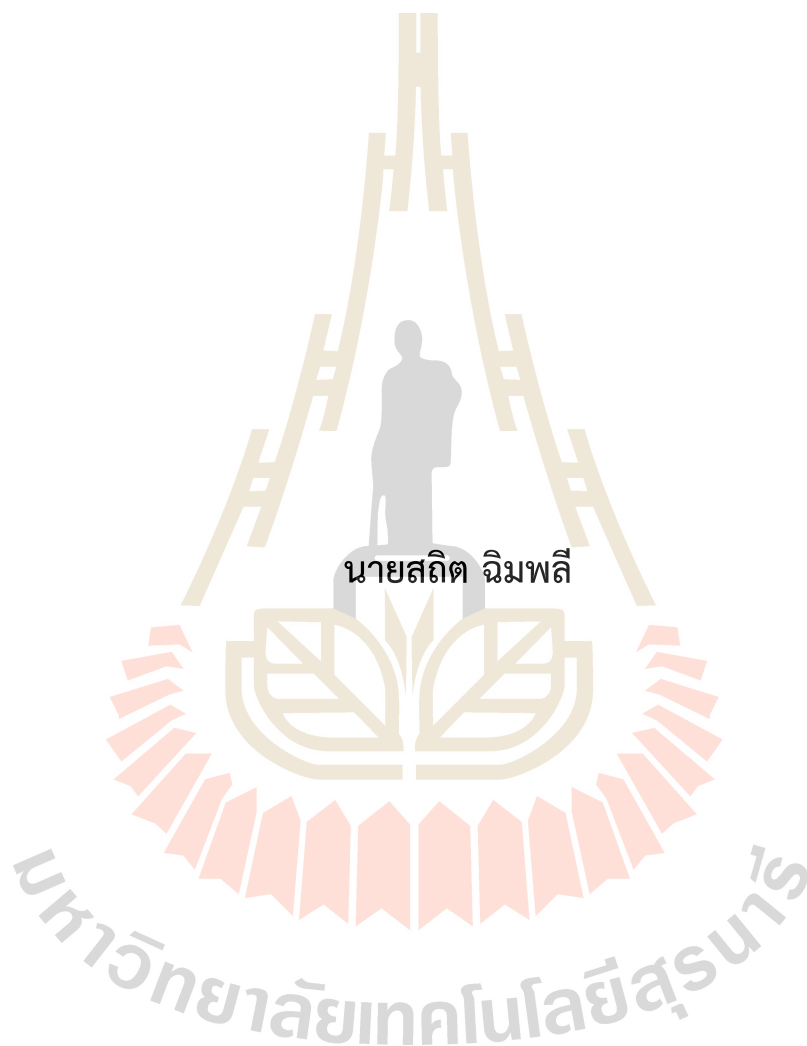


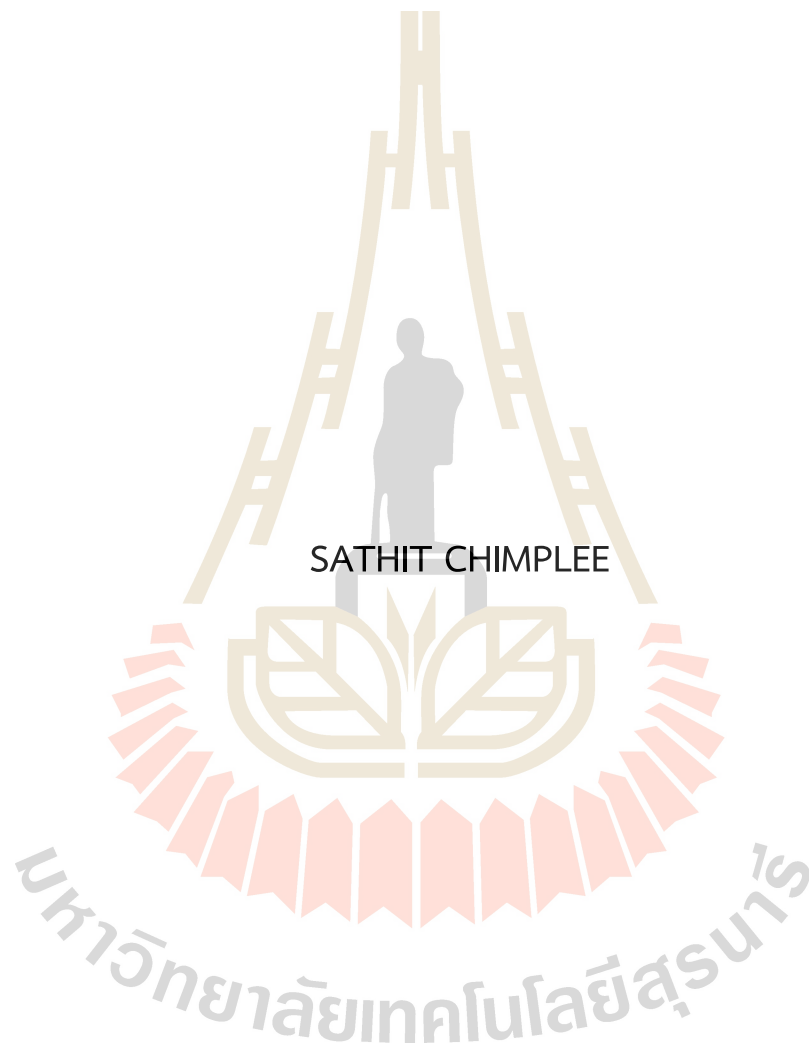
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อ
ความผิดพ่วง โดยอาศัยการควบคุมฟัซซี่



นายสถิต ฉิมพลี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

FAULT-TOLERANT THREE-STAGE CASCADED BOOST CONVERTER
BASED ON FUZZY CONTROL

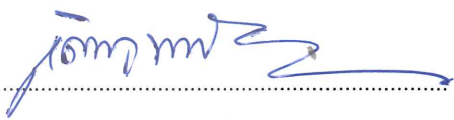


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2024

วาระแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ
โดยอาศัยการควบคุมฟัซซี่

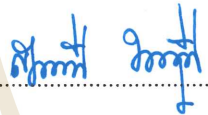
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.สุดาร์ตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ก้องพล อารีรักษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นายสกลิต นิยมพลี : วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความทนต่อ
ความผิดพลาด โดยอาศัยการควบคุมฟัซซี่ (FAULT-TOLERANT THREE-STAGE
CASCADED BOOST CONVERTER BASED ON FUZZY CONTROL)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน, 315 หน้า.

คำสำคัญ : วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น/ตัวควบคุมฟัซซี่/ความชันของ
กระแส/ความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร/ความทนต่อความผิดพลาด

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาวิธีการควบคุม และการสร้างความทนต่อความผิดพลาดให้กับวงจร
แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า เมื่อระดับ
แรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 20V จะได้แรงดันเอาต์พุตสูงถึงประมาณ 400V โดยที่ค่าวัฏ
จักรหน้าที่สวิตช์ไม่สูงมากนัก ทั้งนี้ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นจะทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า
แบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามความต้องการ โดย
มีสมรรถนะที่ดีทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว รวมถึงเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวงจร เพื่อสามารถ
ทำงานต่อไปได้เมื่อมีความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า
แบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายตัว ส่งผลให้แบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์มีความซับซ้อน การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ที่แม่นยำ แต่จะอาศัยความรู้และความเข้าใจพฤติกรรมของวงจรจากการสังเกตการณ์
ดังนั้นเทคนิคฟัซซี่จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์
เรียงต่อกันสามชั้น นอกจากนี้กระบวนการฟัซซียังถูกนำมาใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์
เปิดวงจรได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถระบุตำแหน่งของสวิตช์ที่เกิดความผิดพลาดได้อย่างถูกต้อง เพื่อ
สร้างความทนต่อความผิดพลาดให้กับวงจร ทำให้วงจรยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้เกิด
ความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์กำลัง ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบจริง
แสดงประสิทธิภาพของการควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อ
กันสามชั้นรวมทั้ง วิธีการตรวจจับและระบุตำแหน่งความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นมี
สมรรถนะที่ดีสามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วภายใต้
สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ ของวงจร

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา..... สกลิต นิยมพลี
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ศ.ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน

SATHIT CHIMPLEE : FAULT-TOLERANT THREE-STAGE CASCADED BOOST
CONVERTER BASED ON FUZZY CONTROL : ASST. PROF. SUDARAT KHWAN-ON,
Ph.D. 315 PP.

Keyword : THREE-STAGE CASCADED BOOST CONVERTER/ FUZZY CONTROLLER/
SLOPE/ OPEN-CIRCUIT FAULT SWITCH/ FAULT TOLERANCE

This thesis focuses on developing control and fault tolerance techniques for a three-stage cascaded boost converter with a voltage gain of approximately 20 times. The converter can step-up the low input voltage approximately 20V to achieve a required output voltage level of around 400V without an extreme duty cycle for three switches. The objective of this study is not only to maintain output voltage to the desired levels under both transient and steady states but also to enhance converter reliability in the presence of faults. The three-stage boost converter contains many components, leading to complexity of the mathematical model. The fuzzy logic technique has the ability to deal with this limitation because it relies on knowledge and understanding of the converter behavior, obtained through observation. The mathematical model is not required for designing the fuzzy controller. Moreover, the fuzzy logic technique is also employed to develop the fast fault detection method for the open-circuit switch fault and the accuracy identification at the fault switch. By utilizing the fuzzy process, fault tolerance is created, allowing the three-stage cascaded boost converter to operate continuously even in the presence of open-circuit switch fault. The proposed fuzzy-based control and fault tolerance techniques aim to enhance overall satisfactory performance and reliability for a three-stage cascaded boost converter. Simulation and experimental results demonstrate the effectiveness of the developed fuzzy controller for the three-stage cascaded boost converter. The proposed fault detection and localization method for open-circuit switch faults accurately and rapidly identifies the fault under various operating conditions

School of Electrical Engineering

Academic Year 2024

Student's Signature.....Sathit Chimplee

Advisor's Signature.....Sudarats

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตารัตน์ ขวัญอ่อน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ยิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมไปถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้ทำวิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา และให้กำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตทุกท่านในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ความช่วยเหลือแลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิชาการ และให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณวิศวกร และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน ขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจในการทำวิจัย และกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด

สถิต นิมพลี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	5
2 ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ	7
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ ที่มีอัตราขยายแรงดันสูง	7
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียง ต่อกันหลายชั้น	14
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความ ผิดพร่อง	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	สรุป.....	29
3	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น	30
3.1	บทนำ.....	30
3.2	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	30
3.3	อัตราขยายแรงดันและอัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	37
3.3.1	อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียง ต่อกันสามชั้น	39
3.3.2	อัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียง ต่อกันสามชั้น	41
3.4	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียง ต่อกันสามชั้น.....	43
3.4.1	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ.....	43
3.4.2	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ.....	45
3.5	ผลการจำลองสถานการณ์.....	47
3.6	สรุป.....	49
4	การควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น	51
4.1	บทนำ.....	51
4.2	การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ เรียงต่อกันสามชั้น	51
4.2.1	ฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function).....	55
4.2.2	ตัวแปรภาษา (Linguistic Variable).....	57
4.2.3	กฎของฟัซซี (Fuzzy Rule).....	58
4.2.4	การอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference).....	60
4.2.5	กระบวนการควบคุม (Control Process)	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกัน สามชั้นโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น	69
4.4	การออกแบบการควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเรียงต่อกัน สามชั้น	74
4.4.1	การออกแบบลู่วควบคุมแรงดัน (PI Voltage Loop).....	75
4.4.2	การออกแบบลู่วควบคุมกระแส (PI Current Loop).....	77
4.4.3	เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique)	80
4.4.4	การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวควบคุมฟัซซีที่ พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส	84
4.5	สรุป	89
5	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อ ความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร	91
5.1	บทนำ	91
5.2	การศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ...	91
5.2.1	การจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ เรียงต่อกันสามชั้นในสภาวะปกติ.....	92
5.2.2	การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร	101
5.3	วิธีการตรวจจับและระบุตำแหน่งความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร ที่พัฒนาขึ้น	108
5.3.1	การตรวจจับความผิดพลาดที่ S_1	109
5.3.2	การตรวจจับความผิดพลาดที่ S_2	115
5.3.3	การตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3	122
5.4	การจำลองสถานการณ์	135

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.1	การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรในสภาวะการทำงานปกติ	136
5.4.2	การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร	141
5.4.3	การจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติ	148
5.5	สรุป	156
6	การสร้างชุดทดสอบ	158
6.1	บทนำ	158
6.2	โครงสร้างของชุดทดสอบ	158
6.3	แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง	158
6.4	แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น	160
6.5	วงจรตรวจจับสัญญาณ	165
6.5.1	วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส	165
6.5.2	วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน	168
6.5.3	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	171
6.6	วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคตสัญญาณ	173
6.7	การควบคุมแรงดันเอาต์พุต และการตรวจจับความผิดปกติ	174
6.8	จำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูป	177
6.8.1	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นโดยใช้ตัวควบคุมฟัชซีที่พัฒนาขึ้น	177
6.8.2	การจำลองสถานการณ์การตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดปกติของวงจรแบบฮาร์ดแวร์ในรูป	182
6.9	สรุป	186

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7 ผลการทดสอบ	187
7.1 บทนำ	187
7.2 ผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกัน สามขั้นโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้น	187
7.2.1 กรณีมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง	188
7.2.2 กรณีมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต	190
7.2.3 กรณีมีการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน	193
7.3 ผลการทดสอบวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร	196
7.3.1 กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1	196
7.3.2 กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2	201
7.3.3 กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3	206
7.4 สรุป	209
8 สรุป และข้อเสนอแนะ	211
8.1 สรุป	211
8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต	214
รายการอ้างอิง	215
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp TM F28335	221
ภาคผนวก ข. โปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมการทำงานชุดทดสอบ	225
ภาคผนวก ค. การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ เรียงต่อกันสามขั้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่มีตัวควบคุม และการตรวจ จับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร	235
ภาคผนวก ง. การเปรียบเทียบผลจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ บูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อกระบวนการควบคุมฟัซซี่มีการเปลี่ยนแปลง ..	265

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	280
ประวัติผู้เขียน.....	316



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง..... 9
2.2	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกัน หลายชั้น 14
2.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด และการตรวจจับความผิดพลาด.....24
3.1	โหมดการทำงานของแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น31
3.2	พารามิเตอร์ตัวแปรสวิตช์ในฟังก์ชันการสวิตช์ของแรงดันตกคร่อมสวิตช์ กระแสที่ไหลผ่านไดโอด35
3.3	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ.....46
3.4	ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น47
4.1	ตัวแปรภาษาของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ เรียงต่อกันสามชั้น58
4.2	หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่พัฒนาขึ้น59
4.3	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น68
4.4	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์80
4.5	ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมฟัซซีร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส.....81
4.6	ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟัซซีร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส.....82
5.1	ข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร 108
5.2	หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ตัวที่ 1 113
5.3	หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ตัวที่ 2 119
5.4	หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ตัวที่ 3 128
5.5	ค่าพารามิเตอร์ของการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น 135

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.6	ผลการตรวจจับความผิดพร่องภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน 148
6.1	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับสร้างชุดทดสอบ 164
6.2	ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับสัญญาณกระแส 166
6.3	ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับสัญญาณแรงดัน 169
6.4	ผลการทดสอบเปรียบเทียบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 172
ง.1	การเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการลดจำนวนกฎของฟิชชี 268
ง.2	ผลตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขอบเขตสมาชิกฟังก์ชันเซต Z ของ $\Delta V/V_{ref}$ 276



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อความ ผิดพร่อง โดยอาศัยการควบคุมพีซี.....	3
2.1	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น	11
2.2	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อินเทอร์ลิฟสองเฟส.....	11
2.3	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสอง.....	12
2.4	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีแหล่งจ่ายเดี่ยว	12
2.5	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีหลายแหล่งจ่าย	13
2.6	โครงสร้างตัวควบคุมโหมดการเลื่อน	18
2.7	โครงสร้างตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้.....	18
2.8	โครงสร้างตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนัก	19
2.9	โครงสร้างตัวควบคุมแบบคงทน.....	20
2.10	โครงสร้างตัวควบคุมพีซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น	20
2.11	โครงสร้างตัวควบคุมพีซีสำหรับวงจรทบระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูง	21
3.1	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น	31
3.2	โหมดการทำงานที่ 1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	32
3.3	โหมดการทำงานที่ 2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	32
3.4	โหมดการทำงานที่ 3 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	32
3.5	โหมดการทำงานที่ 4 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	33
3.6	โหมดการทำงานที่ 5 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	33
3.7	โหมดการทำงานที่ 6 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	33
3.8	โหมดการทำงานที่ 7 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	33
3.9	โหมดการทำงานที่ 8 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	34
3.10	ตัวแปรสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 สัญญาณฟังก์ชันการสวิตช์	34
3.12 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมขณะที่ในช่วงที่สวิตช์นำกระแส.....	38
3.13 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมขณะที่ในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแส	38
3.14 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในสภาวะอยู่ตัว.....	39
3.15 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัว.....	41
3.16 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัวของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม.....	44
3.17 ผลจากการจำลองสถานการณ์ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม	48
3.18 ผลจากการจำลองสถานการณ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม	49
4.1 โครงสร้างการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น.....	52
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1.....	53
4.3 กระบวนการสร้างสัญญาณการสวิตช์ (PWM generation).....	55
4.4 ฟังก์ชันสมาชิกนอร์มัลไลซ์ของความผิดพลาดของแรงดัน ($\Delta V/V_{ref}$).....	56
4.5 ฟังก์ชันสมาชิกนอร์มัลไลซ์ของความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (m_{iL1}/m_{ref}).....	56
4.6 ความสัมพันธ์ของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ และฟังก์ชันสมาชิก m_{iL1}/m_{ref}	56
4.7 ฟังก์ชันสมาชิกของการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ (ΔD).....	57
4.8 โครงสร้างของการควบคุมแบบฟuzzy	60
4.9 โครงสร้างการควบคุมฟuzzyสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ..	62
4.10 กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ กรณีที่ค่า $\Delta V/V_{ref} \in N$	63
4.11 ฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD ในกรณี $\Delta V/V_{ref} \in N$	64
4.12 กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ กรณีที่ค่า $\Delta V/V_{ref} \in Z$	65
4.13 ฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD ในกรณี $\Delta V/V_{ref} \in Z$	66
4.14 กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ กรณีที่ค่า $\Delta V/V_{ref} \in P$	67
4.15 ฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD ในกรณี $\Delta V/V_{ref} \in P$	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจร กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต.....	70
4.17 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจร กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง.....	72
4.18 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจร กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน.....	73
4.19 โครงสร้างการควบคุมพีไอควบคุมพีโอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสของวงจร แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น	74
4.20 การประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับลูปควบคุมแรงดัน	75
4.21 แผนภาพการควบคุมพีโอสำหรับลูปควบคุมแรงดัน.....	76
4.22 การประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับลูปควบคุมกระแส	78
4.23 แผนภาพลูปควบคุมกระแสของการควบคุมพีโอ	79
4.24 แผนภาพเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสของตัวควบคุมพีโอ	81
4.25 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุภายใต้การควบคุมพีโอ.....	83
4.26 กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำภายใต้การควบคุมพีโอ.....	83
4.27 ผลการจำลอง v_{C1} , v_{C2} , v_{C3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต...	85
4.28 ผลการจำลอง i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต.....	85
4.29 ผลการจำลองแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ กรณีเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต	86
4.30 ผลการจำลอง v_{C1} , v_{C2} , v_{C3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลง โหลดตัวต้านทาน	88
4.31 ผลการจำลอง i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน.....	88
5.1 โครงสร้างการควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ เรียงต่อกันสามชั้น.....	92
5.2 ผลการจำลองพฤติกรรมการทำงานวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3	ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต 20V เป็น 15V94
5.4	ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต 15V เป็น 25V95
5.5	ผลการจำลองพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง96
5.6	ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง 400V เป็น 300V ..97
5.7	ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง 300V เป็น 500V ..98
5.8	พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน.....99
5.9	ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน 1600Ω เป็น 2400Ω100
5.10	ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน 2400Ω เป็น 1200Ω.....101
5.11	พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1102
5.12	ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_1103
5.13	พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2104
5.14	ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_2105
5.15	พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3106
5.16	ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่ S_3107
5.17	โครงสร้างการควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นร่วมกับการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร.....109
5.18	แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_1110
5.19	โครงสร้างของการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_1111
5.20	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_1111
5.21	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต m_{IL1}/m_{FS1}112
5.22	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต i_{L1}/i_{FS1}112
5.23	ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตค่าสัญญาณความผิดพลาดที่สวิตช์ตัวที่ 1 (FD_1).....112
5.24	แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_2116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25	โครงสร้างของการตรวจจับความผิดพ้องที่ S_2 117
5.26	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต ΔD_{dif} 118
5.27	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต m_{FIL1}/m_{FS2} 118
5.28	ฟังก์ชันสมาชิกการเปลี่ยนแปลงการตรวจจับความผิดพ้องที่ S_2 (ΔFD_2) 118
5.29	แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพ้องที่ S_3 122
5.30	วงจรสมมูลเมื่อเกิดความผิดพ้องที่ S_3 123
5.31	ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดพ้องที่ S_3 และวงจร RC 124
5.32	ภาพขยายผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดพ้องที่ S_3 และวงจร RC 124
5.33	โครงสร้างของการตรวจจับความผิดพ้องที่ S_3 125
5.34	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ 127
5.35	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ 127
5.36	ฟังก์ชันสมาชิกการเปลี่ยนแปลงการตรวจจับความผิดพ้องที่ S_3 (ΔFD_3) 127
5.37	การจำลองสถานการณ์หาค่า FLD_2 และ FLD_3 กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต 132
5.38	การจำลองสถานการณ์หาค่า FLD_2 และ FLD_3 กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง 133
5.39	การจำลองสถานการณ์หาค่า FLD_2 และ FLD_3 กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน 134
5.40	โครงสร้างการควบคุมฟัซซีและการตรวจจับความผิดพ้องแบบสวิตช์เปิดวงจร ที่พัฒนาขึ้น..... 136
5.41	การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพ้องแบบเปิดที่ S_1 138
5.42	การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพ้องแบบเปิดที่ S_2 139
5.43	การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพ้องแบบเปิดที่ S_3 140
5.44	ผลการตรวจจับความผิดพ้องแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุต.. 143
5.45	ผลการตรวจจับความผิดพ้องแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การลดลงของแรงดันอินพุต 144
5.46	ผลการตรวจจับความผิดพ้องแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การลดลงของแรงดันอ้างอิง 145

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.47 ผลการตรวจจับความผิดพ่วงแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเพิ่มขึ้นของ โหลดตัวต้านทาน	146
5.48 ผลการตรวจจับความผิดพ่วงแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การลดลงของ โหลดตัวต้านทาน	147
5.49 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทน ต่อความผิดพ่วง.....	149
5.50 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีคงทนต่อความผิดพ่วงที่ S_1	150
5.51 ผลการจำลองกรณีเกิดความผิดพ่วงที่ S_1 ในสภาวะคงทนต่อความผิดพ่วง	151
5.52 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีคงทนต่อความผิดพ่วงที่ S_2	152
5.53 ผลการจำลองกรณีเกิดความผิดพ่วงที่ S_2 ในสภาวะคงทนต่อความผิดพ่วง	153
5.54 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีคงทนต่อความผิดพ่วงที่ S_3	154
5.55 ผลการจำลองกรณีเกิดความผิดพ่วงที่ S_3 ในสภาวะคงทนต่อความผิดพ่วง	155
6.1 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น	159
6.2 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น	159
6.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	160
6.4 หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส.....	160
6.5 มอดูลวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส GBPC35	161
6.6 ตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	161
6.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพ่วง ..	162
6.8 มอสเฟตกำลัง IXFK80N60P3	162
6.9 ตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวสำหรับชุดทดสอบ	163
6.10 ตัวเก็บประจุสำหรับชุดทดสอบ	163
6.11 ไดโอดกำลังสำหรับชุดทดสอบ.....	164
6.12 โหลดตัวต้านทานสำหรับชุดทดสอบ	164
6.13 วงจรตัวตรวจจับสัญญาณกระแส.....	165

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14	วงจรไฟฟ้าสำหรับวงจรตรวจจับสัญญาณกระแส 166
6.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับกระแส 167
6.16	วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน 168
6.17	วงจรไฟฟ้าสำหรับหาความสัมพันธ์ของตัวตรวจจับสัญญาณแรงดัน 169
6.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ สัญญาณแรงดัน 170
6.19	วงจรสำหรับการเปรียบเทียบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 171
6.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์ และสัญญาณดิจิตอล 173
6.21	ไอซีออปโตเบอร์ PC923L 173
6.22	วงจรขยายแรงดันแบบแยกโหนดสัญญาณ 174
6.23	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp TM F28335 174
6.24	ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันเอาต์พุตและการตรวจจับความผิดพลาด 176
6.25	แผนภาพการเชื่อมโยงระหว่างโปรแกรม MATLAB SIMULINK และบอร์ด DSP 177
6.26	โครงสร้างฮาร์ดแวร์ในรูปของวงจรภายใต้ตัวควบคุมพีซีที่พัฒนาขึ้น 178
6.27	ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต 179
6.28	ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง 180
6.29	ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน 181
6.30	การตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดพลาดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูป 182
6.31	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของการตรวจจับความผิดพลาด แบบเปิดที่ S_1 183
6.32	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของการตรวจจับความผิดพลาด แบบเปิดที่ S_2 184
6.33	การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของการตรวจจับความผิดพลาด แบบเปิดที่ S_3 185

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.1	ชุดทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง.....188
7.2	ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง189
7.3	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง.....190
7.4	ชุดทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต.....191
7.5	ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต.....191
7.6	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต192
7.7	ชุดทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน.....193
7.8	ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน194
7.9	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน195
7.10	ชุดทดสอบวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร.....196
7.11	ชุดทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1197
7.12	ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1198
7.13	ค่าแรงดันเอาต์พุต กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์ เมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1199
7.14	สัญญาณการสวิตช์ และสัญญาณการตรวจจับความผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1200
7.15	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดพลาด.....201
7.16	ชุดทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2202
7.17	ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2203
7.18	ค่าแรงดันเอาต์พุต กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์ เมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2204
7.19	สัญญาณการสวิตช์ และสัญญาณการตรวจจับความผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2204

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.20	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ.....205
7.21	ชุดทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3206
7.22	ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3206
7.23	ค่าแรงดันเอาต์พุต กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์ เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3207
7.24	สัญญาณการสวิตช์ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติ เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3208
7.25	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3209
ก.1	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp TM F28335222
ค.1	แผนการเชื่อมโยงโปรแกรม SIMULINK กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp TM F28335236
ค.2	ไอคอนซอฟต์แวร์โปรแกรมสำหรับการแบบฮาร์ดแวร์ในลูป237
ค.3	การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp TM F28335237
ค.4	หน้าต่างโปรแกรม F28335 eZdsp CCStudio v3.3238
ค.5	การกำหนดค่าบล็อก RTDX Write.....239
ค.6	การกำหนดค่าบล็อก RTDX Read239
ค.7	โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป241
ค.8	แผนภาพระบบ RTDX การรับส่งข้อมูลบนโปรแกรม SIMULINK242
ค.9	หน้าต่างโปรแกรม F28335 eZdsp CCStudio v3.3243
ค.10	การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างโปรแกรมกับบอร์ด eZdsp TM F28335243
ค.11	แผนภาพของตัวควบคุม และการตรวจจับความผิดปกติโดยอาศัย กระบวนการทางฟิสิกส์ในการเขียนโค้ดโปรแกรมภาษาซี.....244
ง.1	สมาชิกฟังก์ชันเดิม ก.) $\Delta V_O/V_{ref}$ ข.) m_{iL1}/m_{ref} และ ค.) ΔD267
ง.2	สมาชิกฟังก์ชันใหม่ ก.) $\Delta V_O/V_{ref}$ ข.) m_{iL1}/m_{ref} และ ค.) ΔD267

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ง.3	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นใน สภาวะการทำงานปกติ.....	269
ง.4	สมาชิกฟังก์ชันเดิม ก.) $\Delta V_O/V_{ref}$ ข.) m_{iL1}/m_{ref} และ ค.) ΔD	270
ง.5	สมาชิกฟังก์ชันใหม่ ก.) $\Delta V_O/V_{ref}$ ข.) m_{iL1}/m_{ref} และ ค.) ΔD	270
ง.6	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมี การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}).....	272
ง.7	ขอบเขตสมาชิกฟังก์ชันเซต Z ของ $\Delta V/V_{ref}$ เป็น [-5, 5]	273
ง.8	ขอบเขตสมาชิกฟังก์ชันเซต Z ของ $\Delta V/V_{ref}$ เป็น [-10, 10]	273
ง.9	ขอบเขตสมาชิกฟังก์ชันเซต Z ของ $\Delta V/V_{ref}$ เป็น [-20, 20]	274
ง.10	การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การ ควบคุมฟัซซีที่มีการเปลี่ยนแปลงขอบเขตสมาชิกฟังก์ชันเซต Z ของ $\Delta V/V_{ref}$	275
ง.11	สมาชิกฟังก์ชันเดิม ก.) ΔD_{dif} ข.) m_{FIL1}/m_{FS2} และ ค.) ΔFD_2	277
ง.12	สมาชิกฟังก์ชันใหม่ ก.) ΔD_{dif} ข.) m_{FIL1}/m_{FS2} และ ค.) ΔFD_2	277
ง.6	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ตัวที่ 2	278

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

บทนำ

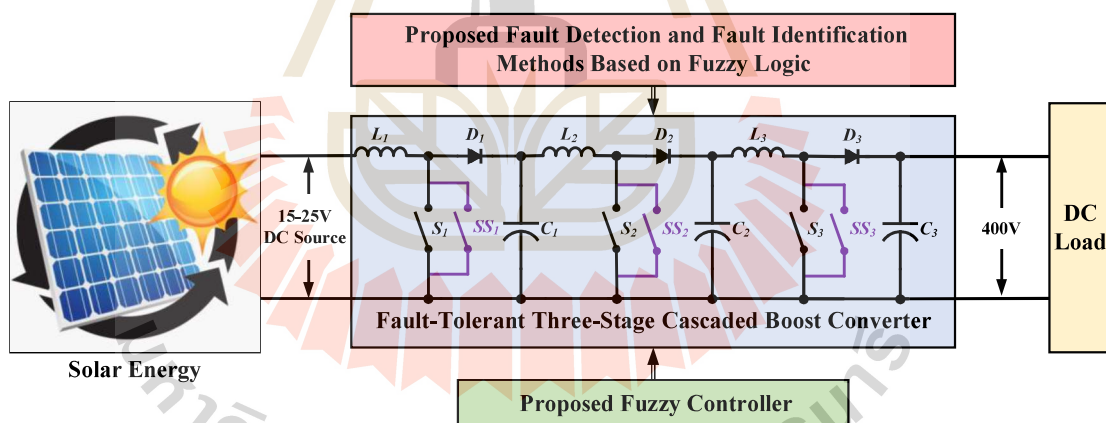
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากจำนวนประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและความต้องการใช้พลังงานในชีวิตประจำวันสูงขึ้น ทำให้ปัจจุบันเรายังคงพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกเป็นปริมาณมาก ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (Cellatoglu and Balasubramanian, 2010) โดยในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกพยายามศึกษา และค้นหาพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า และมีประสิทธิภาพดีขึ้น รวมถึงลดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างพลังงานทดแทน (Renewable energy) ที่สำคัญ เช่น พลังงานลม (Wind energy) พลังงานน้ำ (Water energy) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy) พลังงานชีวภาพ (Biomass Energy) เป็นต้น อย่างไรก็ตามพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตค่อนข้างต่ำและมีกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก อีกทั้งอาจมีระดับแรงดันไม่คงที่ เนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป การบังแสงบางส่วนบนแผงโซลาร์เซลล์ (DJALAB et al., 2018) ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลง ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบที่ใช้การเชื่อมต่อแบบอนุกรม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบแบบอนุกรมคือผลรวมของแรงดันไฟฟ้าจากแผงแต่ละแผง หากมีสิ่งใดมาบดบังแสง แม้เพียงแผงเดียว แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของทั้งระบบก็จะลดลง ทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลงและยังทำให้อายุการใช้งานของแผงสั้นลงอีกด้วย การเชื่อมต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบขนานจึงเป็นวิธีหนึ่งในการลดผลกระทบจากการบังแสง แม้ว่าจะมีแสงบางส่วนถูกบดบัง แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบแบบขนานยังคงที่ วิธีนี้ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ และง่ายต่อการติดตั้งและขยายระบบ แต่กระนั้นการนำแผงโซลาร์เซลล์มาต่อแบบขนาน จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่ค่อนข้างต่ำ จึงจำเป็นต้องขยายแรงดันให้สูงขึ้นสำหรับโหลดที่ต้องการแรงดันสูง จึงมีการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มาใช้ เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์แบบดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดในการเพิ่มระดับแรงดัน กล่าวคือวงจรต้องทำงานด้วยอัตราขยายที่สูงมากเพื่อให้ได้ระดับ

แรงดันเอาต์พุตที่สูงประมาณ 380V ที่ถูกนำไปใช้ในหลากหลายด้าน อาทิเช่น ระบบไมโครกริดกระแสตรง (Kalahasthi et al.,2022) อุตสาหกรรมขนส่ง (Gao et al.,2022) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Chen et al.,2022) เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ให้มีอัตราการขยายแรงดันสูงและมีค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ที่ไม่สูงมาก เนื่องจากอาจส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงขึ้นหากค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์สูง การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่เหมาะสมนั้นเป็นเรื่องท้าทาย เนื่องจากต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการ อาทิ สมรรถนะในการเพิ่มระดับแรงดัน จำนวน อุปกรณ์ที่ใช้ ความน่าเชื่อถือ เพื่อตอบสนองความต้องการเหล่านี้ งานวิจัย (Tofoli et al.,2022) ได้นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่มีการเพิ่มแรงดันสูงรูปแบบใหม่ ซึ่งผสมผสานเทคนิคต่างๆ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและประสิทธิผล เช่น การเชื่อมต่อแบบหลายชั้น (Multi-stage cascaded connection) ตัวเก็บประจุที่ทำงานสลับกัน (Switched capacitor) ตัวคูณแรงดัน (Voltage multiplier) การเชื่อมต่อแบบแม่เหล็ก (Magnetic coupling) ตัวเหนี่ยวนำที่ทำงานสลับกัน (Switched inductor) และการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Voltage lift) เป็นต้น ทั้งนี้การนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มาเรียงต่อกัน (Multi-stage cascaded boost converter) สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นตามต้องการได้ โดยค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์แต่ละตัวไม่สูงมากนัก อีกทั้งยังเหมาะสำหรับระบบพลังงานทดแทน อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดทางด้านความน่าเชื่อถือ เนื่องจากวงจรมีองค์ประกอบต่าง ๆ มากขึ้น ส่งผลให้วงจรมีความซับซ้อน อีกทั้งแหล่งจ่ายที่เป็นพลังงานทดแทนจะขึ้นกับสภาพอากาศอาจส่งผลให้แหล่งจ่ายมีระดับแรงดันไม่คงที่ จำเป็นต้องอาศัยการควบคุมวงจรที่มีประสิทธิภาพ เพื่อสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างเหมาะสม รวมถึงการสร้าง ความคงทนต่อความผิดพลาดให้กับวงจรดังกล่าวให้สามารถทำงานต่อไปได้ เมื่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์กำลัง

รายงานวิทยานิพนธ์นี้จะพัฒนาการควบคุมฟัซซี่ จากนั้นจะสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น (Three-stage cascaded boost converter) ที่มีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า ดังรูปที่ 1.1 โดยแหล่งจ่ายอินพุตมีระดับแรงดันค่อนข้างต่ำประมาณ 15V ถึง 25V เพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงถึงประมาณ 400V โดยที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ไม่สูงมากนัก โดยตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นจะทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามความต้องการได้ รวมถึงเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวงจรเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่มีความถูกต้องและรวดเร็ว วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้นประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายตัว ส่งผลให้การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มี

ความซับซ้อนมากขึ้น กระบวนการฟัซซี่จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่จำเป็นสำหรับตัวควบคุมฟัซซี่ แต่จะอาศัยความรู้ และความเข้าใจพฤติกรรมการทำงานของวงจรจากผู้สังเกตการณ์ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ รวมถึงการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น โดยสามารถระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละสวิตช์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว เพื่อให้การกู้คืนการทำงานของวงจรจากความผิดพลาด โดยนำกระบวนการฟัซซี่มาใช้ในกระบวนการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาด เพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นสามารถทำงานต่อไปได้เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่สวิตช์กำลังของวงจร รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด โดยอาศัยการควบคุมฟัซซี่ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายอินพุตกระแสตรงที่มีแรงดันต่ำ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร โหลดกระแสตรงที่ต้องการแรงดันสูงประมาณ 400V โดยอาศัยตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้น ร่วมกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาด และระบุตำแหน่งความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่มีความถูกต้องและรวดเร็วที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยกระบวนการฟัซซี่



รูปที่ 1.1 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด โดยอาศัยการควบคุมฟัซซี่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้สูงประมาณ 20 เท่า เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำ

1.2.2 เพื่อพัฒนาการควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นให้สามารถเพิ่มระดับและรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้

1.2.3 เพื่อพัฒนากลยุทธ์การตรวจจับความผิดปกติ การระบุตำแหน่งความผิดปกติ และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายตัวส่งผลให้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมมีความซับซ้อน เนื่องจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรดังกล่าวซับซ้อนขึ้น ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyจึงน่าสนใจสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น นอกจากนี้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้นอาศัยการทำงานของสวิตช์กำลังหลายตัว หากสวิตช์กำลังตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติ อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของวงจร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้นให้สามารถทำงานต่อไปได้ แม้มีความผิดปกติเกิดขึ้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ในการสร้างชุดทดสอบสำหรับทดสอบการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น จะอาศัยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส เป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แทนระบบแสงอาทิตย์ที่มีแรงดันต่ำ

1.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะอาศัยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์อาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น พิจารณาเฉพาะโหมดการทำงานต่อเนื่อง (Continuous conduction mode: CCM) เท่านั้น

1.5.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้น มุ่งเน้นการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมการทำงานของวงจร และการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร ภายใต้สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ ของวงจร

1.5.3 การประเมินประสิทธิภาพผลการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น และการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ และการทดสอบชุดทดสอบ ภายใต้สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ ของวงจร

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

1.6.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

1.6.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยการตรวจจับความผิดพลาด และการระบุตำแหน่งความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรจะอาศัยกระบวนการพีซี

1.6.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างชุดทดสอบ เพื่อทดสอบการทำงาน และเก็บรวบรวมผลการทดสอบ สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้น

1.6.5 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท และ 5 ภาคผนวก โดยที่ บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย และการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2 ปรัชญาวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่มีในอดีต ประกอบด้วย ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในรูปแบบต่าง ๆ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์รูปแบบต่าง ๆ และ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

บทที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ภายในวงจร

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น เพื่อควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้ได้ตามที่ต้องการ จากนั้นดำเนินการจำลองสถานการณ์ภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึงโครงสร้าง และการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นให้มีความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยเริ่มจากการพัฒนาพีธีตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรโดยอาศัยการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจร การระบุตำแหน่งความผิดพร่อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร จากนั้นกล่าวถึงผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อแสดงถึงประสิทธิผลของการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น

บทที่ 6 กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตกระแสตรง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแสอินพุต วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุต และการควบคุมการทำงานของวงจรด้วยตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335

บทที่ 7 กล่าวถึงผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น เพื่อแสดงประสิทธิผลของตัวควบคุมฟuzzy การตรวจจับความผิดพร่อง การระบุตำแหน่งความผิดพร่องที่พัฒนาขึ้น และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้สถานการณ์เดียวกัน

บทที่ 8 บทสรุป และข้อเสนอของวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ก. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335

ภาคผนวก ข. โปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมการทำงานชุดทดสอบ

ภาคผนวก ค. การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นแบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่มีตัวควบคุม และการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร

ภาคผนวก ง. การเปรียบเทียบผลจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น เมื่อกระบวนการควบคุมฟuzzyมีการเปลี่ยนแปลง

ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา ผลงานที่เกี่ยวข้อง และประวัติของผู้ทำวิจัย

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาการควบคุม การตรวจจับความผิดปกติ การระบุตำแหน่งความผิดปกติ และสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ทั้งนี้จะอาศัยกระบวนการทางพีชชีในการควบคุม และการตรวจจับความผิดปกติ โดยเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการสำรวจค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง โดยจากการศึกษาค้นคว้าสามารถแบ่งงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องได้ 3 หัวข้อ ได้แก่ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

เพื่อศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ พบว่ามีงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 โดยเป็นการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในอดีต

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2010	D. Cao, and F. Zheng Peng	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าหลายระดับ โดยอาศัยเทคนิคกึ่งเรโซแนนท์ ซึ่งกระบวนการจะมีตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ร่วมกับตัวเก็บประจุภายในวงจร	ทราบถึงการพัฒนาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับ โดยอาศัยตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ เพื่อแก้ปัญหาคาการสวิตช์แบบกระแสวิกฤต ลดการฟุ้งเกินของกระแส และแรงดัน อีกทั้งยังไม่เพิ่มต้นทุนค่าใช้จ่าย
2012	J.S. Anu Rahavi, T. Kanagapriya, and R. Seyezhai	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อินเทอร์ลีฟ (Interleaved boost converter) ที่มีแหล่งพลังงานทดแทนเป็นแหล่งจ่าย	ทราบถึงโครงสร้างวงจร และการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟสำหรับทบระดับแรงดันที่มีคุณสมบัติของกระแสเฟืองของกระแสอินพุตที่ต่ำ
2014	Ye, Y. Eric Cheng, and K. Wai	บทความนี้เสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสองแบบใหม่เปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสองดั้งเดิม	ทราบถึงโครงสร้าง และการออกแบบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสองแบบใหม่ อีกทั้งการวิเคราะห์ความเค้นของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่มีขนาดน้อยกว่า เมื่อเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสองดั้งเดิม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง (ต่อ)

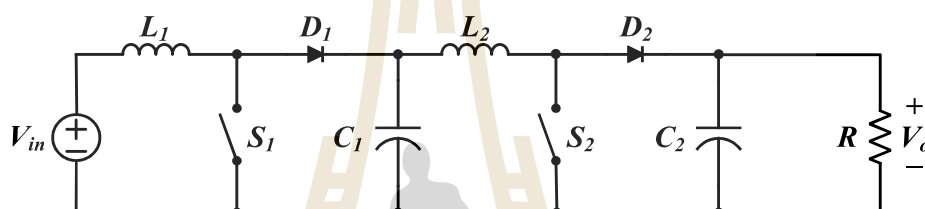
ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2014	M. G. Kashani, M. Mobarrez, and S. Bhattacharya	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างการต่ออนุกรม และการต่อขนานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าบูสต์ที่เรียงต่อกับแผงโซลาร์เซลล์ โดยอาศัย Variable interleaving technique	ทราบถึงโครงสร้างของการต่ออนุกรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าบูสต์ที่เรียงต่อกับแผงโซลาร์เซลล์ ที่ให้แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ภายในวงจรที่ต่ำกว่าการต่อแบบขนาน อีกทั้งยังลดการกระเพื่อมของแรงดัน
2015	F. L. Tofoli, D. de C. Pereira, W. Josias de Paula, and D. de S. Oliveira Júnior	งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม อีกทั้งยังนำเสนอวิธีการต่าง ๆ ในการปรับปรุงประสิทธิภาพและอัตราส่วนการแปลงไฟฟ้า พร้อมทั้งเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้และประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าแบบคงที่ นอกจากนี้ยังยกตัวอย่างการใช้งานจริงของวงจรแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเหล่านี้	ทราบถึงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่ไม่ต้องแยกไดโอด เจาะลึกถึงข้อจำกัดของวงจรแบบเดิม และนำเสนอเทคนิคใหม่ในการดึงประสิทธิภาพสูงสุด ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และแปลงกำลังไฟฟ้าได้คุ้มค่ากว่าเดิม ยิ่งไปกว่านั้นยังกล่าวถึงการใช้งานจริงในระบบพลังงานต่าง ๆ เช่น พลังงานทดแทน รถยนต์ไฟฟ้า ระบบสำรองไฟ เป็นต้น อีกทั้งยังจัดอันดับ และเปรียบเทียบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอุปกรณ์ จำนวนอุปกรณ์ และประสิทธิภาพการแปลงกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2016	M. Forouzesheh, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg, and B. Lehman	บทความนี้นำเสนอการทบทวนที่ครอบคลุมของโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในแบบต่าง ๆ รวมทั้งเทคนิคการเพิ่มอัตราขยายแรงดัน การเพิ่มประสิทธิภาพของวงจร และเปรียบเทียบคุณสมบัติเด่นของวงจรรูปแบบต่าง ๆ	ทราบถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในแบบต่าง ๆ อีกทั้งยังทราบถึงคุณสมบัติเด่นของแต่ละวงจรในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ระดับพลังงาน ต้นทุน ความน่าเชื่อถือ ประสิทธิภาพ ความหนาแน่นของพลังงาน น้ำหนัก บูรณาการ และความซับซ้อน
2019	R. Kiguchi, and Y. Nishida	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น รวมถึงนำเสนอการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการนำกระแสไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ภายในวงจร (Conduction loss) ระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม	ทราบถึงโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการนำกระแสไฟฟ้ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุชั้นที่ 1 และทราบถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการนำกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้นมีขนาดน้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม
2021	A. Balal and F. Shahabi	บทความนี้เสนอการเปรียบเทียบรูปแบบโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ทั้งสามแบบ ได้แก่ แบบทบระดับแรงดันกำลังสอง, แบบทบระดับแรงดันกำลังสองที่มีตัวเหนี่ยวนำสองตัว และแบบเรียงต่อกันสองชั้น ในด้านการเพิ่มอัตราขยายแรงดัน และประสิทธิภาพ	ทราบถึงโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์แบบบูสต์ทั้งสามแบบ เพื่อวิเคราะห์เพื่อให้เห็นภาพรวมในการทำงานและความเหมาะสมของวงจรเหล่านี้สำหรับการใช้งานที่มีการเพิ่มแรงดันสูงในระบบไมโครกริด และทราบถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละโครงสร้าง

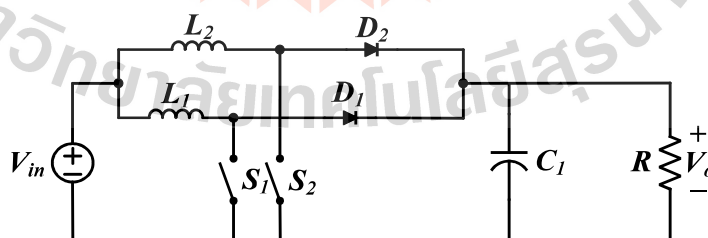
จากการปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูงดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าจากในอดีตมีการพัฒนาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ เริ่มต้นจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม และนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคการเพิ่มอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าหลากหลายรูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดโครงสร้างวงจรแสดงดังต่อไปนี้

1) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น (Multi-stage cascaded boost converter) เป็นวงจรที่มีการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมมาเรียงต่อกันเป็นชั้น ๆ เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า โดยวงจรมีความเค้นแรงดันไฟฟ้าที่ชั้นแรกค่อนข้างต่ำ อีกทั้งสามารถลดพลังงานสูญเสียจากการทำงานของสวิตช์ ซึ่งมีโครงสร้างวงจрдังรูปที่ 2.1 (Rahavi et al., 2012)



รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น

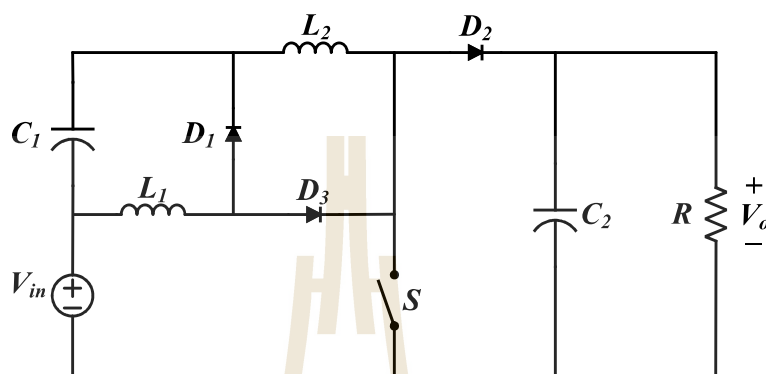
2) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อินเทอร์ลีฟ (Interleaved boost converter) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมมาเชื่อมต่อกันแบบขนาน โดยใช้แหล่งจ่าย ตัวเก็บประจุ และโหลดตัวต้านทาน ร่วมกัน ซึ่งการทำงานของสวิตช์จะมีเฟสที่ต่างกัน เช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อินเทอร์ลีฟสองเฟส สวิตช์ตัวที่ 1 มีการเฟสต่างกัน 180 องศา กับสวิตช์ตัวที่ 2 เพื่อช่วยลดค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุต ซึ่งมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.2 (Rahavi et al., 2012)



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อินเทอร์ลีฟสองเฟส

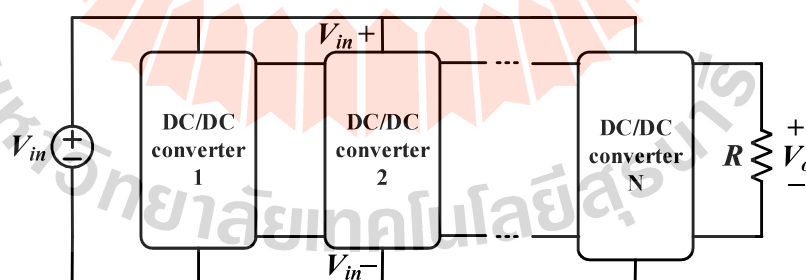
3) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสอง (Quadratic boost converter) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมมาเพิ่มอุปกรณ์ ซึ่งประกอบด้วยไดโอด 3 ตัว ตัว

เหนี่ยวนำ 2 ตัว และตัวเก็บประจุ 1 ตัว ดังโครงสร้างรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น และลดความเค้นของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรให้ดียิ่งขึ้น (Ye and Eric Cheng, 2014)



รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทวิระดับแรงดันกำลังสอง

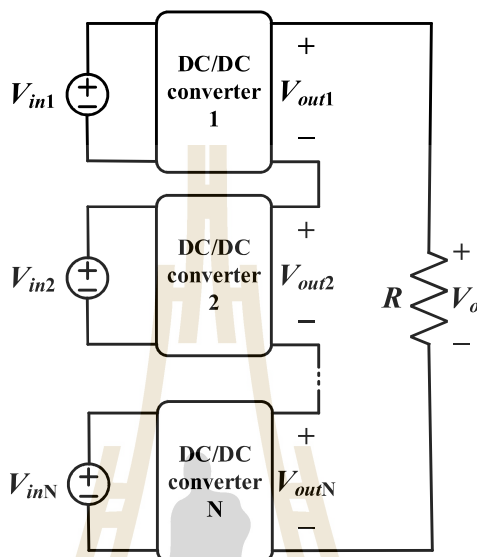
4) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีแหล่งจ่ายเดียว (Multilevel modular switched-capacitor circuit with single DC source) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มาเรียงต่อกัน โดยใช้แหล่งจ่ายเดียวกัน ซึ่งจะมีการควบคุมแรงดันที่หัวของวงจรย่อยให้มีระดับแรงดันที่เท่ากัน เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้า อีกทั้งยังมีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ เพื่อแก้ปัญหากลitches แบบกระแสวิกซ์ ช่วยลดการฟุ้งเกินของกระแสและแรงดัน โดยมีโครงสร้างวงจรรูปที่ 2.4 (Cao and Peng, 2010)



รูปที่ 2.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีแหล่งจ่ายเดียว

5) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีหลายแหล่งจ่าย (Multilevel modular switched-capacitor circuit with multiple DC sources) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มาเรียงต่อกันแบบอนุกรม โดยที่ในแต่ละวงจรมีแรงดันอินพุตแยก เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดัน

เอาต์พุตจากการต่ออนุกรมของแต่ละวงจรย่อย อย่างไรก็ตามการต่อนี้มีข้อจำกัด หากวงจรย่อยใดวงจรหนึ่งหยุดการทำงานจะส่งผลให้วงจรที่เหลือ ทำงานหนัก หรืออาจไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งวงจรดังกล่าวมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.5 (Kashani et al., 2014)



รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีหลายแหล่งจ่าย

จากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้นมีอัตราขยายแรงดันที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม และแบบทบระดับแรงดันกำลังสอง (Balal and Shahabi, 2021) จึงเหมาะสำหรับใช้งานในระบบที่ต้องการอัตราขยายแรงดันที่สูง เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบเซลล์เชื้อเพลิง ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาการสูญเสียพลังงานที่ค่าความต้านทานสมมูลแบบอนุกรมในระบบกำลังต่ำ (Choudhury and Nayak, 2016) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้นการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม งานวิจัย (Choudhury and Nayak, 2015) ได้เปรียบเทียบอัตราความเค้นของแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์แบบเรียงต่อกันสองชั้นมีความเค้นของแรงดันที่สวิตช์น้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์แบบทบระดับแรงดันกำลังสอง

อย่างไรก็ตามการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรียงต่อกันหลายชั้นภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของวงจร เช่น การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน (Zhang et al., 2017) ความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ การผันแปรของแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน (Shoja-Majidabad and Hajizadeh, 2020) ความเค้นของแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ เสถียรภาพของระบบเนื่องจากการทำงานของ

วงจรย่อยแต่ละชั้นในสถานะชั่วครู่ (Yang et al., 2009) จำเป็นต้องมีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมเพื่อให้วงจรสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร

รายงานวิทยานิพนธ์นี้จะพัฒนาการควบคุมฟัซซี่ และการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยเนื้อหาในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะมีการนำเสนอในบทที่ 3 ต่อไป

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น

จากการปริทัศน์วรรณกรรม และเพื่อศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในรูปแบบต่าง ๆ มีรายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 โดยจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมในรูปแบบต่าง ๆ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2013	R. Haroun, A. El Aroudi, A. Cid-Pastor, and L. Martinez-Salamero	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding mode controller) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยอาศัยเทคนิคการเปรียบเทียบแบบฮิสเทอเรซิส โดยการพิจารณากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวที่ 2 เป็นอินพุตของตัวควบคุม

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันหลายชั้น (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2015	R Haroun, A. El Aroudi, A. Cid–Pastor, G. Garcia, C. Olalla, and L. Martinez–Salamero	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point tracking: MPPT) ของแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ ร่วมกับตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding mode controller) กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสองชั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตภายใต้การเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายที่มีความแปรผันตามสภาพแวดล้อม	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสองชั้น ความสัมพันธ์ของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสและแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงสมการการเลื่อน เพื่อให้ได้โหมดการทำงานต่าง ๆ ของสวิตช์สำหรับการควบคุมการทำงานของวงจร
2018	S. Khwan–on, and S. Diewsurin	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current weight technique) เพื่อใช้สำหรับสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันต่ำ และโหลดตัวต้านทาน	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ประกอบด้วยลูปแรงดัน และลูปกระแส กระแสอ้างอิงได้จากเอาต์พุตของลูปแรงดัน หลังจากนั้นถูกแบ่งออกเป็นกระแสอ้างอิงสองค่าด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนัก และเข้าสู่ลูปกระแสจะได้ค่าวัฏจักรหน้าที่สำหรับสวิตช์กำลัง โดยสวิตช์สองตัวแรกจะถูกควบคุมด้วยเอาต์พุตของลูปกระแสที่หนึ่ง ส่วนสวิตช์ตัวที่สามถูกควบคุมด้วยเอาต์พุตของลูปกระแสที่สอง

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น (ต่อ)

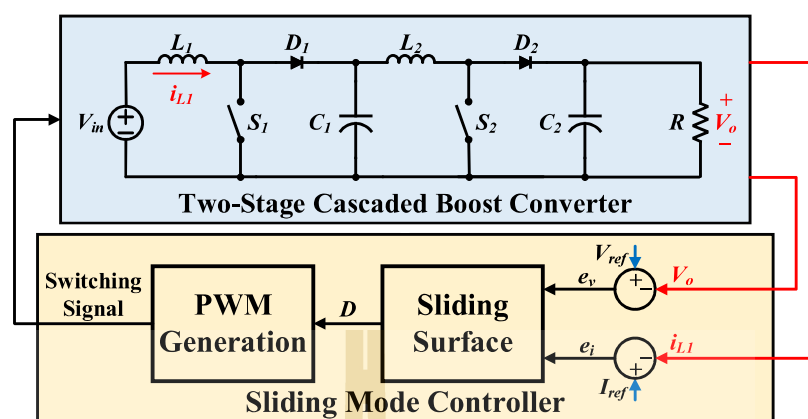
ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2019	M. Moe Lwin	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy controller) โดยใช้แบบจำลองฟัซซีรูปแบบ Takagi-Sugeno สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี โดยที่กระบวนการของตัวควบคุมประกอบด้วยสองอินพุตคือผลต่างของแรงดัน และอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงผลต่างของแรงดัน ส่วนเอาต์พุตเป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์สำหรับสวิตช์ทั้งสองตัว
2020	S. Shoja-Majidabad, and A. Hajizadeh	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัว โดยพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดัน และโหลดตัวต้านทาน	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้ที่ประกอบด้วยรูปแบบแรงดันที่ได้เอาต์พุตเป็นกระแสอ้างอิง และรูปแบบที่ได้เอาต์พุตเป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ โดยที่สวิตช์สองตัวนั้นจะใช้ตัวควบคุมแยกกันเพื่อควบคุมแรงดันและกระแสในแต่ละชั้น อีกทั้งทราบการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ฟังก์ชันเลียปูนอฟ
2020	B M. Alharbi, M. A. Alhomim, and R. A. McCann	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน (Robust controller) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดัน และโหลดตัวต้านทาน	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน โดยอาศัยเทคนิคเอชอนันต์ (H-infinity technique) ซึ่งพิจารณาจากอสมการเชิงเส้นเมทริกซ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2020	N. Kunjittipong, K. Kongkanjana, and S. Khwan-on	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy controller) สำหรับวงจรทบระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อแรงดันเอาต์พุต อีกทั้งยังการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีที่มีสองอินพุต ประกอบด้วยผลต่างของแรงดันเอาต์พุต และกระแสอ้างอิงที่เกิดจากปริพันธ์ของผลต่างของแรงดันเอาต์พุต และได้เอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีเป็นผลต่างของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ในขั้นถัดไป

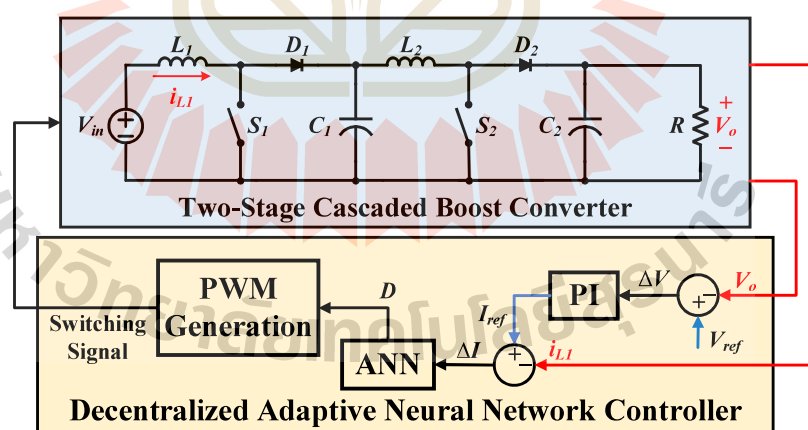
จากปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น จะเห็นได้ว่าในอดีตได้มีการพัฒนาวิธีการ และแนวทางการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรหลากหลายวิธี โดยส่วนใหญ่จะอาศัยการตรวจวัดค่าแรงดันเอาต์พุต และการตรวจวัดค่ากระแสอินพุต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้นให้สามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามความต้องการ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน ซึ่งมีรายละเอียดแสดงได้ดังนี้

1) ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding mode controller) การควบคุมนี้มีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการควบคุมโหมดการเลื่อนนี้ทำงานร่วมกับวิธีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point tracking: MPPT) โดยในการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของกราฟพื้นผิวการเลื่อน (Sliding surface) ในโหมดการทำงานต่าง ๆ ของสวิตช์สำหรับการควบคุมการทำงานของวงจร ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.6 (Haroun et al., 2013)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

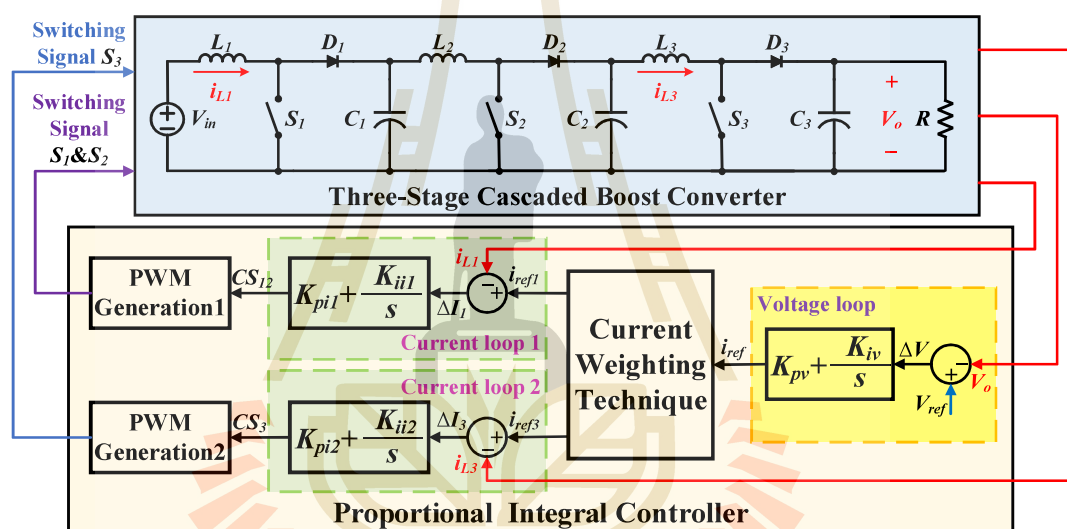
2) ตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้ (Decentralized adaptive neural network controller) ในการออกแบบตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้จะพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น เพื่อใช้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ หลังจากนั้นเอาต์พุตที่ได้จากการควบคุมพีไอจะเข้าสู่กระบวนการรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้ เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 (Shoja-Majidabad and Hajizadeh, 2020)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้

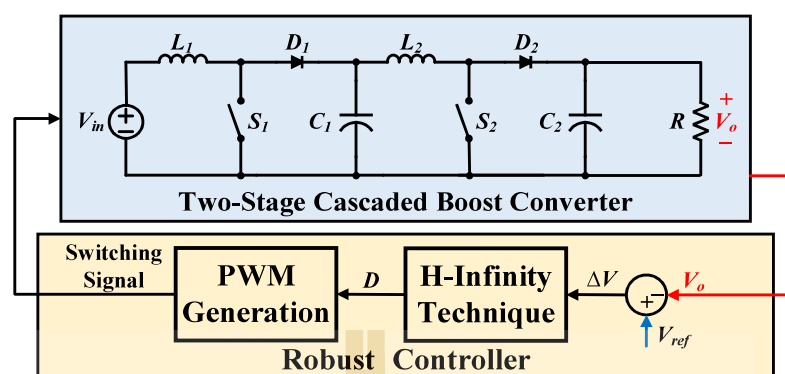
3) ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) การควบคุมนี้เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างการควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control) และการควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าตามต้องการ ซึ่งกระบวนการเริ่มจากการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของระบบมา

เปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง จะได้ผลต่างของแรงดันเข้าสู่ส่วนของลูประดันของตัวควบคุมพีไอ และได้เอาต์พุตเป็นกระแสอ้างอิง หลังจากนั้นกระแสอ้างอิงถูกแบ่งออกเป็นกระแสอ้างอิงสองค่า โดยอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนัก เพื่อปรับคุณค่ากระแสอ้างอิงให้เหมาะกับฟักัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และ 3 ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น หลังจากนั้นกระแสอ้างอิงทั้งสองจะเข้าสู่ลูประดันเพื่อได้สองสัญญาณการควบคุมเป็นเอาต์พุต ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณการควบคุมสวิตช์สองตัวแรก (CS_{12}) ที่ถูกควบคุมด้วยลูประดันที่ 1 และสัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวที่ 3 (CS_3) ที่ถูกควบคุมด้วยลูประดันที่ 2 ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 (Khwan-on and Diewsurin, 2018) วิธีการควบคุมพีไอนี้จะใช้ตัวตรวจจับกระแสสำหรับวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก และตัวสุดท้ายเท่านั้น



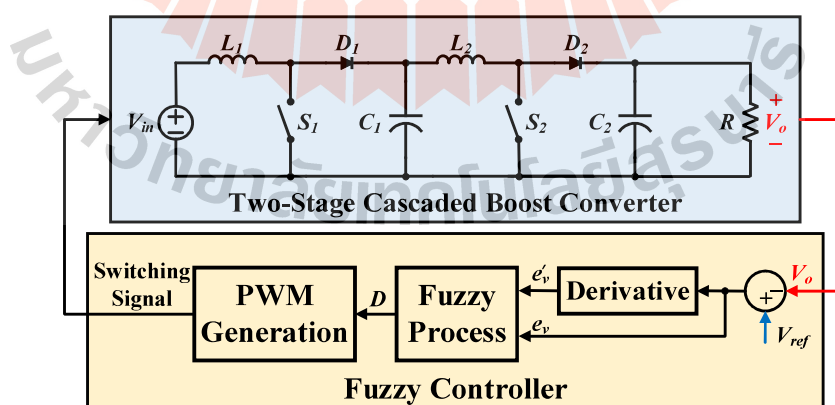
รูปที่ 2.8 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนัก

4) ตัวควบคุมแบบคงทน (Robust controller) การออกแบบตัวควบคุมนี้จะอาศัยเทคนิคเอชอนันต์ (H-infinity technique) โดยอ้างอิงจากอสมการเชิงเส้นเมทริกซ์ (Linear matrix inequality) ที่พิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้งสองให้เหมาะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างวงจрдังรูปที่ 2.9 (Alharbi et al., 2020)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างตัวควบคุมแบบคงทน

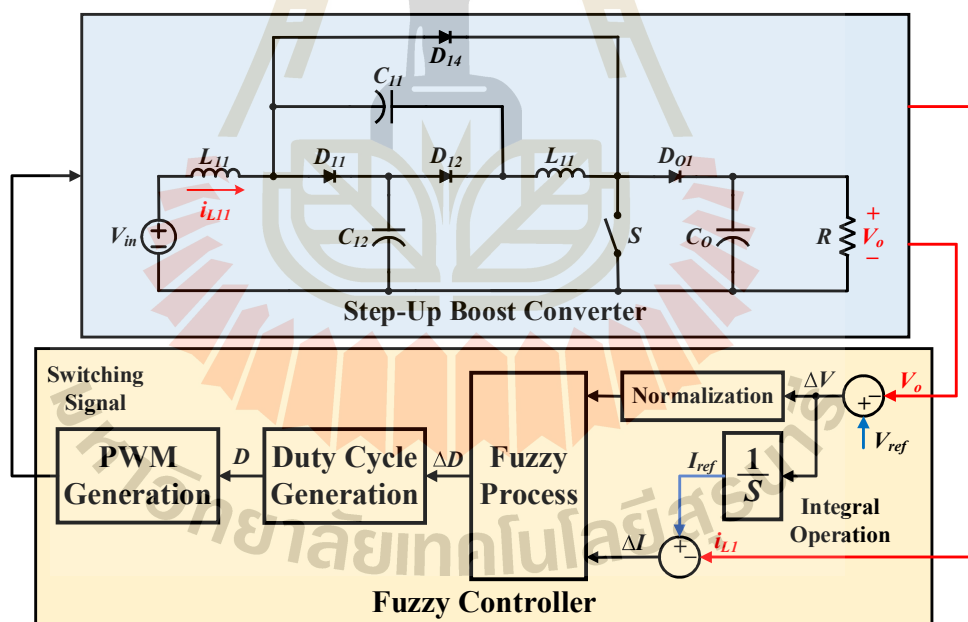
5) ตัวควบคุมคลุมเครือหรือฟัซซี (Fuzzy controller) เป็นหนึ่งในตัวควบคุมแบบปัญญาประดิษฐ์ โดยอาศัยประสบการณ์ ความรู้ และความเข้าใจของผู้สังเกตการณ์ในการออกแบบตัวควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร ซึ่งจะมีความคลุมเครือในความหมายของปริมาณเมื่อพิจารณาในเชิงปริมาณตัวเลข แต่จะอาศัยกระบวนการฟัซซี (Fuzzy process) ประกอบด้วย การฟัซซีไฟ (Fuzzification) การอนุมานฟัซซี (Fuzzy inference) และการดีฟัซซีไฟ (Defuzzification) ตัวควบคุมฟัซซีจะดำเนินการตามกลวิธีที่กำหนดโดยฐานกฎ (Rule base) เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่เหมาะสมและสอดคล้องตามกับผู้สังเกตการณ์กำหนดไว้ ตัวควบคุมแบบคลุมเครือหรือฟัซซีสามารถนำมาใช้ควบคุมการทำงานของระบบที่มีความซับซ้อน เพื่อลดความซับซ้อนในการหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.10 (Lwin, 2019)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้น

อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟuzzyแสดงดังรูปที่ 2.10 อาศัยการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตเพียงค่าเดียว ในการควบคุมการทำงานของวงจร จึงให้ประสิทธิภาพในการควบคุมที่น้อยกว่าตัวควบคุมฟuzzyที่อาศัย ทั้งค่ากระแสอินพุตร่วมกับแรงดันเอาต์พุตเพื่อเป็นค่าอินพุตให้กับตัวควบคุม เนื่องจากผลตอบสนอง ของแรงดันเอาต์พุตที่ช้ากว่ากระแสอินพุต เมื่อมีเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจร

6) ตัวควบคุมฟuzzyสำหรับสำหรับวงจรทบระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูง โดย กระบวนการควบคุมเริ่มจากการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง จะได้ผลต่างของแรงดันเข้าสู่ส่วนกระบวนการปริพันธ์ (Integral operation) และได้เอาต์พุตเป็นกระแส อ้างอิง หลังจากนั้นกระแสอ้างอิงถูกลบด้วยค่ากระแสอินพุตเพื่อให้ได้ผลต่างของกระแส ก่อนนำเข้าสู่ กระบวนการฟuzzyได้ดำเนินการปรับค่าสเกล หรือเรียกว่าการนอร์มัลไลซ์ (Normalization) เพื่อปรับ ขนาดค่าความผิดพลาดของแรงดัน ให้อยู่ภายในขอบเขตการทำงานที่การควบคุมฟuzzyที่พัฒ นาขึ้น สามารถทำงานได้อย่างครอบคลุมและเหมาะสม เอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyเป็นการเปลี่ยนแปลงของ ค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ของวงจร ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างดัง รูปที่ 2.11 (Kunjittipong et al., 2020)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างตัวควบคุมฟuzzyสำหรับวงจรทบระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรียงต่อกันสามขั้นมีความซับซ้อน รวมถึงสภาวะการทำงาน ต่าง ๆ ของวงจรที่ทำให้การทำงานของวงจรไม่เสถียร เช่น การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน ความไม่ แน่นแน่นของพารามิเตอร์ การผันแปรของแหล่งจ่ายพลังงาน ความเค้นของแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์

เสถียรภาพของระบบเนื่องจากการทำงานของวงจรย่อยแต่ละชั้นในสถานะชั่วคราว ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้วงจรสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างคงที่และมีประสิทธิภาพ แม้ในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร การควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ได้แก่ งานวิจัย (Khwan-on and Diewsurin, 2018) ได้พัฒนาตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่ประกอบด้วยลูประดันภายนอกหนึ่งลูประดันภายในสองลูประดัน โดยสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้อย่างน่าพอใจภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน ทั้งนี้การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูประดัน และลูประดันจะอาศัยการประมาณค่าที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม นอกจากนี้เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับลูประดันทั้งสองลูประดัน จำเป็นต้องอาศัยวิธีการถ่วงน้ำหนักกระแส ซึ่งต้องปรับจูนค่าอย่างเหมาะสมเพื่อให้วงจรสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างเหมาะสม การออกแบบตัวควบคุมพีไออีกวิธีหนึ่งสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้นในงานวิจัย (El Aroudi et al., 2016) ได้พัฒนาตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้นตัวที่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถลดปัญหาการขาดเสถียรภาพของระบบเนื่องจากการทำงานของวงจรย่อยแต่ละชั้นในสถานะชั่วคราว อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมนี้ต้องการกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละชั้น ทำให้ต้องใช้ตัวตรวจวัดกระแสและตัวตรวจวัดแรงดันเพิ่มขึ้น งานวิจัย (Karamanakos et al., 2013) นำเสนอการควบคุมแบบทำนาย (Model predictive control) ซึ่งได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถจัดการกับความไม่แน่นอน ทำให้วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างเหมาะสม แต่มีข้อจำกัดด้านการประมวลผลที่สูงขึ้น ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding mode controller) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองชั้นในงานวิจัย (Haroun et al., 2013) และ (Haroun et al., 2014) พบว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ใช้กับวงจร สามารถทำงานได้แม้ในสถานะที่มีการรบกวนและความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามหากออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนโดยใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวควบคุมลดลง ดังนั้นเพื่อออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงจำเป็นต้องเข้าใจขอบเขตของความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีตัวควบคุมเทคนิคอื่น ๆ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ ได้แก่ การสังเคราะห์แบบไมโคร (μ -synthesis) (Ounis and Goléa, 2015) การควบคุมสังเกตการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear observation control) (Cimini et al., 2017) การควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive control) (Johnson et al., 2021) และการควบคุมแบบคงทน (Robust control)

(Alharbi et al., 2020) and (Gkizas, 2021) ซึ่งตัวควบคุมเหล่านี้สามารถควบคุมการทำงานของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจรของ ระดับแรงดันของแหล่งจ่ายอินพุต และการเปลี่ยนแปลงโหลด อย่างไรก็ตามตัวควบคุมเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้อง โดยประสิทธิภาพของตัวควบคุมจะลดลงหากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบเกิดจากการประมาณค่าหรือไม่ถูกต้อง ทั้งนี้หากวงจรที่พิจารณามีความซับซ้อนมากจะส่งผลให้การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความซับซ้อนมากตามไปด้วย

การควบคุมคลุมเครือหรือฟัซซี (Fuzzy controller) ช่วยลดข้อจำกัดด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่อาศัยความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของวงจรเป็นอย่างดี โดยดำเนินการในรูปแบบของกฎการควบคุมที่มนุษย์สามารถเข้าใจได้ การใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่ออกแบบอย่างเหมาะสมจะสามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีจึงเหมาะสำหรับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันหลายชั้น ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนซับซ้อน การพัฒนาตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นจะแสดงรายละเอียดในบทต่อไป

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด

ลำดับต่อมาเป็นการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด ซึ่งมีรายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 2.3 โดยจะกล่าวถึงการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ รวมถึง การตรวจจับความผิดพลาด และการระบุตำแหน่งความผิดพลาด ซึ่งข้อมูลจากการปรัทัศน์วรรณกรรมในหัวข้อนี้ เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด และการตรวจจับความผิดพลาด

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2015	E. Jamshidpour, P. Poure, and S. Saadate	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร (Open-circuit fault) และความผิดพลาดแบบลัดวงจร (Short-circuit fault) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม โดยอาศัยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรม (Field programmable gate array)	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาด ซึ่งพิจารณาจากความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในช่วงการทำงานของสวิตช์เปิด-ปิด (ON-OFF) วิธีการตรวจจับจะใช้เทคนิคสเตตแมชชีน (State machine) เพื่อบอกสถานะการทำงานของวงจรแบบเป็นวัฏจักรเมื่อความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไม่ตรงตามช่วงการทำงานของสวิตช์ จะแสดงสถานะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
2017	L. Li, S. X. Ding, J. Qiu, Y. Yang, and D. Xu	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาดจากผู้สังเกตการณ์ โดยใช้แบบจำลองฟuzzyลอจิกรูปแบบ Takagi-Sugeno สำหรับระบบทั่วไปที่ไม่เป็นเชิงเส้นกรณีศึกษาจะพิจารณาเครื่องทำความร้อนถังกวนอย่างต่อเนื่อง (Continuous stirred tank heater: CSTH) โดยอาศัย Residual generator ที่พิจารณาจากสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบ	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาด ในกระบวนการทำงานของเครื่องทำความร้อนถังกวนเมื่อความผิดพลาด โดยใช้แบบจำลองฟuzzyรูปแบบ Takagi-Sugeno เพื่อออกแบบค่าฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ที่เกิดจากการสังเกตการณ์ ระดับของน้ำและอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งจะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างค่าเกณฑ์ (Threshold) และฟังก์ชันการประเมิน (Evaluation function) เพื่อแสดงสถานะความผิดพลาด

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด และการตรวจจับความผิดพลาด (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2017	M. Lester F. Padilla, S. Jenson C. Lao, R. G. Baldovino, A. A. Bandala, and E. B. Dadios	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาด และการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดภายในระบบอากาศยานไร้คนขับ หรือยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) โดยอาศัยแบบจำลองฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic model)	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาดโดยใช้แบบจำลองฟัซซี ซึ่งอาศัยค่าเปอร์เซ็นต์เบตเตอร์ และระดับความสามารถในการบินเป็นฟังก์ชันสมาชิกอินพุต ส่วนฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตเป็นระดับความสามารถในการทำภารกิจ เอาต์พุตจะเป็นคำสั่งการดำเนินการต่อและยกเลิกการทำภารกิจ
2018	S. Siouane, S. Jovanović, and P. Poure	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาด และการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทระดับแรงดัน และลดระดับแรงดันที่เรียงต่อกัน เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นที่ทรานซิสเตอร์ ทั้งแบบเปิดวงจร และแบบลัดวงจร	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาด โดยพิจารณาจากความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดสำหรับวงจร หากสวิตช์ใดสวิตช์หนึ่งเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร จะสั่งให้สวิตช์เสริมได้ยาร่วมกับไดโอดสองตัวทำงานแทน
2018	E. Jamshidpour, P. Poure, and S. Saadate	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาดทั้งแบบเปิดวงจร และแบบลัดวงจร ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสตรงที่นำมาต่อเรียงกันสองชั้น ภายใต้การควบคุมแบบซิงโครนัส (Synchronous control)	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาด โดยพิจารณาจากรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และรูปแบบสัญญาณการทำงานของสวิตช์ โดยเมื่อสวิตช์มีสถานะนำกระแส (ON) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้น และเมื่อสวิตช์มีสถานะหยุดนำกระแส (OFF) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะลดลง

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด และการตรวจจับความผิดพลาด (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2018	S. Khwan-on, and S. Diewsurin	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ทั้งสามตัว ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ภายใต้การควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักของกระแส ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันตามแรงดันที่ต้องการ	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยใช้การสร้างเงื่อนไขเหตุการณ์ (If-Else condition) จาก การสังเกตการณ์การทำงานของวงจร โดยพิจารณาจากค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และ 3
2019	T. Kim, H. Lee, and S. Kwak	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาด และการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร และการควบคุมแบบชดเชย (Compensated control) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบสองทิศทาง ซึ่งสามารถนำไปใช้กับแหล่งจ่ายได้หลายชนิด รวมถึงระบบจัดเก็บพลังงาน	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพลาด โดยอาศัยดัชนีการตรวจจับความผิดพลาด (Fault detection index) ที่ได้จากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพื่อเปรียบเทียบหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้น อีกทั้งการเปลี่ยนตำแหน่งไดโอด เมื่อเกิดความผิดพลาดจะอาศัยวิธีการควบคุมสวิตช์แบบผสมผสานการสวิตช์ (Mixed switching strategy) เพื่อสร้างความคงทนต่อความผิดพลาด เพื่อให้วงจรกลับมาทำงานได้ภายใต้สภาวะความผิดพลาด

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด และการตรวจจับความผิดพลาด (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2020	S. Kumar, and B. Singh Rajpurohit	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ ภายใต้การควบคุมแบบโปรแกรมเมเบิลลอจิก (Programmable logic control)	ทราบถึงวิธีการออกแบบการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดสำหรับวงจร โดยใช้สวิตช์สองตัวขนานกันเพื่อลดค่ากระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ โดยมีการสั่งการทำงานของสวิตช์ผ่านตัวควบคุม หากสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาด ตัวควบคุมจะสั่งให้อีกสวิตช์ทำงานแทนเพื่อควบคุมแรงดันตามแรงดันอ้างอิง

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อาจเกิดการผิดพลาดได้ ส่วนประกอบที่มีโอกาสเกิดความผิดพลาดมากที่สุดคือสวิตช์กำลัง โดย 21% ของความผิดพลาดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทั้งหมดเป็นความผิดพลาดที่สวิตช์กำลัง (Brunson et al., 2014) ทั้งนี้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่สวิตช์กำลัง ได้แก่ สวิตช์เปิดวงจร (Open-circuit fault : OCF) และสวิตช์ลัดวงจร (Short-circuit fault : SCF) โดยได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในสวิตช์กำลังมากมาย โดยส่วนใหญ่จะอาศัยการตรวจวัดค่ากระแสและการตรวจวัดค่าแรงดันของวงจรในสภาวะการทำงานปกติและสังเกตความผิดปกติเมื่อเกิดความผิดพลาด และนำความผิดปกติดังกล่าวมาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดพลาด

ตัวอย่างผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยอาศัยกระแสอินพุตแสดงดังต่อไปนี้ งานวิจัย (Jamshidpour et al., 2015) นำเสนอการตรวจจับความผิดพลาดที่รวดเร็ว โดยใช้เทคนิคสเตตแมชชีน (State machine) ซึ่งอาศัยสัญญาณรูปทรงในอุดมคติของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เปรียบเทียบกับสัญญาณจากกระแสที่ไหลผ่านกระแสอินพุตที่ใช้ในตัวควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อีกทั้งงานวิจัย (Shahbazi et al., 2012) ได้นำเสนอการตรวจจับความผิดพลาดสองระบบที่ทำงานร่วมกันสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ โดยใช้ความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพื่อ

เปรียบเทียบกับความชันในอุดมคติในช่วงการทำงานของสวิตช์ ระบบย่อยการตรวจจับความผิดปกติของสองระบบที่ทำงานแบบขนานกันแบบไฮบริดในอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array: FPGA) และวิธีการทำนาย (Predictive strategy) ได้รับการพัฒนาเพื่อการตรวจจับความผิดปกติในงานวิจัย (Aravind Balaji et al., 2023) จะอาศัยความแปรผันของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ หากกระแสเกินระดับเกณฑ์ที่กำหนดจะแสดงสถานะความผิดปกติที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้กระบวนการตรวจจับความผิดปกติที่อาศัยแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ได้นำเสนอในงานวิจัยดังต่อไปนี้ งานวิจัย (Jagtap and More., 2020) นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้แรงดันตกคร่อมสวิตช์ โดยการตรวจจับจะอาศัยกระบวนการเปรียบเทียบระหว่างระดับแรงดันตกคร่อมสวิตช์กับสัญญาณการสวิตช์จากตัวควบคุม ส่วนงานวิจัย (Abouobaida et al., 2023) ได้นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ โดยอาศัยฟังก์ชันของแรงดันเอาต์พุตที่ถูกประมาณจากสัญญาณการสวิตช์ จากนั้นจะเปรียบเทียบกับความชันของแรงดันที่ถูกวัดจากวงจร

กระบวนการตรวจจับความผิดปกติที่กล่าวมาข้างต้นใช้ตัวตรวจวัดค่ากระแสหรือแรงดันเพียงหนึ่งตัวสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม อย่างไรก็ตามการใช้ตัวตรวจวัดค่ากระแสหรือแรงดันหนึ่งตัวอาจไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับความผิดปกติของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น โดยงานวิจัย (Siouane et al., 2018) ได้นำเสนอการสร้าง ความคงทนต่อความผิดปกติสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าบูสต์ที่มีระบบกักเก็บพลังงานภายใต้ตัวควบคุมแบบเชิงโครนัส เทคนิคการตรวจจับความผิดปกติจะใช้ตัวตรวจวัดกระแสเพิ่มขึ้นหนึ่งตัวเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ส่วนงานวิจัย (Ali et al., 2018) ได้นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์ขนานกับการทำงานของวงจรจริง อย่างไรก็ตาม ความซับซ้อนของวงจรที่มากขึ้นส่งผลต่อการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงไม่เหมาะสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่มีความรวดเร็วและถูกต้อง เพื่อสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจรอย่างทันท่วงที ก่อนที่จะเกิดความเสียหายกับวงจร รวมทั้งการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวงจรมากขึ้น เทคนิคฟิซซีลอจิกไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร งานวิจัย (Padilla et al., 2017) ได้นำเสนอได้นำเสนอการสร้าง ความคงทนต่อความผิดปกติสำหรับยานพาหนะทางอากาศขนาดเล็ก (Micro aerial vehicles) โดยใช้ฟิซซีลอจิกตัดสินใจอย่างอิสระว่าจะดำเนินการกิจที่ได้รับมอบหมายต่อ หรือยุติภารกิจนั้น งานวิจัย (Li et

all., 2016) ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดปกติในระบบที่ซับซ้อน โดยใช้หลักการของผู้สังเกตการณ์ (Observer) ซึ่งเป็นเหมือนตัวแทนที่คอยเฝ้าสังเกตพฤติกรรมของระบบจริง เมื่อเกิดความผิดปกติ ผู้สังเกตการณ์จะสามารถตรวจจับได้ทันที การวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองฟuzzyของทาคากิ-สุกินะ (Takagi-Sugeno) มาใช้ในการสร้างผู้สังเกตการณ์ เพื่อให้สามารถจับพฤติกรรมที่ไม่แน่นอนของระบบได้อย่างถูกต้อง ผลการทดลองจากการจำลองระบบเครื่องทำความร้อนแสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้มีประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตได้จริง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเป็นวงจรที่มีความน่าเชื่อถือต่ำ เนื่องจากในวงจรประกอบด้วยสวิตช์กำลังสามตัว การตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์กำลังภายในวงจรอย่างรวดเร็วและถูกต้องจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีสมรรถนะที่ดี งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้เทคนิคฟuzzyลอจิก ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับระบบที่ซับซ้อน เนื่องจากเทคนิคฟuzzyลอจิกไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร ยิ่งไปกว่านั้นการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นไม่จำเป็นต้องใช้ตัวตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันเพิ่มเติม วิธีการนี้จะช่วยให้สามารถตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรของสวิตช์กำลังได้ทันที และระบุได้อย่างชัดเจนว่าสวิตช์ตัวใดเกิดความผิดปกติ รวมถึงการสร้างเกณฑ์ต่อความผิดปกติจะเป็นจุดมุ่งหมายของการศึกษานี้

2.5 สรุป

ในบทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น วิธีการตรวจจับความผิดปกติ และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ ซึ่งผลงานวิจัยในอดีตที่ได้รวบรวมไว้ในบทนี้เป็นข้อมูลสำคัญในการศึกษาเพื่อนำมาพัฒนางานวิจัยในอนาคต โดยจะมุ่งเน้นที่การควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร ทั้งยังมีการพัฒนาการตรวจจับความผิดปกติ และสร้างความคงทนต่อความผิดปกติสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น เพื่อให้วงจรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือทั้งในสภาวะการทำงานปกติและสภาวะการทำงานเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น

บทที่ 3

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

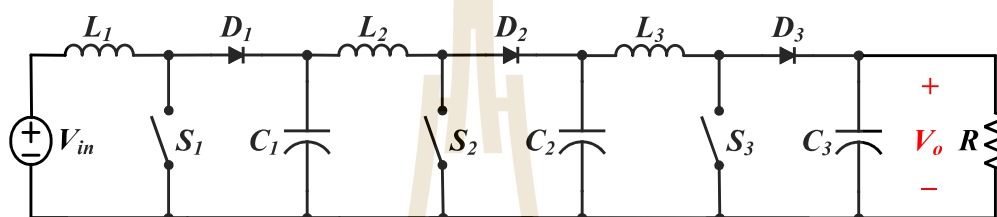
3.1 บทนำ

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าการพัฒนาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้มีอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อหกระดับแรงดันจากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนที่มีแรงดันต่ำประมาณ 20V ให้มีระดับแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้น เพื่อนำไปใช้กับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง หรือแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยอาศัยวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อนำไปใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ ในบทที่ 3 จะนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยกำหนดให้ระบบมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีแรงดันเท่ากับ 20V และต้องการแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงที่มีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 400V สำหรับโหลดตัวต้านทาน 1600Ω ซึ่งจะได้กำลังไฟฟ้าเป็น 100W ในการออกแบบจะเริ่มจากการอธิบายโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น หลักการทำงานของวงจร การพิจารณาอัตราขยายแรงดัน และกระแสของวงจร การออกค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ หลังจากนั้นเป็นการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรดังกล่าวในด้านการหบระดับแรงดัน โดยเนื้อหาที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทที่ 3 นี้ จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาวิธีการควบคุมฟัซซี่ รวมถึงตรวจจับความผิดปกติ และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจรนี้ต่อไป

3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายแรงดันต่ำให้ได้แรงดันเอาต์พุต (V_{out}) กระแสตรงที่เพิ่มขึ้น โดยใช้หลักการนำกระแสและหยุดนำกระแสของสวิตช์ เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีแรงดันที่ต่ำประมาณ 20V และต้องการแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงที่มีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 400V ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า การใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมอาจไม่สามารถทำได้ เนื่องจากอัตราขยายแรงดันดังกล่าวส่งผลให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์สูงมาก ส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สูงมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของ

วงจรลด การนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมมาเรียงต่อกันหลายชั้นสามารถช่วยลดปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามจำนวนสวิตช์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นที่นำมาเรียงต่อกัน วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถเพิ่มแรงดันได้ถึง 20 เท่า โดยที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ไม่สูงมากนัก ทั้งนี้โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นประกอบด้วย แหล่งจ่ายอินพุต (V_{in}) สวิตช์กำลังสามตัว (S_1, S_2, S_3) ไดโอดสามตัว (D_1, D_2, D_3) ตัวเหนี่ยวนำสามตัว (L_1, L_2, L_3) ตัวเก็บประจุสามตัว (C_1, C_2, C_3) และโหลดตัวต้านทาน (R) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น มีช่วงการทำงานของสวิตช์นำกระแส และหยุดนำกระแสที่พร้อมกันและไม่พร้อมกัน จะขึ้นอยู่กับจำนวนสวิตช์กำลังที่มีอยู่ในวงจร S_1, S_2 และ S_n ดังนั้นโหมดการทำงานของวงจรกรณี n สวิตช์ จะมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3.1) โดยที่ N_m คือจำนวนของโหมดการทำงาน และ n คือจำนวนสวิตช์กำลังที่ปรากฏอยู่ในวงจร ในกรณีที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะมีสวิตช์กำลังปรากฏอยู่ในวงจรจำนวนสามตัว จึงมีโหมดการทำงานของวงจร 8 โหมด ดังตารางที่ 3.1

$$N_m = 2^n \quad (3.1)$$

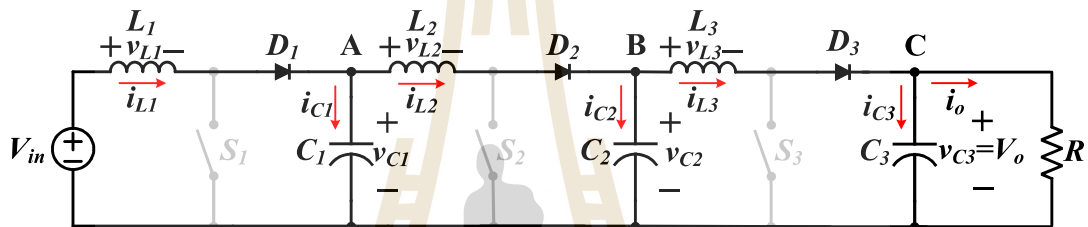
ตารางที่ 3.1 โหมดการทำงานของแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

โหมดการทำงาน	สวิตช์ตัวที่ 1 (S_1)	สวิตช์ตัวที่ 2 (S_2)	สวิตช์ตัวที่ 3 (S_3)
1	OFF	OFF	OFF
2	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF
4	OFF	ON	ON
5	ON	OFF	OFF

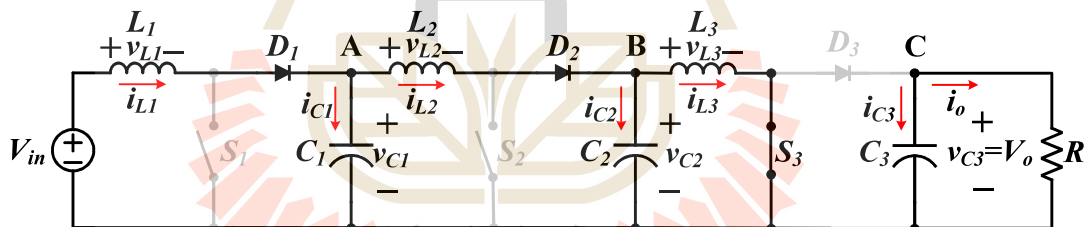
ตารางที่ 3.1 โหมดการทำงานของแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น (ต่อ)

โหมดการทำงาน	สวิตช์ตัวที่ 1 (S_1)	สวิตช์ตัวที่ 2 (S_2)	สวิตช์ตัวที่ 3 (S_3)
6	ON	OFF	ON
7	ON	ON	OFF
8	ON	ON	ON

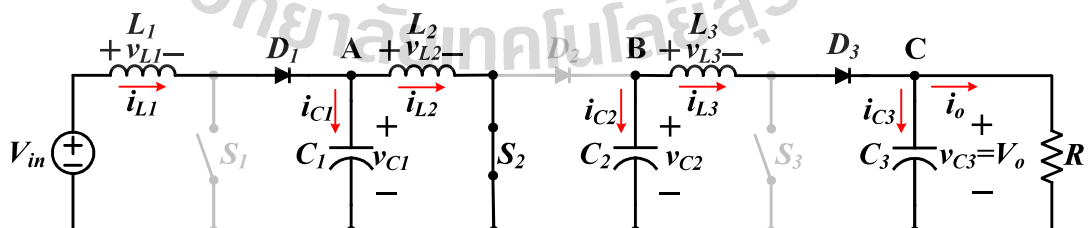
จากตารางที่ 3.1 สามารถพิจารณาการทำงานของสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ชื่อนำกระแส และหยุดนำกระแสของสวิตช์ได้ทั้งหมด 8 โหมดดังรูปที่ 3.2 ถึง 3.9 ตามลำดับ



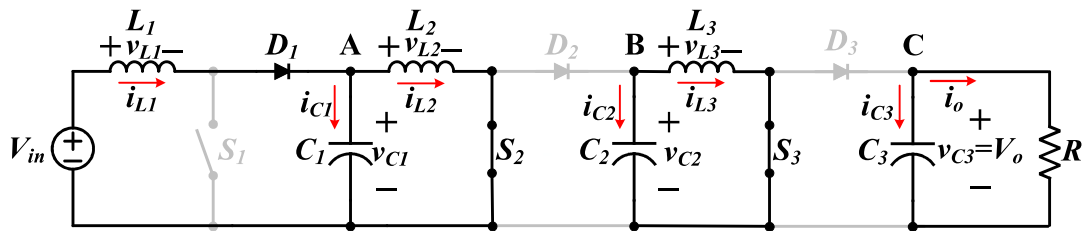
รูปที่ 3.2 โหมดการทำงานที่ 1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น



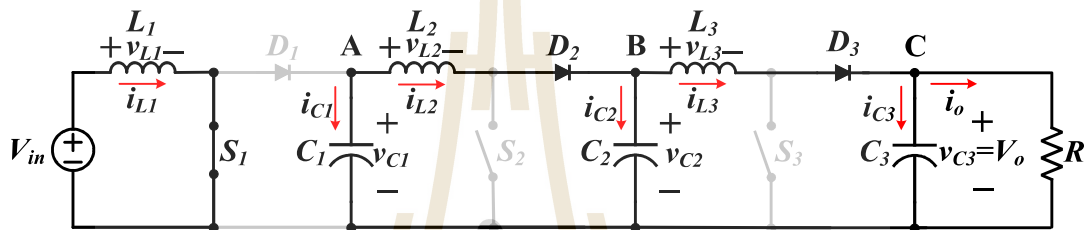
รูปที่ 3.3 โหมดการทำงานที่ 2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น



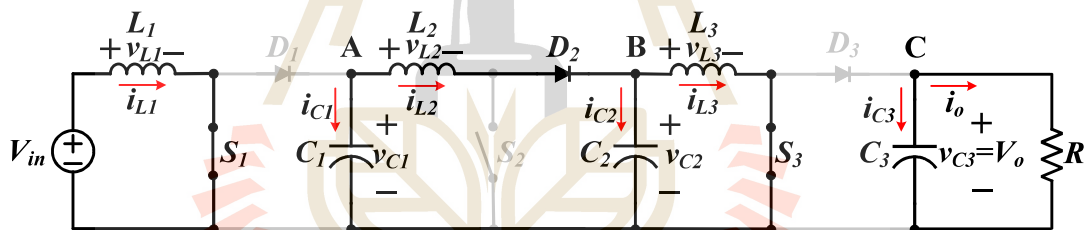
รูปที่ 3.4 โหมดการทำงานที่ 3 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น



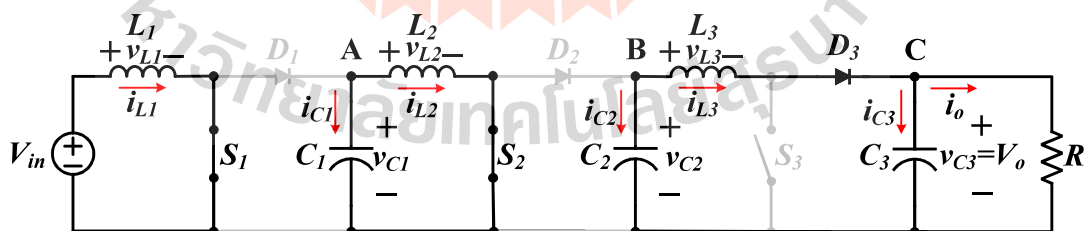
รูปที่ 3.5 โหมดการทำงานที่ 4 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น



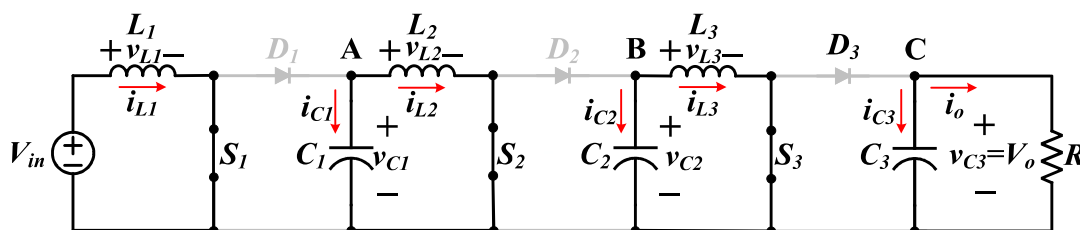
รูปที่ 3.6 โหมดการทำงานที่ 5 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น



รูปที่ 3.7 โหมดการทำงานที่ 6 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

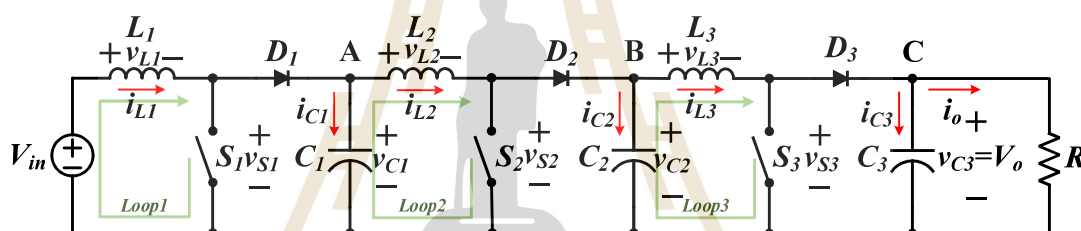


รูปที่ 3.8 โหมดการทำงานที่ 7 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น



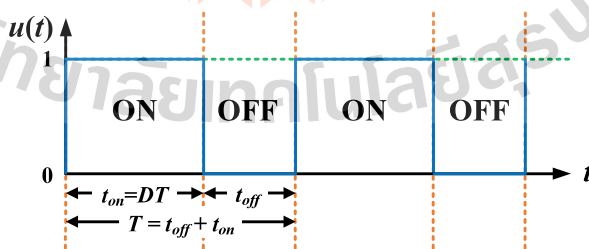
รูปที่ 3.9 โหมดการทำงานที่ 8 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

จากการทำงานทั้ง 8 โหมดข้างต้น สามารถวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นโดยพิจารณาตัวแปรสวิตช์ (Switched variable) ประกอบด้วยแรงดันตกคร่อมสวิตช์ กระแสที่ไหลผ่านไดโอด ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตัวแปรสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นจะใช้สัญญาณฟังก์ชันการสวิตช์ ($u(t)$) เพื่อพิจารณาตัวแปรสวิตช์ในช่วงนำกระแส และหยุดนำกระแสของสวิตช์แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สัญญาณฟังก์ชันการสวิตช์

จากรูปที่ 3.11 สามารถพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ (D) ได้จากช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส (t_{on}) และช่วงเวลาที่ยสวิตช์หยุดนำกระแส (t_{off}) ของสวิตช์ดังสมการที่ (3.2) เมื่อ T คือคาบการสวิตช์

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.2)$$

จากการพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ข้างต้นสามารถหาแรงดันตกคร่อมสวิตช์ทั้งสามตัว (v_{S1} , v_{S2} , v_{S3}) และกระแสที่ไหลผ่านไวด์ทั้งสามตัว (i_{D1} , i_{D2} , i_{D3}) โดยที่ u_1 , u_2 และ u_3 คือสัญญาณการสวิตช์ของสวิตช์ตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ตัวแปรสวิตช์ในฟังก์ชันการสวิตช์ของแรงดันตกคร่อมสวิตช์ กระแสที่ไหลผ่านไวด์

สวิตช์	โหมด	แรงดันสวิตช์	ฟังก์ชันการสวิตช์ของแรงดันตกคร่อมสวิตช์	กระแสไวด์	ฟังก์ชันการสวิตช์ของกระแสไหลผ่านไวด์
S_1	ON	$v_{S1} = 0$	$v_{S1} = (1-u_1)v_{C1}$	$i_{D1} = 0$	$i_{D1} = (1-u_1)i_{L1}$
	OFF	$v_{S1} = v_{C1}$		$i_{D1} = i_{L1}$	
S_2	ON	$v_{S2} = 0$	$v_{S2} = (1-u_2)v_{C3}$	$i_{D2} = 0$	$i_{D2} = (1-u_2)i_{L2}$
	OFF	$v_{S2} = v_{C2}$		$i_{D2} = i_{L2}$	
S_3	ON	$v_{S3} = 0$	$v_{S3} = (1-u_3)v_{C3}$	$i_{D3} = 0$	$i_{D3} = (1-u_3)i_{L3}$
	OFF	$v_{S3} = v_{C3}$		$i_{D3} = i_{L3}$	

จากตารางที่ 3.2 สามารถวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นดังแสดงในรูปที่ 3.10 และเขียนสมการให้อยู่ในรูปตัวแปรฟังก์ชันการสวิตช์ จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law: KCL) และกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law: KVL) ได้ดังนี้

ลูป 1 : $-V_{in} + v_{L1} + v_{S1} = 0$

$$i_{L1} = \frac{1}{L_1}(-v_{S1} + V_{in}) \quad (3.3)$$

ลูป 2 : $-v_{C1} + v_{L2} + v_{S2} = 0$

$$\dot{i}_{L2} = \frac{1}{L_2}(-v_{S2} + v_{C1}) \quad (3.4)$$

ลูป 2 : $-v_{C3} + v_{L3} + v_{S3} = 0$

$$\dot{i}_{L3} = \frac{1}{L_3}(-v_{S3} + v_{C2}) \quad (3.5)$$

โนด A : $-i_{D1} + i_{C1} + i_{L2} = 0$

$$\dot{v}_{C1} = \frac{1}{C_1}(-i_{D1} + i_{L2}) \quad (3.6)$$

โนด A : $-i_{D2} + i_{C2} + i_{L3} = 0$

$$\dot{v}_{C2} = \frac{1}{C_2}(-i_{D2} + i_{L3}) \quad (3.7)$$

โนด A : $-i_{D3} + i_{C3} + i_O = 0$

$$\dot{v}_{C3} = \frac{1}{C_3}(-i_{D3} + \frac{1}{R}v_{C3}) \quad (3.8)$$

แทนค่าฟังก์ชันการสวิตช์ v_{S1} , v_{S2} , v_{S3} , i_{D1} , i_{D2} และ i_{D3} จากตารางที่ 3.2 ลงในสมการที่ (3.3) ถึง (3.8) จะได้อนุพันธ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม และอนุพันธ์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสามดังนี้

$$\dot{i}_{L1} = \frac{1}{L_1}(-(1-u_1)v_{C1} + v_{in}) \quad (3.9)$$

$$i_{L2} = \frac{1}{L_2} \left(-(1-u_2)v_{C2} + v_{C1} \right) \quad (3.10)$$

$$i_{L3} = \frac{1}{L_3} \left(-(1-u_3)v_{C3} + v_{C2} \right) \quad (3.11)$$

$$\dot{v}_{C1} = \frac{1}{C_1} \left(-(1-u_1)i_{L1} + i_{L2} \right) \quad (3.12)$$

$$\dot{v}_{C2} = \frac{1}{C_2} \left(-(1-u_2)i_{L2} + i_{L3} \right) \quad (3.13)$$

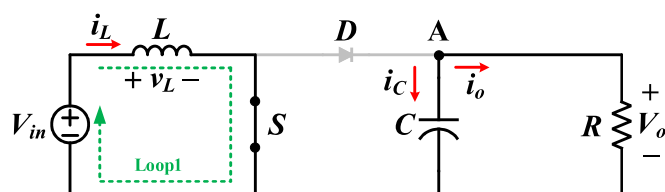
$$\dot{v}_{C3} = \frac{1}{C_3} \left(-(1-u_3)i_{L3} + \frac{1}{R}v_{C3} \right) \quad (3.14)$$

จากการพิจารณาตัวแปรฟังก์ชันการสวิตช์ประกอบด้วยแรงดันตกคร่อมสวิตช์ทั้งสามตัว กระแสที่ไหลผ่านไดโอดทั้งสามตัว จะได้อนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม แสดงถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่เป็นสมการอนุพันธ์อันดับหก นอกจากนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นจะถูกใช้ในการการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำของวงจร ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.3 อัตราขยายแรงดันและอัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้น

การพิจารณาอัตราขยายแรงดันและกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเกิดจากการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมมาต่อเรียงกันสามขั้น โดยสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (v_L), กระแสที่ไหลผ่าน

ตัวเก็บประจุ (i_C), V_{in} , V_{out} , D และสัญญาณฟังก์ชันการสวิตช์ ในช่วงการนำกระแส และหยุดนำกระแส ของสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมแสดงดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมขณะที่ในช่วงที่สวิตช์นำกระแส

ลูป 1 : $-V_{in} + v_L = 0$

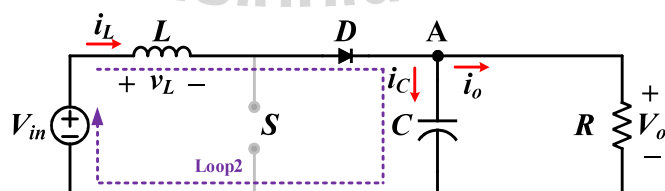
$$v_L = V_{in} \quad (3.15)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (3.16)$$

โหนด A : $i_o + i_c = 0$

$$i_c = -i_o = -\frac{V_o}{L} \quad (3.17)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{V_o}{RC} \quad (3.18)$$



รูปที่ 3.13 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส

ลูป 2 : $-V_{in} + v_L + V_o = 0$

$$v_L = V_{in} - V_o \quad (3.19)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (3.20)$$

โนด A : $-i_L + i_o + i_c = 0$

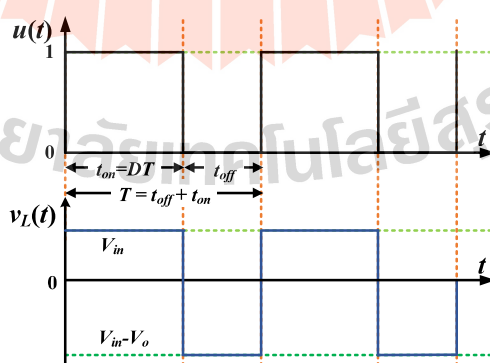
$$i_c = i_L - i_o = i_L - \frac{V_o}{L} \quad (3.21)$$

$$\frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \quad (3.22)$$

จากความสัมพันธ์ของ v_L และ i_c ในสภาวะอยู่ตัว ขณะที่สวิตช์นำกระแส และหยุดนำกระแส สามารถพิจารณาหาอัตราขยายแรงดัน และกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นดังต่อไปนี้

3.3.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

หลักการสมดุลพลังก์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำถูกพิจารณาสำหรับหาอัตราขยายแรงดัน (M_V) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม จากสมการที่ (3.15) และ (3.19) สามารถหาค่าเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (v_L) ในสภาวะอยู่ตัวได้จากรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในสภาวะอยู่ตัว

จาก v_L ในสภาวะอยู่ตัว สามารถพิจารณาค่าเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ $\langle v_L \rangle$ มีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงคาบการทำงานของสวิตช์ และจะได้ค่าอัตราขยายแรงดันดังสมการที่ (3.23)

$$\text{ค่าเฉลี่ย : } \langle v_L \rangle = \frac{DTV_{in} + (1-D)T(V_{in} - V_o)}{T} = 0$$

$$M_V(D) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (3.23)$$

จากอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมข้างต้น สามารถพิจารณาอัตราขยายแรงดันในแต่ละชั้น (M_{V1} , M_{V2} , M_{V3}) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นดังสมการที่ (3.24), (3.25) และ (3.26) ตามลำดับ โดยที่ D_1 , D_2 และ D_3 คือวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ของสวิตช์ตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

$$M_{V1}(D) = \frac{V_{C1}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D_1)} \quad (3.24)$$

$$M_{V2}(D) = \frac{V_{C2}}{V_{C1}} = \frac{1}{(1-D_2)} \quad (3.25)$$

$$M_{V3}(D) = \frac{V_o}{V_{C2}} = \frac{1}{(1-D_3)} \quad (3.26)$$

จากอัตราขยายแรงดันในแต่ละชั้นข้างต้นสามารถหาอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ดังสมการที่ (3.27)

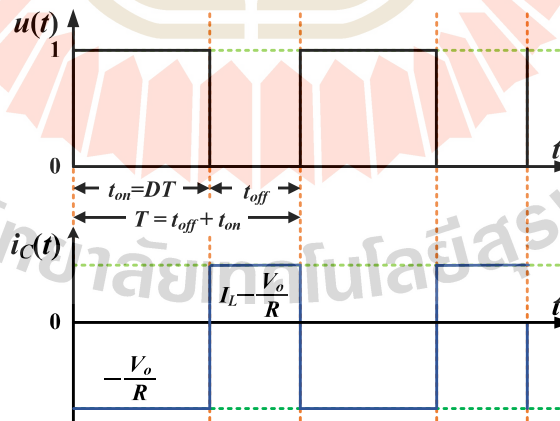
$$M_V(D) = \frac{V_o}{V_{in}} = \begin{cases} \frac{\frac{V_{C1}}{V_{in}} \cdot \frac{V_{C2}}{V_{C1}} \cdot \frac{V_o}{V_{C2}}}{M_{V1}(D) \cdot M_{V2}(D) \cdot M_{V3}(D)} \\ \frac{1}{(1-D_1) \cdot (1-D_2) \cdot (1-D_3)} \end{cases} \quad (3.27)$$

3.3.2 อัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

อัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมจะพิจารณาจากหลักการสมดุลประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ จากสมการที่ (3.17) และ (3.21) สามารถหาค่าเฉลี่ยของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (i_C) ในสภาวะอยู่ตัวดังรูปที่ 3.15

$$\text{ค่าเฉลี่ย : } \langle i_C \rangle = \frac{DT \left(-\frac{V_o}{R} \right) + (1-D)T \left(i_L - \frac{V_o}{R} \right)}{T} = 0$$

$$M_i(D) = \frac{V_o}{i_L R} = \frac{i_o}{i_L} = (1-D) \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.15 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัว

จากอัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม ดังสมการที่ (3.28) สามารถพิจารณาอัตราขยายกระแสในแต่ละชั้น (M_{I1} , M_{I2} , M_{I3}) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นดังสมการที่ (3.29), (3.30) และ (3.31) ตามลำดับ

$$M_{I1}(D) = \frac{i_{L2}}{i_{L1}} = (1 - D_1) \quad (3.29)$$

$$M_{I2}(D) = \frac{i_{L3}}{i_{L2}} = (1 - D_2) \quad (3.30)$$

$$M_{I3}(D) = \frac{i_o}{i_{L3}} = (1 - D_3) \quad (3.31)$$

จากอัตราขยายกระแสในแต่ละชั้นข้างต้นสามารถหาอัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ดังสมการที่ (3.32)

$$M_I(D) = \frac{i_o}{i_{L1}} = \begin{cases} \frac{i_{L2} \cdot i_{L3} \cdot i_o}{i_{L1} \cdot i_{L2} \cdot i_{L3}} \\ M_{I1}(D) \cdot M_{I2}(D) \cdot M_{I3}(D) \\ (1 - D_1) \cdot (1 - D_2) \cdot (1 - D_3) \end{cases} \quad (3.32)$$

จากการวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันและอัตราขยายกระแสของวงจรบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยพิจารณาจากสมดุลพลังค์ในตัวเหนี่ยวนำ และสมดุลประจุในตัวเก็บประจุตามลำดับ เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีแรงดันที่ต่ำประมาณ 20V และต้องการแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงที่มีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 400V สำหรับโหลดตัวต้านทาน 1600Ω ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า ดังนั้น หากพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ทั้งสามเท่ากันจะมีค่าเท่ากับ 0.635 ($D_1=D_2=D_3=0.635$) ซึ่งจะได้ค่ากระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) เป็น 5A, 1.85A และ 0.69A ตามลำดับ ส่วนค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) มีค่าเท่ากับ 54V, 146VA และ 400V

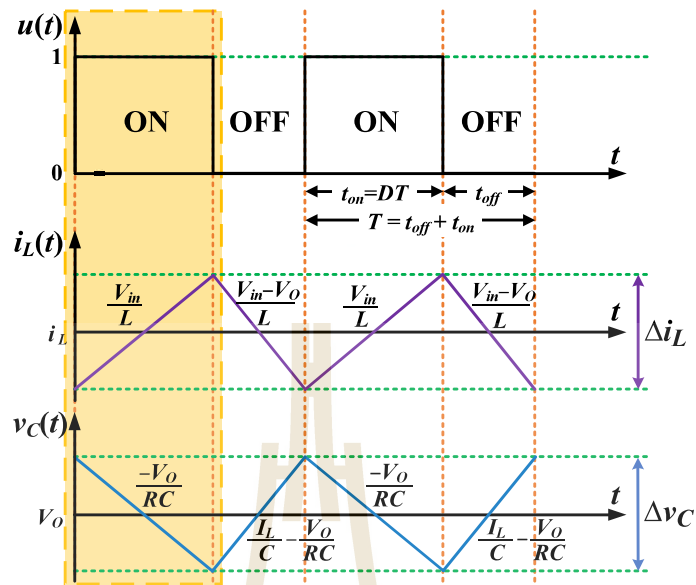
ตามลำดับ โดยข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบตัวควบคุมพีซี อีกทั้งยังใช้ในการออกแบบการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2, L_3) และตัวเก็บประจุ (C_1, C_2, C_3) ที่ปรากฏอยู่ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมแสดงดังรูปที่ 3.16 ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ L จะอาศัยอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในช่วงที่สวิตช์นำกระแสที่เกิดจากการสะสมพลังงาน และคายพลังงานดังสมการที่ (3.16) และ (3.20) ตามลำดับ ส่วนการออกแบบค่าพารามิเตอร์ C จะอาศัยอนุพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เกิดจากการสะสมประจุ และคายประจุดังสมการที่ (3.18) และ (3.22) ตามลำดับ เพื่อให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (Δi_L) และการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (Δv_C) อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จะทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ

ค่าพารามิเตอร์ L มีผลต่อ Δi_L เป็นอย่างมาก หาก Δi_L สูงอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อกับอุปกรณ์วงจรภายในวงจร และยังส่งผลให้ Δv_C สูงตามไปด้วย ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ L จะอาศัยอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำช่วงนำกระแสของสวิตช์ในสถานะอยู่ตัวดังรูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์อนุพันธ์ของกระแสสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ L ได้ดังสมการที่ (3.33) โดยที่ f_s คือความถี่สวิตช์ มีค่าเท่ากับ $f_s = 1/T$



รูปที่ 3.16 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัวของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม

อนุพันธ์ของกระแส :

$$\frac{di_L}{dt} t = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L}$$

$$L = \frac{V_{in} D}{f_s \Delta i_L} \quad (3.33)$$

ดังนั้นในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวภายในของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น สามารถออกแบบได้โดยอาศัยหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์ L สมการที่ (3.33) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม โดยจะกำหนดขอบเขตการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม (Δi_{L1} , Δi_{L2} , Δi_{L3}) โดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์อนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวดังสมการที่ (3.9), (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ จะได้ค่าพารามิเตอร์ L_1 , L_2 และ L_3 ดังสมการที่ (3.34), (3.35) และ (3.36) ตามลำดับ

$$L_1 = \frac{V_{in} D_1}{f_s \Delta i_{L1}} \quad (3.34)$$

$$L_2 = \frac{V_{c1} D_2}{f_s \Delta i_{L2}} \quad (3.35)$$

$$L_3 = \frac{V_{c2} D_3}{f_s \Delta i_{L3}} \quad (3.36)$$

ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ ได้มีการพิจารณาค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว (Δi_{L1} , Δi_{L2} , Δi_{L3}) ให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยมีค่าเท่ากับ 0.09A, 0.19A และ 0.14A ตามลำดับ ซึ่งจากค่าเหล่านี้ ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม (L_1 , L_2 , L_3) เท่ากับ 14mH, 17.9mH และ 65.7mH ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาด 15mH, 18.75mH และ 70mH ตามลำดับ เพื่อใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และการเลือกใช้ขนาดเหล่านี้ยังคงทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้เช่นเดิม

3.4.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ

ค่าพารามิเตอร์ C มีผลต่อ Δv_C เป็นอย่างมากเช่นเดียวกันกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ L หาก Δv_C มีขนาดสูงมากจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่น ๆ ภายในวงจรได้ ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ C จะอาศัยอนุพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในช่วงนำกระแสของสวิตช์ในสถานะอยู่ตัวดังรูปที่ 3.16

$$\text{อนุพันธ์ของแรงดัน : } \frac{dv_C}{dt} t = -\frac{\Delta v_C}{DT} = -\frac{i_o}{C}$$

$$C = \frac{i_o D}{f_s \Delta v_C} \quad (3.37)$$

จะได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์เก็บประจุทั้งสามตัวภายในของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น สามารถอาศัยหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์ C สมการที่ (3.37) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม เนื่องจากมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกัน โดยจะกำหนดขอบเขตการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม (Δv_{C1} , Δv_{C2} , Δv_{C3}) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์อนุพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสามตัวดังสมการที่ (3.12), (3.13)

และ (3.14) ตามลำดับ จะได้ค่าพารามิเตอร์ C_1 , C_2 และ C_3 ดังสมการที่ (3.38), (3.39) และ (3.40) ตามลำดับ

$$C_1 = \frac{i_{L2} D_1}{f_s \Delta v_{C1}} \quad (3.38)$$

$$C_2 = \frac{i_{L3} D_2}{f_s \Delta v_{C2}} \quad (3.39)$$

$$C_3 = \frac{i_O D_3}{f_s \Delta v_{C3}} \quad (3.40)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุจะพิจารณาการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม (Δv_{C1} , Δv_{C2} , Δv_{C3}) โดยมีค่าอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ซึ่งมีค่าเป็น 0.24V, 0.096V และ 0.034V ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าตัวเก็บประจุทั้งสามเท่ากัน (C_1 , C_2 , C_3) เป็น 485.63 μ F, 452.81 μ F และ 463.24 μ F ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าเท่ากันคือ 500 μ F เพื่อใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และการเลือกใช้ค่านี้อย่างคงทำให้ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสามอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้เช่นเดิม

จากสมการออกแบบข้างต้น จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นโดยอาศัยข้อมูลในตารางที่ 3.3 จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ (L_1 , L_2 , L_3) และตัวเก็บประจุ (C_1 , C_2 , C_3) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นแสดงตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
V_{in}	แรงดันไฟฟ้าอินพุต	20	V
V_O	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	400	V
P_O	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	100	W
R	โหลดตัวต้านทาน	1600	Ω

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ (ต่อ)

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
$D_1=D_2=D_3$	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์	0.63	–
i_{L1}	กระแสไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำ	5	A
i_{L2}		1.85	A
i_{L3}		0.69	A
V_{C1}	แรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ	54	V
V_{C2}		146	V
V_{C3}		400	V
Δi_{L1}	กระแสไฟฟ้ากระแสเพิ่ม	0.09	A
Δi_{L2}		0.19	A
Δi_{L3}		0.14	A
ΔV_{C1}	แรงดันไฟฟ้ากระแสเพิ่ม	0.24	V
ΔV_{C2}		0.096	V
ΔV_{C3}		0.034	V

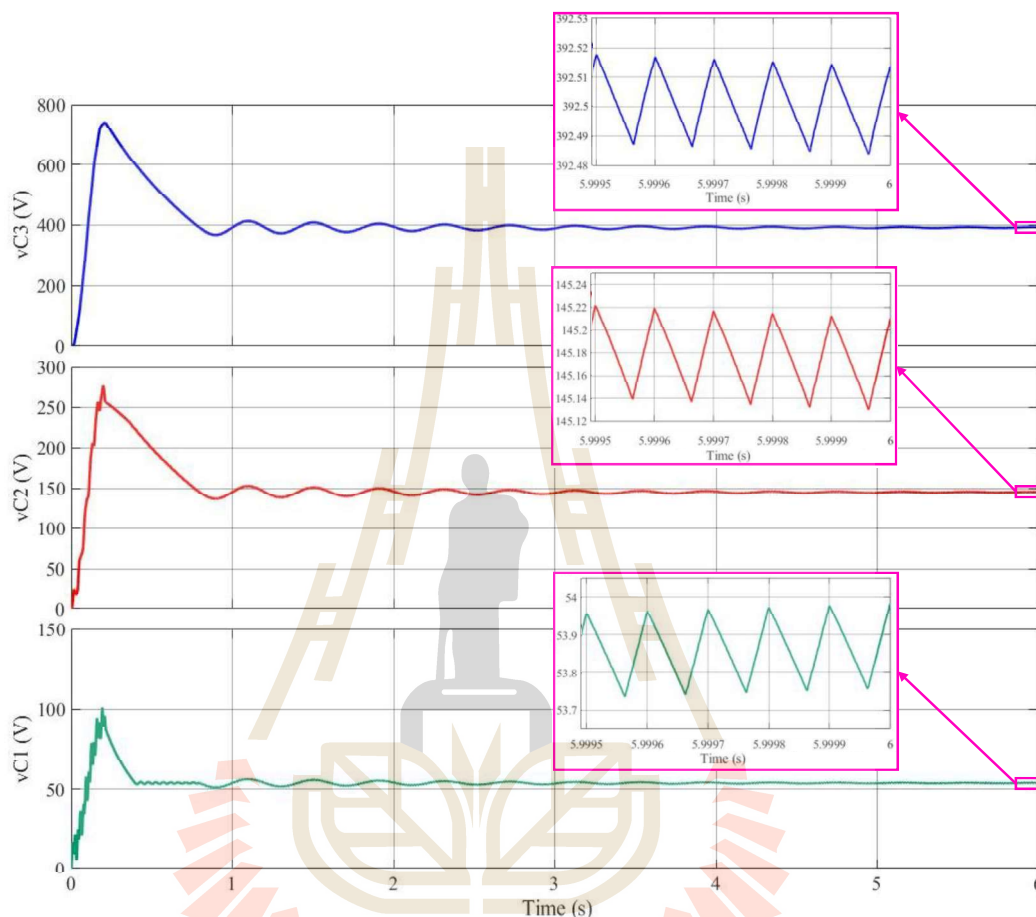
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
L_1	ตัวเหนี่ยวนำ	15	mH
L_2		18.75	mH
L_3		70	mH
$C_1=C_2=C_3$	ตัวเก็บประจุ	500	μF

3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น อาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วยในการจำลองสถานการณ์ โดยใช้โครงสร้างวงจรดังรูปที่ 3.1 โดยกำหนดให้โหลดตัวต้านทานเป็น 1600Ω แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างต่ำประมาณ 20V และค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ D_1 , D_2 และ D_3 เท่ากันที่ 0.63 เพื่อให้ได้อัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้การจำลอง

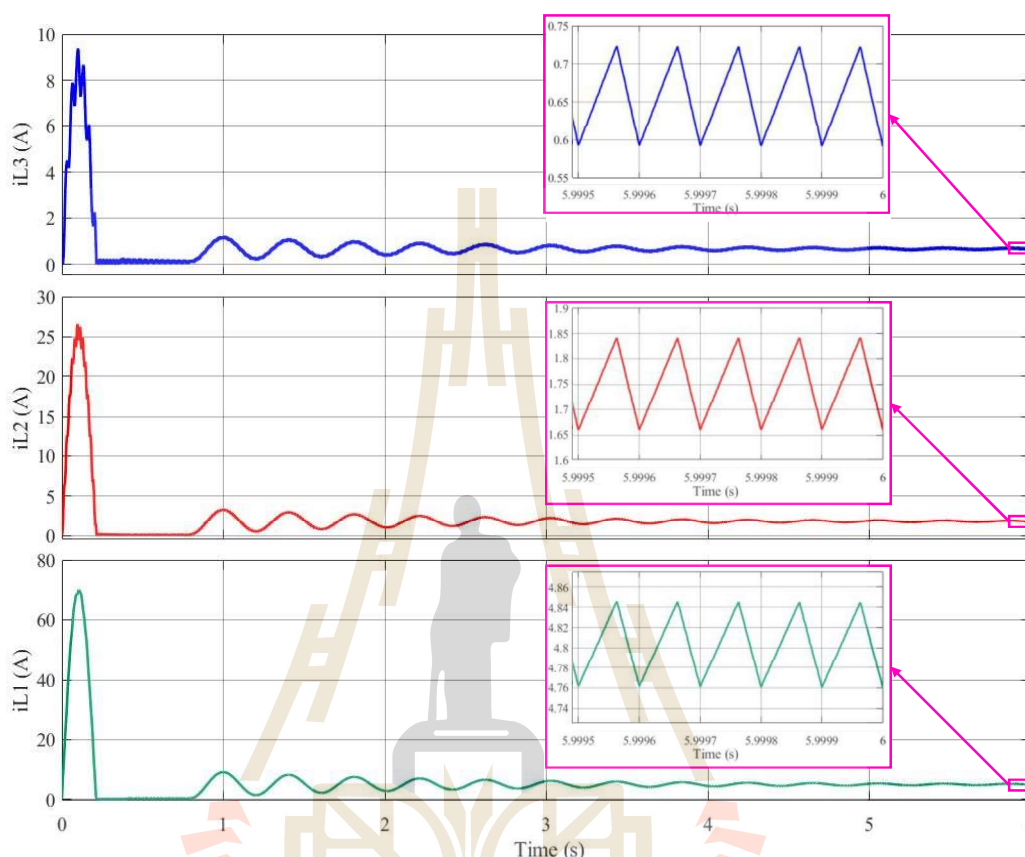
สถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ



รูปที่ 3.17 ผลจากการจำลองสถานการณ์ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 3.17 และ 3.18 เห็นได้ว่าในสภาวะชั่วครู่จะเกิดการพุ่งเกินของ v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} ที่ประมาณ 100V, 275V และ 750V ตามลำดับ ในขณะเดียวกันยังเกิดการพุ่งเกินของ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ที่ประมาณ 70A, 27A และ 9.5A ตามลำดับ ซึ่งอาจส่งผลให้อุปกรณ์ภายในวงจรเสียหายจนวงจรไม่สามารถทำงานต่อไปได้หากค่ากระแส และแรงดันเกินพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง อีกทั้งยังใช้เวลานานประมาณ 4 วินาที ในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว เมื่อพิจารณาผลตอบแทนในสภาวะอยู่ตัวแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ โดย v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} มีค่าประมาณ 54V, 146V และ 400V ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราขยายของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสูงถึง 20 เท่า รวมถึง i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าประมาณ 5A, 1.85A

และ 0.6875A ทั้งนี้ในส่วนของการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสามตัวต่างก็มีค่าสอดคล้องตามที่ออกแบบไว้เช่นกัน



รูปที่ 3.18 ผลจากการจำลองสถานการณ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม

3.6 สรุป

บทที่ 3 ได้นำเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยอธิบายโครงสร้างของวงจร หลักการทำงานของวงจร อัตราขยายแรงดัน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในวงจร และนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ที่สามารถทบทวนแรงดันแรงดันเอาต์พุตของวงจรสูงถึง 400V โดยที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ทั้งสามที่มีค่าเท่ากันที่ 0.63 และจ่ายกำลังไฟฟ้า 100 W ให้กับโหลดตัวต้านทานขนาด 1600Ω เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 20V รวมถึงแสดงการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ได้ผลสอดคล้องตามที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรขณะที่มีตัวควบคุม พบว่ามีการฟุ้งเกินของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่

ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจส่งผลเสียหายกับอุปกรณ์ภายในวงจร อีกทั้งยังใช้เวลานานในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ดังนั้นในบทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีชชีที่พัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้นทั้งในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว สามารถรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร



บทที่ 4

การควบคุมฟิสิกส์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

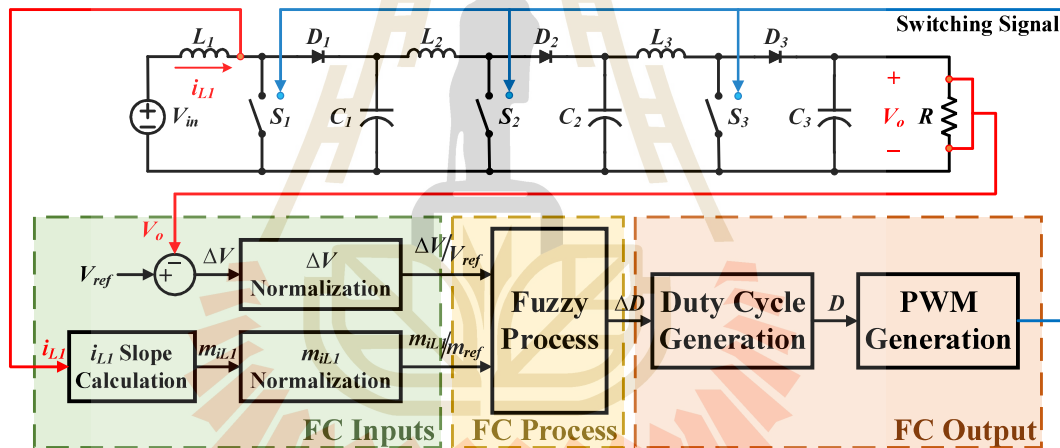
4.1 บทนำ

จากการศึกษาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทที่ 3 นั้น ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรขณะไม่มีตัวควบคุมแสดงให้เห็นถึงการพุ่งเกินของแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งอาจส่งผลให้อุปกรณ์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเสียหายจนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นจำเป็นต้องอาศัยตัวควบคุมที่เหมาะสม เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการและมีสมรรถนะที่ดี ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัวภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานวงจร ในบทที่ 4 นี้จะนำเสนอการพัฒนาและออกแบบตัวควบคุมฟิสิกส์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเพื่อให้ได้ค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ที่เหมาะสม สามารถควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวอย่างรวดเร็ว โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยโครงสร้างตัวควบคุมฟิสิกส์ การออกแบบตัวควบคุมฟิสิกส์ และการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟิสิกส์ โดยประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟิสิกส์ที่พัฒนาขึ้นพิจารณาได้จากผลการจำลองสถานการณ์ เมื่อวงจรทำงานภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต แรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน อีกทั้งยังได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของวงจรเมื่อใช้ตัวควบคุมฟิสิกส์ที่พัฒนาขึ้นกับตัวควบคุมพีไอ ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานเดียวกัน ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

4.2 การออกแบบตัวควบคุมฟิสิกส์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

ตัวควบคุมฟิสิกส์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะอาศัยตัวตรวจจับแรงดันวัดค่า V_o และตัวตรวจจับกระแสวัดค่า i_{L1} เพื่อส่งค่าที่วัดได้ไปยังตัวควบคุมฟิสิกส์ที่พัฒนาขึ้น ส่วนเอาต์พุตของตัวควบคุมฟิสิกส์เป็นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ที่เหมาะสมให้กับสวิตช์

ทั้งสามตัว เพื่อให้การควบคุมฟัซซีที่มีประสิทธิภาพจึงพิจารณาค่าอินพุตสองค่าก่อนเข้าสู่กระบวนการฟัซซีได้แก่ค่าความผิดพลาดของแรงดัน (ΔV) และความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง (m_{iL1}) โดยวัตถุประสงค์ของการเลือกอินพุต ΔV คือเพื่อควบคุมให้ผลตอบสนองมีความถูกต้องในสถานะอยู่ตัว ส่วนอินพุต m_{iL1} จะถูกพิจารณาเพื่อควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบมีความรวดเร็วยิ่งขึ้นในสภาวะชั่วคราว หากพิจารณาอินพุตค่าที่สองเป็นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่สอง (i_{L2}) อาจจะทำให้ผลตอบสนองที่ได้ไม่รวดเร็วเท่ากับการใช้อินพุตเป็น i_{L1} เนื่องจากโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นนั้น ค่า i_{L2} แปรผันตรงกับ v_{C1} ดังสมการ (3.4) ในบทที่ 3 โดยที่ v_{C1} ได้จากการชาร์จกระแส และคายประจุ จากกระแส i_{L1} โครงสร้างการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นประกอบด้วยอินพุตสำหรับตัวควบคุมฟัซซี (FC Inputs) กระบวนการควบคุมฟัซซี (FC Process) และเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี (FC Output) แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

จากโครงสร้างการควบคุมฟัซซีดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าอินพุตสำหรับตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยสองส่วนสำคัญคือแรงดันเอาต์พุต (V_o) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก (i_{L1}) โดยอินพุตค่าแรกของตัวควบคุมฟัซซีคือค่าความผิดพลาดของแรงดัน (ΔV) เป็นค่าผลต่างระหว่างแรงดันอ้างอิง V_{ref} และ V_o แสดงดังสมการ (4.1)

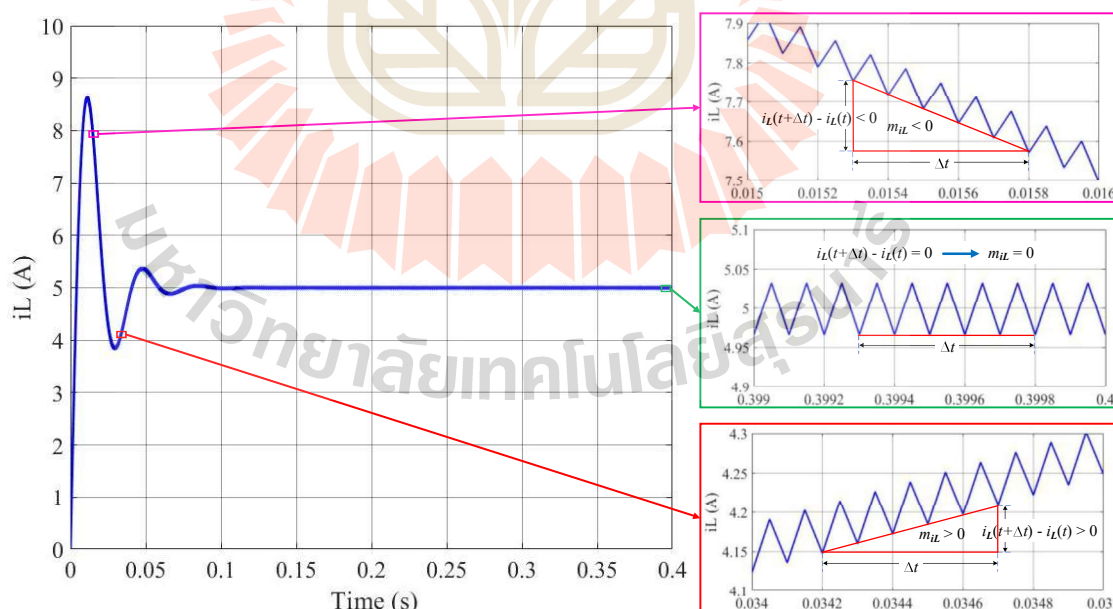
$$\Delta V = V_{ref} - V_o \quad (4.1)$$

ก่อนนำค่า ΔV เข้าสู่กระบวนการฟิชชี ได้ดำเนินการปรับค่าสเกล หรือเรียกว่าการนอร์มัลไลซ์ (Normalization) เพื่อให้ค่า ΔV อยู่ภายในขอบเขตที่การควบคุมฟิชชี สามารถทำงานได้อย่างครอบคลุม โดยหารค่า ΔV ด้วย V_{ref} แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการฟิชชีต่อไป

ส่วนอินพุตค่าที่สองของตัวควบคุมฟิชชีคืออัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา หรือความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง (m_{iL1}) ดังแสดงสมการ (4.2) ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง ณ เวลาใด ๆ ($i_{L1}(t)$) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งในอดีต ($i_{L1}(t-\Delta t)$) ส่วนด้วยการเปลี่ยนแปลงของเวลา (Δt)

$$m_{iL1} = \frac{i_{L1}(t) - i_{L1}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (4.2)$$

ทั้งนี้การพิจารณาค่า Δt จะกำหนดให้มีความมากกว่าคาบการสวิตช์ T_s โดยรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสวิตช์ ($u(t)$) และ i_{L1} โดยเมื่อสวิตช์นำกระแส (ON) พบว่าค่ากระแส i_{L1} จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากการสะสมพลังงาน ดังนั้น m_{iL1} จะเป็นบวก และหากสวิตช์หยุดนำกระแส (OFF) จะทำให้ค่ากระแส i_{L1} มีค่าลดลงจากการคายพลังงาน ดังนั้น m_{iL1} จะเป็นลบ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1

ก่อนนำค่า m_{iL1} เข้าสู่กระบวนการฟัซซี่จะดำเนินการปรับค่าสเกล เพื่อให้ m_{iL1} อยู่ภายในขอบเขตการควบคุมฟัซซี่ สามารถทำงานได้อย่างครอบคลุม โดยทำการหารด้วยค่าความชันอ้างอิง (m_{ref}) แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการฟัซซี่ต่อไป จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ค่า m_{ref} สามารถพิจารณาได้จาก Δi_{L1} ในช่วงสภาวะอยู่ตัวดังแสดงในสมการที่ (3.43) ที่ได้จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และค่า Δt ที่พิจารณาไว้ ดังแสดงในสมการที่ (4.3) โดยที่ D คือค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ทั้งสามที่ทำงานพร้อมกัน

$$m_{ref} \geq \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = \frac{DV_{in}}{\Delta t f_s L_1} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) หากค่า m_{ref} มีค่าน้อยจะส่งผลให้การทำงานของวงจรเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้า จะได้ค่ากระแสอ้างอิง (I_{ref}) ดังสมการที่ (4.4) ซึ่งจะนำไปใช้ในการอธิบายหลักการออกแบบกฎทางฟัซซี่ในขั้นถัดไป

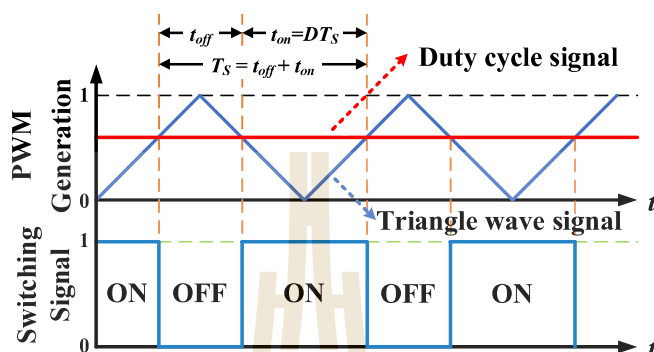
$$I_{ref} = m_{ref} \Delta t \quad (4.4)$$

เอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่คือการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ (ΔD) จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการสร้างค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ (Duty cycle generation) โดยค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ในปัจจุบัน (D_n) จะได้จากการนำค่าวัฏจักรหน้าที่ก่อนหน้า (D_{n-1}) บวกกับการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ปัจจุบัน (ΔD) ดังสมการที่ (4.5)

$$D_n = D_{n-1} + \Delta D \quad (4.5)$$

เอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ ΔD อาจมีค่าเป็นบวก ศูนย์ หรือลบ เพื่อปรับค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์เพิ่มขึ้นหรือลดลงเหมาะสมต่อการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นโดยจะขึ้นอยู่กับการออกแบบกฎในระบบฟัซซี่ของผู้เชี่ยวชาญ สุดท้ายจะเข้าสู่กระบวนการสร้างสัญญาณการสวิตช์ (Pulse width modulation generation) สำหรับสวิตช์ทั้งสามตัว โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่า D กับสัญญาณรายคาบรูปฟันเลื่อย (Sawtooth wave signal) หรือสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยม (Triangle wave signal) โดยหากค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์มากกว่า หรือเท่ากับ

สัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยมจะให้สัญญาณการสวิตช์ที่เป็นเปิด (ON) หรือสวิตช์นำกระแส ในทางตรงกันข้ามหากค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์น้อยกว่าสัญญาณรายคาบรูปสามเหลี่ยมจะให้สัญญาณการสวิตช์ที่เป็นปิด (OFF) หรือสวิตช์หยุดนำกระแส ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณการสวิตช์ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กระบวนการสร้างสัญญาณการสวิตช์ (PWM generation)

จากการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นพบว่าเมื่อค่า D เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ i_{L1} และ V_O เพิ่มขึ้น ในตรงกันข้ามหากค่า D ลดลง ส่งผลให้ i_{L1} และ V_O ลดลงเช่นกัน

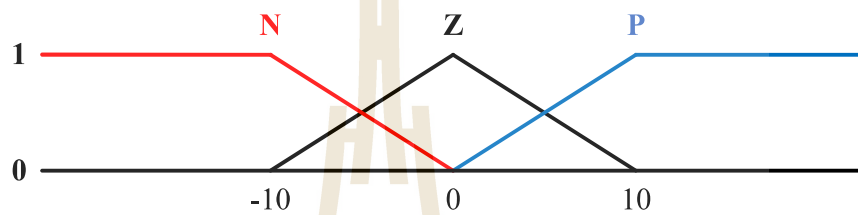
จุดประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีคือต้องการให้ผลตอบสนองของ V_O ไม่เกิดการพุ่งเกินในสถานะชั่วคราว และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวอย่างรวดเร็ว จำเป็นต้องควบคุม i_{L1} ให้มีความชันตามต้องการ ด้วยการปรับค่า D ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีนีได้นิยามความหมายของ ΔV ในรูปของภาษา “Negative: N”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ซึ่งหมายถึง $V_O > V_{ref}$, $V_O = V_{ref}$ และ $V_O < V_{ref}$ ตามลำดับ ในส่วนของ m_{iL1} ถูกพิจารณาให้อยู่ในรูปของภาษา “Negative Large: NL”, “Negative Medium: NM”, “Zero: Z”, “Positive Medium: PM” และ “Positive Large: PL” รายละเอียดตัวแปรทางภาษานั้นจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2.1 ฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function)

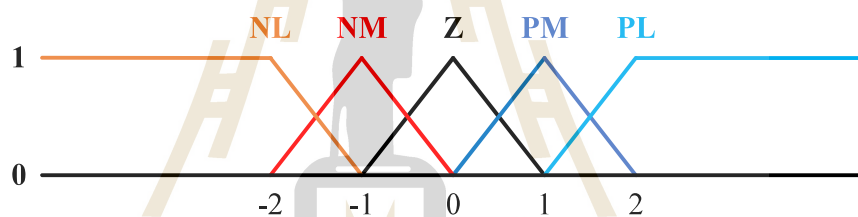
จากพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกระหว่างฟัซซีเซตของค่า ΔV และ m_{iL1} ที่ถูกนอร์มัลไลซ์แล้วให้อยู่ในขอบเขตที่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

สำหรับฟังก์ชันสมาชิกของ $\Delta V/V_{ref}$ และ m_{iL1}/m_{ref} ใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบสามเหลี่ยม (Triangular) และรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) อีกทั้งยังสามารถออกแบบให้มีขอบเขตระหว่างเซตที่มีการทับซ้อนแสดงด้วยเส้นตรงที่มีความชัน ซึ่งทำให้ค่าของตัวแปรสามารถมีค่าความเป็นสมาชิกทับซ้อนระหว่างสองเซตได้ ฟังก์ชันสมาชิกนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ระบบฟัซซี

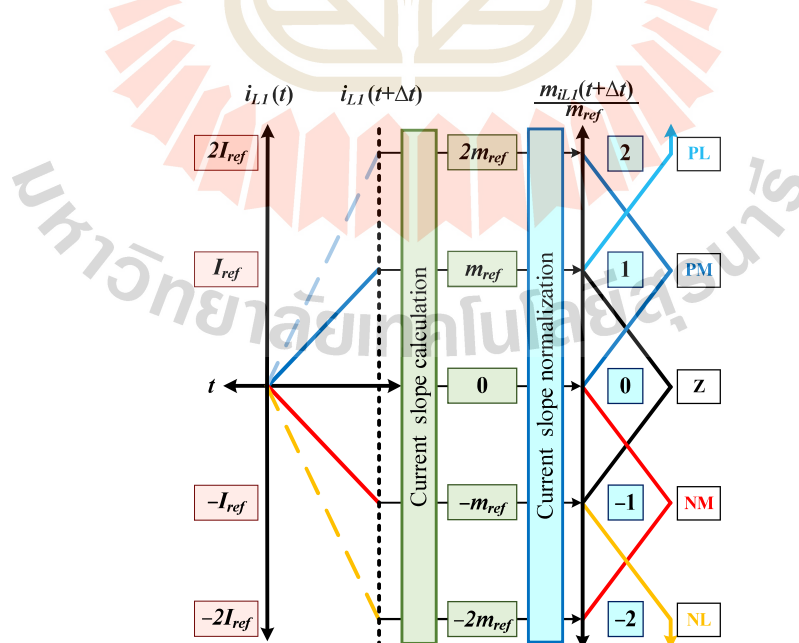
ลอจิกสามารถจำลองความรู้จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานต่าง ๆ ของวงจร ในการออกแบบ ขอบเขตระหว่างเซตจะพิจารณาวจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีแหล่งจ่าย ไฟฟ้า 20V และต้องการแรงดันเอาต์พุตเป็น 400V สำหรับโหลดตัวต้านทาน 1600Ω ซึ่งจะได้ กำลังไฟฟ้าเป็น 100W อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน ซึ่งจุดการทำงานที่เปลี่ยนไปนั้น ส่งผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตให้เปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันสมาชิกนอร์มัลไลซ์ของความผิดพลาดของแรงดัน ($\Delta V/V_{ref}$)



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันสมาชิกนอร์มัลไลซ์ของความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (m_{IL1}/m_{ref})



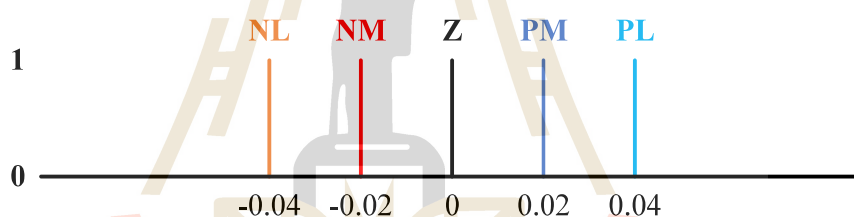
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ และฟังก์ชันสมาชิก m_{IL1}/m_{ref}

เมื่อพิจารณา i_{L1} ณ เวลาใด ๆ สามารถหาความสัมพันธ์ร่วมกับฟังก์ชันสมาชิกของ m_{iL1}/m_{ref} ในช่วง Δt ที่พิจารณา ร่วมกับค่า I_{ref} ในสมการที่ (4.4) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 5 กรณี ดังนี้

- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = 2I_{ref}$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = 2$ ที่เป็นสมาชิกของเซต PL
- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = I_{ref}$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = 1$ ที่เป็นสมาชิกของเซต PM
- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = 0$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = 0$ ที่เป็นสมาชิกของเซต Z
- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = -I_{ref}$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = -1$ ที่เป็นสมาชิกของเซต NM
- หาก $i_{L1}(t+\Delta t) - i_{L1}(t) = -2I_{ref}$ จะได้ $m_{iL1}/m_{ref} = -2$ ที่เป็นสมาชิกของเซต NL

จากความสัมพันธ์ของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ และฟังก์ชันสมาชิก m_{iL1}/m_{ref} แสดงได้ดังรูปที่ 4.6

ส่วนฟังก์ชันสมาชิกของ ΔD จะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นค่าคงที่เส้นตรงทอน ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นรูปแบบการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.7 ฟังก์ชันสมาชิกของการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ (ΔD)

4.2.2 ตัวแปรภาษา (Linguistic variable)

ระบบฟัซซีลอจิกประกอบไปด้วยฟัซซีเซตที่ทำหน้าที่ระบุค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรภายในระบบ จะสังเกตได้ว่าฟัซซีเซตประกอบไปด้วยตัวแปรภาษา (Linguistic variable) ตัวแปรดังกล่าวสามารถเรียกว่าเป็นตัวแปรฟัซซี ตัวแปรฟัซซีจะให้ค่าเป็นคำพูดที่มีความหมายตามที่ต้องการที่เป็นภาษาคำพูดของมนุษย์ ไม่ใช่คอมพิวเตอร์ หรือเครื่องจักร ดังนั้นระบบฟัซซีลอจิกจึงเป็นระบบที่จำลองการสื่อสารของมนุษย์ เช่น ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert system) มีการใช้ตัวแปรภาษาในการกำหนดกฎเกณฑ์ภายในระบบ

จากโครงสร้างการควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อปริมาณในระบบมีการเปลี่ยนแปลง ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในส่วนที่เป็นฟัซซีจะต้องมีการควบคุมให้มีการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมด้วย โดยตัวแปรที่ใช้สำหรับคำสั่งของระบบคือค่า ΔV และ m_{iL1} หลังจากนั้นอินพุตดังกล่าวจะถูกนอร์มัลไลซ์ให้อยู่ในขอบเขตที่

ต้องการก่อนเข้าสู่กระบวนการฟัซซี ดังนั้นระบบในที่นี่จึงมี 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุตที่เป็น ΔD แสดงในตารางที่ 4.1 โดยตัวแปรภาษา และค่าเชิงภาษามีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรภาษาของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ความหมาย	ตัวแปรภาษา	ความหมายตัวแปร
อินพุตที่ 1	$\Delta V/V_{ref}$	ค่าออร์มัลไลซ์ของ ความผิดพลาดของ แรงดัน	Negative: N Zero: Z Positive: P	ลบ ศูนย์ บวก
อินพุตที่ 2	m_{IL1}/m_{ref}	ค่ามัลไลซ์ของ ความชันกระแสที่ ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนำตัวที่ 1	Negative Large: NL Negative Medium: NM Zero: Z Positive Medium: PM Positive Large: PL	ลบมาก ลบปานกลาง ศูนย์ บวกปานกลาง บวกมาก
เอาต์พุต	ΔD	การเปลี่ยนแปลง ของค่าวัฏจักร หน้าที่สวิตช์	Negative Large: NL Negative Medium: NM Zero: Z Positive Medium: PM Positive Large: PL	ลบมาก ลบปานกลาง ศูนย์ บวกปานกลาง บวกมาก

4.2.3 กฎของฟัซซี (Fuzzy Rule)

กฎของฟัซซีเป็นวิธีการนำเอาความเข้าใจพฤติกรรมการทำงานของวงจรจากผู้สังเกตการณ์มาออกแบบให้อยู่ในระบบฟัซซีลอจิก กฎของฟัซซีประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือส่วนถ้า (IF) และส่วนแล้ว (THEN) เมื่อค่าเงื่อนไขใน IF เป็นจริง ส่วน THEN จะถูกประเมิน ในทฤษฎีฟัซซี ค่าเงื่อนไขใน IF จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน THEN จะถูกประเมินค่าด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิก ซึ่งจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับนั้น ๆ ด้วย ค่าเงื่อนไขในส่วนของ IF ยังสามารถมีได้หลายค่าเช่นเดียวกันกับส่วน THEN ทุกเงื่อนไขในส่วน IF จะถูกประเมินพร้อม ๆ กัน และรวมกันด้วยปฏิบัติการทางเซต โดยปกติมักจะจำกัดจำนวนค่าเงื่อนไขในระบบไม่ให้มีมากเกินไป โดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้น การควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นซึ่งมี

สองอินพุต ได้แก่ $\Delta V/V_{ref}$ และ m_{iL1}/m_{ref} และเอาต์พุตคือ ΔD สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 รูปแบบการแสดงกฎของฟัซซีดังกล่าวเรียกว่าหน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ (Fuzzy associative memory) ซึ่งการออกแบบกฎของฟัซซีระหว่างตัวแปรทั้ง 3 มีดังนี้

1 st	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PL$	THEN $\Delta D = NL$
2 nd	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PM$	THEN $\Delta D = NL$
3 rd	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = Z$	THEN $\Delta D = NM$
4 th	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NM$	THEN $\Delta D = Z$
5 th	IF $\Delta V/V_{ref} = N$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NL$	THEN $\Delta D = PM$
6 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PL$	THEN $\Delta D = NL$
7 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PM$	THEN $\Delta D = NM$
8 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = Z$	THEN $\Delta D = Z$
9 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NM$	THEN $\Delta D = PM$
10 th	IF $\Delta V/V_{ref} = Z$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NL$	THEN $\Delta D = PL$
11 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PL$	THEN $\Delta D = NM$
12 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = PM$	THEN $\Delta D = Z$
13 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = Z$	THEN $\Delta D = PM$
14 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NM$	THEN $\Delta D = PL$
15 th	IF $\Delta V/V_{ref} = P$ AND $m_{iL1}/m_{ref} = NL$	THEN $\Delta D = PL$

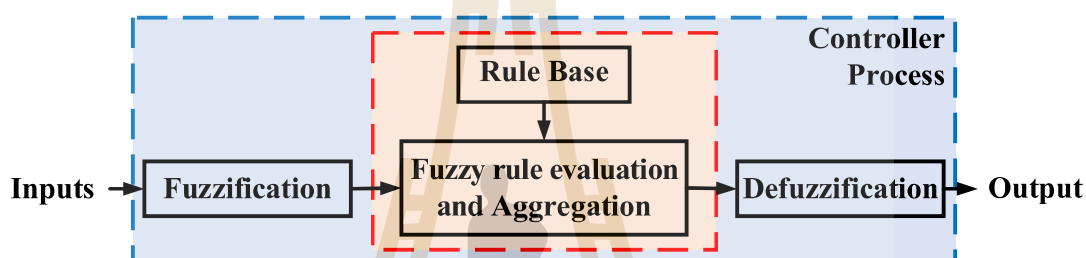
ตารางที่ 4.2 หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่พัฒนาขึ้น

$\Delta V/V_{ref}$ m_{iL1}/m_{ref}	N	Z	P
PL	NL	NL	NM
PM	NL	NM	Z
Z	NM	Z	PM
NM	Z	PM	PL
NL	PM	PL	PL

กฎฟัซซีทั้ง 15 กฎนี้จะใช้สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อกระบวนการควบคุม

4.2.4 การอนุมานฟัซซี (Fuzzy Inference)

การอนุมานฟัซซีสามารถนิยามว่าเป็นการส่งค่า (Mapping) จากค่าอินพุตของระบบไปยังเอาต์พุต โดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference) ถูกใช้สำหรับการควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การทำฟัซซี การประเมินกฎของฟัซซี การรวมกฎ และการทำดีฟัซซีดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของการควบคุมแบบฟัซซี

การทำฟัซซี (Fuzzification) คือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัวแปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟัซซีจะต้องทำการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตดังกล่าวของตัวแปรอินพุต ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ในระบบ จะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข หลังจากนั้นแล้วค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่านั้น ๆ จะสามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิก การทำฟัซซีของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับกฎของฟัซซีด้วยเช่นกัน เนื่องจากสำหรับอินพุตค่าหนึ่ง ๆ จะมีผลต่อกฎของฟัซซีบางข้อเท่านั้น

การควบคุม (Controller) ประกอบด้วยสองส่วนประกอบด้วยส่วนที่หนึ่งคือการการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้ในกฎของฟัซซี (Fuzzy rule evaluation) จะเป็นขั้นตอนถัดไปหลังจากคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งหมด ซึ่งจะเป็นส่วน IF จุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่าค่าเงื่อนไขจากอินพุตนั้นจะทำให้กฎใดต้องกระทำในส่วน THEN ต่อไป ซึ่งอาจจะมีกฎในเงื่อนไขดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อม ๆ กัน เนื่องจากมีอินพุตมากกว่าหนึ่ง เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่าด้วยตัวกระทำของฟัซซีเซต เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่าส่วน THEN ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในขั้นตอนต่อไป ส่วนที่สองคือการรวมกฎ (Aggregation) เป็นกระบวนการหลังจากกฎ

ต่าง ๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า หรือปรับขนาดทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต การรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน ในขั้นตอนต่อไปจะนำผลการรวมกฎนี้ไปแปลงเป็นค่าตัวเลขเดียวเพื่อนำเอาไปใช้ในการประมวลผลต่อไป

