

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์  
ที่รวมพารามิเตอร์ของตัวควบคุม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2556

**MATHEMATICAL MODEL INCLUDING CONTROLLER  
PARAMETERS OF BUCK CONVERTER**



**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 2013**

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์  
ที่รวมพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ก้องพล อารีรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สาธิต ชลสถิตจำเริญ : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่รวมพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (MATHEMATICAL MODEL INCLUDING CONTROLLER PARAMETERS OF BUCK CONVERTER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์, 167 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ทั้ง ตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง โดยจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับการวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ทำให้ลดเวลาในการจำลองสถานการณ์ อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบได้อีกด้วย จากผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม นอกจากนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้มีการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ เพื่อนำไปใช้สำหรับการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้น สามารถนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งผลจากการทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าจากชุดทดสอบ แสดงให้เห็นว่า การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ จะยังคงให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก้องพล อารีรักษ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทพนม โสภณเพิ่ม และ โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

สาธิต ชลสถิตจำเริญ

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
<b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัก์.....	7
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงาน ทางวิศวกรรมไฟฟ้า.....	9
2.5 สรุป.....	10
<b>3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ.....</b>	<b>11</b>
3.1 บทนำ.....	11
3.2 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ.....	11
3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์.....	13
3.3.1 กรณีไม่มีตัวควบคุม.....	13
3.3.2 กรณีมีตัวควบคุมแบบพีไอ.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์.....	22
3.4.1	การออกแบบตัวควบคุมรูปกระแสไฟฟ้า .....	22
3.4.2	การออกแบบตัวควบคุมรูปแรงดันไฟฟ้า .....	24
3.5	การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง.....	25
3.6	สรุป.....	28
<b>4</b>	<b>แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมตสไลด์ดิง.....</b>	<b>30</b>
4.1	บทนำ.....	30
4.2	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมตสไลด์ดิง .....	30
4.3	การออกแบบตัวควบคุมแบบโหมตสไลด์ดิง .....	37
4.4	การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง.....	40
4.5	สรุป.....	44
<b>5</b>	<b>การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์.....</b>	<b>45</b>
5.1	บทนำ.....	45
5.2	หลักการทํางานของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว.....	45
5.3	หลักการทํางานของวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค .....	48
5.4	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ.....	50
5.4.1	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (ATS).....	53
5.4.2	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) .....	56
5.5	การออกแบบตัวควบคุมแบบโหมตสไลด์ดิง .....	59
5.5.1	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (ATS).....	61
5.5.2	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) .....	64
5.6	สรุป.....	67

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>6</b>	<b>การสร้างชุดทดสอบ.....</b>	<b>68</b>
6.1	บทนำ.....	68
6.2	แหล่งจ่าย .....	69
6.3	วงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	71
6.4	ตัวควบคุม.....	75
6.4.1	ตัวควบคุมแบบพีไอ .....	75
6.4.2	ตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง.....	77
6.5	วงจรตรวจจับ.....	79
6.6	ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....	81
6.7	สรุป.....	84
<b>7</b>	<b>ผลการทดสอบ .....</b>	<b>85</b>
7.1	บทนำ.....	85
7.2	วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน กรณีไม่มีตัวควบคุม .....	85
7.3	การทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	86
7.4	การทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วย ตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง .....	91
7.5	สรุป.....	95
<b>8</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>96</b>
8.1	สรุป .....	96
8.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	97
	รายการอ้างอิง.....	98
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของ โปรแกรม MATLAB.....	100
	ภาคผนวก ข. ตารางการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วย วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์.....	103
	ภาคผนวก ค. โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์.....	114
	ภาคผนวก ง. ความรู้พื้นฐานของบอร์ด AVR และการ์ด DSP .....	128
	ภาคผนวก จ. โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino และ DSP.....	134

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	150
ประวัติผู้เขียน .....	167



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง..... 6
2.2	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้ง..... 7
2.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้าน วิศวกรรมไฟฟ้า ..... 9
3.1	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 ..... 17
3.2	ตารางเปรียบเทียบการประหยัดเวลาในการจำลองสถานการณ์ ..... 28
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ โหมคสไลด์คิง..... 40
5.1	ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [ $\omega_{nv} = 150 \text{ Hz} - 700 \text{ Hz}$ และ $\omega_{ni} = 2 \text{ kHz} - 20 \text{ kHz}$ ] ..... 53
5.2	ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS ..... 54
5.3	ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ PSO ..... 57
5.4	ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ โหมคสไลด์คิง ..... 61
5.5	ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบ โหมคสไลด์คิงที่ออกแบบด้วย วิธีการแบบดั้งเดิม และวิธี ATS ..... 62
5.6	ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบ โหมคสไลด์คิงที่ออกแบบด้วย วิธีการแบบดั้งเดิม และวิธี PSO ..... 65
6.1	ตารางการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า ..... 80
6.2	ตารางการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า..... 81
7.1	ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม PSO และ ATS ..... 87
7.2	ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบ โหมคสไลด์คิงที่ได้รับการออกแบบด้วย วิธีการแบบดั้งเดิม PSO และ ATS ..... 91
ข.1	การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)..... 104
ข.2	การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ) ..... 104
ข.3	การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)..... 105
ข.4	การทดสอบค่าปรับลดรัศมี (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ) ..... 105
ข.5	ผลการทดสอบจำนวนอนุภาค (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)..... 106

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.6 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ $C_p$ (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ).....	107
ข.7 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ $C_g$ (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ).....	108
ข.8 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง).....	109
ข.9 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง).....	109
ข.10 การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง).....	110
ข.11 การทดสอบค่าปรับลรัศมี (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง).....	110
ข.12 ผลการทดสอบจำนวนอนุภาค (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง).....	111
ข.13 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ $C_p$ (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง).....	112
ข.14 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ $C_g$ (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง).....	113

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	วงจรแปลงผันแบบบัคค์กรณีไม่มีตัวควบคุม..... 13
3.2	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์กรณี..... 14
3.3	ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 % ..... 17
3.4	ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 % ..... 18
3.5	ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 70 % ..... 18
3.6	ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 70 % ..... 19
3.7	วงจรแปลงผันแบบบัคค์กรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ..... 20
3.8	โครงสร้างระบบการควบคุม ..... 20
3.9	รูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า..... 22
3.10	รูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า..... 24
3.11	ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง ( $V_o^*$ ) จาก 40 V เป็น 50 V ที่เวลา 1 วินาที ..... 26
3.12	ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง ( $V_o^*$ ) จาก 40 V เป็น 50 V ที่เวลา 1 วินาที ..... 26
3.13	ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง ( $V_o^*$ ) จาก 40 V เป็น 70 V ที่เวลา 1 วินาที ..... 27
3.14	ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง ( $V_o^*$ ) จาก 40 V เป็น 70 V ที่เวลา 1 วินาที ..... 27
4.1	วงจรแปลงผันแบบบัคค์กรณีที่มีตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง..... 31
4.2	ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์กรณี..... 31
4.3	โครงสร้างของตัวควบคุม..... 35
4.4	ผลกระทบของพารามิเตอร์ $a$ ที่มีผลต่อระบบ..... 37
4.5	ผลกระทบของพารามิเตอร์ $b$ ที่มีผลต่อระบบ..... 38
4.6	ผลกระทบของพารามิเตอร์ $m$ ที่มีผลต่อระบบ..... 39
4.7	ผลกระทบของพารามิเตอร์ $K$ ที่มีผลต่อระบบ..... 39
4.8	การจำลองผลของแรงดันเอาต์พุตที่มีการควบคุม โดยเปลี่ยนแปลงค่า $V_{ref}$ จาก 10 V เป็น 15 V..... 41



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 การจำลองผลของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีการควบคุม โดยเปลี่ยนแปลงค่า $V_{ref}$ จาก 10 V เป็น 15 V.....	42
4.10 การจำลองผลของแรงดันเอาต์พุตที่มีการควบคุม โดยเปลี่ยนแปลงค่า $V_{ref}$ จาก 10 V เป็น 20 V.....	42
4.11 การจำลองผลของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีการควบคุม โดยเปลี่ยนแปลงค่า $V_{ref}$ จาก 10 V เป็น 20 V.....	43
5.1 สุ่มค่า $S_0$ ในพื้นที่การค้นหา.....	46
5.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ $S_0$ .....	46
5.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่.....	47
5.4 กำหนดค่า $S_0$ ใหม่.....	47
5.5 กลไกการเดินย้อนรอยและการปรับลดค่ารัศมี .....	47
5.6 วงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ.....	50
5.7 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์.....	52
5.8 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	55
5.9 การลู่เข้าของค่า $W$ ด้วยวิธี ATS .....	55
5.10 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี ATS .....	56
5.11 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	57
5.12 การลู่เข้าของค่า $W$ ด้วยวิธี PSO.....	58
5.13 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี PSO .....	59
5.14 วงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่มีตัวควบคุมแบบ โหมดสไลด์ดิง.....	59
5.15 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์.....	60
5.16 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	63
5.17 การลู่เข้าของค่า $W$ ด้วยวิธี ATS.....	63
5.18 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี ATS.....	64
5.19 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	65
5.20 การลู่เข้าของค่า $W$ ด้วยวิธี PSO.....	66

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี PSO .....	66
6.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ .....	68
6.2 วงจรสำหรับออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง .....	69
6.3 หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส .....	69
6.4 มอดูของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ .....	70
6.5 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองแรงดัน .....	70
6.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด .....	71
6.7 โครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ .....	72
6.8 มอดูของมอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัย .....	72
6.9 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ .....	74
6.10 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ .....	74
6.11 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ .....	75
6.12 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280.....	77
6.13 โครงสร้างของสมการ $u_{eq}$ .....	78
6.14 การ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335.....	78
6.15 ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า .....	79
6.16 วงจรทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า .....	79
6.17 ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและวงจรสำหรับใช้งาน .....	80
6.18 วงจรทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า.....	81
6.19 ชุดทดสอบจริงของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	82
6.20 ผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดทดสอบที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยปรับเปลี่ยน ( $v_o^*$ ) จาก 10V ไปเป็น 12V .....	83
6.21 ผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดทดสอบที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง โดยปรับเปลี่ยน ( $v_o^*$ ) จาก 10V ไปเป็น 12V .....	83
7.1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 50 % .....	86
7.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 66.66 % .....	86
7.3 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่าง การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและPSO.....	88

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.4 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและATS.....	88
7.5 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและPSO.....	89
7.6 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและATS.....	89
7.7 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและPSO.....	90
7.8 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและATS.....	90
7.9 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและPSO.....	92
7.10 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและATS.....	92
7.11 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและPSO.....	93
7.12 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและATS.....	93
7.13 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและPSO.....	94
7.14 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบคั้งเดิมและATS.....	95
ก.1 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีไม่มีตัวควบคุม .....	101
ก.2 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีมีตัวควบคุมแบบพีไอ .....	101
ก.3 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีมีตัวควบคุมแบบ โหมคสไลด์คั้ง.....	102
ง.1 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280.....	129
ง.2 การ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335.....	131

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวงจรถอนิกส์กำลัง ได้ถูกนำมาใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังส่วนใหญ่จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจร เมื่อนำไปวิเคราะห์ อาทิเช่น การออกแบบตัวควบคุม, การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องหาวิธีในการทำให้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method : GSSA) (Mahdavi, Emadi, Bellar, and Ehsani, 1997) ใช้สำหรับวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี, วิธีดีคิว (DQ method) (Rim, Choi, Cho, and Cho, 1994) นำมาใช้กับวงจรแปลงผันของระบบไฟฟ้า 3 เฟส เช่นวงจรเรียงกระแส 3 เฟส, วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบควบคุมได้ และวิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value method) (Sudhoff, and Wasynczuk, 1993) ใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองของระบบ 3 เฟส เช่น วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์, วงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ (Han, Wang and Howe, 2007) งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีการวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์และมีความถูกต้องแม่นยำสูงอีกด้วย ซึ่งในอดีตที่ผ่านมามีการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ แต่ยังไม่พบบทความใดที่นำเสนอเกี่ยวกับ การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) ได้อีกมากมาย (Udomsuk, S., Areerak, T., Areerak, K-L., and Areerak, K-N., 2011), (Chaijaroenudomrung, K., Areerak, K-N., and Areerak, K-L., 2011) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมไปเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้น จะส่งผลทำให้ผลการตอบสนองของแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตมีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

1.2.2 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัสก์ทั้งการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง

1.2.3 เพื่อศึกษาและดำเนินการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิงสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัสก์ โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีที่สุด

1.2.4 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน ทั้งตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blockset) ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัสก์ ได้ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมที่อาศัยความรู้จากระบบควบคุม และการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

1.3.4 ตัวควบคุมของชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY ATMEGA 1280 ส่วนวงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง จะใช้การ์ด DSP เบอร์ DSP เบอร์ eZdsp™ F28335

1.3.5 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้น การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

1.3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบ

1.3.7 ระบบที่พิจารณาเป็นวงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน และต้องการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานให้คงที่

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่านั้น

1.4.2 การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะพิจารณาในช่วง โหมดการทำงานแบบต่อเนื่อง (CCM) เท่านั้น

1.4.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ จะอาศัยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

1.5.2 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ทั้งควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง

1.5.3 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์

1.5.4 ได้องค์ความรู้การสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นความต้านทานที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

1.5.5 บทความวิจัยได้เผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

## 1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

*บทที่ 1* เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

*บทที่ 2* กล่าวถึงปริทศวรรษกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และตัวควบคุมที่นิยมใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ รวมถึงการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

*บทที่ 3* นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีตัวควบคุม และมีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

*บทที่ 4* นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป รวมถึงการทดสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีผลต่อระบบ เพื่อใช้ในการกำหนดค่าของตัวควบคุม รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

*บทที่ 5* นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวและการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของ

กลุ่มอนุภาค พร้อมทั้งตรวจสอบเสถียรภาพของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบ รวมถึงการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของการออกแบบแต่ละวิธี

*บทที่ 6* นำเสนอการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดตัวต้านทาน ทั้งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ นอกจากนี้ยังนำเสนอการสร้าง ชุดวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

*บทที่ 7* นำเสนอผลการทดสอบของระบบจริง ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน ทั้งตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง พร้อมทั้งผลการเปรียบเทียบ ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบ แต่ละวิธี

*บทที่ 8* เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 7 ส่วน คือ *ภาคผนวก ก.* แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB *ภาคผนวก ข.* แสดงตารางผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ *ภาคผนวก ค.* แสดงรายละเอียดโปรแกรมการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ *ภาคผนวก ง.* แสดงความรู้พื้นฐานของบอร์ด AVR และ การ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335 *ภาคผนวก จ.* แสดงรายละเอียดโปรแกรมควบคุมภาษา C++ ของ AVR และการ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335 สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ *ภาคผนวก ฉ.* แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัย

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้ถูกนำมาใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย แต่ยังไม่พบเห็นมากนักกับการนำอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความสำคัญอย่างมากต่อการศึกษาพฤติกรรมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่พิจารณาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้ปรากฏอยู่ในแบบจำลอง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัก และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าซึ่งในแต่ละหัวข้อผู้วิจัยได้นำเสนอเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่เร็วกว่าการใช้แบบจำลองที่ใช้จากโปรแกรมสำเร็จรูป นอกจากนี้ประโยชน์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังสามารถนำไปใช้ได้อีกมากมายดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 1.1 ของบทที่ 1 ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

จากตารางที่ 2.1 พบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีนินมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักสำหรับนำไปใช้ในการออกแบบ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมายังไม่พบเห็นมากนักที่จะพิจารณาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เข้าไปอยู่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Sanders, S. R., Noworolski, J. M., Liu, X. Z., and Vergliese, G.C.	นำเสนอวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะสำหรับวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบใช้พีดับเบิลยูเอ็ม สำหรับการสวิตช์ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์ประเภทต่าง ๆ
1993	Sudhoff, S.D., and Wasynczuk, O.	นำเสนอการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันที่มีโหลดเป็นเครื่องจักรกลเชิงโรตารี
1993	Baghrmian, A., and Forsyth, A.J.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น
1997	Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.B., and Ehsani, M.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี โดยใช้ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
1998	Jianping, X., and Lee, C. Q.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับการวิเคราะห์ของวงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์เสมือน
2004	Mahdavi, J., Emadi, A., Geoffrey, A., and Williamson	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์ของระบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากำลังต่าง ๆ บนเรือโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ
2006	Dong, P., Cheng, K.W.E., Ho, S. L., Yang, J. M., and Choi, W.F.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีแบบคลาสสิก โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยนำมาประยุกต์ใช้กับระบบยานยนต์
2007	Han, L., Wang, J., and Howe, D.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์

ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลอง เพื่อใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์

วงจรแปลงผันกำลังเป็นที่นิยมกับการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม ซึ่งวงจรแปลงผันแบบบักก์จะทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโหลด จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่และเป็นไปตามความต้องการ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม เพื่อใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1995	Nguyen, V.M., and Lee, C.Q.	นำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์ โดยใช้วิธีโหมดสไลด์ดิ่งร่วมกับการปรับตัวของฮิสเทอรีซิส
1997	Mahdavi, j., Emadi, A., and Toliyat, H.A.	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิ่งสำหรับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบ
2000	Uran, S. and Miro, M.	นำเสนอการออกแบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ซึ่งได้นำเสนอตัวควบคุม 2 วิธีคือ <ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ</li> <li>- ใช้ตัวควบคุมด้วยวิธี state space control เพื่อต้องการให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์</li> </ul>
2005	Tsang, K.M., and Chan, W.L.	นำเสนอเกี่ยวกับการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยใช้เทคนิคการต่อกันแบบคาสเคดของตัวควบคุมแบบพีไอ

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	He, Y., and Luo, F.L.,	นำเสนอการออกแบบและการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบโพล (POEL converter) โดยใช้วิธี constant switching frequency sliding mode control: CSFSMC ในการควบคุมสัญญาณควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่
2007	He, M., and Xu, J.	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ โดยทำการควบคุมด้วยโปรแกรม FPGA โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบเป็นเชิงเส้นกับการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของตัวควบคุมแบบพีไอดี
2007	Li-kui., Jun ZHAO., and Dan MA.	นำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ โดยใช้การควบคุมแบบ adaptive backstepping sliding mode control เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต ซึ่งการใช้ตัวควบคุมวิธีนี้จะมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์
2008	Tan, S.-C., and Lai, Y.M.	นำเสนอการควบคุมกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบฮุก โดยใช้วิธี constant-frequency reduces-state sliding mode current controller และการทดสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีผลต่อระบบ
2008	Sarvi, M., and NamazyPour, N.	นำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซีซีร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดี
2011	Sureshkumar, R., and Ganeshkumar, S.	นำเสนอการเปรียบเทียบใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบย้อนกลับ (Backstepping) ในการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้งที่มีโหลดเป็นความต้านทานและโหลดที่เป็นมอเตอร์

จากตารางที่ 2.3 พบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์นั้นมีมากมาย แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมทั้งแบบพีไอและตัวควบคุมแบบ

โหมคสไลด์คิงเนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงนั้นเป็นที่นิยมสำหรับใช้ควบคุมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง อีกทั้งตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงยังไม่มีการออกแบบตัวควบคุมที่แน่นอน ซึ่งยังต้องอาศัยการสุ่มค่าของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม หรือการหาผลกระทบของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมว่ามีผลต่อระบบอย่างไรเพื่อที่จะกำหนดค่าของตัวควบคุม ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้การออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงเป็นไปได้ง่ายขึ้นหลีกเลี่ยงการออกแบบที่ต้องอาศัยการสุ่มจากผู้ออกแบบ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตไม่ว่าจะเป็นในส่วนของตัวควบคุมแบบพีไอหรือตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงนอกจากนี้ยังแสดงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบักคัทที่มีตัวควบคุม เพื่อให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองที่ได้นั้นมีความถูกต้องเพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบต่อไป

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

ปัจจุบันการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้งานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็นการระบุเอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของระบบ เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่ถูกต้องสำหรับงานที่ต้องใช้ความแม่นยำสูง หรือการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อให้วงจรดังกล่าวมีสมรรถนะในการทำงานที่ดีที่สุด เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2005	Cupertino, Marinelli, Zanchetta, and Sumner	นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และระบบการควบคุม โดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ โดยถูกนำมาช่วยในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Narongrit, Areerak, K-L., and Srikaew	นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (adaptive tabu search) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์อีกวิธีหนึ่งโดยการออกแบบจะอาศัยการค้นหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อให้วงจรดังกล่าวมีสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุด
2011	Udomsuk, S., Areerak, T., Areerak, K-L., and Areerak, K-N.	นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของค่าพารามิเตอร์ในสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ่น โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เพื่อให้ได้แบบจำลองกำลังงานสูญเสียที่ถูกต้องสำหรับการประหยัดพลังงาน
2011	Chaijaroenudomrung, K., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรเรียงกระแสแบบควบคุมได้ ด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ดีที่สุด

จากตารางที่ 2.3 พบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ามีมากมาย ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้งตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมตสโลด์คิง โดยเลือกใช้ 2 วิธีคือวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (ATS) และ วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลองมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับออกแบบตัวควบคุม

## 2.5 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์และการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

### บทที่ 3

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ

### 3.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับวิศวกรในการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมพลวัตของระบบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับผู้วิจัย และเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี โดยทั่วไปแล้ววงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของสวิตช์ในระบบ ซึ่งวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะกำจัดผลกระทบของสวิตช์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา ซึ่งจะง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมรวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 กรณี คือ กรณีไม่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม รวมทั้งผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการอภิปรายผล

### 3.2 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เป็นวิธีการที่ใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะของวงจร (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ซึ่งอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

โดยทั่วไป สัญญา  $f(t)$  ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น  $T$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (T.W. Gamelin, 2000) ดังสมการที่ (3-1) ดังนี้

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (3-1)$$

โดยที่  $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$  และ  $\langle x \rangle_k(t)$  คือ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จะใช้  $\langle x \rangle_k(t)$  ของสัญญาณแทนตัวแปรสถานะของระบบ ซึ่งสัมประสิทธิ์ฟูรีเยอร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (3-2) ดังนี้

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-2)$$

คุณสมบัติที่จำเป็น 3 ข้อของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยอร์เชิงซ้อน สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง (T.W. Gamelin, 2000) โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังนี้

- ข้อที่ 1: คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-3) ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega_s \langle x \rangle_k \quad (3-3)$$

- ข้อที่ 2: คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (3-4) ดังนี้

$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \quad (3-4)$$

- ข้อที่ 3: ถ้า  $f(t)$  คือ ค่าจริง (real-value periodic waveform) แสดงได้ดังสมการที่ (3-5) ดังนี้

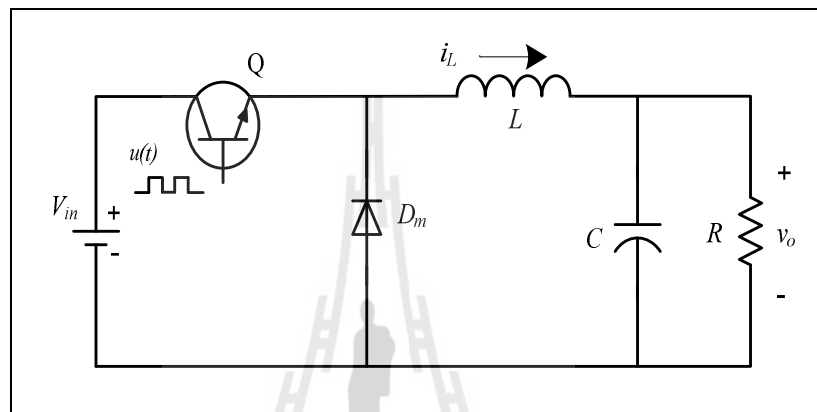
$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (3-5)$$

จากสมการที่ (3-1) และ (3-2) ค่า  $k$  เป็นตัวบ่งบอกความถูกต้องของการใช้ อนุกรมฟูรีเยอร์ ถ้า  $k$  มีค่าเป็นอันดับอนันต์ ค่าผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับ 0 และถ้าสัญญาณที่ไม่ปรากฏการสั่นไหวสามารถกำหนดให้ค่า  $k=0$  ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า การประมาณค่าอันดับศูนย์ (Mahdavi, Emadi, Bellar, and Ehsani, 1997) หรือถ้าสัญญาณมีการสั่นไหว สามารถกำหนดให้  $k$  มีค่าเป็น  $-1, 1$  ซึ่งจะเรียกวิธีนี้ว่าการประมาณค่าอันดับหนึ่ง (A. Emadi, 2004) ในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

### 3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

#### 3.3.1 กรณีไม่มีตัวควบคุม

วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง  $V_{in}$  แทนอุปกรณ์สวิตช์ ในที่นี้ใช้ มอสเฟต ส่วน  $u(t)$  แทนสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน  $L$  แทนขดลวดเหนี่ยวนำ  $C$  แทนตัวเก็บประจุ และ  $R$  แทนโหลดตัวต้านทาน



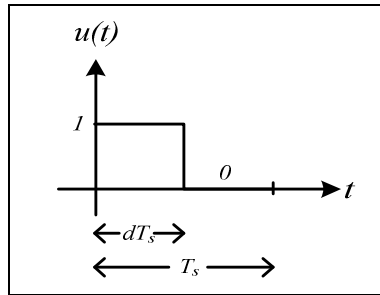
รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันแบบบัคค์กรณีไม่มีตัวควบคุม

โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ในรูปที่ 3.1 เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากการใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ และกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ดังสมการการที่ (3-6) จากสมการพบว่าแบบจำลองที่ได้นั้นเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กัเวลา สังเกตได้จากสัญญาณการสวิตช์  $u(t)$  ที่ติดอยู่ในรูปของเวลาปรากฏอยู่ในสมการ ซึ่งสัญญาณการสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 การนำสมการดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบตัวควบคุมหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะมีความซับซ้อน ไม่สามารถอาศัยทฤษฎีพื้นฐานทางระบบควบคุมได้ ดังนั้นวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะเข้ามากำจัดผลกระทบดังกล่าว

$$\begin{cases} \dot{i}_L = -\frac{1}{L} v_o + \frac{V_{in}}{L} u(t) \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_o \end{cases} \quad (3-6)$$

จากรูปที่ 3.2 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันที่ขึ้นกับเวลา ให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ได้ดังสมการการที่ (3-7) ดังนี้





รูปที่ 3.2 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้ง

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (3-7)$$

โดยที่  $d$  คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 1 หรือ 0 – 100 เปอร์เซ็นต์

ใช้สมการที่ (3-2) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของสัญญาณสวิตช์ของวงจรแปลงผันในสมการที่ (3-7) ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์สำหรับการประมาณค่าอันดับศูนย์ ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

$$\text{จาก } \langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt$$

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} 1 e^0 dt$$

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} [t]_{t=0}^{t=dT_s}$$

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \cdot dT_s$$

จะได้สัมประสิทธิ์การประมาณค่าอันดับศูนย์ของสัญญาณสวิตช์แสดงดังสมการที่ (3-8) ดังนี้

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (3-8)$$

เนื่องจาก  $V_{in}$  เป็นค่าคงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงดังนั้น

$$\langle V_{in} \rangle_0 = V_{in} \quad (3-9)$$

เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันแบบบักก์ในรูปที่ 3.1 พบว่ามีตัวแปรสถานะของวงจร 2 ตัวคือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $v_c$ ) ดังนั้นสามารถเขียนสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $i_L$  และ  $v_c$  โดยเลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ หรือไม่คิดผลของการสั้นไกวของสัญญาณ ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว สามารถกำหนดตัวแปรสถานะของแบบจำลองได้ดังสมการที่ (3-10) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle i_L \rangle_0 = i_L \\ \langle v_o \rangle_0 = v_o \end{cases} \quad (3-10)$$

ดังนั้น นำสมการที่ (3-3) - (3-5) มาประยุกต์กับสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (3-6) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์กรณีไม่มีตัวควบคุมในรูปที่ 3.1 ที่ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

จากสมการที่ (3-6) สามารถใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปพิสูจน์หาแบบจำลอง คือการใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $i_L$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองโดยที่เลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ ( $k = 0$ ) แสดงได้ดังนี้

$$\langle i_L \rangle_0 = -\frac{1}{L} \langle v_o \rangle_0 + \frac{\langle V_{in} \rangle_0 \langle u \rangle_0}{L} - j(0)\omega_s \langle i_L \rangle_0$$

จากสมการที่ (3-8) - (3-10) สามารถแทน  $\langle i_L \rangle_0 = i_L$ ,  $\langle V_{in} \rangle_0 = V_{in}$ , และ  $\langle u \rangle_0 = d$  จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาแสดงดังสมการที่ (3-11) ดังนี้

$$i_L = -\frac{1}{L} v_o + \frac{d}{L} V_{in} \quad (3-11)$$

จากสมการที่ (3-6) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $v_o$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (3-12) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle \dot{v}_o \rangle = \frac{1}{C} \langle i_L \rangle_0 - \frac{1}{RC} \langle v_o \rangle_0 - jk\omega_s \langle v_o \rangle_0 \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_o \end{cases} \quad (3-12)$$

จากสมการที่ (3-11) และ (3-12) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคกักรณีไม่มีตัวควบคุมที่ไม่ขึ้นกับเวลา สามารถเขียนสมการเป็นแบบจำลองปริภูมิสถานะแสดงดังสมการที่ (3-13) ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}u \end{aligned} \quad (3-13)$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปรสถานะ อินพุต และเอาต์พุตเป็นดังสมการ

$$\text{ตัวแปรสถานะ : } x = [i_L \quad v_o]^T$$

$$\text{อินพุต : } u = [V_{in}]$$

$$\text{เอาต์พุต : } y = [v_o]$$

- รายละเอียดของ  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  และ  $\mathbf{D}$  แสดงดังสมการที่ (3-14) ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} d \\ \frac{L}{0} \end{bmatrix}_{2 \times 1}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{2 \times 1} \quad (3-14)$$

#### ■ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

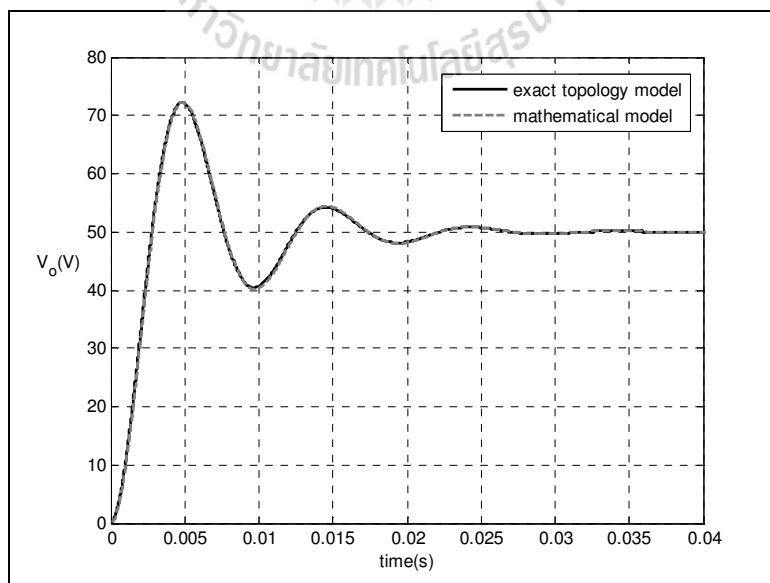
เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จำเป็นต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โปรแกรม MATLAB ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ในสมการที่ (3-13) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปแบบที่ (3.1) โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ดูได้จากภาคผนวก ก ในรูปที่ ก.1 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.1 เป็นเพียง

พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเท่านั้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบทดสอบนั้นจะแสดงการออกแบบไว้ที่บทที่ 6

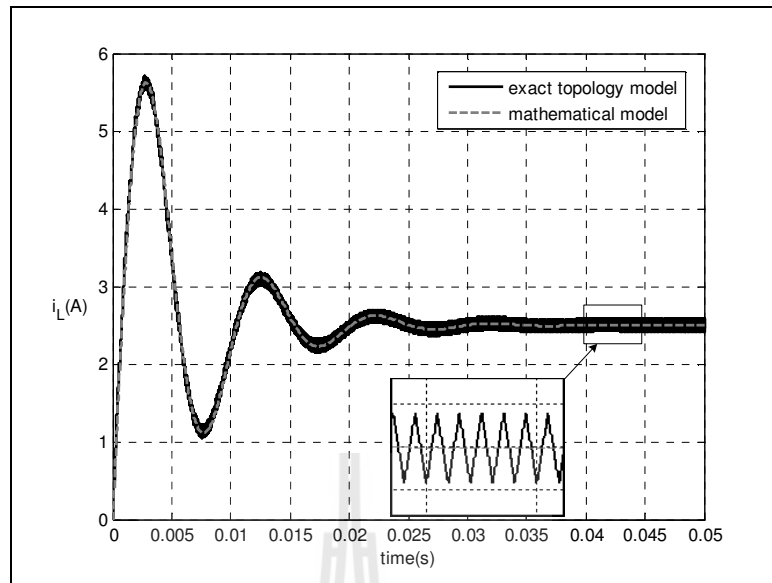
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_{in}$	100 V	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
$L (\Delta I \leq 0.12 \text{ A})$	15 mH	ความเหนี่ยวนำ
$C (\Delta V \leq 10 \text{ mV})$	150 $\mu\text{F}$	ความจุไฟฟ้า
$R$	20 $\Omega$	ความต้านทาน
$f_s$	10 kHz	ความถี่ของการสวิตช์

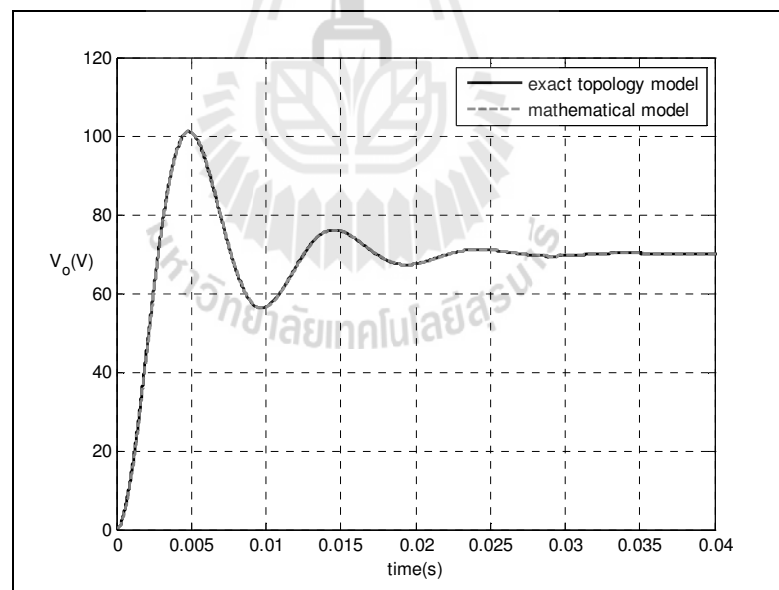
รูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.6 แสดงผลการตอบสนองของ  $v_o$  และ  $i_L$  สำหรับการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในสมการที่ (3-13) และรูปสัญญาณของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK โดยการตรวจสอบความถูกต้องจะใช้ค่าแรงดันอินพุตให้กับวงจรที่ 100 V ซึ่งในรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4 คือผลการตอบสนองของ  $v_o$  และ  $i_L$  ที่ค่า  $d = 50 \%$  ตามลำดับ และ รูปที่ 3.5 และ รูปที่ 3.6 สำหรับค่า  $d = 70 \%$



รูปที่ 3.3 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 %



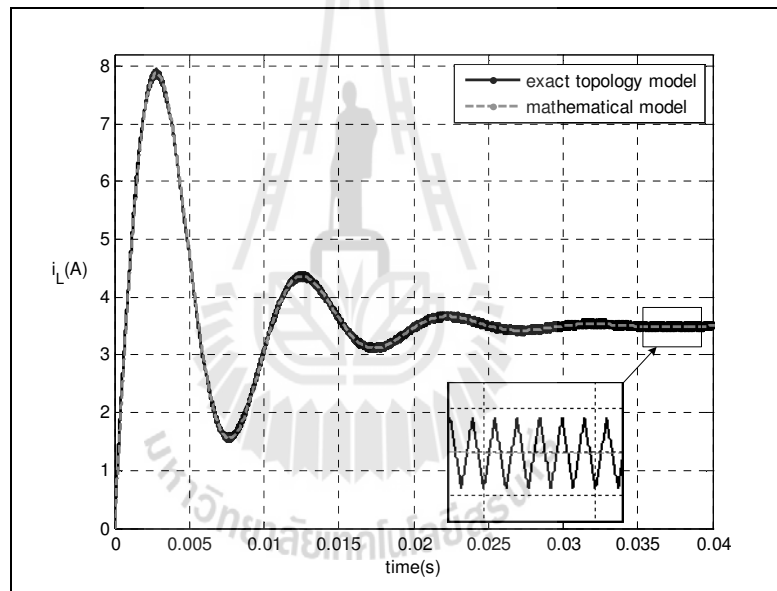
รูปที่ 3.4 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 %



รูปที่ 3.5 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 70 %

จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.6 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว แต่อย่างไรก็ตาม ผลการตอบสนองที่ได้จากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังจะปรากฏการกระเพื่อมของสัญญาณ เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ของระบบจริง แต่ผลการ

ตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่มีการกระเพื่อมของสัญญาณ เนื่องจากการพิสูจน์เพื่อให้ได้แบบจำลองนั้น ไม่ได้พิจารณาผลของการสวิตช์ ด้วยเหตุนี้ในบางครั้งเราจึงเรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองแบบค่าเฉลี่ย (averaging model) ถึงแม้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่ได้อธิบายถึงการกระเพื่อมของสัญญาณ แต่พลวัตที่สำคัญของระบบยังคงอยู่และเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ อีกทั้งยังสามารถลดเวลาในการจำลองสถานการณ์เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะกำจัดผลกระทบของสวิตช์ในระบบออกไป ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งมีไม่มีตัวควบคุม ถือเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีการควบคุมพีไอ ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในหัวข้อถัดไป

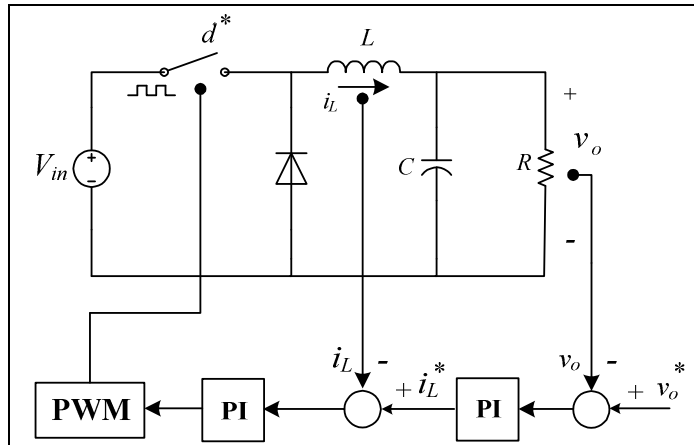


รูปที่ 3.6 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 70 %

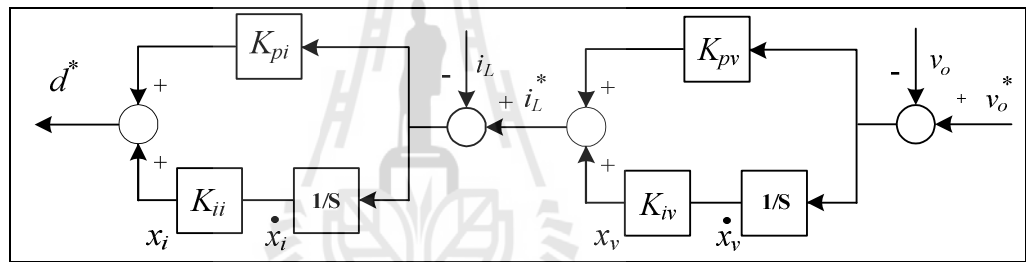
### 3.3.2 กรณีมีตัวควบคุมแบบพีไอ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

จากรูปที่ 3.7 เป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอ 2 รูป คือรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าหรือเรียกว่าการต่อกันแบบคาสเคดแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือ  $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$ , และ  $K_{ii}$  ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 วงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 3.8 โครงสร้างระบบการควบคุม

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระบบควบคุมในรูปที่ 3.8 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปของ  $d^*$  แสดงดังสมการที่ (3-15) และกำหนดให้  $x_v$  และ  $x_i$  เป็นตัวแปรสถานะของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (3-16) และ (3-17) ตามลำดับ

$$d^* = -K_{pi}i_L - K_{pv}K_{pi}v_o + K_{iv}K_{pi}x_v + K_{ii}x_i + K_{pv}K_{pi}v_o^* \tag{3-15}$$

$$\dot{x}_v = -v_o + v_o^* \tag{3-16}$$

$$\dot{x}_i = -i_L - K_{pv}v_o + K_{iv}x_v + K_{pv}v_o^* \tag{3-17}$$

ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมสามารถดำเนินการได้โดยการแทนค่า  $d$  ในสมการที่ (3-11) ด้วย  $d^*$  จากสมการที่ (3-15) จากนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 3.7 ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (3-18) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{-K_{pi}V_{in}i_L - (K_{pv}K_{pi}V_{in} + 1)v_o + K_{iv}K_{pi}V_{in}x_v + K_{ii}V_{in}x_i + K_{pv}K_{pi}V_{in}v_o^*}{L} \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C}i_L - \frac{v_o}{RC} \\ \dot{x}_v = -v_o + v_o^* \\ \dot{x}_i = -i_L - K_{pv}v_o + K_{iv}x_v + K_{pv}v_o^* \end{cases} \quad (3-18)$$

สมการที่ (3-18) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลองปริภูมิสถานะแสดงดังสมการที่ (3-19) ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}u \end{aligned} \quad (3-19)$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปรสถานะ อินพุต และเอาต์พุตเป็นดังสมการ

$$\text{ตัวแปรสถานะ : } x = [i_L \quad v_o \quad x_v \quad x_i]^T$$

$$\text{อินพุต : } u = [v_o^*]$$

$$\text{เอาต์พุต : } y = [v_o]$$

- รายละเอียดของ  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  และ  $\mathbf{D}$  แสดงดังสมการที่ (3-20) ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{pi}V_{in}}{L} & -\frac{K_{pv}K_{pi}V_{in} + 1}{L} & \frac{K_{iv}K_{pi}V_{in}}{L} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_{pv}K_{pi}V_{in}}{L} \\ L \\ 0 \\ 1 \\ K_{pv} \end{bmatrix}_{4 \times 1}$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]_{1 \times 4}$$

$$\mathbf{D} = [0]_{1 \times 1} \quad (3-20)$$



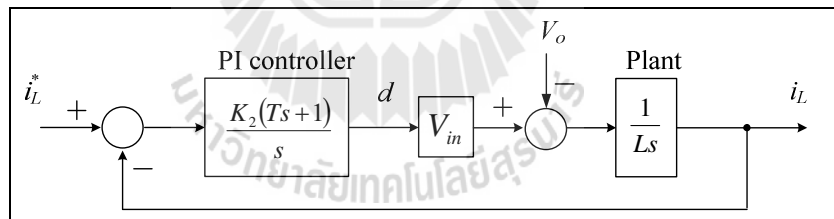
จากสมการที่ (3-19) พบแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมพีไอนั้น จะปรากฏพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ( $K_{pi}$ ,  $K_{ii}$ ,  $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ) อยู่ภายในแบบจำลอง ซึ่งเราสามารถประยุกต์วิธีทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ทำให้สมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันดียิ่งขึ้น ซึ่งการออกแบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

### 3.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ได้อาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมของระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ 2 คู่ต่อกันแบบคาสเคด (K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน การออกแบบตัวควบคุมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า และการออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะได้นำเสนอดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 การออกแบบตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า

ในส่วนของลูปของการควบคุมกระแสไฟฟ้าของระบบ สามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 3.9 ดังนี้



รูปที่ 3.9 ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.9  $K_2$  และ  $T$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า ในขณะที่  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ดังนั้นจากรูปที่ 3.9 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3-21) ดังนี้

$$\frac{I_L}{I_L^*} = \frac{K_2 V_{in} (Ts + 1)}{Ls^2 + K_2 T V_{in} s + K_2 V_{in}} \quad (3-21)$$

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมอัสระบบสมการอันดับ 2 ของระบบควบคุม แสดงดังสมการที่ (3-22)

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3-22)$$

ดังนั้น ตัวควบคุมลูกระแส สามารถออกแบบด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวหารของสมการที่ (3-21) และ (3-22) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (3-23) และ (3-24) ดังนี้

$$T = \frac{2\zeta_i}{N\omega_{nv}} \quad (3-23)$$

$$\omega_{ni} = N\omega_{nv} = \sqrt{\frac{K_2 V_{in}}{L}}, \quad N > 4 \quad (3-24)$$

โดยที่  $N$  คือค่าคงที่ สำหรับกำหนดแบนด์วิธของลูกระแสไฟฟ้า

จากสมการที่ (3-24) สามารถหาค่า  $K_2$  แสดงดังสมการที่ (3-25) ดังนี้

$$K_2 = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{in}} \quad (3-25)$$

จากรูปที่ 3.9 สามารถเขียนตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปตามสมการที่ (3-26) ดังนี้

$$K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} = \frac{K_2(Ts + 1)}{s} \quad (3-26)$$

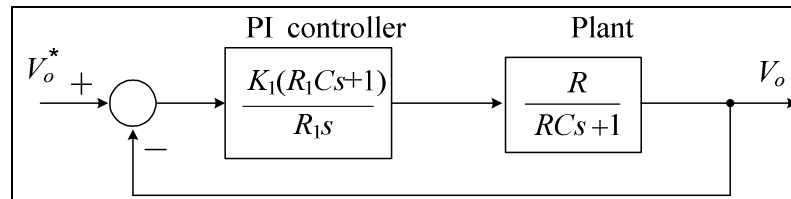
จากสมการที่ (3-23), (3-25) และ (3-26) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ  $K_{pi}$  และ  $K_{ii}$  สำหรับลูกระแสไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (3-27) และ (3-28) ดังนี้

$$K_{pi} = \frac{2N\zeta_i\omega_{nv}L}{V_{in}} \quad (3-27)$$

$$K_{ii} = \frac{N^2\omega_{nv}^2L}{V_{in}} \quad (3-28)$$

### 3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ในส่วนของลูปรการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบในรูปที่ 3.7 สามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 3.10 ดังนี้



รูปที่ 3.10 ลูปรการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.10  $K_1$  และ  $R_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่  $R$  และ  $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ตามลำดับ ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปรการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแสดงสมการที่ (3-29) ดังนี้

$$\frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{K_1 R_1 RCs + K_1 R}{R_1 RCs^2 + (R_1 + K_1 R_1 RC)s + K_1 R} \quad (3-29)$$

ตัวควบคุมลูปรการควบคุมแรงดันไฟฟ้า สามารถออกแบบด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวหารของสมการที่ (3-22) และ (3-29) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (3-30) และ (3-31) ดังนี้

$$\omega_{nv} = \sqrt{\frac{K_1}{R_1 C}} \quad (3-30)$$

$$2\zeta_v \omega_{nv} = \frac{1}{RC} + K_1 \quad (3-31)$$

จากสมการที่ (3-30) และ (3-31) สามารถหาค่า  $K_1$  และ  $R_1$  ดังสมการที่ (3-32) และสมการที่ (3-33) ดังนี้

$$K_1 = \frac{2\zeta_v \omega_{nv} RC - 1}{RC} \quad (3-32)$$

$$R_1 = \frac{K_1}{\omega_{nv}^2 C} \quad (3-33)$$

จากรูปที่ 3.10 สามารถเขียนตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปตามสมการที่ (3-34) ดังนี้

$$K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} = \frac{K_1(R_1Cs + 1)}{R_1s} \quad (3-34)$$

จากสมการที่ (3-32), (3-33) และ (3-34) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ  $K_{pv}$  และ  $K_{iv}$  สำหรับลูประแสไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (3-35) และ (3-36) ดังนี้

$$K_{pv} = K_1 C = \frac{2\zeta_v \omega_{nv} RC - 1}{R} \quad (3-35)$$

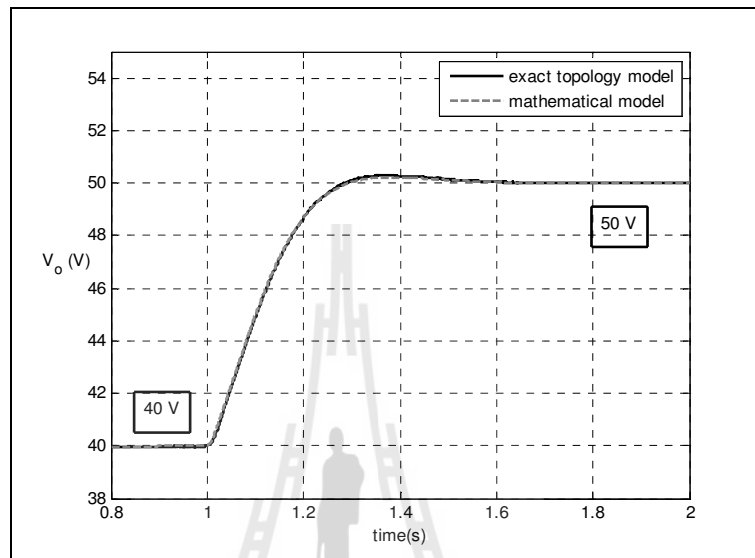
$$K_{iv} = \frac{K_1}{R_1} = C\omega_{nv}^2 \quad (3-36)$$

ตัวควบคุมแบบพีไอของลูประแสไฟฟ้าและลูประแรงดันไฟฟ้า ( $K_{pi}$ ,  $K_{ii}$ ,  $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ) สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3-27), (3-28), (3-35) และ (3-36) ตามลำดับ ซึ่งสมการของตัวควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบ คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูประแรงดันไฟฟ้า ( $\zeta_v$ ) และลูประแสไฟฟ้า ( $\zeta_i$ ), แบนด์วิธของลูประแรงดันไฟฟ้า ( $\omega_{nv}$ ) และแบนด์วิธของลูประแสไฟฟ้า ( $\omega_{ni}$ ) ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวิธีแบบดั้งเดิมในหัวข้อนี้ สามารถออกแบบได้โดยการเลือก  $\zeta_v = 0.8$ ,  $\zeta_i = 0.8$ ,  $\omega_{nv} = 250$  rad/s และ  $\omega_{ni} = 10 \times 250$  rad/s ดังนั้น พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมมีค่าดังนี้  $K_{pv} = 0.01$ ,  $K_{iv} = 9.375$ ,  $K_{pi} = 0.6$  และ  $K_{ii} = 937.5$

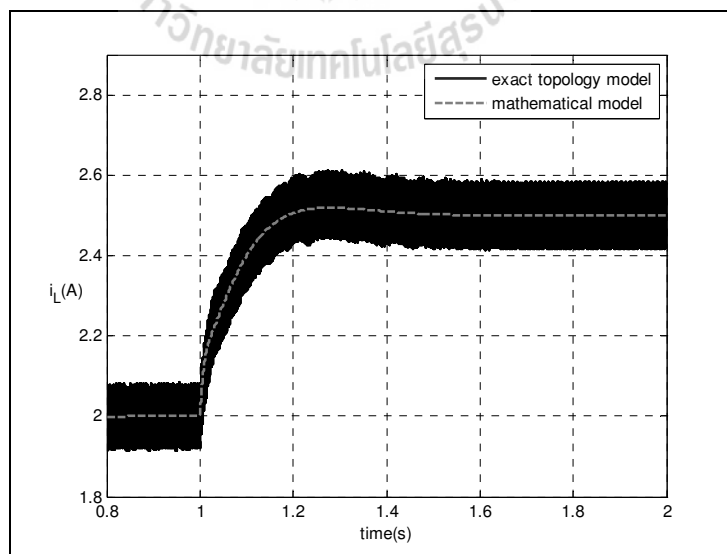
### 3.5 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ ดังสมการที่ (3-19) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ (3.7) โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB คูได้จากภาคผนวก ก ในรูป ก.2 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับรูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) และผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ( $i_L$ ) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน

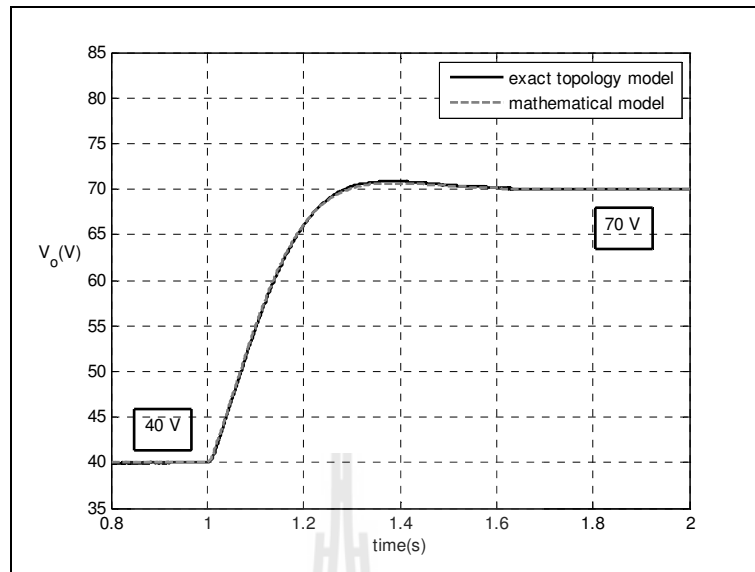
เอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 40 V ไปเป็น 50 V ที่เวลา 1 วินาที และ รูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 แสดงผลการตอบสนองเช่นเดียวกันกับรูปที่ 3.11 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 40 V ไปเป็น 70 V



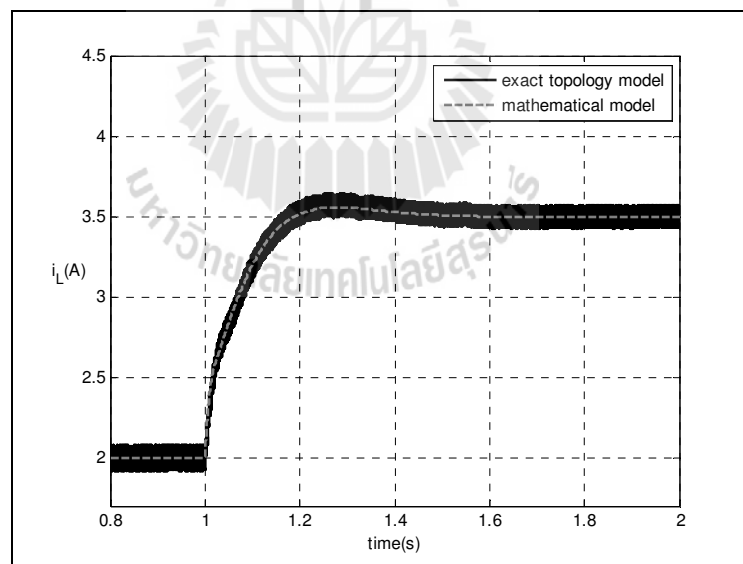
รูปที่ 3.11 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง ( $V_o^*$ ) จาก 40 V เป็น 50 V ที่เวลา 1 วินาที



รูปที่ 3.12 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง ( $V_o^*$ ) จาก 40 V เป็น 50 V ที่เวลา 1 วินาที



รูปที่ 3.13 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง ( $V_o$ ) จาก 40 V เป็น 70 V ที่เวลา 1 วินาที



รูปที่ 3.14 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง ( $V_o$ ) จาก 40 V เป็น 70 V ที่เวลา 1 วินาที

จากการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 3.11 ถึงรูปที่ 3.14 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว ซึ่งข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประการ

สำคัญนั่นก็คือ การใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่สั้น ซึ่งการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK นั้นจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ประมาณ ( $t_{fs}$ ) 560 วินาที ส่วนการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ประมาณ ( $t_{av}$ ) 40 วินาที เมื่อคำนวณการประหยัดเวลาดังสมการที่ (3-37)

$$\%t_{saving} = \frac{t_{fs} - t_{av}}{t_{fs}} \times 100\% \quad (3-37)$$

จากการคำนวณ เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองสถานการณ์จะทำให้ประหยัดเวลาในการจำลองสถานการณ์ได้ถึง 92.86% ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์เพียง 1 รอบของ 1 ชุดพารามิเตอร์เท่านั้น ซึ่งในบทที่ 5 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ แต่การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจะต้องมีการคำนวณแบบซ้ำ ๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำตารางการเปรียบเทียบ เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่ต้องคำนวณหลายรอบ ดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางเปรียบเทียบการประหยัดเวลาในการจำลองสถานการณ์

จำนวนรอบของการจำลองสถานการณ์ (รอบ)	การจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้าร่วมกับ SIMULINK (นาที)	การจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (นาที)	การประหยัดเวลา (%)
10	93.33	6.67	92.86
50	466.33	33.33	92.86
100	933.33	66.67	92.86

ผลจากตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความเหมาะสม สำหรับการนำไปใช้ร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากช่วยลดเวลาในการจำลองสถานการณ์ได้ถึง 92.86% ส่วนรายละเอียดของการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

### 3.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นำเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่ที่มีโหลดเป็นความต้านทานทั้ง กรณีที่ไม่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ โดยใช้วิธี

ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ในบทนี้ ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ซึ่งผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบดังกล่าวถือว่าเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัสก์ที่มีตัวควบคุมพีไอที่นำเสนอไว้ในบทนี้ ถือเป็นองค์ความรู้ในส่วนที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะเป็นเนื้อหาในส่วนของบทที่ 5 โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะได้รับการนำเสนอต่อไป





## บทที่ 4

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง

#### 4.1 บทนำ

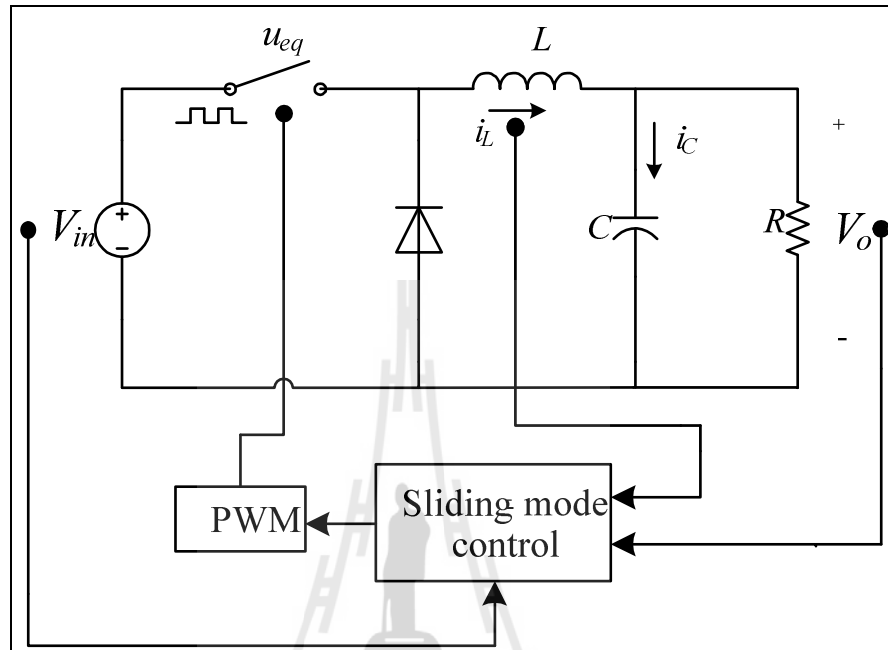
จากบทที่ 3 ที่ผ่านมาผู้วิจัยได้นำเสนอ การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหมดเป็นความต้านทานกรณีไม่มีตัวควบคุม และ การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหมดเป็นความต้านทานกรณีมีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งรายละเอียดของวิธีดังกล่าวได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 เช่นกัน ดังนั้นในบทนี้ จะนำเสนอการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง และการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งในส่วนของ การออกแบบตัวควบคุมของตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิงนั้น ยังไม่มีการออกแบบตัวควบคุมที่แน่นอน ต้องอาศัยการสุ่มค่าหรือการประมาณค่าบางค่าในการออกแบบ ด้วยเหตุผลนี้เองในบทที่ 5 ของรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะนำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ต่อไป

#### 4.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง เป็นที่นิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์และยังให้ผลการตอบสนองที่ดี (Ahmed, Mohammad 2004) วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง แสดงได้ดังรูปที่ 4.1

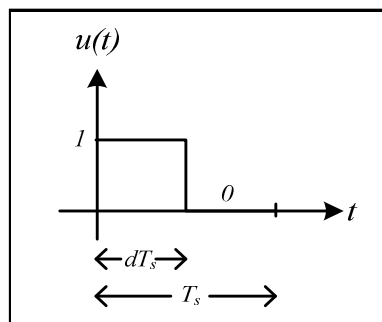
จากเนื้อหาของบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ในรูปที่ 4.1 กรณีที่ไม่มีตัวควบคุม สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ (4-1) จากสมการดังกล่าวพบว่าแบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา สังกัดได้จากสัญญาณการสวิตช์  $u(t)$  ที่ติดอยู่ในรูปของเวลาปรากฏอยู่ในสมการ ซึ่งสัญญาณการสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 การนำสมการดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบตัวควบคุมหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะมีความซับซ้อน ไม่สามารถอาศัยทฤษฎีพื้นฐานทางระบบควบคุมได้ ดังนั้นวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

จะเข้ามากำจัดผลกระทบดังกล่าว เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ระบบด้วยทฤษฎีพื้นฐานทางระบบควบคุม



รูปที่ 4.1 วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิ้ง

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{1}{L} & -1 \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (4-1)$$



รูปที่ 4.2 ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

สำหรับระบบที่ยังไม่มีตัวควบคุม สัญญาณการสวิตช์จะมีการทำงานดังรูปที่ 4.2 แต่สำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิ้งที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.1 นั้นสัญญาณการสวิตช์ที่

ได้หลังจากผ่านตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงนั้นจะเปลี่ยนเป็น  $u_{eq}$  ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตาม  $V_{ref}$  ที่กำหนด

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ได้จากการใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งวิธีดังกล่าวได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแสดงได้ดังสมการที่ (4-2) จะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา เนื่องจากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะนั้นจะเปลี่ยนสัญญาณการสวิตช์  $u(t)$  ที่เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาไปเป็นค่าคงที่  $d$  สังเกตได้จากสมการที่ (4.2)

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{dV_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

โดย  $i_L$  และ  $v_o$  เป็นตัวแปรสถานะของวงจร และ  $d$  คือ ค่าวัฏจักรของระบบ

ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ให้ได้ระดับตามแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ จำเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการสไลด์ (Sliding surface) ซึ่งในการกำหนดสมการพื้นผิวการสไลด์สำหรับการใช้ในการควบคุมนั้นสามารถกำหนดสมการพื้นผิวการสไลด์ได้หลายแบบ แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดสมการพื้นผิวการสไลด์สำหรับการใช้ในการควบคุมให้เป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและการสร้างชุดทดสอบจริง (Ahmed, Mohammad 2004) โดยสมการพื้นผิวการสไลด์เป็นดังสมการที่ (4-3)

$$S = J^T e = ae_1 + be_2 + me_3 = 0 \quad (4-3)$$

โดยที่  $J = [a \ b \ m]$  เป็นเวกเตอร์สำหรับกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ซึ่งพารามิเตอร์  $a$ ,  $b$  และ  $m$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม ในส่วนของการกำหนดพื้นผิวของการสไลด์จะใช้ค่าความผิดพลาดของกระแส  $e_1$  และค่าความผิดพลาดของแรงดัน  $e_2$  ซึ่งในการควบคุมนี้ระบบจะทำให้  $i_L = i_{ref}$  และ  $V_o = V_{ref}$  ตามลำดับ และค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดของกระแสกับค่าความผิดพลาดของแรงดัน  $e_3$  ซึ่งเป็นเทคนิคที่มาจากบทความของ (Tan., S.C., and Lai Y.M. 2008) ที่ช่วยปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัวให้เท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังสมการที่ (4-4)

$$\begin{cases} e_1 = i_{ref} - i_L \\ e_2 = V_{ref} - V_o \\ e_3 = \int [e_1 + e_2] dt \end{cases} \quad (4-4)$$

โดยที่  $i_{ref} = K[V_{ref} - V_o]$  ซึ่งค่า  $K$  จะเป็นค่าของอัตราขยายค่าผิดพลาดของแรงดัน (Tan., S.C., and Lai Y.M. 2008)

ในสภาวะคงตัวนั้น ระบบจะเคลื่อนที่บนระนาบของพื้นผิวการสไลด์ตามสมการที่ (4-3) โดยที่สมการอนุพันธ์ของ  $S$  แสดงได้ดังสมการที่ (4-5)

$$\dot{S} = J^T * \dot{e} \quad (4-5)$$

ซึ่งในอุดมคติเมื่อระบบเคลื่อนที่โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4-5) ระบบจะเคลื่อนที่บนระนาบพื้นผิวการสไลด์ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{cases} S = 0 \\ \dot{S} = 0 \end{cases}$$

โดยในสภาวะคงตัว  $S = 0$ ,  $\dot{S} = 0$  จึงทำให้  $V_o = V_{ref}$  ซึ่งหมายความว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะควบคุม ดังนั้นสามารถคำนวณหาสัญญาณการสวิตซ์  $u_{eq}$  ได้จากการนำสมการที่ (4-4) แทนในสมการที่ (4-3) ดังนี้

$$S = a(i_{ref} - i_L) + b(V_{ref} - V_o) + m \int (i_{ref} - i_L + V_{ref} - V_o) dt$$

ดังนั้น

$$\dot{S} = a i_{ref} - a i_L + b \dot{V}_{ref} - b \dot{V}_o + [(K+1)(V_{ref} - V_o) - i_L]$$

เมื่อระบบเข้าสู่การควบคุมหรือสภาวะคงตัว สามารถแทน  $\dot{S} = 0$  และจัดรูปสมการได้เป็น

$$0 = [-a \quad -b] * \begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} - \frac{aki_L}{C} + \frac{akv_o}{RC} + m[(K+1)[V_{ref} - V_o] - i_L] \quad (4-7)$$

จากนั้นแทน  $\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix}$  จากสมการที่ (4-2) ลงในสมการที่ (4-7) โดยตัวแปร  $d$  จะถูกเปลี่ยนเป็น  $u_{eq}$

$$0 = [-a \quad -b] \begin{bmatrix} -\frac{v_o}{L} + \frac{V_{in}}{L} u_{eq} \\ \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC} \end{bmatrix} - \frac{aki_L}{C} + \frac{akv_o}{RC} + m[(K+1)[V_{ref} - V_o] - i_L]$$

$$0 = \frac{axv_o}{L} - \frac{aV_{in}u_{eq}}{L} - \frac{bi_L}{C} + \frac{bv_o}{RC} - \frac{aki_L}{C} + \frac{akv_o}{RC} + m[(K+1)[V_{ref} - V_o] - i_L]$$

จากสมการด้านบน ทำการย้ายข้างหาค่าของ  $u_{eq}$  ซึ่งได้ดังนี้

$$u_{eq} = \frac{L}{aV_{in}} \left[ \frac{av_o}{L} - \frac{bi_L}{C} + \frac{bv_o}{RC} - \frac{aki_L}{C} + \frac{akv_o}{RC} + m[(K+1)[V_{ref} - V_o] - i_L] \right]$$

จากสมการ  $u_{eq}$  ทำการจัดรูปสมการได้เป็นสมการที่ (4-8)

$$u_{eq} = \frac{aRCv_o - bL(Ri_L - v_o) - aLK(Ri_L - v_o) + mRLC[(K+1)[V_{ref} - v_o] - i_1]}{aRCV_{in}} \quad (4-8)$$

สมการของ  $u_{eq}$  เป็นสมการสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีโครงสร้างของระบบควบคุมดังรูปที่ 4.3

เมื่อได้โครงสร้างสมการของระบบควบคุมดังสมการที่ (4-8) จากนั้นดำเนินการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิงปรากฏอยู่ในแบบจำลองได้ดังนี้

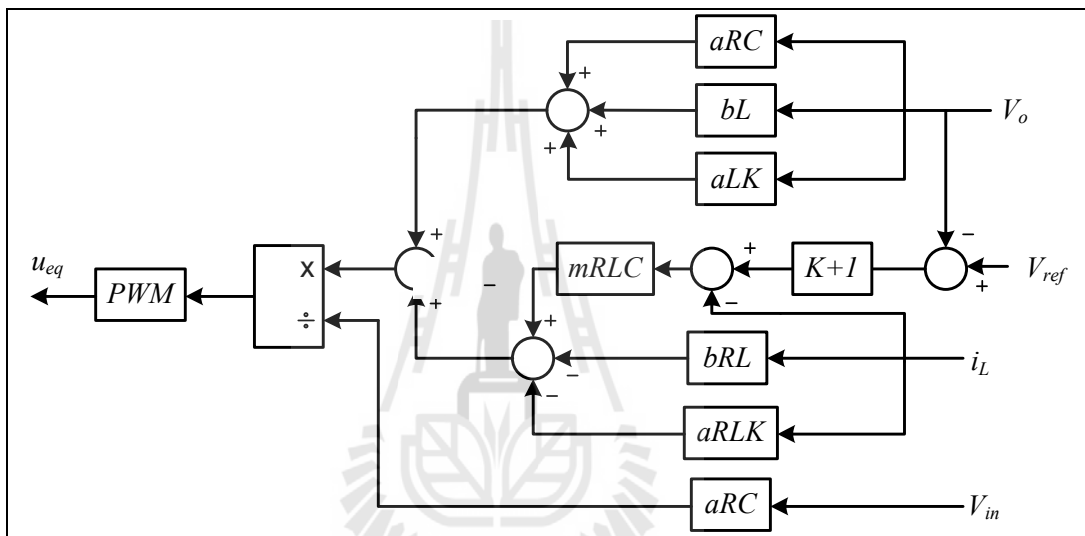
จากความสัมพันธ์

$$V_{in}u(t) = V_L + V_o$$

$$V_L = V_{in}u_{eq} - V_o$$

ดังนั้น

$$i_L = \frac{V_{in}u_{eq} - V_o}{L} \quad (4-9)$$



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของตัวควบคุม

แทนค่า  $u_{eq}$  จากสมการที่ (4-8) ลงในสมการที่ (4-9) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$i_L = \frac{V_{in} \left[ \frac{aRCv_o - bL(Ri_L - v_o) - aLK(Ri_L - v_o) + mRLC[(K+1)[V_{ref} - v_o] - i_L]}{aRCV_{in}} \right] - v_o}{L}$$

$$= \frac{V_{in}}{L} \left[ \frac{aRCv_o - bL(Ri_L - v_o) - aLK(Ri_L - v_o) + mRLC[(K+1)[V_{ref} - v_o] - i_L]}{aRCV_{in}} \right] - \frac{v_o}{L}$$

$$= -\left( \frac{b + ak + mC}{aC} \right) i_L + \left( \frac{b + ak - mRC(k+1)}{aRC} \right) v_o + \frac{m(k+1)V_{ref}}{a}$$

ดังนั้น จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 4.1 ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (4-10)

$$\begin{cases} \dot{i}_L = -\left(\frac{b+ak+mC}{aC}\right)i_L + \left(\frac{b+ak-mRC(k+1)}{aRC}\right)v_o + \frac{m(k+1)V_{ref}}{a} \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C}i_L - \frac{v_o}{RC} \end{cases} \quad (4-10)$$

สมการที่ (4-10) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลองปริภูมิสถานะแสดงดังสมการที่ (4-11)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}u \end{aligned} \quad (4-11)$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปรสถานะ อินพุต และเอาต์พุตเป็นดังสมการ

$$\text{ตัวแปรสถานะ : } x = [i_L \quad V_o]^T$$

$$\text{อินพุต: } u = [V_{ref}]$$

$$\text{เอาต์พุต: } y = [V_o]$$

- รายละเอียดของ  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  และ  $\mathbf{D}$  แสดงดังสมการที่ (4-12) ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -\left(\frac{b+aK+mC}{aC}\right) & \frac{b+aK-mRC(K+1)}{aRC} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \frac{m(K+1)}{a} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-12)$$

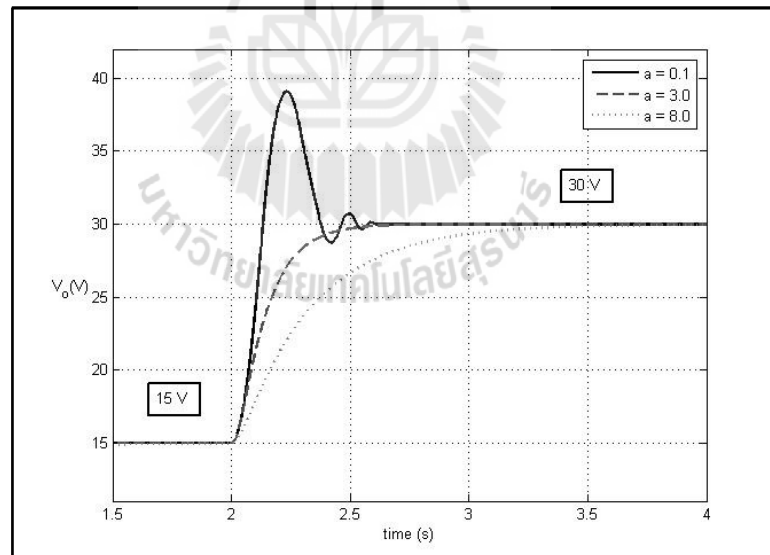
จากสมการที่ (4-11) พบแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ ดังนั้น จะปรากฏพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ( $a, b, m, K$ ) อยู่ในแบบจำลอง ซึ่งเราสามารถประยุกต์วิธีทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ซึ่งทำให้สมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันดียิ่งขึ้น ซึ่งการออกแบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

### 4.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงนั้น ในปัจจุบันยังไม่มี การออกแบบตัวควบคุมที่แน่นอน ซึ่งยังต้องอาศัยการสุ่มค่าบางค่าในการออกแบบและการทดสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ส่งผลต่อการตอบสนองแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโดยการทดสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่มีผลต่อการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะทำการทดสอบมีด้วยกัน 4 ตัวคือ  $a$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $K$  ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้

#### ■ การทดสอบพารามิเตอร์ $a$

จากการทดสอบพารามิเตอร์  $a$  ด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปของระบบในรูปที่ 4.1 (ภาคผนวก ก รูปที่ ก.3) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า  $a$  เป็น 0.1, 3.0 และ 8.0 โดยคงค่า  $b = 25$ ,  $m = 2600$  และ  $K = 2000$  ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 พบว่าพารามิเตอร์  $a$  นั้นมีผลต่อการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้างานี้



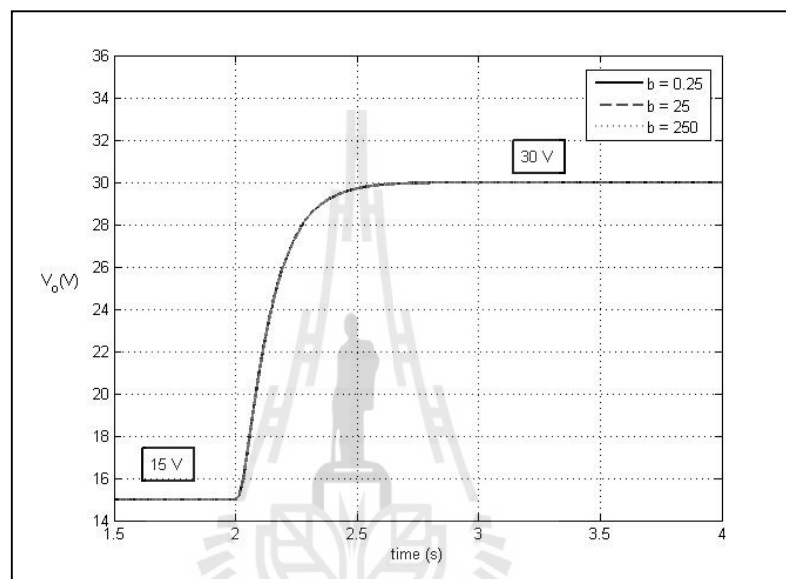
รูปที่ 4.4 ผลกระทบของพารามิเตอร์  $a$  ที่มีผลต่อระบบ

จากผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ สามารถสรุปได้ว่า พารามิเตอร์  $a$  มีผลต่อช่วงเวลาขึ้น (rise time ( $T_r$ )), ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time ( $T_s$ )) และการพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot ( $P.O.$ )) ถ้า  $a$  มีค่ามาก การตอบสนองของระบบมีแนวโน้มทำให้  $P.O.$  ลดลง ส่วน  $T_s$  และ  $T_r$  มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น



■ การทดสอบพารามิเตอร์  $b$

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า  $b$  เป็น 0.25, 25 และ 250 โดยคงค่า  $a = 3$ ,  $m = 2600$  และ  $K = 2000$  ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 พบว่าพารามิเตอร์  $b$  นั้นมีผลต่อการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ สามารถสรุปได้ว่า  $b$  มีผลต่อช่องเวลาขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



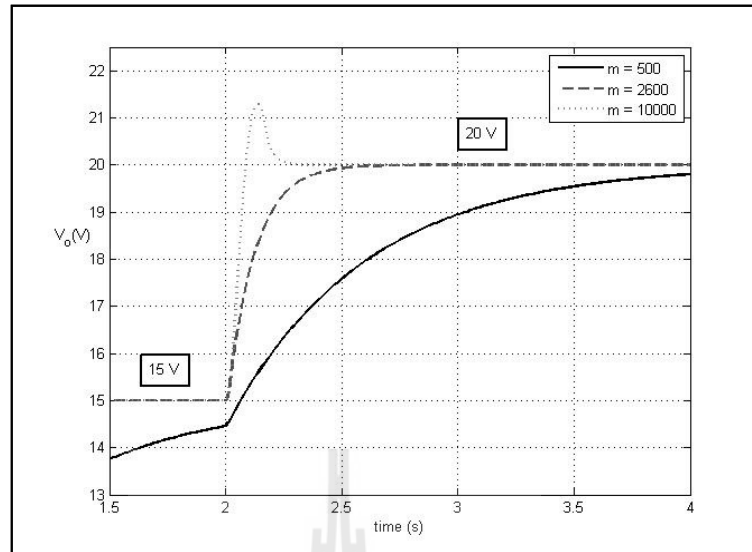
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของพารามิเตอร์  $b$  ที่มีผลต่อระบบ

จากผลการทดสอบพารามิเตอร์  $b$  พบว่าจะไม่ค่อยมีผลต่อการตอบสนองของระบบ ซึ่งอาจเป็นเพราะจากสมการที่ (4-12) พารามิเตอร์  $b$  นั้นไม่ได้คูณกับพารามิเตอร์อื่นเลย จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พารามิเตอร์  $b$  ไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อสัญญาณเอาต์พุตของระบบ

■ การทดสอบพารามิเตอร์  $m$

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า  $m$  เป็น 500, 2600 และ 10000 โดยคงค่า  $a = 3$ ,  $b = 25$  และ  $K = 2000$  ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 พบว่าพารามิเตอร์  $m$  นั้นมีผลต่อการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

จากผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ สามารถสรุปได้ว่าพารามิเตอร์  $m$  มีผลต่อช่องเวลาขึ้น, การพุ่งเกินชั่วคราว และค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัว (steady state error) ถ้า  $m$  มีค่ามาก การตอบสนองของระบบมีแนวโน้มทำให้  $P.O.$  เพิ่มขึ้น ส่วน  $T_r$  และ  $T_s$  มีแนวโน้มที่ลดลง นอกจากนี้ ถ้า  $m$  มีค่าน้อยจะปรากฏค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัวด้วยเช่นกัน

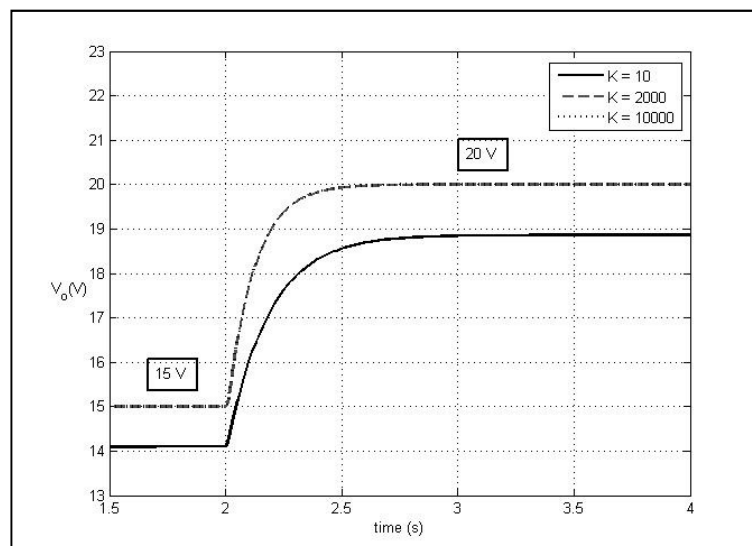


รูปที่ 4.6 ผลกระทบของพารามิเตอร์  $m$  ที่มีผลต่อระบบ

▪ การทดสอบพารามิเตอร์  $K$

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า  $K$  เป็น 10, 2000 และ 10000 โดยคงค่า  $a = 3$ ,  $b = 25$  และ  $m = 2600$  ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 พบว่าพารามิเตอร์  $K$  นั้นมีผลต่อการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

จากผลการจำลองสถานการณ์ การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ สามารถสรุปได้ว่า  $K$  มีผลต่อช่วงเวลาขึ้น และค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัว ถ้า  $K$  มีค่าน้อย การตอบสนองของระบบมีแนวโน้มทำให้ระบบไม่สามารถเข้าสู่สภาวะของการควบคุมได้



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของพารามิเตอร์  $K$  ที่มีผลต่อระบบ

จากการทดสอบผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ทำให้ผู้วิจัยสามารถกำหนดค่าของตัวควบคุมเบื้องต้นแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักคี่ที่มีตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ โหมคสไลด์คิง

พารามิเตอร์	ขนาด
$a$	3
$b$	25
$m$	2600
$K$	2000

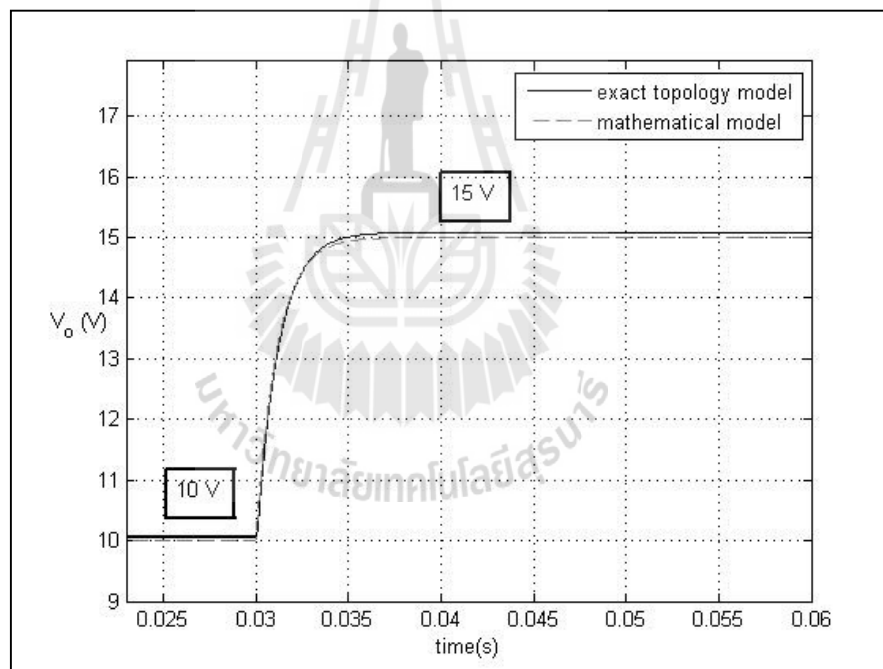
จากการทดสอบ ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงที่มีผลต่อผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตนั้น เพื่อที่จะนำไปสู่การกำหนดค่าของตัวควบคุมที่ใช้สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักคี่ ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของการออกแบบที่ยังต้องอาศัยการสุ่มค่าของตัวผู้ออกแบบเอง ด้วยเหตุผลดังกล่าว ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง เพื่อแก้ไขปัญหาในการออกแบบที่ต้องอาศัยการสุ่มค่า และยังช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

#### 4.4 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

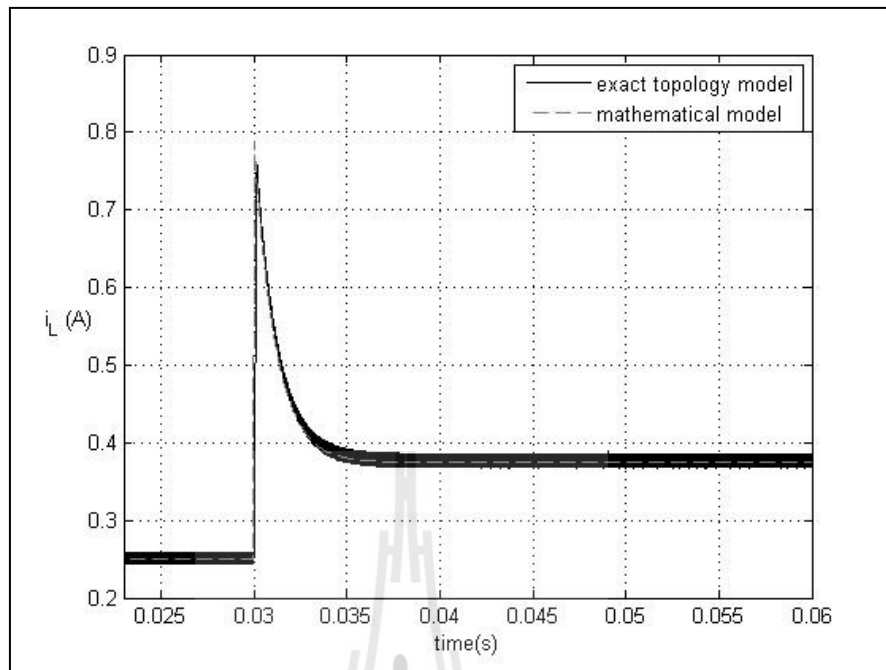
เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักคี่ที่มีตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ดังสมการที่ (4-10) ในหัวข้อที่ 4.2 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB คูได้จากภาคผนวก ก ในรูป ก.3 สำหรับรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงค่า  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 15 V ส่วนรูปที่ 4.10 และ 4.11 มีการเปลี่ยนแปลงค่า  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 20 V ที่เวลา 0.03 วินาที เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในการเปลี่ยนแปลงในสถานะชั่วคราวและในสถานะคงตัว

จากผลการจำลองสถานการณ์ ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยน  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 15 V ที่เวลา 0.03 s (รูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9) ของวงจรแปลงผันแบบบักคี่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว แต่การจำลองสถานการณ์ด้วย

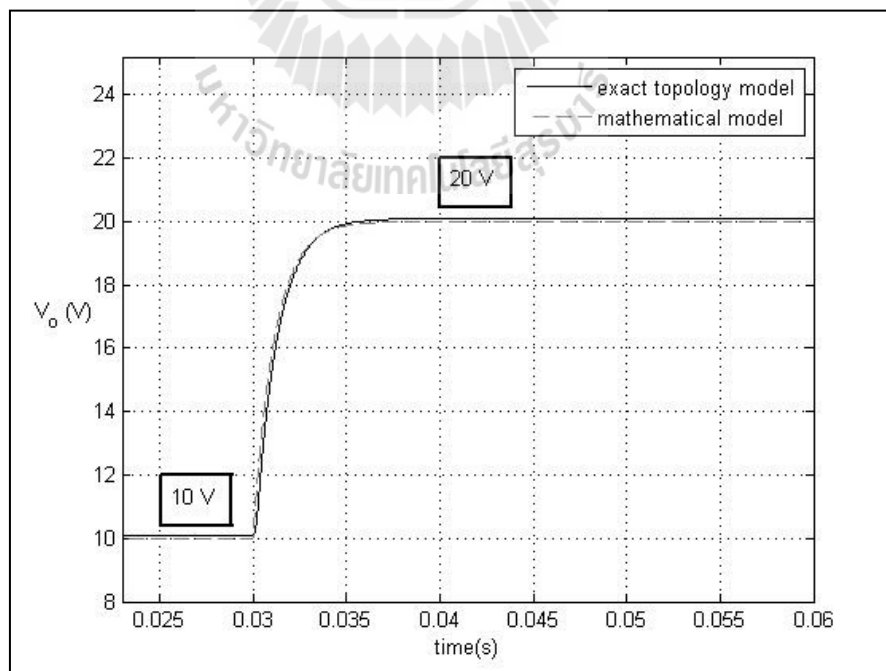
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังนั้น จะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ 735 วินาที ส่วนการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้เวลาเพียง 35 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วการจำลองสถานการณ์ผ่านแบบจำลองจะใช้เวลาน้อยกว่าถึง 95.24% และเมื่อเปลี่ยน  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 15 V ที่เวลา 0.03 วินาที (รูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ยังสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้ถูกต้องและสามารถลดเวลาในการจำลองสถานการณ์ได้ถึง 96.51% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบสไลด์คิงมีความถูกต้อง และยังเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้การออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่รวดเร็ว และการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะเข้ามาช่วยลดข้อจำกัดของการสุ่มค่าในขั้นตอนของการออกแบบ และยังช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย



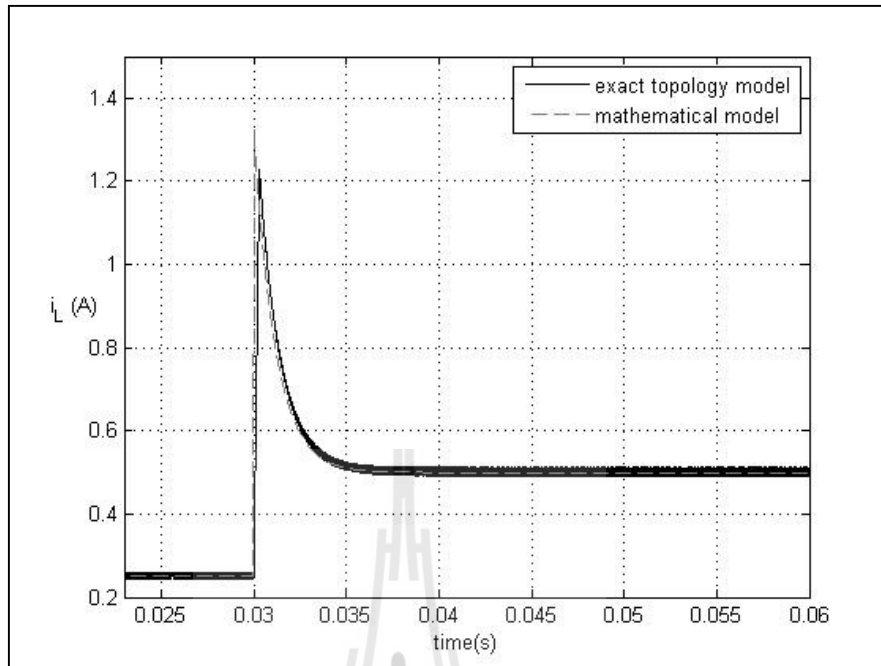
รูปที่ 4.8 การจำลองผลของแรงดันเอาต์พุตที่มีการควบคุม  
โดยเปลี่ยนแปลงค่า  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 15 V



รูปที่ 4.9 การจำลองผลของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีการควบคุม โดยเปลี่ยนแปลงค่า  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 15 V



รูปที่ 4.10 การจำลองผลของแรงดันเอาต์พุตที่มีการควบคุม โดยเปลี่ยนแปลงค่า  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 20 V

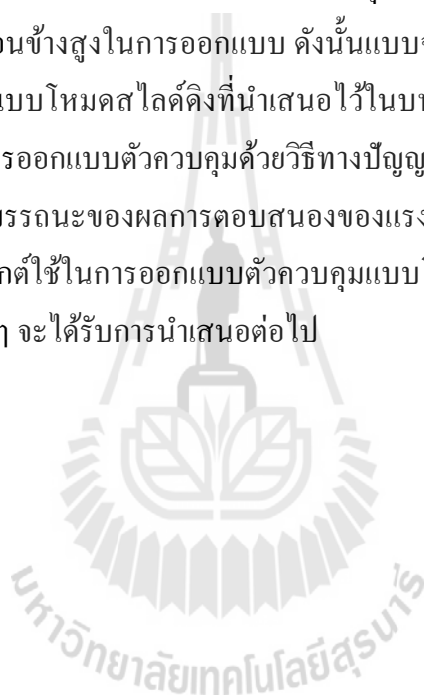


รูปที่ 4.11 การจำลองผลของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีการควบคุม โดย  
โดยเปลี่ยนแปลงค่า  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 20 V

จากผลการจำลองสถานการณ์ ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยน  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 15 V ที่เวลา 0.03 s (รูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9) ของวงจรแปลงผันแบบบ็ลคซ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว แต่การจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังนั้น จะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ 735 วินาที ส่วนการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้เวลาเพียง 35 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วการจำลองสถานการณ์ผ่านแบบจำลองจะใช้น้อยกว่าถึง 95.24% และเมื่อเปลี่ยน  $V_{ref}$  จาก 10 V เป็น 15 V ที่เวลา 0.03 วินาที (รูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ยังสามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้ถูกต้องและสามารถลดเวลาในการจำลองสถานการณ์ได้ถึง 96.51% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบ็ลคซ์ที่มีตัวควบคุมแบบสไลด์คิงมีความถูกต้อง และยังเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้การออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่รวดเร็ว และการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะเข้ามาช่วยลดข้อจำกัดของการสุ่มค่าในขั้นตอนของการออกแบบ และยังช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

#### 4.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 ได้นำเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิง โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้กำลังทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ซึ่งผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบดังกล่าวถือว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องและแม่นยำ ส่วนการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิงนั้นยังต้องอาศัยการสุ่มค่าจากตัวผู้ออกแบบเอง ซึ่งต้องใช้ความชำนาญและประสบการณ์ค่อนข้างสูงในการออกแบบ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิงที่นำเสนอไว้ในบทนี้ ถือเป็นองค์ความรู้ในส่วนที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมและยังช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าอีกด้วย เนื้อหาการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิง จะได้รับการอธิบายในบทที่ 5 โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะได้รับการนำเสนอต่อไป



## บทที่ 5

### การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

#### 5.1 บทนำ

จากบทที่ผ่านมาได้นำเสนอ การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมทั้งตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์จึงรวมถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ในส่วนของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์จึงนั้นยังไม่มีการออกแบบตัวควบคุมที่แน่นอนซึ่งยังต้องอาศัยการสุ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมบางตัวในการออกแบบ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วย สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้งตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์จึง ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต อีกทั้งยังเหมาะสมในการนำไปใช้ออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์จึงที่ยังต้องอาศัยการสุ่มค่าพารามิเตอร์ โดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ปรากฏตัวควบคุมในแบบจำลองมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทำให้การจำลองสถานการณ์ของระบบเป็นไปอย่างรวดเร็ว เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยใช้วิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว และวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค อัลกอริทึมดังกล่าวจะถูกใช้สำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์จึง การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ทั้ง 2 วิธีดังกล่าวจะถูกเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งผลการเปรียบเทียบได้นำเสนอในส่วนท้ายพร้อมการอภิปรายผล

#### 5.2 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

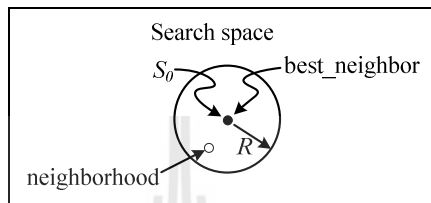
การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามู (Tabu Search : TS) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น อัลกอริทึมนี้ได้พัฒนาขึ้นโดย กองพัน อารีรักษ์ และสรารุณี สุจิตจร ในปี พ.ศ. 2545 โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตามูธรรมชาติคือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius) ซึ่งกลไกการเดินย้อนรอยนั้นจะใช้แก้ปัญหาสำหรับการติดอยู่ในคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) สำหรับกลไกการปรับรัศมีการค้นหาจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการ



ค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูซึ่งปรับตัวพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

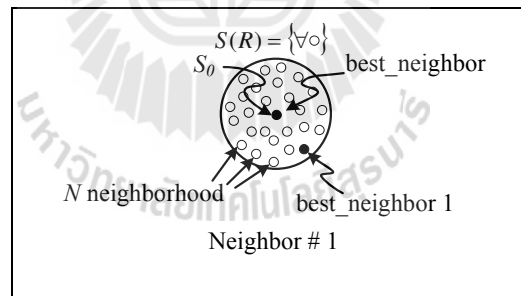
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น  $S_0$  ภายในพื้นที่การค้นหา และให้  $S_0$  เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 สุ่มค่า  $S_0$  ในพื้นที่การค้นหา

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน  $N$  คำตอบ รอบ ๆ  $S_0$  ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา  $R$  และกำหนดให้เซต  $S(R)$  เป็นเซตของคำตอบ  $N$  คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ  $S_0$

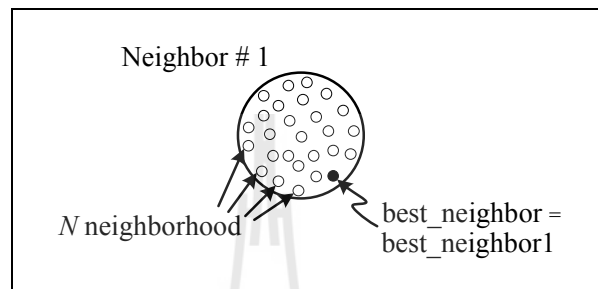
ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน  $S(R)$  โดยกำหนดให้  $S_1$  เป็นคำตอบที่ดีที่สุดภายใน  $S(R)$

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า  $S_1 < S_0$  ดังนั้นกำหนดให้  $S_0 = S_1$  และเก็บค่า  $S_0$  ในรายการตามู ดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4

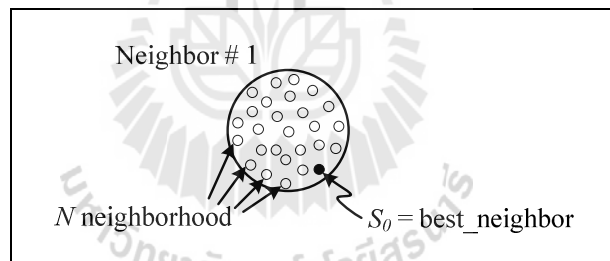
ขั้นตอนที่ 6 ถ้า  $count \geq count_{max}$  จะหยุดกระบวนการการค้นหา โดยที่ค่า  $S_0$  คือ คำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือก

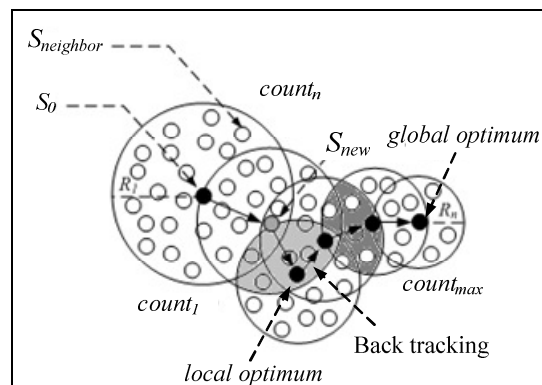
คำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแหวนเฉพาะถิ่นดังรูปที่ 5.5 และจะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-1) จะทำการลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งทำให้คำตอบจากการค้นหามีความละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 5.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่



รูปที่ 5.4 กำหนดค่า  $S_0$  ใหม่



รูปที่ 5.5 กลไกการเดินย้อนรอยและการปรับลดค่ารัศมี

$$radius_{new}(R_n) = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (5-1)$$

โดยที่  $DF$  คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (Decreasing Factor)

### 5.3 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

ในปี ค.ศ. 1995 James Kennedy และ Russell Eberhart ได้นำเสนอการค้นหาที่เหมาะสมแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการค้นหาเชิงประชากรโดยมีอนุภาคย่อย ๆ (individual particle) จำนวน  $NP$  อนุภาครวมกลุ่มกันเคลื่อนที่ไปในปริภูมิเกิน (hyperspace) เพื่อค้นหาคำตอบที่ต้องการ โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคจะแปรเปลี่ยนไปตามข้อมูลการค้นหาที่ผ่านมาของอนุภาคนั้น ๆ และข้อมูลการค้นหาจากอนุภาคที่เจอคำตอบที่ดีที่สุดภายในกลุ่ม สำหรับขั้นตอนและวิธีการค้นหาที่เหมาะสมแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค อธิบายได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดให้ iteration เป็นจำนวนรอบของการค้นหาและ  $iteration_{max}$  เป็นจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มค่าเวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector:  $\bar{P}$ ) และเวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector :  $\bar{V}$ ) ของแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากร โดยเวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคจะมีมิติเท่ากับจำนวนของตัวแปรที่ต้องการค้นหาคำตอบในแต่ละปัญหา เช่นในกรณีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอซึ่งมีจำนวนตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวดังนั้น เวกเตอร์ตำแหน่งและเวกเตอร์ความเร็วของแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากรจะมีมิติเท่ากับ 4 ดังสมการที่ (5-2) และ (5-3) ดังนี้

$$\bar{P}_i = \begin{bmatrix} K_{pv,i} \\ K_{iv,i} \\ K_{pi,i} \\ K_{ii,i} \end{bmatrix}; i = 1, 2, 3, \dots, NP \quad (5-2)$$

$$\bar{V}_i = \begin{bmatrix} v_{1,i} \\ v_{2,i} \\ v_{3,i} \\ v_{4,i} \end{bmatrix}; i = 1, 2, 3, \dots, NP \quad (5-3)$$

โดยที่  $\vec{P}_i$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคตัวที่ 1 ถึง  $NP$

$\vec{V}_i$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคตัวที่ 1 ถึง  $NP$

ขั้นที่ 3 ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาคด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งการประเมินจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใด มีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาค หรือค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง ( $gbest$ ) ให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นดังสมการที่ (5-4) และ (5-5)

$$gbest = F(\vec{P}_i) \quad (5-4)$$

$$\vec{P}_{gbest} = \vec{P}_i \quad (5-5)$$

กรณีที่ 2 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใด มีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคตัวเดียวกัน ( $pbest$ ) ที่เคยค้นพบมาก่อน ให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นไว้ดังสมการที่ (5-6) และ (5-7)

$$pbest = F(\vec{P}_i) \quad (5-6)$$

$$\vec{P}_{pbest,i} = \vec{P}_i \quad (5-7)$$

ขั้นที่ 4 ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาคด้วยสมการที่ (5-8) จากสมการดังกล่าว เทอมที่สองและสามเรียกว่า องค์ประกอบเชิงปริชาณ (cognitive component) และองค์ประกอบทางสังคม (social component) ตามลำดับ

$$\vec{V}_i(new) = \vec{V}_i(old) + \underbrace{\rho_p (\vec{P}_{pbest,i} - \vec{P}_i(old))}_{cognitive\ component} + \underbrace{\rho_g (\vec{P}_{gbest} - \vec{P}_i(old))}_{social\ component} \quad (5-8)$$

โดยที่  $\rho_p$  คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบเชิงปริชาณ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $r_p C_p$ ;  $r_p \in U(0,1)$

$\rho_g$  คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบทางสังคม ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $r_g C_g$ ;  $r_g \in U(0,1)$

$C_p$  คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบเชิงปริชาณ

$C_g$  คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบทางสังคม

องค์ประกอบเชิงปริมาตรที่ปรากฏในสมการที่ (5-8) ใช้แทนประสบการณ์ค้นหาคำตอบของแต่ละอนุภาค ในขณะที่องค์ประกอบเชิงสังคมจะแทนประสบการณ์ค้นหาของกลุ่มอนุภาค ซึ่งถ้าไม่พิจารณาใช้ องค์ประกอบเชิงสังคมในการปรับค่าเวกเตอร์ความเร็ว อัลกอริทึมการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคจะถูกเรียกว่าเป็นแบบเฉพาะที่ (local best) สำหรับพารามิเตอร์  $\rho_p$  ถูกใช้สำหรับการจำกัดขนาดเส้นทางเดินของอนุภาคออกจากตำแหน่งที่ค่าความเหมาะสมที่สุด ( $\vec{P}_{gbest}$ ) โดยถ้า  $\rho_p$  มีค่ามาก จะทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการกวัดแกว่ง ในขณะที่ ถ้า  $\rho_p$  มีค่าน้อยจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่อย่าง เรียบ สำหรับพารามิเตอร์  $\rho_g$  ถูกใช้สำหรับการจำกัดเส้นทางเดินของกลุ่มอนุภาค โดยถ้า  $\rho_g$  มีค่ามาก จะทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการกวัดแกว่ง และถ้า  $\rho_g$  มีค่าน้อย จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่อย่าง เรียบ เช่นกัน

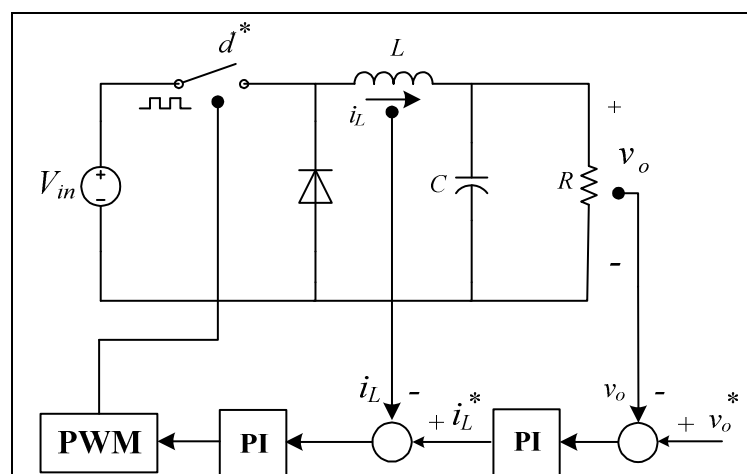
ขั้นที่ 5 ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับรอบการค้นหาต่อไป (next round) ด้วยสมการที่ (5-9)

$$\vec{P}_i(new) = \vec{P}_i(old) + \vec{V}_i(new) \quad (5-9)$$

ขั้นที่ 6 ถ้า  $iteration < iteration_{max}$  ให้กลับไปเริ่มที่ขั้นที่ 3 ใหม่ และทำการค้นหาจนกระทั่ง ได้ค่าเหมาะสมที่ต้องการ แต่ถ้า  $iteration > iteration_{max}$  ให้หยุดทำการค้นหา โดยคำตอบที่ดีที่สุดแบบ  $gbest$  จะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา

#### 5.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับระบบดังรูปที่ 5.6 ดังนี้



รูปที่ 5.6 วงจรแปลงผันแบบบักคี่ที่มีตัวควบคุมพีไอ

โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้น จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่ได้อีกกล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งการนำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเข้ามาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นมีเหตุผลที่สำคัญ 2 ประการคือ

1) การใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้น เป็นการคำนวณเข้าไปเข้ามาเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด ยิ่งหากนำไปใช้ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB จะส่งผลทำให้ใช้เวลานานในการคำนวณแต่ละรอบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองนั้นจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่รวดเร็ว ดังนั้นจึงเหมาะสมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

2) ในระหว่างกระบวนการ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งหากใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและ SIMULINK จะไม่สามารถทำได้

จากบทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัวควบคุมแบบพีไอสามารถเขียนสรุปได้ดังสมการที่ (5-10)

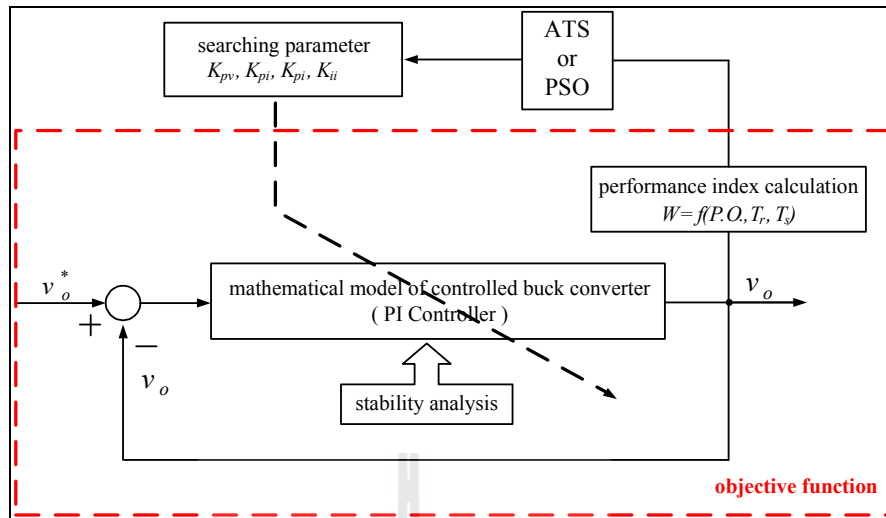
$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ y &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (5-10)$$

โดยเมตริกซ์  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  และ  $\mathbf{D}$  แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{pi}V_{in}}{L} & -\frac{K_{pv}K_{pi}V_{in} + 1}{L} & \frac{K_{iv}K_{pi}V_{in}}{L} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 4} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_{pv}K_{pi}V_{in}}{L} \\ L \\ 0 \\ 1 \\ K_{pv} \end{bmatrix}_{4 \times 1}$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 1 \ 0 \ 0]_{1 \times 4}$$

$$\mathbf{D} = [0]_{1 \times 1}$$



รูปที่ 5.7 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ  
ด้วยวิธีการทางปัญญาระดับสูง

จากรูปที่ 5.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอโดยใช้วิธี  
ปัญญาระดับสูง การออกแบบจะค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ( $K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}$ ) จาก  
ขอบเขตที่กำหนด ซึ่งในการค้นหาพารามิเตอร์ในแต่ละรอบนั้น ระบบจะตรวจสอบค่า  $W$  ซึ่งอธิบายได้  
ดังสมการที่ (5-11) รวมถึงการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบในระหว่างการค้นหา และจะทำการค้นหา  
จนกว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ ( $K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}$ ) ที่ทำให้ผลการตอบสนองดี  
ที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ค่า  $W$  มีค่าน้อยที่สุด

$$W(T_{Rp.u.}, T_{Sp.u.}, P.O._{p.u.}) = \sigma T_R + \alpha T_S + \gamma P.O. \quad (5-11)$$

และ  $\sigma, \alpha, \gamma$  มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-12)

$$\sigma + \alpha + \gamma = 1 \quad (5-12)$$

โดยที่  $P.O.$  คือ การพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot)

$T_R$  คือ ช่วงเวลาขึ้น (rise time)

$T_S$  คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time)

$\sigma, \alpha,$  และ  $\gamma$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของ  $T_R, T_S$  และ  $P.O.$  ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้  
กำหนดให้เป็น 0.33, 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ

สำหรับขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ได้กำหนดจากค่าแบนด์วิธการทำงานของอุปกรณ์แรงดันไฟฟ้าและการทำงานของอุปกรณ์กระแสดังนี้  $\omega_{nv} = 150 \text{ Hz} - 700 \text{ Hz}$  และ  $\omega_{ni} = 2 \text{ kHz} - 20 \text{ kHz}$  ตามลำดับ จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมตามขอบเขตที่กำหนดจะได้ขอบเขตล่างและขอบเขตบนของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ( $K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}$ ) ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

[ $\omega_{nv} = 150 \text{ Hz} - 700 \text{ Hz}$  และ  $\omega_{ni} = 2 \text{ kHz} - 20 \text{ kHz}$ ]

พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	ขอบเขต	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
$K_{pv}$	0.0027	0.1347
$K_{iv}$	3.3750	73.5
$K_{pi}$	1.6	16
$K_{ii}$	2000	200000

#### 5.4.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว(ATS)

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ในหัวข้อย่อหน้านี้ ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัสคัทที่มีโหลดเป็นความต้านทานที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ ดังรูปที่ 5.6 และก่อนการนำวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวไปใช้ในการออกแบบ จำเป็นต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาตามูเชิงปรับตัวสำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่า คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธีการค้นหาตามูเชิงปรับตัวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาตามูเชิงปรับตัว ของพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวนั้นได้นำเสนอไว้ที่ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1 – ตารางที่ ข.4

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวทั้งหมดที่ได้ นำเสนอในภาคผนวก ข ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวดังนี้

เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ

เลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ

เลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5

เลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาที่เหมาะสมแล้วนั้น ก็จะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการตามูเชิงปรับตัว



สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 ดังนี้ (สำหรับ โปรแกรมการออกแบบสามารถดูได้จากภาคผนวก ก)

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS

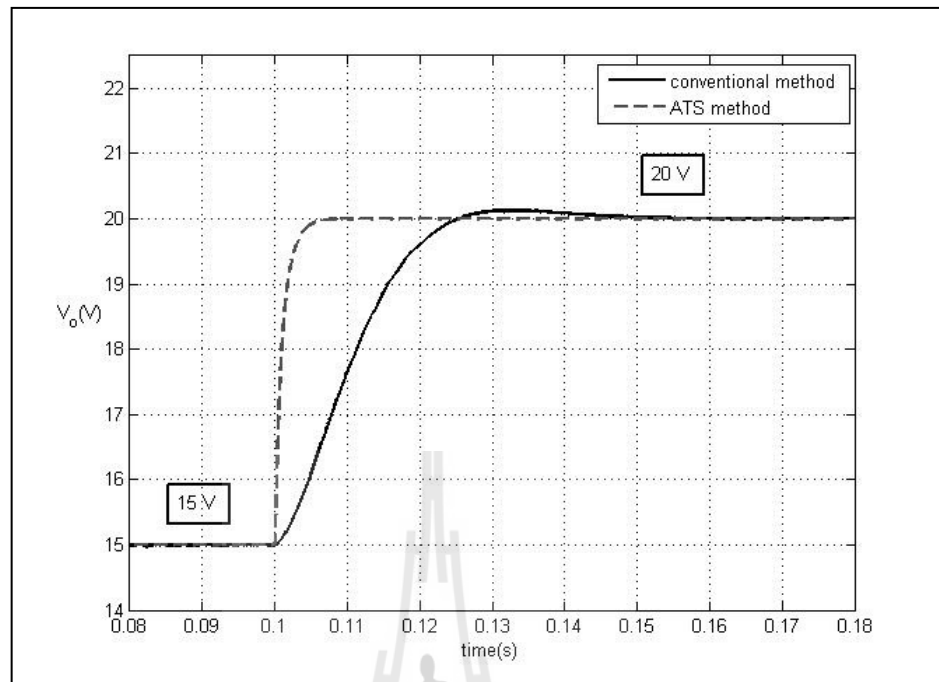
พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	วิธีการออกแบบ	
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี ATS
$K_{pv}$	0.0027	0.1346
$K_{iv}$	3.3750	28.5658
$K_{pi}$	1.2	3.7243
$K_{ii}$	2250	5450.7
$W$	0.6821	0.0030

#### ■ ผลการจำลองสถานการณ์

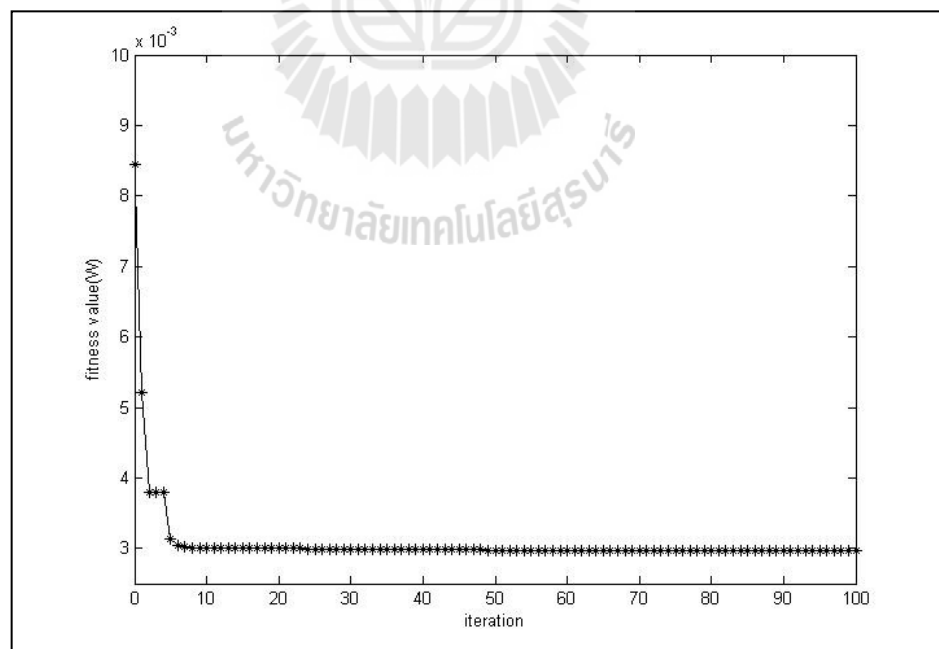
การจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและการออกแบบด้วยวิธี ATS โดยใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 5.2 ในการจำลองสถานการณ์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลาเท่ากับ 0.1 วินาที เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.8

จากผลการจำลองสถานการณ์ รูปที่ 5.8 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยเริ่มจากการให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 15 V จากนั้น ที่เวลาของระบบเท่ากับ 0.1 วินาที จะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันของการควบคุมไปที่ระดับแรงดัน 20 V จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ได้อย่างถูกต้อง แต่จะสังเกตเห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี ATS นั้นให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าทั้ง ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และการพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

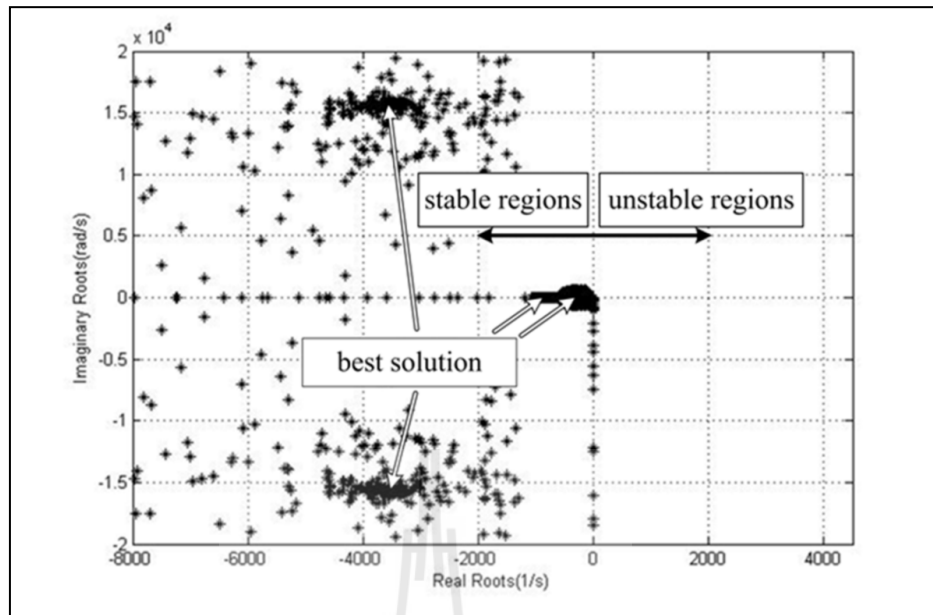
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่ผ่านการทดสอบมาออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ จะได้ผลของการลู่เข้าของค่า  $W$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 และการตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างกระบวนการค้นหาของการออกแบบด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 ซึ่งจะแสดงค่าเจาะจงที่ได้จากกระบวนการค้นหาในแต่ละรอบ รวมถึงค่าที่ดีที่สุดจากการค้นหาด้วยวิธี ATS



รูปที่ 5.8 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 5.9 การดูเข้าของค่า  $W$  ด้วยวิธี ATS



รูปที่ 5.10 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี ATS

#### 5.4.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO)

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค เช่นเดียวกันกับการออกแบบด้วยวิธี ATS โดยจะต้องทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสำหรับออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคจะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ค่า คือ จำนวนอนุภาคการค้นหา ( $NP$ ) ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  และค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคของพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนั้นได้นำเสนอไว้ในที่ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.5 - ตารางที่ ข.7

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคทั้งหมดที่ได้นำเสนอในภาคผนวก ข ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวดังนี้

เลือกใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 40 คำตอบ

เลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  เท่ากับ 0.75

เลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  เท่ากับ 0.25

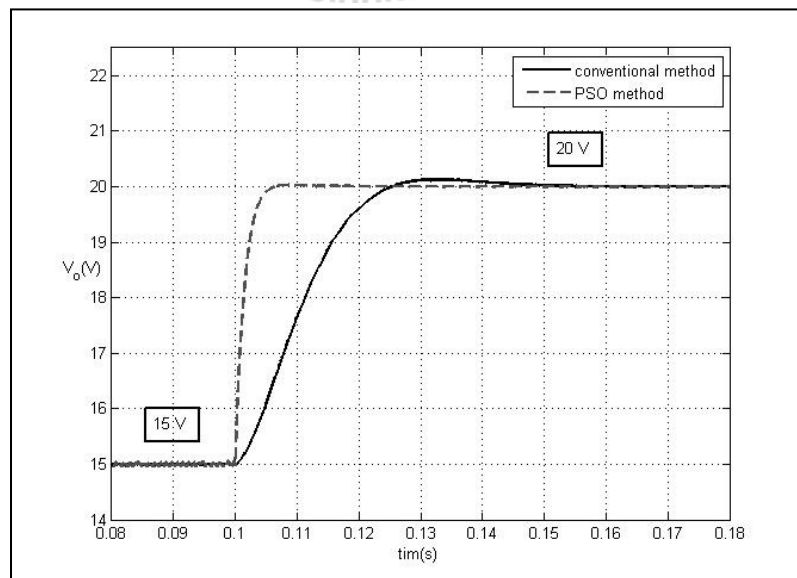
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาที่เหมาะสมแล้วนั้น ก็จะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 ดังนี้

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ PSO

พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	วิธีการออกแบบ	
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี PSO
$K_{pv}$	0.0027	0.1138
$K_{iv}$	3.3750	24.22
$K_{pi}$	1.2	4.1986
$K_{ii}$	2250	6795.2
$W$	0.6821	0.0030

■ ผลการจำลองสถานการณ์

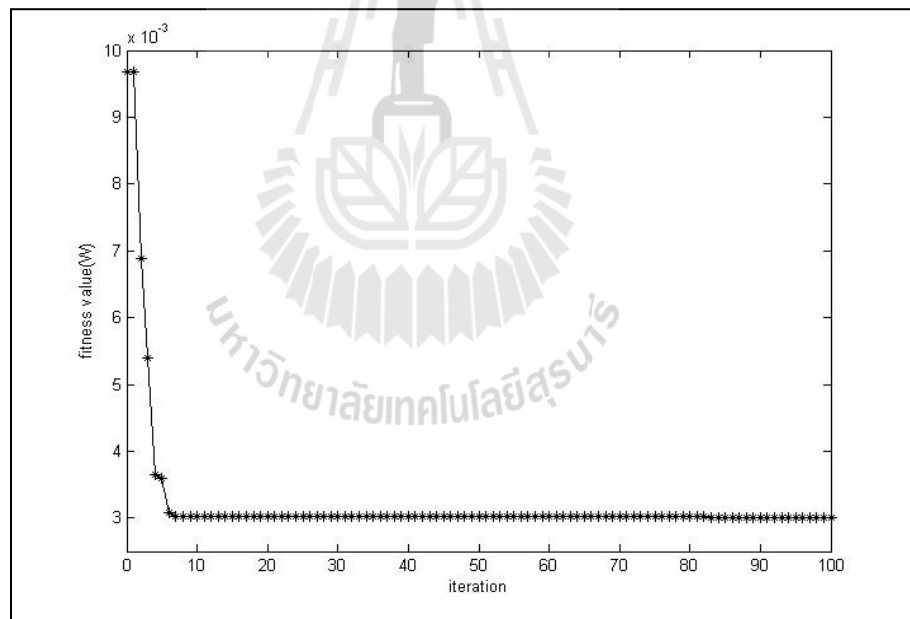
การจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ โดยจะทำการเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและการออกแบบด้วยวิธี PSO โดยใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 5.3 ในการจำลองสถานการณ์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลาเท่ากับ 0.1 วินาที เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.11



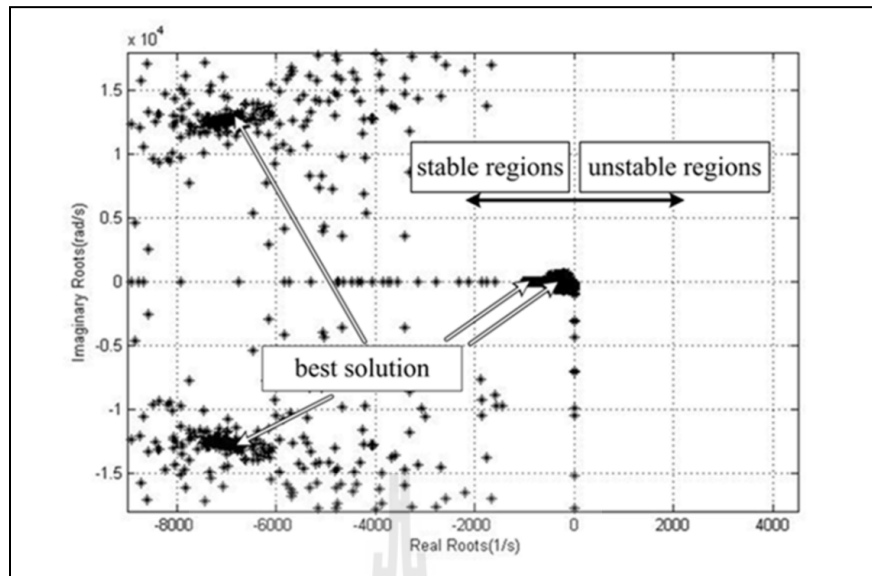
รูปที่ 5.11 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จากผลการจำลองสถานการณ์ รูปที่ 5.11 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยเริ่มจากการให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 15 V จากนั้น ที่เวลาของระบบเท่ากับ 0.1 วินาทีจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันของการควบคุมไปที่ระดับแรงดัน 20 V จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก็ได้ อย่างถูกต้อง แต่จะสังเกตเห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี PSO นั้นให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าทั้ง ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และ การพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

เช่นเดียวกันเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของ PSO ที่ผ่านการทดสอบมาออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ จะได้ผลของการลู่เข้าของค่า  $W$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 และการตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างกระบวนการค้นหาของการออกแบบด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งจะแสดงค่าเจาะจงที่ได้จากกระบวนการค้นหาในแต่ละรอบ รวมถึงค่าที่ดีที่สุดจากการค้นหาด้วยวิธี PSO



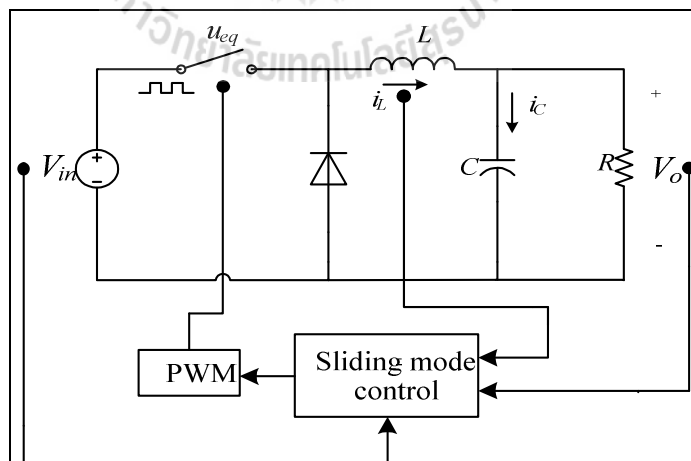
รูปที่ 5.12 การลู่เข้าของค่า  $W$  ด้วยวิธี PSO



รูปที่ 5.13 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี PSO

## 5.5 การออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิ่ง

สำหรับระบบที่ใช้พิจารณาการออกแบบเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน แต่จะเปลี่ยนตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมแบบ โหมคสไลด์ดิ่งสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแสดงได้ ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิ่ง

โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิ่งด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้น จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ที่ได้จากการนำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเข้ามาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเป็นฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์ของการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เช่นเดียวกันกับตัวควบคุมแบบฟuzzy ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในรูปที่ 5.14 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5-11)

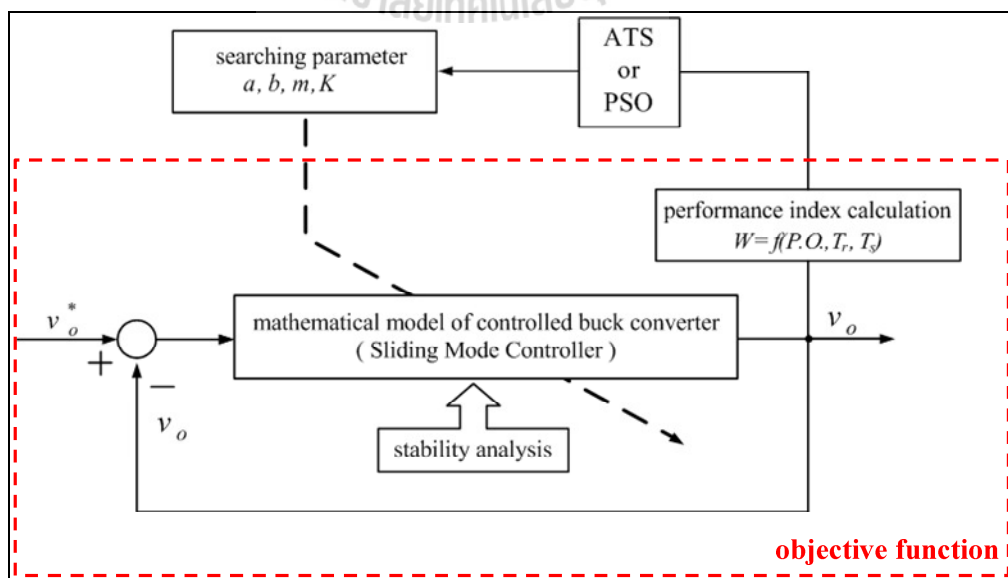
$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}u \end{aligned} \quad (5-11)$$

โดยเมตริกซ์ A, B, C และ D แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{b+aK+mC}{aC}\right) & \frac{b+aK-mRC(K+1)}{aRC} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{m(K+1)}{a} \\ 0 \end{bmatrix}_{2 \times 1}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{2 \times 1}$$

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์จึงจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5-11) สำหรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สามารถแสดงได้ด้วยบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 5.15 ดังนี้



รูปที่ 5.15 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

จากรูปที่ 5.15 แสดงบล็อกโคอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยการออกแบบจะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ( $a, b, m, K$ ) จากขอบเขตที่กำหนด ซึ่งในการค้นหาพารามิเตอร์ในแต่ละรอบนั้นระบบจะตรวจสอบค่า  $W$  (ซึ่งในรายละเอียดของการคำนวณค่า  $W$  จะดำเนินการเช่นเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ) รวมถึงการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ และจะทำการค้นหาจนกว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ( $a, b, m, K$ ) ที่ทำให้ผลการตอบสนองดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ค่า  $W$  มีค่าน้อยที่สุด

สำหรับขอบเขตของการค้นหาพารามิเตอร์ เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงนั้นต้องอาศัยการสุ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบผลกระทบของตัวควบคุมที่มีผลต่อระบบ ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 4 ในหัวข้อ 4.3 จึงสามารถสรุปขอบเขตของการค้นหาได้ดังตารางที่ 5.4 ดังนี้

ตารางที่ 5.4 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง

พารามิเตอร์	ขอบเขต	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
$a$	2	10
$b$	1	100
$m$	100	8000
$K$	100	6000

### 5.5.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS)

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ในหัวข้อย่อหน้านี้ ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัสคัทที่มีโหลดเป็นความต้านทานที่มีตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งการนำวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวไปใช้ในการออกแบบ จำเป็นต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาตามูเชิงปรับตัว ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธีการค้นหาตามูเชิงปรับตัวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สำหรับรายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธี ATS ได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.8 – ตารางที่ ข.11

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวทั้งหมดที่ได้ นำเสนอในภาคผนวก ข ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวดังนี้

เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ



เลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ

เลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5

เลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาที่เหมาะสมแล้วนั้น ก็จะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง สำหรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีตามเชิงปรับตัว แสดงได้ดังตารางที่ 5.5 ดังนี้

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธี ATS

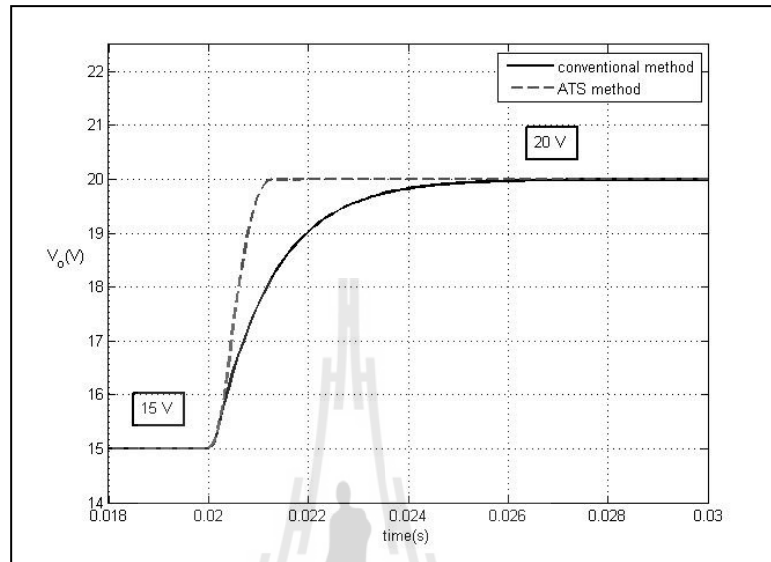
พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	วิธีการออกแบบ	
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี ATS
$a$	3	2.8789
$b$	25	90.2589
$m$	2600	7018.8
$K$	2000	4936.9
$W$	0.0019	0.000251

#### ■ ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ได้ทำการเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและการออกแบบด้วยวิธี ATS โดยใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 5.5 ในการจำลองสถานการณ์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลาเท่ากับ 0.02 วินาที เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.16

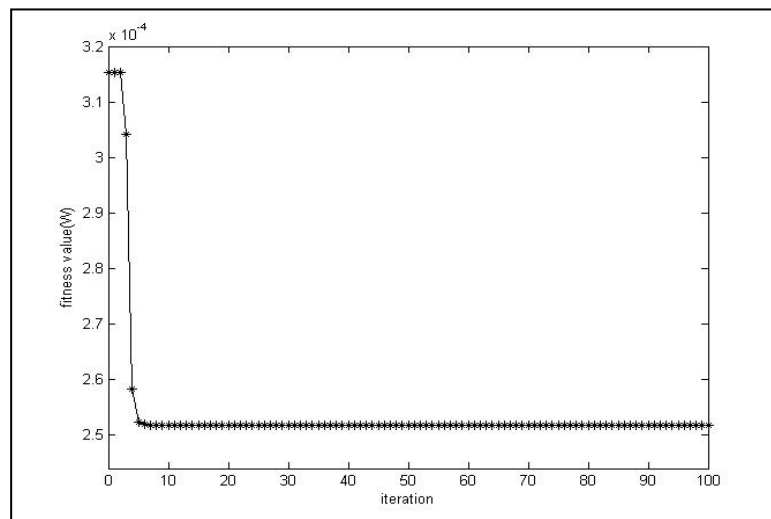
จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.16 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยเริ่มจากการให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 15 V จากนั้นที่เวลาของระบบเท่ากับ 0.02 วินาทีจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันของการควบคุมไปที่ระดับแรงดัน 20 V จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักได้อย่างถูกต้อง แต่จะสังเกตเห็นว่าตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี ATS นั้นจะ

ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าทั้ง ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

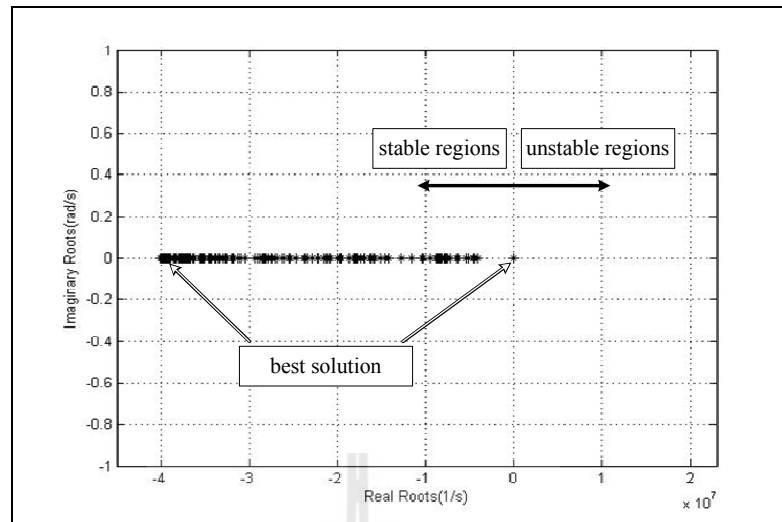


รูปที่ 5.16 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่ผ่านการทดสอบมาออกแบบตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิ้ง จะได้ผลของการดูเ้าของค่า  $W$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.17 และการตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างกระบวนการค้นหาของการออกแบบด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงแสดงได้ดังรูปที่ 5.18 ซึ่งจะแสดงค่าเจาะจงที่ได้จากกระบวนการค้นหาในแต่ละรอบ รวมถึงค่าที่ดีที่สุดจากการค้นหาด้วยวิธี ATS



รูปที่ 5.17 การดูเ้าของค่า  $W$  ด้วยวิธี ATS



รูปที่ 5.18 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี ATS

### 5.5.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิ่งด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO)

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิ่ง ด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค เช่นเดียวกันกับการออกแบบด้วยวิธี ATS ก็จะต้องทำการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาของวิธี PSO ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธี PSO มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธี PSO ได้นำเสนอไว้ที่ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.12 – ตารางที่ ข.14 ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาด้วยวิธี PSO ที่ได้นำเสนอในภาคผนวก ข ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวดังนี้

เลือกใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 40 คำตอบ

เลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  เท่ากับ 0.75

เลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  เท่ากับ 0.25

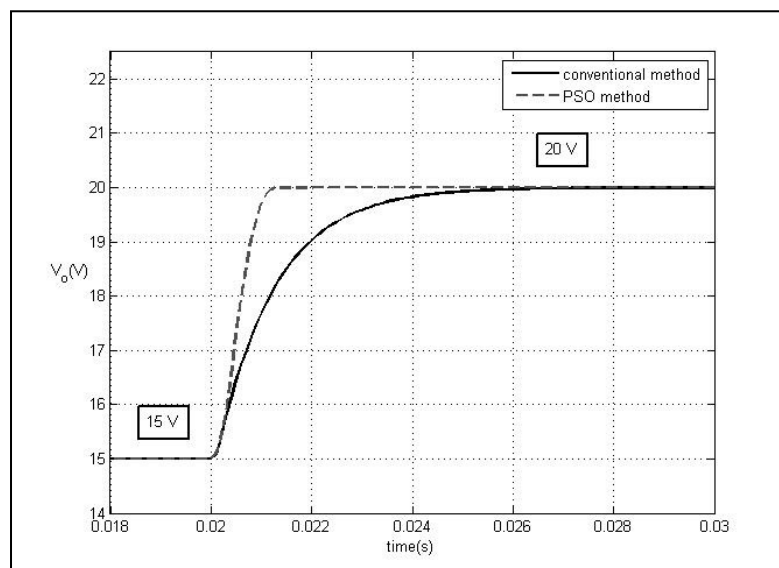
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาที่เหมาะสมแล้ว ก็จะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิ่ง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิ่งที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี PSO สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.6 ดังนี้

ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธี PSO

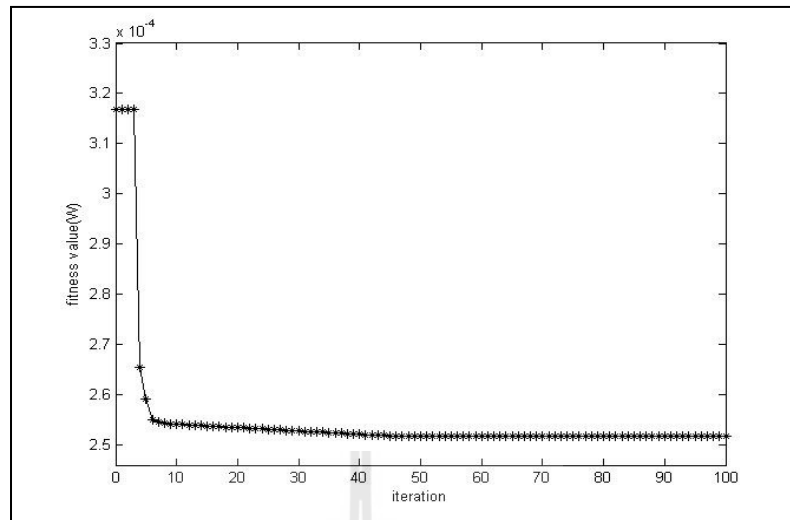
พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	วิธีการออกแบบ	
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี PSO
$a$	3	2.9380
$b$	25	56.1244
$m$	2600	7114
$K$	2000	5518
$W$	0.0019	0.000251

■ ผลการจำลองสถานการณ์

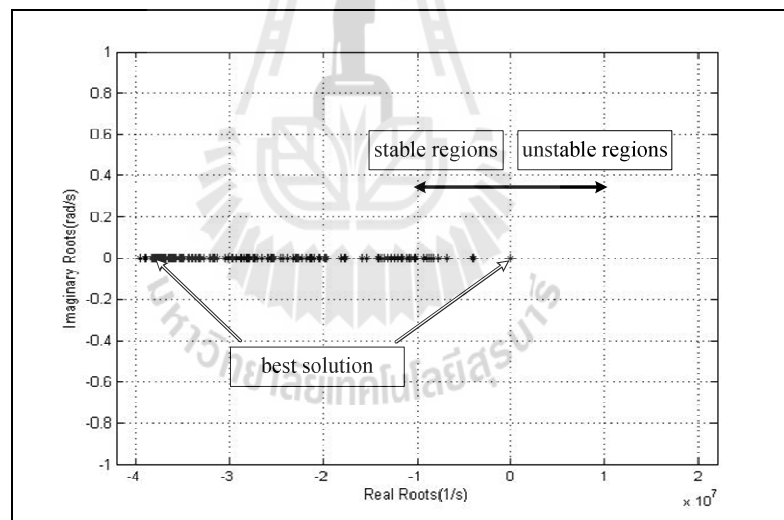
การจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ได้ทำการเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและการออกแบบด้วยวิธี PSO โดยใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 5.6 ในการจำลองสถานการณ์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลาเท่ากับ 0.02 วินาที เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.19 ดังนี้



รูปที่ 5.19 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 5.20 การลู่เข้าของค่า  $W$  ด้วยวิธี PSO



รูปที่ 5.21 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี PSO

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.19 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยเริ่มจากการให้ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 15 V จากนั้น ที่เวลาของระบบเท่ากับ 0.02 วินาที จะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันของการควบคุมไปที่ระดับแรงดัน 20 V จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักคี่ได้อย่างถูกต้อง แต่จะสังเกตเห็นว่าตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิงที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี PSO นั้นจะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าทั้ง ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของ PSO ที่ผ่านการทดสอบมาออกแบบตัว

ควบคุมแบบโหมดสโลว์ดีดิง จะได้ผลของการลู่เข้าของค่า  $W$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 และการตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างกระบวนการค้นหาของการออกแบบด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงแสดงได้ดังรูปที่ 5.21 ซึ่งจะแสดงค่าเจาะจงที่ได้จากกระบวนการค้นหาในแต่ละรอบ รวมถึงค่าที่ดีที่สุดจากการค้นหาด้วยวิธี PSO

## 5.6 สรุป

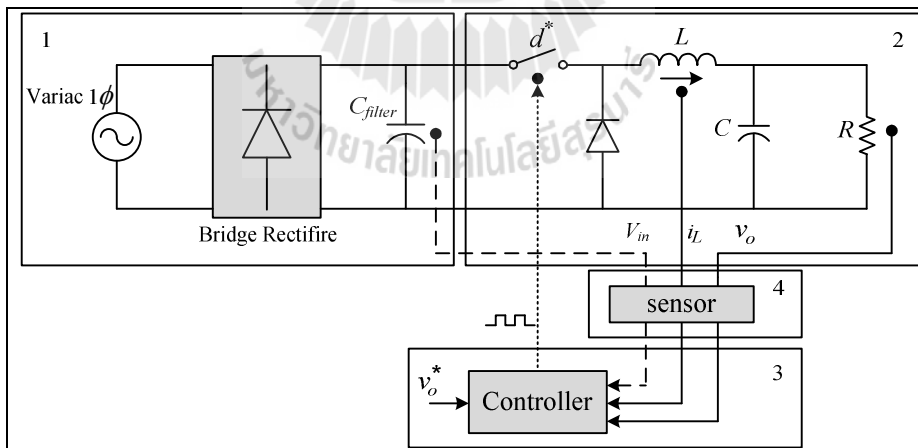
ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมทั้งตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสโลว์ดีดิงสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ จากการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า โดยทำการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม การออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า การออกแบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ทำให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างการออกแบบตัวควบคุมได้อีกด้วย และเพื่อให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์บนคอมพิวเตอร์นั้นสามารถใช้ได้กับระบบจริง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้สร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักค์ สำหรับทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งในบทที่ 6 จะกล่าวถึงรายละเอียดของการสร้างชุดทดสอบรวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา

## บทที่ 6

### การสร้างชุดทดสอบ

#### 6.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ถึงบทที่ 5 ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง รวมถึงการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ได้ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ด้วยเหตุนี้ในบทนี้ จึงได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบ วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหมดเป็นความต้านทาน โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 6.1 ดังนี้



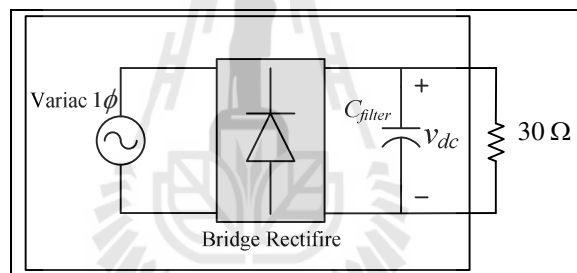
รูปที่ 6.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

จากโครงสร้างของชุดทดสอบในรูปที่ 6.1 นั้นสามารถแบ่งได้ดังนี้ ส่วนที่ 1 จะเป็นในส่วนของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ส่วนที่ 2 จะเป็นในส่วนของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหมดเป็นตัวต้านทาน ส่วนที่ 3 จะเป็นในส่วนของตัวควบคุม ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุม 2 ตัว คือ ตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง ถ้าเป็นกรณีใช้ตัวควบคุมแบบพีไอจะต้องมีตัวตรวจจับ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตกคร่อมตัวต้านทาน

เพื่อใช้ในการคำนวณสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งตัวตรวจจับแสดงได้ในส่วนที่ 4 แต่หากเป็นการใช้ตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิ่งนั้น จะต้องตรวจจับแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์เพิ่มเข้ามา เพื่อใช้ในการคำนวณ สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่เช่นกัน สำหรับรายละเอียดการออกแบบการสร้างชุดทดสอบของส่วนต่าง ๆ ในรูปที่ 6.1 ได้นำเสนอในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

## 6.2 แหล่งจ่าย

เนื่องจากการทดสอบชุดทดสอบ ผู้วิจัยไม่สามารถหาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สมบูรณ์แบบเพื่อป้อนให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหมคเป็นความต้านทาน ซึ่งค่าความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ในการทดสอบคือ  $30 \Omega$  ดังนั้น วงจรในรูปที่ 6.2 จะใช้สำหรับออกแบบเพื่อสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงดังนี้



รูปที่ 6.2 วงจรสำหรับออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส (variac) ที่มีพิกัดอยู่ในช่วง  $0 - 250 V_{rms}$  แสดงได้ดังรูปที่ 6.3 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้กับระบบ



รูปที่ 6.3 หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส



เนื่องจากวงจรแปลงผันแบบบักท์ที่ใช้ในการทดสอบ ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ไม่เกิน 60 V และโหลดความต้านทาน 30  $\Omega$  ดังนั้นในการเลือกใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบบริดจ์ จะต้องมียี่ห้อพิกัดที่สามารถรองรับการใช้งานได้ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบบริดจ์ที่สามารถหาซื้อในท้องตลาดคือ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 400 V และพิกัดกระแส 15 A แสดงได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.5 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

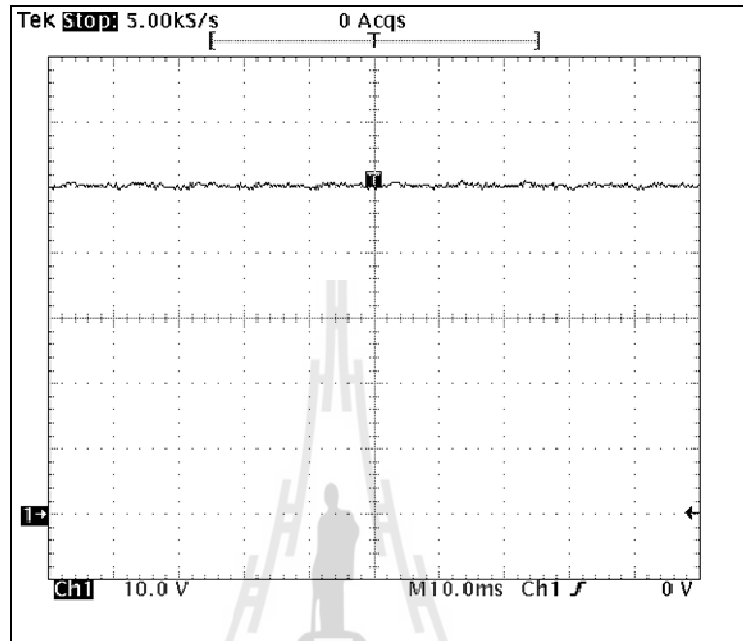
สำหรับตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังจากผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งหมายถึง แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องมีแรงดันพลั่วน้อยที่สุด โดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าพิกัด 400 V 3300  $\mu F$  แสดงได้ดังรูปที่ 6.5 ดังนี้



รูปที่ 6.5 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองแรงดัน

สำหรับการทดสอบระบบดังรูปที่ 6.2 โดยจะป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากหม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรง จนทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $V_{dc}$  มีค่าเท่ากับ 50 V โดยมีโหลดเป็นความต้านทาน 30  $\Omega$  ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.6 ดังนี้



รูปที่ 6.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด

จากรูปที่ 6.6 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดที่ประมาณ 50 V ซึ่งรูปสัญญาณนั้นมีความเป็นกระแสตรงที่ค่อนข้างดี คือไม่ค่อยมีการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด ดังนั้นจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้สร้างขึ้นมานั้นสามารถใช้งานได้ และเหมาะสมสำหรับจ่ายให้กับชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัก์ สำหรับทำการทดสอบต่อไป

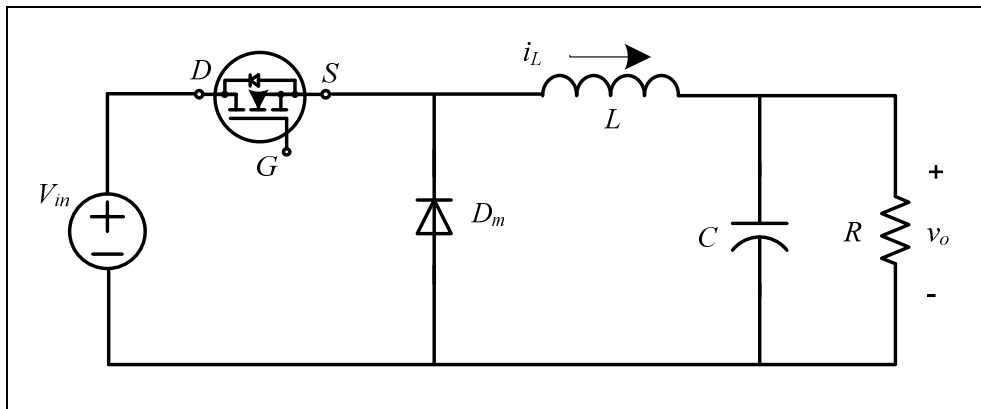
### 6.3 วงจรแปลงผันแบบบัก์

การสร้างวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีโหลดเป็นความต้านทานที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ เพื่อใช้สำหรับทดสอบจำเป็นมีการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจร ซึ่งโครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัก์แสดงได้ดังรูปที่ 6.7

สำหรับขั้นตอนของการออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัก์รวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับใช้งาน สามารถแสดงได้ดังนี้

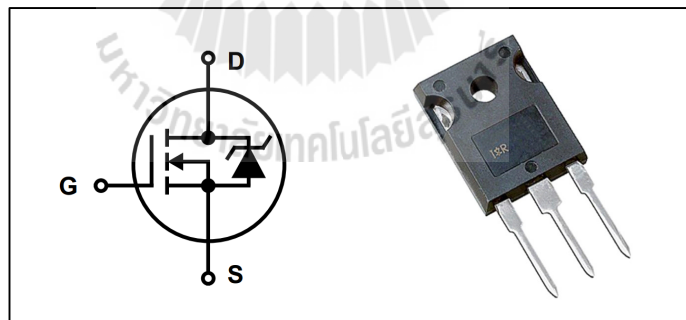
#### วิธีการออกแบบมอดูลของมอสเฟต

วงจรแปลงผันแบบบัก์ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่เป็นลักษณะมอดูล การออกแบบอุปกรณ์จะคำนึงถึงพิกัดของค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นสำคัญโดยค่าพิกัด



รูปที่ 6.7 โครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

ของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 220 V ส่วนค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดจะมีค่าเท่ากับ 3 A และในการออกแบบต้องคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25% ดังนั้นมอดูลที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะต้องมีค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 275 V และจะต้องมีค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้ามากกว่า 3.75 A ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอดูลของ มอสเฟตที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 500 V ค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 13 A ซึ่งมอดูลดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 มอดูลของมอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัย

#### วิธีการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบคือ ค่าแรงดันพลิว ( $\Delta V_C$  : ripple voltage) ของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด และค่ากระแสพลิว ( $\Delta I_L$  : ripple current) ของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) แสดงดังสมการที่ (6-1) และ (6-2) ดังนี้

$$\Delta I_L = \frac{V_o(V_{in} - V_o)}{f L V_{in}} \quad (6-1)$$

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8 f C} \quad (6-2)$$

โดยที่	$V_{in}$	คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต
	$V_o$	คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
	$f$	คือ ความถี่ในการสวิตช์
	$L$	ค่าความเหนี่ยวนำ
	$\Delta I_L$	คือ ค่ากระแสพลั่ว
	$\Delta V_C$	คือ ค่าแรงดันพลั่ว
	$C$	คือ ค่าตัวเก็บประจุ

สำหรับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเป็นดังนี้

$$V_{in} = 60 \text{ V}$$

$$V_o = 0 \text{ V ถึง } 60 \text{ V}$$

$$\Delta I_L \leq 0.12 \text{ A}$$

$$\Delta V_C \leq 10 \text{ mV}$$

$$f = 10 \text{ kHz}$$

ผู้วิจัยจะพิจารณาแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 30 V สำหรับการออกแบบ เนื่องจากเป็นแรงดันที่อยู่ภายในช่วงของการทดสอบ ซึ่งการออกแบบเป็นดังนี้

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุจะพิจารณาจากสมการที่ (6-1) และ (6-2) เมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะได้สมการสำหรับออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$L \geq \frac{30(60 - 30)}{10 \times 10^3 \times 60 \times 0.12} = 12.5 \text{ mH}$$

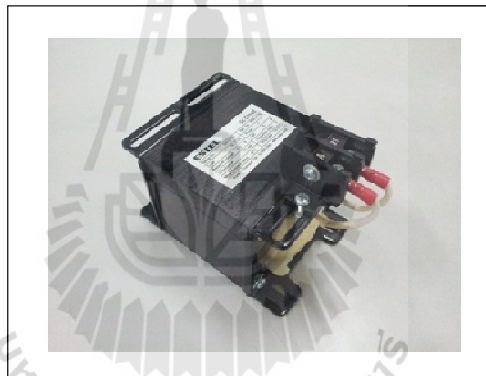
จากค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้เท่ากับ 12.5 mH แต่เมื่อพิจารณาเรื่องราคาแล้ว ไม่ต่างกับค่าความเหนี่ยวนำ 15 mH ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 15 mH

สำหรับสมการการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแสดงได้ดังนี้

$$C \geq \frac{0.12}{8 \times 10 \times 10^3 \times 10 \times 10^3} = 150 \mu\text{F}$$

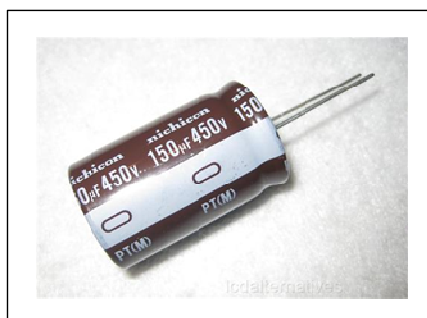
จากการออกแบบข้างต้น การเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุจะต้องครอบคลุมการทำงานทั้งหมดของงานวิจัยนี้ โดยมีเงื่อนไขว่าค่ากระแสพัลส์มีค่าไม่เกิน 0.12 A และค่าแรงดันพัลส์ไม่เกิน 10 mV เพราะฉะนั้นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคสำหรับงานวิจัยดังรูปที่ 6.9 และ 6.10 ตามลำดับดังนี้

- L = 15 mH พิกัดกระแส 5 A แรงดัน 220 V



รูปที่ 6.9 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัค

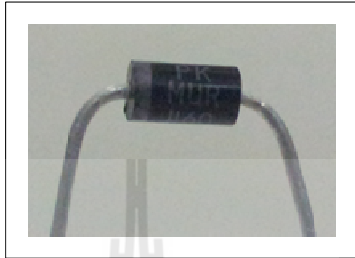
- C = 150  $\mu\text{F}$  พิกัดแรงดัน 450 V



รูปที่ 6.10 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัค

### วิธีการออกแบบไดโอด ( $D_m$ )

พิจารณาจากวงจรแปลงผันแบบบักก์ในรูปที่ 6.7 ไดโอด  $D_m$  ต้องมีพิกัดของแรงดันมากกว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าพิกัดของไดโอด  $D_m$  ที่ 400 V แสดงได้ดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบักก์

## 6.4 ตัวควบคุม

ในส่วนของตัวควบคุมที่จะใช้สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหนดเป็นความต้านทาน ในรูปที่ 6.1 นั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต คือ กรณีที่ 1 จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งในการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 สำหรับคำนวณประมวลผลสำหรับสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้สำหรับควบคุมแรงดัน ส่วน กรณีที่ 2 จะใช้ตัวควบคุมแบบโหมตสไลด์คิง ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร ซึ่งในการคำนวณประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณควบคุม PWM จะใช้การ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335 ซึ่ง การ์ด DSP จะมีการประมวลผลที่เร็วมากจึงเหมาะสำหรับใช้กับตัวควบคุมแบบโหมตสไลด์คิง ซึ่งในส่วนของการรู้พื้นฐานทั้ง ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 และ การ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335 สามารถดูได้จากภาคผนวก.

### 6.4.1 ตัวควบคุมแบบพีไอ

โดยทั่วไปโครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอจะมีการทำงานแบบต่อเนื่อง (continuous) ซึ่งการนำตัวควบคุมแบบพีไอมาใช้งานผ่านชุดไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จำเป็นต้องแปลงสมการควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปของการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) ซึ่งสามารถดำเนินการได้ดังนี้ โดยการสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR จะอาศัยพื้นฐานมาจากการนำตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ คือ การควบคุมแบบสัดส่วน และการควบคุมแบบอินทิกรัล มาใช้ร่วมกัน โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (6-3)

$$V_{out} = K_p \cdot V_{error} + K_i \cdot \int V_{error} dt \quad (6-3)$$

โดยที่  $V_{out}$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอ  
 $K_p$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน  
 $K_i$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล  
 $V_{error}$  คือ สัญญาณอินพุตของตัวควบคุมแบบพีไอ

จากสมการที่ (6-3) สามารถนำมาสร้างสมการใหม่ได้ โดยทำให้อยู่ในรูปแบบของเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) เพื่อใช้สำหรับเขียน โปรแกรมสร้างตัวควบคุมด้วยชุดทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ขั้นที่ 1 จากสมการของตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาต่อเนื่อง (continuous time)

$$V_{out} = K_p \cdot V_{error} + K_i \cdot \int V_{error} dt$$

ขั้นที่ 2 หาสมการอนุพันธ์ของสมการที่ (6-3) เพื่อกำจัดอินทิกรัล ดังสมการที่ (6-4) ดังนี้

$$\frac{dV_{out}}{dt} = K_p \cdot \frac{dV_{error}}{dt} + K_i \cdot V_{error} \quad (6-4)$$

ขั้นที่ 3 กำหนดให้  $dt = T_i$  เมื่อ  $T_i$  คือ การสุ่มตัวอย่างเวลา (sampling time) และเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบของผลต่างจะได้ดังสมการที่ (6-5) ดังนี้

$$\frac{\Delta V_{out}}{T_i} = K_p \cdot \frac{\Delta V_{error}}{T_i} + K_i \cdot V_{error} \quad (6-5)$$

ขั้นที่ 4 กำหนดให้ผลต่างของแรงดันเอาต์พุต ( $\Delta V_{out}$ ) มีค่าเท่ากับ  $V_{out(i)} - V_{out(i-1)}$  และผลต่างของแรงดันคลาดเคลื่อน ( $\Delta V_{error}$ ) มีค่าเท่ากับ  $V_{error(i)} - V_{error(i-1)}$  จะได้สมการดังสมการที่ (6-6) ดังนี้

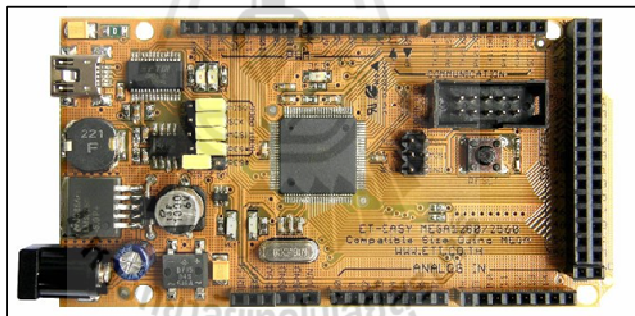
$$\left( \frac{V_{out(i)} - V_{out(i-1)}}{T_i} \right) = K_p \cdot \left( \frac{V_{error(i)} - V_{error(i-1)}}{T_i} \right) + K_i \cdot V_{error(i)} \quad (6-6)$$

โดยที่  $V_{out(i)}$  คือ ค่าแรงดันปัจจุบัน  
 $V_{out(i-1)}$  คือ ค่าแรงดันอดีต  
 $V_{error(i)}$  คือ ค่าแรงดันคลาดเคลื่อนปัจจุบัน  
 $V_{error(i-1)}$  คือ ค่าแรงดันคลาดเคลื่อนอดีต

จากนั้น คูณ  $T_i$  ทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาไม่ต่อเนื่องดังสมการที่ (6-7)

$$V_{out} = V_{out(i-1)} + K_p \cdot (V_{error(i)} - V_{error(i-1)}) + K_i \cdot T_i \cdot V_{error(i)} \quad (6-7)$$

จากสมการที่ (6-7) จะเป็นสมการที่ใช้ในการเขียน โปรแกรมด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 แสดงได้ดังรูปที่ 6.12 ซึ่งในส่วนของรายละเอียดของโปรแกรม สามารถดูได้จากภาคผนวก จ.



รูปที่ 6.12 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280

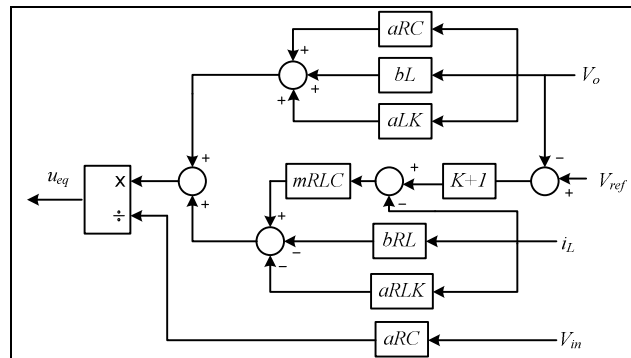
#### 6.4.2 ตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง

โดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง เป็นตัวควบคุมที่มีโครงสร้างที่ไม่แน่นอน เนื่องจากโครงสร้างของตัวควบคุมชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับตัวผู้ออกแบบ คือขั้นตอนของการเลือกสมการพื้นผิวสไลด์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้เลือกสมการพื้นผิวสไลด์ที่เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งจะง่ายต่อการใช้งานและการสร้างชุดทดสอบจริง ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2 ของบทที่ 4 โดยสมการสำหรับการสร้างสัญญาณควบคุม  $u_{eq}$  มีโครงสร้างดังรูปที่ 6.13

จากรูปที่ 6.13 สามารถเขียนสมการสำหรับใช้ในการคำนวณเพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งในการสร้างสัญญาณควบคุมด้วยการ์ด DSP ดังนี้

$$w = (bL + aLK + aRC) * V_o;$$





รูปที่ 6.13 โครงสร้างของสมการ  $u_{eq}$

$$x = (((setpoint - V_o) * (K + 1)) - I_L) * mRLC;$$

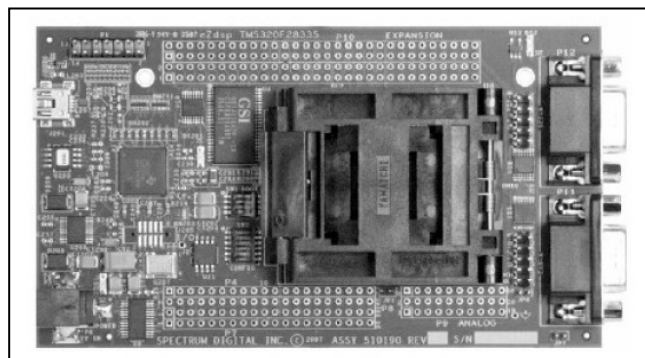
$$y = (-bRL - aRLK) * I_L;$$

$$z = (w + (x + y));$$

$$Down = aRC * V_{in};$$

$$u_{eq} = z / Down;$$

จากสมการ  $u_{eq}$  สามารถนำมาเขียน โปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณประมวลผลได้อย่าง ง่ายตาย เนื่องจากมีแค่การบวก ลบ คูณ หาร เท่านั้น สำหรับ DSP เบอร์ eZdsp™ F28335 แสดงได้ดังรูปที่ 6.14 ส่วนรายละเอียดของการ โปรแกรมสำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผัน แบบบักต์ ด้วยการ์ด DSP สามารถดูได้จากภาคผนวก จ.



รูปที่ 6.14 การ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335

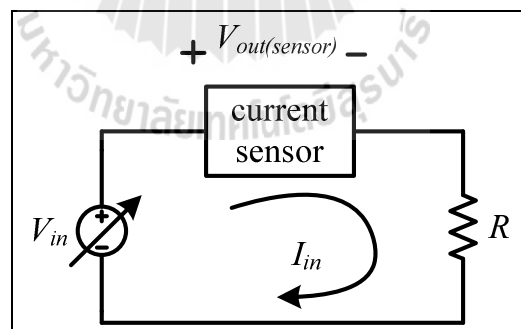
## 6.5 วงจรตรวจจับ

การตรวจจับสัญญาณที่ต้องป้อนให้กับชุดควบคุมสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างสัญญาณควบคุม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัดกระแส 5 A แสดงได้ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า

การนำตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าไปใช้งานนั้น จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลเข้าวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า  $I_{in}$  และแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า  $V_{out(sensor)}$  เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรง ดังนั้นผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการทดสอบตามวงจรดังรูปที่ 6.16

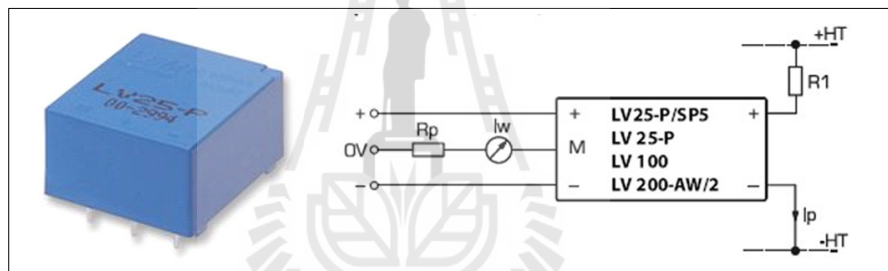


รูปที่ 6.16 วงจรทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า

สำหรับขั้นตอนการทดสอบนั้นได้ทำการเพิ่มกระแสที่ไหลในวงจรด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าอินพุต  $V_{in}$  โดยมีโหลดเป็นความต้านทาน  $30 \Omega$  ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 และสำหรับการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P พิกัด 500 V แสดงได้ดังรูปที่ 6.17

ตารางที่ 6.1 ตารางการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

$I_{in}$ (A)	$V_{out(sensor)}$
0.204	0.150
0.402	0.306
0.603	0.467
0.800	0.625
1.000	0.787
1.200	0.949
1.400	1.110
1.600	1.276



รูปที่ 6.17 ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและวงจรสำหรับใช้งาน

สำหรับการใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 6.17

**พิจารณาทางด้านแรงดันสูง**

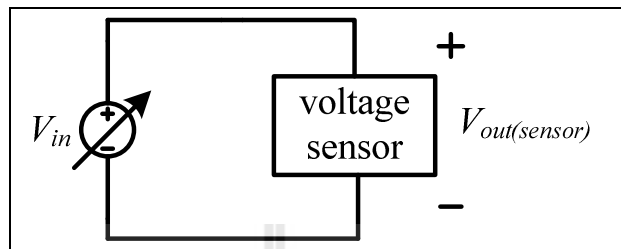
จะต้องทำการออกแบบค่า  $R1$  ซึ่งอยู่ทางด้านแรงดันสูง เพื่อไม่ให้กระทางด้านแรงดันสูง ( $I_p$ ) ไม่เกิน 10 mA เมื่อพิจารณาแรงดันอินพุตเท่ากับ 220 V จะได้สมการสำหรับออกแบบ  $R1$  ดังสมการที่ (6-8)

$$R1 = \frac{220}{I_p} = \frac{220}{10 \times 10^{-3}} = 22 \text{ k}\Omega \quad (6-8)$$

**พิจารณาทางด้านแรงดันต่ำ**

จะต้องทำการปรับจูนค่าความต้านทาน  $R_p$  เพื่อปรับแรงดันของสัญญาณแอนาลอกที่จะเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้มีค่าไม่เกิน 3 V ซึ่งผลจากการทดสอบการปรับจูนจะต้องใช้ค่าความต้านทาน  $R_p$  เท่ากับ 135  $\Omega$

การนำตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าไปใช้งานก็เช่นกัน จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุต  $V_{in}$  กับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับ  $V_{out(sensor)}$  เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรง ดังนั้นผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการทดสอบตามวงจรดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 วงจรทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

สำหรับขั้นตอนการทดสอบนั้นได้ทำการเพิ่มแรงดันอินพุต  $V_{in}$  จาก 20V - 100V เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 6.2 ดังนี้

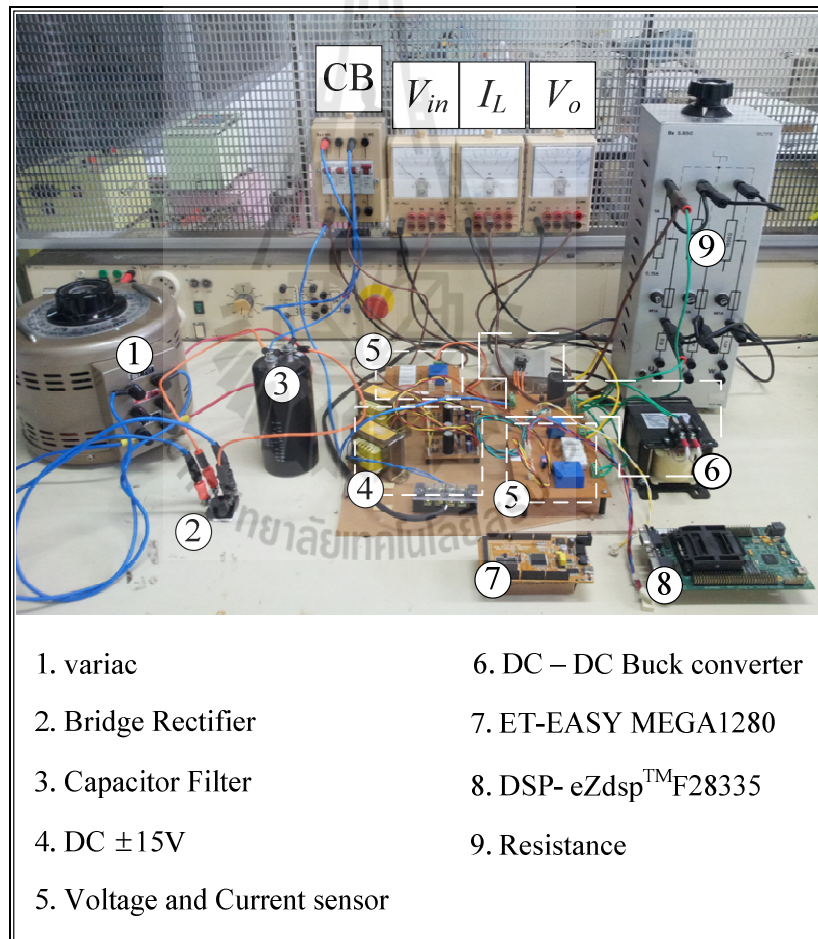
ตารางที่ 6.2 ตารางการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

$V_{in}$ (V)	$V_{out(sensor)}$
20	0.596
30	0.892
40	1.190
50	1.484
60	1.779
70	2.076
80	2.373
90	2.672
100	2.967

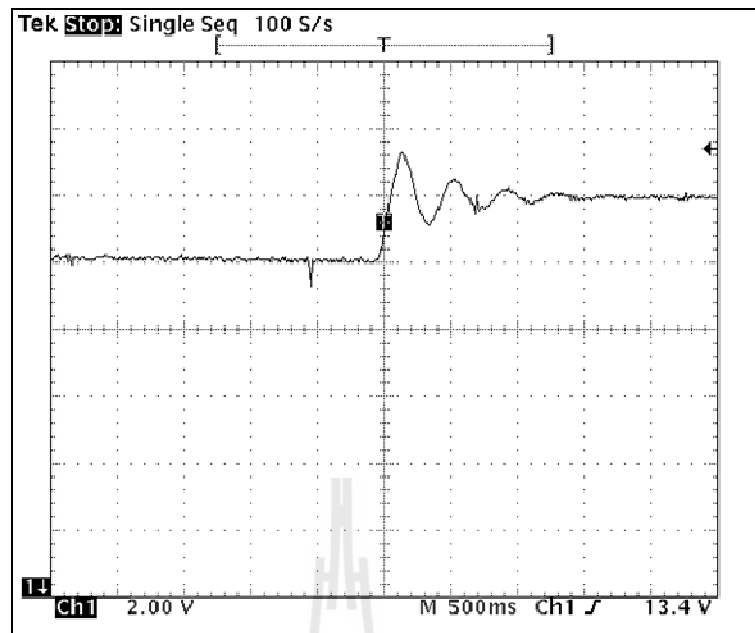
## 6.6 ผลการทดสอบวงจรและอภิปรายผล

การทดสอบการเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ของระบบดังรูปที่ 6.1 ซึ่งหลังจากการออกแบบรวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบดังกล่าวที่ได้นำเสนอไว้แล้วนั้น จึงได้ชุดทดสอบจริงที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ แสดงได้ดังรูปที่ 6.19 โดยการทดสอบจะแบ่ง

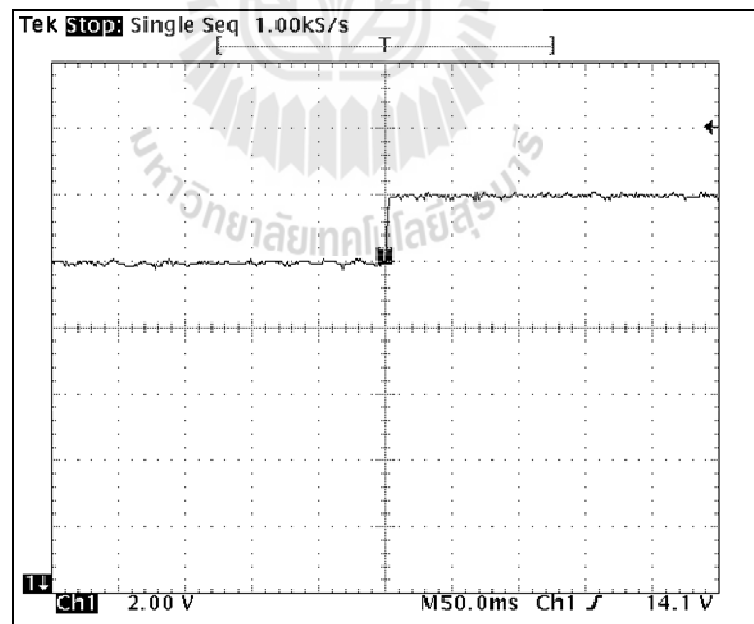
ออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 ในการประมวลผล คือ หมายเลข 7 ในรูปที่ 6.19 และการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักด้วยตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์จิง จะใช้การ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335 ในการประมวลผล คือ หมายเลข 8 ในรูปที่ 6.19 โดยการทดสอบนั้นจะคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10V หลังจากนั้นจะปรับระดับแรงดันอ้างอิง ( $V_o^*$ ) ไปเป็น 12 V เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของชุดทดสอบ ว่าสามารถคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามแรงดันอ้างอิงที่ต้องการได้หรือไม่ โดยรูปที่ 6.20 คือผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอ และรูปที่ 6.21 คือผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์จิงตามลำดับ



รูปที่ 6.19 ชุดทดสอบจริงของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีโหมดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ 6.20 ผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดทดสอบที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยปรับเปลี่ยน ( $v_o^*$ ) จาก 10V ไปเป็น 12V



รูปที่ 6.21 ผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดทดสอบที่มีตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง โดยปรับเปลี่ยน ( $v_o^*$ ) จาก 10V ไปเป็น 12V

จากผลการทดสอบ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอในรูปที่ 6.20 และการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ด้วยตัวควบคุมแบบโหมตสไลด์คิงในรูปที่ 6.21 ต่างสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ แต่พบว่าผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมแบบโหมตสไลด์คิง จะให้ผลที่ดีกว่าอีกทั้งยังใช้เวลาในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ เนื่องจากการกำหนดสมการพื้นผิวของระนาบการสไลด์ให้เป็นแบบการรวมกันเป็นเชิงเส้นของตัวแปรสถานะของระบบ ทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะควบคุมได้อย่างรวดเร็ว

## 6.7 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน ตั้งแต่การสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบค่าพารามิเตอร์และเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ การสร้างตัวควบคุมรวมถึงวงจรตรวจจับ และจากการทดสอบชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้น ทำให้มั่นใจได้ว่าสามารถใช้งานได้จริง เพื่อเป็นการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ว่า พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบทั้ง 3 วิธีที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น เมื่อนำมาใช้กับชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้น จะยังให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์หรือไม่ ซึ่งผลการทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตพร้อมกับการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบทั้ง 3 วิธีจะนำเสนอในบทที่ 7 ต่อไป

## บทที่ 7

### ผลการทดสอบ

#### 7.1 บทนำ

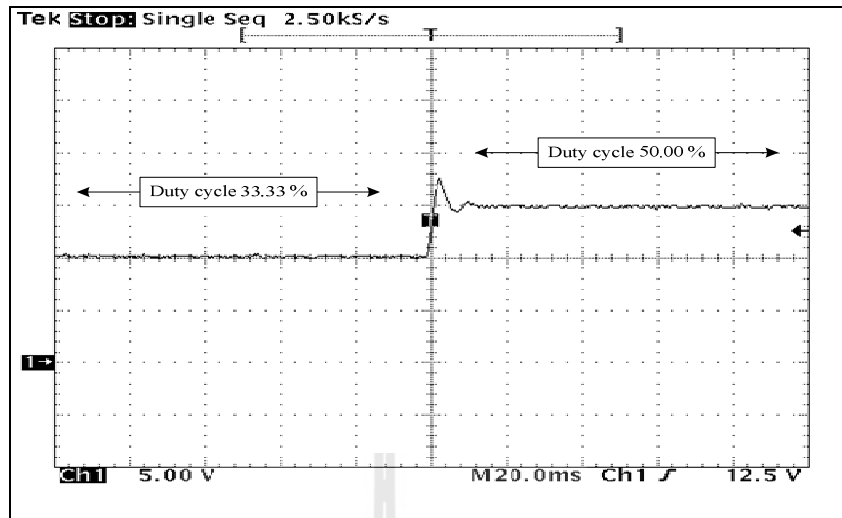
จากบทที่ 6 ที่ผ่านมาได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบรวมถึงการออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิงสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรให้เป็นไปตามความต้องการ ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเพื่อเป็นการยืนยันผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่ได้จากการออกแบบตามทฤษฎี สำหรับการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบ ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 3 วิธี ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 ถึงบทที่ 5 คือ การออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม การออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS สำหรับผลการทดสอบรวมถึงการอภิปรายผล นำเสนอในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

#### 7.2 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน กรณีไม่มีตัวควบคุม

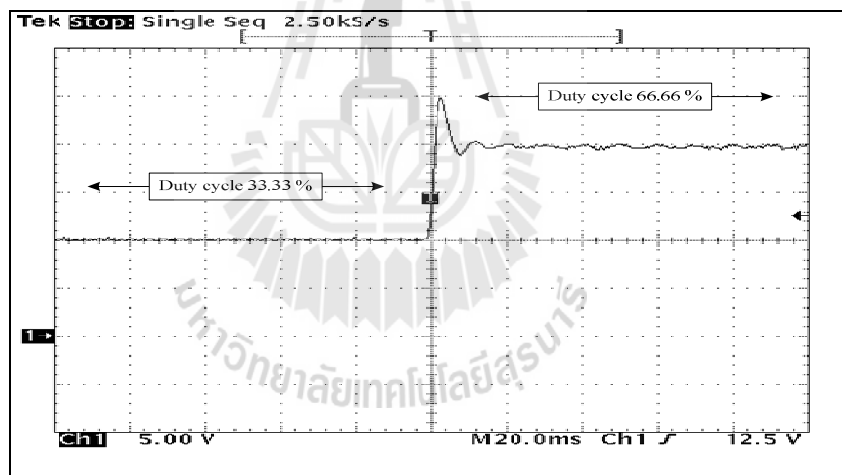
การทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อดูผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 30 V เป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยรูปที่ 7.1 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33% เป็น 50% และรูปที่ 7.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 66.66 % ที่เวลา 0.01 วินาที

จากรูปที่ 7.1 และ 7.2 เป็นผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักร ซึ่งจากรูปที่ 7.1 เป็นการทดสอบการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 50 % จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 10 V ไปเป็น 15 V และจากรูปที่ 7.2 เป็นการทดสอบการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 66.66 % จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 10 V ไปเป็น 20 V ซึ่งจากผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ แสดงให้เห็นว่าการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ให้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องตามสมการ  $v_o = kV_{in}$





รูปที่ 7.1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 50 %



รูปที่ 7.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 66.66 %

### 7.3 การทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบับคัทที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานให้มีค่าคงที่ ในหัวข้อนี้จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยในการทดสอบนั้นจะเป็นการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากคอมพิวเตอร์ ว่าการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับชุดทดสอบ และยังคงให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในการทดสอบ ซึ่งการทดสอบจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) 3 กรณีคือ

1. ปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V ไปเป็น 12 V
2. ปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V ไปเป็น 14 V และ
3. ปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V ไปเป็น 16 V ที่เวลา 0.1 วินาที โดยในแต่ละกรณีจะทำการเปรียบเทียบการออกแบบของทั้ง 3 วิธี สำหรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ส่วนค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ทั้ง ATS และ PSO ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5 แสดงได้จากตารางที่ 7.1 ดังนี้

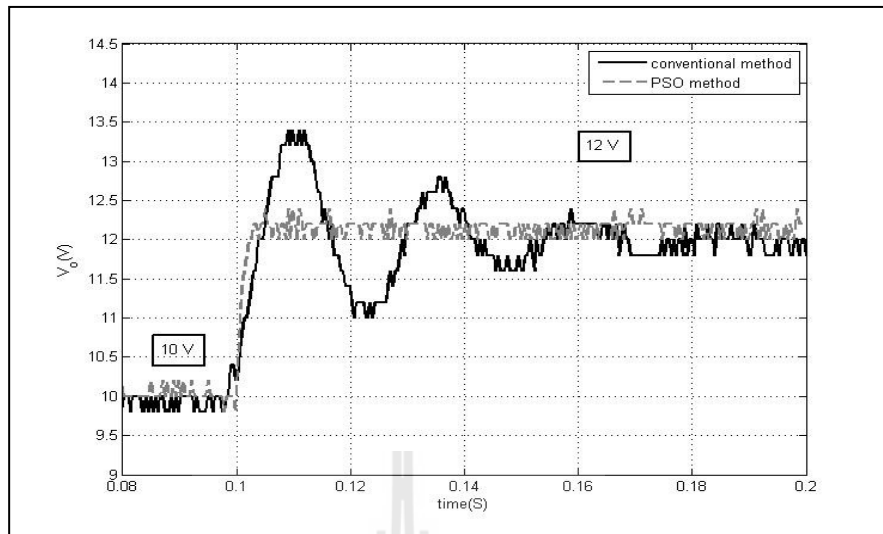
ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม PSO และ ATS

พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	วิธีการออกแบบ		
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี PSO	วิธี ATS
$K_{pv}$	0.0027	0.1138	0.1346
$K_{iv}$	3.3750	24.22	28.565878
$K_{pi}$	1.2	4.1986	3.7243
$K_{ii}$	2250	6795.2	5450.7
$w$	0.6821	0.0030	0.0030

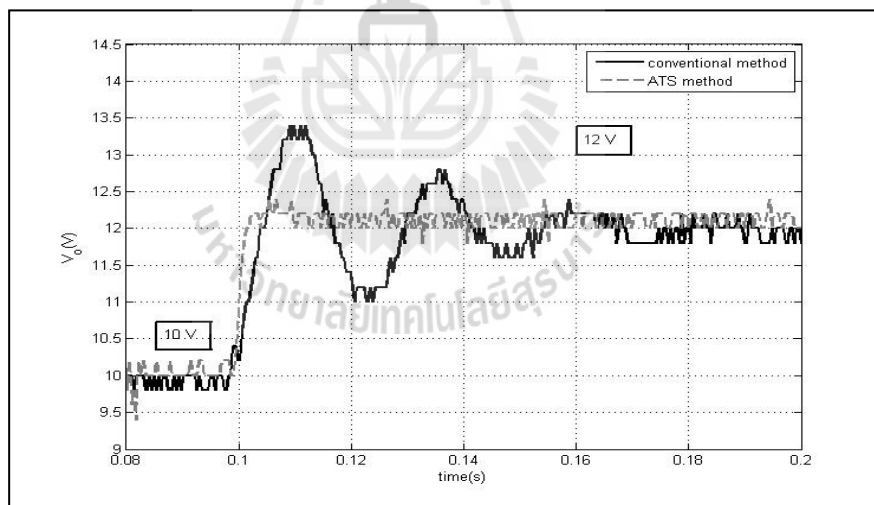
- กรณีปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 10 V ไปเป็น 12 V

รูปที่ 7.3 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี PSO ส่วนรูปที่ 7.4 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี ATS

จากผลการทดสอบรูปที่ 7.3 แสดงผลการตอบสนองการปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V เป็น 12 V ที่เวลา 0.1 วินาที จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี PSO นั้นให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าทั้ง ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และ การพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ส่วนรูปที่ 7.4 แสดงผลการตอบสนองการปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V เป็น 12 V ที่เวลา 0.1 วินาที จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ATS ก็ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมเช่นกัน



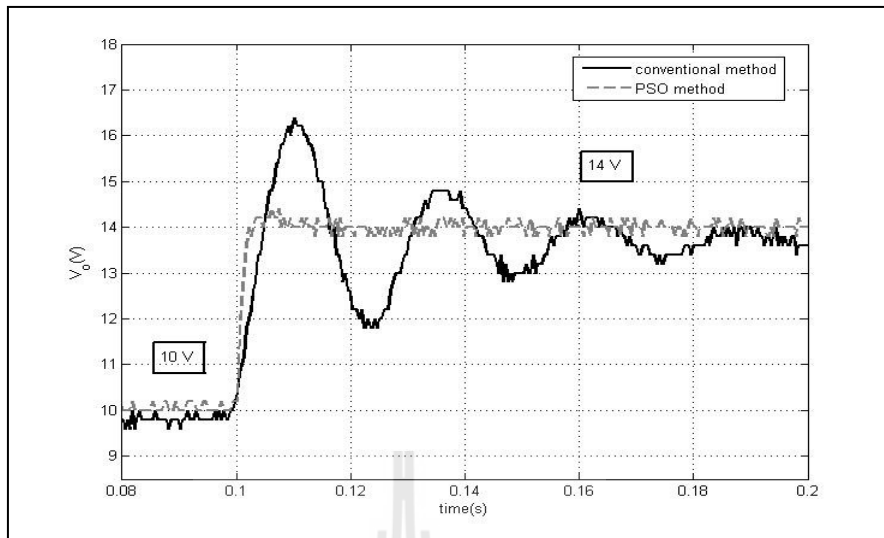
รูปที่ 7.3 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและPSO



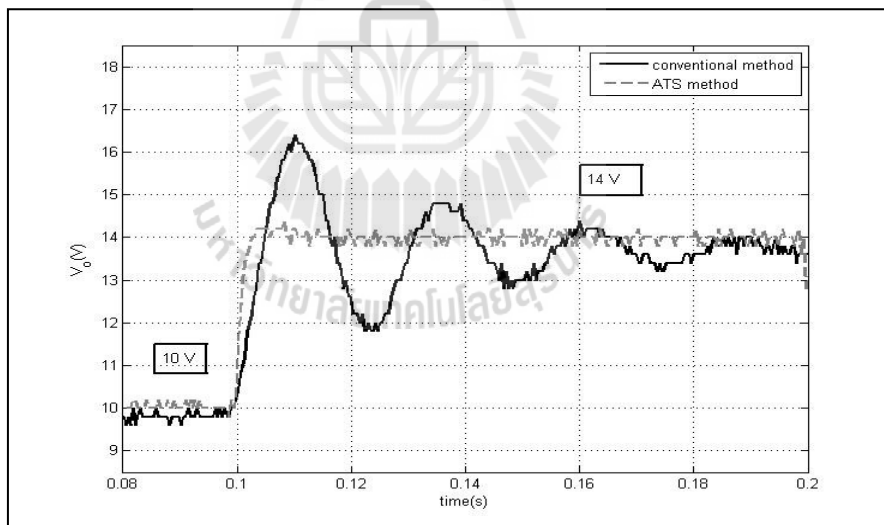
รูปที่ 7.4 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและATS

- กรณีปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 10 V ไปเป็น 14 V

รูปที่ 7.5 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี PSO ส่วนรูปที่ 7.6 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 7.5 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและPSO

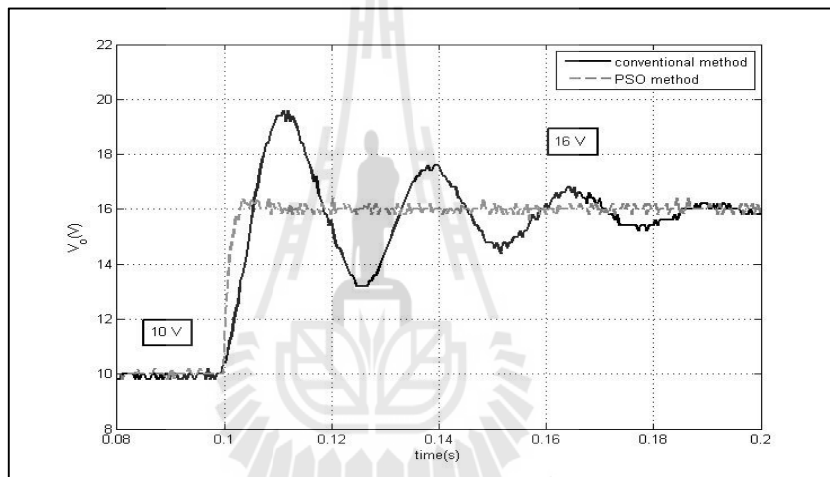


รูปที่ 7.6 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและATS

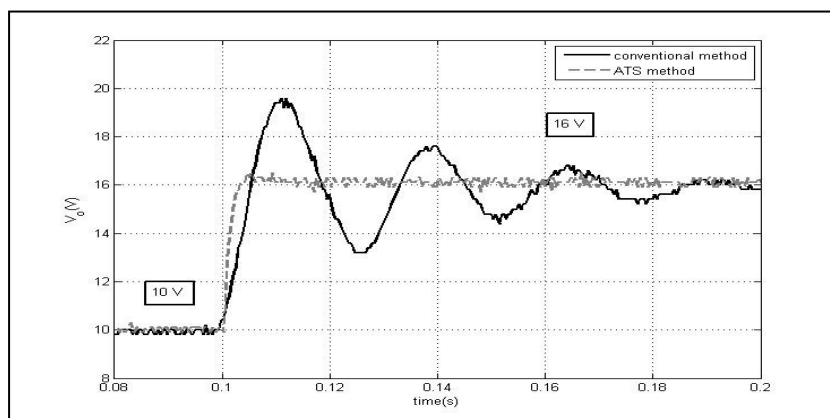
ผลการทดสอบที่ได้จะให้ผลในการทำงานเดียวกันกับกรณีปรับเปลี่ยนจาก 10 V ไปเป็น 12 V คือ การออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

- กรณีปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 10 V ไปเป็น 16 V

รูปที่ 7.7 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี PSO ส่วนรูปที่ 7.8 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี ATS จากผลการทดสอบที่ได้จะให้ผลในทำนองเดียวกันกับกรณีปรับเปลี่ยนจาก 10 V ไปเป็น 12 V และ กรณีปรับเปลี่ยนจาก 10 V ไปเป็น 14 V เช่นกัน คือการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ทั้งการออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม



รูปที่ 7.7 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ PSO



รูปที่ 7.8 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ ATS

#### 7.4 การทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักคัทที่มีโหมคเป็นตัวต้านทาน ในหัวข้อนี้จะใช้ตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยในการทดสอบนั้น เพื่อเป็นการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากคอมพิวเตอร์ ว่าการออกแบบตัวแบบโหมคสไลด์คิง โดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับชุดทดสอบ และยังคงให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

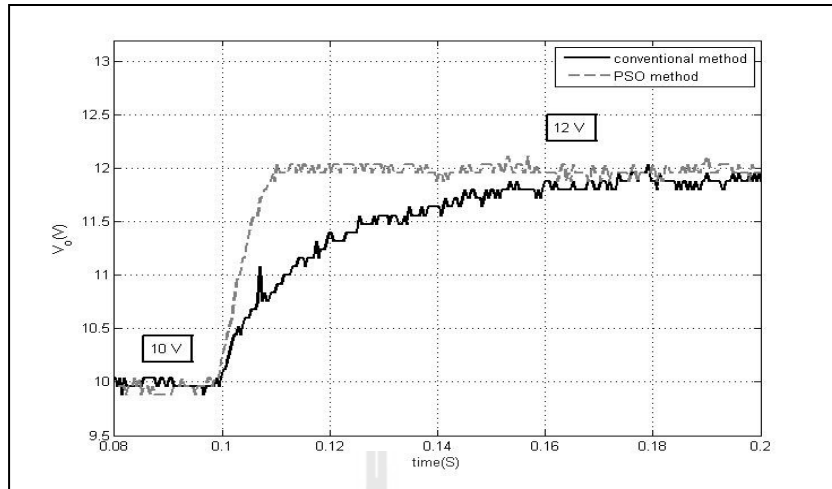
การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักคัทจะใช้ตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงในการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบจะทำการทดสอบเช่นเดียวกับกรณีการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอคือ จะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) 3 กรณีคือ 1. ปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V ไปเป็น 12 V 2. ปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V ไปเป็น 14 V และ 3. ปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V ไปเป็น 16 V ที่เวลา 0.1 วินาที โดยในแต่ละกรณีจะทำการเปรียบเทียบการออกแบบของทั้ง 3 วิธี สำหรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 4 ส่วนค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ทั้ง ATS และ PSO ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 5 แสดงได้จากตารางที่ 7.2 ดังนี้

ตารางที่ 7.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิงที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม PSO และ ATS

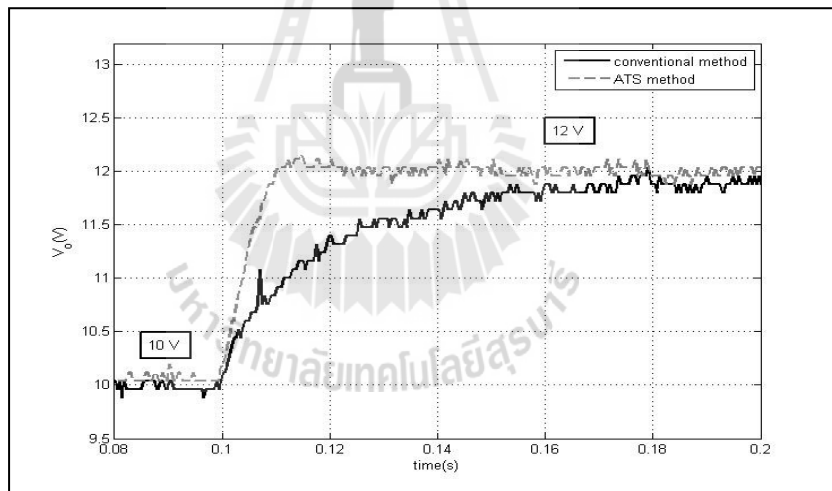
พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	วิธีการออกแบบ		
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี PSO	วิธี ATS
$a$	3	2.9380	2.8789
$b$	25	56.1244	90.2589
$m$	2600	7114	7018.8
$K$	2000	5518	4936.9
$w$	0.0019	0.000251	0.000251

- กรณีปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 10 V ไปเป็น 12 V

รูปที่ 7.9 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี PSO ส่วนรูปที่ 7.10 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 7.9 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและPSO

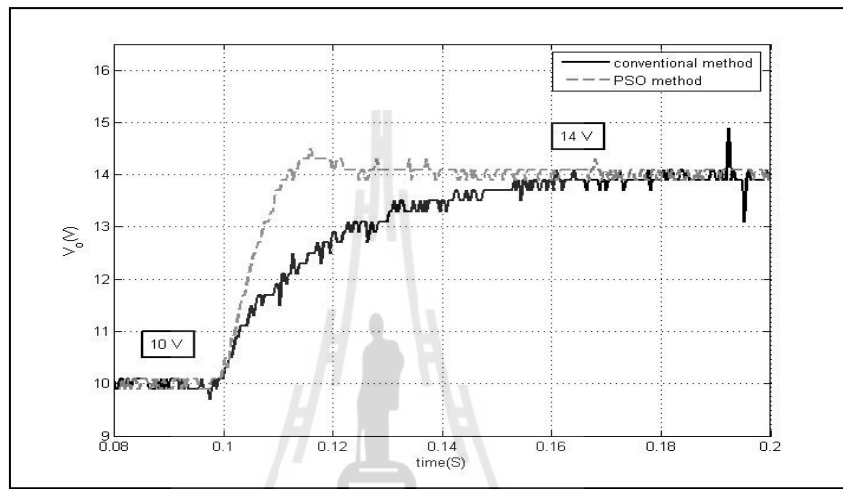


รูปที่ 7.10 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและATS

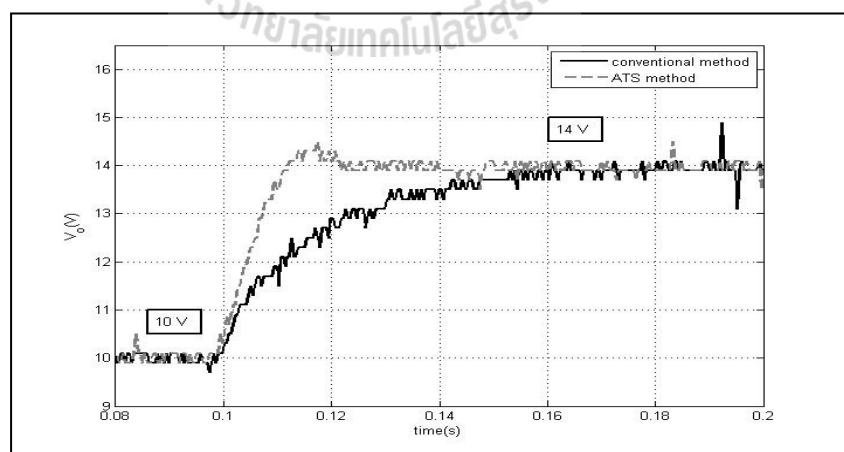
จากผลการทดสอบรูปที่ 7.9 แสดงผลการตอบสนองการปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V เป็น 12 V ที่เวลา 0.1 วินาที จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี PSO นั้นให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าทั้ง ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ส่วนรูปที่ 7.10 แสดงผลการตอบสนองการปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 10 V เป็น 12 V ที่เวลา 0.1 วินาที จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ATS ก็ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแบบดั้งเดิมเช่นกัน

- กรณีปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 10 V ไปเป็น 14 V

รูปที่ 7.11 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี PSO ส่วนรูปที่ 7.12 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการทดสอบ แสดง ได้ดังนี้



รูปที่ 7.11 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ PSO



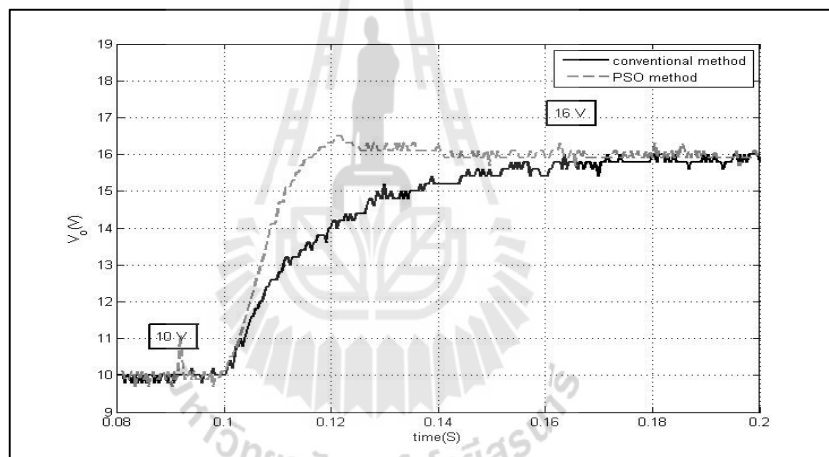
รูปที่ 7.12 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ ATS



ผลการทดสอบที่ได้จะให้ผลในทำนองเดียวกันกับกรณีปรับเปลี่ยนจาก 10 V ไปเป็น 12 V คือ การออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

- กรณีปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 10 V ไปเป็น 16 V

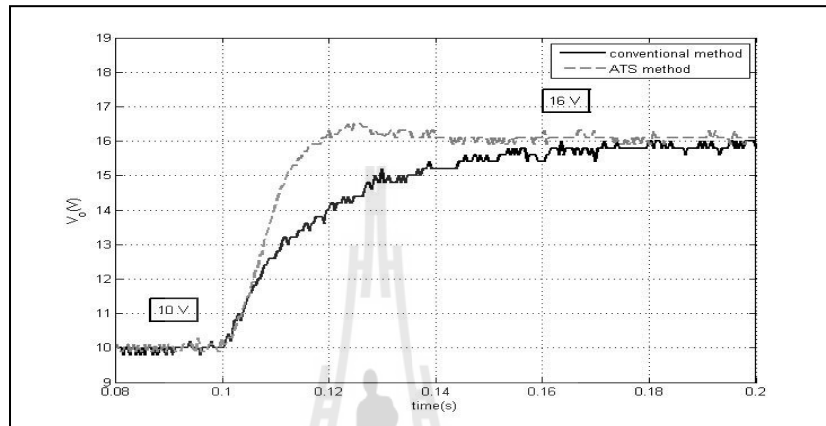
รูปที่ 7.13 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี PSO ส่วนรูปที่ 7.14 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะให้ผลในทำนองเดียวกันกับกรณีปรับเปลี่ยนจาก 10 V ไปเป็น 12 V และกรณีปรับเปลี่ยนจาก 10 V ไปเป็น 14 V เช่นกันคือ การออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม



รูปที่ 7.13 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ PSO

จากผลการทดสอบของชุดทดสอบจริงที่ได้สร้างขึ้นนั้น ทั้งการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและการใช้ตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบที่พิจารณาก็คือ วงจรแปลงผันแบบบัคค์ จากการทดสอบที่ผ่านมา ผลที่ได้จากชุดทดสอบจริงนั้นมีข้อสรุปเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ คือ การออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่า การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม แต่หากพิจารณาไปในรายละเอียดถึงผลการตอบสนอง ในเรื่องของช่วงเวลายื่น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และการพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot) จะมีความแตกต่างกันระหว่างผลจากชุดทดสอบจริงกับผลที่ได้จากคอมพิวเตอร์ เนื่องจากการศึกษาในบทที่ 5 ผู้วิจัยวิทยานิพนธ์ไม่ได้นำเรื่องของการระบุเอกลักษณ์ของ

ระบบเข้ามาใช้ อีกทั้งการทดสอบกับระบบจริงยังมีเงื่อนไขของเวลาในการคำนวณหรือประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอาจจะเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดข้อแตกต่างกัน ระหว่างผลจากชุดทดสอบจริงกับผลจากคอมพิวเตอร์ แต่จากผลที่ได้จากชุดทดสอบจริงนั้นยังแสดงให้เห็นว่า แม้จะปราศจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ แต่ก็ยังคงให้ผลที่สอดคล้องกับผลจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 7.14 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและATS

## 7.5 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์โดยใช้ตัวควบคุมในการทดสอบทั้ง 2 ตัวควบคุมคือ ตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง ซึ่งได้ทำการทดสอบการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุม รวมถึงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ โดยทำการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 3 วิธี ได้แก่การออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม การออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าการออกแบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ทำให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของสัญญาณผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้ดียิ่งขึ้น และจากผลการทดสอบเป็นการยืนยันได้ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอและตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สามารถใช้งานในทางปฏิบัติได้จริงและยังคงให้ผลที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์

## บทที่ 8

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการศึกษาวิเคราะห์การสร้างความจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่พิจารณาตัวควบคุม รวมถึงการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับออกแบบตัวควบคุม โดยงานวิจัยได้เริ่มต้นจากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การใช้ตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดการค้นคว้าต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น มีความจำเป็นต่อวิศวกรเป็นอย่างมาก ในการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่พิจารณาตัวควบคุมด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้ตัวควบคุม 2 แบบคือ ตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง สำหรับรายละเอียดในบทที่ 3 ได้นำเสนอการศึกษาและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไออยู่ในแบบจำลอง รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ส่วนในบทที่ 4 ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิงปรากฏอยู่ในแบบจำลอง การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิงที่มีผลต่อระบบสำหรับการเลือกใช้อ่านในการกำหนดค่าสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของระบบ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้นในบทที่ 5 ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับออกแบบตัวควบคุมทั้งตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS) และวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งข้อดีของการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์คือ การจำลองสถานการณ์จะใช้เวลาที่รวดเร็วและเหมาะสมสำหรับการคำนวณที่เข้าไปเข้ามา อีกทั้งในระหว่างกระบวนการค้นหาการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ยังสามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบได้ แต่หากเป็นชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและ SIMULINK จะไม่สามารถทำได้ สำหรับผลการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์

ในคอมพิวเตอร์ พบว่าการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็น ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (setting time) และการพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

เพื่อเป็นการยืนยันผลว่าตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เมื่อนำไปใช้งานกับระบบจริงแล้วจะยังคงให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเนื้อหาในบทที่ 6 จึงได้นำเสนอการดำเนินการออกแบบรวมถึงการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักก์ เพื่อใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ สำหรับผลการทดสอบได้ทดสอบการควบคุมแรงดันในย่านต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบจะให้ผลที่สอดคล้องในทำนองเดียวกันกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ คือการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ส่วนรายละเอียดต่าง ๆ ของขั้นตอนการทดสอบชุดทดสอบ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7

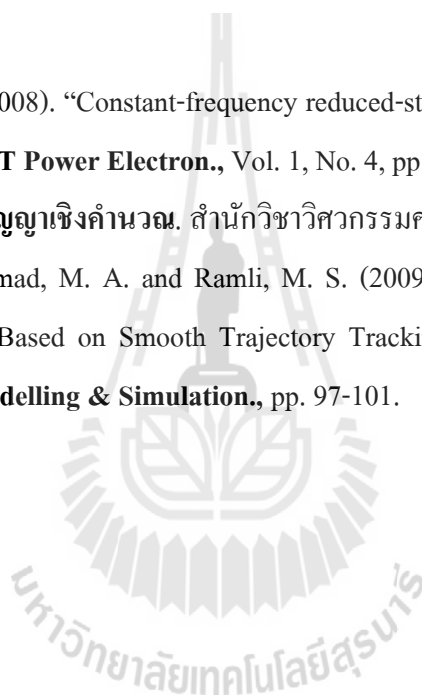
## 8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ (Identification) ระบบที่พิจารณา เพื่อให้ผลสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์มากยิ่งขึ้น
2. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการหาแบบจำลองของระบบที่มีโพลเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง เพื่อให้ครอบคลุมสำหรับการนำแบบจำลองไปใช้งาน (Ismail, ahmad and Ramli, 2009)

## รายการอ้างอิง

- Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M. (1997). Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach. **IEEE Trans. on Circuit and Systems.** 44: 767-770.
- Han, L., Wang, J., and Howe, D. (2007). State-space average modelling of 6- and 12-pulse diode rectifiers. **The 12th European Conf. on Power Elect. and Appl.**
- Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C., and Cho, G.H. (1994). A Complete DC and AC Analysis of Three-Phase Controlled-Current PWM Rectifier Using CircuitD-Q Transformation. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 9(4): 390-396.
- Sudhoff, S.D., and Wasynczuk, O. (1993). Analysis and Average-Value Modeling of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems. **IEEE Trans. on Energy Conversion.** 8(1): 92-99.
- Udomsuk, S., Areerak, T., Areerak, K-L., and Areerak, K-N. Power Loss Identification of Separately Excited DC Motor Using Adaptive Tabu Search. **European Journal of Scientific Research,** vol. 60, no. 4, pp. 488-497.
- Chaijarumudomrung, K., Areerak K-N. and Areerak, K-L. (2011). "The Stability Study of AC-DC Power System with Controlled Rectifier Including Effect of Voltage Control". **European Journal of Scientific Research,** vol. 62, no. 4, pp. 463-480, October 2011.
- Uran, S. and Miro, M. (2000). State controller for buck converter. **EUROCON 2003 Ljubljana, Sloveni,** Vol. 1, pp. 381 - 385.
- Nguyen, V.M. and Lee C.Q. (1995). Tracking Control of Buck Converter Using Sliding-Mode with Adaptive Hysteresis. Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95 Record., 26th Annual IEEE. Vol. 2, pp. 1086-1093.
- Gamelin, T.W. (2000). Complex Analysis.
- Cupertino, F., Marinelli, M., Zanchetta, P. and Sumner, M. (2005). Modelling and Design of Shunt Active Power Filters using Genetic Algorithms. **European Conference on Power Electronics and Applications,** pp. 1-9.
- YI, L.K., ZHAO, J. and MA, D. (2007). Adaptive Backstepping Sliding Mode Nonlinear Control for Buck DC/DC Switched Power Converter. IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou, CHINA - May 30 to June 1, pp. 1198-1201.

- He, Y. and Luo, F.L. (2006). Sliding-mode control for dc–dc converters with constant switching frequency. **IEE Proc.-Control Theory Appl.**, Vol. 153, No. 1, January 2006
- Emadi, A. (2004). Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect.** 51(3): 661-668.
- Tsang, K.M., and Chan, W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck convertor. **IEE Electric Power Applications.** 152(4): 827-831.
- Ahmed, M. (2004). **SLIDING MODE CONTROL FOR SWITCHED MODE POWER SUPPLIES.** Ph.D. Master Thesis. Science (Technology) Lappeenranta University of Technology.
- Tan, S.-C. and Lai, Y.M. (2008). “Constant-frequency reduced-state sliding mode current controller for Cuk converters” **IET Power Electron.**, Vol. 1, No. 4, pp. 466–477.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552).1. **ปัญหาเชิงคำนวณ.** สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Raja Ismail, R. M. T., Ahmad, M. A. and Ramli, M. S. (2009). “Speed Control of Buck-converter Driven Dc Motor Based on Smooth Trajectory Tracking” **2009 Third Asia International Conference on Modelling & Simulation.**, pp. 97-101.

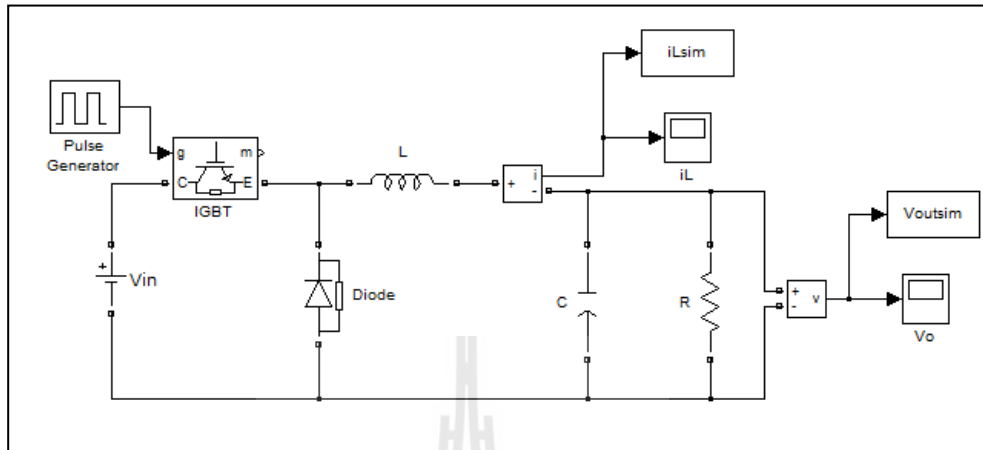




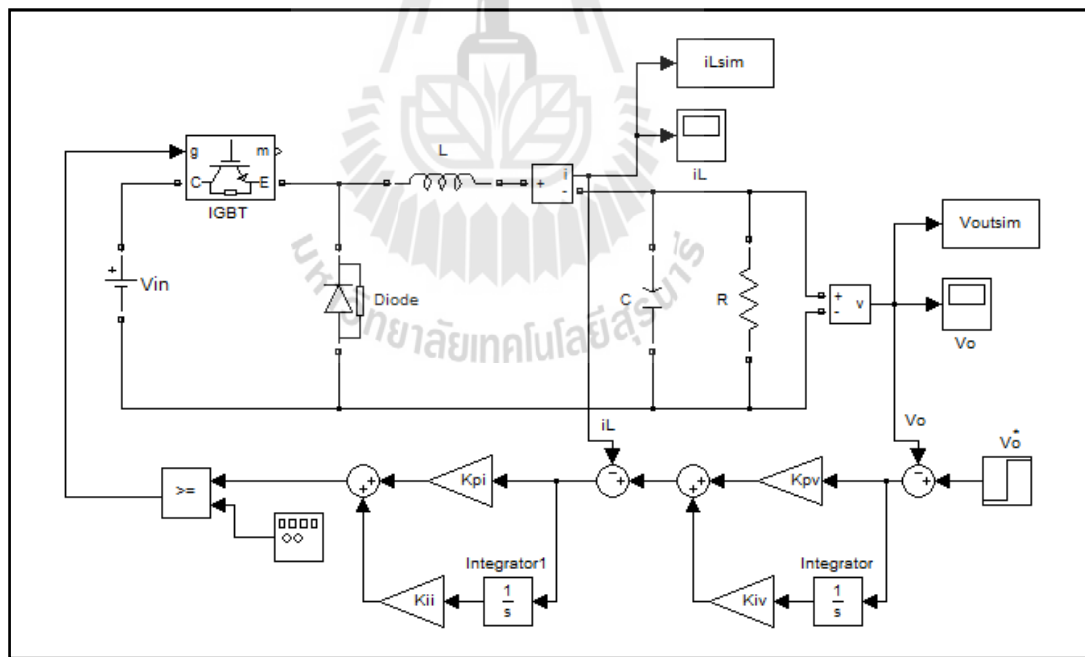
ภาคผนวก ก

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

## ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

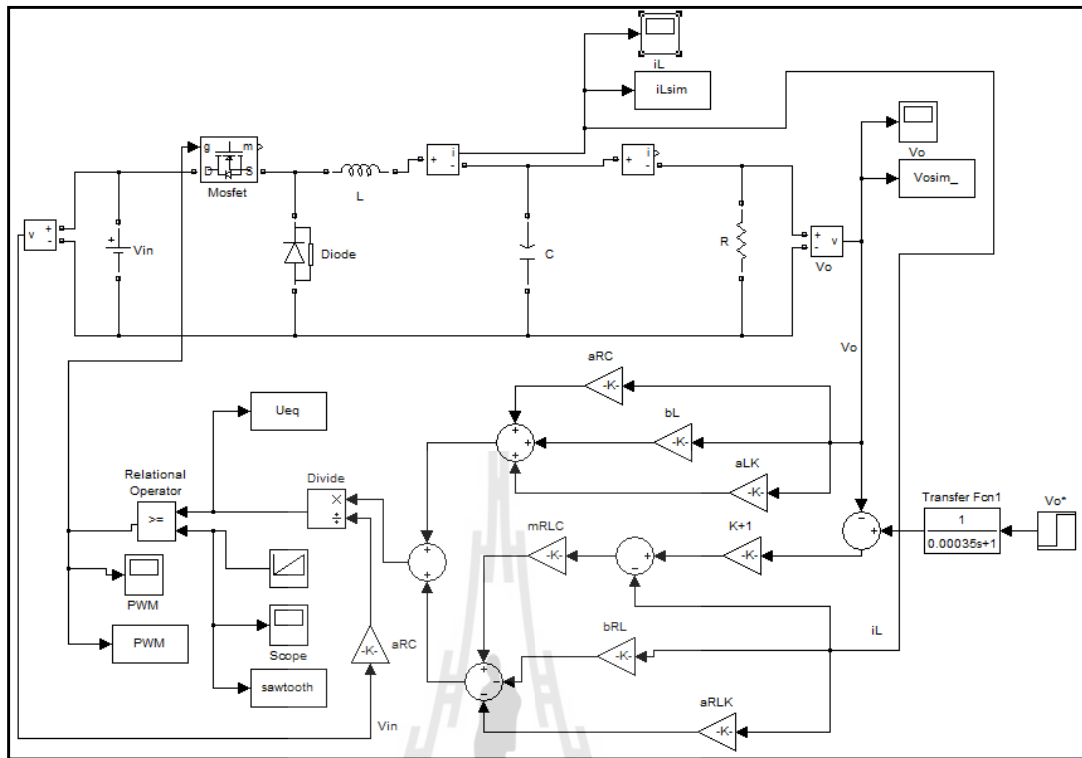


รูปที่ ก.1 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ ก.2 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีมีตัวควบคุมแบบพีไอ





รูปที่ ก.3 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีมีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิง

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the center of the page. It features a stylized figure of a person standing on a path that leads up to a large, ornate structure resembling a traditional Thai temple or stupa. The figure is holding a staff or a similar object. The entire logo is rendered in a light gray color.

ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหา  
สำหรับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

### ผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธีตามเชิงปรับตัวสำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ

ตารางที่ ข.1 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0034	0.0034	0.0033	0.0075	0.0029	0.0041
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0036	0.0038	0.0034	0.0037	0.0039	0.00368
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0036	0.0035	0.0033	0.0036	0.0034	0.00348
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0029	0.0034	0.0033	0.0055	0.0036	0.00374
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ						
ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$	ค่า $W$

ตารางที่ ข.2 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0080	0.0030	0.0033	0.0029	0.0065	0.00474
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0038	0.0036	0.0030	0.0030	0.0041	0.0035
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0033	0.0036	0.0042	0.0029	0.0033	0.00346
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0043	0.0055	0.0080	0.0033	0.0030	0.00482
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0028	0.0036	0.0031	0.0029	0.0031	0.0031

ตารางที่ ข.2 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ) (ต่อ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 60 คำตอบ						
ค่า $W$	0.0028	0.0034	0.0041	0.0031	0.0029	0.00326

ตารางที่ ข.3 การทดสอบค่าร้อยละเริ่มต้น (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 1						
ค่า $W$	0.0041	0.0030	0.0049	0.0028	0.0031	0.00358
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 2						
ค่า $W$	0.0059	0.0052	0.0030	0.0036	0.0039	0.00432
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 3						
ค่า $W$	0.0029	0.0034	0.0035	0.0033	0.0035	0.00332
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 4						
ค่า $W$	0.0038	0.0031	0.0035	0.0045	0.0035	0.00368
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 5						
ค่า $W$	0.0029	0.0041	0.0029	0.0030	0.0032	0.00322
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 6						
ค่า $W$	0.0033	0.038	0.030	0.0029	0.0032	0.00324

ตารางที่ ข.4 การทดสอบค่าปรับลดร้อยละ (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าตัวปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.1						
ค่า $W$	0.0031	0.0033	0.0041	0.0035	0.0028	0.00336
ค่าตัวปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.2						
ค่า $W$	0.0042	0.0038	0.0028	0.0033	0.0030	0.00342
ค่าตัวปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.3						
ค่า $W$	0.0035	0.0028	0.0033	0.0029	0.0034	0.00318

ตารางที่ ข.4 การทดสอบค่าปรับลดร้อยละ (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ) (ต่อ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4						
ค่า $W$	0.0028	0.0033	0.0035	0.0030	0.0030	0.00338
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5						
ค่า $W$	0.0032	0.0031	0.0029	0.0030	0.0035	0.00334
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.6						
ค่า $W$	0.0035	0.0030	0.0028	0.0030	0.0033	0.0032

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าว ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- จากตารางที่ ข.1 เมื่อพิจารณาจากค่า  $W$  สังเกตได้ว่าค่า  $W$  ในกรณีจำนวนคำตอบเริ่มต้น 50 คำตอบ มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.2 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง 50 คำตอบ มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.3 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5 มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.4 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

### ผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบจำนวนอนุภาค (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 10						
ค่า $W$	0.0032	0.0046	0.0052	0.0052	0.0031	0.00426
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 20						
ค่า $W$	0.0030	0.0032	0.0036	0.0043	0.0034	0.00350
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 30						
ค่า $W$	0.0030	0.0032	0.0032	0.0034	0.0039	0.00334

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบจำนวนอนุภาค (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ) (ต่อ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 40						
ค่า $W$	0.0031	0.0033	0.0031	0.0033	0.0033	0.00322
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 50						
ค่า $W$	0.0034	0.0033	0.0031	0.0032	0.0032	0.00324
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 60						
ค่า $W$	0.0033	0.0032	0.0036	0.0031	0.0030	0.00324

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่า $C_p$ เท่ากับ 0.25						
ค่า $W$	0.0032	0.0033	0.0031	0.0033	0.0039	0.00336
ค่า $C_p$ เท่ากับ 0.50						
ค่า $W$	0.0031	0.0036	0.0031	0.0031	0.0031	0.00320
ค่า $C_p$ เท่ากับ 0.75						
ค่า $W$	0.0032	0.0031	0.0032	0.0033	0.0030	0.00316
ค่า $C_p$ เท่ากับ 1.00						
ค่า $W$	0.0031	0.0036	0.0031	0.0036	0.0032	0.00332
ค่า $C_p$ เท่ากับ 0.25						
ค่า $W$	0.0031	0.0030	0.0034	0.0034	0.031	0.00320
ค่า $C_p$ เท่ากับ 1.50						
ค่า $W$	0.0035	0.0031	0.0034	0.0034	0.0040	0.00348
ค่า $C_p$ เท่ากับ 1.75						
ค่า $W$	0.0031	0.0034	0.0033	0.0034	0.0031	0.00326
ค่า $C_p$ เท่ากับ 2.00						
ค่า $W$	0.0030	0.0030	0.0032	0.0034	0.0033	0.00318

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  (สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ)

ครั้งที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่า $C_g$ เท่ากับ 0.25						
ค่า $W$	0.0033	0.0031	0.0030	0.0033	0.0030	0.00314
ค่า $C_g$ เท่ากับ 0.50						
ค่า $W$	0.0031	0.0038	0.0033	0.0032	0.0031	0.00330
ค่า $C_g$ เท่ากับ 0.75						
ค่า $W$	0.0030	0.0030	0.0034	0.0035	0.0032	0.00322
ค่า $C_g$ เท่ากับ 1.00						
ค่า $W$	0.0031	0.0034	0.0033	0.0034	0.0031	0.00326
ค่า $C_g$ เท่ากับ 1.25						
ค่า $W$	0.0033	0.0031	0.0030	0.0033	0.0030	0.00314
ค่า $C_g$ เท่ากับ 1.50						
ค่า $W$	0.0038	0.0034	0.0032	0.0040	0.0038	0.00364
ค่า $C_g$ เท่ากับ 1.75						
ค่า $W$	0.0038	0.0032	0.0035	0.0034	0.0033	0.00344
ค่า $C_g$ เท่ากับ 2.00						
ค่า $W$	0.0033	0.0037	0.0032	0.0032	0.0032	0.00332

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าว ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- จากตารางที่ ข.5 เมื่อพิจารณาจากค่า  $W$  สังเกตได้ว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบจำนวนอนุภาค ซึ่งกรณีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 40 มีค่า  $W$  น้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 40 คำตอบ
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.6 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  ซึ่งกรณี  $C_p$  เท่ากับ 0.75 มีค่า  $W$  น้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  เท่ากับ 0.75
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.7 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  ซึ่งกรณี  $C_g$  เท่ากับ 0.25 มีค่า  $W$  น้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  เท่ากับ 0.25

### ผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธีตามูเชิงปรับตัวสำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง

ตารางที่ ข.8 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง)

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000252	0.000251	0.000252	0.000274	0.000253	0.0002564
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า $W$	0.00026	0.000252	0.000258	0.000256	0.000258	0.0002568
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000253	0.000254	0.000254	0.000255	0.000252	0.0002536
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000255	0.000256	0.000252	0.000252	0.000251	0.0002532
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000251	0.000252	0.000251	0.000253	0.000251	0.0002516
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 60 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000251	0.000252	0.000252	0.000253	0.000251	0.0002518

ตารางที่ ข.9 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง)

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000262	0.000251	0.000253	0.000257	0.000256	0.0002558
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000258	0.000256	0.000253	0.000253	0.000253	0.0002546
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000253	0.000254	0.00026	0.000251	0.000253	0.0002542
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000255	0.000254	0.000254	0.000253	0.000252	0.0002536
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000251	0.000253	0.000251	0.000252	0.000252	0.0002518



ตารางที่ ข.9 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิง) (ต่อ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 60 คำตอบ						
ค่า $W$	0.000252	0.000252	0.000253	0.000253	0.000251	0.0002522

ตารางที่ ข.10 การทดสอบค่าร้อยละเริ่มต้น (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิง)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 1						
ค่า $W$	0.000257	0.000253	0.000255	0.000251	0.000253	0.0002538
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 2						
ค่า $W$	0.000254	0.000251	0.000253	0.000253	0.000253	0.0002528
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 3						
ค่า $W$	0.000252	0.000254	0.000253	0.000253	0.000253	0.000253
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 4						
ค่า $W$	0.000254	0.000252	0.000251	0.000253	0.000252	0.0002524
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 5						
ค่า $W$	0.000251	0.000252	0.000252	0.000253	0.000251	0.0002518
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 6						
ค่า $W$	0.000253	0.000253	0.000251	0.000253	0.000251	0.0002522

ตารางที่ ข.11 การทดสอบค่าปรับลดร้อยละ (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์ดิง)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าตัวปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.1						
ค่า $W$	0.000253	0.000253	0.000254	0.000253	0.000253	0.0002532
ค่าตัวปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.2						
ค่า $W$	0.000255	0.000254	0.000251	0.000253	0.000253	0.0002532
ค่าตัวปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.3						
ค่า $W$	0.000252	0.000254	0.000253	0.000253	0.000253	0.000253

ตารางที่ ข.11 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง) (ต่อ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4						
ค่า $W$	0.000251	0.000251	0.000253	0.000251	0.000252	0.0002516
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5						
ค่า $W$	0.000252	0.000253	0.000251	0.000251	0.000252	0.0002518
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.6						
ค่า $W$	0.000253	0.000252	0.000252	0.000253	0.000251	0.0002522

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าว ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- จากตารางที่ ข.8 เมื่อพิจารณาจากค่า  $W$  สังเกตได้ว่าค่า  $W$  ในกรณีจำนวนคำตอบเริ่มต้น 50 คำตอบ มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.9 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง 50 คำตอบ มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.10 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5 มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.11 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4 มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4

### ผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบจำนวนอนุภาค (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์ดิง)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 10						
ค่า $W$	0.000257	0.000254	0.000251	0.000255	0.000252	0.0002538
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 20						
ค่า $W$	0.000253	0.000253	0.000255	0.000252	0.000253	0.0002532
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 30						
ค่า $W$	0.000254	0.000253	0.000253	0.000252	0.000253	0.000253

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบจำนวนอนุภาค (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง) (ต่อ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 40						
ค่า $W$	0.000252	0.000253	0.000253	0.000253	0.000251	0.0002524
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 50						
ค่า $W$	0.000251	0.000253	0.000253	0.000252	0.000252	0.0002522
จำนวนอนุภาคเท่ากับ 60						
ค่า $W$	0.000253	0.000253	0.000252	0.000253	0.000252	0.0002526

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่า $C_p$ เท่ากับ 0.25						
ค่า $W$	0.000253	0.000253	0.000253	0.000254	0.000252	0.000253
ค่า $C_p$ เท่ากับ 0.50						
ค่า $W$	0.000253	0.000253	0.000252	0.000253	0.000253	0.0002528
ค่า $C_p$ เท่ากับ 0.75						
ค่า $W$	0.000253	0.000253	0.000251	0.000251	0.000251	0.0002518
ค่า $C_p$ เท่ากับ 1.00						
ค่า $W$	0.000252	0.000253	0.000252	0.000253	0.000251	0.0002522
ค่า $C_p$ เท่ากับ 1.25						
ค่า $W$	0.000252	0.000251	0.000253	0.000253	0.000252	0.0002522
ค่า $C_p$ เท่ากับ 1.50						
ค่า $W$	0.000254	0.000252	0.000253	0.000253	0.000253	0.000253
ค่า $C_p$ เท่ากับ 1.75						
ค่า $W$	0.000252	0.000255	0.000253	0.000253	0.000253	0.0002532
ค่า $C_p$ เท่ากับ 2.00						
ค่า $W$	0.000251	0.000253	0.000253	0.000253	0.000253	0.0002526

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  (สำหรับตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คิง)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่า $C_g$ เท่ากับ 0.25						
ค่า $W$	0.000251	0.000252	0.000251	0.000252	0.000251	0.0002514
ค่า $C_g$ เท่ากับ 0.50						
ค่า $W$	0.000253	0.000251	0.000253	0.000253	0.000252	0.0002524
ค่า $C_g$ เท่ากับ 0.75						
ค่า $W$	0.000251	0.000251	0.000252	0.000252	0.000252	0.0002516
ค่า $C_g$ เท่ากับ 1.00						
ค่า $W$	0.000253	0.000254	0.000253	0.000252	0.000254	0.0002532
ค่า $C_g$ เท่ากับ 1.25						
ค่า $W$	0.000251	0.000252	0.000251	0.000252	0.000253	0.0002518
ค่า $C_g$ เท่ากับ 1.50						
ค่า $W$	0.000254	0.000253	0.000253	0.000253	0.000253	0.0002532
ค่า $C_g$ เท่ากับ 1.75						
ค่า $W$	0.000252	0.000252	0.000254	0.000253	0.000253	0.0002528
ค่า $C_g$ เท่ากับ 2.00						
ค่า $W$	0.000253	0.000251	0.000253	0.000253	0.000253	0.0002526

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าว ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- จากตารางที่ ข.12 เมื่อพิจารณาจากค่า  $W$  สังเกตได้ว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบจำนวนอนุภาค ซึ่งกรณีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 50 มีค่า  $W$  น้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 50 คำตอบ
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.13 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  ซึ่งกรณี  $C_p$  เท่ากับ 0.75 มีค่า  $W$  น้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_p$  เท่ากับ 0.75
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.14 พบว่าค่า  $W$  ในกรณีการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  ซึ่งกรณี  $C_g$  เท่ากับ 0.25 มีค่า  $W$  น้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ  $C_g$  เท่ากับ 0.25

The logo of Sakon Nakhon University is a circular emblem. At the top, it features a stylized tower or spire. Below this, a silhouette of a person stands on a path that leads down to a central emblem. This central emblem consists of two stylized leaves or petals. The entire design is enclosed within a circular border containing the university's name in Thai script.

ภาคผนวก ก

โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

```

*****
ค.1 โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบตาม
โดยนายสาธิต ชลสถิตจำเริญ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2554
*****

โปรแกรม ATS.m

N=4; % N คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา
xlimit = [0.1347 73.5 16 200000]; % แถวที่ 1 ของ xlimit คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
0.0027 3.375 1.6 2000]; % แถวที่ 2 ของ xlimit คือ ขอบเขตล่างของพารามิเตอร์
for r=1:50
S(r,:)=(xlimit(1,:)-xlimit(2,:)).*rand(1,N)+xlimit(2,:);
End % สุ่มค่าตอบเริ่มต้นภายในขอบเขตของการค้นหา
ของ พารามิเตอร์แต่ละตัวจำนวน 50 ชุด
for k=1:size(S,1)
g=design1(S(k,1),S(k,2),S(k,3),S(k,4));
costvalue(k,1)=g;
end % ประเมินค่าตอบเริ่มต้นด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
[best_error,index]=min(costvalue); % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดใน costvalue
และเก็บไว้ใน best_error
S0=S(index,:); % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
น้อยที่สุดไว้ใน S0
max_count=round; % กำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา
best_neighbor=S0; % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
มีค่าน้อยที่สุด
neighbor_list=zeros(6,N); % รีเซตค่าใน neighbor_list
radius=5; % กำหนดรัศมีการค้นหาเริ่มต้น
Number_neighbor=50; % กำหนดการสุ่มค่าใกล้เคียง
overall_best_error=best_error; % ปรับค่า overall_best_error = best_error
overall_neighbor=best_neighbor; % ปรับค่า overall_neighbor = best_neighbor
n=0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการซ้ำของคำตอบ
t=0; % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt=0; % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list

```

```

ttt=0; % กำหนดค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
count=0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนรอบการค้นหา
n_backtracking=0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนการเรียกใช้กลไกการ
เดินย้อนรอย
tic; % เริ่มต้นคำนวณเวลาในการค้นหา
% เริ่มโปรแกรม ATS
t=t+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt=tt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt=ttt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
local(t,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22 ของ local
local(t,6)=best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ local
tabu_list(tt,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
tabu_list(tt,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
ของ tabu_list
tabu_list(tt,6)=best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ tabu_list
best_error_list(ttt,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
best_error_list(ttt,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
ของ best_error_list
best_error_list(ttt,6)=best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ
best_error_list
for count=1:max_count
    S1=random_neigh(Number_neighb,radius,xlimit,S0);
    % เรียกใช้โปรแกรม random_neigh เพื่อสุ่มค่าใกล้เคียง
    รอบคำตอบ S0 ภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบัน
    % อินพุตของโปรแกรมนี้คือ Number_neighb, radius,
    xlimit และ S0
    % เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง (S1) เท่ากับจำนวน
    Number_neighb
    [best_error1,best_neighbor1,best_error,best_neighbor]=objective1(S1,best_error,S0);
    % เรียกใช้โปรแกรม objective1 เพื่อประเมินค่า
    ใกล้เคียงที่สุ่มได้

```

```

% อินพุตของโปรแกรมนี้คือ S1, best_error และ S0
% เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1, best_error
% และ best_neighbor

neighbor_list(k,1:size(S0,2))=[best_neighbor1];

% เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มี
% ค่าน้อยที่สุดภายในปริภูมิการค้นหาล่าสุดไว้ใน
% คอลัมน์ที่ 1 และ 2 ของ neighbor_list

neighbor_list(k,size(S0,2)+1)=best_error1;

% เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด
% ภายในปริภูมิการค้นหาล่าสุดไว้ในคอลัมน์ที่ 3
% ของ neighbor_list

if (count>1)
if (tabu_list(count,6)>best_error)
n=n+1;
else
n=0;
end
end

% ตรวจสอบการซ้ำของคำตอบโดยการเปรียบเทียบ
% ระหว่าง best_error1 และ best_error ถ้ามีการซ้ำของ
% คำตอบ ให้ปรับเพิ่มค่า n

tt=tt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
tabu_list(tt,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
tabu_list(tt,2:5)=best_neighbor1; % เก็บค่า best_neighbor1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
% ของ tabu_list
tabu_list(tt,6)=best_error1; % เก็บค่า best_error1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ tabu_list
ttt=ttt+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
best_error_list(ttt,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
best_error_list(ttt,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
% ของ best_error_list
best_error_list(ttt,6)=best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ best_error_list

```



```

disp([count tabu_list(count,6) best_error n n_backtracking ])
                                % แสดงค่า count, tabu_list(count,6), best_error, n
                                และ n_backtracking
                                % เริ่มกลไกการปรับลดรัศมี

if best_error<=0.5&& radius>1e-3
radius=radius/1.3;
end                                % เงื่อนไขที่ 1) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.5
                                ให้ทำการปรับลดรัศมี

if best_error<=0.05&& radius>1e-3
radius=radius/1.3;
end                                % เงื่อนไขที่ 2) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.05
                                ให้ทำการปรับลดรัศมี

if best_error<=0.01&& radius>1e-3
radius=radius/1.3;
end                                % เงื่อนไขที่ 3) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.01
                                ให้ทำการปรับลดรัศมี

if best_error<=0.008&& radius>1e-3
radius=radius/1.3;
end                                % เงื่อนไขที่ 4) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.008
                                ให้ทำการปรับลดรัศมี

if (best_error<0.0001)            % ตรวจสอบเกณฑ์ยุติการค้นหา เมื่อ best_error < 0.0001
t=t+1;                            % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt=tt+1;                          % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
disp([count best_error overall_best_error])
                                % แสดงค่า count, best_error และ overall_best_error

local(t,1) = count;                % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2) = tabu_list(count,2);   % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 2 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 2 ของ local

local(t,3) = tabu_list(count,3);   % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 3 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 3 ของ local

local(t,4) = tabu_list(count,4);   % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 4 ของcount ไว้ใน

```

```

                                คอลัมน์ที่ 4 ของ local
local(t,5) = tabu_list(count,5);    % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 5 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 5 ของ local
local(t,6) = tabu_list(count,6);    % เก็บค่า tabu_list ของคอลัมน์ที่ 6 ของcount ไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 6 ของ local
break;                            % ยุติการค้นหา
end
                                % เริ่มกลไกการเดินย้อนรอย
if n>=100                          % ถ้าจำนวนการซ้ำของคำตอบเท่ากับ 100
n_backtracking=n_backtracking+1; % เพิ่มค่า n_backtracking

TEMP=tabu_list(count-3:count+1,:);
                                % จัดลำดับ rank ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
                                ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนมีการเรียกใช้กลไกย้อนรอย
                                การค้นหา
                                % TEMP จะเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
                                ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนทำการจัดลำดับ
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));
                                % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(5,:) = TEMP(INDEX,:);    % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และ
                                ค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 5 ใน RANK
TEMP(INDEX,6)=0;            % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                ด้วยศูนย์
                                % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                เพียง 4 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));
                                % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(4,:) = TEMP(INDEX,:);    % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                                พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 4 ใน RANK

```

TEMP(INDEX,6)= 0;	% แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP ด้วยศูนย์ % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 3 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));	% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(3,:) = TEMP(INDEX,:);	% จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 3 ใน RANK
TEMP(INDEX,6)= 0;	% แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP ด้วยศูนย์ % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 2 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));	% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(2,:) = TEMP(INDEX,:);	% จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 2 ใน RANK
TEMP(INDEX,6)= 0;	% แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP ด้วยศูนย์ % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 1 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));	% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(1,:) = TEMP(INDEX,:);	% จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 1 ใน RANK
TEMP(INDEX,6)= 0;	% แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP ด้วยศูนย์ % ขณะนี้ใน TEMP จะไม่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้ทำการจัดลำดับอีกต่อไป



```

time=toc; % ยุติการคำนวณเวลาการค้นหา
count % แสดงจำนวนรอบการค้นหา
best_error % แสดงค่า best_error
Kpe=best_neighbor(1) % แสดงค่า Kpe
Kie=best_neighbor(2) % แสดงค่า Kie
Kpd=best_neighbor(3) % แสดงค่า Kpd
Kid=best_neighbor(4) % แสดงค่า Kid
figure(1)
plot([0:1:count],best_error_list(:,6)) % พล็อตกราฟระหว่าง count กับ best_error_list
xlabel('number of cycle') % แสดงชื่อแกน x เป็น number of cycle
ylabel('W') % แสดงชื่อแกน y เป็น W

โปรแกรม random_neigh.m
function S1 = random_neigh(Number_neighb, radius, xlimit, S0)
% โปรแกรม random_neigh เป็นโปรแกรมสุ่มค่า
ใกล้เคียงรอบคำตอบ S0
% อินพุตของโปรแกรม คือ Number_neighb, radius,
xlimit และ S0
% เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง S1 จำนวนเท่ากับ
Number_neighb
for u = 1: Number_neighb
for k = 1: size(xlimit,2)
S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
% ทำการสุ่มค่าใกล้เคียงโดยเรียกใช้โปรแกรม rand1
โดยให้ทำการสุ่มค่าในช่วง -1 ถึง 1
while ( S1(u,k)>xlimit(1,k) | S1(u,k)<xlimit(2,k) )
% ค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้จะต้องอยู่ในขอบเขตบนและ
ขอบเขตล่างของค่าพารามิเตอร์ ถ้าค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้
มีค่าเกินขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่กำหนดให้ทำการ
สุ่มค่าใกล้เคียงใหม่
S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));

```

```

        end
    end
end
return % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน

โปรแกรม rand1.m
function x = rand1(a,b) % โปรแกรม rand1 เป็นโปรแกรมสุ่มค่าพารามิเตอร์
                        % ในช่วงที่กำหนด
                        % อินพุตของโปรแกรม คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
                        a และขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ b
                        % เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ผลของการสุ่ม
                        ค่าพารามิเตอร์ในช่วง a ถึง b
x = a+rand*(b-a); % สุ่มค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยความสัมพันธ์ a rand b
return % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน

โปรแกรม objective1.m
function [best_error1, best_neighbor1,best_error, best_neighbor]=objective1(S1, best_error,S0)
                        % โปรแกรม objective1 เป็นโปรแกรมประเมินค่า
                        ใกล้เคียงที่สุ่มได้รอบ S0
                        % อินพุตของโปรแกรม คือ S1, best_error และ S0
                        % เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1, best_error,
                        และ best_neighbor
error = []; % ตัวแปร error สำหรับรองรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                        ของค่าใกล้เคียงที่ได้จากการสุ่ม
for k = 1: size(S1,1)
    g = design(S1(k,1),S1(k,2),S1(k,3),S1(k,4));
                        % ประเมินค่าใกล้เคียงใน S1 ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                        ในโปรแกรม design
    error(k,1) = g; % เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าใกล้เคียงทั้งหมด
end

```

```

[best_error1,index] = min(error); % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในบรรดาค่า
                                  ใกล้เคียง และเก็บไว้ใน best_error1
best_neighbor1 = S1(index,:); % เก็บค่าพารามิเตอร์ของค่าใกล้เคียงที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน
                               วัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดไว้ใน best_neighbor1

if best_error1<best_error
best_error=best_error1;
% ปรับค่า best_error ถ้า best_error1 < best_error
โดยแทนค่า best_error ด้วย best_error1

best_neighbor=S1(index,:); % แทนค่าพารามิเตอร์ best_neighbor ด้วย S1(index,:)
else % ไม่เช่นนั้นแล้ว
best_neighbor = S0; % แทนค่า best_neighbor ด้วย S0
end
return % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน

```

โปรแกรม *design.m*

```

function g=design1(var1,var2,var3,var4)
% โปรแกรมรับอินพุต 4 ค่า คือ ฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพของตัวควบคุมแบบพีไอ
% เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ค่าบ่งบอกถึงสมรรถนะของตัวควบคุม
% กำหนดตัวแปรเริ่มต้นของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

Kpv_a = var1;
Kiv_a = var2;
Kpi_a = var3;
Kii_a = var4;

% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม

R= 30;
L= 15e-3;
C= 150e-6;
Vi= 30;

```





```

[y,t]=lsim(sys,u,t);           % จำลองสถานการณ์ด้วย lsim โดยเก็บเอาต์พุตไว้ที่ y และ t
V_out=y(:,1);
%%%%%%%% จำนวนค่า overshoot ของระบบ %%%%%%%%%
PO=abs(S2-max(V_out));
%%%%%%%% กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับจำนวนค่า rise time ของระบบ %%%%%%%%%
char=[V_out,t];
t0=((length(t))/2);
Vo_tr=.9*S2;                  % พิจารณา rise time ที่ 90% ของ S2
ts=0;
tr=0;
%%%%%%%% จำนวนค่า rise time ของระบบ %%%%%%%%%
for i=1:size(char,1)
    c=char(i,1);
    if c >= Vo_tr
        tr=char(i,2)-1;
    end
    if tr ~= 0
        break;
    end
end
%%%%%%%% จำนวนค่า setting time ของระบบ %%%%%%%%%
for i=size(char,1):-1:1
    c=char(i,1);
    if c <= S2-1e-2 | c >= S2+1e-2      % กำหนดค่าช่วง error ที่ยอมรับได้ของการคู่เข้า
        ts=char(i,2)-1;
    end
    if ts ~= 0
        break;
    end
end
a=(1/xxx);b=(1/xxx);c=(1/xxx);      % กำหนดค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับจูน
                                       โดยค่า xxx คือค่า PO, tr, ts ที่ได้จากการ step response

```

เพื่อใช้สำหรับทำให้เป็น p.u.

```
w=a*PO+b*tr+c*ts;
```

```
g=w;
```

```
return
```

% กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน





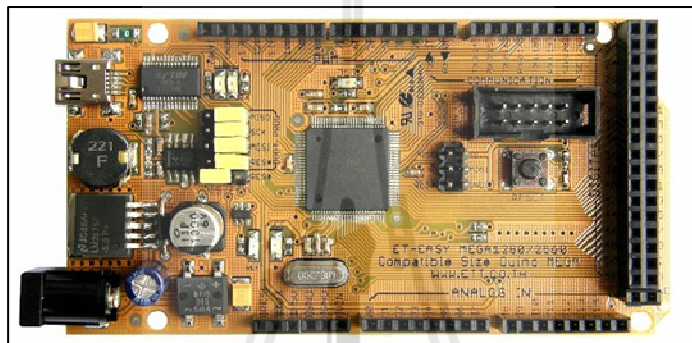
ภาคผนวก ง

ความรู้พื้นฐานของบอร์ด AVR และการ์ด DSP

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เป็นหนึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ผลิตโดยบริษัท ATMEL โดยจัดเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพและความสามารถสูง ซึ่งจะแบ่งออกเป็นหลายรุ่น เพื่อรองรับความต้องการที่แตกต่างของผู้ใช้งาน โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATMEGA 1280 เนื่องจากเป็นชุดบอร์ด AVR ที่พัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C++ ของ Arduino ของทางบริษัท อีทีที เป็นผู้จัดทำ โดยใช้ชื่อว่า ET-EASY MEGA1280 แสดงได้ดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280

### คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ด ET-EASY MEGA1280

- ใช้ ATMEGA1280 เป็น MCU ประจำบอร์ด
- สถาปัตยกรรมแบบ RISC
  - มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว
  - ใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz ในการประมวลผล
- หน่วยความจำ
  - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโปรแกรม 128 กิโลไบต์
  - หน่วยความจำแบบ EEROM ขนาด 4 กิโลไบต์
  - หน่วยความจำชนิด SRAM ขนาด 4 กิโลไบต์
- คุณสมบัติการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
  - มีตัวตั้งและตัวนับเวลาขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานได้ 2 โหมด
  - มีตัวตั้งและตัวนับเวลาขนาด 16 บิต จำนวน 4 ตัว ที่สามารถแยกการทำงานได้ 3 โหมด คือ prescaler, compare และ capture
  - มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต

- มีตัวแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
- มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งข้อมูลได้จำนวน 4 พอร์ต
- เชื่อมประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น ส่งข้อมูลแบบเรียงไปด้
- มีตัวตั้งเวลาแบบวอตซ์ค็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
- อินพุต / เอาต์พุต และตัวถัง
  - มีขาของอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 พิน
  - ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา

#### การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีมอดูลสำหรับแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล หรือ ADC (analog to digital converter) ซึ่งมีความละเอียด 10 บิต โดยแรงดันต้อง ไม่เกิน 5 V หมายถึงเมื่อรับสัญญาณในช่วงของแรงดันดังกล่าวแล้วจะทำการแปลงดิจิทัล ตัวเลขที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1024 สำหรับมอดู ADC มี 16 ช่องอินพุตสัญญาณ คือ ADC0 – ADC15 สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แค่ 2 ช่องสัญญาณ คือ ADC0 และ ADC1 สำหรับรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงพันแบบบักก์ และรับสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ โดยสมการที่ใช้ในการแปลงจากสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล แสดงได้ดังสมการที่ (ง-1)

$$ADC = \frac{V_{IN} \times 1024}{V_{REF}} \quad (ง-1)$$

โดยที่  $V_{IN}$  คือ แรงดันด้านขาอินพุต

$V_{REF}$  คือ แรงดันอ้างอิง (จะถูกกำหนดไว้ที่ 5 V ตามคุณสมบัติของบอร์ด)

#### การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR แบ่งออกเป็น 3 โหมด คือ

- Fast PWM Mode เป็นการสร้างสัญญาณ PWM ความถี่สูงด้วยวิธีการแบบสโลปเดียว (single-slope) เหมาะสำหรับนำไปใช้งานทางด้านสวิตชิ่ง power regulation, rectification เป็นต้น ข้อเสียสำหรับการใช้โหมดนี้คือ ไม่สามารถปรับความถี่ได้ตามที่ต้องการ
- Phase Correct PWM Mode เป็นการสร้างสัญญาณ PWM ความละเอียดสูง ด้วยวิธีการแบบสโลปคู่ (dual-slope) เหมาะสำหรับนำไปใช้งานทางด้านการควบคุมมอเตอร์ สำหรับข้อเสียจะเหมือนกับ Fast PWM Mode ที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

- Phase and Frequency Corrent PWM Mode เป็นการสร้างเฟสและความถี่ของสัญญาณ PWM ซึ่งเป็นโหมดที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยความถี่ของสัญญาณสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ง-2) ดังนี้

$$f_{PWM} = \frac{f_{clk}}{2 \times N \times TOP} \quad (ง-2)$$

โดยที่  $N$  คือ ค่าปริสเกลเลอร์ ซึ่งมีค่าเป็น 1, 8, 64, 256, และ 1024

$TOP$  คือ ค่าที่กำหนดให้กับรีจิสเตอร์ ICR1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต

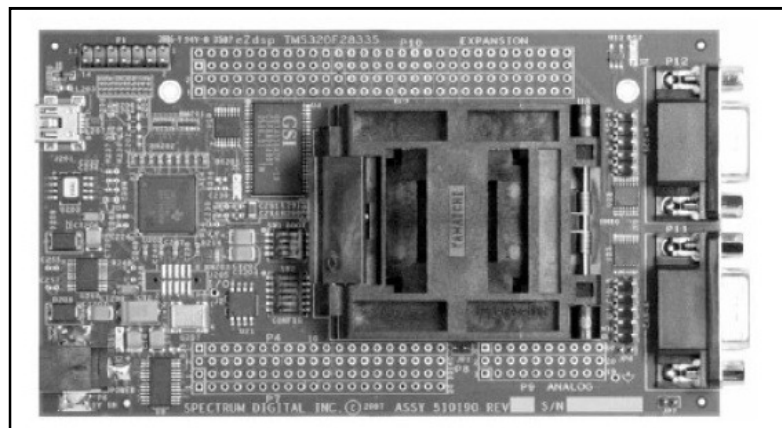
$f_{clk}$  คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ในที่นี้ใช้ 16 MHz

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความถี่การสวิตช์ 10 kHz ดังนั้น จากสมการที่ (ง-2) จะสามารถคำนวณค่าสำหรับป้อนให้กับรีจิสเตอร์ ICR1 เพื่อให้ได้ความถี่การสวิตช์ 10 kHz ดังนี้

$$TOP = \frac{16 \times 10^6}{2 \times 1 \times 10 \times 10^3}$$

#### ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335

การสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่มีตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิงเป็นตัวควบคุมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้การ์ด DSP มาเป็นตัวประมวลผลสำหรับสร้างสัญญาณควบคุม เนื่องจากมีความเร็วในการประมวลผลของซีพียูเท่ากับ 150 MHz ซึ่งการ์ด DSP ดังกล่าว เป็นของบริษัท Texas Instruments เบอร์ eZdsp™ F28335 แสดงได้ดังรูปที่ ง.2 ซึ่งลักษณะที่สำคัญของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ eZdsp™ F28335 มีดังต่อไปนี้



รูปที่ ง.2 การ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335

### คุณสมบัติที่สำคัญของการ์ด DSP เบอร์ eZdsp™ F28335

- มี TMS320F28335 สำหรับประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
  - ใช้สัญญาณนาฬิกา 150 MHz ในการประมวลผล หรือ 6.67 ns ต่อหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา
  - หน่วยประมวลผลกลางประสิทธิภาพสูงขนาด 32 บิต ใช้สถาปัตยกรรมบัสแบบฮาร์วาร์ด (Harward Bus Architecture) ปฏิบัติการแบบ 16×16 และ 32×32 มีกระบวนการตอบสนองอินเทอร์รัพท์ที่รวดเร็ว
- หน่วยความจำ
  - หน่วยความจำ RAM ขนาด 68 กิโลไบต์ในตัวชิพ
  - หน่วยความจำแบบ Flash ขนาด 512 กิโลไบต์ในตัวชิพ
  - หน่วยความจำชนิด SRAM ขนาด 256 กิโลไบต์นอกตัวชิพ
- คุณสมบัติการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
  - ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลความละเอียด 12 บิตจำนวน 16 ช่องสัญญาณอินพุต
  - ชุดติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมหรือ RS-232
  - ตัวรับสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ (Quadrature Encoder Pulse)
  - Multichannel Buffered Serial Port (McBSP) With SPI Mode
  - รองรับสัญญาณอินเทอร์รัพท์จากอุปกรณ์รอบข้างจำนวน 45 แหล่ง
  - มี PWM จำนวน 16 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 32 บิต
- อินพุต / เอาต์พุต
  - มีขาของอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 96 พิน

### การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล

การ์ด DSP มีมอดูสำหรับแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล หรือ ADC (analog to digital converter) ซึ่งมีความละเอียด 12 บิต โดยแรงดันต้องไม่เกิน 3.3 V หมายถึงเมื่อรับสัญญาณในช่วงของแรงดันดังกล่าวแล้วจะทำการแปลงดิจิทัล ตัวเลขที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 4095 สำหรับมอดู ADC มี 16 ช่องอินพุตสัญญาณ โดยจะแบ่งเป็น 2 ชุดคือ (ADCA0 - ADCA7) และ (ADCB0 - ADCB7) สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แค่ 3 ช่องสัญญาณ คือ ADCA5 - ADCA7 (ADCA5 สำหรับรับสัญญาณแรงดันอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรแปลงผันแบบบักก์, ADCA6 สำหรับรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ และ ADCA7 รับสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ) โดยสมการที่ใช้ในการแปลงจากสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล แสดงได้ดังสมการที่ (ง-3)

$$ADC = \frac{V_{IN} \times 4095}{V_{REF}} \quad (\text{ง-3})$$

โดยที่  $V_{IN}$  คือ แรงดันด้านขาอินพุต  
 $V_{REF}$  คือ แรงดันอ้างอิง (จะถูกกำหนดไว้ที่ 3.3 V ตามคุณสมบัติของบอร์ด)







ภาคผนวก จ

โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino และ DSP

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

*****
จ.1 โปรแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR
โดยนายสาธิต ชลสถิตจำเริญ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2554
*****

#include <avr/io.h>

int EN = 11;
int duty_cycle =0;

void setup()
{
    %%% กำหนดโหมดของการสร้างสัญญาณ PWM %%%
    pinMode(EN, OUTPUT);
    TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
    TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
    TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
    TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
    TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
    ICR1 = 800;
    OCR1A = 0;
    OCR1B = 0;
    TCNT1=0;
}

void loop()
{
    duty_cycle= 66.667;          % การทดสอบที่วัฏจักรหน้าที่มีค่าเท่ากับ 66.667 %
    OCR1A =8*duty_cycle ;
}

```

```

*****
จ.2 โปรแกรมการสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR
โดยนายสาธิต ชลสถิตจำเริญ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2554
*****

#include <avr/io.h>

#include <avr/interrupt.h>

int EN = 11;

float setpoint=0;

%%% กำหนดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แรงดันไฟฟ้า %%%
//////////////////// Voltage //////////////////////

float err_v,Upv,Uiv,Uiv_1,Upi_v;

//float kp2=0.0027;

//float kiv2=3.3750;

%%% กำหนดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์กระแสไฟฟ้า %%%
//////////////////// Current //////////////////////

float err_i,Upi,Uii,Uii_1,Upi_i;

//float kpi2=1.2;

//float kii2=2250;

int Upi_max=800,Upi_min=0;

%%% กำหนด sampling time %%%

float Ts=0.00043; // ms

%%% กำหนดพินสำหรับรับสัญญาณจากชุดตรวจจذب %%%

int voltage_sensor = 1;

int current_sensor = 0;

%%% กำหนดตัวแปรสำหรับรับสัญญาณจากชุดตรวจจذبมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 %%%

int Read_Voltage=0, Read_Current=0,ii=0;

float Vo=0, IL=0;

void setup()
{
%%% กำหนดโหมดการสร้างสัญญาณ PWM %%%

pinMode(EN, OUTPUT);

TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);

```

```

TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
ICR1 = 800;
OCR1A = 0;
OCR1B = 0;
TCNT1=0;
}
void loop()
{
  setpoint=400;
  while(1)
  {
    %%% รับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ารวมทั้งปรับคูนให้เป็นค่าจริง %%%
    Read_Voltage = analogRead(voltage_sensor);
    Read_Current = analogRead(current_sensor);
    Vo = (((float) Read_Voltage)*1211/1023)-2)*1.97;
    IL = (((float) Read_Current)*6170/1023);
    %%% เข้าสู่ลูปแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุมแบบพีไอ %%%
    err_v=(setpoint-V2)/10;
    Upv=kpv2*err_v;
    Uiv=kiv2*Ts*err_v+Uiv_1;
    Upi_v=Upv+Uiv;
    if (Upi_v >= Upi_max)
    {
      Upi_v=Upi_max;
    }
    else if (Upi_v <=Upi_min)
    {
      Upi_v=Upi_min;
    }
  }
}

```

```

%%% เข้าสู่ลูประแสไฟฟ้าของตัวควบคุมแบบพีไอ %%%
err_i=Upi_v-(I2)/1000;
Upi=kpi2*err_i;
Uii=kii2*Ts*err_i+Uii_1;
Upi_i=Upi+Uii; // PI value
if (Upi_i >= Upi_max)
{
Upi_i=Upi_max;
}
else if (Upi_i <=Upi_min)
{
Upi_i=Upi_min;
}
%%% ส่งค่า PWM ไปยังพินที่ 11 %%%
OCR1A = Upi_i;
Uiv_1=Uiv;
Uii_1=Uii;

%%%ตรวจสอบว่าถึงค่าที่กำหนดที่จะเรียกฟังก์ชัน PI2 หรือยัง (ฟังก์ชันสำหรับปรับเปลี่ยนระดับแรงดัน
ไฟฟ้าเอาต์พุต ) %%%
if (ii > 20000)
{
setpoint=600;
call_PI2();
}
else {
ii++;
}
}
}

```

```

%%% เรียกใช้ฟังก์ชัน PI2 %%%

void call_PI2()
{
while(1)
{
%%% รับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ารวมทั้งปรับอุณหภูมิเป็นค่าจริง %%%

Read_Voltage = analogRead(voltage_sensor);
Read_Current = analogRead(current_sensor);
Vo = (((float) Read_Voltage)*1211/1023)-2)*1.97;
IL = (((float) Read_Current)*6170/1023);
%%% เข้าสู่ลูปแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุมแบบพีไอ %%%

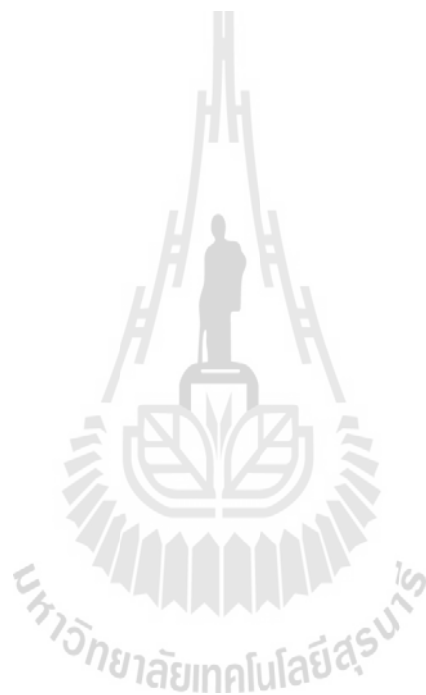
err_v=(setpoint-V2)/10;
Upv=kpv2*err_v;
Uiv=kiv2*Ts*err_v+Uiv_1;
Upi_v=Upv+Uiv;

if (Upi_v >= Upi_max)
{
Upi_v=Upi_max;
}
else if (Upi_v <=Upi_min)
{
Upi_v=Upi_min;
}
%%% เข้าสู่ลูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมแบบพีไอ %%%

err_i=Upi_v-(I2)/1000;
Upi=kpi2*err_i;
Uii=kii2*Ts*err_i+Uii_1;
Upi_i=Upi+Uii; // PI value
if (Upi_i >= Upi_max)
{
Upi_i=Upi_max;
}
}
}

```

```
}  
else if (Upi_i <=Upi_min)  
{  
Upi_i=Upi_min;  
}  
%%% ส่งค่า PWM ไปยังพินที่ 11 %%%  
OCR1A = Upi_i;  
Uiv_1=Uiv;  
Uii_1=Uii;  
}  
}  
}
```



```

*****
จ.3 โปรแกรมการสร้างตัวควบคุมแบบโหมดสไลด์คิงด้วยชุดการ์ด DSPเบอร์ eZdsp™ F28335
โดยนายสาธิต ชลสถิตจำเริญ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2554
*****

#include "DSP28x_Project.h"

#include "DSP2833x_Device.h"

#include "DSP2833x_Examples.h"

#include "math.h"

%%% กำหนดค่าเริ่มต้นของฟังก์ชันต่างๆ %%%

#if (CPU_FRQ_150MHZ)

#define ADC_MODCLK 0x3

#endif

#if (CPU_FRQ_100MHZ)

#define ADC_MODCLK 0x2

#endif

#define ADC_CKPS 0x0

#define ADC_SHCLK 0x1

#define AVG 1000

#define ZOFFSET 0x00

#define BUF_SIZE 1024

%%% ประกาศฟังก์ชันสำหรับใช้งาน %%%

void InitEPwm1Example(void);

void InitEPwm2Example(void);

void InitEPwm3Example(void);

interrupt void epwm1_isr(void);

interrupt void epwm2_isr(void);

interrupt void epwm3_isr(void);

interrupt void cpu_timer0_isr(void);

void Gpio_select(void);

void CalProgramSMC2(void);

%%% กำหนดตัวแปรสำหรับใช้งาน PWM %%%

Uin32 EPwm1TimerIntCount;

```



```

Uint32 EPwm2TimerIntCount;
Uint32 EPwm3TimerIntCount;
Uint16 EPwm1_DB_Direction;
Uint16 EPwm2_DB_Direction;
Uint16 EPwm3_DB_Direction;

%%%% กำหนดตัวแปรที่จำเป็นสำหรับเขียนโปรแกรม %%%%
float adc_0,adc_1,adc_2,dac_2=0;
float va,vb,vc,ii=0,jun;
int Duty;
float V2,V1,I1,Vin,Vo,IL,setpoint=0,R=30,L=0.015,C=0.000150;
float w,x,y,z,Down,Ueq;
float aC,bL,aLK,aRC,MRLC,bRL,aRLK;
%%%% ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม %%%%
//float a=3,b=25,M=2600,K=2000;
%%%% ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS %%%%
//float a=2.8789,b=90.2589,M=7018.8,K=4936.9;
%%%% ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี PSO %%%%
float a=2.9380,b=56.1244,M=7114,K=5518;
%%%% กำหนดค่า dead-time ของสัญญาณ PWM %%%%
#define EPWM1_MAX_DB 0x03FF
#define EPWM2_MAX_DB 0x03FF
#define EPWM3_MAX_DB 0x03FF

#define EPWM1_MIN_DB 0
#define EPWM2_MIN_DB 0
#define EPWM3_MIN_DB 0
#define DB_UP 1
#define DB_DOWN 0

void main(void)
{
InitSysCtrl();

```

```

EALLOW;
SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK;
EDIS;
Gpio_select();
InitEPwm1Gpio();
InitEPwm2Gpio();
InitEPwm3Gpio();
DINT;
InitPieCtrl();
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;
InitPieVectTable();
EALLOW;
PieVectTable.TINT0 = &cpu_timer0_isr;
EDIS
InitEPwm1Example();
InitEPwm2Example();
InitEPwm3Example();
InitCpuTimers();

#if (CPU_FRQ_150MHZ)
%%% กำหนดตัวปรับคูนเพื่อให้ได้สัญญาณ PWM ที่ความถี่ 10kHz %%%%
ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 10, 2500);
#endif
#if (CPU_FRQ_100MHZ)
ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 100, 50000);
#endif
CpuTimer0Regs.TCR.all = 0x4001;
// Configure GPIO32 as a GPIO output pin
%%% กำหนดให้ GPIO32 และ 79 เป็นเอาต์พุต %%%%
EALLOW;
GpioCtrlRegs.GPBMUX1.bit.GPIO32 = 0;

```

```

GpioCtrlRegs.GPBDIR.bit.GPIO32 = 1;
GpioCtrlRegs.GPCMUX1.bit.GPIO79 = 0;
GpioCtrlRegs.GPCDIR.bit.GPIO79 = 1;
EDIS;
%%%% กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการใช้งาน ADC A0 – A7 และ B0 – B7 %%%%
InitAdc();
AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = ADC_SHCLK;
AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = ADC_CKPS;
AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0;
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 1;
AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_OVRD = 1;
AdcRegs.ADCMAXCONV.bit.MAX_CONV1=0xf;
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; //A0
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; //A1
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; //A2
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x3; //A3
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV04 = 0x4; //A4
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV05 = 0x5; //A5
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV06 = 0x6; //A6
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV07 = 0x7; //A7
AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV08 = 0x8; //B0
AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV09 = 0x9; //B1
AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV10 = 0x0A; //B2
AdcRegs.ADCCHSELSEQ3.bit.CONV11 = 0x0B; //B3
AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV12 = 0x0C; //B4
AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV13 = 0x0D; //B5
AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV14 = 0x0E; //B6
AdcRegs.ADCCHSELSEQ4.bit.CONV15 = 0x0F; //B7
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;
AdcRegs.ADCTRL2.all = 0x2000;
IER |= M_INT1;

```

```

PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1;

EINT;

ERTM;

EALLOW;

SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0;

EDIS;

EALLOW;

SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1;

EDIS

EINT;

ERTM;

%%%% คำนวณค่าคงเพื่อลดเวลาในการทำงานของโปรแกรม %%%%

aC=a*C;

bL=b*L;

aLK=a*L*K;

aRC=a*R*C;

MRLC=M*R*L*C;

bRL=b*R*L;

aRLK=a*R*L*K;

%%%% กำหนดค่า setpoint ที่ 10 V %%%%

setpoint = 10;

%%%% เข้าสู่การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบโหมคสไลด์คั้ง %%%%

for(;;)

{

%%%% รับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากชุดตรวจจับ %%%%

    adc_2 = (AdcRegs.ADCRESULT5>>4);           // reading current values Ia

    adc_1 = (AdcRegs.ADCRESULT6>>4);           // reading current values Ib

    adc_0 = (AdcRegs.ADCRESULT7>>4);           // reading speed values

%%%% ปรับคุณค่าที่ได้จาก ADC ให้เป็นค่าจริง %%%%

    Vin=30*(adc_2*3.3/4095)-0.05645;

    Vo=30*(adc_1*3.3/4095)-0.05645;

    IL=(adc_0*1.24*3.3/4095)+0.0223;

```

```

%%%% เข้าสู่รูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมแบบพีโอ %%%
    w=(bL+aLK+aRC)*Vo;
    x=((setpoint-Vo)*(K+1))-IL)*MRLC;
    y=(-bRL-aRLK)*IL;
    z=(w+(x+y));
    Down = aRC*Vin;
    Ueq=z/Down;
%%%% ส่งสัญญาณ PWM ออกทาง Pwm1 %%%
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = Ueq;
    ii++;
%%%% ตรวจสอบว่าถึงค่าที่กำหนดแล้วหรือไม่ เพื่อที่จะเปลี่ยนค่า setpoint ค่าถัดไป %%%
    if(ii>220000)
    {
        setpoint = setpoint16;
%%%% เรียกใช้ฟังก์ชัน CalProgramSMC2(); %%%
        CalProgramSMC2();
    }
}

%%%% เข้าสู่ฟังก์ชัน CalProgramSMC2(); %%%
void CalProgramSMC2(void)
{
    for(;;)
    {
%%%% รับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากชุดตรวจจับ %%%
        adc_2 = (AdcRegs.ADCRESULT5>>4); // reading current values Ia
        adc_1 = (AdcRegs.ADCRESULT6>>4); // reading current values Ib
        adc_0 = (AdcRegs.ADCRESULT7>>4); // reading speed values
%%%% ปรับคุณค่าที่ได้จาก ADC ให้เป็นค่าจริง %%%
        Vin=30*(adc_2*3.3/4095)-0.05645;
        Vo=30*(adc_1*3.3/4095)-0.05645;
    }
}

```

```

IL=(adc_0*1.24*3.3/4095)+0.0223;
%%%%% เข้าสู่ลูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมแบบพีโอ %%%%%

w=(bL+aLK+aRC)*Vo;
x=((setpoint-Vo)*(K+1))-IL)*MRLC;
y=(-bRL-aRLK)*IL;
z=(w+(x+y));
Down = aRC*Vin;
Ueq=z/Down;
%%%%% ส่งสัญญาณ PWM ออกทาง Pwm1 %%%%%

EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = Ueq;
%%%%% ฟังก์ชัน InitEPwm1Example() สำหรับเซ็ตสัญญาณ PWM 10 kHz%%%%%
void InitEPwm1Example()
{
    EPwm1Regs.TBPRD = 7500;
    EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0x0000;
    EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 0;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 0;
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 10;
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET;
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.CAU = AQ_CLEAR;
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.CAD = AQ_SET;
    EPwm1Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE;
    EPwm1Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC;
    EPwm1Regs.DBCTL.bit.IN_MODE = DBA_ALL;
    EPwm1Regs.DBRED = 3;
    EPwm1Regs.DBFED = 3;
    EPwm1_DB_Direction = DB_UP;

```

```

}
%%%% ฟังก์ชัน InitEPwm2Example() สำหรับเซ็ตสัญญาณ PWM %%%%
void InitEPwm2Example()
{
    EPwm2Regs.TBPRD = 100;
    EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0x0000;
    EPwm2Regs.TBCTR = 0x0000;
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 4;
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 4;
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 10;
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET;
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
    EPwm2Regs.AQCTLB.bit.CAU = AQ_CLEAR;
    EPwm2Regs.AQCTLB.bit.CAD = AQ_SET;
    EPwm2Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE;
    EPwm2Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC;
    EPwm2Regs.DBCTL.bit.IN_MODE = DBA_ALL;
    EPwm2Regs.DBRED = 3;
    EPwm2Regs.DBFED = 3;
    EPwm2_DB_Direction = DB_UP;
}
%%%% ฟังก์ชัน InitEPwm3Example() สำหรับเซ็ตสัญญาณ PWM %%%%
void InitEPwm3Example()
{
    EPwm3Regs.TBPRD = 100;
    EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0x0000;
    EPwm3Regs.TBCTR = 0x0000;
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = 4;

```

```

EPwm3Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = 4;
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 10;
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET;
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
EPwm3Regs.AQCTLB.bit.CAU = AQ_CLEAR;
EPwm3Regs.AQCTLB.bit.CAD = AQ_SET;
EPwm3Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE;
EPwm3Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC;
EPwm3Regs.DBCTL.bit.IN_MODE = DBA_ALL;
EPwm3Regs.DBRED = 3;
EPwm3Regs.DBFED = 3;
EPwm3_DB_Direction = DB_UP;
}
%%%% ฟังก์ชันอินเตอร์รัปต์ interrupt void cpu_timer0_isr(void) %%%%
interrupt void cpu_timer0_isr(void)
{
    CpuTimer0.InterruptCount++;
    GpioDataRegs.GPBTOGGLE.bit.GPIO32 = 1;
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}
%%%% ฟังก์ชันสำหรับเซ็ตพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตสำหรับใช้งาน %%%%
void Gpio_select(void)
{
    EALLOW;

    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0x0000;    % GPIO0 –GPIO31
    GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0x0000;    % GPIO32-GPIO47
    GpioCtrlRegs.GPCMUX1.all = 0x0000;    % GPIO64-GPIO79
    GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0xFFFF;     % กำหนดให้ GPIO0 –GPIO31 เป็นเอาต์พุต
    GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0xFFFF;     % กำหนดให้ GPIO32 –GPIO47 เป็นเอาต์พุต
    GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0xFFFF;     % กำหนดให้ GPIO64 –GPIO79 เป็นเอาต์พุต

    EDIS;
}

```





ภาควิชา ๓

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- S. Chonsatidjamroen, T. Sopapirm, K-N. Areerak and K-L. Areerak, **Mathematical Model of a Controlled Buck Converter with a Resistive Load**, European Journal of Scientific Research, Volume 52, No 4, 2011, pp. 487-494.
- S. Chonsatidjamroen, K-N. Areerak and K-L. Areerak, **Dynamic Model of a Buck Converter with a Sliding Mode Control**, World Academy of Science Engineering and Technology, issue 60, 2011, pp. 386-391.
- S. Chonsatidjamroen, K-N. Areerak, K-L. Areerak and A. Srikaew, **Optimal Design of Cascade PI Controllers for Buck Converters Using Particle Swarm Optimization Technique**, The 11th WSEAS International Conference on ARTIFICIAL INTELLIGENCE, KNOWLEDGE ENGINEERING and DATA BASES (AIKED'12), Cambridge, United Kingdom, 22-24, 2012, pp. 21-26.
- S. Chonsatidjamroen, K-N. Areerak and K-L. Areerak, **The Optimal Cascade PI Controller Design of buck converters**, The 9<sup>th</sup> Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2012) Association, Phetchaburi, Thailand, 2012, pp.1-4.
- S. Chonsatidjamroen, K-N. Areerak and K-L. Areerak, **The Application of Averaging Model for Optimized Cascade PI Controllers of Buck Converters using Artificial Intelligence Techniques**, European Journal of Scientific Research, Volume 98, No 3, 2013, pp. 339-353.

## The Application of Averaging Model for the Optimized Cascade PI Controllers of Buck Converters using Artificial Intelligence Techniques

**Satit Chonsatidjamroen**

*School of Electrical Engineering, Institute of Engineering  
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

**Kongpan Areerak**

*Corresponding Author, School of Electrical Engineering  
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology  
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand  
E-mail: kongpan@sut.ac.th  
Tel: +66-44224520; Fax: +66-44224601*

**Kongpol Areerak**

*School of Electrical Engineering, Institute of Engineering  
Suranaree University of Technology  
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

### Abstract

This paper presents the application of the averaging model of the buck converters derived from the generalized state-space averaging method to the optimal controller design of the buck converters. The proposed dynamic model is used with the artificial intelligence techniques to design the cascade PI controllers of the buck converter so as to achieve the best output performance. The averaging model of the buck converters is used as an objective function instead of the exact topology model from software packages to reduce the simulation time. Moreover, the stability criteria based on the eigenvalue theorem can be included into the searching process via the proposed mathematical model to confirm the stable operation. The results from the simulation and the experiment show that the proposed method can provide the best output performance compared with those designed from the conventional method. Moreover, this approach is convenient and flexible for electrical engineering to design the controller of power electronic systems with good performances.

**Keywords:** Cascade PI controllers, Generalized state-space averaging method, Adaptive tabu search, Particle swarm optimization, Buck converter, Modeling, Simulation, Artificial Intelligence

### 1. Introduction

Presently, power electronic converters are widely used in many applications. For the system analysis and design, the dynamic model of the power electronic based system is very important. Unfortunately,

the power converter model is time-varying in nature because of the switching behaviour in which it is very complicated for a system analysis and design. Hence, several approaches are commonly used for eliminating the switching actions to achieve a time-invariant model. Then the classical linear control theory can be easily applied for the system analysis and design. For DC/DC converters, the generalized state-space averaging (GSSA) method is normally used to achieve the averaging model (time-invariant model) (Emadi, 2004; Gatto et al., 2011; Bor-Ren et al., 2010; Isastia and Meo, 2011). This method has been also used to analyze uncontrolled and controlled rectifiers in single-phase AC distribution systems (Emadi, 2004). and 6 and 12- pulse diode rectifiers in three phase systems (Han et al., 2007).

The artificial intelligence (AI) techniques are widely applied to many works of engineering such as the system identifications using adaptive tabu search (ATS) (Puangdownreong et al., 2002; Sujitjorn et al., 2006; Puangdownreong et al., 2005; Kulworawanichpong et al., 2005; Kulworawanichpong et al., 2004). the protection design in power system via ATS (Areerak et al., 2004). the active power filter design using genetic algorithm (GA) (Narongrit et al., 2010). power loss minimization using particle swarm optimization (PSO) and artificial bee colony (ABC) (Leeton et al., 2010). reactive power optimization for distribution systems based on ant colony optimization (ACO) (Lirui et al., 2008). and etc.

According to the literature review papers, the aim of this paper is to extend the work of (Chonsatidjamroen, et al., 2012) in which it presents the idea how to design the controller of buck converter to achieve the best output response by using the artificial intelligence techniques called the ATS and PSO algorithms. This is because the ATS algorithm has the mathematical proof to confirm that the algorithm can escape the local solution. As for the PSO algorithm, it is very simple compared with other AI-based heuristic optimization techniques. The structure of the controller in the paper is the PI cascade having the current loop control as the inner loop and voltage loop control as the outer loop (Tsang and Chan, 2005). Normally, the simple block diagram is used for the controller design using the conventional method in which some system dynamic is ignored. Hence, in the paper, the averaging model derived from the GSSA method is applied to analyze the buck converter to achieve the dynamic model that can explain the behaviour of the whole system. In addition, when the controllers are designed via the ATS or PSO methods, the searching process needs to simulate the power electronic system for each tuned controller parameter until the appropriate parameters are obtained. It is well known that the transient simulations of the power electronic system consume the vast simulation time due to the switching devices in the circuit. Therefore, according to the huge simulation time of the switching devices, the application of AI techniques is not widely applied to design the controller of the power converter. To solve the simulation time problem, the proposed averaging model derived from the GSSA method can be also used in the paper instead of the exact topology model. Before using the reported mathematical model, this model has to be compared with the intensive time-domain simulation via the full switching model of software package in terms of accuracy and simulation time. The comparison results will show later that the proposed mathematical models provide high accuracies in both transient and steady-state responses with the faster simulation time. Hence, the reported model derived from the GSSA method is suitable for the optimal controller design via the ATS and PSO algorithms. In this paper the additional results from the work of (Chonsatidjamroen, et al., 2012) are that the stability analysis based on the eigenvalue theorem (Areerak et al, 2011; Areerak et al, 2012) is included to confirm the stable operation during the searching process via the averaging model with AI algorithms. Moreover, the final results from the simulation and the experiment show that the proposed technique using the ATS and PSO algorithms with the averaging model can be used to design the controller of buck converter in which the better output response is obtained compared with the waveforms from the conventional design method.

The paper is structured as follows. In Section 2, considered system with deriving the dynamic model by using the GSSA modelling methods is firstly explained. Moreover, the comparison results between the reported model and the full switching model from the commercial software package in

terms of accuracy and simulation time are also illustrated in Section 2 to ensure that the proposed model can explain the dynamic of the whole system with the fast simulation time. In Section 3, the controller designs using the ATS, PSO, and the conventional method are addressed. The simulation results are fully shown in Section 4. In addition, the experimental results are also given in Section 5 to support the simulation results. Finally, Section 6 concludes and discusses the advantages of the proposed technique for the optimal controller design of the power electronic systems.

### 2. Dynamic Model of Studied System

The power system considered in this paper is shown in Fig.1. It consists of a DC voltage source  $V_{in}$ , the elements of buck converter represented by  $L$  and  $C$ , the resistive load  $R$ , and the PI controllers of current loop (inner loop) and voltage loop (outer loop) represented by  $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$ , and  $K_{ii}$ , respectively. The schematic of cascade PI controllers for a buck converter is depicted in Fig.2.

Figure 1: The regulated buck converter with a resistive load

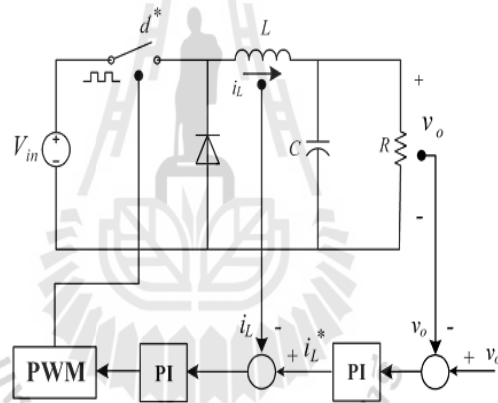
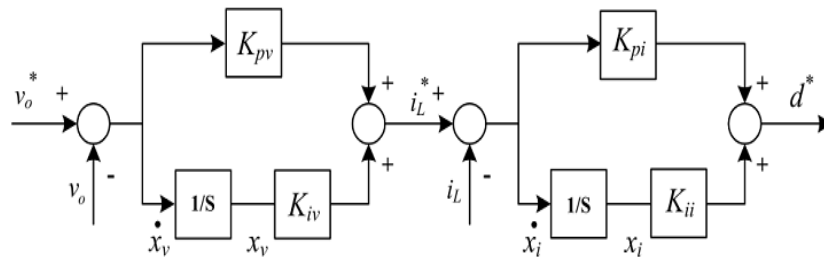


Figure 2: The schematic of buck converter controllers



The dynamic model of a controlled buck converter as shown in Fig.1 derived from the GSSA modeling method can be written as:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Dx} \end{aligned} \tag{1}$$

where state-variable:  $\mathbf{x} = [i_L \ v_o \ x_v \ x_i]^T$ , input:  $\mathbf{u} = [v_o^*]$ , and output:  $\mathbf{y} = [v_o]$

The details of **A**, **B**, **C**, and **D** are as follows:

The Application of Averaging Model for the Optimized Cascade PI Controllers of Buck Converters using Artificial Intelligence Techniques

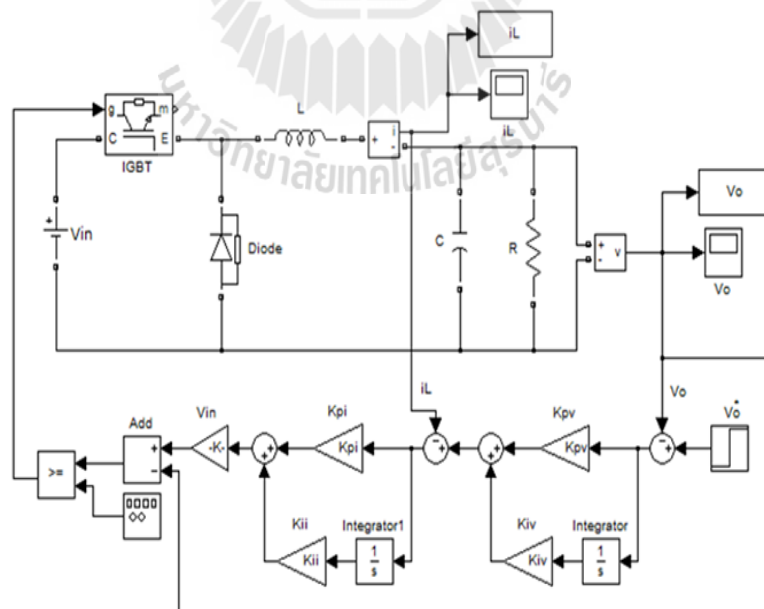
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{pv}V_{in}}{L} & -\frac{K_{pv}K_{pi}V_{in}+1}{L} & \frac{K_{iv}K_{pi}V_{in}}{L} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 4}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_{pv}K_{pi}V_{in}}{L} \\ L \\ 0 \\ 1 \\ K_{pv} \end{bmatrix}_{4 \times 1}, \mathbf{C} = [0 \ 1 \ 0 \ 0]_{1 \times 4}, \text{ and}$$

$$\mathbf{D} = [0]_{1 \times 1} \tag{2}$$

Notice that the cascade PI controller parameters ( $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$ , and  $K_{ii}$ ) appear in the dynamic model as given in (2). Before using the averaging model of (1) with the details of **A**, **B**, **C**, and **D** as given in (2), the transient simulation from the reported model has to be compared with those from the commercial software package; here is the SimPowerSystem™ (SPS™) of SIMULINK. The exact topology model of SPS™ for the system in Fig.1 is depicted in Fig. 3. The more details how to derive the model of the buck converter with the cascade PI controllers using the GSSA method can be found in (Chonsatidjamroen et al., 2011).

Figure 3: The full topology model in SPS™ of SIMULINK



The set of parameters for the system in Fig.1 is given as follows:  $R = 20 \Omega$ ,  $L = 15 \text{ mH}$  ( $\Delta I = 0.12 \text{ A}$ ),  $C = 150 \mu\text{F}$  ( $\Delta V = 10 \text{ mV}$ ),  $V_{in} = 100 \text{ V}$ , and  $T_s = 0.1 \text{ ms}$ . Fig. 4 and Fig. 5 shows the comparisons of the output voltage responses and the inductor current of the system in Fig. 1 between the exact topology model as given in Fig. 3 and the averaging model as given in (1) to a step change of

the voltage command  $v_o^*$  from 40 V to 50 V that occurs at  $t = 1$  s., respectively. Similarly, Fig. 6 and Fig. 7 show the comparison responses for a step change of the voltage command  $v_o^*$  from 40 V to 70 V that occurs at  $t = 1$  s.. The parameters of PI controllers for Fig. 4-Fig. 7 are designed via the conventional method by setting the bandwidth of current loop is faster than the bandwidth of voltage loop by 10 times. The PI controller parameters for this case are  $K_{pv} = 0.01$ ,  $K_{iv} = 9.375$ ,  $K_{pi} = 0.6$ , and  $K_{ii} = 937.5$  in which  $\omega_{nv}$ ,  $\zeta_v$ ,  $\omega_{ni}$ , and  $\zeta_i$  are equal to 250 rad/s, 0.8, 2500 rad/s, and 0.8, respectively. The details how to design the PI controllers using the classical method for buck converter having the schematic as depicted in Fig. 2 can be found in (Tsang and Chan, 2005).

Figure 4: Response of  $v_o$  for changing the  $v_o^*$  from 40 V to 50 V

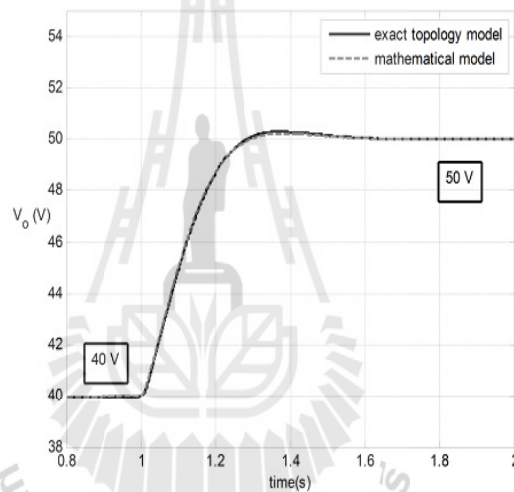
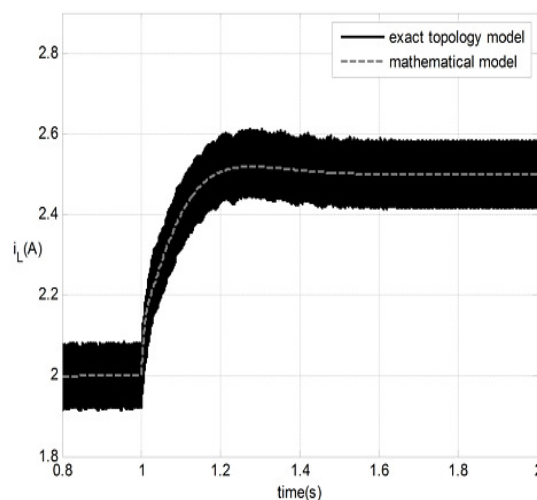
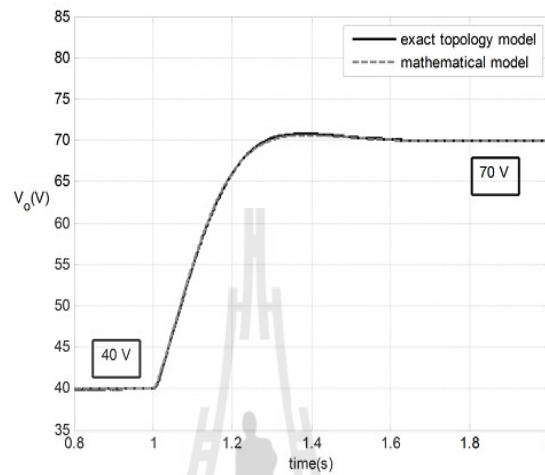


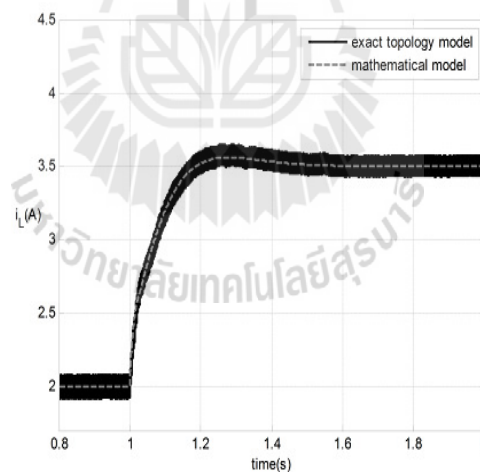
Figure 5: Response of  $i_L$  for changing the  $v_o^*$  from 40 V to 50 V



**Figure 6:** Response of  $v_o$  for changing the  $v_o^*$  from 40 V to 70 V



**Figure 7:** Response of  $i_L$  for changing the  $v_o^*$  from 40 V to 70 V



From the comparison results of both models as shown in Fig. 4- Fig. 7, it confirms that the mathematical model of the power system with a controlled buck converter derived from the GSSA method provide a good accuracy in both transient and steady-state responses. The model can describe the dynamic behaviour of the whole system. Moreover, the simulation time when the system was simulated via the proposed model coding in MATLAB requires 8.82 second, while the full topology model of SPS<sup>TM</sup> consumes 1920 second. Hence, the proposed model as described in this section is suitable for the optimal controller design of the buck converter via the PSO algorithm because the very fast simulation time can be achieved. Moreover, the eigenvalue of the system can be calculated from matrix  $\mathbf{A}$  in (2) during the searching process in which the PI controlled parameters are varied following from the ATS or PSO algorithms. For this case, the stability analysis based on the eigenvalue theorem can be applied during the searching process via the proposed GSSA model.



### 3. Controller Designs

In this section, the controller designs for the buck converter via the conventional, ATS, and PSO methods are illustrated.

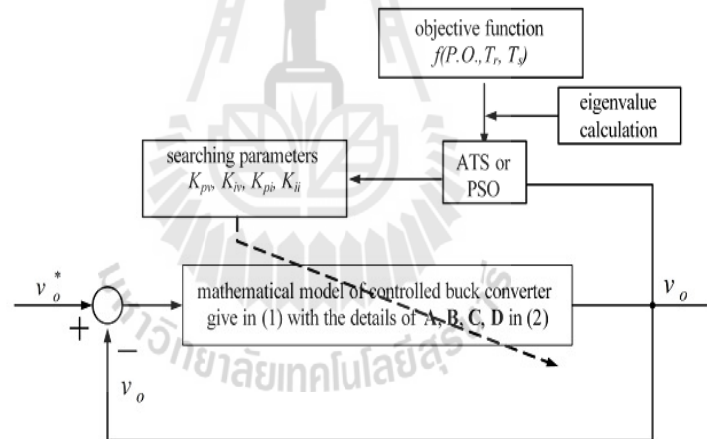
#### 3.1. Conventional Method

The details of PI controller design using the conventional method via the simple block diagram can be found in (Tsang and Chan, 2005). The PI parameters for the conventional method in this paper are designed by selecting  $\zeta_v = 0.8$ ,  $\zeta_i = 0.8$ ,  $\omega_{hi} = 2500$  rad/s, and  $\omega_{hv} = 250$  rad/s. Hence, the PI controller parameters designed by the conventional method are given by  $K_{pv} = 0.01$ ,  $K_{iv} = 9.375$ ,  $K_{pi} = 0.6$ , and  $K_{ii} = 937.5$ .

#### 3.2. ATS Algorithm

The block diagram to explain how to search the PI controller parameters using ATS algorithm is shown in Fig.8. The mathematical model derived from the GSSA method is used to simulate the system during the search process in which the computational time can considerably reduced.

Figure 8: The AI methods for the cascade PI controller design



In Fig.8, the ATS algorithm will search the appropriate controller parameters  $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$ ,  $K_{ii}$  in which the objective value ( $W$ ) is defined by

$$W(T_r, T_s, P.O.) = \sigma T_r + \alpha T_s + \gamma P.O. \quad (3)$$

and

$$\sigma + \alpha + \gamma = 1 \quad (4)$$

where

$P.O.$  is the percent overshoot of the  $v_o$  response.

$T_r$  is the rise time of the  $v_o$  response.

$T_s$  is the setting time of the  $v_o$  response.

$\sigma$ ,  $\alpha$ , and  $\gamma$  are the priority coefficients of  $T_r$ ,  $T_s$ , and  $P.O.$ , respectively.

In this paper, the values of  $\sigma$ ,  $\alpha$ , and  $\gamma$  are set to 0.34, 0.33, and 0.33, respectively. The ATS searching method will try to search the best controller parameters until the minimum  $W$  is achieved. It means that the controller parameters from the searching process provide the best performance of the  $v_o$  response. In addition, during the searching process, the eigenvalue is calculated via the matrix  $A$  in (2) to confirm that the controllers from the ATS can provide the best performance with the stable operation.

According to Fig.8, the steps of searching controller parameters by using ATS are as follow:

- Step 1:** Determine the boundary of parameters. In this paper, the upper and lower limits of  $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$ ,  $K_{ii}$  are set to [0.0027 0.1347], [3.3750 73.50], [1.6 16], [2000 200000], respectively. These boundary values are calculated by using  $\omega_{hi} = 2\pi \times 2000$  to  $2\pi \times 20000$  rad/s and  $\omega_{hv} = 2\pi \times 150$  to  $2\pi \times 700$  rad/s with the constant  $\zeta=0.8$  and the system parameters as defined in Section 2.
- Step 2:** Define the initial value for each parameter by random within the search space.
- Step 3:** Define the radius value ( $R$ ), the one of ATS parameters.
- Step 4:** Define the condition for ATS back tracking.
- Step 5:** Define the cost value, here is  $W$  calculated from the objective function as given in (3).
- Step 6:** Define the maximum of searching iteration for ATS ( $count_{max}$ ). This value is set as a stop criterion for ATS algorithm. In this paper, it is equal to 300 iterations. Note that the more details of ATS algorithm can be found in (Sujitjorn et al., 2006).

### 3.3. PSO Algorithm

According to Fig.8, the steps of searching controller parameters by using PSO are as follow.

- Step 1:** Determine the boundary of parameters (the same as ATS algorithm).
- Step 2:** Define the initial value for position and velocity vectors by random within the search space as defined from Step 1.
- Step 3:** Define the  $NP = 60$ ,  $C_p = 2$ , and  $C_g = 1.75$ .
- Step 4:** Define the fitness value, here is  $W$  given by (3) in which it can be calculated from the output response of the objective function as given in the model of (1).
- Step 5:** Define the maximum of searching iteration for PSO ( $NT_{max}$ ). In this paper, it is equal to 300 iterations.
- The more details of PSO algorithm can be found in (Leeton et al., 2010).

## 4. Simulation Results

In this section, the system as shown in Fig.1 having the controllers designed by using the ATS, PSO, and the conventional methods is simulated by using SPS<sup>TM</sup> in SIMULINK as given in Fig. 3. The aim of the ATS and PSO approaches are to minimize the  $W$  value to achieve the best output voltage response. The comparison results of the controller parameters that are designed from the difference methods are given in Table 1.

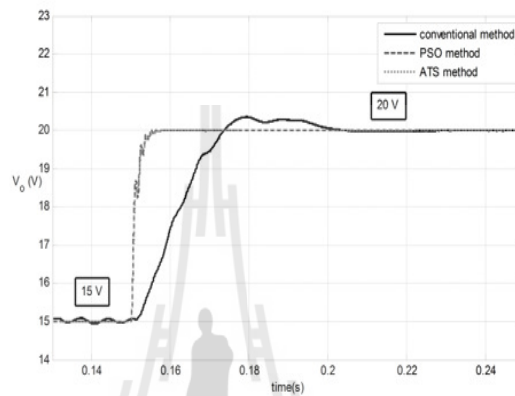
**Table 1:** The Comparison between ATS and Classical Methods

Controller Parameters	Design Methods		
	Conventional Method	PSO Method	ATS Method
$K_{pv}$	0.0027	0.1228	0.1174
$K_{iv}$	3.3750	27.1625	25.9984
$K_{pi}$	2.4	9.3736	11.4548
$K_{ii}$	4500	70103	77629
$W$	0.6821	0.0034	0.0030

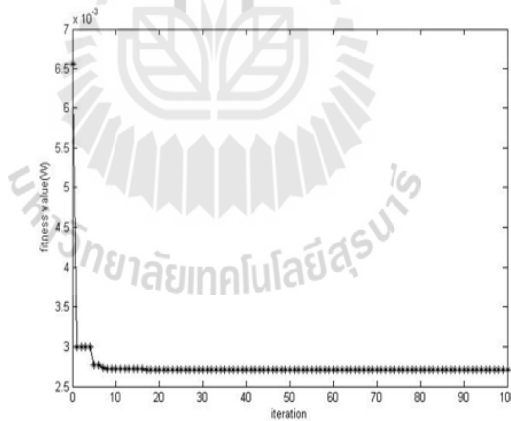
According to Table 1, the controllers designed from the ATS and PSO methods provide the minimum  $W$  value compared with those of the classical method. Fig.9 shows the  $v_o$  response to a step change of  $v_o^*$  from 15 V to 20 V that occurs at  $t = 0.15$  second. The comparison results show that the

output response when the controllers designed by the ATS and PSO methods is better than that from the conventional method in terms of percent overshoot, rise time and setting time under the changing of command input. In addition, the convergences of  $W$  value during the ATS and PSO searching processes are depicted in Fig.10 and Fig. 11, respectively.

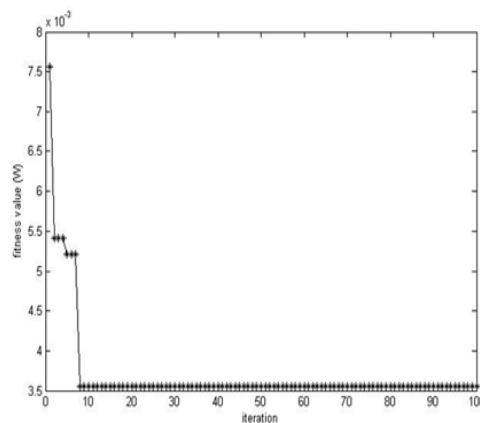
**Figure 9:** The comparison results of  $v_o$  response



**Figure 10:** The convergence of  $W$  value from the ATS method

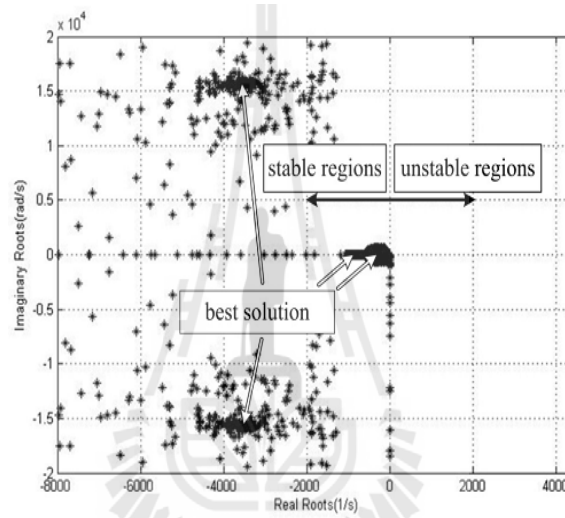


**Figure 11:** The convergence of  $W$  value from the PSO method

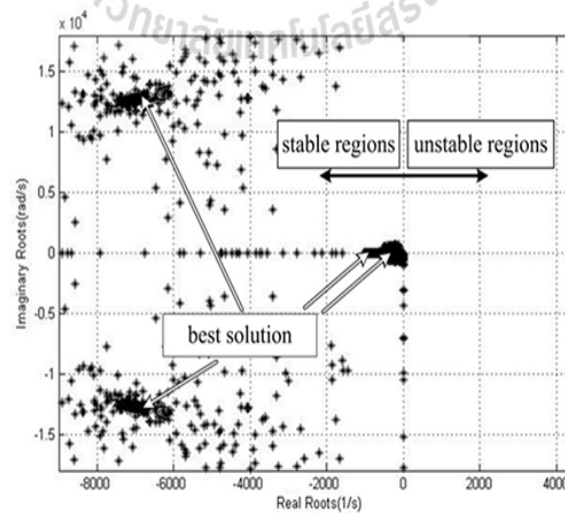


As for the stability analysis, the eigenvalues of the system during the searching process from the ATS and PSO algorithms are depicted in Fig. 12 and Fig. 13, respectively. There are four eigenvalues for the proposed system having the dynamic model as given in (1) and (2). It can be seen that these eigenvalues of the best solution from the proposed searching methods are located on the left-hand side of the  $s$ -plane. Based on the eigenvalue theorem, it means that the system with the controller parameters designed from the ATS and PSO algorithms can provide the stable operation.

**Figure 12:** The eigenvalue plot during the ATS searching process



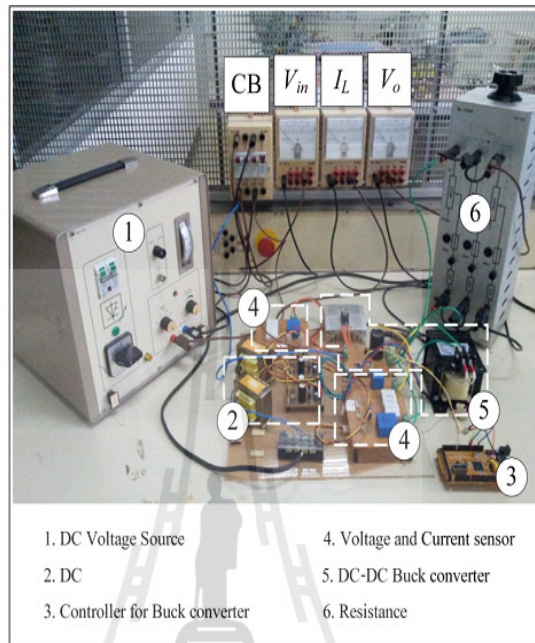
**Figure 13:** The eigenvalue plot during the PSO searching process



## 5. Experimental Results

The test rig of the system in Fig. 1 is shown in Fig. 14.

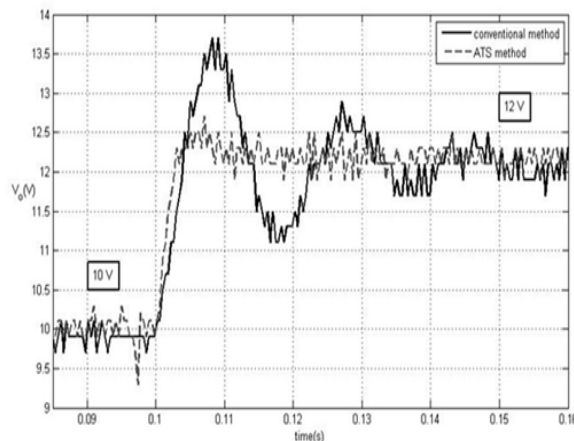
**Figure 14:** The testing rig of the system in Fig. 1



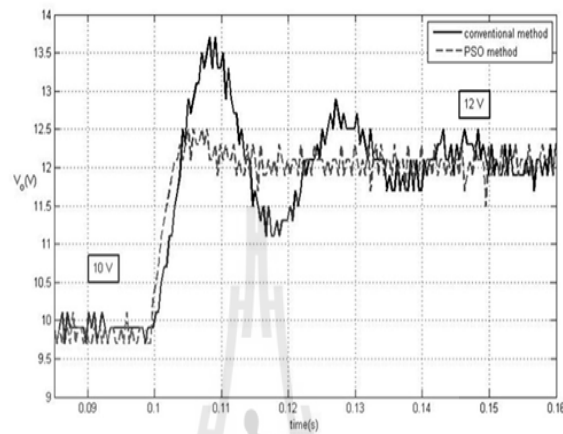
The controller of the rig was implemented using. The buck converters have been constructed using 3A and 220 V.

The PI controller parameters as shown in Table 1 were coded in the microcontroller of the rig in Fig. 14. The comparison of the output voltage response between the controllers designed from the conventional and the ATS methods for a step change of the voltage command  $v_o^*$  from 10 V to 12 V that occurs at  $t = 0.1$  s is given in Fig. 15. Fig. 16 is the results when the controllers are designed from the PSO algorithm. Similarly, for other operating points, the experimental results using the PI controller parameters designed from the ATS and PSO methods for a step change of the voltage command  $v_o^*$  from 10 V to 14 V and 10 V to 16 V are shown in Fig. 17-Fig. 20, respectively.

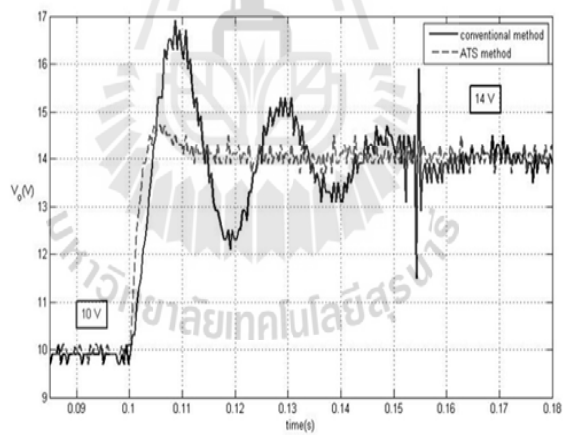
**Figure 15:** The experimental results of  $v_o$  for changing the  $v_o^*$  from 10 V to 12 V



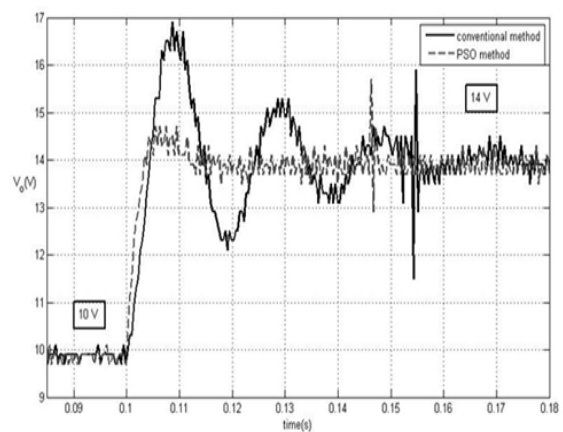
**Figure 16:** The experimental results of  $v_o$  for changing the  $v_o^*$  from 10 V to 12 V



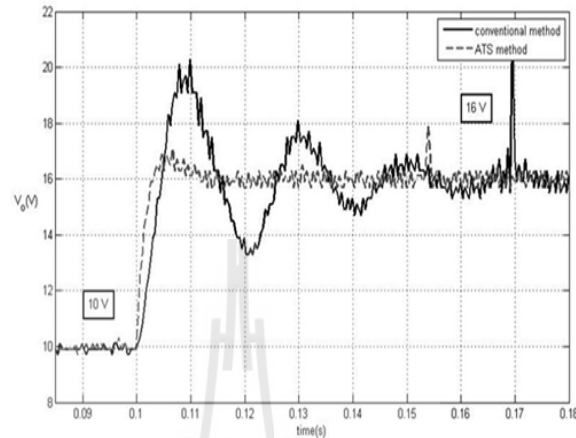
**Figure 17:** The experimental results of  $v_o$  for changing the  $v_o^*$  from 10 V to 14 V



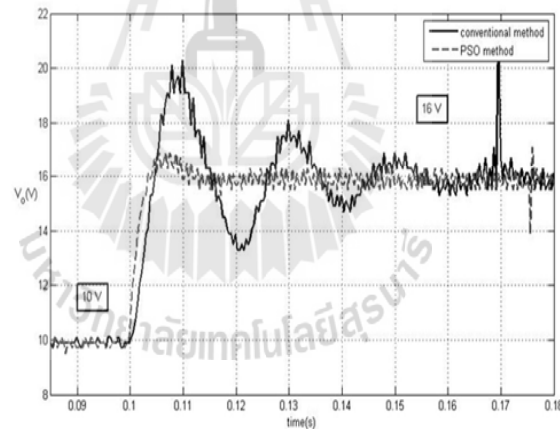
**Figure 18:** The experimental results of  $v_o$  for changing the  $v_o^*$  from 10 V to 14 V



**Figure 19:** The experimental results of  $v_o$  for changing the  $v_o^*$  from 10 V to 16 V



**Figure 20:** The experimental results of  $v_o$  for changing the  $v_o^*$  from 10 V to 16 V



The comparison results from the simulation and experiment show that the output responses when the controllers designed by the ATS and PSO methods are better than that from the conventional method in terms of percent overshoot, rise time and setting time under the changing of command input.

## 6. Conclusion

The paper presents the cooperation between the averaging model derived from the GSSA method and the AI methods called the ATS and PSO algorithms to design the appropriate cascade PI controller parameters of the buck converter. The resulting output responses using the ATS and PSO designs are better than that of the conventional method for variations in command input. Moreover, the paper also show that the simulation of the switching converter system using the averaging model consumes the faster computational time compared with the simulation time of the exact topology model from the software package. The eigenvalue of the system can be also calculated via the proposed averaging model for the stability analysis during the searching process. Hence, the reported dynamic model is suitable for the optimal controller design application in which the repeating calculation during the searching process is needed. In the paper, the experimental results from the testing rig are used to

support the simulation results. The results shows that the proposed design technique is very useful for engineers and it can provide the best output performance with the stable operation confirmation. The concept of the optimal design for the buck converter using the AI methods described in the paper can be applied to other converters such as boost converters, buck-boost converters, and cuk converters. The GSSA method can be also used to derive the averaging model of these DC/DC converters in which the work of this paper show that the GSSA averaging model is suitable for the optimal design using the AI techniques.

### Acknowledgments

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand.

### References

- [1] Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., De Lillo, L., Thomas, D.W.P., 2012. "Stability Study for a Hybrid AC-DC More-Electric Aircraft Power System", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 48 (1), 329-347.
- [2] Areerak, K-N., Kulworawanichpong T., and Sujitjorn, S., 2004. "Moving Towards a New Era of Intelligent Protection through Digital Relaying in Power Systems", Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag Heidelberg. 3213, 1255-1261.
- [3] Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., 2011. "Aircraft Power System Stability Study Including Effect of Voltage Control and Actuators Dynamic", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*. 47 (4), 2574-2589.
- [4] Bor-Ren, L., Huann-Keng, C., Chih-Yuan, C., 2010. "Analysis and Implementation of an Interleaved ZVS DC-DC Converter", *International Review of Electrical Engineering (IREE)*. 5 (1), 1-9.
- [5] Chonsatidjamroen, S., Sopapim, T., Areerak, K-N., Areerak, K-L., 2011. "Mathematical Model of a Controlled Buck Converter with a Resistive Load", *European Journal of Scientific Research*. 52 (4), 487-494.
- [6] Chonsatidjamroen, S., Areerak, K-N., Areerak, K-L., 2012. "The Optimal of Cascade PI Controller Design of Buck Converters", International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Hua Hin, Thailand. 1-4.
- [7] Emadi, A., 2004. "Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method", *IEEE Trans. Indus. Elect.* 51 (3), 661-668.
- [8] Emadi, A., 2004. "Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method", *IEEE Trans. on Indus. Elect.* 51 (5), 992-1000.
- [9] Gatto, G., Isastia, V., Marongiu, I., Meo, S., Perfetto, A., 2011. "Interleaved ZVS Active-Clamped Bidirectional DC-DC Converter for Hybrid-Electric Vehicles", *International Review of Electrical Engineering (IREE)*. 6 (5), 2188-2197.
- [10] Han, L., J., Wang, and D., Howe, 2007. "State-space average modelling of 6- and 12-pulse diode rectifiers", *The 12<sup>th</sup> European Conf. on Power Elect. and Appl.*, Aalborg, Denmark.
- [11] Isastia, V., and Meo, S., "A New ZVS-CV Bridgeless PFC Dual Boost Converter for Pure Electric Vehicle Battery Charger", *International Review of Electrical Engineering (IREE)*. 6 (3), 1060-1069.



- [12] Kulworawanichpong, T., Areerak, K-L., Areerak, K-N., and Sujitjorn, S., 2004. "Harmonic Identification for Active Power Filters Via Adaptive Tabu Search Method", LNCS (Lecture Notes in Computer Science). Springer-Verlag Heidelberg. 3215, 687-694.
- [13] Kulworawanichpong, T., Areerak, K-L., Areerak, K-N., Pao-la-or, P., Puangdownreong, D., and Sujitjorn, S., 2005. "Dynamic parameter identification of induction motors using intelligent search techniques", *IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005)*. Innsbruck, Austria. 328-332.
- [14] Leeton, U., Uthitsunthorn, D., Kwannetr, U., Sinsuphun, N., and Kulworawanichpong, T., 2010. "Power loss minimization using optimal power flow based on particle swarm optimization", *International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. Chaing Mai. 440-444.
- [15] Lirui, G., Limin, H., Liguoz, Z., Weina, L., and Jie, H., 2008. "Reactive Power Optimization for sidtribution systems based on Dual Population Ant Colony Optimization", *In Proc. 27<sup>th</sup> Chinese Control Conference (CCC 2008)*. China. 89-93.
- [16] Narongrit, T., Areerak, K-L., and Areerak, K-N., "Design of an Active Power Filter using Genetic Algorithm Technique", *The 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Artificial Intelligent*. Knowledge Engineering and Data Bases (AIKED'10). Cambridge, United Kingdom. 46-50.
- [17] Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Areerak, K-L., Kulworawanichpong, T., and Sujitjorn, S., 2005. "Application of adaptive tabu search to system identification", *IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005)*. Innsbruck, Austria. 178-183.
- [18] Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., Sujijorn, S., and Totarong, P., 2002. "System Identification via Adative Tabu Search", *In: Proceedings IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT02)*. 915-920.
- [19] Sujitjorn, S., Kulworawanichpong, T., Puangdownreong, D., and Areerak, K-N., 2006. "Adaptive Tabu Search and Applications in Engineering Design", *Book Chapters in Integrated Intelligent Systems for Engineering Design* (ed. X. F. Zha and R.J. Howlett), IOS Press, The Netherlands. 233-257.
- [20] Tsang K.M. and Chan, W.L. 2005. "Cascade controller for DC/DC buck convertor", *IEE Electric Power Applications*. 152 (4), 827-831.

## ประวัติผู้เขียน

นายสาธิต ชลสติดำริชญ เกิดเมื่อวันที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดชลบุรี เริ่มการศึกษา ระดับประถมศึกษาที่ 1-6 ที่โรงเรียนโรงเรียนอนุบาลวัดอุททยานนท์ ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนชลบุรี สุขขบท สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาเมื่อ พ.ศ. 2552 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปี พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 (3) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 และ (4) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม โดยมีความสนใจในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การควบคุมอัตโนมัติ และปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจากการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางด้านระบบควบคุม และการการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์เป็นอย่างดี และมีผลงานตีพิมพ์ ปรากฏดั่งภาคผนวก ฉ. จำนวน 5 ฉบับ