การสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

นางสาวสุชาวดี จีนสุทธิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

THE IMPLEMENTATION OF HEAT CONTROL SYSTEMS FOR SMALL FUEL ETHANOL PRODUCTION PLANTS

Suchawadi Chinsut

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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 2019

การสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

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

สุชาวดี จีนสุทธิ์ : การสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก (THE IMPLEMENTATION OF HEAT CONTROL SYSTEMS FOR SMALL FUEL ETHANOL PRODUCTION PLANTS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์, 155 หน้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นำเสนอการสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีชื่อเรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองอุณหภูมิเอาต์พุตที่ดีที่สุด ซึ่งในแต่ละรอบของการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว อัลกอริทึมจะทำการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งลูปอุณหภูมิและลูปกระแสเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของค่าอุณหภูมิที่มีสมรรถนะดีที่สุด โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีการเพิ่มเงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุม ผ่านการจำกัดสัญญาณควบคุมที่สามารถนำไปสร้างจริงได้ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ในการนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากการคำนวณหาผลตอบสนองผ่านแบบจำลองดังกล่าวใช้เวลาในการคำนวณที่รวดเร็วกว่าการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองสวิตซ์ของโปรแกรม MATLAB โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งผลการออกแบบตัวควบคุมที่ได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะดำเนินการโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม MATLAB รวมไปถึงการสร้างชุดทดสอบจริงของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก เพื่อเป็นการยืนยันความสมจริงและแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะการควบคุมอุณหภูมิความร้อนที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวมีสมรรถนะที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการดั้งเดิม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา สุชาวดี จีนสุทธิ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กองพัน อารีรักษ์

SUCHAWADI CHINSUT : THE IMPLEMENTATION OF HEAT CONTROL SYSTEMS FOR SMALL FUEL ETHANOL PRODUCTION PLANTS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D. 155 PP.

HEAT CONTROL/ AC-DC-AC POWER CONVERSION CIRCUIT WITH CONTROLLER/ GSSA METHOD/ ADAPTIVE TABU SEARCH METHOD

This research presents the implementation of heat control systems for small fuel ethanol production plants using the artificial intelligence technique called the adaptive tabu search method. The aim of the proposed design method is to achieve the best output performance. The algorithm searches the controller parameters of both temperature and current loops for the best output temperature response performance. The ability for implementation were added via the limitation of control signal to confirm that the resetting parameters can be implemented. Designing a controller using the adaptive tabu search method requires a mathematical model of the AC-DC-AC power converter circuit used as a part of the objective function because the computation of time of the system simulation much faster than the switch model. The mathematical model of power system was derived by using the generalized state-space averaging approach to obtain a time-invariant model. The results obtained from the thesis research were validated by using the simulation via of MATLAB program including the experiment. It shows that the best output performance can be achieved by using the proposed method compared with the conventional approach.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature สุชาวดี สินสุทธิ์

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ พร้อมทั้งข้อคิดและแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งยังช่วยสละเวลาเพื่อตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนกระทั่งมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีสำหรับการดำเนินชีวิตในหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาต บุญทาวัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร ที่ช่วยให้คำปรึกษา และคำแนะนำในด้านการปฏิบัติงาน อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัย

คณาจารย์ เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน อีกทั้งข้อคิดในการดำเนินชีวิตอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ด้านการปฏิบัติงาน และให้กำลังใจในการศึกษาค้นคว้าตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนในการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเสมอมา

สุชาวดี จีนสุทธิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....ข

กิตติกรรมประกาศ.....ค

สารบัญ.....ง

สารบัญตาราง.....ซ

สารบัญรูป.....ฌ

บทที่

1. บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย.....3

1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....3

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....5

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....5

2. ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....7

2.1 บทนำ.....7

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก.....7

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง.....10

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์.....12

2.5 สรุป.....15

3. แบบจำลองพลวัตของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก.....16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1 บทนำ……...16

3.2 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก……...……...16

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่ไม่มีตัวควบคุม……...……..…22

3.3.1 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลัง……....22

3.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์……..…....32

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต……..…..…….35

3.4.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบ……..….35

3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผัน AC-DC-AC……....40

3.4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์……..….44

3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ……...……..…47

3.5.1 การพิสูจน์หาความสัมพันธ์และการออกแบบตัวควบคุมพีไอ……..……47

3.5.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบ……..……54

3.5.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์……..….57

3.6 สรุป……..……..59

4. การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์……61

4.1 บทนำ……..…...61

4.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC และระบบควบคุมป้อนกลับ……....61

4.3 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว……..63

4.3.1 การค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ATS)……..63

4.3.2 กระบวนการออกแบบตัวควบคุม……...……..67

4.3.3 ผลการออกแบบตัวควบคุมและการอภิปรายผล……..……..…72

4.4 สรุป……...……77

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5. การสร้างชุดทดสอบ……78

5.1 บทนำ……78

5.2 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์……80

5.2.1 ภาพรวมชุดทดสอบ……80

5.2.2 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล……83

5.3 วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน……84

5.3.1 ภาพรวมชุดทดสอบ……84

5.3.2 วงจรการควบคุม……87

5.3.3 วงจรจุดชนวนสวิตช์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม……93

5.3.4 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล……102

5.4 อุปกรณ์ตรวจวัด……104

5.4.1 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแส……104

5.4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ……107

5.5 การเปรียบเทียบผลทดสอบตัวควบคุมสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก……110

5.6 สรุป……112

6. สรุปและข้อเสนอแนะ……114

6.1 สรุป……114

6.2 ข้อเสนอแนะ……115

รายการอ้างอิง……117

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. รายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบที่จำลองสถานการณ์ด้วย SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB……120

ภาคผนวก ข. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อหาผลเฉลยของแบบจำลอง ที่ทำงานบนโปรแกรม MATLAB……123

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. โปรแกรมการสร้างสัญญาณไซน์สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....129
ภาคผนวก ง. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....140
ประวัติผู้เขียน.....155

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก……...8

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง……..….10

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์……...13

3.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอลบริสุทธิ์……18

3.2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา……33

3.3 พารามิเตอร์การออกแบบตัวควบคุมพีไอ……43

3.4 พารามิเตอร์สำหรับระบบที่มีตัวควบคุม……...44

3.5 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ โดยวิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ……..51

3.6 พารามิเตอร์สำหรับระบบที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ……57

4.1 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น……...68

4.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง……69

4.3 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น……69

4.4 ผลการทดสอบค่าตัวประกอบการปรับลดรัศมี……70

4.5 ผลการทดสอบจำนวนรอบการค้นหาคำตอบ……70

4.6 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม……73

5.1 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์……104

5.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส……106

5.3 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ RTD PT100……...109

5.4 พารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอ……...111

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

3.1 เครื่องต้นแบบการกลั่นลำดับส่วนแบบต่อเนื่องโดยใช้การให้ความร้อน…..……19

3.2 แผนภาพกระบวนการของระบบการกลั่นเอทานอลแบบต่อเนื่อง ……..……19

3.3 หม้อต้มสำหรับให้ความร้อนแก่ระบบ……..20

3.4 คอลัมน์……..……...21

3.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่ไม่มีการควบคุม……...……22

3.6 การมอดูเลตของสัญญาณอ้างอิงไซน์กับสัญญาณพาห์สามเหลี่ยม…..…….……24

3.7 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC…..…….……27

3.8 ผลการตอบสนองของกระแส i_1 และแรงดัน v_1 ……..……..……33

3.9 ผลการตอบสนองของกระแส i_2 และแรงดัน v_2 ……..……34

3.10 ผลการตอบสนองของกระแส i_o และแรงดัน v_o ……...…..……..34

3.11 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม……...…..…….……..36

3.12 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอ……..……....37

3.13 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต……...……..40

3.14 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต……..……..…..42

3.15 ผลการตอบสนอง i_1 และ v_1 ……...……...45

3.16 ผลการตอบสนอง i_2 และ v_2 ……...……...46

3.17 ผลการตอบสนอง i_o และ v_o ……....…...46

3.18 วงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ……...…….....47

3.19 ผลการทดสอบความสัมพันธ์อุณหภูมิกับแรงดัน ณ เวลาต่างๆ……..……..48

3.20 ผลของสมการเชิงเส้นสำหรับความสัมพันธ์อุณหภูมิกับแรงดัน……..……...……..49

3.21 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมพีไอสำหรับควบคุมอุณหภูมิ……..……....50

3.22 การตอบสนองของระบบโดยวิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ…….....50

3.23 ผลการตอบสนองของระบบ……...……..……51

3.24 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิ……...……..……52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.25 พลานต์ของตัวควบคุมอุณหภูมิ……...……...53

3.26 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนแปลง T_o^* จาก 50 °C ไปเป็น 70 °C ที่เวลา 2 วินาที……...……58

3.27 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนแปลง T_o^* จาก 70 °C ไปเป็น 90 °C ที่เวลา 2 วินาที……...……58

4.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุมพีไอ……...……...62

4.2 สุ่มเลือกค่าคำตอบเริ่มต้น (S_0)……..……64

4.3 สุ่มเลือกค่าคำตอบรอบข้าง...……...……64

4.4 สุ่มเลือกค่าคำตอบรอบข้างในรอบการค้นหาใหม่...……65

4.5 กลไกการเดินย้อนรอยค้นหาคำตอบ……..……..……66

4.6 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS ……...……67

4.7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดสำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม ในแต่ละรอบ.....73

4.8 สัญญาณควบคุม m ที่ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $70^\circ C$ ไปเป็น $85^\circ C$ ……..…...74

4.9 สัญญาณควบคุม m ที่ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $85^\circ C$ ไปเป็น $100^\circ C$ ……..……..75

4.10 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $70^\circ C$ ไปเป็น $85^\circ C$ 76

4.11 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $85^\circ C$ ไปเป็น $100^\circ C$ 76

5.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์……..79

5.2 ภาพรวมของชุดทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์……...……..……..……79

5.3 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน…….…….....80

5.4 โครงสร้างวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน…….…….....80

5.5 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์……...……...……..……..……81

5.6 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับใช้ในวงจรกรอง……...……..……82

5.7 ตัวเก็บประจุสำหรับใช้ในวงจรกรอง……...……..……82

5.8 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส……...83

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.9 ชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน……..…….....84

5.10 โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน…..…….....84

5.11 มอดูล IGBT ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์……..……...…....85

5.12 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์……...…….....86

5.13 ตัวเก็บประจุสำหรับใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์……...……...…....86

5.14 โหลดขดลวดความร้อน……...…….....87

5.15 ชุดบอร์ด Atmega2560……...……...…....88

5.16 ไอซีเบอร์ MCP4922……...……...……...…....90

5.17 Module ET-MINI MCP4922 DAC……..…….....…...…....91

5.18 สัญญาณเอาต์พุต Module ET-MINI MCP4922 DAC……..……....92

5.19 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม……...……...……...……...…....93

5.20 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 5 kHz…….....94

5.21 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส……...……...……...……...…....95

5.22 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส……..96

5.23 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ……...……...……...……...…....96

5.24 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ……....97

5.25 วงจรยกระดับสัญญาณ……...……...……...……...…....97

5.26 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรยกระดับสัญญาณ……...……..98

5.27 โครงสร้าง IC 7404 เบอร์ SD74LS04P……99

5.28 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกลับเฟสสัญญาณ……...……..99

5.29 โครงสร้างไอซีเบอร์ PC923L……...……..100

5.30 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ
ที่มีค่า m=0.8……..……..101

5.31 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ
ที่มีค่า m=0.6……..……..101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.32 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ
ที่มีค่า m=0.4……..……..101
5.33 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์……...……..102
5.34 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่มีค่า m = 0.8……..……..103
5.35 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่มีค่า m = 0.6……..……..103
5.36 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่มีค่า m = 0.4……..……..103
5.37 โมดูลตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ ACS712-20……..……...……105
5.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{P,test}$ และ $V_{i,out}$ ของโมดูลวัดกระแส……..…...…..106
5.39 เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ RTD PT100……..……..……..…107
5.40 Temperature Transmitter……..……..……..……..…108
5.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_{sensor} และ $V_{T,out}$ ของโมดูลวัดกระแส…...……..109
5.42 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล…...……..111
ก.1 ชุดบล็อกการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC
กรณีไม่มีตัวควบคุม……121
ก.2 ชุดบล็อกการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC
กรณีมีตัวควบคุมอุณหภูมิ……..……122

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสภาวะของราคาน้ำมันปิโตรเลียมมีความผันผวนอย่างมาก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการสำรวจแหล่งน้ำมันดิบยังพบว่ามีปริมาณที่ลดลงและมีแนวโน้มที่จะหมดไป สำหรับน้ำมันดิบในประเทศไทยนั้น มีในแหล่งต่าง ๆ กระจายอยู่ทั่วประเทศ แต่ในปัจจุบันประเทศไทยยังต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นอัตราส่วนที่สูง เนื่องจากกำลังผลิตในประเทศยังต่ำกว่าปริมาณการใช้อยู่มาก อีกทั้งการขุดเจาะและผลิตน้ำมันปิโตรเลียม ก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมและใช้เงินทุนสูง น้ำมันดิบเป็นสิ่งที่จะต้องใช้เวลานานในการเกิด อีกทั้งความต้องการในการบริโภคน้ำมันของโลกยังสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงได้รับความนิยมและเป็นที่สนใจอย่างมาก ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวทำให้มีแนวคิดที่จะผลิตเชื้อเพลิงที่สามารถใช้น้ำมันผสมเอทานอลให้ได้ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น เช่นน้ำมัน E10, E20, และ E85 เป็นต้น ขึ้นมาทดแทน หรือแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์จากสิ่งที่มีอยู่แปรรูปเป็นเชื้อเพลิง จากงานวิจัย พบว่าเอทานอลสามารถผลิตจากวัตถุดิบทางเกษตรได้หลากหลายชนิด เช่นกากน้ำตาลอ้อยและมันสำปะหลัง และจากการทดสอบเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถใช้งานได้จริงกับเครื่องยนต์ แต่ปัญหาของการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลคือ การที่ไม่สามารถผลิตได้ในระดับชุมชนหรือโรงงานขนาดเล็กและขนาดกลางได้ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตทางด้านเครื่องจักรสูง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะศึกษาระบบของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องต้นแบบที่ถูกผลิตและพัฒนาขึ้น เพื่อทำการศึกษาและค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการผลิตเอทานอล พบว่ามีระบบทำความร้อนที่ให้ความร้อนแก่น้ำหมัก ที่เกิดจากการหมักวัตถุดิบทางการเกษตร และนำไปผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ ทำให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์ ที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบทำความร้อนเป็นส่วนสำคัญในการกลั่นเอทานอล ถ้าหากมีประสิทธิภาพการทำงานต่ำ หรือมีข้อผิดพลาดของระบบควบคุม อาจส่งผลกระทบต่อการกลั่นเอทานอลคือ ทำให้กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลดำเนินการได้ช้าลงและส่งผลให้อุณหภูมิการกลายเป็นไอของเอทานอลเมื่อนำไปควบแน่นที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง จะได้ของเหลวที่มีความเข้มข้นเอทานอลในประมาณร้อยละที่ต่ำลง ดังนั้นกระบวนการกลั่นเอทานอลโดยให้ความร้อนมีความสำคัญมากที่ทำให้ระบบทำความร้อนมีประสิทธิภาพ ต้องมีตัวควบคุมที่ดีและเหมาะสม

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีชื่อเรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search; ATS) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองทางฝั่งเอาต์พุตที่ดีที่สุด ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำไปคำนวณหาสัญญาณการควบคุม และในการนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ระบบที่ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดังกล่าว ส่วนใหญ่จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในระบบ ซึ่งจะส่งผลเมื่อนำไปวิเคราะห์การออกแบบตัวควบคุมหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ด้วยเหตุนี้จึงต้องอาศัยวิธีในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) โดยในปัจจุบันมีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method : GSSA), วิธีดีคิว (DQ method) และวิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value method) ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง และเป็นที่นิยมในการนำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยมีงานวิจัยในอดีตกล่าวไว้มากมาย (Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M., 1997), (Emadi, A., 2004) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะทำให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้อย่างเหมาะสม (Narongrit, Areerak, K-L., and Srikaew, A., 2009), (Chaijaroenudomrung, K. Areerak, K-N., and Areerak, K-L., 2011) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ จะต้องแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมความร้อน ให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตที่มีสมรรถนะดียิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม การยืนยันผลการออกแบบจะดำเนินการโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม MATLAB รวมถึงการสร้างชุดทดสอบระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะได้กล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และการนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยในอดีตมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและวิจัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าความรู้และพัฒนาเกี่ยวกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

1.2.2 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม โดยอาศัยวิธี GSSA

1.2.3 เพื่อศึกษาค้นคว้าหาความรู้เกี่ยวกับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด

1.2.4 เพื่อสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัย

1.3.1 ระบบที่พิจารณาเป็นระบบหนึ่งเฟสของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

1.3.2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า คือ แหล่งจ่ายแรงดันที่มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์

1.3.3 โหลดตัวต้านทาน R ทางฝั่งเอาต์พุต เปรียบเสมือนขดลวดความร้อนของระบบการกลั่นเอทานอล

1.3.4 ความร้อนของระบบควบคุมสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน

1.3.5 การยืนยันผลการศึกษาของระบบควบคุมความร้อนในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ระบบที่ทำการวิเคราะห์เป็นระบบที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

1.4.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีตัวควบคุมได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธี GSSA

1.4.3 การออกแบบตัวควบคุมจะใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

1.4.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ทำงานในโหมดการทำงานนำกระแสต่อเนื่อง

1.4.5 การยืนยันผลการตอบสนองของระบบ ในส่วนของการจำลองสถานการณ์ของระบบจะอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป SimPowerSystem(SPSTM)ใน SIMULINK

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 สมมติฐานการวิจัย

การควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเอทานอลขนาดเล็ก จำเป็นต้องมีการออกแบบตัวควบคุม เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่เหมาะสม ที่ทำให้เครื่องผลิตเอทานอลกลั่นเอทานอลออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุณภาพที่ดีที่สุด โดยการออกแบบตัวควบคุมจะอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีชื่อเรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองทางฝั่งเอาต์พุตที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ให้แก่เอทานอลมากขึ้นและส่งผลให้เอทานอลมีคุณภาพที่ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน สามารถยืนยันผลการออกแบบโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม MATLAB รวมถึงการสร้างชุดทดสอบระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก เพื่อแสดงให้เห็นสมรรถนะที่ดีของการควบคุมความร้อนที่ได้จากการออกแบบ

1.5.2 สถานที่วิจัย

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

1.5.3 ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นที่ 1 สำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและระบบของเครื่องผลิตเอทานอลขนาดเล็ก

ขั้นที่ 2 สำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC

ขั้นที่ 3 ทำการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC กรณีไม่มีตัวควบคุม เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (GSSA)

ขั้นที่ 4 ศึกษาและสร้างโปรแกรมสำหรับจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีไม่มีตัวควบคุม เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ขั้นที่ 5 ทำการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC กรณีมีตัวควบคุม โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ

ขั้นที่ 6 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

ขั้นที่ 7 สำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

ขั้นที่ 8 วิเคราะห์และสร้างโปรแกรมสำหรับออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC และทำการยืนยันผลการตอบสนองของระบบ จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

ขั้นที่ 9 ออกแบบและสร้างชุดทดสอบระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก และดำเนินการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้นโดยเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบจากงานวิจัย

1.5.4 วิธีการเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการค้นคว้าที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และในการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ

1.5.5 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล พร้อมติดตั้งโปรแกรม MATLAB
- เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC

1.6.2 ได้องค์ความรู้ด้านการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ทั้งกรณีไม่มีตัวควบคุม และกรณีมีตัวควบคุม ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (GSSA)

1.6.3 ได้องค์ความรู้ด้านการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

1.6.4 ได้โปรแกรมสำหรับจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก บนโปรแกรม MATLAB

1.6.5 ได้ต้นแบบระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

1.6.6 ได้บทความเผยแพร่ในวารสารหรือการประชุมวิชาการระดับชาติ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

รายงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 7 บท ซึ่งในแต่ละบทมีรายละเอียดที่นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้นและขอบเขตของการวิจัย รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าและการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ รวมถึงการสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดทำวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 นำเสนอหลักการทำงานและอธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องผลิตเชื้อเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก และนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

บทที่ 4 นำเสนอการประยุกต์ใช้การค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC และการเปรียบ เทียบผลการทดสอบเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ที่อาศัยตัวควบคุมอุณหภูมิออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และระบบที่อาศัยตัวควบคุมอุณหภูมิออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ โดยกล่าวถึงผลสรุปของการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งนำเสนอปัญหาและข้อเสนอแนะเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกมี 4 ส่วนคือ ภาคผนวก ก.รายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบที่จำลองสถานการณ์ด้วย SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB เพื่อการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ภาคผนวก ข.รายละเอียดโปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อหาผลเฉลยของแบบจำลองที่ทำงานบนโปรแกรม MATLAB ภาคผนวก ค. โปรแกรมการควบคุมระบบทำความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR และภาคผนวก ง. รายการผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษาทำวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ให้ได้เอทานอลที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และเหมาะสมที่สุดที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ด้วยเหตุนี้การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม และการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงมีความสำคัญในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ในส่วนที่สอง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ส่วนสุดท้ายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อค้นหาตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสม และมีผลตอบสนองของระบบที่ดีที่สุด ซึ่งในแต่ละส่วนผู้วิจัยจะเรียงลำดับการนำเสนอ จากปีที่ตีพิมพ์ งานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน คณะผู้วิจัย รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามที่ผู้วิจัยได้ศึกษา

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากวัตถุดิบทางเกษตรที่เหลือใช้ นำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง และจากการทดสอบเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถใช้งานได้จริงกับเครื่องยนต์ โดยให้ความสำคัญเกี่ยวกับกลั่นลำดับส่วนของเอทานอล ซึ่งเป็นวิธีแยกของเหลวที่สามารถระเหยได้ เพื่อต้องการให้องค์ประกอบในสารละลายแยกออกจากกัน โดยปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก สามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	ดร. อภิชาติ บุญทาวัน	นำเสนอเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศประสิทธิภาพสูงได้ถูกนำมาใช้ในการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักน้ำหมัก แสดงให้เห็นถึงการยับยั้งอย่างมีนัยสำคัญของผลิตภัณฑ์และความเข้มข้นวิกฤตของเอทานอลอยู่ที่ 100 กรัมต่อลิตร น้ำหมักถูกทำให้เดือด และไอผสมของเอทานอลจะถูกกลั่นให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 94 ก่อนจะลอยออกจากหอกลั่น ซึ่งเป็นการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักแบบกะซ้ำ ๆ นอกจากนี้การกำจัดน้ำของเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกถูกศึกษาและประดิษฐ์ขึ้น เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงเอทานอลที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2014	ดร. อภิชาติ บุญทาวัน	นำเสนอระบบการกลั่นลำดับส่วนที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเป็นวิธีการแยกของเหลวที่สามารถระเหยได้เพื่อต้องการให้องค์ประกอบสารละลายออกจากกันโดยที่มีจุดเดือดของสารไม่ต่างการมากนัก จึงเป็นการนำมาประยุกต์ใช้แยกเอทานอลออกจากน้ำหมักส่งผลให้ได้ความเข้มข้นเอทานอลสูง และสามารถเข้าสู่กะบวนการแยกน้ำได้โดยตรง ซึ่งไม่ต้องกลั่นเพิ่มเติม ในส่วนการกำจัดน้ำ จะใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับแบบสลับความดัน ซึ่งผลการวิจัยพบว่าสามารถกำจัดน้ำได้ปริมาณสูง
2016	นายอาทิตย์ กองแก้ว	นำเสนอการพัฒนาและจำลองระบบการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล ได้แก่ กระบวนการหมัก การกลั่นและการแยกน้ำ เพื่อนำไปใช้ในระบบเอสเทอริฟิเคชันใช้ระบบการหมักควบคู่การกลั่น พบว่าเอทานอลที่หมัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ได้จะถูกดึงออกอย่างต่อเนื่อง ที่อัตราการกลั่น 10.2 g/Hr มีความเข้มข้นของเอทานอลประมาณ 80% โดยกระบวนการหมักดังกล่าวทำซ้ำถึง 8 รอบ ดังนั้นจึงมีการนำระบบการกลั่นประสิทธิภาพสูงขนาดเล็กมาประยุกต์ใช้ สามารถกลั่นเอทานอลบริสุทธิ์ได้ถึง 93%
2018	ดร. อภิชาติ บุญทาวัน	การจำลองระบบการหมักร่วมกับการกลั่นลำดับส่วนแบบต่อเนื่องโดยมีการดำเนินงานสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ 1. ถังหมักหรือถังปฏิกรณ์ชีวภาพ 2. หอกลั่นและ 3. ระบบเวนจูรี่ (Venturi) คอลัมน์ของหอกลั่นที่ใช้มีการทำงานแบ่งออกเป็น 4 ส่วนของไอไหลย้อนหรือ reflux stream ทั้งนี้ไอที่ออกจากหอกลั่นพบว่ามีความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ประมาณ 82% โดยน้ำหนัก ในส่วนระบบเวนจูลี่ที่ใช้จะทำหน้าที่ควบแน่นไอของเอทานอลเปลี่ยนกลับเป็นของเหลวอีกครั้ง

จากงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก เป็นเครื่องต้นแบบที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับระบบการกลั่นเอทานอล โดยยังไม่มีการนำเสนอระบบควบคุมความร้อนของตัวเครื่อง ที่สามารถคงค่าอุณหภูมิที่ทำให้การกลั่นเอทานอลทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยมุ่งเน้นการออกแบบตัวควบคุมของระบบให้มีเสถียรภาพ มีสมรรถนะในการทำงานที่ดี และเหมาะสมที่สุด

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC เนื่องจากมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม ให้กับระบบทำความร้อนของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่รวดเร็วกว่าการใช้แบบจำลองที่ใช้จากโปรแกรมสำเร็จรูป ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1989	Ridley, R.B.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบูสต์ สำหรับการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยวิธีค่าเฉลี่ยและนำเสนอแนวทางการออกแบบตัวควบคุม พร้อมกับการตรวจสอบความถูกต้อง โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
1989	VladGrigore, JariHatonen , JormaKyyra, and TeuvoSuntio	นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมพลวัตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ โดยที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในช่วงโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง
1990	Sanders, S. R., Noworolslti, J. M., Liu, X. Z., and Vergliese, G.C.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์ประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M.	นำเสนอวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized state-space averaging) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
2004	Emadi, A.	การวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกับโหลดตัวต้านทาน
2008	Liang Dong, Hao Ma, and Fei Xu	นำเสนอการทำงานของสวิตซ์ในระบบ ด้วยเทคนิค PWM โดยใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบปริภูมิสถานะเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับวงจรแปลงผันชนิดบัคก์-บูสต์
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟส โดยใช้เทคนิคการควบคุมสวิตซ์ด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม ด้วยการใช้วิธีการแปลงดีคิว และทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีค่าเจาะจง พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์
2011	G.-R. Yu, and J.-S.Wei	นำเสนอการควบคุมแบบสองทิศทางของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มคลื่นแบบบริดจ์ โดยสมการการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ของโหมดการทำงาน GCM และ PFCM สำหรับใช้ในการคำนวณค่าวัฏจักรการทำงาน และนำไปสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งการควบคุมนี้จะไม่อาศัยเฟสล็อกลูป

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	Chonsatidjamroen, S., Areerak, K-N., Areerak, K-L.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม มีวัตถุประสงค์สำหรับประยุกต์ใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยอาศัยการหาแบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากมีความถูกต้องและแม่นยำสูง
2015	Areerak, K-N.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์-บูสต์ โดยอาศัยการประยุกต์ใช้วิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการสร้างแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาให้ไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา รวมทั้งนำเสนอผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

จากงานวิจัยในอดีตดังตารางที่ 2.2 พบว่าการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง มีการศึกษาและกล่าวไว้มากมาย โดยมีวงจรและวิธีการหาแบบจำลองที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีความถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งจากการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังดังกล่าวจะมีค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลอง เพื่อใช้สำหรับการประยุกต์ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ต่อไป

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

ปัจจุบันการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างมากมายในงานทางด้านวิศวกรรม เช่น ในงานระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบควบคุม การระบุเอกลักษณ์

เป็นต้น โดยมีงานวิจัยในอดีตรองรับอย่างแพร่หลาย ซึ่งจุดประสงค์ของการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ คือ ต้องการผลการตอบสนองของระบบที่มีสมรรถนะในการทำงานที่ดีและเหมาะสมที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวจะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ด้วยกระบวนการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยจะทำให้การยืนยันผลการควบคุมด้วยชุดทดสอบจริงมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ซึ่งงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	**คณะผู้วิจัย**	**สาระสำคัญของงานวิจัย**
2002	Puangdownreong, D., Areerak, K-N.,Srikaew, A., Sujitjorn, S., and Totarong, P.	นำเสนอแนวทางและขั้นตอน สำหรับวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการระบุเอกลักษณ์ของระบบ โดยระบบที่ทำการศึกษาเป็นการแกว่งของลูกตุ้ม
2005	Cupertino, Marinelli, Zanchetta, and Sumner	นำเสนอระบบการออกแบบระบบควบคุม สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยอาศัยวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ใช้ ซึ่งถูกนำมาใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรในระบบ
2009	Narongrit, Areerak, K-L., and Srikaew, A.	นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยจะดำเนินการค้นหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมสำหรับวงจร เพื่อทำให้วงจรดังกล่าวมีสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุด โดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (adaptive tabu search) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์
2011	Chaijaroenudomrung, K. Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และในการออกแบบตัวควบคุมของระบบพบว่าที่มีสมรรถนะดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Sopapirm, T., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ โดยอาศัยการประยุกต์ใช้วิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากมีข้อดีในการประหยัดเวลาเพื่อการคำนวณแบบซ้ำ ๆ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิคการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวให้ผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบมีสมรรถนะที่ดี
2015	Areerak, K-N	นำเสนอแนวทางและขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันชนิดบัคก์-บูสต์ เพื่อควบคุมแรงดันทางฝั่งเอาต์พุตตามที่ต้องการ และสามารถนำไปสร้างจริงได้ ผ่านทางการจำกัดสัญญาณควบคุม โดยการออกแบบจะอาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองทางฝั่งเอาต์พุตที่ดีที่สุด

จากงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังและการการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้านั้นมีมากมาย ซึ่งพบว่ายังไม่มีการนำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน สำหรับระบบทำความร้อนของเครื่องผลิตเอทานอลขนาดเล็ก โดยอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีชื่อว่า วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (ATS) เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองทางฝั่งเอาต์พุตที่ดีที่สุดและช่วยเพิ่มสมรรถนะการควบคุมให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลองมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออกแบบตัวควบคุม โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยวิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป นอกจากนี้ ในระบบเลือกใช้

เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มควบคุมการทำงานของสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวมีความถี่การสวิตช์คงที่เท่ากับความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม เหมาะสำหรับนำมาใช้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ และสำหรับการดำเนินงานสามารถยืนยันผลความถูกต้อง โดยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

2.5 สรุป

จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้ ผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการนำไปประยุกต์ใช้ค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เพื่อนำไปพัฒนาระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในอดีตข้างต้น ถือเป็นแนวทางองค์ความรู้เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์พัฒนาระบบการควบคุมให้มีประสิทธิภาพและสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้น จึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
แบบจำลองพลวัตของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

3.1 บทนำ

การสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก จำเป็นที่จะต้องมีตัวควบคุมที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบสนองทางฝั่งเอาต์พุตที่ดีที่สุด ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC เพื่อนำพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ปรากฏอยู่ในแบบจำลองมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ทำให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตในระบบควบคุมความร้อนมีสมรรถนะที่ดีที่สุด โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการสร้างแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา เพื่อให้ง่ายต่อการหาผลการตอบสนองในกระบวนการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC กรณีที่ไม่มีตัวควบคุม เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC กรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ และได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการดั้งเดิม รวมทั้งผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เนื้อหาในบทนี้เป็นความรู้พื้นฐานในการอธิบายความเป็นมาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC

3.2 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก เป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการแปรรูปวัตถุดิบทางการเกษตรให้เป็นเชื้อเพลิงเอทานอล มีการคิดค้นออกแบบและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้เอทานอลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เอทานอลหรือไบโอเอทานอลมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ในภาคการขนส่ง หรือสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงได้ และเป็นที่ทราบกันดีว่าการพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลในโรงงาน

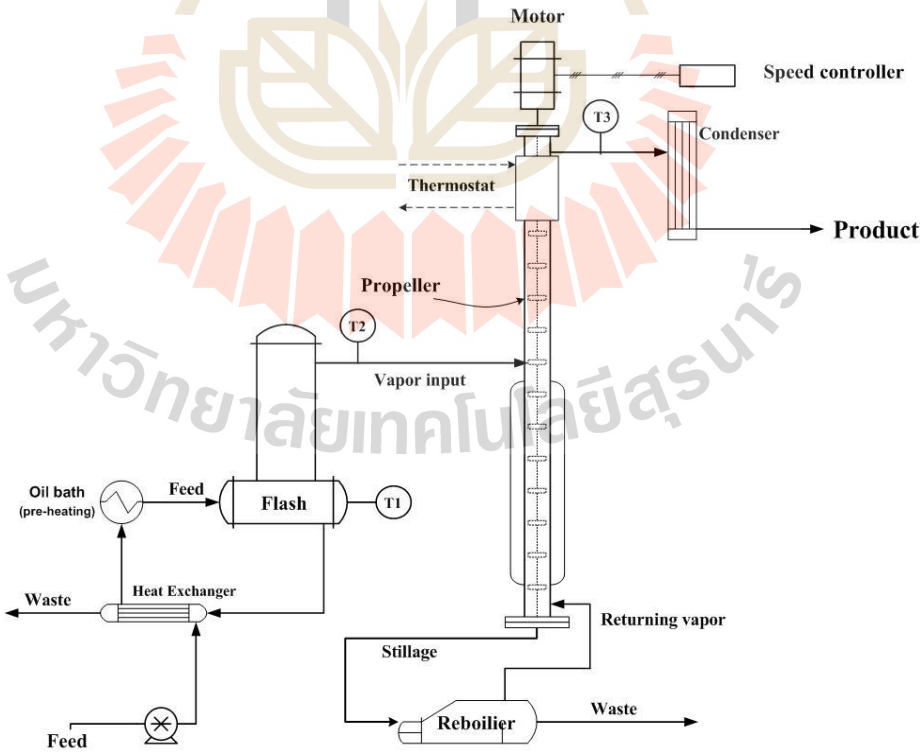
อุตสาหกรรมขนาดเล็กและในระดับชุมชนเป็นไปได้ยาก ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้พัฒนาระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งมีการพัฒนาต่อยอดมาจากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับระบบการผลิตเชื้อเพลิตเอทานอล (อภิชาติ บุญทาวัน, 2012, 2014) งานวิจัยดังกล่าวให้ความสนใจในสองส่วนหลักคือ 1. การออกแบบและพัฒนาระบบการกลั่นแบบต่อเนื่องที่มีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกับระบบการกลั่นที่มีอยู่ในภาคอุตสาหกรรม และ 2. การพัฒนาระบบการกำจัดน้ำ ทั้งนี้ระบบปฏิบัติการที่ดำเนินงานสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ 1. ถังหมักหรือถังปฏิกรณ์ชีวภาพ 2. หอกลั่น และ 3. ระบบเวนจูรี่ (Venturi) โดยการผลิตมีกระบวนการแปรรูปตั้งแต่นำวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น กากน้ำตาลและมันสำปะหลัง มาหมักเป็นน้ำหมัก ซึ่งมีความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้นประมาณร้อยละ 10 – 12 โดยน้ำหนัก โดยที่เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหมักจะสามารถสร้างผลผลิตเป็นเอทานอลและมีผลพลอยได้อื่น ๆ ถูกผลิตขึ้นเช่นเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น กรดอินทรีย์และสารประกอบที่ระเหยได้ เป็นต้น จากนั้นน้ำหมักจะถูกนำเข้าเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กถูกกลั่นลำดับส่วน (อาทิตย์ กองแก้ว, 2016) โดยการให้ความร้อนจนได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดประมาณร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก ในส่วนของคอลัมน์หอกลั่นที่ใช้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีการทำงานด้วยการกลั่นลำดับส่วนที่แบ่งออกเป็น 4 ส่วนของไอไหลย้อน หรือ reflux stream อีกทั้งระบบเวนจูรี่ที่ใช้จะทำหน้าที่ควบแน่นไอของเอทานอลเปลี่ยนกลับเป็นของเหลวอีกครั้ง โดยทั้งนี้ไอที่ออกจากหอกลั่นลำดับส่วนนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์และนำไปผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ เพื่อแยกน้ำออกจากเอทานอล เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านมาตรฐานปริมาณน้ำปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ที่อนุญาตให้มีได้ไม่เกินร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งการกลั่นเอทานอลโดยปกติจะได้ความเข้มข้นของน้ำต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเท่านั้น จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดน้ำในขั้นตอนสุดท้าย ทำให้ได้เชื้อเพลิงเอทานอลบริสุทธิ์ ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง การกลั่นเป็นกระบวนการแยกสารส่วนประกอบออกจากส่วนผสมของของเหลวโดยการระเหยและการควบแน่น เป็นกระบวนการทางเคมีที่เก่าแก่และเป็นสากลมากที่สุด เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการแยกสารที่มีความบริสุทธิ์เนื่องจากสามารถแยกได้ทุกระดับด้วยการใช้พลังงานคงที่ เอทานอลบริสุทธิ์ สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้โดยการผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วนเอทานอลที่แตกต่างกัน ซึ่งจะได้เป็นผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่แตกต่างกัน เช่นเอทานอล 1 ส่วนต่อน้ำมัน 9 ส่วนปรับเพิ่มค่าออกเทน จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สโซฮอล์ E10 ซึ่งเป็นการลดปริมาณการใช้น้ำมันลงและส่งผลให้การนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศมีปริมาณที่ลดลงได้ นอกจากนี้เอทานอลบริสุทธิ์สูงมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เครื่องสำอาง น้ำหอม ไบโอดีเซล ฯลฯ โดยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเอทานอลบริสุทธิ์แสดงดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอลบริสุทธิ์

สมบัติ	ค่า
สูตรโครงสร้าง	CH_3CH_2OH
มวลโมเลกุล	46
จุดเดือด (°C)	78.32
อุณหภูมิวิกฤต (°C)	243.1
ความหนาแน่นที่ 20 (°C)	0.7893 $g.cm^3$
ความร้อนของการสันดาป,กิโลจูลต่อกิโลกรัม	29.68
อุณหภูมิที่ติไฟได้เอง (°C)	793.0

สิ่งสำคัญในการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลคือการกลั่นเอทานอลให้ได้ความเข้มข้นสูงสุดที่ประมาณร้อยละ 95% ก่อนที่จะนำไปกำจัดน้ำขั้นตอนสุดท้าย เนื่องจากน้ำและเอทานอลมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกันคือ 100 และ 78.32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อทำให้สารละลายเอทานอลเดือด จะทำให้เอทานอลกลายเป็นไอและจะมีน้ำบางส่วนระเหยกลายเป็นไอปนมากับไอของเอทานอลดังกล่าวด้วย โดยธรรมชาติแล้วสารละลายเอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จะส่งผลให้เกิดไอของเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างกัน ในการกลั่นลำดับส่วนเป็นวิธีการแยกของเหลวที่สามารถระเหยได้ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยเฉพาะสารที่มีความแตกต่างของจุดเดือดไม่มากนัก ซึ่งสามารถควบคุมความเข้มข้นของเอทานอลได้ 2 วิธี คือ 1. ควบคุมอุณหภูมิของไอเอทานอลที่ออกจากหอกลั่น โดยจำเป็นต้องทำให้ไอเอทานอลที่ลอยขึ้นมาเกิดการควบแน่นบางส่วน เหลือเพียงส่วนของเอทานอลบริสุทธิ์ ซึ่งก่อนที่จะลอยออกทางด้านบนของหอกลั่น จะถูกควบคุมอุณหภูมิไอให้อยู่ที่ 77– 78 °C ในส่วนวิธีที่ 2. ควบคุมอุณหภูมิภายในของหม้อต้ม ซึ่งน้ำหมักที่เข้าสู่หอกลั่นจะถูกให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อน และทำการเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ที่ 100 °C เพื่อที่จะทำให้เอทานอลทั้งหมดแยกตัวออกมาจากของเหลว ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้วิธีที่ 2 ในการควบคุมความเข้มข้นของเอทานอล โดยจะดำเนินการควบคุมอุณหภูมิภายในของหม้อต้มให้คงที่ที่ 100 °C เนื่องจากหม้อต้มเป็นส่วนหลักและเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการเริ่มต้นของการกลั่นเอทานอลสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

รูปที่ 3.1 เครื่องต้นแบบการกลั่นลำดับส่วนแบบต่อเนื่องโดยใช้การให้ความร้อน



รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการของระบบการกลั่นเอทานอลแบบต่อเนื่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงกระบวนการของระบบกลั่นเอทานอล ด้วยเครื่องต้นแบบการกลั่นลำดับส่วนแบบต่อเนื่องโดยใช้การให้ความร้อน ที่ถูกออกแบบให้ระบบหอกลั่นเป็นแจ็คเก็ตความร้อนที่สร้างจากสแตนเลส โดยสารที่ป้อนเป็นน้ำหมักจะถูกดูดเข้าทางสายยางซิลิโคลนทนความร้อนและถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องทำความร้อน โดยภายในหอกลั่นเอทานอลแบบต่อเนื่อง ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญดังนี้ คือ

1. หม้อต้ม (boiler) – ภายในเป็นขดลวดทำความร้อน Flash ขนาด 3 kW และ Reboilier ขนาด 2 kW โดยขดลวดความร้อน 3 kW ได้รับการติดตั้งให้ทำหน้าที่ในการให้ความร้อนหลักแก่ระบบและสำหรับการสร้างไอน้ำก่อนเข้าสู่คอลัมน์ โดยด้านบนเชื่อมต่อกับท่อสแตนเลส เพื่อนำไอเข้าสู่คอลัมน์และในส่วนด่านล่างมีรูระบายของเหลวออก นอกจากนี้ในส่วนของด้านข้างมีช่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ ในส่วนขดลวดความร้อน 2 kW เป็นหม้อหุงต้มเพื่อให้ความร้อนด้านล่างสุด ได้รับการติดตั้งเพื่อให้ความร้อนแก่ส่วนเกินที่เป็นของเหลวในคอลัมน์ ซึ่งจะไหลลงมาด้านล่าง เข้าสู่ Reboilier แล้วทำการแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 3.3 หม้อต้มสำหรับให้ความร้อนแก่ระบบ

2. คอลัมน์ (column) - ในแกนหลักของคอลัมน์จะประกอบไปด้วยชุดของใบพัดที่เชื่อมติดกับแกนเหล็กกล้าไร้สนิมยาวเท่ากับความสูงขอคอลัมน์ ได้รับการติดตั้งไว้ที่เพลากลาง ทำหน้าที่กวนของเหลว โดยปลายด้านบนจะยึดติดกับมอเตอร์ ที่สามารถความคุมความเร็วรอบของการหมุนได้ และในระหว่างการดำเนินการอัตราการหมุนวนสูง (1000 rpm) ส่งผลให้ไอระเหยขึ้นสู่ด้านบน

ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในระหว่างการกลั่นนั้นไอเอทานอลจะถูกพัดให้เข้าสู่ผนังด้านในของคอลัมน์ ทำให้เกิดการควบแน่นบางส่วนกลายเป็นของเหลวไหลลงสู่ด้านล่าง ขณะที่ชุดล่างของใบพัดมีหน้าที่ในการพัดกรองเอทานอลออกจากของเหลวในทิศทางขึ้น และส่วนเกินที่เป็นของเหลวจะไหลลงมาด้านล่างของคอลัมน์ และในส่วนด้านบนของคอลัมน์ทำการต่อเข้ากับช่องนำไอออก โดย ในขณะเดียวกันไอร้อนที่ลอยมาจากด้านล่างของคอลัมน์จะทำให้เกิดการเดือดกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดสมดุลของระบบของเหลวและไอที่รวดเร็ว ส่งผลให้สารสามารถแยกออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