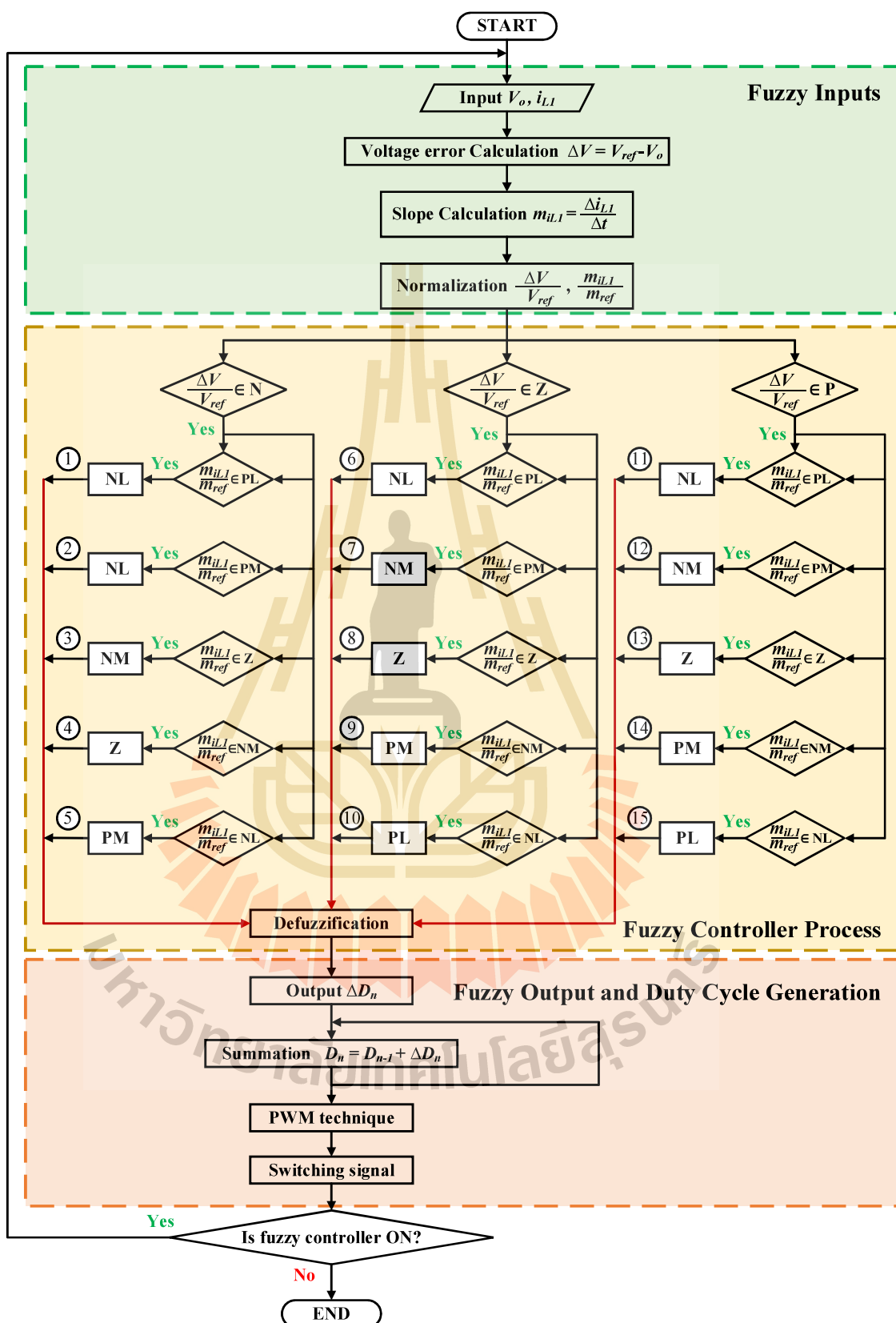
การทำดีฟัซซี (Defuzzification) จากขั้นตอนแรกมาจนถึงขั้นตอนนี้ ค่าต่าง ๆ ในระบบเป็นค่าฟัซซี ไม่ว่าจะเป็นอินพุต กฎต่าง ๆ หรือเอาต์พุต ค่าของเอาต์พุตจะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้จริง ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถเป็นค่าฟัซซีได้ เพราะค่าฟัซซีจะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซีเท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายจากเอาต์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน (Crisp value) การทำดีฟัซซีคือขั้นตอนในการแปลงค่าจากผลการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน

สำหรับการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference) ค่าเอาต์พุตของแต่ละกฎจะเป็นเส้นตรงโทน ดังรูปที่ 4.7 ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซีนี้เรียกว่าค่าน้ำหนักเฉลี่ย (Weighted average: WA) ดังสมการที่ (4.6)

$$\Delta D = \frac{\sum_{i=1}^N y_i u_i}{\sum_{i=1}^N u_i} \quad (4.6)$$

โดยที่ y_i คือ เอาต์พุตจากแต่ละกฎ
 u_i คือ เอาต์พุตของแต่ละสมาชิกฟังก์ชัน
 N คือ จำนวนกฎ

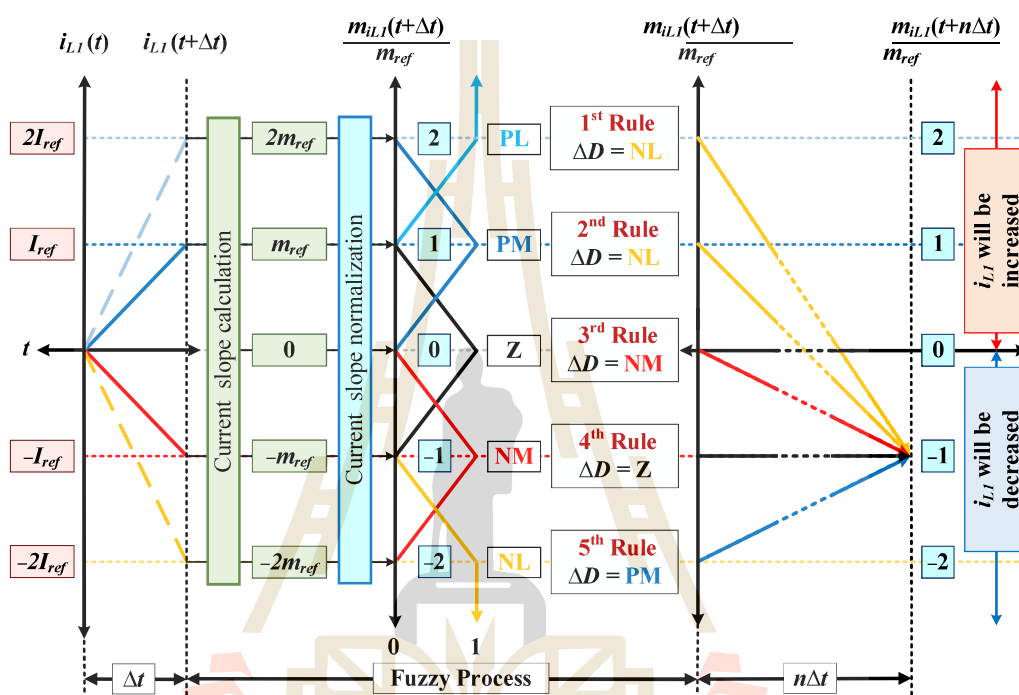
จากการออกแบบการควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่กล่าวมาข้างต้น สามารถอธิบายด้วยโครงสร้างการควบคุมฟัซซีดังรูปที่ 4.9 โดยค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ในปัจจุบัน (D_n) จะได้จากการนำค่าวัฏจักรหน้าที่ก่อนหน้า (D_{n-1}) บวกกับการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ปัจจุบัน (ΔD)



รูปที่ 4.9 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

4.2.5 กระบวนการควบคุม (Control Process)

จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถออกแบบการควบคุมฟัซซี โดยพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกของ $\Delta V/V_{ref}$ อีกทั้งหน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.2 สามารถแยกกระบวนการควบคุมออกได้เป็น 3 กรณี ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

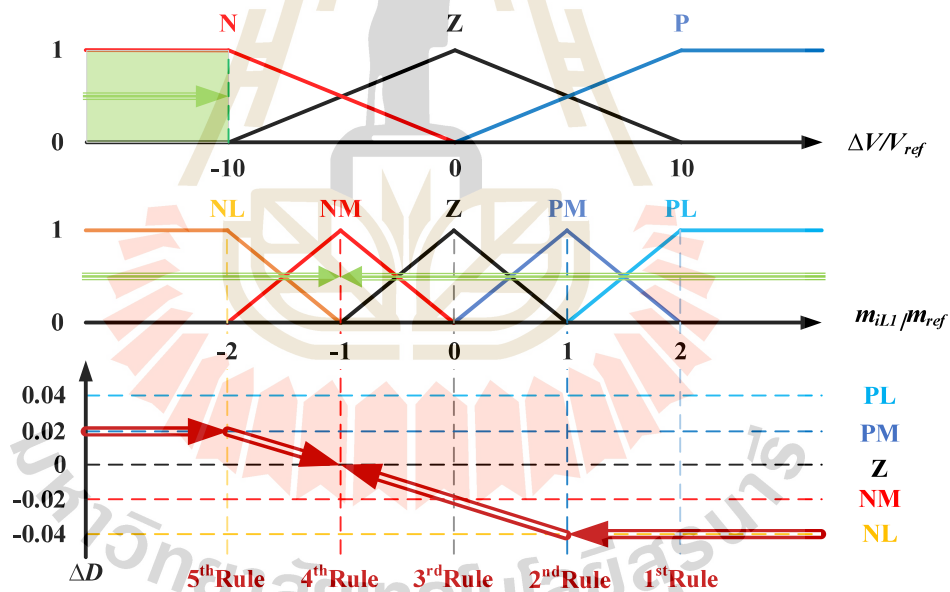


รูปที่ 4.10 กระบวนการฟัซซีของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ กรณีที่ค่า $\Delta V/V_{ref} \in N$

กรณีที่ 1 $\Delta V/V_{ref}$ เป็นสมาชิกของเซตลบ ($\Delta V/V_{ref} \in N$) ก็ต่อเมื่อ V_o มีค่ามากกว่า V_{ref} กระบวนการฟัซซีของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟัซซีข้อที่ 1 ถึงกฎที่ 5 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) กฎฟัซซีข้อที่ 1 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} เป็นบวกค่ามากอยู่ในเซต PL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบมาก (NL) เพื่อทำให้ค่า m_{iL1} ลดลงมากเข้าหา $-m_{ref}$
- 2) กฎฟัซซีข้อที่ 2 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบมาก (NL) เพื่อทำให้ค่า m_{iL1} ลดลงมากเข้าหา $-m_{ref}$

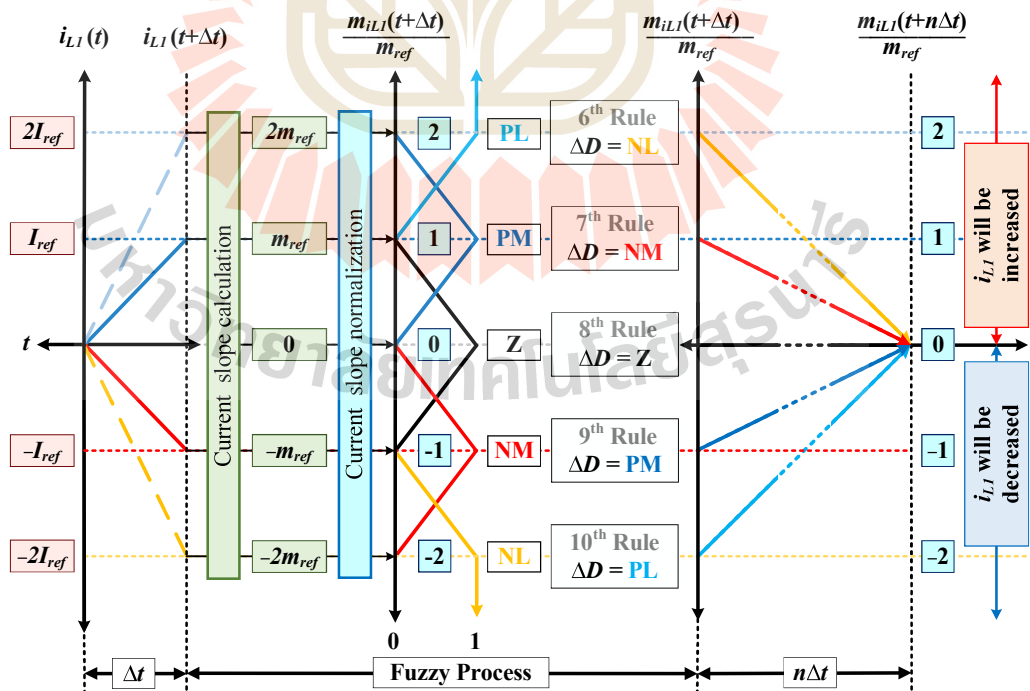
- 3) กฎฟuzzyข้อที่ 3 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าประมาณศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณาไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบปานกลาง (NM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} ลดลงไม่มากนักเข้าหา $-m_{ref}$
- 4) กฎฟuzzyข้อที่ 4 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบปานกลางอยู่ในเซต NM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องคงค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่เป็นศูนย์ (Z) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} มีค่าลบพอดีประมาณ $-m_{ref}$
- 5) กฎฟuzzyข้อที่ 5 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบมากอยู่ในเซต NL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกปานกลาง (PM) เพื่อจะทำให้ค่า m_{iL1} มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักเข้าหา $-m_{ref}$
- จะเห็นได้ว่าเมื่อ V_O มีค่ามากกว่า V_{ref} ส่งผลให้ตัวควบคุมฟuzzyจะสร้าง ΔD ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้ m_{iL1} มีค่าเข้าหา $-m_{ref}$ เพื่อให้ i_{L1} มีค่าลดลง ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้ V_O มีค่าลดลงเข้าหา V_{ref} โดยกระบวนการฟuzzyข้างต้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 และจากกระบวนการฟuzzyข้างต้นสามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD ในกรณี $\Delta V/V_{ref} \in N$

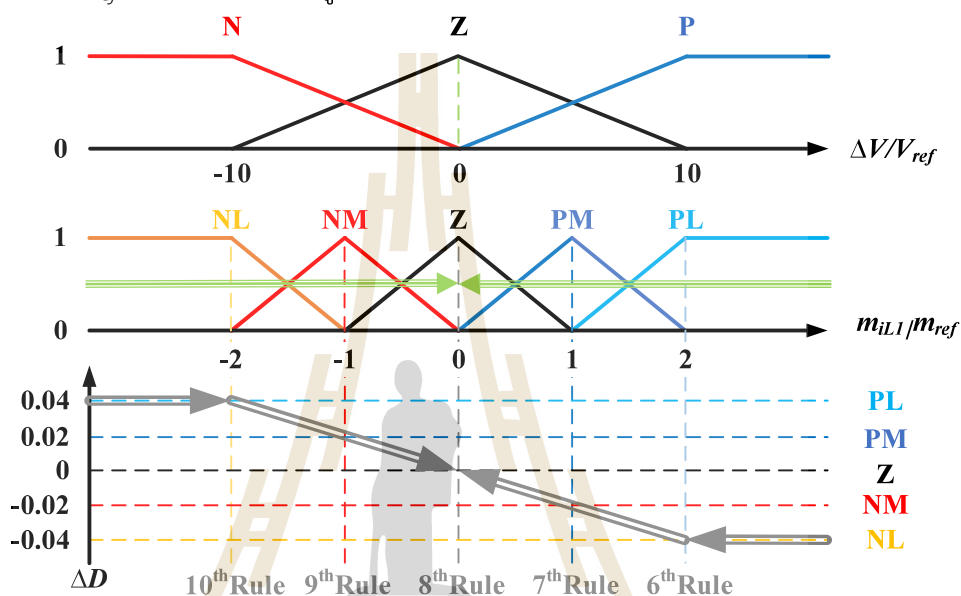
กรณีที่ 2 $\Delta V/V_{ref}$ เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($\Delta V/V_{ref} \in Z$) ก็ต่อเมื่อ V_O มีค่าประมาณ V_{ref} กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟuzzyข้อที่ 6 ถึงกฎที่ 10 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 6) กฎฟuzzyข้อที่ 6 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่ามากอยู่ในเซต PL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบมาก (NL) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} ลดลงมาก ๆ เข้าหาศูนย์
- 7) กฎฟuzzyข้อที่ 7 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบปานกลาง (NM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} ลดลงไม่มากนัก เข้าหาศูนย์
- 8) กฎฟuzzyข้อที่ 8 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าประมาณศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณาไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องคงค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่เป็นศูนย์ (Z) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} คงค่าที่ประมาณศูนย์
- 9) กฎฟuzzyข้อที่ 9 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบปานกลางอยู่ในเซต NM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกปานกลาง (PM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นไม่มากนักเข้าหาศูนย์
- 10) กฎฟuzzyข้อที่ 10 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบมากอยู่ในเซต NL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกมาก (PL) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นมากเข้าหาศูนย์



รูปที่ 4.12 กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ กรณีที่ค่า $\Delta V/V_{ref} \in Z$

จะเห็นได้ว่าเมื่อ V_O มีค่าประมาณ V_{ref} ส่งผลให้ตัวควบคุมฟuzzyจะสร้าง ΔD ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้ m_{iL1} มีค่าเข้าหาศูนย์ เพื่อให้ i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลง หลังจากนั้นจะคงค่ากระแส ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้ V_O มีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลง หลังจากนั้นจะคงค่าแรงดันที่ V_{ref} โดยกระบวนการฟuzzyข้างต้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และสามารถพิจารณาในรูปฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD แสดงดังรูปที่ 4.13



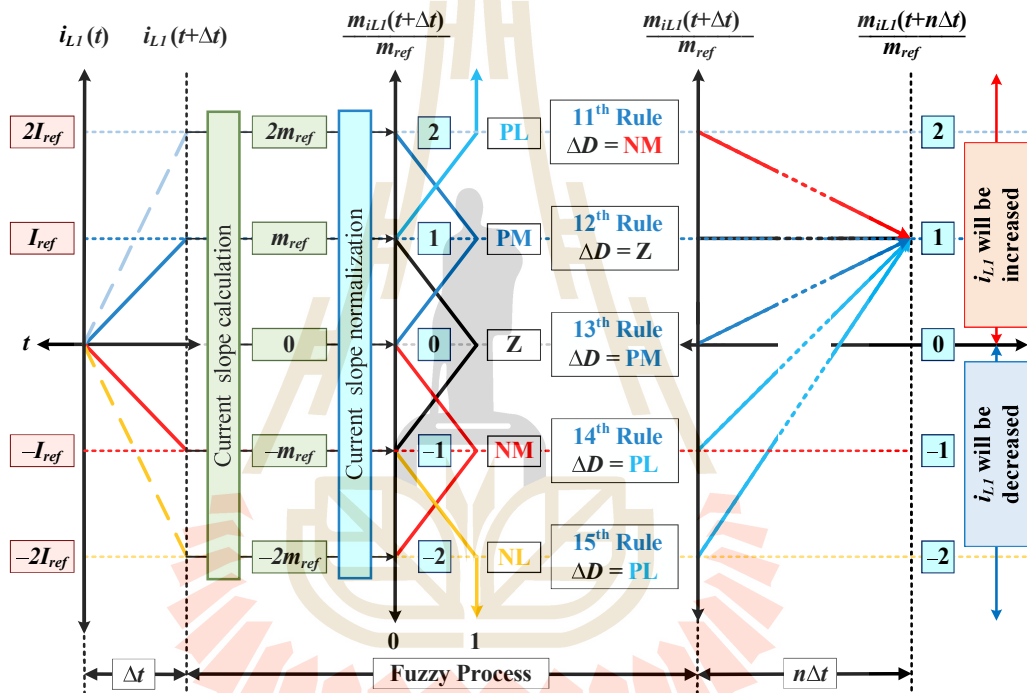
รูปที่ 4.13 ฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD ในกรณี $\Delta V/V_{ref} \in Z$

กรณีที่ 3 $\Delta V/V_{ref}$ เป็นสมาชิกของเซตบวก ($\Delta V/V_{ref} \in P$) ก็ต่อเมื่อ V_O มีค่าน้อยกว่า V_{ref} กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟuzzyข้อที่ 11 ถึงกฎที่ 15 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 11) กฎฟuzzyข้อที่ 11 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีบวกค่ามากอยู่ในเซต PL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องลดค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่ติดลบปานกลาง (NM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} ลดลงไม่มากนักเข้าหา m_{ref}
- 12) กฎฟuzzyข้อที่ 12 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังเพิ่มขึ้นสูงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องคงค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่เป็นศูนย์ (Z) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} คงค่าที่ m_{ref}
- 13) กฎฟuzzyข้อที่ 13 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าประมาณศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณาไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการ

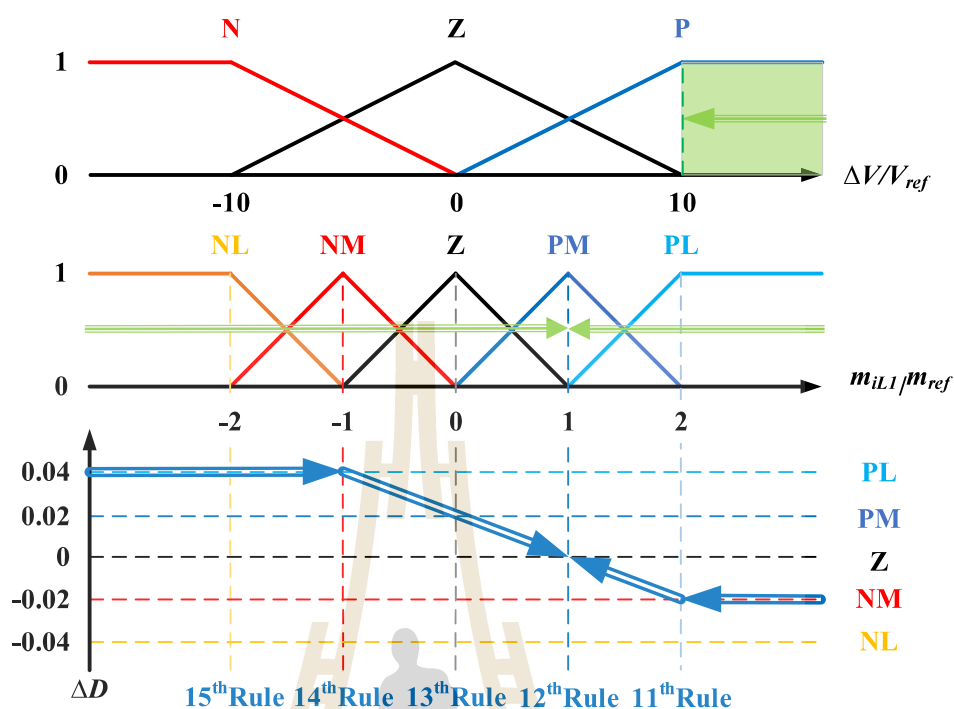
สร้าง ΔD ที่เป็นบวกปานกลาง (PM) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นไม่มากนักเข้าหา m_{ref}

- 14) กฎฟuzzyข้อที่ 14 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบปานกลางอยู่ในเซต NM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงไม่มากนัก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกมาก (PL) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นมากเข้าหา m_{ref}
- 15) กฎฟuzzyข้อที่ 15 เมื่อ m_{iL1}/m_{ref} มีค่าลบมากอยู่ในเซต NL หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณากำลังลดลงมาก ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzyต้องเพิ่มค่า D โดยการสร้าง ΔD ที่บวกมาก (PL) เพื่อจะทำให้ m_{iL1} เพิ่มขึ้นมากเข้าหา m_{ref}



รูปที่ 4.14 กระบวนการฟuzzyของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ กรณีที่ค่า $\Delta V/V_{ref} \in P$

จะเห็นได้ว่าเมื่อ V_o มีค่าน้อยกว่า V_{ref} ส่งผลให้ตัวควบคุมฟuzzyจะสร้าง ΔD ที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้ m_{iL1} มีค่าเข้าหา m_{ref} เพื่อให้ i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้ V_o มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าหา V_{ref} โดยกระบวนการฟuzzyข้างต้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และสามารถพิจารณาในรูปฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{iL1}/m_{ref} และ ΔD แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$, m_{IL1}/m_{ref} และ ΔD ในกรณี $\Delta V/V_{ref} \in P$

จากการออกแบบฟังก์ชันสมาชิก $\Delta V/V_{ref}$ ที่มีการทับซ้อนกันระหว่างเซต ดังนั้น $\Delta V/V_{ref}$ ที่ได้สามารถเป็นสมาชิกของ เซตลบ ร่วมกับ เซตศูนย์ ($\Delta V/V_{ref} \in N \& Z$) และเซตศูนย์ ร่วมกับ เซตบวก ($\Delta V/V_{ref} \in Z \& P$) อีกทั้งฟังก์ชันสมาชิก m_{IL1}/m_{ref} ที่มีการทับซ้อนกันระหว่างเซต เช่นกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่ค่าอินพุตทั้งสองจะเข้าเงื่อนไขกฎฟัซซีได้มากที่สุด 4 ข้อ อย่างไรก็ตามการทำให้ฟัซซีจะทำหน้าที่แปลงค่าจากผลการรวมกฎฟัซซีให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน นั่นคือ ΔD ที่เหมาะสม เพื่อควบคุมให้ V_O มีค่าเท่ากับ V_{ref} ในสถานะอยู่ตัว

จากการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจร นำไปสู่กระบวนการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นได้ดังตารางที่ 4.3

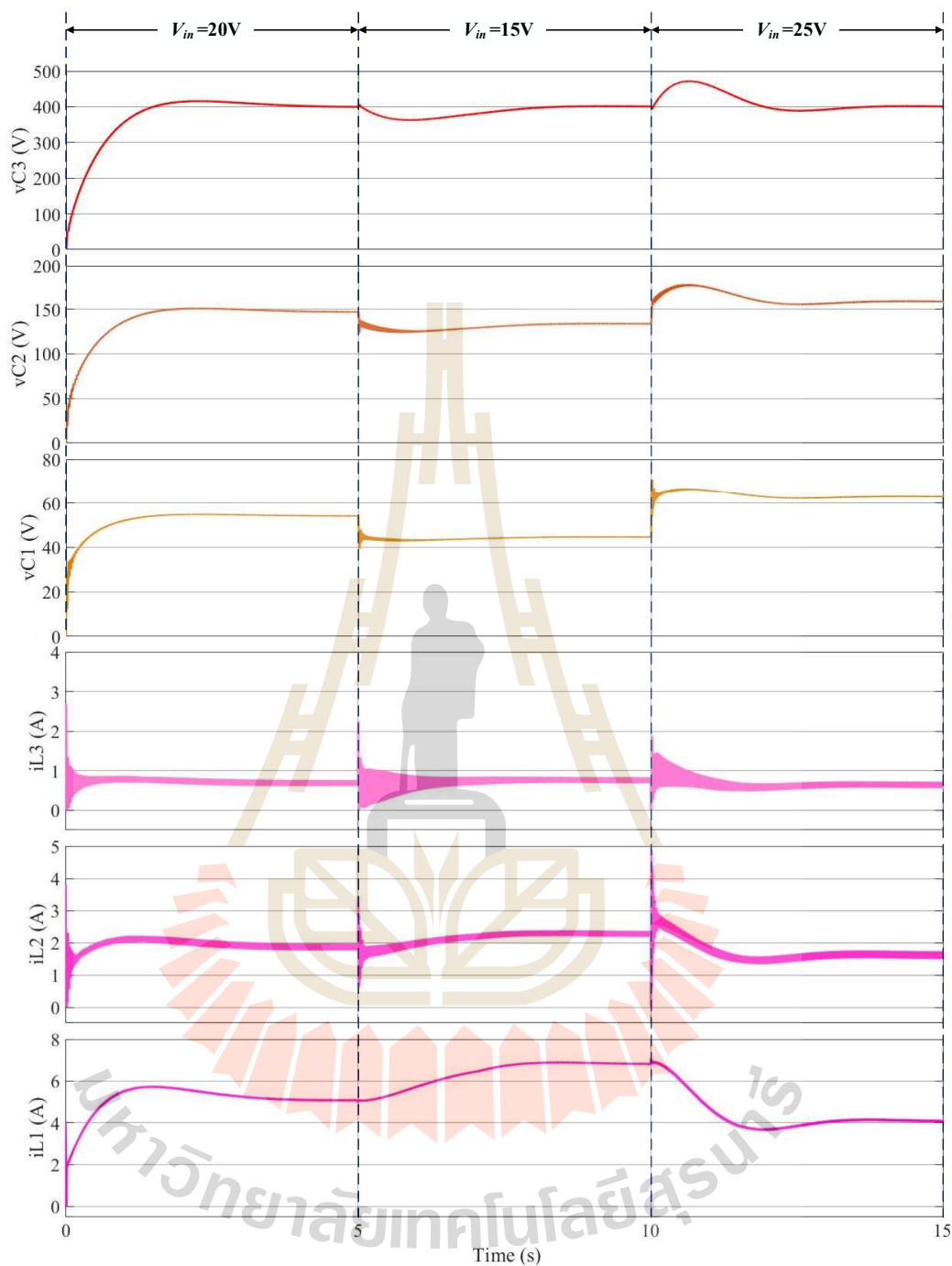
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
การเปลี่ยนแปลงของเวลา	Δt	500	μs
ความชันอ้างอิง	m_{ref}	100	A/s

4.3 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้น

จากการออกแบบการควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นดังที่อธิบายข้างต้น สามารถยืนยันประสิทธิภาพ ด้วยการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซี่ อาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK โดยพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์รวมเป็น 3 กรณี ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{in}) การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R)

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} เป็น 20V, 15V และ 25V ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{ref} ที่ 400V และ R ที่ 1600Ω ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.16 ในช่วงเริ่มต้นการทำงาน โดยที่มี V_{in} เป็น 20V จ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง สังเกตเห็นว่า V_o หรือ V_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400 V โดยใช้เวลาประมาณ 2s ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจะคงที่ประมาณ 5A, 1.85A และ 0.6875A ตามลำดับ หลังจากนั้น ณ เวลาที่ 5s แรงดัน V_{in} ลดลงจาก 20V เป็น 15V จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นว่า V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} มีค่าลดลง เนื่องจากการลดลงของ V_{in} หลังจากนั้น V_{C3} ถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ V_{ref} ที่ 400V โดยที่ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อคงค่ากำลังไฟฟ้าไว้ที่ 100W โดย i_{L1} มีค่าคงที่ประมาณ 6.67A ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 2.5s และ ณ เวลาที่ 10s แรงดัน V_{in} เพิ่มขึ้นจาก 15V เป็น 25V จะเห็นว่าหลังจากเปลี่ยนจุดการทำงาน แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการพุ่งเกิน หลังจากนั้น V_{C3} ถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ 400V ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าลดลงเพื่อคงค่ากำลังไฟฟ้าไว้ที่ 100W โดย i_{L1} มีค่าคงที่ประมาณ 4A ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 2s



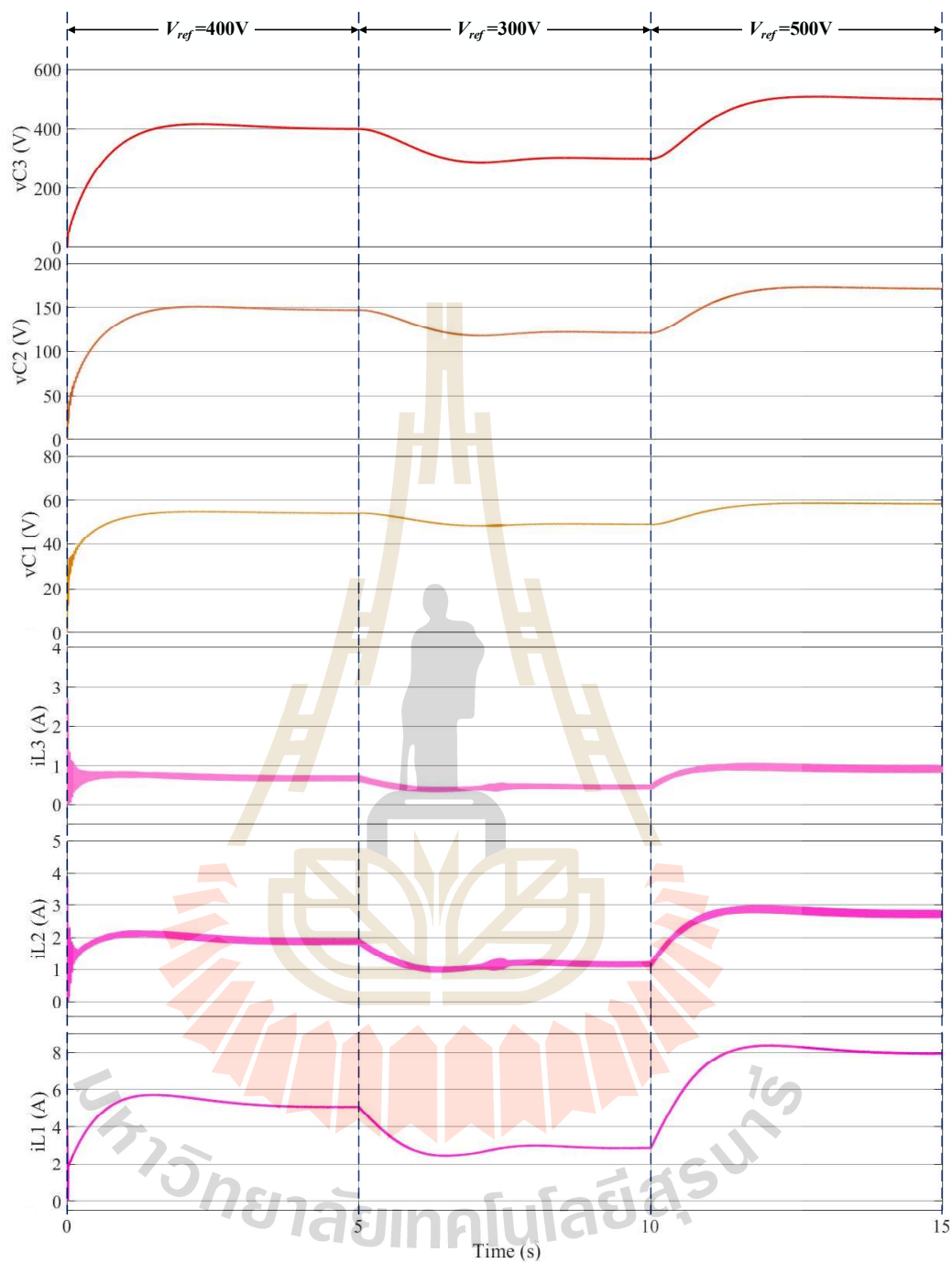
รูปที่ 4.16 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรณี
เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} เป็น 400V, 300V และ 500V
ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ R ที่ 1600Ω ผลการจำลอง

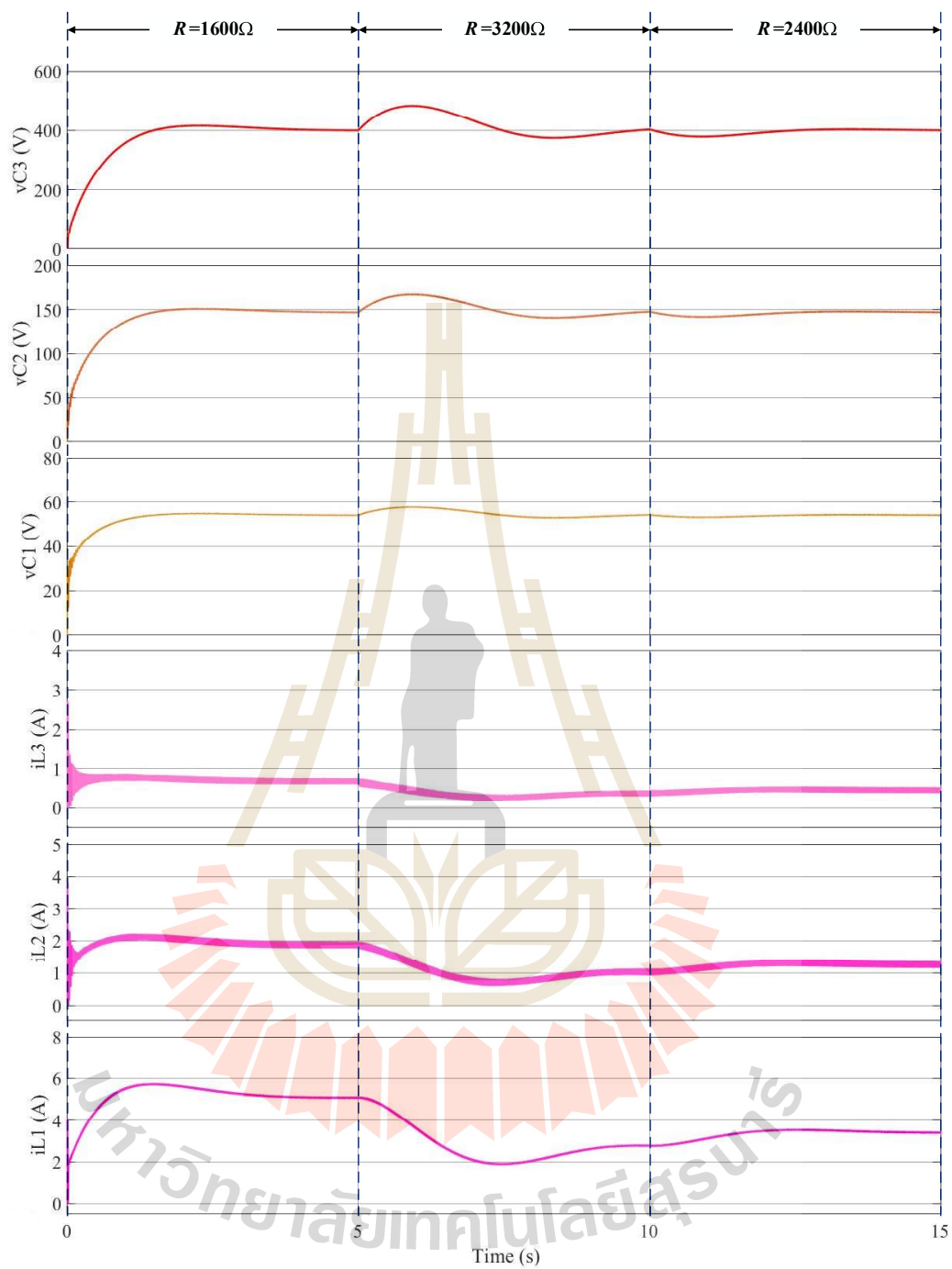
สถานการณ์แรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นการทำงาน เมื่อมี V_{in} เป็น 20V จ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า สังเกตเห็นได้ว่า V_O หรือ v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400V โดยใช้เวลาประมาณ 2s ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ และคงที่ประมาณ 5A, 1.85A และ 0.6875A ตามลำดับ หลังจากนั้น V_{ref} จะเปลี่ยนเป็น 300V และ 500V ณ เวลาที่ 5s และ 10s ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษา v_{C3} มีค่าตาม V_{ref} โดยที่ i_{L1} ถูกควบคุมให้มีความชันตาม m_{ref} โดยที่ไม่เกิดการฟุ้งเกิน และใช้เวลาเข้าที่ประมาณ 2s

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R เป็น 1600Ω, 3200Ω และ 2400Ω ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ V_{ref} ที่ 400V จากผลการจำลองสถานการณ์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.18 ในช่วงเริ่มต้นการทำงาน เมื่อมี V_{in} เป็น 20V จะเห็นได้ว่า V_O หรือ v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400 V โดยใช้เวลาประมาณ 2s ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ และคงที่ประมาณ 5A, 1.85A และ 0.6875A ตามลำดับ หลังจากนั้น R ถูกเปลี่ยนจาก 1600Ω เป็น 3200Ω ณ เวลาที่ 5s นั่นคือกำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจาก 100W เป็น 50W จะเห็นได้ว่าหลังจากเปลี่ยนจุดการทำงาน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} เกิดการฟุ้งเกิน และลดลง โดย v_{C3} ลดลงเข้าหา V_{ref} ที่ 400 โดยที่ i_{L1} ถูกควบคุมให้มีความชันตาม $-m_{ref}$ มีค่าคงที่ประมาณ 2.5A ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3s และ ณ เวลาที่ 10s R ถูกเปลี่ยนจาก 3200Ω เป็น 2400Ω จะเห็นได้ว่าหลังจากเปลี่ยนจุดการทำงาน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} ลดลงกะทันหัน หลังจากนั้นถูกควบคุมให้มีแรงดันเพิ่มขึ้นเท่ากับ V_{ref} ที่ 400V โดยที่ i_{L1} มีความชันตาม m_{ref} และมีค่าคงที่ประมาณ 3.33A ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 2s

จากผลการจำลองสถานการณ์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพของการควบคุมที่ดี โดยสามารถรักษา V_O หรือ v_{C3} มีค่าเท่ากับ V_{ref} โดยใช้เวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวอย่างรวดเร็ว และเกิดการฟุ้งเกินที่ไม่มากนัก



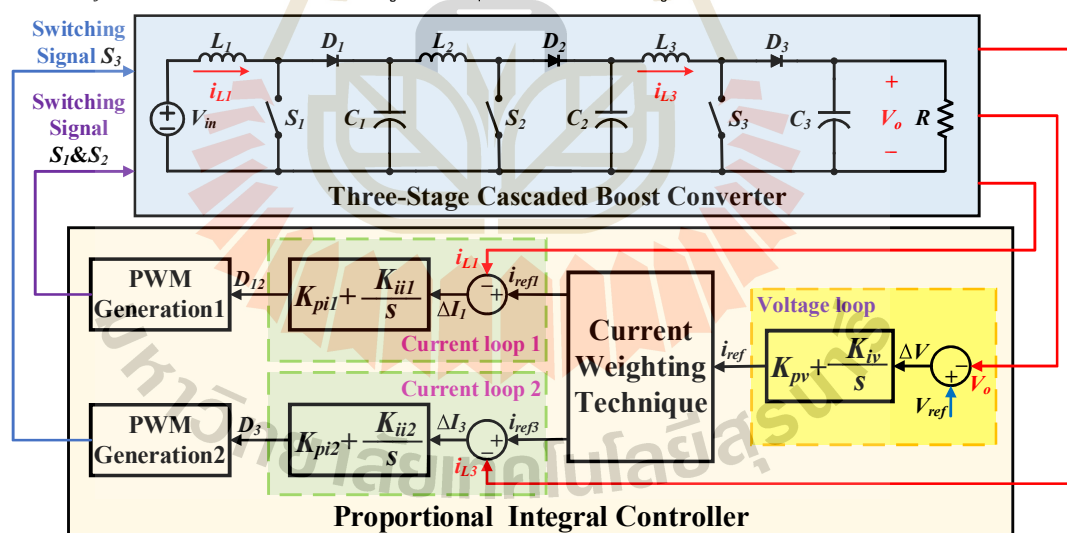
รูปที่ 4.17 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรณี
เปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 4.18 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรนี้
เปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

4.4 การออกแบบการควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

บทนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวควบคุมพีซีซีทีที่พัฒนาขึ้นกับตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมจะวัดค่ากระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต สำหรับใช้ในการควบคุมลูปกระแสและลูปแรงดัน ไม่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้มีการพัฒนาตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Kwan-on and Diewsurin, 2018) ดังนั้นจึงพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมพีซีซีทีที่พัฒนาขึ้นกับตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ การออกแบบการควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นอาศัยหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม โดยมีการตรวจวัดค่าแรงดัน V_o และตรวจวัดกระแส i_{L1} และ i_{L3} เพื่อส่งค่าที่ตรวจวัดได้ไปยังตัวควบคุมพีไอ ซึ่งประกอบด้วยลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตหนึ่งลูป (PI Voltage Loop) และลูปควบคุมกระแสสองลูป (PI Current Loops) เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสวิตช์ (S_1, S_2, S_3) ได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังอาศัยการถ่วงน้ำหนักกระแสเข้าช่วยปรับค่ากระแสอ้างอิง (i_{ref}) ให้มีค่าเหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป



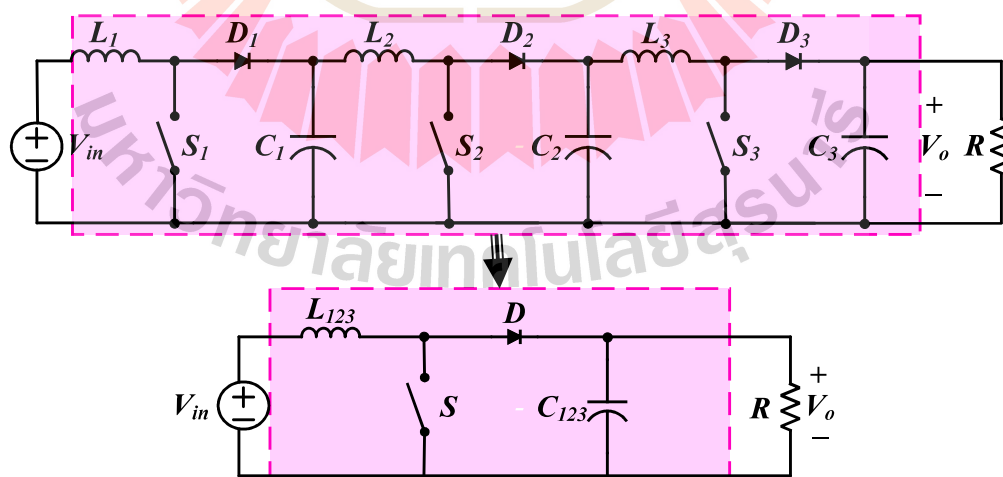
รูปที่ 4.19 โครงสร้างการควบคุมพีไอควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

กระบวนการควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเริ่มจากการตรวจวัด V_o เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ V_{ref} ก่อนนำเข้าสู่ลูปควบคุมแรงดัน ที่ได้รับการออกแบบ

จากพารามิเตอร์ (K_{pv} , K_{iv}) ของตัวควบคุมพีไอ หลังจากนั้นลูปควบคุมแรงดันจะสร้างสัญญาณ i_{ref} สำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสอง โดยจะอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current weighting technique) กระบวนการดังกล่าวจะทำหน้าที่ปรับแก้กระแสอ้างอิงให้มีค่าเหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสอง (i_{ref1} , i_{ref3}) หลังจากนั้นค่ากระแสอ้างอิงทั้งสองจะถูกส่งไปให้ลูปควบคุมกระแสทั้งสองเพื่อเปรียบเทียบกับค่า i_{L1} และ i_{L3} ที่ตรวจวัดได้ตามลำดับ โดยลูปควบคุมกระแสจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ตัวควบคุม (K_{p1} , K_{i1} , K_{p2} , K_{i2}) จากการออกแบบ โดยลูปควบคุมกระแสแต่ละลูปจะสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ หรือค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์เปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Signal) โดยลูปควบคุมกระแสที่หนึ่งที่มีอินพุตเป็นผลเปรียบเทียบระหว่าง i_{ref1} และ i_{L1} เอาต์พุตที่ได้เป็นสัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวที่ 1 และ 2 (S_1 , S_2) ส่วนลูปควบคุมกระแสที่สองที่มีอินพุตเป็นผลเปรียบเทียบระหว่างค่า i_{ref3} และ i_{L3} เอาต์พุตที่ได้เป็นสัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวที่ 3 (S_3) การออกแบบตัวควบคุมพีไอประกอบด้วย 2 ส่วน คือการออกแบบการควบคุมลูปแรงดัน และการออกแบบการควบคุมลูปกระแส ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.19

4.4.1 การออกแบบลูปควบคุมแรงดัน (PI Voltage Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นได้อาศัยการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม ดังรูปที่ 4.20 โดยการออกแบบตัวควบคุมพีไอจะอาศัยการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม



รูปที่ 4.20 การประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับลูปควบคุมแรงดัน

$$L_{123} = L_1 + L_2 + L_3 \quad (4.7)$$

$$C_{123} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (4.8)$$

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแสดังรูปที่ 3.13 จะได้ความชันแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุดังสมการที่ (3.22) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังสมการที่ (4.9)

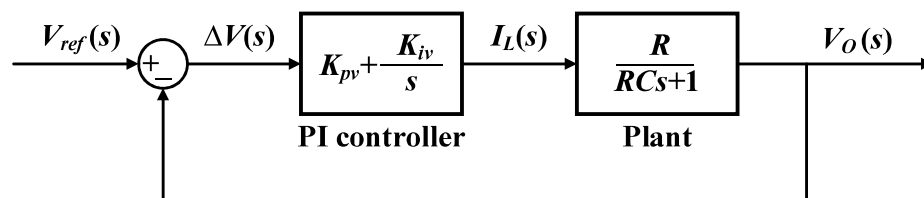
$$CsV_o s = I_L s - \frac{V_o s}{R} \quad (4.9)$$

ดังนั้นจะได้พลานต์ของระบบจากการหาฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (4.10) และตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันแสดงดังสมการที่ (4.11)

$$\frac{V_o s}{I_L s} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (4.10)$$

$$G_{CV} s = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \quad (4.11)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนข้างต้น สามารถอธิบายเป็นแผนภาพการควบคุมพีไอดังรูปที่ 4.21 และสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังสมการที่ (4.12)



รูปที่ 4.21 แผนภาพการควบคุมพีไอลูปควบคุมแรงดัน

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอในลูปควบคุมแรงดัน (K_{pv} , K_{iv}) จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ดังสมการที่ (4.12) กับพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (4.13) เมื่อ ζ คืออัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) และ ω_n คือค่าความถี่ธรรมชาติ โดยกำหนดให้ $\omega_n = 1/RC$ rad/s

$$\frac{V_O}{V_{ref}} \frac{s}{s} = \frac{K_{pv}Rs + K_{iv}Rs}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}R + 1}{RC} \right)s + \frac{K_{iv}R}{RC}} \quad (4.12)$$

$$G \frac{s}{s} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.13)$$

ดังนั้นจะได้สมการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ สำหรับลูปแรงดันดังสมการที่ (4.14) และ (4.15) ตามลำดับ

$$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - 1/R \quad (4.14)$$

$$K_{iv} = \omega_n^2 C \quad (4.15)$$

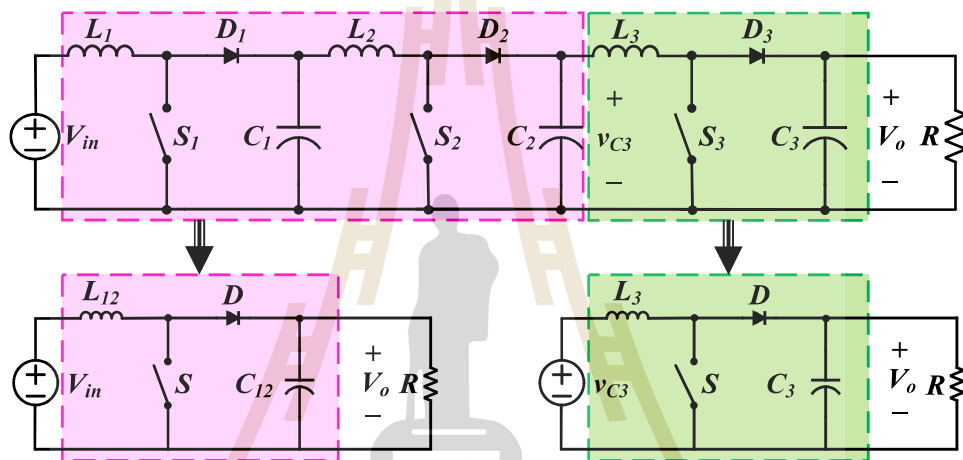
4.4.2 การออกแบบลูปควบคุมกระแส (PI Current Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นได้อาศัยการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมดังรูปที่ 4.22 ซึ่งประกอบด้วยสองลูปควบคุมกระแส โดยลูปควบคุมกระแสที่หนึ่งจะพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ขั้นที่หนึ่งและสอง โดยพิจารณาจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุตัวทั้งสองชั้นรวมกันดังสมการที่ (4.16) และ (4.17) ส่วนลูปควบคุมกระแสที่สองจะพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

แบบบัสต์ขั้นที่สาม โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุตัวที่สามเท่านั้น เมื่อแรงดันอินพุตคือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวที่สอง

$$L_{12} = L_1 + L_2 \quad (4.16)$$

$$C_{12} = C_1 + C_2 \quad (4.17)$$



รูปที่ 4.22 การประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับรูปควบคุมกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแสดังรูปที่ 3.12 จะได้ความชันของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (3.16) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังสมการที่ (4.18)

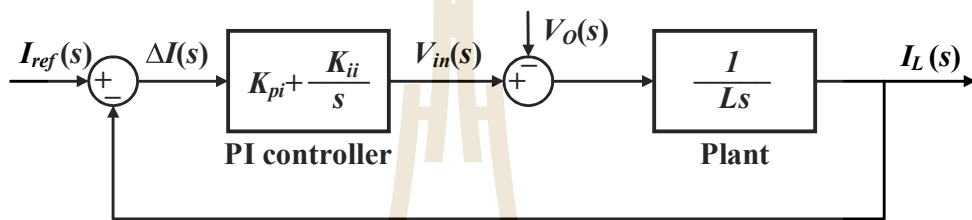
$$Ls I_L s = V_{in} s - V_o s \quad (4.18)$$

ดังนั้นจะได้พลานต์ของระบบจากการหาฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (4.19) และตัวควบคุมพีไอสำหรับรูปควบคุมกระแสแสดงดังสมการที่ (4.20)

$$\frac{V_o s}{I_L s} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (4.19)$$

$$G_{Cl} s = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \quad (4.20)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมกระแสที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนข้างต้น สามารถอธิบายเป็นแผนภาพการควบคุมพีไอดังรูปที่ 4.23 และสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังสมการที่ (4.21)



รูปที่ 4.23 แผนภาพลูปควบคุมกระแสของการควบคุมพีไอ

$$\frac{I_L s}{I_{ref} s} = \frac{K_{pi} V_{in} s + K_{ii} V_{in}}{s^2 + K_{pi} \frac{V_{in}}{L} s + K_{ii} \frac{V_{in}}{L}} \quad (4.21)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ลูปควบคุมแรงดัน (K_{pi} , K_{ii}) ของการควบคุมพีไอ จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ของโพลระหว่างพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ดังสมการที่ (4.12) กับพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (4.22) เมื่อ ω_{ni} คือค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมกระแส มีค่าเท่ากับ $\omega_{ni} = N\omega_n$ rad/s และ N คือจำนวนเท่าความถี่ธรรมชาติของลูปกระแสเมื่อเทียบกับลูปแรงดัน

$$G s = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \quad (4.22)$$

จะได้สมการออกแบบค่าพารามิเตอร์การควบคุมพีไอ สำหรับลูปแรงดันดังสมการที่ (4.23) และ (4.24) ตามลำดับ

$$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L}{V_{in}} \quad (4.23)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{in}} \quad (4.24)$$

ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์การควบคุมพีโอสำหรับสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยอาศัยการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับรูปแรงดันและลูกระแสดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.22 ตามลำดับ ดังนั้นจะสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีโอได้ดังตารางที่ 4.4

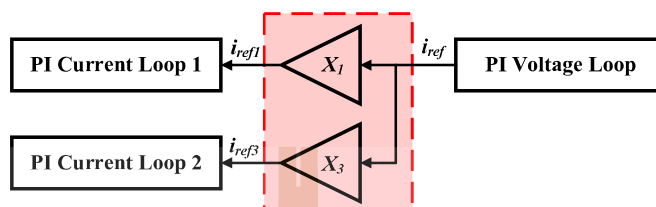
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น
$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - 1/R$	$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C_1 + C_3 + C_2 - 1/R$
$K_{iv} = \omega_n^2 C$	$K_{iv} = \omega_n^2 C_1 + C_3 + C_2$
$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L}{V_{in}}$	$K_{pi1} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L_1 + L_2}{V_{in}}$
	$K_{pi2} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L_3}{V_{C2}}$
$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{in}}$	$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L_1 + L_2}{V_{in}}$
	$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L_3}{V_{C2}}$

4.4.3 เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique)

การควบคุมพีโอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น ประกอบด้วยลูควบคุมกระแสสองลู แต่สัญญาณ i_{ref} ที่ได้จากลูควบคุมแรงดันยังมีค่าไม่เหมาะสม

สำหรับรูปควบคุมแรงดันทั้งสอง ดังนั้นจึงอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current weighting technique) เพื่อช่วยปรับแก้กระแสอ้างอิงให้มีค่าเหมาะสมสำหรับรูปควบคุมกระแสทั้งสอง (i_{ref1} , i_{ref3}) ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แผนภาพเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสของตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพรูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส โดยที่สัญญาณ i_{ref} จากรูปควบคุมแรงดันถูกปรับแก้กระแสโดยการคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักทั้งสอง (X_1 , X_3) เพื่อให้ได้ i_{ref1} และ i_{ref3} ดังสมการที่ (4.25) และ (4.26) ตามลำดับ และค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิงทั้งสองสามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (4.27) และ (4.28) ตามลำดับ

$$i_{ref1} = X_1 i_{ref} \quad (4.25)$$

$$i_{ref3} = X_3 i_{ref} \quad (4.26)$$

$$X_1 = \frac{i_{L1} + i_{L2}}{i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}} \quad (4.27)$$

$$X_3 = \frac{i_{L3}}{i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}} \quad (4.28)$$

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
D_1	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_1	0.6	—
D_2	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_2	0.6	—
D_3	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ S_3	0.6785	—

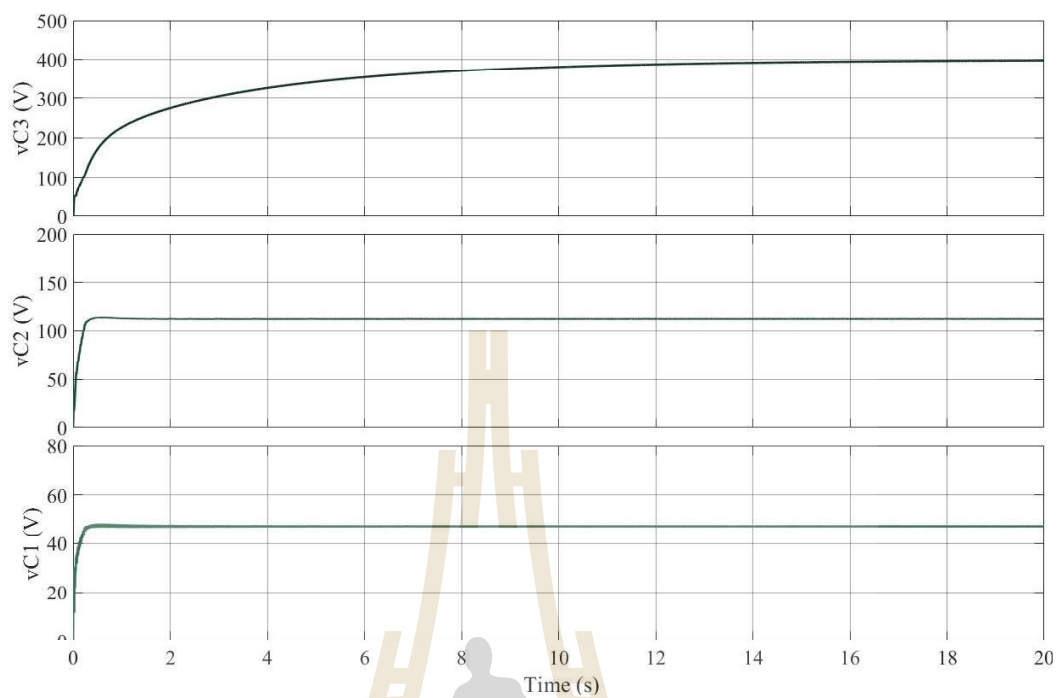
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (ต่อ)

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
i_{L1}	กระแสไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำ	5	A
i_{L2}		2	A
i_{L3}		0.8	A
V_{C1}	แรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ	50	V
V_{C2}		125	V
V_{C3}		400	V

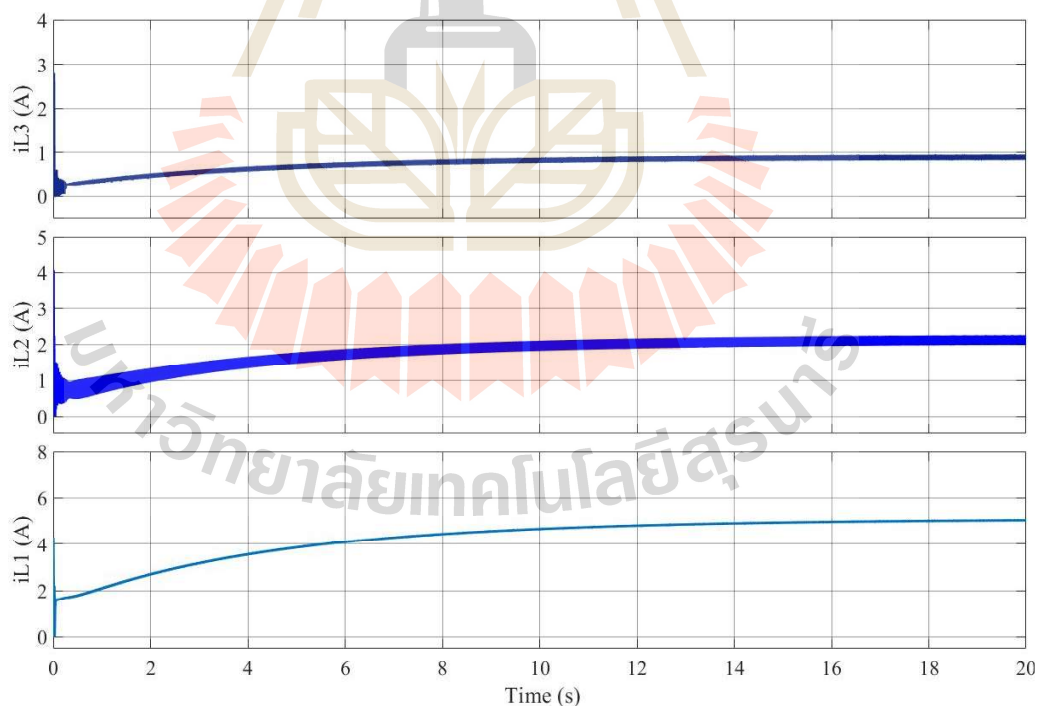
จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถคำนวณเพื่อออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทที่ 3 ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ รวมถึงค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบการควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสตารางที่ 4.5 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมพีไอทั้งลูปแรงดัน สองลูปกระแส และค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิง แสดงดังตารางที่ 4.6 โดยผลการจำลองสถานการณ์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

สัญลักษณ์	ขนาด	สัญลักษณ์	ขนาด
ζ	0.9	N	100
ω_n	2.083	ω_{ni}	208.33
K_{pv}	0.005	K_{pi1}	1.27
K_{iv}	0.0065	K_{ii1}	292.97
X_1	0.85	K_{pi2}	0.42
X_3	0.15	K_{ii2}	97.22



รูปที่ 4.25 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุภายใต้การควบคุมพีไอ



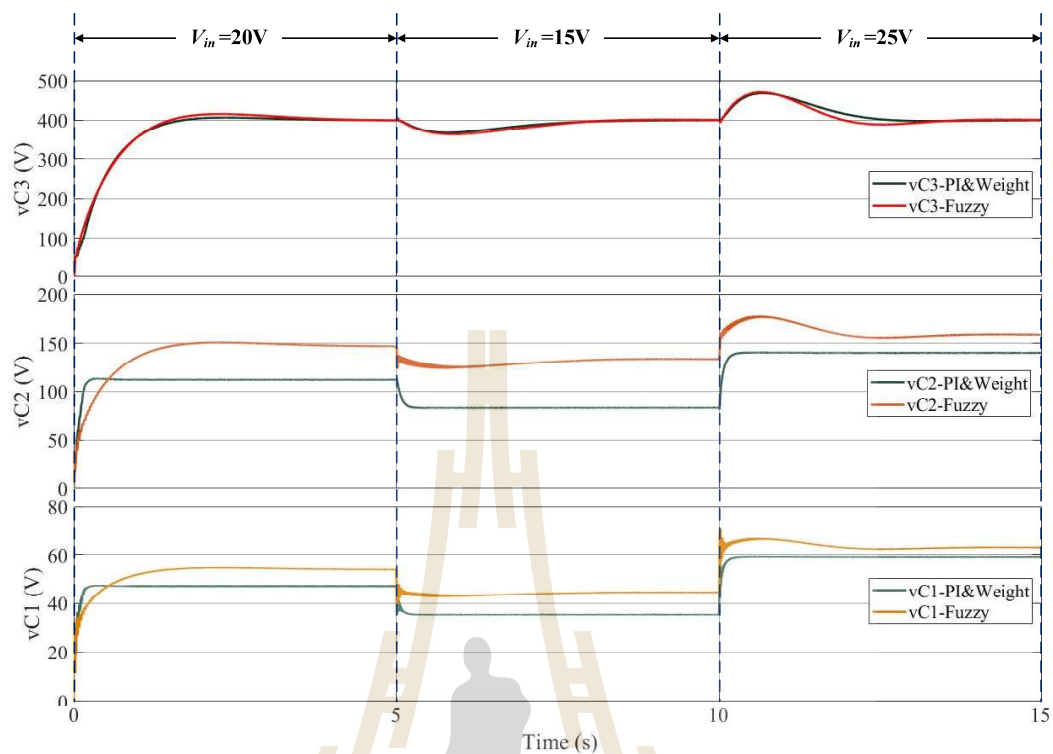
รูปที่ 4.26 กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำภายใต้การควบคุมพีไอ

จากผลการจำลองสถานการณ์รูปที่ 4.25 และ 4.26 จะเห็นได้ว่า V_o หรือ V_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400V โดยใช้เวลานานในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 14s เนื่องจากลูปควบคุมแรงดันของการควบคุมพีไอสร้าง i_{ref} ที่มีผลตอบสนองที่ช้า เมื่อพิจารณาโครงสร้างการควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า i_{ref} เป็นเอาต์พุตของลูปแรงดัน โดยที่ค่าพารามิเตอร์ K_{pv} และ K_v ถูกพิจารณาจากการประมาณวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นแบบบัสต์ดั้งเดิมที่แสดงในรูปที่ 4.20 ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ลูปควบคุมแรงดัน (K_{pv} , K_v) มีค่าไม่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้น จึงจำเป็นต้องทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ K_v ให้มีค่าเหมาะสม เพื่อให้ i_{ref} มีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น โดยทำการคูณ K_v ด้วย 5.5 จะทำให้ผลตอบสนองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่เร็ว และไม่เกิดการฟุ้งเกิน

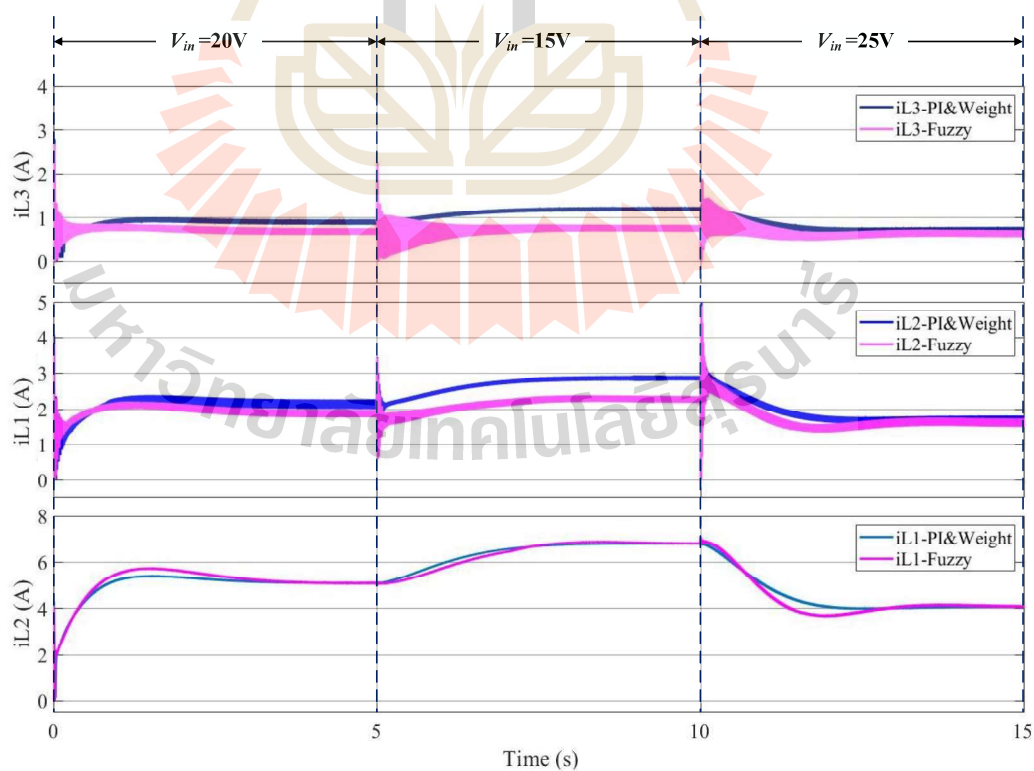
4.4.4 การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

จากการออกแบบการควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส และการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น จะดำเนินการเปรียบเทียบสมรรถนะด้วยการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมทั้งสอง โดยพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{in}) การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R)

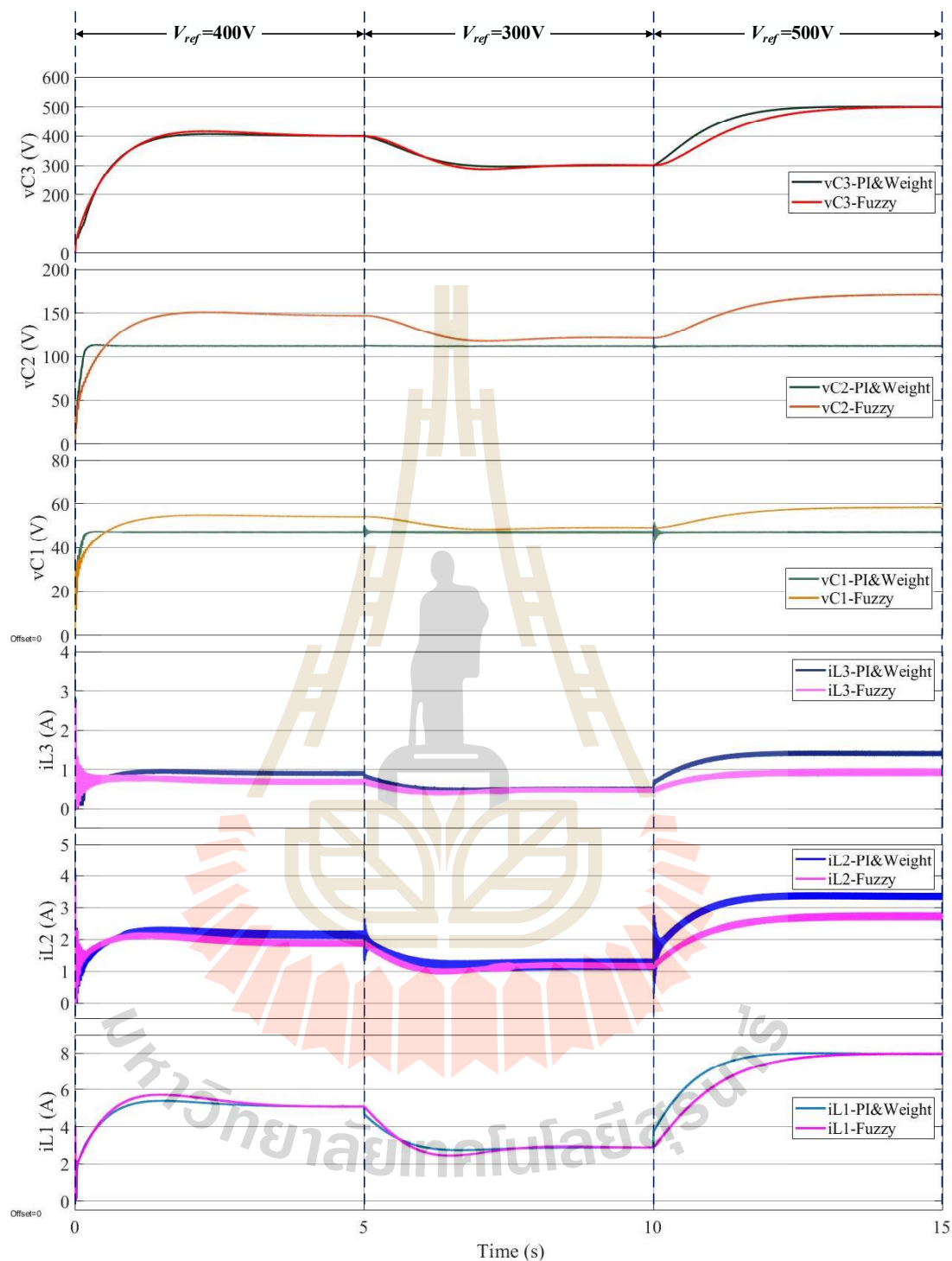
จากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมทั้งสองกรณีเปลี่ยนแปลง V_{in} จะเห็นได้ว่าทั้งตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถรักษาค่า V_o หรือ V_{C3} มีค่าคงที่เท่ากับ V_{ref} โดยใช้เวลาเข้าที่ใกล้เคียงกันประมาณ 2s หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของ V_{in} ที่ส่งผลให้เกิดการลดลง และฟุ้งเกินของแรงดันที่ตัวคร่อมตัวเก็บประจุ ทั้งนี้ V_{C3} มีค่าเท่ากับ V_{ref} ในสภาวะอยู่ตัวโดยใช้เวลาไม่เกิน 3s อย่างไรก็ตามค่า i_{L3} ภายใต้ตัวควบคุมฟuzzyมีการสั่นไกวมากกว่า เมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 4.27 ผลการจำลอง v_{C1} , v_{C2} , v_{C3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต



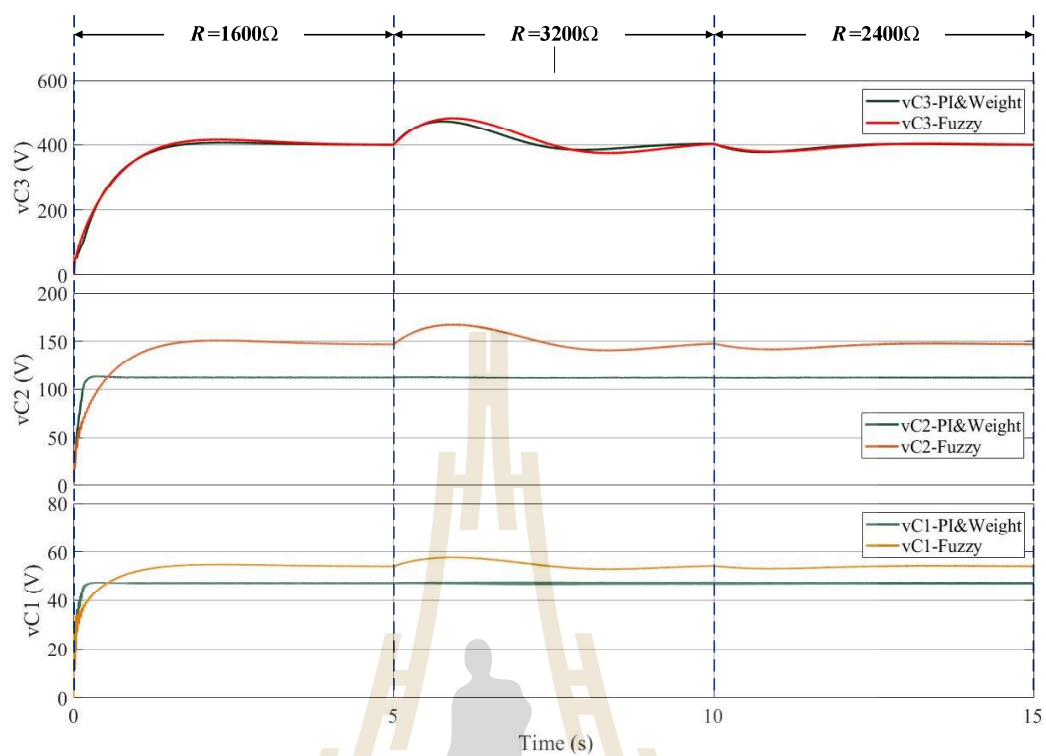
รูปที่ 4.28 ผลการจำลอง i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต



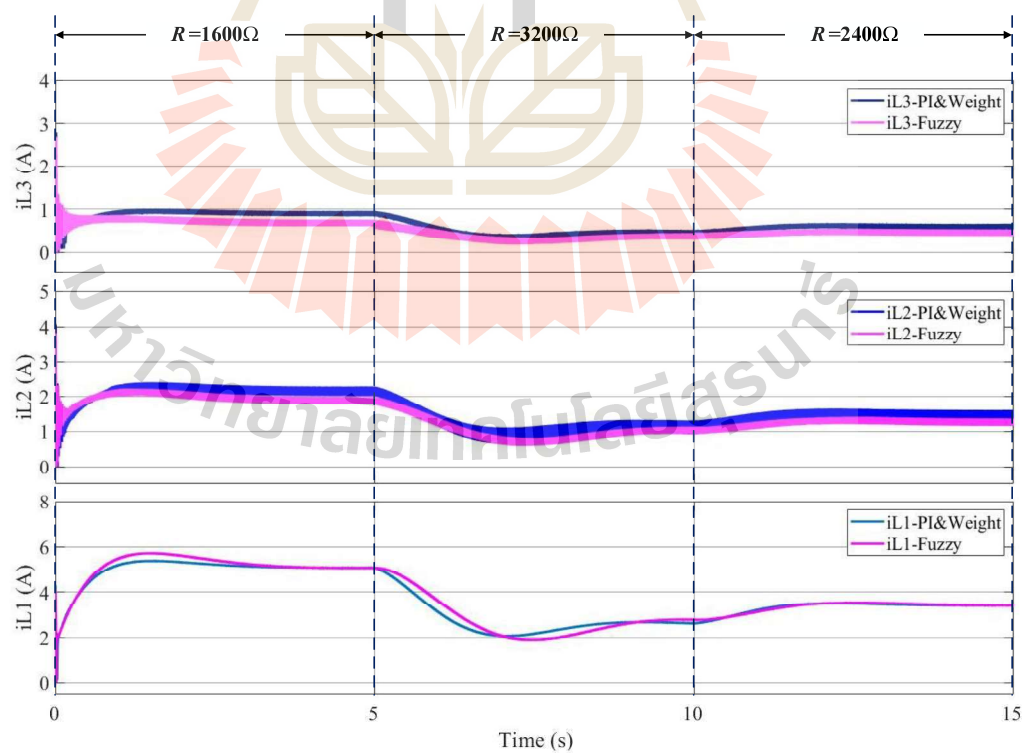
รูปที่ 4.29 ผลการจำลองแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำกรณีเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมทั้งสอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} เป็น 400V, 300V และ 500V ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ R ที่ 1600Ω แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.29 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีโอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถรักษา V_O หรือ v_{C3} มีค่าเท่ากับ V_{ref} โดยที่ไม่เกิดการพุ่งเกิน อีกทั้งยังใช้เวลาเข้าที่ไม่เกิน 3s อย่างไรก็ตามค่า v_{C3} และกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ภายใต้การควบคุมพีโอมีการสั่นไกวมากกว่า เมื่อเทียบกับการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนค่า V_{ref} จะส่งผลให้ขนาดค่า ΔV มีค่ามาก อีกทั้งยังส่งผลให้ค่า i_{ref} มีขนาดที่มากตามไปด้วย โดยเฉพาะในช่วงหลังเปลี่ยนจุดการทำงาน ส่งผลให้ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} เพิ่มขึ้น และลดลงกะทันหัน จากการเปลี่ยน V_{ref} ซึ่งเมื่อเทียบกับกระบวนการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถรักษา m_{iL1} ให้มีค่าตาม $-m_{ref}$ ในช่วงเวลา 0s ถึง 5s ส่วนช่วงเวลา 10s ถึง 15s ตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นจะควบคุมให้ m_{iL1} ให้มีค่าตาม m_{ref} เพื่อเพิ่มระดับกระแสและแรงดันตามลำดับ

