การออกแบบระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟ LED ที่ใช้ในการปลูกพืชด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

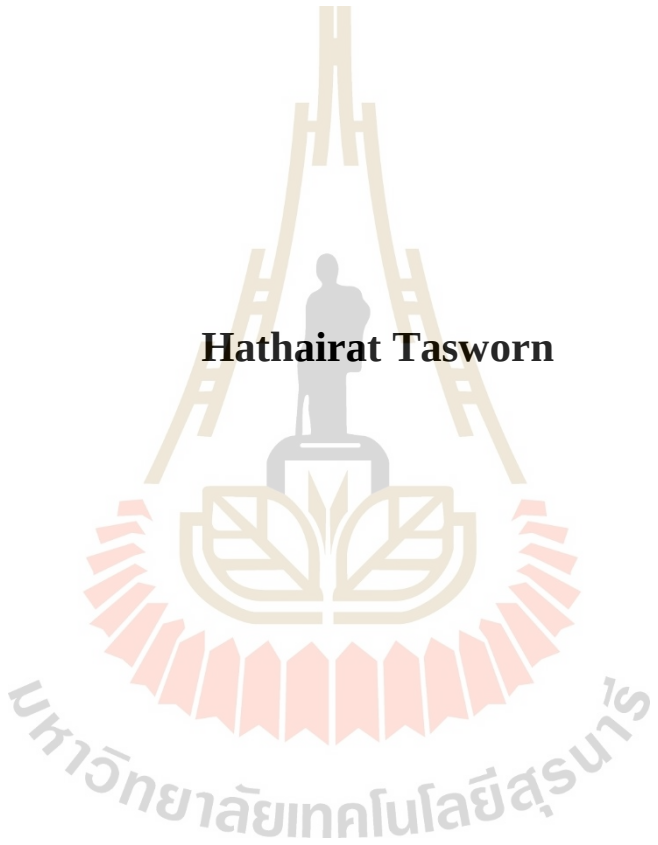
นางสาวหทัยรัตน์ ทัศน์วรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

DESIGN OF LEDs INTENSITY CONTROL SYSTEM FOR PLANT CULTIVATION BY USING THE ADAPTIVE TABU SEARCH TECHNIQUE

Hathairat Tasworn



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การออกแบบระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดีที่ใช้ในการปลูกพืช
ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)
ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)
กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หทัยรัตน์ ทัศน์วรณ์ : การออกแบบระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดีที่ใช้ในการปลูกพืชด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (DESIGN OF LEDs INTENSITY CONTROL SYSTEM FOR PLANT CULTIVATION BY USING THE ADAPTIVE TABU SEARCH TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์, 131 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดีที่ใช้ในการปลูกพืชด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมพีไอต่อเรียงกันแบบคาสเคด งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อให้ได้การตอบสนองของความเข้มแสงของหลอดไฟแอลอีดีมีการตอบสนองที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริงยืนยันความถูกต้องของผลทางทฤษฎี ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ผลการตอบสนองทั้งจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบยังมีความสอดคล้องและเป็นไปแนวทางเดียวกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา หทัยรัตน์ ทัศน์วรณ์

ปีการศึกษา 2563 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

HATHAIRAT TASWORN : DESIGN OF LEDs INTENSITY CONTROL SYSTEM FOR PLANT CULTIVATION BY USING THE ADAPTIVE TABU THESIS TECHNIQUE : ASST. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 131 PP.

GSSA MODELLING METHOD/ TABU SEARCH/ LEDs INTENSITY/ PI CONTROLLER

The thesis presents the design of LEDs intensity control system for plant cultivation by using the adaptive TABU search technique. The cascade PI controller are applied. The optimal design of the controller via the adaptive TABU search algorithm is presented in the thesis to provide the better response of the light intensity of the LED lamp compared with the conventional method. The simulation and experimental results are used to confirm the theoretical results. The results show that the proposed design technique can provide the better response compared with the conventional method. Good agreement between simulation and experiment is also obtained.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electrical Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ รวมถึง น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุก ๆ คน ที่ให้คำปรึกษา และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

หทัยรัตน์ ทัศน์วรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 3

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 4

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 บทนำ 6

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 8

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเชิงเส้นของหลอดไฟแอลอีดี 9

2.5 สรุป 11

3 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดี 12

3.1 บทนำ 12

3.2 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป 12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ 14
3.3.1 กรณีวงจรแปลงผันแบบบัคก์ไม่มีตัวควบคุม 14
3.3.2 กรณีวงจรแปลงผันแบบบัคก์มีตัวควบคุม 31
3.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ 33
3.4.1 การออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า 34
3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า 36
3.5 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง 38
3.6 สรุป 43
4 การออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 44
4.1 บทนำ 44
4.2 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 44
4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 48
4.3.1 การทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 49
4.3.2 การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 54
4.4 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล 56
4.5 สรุป 59
5 การสร้างชุดทดสอบ 60
5.1 บทนำ 60
5.2 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 61
5.2.1 ภาพรวมชุดทดสอบ 61
5.2.2 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล 64
5.3 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรองดีซี ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม 65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.1 ภาพรวมชุดทดสอบ....65
5.3.2 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล....72
5.4 วงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่มีตัวควบคุม....75
5.4.1 ภาพรวมชุดทดสอบ....75
5.4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแส....76
5.4.3 อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง....78
5.4.4 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล....80
5.5 สรุป....84
6 **สรุปและข้อเสนอแนะ**....85
6.1 สรุป....85
6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต....86
รายการอ้างอิง....87
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB....89
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบตาบู....92
ภาคผนวก ค. โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Ardunio....107
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา....115
ประวัติผู้เขียน....131

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 7
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว 8
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเชิงเส้นของหลอดไฟแอลอีดี 10
3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 28
3.2 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีตัวควบคุม 38
3.3 ตารางเปรียบเทียบการประหยัดเวลาในการจำลองสถานการณ์ 42
4.1 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น 50
4.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง 51
4.3 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น 52
4.4 ผลการทดสอบค่าปรับลดรัศมี 53
4.5 ผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม 56
4.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม 56
5.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม 73
5.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์วัดกระแส 77
5.3 ผลการทดสอบชุดวัดความเข้มแสง 79
5.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS 80

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

3.1 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ กรณีไม่มีตัวควบคุม 14

3.2 วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 16

3.3 วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กรณีสวิตช์ S_1 ไม่นำกระแส 16

3.4 วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กรณีสวิตช์ S_1 นำกระแส 17

3.5 ฟังก์ชันการสวิตช์ $u(t)$ 19

3.6 ฟังก์ชันการสวิตช์ของ $u_a(t)$ 20

3.7 แรงดันอินพุตของระบบ v_{ac} 21

3.8 ผลการตอบสนองของ i_1 และ v_{in} เมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 % 29

3.9 ผลการตอบสนองของ i_f และ v_f เมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 % 29

3.10 ผลการตอบสนองของ i_o และ v_o เมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 % 30

3.11 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ 31

3.12 โครงสร้างระบบการควบคุม 32

3.13 โครงสร้างสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต 34

3.14 โครงสร้างสำหรับออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า 36

3.15 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ เมื่อเปลี่ยนแปลง (v_o^*) จาก 30 V เป็น 40 V 40

3.16 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง (v_o^*) จาก 30 V เป็น 40 V 40

3.17 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ เมื่อเปลี่ยนแปลง (v_o^*) จาก 30 V เป็น 50 V 41

3.18 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง (v_o^*) จาก 30 V เป็น 50 V 41

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา 45
4.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0 46
4.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่ 46
4.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่ 47
4.5 กลไกการเดินย้อนรอย 47
4.6 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นแบบตาบู เชิงปรับตัว 48
4.7 การลู่เข้าหาคำตอบ W 55
4.8 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต อ้างอิงจาก 53.9 V เป็น 56.1 V 57
4.9 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต อ้างอิงจาก 52.8 V เป็น 56.1 V 58
4.10 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต อ้างอิงจาก 52.8 V เป็น 53.9 V 58
5.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย 60
5.2 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 61
5.3 โครงสร้างวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 61
5.4 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ 62
5.5 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 63
5.6 ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรกรองแรงดันไฟฟ้า 63
5.7 ตัวต้านทานสำหรับชุดทดสอบ 64
5.8 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี 64
5.9 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรองดีซี ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม 65
5.10 โครงสร้างของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรองดีซี ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม 66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.11 โครงสร้างชุดแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 66
5.12 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 67
5.13 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ 68
5.14 ชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ 68
5.15 มอดูลของมอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัย 69
5.16 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์ 71
5.17 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์ 71
5.18 ไดโอดที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์ 71
5.19 สัญญาณพีดับเบิลยูเอมที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 35 เปอร์เซ็นต์ 72
5.20 สัญญาณพีดับเบิลยูเอมที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 65 เปอร์เซ็นต์ 72
5.21 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต เมื่อ d เปลี่ยนค่าจาก 35% ไปเป็น 85% 73
5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรการทำงานและแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณ 74
5.23 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์กรณีที่มีตัวควบคุม 75
5.24 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์กรณีที่มีตัวควบคุม 75
5.25 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า 76
5.26 โครงสร้างวงจรวัดกระแสไฟฟ้า 76
5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสปฐมภูมิและแรงดันทุติยภูมิของอุปกรณ์วัดกระแส 78
5.28 อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง 78
5.29 โครงสร้างวงจรตรวจวัดความเข้มแสง 79
5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงปฐมภูมิและแรงดันทุติยภูมิ 79
5.31 ผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนจาก 80 เป็น 140 $\mu mol/m^2/s$ 81
5.32 ผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนจาก 100 เป็น 140 $\mu mol/m^2/s$ 82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.33 ผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนจาก 80 เป็น 100 $\mu mol/m^2/s$ 83
ก.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดี 90
ก.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดแอลอีดี กรณีมีตัวควบคุม 91

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไดโอดเปล่งแสง (Light-emitting diodes , LEDs) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากหลอดแอลอีดี มีขนาดเล็ก อายุการใช้งานยาวนาน ปล่อยความร้อนน้อย และสามารถปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้ได้หลากหลายกว่าแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดเมทัลฮาไลด์ หลอดโซเดียมความดันไอสูง และ หลอดอินแคน –เดสเซนต์ เป็นต้น ดังนั้นในปัจจุบันหลอดแอลอีดี จึงถูกประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเทียมในการเพาะปลูกพืชชนิดต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามพืชแต่ละชนิดมีความต้องการแสงที่แตกต่างกัน ดังนั้นต้องเลือกใช้แสงเทียมที่มีความยาวคลื่น และความเข้มแสงที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิด เพื่อให้พืชสามารถสังเคราะห์แสงและเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับตามธรรมชาติ (Massa et al., 2008) เช่น การให้แสงแอลอีดี สีแดง:ฟ้า (3:1) ที่ความเข้มแสง 350 μmol/m^2/s เป็นเวลา 16 ชั่วโมง/วัน กับสาหร่าย สไปรูลินา (Spirulina platensis) ส่งผลให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีกว่าการเลี้ยงในแสงฟลูโอเรสเซนต์ (Jaturongloumlart et al., 2017) การใช้แสงแอลอีดี สีแดง (6500K) : สีฟ้า (3000 K) (1:1) ที่ความเข้มแสง 150 μmol/m^2/s ส่งผลให้ต้นพิทูเนียพันธุ์ Purple มีอัตราการสังเคราะห์แสง และการเจริญเติบโตดีกว่าต้นที่ปลูกด้วยแสงชนิดเดียวกันที่ความเข้มแสง 200 μmol/m^2/s (Jamaree et al., 2017) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้แสงแอลอีดี ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อกระตุ้นให้พืชผลิตสารที่ต้องการเพิ่มขึ้น เช่น การให้แสงแอลอีดี สีแดง: สีฟ้า (3:1) ที่ความเข้มแสง 215 μmol/m^2/s กับต้นโหระพา ส่งผลให้ต้นโหระพามีสรีรวิทยา และการเจริญเติบโต รวมถึงการสังเคราะห์ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatiles) ได้ดีกว่าการใช้แสงสีแดง:สีฟ้า ที่อัตราส่วน 1:2 1:1 2:1 และ 4:1 (Pennisi et al., 2019) การปลูกผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดและเรดโอ๊คจากหลอดไฟแอลอีดี ที่ความเข้มแสง 298.98 μmol/m^2/s เปิดนาน 12 ชั่วโมง ให้การเจริญเติบโตดีกว่าของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ (Petchthai et al., 2017) เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการควบคุมความเข้มแสงของแอลอีดีตามความต้องการของผู้ใช้งาน ด้วยวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ที่มีโหลดเป็นหลอดแอลอีดี ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร เมื่อนำมา

ออกแบบตัวควบคุมหรือวิเคราะห์เสถียรภาพ จะเกิดความยุ่งยากและซับซ้อน จึงต้องทำให้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method : GSSA), (Mahdavi, Emadi, Bellar, and Ehsani, 1997) เป็นวิธีที่ง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุม และไม่ทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ เพื่อให้ผลที่ได้ของเอาต์พุตมีสมรรถนะที่ดีที่สุด ในขอบเขตความสมจริงและมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ที่มีโหลดเป็นแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี (Li, Yu, and Shi, 2016), (Lin, 2017), (Leng and Zhou, 2018), (Fernando Menke, Raniere Seidelm, and Varella Tambara, 2019) ซึ่งจะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมไปเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ATS ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS (Sopapirm, Areerak, K-N., Areerak, K-L., and Srikaew, 2011), (Chonsatidjamroen, Areerak, K-N., and Areerak, K-L., 2012) นั้น จะส่งผลทำให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตนั้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี การตรวจวัดแสงทำได้โดยการใช้เครื่องมือตรวจวัดแสงมาตรฐานที่เรารู้จักกันคือเครื่องวัดแสง (Lux meter) มีหลายรุ่นและหลายบริษัทที่ผลิตขึ้นที่สามารถวัดความเข้มของการส่องสว่างได้ ตั้งแต่ 0-20,000 Lux และคุณลักษณะของเครื่องวัดแสงต้องเป็นไปตามมาตรฐาน CIE 1931 ของคณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยความส่องสว่าง (International Commission on Illumination) หรือ ISO/CIE 10527 หรือเทียบเท่า จากข้อกำหนดดังกล่าวทำให้เครื่องมือวัดแสงส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาสูง

ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงตรวจวัดความส่องสว่างของแสงโดยใช้โมดูล GY-302 (Ambient Light Sensor Module) เป็นตัวเซนเซอร์รับแสงภายในหัววัดเพื่อนำไปประมวลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ในการวัดและเปรียบเทียบความส่องสว่างหรือตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแสง โดยให้แสดงผลการวัดบนหน้าจอ LCD ขนาด 16x2 ตัวอักษร และในส่วนสำหรับประมวลผลทำการเก็บข้อมูลและประมวลผลโดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MEGA2560 (Sirithong, Katathikarnkul, and Khongpugdee, 2014), (Leelaratsamee and Detchjarat, 2011) ข้อดีของเครื่องมือที่ประดิษฐ์นั้นคือ ใช้งานง่าย สะดวก ปลอดภัย ง่ายต่อการบำรุงรักษา รวมถึงเป็นการนำเทคโนโลยีที่มีอยู่มาพัฒนาให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเป็นการลดการนำเข้าของสินค้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง

การวัดความหนาแน่นของแสงในขณะที่พืชมีการสังเคราะห์แสงชั่วขณะเรียก Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) มีหน่วยเป็น $\mu mol/m^2/s$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการหา

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วย Lux ทางไฟฟ้า และหน่วย $\mu mol/m^2/s$ ทางพืช พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมความเข้มแสงบนคอมพิวเตอร์ และผลการตอบสนองจากชุดทดสอบด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส และวงจรกรองสัญญาณดีซี เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ โดยมีโหลดเป็นแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี

1.2.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยใช้วิธีการดั้งเดิม และวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสำหรับวงจรปรับความเข้มแสง

1.2.3 เพื่อนำองค์ความรู้จากการศึกษาทางทฤษฎี มาดำเนินการตรวจสอบโดยใช้ชุดทดสอบจริงของระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดี

1.2.4 เพื่อศึกษาและพัฒนาการควบคุมโดยใช้บอร์ดดิจิตอลไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมความเข้มของแสง ผ่านเซนเซอร์วัดความเข้มของแสง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสและวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้

1.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.3 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (power system blockset) ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.4 ตัวควบคุมที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้เป็นตัวควบคุมพีไอต่อเรียงกันแบบคาสเคด

1.3.5 การออกแบบคัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ใช้วิธีการค้นหาแบบแบบตาบูเชิงปรับตัว

1.3.6 ตัวควบคุมของชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARDUINO MEGA 2560

1.3.7 ยืนยันผลการศึกษาและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ และผลจากชุดทดสอบ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิจารณาเฉพาะส่วนประกอบมูลฐานในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และละทิ้งค่าแรงดันกระเพื่อมในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

1.4.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส พิจารณาในช่วงโหมดการทำงานแบบต่อเนื่องเท่านั้น (CCM)

1.4.3 ออกแบบตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบควบคุมได้ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า การค้นหาแบบแบบตาบูเชิงปรับตัว

1.4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของระบบ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสและวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้

1.5.2 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ควบคุมได้ ด้วยตัวควบคุมพีไอ

1.5.3 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

1.5.4 บทความวิจัยเผยแพร่ระดับชาติ หรือ นานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว และแบบจำลองเชิงเส้นของหลอดไฟแอลอีดี

บทที่ 3 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสและวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม และการตรวจสอบความถูกต้องของ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทที่ 4 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ขอบเขตการค้นหาและการทดสอบพารามิเตอร์ นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลการทำงานของตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมและตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดี ทั้งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรวมไปถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ ผลการทดสอบของระบบจริงพร้อมทั้งผลการเปรียบเทียบ ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบแต่ละวิธี

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงโครงสร้างชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังใน SimPowerSystem™ ของโปรแกรม MATLAB ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการออกแบบด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียดโปรแกรมที่ใช้ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของชุดทดสอบ และภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดี ที่ใช้ในการปลูกพืชด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยวงจรที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการวิจัยค้นคว้าการปลูกพืชด้วยหลอดไฟแอลอีดี และการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีต่าง ๆ ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวกับงานวิศวกรรมเพื่อใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเชิงเส้นหลอดไฟแอลอีดี เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมความเข้มแสงของแอลอีดี

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีความจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ซึ่งแบบจำลองโดยทั่วไปมักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลของการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทำให้มีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์และออกแบบตัวควบคุมของระบบ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	Emadi, A.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีหลายวงจรเชื่อมต่อกันในระบบ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2004	Jalla, M.M., Emadi, A.,Williamson, G.A., andFahimi, B.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีหลายวงจรเชื่อมต่อกันในระบบ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งผลที่ได้จากการทดลอง
2004	Emadi, A.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสซึ่งมีโหลดตัวต้านทานขนานกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยแบบจำลองของวงจรได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยวิธีค่าเจาะจง
2005	Tsang, K.M.	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ โดยใช้ตัวควบคุมลูปแรงดันและตัวควบคุมลูปกระแสต่อเรียงกัน
2011	Udomsuk, S., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2011	Chonsatidjamroen, S. , Sopapirm, T., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่มีโหลดตัวต้านทานขนานกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยแบบจำลองของวงจรได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

จากผลงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น พบว่าการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส และวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี นิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสภานะทั่วไป เนื่องจากมีความง่าย รวดเร็ว มีความเหมาะสมกับการนำไปออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวเป็นวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันได้มีการนำวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมมากมาย เช่น ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบควบคุม การระบุเอกลักษณ์ เป็นต้น โดยในอดีตที่ผ่านมาการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มีการนำไปใช้กับระบบที่แตกต่างกันออกไป โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Sopapirm, T., Areerak, K-N., Areerak, K-L., and Srikaew, A.	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์เทียบกับวิธีแบบดั้งเดิม
2012	Chaijarurnudomrung, K., Areerak, K-N., and Kwannetr, U.	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสควบคุมโดยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง นำเสนอการจำลองสถานการณ์เทียบกับวิธีแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	Chonsatidjamroen, S., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันแบบคาสเคต ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว นำเสนอการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เทียบกับวิธีแบบดั้งเดิม
2013	Areerak, K-N.	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมพีไอที่เรียงต่อกัน การตรวจสอบความถูกต้องอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งผลที่ได้จากการทดลอง

จากงานวิจัยในอดีตที่กล่าวไว้ในข้างต้นพบว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จะมีสรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม จากผลการออกแบบแสดงให้เห็นถึงการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมาใช้งานร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งนำมาทำการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้สมรรถนะของสัญญาณเอาต์พุตดีที่สุดและดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเชิงเส้นของหลอดไฟแอลอีดี

งานวิจัยวิทยานิพนธ์กล่าวถึงหลอดไฟแอลอีดีที่ใช้ในการปลูกพืช ซึ่งพืชแต่ละชนิดมีความต้องการความเข้มแสงที่แตกต่างกัน ความเข้มแสงของหลอดไฟแอลอีดีขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า การออกแบบตัวควบคุมจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แอลอีดีจึงต้องใช้แบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดีในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันแสดงได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเชิงเส้นของหลอดไฟแอลอีดี

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Juárez, M.A., Martínez, P.R., Vázquez, G., Sosa, J.M., Prieto, X., and Martínez, R.	นำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ โดยการออกแบบตัวควบคุมและการจำลองสถานการณ์ ต้องใช้แบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี แสดงผลการตอบสนองของกระแสและความส่องสว่างของหลอดไฟแอลอีดี
2015	Kim, M.G.	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอ เพื่อนำไปควบคุมค่าวัฏจักรของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ต้องใช้แบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี ในการออกแบบวงจรขับหลอดไฟแอลอีดี ให้มีแรงดันที่คงที่
2016	Li, G., Yu, S., and Shi, J.	นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองของหลอดไฟแอลอีดีกำลังสูง โดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดีในการออกแบบตัวควบคุม ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์
2017	Lin, R.L.	นำเสนอการศึกษาวงจรขับหลอดไฟแอลอีดี เพื่อไม่ให้เกิด CCM จึงใช้แบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี ในการจำลองสถานการณ์และออกแบบตัวควบคุมวงจรขับหลอดไฟแอลอีดี

จากงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวและแบบจำลองเชิงเส้นของหลอดไฟแอลอีดี ยังไม่มีการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดีด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์แบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ 2 ตัว เรียงกันแบบคาสเคต แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกับระบบแปลงผันดีซีเป็นดีซี การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อให้ผลที่ได้ของเอาต์พุตมีสมรรถนะที่ดี

ที่สุด ในขอบเขตความสมจริงและมีเสถียรภาพ และแบบจำลองแอลอีดีนั้นเป็นแบบจำลองเชิงเส้น มาเป็นโหลดให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

2.5 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้ เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว และแบบจำลองเชิงเส้นของหลอดไฟแอลอีดี ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย เป็นผลงานวิจัยที่มีความน่าเชื่อถือ วิธีการต่าง ๆ ที่ได้จากการศึกษาเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุม ความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดี

3.1 บทนำ

ระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟแอลอีดีที่ใช้ในงานวิจัย อาศัยการออกแบบตัวควบคุมจากแบบจำลองวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากอุปกรณ์สวิตช์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาค้นคว้าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป วิธีดังกล่าวจะกำจัดผลของการสวิตช์ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะกับการนำไปวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมของระบบ ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ทั้ง 2 กรณี คือ กรณีไม่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ เนื่องจากผลของแรงดันเอาต์พุตมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงที่ต้องการควบคุม นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยอาศัยการเปรียบเทียบด้วยผลการจำลองสถานการณ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป กับการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทั้งสองมีความสอดคล้องกัน

3.2 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เป็นวิธีการที่ใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะของวงจร (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ซึ่งอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

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

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

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

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

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

คุณสมบัติที่จำเป็น 3 ข้อของสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลัง โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังนี้

ข้อที่ 1 คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-3)

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

ข้อที่ 2 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (3-4)

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

ข้อที่ 3 ถ้า *f(t)* คือค่าจริง (real-value periodic waveform) แสดงได้ดังสมการที่ (3-5)

$$\langle x\rangle_{-k}=\overline{\langle x\rangle}_k=\langle x\rangle_k^* \tag{3-5}$$

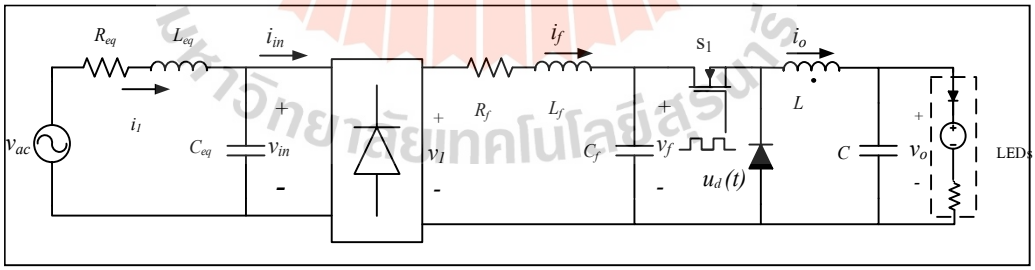
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากสมการที่ (3-1) และ (3-2) ค่า k เป็นตัวบ่งบอกความถูกต้องของการใช้ อนุกรมฟูริเยร์ ถ้า k มีค่าเป็นอันดับอนันต์ ค่าผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับ 0 และถ้าสัญญาณที่ไม่ปรากฏการสั่นไกว สามารถกำหนดให้ค่า $k = 0$ ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า การประมาณค่าอันดับศูนย์ (zero-order approximation) ของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Mahdavi, Emadi,Bellar, and Ehsani, 1997) หรือถ้าสัญญาณมีการสั่นไกว สามารถกำหนดให้ k มีค่าเป็น -1, 1 ซึ่งจะเรียกวิธีนี้ว่า การประมาณค่าอันอับหนึ่ง (first-order approximation) ของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (A. Emadi, 2004) ในหัวข้อถัดไปจะนำ เสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์

3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์

3.3.1 กรณีวงจรแปลงผันแบบบัคก์ไม่มีตัวควบคุม

วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{rms} วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ R_{eq}, L_{eq} และ C_{eq} จะเป็นพารามิเตอร์ที่สายส่ง ตัวกรองฝั่งกระแสตรง จะเป็นค่าพารามิเตอร์ R_f, L_f และ C_f สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ $u(t)$ และพารามิเตอร์ L และ C เป็นองค์ประกอบของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบบัคก์และโหลดแอลอีดี



รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ กรณีไม่มีตัวควบคุม

เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันและวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีการทำงานตามฟังก์ชันของเวลา แบบจำลองของระบบจึงเป็นแบบจำลองขึ้นกับเวลา(time varying model) การวิเคราะห์ระบบด้วยแบบจำลองดังกล่าวจึงมีความซับซ้อน จึง

ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเหมาะกับวงจรเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส และวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี วิธีการดังกล่าวจะได้แบบจำลองไม่ขึ้นกับเวลา (time-invariant model) ทำให้การวิเคราะห์ระบบมีความสะดวกมากขึ้น

จากวงจรรูปที่ 3.1 $u(t)$ จะแทนฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรเรียงกระแส และ $u_d(t)$ จะแทนฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ดังนี้

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < \dfrac{T}{2} \\ -1, & \dfrac{T}{2} < t < T \end{cases} \tag{3-6}$$

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

โดยที่ T คือ คาบเวลาสัญญาณสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส

T_s คือ คาบเวลาสัญญาณสวิตช์วงจรแปลงผันแบบบัคก์

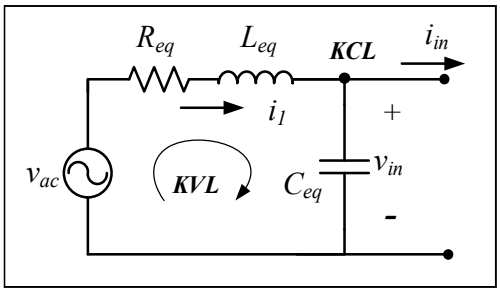
d คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 หรือ 0-100 เปอร์เซ็นต์

ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-8)

$$i_{in} = u(t) \cdot i_f \quad \text{และ} \quad v_1 = u(t) \cdot v_{in} \tag{3-8}$$

ในการพิจารณาหาแบบจำลองสวิตช์ของระบบในรูปที่ 3.1 จะแบ่งการพิจารณาวงจรออกเป็น 3 ส่วนคือ วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรแปลงผันแบบบัคก์ การหาสมการเชิงอนุพันธ์จะอาศัยกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) และกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL)

พิจารณาส่วนที่ 1 วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2

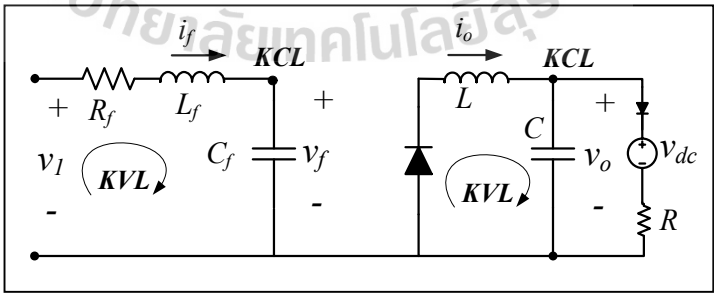


รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

KVL ;
$$-v_{ac} + i_1 R_{eq} + L_{eq}\dot{i}_1 + v_{in} = 0$$
$$\dot{i}_1 = \frac{-R_{eq}}{L_{eq}} i_1 - \frac{1}{L_{eq}} v_{in} + \frac{1}{L_{eq}} v_{ac}$$

KCL ;
$$i_1 - i_{in} - C_{eq}\dot{v}_{in} = 0$$
$$\dot{v}_{in} = \frac{1}{C_{eq}} i_1 - \frac{1}{C_{eq}} i_{in}$$
$$\dot{v}_{in} = \frac{1}{C_{eq}} i_1 - \frac{1}{C_{eq}} i_f u(t)$$

พิจารณาส่วนที่ 2 วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แสดงได้ดังรูปที่ 3.3
เมื่อกำหนดให้สวิตช์ S_1 ไม่นำกระแส $\left(u_d(t) = 0\right)$



รูปที่ 3.3 วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กรณีสวิตช์ S_1 ไม่นำกระแส

KVL; $$i_f R_f + L_f \dot{i}_f + v_f - v_1 = 0$$

$$\dot{i}_f = -\frac{R_f}{L_f} i_f - \frac{1}{L_f} v_f + \frac{1}{L_f} v_{in} \cdot u(t)$$