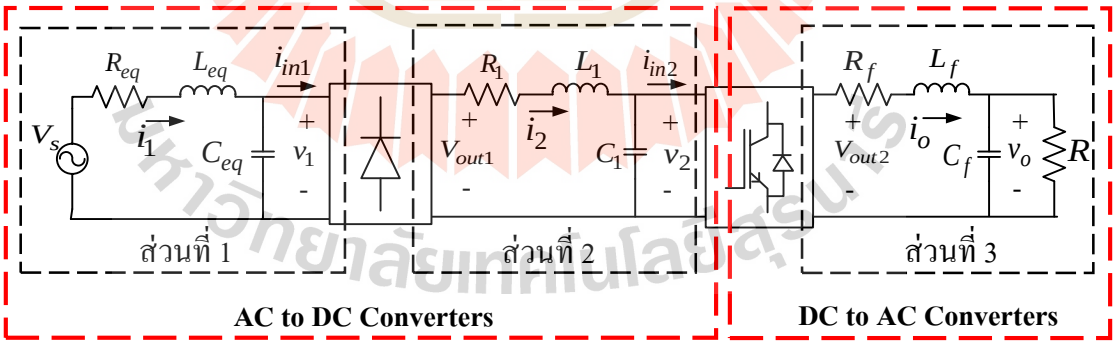
รูปที่ 3.4 คอลัมน์

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ให้ความสำคัญและสนใจในส่วนของขดลวดทำความร้อน 3 kW เนื่องจากเป็นส่วนที่ต้องการจะควบคุมให้ได้อุณหภูมิ T1 ตามที่ต้องการ ซึ่งจะอาศัยการออกแบบตัวควบคุม ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เนื่องจากเป็นวิธีการที่ได้รับการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ว่าสามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้จริง ซึ่งจะทำให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิมีความรวดเร็วและถูกต้อง ส่งผลให้กระบวนการผลิตเอทานอลมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่ไม่มีตัวควบคุม

3.3.1 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลัง

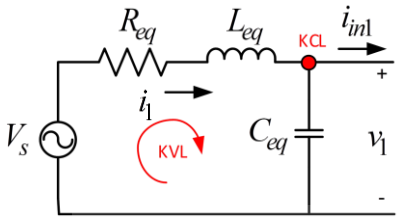
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ในระบบหนึ่งเฟส 220 V 50 Hz กรณีที่ไม่มีการควบคุม มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยมีองค์ประกอบทั้งหมด 2 วงจรทำงานร่วมกัน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังรูป โดยในส่วนที่ 1 จะมีแหล่งจ่ายของวงจรเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (V_s) ต่อเข้ากับสายส่งที่เขียนแทนด้วยพารามิเตอร์ R_{eq}, L_{eq}, C_{eq} และต่อเข้ากับไดโอด 4 ตัวแบบบริดจ์ นั่นคือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC ซึ่งพิจารณาวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปแรงดันเอซีไปเป็นแรงดันดีซี ซึ่งเมื่อปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายผ่านไดโอด ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จะเป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง มีด้านเอาต์พุตต่อเข้ากับวงจรกรองแทนด้วยพารามิเตอร์ R_1, L_1, C_1 แสดงในส่วนที่ 2 ลำดับถัดมาต่อเข้ากับอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที 4 ตัว เชื่อมต่อกันแบบเฮชบริดจ์ (H-bridge IGBT) ซึ่งเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า DC-AC พิจารณาวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสทำหน้าที่แปลงปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ไปเป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทางด้านเอาต์พุตของอุปกรณ์สวิตช์เชื่อมต่อกับวงจรกรองแทนด้วยพารามิเตอร์ R_f, L_f, C_f, และโหลดตัวต้านทาน R โดยโหลด R เปรียบเสมือนขดลวดความร้อนของระบบกลั่นเอทานอล แสดงได้ดังรูปในส่วนที่ 3



รูปที่ 3.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่ไม่มีการควบคุม

พิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ในส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.5 โดยอาศัยการหาความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของกระแส (KCL) และแรงดัน (KVL) ใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์มาวิเคราะห์วงจร โดยที่ V_s เป็นค่าคงตัว

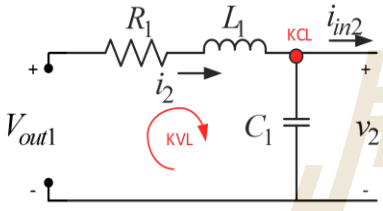
- พิจารณาวงจรส่วนที่ 1



$$\dot{i}_1 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_1 - \frac{1}{L_{eq}} v_1 + \frac{1}{L_{eq}} V_s \qquad (3\text{-}1)$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{C_{eq}} i_1 - \frac{1}{C_{eq}} i_{in1} \qquad (3\text{-}2)$$

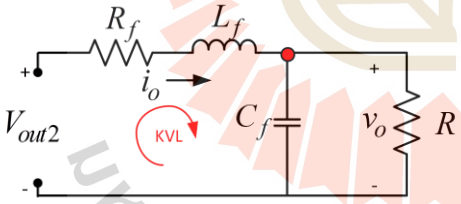
- พิจารณาวงจรส่วนที่ 2



$$\dot{i}_2 = -\frac{R_1}{L_1} i_2 - \frac{1}{L_1} v_2 + \frac{1}{L_1} V_{out1} \qquad (3\text{-}3)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{C_1} i_2 - \frac{1}{C_1} i_{in2} \qquad (3\text{-}4)$$

- พิจารณาวงจรส่วนที่ 3



$$\dot{i}_o = -\frac{R_f}{L_f} i_o - \frac{1}{L_f} v_o + \frac{1}{L_f} V_{out2} \qquad (3\text{-}5)$$

$$\dot{v}_o = \frac{1}{C_f} i_o - \frac{1}{RC_f} v_o \qquad (3\text{-}6)$$

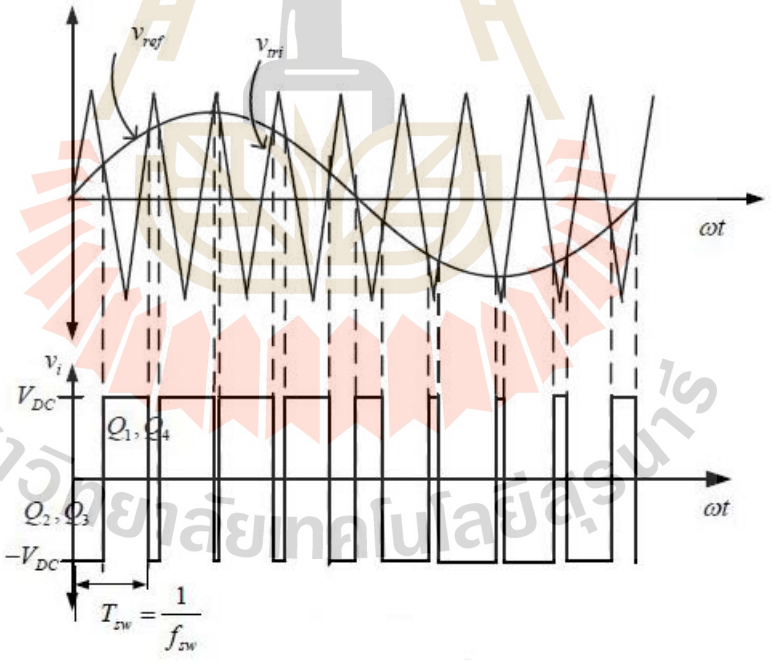
จากสมการที่ (3-1) ถึงสมการที่ (3-6) สามารถพิจารณาฟังก์ชันการทำงานของไดโอด ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3-7)

$$\begin{cases} V_{out1} = u_d(t) v_1 \\ i_{in1} = u_d(t) i_2 \end{cases} \qquad (3\text{-}7)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในส่วนฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ จะพิจารณาร่วมกับเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse-width modulation ; PWM) (Liang Dong, Hao Ma, and Fei Xu, 2008) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์ไอจีบีทีทั้งหมด 4 ตัว โดย PWM มีลักษณะของการทำงานเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการสวิตช์ไอจีบีที เป็นการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน คือ สัญญาณที่ต้องการปรับความกว้างของพัลส์ (V_{ref}) กับสัญญาณพาห์สามเหลี่ยม (V_{tr}) ที่มีค่าแอมพลิจูด (A) และค่าความถี่ (f) คงที่แสดงความสัมพันธ์ค่าดัชนีการมอดูเลตได้ดังสมการที่ (3-8) โดยมีเงื่อนไขการขับสัญญาณสวิตช์ คือ กรณีที่ค่า $V_{ref} > V_{tr}$ จะได้สัญญาณการนำสวิตช์ Q_1 และ Q_4 เมื่อ $V_{ref} < V_{tr}$ จะได้สัญญาณการนาสวิตช์ Q_2 และ Q_3 แสดงรูปการมอดูเลตของสัญญาณดังรูปที่ 3.6

$$m = \frac{V_{ref}}{V_{tr}} \tag{3-8}$$



รูปที่ 3.6 การมอดูเลตของสัญญาณอ้างอิงไซน์กับสัญญาณพาห์สามเหลี่ยม

สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (V_{rms}) ได้ดังสมการที่ (3-9) และสามารถแสดงความสัมพันธ์ฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า DC–AC ดังสมการที่ (3-10)

$$V_{rms} = \frac{V_{dc} \times m}{\sqrt{2}} \tag{3-9}$$

$$\begin{cases} V_{out2} = \dfrac{u_s(t) v_2 * m}{\sqrt{2}} \\ i_{in2} = \dfrac{u_s(t) i_o * m}{\sqrt{2}} \end{cases} \tag{3-10}$$

โดยที่ m คือค่าดัชนีมอดูเลตสวิตช์ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

สามารถเขียนสมการในรูปของฟังก์ชันการสวิตช์ โดยแทนค่าความสัมพันธ์สมการที่ (3-7) และ (3-10) จะทำให้ได้ความสัมพันธ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (3-11) ซึ่งจะพบว่ามีค่าพารามิเตอร์ $u_d(t)$ และ $u_s(t)$ เป็นฟังชันก์ของตัวแปรเวลา ที่เกิดจากการทำงานของสวิตซ์ในวงจร ส่งผลให้แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อแปลงให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา

$$\begin{cases} \dot{i}_1 = -\dfrac{R_{eq}}{L_{eq}} i_1 - \dfrac{1}{L_{eq}} v_1 + \dfrac{1}{L_{eq}} V_s \\ \dot{v}_1 = \dfrac{1}{C_{eq}} i_1 - \dfrac{1}{C_{eq}} (u_d(t) * i_2) \\ \dot{i}_2 = -\dfrac{R_1}{L_1} i_2 - \dfrac{1}{L_1} v_2 + \dfrac{1}{L_1} (u_d(t) * v_1) \\ \dot{v}_2 = \dfrac{1}{C_1} i_2 - \dfrac{m}{\sqrt{2} C_1} (u_s(t) * i_o) \\ \dot{i}_o = -\dfrac{R_f}{L_f} i_o - \dfrac{1}{L_f} v_o + \dfrac{m}{\sqrt{2} L_f} (u_s(t) * v_2) \\ \dot{v}_o = \dfrac{1}{C_f} i_o - \dfrac{1}{RC_f} v_o \end{cases} \tag{3-11}$$

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC จะอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Chonsatidjamroen, S., Areerak, K-N., and Areerak, K-L, 2013), (Areerak, K-N., 2015) ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองจะอาศัยสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน

(complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง โดยหลักการของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน สามารถอธิบายจากสัญญาณ $f(t)$ ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3-12) และสามารถแสดงความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนดังสมการที่ (3-13)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k (t) e^{jk\omega_s t} \tag{3-12}$$

$$\langle x \rangle_k (t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^{t} f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \tag{3-13}$$

โดยที่ $\omega_s = \frac{2\pi}{T_s}$

$\langle x \rangle_k (t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier coefficients)

จากสมการที่ (3-12) และ (3-13) ค่า k เป็นตัวบ่งบอกความถูกต้องของการใช้อนุกรมฟูริเยร์ ถ้า k มีค่าเป็นอันดับอนันต์ ค่าผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับ 0 และถ้าสัญญาณที่ไม่ปรากฏการสั่นไกว สามารถกำหนดให้ค่า $k = 0$ ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า การประมาณค่าอันดับศูนย์ หรือถ้าสัญญาณมีการสั่นไกว สามารถกำหนดให้ k มีค่าเป็น -1, 1 ซึ่งจะเรียกวิธีนี้ว่า การประมาณค่าอันดับหนึ่ง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้การประมาณอันดับหนึ่ง (first-order approximation) และ การประมาณอันดับศูนย์ (zero-order approximation) (Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M., 1997) สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลอง

คุณสมบัติของสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรวงจรแปลงผันกำลัง โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มี 3 ข้อแสดงดังนี้

1. คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-14)

$$\frac{d}{dt}\langle x \rangle_k (t) = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k (t) - jk\omega \langle x \rangle_k (t) \tag{3-14}$$

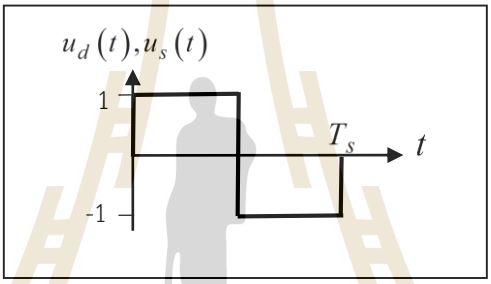
2. คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (3-15)

$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \tag{3-15}$$

3. ถ้า $f(t)$ คือ ค่าจริง (real-value periodic waveform) แสดงได้ดังสมการที่ (3-16)

$$\langle x \rangle_{-k} = \langle x \rangle_k^* \tag{3-16}$$

ทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC โดยเริ่มพิจารณาจากสัญญาณรายคาบของฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC และ DC-AC ที่มีลักษณะการทำงานเหมือนกัน ซึ่งมีสัญญาณการสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังได้ดังสมการที่ (3-17)



รูปที่ 3.7 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC

$$u_d(t) = u_s(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < \dfrac{T_s}{2} \\ -1 & \dfrac{T_s}{2} < t < T_s \end{cases} \tag{3-17}$$

โดยที่ $u_d(t)$ คือ ฟังก์ชันการทำงานของไดโอด

$u_s(t)$ คือ ฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์

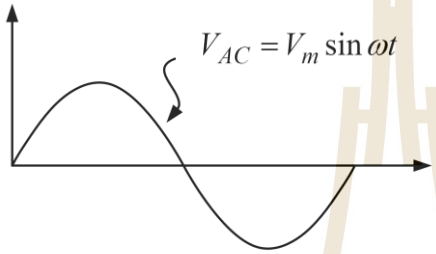
T_s คือ คาบฟังก์ชันการสวิตช์

พิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ (switching function : $u(t)$) โดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-13) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของสัญญาณการสวิตช์สำหรับวงจรแปลงผันกำลัง ที่การประมาณค่าอันดับศูนย์และอันดับหนึ่ง ได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการที่ (3-18)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\begin{cases} \langle u_d(t)\rangle_0 = \langle u_s(t)\rangle_0 = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}}(1)\,e^0\,dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}}^{T}(-1)\,e^0\,dt = 0 \\ \langle u_d(t)\rangle_1 = \langle u_s(t)\rangle_1 = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}}(1)\,e^{-jk\omega t}\,dt + \frac{1}{T}\int_{\frac{T}{2}}^{T}(-1)\,e^{-jk\omega t}\,dt = \frac{-j2}{\pi} \end{cases} \quad (3\text{-}18)$$

Voltage Source



$$\begin{cases} \langle v_{AC}\rangle_0 = \langle V_s\rangle_0 = 0 \\ \langle v_{AC}\rangle_1 = \langle V_s\rangle_1 = -\frac{jV_m}{2} \end{cases} \quad (3\text{-}19)$$

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์พิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC พบว่ามีตัวแปรสถานะของวงจรทั้งหมด 6 ตัวแปร แสดงในสมการที่ (3-11) ซึ่งมีการเลือกใช้การประมาณอันดับหนึ่ง และการประมาณอันดับศูนย์ ดังนั้นจึงสามารถเขียนตัวแปรสถานะของแบบจำลองในสมการที่ (3-11) ให้อยู่ในรูป สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน โดยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังดังกล่าวเมื่อไม่พิจารณาปริมาณ DC ทางด้านวงจรไฟฟ้ากระแสสลับและไม่พิจารณาสัญญาณกระเพื่อม ทางด้านวงจรไฟฟ้ากระแสตรง จะได้ตัวแปรสถานะของแบบจำลองทั้งหมดตามความสัมพันธ์ที่แสดงได้ดังสมการ ที่ (3-20)

$$\begin{cases} \text{k=0} & \begin{cases} \langle i_2\rangle_0 = x_1 \\ \langle v_2\rangle_0 = x_2 \end{cases} \\ \text{k=1} & \begin{cases} \langle i_1\rangle_1 = x_3 + jx_4 \\ \langle v_1\rangle_1 = x_5 + jx_6 \\ \langle i_o\rangle_1 = x_7 + jx_8 \\ \langle v_o\rangle_1 = x_9 + jx_{10} \end{cases} \end{cases} \quad (3\text{-}20)$$

พิจารณาจากสมการที่ (3-11) สามารถพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยเริ่มพิจารณาสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของ i_1 และ v_1 ที่เป็นตัวแปรสถานะของวงจร ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังนี้

- พิจารณา i_1 จากสมการที่ (3-21)

$$\dot{i}_1 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_1 - \frac{1}{L_{eq}} v_1 + \frac{1}{L_{eq}} V_s \tag{3-21}$$

เมื่อ k=0

ไม่พิจารณา DC values ทางด้านวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

เมื่อ k=1 จากคุณสมบัติข้อที่ 1

$$\left\langle \dot{i}_1 \right\rangle_1 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle i_1 \rangle_1 - \frac{1}{L_{eq}} \langle v_1 \rangle_1 + \frac{1}{L_{eq}} \langle V_s \rangle_1 - j\omega \langle i_1 \rangle_1$$

แทนค่าตัวแปรสถานะของแบบจำลองจากสมการที่ (3-19) และสมการที่ (3-20) จะได้สมการความสัมพันธ์เชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาแสดงดังสมการที่ (3-22) ถึง (3-23)

$$\dot{x}_3 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} x_3 + \omega x_4 - \frac{1}{L_{eq}} x_5 \tag{3-22}$$

$$\dot{x}_4 = -\omega x_3 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} x_4 - \frac{1}{L_{eq}} x_6 - \frac{V_m}{2L_{eq}} \tag{3-23}$$

- พิจารณา v_1 จากสมการที่ (3-24)

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{C_{eq}} i_1 - \frac{1}{C_{eq}} (u_d(t) * i_2) \tag{3-24}$$

เมื่อ k=0

ไม่พิจารณา DC values ทางด้านวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

เมื่อ k=1 จากคุณสมบัติข้อที่ 1

$$\left\langle \dot{v}_1 \right\rangle_1 = \frac{1}{C_{eq}} \langle i_1 \rangle_1 - \frac{1}{C_{eq}} \langle i_2 . u_d \rangle_1 - j\omega \langle v_1 \rangle_1$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากคุณสมบัติข้อที่ 2

$$\langle i_2 . u_d \rangle_1 = \sum_i \langle i_2 \rangle_{k-i} \langle u_d \rangle_i \qquad ;i = -1,0,1$$
$$= \langle i_2 \rangle_2 \langle u_d \rangle_{-1} + \langle i_2 \rangle_1 \langle u_d \rangle_0 + \langle i_2 \rangle_0 \langle u_d \rangle_1$$
$$= \langle i_2 \rangle_0 \langle u_d \rangle_1$$

$$\left\langle \dot{v}_1 \right\rangle_1 = \frac{1}{C_{eq}} \langle i_1 \rangle_1 - \frac{1}{C_{eq}} \left[\langle i_2 \rangle_0 \langle u_d \rangle_1 \right] - j\omega \langle v_1 \rangle_1$$

จะได้สมการความสัมพันธ์เชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาแสดงดังสมการที่ (3-25) ถึงสมการที่ (3-26) ดังนี้

$$\dot{x}_5 = -\frac{1}{C_{eq}} x_3 + \omega x_6 \tag{3-25}$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C_{eq}} x_4 + \frac{2}{\pi C_{eq}} x_1 - \omega x_5 \tag{3-26}$$

สำหรับตัวแปรสถานะของวงจร i_2, v_2, i_o และ v_o สามารถพิสูจน์หาสมการความสัมพันธ์เชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาได้ โดยดำเนินการเช่นเดียวกับ i_1 และ v_1 จะได้ดังสมการที่ (3-27) ถึง (3-32)

$$\dot{x}_1 = -\frac{R}{L_1} x_1 - \frac{1}{L_1} x_2 - \frac{4}{\pi L_1} x_6 \tag{3-27}$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{C_1} x_1 + \frac{4m}{\sqrt{2}\pi C_1} x_8 \tag{3-28}$$

$$\dot{x}_7 = -\frac{R_f}{L_f} x_7 + \omega x_8 - \frac{1}{L_f} x_9 \tag{3-29}$$

$$\dot{x}_8 = -\frac{2m}{\sqrt{2}\pi L_f} x_2 - \omega x_7 - \frac{R_f}{L_f} x_8 - \frac{1}{L_f} x_{10} \tag{3-30}$$

$$\dot{x}_9 = \frac{1}{C_f} x_7 - \frac{1}{RC_f} x_9 + \omega x_{10} \tag{3-31}$$

$$\dot{x}_{10} = \frac{1}{C_f} x_8 - \omega x_9 - \frac{1}{RC_f} x_{10} \tag{3-32}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากการพิจารณาหาตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ทำให้ได้ตัวแปรสถานะของแบบจำลองทั้งหมด 10 ตัวแปร แสดงดังสมการที่ (3-27) ถึง (3-32) ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบปริภูมิสถานะได้ดังสมการที่ (3-33)

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3-33}$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ คือ $x = [x_1 \;\; x_2 \;\; x_3 \;\; x_4 \;\; x_5 \;\; x_6 \;\; x_7 \;\; x_8 \;\; x_9 \;\; x_{10}]^T$

อินพุต $u = [V_s]$

สามารถแสดงรายละเอียดของ A และ B ในสมการที่ (3-33) ได้ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix}
-\frac{R_1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{4}{\pi L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4m}{\sqrt{2}\pi C_1} & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{2}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \omega & -\frac{1}{L_f} & 0 \\
0 & -\frac{2m}{\sqrt{2}\pi L_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{1}{RC_f} & \omega \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & -\frac{1}{RC_f}
\end{bmatrix}_{10\times 10}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{2L_{eq}}Vm \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{10\times 1}$$

จากความสัมพันธ์ของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน ทำการแทนค่าตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จึงทำให้ได้ตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ดังสมการที่ (3-34)

$$\begin{cases} i_2 = x_1 \\ v_2 = x_2 \\ i_1 = 2x_3\cos\omega t - 2x_4\sin\omega t \\ v_1 = 2x_5\cos\omega t - 2x_6\sin\omega t \\ i_o = 2x_7\cos\omega t - 2x_8\sin\omega t \\ v_o = 2x_9\cos\omega t - 2x_{10}\sin\omega t \end{cases} \tag{3-34}$$

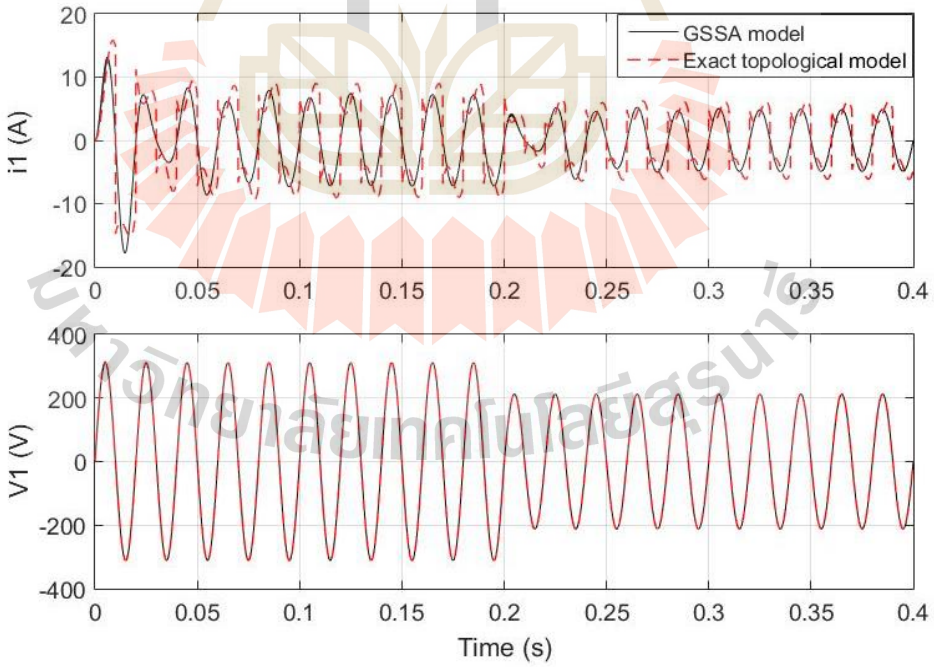
3.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่ไม่มีตัวควบคุม โดยทำการตรวจสอบเพื่อยืนยันว่าแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์มีความถูกต้อง และมีผลตอบสนองของระบบไปในทิศทางเดียวกัน ด้วยการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้บล็อกกำลังไฟฟ้าโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 3.2

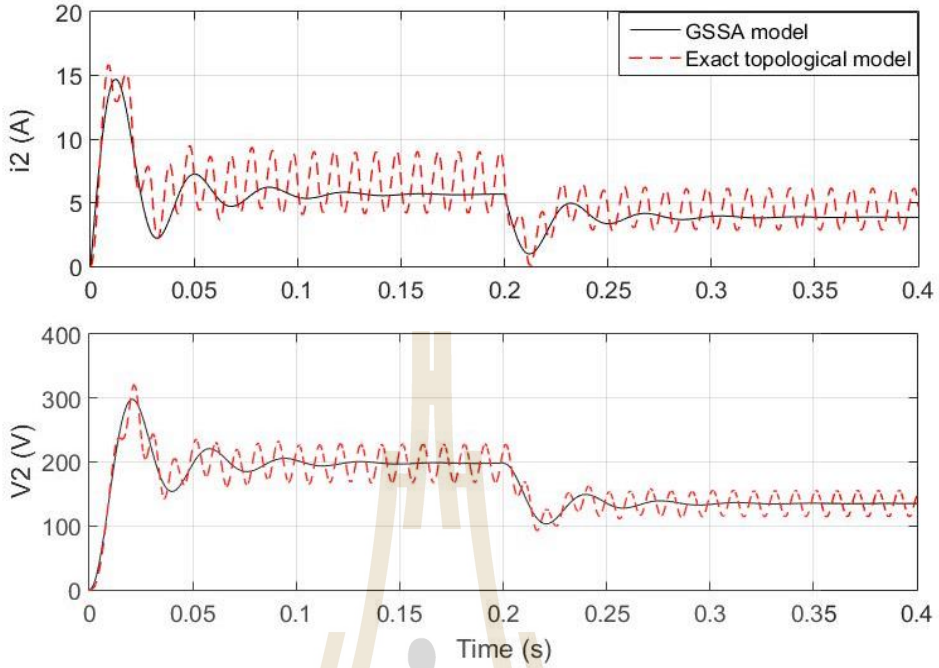
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า	พารามิเตอร์	ค่า
V_s	220 V_{rms}	R_f	1 mΩ
R_{eq}	1 mΩ	L_f	5 mH
L_{eq}	1 μF	C_f	10 μF
C_{eq}	22 μF	R	30 Ω
R_1	1 mΩ	f_s	5 kHz
L_1	100 mH	m	0.5
C_1	500 μF		

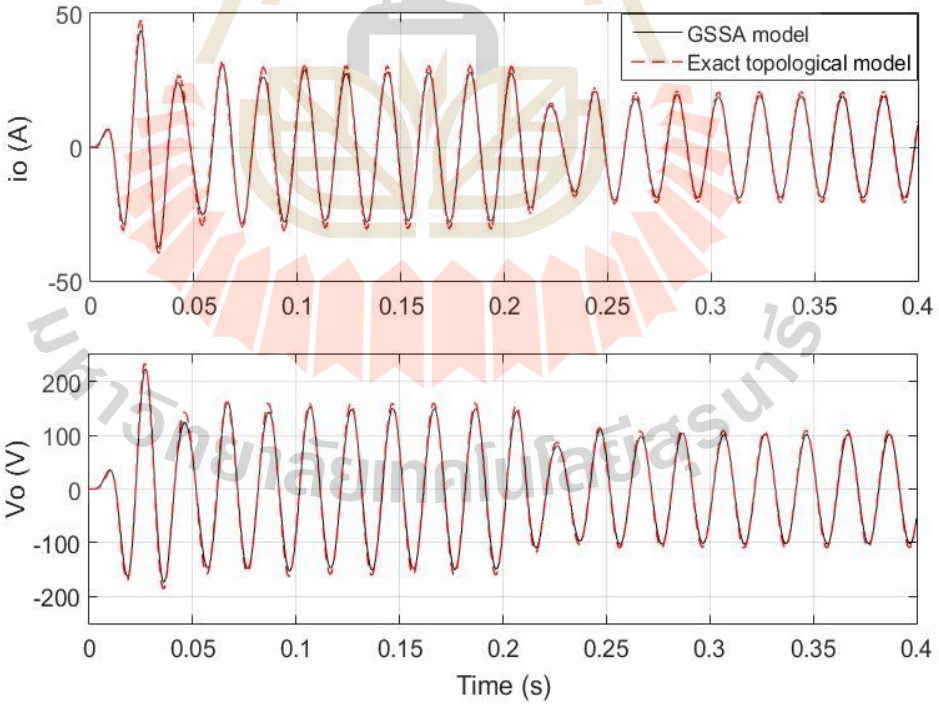
การจำลองสถานการณ์จะดำเนินการ โดยการเปลี่ยนระดับแรงดันอินพุตของระบบ (V_s) จาก 220√2 V ไปเป็น 150√2 V ในวินาทีที่ 0.2 สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของกระแสและแรงดันที่ได้ในแต่ละส่วน ดังรูปที่ 3.8 ถึง 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 ผลการตอบสนองของกระแส i_1 และแรงดัน v_1



รูปที่ 3.9 ผลการตอบสนองของกระแส i_2 และแรงดัน v_2



รูปที่ 3.10 ผลการตอบสนองของกระแส i_o และแรงดัน v_0

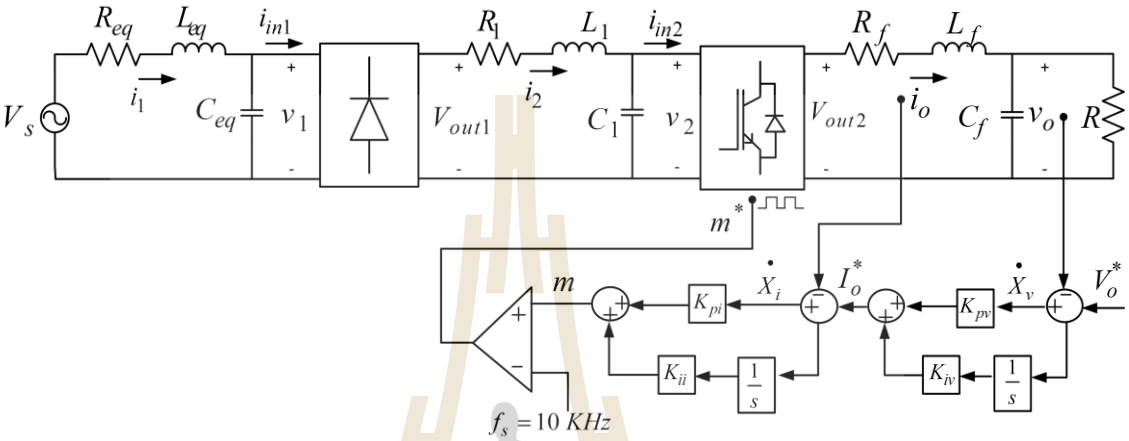
จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์สำหรับการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองในรูปที่ 3.8 ถึงรูปที่ 3.10 จะสังเกตเห็นว่าผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของวงจร ที่ได้รับการพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มีรูปสัญญาณการตอบสนองที่สอดคล้องและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในส่วนการตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ และสภาวะอยู่ตัว ถึงแม้ว่าในการจำลองสถานการณ์จะมีการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันอินพุตของวงจร ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากผลการจำลองสถานการณ์ เมื่อทำการลดค่าแรงดันอินพุตลง ส่งผลให้ค่ากระแส แรงดัน และแอมพลิจูดมีค่าลดลงเช่นกัน แต่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวนั้นยังคงมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มีความถูกต้อง ใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็ว และสามารถนำไปพัฒนาเป็นแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุมได้ ซึ่งจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อถัดไป สำหรับองค์ความรู้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบความคุมความร้อนกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 41 (EECON-41) ซึ่งมีรายละเอียดบทความแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

3.4.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบ

จากการวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไม่มีตัวควบคุม พบว่าการปรับแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้สองทางคือ ทำการปรับค่าแรงดันอินพุตของระบบ (V_s) และทำการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (m^*) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุมได้ (Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P., 2008), (Areerak, K-N., 2015) ในปัจจุบันตัวควบคุมที่ใช้งานมีหลากหลายประเภท โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะนำเสนอตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่มีความซับซ้อนน้อยและเหมาะกับการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังที่ให้ความสำคัญในการปรับปรุงผลการตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว อีกทั้งยังมีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่าย และไม่ซับซ้อน นั่นคือการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามส่วนของระบบที่พิจารณากับระบบมาตรฐานอันดับสอง ซึ่งในการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยแบบจำลองของ

ระบบที่มีตัวควบคุมที่กล่าวในหัวข้อนี้จะถูกนำไปเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ พร้อมแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและอุณหภูมิในหัวข้อถัดไป ซึ่งระบบไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม

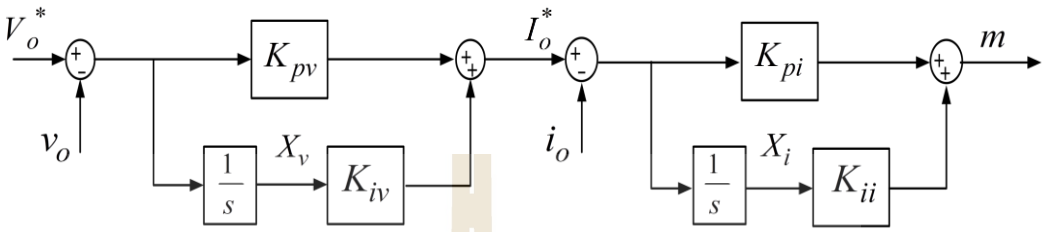
จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.11 สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม โดยอาศัยการพิสูจน์สมการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ผ่านมา แต่มีการเพิ่มชุดตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งในส่วนการควบคุมจะพบว่ามีอินพุตคือ V_o^* เป็นแรงดันอ้างอิง และมีเอาต์พุตคือ m^* เป็นค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยตัวควบคุม กำหนดให้ m เป็นสัญญาณควบคุม และจะนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Sawtooth compare signal) เพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) โดยที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง m^* และ m แสดงดังสมการที่ (3-35)

$$m^* = \frac{m}{A_r} \tag{3-35}$$

โดย A_r คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม

พิจารณาหาความสัมพันธ์ในส่วนการควบคุม ซึ่งโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอ 2 ลูป คือลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า หรือเรียกว่าการต่อกันแบบคาสเคดแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือ

K_{pv}, K_{iv}, K_{pi} และ K_{ii} ตามลำดับ และสามารถวิเคราะห์หาค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ที่เกิดจากกระบวนการของตัวควบคุม ได้ดังสมการที่ (3-36) และ (3-37)



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอ

$$m = -K_{pi} i_o - K_{pv} K_{pi} v_o + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pv} K_{pi} V_o^* \tag{3-36}$$

$$m^* = \frac{1}{A_r}\left(-K_{pi} i_o - K_{pv} K_{pi} v_o + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pv} K_{pi} V_o^*\right) \tag{3-37}$$

ในส่วนตัวควบคุมพีไอจะประกอบด้วยเป็นพจน์ที่เป็นปริพันธ์ (Integral) อยู่ในตัวควบคุมทั้งตัวควบคุมลูปแรงดันและตัวควบคุมลูปกระแส ส่งผลให้การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีการควบคุม มีตัวแปรสถานะของระบบเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะของลูปแรงดัน เป็น X_v และตัวแปรสถานะของลูปกระแส เป็น X_i แสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\begin{cases} \dot{X}_v = V_o^* - v_o \\ \dot{X}_i = -i_o - K_{pv} v_o + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^* \end{cases} \tag{3-38}$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-37) และ (3-38) จะสังเกตเห็นว่า มีตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC อยู่ 2 ตัวคือ v_o และ i_o ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับ และจากสมการที่ (3-20) พบว่าตัวแปรสถานะของแบบจำลองอยู่ในรูปเชิงซ้อน เมื่อนำมาพิจารณาหาแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุม ส่งผลให้มีความผิดพลาดของแบบจำลองเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยค่าเฉลี่ยของ v_o และ i_o จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปสัญญาณเฉลี่ยทั่วไปและรูปคลื่นจริงพบว่าขนาดของสัญญาณมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-39)

$$\begin{cases} i_o = 2\sqrt{x_7^2 + x_8^2} \\ v_o = 2\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} \end{cases} \tag{3-39}$$

จากสมการที่ (3-39) นำไปแทนค่าความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-37) และ (3-38) ทำให้ได้ความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3-40)

$$\begin{cases} m^* = \dfrac{1}{A_r}\left(-2K_{pi}\sqrt{x_7^2 + x_8^2} - 2K_{pv}K_{pi}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} + K_{iv}K_{pi}X_v + K_{ii}X_i + K_{pv}K_{pi}V_o^*\right) \\ \dot{X}_v = V_o^* - 2\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} \\ \dot{X}_i = -2\sqrt{x_7^2 + x_8^2} - 2K_{pv}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} + K_{iv}X_v + K_{pv}V_o^* \end{cases} \tag{3-40}$$

กระบวนการควบคุมเกิดจากการปรับค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ ซึ่งแต่เดิมในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่ไม่มีตัวควบคุม เกิดจากการกำหนดค่า (m)โดยผู้ใช้งาน ดังนั้นจากแบบจำลองของระบบที่ไม่มีตัวควบคุม สามารถเปลี่ยนเป็นแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม โดยแทนค่า $m = m^*$ และทำการเพิ่มตัวแปรสถานะ X_v และ X_i จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม และเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่ปรากฏพารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_{pv}, K_{iv}, K_{pi} และ K_{ii} อยู่ในแบบจำลอง แสดงได้ดังสมการที่ (3-41)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$
\begin{cases}
\dot{x}_1 = -\dfrac{R_1}{L_1}x_1 - \dfrac{1}{L_1}x_2 - \dfrac{4}{\pi L_1}x_6 \\
\dot{x}_2 = \dfrac{1}{C_1}x_1 - \dfrac{8K_{pi}\sqrt{x_7^2+x_8^2}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}x_8 - \dfrac{8K_{pv}K_{pi}\sqrt{x_9^2+x_{10}^2}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}x_8 + \dfrac{4K_{iv}K_{pi}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}X_v x_8 \\
\qquad + \dfrac{4K_{ii}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}X_i x_8 + \dfrac{4K_{pv}K_{pi}V_o^*}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}x_8 \\
\dot{x}_3 = -\dfrac{R_{eq}}{L_{eq}}x_3 + \omega x_4 - \dfrac{1}{L_{eq}}x_5 \\
\dot{x}_4 = -\omega x_3 - \dfrac{R_{eq}}{L_{eq}}x_4 - \dfrac{1}{L_{eq}}x_7 + \dfrac{1}{2L_{eq}}Vm \\
\dot{x}_5 = \dfrac{1}{C_{eq}}x_3 - \omega x_6 \\
\dot{x}_6 = \dfrac{2}{\pi C_{eq}}x_1 + \dfrac{1}{C_{eq}}x_4 - \omega x_5 \\
\dot{x}_7 = -\dfrac{R_f}{L_f}x_7 + \omega x_8 - \dfrac{1}{L_f}x_9 \\
\dot{x}_8 = \dfrac{4K_{pi}\sqrt{x_7^2+x_8^2}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}x_2 + \dfrac{4K_{pv}K_{pi}\sqrt{x_9^2+x_{10}^2}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}x_2 - \dfrac{2K_{iv}K_{pi}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}X_v x_2 \\
\qquad - \dfrac{2K_{ii}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}X_i x_2 - \dfrac{2K_{pv}K_{pi}V_o^*}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}x_2 - \omega x_7 - \dfrac{R_f}{L_f}x_8 - \dfrac{1}{L_f}x_{10} \\
\dot{x}_9 = \dfrac{1}{C_f}x_7 - \dfrac{1}{RC_f}x_9 + \omega x_{10} \\
\dot{x}_{10} = \dfrac{1}{C_f}x_8 - \omega x_9 - \dfrac{1}{RC_f}x_{10} \\
\dot{X}_v = V_o^* - 2\sqrt{x_9^2+x_{10}^2} \\
\dot{X}_i = -2\sqrt{x_7^2+x_8^2} - 2K_{pv}\sqrt{x_9^2+x_{10}^2} + K_{iv}X_v + K_{pv}V_o^*
\end{cases}
\tag{3-41}
$$

ส่วนสำคัญในลำดับถัดไปคือ การออกแบบตัวควบคุม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้การออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อเป็นพื้นฐานในการนำไปเปรียบเทียบกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ทำให้สมรรถนะของผลการตอบสนองของแรงดันดียิ่งขึ้น ซึ่งการออกแบบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์จะนำเสนอไว้ในบทที่ 4

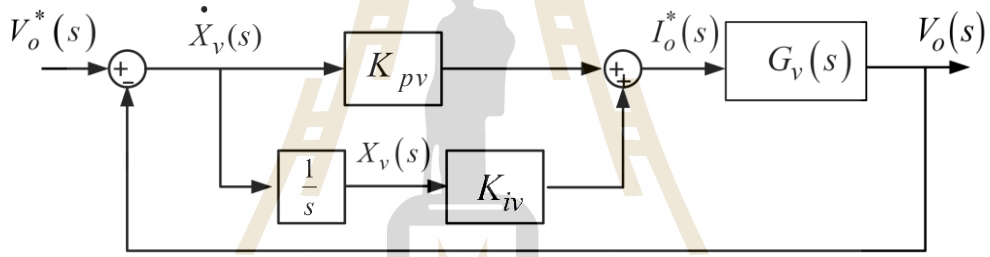
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผัน AC-DC-AC

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC โดยอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม ด้วยการใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ 2 ลูปต่อกันแบบคาสเคด (Areerak, K-N., 2015) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน การออกแบบตัวควบคุมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดันเอาต์พุต และการออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต ซึ่งทั้ง 2 ส่วนมีกระบวนการทำงานร่วมกันแสดงดังรูปที่ 3.12

- **การออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต**

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุต โดยจะอาศัยบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

จากรูปที่ 3.13 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ ได้จากสมการแรงดันเอาต์พุตของตัวแปรสถานะสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3-42)

$$\dot{v}_o(t) = \frac{1}{C_f} i_o(t) - \frac{1}{RC_f} v_o(t) \tag{3-42}$$

ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ (3-43) จะได้

$$sV_o(s) = \frac{1}{C_f} I_o(s) - \frac{1}{RC_f} V_o(s) \tag{3-43}$$

ทำการจัดรูปหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (3-44)

$$G_v(s) = \frac{V_o(s)}{I_o(s)} = \frac{R}{sRC_f + 1} \tag{3-44}$$

สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ได้ดังสมการที่ (3-45)

$$T_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s}\right).G_v(s)}{1 + \left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s}\right).G_v(s)}$$

$$T_v(s) = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{C_f}\right)}{s^2 + \left(\frac{RK_{pv} + 1}{RC_f}\right)s + \left(\frac{K_{iv}}{C_f}\right)} \tag{3-45}$$

ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมใช้การเทียบสัมประสิทธ์ของพหุนามส่วนระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแบบวงปิดเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสองมาตรฐาน ซึ่งสมการระบบอันดับสองมาตรฐานแสดงได้ดังสมการที่ (3-46)

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{3-46}$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารของ $T_v(s)$ ในสมการที่ (3-45) กับพหุนามตัวหารของระบบอันดับสอง ในสมการที่ (3-46) จะได้ดังสมการที่ (3-47) และ (3-48) ดังนี้