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R เป็น 1600Ω, 3200Ω และ 2400Ω ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ V_{ref} ที่ 400V ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนจุดการทำงานโดยการเพิ่มค่า R จะส่งผลให้ v_{C3} เกิดการพุ่งเกิน และลดค่า R จะส่งผลให้ v_{C3} ลดลงในช่วงแรก จากนั้นตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีโอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถรักษา V_O หรือ v_{C3} มีค่าเท่ากับ V_{ref} โดยระยะเวลาเข้าที่นั้นจะขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่า R จาก 1600Ω เป็น 3200Ω นั่นคือการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจาก 100W เป็น 50W ส่งผลให้เวลาเข้าที่ผลตอบสนองของ v_{C3} ช้ากว่าเมื่อเทียบกับกรณีลดค่า R จาก 3200Ω เป็น 2400Ω นั่นคือการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจาก 50W เป็น 66.67W



รูปที่ 4.30 ผลการจำลอง v_{C1} , v_{C2} , v_{C3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน



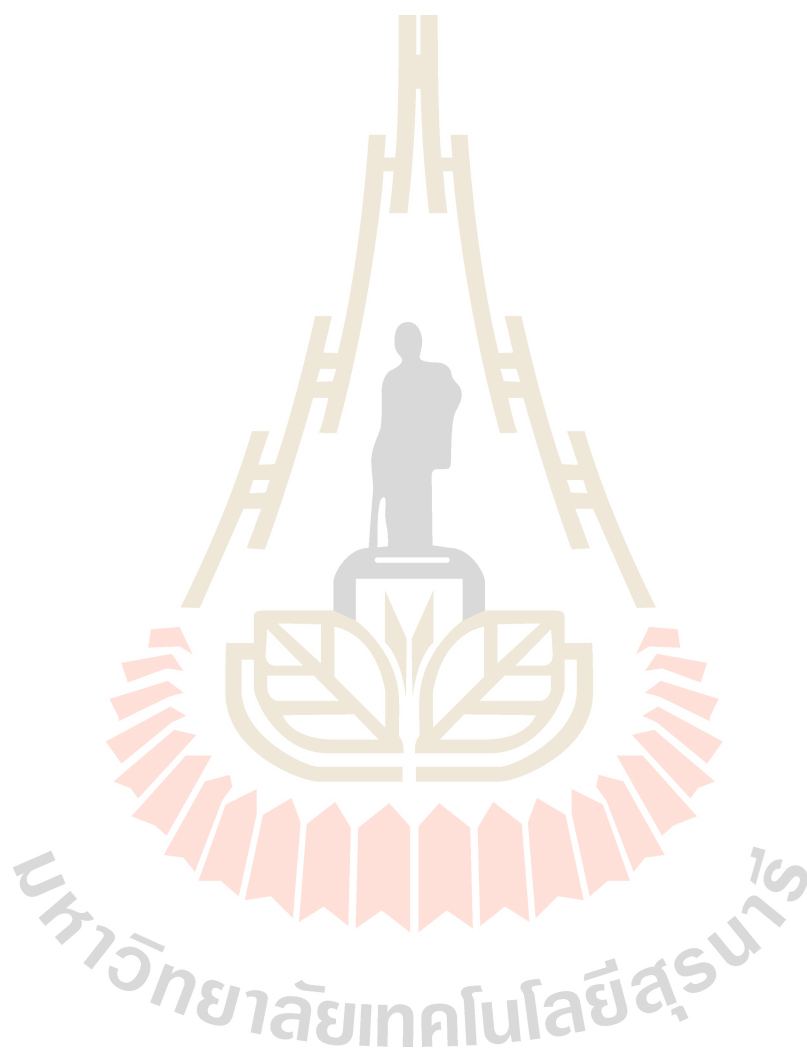
รูปที่ 4.31 ผลการจำลอง i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

จากผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมทั้งสองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีโอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถรักษา V_O หรือ v_{C3} มีค่าคงที่เท่ากับ V_{ref} โดยใช้เวลาเข้าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมพีโอจะอาศัยการประมาณค่าของค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม จึงส่งผลให้การออกแบบค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นนั้นไม่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการประมาณวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นแบบบัสต์ดั้งเดิม ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ลู่วควบคุมแรงดัน (K_{pv} , K_v) มีค่าไม่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ K_v ให้มีค่าเหมาะสม จนกระทั่งได้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว และไม่เกิดการฟุ้งเกิน

4.5 สรุป

การควบคุมฟuzzyสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นถูกนำเสนอในบทนี้ โดยที่ตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ รวมทั้งไม่มีการฟุ้งเกินของค่าแรงดัน และกระแส เพื่อยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น ได้อาศัยการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟuzzy พบว่าสามารถรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต แรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน อีกทั้งยังได้นำเสนอผลเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น กับตัวควบคุมพีโอ ผ่านการจำลองสถานการณ์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานเดียวกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าทั้งตัวควบคุมฟuzzyและตัวควบคุมพีโอที่ใช้เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ใกล้เคียงกับค่าแรงดันอ้างอิงอ้างอิง และมีเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การออกแบบตัวควบคุมพีโอต้องอาศัยการประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นแบบบัสต์ดั้งเดิม ทำให้ค่าพารามิเตอร์ลู่วควบคุมแรงดันที่ได้อาจไม่เหมาะสม ส่งผลให้การตอบสนองของระบบไม่ตึง จึงต้องมีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติม ในบทต่อไปจะนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบ

สวิตช์เปิดวงจร เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อให้วงจรดังกล่าวสามารถทำงานต่อในสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 5

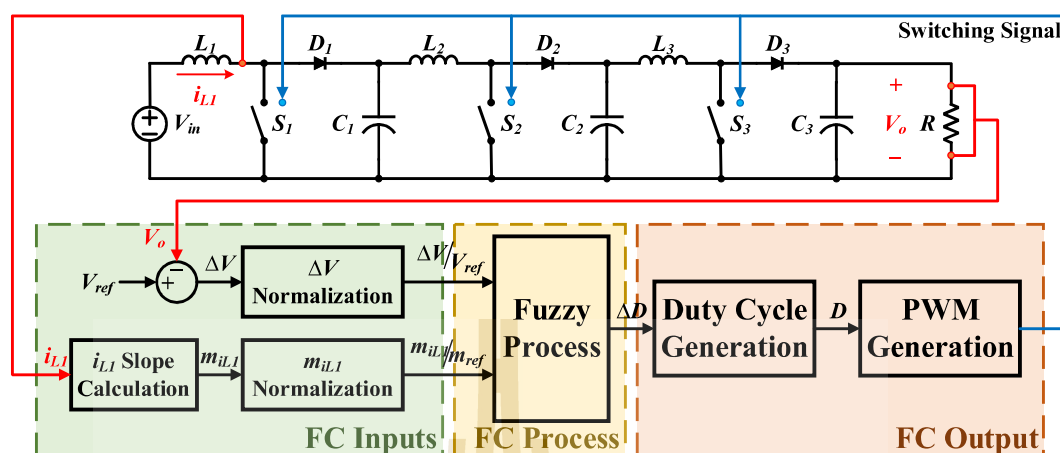
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อ ความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร

5.1 บทนำ

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น ที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 2 นั้น พบว่าวงจรดังกล่าวประกอบด้วยสวิตช์กำลังหลายตัว ในบทนี้จึงเป็นการศึกษาหาแนวทางการพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น ให้มีความคงทนต่อความผิดพลาดเมื่อสวิตช์เปิดวงจร โดยศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นทั้งในสภาวะปกติและมีความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น ดำเนินการสังเกตค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัว รวมถึงสัญญาณของการควบคุมฟลักซ์ที่พัฒนาขึ้น ทั้งในสภาวะปกติ และสภาวะเกิดความผิดพลาด เพื่อนำมาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดพลาด ต่อมาเป็นการนำเสนอการระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยสามารถระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง และสุดท้ายเป็นการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาด เพื่อให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

5.2 การศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น

การศึกษาพฤติกรรมของวงจรจะพิจารณาการทำงานของวงจรในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (Continuous conduction mode: CCM) ทั้งสภาวะปกติ และเมื่อเกิดความผิดพลาดในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ภายใต้ตัวควบคุมฟลักซ์ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้โครงสร้างดังรูปที่ 5.1 โดยจะอาศัยค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเรียงต่อกันสามชั้น และการควบคุมฟลักซ์ดังที่ได้ออกแบบไว้แล้วในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

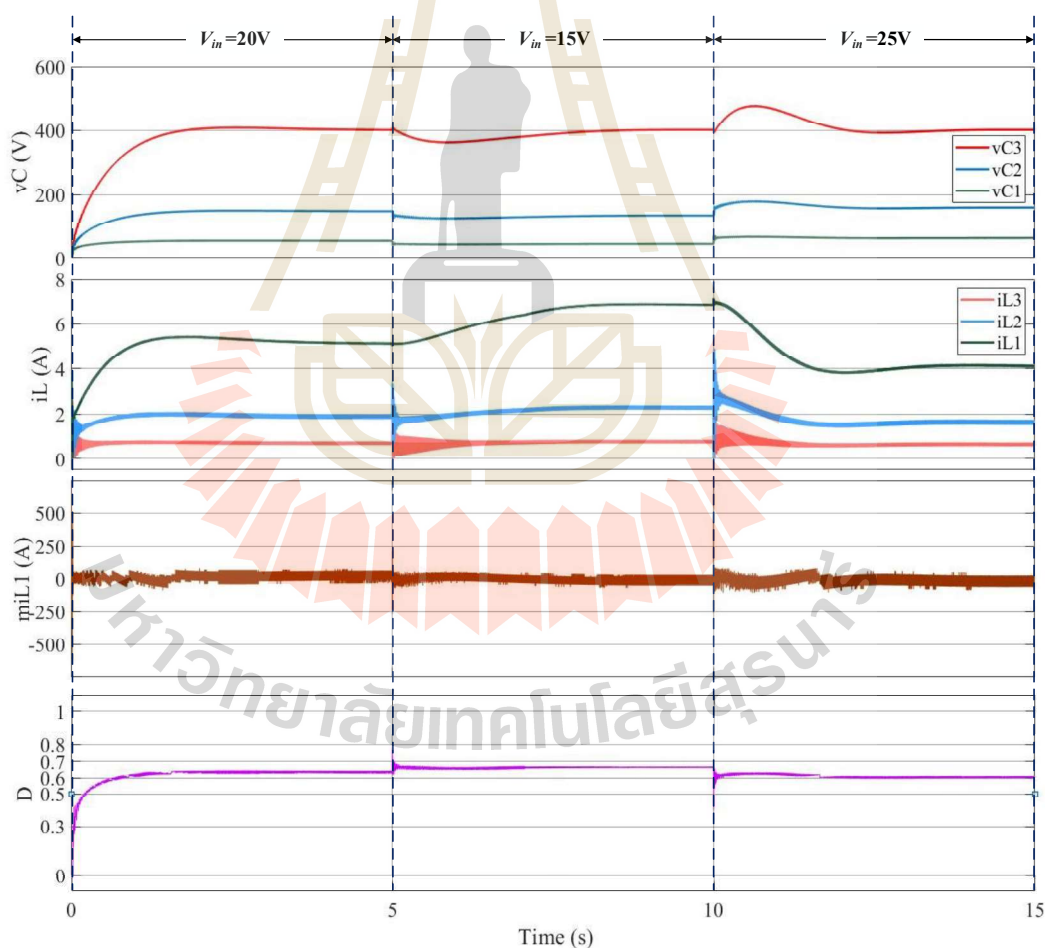
การสังเกตพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นทั้งในสภาวะปกติและเมื่อเกิดความผิดพลาด จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ โดยสังเกตค่ากระแสอินพุต แรงดันเอาต์พุต และค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ที่ได้จากการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร และนำไปสู่การทำงานของวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด ในการจำลองสถานการณ์จะแสดงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{C1} , V_{C2} , V_{C3}) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) ความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก (m_{iL1}) และค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ (D) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 การจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในสภาวะปกติ

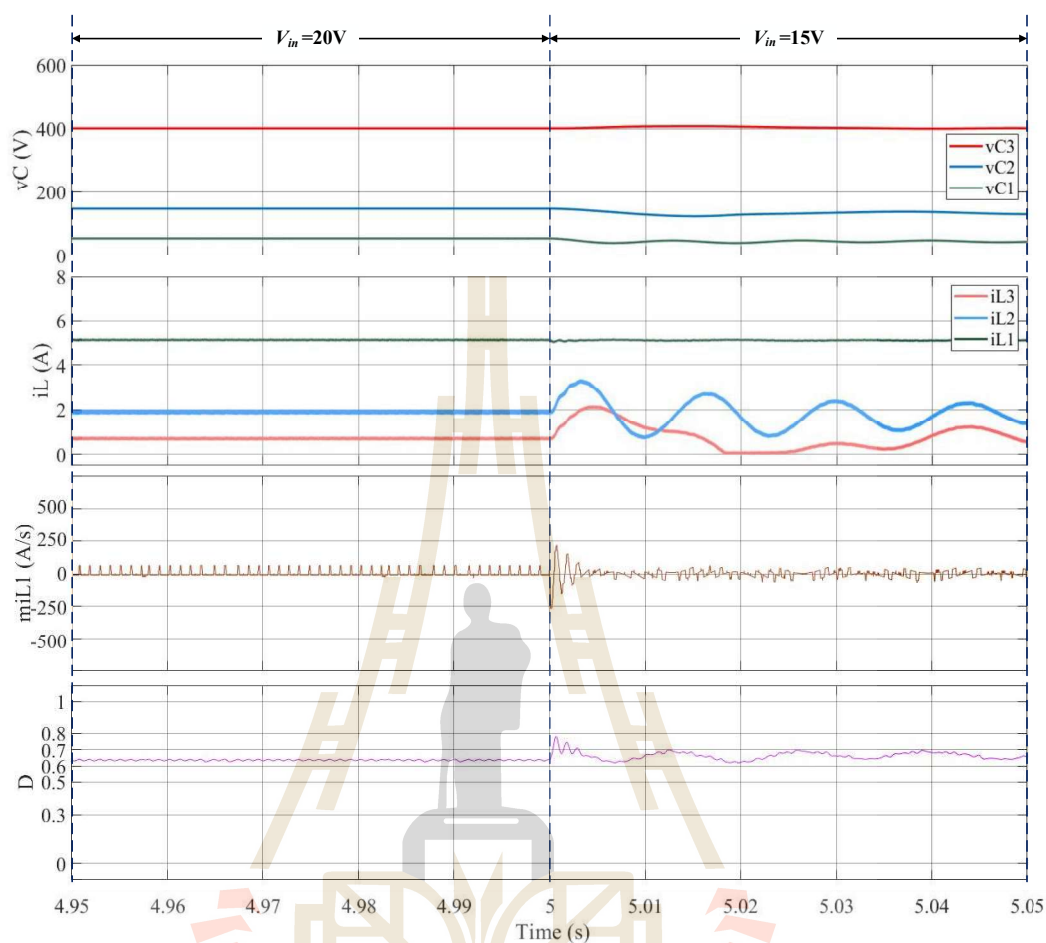
เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ทำงานได้อย่างถูกต้อง ได้ทำการสังเกตพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นจากการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ของวงจรในขณะที่ทำงานปกติ โดยการเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจร 3 กรณี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{in}) การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R) โดยพิจารณาการทำงานของวงจรในสภาวะชั่วคราว หลังจากการเปลี่ยนจุดการทำงานต่าง ๆ ของวงจร เนื่องจากในช่วงเวลาสั้น ๆ นี้ วงจรจะแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างจากการทำงานของวงจรในสภาวะอยู่ตัวอย่างชัดเจน ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของวงจรมากขึ้น และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบวิธีการตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} เป็น 20V, 15V และ 25V ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{ref} ที่ 400V และ R ที่ 1600Ω จากผลการ

จำลองสถานการณ์รูปที่ 5.2 สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{C1} , V_{C2} , V_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) เกิดการพุ่งเกิน และลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้น และลดลงตามลำดับ หลังจากนั้น V_O จะถูกควบคุมให้เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าในช่วงเริ่มต้นการทำงานของวงจร m_{iL1} มีค่าของการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $-100A/s$ ถึง $100A/s$ ส่วน D มีค่าเริ่มต้นจากศูนย์ เพิ่มขึ้น และคงที่ประมาณ 0.63 เพื่อให้ได้ V_O ที่ 400V ตาม V_{ref} โดยที่มี V_{in} เป็น 20V หลังจากนั้น ณ เวลาที่ 5s แรงดัน V_{in} ลดลงจาก 20V เป็น 15V จะเห็นได้ว่า V_{C3} มีค่าลดลง และถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ V_{ref} ส่วน i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นจากการควบคุมให้ m_{iL1} มีค่าใกล้เคียง m_{ref} โดยในสภาวะอยู่ตัว i_{L1} มีค่าประมาณ 6.67A เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดเท่ากับ 100W สุดท้าย ณ เวลาที่ 10s แรงดัน V_{in} เพิ่มขึ้นจาก 15V เป็น 25V จะเห็นได้ว่า V_O มีการพุ่งเกิน หลังจากนั้นจะถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ V_{ref} ส่วน i_{L1} มีค่าลดลงจาก 6.67A เป็น 4A เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดเท่ากับ 100W เช่นเดิม

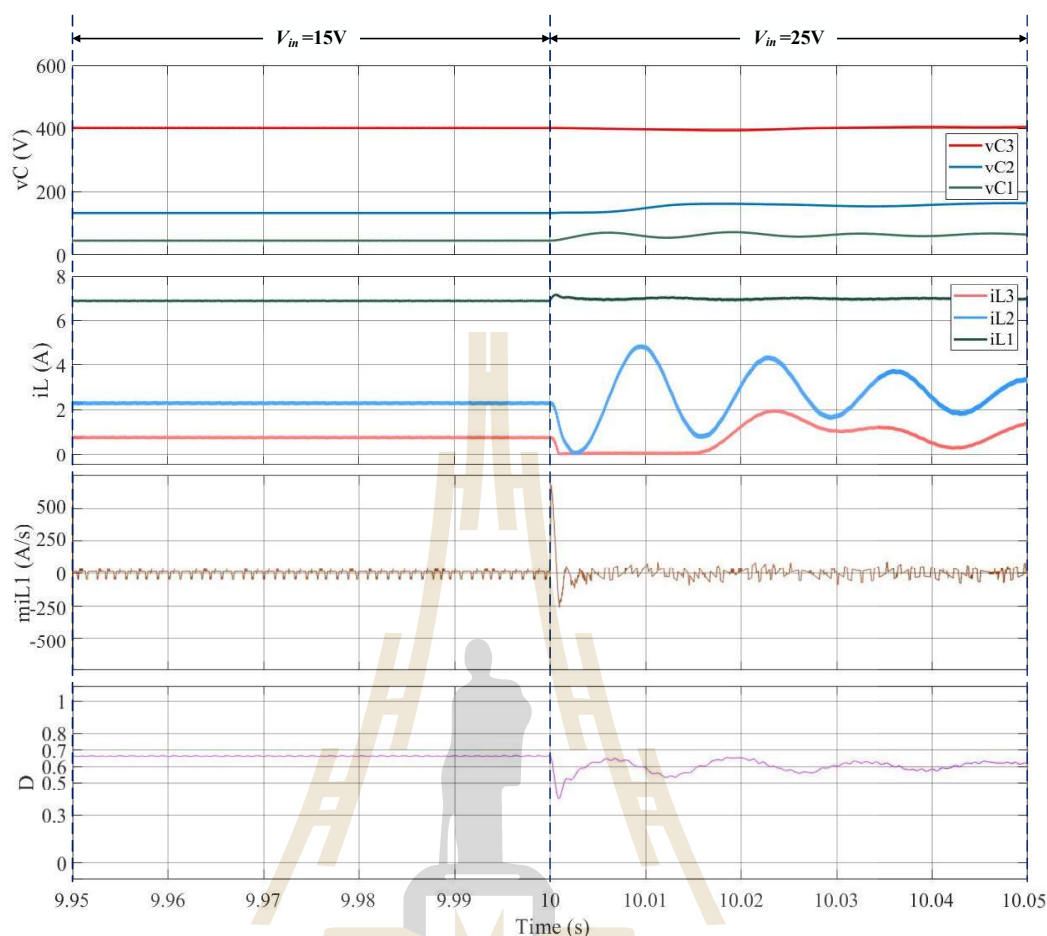


รูปที่ 5.2 ผลการจำลองพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต



รูปที่ 5.3 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต 20V เป็น 15V

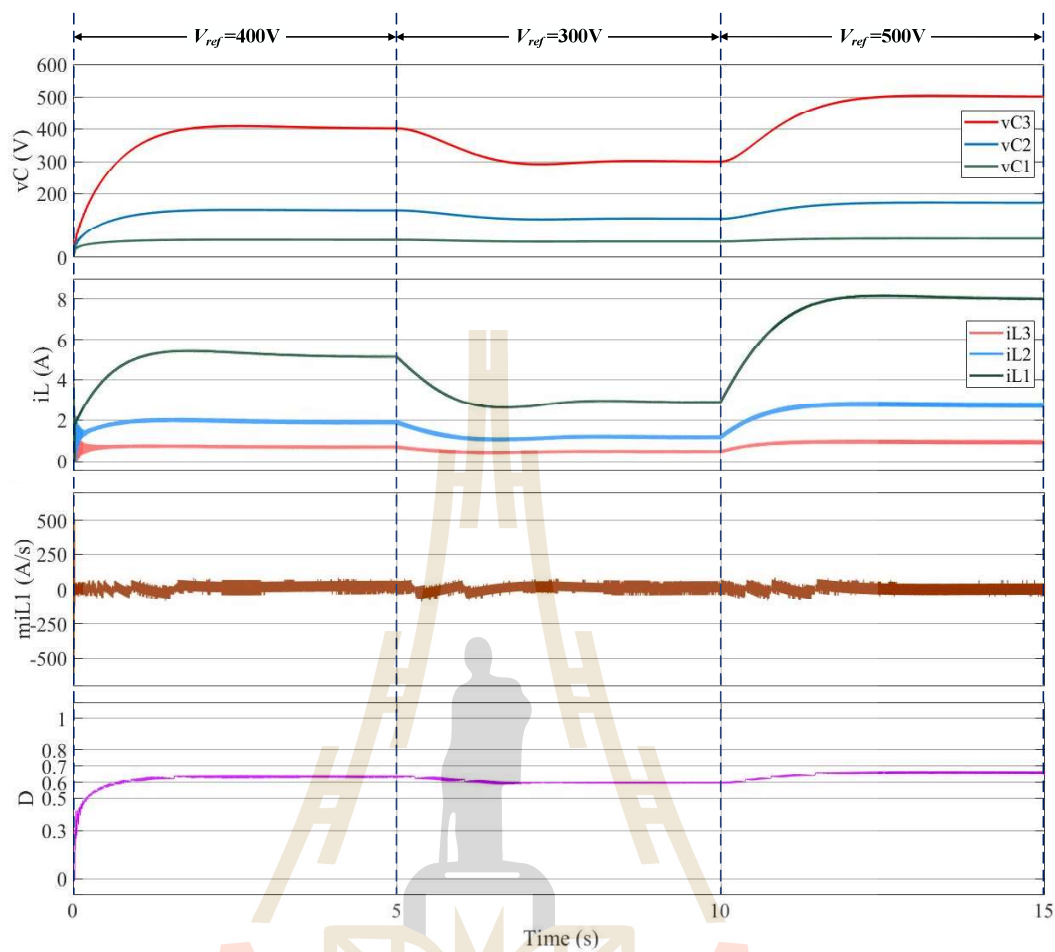
เมื่อพิจารณาภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจร ในรูปที่ 5.3 ณ วินาทีที่ 5 เมื่อแรงดันอินพุตลดลงจาก 20V เป็น 15V พบว่า v_{C3} และ i_{L1} ถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ โดยที่ m_{iL1} มีการสั่นไหวต่ำกว่า $-250A/s$ ในระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น หลังจากนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง $-100A/s$ ถึง $100A/s$ ส่วน D มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.63 เป็น 0.67 เพื่อรักษาระดับแรงดัน V_O เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V เมื่อมีแรงดันอินพุต V_{in} ลดลงจาก 20V เป็น 15V



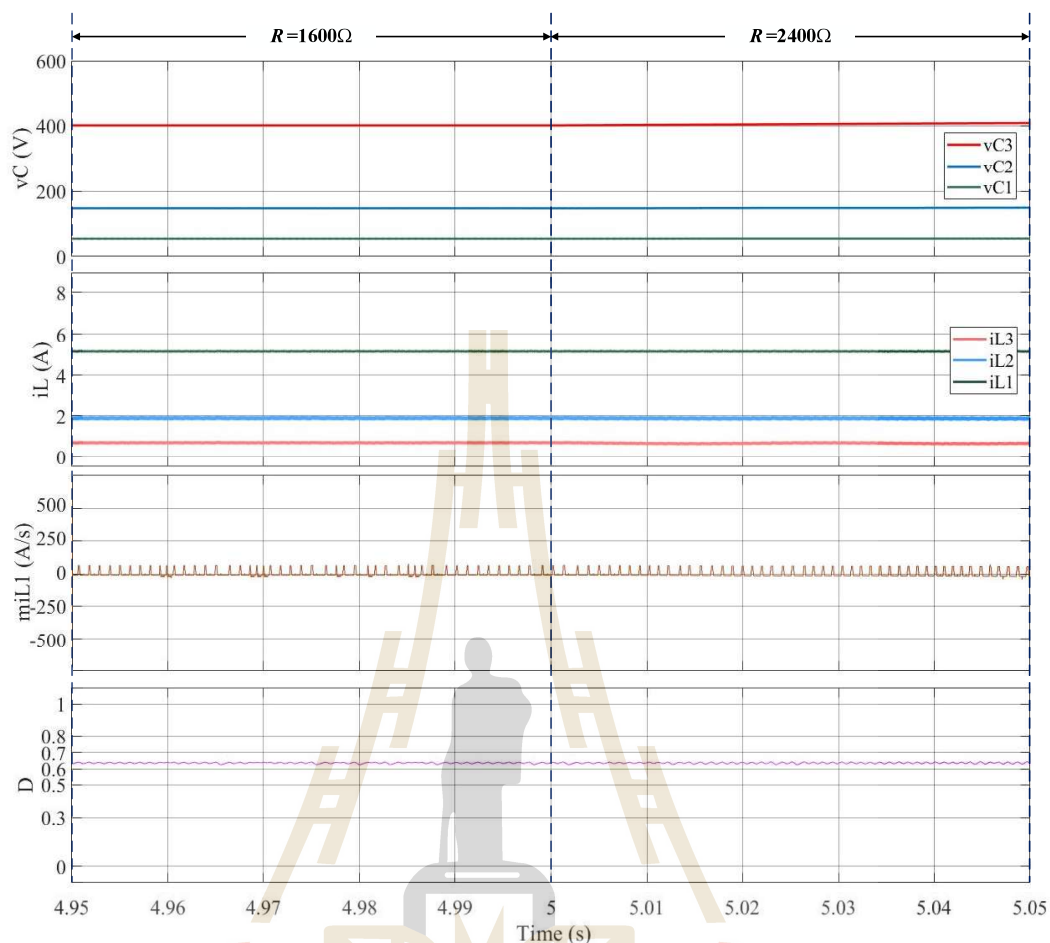
รูปที่ 5.4 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต 15V เป็น 25V

จากภาพขยายผลการจำลองพฤติกรรมรูปที่ 5.4 แรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นจาก 15V เป็น 25V ณ เวลาที่ 10s เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของวงจรพบว่า v_{C3} และ i_{L1} ยังคงที่ ในขณะที่ m_{iL1} มีค่าการสั่นไหวที่สูงกว่า 250A/s ในระยะเวลาสั้น ๆ จากนั้น m_{iL1} จะคงที่ในช่วง -100A/s ถึง 100A/s ส่วน D มีค่าลดลงจาก 0.67 เป็น 0.6 ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมฟีดแบ็คเพื่อให้ได้ V_O เท่ากับ 400V หรือ V_{ref} เมื่อมีแรงดันอินพุต V_{in} เพิ่มขึ้นจาก 15V เป็น 25V

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} เป็น 400V, 300V และ 500V ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ R ที่ 1600Ω แสดงดังรูปที่ 5.5 พบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) ถูกควบคุมให้มีค่าเหมาะสมจากการควบคุมฟีดแบ็คที่พัฒนาขึ้นเพื่อรักษา V_O ให้มีค่าเท่ากับ V_{ref} ที่เปลี่ยนแปลง โดยในสภาวะอยู่ตัว D มีค่าคงที่ประมาณ 0.63, 0.60 และ 0.66 ตามลำดับ

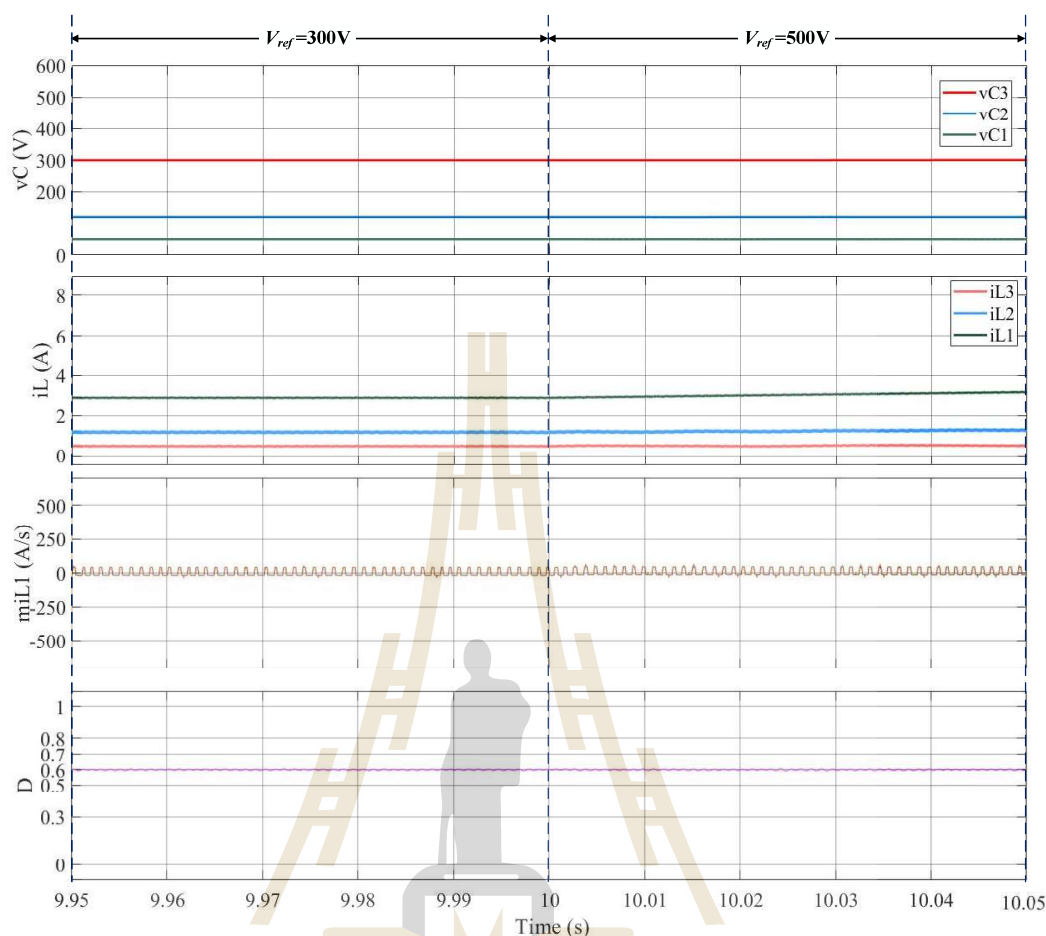


รูปที่ 5.5 ผลการจำลองพฤติกรรมการทำงานวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 5.6 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง 400V เป็น 300V

เมื่อพิจารณาภาพขยายการจำลองพฤติกรรมในรูปที่ 5.6 ณ วินาทีที่ 5 เมื่อ V_{ref} ลดลงพบว่าค่ากระแสและแรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่พิจารณา โดย v_{C3} มีค่าเท่ากับ 400V ซึ่งเท่ากับ V_{ref} ส่วนค่ากระแส i_{L1} มีค่าประมาณ 5 A ค่า m_{IL1} อยู่ในช่วง -100A/s ถึง 100A/s และ D มีค่าประมาณ 0.63

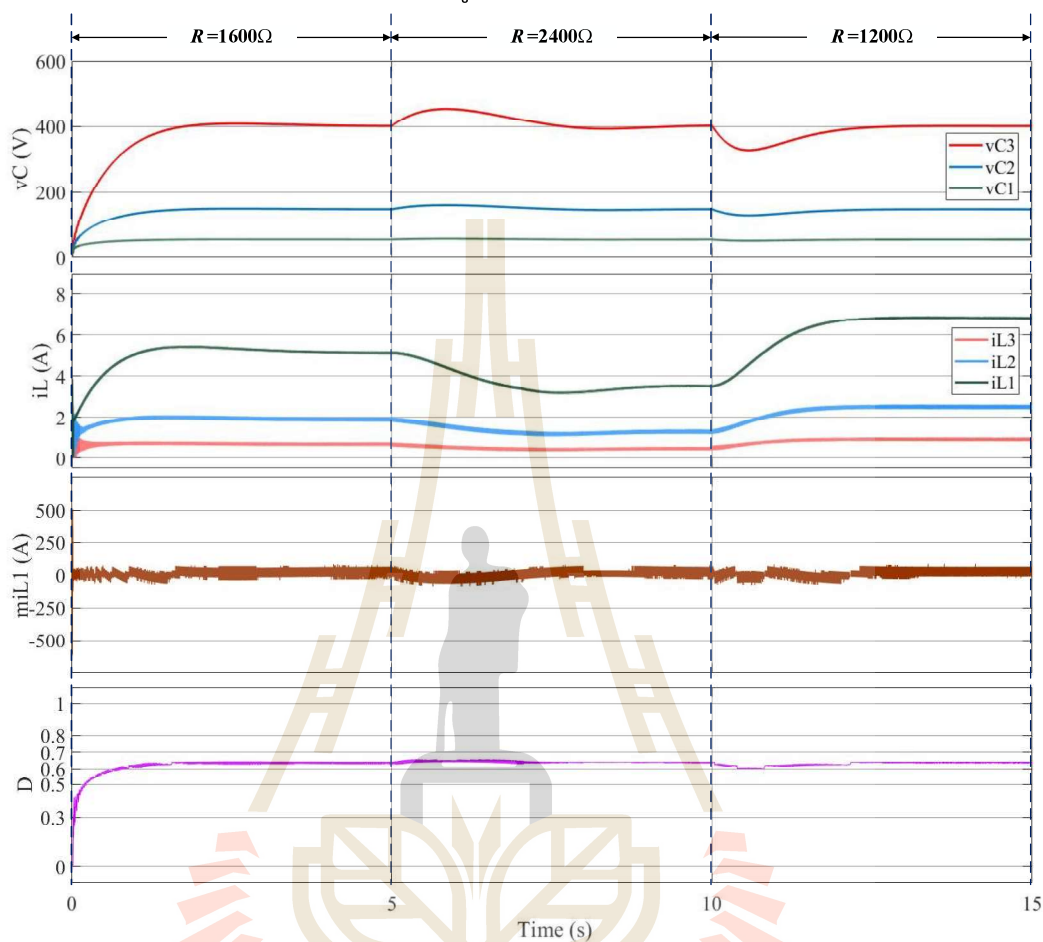


รูปที่ 5.7 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง 300V เป็น 500V

จากภาพขยายการจำลองพฤติกรรมในรูปที่ 5.7 โดย V_{ref} เพิ่มขึ้น ณ เวลาที่ 10s เมื่อพิจารณาพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา โดย v_{C3} และ i_{L1} จากการทำงานของวงจรก่อนวินาทีที่ 10 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 300V และ 2.81A ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลง m_{iL1} และ D ที่มีค่าอยู่ในช่วง -100A/s ถึง 100A/s และ 0.67 ตามลำดับ

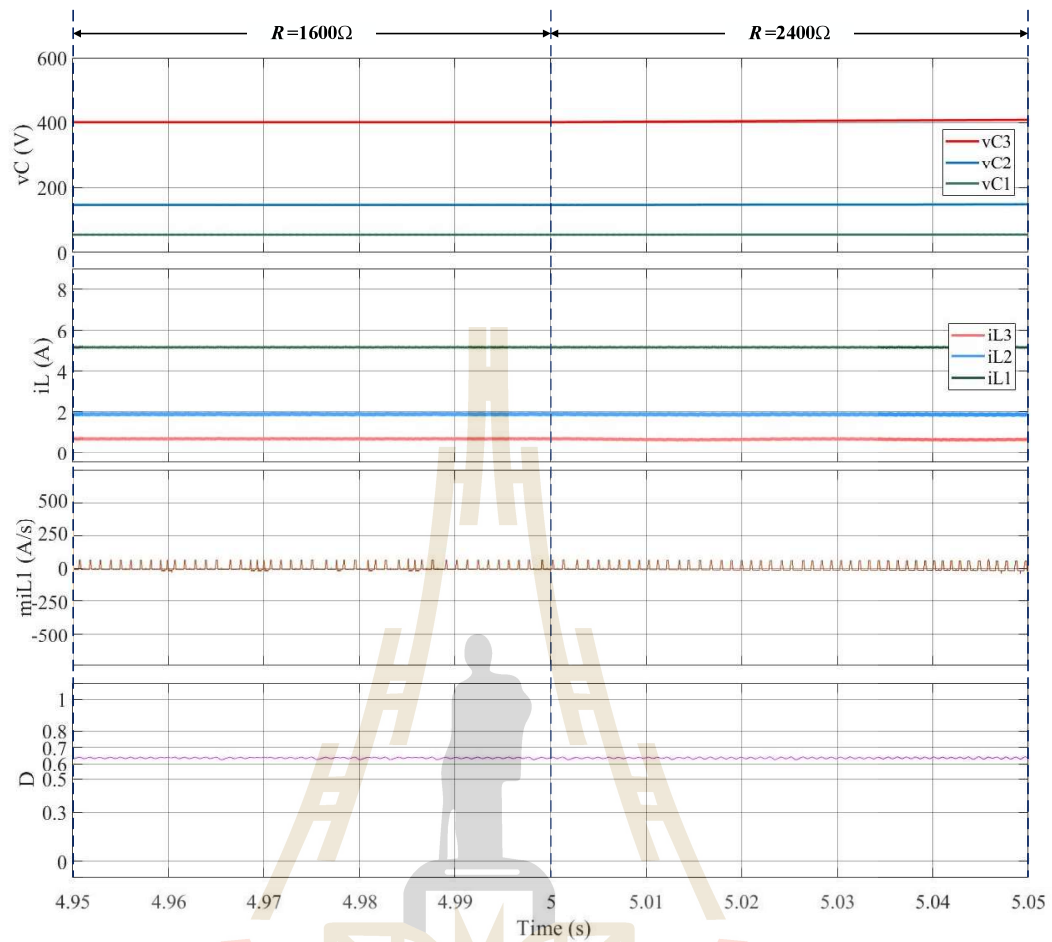
กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด R เป็น 1600Ω , 3200Ω และ 2400Ω ในช่วงเวลา 0s, 5s และ 10s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ V_{ref} ที่ 400V ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.8 พบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) เกิดการพุ่งเกิน และลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อโหลด R เพิ่มขึ้น และลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซียังคงค่า V_O ที่ 400V ได้ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงโหลด R จะส่งผลโดยตรงต่อกำลังไฟฟ้า โดยเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัวกำลังไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็น 100W,

66.67W และ 133.33W ตามลำดับ เมื่อ V_{in} คงที่ค่ากระแส i_{L1} ถูกควบคุมให้มีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโหลด R ที่เกิดขึ้น โดยในสภาวะอยู่ตัว i_{L1} มีค่าประมาณ 5A, 3.33A และ 6.67A ตามลำดับ



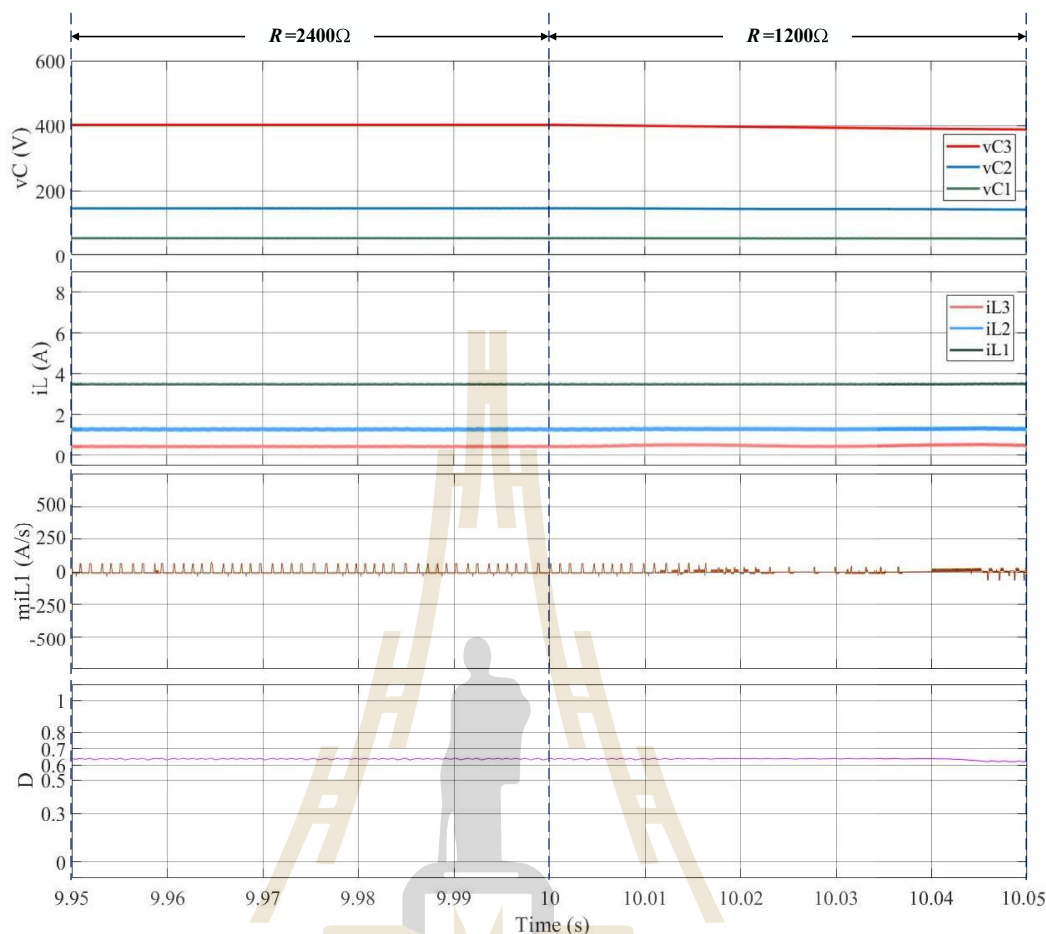
รูปที่ 5.8 พฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

ภาพขยายแสดงความแตกต่างพฤติกรรมการทำงานของวงจรเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลด R ณ เวลาที่ 5s และ 10s ตามลำดับ แสดงดังในรูปที่ 5.9 และ 5.10 จะเห็นได้ว่าทั้งสองกรณีเปลี่ยนแปลง R ให้ผลตอบสนองของ v_{C3} และ i_{L1} ที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลาที่พิจารณา ส่วน m_{IL1} มีการเปลี่ยนแปลงที่คงที่ในช่วง $-100A/s$ ถึง $100A/s$ ส่วนค่า D จะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ประมาณ 0.63 เพื่อรักษา V_O ให้เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V โดยที่มี V_{in} เป็น 20V



รูปที่ 5.9 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน 1600Ω เป็น 2400Ω

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.10 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน 2400Ω เป็น 1200Ω

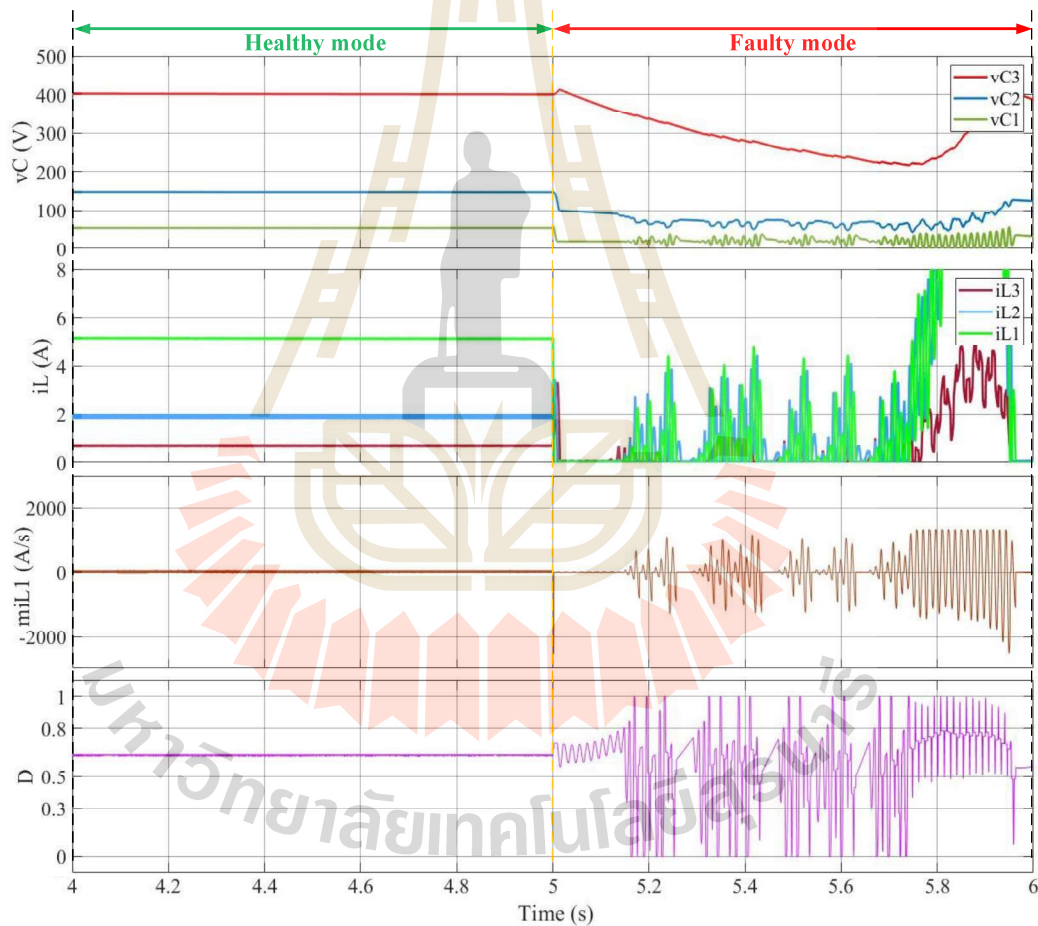
ในการศึกษาการทำงานของวงจรในสภาวะปกติ โดยพิจารณาการเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจรทั้ง 3 กรณี สามารถสังเกตพฤติกรรมผลตอบสนองที่เกิดขึ้น เพื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเกิดความผิดปกติ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติให้มีความถูกต้อง และรวดเร็ว

5.2.2 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร

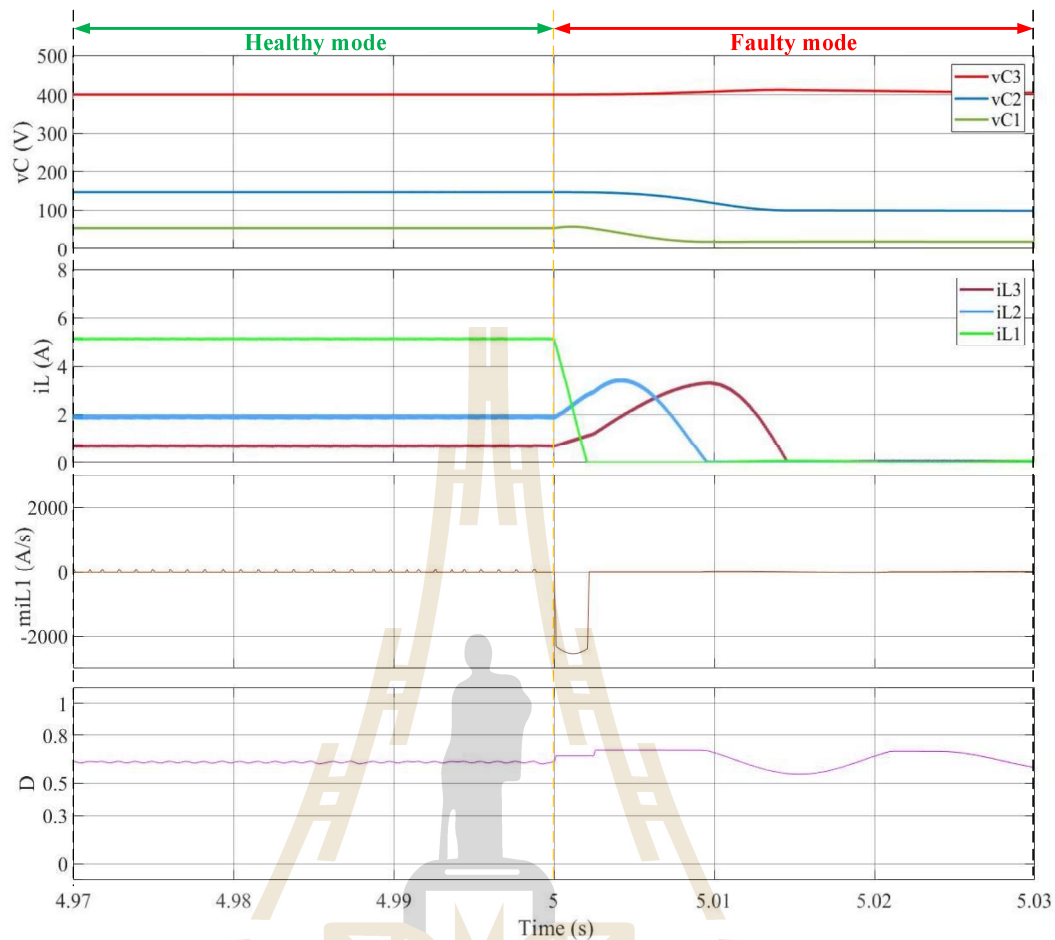
การจำลองสถานการณ์กำหนดให้ V_{ref} เป็น 400V, R เป็น 1600Ω และ V_{in} เป็น 20V คงที่ตลอดการจำลองสถานการณ์ โดยผลการจำลองสถานการณ์พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในสภาวะปกติ (Healthy mode) ภายใต้การควบคุมฟuzzy ที่พัฒนาขึ้น สามารถควบคุมแรงดัน V_O ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปยัง V_{ref} ที่ 400V อีกทั้งแรงดันตกคร่อม

ตัวเก็บประจุ (V_{C1} , V_{C2} , V_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) มีผลตอบสนองคงที่ในสภาวะอยู่ตัว หลังจากนั้นวินาทีที่ 5 จะเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร (Faulty mode) ทั้งนี้การจำลองสถานการณ์จะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเท่านั้น ซึ่งจะแบ่งการจำลองสถานการณ์ออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วยการจำลองสถานการณ์ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 แสดงดังรูปที่ 5.11 จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{C1} , V_{C2} , V_{C3}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) มีค่าลดลง และเกิดการสั่นไกวอย่างชัดเจน รวมทั้ง m_{iL1} และ D เกิดการสั่นไกว และไม่สามารถรักษาค่าตาม V_{ref} ที่ 400 V ได้



รูปที่ 5.11 พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1

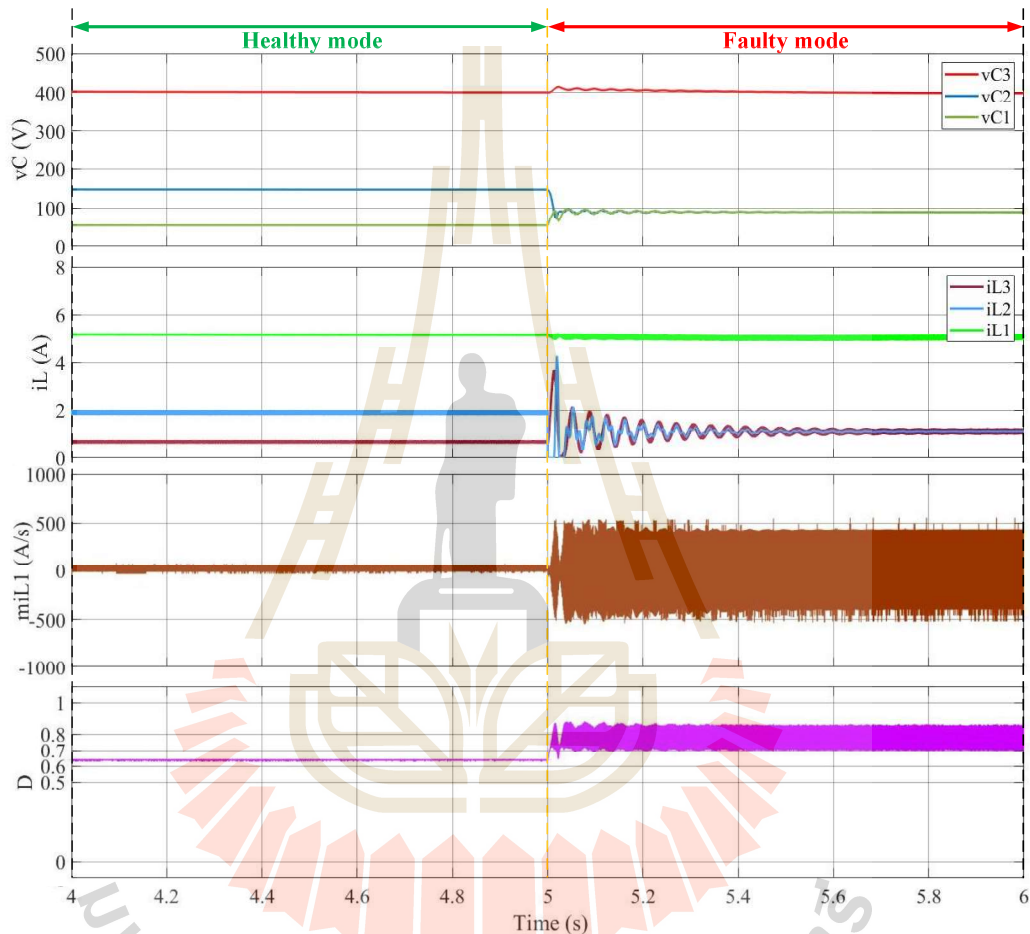


รูปที่ 5.12 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1

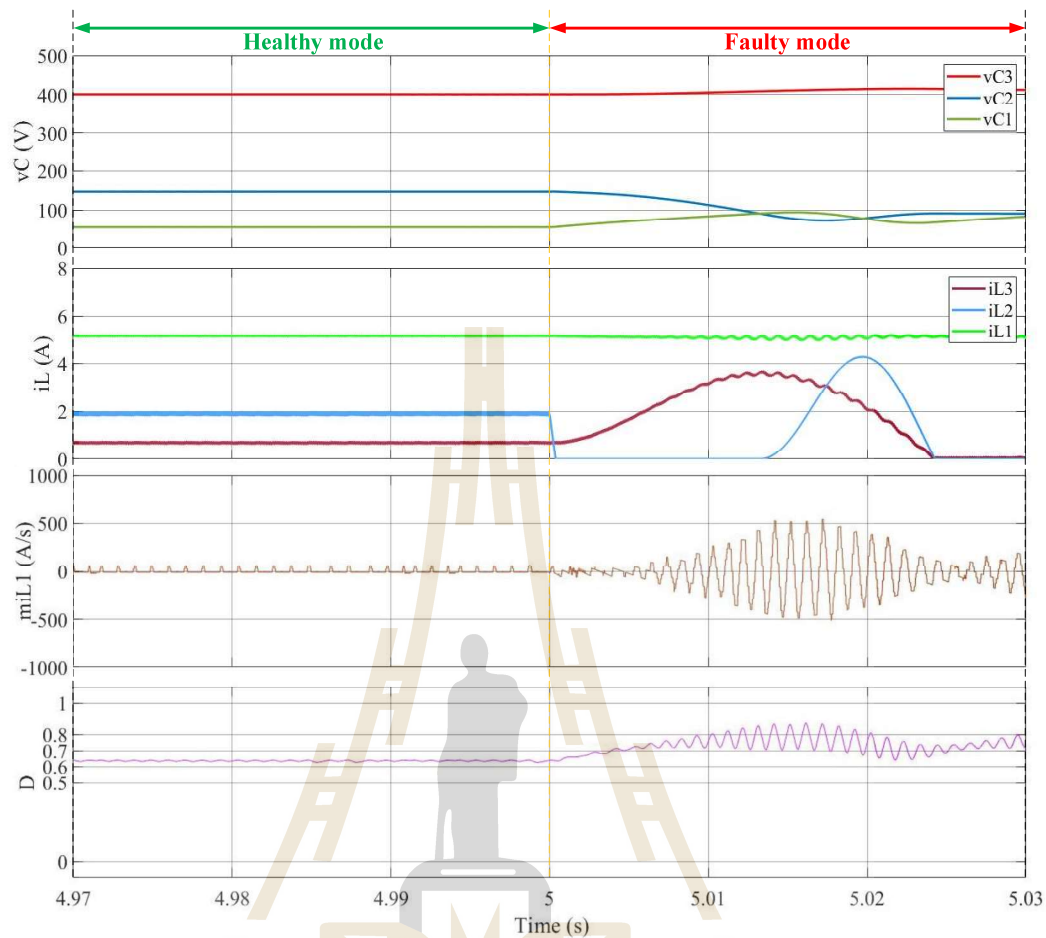
เมื่อพิจารณาภาพขยายเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของวงจรระหว่างสภาวะปกติและเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_1 ดังแสดงในรูปที่ 5.12 พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นหลังจากเกิดความผิดปกติ i_{L1} จะลดลงอย่างรวดเร็ว จากค่าประมาณ 5A ลดลงจนถึง 0A ใช้เวลาประมาณ 3ms ส่วน m_{iL1} มีค่าติดลบเนื่องจากการที่กระแสลดลงอย่างรวดเร็วโดยมีค่าประมาณ -2300A/s ส่วนแรงดัน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ D มีค่าไม่คงที่ จะเห็นได้ว่า i_{L1} และ m_{iL1} มีผลตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็วอย่างเห็นได้ชัด จึงพิจารณาค่าดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนานิเวศการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 โดยรายละเอียดจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์ความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 แสดงดังรูปที่ 5.13 พบว่าตัวควบคุมฟัซซี่ยังสามารถที่จะเพิ่ม และรักษา V_O มีค่าประมาณ V_{ref} ได้ อย่างไรก็ดีตามแรงดัน v_{C1} และ v_{C2} เกิดการสั่นไหวเล็กน้อย หลังจากนั้นแรงดันทั้งสองจะมีค่าเท่ากันประมาณ 90V ในสภาวะอยู่

ตัว ส่วนกระแส i_{L2} และ i_{L3} เกิดการสั่นไกวอย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นกระแสทั้งสองจะมีเท่ากัน ค่าประมาณ 1.2A ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าเกิดการสั่นไกวที่มากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงเกินขอบเขต -250A/s ถึง 250A/s ส่วน D เพิ่มขึ้นจาก 0.63 เป็น 0.78 อย่างรวดเร็ว และไม่คงที่ เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ามากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัดเช่นกัน โดยที่สภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 0.77 เพื่อรักษา V_O ให้เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V



รูปที่ 5.13 พฤติกรรมการทำงานของวงจรนี้เกิดความผิดปกติที่ S_2

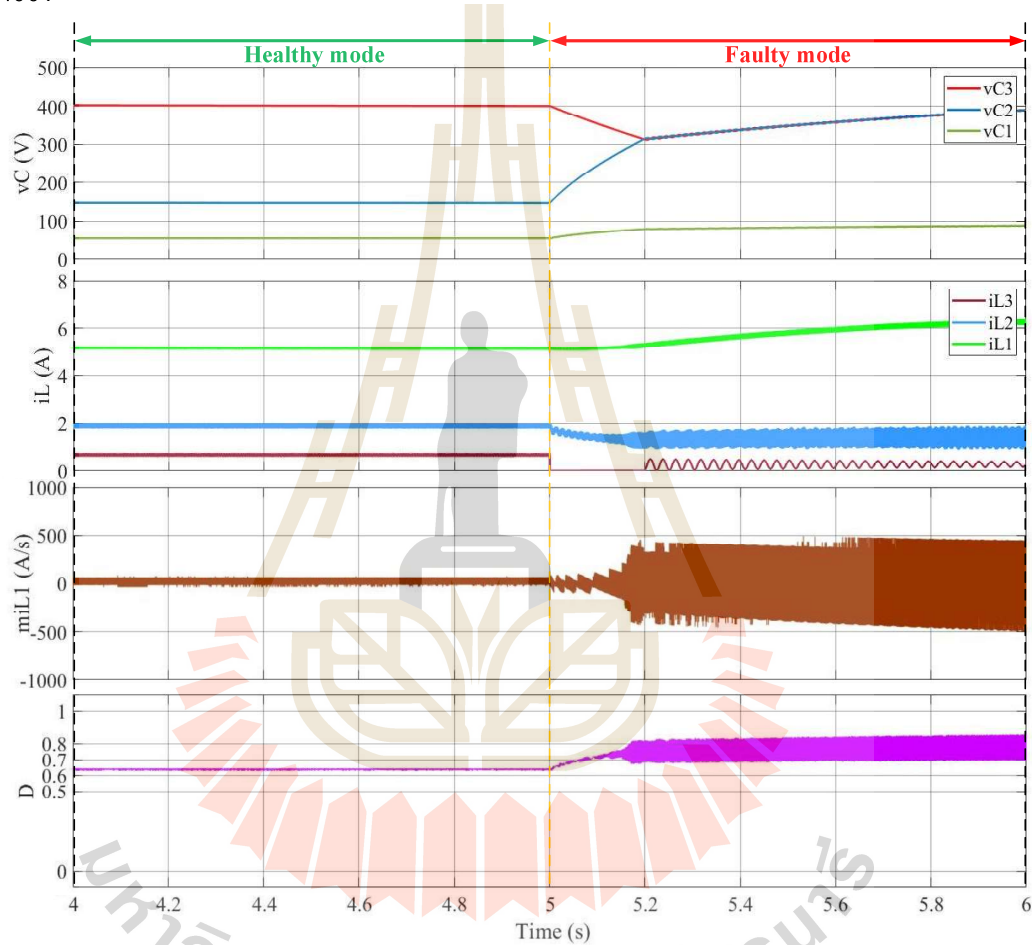


รูปที่ 5.14 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2

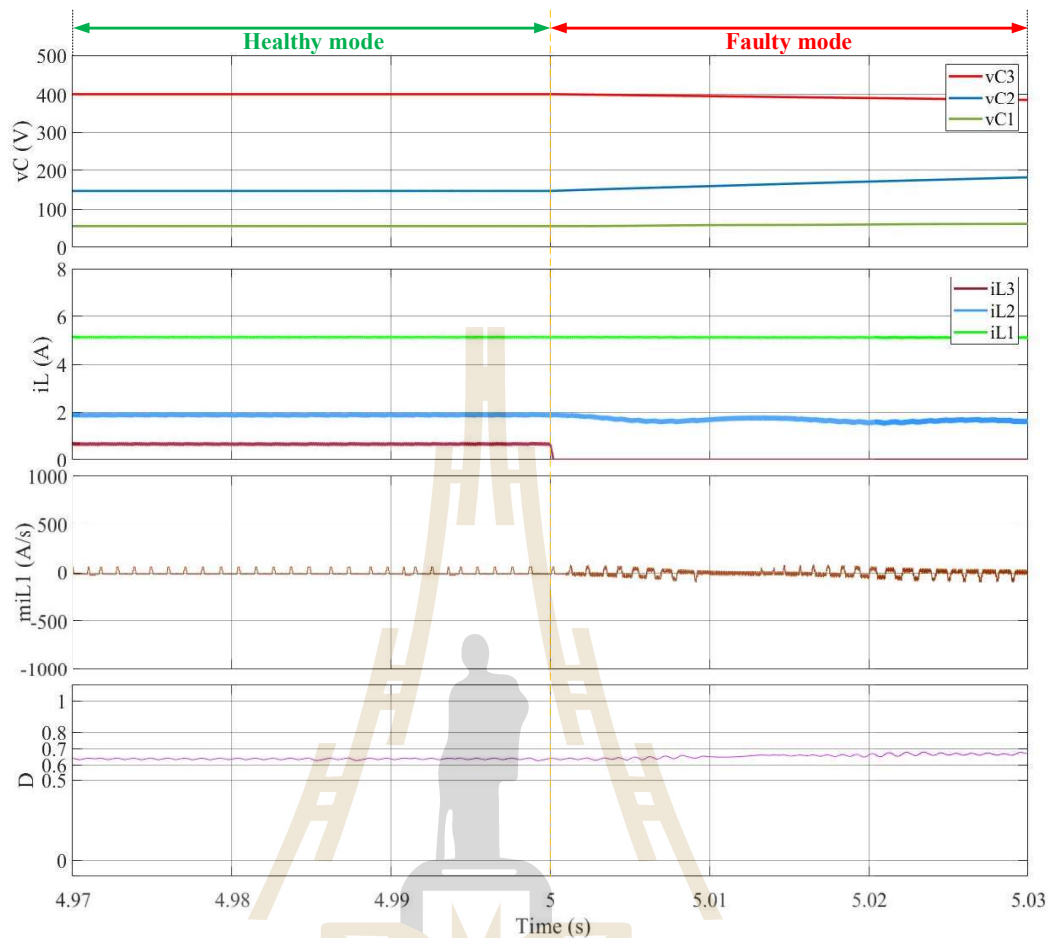
จากภาพขยายเพื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของวงจรในรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นความแตกต่างพฤติกรรมการทำงานของวงจรระหว่างสภาวะปกติ และเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_2 จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น หลังจากเกิดความผิดปกติ จะสังเกตได้ว่าแรงดัน v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กระแส i_{L1} มีการสั่นไหวเล็กน้อย เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าหลังจากเกิดความผิดปกติมีการสั่นไหวทันทีอย่างเห็นได้ชัด สัญญาณ D มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น m_{iL1} และ D มีผลตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จึงพิจารณาค่าดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 โดยรายละเอียดจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์ความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 แสดงดังรูปที่ 5.15 พบว่าการควบคุมฟัซซี่ ยังคงสามารถรักษา V_O ตามที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามแรง v_{C1} และ v_{C2} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 90V และ 400V ตามลำดับ ส่วนแรงดัน v_{C3} มีค่าลดลงจากการคายประจุให้กับโหลดตัวต้านทาน หลังจากนั้นค่าเพิ่มขึ้นเข้าหา V_{ref} โดยใช้เวลาเข้าที่ประมาณ 1s ส่วนผลตอบสนองกระแสที่ไหล

ผ่านตัวเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นพบว่า i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วน i_{L2} มีค่าลดลงเล็กน้อย หลังจากนั้นเกิดการสั้นไกวอย่างเห็นได้ชัด และ i_{L3} มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และคงที่ 0A ประมาณ 0.2s หลังจากนั้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นแบบสั้นไกว เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าในช่วงแรกค่าไม่เปลี่ยนแปลงประมาณ 0.17s หลังจากนั้นเกิดการสั้นไกว โดยมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัด ส่วน D มีค่าเพิ่มขึ้น และเกิดการสั้นไกวมากกว่าในสภาวะปกติ โดยที่สภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 0.77 เพื่อรักษา V_O ให้เท่ากับ V_{ref} ที่ 400V



รูปที่ 5.15 พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3



รูปที่ 5.16 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3

ในการพิจารณาความแตกต่างพฤติกรรมการทำงานของวงจรระหว่างสภาวะปกติ และเมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 จะอาศัยภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรในรูปที่ 5.16 พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นหลังจากเกิดความผิดปกติตอบสนองของ v_{C3} มีค่าลดลงจากการคายประจุ ส่วนกระแส i_{L1} มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นมีการสั่นไกวเล็กน้อย ส่วน m_{iL1} มีการสั่นไกวเล็กน้อยเช่นกัน และสัญญาณ D มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงพิจารณาค่า v_{C3} เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติ S_3 โดยรายละเอียดจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมพัลส์ที่พัฒนาขึ้นดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทั้งในสภาวะปกติที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร และในสภาวะที่เกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรของทั้งสามสวิตช์ จะเห็นได้ว่าค่ากระแส i_{L1} และแรงดัน V_O ที่ได้จากตัวตรวจจับกระแส และตัวตรวจจับแรงดันที่ใช้ใน

กระบวนการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น รวมถึงสัญญาณ D ที่ได้จากการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์แต่ละตัว ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

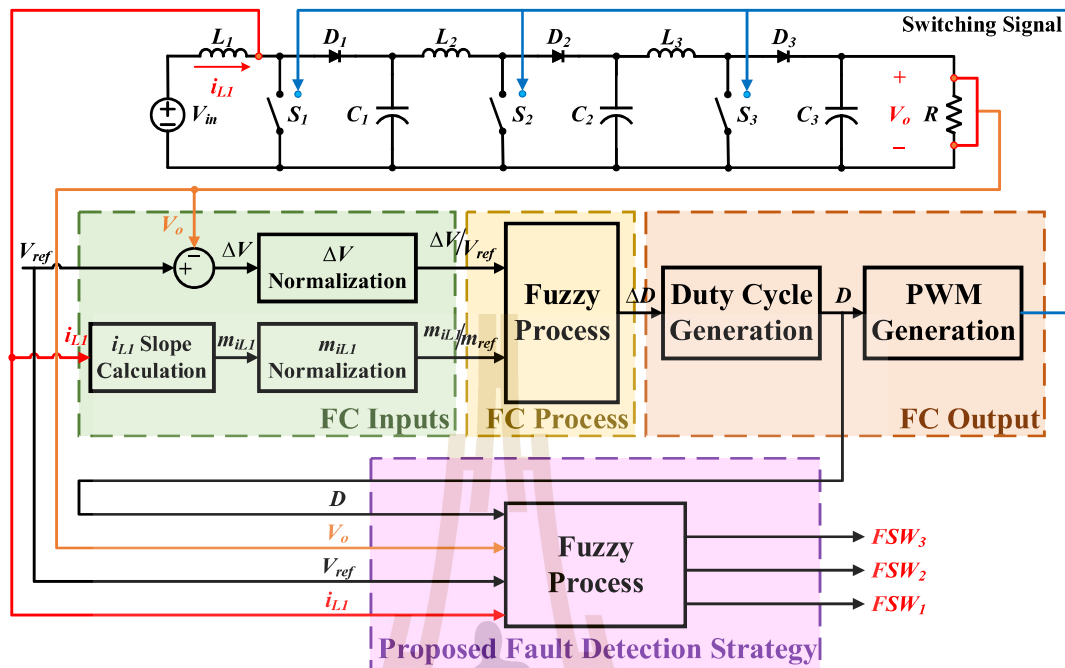
ตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร

ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร	พารามิเตอร์ที่พิจารณา
S_1	ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (i_{L1})
S_2	ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (i_{L1}) และ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ (D)
S_3	ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวที่ 3 (v_{C3})

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็วอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเหล่านี้สามารถนำไปใช้พัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติ รวมถึงพัฒนาการสร้างความรู้ความเข้าใจถึงความผิดปกติให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้ยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ และต่อเนื่อง

5.3 วิธีการตรวจจับและระบุตำแหน่งความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น

จากการศึกษาพฤติกรรมของค่าพารามิเตอร์ที่สามารถตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร ประกอบด้วยกระแส i_{L1} แรงดัน v_{C3} และสัญญาณ D ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้ตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในขั้นต้น สามารถนำมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติ (Fault detection strategy) พร้อมทั้งยังสามารถระบุตำแหน่งสวิตช์ที่เกิดความผิดปกติภายในวงจร (Fault identification) โดยใช้กระบวนการฟuzzyแสดงดังรูปที่ 5.17 ทั้งนี้จะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเท่านั้น

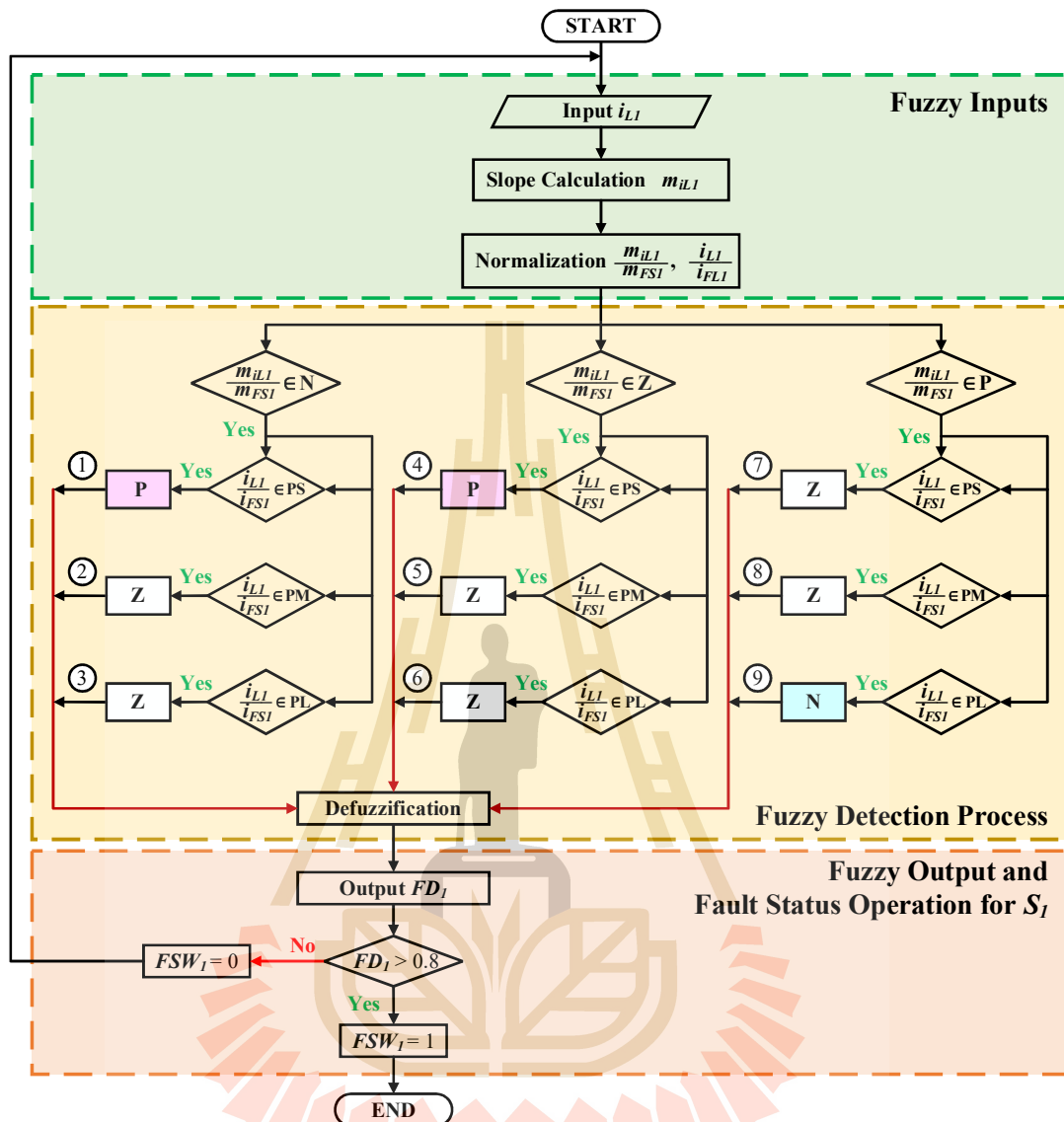


รูปที่ 5.17 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นร่วมกับการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร

ในกระบวนการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรจะแสดงผลเอาต์พุตที่เป็นสถานะการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัว (FSW_1 , FSW_2 , FSW_3) โดยหากการทำงานของวงจรอยู่ในสภาวะปกติ (Healthy mode) สถานะการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์จะแสดงค่าเป็นศูนย์ ($FSW_n = 0$) แต่หากเกิดความผิดปกติ (Faulty mode) สถานะการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์จะแสดงค่าเป็นหนึ่ง ($FSW_n = 1$) ในการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรของสวิตช์แต่ละตัวมีวิธีการที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากการสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรของสวิตช์แต่ละตัว และนำไปสู่การพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ หรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) โดยมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

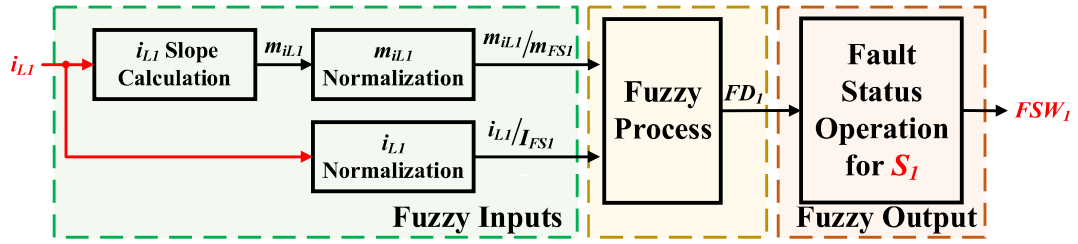
5.3.1 การตรวจจับความผิดปกติที่ S_1

จากการสังเกตพฤติกรรมของวงจรเมื่อการเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 จะเห็นได้ว่ากระแส i_{L1} และ m_{iL1} มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วอย่างเห็นได้ชัด แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 แสดงดังรูปที่ 5.18



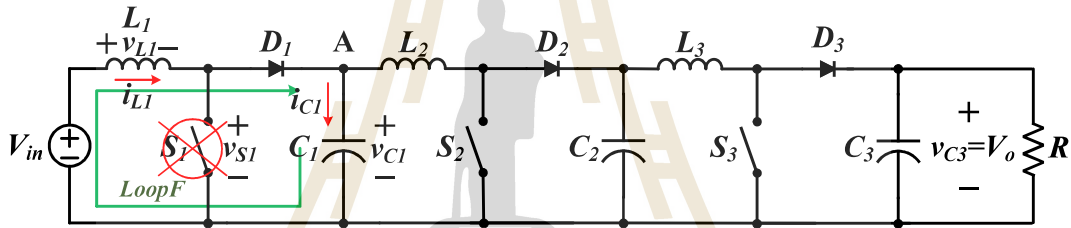
รูปที่ 5.18 แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติของ S_1

จากแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติของ S_1 ที่แสดงดังรูปที่ 5.19 อินพุตของการตรวจจับความผิดปกติของ S_1 ประกอบด้วย ความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (m_{iL1}) และกระแส i_{L1} ที่ถูกปรับค่าสเกลในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ด้วยค่าความชันของกระแสขณะเกิดความผิดปกติของ S_1 (m_{FSI}) และกระแสที่ไหลผ่าน L_1 ในสภาวะปกติ (i_{FSI}) ตามลำดับ ซึ่งจะถูกลำถึงในขั้นถัดไป



