



รายงานการวิจัย

การออกแบบตัวควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคค์

ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

The Controller Design of Buck Converters Using

Artificial Intelligence Techniques

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การออกแบบตัวควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคค์

ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

The Controller Design of Buck Converters Using

Artificial Intelligence Techniques

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักต์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมพีไอที่เรียงต่อกัน การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้การตอบสนองของแรงดันทางฝั่งเอาต์พุต มีการตอบสนองที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม ในงานวิจัยได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักต์ ที่ได้รับการพิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป มาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว และวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ มีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ของระบบผ่านแบบจำลองจะใช้เวลาที่สั้นเมื่อเทียบกับการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป และนอกจากนี้การอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถดำเนินการได้ในระหว่างการค้นหา เพื่อยืนยันว่า คำตอบที่ได้ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ และให้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด หลังจากทราบผลการค้นหางานวิจัยได้นำคำตอบที่ได้มาดำเนินการจำลองจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ และนำมาสร้างชุดทดสอบจริง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันแบบบักต์ที่มีตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าวงจรที่อาศัยตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ดังนั้นองค์ความรู้ในงานวิจัยนี้ถือว่าเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อลดปัญหาเวลาในการจำลองสถานการณ์

Abstract

This research presents the optimal controller design of buck converter using an artificial intelligence technique. The cascade PI controllers are used in the system. The aim of the research is to achieve the best output performance when the power converter is operated with the controller designed by the proposed method compared with the conventional method. In the research, the mathematical model derived from the generalized state-space averaging method is used as the objective function for the searching algorithm. The adaptive tabu search and the particle swarm optimization method are used as the searching algorithms for this research. The proposed mathematical model of buck converter is suitable for the optimal design because the model consumes the short simulation time. Moreover, the stability analysis via such mathematical model can be included in the searching process in which it is not possible to do via the model from software package. The simulation and experimental results show that the buck converter with the controller designed from the proposed method can provide the best output performance compared with those designed from the conventional method. The concept from this research is very useful for electrical engineers who need to achieve the best output performance for the power electronic based system.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ การออกแบบตัวควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคค์ด้วยวิธีการทาง
ปัญญาประดิษฐ์ สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายสาธิต ชลสถิตจำเริญ ที่เป็นผู้ช่วย
วิจัย ที่มีความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณพนักงาน
ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3 ทุกคนที่ให้ความสะดวกในการใช้
เครื่องมือ

กองพัน อารีรักษ์

ตุลาคม 2556



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature) / สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง ...	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย.....	4
2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมพีไอ.....	6
2.1 บทนำ	6
2.2 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ.....	6
2.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	8
2.3.1 กรณีไม่มีตัวควบคุม	8
2.3.2 กรณีมีตัวควบคุมพีไอ	15
2.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	18
2.4.1 การออกแบบตัวควบคุมลูประแสไฟฟ้า	18
2.4.2 การออกแบบตัวควบคุมลูประดันไฟฟ้า	20
2.5 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง	22
2.6 สรุป.....	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์.....	26
3.1	บทนำ.....	26
3.2	หลักการทํางานของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว.....	26
3.3	หลักการทํางานของวิธีการค้นหาแบบเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค	29
3.4	การออกแบบตัวควบคุมพีไอ	32
3.4.1	การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS).....	35
3.4.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO)	39
3.5	สรุป.....	42
4	การสร้างชุดทดสอบ.....	43
4.1	บทนำ.....	43
4.2	แหล่งจ่าย	44
4.3	วงจรแปลงผันแบบบัคก์.....	47
4.4	ตัวควบคุม.....	51
4.4.1	การสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR	51
4.5	วงจรตรวจจับ.....	53
4.6	ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....	57
4.7	สรุป.....	58
5	ผลกาทดสอบ.....	59
5.1	บทนำ.....	59
5.2	วงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน กรณีไม่มีตัวควบคุม	59
5.3	การทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	60
5.4	สรุป.....	68
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	70
6.1	สรุป	70
6.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	72
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB	74
ภาคผนวก ข. ตารางการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วย วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์	76
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์	83
ภาคผนวก ง. ความรู้พื้นฐานของบอร์ด AVR	98
ภาคผนวก จ. โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino	102
ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	109
ประวัติผู้เขียน	126



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2
2.1	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 2.1 12
2.2	ตารางเปรียบเทียบการประหยัดเวลาในการจำลองสถานการณ์ 25
3.1	ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [$\omega_{nv} = 150 \text{ Hz} - 700 \text{ Hz}$ และ $\omega_{ni} = 2 \text{ kHz} - 20 \text{ kHz}$] 35
3.2	ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS 36
3.3	ตารางเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต 37
3.4	ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ PSO 39
3.5	ตารางเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต 41
4.1	ตารางการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า 54
4.2	ตารางการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า 56
5.1	ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม PSO และ ATS 61
ข.1	การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น 77
ข.2	การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง 77
ข.3	การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น 78
ข.4	การทดสอบค่าปรับลดรัศมี 78
ข.5	ผลการทดสอบจำนวนอนุภาค 80
ข.6	ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ C_p 80
ข.7	ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ C_g 81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรแปลงผันแบบบัคกักรณีไม่มีตัวควบคุม..... 8
2.2	สัญญาณการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคกั..... 9
2.3	ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 % 13
2.4	ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 % 14
2.5	ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 70 % 14
2.6	ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 70 % 15
2.7	วงจรแปลงผันแบบบัคกัที่มีตัวควบคุมพีไอ 15
2.8	โครงสร้างระบบการควบคุม 16
2.9	รูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า..... 18
2.10	รูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า..... 20
2.11	ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง (V_o^*) จาก 40 V เป็น 50 V ที่เวลา 1 วินาที 22
2.12	ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง (V_o^*) จาก 40 V เป็น 50 V ที่เวลา 1 วินาที 23
2.13	ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง (V_o^*) จาก 40 V เป็น 70 V ที่เวลา 1 วินาที 23
2.14	ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง (V_o^*) จาก 40 V เป็น 70 V ที่เวลา 1 วินาที 24
3.1	สูตรค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา..... 27
3.2	ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0 27
3.3	กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่..... 28
3.4	กำหนดค่า S_0 ใหม่ 28
3.5	กลไกการเดินย้อนรอยและการปรับลดค่ารัศมี 29
3.6	วงจรแปลงผันแบบบัคกัที่มีตัวควบคุมพีไอ 32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 แผนภาพบล็อกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์.....	34
3.8 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	37
3.9 การลู่เข้าของค่า W ด้วยวิธี ATS	38
3.10 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี ATS	38
3.11 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	40
3.12 การลู่เข้าของค่า W ด้วยวิธี PSO.....	41
3.13 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี PSO	42
4.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
4.2 วงจรสำหรับออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	44
4.3 หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส	44
4.4 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์.....	45
4.5 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองแรงดัน	45
4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด.....	46
4.7 โครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	47
4.8 มอดูลของมอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
4.9 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	50
4.10 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	50
4.11 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	51
4.12 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280	53
4.13 ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....	53
4.14 วงจรทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า	54
4.15 ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและวงจรสำหรับใช้งาน	55
4.16 วงจรทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	56
4.17 ชุดทดสอบจริงของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดทดสอบที่มีตัวควบคุมพีไอ โดยปรับเปลี่ยน (v_o^*) จาก 10V ไปเป็น 12V	58
5.1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 50 %	60
5.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 66.66 %	60
5.3 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่าง การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและPSO.....	62
5.4 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่าง การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและATS.....	63
5.5 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่าง การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและPSO.....	64
5.6 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่าง การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและATS.....	65
5.7 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่าง การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและPSO.....	67
5.8 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่าง การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและATS.....	68
ก.1 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีไม่มีตัวควบคุม	75
ก.2 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีมีตัวควบคุมพีไอ.....	75
ง.1 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้ถูกนำมาใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังส่วนใหญ่จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร เมื่อนำไปวิเคราะห์ อาทิเช่น การออกแบบตัวควบคุมและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะทำให้เกิดความยุ่งยาก และซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องหาวิธีในการทำให้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method : GSSA) (Mahdavi, Emadi, Bellar, and Ehsani, 1997) ใช้สำหรับวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี, วิธีดีคิว (DQ method) (Rim, Choi, Cho, and Cho, 1994) นำมาใช้กับวงจรแปลงผันของระบบไฟฟ้า 3 เฟส เช่นวงจรเรียงกระแส 3 เฟส, วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบควบคุมได้ และ วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value method) (Sudhoff, and Wasynczuk, 1993) ใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองของระบบ 3 เฟส เช่น วงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์, วงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ (Han, Wang and Howe, 2007) งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และมีความถูกต้องแม่นยำสูงอีกด้วย ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ แต่ยังไม่พบบทความใดที่นำเสนอเกี่ยวกับ การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอ 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) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมไปเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจะส่งผลทำให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม
- 1.2.2 เพื่อสร้างชุดทดสอบ สำหรับระบบที่มีตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์
- 1.2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการหาแบบจำลองของระบบ สำหรับใช้วิเคราะห์กับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต เช่น ระบบเครื่องบิน ระบบเรือดำน้ำ หรือระบบรถไฟฟ้า เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ระบบที่ทำการวิเคราะห์เป็นระบบที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันกระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ถูกเชื่อมต่ออยู่กับตัวต้านทาน
- 1.3.2 การออกแบบตัวควบคุมจะใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีตัวควบคุมจะถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- 1.3.3 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ทำงานในโหมดการทำงานนำกระแสต่อเนื่องเท่านั้น (continuous conduction mode)

1.4 ทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature) / สารสนเทศ (information)

ที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการค้นคว้าเกี่ยวกับองค์ความรู้ที่จำเป็นจากงานวิจัยในอดีต ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 1.1 ดังนี้

ตารางที่ 1.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่พิมพ์ (ลำดับเอกสารอ้างอิง)	คณะผู้วิจัย	องค์ความรู้ที่ได้จากบทความ
1997	J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani	บทความนี้นำเสนอถึงวิธีการหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC distribution system) ด้วยวิธีที่เรียกว่าวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ (state-space averaging: SSA) สำหรับวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

ตารางที่ 1.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

2004	A. Emadi	บทความนี้นำเสนอวิธีการ SSA สำหรับหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันในระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีการต่อวงจรแปลงผันหลาย ๆ ตัว
2005	D. Puangdownreong, K-N. Areerak, K-L. Areerak, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn	บทความนี้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบตามู (tabu search) ซึ่งเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์วิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ นำมาใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ
2010	T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak	บทความนี้นำเสนอจินเนติกอัลกอริทึมสำหรับการออกแบบตัวกรองกำลังแบบแยกทีฟ ในระบบไฟฟ้ากำลัง
2002	K-N. Areerak and S. Sujitjorn	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการค้นหาแบบตามูกับจินเนติกอัลกอริทึม
2010	U. Leeton, D. Uthitsunthorn, U. Kwannetr, N. Sinsuphun and T. Kulworawanichpong	บทความนี้เสนอวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) มาทำการลดค่ากำลังงานสูญเสียในการไหลของกำลังไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม

1.5.2 ได้โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการตรวจสอบผลการตอบสนองของระบบ

1.5.3 ได้องค์ความรู้ด้านการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

1.5.4 ได้ค้นแบบชุดทดสอบทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีวงจรแปลงผันแบบบักก์เป็นส่วนประกอบ

1.5.5 บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.5.5 ผลที่ได้จากการวิจัย จะนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งระดับปริญญาตรี และปริญญาโท เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 6 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของโครงการวิจัย การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ไม่มีตัวควบคุม และมีตัวควบคุมพีไอ โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทที่ 3 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวและการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค พร้อมทั้งตรวจสอบเสถียรภาพของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบ รวมถึงการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของการออกแบบแต่ละวิธี

บทที่ 4 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดตัวต้านทาน ทั้งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ นอกจากนี้ยังนำเสนอการสร้าง ชุดวงจรตรวจจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 5 นำเสนอผลการทดสอบของระบบจริง ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นความต้านทานที่มีตัวควบคุมพีไอ พร้อมทั้งผลการเปรียบเทียบ ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบแต่ละวิธี

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 6 ส่วน คือ *ภาคผนวก ก.* แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB *ภาคผนวก ข.* แสดงตารางผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ *ภาคผนวก ค.* แสดงรายละเอียดโปรแกรมการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ *ภาคผนวก ง.* แสดงความรู้พื้นฐานของบอร์ด AVR *ภาคผนวก จ.* แสดงรายละเอียดโปรแกรมควบคุมภาษา C++ ของ AVR สำหรับควบคุม

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ภาคผนวก จ.แสดงรายการบทความทางวิชาการ
ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัย



บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่มีตัวควบคุมพีไอ

2.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับวิศวกรในการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมพลวัตของระบบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับผู้วิจัย และเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี โดยทั่วไปแล้ววงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากผลของสวิตช์ในระบบ ซึ่งวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะกำจัดผลกระทบของสวิตช์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา ซึ่งจะง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมรวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 กรณี คือ กรณีไม่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม รวมทั้งผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการอภิปรายผล

2.2 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เป็นวิธีการที่ใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะของวงจร (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ซึ่งอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

โดยทั่วไป สัญญา $f(t)$ ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น T สามารถเขียนให้อยู่ในรูป อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (T.W. Gamelin, 2000) ดังสมการที่ (2-1) ดังนี้

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (2-1)$$

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

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

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

คุณสมบัติที่จำเป็น 3 ข้อของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรจริงแปลงผันกำลัง (T.W. Gamelin, 2000) โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังนี้

- ข้อที่ 1: คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (2-3) ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega_s \langle x \rangle_k \quad (2-3)$$

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

$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \quad (2-4)$$

- ข้อที่ 3: ถ้า $f(t)$ คือ ค่าจริง (real-value periodic waveform) แสดงได้ดังสมการที่ (2-5) ดังนี้

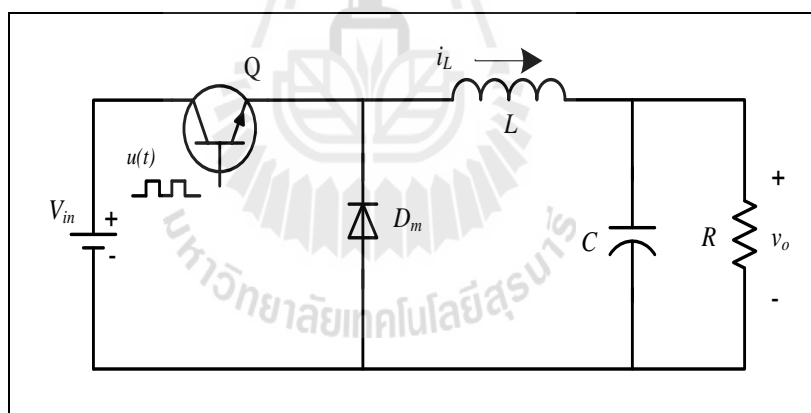
$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (2-5)$$

จากสมการที่ (2-1) และ (2-2) ค่า k เป็นตัวบ่งบอกความถูกต้องของการใช้ อนุกรมฟูรีเยร์ ถ้า k มีค่าเป็นอันดับอนันต์ ค่าผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับ 0 และถ้าสัญญาณที่ไม่ปรากฏการสั้นไกว สามารถกำหนดให้ค่า $k = 0$ ซึ่งเรียกวินี้ว่า การประมาณค่าอันดับศูนย์ (Mahdavi, Emadi, Bellar, and Ehsani, 1997) หรือถ้าสัญญาณมีการสั้นไกว สามารถกำหนดให้ k มีค่าเป็น -1, 1 ซึ่งจะเรียกวินี้ว่า การประมาณค่าอันดับหนึ่ง (A. Emadi, 2004) ในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

2.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

2.3.1 กรณีไม่มีตัวควบคุม

วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{in} แทนอุปกรณ์สวิตช์ ในที่นี้ใช้ มอสเฟส ส่วน $u(t)$ แทนสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน L แทนขดลวดเหนี่ยวนำ C แทนตัวเก็บประจุ และ R แทนโหลดตัวต้านทาน

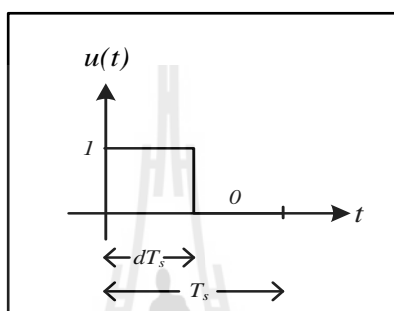


รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันแบบบัคค์กรณีไม่มีตัวควบคุม

โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ในรูปที่ 2.1 เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากการใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ และกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ดังสมการการที่ (2-6) จากสมการพบว่าแบบจำลองที่ได้นั้นเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา สังเกตได้จากสัญญาณการสวิตช์ $u(t)$ ที่ติดอยู่ในรูปของเวลาปรากฏอยู่ในสมการ ซึ่งสัญญาณการสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 การนำสมการดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบตัวควบคุมหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะมีความ

ซับซ้อน ไม่สามารถอาศัยทฤษฎีพื้นฐานทางระบบควบคุมได้ ดังนั้นวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จะเข้ามากำจัดผลกระทบดังกล่าว

$$\begin{cases} \dot{i}_L = -\frac{1}{L}v_o + \frac{V_{in}}{L}u(t) \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_o \end{cases} \quad (2-6)$$



รูปที่ 2.2 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัตต์

จากรูปที่ 2.2 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันที่ขึ้นกับเวลา ให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ได้ดังสมการที่ (2-7) ดังนี้

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (2-7)$$

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

ใช้สมการที่ (2-2) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันในสมการที่ (2-7) ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์สำหรับการประมาณค่าอันดับศูนย์ ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

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

$$\langle u \rangle_0 = \frac{I}{T_s} \int_0^{dt_s} I e^0 dt$$

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

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

จะได้สัมประสิทธิ์การประมาณค่าอันดับศูนย์ของสัญญาณการสวิตช์แสดงดังสมการที่ (2-8) ดังนี้

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (2-8)$$

เนื่องจาก V_{in} เป็นค่าคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลงดังนั้น

$$\langle V_{in} \rangle_0 = V_{in} \quad (2-9)$$

เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันแบบบักก์ในรูปที่ 2.1 พบว่ามีตัวแปรสถานะของวงจร 2 ตัวคือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_c) ดังนั้นสามารถเขียนสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ i_L และ v_c โดยเลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ หรือไม่คิดผลของการสั่นไกวของสัญญาณ ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว สามารถกำหนดตัวแปรสถานะของแบบจำลองได้ดังสมการที่ (2-10) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle i_L \rangle_0 = i_L \\ \langle v_c \rangle_0 = v_c \end{cases} \quad (2-10)$$

ดังนั้น นำสมการที่ (2-3) - (2-5) มาประยุกต์กับสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (2-6) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์กรณีไม่มีตัวควบคุมในรูปที่ 2.1 ที่ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

จากสมการที่ (2-6) สามารถใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปพิสูจน์หาแบบจำลองคือการใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ i_L เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองโดยที่เลือกให้การประมาณค่าอันดับศูนย์ ($k=0$) แสดงได้ดังนี้

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

จากสมการที่ (2-8) - (2-10) สามารถแทน $\langle i_L \rangle_0 = i_L$, $\langle V_m \rangle_0 = V_m$, และ $\langle u \rangle_0 = d$ จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาแสดงดังสมการที่ (2-11) ดังนี้

$$i_L = -\frac{1}{L} v_o + \frac{d}{L} V_m \quad (2-11)$$

จากสมการที่ (2-6) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ v_o เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (2-12) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle \dot{v}_o \rangle = \frac{1}{C} \langle i_L \rangle_0 - \frac{1}{RC} \langle v_o \rangle_0 - jk\omega_s \langle v_o \rangle_0 \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_o \end{cases} \quad (2-12)$$

จากสมการที่ (2-11) และ (2-12) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคกักรณีไม่มีตัวควบคุมที่ไม่ขึ้นกับเวลา สามารถเขียนสมการเป็นแบบจำลองปริภูมิสถานะแสดงดังสมการที่ (2-13) ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ y &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (2-13)$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปรสถานะ อินพุต และเอาต์พุตเป็นดังสมการ

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

$$\text{อินพุต : } u = [V_m]$$

$$\text{เอาต์พุต : } y = [v_o]$$

- รายละเอียดของ **A**, **B**, **C** และ **D** แสดงดังสมการที่ (2-14) ดังนี้

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

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

■ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จำเป็นต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม MATLAB ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ในสมการที่ (2-13) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับ การจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ (2.1) โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB คูได้จากภาคผนวก ก ในรูปที่ ก.1 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.1 เป็นเพียงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเท่านั้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบทดสอบนั้นจะแสดงการออกแบบไว้ที่บทที่ 4

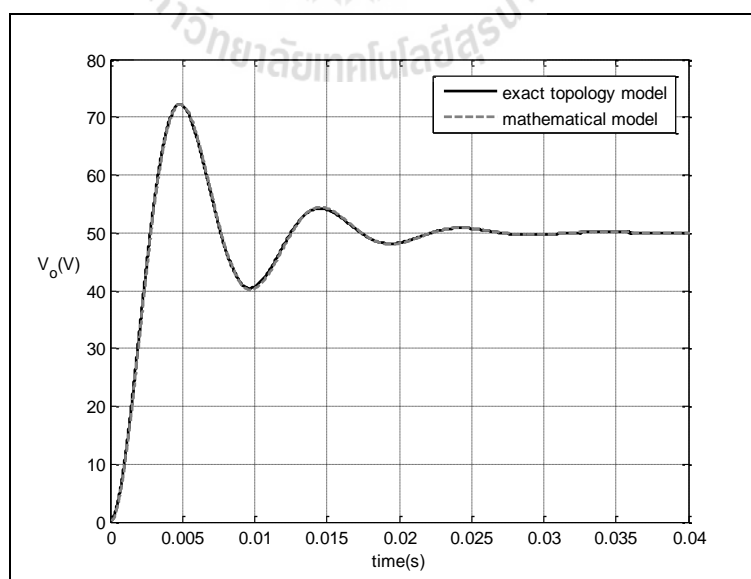
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 2.1

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 μF	ความจุไฟฟ้า
R	20 Ω	ความต้านทาน
f_s	10 kHz	ความถี่ของการสวิตช์

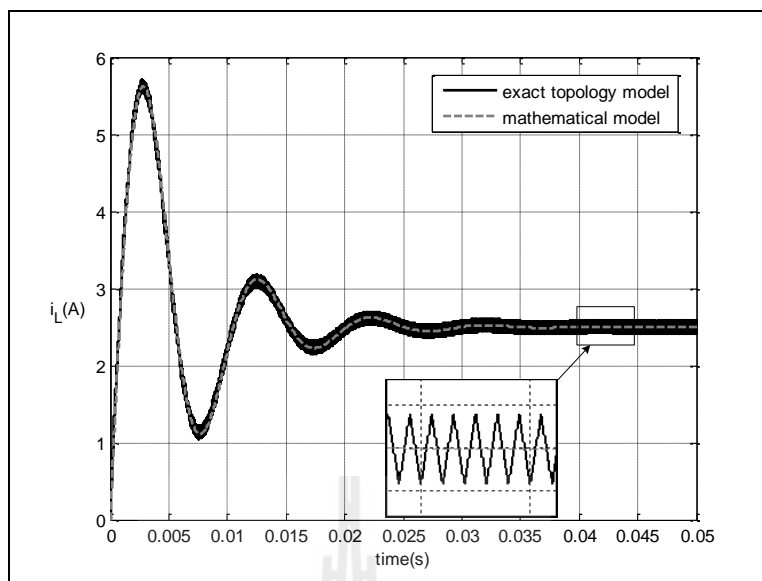
รูปที่ 2.3 ถึงรูปที่ 2.6 แสดงผลการตอบสนองของ v_o และ i_L สำหรับการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในสมการที่ (2-13) และรูปสัญญาณของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง

ร่วมกับ SIMULINK โดยการตรวจสอบความถูกต้องจะใช้ค่าแรงดันอินพุตให้กับวงจรที่ 100 V ซึ่งในรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4 คือผลการตอบสนองของ v_o และ i_L ที่ค่า $d = 50\%$ ตามลำดับ และ รูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6 สำหรับค่า $d = 70\%$

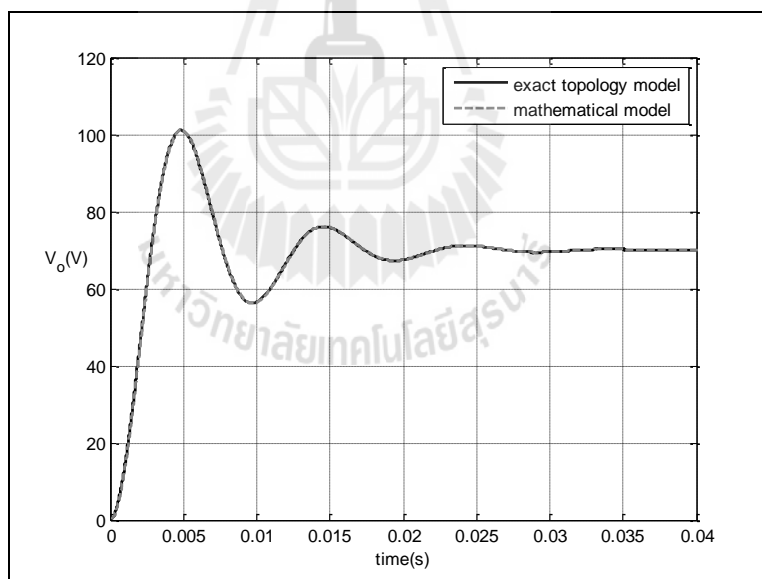
จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 2.3 ถึงรูปที่ 2.6 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว แต่อย่างไรก็ตาม ผลการตอบสนองที่ได้จากชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังจะปรากฏการกระเพื่อมของสัญญาณ เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ของระบบจริง แต่ผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่มี การกระเพื่อมของสัญญาณ เนื่องจากการพิสูจน์เพื่อให้ได้แบบจำลองนั้นไม่ได้พิจารณาผลของการสวิตช์ ด้วยเหตุนี้ในบางครั้งเราจึงเรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองแบบค่าเฉลี่ย (averaging model) ถึงแม้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่ได้อธิบายถึงการกระเพื่อมของสัญญาณ แต่พลวัตที่สำคัญของระบบยังคงอยู่และเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาระดับสูง อีกทั้งยังสามารถลดเวลาในการจำลองสถานการณ์ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะกำจัดผลกระทบของสวิตช์ในระบบออกไป ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งกรณีไม่มีตัวควบคุม ถือเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีการควบคุมพีไอ ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในหัวข้อถัดไป



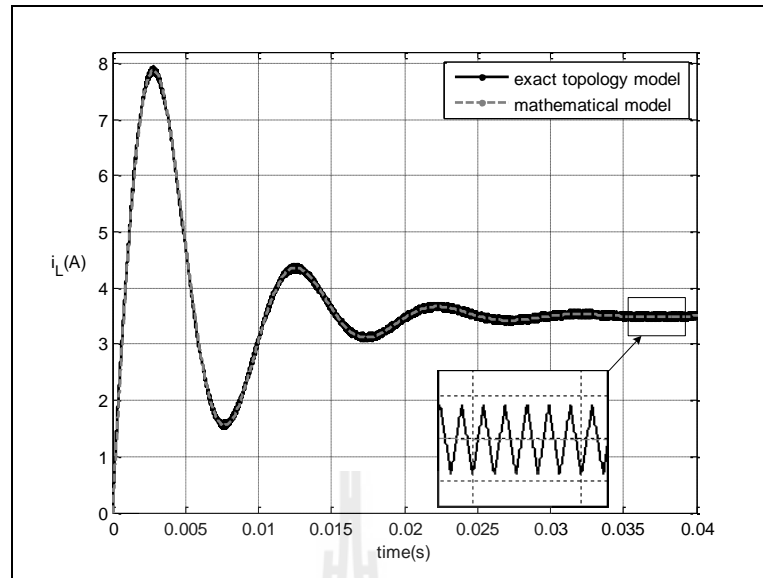
รูปที่ 2.3 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 %



รูปที่ 2.4 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 %



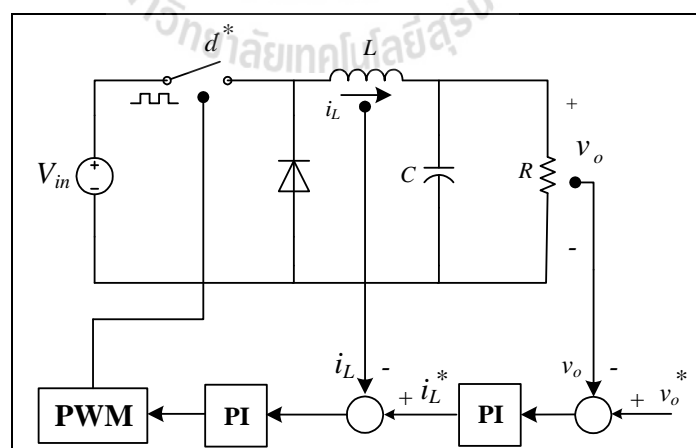
รูปที่ 2.5 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 70 %



รูปที่ 2.6 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 70 %

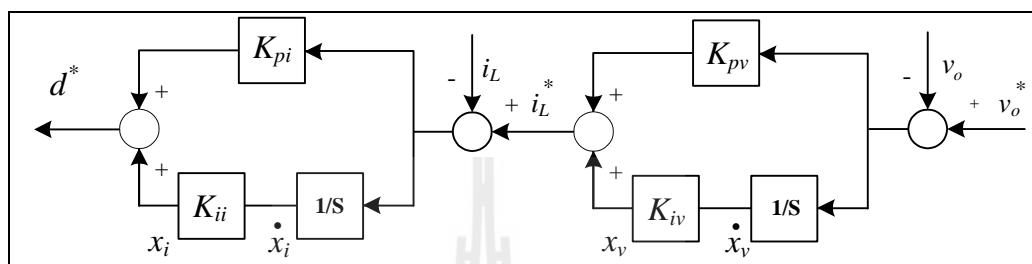
2.3.2 กรณีมีตัวควบคุมพีไอ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม



รูปที่ 2.7 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมพีไอ

จากรูปที่ 2.7 เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอ 2 รูป คือรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าหรือเรียกว่าการต่อกันแบบคาสเคดแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือ K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} , และ K_{ii} ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างระบบการควบคุม

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระบบควบคุมในรูปที่ 2.8 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปของ d^* แสดงดังสมการที่ (2-15) และกำหนดให้ x_v และ x_i เป็นตัวแปรสถานะของรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-16) และ (2-17) ตามลำดับ

$$d^* = -K_{pi}i_L - K_{pv}K_{pi}v_o + K_{iv}K_{pi}x_v + K_{ii}x_i + K_{pv}K_{pi}v_o^* \quad (2-15)$$

$$\dot{x}_v = -v_o + v_o^* \quad (2-16)$$

$$\dot{x}_i = -i_L - K_{pv}v_o + K_{iv}x_v + K_{pv}v_o^* \quad (2-17)$$

ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม สามารถดำเนินการได้โดยการแทนค่า d ในสมการที่ (2-11) ด้วย d^* จากสมการที่ (2-15) จากนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 2.7 ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (2-18) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{-K_{pi}V_{in}i_L - (K_{pv}K_{pi}V_{in} + 1)v_o + K_{iv}K_{pi}V_{in}x_v + K_{ii}V_{in}x_i + K_{pv}K_{pi}V_{in}v_o^*}{L} \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C}i_L - \frac{v_o}{RC} \\ \dot{x}_v = -v_o + v_o^* \\ \dot{x}_i = -i_L - K_{pv}v_o + K_{iv}x_v + K_{pv}v_o^* \end{cases} \quad (2-18)$$

สมการที่ (2-18) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลองปริภูมิสถานะแสดงดังสมการที่ (2-19) ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}u \end{aligned} \quad (2-19)$$

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 (2-20) ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -\frac{K_{pi}V_{in}}{L} & -\frac{K_{pv}K_{pi}V_{in} + 1}{L} & \frac{K_{iv}K_{pi}V_{in}}{L} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 4} & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \frac{K_{pv}K_{pi}V_{in}}{L} \\ L \\ 0 \\ 1 \\ K_{pv} \end{bmatrix}_{4 \times 1} \\ \mathbf{C} &= [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]_{1 \times 4} & \mathbf{D} &= [0]_{1 \times 1} \end{aligned} \quad (2-20)$$

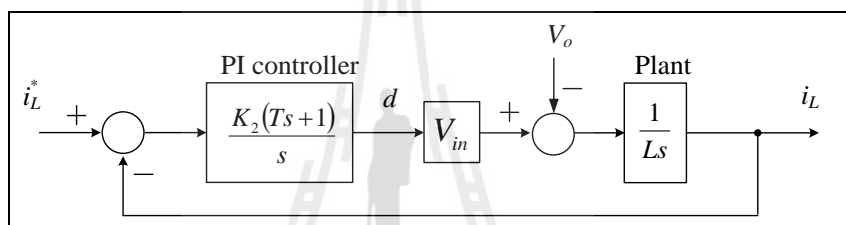
จากสมการที่ (2-19) พบแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมพีไออนั้น จะปรากฏพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (K_{pi} , K_{ii} , K_{pv} , K_{iv}) อยู่ภายในแบบจำลอง ซึ่งเราสามารถประยุกต์วิธีทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ทำให้สมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันดียิ่งขึ้น ซึ่งการออกแบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

2.4 การออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คของวงจรแปลงผันแบบบักก์

การออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ได้อาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมของระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมฟีดแบ็ค 2 รูปต่อกันแบบคาสเคด (K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน การออกแบบตัวควบคุมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมรูปกระแสไฟฟ้า และการออกแบบตัวควบคุมรูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะได้นำเสนอดังต่อไปนี้

2.4.1 การออกแบบตัวควบคุมรูปกระแสไฟฟ้า

ในส่วนของรูปของการควบคุมกระแสไฟฟ้าของระบบ สามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2.9 ดังนี้



รูปที่ 2.9 รูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.9 K_2 และ T คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมรูปกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ดังนั้นจากรูปที่ 2.9 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (2-21) ดังนี้

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

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมอาศัยระบบสมการอันดับ 2 ของระบบควบคุมแสดงดังสมการที่ (2-22)

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

ดังนั้น ตัวควบคุมลูกระแส สามารถออกแบบด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวหารของสมการที่ (2-21) และ (2-22) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (2-23) และ (2-24) ดังนี้

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

$$\omega_{ni} = N\omega_{nv} = \sqrt{\frac{K_2 V_{in}}{L}}, \quad N > 4 \quad (2-24)$$

โดยที่ N คือค่าคงที่ สำหรับกำหนดแบนด์วิธของลูกระแสไฟฟ้า

จากสมการที่ (2-24) สามารถหาค่า K_2 แสดงดังสมการที่ (2-25) ดังนี้

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

จากรูปที่ 2.9 สามารถเขียนตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปตามสมการที่ (2-26) ดังนี้

$$K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} = \frac{K_2(Ts + 1)}{s} \quad (2-26)$$

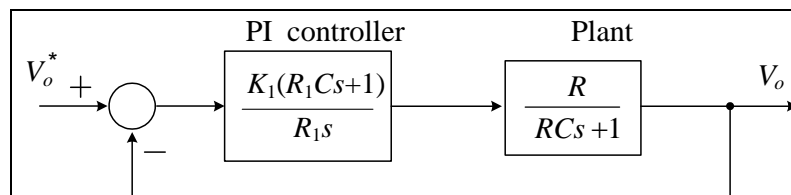
จากสมการที่ (2-23), (2-25) และ (2-26) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ K_{pi} และ K_{ii} สำหรับลูกระแสไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2-27) และ (2-28) ดังนี้

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

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

2.4.2 การออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า

ในส่วนของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบในรูปที่ 2.7 สามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2.10 ดังนี้



รูปที่ 2.10 ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.10 K_I และ R_I คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่ R และ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบักต์ ตามลำดับ ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปแรงดันไฟฟ้าแสดงสมการที่ (2-29) ดังนี้

$$\frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{K_I R_I R C s + K_I R}{R_I R C s^2 + (R_I + K_I R_I R C) s + K_I R} \quad (2-29)$$

ตัวควบคุมลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า สามารถออกแบบด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวหารของสมการที่ (2-22) และ (2-29) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (2-30) และ (2-31) ดังนี้

$$\omega_{nv} = \sqrt{\frac{K_I}{R_I C}} \quad (2-30)$$

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

จากสมการที่ (2-30) และ (2-31) สามารถหาค่า K_I และ R_I ดังสมการที่ (2-32)

และสมการที่ (2-33) ดังนี้

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

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

จากรูปที่ 2.10 สามารถเขียนตัวควบคุมฟีดแบ็คให้อยู่ในรูปตามสมการที่ (2-34) ดังนี้

$$K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} = \frac{K_1(R_1Cs + 1)}{R_1s} \quad (2-34)$$

จากสมการที่ (2-32), (2-33) และ (2-34) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟีดแบ็ค K_{pv} และ K_{iv} สำหรับลูกระแสไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2-35) และ (2-36) ดังนี้

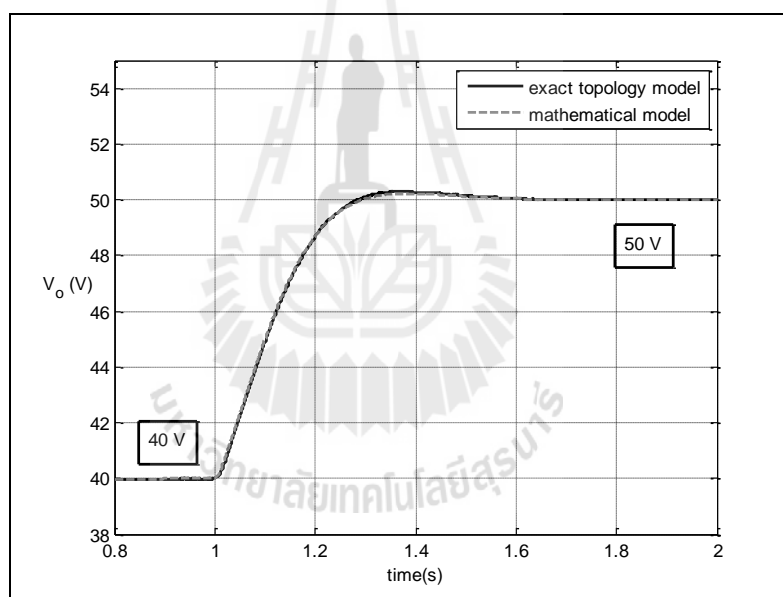
$$K_{pv} = K_1 C = \frac{2\zeta_v \omega_{nv} RC - 1}{R} \quad (2-35)$$

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

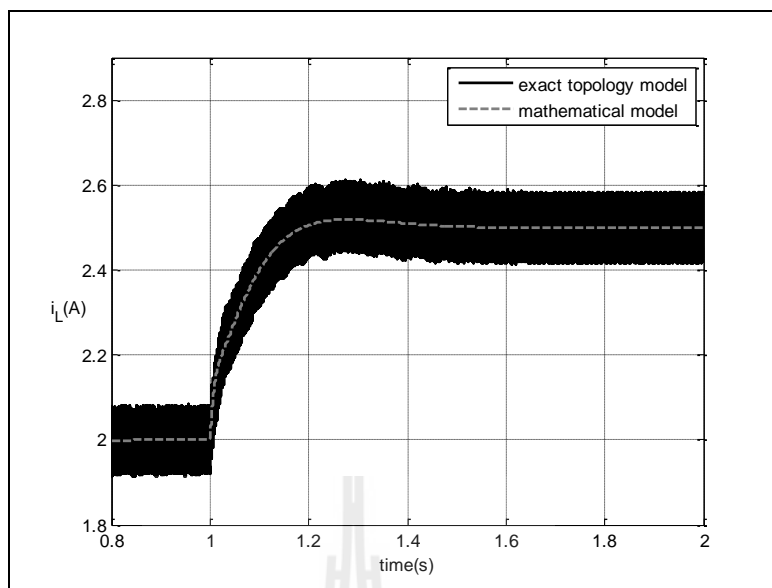
ตัวควบคุมฟีดแบ็คของลูกระแสไฟฟ้าและลูประแรงดันไฟฟ้า (K_{pi} , K_{ii} , K_{pv} , K_{iv}) สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (2-27), (2-28), (2-35) และ (2-36) ตามลำดับ ซึ่งสมการของตัวควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบ คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูประแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) และลูกระแสไฟฟ้า (ζ_i), แบนด์วิธของลูประแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) และแบนด์วิธของลูกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) ตัวควบคุมฟีดแบ็คสำหรับวิธีแบบดั้งเดิมในหัวข้อนี้ สามารถออกแบบได้โดยการเลือก $\zeta_v = 0.8$, $\zeta_i = 0.8$, $\omega_{nv} = 250$ rad/s และ $\omega_{ni} = 10 \times 250$ rad/s ดังนั้น พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟีดแบ็คสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมมีค่าดังนี้ $K_{pv} = 0.01$, $K_{iv} = 9.375$, $K_{pi} = 0.6$ และ $K_{ii} = 937.5$

2.5 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

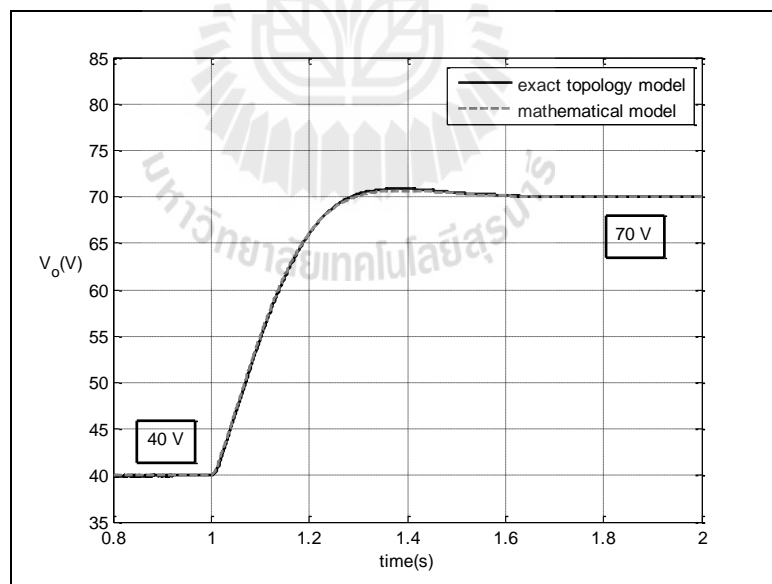
เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ ดังสมการที่ (2-19) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับ การจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ (2.7) โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB คูได้จากภาคผนวก ก ในรูป ก.2 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการ จำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 2.1 สำหรับรูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12 แสดงผลการ ตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o) และผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์ (i_L) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) จาก 40 V ไปเป็น 50 V ที่ เวลา 1 วินาที และ รูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 แสดงผลการตอบสนองเช่นเดียวกันกับรูปที่ 2.11 โดย ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) จาก 40 V ไปเป็น 70 V



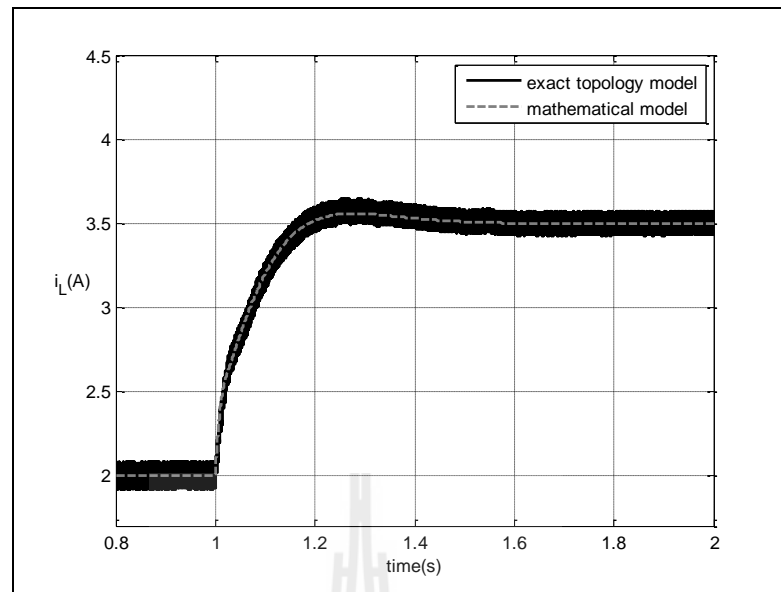
รูปที่ 2.11 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง (V_o^*) จาก 40 V เป็น 50 V ที่เวลา 1 วินาที



รูปที่ 2.12 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง (V_o^*) จาก 40 V เป็น 50 V ที่เวลา 1 วินาที



รูปที่ 2.13 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง (V_o^*) จาก 40 V เป็น 70 V ที่เวลา 1 วินาที



รูปที่ 2.14 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง(V_o^*) จาก 40 V เป็น 70 V ที่เวลา 1 วินาที

จากการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 2.11 ถึงรูปที่ 2.14 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ซึ่งข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประการที่สำคัญนั้นก็คือ การใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่สั้น ซึ่งการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK นั้นจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ประมาณ (t_{fs}) 560 วินาที ส่วนการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ประมาณ (t_{av}) 40 วินาที เมื่อคำนวณการประหยัดเวลาดังสมการที่ (2-37)

$$\%t_{saving} = \frac{t_{fs} - t_{av}}{t_{fs}} \times 100\% \quad (2-37)$$

จากการคำนวณ เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองสถานการณ์จะทำให้ประหยัดเวลาในการจำลองสถานการณ์ได้ถึง 92.86% ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์เพียง 1 รอบของ 1 ชุดพารามิเตอร์เท่านั้น ซึ่งในบทที่ 3 ของงานวิจัยจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วย

วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ แต่การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจะต้องมีการคำนวณแบบซ้ำ ๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบ เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่ต้องคำนวณหลายรอบ ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบการประหยัดเวลาในการจำลองสถานการณ์

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

ผลจากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากช่วยลดเวลาในการจำลองสถานการณ์ได้ถึง 92.86% ส่วนรายละเอียดของการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

2.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 2 นำเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นความต้านทานทั้ง กรณีที่ไม่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ในบทนี้ ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังทั้งในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว ซึ่งผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบดังกล่าวถือว่าเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมพีไอที่นำเสนอไว้ในบทนี้ ถือเป็นองค์ความรู้ในส่วนที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะเป็นเนื้อหาในส่วนของบทที่ 3 โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะได้รับการนำเสนอต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

3.1 บทนำ

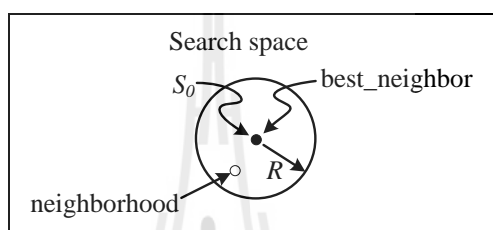
จากบทที่ที่ผ่านมาได้นำเสนอ การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์ การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตยังมีการฟุ้งเกินของสัญญาณ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วย สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ปรากฏพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอยู่ในแบบจำลอง เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทำให้การจำลองสถานการณ์ของระบบเป็นไปอย่างรวดเร็ว เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยใช้วิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว และวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค อัลกอริทึมดังกล่าวจะถูกใช้สำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมพีไอ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ทั้ง 2 วิธีดังกล่าวจะถูกเปรียบเทียบกับ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งผลการเปรียบเทียบได้นำเสนอในส่วนท้ายพร้อมการอภิปรายผล

3.2 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามู (Tabu Search : TS) (Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Areerak, K-L., Kulworawanichpong, T. and Sujitjorn, S. 2005). (Areerak, K-N., Kulworawanichpong, T. and Sujitjorn, S. 2004). มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น อัลกอริทึมนี้ได้พัฒนาขึ้นโดย กองพัน อารีรักษ์ และ สรวาตุมิ สุจิตจร ในปี พ.ศ. 2545 โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตามูธรรมชาติคือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius) ซึ่งกลไกการเดินย้อนรายนี้นี้จะใช้แก้ปัญหาสำหรับการติดอยู่ในคำตอบที่เป็นแบบวงแหวน

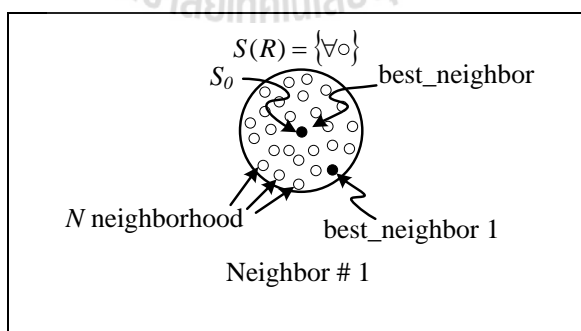
เฉพาะถิ่น (local optimum) สำหรับกลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหาจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา
 ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา

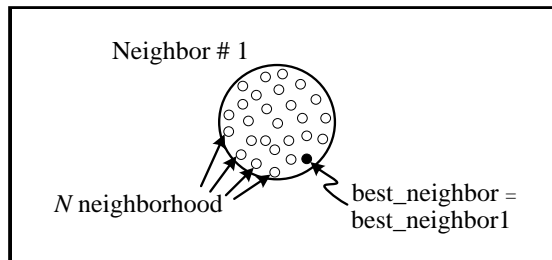
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ รอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 3.2



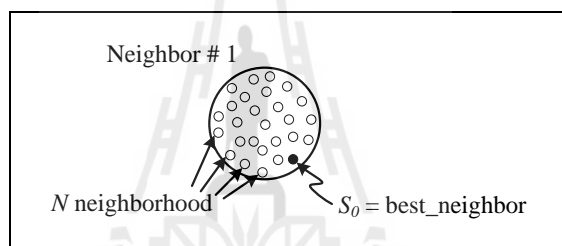
รูปที่ 3.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

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

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตาม ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



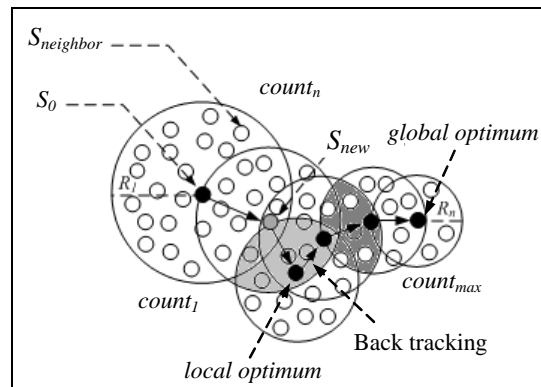
รูปที่ 3.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่



รูปที่ 3.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่

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

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นดังรูปที่ 3.5 และจะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-1) จะทำการลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งทำให้คำตอบจากการค้นหามีความละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 3.5 กลไกการเดินข้อนรอยและการปรับลดค่ารัศมี

$$radius_{new}(R_n) = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (3-1)$$

โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (Decreasing Factor)

3.3 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

ในปี ค.ศ. 1995 James Kennedy และ Russell Eberhart ได้นำเสนอการค้นหาค่าที่เหมาะสมแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) (Eberhart, R. and Kennedy, J., 1995) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการค้นหาเชิงประชากรโดยมีอนุภาคย่อย ๆ (individual particle) จำนวน NP อนุภาครวมกลุ่มกันเคลื่อนที่ไปในปริภูมิเกิน (hyperspace) เพื่อค้นหาคำตอบที่ต้องการ โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคจะแปรเปลี่ยนไปตามข้อมูลการค้นหาที่ผ่านมาของอนุภาคนั้น ๆ และข้อมูลการค้นหาจากอนุภาคที่เจอคำตอบดีที่สุดภายในกลุ่ม สำหรับขั้นตอนและวิธีการค้นหาที่เหมาะสมแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค อธิบายได้ดังนี้

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

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มค่าเวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector: \bar{P}) และเวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector : \bar{V}) ของแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากร โดยเวกเตอร์ตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคจะมีมิติเท่ากับจำนวนของตัวแปรที่ต้องการค้นหาคำตอบในแต่ละปัญหา เช่นในกรณีการ

ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิโอสซึ่งมีจำนวนตัวแปรทั้งหมด 4 ตัว ดังนั้น เวกเตอร์ตำแหน่งและเวกเตอร์ความเร็วของแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากรจะมีมิติเท่ากับ 4 ดังสมการที่ (3-2) และ (3-3) ดังนี้

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

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

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 หรือค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบกว้าง ($gbest$) ให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นดังสมการที่ (3-4) และ (3-5)

$$gbest = F(\vec{P}_i) \quad (3-4)$$

$$\vec{P}_{gbest} = \vec{P}_i \quad (3-5)$$

กรณีที่ 2 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใด มีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคตัวเดียวกัน ($pbest$) ที่เคยค้นพบมาก่อน ให้ทำการบันทึกค่าความเหมาะสมและเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคนั้นไว้ดังสมการที่ (3-6) และ (3-7)

$$pbest = F(\vec{P}_i) \quad (3-6)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{pbest,i} = \bar{\mathbf{P}}_i \quad (3-7)$$

ขั้นที่ 4 ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาคด้วยสมการที่ (3-8) จากสมการดังกล่าว เทอมที่สองและสามเรียกว่า องค์ประกอบเชิงปริชาณ (cognitive component) และองค์ประกอบทางสังคม (social component) ตามลำดับ

$$\vec{V}_i(new) = \vec{V}_i(old) + \underbrace{\rho_p(\bar{\mathbf{P}}_{pbest,i} - \bar{\mathbf{P}}_i(old))}_{\text{cognitive component}} + \underbrace{\rho_g(\bar{\mathbf{P}}_{gbest} - \bar{\mathbf{P}}_i(old))}_{\text{social component}} \quad (3-8)$$

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

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

C_p คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบเชิงปริชาณ

C_g คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบทางสังคม

องค์ประกอบเชิงปริชาณที่ปรากฏในสมการที่ (3-8) ใช้แทนประสบการณ์ค้นหาคำตอบของแต่ละอนุภาค ในขณะที่องค์ประกอบเชิงสังคมจะแทนประสบการณ์ค้นหาของกลุ่มอนุภาค ซึ่งถ้าไม่พิจารณาใช้องค์ประกอบเชิงสังคมในการปรับค่าเวกเตอร์ความเร็ว อัลกอริทึมการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคจะถูกเรียกว่าเป็นแบบเฉพาะที่ (local best) สำหรับพารามิเตอร์ ρ_p ถูกใช้สำหรับการจำกัดขนาดเส้นทางเดินของอนุภาคออกจากตำแหน่งที่ค่าความเหมาะสมดีที่สุด ($\bar{\mathbf{P}}_{gbest}$) โดยถ้า ρ_p มีค่ามาก จะทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการกวัดแกว่ง ในขณะที่ ถ้า ρ_p มีค่าน้อยจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่อย่างเรียบ สำหรับพารามิเตอร์ ρ_g ถูกใช้สำหรับการจำกัดเส้นทางเดินของกลุ่มอนุภาค โดยถ้า ρ_g มีค่ามาก จะทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการกวัดแกว่ง และถ้า ρ_g มีค่าน้อย จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่อย่างเรียบเช่นกัน

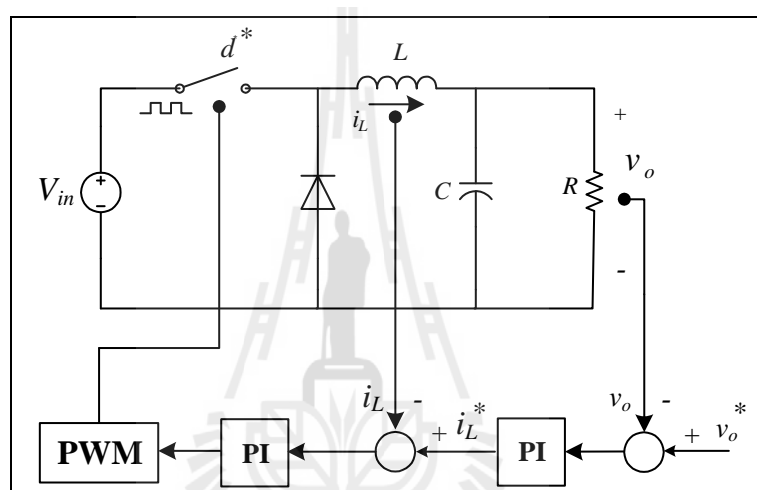
ขั้นที่ 5 ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับรอบการค้นหาต่อไป (next round) ด้วยสมการที่ (3-9)

$$\bar{\mathbf{P}}_i(new) = \bar{\mathbf{P}}_i(old) + \vec{V}_i(new) \quad (3-9)$$

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

3.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับระบบดังรูปที่ 3.6 ดังนี้



รูปที่ 3.6 วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ

โดยการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้น จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งการนำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเข้ามาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นมีเหตุผลที่สำคัญ 2 ประการคือ

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

2) ในระหว่างกระบวนการ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งหากใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและ SIMULINK จะไม่สามารถทำได้

จากบทที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัวควบคุมพีไอ สามารถเขียนสรุปได้ดังสมการที่ (3-10)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ y &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (3-10)$$

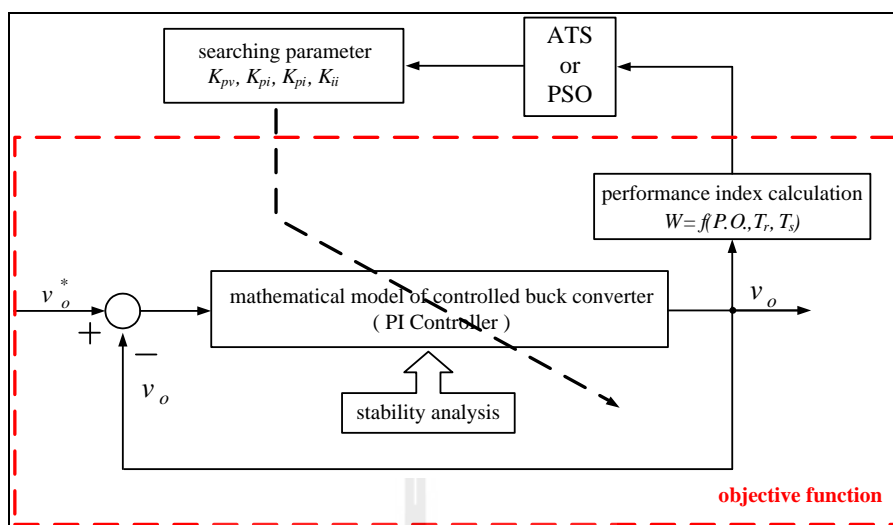
โดยเมตริกซ์ \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} และ \mathbf{D} แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

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

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_{pv}K_{pi}V_{in}}{L} \\ 0 \\ 1 \\ K_{pv} \end{bmatrix}_{4 \times 1}$$

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

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



รูปที่ 3.7 แผนภาพบล็อกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ
ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

จากรูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพบล็อกสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ โดยใช้วิธีปัญญาประดิษฐ์ โดยการออกแบบจะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ($K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}$) จากขอบเขตที่กำหนด ซึ่งในการค้นหาพารามิเตอร์ในแต่ละรอบนั้น ระบบจะตรวจสอบค่า W ซึ่งอธิบายได้ดังสมการที่ (3-11) รวมถึงการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบในระหว่างการค้นหา และจะทำการค้นหาจนกว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ($K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}$) ที่ทำให้ผลการตอบสนองดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ค่า W มีค่าน้อยที่สุด

$$W(T_{Rp.u.}, T_{Sp.u.}, P.O._{p.u.}) = \sigma T_R + \alpha T_S + \gamma P.O. \quad (3-11)$$

และ σ, α, γ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-12)

$$\sigma + \alpha + \gamma = 1 \quad (3-12)$$

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

T_R คือ ช่วงเวลาขึ้น (rise time)

T_S คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time)

σ , α , และ γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของ T_R , T_S และ $P.O.$ ตามลำดับ

สำหรับขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ได้กำหนดจากค่าแบนด์วิธการทำงานของ อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและการทำงานของอุปกรณ์กระแสดังนี้ $\omega_{nv} = 150 \text{ Hz} - 700 \text{ Hz}$ และ $\omega_{ni} = 2 \text{ kHz} - 20 \text{ kHz}$ ตามลำดับ จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมตามขอบเขตที่กำหนดจะได้ขอบเขตล่างและขอบเขตบนของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} , K_{ii}) ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

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

พารามิเตอร์	ขอบเขต	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
K_{pv}	0.0027	0.1347
K_{iv}	3.3750	73.5
K_{pi}	1.6	16
K_{ii}	2000	20000

3.4.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว (ATS)

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ในหัวข้อย่อยนี้ ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักคัทที่มีโหลดเป็นความต้านทานที่มีตัวควบคุมพีไอ ดังรูปที่ 3.6 และก่อนการนำวิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัวไปใช้ในการออกแบบ จำเป็นต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาตาบอดเชิงปรับตัวสำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัวจะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่า คือ จำนวนค่าตอบเริ่มต้น จำนวนค่าตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธีการค้นหาตาบอดเชิงปรับตัวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาตาบอดเชิงปรับตัว ของพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวนั้นได้นำเสนอไว้ที่ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1 – ตารางที่ ข.4

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัวทั้งหมดที่ได้นำเสนอในภาคผนวก ข ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวดังนี้

เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ

เลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ

เลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5

เลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

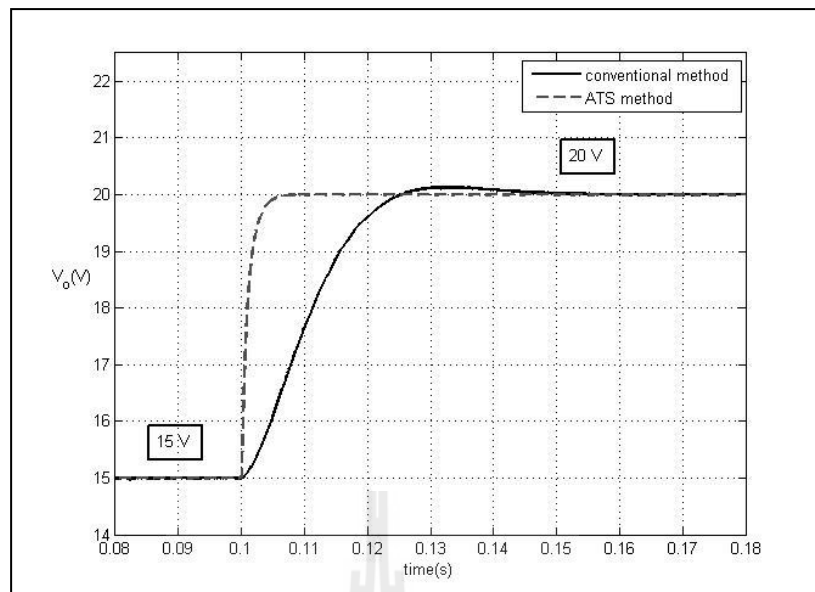
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาที่เหมาะสมแล้วนั้น ก็จะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมพีไอ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีตามูเชิงปรับตัวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 ดังนี้ (สำหรับโปรแกรมการออกแบบสามารถดูได้จากภาคผนวก ค)

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม 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

การจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก์ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและการออกแบบด้วยวิธี ATS โดยใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 3.2 ในการจำลองสถานการณ์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) จาก จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลาเท่ากับ 0.1 วินาที เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



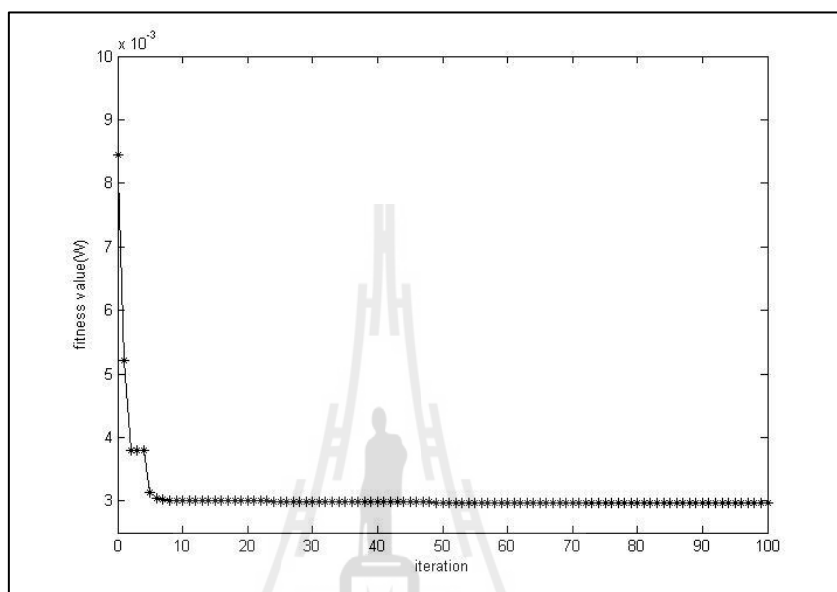
รูปที่ 3.8 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จากผลการจำลองสถานการณ์ รูปที่ 3.8 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยเริ่มจากการให้ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 15 V จากนั้น ที่เวลาของระบบเท่ากับ 0.1 วินาที จะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันของการควบคุมไปที่ระดับแรงดัน 20 V จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งได้อย่างถูกต้อง จากตารางที่ 3.3 สังเกตเห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี ATS นั้น ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าทั้ง ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และ การพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

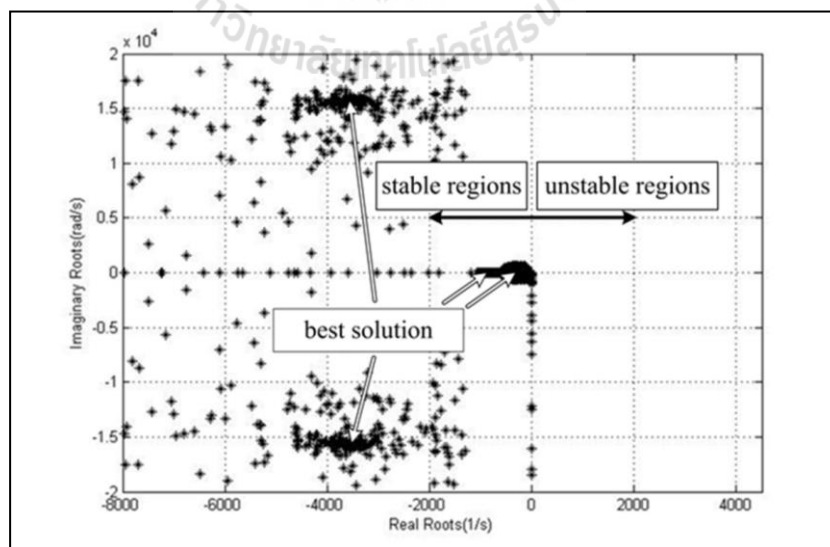
ตารางที่ 3.3 ตารางเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต

ผลการตอบสนอง	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี ATS
T_R	0.1113 s	0.1011 s
T_S	0.1539 s	0.1072 s
$P.O.$	12.8%	0.4%

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่ผ่านการทดสอบมาออกแบบตัวควบคุมพีไอ จะได้ผลของการลู่เข้าของค่า W แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 และการตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างกระบวนการค้นหาของการออกแบบด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจะแสดงค่าเจาะจงที่ได้จากกระบวนการค้นหาในแต่ละรอบ รวมถึงค่าที่ดีที่สุดจากการค้นหาด้วยวิธี ATS



รูปที่ 3.9 การลู่เข้าของค่า W ด้วยวิธี ATS



รูปที่ 3.10 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี ATS

3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO)

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค เช่นเดียวกันกับการออกแบบด้วยวิธี ATS โดยจะต้องทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคจะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ค่า คือ จำนวนอนุภาคการค้นหา (NP) ค่าคงที่ความเร่งแบบ C_p และค่าคงที่ความเร่งแบบ C_g ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคให้ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคของพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนั้นได้นำเสนอไว้ที่ภาคผนวก ข ตารางที่ ข.5 - ตารางที่ ข.7

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคทั้งหมดที่ได้นำเสนอในภาคผนวก ข ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวดังนี้

เลือกใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 40 ค่าตอบ

เลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ C_p เท่ากับ 0.75

เลือกใช้ค่าคงที่ความเร่งแบบ C_g เท่ากับ 0.25

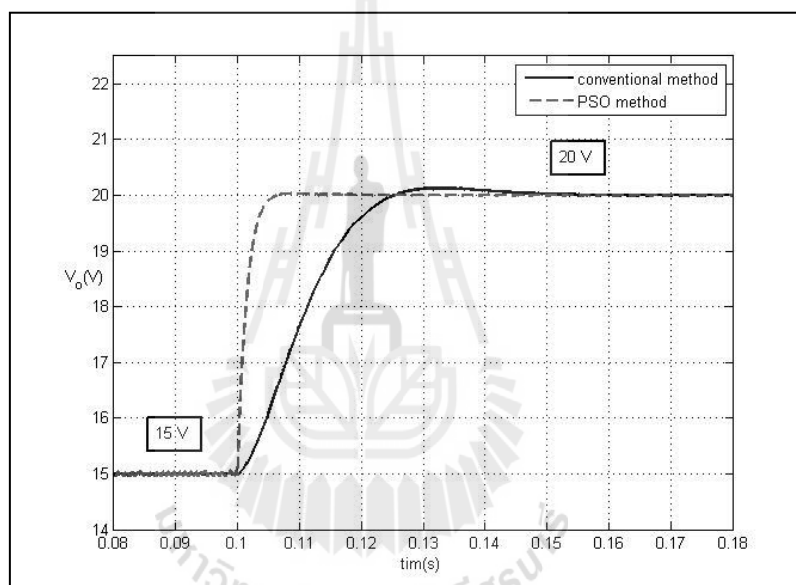
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาที่เหมาะสมแล้วนั้น ก็จะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมพีไอ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม 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

การจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัค โดยจะทำการเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและการออกแบบด้วยวิธี PSO โดยใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 3.4 ในการจำลองสถานการณ์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) จาก จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลาเท่ากับ 0.1 วินาที เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.11



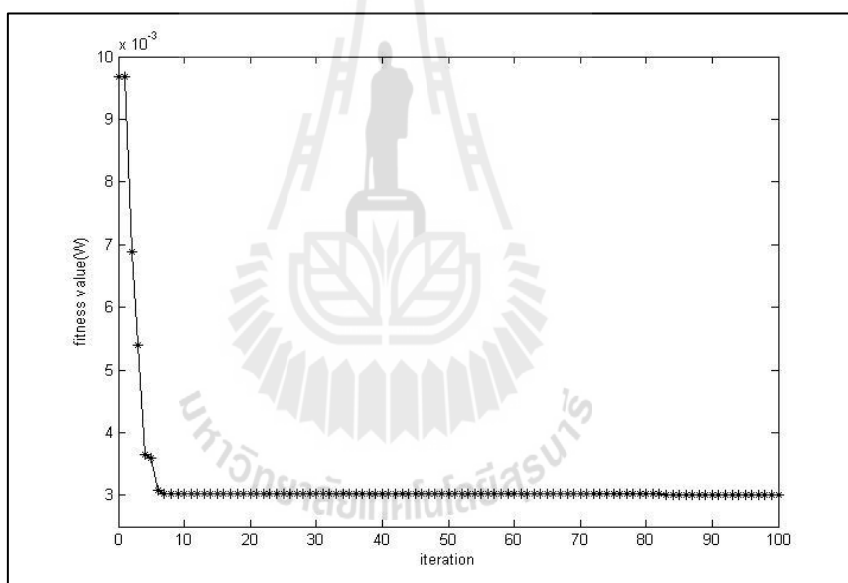
รูปที่ 3.11 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จากผลการจำลองสถานการณ์ รูปที่ 3.11 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยเริ่มจากการให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 15 V จากนั้น ที่เวลาของระบบเท่ากับ 0.1 วินาที จะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันของการควบคุมไปที่ระดับแรงดัน 20 V จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคได้อย่างถูกต้อง จากตารางที่ 3.5 สังเกตเห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี PSO นั้น ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าทั้ง ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และ การพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

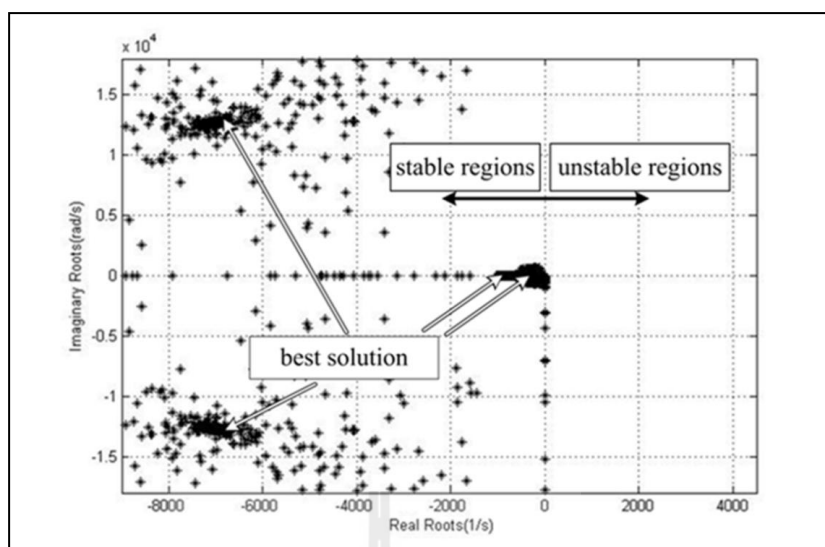
ตารางที่ 3.5 ตารางเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต

ผลการตอบสนอง	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี PSO
T_R	0.1113 s	0.1014 s
T_S	0.1539 s	0.1064 s
$P.O.$	12.8%	0.9%

เช่นเดียวกันเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของ PSO ที่ผ่านการทดสอบมาออกแบบตัวควบคุมพีไอ จะได้ผลของการลู่เข้าของค่า W แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 และการตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างกระบวนการค้นหาของการออกแบบด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งจะแสดงค่าเจาะจงที่ได้จากกระบวนการค้นหาในแต่ละรอบ รวมถึงค่าที่ดีที่สุดจากการค้นหาด้วยวิธี PSO



รูปที่ 3.12 การลู่เข้าของค่า W ด้วยวิธี PSO



รูปที่ 3.13 ค่าเจาะจงของระบบระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยวิธี PSO

3.5 สรุป

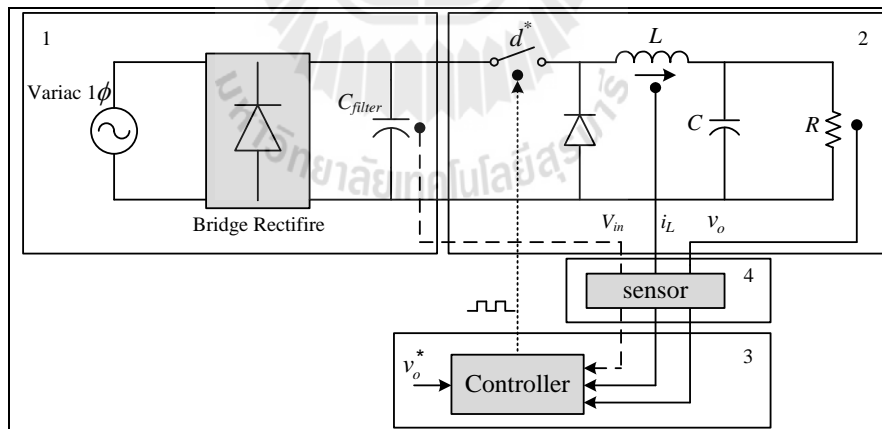
ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก์จากการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า โดยทำการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม การออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า การออกแบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ทำให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างการออกแบบตัวควบคุมได้อีกด้วย และเพื่อให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์บนคอมพิวเตอร์นั้นสามารถใช้ได้กับระบบจริง ในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัก์สำหรับทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งในบทที่ 4 จะกล่าวถึงรายละเอียดของการสร้างชุดทดสอบรวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา

บทที่ 4

การสร้างชุดทดสอบ

4.1 บทนำ

จากบทที่ 2 และบทที่ 3 ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ได้ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ด้วยเหตุนี้ในบทนี้ จึงได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบ วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.1 ดังนี้



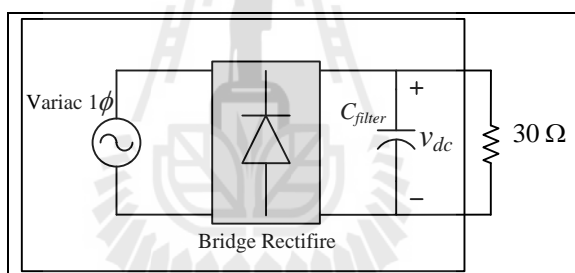
รูปที่ 4.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

จากโครงสร้างของชุดทดสอบในรูปที่ 4.1 นั้นสามารถแบ่งได้ดังนี้ ส่วนที่ 1 จะเป็นในส่วน of แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ส่วนที่ 2 จะเป็นในส่วน of วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ส่วนที่ 3 จะเป็นในส่วน of ตัวควบคุม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัว

ควบคุมแบบพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยตัวควบคุมพีไอ จำเป็นจะต้องมีตัวตรวจจับ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตกคร่อมตัวต้านทาน เพื่อใช้ในการคำนวณสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งตัวตรวจจับแสดงได้ในส่วนที่ 4 สำหรับรายละเอียดการออกแบบในการสร้างชุดทดสอบของส่วนต่าง ๆ ในรูปที่ 4.1 ได้นำเสนอในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

4.2 แหล่งจ่าย

เนื่องจากการทดสอบชุดทดสอบ ผู้วิจัยไม่สามารถหาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สมบูรณ์แบบเพื่อป้อนให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน ซึ่งค่าความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ในการทดสอบคือ $30\ \Omega$ ดังนั้น วงจรในรูปที่ 4.2 จะใช้สำหรับออกแบบเพื่อสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงดังนี้



รูปที่ 4.2 วงจรสำหรับออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

งานวิจัยได้เลือกใช้ หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส (variac) ที่มีพิกัดอยู่ในช่วง $0 - 250\ V_{rms}$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้กับระบบ



รูปที่ 4.3 หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส

เนื่องจากวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่จะใช้ในการทดสอบ ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (v_{dc}) ไม่เกิน 60 V และโหลดความต้านทาน 30Ω ดังนั้นในการเลือกใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบบริดจ์ จะต้องมามีค่าพิกัดที่สามารถรองรับการใช้งานได้ ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบบริดจ์ที่สามารถหาซื้อในท้องตลาดคือ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 400 V และพิกัดกระแส 15 A แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



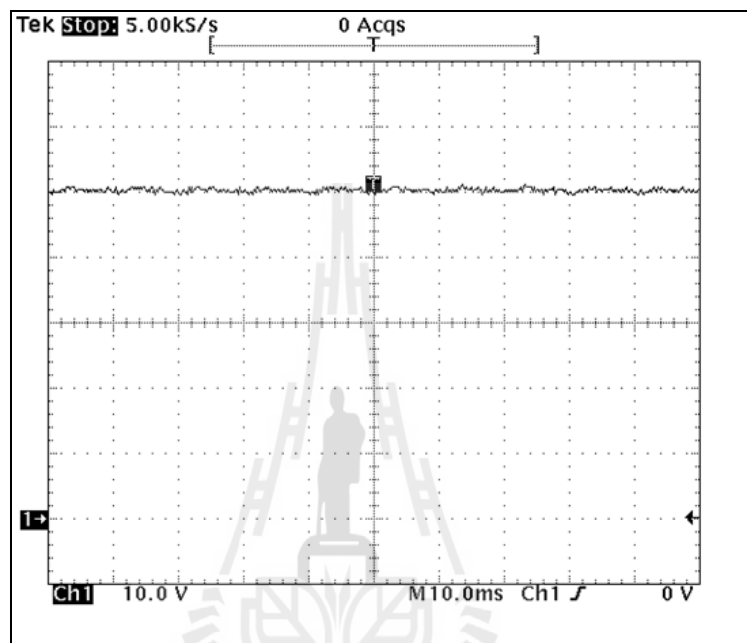
รูปที่ 4.4 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

สำหรับตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังจากผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งหมายถึง แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องมีแรงดันพลั่วน้อยที่สุด โดยเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่าพิกัด 400 V $3300 \mu F$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ดังนี้



รูปที่ 4.5 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองแรงดัน

สำหรับการทดสอบระบบดังรูปที่ 4.2 โดยจะป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากหม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จนทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_{dc} มีค่าเท่ากับ 50 V โดยมีโหลดเป็นความต้านทาน 30Ω ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ดังนี้

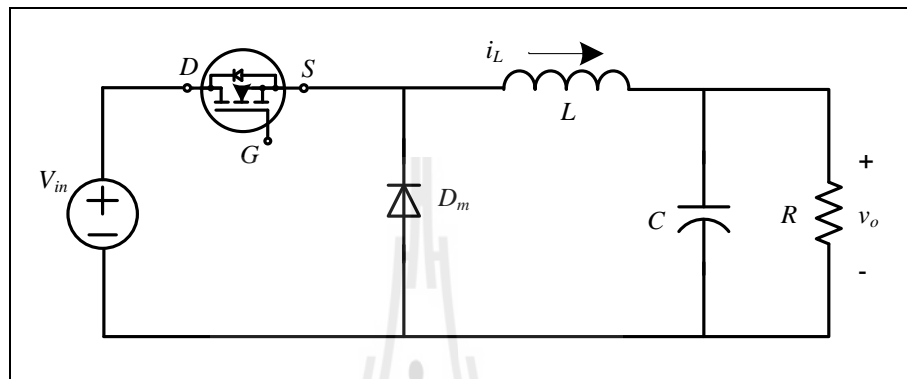


รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด

จากรูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดที่ประมาณ 50 V ซึ่งรูปสัญญาณนั้นมีความเป็นกระแสตรงที่ค่อนข้างดี คือไม่ค่อยมีการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด ดังนั้นจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้สร้างขึ้นมานั้นสามารถใช้งานได้ และเหมาะสมสำหรับจ่ายให้กับชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ สำหรับทำการทดสอบต่อไป

4.3 วงจรแปลงผันแบบบัคค์

การสร้างวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นความต้านทานที่ใช้ในงานวิจัย เพื่อใช้สำหรับทดสอบจำเป็นมีการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจร ซึ่งโครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคค์แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ดังนี้

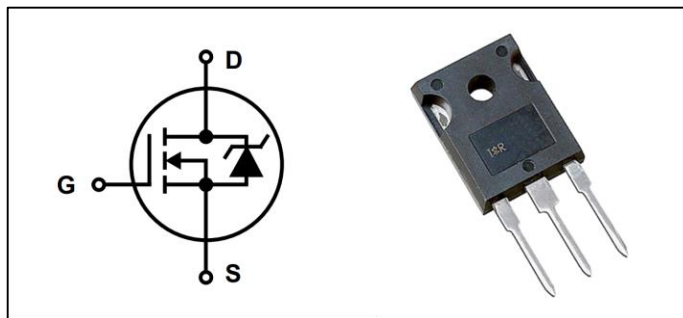


รูปที่ 4.7 โครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

สำหรับขั้นตอนของการออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคค์รวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับใช้งาน สามารถแสดงได้ดังนี้

วิธีการออกแบบมอดูลของมอสเฟต

วงจรแปลงผันแบบบัคค์ในงานวิจัย จะใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่เป็นลักษณะมอดูล การออกแบบอุปกรณ์จะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสเป็นสำคัญ โดยค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 220 V ส่วนค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดจะมีค่าเท่ากับ 3 A และในการออกแบบต้องคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25% ดังนั้นมอดูลที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะต้องมีค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 275 V และจะต้องมีค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้ามมากกว่า 3.75 A ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอดูลของ มอสเฟตที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 500 V ค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 13 A ซึ่งมอดูลดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 มอดูลของมอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัย

วิธีการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบ คือ ค่าแรงดันพลิว (ΔV_C : ripple voltage) ของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด และค่ากระแสพลิว (ΔI_L : ripple current) ของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) แสดงดังสมการที่ (4-1) และ (4-2) ดังนี้

$$\Delta I_L = \frac{V_o (V_{in} - V_o)}{f L V_{in}} \quad (4-1)$$

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8 f C} \quad (4-2)$$

- โดยที่ V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต
 V_o คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
 f คือ ความถี่ในการสวิตช์
 L ค่าความเหนี่ยวนำ
 ΔI_L คือ ค่ากระแสพลิว
 ΔV_C คือ ค่าแรงดันพลิว
 C คือ ค่าตัวเก็บประจุ

สำหรับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} V_{in} &= 60 \text{ V} \\ V_o &= 0 \text{ V ถึง } 60 \text{ V} \\ \Delta I_L &\leq 0.12 \text{ A} \\ \Delta V_C &\leq 10 \text{ mV} \\ f &= 10 \text{ kHz} \end{aligned}$$

ผู้วิจัยจะพิจารณาแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 30 V สำหรับการออกแบบ เนื่องจากเป็นแรงดันที่อยู่ภายในช่วงของการทดสอบ ซึ่งการออกแบบเป็นดังนี้

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุจะพิจารณาจากสมการที่ (4-1) และ (4-2) 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

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

จากการออกแบบข้างต้น การเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุจะต้องครอบคลุมการทำงานทั้งหมดของงานวิจัยนี้ โดยมีเงื่อนไขว่าค่ากระแสพลีวมีค่าไม่เกิน 0.12 A และค่าแรงดันพลีวไม่เกิน 10 mV เพราะฉะนั้นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ ที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบักคี่สำหรับงานวิจัยดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับดังนี้

- $L = 15 \text{ mH}$ พิกัดกระแส 5 A แรงดัน 220 V



รูปที่ 4.9 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์

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



รูปที่ 4.10 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์

วิธีการออกแบบไดโอด (D_m)

พิจารณาจากวงจรแปลงผันแบบบัคค์ในรูปที่ 4.7 ไดโอด D_m ต้องมีพิกัดของแรงดันมากกว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าพิกัดของไดโอด D_m ที่ 400 V แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบักก์

4.4 ตัวควบคุม

ในส่วน of ตัวควบคุมที่จะใช้สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน ในรูปที่ 4.1 ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 ในการคำนวณและประมวลผลสำหรับสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้สำหรับควบคุม ส่วนของความรู้พื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 สามารถดูได้จากภาคผนวก ง.

4.4.1 การสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

โดยทั่วไปโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอจะมีการทำงานแบบต่อเนื่อง (continuous) ซึ่งการนำตัวควบคุมพีไอมาใช้งานผ่านชุดไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จำเป็นต้องแปลงสมการควบคุมของตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปของการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) ซึ่งสามารถดำเนินการได้ดังนี้ โดยการสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR จะอาศัยพื้นฐานมาจากการนำตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ คือ การควบคุมแบบสัดส่วน และการควบคุมแบบอินทิกรัล มาใช้ร่วมกัน โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4-3)

$$V_{out} = K_p \cdot V_{error} + K_i \cdot \int V_{error} dt \quad (4-3)$$

โดยที่ V_{out} คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ

K_p คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

K_i คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

V_{error} คือ สัญญาณอินพุตของตัวควบคุมพีไอ

จากสมการที่ (4-3) สามารถนำมาสร้างสมการใหม่ได้ โดยทำให้อยู่ในรูปแบบของเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) เพื่อใช้สำหรับเขียนโปรแกรมสร้างตัวควบคุมด้วยชุดทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ขั้นที่ 1 จากสมการของตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาต่อเนื่อง (continuous time)

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

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

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

ขั้นที่ 3 กำหนดให้ $dt = T_i$ เมื่อ T_i คือ การสุ่มตัวอย่างเวลา (sampling time) และเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบของผลต่างจะได้ดังสมการที่ (4-5) ดังนี้

$$\frac{\Delta V_{out}}{T_i} = K_p \cdot \frac{\Delta V_{error}}{T_i} + K_i \cdot V_{error} \quad (4-5)$$

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

$$\left(\frac{V_{out(i)} - V_{out(i-1)}}{T_i} \right) = K_p \cdot \left(\frac{V_{error(i)} - V_{error(i-1)}}{T_i} \right) + K_i \cdot V_{error(i)} \quad (4-6)$$

โดยที่ $V_{out(i)}$ คือ ค่าแรงดันปัจจุบัน

$V_{out(i-1)}$ คือ ค่าแรงดันอดีต

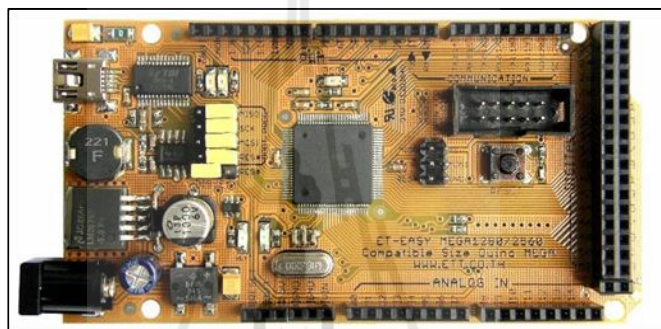
$V_{error(i)}$ คือ ค่าแรงดันคลาดเคลื่อนปัจจุบัน

$V_{error(i-1)}$ คือ ค่าแรงดันคลาดเคลื่อนอดีต

จากนั้น คูณ T_i ทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาไม่ต่อเนื่องดังสมการที่ (4-7)

$$V_{out} = V_{out(i-1)} + K_p \cdot (V_{error(i)} - V_{error(i-1)}) + K_i \cdot T_i \cdot V_{error(i)} \quad (4-7)$$

จากสมการที่ (4-7) จะเป็นสมการที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 แสดงได้ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งในส่วนของรายละเอียดของโปรแกรม สามารถดูได้จากภาคผนวก จ.



รูปที่ 4.12 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280

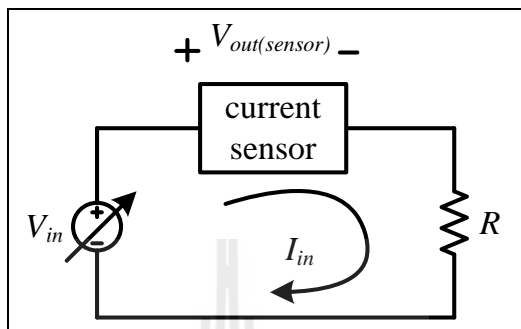
4.5 วงจรตรวจจับ

การตรวจจับสัญญาณที่ต้องป้อนให้กับชุดควบคุมสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างสัญญาณควบคุม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ โดยใช้ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัดกระแส 5 A แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า

การนำตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าไปใช้งานนั้น จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลเข้าวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า I_{in} และแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า $V_{out(sensor)}$ เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบตามวงจรดังรูปที่ 4.14



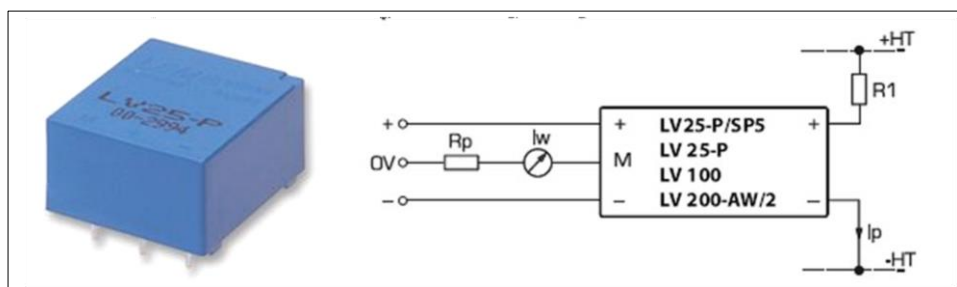
รูปที่ 4.14 วงจรทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า

สำหรับขั้นตอนการทดสอบนั้นได้ทำการเพิ่มกระแสที่ไหลในวงจรด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าอินพุต V_{in} โดยมีโหลดเป็นความต้านทาน $30\ \Omega$ ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

I_{in} (A)	$V_{out(sensor)}$ (V)
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

สำหรับการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P พิกัด 500 V แสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและวงจรถ่ายสำหรับใช้งาน

สำหรับการใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.15

พิจารณาทางด้านแรงดันสูง

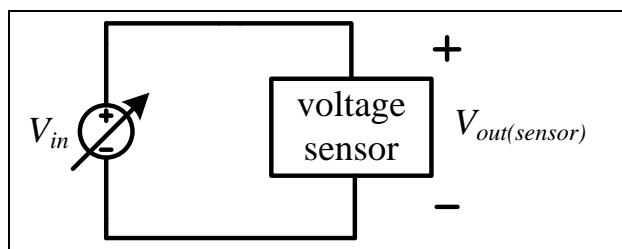
จะต้องทำการออกแบบค่า R_1 ซึ่งอยู่ทางด้านแรงดันสูง เพื่อไม่ให้กระทางด้านแรงดันสูง (I_p) ไม่เกิน 10 mA เมื่อพิจารณาแรงดันอินพุตเท่ากับ 220 V จะได้สมการสำหรับออกแบบ R_1 ดังสมการที่ (4-8)

$$R_1 = \frac{220}{I_p} = \frac{220}{10 \times 10^{-3}} = 22 \text{ k}\Omega \quad (4-8)$$

พิจารณาทางด้านแรงดันต่ำ

จะต้องทำการปรับจูนค่าความต้านทาน R_p เพื่อปรับแรงดันของสัญญาณแอนะล็อกที่จะเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้มีค่าไม่เกิน 3 V ซึ่งผลจากการทดสอบการปรับจูนจะต้องใช้ค่าความต้านทาน R_p เท่ากับ 135 Ω

การนำตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าไปใช้งานก็เช่นกัน จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุต V_{in} กับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับ $V_{out(sensor)}$ เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบตามวงจรดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 วงจรทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

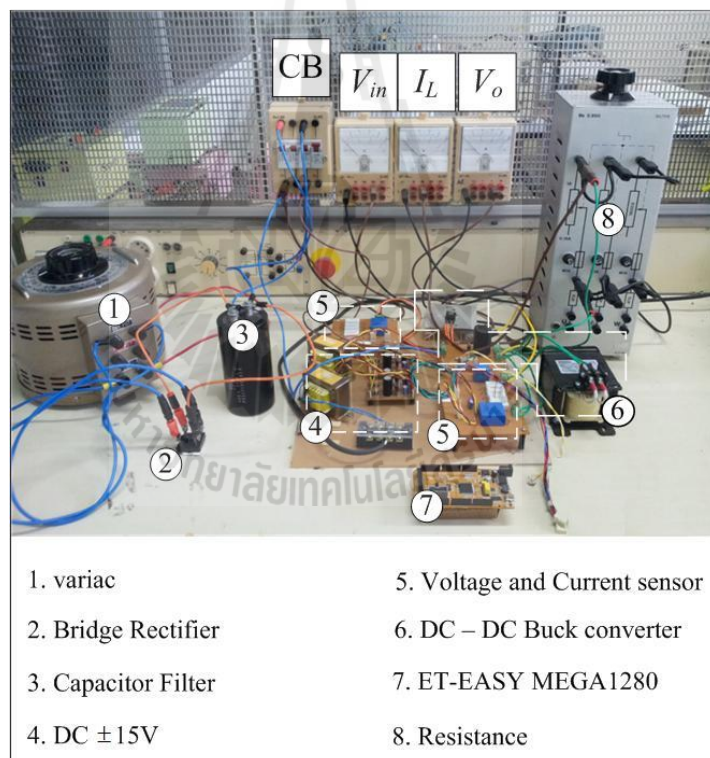
สำหรับขั้นตอนการทดสอบนั้น ได้ทำการเพิ่มแรงดันอินพุต V_{in} จาก 20V - 100V เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

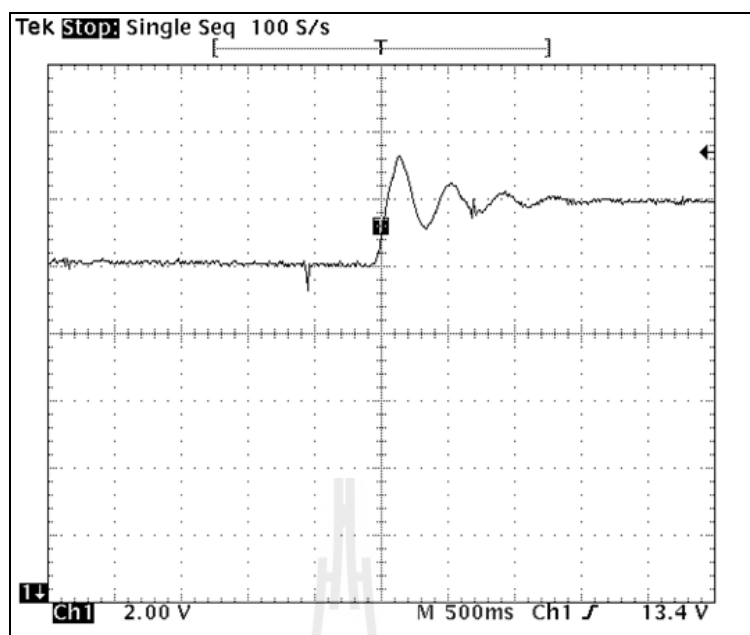
V_{in} (V)	$V_{out(sensor)}$ (V)
20	0.596
30	0.892
40	1.190
50	1.484
60	1.779
70	2.076
80	2.373
90	2.672
100	2.967

4.6 ผลการทดสอบวงจรและอภิปรายผล

การทดสอบการเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ของระบบดังรูปที่ 4.1 ซึ่งหลังจากการออกแบบรวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบดังกล่าวที่ได้นำเสนอไว้แล้วนั้น จึงได้ชุดทดสอบจริงที่ใช้ในงานวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 โดยการทดสอบสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ด้วยตัวควบคุมพีไอ ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ 1280 ในการประมวลผล คือ หมายเลข 7 ในรูปที่ 4.17 โดยการทดสอบนั้นจะคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10V หลังจากนั้นจะปรับระดับแรงดันอ้างอิง (V_o^*) ไปเป็น 12V เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของชุดทดสอบ ว่าสามารถคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามแรงดันอ้างอิงที่ต้องการได้หรือไม่ โดยรูปที่ 4.18 คือผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 4.17 ชุดทดสอบจริงของวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ 4.18 ผลการตอบสนองแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดทดสอบที่มีตัวควบคุมพีไอ โดยปรับเปลี่ยน (v_o^*) จาก 10V ไปเป็น 12V

จากผลการทดสอบ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ด้วยตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 4.18 สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ แสดงให้เห็นว่าชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ตามที่ต้องการ

4.7 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นความต้านทาน ตั้งแต่การสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบค่าพารามิเตอร์และเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบักค์ การสร้างตัวควบคุมรวมถึงวงจรตรวจจับ และจากการทดสอบชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้น ทำให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถใช้งานได้จริง เพื่อเป็นการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ว่า พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบทั้ง 3 วิธีที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น เมื่อนำมาใช้กับชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้น จะยังให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์หรือไม่ ซึ่งผลการทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตพร้อมกับการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบทั้ง 3 วิธีจะนำเสนอในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

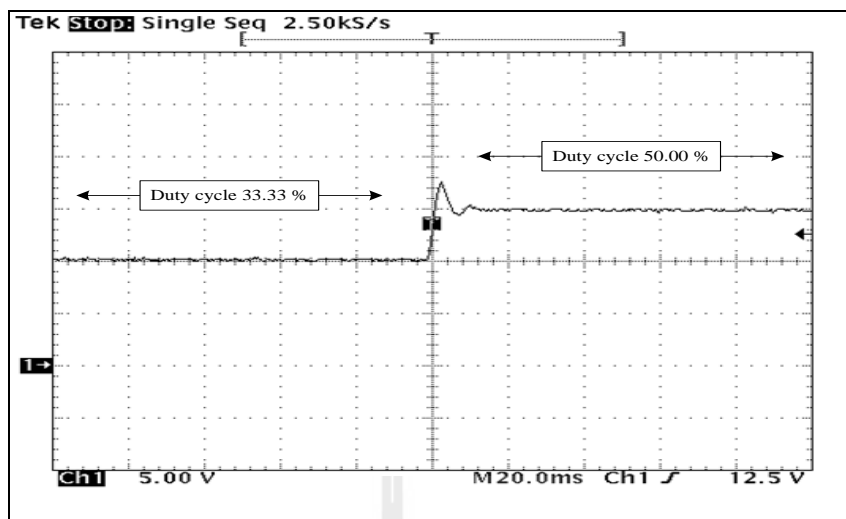
5.1 บทนำ

จากบทที่ 4 ที่ผ่านมามีได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบรวมถึงการออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรให้เป็นไปตามความต้องการ ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบ การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง เพื่อเป็นการยืนยันผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัค ที่ได้จากการออกแบบตามทฤษฎี สำหรับการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบ ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 3 วิธี ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 2 และบทที่ 3 คือ การออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม การออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS สำหรับผลการทดสอบรวมถึงการอภิปรายผล นำเสนอในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

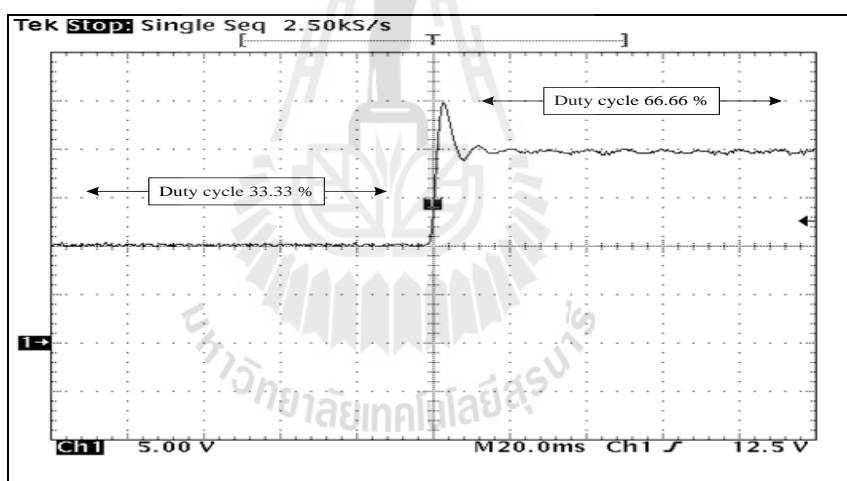
5.2 วงจรแปลงผันแบบบัคที่มีโหลดเป็นความต้านทาน กรณีไม่มีตัวควบคุม

การทดสอบการปรับแก้ค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อดูผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต จะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 30 V เป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรแปลงผันแบบบัค โดยรูปที่ 5.1 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33% เป็น 50% และรูปที่ 5.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 66.66 % ที่เวลา 0.01 วินาที

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 เป็นผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการปรับแก้ค่าวัฏจักร ซึ่งจากรูปที่ 5.1 เป็นการทดสอบการปรับแก้ค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 50 % จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 10 V ไปเป็น 15 V และจากรูปที่ 5.2 เป็นการทดสอบการปรับแก้ค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 66.66 % จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 10 V ไปเป็น 20 V ซึ่งจากผลการทดสอบการปรับแก้ค่าวัฏจักร แสดงให้เห็นว่าการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัค ให้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องตามสมการ



รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 50 %



รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 33.33 % เป็น 66.66 %

5.3 การทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมพีไอ

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานให้ มีค่าคงที่ ในหัวข้อนี้จะใช้ตัวควบคุมพีไอ สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยในการทดสอบ นั้นจะเป็นการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากคอมพิวเตอร์ ว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอ โดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับชุดทดสอบ และยังคงให้ผลการ ตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก็จะใช้ตัวควบคุมพีไอในการทดสอบ 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 สำหรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ส่วนค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ทั้ง ATS และ PSO ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 แสดงได้จากตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม PSO และ ATS

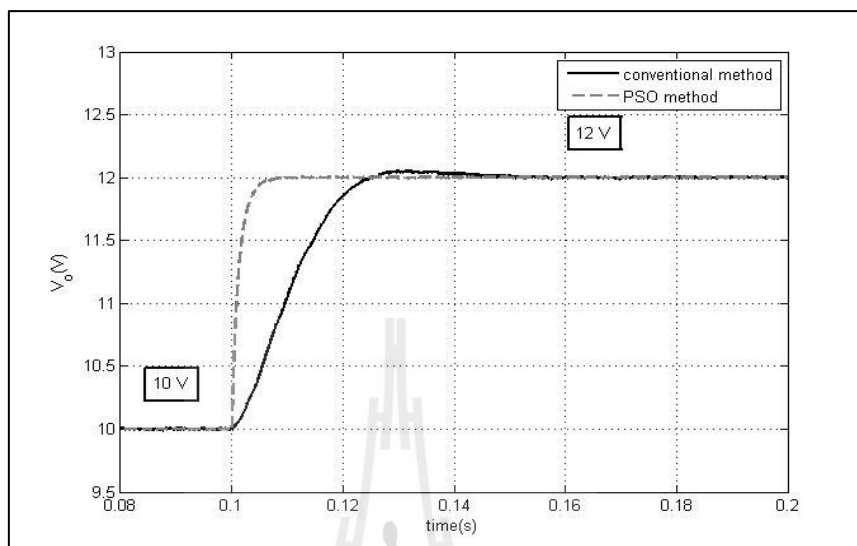
พารามิเตอร์ของ ตัวควบคุม	วิธีการออกแบบ		
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี PSO	วิธี ATS
K_{pv}	0.0027	0.1138	0.1346
K_{iv}	3.3750	24.22	28.565878
K_{pi}	1.2	4.1986	3.7243
K_{ii}	2250	6795.2	5450.7
w	0.6821	0.0030	0.0030

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

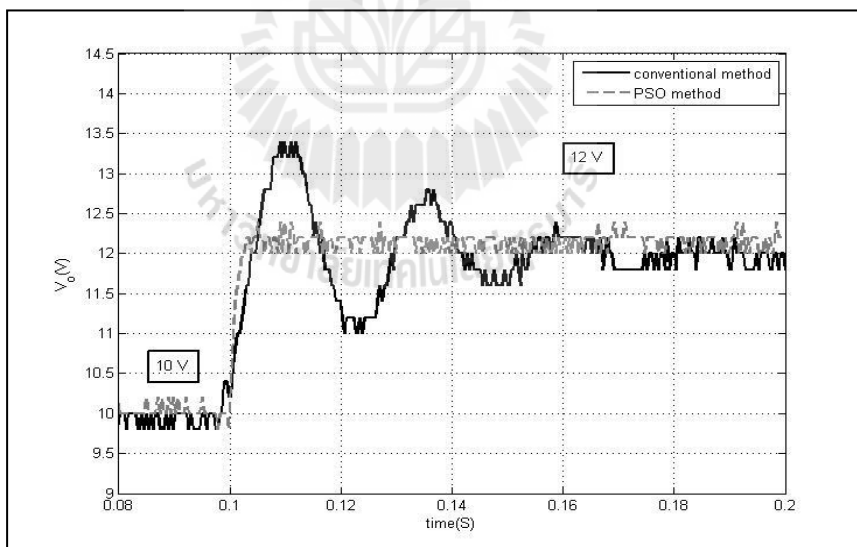
รูปที่ 5.3 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี PSO ส่วนรูปที่ 5.4 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้

จากผลการทดสอบรูปที่ 5.3 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 5.4 แสดงผลการตอบสนองการปรับเปลี่ยนแรงดัน

จาก 10 V เป็น 12 V ที่เวลา 0.1 วินาที จะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ATS ก็ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมเช่นกัน

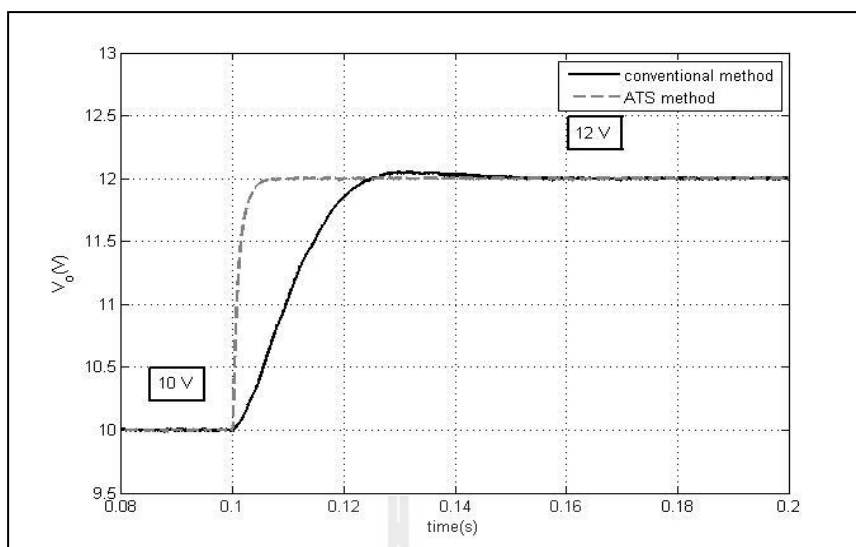


ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์

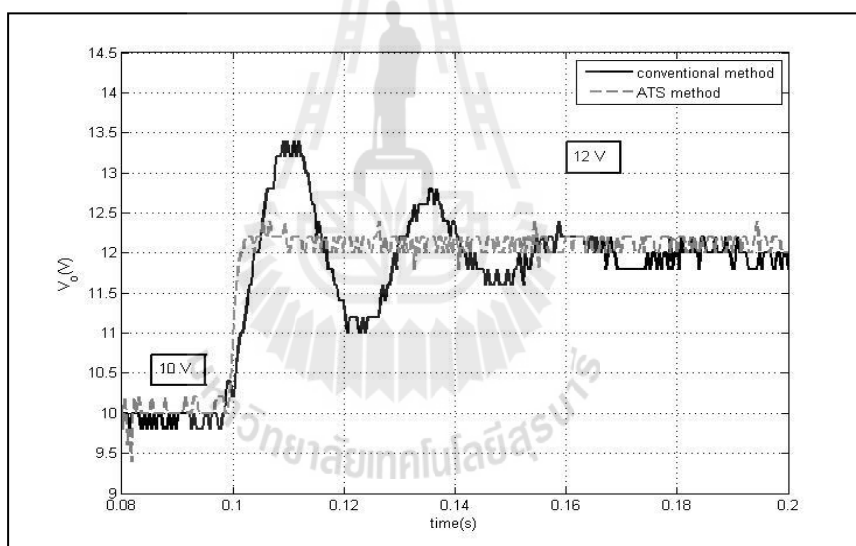


ข) ผลจากชุดทดสอบ

รูปที่ 5.3 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและ PSO



ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์



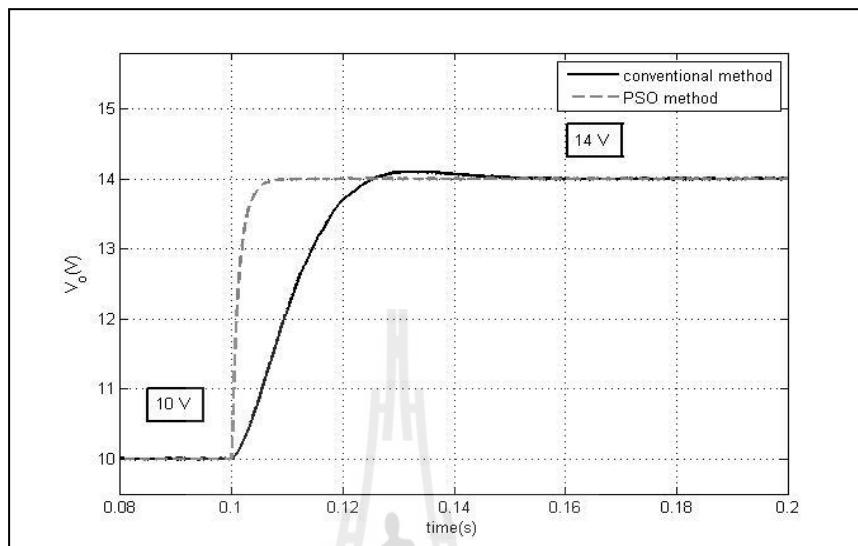
ข) ผลจากชุดทดสอบ

รูปที่ 5.4 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 12 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ ATS

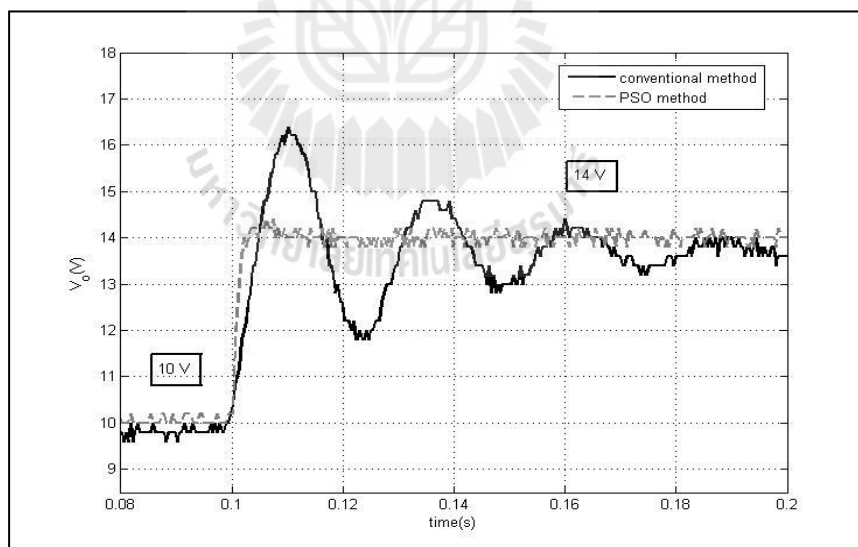
- กรณีปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) จาก 10 V ไปเป็น 14 V

รูปที่ 5.5 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี PSO ส่วนรูปที่ 5.6 แสดงผลการตอบสนองของ

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้

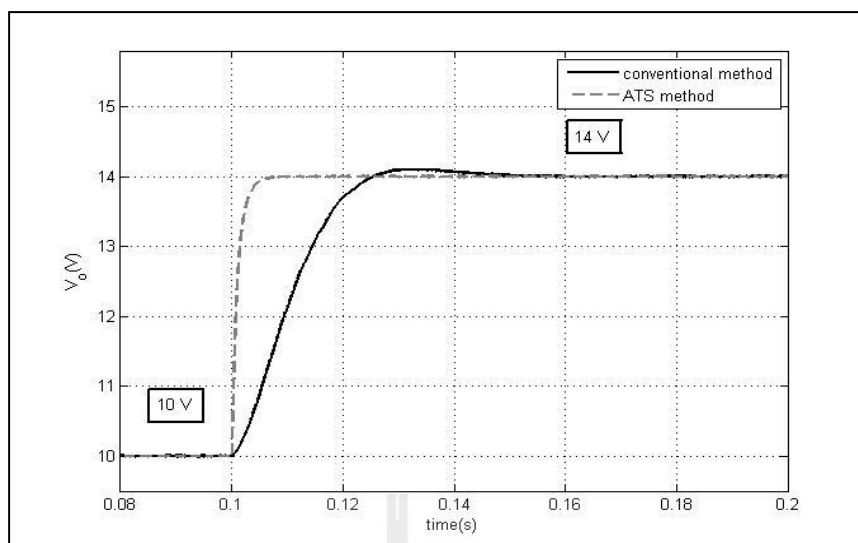


ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์

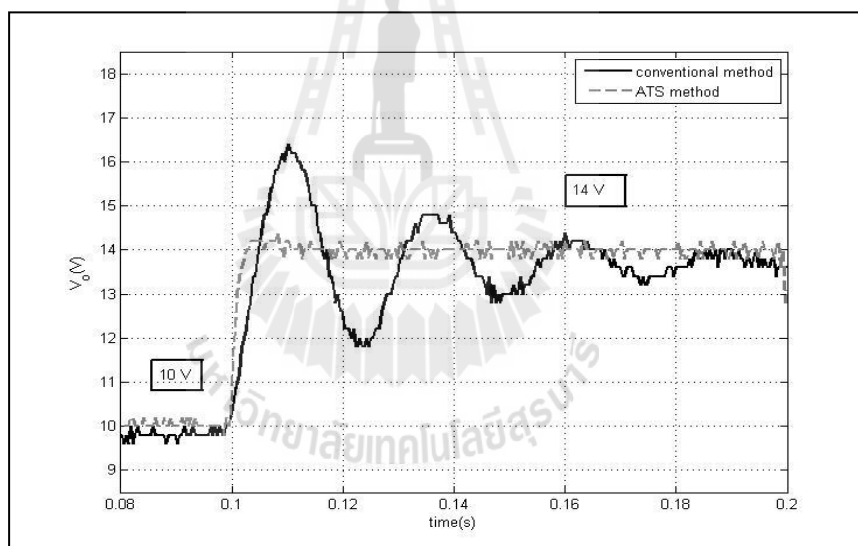


ข) ผลจากชุดทดสอบ

รูปที่ 5.5 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ PSO



ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์



ข) ผลจากชุดทดสอบ

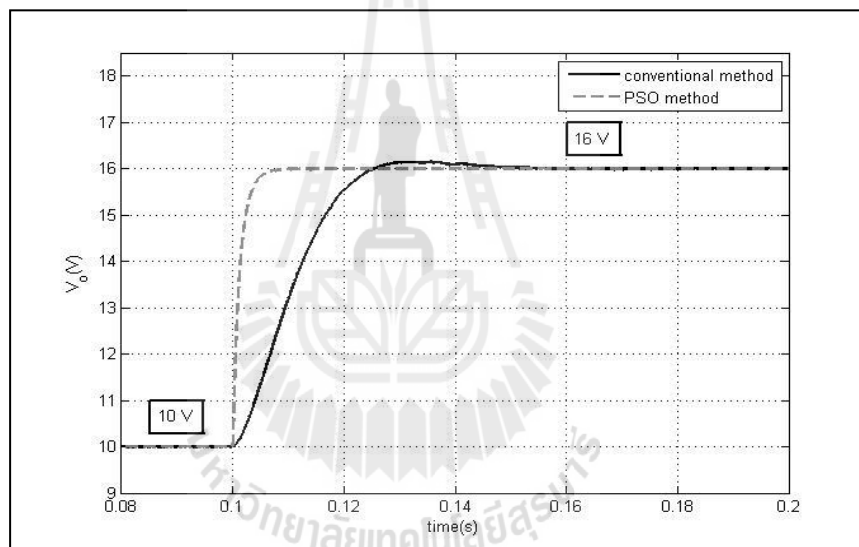
รูปที่ 5.6 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 14 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ ATS

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

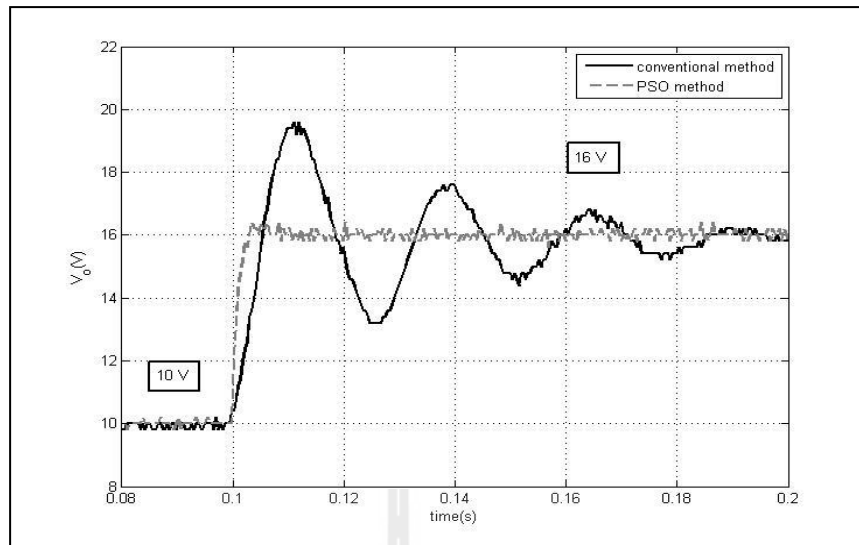
- กรณีปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) จาก 10 V ไปเป็น 16 V

รูปที่ 5.7 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี PSO ส่วนรูปที่ 5.8 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้

ผลการทดสอบที่ได้จะให้ผลในทำนองเดียวกันกับกรณีปรับเปลี่ยนจาก 10 V ไปเป็น 12 V และ กรณีปรับเปลี่ยนจาก 10 V ไปเป็น 14 V เช่นกัน คือการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ทั้งการออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

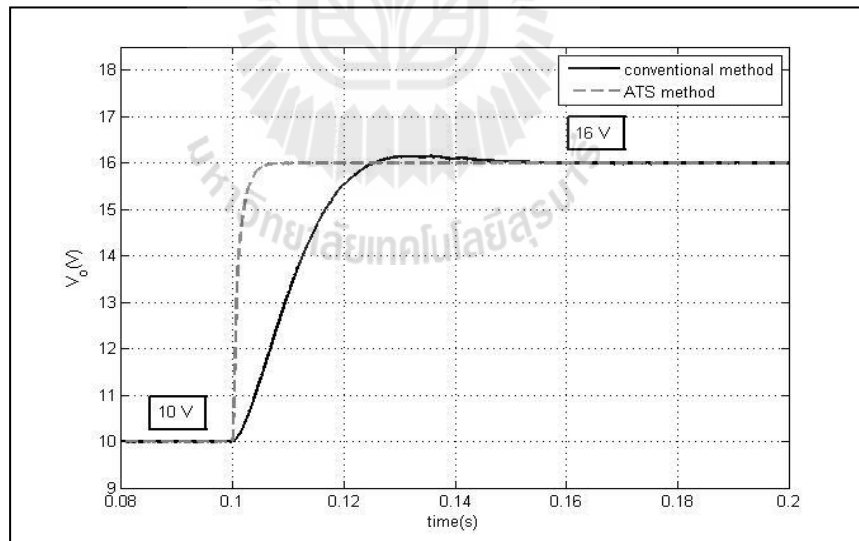


ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์

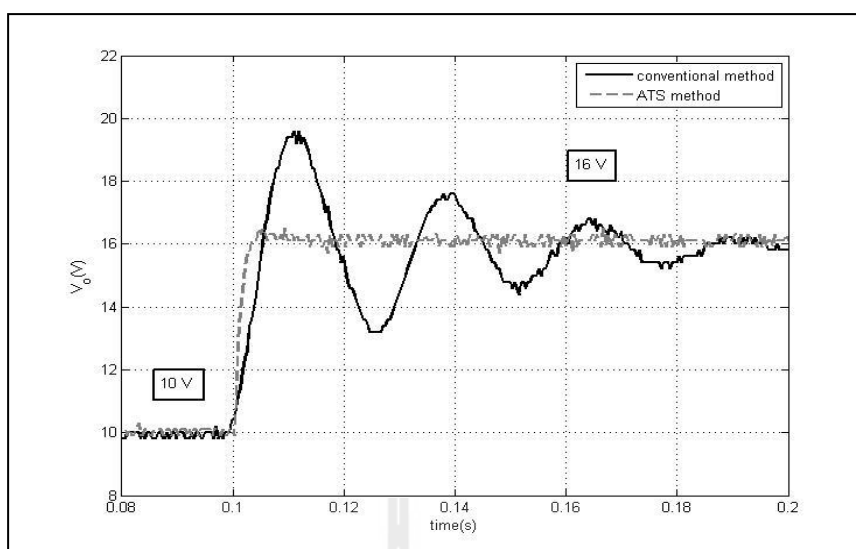


ข) ผลจากชุดทดสอบ

รูปที่ 5.7 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ PSO



ก) ผลการจำลองสถานการณ์



ข) ผลจากชุดทดสอบ

รูปที่ 5.8 ผลการตอบสนองของแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 10 V ไปเป็น 16 V ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและ ATS

จากผลการทดสอบของชุดทดสอบจริงที่ได้สร้างขึ้นนั้น การใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบที่พิจารณาก็คือ วงจรแปลงผันแบบบัก์ จากการทดสอบที่ผ่านมา ผลที่ได้จากชุดทดสอบจริงนั้นมีข้อสรุปเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ คือ การออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่า การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม แต่หากพิจารณาลงไปในรายละเอียดถึงผลการตอบสนอง ในเรื่องของช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และ การพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot) จะมีความแตกต่างกันระหว่างผลจากชุดทดสอบจริงกับผลที่ได้จากคอมพิวเตอร์ เนื่องจากการศึกษาในบทที่ 3 ผู้วิจัยไม่ได้นำเรื่องของการระบุเอกลักษณ์ของระบบเข้ามาใช้ ซึ่งอาจจะเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดข้อแตกต่างกัน ระหว่างผลจากชุดทดสอบจริงกับผลจากคอมพิวเตอร์ แต่จากผลที่ได้จากชุดทดสอบจริงนั้นยังแสดงให้เห็นว่า แม้จะปราศจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ แต่ก็ยังคงให้ผลที่สอดคล้องกับผลจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

5.4 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบการควบคุมแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก์ โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งได้ทำการทดสอบการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อ

ตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมรวมถึงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ โดยทำการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 3 วิธี ได้แก่การออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม การออกแบบด้วยวิธี PSO และการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า การออกแบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ทำให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของสัญญาณผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้ดียิ่งขึ้น และจากผลการทดสอบเป็นการยืนยันได้ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของตัวควบคุมพีไอ ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สามารถใช้งานในทางปฏิบัติได้จริงและยังคงให้ผลที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการศึกษาวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่พิจารณาตัวควบคุม ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น มีความจำเป็นต่อวิศวกรเป็นอย่างมากในการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบ ในงานวิจัยนี้ได้ นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่พิจารณาตัวควบคุมด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยในบทที่ 2 ได้นำเสนอการศึกษาและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมพีไออยู่ในแบบจำลอง และการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้นในบทที่ 3 ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยวิธีการค้นหาแบบดาวยูเชิงปรับตัว (ATS) และวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) ซึ่งข้อดีของการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์คือ การจำลองสถานการณ์จะใช้เวลาที่รวดเร็วและเหมาะสมสำหรับการคำนวณที่ซ้ำไปซ้ำมา อีกทั้งในระหว่างกระบวนการค้นหาการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ยังสามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบได้ แต่หากเป็นชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและ SIMULINK จะไม่สามารถทำได้ สำหรับผลการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ พบว่าการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็น ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และ การพุ่งเกินชั่วคราว (overshoot) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

เพื่อเป็นการยืนยันผลว่าตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เมื่อนำไปใช้งานกับระบบจริงแล้วจะยังคงให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเนื้อหาในบทที่ 4 จึงได้นำเสนอการดำเนินการออกแบบรวมถึงการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ เพื่อใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันผลการจำลองสถานการณ์

สำหรับผลการทดสอบ ได้ทดสอบการควบคุมแรงดันในย่านต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบ จะให้ผลที่สอดคล้องในทำนองเดียวกันกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ คือการ ออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาระดับสูงจะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่า การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ส่วนรายละเอียดต่าง ๆ ของขั้นตอนการทดสอบชุดทดสอบ ได้ นำเสนอไว้ในบทที่ 5

6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ (Identification) ระบบ ที่พิจารณา เพื่อให้ผลสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์มากยิ่งขึ้น
2. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการหาแบบจำลองของระบบที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้ครอบคลุมสำหรับการนำแบบจำลองไปใช้งาน



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.
- 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.
- 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.**
- Udomsuk, S., Areerak, T., Areerak, K-L., and Areerak, K-N. (2011). Power Loss Identification of Separately Excited DC Motor Using Adaptive Tabu Search. **European Journal of Scientific Research**, vol. 60, no. 4, pp. 488-497.
- Chaijarunudomrung, 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.
- Gamelin, T.W. (2000). **Complex Analysis.** New York. Springer.
- 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.
- T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak. (2010). Design of an Active Power Filter using Genetic Algorithm Technique. **The 9th WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases (AIKED'10)**, Cambridge, United Kingdom: February 20-22, 2010, pp.46-50.

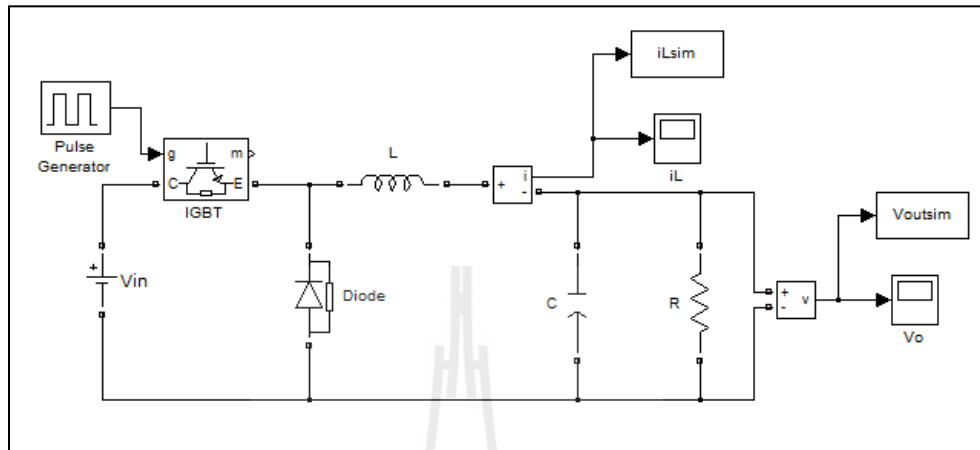
- K-N. Areerak and S. Sujitjorn. (2002). Performance Comparison between Genetic Algorithm and Tabu Search Methods. **Suranaree J. Sci. Technol.**, 9, 61-68, 2002.
- Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Areerak, K-L., Kulworawanichpong, T., and Sujitjorn, S. (2005). Application of adaptive tabu search to system identification. **IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005)**, Innsbruck, Austria: February 16-18, 2005, pp.178-183.
- 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, Vol. 3213, 1255-1261.
- Leeton, U., Uthitsunthon, 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: 19-21, 2010, pp. 440-444.
- Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. **Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95., Proceedings of the Sixth International Symposium on**, Nagoya: Oct 04-06, 1995, pp. 39-43.
- Mohan. N., Underland, T.M., and Robbins, W.P. (2003). **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. John Wiley & Son.

ภาคผนวก ก

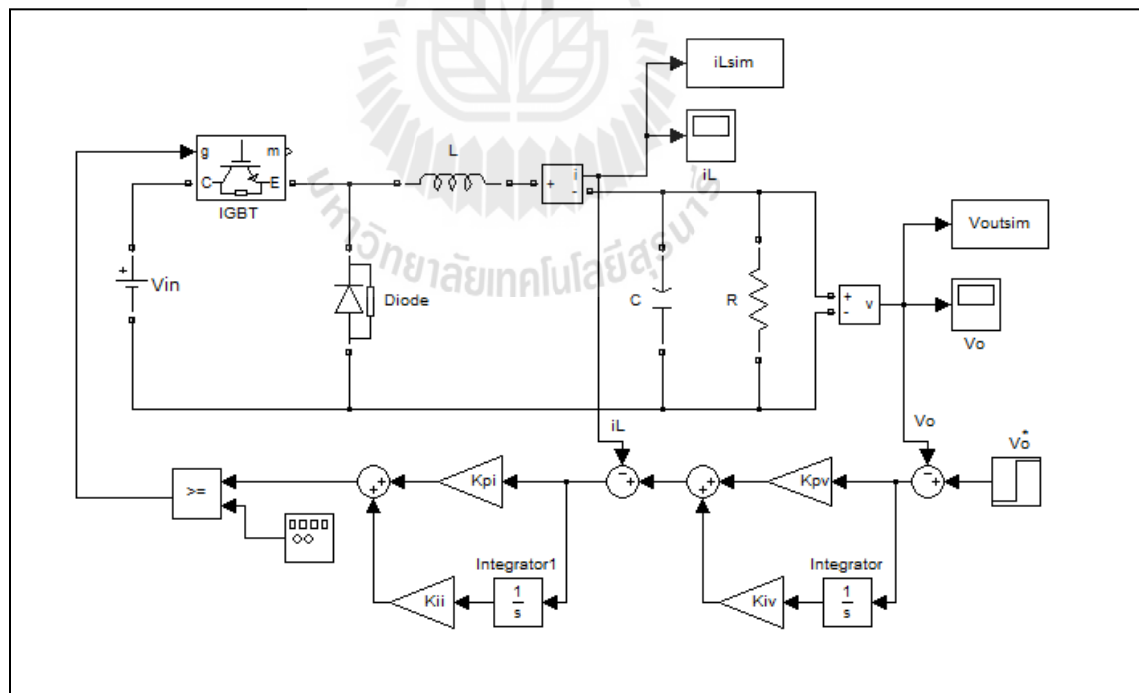
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB



รูปที่ ก.1 วงจรแปลงผันแบบบักคัทที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ ก.2 วงจรแปลงผันแบบบักคัทที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกรณีมีตัวควบคุมพีไอ

ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาสำหรับวิธีการทาง
ปัญญาประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธีตามเชิงปรับตัวสำหรับตัว

ควบคุมพีไอ

ตารางที่ ข.1 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	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

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	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

ตารางที่ ข.2 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (ต่อ)

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า W	0.0028	0.0036	0.0031	0.0029	0.0031	0.0031
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 60 คำตอบ						
ค่า W	0.0028	0.0034	0.0041	0.0031	0.0029	0.00326

ตารางที่ ข.3 การทดสอบค่าร้อยละเริ่มต้น

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

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

ตารางที่ ข.4 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี (ต่อ)

ครั้งที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2						
ค่า W	0.0042	0.0038	0.0028	0.0033	0.0030	0.00342
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3						
ค่า W	0.0035	0.0028	0.0033	0.0029	0.0034	0.00318
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 มีค่า มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5
- ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ ข.4 พบว่าค่า W ในกรณีการทดสอบค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 มีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

ผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของ
กลุ่มอนุภาคสำหรับตัวควบคุมฟิว

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบจำนวนอนุภาค

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	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
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

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	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

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ C_p (ต่อ)

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
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	0.0031	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

ค่าที่ทดสอบ \ 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

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบค่าคงที่ความเร่งแบบ C_g (ต่อ)

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
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

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าว ซึ่งสรุปได้ดังนี้

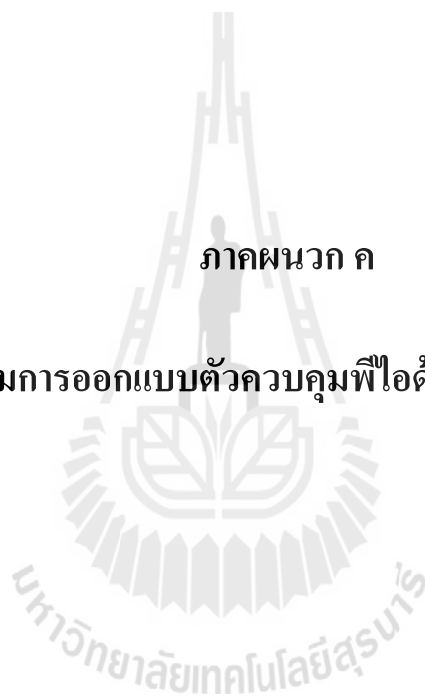
- จากตารางที่ ข.5 เมื่อพิจารณาจากค่า W สังเกตได้ว่าค่า W ในกรณีการทดสอบจำนวนอนุภาค ซึ่งกรณีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 40 มีค่า W น้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 40 คำตอบ

- 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

ภาคผนวก ค

โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบตาม



```

*****
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 % ประเมินคำตอบเริ่มต้นด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
[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_neighb=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

```

```

% อินพุตของ โปรแกรมนี้คือ 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
% อินพุตของ โปรแกรมนี้คือ 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
% ค่าน้อยที่สุดภายในปริภูมิการค้นหปัจจุบันไว้ใน
% คอลัมน์ที่ 1 และ 2 ของ neighbor_list

neighbor_list(k,size(S0,2)+1)=best_error1;
% เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด
% ภายในปริภูมิการค้นหปัจจุบันไว้ในคอลัมน์ที่ 3
% ของ neighbor_list

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

```



```

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 ชุดสุดท้ายก่อนมีการเรียกใช้กลไกย้อน
                                รอยการค้นหา
                                % TEMP จะเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ

```

	ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนทำการจัดลำดับ
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));	
	% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(5,:) = TEMP(INDEX,:);	% จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 5 ใน RANK
TEMP(INDEX,6)=0;	% แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP ด้วยศูนย์
	% ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 4 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));	
	% หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(4,:) = TEMP(INDEX,:);	% จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 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
neighbor=RANK(5,2:5);	% แทนค่า neighbor ด้วยค่าพารามิเตอร์ลำดับที่ 5 ใน RANK ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แตกต่างจากค่าตอบที่ซ้ำมากที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 4 ลำดับที่เหลือใน RANK
S0=neighbor;	% ปรับค่า S0 = neighbor
if best_error<overall_best_error	
overall_best_error=best_error;	
overall_best_neighbor=best_neighbor;	
	% ถ้า best_error < overall_best_error ให้ปรับค่า overall_best_error โดยแทนค่า overall_best_error ด้วย best_error และแทนค่าพารามิเตอร์ overall_best_neighbor ด้วย best_neighbor

```

t=t+1; % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
local(t,1)=count; % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5 ของ
local
local(t,6)=best_error; % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ local
end
best_error=RANK(5,6); % แทนค่า best_error ด้วยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
ลำดับที่ 5 ใน RANK n=0;
else
S0=best_neighbor; % แทนค่า S0 ด้วย best_neighbor
best_error=best_error; % แทนค่า best_error ด้วย best_error
end
end
if overall_best_error<best_error
best_error=overall_best_error;
best_neighbor=overall_best_neighbor; % ถ้า overall_best_error<best_error ให้ปรับค่า
best_error โดยแทนค่า best_error ด้วย
overall_best_error
และแทนค่าพารามิเตอร์ best_neighbor
ด้วย overall_best_neighbor
end
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
    % อินพุตของ โปรแกรม คือ Number_neighb, radius,
    % เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง S1 จำนวนเท่ากับ
    % ใกล้เคียงรอบคำตอบ 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) )
                % ค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้จะต้องอยู่ภายในขอบเขตบนและ
                % ขอบเขตล่างของค่าพารามิเตอร์ ถ้าค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้
                % มีค่าเกินขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่กำหนดให้ทำการ
                % สุ่มค่าใกล้เคียงใหม่
                S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
            end
        end
    end
end
return                               % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน

```


โปรแกรม rand1.m

```
function x = rand1(a,b) % โปรแกรม rand1 เป็น โปรแกรมสุ่มค่าพารามิเตอร์
                        ในช่วงที่กำหนด
                        % อินพุตของ โปรแกรม คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
                        a และขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ b
                        % เอาต์พุตของ โปรแกรม 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 เป็น โปรแกรมประเมินค่า
                        ใกล้เคียงที่สุ่มได้รอบ S0
                        % อินพุตของ โปรแกรม 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 ฟังก์ชันแสดงสมาชิก
                                % ภาพของตัวควบคุมพีไอ
                                % เอาต์พุตของ โปรแกรม คือ ค่าบ่งบอกถึงสมรรถนะ
                                % ของตัวควบคุม
                                % กำหนดตัวแปรเริ่มต้นของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ

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

                                % กำหนดค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม

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

                                % แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการ
                                % พิจารณา

```

```

A=[ -(Kpi_a*Vi)/L   -(((Kpv_a*Kpi_a*Vi)/L)+(1/L))   (Kiv_a*Kpi_a*Vi)/L   (Kii_a*Vi)/L ;
      1/C           -1/(R*C)           0           0 ;
      0             -1                 0           0 ;
      -1            -Kpv_a             Kiv_a       0 ];

```

```
B=[((Kpv_a*Kpi_a*Vi)/L);
```

```
0 ;
```

```
1 ;
```

```
Kpv_a ];
```

```
C=[0 1 0 0];
```

```
D=[0];
```

```
%%%%%%%%%%%% ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ%%%%%%%%%%%%
```

```
Hold on
```

```
figure(4)
```

```
plot(eig(A),'*')
```

```
hold off
```

```
%%%%%%%%%%%%%%
```

```
sys=ss(A,B,C,D);
```

```
tstep = 1e-4; tend = 2;
```

```
t=0:tstep:tend;
```

```
N=length(t);
```

```
S1=15;
```

```
% กำหนดแรงดันไฟฟ้าอินพุตช่วงที่ 1 เท่ากับ 15 V
```

```
S2=20;
```

```
% กำหนดแรงดันไฟฟ้าอินพุตช่วงที่ 1 เท่ากับ 20 V
```

```
u(1)=S1;
```

```
for k=2:N
```

```
    if k<N/2
```

```
        u(k)=S1;
```

```
    else
```

```
        u(k)=S2;
```

```
    end
```

```

end
[y,t]=lsim(sys,u,t);           % จำลองสถานการณ์ด้วย lsim โดยเก็บเอาต์พุตไว้ที่ y
                               % และ t

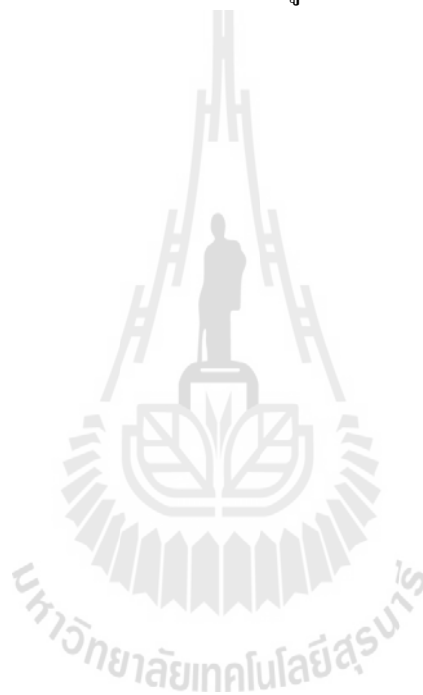
V_out=y(:,1);
%%%%%% ค่า overshoot ของระบบ %%%%%%
PO=abs(S2-max(V_out));
%%%%% กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับค่า rise time ของระบบ %%%%%%
char=[V_out,t];
t0=((length(t))/2);
Vo_tr=.9*S2;                   % พิจารณา rise time ที่ 90% ของ S2
ts=0;
tr=0;
%%%%% ค่า rise time ของระบบ %%%%%%
for i=1:size(char,1)
    c=char(i,1);
    if c >= Vo_tr
        tr=char(i,2)-1;
    end
    if tr ~= 0
        break;
    end
end

%%%%% ค่า 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 ที่ยอมรับได้ของการลู่อเข้า
        ts=char(i,2)-1;
    end
    if ts ~= 0
        break;
    end
end

```

```
end
end
a=(1/xxx);b=(1/xxx);c=(1/xxx);      % กำหนดค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับคูณ
                                       โดยค่า xxx คือค่า PO, tr, ts ที่ได้จากการ step response
                                       เพื่อใช้สำหรับทำให้เป็น p.u.

w=a*PO+b*tr+c*ts;
g=w;
return                                % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```



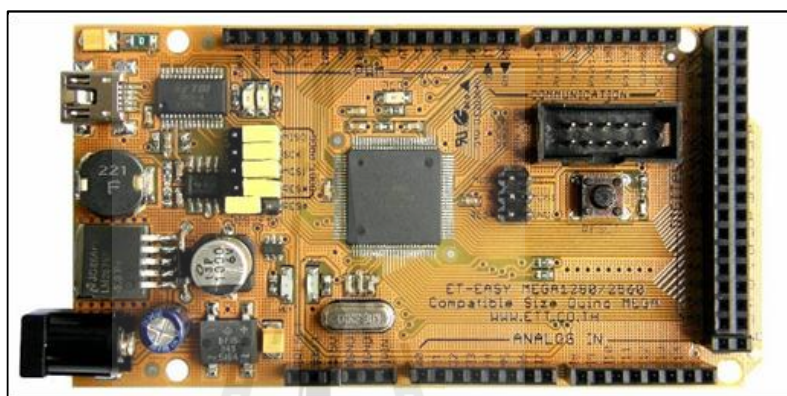
ภาคผนวก ง

ความรู้พื้นฐานของบอร์ด AVR

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เป็นหนึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ผลิตโดยบริษัท ATMEL โดยจัดเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพและความสามารถสูง ซึ่งจะแบ่งออกเป็นหลายรุ่น เพื่อรองรับความต้องการที่แตกต่างของผู้ใช้งาน โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 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
- มีตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
- มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งข้อมูลได้จำนวน 4 พอร์ต
- เชื่อมประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น ส่งข้อมูลแบบเรียงไบนารี
- มีตัวตั้งเวลาแบบวอตช์ดอกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
- อินพุต / เอาต์พุต และตัวถัง
 - มีขาของอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 พิน
 - ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา

การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีมอดูสำหรับแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล หรือ ADC (analog to digital converter) ซึ่งมีความละเอียด 10 บิต โดยแรงดันต้องไม่เกิน 5 V หมายถึงเมื่อรับสัญญาณในช่วงของแรงดันดังกล่าวแล้วจะทำการแปลงดิจิตอล ตัวเลขที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1024 สำหรับมอดู ADC มี 16 ช่องอินพุตสัญญาณ คือ ADC0 – ADC15 สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แค่ 2 ช่องสัญญาณ คือ ADC0 และ ADC1 สำหรับรับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัทท์ และ รับสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ โดยสมการที่ใช้ในการแปลงจากสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล 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)

การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR แบ่งออกเป็น 3 โหมด คือ

- Fast PWM Mode เป็นการสร้างสัญญาณ PWM ความถี่สูงด้วยวิธีการแบบสโลปเดียว (single-slope) เหมาะสำหรับนำไปใช้งานทางด้านสั่น power regulation, rectification เป็นต้น ข้อเสียสำหรับการใช้โหมดนี้คือ ไม่สามารถปรับความถี่ได้ตามที่ต้องการ
- Phase Correct PWM Mode เป็นการสร้างสัญญาณ PWM ความละเอียดสูงด้วยวิธีการแบบสโลปคู่ (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

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



ภาคผนวก จ

โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino

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;
%%% กำหนดพารามิเตอร์ของลูปแรงดันไฟฟ้า %%%
//////////////////// Voltage //////////////////////
float err_v,Upv,Uiv,Uiv_1,Upi_v;
//float kp2=0.0027;
//float kiv2=3.3750;
%%% กำหนดพารามิเตอร์ของลูปกระแสไฟฟ้า %%%
//////////////////// 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);
        %%% เข้าสู่ลูปแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ %%%
        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;
}
%%% เข้าสู่รูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ %%%
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 (ฟังก์ชันสำหรับปรับเปลี่ยน
ระดับแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุต ) %%%
if (ii > 20000)
{

```

```

setpoint=600;

call_PI2();
}
else {
    ii++;
}
}
}

%%% เรียกใช้ฟังก์ชัน PI2 %%%

void call_PI2()
{
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);
%%% เข้าสู่ลูปแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ %%%
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;  
}  
%%% เข้าสู่รูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ %%%  
erri=Upi_v-(I2)/1000;  
Upi=kpi2*erri;  
Uii=kii2*Ts*erri+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;  
}  
}  
}
```




ภาคผนวก ฉ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. 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.

2. 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.

3. S. Chonsatidjamroen, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "The Optimal Cascade PI Controller Design of buck converters", *The 9th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2012) Association*, Phetchaburi, Thailand: May 16-18, 2012, pp.1-4.

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

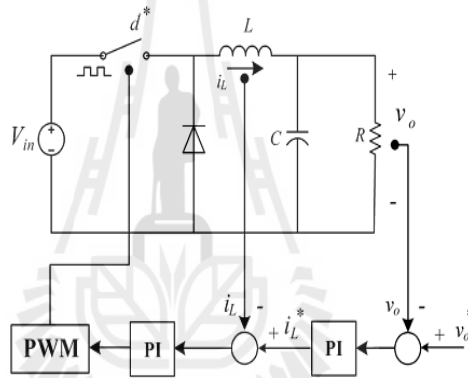
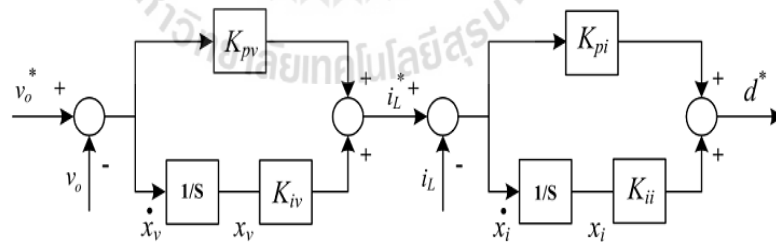


Figure 2: The schematic of buck converter controllers



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

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

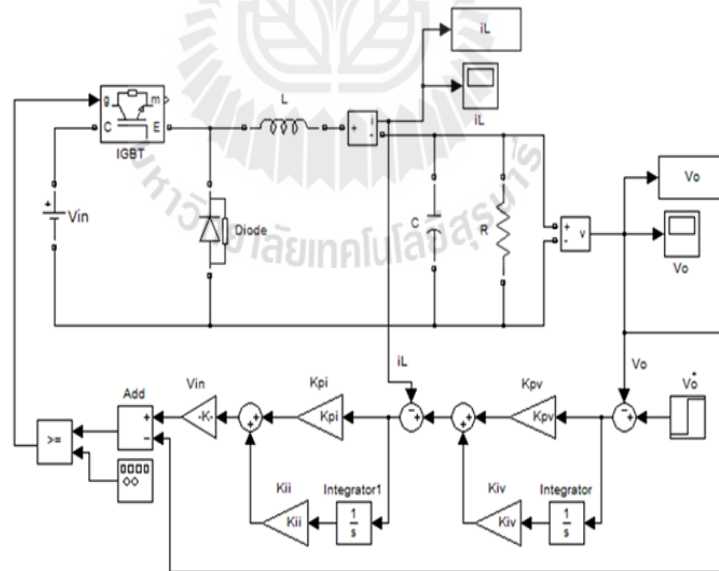
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{K_{pi}V_{in}}{L} & -\frac{K_{pv}K_{pi}V_{in}+1}{L} & \frac{K_{iv}K_{pi}V_{in}}{L} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 4}$$

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

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

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 ω_{nv} , ζ_v , ω_{ni} , and ζ_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

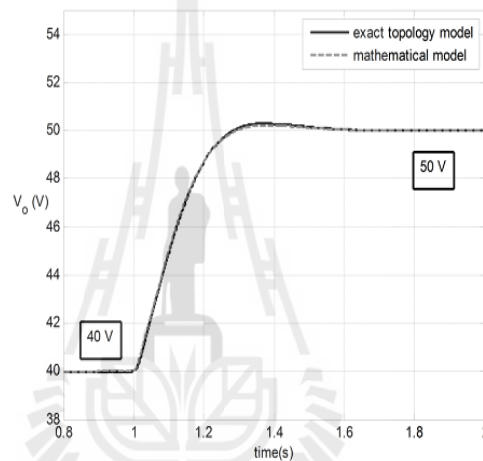


Figure 5: Response of i_L for changing the v_o^* from 40 V to 50 V

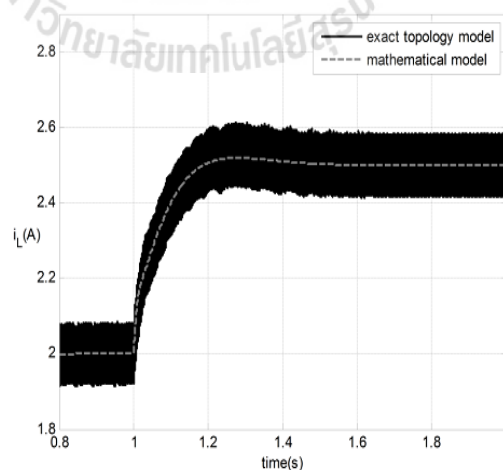
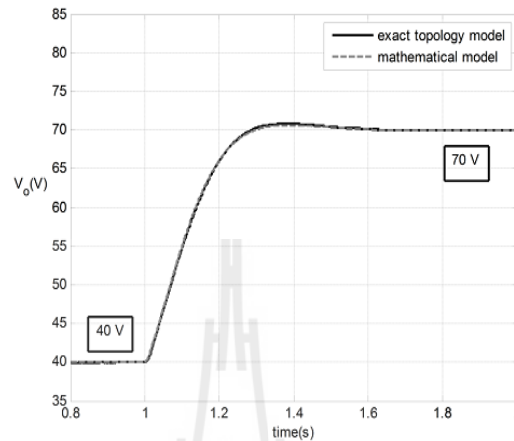
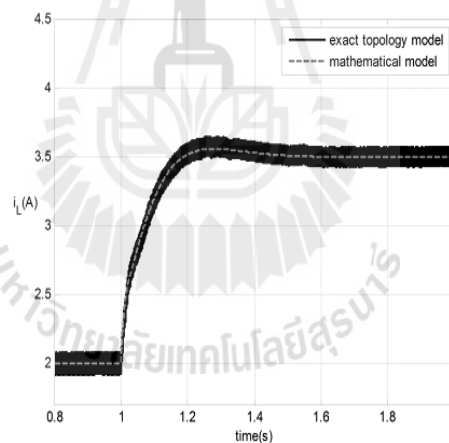


Figure 6: Response of v_o for changing the v_o^* from 40 V to 70 V**Figure 7:** Response of i_L for changing the v_o^* from 40 V to 70 V

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 SPSTM 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 **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.

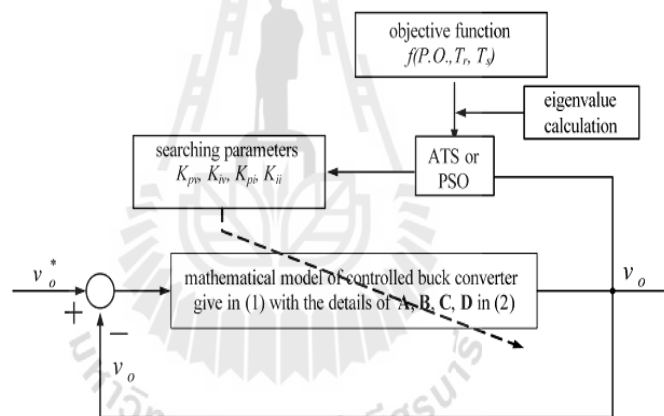
3.1. Conventional Method

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 $\zeta_v = 0.8$, $\zeta_i = 0.8$, $\omega_{ii} = 2500$ rad/s, and $\omega_{iv} = 250$ 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.

σ , α , and γ are the priority coefficients of T_r , T_s , and $P.O.$, respectively.

In this paper, the values of σ , α , and γ 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 SPSTM 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

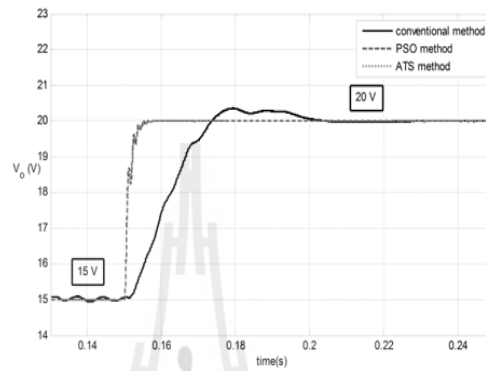


Figure 10: The convergence of W value from the ATS method

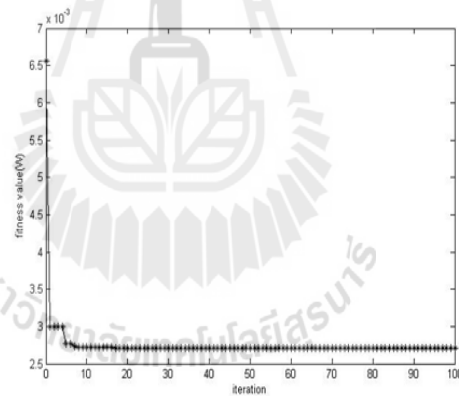
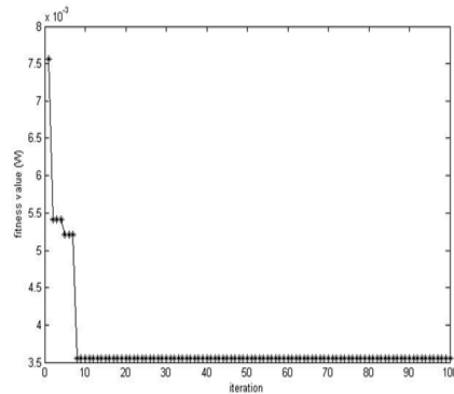


Figure 11: The convergence of W value from the PSO method



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

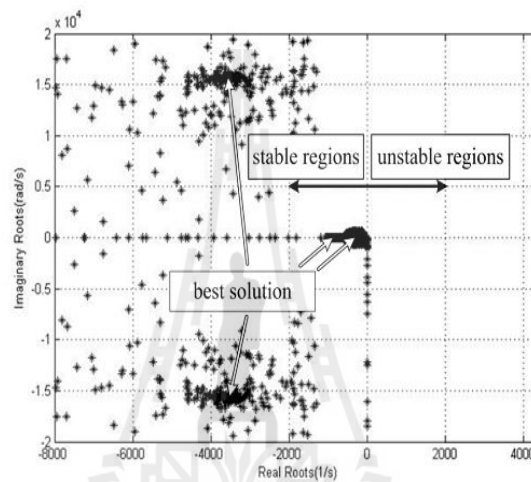
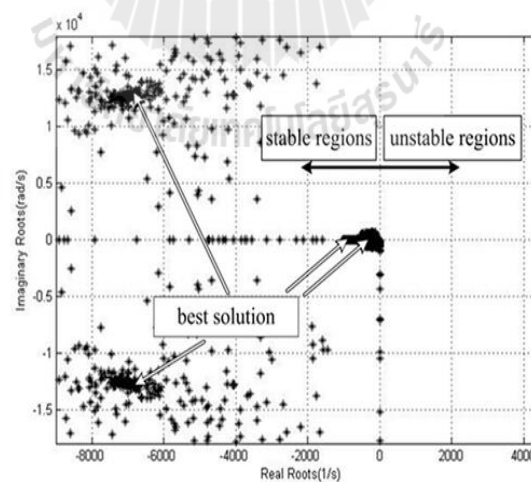
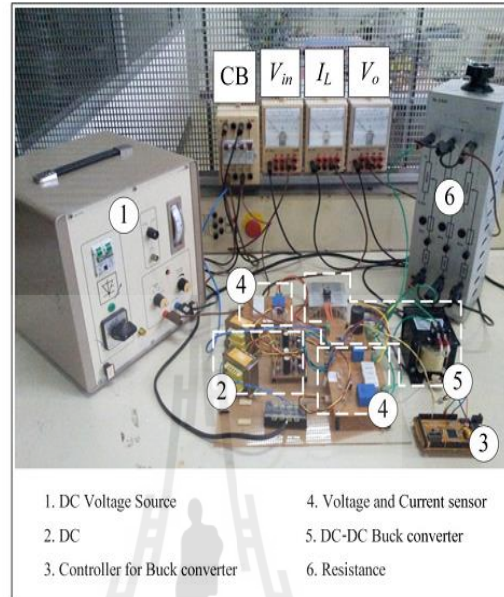


Figure 13: The eigenvalue plot during the PSO searching process



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.

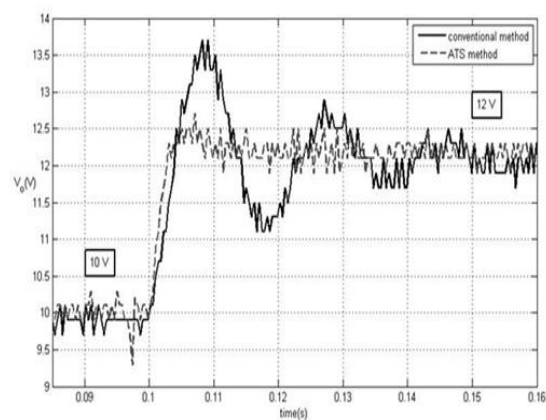
Figure 15: The experimental results of v_o for changing the v_o^* from 10 V to 12 V

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

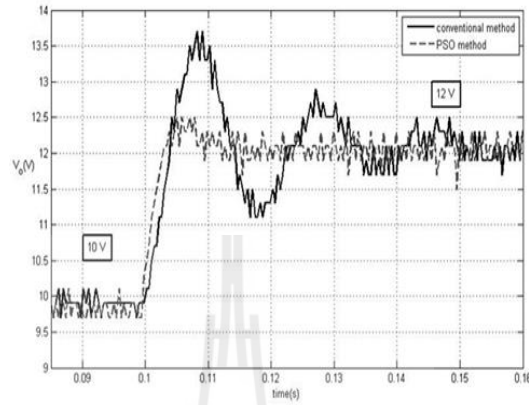


Figure 17: The experimental results of v_o for changing the v_o^* from 10 V to 14 V

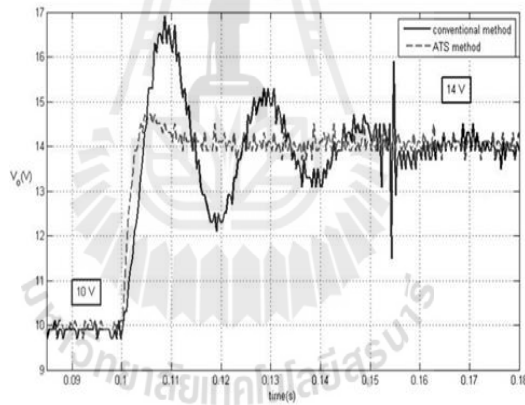


Figure 18: The experimental results of v_o for changing the v_o^* from 10 V to 14 V

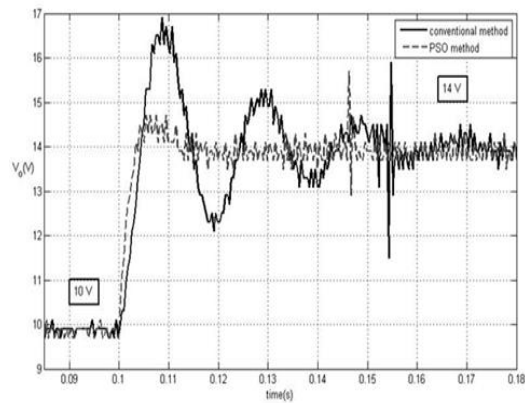


Figure 19: The experimental results of v_o for changing the v_o^* from 10 V to 16 V

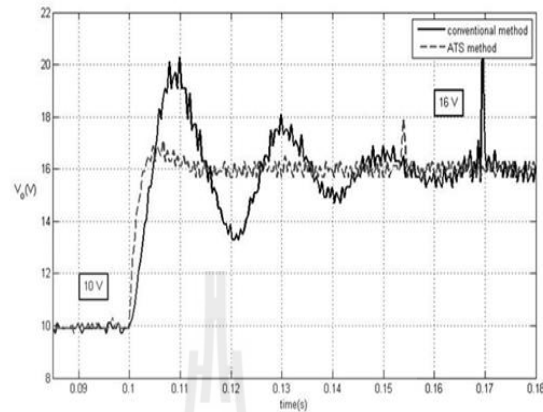
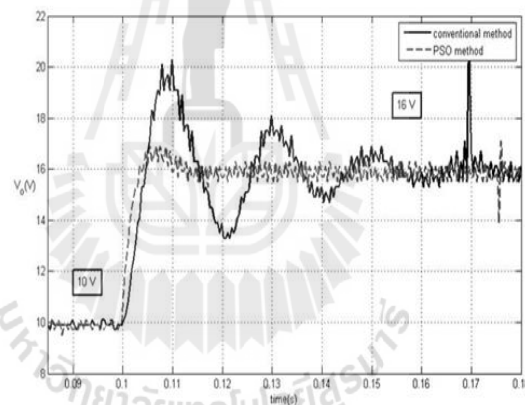


Figure 20: The experimental results of v_o for changing the v_o^* from 10 V to 16 V



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 Sujitjom, 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 12th 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., Liguu, Z., Weina, L., and Jie, H., 2008. "Reactive Power Optimization for sidtribution systems based on Dual Population Ant Colony Optimization", *In Proc. 27th 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 9th 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., Sujitjorn, S., and Totarong, P., 2002. "System Identification via Adaptive 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.

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

กองพัน อารีรักษ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี และปริญญาโททางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2543 และ 2544 ตามลำดับ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากมหาวิทยาลัยนอตติงแฮม ประเทศอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2552 ด้วยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยเน้นทางด้านระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน ภายหลังจากสำเร็จการศึกษา ได้ดำเนินงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยที่มีความชำนาญ จะเน้นไปทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ การประยุกต์วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับปัญหาทางด้านวิศวกรรม ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า ตลอดจนทฤษฎีระบบควบคุม ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ และหัวหน้ากลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุมประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