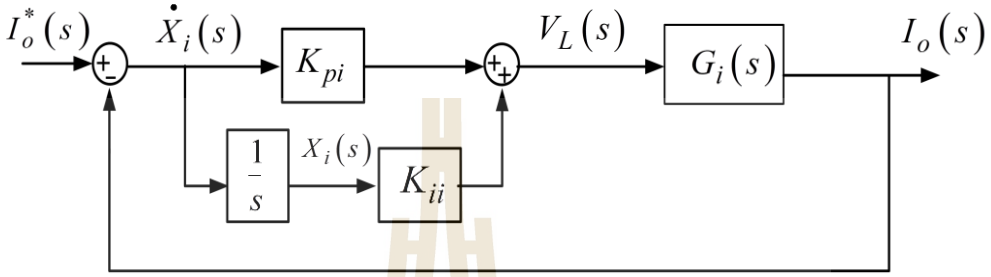
$$K_{pv} = \frac{2\zeta_v\omega_{n,v}RC_f - 1}{R} \tag{3-47}$$

$$K_{iv} = \omega_{n,v}^2 C_f \tag{3-48}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- **การออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต**

ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต จะอาศัยบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

จากรูปที่ 3.14 ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ หาได้จากสมการกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุตของตัวแปรสถานะสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC คือ

$$\dot{i}_o(t) = \frac{1}{L_f} V_L(t) - \frac{R_f}{L_f} i_o(t) \tag{3-49}$$

ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ (3-50) จะได้

$$sI_o(s) = \frac{1}{L_f} V_L(s) - \frac{R_f}{L_f} I_o(s) \tag{3-50}$$

ทำการจัดรูปหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (3-51)

$$G_i(s) = \frac{I_o(s)}{V_L(s)} = \frac{1}{\left(sL_f + R_f\right)} \tag{3-51}$$

สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ได้ดังสมการที่ (3-52)

$$T_i(s) = \frac{I_o(s)}{I_o^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s}\right).G_i(s)}{1+\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s}\right).G_i(s)}$$

$$T_i(s) = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{L_f}\right)}{s^2 + \left(\frac{R_f + K_{pi}}{L_f}\right)s + \left(\frac{K_{ii}}{L_f}\right)} \quad (3\text{-}52)$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารของ $T_i(s)$ ในสมการที่ (3-52) กับพหุนามตัวหารของระบบอันดับสอง ในสมการที่ (3-46) แสดงได้ดังสมการที่ (3-53) และ (3-54) ดังนี้

$$K_{pi} = 2\zeta_i \omega_{n,i} L_f - R_f \quad (3\text{-}53)$$

$$K_{ii} = \omega_{n,i}^2 L_f \quad (3\text{-}54)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC จะอาศัยสมการที่ (3-47), (3-48), (3-53) และ (3-54) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่จะกำหนดสมรรถนะของตัวควบคุม คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio: ζ) และ ความกว้างแถบ (Bandwidth: ω_n) ของตัวควบคุม ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ กำหนดให้ ζ_v = 0.85 และ $\omega_{n,v}$ = 5250 rad/s สำหรับลูปควบคุมแรงดัน ζ_i = 0.3 และ $\omega_{n,i}$ = 42.5 rad/s สำหรับลูปควบคุมกระแส นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบตัวควบคุม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

พารามิเตอร์	**ค่า**
V_{dc}	200 V
R_f	125 mΩ
L_f	5 mH
C_f	10 μF
R	30 Ω

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พิจารณาค่าพารามิเตอร์การออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยการแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (3-47), (3-48), (3-53) และ (3-54) ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแสดงได้ดังนี้

$$K_{pv} = 0.0191,\ K_{iv} = 275.625,\ K_{pi} = 0.0025 \text{ และ } K_{ii} = 9.03125$$

3.4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการเขียนโปรแกรมจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB โดยจากรูปที่ 3.11 สามารถพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางฝั่ง DC จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์วงจรกรองสำหรับวงจรเรียงกระแส ซึ่งจำเป็นต้องใช้ $L_1 \geq 4.7$ mH และ $C_1 \geq 254$ µF เพื่อให้นำกระแสได้ต่อเนื่องและกรองแรงดัน v_2 ให้เรียบขึ้น นอกจากนี้สามารถพิจารณาค่าพารามิเตอร์การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำ ในส่วนทางฝั่งเอาต์พุตของวงจรที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ (L_f) และตัวเก็บประจุ (C_f) เพื่อกรองเอาความถี่ต่ำผ่าน โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์แสดงดังสมการที่ (3-55)

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \tag{3-55}$$

โดยที่ f_o คือความถี่ตัดผ่าน (Cutoff frequency)

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ค่าความถี่ตัดผ่านเท่ากับ 1 kHz และเลือกใช้ค่า L_f = 5 mH สามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ คือ $C_f \geq 10$ µF จากเงื่อนไขที่ได้จากการออกแบบสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์สำหรับระบบที่มีตัวควบคุม

พารามิเตอร์	ค่า	พารามิเตอร์	ค่า
V_s	220 V_{rms}	L_f	5 mH
ω_n	$2\pi \times 50$ rad/s	C_f	10 µF
R_{eq}	1 mH	R	30 Ω
L_{eq}	1 µF	f_s	10 kHz

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

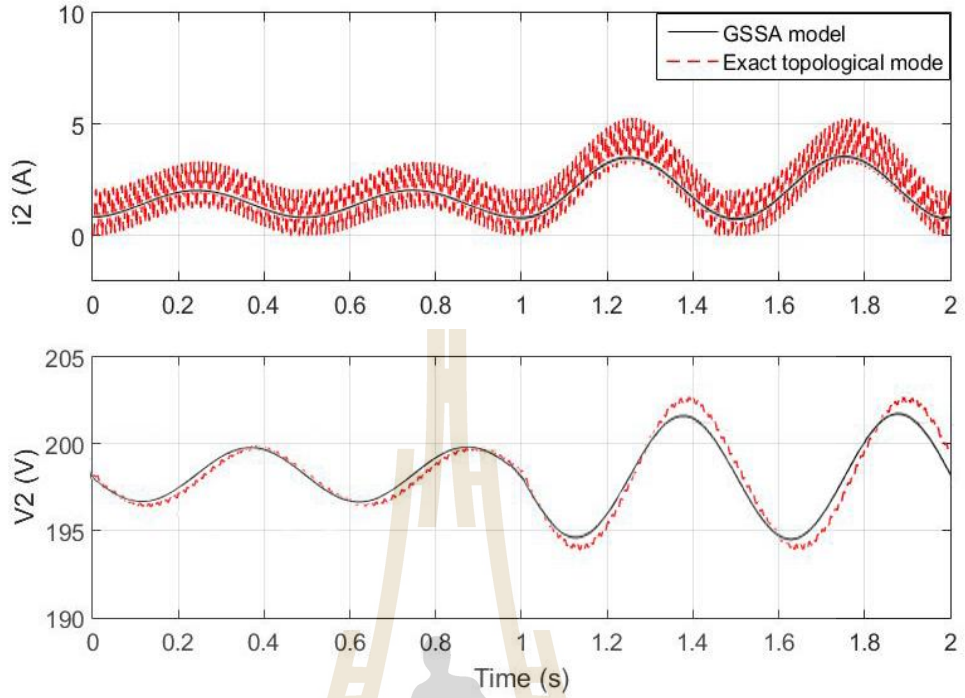
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์สำหรับระบบที่มีตัวควบคุม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า	พารามิเตอร์	ค่า
C_{eq}	22 nF	A_r	10
R_1	1 mΩ	K_{pv}	0.0191
L_1	140 mH	K_{iv}	275.625
C_1	27 mF	K_{pi}	0.0025
R_f	125 mΩ	K_{ii}	9.03125

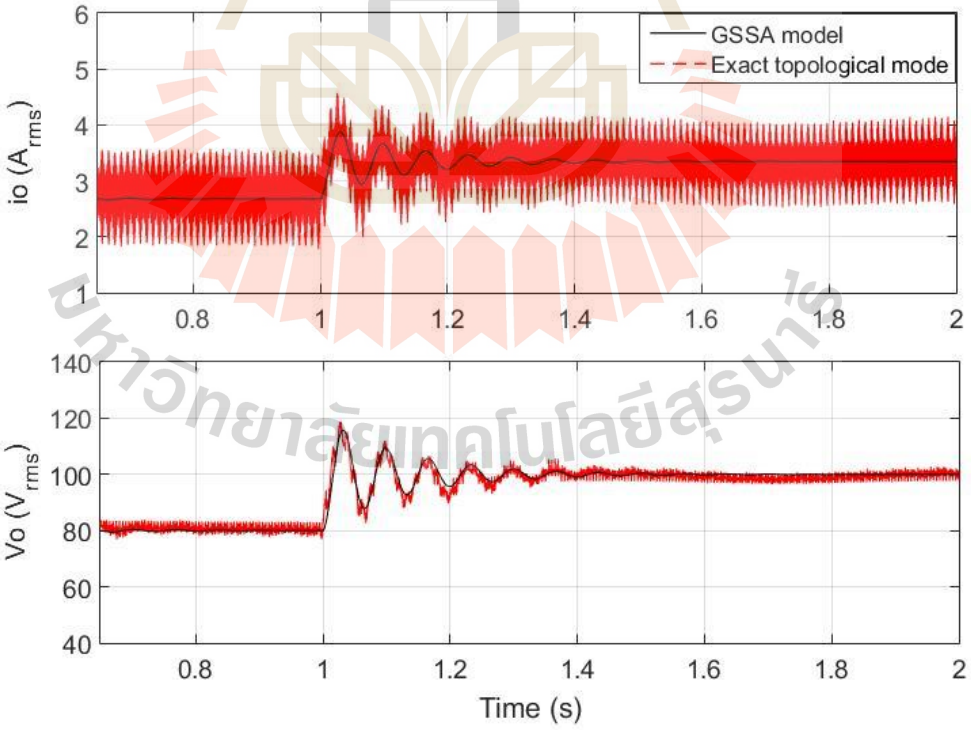
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ดำเนินการโดยกำหนดให้ V_o^* มีการเปลี่ยนแปลงจาก 80 V_{rms} เป็น 100 V_{rms} ในวินาทีที่ 1.0 จะได้ผลการตอบสนองของ i_1, v_1, i_2, v_2, i_o และ v_o ของระบบ แสดงดังรูปที่ 3.15 ถึงรูปที่ 3.17 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.15 ผลการตอบสนอง i_1 และ v_1



รูปที่ 3.16 ผลการตอบสนอง i_2 และ v_2



รูปที่ 3.17 ผลการตอบสนอง i_o และ v_o

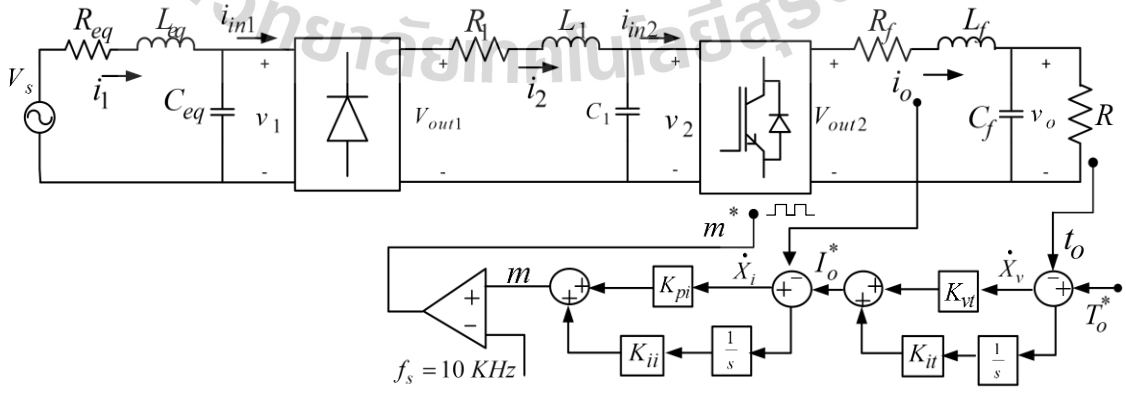
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองเมื่อมีการปรับค่าแรงดันอ้างอิงให้เพิ่มขึ้น ในวินาทีที่ 1.0 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลง และผลการตอบสนองที่ได้ทำการพิสูจน์หาแบบจำลองมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว ซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวนั้นยังคงมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม แต่อย่างไรก็ตามชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังจะปรากฏการกระเพื่อมของสัญญาณเนื่องจากเป็นการจำลองสถานการณ์ของระบบจริง แต่ผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองจะไม่มีการกระเพื่อมของสัญญาณ เนื่องจากแบบจำลองนั้นไม่ได้พิจารณาผลของอุปกรณ์สวิตซ์ ด้วยเหตุนี้เราจึงเรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองเฉลี่ย ถึงแม้ไม่ได้อธิบายถึงการกระเพื่อมของสัญญาณ แต่พลวัตที่สำคัญของระบบยังคงอยู่และเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการแบบจำลองที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิในหัวข้อถัดไป สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองพลวัตของระบบความคุมความร้อนของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ ลงในวารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดบทความแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ

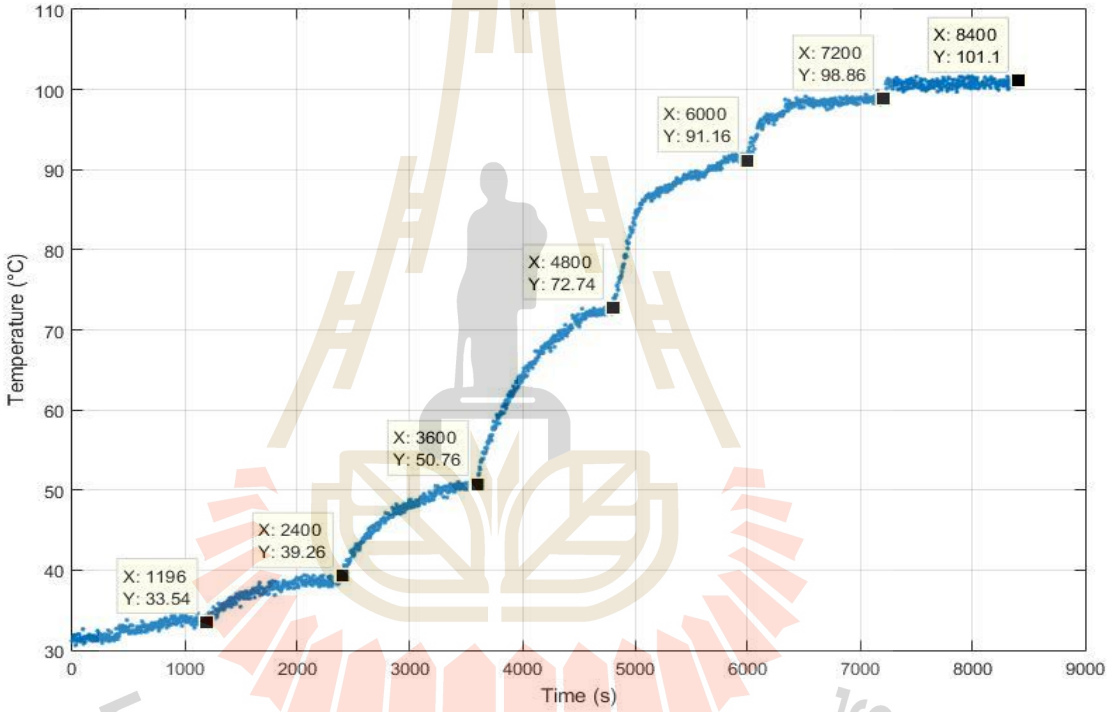
3.5.1 การพิสูจน์หาความสัมพันธ์และการออกแบบตัวควบคุมพีไอ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ให้ความสนใจในการควบคุมอุณหภูมิของระบบทำความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื่อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านๆมา โดยในหัวข้อนี้จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีตัวควบคุมมาประยุกต์เป็นแบบจำลองทางพลวัตของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 3.18



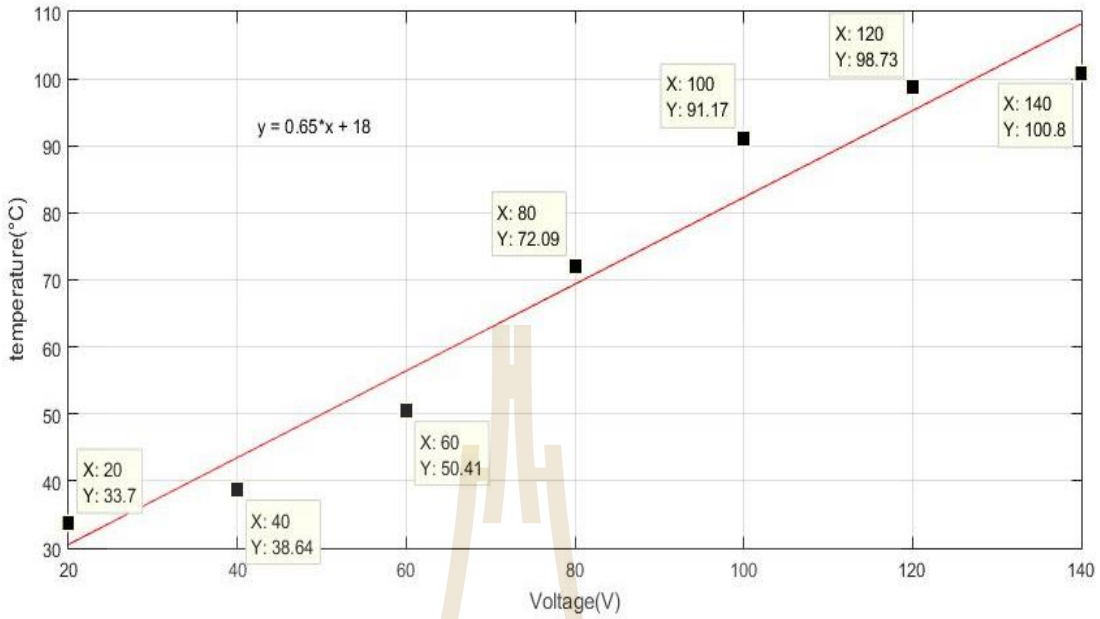
รูปที่ 3.18 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ

พิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอุณหภูมิ โดยทำการทดสอบจากเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก การทดสอบจะใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องปกติ เนื่องจากน้ำและเอทานอลมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกันคือ 100 และ 78.32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งการทดสอบทำได้ด้วยวิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ ด้วยการตั้งค่าแรงดันเริ่มต้น 20 V_{rms} และทำการเพิ่มค่าแรงดันขึ้นทีละ 20 V_{rms} จนกระทั่งถึงค่าแรงดันที่ 140 จากนั้นทำการตรวจวัดอุณหภูมิในทุก ๆ 5 วินาที ทำการทดลองซ้ำกัน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ได้ผลการทดสอบแสดงดังกราฟในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ผลการทดสอบความสัมพันธ์อุณหภูมิกับแรงดัน ณ เวลาต่างๆ

จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้น สามารถหาความสัมพันธ์แรงดันและอุณหภูมิ โดยนำค่าอุณหภูมิที่สภาวะอยู่ตัวสำหรับแรงดันแต่ละค่า มาดำเนินการหาค่าเฉลี่ย และทำการพล็อตกราฟสมการเชิงเส้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.20 จากรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันแสดงได้ดังสมการที่ (3-56)



รูปที่ 3.20 ผลของสมการเชิงเส้นสำหรับความสัมพันธ์อุณหภูมิกับแรงดัน

$$y = 0.65x + 18 \tag{3-56}$$

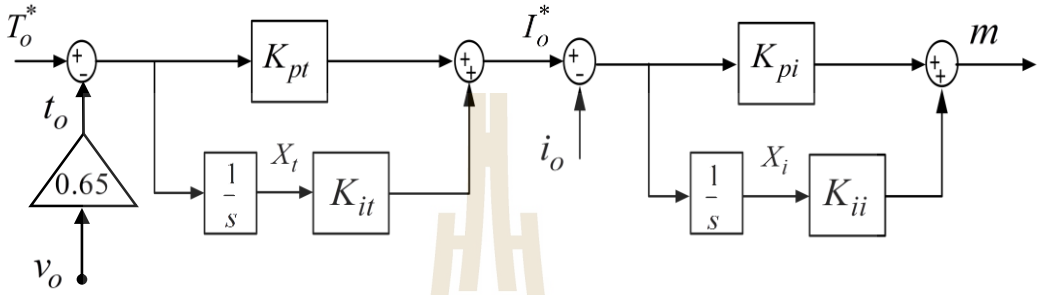
โดย y คือ ค่าอุณหภูมิ (^{o}C)

x คือ ค่าแรงดัน (V)

จากการทดสอบพิจารณาสมการความสัมพันธ์อุณหภูมิกับแรงดัน ดังสมการที่ (3-56) พบว่ามีความชันเท่ากับ 0.65 และมีจุดตัดแกนอยู่ที่ 18 สามารถนำไปพิจารณาร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยมีการอธิบายรายละเอียด ได้ดังต่อไปนี้

การออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิสำหรับวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยตัวควบคุมพีไอในการควบคุมระบบทำความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 3.21 ซึ่งโครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การออกแบบตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยการออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุตในหัวข้อที่ 3.4.2 ทำให้ได้ค่า K_{pi} และ K_{ii} ดังสมการที่ (3-53) และ (3-54) ในส่วนที่ 2 การออกแบบตัวควบคุมลูปอุณหภูมิ จากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เป็นการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องอันดับของระบบที่มีค่าตัวแปรต่าง ๆ อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์

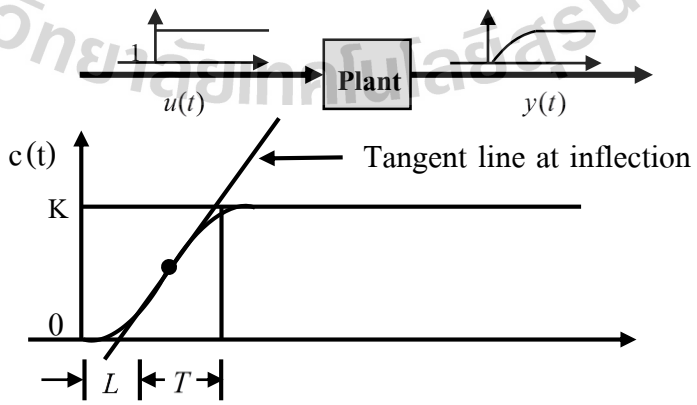
อันดับสอง แต่เนื่องจากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมลูปอุณหภูมิ อยู่ในรูปแบบสมการอนุพันธ์อันดับสาม จึงไม่สามารถดำเนินการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวได้ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้วิธีการของซีกเกลอร์-นิโคลส์ โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะได้นำเสนอดังนี้



รูปที่ 3.21 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมพีไอสำหรับควบคุมอุณหภูมิ

- **การออกแบบตัวควบคุมลูปอุณหภูมิ**

ระบบการควบคุมอุณหภูมิที่ศึกษา เริ่มจากการนำหลักการของซีกเกลอร์-นิโคลส์ มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ซึ่งมีวิธีการออกแบบด้วยกันสองวิธีคือ วิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ (Process Reaction Method) และ วิธีการวัฏจักรท้ายสุด (Ultimate Cycle Method) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์อาศัยวิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ ซึ่งเป็นการปรับค่าเกนตัวควบคุมโดยจะใช้ระบบเปิด (Open-loop System) เริ่มจากการป้อนสัญญาณขั้นบันไดไปยังระบบ และทำการวัดตัวแปรต่าง ๆ จากผลการตอบสนองของกระบวนการ แสดงได้ดังรูปที่ 3.22 โดยเลือกเส้นสัมผัสกราฟสัญญาณเอาต์พุตที่ความชันสูงสุด และดำเนินคำนวณหาค่าอัตราขยายต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.22 การตอบสนองของระบบโดยวิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ

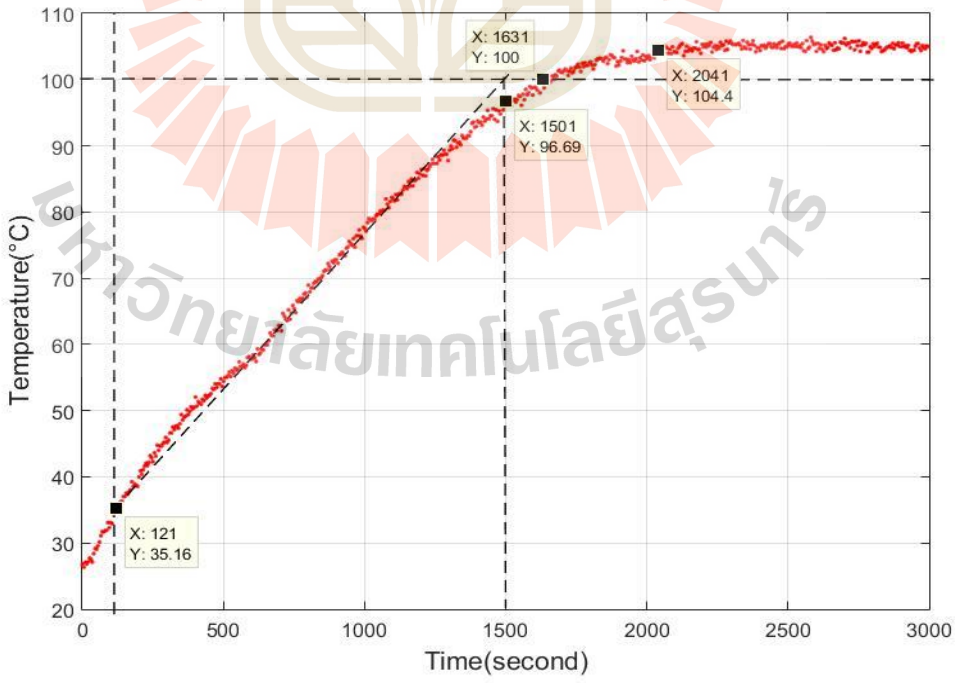
โดยที่ L = ค่าหน่วงเวลา (วินาที)

T = ค่าคงตัวเวลา (วินาที)

ตารางที่ 3.5 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ โดยวิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ

Type	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดความร้อนกับอุณหภูมิเป็นสิ่งจำเป็น โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดำเนินการทดสอบด้วยการเริ่มต้นที่อุณหภูมิน้ำปกติประมาณ 25 องศาเซลเซียส ให้เพิ่มขึ้นเป็น 100 องศาเซลเซียส ซึ่งแรงดันที่จ่ายให้กับระบบอยู่ที่ 100 V_{rms} ตรวจวัดอุณหภูมิทุกๆ 5 วินาที ทำซ้ำกัน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย จากผลการทดสอบทำให้ได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 3.23

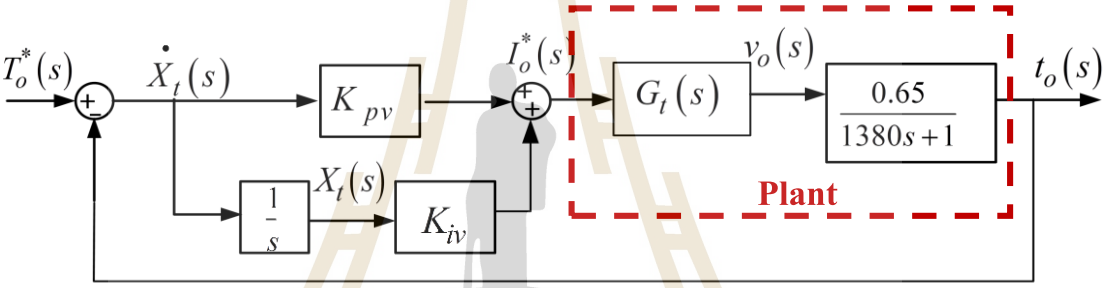


รูปที่ 3.23 ผลการตอบสนองของระบบ

ซึ่งวิธีการนี้จะพิจารณาค่าคงตัวทางเวลา (time Constant ; τ) พิจารณาด้วยการลากเส้นตรงให้สัมผัสกับจุดที่มีความชันมากที่สุด พบว่ามีค่า $\tau = 1380$ วินาที โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของผลการตอบสนองเมื่อสัญญาณขาเข้าเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยแสดงดังสมการที่ (3-57)

$$T(s) = \frac{1}{\tau s + 1} = \frac{1}{1380s + 1} \tag{3-57}$$

ดังนั้นโครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิของระบบทำความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิ

ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_t(s)$ หาได้จากสมการแรงดันเอาต์พุตของตัวแปรสถานะสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC คือ

$$\dot{v}_o(t) = \frac{1}{C_f} i_o(t) - \frac{1}{RC_f} v_o(t) \tag{3-58}$$

ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ (3-58) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (3-59)

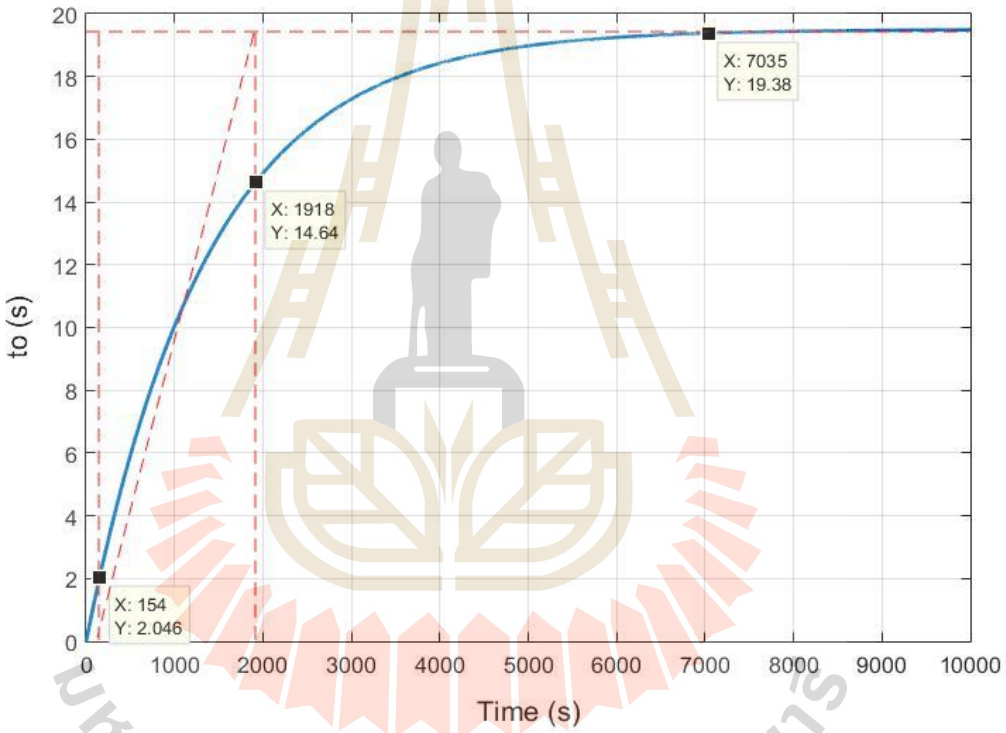
$$sV_o(s) = \frac{1}{C_f} I_o(s) - \frac{1}{RC_f} V_o(s) \tag{3-59}$$

ดำเนินการจัดรูปหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_t(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (3-60)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$G_t(s) = \frac{V_o(s)}{I_o(s)} = \frac{R}{sRC_f + 1} \tag{3-60}$$

จากการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปควบคุมอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.24 สามารถพิจารณาหาค่าหน่วงเวลา L และค่าคงตัวทางเวลา T สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยวิธีการของซีกเกลอร์-นิโคลส์ การจำลองผลการตอบสนองของพลานต์ในระบบควบคุมวงเปิดจะอาศัยโปรแกรม MATLAB บนคอมพิวเตอร์ โดยผลการตอบสนองของระบบวงเปิดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 พลานต์ของตัวควบคุมอุณหภูมิ

ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-61)

$$G(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s}) \tag{3-61}$$

จากรูปที่ 3.25 จะได้ค่า $L = 154\,s$ และ $T = 1764\,s$ ทำการแทนค่าหาตัวควบคุม PI จะได้

$$\begin{cases} K_p = 0.9\dfrac{T}{L} & = 10.309 \\ T_i = \dfrac{L}{0.3} & = 513.333 \end{cases} \tag{3-62}$$

ดังนั้นจะได้

$$K_{pt} = 10.309 \tag{3-63}$$

$$K_{it} = \frac{K_p}{T_i} = 0.020 \tag{3-64}$$

3.5.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบ

จากการศึกษาและอธิบายเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้น โดยหลักการของตัวควบคุมพีไอ คือ การหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง T_o^* และ t_o เพื่อทำการปรับคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสัญญาณที่ได้หลังจากการปรับคูณจะถูกส่งเข้าสู่ตัวเปรียบเทียบ เพื่อให้ได้สัญญาณวัฏจักรการทำงานของสวิตซ์ เมื่อทำการพิจารณาหาแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุมโดยจะทำการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (m^*) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยพิจารณาหาความสัมพันธ์ในส่วนการควบคุม ดังรูปที่ 3.21 ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือ K_{pt}, K_{it}, K_{pi} และ K_{ii} ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างสามารถเขียนสมการของตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปของค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ที่เกิดจากกระบวนการของตัวควบคุม ได้ดังสมการที่ (3-65) และ (3-66)

$$m = -K_{pi}i_o - 0.65K_{pt}K_{pi}v_o + K_{it}K_{pi}X_t + K_{ii}X_i + K_{pt}K_{pi}T_o^* \tag{3-65}$$

$$m^* = \frac{1}{A_r}\left(-K_{pi}i_o - 0.65K_{pt}K_{pi}v_o + K_{it}K_{pi}X_t + K_{ii}X_i + K_{pt}K_{pi}T_o^*\right) \tag{3-66}$$

ในส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับตัวควบคุมพีไอ ทั้งลูปการควบคุมอุณหภูมิและลูปการควบคุมกระแส จะประกอบด้วยเป็นพจน์ที่เป็นปริพันธ์ โดยกำหนดให้มีตัวแปรสถานะของลูปอุณหภูมิ เป็น X_t และตัวแปรสถานะของลูปกระแส เป็น X_i แสดงได้ดังสมการที่ (3-67)

$$\begin{cases} \dot{X}_t = T_o^* - 0.65v_o \\ \dot{X}_i = -i_o - 0.65K_{pt}v_o + K_{it}X_t + K_{pt}T_o^* \end{cases} \tag{3-67}$$

ความสัมพันธ์ข้างต้นมีตัวแปรสถานะบ่งบอกถึงปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับ และพบว่าตัวแปรสถานะของแบบจำลองอยู่ในรูปเชิงซ้อน ดังนั้นจึงดำเนินการหาขนาดของสัญญาณเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.4.1 เมื่อทำการแทนค่าจะได้ความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3-68)

$$\begin{cases} m^* = \dfrac{1}{A_r}\left(-2K_{pi}\sqrt{x_7^2 + x_8^2} - 1.3K_{pt}K_{pi}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} + K_{it}K_{pi}X_t + K_{ii}X_i + K_{pt}K_{pi}T_o^*\right) \\ \dot{X}_t = T_o^* - 1.3\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} \\ \dot{X}_i = -2\sqrt{x_7^2 + x_8^2} - 1.3K_{pt}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} + K_{it}X_t + K_{pt}T_o^* \end{cases} \tag{3-68}$$

ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ สามารถดำเนินการได้โดยทำการแทนค่า $m = m^*$ ลงในสมการตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ที่ถูกเขียนให้อยู่ในรูปแบบปริภูมิสถานะในสมการที่ (3-33) ในหัวข้อที่ 3.3.1 และทำการเพิ่มตัวแปรสถานะ X_t และ X_i จากนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบควบคุมอุณหภูมิ แสดงได้ดังสมการที่ (3-69) ซึ่งจะพบว่ามีพารามิเตอร์ตัวควบคุม K_{pt}, K_{it}, K_{pi} และ K_{ii} ปรากฏอยู่ในแบบจำลอง นอกจากนี้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยได้นำเสนอรายละเอียดต่าง ๆ ไว้ในหัวข้อถัดไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$
\begin{cases}
\dot{x}_1 = -\dfrac{R_1}{L_1}x_1 - \dfrac{1}{L_1}x_2 - \dfrac{4}{\pi L_1}x_6 \\
\dot{x}_2 = \dfrac{1}{C_1}x_1 - \dfrac{8K_{pi}\sqrt{x_7^2+x_8^2}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}x_8 - \dfrac{5.2K_{pT}K_{pi}\sqrt{x_9^2+x_{10}^2}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}x_8 + \dfrac{4K_{it}K_{pi}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}X_t x_8 \\
\quad + \dfrac{4K_{ii}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}X_i x_8 + \dfrac{4K_{pt}K_{pi}T_o^*}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}x_8 \\
\dot{x}_3 = -\dfrac{R_{eq}}{L_{eq}}x_3 + \omega x_4 - \dfrac{1}{L_{eq}}x_5 \\
\dot{x}_4 = -\omega x_3 - \dfrac{R_{eq}}{L_{eq}}x_4 - \dfrac{1}{L_{eq}}x_7 + \dfrac{1}{2L_{eq}}Vm \\
\dot{x}_5 = \dfrac{1}{C_{eq}}x_3 - \omega x_6 \\
\dot{x}_6 = \dfrac{2}{\pi C_{eq}}x_1 + \dfrac{1}{C_{eq}}x_4 - \omega x_5 \\
\dot{x}_7 = -\dfrac{R_f}{L_f}x_7 + \omega x_8 - \dfrac{1}{L_f}x_9 \\
\dot{x}_8 = \dfrac{4K_{pi}\sqrt{x_7^2+x_8^2}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}x_2 + \dfrac{2.6K_{pt}K_{pi}\sqrt{x_9^2+x_{10}^2}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}x_2 - \dfrac{2K_{it}K_{pi}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}X_t x_2 \\
\quad - \dfrac{2K_{ii}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}X_i x_2 - \dfrac{2K_{pt}K_{pi}T_o^*}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}x_2 - \omega x_7 - \dfrac{R_f}{L_f}x_8 - \dfrac{1}{L_f}x_{10} \\
\dot{x}_9 = \dfrac{1}{C_f}x_7 - \dfrac{1}{RC_f}x_9 + \omega x_{10} \\
\dot{x}_{10} = \dfrac{1}{C_f}x_8 - \omega x_9 - \dfrac{1}{RC_f}x_{10} \\
\dot{X}_t = T_o^* - 1.3\sqrt{x_9^2+x_{10}^2} \\
\dot{X}_i = -2\sqrt{x_7^2+x_8^2} - 1.3K_{pt}\sqrt{x_9^2+x_{10}^2} + K_{it}X_t + K_{pt}T_o^*
\end{cases}
\tag{3-69}
$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

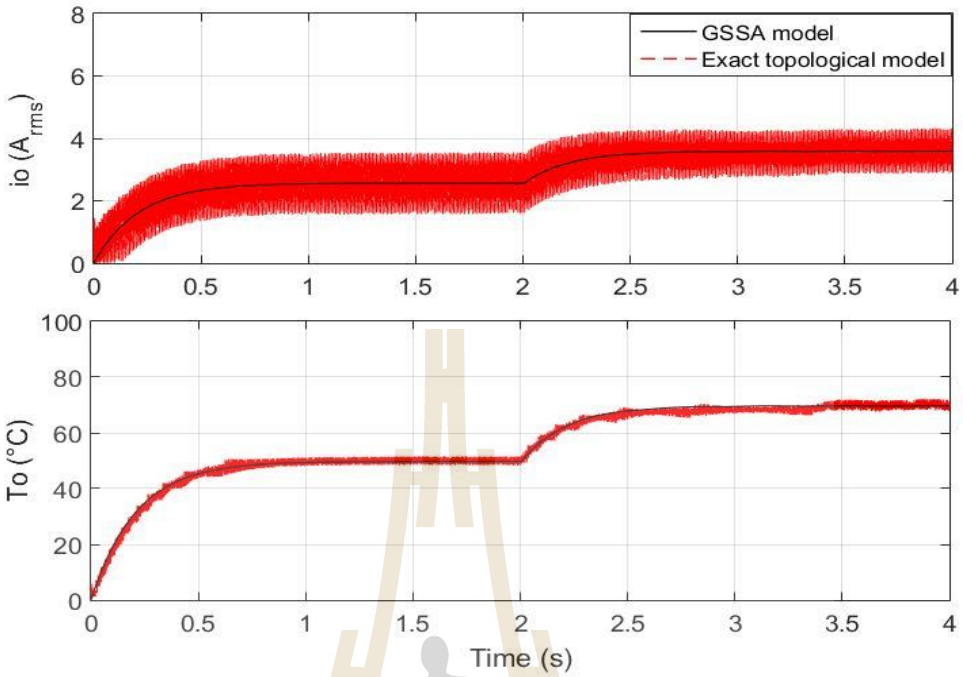
3.5.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยเลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ แสดงดังสมการที่ (3-61) และจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 3.18 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งพารามิเตอร์การจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.6 มีผลการตอบสนองที่ได้จากพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.26 ซึ่งแสดงผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต (t_o) และผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ (i_o) ตามลำดับ โดยการหาผลการตอบสนองกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของอุณหภูมิเอาต์พุต (T_o^*) ที่กำหนด จาก 50 °C ไปเป็น 70 °C ที่เวลา t = 2 เป็นต้นไป และในรูปที่ 3.27 แสดงผลการตอบสนองเช่นเดียวกันกับรูปที่ 3.26 โดยมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเอาต์พุตที่กำหนด (T_o^*) จาก 70 °C ไปเป็น 90 °C ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ของทั้งสองกรณีดังกล่าว

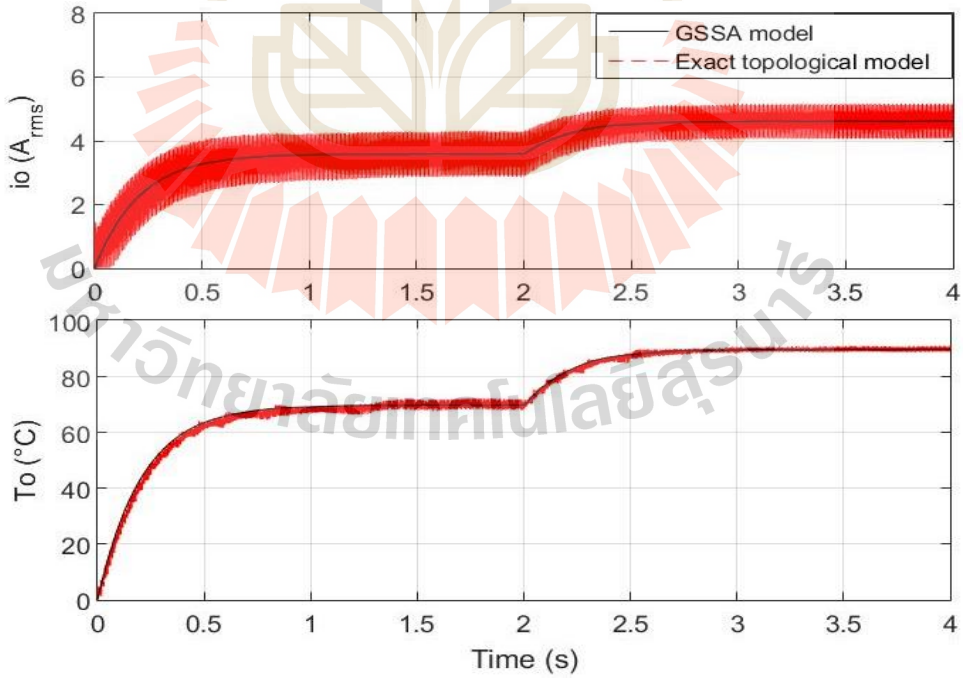
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์สำหรับระบบที่มีตัวควบคุม

พารามิเตอร์	ค่า	พารามิเตอร์	ค่า
V_s	220 V_{rms}	L_f	5 mH
ω_n	$2\pi \times 50$ rad/s	C_f	10 µF
R_{eq}	1 mΩ	R	30 Ω
L_{eq}	1 mH	f_s	10 kHz
C_{eq}	22 µF	A_r	10
R_1	1 mΩ	K_{pt}	10.309
L_1	140 mH	K_{it}	0.02
C_1	27 mF	K_{pi}	0.0025
R_f	125 mΩ	K_{ii}	9.03125

สำนักวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.26 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนแปลง T_o^* จาก 50 °C ไปเป็น 70 °C ที่เวลา 2 วินาที



รูปที่ 3.27 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อเปลี่ยนแปลง T_o^* จาก 70 °C ไปเป็น 90 °C ที่เวลา 2 วินาที

จากการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 3.26 และ 3.27 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตและผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรอินเวอร์เตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเอาต์พุตมีความถูกต้อง โดยมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องและคล้อยตามกันกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วครู่ และสภาวะอยู่ตัว ซึ่งข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประการสำคัญนั้นก็คือ การใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่สั้น ซึ่งการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK นั้นจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ประมาณ (t_{fs}) 786.186 วินาที ส่วนการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ประมาณ (t_{av}) 146.724 วินาที สามารถคำนวณการประหยัดเวลาได้ดังสมการที่ (3-70)

$$\%t_{saving} = \frac{t_{fs} - t_{av}}{t_{fs}} x\,100\% \tag{3-70}$$

เมื่อทำการคำนวณเวลา จะพบว่าประหยัดเวลาในการจำลองสถานการณ์ได้ถึง 81.33% ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์เพียง 1 รอบ ของ 1 ชุดพารามิเตอร์เท่านั้น ซึ่งในบทถัดไปของงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ โดยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจำเป็นต้องมีการคำนวณแบบซ้ำ ๆ หลาย ๆ รอบ ดังนั้นแบบจำลองระบบที่มีการควบคุมดังกล่าวจึงเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้กับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งจะช่วยลดข้อจำกัดสำหรับการสุ่มค่าในขั้นตอนของการออกแบบ และช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตให้ดียิ่งขึ้น แสดงรายละเอียดต่อไปในบทที่ 4

3.6 สรุป

จากรายละเอียดเนื้อหาที่กล่าวในบทที่ 3 ได้นำเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมพีไอ ซึ่งเนื้อหาได้กล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรที่ไม่มีการควบคุมเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรที่มีตัวควบคุมกระแสและแรงดัน และแบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำไปเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ พร้อมแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อุณหภูมิ นอกจากนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธีการดั้งเดิมซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอจะส่งผลต่อการลู่เข้าสู่สถานะอยู่ตัวและการพุ่งเกินของระบบ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าที่มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังทั้งในสภาวะชั่วครู่ และสภาวะอยู่ตัว ซึ่งผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบดังกล่าวถือว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องและแม่นยำ เนื้อหาในบทนี้ถือเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญ สำหรับการนำไปประยุกต์ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมและยังช่วยเพิ่มสมรรถนะของผลการตอบสนองของอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่รวดเร็ว ซึ่งเนื้อหาการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมจะได้รับการอธิบายไว้ในบทที่ 4 และรายละเอียดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้รับการนำเสนอต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

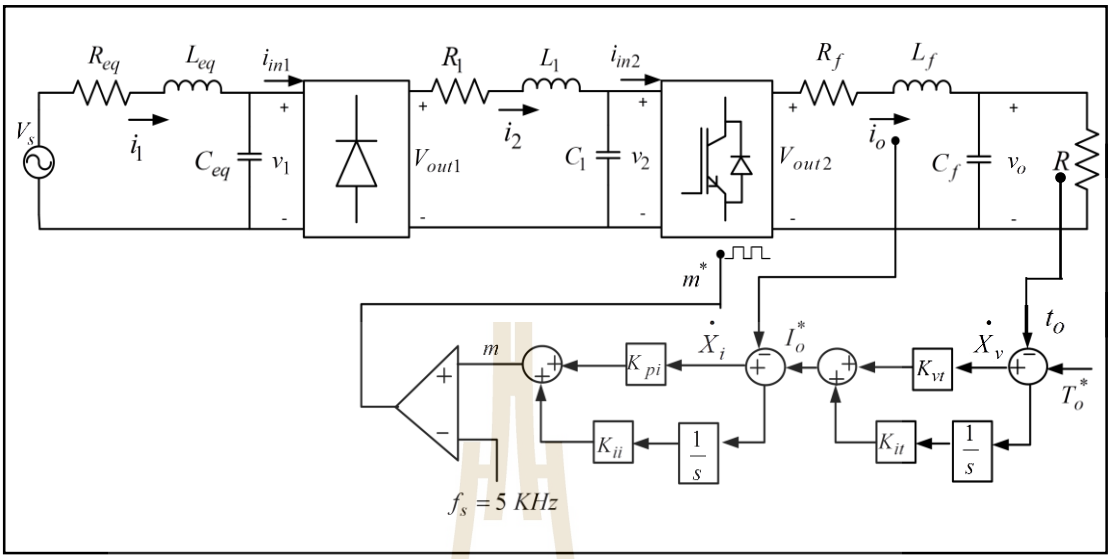
บทที่ 4
การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

4.1 บทนำ

จากบทที่ผ่านมาได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมพีไอ รวมไปถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของระบบ ซึ่งพบว่าแบบจำลองดังกล่าวใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่รวดเร็วกว่าแบบจำลองสวิตซ์ใน MATLAB ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมสำหรับการหาจุดที่ดีที่สุด (Optimization) ที่มีการค้นหาแบบซ้ำ ๆ ดังนั้นสำหรับเนื้อหาในบทที่ 4 จะนำเสนอการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดให้กับระบบ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว เข้ามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า เพื่อทำการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตมีสมรรถนะที่ดีมากยิ่งขึ้น ร่วมทั้งมีการตรวจสอบความสมจริงในขณะการออกแบบ เพื่อให้ตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบขึ้นสามารถนำไปสร้างจริงได้ในทางปฏิบัติ สำหรับการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบตาบูเชิงปรับตัวเป็นวิธีการที่ได้รับการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ว่าสามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้จริง (Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., Sujitjorn, S., and Totarong, P., 2002) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันผลการเปรียบเทียบ พร้อมกับการอภิปรายผล โดยมีรายละเอียดทั้งหมดแสดงไว้ในบทนี้

4.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC และระบบควบคุมป้อนกลับ

ระบบที่พิจารณา คือวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มคลื่นต่อเชื่อมกันแบบเฮชบริดจ์ ผ่านวงจรกรองต่อเข้ากับโหลดตัวต้านทาน R โดยโหลด R เปรียบเสมือนขดลวดความร้อนของระบบกลั่นเอทานอล และมีตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในหม้อต้ม



รูปที่ 4.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุมพีไอ

ระบบควบคุมป้อนกลับของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือระบบควบคุมที่ประกอบด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต โดยตัวควบคุมอุณหภูมินั้นทำหน้าที่ในการควบคุมค่าอุณหภูมิเอาต์พุต ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิในส่วนของหม้อต้ม โดยเป็นส่วนการทำความร้อนหลัก สำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ทำให้มีการคงค่าเท่ากับจุดปรับตั้ง (setpoint) และอาศัยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วย ATS จำเป็นจะต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา ด้วยการนำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเข้ามาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเพื่อนำไปประเมินผลตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ของการออกแบบด้วย ATS ซึ่งแบบจำลองของระบบได้ทำการวิเคราะห์และอธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 สำหรับเหตุผลที่สำคัญในการเลือกใช้วิธีการ ATS นั่นคือ ในระบบมีการคำนวณแบบซ้ำ ๆ เพื่อหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด ถ้าหากนำไปใช้ร่วมกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (SIMULINK) จะส่งผลให้การคำนวณในแต่ละรอบใช้เวลานาน จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ในระหว่างกระบวนการ การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดังกล่าวร่วมกับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถนำไปประยุกต์ตรวจสอบผลการตอบสนองของระบบได้อีกด้วย

4.3 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

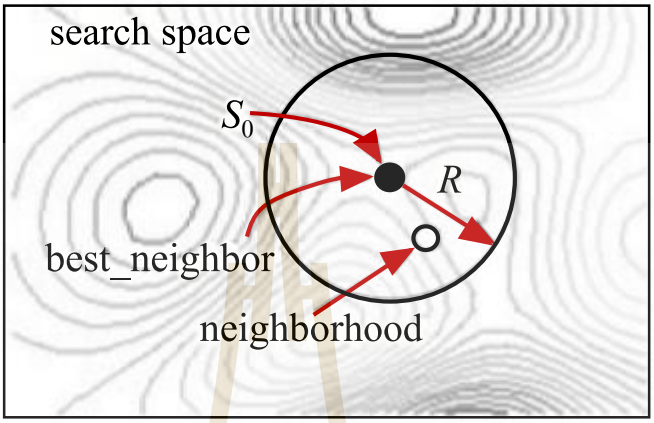
การออกแบบตัวควบคุมพีไอ ให้มีสมรรถนะผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตที่ดีที่สุด เป็นสิ่งที่ผู้วิจัยให้ความสำคัญและคาดหวังเป็นอย่างยิ่ง จึงได้มุ่งเน้นพัฒนาระบบดังกล่าว โดยการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า ATS เป็นการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นโดย กองพันอารีรักษ์ และสราวุฒิ สุจิตจร ในปี ค.ศ. 2002 มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะปรับปรุงสมรรถนะการค้นหาคำตอบ ซึ่งถูกพัฒนามาจากวิธีการค้นหาแบบตาบู (Tabu Search: TS) ที่มีพื้นฐานการค้นหาคำตอบโดยเงื่อนไขที่ช่วยในการเลือกคำตอบใหม่ในเส้นทางที่คาดว่าจะพบคำตอบที่เหมาะสมมากที่สุด ได้แก่ เงื่อนไขการค้นหาคำตอบใหม่โดยเริ่มต้นการค้นหาจากคำตอบปัจจุบัน จะใช้หลักการเดิน (move operator) เพื่อให้ได้คำตอบใหม่ที่ดีกว่า อาศัยการประเมินค่าคำตอบรอบข้าง ภายในรัศมีเริ่มต้นที่กำหนด และอีกเงื่อนไข คือ การหลีกเลี่ยงเส้นทางการค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ (cycle avoidance) เพื่อให้วิธี TS สามารถค้นหาคำตอบที่หลุดจากคำตอบที่เหมาะสมแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum avoidance) ไปยังการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (global optimum) ในส่วนวิธี ATS ได้รับการพัฒนาด้วยการเพิ่ม 2 กลไก คือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius) โดยกลไกการเดินย้อนรอยจะใช้แก้ปัญหาสำหรับการติดอยู่ในคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น เป็นกลไกที่อนุญาตให้ระบบย้อนกลับไปค้นหาคำตอบบริเวณพื้นที่เดิมที่เคยถูกค้นหามาก่อน ซึ่งจะส่งผลให้ ระบบการค้นหามีโอกาสที่จะได้คำตอบในบริเวณพื้นที่ใหม่ สำหรับกลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหาคำตอบจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีและเหมาะสมที่สุด โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการค้นหาด้วย ATS สำหรับการพิจารณาตามขั้นตอนการค้นหาคำตอบ การกำหนดขอบเขตการค้นหา แนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วย ATS รวมไปถึงการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบผลการออกแบบ ซึ่งอัลกอริทึมการค้นหาดังกล่าวมีหลักการดังนี้

4.3.1 การค้นหาคำตอบด้วย ATS

โดยอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบด้วย ATS ที่พิจารณา สามารถสรุปรายละเอียดได้ตามขั้นตอนดังนี้

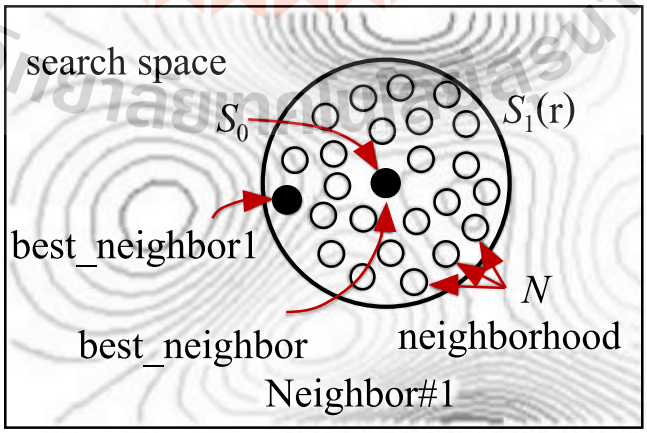
ขั้นตอนที่ 1 ทำการกำหนดขนาดพื้นที่การค้นหาคำตอบ กำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา ($count_{set}$) และทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้นภายในพื้นที่ค้นหาจำนวนคำตอบ ซึ่งในกรณีนี้คือ

K_{pt}, K_{it}, K_{pi} และ K_{ii} จากนั้นประเมินคำตอบที่ดีที่สุด เป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0) โดยที่การประเมินคำตอบจะพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (w) แสดงดังรูปที่ 4.2

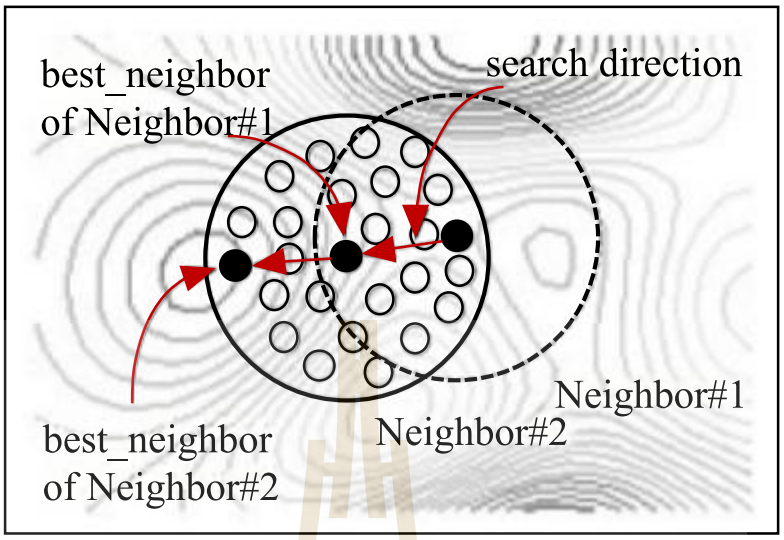


รูปที่ 4.2 สุ่มเลือกค่าคำตอบเริ่มต้น (S_0)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มเลือกคำตอบรอบข้างจำนวน N คำตอบ โดยนำ S_0 มาเป็นตำแหน่งศูนย์กลางเพื่อใช้สุ่มคำตอบในบริเวณใกล้เคียง (neighbor) ตามจำนวนที่กำหนดไว้ ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R (Radius) แล้วเก็บไว้ในเซต $S_1(r)$ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ทำการประเมินคำตอบรอบข้างด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นนำคำตอบที่ดีที่สุด ในบริเวณใกล้เคียง (S_1) มาเปรียบเทียบกับ S_0 และทำการประเมินเป็นคำตอบใหม่ (S_{new}) สำหรับรอบการค้นหาปัจจุบัน ($count_n$) และจะทำให้กลายเป็นคำตอบเริ่มต้น (S_0) สำหรับรอบการค้นหาถัดไป



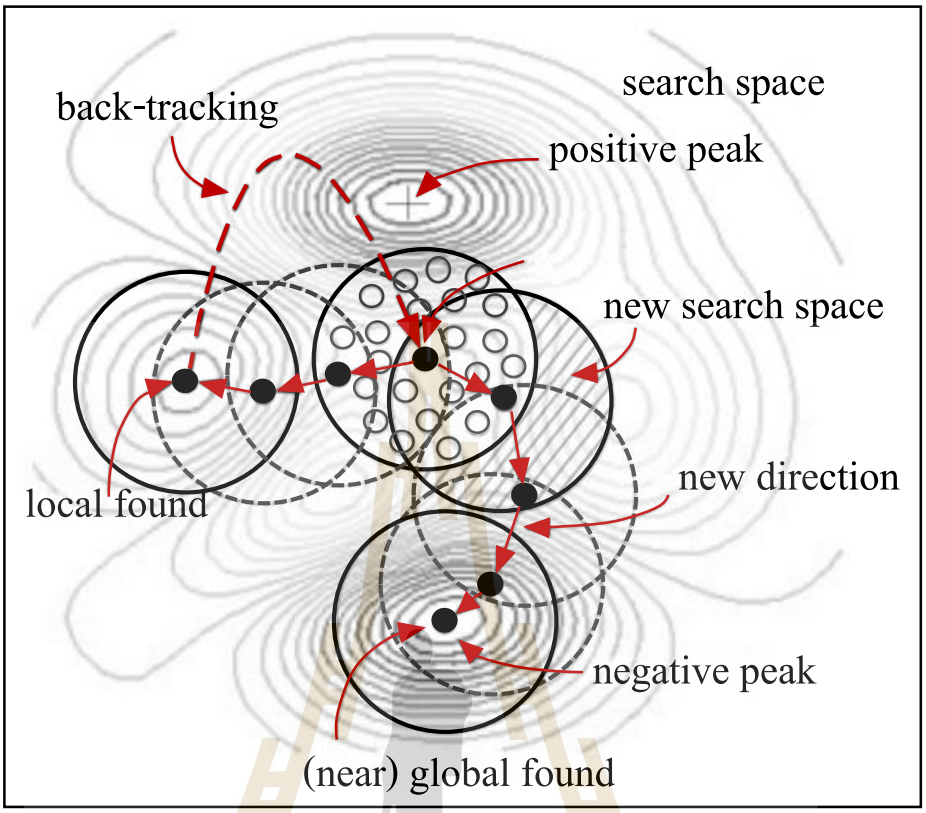
รูปที่ 4.3 สุ่มเลือกค่าคำตอบรอบข้าง



รูปที่ 4.4 สุ่มเลือกค่าคำตอบรอบข้างในรอบการค้นหาใหม่

ขั้นตอนที่ 3 ในรอบถัดไปโดยเมื่อ $count_n < count_{set}$ อัลกอริทึมจะดำเนินการค้นหาตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง จนกระทั่งได้คำตอบตามเงื่อนไขที่กำหนด หรือ $count_n > count_{set}$ จะหยุดกระบวนการค้นหา และในกรณีที่การค้นหาไม่พบคำตอบที่ดีขึ้น กลไกการเดินย้อนรอยจะถูกนำมาใช้

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น โดยอัลกอริทึมแบบตาบูไม่สามารถหาคำตอบใหม่ (S_{new}) ที่ดีกว่าคำตอบเริ่มต้น (S_0) ในรอบการค้นหาปัจจุบันได้ จึงต้องดำเนินการเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย ซึ่งกลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิม เพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้ผลจากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดพื้นที่การค้นหาใหม่ ซึ่งมีโอกาสที่จะหลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ เมื่อครบจำนวนรอบการค้นหาสิ้นสุดกระบวนการคำตอบที่ดีที่สุดถูกส่งมาเป็นคำตอบของกระบวนการค้นหา แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กลไกการเดินย้อนรอยค้นหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 5 เข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะทำการลดรัศมี เพื่อกระชับพื้นที่การค้นหาให้แคบลงเมื่อกระบวนการการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งจะทำให้ได้คำตอบจากการค้นหาที่มีความละเอียดมากขึ้น จนพบคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ส่งผลให้การค้นหาสามารถพบคำตอบได้เร็วยิ่งขึ้น ซึ่งการปรับลดรัศมีเป็นไปตามสมการที่ (4-1)

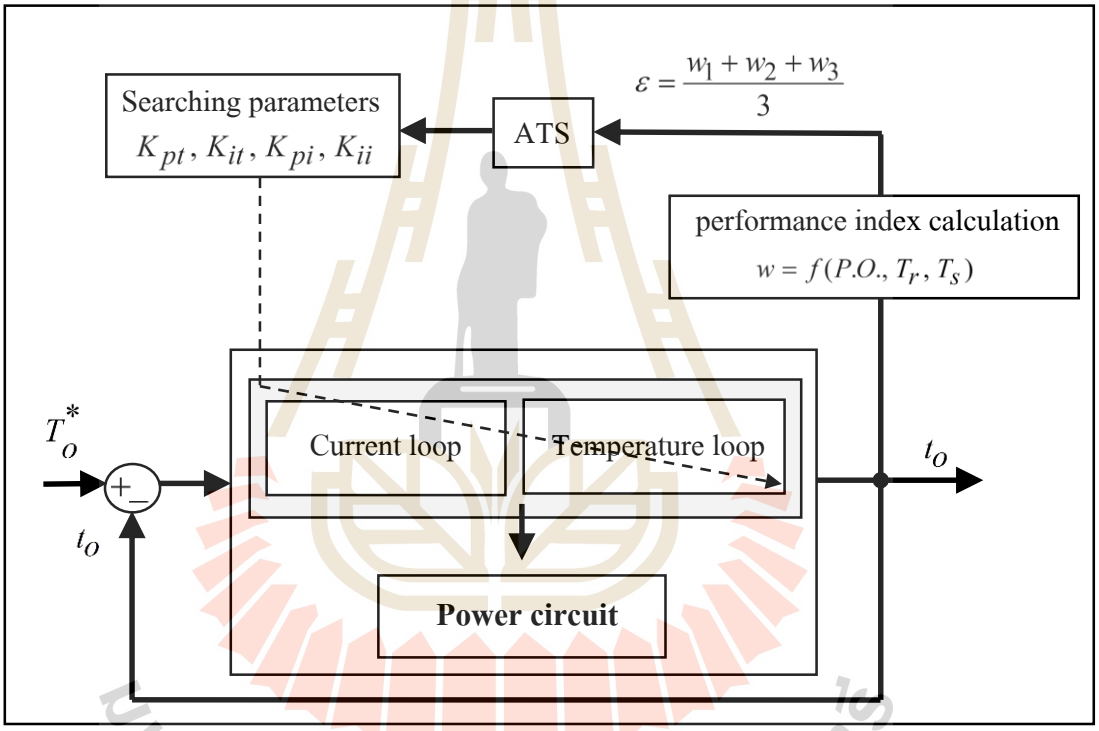
$$Radius(new) = \frac{Radius(old)}{DF} \tag{4-1}$$

โดยที่ $DF > 1$ คือ ตัวประกอบปรับลดรัศมี (Decreasing Factor)

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อทำการค้นหาคำตอบครบจำนวนรอบที่กำหนด จะได้คำตอบที่ดีที่สุด ถูกส่งมาเป็นคำตอบของกระบวนการค้นหา ซึ่งถือว่าสิ้นสุดกระบวนการการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

4.3.2 กระบวนการออกแบบตัวควบคุม

สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สามารถแสดงโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมในการค้นหา โดยมีองค์ประกอบสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาสำหรับใช้ในการจำลองผลการตอบสนองของระบบ และอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบของ ATS โดยจะดำเนินการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ 4 ค่า ได้แก่ K_{pt}, K_{it}, K_{pi} และ K_{ii} สามารถเขียนเป็นแผนผังกระบวนการแสดงได้ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วยวิธี ATS จะอาศัยการพิจารณาและประเมินค่าผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบ (w) โดยจะกำหนดค่าอุณหภูมิ (T_o^*) ใน 2 ย่านการทำงาน ที่มีการเปลี่ยนแปลงในทันทีทันใด ซึ่งถ้าหากผลการตอบสนองอุณหภูมิเอาต์พุตของระบบมีแนวโน้มที่ดีขึ้น จะส่งผลให้ w มีค่าลดลง โดยค่าดังกล่าวจะถูกนำมาใช้สำหรับการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมในกระบวนการค้นหาคำตอบด้วย ATS จนกระทั่งได้คำตอบที่ดีที่สุด ในลำดับถัดไปจะเป็นการนำเสนอกระบวนการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมแต่ละตัวที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 1 ทำการกำหนดค่าอุณหภูมิ (T_O^*) ในจุดการทำงานที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ กำหนดให้มีย่านการทำงาน 2 ย่านคือ ค่าอุณหภูมิ T_O^* เปลี่ยนแปลงจาก $60^\circ C$ ไปเป็น $70^\circ C$ และ T_O^* เปลี่ยนแปลงจาก $70^\circ C$ ไปเป็น $85^\circ C$ จากนั้นทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ อาทิเช่น จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด ขอบเขตการค้นหาคำตอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง ค่ารัศมี และตัวประกอบการปรับลดค่ารัศมี โดยคำตอบของกระบวนการค้นหากำหนดให้เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้แก่ K_{pt}, K_{it}, K_{pi} และ K_{ii}

สำหรับค่าพารามิเตอร์การค้นหาที่เหมาะสม สามารถกำหนดค่าเริ่มต้นของอัลกอริทึม ATS โดยทำการค้นหาจนกว่าจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ที่ทำให้ผลการตอบสนองดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ค่า w มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการค้นหาในระบบจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิผลการค้นหาคำตอบ และส่งผลต่อสมรรถนะของผลการตอบสนอง ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบพารามิเตอร์ดังกล่าว ดังตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.5 โดยการทดสอบพารามิเตอร์เริ่มต้นของอัลกอริทึม ATS มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

– การหาจำนวนค่าคำตอบเริ่มต้น (Initial number neighbor) ที่เหมาะสม ภายในขอบเขตการค้นที่กำหนดไว้ โดยกำหนดให้จำนวนการวนรอบมีค่า 10 รอบ จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 10 รัศมีของคำตอบเท่ากับ 20 และตัวปรับคูณลดรัศมีมีค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่า w ครั้งที่	**จำนวนคำตอบเริ่มต้น**			
	10	20	30	40
1	0.4988	0.4904	0.4896	0.4955
2	0.4904	0.4898	0.4955	0.4917
3	0.4986	0.4986	0.4904	0.4988
เฉลี่ย	0.4959	0.4929	0.4918	0.4953

การเลือกค่าพารามิเตอร์ของ ATS สำหรับใช้ค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่เหมาะสม จะใช้เกณฑ์พิจารณาจาก w เป็นประเด็นสำคัญ ซึ่งจากการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น โดยกำหนดจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 คำตอบ ซึ่งผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 สังเกตได้ว่า จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ จะให้ผลค่า w เฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 0.4918 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

– การหาจำนวนคำตอบรอบข้าง (Number neighbor) ที่เหมาะสม ภายในรัศมีการค้นหา โดยกำหนดให้จำนวนการวนรอบมีค่า 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 รัศมีของคำตอบเท่ากับ 20 และตัวปรับคูณลดรัศมีมีค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ค่า *w* ครั้งที่	**จำนวนคำตอบรอบข้าง**			
	10	20	30	40
1	0.4904	0.4917	0.4899	0.4955
2	0.4986	0.4904	0.4986	0.4988
3	0.4904	0.4904	0.4984	0.4986
เฉลี่ย	0.4931	0.4908	0.4956	0.4976

จากการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างดังตารางที่ 4.2 โดยกำหนดจำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 คำตอบ สังเกตว่า การใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ จะให้ค่า *w* เฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 0.4908 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ

– การหารัศมี (Radius) ของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม โดยกำหนดให้จำนวนการวนรอบมีค่า 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 20 และตัวปรับคูณลดรัศมีเท่ากับ 1

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

ค่า *w* ครั้งที่	**ค่ารัศมีเริ่มต้น**			
	10	20	30	40
1	0.4986	0.4899	0.4917	0.4955
2	0.4917	0.4899	0.4984	0.4955
3	0.4899	0.4899	0.4904	0.4986
เฉลี่ย	0.4934	0.4899	0.4935	0.4965

จากการทดสอบหารัศมีเริ่มต้นของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ดังตารางที่ 4.3 โดยกำหนดรัศมีเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 พบว่าการกำหนดรัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 20 จะให้ค่า *w* เฉลี่ยน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.4899 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้รัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 20

– การหาค่าตัวประกอบการปรับลดรัศมี (DF) ที่เหมาะสม อัตราปรับลดรัศมี มีค่า DF > 1 โดยกำหนดให้จำนวนการวนรอบมีค่า 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 , จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 20 และรัศมีของคำตอบเท่ากับ 20

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าตัวประกอบการปรับลดรัศมี

ค่า *w* ครั้งที่	**ค่าปรับลดรัศมี**			
	1.1	1.2	1.3	1.4
1	0.4898	0.4899	0.4904	0.4917
2	0.4899	0.4904	0.4917	0.4917
3	0.4899	0.4917	0.4955	0.4904
เฉลี่ย	0.4898	0.4906	0.4925	0.4912

จากการทดสอบค่าตัวประกอบการปรับลดรัศมีดังตารางที่ 4.4 โดยกำหนดค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1, 1.2, 1.3 และ 1.4 พบว่าค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีมีค่าเท่ากับ 1.1 จะให้ค่า *w* เฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 0.4898 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1

– การหาจำนวนรอบ (Round) หรือจำนวนการเดินในการค้นหาคำตอบ โดยกำหนดให้จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 , จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 20 , รัศมีของคำตอบ = 20 และตัวปรับคูณลดรัศมี = 1.1

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบจำนวนรอบการค้นหาคำตอบ

ค่า *w* ครั้งที่	**จำนวนรอบการค้นหาเริ่มต้น**			
	10	20	30	40
1	0.4904	0.4904	0.4904	0.4955
2	0.4904	0.4955	0.4898	0.4917
3	0.4917	0.4899	0.4899	0.4986
เฉลี่ย	0.4908	0.4919	0.4900	0.4952

จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของจำนวนรอบการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยกำหนดจำนวนรอบการค้นหาคำตอบ 10, 20, 30 และ 40 รอบ พบว่าเมื่อใช้จำนวน

รอบการค้นหาคำตอบมีค่าเท่ากับ 30 จะได้ค่า w เฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 0.4900 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้จำนวนรอบการค้นหาคำตอบเท่ากับ 30 รอบ

ขั้นตอนที่ 2 ดำเนินการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วย ATS โดยพิจารณาร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังรูปที่ 4.1 จากนั้นดำเนินการตรวจสอบความสมจริง โดยในการจัดทำวิจัยวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยได้คำนึงถึงความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ จึงมีการกำหนดเงื่อนไขตรวจสอบความสมจริง ด้วยการคำนวณหาสัญญาณควบคุม (m) ซึ่งเกิดจากตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้น โดยมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (4-2)

$$m = -K_{pi}i_o - 0.65K_{pt}K_{pi}v_o + K_{it}K_{pi}X_t + K_{ii}X_i + K_{pt}K_{pi}T_o^* \qquad (4\text{-}2)$$

จากเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น สัญญาณ m จะต้องมีค่าอยู่ภายในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 10 จึงจะถือว่าตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมีความสมจริง เนื่องจากมีการกำหนดให้สัญญาณเปรียบเทียบสามเหลี่ยมอยู่ภายในช่วง 0 ถึง 10 เป็นช่วงที่สามารถเปรียบเทียบสัญญาณเพื่อนำไปสร้างเป็นสัญญาณการสวิตซ์พีดับเบิลยูเอ็ม โดยในเงื่อนไขกำหนดให้ $w_1 = 0$ มิเช่นนั้นแล้ว กำหนดให้ $w_1 = 10$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการประเมินค่าสมรรถนะของผลการตอบสนอง t_o ซึ่งประกอบด้วยเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot; $P.O.$), ช่วงเวลาขึ้น (Rise time; T_R) และช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time; T_S) โดยสามารถสรุปได้ว่าผลการตอบสนองที่ดีจะต้องมีค่าสมรรถนะต่าง ๆ ที่น้อย ซึ่งในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมในแต่ละรอบนั้น ระบบจะทำการตรวจสอบค่า w จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-3) และจะทำการปรับค่าตัวควบคุมทั้ง 4 ค่า ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้สมรรถนะของ t_o ที่ดีที่สุด

$$w(T_{R\,p.u}, T_{S\,p.u}, P.O._{p.u}) = \sigma T_R + \alpha T_s + \gamma P.O \qquad (4\text{-}3)$$

โดยค่า σ α และ γ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-4)

$$\sigma + \alpha + \gamma = 1 \qquad (4\text{-}4)$$

σ, α และ γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของ T_R, T_s และ $P.O$ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ กำหนดให้มีค่าเป็น 0.33, 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้ได้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตมีสมรรถนะที่ดีที่สุด จะอาศัยการคำนวณหาค่าคุณภาพของคำตอบผ่านการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (w) ซึ่งจากรูปที่ 4.6 ค่า w_1, w_2 และ w_3 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดที่ 1 ถึงชุดที่ 3 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ข้อมูลชุดที่ 1 คือ การตรวจสอบความสมจริง และข้อมูลชุดที่ 2 ถึง 3 คือ การประเมินค่าสมรรถนะของผลตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงย่านการทำงาน โดยกลไกการค้นหาจะใช้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากการนำชุดข้อมูลทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-5)

$$\varepsilon = \sum_{x=1}^{\beta} \frac{w_x}{\beta} \tag{4-5}$$

โดยที่ β คือ จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการค้นหา ทั้งหมด 3 ค่า

ขั้นตอนที่ 5 นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ย (ε) ส่งให้กับกลไกการค้นหา ทำการประมวลผลปรับจูนเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึม ATS จนกระทั่งได้ค่า ε ที่น้อยที่สุด ที่แสดงให้เห็นว่าผลของการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมสามารถเข้าใกล้ค่าที่แท้จริงได้มากที่สุด โดยในกระบวนการทั้งหมดนี้จะทำวนซ้ำตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้ และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ โปรแกรมการค้นหาด้วยอัลกอริทึม ATS จะแสดงผลการออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมชุดใหม่ส่งให้กับแบบจำลองของระบบ ซึ่งผลการออกแบบตัวควบคุมและผลการตรวจสอบเงื่อนไขต่าง ๆ มีรายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

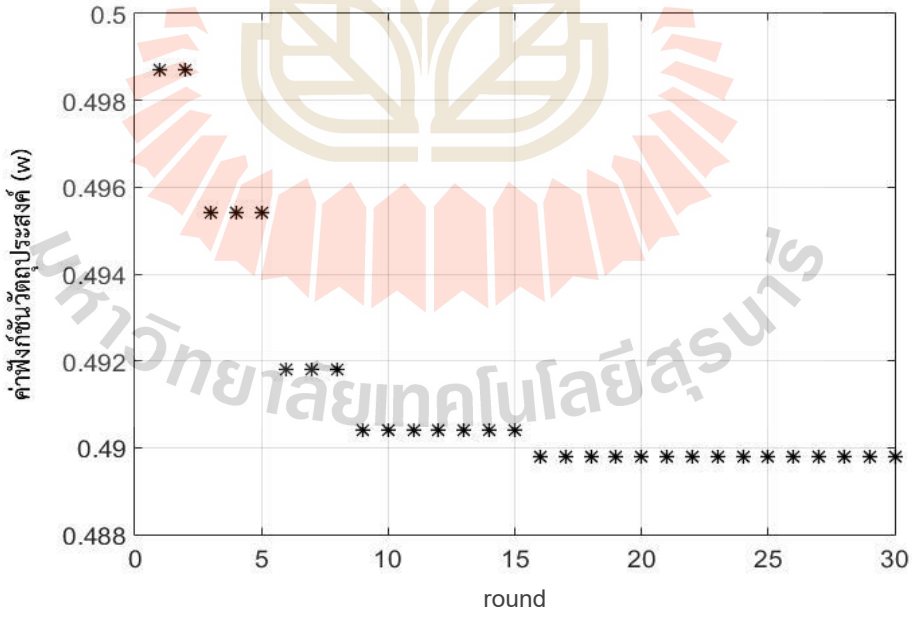
4.3.3 ผลการออกแบบตัวควบคุมและการอภิปรายผล

การออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยใช้กระบวนการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึม ATS มีขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม จากการอ้างอิงค่าพารามิเตอร์ของระบบดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีรายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 3 จะได้ขอบเขตล่างและขอบเขตบนโดยอาศัยการสุ่มค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม เมื่อคำตอบที่ทำการค้นหามีค่าเท่ากับขอบเขตล่างหรือขอบเขตบน จะทำการขยายขอบเขตให้มีค่าเพิ่มขึ้นอีก เพื่อให้ตัวควบคุมมีขอบเขตที่ครอบคลุม สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบค่าขอบเขตที่เหมาะสมของการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

พารามิเตอร์ตัวควบคุม	ขอบเขตของตัวควบคุม	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
K_{pt}	1.00	20.00
K_{it}	0.005	0.50
K_{pi}	0.0001	0.10
K_{ii}	1.00	50.00

สำหรับการค้นหาคำตอบด้วย ATS มีพารามิเตอร์สำคัญหลายตัวที่ต้องคำนึงถึง โดยจากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นต่าง ๆ ที่เหมาะสม ผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์จากการกำหนดให้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 20 คำตอบ รัศมีมีค่าเท่ากับ 20 และค่าตัวประกอบการปรับลดรัศมีมีค่าเท่ากับ 1.1 โดยใช้กระบวนการค้นหาคำตอบจำนวน 30 รอบ เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ข้างต้น ไปทดสอบค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึม ATS จะได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาที่ดีที่สุดในแต่ละรอบ ดังรูปที่ 4.7

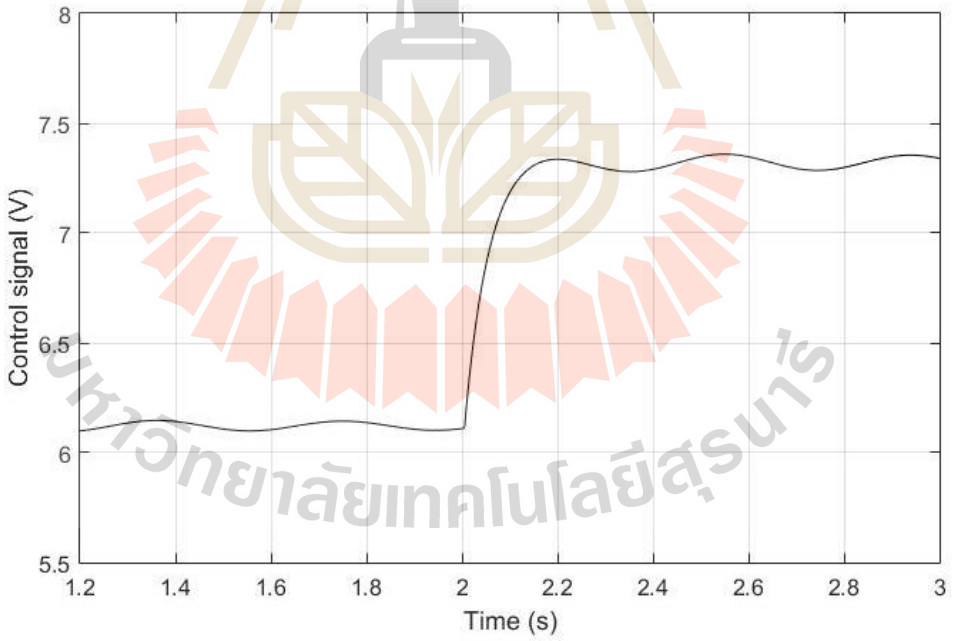


รูปที่ 4.7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดสำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมในแต่ละรอบ

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมในแต่ละรอบที่มีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นการลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดของค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม ที่สามารถทำให้ผลการตอบสนองของ t_o มีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด คือ 0.4898 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ได้จากการค้นหามีค่าดังต่อไปนี้

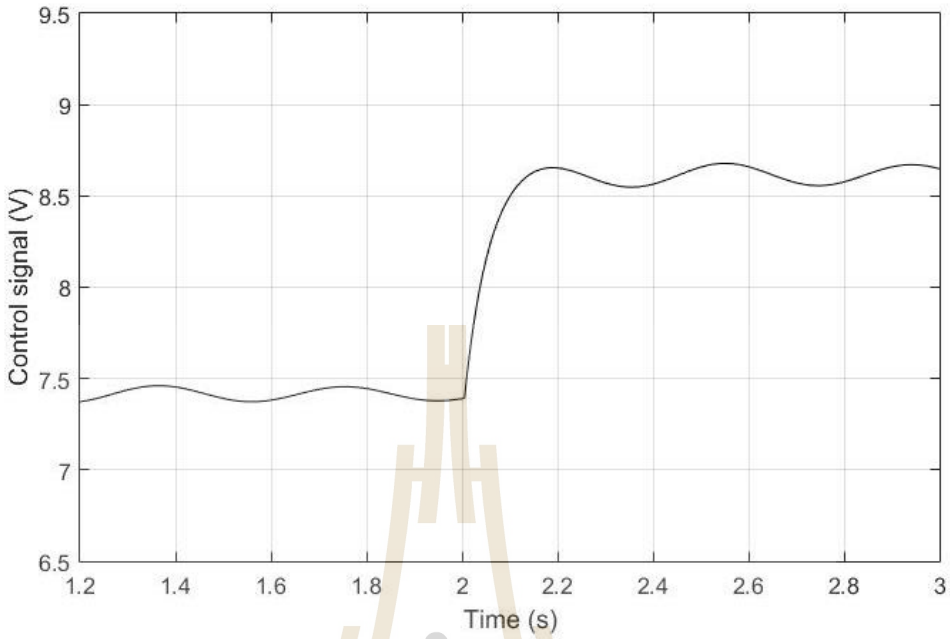
$$K_{pt} = 14.3659,\ K_{it} = 0.1513,\ K_{pi} = 0.0989 \text{ และ } K_{ii} = 29.95$$

ทำการตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นด้วยอัลกอริทึม ATS โดยมีการตรวจสอบความสมจริงในกระบวนการออกแบบตัวควบคุม ที่มีจำนวนรอบการค้นหาทั้งหมด 30 รอบ ซึ่งคำนวณตามความสัมพันธ์ m ในสมการที่ (4-2) และอาศัยการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยกำหนดย่านการทำงาน 2 ย่าน คือ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $70^\circ C$ ไปเป็น $85^\circ C$ และ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $85^\circ C$ ไปเป็น $100^\circ C$ ซึ่งจะได้สัญญาณควบคุม m ที่ออกแบบขึ้นด้วย ATS แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 สัญญาณควบคุม m ที่ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $70^\circ C$ ไปเป็น $85^\circ C$

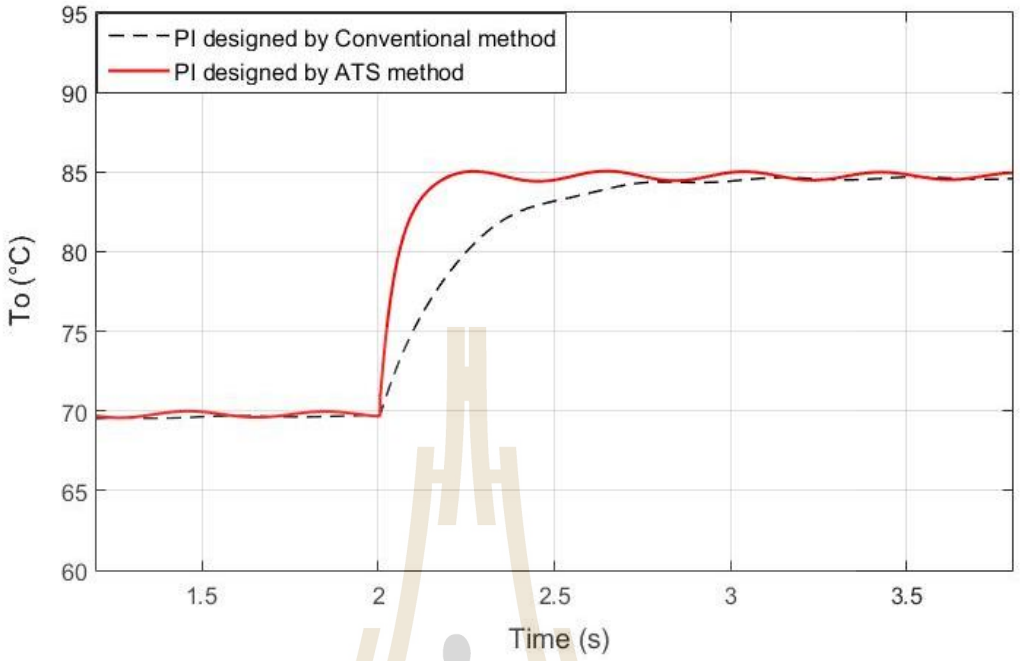
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



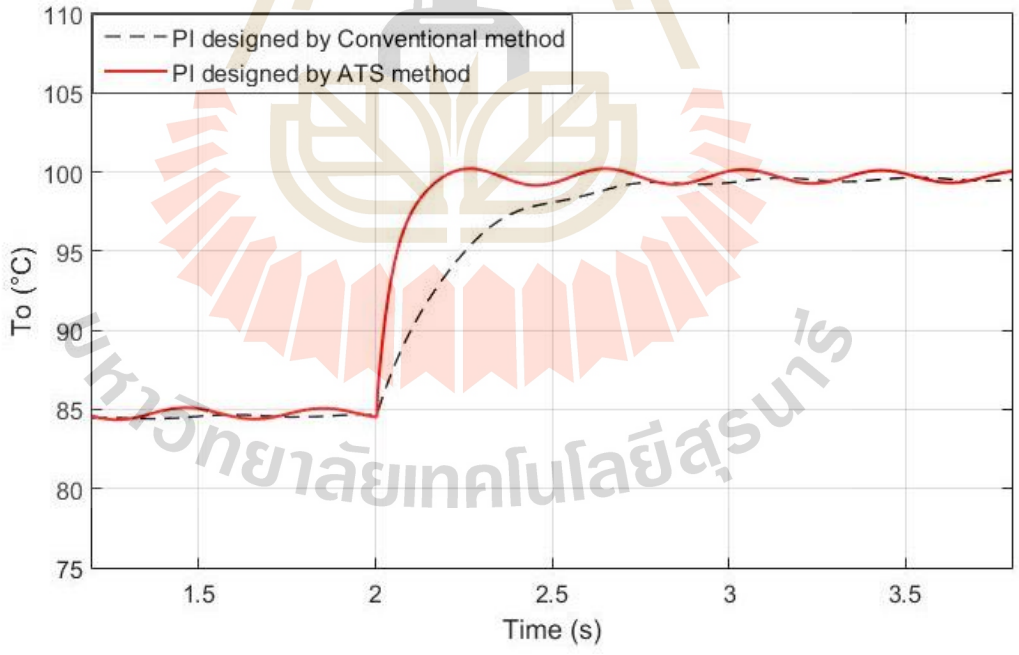
รูปที่ 4.9 สัญญาณควบคุม m ที่ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $85^\circ C$ ไปเป็น $100^\circ C$

จากสัญญาณควบคุม m ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าระดับของสัญญาณอยู่ภายในช่วง 0 ถึง 10 ซึ่งอยู่ภายในเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงถือได้ว่าตัวควบคุมที่ทำการออกแบบขึ้นด้วยอัลกอริทึม ATS มีความสมจริง สามารถนำไปใช้ในงานได้จริงในทางปฏิบัติ

การทดสอบตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบขึ้นสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตของเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก เป็นการนำตัวควบคุมที่ได้รับออกแบบไปจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของ t_o และเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับชุดทดสอบจริง ซึ่งสามารถยืนยันผลการออกแบบตัวควบคุมโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและการออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนย่านการควบคุมอุณหภูมิ (T_o^*) ในจุดที่ต้องการ โดยกำหนดให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก $70^\circ C$ ไปเป็น $85^\circ C$ และจาก $85^\circ C$ ไปเป็น $100^\circ C$ ตามลำดับ ที่เวลา t = 2 วินาที เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต และตรวจสอบความถูกต้องของตัวควบคุม ณ. จุดการทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $70^\circ C$ ไปเป็น $85^\circ C$



รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต เมื่อ T_o^* เปลี่ยนแปลงจาก $85^\circ C$ ไปเป็น $100^\circ C$

จากรูปผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่าการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธีนั้น สามารถควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตของระบบได้อย่างถูกต้อง ตามค่าจุดทำงานที่ต้องการ และพบว่าผลการตอบสนองมีความสอดคล้องกันในสภาวะอยู่ตัว แต่จะสังเกตเห็นว่าตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบให้ค้นหาคำตอบด้วย ATS นั้น มีผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตทั้งในช่วงเวลาขึ้น (rise time) และช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) มีความรวดเร็วและดีกว่า ส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด

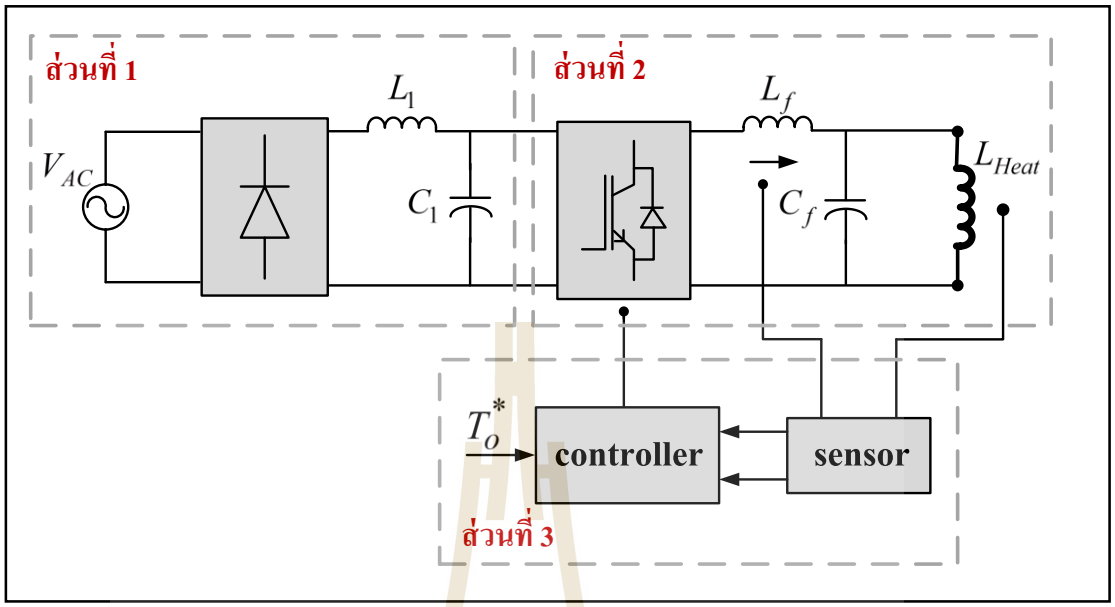
4.4 สรุป

สำหรับเนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งเป็นการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึม ATS โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงแปลงผันกำลัง AC-DC-AC กรณีมีตัวควบคุมอุณหภูมิที่ได้ทำการพิสูจน์ขึ้นเป็นองค์ประกอบในกระบวนการออกแบบ ในการทำงานของอัลกอริทึมให้มีประสิทธิภาพนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของผลการตอบสนองอุณหภูมิเอาต์พุต ดังนั้นจะต้องมีค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่สำคัญในการค้นหาคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ทำการกำหนดค่าต่าง ๆ ได้แก่ ขอบเขตการค้นหา ค่าคำตอบเริ่มต้น ค่าคำตอบรอบข้าง ค่ารัศมี และค่าปรับลดรัศมี เป็นต้น ซึ่งทำการตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบ โดยเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 วิธี ได้แก่ การออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิม และการออกแบบด้วย ATS จากผลการออกแบบพบว่าผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตของระบบที่อาศัยการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วย ATS มีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นและดีกว่าระบบที่ใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบสัญญาณการควบคุม m ที่เกิดจากตัวควบคุมที่ออกแบบขึ้นด้วย ATS สามารถบ่งบอกได้ว่าตัวควบคุมนี้มีความสมจริงและสามารถนำไปใช้งานได้กับระบบจริง ดังนั้นจึงถือได้ว่าการออกแบบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอด้วย ATS มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิผล ซึ่งค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับการทดสอบ ในชุดทดสอบควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตของเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยมีรายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 5 เป็นลำดับถัดไป

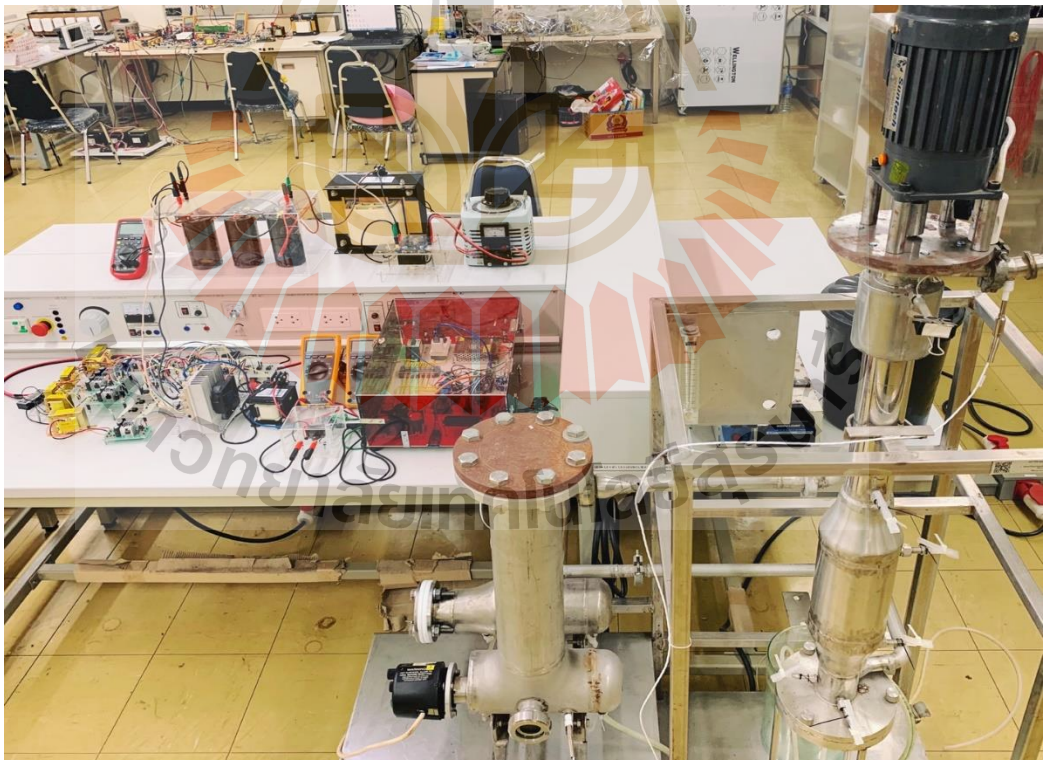
บทที่ 5
การสร้างชุดทดสอบ

5.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์มีวัตถุประสงค์ ในการสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยอาศัยแบบจำลองพลวัตระบบควบคุม ซึ่งจากเนื้อหาในบทที่ผ่านมาได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ โดยอาศัยการออกแบบตัวควบคุมพีไอ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธี ATS อีกทั้งมีการตรวจสอบความถูกต้องและสมรรถนะของการออกแบบตัวควบคุม จากการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต โดยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี ATS จะให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และเพื่อเป็นการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบควบคุมที่ได้ดำเนินการ ให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น จึงได้จัดทำชุดทดสอบระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขึ้น โดยสร้างชุดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC หนึ่งเฟส และมีโหลดเป็นขดลวดความร้อน ดังนั้นสำหรับเนื้อหาในรายงานวิทยานิพนธ์บทนี้จึงได้กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1. วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 2. วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน ในส่วนที่ 3. คืออุปกรณ์ตรวจวัด และส่วนที่ 4. คือการเปรียบเทียบผลทดสอบตัวควบคุมสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งจะมีการทดสอบการทำงานของวงจรการควบคุม โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎีที่ได้ทำการออกแบบและจำลองสถานการณ์ โดยมีโครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงดังรูปที่ 5.1 และภาพรวมของชุดทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 5.2 สำหรับรายละเอียดการออกแบบการสร้างชุดทดสอบในส่วนต่าง ๆ นำเสนอในหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

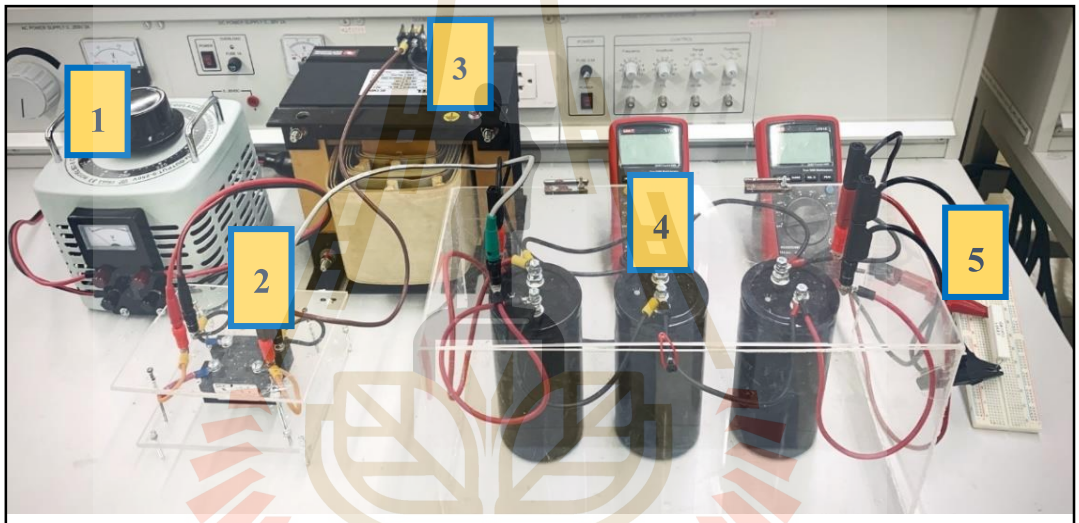


รูปที่ 5.2 ภาพรวมของชุดทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

5.2 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

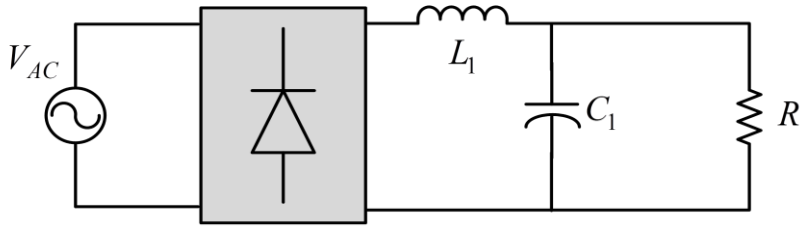
5.2.1 ภาพรวมชุดทดสอบ

วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์เป็นวงจรไฟฟ้าที่มีความสำคัญสำหรับสร้างชุดทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เนื่องจากมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน ซึ่งในการทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ จำเป็นต้องกำหนดโหลดเป็นความต้านทาน เพื่อดูสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกระแสตรงที่ตกคร่อมโหลด โดยให้ค่าความต้านทานของวงจรที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 5 kΩ มีชุดทดสอบที่สร้างขึ้นแสดงดังรูป ที่ 5.3 และโครงสร้างวงจรดังรูป 5.4



1. แหล่งจ่ายแรงดัน (variac)
2. single phase bridge rectifier
3. ตัวเหนี่ยวนำ (L_1 = 140 mH)
4. ตัวเก็บประจุ (C_1 = 27000 µF)
5. โหลดตัวต้านทาน (5 kΩ)

รูปที่ 5.3 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ 5.4 โครงสร้างวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ (variac) ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตเท่ากับ 220 V_{rms} มีค่าความถี่เท่ากับ 50 Hz พิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสามารถปรับได้ อยู่ในช่วง 0-250 V_{rms} และพิกัดกระแสสูงสุดมีค่าเท่ากับ 8 A แสดงดังรูปที่ 5.3 หมายเลข 1 ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่เพียงพอในระบบ

สำหรับหมายเลข 2 ในรูปที่ 5.3 เนื่องจากจำเป็นจะต้องนำแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส มาเป็นแหล่งจ่ายให้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) มีค่าประมาณ 200 V โดยมีโหลดความต้านทานขนาด 5 kΩ ดังนั้นในการเลือกใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ จะต้องมีค่า พิกัดที่สามารถรองรับการใช้งานได้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้มอดูลเรียงกระแสแบบบริดจ์ใช้ไอซีเบอร์ VBO125-12NO7 โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1200 V และพิกัดกระแส 124 A เนื่องจากระบบต้องการแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงที่มีค่าสูง และทำการทดสอบวงจรเป็นเวลานาน จึงเลือกใช้พิกัดที่สูง เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายของอุปกรณ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5

รูปที่ 5.5 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

จากรูปที่ 5.5 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ จะถูกนำไปต่อร่วมกับวงจรกรองกำลังไฟฟ้าแบบ LC เพื่อช่วยในการลดกระแสพลิ้ว (ΔI_{dc}) และแรงดันพลิ้ว (ΔV_{dc}) ของสัญญาณเอาต์พุต เพื่อให้ ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีประสิทธิภาพ

สำหรับหมายเลข 3 และ 4 ของรูปที่ 5.3 คือวงจรกรองของสัญญาณที่ออกมาจากวงจรเรียงกระแส ซึ่งมีการออกแบบค่าพารามิเตอร์วงจรกรองสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส โดยจากการออกแบบจำเป็นต้องใช้ $L_1 \geq 47.7$ mH และ $C_1 \geq 147$ μF เพื่อให้วงจรเรียงกระแสทำงานที่โหมดนำกระแสได้ต่อเนื่อง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L_1) เท่ากับ 140 mH 10 A และเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าพิกัด 400 V 27000 μF แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 ตามลำดับ

รูปที่ 5.6 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับใช้ในวงจรกรอง

รูปที่ 5.7 ตัวเก็บประจุสำหรับใช้ในวงจรกรอง

สำหรับหมายเลข 5 ในรูปที่ 5.3 คือโหลดตัวต้านทาน ขนาด 5 kΩ พิกัดกระแส 3 A ซึ่งใช้ในการทดสอบชุดวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส เพื่อให้ในระบบมีกระแสไหลครบวงจร

สำหรับการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกระแสตรงในทางทฤษฎีของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ สามารถทำการคำนวณหาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและตรวจสอบจุดการทำงานที่ได้ออกแบบขึ้น และเพื่อเป็นการยืนยันว่าค่าที่ได้อยู่ในพิสัยที่สามารถรองรับได้ แสดงการคำนวณได้ดังสมการที่ (5-1) ดังนี้

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \quad (5\text{-}1)$$

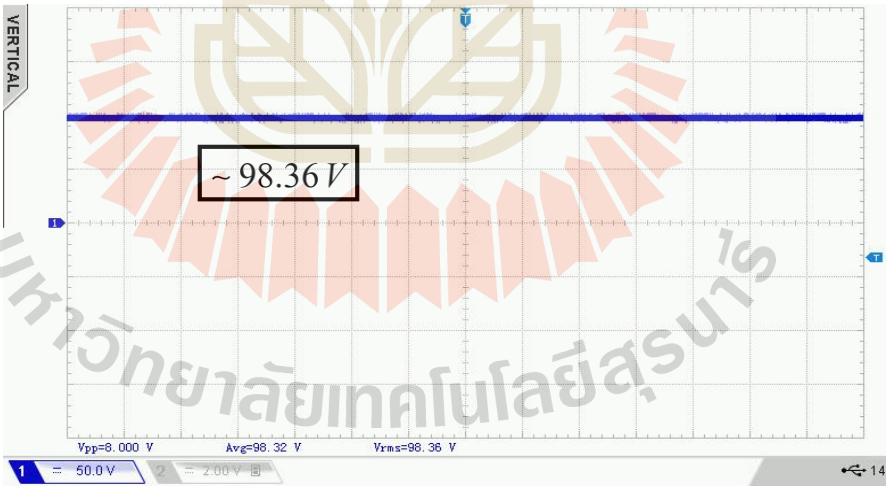
เมื่อ V_{dc} คือ แรงดันเอาต์พุตกระแสตรงของวงจรเรียงกระแส

V_m คือ แรงดันค่ายอดของอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ

5.2.2 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล

การดำเนินการทดสอบระบบดังรูปที่ 5.3 โดยทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสจากแหล่งจ่ายปรับค่าได้ และดำเนินการปรับแรงดันผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์จนกระทั่งทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งจากสมการที่ (5-1) สามารถคำนวณผลของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกระแสตรงในสภาวะอยู่ตัว โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตกระแสสลับมีค่าเท่ากับ 110 V_{rms} จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงดังสมการที่ (5-2)

$$V_{dc} = \frac{2 \times \sqrt{2} \times 110}{\pi} = 99.03 \quad (5\text{-}2)$$



รูปที่ 5.8 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส

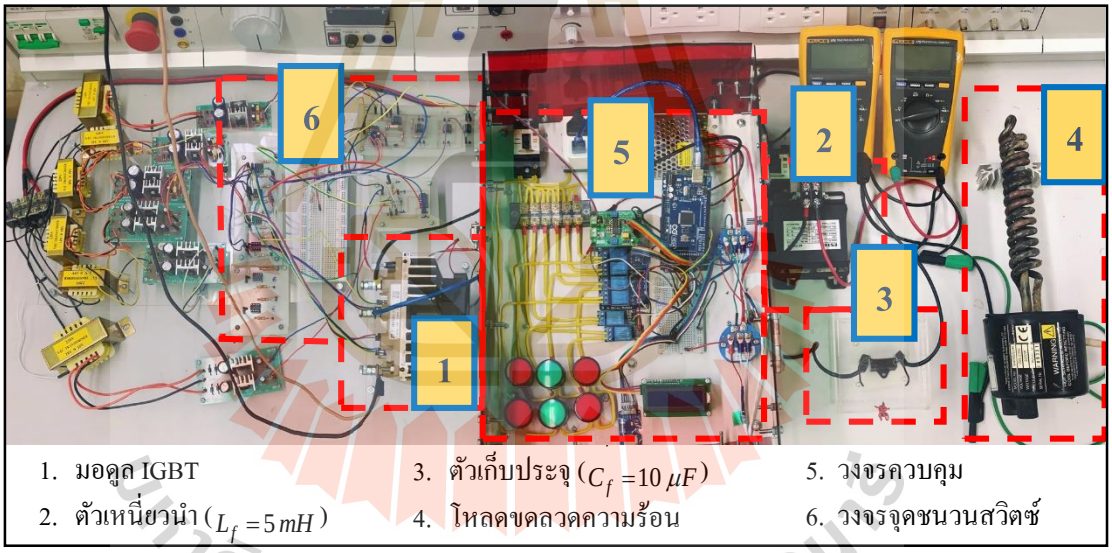
โดยผลการทดสอบจากชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งจากการทดสอบพบว่าให้ผลการทดสอบมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่สร้างขึ้น สามารถนำไปสร้างชุดทดสอบ

โดยทำการปลดโหลดตัวต้านทานขนาด 5 kΩ ออก เพื่อนำไปเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะแสดงชุดทดสอบและผลการทดสอบในลำดับถัดไป

5.3 วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน

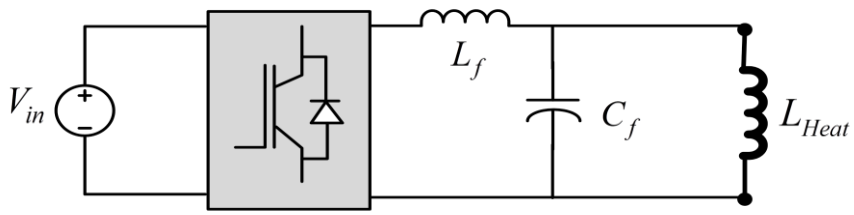
5.3.1 ภาพรวมชุดทดสอบ

การสร้างชุดทดสอบของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในหัวนี้จะกล่าวถึงการสร้างวงจรต้นแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อนกรณีที่ไม่มีการควบคุม ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายอินพุตของวงจร โดยอาศัยแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่สร้างขึ้น ชุดสร้างสัญญาณพัลส์ ด้วยการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) สำหรับจุดชนวนสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ชุดมอดูล IGBT และโหลดขดลวดความร้อน ซึ่งชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 โดยมีโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 5.10 ดังนี้



1. มอดูล IGBT
2. ตัวเหนี่ยวนำ ($L_f = 5\,mH$)
3. ตัวเก็บประจุ ($C_f = 10\,\mu F$)
4. โหลดขดลวดความร้อน
5. วงจรควบคุม
6. วงจรจุดชนวนสวิตช์

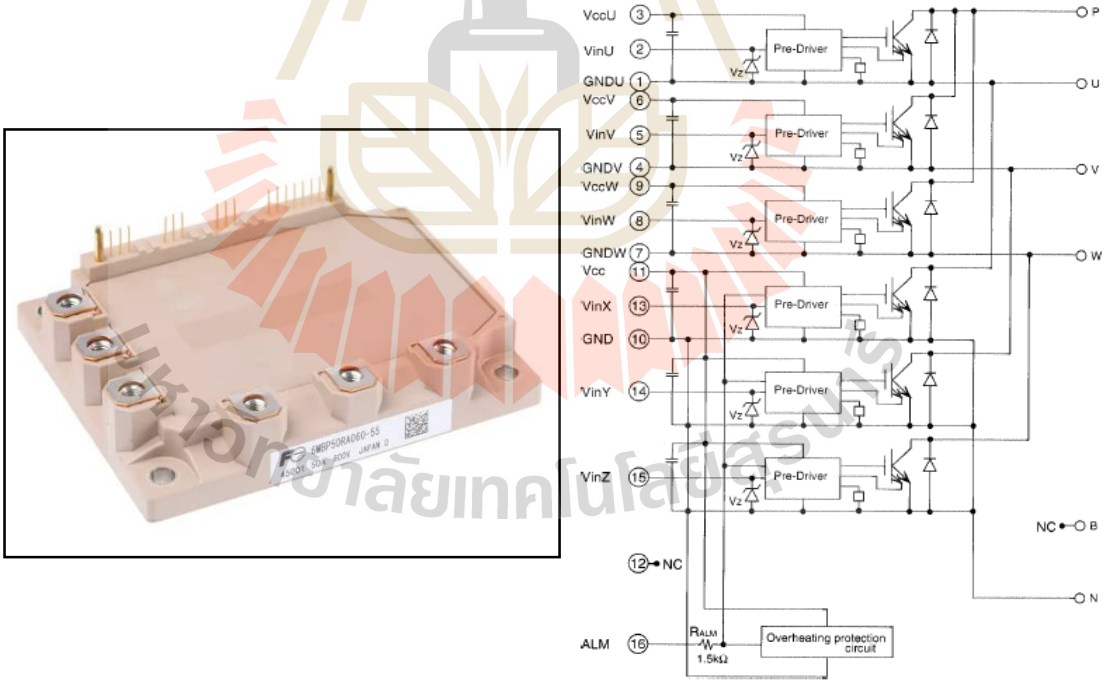
รูปที่ 5.9 ชุดทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน



รูปที่ 5.10 โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน

- มอดูล IGBT

การสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อใช้สำหรับทดสอบจำเป็นจะต้องมีการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ภายในวงจร โดยการออกแบบดังกล่าวมีการคำนวณถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25% โดยคำนึงถึงค่าพิกัดที่สำคัญได้แก่ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในระบบ สำหรับอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เลือกใช้มอดูล IGBT (6MBP50RA060) เป็นอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์สามเฟส สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบเฟสเดียวได้ โดยโมดูลดังกล่าวมีสวิตช์ไอจีบีทีทั้งหมด 6 ตัว 3 เฟส ได้แก่ u, v และ w ซึ่งมอดูลดังกล่าวมีขาทั้งหมด 16 ขา โดยมีค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตสูงสุดเท่ากับ 450 V พิกัดของกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 50 A และความถี่การสวิตซ์สูงสุด 20 kHz ซึ่งเพียงพอสำหรับใช้ในวงจร สิ่งสำคัญนอกจากนี้ยังมี Pre-drivers ที่มีคุณสมบัติป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ที่อาจจะเกิดจากการลัดวงจร ป้องกันการเกิดกระแสเกินในระบบ และมียังมีเซนเซอร์อุณหภูมิเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากความร้อนสะสมในอุปกรณ์มอดูล IGBT มากเกินไปด้วย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 มอดูล IGBT ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะใช้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ $L_f =$ 5 mH และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $C_f =$ 10 µF สำหรับรายละเอียดสามารถแสดงได้ดังนี้

- $L_f =$ 5 mH พิกัดกระแส 10 A แรงดันไฟฟ้า 220 V แสดงดังรูปที่ 5.12

รูปที่ 5.12 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์

- $C_f =$ 10 µF พิกัดแรงดัน 450 V แสดงดังรูปที่ 5.13

รูปที่ 5.13 ตัวเก็บประจุสำหรับใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์

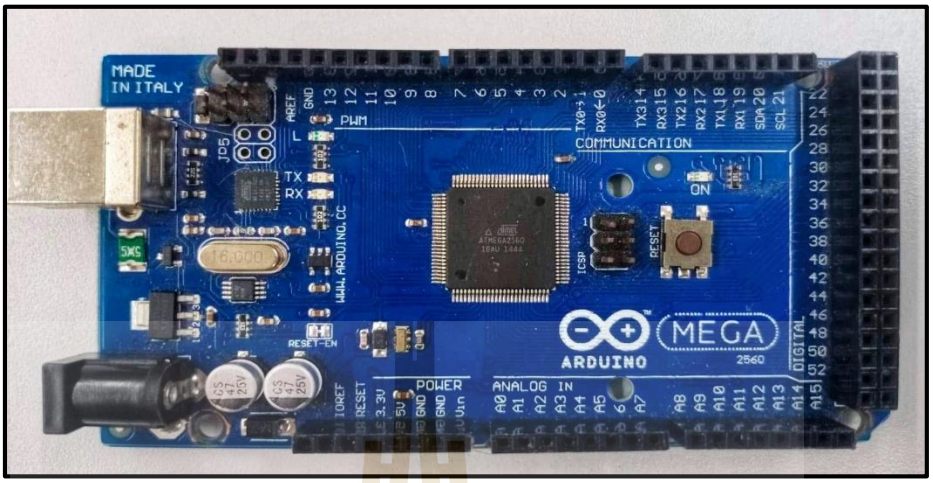
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในส่วนถัดมา ส่วนที่ 4 คือโหลดขดลวดความร้อน ทำหน้าที่จ่ายความร้อนหลักให้แก่ระบบกลั่นเชื้อเพลิงเอทานอลโดยพิกัดแรงดันมีค่าเท่ากับ 220 V และพิกัดกำลังงานเท่ากับ 3000 W สามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 5.14

รูปที่ 5.14 โหลดขดลวดความร้อน

5.3.2 วงจรควบคุม

ในส่วนการควบคุมที่ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตของระบบทำความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิง โดยมีโหลดของระบบเป็นขดลวดความร้อน จากรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่าน ๆ มา ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยจะใช้การออกแบบตัวควบคุม 2 แบบ คือ 1. การออกแบบตัวควบคุมพีไอ และ 2. การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว ซึ่งทั้งสองแบบจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่ใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega2560 สำหรับคำนวณและประมวลผลสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตของระบบ สามารถแสดงวงจรการควบคุมดังรูปที่ 5.9 ในส่วนที่ 5 โดยจากการศึกษาการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวจะให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอ สามารถดูได้จากผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุต (T_o^*) ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3.3 ในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega2560 รองรับการเขียนโปรแกรมภาษาซีของ Arduino ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับการใช้งาน โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้ Arduino มีโปรแกรมที่ใช้ชิพ AVR รุ่นใหญ่ขึ้น เพื่อที่จะสามารถรองรับการใช้งานขนาดใหญ่ โดยให้จำนวนพอร์ต และขนาดความจำที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.15 ชุดบอร์ด Atmega2560

- คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ด
  - เป็นไมโครคอนโทรเลอร์ในตระกูล AVR ขนาด 8 บิต ที่มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงแต่ใช้พลังงานต่ำ
  - สถาปัตยกรรมขั้นสูงแบบ RISC
    - มีชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง โดยการประมวลผลคำสั่งจะใช้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกา
    - มีรีจิสเตอร์สำหรับการใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว
    - มีการดำเนินการที่คงที่และอย่างเต็มที่
    - มีการทำงานมากถึง 16 MIPS เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz
  - หน่วยความจำที่มีความทนทานสูง
    - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโหลดโปรแกรมขนาด 256 กิโลไบต์
    - หน่วยความจำแบบ EEPROW ขนาด 4 กิโลไบต์
    - หน่วยความจำแรมชนิด SRAM ขนาด 8 กิโลไบต์
    - เขียน / ลบ : ของหน่วยความจำแฟลช 10,000 รอบ และความจำแบบ EEPROW 100,000 รอบ
    - เก็บข้อมูลได้นานกว่า 20 ปีที่อุณหภูมิ 85 °C และกว่า 100 ปีที่อุณหภูมิ 25 °C
    - ล็อคการเขียนโปรแกรมเพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์
  - มีการเชื่อมประสานกับ JTAG (IEEE std.1149.1 compliant)
  - คุณสมบัติเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก

- มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว สามารถแยกโหมดการทำงานได้ 2 โหมดคือ Prescalar และ Capture
- มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 16 บิต จำนวน 4 ตัว สามารถแยกโหมดการทำงานได้ 3 โหมด คือ Prescalar, Compare และ Capture
- มีตัวนับเวลาจริง (Real Time Counter)
- มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณ ที่ความละเอียดสามารถกำหนดได้ตั้งแต่ 2 - 16 บิต
- มีตัวปรับเปรียบเทียบผลของเอาต์พุต
- มีตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลจำนวน 16 ช่องสัญญาณ , ขนาด 10 บิต
- มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ 4 พอร์ต
- เชื่อมประสานอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งการเป็นมาสเตอร์และสเลฟ (Master/Slave)
- มีการเชื่อมต่อประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น แบบ Byte Oriented
- Watchdog Timer สามารถกำหนดการทำงาน โดยแยกสัญญาณนาฬิกาจากตัวชิพได้
- มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแบบอนาล็อกบนตัวชิพ
- มีการรองรับการขัดจังหวะและ Wake - up เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับพิน

- คุณสมบัติพิเศษ
  - มีระบบเปิดเครื่องใหม่เมื่อมีการรีเซ็ตและมีระบบตรวจจับการเกิด Brow – out
  - มีตัวตรวจหาความเที่ยงตรงของออสซิเลเตอร์
  - มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายนอกและภายใน
  - มีโหมดการทำงานสลีป 6 โหมด คือ Idle, ADC Noise Redution, Power – save, Power – down, Stanby, และ Extended Standby
- อินพุต/เอาต์พุต และตัวถัง
  - มีขาอินพุต/เอาต์พุตที่สามารถทำงานได้มากสุดถึง 86 ขา
  - ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา
- ช่วงอุณหภูมิที่ชิพสามารถทำงานได้ -40 °C ถึง 85 °C
- มีการใช้พลังงานต่ำเป็นพิเศษ
  - โหมดแอคทีฟ : 1 MHz ต้องการแรงดัน 1.8 V กระแส 500 µA
  - โหมดปิดเครื่อง : ต้องการกระแสเพียง 0.1 µA ที่แรงดัน 1.8 V

➢ การใช้งานพอร์ตสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

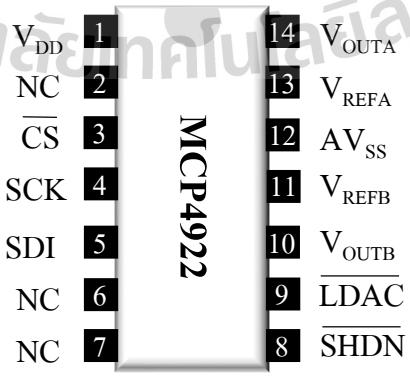
Atmega2560 ถูกออกแบบมาสำหรับงานที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยพอร์ตมีความสำคัญในการรับค่าจากชุดทดสอบ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR นี้มีพอร์ตแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล หรือ ADC (Analog to digital converter) ที่แรงดัน +5 V ซึ่งเมื่อทำการแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล และจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1023 โดยมีพอร์ตอนาล็อกอินพุตจำนวน 16 ช่องสัญญาณคือ A0-A15 และมีดิจิตอล 54 พิน (15 pin สามารถใช้เป็น PWM output ได้) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถคำนวณผลการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลได้ดังสมการที่ (5-3)

$$ADC = \frac{V_{sensor} \times 1024}{V_{ref}} \tag{5-3}$$

โดยที่ V_{sensor} คือแรงดันจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

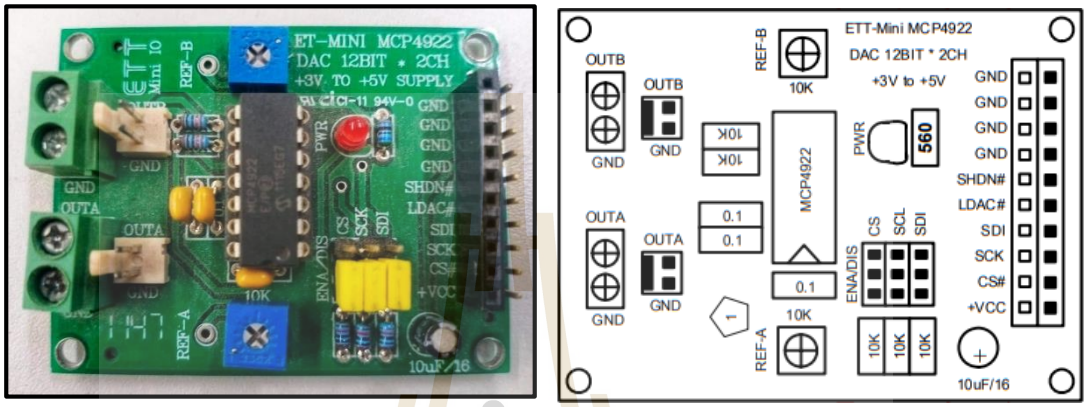
V_{ref} คือแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 5 V

การใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะอาศัยพอร์ตสัญญาณดิจิตอลเอาต์พุตจาก Atmega2560 สำหรับการส่งค่าแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบตัวเลขดิจิตอล ที่ได้จากการคำนวณด้วยฟังก์ชันการควบคุมไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก หรือ DAC (digital to analog converter) ความละเอียด 12 บิต เพื่อส่งต่อไปยังวงจรสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซีแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก เบอร์MCP4922 ซึ่งมีคุณสมบัติความละเอียด 12 บิต อินเตอร์เฟส SPI ™ พร้อมรองรับสัญญาณนาฬิกา 20 MHz การดำเนินงานแบบ Single-Supply 2.7 V ถึง 5.5 V และมีช่วงอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้ -40 °C ถึง 125 °C สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ไอซีเบอร์ MCP4922

ในปัจจุบันมีการพัฒนานำไอซีชนิดนี้มาสร้างเป็นโมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกที่สามารถนำมาประยุกต์ต่อใช้งานกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว โดยรูปร่างของโมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกดังกล่าว สามารถดูแสดงได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 Module ET-MINI MCP4922 DAC

- คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ด
  - Digital Input ที่มีความละเอียด 12 บิต
  - แรงดันอ้างอิง V_{refA} และ V_{refB} สามารถปรับจาก VR ได้ตั้งแต่ 0 ถึง $+V_{cc}$
  - ใช้ได้กับ Power Supply 2.7 V ถึง 5.5 V
  - Interface การส่งข้อมูล Digital Input ด้วย SPI ซึ่งรองรับสัญญาณ Clock ได้ถึง 20 MHz
  - มี DAC Output สามารถใช้งานได้ 2 แชนแนล และสามารถเลือกเกณฑ์ขยายสัญญาณ Output ได้ที่ 1x หรือ 2x
- หน้าที่ขาสัญญาณบนบอร์ด
  1. ขา +Vcc และ GND ใช้ต่อเข้ากับ MCU ที่ใช้ควบคุม ซึ่งรองรับแรงดัน 2.7 V-5.5 V
  2. ขา CS จะทำงานที่ Logic Low เพื่อที่จะ Enable Clock และ Data
  3. ขา SCK เป็นขาสำหรับรับสัญญาณ Clock (SPI) จากภายนอกเข้ามา
  4. ขา SDI เป็นขา Data สำหรับรับข้อมูลแบบ Serial จากภายนอกเข้ามา
  5. ขา LDAC ทำงานที่ Logic Low ทำหน้าที่ในการโหลดข้อมูลที่ถูก Convert ออกขา Output
  6. ขา OUTA และ OUTB เป็นขา Output สำหรับนำสัญญาณ Analog ที่ได้ไปใช้งาน
  7. ขา SHDN ทำงานที่ Logic Low ทำหน้าที่ Shutdown DAC ให้อยู่ใน Satndby Mode ในสภาวะใช้งานปกติ จะต้องให้เป็น Logic High

8. V_{REF-A} และ V_{REF-B} ใช้สำหรับปรับแรงดันอ้างอิง แชนแนล A และ B ตามลำดับ โดยแรงดันอ้างอิงนี้ สามารถปรับได้ที่ 0 ถึง +Vcc

➢ การใช้งานพอร์ตสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก

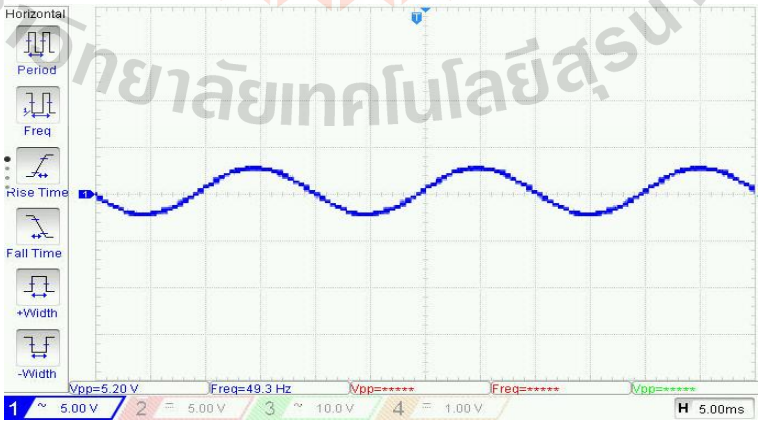
พอร์ตมีความสำคัญในการรับค่าจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับ Module นี้มีพอร์ตแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก หรือ DAC (digital to Analog converter) ที่แรงดันสูงสุด +5.5 V มีรูปแบบการส่งข้อมูล ในลักษณะของ Serial (SPI) และสำหรับ Module นี้ผู้วิจัยจะต้องส่งข้อมูล Digital Input ให้กับ Module โดยจะมีการส่งคำสั่งและส่งข้อมูลไปด้วยกันครั้งละ 16 Bit (2Byte) ต่อการ Convert สัญญาณ Digital 1 ค่า หลังจากส่งข้อมูลครบ สัญญาณดิจิตอลที่ถูก Convert เป็นอนาล็อก และจะถูกส่งออกมาที่ขา Output ในแชนแนลที่กำหนดไว้ ซึ่งเมื่อทำการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อก จะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 4095 โดยระดับแรงดันที่ออกมา จะสามารถคำนวณค่าตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-4)

$$DAC_A = \frac{V_D \times V_{ref}}{4095} \tag{5-4}$$

โดยที่ V_D คือตัวเลขดิจิตอลของค่าเอาต์พุต voltage จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

V_{ref} คือแรงดันอ้างอิง กำหนดให้เท่ากับ 5 V

สามารถแสดงผลการทดสอบโมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกได้ดังรูปที่ 5.18 และสามารถสังเกตได้ว่าเป็นสัญญาณไซน์ ที่มีค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 5 V



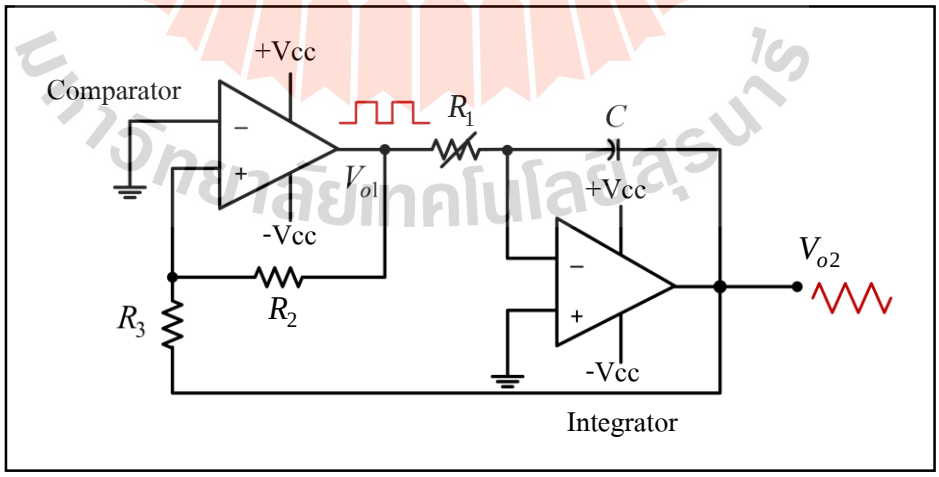
รูปที่ 5.18 สัญญาณเอาต์พุต Module ET-MINI MCP4922 DAC

5.3.3 วงจรจุดชนวนสวิตช์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม

วงจรจุดชนวนด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม สำหรับใช้ควบคุมการสวิตช์ของมอดูล IGBT ในวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจะอาศัยการสวิตช์แบบไบโพลาร์ วงจรจุดชนวนดังกล่าวนี้ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญทั้งหมดดังนี้ ได้แก่ วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรยกระดับสัญญาณ วงจรกลับเฟสสัญญาณ และวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ สามารถดูรายละเอียดของวงจรจุดชนวนสวิตช์ได้ดังรูปที่ 5.9 ในส่วนที่ 6 โดยวงจรดังกล่าวจะถูกอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับวงจรทั้งหมดไว้ในหัวข้อนี้และมีดังต่อไปนี้

- **วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม**

วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม หรือเรียกได้ว่าเป็น Function generator ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถผลิตสัญญาณออกมาได้หลากหลายรูปแบบโดยมีให้เลือกตามการใช้งาน นอกจากนี้สามารถผลิตรูปสัญญาณคลื่นออกมาได้ตั้งแต่ความถี่ต่ำไปจนถึงหลายเมกกะเฮิรตซ์ (MHz) ในงานวิจัยนี้จะสร้างวงจรสามเหลี่ยม ที่ประกอบไปด้วยวงจรอินทีเกรเตอร์ (Integrator) และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator) โดยมีสัญญาณเอาต์พุต 2 สัญญาณ คือ สัญญาณสี่เหลี่ยม (Square wave) ของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (V_{o1}) และสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle wave) ของวงจรอินทีเกรเตอร์ (V_{o2}) โดยสามารถแสดงโครงสร้างของวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

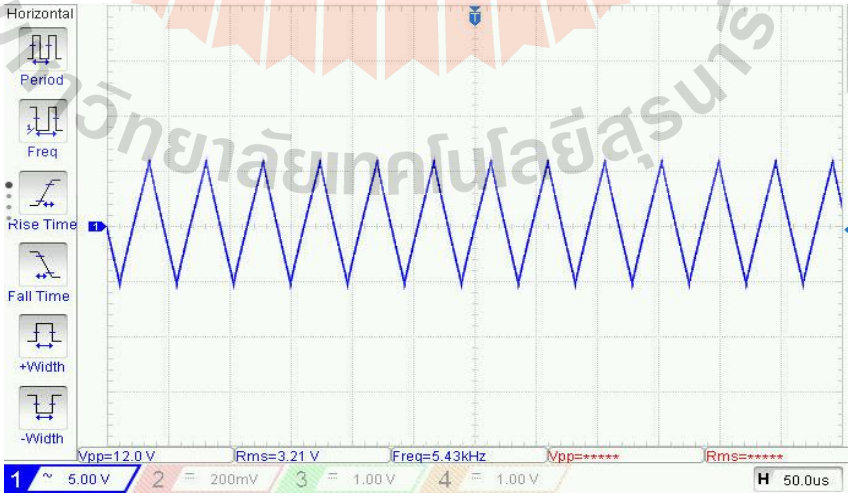
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ออปแอมป์ไอซี TL071CN เนื่องจากในส่วนอินพุตมีอิมพีแดนซ์สูง สัญญาณแรงดันและกระแสต่ำ ทำงานได้รวดเร็ว รองรับ Voltage Ranges ได้กว้าง และนอกจากนี้ยังตอบสนองที่ความถี่สูงได้ดี ซึ่งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ในการสร้างวงจรสามเหลี่ยมโดยกำหนดให้ความถี่ที่ต้องการมีค่าเท่ากับ 5 kHz ให้ค่าความต้านทาน $R_3 = 5\ \text{k}\Omega$ และกำหนดให้ตัวเก็บประจุ $C = 500\ \mu\text{F}$ ทั้งนี้ความถี่ของวงจรจะถูกควบคุมด้วยวงจรเวลาคงที่ ชนิด RC ในวงจรอินทีเกรเตอร์ หากต้องการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ค่าอื่น ๆ สามารถทำการปรับค่า R_1 และ C ให้มีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงจากค่าที่ออกแบบไว้ได้ ในการสร้างวงจรดังกล่าวจะทำการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจร คือ +15 V และ -15 V และทำการคำนวณหาค่าความต้านทาน R_2 ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-5)

$$R_2 = 2 \times R_3 \frac{V_{SAT}}{V_{O2(p-p)}} = 10\ k\Omega \tag{5-5}$$

สามารถคำนวณหาค่า R_1 ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-6)

$$R_1 = \frac{R_2}{4R_3 f_o C} = 2\ k\Omega \tag{5-6}$$

และสามารถดูผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 5.20

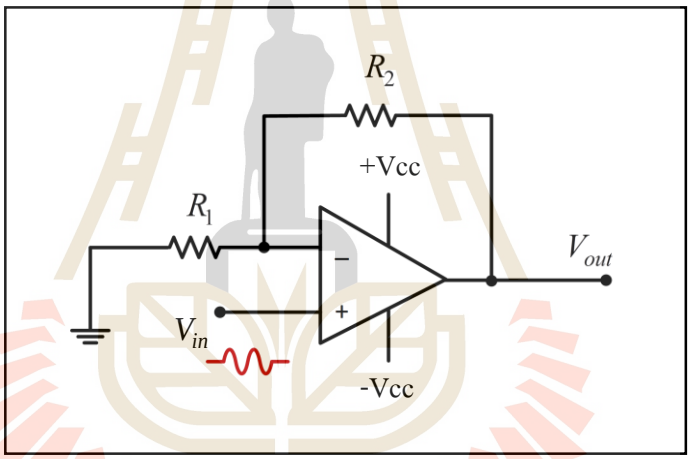


รูปที่ 5.20 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 5 kHz

➢ **วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส**

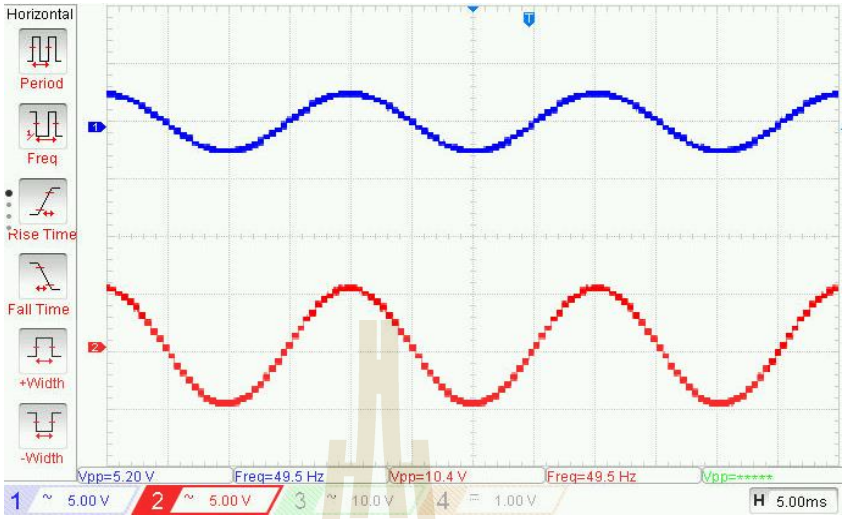
วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส คือวงจรขยายขนาดของสัญญาณไฟฟ้าให้มีขนาดเพิ่มขึ้น โดยที่สัญญาณเอาต์พุตมีเฟสตรงกับสัญญาณอินพุต ซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์ ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ต่อกันในลักษณะป้อนกลับ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต้องการอาศัยวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสเพื่อขยายสัญญาณเอาต์พุตให้มีอัตราขยายเป็น 2 เท่าของสัญญาณอินพุตเพียงเท่านั้น และอัตราขยายของวงจรดังกล่าวสามารถออกแบบได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-7) หรือสามารถแสดงวงจรได้ดังรูปที่ 5.21

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \tag{5-7}$$



รูปที่ 5.21 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

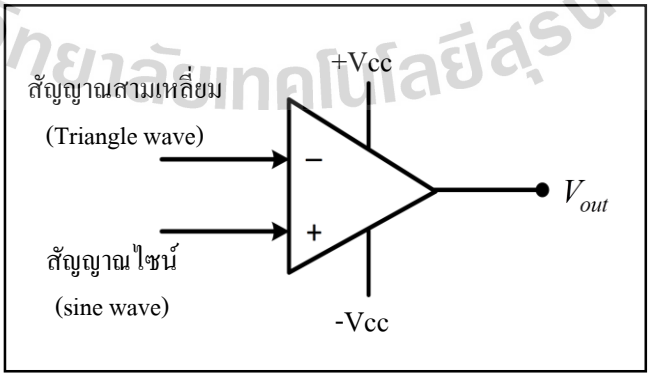
โดยจากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวต้านทานทำให้ได้ค่าความต้านทาน $R_1 = 10\ \text{k}\Omega$ และ $R_2 = 10\ \text{k}\Omega$ สามารถแสดงผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสได้ดังรูปที่ 5.22



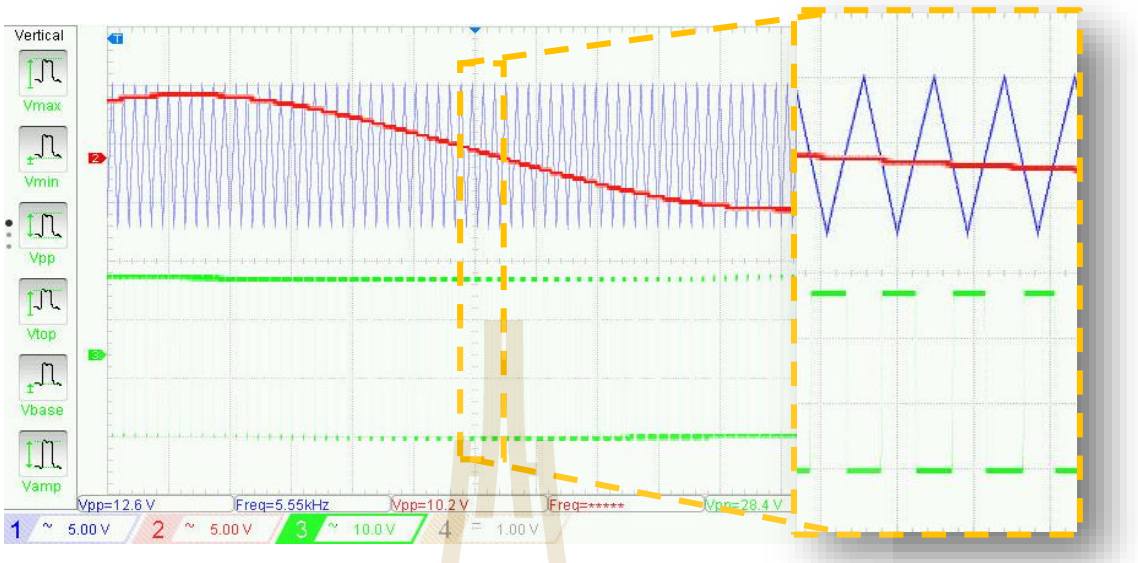
รูปที่ 5.22 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

➢ **วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ**

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ เป็นวงจรที่มีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบและเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันอินพุตสองสัญญาณ โดยส่วนใหญ่การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันนี้มักจะใช้ออปแอมป์เป็นตัวเปรียบเทียบ ดังนั้นจึงเป็นวงจรที่มีอินพุตเป็นสัญญาณอนาล็อก และจะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิตอล โดยในงานวิจัยนี้จะทำการป้อนแรงดันอินพุตให้กับวงจร 2 สัญญาณด้วยกันนั่นคือ สัญญาณสามเหลี่ยม และสัญญาณไซน์ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.23 และสามารถแสดงสัญญาณเอาต์พุตจากการทดสอบวงจรได้ดังรูปที่ 5.24 ดังนี้



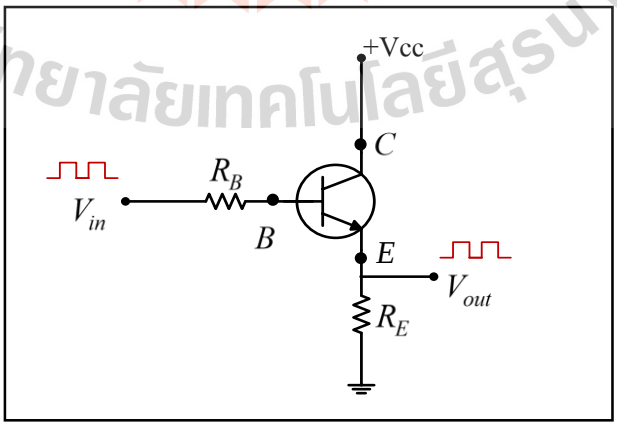
รูปที่ 5.23 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ



รูปที่ 5.24 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

➢ **วงจรยกระดับสัญญาณ**

วงจรยกระดับสัญญาณเป็นวงจรที่ถูกนำมาใช้ในการปรับเปลี่ยนระดับสัญญาณไฟฟ้าทางด้านอินพุต เพื่อให้ได้สัญญาณไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตอยู่บนซีกบวก ซึ่งในงานวิจัยนี้อาศัยการสร้างวงจรยกระดับสัญญาณจากทรานซิสเตอร์เบอร์ P2N2222A โดยแรงดันอินพุตของวงจรดังกล่าว คือแรงดันพัลส์ที่เป็นแรงดันเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งทำการกำหนดแรงดันไฟฟ้า Vcc มีค่าเท่ากับ 5 V และกำหนดให้ค่าความต้านทาน $R_B = 1$ kΩ สามารถแสดงโครงสร้างของวงจรยกระดับสัญญาณได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 วงจรยกระดับสัญญาณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การออกแบบวงจรยกระดับแรงดัน โดยต้องการให้กระแสอิมิตเตอร์อิ่มตัว (I_E) มีค่าเท่ากับ 15 mA และทำการคำนวณหาค่าความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์ (R_E) ซึ่งทรานซิสเตอร์เบอร์ P2N2222A มีค่า $\beta = 300$ สามารถคำนวณหาค่ากระแสเบส (I_B) ได้ดังสมการที่ (5-8)

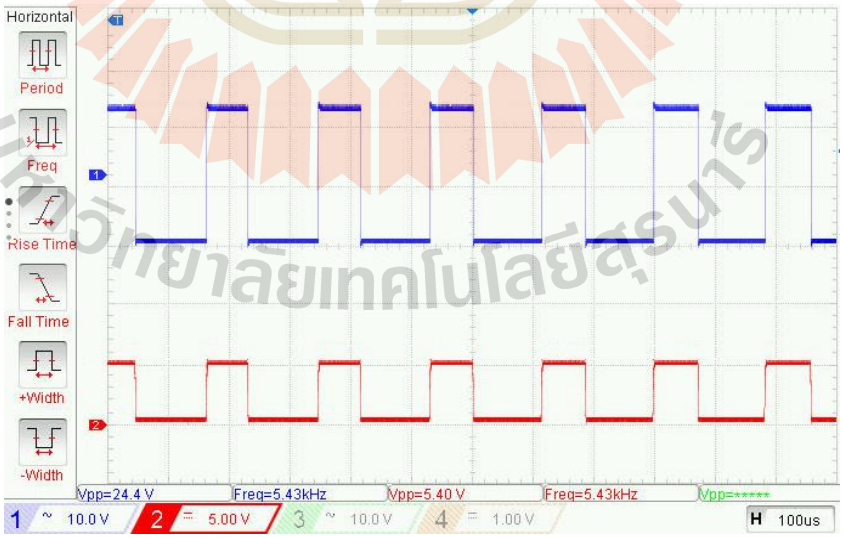
$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} \qquad (5\text{-}8)$$

$$= \frac{15 \times 10^{-3}}{301} \quad = 49.83 \times 10^{-6}$$

สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของอิมิตเตอร์ได้โดยการนำกระแสเบสของทรานซิสเตอร์ ไปหาค่าตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (5-9) และเมื่อทำการทดสอบวงจรจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5.26 ดังนี้

$$I_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \qquad (5\text{-}9)$$

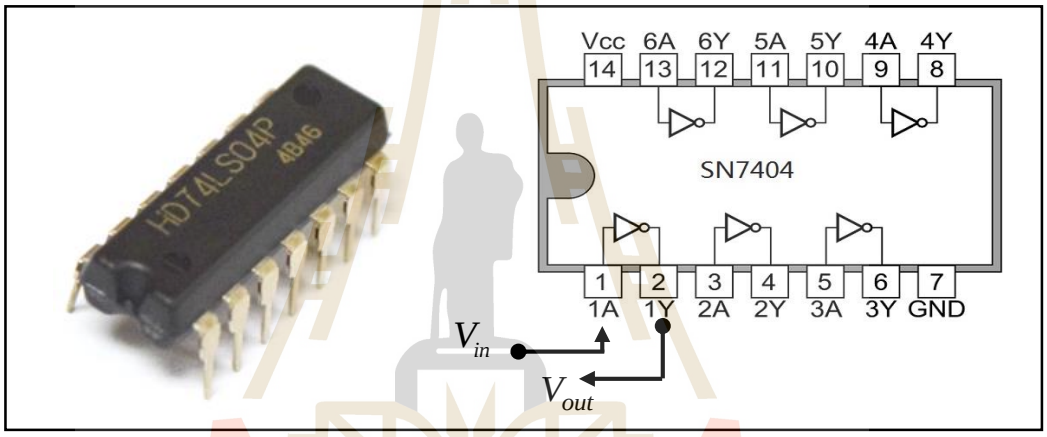
$$R_E = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)I_B} \quad = 1\,k\Omega$$



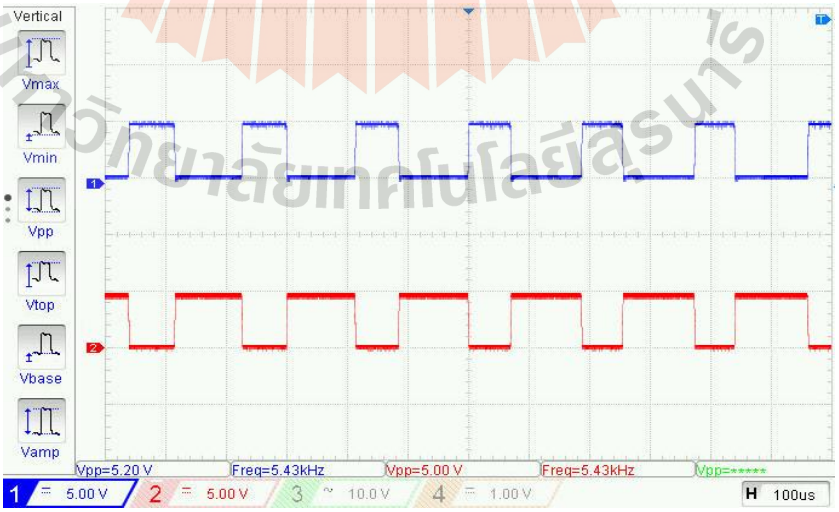
รูปที่ 5.26 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรยกระดับสัญญาณ

➢ **วงจรกลับเฟสสัญญาณ**

วงจรกลับเฟสสัญญาณ เป็นวงจรที่สัญญาณเอาต์พุตมีค่าความต่างเฟสกับสัญญาณอินพุตเท่ากับ 180^{o} จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Inverter สร้างขึ้นเพื่อรับสัญญาณพัลส์เอาต์พุตจากวงจรยกระดับสัญญาณ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ IC 7404 เบอร์ SD74LS04P เป็น Logic NOT Gate ซึ่งมีรูปแบบการทำงานของสวิตซ์ คือถ้าสวิตช์ทำงานลอจิกจะเป็น 1 (high) แต่ถ้าสวิตซ์ไม่ทำงานลอจิกจะเป็น 0 (low) โดยจะทำงานที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Vcc) เท่ากับ 5 V สามารถแสดงรายละเอียดและโครงสร้างได้ดังรูปที่ 5.27 นอกจากนี้สามารถแสดงผลการทดสอบวงจรกลับเฟสสัญญาณได้ดังรูปที่ 5.28 ดังต่อไปนี้



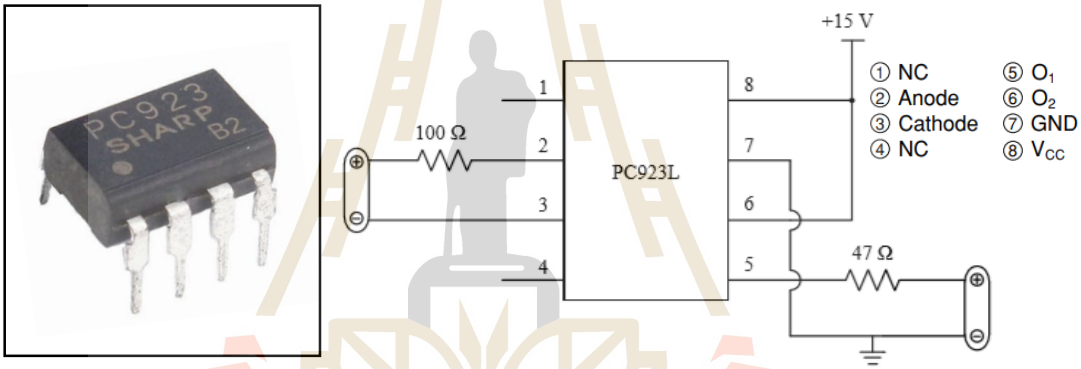
รูปที่ 5.27 โครงสร้าง IC 7404 เบอร์ SD74LS04P



รูปที่ 5.28 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกลับเฟสสัญญาณ

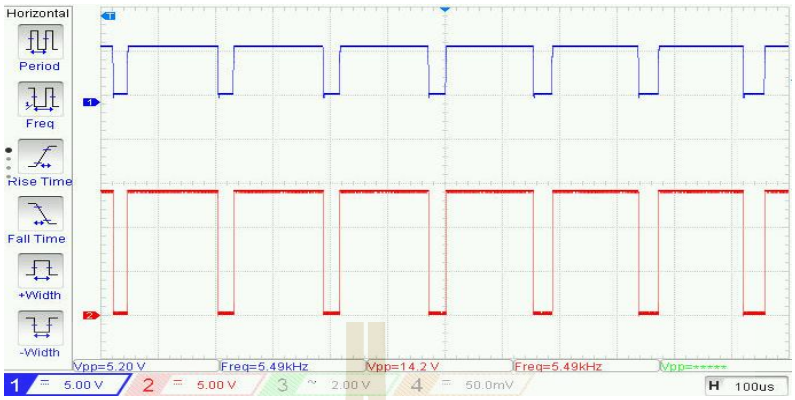
➢ **วงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ**

วงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ เป็นวงจรที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการขยายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรยกระดับสัญญาณ และวงจรกลับเฟสสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากวงจรดังกล่าวมีระดับแรงดันไม่เพียงพอที่จะสามารถใช้จุดชนวนสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ได้ โดยในวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณจะมีการแยกกราวด์ทางฝั่งแรงดันต่ำกับทางฝั่งแรงดันสูงออกจากกัน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในวงจรควบคุมขณะที่ส่งสัญญาณขับขาเกตของสวิตช์ IGBT ซึ่งชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณในงานวิจัยนี้จะใช้ไอซีเบอร์ PC923L เป็นวงจรแยกโดดที่มีการขยายสัญญาณอยู่ภายในตัววงจร ซึ่งมีโครงสร้างการต่อวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 5.29 และมีผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 5.30

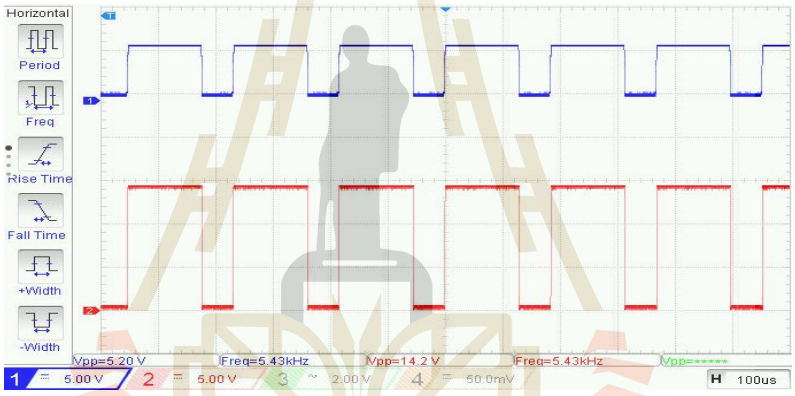


รูปที่ 5.29 โครงสร้างไอซีเบอร์ PC923L

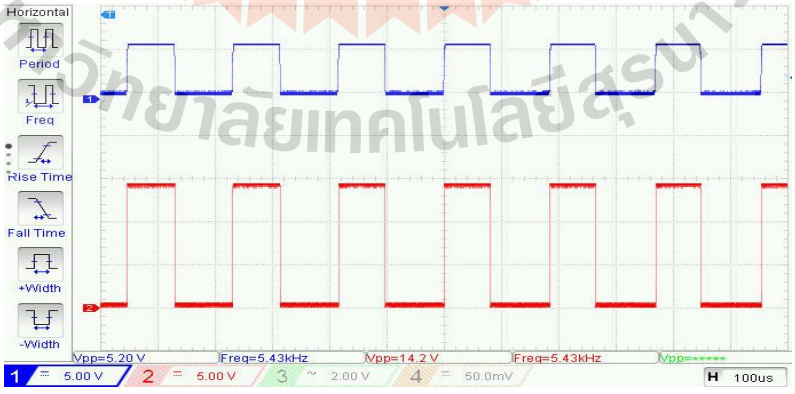
ดำเนินการทดสอบวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ สำหรับจุดชนวนสวิตซ์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม โดยทำการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรเท่ากับ 15 V และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรดังกล่าว โดยในการทดสอบได้ทำการทดสอบ 3 กรณีคือ กรณีแรก สัญญาณอินพุตมีค่ามอดูเลตสวิตช์ (m) เท่ากับ 0.8 กรณีที่ 2 สัญญาณอินพุตมีค่า m=0.6 และในกรณีสุดท้าย สัญญาณอินพุตมีค่า m=0.4 ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบวงจรได้ดังรูปที่ 5.30 ถึงรูปที่ 5.32 และจากผลการทดสอบจะพบว่าวงจรดังกล่าวสามารถควบคุมการทำงานของสวิตซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5.30 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ ที่มีค่า m=0.8



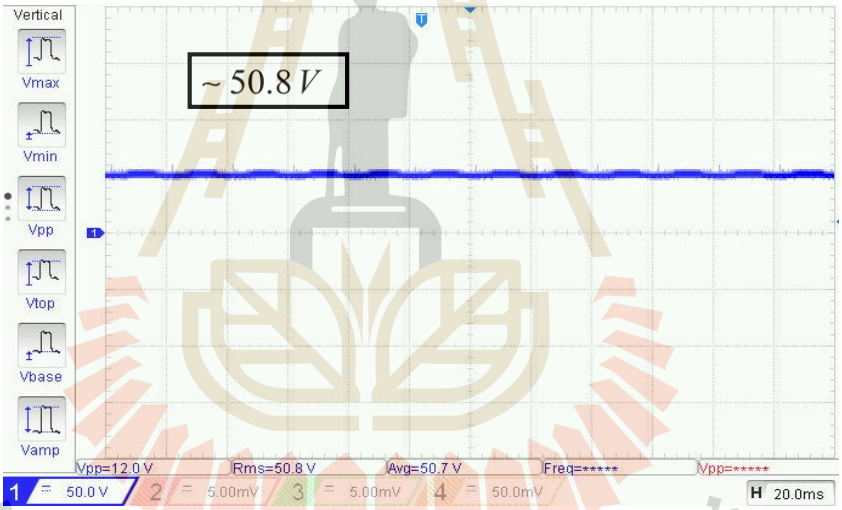
รูปที่ 5.31 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ ที่มีค่า m=0.6



รูปที่ 5.32 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ ที่มีค่า m=0.4

5.3.4 การทดสอบวงจรและอภิปรายผล

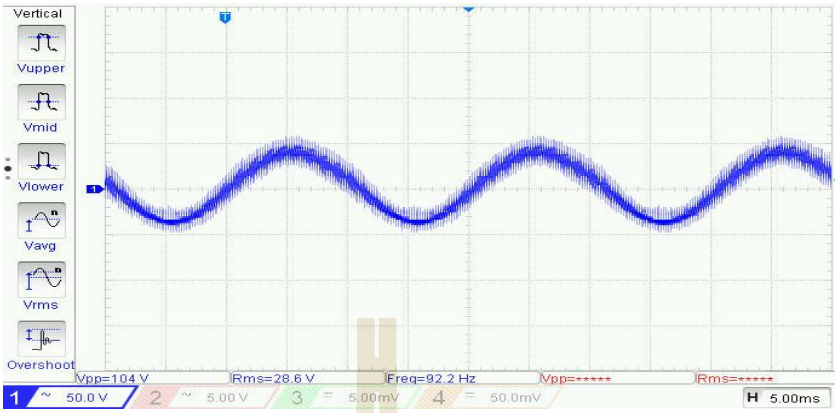
การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน โดยใช้เทคนิคการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งจากการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบดังกล่าวที่ได้นำเสนอไว้แล้วในเบื้องต้น จะได้ชุดทดสอบจริงที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตจะได้จากวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ มีการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.2 ในส่วนของการทดสอบวงจรดังกล่าวจะใช้ออสซิลโลสโคปเป็นอุปกรณ์ในการวัด และในการทดสอบจะทำการปรับค่าดัชนีมอดูเลตสวิตช์ (m) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ให้มีค่าเท่ากับ 0.8 , 0.6 และ 0.4 ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบการใช้งานและความถูกต้องของชุดทดสอบ ว่าสามารถทำงานภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงได้หรือไม่ โดยการทดสอบจะทำการคงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตที่ 50 V ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.33



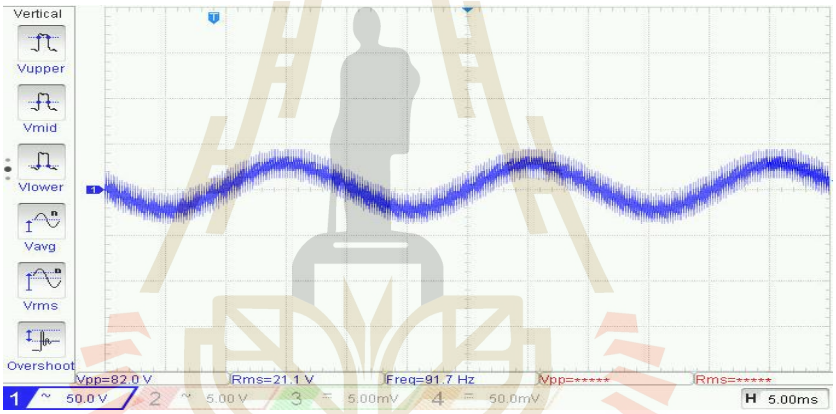
รูปที่ 5.33 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์

สามารถทำการคำนวณผลของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน เมื่ออยู่ในสภาวะอยู่ตัว จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่มีความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการที่ (5-10)

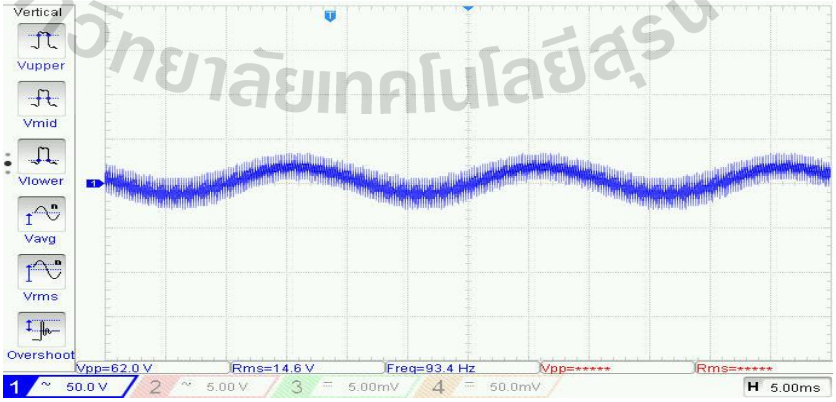
$$V_{o,rms} = \frac{(V_{DC} \times m)}{\sqrt{2}} \tag{5-10}$$



รูปที่ 5.34 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่มีค่า m = 0.8



รูปที่ 5.35 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่มีค่า m = 0.6



รูปที่ 5.36 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่มีค่า m = 0.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์

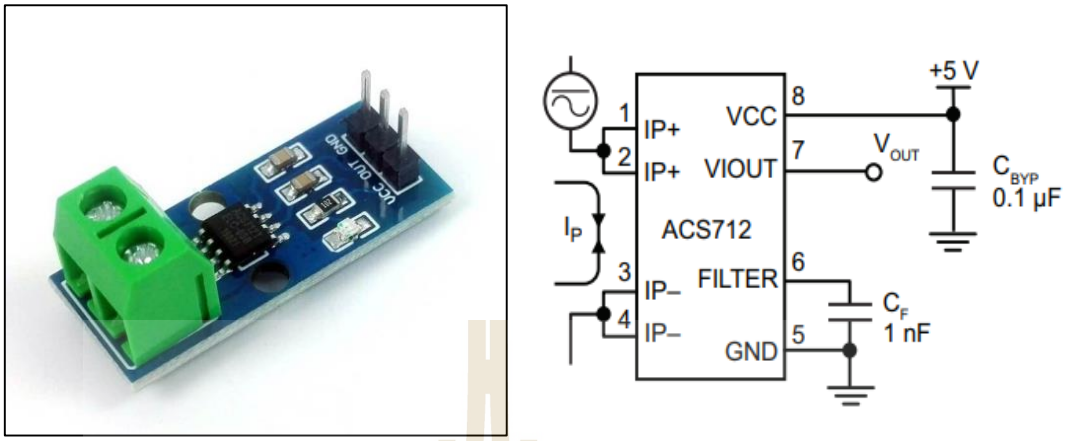
รูปที่	Modulation index	Voltage at the PWM inverter output ($V_{o,rms}$)	
		ชุดทดสอบ (DMM)	คำนวณ
5.34	m=0.8	27.86	28.73
5.35	m=0.6	20.70	21.55
5.36	m=0.4	13.63	14.36

จากกราฟดังรูปที่ 5.34 ถึง 5.36 สามารถนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งแสดงผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ และจะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน เมื่อทำการปรับลดค่าดัชนีมอดูเลตของสวิตซ์ โดยจากการทดสอบวงจรพบว่าชุดทดสอบที่สร้างขึ้นให้ผลการตอบสนองแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น สามารถนำไปสร้างชุดทดสอบระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กต่อไปได้ โดยจะดำเนินการทดสอบและอธิบายรายละเอียดไว้ในบทถัดไป

5.4 อุปกรณ์ตรวจวัด

5.4.1 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแส

ทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L_f) ของวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับใช้ในการจ่ายเป็นอินพุตให้กับวงจรควบคุมวงปิด โดยเซนเซอร์วัดกระแสดังกล่าวจะใช้กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นโมดูลวัดกระแส เบอร์ ACS712-20 จะมีความสามารถในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วง -20 A ถึง +20 A ในส่วนค่าเอาต์พุตที่ได้จะเป็นค่าแรงดัน ให้สัญญาณที่ออกมาเป็นอนาล็อก สามารถป้อนเข้าสู่บอร์ด ไมโครคอนโทรเลอร์ Atmega2560 ให้ทำการประมวลผลต่อไปได้อย่างสะดวก โดยโมดูลดังกล่าวมีคุณสมบัติคือ สามารถรับค่า Vcc ได้ในช่วง 4.5-5.5 V และสามารถวัดกระแสได้ทั้ง AC และ DC สามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 โมดูลตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ ACS712-20

โดยหลักการทำงาน เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลภายในในวงจรเลยจะทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ Vcc/2 เนื่องจากเป็นค่าแรงดันออฟเซต หรือค่า 0 ของการวัดกระแส โดยแรงดันเอาต์พุตจะมีการเปลี่ยนแปลง ขึ้นลง ตามค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านเซนเซอร์ เช่น ถ้าหากมีกระแสไฟฟ้าไหลภายในวงจรวัดได้มีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าค่าของแรงดันเอาต์พุตจะมีค่ามากกว่า Vcc/2 และในทางตรงกันข้ามถ้าหากกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรวัดได้มีค่าเป็นลบ ค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าน้อยกว่า Vcc/2 โดยสมการความสัมพันธ์ของกระแสทางด้านอินพุต (I_P) และแรงดันทางด้านเอาต์พุต ($V_{i,out}$) ของโมดูลตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ ACS712-20 แสดงได้ดังสมการที่ (5-11) และเมื่อทำการทดสอบจะได้ผลการทดสอบโมดูลแสดงดังตารางที่ 5.2 ดังนี้

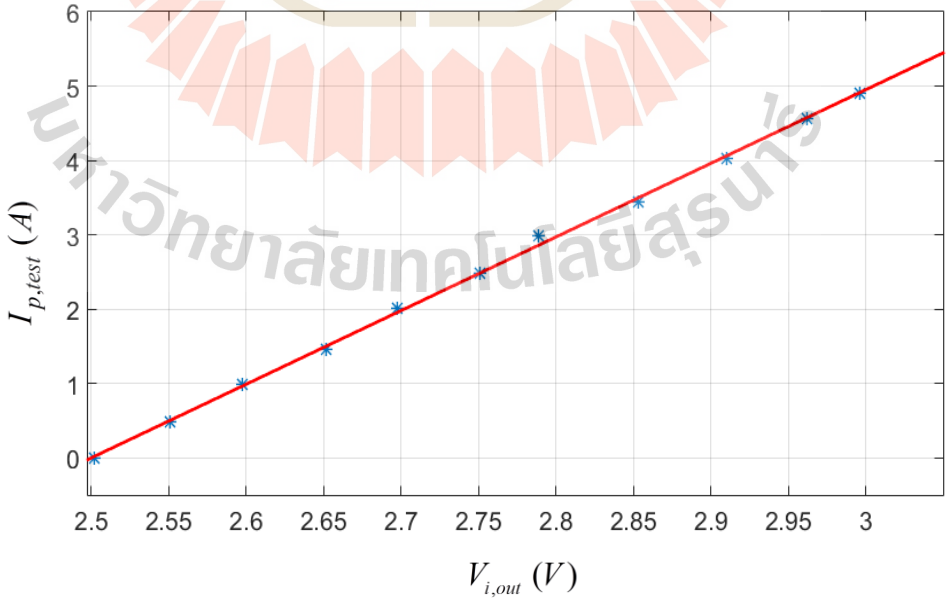
$$I_P = \frac{V_{i,out} - V_{offset}}{0.1} \tag{5-11}$$

โดยที่ V_{offset} มีค่าเท่ากับ 2.5 V และค่า 0.1 ในสมการคือ ค่าแรงดันเอาต์พุต 100 mV/A ซึ่งมีการแสดงรายละเอียดต่างๆไว้ใน datasheet

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส

$I_{P,test}(A)$	$I_{P,cal}(A)$	$V_{i,out}(V)$
0.495	0.510	2.551
0.977	0.980	2.598
1.493	1.520	2.652
2.012	1.980	2.698
2.489	2.510	2.751
2.787	2.890	2.789
3.475	3.530	2.853
4.061	4.100	2.910
4.583	4.620	2.962
4.931	4.960	2.996

จากผลการทดสอบอุปกรณ์โมดูลตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเบอร์ ACS712-20 แสดงดังตาราง ที่ 5.2 สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทางด้านอินพุต (I_P) และแรงดันทางด้านเอาต์พุต ($V_{i,out}$)ของโมดูลได้ดังรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{P,test}$ และ $V_{i,out}$ ของโมดูลวัดกระแส

สำหรับผลการทดสอบอุปกรณ์ดังกล่าวพบว่าสามารถนำไปใช้งานในการวัดกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากให้ค่าผลการทดสอบอุปกรณ์กับค่าจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ที่ (5-11) และจากกราฟมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ทำให้ง่ายต่อการเขียนฟังก์ชันลงในบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์

5.4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

ทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิในระบบทำความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ RTD PT100 สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง –40°C ถึง 220°C ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิลที่มีหลักการทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติของโลหะ คือเมื่อปลายลวดโลหะหรืออัลลอยด์ มี 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ถูกนำมาเชื่อมติดกัน ถ้าหากปลายลวดด้านที่เชื่อมติดกัน มีความแตกต่างของอุณหภูมิกับปลายลวดอีกด้านหนึ่งจะเกิด Voltage ขึ้น เรียกว่า Seebeck Voltage (โดยมักจะมีหน่วยเป็น ไมโครโวลต์ μV) และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Seebeck Effect สามารถแสดงเซนเซอร์ได้ดังรูปที่ 5.39

รูปที่ 5.39 เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ RTD PT100

โดยเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยตัวแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า Temperature Transmitter เพื่อทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณเอาต์พุตได้จากทรานสดิวเซอร์ให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน ซึ่งมี 2 ประเภท โดยสัญญาณที่หนึ่งคือ สัญญาณนิวเมติกส์ (pneumatics signal)

เป็นสัญญาณมาตรฐานที่อยู่ในรูปของความดันลม และในส่วนของสัญญาณที่สองคือ สัญญาณทางไฟฟ้า (electrical signal) เป็นสัญญาณมาตรฐานที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 1-5 V กระแสไฟฟ้า 4-20 mA และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 0-10 V กระแสไฟฟ้า 0-100 mA โดยในงานวิจัยนี้จะใช้งานในรูปแบบสัญญาณที่สอง สามารถแสดงตัวแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 5.40

รูปที่ 5.40 Temperature Transmitter

ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้น เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ RTD PT100 จะมีค่าเอาต์พุตที่ได้เป็นค่าแรงดัน ($V_{T,out}$) โดยเป็นสัญญาณอนาล็อก และสัญญาณดังกล่าวจะถูกป้อนเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ Atmega2560 ให้ทำการประมวลผลในส่วนของการควบคุมภายในบอร์ดต่อไป โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิ (T) และค่าแรงดันเอาต์พุต ($V_{T,out}$) เป็นดังสมการที่ (5-12)

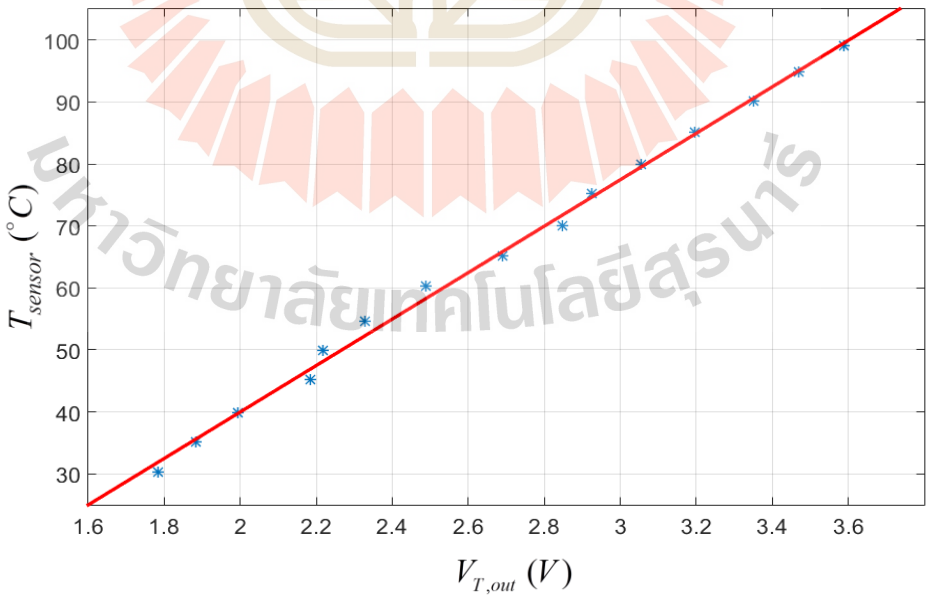
$$V_{T,out} = \frac{2}{75}T + 1 \qquad (5\text{-}12)$$

เมื่อทำการทดสอบเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิจะได้ค่าดังตารางที่ 5.3 และสามารถนำผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิมาสร้างกราฟความสัมพันธ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.41

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ RTD PT100

$T_{sensor}\ (°C)$	$T_{\text{thermometer}}\ (°C)$	$T_{\text{cal}}\ (°C)$	$V_{T,out}\ (V)$
30.25	30.18	29.43	1.785
35.12	35.25	34.95	1.932
39.77	40.20	39.60	2.056
45.22	45.15	44.85	2.196
49.89	50.05	49.76	2.327
54.55	55.01	54.90	2.464
60.32	60.15	59.66	2.591
65.16	65.33	64.95	2.732
69.96	70.12	69.82	2.862
75.28	75.16	74.88	2.997
79.91	80.14	79.53	3.121
85.11	85.15	84.90	3.264
90.21	90.30	89.85	3.396



รูปที่ 5.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_{sensor} และ $V_{T,out}$ ของโมดูลวัดกระแส

จากผลการทดสอบอุปกรณ์ พบว่าค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์ RTD PT100 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้เทอร์โมมิเตอร์ และค่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี มีค่าใกล้เคียงกัน จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความเที่ยงตรง ในส่วนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T_{sensor} และ $V_{T,out}$ มีลักษณะเป็นเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับสมการที่ (5-12) เมื่อนำไปเขียนฟังก์ชันลงในบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์จะทำให้ง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น