รูปที่ 5.19 โครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1

จากโครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 ดังแสดงในรูปที่ 5.19 จะเห็นได้ว่า อินพุตค่าแรกเริ่มจากกระบวนการคำนวณค่าความชันของ i_{L1} ให้ได้ค่าความชัน m_{iL1} จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการ m_{iL1} Normalization เพื่อปรับค่าสเกลด้วย m_{FS1} ที่ได้จากการพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_1 ที่แสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_1

จากการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นในบทที่ 3 ในสภาวะปกติ (Healthy mode) สามารถพิจารณาค่า v_{C1} ได้จากอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ขั้นที่ 1 สมการที่ (3.24) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หาขนาด m_{FS1} จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ดังสมการที่ (5.1)

$$\text{ลูป F: } -V_{in} + v_{L1} + v_{C1} = 0$$

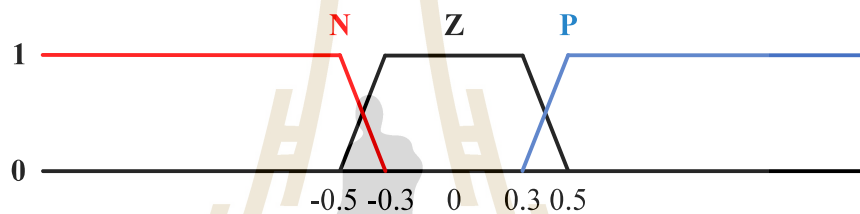
$$m_{FS1} = \left| \frac{di_{L1}}{dt} \right| = \left| \frac{V_{in} - V_{C1}}{L_1} \right| = \frac{V_{in} D}{L_1 (1 - D)} \quad (5.1)$$

อินพุตค่าที่สองของกระบวนการฟัซซีเป็น i_{L1} ที่ปรับค่าสเกลด้วย i_{FS1} โดยคำนวณ i_{FS1} ได้ดังสมการที่ (5.2) ซึ่งพิจารณาได้จากอัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นในบทที่ 3 จากสมการ (3.32)

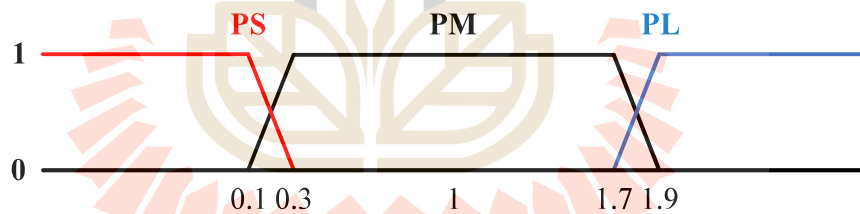
$$i_{FS1} = \frac{I_o}{M_f} = \frac{V_{ref}}{R(1-D)^3} \quad (5.2)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ในบทที่ 3 จะสามารถคำนวณค่า m_{FS1} และ i_{FS1} เท่ากับ 2,319A/s และ 5A ตามลำดับ

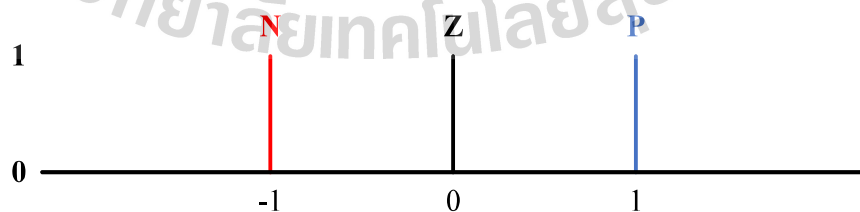
จากผลตอบสนองการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น เมื่อเกิดความผิดพร่องที่ S_1 สามารถพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกระหว่างฟัซซีเซตของค่า m_{iL1} และ i_{L1} ที่ถูกนอร์มัลไลซ์ (Normalization) ในขอบเขตที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.21 และ 5.22 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร



รูปที่ 5.21 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต m_{iL1}/m_{FS1}



รูปที่ 5.22 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต i_{L1}/i_{FS1}



รูปที่ 5.23 ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตค่าสัญญาณความผิดพร่องที่สวิตช์ตัวที่ 1 (FD_1)

จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร จะกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันสมาชิก อินพุตทั้งสองเป็นแบบเหลี่ยมคางหมู และพิจารณาค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิกได้ดังนี้ ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต m_{iL1}/m_{FS1} กำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก 3 เซต ได้แก่ “Negative: N”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ส่วนฟังก์ชันสมาชิกอินพุต i_{L1}/i_{FS1} กำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก 3 เซต ได้แก่ “Positive Small: PS”, “Positive Medium: PM” และ “Positive Large: PL” ส่วนฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 คือสัญญาณความผิดปกติที่ S_1 (FD_1) จะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นค่าคงที่เส้นตรงโทนที่มี 3 ค่าประกอบด้วย “Negative: N”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ดังรูปที่ 5.23 ซึ่งเป็นรูปแบบการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference)

ความสัมพันธ์ของอินพุต m_{iL1}/m_{FS1} และ i_{L1}/i_{FS1} และเอาต์พุตคือ FD_1 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 การออกแบบกฎของฟัซซีระหว่างตัวแปรทั้ง 3 มีดังนี้

1 st	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = N$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PS$	THEN	$FD_1 = P$
2 nd	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = N$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PM$	THEN	$FD_1 = Z$
3 rd	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = N$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PL$	THEN	$FD_1 = Z$
4 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = Z$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PS$	THEN	$FD_1 = P$
5 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = Z$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PM$	THEN	$FD_1 = Z$
6 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = Z$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PL$	THEN	$FD_1 = Z$
7 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = P$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PS$	THEN	$FD_1 = Z$
8 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = P$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PM$	THEN	$FD_1 = Z$
9 th	IF	$m_{iL1}/m_{FS1} = P$	AND	$i_{L1}/i_{FS1} = PL$	THEN	$FD_1 = N$

ตารางที่ 5.2 หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 1

$m_{iL1}/m_{FS1} \backslash i_{L1}/i_{FS1}$	N	Z	P
PS	P	P	Z
PM	Z	Z	Z
PL	Z	Z	N

จากหน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ที่ใช้ตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 1 นั้น ค่าเอาต์พุต FD_1 ที่ได้จากการทำดีฟัซซีจะมีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 โดยค่า FD_1 ที่เป็นลบ บ่งบอกถึงการทำงานของวงจรในสภาวะปกติ ในขณะที่ค่า FD_1 ที่เป็นบวก บ่งบอกถึงสภาวะที่เกิดความผิดปกติเพื่อให้การตรวจจับมีความถูกต้องและรวดเร็ว จึงได้กำหนดขอบเขตการตรวจจับความผิดปกติของเอาต์พุต FD_1 ไว้ที่ 0.8 กล่าวคือ หากค่า FD_1 น้อยกว่า 0.8 อาจทำให้การตรวจจับความผิดปกติเกิดความผิดพลาดในช่วงที่วงจรมีการเปลี่ยนจุดการทำงาน หากกำหนดค่า FD_1 ให้มากกว่า 0.8 จะส่งผลให้ระยะเวลาในการตรวจจับความผิดพร่องนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.18 ซึ่งแสดงกระบวนการระบุสถานะความผิดปกติที่สวิตช์ S_1

จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติที่ S_1 สามารถออกแบบความสัมพันธ์ของอินพุตในการตรวจจับความผิดปกติแสดงในรูปของกฎทางฟัซซีดังแสดงในตารางที่ 5.2 สามารถอธิบายตัวอย่างการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 ได้ดังนี้

กรณีที่ 1 m_{iL1}/m_{FS1} เป็นสมาชิกของเซตลบ ($m_{iL1}/m_{FS1} \in N$) ก็ต่อเมื่อ m_{iL} มีค่าน้อยกว่า -0.3 เท่าของ m_{FS1} กระบวนการฟัซซีของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟัซซีข้อที่ 1 ถึงกฎที่ 3 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) กฎฟัซซีข้อที่ 1 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} เป็นบวกค่าน้อยอยู่ในเซต PS หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.3 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดปกติที่ S_1
- 2) กฎฟัซซีข้อที่ 2 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.9 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 3) กฎฟัซซีข้อที่ 3 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าเกิน 1.7 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) ซึ่งแสดงถึงสภาวะการทำงานของวงจรแบบปกติ

กรณีที่ 2 m_{iL1}/m_{FS1} เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($m_{iL1}/m_{FS1} \in Z$) ก็ต่อเมื่อ m_{iL} มีค่าอยู่ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 เท่าของ m_{FS1} กระบวนการฟัซซีของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟัซซีข้อที่ 4 ถึงกฎที่ 6 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 4) กฎฟิชชีข้อที่ 4 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกลittleน้อยอยู่ในเซต PS หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.3 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติพร้อมต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดปกติพร้อมที่ S_1
- 5) กฎฟิชชีข้อที่ 5 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.9 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติพร้อมต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 6) กฎฟิชชีข้อที่ 6 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าเกิน 1.7 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติพร้อมต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) ซึ่งแสดงถึงสภาวะการทำงานของวงจรแบบปกติ

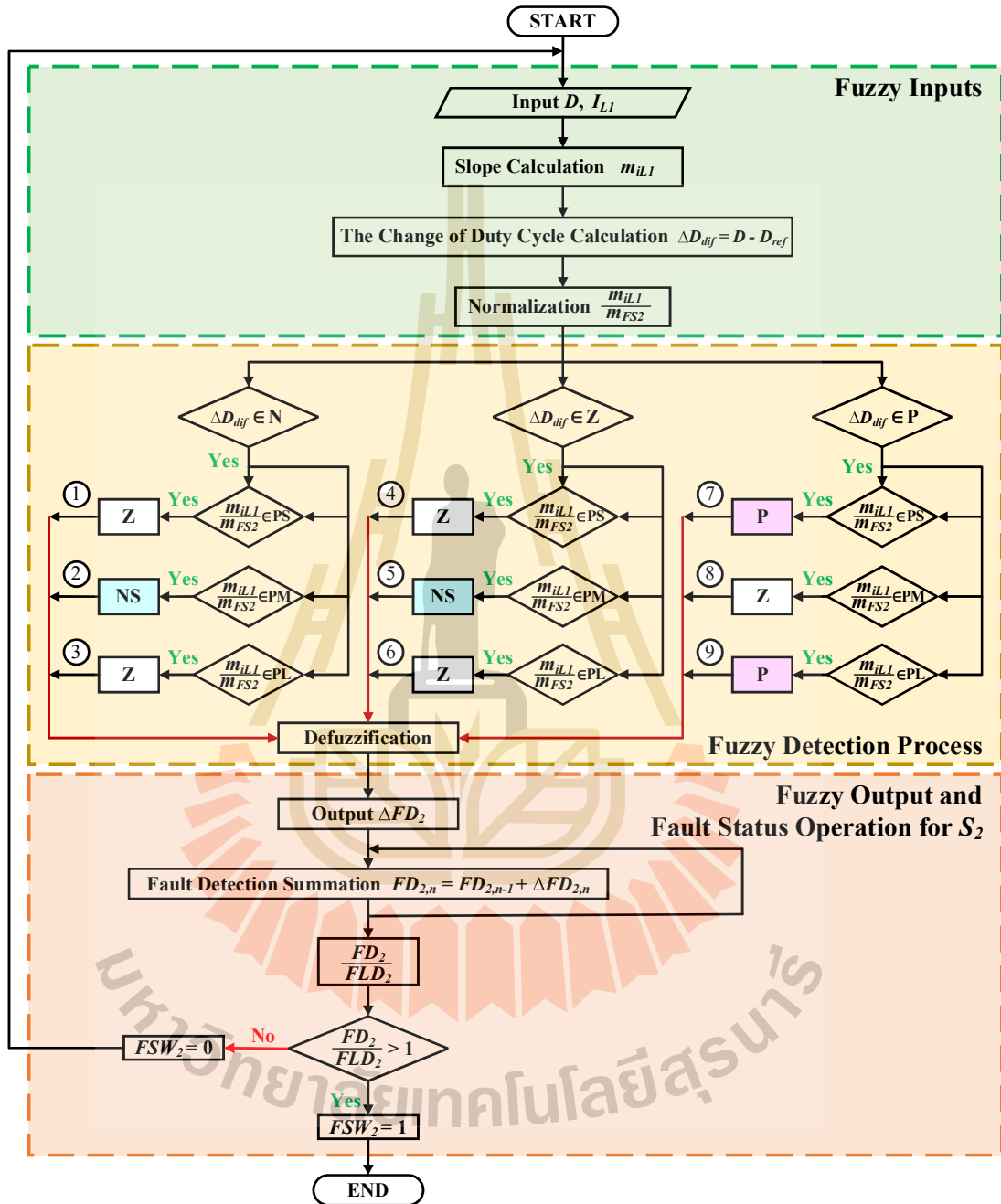
กรณีที่ 3 m_{iL1}/m_{FS1} เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($m_{iL1}/m_{FS1} \in Z$) ก็ต่อเมื่อ m_{iL1} มีค่ามากกว่า 0.3 เท่าของ m_{FS1} กระบวนการฟิชชีของ i_{L1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิชชีข้อที่ 7 ถึงกฎที่ 9 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 7) กฎฟิชชีข้อที่ 4 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกลittleน้อยอยู่ในเซต PS หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.3 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติพร้อมต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นบวก (P) ซึ่งแสดงถึงสภาวะการทำงานของวงจรแบบปกติ
- 8) กฎฟิชชีข้อที่ 5 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.9 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติพร้อมต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 9) กฎฟิชชีข้อที่ 6 เมื่อ i_{L1}/i_{FS1} มีค่าบวกปานกลางอยู่ในเซต PM หมายถึง i_{L1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าเกิน 1.7 เท่าของ i_{FS1} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดปกติพร้อมต้องสร้าง FD_1 ที่เป็นศูนย์ (Z) ซึ่งแสดงถึงสภาวะการทำงานของวงจรแบบปกติ

5.3.2 การตรวจจับความผิดปกติ S_2

จากการสังเกตพฤติกรรมของวงจรเมื่อการเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 พบว่าสัญญาณ D และ m_{iL1} มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จึงพิจารณาค่าดังกล่าวเป็นอินพุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติ S_2 โดยแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติ S_2 แสดงดังรูปที่ 5.24 โดยค่าสัญญาณความผิดปกติ S_2 (FD_2) ในปัจจุบัน จะได้จากการนำค่าสัญญาณความผิดปกติ S_2

ก่อนหน้านี้ ($FD_{2,n-1}$) บวกกับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่สวิตช์ตัวที่ 2 (ΔFD_2) ที่สร้างขึ้นในขณะนั้น ๆ

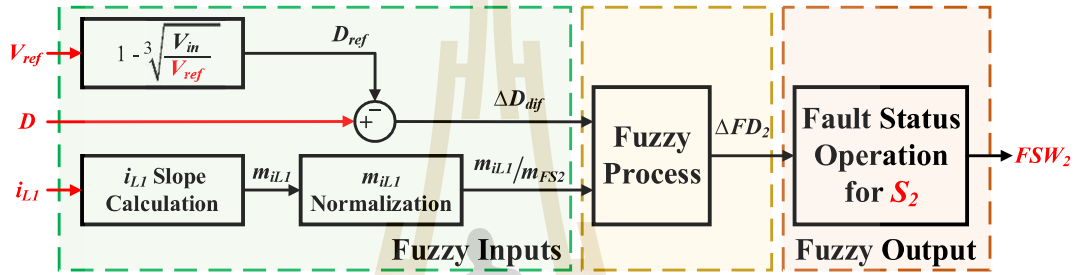


รูปที่ 5.24 แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_2

จากแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_2 ที่แสดงดังรูปที่ 5.15 อินพุตของการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_2 ประกอบด้วย ได้แก่ สัญญาณค่าผลต่างของค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์

(ΔD_{dif}) และ ความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 (m_{iL1}) ที่ถูกปรับค่าสเกลในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ด้วยค่าความชันของกระแสขณะเกิดความผิดปกติที่ S_2 (m_{FS2}) ซึ่งจะถูกลำเลียงในขั้นถัดไป

อินพุตค่าแรกก่อนเข้ากระบวนการฟัซซีเป็น ΔD_{dif} ดังสมการที่ (5.3) โดย D_{ref} เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่อ้างอิงของสวิตช์ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทยที่ 3 ในสภาวะปกติ (Healthy mode) โดยที่ V_O เท่ากับ V_{ref} และ V_{in} มีขนาดประมาณ 20V จากอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสมการที่ (3.26) สามารถคำนวณ D_{ref} ได้ดังสมการที่ (5.4)



รูปที่ 5.25 โครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2

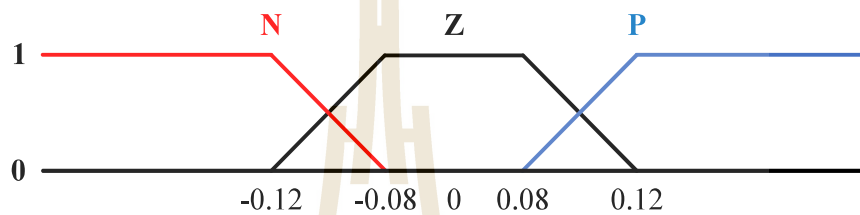
$$\Delta D_{dif} = D - D_{ref} \quad (5.3)$$

$$D_{ref} = 1 - \sqrt[3]{\frac{V_{in}}{V_{ref}}} \quad (5.4)$$

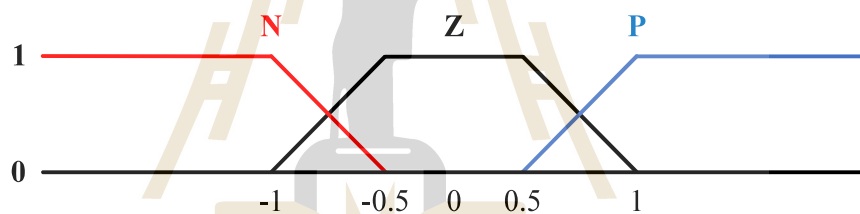
อินพุตค่าที่สองเริ่มจากกระบวนการคำนวณค่าความชันของ i_{L1} ให้ได้ค่า m_{iL1} จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการ m_{iL1} Normalization เพื่อปรับค่าสเกลด้วย m_{FS2} ที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นในสภาวะปกติ โดยที่ m_{iL1} มีค่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -100A/s ถึง 100A/s ดังนั้นจึงกำหนดค่า m_{FS2} เป็นสองเท่าของ m_{ref} สมการที่ (4.3) ซึ่งได้จากการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทยที่ 4 ดังนั้น m_{FS2} คำนวณได้ดังสมการที่ (5.5)

$$m_{FS2} = 2m_{ref} \quad (5.5)$$

ดังนั้นหากกำหนดให้แรงดัน V_{ref} ไว้ที่ 400V และพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นในตารางที่ 4.3 จะสามารถคำนวณค่า D_{ref} และ m_{FS2} เท่ากับ 0.635 และ 200A/s ตามลำดับ และจากผลตอบสนองการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_2 สามารถพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกระหว่างฟัซซีเซตของค่า ΔD_{diff} และ m_{IL1} ที่ถูกปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalization) อยู่ในขอบเขต ดังรูปที่ 5.26 และ 5.27 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร

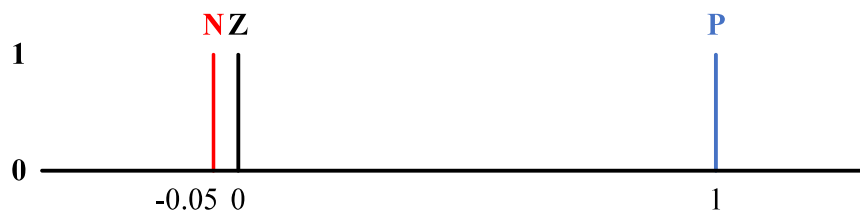


รูปที่ 5.26 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต ΔD_{diff}



รูปที่ 5.27 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต m_{IL1}/m_{FS2}

ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตทั้งสองจะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบเหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันสมาชิก ΔD_{diff} และ m_{IL1}/m_{FS2} กำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก 3 เซต ได้แก่ “Negative: N”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ส่วนฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติ S_2 คือสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดปกติที่สวิตช์ตัวที่ 2 (ΔFD_2) จะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นค่าคงที่เส้นตรงโทนที่มี 3 ค่าประกอบด้วย “Negative Small: NS”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ดังรูปที่ 5.28 ซึ่งเป็นรูปแบบการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference)



รูปที่ 5.28 ฟังก์ชันสมาชิกการเปลี่ยนแปลงการตรวจจับความผิดปกติ S_2 (ΔFD_2)

จากค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก ΔFD_2 ดังแสดงในรูปที่ 5.28 ได้กำหนดค่าเชิงภาษาของ Negative Small ที่ค่า -0.05 ซึ่งไม่สมมาตรกับ Positive ที่ค่า 1 นั้น จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น พบว่าผลตอบสนองของการทำงานของวงจรบางกรณีเมื่อเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจรคล้ายคลึงกับการทำงานของวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_2 ซึ่งจะถูกกล่าวถึงในขั้นถัดไปในหัวข้อกระบวนการแสดงสถานะความผิดปกติที่ S_2

ความสัมพันธ์ของอินพุต ΔD_{dif} และ m_{iL1}/m_{FS2} และเอาต์พุต ΔFD_2 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 การออกแบบกฎฟัซซีเป็น 9 กฎมีดังนี้

1 st	IF	$\Delta D_{dif} = N$	AND	$m_{iL1}/m_{FS2} = N$	THEN	$\Delta FD_2 = Z$
2 nd	IF	$\Delta D_{dif} = N$	AND	$m_{iL1}/m_{FS2} = Z$	THEN	$\Delta FD_2 = NS$
3 rd	IF	$\Delta D_{dif} = N$	AND	$m_{iL1}/m_{FS2} = P$	THEN	$\Delta FD_2 = Z$
4 th	IF	$\Delta D_{dif} = Z$	AND	$m_{iL1}/m_{FS2} = N$	THEN	$\Delta FD_2 = Z$
5 th	IF	$\Delta D_{dif} = Z$	AND	$m_{iL1}/m_{FS2} = Z$	THEN	$\Delta FD_2 = NS$
6 th	IF	$\Delta D_{dif} = Z$	AND	$m_{iL1}/m_{FS2} = P$	THEN	$\Delta FD_2 = Z$
7 th	IF	$\Delta D_{dif} = P$	AND	$m_{iL1}/m_{FS2} = N$	THEN	$\Delta FD_2 = P$
8 th	IF	$\Delta D_{dif} = P$	AND	$m_{iL1}/m_{FS2} = Z$	THEN	$\Delta FD_2 = Z$
9 th	IF	$\Delta D_{dif} = P$	AND	$m_{iL1}/m_{FS2} = P$	THEN	$\Delta FD_2 = P$

ตารางที่ 5.3 หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 2

$\Delta D_{dif} \backslash m_{iL1}/m_{FS2}$	N	Z	P
N	Z	Z	P
Z	NS	NS	Z
P	Z	Z	P

จากหน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 2 ข้างต้น เอาต์พุต ΔFD_2 ที่ได้จากการทำดีฟัซซีมีค่าอยู่ในช่วง -0.05 ถึง 1 โดยหากค่า ΔFD_2 ติดลบ จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะปกติ แต่หากค่า ΔFD_2 เป็นบวกจะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะเกิดความผิดปกติที่ S_2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

แบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ทำให้สามารถออกแบบกระบวนการทางฟิสิกส์เพื่อตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 ได้ โดยกำหนดความสัมพันธ์ของอินพุตที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพร่องในรูปของกฎฟิสิกส์ ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบของหน่วยความจำฟิสิกส์สัมพันธ์ตามที่ปรากฏในตารางที่ 5.3 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 สามารถอธิบายได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ΔD_{dif} เป็นสมาชิกของเซตลบ ($\Delta D_{dif} \in \mathbb{N}$) ก็ต่อเมื่อ ΔD_{dif} มีค่าน้อยกว่า -0.08 กระบวนการฟิสิกส์ของ m_{iL1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิสิกส์ข้อที่ 1 ถึงกฎที่ 3 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 1 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} เป็นบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า -0.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 2) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 2 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง $-m_{FS2}$ ถึง m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 3) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 3 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} มีค่าบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าเกิน $0.5m_{FS2}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

กรณีที่ 2 ΔD_{dif} เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($\Delta D_{dif} \in \mathbb{Z}$) ก็ต่อเมื่อ ΔD_{dif} มีค่าอยู่ในช่วง -0.12 ถึง 0.12 กระบวนการฟิสิกส์ของ m_{iL1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิสิกส์ข้อที่ 4 ถึงกฎที่ 6 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 4) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 4 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} เป็นบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า -0.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 5) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 5 เมื่อ m_{iL1}/m_{FS2} มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง m_{iL1} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง $-m_{FS2}$ ถึง m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

6) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 6 เมื่อ m_{IL1}/m_{FS2} มีค่าบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{IL1} ณ เวลาที่พิจารณา มีค่าเกิน $0.5m_{FS2}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

กรณีที่ 3 ΔD_{dif} เป็นสมาชิกของเซตศูนย์ ($\Delta D_{dif} \in Z$) ก็ต่อเมื่อ ΔD_{dif} มีค่ามากกว่า 0.08 กระบวนการฟิสิกส์ของ m_{IL1} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิสิกส์ข้อที่ 7 ถึงกฎที่ 9 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

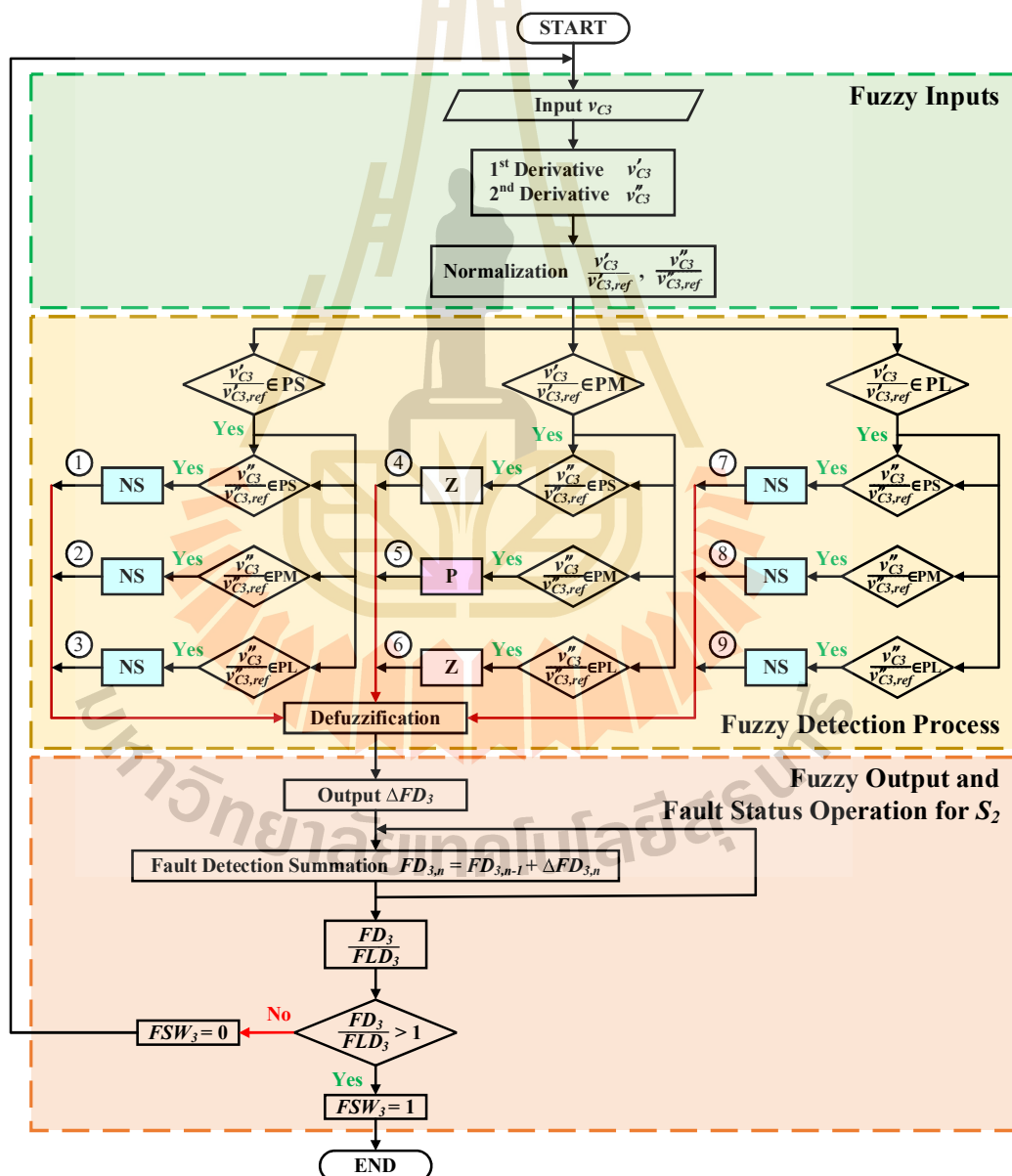
- 7) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 7 เมื่อ m_{IL1}/m_{FS2} เป็นบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{IL1} ณ เวลาที่พิจารณา มีค่าต่ำกว่า -0.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดพร่องที่ S_2
- 8) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 8 เมื่อ m_{IL1}/m_{FS2} มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต Z หมายถึง m_{IL1} ณ เวลาที่พิจารณา มีค่าอยู่ในช่วง $-m_{FS2}$ ถึง m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 9) กฎฟิสิกส์ข้อที่ 9 เมื่อ m_{IL1}/m_{FS2} มีค่าบวกอยู่ในเซต P หมายถึง m_{IL1} ณ เวลาที่พิจารณา มีค่าเกิน $0.5m_{FS2}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพร่องต้องสร้าง ΔFD_2 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดพร่องที่ S_2

กระบวนการแสดงสถานะการผิดพร่องที่ S_2 จะแสดงสถานะการทำงานปกติ เมื่อ FWS_2 เป็น 0 โดยเมื่อเกิดความผิดพร่องที่ S_2 สถานะ FWS_2 จะเป็น 1 จะเห็นว่ากระบวนการแสดงสถานะการผิดพร่องที่ S_2 มีความแตกต่างจากกระบวนการแสดงสถานะการผิดพร่องที่ S_1 เนื่องจากพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_{in} จะทำให้ m_{IL1} จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเกินช่วง $-m_{FS2}$ ถึง m_{FS2} ในระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้นดังที่แสดงในภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตรูปที่ 5.3 และ 5.4 ผลตอบสนองดังกล่าวตรงกับกฎฟิสิกส์ของการตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 ข้อที่ 7 และ 9 ที่ให้ ΔFD_2 เป็นบวก (P) จึงใช้วิธีการบวกสะสมค่าของ ΔFD_2 เข้าช่วยเพื่อให้การตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 มีความถูกต้องยิ่งขึ้น ค่าสัญญาณความผิดพร่องที่ S_2 (FD_2) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.6)

$$FD_{2,n} = FD_{2,n-1} + \Delta FD_{2,n} \quad (5.6)$$

จากสมการคำนวณหาเอาต์พุต FD_2 ที่กล่าวมาหากมีค่าเป็นบวกละบวจะแสดงถึงการทำงานของวงจรในที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดสถานะเกิดความผิดปกติ เพื่อให้ได้การตรวจจับที่ถูกต้อง จึงกำหนดขอบเขตการตรวจจับความผิดปกติของเอาต์พุต FD_2 อยู่ในช่วงศูนย์ถึงค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 (FLD_2) เพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจจับผิดพลาดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน เพื่อให้ได้ค่า FLD_2 ที่เหมาะสม ซึ่งจะกล่าวในเนื้อหาถัดไป ดังนั้นเพื่อให้ได้การตรวจจับที่ถูกต้องกระบวนการแสดงสถานะการผิดปกติจะแสดงสถานะ FSW_2 เป็น 1 ก็ต่อเมื่อค่าสัญญาณ FD_2 หาดด้วย FLD_2 มีค่ามากกว่า 1

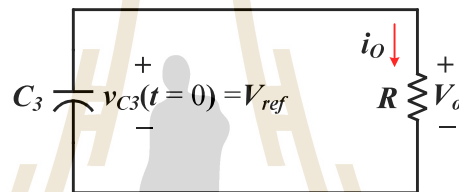
5.3.3 การตรวจจับความผิดปกติที่ S_3



รูปที่ 5.29 แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3

จากการสังเกตพฤติกรรมการเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 จะเห็นได้ว่า สัญญาณแรงดัน v_{C3} มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จึงพิจารณาค่าดังกล่าวเป็นอินพุตสำหรับการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 โดยแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 แสดงดังรูปที่ 5.29 โดยที่ ค่าสัญญาณความผิดพลาดที่ S_3 (FD_3) ในปัจจุบัน จะได้จากการนำค่าสัญญาณความผิดพลาดที่ S_3 ก่อนหน้านั้น ($FD_{3,n-1}$) บวกกับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่สวิตช์ตัวที่ 3 (ΔFD_3) ที่สร้างขึ้นในขณะนั้น ๆ

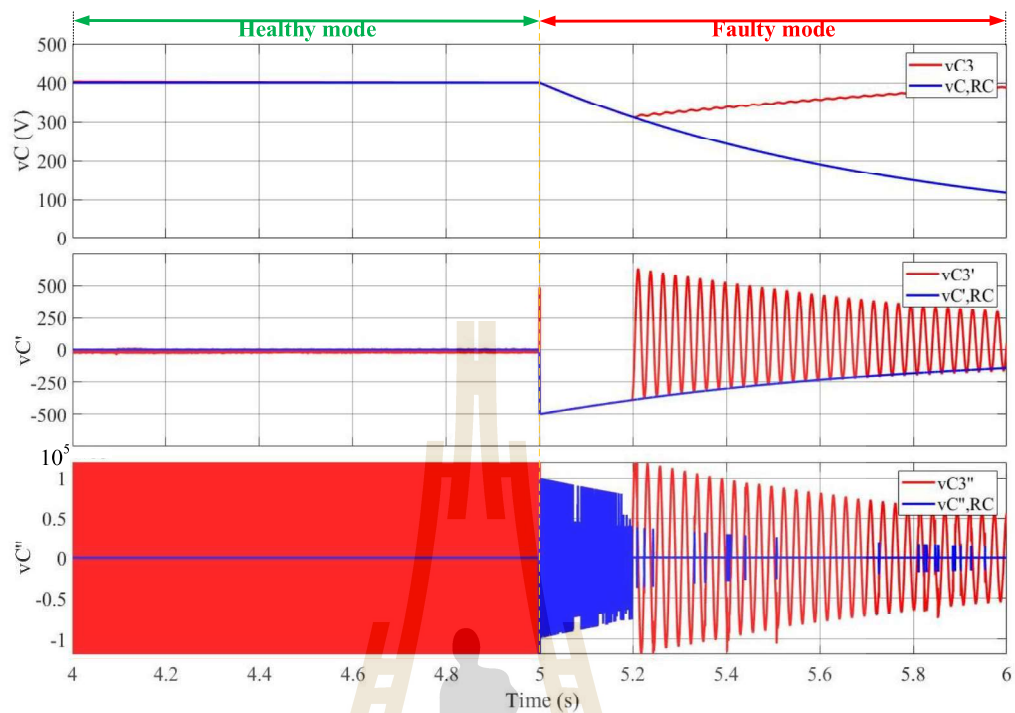
ผลตอบสนองของ v_{C3} เมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 พบว่ามีค่าลดลงจากการคายประจุให้กับ R เนื่องจาก i_{L3} มีค่าเป็น 0A ทันทีที่เกิดความผิดพลาด ซึ่งจะได้อัตราการรวมมูลเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 ที่มีลักษณะคล้ายกับวงจร RC ที่มีแรงดันเริ่มต้นเท่ากับแรงดันอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 5.30 ดังนั้น จะสามารถพิจารณา v_{C3} เมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 ได้จากสมการที่ (5.7)



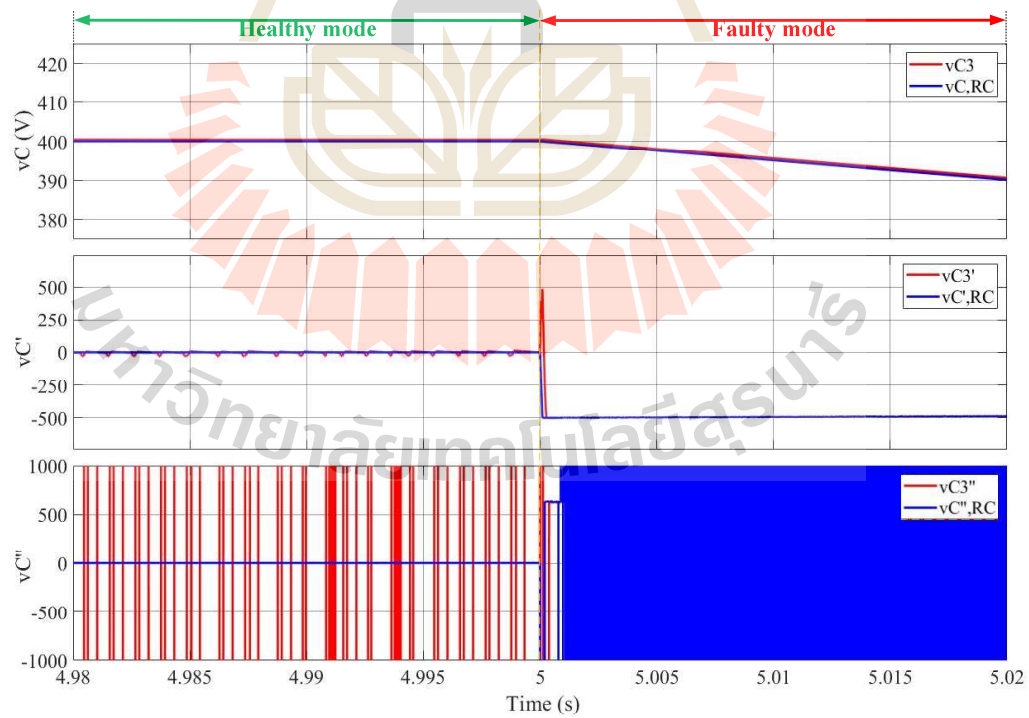
รูปที่ 5.30 วงจรสมมูลเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3

$$v_{C3} \text{ } t = V_{ref} e^{-t/RC_3} \quad (5.7)$$

การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 เปรียบเทียบกับวงจร RC เมื่อ C_3 คายประจุให้โหลด R แสดงดังรูปที่ 5.31 โดยเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ณ วินาทีที่ 5 จะเห็นได้ว่าแรงดัน v_{C3} มีค่าลดลงจากการคายประจุให้กับ R และมีผลตอบสนองเหมือนกับวงจร RC หลังจากนั้น ณ วินาทีที่ 5.2 แรงดัน v_{C3} มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าหา V_{ref} เนื่องจากตัวควบคุมฟัซซีพยายามควบคุมแรงดันให้ได้ตามต้องการโดยอาศัยสวิตช์สองตัวที่เหลือ ซึ่งยังคงทำงานได้ตามปกติ ส่วนค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและค่าอนุพันธ์อันดับสองของ v_{C3} มีผลตอบสนองที่คล้ายกันในช่วงเวลาวินาทีที่ 5 ถึง 5.02



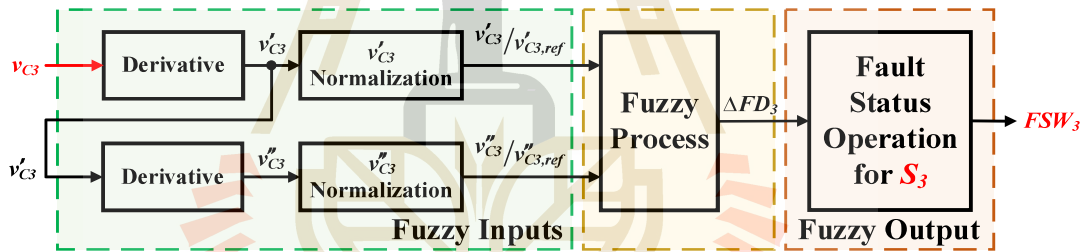
รูปที่ 5.31 ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 และวงจร RC



รูปที่ 5.31 ภาพขยายผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 และวงจร RC

รูปที่ 5.32 แสดงภาพขยายเพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างพฤติกรรมการทำงานของวงจรที่แสดงในรูปที่ 5.31 เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นหลังจากเกิดความผิดปกติที่ S_3 และวงจร RC พบว่าแรงดัน v_{C3} ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น และแรงดัน v_C ของวงจร RC มีค่าลดลงจาก 400V อย่างต่อเนื่อง โดยการคายประจุให้กับ R ส่วนอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ v_{C3} และ v_C มีค่าเท่ากันประมาณ -500V/s และอนุพันธ์อันดับสองของ v_{C3} และ v_C มีค่าเท่ากันประมาณ 625V/s^2 ในช่วงเวลาสั้น ๆ หลังจากเกิดความผิดปกติ ดังนั้นจึงใช้ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของ v_{C3} ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

จากแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ข้างต้น อินพุตของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ได้แก่ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ v_{C3} และค่าอนุพันธ์อันดับสองของ v_{C3} ที่ถูกปรับค่าสเกลในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ด้วยค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งอ้างอิงของ v_{C3} ($v'_{C3,ref}$) และค่าอนุพันธ์อันดับสองอ้างอิงของ v_{C3} ($v''_{C3,ref}$) ตามลำดับ โดยที่สัญญาณ v_{C3} ได้จากการตรวจวัดค่าแรงดันที่ใช้ในกระบวนการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นจากนั้นทำการหาค่าอนุพันธ์ หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดัน v_{C3} ดังรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 โครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3

จากโครงสร้างของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ดังแสดงในรูปที่ 5.33 จะเห็นได้ว่า อินพุตค่าแรกเริ่มจากกระบวนการอนุพันธ์ของ v_{C3} ให้ได้ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ v_{C3} (v'_{C3}) หลังจากนั้นจะถูกปรับค่าสเกลด้วยค่า $v'_{C3,ref}$ ในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ ที่ได้จากการพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_3 และวงจร RC โดยที่ค่า $v'_{C3,ref}$ สามารถพิจารณาจากผลตอบสนองทางธรรมชาติของวงจร RC ดังแสดงในรูปที่ 5.30 เมื่อ V_{ref} คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ณ เวลา $t = 0$ วินาที ดังสมการที่ (5.8)

$$v'_{C3} t = -\frac{V_{ref} e^{-t/RC}}{RC} \quad (5.8)$$

จะเห็นได้ว่า v'_{C3} แปรผันตามเวลา อย่างไรก็ตามการตรวจจับความผิดพร่องของสวิตช์ จำเป็นต้องมีความรวดเร็ว จึงพิจารณา $V'_{C3,ref}$ เมื่อเกิดความผิดพร่องทันที หรือช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุ เริ่มคายประจุ ดังนั้นจึงกำหนดให้ตัวแปรเวลามีค่าเป็นศูนย์ ($t = 0s$) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หาขนาด $V'_{C3,ref}$ ได้ดังสมการที่ (5.9)

$$V'_{C3,ref} = -\frac{V_{ref}}{RC} \quad (5.9)$$

จากค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ v_{C3} (v'_{C3}) ที่ได้จากการอนุพันธ์ข้างต้น ในขณะเดียวกัน v'_{C3} จะเข้าสู่กระบวนการอนุพันธ์อีกครั้งให้ได้ค่าอนุพันธ์อันดับสองของ v_{C3} (v''_{C3}) หลังจากนั้นจะถูกปรับค่าสเกลด้วยค่า $V''_{C3,ref}$ ในกระบวนการนอร์มัลไลซ์ โดยที่ค่า $V'_{C3,ref}$ สามารถพิจารณาได้จากค่าอนุพันธ์ของ v'_{C3} ดังที่แสดงในสมการที่ (5.10)

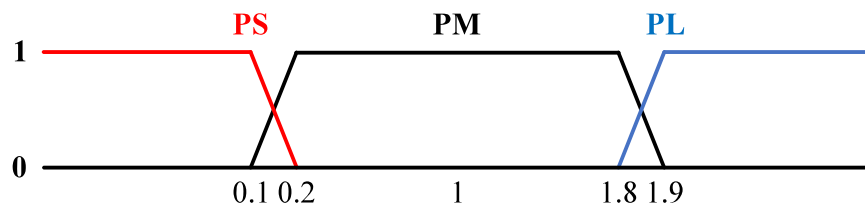
$$v''_{C3} t = \frac{V_{ref} e^{-t/RC}}{RC^2} \quad (5.10)$$

เช่นเดียวกันกับการพิจารณา $V'_{C3,ref}$ การตรวจจับความผิดพร่องของสวิตช์จำเป็นต้องมีความรวดเร็ว จึงพิจารณา $V''_{C3,ref}$ เมื่อเกิดความผิดพร่องทันที หรือช่วงเวลาที่ตัวเก็บประจุเริ่มคายประจุ ณ เวลาที่ 0 วินาที ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หาขนาด $V''_{C3,ref}$ ได้ดังสมการที่ (5.11)

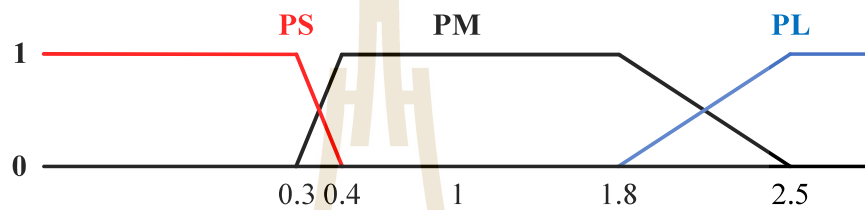
$$V''_{C3,ref} = \frac{V_{ref}}{RC^2} \quad (5.11)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ในบทที่ 3 จะสามารถคำนวณค่า $V'_{C3,ref}$ และ $V''_{C3,ref}$ เท่ากับ $-500V/s$ และ $625V/s^2$ ตามลำดับ

จากผลตอบสนองการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เมื่อเกิดความผิดพร่องที่ S_3 สามารถพิจารณาฟังก์ชันสมาชิกของค่า v'_{C3} และ v''_{C3} ที่ถูกปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalization) ในขอบเขตเฉพาะที่ต้องการ ดังรูปที่ 5.34 และ 5.35 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร



รูปที่ 5.34 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$



รูปที่ 5.34 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$

ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตทั้งสองจะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบเหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันสมาชิก $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ และ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ กำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก 3 เซต ได้แก่ “Positive Small: PS”, “Positive Medium: PM” และ “Positive Large: PL” ส่วนฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 3 คือสัญญาณการเปลี่ยนแปลงความผิดปกติของสวิตช์ตัวที่ 3 (ΔFD_3) จะใช้รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเป็นค่าคงที่เส้นตรงโทนที่มี 3 ค่าประกอบด้วย “Negative Small: NS”, “Zero: Z” และ “Positive: P” ดังรูปที่ 5.36 ซึ่งเป็นรูปแบบการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno fuzzy inference)



รูปที่ 5.36 ฟังก์ชันสมาชิกการเปลี่ยนแปลงการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 (ΔFD_3)

เช่นเดียวกันกับการกำหนดค่าเชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตสำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 จากการศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น พบว่าเมื่อเกิดความผิดปกติที่ S_3 วงจรจะมีการตอบสนองที่คล้ายคลึงกับการเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจรในบางสถานการณ์ ดังนั้น จึงกำหนดค่า

เชิงภาษาของฟังก์ชันสมาชิก ΔFD_3 เป็นน้อยมาก (Negative Small) ไว้ที่ -0.05 โดยค่านี้ไม่ได้สมมาตรกับค่า Positive ดังที่แสดงในรูปที่ 5.36 ซึ่งจะถูกกล่าวถึงในขั้นถัดไปในหัวข้อกระบวนการแสดงสถานะความผิดพลาดที่ S_3

ความสัมพันธ์ของอินพุต $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ และ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ และเอาต์พุต ΔFD_3 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 การออกแบบกฎของฟัซซีระหว่างตัวแปรทั้ง 3 มีดังนี้

1 st	IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PS AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PS THEN ΔFD_3 = N
2 nd	IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PS AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PM THEN ΔFD_3 = N
3 rd	IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PS AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PL THEN ΔFD_3 = N
4 th	IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PM AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PS THEN ΔFD_3 = Z
5 th	IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PM AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PM THEN ΔFD_3 = P
6 th	IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PM AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PL THEN ΔFD_3 = Z
7 th	IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PL AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PS THEN ΔFD_3 = N
8 th	IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PL AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PM THEN ΔFD_3 = N
9 th	IF $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ = PL AND $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ = PL THEN ΔFD_3 = N

ตารางที่ 5.4 หน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ของการตรวจจับความผิดพลาดของสวิตซ์ตัวที่ 3

$v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ \ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$	PS	PM	PL
PS	NS	Z	NS
PM	NS	P	NS
PL	NS	Z	NS

จากการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิก ΔFD_3 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้สามารถใช้ในการระบุสถานะความผิดพลาดที่ S_3 ได้ โดยหากค่า ΔFD_3 มีค่าเป็นลบ จะแสดงว่าระบบอยู่ในสภาวะปกติ แต่หากค่า ΔFD_3 มีค่าเป็นบวก จะบ่งชี้ถึงการเกิดความผิดพลาด การวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ทำให้สามารถออกแบบกระบวนการทางฟัซซีเพื่อตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 ได้ โดยกำหนดความสัมพันธ์ของอินพุตที่ใช้ในการตรวจจับความผิดพลาดในรูปของกฎฟัซซี ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบของหน่วยความจำฟัซซีสัมพันธ์ตามที่ปรากฏในตารางที่ 5.4 ตัวอย่างการตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 สามารถอธิบายได้ดังนี้

กรณีที่ 1 $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ เป็นสมาชิกของเซตบวกค่าน้อย ($v'_{C3}/V'_{C3,ref} \in PS$) ก็ต่อเมื่อ v'_{C3} มีค่าน้อยกว่า 0.2 เท่าของ $V'_{C3,ref}$ กระบวนการฟิชซีของ v''_{C3} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิชซีข้อที่ 1 ถึงกฎที่ 3 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) กฎฟิชซีข้อที่ 1 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PS หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.4 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 2) กฎฟิชซีข้อที่ 2 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต PM หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 2.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 3) กฎฟิชซีข้อที่ 3 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PL หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่ามากกว่า 1.8 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

กรณีที่ 2 $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ เป็นสมาชิกของเซตค่าบวกปานกลาง ($v'_{C3}/V'_{C3,ref} \in PM$) ก็ต่อเมื่อ v'_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.9 เท่าของ $V'_{C3,ref}$ กระบวนการฟิชซีของ v''_{C3} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิชซีข้อที่ 4 ถึงกฎที่ 6 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 4) กฎฟิชซีข้อที่ 4 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PS หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.4 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 5) กฎฟิชซีข้อที่ 5 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต PM หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 2.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นบวก (P) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เกิดความผิดพลาดที่ S_3
- 6) กฎฟิชซีข้อที่ 6 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PL หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่ามากกว่า 1.8 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาด

ต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นศูนย์ (Z) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

กรณีที่ 2 $v'_{C3}/V'_{C3,ref}$ เป็นสมาชิกของเซตค่าบวกปานกลาง ($v'_{C3}/V'_{C3,ref} \in PM$) ก็ต่อเมื่อ v'_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่ามากกว่า 1.8 เท่าของ $V'_{C3,ref}$ กระบวนการฟิชซีของ v''_{C3} ณ เวลาใด ๆ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเข้าเงื่อนไขกฎฟิชซีข้อที่ 7 ถึงกฎที่ 9 กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 7) กฎฟิชซีข้อที่ 7 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PS หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าต่ำกว่า 0.4 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 8) กฎฟิชซีข้อที่ 8 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ มีค่าเป็นศูนย์อยู่ในเซต PM หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 2.5 เท่าของ m_{FS2} ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ
- 9) กฎฟิชซีข้อที่ 9 เมื่อ $v''_{C3}/V''_{C3,ref}$ เป็นบวกอยู่ในเซต PL หมายถึง v''_{C3} ณ เวลาที่พิจารณามีค่ามากกว่า 1.8 เท่าของ $V''_{C3,ref}$ ดังนั้นตัวตรวจจับความผิดพลาดต้องสร้าง ΔFD_3 ที่เป็นลบน้อย (NS) จะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสภาวะนี้เป็นการทำงานปกติ

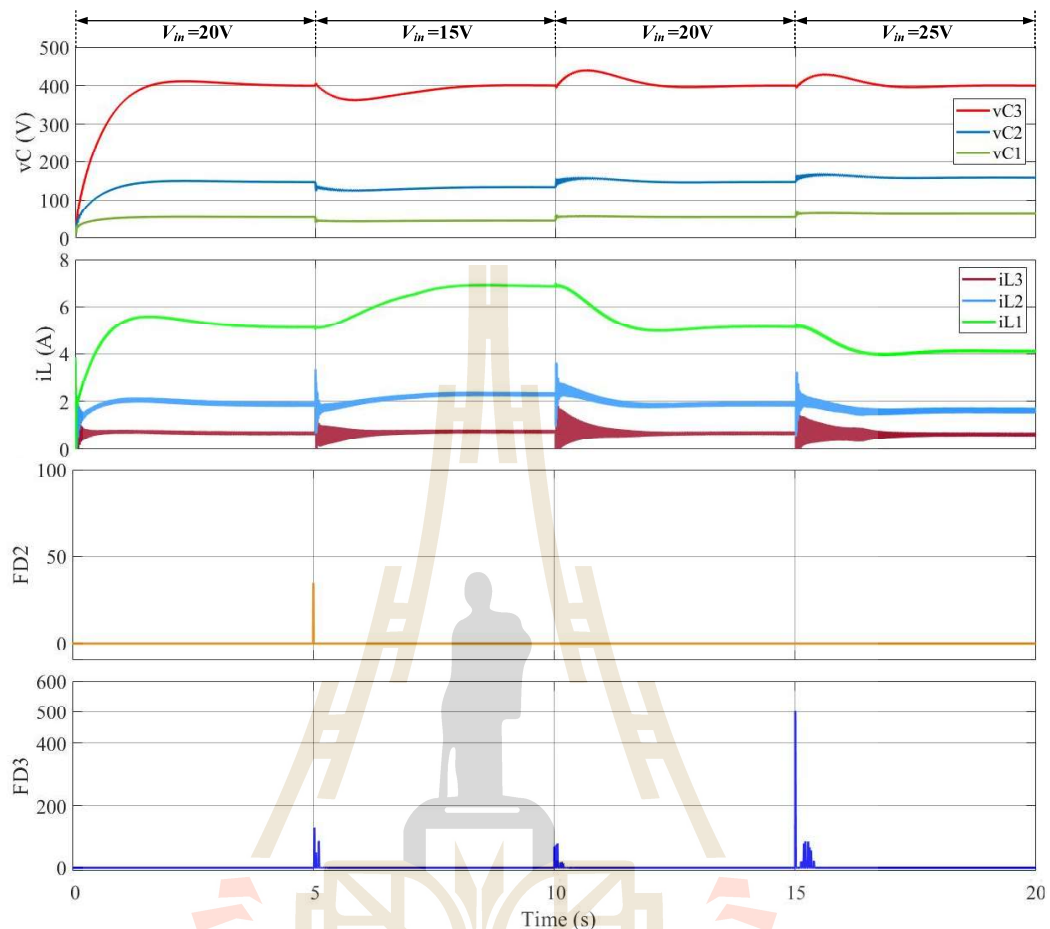
กระบวนการแสดงสถานะการผิดพลาดที่ S_3 จะมีกระบวนการคล้ายคลึงกับการแสดงสถานะการผิดพลาดที่ S_2 โดยจะแสดงสถานะการทำงานปกติ เมื่อ FWS_3 เป็น 0 โดยเมื่อเกิดความผิดพลาดที่ S_3 สถานะ FSW_3 จะเป็น 1 อย่างไรก็ตามจากการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนจุดการทำงานของแรงดัน V_{in} และ V_{ref} บางกรณี ที่ทำให้กระแส i_{L3} มีค่าเป็น 0A ในระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น โดยในช่วงดังกล่าว C_3 จะทำหน้าที่คายประจุให้กับ R ทั้งที่ช่วงเวลาดังกล่าวควรเป็นช่วงการอัดประจุ ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวตรงกับกฎฟิชซีของการตรวจจับความผิดพลาดของสวิตช์ตัวที่ 3 ข้อที่ 5 ที่ให้ ΔFD_3 เป็นบวก (P) จึงอาศัยวิธีการบวกสะสมค่าของ ΔFD_3 เข้าช่วยเพื่อให้การตรวจจับความผิดพลาดที่ S_3 มีความถูกต้องยิ่งขึ้น ค่าสัญญาณความผิดพลาดที่ S_3 (FD_3) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5.12)

$$FD_{3,n} = FD_{3,n-1} + \Delta FD_{3,n} \quad (5.12)$$

จากสมการคำนวณหาเอาต์พุต FD_2 ที่กล่าวมาเมื่อเป็นไปได้อัตโนมัติและลบ โดยที่ค่าบวกจะแสดงถึงการทำงานของวงจรในสถานะเกิดความผิดปกติ เพื่อให้ได้การตรวจจับที่ถูกต้อง จึงกำหนดขอบเขตการตรวจจับความผิดปกติของเอาต์พุต FD_3 อยู่ในช่วงศูนย์ถึงค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 (FLD_3) เพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจจับผิดพลาดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน เพื่อให้ได้ค่า FLD_3 ที่เหมาะสมจากการศึกษาพฤติกรรม ซึ่งจะกล่าวในเนื้อหาถัดไป ดังนั้นเพื่อให้ได้การตรวจจับที่ถูกต้อง กระบวนการแสดงสถานะการผิดปกติจะแสดงสถานะ FSW_3 เป็น 1 ก็ต่อเมื่อค่าสัญญาณ FD_3 หาดด้วย FLD_3 มีค่ามากกว่า 1

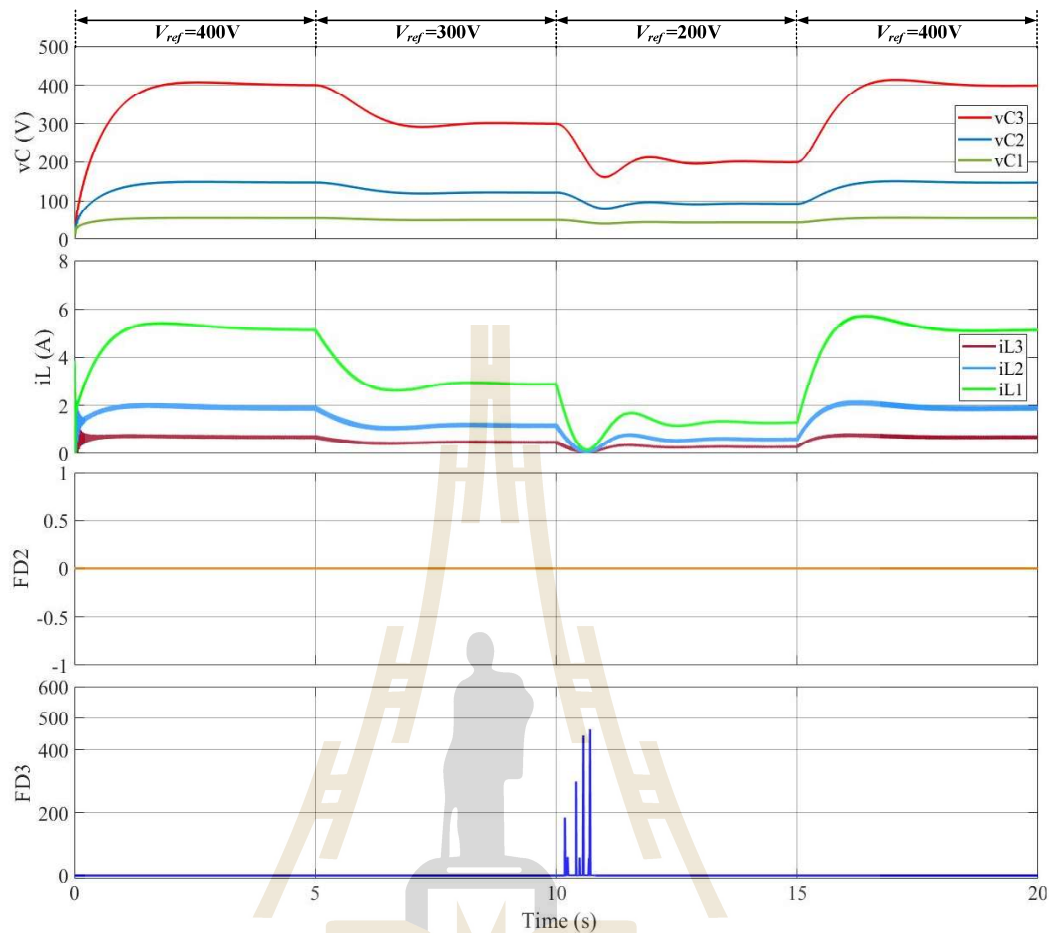
จากกระบวนการแสดงสถานะการผิดปกติ (Fault Status Operation) ของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 และ S_3 มีค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติสวิตช์ (FLD_2, FLD_3) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมกรณีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานโดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วย ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{in}) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R) การจำลองสถานการณ์แสดงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (v_{C1}, v_{C2}, v_{C3}) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}) ค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติ FLD_2 และ FLD_3 แสดงดังรูปที่ 5.37 โดยที่เอาต์พุตของการตรวจจับความผิดปกติ FD_2 และ FD_3 ได้จากสมการที่ (5.6) และ (5.12) ตามลำดับ

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} เป็น 20V, 15V, 20V และ 25V ในช่วงเวลา 0s, 5s, 10s และ 15s ตามลำดับ โดยที่คงค่า V_{ref} และ R ไว้ที่ 400V และ 1600Ω ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.37 สังเกตเห็นได้ว่า FD_2 มีขนาดเท่าประมาณ 0, 35, 0 และ 0 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} จาก 20V เป็น 15V จะส่งผลให้ m_{iL1} เกิดการสั้นไกว และมีค่าการเปลี่ยนแปลง เกินช่วง $-2m_{ref}$ ถึง $2m_{ref}$ A/s อีกทั้ง D เกิดการสั้นไกว ในเวลาสั้น ๆ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นตรงกับกฎฟิซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_2 เป็นค่า Positive สำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 ในขณะเดียวกัน FD_3 มีขนาดเท่าประมาณ 0, 125, 80 และ 500 ตามลำดับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานในช่วงเวลาที่ 5s, 10s และ 15s ทำให้กระแส i_{L3} มีค่าเป็น 0A ในระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น โดยในช่วงดังกล่าว C_3 จะทำหน้าที่คายประจุให้กับ R ทั้งในช่วงเวลาดังกล่าวควรเป็นช่วงการอัดประจุ ซึ่งผลตอบสนองที่ตรงกับกฎฟิซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_3 เป็นค่า Positive ในกระบวนการฟิซซีสำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการตรวจจับความผิดปกติจึงกำหนดค่า FLD_2 และ FLD_3 เป็น 50 และ 600 ตามลำดับ



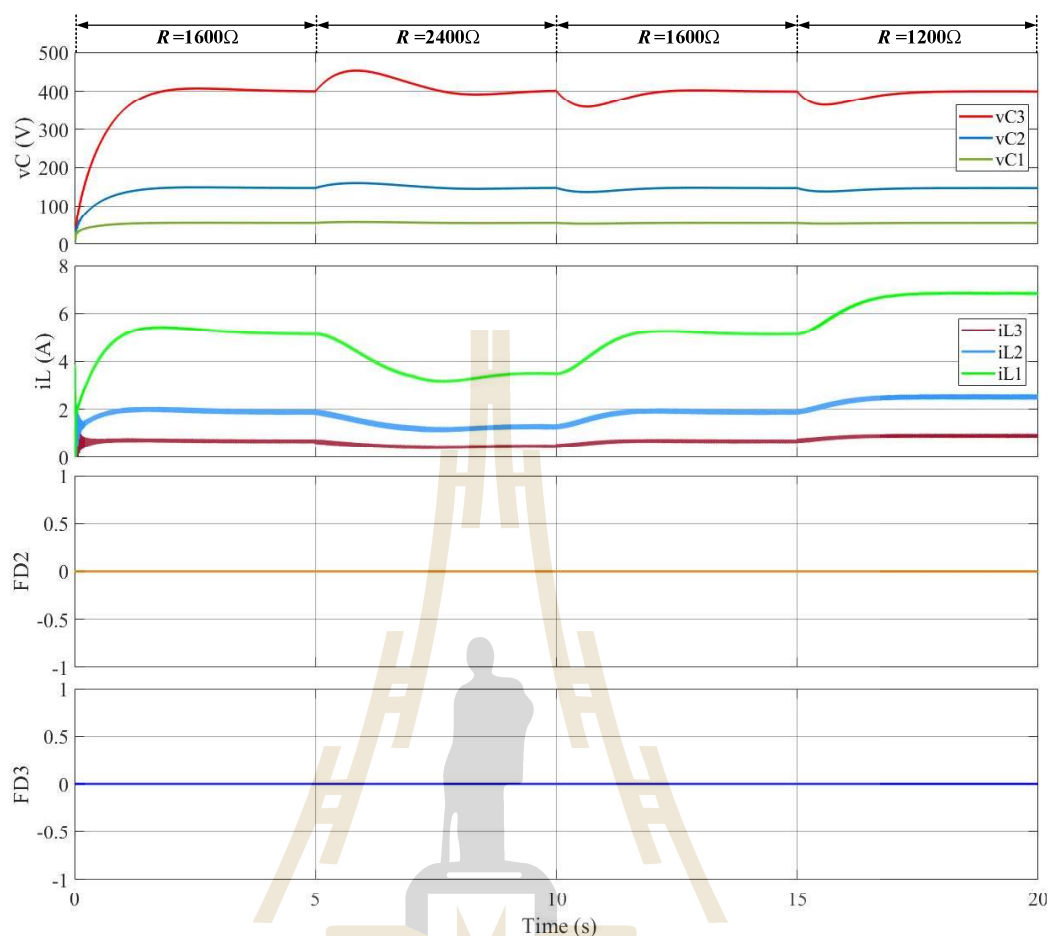
รูปที่ 5.37 การจำลองสถานการณ์หาค่า FLD_2 และ FLD_3 กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} เป็น 400V, 300V, 200V และ 400V ในช่วงเวลา 0s, 5s, 10s และ 15s ดังรูปที่ 5.38 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_{ref} ลดลงจาก 300V เป็น 200V ส่งผลให้ FD_3 มีขนาดสูงสุดประมาณ 460 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง V_{ref} จาก 300V เป็น 200V เท่านั้นที่ส่งผลให้ i_{L3} มีค่าเป็น 0A ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งผลตอบสนองที่เกิดขึ้นตรงกับกฎฟัซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_3 เป็นค่า Positive ของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณา FD_2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} แต่ละค่า จะได้ค่า FD_2 มีขนาดเท่ากับศูนย์ เนื่องจากผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ไม่ตรงกับกฎฟัซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_2 เป็นค่า Positive ในกระบวนการฟัซซีของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2 อย่างไรก็ตามการกำหนดค่า FLD_3 ที่ 600 ก่อนหน้านี้ ยังมีความครอบคลุมและสามารถหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 ได้



รูปที่ 5.38 การจำลองสถานการณ์หาค่า FLD_2 และ FLD_3 กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R เป็น 1600Ω, 2400Ω, 1600Ω และ 1200Ω ในช่วงเวลา 0s, 5s, 10s และ 15s ตามลำดับ โดยที่คงค่า V_{in} และ V_{ref} ไว้ที่ 20V และ 400V ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และเอาต์พุตของการตรวจจับความผิดพร่องทั้งสองแสดงดังรูปที่ 5.39 สังเกตเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R แต่ละค่า ส่งผลให้ค่าเอาต์พุต ΔFD_2 และ ΔFD_3 มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากผลตอบสนองจากการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานที่เกิดขึ้น ไม่ตรงกับกฎฟิซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_2 และ ΔFD_3 เป็นค่า Positive ในกระบวนการฟิซซีของการตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 และ S_3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.39 การจำลองสถานการณ์หาค่า FLD_2 และ FLD_3 กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจจับความผิดพลาด จำเป็นต้องมีการพิจารณาค่าจำกัดการตรวจจับความผิดพลาดสวิตช์ทั้งสอง (FLD_2 , FLD_3) โดยอาศัยผลจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นเมื่อการทำงานการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน ซึ่งพบว่ากรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตให้ผลตอบสนองสั้น ๆ ที่คล้ายกับการเกิดความผิดพลาดที่ S_2 และ S_3 ซึ่งผลตอบสนองที่เกิดขึ้นตรงกับกฎฟัซซีที่ให้เอาต์พุต ΔFD_2 และ ΔFD_3 เป็นค่า Positive เมื่อพิจารณาเอาต์พุตของการตรวจจับความผิดพลาด FD_2 และ FD_3 ได้จากสมการที่ (5.6) และ (5.12) ตามลำดับ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานได้ศึกษา ซึ่งจะสามารถกำหนดค่า FLD_2 และ FLD_3 ที่สามารถหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจจับความผิดพลาดได้ดังตารางที่ 5.5

จากการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรในสภาวะปกติในสภาวะการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานต่าง ๆ และเมื่อเกิดความผิดปกติ ภายใต้การทำงานการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาผลตอบสนองของกระแส i_{L1} แรงดัน v_{C3} และ สัญญาณ D ภายใต้การควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น สามารถนำมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติ (Fault detection strategy) เพื่อที่จะสามารถระบุตำแหน่งสวิตช์ที่เกิดความผิดปกติภายในวงจร โดยใช้กระบวนการฟuzzyในการตรวจจับความผิดปกติแสดงดังรูปที่ 5.17 การตรวจจับความผิดปกติของแต่ละสวิตช์มีพารามิเตอร์ต้องพิจารณาในการดำเนินการปรับค่าสเกล หรือเรียกว่าการนอร์มัลไลซ์ (Normalization) เพื่อปรับขนาดค่าให้อยู่ภายในขอบเขตการทำงานที่การควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างครอบคลุม ดังตารางที่ 5.5 โดยพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุภายในวงจร และค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น ดังตารางที่ 3.3, 3.4 และ 4.2 ตามลำดับ อีกทั้งยังมีค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติทั้งสอง (FLD_2, FLD_3)

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ของการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น

การตรวจจับความผิดปกติ	พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
S_1	ค่าความชันของกระแสขณะเกิดความผิดปกติที่ S_1	m_{FS1}	2,319	A/s
	ค่ากระแสที่ไหลผ่าน L_1 ในสภาวะปกติ	i_{FS1}	5	A
S_2	ค่าวัฏจักรหน้าที่อ้างอิงของสวิตช์	D_{ref}	0.635	–
	ค่าความชันของกระแสขณะเกิดความผิดปกติที่ S_2	m_{FS2}	200	A/s
	ค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2	FLD_2	50	–
S_3	ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งอ้างอิงของ v_{C3}	$V'_{C3,ref}$	–500	V/s
	ค่าอนุพันธ์อันดับสองอ้างอิงของ v_{C3}	$V''_{C3,ref}$	625	V/s ²
	ค่าจำกัดการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3	FLD_3	600	–

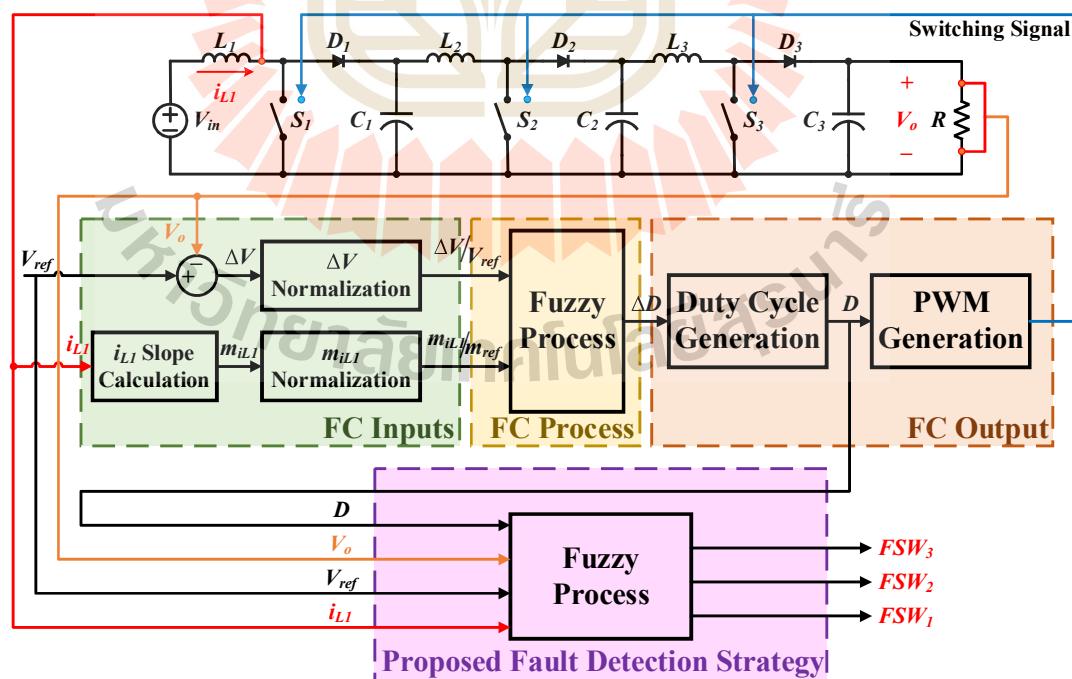
5.4 การจำลองสถานการณ์

เพื่อแสดงประสิทธิภาพของตัวตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นที่สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จะอาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วยในการจำลองสถานการณ์การตรวจจับ

ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจร และค่าพารามิเตอร์การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ การจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรในสภาวะการทำงานปกติ การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร รวมถึงการสร้างสมมติฐานต่อความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น โดยสามารถระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นในแต่ละสวิตช์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว เพื่อให้การกู้คืนการทำงานของวงจรจากความผิดปกติ โดยจะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดปกติขึ้นเท่านั้น

5.4.1 การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรในสภาวะการทำงานปกติ

การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรในสภาวะการทำงานปกติ เพื่อยืนยันว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นนั้นมีความสามารถในการตรวจจับความผิดปกติ และระบุตำแหน่งของสวิตช์ได้อย่างถูกต้อง การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 โดยผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติ ตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานของวงจรในสภาวะปกติ และเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่วินาทีที่ 5 ทั้งนี้โครงสร้างที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.40



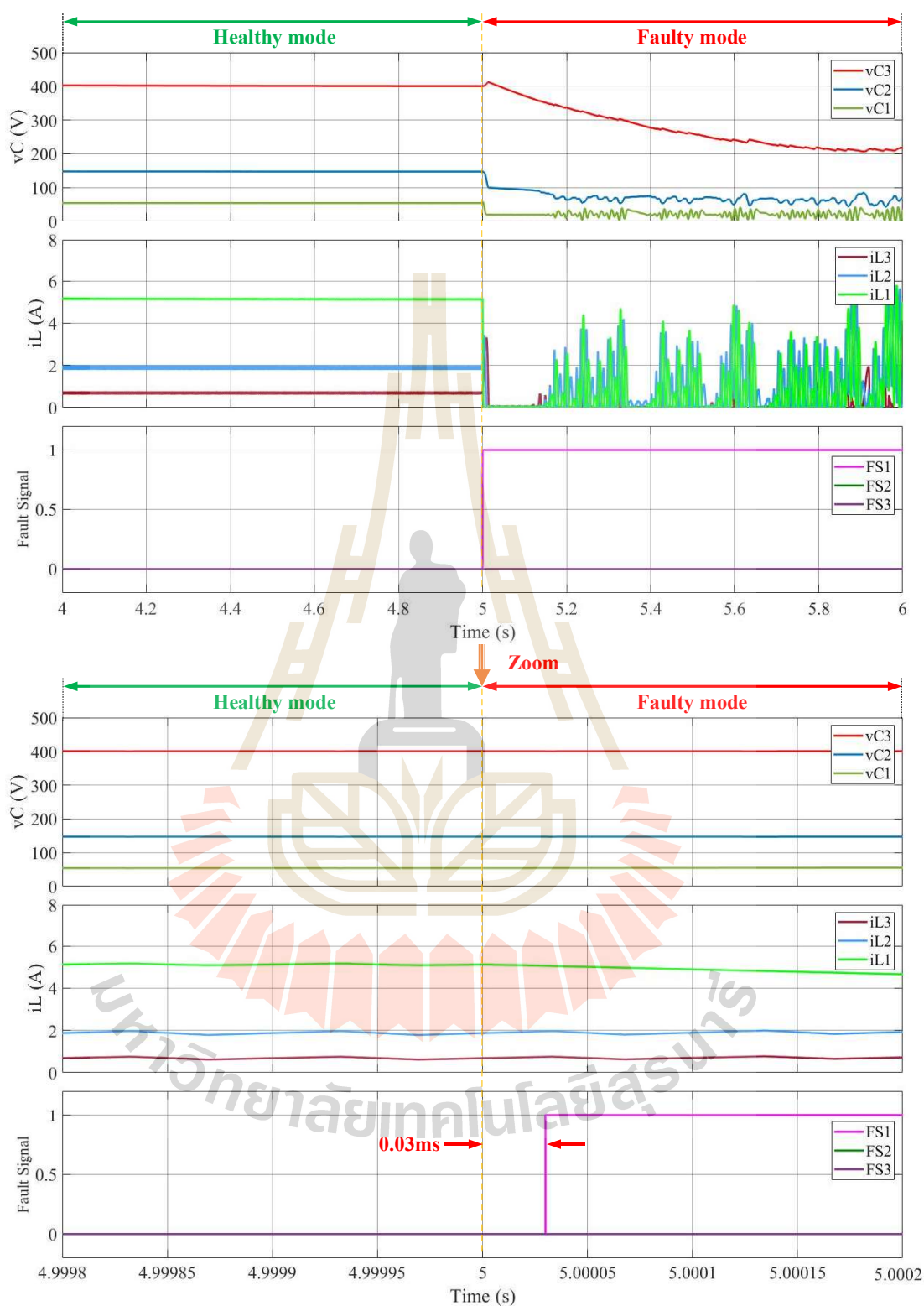
รูปที่ 5.40 โครงสร้างการควบคุมฟัซซีและการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น

ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 แสดงดังรูปที่ 5.41, 5.42 และ 5.43 ตามลำดับ พบพฤติกรรมการทำงานของวงจร และการตรวจจับความผิดพร่องที่พัฒนาขึ้นดังนี้

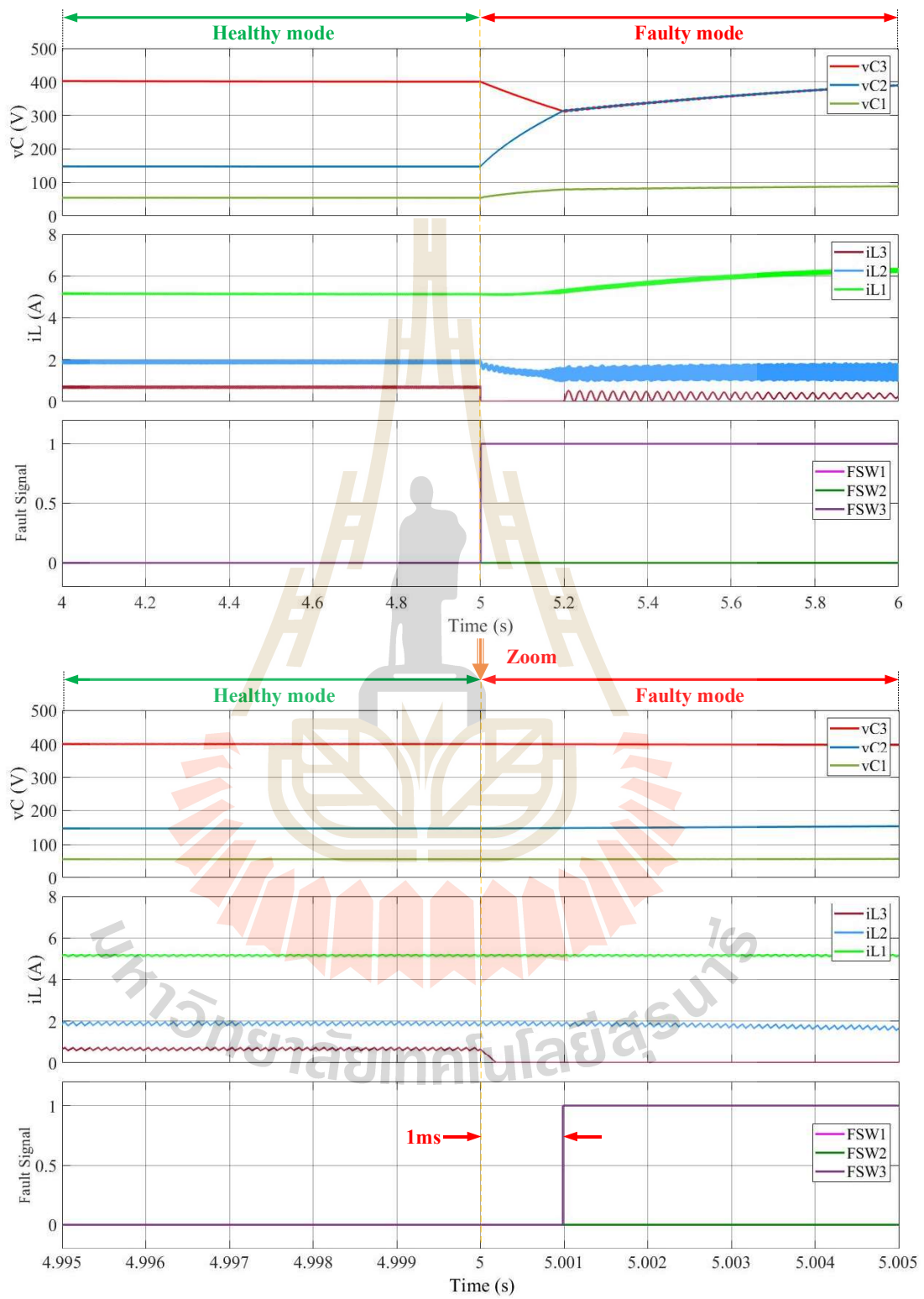
การตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 : พิจารณารูปที่ 5.41 พบว่าแรงดัน V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ลดลงอย่างรวดเร็วจนถึง 0A ในการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ได้อาศัย i_{L1} และ m_{iL1} เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นว่า i_{L1} มีขนาดลดลงจากสภาวะอยู่ตัวที่ค่าประมาณ 5A ลดลงจนถึง 0A และ m_{iL1} มีค่าติดลบจากการที่กระแสลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีค่าประมาณ $-2300A/s$ ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวตกอยู่ในกฎฟิซซีที่ 1 และ 4 ดังที่กล่าวไว้ดังตารางที่ 5.2 ทำให้สามารถตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นโดยใช้เวลา 0.03ms

การตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 : จากรูปที่ 5.47 พบว่าแรงดัน V_O ยังคงค่าตาม V_{ref} ที่ 400V โดยตัวควบคุมฟิซซี เมื่อพิจารณา m_{iL1} พบว่าเกิดการสั่นไหวที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัด และ D เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเกิดการสั่นไหวมากกว่าในสภาวะปกติอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวตกอยู่ในกฎฟิซซีที่ 7 และ 9 ให้ค่าเอาต์พุตเป็น Positive ของการตรวจจับความผิดพร่องที่ S_2 ดังที่กล่าวไว้ดังตารางที่ 5.3 ทำให้สามารถตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นโดยใช้เวลา 0.0054s หรือ 5.4ms

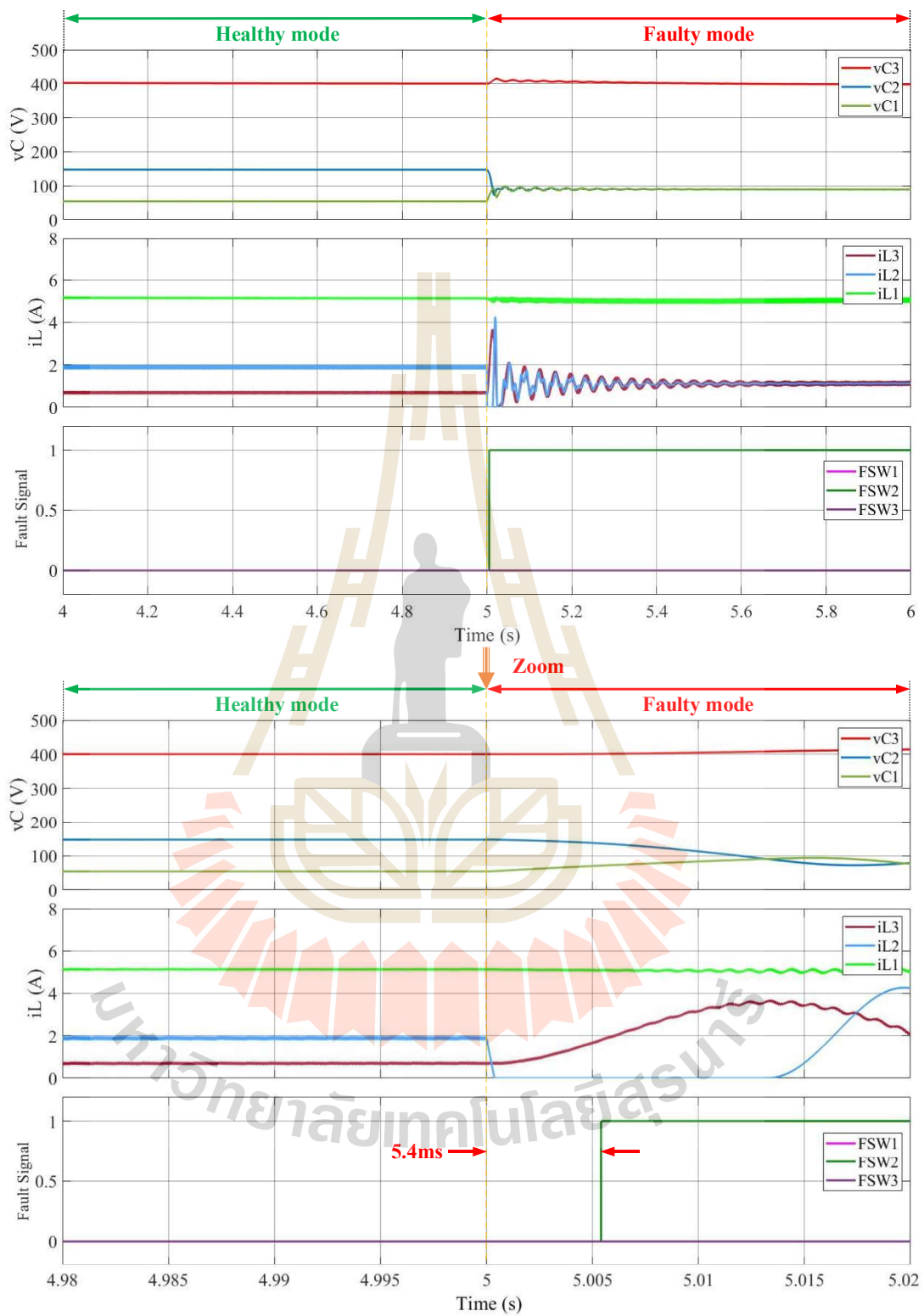
การตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 : พิจารณารูปที่ 5.41 จะเห็นว่าแรงดัน V_{C3} มีค่าลดลงจากการคายประจุให้กับ R ส่งผลให้ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ V_{C3} และค่าอนุพันธ์อันดับสองของ V_{C3} มีผลตอบสนองสอดคล้องกับกฎฟิซซีที่ 5 ให้ค่าเอาต์พุตเป็นบวก ดังที่แสดงไว้ดังตารางที่ 5.4 ทำให้สามารถตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นโดยใช้เวลา 1ms



รูปที่ 5.41 การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดที่ S_1



รูปที่ 5.42 การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดที่ S_2



รูปที่ 5.43 การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดที่ S_3

5.4.2 การจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องภายใต้สภาวะการทำงานของวงจรที่เปลี่ยนแปลง จะแบ่งออกเป็น 5 กรณี การเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุต การลดลงของแรงดันอินพุต การลดลงของแรงดันอ้างอิง การเพิ่มขึ้นของโหลดตัวต้านทาน และการลดลงของโหลดตัวต้านทาน

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} เพิ่มขึ้นจาก 20V เป็น 25V ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{ref} และ R ไว้ที่ 400V และ 1600Ω ตามลำดับ จากรูปที่ 5.44 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของ V_{in} ส่งผลให้แรงดัน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} การพุ่งเกิน อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้มีค่าลดลงเข้าหา V_{ref} ที่ 400V ส่วน i_{L1} และ i_{L2} มีค่าลดลง เพื่อรักษากำลังไฟฟ้าอินพุตเท่ากับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตไว้ที่ 100W โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 2.3s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดปกติที่ S_1 , S_2 และ S_3 ดังที่แสดงดังรูปที่ 5.44 (ก), (ข) และ (ค) เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับความผิดปกติที่ S_1 , S_2 และ S_3 โดยใช้เวลา 0.024ms, 9.239ms และ 0.978ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มีตรวจจับความผิดปกติที่ผิดพลาดในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของ V_{in} ที่เพิ่มขึ้น

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} ลดลงจาก 20V เป็น 15V ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{ref} และ R ไว้ที่ 400V และ 1600Ω ตามลำดับ จากรูปที่ 5.45 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติขณะที่มีการลดลงของ V_{in} ส่งผลให้แรงดัน v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} เกิดการลดลง อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าหา V_{ref} ที่ 400V ส่วน i_{L1} และ i_{L2} มีค่าเพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดปกติที่ S_1 , S_2 และ S_3 เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับความผิดปกติโดยใช้เวลา 0.068ms, 7.5ms และ 2.642ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มีตรวจจับความผิดปกติที่ผิดพลาดในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของ V_{in} ที่ลดลง

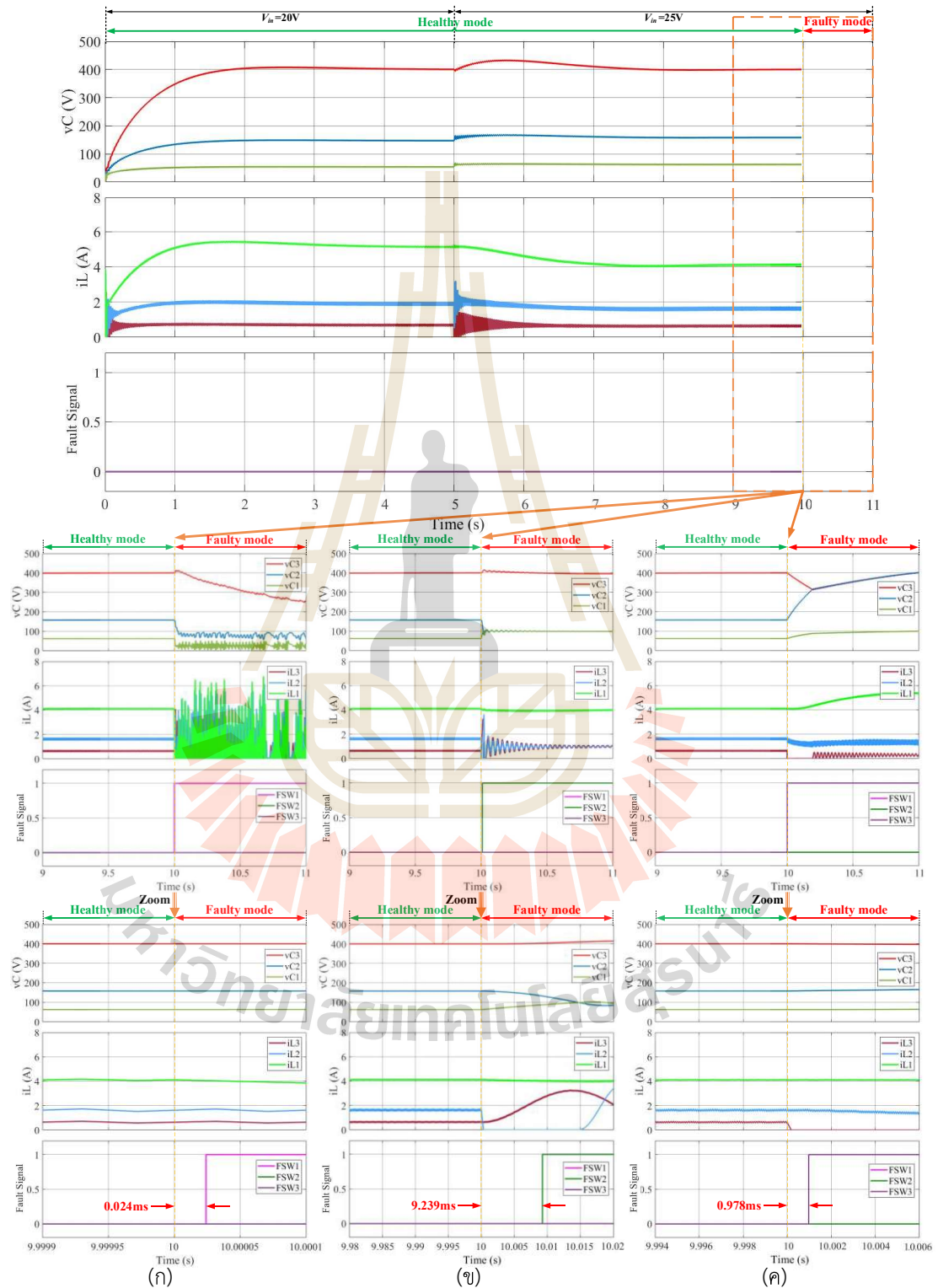
กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} ลดลงจาก 400V เป็น 200V ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{in} และ R ไว้ที่ 20V และ 1600Ω ตามลำดับ หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10

เกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 จากรูปที่ 5.46 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติ V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} ส่วน i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีผลที่ลดลง และสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้ได้ตามต้องการที่ลดลงจาก 400V เป็น 200V โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3.5s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดพลาดที่ S_1 , S_2 และ S_3 เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้โดยใช้เวลา 0.083ms, 14.995ms และ 2.651ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มี การตรวจจับความผิดพลาดที่ผิดพลาดในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของ V_{ref} ที่ลดลง

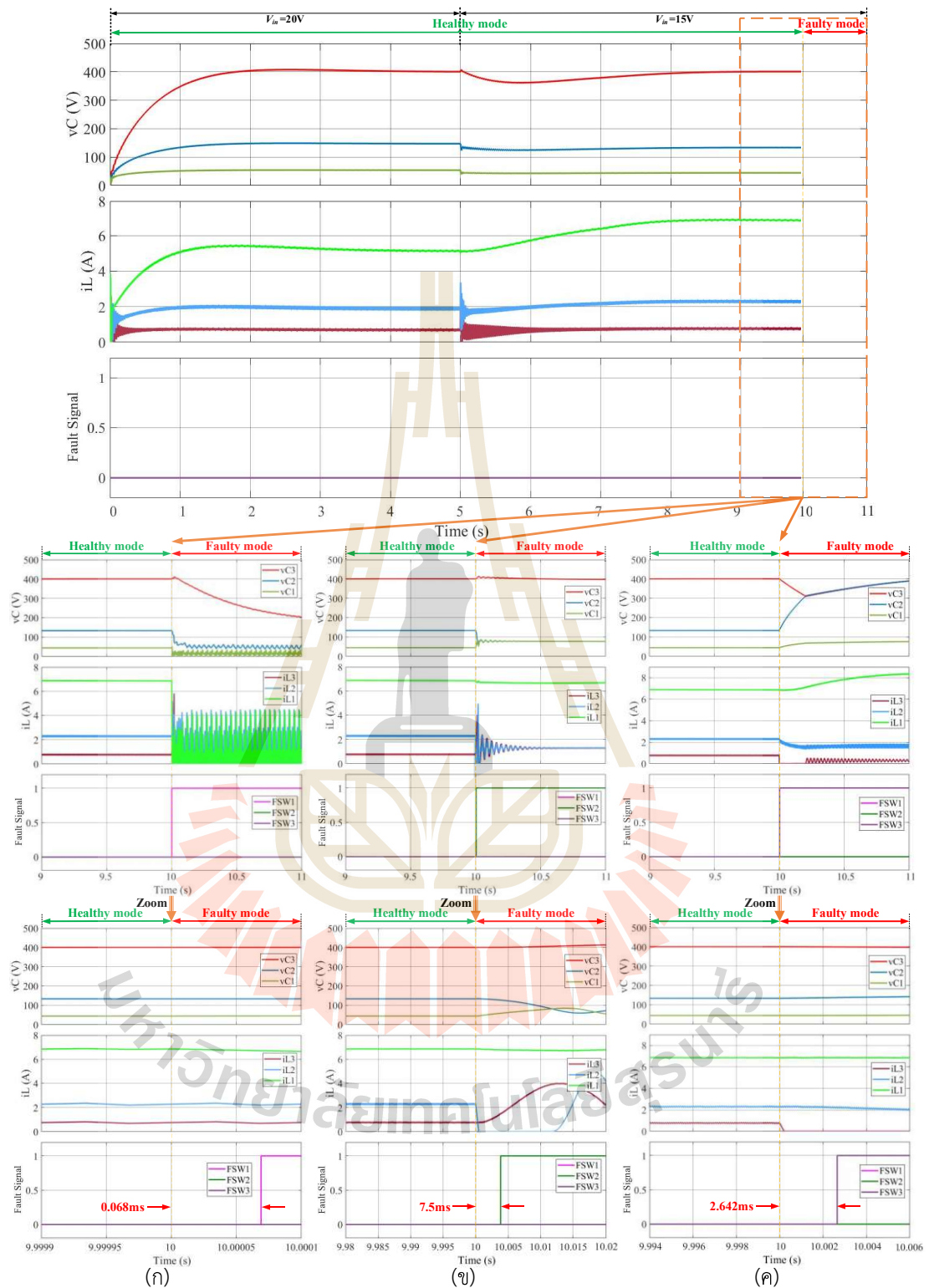
กรณีที่ 4 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R เพิ่มขึ้นจาก 1600Ω เป็น 2400Ω ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{in} และ V_{ref} ไว้ที่ 20V และ 400V ตามลำดับ จากรูปที่ 5.47 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของ R ส่งผลให้แรงดัน V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} เกิดการพุ่งเกิน จากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ลดลงจาก 100W เป็น 66.67W อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้มีค่าตาม V_{ref} ที่ 400V โดยการปรับกระแส i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ลดลง ซึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดพลาดที่ S_1 , S_2 และ S_3 ดังที่แสดงดังรูปที่ 5.47 (ก), (ข) และ (ค) เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้โดยใช้เวลา 0.031ms, 7.5ms และ 1.696ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มี การตรวจจับความผิดพลาดที่ผิดพลาดในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของ R ที่เพิ่มขึ้น

กรณีที่ 5 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R ลดลงจาก 1600Ω เป็น 1200Ω ณ วินาทีที่ 5 โดยที่คงค่า V_{in} และ V_{ref} ไว้ที่ 20V และ 400V ตามลำดับจากรูปที่ 5.48 พบว่าในสภาวะการทำงานปกติขณะที่มีการลดลงของ R ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจาก 100W เป็น 133.33W ทันที ในขณะที่เดียวกันแรงดัน V_{C1} , V_{C2} และ V_{C3} เกิดการลดลง อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับ V_O ให้มีค่าตาม V_{ref} ที่ 400V โดยการปรับค่า i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} เพิ่มขึ้น ซึ่งใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวประมาณ 3s หลังจากนั้นที่วินาทีที่ 10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ของการเกิดความผิดพลาดที่ S_1 , S_2 และ S_3 เมื่อพิจารณาภาพขยายจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้โดยใช้เวลา 0.03ms, 4.559ms และ 1.043ms ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้น

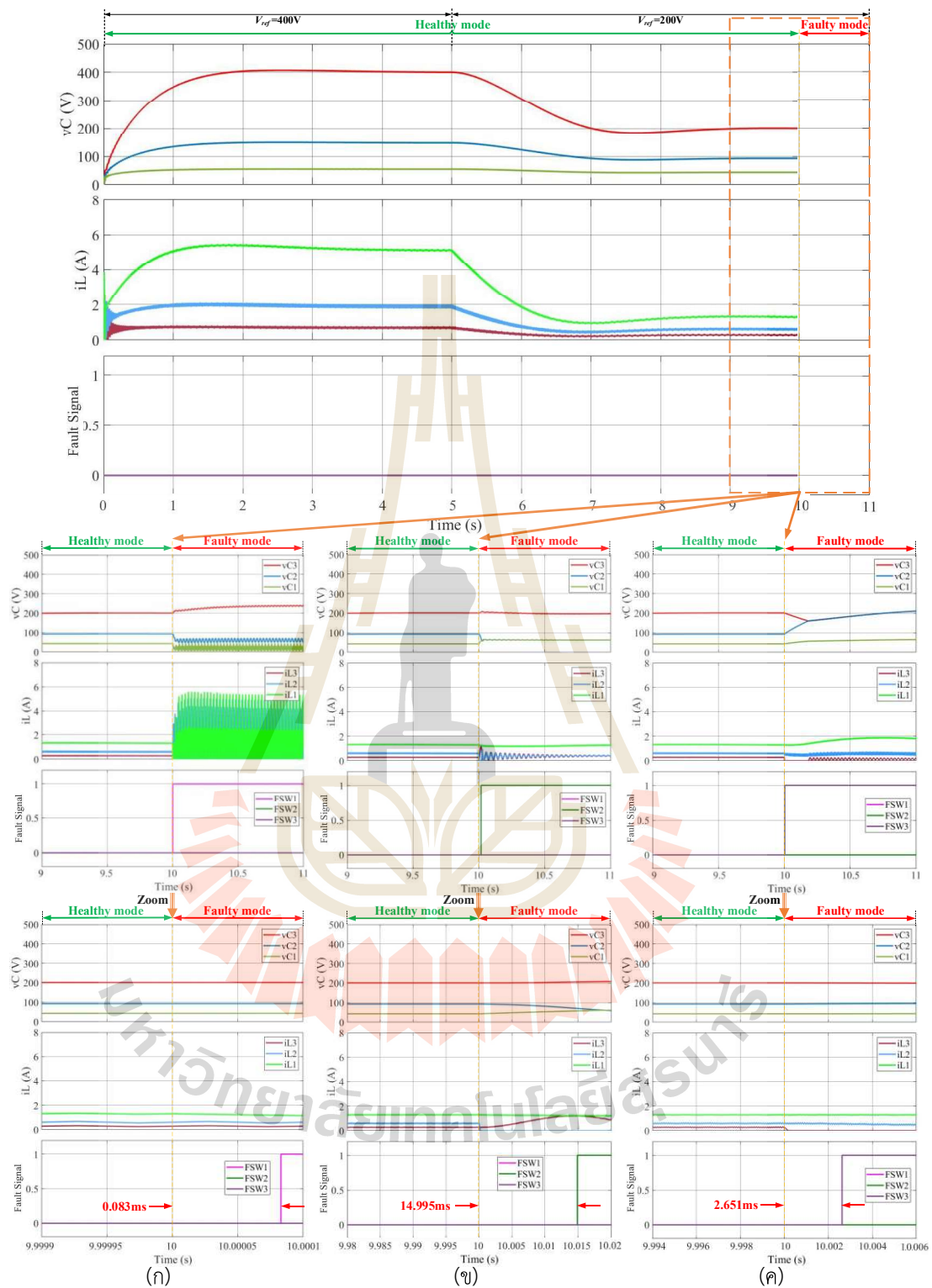
สามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังไม่มี การตรวจจับความผิดปกติที่ผิดพลาดในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของ R ที่ลดลง



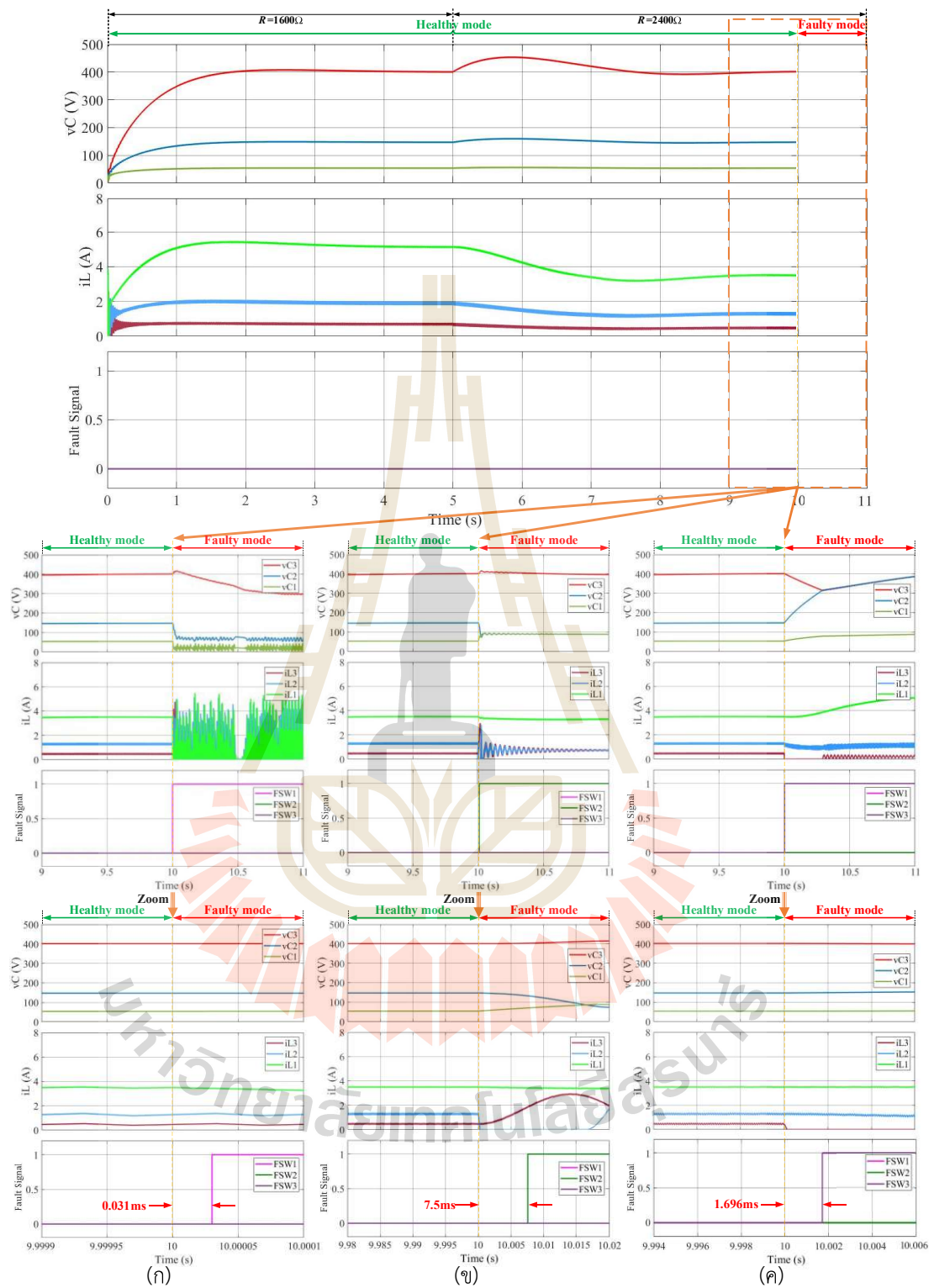
รูปที่ 5.44 ผลการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุต



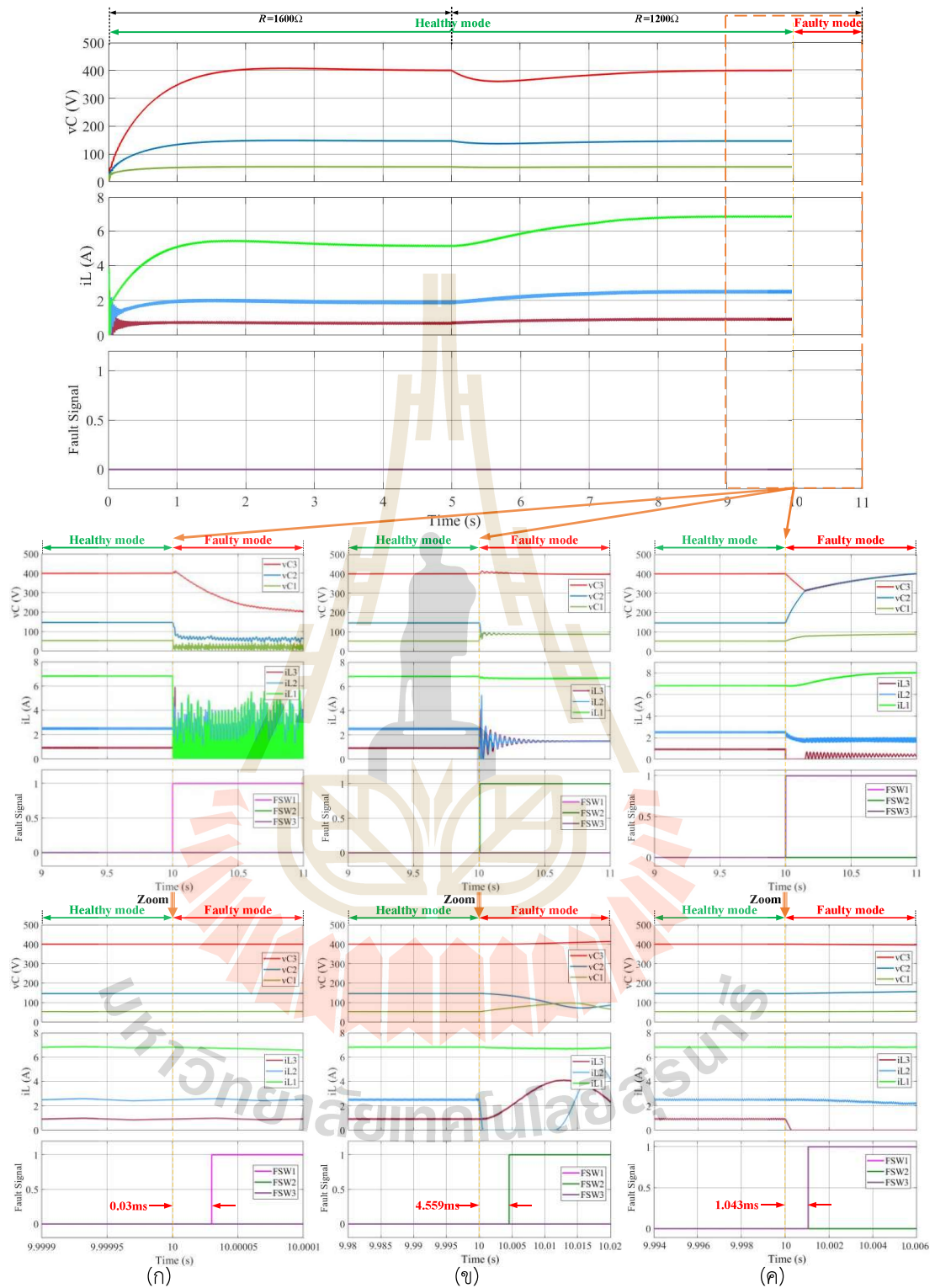
รูปที่ 5.45 ผลการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การลดลงของแรงดันอินพุต



รูปที่ 5.46 ผลการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การลดลงของแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 5.47 ผลการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเพิ่มขึ้นของโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 5.48 ผลการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การลดลงของโหลดตัวต้านทาน

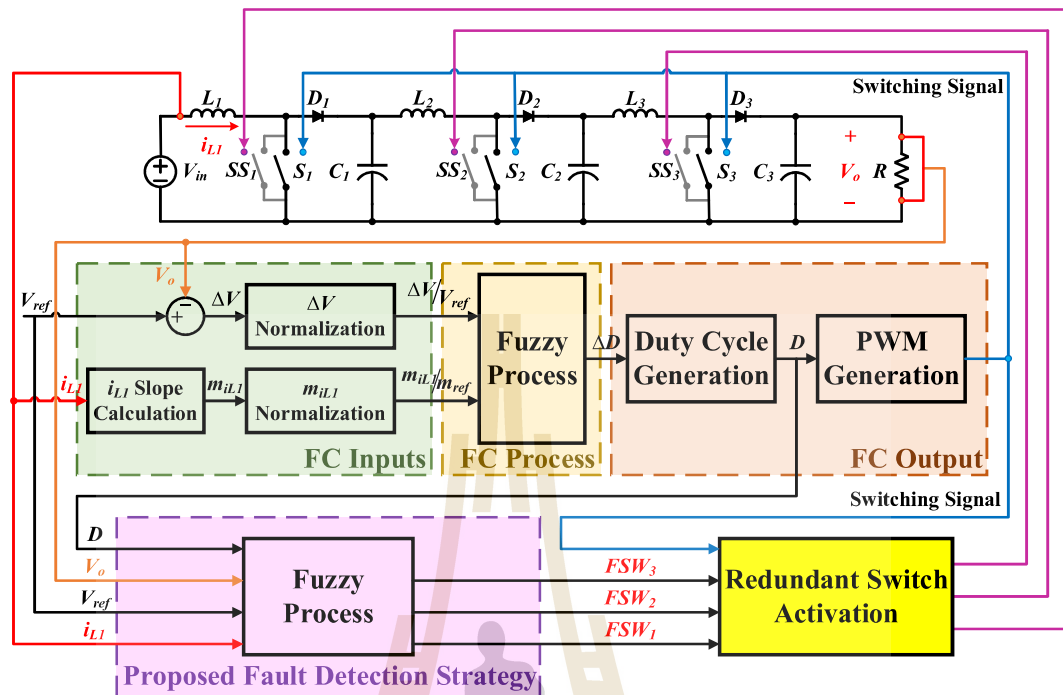
จากการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร จะ เห็นได้ว่าตัวตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับ และสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดได้ อย่างรวดเร็วและถูกต้อง อีกทั้งยังไม่มีผลผิดพลาด ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน โดยผล การตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน

กรณี	การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน	เวลาในการตรวจจับความผิดพลาด (ms)		
		S_1	S_2	S_3
1	เพิ่ม V_{in} จาก 20V เป็น 25V	0.024	9.239	0.978
2	ลด V_{in} จาก 20V เป็น 15V	0.068	7.5	2.642
3	ลด V_{ref} จาก 400V เป็น 200V	0.083	14.995	2.651
4	เพิ่ม R จาก 1600Ω เป็น 2400Ω	0.031	7.5	1.696
5	ลด R จาก 1600Ω เป็น 1200Ω	0.03	4.559	1.043

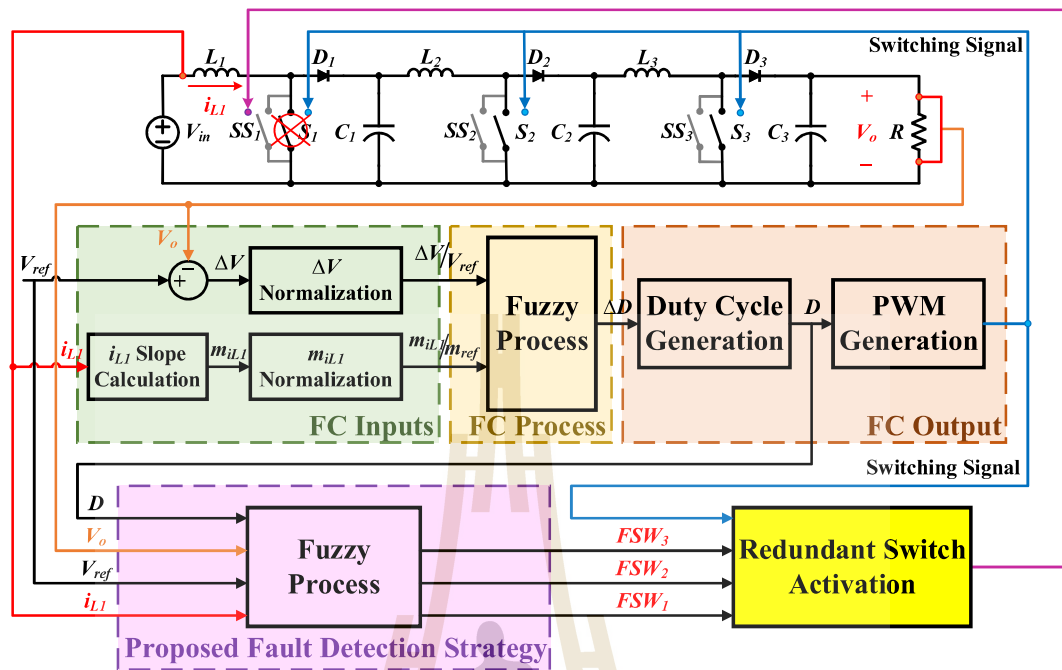
5.4.3 การจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดพลาด

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกัน สามขั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่มีคงทนต่อความผิดพลาด โดยพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิด ความผิดพลาดเท่านั้นดังรูปที่ 5.49 เมื่อตรวจพบว่าสวิตช์ตัวใดเกิดความผิดพลาดจะสั่งให้สวิตช์ตัวสำรอง (SS_1 , SS_2 , SS_3) ทำงานแทนทันที โดยอาศัยกระบวนการเปิดใช้งานสวิตช์สำรอง (Redundant switch activation) เพื่อให้วงจรสามารถทำงานต่อได้ด้วยสมรรถนะที่ดี ผลการจำลองสถานการณ์สามารถแบ่ง ออกเป็น 3 กรณี โดยพิจารณาผลของแรงดันตรรกะตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ สถานะการตรวจจับความผิดพลาดทั้งสาม ทั้งสภาวะการทำงานปกติ (Healthy mode) สภาวะเกิด ความผิดพลาด (Faulty mode) และสภาวะความคงทนต่อความผิดพลาด (Fault-tolerant mode) ดังนี้

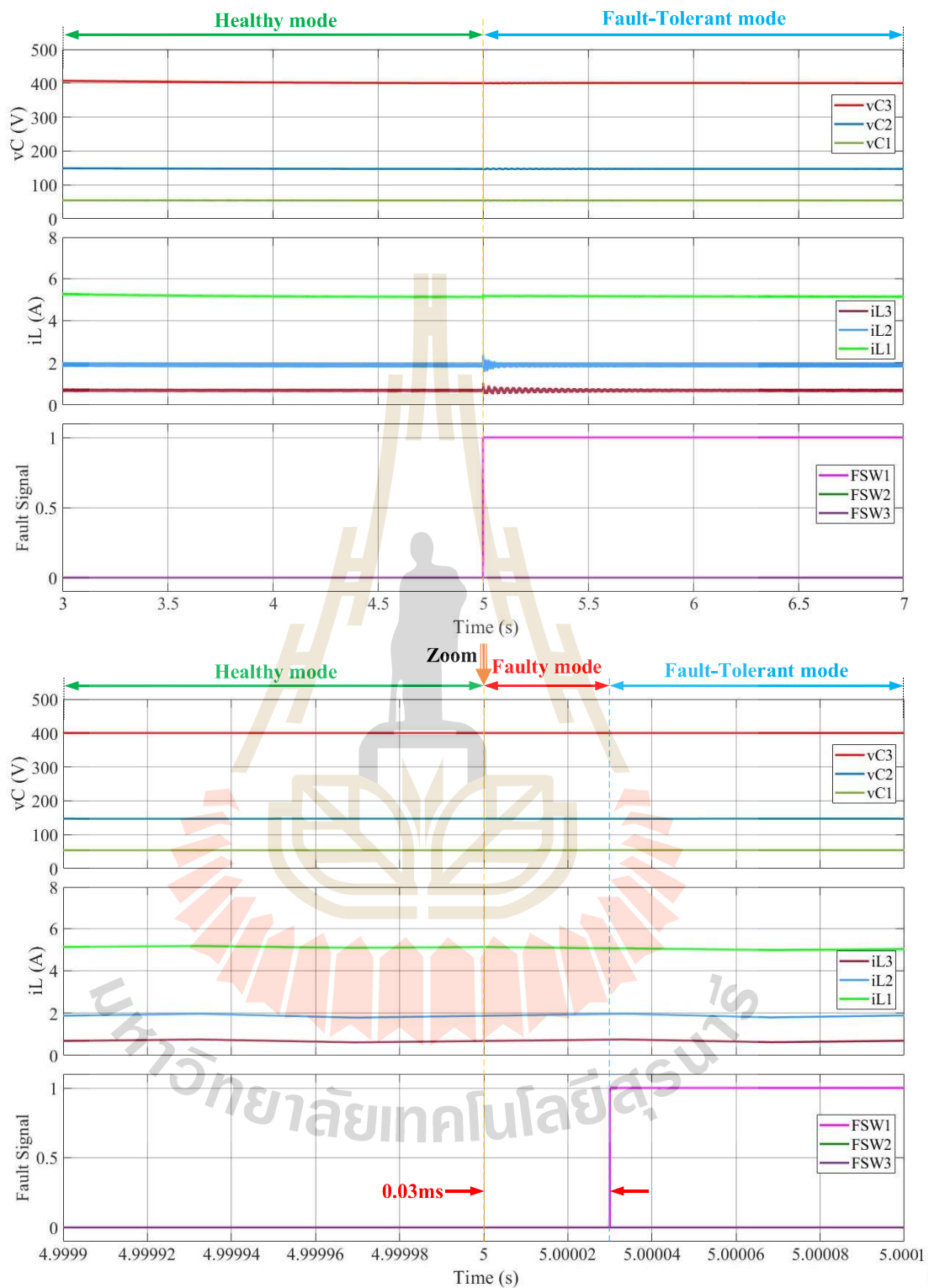


รูปที่ 5.49 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ

กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์วงจรที่มีคงทนต่อความผิดปกติพ่วงแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ซึ่งมีโครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงรูปที่ 5.50 เมื่อเกิดความผิดปกติพ่วงแบบสวิตช์เปิดวงจร ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.51 จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าในเวลาช่วงเริ่มต้นถึงวินาทีที่ 5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นทำงานเป็นปกติ วงจรสามารถเพิ่มระดับ V_{in} ที่มีแรงดันต่ำประมาณ 20V ให้มี V_o สูงถึงประมาณ 400V ต่อมาที่เวลาวินาทีที่ 5 เกิดความผิดปกติพ่วงแบบสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่ S_1 ส่งผลให้สามารถตรวจพบความผิดปกติพ่วงได้จากผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้จากสัญญาณ FSW_1 มีค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 โดยใช้เวลาในการตรวจจับความผิดปกติพ่วงประมาณ 0.03ms หลังจากตรวจพบความผิดปกติพ่วงระบบควบคุมจะทำการส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_1 ไปให้สวิตช์สำรอง SS_1 เพื่อให้สวิตช์สำรองทำงานแทน จะสังเกตเห็นได้ว่าหลังจาก SS_1 ทำงานแทนที่ S_1 แล้ว วงจรยังคงสามารถรักษาระดับ V_o ให้มีค่าคงที่ได้ตามต้องการ เพื่อให้วงจรยังคงทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

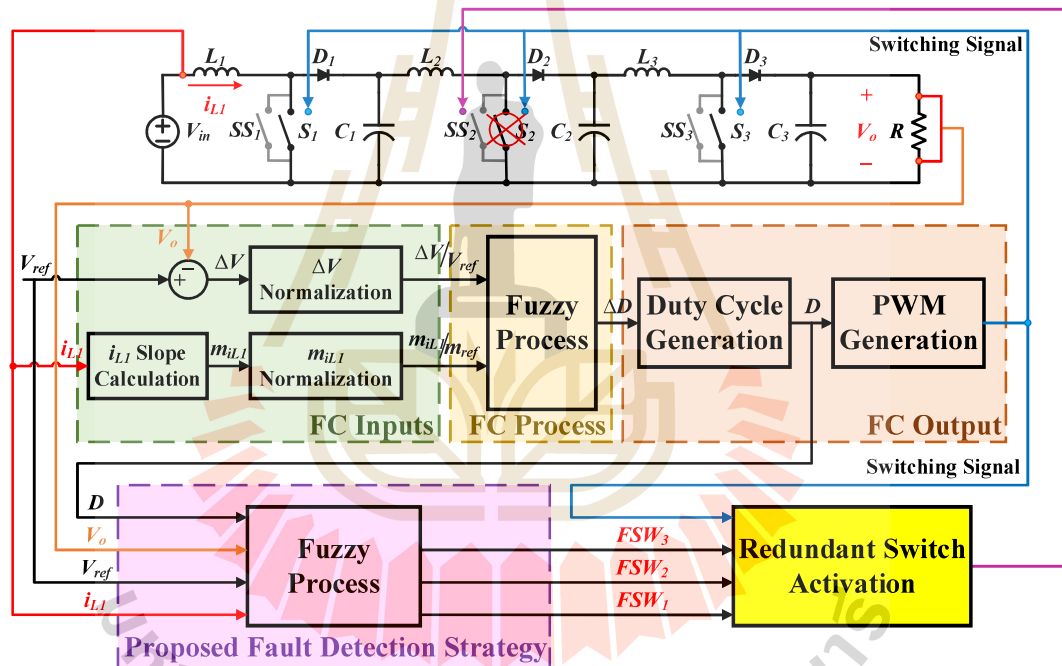


รูปที่ 5.50 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีคงทนต่อความผิดปกติที่ S_1

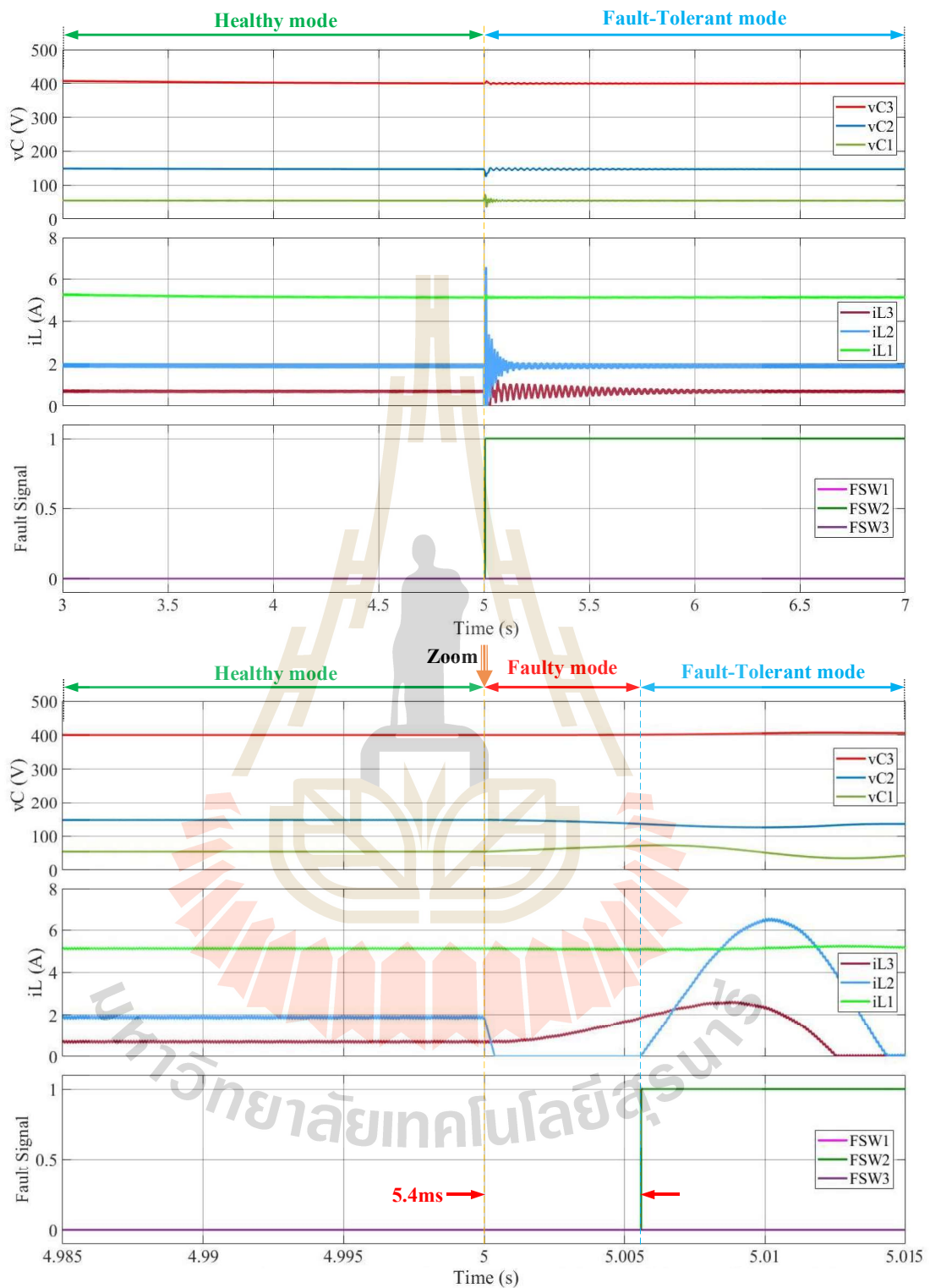


รูปที่ 5.51 ผลการจำลองกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_1 ในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์วงจรที่มีคงทนต่อความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 ซึ่งมีโครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงรูปที่ 5.52 เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร มีผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.53 จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นว่าเวลาวินาทีที่ 5 เกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่ S_2 ส่งผลให้สามารถตรวจพบความผิดปกติได้จากผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้จากสัญญาณความผิดปกติของสวิตช์ FSW_2 มีค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 5.4ms หลังจากตรวจพบความผิดปกติ ระบบควบคุมจะทำการส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของ S_2 ไปให้ SS_2 ทำงานแทน จะสังเกตเห็นได้ว่าวงจรยังคงสามารถรักษาระดับ V_o ให้มีค่าคงที่ได้ตามต้องการ เพื่อให้วงจรยังคงทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม i_{L2} และ i_{L3} เกิดการพุ่งเกิน หลังจากนั้นกระแสถูกควบคุมให้มีค่าที่สอดคล้องกับค่า V_{ref} ที่ต้องการ

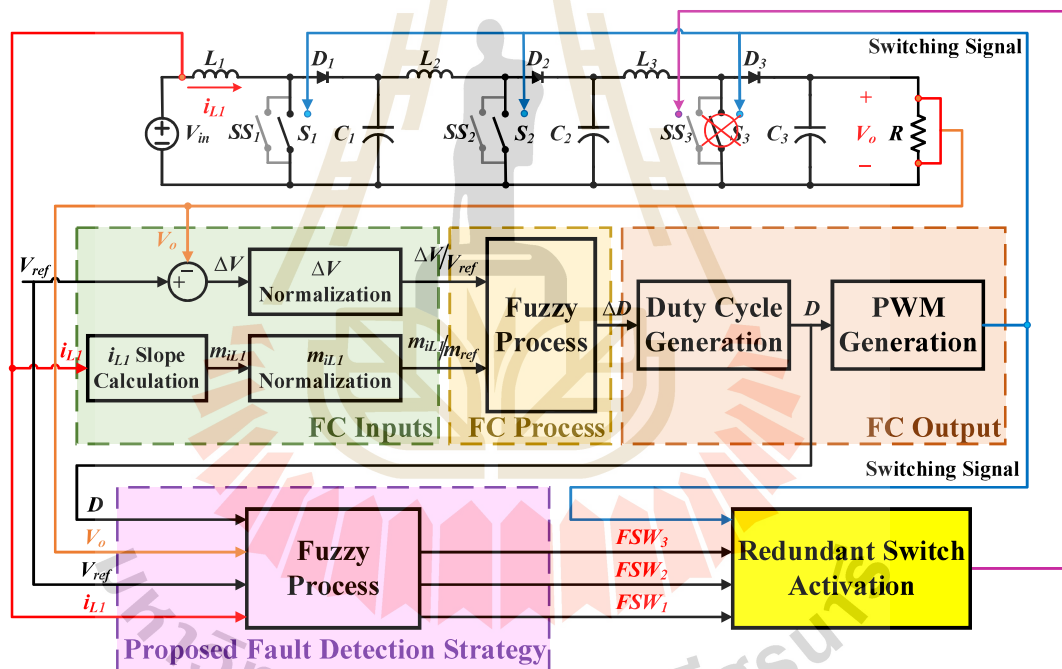


รูปที่ 5.52 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีคงทนต่อความผิดปกติที่ S_2

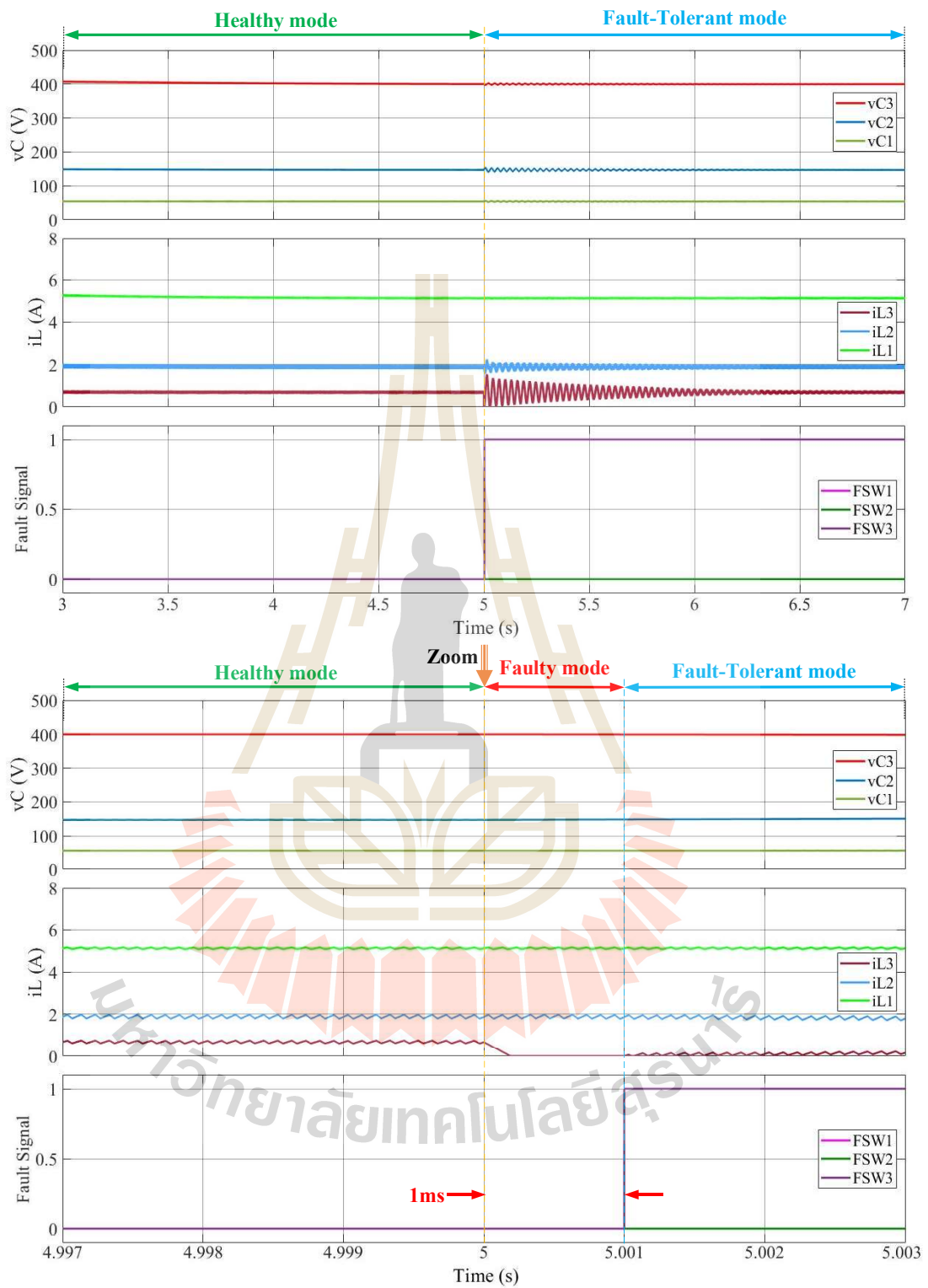


รูปที่ 5.53 ผลการจำลองกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_2 ในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์วงจรที่มีคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ซึ่งมีโครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงรูปที่ 5.54 มีผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.55 จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าที่เวลาวินาทีที่ 5 เกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรขึ้นที่สวิตช์ S_3 สามารถตรวจพบความผิดพลาดได้จากผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงได้จากสัญญาณความผิดพลาดของสวิตช์ FSW_3 มีค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 1ms หลังจากตรวจพบความผิดพลาดระบบควบคุมจะทำการส่งสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_3 ไปให้สวิตช์สำรอง SS_3 ทำงานแทน จะสังเกตเห็นได้ว่าวงจรยังคงสามารถรักษาระดับ V_o ให้มีค่าคงที่ได้ตามต้องการ เพื่อให้วงจรยังคงทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามค่ากระแส i_{L2} และ i_{L3} เกิดการสั่นไหว หลังจากนั้นกระแสถูกควบคุมให้มีค่าที่สอดคล้องกับตามค่า V_{ref} ที่ต้องการ



รูปที่ 5.54 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีคงทนต่อความผิดพลาดที่ S_3



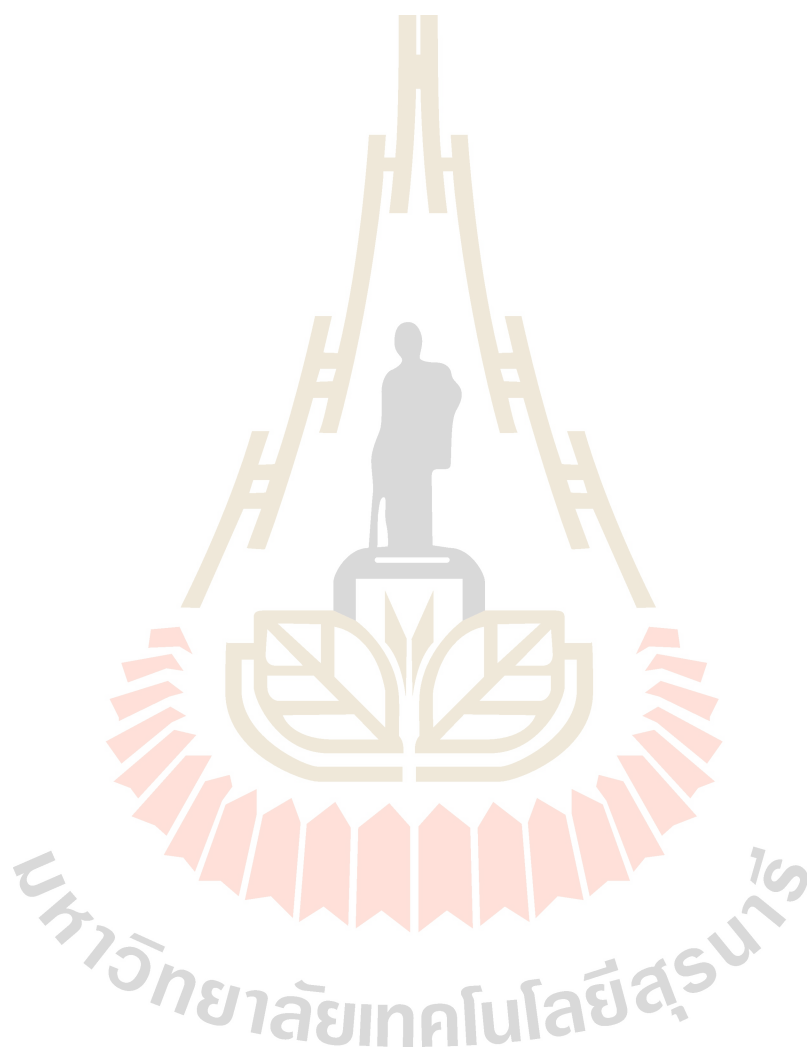
รูปที่ 5.55 ผลการจำลองกรณีเกิดความผิดปกติที่ S_3 ในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 3 กรณี แสดงให้เห็นว่าการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซี่ สามารถตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ในสภาวะการทำงานปกติ จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดปกติ และสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง โดยเมื่อตรวจพบว่าสวิตช์ตัวใดเกิดความผิดปกติจะสั่งให้สวิตช์ตัวสำรอง (SS_1 , SS_2 , SS_3) ทำงานแทนทันที ทำให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้กล่าวถึงการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นขณะที่มีตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้น ให้มีความคงทนต่อความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยเริ่มต้นจากการสังเกตพฤติกรรมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นขณะที่มีตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นทั้งในสภาวะปกติ และสภาวะเกิดความผิดปกติ เพื่อนำมาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติของแต่ละสวิตช์ ในการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นในแต่ละสวิตช์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ทำให้การกู้คืนการทำงานของวงจรจากความผิดปกติ โดยนำกระบวนการฟัซซี่มาใช้ในการกระบวนการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ เพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถทำงานต่อไปได้เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นที่สวิตช์กำลังของวงจร ในกระบวนการตรวจจับความผิดปกติจะอาศัยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และแรงดันเอาต์พุต ที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสและตัวตรวจจับแรงดันที่ใช้ในกระบวนการควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้น รวมถึงสัญญาณวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ที่ได้จากควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งให้ผลตอบสนองที่แตกต่างจากพฤติกรรมการทำงานของวงจรในสภาวะการทำงานปกติอย่างชัดเจน เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์แต่ละตัว จากการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร จะเห็นได้ว่าตัวตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับ และสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง อีกทั้งยังไม่มีผลผิดพลาดในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน และผลการจำลองสถานการณ์สุดท้ายเป็นการสร้างความ

คงทนต่อความผิดพลาด เพื่อให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น



บทที่ 6

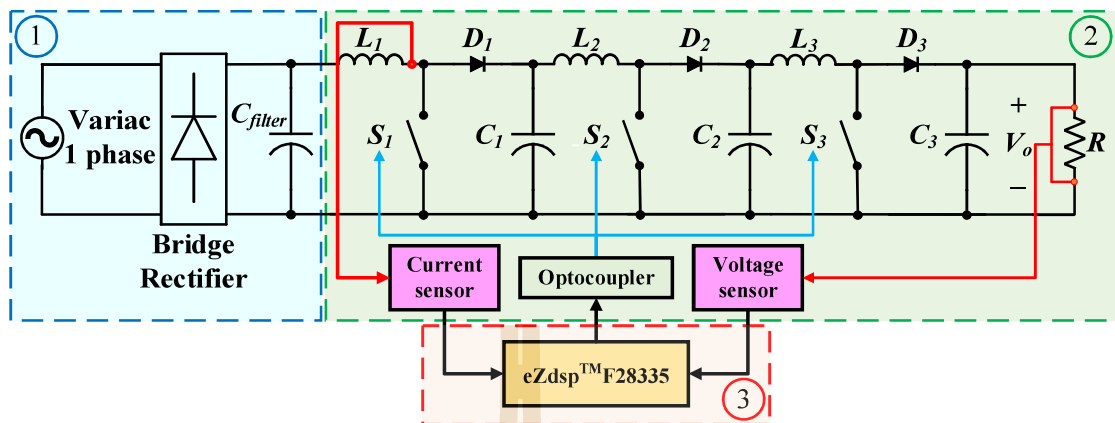
การสร้างชุดทดสอบ

6.1 บทนำ

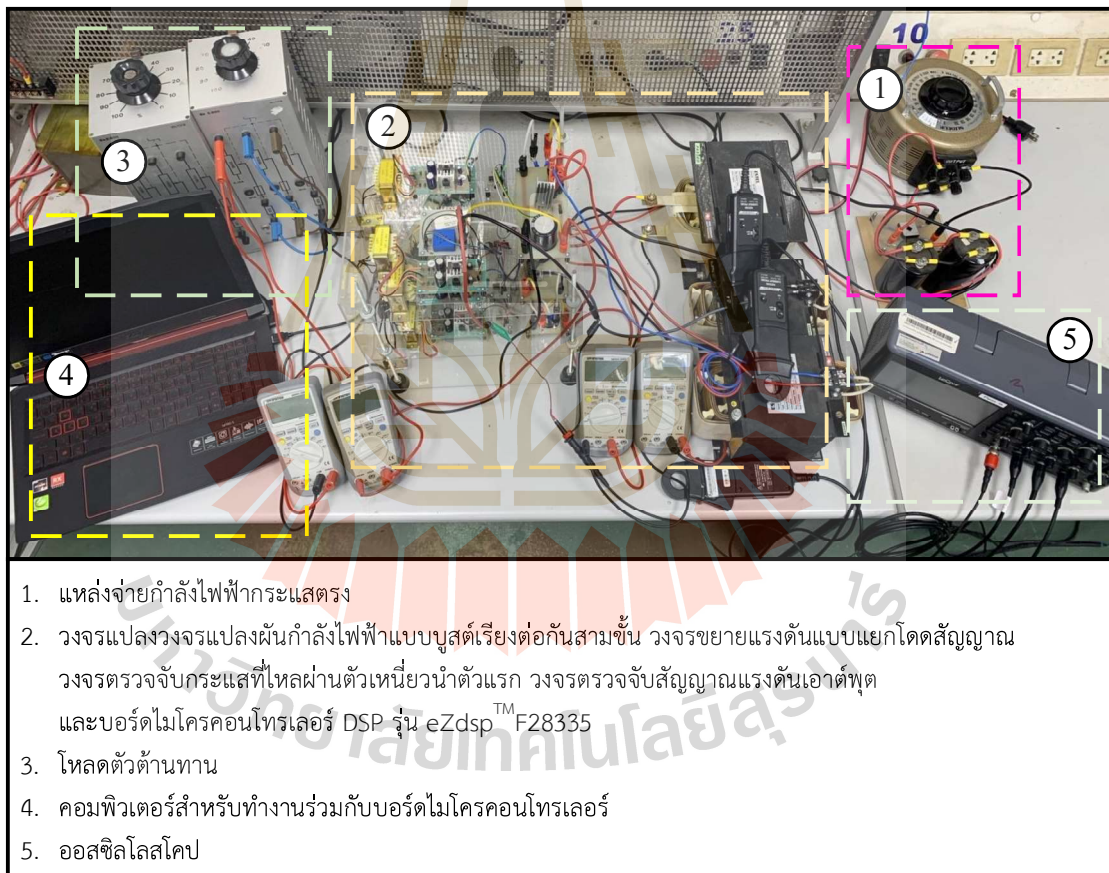
จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในวงจรแปลงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นดังแสดงในบทที่ 3 และการออกแบบตัวควบคุมพีซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นในบทที่ 4 รวมถึงการตรวจจับความผิดพร่องการระบุตำแหน่งความผิดพร่อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นดังแสดงในบทที่ 5 นำไปสู่การสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นสำหรับทดสอบการทำงานของวงจรในกรณีต่าง ๆ เพื่อยืนยันประสิทธิภาพ โดยการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่จะนำเสนอต่อไปในบทที่ 7 การสร้างชุดทดสอบประกอบด้วย การสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นร่วมกับสวิตช์สำรองที่ต่อขนานกับสวิตช์หลักสำหรับสร้างความคงทนต่อความผิดพร่อง วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต วงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ และการควบคุมแรงดันเอาต์พุตรวมกับการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335

6.2 โครงสร้างของชุดทดสอบ

โครงสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นแสดงดังรูปที่ 6.1 ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ ส่วนแรกคือแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่อาศัยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 2 คือวงจรแปลงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ร่วมกับวงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ วงจรตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก และวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต และส่วนสุดท้ายเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 โดยชุดทดสอบของวงจรแปลงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 6.2



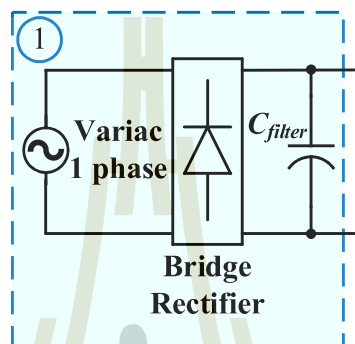
รูปที่ 6.1 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น



รูปที่ 6.2 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

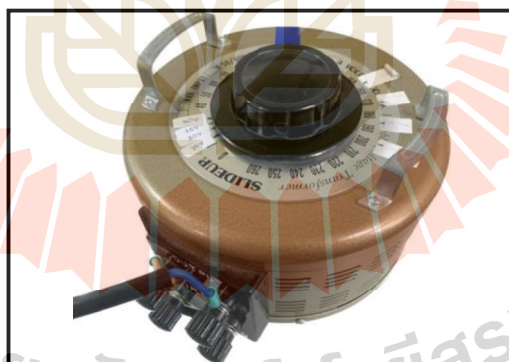
6.3 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

โครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแสดงดังรูปที่ 6.3 โดยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่มีแรงดันต่ำสร้างขึ้นจากหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบหนึ่งเฟสที่มีฟักัดกระแสที่ 10A ต่อกับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟสที่สามารถปรับแรงดันอินพุตได้ตามต้องการ หลังจากนั้นต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ เพื่อลดการกระเเิมของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 6.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับชุดทดสอบมีหม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส (Variac) เป็นส่วนประกอบโดยสามารถจ่ายแรงดันได้ในช่วง 0–250Vrms มีฟักัดกระแส 10A แสดงดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส

ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากหม้อแปลงปรับแรงดันให้เป็นกระแสตรงแบบเต็มคลื่น จะใช้มอดูลวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส GBPC35 โดยมีฟักัดแรงดันไฟฟ้าที่ 100V และฟักัดกระแสที่ 35A มอดูลวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส GBPC35 แสดงดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 มอดูลวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส GBPC35

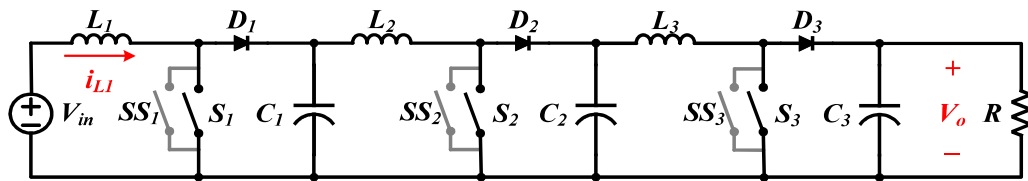
แรงดันกระแสตรงที่เป็นเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟสจะถูกกรองโดยตัวเก็บประจุแสดงดังรูปที่ 6.6 ที่ต่อขนาน เพื่อลดการกระเพื่อมแรงดัน ตัวเก็บประจุที่ใช้มีพิกัดแรงดันที่ 400V และมีขนาด 2200 μ F และ 3300 μ F ต่อขนานกันเป็นขนาด 5500 μ F



รูปที่ 6.6 ตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

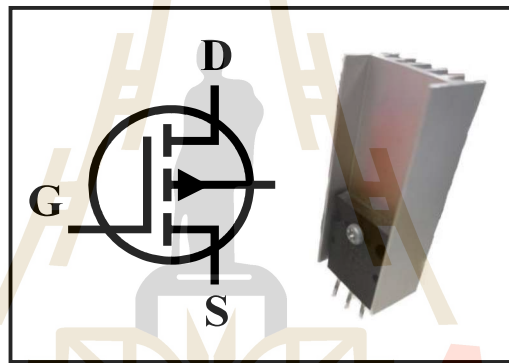
6.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

องค์ประกอบสำคัญที่สุดของชุดทดสอบคือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีสวิตช์สำรองต่อขนานกับสวิตช์หลัก ซึ่งจะใช้ทดสอบสมรรถนะการทำงานในการทบทระดับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันต่ำประมาณ 20V ให้มีแรงดันเอาต์พุตที่สูงถึง 400V และยังสามารถรักษาแรงดันให้คงที่ตามความต้องการภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานที่อาศัยตัวควบคุมพีซีที่พัฒนาขึ้น รวมถึงการตรวจจับความผิดปกติ และการระบุตำแหน่งความผิดปกติที่อาศัยกระบวนการทางพีซี อีกทั้งยังมีการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจร โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 6.7



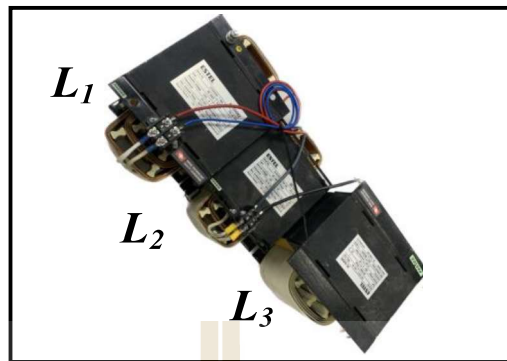
รูปที่ 6.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญคือ ทรานซิสเตอร์ชนิดหนึ่งๆที่เรียกว่ามอสเฟต โดยมอสเฟตตัวที่เลือกใช้คือ IXFK80N60P3 ซึ่งสามารถรับแรงดันไฟฟ้าได้สูงถึง 600V และรองรับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 80A เหมาะสำหรับการใช้งานในวงจรนี้ ดังแสดงในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 มอสเฟตกำลัง IXFK80N60P3

ตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวจะมีขนาดตามที่ออกแบบค่าพารามิเตอร์ไว้ในบทที่ 3 ซึ่งออกแบบจากการกำหนดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละตัว โดยตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 มีขนาดเท่ากับ 15mH มีพิกัดกระแสที่ 25A ตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 2 มีขนาดเท่ากับ 18.75mH มีพิกัดกระแสที่ 15A และตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 3 มีขนาดเท่ากับ 70mH มีพิกัดกระแสที่ 10A ตัวเหนี่ยวนำทั้งสามแสดงดังรูปที่ 6.9



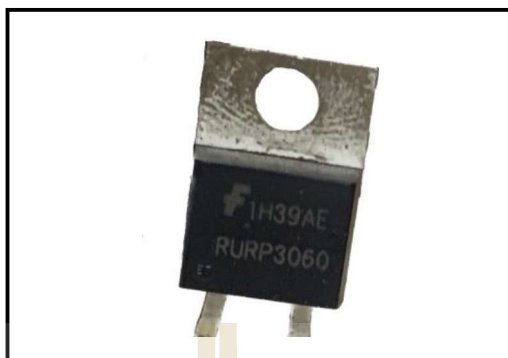
รูปที่ 6.9 ตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวสำหรับชุดทดสอบ

ในการเลือกใช้ตัวเก็บประจุทั้งสามตัวแสดงดังรูปที่ 6.10 ซึ่งมีขนาดตามทีออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยตัวเก็บประจุทั้งสามมีขนาดเท่ากับ $560\mu\text{F}$ และมีพิกัดแรงดัน 450V



รูปที่ 6.10 ตัวเก็บประจุสำหรับชุดทดสอบ

สำหรับไดโอดกำลังทั้งสามตัวจะพิจารณาจากค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านไดโอด โดยจะอาศัยการจำลองสถานการณ์เข้าช่วย โดยเลือกใช้ไดโอดกำลังเบอร์ RURP3060 ที่มีพิกัดกระแสที่ 30A และพิกัดแรงดันที่ 600V ยิ่งไปกว่านั้นไดโอดกำลังยังมีการฟื้นฟูย้อนกลับเร็ว (Ultrafast Diode) โดยมีเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse recovery time) ที่ 60ns ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการเกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับช่วงท้ายของการไบอัสน้อยลง ไดโอดกำลังเบอร์ RURP3060 แสดงดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 ไดโอดกำลังสำหรับชุดทดสอบ

สำหรับโหลดตัวต้านทานจะใช้แบบปรับค่าได้ แสดงดังรูปที่ 6.12 โดยมีช่วงค่าความต้านทานที่ 140Ω ถึง 5400Ω และมีค่าพิกัดกระแสที่ 1A ถึง 3A ในการทดสอบจะพิจารณาให้โหลดตัวต้านทานทำงานที่กำลังไฟฟ้าไม่เกิน 100W ที่แรงดันเอาต์พุตที่ 400V ดังนั้นค่าความต้านทานจะมีค่าประมาณ 1600Ω



รูปที่ 6.12 โหลดตัวต้านทานสำหรับชุดทดสอบ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างที่ใช้สำหรับสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับสร้างชุดทดสอบ

อุปกรณ์	สัญลักษณ์	เบอร์	ขนาด	พิกัด
มอสเฟตกำลัง	$S_1, S_2, S_3,$ SS_1, SS_2, SS_3	IXFK80N660P3	–	80A, 600V
ตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1	L1	–	15mH	25A, 200V

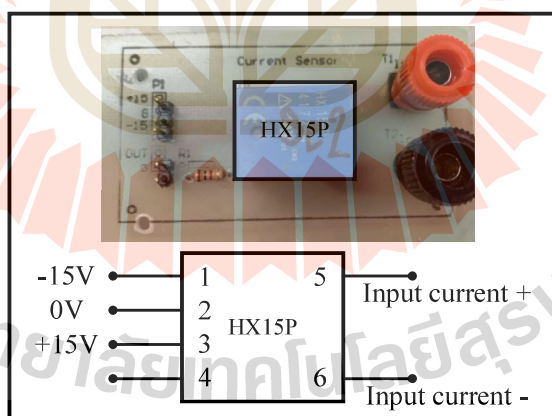
ตารางที่ 6.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับสร้างชุดทดสอบ (ต่อ)

อุปกรณ์	สัญลักษณ์	เบอร์	ขนาด	พิกัด
ตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 2	L_2	–	18.75mH	15A, 400V
ตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 3	L_3	–	70mH	10A, 400V
ตัวเก็บประจุ	C_1, C_2, C_3	–	560	450V
ไดโอด	D_1, D_2, D_3	RURP3060	–	30A, 600V
โหลดตัวต้านทาน	R	–	5400 Ω	100W

6.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ

การตรวจจับสัญญาณของชุดทดสอบประกอบด้วยวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต (V_o) และการตรวจจับสัญญาณกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก (i_{L1}) โดยจะนำสัญญาณทั้งสองมาประมวลผลในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กำลังให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานต่าง ๆ ของวงจร รวมถึงการตรวจจับความผิดปกติ การระบุตำแหน่งความผิดปกติ และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

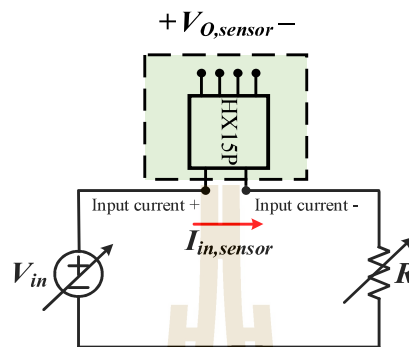
6.5.1 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส



รูปที่ 6.13 วงจรตัวตรวจจับสัญญาณกระแส

ตัวตรวจจับสัญญาณกระแสเบอร์ HX15P ใช้ในการตรวจจับสัญญาณกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก (i_{L1}) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ชุดทดสอบนี้จะกำหนดให้วงจรทำงานโดยมีกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก (i_{L1}) ไม่เกิน 15A เพื่อไม่ให้เกินพิกัด

กระแสของตัวตรวจจับสนญาณกระแสเบอร์ HX15P ซึ่งมีฟิวด์กระแสที่ 15A โครงสร้างของวงจรตรวจจับสนญาณแสดงดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.14 วงจรไฟฟ้าสำหรับวงจรตรวจจับสนญาณกระแส

การปรับเทียบค่าการวัดของตัวตรวจจับสนญาณกระแสจะอาศัยวงจรรูปที่ 6.14 เพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแสอินพุต ($I_{in,sensor}$) ที่ไหลผ่านตัวตรวจจับสนญาณกระแส โดยการวัดแรงดันเอาต์พุต ($V_{O,sensor}$) ของตัวตรวจจับสนญาณกระแส ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 0V ถึง 3V สำหรับขั้นตอนการทดสอบปรับเทียบตัวตรวจจับสนญาณกระแส จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต ร่วมกับการเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน เพื่อให้ได้ช่วงของกระแสที่เหมาะสมสำหรับหาความสัมพันธ์ของ $I_{in,sensor}$ และ $V_{O,sensor}$ โดยผลการทดสอบปรับเทียบตัวตรวจจับสนญาณกระแสแสดงดังตารางที่ 6.2

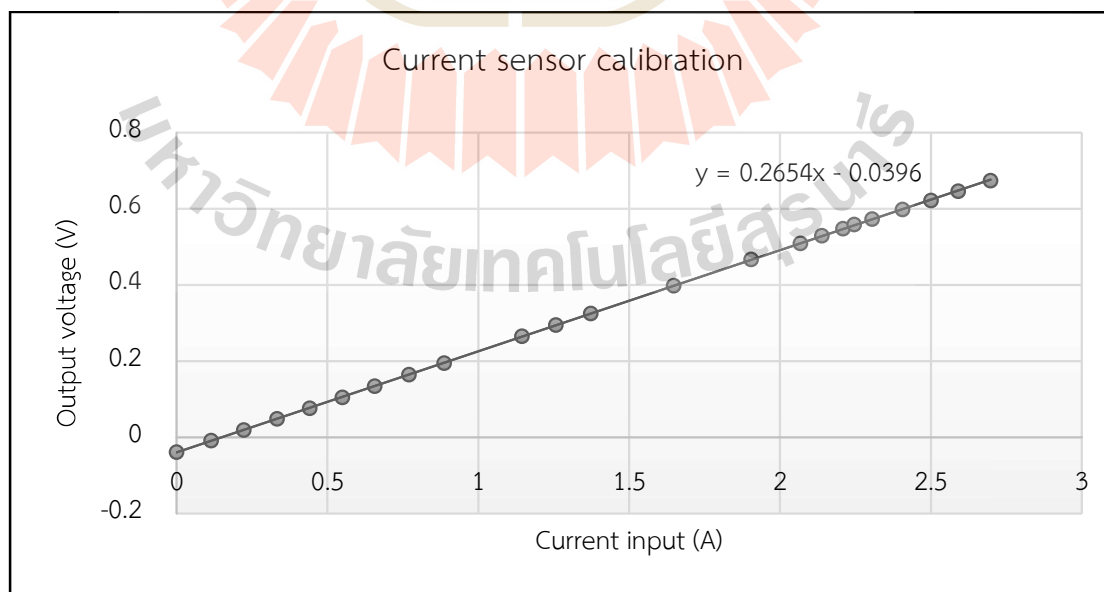
ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบปรับเทียบการวัดตัวตรวจจับสนญาณกระแส

$I_{in,sensor}$ (A)				$V_{O,sensor}$ (V)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.000	0.000	0.000	0.000	-0.039	-0.038	-0.040	-0.039
0.120	0.114	0.112	0.115	-0.009	-0.009	-0.008	-0.009
0.212	0.241	0.216	0.223	0.018	0.021	0.019	0.019
0.340	0.336	0.323	0.333	0.049	0.049	0.047	0.049
0.454	0.450	0.419	0.441	0.079	0.078	0.073	0.077
0.527	0.576	0.544	0.549	0.101	0.110	0.104	0.105
0.657	0.618	0.696	0.657	0.134	0.126	0.142	0.134
0.785	0.762	0.762	0.770	0.168	0.163	0.163	0.164
0.816	0.887	0.958	0.887	0.179	0.195	0.210	0.195
1.156	1.145	1.134	1.145	0.268	0.265	0.262	0.265

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับสนัยญาณกระแส (ต่อ)

$I_{in,sensor}$ (A)				$V_{O,sensor}$ (V)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1.194	1.295	1.282	1.257	0.280	0.304	0.301	0.295
1.455	1.263	1.400	1.373	0.345	0.299	0.332	0.325
1.696	1.680	1.565	1.647	0.410	0.406	0.378	0.398
1.828	1.999	1.885	1.904	0.448	0.490	0.462	0.467
2.067	1.943	2.191	2.067	0.509	0.479	0.540	0.509
2.225	2.139	2.053	2.139	0.550	0.529	0.508	0.529
2.099	2.386	2.143	2.209	0.521	0.592	0.531	0.548
2.246	2.111	2.381	2.246	0.558	0.525	0.592	0.558
2.351	2.282	2.282	2.305	0.585	0.568	0.568	0.573
2.214	2.406	2.598	2.406	0.551	0.599	0.646	0.599
2.525	2.500	2.475	2.500	0.628	0.622	0.616	0.622
2.486	2.668	2.616	2.590	0.620	0.665	0.652	0.646
2.860	2.482	2.752	2.698	0.714	0.620	0.687	0.674

จากตารางที่ 6.2 สามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสอินพุต ($I_{in,sensor}$) ที่ไหลผ่านตัวตรวจจับสนัยญาณกระแส และแรงดันเอาต์พุต ($V_{O,sensor}$) ของตัวตรวจจับสนัยญาณกระแสได้ดังรูปที่ 6.15 และสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (6.1)

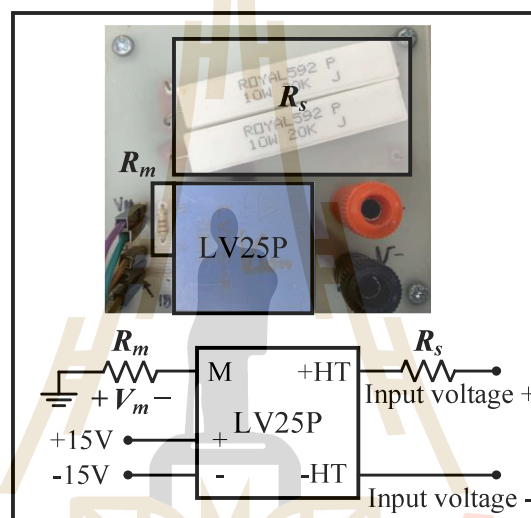


รูปที่ 6.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนัยญาณกระแส

$$V_{O,sensor} \quad t = 0.2654 I_{in,sensor} - 0.0396 \quad (6.1)$$

6.5.2 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

การตรวจจับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแรงดันเบอร์ LV25P เนื่องจากสามารถตรวจจับสัญญาณแรงดันได้ในช่วง 0V ถึง 500V ซึ่งเหมาะสำหรับชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่มีแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการที่อยู่ในช่วง 200V ถึง 400V โครงสร้างของวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันแสดงดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

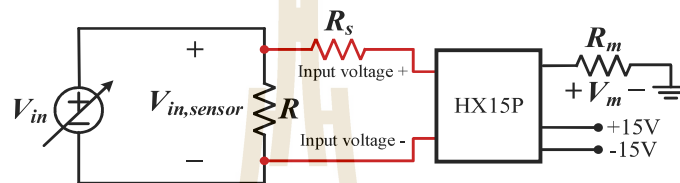
วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันจะเห็นได้ว่ามีตัวต้านทานทั้งฝั่งอินพุต และเอาต์พุต ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันเพื่อไม่ให้กระแสไหลเกิน โดยฝั่งอินพุตมีการต่อกับตัวต้านทาน R_s เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไหลเกิน 10mA เมื่อพิจารณาแรงดันอินพุตเท่ากับ 500V จะสามารถออกแบบ R_s ได้ดังสมการที่ 6.2

$$R_s = \frac{500}{10 \times 10^{-3}} = 50k\Omega \quad (6.2)$$

ส่วนฝั่งเอาต์พุตมีการต่อกับตัวต้านทาน R_m เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไหลเกิน 25mA อีกทั้งยังปรับสัญญาณแรงดัน V_m ให้มีค่าไม่เกิน 3V ก่อนเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP โดยสามารถออกแบบ R_m ได้ดังสมการที่ 6.3

$$R_m = \frac{3}{25 \times 10^{-3}} = 120\Omega \quad (6.3)$$

ในการปรับเทียบตัวตรวจจับสัญญาณแรงดันมีหลักการคล้ายกับการปรับเทียบตัวตรวจจับสัญญาณกระแส โดยวงจรที่ใช้สำหรับการปรับเทียบตัวตรวจจับสัญญาณแรงดันแสดงดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 วงจรไฟฟ้าสำหรับหาความสัมพันธ์ของตัวตรวจจับสัญญาณแรงดัน

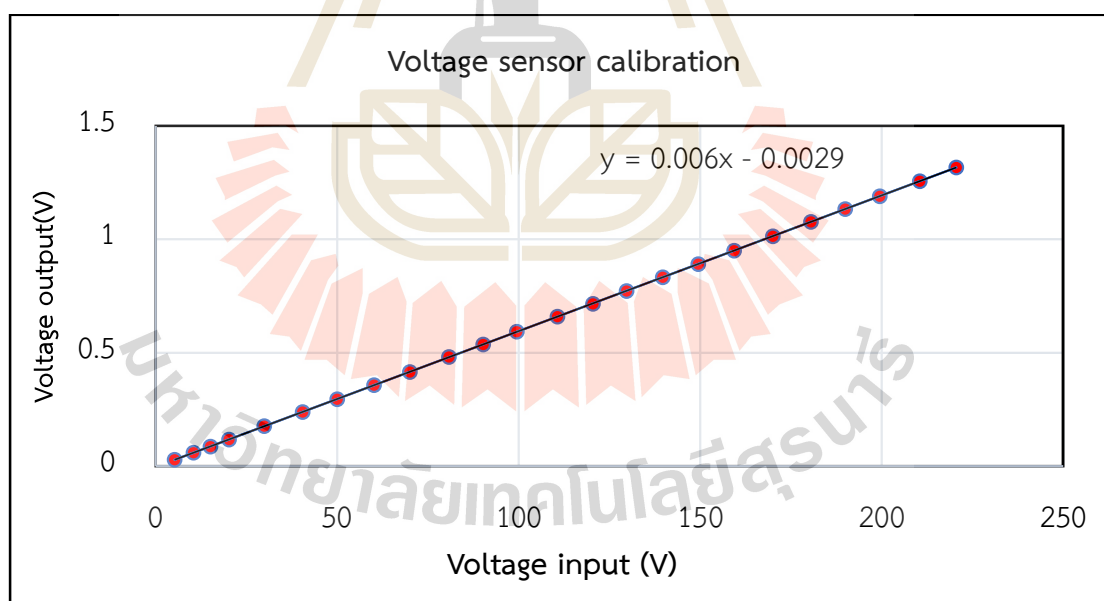
ในการหาความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต ($V_{in,sensor}$) และแรงดันเอาต์พุต (V_m) จะทดสอบปรับเทียบตัวตรวจจับสัญญาณแรงดันโดยการปรับค่าแรงดัน $V_{in,sensor}$ จาก 0V จนถึง 220V และวัดค่าแรงดัน V_m ผลการทดสอบปรับเทียบตัวตรวจจับสัญญาณสัญญาณแรงดันแสดงดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบปรับเทียบการวัดตัวตรวจจับสัญญาณแรงดัน

$V_{in,sensor}$ (V)				V_m (V)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
5.378	5.119	5.016	5.171	0.029	0.028	0.027	0.028
9.899	11.254	10.107	10.420	0.056	0.064	0.058	0.059
15.351	15.201	14.599	15.050	0.089	0.088	0.084	0.087
20.624	20.018	20.018	20.220	0.120	0.117	0.117	0.118
27.526	29.920	32.314	29.920	0.162	0.176	0.190	0.176
40.905	40.500	40.095	40.500	0.241	0.239	0.237	0.239
51.965	49.466	48.467	49.966	0.308	0.293	0.287	0.296
57.171	64.994	58.375	60.180	0.339	0.385	0.346	0.357
71.400	70.700	67.900	70.000	0.424	0.420	0.403	0.416
81.608	80.800	79.992	80.800	0.486	0.481	0.476	0.481
85.690	92.906	92.004	90.200	0.510	0.553	0.548	0.537
99.500	93.530	105.470	99.500	0.593	0.557	0.628	0.593

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตัวตรวจจับสนญาณแรงดัน (ต่อ)

$V_{in,sensor}$ (V)				V_m (V)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
112.914	109.593	109.593	110.700	0.672	0.652	0.652	0.659
110.860	120.500	130.140	120.500	0.659	0.716	0.773	0.716
130.997	129.700	128.403	129.700	0.780	0.772	0.764	0.772
132.715	143.891	142.494	139.700	0.791	0.858	0.850	0.833
158.470	137.540	152.490	149.500	0.944	0.820	0.909	0.891
160.994	159.400	157.806	159.400	0.960	0.950	0.941	0.950
161.500	175.100	173.400	170.000	0.962	1.043	1.033	1.013
191.330	166.060	184.110	180.500	1.141	0.990	1.098	1.076
180.500	205.200	184.300	190.000	1.076	1.224	1.099	1.133
199.500	187.530	211.470	199.500	1.190	1.119	1.261	1.190
214.710	208.395	208.395	210.500	1.281	1.243	1.243	1.256
209.570	227.218	225.012	220.600	1.250	1.355	1.342	1.316



รูปที่ 6.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนญาณแรงดัน

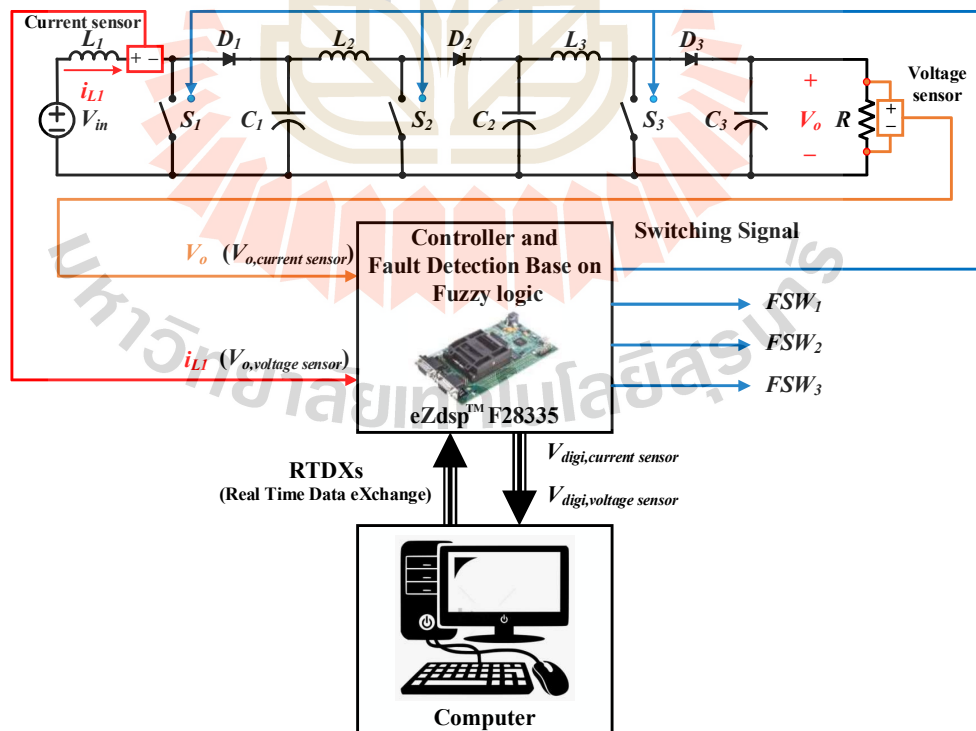
จากตารางที่ 6.3 สามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุต ($V_{in,sensor}$) และแรงดันเอาต์พุต (V_m) ของตัวตรวจจับสัญญาณแรงดันได้ดังรูปที่ 6.15 และสามารถหาสมการความสัมพันธ์ $V_{in,sensor}$ และ V_m ได้ดังสมการที่ (6.3)

$$V_m = 0.006V_{in,sensor} - 0.0029 \quad (6.3)$$

6.5.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

หลังจากได้แรงดันที่อยู่ในช่วง 0V ถึง 3V ตัวตรวจจับสัญญาณกระแส HX15P และตัวตรวจจับสัญญาณแรงดัน LV25P สัญญาณดังกล่าวจะเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 จากนั้นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงสัญญาณแรงดันที่ได้เป็นค่าสัญญาณดิจิทัลที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 4095 ดังนั้นจำเป็นต้องมีการปรับเทียบ โดยวงจรที่ใช้สำหรับการปรับเทียบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 6.19

ในการหาความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์ ($V_{o,sensor}$) และสัญญาณดิจิทัล (N_{digi}) จะทดสอบปรับเทียบโดยการปรับค่าแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์ $V_{o,sensor}$ จาก 0V จนถึง 3V และสัญญาณดิจิทัล N_{digi} ผลการทดสอบปรับเทียบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังตารางที่ 6.4

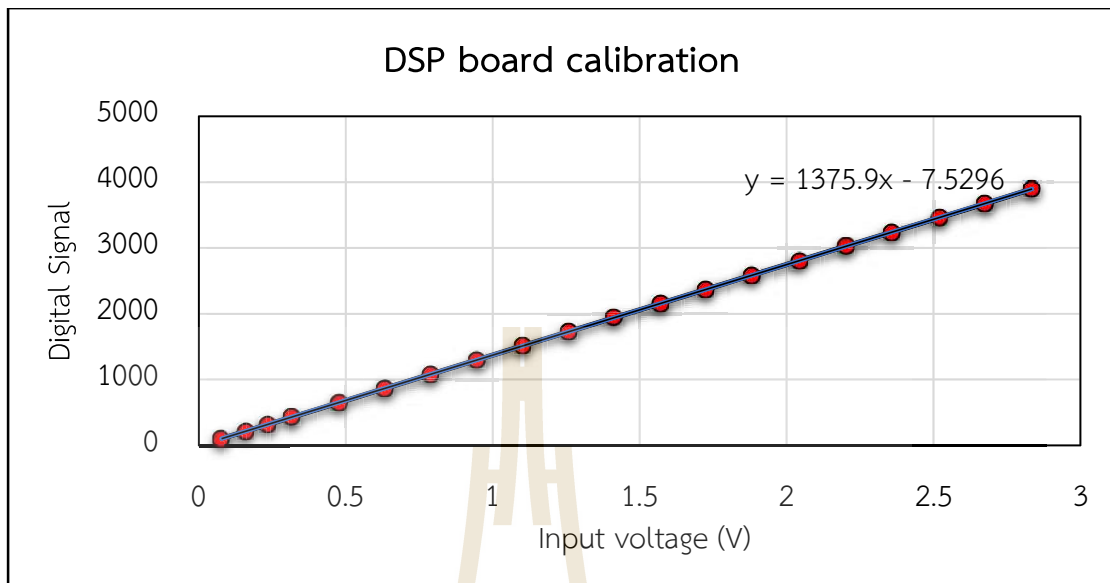


รูปที่ 6.19 วงจรสำหรับการปรับเทียบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์

$V_{O,sensor}$ (V)				N_{digi}			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
3.024	2.994	2.964	2.994	4136	4095	4054	4095
2.864	2.836	2.808	2.836	3933	3894	3855	3894
2.543	2.757	2.731	2.677	3490	3784	3747	3674
2.520	2.369	2.671	2.52	3459	3251	3667	3459
2.454	2.336	2.289	2.36	3370	3208	3143	3240
2.092	2.378	2.136	2.202	2872	3265	2932	3023
2.085	2.064	1.983	2.044	2861	2833	2721	2805
1.903	1.884	1.865	1.884	2611	2585	2559	2585
1.640	1.778	1.761	1.726	2250	2439	2415	2368
1.571	1.477	1.665	1.571	2154	2025	2283	2154
1.442	1.400	1.400	1.414	1979	1921	1921	1940
1.272	1.259	1.246	1.259	1743	1726	1709	1726
1.048	1.136	1.125	1.103	1435	1555	1540	1510
1.005	0.872	0.967	0.948	1374	1192	1322	1296
0.797	0.789	0.781	0.789	1088	1077	1066	1077
0.640	0.634	0.628	0.634	874	865	856	865
0.452	0.490	0.486	0.476	614	665	659	646
0.320	0.317	0.314	0.317	432	428	424	428
0.239	0.236	0.227	0.234	320	317	305	314
0.161	0.159	0.157	0.159	214	212	210	212
0.074	0.080	0.080	0.078	95	103	102	100

จากตารางที่ 6.4 สามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์ ($V_{O,sensor}$) และสัญญาณดิจิทัล (N_{digi}) ของบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ได้ดังรูปที่ 6.20 และสามารถหาสมการความสัมพันธ์ $V_{O,sensor}$ และ N_{digi} ได้ดังสมการที่ (6.4)

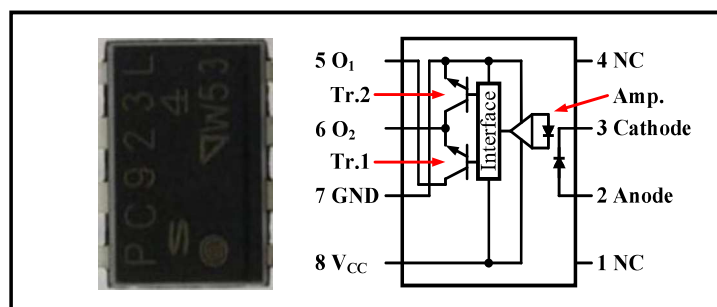


รูปที่ 6.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์ และสัญญาณดิจิตอล

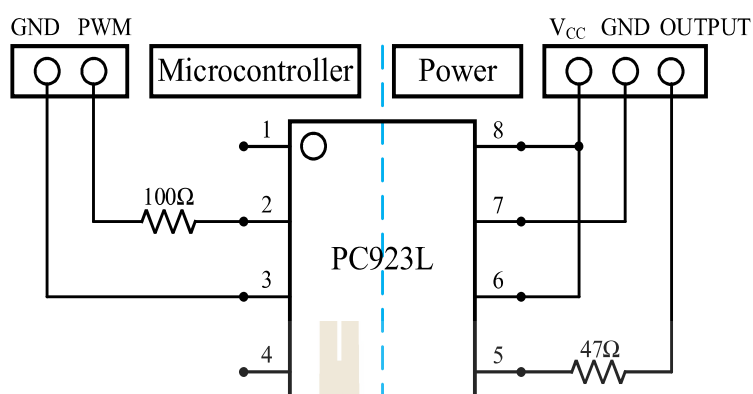
$$N_{digi} = 1375.9V_{O,sensor} - 7.5296 \quad (6.4)$$

6.6 วงจรขยายสัญญาณแบบแยกโคตสัญญาณ

จากการควบคุมการทำงานของมอสเฟตกำลังด้วยกระบวนการพัลส์ที่พัฒนาขึ้น บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP จะให้สัญญาณการสวิตช์ที่มีระดับแรงดันประมาณ 5V ในการขับเคลื่อนมอสเฟตกำลังต้องใช้แรงดันที่ระดับแรงดัน 15V ดังนั้นจำเป็นต้องขยายสัญญาณควบคุมการทำงานของมอสเฟตกำลังด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบแยกโคตสัญญาณ และยังทำหน้าที่แยกกราวด์ด้านแรงดันสูง และแรงดันต่ำออกจากกัน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรควบคุมขณะส่งสัญญาณการสวิตช์ ไอซีออปโตเบอร์ PC923L ถูกใช้ในวงจรขยายสัญญาณแบบแยกโคตสัญญาณแสดงดังรูปที่ 6.21 และวงจรขยายสัญญาณแบบแยกโคตสัญญาณแสดงดังรูปที่ 6.22



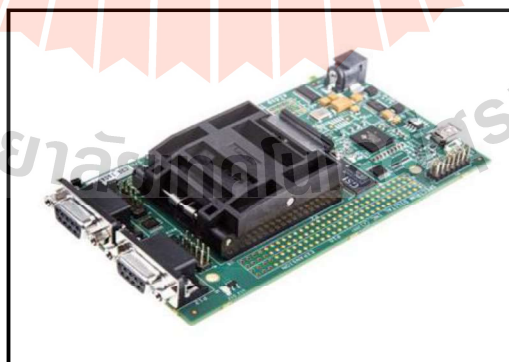
รูปที่ 6.21 ไอซีออปโตเบอร์ PC923L



รูปที่ 6.22 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ

6.7 การควบคุมแรงดันเอาต์พุต และการตรวจจับความผิดปกติ

สำหรับการควบคุมแรงดันเอาต์พุต และการตรวจจับความผิดปกติด้วยกระบวนการทางพีซีซี จะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ดังรูปที่ 6.23 กระบวนการการควบคุมแรงดันเอาต์พุต และการตรวจจับความผิดปกติจะใช้สัญญาณแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก จากการตรวจจับสัญญาณแรงดัน และกระแสตามลำดับ หลังจากนั้นบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์จะประมวลผลจากข้อมูล และกระบวนการทางพีซีซีที่โปรแกรมไว้ เพื่อสร้างสัญญาณการสวิตช์ที่เหมาะสมจากกระบวนการสร้างสัญญาณมอดูเลตตามความกว้างพัลส์ (Pulse-width modulation) เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตตามค่าแรงดันอ้างอิง อีกทั้งยังแสดงค่าการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัว



รูปที่ 6.23 บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335

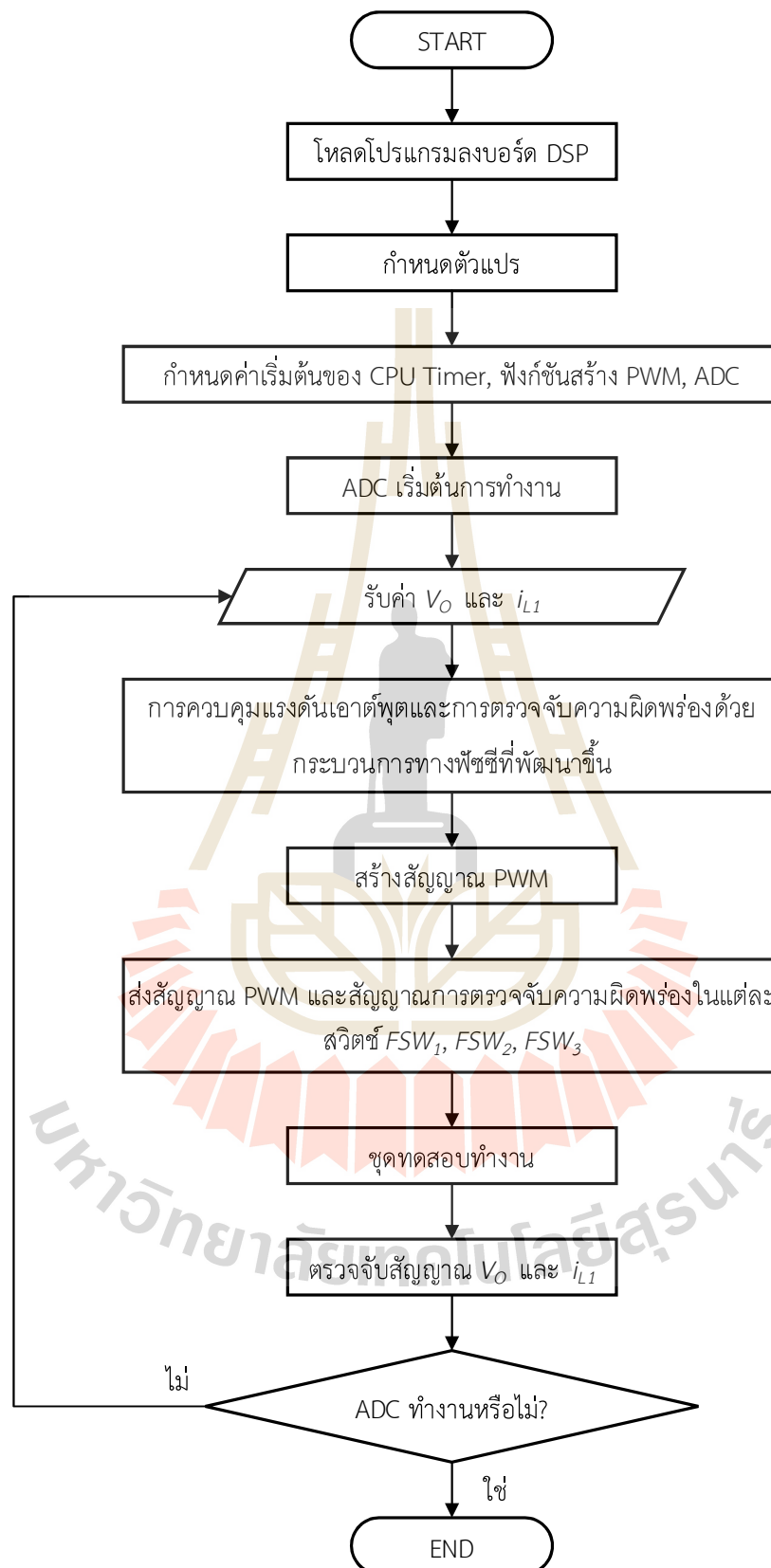
การควบคุมแรงดันเอาต์พุต และการตรวจจับความผิดพร่องด้วยกระบวนการทางพีชชีจะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 และการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี โดยสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6.24 ซึ่งสามารถอธิบายโปรแกรมออกได้เป็น 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่รับสัญญาณค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก หลังจากนั้นจะปรับค่าดิจิตอลจากการแปลงค่าจากสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นดิจิทัล (Analog to digital converter: ADC) ให้เทียบเท่ากับค่ากระแส และแรงดันจริง

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนการควบคุมแรงดันเอาต์พุต และการตรวจจับความผิดพร่องด้วยกระบวนการทางพีชชี

ส่วนที่ 3 เป็นการสร้างสัญญาณการสวิตช์ ด้วยกระบวนการเปรียบเทียบค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์กับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย และการแสดงสัญญาณความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้นในแต่ละสวิตช์

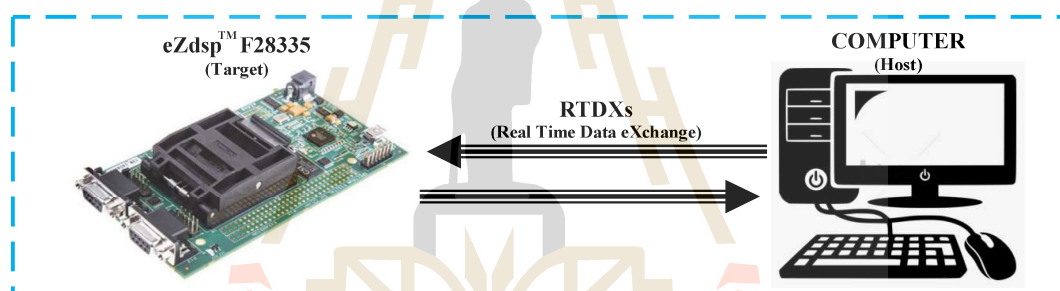




รูปที่ 6.24 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันเอาต์พุต และการตรวจจับความผิดปกติ

6.8 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นแบบฮาร์ดแวร์ในลูป

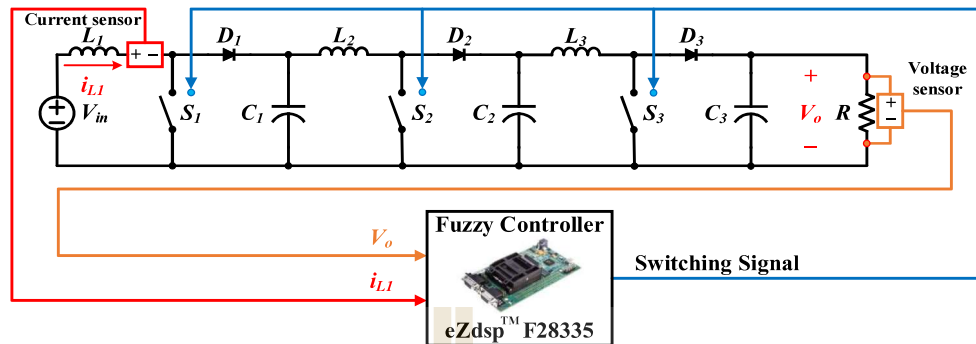
การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the loop) เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม MATLAB SIMULINK และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 โดยจะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุมฟัซซี ร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่มีพารามิเตอร์ภายในวงจรที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 สร้างขึ้นภายใน MATLAB SIMULINK และใช้โปรแกรม Code Composer Studio v3.3 ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของวงจร การทำงานของฮาร์ดแวร์ในลูปจะเป็นการรับ และส่งข้อมูลผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchange) เชื่อมโยงระหว่างโปรแกรม MATLAB SIMULINK (Host) และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Target) แสดงดังรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 แผนภาพการเชื่อมโยงระหว่างโปรแกรม MATLAB SIMULINK และบอร์ด DSP

6.8.1 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น เป็นผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเพื่อยืนยันได้ว่าการตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดพร่องที่พัฒนาขึ้น และเขียนขึ้นด้วยภาษาซี สามารถนำมาใช้ควบคุมการทำงานของชุดทดสอบได้ โดยโครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป แสดงดังรูป 6.26



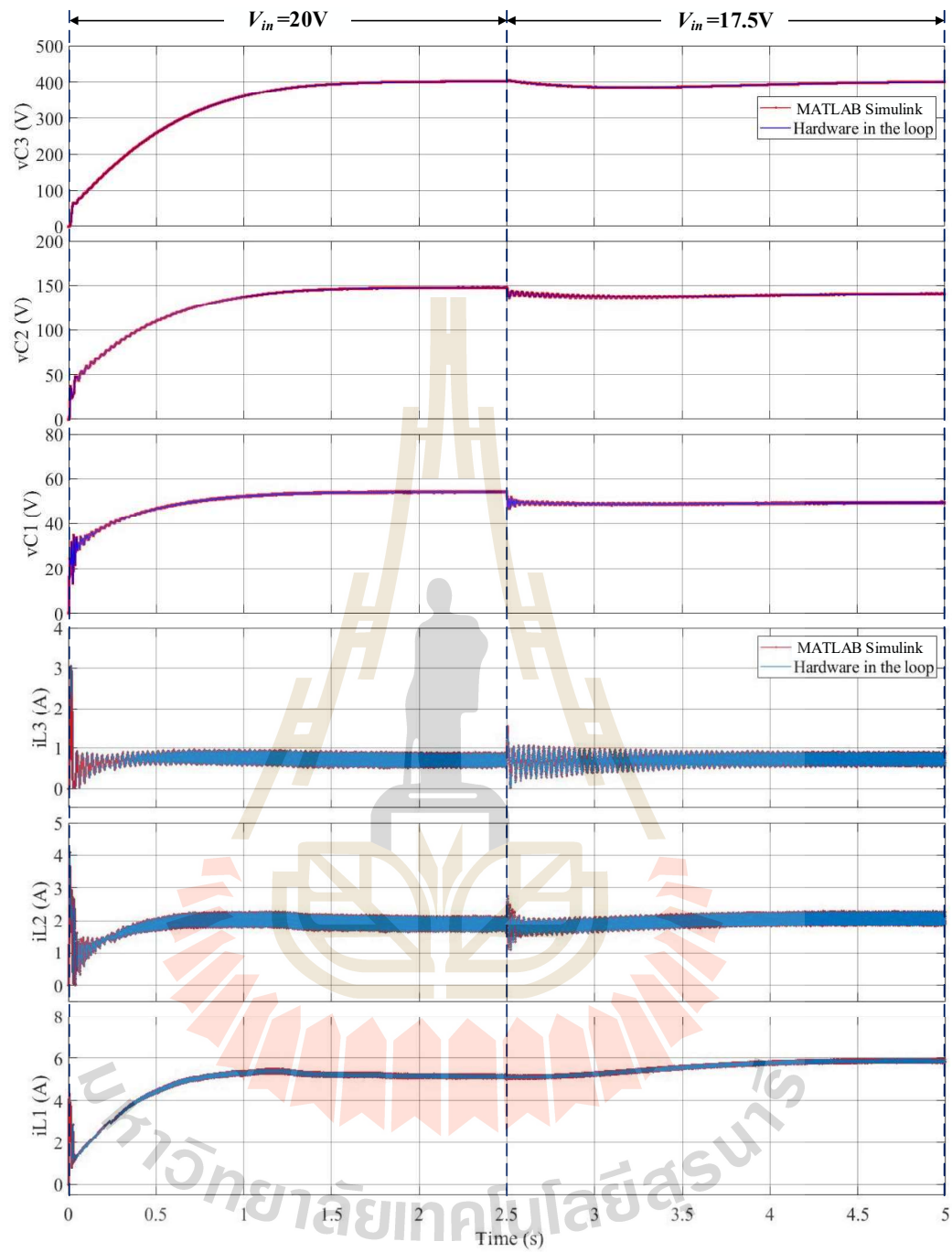
รูปที่ 6.26 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ในรูปของวงจรภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น

โดยพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น 3 กรณี ประกอบด้วย ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_{in}) ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (R)

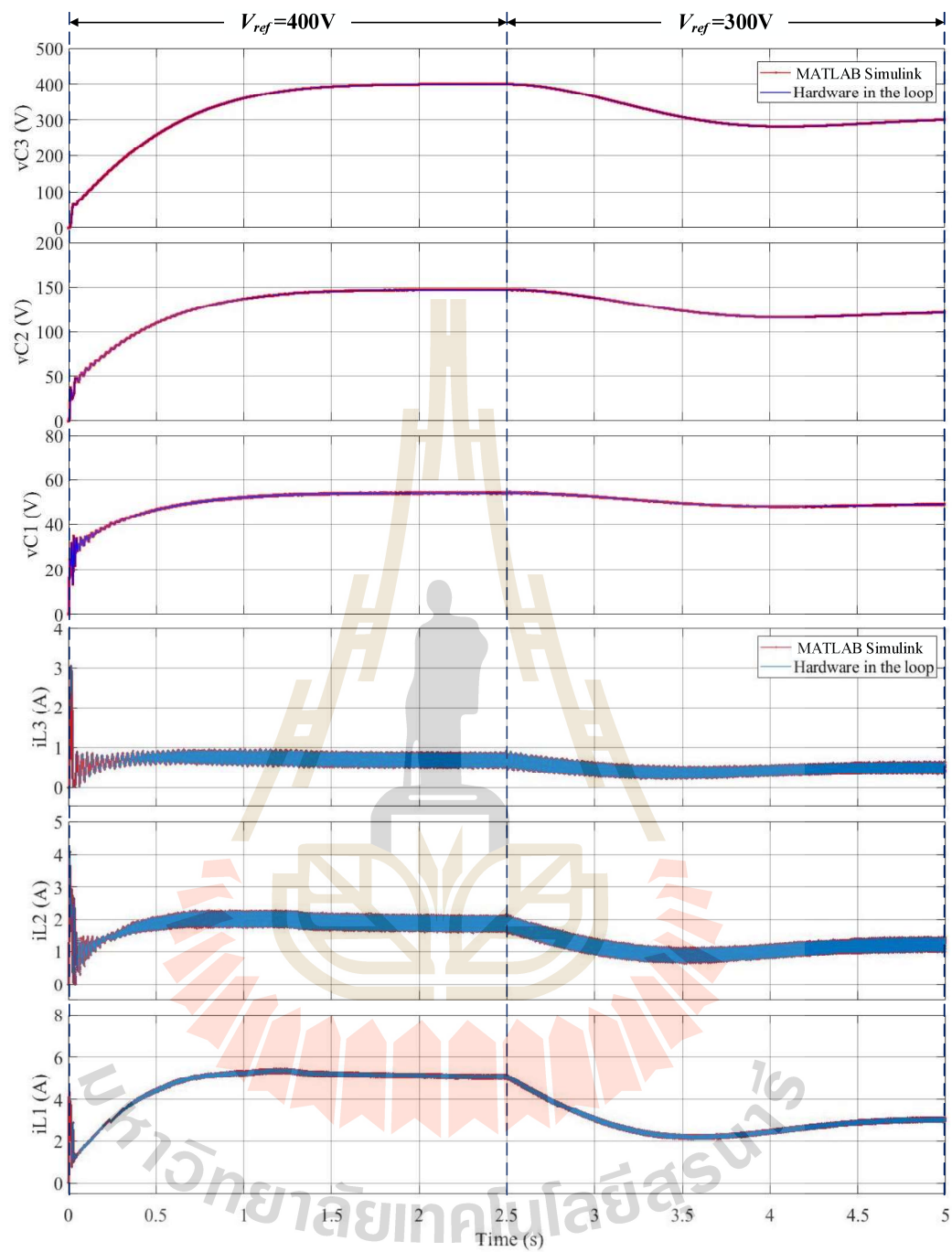
กรณีที่ 1 การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} เป็น 20V และ 17.5V ในช่วงเวลา 0s และ 2.5s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{ref} ที่ 400V และ R ที่ 1600Ω ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{in} แสดงดังรูปที่ 6.27

กรณีที่ 2 การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} เป็น 400V และ 300V ในช่วงเวลา 0s และ 2.5s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ R ที่ 1600Ω ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{ref} แสดงดังรูปที่ 6.28

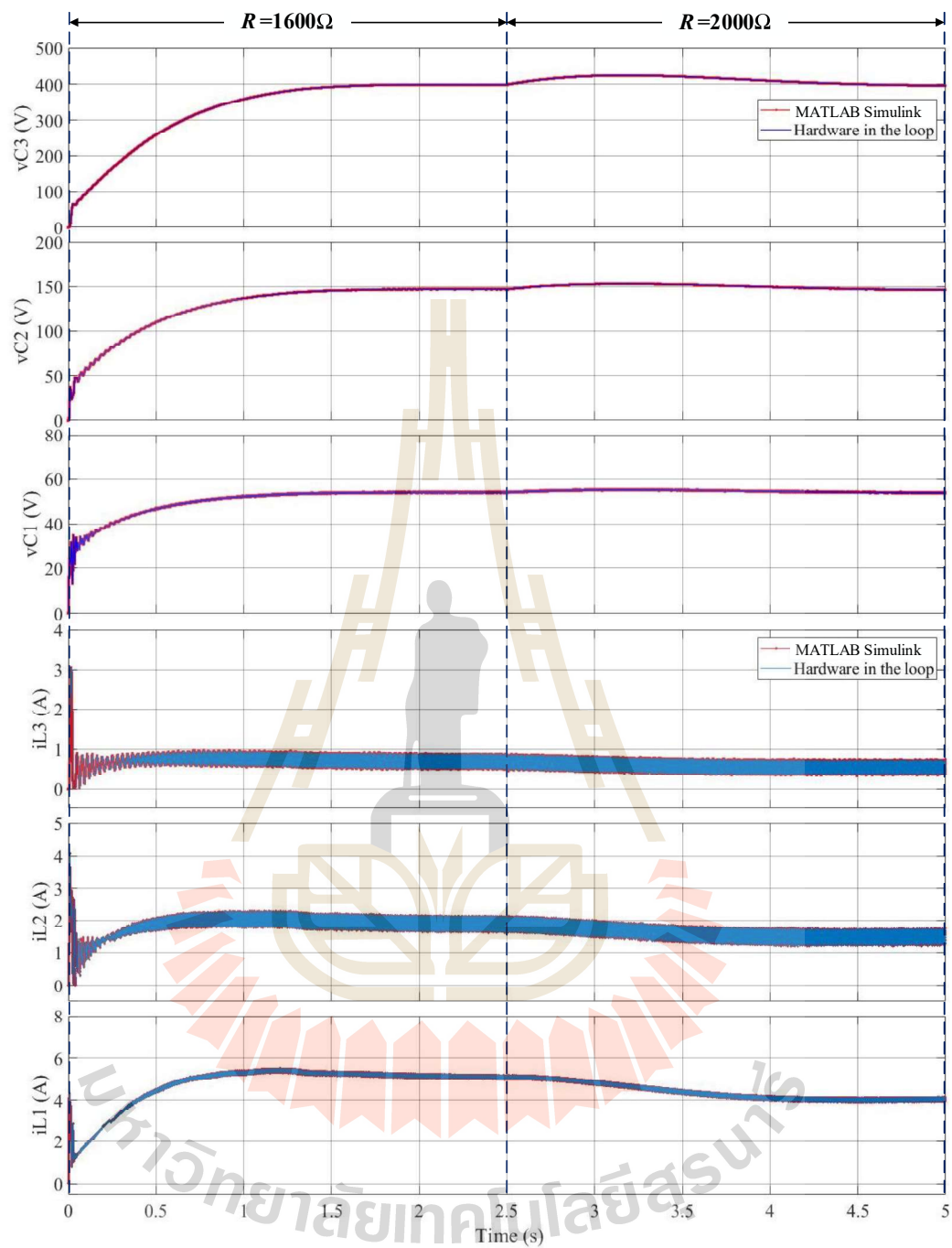
กรณีที่ 3 การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R เป็น 1600Ω และ 2000Ω ในช่วงเวลา 0s และ 2.5s ตามลำดับ โดยคงค่า V_{in} ที่ 20V และ V_{ref} ที่ 400V ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง R แสดงดังรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.27 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต



รูปที่ 6.28 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง



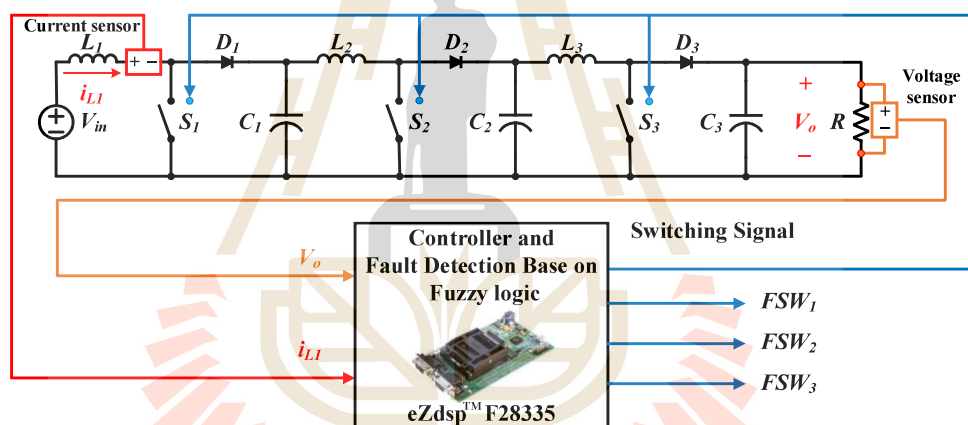
รูปที่ 6.29 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

จากผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปการควบคุมฟิซซีที่

พัฒนาขึ้น ทั้ง 3 กรณี จะเห็นได้ว่าผลของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เป็นไปในทางสอดคล้องใกล้เคียงกัน

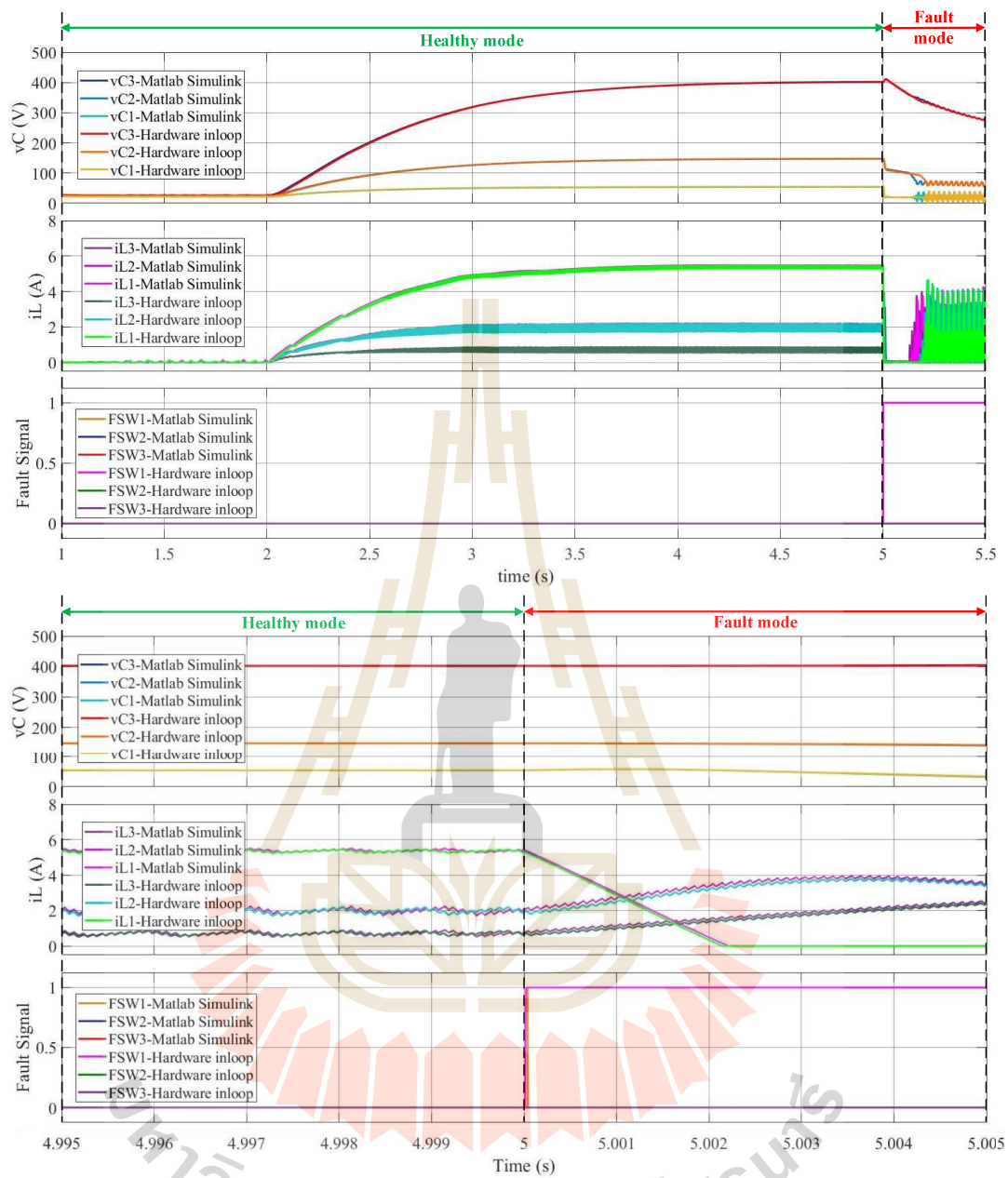
6.8.2 การจำลองสถานการณ์การตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดปกติของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น การตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดปกติ ดำเนินการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบบะระหว่างการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป โดยการจำลองสถานการณ์การตรวจจับและการระบุตำแหน่งความผิดปกติของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงดังรูป 6.30

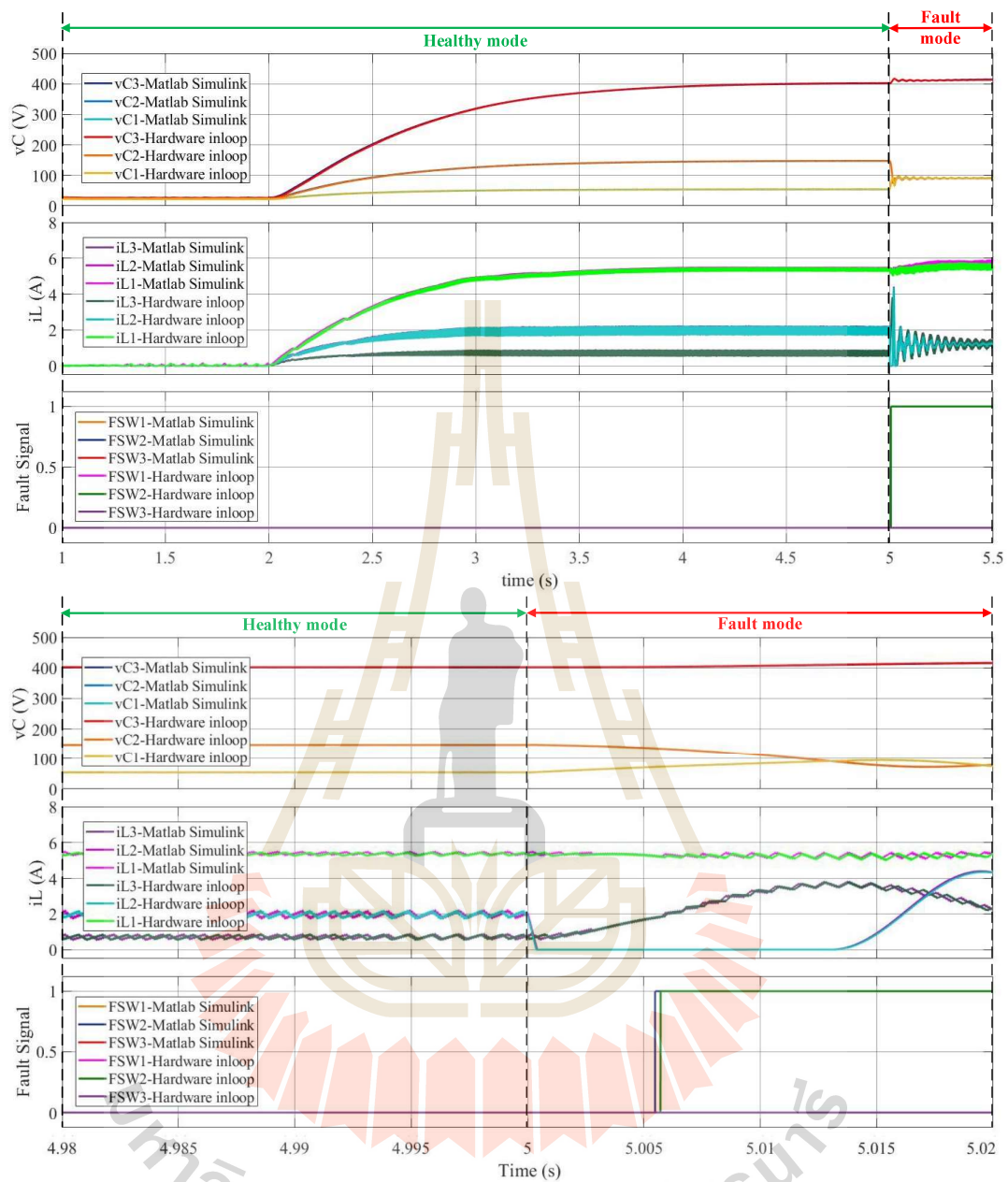


รูปที่ 6.30 โดยการจำลองสถานการณ์การตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดปกติของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

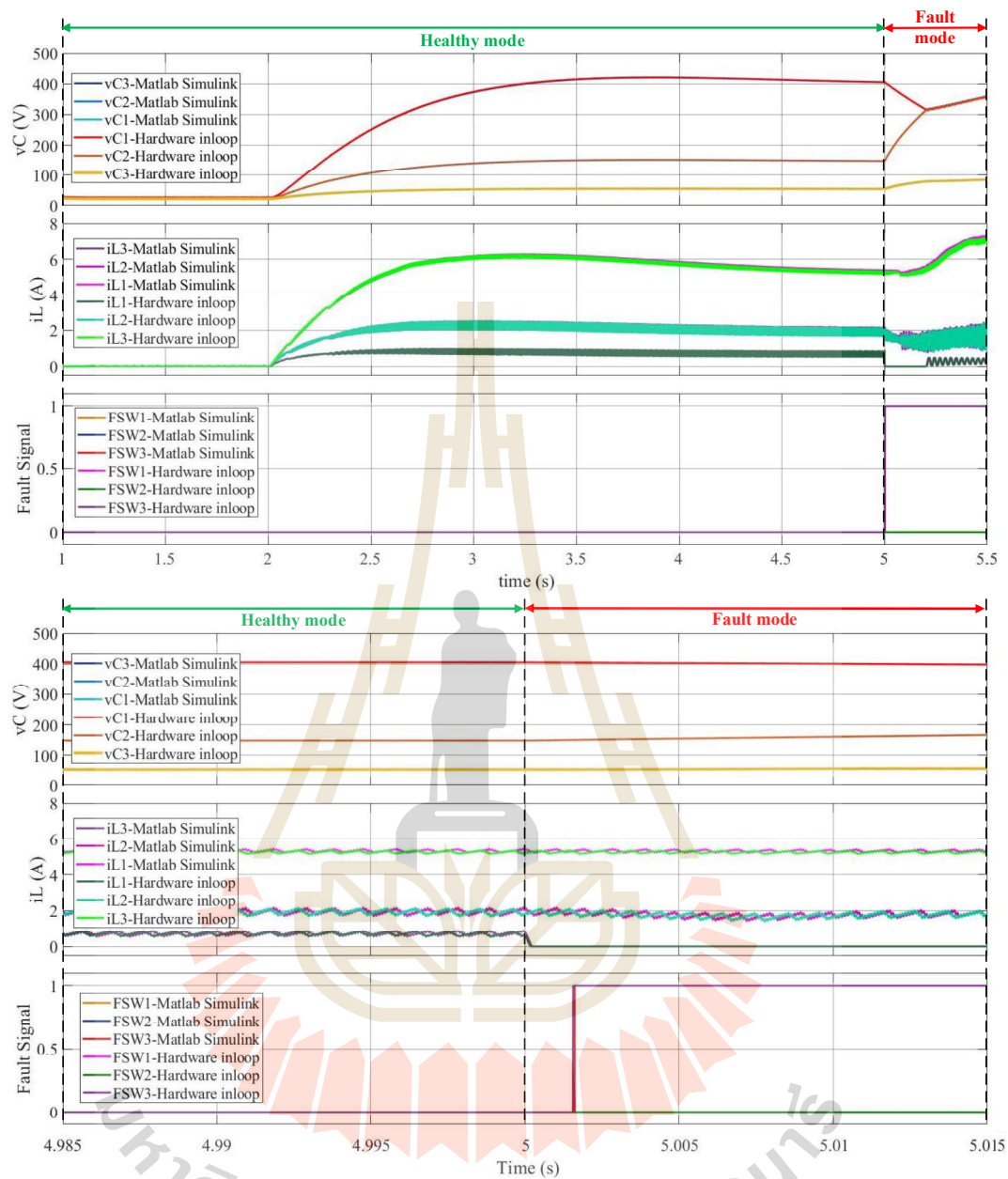
จากการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 พบว่าระบบสามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งของความผิดปกติได้อย่างถูกต้อง โดยจะแสดงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติทั้งสามตัว ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 6.31, 6.32 และ 6.33 ตามลำดับ



รูปที่ 6.31 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_1



รูปที่ 6.32 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_2



รูปที่ 6.33 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3

จากผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปการตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดปกติ ด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ทั้ง 3 กรณี จะเห็นได้ว่าผลของการตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดปกติ เป็นไปในทางสอดคล้องใกล้เคียงกัน ซึ่งยืนยันประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม CCStudio

และภาษาซี บนบอร์ดประมวลผล DSP eZdspTMF28335 นำไปสู่การควบคุมทำงาน การตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดพร่องของชุดทดสอบได้

6.9 สรุป

บทนี้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยเริ่มต้นจากการพิจารณาอุปกรณ์ต่าง ๆ และค่าพิกัดที่อ้างอิงจากการบทที่ 3 อุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ มอสเฟต ไดโอด โหลดตัวต้านทาน วงจรตรวจจับแรงดัน วงจรตรวจจับกระแส และวงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ หลังจากนั้นจะโปรแกรมการควบคุมแรงดันเอาต์พุต การตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดพร่องที่ใช้กระบวนการทางพีซี บันทึกลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 โดยมีผลการจำลองแบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงให้เห็นถึงการควบคุมแรงดันเอาต์พุต การตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดพร่องของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเป็นไปในทางสอดคล้องใกล้เคียงกันกับการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB SIMULINK

บทที่ 7

ผลการทดสอบ

7.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นดังที่นำเสนอการสร้างชุดทดสอบไว้ในบทที่ 6 โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 และตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นเพื่อรักษาแรงดันให้คงที่ตามต้องการดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 รวมถึงการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ โดยการสั่งให้สวิตช์สำรองทำงานแทนทันทีหลังจากตรวจพบความผิดปกติที่เกิดขึ้น เพื่อให้วงจรสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพดังที่นำเสนอในบทที่ 5 ในการแสดงผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นจะทำการทดสอบภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแรงดันอ้างอิง แรงดันอินพุต และโหลดตัวต้านทาน ทั้งนี้จะนำเสนอผลตอบสนองของการทำงานของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน โดยพิจารณาจากแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพื่อแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นให้สามารถรักษาระดับแรงดันตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการแสดงผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้ผลการทดสอบจะแสดงการตรวจจับความผิดปกติ ต่อมาเป็นการระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นโดยสามารถระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง และสุดท้ายเป็นการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ เพื่อให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความผิดปกติที่เกิดขึ้น

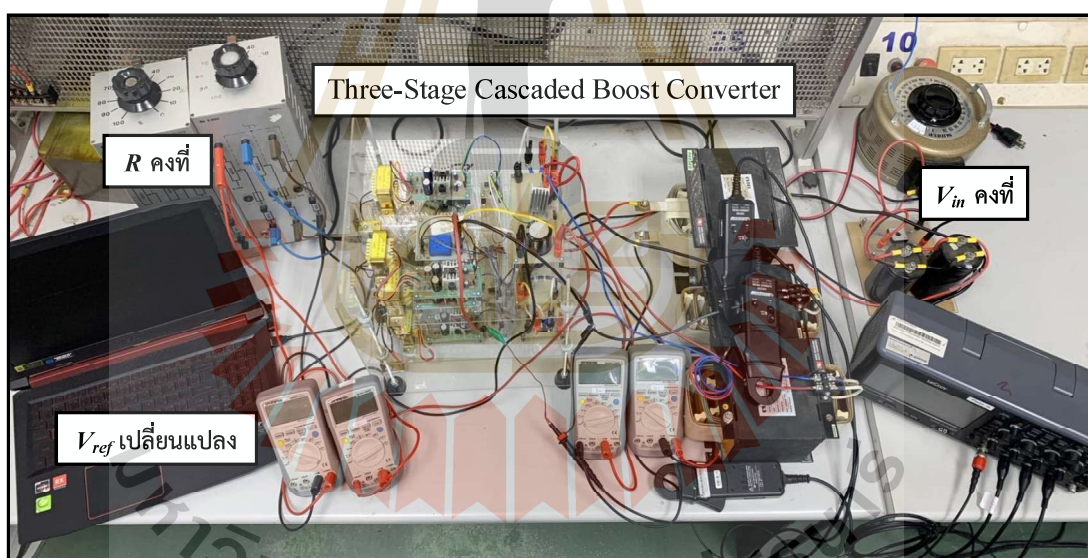
7.2 ผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 เพื่อสร้างสัญญาณการสวิตช์ทั้งสามตัว โดยอาศัยตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นทำการทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง แรงดันอินพุต

และโหลดตัวต้านทาน นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นในการรักษาแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นให้คงที่ตามต้องการ รายละเอียดการทดสอบวงจรในแต่ละกรณีแสดงดังต่อไปนี้

7.2.1 กรณีมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง

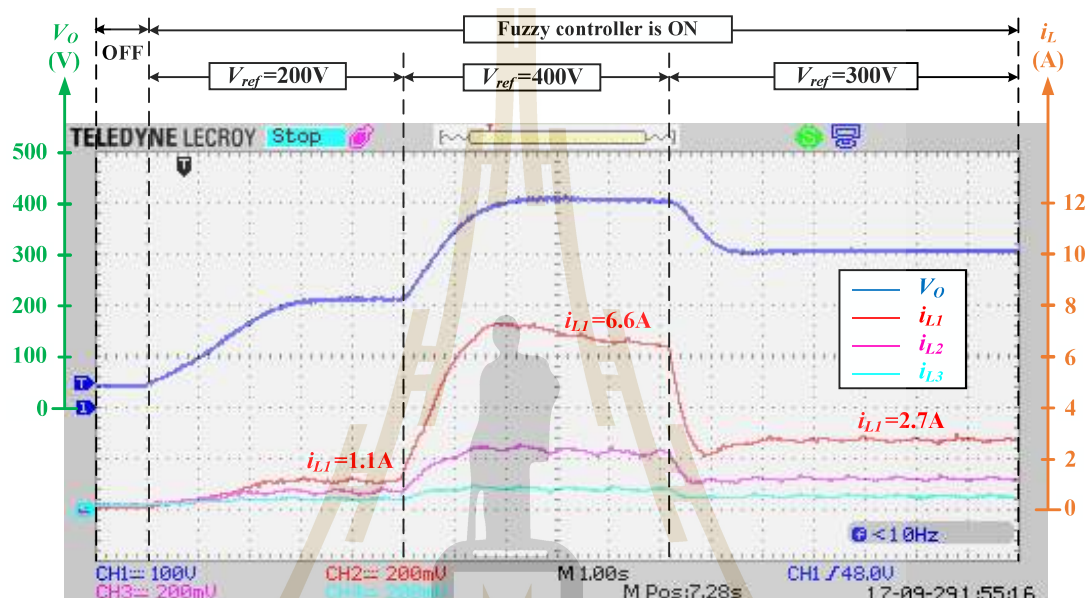
การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง จะอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.1 ในการทดสอบจะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงเปลี่ยนแปลงซึ่งจะอาศัยการตั้งค่าแรงดันอ้างอิงโดยการโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 โดยแรงดันอ้างอิงจะเปลี่ยนแปลงจาก 200V เป็น 400V หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็น 300V ส่วนแรงดันอินพุตจ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นคงที่ประมาณ 20V และโหลดตัวต้านทานมีขนาดคงที่ประมาณ 1600Ω ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.1 ชุดทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

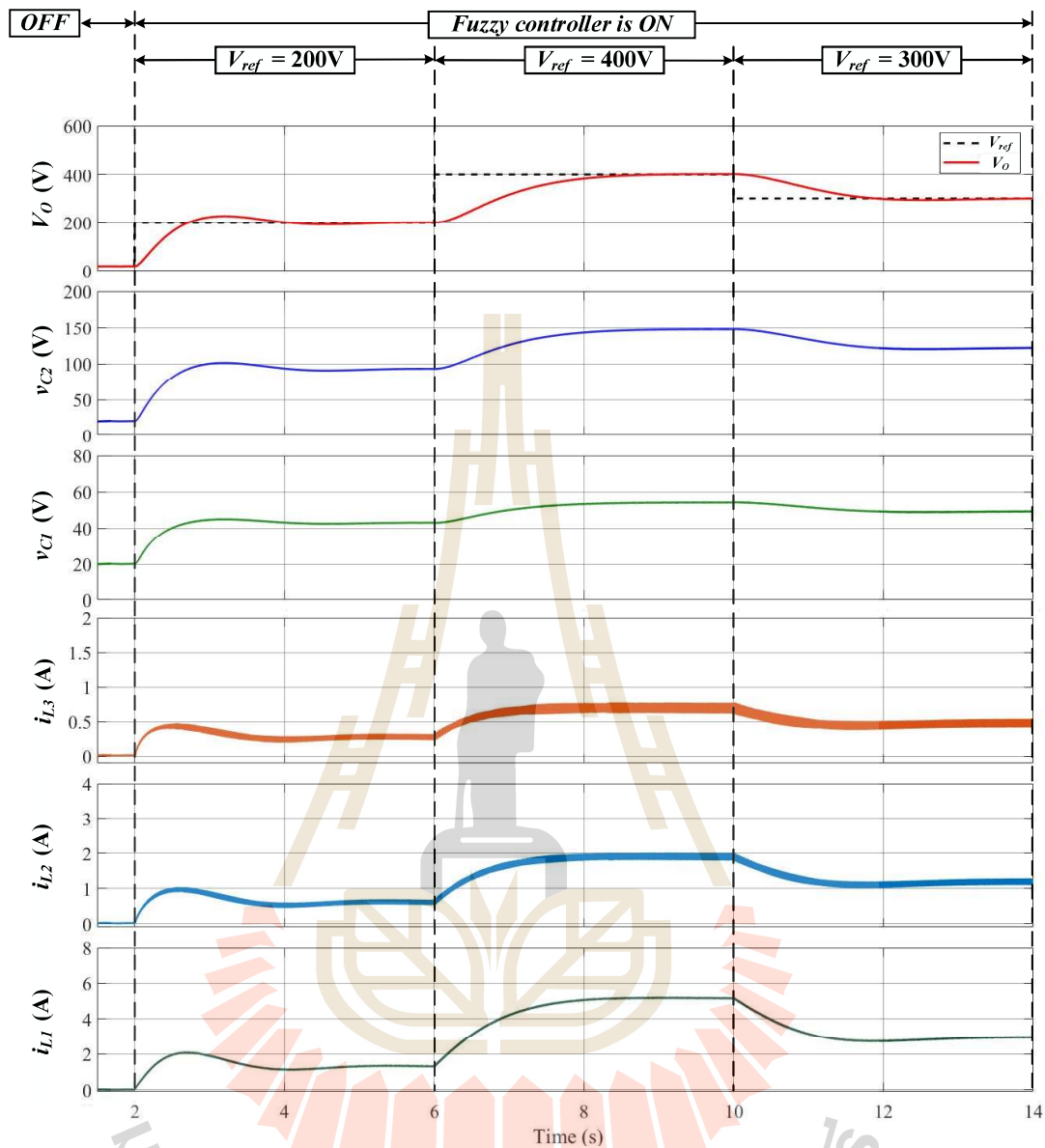
ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 7.2 จะเห็นได้ว่าในขณะที่คงค่า V_{in} ที่ 20V และ R ที่ 1600Ω การทดสอบจะเปลี่ยนค่า V_{ref} เป็น 200V, 400V และ 300V โดยขณะที่เริ่มต้นการทำงานของวงจรค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะมีการการพุ่งเกินเล็กน้อย หลังจากนั้นตัวควบคุมฟัซซีสามารถควบคุม V_o ให้คงที่ 200V โดยเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวภายในเวลาประมาณ 2.8s ส่วน i_{L1} เพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันและคงที่ที่

ประมาณ 1.1A จะเห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมค่า i_{L1} ให้มีค่าความชันตาม m_{ref} ตามกฎฟัซซีที่กำหนดไว้ ต่อจากนั้นที่วินาทีที่ 5 ค่าแรงดัน V_{ref} เปลี่ยนจาก 200V เป็น 400V จะเห็นว่าตัวควบคุมเพิ่มระดับ V_o และ i_{L1} จากเริ่มต้นไปยังสภาวะอยู่ตัวเป็นเวลาประมาณ 1.9s โดยที่มีค่าประมาณ 400 V และ 6.6A ตามลำดับ หลังจากนั้น V_{ref} ถูกลดลงเป็น 300V และตัวควบคุมฟัซซีควบคุม V_o ไปสู่สภาวะอยู่ตัวใหม่ในเวลาประมาณ 1.2 s



รูปที่ 7.2 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

จากผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงรูปที่ 7.2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 7.3 พบว่าผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฮาร์ดแวร์ต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นที่สามารถควบคุม และรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ

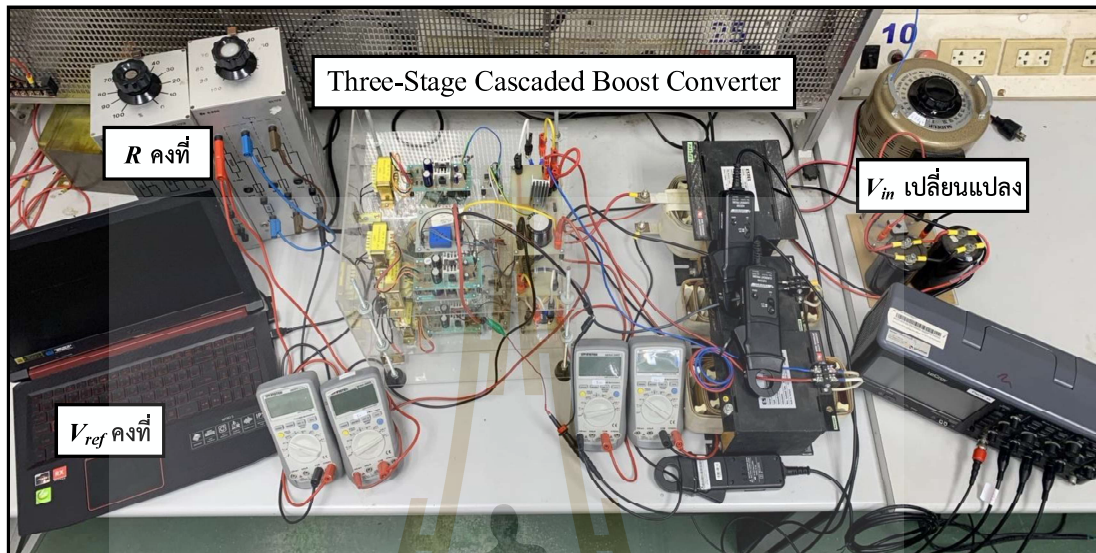


รูปที่ 7.3 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

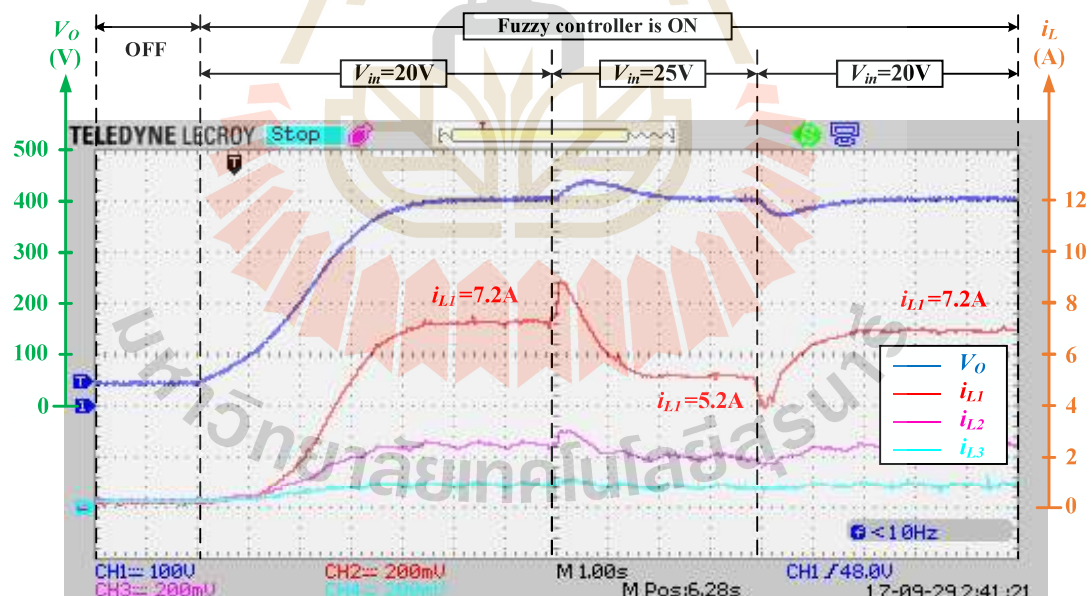
7.2.2 กรณีมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต จะอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.4 ในการทดสอบจะปรับให้แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะอาศัยการปรับวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับชุดทดสอบมีหม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส ให้ได้แรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นจาก 20V เป็น 25V หลังจากนั้นปรับแรงดันอินพุตลดลงจาก 25V เป็น 20V โดยที่ค่าแรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทานมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบที่ 400V

และ 1600Ω ตามลำดับ ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตแสดงได้ดังต่อไปนี้



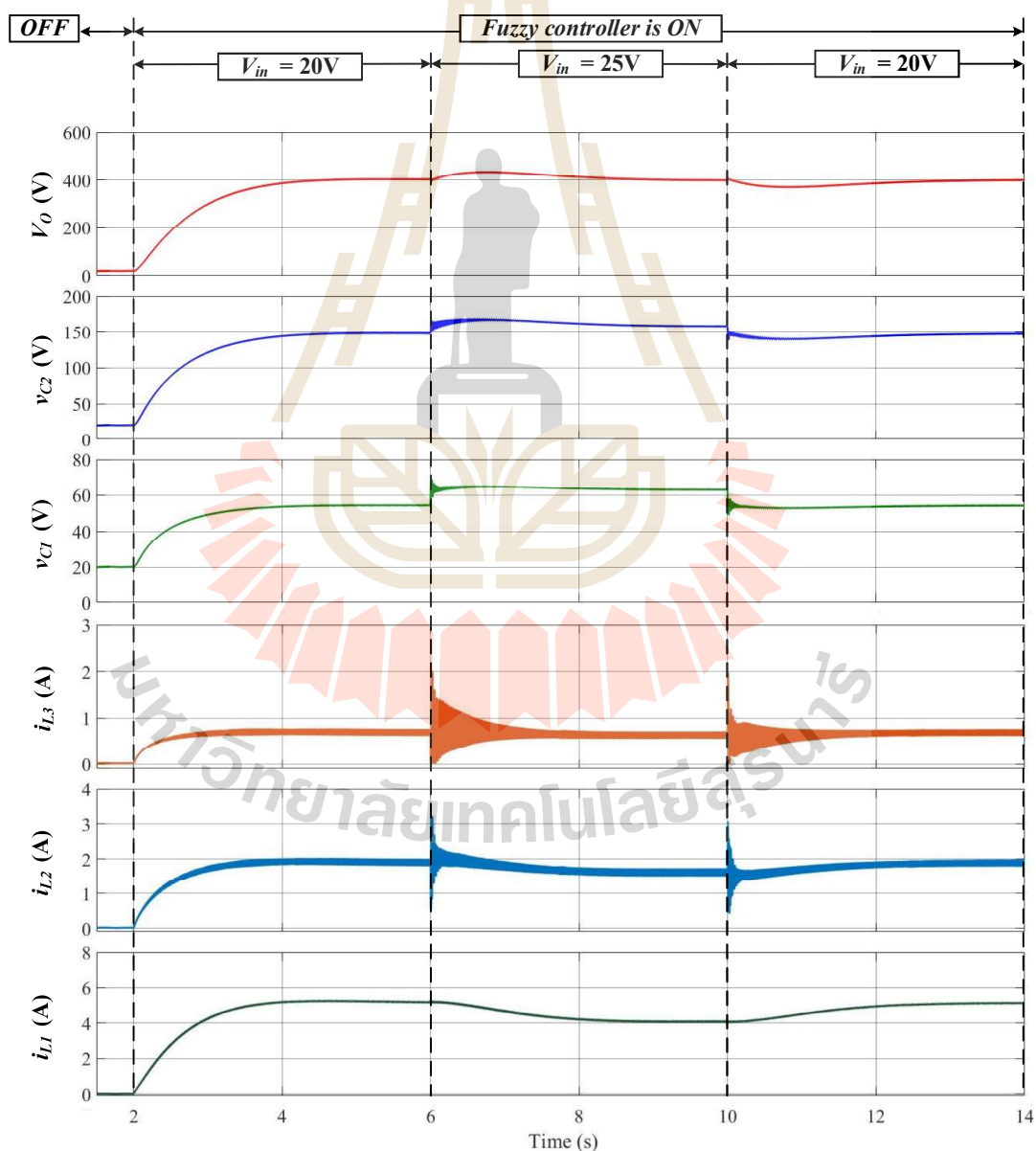
รูปที่ 7.4 ชุดทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต



รูปที่ 7.5 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตแสดงดังรูปที่ 7.5 จะพบว่าในช่วงเริ่มต้นการทำงานของวงจรแปลงผัน

กำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยมีแหล่งจ่ายแรงดัน V_{in} ที่ 20V จากรูปแสดงค่า V_O เพิ่มขึ้นจาก 20V ไปยังแรงดันอ้างอิงคือ 400V ภายในระยะเวลาประมาณ 4.2s ในเวลาเดียวกัน i_{L1} เพิ่มขึ้น และคงที่ประมาณ 7.2A ที่สภาวะอยู่ตัว หลังจากนั้น V_{in} ถูกเปลี่ยน 20V เป็น V_{in} 25V ในการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตส่งผลให้ทั้ง i_{L1} และ V_O เกิดการพุ่งเกินในช่วงเริ่มต้น จากนั้นตัวควบคุมฟัซซีทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรอย่างมีประสิทธิภาพโดยสามารถรักษา V_O ยังคงอยู่ที่ 400V และ i_{L1} มีค่าสภาวะอยู่ตัวประมาณ 5.2A ต่อมา V_{in} ถูกลดลงจาก 25V ไปยัง 20V ที่เวลา 10s ทำให้ i_{L1} และ V_O ลดลง จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีสามารถควบคุมการทำงานของวงจรอย่างรวดเร็ว โดยที่ i_{L1} และ V_O กลับเข้าสู่สภาวะคงตัวครั้งที่ โดยใช้เวลาประมาณ 1.6 s

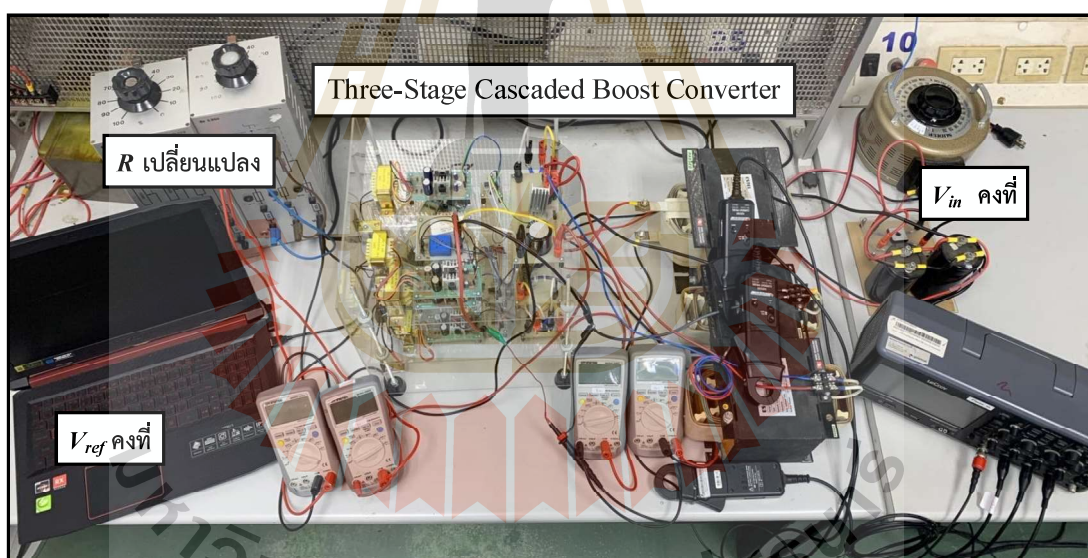


รูปที่ 7.6 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

จากผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตดังรูปที่ 7.5 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 7.6 พบว่าผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น ที่สามารถควบคุม และรักษาระดับแรงดันตามแรงดันอ้างอิงที่ 400V

7.2.3 กรณีมีการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน

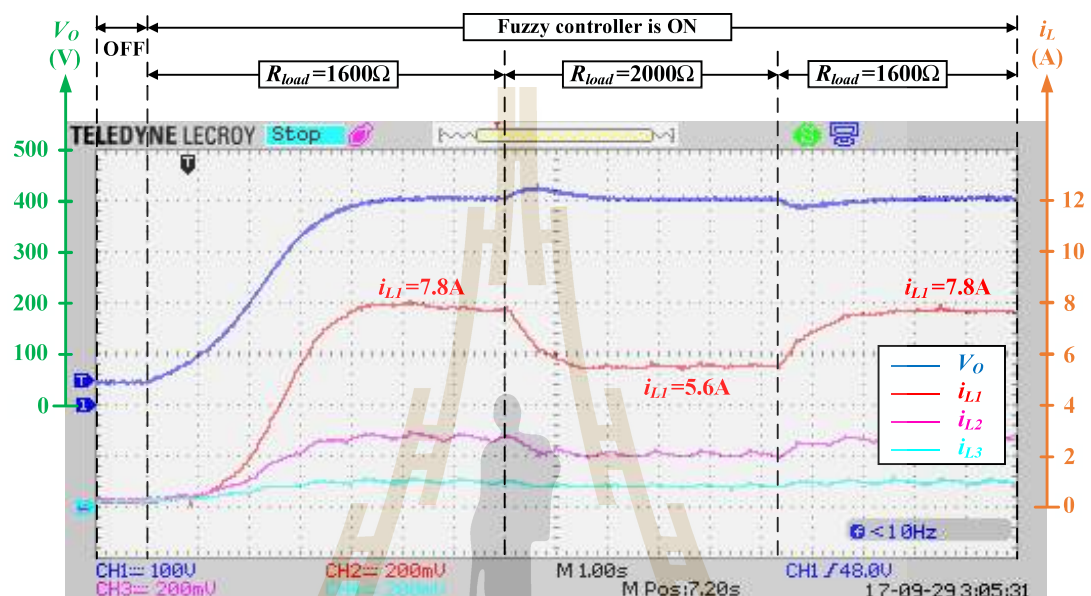
การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน ซึ่งแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงโดยอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.7 ในการทดสอบจะปรับให้โหลดตัวต้านทานให้ได้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 1600Ω เป็น 2000Ω หลังจากนั้นปรับโหลดตัวต้านทานลดลงจาก 2000Ω เป็น 1600Ω โดยที่ค่าแรงดันอ้างอิง และแรงดันอินพุตมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบที่ 400V และ 20V ตามลำดับ ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.7 ชุดทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

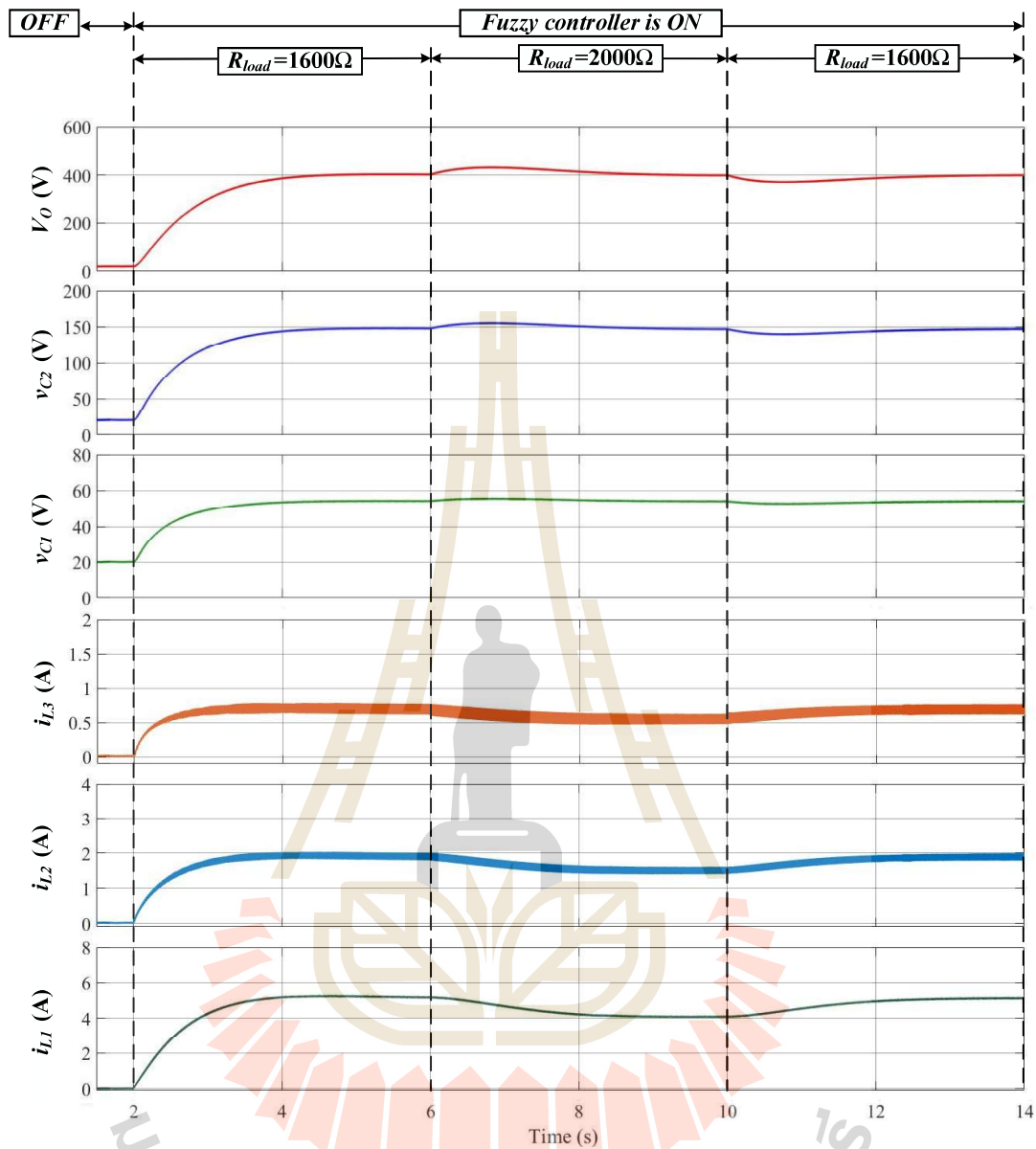
ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานแสดงดังรูปที่ 7.8 จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมแรงดัน V_o จาก 20V ของแรงดันอินพุตเป็น 400V เท่ากับแรงดันอ้างอิงที่สภาวะอยู่ตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4.2s ส่วน i_{L1} เพิ่มขึ้น และคงที่ที่ประมาณ 7.8A จากนั้นโหลดตัวต้านทานถูกปรับเพิ่มจาก 1600Ω เป็น 2000Ω ส่งผลให้ V_o เกิดการพุ่งเกิน โดยตัวควบคุมฟัซซีสามารถตอบสนองควบคุม V_o

ให้โหลดลงเข้าหา V_{ref} ที่ 400V อีกทั้งยังควบคุมให้ i_{L1} เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 5.6A หลังจากนั้นโหลดตัวต้านทานถูกเปลี่ยนจาก 2000Ω เป็น 1600Ω ส่งผลให้แรงดัน V_o ลดลง จากนั้นตัวควบคุมฟัซซี่จะควบคุมแรงดัน V_o ให้เข้าสู่ V_{ref} ที่ 400 V ส่วน i_{L1} มีค่าประมาณ 7.8A ที่สภาวะอยู่ตัวโดยใช้เวลาประมาณ 1.4s



รูปที่ 7.8 ผลการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรจริง กับผลการจำลองสถานการณ์ดังที่แสดงในรูปที่ 7.8 และ 7.9 ตามลำดับ พบว่าทั้งสองผลลัพธ์มีความสอดคล้องกัน ซึ่งยืนยันประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การควบคุมฟัซซี่ในการรักษาระดับแรงดันอ้างอิงที่ 400V แม้ว่าโหลดตัวต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลง

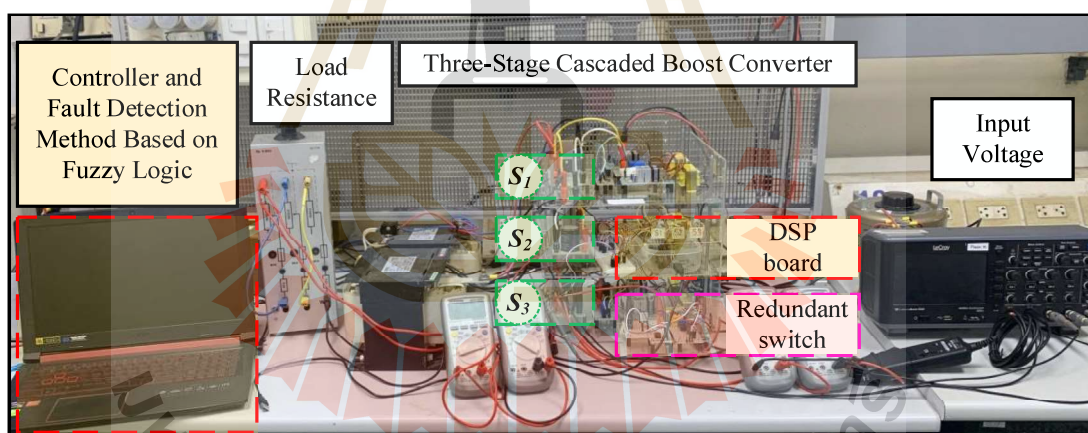


รูปที่ 7.9 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน

ผลการทดสอบชุดทดลองที่มีตัวควบคุมฟัซซีภายใต้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันอ้างอิง แรงดันอินพุต และโหลดตัวต้านทาน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ พบว่ามีความสอดคล้องกันทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟัซซีในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

7.3 ผลการทดสอบวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร

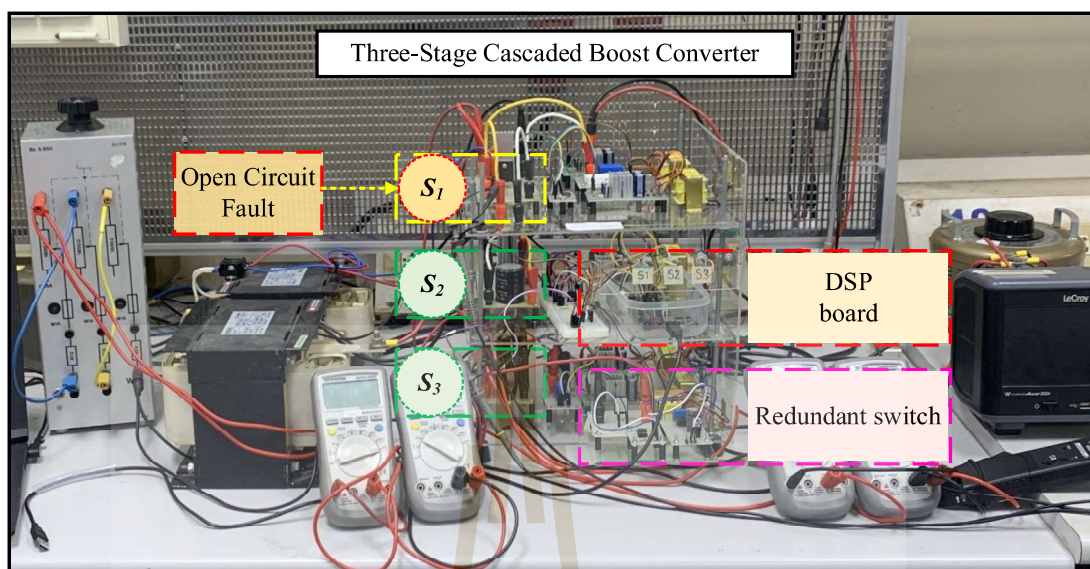
การทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรจะทำงานร่วมกันกับการควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยการเขียนโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 แสดงดังรูปที่ 7.10 เพื่อสร้างสัญญาณการสวิตช์ทั้งสามตัว สำหรับรักษาแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ โดยใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้น รวมถึงการสร้าง ความคงทนต่อความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ 5 โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 , S_2 และ S_3 ตามลำดับ โดยขั้นตอนการทดสอบแต่ละกรณีจะประกอบไปด้วยการตรวจจับความผิดปกติที่สามารถระบุตำแหน่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร จะดำเนินการตรวจจับความผิดปกติโดยอาศัยวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้น หลังจากนั้นจะสั่งให้สวิตช์สำรองทำงานทันที โดยใช้สัญญาณสถานะความผิดปกติเพื่อให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์เพื่อแสดงประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 7.10 ชุดทดสอบวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร

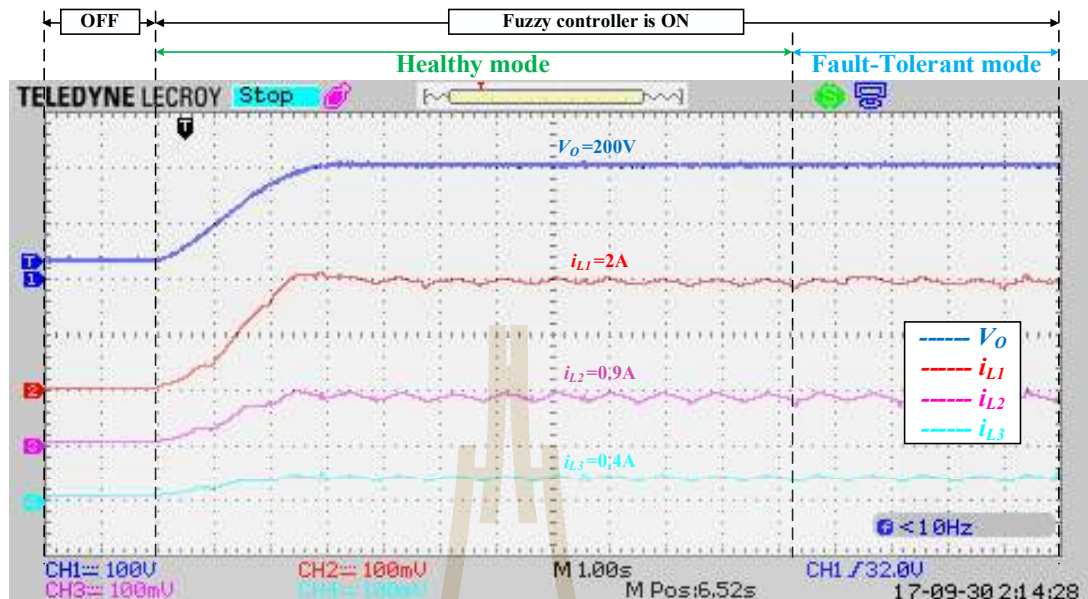
7.3.1 กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 จะอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.11 ในการทดสอบจะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงคงที่ 200V ซึ่งจะอาศัยการตั้งค่าแรงดันอ้างอิงโดยการโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ส่วนแรงดันอินพุตจ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นคงที่ประมาณ 20V และโหลดตัวต้านทานมีขนาดคงที่ประมาณ 1600Ω



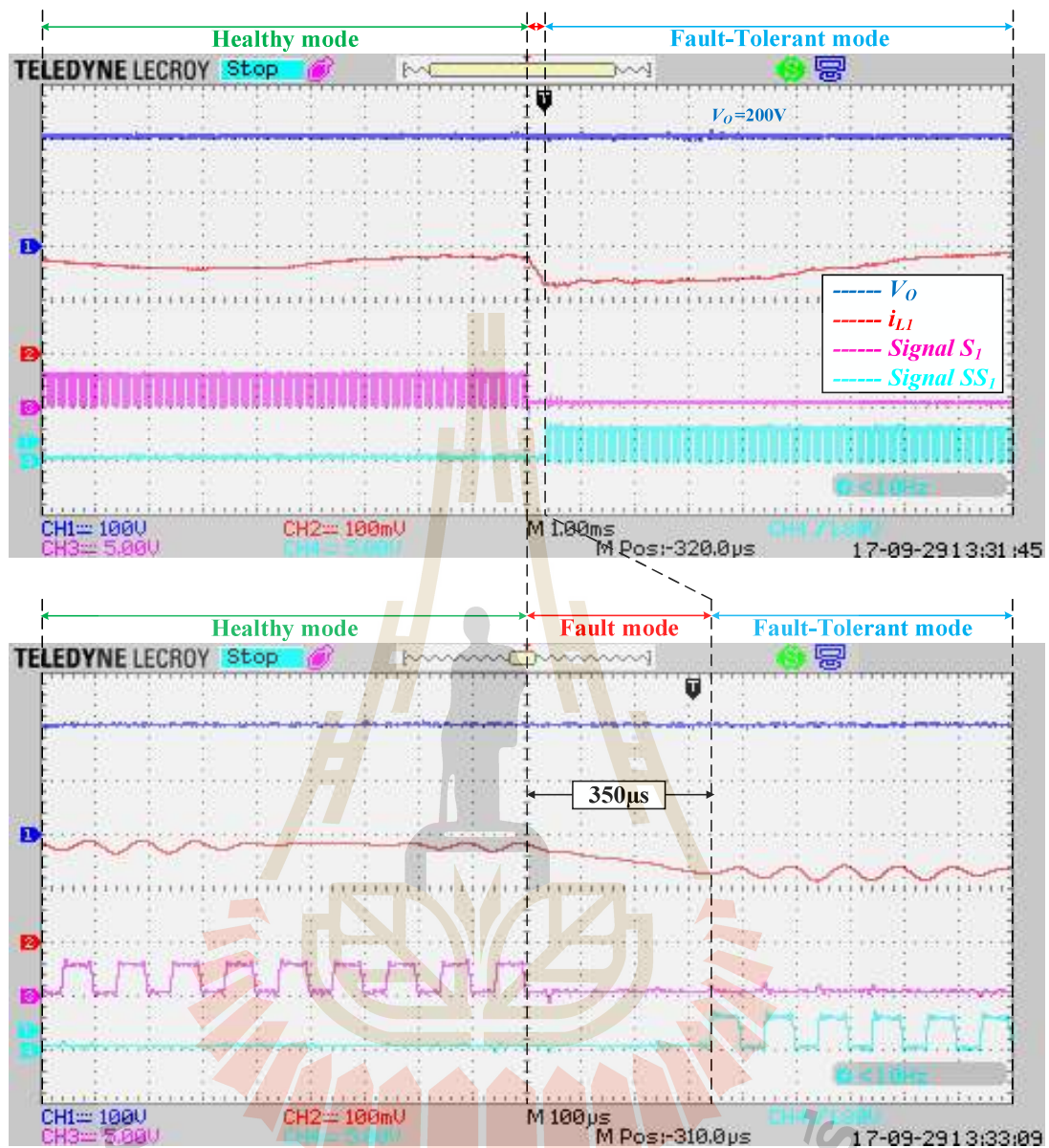
รูปที่ 7.11 ชุดทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1

ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดกับการสวิตช์วงจรที่ S_1 แสดงให้เห็นในรูปที่ 7.12, 7.13 และ 7.14 รูปที่ 7.12 แสดงแรงดันเอาต์พุต และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามในช่วงโหมดปกติ ตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานจนกระทั่งเกิดความผิดพลาด สังเกตได้ว่าตัวควบคุมฟัซซี่ที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงสุดที่ 200V และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} เพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 2A, 0.9A และ 0.4A ตามลำดับ หลังจากนั้นที่เวลาประมาณ 11.2s เกิดความผิดพลาดที่สวิตช์ S_1 จะสังเกตได้ว่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากสามารถตรวจจับได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นได้ส่งสัญญาณการสวิตช์ไปยังสวิตช์สำรอง SS_1 ให้ทำงานทันทีเมื่อตรวจพบความผิดพลาดดังกล่าว

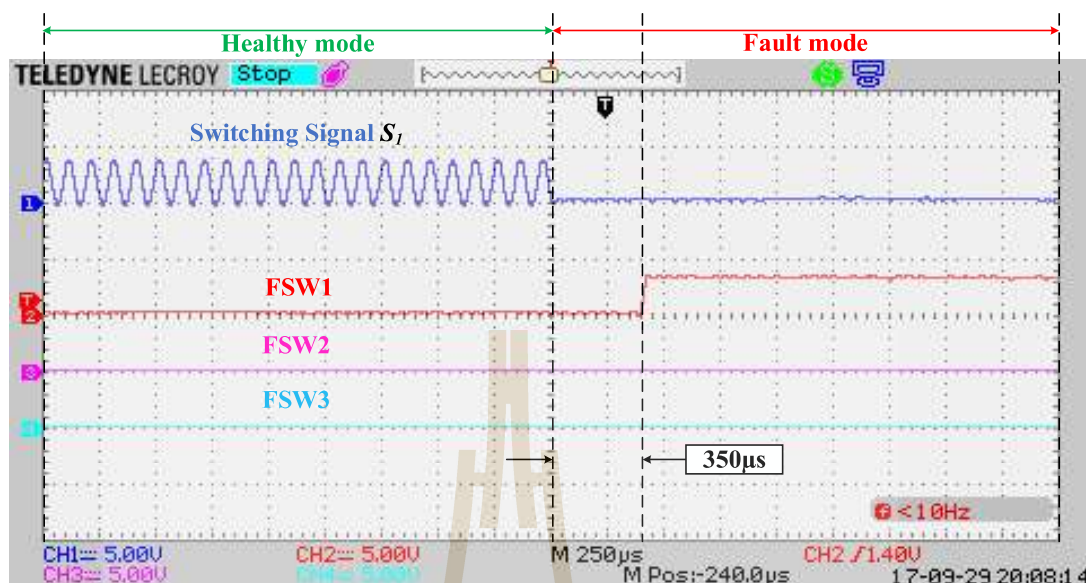


รูปที่ 7.12 ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบวงจรรูปที่ 7.13 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง สัญญาณสวิตช์ S_1 และสัญญาณสวิตช์สำรอง SS_1 สังเกตเห็นว่าในช่วงสภาวะปกติ ก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดันเอาต์พุต กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์ที่ S_1 ทำงานตามปกติอยู่ในสภาวะอยู่ตัว หลังจากเกิดความผิดปกติ ส่งผลให้กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง i_{L1} ลดลงทันที เมื่อใช้วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จากนั้นดำเนินการส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_1 ทำงานแทน นอกจากนี้ผลการทดสอบในรูปที่ 7.14 แสดงสัญญาณสวิตช์ของ S_1 และสัญญาณตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัว (FSW_1 , FSW_2 , FSW_3) ซึ่งพบว่าในช่วงสภาวะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ สัญญาณสวิตช์ S_1 ยังคงมีสัญญาณพัลส์ปกติ ส่วนสัญญาณตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัวยังคงค่าเป็นศูนย์ แต่หลังจากเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 โดยสัญญาณสวิตช์ S_1 จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนสัญญาณตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ที่ S_1 (FSW_1) จะแสดงค่าเป็น 1 ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจึงส่งผลให้สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_1 ทำงานแทนดังแสดงในรูปที่ 7.14 ในกระบวนการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 จะใช้เวลาเพียง $350\mu s$ หรือ $0.35ms$ ส่งผลให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นทำงานได้อย่างต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพในโหมดความคงทนต่อความผิดปกติ (Fault-tolerant mode)

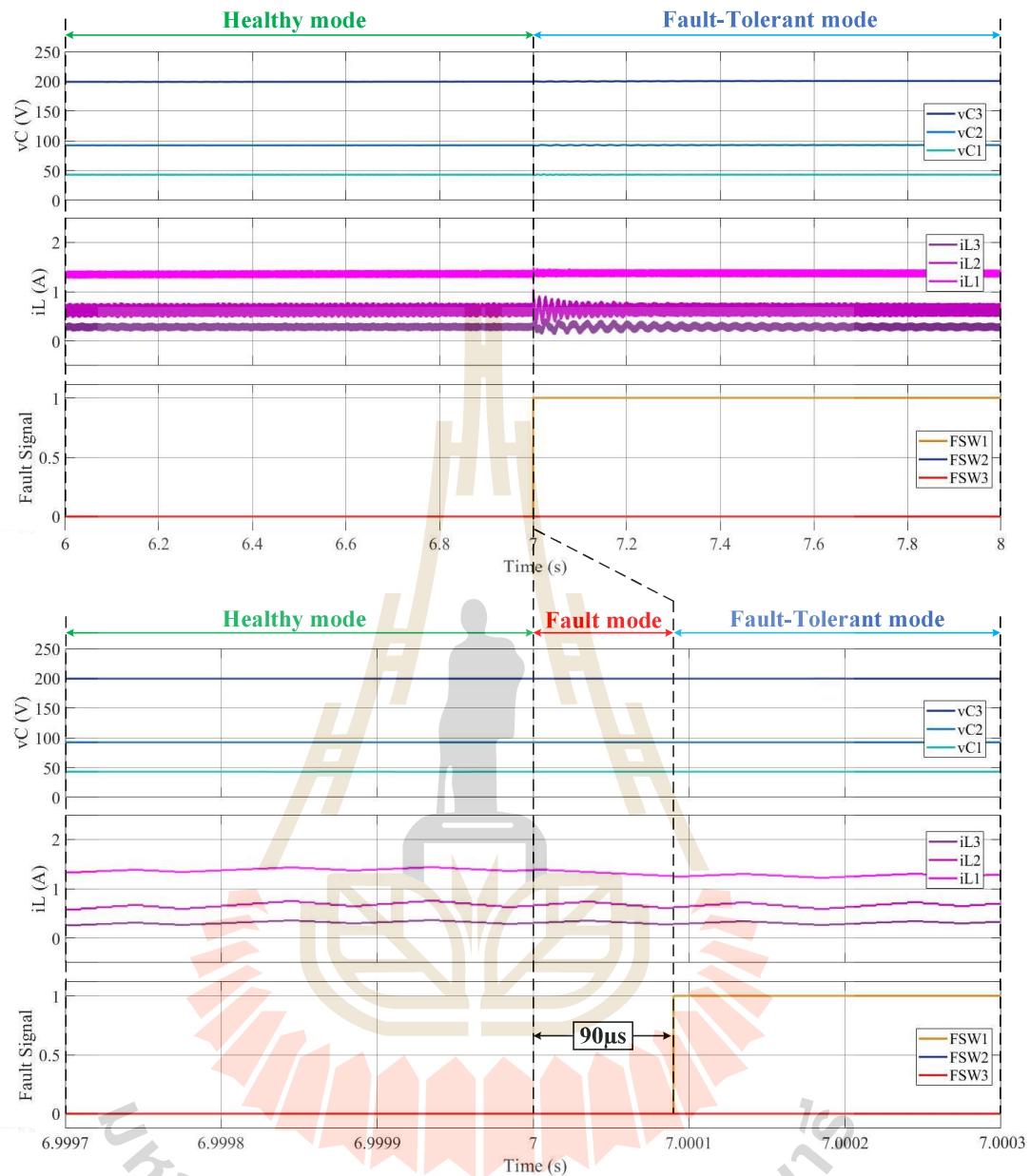


รูปที่ 7.13 ค่าแรงดันเอาต์พุต กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์เมื่อเกิด
ความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1



รูปที่ 7.14 สัญญาณการสวิตช์ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติเมื่อเกิดความผิดปกติแบบ สวิตช์เปิดวงจรที่ S_1

จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิด ความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ที่ได้แสดงไว้ข้างต้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง สถานการณ์ในรูปที่ 7.15 พบว่าผลการจำลองสถานการณ์สามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว กว่าผลการทดสอบโดยใช้เวลาประมาณ 90 μ s หรือ 0.09ms ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากอุปกรณ์ ต่าง ๆ ภายในชุดทดสอบ และตัวตรวจจับกระแส อย่างไรก็ตามผลการจำลองสถานการณ์ยังคงมีความ สอดคล้องกับผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการสร้างความคงทนต่อความผิด พหุร่อง ที่สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกต้อง ทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า แบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องในโหมดความคงทนต่อความผิดปกติ (Fault- tolerant mode) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

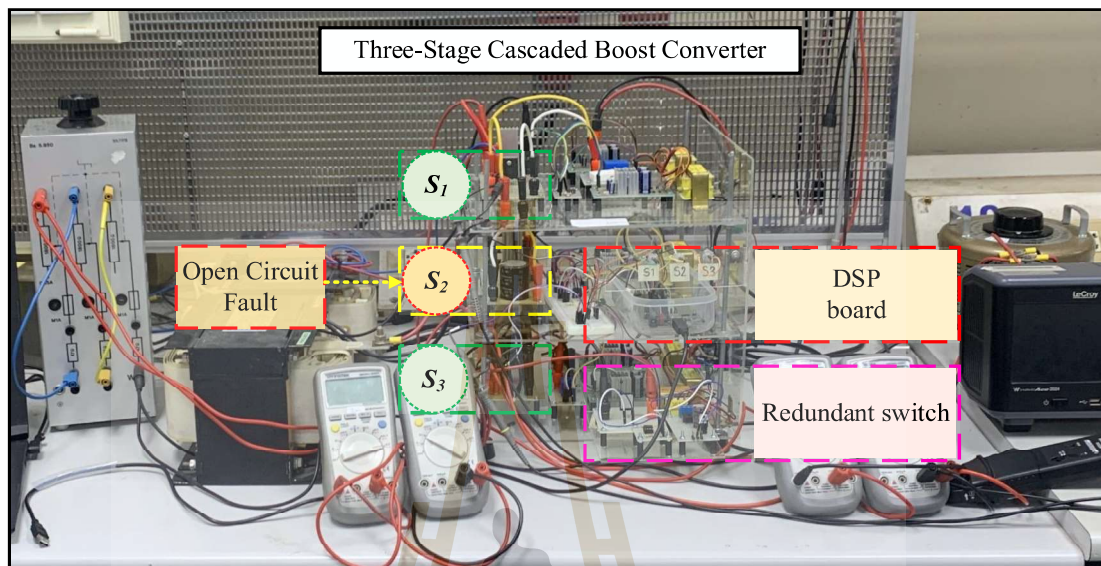


รูปที่ 7.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_1 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

7.3.2 กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2

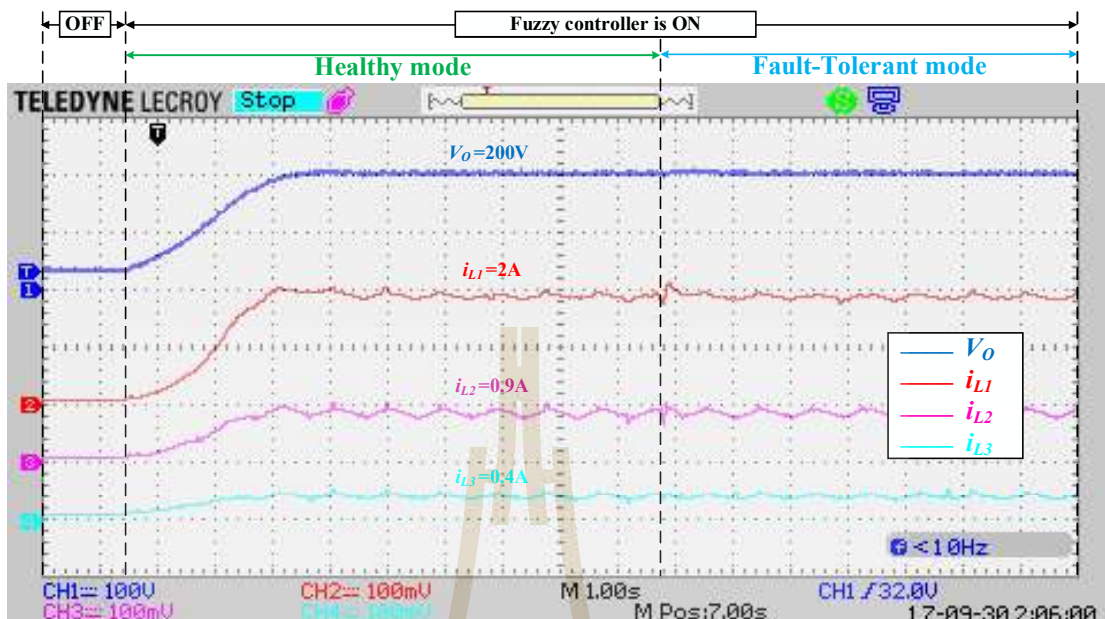
การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 จะอาศัยชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 7.16 ในการทดสอบจะกำหนดให้แรงดันอ้างอิงคงที่ 200V ซึ่งจะอาศัยการตั้งค่าแรงดันอ้างอิงโดยการโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอน

ไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ส่วนแรงดันอินพุตจ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นคั้งที่ประมาณ 20V และโหลดตัวต้านทานมีขนาดคั้งที่ประมาณ 1600Ω



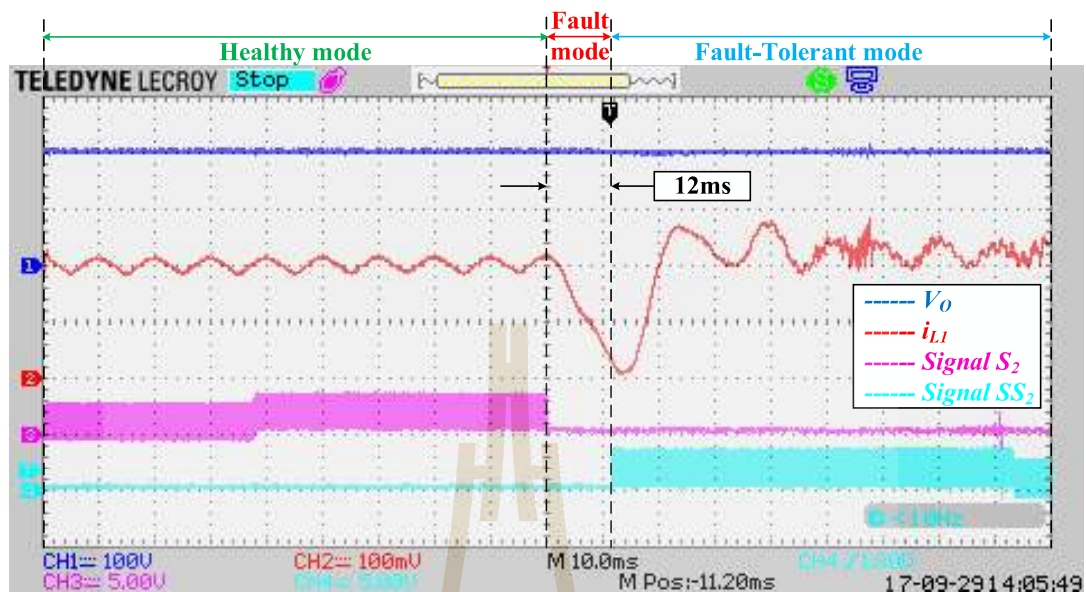
รูปที่ 7.16 ชุดทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2

ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 ถูกแสดงในภาพที่ 7.17, 7.18 และ 7.19 โดยรูปที่ 7.17 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวของชุดทดสอบวงจรในโหมดการทำงานปกติ (Healthy Mode) ตั้งแต่ชุดทดสอบเริ่มทำงานจะเห็นว่าตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ตามที่ต้องการ หลังจากนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 จะสังเกตได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สามารถตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_2 ทำงานทันทีเมื่อตรวจพบความผิดปกติได้

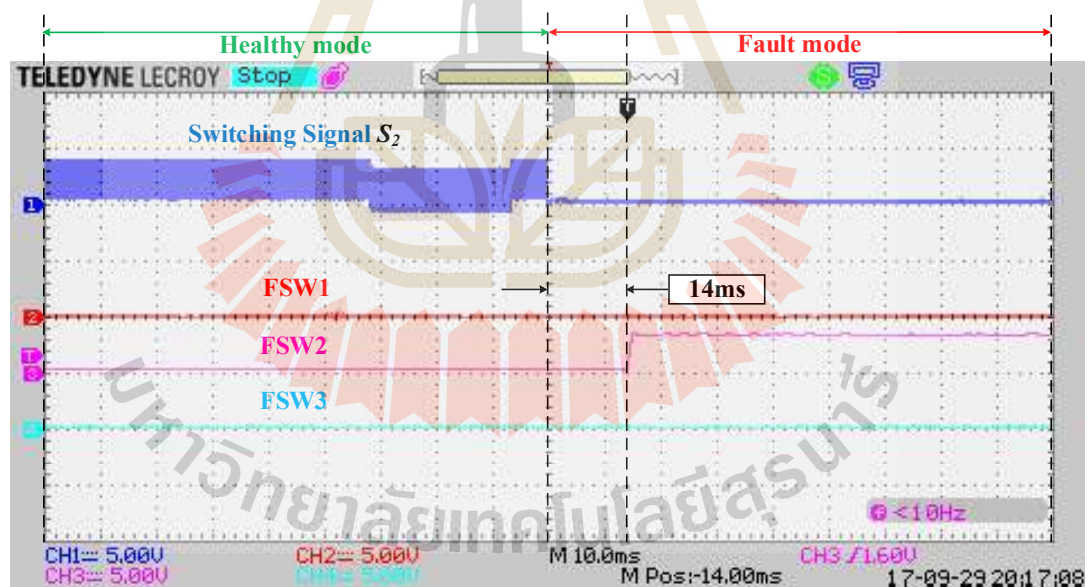


รูปที่ 7.17 ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 7.18 ซึ่งแสดงค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์ S_2 และสัญญาณการสวิตช์สำหรับสวิตช์สำรอง SS_2 จะเห็นว่าในสถานะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดันเอาต์พุต กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์ที่ S_2 ทำงานตามปกติอยู่ในสถานะอยู่ตัว หลังจากเกิดความผิดพร่องนั้น กระแส i_{L1} มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ความชัน $m_{i_{L1}}$ มีค่าติดลบ ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ถึงกระบวนการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 ที่ทำได้ทันที และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_2 เพื่อทำหน้าที่แทน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 7.19 ซึ่งแสดงสัญญาณการสวิตช์ S_2 และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติ FSW_1 , FSW_2 และ FSW_3 พบว่าในสถานะปกติก่อนเกิดความผิดปกติ สัญญาณการสวิตช์ S_2 ยังคงมีสัญญาณพัลส์ปกติ ส่วนสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัวมีค่าเป็นศูนย์ หลังจากเกิดความผิดพร่องที่สวิตช์ S_2 พบว่าสัญญาณการสวิตช์ S_2 จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติ FSW_1 , FSW_2 และ FSW_3 จะมีค่าเป็น 0, 1 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_2 เพื่อทำหน้าที่แทน ในกระบวนการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 จะใช้ระยะเวลาประมาณ 12ms ซึ่งทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพในโหมดความคงทนต่อความผิดปกติ



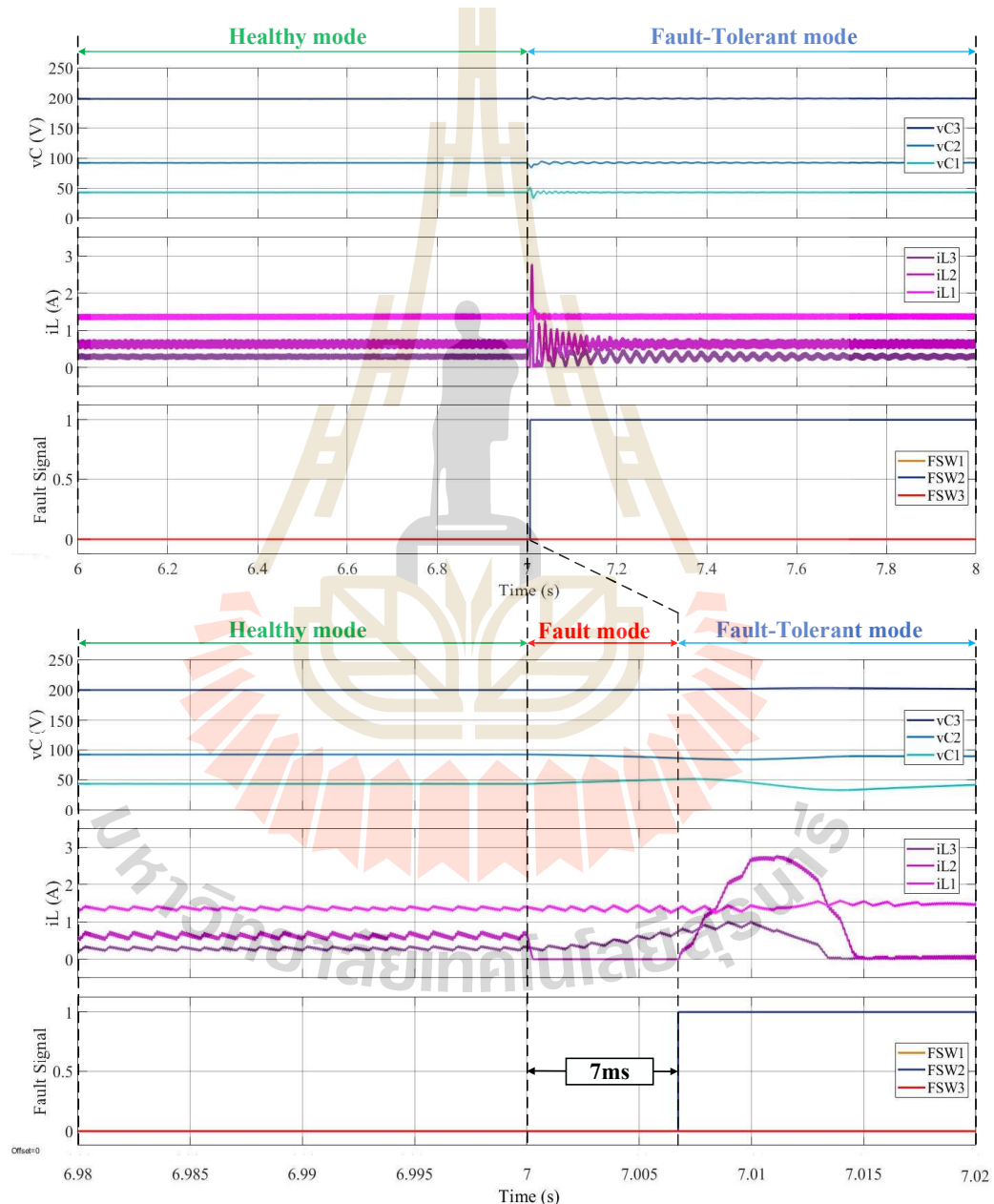
รูปที่ 7.18 แรงดันเอาต์พุต กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์เมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2



รูปที่ 7.19 สัญญาณการสวิตช์ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติพร้อมเมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2

จากผลการทดสอบวงจรรูปแบบแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติพร้อมแบบการเปิดวงจรที่ S_2 ตามที่ได้แสดงไว้ข้างต้น เมื่อเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์

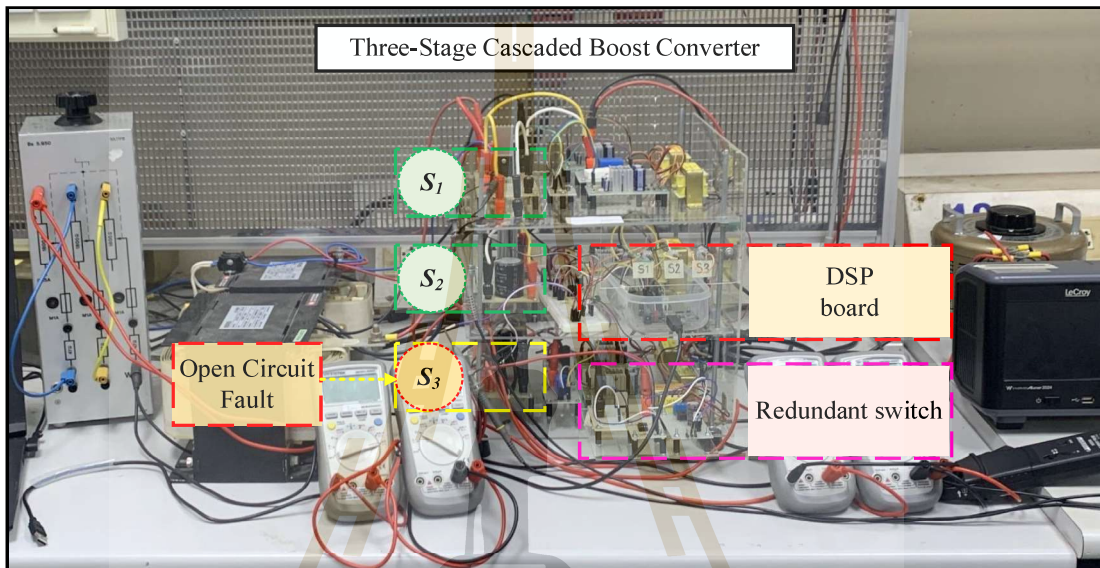
ที่แสดงในรูปที่ 7.20 จะพบว่าผลการจำลองสถานการณ์สามารถตรวจจับความผิดปกติได้เร็วกว่าผลการทดสอบจริง โดยใช้เวลาประมาณ 7ms ความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นได้จากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดทดสอบ อย่างไรก็ตามผลการจำลองสถานการณ์ยังคงมีความคล้ายคลึงกับผลการทดสอบจริงในชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ ซึ่งสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกต้อง ทำให้วงจรทำงานอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ



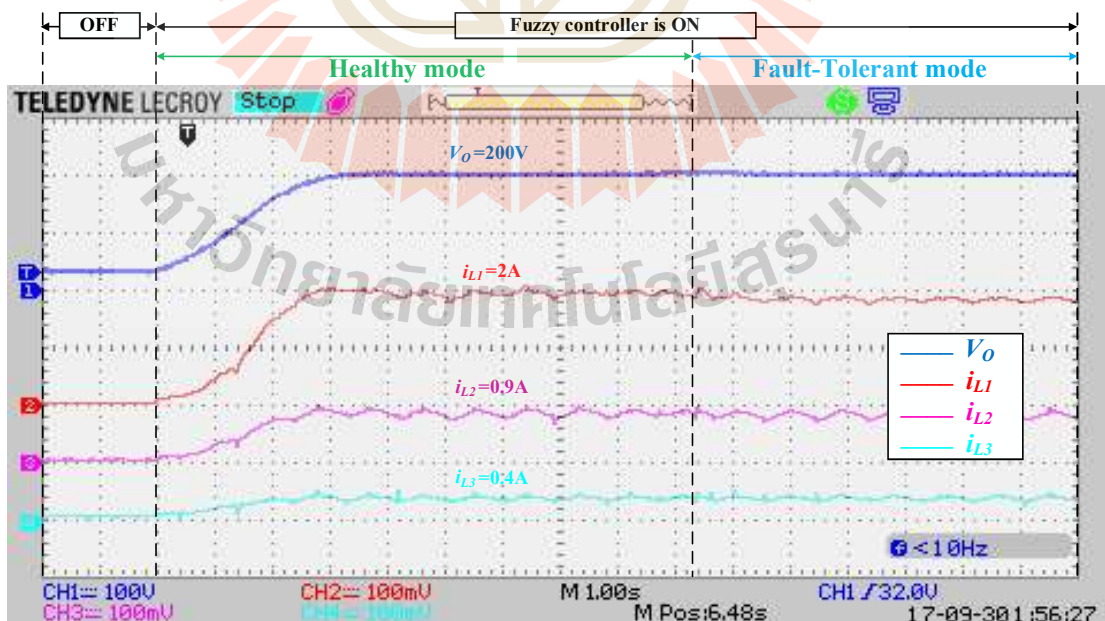
รูปที่ 7.20 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_2 ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

7.3.3 กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ดำเนินการโดยใช้ชุดทดสอบตามรูปที่ 7.21 โดยกำหนดแรงดันอ้างอิงที่ 200V ผ่านการตั้งค่าในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 และใช้แรงดันอินพุตคงที่ 20V พร้อมโหลดตัวต้านทาน 1600Ω

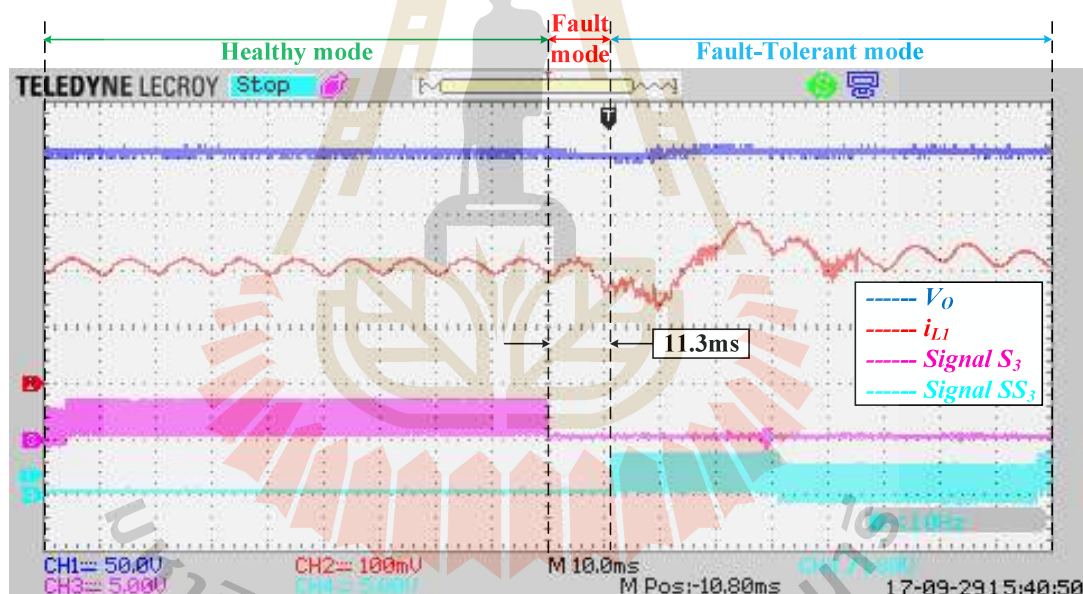


รูปที่ 7.21 ชุดทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3



รูปที่ 7.22 ผลการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

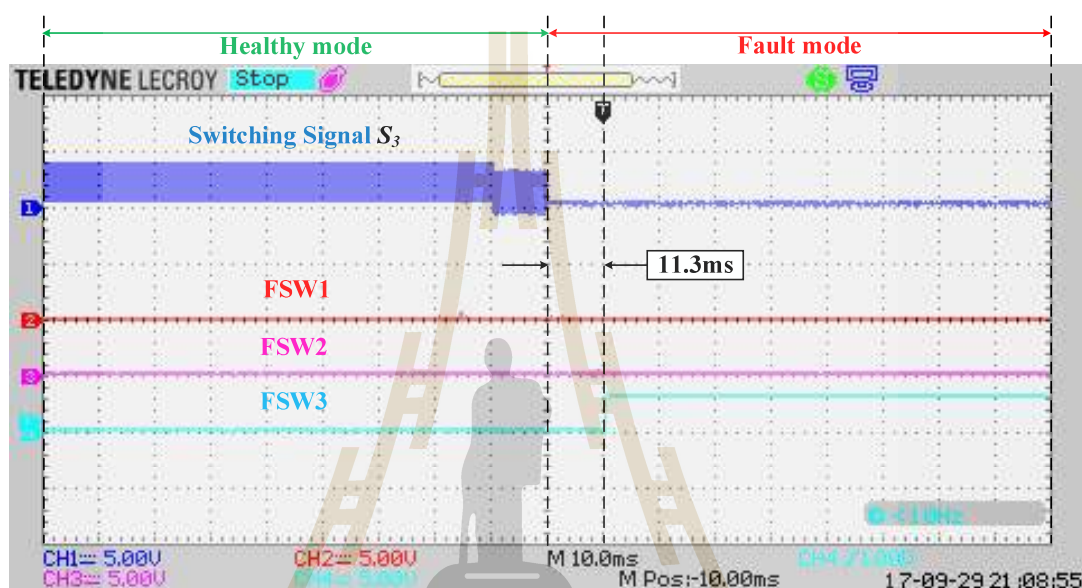
ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 แสดงในรูปที่ 7.22 ในโหมดสถานะปกติ (Healthy Mode) พบว่าตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต และกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ตามความต้องการ หลังจากเกิดความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 จะสังเกตได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวของชุดทดสอบวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยสามารถตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ได้ และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_3 ทำงานแทนทันทีเมื่อตรวจจับได้ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 7.23 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุต และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวในโหมดการทำงานปกติ (Healthy Mode) หลังจากเกิดความผิดปกติทำให้แรงดันเอาต์พุตลดลงจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_3 ไปยังโหลดตัวต้านทาน ทำให้สามารถตรวจจับความผิดปกติของการเปิดวงจรที่ S_3 และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_3 ให้ทำงานแทนทันทีเมื่อตรวจจับได้



รูปที่ 7.23 แรงดันเอาต์พุต กระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง และสัญญาณการสวิตช์เมื่อเกิดความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

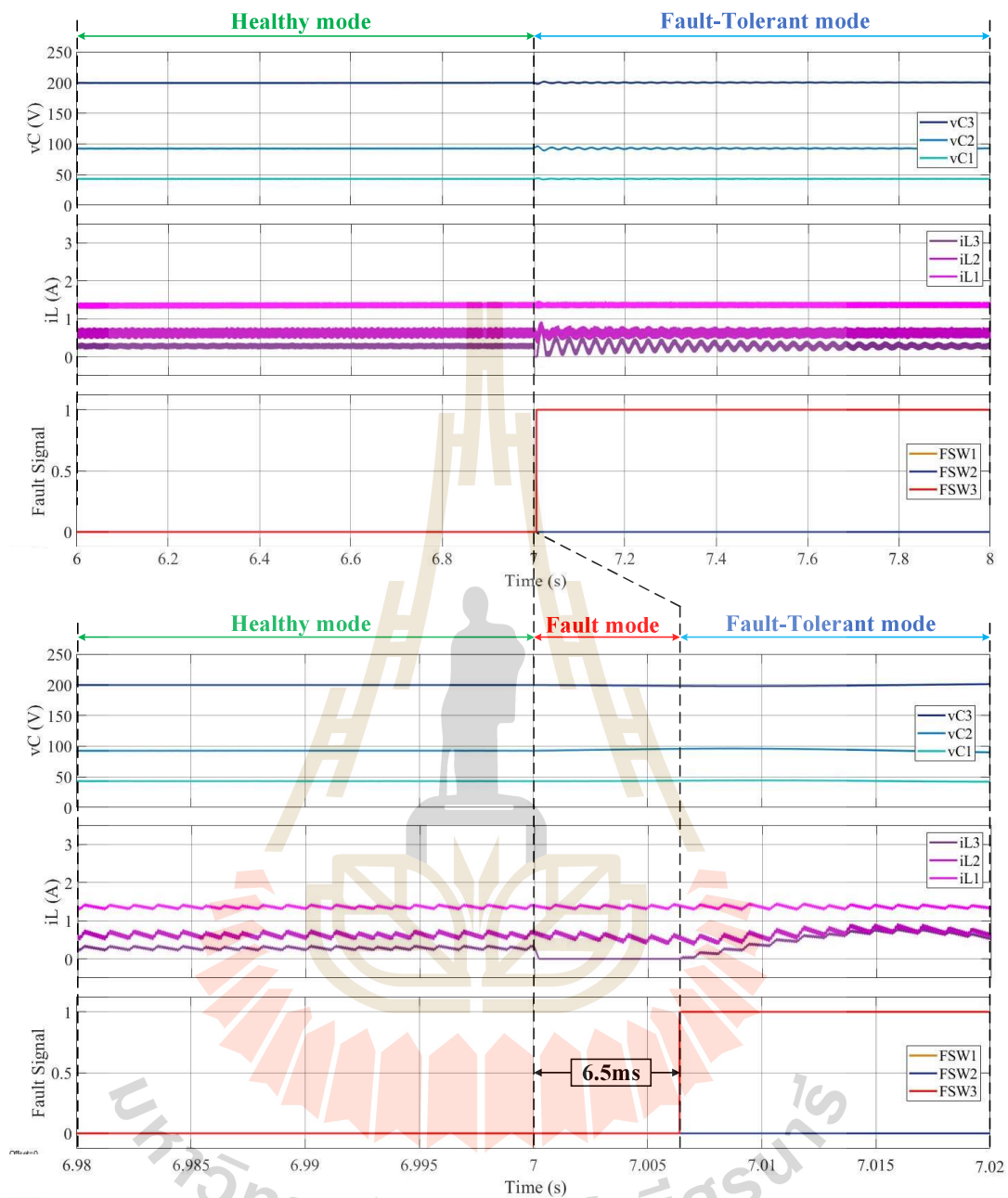
ผลการทดสอบวงจรตามรูปที่ 7.24 ที่แสดงสัญญาณการสวิตช์ S_3 และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัว FSW_1 , FSW_2 และ FSW_3 พบว่าในโหมดการทำงานปกติก่อนเกิดความผิดปกติ สัญญาณการสวิตช์ S_3 ยังคงสร้างสัญญาณพัลส์ ส่วนสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้งสามตัวมีค่าเป็นศูนย์ แต่หลังจากเกิดความผิดปกติที่สวิตช์ S_3 พบว่าสัญญาณการ

สวิตช์ S_3 จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติ FSW_1 , FSW_2 และ FSW_3 จะมีค่าเป็น 0, 0 และ 1 ตามลำดับ และส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์สำรอง SS_3 เพื่อให้ทำงานแทนทันที การตรวจจับความผิดปกติแบบการเปิดวงจรที่ S_3 ใช้ระยะเวลาประมาณ 11.3ms ซึ่งทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพในโหมดความคงทนต่อความผิดปกติ



รูปที่ 7.24 สัญญาณการสวิตช์ และสัญญาณการตรวจจับความผิดปกติเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ที่ได้แสดงไว้ข้างต้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 7.25 พบว่าระบบจำลองสถานการณ์สามารถตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3 ได้เร็วกว่า โดยที่ชุดทดสอบสามารถตรวจจับความผิดปกติได้โดยใช้เวลาประมาณ 11.3ms ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ในการตรวจจับความผิดปกติที่ S_3 โดยใช้เวลาประมาณ 6.5ms จากผลการทดสอบวงจรและผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกัน ซึ่งสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกต้อง ทำให้วงจรทำงานอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 7.25 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเกิดความผิดปกติของสวิตช์เปิดวงจรที่ S_3

7.4 สรุป

บทนี้นำเสนอผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยทำการทดสอบวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแรงดันอ้างอิง แรงดันอินพุต และโหลด ตัวต้านทาน อีกทั้งยังแสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ พบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพ

ของตัวควบคุมพีซีซีที่พัฒนาขึ้นในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้สถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน นอกจากนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเมื่อเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรทั้งสามตัว ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับ และระบุตำแหน่งความผิดปกติ รวมถึงการสร้าง ความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจร จากเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลอง สถานการณ์พบว่ามีผลสอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการสร้างความคงทนต่อ ความผิดปกติที่สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกต้อง ทำให้วงจรทำงานอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 8

สรุป และข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาวิธีการตัวควบคุม การตรวจจับความผิดปกติ แบบสวิตช์เปิดวงจร และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ทั้งนี้งานวิจัยเริ่มต้นจากการสำรวจค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง โดยสามารถแบ่งได้สามลักษณะคือผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติ จากการสำรวจค้นคว้างานวิจัยในอดีตเหล่านี้ทำให้ทราบถึงโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่มีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า เพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงประมาณ 380V ที่ถูกนำไปใช้ในหลากหลายด้าน อาทิเช่น ระบบไมโครกริดกระแสตรง อุตสาหกรรมขนส่ง ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ให้มีอัตราการขยายแรงดันสูงและมีค่าวัฏจักรหน้าที่ยของสวิตช์ที่ไม่สูงมาก ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นตามต้องการได้ โดยค่าวัฏจักรหน้าที่ยของสวิตช์แต่ละตัวไม่สูงมากนัก อีกทั้งยังเหมาะสมสำหรับระบบพลังงานทดแทน อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดทางด้านความน่าเชื่อถือ เนื่องจากวงจรมีองค์ประกอบต่าง ๆ มากขึ้น ส่งผลให้วงจรมีความซับซ้อน อีกทั้งแหล่งจ่ายที่เป็นพลังงานทดแทนจะขึ้นกับสภาพอากาศอาจส่งผลให้แหล่งจ่ายมีระดับแรงดันไม่คงที่ จำเป็นต้องอาศัยการควบคุมวงจรที่มีประสิทธิภาพ เพื่อสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างเหมาะสม รวมถึงการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจรดังกล่าวให้สามารถทำงานต่อไปได้ เมื่อความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์กำลัง วิธีการฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic technique) เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาการตัวควบคุม และการตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดสวิตช์ เนื่องจากวิธีการนี้ช่วยลดข้อจำกัดทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนของวงจร โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่จำเป็นสำหรับตัวควบคุมฟัซซี แต่จะอาศัยความรู้และความเข้าใจพฤติกรรมการทำงานของวงจรจากผู้สังเกตการณ์ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี รวมถึงการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียง

ต่อกันสามชั้น เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละสวิตช์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว และสามารถการกักเก็บการทำงานของวงจรจากความผิดพลาดอย่างทันทีทันใด

ในบทที่ 3 ได้นำเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยอธิบายโครงสร้างของวงจร หลักการทำงานของวงจร อัตราขยายแรงดัน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร และนำเสนอการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่สามารถหบแรงดันแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่ 400V จากค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ทั้งสามที่มีค่าเท่ากันที่ 0.63 และจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดตัวต้านทานขนาด 1600Ω ซึ่งต้องการกำลังไฟฟ้าประมาณ 100W โดยพิจารณาแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างต่ำประมาณ 20V รวมถึงแสดงการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่าน ตัวเหนี่ยวนำที่ได้ผลที่สอดคล้องตามที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรขณะที่ไม่มีตัวควบคุม พบว่ามีการพุ่งเกินของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจส่งผลเสียหายกับอุปกรณ์ภายในวงจร อีกทั้งยังใช้เวลานานในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว การออกแบบตัวควบคุมพีซีจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น ให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้นทั้งในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว สามารถรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร

ในบทที่ 4 ได้นำเสนอการพัฒนาและออกแบบตัวควบคุมพีซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้น เพื่อให้ได้ค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ที่เหมาะสม สามารถควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวอย่างรวดเร็ว ในบทนี้อธิบายถึงโครงสร้างตัวควบคุมพีซี การออกแบบการควบคุมพีซี และการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมพีซี โดยผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีซีที่พัฒนาขึ้น พบว่าสามารถรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต แรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน อีกทั้งยังได้นำเสนอผลเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวควบคุมพีซีที่พัฒนาขึ้นกับตัวควบคุมพีโอผ่านการจำลองสถานการณ์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบผลการการทำงานของตัวควบคุมทั้งสองแบบ พบว่าทั้งตัวควบคุมพีซีและตัวควบคุมพีโอสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การออกแบบตัวควบคุมพีโออาศัยการประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจร เทียบเคียงกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิมทำให้ต้องทำการปรับจูน

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้ผลตอบสนองทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวเป็นที่น่าพอใจ

ในบทที่ 5 ได้นำเสนอการพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นขณะที่มีตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น ให้มีความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยเริ่มต้นจากการสังเกตพฤติกรรมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นขณะที่มีตัวควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้นทั้งในสภาวะปกติ และสภาวะเกิดความผิดพลาด เพื่อนำมาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดพลาดของแต่ละสวิตช์ ในการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละสวิตช์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ทำให้การกู้คืนการทำงานของวงจรจากความผิดพลาด โดยนำกระบวนการฟuzzyมาใช้ในกระบวนการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาด เพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นสามารถทำงานต่อไปได้เมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่สวิตช์กำลังของวงจร ในกระบวนการตรวจจับความผิดพลาดจะอาศัยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และแรงดันเอาต์พุต ที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสและตัวตรวจจับแรงดันที่ใช้ในกระบวนการควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น รวมถึงสัญญาณวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ที่ได้จากควบคุมฟuzzyที่พัฒนาขึ้น ซึ่งให้ผลตอบสนองที่แตกต่างจากพฤติกรรมการทำงานของวงจรในสภาวะการทำงานปกติอย่างชัดเจน เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์แต่ละตัว จากการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับ และสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง อีกทั้งยังไม่มีความผิดพลาด ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน และผลการจำลองสถานการณ์สุดท้ายเป็นการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาด เพื่อให้วงจรยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

ในบทที่ 6 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น อุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ มอสเฟต ไดโอด โหลดตัวต้านทาน วงจรตรวจจับแรงดัน วงจรตรวจจับกระแส และวงจรขยายแรงดันแบบแยกโค๊ดสัญญาณ หลังจากนั้นจะโปรแกรมการควบคุมแรงดันเอาต์พุต การตรวจจับ และการระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่ใช้กระบวนการทางฟuzzy บนทีกลองในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 โดยมีผลการจำลองแบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงให้เห็นถึงการควบคุมแรงดันเอาต์พุต การตรวจจับ และการ

ระบุตำแหน่งความผิดพลาดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นเป็นไปในทางสอดคล้องใกล้เคียงกันกับการจำลองสถานการณ์ด้วย MATLAB SIMULINK

ในบทที่ 7 ได้นำเสนอผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยทำการทดสอบวงจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแรงดันอ้างอิง แรงดันอินพุต และโหลดตัวต้านทาน อีกทั้งแสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์พบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลทดสอบทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นในการรักษาแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นตามต้องการ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแรงดันอ้างอิง ได้นำเสนอผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้การควบคุมฟัซซี ทั้งนี้ผลการทดสอบแสดงการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น รวมถึงสามารถระบุตำแหน่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาด โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดที่สามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถูกต้อง ส่งผลให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาและออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยที่มีแหล่งจ่ายอินพุตกระแสตรงที่คงที่ ซึ่งในอนาคตอาจมีการใช้แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ ร่วมกับการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด อีกทั้งอาจจะมีการประยุกต์ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ต่อกันมากกว่าสามชั้น หรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอื่น ๆ

2. งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เสนอการสร้างความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นที่ทำงานภายใต้ตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น ซึ่งในอนาคตอาจมีการพัฒนากระบวนการอื่น ๆ ร่วมด้วย เพื่อให้การตรวจจับความผิดพลาดเร็วขึ้น อีกทั้งยังสามารถตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่มากกว่าหนึ่งตัวพร้อมกัน

รายการอ้างอิง

- Abouobaida, H., Abouelmahjoub, Y., & Oliveira-Assis, L. (2021). *New open circuit fault detection in a DC–DC converter*. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, 31(11). Portico. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13094>.
- Alharbi, B. M., Alhomim, M. A., & McCann, R. A. (2020). *Robust control for cascade boost converter based on H-infinity controller*. **2020 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)**. <https://doi.org/10.1109/kpec47870.2020.9167542>
- Ali, S., Raza, M. T., Abbas, G., Ullah, N., Al Otaibi, S., & Luo, H. (2022). *Sliding mode observer-based fault detection in continuous time linear switched systems*. **Energies**, 15(3), 1090. <https://doi.org/10.3390/en15031090>
- B, A. B., S, S., & G A, R. (2023). *Failure identification of power converter circuit using labVIEW myRIO*. **International Journal of Electrical and Electronics Engineering**, 10(01), 106–116. <https://doi.org/10.14445/23488379/ijeee-v10i1p110>
- Balal, A., & Shahabi, F. (2021). *Ltspice analysis of double-inductor quadratic boost converter in comparison with quadratic boost and double cascaded boost converter*. **2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)**. <https://doi.org/10.1109/icccnt51525.2021.9579931>
- Brunson, C., Empringham, L., De Lillo, L., Wheeler, P., & Clare, J. (2015). *Open-circuit fault detection and diagnosis in matrix converters*. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 30(5), 2840–2847. <https://doi.org/10.1109/tpel.2014.2364152>
- Cao, D., & Peng, F. Z. (2010). *Zero-current-switching multilevel modular switched-capacitor dc–dc converter*. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 46(6), 2536–2544. <https://doi.org/10.1109/tia.2010.2073432>

- Cellatoglu, A., & Balasubramanian, K. (2010). *Renewable energy resources for residential applications in coastal areas: A modular approach*. 2010 42nd Southeastern Symposium on System Theory (SSST 2010). <https://doi.org/10.1109/ssst.2010.5442813>
- Chen, S.-M., Liang, T.-J., Yang, L.-S., & Chen, J.-F. (2011). *A cascaded high step-up DC-DC converter with single switch for micro source applications*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(4), 1146–1153. <https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2090362>
- Choudhury, T. R., & Nayak, B. (2015). *Comparison and analysis of cascaded and quadratic boost converter*. 2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC). <https://doi.org/10.1109/pcitc.2015.7438108>
- Cimini, G., Ippoliti, G., Orlando, G., Longhi, S., & Miceli, R. (2017). *A unified observer for robust sensorless control of DC-DC converters*. *Control Engineering Practice*, 61, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.01.012>
- DJALAB, A., BESSOUS, N., REZAOU, M. M., & MERZOUK, I. (2018, December). *Study of the effects of partial shading on PV array*. 2018 international conference on communications and electrical engineering (ICCEE), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ccee.2018.8634512>
- El Aroudi, A., Mandal, K., Giaouris, D., Banerjee, S., Abusorrah, A., Al Hindawi, M., & Al-Turki, Y. (2015). *Fast-scale stability limits of a two-stage boost power converter*. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 44(5), 1127–1141. Portico. <https://doi.org/10.1002/cta.2153>
- Forouzesh, M., Siwakoti, Y. P., Gorji, S. A., Blaabjerg, F., & Lehman, B. (2016). *A survey on voltage boosting techniques for step-up DC-DC converters*. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). <https://doi.org/10.1109/ecce.2016.7854792>

- Gao, D., Jin, Z., Liu, J., & Ouyang, M. (2016). *An interleaved step-up/step-down converter for fuel cell vehicle applications*. **International Journal of Hydrogen Energy**, 41(47), 22422–22432. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.171>
- Gkizas, G. (2021). *Optimal robust control of a Cascaded DC–DC boost converter*. **Control Engineering Practice**, 107, 104700. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104700>
- Haroun, R., El Aroudi, A., Cid–Pastor, A., & Martinez–Salamero, L. (2013). *Synthesis of a power gyrator based on sliding mode control of two cascaded boost converters using a single sliding surface*. **10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013 (SSD13)**. <https://doi.org/10.1109/ssd.2013.6564072>
- Haroun, R., El Aroudi, A., Cid–Pastor, A., Garcia, G., Olalla, C., & Martinez–Salamero, L. (2015). *Impedance matching in photovoltaic systems using cascaded boost converters and sliding–mode control*. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 30(6), 3185–3199. <https://doi.org/10.1109/tpel.2014.2339134>
- Jagtap, S., & More, D. (2020). *Switch open–circuit fault diagnosis and fault–tolerant control strategy for DC–DC converters*. **2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)**. <https://doi.org/10.1109/iccsp48568.2020.9182063>
- Jamshidpour, E., Poure, P., & Saadate, S. (2015). *Photovoltaic systems reliability improvement by real–time FPGA–based switch failure diagnosis and fault–tolerant DC–DC converter*. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 62(11), 7247–7255. <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2421880>
- Jamshidpour, E., Poure, P., & Saadate, S. (2018). *Unified switch fault detection for cascaded non–isolated DC–DC converters*. **2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)**. <https://doi.org/10.1109/eeeic.2018.8494609>

- Johnson, R. S., Altin, B., & Sanfelice, R. G. (2021). *Hybrid adaptive control for the DC–DC boost converter*. *IFAC–PapersOnLine*, 54(5), 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.477>
- Kalahasthi, R. B., Ramteke, M. R., & Suryawanshi, H. M. (2022). *A high step-up soft-switched DC–DC converter with reduced voltage stress for DC micro-grid applications*. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 51(4), 1758–1776. Portico. <https://doi.org/10.1002/cta.3499>
- Karamanakos, P., Geyer, T., & Manias, S. (2014). *Direct voltage control of DC–DC boost converters using enumeration-based model predictive control*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2), 968–978. <https://doi.org/10.1109/tpel.2013.2256370>
- Kashani, M. G., Mobarrez, M., & Bhattacharya, S. (2014). *Variable interleaving technique for photovoltaic cascaded DC–DC converters*. *IECON 2014 – 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. <https://doi.org/10.1109/iecon.2014.7049359>
- Khwan-on, S., & Diewsurin, S. (2018). *An open-circuit switch fault detection strategy for a three-stage cascaded boost converter*. **2018 International Electrical Engineering Congress (IEECON)**. <https://doi.org/10.1109/ieecon.2018.8712175>
- Kiguchi, R., & Nishida, Y. (2019, May). *Cascaded boost converter to achieve high voltage boost rate–conduction loss analysis*. **PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management** (pp. 1–7). VDE.
- Kim, T., Lee, H.–W., & Kwak, S. (2019). *Open-circuit switch-fault tolerant control of a modified boost DC–DC converter for alternative energy systems*. *IEEE Access*, 7, 69535–69544. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2919238>
- Kumar, S., & Rajpurohit, B. S. (2020). *A novel fault tolerant control scheme for power converter*. **2020 IEEE International Power and Renewable Energy Conference**. <https://doi.org/10.1109/iprecon49514.2020.9315247>

- Kunjittipong, N., Kongkanjana, K., & Khwan-on, S. (2020). *Comparison of fuzzy controller and PI controller for a high step-up single switch boost converter*. **2020 3rd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)**. <https://doi.org/10.1109/icpea49807.2020.9280118>
- Li, L., Ding, S. X., Qiu, J., Yang, Y., & Xu, D. (2017). *Fuzzy observer-based fault detection design approach for nonlinear processes*. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, 47(8), 1941–1952. <https://doi.org/10.1109/tsmc.2016.2576453>
- Lwin, M. M. (2023). *High-performance double boost dc-dc converter based on fuzzy logic controller*. **An International Journal (MECHATROJ)**, 2(1). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8084661>
- Ounis, F., & Golea, N. (2015). *μ -synthesis based robust voltage control for cascade boost power converter*. **2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)**. <https://doi.org/10.1109/ceit.2015.7232982>
- Padilla, M. L. F., Lao, S. J. C., Baldovino, R. G., Bandala, A. A., & Dadios, E. B. (2017). *Fuzzy-based fault-tolerant control of Micro Aerial Vehicles (MAV) — A preliminary study*. **2017IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)**. <https://doi.org/10.1109/hnicem.2017.8269562>
- Rahavi, J. S. A., Kanagapriya, T., & Seyezhai, R. (2012). *Design and analysis of Interleaved Boost Converter for renewable energy source*. **2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)**. <https://doi.org/10.1109/icceet.2012.6203850>
- Roy Choudhury, T., & Nayak, B. (2016). *Comparative steady state analysis of boost and cascaded boost converter with inductive ESR losses & capacitor current behaviour*. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)**, 7(1), 159. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v7.i1.pp159-172>

- Shahbazi, M., Jamshidpour, E., Poure, P., Saadate, S., & Zolghadri, M. R. (2013). *Open- and short-circuit switch fault diagnosis for nonisolated DC-DC converters using field programmable gate array*. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 60(9), 4136–4146. <https://doi.org/10.1109/tie.2012.2224078>
- Shoja-Majidabad, S., & Hajizadeh, A. (2020). *Decentralized adaptive neural network control of cascaded DC-DC converters with high voltage conversion ratio*. **Applied Soft Computing**, 86, 105878. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105878>
- Siouane, S., Jovanović, S., & Poure, P. (2018). *Service continuity of PV synchronous buck/buck-boost converter with energy storage†*. **Energies**, 11(6), 1369. <https://doi.org/10.3390/en11061369>
- Tofoli, F. L., Pereira, D. de C., Josias de Paula, W., & Oliveira Júnior, D. de S. (2015). *Survey on non-isolated high-voltage step-up DC-DC topologies based on the boost converter*. **IET Power Electronics**, 8(10), 2044–2057. Portico. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2014.0605>
- Yang, X., Zhang, H., & Ma, X. (2009). *Modeling and stability analysis of cascade buck converters with N-power stages*. **Mathematics and Computers in Simulation**, 80(3), 533–546. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2009.08.039>
- Ye, Y., & Eric Cheng, K. W. (2014). *Quadratic boost converter with low buffer capacitor stress*. **IET Power Electronics**, 7(5), 1162–1170. Portico. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0205>
- Zhang, H., Li, W., Ding, H., Luo, P., Wan, X., & Hu, W. (2017). *Nonlinear modal analysis of transient behavior in cascade DC-DC boost converters*. **International Journal of Bifurcation and Chaos**, 27(09), 1750140. <https://doi.org/10.1142/s0218127417501401>

ประวัติผู้เขียน

นายสถิต ฉิมพลี เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2539 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 1 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2561 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2564 โดยในขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้สอนรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก จ