KCL; $$i_f - C_f \dot{v}_f = 0$$

$$\dot{v}_f = \frac{1}{C_f} i_f$$

KVL; $$L \dot{i}_0 + v_o = 0$$

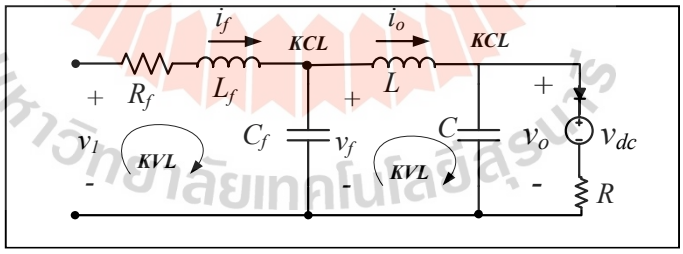
$$\dot{i}_o = -\frac{1}{L} v_o$$

KCL; $$i_o - C \dot{v}_o - i_R = 0$$

$$\dot{v}_o = \frac{1}{C} i_o - \frac{1}{RC} v_o + \frac{1}{RC} v_{dc}$$

พิจารณาส่วนที่ 3 วงจรแปลงผันแบบบัคก์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3

เมื่อกำหนดให้สวิตช์ S_1 นำกระแส $(u_a(t) = 1)$



รูปที่ 3.4 วงจรเรียงกระแสฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กรณีสวิตช์ S_1 นำกระแส

KVL; $$i_f R_f + L_f \dot{i}_f + v_f - v_1 = 0$$

$$\dot{i}_f = -\frac{R_f}{L_f} i_f - \frac{1}{L_f} v_f + \frac{1}{L_f} v_{in} \cdot u(t)$$

KCL; $$i_f - i_o - C_f \dot{v}_f = 0$$
$$\dot{v}_f = \frac{1}{C_f} i_f - \frac{1}{C_f} i_o$$

KVL; $$-v_f + L\dot{i}_0 + v_o = 0$$
$$\dot{i}_o = -\frac{1}{L} v_o + \frac{1}{L} v_f$$

KCL; $$i_o - C\dot{v}_o - i_R = 0$$
$$\dot{v}_o = \frac{1}{C} i_o - \frac{1}{RC} v_o + \frac{1}{RC} v_{dc}$$

จากการวน KVL และ KCL ในรูปที่ (3.2) – (3.4) จะได้สมการตัวแปรสถานะ6 ตัวดังสมการ (3-9)

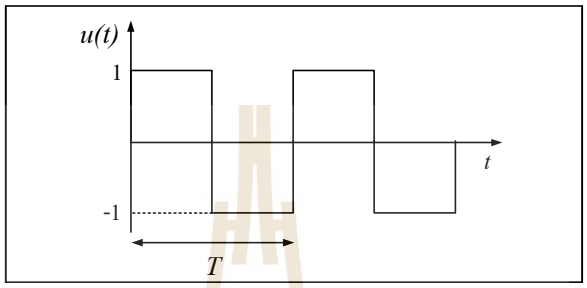
$$\begin{cases} \dot{i}_1 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_1 - \frac{1}{L_{eq}} v_{in} + \frac{1}{L_{eq}} v_{ac} \\ \dot{v}_{in} = \frac{1}{C_{eq}} i_1 - \frac{1}{C_{eq}} i_f u(t) \\ \dot{i}_f = -\frac{R_f}{L_f} i_f - \frac{1}{L_f} v_f + \frac{1}{L_f} v_{in} \cdot u(t) \\ \dot{v}_f = \frac{1}{C_f} i_f - \frac{1}{C_f} i_o \cdot u_d(t) \\ \dot{i}_o = -\frac{1}{L} v_o + \frac{1}{L} v_f \cdot u_d(t) \\ \dot{v}_o = \frac{1}{C} i_o - \frac{1}{RC} v_o + \frac{1}{RC} v_{dc} \end{cases} \quad (3\text{-}9)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-9) พบว่ามีพารามิเตอร์ $u(t)$ เป็นฟังก์ชันของเวลา ที่เกิดจากพฤติกรรมการทำงานของวงจรเรียงกระแส และพารามิเตอร์ $u_d(t)$ ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่เกิดจากพฤติกรรมการทำงานของสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ จึงต้องทำการแปลงแบบจำลองให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา โดยในที่นี้จะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การพิสูจน์หาแบบจำลองจะพิจารณาเฉพาะส่วนประกอบมูลฐานในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และละทิ้งค่าแรงดันกระเพื่อมในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

พิจารณาหาสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตซ์ $u(t)$ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันการสวิตซ์ $u(t)$

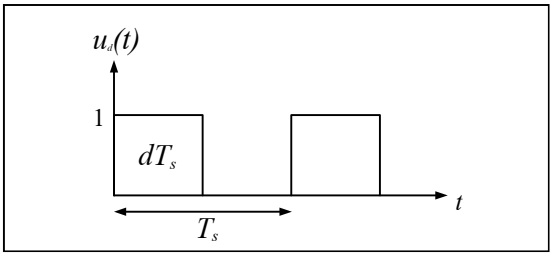
เมื่อกำหนดให้ $k = 0$ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตซ์ $u(t)$ แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\langle u \rangle_0 &= \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} (1)e^0 dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}}^{T} (-1)e^0 dt \\ &= \frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi} 1 d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} -1 d\theta\right] \\ &= 0\end{aligned} \tag{3-10}$$

เมื่อกำหนดให้ $k = 1$ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตซ์ $u(t)$ แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\langle u \rangle_1 &= \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} (1)e^{-j\omega t} dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}}^{T} (-1)e^{-j\omega t} dt \\ &= \frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi} (1)e^{-j\theta} d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} (-1)e^{-j\theta} d\theta\right] \\ &= -\frac{j2}{\pi}\end{aligned} \tag{3-11}$$

พิจารณาหาสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตซ์ $u_d(t)$ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ฟังก์ชันการสวิตซ์ของ $u_d(t)$

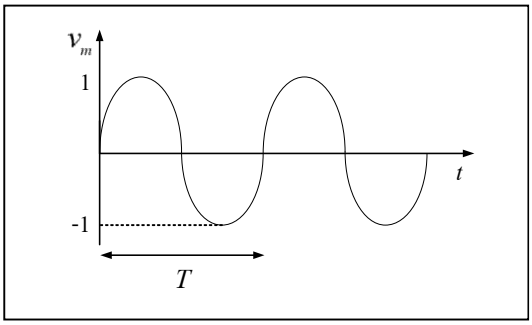
เมื่อกำหนดให้ $k = 0$ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตซ์ $u_d(t)$ แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\langle u_d \rangle_0 &= \frac{1}{T_s}\int_0^{dT_s}(1)e^0 dt \\ &= d\end{aligned} \tag{3-12}$$

เมื่อกำหนดให้ $k = 1$ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตซ์ $u_d(t)$ แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\langle u_d \rangle_1 &= \frac{1}{T_s}\int_0^{dT_s}(1)e^{-j\omega_s t} dt \\ &= \frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi}\end{aligned} \tag{3-13}$$

พิจารณาหาสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของแรงดันอินพุตของระบบ v_{ac} ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แรงดันอินพุตของระบบ v_{ac}

เมื่อกำหนดให้ $k = 0$ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของแรงดันอินพุตของระบบ v_{ac} แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\langle v_{ac} \rangle_0 &= \frac{1}{T}\int_0^T V_m \sin \omega t \cdot e^0 dt \\ &= \frac{V_m}{2\pi}\int_0^{2\pi} \sin 0 \cdot e^0 d\theta \\ &= 0 \end{aligned} \tag{3-14}$$

เมื่อกำหนดให้ $k = 1$ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของแรงดันอินพุตของระบบ v_{ac} แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\langle v_{ac} \rangle_1 &= \frac{1}{T}\int_0^T V_m \sin \omega t \cdot e^{-j\omega t} dt \\ &= \frac{V_m}{2\pi}\int_0^{2\pi} \sin \theta \cdot e^{-j\theta} d\theta \\ &= -\frac{jV_m}{2} \end{aligned} \tag{3-15}$$

โดย V_m คือค่าแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่าย

การหาแบบจำลอง GSSA ด้วยการประมาณอันดับหนึ่ง (first-order approximation)

จากแบบจำลองสวิตช์ มีตัวแปรสถานะ 6 ตัว คือ $i_1, v_{in}, i_f, v_f, i_o$ และ v_o โดยจะสร้างตัวแปรสถานะของแบบจำลองจากสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนข้างต้น ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พิจารณาที่ k = -1,0,1 จะได้

$$
\begin{aligned}
i_1 &= \langle i_1 \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle i_1 \rangle_0 + \langle i_1 \rangle_1 e^{j\omega t} \\
v_{in} &= \langle v_{in} \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle v_{in} \rangle_0 + \langle v_{in} \rangle_1 e^{j\omega t} \\
i_f &= \langle i_f \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle i_f \rangle_0 + \langle i_f \rangle_1 e^{j\omega t} \\
v_f &= \langle v_f \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle v_f \rangle_0 + \langle v_f \rangle_1 e^{j\omega t} \\
i_1 &= \langle i_1 \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle i_1 \rangle_0 + \langle i_1 \rangle_1 e^{j\omega t} \\
v_{in} &= \langle v_{in} \rangle_{-1} e^{-j\omega t} + \langle v_{in} \rangle_0 + \langle v_{in} \rangle_1 e^{j\omega t}
\end{aligned}
$$

เมื่อ $i_1, v_{in}, i_f, v_f, i_o$ และ v_o เป็นจำนวนจริง

เนื่องจากในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีการพิจารณาเฉพาะส่วนประกอบมูลฐานในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และละทิ้งค่าแรงดันกระเพื่อม ในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นการกำหนดตัวแปรสถานะของแบบจำลองจึงเหลือเพียง 8 ตัว ดังนี้

เมื่อ k = 1 ทางฝั่งแรงดันกระแสสลับ

$$
\left.
\begin{aligned}
\langle i_1 \rangle_1 &= x_1 + jx_2 \\
\langle v_{in} \rangle_1 &= x_3 + jx_4
\end{aligned}
\right\} \qquad (3\text{-}16)
$$

เมื่อ k = 0 ทางฝั่งแรงดันกระแสตรง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\left.\begin{aligned} \langle i_f \rangle_0 &= x_5 \\ \langle v_f \rangle_0 &= x_6 \\ \langle i_o \rangle_0 &= x_7 \\ \langle v_o \rangle_0 &= x_8 \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}17)$$

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$ คือ ตัวแปรสถานะของแบบจำลอง GSSA

จากสมการที่ (3-9) สามารถใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปพิสูจน์หาแบบจำลองคือการใช้สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ของ i_1 เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองที่การประมาณค่าอันดับหนึ่ง ($k = 1$) แสดงได้ดังนี้

พิจารณา k=1 กับ สมการอนุพันธ์ของ i_1 ด้วยคุณสมบัติข้อที่ 1 จะได้

$$\langle \dot{i}_1 \rangle_1 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}\langle i_1 \rangle_1 - \frac{1}{L_{eq}}\langle v_{in} \rangle_1 + \frac{1}{L_{eq}}\langle v_{ac} \rangle_1 - j\omega\langle i_1 \rangle_1$$

แทนค่า $\langle i_1 \rangle_1 = x_1 + jx_2$

$\langle v_{in} \rangle_1 = x_3 + jx_4$

และ $\langle v_{ac} \rangle_1 = -\frac{jV_m}{2}$

$$\dot{x}_1 + j\dot{x}_2 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}(x_1 + jx_2) - \frac{1}{L_{eq}}(x_3 + jx_4) + \frac{1}{L_{eq}}\left(-\frac{jV_m}{2}\right) - j\omega(x_1 + jx_2)$$

นั่นคือ
$$\dot{x}_1 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_1 + \omega x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_3 \qquad (3\text{-}18)$$

$$\dot{x}_2 = -\omega x_1 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_4 - \frac{V_m}{2L_{eq}} \qquad (3\text{-}19)$$

สำหรับตัวแปรสถานะ v_{in} ดำเนินการเช่นเดียวกับ i_1 มีรายละเอียดดังนี้

พิจารณา k=1 กับ สมการอนุพันธ์ของ v_{in}

$$\left\langle \dot{v}_{in} \right\rangle_1 = \frac{1}{C_{eq}} \langle i_1 \rangle_1 - \frac{1}{C_{eq}} \left\langle u \cdot i_f \right\rangle_1 - j\omega \langle v_{in} \rangle_1$$

พิจารณาเทอม $\left\langle u \cdot i_f \right\rangle_1$ ด้วยคุณสมบัติของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนข้อ 2

จากสมการ $\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i$

จะได้ $$\left\langle \dot{v}_{in} \right\rangle_1 = \frac{1}{C_{eq}} \langle i_1 \rangle_1 - \frac{1}{C_{eq}} \left(\langle u \rangle_2 \left\langle i_f \right\rangle_{-1} + \langle u \rangle_1 \left\langle i_f \right\rangle_0 + \langle u \rangle_0 \left\langle i_f \right\rangle_1 \right) - j\omega \langle v_{in} \rangle_1$$

แทนค่า $\left\langle i_1 \right\rangle_1 = x_1 + jx_2$

$\left\langle v_{in} \right\rangle_1 = x_3 + jx_4$

$\left\langle i_f \right\rangle_1 = 0$

$\left\langle i_f \right\rangle_0 = x_5$

$\langle u \rangle_2 = 0$

$\langle u \rangle_1 = -\frac{j2}{\pi}$

$\langle u \rangle_0 = 0$

จะได้ $$\dot{x}_3 + j\dot{x}_4 = \frac{1}{C_{eq}} \left(x_1 + jx_2 \right) - \frac{1}{C_{eq}} \left(-\frac{j2}{\pi} \right) x_5 - j\omega \left(x_3 + jx_4 \right)$$

นั่นคือ

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{C_{eq}} x_1 + \omega x_4 \tag{3-20}$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{C_{eq}} x_2 - \omega x_3 + \frac{2}{\pi C_{eq}} x_5 \tag{3-21}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับตัวแปรสถานะ i_f v_f i_o และ v_o หาการประมาณค่าอันดับศูนย์ ($k = 0$) แสดงได้ดังนี้

พิจารณา k=0 กับ สมการอนุพันธ์ของ i_f

$$\left\langle \dot{i}_f \right\rangle_0 = \frac{1}{L_f}\left\langle u \cdot v_{in} \right\rangle_0 - \frac{R_f}{L_f}\left\langle i_f \right\rangle_0 - \frac{1}{L_f}\left\langle v_f \right\rangle_0$$

พิจารณาเทอม $\left\langle u \cdot v_{in} \right\rangle_0$ ด้วยคุณสมบัติของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนข้อ 2

จากสมการ $\left\langle xy \right\rangle_k = \sum_i \left\langle x \right\rangle_{k-i} \left\langle y \right\rangle_i$

จะได้ $$\left\langle \dot{i}_f \right\rangle_0 = \frac{1}{L_f}\left(\left\langle u \right\rangle_1 \left\langle v_{in} \right\rangle_{-1} + \left\langle u \right\rangle_0 \left\langle v_{in} \right\rangle_0 + \left\langle u \right\rangle_{-1} \left\langle v_{in} \right\rangle_1 \right) - \frac{R_f}{L_f}\left\langle i_f \right\rangle_0 - \frac{1}{L_f}\left\langle v_f \right\rangle_0$$

แทนค่า $\left\langle i_f \right\rangle_0 = x_5$

$\left\langle v_f \right\rangle_0 = x_6$

$\left\langle v_{in} \right\rangle_1 = x_3 + jx_4$

$\left\langle v_{in} \right\rangle_0 = 0$

$\left\langle v_{in} \right\rangle_{-1} = x_3 - jx_4$

$\left\langle u \right\rangle_1 = -\frac{j2}{\pi}$

$\left\langle u \right\rangle_0 = 0$

$\left\langle u \right\rangle_{-1} = \frac{j2}{\pi}$

นั่นคือ $$\dot{x}_5 = -\frac{4}{\pi L_f}x_4 - \frac{R_f}{L_f}x_5 - \frac{1}{L_f}x_6 \qquad (3\text{-}22)$$

พิจารณา k=0 กับ สมการอนุพันธ์ของ v_f

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\left\langle \dot{v}_f \right\rangle_0 = \frac{1}{C_f}\left\langle i_f \right\rangle_0 - \frac{1}{C_f}\left\langle u_d \cdot i_o \right\rangle_0$$

พิจารณาเทอม $\left\langle u_d \cdot i_o \right\rangle_0$ ด้วยคุณสมบัติของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนข้อ 2

จากสมการ $\left\langle xy \right\rangle_k = \sum_i \left\langle x \right\rangle_{k-i} \left\langle y \right\rangle_i$

จะได้ $\left\langle \dot{v}_f \right\rangle_0 = \frac{1}{C_f}\left\langle i_f \right\rangle_0 - \frac{1}{C_f}\left(\left\langle u_d \right\rangle_1 \left\langle i_o \right\rangle_{-1} + \left\langle u_d \right\rangle_0 \left\langle i_o \right\rangle_0 + \left\langle u_d \right\rangle_{-1} \left\langle i_o \right\rangle_1\right)$

แทนค่า $\left\langle i_f \right\rangle_0 = x_5$

$\left\langle v_f \right\rangle_0 = x_6$

$\left\langle i_o \right\rangle_0 = x_7$

$\left\langle i_o \right\rangle_1 = 0$

$\left\langle i_o \right\rangle_{-1} = 0$

$\left\langle u_d \right\rangle_0 = d$

$\left\langle u_d \right\rangle_1 = \frac{\sin 2\pi d + j\left(\cos 2\pi d - 1\right)}{2\pi}$

$\left\langle u_d \right\rangle_{-1} = \frac{\sin 2\pi d - j\left(\cos 2\pi d - 1\right)}{2\pi}$

นั่นคือ $\dot{x}_6 = \frac{1}{C_f}x_5 - \frac{d}{C_f}x_7$ (3-23)

พิจารณา k=0 กับ สมการอนุพันธ์ของ i_o

$$\left\langle \dot{i}_o \right\rangle_0 = -\frac{1}{L}\left\langle v_o \right\rangle_0 - \frac{1}{L}\left\langle u_d \cdot v_f \right\rangle_0$$

พิจารณาเทอม $\left\langle u_d \cdot v_f \right\rangle_0$ ด้วยคุณสมบัติของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนข้อ 2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากสมการ $\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i$

จะได้ $\left\langle \dot{i}_o \right\rangle_0 = -\frac{1}{L}\langle v_o \rangle_0 - \frac{1}{L}\left(\langle u_d \rangle_1 \langle v_f \rangle_{-1} + \langle u_d \rangle_0 \langle v_f \rangle_0 + \langle u_d \rangle_{-1} \langle v_f \rangle_1 \right)$

แทนค่า $\langle v_f \rangle_0 = x_6$

$\langle i_o \rangle_0 = x_7$

$\langle v_o \rangle_0 = x_8$

$\langle v_f \rangle_1 = 0$

$\langle v_f \rangle_{-1} = 0$

$\langle u_d \rangle_0 = d$

$\langle u_d \rangle_1 = \frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi}$

$\langle u_d \rangle_{-1} = \frac{\sin 2\pi d - j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi}$

นั่นคือ $\dot{x}_7 = \frac{d}{L} x_6 - \frac{1}{L} x_8$ (3-24)

พิจารณา k=0 กับ สมการอนุพันธ์ของ i_o

$$\left\langle \dot{v}_o \right\rangle_0 = \frac{1}{C}\langle i_o \rangle_0 - \frac{1}{RC}\langle v_o \rangle_0 + \frac{1}{RC}\langle v_{dc} \rangle_0$$

แทนค่า $\langle i_o \rangle_0 = x_7$

$\langle v_o \rangle_0 = x_8$

$\langle v_{dc} \rangle_0 = v_{dc}$

นั่นคือ $\dot{x}_8 = \frac{1}{C} x_7 - \frac{1}{RC} x_8 + \frac{1}{RC} v_{dc}$ (3-25)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

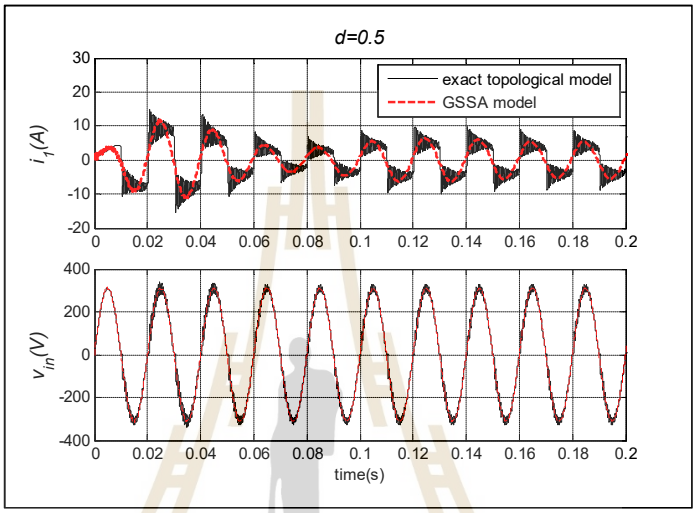
จากสมการที่ (3-18) ถึง (3-25) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นแปลงผันแบบบัคก์กรณีไม่มีตัวควบคุมที่ไม่ขึ้นกับเวลา การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ด้วยการประมาณอันดับหนึ่ง สามารถใช้ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) และคำนวณหา $i_1, v_{in}, i_f, v_f, i_o$ และ v_o ของวงจรดังกล่าวได้จากสมการที่ (3-26) โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

$$
\begin{aligned}
i_1 &= 2x_1 \cos \omega_s t - 2x_2 \sin \omega_s t \\
v_{in} &= 2x_3 \cos \omega_s t - 2x_4 \sin \omega_s t \\
i_f &= x_5 \\
v_f &= x_6 \\
i_o &= x_7 \\
v_o &= x_8
\end{aligned}
\qquad (3\text{-}26)
$$

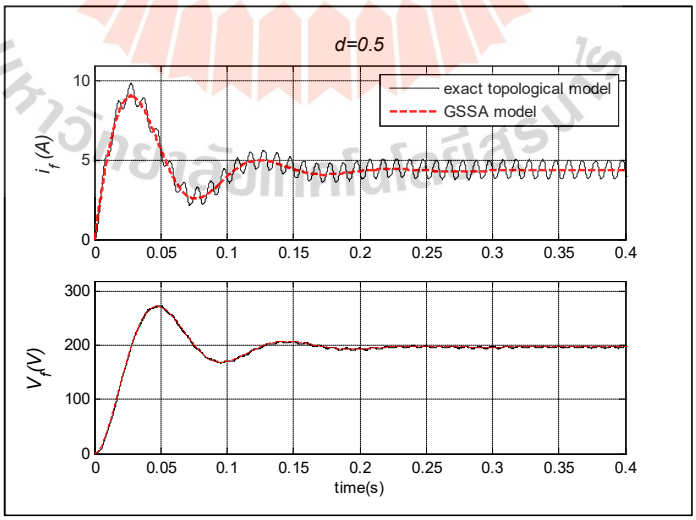
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_m	220 V_{rms}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	1 mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	10 μF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
R_f	10 mΩ	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_f	350 mH	ความเหนี่ยวนำขอวงจรกรอง
C_f	650 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L	25 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคก์
C	150 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคก์
R	10 Ω	ความต้านทานภายในของ LED
V_{dc}	12 V	แรงดันกระแสตรงของ LED
d	0.5	ค่าวัฏจักรหน้าที่วงจรแปลงผันแบบบัคก์

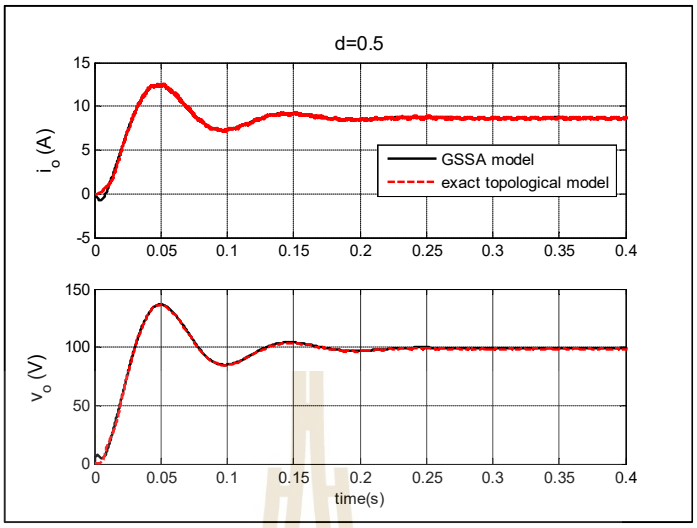
ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB นำมาใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การจำลองสถานการณ์จะกำหนดค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ เท่ากับ 0.5 (50%) ผลการตอบสนองของ $i_1, v_{in}, i_f, v_f, i_o$ และ v_o ของระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ถึงรูปที่ 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 ผลการตอบสนองของ i_1 และ v_{in} เมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 %



รูปที่ 3.9 ผลการตอบสนองของ i_f และ v_f เมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 %

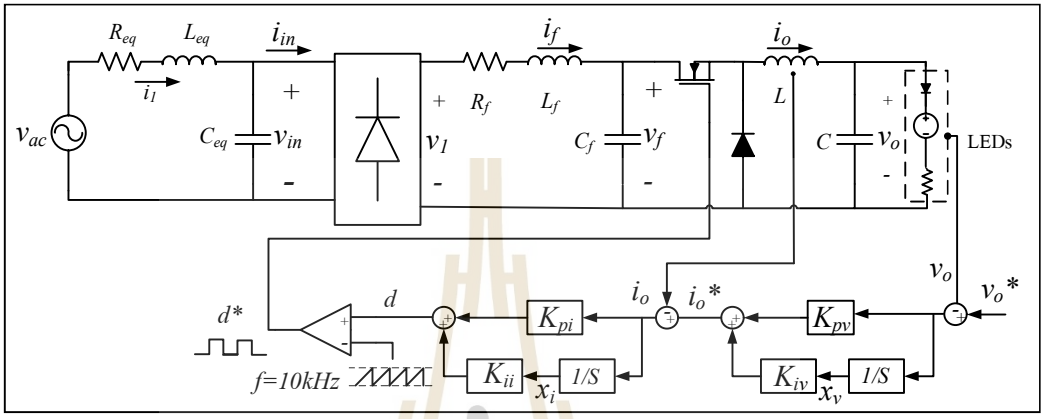


รูปที่ 3.10 ผลการตอบสนองของ i_o และ v_o เมื่อวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 50 %

จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ตามรูปที่ 3.8 ถึงรูปที่ 3.10 จะสังเกตได้ว่าผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีรูปสัญญาณสอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของ MATLAB ทั้งในสภาวะชั่วครู่ และสภาวะอยู่ตัว สังเกตได้ว่าผลการตอบสนองที่ได้จากชุดบล็อกไฟฟ้าจะปรากฏสัญญาณกระเพื่อม เนื่องจากเป็นการจำลองสถานการณ์ของระบบจริง แต่ผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่มีการกระเพื่อมของสัญญาณ เนื่องจากการพิสูจน์เพื่อให้ได้แบบจำลองนั้นไม่ได้พิจารณาผลการสวิตช์ จึงเรียกว่าเป็นแบบจำลองแบบค่าเฉลี่ย แต่พลวัตที่สำคัญของระบบยังคงอยู่และนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาทางประดิษฐ์ได้ เมื่อพิจารณาเวลาในการตอบสนองพบว่า ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังนั้นใช้เวลา 42 วินาที และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลาในการคำนวณ 16.2 วินาที ซึ่งใช้เวลาเร็วกว่า 2.59 เท่า ลดเวลาในการจำลองสถานการณ์เนื่องจากแบบจำลองจะกำจัดผลกระทบของสวิตช์ในระบบออกไป ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ถือเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรที่มีการควบคุมพีไอ ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในหัวข้อถัดไป

3.3.2 กรณีวงจรแปลงผันแบบบัคก์มีตัวควบคุม

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร ที่มีตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 ดังนี้



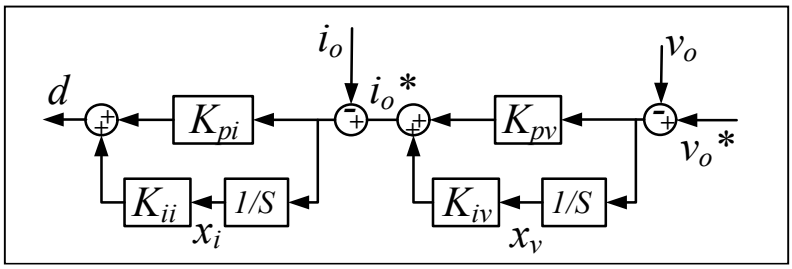
รูปที่ 3.11 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ

จากรูปที่ 3.11 เป็นวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ค่า d^* คือค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยตัวควบคุม เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเรียกว่าสัญญาณควบคุม (Control signal) กำหนดให้เป็น d สัญญาณควบคุม d จะนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Sawtooth compare signal) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอม (PWM) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง d^* และ d เป็นไปตามสมการที่ (3-21) ดังนี้

$$d^* = \frac{d}{A_r} \tag{3-27}$$

เมื่อ A_r คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม

โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอ 2 ลูป คือลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าหรือเรียกว่าการต่อกันแบบคาสเคดแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือ K_{pv}, K_{pi}, K_{iv} และ K_{ii} ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 โครงสร้างระบบการควบคุม

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระบบควบคุมในรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปของ d^* แสดงดังสมการที่ (3-28) และกำหนดให้ x_v และ x_i เป็นตัวแปรสถานะของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า สมการอนุพันธ์ของตัวแปรสถานะที่เกิดจากลูปการควบคุม แสดงได้ดังสมการที่ (3-29) และ (3-30)

$$d^* = \frac{1}{A_r}(-K_{pi}i_L - K_{pv}K_{pi}v_o + K_{iv}K_{pi}x_v + K_{ii}x_i + {}^*K_{pv}K_{pi}v_o) \tag{3-28}$$

$$\dot{x_v} = -v_o + v_o^* \tag{3-29}$$

$$\dot{x_i} = -i_L - K_{pv}v_o + K_{iv}x_v + K_{pv}v_o^* \tag{3-30}$$

วงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม การปรับค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์จึงเกิดจากกระบวนการของตัวควบคุม ซึ่งแต่เดิมเกิดจากการกำหนดค่าโดยผู้ใช้งาน ดังนั้นจากแบบจำลองของระบบที่ไม่มีตัวควบคุมตามสมการที่ 3.31 สามารถเปลี่ยนให้เป็นแบบจำลองที่มีตัวควบคุมได้โดยแทนค่า d^* จากสมการที่ (3-28) ลงในค่า d ของสมการที่ (3-23) และ (3-24) และเพิ่มตัวแปรสถานะ x_v และ x_i จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีตัวควบคุม แสดงดังสมการที่ (3-31)

$$
\left.
\begin{aligned}
\dot{x_1} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_1 + \omega\, x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_3 \\
\dot{x_2} &= -\omega\, x_1 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_4 - \frac{1}{2L_{eq}}v_m \\
\dot{x_3} &= \frac{1}{C_{eq}}x_1 + \omega x_4 \\
\dot{x_4} &= \frac{1}{C_{eq}}x_2 - \omega x_3 + \frac{2}{\pi C_{eq}}x_5 \\
\dot{x_5} &= -\frac{4}{\pi L_{eq}}x_4 - \frac{R_f}{L_f}x_5 - \frac{1}{L_f}x_6 \\
\dot{x_6} &= \frac{1}{C_f}x_5 + \frac{K_{pi}}{A_r C_f}x_7 x_7 + \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_r C_f}x_7 x_8 - \frac{K_{iv}K_{pi}}{A_r C_f}x_7 x_9 - \frac{K_{ii}}{A_r C_f}x_7 x_{10} - \frac{K_{pv}K_{pi}v_o^*}{A_r C_f}x_7 \\
\dot{x_7} &= -\frac{K_{pi}}{A_r L}x_6 x_7 - \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_r L}x_6 x_8 + \frac{K_{iv}K_{pi}}{A_r L}x_6 x_9 + \frac{K_{ii}}{A_r L}x_6 x_{10} + \frac{K_{pv}K_{pi}v_o^*}{A_r L} - \frac{1}{L}x_8 \\
\dot{x_8} &= \frac{1}{C}x_7 - \frac{1}{RC}x_8 + \frac{1}{RC}v_d \\
\dot{x_9} &= -x_8 + v_o^* \\
\dot{x_{10}} &= -x_7 - K_{pv}x_8 + K_{iv}x_9 + K_{pv}v_o^*
\end{aligned}
\right\} \quad (3\text{-}31)
$$

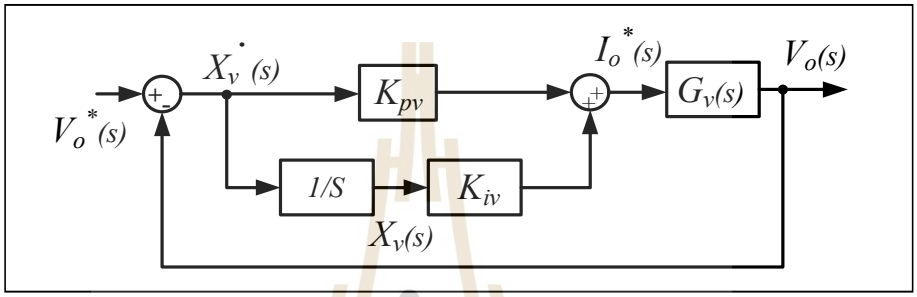
จากสมการที่ (3-31) พบแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมพีไอนั้น จะปรากฏพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (K_{pv}, K_{pi}, K_{iv} และ K_{ii}) อยู่ภายในแบบจำลอง ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อถัดไป

3.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคก์

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ได้อาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมของระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ 2 ลูปต่อกันแบบคาสเคด โดยทำการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน การออกแบบตัวควบคุมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า และการออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะได้นำเสนอดังต่อไปนี้

3.4.1 การออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า

พิจารณาโครงสร้างของตัวควบคุมแรงดันดังรูปที่ 3.13 จะพบว่าเอาต์พุตของตัวควบคุมคือ $I_o^*(s)$ และค่าที่ใช้ป้อนกลับคือ $V_o(s)$ ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมจะต้องหาพลานต์ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง I_o และ V_o เพราะฉะนั้นพลานต์ของตัวควบคุมนี้จึงเป็นฟังก์ชันถ่านโอน $V_o(s)/I_o(s)$ กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์เป็น $G_v(s)$



รูปที่ 3.13 โครงสร้างสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ หาได้จากสมการตัวแปรสถานะของแรงดันเอาต์พุต คือ

$$v_o^*(t) = \frac{1-d(t)}{C} i_o(s) - \frac{1}{RC} v_o(t) \tag{3-32}$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (3-32) จะได้

$$sV_o(s) = \frac{1-D(s)}{C} I_o(s) - \frac{1}{RC} V_o(s) \tag{3-33}$$

การหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s) = \frac{V_o(s)}{I_o(s)}$ สามารถดำเนินการได้โดยกำหนดให้ $D(s)$ ในสมการที่ (3-33) เท่ากับศูนย์ จะได้

$$G_v(s) = \frac{V_o(s)}{I_o(s)} = \frac{R}{sRC+1} \tag{3-34}$$

กำหนดให้ $G_{cv}(s)$ คือตัวควบคุมพีไอสำหรับแรงดันเอาต์พุต

$$G_{cv}(s) = \frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s} \tag{3-35}$$

เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 3.13 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ได้ดังสมการที่ (3-36)

$$T_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_o^{\cdot}(s)} = \frac{G_{cv}(s)\cdot G_v(s)}{1 + G_{cv}(s)\cdot G_v(s)}$$

$$T_v(s) = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{C}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}R+1}{RC}\right)s + \left(\frac{K_{iv}}{C}\right)} \tag{3-36}$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารของ $T_v(s)$ ในสมการที่ (3-36) กับพหุนามตัวหารของระบบอันดับสองซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3-37)

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{3-37}$$

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ จะได้

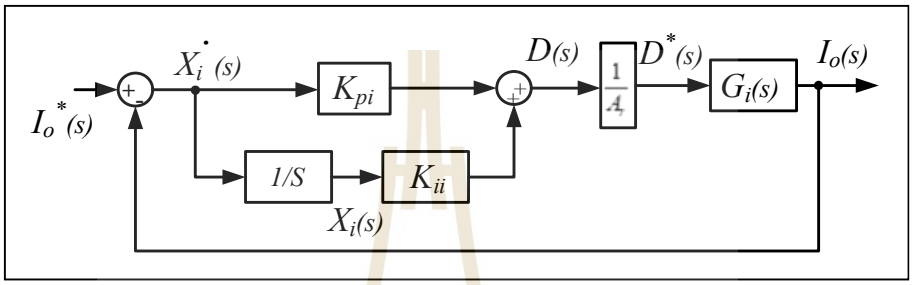
$$K_{pv} = \frac{2\zeta_v\omega_{nv}RC - 1}{R} \tag{3-38}$$

$$K_{iv} = \omega_{nv}^2 C \tag{3-39}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า

พิจารณาตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในรูปที่ 3.14 เอาต์พุตของตัวควบคุมคือ $D(s)$ เป็นสัญญาณที่ใช้นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีค่ายอดเท่ากับ A_r แล้วจึงออกมาเป็นค่าวัฏจักรการทำงาน $D^*(s)$ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างสองค่านี้เป็นไปตามสมการที่ (3-27)



รูปที่ 3.14 โครงสร้างสำหรับออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.14 เมื่อเอาต์พุตของตัวควบคุมกระแสคือ $D(s)$ ถูกปรับคูณด้วย $1/A_r$ ได้เป็นค่าวัฏจักรการทางาน $D^*(s)$ และค่าที่ใช้ป้อนกลับคือ $I_o(s)$ ดังนั้นจึงต้องหาพลานต์ที่เป็นฟังก์ชันถ่านโอนของ $I_o(s)/d(s)$ หาได้จากสมการตัวแปรสถานะของ I_o กำหนดให้ $G_i(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของ $I_o(s)/d(s)$ การหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ สามารถหาได้จากสมการตัวแปรสถานะของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ คือ

$$i_o^*(t) = \frac{d(t)}{L} v_f - \frac{1-d(t)}{L} v_o(t) \tag{3-40}$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (3-40) จะได้

$$sI_o(s) = \frac{D(s)}{L} v_f - \frac{1-D(s)}{L} V_o(s) \tag{3-41}$$

ต้องการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ $I_o(s)/D(s)$ ดังนั้นจึงพิจารณาให้ $V_o(s)$ ในสมการที่ (3-41) มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$G_i(s) = \frac{I_o(s)}{D(s)} = \frac{v_f}{sL} \tag{3-42}$$

กำหนดให้ $G_{ci}(s)$ คือตัวควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

$$G_{ci}(s) = \frac{K_{pi}(s) + K_{ii}}{s} \tag{3-43}$$

เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 3.14 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ได้ดังสมการที่ (3-43)

$$T_i(s) = \frac{I_o(s)}{I_o^*(s)} = \frac{\left(\frac{G_{ci}(s)\cdot G_i(s)}{A_r}\right)}{1+\left(\frac{G_{ci}(s)\cdot G_i(s)}{A_r}\right)}$$

$$T_i(s) = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{A_r L}\right)v_f}{s^2 + \left(\frac{K_{pi}v_f}{A_r L}\right)s + \left(\frac{K_{ii}v_f}{A_r L}\right)} \tag{3-44}$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารของ $T_i(s)$ ในสมการที่ (3-44) กับพหุนามตัวหารของระบบอันดับสองดังสมการที่ (3-37) จะได้

$$K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{v_f} \tag{3-45}$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 A_r L}{v_f} \tag{3-46}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปแรงดันไฟฟ้าและลูปกระแสไฟฟ้า ($K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}$) สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3-43), (3-44), (3-45) และ (3-46) ตามลำดับ ซึ่งสมการของตัวควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบและค่าทางสมรรถนะของตัวควบคุม คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio: ζ) และ ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency: ω_n) ของตัวควบคุม ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถออกแบบได้โดยการเลือก $\zeta_v = 0.8$ และ $\zeta_i = 0.8$ เนื่องจากต้องการให้มีผลการตอบสนองที่รวดเร็วและไม่เกิดการพุ่งเกินที่สูงจนเกินไป $\omega_{nv} = 175$ rad/s และ $\omega_{ni} = 3500$ rad/s เนื่องจากการออกแบบค่าความถี่ธรรมชาติของการควบคุมแรงดันควรให้มีค่าน้อยกว่าค่าความถี่ธรรมชาติของการควบคุมกระแส 10 เท่า ในที่นี้เลยเลือกค่า ω_{ni} มากกว่า ω_{nv} ประมาณ 20 เท่า เนื่องจากการควบคุมของลูปแรงดันจำเป็นต้องมีความไวช้ากว่าลูปของกระแส ดังนั้นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ สำหรับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมมีค่าดังนี้ $K_{pv} = 0.0116,\ K_{iv} = 6.738,\ K_{pi} = 4.21$ และ $K_{ii} = 9208.6$

3.5 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมพีไอ ดังสมการที่ (3-31) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 3.11 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับSIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ดูได้จากภาคผนวก ก ในรูป ก.2 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีตัวควบคุม

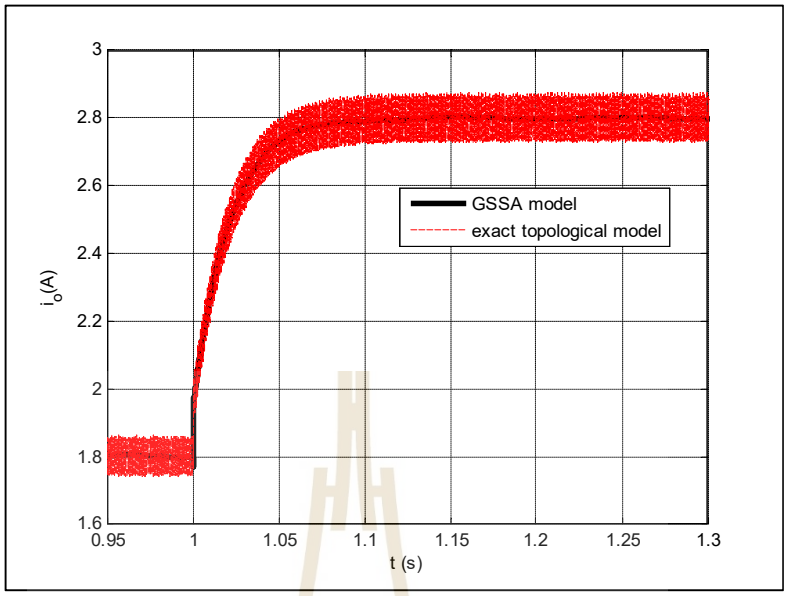
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_m	220 V_{rms}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	1 mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	10 μF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
R_f	10 mΩ	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_f	50 mH	ความเหนี่ยวนำขอวงจรกรอง
C_f	650 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีตัวควบคุม (ต่อ)

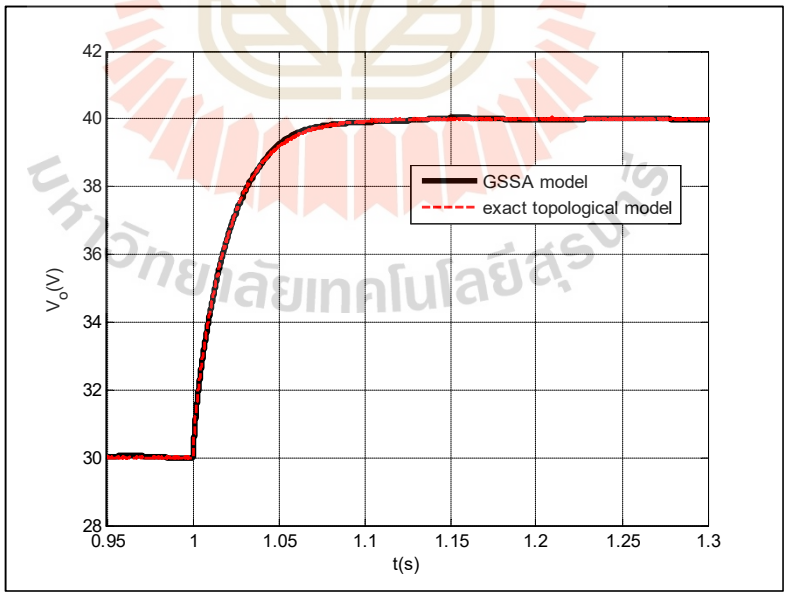
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
L	25 mΩ	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคก์
C	150 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคก์
R	10 Ω	ความต้านทานภายในของ LED
V_{dc}	12 V	แรงดันกระแสตรงของ LED
A_r	10	แอมพลิจูดของสัญญาณเปรียบเทียบ
K_{pv}	0.0116	ตัวปรับคูณตัวควบคุมพีของลูปแรงดัน
K_{iv}	6.738	ตัวปรับคูณตัวควบคุมไอของลูปแรงดัน
K_{pi}	4.21	ตัวปรับคูณตัวควบคุมพีของลูปกระแส
K_{ii}	9208.6	ตัวปรับคูณตัวควบคุมไอของลูปกระแส

สำหรับรูปที่ 3.15 และ รูปที่ 3.16 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) และผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ (i_o) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด (v_o^*) จาก 30 V ไปเป็น 40 V ที่เวลา 1 วินาที และ รูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 แสดงผลการตอบสนองเช่นเดียวกันกับรูปที่ 3.12 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด (Vo*) จาก 30 V ไปเป็น 50 V

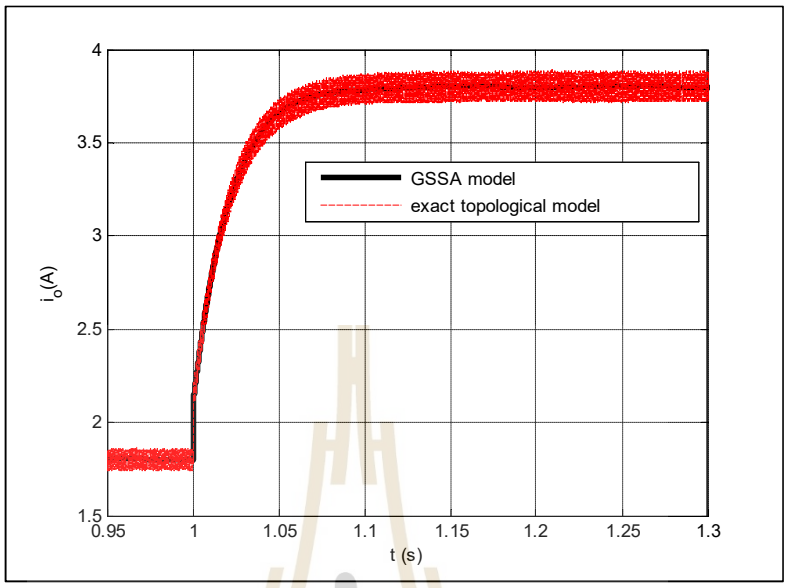
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



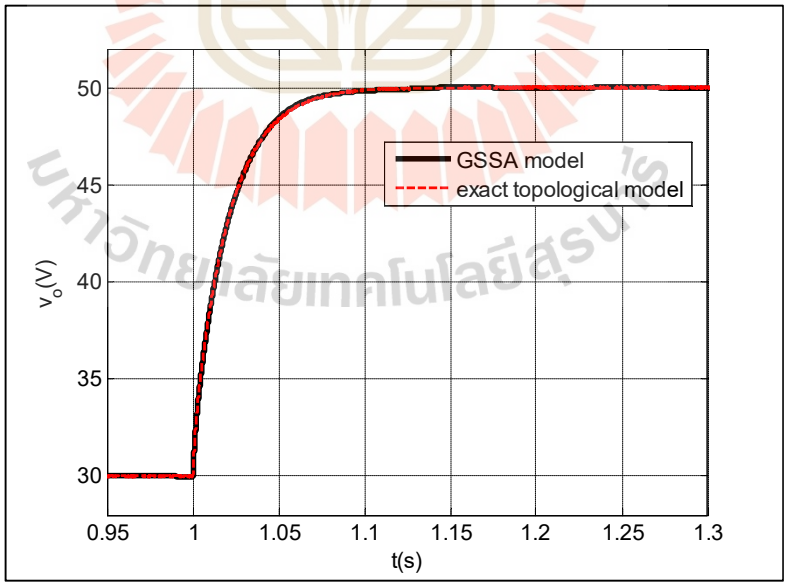
รูปที่ 3.15 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง (v_o^*) จาก 30 V เป็น 40 V



รูปที่ 3.16 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง (v_o^*) จาก 30 V เป็น 40 V



รูปที่ 3.17 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อเปลี่ยนแปลง (v_o^*) จาก 30 V เป็น 50 V



รูปที่ 3.18 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแปลง (v_o^*) จาก 30 V เป็น 50 V

จากการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 3.15 ถึงรูปที่ 3.18 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าและผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วครู่ และสภาวะอยู่ตัว ซึ่งข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประการที่สำคัญนั้นก็คือ การใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่สั้น ซึ่งการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK นั้นจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ประมาณ (t_{fs}) 42 วินาที ส่วนการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ประมาณ (t_{av}) 16.2 วินาที เมื่อคำนวณการประหยัดเวลาดังสมการที่ (3-47)

$$\%t_{saving} = \frac{t_{fs} - t_{av}}{t_{fs}} \times 100\% \tag{3.47}$$

จากการคำนวณ เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองสถานการณ์จะช่วยทำให้การจำลองสถานการณ์รวดเร็วขึ้นถึง 61.43% ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์เพียง 1 รอบของ 1 ชุดพารามิเตอร์เท่านั้น ซึ่งในบทที่ 4 ของงานวิจัยจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ แต่การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจะต้องมีการคำนวณแบบซ้ำ ๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำตารางการเปรียบเทียบ เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่ต้องคำนวณหลายรอบ ดังตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ตารางเปรียบเทียบการประหยัดเวลาในการจำลองสถานการณ์

จำนวนรอบของการจำลองสถานการณ์ (รอบ)	**การจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้าร่วมกับ SIMULINK (นาที)**	**การจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (นาที)**	**การประหยัดเวลา (%)**
10	105	40.5	61.43
50	525	202.5	61.43
100	1050	405	61.43

ผลจากตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความเหมาะสม สำหรับการนำไปใช้ร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากช่วยลดเวลาในการจำลองสถานการณ์ได้ถึง 61.43% ส่วนรายละเอียดของการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

3.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นำเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีทั้งกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ในบทนี้ ให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังทั้งในสภาวะชั่วครู่ และสภาวะอยู่ตัว ซึ่งผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบดังกล่าวถือว่าเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมพีไอที่นำเสนอไว้ในบทนี้ ถือเป็นองค์ความรู้ในส่วนที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งจะเป็นเนื้อหาในส่วนของบทที่ 4 โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะได้รับการนำเสนอต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
การออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

4.1 บทนำ

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ให้มีสมรรถนะในการควบคุมการรักษาระดับความเข้มแสงเอาต์พุตของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญต่อการนำวงจรดังกล่าวไปใช้ในงานอุตสาหกรรม ในบทนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว นำเสนอแนวทางใหม่สำหรับการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์นาน ดังนั้นการประยุกต์วิธีการปัญญาประดิษฐ์สำหรับระบบดังกล่าวจึงยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แทนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวจะนำไปเปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ในบทนี้จะอธิบายกระบวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ขอบเขตการค้นหา และการทดสอบพารามิเตอร์ รวมทั้งผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

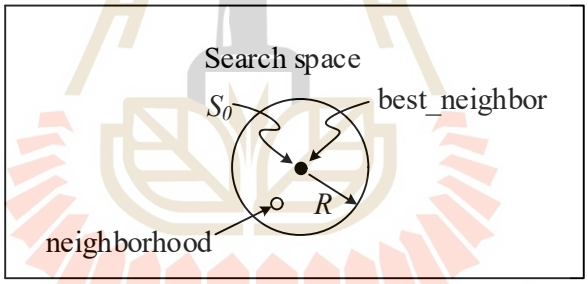
4.2 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (adaptive tabu search: ATS) เป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งอัลกอริทึมนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู (tabu search: TS) โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูได้นำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวได้ถูกคิดค้นโดย Glover ปี 1989 (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) และต่อมาได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงคำตอบแบบวง

แคบเฉพาะถิ่น (local solution) และยังสามารถทำการค้นหาคำตอบจนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงกว้าง (near global solution) ต่อมาในปี พ.ศ. 2545 กองพัน อารีรักษ์ และ สราวุฒิ สุจิตจร ได้พัฒนาและปรับปรุงอัลกอริทึมดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพการค้นหาที่ดียิ่งขึ้น โดยการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในอัลกอริทึม สำหรับกลไกแรก คือ การเดินย้อนรอย (black-tracking) เป็นกลไกที่อนุญาติให้ระบบการค้นหาสามารถย้อนกลับไปค้นหาตำตอบบริเวณพื้นที่เดิมที่เคยถูกค้นหามาก่อน ซึ่งทำให้ระบบการค้นหามีโอกาสที่จะค้นหาคำตอบในบริเวณพื้นที่ใหม่ และหลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ กลไกที่สอง คือ การปรับค่ารัศมีในการค้นหา (adaptive radius) ซึ่งจะทำการปรับลดค่ารัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

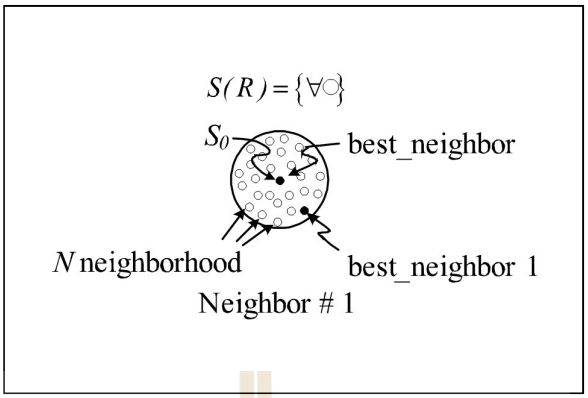
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ รอบ ๆ S_0 (neighborhood) ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 4.2

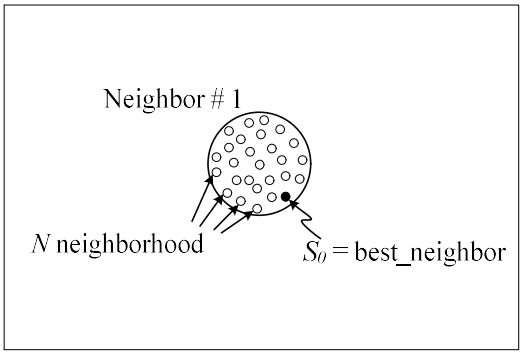


รูปที่ 4.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (best_neighborl) ใน $S(R)$

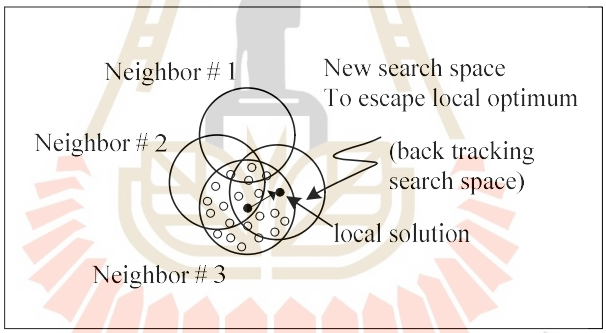
ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตาบูดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่



รูปที่ 4.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่

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



รูปที่ 4.5 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตาบูเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งใช้ค่า local solution ในรายการตาบูเป็นค่าเริ่มต้นการค้นหา

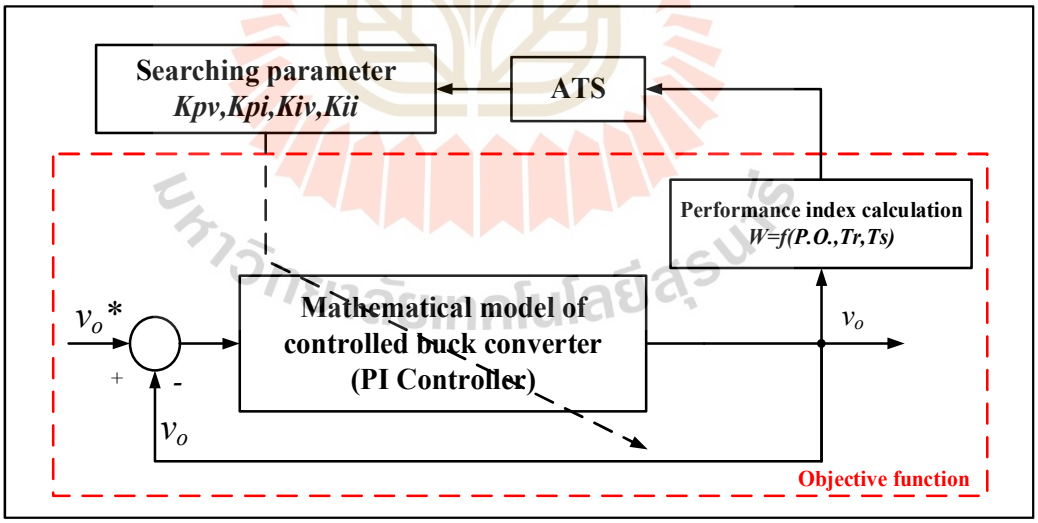
ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.1)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \tag{4.1}$$

โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (decreasing factor)

4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมพีไอสำหรับตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี จะดำเนินการโดยการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งมีกระบวนการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงไว้แล้วในสมการที่ (3-25) ของบทที่ 3 หลักการออกแบบตัวควบคุมที่อาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว แสดงได้ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นแบบตาบูเชิงปรับตัว

จากรูปที่ 4.6 กระบวนการปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมพีไอจะเริ่มทำการค้นหาพารามิเตอร์ K_{pv} K_{iv} K_{pi} และ K_{ii} ของตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้าและตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า โดยนำไปจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ซึ่งได้รับการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 หลังจากนั้นจะนำผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรดังกล่าว ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปคำนวณตัวชี้วัดด้วยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งใช้ค่า W เป็นชี้วัดคุณภาพของคำตอบในแต่ละของรอบการค้นหา ทั้งนี้ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งถ้าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีผลตอบสนองที่ดีจะส่งผลให้ค่า W มีค่าน้อย โดยที่ค่า W สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.2) และการถ่วงน้ำหนักแสดงได้ดังสมการที่ (4.3)

$$W(T_R, T_S, P.O.) = \sigma T_R + \alpha T_S + \gamma P.O. \tag{4.2}$$

โดยที่ $P.O.$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (เปอร์เซ็นต์)

T_R คือ ค่าเวลาขึ้นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (วินาที)

T_S คือ ค่าเวลาสู่เข้าสภาวะคงตัวของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (วินาที)

$$\sigma + \alpha + \gamma = 1 \tag{4.3}$$

เมื่อ σ α และ γ คือค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการกำหนดนัยสำคัญของค่า T_R T_S และ $P.O.$ ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ค่า σ α และ γ มีค่าเท่ากับ 0.34 0.33 และ 0.33 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึง การออกแบบจะให้ความสำคัญของค่า $P.O.$ T_R และ T_S เท่า ๆ กัน

4.3.1 การทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ มีพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ซึ่งได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวน

คำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยมีขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดของพารามิเตอร์ K_{pv} K_{iv} K_{pi} และ K_{ii} เป็น [0.0028-0.0908] [4.95-35.2] [1.8-5.143] และ [1691.73-14062.5] ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้คำนวณได้จากการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4 ขอบเขตของพารามิเตอร์สามารถคำนวณได้โดยใช้ ω_{ni} =1500 rad/s ถึง 4500 rad/s และ ω_{nv} =150 rad/s ถึง 400 rad/s ซึ่งกำหนดให้ค่า ω_{ni} มีค่ามากกว่า ω_{nv} ประมาณ 10 เท่า และ $\zeta = 0.8$ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-25) เป็นดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 โดยที่ ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า และ ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า การเลือกค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จะใช้เกณฑ์การพิจารณาค่า W เฉลี่ย และค่าจำนวนรอบเฉลี่ยในการเปรียบเทียบควบคู่กันไป ซึ่งการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ได้ทำการทดสอบที่ค่า 5 10 15 และ 20 โดยกำหนด จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 5 และค่าตัวประกอบปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.3 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่า ที่ค่าจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 20 พบว่า ที่จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 20 จะมีค่าทดสอบที่น้อยใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยจำนวนรอบการค้นหาที่พบคำตอบของทั้งสองกรณี พบว่า ที่จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าเท่ากับ 10

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ						
ค่า W	0.00680	0.00673	0.00670	0.00674	0.00676	0.00675
จำนวนรอบ	26	7	8	20	45	21.2
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า W	**0.00672**	**0.00669**	**0.00673**	**0.00670**	**0.00670**	**0.00671**
จำนวนรอบ	**27**	**33**	**5**	**8**	**10**	**16.6**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น(ต่อ)