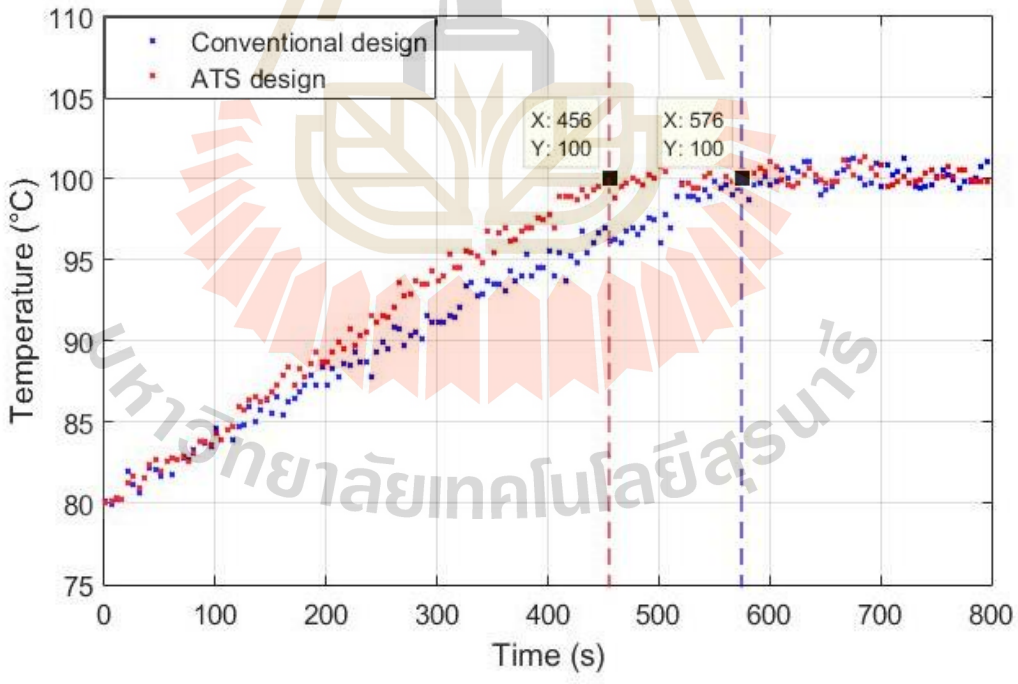
5.5 การเปรียบเทียบผลทดสอบตัวควบคุมสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

การสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้วงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน โดยใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตของระบบให้เป็นไปตามความต้องการ อาศัยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และการออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS ทั้งนี้รายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมได้นำเสนอเนื้อหาไว้แล้วในบทที่ 3 และบทที่ 4 โดยมีการยืนยันผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตที่ได้จากการออกแบบตามทฤษฎี ในการทดสอบตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบ จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งพบว่าการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิด้วย ATS สามารถให้ผลการตอบสนองมีสมรรถนะที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด เพื่อให้เกิดความสมจริงมากยิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการนำตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบ ไปใช้กับชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้น และทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนอง จากการทดสอบควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และการออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS โดยมีค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแสดงดังตารางที่ 5.4 ดำเนินการทดสอบด้วยการปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ คือกำหนดให้ T_o^* มีค่าเท่ากับ 100 °C เพื่อทำให้ของเหลวทั้งหมดแตกตัว และกลายเป็นไอ โดยจะเริ่มต้นกระบวนการควบคุม ที่อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 80 °C เนื่องจากในระบบจริงของเหลวก่อนนำเข้าสู่ระบบจะถูกทำให้มีความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C ซึ่งผลการทดสอบและการอภิปรายผลสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอ

พารามิเตอร์ของตัวควบคุม	วิธีการออกแบบตัวควบคุม	
	วิธีดั้งเดิม	วิธี ATS
K_{pt}	10.3090	14.3659
K_{it}	0.0200	0.1513
K_{pi}	0.0025	0.0989
K_{ii}	9.0312	29.9500
w	0.9439	0.4898

ดำเนินการทดสอบโดยตรวจวัดอุณหภูมิเฉลี่ยในทุก ๆ 5 วินาที และทำการทดสอบโดยอาศัยการออกแบบตัวควบคุมทั้งสองวิธีซ้ำกัน 2 ครั้ง แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะได้ผลการทดสอบระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 5.42



รูปที่ 5.42 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 5.42 เมื่อทำการประเมินค่าสมรรถนะผลตอบสนองของอุณหภูมิภายในหม้อต้มที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ พบว่าการออกแบบตัวควบคุมโดยอาศัยวิธี ATS มีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ที่รวดเร็วกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม โดยสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 100 °C ในวินาทีที่ 456 ส่วนวิธีการดั้งเดิมจะใช้เวลาประมาณ 576 วินาทีในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 100 °C อีกทั้งในช่วงสภาวะอยู่ตัว วิธี ATS สามารถคงค่าอุณหภูมิให้อยู่ภายในช่วง 100 ± 2 °C ได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิมอีกด้วย ซึ่งจากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS สามารถให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าการใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม โดยมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ที่แสดงรายละเอียดและอภิปรายผลในบทที่ 4 หากเมื่อทำการพิจารณาลงไปในรายละเอียดจะเห็นความแตกต่างช่วงเวลาของผลตอบสนอง ซึ่งเกิดจากการทดสอบกับระบบจริงมีเงื่อนไขของเวลาในการคำนวณหรือประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ อีกทั้งระบบควบคุมอุณหภูมิจำเป็นต้องใช้เวลานานพอสมควร จึงอาจจะเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดข้อแตกต่างของเวลาการตอบสนอง ระหว่างผลจากชุดทดสอบจริงกับผลจากคอมพิวเตอร์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ด้วยวิธีการ ATS สามารถออกแบบตัวควบคุมที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าและมีประสิทธิภาพมากกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

5.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยวงจรที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบคือ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC โดยมีการอธิบายรายละเอียดส่วนประกอบของวงจรในแต่ละส่วน ได้แก่ ส่วนแรกวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ในส่วนถัดมาวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน อาศัยการจุดชนวนสวิตช์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม มีการสร้างสัญญาณจุดชนวนเกตส่วนใหญ่ด้วยวงจรอนาล็อก และในส่วนสุดท้าย คืออุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งจากการทดสอบการใช้งานอุปกรณ์เซนเซอร์มีความเที่ยงตรงและมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน ในส่วนของการควบคุม เมื่อมีการรับค่าอนาล็อกจากอุปกรณ์ตรวจวัดทั้ง 2 อุปกรณ์ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการของตัวควบคุมพีไอในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และจะมีการเขียนโปรแกรมคำสั่งการคำนวณเพิ่มเติมในส่วนของตัวควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณเป็นไซน์ออกมา ทั้งนี้สัญญาณไซน์ดังกล่าวจะถูกนำไปสร้างเป็นสัญญาณ

พีดับเบิลยูเอ็ม เพื่อไปจุดชนวนสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ได้แสดงผลการทดสอบด้วยชุดทดสอบจริงของระบบที่มีการควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองอุณหภูมิเอาต์พุตของระบบที่ใช้ตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบด้วย ATS ซึ่งพบว่ามีสมรรถนะดีกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม โดยผลการตอบสนองทั้งชุดทดสอบจริงและผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องไปในทางทิศเดียวกัน ดังนั้นจึงถือได้ว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยอัลกอริทึม ATS สามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิผล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากแนวโน้มของราคาสินค้าต่าง ๆ ในปัจจุบันมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดกำลังมีปริมาณลดลงจนอาจหมดไป ดังนั้นเครื่องต้นแบบดังกล่าวจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบแปรรูปสิ่งที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทั้งนี้เมื่อมีการศึกษาและทดสอบสำเร็จสามารถนำไปใช้งานได้จริง จึงถูกพัฒนาเป็นระบบการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลที่มีขนาดใหญ่และมีคุณภาพมากยิ่งขึ้น โดยสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล คือระบบการกลั่นและการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพ เพื่อส่งผลให้เอทานอลที่ได้มีประสิทธิผลที่สมบูรณ์ที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยได้เริ่มต้นจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง และการค้นหาคำตอบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งรายละเอียดการศึกษาค้นคว้าต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

ในบทที่ 3 ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่อาศัยโหลดตัวต้านทานแทนขดลวดความร้อน โดยเริ่มพิจารณาจากระบบแบบวงเปิด (กรณีไม่มีตัวควบคุม) เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบวงปิดที่พิจารณาตัวควบคุมพีไอ โดยทำการพิสูจน์หาแบบจำลองเพิ่มเติมเฉพาะส่วนของตัวควบคุมเพียงเท่านั้น สำหรับการวิเคราะห์วงจรได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งจะทำให้แบบจำลองของระบบเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่งผลให้สามารถนำไปจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบหาผลตอบสนองของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB บนคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองจากแบบจำลองและผลการตอบสนองจากการจำลองสถานการณ์ ซึ่งพบว่าผลการตอบสนองของระบบพิจารณามีความสอดคล้องในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงถือได้ว่าแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ของระบบที่ได้ทำการพิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้อง สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นองค์ประกอบในการออกแบบตัวควบคุมความร้อนด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ต่อไปได้

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้างตัวควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ หรือที่เรียกว่า ATS โดยเป็นการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหา เพื่อช่วยในการออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตมีสมรรถนะที่ดีที่สุด มีการกำหนดเงื่อนไขการค้นหาคำตอบเกี่ยวกับการตรวจสอบความสมจริง สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมในแต่ละรอบ ซึ่งระบบจะทำการคำนวณหาค่าคุณภาพของคำตอบผ่านการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ที่เป็นองค์ประกอบหลักในกระบวนการออกแบบ ทั้งนี้การออกแบบตัวควบคุมจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ได้ทำการพิสูจน์ขึ้น โดยมีข้อดี คือ สามารถให้ผลการตอบสนองภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว เหมาะกับการนำมาใช้กับอัลกอริทึมการค้นหาด้วย ATS ซึ่งจากการจำลองสถานการณ์ผลการออกแบบตัวควบคุม พบว่าระบบที่อาศัยการออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS ให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตที่มีสมรรถนะดีกว่าระบบที่ใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด โดยรายละเอียดและการอภิปรายผลได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4

เพื่อความสมจริงและเป็นการยืนยันผลการตอบสนองของระบบ โดยตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วย ATS เมื่อนำไปใช้งานกับระบบจริงแล้วจะยังคงสามารถให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตที่มีสรรถนะที่ดีกว่าวิธีดั้งเดิมเช่นเดียวกันกับการจำลองผลบนคอมพิวเตอร์ ดังนั้นเนื้อหาในบทที่ 5 จึงนำเสนอการดำเนินการออกแบบและสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน ทั้งนี้เพื่อให้สังเกตการทำงานและดูผลการตอบสนองของวงจรในแต่ละส่วน จึงได้ทำการสร้างชุดทดสอบอย่างเป็นขั้นตอน มีการอธิบายไว้อย่างละเอียด โดยรวมไปถึงการทำงานของตัวควบคุมด้วย ในการทดสอบได้ทำการควบคุมอุณหภูมิเอาต์พุตให้อยู่ในย่าน 100 ± 2 °C ซึ่งผลที่เกิดจากการทดสอบพบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในจุดทำงานที่ต้องการได้ โดยมีผลสอดคล้องในทำนองเดียวกันกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ คือการออกแบบตัวควบคุมด้วย ATS ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะของอุณหภูมิเอาต์พุตที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม

6.2 ข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ การสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยมีผลการจำลองสถานการณ์ และผลจากการทดสอบของ

ชุดทดสอบจริง ทำให้ได้ทราบถึงปัญหา ส่งผลให้เกิดแนวคิด และมีข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคตดังนี้

1. จากการศึกษาค้นคว้า พบว่าการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC มีเนื้อหาและรายละเอียดค่อนข้างน้อย ดังนั้นในอนาคตควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการหาแบบจำลองของระบบดังกล่าว ในวิธีการต่าง ๆ ออกไป เพิ่มมากขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมสำหรับการพิสูจน์หาและการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้งาน

2. การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เป็นการพิจารณาภายใต้เงื่อนไขการทำงานของโหมดการนำกระแสต่อเนื่องเพียงเท่านั้น ดังนั้นในอนาคตควรมีการพัฒนา เพื่อให้สามารถพิจารณาในโหมดการนำกระแสที่ไม่ต่อเนื่องได้

3. จากการศึกษาการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีโหลดเป็นขดลวดความร้อน ซึ่งเป็นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นภายในระบบ เนื่องจากพบว่าเมื่อระบบมีการทำงาน สัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำถูกส่งเข้าสู่ชุดควบคุมเพื่อทำการประมวลผล มีผลทำให้สัญญาณไซน์เอาต์พุตของชุดควบคุมที่จะนำไปสร้างเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม มีความผิดเพี้ยนไปจากเดิม ทั้งนี้จึงส่งผลโดยตรงกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบ เมื่อนำใช้งานเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์นั้น ๆ ได้ ดังนั้นในอนาคตจึงควรมีการพิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบขึ้น เพื่อให้มีการทำงานที่มีประสิทธิผลสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

4. การสร้างชุดทดสอบจริงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้คำนวณ ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรอง ที่มีพิกัดและราคาค่อนข้างสูง ในอนาคตควรมีการพัฒนาออกแบบร่วมกับระบบควบคุม ให้มีค่าพิกัดที่ลดลง เพื่อเป็นการประหยัด และยังสามารถนำไปใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

จักรกริช ภักดีโต. (2557). การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลด เป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. **วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

สาธิต ชลสถิตจำเริญ. (2556). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ที่รวมพารามิเตอร์ของตัวควบคุม. **วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

อภิชาต บุญทาวัน. (2557). การสร้างโรงงานต้นแบบขนาดเล็กเพื่อการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ด้วยเทคนิคผสมระหว่างการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ. **งานวิจัยสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

อภิชาต บุญทาวัน. (2561). โครงการปรับปรุงโรงงานต้นแบบสำหรับการผลิตไบโอเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ. **งานวิจัยสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

อาทิตย์ กองแก้ว. (2559). การพัฒนาและจำลองกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลและการประยุกต์ใช้ในระบบเอสเทอริฟิเคชั่นของกรดซักซินิกควบคู่กับการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น. **วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชา เทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P. (2008). Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load using DQ-transformation method. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics.,** pp. 19-24.

Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P. (2008). DQ-transformation approach for modelling and stability analysis of AC-DC power system with controlled PWM rectifier and constant power loads. **Power Electronics and Motion Control Conference.,** pp. 2049-2054.

Areerak K-N., and Sujitjorn S. (2002). Performance Comparison between Genetic Algorithm and Tabu Search Methods. **Suranaree J. Sci. Technol.,** Vol. 9, pp. 61-68.

Areerak, K-N. (2009). Modelling and Stability Analysisof Aircraft Power Systems. **(M. Eng)**

Chaijarurnudomrung, K., Areerak, K-N., Areerak, K-L., Srikaew, A. (2011). The controller design of three-phase controlled rectifier using an adaptive tabu search algorithm. **International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).**, pp. 605 - 608.

Chonsatidjamroen S., Areerak K.-N., Areerak K.-L. (2012). The optimal cascade PI controller design of buck converters. **International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).**

Emadi, A. (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.

Emadi, A. (2004). Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect.,** Vol. 51, No. 5, pp. 992-1000.

Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T. and Cho, G.H. (1998). Modeling and analysis of Static and Dynamic Characteristics for Buck-Type Three-Phase PWM Rectifier by Circuit DQ Transformation. **IEEE Trans. on Power Electronics.**, Vol.13, No.2, pp. 323-336.

Liang Dong, Hao Ma, and Fei Xu. (2008). Modeling and Analysis of PWM Converters with a New GSSA Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect.,** pp. 821–826.

Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M. (1997). Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach. **IEEE Trans. on Circuits and Systems.,** Vol. 44, pp. 767-770.

Narongrit, T., Areerak, K-L. and Areerak, K-N. (2010). Design for an active Power Filter using Genetic Algorithm Technique. **The 9th WSEAS Internatonal Conference on artifical Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases (AIKED'10), Cambridge, United Kingdom**., pp. 46-50.

Puangdownreong, D., Areerak, K.-N., Srikaew, A., Sujitjorn, S., Totarong, P. (2005). System identification via Adaptive Tabu Search. **IEEE International Conference on Industrial Technology.,** Vol.2, pp. 915 - 920.

Sopapirm, T., Areerak, K-N., and Areerak, K-L. (2011). The Application of Adaptive Tabu Search Algorithm and Averaging Model to the Optimal Controller Design of Buck Converters. **Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering.,** Vol.5, No.12, pp. 1707-1713.

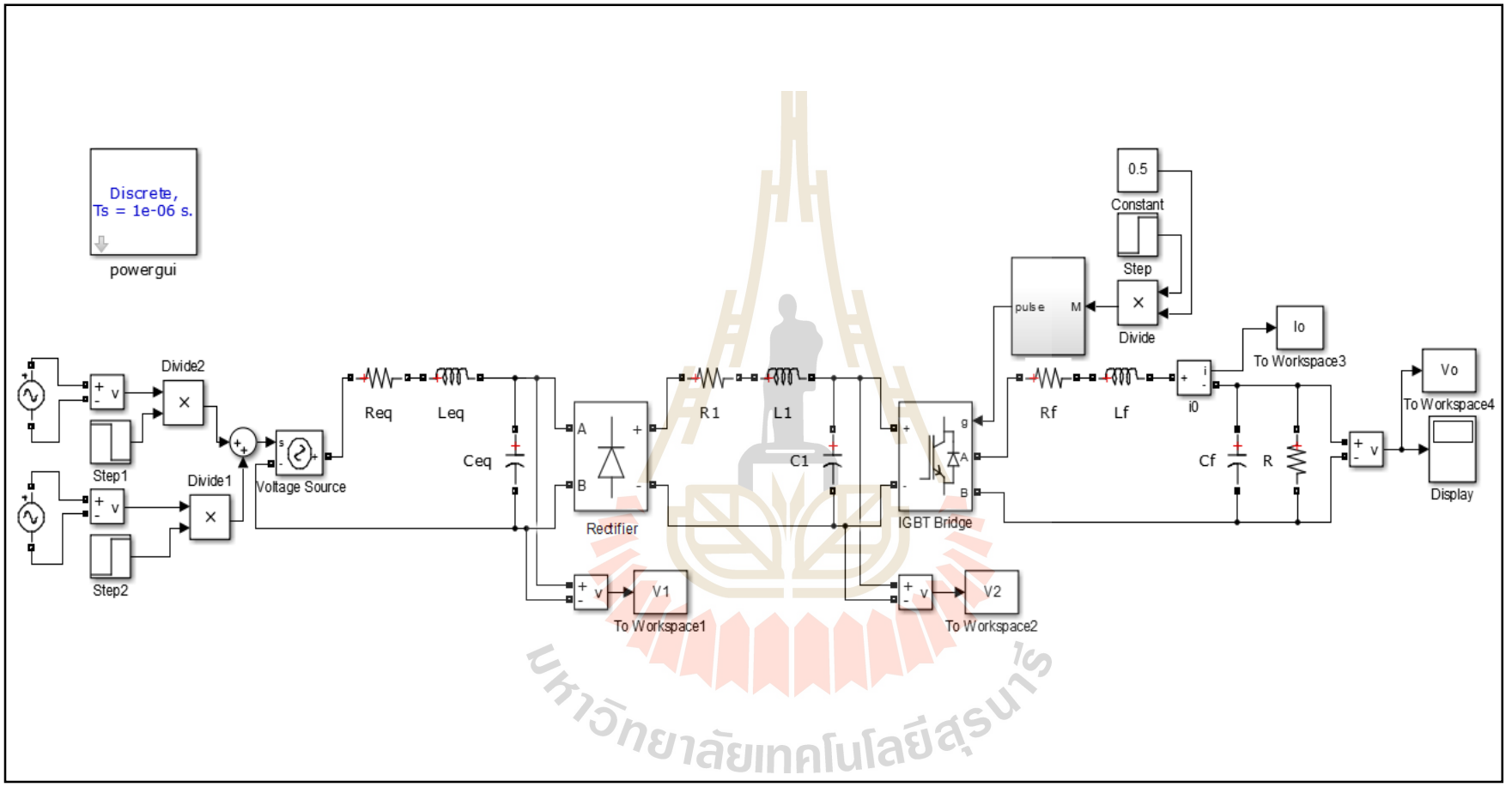
Udomsuk, S., Areerak, T., Areerak, K-L., and Areerak, K-N. (2011). Power Loss Identification of Separately Excited DC Motor Using Adaptive Tabu Search. **European Journal of Scientific Research.,** Vol. 60, No. 4, pp. 488-497.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

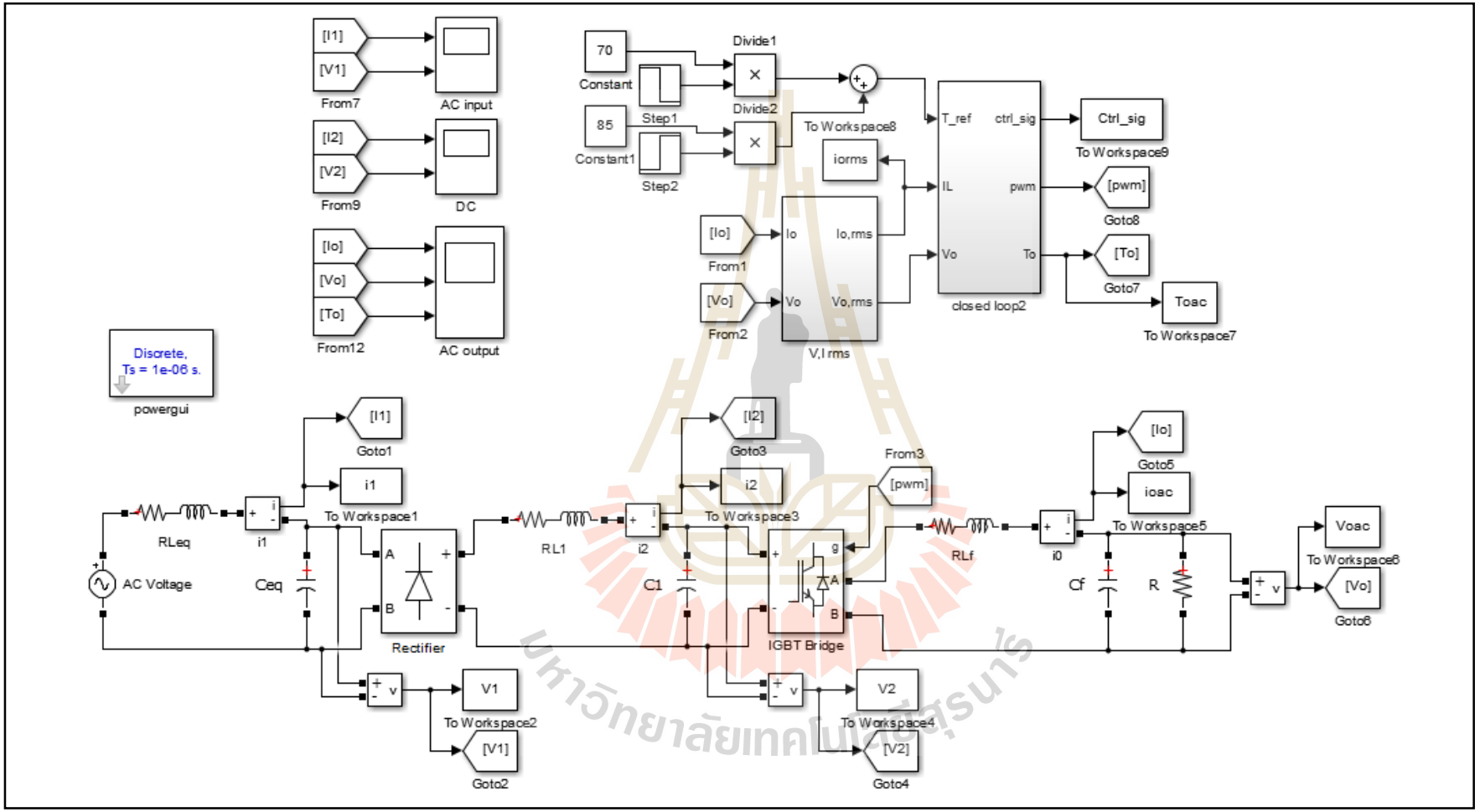
ภาคผนวก ก

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบที่จำลองสถานการณ์ด้วย SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.1 ชุดบล็อกการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC กรณีไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ ก.2 ชุดบล็อกการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC กรณีมีตัวควบคุมอุณหภูมิ

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อหาผลเฉลยของแบบจำลอง ที่ทำงานบนโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข.1 โปรแกรมสำหรับคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า สำหรับวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC กรณีไม่มีตัวควบคุม

```
**************************************************************************
%%% กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของระบบ %%%
global w  m  Req  Leq  Ceq  R1  L1  C1  Rf  Lf  Cf  R  Vm
w=2*pi*50;
m=0.5;
Req=0.1e-3;
Leq=1e-6;
Ceq=22e-9;
R1=1e-3;
L1=100e-3;
C1=500e-6;
Rf=1e-3;
Lf=5e-3;
Cf=10e-6;
R=30;
Vm=220*sqrt(2);
%%% ประกาศฟังก์ชันคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า %%%
function dx=coefficients1(t,x)
global w  m  Req  Leq  Ceq  R1  L1  C1  Rf  Lf  Cf  R  Vm
if t>0.2
    Vm=150*sqrt(2);
End
dx=zeros(18,1);
dx(1)=-(Req/Leq)*x(1)-(1/Leq)*x(2);
dx(2)=(1/Ceq)*x(1)+(4/(pi*Ceq))*x(12);
dx(3)=-(R1/L1)*x(3)-(1/L1)*x(4)-(4/(pi*L1))*x(10);
dx(4)=(1/C1)*x(3)+((4*m)/(sqrt(2)*pi*C1))*x(16);
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
dx(5)=-(Rf/Lf)*x(5)-(1/Lf)*x(6)-((4*m)/(sqrt(2)*pi*Lf))*x(14);
dx(6)=(1/Cf)*x(5)-(1/(R*Cf))*x(6);
dx(7)=-(Req/Leq)*x(7)+w*x(8)-(1/Leq)*x(9);
dx(8)=-w*x(7)-(Req/Leq)*x(8)-(1/Leq)*x(10)-(Vm/(2*Leq));
dx(9)=(1/Ceq)*x(7)+w*x(10);
dx(10)=(2/(pi*Ceq))*x(3)+(1/Ceq)*x(8)-w*x(9);
dx(11)=-(R1/L1)*x(11)+w*x(12)-(1/L1)*x(13);
dx(12)=-(2/(pi*L1))*x(2)-w*x(11)-(R1/L1)*x(12)-(1/L1)*x(14);
dx(13)=(1/C1)*x(11)+w*x(14);
dx(14)=((2*m)/(sqrt(2)*pi*C1))*x(5)+(1/C1)*x(12)-w*x(13);
dx(15)=-(Rf/Lf)*x(15)+w*x(16)-(1/Lf)*x(17);
dx(16)=-((2*m)/(sqrt(2)*pi*Lf))*x(4)-w*x(15)-(Rf/Lf)*x(16)-(1/Lf)*x(18);
dx(17)=(1/Cf)*x(15)-(1/(R*Cf))*x(17)+w*x(18);
dx(18)=(1/Cf)*x(16)-w*x(17)-(1/(R*Cf))*x(18);
return
%%% เรียกใช้ฟังก์ชันการคำนวณที่ค่าตัวแปรสถานะในจุดการทำงานเริ่มต้นและจุดทำงานที่
เปลี่ยนแปลง ดำเนินการแก้ระบบสมการอนุพันธ์เพื่อหาผลการตอบสนอง  %%%
[t_18,x]=ode45('coefficients1',[0:1e-6:0.4],zeros(1,18));
i1ode18=x(:,1)+2*x(:,7).*cos(w*t_18)-2*x(:,8).*sin(w*t_18);
V1ode18=x(:,2)+2*x(:,9).*cos(w*t_18)-2*x(:,10).*sin(w*t_18);
i2ode18=x(:,3)+2*x(:,11).*cos(w*t_18)-2*x(:,12).*sin(w*t_18);
V2ode18=x(:,4)+2*x(:,13).*cos(w*t_18)-2*x(:,14).*sin(w*t_18);
ioode18=x(:,5)+2*x(:,15).*cos(w*t_18)-2*x(:,16).*sin(w*t_18);
Voode18=x(:,6)+2*x(:,17).*cos(w*t_18)-2*x(:,18).*sin(w*t_18);
sim('AC_DC_ACstepV',[0 0.4])
```

ภาคผนวก ข.2 โปรแกรมสำหรับคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า สำหรับวงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC กรณีมีตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ

```
**************************************************************************
%%% กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของระบบ %%%
global w  Ar  Req  Leq  Ceq  R1 L1 C1 Rf  Lf  Cf  R  Vm  Kpt  Kit  Kpi  Kii
w=2*pi*50;
Ar=10;
Req=1e-3;
Leq=1e-6;
Ceq=22e-6;
R1=100e-3;
L1=140e-3;
C1=0.027;
Rf=125e-3;
Lf=5e-3;
Cf=10e-6;
R=30;
Vm=220*sqrt(2);
Kpt=10.309;
Kit=0.02;
Kpi=0.0025;
Kii=9.03125;
%%% ประกาศฟังก์ชันคำนวณสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า %%%
function dx=Unti(t,x)
global w  Ar  Req  Leq  Ceq  R1  L1  C1  Rf  Lf  Cf  R  Vm  Kpt  Kit  Kpi  Kii  To
if (t<=2.00)
    To=70.0;
else
    To=85.0;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
 end
dx=zeros(13,1);
dx(1)=-(R1/L1)*x(1)-(1/L1)*x(2)-(4/(pi*L1))*x(6);
dx(2)=(1/C1)*x(1)+((4*To*Kpt*Kpi)/( sqrt(2)*pi*C1*Ar))*x(8)
     -5.2*Kpt*Kpi*sqrt((x(9)^2)+(x(10)^2))/( sqrt(2)*pi*C1*Ar)
     *x(8)+((4*Kit*Kpi)/( sqrt(2)*pi*C1*Ar))*x(8)*x(11)
     -((8*Kpi*sqrt((x(7)^2)+(x(8)^2)))/( sqrt(2)*pi*C1*Ar))*x(8)
     +((4*Kii)/( sqrt(2)*pi*C1*Ar))*x(8)*x(12);
dx(3)=-(Req/Leq)*x(3)+w*x(4)-(1/Leq)*x(5);
dx(4)=-w*x(3)-(Req/Leq)*x(4)-(1/Leq)*x(6)-(Vm/(2*Leq));
dx(5)=(1/Ceq)*x(3)+w*x(6);
dx(6)=(2/(pi*Ceq))*x(1)+(1/Ceq)*x(4)-w*x(5);
dx(7)=-(Rf/Lf)*x(7)+w*x(8)-(1/Lf)*x(9);
dx(8)=-((2*To*Kpt*Kpi)/( sqrt(2)*pi*Lf*Ar))*x(2)
     +(2.6*Kpt*Kpi*sqrt((x(9)^2)+(x(10)^2)))/( sqrt(2)*pi*Lf*Ar)x*(2)
     -((2*Kit*Kpi)/( sqrt(2)*pi*Lf*Ar))*x(2)*x(11)
     +((4*Kpi*sqrt((x(7)^2)+(x(8)^2)))/( sqrt(2)*pi*Lf*Ar))*x(2)
     -((2*Kii)/( sqrt(2)*pi*Lf*Ar))*x(2)*x(12)-w*x(7)-(Rf/Lf)*x(8)-(1/Lf)*x(10);
dx(9)=(1/Cf)*x(7)-(1/(R*Cf))*x(9)+w*x(10);
dx(10)=(1/Cf)*x(8)-w*x(9)-(1/(R*Cf))*x(10);
dx(11)= To-(1.3*sqrt((x(9)^2)+(x(10)^2)));
dx(12)= To*Kpt-(1.3*Kpt*sqrt((x(9)^2)+(x(10)^2)))+Kit*x(11)-(2*sqrt((x(7)^2)+(x(8)^2)));
dx(13)=-2*Kpi*sqrt((x(7)^2)+(x(8)^2))-(1.3*Kpt*Kpi*sqrt((x(9)^2)
      +(x(10)^2)))+Kit*Kpi*x(11)+Kii*x(12)+Kpt*Kpi*To;
%%% เรียกใช้ฟังก์ชันการคำนวณที่ค่าตัวแปรสถานะในจุดการทำงานเริ่มต้นและจุดทำงานที่
เปลี่ยนแปลง ดำเนินการแก้ระบบสมการอนุพันธ์เพื่อหาผลการตอบสนอง  %%%
[t,x] = ode23(@Unti,[0:1e-6:4],[0 198 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]);
 i2ode=x(:,1);
 V2ode=x(:,2);
```

```
i1ode=2*x(:,3).*cos(w*t)-2*x(:,4).*sin(w*t);
V1ode=2*x(:,5).*cos(w*t)-2*x(:,6).*sin(w*t);
//ioode=2*x(:,7).*cos(w*t)-2*x(:,8).*sin(w*t);
Iorms=2*sqrt((x(:,7).^2)+(x(:,8).^2));
//Toode=2*x(:,9).*cos(w*t)-2*x(:,10).*sin(w*t);
Torms=1.3*sqrt((x(:,9).^2)+(x(:,10).^2));
sim('testTem',[0 4])
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค.

โปรแกรมการสร้างสัญญาณไซน์สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค.1 โปรแกรมการสร้างสัญญาณไซน์ เพื่อนำไปเปรียบเทียบเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอม สำหรับชุดทดสอบที่เป็นระบบวงปิด

```
**************************************************************************
 #include <Wire.h>
 #include <SPI.h>
 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
 #include <SD.h>
 %%% ประกาศตัวแปรให้เก็บผลใน SD Card %%%
 const int chipSelect = 4;
 File Temp1;
 File Temp2;
 %%% ประกาศตัวแปรอุณหภูมิ %%%
 int sensorTem1 = 0;
 int temperature1 = 0;
 int sensorTem2 = 0;
 int temperature2 = 0;
 float T = 100;
 int d=0,tm=0;
 float tsum1=0;
 float tsum2=0;
 %%% ประกาศตัวแปรกระแส %%%
 int sensorCurrent = 0;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
int sensitivity = 100; // สำหรับ 20A

int offsetVoltage = 2500; // ค่าเริ่มต้นเพื่อปรับค่าตรงนี้ให้ค่ายังไม่มีโหลดเป็น 0.00

%%% ประกาศตัวแปร PWM %%%

float S,m,A,PWM,M;

float T_o2,T_o,co_LPF=0.68,Msum=0,Vsum=0,Tsum1=0,Isum=0;

double adcVoltage=0,I_L=0;

float kpt=10.309, kit=0.02,kpi=0.0025,kii=9.03125,Ts=0.001;

float err_t,Upt,Uit,Uit_1=0,Upi_t;

float err_i,Upi,Uii,Uii_1=0,Upi_i,V,V_o1=0,I_L1=0;

%%% ประกาศตัวแปร LCD %%%

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

int lp0=3;

int lp1 = 5;

int lp2 = 6;

int lp3 = 7;

int lp4 = 8;

int lp5 = 9;

int lp6 = 10;

%%% ประกาศตัวแปร DAC พร้อมกับสร้างสัญญาณ sine 50 Hz %%%

int CS =43;

int SCX =52;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
int SDI =53;
int LDAC =51;
int SHDN =50;
int table_sin[64]={
        0x07FF,0x08C8,0x098E,0x0A51,0x0B0F,0x0BC4,0x0C71,0x0D12,
        0x0DA7,0x0E2E,0x0EA5,0x0F0D,0x0F63,0x0FA6,0x0FD7,0x0FF5,
        0x0FFF,0x0FF5,0x0FD7,0x0FA6,0x0F63,0x0F0D,0x0EA5,0x0E2E,
        0x0DA7,0x0D12,0x0C71,0x0BC4,0x0B0F,0x0A51,0x098E,0x08C8,
        0x07FF,0x0736,0x0670,0x05AD,0x04EF,0x043A,0x038D,0x02EC,
        0x0257,0x01D0,0x0159,0x00F1,0x009B,0x0058,0x0027,0x0009,
        0x0000,0x0009,0x0027,0x0058,0x009B,0x00F1,0x0159,0x01D0,
        0x0257,0x02EC,0x038D,0x043A,0x04EF,0x05AD,0x0670,0x0736
 };
void setup() {
Serial.begin(9600);
%%% สำหรับ LCD %%%
 pinMode(lp0, OUTPUT);
 pinMode(lp1, OUTPUT);
 pinMode(lp2, OUTPUT);
 pinMode(lp3, OUTPUT);
 pinMode(lp4, OUTPUT);
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
  pinMode(lp5, OUTPUT);
  pinMode(lp6, OUTPUT);
  digitalWrite(lp0, LOW);
  digitalWrite(lp1, LOW);
  digitalWrite(lp2, LOW);
  digitalWrite(lp3, LOW);
  digitalWrite(lp4, LOW);
  digitalWrite(lp5, LOW);
  digitalWrite(lp6, LOW);
  lcd.begin();
  lcd.backlight();
%%% สำหรับ SD Card %%%
Serial.print("Initializing SD card...");
  pinMode(SS, OUTPUT);
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
     Serial.println("initialization failed!");
  return;
}
     Serial.println("initialization done.");
  while (!Serial) {
; // รอจนกระทั่งเชื่อมต่อกับ Serial port แล้ว สำหรับ Arduino Leonardo เท่านั้น
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
}
%%% สำหรับ DAC %%%
  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);
}
%%% กระบวนการทำงานของ DAC %%%
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;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
}
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() {
 %%% การอ่านค่าและเก็บค่าลง SD Card จากอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิตัวที่ 1 และ 2 %%%
 sensorTem1 = analogRead(A0);
 temperature1 = map(sensorTem1, 255, 1023, 0, 1500);
 T_o = temperature1 / 10.0; //ค่าอุณหภูมิจากเซนเซอร์ 1
 sensorTem2 = analogRead(A1);
 temperature2 = map(sensorTem2, 255, 1023, 0, 1500);
 T_o2 = temperature2 / 10.0; //ค่าอุณหภูมิจากเซนเซอร์ 2
 tsum1=tsum1+T_o;
 tsum2=tsum2+T_o2;
 c=c+1;
 if(c==10){
     tm++;
      Temp1 = SD.open("T1.txt", FILE_WRITE); // เปิดไฟล์ที่ชื่อ test.txt เพื่อเขียนข้อมูล
โหมด FILE_WRITE
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
      Temp2 = SD.open("T2.txt", FILE_WRITE); // เปิดไฟล์ที่ชื่อ test.txt เพื่อเขียนข้อมูล
โหมด FILE_WRITE

%%% การแสดงค่าอุณหภูมิบนจอ LCD %%%

  if(tsum1*0.1<95){
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("T1: ");
    lcd.print(tsum2*0.1);
    lcd.print(" Under  ");
  }
  else if(tsum1*0.1>103){
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("T1: ");
    lcd.print(tsum2*0.1);
    lcd.print(" Over   ");
  }
  else{
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("T1: ");
    lcd.print(tsum2*0.1);
    lcd.print(" Good   ");
  }

      c=0;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
        tsum1=0;
        tsum2=0;
  }
    delay(500);
}
%%% กระบวนการอ่านค่าและแปลงค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส %%%
int getMaxValue()
{
int sensorValue; //value read from the sensor
int sensorMax = 0;
uint32_t start_time = millis();
while((millis()-start_time) < 1) //sample for 1000ms
{
sensorValue = analogRead(A2);
if (sensorValue > sensorMax)
{
sensorMax = sensorValue;
}
return sensorMax;
}
  sensorCurrent = getMaxValue();
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
  adcVoltage = (sensorCurrent / 1024.0) * 5000;
  I_L = ((adcVoltage - offsetVoltage) / sensitivity)/1.404;
%%% กระบวนการของตัวควบคุมพีไอลูปอุณหภูมิ %%%
  err_t=T-T_o2;
  Upt=kpt*err_t;
  Uit=(kit*Ts*err_t)+Uit_1;
  Upi_t=Upt+Uit;
  if (Upi_t >= 799)
    {Upi_t=799;}
  else if (Upi_t <=-799)
    {Upi_t=-799;}
%%% กระบวนการของตัวควบคุมพีไอลูปกระแส %%%
  err_i=Upi_t-I_L;
  Upi=kpi*err_i;
  Uii=(kii*Ts*err_i)+Uii_1;
  Upi_i=Upi+Uii;
  if (Upi_i >= 700)
    {Upi_i=700;}
  else if (Upi_i <=0)
    {Upi_i=0;}
  PWM=Upi_i;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
m = map(PWM, 0, 24, 45, 100); // เปรียบเทียบค่า m
 M=m/100.0; //ค่าอยู่ระหว่าง 0.45-0.1
%%% เอาต์พุต DAC สัญญาณ sine 50 Hz %%%
for(int i=0;i<64;i++)
{
   S=table_sin[i];
   A=M*S; // analog output อยู่ที่ 0-4095V
   Write_MCP4922(1,A); }
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

สุชาวดี จีนสุทธิ์, กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์ และ อภิชาต บุญทาวัน, “**แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก**”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 41 ประจำปี 2561 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ร่วมกับมหาวิทยาลัยศรีปทุม, หน้า 212-215

สุชาวดี จีนสุทธิ์, กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์ และ อภิชาต บุญทาวัน, “**แบบจำลองพลวัตระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก**”, วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 ประจำปี 2563, หน้า 62-70

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

Mathematical Model of Heat Control Systems for Small Fuel Ethanol Production Plants

สุชาวดี จีนสุทธิ์[1], กองพัน อารีรักษ์[1], กองพล อารีรักษ์[1] และอภิชาต บุญทาวัน[2]

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

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก เป็นเครื่องที่มีระบบการกลั่นลำดับส่วนที่มีประสิทธิภาพ ได้ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตเอทานอล โดยในระบบของเครื่องจะมีระบบทำความร้อน ทำหน้าที่ให้ความร้อนในกระบวนการกลั่น ในบทความนี้จึงนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนโดยใช้วงจรการแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส อาศัยการพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความถูกต้องสูงและใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็ว

คำสำคัญ : วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC, แบบจำลองวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (GSSA) , ระบบควบคุมความร้อน

Abstract

This paper presents the mathematical modeling of heat control systems for small fuel ethanol production plants. It is a machine with efficient sequential refining developed and applied in ethanol production. The heating system is to provide heat in the process of distillation. In this paper the mathematical model of heat control systems using AC-DC-AC power conversion circuit with one-phase power system is presented. The proposed model is derived by using generalized state-space averaging approach. The model is validated by the simulation via the SimPowerSystem™ of MATLAB program. The results show that the model is highly accurate and provide the fast computational time.

Keyword : AC-DC-AC power converters , GSSA method , Heat control

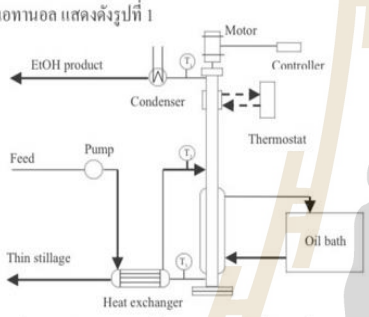
1. บทนำ

ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงได้รับความสนใจและเป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากสภาวะของราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่ผันผวนและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้จากการสำรวจแหล่งน้ำมันดิบยังพบว่ามีปริมาณที่ลดลงและมีแนวโน้มที่จะหมดไป จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีแนวคิดที่จะผลิตเชื้อเพลิงขึ้นมาทดแทน หรือแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์จากสิ่งที่มีอยู่แปรรูปเป็นเชื้อเพลิงจากงานวิจัย [1] พบว่าเอทานอลสามารถผลิตจากวัตถุดิบทางเกษตรได้ และจากการทดสอบเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถใช้งานได้จริงกับเครื่องยนต์ ซึ่งจากการศึกษาระบบของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กนี้พบว่ามีระบบทำความร้อนที่ให้ความร้อนแก่น้ำหมัก ที่เกิดจากการหมักวัตถุดิบทางการเกษตร ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นเอทานอลประมาณร้อยละ 10 – 12 โดยน้ำหนัก ถูกกลั่นลำดับส่วนโดยการให้ความร้อนจนได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดประมาณร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก และนำไปผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ เพื่อแยกน้ำออกจากเอทานอล ทำให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์ ดังนั้นกระบวนการกลั่นโดยให้ความร้อนมีความสำคัญมาก จึงต้องมีระบบทำความร้อนที่มีประสิทธิภาพ มีตัวควบคุมที่ดีและเหมาะสม

ในบทความนี้จึงนำเสนอการหาแบบจำลองทางของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC การแปลงรูปพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับโหลด โดยใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีบทบาทที่สำคัญและมีการใช้งานเพิ่มสูงขึ้น ถูกนำมาพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานกับระบบหรือโหลดที่เหมาะสม จากแนวโน้มการใช้งานโหลดของระบบในปัจจุบันมีลักษณะเป็นโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น เครื่องทำความร้อน เครื่องทำน้ำอุ่น เตาไฟฟ้า เป็นต้น ในงานวิจัย [2-3] พบว่าการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแปลงผันกำลังไฟฟ้าไปประยุกต์ใช้งานมีความจำเป็น ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ระบบ เพื่อพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพ หลีกเลี่ยงความยุ่งยากซับซ้อนในการใช้งาน การหาแบบจำลองของระบบดังกล่าวจะทำให้แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในระบบ ซึ่งมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เพื่อให้มีความสะดวกและลดความซับซ้อน ในบทความนี้จึงอาศัยวิธีการหาค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging approach, GSSA) [6-7] เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ระบบ และง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จะยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์ ผ่านโปรแกรม MATLAB

2. เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

จากงานวิจัย [1] มีการคิดค้นเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กขึ้น และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้เอทานอลที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และเหมาะสมที่สุดที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลนี้ถูกพัฒนาให้ดีขึ้น โดยมีการออกแบบระบบการควบคุมความเข้มข้นของส่วนการกลั่นเอทานอล ด้วยการควบคุมอุณหภูมิของไอเอทานอลที่ออกจากหอกลั่น การพัฒนาระบบการกลั่นเอทานอล แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การพัฒนาระบบการกลั่นเอทานอลแบบต่อเนื่องรุ่นที่ 2 [1]

จากระบบดังรูปที่ 1 การควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม ต้องมีระบบความร้อนที่มีประสิทธิภาพ จึงนำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2 โดยมีส่วนประกอบของวงจรแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC ซึ่งพิจารณาวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ โดยมีแหล่งจ่ายของวงจรเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (V_s) ต่อเข้ากับพารามิเตอร์ R_{eq}, L_{eq}, C_{eq} และไดโอด 4 ตัวแบบบริดจ์ เมื่อปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายผ่านไดโอด ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จะเป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง ลำดับถัดมาในส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า DC-AC ซึ่งเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ไปเป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจากวงจรดังรูปที่ 2 แรงดันเอาต์พุต (v_o) และกระแสเอาต์พุต (i_o) ที่ได้จึงเป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ R_1, L_1, C_1 และอุปกรณ์สวิตช์ 4 ตัวแบบบริดจ์ จากนั้นต่อเข้ากับพารามิเตอร์ R_f, L_f, C_f และโหลดตัวต้านทาน R โดยโหลด R เปรียบเสมือนขดลวดความร้อนของระบบกลั่นเอทานอล

3. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ในระบบหนึ่งเฟสแสดงดังรูปที่ 2 จะอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งวิธีนี้ได้รับการยอมรับ [4-5] และถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดความซับซ้อนและง่ายต่อการนำไปศึกษาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะใช้สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรเวลาอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะ โดยหลักการของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน [6-7] สามารถอธิบายจากสัญญาณ $f(t)$ ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)

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

$\langle x\rangle_k(t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier coefficients) สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

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

วิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC เริ่มพิจารณาจากสัญญาณรายคาบของฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC และ DC-AC มีลักษณะการทำงานเหมือนกันแสดงดังสมการที่ (3)

$$u_d(t)=u_s(t)=\begin{cases}1 & 0<t<\frac{T_s}{2}\\ -1 & \frac{T_s}{2}<t<T_s\end{cases} \tag{3}$$

โดยที่ $u_d(t)$ คือฟังก์ชันการทำงานของไดโอด
$u_s(t)$ คือฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์
T_s คือคาบฟังก์ชันการสวิตช์

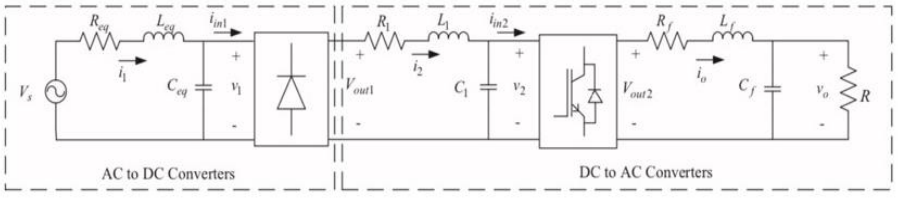
ฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC สามารถพิจารณาร่วมกับแรงดันและกระแส โดยแบ่งออกเป็นดังนี้ ส่วนที่ 1 ฟังก์ชันการทำงานของไดโอดในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{cases}V_{out1}=u_d(t)v_1\\ i_{in1}=u_d(t)i_2\end{cases} \tag{4}$$

ส่วนที่ 2 ฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า DC-AC และเนื่องจากในส่วนนี้มีความสัมพันธ์ของ PWM ดังนั้นจึงต้องพิจารณาความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5)

$$\begin{cases}V_{out2}=\dfrac{u_s(t)v_2*m}{\sqrt{2}}\\ i_{in2}=\dfrac{u_s(t)i_o*m}{\sqrt{2}}\end{cases} \tag{5}$$

โดยที่ m คือค่าดัชนีมอดูเลตสวิตช์ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC

จากรูปที่ 2 พิจารณาหาความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL, KCL) โดยที่ V_s เป็นค่าคงตัว ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนสมการในรูปของฟังก์ชันการสวิตช์ $u_d(t)$ และ $u_s(t)$ โดยแทนค่าความสัมพันธ์ในสมการที่ (4) และ (5) จะได้ความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (6) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นจึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อแปลงแบบจำลองดังกล่าวให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา

$$\begin{cases} \dot{i_1} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_1 - \frac{1}{L_{eq}} v_1 + \frac{1}{L_{eq}} V_s \\ \dot{v_1} = \frac{1}{C_{eq}} i_1 - \frac{1}{C_{eq}} (u_d(t) * i_2) \\ \dot{i_2} = -\frac{R_1}{L_1} i_2 - \frac{1}{L_1} v_2 + \frac{1}{L_1} (u_d(t) * v_1) \\ \dot{v_2} = \frac{1}{C_1} i_2 - \frac{m}{\sqrt{2}C_1} (u_s(t) * i_o) \\ \dot{i_o} = -\frac{R_f}{L_f} i_o - \frac{1}{L_f} v_o + \frac{m}{\sqrt{2}L_f} (u_s(t) * v_2) \\ \dot{v_o} = \frac{1}{C_f} i_o - \frac{1}{RC_f} v_o \end{cases} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) พบว่าแบบจำลองมีตัวแปรสถานะ (state variables) ของวงจรทั้งหมด 6 ตัว คือ i_1, v_1, i_2, v_2, i_o และ v_o ซึ่งการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนั้น จะอาศัยการสร้างตัวแปรสถานะของแบบจำลองจากสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน โดยพิจารณาการประมาณอันดับหนึ่ง (first-order approximation) และ การประมาณอันดับศูนย์ (zero-order approximation) ได้สมการที่ (7)

$$\begin{cases} i_1 = \langle i_1 \rangle_{-1} e^{-jk\omega_s t} + \langle i_1 \rangle_0 + \langle i_1 \rangle_1 e^{jk\omega_s t} \\ v_1 = \langle v_1 \rangle_{-1} e^{-jk\omega_s t} + \langle v_1 \rangle_0 + \langle v_1 \rangle_1 e^{jk\omega_s t} \\ i_2 = \langle i_2 \rangle_{-1} e^{-jk\omega_s t} + \langle i_2 \rangle_0 + \langle i_2 \rangle_1 e^{jk\omega_s t} \\ v_2 = \langle v_2 \rangle_{-1} e^{-jk\omega_s t} + \langle v_2 \rangle_0 + \langle v_2 \rangle_1 e^{jk\omega_s t} \\ i_o = \langle i_o \rangle_{-1} e^{-jk\omega_s t} + \langle i_o \rangle_0 + \langle i_o \rangle_1 e^{jk\omega_s t} \\ v_o = \langle v_o \rangle_{-1} e^{-jk\omega_s t} + \langle v_o \rangle_0 + \langle v_o \rangle_1 e^{jk\omega_s t} \end{cases} \quad (7)$$

การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่พิจารณาปริมาณ DC ทางด้านวงจรไฟฟ้ากระแสสลับและไม่พิจารณาสัญญาณกระเพื่อม ทางด้านวงจรไฟฟ้ากระแสตรง จะได้ตัวแปรสถานะของแบบจำลองทั้งหมดแสดงดังสมการที่ (8)

k=0, k=1

$$\begin{cases} \langle i_2 \rangle_0 = x_1 \\ \langle v_2 \rangle_0 = x_2 \\ \langle i_1 \rangle_1 = x_3 + jx_4 \\ \langle v_1 \rangle_1 = x_5 + jx_6 \\ \langle i_o \rangle_1 = x_7 + jx_8 \\ \langle v_o \rangle_1 = x_9 + jx_{10} \end{cases} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) จะได้ตัวแปรสถานะของแบบจำลองที่พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป 10 ตัวแปร สำหรับสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของฟังก์ชันการสวิตช์แสดงดังสมการที่ (9)

$$\begin{cases} \langle u_d(t) \rangle_0 = \langle u_s(t) \rangle_0 = 0 \\ \langle u_d(t) \rangle_1 = \langle u_s(t) \rangle_1 = \frac{-j2}{\pi} \end{cases} \quad (9)$$

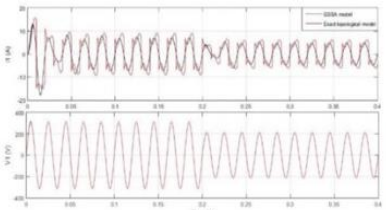
$$\begin{bmatrix} \dot{x_1} \\ \dot{x_2} \\ \dot{x_3} \\ \dot{x_4} \\ \dot{x_5} \\ \dot{x_6} \\ \dot{x_7} \\ \dot{x_8} \\ \dot{x_9} \\ \dot{x_{10}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{4}{\pi L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4m}{\sqrt{2}\pi C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \omega & -\frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{2m}{\sqrt{2}\pi L_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{1}{RC_f} & \omega \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & -\frac{1}{RC_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2L_{eq}} V_m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

จากสมการที่ (6) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของ i_1, v_1, i_2, v_2, i_o และ v_o มาเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง โดยอาศัยคุณสมบัติของสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน แสดงได้ดังสมการที่ (10) และจากความสัมพันธ์ของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถแทนค่าตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (11)

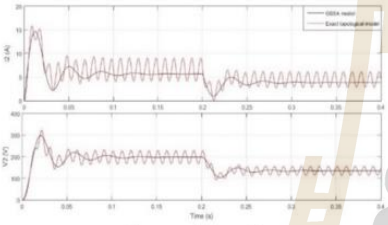
$$\begin{cases} i_2 = x_1 \\ v_2 = x_2 \\ i_1 = 2x_3 \cos\omega t + 2x_4 \sin\omega t \\ v_1 = 2x_5 \cos\omega t + 2x_6 \sin\omega t \\ i_o = 2x_7 \cos\omega t + 2x_8 \sin\omega t \\ v_o = 2x_9 \cos\omega t + 2x_{10} \sin\omega t \end{cases} \quad (11)$$

4. ผลการจำลองสถานการณ์

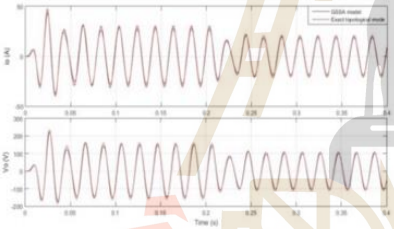
จากการวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับการประมาณอันดับหนึ่งและการประมาณอันดับศูนย์ ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรที่ไม่ขึ้นกับเวลา สามารถทำการตรวจสอบความถูกต้อง โดยการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (10) กับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้บล็อกกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB เพื่อให้ได้ค่า i_1, v_1, i_2, v_2, i_o และ v_o ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC โดยมีค่าแรงดันที่แหล่งจ่าย $V_s = 220\sqrt{2}\ V$ ค่าดัชนีมอดูเลตสวิตช์ m = 0.5 ค่าพารามิเตอร์ตัวต้านทาน $R_{eq} = R_1 = R_f = 1\,m\Omega$ ตัวเหนี่ยวนำ $L_{eq} = 1\,\mu H$, $L_1 = 100\,mH$, $L_f = 10\,mH$ ตัวเก็บประจุ $C_{eq} = 22\,nF$, $C_1 = 500\,\mu F$, $C_f = 500\,\mu F$ โหลดตัวต้านทาน $R = 10\,\Omega$ และความถี่ของสวิตช์ $f_s = 10\,kHz$ แสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 5



รูปที่ 3 กระแส i_1 และแรงดัน v_1



รูปที่ 4 กระแส i_2 และแรงดัน v_2



รูปที่ 5 กระแส i_0 และแรงดัน v_0

รูปที่ 3 จะสังเกตเห็นว่ากราฟที่ได้มีความสอดคล้องและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และเนื่องจากเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC ที่มีแหล่งจ่ายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้ค่ากระแส i_1 และแรงดัน v_1 ที่ได้เป็นค่าไฟฟ้ากระแสสลับที่ยังไม่มีการแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้น ได้ทำการเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุตจาก $220\sqrt{2}\ V$ ไปเป็น $150\sqrt{2}\ V$ ในวินาทีที่ 0.2 จะเห็นได้ว่าจากผลการจำลองสถานการณ์ เมื่อทำการลดค่าแรงดันอินพุตลง ทำให้ค่ากระแส, แรงดัน และแอมพลิจูดมีค่าลดลงที่วินาที 0.2 ดังรูปตั้งแต่รูปที่ 3 ซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวนั้นยังคงมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม

รูปที่ 4 มีการแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC ทำให้ได้ค่ากระแส i_2 และแรงดัน v_2 ที่เป็นค่าไฟฟ้ากระแสตรง และจากรูปที่ 5 เมื่อ i_2 และ v_2 ผ่านอุปกรณ์สวิตช์หรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า DC-AC ค่ากระแส i_0 และแรงดัน v_0 ที่ได้จึงเป็นค่าไฟฟ้ากระแสสลับ และจากการตรวจสอบความถูกต้องกราฟที่ได้มีความสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองมีความถูกต้องสูงและใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็ว

5.สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยนำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ หรือนำไปออกแบบตัวควบคุมเพื่อปรับปรุง พัฒนาระบบให้ดีขึ้น ลดความซับซ้อนและได้ผลรวดเร็วยิ่งขึ้น จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB พบว่ามีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน และใช้เวลาในการประมวลผลที่รวดเร็ว เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมที่เหมาะสมต่อไปในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

[1]. รศ.ดร. อภิชาต บุญทาวัน (2557). การสร้างโรงงานต้นแบบขนาดเล็กเพื่อการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคผสมระหว่างการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ.งานวิจัยสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. : 24-59

[2]. F. H. Dupont, J. Zaragoza, C. Rech, and J. R. Pinheiro, "A new method to improve the total efficiency of parallel converters," in Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2013, pp. 210–215.

[3]. F. H. Dupont, J. Zaragoza, C. Rech, and J. R. Pinheiro, "Mathematical efficiency modeling of static power converters," in Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, pp. 1-6.

[4]. P.T. Krein, J. Bentsman, R. M. Bass, and B. C. Lesieutre, "On the Use of Averaging for the Analysis of Power Electronic Systems," In Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1989, pp. 463-467.

[5]. B. Lehman, and R. M. Bass, "Extensions of Averaging Theory for Power Electronics Systems," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 11, 1996, pp. 542-553.

[6]. Liang Dong, Hao Ma, and Fei Xu, "Modeling and Analysis of PWM Converters with a New GSSA Method," in 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008, pp. 821–826.

[7]. J. Mahdavi, A. Emaadi, M. D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 44, no. 8, 1997, pp. 767-770.

วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

แบบจำลองพลวัตระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

Dynamic Model of Heat Control Systems for Small Fuel Ethanol Production Plants

สุชาวดี จีนสุทธิ์[1] กองพัน อารีรักษ์*[1] กองพล อารีรักษ์[1] อภิชาต บุญทาวัน[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Suchawadi Chinsut[1] Kongpan Areerak*[1] Kongpol Areerak[1] Apichat Boontawan[2]

[1] School of Electrical Engineering Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchsima 30000

[2] School of Biotechnology Agricultural Technology Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchsima 30000

* Corresponding author.

E-mail: kongpan@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4520

วันที่รับบทความ 4 มิถุนายน 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 1 9 กันยายน 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 2 17 กันยายน 2562; วันที่ตอบรับบทความ 18 ตุลาคม 2562

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยในระบบของเครื่องจะมีขดลวดทำความร้อน ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำหมักในกระบวนการกลั่น จนกระทั่งได้เป็นเอทานอล ซึ่งเครื่องต้นแบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตเอทานอล ในบทความนี้จึงนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุมพีไอ กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยอาศัยการพิสูจน์หาแบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB

คำสำคัญ

วงจรแปลงผันกำลัง AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พีไอ ระบบควบคุมความร้อน

Abstract

This paper presents the mathematical model of heat control systems for small fuel ethanol production plants. The system consists of heating coils to heat the fermented water in the distillation process until achieving an ethanol. This prototype was developed and applied in the production of ethanol. In this paper the mathematical model of heat control systems using AC-DC-AC power conversion circuit with a PI control supplied by one-phase power system is presented. The proposed model is derived by using a generalized state-space averaging approach. The model is validated by the simulation via the SimPowerSystem™ of MATLAB program.

Keywords

AC-DC-AC power conversion circuit with controller; GSSA method; PI; heat control

1. บทนำ

ปัจจุบันสภาวะของราคาน้ำมันปิโตรเลียมมีความผันผวนอย่างมากและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการสำรวจแหล่งน้ำมันดิบยังพบว่ามีปริมาณที่ลดลงและมีแนวโน้มที่จะหมดไป สำหรับน้ำมันดิบในประเทศไทยนั้น มีในแหล่งต่าง ๆ กระจายอยู่ทั่วประเทศ แต่ในปัจจุบันประเทศไทยยังต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นอัตราส่วนที่สูง เนื่องจากกำลังผลิตในประเทศยังต่ำกว่าปริมาณการใช้อยู่มาก อีกทั้งการขุดเจาะและผลิตน้ำมันปิโตรเลียม ก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมและใช้เงินทุนสูง ในอนาคตทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันดิบเป็นสิ่งที่จะต้องใช้เวลานานในการเกิด อีกทั้งความต้องการในการบริโภคน้ำมันของโลกยังสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงได้รับความนิยมและเป็นที่สนใจอย่างมาก ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวทำให้มีแนวคิดที่จะผลิตเชื้อเพลิงที่สามารถใช้น้ำมันผสมเอทานอลให้ได้ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น เช่นน้ำมัน E10 E20 และ E85 เป็นต้น ขึ้นมาทดแทนหรือแนวคิดที่จะใช้ประโยชน์จากสิ่งที่มีอยู่แปรรูปเป็นเชื้อเพลิงจากงานวิจัย [1,2] พบว่าเอทานอลสามารถผลิตจากวัตถุดิบทางเกษตรได้หลากหลายชนิด เช่นกากน้ำตาลอ้อยและมันสำปะหลัง และจากการทดสอบเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถใช้งานได้จริงกับเครื่องยนต์ แต่ปัญหาของการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลคือการที่ไม่สามารถผลิตได้ในระดับชุมชนหรือโรงงานขนาดเล็กและขนาดกลางได้ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตทางด้านเครื่องจักรสูง ในบทความนี้ได้ศึกษาระบบของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องต้นแบบที่ถูกผลิตและพัฒนาขึ้น เพื่อทำการศึกษาและค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการผลิตเอทานอล พบว่ามีระบบทำความร้อนที่ให้ความร้อนแก่น้ำหมัก ที่เกิดจากการหมักวัตถุดิบทางการเกษตร ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นเอทานอลประมาณร้อยละ 10 – 12 โดยน้ำหนักถูกกลั่นลำดับส่วนโดยการให้ความร้อนจนได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดประมาณร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก และนำไปผ่านกระบวนการกำจัดน้ำ ทำให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์ ที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบทำความร้อนเป็นส่วนสำคัญในการกลั่นเอทานอล ถ้าหากมีประสิทธิภาพการทำงานต่ำ หรือมีข้อผิดพลาดของระบบควบคุม อาจส่งผลกระทบต่อการกลั่นเอทานอลคือ ทำให้กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลดำเนินการได้ช้าลง และส่งผลให้อุณหภูมิการกลายเป็นไอของเอทานอลเมื่อนำไปควบแน่นที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง จะได้ของเหลวที่มีความเข้มข้นเอทานอลในประมาณร้อยละที่ต่ำลง [1] ดังนั้นกระบวนการกลั่นเอทานอลโดยให้ความร้อนมีความสำคัญมากที่ทำให้ระบบทำความร้อนมีประสิทธิภาพ ต้องมีตัวควบคุมที่ดีและเหมาะสม

ในบทความนี้จึงนำเสนอการหาแบบจำลองพลวัตของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก จากบทความ [3] ได้กล่าวเกี่ยวกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่ไม่มีการควบคุม ซึ่งแสดงให้เห็นแล้วว่าได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นจะนำวงจรดังกล่าวมาเป็นพื้นฐานสำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมกระแสและแรงดัน [4] โดยแบบจำลองที่กล่าวในบทความนี้จะถูกนำไปเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิพร้อมแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและอุณหภูมิต่อไปในอนาคต เช่นเดียวกันในบทความนี้การหาแบบจำลองของระบบดังกล่าวจะทำให้แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในระบบ ซึ่งจะทำให้เกิดความซับซ้อน จึงนำเสนอแบบจำลองเฉลี่ย (averaging model) ที่พิสูจน์จากวิธีค่าเฉลี่ย

ปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging approach, GSSA) [5] ซึ่งเป็นวิธีที่กำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ในระบบ เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะทำให้ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์ระบบ เพื่อพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม ด้วยการใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง จะยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์ ผ่านโปรแกรม MATLAB

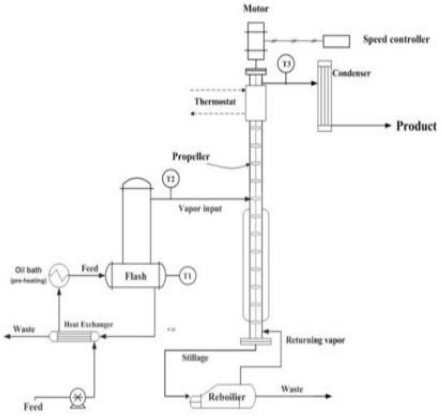
2. เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก

เครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก ถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการแปรรูปวัตถุดิบทางการเกษตรให้เป็นเชื้อเพลิงเอทานอล โดยมีการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้เอทานอลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และเหมาะสมที่สุด ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง

โดยมีกระบวนการของระบบการกลั่นเอทานอลดังรูปที่ 1 ในบทความนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็กให้ระบบการกลั่นเอทานอลมีส่วนทำความร้อน 2 ส่วน นั่นก็คือ Flash 3 kw และ Reboilier 2 kw โดยที่ Flash ติดตั้งไว้สำหรับการสร้างไอน้ำก่อนเข้าสู่คอลัมน์ ภายในคอลัมน์จะมีแกนหลักเป็นใบพัดทำหน้าที่กวนไอและของเหลว ขณะที่ชุดล่างของใบพัดมีหน้าที่ในการกรองเอทานอลออกจากของเหลว ถ้าหากมีส่วนเกินของของเหลวจะถูกป้อนลงด้านล่างเข้าสู่ Reboilier แล้วทำการแลกเปลี่ยนความจุความร้อน ผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและกลับเข้าสู่คอลัมน์อีกครั้ง

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม

การวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม แสดงดังรูปที่ 2 โดยในบทความได้ประยุกต์ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการสร้าง



รูปที่ 1 แผนภาพกระบวนการของระบบการกลั่นเอทานอล [2]

แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา เป็นวิธีที่ใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะของวงจร (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ในส่วนแรกจะพิจารณาเพียงวงจรแปลงผัน AC-DC-AC โดยหลักการของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน สามารถอธิบายจากสัญญาณใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)

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

$\langle x\rangle_k(t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (2)

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

พิจารณาสัญญาณรายคาบของฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC และ DC-AC มีลักษณะการทำงานเหมือนกันแสดงดังสมการที่ (3)

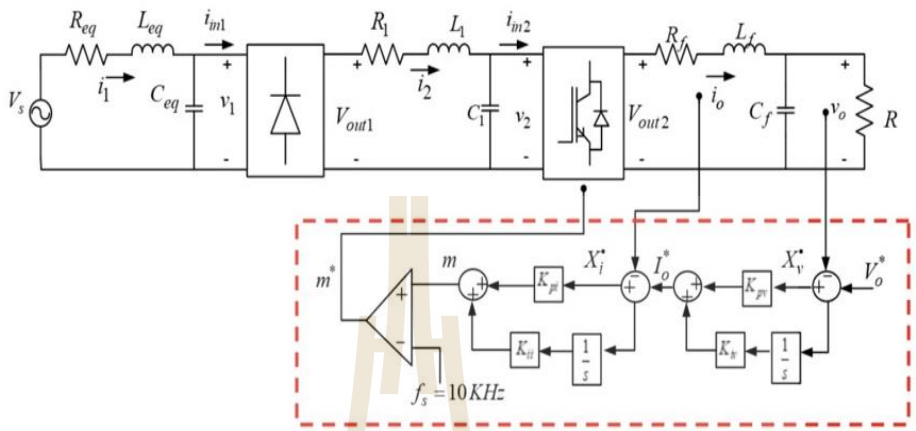
$$u_d(t)=u_s(t)=\begin{cases}1 & 0<t<\dfrac{T_s}{2}\\ -1 & \dfrac{T_s}{2}<t<T_s\end{cases} \tag{3}$$

โดยที่ $u_d(t)$ คือ ฟังก์ชันการทำงานของไดโอด

$u_s(t)$ คือ ฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์

T_s คือ คาบฟังก์ชันการสวิตช์

ห้องสมุดวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม

ฟังก์ชันการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC สามารถพิจารณาร่วมกับแรงดันและกระแส แสดงได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$\text{AC-DC} \quad \begin{cases} V_{out1} = u_d(t) v_1 \\ i_{in1} = u_d(t) i_2 \end{cases} \tag{4}$$

$$\text{DC-AC} \quad \begin{cases} V_{out2} = \dfrac{u_s(t) v_2 * m}{\sqrt{2}} \\ i_{in2} = \dfrac{u_s(t) i_o * m}{\sqrt{2}} \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} \dot{i}_1 = -\dfrac{R_{eq}}{L_{eq}} i_1 - \dfrac{1}{L_{eq}} v_1 + \dfrac{1}{L_{eq}} V_s \\ \dot{v}_1 = \dfrac{1}{C_{eq}} i_1 - \dfrac{1}{C_{eq}} (u_d(t) * i_2) \\ \dot{i}_2 = -\dfrac{R_1}{L_1} i_2 - \dfrac{1}{L_1} v_2 + \dfrac{1}{L_1} (u_d(t) * v_1) \\ \dot{v}_2 = \dfrac{1}{C_1} i_2 - \dfrac{m}{\sqrt{2} C_1} (u_s(t) * i_o) \\ \dot{i}_o = -\dfrac{R_f}{L_f} i_o - \dfrac{1}{L_f} v_o + \dfrac{m}{\sqrt{2} L_f} (u_s(t) * v_2) \\ \dot{v}_o = \dfrac{1}{C_f} i_o - \dfrac{1}{RC_f} v_o \end{cases} \tag{6}$$

k=0, k=1

$$\begin{cases} \langle i_2 \rangle = x_1 \\ \langle v_2 \rangle = x_2 \\ \langle i_1 \rangle = x_3 + jx_4 \\ \langle v_1 \rangle = x_5 + jx_6 \\ \langle i_0 \rangle = x_7 + jx_8 \\ \langle v_0 \rangle = x_9 + jx_{10} \end{cases} \tag{7}$$

โดยที่ m คือ ค่าดัชนีมอดูเลตสวิตช์ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 พิจารณาหาความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงกระแสและแรงดันของวงจรแปลงผัน AC-DC-AC โดยพบว่ามีตัวแปรสถานะ (state variables) ของวงจรทั้งหมด 6 ตัว สามารถเขียนสมการในรูปของฟังก์ชันการสวิตช์ แสดงดังสมการที่ (6)

การสร้างตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะอาศัยสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน โดยพิจารณาการประมาณอันดับหนึ่ง และอันดับศูนย์ เมื่อไม่พิจารณาปริมาณ DC ทางด้านวงจรไฟฟ้ากระแสสลับและไม่พิจารณาสัญญาณกระเพื่อมทางด้านวงจรไฟฟ้ากระแสตรง จะได้ตัวแปรสถานะของแบบจำลองทั้งหมดแสดงดังสมการที่ (7)

จากสมการที่ (6) อาศัยคุณสมบัติของสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน ทำให้ได้ตัวแปรสถานะของแบบจำลองทั้งหมด 10 ตัวแปร โดยการกำจัดผลกระทบของอุปกรณ์สวิตช์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา แสดงดังสมการที่ (8)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & -\frac{4}{\pi L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4m}{\sqrt{2}\pi C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \omega & -\frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{2m}{\sqrt{2}\pi L_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{1}{RC_f} & \omega \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & -\frac{1}{RC_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{2L_{eq}}Vm \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

จากความสัมพันธ์ของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถแทนค่าตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (9)

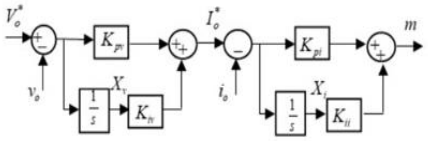
$$\begin{cases} i_2 = x_1 \\ v_2 = x_2 \\ i_1 = 2x_3\cos\omega t + 2x_4\sin\omega t \\ v_1 = 2x_5\cos\omega t + 2x_6\sin\omega t \\ i_o = 2x_7\cos\omega t + 2x_8\sin\omega t \\ v_o = 2x_9\cos\omega t + 2x_{10}\sin\omega t \end{cases} \quad (9)$$

จากการวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผัน กรณีไม่พิจารณาตัวควบคุม พบว่าการปรับแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้สองทางคือ ทำการปรับค่าแรงดันอินพุตของระบบ (V_s) และทำการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (m^*) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการควบคุมได้ ในบทความนี้ใช้ตัวควบคุมพีไอเนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่มีความซับซ้อนน้อยและเหมาะกับการควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังที่ให้ความสำคัญในการปรับปรุงผลการตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม จะทำการเพิ่มชุดตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 2 ในส่วนการควบคุม จะพบว่ามีอินพุตคือ V_o^* ซึ่งเป็นแรงดันอ้างอิง และมีเอาต์พุตคือ m^* ซึ่งเป็นค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยตัวควบคุม กำหนดให้ m เป็นสัญญาณควบคุม และจะนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (sawtooth compare signal) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอม (PWM) โดยที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง m^* และ m แสดงดังสมการที่ (10)

$$m^* = \frac{m}{A_r} \quad (10)$$

โดย A_r คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม พิจารณาหาความสัมพันธ์ในส่วนการควบคุม แสดงในรูปที่ 3 สามารถ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมพีไอ

วิเคราะห์หาค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ที่เกิดจากกระบวนการของตัวควบคุม ได้ดังสมการที่ (11) และ (12)

$$m = -K_{pi}i_o - K_{pv}K_{pi}v_o + K_{iv}K_{pi}X_v + K_{ii}X_i + K_{pv}K_{pi}V_o^* \quad (11)$$

$$m^* = \frac{1}{A_r}\left(-K_{pi}i_o - K_{pv}K_{pi}v_o + K_{iv}K_{pi}X_v + K_{ii}X_i + K_{pv}K_{pi}V_o^*\right) \quad (12)$$

ในส่วนตัวควบคุมพีไอจะประกอบด้วยเป็นพจน์ที่เป็นปริพันธ์ (integral) อยู่ในตัวควบคุม ทั้งตัวควบคุมลูปแรงดันและตัวควบคุมลูปกระแส ส่งผลให้การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีการควบคุม มีตัวแปรสถานะของระบบเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะของลูปแรงดันเป็น X_v และตัวแปรสถานะของลูปกระแสเป็น X_i แสดงได้ดังความสัมพันธ์สมการที่ (13)

$$\begin{cases} \dot{X}_v = V_o^* - v_o \\ \dot{X}_i = -i_o - K_{pv}v_o + K_{iv}X_v + K_{pv}V_o^* \end{cases} \quad (13)$$

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (12) และ (13) จะสังเกตเห็นว่า มีตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC อยู่ 2 ตัวคือ i_o และ v_o ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณไฟฟ้ากระแส สลับ และพบว่ามีตัวแปรสถานะอยู่ในรูปเชิงซ้อน เมื่อนำมาพิจารณาหาแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุม ส่งผลให้มีความผิดพลาดของแบบจำลองเกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยค่าเฉลี่ยของ i_o และ v_o จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปสัญญาณเฉลี่ยทั่วไปและรูปคลื่นจริงพบว่าขนาดของสัญญาณมีความสัมพันธ์ แสดงได้ดังสมการที่ (14)

$$\begin{cases} i_o = 2\sqrt{x_7^2 + x_8^2} \\ v_o = 2\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} \end{cases} \quad (14)$$

กระบวนการควบคุมเกิดจากการปรับค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ ซึ่งแต่เดิมในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่ไม่มีตัวควบคุมเกิดจากการกำหนดค่า m โดยผู้ใช้งาน ดังนั้นจากแบบจำลองของระบบที่ไม่มีตัวควบคุม สามารถเปลี่ยนเป็นแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุมโดยแทนค่า m^* ลงในค่า m ของสมการที่ (8) และทำการเพิ่มตัวแปรสถานะ X_v และ X_i จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ที่มีตัวควบคุม แสดงดังสมการที่ (15)

จากสมการที่ (15) จะได้แบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุมกระแสและแรงดัน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา มีตัวควบคุม K_{pv} K_{iv} K_{pi} และ K_{ii} ปรากฏอยู่ในแบบจำลอง

4. การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC โดยอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมด้วยการใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสอง โดยแบ่งตัวควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัว ควบคุมแรงดันเอาต์พุต และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต ซึ่งทั้ง 2 ส่วนมีกระบวนการทำงานร่วมกัน แสดงดังรูปที่ 3

4.1 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

เมื่อพิจารณาสมการที่ (6) ในส่วนของสมการแรงดันเอาต์พุตของตัวแปรสถานะสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ซึ่งแสดงดังสมการที่ (16) ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ (16) และจัดรูป จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (17)

$$\dot{v}_o(t) = \frac{1}{C_f}i_o(t) - \frac{1}{RC_f}v_o(t) \quad (16)$$

$$G_v(s) = \frac{V_o(s)}{I_o(s)} = \frac{R}{sRC_f + 1} \quad (17)$$

จากรูปที่ 4 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด และทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหารกับพหุนามตัวหารของระบบอันดับสอง จะได้ความสัมพันธ์ของตัวควบคุม ได้ดังสมการที่ (18)

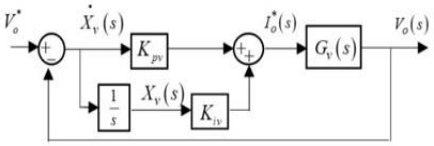
$$\begin{cases} K_{pv} = \dfrac{2\zeta_v \omega_{n,v} RC_f - 1}{R} \\ K_{iv} = \omega_{n,v}^2 C_f \end{cases} \tag{18}$$

4.2 การออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า

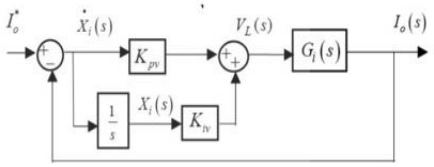
เมื่อพิจารณาสมการที่ (6) ในส่วนของสมการกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต แสดงดังสมการที่ (19) ทำการแปลงลาปลาซในสมการที่ (19) และจัดรูป จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (20)

$$\dot{i}_o(t) = \frac{1}{L_f} V_L(t) - \frac{R_f}{L_f} i_o(t) \tag{19}$$

$$G_i(s) = \frac{I_o(s)}{V_L(s)} = \frac{1}{(sL_f + R_f)} \tag{20}$$



รูปที่ 4 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 5 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดในรูปที่ 5 และทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามตัวหาร จะได้ความสัมพันธ์ของตัวควบคุมลูปกระแสดังสมการที่ (21)

$$\begin{cases} K_{pi} = 2\zeta_i \omega_{n,i} L_f - R_f \\ K_{ii} = \omega_{n,i}^2 L_f \end{cases} \tag{21}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dfrac{R_1}{L_1}x_1 - \dfrac{1}{L_1}x_2 - \dfrac{4}{\pi L_1}x_6, \quad \dot{x}_2 = \dfrac{1}{C_1}x_1 - \dfrac{8K_{pi}\sqrt{x_7^2 + x_8^2}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}x_8 - \dfrac{8K_{pv}K_{pi}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}x_8 + \dfrac{4K_{iv}K_{pi}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}X_v x_8 \\ \qquad + \dfrac{4K_{ii}}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}X_i x_8 + \dfrac{4K_{pv}K_{pi}V_o^*}{\sqrt{2}\pi C_1 A_r}x_8 \\ \dot{x}_3 = -\dfrac{R_{eq}}{L_{eq}}x_3 + \omega x_4 - \dfrac{1}{L_{eq}}x_5, \quad \dot{x}_4 = -\omega x_3 - \dfrac{R_{eq}}{L_{eq}}x_4 - \dfrac{1}{L_{eq}}x_7 + \dfrac{1}{2L_{eq}}Vm \\ \dot{x}_5 = \dfrac{1}{C_{eq}}x_3 - \omega x_6, \quad \dot{x}_6 = \dfrac{2}{\pi C_{eq}}x_1 + \dfrac{1}{C_{eq}}x_4 - \omega x_5 \\ \dot{x}_7 = -\dfrac{R_f}{L_f}x_7 + \omega x_8 - \dfrac{1}{L_f}x_9, \quad \dot{x}_8 = \dfrac{4K_{pi}\sqrt{x_7^2 + x_8^2}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}x_2 + \dfrac{4K_{pv}K_{pi}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}x_2 - \dfrac{2K_{iv}K_{pi}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}X_v x_2 \\ \qquad - \dfrac{2K_{ii}}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}X_i x_2 - \dfrac{2K_{pv}K_{pi}V_o^*}{\sqrt{2}\pi L_f A_r}x_2 - \omega x_7 - \dfrac{R_f}{L_f}x_8 - \dfrac{1}{L_f}x_{10} \\ \dot{x}_9 = \dfrac{1}{C_f}x_7 - \dfrac{1}{RC_f}x_9 + \omega x_{10}, \quad \dot{x}_{10} = \dfrac{1}{C_f}x_8 - \omega x_9 - \dfrac{1}{RC_f}x_{10} \\ \dot{x}_v = V_o^* - 2\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2}, \quad \dot{x}_i = -2\sqrt{x_7^2 + x_8^2} - 2K_{pv}\sqrt{x_9^2 + x_{10}^2} + K_{iv}X_v + K_{pv}V_o^* \end{cases} \tag{15}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

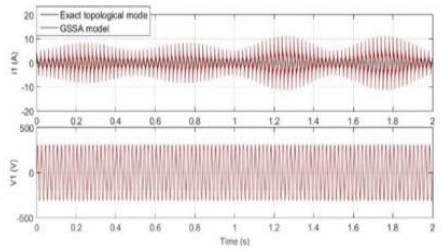
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับระบบที่มีตัวควบคุม

พารามิเตอร์	ค่า	พารามิเตอร์	ค่า
V_s	$220\,V_{rms}$	L_f	$5\,mH$
ω_n	$2\pi \times 50\,rad/s$	C_f	$10\,\mu F$
R_{eq}	$1\,m\Omega$	R	$30\,\Omega$
L_{eq}	$1\,\mu\Omega$	f_s	$10\,kHz$
C_{eq}	$22\,\mu F$	A_r	10
R_1	$1\,m\Omega$	K_{pv}	0.0067
L_1	$200\,mH$	K_{iv}	62.5
C_1	$32\,mF$	K_{pi}	0.6
R_f	$1\,m\Omega$	K_{ii}	50

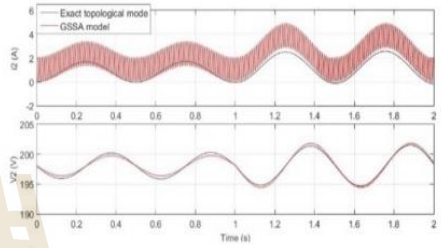
สามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า AC-DC-AC ได้จากสมการที่ (18) และ (21) ตามลำดับ ซึ่งค่าทางสมรรถนะของตัวควบคุมคือ อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio: ζ) และความกว้างแถบ (bandwidth: ω_n) ของตัวควบคุม กำหนดให้ ζ_v = 0.8 $\omega_{n,v}$ = 2500 rad/s ζ_i = 0.6 และ $\omega_{n,i}$ = 100 rad/s

5. ผลการจำลองสถานการณ์

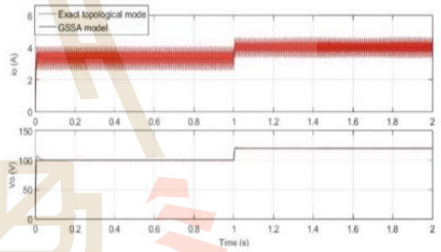
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการเขียนโปรแกรมจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางฝั่ง AC_{input} ให้มีค่าน้อย เพื่อไม่ทำให้ v_1 ลดลง ทางฝั่ง DC จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์วงจรเรียงกระแสจำเป็นต้องใช้ $L_1 \geq 47.4$ mH และ $C_1 \geq 147\,\mu F$ เพื่อให้นำกระแสได้ต่อเนื่องและกรองแรงดัน v_2 ให้เรียบ และทางฝั่ง AC_{output} ค่าพารามิเตอร์ควรมีค่าน้อย เพื่อป้องกันแรงดันเอาต์พุตตก ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 และจะได้ผลการตอบสนองของแบบจำลองที่มีตัวควบคุม แสดงดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ผลการตอบสนอง i_1 และ v_1



รูปที่ 7 ผลการตอบสนอง i_2 และ v_2



รูปที่ 8 ผลการตอบสนอง i_o และ v_o

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องโดยจะมีการเพิ่มค่าแรงดันอ้างอิง กำหนดให้ V_o^* มีการเปลี่ยนแปลงจาก $100\,V_{rms}$ เป็น $120\,V_{rms}$ ในวินาทีที่ 1.0 เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลง พบว่าผลการตอบสนองที่ได้ทำการพิสูจน์หาแบบจำลองมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว ซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวนั้นยังคงมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดิม แต่อย่างไรก็ตามชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังจะปรากฏการกระเพื่อมของสัญญาณ

เนื่องจากเป็นการจำลองสถานการณ์ของระบบจริง แต่ผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองจะไม่มีการกระเพื่อมของสัญญาณ เนื่องจากแบบจำลองนั้นไม่ได้พิจารณาผลของอุปกรณ์สวิตช์ ด้วยเหตุนี้เราจึงเรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองเฉลี่ย ถึงแม้ไม่ได้อธิบายถึงการกระเพื่อมของสัญญาณ แต่พลวัตที่สำคัญของระบบยังคงอยู่และเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการแบบจำลองที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิต่อไปในอนาคต

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองพลวัตของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ให้ผลการตอบสนองที่มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ เวลาในการตอบสนองพบว่าชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังนั้นใช้เวลา 234 วินาที และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เวลา 75.5 วินาที ซึ่งใช้เวลาเร็วกว่า 3.1 เท่า แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการพิสูจน์นั้นมีความถูกต้อง แม่นยำและใช้เวลาในการหาผลตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] อภิชาต บุญทาวัน. การสร้างโรงงานต้นแบบขนาดเล็กเพื่อการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคผสมระหว่างการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ. งานวิจัยสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2557: 24–59.

[2] อาทิตย์ กองแก้ว. การพัฒนาและจำลองกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลและการประยุกต์ใช้ในระบบเอสเทอริฟิเคชั่นของกรดซักซินิกควบคู่กับการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2559: 98–115.

[3] สุชาวดี จีนสุทธิ์, กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์, อภิชาต บุญทาวัน. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก. ใน: *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 41*. 2559.

[4] กองพัน อารีรักษ์. การสร้างวงจรแปลงผันชนิดบัคก์-บูสต์ที่มีตัวควบคุมแบบเหมาะที่สุด. กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2558.

[5] Mahdavi J, Emaadi A, Bellar MD, Ehsani M. Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1997; 44(8): 767–770.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุชาวดี จีนสุทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 กันยายน พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดสุโขทัย เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนเทศบาลวัดไทยชุมพล (ดำรงประชาสรรค์) ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนอุดมดรุณี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2559 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษา ได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง และในปีเดียวกัน ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในระหว่างศึกษาได้รับทุนการศึกษา “ศักยภาพ” สำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาบัณฑิตศึกษา และทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยมีความสนใจในงานทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุม และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์ จึงได้ทำการศึกษาและสร้างระบบควบคุมความร้อนสำหรับเครื่องต้นแบบผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลขนาดเล็ก โดยมีการพัฒนาออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่ให้ผลตอบสนองของอุณหภูมิเอาต์พุตมีสมรรถนะที่ดีที่สุด และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 2 บทความ ดังที่ได้รวบรวมนำเสนอไว้ใน ภาคผนวก ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี