเอียดโปรแกรมภาษาซี สร้างเป็น DLL Block ใช้งานกับ PSIM™ (ก) การคำนวณตามอัลกอริทึม SWFA (ข) การคำนวณค่า RMS ที่อาศัยผลการคำนวณแบบจุดต่อจุด



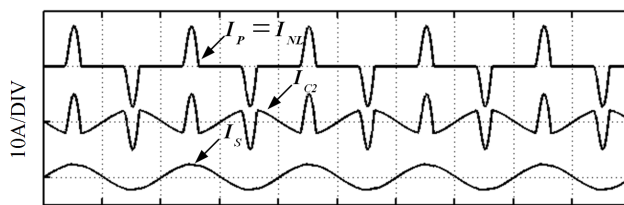
รูปที่ 4.17 สัญญาณกระแสไหลเข้าวงจรองกำลังพาสซีฟ (I_p) กระแสชดเชยฮาร์มอนิก (I_{c2}) และกระแสแหล่งจ่าย (I_s) จำลองด้วย PSIM™ (มาตราส่วน $5A/DIV$)

ระบบทำการคำนวณกระแสชดเชยตามอัลกอริทึม SWFA ให้แก่วงจรองกำลังแอกทีฟและฉีดกระแสชดเชยดังกล่าวเข้าสู่ระบบ ณ จุดต่อร่วมทันที เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์หลังใช้วงจรองกำลังไฮบริดเปรียบเทียบกับ IEEE Std 519-1992 พบว่ากระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับอยู่ในกรอบของข้อกำหนดมาตรฐานดังกล่าว สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังต่ำ โดยมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม THD_1 เพียง 0.18% เท่านั้นแสดงดังรูปที่ 4.18

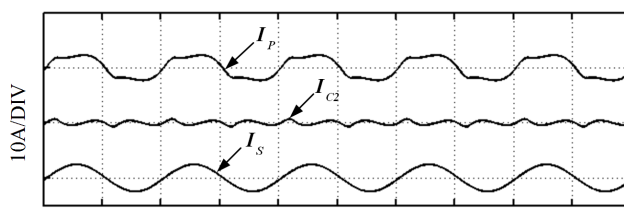
ผลการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบพิกัดกำลังปรากฏ (VA) ของวงจรองกำลังแอกทีฟแสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) ก่อนติดตั้งวงจรองกำลังพาสซีฟ และ (ข) หลังติดตั้งวงจรองกำลังพาสซีฟพบว่าหากไม่มีการติดตั้งวงจรองกำลังพาสซีฟ วงจรองกำลังแอกทีฟจะต้องฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิก I_{c2} เท่ากับ $3.95 A_{rms}$ เมื่อพิจารณาระดับแรงดัน $220 V_{rms}$ พบว่าต้องการกำลังปรากฏเท่ากับ 869 VA ในกรณีติดตั้งวงจรองกำลังพาสซีฟใช้งานร่วมด้วยเป็นวงจรองกำลังไฮบริด วงจรองกำลังแอกทีฟฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิก I_{c2} เพียง $0.71 A_{rms}$ เท่านั้นคำนวณกำลังปรากฏได้ประมาณ 156 VA ซึ่งมีพิกัดกำลังลดลงจากเดิมถึง 82%



รูปที่ 4.18 แผนภาพเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากการจำลองสถานการณ์ก่อนและหลังใช้วงจรกรองแบบต่าง ๆ กับ IEEE Std 519-1992 สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังต่ำที่มี $I_{SC}/I_L < 20$



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 สัญญาณกระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (I_p) กระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (I_{c2}) และกระแสแหล่งจ่าย (I_s) (ก) ก่อนติดตั้ง (ข) หลังติดตั้ง วงจรกรองกำลังพาสซีฟ

4.5 สรุป

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกข้างต้น แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า วงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจาก อินเวอร์เตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวได้เป็นอย่างดี กระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับมีค่าลดลงจากเดิมอย่างชัดเจน ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมมีค่าลดลงจากเดิม 122.3% เหลือเพียง 24.37% เมื่อใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแต่เพียงอย่างเดียว ในขณะที่อัลกอริทึม SWFA สามารถระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพื่อใช้สร้างกระแสชดเชยอ้างอิงให้แก่วงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟได้เป็นอย่างดี ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้หลังติดตั้งวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟเพิ่มเติม พบว่าค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเหลือเพียง 0.18% จากเดิม 24.37% ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับอยู่ในกรอบข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังต่ำ อีกด้วย ในแง่มุมของพิกัดกำลังไฟฟ้า กรณีศึกษาที่นำเสนอนี้พบว่าการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ ร่วมกับวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟสามารถลดพิกัด VA ของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟได้ถึง 82%



บทที่ 5

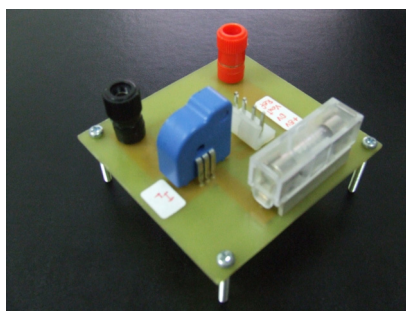
ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

5.1 บทนำ

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ซึ่งโปรแกรมด้วยภาษาซีบนการ์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) จำเป็นต้องตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้า ได้แก่ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับชุดตัวตรวจวัดปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่รวมวงจรแปลงสัญญาณ โครงสร้างของการ์ด DSP วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก วงจรรอกำลังพาสซีฟ วงจรรอกำลังแอกทีฟ และซอฟต์แวร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ส่วนผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ตามที่นำเสนอไว้ในบทนี้ปรากฏในบทที่ 6

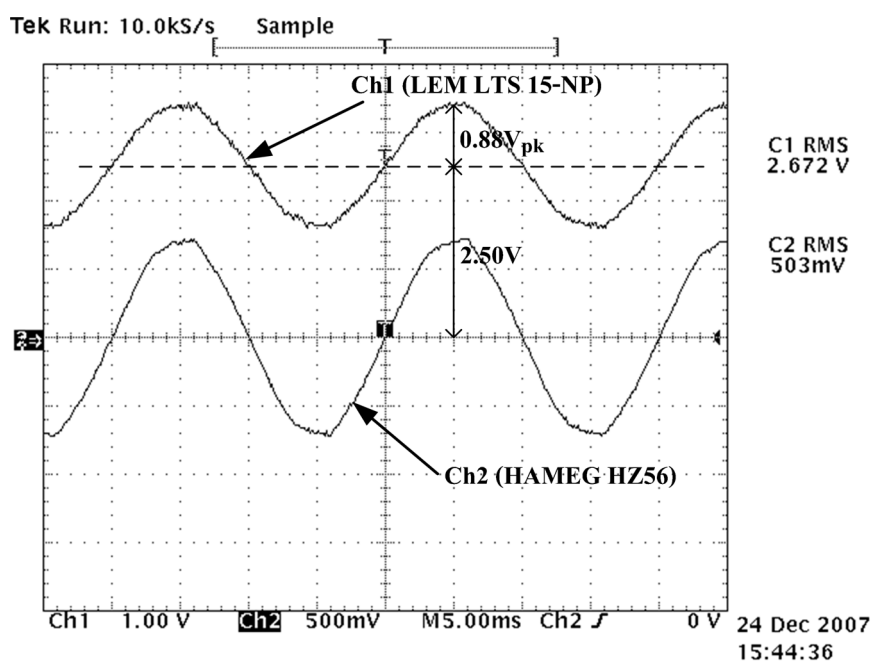
5.2 การตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า

การตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของบริษัท LEM รุ่น LTS 15-NP แสดงดังรูปที่ 5.1 ที่สามารถเลือกย่านการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าได้ 3 ระดับ คือ $5 A_{\text{rms-nominal}}$ ($16 A_{\text{rms-MAX}}$) $7.5 A_{\text{rms-nominal}}$ ($24 A_{\text{rms-MAX}}$) และ $15 A_{\text{rms-nominal}}$ ($48 A_{\text{rms-MAX}}$) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้ย่านการตรวจวัดกระแสที่ $5 A_{\text{rms}}$ ($16 A_{\text{rms-MAX}}$) ซึ่งสอดคล้องกับกระแสโหลดของระบบที่ทดสอบ (ข้อมูลทางเทคนิคของ LEM LTS15-NP ปรากฏในภาคผนวก ก.) เอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าบวก



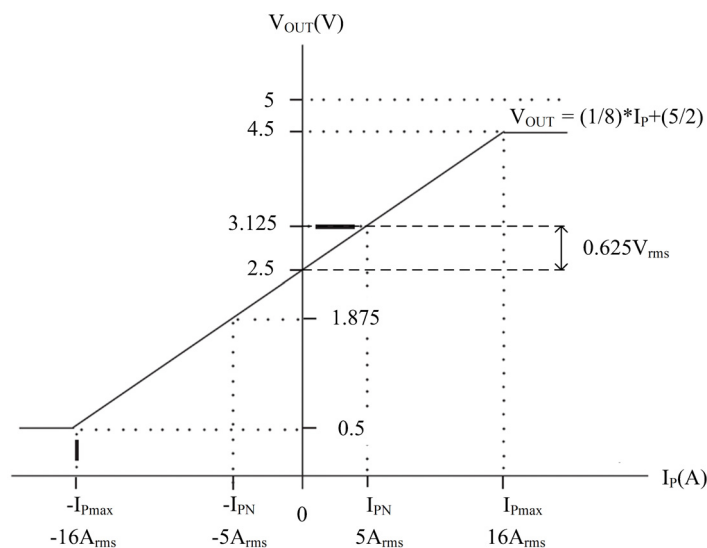
รูปที่ 5.1 อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า LEM LTS 15-NP

มีขนาด 0-5 V การทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าทำโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด $5 A_{rms}$ ผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าง่ายแล้ววัดแรงดันเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจวัด โดยได้เปรียบเทียบกับกรวัดด้วยโพรบวัดกระแส (current probe) ของบริษัท HAMEG รุ่น HZ56 ซึ่งมีอัตราส่วนเอาต์พุตต่ออินพุตเท่ากับ 100 mV:1 A ผลการตรวจวัดกระแสดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.2

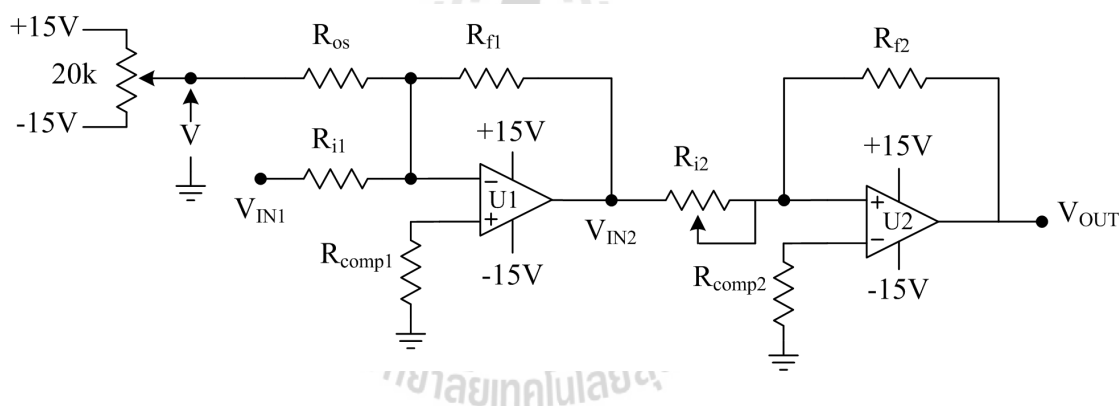


รูปที่ 5.2 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (Ch1:8A/DIV Ch2:5A/DIV)

โดยช่องสัญญาณที่ 1 (Ch1) คือ สัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด LEM รุ่น LTS 15-NP มีแรงดันดีซีเชิงศูนย์ขนาด 2.5 V ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 ดังนั้นหากกระแสที่วัดเป็น $0 A_{rms}$ LTS 15-NP จะให้แรงดันเอาต์พุต 2.5 V เมื่อพิจารณารูปคลื่นของสัญญาณในช่องที่ 1 ตามรูปที่ 5.2 เมื่อใช้เส้นประที่ 2.5 V เป็นจุดอ้างอิง จะสามารถอ่านค่ายอดแรงดันเอาต์พุตจาก LEM LTS 15-NP ได้ประมาณ $0.88 V_{pk}$ แรงดันอาร์เอ็มเอสเป็น $0.622 V_{rms}$ ซึ่งสอดคล้องกับกราฟลักษณะสมบัติของ LEM LTS 15-NP ดังรูปที่ 5.3 ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 (Ch2) คือ สัญญาณที่ได้จากโพรบวัดกระแส อ่านค่าได้ $5 A_{rms}$ ซึ่งมีค่ายอดประมาณ 7 A เนื่องจากการ์ด DSP สามารถรับอินพุตสัญญาณแอนะล็อกเป็นแรงดันค่าบวกขนาดไม่เกิน 3 V เท่านั้น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ส่งไปยังการ์ด DSP จำเป็นต้องผ่านวงจรแปลงสัญญาณดังรูปที่ 5.4 ซึ่งเป็นวงจรขยายรวมกลับเฟสสัญญาณ

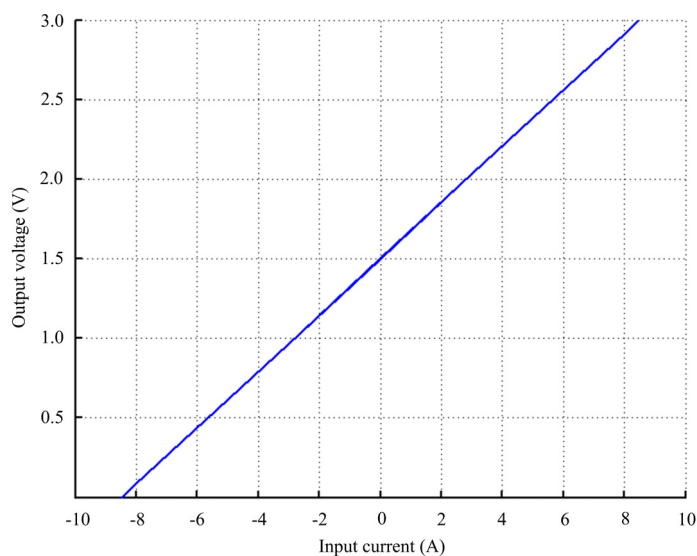


รูปที่ 5.3 กราฟลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า LEM LTS 15-NP



รูปที่ 5.4 วงจรปรุ่่งแต่งสัญญาณสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต้องการตรวจวัดกระแสในช่วง 0 ถึง $6 A_{rms}$ และต้องการให้เอาต์พุตตามกราฟลักษณะสมบัติแบบเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.25 V การออกแบบวงจรปรุ่่งแต่งสัญญาณจึงมีเงื่อนไขดังนี้ ที่ค่ากระแส 0 A แรงดันเอาต์พุต (V_{OUT}) จะต้องมีค่าเท่ากับ 1.5 V และที่ค่ากระแสสูงสุด $6 A_{rms}$ ซึ่งค่าขดทางด้านลบมีค่าเท่ากับ 8.485 A แรงดันเอาต์พุต (V_{OUT}) จะต้องมีค่าเท่ากับ 3 V นั้นหมายถึงค่าขดทางด้านลบ -8.485 A แรงดันเอาต์พุต (V_{OUT}) จะมีค่าเท่ากับ 0 V ดังกราฟรูปที่ 5.5 วงจรปรุ่่งแต่งสัญญาณประกอบด้วยวงจรออปแอมป์ 2 ชุด ดังแผนภาพวงจรในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของวงจรป้อนกลับสัญญาณ

วงจรชุดแรก (U1) เป็นวงจรขยายรวมสัญญาณ (summing amplifier) มีหน้าที่ปรับแรงดันเชิงศูนย์ของสัญญาณอินพุต (V_{IN1}) ซึ่งปรับโดยแรงดัน V ในที่นี้ได้กำหนดอัตราขยายสัญญาณอินพุต (m_1) ไว้เท่ากับ -1 และกำหนดอัตราขยายสัญญาณแรงดันเชิงศูนย์ (m_{OS}) เท่ากับ -1 วงจรชุดที่สอง (U2) เป็นวงจรขยายกลับเฟสสัญญาณ (inverting amplifier) มีหน้าที่ปรับอัตราขยายสัญญาณ (m_2) ให้มีค่าเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังกราฟในรูปที่ 5.5 จากวงจรในรูปที่ 5.4 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต (V_{IN1}) และสัญญาณเอาต์พุต (V_{OUT}) ได้ดังสมการที่ (5.1) การออกแบบค่าแรงดันเชิงศูนย์ (V) และค่าความต้านทานของวงจรป้อนกลับสัญญาณสามารถทำได้ด้วยการแก้สมการเชิงเส้นดังต่อไปนี้

$$V_{OUT} = \left[-\frac{R_{f1}}{R_{i1}} \times V_{IN1} - \frac{R_{f1}}{R_{OS}} \times V \right] \times -\frac{R_{f2}}{R_{i2}} \quad (5.1)$$

$$\text{โดยที่ } V_{IN1} = \frac{1}{8} \times I_p + \frac{5}{2} \quad (5.2)$$

$$m_1 = -\frac{R_{f1}}{R_{i1}} \quad (5.3)$$

$$m_{os} = -\frac{R_{f1}}{R_{os}} \quad (5.4)$$

$$m_2 = -\frac{R_{f2}}{R_{i2}} \quad (5.5)$$

กำหนดให้อัตราขยายของวงจรชุดแรก $m_1 = -1$ และ $m_{os} = -1$ ดังนั้นจะได้

$$m_1 = m_{os} = -\frac{R_{f1}}{R_{i1}} = -\frac{R_{f1}}{R_{os}} = -1 \quad (5.6)$$

เลือกใช้ $R_{f1} = R_{i1} = R_{os} = 100 \text{ k}\Omega$ จะได้

$$V_{out} = [-V_{in1} - V] \times m_2 \quad (5.7)$$

แทนค่า V_{in1} ตามสมการที่ (5.2) ลงในสมการที่ (5.7) จะได้

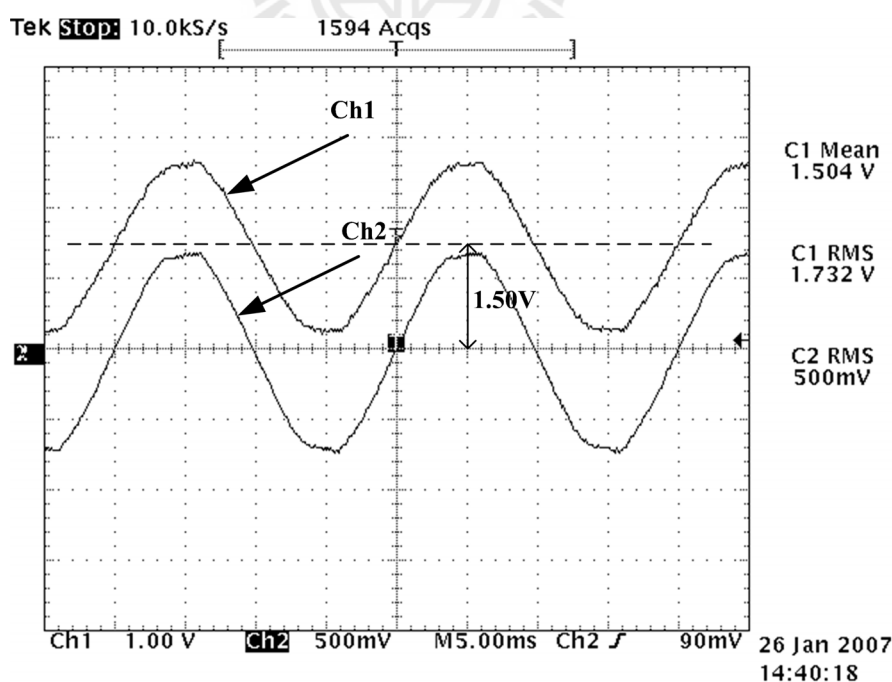
$$V_{out} = \left[\left(-\frac{1}{8} \times I_p - \frac{5}{2} \right) - V \right] \times m_2 \quad (5.8)$$

จากสมการที่ (5.8) เหลือค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า คือ V และ m_2 จึงทำการสร้างสมการใหม่ขึ้นสองสมการเพื่อหาค่าคงที่ดังกล่าว โดยสมการแรกแทนค่า $I_p = 6\sqrt{2} \text{ A}$ และ $V_{out} = 3 \text{ V}$ ลงในสมการที่ 5.8 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.9) ส่วนสมการที่สองแทนค่า $I_p = 0 \text{ A}$ และ $V_{out} = 1.5 \text{ V}$ ลงในสมการที่ 5.8 เช่นกัน จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.10)

$$3 = -\frac{1}{8} \times 6\sqrt{2} \times m_2 - \frac{5}{2} \times m_2 - V \times m_2 \quad (5.9)$$

$$1.5 = -\frac{1}{8} \times 0 \times m_2 - \frac{5}{2} \times m_2 - V \times m_2 \quad (5.10)$$

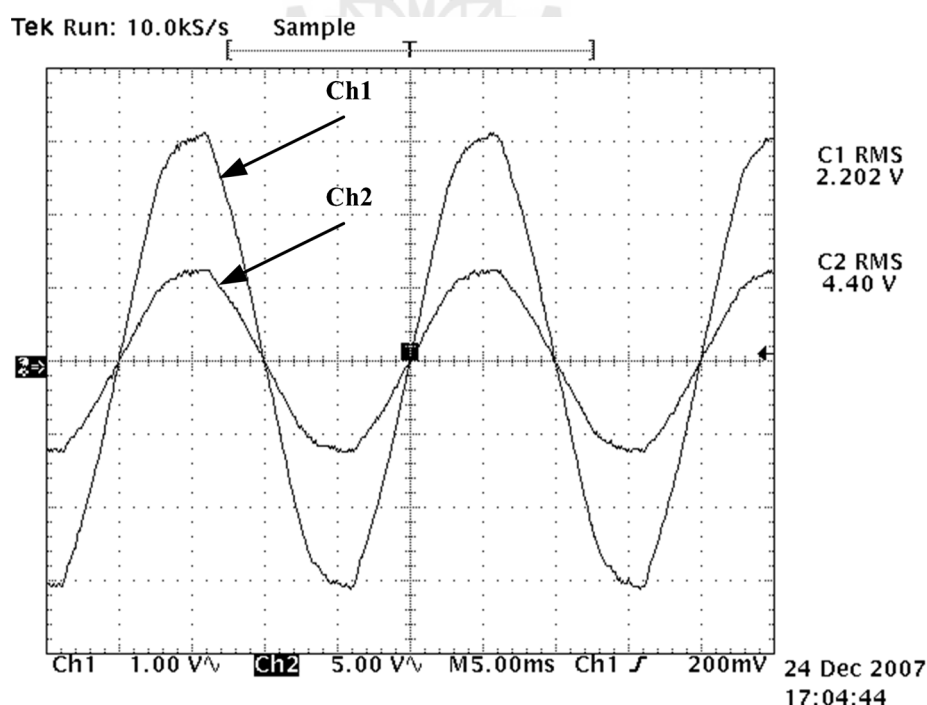
จากสมการที่ (5.9) และ (5.10) จะได้ว่า $m_2 = -\sqrt{2}$ และ $V = -1.439$ V จากสมการที่ (5.5) เลือก $R_{i2} = 50$ k Ω จะได้ $R_{i2} = 35.35$ k Ω ในทางปฏิบัติใช้ความต้านทานแบบปรับค่าได้ขนาด 100 k Ω ส่วน R_{comp1} มีค่าประมาณ $R_{i1}/R_{i1}/R_{OS} = 33.33$ k Ω เลือกใช้ $R_{comp1} = 33.2$ k Ω และ R_{comp2} มีค่าประมาณ $R_{i2}/R_{i2} = 20.7$ k Ω เลือกใช้ $R_{comp2} = 21$ k Ω หลังจากทำการตั้งค่าต่าง ๆ ของวงจรป้อนแต่งสัญญาณตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ได้ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 5 A_{rms} ผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส จากนั้นป้อนแรงดันเอาต์พุตจากอุปกรณ์ตรวจวัดผ่านวงจรป้อนแต่งสัญญาณดังกล่าว ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุต (V_{OUT}) ของวงจรป้อนแต่งสัญญาณ ได้สัญญาณเอาต์พุต ดังรูปที่ 5.6 ช่องสัญญาณที่ 1 (Ch1) แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรป้อนแต่งสัญญาณ และช่องสัญญาณที่ 2 (Ch2) แสดงสัญญาณที่ได้จากโพรบวัดกระแส (100 mV:1 A) อ่านค่าได้ 5 A_{rms} จะเห็นได้ว่าสัญญาณในช่องสัญญาณที่ 1 มีเฉพาะค่าบวกไม่เกิน 3 V และมีแรงดันเยื้องศูนย์ 1.5 V ตามความต้องการที่กำหนดด้วยกราฟลักษณะสมบัติดังรูปที่ 5.5 ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตนี้จะถูกส่งเข้าการ์ด DSP เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป



รูปที่ 5.6 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรป้อนแต่งสัญญาณเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากโพรบวัดกระแส (Ch1: $4\sqrt{2}$ A/DIV และ Ch2: 5A/DIV)

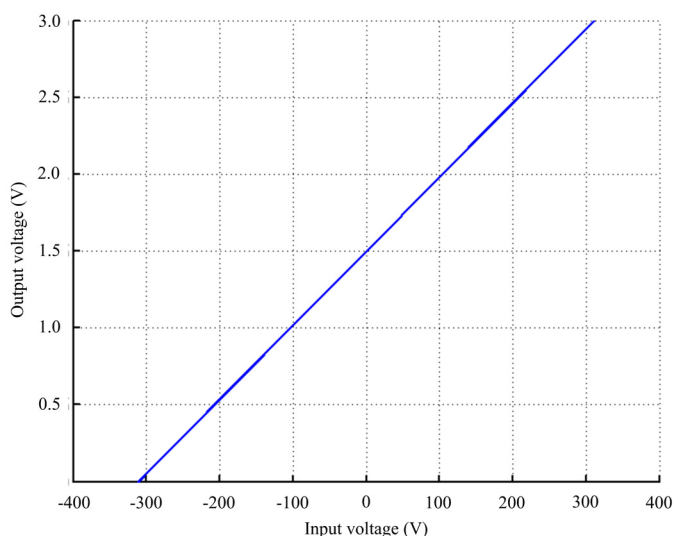
5.3 การตรวจวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้า

การตรวจวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ $250\text{ V}_{\text{rms}}$ และพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ 5 V_{rms} ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนอินพุตต่อเอาต์พุตเท่ากับ 50:1 ดังนั้นหากป้อนแรงดันทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ $220\text{ V}_{\text{rms}}$ แรงดันเอาต์พุตทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าเท่ากับ $4.4\text{ V}_{\text{rms}}$ และมีค่ายอดเท่ากับ $6.22\text{ V}_{\text{pk}}$ ผลการทดสอบหม้อแปลงแสดงดังรูปที่ 5.7 ช่องสัญญาณที่ 1 (Ch1) แสดงสัญญาณแรงดันทางด้านปฐมภูมิ และเพื่อความปลอดภัยจึงวัดแรงดันนี้ผ่านอุปกรณ์แยกโคดสัญญาณไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนอินพุตต่อเอาต์พุตเท่ากับ 100:1 ดังนั้นการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากช่องสัญญาณที่ 1 ต้องคูณด้วย 100 เพื่อแปลงเป็นขนาดของสัญญาณที่วัดได้จริง ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 (Ch2) แสดงสัญญาณแรงดันทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งเป็นแรงดันต่ำสามารถวัดได้โดยตรงไม่ต้องผ่านการแยกโคดสัญญาณ จากรูปวัดได้ประมาณ $4.4\text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งมีค่ายอดประมาณ $6.22\text{ V}_{\text{pk}}$ จะเห็นได้ว่าสัญญาณมีทั้งค่าบวกและลบ ก่อนส่งเข้าการ์ด DSP ต้องทำการปรับสัญญาณด้วยวงจรปรังแต่งสัญญาณ ซึ่งมีลักษณะของวงจรเหมือนกับวงจรปรังแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.4 แต่ค่าความต้านทานต่าง ๆ และค่าแรงดันอ้างอิงศูนย์ (V) ของวงจรจะมีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 5.7 สัญญาณที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

(Ch1:100V/DIV และ Ch2:5V/DIV)



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตรวจวัดกับแรงดันเอาต์พุตของวงจรป้อนแรงดัน

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต้องการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง $220 \text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งทำให้เอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0 ถึง $4.4 \text{ V}_{\text{rms}}$ การออกแบบวงจรป้อนแรงดันสัญญาณจึงมีเงื่อนไขดังนี้ ที่ค่าแรงดันตรวจวัด 0 V แรงดันเอาต์พุตของวงจรป้อนแรงดันสัญญาณ (V_{OUT}) จะต้องมีค่าเท่ากับ 1.5 V และที่ค่าแรงดันตรวจวัดสูงสุด $220 \text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งค่าขดทางด้านลบมีค่าประมาณ 311 V แรงดันเอาต์พุต (V_{OUT}) จะต้องมีค่าเท่ากับ 3 V นั่นหมายถึงค่าขดทางด้านลบ -311 V แรงดันเอาต์พุต (V_{OUT}) จะมีค่าเท่ากับ 0 V แสดงดังกราฟรูปที่ 5.8 วงจรออปแอมป์ชุดแรก (U1) ถูกกำหนดอัตราขยายสัญญาณอินพุต (m_1) ไว้เท่ากับ -1 และกำหนดอัตราขยายสัญญาณแรงดันเชิงศูนย์ (m_{OS}) เท่ากับ -1 วงจรชุดที่สอง (U2) มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ m_2 จากวงจรในรูปที่ 5.4 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต (V_{IN1}) และสัญญาณเอาต์พุต (V_{OUT}) ได้ดังสมการที่ (5.11) การออกแบบค่าแรงดันเชิงศูนย์ (V) และค่าความต้านทานของวงจรป้อนแรงดันสัญญาณสามารถทำได้ด้วยการแก้สมการเชิงเส้นดังต่อไปนี้

$$V_{\text{OUT}} = \left[-\frac{R_{f1}}{R_{i1}} \times V_{\text{IN1}} - \frac{R_{f1}}{R_{\text{OS}}} \times V \right] \times -\frac{R_{f2}}{R_{i2}} \quad (5.11)$$

โดยที่ $V_{\text{IN1}} = \frac{V_{\text{primary}}}{50}$ (5.12)

$$m_1 = -\frac{R_{f1}}{R_{i1}} \quad (5.13)$$

$$m_{os} = -\frac{R_{f1}}{R_{os}} \quad (5.14)$$

$$m_2 = -\frac{R_{f2}}{R_{i2}} \quad (5.15)$$

กำหนดให้อัตราขยายของวงจรชุดแรก $m_1 = -1$ และ $m_{os} = -1$ ดังนั้นจะได้

$$m_1 = m_{os} = -\frac{R_{f1}}{R_{i1}} = -\frac{R_{f1}}{R_{os}} = -1 \quad (5.16)$$

เลือกใช้ $R_{i1} = R_{i2} = R_{os} = 100 \text{ k}\Omega$ จะได้

$$V_{OUT} = [-V_{IN1} - V] \times m_2 \quad (5.17)$$

แทนค่า V_{IN1} ตามสมการ (5.12) ลงในสมการที่ (5.17) จะได้

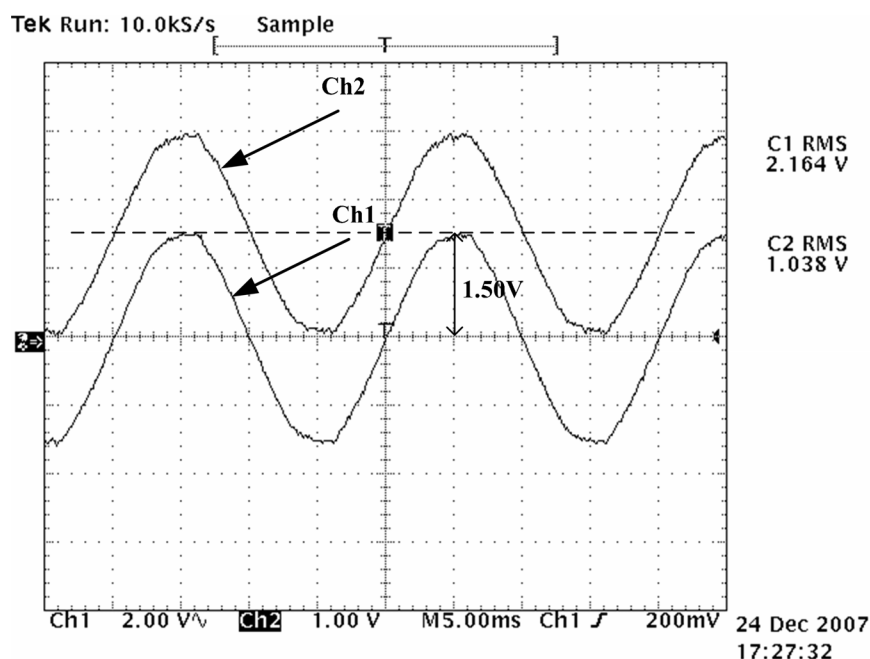
$$V_{OUT} = \left[-\frac{V_{primary}}{50} - V \right] \times m_2 \quad (5.18)$$

จากสมการที่ (5.18) เหลือค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า คือ V และ m_2 จึงทำการสร้างสมการใหม่ขึ้นสองสมการเพื่อหาค่าคงที่ดังกล่าว โดยสมการแรกแทนค่า $V_{primary} = 220\sqrt{2} \text{ V}$ และ $V_{OUT} = 3 \text{ V}$ ลงในสมการที่ (5.18) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.19) ส่วนสมการที่สองแทนค่า $V_{primary} = 0 \text{ V}$ และ $V_{OUT} = 1.5 \text{ V}$ ลงในสมการที่ (5.18) เช่นกัน จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5.20)

$$3 = -\frac{220\sqrt{2}}{50} \times m_2 - V \times m_2 \quad (5.19)$$

$$1.5 = \frac{0}{50} \times m_2 - V \times m_2 \quad (5.20)$$

จากสมการที่ (5.19) และ (5.20) จะได้ว่า $m_2 = -0.241$ และ $V = 6.22$ V จากสมการที่ (5.15) เลือก $R_{i2} = 100$ k Ω จะได้ $R_{i2} = 414.9$ k Ω ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้ความต้านทานแบบปรับค่าได้ขนาด 500 k Ω ส่วน R_{comp1} มีค่าประมาณ $R_{f1}/R_{i1}/R_{OS} = 33.33$ k Ω เลือกใช้ $R_{comp1} = 33.2$ k Ω และ R_{comp2} มีค่าประมาณ $R_{i2}/R_{i2} = 80.58$ k Ω เลือกใช้ $R_{comp2} = 80.6$ k Ω หลังจากทำการตั้งค่าต่าง ๆ ของวงจรปรุงแต่งสัญญาณตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ได้ทำการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 V_{rms} โดยอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า แล้วป้อนแรงดันเอาต์พุตจากอุปกรณ์ตรวจวัดผ่านวงจรปรุงแต่งสัญญาณดังกล่าว จากนั้นทำการวัดสัญญาณเอาต์พุต (V_{OUT}) ของวงจรปรุงแต่งสัญญาณ ได้สัญญาณเอาต์พุต ดังรูปที่ 5.9 โดยช่องสัญญาณที่ 1 (Ch1) แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงวัดผ่านอุปกรณ์แยกโคตสัญญาณไฟฟ้า (100:1) อ่านค่าได้ประมาณ 216.4 V_{rms} และช่องสัญญาณที่ 2 (Ch2) แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรปรุงแต่งสัญญาณ จะเห็นได้ว่าสัญญาณดังกล่าวมีเฉพาะค่าบวกไม่เกิน 3 V และมีแรงดันเยื้องศูนย์ 1.5 V ตามที่กำหนด ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตนี้จะถูกส่งเข้าการ์ด DSP เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป



รูปที่ 5.9 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรปรั้งแต่งสัญญาณสำหรับการตรวจวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้า (Ch1:200V/DIV และ Ch2:207.42V/DIV)

5.4 การ์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

การ์ด DSP ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สำหรับระบบเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกเป็นของบริษัท Texas Instruments รุ่น eZdsp™ F2812 ความเร็วในการประมวลผลของซีพียูเท่ากับ 150 MHz สถาปัตยกรรมของซีพียูเป็น 32 บิต การ์ดดังกล่าวมีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในตัวทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีความแยกชัด (resolution) 12 บิต ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพียง 2 ช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณแรกรับข้อมูลแรงดันไฟฟ้า จากวงจรปรั้งแต่งสัญญาณที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ส่วนอีกหนึ่งช่องสัญญาณรับข้อมูลกระแสไฟฟ้า จากวงจรปรั้งแต่งสัญญาณที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.2 นอกจากนี้การ์ด DSP ดังกล่าว มีพอร์ตไอโอ (I/O ports) ทั้งหมด 3 ชุด ได้แก่ พอร์ต P4 P7 และ P8 ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้พอร์ตไอโอเพื่อส่งข้อมูลผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก รายละเอียดเกี่ยวกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.5 ส่วนการอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการ์ด DSP ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเฉพาะการเชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลกับวงจรปรั้งแต่งสัญญาณ และการเชื่อมต่อกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกผ่านพอร์ตไอโอเท่านั้น รายละเอียดอื่น ๆ เกี่ยวกับการ์ด DSP รุ่น eZdsp™ F2812 สามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จาก <http://www.ti.com>

การจัดเรียงพินสำหรับวงจรแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของการ์ด DSP แสดงไว้ในรูปที่ 5.10 ซึ่งมีอยู่สองพอร์ตด้วยกัน คือ P5 และ P9 โดยรายละเอียดของพอร์ตดังกล่าวควรถูกได้จากตารางที่ 5.1

P5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
P9	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19

รูปที่ 5.10 การจัดเรียงพินของพอร์ตรับข้อมูลแอนะล็อก P5 และ P9 ของ eZdsp™ F2812

พิน 1 ถึงพิน 8 ของพอร์ต P5 เป็นช่องรับข้อมูลสัญญาณแอนะล็อก 8 ช่องสัญญาณ (ADC B0 ถึง ADC B7) ส่วนพิน 2 4 6 8 10 12 14 และ 16 ของพอร์ต P9 เป็นช่องรับข้อมูลสัญญาณแอนะล็อกอีก 8 ช่องสัญญาณ (ADC A0 ถึง ADC A7) รวมทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากวงจรปรุแต่งสัญญาณต่อกับพิน 7 ของพอร์ต P5 ในขณะที่สัญญาณกระแสไฟฟ้าจากวงจรปรุแต่งสัญญาณต่อกับพิน 2 ของพอร์ต P9 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดพอร์ตรับข้อมูลแอนะล็อก P5 และ P9 ของ eZdsp™ F2812

พินของพอร์ต	ช่องสัญญาณแอนะล็อก	พินของพอร์ต	ช่องสัญญาณแอนะล็อก	พินของพอร์ต	ช่องสัญญาณแอนะล็อก
5	แอนะล็อก	9	แอนะล็อก	9	แอนะล็อก
1	ADC B0	1	GND	2	ADC A0
2	ADC B1	3	GND	4	ADC A1
3	ADC B2	5	GND	6	ADC A2
4	ADC B3	7	GND	8	ADC A3
5	ADC B4	9	GND	10	ADC A4
6	ADC B5	11	GND	12	ADC A5
7	ADC B6	13	GND	14	ADC A6
8	ADC B7	15	GND	16	ADC A7
9	ADC REFM	17	GND	18	VREFLO
10	ADC REFP	19	GND	20	No connect

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดพอร์ตไอโอ P7 ของ eZdsp™ F2812

พินของพอร์ต P7	รายละเอียดของพิน
1	A13
2	A14
3	A15
4	T2CTRIpN/EVASOCn
5	B13
6	B14
7	B15
8	T4CTRIpN/EVBSOCn
9	No connect
10	GND

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดพอร์ตไอโอ P4 และ P8 ของ eZdsp™ F2812

พินของพอร์ต P4	รายละเอียดของพิน	พินของพอร์ต P8	รายละเอียดของพิน	พินของพอร์ต P8	รายละเอียดของพิน
1	+3.3	1	+3.3V	2	+3.3V
2	XINT2/ASC SOC	3	SCITXDA	4	SCIRXDA
3	MCLKXA	5	XINT1n/XBIO n	6	A8
4	MCLKRA	7	A9	8	A10
5	MFSXA	9	A0	10	A1
6	MFSRA	11	A2	12	A3
7	MDXA	13	A4	14	A5
8	MDRA	15	A6	16	A7
9	No connect	17	A11	18	A12
10	GND	19	GND	20	GND

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดพอร์ตไอโอ P4 และ P8 ของ eZdsp™ F2812 (ต่อ)

พินของ พอร์ต P4	รายละเอียด ของพิน	พินของ พอร์ต P8	รายละเอียดของพิน	พินของ พอร์ต P8	รายละเอียดของพิน
11	B9	21	No connect	22	XINT1n/XBIO _n
12	B10	23	SPISIMOA	24	SPISOMIA
13	B6	25	SPICLKA	26	SPISTEAA
14	B7	27	CANTXA	28	CANRXA
15	B11	29	XCLKOUT	30	B0
16	B12	31	B1	32	B2
17	XF/XPLLDIS _n	33	B3	34	B4
18	SCITXDB	35	B5	36	B8
19	SCIRXDB	37	T1CTRIIP/PDPINTA _n	38	T3CTRIIP/PDPINTB _n
20	GND	39	GND	40	GND

การจัดเรียงพินของพอร์ตไอโอ P4 P7 และ P8 แสดงไว้ในรูปที่ 5.11 โดยที่รายละเอียดของพอร์ต P7 คูได้จากตารางที่ 5.2 ส่วนรายละเอียดของพอร์ต P4 และ P8 คูได้จากตารางที่ 5.3

P4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P8	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39
P7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										

รูปที่ 5.11 การจัดเรียงพินของพอร์ตไอโอ P4 P7 และ P8 ของ eZdsp™ F2812

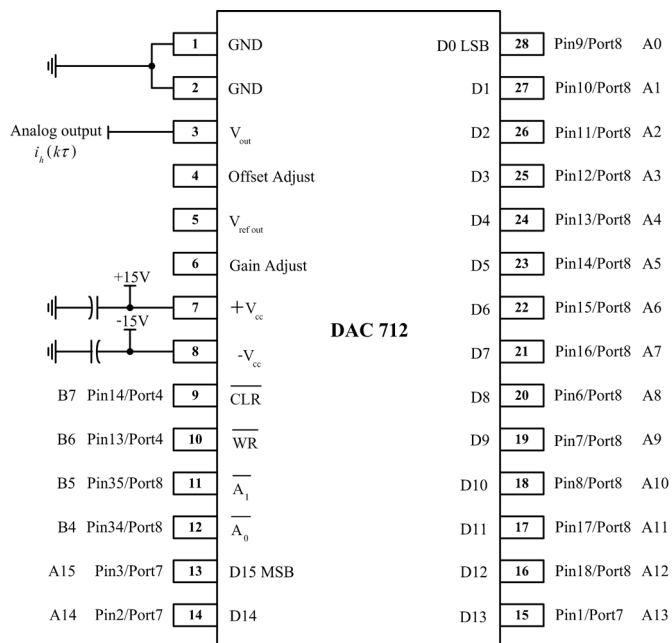
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้พิน 1 ถึง 3 ของพอร์ต P7 พิน 6 ถึง 18 และพิน 34 กับ 35 ของพอร์ต P8 ในขณะที่พอร์ต P4 ใช้พิน 13 และ 14 สำหรับการเชื่อมต่อพอร์ตไอโอกับวงจรแปลง

สัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ที่เป็นวงจรภายนอกการ์ด DSP รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.5

5.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

ไอซีที่ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ที่เชื่อมต่อกับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP ใช้ไอซีเบอร์ DAC712 ของ Burr-Brown ซึ่งมีความแยกชัด 16 บิต การเชื่อมต่อระหว่าง DAC712 กับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP แสดงไว้ในรูปที่ 5.12 ซึ่งเชื่อมต่อกับพอร์ต P4 P7 และ P8 โดย DAC712 ให้เอาต์พุตแอนะล็อกออกทางขา 3 ของไอซี การ์ด DSP เป็นอุปกรณ์ระบบเอกลักษณ์ฮาร์โมนิก ซึ่งผลการระบบเอกลักษณ์จะได้กระแสชดเชยฮาร์โมนิกอ้างอิง ($i_h(kT)$) ข้อมูลกระแสอ้างอิงดังกล่าวจะถูกส่งออกมาทางขา 3 ของไอซี DAC712 เพื่อส่งต่อไปที่วงจรรอกกำลังแอกทิฟ (วงจรรอกกำลังแอกทิฟได้นำเสนอในหัวข้อที่ 5.8)

การควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 ควบคุมโดยสัญญาณดิจิทัล 4 บิต (B7 B6 B5 และ B4) ของการ์ด DSP โดยต่อสัญญาณควบคุมเข้าที่ขา 9 10 11 และ 12 ตามลำดับ โดยลำดับขั้นตอนและรหัสควบคุมแสดงดังตารางที่ 5.4 ขั้นตอนที่ 1 เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับ DAC712 (โหมด “no change”) ขั้นตอนที่ 2 เป็นการโหลดข้อมูล 16 บิต ซึ่งเป็นกระแสอ้างอิงผ่านพิน A0 ถึง A15 (ขา 13 ถึงขา 28 ของ DAC712 ในรูปที่ 5.12) ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนที่บ่งบอกถึงการสิ้นสุดการโหลดข้อมูล (โหมด “no change”) ขั้นตอนที่ 4 ถึง 6 เป็นขั้นตอนสำหรับโหลดอินพุตแลตช์ (load input latch $\overline{WR} = 1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$) ส่วนขั้นตอนที่ 7 ถึง 9 เป็นขั้นตอนสำหรับโหลดดีทิวเอแลตช์ (load D/A latch $\overline{WR} = 1 \rightarrow 0 \rightarrow 1$) รายละเอียดต่าง ๆ ของไอซี DAC712 สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก <http://www.burr-brown.com>



รูปที่ 5.12 การเชื่อมต่อพอร์ตไอโอของการ์ด DSP กับไอซี DAC712

ตารางที่ 5.4 ขั้นตอนควบคุมการทำงานของไอซี DAC712 และรหัสควบคุมซึ่งออกแบบตามตารางความจริง (truth table) ของ DAC712

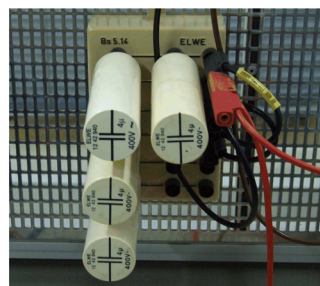
ลำดับขั้นตอนการทำงานของไอซี DAC712	รหัสควบคุม			
	B7	B6	B5	B4
ขั้นตอนที่ 1 (no change)	1	1	1	1
ขั้นตอนที่ 2 (load reference current)	NC	NC	NC	NC
ขั้นตอนที่ 3 (no change)	1	1	1	1
ขั้นตอนที่ 4 (load input latch $\overline{WR} = 1$)	1	1	1	0
ขั้นตอนที่ 5 (load input latch $\overline{WR} = 0$)	1	0	1	0
ขั้นตอนที่ 6 (load input latch $\overline{WR} = 1$)	1	1	1	0
ขั้นตอนที่ 7 (load D/A latch $\overline{WR} = 1$)	1	1	0	1
ขั้นตอนที่ 8 (load D/A latch $\overline{WR} = 0$)	1	0	0	1
ขั้นตอนที่ 9 (load D/A latch $\overline{WR} = 1$)	1	1	0	1

5.6 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ

วงจรกรองกำลังพาสซีฟประกอบด้วยอุปกรณ์รีแอคทีฟสองชนิด คือ ตัวเหนี่ยวนำ (L_f) ขนาด 105 mH และตัวเก็บประจุ (C_f) ขนาด $10\ \mu\text{F}$ ตัวเหนี่ยวนำเป็นชนิดแกนเหล็กผลิตโดยบริษัท ESTEL มีพิกัด $220\text{ V}_{\text{rms}}/8\text{ A}_{\text{rms}}$ แสดงดังรูปที่ 5.13 (ก) ส่วนตัวเก็บประจุเป็นของบริษัท ELWE มีพิกัด 400 V แสดงดังรูปที่ 5.13 (ข) โดยรายละเอียดของโครงสร้างและการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการนำเสนอไว้แล้วในบทที่ 4



(ก)

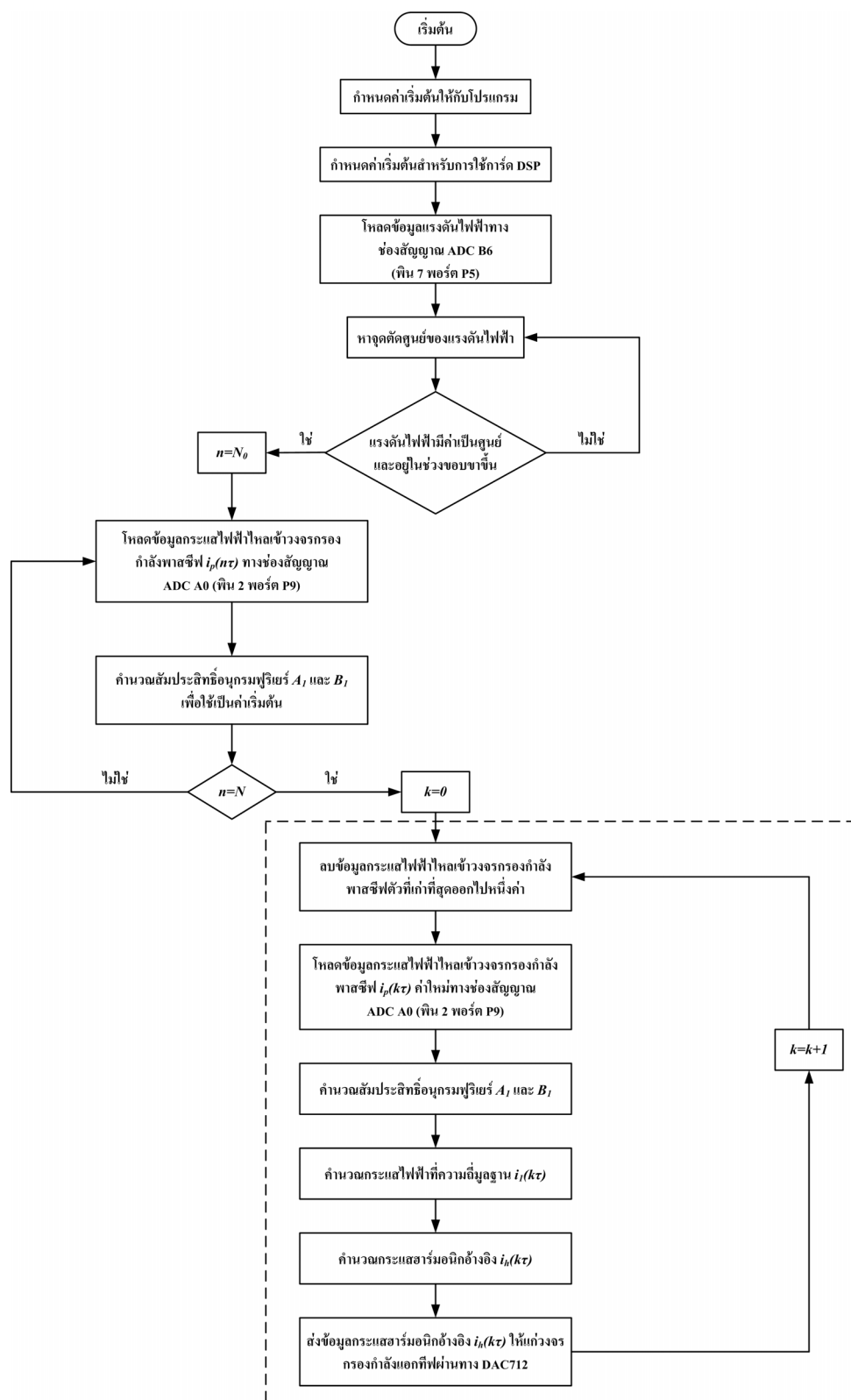


(ข)

รูปที่ 5.13 สาร์ดแวร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (ก) ตัวเหนี่ยวนำ และ (ข) ตัวเก็บประจุ

5.7 ซอฟต์แวร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่โปรแกรมด้วยภาษาซีบนการ์ด DSP สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธี SWFA ในการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 4 ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่โปรแกรมบนการ์ด DSP แผนภูมิขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 5.14 แผนภูมิเริ่มต้นจากการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรมและกำหนดสถานะเริ่มต้นสำหรับการใช้งานการ์ด DSP หลังจากนั้นเป็นการโหลดข้อมูลแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักจากวงจรป้อนแต่งสัญญาณ (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.3) ผ่านวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลทางช่องสัญญาณ ADC B6 เพื่อคำนวณหาจุดตัดศูนย์ ถ้าแรงดันดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์และอยู่ในช่วงขอบขาขึ้น จะดำเนินการโหลดข้อมูลกระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ $i_p(nT)$ จากวงจรป้อนแต่งสัญญาณ (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.2) ผ่านทางวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลทางช่องสัญญาณ ADC A0 จากนั้นคำนวณหาสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ความถี่มูลฐาน A_1 และ B_1 ซึ่งจะทำการโหลดข้อมูลกระแส



รูปที่ 5.14 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก
ด้วยวิธี SWFA บนการ์ด DSP

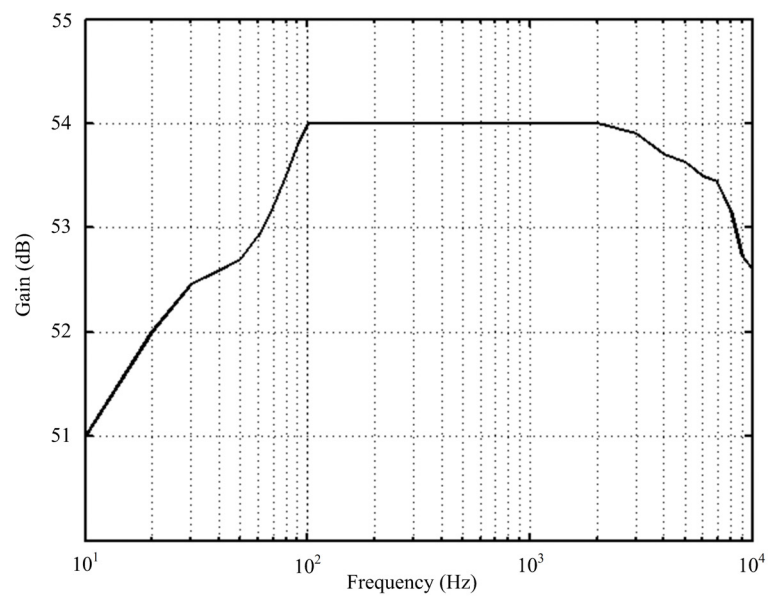
$i_p(nt)$ และคำนวณหา A_1 และ B_1 ไปจนกว่าจะครบหนึ่งคาบสัญญาณไฟฟ้า 50 Hz ซึ่งภายในหนึ่งคาบจะได้ตัวอย่างข้อมูลกระแส $i_p(nt)$ ทั้งหมด N ตัวอย่าง ($N=400$) ข้อมูลดังกล่าวจะถูกเก็บไว้ในตัวแปรชนิดแถวลำดับในภาษาซีภายในการ์ด DSP ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนตั้งค่าเริ่มต้นให้สัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1

เมื่อโหลดข้อมูลกระแส $i_p(nt)$ จนครบ N ตัวอย่าง ($N=400$) จะเริ่มเข้าสู่กระบวนการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกอ้างอิง ขั้นแรกทำการลบข้อมูลกระแส $i_p(nt)$ ตัวที่เก่าที่สุดออกไปหนึ่งค่า หลังจากนั้นโหลดข้อมูลกระแส $i_p(k\tau)$ ค่าใหม่ทางช่องสัญญาณ ADC A0 เข้ามาแทนที่ตัวที่ถูกลบทิ้งไป จากนั้นคำนวณหา A_1 และ B_1 ค่าใหม่เมื่อได้สัมประสิทธิ์ค่าใหม่แล้ว จึงคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน $i_1(k\tau)$ กระแสฮาร์มอนิกอ้างอิง $i_h(k\tau)$ และส่งข้อมูลกระแสอ้างอิงดังกล่าวให้แก่วงจรรอกกำลังแอกทีฟผ่านทาง ADC ตามลำดับ การอธิบายขั้นตอนการโปรแกรมข้างต้นเป็นการดำเนินงานเพียงหนึ่งรอบการทำงานเท่านั้น ซึ่งการคำนวณในรอบถัดไปจะเริ่มต้นที่การลบข้อมูลกระแส $i_p(nt)$ ตัวที่เก่าที่สุดออกไปหนึ่งค่า และดำเนินการซ้ำเดิมตามขั้นตอนในรอบเส้นประของแผนภูมिरูปที่ 5.14 ซึ่งเป็นการวนรอบแบบไม่สิ้นสุด จนกว่าจะมีการสั่งให้การ์ด DSP หยุดทำงาน รายละเอียดโปรแกรมสามารถดูได้ที่ <http://www.sut.ac.th/engineering/electrical/carg/Fourier.html>

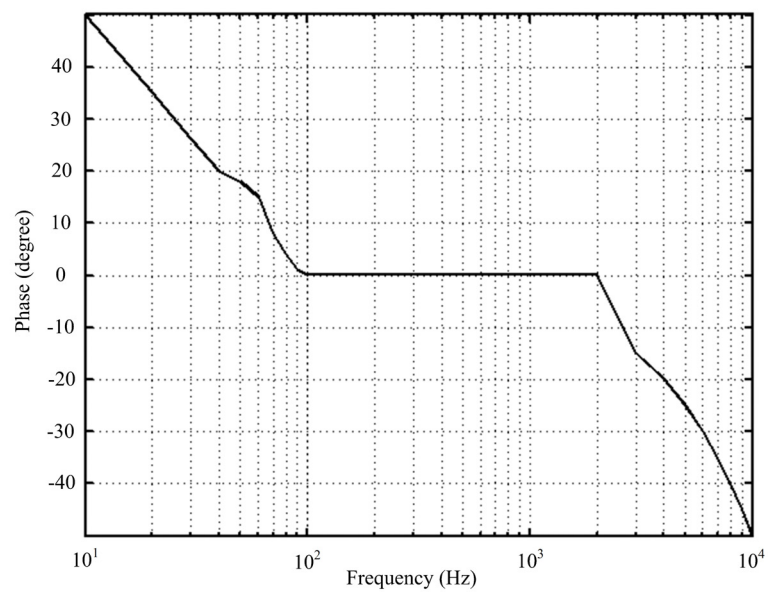
5.8 วงจรรอกกำลังแอกทีฟ

วงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ใช้วงจรขยายกำลังทำหน้าที่ขยายสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกอ้างอิง ($i_h(k\tau)$) ที่คำนวณได้จากการ์ด DSP วงจรขยายสัญญาณดังกล่าวมีพิกัดกำลัง 750 W ซึ่งมีพิกัดแรงดันสูงสุด $250 V_{rms}$ ในขณะที่พิกัดกระแสสูงสุดเท่ากับ $3 A_{rms}$ การตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายสัญญาณได้ทำการทดสอบและแสดงอัตราขยายสัญญาณ (gain) คำนวณจากสมการที่ (5.21) ไว้ในรูปที่ 5.15 และแสดงมุมเฟส (phase) ไว้ในรูปที่ 5.16 พบว่าอัตราขยายของวงจรมีค่าคงที่ 54 dB ในย่านความถี่ประมาณ 100 Hz ถึง 2 kHz ในขณะที่ลักษณะสมบัติทางเฟสเป็น 0 องศา ในย่านความถี่ประมาณ 100 Hz ถึง 2 kHz ด้วย

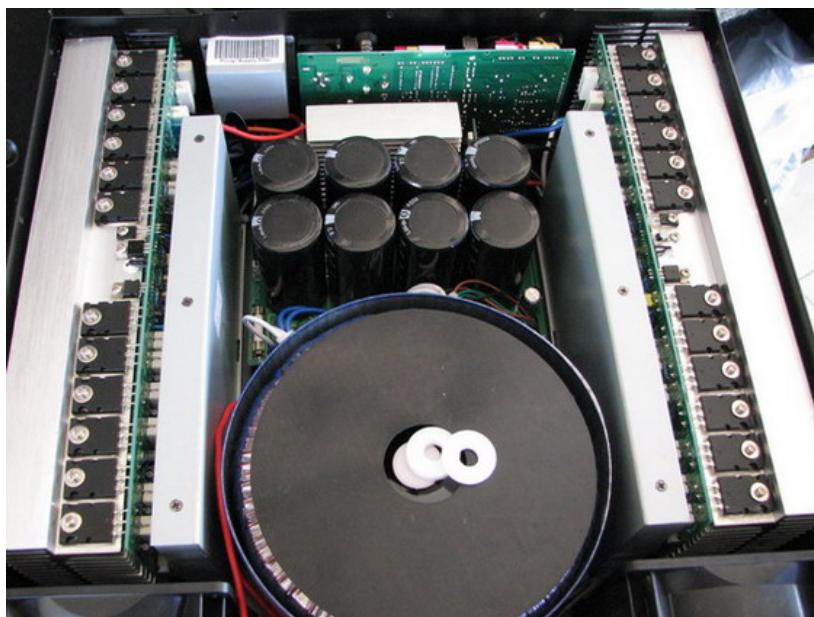
$$Gain = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (5.21)$$



รูปที่ 5.15 อัตรขยาย (เดซิเบล) ของวงจรขยายกำลัง



รูปที่ 5.16 มุมเฟส (องศา) ของวงจรขยายกำลัง



รูปที่ 5.17 วงจรขยายกำลังที่ใช้เป็นวงจรรอกำลังแอกทีฟในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ย่านความถี่ที่สามารถใช้งานได้ดีตามการประยุกต์นี้ จึงอยู่ในช่วง 100 Hz ถึง 2 kHz วงจรขยายกำลังที่นำเสนอในหัวข้อนี้แสดงดังภาพในรูปที่ 5.17 และจะนำไปใช้กับการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ ผลการทดสอบได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 6

ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกและอภิปรายผล

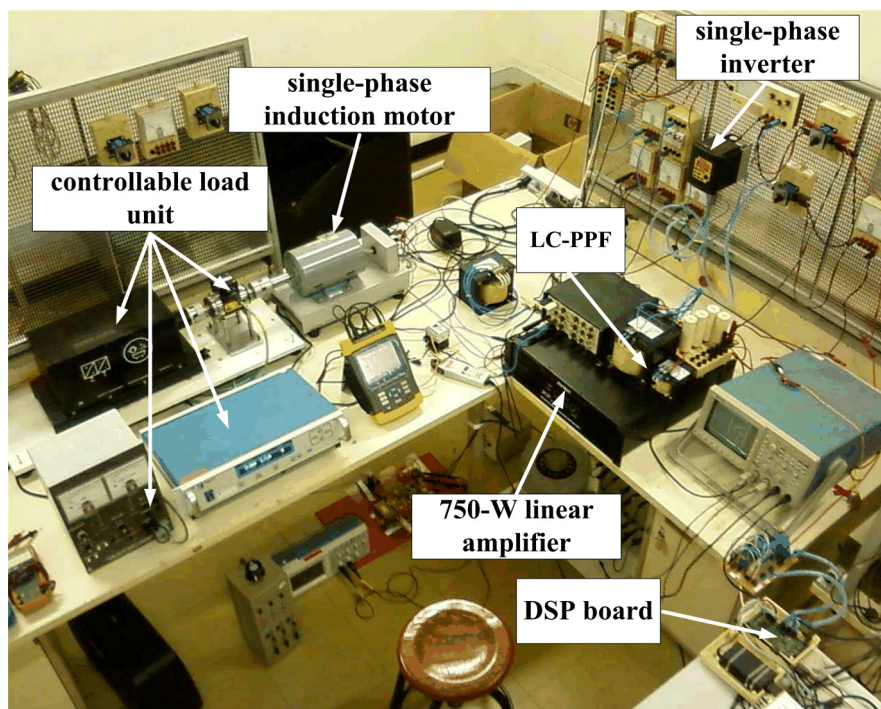
6.1 บทนำ

ในบทนี้นำเสนอผลการทดสอบพร้อมกับการอภิปรายผล การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบปรับความเร็วได้ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นแบบพีดับบลิวเอ็ม การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าวทำโดยใช้วงจรกรองกำลังไฮบริด วงจรกรองกำลังพาสซีฟถูกใช้เพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกบางส่วนและลดพิกัดกำลังของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอคทีฟใช้วิธี SWFA โดยประยุกต์ใช้การ์ด DSP รุ่น eZdsp™ F2812 ในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกให้แก่วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานและมีโครงสร้างเป็นวงจรขยายกำลัง วงจรดังกล่าวขยายกระแสฮาร์มอนิกที่คำนวณโดยการ์ด DSP และฉีดกระแสเหล่านั้นเข้าสู่ระบบทดสอบ ณ จุดต่อรวม โดยการทดสอบจะทำการปฏิบัติงานตามพิกัดของมอเตอร์ผลการทดสอบวงจรกรองกำลังพาสซีฟและวงจรกรองกำลังไฮบริดนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.2.1 นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรกรองกำลังไฮบริดเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ระดับโหลดและความเร็วรอบต่าง ๆ แตกต่างไปจากจุดปฏิบัติงานที่พิกัดซึ่งได้นำเสนอผลการทดสอบนี้ไว้ในหัวข้อที่ 6.2.2

6.2 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบปรับความเร็วได้

การทดสอบการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขนาด 1/2 hp ($220 V_{rms}/5 A_{rms}/3 Nm/1,425 rpm$) ชุด โหลดซึ่งสามารถควบคุมแรงบิดได้ (LUCAS NULL SE-2662-R5 $230 V_{rms}/50 Hz/25 Nm/3,000 rpm$) อินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มพิกัด 2 hp/7 A_{rms} (FRECON F002i-2x) วงจรกรองกำลังพาสซีฟชนิด LC มีโครงสร้างตามที่ได้รับคำแนะนำไว้ในบทที่ 4 วงจรกรองกำลังแอคทีฟที่ใช้ฉีดกระแสฮาร์มอนิกมีโครงสร้างตามที่ได้รับคำแนะนำไว้ในบทที่ 5 ชุดระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA มี DSP eZdsp™ F2812 เป็นหน่วยประมวลผล ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า รวมถึงการเชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็น

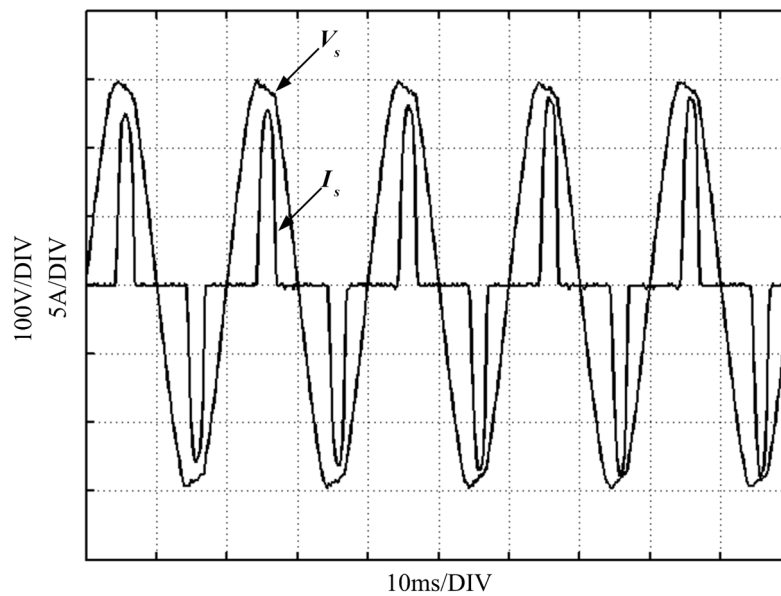
แอนะล็อกกับพอร์ตไอโอของการ์ด DSP ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5 เมื่อต่ออุปกรณ์ดังกล่าวเข้าด้วยกันจะมีลักษณะดังรูปที่ 6.1 การทดสอบดำเนินการที่จุดปฏิบัติงานพิกัดของมอเตอร์



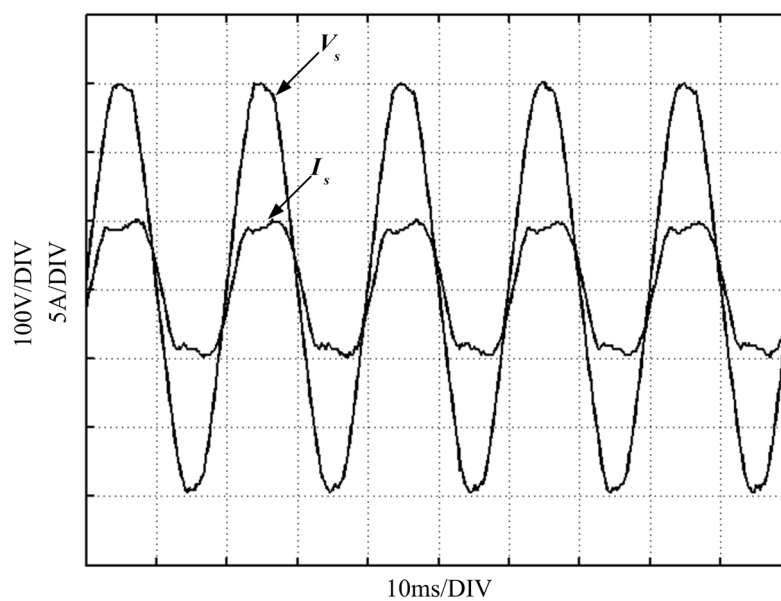
รูปที่ 6.1 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ

6.2.1 ผลการทดสอบวงจรรอกำลังไฮบริด ณ จุดปฏิบัติงานของมอเตอร์

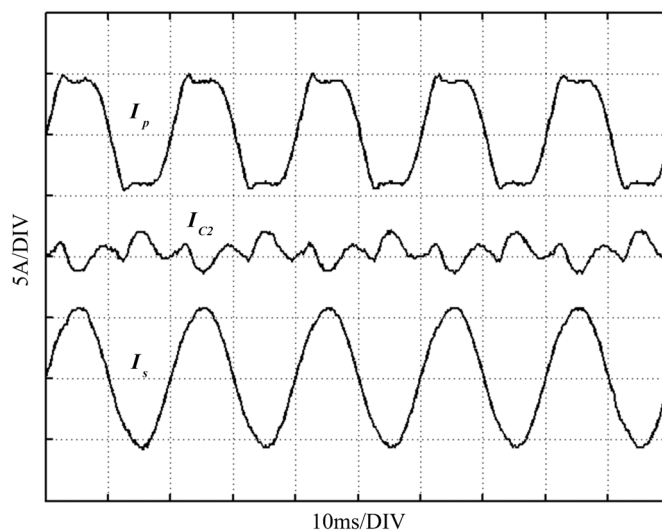
รูปคลื่นสัญญาณกระแสของแหล่งจ่าย (I_s) ก่อนการชดเชยด้วยวงจรรอกำลังใด ๆ แสดงดังรูปที่ 6.2 รูปคลื่นสัญญาณกระแสของแหล่งจ่ายหลังการชดเชยด้วยวงจรรอกำลังพาสซีฟ (PPF) และวงจรรอกำลังไฮบริด (HPF) แสดงดังรูปที่ 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 6.1 แสดงข้อมูลสรุปของขนาดกระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ รวมถึงค่าตัวประกอบกำลังจากการทดสอบวงจรรอกำลังแบบต่าง ๆ ซึ่งทำการวัดที่จุดต่อร่วม (PCC) ณ จุดปฏิบัติงานพิกัดของมอเตอร์ตลอดระยะเวลาที่ทำการวัดบันทึกผล มอเตอร์กินกระแส $5 A_{rms}$ ชับโหลด 3 Nm อย่างสม่ำเสมอ รูปคลื่นสัญญาณกระแสก่อนการชดเชยด้วยวงจรรอกำลังพบว่ากระแส I_s มีค่ายอดค่อนข้างสูงประมาณ 13 A เมื่อทำการวัดกระแสฮาร์มอนิก 15 อันดับแรก ด้วยเครื่อง FLUKE 434 พบว่าไม่ปรากฏฮาร์มอนิกอันดับคู่ ฮาร์มอนิกอันดับคี่แต่ละอันดับสูงเกินกรอบข้อกำหนดของ



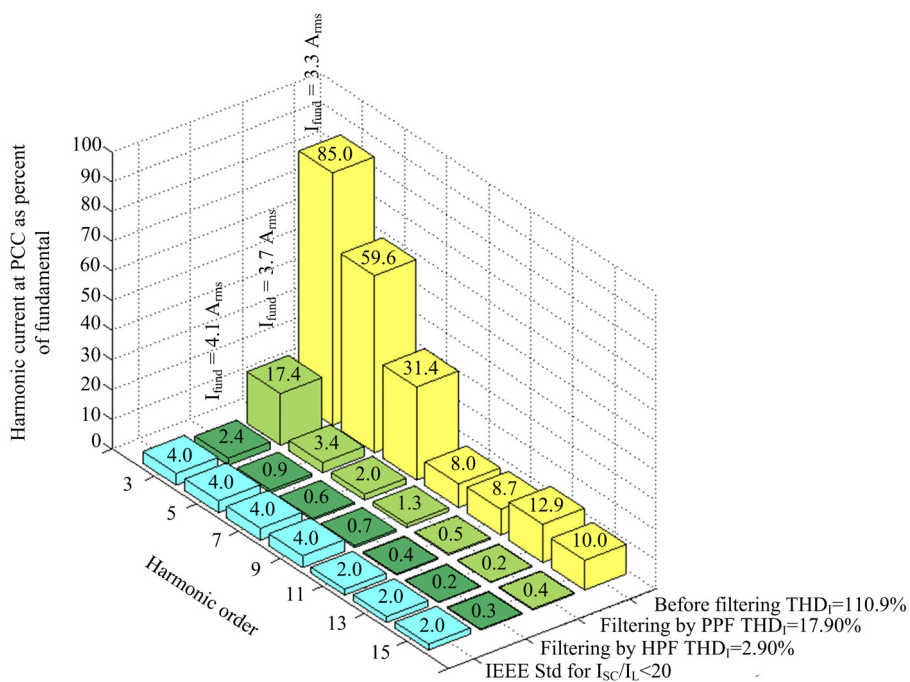
รูปที่ 6.2 สัญญาณกระแสของแหล่งจ่าย (I_s) ก่อนการชดเชยด้วยวงจรรอกำลังใด ๆ



รูปที่ 6.3 สัญญาณกระแสของแหล่งจ่าย (I_s) หลังการชดเชยด้วยวงจรรอกำลังพาสซีฟ



รูปที่ 6.4 สัญญาณกระแสไหลเข้าวงจรรอกกำลังพาสซีฟ (I_p) กระแสชดเชยฮาร์มอนิก (I_{c2}) และกระแสแหล่งจ่าย (I_s) หลังการชดเชยด้วยวงจรรอกกำลังไฮบริด



รูปที่ 6.5 แผนภาพเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกก่อนและหลังใช้วงจรรอกกำลังแบบต่าง ๆ กับ IEEE Std 519-1992 สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังต่ำที่มี $I_{sc} / I_L < 20$

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบกระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้าและตัวประกอบกำลัง ก่อนและหลังใช้วงจร
กรองกำลังแบบต่าง ๆ (วัดที่จุด PCC โดย FLUKE 434)

สภาวะของระบบ	V_{rms}	V_{peak}	A_{rms}	A_{peak}	kW	kVA	kVAR	PF
ก่อนใช้วงจรกรอง	220.9	302.8	5.0	13.0	0.75	1.14	0.85	0.66(lag)
หลังใช้ PPF	222.0	308.5	3.8	4.7	0.83	0.84	0.15	0.98(lag)
หลังใช้ HPF	221.3	311.4	4.1	5.8	0.89	0.89	0.00	1.00

IEEE Std 519-1992 ทุกอันดับโดยมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_I) สูงถึง 110.9% แสดงดังรูปที่ 6.5 เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลัง (PF) พบว่าระบบมีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.66 ล้าหลังซึ่งต่ำมาก หลังจากทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟพบว่ากระแส I_s มีค่าขยดลดลงจาก 13 A เหลือ 4.7A กระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับลดลงทุกอันดับมีเพียงอันดับสามเท่านั้นที่ยังคงเกินข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 โดยมีค่า THD_I ลดลงจากเดิม 110.9% เหลือ 17.9% ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.66 ล้าหลังเป็น 0.98 ล้าหลังจะเห็นได้ว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟสามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกส่วนใหญ่ได้ และยังช่วยจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบด้วย ดังนั้นฮาร์มอนิกส่วนที่เหลือจึงชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟและเรียกการทำงานร่วมกันของวงจรกรองกำลังทั้งสองโดยรวมว่าวงจรกรองกำลังไฮบริด หลังจากชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริดพบว่าสัญญาณกระแส I_s มีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากขึ้นแสดงดังรูปที่ 6.4 I_p คือ สัญญาณกระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟและ I_{C2} คือ สัญญาณกระแสชดเชยฮาร์มอนิกจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟ กระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับลดลงจนอยู่ในกรอบข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 ทุกอันดับ โดยปรากฏค่า THD_I เพียง 2.9% เท่านั้นซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนด 5% ของ IEEE Std 519-1992 เช่นกัน ในขณะที่ค่าตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าสูงถึง 1.00

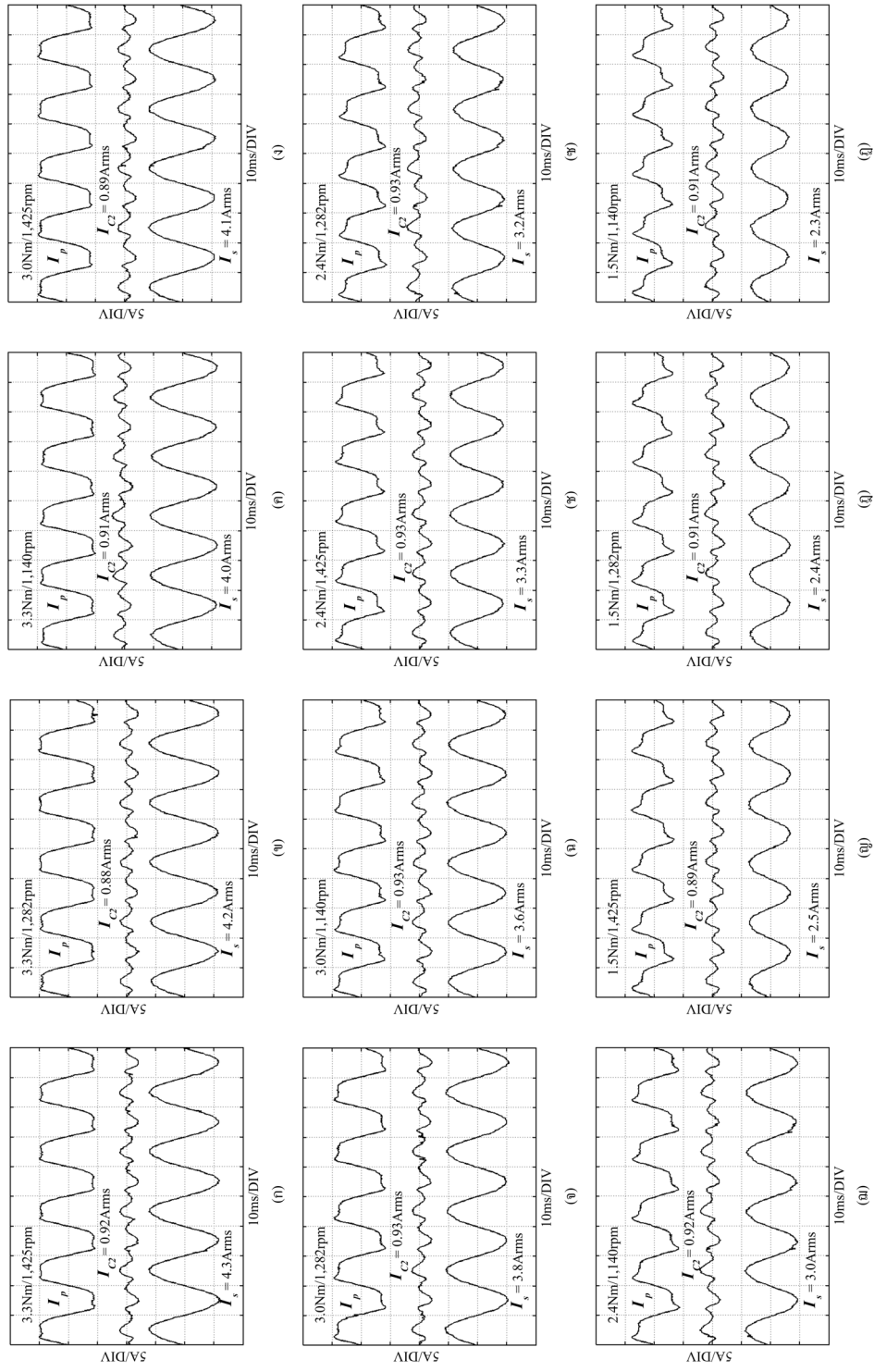
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านพลังงานพบว่าก่อนใช้วงจรกรองกำลังใด ๆ พบว่ามอเตอร์ให้กำลังเอาต์พุตเชิงกลแสดงในหน่วยวัตต์เท่ากับ 446 W (วัดโดยเครื่องวัดแรงบิด MAGTROL TMB 211 /100 Nm/4,000 rpm) ในขณะที่ผลรวมกำลังไฟฟ้าที่จุด PCC เท่ากับ 750 W ดังนั้นกำลังสูญเสียโดยรวมจากอินพุตไปเอาต์พุตเชิงกลจึงมีค่าเท่ากับ 304 W เมื่อใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟระบบต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มอีก 80 W ซึ่งเพิ่มขึ้น 10.67% (ของ 750 W) กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเกิดจากกำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ในขณะที่วงจรกรองกำลังพาสซีฟสามารถลดทอน % THD_I ได้ถึง 83.86% (ของ 110.9) และสามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟจนตัวประกอบกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.98 ล้าหลังซึ่งเพิ่มขึ้นมา 48.48% (ของ 0.66) เมื่อใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟร่วมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟระบบต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มอีก

60 W ซึ่งเพิ่มขึ้นอีก 8.0% (ของ 750 W) ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกลดลงไปอีกเพียง 13.53% (ของ 110.9) แต่วงจรกรองกำลังแอกทีฟก็สามารถให้การชดเชยความต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดัน เกิดเป็นผลกระทบที่เหมือนว่ามีกระแสรีแอกทีฟด้วย โดยสามารถวัดค่าตัวประกอบกำลังได้เท่ากับ 1.00 จากการเปรียบเทียบการใช้กำลังไฟฟ้าและผลการกำจัดฮาร์มอนิกข้างต้นจะเห็นได้ว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟเป็นตัวเลือกที่นำลงทุนสำหรับใช้ลดทอนกระแสฮาร์มอนิก ณ จุดที่ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก เนื่องจากวงจรกรองกำลังพาสซีฟมีต้นทุนที่ต่ำในขณะที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟยังมีต้นทุนที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้ หากสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อนำไปใช้กำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่มีพิกัดกำลังต่ำเพียงตัวเดียว อาจไม่คุ้มค่าในการลงทุน

เพื่อเปรียบเทียบพิกัดกำลังปรากฏ (VA) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟก่อนและหลังใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟจึงได้นำกระแสก่อนการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังใด ๆ ในสถานะอยู่ตัว ดังรูปที่ 6.2 จำนวนหนึ่งคาบ ไปคำนวณหาอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมด ด้วยวิธี SWFA พบว่าหากใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเพียงอย่างเดียว วงจรกรองกำลังแอกทีฟจะต้องมีกระแสชดเชยฮาร์มอนิก I_{C2} เท่ากับ $3.49 A_{rms}$ เมื่อพิจารณาระดับแรงดัน $220 V_{rms}$ พบว่าต้องการกำลังปรากฏเท่ากับ 767.8 VA ผลการทดสอบหลังติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟกระแส I_{C2} ดังรูปที่ 6.4 มีค่าอาร์เอ็มเอสเท่ากับ $0.8 A_{rms}$ ค่าพิกัดกำลังปรากฏได้ประมาณ 176 VA ซึ่งมีพิกัดกำลังลดลงจากเดิมถึง 77% จากผลทดสอบวงจรกรองกำลังแบบต่าง ๆ ในทางปฏิบัตินี้ ให้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพึงพอใจและบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ตลอดจนผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมมติฐานเบื้องต้นที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้าในบทที่ 4

6.2.2 ผลการทดสอบวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ค่าโหลดและความเร็วรอบต่าง ๆ ของมอเตอร์

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ค่าโหลดและความเร็วรอบต่าง ๆ นอกเหนือจากจุดปฏิบัติงานของมอเตอร์ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกนอกเหนือจุดปฏิบัติงานที่ใช้ออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟ โดยมีการแบ่งโหลดเพื่อการทดสอบออกเป็น 4 ย่าน คือ 110% 100% 80% และ 50% ของพิกัดโหลด 3 Nm ซึ่งแต่ละระดับโหลด ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 100% 90% และ 80% ของความเร็วพิกัด 1,425 rpm จากผลการทดสอบพบว่าวงจรกรองกำลังไฮบริดยังให้ประสิทธิภาพในการชดเชย



รูปที่ 6.6 สัญญาณกระแสไหลเข้าวงจรกึ่งพาสซีฟ (IP) กระแสเดซเซซาร์โมนิก (IC2) และกระแสแหล่งจ่าย (IS) ที่ระดับโหลดและความเร็วรอบต่าง ๆ ของมอเตอร์

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบวงจรถองกำลังไฮบริดที่ระดับโหลดและความเร็วรอบต่าง ๆ

แรงบิดที่เพลา (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	THD_I (%)	THD_V (%)	PF
3.3 (110%)	1,425 (100%)	2.9	1.6	1.00
	1,282 (90%)	2.9	1.9	1.00
	1,140 (80%)	2.9	1.9	1.00
3.0 (100%)	1,425 (100%)	2.9	2.0	1.00
	1,282 (90%)	3.2	2.1	0.99 (lag)
	1,140 (80%)	3.3	2.1	0.99 (lead)
2.4 (80%)	1,425 (100%)	3.7	2.0	0.98 (lead)
	1,282 (90%)	3.8	2.1	0.97 (lead)
	1,140 (80%)	3.9	2.1	0.96 (lead)
1.5 (50%)	1,425 (100%)	4.5	2.0	0.91 (lead)
	1,282 (90%)	4.7	2.1	0.90 (lead)
	1,140 (80%)	4.8	2.1	0.88 (lead)

ฮาร์มอนิกตลอดจนค่าตัวประกอบกำลังที่ตีมากที่สุดทำงานต่ำกว่าที่คิดอีกด้วย ผลการทดสอบดังกล่าวสรุปได้ดังรูปที่ 6.6 และ ตารางที่ 6.2 โดยรูปที่ 6.6 ได้แบ่งกลุ่มโหลดออกเป็น 4 ระดับได้แก่ 3.3 Nm (รูปที่ 6.6 ก ถึง ค) 3.0 Nm (รูปที่ 6.6 ง ถึง ฉ) 2.4 Nm (รูปที่ 6.6 ช ถึง ฉ) และ 1.5 Nm (รูปที่ 6.6 ญ ถึง ฎ) โดยแต่ละระดับโหลด เรียงจากระดับความเร็วรอบมอเตอร์สูงไปต่ำ คือ 1,425 1,282 และ 1,140 ตามลำดับ จากผลการทดสอบเป็นที่น่าสังเกตว่าแม้ระดับกระแส I_s จะเพิ่มตามระดับโหลดและความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น แต่ขนาดของกระแสชดเชย I_{C2} กลับมีขนาดใกล้เคียงกันในทุกกลุ่มโหลดและทุกย่านความเร็วรอบมอเตอร์ สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากระดับกระแสฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นชนิดนี้ ไม่แปรเปลี่ยนไปตามระดับกระแสโหลดหรือระดับความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงไป มีเพียงกระแสโหลดที่ความถี่มูลฐานเท่านั้นที่แปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงของระดับโหลดและความเร็วรอบ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ เหนียวนาฟสดียวในบทที่ 3 ที่พบว่าแนวโน้มของ $\%THD_I$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับโหลดของมอเตอร์

ลดลง ซึ่งเกิดจากการคงตัวของระดับกระแสฮาร์มอนิกนั่นเอง จึงทำให้กระแสชดเชยฮาร์มอนิก จากวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีค่าใกล้เคียงกันในทุกกรณีของการทดสอบนี้ จากตารางที่ 6.2 พบว่า $\%THD_I$ และ $\%THD_V$ ในการทดสอบนี้อยู่ในกรอบข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 ทุกกรณี ในขณะที่ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) มีค่าอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 เป็นที่น่าสังเกตว่าที่ระดับโหลดต่ำกว่า พิกัด 3 Nm ค่าตัวประกอบกำลังเริ่มเป็นแบบเฟสล้ำหน้า (leading) สาเหตุเกิดจากขนาดของตัวเก็บประจุ C_f ที่ใช้สร้างวงจรกรองกำลังพาสซีฟ สามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟชดเชยตามความต้องการของมอเตอร์และตัวเหนี่ยวนำ L_f ได้พอดี ทำให้กำลังรีแอกทีฟภายในระบบหักล้างกันจนมีค่าใกล้เคียงศูนย์ที่พิกัดการทำงานของมอเตอร์ แต่ความต้องการกำลังรีแอกทีฟของระบบจะต่ำลงเมื่อโหลดของมอเตอร์มีค่าลดลงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์และตัวเหนี่ยวนำ L_f มีค่าลดลง ในขณะที่ตัวเก็บประจุ C_f กลับจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการจ่ายกำลังรีแอกทีฟเกินความต้องการของระบบ กำลังรีแอกทีฟส่วนเกินนี้จะไหลเข้าสู่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดตัวประกอบกำลังแบบล้ำหน้า ณ จุดต่อรวม ถ้าหากกำลังรีแอกทีฟส่วนเกินนี้มีปริมาณไม่มากนักจะไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบไฟฟ้าแต่อย่างใด เนื่องจากโหลดชนิดอื่นภายในระบบเดียวกัน ที่ใช้งานตามอุตสาหกรรมและครัวเรือนส่วนใหญ่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็นแบบล้ำหลัง (lagging) จึงมีความต้องการกำลังรีแอกทีฟส่วนเกินที่เกิดขึ้นนี้ แต่ถ้าหากกำลังรีแอกทีฟส่วนเกินมีปริมาณที่มากจนเกินความต้องการของระบบโดยรวมซึ่งอาจเกิดจากการติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟประเภทนี้หลายชุดในระบบเดียวกัน กำลังรีแอกทีฟส่วนเกินนี้อาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบนั้น เช่น ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบแสงสว่าง เป็นต้น ดังนั้นหากมอเตอร์เหนี่ยวนำภายในระบบมีจำนวนมากและทำงานที่หลายระดับโหลดและความเร็วรอบ การติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟประเภทนี้จึงควรพิจารณาถึงผลกระทบของกำลังรีแอกทีฟส่วนเกินนี้ด้วย ซึ่งอาจแก้ปัญหาโดยยอมให้เกิด $\%THD_I$ มากขึ้นและค่าตัวประกอบกำลังลดลงบ้าง โดยเลือกขนาดตัวเก็บประจุ C_f ที่เล็กลงเพื่อจ่ายกำลังรีแอกทีฟน้อยลง และชดเชย $\%THD_I$ ที่สูงขึ้นนี้ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ระบบประธานแทน ซึ่งคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่าการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดเพียงตัวเดียวเท่านั้น

6.3 สรุป

ผลการทดสอบการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ในทางปฏิบัติให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพึงพอใจมาก ก่อนการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังใด ๆ ระบบขับเคลื่อนปรากฏกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณที่สูงมาก โดยกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่สามสามารถวัด

ได้อันดับที่ 3 ถึง 15 มีค่ามากกว่ากรอบข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 ทุกอันดับ รวมถึงค่า %THD_r ยังมีค่าเกินกรอบข้อกำหนดเช่นกัน ในขณะที่ตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าต่ำถึง 0.66 ล้าหลัง ภายหลังจากชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริดพบว่าสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์บริสุทธิ์อย่างมาก กระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับลดลงจนอยู่ภายในกรอบข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 ทุกอันดับ วัตถุประสงค์ที่ THD_r ได้เท่ากับ 2.9% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดที่ 5% เช่นกัน ตัวประกอบกำลังของระบบยังมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 1.00 นอกจากนี้ยังพบว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟสามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกและลดพิกัดกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้เป็นอย่างดีซึ่งวงจรกรองกำลังแอกทีฟต้องจ่ายกำลัง ณ จุดปฏิบัติงานของมอเตอร์เพียง 176 VA เท่านั้น ซึ่งคิดเป็น 23% ของพิกัดกำลังวงจรกรองกำลังแอกทีฟหากใช้งานแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งหมายความว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่นำมาใช้ร่วมเป็นวงจรกรองกำลังไฮบริด ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวที่ปรับแปรความเร็วได้นี้ สามารถช่วยลดพิกัดกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้เกือบถึง 80% นอกจากนี้วงจรกรองกำลังไฮบริดที่นำเสนอนี้ มีสมรรถนะการทำงานในขอบเขตที่กว้างขวาง กล่าวคือสามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่รับโหลด 50-110% ของพิกัด และปรับแปรความเร็วในย่าน 80-100% ของพิกัดความเร็วรอบ %THD_r อยู่ในย่าน 2.9-4.8% และค่าตัวประกอบกำลังอยู่ในย่าน 0.88-1.00 (ล้าหน้า/ล้าหลัง) จากการอธิบายทั้งหมดข้างต้นจึงสรุปได้ว่าการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ได้พัฒนาขึ้น ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกเป็นไปตามข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 ซึ่งถือเป็นเป้าหมายของงานวิจัยนี้

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบปรับความเร็วได้ เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมขนาดเล็กและกลางในประเทศไทย มีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเฟสเดียวกันมากเพราะสามารถใช้กับไฟฟ้า 220 V_{rms}/50 Hz ได้สะดวกและบำรุงรักษาง่าย การใช้งานมักควบคู่กับอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับความเร็ว อินเวอร์เตอร์เป็นพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่ง ที่สร้างปัญหาทางฮาร์มอนิก อุปกรณ์ประเภทนี้ประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสและใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ในการลดแรงดันกระแสเพื่อทางด้านเอาต์พุตกระแสตรง กระแสจะไหลผ่านไดโอดที่ต่อเมื่อแรงดันทางด้านอินพุตมีค่าสูงกว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งทำให้กระแสทางด้านอินพุตมีความไม่ต่อเนื่อง จึงเกิดฮาร์มอนิกของกระแสปริมาณมาก งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาและพัฒนาวงจรกรองกำลังพาสซีฟและวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อใช้ร่วมกันในการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากระบบขับเคลื่อนดังกล่าว เรียกโดยรวมว่าวงจรกรองกำลังไฮบริด เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในด้านฮาร์มอนิกของระบบให้ดีขึ้นอยู่ในกรอบข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ถูกลำมาใช้อย่างแพร่หลาย ในขณะที่พิกัดกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟต้องไม่สูงมากนัก

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 1 ถือเป็นรากฐานที่สำคัญในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในงานวิจัย นอกจากนี้การศึกษาศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในบทที่ 2 ทั้งเรื่องความหมายของฮาร์มอนิก แหล่งกำเนิดและผลเสีย ตลอดจนวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกดังกล่าว ยังเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีในการกำจัดฮาร์มอนิกอีกด้วย

บทที่ 3 เป็นขั้นตอนการศึกษาเกี่ยวกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว เป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์และการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรอง นอกจากนี้การศึกษาลักษณะของฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวยังรวมอยู่ในบทนี้ด้วย

บทที่ 4 นำเสนอขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟ ด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม PSIM™ ร่วมกับ MATLAB™ เพื่อสร้างแผนภาพคอนทัวร์ของดัชนีชี้วัดคุณภาพไฟฟ้าสำหรับการเลือก L และ C ที่เหมาะสม นอกจากนั้นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (SWFA) เพื่อใช้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด เพื่อตรวจสอบสมมติฐานในเบื้องต้นได้รับการนำเสนอไว้ด้วย จากการจำลองสถานการณ์การกำจัดกระแสฮาร์มอนิก พบว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟที่ออกแบบโดยแผนภาพคอนทัวร์สามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ณ จุดปฏิบัติงานได้เป็นอย่างดี กระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับมีค่าลดลงจากเดิมทุกอันดับ มีเพียงอันดับสามเท่านั้นที่ยังคงเกินข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังต่ำ %THD_i มีค่าลดลงเหลือ 24.37% จากเดิม 122.3% เมื่อใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแต่เพียงอย่างเดียว ในขณะที่อัลกอริทึม SWFA สามารถระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพื่อใช้สร้างกระแสชดเชยอ้างอิงให้แก่วงจรกรองกำลังแอกทีฟได้เป็นอย่างดี ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้หลังติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพิ่มเติม พบว่า %THD_i เหลือเพียง 0.18% เท่านั้น ซึ่งลดลงไป 99.85% จากเดิมที่ไม่มีการติดตั้งวงจรกรองกำลังใด ๆ กระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับลดลงอยู่ในกรอบข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 ทุกอันดับ และในด้านพิกัดกำลังไฟฟ้าพบว่าการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สามารถลดพิกัด VA ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ถึง 82% อีกด้วย

บทที่ 5 นำเสนอโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบวงจรกรองที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้า การเชื่อมต่อการ์ด DSP กับอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าผ่านวงจรแปลงสัญญาณ และการเชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกกับการ์ด DSP ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่นำมาใช้สร้างวงจรกรองกำลังพาสซีฟ ซอฟต์แวร์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกและโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ตลอดจนผลตอบแทนของทางความถี่ อุปกรณ์ทั้งหมดที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทนี้ได้ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นวงจรกรองกำลังไฮบริด เพื่อใช้ทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกในทางปฏิบัติ

บทที่ 6 นำเสนอขั้นตอนการทดสอบการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ได้พัฒนาขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าวงจรกรองกำลังไฮบริดสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียว ณ จุดปฏิบัติงานของมอเตอร์ให้อยู่ภายในกรอบข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 ได้อย่างสมบูรณ์ ก่อนการติดตั้งวงจรกรองกำลังใด ๆ ระบบขับเคลื่อนมี %THD_i สูงถึง 110.9% และตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 0.66 ถัดมาหลังการติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟ %THD_i มีค่าลดลงเหลือ 17.9% ซึ่งลดลงไป 83.86%

เมื่อใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟแต่เพียงอย่างเดียว ภายหลังจากติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพิ่มเติม พบว่าสัญญาณกระแสแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก I_s มีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์บริสุทธิ์อย่างมาก โดยปรากฏ %THD₁ เพียง 2.9% เท่านั้น ซึ่งลดลงไป 97.39% จากเดิมที่ไม่ติดตั้งวงจรกรองใด ๆ เลย ตัวประกอบกำลังของระบบยังเพิ่มขึ้นถึง 1.00

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพทางด้านพลังงานพบว่าก่อนใช้วงจรกรองกำลังใด ๆ ระบบต้องการกำลังไฟฟ้ารวม 750W เมื่อใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟระบบต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 80W ซึ่งเพิ่มขึ้น 10.67% ในขณะที่วงจรกรองกำลังพาสซีฟสามารถลดทอน %THD₁ ได้ถึง 83.86% และสามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟจนตัวประกอบกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.98 ล้าหลัง เมื่อใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟร่วมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟระบบต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มอีก 60W ซึ่งเพิ่มขึ้นอีก 8.0% ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกลดลงไปอีกเพียง 13.53% เท่านั้น แต่วงจรกรองกำลังแอกทีฟก็สามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟได้ทั้งหมดโดยสามารถวัดค่าตัวประกอบกำลังได้เท่ากับ 1.00 เมื่อเปรียบเทียบการใช้กำลังไฟฟ้ากับผลลัพธ์ในการกำจัดฮาร์มอนิกพบว่า วงจรกรองกำลังพาสซีฟเป็นตัวเลือกที่น่าลงทุนสำหรับใช้ลดทอนกระแสฮาร์มอนิก ณ จุดที่ติดตั้งโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก เนื่องจากวงจรกรองกำลังพาสซีฟมีต้นทุนที่ต่ำ ในขณะที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟยังมีต้นทุนที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้ หากสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อนำไปใช้กำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่มีพิกัดกำลังต่ำเพียงตัวเดียวอาจไม่คุ้มค่าในการลงทุน ควรติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟในจุดที่ติดตั้งโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นหลาย ๆ ตัวพร้อมกันซึ่งจะคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟสามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกและลดพิกัดกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้เป็นอย่างดี ซึ่งวงจรกรองกำลังพาสซีฟสามารถช่วยลดพิกัดกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ถึง 77% และวงจรกรองกำลังไฮบริดที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ ยังมีสมรรถนะการทำงานในขอบเขตที่กว้างขวาง กล่าวคือสามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่รับโหลด 50-110% ของพิกัด และปรับแปรความเร็วในย่าน 80-100% ของพิกัดความเร็วรอบ %THD₁ อยู่ในย่าน 2.9-4.8% และค่าตัวประกอบกำลังอยู่ในย่าน 0.88-1.00 (ล้าหน้า/ล้าหลัง) จากผลทดสอบวงจรกรองกำลังไฮบริดในทางปฏิบัตินี้ ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้นี้ในบทที่ 4 และบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อย่างสมบูรณ์

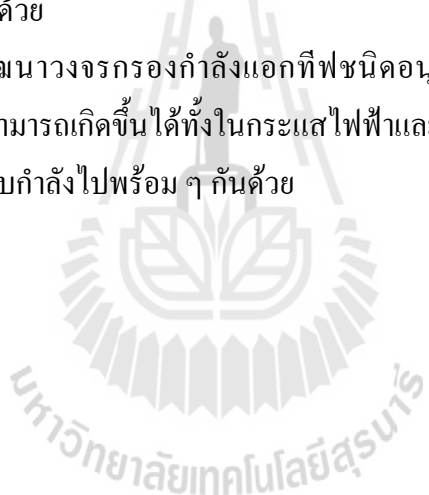
7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1) การพัฒนางจรกรองกำลังแอกทีฟควรพิจารณาถึงการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไปพร้อม ๆ กันด้วย เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่ไม่ปรากฏฮาร์มอนิกแต่มีค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำกว่าหนึ่งมาก ๆ ก็ถือเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพทางพลังงานต่ำ

2) อินเวอร์เตอร์ที่ราคาถูกลง ๆ มักจะไม่มีการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถแพร่กระจายได้ในอากาศ สัญญาณรบกวนดังกล่าวจะรบกวนสัญญาณกระแสชดเชยฮาร์มอนิกอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ทำให้เกิดความผิดพลาดในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากสัญญาณรบกวนดังกล่าวอาจถูกขยายโดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดังนั้นจึงควรติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันหรือพัฒนาวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวด้วย

3) ควรมีการพัฒนางจรกรองกำลังแอกทีฟชนิดอนุกรม เพื่อกำจัดแรงดันฮาร์มอนิกด้วย เนื่องจากฮาร์มอนิกสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า และควรพิจารณาถึงการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไปพร้อม ๆ กันด้วย



รายการอ้างอิง

- กองพล อารีรักษ์. (2549). การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ. (2544). ฮาร์มอนิกในกระแสของอุปกรณ์ไฟฟ้า. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- Arrillaga, J. and Watson, Neville, R. (2003). **Power system harmonics**. West Succex, England: John Wiley & Sons.
- Blooming, T.M. and Carnovale, D.J. (2007). Harmonic convergence. **IEEE Industrial Applications Magazine**. 13(1): 21-27.
- Chang, G.W., Chen, S.K. and Chu, M. (2002). An Efficient a–b–c Reference Frame-based Compensation Strategy for Three-Phase Active Power Filter Control. **Electric Power Systems Research**. 60(3): 161-166.
- Chapman, Stephen J. (2005). **Electric machinery fundamentals**. Singapore: McGraw-Hill.
- Chen, C.L., Lin, C.E. and Huang, C.L. (1994). The Reference Active Source Current for Active Power Filter in an Unbalanced Three-Phase Power System via the Synchronous Detection Method. **Proceedings on the 10th Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC1994)**. 2: 502-505.
- Chen, C.L., Lin, C.E. and Huang, C.L. (1994). The Reference Active Source Current for Active Power Filter in an Unbalanced Three-Phase Power System via the Method of Instantaneous Power Theory. **Proceedings on the 10th Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC1994)**. 2: 1020-1023.
- De La Rosa and Francisco. C. (2006). **Harmonics and power systems**. Boca Ration, FL: Taylor & Francis Group.
- Donghua, Chen. and Shaojun, Xie. (2004). Review of the control strategies applied to active power filters. **Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004)**. 2: 666-670.

- EL-Habrouk, M. and Darwish, M.K. (2001). Design and Implementation of a Modified Fourier Analysis Harmonic Current Computation Technique for Power Active Filter Using DSPs. **IEE Proceedings on Electric Power Applications**. 148: 21-28.
- El-Habrouk, M.I., Darwish, M.K. and Mehta, P. (2000). Active power filter: a review. **IEEE Proceedings on Electric Power Applications**. 147(5): 403-413.
- Enrique, Acha. and Manuel, Madrigal. (2001). **Power systems harmonics: computer modeling and analysis**. West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- Fang, Zheng Peng., Ott, G.W., Jr. and Adams, D.J. (1998). Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Four-Wire Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 13(6): 1174-1181.
- Furuhashi, T., Okuma, S. and Uchikawa, Y. (1990). A study on the theory of instantaneous reactive power. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 37(1): 86-90.
- Guru, B.S. and Hiziroglu, H.R. (2001). **Electric machinery and transformers**. New York: Oxford University Press.
- Hoevenaars, T., LeDoux, K., and Colosino, M. (2003). Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications. **Proceedings on the IEEE Industry Applications Society 50th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference**. : 145-150
- IEEE Std 519-1992. (1993). **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**.
- Lin, C.E., Chen, C.L. and Huang, C.L. (1992). Calculating approach and implementation for active filters in unbalanced three-phase system using synchronous detection method. **Proceeding of the International Conference on 'Power Electronics and Motion Control'**. 1: 374-380.
- Magtrol. (2001). **Model 6400 torque transducer display user's manual**. New York: Magtrol.
- Magtrol. (2001). **TM210-TM213 torque transducer datasheet**. New York: Magtrol.
- Moo, C.S., Cheng, H.L., and Guo, S.J. (1997). Designing passive LC filters with contour maps [for diode bridge rectifiers]. **Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems**. 2: 834-838.

- Pakdel, M., Khoshoei, K.R. and Nezhad, A.Z. (2007). Three Topologies and a Control Strategy for Harmonic Suppression in Single-Phase Systems Using a Shunt Active Power Filter. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2007)**. : 449-454.
- Peng, F.Z., Gui-Jia Su. and Farguharson, G. (1999). A series LC filter for harmonic compensation of AC drives. **Proceedings on the IEEE 30th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC1999)**. 1: 213-218.
- Sasaki, H. and Machida, T. (1971). A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation Considerations on Basic Design. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. PAS-90(5): 2009-2019.
- Singh, B., Al-Haddad, K. and Chandra, A. (1999). A review of active filters for power quality improvement. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 46(5): 960-971.
- Sujitjorn, S., Areerak, K.-L. and Kulworawanichpong, T. (2007). The DQ Axis With Fourier (DQF) Method for Harmonic Identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 22(1): 737-739.
- Takeda, M., Ikeda, K., Teramoto, A. and Aritsuka, T. (1988). Harmonic current and reactive power compensation with an active filter. **Proceedings on the 19th Power Electronic Specialists Conference (PESC1998)**. 2: 1174-1179.
- Yanchao, Ji., and Fei, Wang. (1998). Single-phase diode rectifier with novel passive filter. **IEE Proceedings Circuits, Devices and Systems**. 145: 254-259.
- Yaow-Ming, Chen. (2003). Passive filter design using genetic algorithms. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 50(1): 202-207.



ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า

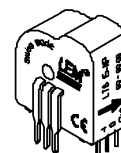
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Current Transducer LTS 15-NP

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed, mixed, with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).

$I_{PN} = 5 - 7.5 - 15 \text{ A}$



Electrical data			
I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	15	At
I_p	Primary current, measuring range	0 .. ± 45	At
V_{OUT}	Analog output voltage @ $I_p = 0$	$2.5 \pm (0.625 \cdot I_p / I_{PN})$	V
N_s	Number of secondary turns ($\pm 0.1 \%$)	2000	
R_L	Load resistance	≥ 2	k Ω
R_{IM}	Internal measuring resistance ($\pm 0.5 \%$)	83.33	Ω
TCR_{IM}	Thermal drift of R_{IM}	< 50	ppm/K
V_c	Supply voltage ($\pm 5 \%$)	5	V
I_c	Current consumption @ $V_c = 5 \text{ V}$	Typ $23 + I_s^2 + (V_{OUT} / R_L)$	mA
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50/60 Hz, 1 mn	3	kV
V_p	R.m.s. voltage for partial discharge extinction @ 10 pC	> 1.5	kV
V_w	Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s	> 8	kV

Features

- Closed loop (compensated) multi-range current transducer using the Hall effect
- Unipolar voltage supply
- Compact design for PCB mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0
- Incorporated measuring resistance
- Extended measuring range.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Very low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Accuracy - Dynamic performance data			
X	Accuracy @ $I_{PN}, T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.2	%
	Accuracy with R_{IM} @ $I_{PN}, T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.7	%
ϵ_L	Linearity	< 0.1	%
TCV_{OUT}	Thermal drift of V_{OUT} @ $I_p = 0$	-10 $^\circ\text{C}$.. +85 $^\circ\text{C}$	Typ Max 100 150 ppm/K
TCE_G	Thermal drift of the gain	-10 $^\circ\text{C}$.. +85 $^\circ\text{C}$	50 ³⁾ ppm/K
V_{OM}	Residual voltage @ $I_p = 0$, after an overload of	3 x I_{PN} 5 x I_{PN} 10 x I_{PN}	± 0.5 mV ± 2.0 mV ± 2.0 mV
t_{ra}	Reaction time @ 10 % of I_{PN}	< 50	ns
t_r	Response time @ 90 % of I_{PN}	< 400	ns
di/dt	di/dt accurately followed	> 35	A/ μ s
f	Frequency bandwidth (0 .. -0.5 dB)	DC .. 100	kHz
	(-0.5 .. 1 dB)	DC .. 200	kHz

General data			
T_A	Ambient operating temperature	-10 .. +85	$^\circ\text{C}$
T_s	Ambient storage temperature	-25 .. +100	$^\circ\text{C}$
	Insulating material group	III a	
m	Mass	10	g
	Standards	EN 50178 EN 60950	

Notes : ¹⁾ Absolute value @ $T_A = 25^\circ\text{C}$, $2.475 < V_{OUT} < 2.525$

²⁾ Please see the operation principle on the other side

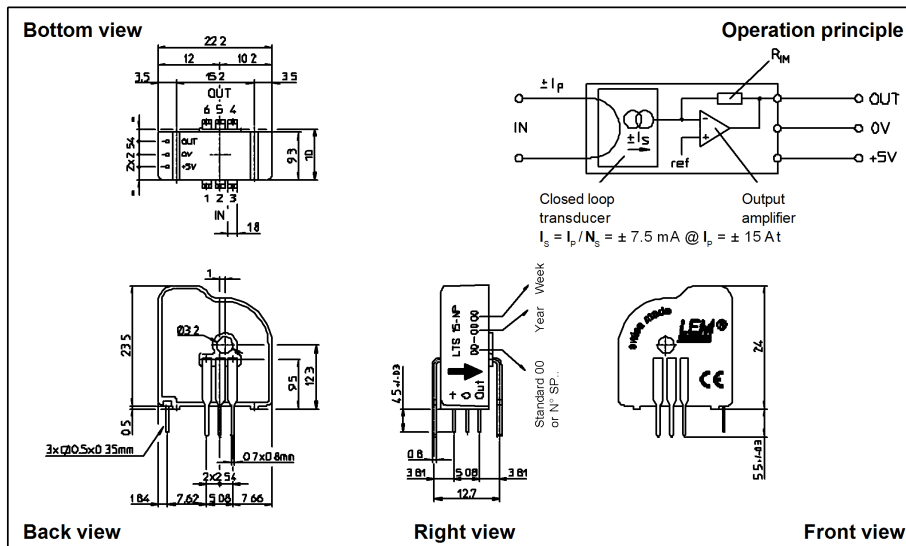
³⁾ Only due to TCR_{IM}

Copyright protected.

001208/4



Dimensions LTS 15-NP (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)



Number of primary turns	Primary nominal r.m.s. current I_{PN} [A]	Nominal output voltage V_{OUT} [V]	Primary resistance R_p [mΩ]	Primary insertion inductance L_p [μH]	Recommended connections
1	± 15	2.5 ± 0.625	0.18	0.013	
2	± 7.5	2.5 ± 0.625	0.81	0.05	
3	± 5	2.5 ± 0.625	1.62	0.12	

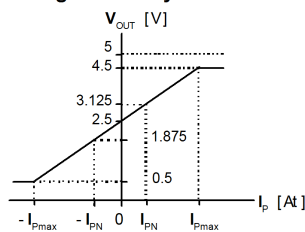
Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Fastening & connection of primary 6 pins 0.7 x 0.8 mm
Recommended PCB hole 1.3 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins 0.5 x 0.35 mm
Recommended PCB hole 0.8 mm
- Additional primary through-hole ∅ 3.2 mm

Remark

- V_{OUT} is positive when I_p flows from terminals 1, 2, 3 to terminals 6, 5, 4.

Output Voltage - Primary Current




LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ศุภกร วิศวภัทรธนธร, สรวุฒิ สุจิตจร และ กองพล อารีรักษ์ (2552). การกำจัดฮาร์ดดิสก์ในระบบ
ขับเคลื่อนกระแสดลัดด้วยวิธีไฮบริด. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา วิศวกรรมสถาน
แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.). (ตอบรับแล้ว)



ที่ R&D 084/2553

12 พฤษภาคม 2553

เรื่อง ผลการพิจารณาบทความลงตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา


เรียน นายศุภกร วิศวภัทรธนธร

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง “การกำจัดฮาร์ดดิสก์ในระบบขับเคลื่อนกระแสดลัดด้วยวิธีไฮบริด” มาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา นั้น

กองบรรณาธิการฯ มีความยินดีที่จะแจ้งให้ท่านทราบว่า บทความที่ท่านเสนอมาได้รับการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิให้ “ลงตีพิมพ์ได้” ในวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา โดยจะแจ้งความคืบหน้าให้ทราบต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ



(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชรินทร์ กาสลัก)

ประธานคณะกรรมการวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา

ฝ่ายประสานงาน : คุณอัจฉรากรณี โทรศัพท์ 0-2319-2410-3 ต่อ 516 E-mail: ach_eit@eit.or.th

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage
487 ซอยรามคำแหง 39 (ทพสี่สี) ถนนรามคำแหง แขวงวังทองหลาง เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310
โทรศัพท์ : (662) 319 2410-3, (662) 319 2807-9, (662) 184 4600-9 โทรสาร : (662) 319 2710-1, www.eit.or.th E-mail : eit@eit.or.th

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนกระแสสลับด้วยวิธีไฮบริด

Harmonic Elimination for an AC Drive Via Hybrid Method

ศุภกร วิศวภัทรชนทร, สรวุฒิ สุจิตจร และ กองพล อารีรัมย์*

Soupagorn Visawa phatra dhanadhorn, Sarawut Sujitjorn and Kongpol Areerak^{*}

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร. 044-224400 โทรสาร 044-224401

E-mail: soupagorn@gmail.com, sarawut@sut.ac.th, kongpol@sut.ac.th^{*}

^{*}corresponding author

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวด้วยวิธีไฮบริด ที่ใช้การวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกให้กับวงจรกรองกำลังแยกที่แบบขนาน วงจรกรองกำลังพาสซีฟ LC ออกแบบด้วยวิธีแผนภาพคอนทัวร์ถูกนำมาใช้เพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกและลดที่กีดกำลังของวงจรกรองกำลังแยกที่ จากผลการวิจัยพบว่าวงจรกรองกำลังไฮบริดสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกให้อยู่ในข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังต่ำ

ABSTRACT

This paper presents a hybrid method for current harmonic elimination for a single-phase induction motor drive. The approach employs the sliding window Fourier analysis method to identify harmonic contents for a parallel active power filter. An LC passive power filter designed by the contour map method is employed to compress some harmonics and decrease the power rating of the active power filter. It is found that the proposed hybrid power filter successfully eliminate the current harmonic to be complied with the IEEE Std 519-1992 for low rated power systems.

รายการสัญลักษณ์

$i_1(t)$	องค์ประกอบกระแสที่มีความถี่มูลฐาน (A)
$i_1(kT)$	องค์ประกอบกระแสที่มีความถี่มูลฐานในเวลาดิสครีต (A)
$i_{c_1}(t)$	กระแสชดเชยฮาร์มอนิกจากวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (A)
$i_{c_2}(t)$	กระแสชดเชยฮาร์มอนิกจากวงจรกรองกำลังแยกที่ (A)
$i_h(t)$	กระแสชดเชยฮาร์มอนิกอ้างอิง (A)
$i_h(kT)$	กระแสชดเชยฮาร์มอนิกอ้างอิงในเวลาดิสครีต (A)
$i_l(t)$	กระแสไหลลบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (A)
$i_p(t)$	กระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (A)
$i_p(kT)$	กระแสไหลเข้าวงจรกรองกำลังพาสซีฟในเวลาดิสครีต (A)
$i_s(t)$	กระแสแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (A)
k, n	ดัชนีเวลา (time index)
A_1, B_1	สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ความถี่มูลฐาน
A_1^{new}, B_1^{new}	สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ความถี่มูลฐานค่าใหม่
A_1^{old}, B_1^{old}	สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ที่ความถี่มูลฐานค่าเก่า

N	จำนวนตัวอย่างข้อมูลกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่งคาบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก
N_0	จุดเริ่มต้นซีกตัวอย่างข้อมูลกระแสไฟฟ้า
T	คาบเวลาของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (sec)
ω_1	ความถี่เชิงมุมมูลฐาน (rad/sec)
τ	คาบเวลาของการซีกตัวอย่าง (sec)

1. บทนำ

ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่ใช้วงจรแปลงผันกำลัง (power converter) มักก่อให้เกิดฮาร์มอนิกในกระแสเป็นปริมาณมาก เมื่อใช้งานแบบปรับแปรความเร็วตลอดจนขับโหลดที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงไป จะประสบกับการมีค่าตัวประกอบกำลังที่อาจต่ำถึง 0.6 ในปัจจุบัน การคุมค่าฮาร์มอนิกมีความเข้มงวดมาก ผู้พัฒนาเทคโนโลยีระบบขับเคลื่อนอาจพิจารณาแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟ หรือวงจรกรองกำลังแอกทีฟ แต่เป็นที่ทราบกันอย่างกว้างขวางว่าวงจรกรองกำลังพาสซีฟไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างสมบูรณ์ และในการใช้งานต้องระมัดระวังสภาพเรโซแนนซ์ ตลอดจนแรงดันตกและกำลังสูญเสีย ในขณะที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีสมรรถนะสูง แต่ราคาแพงตามพิคคัลลิ่งที่ใช้ทางเลือกหนึ่งเป็นการผสมผสานวงจรกรองทั้งสองชนิดให้ได้สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีโดยไม่ต้องใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีพิคคัลสูงมากนัก

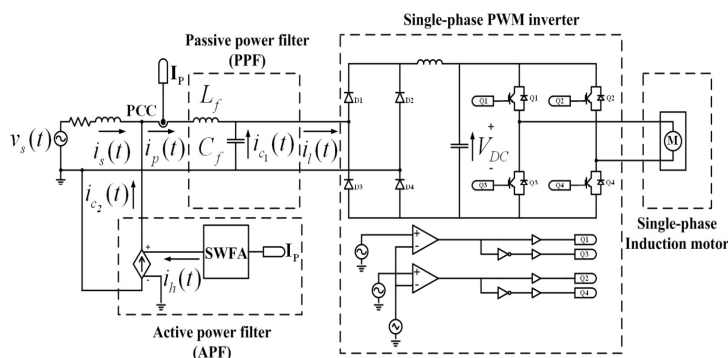
งานวิจัยนี้นำเสนอการลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำฟาสต์ด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด (hybrid power filter, HPF) วงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นต้องมีกระบวนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก เพื่อทำการชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบได้อย่างถูกต้อง วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่นำมาใช้ในวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power method) [1] วิธีตรวจจับซิงโครนัส (synchronous detection method) [2] วิธีแปลงแกนดีควิว (dq-frame method) [3] วิธีกรอบ

อ้างอิงเบบิซี (abc-reference-frame method) [4] และวิธีแปลงแกนดีควิวประกอบกับวิธีฟูรีเยร์ (dq-axis-with-Fourier (DQF) method) [5] เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (sliding-window-Fourier-analysis (SWFA)) ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพราะมีความรวดเร็วในการคำนวณในขณะที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำ [6] วงจรกรองกำลังพาสซีฟชนิด LC ถูกนำมาใช้เพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกและลดพิคคัลกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การออกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟใช้วิธีสร้างแผนภาพคอนทัวร์ [7] โดยมีเป้าหมายในการลดทอนกระแสฮาร์มอนิก ณ พิกคัลทำงานของระบบขับเคลื่อนดังกล่าวให้เป็นไปตามข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 [8]

บทความมีการแบ่งหัวข้อดังต่อไปนี้ หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงหลักการและความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA หัวข้อที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและพัฒนางจรกรองกำลังไฮบริด หัวข้อที่ 4 กล่าวถึงวิธีการเลือกพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟจากแผนภาพคอนทัวร์ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบการทำงานของวงจรกรองกำลัง และหัวข้อที่ 5 เป็นการสรุปผล

2. การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (SWFA)

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าสัญญาณรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่เชิงมุมมูลฐานเท่ากับ ω_1 (เรเดียน/วินาที) และมีความยาวเท่ากับ T (วินาที) สามารถเขียนแทนด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ การคำนวณเชิงเลขอาจใช้อัลกอริทึม FFT แต่มีข้อเสียที่ใช้เวลาในการคำนวณนาน ปัจจุบันการคำนวณองค์ประกอบของอนุกรมฟูรีเยร์ สามารถทำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำด้วยอัลกอริทึม SWFA เพื่อประยุกต์กับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก สามารถคำนวณเฉพาะองค์ประกอบกระแสไฟฟ้าที่ความถี่เชิงมุมมูลฐานและคำนวณกระแสฮาร์มอนิกรวมได้จากผลต่างระหว่างกระแสจริงที่ตรวจวัดได้กับกระแสมูลฐานนี้



รูปที่ 1 แผนภาพแทนระบบขับเคลื่อน

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_p(nT) \cos(n\omega_1 T) \quad (1)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_p(nT) \sin(n\omega_1 T) \quad (2)$$

$$A_1^{(new)} = A_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{ i_p[(N_0+N)T] \cos[(N_0+N)\omega_1 T] \dots - i_p[(N_0-1)T] \cos[(N_0-1)\omega_1 T] \} \quad (3)$$

$$B_1^{(new)} = B_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{ i_p[(N_0+N)T] \sin[(N_0+N)\omega_1 T] \dots - i_p[(N_0-1)T] \sin[(N_0-1)\omega_1 T] \} \quad (4)$$

$$i_1(kT) = A_1 \cos(\omega_1 kT) + B_1 \sin(\omega_1 kT) \quad (5)$$

$$i_h(kT) = i_p(kT) - i_1(kT) \quad (6)$$

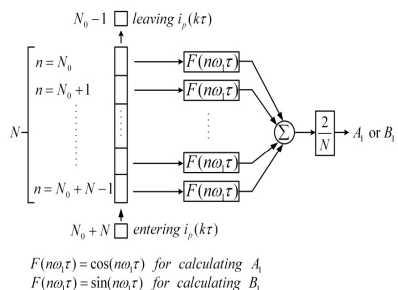
โดยที่ $k = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$ และ $T = \frac{T}{N}$

การดำเนินงานดังกล่าวในทางปฏิบัติอาศัย DSP และดำเนินการตามความสัมพันธ์ในเวลา discrete ดังที่แสดงด้วยสมการ (1)-(6)

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพแทนระบบขับเคลื่อนกระแสไหลเข้าวงจรกำลังพาสซีฟ ($i_p(t)$) ถูกนำมาคำนวณหาปริมาณฮาร์มอนิกที่เหลือจากการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟด้วยวิธี SWFA ในขั้นแรก DSP จะรับข้อมูลกระแส $i_p(t)$ จำนวนหนึ่งคาบเท่ากับ N ตัวอย่างข้อมูล เพื่อนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์

A_1 และ B_1 ตามความสัมพันธ์ที่ (1) และ (2) ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ดังกล่าวถูกใช้เป็นตัวเริ่มต้น ($A_1^{(old)}, B_1^{(old)}$)

ในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก หลังจากคาบแรก สัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 ค่าใหม่ ($A_1^{(new)}, B_1^{(new)}$) ถูกคำนวณโดยรับตัวอย่างข้อมูล $i_p(t)$ ค่าใหม่มาหนึ่งตัวอย่างและลบข้อมูลตัวที่เก่าที่สุดออกไปหนึ่งตัวอย่าง เพื่อทำการปรับปรุงข้อมูลตามความสัมพันธ์ที่ (3) และ (4) ตามลำดับ แผนภาพอธิบายการคำนวณดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2 จากนั้นจึงคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ความถี่เชิงมุมมูลฐาน ณ เวลาปัจจุบัน ($i_1(kT)$) ดังสมการที่ (5) และกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ ณ เวลาปัจจุบัน ($i_h(kT)$) ดังสมการที่ (6) โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบห่างกัน T วินาที กระแสฮาร์มอนิก $i_h(kT)$ ที่คำนวณได้ถูกใช้เป็นกระแสชดเชยอ้างอิงให้แก่วงจรกำลังแอคทีฟ



รูปที่ 2 แผนภาพอธิบายการคำนวณสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ A_1 และ B_1

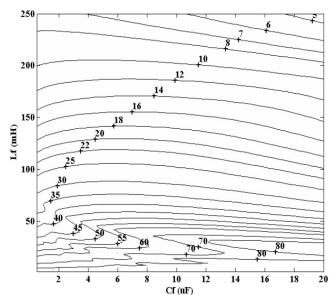
3. วงจรรอกกำลังไฮบริด

ในงานวิจัยนี้ วงจรรอกกำลังพาสซีฟ ใช้เพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกและลดพิกัดกำลังของวงจรรอกกำลัง แอ็กทีฟ ดังนั้น วงจรรอกกำลังพาสซีฟ จึงถูกออกแบบก่อน ส่วนวงจรรอกกำลังแอ็กทีฟถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เหลือจากการชดเชยด้วยวงจรรอกกำลังพาสซีฟในภายหลัง แบบจำลองของระบบขับเคลื่อนสร้างเลียนแบบระบบจริงโดยโปรแกรม PSIM แสดงดังรูปที่ 1 แบบจำลองประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว วงจรรอกกำลังพาสซีฟและแอ็กทีฟ แบบจำลองและระบบจริงใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 4 โพล มีพิกัดทำงาน $220V_{rms}/5A_{rms}/1,425rpm$ ที่พิกัดโหลด 3 Nm อินเวอร์เตอร์ทำงานแบบที่ดับขั้วเอ็ม และวงจรรอกกำลัง

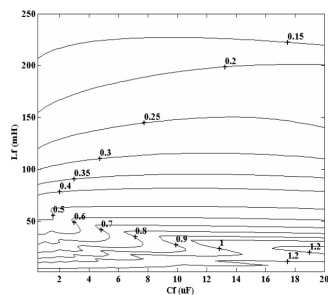
แอ็กทีฟแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสสมบุรณ์ ซึ่งรายละเอียดของวงจรรอกกำลังทั้งสองมีดังต่อไปนี้

3.1 วงจรรอกกำลังพาสซีฟ

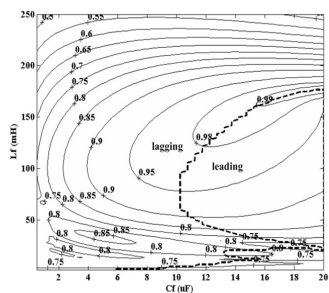
วงจรรอกกำลังพาสซีฟประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L_f และตัวเก็บประจุ C_f ดังรูปที่ 1 ขนาดของ L_f และ C_f ออกแบบโดยใช้โปรแกรม PSIM ร่วมกับ MATLAB จำลองสถานการณ์การทำงานจากระบบขับเคลื่อนขณะคิดตั้งวงจรรอกกำลังพาสซีฟเพียงอย่างเดียว เพื่อนำข้อมูลเชิงเลขที่ได้ไปสร้างแผนภาพคอนทัวร์ของค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกรวม (% THD_f และ % THD_v) ตัวประกอบกำลัง (PF) และค่าแรงดันดีซีเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (V_{DC}) เมื่อมีการผันแปรค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f และค่าตัวเก็บประจุ C_f



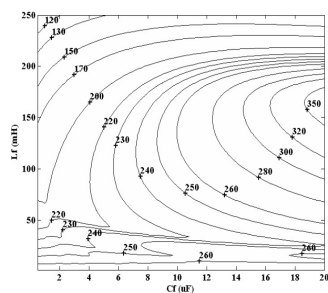
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

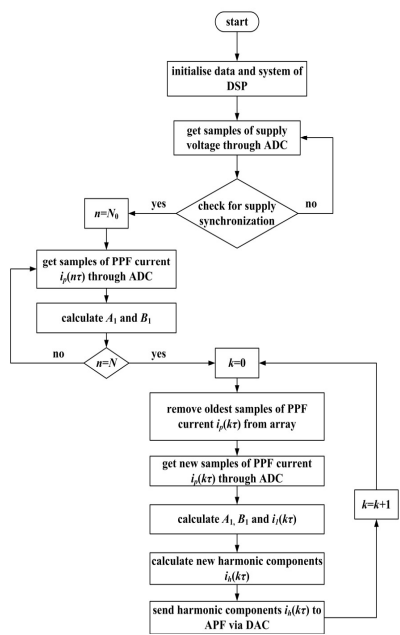
รูปที่ 3 แผนภาพคอนทัวร์สร้างจากข้อมูลเชิงเลขที่ได้จากการจำลองสถานการณ์การทำงานจากระบบขับเคลื่อนที่จุดทำงาน (ก) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (% THD_f) (ข) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (% THD_v) (ค) ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) และ (ง) ค่าแรงดันดีซีเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (V_{DC})

โดยกำหนดจุดทำงานในการจำลองสถานการณ์ของมอเตอร์ไว้ที่ (220V_{rms}/50Hz/5A_{rms}) เนื่องจาก L_f ถูกต่ออนุกรมกับระบบจึงมีแรงดันจากแหล่งจ่ายส่วนหนึ่งตกคร่อม L_f ซึ่ง L_f มีขนาดใหญ่แรงดันที่ตกคร่อมก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงและอาจทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถจ่ายกระแสที่กักทำงาน 5A_{rms} ให้แก่มอเตอร์ได้ ดังนั้นจึงต้องกำหนดขอบเขตของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์จากการจำลองสถานการณ์เบื้องต้นพบว่าค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f สูงสุดที่ทำให้ระบบยังคงสามารถจำลองสถานการณ์ได้ที่เกิดกระแสมอเตอร์ 5A_{rms} คือ 250mH ส่วนขอบเขตของตัวเก็บประจุ C_f สามารถกำหนดได้อย่างอิสระแต่ไม่ควรมีขนาดใหญ่เกินไป เนื่องจาก C_f ขนาดใหญ่อาจทำให้เกิดการดึงกระแสจากแหล่งจ่ายมากขึ้นและทำให้ตัวประกอบกำลังเป็นแบบล้าหน้าในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ 20 μ F ในขอบเขตดังกล่าวไม่เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ของแหล่งจ่าย (50Hz) แผนภาพคอนทัวร์ของ %THD₁, %THD_v, PF และ V_{DC} ที่สร้างจากข้อมูลเชิงเลขแสดงดังรูปที่ 3(ก) ถึง 3(ง) ตามลำดับ

3.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัยเป็นชนิดขนานมีโครงสร้างเป็นวงจรขยายกำลังมีที่กัก 750 วัตต์และมีอุปกรณ์ระบบอิเล็กทรอนิกส์สาร์โมนิกที่สร้างขึ้นโดยการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) รุ่น eZdsp™ F2812 ความเร็วในการประมวลผล 150MHz อัลกอริทึมระบบอิเล็กทรอนิกส์สาร์โมนิกด้วยวิธี SWFA ของ DSP เขียนด้วยภาษา C/C++ โดยการคำนวณได้ทำการซีกตัวอย่างสัญญาณกระแส $i_p(t)$ ผ่านทางตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ขนาด 12 บิต กระแสสาร์โมนิกที่คำนวณได้ถูกใช้เป็นกระแสชดเชยอ้างอิงให้แก่วงจรขยายกำลัง โดยถูกส่งผ่านทางตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาด 16 บิต (DAC712) กระแสชดเชยดังกล่าวจะถูกขยายและฉีดเข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยกระแสสาร์โมนิกที่เหลือทั้งหมดของระบบ ณ จุด

ต่อร่วม โดยแผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมระบบอิเล็กทรอนิกส์สาร์โมนิกด้วยวิธี SWFA แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมระบบอิเล็กทรอนิกส์สาร์โมนิกด้วยวิธีฟูริเยร์วิน โคว์เลื่อน

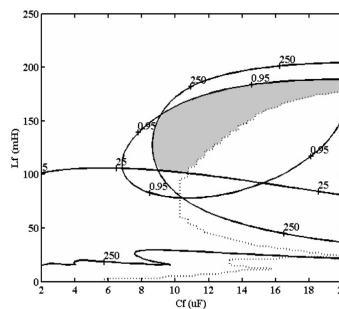
4. ผลการจำลองสถานการณ์และการทดสอบ

4.1 วงจรกรองกำลังพาสซีฟ

จากแผนภาพคอนทัวร์รูปที่ 3(ก) และ 3(ข) พบว่ายิ่ง L_f มีขนาดใหญ่ค่า %THD₁ และ %THD_v จะมีค่าลดลง แต่ผลเสียประการหนึ่งของ L_f ขนาดใหญ่ คือ ทำให้ V_{DC} มีค่าลดลงแสดงดังแผนภาพคอนทัวร์รูปที่ 3(ง) ส่วน C_f ที่ต่อขนานหน้าอินเวอร์เตอร์จะช่วยชดเชยกำลังรีแอกทีฟทำให้ตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าสูงขึ้น จากแผนภาพคอนทัวร์รูปที่ 3(ค) และ 3(ง) พบว่าแนวโน้มของค่า PF และ V_{DC} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ C_f มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะทำให้กระแสอาร์เอ็มเอสของระบบสูงขึ้นด้วยถือเป็นการสูญเสียในระบบและทำให้ตัวเหนี่ยวนำต้องรับภาระของ

กระแสอาร์เอ็มเอสที่สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นควรเลือก L_f และ C_f ที่มีขนาดเหมาะสมและมีขนาดเล็ก ที่จะทำให้ได้คลื่น กว้างกำลังไฟฟ้าโดยรวมที่ดีไม่เกิดเรโซแนนซ์กับแหล่งจ่าย เกิดกำลังสูญเสียและราคาถูก การเลือกค่า L_f และ C_f อาจพิจารณาค่า V_{DC} และ PF เป็นหลักโดยพิจารณา $\%THD_I$ และ $\%THD_V$ รองลงมา เนื่องจากค่า $\%THD_I$ และ $\%THD_V$ สามารถแก้ไขให้ดีขึ้นได้ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ แต่การทำงานของอินเวอร์เตอร์ ต้องพึ่งพา V_{DC} ในระดับที่เหมาะสม จากผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์พบว่าค่า V_{DC} ณ จุดทำงานไม่ควรต่ำกว่า 250V ในขณะที่ค่าตัวประกอบกำลังไม่ควรเป็นแบบพาสส์น้ำ เนื่องจากกำลังรีแอกทีฟส่วนเกินอาจไหลเข้าสู่ระบบข้างเคียงและก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าของระบบข้างเคียงได้

ข้อกำหนดสำหรับวงจรกรองกำลังพาสซีฟนั้น จะต้องสามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกให้เหลือ $\%THD_I$ ไม่มากกว่า 25% ค่า PF ต้องไม่ต่ำกว่า 0.95 (ล้าหลัง) ในขณะที่ค่า V_{DC} จะต้องไม่ต่ำกว่า 250V ณ จุดทำงาน เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สามารถผลิตแรงดันเอาต์พุตได้ 220V_{rms} ตามเงื่อนไขข้ดังกล่าวสามารถสร้างพื้นที่เพื่อเลือกพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟได้ดังส่วนที่แรงงาในภาพรูปที่ 5 ซึ่งได้เลือกพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังพาสซีฟเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการกรองทั้งหมด 13 กรณี แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่ากรณีที่ 5 6 8 9 11 และ 12 ให้ประสิทธิภาพตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยกรณีที่ 12 ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีที่สุด ส่วนในกรณีที่ 5 พารามิเตอร์มีขนาดเล็กที่สุดพารามิเตอร์ทั้ง 6 กรณีสามารถเลือกใช้ได้ทุกกรณี แต่เมื่อพิจารณาทางด้านราคาที่สูงขึ้นของตัวเหนี่ยวนำที่ใหญ่ขึ้น ในขณะที่ค่า $\%THD_I$ มีค่าลดลงเพียง 1 ถึง 3% เท่านั้น จึงควรเลือกใช้พารามิเตอร์ที่มีขนาดเล็กเพราะฮาร์มอนิกส่วนที่เหลือสามารถกำจัดให้อยู่ในข้อกำหนดของ IEEE Std 519-1992 ได้ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ แม้ว่ากรณีที่ 5 ให้ประสิทธิภาพในการกรองตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดและมีขนาดเล็กที่สุด แต่ขนาดของ V_{DC}

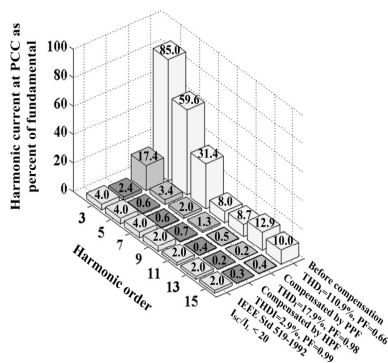


รูปที่ 5 แผนภาพคอนทัวร์แสดงพื้นที่ที่สามารถเลือกพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรกรองกำลังพาสซีฟจากการจำลองสถานการณ์ในแต่ละกรณี

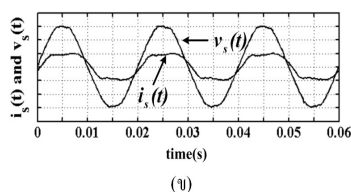
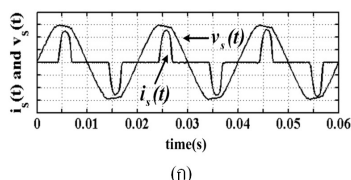
กรณีที่	L_f (mH)	C_f (μF)	THD_I (%)	PF	V_{DC} (V)
1	no PPF		122.3	0.610 (lag)	288.00
2	100	9	25.94	0.965 (lag)	249.38
3	100	10	25.62	0.968 (lag)	254.99
4	100	12	24.72	0.969 (lead)	265.89
5	105	9	24.66	0.966 (lag)	250.31
6	105	10	24.37	0.971 (lag)	256.22
7	105	12	24.72	0.969 (lead)	265.89
8	110	9	23.50	0.967 (lag)	251.12
9	110	10	23.23	0.965 (lag)	257.32
10	110	12	22.44	0.975 (lead)	269.39
11	120	9	21.46	0.968 (lag)	252.34
12	120	10	21.21	0.974 (lag)	259.04
13	120	12	21.54	0.979 (lead)	272.37

อยู่ติดกับขอบเขตของเงื่อนไขคือ 250V มากเกินไป ผู้วิจัยจึงเลือกใช้พารามิเตอร์ในกรณีที่ 6 ($L_f = 105mH$ และ $C_f = 10\mu F$) ซึ่งให้ค่า PF และค่า V_{DC} ที่สูงกว่าและตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 6 กระแสฮาร์มอนิกก่อนและหลังใช้วงจรกรองกำลังแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับ IEEE Std 519-1992

ผลการทดสอบวงจรกรองกำลังพาสซีฟในรูปที่ 6 พบว่าหลังติดตั้งวงจรกำลังพาสซีฟ %THD₁ มีค่าลดลงเหลือ 17.9% จากเดิมอยู่ที่ 110.9% ค่า PF เพิ่มขึ้นเป็น 0.98 ล้าหลัง จากเดิมอยู่ที่ 0.66 ล้าหลัง (วัดโดย FLUKE 434) ลักษณะสัญญาณกระแสแหล่งจ่าย $i_s(t)$ ก่อนและหลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟแสดงดังรูปที่ 7 (ก) และ 7(ข) ตามลำดับ (วัดโดย Tektronix TDS420A)

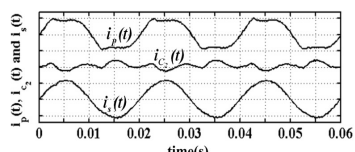
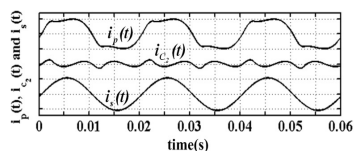


รูปที่ 7 สัญญาณกระแสและแรงดัน (ก) ก่อนการชดเชย (ข) หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (มาตราส่วน 5A/DIV และ 100V/DIV)

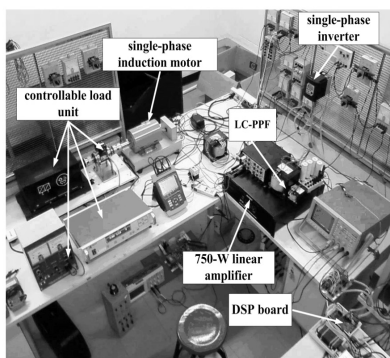
เมื่อพิจารณาค่า %THD₁ ก่อนและหลังติดตั้งวงจรกรองกำลังพาสซีฟ จากการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับ การทดสอบจริงพบว่าให้ค่าที่แตกต่างกันซึ่งนี้อาจเกิดจากแบบจำลองของระบบขับเคลื่อนไม่สามารถนำพารามิเตอร์ เช่น ค่าความต้านทานแฝงในแกนเหล็กและขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุ ตลอดจนค่าพารามิเตอร์แฝงที่อยู่ในสายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบจริงซึ่งมีจำนวนมากมารวมในแบบจำลองได้ครบถ้วน แต่อย่างไรก็ตามการลดลงของ %THD₁ ก็มีค่าใกล้เคียงกัน ในการจำลองสถานการณ์ %THD₁ ลดลงเหลือ 24.37% และผลการทดสอบจริงลดลงเหลือ 17.9% เมื่อพิจารณากระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับดังรูปที่ 6 พบว่ามีเพียงอันดับสามเท่านั้นที่ยังคงเกินข้อกำหนด IEE Std 519-1992 สำหรับระบบแรงดันต่ำ ซึ่งจะทำให้การชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแยกที่ต่อไป

4.2 วงจรกรองกำลังแยกที่ฟ

ก่อนการสร้างวงจรกรองกำลังแยกที่ฟได้จำลองการทำงานของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟโดยใช้วิธีคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดที่เหลือจากการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟตามอัลกอริทึม SWFA ซึ่งเขียนขึ้นโดยภาษา C โดยสร้างเป็น .dll ไฟล์เพื่อใช้ร่วมกับฟังก์ชัน DLL block ของ PSIM จากแบบจำลองรูปที่ 1 กระแส $i_p(t)$ ถูกส่งผ่านไปยัง DLL block หนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต SWFA ซึ่งภายในฟังก์ชันดังกล่าว $i_p(t)$ ถูกแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกทั้งหมดออกมาเป็นกระแสอ้างอิง $i_h(t)$ และส่งต่อไปยังแหล่งจ่ายกระแสสมบูร์นเพื่อสร้างกระแสชดเชยฮาร์มอนิก $i_c(t)$ และดีคิกระแสดังกล่าวเข้าสู่ระบบ ณ จุดต่อร่วม ผลของ PSIM แสดงดังรูปที่ 8(ก) และผลการทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 8(ข) (วัดโดย Tektronix TDS420A) ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 (ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์ด้วย PSIM
(ข) ผลจากการทดสอบจริง (มาตราส่วน 5A/DIV)



รูปที่ 9 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบจริง

ผลการทดสอบวงจรงอกกำลังไสบริดในรูปที่ 6 พบว่าหลังการชดเชยด้วยวงจรงอกกำลังไสบริด ค่า%THD_i ลดลงเหลือเพียง 2.9% ในขณะที่ PF เพิ่มขึ้นเป็น 0.99 ล้าหลัง เมื่อพิจารณากระแสรอมอนิกแต่ละอันดับพบว่ากระแสรอมอนิกแต่ละอันดับอยู่ในข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 ทุกอันดับ เมื่อนำกระแสแหล่งจ่าย $i_s(t)$ ก่อนการชดเชยด้วยวงจรงอกกำลังใด ๆ ในสภาวะอยู่ตัวดังรูปที่ 7(ก) จำนวนหนึ่งคาบไปคำนวณหาค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสรอมอนิกทั้งหมดด้วยวิธี SWFA พบว่าหากใช้วงจรงอกกำลังแอกทีฟเพียงอย่างเดียววงจรงอกกำลังแอกทีฟจะต้องฉีดกระแส

ชดเชยรอมอนิกเท่ากับ 3.49 A_{rms} เมื่อทำการคิดตั้งวงจรงอกกำลังพาสซีฟสามารถลดที่ฉีดกระแสของวงจรงอกกำลังแอกทีฟได้ถึง 77% โดยหลังการคิดตั้งวงจรงอกกำลังพาสซีฟ วงจรงอกกำลังแอกทีฟที่ต้องฉีดกระแสชดเชยรอมอนิกเพียง 0.8 A_{rms} เท่านั้น ซึ่งคิดเป็น 22.92% ของ 3.49 A_{rms} ในขณะที่ค่าตัวประกอบกำลังของระบบก็มีค่าที่ดีขึ้นเช่นกัน โดยสามารถวัดได้เท่ากับ 0.99 ล้าหลัง ที่เกิดการทำงานของมอเตอร์

นอกจากการทดสอบที่ที่กัลทำงานของระบบขับเคลื่อน ผู้วิจัยยังทำการทดสอบวงจรงอกกำลังไสบริดที่ 110% 100% 80% และ 50% ของพิคโกลด 3Nm โดยปรับความเร็วมอเตอร์ไว้ที่ 100% 90% และ 80% ของความเร็วพิค 1,425 rpm จากการทดสอบพบว่าวงจรงอกกำลังไสบริดยังให้ประสิทธิภาพในการชดเชยที่ดีที่สุดทำงานต่ำกว่าพิคอีกด้วย โดยผลการทดสอบดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 2 (วัดโดย FLUKE 434)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบที่ค่าโกลดและความเร็วรอบต่าง ๆ

แรงบิดที่เพลา (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	THD _i (%)	THD _v (%)	PF
3.3 (110%)	1,425	2.9	1.6	0.99
	1,282	2.9	1.9	0.99
	1,140	2.9	1.9	0.99
3.0 (100%)	1,425	2.9	2.0	0.99
	1,282	3.2	2.1	0.99
	1,140	3.3	2.1	0.99
2.4 (80%)	1,425	3.7	2.0	0.98
	1,282	3.8	2.1	0.97
	1,140	3.9	2.1	0.96
1.5 (50%)	1,425	4.5	2.0	0.91
	1,282	4.7	2.1	0.90
	1,140	4.8	2.1	0.88

5. สรุป

จากผลการวิจัยพบว่า การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกในระบบขับเคลื่อนกระแสสลับเฟสเดียวด้วยวิธีไฮบริด ให้ผลเป็นอย่างไร โดยที่วงจรกรองกำลังแยกที่มีพิกัดกำลังไม่สูง ค่า $\%THD_L$ หลังการชดเชยด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริด เหลือเพียง 2.9% ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของงานวิจัย คือ อยู่ภายในข้อกำหนด IEEE Std 519-1992 นอกจากนี้ วงจรกรองกำลังไฮบริดยังให้ประสิทธิภาพที่ดีมีแนวโน้มใช้กับโหลดและความเร็วรอบมอเตอร์ในย่านต่ำกว่าพิกัด ในขณะที่วงจรกรองกำลังพาสซีฟที่สามารถลดพิกัดกระแสของวงจรกรองกำลังแยกที่ได้ดีเช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่เอื้อเฟื้อซอฟต์แวร์ PSIM ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและจำลองผลต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Furuhashi, T., Okuma, S., and Uchikawa, Y. (1990). A study on the theory of instantaneous reactive power. IEEE Transactions on Industrial Electronics., 37(1):86-90.

[2] Lin, C.E., Chen, C.L., and Huang, C.L. (1992). Calculating approach and implementation for active filters in unbalanced three-phase system using synchronous detection method. Proceedings of the 1992 International Conference on Power Electronics and Motion Control; Nov 9-13, 1992; San Diego, CA, USA, p. 374-380 (vol.1).

[3] Takeda, M., Ikeda, K., Teramoto, A., and Aritsuka, T. (1988). Harmonic current and reactive power compensation with and active filter. IEEE 19th Annual Power Electronics Speciallists Conference (PESC 1988); April 11-14, 1988; Kyoto, Japan, p. 1174-1179 (vol.2).

[4] Chang, G.W., Chen, S.K., and Chu, M. (2002). An efficient a-b-c reference frame-based compensation strategy for three-phase active power filter control. Electric Power Systems Research., 60(3):161-166.

[5] Sujitjorn, S., Arecrak, K.-L., and Kulworawanichpong, T. (2007). The DQ axis with Fourier (DQF) method for harmonic identification. IEEE Transactions on Power Delivery., 22(1):737-739.

[6] El-Habrouk, M., and Darwish, M.K. (2001). Design and implementation of a modified fourier analysis harmonic current computation technique for power active filter using DSPs. IEE Proceedings of Electric Power Applications., 148:21-28.

[7] Moo, C.S., Cheng, H.L., and Guo, S.J. (1997). Designing passive LC filters with contour maps [for diode bridge rectifiers]. Proceedings of the 1997 International Conference on Power Electronics and Drive System; May 26-29, 1997, p. 834-838 (vol.2).

[8] IEEE Std. 519-1992. (1993). IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electrical power system.

ประวัติผู้เขียน

นายสุภกร วิศวภัทรธนธร เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2525 ที่อำเภอตากลิ จังหวัดนครสวรรค์ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ถึงมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนปรีชาโชติ อำเภอตากลิ จังหวัดนครสวรรค์ และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนตากลิประชาสรรค์ อำเภอตากลิ จังหวัดนครสวรรค์ ในปี พ.ศ. 2543 ภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2547 จากนั้นศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยระบบควบคุมและอัตโนมัติ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 6 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 (3) ปฏิบัติการระบบควบคุม (4) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ (5) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 และ (6) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ข. ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและการประหยัดพลังงานระบบควบคุมอัตโนมัติ และอิเล็กทรอนิกส์กำลัง