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15 คำตอบ						
ค่า *W*	0.00672	0.00687	0.00673	0.00674	0.00672	0.00676
จำนวนรอบ	6	36	19	32	8	20.2
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า *W*	0.00670	0.00680	0.00673	0.00671	0.00671	0.00673
จำนวนรอบ	31	6	49	11	32	25.8

การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 10 15 และ 20 เช่นกัน โดยกำหนด จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 10 ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 5 และ ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.3 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 จากตารางดังกล่าว เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย *W* พบว่า ที่จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 จะมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยจำนวนรอบการค้นหาที่พบคำตอบ พบว่า มีค่าค่อยข้างมากกว่ากรณีอื่น ๆ แต่เนื่องด้วยผู้วิจัยพิจารณาที่ค่า *W* เป็นเกณฑ์สำคัญ ดังนั้น จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ						
ค่า *W*	0.00676	0.00674	0.00673	0.00681	0.00677	0.00676
จำนวนรอบ	44	32	25	7	33	28.2
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า *W*	**0.00674**	**0.00671**	**0.00672**	**0.00671**	**0.00671**	**0.00672**
จำนวนรอบ	**11**	**14**	**21**	**39**	**14**	**19.8**

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง (ต่อ)

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 15 คำตอบ						
ค่า *W*	0.00676	0.00673	0.00673	0.00671	0.00682	0.00675
จำนวนรอบ	36	24	34	10	40	28.8
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า *W*	0.00676	0.00677	0.00678	0.00677	0.00676	0.00677
จำนวนรอบ	6	30	28	45	13	24.4

การทดสอบจำนวนค่ารัศมีเริ่มต้นของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 1 2 3 4 5 และ 6 โดยกำหนด จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 10 จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 10 และตัวประกอบปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.3 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 4.3 จากตารางดังกล่าว เมื่อพิจารณาค่า *W* เฉลี่ย พบว่า กรณีค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5 จะให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5						
ค่า *W*	0.00673	0.00677	0.00675	0.00683	0.00676	0.00677
จำนวนรอบ	14	43	25	9	16	21.4
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1						
ค่า *W*	0.00676	0.00674	0.00673	0.00677	0.00674	0.00675
จำนวนรอบ	23	19	43	16	9	22
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2						
ค่า *W*	0.00676	0.00677	0.00678	0.00671	0.00674	0.00676
จำนวนรอบ	17	6	40	38	21	24.4

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น (ต่อ)

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 3						
ค่า *W*	0.00674	0.00673	0.00677	0.00677	0.00679	0.00675
จำนวนรอบ	40	22	17	36	4	23.8
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4						
ค่า *W*	0.00677	0.00678	0.00678	0.00679	0.00677	0.00678
จำนวนรอบ	12	25	44	3	29	22.6
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5						
ค่า *W*	**0.00670**	**0.00671**	**0.00672**	**0.00671**	**0.00672**	**0.00672**
จำนวนรอบ	**8**	**13**	**19**	**35**	**26**	**20.2**
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 6						
ค่า *W*	0.00673	0.00677	0.00680	0.00664	0.00676	0.00674
จำนวนรอบ	21	15	11	25	34	21.2

การทดสอบจำนวนค่าปรับลดรัศมีของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1 1.2 1.3 1.4 และ 1.5 โดยกำหนด จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 10 จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 10 และค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 5 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4 จากตารางดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 จะทำให้มีค่าเฉลี่ย *W* น้อยที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าปรับลดรัศมี

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1.1						
ค่า *W*	0.00672	0.00670	0.00673	0.00674	0.00677	0.00674
จำนวนรอบ	26	12	40	7	38	24.6

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าปรับลดรัศมี(ต่อ)

ครั้งที่ / ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2						
ค่า W	0.00670	0.00677	0.00671	0.00671	0.00673	0.00673
จำนวนรอบ	16	4	35	46	33	26.8
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3						
ค่า W	**0.00670**	**0.00671**	**0.00672**	**0.00665**	**0.00672**	**0.00670**
จำนวนรอบ	**8**	**13**	**19**	**37**	**25**	**20.4**
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4						
ค่า W	0.00671	0.00675	0.00674	0.00677	0.00674	0.00674
จำนวนรอบ	37	8	31	6	23	21
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5						
ค่า W	0.00676	0.00679	0.00676	0.00674	0.00678	0.00677
จำนวนรอบ	4	38	23	17	20	20.4

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10
- เลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10
- เลือกใช้ค่ารัศมีเท่ากับ 5
- เลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

4.3.2 การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{pv} K_{iv} K_{pi} และ K_{ii} ของตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยใช้การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว แสดงขั้นตอนการออกแบบและการกำหนดพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวได้ ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ K_{pv} เท่ากับ 0.0028-0.0908 K_{iv} เท่ากับ 4.95-35.2 K_{pi} เท่ากับ 1.8-5.143 และ K_{ii} เท่ากับ 1691.73-14062.5

ขั้นที่ 2 กำหนดการสุ่มคำตอบเริ่มต้นจำนวนเท่ากับ 10

ขั้นที่ 3 กำหนดการสุ่มคำตอบรอบข้างภายในรัศมีการค้นหาจำนวนเท่ากับ 10

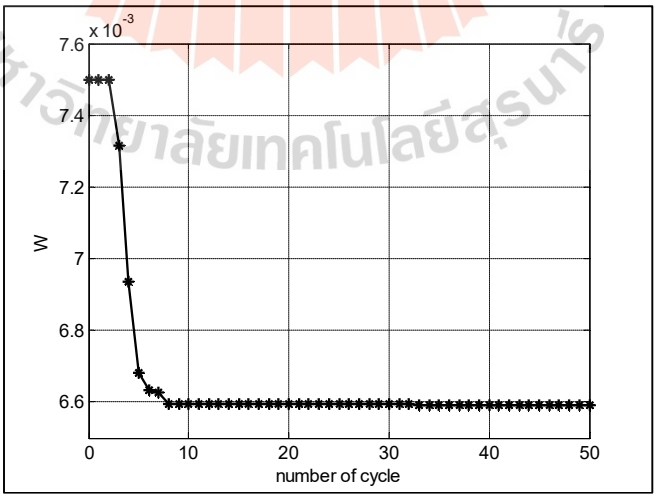
ขั้นที่ 4 กำหนดค่ารัศมีเริ่มต้นสำหรับการค้นหาเท่ากับ 5

ขั้นที่ 5 กำหนดค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

ขั้นที่ 6 กำหนดเงื่อนไขการเดินย้อนรอย โดยถ้าระบบการค้นหาไม่สามารถหลุดออกจากคำตอบแบบท้องถิ่น (local solution) ได้เป็นจำนวน 50 รอบการค้นหา กำหนดให้มีการเดินย้อนรอยเกิดขึ้น

ขั้นที่ 7 กำหนดจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด ($count_{max}$) เท่ากับ 50 รอบ

จากการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวภายใต้ขั้นตอนการออกแบบข้างต้น ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงการลู่เข้าของ W ที่ค่าเท่ากับ 0.0066 ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 50 โดยในช่วงรอบการค้นหาที่ 7 ถึง 8 W มีค่าเท่ากับ 0.00664 ซึ่งค่า W ดังกล่าวเป็นคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่นอย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว สามารถค้นหาพบคำตอบค่าที่ดีกว่าที่ค่าเท่ากับ 0.0066 ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเดินย้อนรอยภายในอัลกอริทึม จึงทำให้ระบบการค้นหาสามารถหลุดออกจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นสู่บริเวณค้นหาที่ให้คำตอบที่ดีขึ้น สำหรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว คือ K_{pv} เท่ากับ 0.0447 K_{iv} เท่ากับ 28.1829 K_{pi} เท่ากับ 4.4754 และ K_{ii} เท่ากับ 1908.1



รูปที่ 4.7 การลู่เข้าหาคำตอบ W

4.4 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของระบบที่มีตัวควบคุมที่ผ่านการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SimPowerSystem ใน SIMULINK มาจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีตัวควบคุมซึ่งได้รับการออกแบบจากวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จากนั้นผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลของระบบที่มีตัวควบคุมออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ของบทที่ 3 โดยกำหนดค่า $\omega_{nv} = 175$ rad/s และ $\omega_{ni} = 3500$ rad/s สำหรับผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุม และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ สามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

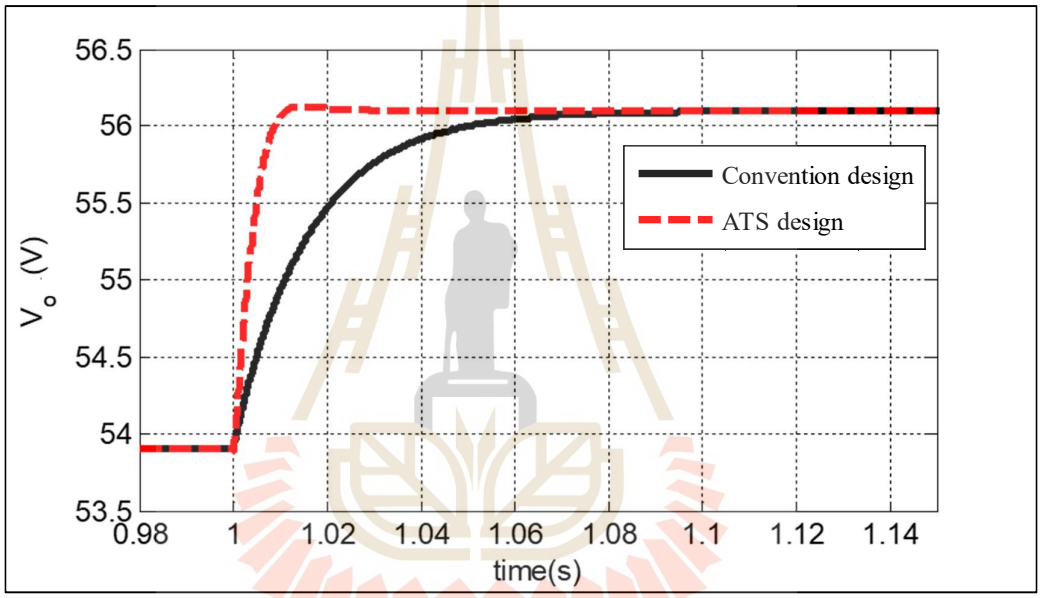
ตัวควบคุม	วิธีการออกแบบตัวควบคุม	
	วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว	วิธีดั้งเดิม
K_{pv}	0.0447	0.0116
K_{iv}	28.1829	6.738
K_{pi}	4.4754	4.21
K_{ii}	1908.1	9208.6

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

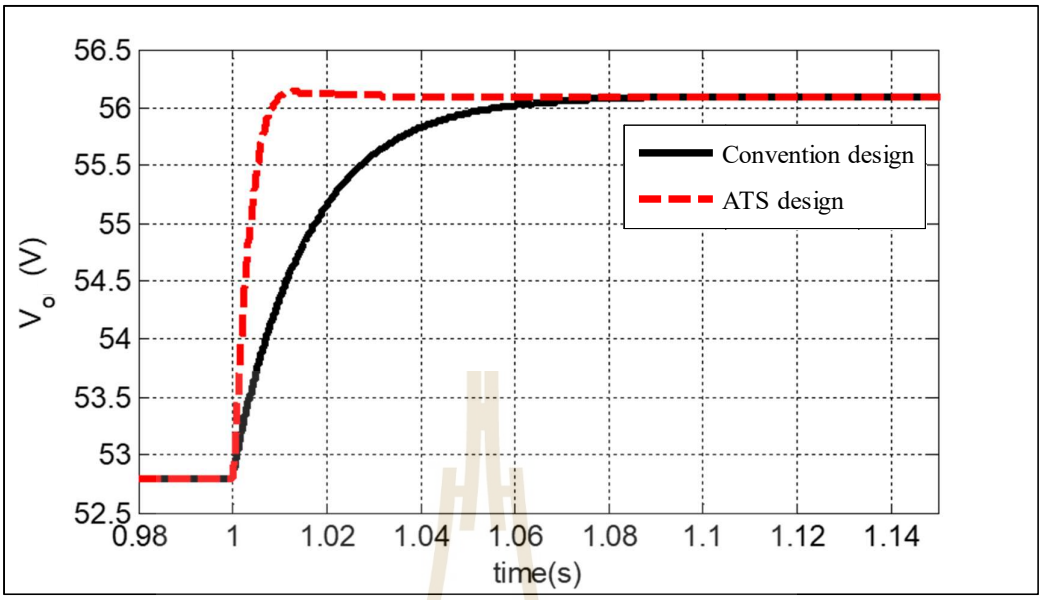
สมรรถนะการควบคุม	วิธีการออกแบบตัวควบคุม	
	วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว	วิธีดั้งเดิม
T_R	0.0390	0.0540
T_S	0.1290	0.2660
P.O.	4.2651	6.8002
W	0.0066	0.0655

สำหรับรูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่อาศัยการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งแสดงผล

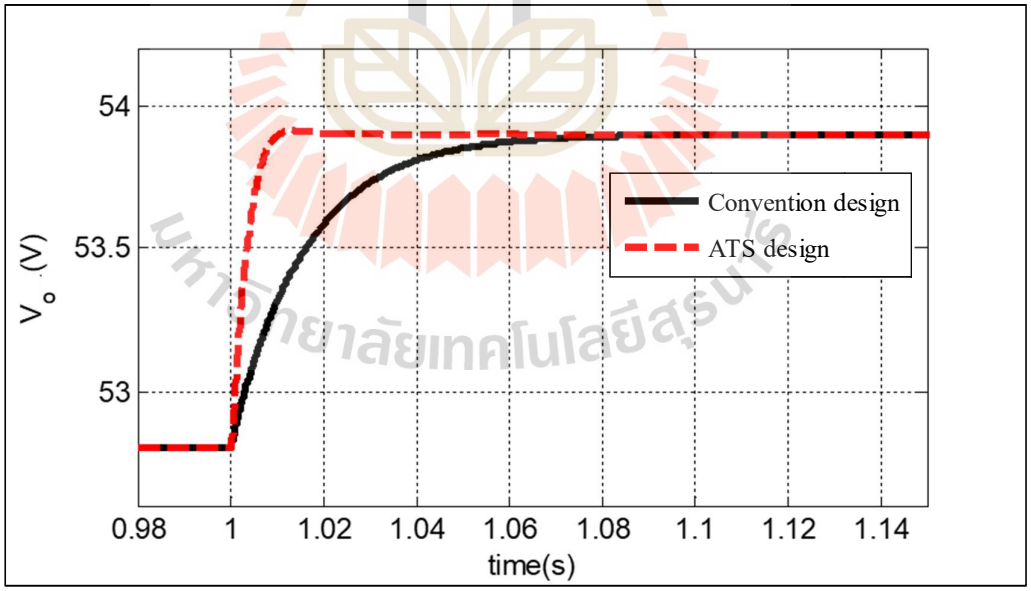
ตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงจาก 53.9 V เป็น 56.1 V ที่เวลา $t = 1$ s ในทำนองเดียวกันรูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงจาก 52.8 V เป็น 56.1 V และรูปที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงจาก 52.8 V เป็น 53.9 V ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จะมีผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงจาก 53.9 V เป็น 56.1 V



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิง จาก 52.8 V เป็น 56.1 V



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิง จาก 52.8 V เป็น 53.9 V

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะมีความรวดเร็วมากกว่าการใช้แบบจำลองทั่วไปในการจำลองสถานการณ์ของการค้นหาในแต่ละรอบ เนื่องจากแบบจำลองทั่วไป มักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากการสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง นอกจากนี้หลังจากการออกแบบตัวควบคุมยังสามารถนำพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไปควบคุมผลตอบสนองความเข้มแสงของชุดทดสอบที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรด้วย

4.5 สรุป

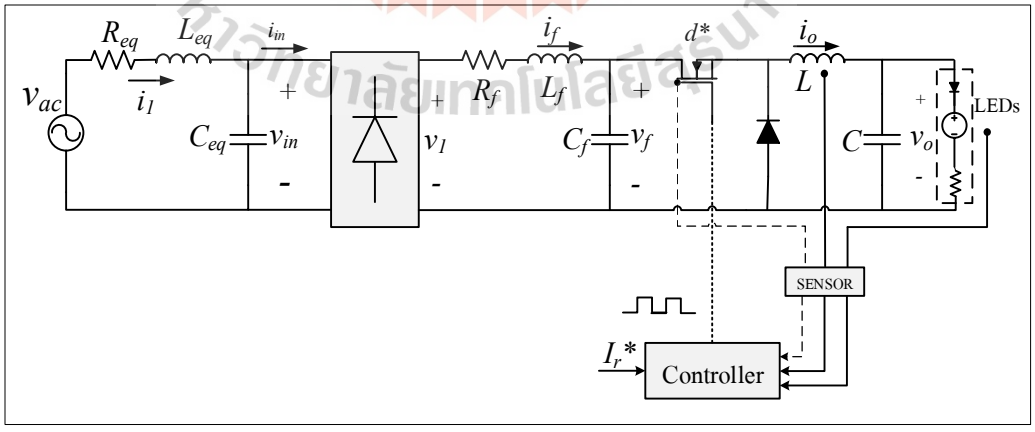
เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบควบคุมได้ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการค้นหาที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง การกำหนดขอบเขตของการค้นหา และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธี การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการค้นหา หลังจากการทดสอบงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 10 รัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5 และตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 ซึ่งส่งผลให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (W) ลดลง และจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า ตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จะมีสรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม จากผลการออกแบบในบทนี้แสดงให้เห็นถึงการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มาใช้งานร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งนำมาทำการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้สมรรถนะของสัญญาณเอาต์พุตดีที่สุดและดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
การสร้างชุดทดสอบ

5.1 บทนำ

จากบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์แบบมีตัวควบคุมพีไอ รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ได้ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวนั้นจะให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ด้วยเหตุนี้ในบทนี้ จึงได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดี โดยแยกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ การสร้างวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีวงจรกรองดีซีให้สัญญาณเรียบขึ้นเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผัน การสร้างวงจรแปลงผันแบบบัคก์กรณีที่ไม่มีตัวควบคุม และสร้างวงจรแปลงผันแบบบัคก์กรณีมีตัวควบคุม โดยจะมีการทดสอบการทำงานของวงจร และการควบคุม เปรียบเทียบผลกับทางทฤษฎี

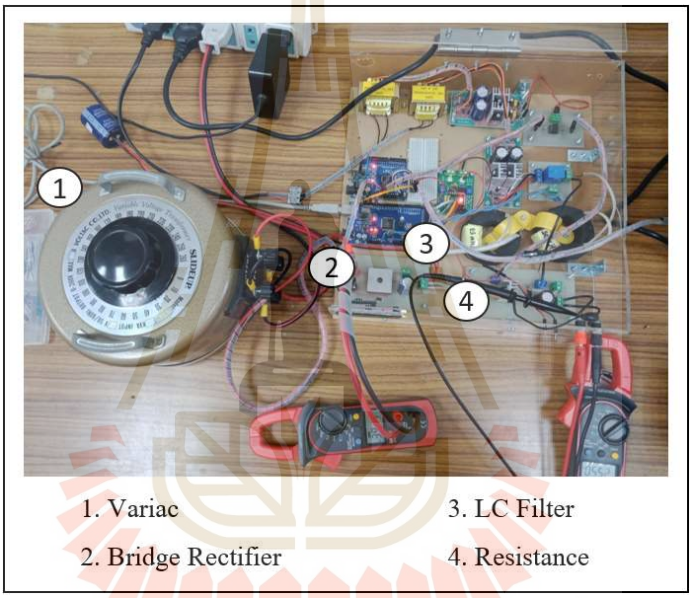


รูปที่ 5.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

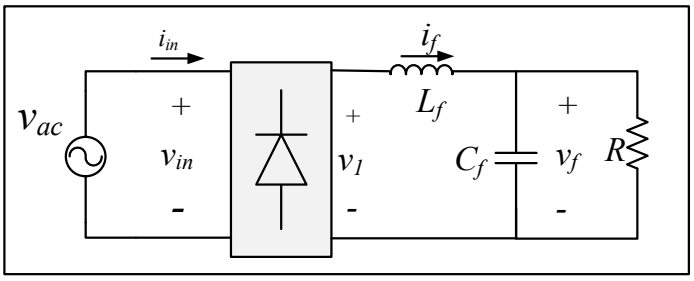
5.2 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

5.2.1 ภาพรวมชุดทดสอบ

วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์เป็นวงจรไฟฟ้าที่สำคัญ สำหรับระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้า ในงานวิจัยได้มีการสร้างชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าเอซีหนึ่งเฟสให้เป็นแรงดันไฟฟ้าดีซี เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ซึ่งในการสร้างชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสจะใช้โหลดเป็นตัวต้านทานในการทดสอบการทำงาน โดยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.1 และมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 5.2 ดังนี้



รูปที่ 5.2 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ 5.3 โครงสร้างวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 5.2 อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของชุดทดสอบมีรายละเอียด ดังนี้

<u>หมายเลข 1</u> แรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ โดยปรับแรงดันให้มีขนาด $72V_{rms}$ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับการทดสอบการตอบสนองของวงจรแปลงผันแบบบัคก์

ในทางทฤษฎีสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ สามารถคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตดีซีของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบเต็มคลื่น เพื่อใช้ตรวจสอบจุดการทำงานที่ได้ออกแบบขึ้นว่าอยู่ในพิสัยที่ชุดทดสอบสามารถรองรับได้หรือไม่ โดยสามารถคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตดีซีได้จากสมการที่ (5-1) ดังนี้

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m \tag{5-1}$$

เมื่อ V_{dc} คือ แรงดันเอาต์พุตดีซีของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส

V_m คือ ค่ายอดของแรงดันอินพุตเอซีของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส

งานวิจัยได้เลือกใช้ หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส (variac) ที่มีพิกัดอยู่ในช่วง $0-250V_{rms}$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้กับระบบ

รูปที่ 5.4 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้

<u>หมายเลข 2</u> วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

เนื่องจากวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่จะใช้ในการทดสอบ ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) ไม่เกิน 72 V และโหลดความต้านทาน ดังนั้นในการเลือกใช้วงจรเรียงกระแส

แบบบริดจ์ จะต้องมีค่าพิกัดที่สามารถรองรับการใช้งานได้ ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้มอดูลเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่สามารถหาซื้อในท้องตลาดคือ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 100 V และพิกัดกระแส 10 A แสดงได้ดังรูปที่ 5.5

รูปที่ 5.5 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

<u>หมายเลข 3</u> วงจรกรองกำลังไฟฟ้าแบบ LC เพื่อลดกระแสพลิ้ว I_{dc} และแรงดันพลิ้ว V_{dc} ของเอาต์พุตดีซี ซึ่ง I_{dc} และ V_{dc} สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-2) และ (5-3) ตามลำดับ คือ

$$\Delta I_{dc} = \frac{\sqrt{2} \times V_{dc}}{2\pi fL} \tag{5-2}$$

$$\Delta V_{dc} = \frac{\Delta I_{dc}}{2\pi f_f C_f} \tag{5-3}$$

เมื่อ f คือความถี่ของแรงดันที่ได้จากวงจรกรองกำลังไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 50 Hz

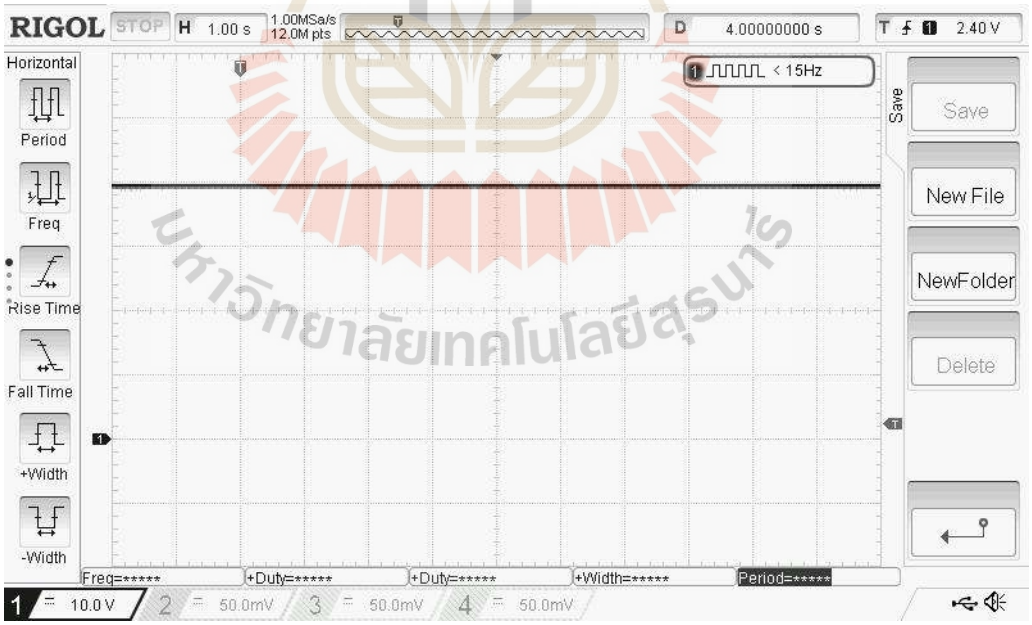
รูปที่ 5.6 ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรกรองแรงดันไฟฟ้า

หมายเลข 4 โหลดตัวต้านทานสำหรับใช้ในการทดสอบชุดวงจรเรียงกระแสเพื่อให้กระแสไหลครบวงจร โดยใช้ตัวต้านทานขนาด 33 kΩ

รูปที่ 5.7 ตัวต้านทานสำหรับชุดทดสอบ

5.2.2 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล

การทดสอบวงจรในรูปที่ 5.2 ดำเนินการโดยการจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสให้กับชุดทดสอบ แล้วรอจนกว่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตดีซีจะเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า จะทำให้แรงดันเอาต์พุตดีซีเกิดการกระเพื่อมและเข้าสู่สภาวะคงตัวอีกค่าหนึ่ง แสดงได้ดังรูปที่ 5.8

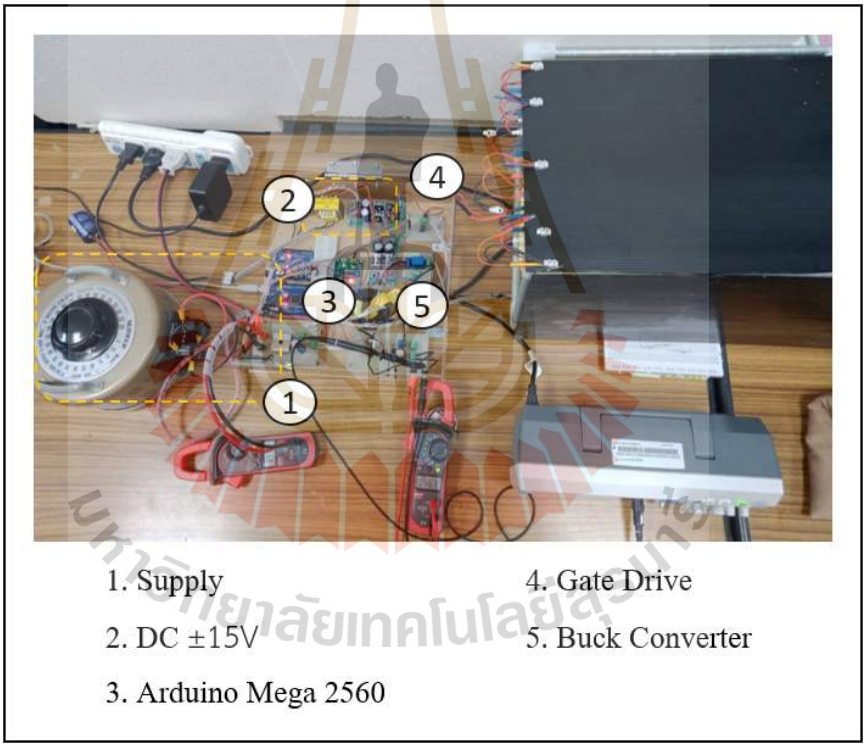


รูปที่ 5.8 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี

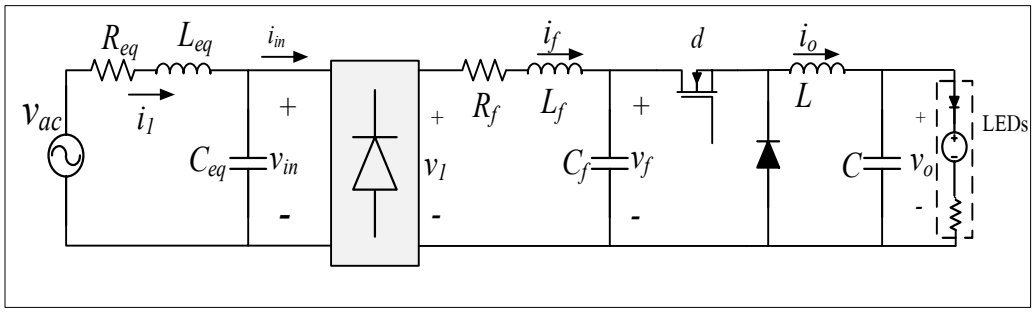
5.3 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรองดีซี ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

5.3.1 ภาพรวมชุดทดสอบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรองดีซีต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม จากหัวข้อ 5.2 จะได้แหล่งจ่ายแรงดันดีซีจากวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่สร้างขึ้น เป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอม (PWM) สำหรับจุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผันสร้างขึ้นโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านวงจรแยกโดดสัญญาณ ชุดทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 5.9 โดยมีโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 5.10 ดังนี้



รูปที่ 5.9 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรองดีซี ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

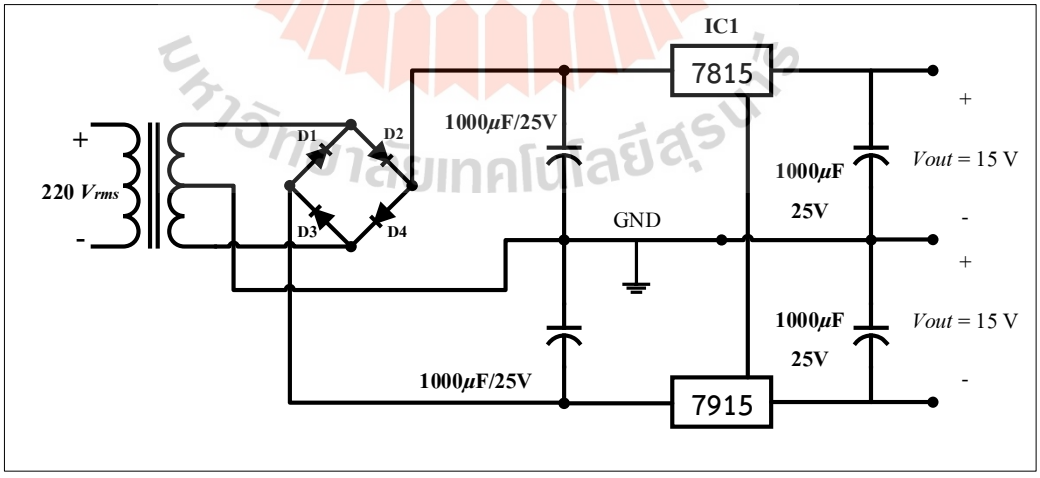


รูปที่ 5.10 โครงสร้างของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรองดีซี ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

จากรูปที่ 5.9 อุปกรณ์ต่าง ๆ ของชุดทดสอบมีรายละเอียด ดังนี้

<u>หมายเลข 1</u> ชุดวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่สร้างขึ้นในหัวข้อ 5.2 โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีขนาดแรงดัน 66.67 V_{rms} ซึ่งจะได้แรงดันกระแสตรง 60 V

<u>หมายเลข 2</u> ชุดแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในหัวข้อนี้จะใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ โดยโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 5.10



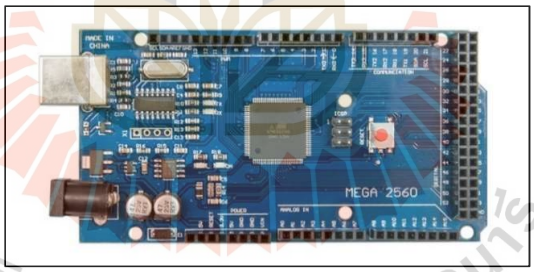
รูปที่ 5.11 โครงสร้างชุดแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์

หลักการทำงานของชุดแหล่งจ่ายแรงดันในรูปที่ 5.11 ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส 220 V 50 Hz ผ่านหม้อแปลงแรงดันแบบมีแทปกลาง ลดแรงดันลงมาเป็น 18V จากนั้นต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อเปลี่ยนจากแรงดันเอซีให้เป็นแรงดันดีซี ซึ่งค่าเฉลี่ยของแรงดันดีซีที่ได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-3) ดังนี้

จากนั้นนำตัวเก็บประจุต่อขนานกับ $V_{o,av}$ เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ หลังจากนั้นจะต่อด้วยไอซีคงค่าแรงดัน ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ 7815 และ 7915 จะได้แรงดันเอาต์พุต 15 V, 0 V และ -15 V ตามลำดับ เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

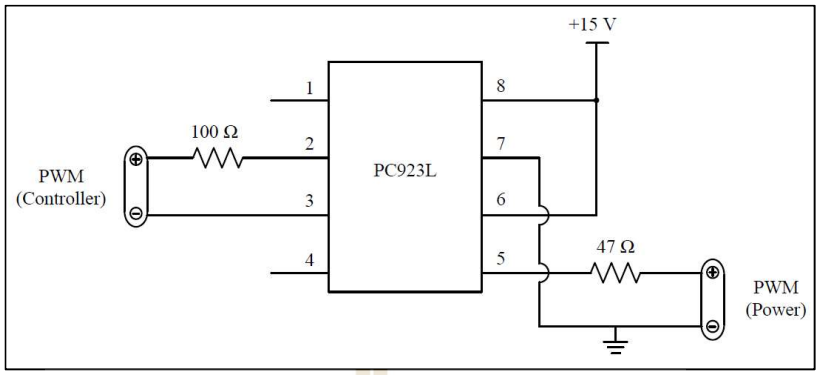
- ใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรตรวจวัดกระแส
- ใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
- ใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรแยกโดดสัญญาณ

<u>หมายเลข 3</u> บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีโปรแกรมการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอม ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA 2560 การเขียนโปรแกรมสำหรับสร้างสัญญาณ PWM ดูได้จากภาคผนวก ค.1

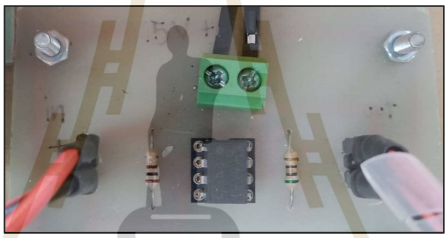


รูปที่ 5.12 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

<u>หมายเลข 4</u> วงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ เป็นวงจรที่ใช้สำหรับขยายสัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นโดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีระดับแรงดันไม่เพียงพอสำหรับใช้จุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผัน และมีการแยกโดดสัญญาณระหว่างฝั่งวงจรกำลังและฝั่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์แรงต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้กำลังไฟฟ้าทางด้านวงจรแปลงผันเข้าไปรบกวนการทำงานของวงจรทางฝั่งอิเล็กทรอนิกส์ ชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณใช้ไอซีเบอร์ PC923L ซึ่งมีโครงสร้างการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ



รูปที่ 5.14 ชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หมายเลข 5 ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้ MOSFET เบอร์ IRL510PBF พร้อมด้วยอุปกรณ์ระบายความร้อน ไดโอดความถี่สูง ใช้ไอซีเบอร์ 1N5405 ตัวเหนี่ยวนำขนาด 50 mH พิกัดกระแส 5 A ตัวเก็บประจุขนาด 1,100 μF พิกัดแรงดัน 250 V และโหลดตัวต้านทานขนาด 80 พิกัดกระแส 3 A

วิธีการออกแบบมอดูลของมอสเฟตวงจรแปลงผันแบบบัคก์ในงายวิจัย จะใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่เป็นลักษณะมอดูล การออกแบบอุปกรณ์จะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสเป็นสำคัญ โดยค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 72 V ส่วนค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดจะมีค่าเท่ากับ 3 A และในการออกแบบต้องคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25% ดังนั้นมอดูลที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคก์จะต้องมีค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 90 V และจะต้องมีค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้ามากกว่า 3.75 A ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอดูลของมอสเฟตที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 100 V ค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 6.5 A ซึ่งมอดูลดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 5.15

รูปที่ 5.15 มอดูลของมอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัย

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบ คือ ค่าแรงดันพลิ้ว (ΔV_C : ripple voltage) ของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด และค่ากระแสพลิ้ว (ΔI_L : ripple current) ของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) แสดงดังสมการที่ (5-4) และ (5-5) ดังนี้

$$\Delta I_L = \frac{V_o(V_{in} - V_o)}{fLV_{in}} \tag{5-4}$$

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8fC} \tag{5-5}$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต

V_o คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

f คือ ความถี่ในการสวิตช์

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

ΔI_L คือ ค่ากระแสพริ้ว

ΔV_C คือ ค่าแรงดันพริ้ว

C คือ ค่าตัวเก็บประจุ

สำหรับเงื่อนไขในการออกแบบหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุเป็นดังนี้

V_{in} = 72 V

V_o = 0 V – 72 V

$\Delta I_L \leq 0.1$ A

$\Delta V_C \leq 10$ mV

f = 10 kHz

ผู้วิจัยจะพิจารณาแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 52 V สำหรับการออกแบบ เนื่องจากเป็นแรงดันที่อยู่ภายในช่วงของการทดสอบ ซึ่งการออกแบบเป็นดังนี้

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวตัวเก็บประจุจะพิจารณาจากสมการที่ (5-1) และ (5-2) เมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะได้สมการสำหรับออกแบบตัวเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$L \geq \frac{52(72-52)}{5\times10^{3}\times60\times0.1} = 34.67\,\text{mH}$$

จากค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้เท่ากับ 34.67 mH ผู้วิจัยจึงได้เลือกค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 50 mH

สำหรับสมการการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแสดงได้ดังนี้

$$C \geq \frac{0.1}{8\times10\times10^{3}\times10\times10^{-3}} = 125\mu\text{F}$$

จากการออกแบบข้างต้น การเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุจะต้องครอบคลุมการทำงานทั้งหมดของงานวิจัยนี้ โดยมีเงื่อนไขว่าค่ากระแสพลิ้วมีค่าไม่เกิน 0.1 A และค่าแรงดันพลิ้วไม่เกิน 10 mV เพราะฉะนั้นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ ที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์สำหรับงานวิจัยดังรูปที่ 5.16 และ 5.17 ตามลำดับดังนี้

รูปที่ 5.16 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์

รูปที่ 5.17 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์

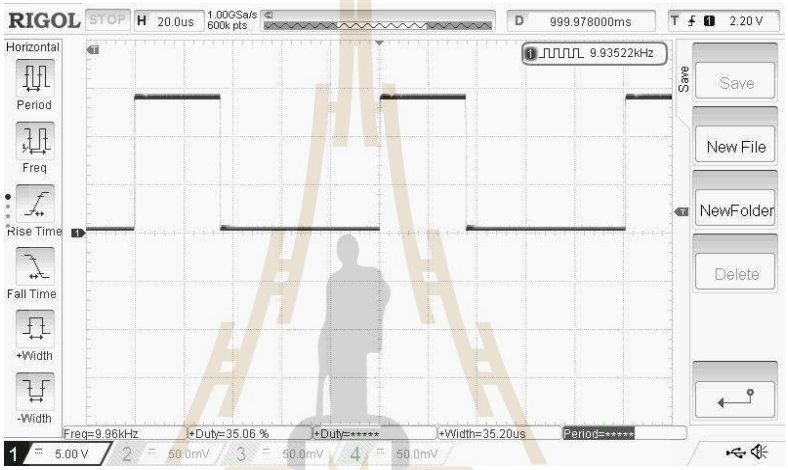
พิจารณาจากวงจรแปลงผันแบบบัคก์ในรูปที่ 5.1 ไดโอด *d* ต้องมีพิกัดของแรงดันมากกว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไดโอดความถี่สูง ใช้ไอซีเบอร์ 1N5405 ค่าพิกัดของไดโอด *d* ที่ 100 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.18

รูปที่ 5.18 ไดโอดที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์

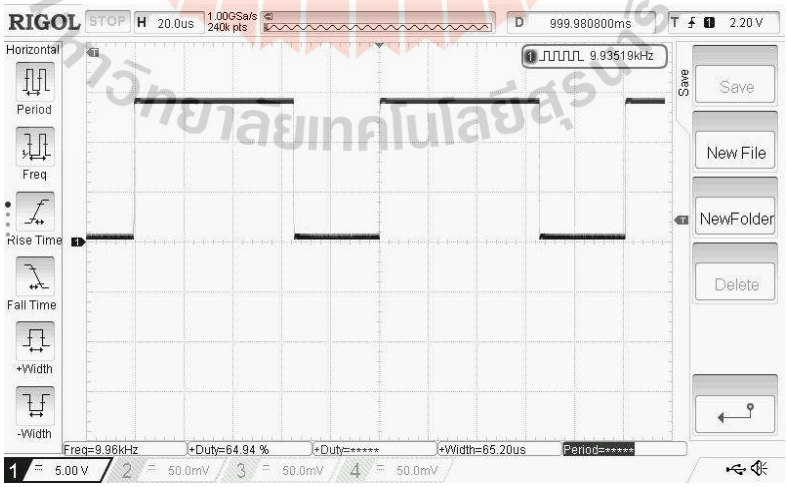
5.3.2 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล

เมื่อดำเนินการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันและตรวจสอบจุดการทำงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะเป็นการทดสอบวงจรตามรูปที่ 5.10 โดยมีขั้นตอน ดังนี้

ทดสอบการสร้างสัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ โดยสร้างสัญญาณ PWM ที่มีค่าวัฏจักรการทำงานเท่ากับ35 เปอร์เซ็นต์ และ 65 เปอร์เซ็นต์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 ตามลำดับ



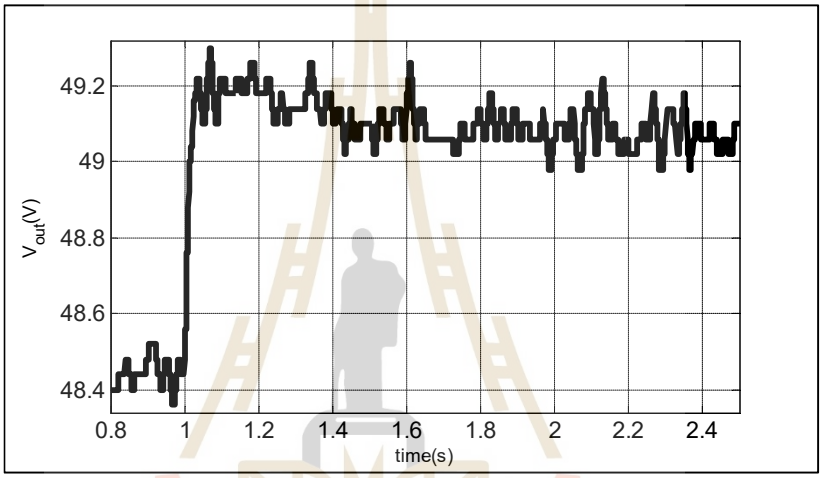
รูปที่ 5.19 สัญญาณ PWM ที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 35 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.20 สัญญาณ PWM ที่ค่าวัฏจักรการทำงาน 65 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.19 และ 5.20 สัญญาณ PWM ที่สร้างขึ้นมีค่าวัฏจักรการทำงานและมีความถี่ถูกต้องตามที่ต้องการ โดยมีค่ายอดของสัญญาณประมาณ 15 V ซึ่งเพียงพอสำหรับใช้จุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผัน

จากนั้นทำการป้อนสัญญาณ PWM ให้กับวงจรแปลงผันโดยเริ่มจากโหมดการลดแรงดัน โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรการทำงานจาก 35 เปอร์เซ็นต์ ไปเป็น 85 เปอร์เซ็นต์จะได้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 5.21 ดังนี้



รูปที่ 5.21 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต เมื่อ d เปลี่ยนค่าจาก 35% ไปเป็น 85%

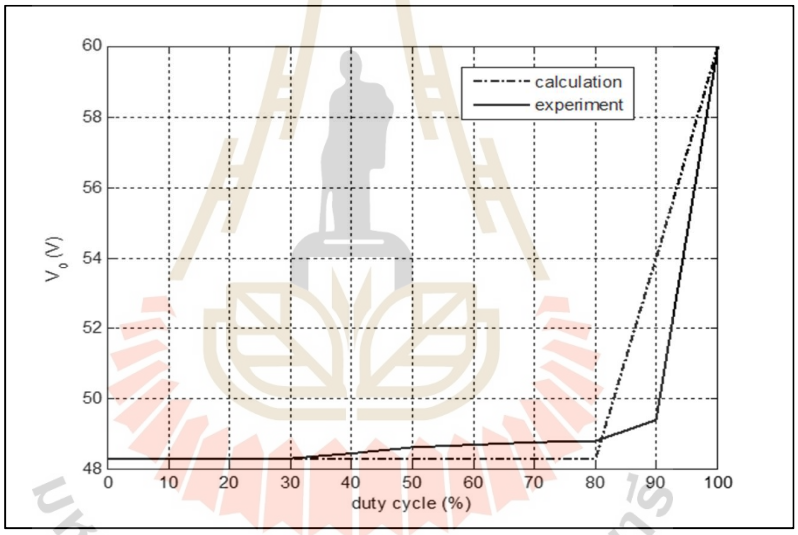
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

วัฏจักรการทำงาน (duty cycle) %	**แรงดันเอาต์พุต (V)**
0	48.315
10	48.315
20	48.315
30	48.315
40	48.5
50	48.6
60	48.7
70	48.75

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม (ต่อ)

วัฏจักรการทำงาน (duty cycle) %	**แรงดันเอาต์พุต (V)**
80	48.8
90	49.4
100	60

จากตารางที่ 5.1 สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรการทำงานและแรงดันเอาต์พุตเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี แสดงได้ดังรูปที่ 5.22 ดังนี้



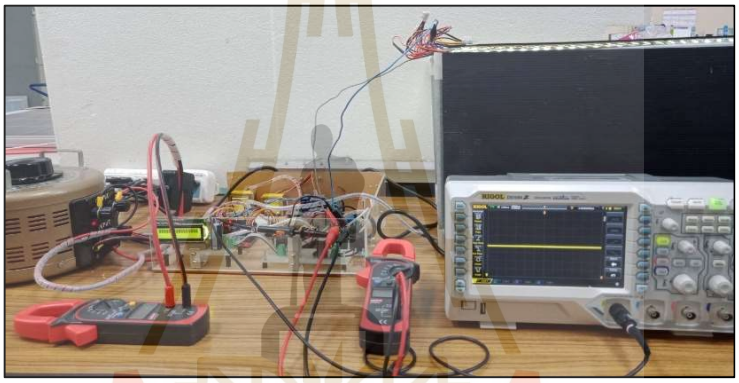
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรการทำงานและแรงดันเอาต์พุต ที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณ

จากรูปที่ 5.22 การทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดตัวต้านทานกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม พบว่าวงจรทดสอบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้จริง และให้ผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับทฤษฎี แต่อาจมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเนื่องจากชุดทดสอบที่ไม่เป็นอุดมคติ ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการนำเสนอการสร้างวงจรแปลงผันแบบบัคก์กรณีที่มีตัวควบคุม ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถปรับค่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการได้สะดวกยิ่งขึ้น

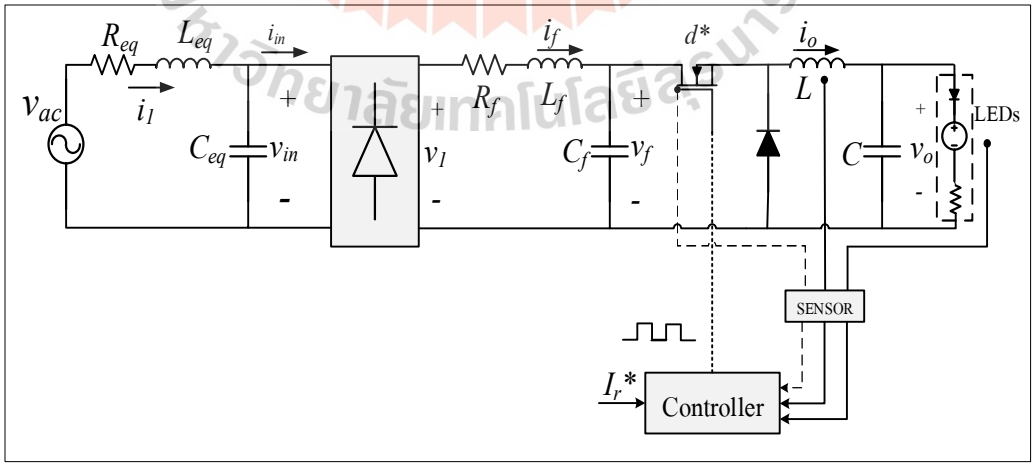
5.4 วงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่มีตัวควบคุม

5.4.1 ภาพรวมชุดทดสอบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ เป็นการพัฒนาวงจรมาจากหัวข้อ 5.3 โดยเพิ่มชุดตัวควบคุมพีไอให้กับวงจรแปลงผัน ช่วยให้ผู้ใช้สามารถใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.23 และโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 5.24 ซึ่งสังเกตได้ว่า ได้มีการเพิ่มเติมอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส (current sensor) และอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน (voltage sensor) ลงในชุดทดสอบ ส่วนตัวควบคุมพีไอได้ถูกโปรแกรมไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 5.23 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์กรณีที่มีตัวควบคุม

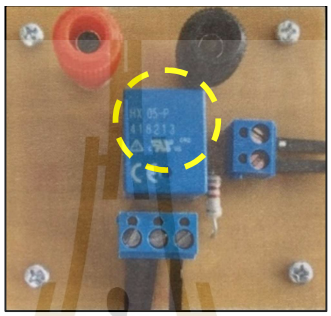


รูปที่ 5.24 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์กรณีที่มีตัวควบคุม

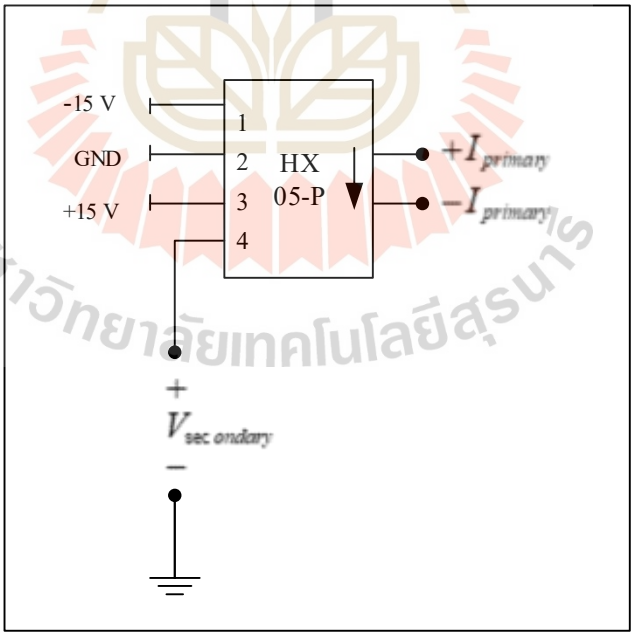
อุปกรณ์ตรวจวัดแรงความเข้มแสงและอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส มีรายละเอียดดังนี้

5.4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแส

การตรวจจับสัญญาณที่ต้องป้อนให้กับชุดควบคุมสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างสัญญาณควบคุม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าไอซีเบอร์ HX 05-P พิกัดกระแส 5 A แสดงได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า



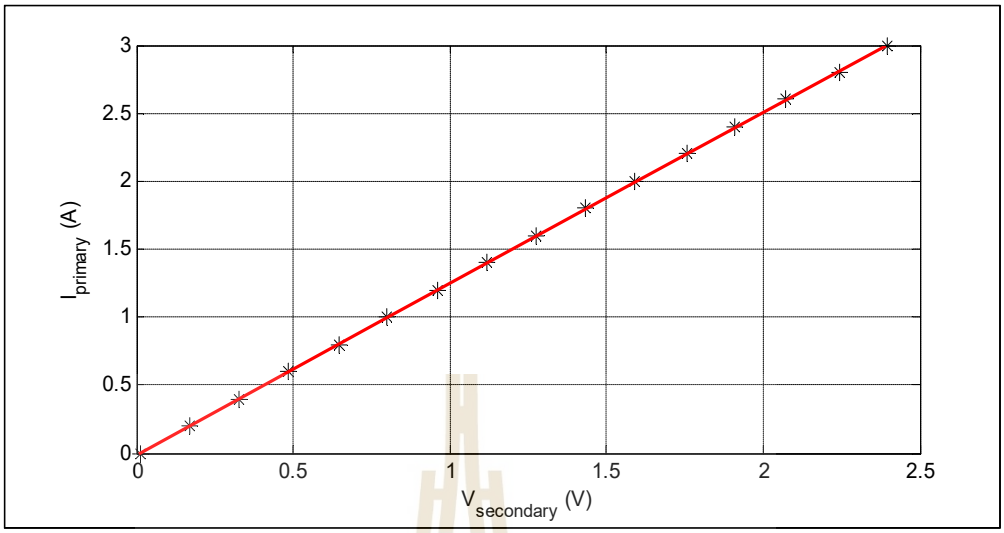
รูปที่ 5.26 โครงสร้างวงจรวัดกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์วัดกระแส

$I^{*}_{primary}$ **(A)**	$V_{secondary}$ **(V)**
0	0.015
0.2	0.172
0.4	0.328
0.6	0.486
0.8	0.645
1.0	0.800
1.2	0.960
1.4	1.118
1.6	1.275
1.8	1.435
2.0	1.590
2.2	1.756
2.4	1.910
2.6	2.072
2.8	2.244
3.0	2.398

จากผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสในตารางที่ 5.2 สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.27 ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



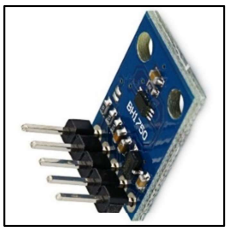
รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสปฐมภูมิและแรงดันทุติยภูมิของอุปกรณ์วัดกระแส

จากรูปที่ 5.27 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันทุติยภูมิและกระแสปฐมภูมิมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ทำการหาฟังก์ชันของกราฟโดยใช้โปรแกรม MATLAB จะได้ดังสมการที่ (5-6) ดังนี้

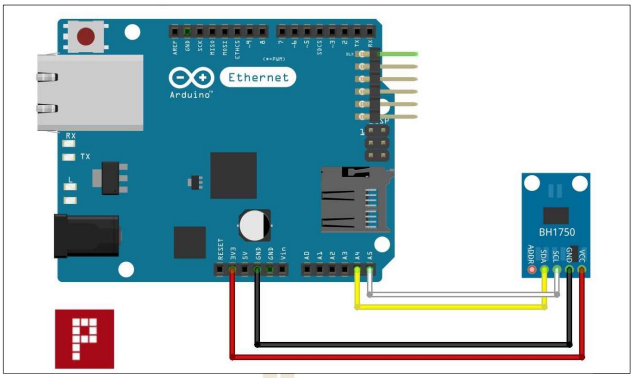
$$I_{primary} = (1.228 \times V_{secondary}) - 0.0115 \quad (5\text{-}6)$$

5.4.3 อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง

อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงเอาต์พุตสำหรับชุดทดสอบใช้ GY-302 BH1750 แสดงดังรูปที่ 5.28 ซึ่งมีโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.28 อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง

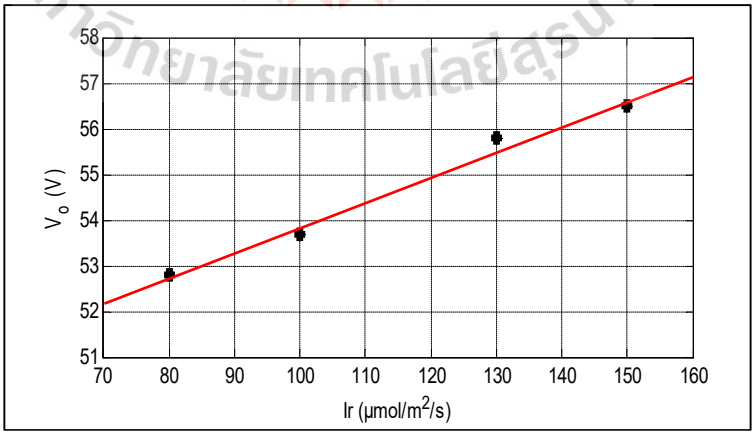


รูปที่ 5.29 โครงสร้างวงจรตรวจวัดความเข้มแสง

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบชุดวัดความเข้มแสง

$Ir_{primary}\ (\mu mol/m^2/s)$	$V_{secondary}\ (V)$
80	52.8
100	53.7
130	55.8
150	56.5

จากผลการทดสอบในตารางที่ 5.3 สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.30 ดังนี้



รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงปฐมภูมิและแรงดันทุติยภูมิ

จากรูปที่ 5.30 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ทำให้ง่ายต่อการหาฟังก์ชันสำหรับนำไปเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งการหาฟังก์ชันของกราฟทำได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB จะได้ดังสมการที่ (5-7) ดังนี้

$$V_{\text{secondary}} = \left(0.0555 \times Ir_{primary}\right) + 48.3155 \tag{5-7}$$

สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้มีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมในส่วนโปรแกรมของตัวควบคุม โดยมีการรับค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสและความเข้มแสงนำไปเข้ากระบวนการของตัวควบคุมพีไอ และสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอมไปจุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผัน รายละเอียดโปรแกรมสามารถดูได้จากภาคผนวก ค.2

5.4.4 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล

การทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโหลดเป็นแอลอีดีกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอในรูปที่ 5.13 มีขั้นตอนการทดสอบ 3 กรณีคือ

1. ปรับเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 80 $\mu mol/m^2/s$ ไปเป็น 140 $\mu mol/m^2/s$
2. ปรับเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 100 $\mu mol/m^2/s$ ไปเป็น 140 $\mu mol/m^2/s$
3. ปรับเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 80 $\mu mol/m^2/s$ ไปเป็น 100 $\mu mol/m^2/s$

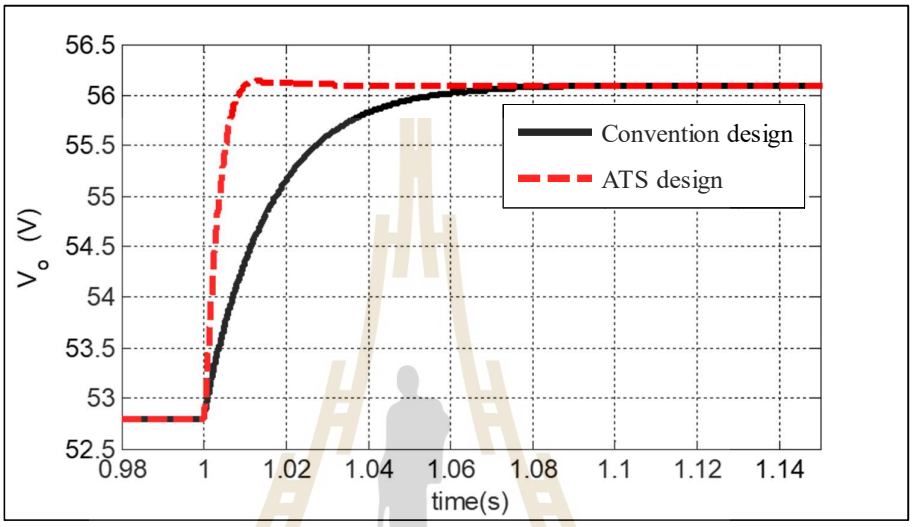
ที่เวลา 1 วินาที โดยในแต่ละกรณีจะทำการเปรียบเทียบการออกแบบของทั้ง 2 วิธีสำหรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ส่วนค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 แสดงได้จากตารางที่ 5.4 ดังนี้

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS

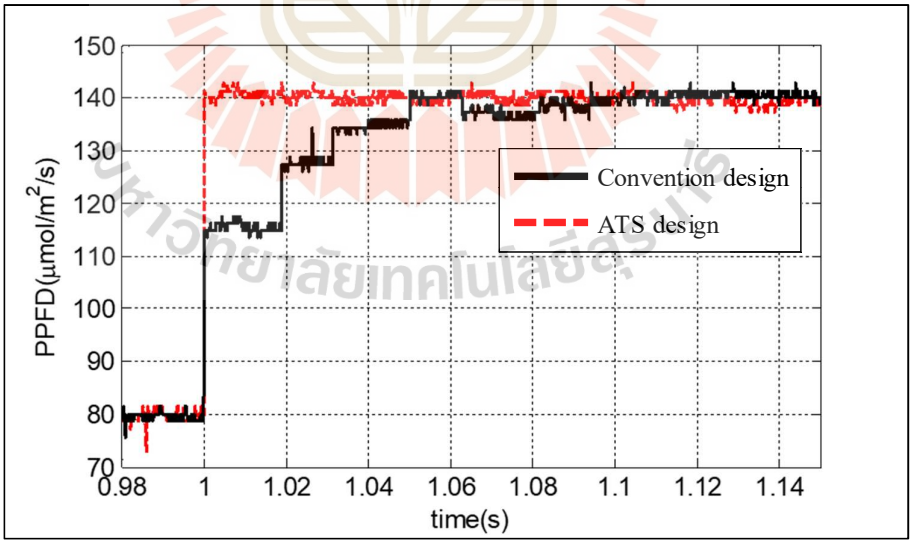
พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	**วิธีการออกแบบ**	
	วิธีแบบดั้งเดิม	**วิธี ATS**
K_{pv}	0.0116	0.0447
K_{pi}	6.738	28.1829
K_{iv}	4.21	4.4754
K_{ii}	9208.6	1908.1
W	0.0655	0.007391

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผัน โดยปรับความเข้มแสงอ้างอิง (Ir_o^*) ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จาก 80 μmol/m^2/s เป็น 140 μmol/m^2/s จะได้ผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุตดังรูปที่ 5.31



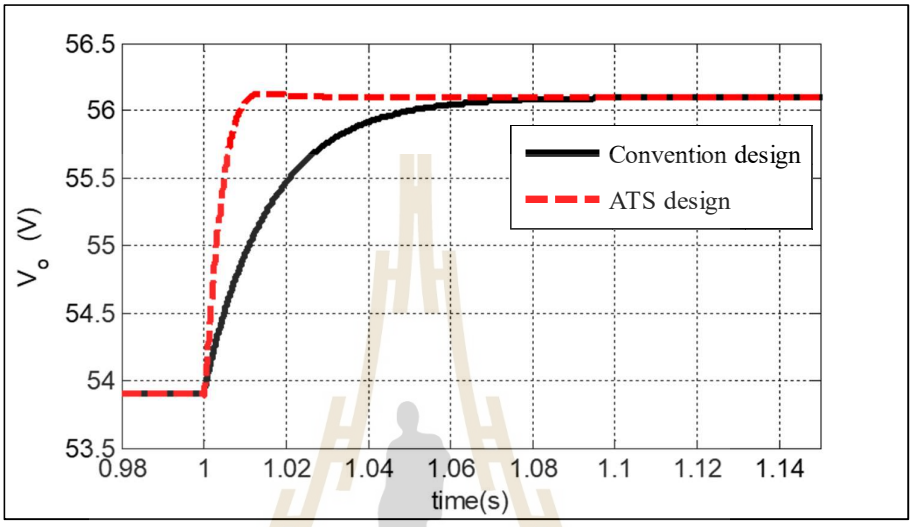
ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์



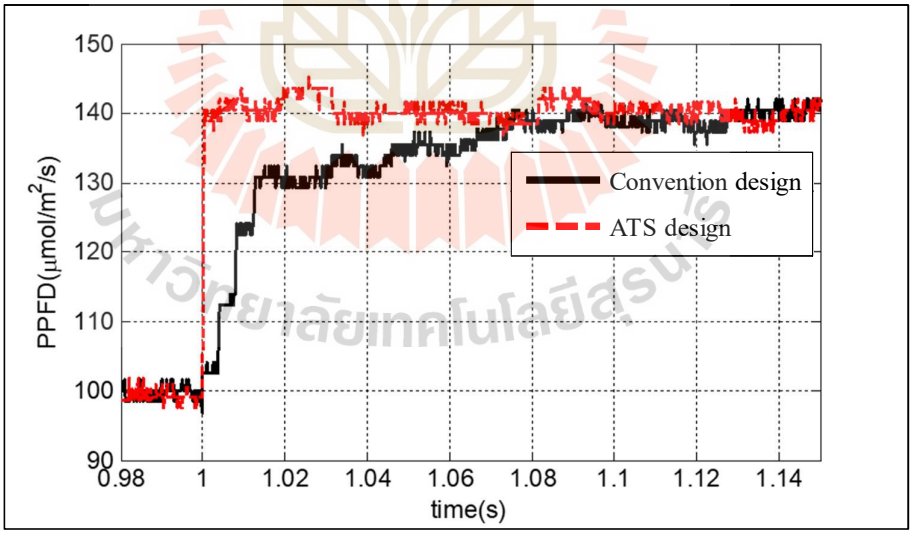
ข) ผลจากชุดทดสอบ

รูปที่ 5.31 ผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนจาก 80 เป็น 140 μmol/m^2/s

และทดสอบการทำงานโดยปรับความเข้มแสงอ้างอิง (Ir_o^*) ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จาก 100 μmol/m^2/s เป็น 140 μmol/m^2/s จะได้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดังรูปที่ 5.32



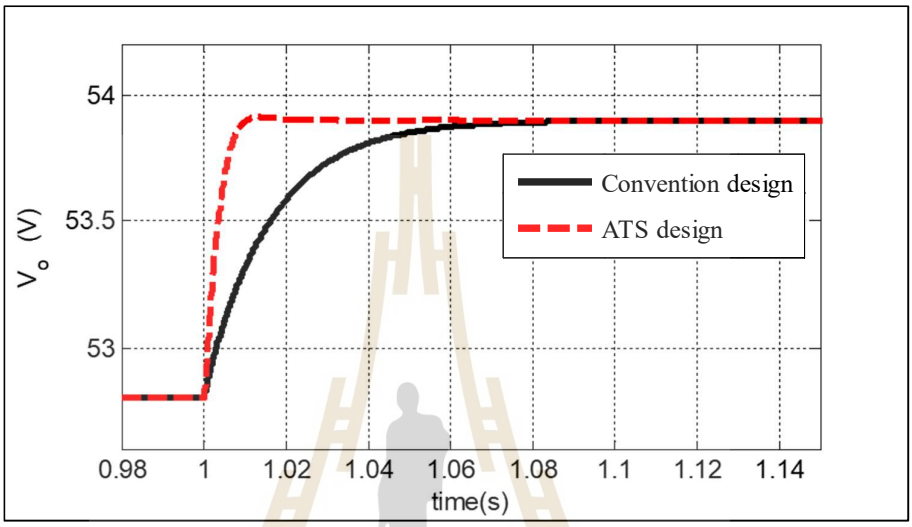
ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์



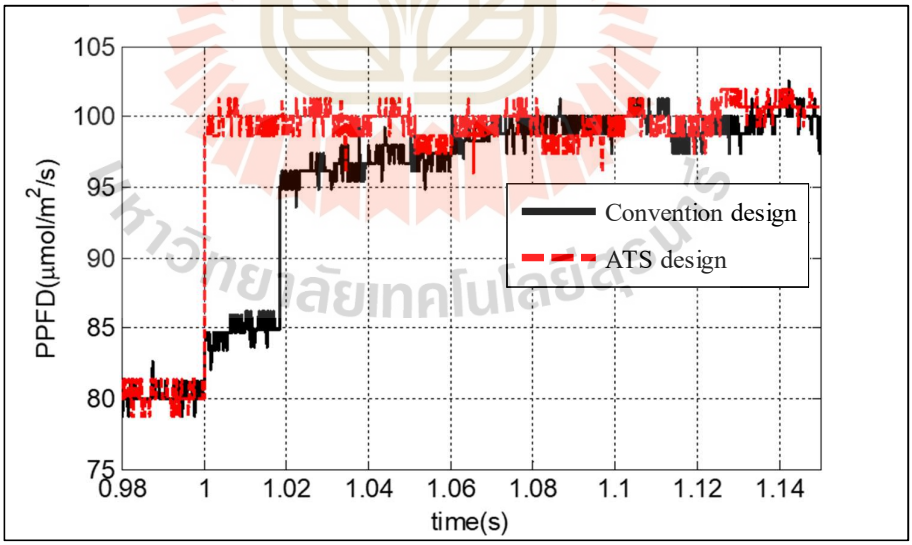
ข) ผลจากชุดทดสอบ

รูปที่ 5.32 ผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนจาก 100 เป็น 140 μmol/m^2/s

จากนั้นทดสอบการทำงานโดยปรับความเข้มแสงอ้างอิง (Ir_o^*) ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จาก 80 μmol/m^2/s เป็น 100 μmol/m^2/s จะได้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดังรูปที่ 5.33



ก) ผลจากการจำลองสถานการณ์



ข) ผลจากชุดทดสอบ

รูปที่ 5.33 ผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนจาก 80 เป็น 100 μmol/m^2/s

จากผลการทดสอบชุดทดสอบจริง รูปที่ 5.31 5.32 และ 5.33 การใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบที่พิจารณาก็คือ วงจรแปลงผันแบบบัคก์ จากการทดสอบที่ผ่านมา ผลที่ได้จากชุดทดสอบจริงนั้นมีข้อสรุปเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ คือ การออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่า การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม แต่ก็ยังคงให้ผลที่สอดคล้องกับผลจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

5.5 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบการควบคุมความเข้มแสงเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสและวงจรกรองดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งได้ทำการทดสอบการปรับเปลี่ยนระดับค่าความเข้มแสง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุม รวมถึงผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุตของระบบ โดยทำการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ได้แก่การออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม และการออกแบบด้วยวิธี ATS ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าการออกแบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ทำให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของสัญญาณผลการตอบสนองของความเข้มแสงเอาต์พุตให้ดียิ่งขึ้น และจากผลการทดสอบเป็นการยืนยันได้ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สามารถใช้งานในทางปฏิบัติได้จริง แต่หากพิจารณาลงไปในรายละเอียดถึงผลการตอบสนอง ในเรื่องของช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และ การพุ่งเกินชั่วครู่ (overshoot) จะมีความแตกต่างกันระหว่างผลจากชุดทดสอบจริงกับผลที่ได้จากคอมพิวเตอร์ แต่ยังคงให้ผลที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น มีความจำเป็นต่อการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างมากในการศึกษาออกแบบตัวควบคุมของระบบ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่พิจารณาตัวควบคุมด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว และแบบจำลองของหลอดแอลอีดี โดยผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้นถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งผลงานวิจัยดังกล่าวได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 2

ต่อมาในบทที่ 3 ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมพีไออยู่ในแบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จากวิธีการดังกล่าวจะทำให้แบบจำลองของระบบเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา สามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมได้ และการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เช่นเดียวกัน

งานวิจัยวิทยานิพนธ์มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้นในบทที่ 4 จึงได้นำเสนอการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ATS) ซึ่งข้อดีของการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์คือ การจำลองสถานการณ์จะใช้เวลาที่รวดเร็วและเหมาะสมสำหรับการคำนวณที่ซ้ำไปซ้ำมา นอกจากนี้การออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะทำให้ได้สมรรถนะของสัญญาณเอาต์พุตที่ดีที่สุดและดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม สำหรับผลการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ พบว่า

การออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตไม่ว่าจะเป็น ช่วงเวลาขึ้น (rise time) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) และ การพุ่งเกินชั่วครู่ (overshoot) ที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

เพื่อเป็นการยืนยันผลว่าตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เมื่อนำไปใช้งานกับระบบจริงแล้วจะยังคงให้ผลการสอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ เนื้อหาในบทที่ 5 จึงได้นำเสนอการดำเนินการออกแบบรวมถึงการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ เพื่อใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันผลการจำลองสถานการณ์ สำหรับผลการทดสอบ ได้ทดสอบการควบคุมแรงดันในย่านต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบ จะให้ผลที่สอดคล้องในทำนองเดียวกันกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ คือการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะให้ผลการสอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการอื่นๆ และนำมาเปรียบเทียบ เพื่อหาวิธีที่ได้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด

2. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการเกี่ยวกับโครงสร้างการหักเหแสงของหลอดไฟแอลอีดี ให้แสงกระจายได้อย่างครอบคลุม เพื่อให้ประหยัดพลังงานและลดต้นทุนได้มากขึ้น

3. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการสร้างชุดควบคุมความเข้มแสงให้มีขนาดกะทัดรัดขึ้น เพื่อสามารถนำไปใช้งานกับกลุ่มเกษตรกรได้จริง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

Massa, G.D., Kim, H.-H., Wheeler, R.M., and Mitchell, C.A. (2008). Plant productivity in response to LED lighting. **HortScience 2008**. 43(7) : 1951–1956.

Jaturongloumlart, S., Promya, J., and Varith, J. (2017). Modeling of Spirulina Growth Rate with LED Illumination and Applications. **Engineering Journal Chiang Mai University**. 24(1) : 142-151.

Jamaree, T., Kanjanaprachot, P., Jaturongloumlart, S., and Sakornvasee, S. (2017). The effect of LED light on growth of Petunia hybrida Vilm 'Purple' under a semi-closed plant production system. **National Academic Conference**. 3 : 184-191.

Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J.A., Stanghellini, C., Marcelis, L.F.M., Orsini, F., and Gianquinto, G. (2019). Unraveling the Role of Red: Blue LED Lights on Resource Use Efficiency and Nutritional Properties of Indoor Grown Sweet Basil. **Frontiers in Plant Science**. (13)10 : 1-14.

Petchthai, P., and Thongket, T. (2017). Effect of Light Intensity and Light-Exposure Duration on Growth and Quality of Lettuce. **Songklanakarin Journal of Plant Science**. 4(3)

Udomsuk, S., Areerak, K-N., and Areerak, K-L. (2011). Mathematical Model of a Single-Phase Uncontrolled Rectifier Feeding a Buck Converter. **European Journal of Scientific Research**. 50(1) : 89-98.

Li, G., Yu, S., and Shi, J. (2016). Dynamic response analysis of buck driver for LED based on second-order model. **Electronics Letters**. 24(52) : 2005–2007.

Lin, R. (2017) Modeling and Compensator Design of LED Driver Systems. **IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**.

Leng, M. and Zhou, G. (2018). Stability Analysis for Peak Current-Mode Controlled Buck LED Driver Based on Discrete-Time Modeling. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**. 6.

Fernando Menke, M., Raniere Seidelmand, Á. Varella Tambara, R. (2019). LLC LED Driver Small-Signal Modeling and Digital Control Design for Active Ripple Compensation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 66 : 387 – 396.

Sopapirm, T., Areerak, K-N., Areerak, K-L., and Srikaew, A. (2011). The Application of Adaptive Tabu Search Algorithm and Averaging Model to the Optimal Controller Design of Buck Converters. **World Academy of Science Engineering and Technology.** Issue 60 : 477-483.

Chonsatidjamroe, S., Areerak, K-N., and Areerak, K-L. (2012). The Optimal Cascade PI Controller Design of Buck Converters. **The 9th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2012) Association.** : 1-4.

Sirithong, N., Katathikarnkul, S. and Khongpugdee, S. (2014). Design and Development Lux Meter. **Thaksin University Journal**. 17(3) : 44-50.

Leelaratsamee, A., and Detchjarat, S. (2011). A Smart Lighting Control System Using DALI Protocol. **Journal of Energy Research**. 8(2) : 45-53.

Krajangpan1, K., Suebtaanaawong1, T., and Wangsathiswong, S. (2018). LED Lighting Design for Indoor Planting Based on Daily Light Integral. **Agricultural Science Journal.** 49(1) (Suppl.) : 498-501.

Wangwibulkit1, M., Ngamwongchon1, S., Laohavisuti, N., and Kasam W. (2018). Effect of Fertilizer and Light Intensity on Leaf Color in Ludwigia repens. **King Mongkut's Agricultural Journal**. 36(3) : 42-49.

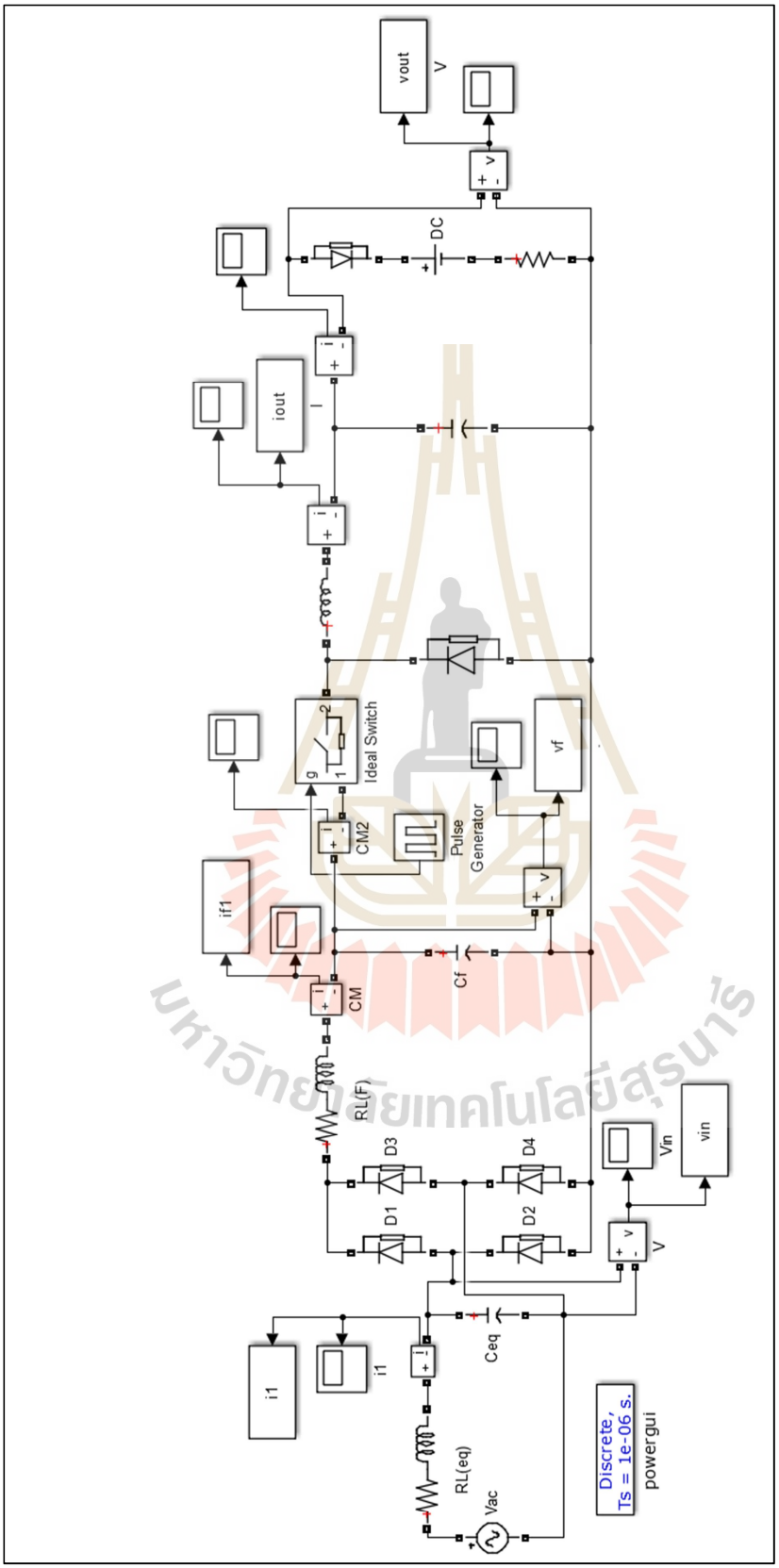
Yotdee, P., Sukkasame, N., Tanyasrirat, S., Kapanya, D., and Vungnibpanto, S. (2017). Optimal PI Controller Design for Brushless DC Motor Speed Control by Intensified Current Search. **Electrical Engineering Network Journal** 1(2) : 18-21.

Chonsatidjamroen, S., Areerak, K-N., and Areerak, K-L. (2013). The Applicayion of Averaging Model for Optimized Cascade PI Controllers of Buck Converters using Aftificial Intelligence Techniques. **European Journal of Scientific Research**. 98(3) : 339-353.

ภาคผนวก ก

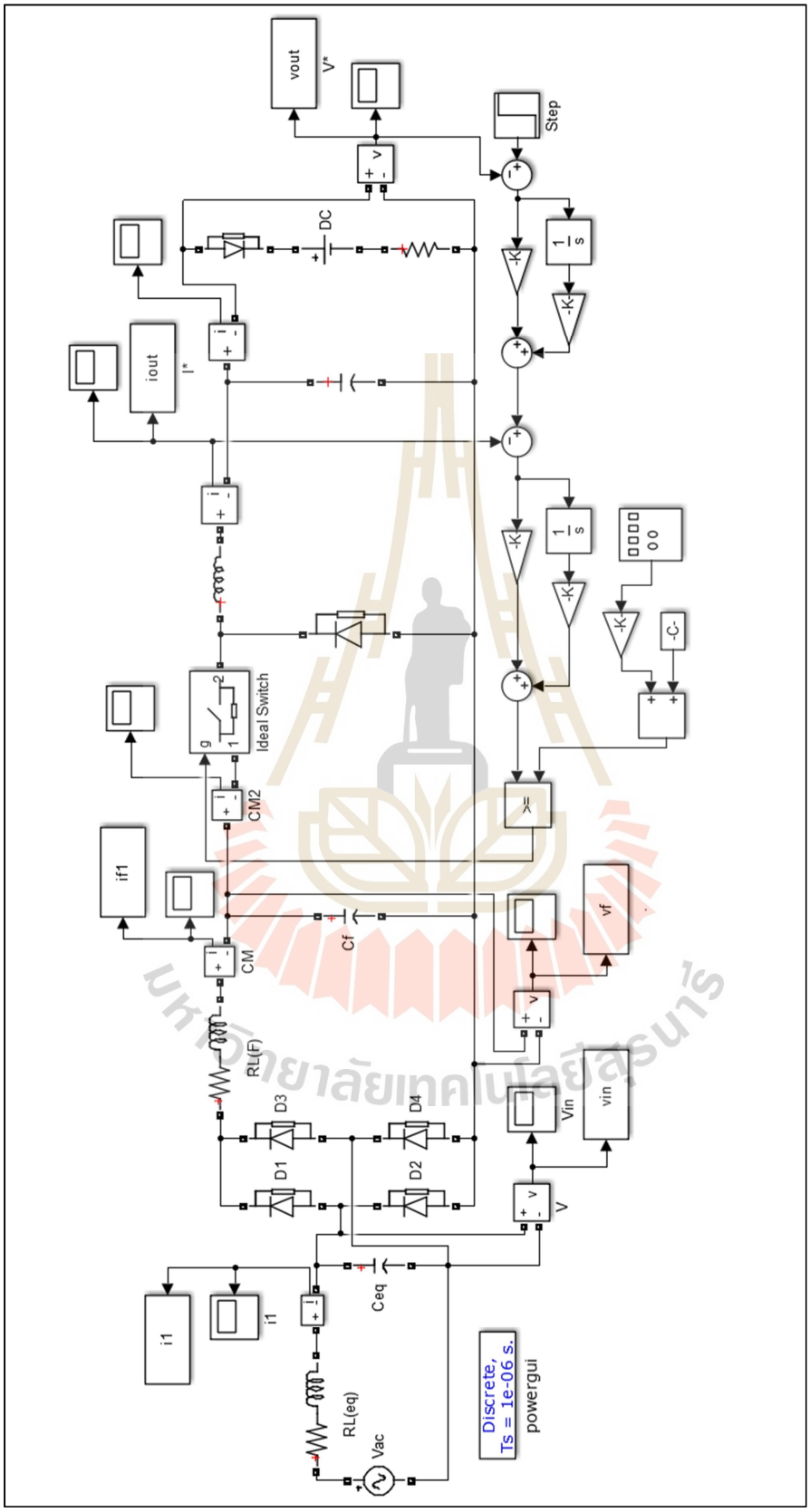
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ดีไม่โหลดเป็นแอคดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดแอคทีฟ กรณีมีตัวควบคุม

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบตาบู

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

****

ข.1 โปรแกรมการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบตาบู

****

โปรแกรม ATS.m

```
clear all;
clc;
N=4;                                % N คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา
xlimit= [0.045 28.2 5 1900;         % แถวที่ 1 ของ xlimit คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์
    0.04 23 4 1900];                % แถวที่ 2 ของ xlimit คือ ขอบเขตล่างของพารามิเตอร์
for r=1:5
    S(r,:)=((xlimit(1,:)-xlimit(2,:)).*rand(1,N))+xlimit(2,:);
end                                 % สุ่มค่าตอบเริ่มต้นภายในขอบเขตของการค้นหา
for k=1:size(S,1)
    [g,V_out]=design1(S(k,1),S(k,2),S(k,3),S(k,4));
    costvalue(k,1)=g;
    h=V_out;
end                                 % ประเมินคำตอบเริ่มต้นด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์
ll=g
[best_error,index]=min(costvalue);  % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดใน costvalue
                                    และเก็บไว้ใน best_error
S0=S(index,:);                      % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                    น้อยที่สุดไว้ใน S0
round=5;
max_count=round;                    % กำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา
best_neighbor=S0;                   % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่า
                                    น้อยที่สุด
neighbor_list=zeros(6,N);           % รีเซตค่าใน neighbor_list
radius=5;                           % กำหนดรัศมีการค้นหาเริ่มต้น
Number_neighb=10;                   % 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;                                   % เริ่มต้นคำนวนเวลาในการค้นหา
  % เริ่มโปรแกรม ATS
t=t+1;                                 % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
tt=tt+1;                               % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
ttt=ttt+1;                             % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ best_error_list
local(t,1)=count;                      % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ local
local(t,2:5)=best_neighbor;            % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22 ของ local
local(t,6)=best_error;                 % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ local
tabu_list(tt,1)=count;                 % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
tabu_list(tt,2:5)=best_neighbor;       % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
                                       ของ tabu_list
tabu_list(tt,6)=best_error;            % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ tabu_list
best_error_list(ttt,1)=count;          % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
best_error_list(ttt,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 22
                                       ของ best_error_list
best_error_list(ttt,6)=best_error;     % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 23 ของ
                                       best_error_list
for count=1:max_count
  S1=random_neigh(Number_neighb,radius,xlimit,S0);
                                       % เรียกใช้โปรแกรม random_neigh เพื่อสุ่มค่าใกล้เคียง
                                       รอบคำตอบ S0 ภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบัน
```

```
                                % อินพุตของโปรแกรมนี้คือ Number_neighb,
                                radius,xlimit และ S0
                                % เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง (S1) เท่ากับจำนวน
                                Number_neighb
[best_error1,best_neighbor1,best_error,best_neighbor]=objective1(S1,best_error,S0);
                                % เรียกใช้โปรแกรม objective1 เพื่อประเมินค่า
                                ใกล้เคียงที่สุ่มได้
                                % อินพุตของโปรแกรมนี้คือ S1, best_error และ S0
                                % เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1, best_error
                                และ best_neighbor
neighbor_list(k,1:size(S0,2))=[best_neighbor1];
                                % เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ทาให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มี
                                ค่าน้อยที่สุดภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบันไว้ใน
                                คอลัมน์ที่ 1 และ 2 ของ neighbor_list
neighbor_list(k,size(S0,2)+1)=best_error1;
                                % เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด
                                % ภายในปริภูมิการค้นหาปัจจุบันไว้ในคอลัมน์ที่ 3
                                ของ neighbor_list
if (count>1)
if (tabu_list(count,6)>best_error)
    n=n+1;
else
    n=0;
end
end                             % ตรวจสอบการซ้ำของคาตอบโดยการเปรียบเทียบ
                                ระหว่าง best_error1 และ best_error ถ้ามีการซ้ำของคำตอบ
                                คำตอบ ให้ปรับเพิ่มค่า n
    tt=tt+1;                    % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ tabu_list
tabu_list(tt,1)=count;          % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ tabu_list
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
tabu_list(tt,2:5)=best_neighbor1;        % เก็บค่า best_neighbor1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
                                         ของ tabu_list
tabu_list(tt,6)=best_error1;             % เก็บค่า best_error1 ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ tabu_list
ttt= ttt+1;                              % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสาหรับ best_error_list
best_error_list(ttt,1)=count;            % เก็บค่า count ไว้ในคอลัมน์ที่ 1 ของ best_error_list
best_error_list(ttt,2:5)=best_neighbor; % เก็บค่า best_neighbor ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 5
                                         ของ tabu_list
best_error_list(ttt,6)=best_error;       % เก็บค่า best_error ไว้ในคอลัมน์ที่ 6 ของ best_error_list
disp([count tabu_list(count,6) best_error n n_backtracking ])
                                         % แสดงค่า count, tabu_list(count,6), best_error, n
                                         และ n_backtracking
                                         % เริ่มกลไกการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.5&& radius>1e-3
radius=radius/1.3;
end                                      % เงื่อนไขที่ 1) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.5
                                         ให้ทำการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.05&& radius>1e-3
radius=radius/1.3;
end                                      % เงื่อนไขที่ 2) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.05
                                         ให้ทำการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.01&& radius>1e-3
radius=radius/1.3;
end                                      % เงื่อนไขที่ 3) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.01
                                         ให้ทำการปรับลดรัศมี
if best_error<=0.008&& radius>1e-3
radius=radius/1.3;
end                                      % เงื่อนไขที่ 4) ถ้า best_error น้อยกว่าเท่ากับ 0.008
                                         ให้ทำการปรับลดรัศมี
if (best_error<0.0001)                   % ตรวจสอบเกณฑ์ยุติการค้นหา เมื่อ best_error < 0.0001
t=t+1;                                   % ปรับเพิ่มค่าตัวเลื่อนสำหรับ local
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
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,:);      % จัดลาดับ rank ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
                                        ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนมีการเรียกใช้กลไกย้อน
                                        รอยการค้นหา
                                        % TEMP จะเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ
                                        ค่าพารามิเตอร์ 5 ชุดสุดท้ายก่อนทำการจัดลำดับ
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));           % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                        ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(5,:) = TEMP(INDEX,:);              % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และ
                                        ค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 5 ใน RANK
TEMP(INDEX,6)=0;                        % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                        ด้วยศูนย์
```

```
                                % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                เพียง 4 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));   % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(4,:) = TEMP(INDEX,:);      % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                                พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 4 ใน RANK
TEMP(INDEX,6)= 0;               % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                ด้วยศูนย์
                                % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                เพียง 3 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));   % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(3,:) = TEMP(INDEX,:);      % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                                พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 3 ใน RANK
TEMP(INDEX,6)=0;                % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                ด้วยศูนย์
                                % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                เพียง 2 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));   % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(2,:) = TEMP(INDEX,:);      % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และค่า
                                พารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 2 ใน RANK
TEMP(INDEX,6)= 0;               % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                ด้วยศูนย์
                                % ขณะนี้ใน TEMP จะเหลือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
                                เพียง 1 ค่า
[MAX,INDEX] = max(TEMP(:,6));   % หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด และลำดับที่ของค่า
                                ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด
RANK(1,:) = TEMP(INDEX,:);      % จัดลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุด และ
                                ค่าพารามิเตอร์ไว้เป็นลำดับที่ 1 ใน RANK
```

```
TEMP(INDEX,6)= 0;                    % แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าสูงสุดใน TEMP
                                     ด้วยศูนย์
                                     % ขณะนี้ใน TEMP จะไม่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้
                                     ทำการจัดลำดับอีกต่อไป
neighbor=RANK(5,2:5);                % แทนค่า neighbor ด้วยค่าพารามิเตอร์ลำดับที่ 5 ใน
                                     RANK ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชัน
                                     วัตถุประสงค์แตกต่างจากคำตอบที่ซ้ำมากที่สุดเมื่อเทียบ
                                     กับอีก 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 และแทน
                                    ค่าพารามิเตอร์ best_neighbor ด้วย overall_best_neighbor
end
time=toc;                           % ยุติการคานวณเวลาการค้นหา
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

%%%%%%%กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ%%%%%%%
global w1 Vm Req Leq Ceq Rf Lf Cf R L C Kpv Kiv Kpi Kii Vo vdc
w1 = 2*pi*50;
Req = 0.1;
Leq = 1e-3;
Ceq = 10e-6;
Rf = 10e-3;
Lf = 25e-3;
Cf = 670e-6;
L = 50e-3;
C = 220e-6;
R = 12;
Kpv=0.0145;
Kiv=5.2;
Kpi=10;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
Kii=8000;
Vm = 220*sqrt(2);
vdc=12;
Vo=52.8;
 [t1,x] = ode23s('coefficient',[0:1e-4:2],zeros(1,10));
  i1o  =2*x(:,1).*cos(w1*t1)-2*x(:,2).*sin(w1*t1);
  vino =2*x(:,3).*cos(w1*t1)-2*x(:,4).*sin(w1*t1);
  ifo=x(:,5);
  vfo=x(:,6);
 iouto=x(:,7);
 vouto=x(:,8);

figure(2)                                %พล็อตกราฟแสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต
 plot(t1,vouto,'r')
 hold on
 plot(t1,h,'b')
 hold off
 grid on
 xlabel('time(s)')
 ylabel('Vout(V)')
 legend('Conventional','ATS')
```

โปรแกรม random_neigh.m

```
function S1 = random_neigh(Number_neighb, radius, xlimit, S0)
                                         % โปรแกรม random_neigh เป็นโปรแกรมสุ่มค่า
                                         ใกล้เคียงรอบคำตอบ S0
                                         % อินพุตของโปรแกรม คือ Number_neighb, radius,
                                         xlimit และ S0
                                         % เอาต์พุต คือ ค่าใกล้เคียง S1 จำนวนเท่ากับ
                                         Number_neighb
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
   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 ถ้าค่าใกล้เคียงที่สุ่มได้มีค่า
                                        เกินขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่กาหนดให้ทำการสุ่มค่า
                                        ใกล้เคียงใหม่
         S1(u,k) = S0(1,k)+(radius*(xlimit(1,k)-xlimit(2,k))*rand1(-1,1));
         end
      end
   end
return                                  % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม rand1.m

```
function x = rand1(a,b)                 % โปรแกรมสุ่มค่าพารามิเตอร์ในช่วงที่กำหนด
                                        % อินพุตของโปรแกรม คือ ขอบเขตบนของพารามิเตอร์a
                                        และขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ b
                                        % เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ผลของการสุ่ม
                                           ค่าพารามิเตอร์ในช่วง a ถึง b
x = a+rand*(b-a);                       % สุ่มค่าพารามิเตอร์โดยอาศัยความสัมพันธ์ a rand b
return                                  % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม objective1.m

```
function [best_error1, best_neighbor1,best_error, best_neighbor]=objective1(S1, best_error,S0)
                                        % โปรแกรม objective1 เป็นโปรแกรมประเมินค่า
                                        ใกล้เคียงที่สุ่มได้รอบ S0
                                        % อินพุตของโปรแกรม คือ S1, best_error และ S0
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
                                    % เอาต์พุตคือ best_error1, best_neighbor1, best_error,
                                    และ best_neighbor
error = [];                         % ตัวแปร error สำหรับรองรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ
                                    ค่าใกล้เคียงที่ได้จากการสุ่ม
for k = 1: size(S1,1)
 g = design1(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,:);       % เก็บค่าพารามิเตอร์ของค่าใกล้เคียงที่ทาให้ค่าฟังก์ชัน
                                    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,V_out]=design1(var1,var2,var3,var4)
                                    % โปรแกรมรับอินพุต 4 ค่า คือ ฟังก์ชันแสดงสมาชิก
                                    ภาพของตัวควบคุมพีไอ
                                    % เอาต์พุตของโปรแกรม คือ ค่าบ่งบอกถึงสมรรถนะ
                                    ของตัวควบคุม
                                    % กำหนดตัวแปรเริ่มต้นของฟังก์ชันแสดงสมาชิกภาพ
```

```
%%% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม%%%
global w Vm Req Leq Ceq Rf Lf Cf R L C Kpv_a Kiv_a Kpi_a Kii_a Vo vdc
Kpv_a = var1;
Kiv_a = var2;
Kpi_a = var3;
Kii_a = var4;
w = 2*pi*50;
Req = 0.1;
Leq = 1e-3;
Ceq = 10e-6;
Rf = 10e-3;
Lf = 25e-3;
Cf = 670e-6;
L = 50e-3;
C = 220e-6;
R = 12;
Vm = 56*sqrt(2);
vdc=12;
Vo=52.8;
tic
    [t,y] = ode23s('coefficient1',[0:1e-4:2],zeros(1,10));
    i1o  =2*y(:,1).*cos(w*t)-2*y(:,2).*sin(w*t);
    vino =2*y(:,3).*cos(w*t)-2*y(:,4).*sin(w*t);
    ifo=y(:,5);
    vfo=y(:,6);
    iouto=y(:,7);
    V_out=y(:,8);
toc
S2=53.9;                                % กำหนดแรงดันไฟฟ้าอินพุตช่วงที่ 2 เท่ากับ 53.9 V
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
%%%%% คำนวณค่า overshoot ของระบบ %%%%%
PO=abs(S2-max(V_out));

%%%% กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับคำนวณค่า rise time ของระบบ %%%%
char=[V_out,t];
Vo_tr=.9*S2;                          % พิจารณา rise time ที่ 90% ของ S2
ts=0;
tr=0;

%%%% คำนวณค่า 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

%%%% คำนวณค่า 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 ทียอมรับได้ของการลู่เข้า
        ts=char(i,2)-1;
    end
    if ts ~= 0
        break;
    end
    end
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
a=1/3;b=1/3;c=1/3;                    % กำหนดค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการปรับคูณ
w=a*PO+b*tr+c*ts;
    g=w;
return                                % กลับสู่หน้าโปรแกรมที่เรียกใช้ฟังก์ชัน
```

โปรแกรม coefficient.m

```
function dx=coefficient1(t,y)
global w Vm Req Leq Ceq Rf Lf Cf R L C Kpv_a Kiv_a Kpi_a Kii_a Vo vdc
d=(-(Kpi_a)*y(7)-(Kpv_a*Kpi_a)*y(8)+(Kiv_a*Kpi_a)*y(9)+Kii_a*y(10)
+(Kpv_a*Kpi_a*Vo));
Vo= 52.8;
if t>1
   Vo=53.9;
end

%%%%แบบจำลองของระบบที่ต้องการพิจารณา%%%%
dx=zeros(10,1);
dx(1)=-(Req/Leq)*y(1)+w*y(2)-(1/Leq)*y(3);
dx(2)=-w*y(1)-(Req/Leq)*y(2)-(1/Leq)*y(4)-(Vm/(2*Leq));
dx(3)=(1/Ceq)*y(1)+w*y(4);
dx(4)=(1/Ceq)*y(2)-w*y(3)+(2/(pi*Ceq))*y(5);
dx(5)=(-4/(pi*Lf))*y(4)-(Rf/Lf)*y(5)-(1/Lf)*y(6);
dx(6)=(1/Cf)*y(5)+(d/Cf)*y(7);
dx(7)=(d/L)*y(6)-(1/L)*y(8);
dx(8)=(1/(C))*y(7)-(1/(R*C))*y(8)-(vdc/(R*C));
dx(9)=-y(8)+Vo;
dx(10)=-y(7)-(Kpv_a)*y(8)+(Kiv_a)*y(9)+(Kpv_a*Vo);
return
```

ภาคผนวก ค

โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Ardunio

```
**************************************************************************
ค.1 โปรแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
**************************************************************************
#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= 35;                    // การทดสอบที่วัฏจักรหน้าที่มีค่าเท่ากับ 35 %
OCR1A =8*duty_cycle ;
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
**************************************************************************
ค.2 โปรแกรมการสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
**************************************************************************
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <BH1750FVI.h>
#include <Wire.h>
BH1750FVI LightSensor(BH1750FVI::k_DevModeContLowRes);
float  R;
int CS =43;
int SCX =52;
int SDI =53;
int LDAC =51;
int SHDN =50;
int EN = 11;
float setpoint=0;

//กำหนดพารามิเตอร์ของลูปแรงดันไฟฟ้า //Voltage //
float err_v,Upv,Uiv,Uiv_1=0,Upi_v;
float kpv2=0.0447;
float kiv2=4.4754;

//กำหนดพารามิเตอร์ของลูปกระแสไฟฟ้า //Current //
float err_i,Upi,Uii,Uii_1=0,Upi_i;
float kpi2=28.1829;
float kii2=1908.1;
int Upi_max=800,Upi_min=0;
float Ts=0.0001;                    //กำหนด sampling time
int current_sensor = A1;           //กำหนดพินสำหรับรับสัญญาณจากชุดตรวจจับ
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
//กำหนดตัวแปรสาหรับรับสัญญาณจากชุดตรวจจับมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0
int Read_Current=0,i=0,ii=0;
float Vo=0, IL=0;

void setup(){
Serial.begin(9600);
LightSensor.begin();
  pinMode(CS,OUTPUT);
  pinMode(SCX,OUTPUT);
  pinMode(SDI,OUTPUT);
  pinMode(LDAC,OUTPUT);
  pinMode(SHDN,OUTPUT);
  digitalWrite(CS,HIGH);
  digitalWrite(SCX,LOW);
  digitalWrite(SDI,LOW);
  digitalWrite(LDAC,HIGH);
  digitalWrite(SHDN,HIGH);

//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;
```

```
}
//กำหนดโหมด MCP4922//
void Write_MCP4922(unsigned char DAC_Chanel,unsigned int DAC_Data) {
digitalWrite(CS,LOW);
switch(DAC_Chanel) {
  case 0x00:DAC_Data |=0x3000;
break;
  case 0x01:DAC_Data |=0xB000;
break;
}
shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,(DAC_Data>>8)&0xFF);
shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,DAC_Data&0xFF);
digitalWrite(CS,HIGH);
digitalWrite(LDAC,LOW);
digitalWrite(LDAC,HIGH);
}

void loop(){
setpoint=528;
while(1) {
//รับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ารวมทั้งปรับคูณให้เป็นค่าจริง
Read_Current = analogRead(current_sensor);
uint16_t V = LightSensor.GetLightIntensity();
IL = (((float) Read_Current)*6140/1023);
Vo = V/10+483.155;

//เข้าสู่ลูปแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ
err_v=(setpoint-Vo)/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;
        }

//เข้าสู่ลูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ
err_i=Upi_v-(IL)/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;
R = map(Vo, 0, 60, 0, 4095);
Write_MCP4922(1,R);

//ตรวจสอบว่าถึงค่าที่กำหนดที่จะเรียกฟังก์ชันPI2หรือยัง(สำหรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต)
if(ii > 1000){
        setpoint=539;
        call_PI2();
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
        }
else {
        ii++;
        }
}
}

// เรียกใช้ฟังก์ชัน PI2 //
void call_PI2(){
        while(1){
// รับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ารวมทั้งปรับคูณให้เป็นค่าจริง //
Read_Current = analogRead(current_sensor);
uint16_t V = LightSensor.GetLightIntensity();
IL = (((float) Read_Current)*6140/1023);
Vo = V/10+483.155;

// เข้าสู่ลูปแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ//
err_v=(setpoint-Vo)/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;
        }

// เข้าสู่ลูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ //
err_i=Upi_v-(IL)/1000;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
Upi=kpi2*err_i;
Uii=kii2*Ts*err_i+Uii_1;
Upi_i=Upi+Uii; // PI value
if (Upi_i >= 800){
        Upi_i=800;
        }
else if (Upi_i <=Upi_min){
        Upi_i=Upi_min;
        }
//ส่งค่า PWM ไปยังพินที่ 11 //
OCR1A = Upi_i;
Uiv_1=Uiv;
Uii_1=Uii;
R = map(Vo, 0, 60, 0, 4095);
Write_MCP4922(1,R);
}
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเข้มแสงหลอดไฟ LED ที่ใช้ในการปลูกพืช

Mathematical Model of LED Intensity Control for Plant Cultivation

พทัยรัตน์ ทัศน์วรณ์ [1] กองพัน อารีรักษ์ [1*] ฐิติพร มะชิโกวา [2] และ สุภาลัย อารีรักษ์ [3]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี *E-mail : kongpan@sut.ac.th

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[3]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเข้มแสงของหลอดไฟ LED ที่ใช้ในการปลูกพืช ซึ่งเป็นระบบที่สามารถควบคุมความเข้มแสงได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ให้สอดคล้องกับความต้องการของพืชด้วยวงจรแปลงผันกำลัง โดยใช้หลอดไฟ LED เฉพาะช่วงแสงสีขาว สีแดง และสีน้ำเงิน การหาแบบจำลองใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์ของระบบ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองมีความถูกต้อง และใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่รวดเร็ว

คำสำคัญ: หลอดไฟ LED,การเจริญเติบโตของพืช,วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป, วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์,การควบคุมความเข้มแสง

Abstract

This paper presents a mathematical model of LED intensity control for plant cultivation. The system can control the light intensity according to the user requirement. The LEDs used in the study are white, red, and blue. The proposed mathematical model is derived from the generalized state space averaging method. The model is validated by the simulation from the exact topological model for MATLAB. The results show that the derived model can provide a good accuracy and faster computational time compared with those from MATLAB.

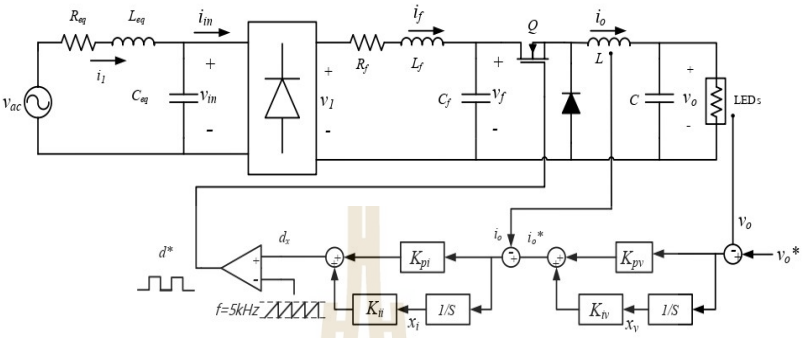
Keywords: LED, Vegetative growth, State-space averaging, Buck Converter, Intensity control

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้หลอดไฟ LED [1] ในการเพาะปลูกพืชอย่างแพร่หลาย เนื่องจากแสงจากหลอด LED สามารถช่วยให้ต้นพืชเติบโตและพัฒนาได้คล้ายกับแสงธรรมชาติ นอกจากนี้ความเข้มแสงรวมถึงความยาวคลื่นของ LED ที่แตกต่างกันยังส่งผลให้พืชมีกระบวนการเมแทบอลิซึมแตกต่างกันอีกด้วย เช่น การให้แสง LED สีแดง ที่ความเข้ม 100 $\mu mol\ m^{-1}s^{-1}$ กับต้นข้าวสาลี ส่งผลให้ต้นข้าวสาลีมีการสังเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับต้นที่ได้รับแสงสีขาว ในขณะที่เพิ่มความเข้มแสงเป็น 500 $\mu mol\ m^{-1}s^{-1}$ ให้กับต้นข้าวสาลีส่งผลให้มีการยับยั้งการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ แต่ถ้าหากให้แสง LED สีน้ำเงินที่ความเข้ม 30 $\mu mol\ m^{-1}s^{-1}$ ร่วมกับความเข้มแสงเป็น 500 $\mu mol\ m^{-1}s^{-1}$ จะส่งผลให้ต้นข้าวสาลีมีการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เป็นปกติ [2] การปรับความเข้มแสงของหลอดไฟ LED จะใช้ระบบทางไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสทำงานร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมกับระบบดังกล่าว จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ [3-5] โดยกำหนดใช้ตัวต้านทานแทนหลอดไฟ LED การพิสูจน์จะอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state space averaging method) ในการพิสูจน์หาแบบจำลอง แบบจำลองของระบบที่ได้จากการพิสูจน์จะเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) สามารถนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงได้อย่างง่าย นอกจากนี้แบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้มีการประมวลผลที่รวดเร็ว มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในการออกแบบหาตัวควบคุมแบบเหมาะสมที่สุดต่อไป

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

วงจรที่ใช้ควบคุมความเข้มแสงของหลอดไฟ LED แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{rms} วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ R_{eq}, L_{eq} และ C_{eq} จะเป็นพารามิเตอร์ที่สายส่ง ตัวกรองฝั่งกระแสตรง จะเป็นค่าพารามิเตอร์ R_f, L_f และ C_f และพารามิเตอร์ L และ C เป็นองค์ประกอบของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบบัคก์ โดยกำหนดใช้ตัวต้านทานแทนหลอดไฟ LED และควบคุมแรงดันและกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบมีตัวควบคุมที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์

3. วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป [6] เป็นวิธีการที่ใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน ของตัวแปรสถานะของวงจร ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง โดยทั่วไปสัญญาณ $f(t)$ ใดๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น T สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน ได้ดังสมการที่ (1)

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

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

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

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

คุณสมบัติที่จำเป็น 3 ข้อของสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังนี้

ข้อที่ 1 คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3)

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

ข้อที่ 2 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$\langle xy\rangle_k=\sum_{i}\langle x\rangle_{k-i}\langle y\rangle_i \qquad (4)$$

ข้อที่ 3 ถ้า $f(t)$ คือค่าจริง (real-value periodic waveform) แสดงได้ดังสมการที่ (5)

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

จากสมการที่ (1) และ (2) ค่า k เป็นตัวบ่งบอกความถูกต้องของการใช้อนุกรมฟูริเยร์ถ้า k มีค่าเป็นอันดับอนันต์ ค่าผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับ 0 และถ้าสัญญาณที่ไม่ปรากฏการสั่นไกว สามารถกำหนดให้ค่า $k=0$ ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่าการประมาณค่าอันดับศูนย์หรือถ้าสัญญาณมีการสั่นไกว สามารถกำหนดให้ k มีค่าเป็น -1, 1 ซึ่งจะ เรียกวิธีนี้ว่าการประมาณค่าอันดับหนึ่ง

4. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากวงจร แทนฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรเรียงกระแสเป็น $u(t)$ และในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ แทนฟังก์ชันการสวิตช์เป็น $u_d(t)$ ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$u(t)=\begin{cases}1, & 0\le t<dT\\ -1, & dT<t<T\end{cases} \qquad (6)$$

$$u_d(t)=\begin{cases}1, & 0<t<dT\\ 0, & dT<t<T\end{cases} \qquad (7)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$\left.\begin{aligned}i_{in}&=u(t)\cdot i_f\\ v_1&=u(t)\cdot v_{in}\end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

เมื่อทำการ KCL และ KVL จากระบบในรูปที่ 1 จะได้สมการที่เป็นสมการที่ขึ้นกับเวลาดังสมการที่ (9) และจากโครงสร้างการควบคุมจะได้ d^* ตามสมการที่ (10)

$$\left.\begin{aligned}
i_1^{\bullet} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_1 - \frac{1}{L_{eq}} v_{in} + \frac{1}{L_{eq}} v_{ac} \\
v_{in}^{\bullet} &= \frac{1}{C_{eq}} i_1 - \frac{1}{C_{eq}} i_f u(t) \\
i_f^{\bullet} &= -\frac{R_f}{L_f} i_1 - \frac{1}{L_f} v_f + \frac{1}{L_{eq}} v_{in} u(t) \\
v_f^{\bullet} &= \frac{1}{C_f} i_f - \frac{1}{C_f} i_o u_d(t) \\
i_o^{\bullet} &= -\frac{1}{L} v_o + \frac{1}{L} v_f u_d(t) \\
v_o^{\bullet} &= \frac{1}{C} i_o - \frac{1}{RC} v_o
\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

$$d^{*} = -K_{pi} i_o - K_{pv} K_{pi} v_o + K_{iv} K_{pi} x_v + K_{ii} x_i + K_{pv} K_{pi} v_o^{*} \quad (10)$$

เนื่องจากมีการพิจารณาเฉพาะส่วนประกอบมูลฐานในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และละทิ้งค่าแรงดันกระเพื่อมในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้น การกำหนดตัวแปรสถานะจึงเหลือเพียง 8 ตัว ดังสมการที่ (11) และ (12)

เมื่อ $k = 1$

$$\left.\begin{aligned}
\langle i_1 \rangle_1 &= x_1 + jx_2 \\
\langle v_{in} \rangle_1 &= x_3 + jx_4
\end{aligned}\right\} \quad (11)$$

เมื่อ $k = 0$

$$\left.\begin{aligned}
\langle i_f \rangle_0 &= x_5 \\
\langle v_f \rangle_0 &= x_6 \\
\langle i_o \rangle_0 &= x_7 \\
\langle v_o \rangle_0 &= x_8
\end{aligned}\right\} \quad (12)$$

พิจารณาหาสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนจากสมการที่ (2) ของฟังก์ชันการสวิตช์ $u(t)$ จะได้ดังสมการที่ (15)

$$\left.\begin{aligned}
\langle u \rangle_0 &= \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} (1) e^{0} dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}}^{T} (-1) e^{0} dt = 0 \\
\langle u \rangle_1 &= \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} (1) e^{-j\omega t} dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}}^{T} (-1) e^{-j\omega t} dt = -\frac{j2}{\pi}
\end{aligned}\right\} \quad (13)$$

พิจารณาหาสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนจากสมการที่ (2) ของฟังก์ชันการสวิตช์ $u_d(t)$ จะได้ดังสมการที่ (14)

$$\left.\begin{aligned}
\langle u_d \rangle_0 &= d \\
\langle u_d \rangle_1 &= \frac{\sin 2\pi d + j(\cos 2\pi d - 1)}{2\pi}
\end{aligned}\right\} \quad (14)$$

พิจารณาหาสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนจากสมการที่ (2) ของแรงดันอินพุตของระบบ จะได้ดังสมการที่ (15)

$$\left.\begin{aligned}
\langle v_{ac} \rangle_0 &= \frac{1}{T}\int_0^{T} V_m \sin \omega t \cdot e^{0} dt = 0 \\
\langle v_{ac} \rangle_1 &= \frac{1}{T}\int_0^{T} V_m \sin \omega t \cdot e^{-j\omega t} dt = -\frac{jV_m}{2}
\end{aligned}\right\} \quad (15)$$

โดย V_m คือค่าแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่าย

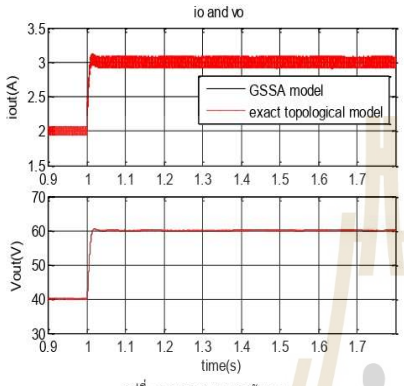
จากสมการที่ (9)-(15) สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังรูปที่ 1 ในรูปของแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ (16)

$$\left.\begin{aligned}
x_1^{\bullet} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} x_1 + \omega x_2 - \frac{1}{L_{eq}} x_3 \\
x_2^{\bullet} &= -\omega x_1 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} x_2 - \frac{1}{L_{eq}} x_4 - \frac{1}{2L_{eq}} v_m \\
x_3^{\bullet} &= \frac{1}{C_{eq}} x_1 + \omega x_4 \\
x_4^{\bullet} &= \frac{1}{C_{eq}} x_2 - \omega x_3 + \frac{2}{\pi C_{eq}} x_5 \\
x_5^{\bullet} &= -\frac{4}{\pi L_{eq}} x_4 - \frac{R_f}{L_f} x_5 - \frac{1}{L_f} x_6 \\
x_6^{\bullet} &= \frac{1}{C_f} x_5 - \frac{d}{C_f} x_7 \\
x_7^{\bullet} &= \frac{d}{L} x_6 - \frac{1}{L} x_8 \\
x_8^{\bullet} &= \frac{1}{C} x_7 - \frac{1}{RC} x_8 \\
x_9^{\bullet} &= -x_8 + v_o^{*} \\
x_{10}^{\bullet} &= -x_7 - K_{pv} x_8 + K_{ii} x_9 + K_{pv} v_o^{*}
\end{aligned}\right\} \quad (16)$$

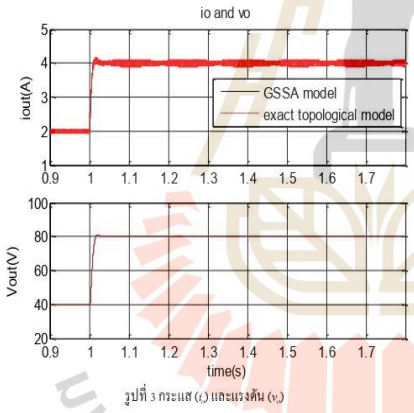
5. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อาศัยแบบจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink ของโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเท่านั้น กำหนดค่าที่ใช้พิจารณาดังนี้ $V_m = 220\sqrt{2}$, $R_{eq} = 0.1\ \Omega$, $L_{eq} = 1\ mH$, $C_{eq} = 10\ \mu F$, $R_f = 10\ m\Omega$, $L_f = 600\ mH$, $C_f = 700\ \mu F$, $R = 20\ \Omega$,

$L=25\ mH$, $C=150\mu F$, $K_{rv}=0.009$, $K_{iv}=9.375$, $K_{ri}=3$ และ $K_{ro}=937.5$



รูปที่ 2 กระแส (i_o) และแรงดัน (v_o)



รูปที่ 3 กระแส (i_o) และแรงดัน (v_o)

จากการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 2 ที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุทที่กำหนด (v_o^*) จาก 40 V ไป 60 V และ รูปที่ 3 ที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุทที่กำหนด (v_o^*) จาก 40 V ไป 80 V ที่เวลา 1 วินาที จะสังเกตได้ว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลที่ถูกต้องตรงกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของ MATLAB ทั้งในสภาวะชั่วครู่ และสภาวะอยู่ตัว เมื่อพิจารณาเวลาในการตอบสนองพบว่า ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังนั้นใช้เวลา 42 วินาที และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลาในการคำนวณ 16.2 วินาที ซึ่งใช้เวลาเร็วกว่า 2.59 เท่า ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ รวดเร็ว และสามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเข้มแสงของแอลอีดีที่ใช้ในการปลูกพืช โดยกำหนดใช้ตัวต้านทานแทนหลอดไฟ LED ของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบควบคุมได้ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พิจารณาเฉพาะส่วนประกอบมูลฐานในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และละทิ้งค่าแรงดันกระเพื่อมในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทำงานในโหมดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำต่อเนื่อง (CCM) ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 3 พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องตามระบบที่พิจารณา ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความถูกต้อง แม่นยำ ใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์อย่างรวดเร็ว และสามารถควบคุมความเข้มแสงของแอลอีดีตามความต้องการของผู้ใช้งานได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] "Light-emitting diode." [online] Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode Retrieved June 2018.

[2] Darko E, Heydarizadeh P, Schoefs B, Sabzalian MR. 2014 Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. Phil. Trans. R. Soc. B 369: 20130243. http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0243

[3] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach, IEEE Trans. on Circuit and Systems., Vol. 44, August 1997, pp.767-770.

[4] A. Emadi, 2004. "Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method," IEEE Trans. on Indus. Elect., vol. 51, no. 3, pp. 661-668.

[5] A. Emadi, 2004. "Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Genearlized State-Space Averaging Method," IEEE Trans. on Indus. Elect., vol. 51, no. 5, pp. 992-1000.

[6] T.W. Gamelin, 2000. "Complex Analysis," Springer-Verlag.

SWU Engineering Journal (2021) 16(1), 26-36

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564

การออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

The Controller Design of LEDs Intensity Using Adaptive TABU Search Method

หทัยรัตน์ ทัศน์วรณ์[1] กองพัน อารีรักษ์[1]* ฐิติพร มะชิโกวา[2] สุภาลัย อารีรักษ์[3]
[1]กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[3]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
Hathairat Tasworn[1] Kongpan Areerak[1]* Thitiporn Machikowa[2] Subhalai Areerak[3]
[1]Power Electronic, Energy, Machines and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
[2]School of Crop Production Technology, Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology
[3]Department of Biology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University
*Corresponding author Email: kongpan@sut.ac.th
(Received: October 17, 2020; Accepted: February 17, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อให้สามารถควบคุมความเข้มแสงที่ให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ผลจากงานวิจัยพบว่าผลตอบสนองความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี มีผลที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบจากวิธีการแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลการทดสอบจริง นำมาใช้ยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการออกแบบที่นำเสนอในงานวิจัย

คำสำคัญ: การออกแบบตัวควบคุม ความเข้มแสง แอลอีดี การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

ABSTRACT

This research presents the controller design of LEDs intensity using the adaptive TABU search. The aim of the research is the control the LEDs intensity within the response as fast as possible. The mathematical model of the proposed system derived from the generalized state – space averaging technique was used as the objective function for the adaptive TABU search algorithm. The results show that the LEDs intensity response is better than the response using the controller designed by

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 27
ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564

the conventional method. Moreover, the simulation and experimental results were used to validate the efficiency of the proposed controller design algorithm.

Keyword: Controller Design, Intensity, LEDs, Tabu Search.

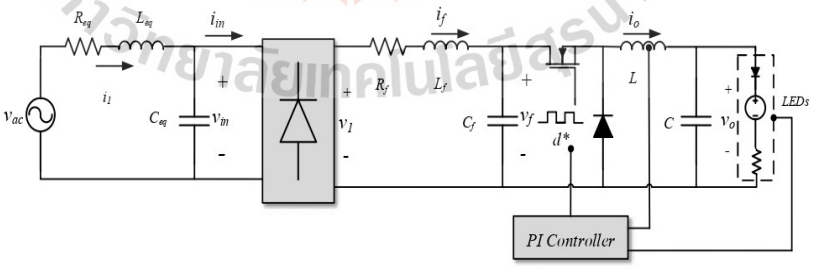
1. บทนำ

ไดโอดเปล่งแสง (Light-emitting diodes , LEDs) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากหลอดแอลอีดี มีขนาดเล็ก อายุการใช้งานยาวนาน ปล่อยความร้อนน้อย และสามารถปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้หลากหลายกว่าแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดเมทัลฮาไลด์ หลอดโซเดียมความดันไอสูง และ หลอดอินแคน –เดสเซนต์ เป็นต้น ดังนั้นในปัจจุบันหลอดแอลอีดี จึงถูกประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเทียมในการเพาะปลูกพืชชนิดต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามพืชแต่ละชนิดมีความต้องการแสงที่แตกต่างกัน ดังนั้นต้องเลือกใช้แสงเทียมที่มีความยาวคลื่น และความเข้มแสงที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิด เพื่อให้พืชสามารถสังเคราะห์แสง และเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับตามธรรมชาติ [1] เช่น การให้แสงแอลอีดี สีแดง:ฟ้า (3:1) ที่ความเข้มแสง 350 μmol/m^2/s เป็นเวลา 16 ชั่วโมง/วัน กับสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) ส่งผลให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีกว่าการเลี้ยงในแสงฟลูโอเรสเซนต์ [2] การใช้แสงแอลอีดี สีแดง (6500K) : สีฟ้า (3000 K) (1:1) ที่ความเข้มแสง 150 μmol/m^2/s ส่งผลให้ต้นพิทูเนียพันธุ์ Purple มีอัตราการสังเคราะห์แสง และการเจริญเติบโตดีกว่าต้นที่ปลูกด้วยแสงชนิดเดียวกันที่ความเข้มแสง 200 μmol/m^2/s [3] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้แสง LED ในอัตราส่วนต่างๆเพื่อกระตุ้นให้พืชผลิตสารที่ต้องการเพิ่มขึ้น เช่น การให้แสงแอลอีดี สีแดง:สีฟ้า (3:1) ที่ความเข้มแสง 215 μmol/m^2/s กับต้นโหระพา ส่งผลให้ต้นโหระพามีสรีรวิทยา และการเจริญเติบโต รวมถึงการสังเคราะห์ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatiles) ได้ดีกว่าการใช้แสงสีแดง:สีฟ้า ที่อัตราส่วน 1:2 1:1 2:1 และ 4:1 [4] การปลูกผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดและเรดโอ๊คจากหลอดไฟแอลอีดีที่ความเข้มแสง 298.98 μmol/m^2/s เปิดนาน 12 ชั่วโมง ให้การเจริญเติบโตดีกว่าของหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ [5] เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของแอลอีดี ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ด้วยวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ที่มีโหลดหลอดแอลอีดี ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร เมื่อนำมาออกแบบตัวควบคุมหรือวิเคราะห์เสถียรภาพ จะเกิดความยุ่งยากและซับซ้อน จึงต้องทำให้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป [6] เป็นวิธีที่ง่ายต่อการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง ดังนั้นงานวิจัยจึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ที่มีโหลดเป็นแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี [7-10] ซึ่งจะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมไปเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (adaptive tabu search: ATS) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS [11-12] นั้น จะส่งผลทำให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีสมรรถนะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตนั้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี การ

ตรวจวัดแสงทำได้โดยการใช้เครื่องมือตรวจวัดแสงมาตรฐานคือ เครื่องวัดแสง (Lux meter) มีหลายรุ่นและหลายบริษัทที่ผลิตขึ้นที่สามารถวัดความเข้มของการส่องสว่างได้ ตั้งแต่ 0-20,000 Lux และคุณลักษณะของเครื่องวัดแสงต้องเป็นไปตามมาตรฐาน CIE 1931 ของคณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยความส่องสว่าง (International Commission on Illumination) หรือ ISO/CIE 10527 หรือเทียบเท่า จากข้อกำหนดดังกล่าวทำให้เครื่องมือวัดแสงส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องมือวัดความส่องสว่างโดยใช้เทคนิคตรวจวัดความส่องสว่างของแสงโดยใช้โมดูล GY-302 (Ambient Light Sensor Module) เป็นตัวเซนเซอร์รับแสงภายในหัววัดเพื่อนำไปประมวลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ในการวัดและเปรียบเทียบความส่องสว่างหรือตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแสง โดยเครื่องวัดที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดความส่องสว่างจากแหล่งกำเนิดแสง โดยให้แสดงผลการวัดบนหน้าจอ LCD ขนาด 16x2 ตัวอักษร และสำหรับการประมวลผลจะทำการเก็บข้อมูลและประมวลผลโดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น MEGA2560 [13-14] ข้อดีของเครื่องมือที่ประดิษฐ์นั้นคือ ใช้งานง่าย สะดวก ปลอดภัย ง่ายต่อการบำรุงรักษา รวมถึงเป็นการนำเทคโนโลยีที่มีอยู่มาพัฒนาให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเป็นการลดการนำเข้าของสินค้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง การวัดความหนาแน่นของแสงในขณะที่พืชมีการสังเคราะห์แสงชั่วขณะเรียก Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) มีหน่วยเป็น μmol/m^2/s จึงทำให้งานวิจัยนี้ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างในหน่วย Lux ทางไฟฟ้า และในหน่วย μmol/m^2/s ทางพืช พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมความเข้มแสงบนคอมพิวเตอร์ และผลการตอบสนองจากชุดทดสอบด้วย

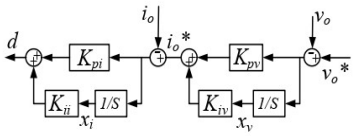
2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

วงจรที่ใช้ควบคุมความเข้มแสงของหลอดไฟแอลอีดีแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (v_{ac}) 220 V_{rms} สายส่งกำลังฝั่งเอซี (R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}) วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซี (R_f, L_f, C_f) ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ (L, C) ที่มีโหลดเป็นแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี และควบคุมความเข้มแสง (I_o) ที่ขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต และกระแสเอาต์พุต (i_o) ด้วยตัวควบคุมพีไอสองตัวเรียงกันแบบคาสเคดแสดงดังรูปที่ 2 โดยจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว



รูปที่ 1 วงจรควบคุมความเข้มแสงที่พิจารณา

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 29
ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564



รูปที่ 2 ตัวควบคุมพีไอสองตัวเรียงกันแบบคาสเคด

นำสัญญาณควบคุม d (Control signal) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Sawtooth compare signal) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอม (PWM) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง d^* และ d เป็นไปตามสมการที่ (1) ดังนี้

$$d^* = \frac{d}{A_r} \quad (1)$$

เมื่อ d สัญญาณการควบคุม
d^* ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์
A_r ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปของ d^* แสดงดังสมการที่ (2) และกำหนดให้ x_v และ x_i เป็นตัวแปรสถานะของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

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

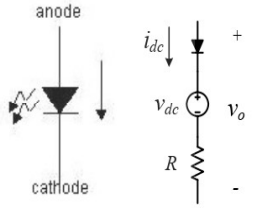
$$\dot{x_v} = -v_o + v_o^* \quad (3)$$

$$\dot{x_i} = -i_L - K_{pv}v_o + K_{iv}x_v + K_{pv}v_o^* \quad (4)$$

เมื่อ K_{pv}, K_{pi} ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี
K_{iv}, K_{ii} ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอ
x_v, x_i อัตราการเปลี่ยนแปลงวงรอบกระแสและแรงดันของวงจรแปรผันแบบบัคก์
v_o แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปรผันแบบบัคก์
v_o^* แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยหลอดแอลอีดีมีสัญลักษณ์และแบบจำลองเชิงเส้น แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัญลักษณ์และแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี

จากแบบจำลองเชิงเส้นของแอลอีดี สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (5)

$$v_o = v_{dc} + i_{dc}R \quad (5)$$

เมื่อ v_{dc} แรงดันไฟฟ้าของหลอดแอลอีดี
i_{dc} กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอดแอลอีดี
R ตัวต้านทานของหลอดแอลอีดี

จากการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป switched model มีตัวแปรสถานะ 8 ตัว คือ $i_1, v_{in}, i_f, v_f, i_o, v_o, x_v$ และ x_i พิจารณาเฉพาะส่วนประกอบมูลฐานในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และละทิ้งค่าแรงดันกระเพื่อมในฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทำงานในโหมดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำต่อเนื่อง (CCM) ดังนั้นการกำหนดตัวแปรสเตทของแบบจำลองจึงเหลือเพียง 10 ตัว ดังนี้

เมื่อ $k = 1$ $\quad i_1 = x_1 + jx_2$
$\quad v_{in} = x_3 + jx_4$

เมื่อ $k = 0$ $i_f = x_5$

$v_f = x_6$

$i_o = x_7$

$v_o = x_8$

$x_v = x_9$

$x_i = x_{10}$

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}$ คือ ตัวแปรสถานะของแบบจำลอง GSSA สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรูปของแบบจำลองตัวแปรสถานะแสดงดังสมการที่ (6)

$$\dot{x}_1 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_1 + \omega x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_3$$

$$\dot{x}_2 = -\omega x_1 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}x_2 - \frac{1}{L_{eq}}x_4 - \frac{1}{2L_{eq}}v_m$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{C_{eq}}x_1 + \omega x_4$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{C_{eq}}x_2 - \omega x_3 + \frac{2}{\pi C_{eq}}x_5$$

$$\dot{x}_5 = -\frac{4}{\pi L_{eq}}x_4 - \frac{R_f}{L_f}x_5 - \frac{1}{L_f}x_6$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C_f}x_5 + \frac{K_{pi}}{A_r C_f}x_7 x_7 + \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_r C_f}x_7 x_8 - \frac{K_{iv}K_{pi}}{A_r C_f}x_7 x_9 - \frac{K_{ii}}{A_r C_f}x_7 x_{10} - \frac{K_{pv}K_{pi}v_o^*}{A_r C_f}x_7$$

$$\dot{x}_7 = -\frac{K_{pi}}{A_r L}x_6 x_7 - \frac{K_{pv}K_{pi}}{A_r L}x_6 x_8 + \frac{K_{iv}K_{pi}}{A_r L}x_6 x_9 + \frac{K_{ii}}{A_r L}x_6 x_{10} + \frac{K_{pv}K_{pi}v_o^*}{A_r L} - \frac{1}{L}x_8$$

$$\dot{x}_8 = \frac{1}{C}x_7 - \frac{1}{RC}x_8 + \frac{1}{RC}v_{dc}$$

$$\dot{x}_9 = -x_8 + v_o^*$$

$$\dot{x}_{10} = -x_7 - K_{pv}x_8 + K_{iv}x_9 + K_{pv}v_o^* \qquad (6)$$

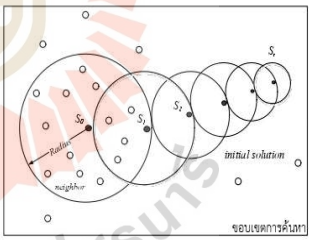
เมื่อ v_m ค่าแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่าย

ω ค่าความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

4. การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ATS)

4.1 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู (Tabu Search: TS) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น อัลกอริทึมนี้ได้พัฒนาขึ้นโดย กองพัน อารีรักษ์ และสราวุฒิ สุจิตจร ในปี พ.ศ. 2545 (K-N. Areerak and S. Sujitjorn, 2002) โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบูธรรมดา คือ การเดินย้อนรอย (Back tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive radius) กลไกการเดินย้อนรอยนั้นใช้แก้ปัญหาสาหรับการติดอยู่ในคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimum) สำหรับกลไกการปรับรัศมีการค้นหา จะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด อัลกอริทึมการค้นหาแบบ ATS ถูกสร้างขึ้นในรูปแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีหลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 4 การค้นหาคำตอบด้วย ATS

จากรูปที่ 4 สามารถเขียนเป็นขั้นตอนของอัลกอริทึมการค้นหาได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 โปรแกรมจะทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น (Initial solution) ซึ่งในกรณีนี้คือ K_{pv}, K_{iv}, K_{pi} และ K_{ii} ตามจำนวนที่กำหนดไว้ภายในขอบเขตค้นหา เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดมาเป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0) โดยที่การประเมินคำตอบว่าดีหรือไม่นั้นพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (W) ซึ่งรายละเอียดของการประเมินค่า

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุมนี้จะแสดงในหัวข้อที่ 4.2 สำหรับกระบวนการค้นหาจะกำหนดให้ S_{best} คือ คำตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาในทุกรอบที่ผ่านมา ดังนั้นในรอบแรกนี้จึงกำหนดให้ S_{best} มีค่าเท่ากับ S_0

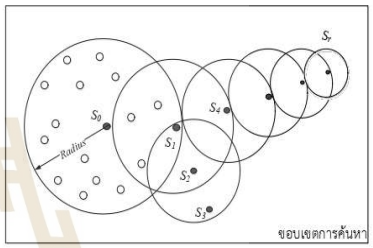
ขั้นตอนที่ 2 นำ S_0 มาใช้เป็นตำแหน่งศูนย์กลางเพื่อใช้สุ่มคำตอบในบริเวณใกล้เคียง (Neighbour) ตามจำนวนที่กำหนดไว้ โดยการสุ่มจะอยู่ภายในรัศมีการค้นหา (Radius) จากนั้นนำคำตอบที่ดีที่สุดของการสุ่มในบริเวณใกล้เคียง (S_1) มาเปรียบเทียบกับ S_{best} โดยประเมินจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตามเงื่อนไขคือ ถ้า S_1 มีผลการประเมินที่ดีกว่า S_{best} ให้ $S_{best}=S_1$ มิเช่นนั้นแล้ว ให้ $S_{best}=S_{best}$ นอกจากนี้ยังมีการปรับลดรัศมีการค้นหาหากพบคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งการปรับลดรัศมีเป็นไปตามสมการที่ (7)

$$Radius(new)=\frac{Radius(old)}{DF} \tag{7}$$

เมื่อ DF คือ อัตราปรับลดรัศมี

ขั้นตอนที่ 3 ดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 โดยเปลี่ยนจาก S_0 เป็น S_1 และดำเนินการตามขั้นตอนที่3 โดยเปลี่ยนจาก S_1 เป็น S_2

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการซ้ำ ตามขั้นตอนที่ 3 โดยมีการเปลี่ยนแปลงจาก S_k เป็น S_{k+1} และทำซ้ำไปจนครบจำนวนรอบการค้นหา (Round) ที่กำหนดไว้ ซึ่งคำตอบในรอบสุดท้ายกำหนดให้เป็น S_f และในกรณีที่การค้นหาไม่พบคำตอบที่ดีขึ้น กลไกการเดินย้อนรอยจะถูกนำมาใช้ โดยมีกระบวนการ คือ หากการค้นหาคำตอบพบว่ามีการประเมินค่าที่ทำให้ $S_{best}=S_{best}$ ติดต่อกันครบตามจำนวน b ที่กำหนดไว้ ให้ S_k มีค่าเท่ากับ S_{k-b} ตัวอย่างการเดินย้อนรอยแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อกำหนดให้ b เท่ากับ 2 และพบว่าคำตอบ S_1 มีค่า W เท่ากับ 0.3 ซึ่งเป็นตำแหน่งของ S_{best} ในปัจจุบัน จากนั้นค้นหาคำตอบ S_2 ได้ค่า W เท่ากับ 0.4 ดังนั้นคำตอบ S_1 ยังคงมีผลการประเมินที่ดีกว่า S_2 จึงกำหนดให้ $S_{best}=S_{best}$ จากนั้นดำเนินการค้นหาคำตอบ S_3 ได้ค่า W เท่ากับ 0.35 ซึ่งยังคงเป็นคำตอบที่แย่กว่า S_1 จึงกำหนดให้ $S_{best}=S_{best}$ เป็นครั้งที่ 2 ติดต่อกัน ซึ่งครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ กลไกการเดินย้อนรอยจึงเริ่มทำงาน โดยปรับให้คำตอบ S_3 กลับไปอยู่ที่ตำแหน่งของ S_1 เพื่อหาคำตอบในทิศทางเดินใหม่



รูปที่ 5 การเดินย้อนรอยขณะการค้นหาคำตอบด้วย ATS

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อครบจำนวนรอบการค้นหา คำตอบที่ดีที่สุด หรือ S_{best} จะถูกส่งมาเป็นคำตอบของกระบวนการค้นหา ซึ่งถือว่าสิ้นสุดกระบวนการ

นอกจากนี้อัลกอริทึมของ ATS จะมีพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาที่เหมาะสมกับระบบแต่ละชนิด ถ้าเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบยิ่งขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

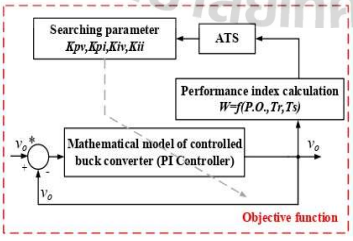
- Initial number neighbour คือ จำนวนการสุ่มคำตอบเริ่มต้นในการค้นหา โดยอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้
- Round คือ จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ
- Number neighbour คือ จำนวนการสุ่มคำตอบในแต่ละรอบการค้นหา โดยการสุ่มจะอยู่ภายในรัศมีการค้นหา
- Radius คือ รัศมีการค้นหาคำตอบรอบจุดคำตอบเดิม โดยมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของขอบเขตการค้นหา
- DF คือ อัตราปรับลดรัศมีเมื่อพบคำตอบตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยที่ $DF > 1$

4.2 วิธีการค้นหาแบบดั้งเดิม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของลูปกระแสไฟฟ้าและลูปแรงดันไฟฟ้าที่ต่อเรียงกันแบบ คาสเคด (K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}) ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เป็นวิธีที่ขั้นตอนการออกแบบง่ายไม่ซับซ้อนและมีการผลตอบสนองที่ดี ซึ่งสมการของตัวควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบและค่าทางสมรรถนะของตัวควบคุม คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio: ζ) และ ความกว้างแถบ (Bandwidth: ω_n) โดยที่ ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า และ ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า กำหนดให้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ ζ = 0.8, ω_{nv} = 175 rad/s และ ω_{ni} = 3500 rad/s ดังนั้นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ จะมีค่า K_{pv} = 0.0116 , K_{iv} = 6.738 , K_{pi} =4.21 และ K_{ii} = 9208.6

4.3 วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยด้วยการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เป็นการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำให้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตมีสมรรถนะดีที่สุด จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไว้สำหรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุม การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัวสามารถดำเนินการตามแผนภาพบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว

จากรูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว มีการออกแบบการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}) จากขอบเขตที่กำหนด ซึ่งในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ในแต่ละรอบนั้น ระบบจะตรวจสอบค่า W และจะทำการค้นหาจนกว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}, K_{ii}) ที่ทำให้ผลการตอบสนองดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ค่า W มีค่าน้อยที่สุด

$$W(T_{R_{p.u.}}, T_{S_{p.u.}}, P.O._{p.u.}) = \sigma T_R + \alpha T_S + \gamma P.O. \quad (8)$$

และ σ, α, γ มีความสัมพันธ์คือ

$$\sigma + \alpha + \gamma = 1 \quad (9)$$

เมื่อ $P.O.$ คือ การพุ่งเกินชั่วครู่ (overshoot)

T_R คือ ช่วงเวลาขึ้น (rise time)

T_S คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time)

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

งานวิจัยนี้กำหนดค่าของ σ, α และ γ ไว้ที่ 0.34 0.33 และ 0.33 ตามลำดับ วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะพยายามค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้ค่าวัตถุฟังก์ชัน W น้อยที่สุด

สำหรับขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ ได้กำหนดจากค่าแบนด์วิธการทำงานของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปควบคุมกระแส ที่อยู่ระหว่างค่าแบนด์วิธจากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมดังนี้ ω_{nv} = 150 - 400 rad/s และ ω_{ni} = 1500 - 4500 rad/s ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ค่า ω_{ni} มีค่ามากกว่า ω_{nv} ประมาณ 10 เท่า จะได้ขอบเขตล่างและขอบเขตบนของพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 1

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564

ตารางที่ 1 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [ω_{m} = 150-400 rad/s และ ω_{m} = 1500-4500 rad/s]

พารามิเตอร์	ขอบเขต	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
K_{pv}	0.0028	0.0908
K_{iv}	4.95	35.2
K_{pi}	1.8	5.143
K_{ii}	1691.73	14062.5

การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่า คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธีการค้นหาตาบูเชิงปรับตัวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การกำหนดพารามิเตอร์มีดังนี้

จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ
รัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5
ตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

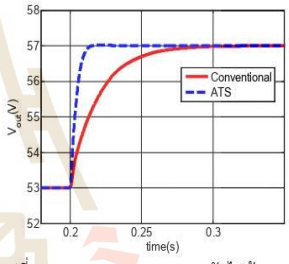
จากการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวภายใต้ขั้นตอนการออกแบบข้างต้น นำไปออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS

พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	วิธีการออกแบบ	
	วิธีแบบดั้งเดิม	วิธี ATS
K_{pv}	0.0116	0.0447
K_{iv}	6.738	28.1829
K_{pi}	4.21	4.4754
K_{ii}	9208.6	1908.1
W	0.0655	0.007391

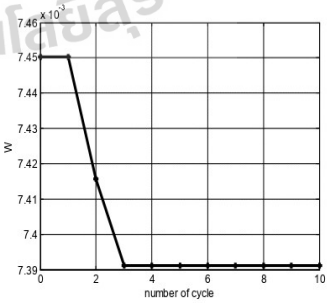
5. ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งทำการเปรียบเทียบการออกแบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และ ATS โดยใช้ค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 2 ในการจำลองสถานการณ์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด (v_o^*) จาก จาก 53 V ไปเป็น 57 V ที่เวลาเท่ากับ 0.2 วินาที ตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุมสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จากรูปที่ 7 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ได้อย่างถูกต้อง เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของ ATS ที่ผ่านการทดสอบมาออกแบบตัวควบคุมพีไอ พบว่าค่า W มีการลู่เข้าดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การลู่เข้าของค่า W ด้วยวิธี ATS

6. ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์และผลการทดสอบ

6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (Lux) กับค่า PPFD (μmol/m^2/s)

การวัดค่าความเข้มแสงทางพืชในขณะที่พืชทำการสังเคราะห์แสงมีหน่วยเป็น μmol/m^2/s แต่เซนเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบคือโมดูล GY-302 ที่มีหน่วยเป็น Lux จึงจำเป็นต้องมีการแปลงหน่วย ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงทางไฟฟ้าที่มีหน่วยเป็น Lux กับหน่วย μmol/m^2/s ทางพืช จะดำเนินการผ่านการทดสอบโดยอาศัยเครื่องมือวัดวัดค่าทั้งสอง ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 3

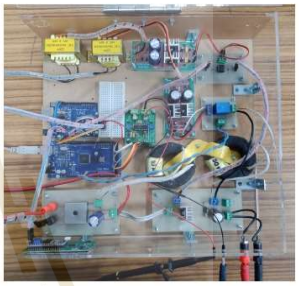
ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (Lux) กับค่า PPFD (μmol/m^2/s)

μmol/m^2/s	Lux
80	4380
100	5500
120	6670
140	7640
160	8790

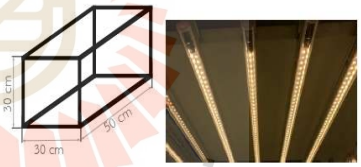
นำค่าที่ได้จากการทดสอบ (ตารางที่ 2) ไปหาสมการความสัมพันธ์ พบว่ามีค่าความสัมพันธ์คือ 1 Lux มีค่าเท่ากับ 0.018 μmol/m^2/s หรือ 1 μmol/m^2/s มีค่าเท่ากับ 55.56 Lux

6.2 การสร้างชุดทดสอบ

การทดสอบการเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมความเข้มแสงเอาต์พุต ที่มีความสัมพันธ์กันกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ของระบบดังรูปที่ 1 ซึ่งหลังจากการออกแบบรวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบ จึงได้ชุดทดสอบจริงที่ใช้ในงานวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยการทดสอบสำหรับควบคุมความเข้มแสงเอาต์พุตของวงจร ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO รุ่น MEGA 2560 ในการประมวลผล และใช้โมดูล GY-302 เป็นเซนเซอร์วัดความเข้มแสงซึ่งมีหน่วยเป็น Lux ทำการแปลงให้เป็นหน่วยของ μmol/m^2/s โดยคูณตัวปรับคูณเท่ากับ 0.018 โดยโครงสร้างของชุดควบคุมความเข้มแสงหลอดแอลอีดีนี้เป็นชั้นวางของกว้าง 50 ซม.x 30 ซม. สูง 30 ซม. สามารถประยุกต์วางต่อกันเป็นชั้นๆได้ ชุดไฟส่องสว่าง ใช้หลอดแอลอีดีแบบเส้น (LED STRIP) ขนาดกำลังไฟฟ้า 12 วัตต์ที่ต่อเรียงกันแบบขนาน 3 เส้น และอนุกรมกัน 5 ชุด ดังรูปที่ 10 จะได้ค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ 180 μmol/m^2/s



รูปที่ 9 ชุดทดสอบตัวควบคุมความเข้มแสง

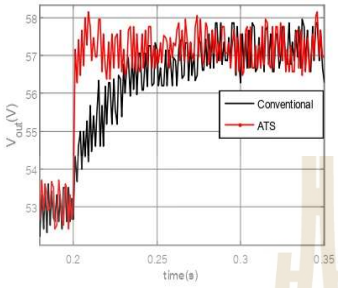


รูปที่ 10 แบบโครงสร้างกล่องและการออกแบบกล่องปลูกผักที่ใช้ในงานวิจัย

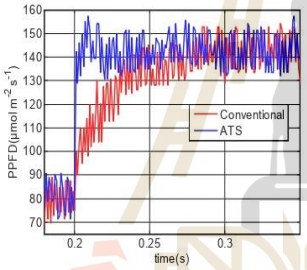
6.3 ผลการทดสอบจากชุดทดสอบ

ทำการทดสอบควบคุมความเข้มแสงเอาต์พุตของหลอดแอลอีดี โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจาก 80 μmol/m^2/s ไปเป็น 140 μmol/m^2/s ที่เวลา 0.2 วินาที โดยเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธี ATS เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุม ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตตกคร่อมแอลอีดี รวมถึงผลการตอบสนองของความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564



รูปที่ 11 ผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตกคร่อมหลอดแอลอีดีของชุดทดสอบ



รูปที่ 12 ผลการตอบสนองความเข้มแสงของหลอดแอลอีดีของชุดทดสอบ

ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบดังรูปที่ 11 และ 12 มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งผลเปรียบเทียบแสดงให้ไว้แล้ว เห็นว่าชุดทดสอบที่อาศัยการออกแบบด้วย ATS ให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ทั้งแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมแอลอีดี และความเข้มแสงเอาต์พุต

7. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี โดยไฟเส้นแอลอีดีแบบ 12 V ที่มีความเข้มแสงสูงสุดของชุดทดสอบมีค่า 180 μmol/m^2/s เพื่อให้ได้ค่าความเข้มแสงที่ทำให้ได้ผลตอบสนองทางพลวัตที่เร็วที่สุด ผ่านการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบตัวควบคุม ยืนยันผลการตอบสนองของความเข้มแสงด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลจากชุดทดสอบจริง ที่ควบคุมความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO รุ่น MEGA 2560 เป็นตัวประมวลผลและใช้โมดูล GY-302 เป็นเซนเซอร์วัดความเข้มแสง แสดงให้เห็นว่าการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม งานวิจัยนี้สามารถใช้กับระบบได้จริง อีกทั้งยังควบคุมค่าความเข้มแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

[1] G.D. Massa, H.-H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Mitchell, “Plant productivity in response to LED lighting.” *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 43 (7), pp. 1951–1956, Dec. 2008.

[2] S. Jaturongloumlart, J. Promya and J. Varith, “Modeling of Spirulina Growth Rate with LED Illumination and Applications,” *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 24 (1), pp. 142-151, Jan-Apl. 2017.

[3] T. Jamaree, P. Kanjanaprachot, S. Jaturongloumlart and S. Sakornvasee, “The effect of LED light on growth of Petunia hybrida Vilm ‘Purple’ under a semi-closed

plant production system," *The National Academic Conference*, Vol. 3, Mar. 2017, pp. 184-191.

[4] G. Pennisi, S. Blasioli, A. Cellini, L. Maia, A. Crepaldi, I. Braschi, F. Spinelli, S. Nicola, J. A. Fernandez, C. Stanghellini, L.F.M. Marcelis, F. Orsini, and G. Gianquinto, "Unraveling the Role of Red:Blue LED Lights on Resource Use Efficiency and Nutritional Properties of Indoor Grown Sweet Basil." *Front. Plant Sci.*, No. 10, Vol. 305, pp. 1-14, Mar. 2019.

[5] P. Petchthai and T. Thongket, "Effect of Light Intensity and Light-Exposure Duration on Growth and Quality of Lettuce," *Songklanakarin Journal of Plant Science*, Vol. 4, No. 3, Jul-Sep. 2017.

[6] S. Udomsuk, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "Mathematical Model of a Single-Phase Uncontrolled Rectifier Feeding a Buck Converter" *European Journal of Scientific Research*, vol. 50, no. 1, pp. 89-98, Feb. 2011.

[7] G. Li, S. Yu and J. Shi, "Dynamic response analysis of buck driver for LED based on second-order model," *IET Journal*, No. 24, Vol. 52, pp. 2005–2007, Nov. 2016.

[8] R. Lin, "Modeling and Compensator Design of LED Driver Systems," in *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1-6*, Nov. 2017.

[9] M. Leng and G. Zhou, "Stability Analysis for Peak Current-Mode Controlled Buck LED Driver Based on Discrete-Time Modeling," *IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS*, Vol. 6, pp. 1567-1580, Sep. 2018.

[10] M. Fernando Menke, Á. Raniere Seidelmand R. Varella Tambara, "LLC LED Driver Small-Signal Modeling and Digital Control Design for Active Ripple Compensation," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 66, pp. 387 – 396, Jan. 2019.

[11] T. Sopapirm, K-N. Areerak, K-L. Areerak, and A. Srikaew, "The Application of Adaptive Tabu Search Algorithm and Averaging Model to the Optimal Controller Design of Buck Converters", *World Academy of Science Engineering and Technology*, issue 60, pp. 477-483, Dec. 2011.

[12] S. Chonsatidjamroen, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "The Optimal Cascade PI Controller Design of Buck Converters," in *2012 IEEE 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2012, *pp. 1-4.*

[13] N. Sirithong, S. Katathikarnkul and S. Khongpugdee, "Design and Development Lux Meter," *Thaksin University Journal*, No. 17, vol. 3 (special), pp. 44-50, Dec. 2014.

[14] A. Leelaratsamee and S. Detchjarat, "A Smart Lighting Control System Using DALI Protocol," *Journal of Energy Research*, No. 8, Vol. 2, pp. 45-53, Feb. 2011.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวหทัยรัตน์ ทัศน์วรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2560 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 5 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ ปฏิบัติการระบบควบคุม และปฏิบัติการโปรแกรมแม็ตแล็บ โดยมีความสนใจในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งจากการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีผลงานตีพิมพ์ปรากฏดังภาคผนวก ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี