



## รายงานการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์หลายชั้นที่คงทนต่อความผิดพลาดสำหรับ

ประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน

(A Fault-Tolerant, Multi-Stage Boost Converter for  
Renewable System Applications)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความลับของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์หลายชั้นที่คงทนต่อความผิดพลาดสำหรับ  
ประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน

(A Fault-Tolerant, Multi-Stage Boost Converter for  
Renewable System Applications)

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุदारัตน์ ขวัญอ่อน

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2564

## บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์หลายขั้นที่คงทนต่อความผิดพลาด สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น ถูกใช้ในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงกว่าระดับแรงดันอินพุตที่ได้จากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนที่มีค่าค่อนข้างต่ำ กล่าวคือจาก 20V เพิ่มขึ้นไปเป็น 400V โดยที่มีค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ไม่สูงจนเกินไป มีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น ในการควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นจะอาศัยตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ โดยตัวควบคุมจะประกอบไปด้วย ลูปควบคุมแรงดันหนึ่งลูป ลูปกระแสสองลูป รวมทั้งอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแส นอกจากนี้ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อให้สามารถตรวจจับและ ระบุสวิตช์ตัวที่เกิดความผิดพลาดขึ้นได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ในการทำให้วงจรสามารถทำงานภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดพลาดได้อย่างต่อเนื่อง จะใช้สวิตช์สำรองต่อขนานกับสวิตช์หลัก โดยที่สวิตช์สำรองจะทำงานแทนสวิตช์ตัวที่เกิดความเสียหายทันทีที่ตรวจพบความผิดพลาด ผลการจำลองสถานการณ์กับผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นมีอัตราขยายแรงดันสูงถึง 20 เท่า สามารถเพิ่มระดับแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างต่ำจาก 20 V ให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงถึง 400 V ได้ ในขณะที่ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ได้ตามต้องการภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ วิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น สามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ส่งผลให้สามารถใช้สวิตช์ที่สำรองไว้ทำงานแทนได้อย่างทันที ทำให้วงจรสามารถทำงานภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดพลาดด้วยสมรรถนะที่น่าพอใจได้อย่างต่อเนื่อง

## Abstract

This research proposes a fault-tolerant, multi-stage boost converter for renewable applications. A three-stage boost converter is used to step the low input voltage about 20 V up to the high output voltage level of 400 V without using extreme duty cycle. The converter parameters such as inductors and capacitors are designed. The PI controller with one outer voltage loop and two inner current loops, is also designed to regulate the output voltage at the desired constant levels. The current control is based on the current weighting technique in order to provide the proper reference current for each current loop. The fault detection method is determined to determine the open-circuit fault detection, and to develop such fault detection methods to identify the faulted switch is accurately and quickly. In addition, the converter operates continuously under the fault-tolerant conditions. A redundant switch that is parallel to the main switch, is activated as soon as the fault is detected. Simulation and experimental results show that the proposed three-stage boost converter can increase the output voltage with the high conversion ratio of 20. The PI controller with the current weighting technique can satisfactorily regulate the output voltage at the desired constant levels under different operating conditions. The proposed open-circuit fault detection method for a three-stage boost converter can identify the failed switch accurately and quickly. As a result, the redundant switch will be activated immediately after the fault is detected. Therefore, the fault-tolerant three-stage boost converter can achieve the satisfactory performance under the faulty operating conditions.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์หลายขั้นที่คงทนต่อความผิดพร่องสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายศุภณัฐ เดี่ยวสุรินทร์ ผู้ช่วยวิจัย ที่ดำเนินงานด้วยความทุ่มเทและเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือให้การดำเนินงานเป็นไปด้วยความเรียบร้อย

สุดารัตน์ ขวัญอ่อน  
พฤษภาคม 2564



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย .....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	6
1.5 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย.....	6
<b>บทที่ 2 การสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง</b> .....	<b>8</b>
2.1 บทนำ.....	8
2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบ เพิ่มแรงดันสูง .....	8
2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง .....	13
2.4 สรุป .....	16
<b>บทที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น</b> .....	<b>17</b>
3.1 บทนำ.....	17
3.2 โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น.....	17
3.3 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น .....	18
3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น .....	28
3.5 ผลการจำลองสถานการณ์ .....	31

3.6	สรุป .....	34
<b>บทที่ 4</b>	<b>การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น.....</b>	<b>35</b>
4.1	บทนำ .....	35
4.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น .....	35
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์ .....	46
4.4	สรุป .....	52
<b>บทที่ 5</b>	<b>การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น .....</b>	<b>53</b>
5.1	บทนำ .....	53
5.2	พฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นในสภาวะปกติ และเกิดความผิดปกติ.....	53
5.3	วิธีการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์.....	62
5.4	จำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร .....	67
5.5	การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นที่มี ความคงทนต่อความผิดปกติ .....	76
5.6	สรุป .....	86
<b>บทที่ 6</b>	<b>ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น.....</b>	<b>87</b>
6.1	บทนำ .....	87
6.2	การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นขณะที่ไม่มีตัวควบคุม.....	87
6.3	การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นขณะที่มีตัวควบคุมพีไอ .....	94
6.4	การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น.....	104
6.5	สรุป .....	120
<b>บทที่ 7</b>	<b>สรุป .....</b>	<b>121</b>
7.1	สรุป .....	121
7.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	123
รายการอ้างอิง	.....	124
ภาคผนวก	.....	128
ประวัติผู้เขียน	.....	128

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

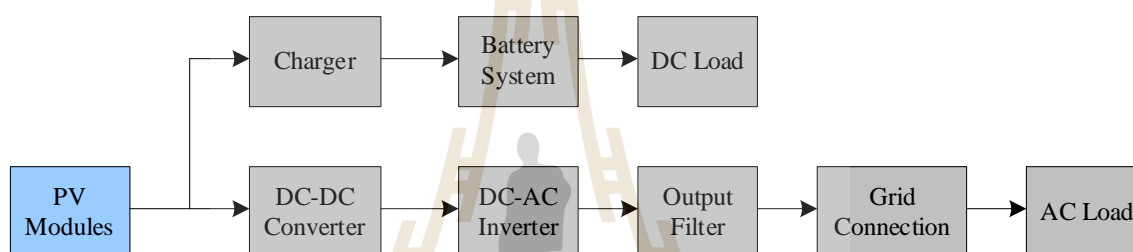
ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานเพื่อการพัฒนาประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ทรัพยากรธรรมชาติในประเทศที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงาน เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และ ถ่านหิน มีปริมาณลดลง ซึ่งอาจหมดสิ้นในที่สุด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการแสวงหาแนวทางเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต ซึ่งอาจทำได้โดยส่งเสริมให้มีการพัฒนาด้านพลังงานทดแทน (Renewable Energy) เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) พลังงานลม (wind energy) พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell energy) และพลังงานชีวมวล (biomass energy) เป็นต้น เพื่อสามารถนำพลังงานดังกล่าวมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรครอบคลุมกับลักษณะทางภูมิประเทศและภูมิอากาศ ทำให้ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวันอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง รวมทั้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาด (clean energy) ไม่สร้างมลภาวะให้กับสภาพแวดล้อม อีกทั้งเป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในประเทศอย่างยั่งยืน

รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อจ่ายโหลดกระแสตรง และโหลดกระแสสลับ โดยที่แผง Photovoltaic (PV) module ซึ่งสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำ จะรับพลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง แต่เนื่องจากเอาต์พุตที่ได้ในแต่ละ module มีค่าไม่มากนักเพียงประมาณ 16 Vdc ในช่วงเวลาที่แสงอาทิตย์ส่องมายังแผง PV module อย่างเต็มที่ [1] ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องนำ PV modules จำนวนมากมาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงให้สูงขึ้น [2] จากนั้นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC converter) จะเพิ่มระดับแรงดันกระแสตรงอีกครั้งและควบคุมให้คงที่ประมาณ 350 Vdc [3] และเป็นอินพุตให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC-AC inverter) เพื่อ



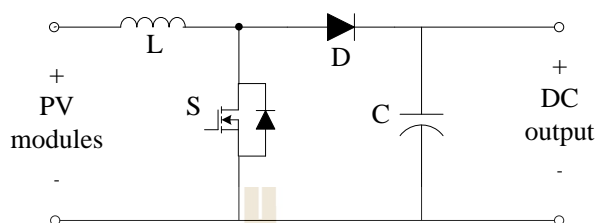
ผลิตไฟฟ้าแรงดันกระแสสลับ โดยวงจรกรองเอาต์พุต (Output filter) จะทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงอันเนื่องมาจากการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ได้แรงดันกระแสสลับ 220 Vrms, 50 Hz เพื่อเชื่อมต่อเข้าระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Grid-connected system) และพร้อมจ่ายกำลังงานให้กับโหลดกระแสสลับ หรืออาจนำแรงดันกระแสสลับที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในลักษณะระบบอิสระ (PV stand-alone system) เพื่อใช้ในภาคครัวเรือนหรือชนบทที่ห่างไกลจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า นอกจากนี้พลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์สามารถใช้ประจุแบตเตอรี่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดกระแสตรง รวมทั้งเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง [4]



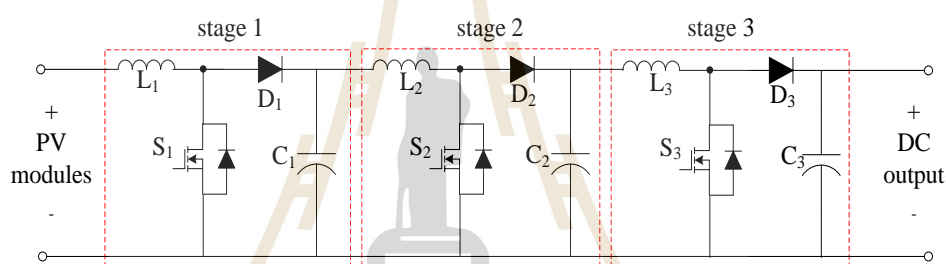
รูปที่ 1.1 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

เนื่องจากแรงดันกระแสตรงที่ได้จากแผง PV modules มีค่าไม่สูงมากนัก จำเป็นต้องอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง เข้าช่วยในการเพิ่มระดับแรงดันให้สูงพอกับการนำไปใช้งานต่อไป แนวทางหนึ่งคือการใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ (boost converter) เข้าช่วยในการทบระดับแรงดันอินพุตเพื่อเพิ่มแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น แต่เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์แบบดั้งเดิม (conventional boost converter) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ไม่สามารถขยายแรงดันได้สูงพอ จึงจำเป็นต้องนำวงจรดังกล่าวมาต่ออนุกรมกันหลายชั้น เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์หลายชั้น (multi-stage boost converter) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 เพื่อได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบของค์ประกอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏในรูปที่ 1.2 และ 1.3 จะเห็นว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์หลายชั้น มีจำนวนอุปกรณ์ที่เพิ่มมากขึ้น รวมถึงจำนวนสวิตช์กำลัง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญยิ่งในการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้างดังกล่าว หากสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งทำงานผิดพลาดไป ซึ่งอาจเกิดจากการพังเสียหายแบบเปิดวงจร (open-circuit switch fault) ทำให้วงจร

แปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นไม่สามารถทำงานได้ปกติดั้งเดิม ส่งผลให้ไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการได้



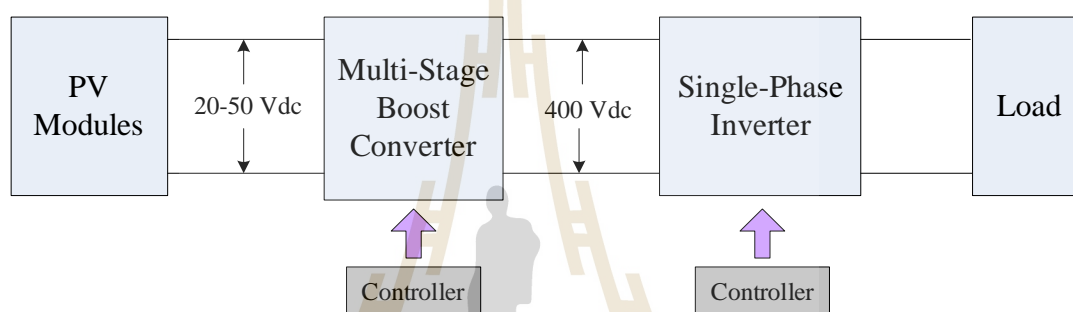
รูปที่ 1.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิม



รูปที่ 1.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแนวทางในการเพิ่มความน่าเชื่อถือ (reliability) ให้กับระบบพลังงานทดแทน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้น ที่ใช้ในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต โดยทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นสามารถทำงานได้ต่อไปแม้จะอยู่ในสถานะที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น (fault operation) และยังคงสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงเพียงพอ เมื่อแรงดันอินพุตที่มาจากพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าไม่สูงมากประมาณ 20-30 Vdc โดยในงานวิจัยต้องการขยายระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงได้สูงถึงประมาณ 400 Vdc เพื่อทำหน้าที่เป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับโหลดกระแสตรง หรือให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ทั้งนี้จะทำการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้น และศึกษาพฤติกรรมของวงจрдังกล่าวทั้งในสถานะการทำงานปกติ (normal operating

conditions) และในสภาวะการทำงานผิดปกติ (fault operating conditions) เพื่อหาแนวทางในการตรวจจับความผิดปกติ (fault detection) เนื่องจากสวิตช์กำลังเกิดการพังเสียหายแบบเปิดวงจร จากนั้นจะหาแนวทางในการควบคุมให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้างานดังกล่าวสามารถทำงานได้ต่อไปแม้จะยังคงมีความผิดปกติเกิดขึ้น และยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ นอกจากนี้จะทำการสร้างชุดทดสอบและทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงประสิทธิผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์หลายชั้นทั้งในสภาวะการทำงานปกติ และทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทนต่อไป



รูปที่ 1.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์หลายชั้นประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์หลายชั้น สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์หลายชั้น เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต เมื่อแรงดันอินพุตของวงจรได้มาจากแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีระดับแรงดันที่ค่อนข้างต่ำ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์หลายชั้น เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงเพียงพอ เมื่อแรงดันอินพุตกระแสตรงของวงจรมีค่าน้อยและไม่คงที่
- 1.2.4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์หลายชั้นทั้งในสภาวะการทำงานปกติ และในสภาวะการทำงานที่มีความผิดปกติ อันเนื่องมาจากความผิดปกติของสวิตช์กำลัง

- 1.2.5 เพื่อหาแนวทางในการตรวจจับสัญญาณความผิดปกติที่เกิดขึ้น ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้น
- 1.2.6 เพื่อหาแนวทางในการควบคุมให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นสามารถทำงานต่อไปได้ในสภาวะที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น
- 1.2.7 เพื่อสร้างชุดทำสอบ สำหรับแสดงประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้น ทั้งในสภาวะการทำงานปกติ และในสภาวะการทำงานที่มีการผิดปกติเกิดขึ้น
- 1.2.8 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้น
- 1.2.9 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นให้ยังคงสามารถทำงานต่อไปได้ ภายใต้สภาวะการทำงานที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น เพื่อสามารถนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นที่คงทนต่อความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นดังกล่าว ไปประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทนได้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ระบบพลังงานทดแทนที่พิจารณาในโครงการวิจัยคือระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะใช้แหล่งจ่ายกระแสตรง (DC power supply) ที่ปรับค่าได้เสมือนแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแผง PV modules
- 1.3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นจะถูกออกแบบเพื่อทำการเพิ่มระดับแรงดันกระแสตรงจาก 20-50 Vdc เป็น 400 Vdc
- 1.3.3 ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบพลังงานทดแทน จะพิจารณาเพียงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นเท่านั้น กรณีเกิดความผิดปกติของสวิตช์กำลังเนื่องจากการเปิดวงจร (open-circuit switch fault) เท่านั้น
- 1.3.4 การตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้น จะดำเนินการตรวจจับเพียงความผิดปกติของสวิตช์กำลังเนื่องจากการเปิดวงจรเท่านั้น
- 1.3.5 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นที่คงทนต่อความผิดปกติ ภายใต้สภาวะการทำงานปกติและสภาวะการทำงานผิดปกติ จะพิจารณาจากผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB และผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ได้จากการสร้างชุดทดสอบ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้ด้านการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นที่คงทนต่อความผิดพลาด เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน โดยเมื่อเกิดความผิดพลาด วงจรที่พัฒนาขึ้นยังคงสามารถทำงานต่อไปได้
- 1.4.2 ได้องค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้น ภายใต้การทำงานในสภาวะปกติและในสภาวะที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยศึกษาพฤติกรรมของระบบจากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.3 ได้องค์ความรู้ด้านการตรวจจับความผิดพลาด และการระบุตำแหน่งของสวิตช์ที่เกิดความผิดพลาด โดยอาศัยการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของระบบในสภาวะปกติและสภาวะความผิดพลาด
- 1.4.4 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นที่คงทนต่อความผิดพลาด โดยอาศัยแนวทางการควบคุมที่คงทนต่อความผิดพลาด
- 1.4.5 ได้องค์ความรู้ด้านการใช้บอร์ดดีเอสพีคอนโทรลเลอร์ สำหรับการตรวจจับความผิดพลาด การระบุตำแหน่งความผิดพลาด และการควบคุมที่คงทนต่อความผิดพลาด
- 1.4.6 ได้ต้นแบบชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นที่คงทนต่อความผิดพลาด สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน
- 1.4.7 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ
- 1.4.8 ผลที่ได้จากการวิจัย สามารถนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าทั้งระดับปริญญาตรีและปริญญาโท เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยในอนาคตต่อไป

#### 1.5 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้มีการนำเสนอเนื้อหาดังต่อไปนี้

*บทที่ 1* เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

*บทที่ 2* ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่มีในอดีตประกอบด้วย ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง ในโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ จากนั้นได้ศึกษาผลงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบต่าง ๆ ที่ปรากฏในงานวิจัยในอดีต

บทที่ 3 ในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น อธิบายหลักการ ทำงานของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ปรากฏในวงจร เพื่อช่วยลด การกระเพื่อมของกระแสและการกระเพื่อมของแรงดัน

บทที่ 4 กล่าวถึงการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งได้อธิบายการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โครงสร้างการควบคุมสำหรับวงจรดังกล่าว ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้น จากนั้นดำเนินการจำลองสถานการณ์การทำงาน ของวงจรดังกล่าว เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุมในการควบคุมการทำงานของวงจรภายใต้ สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5 บทนี้กล่าวถึงการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นที่มีตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น โดยมีการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจร ดังกล่าวทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดพร่องขึ้น เพื่อนำพฤติกรรมดังกล่าวไปใช้เป็นแนวทาง พัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรดังกล่าว รวมถึงเมื่อตรวจพบ ความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร จะส่งผลให้สวิตช์สำรองทำงานแทนทันที เพื่อให้สามารถลดผลกระทบ ที่มีต่อวงจรให้น้อยลงได้ โดยวงจรดังกล่าวยังคงสามารถทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 6 บทนี้นำเสนอผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น ขณะ ไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุม รวมถึงดำเนินการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร ที่สวิตช์แต่ละตัวและทดสอบความคงทนต่อความผิดพร่องของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นกับผลการจำลอง สถานการณ์ภายใต้สถานการณ์การทำงานเดียวกันในกรณีต่าง ๆ

บทที่ 7 บทสรุป

## บทที่ 2

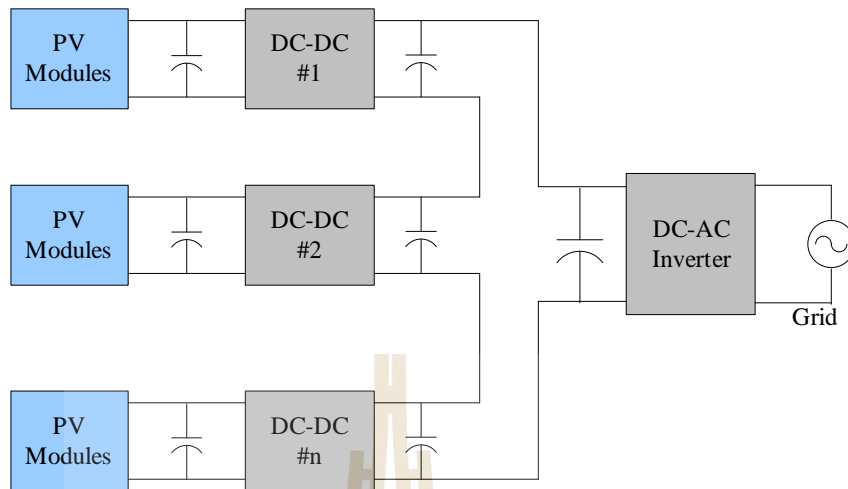
### การสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้จะดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดันสูงและวิธีการตรวจจับความผิดปกติภายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งในปรัทัศน์วรรณกรรมได้นำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดันสูง และวิธีการตรวจจับความผิดปกติภายในวงจร ซึ่งมีการคิดค้นและวิจัยมาอย่างต่อเนื่องจากอดีตมาจนถึงปัจจุบัน สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

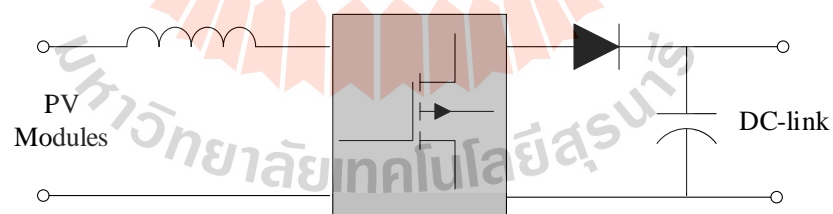
#### 2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC converter) ที่ใช้ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันกระแสตรงและควบคุมให้คงที่เพื่อใช้เป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC-AC inverter) รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพการเชื่อมต่อพลังงานจากแผง PV modules เข้ากับกริด (Grid) เพื่อจ่ายโหลดกระแสสลับ [5] โดยนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงมาต่อขนานกัน เพื่อเพิ่มระดับแรงดันอินพุตที่ DC Bus สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงมีค่าอัตราขยายแรงดันไม่สูง ทำให้ต้องใช้วงจรดังกล่าวจำนวนหลายชุดมาต่อขนานกัน รวมทั้งต้องใช้แผง PV Modules จำนวนมากเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่เพียงพอสำหรับผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเชื่อมต่อกับกริด



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อพลังงานจากแผง PV modules เข้ากับระบบกริด

โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC converter) ที่ปรากฏในรูปที่ 2.1 แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ ที่ต่อเชื่อมกับแผง PV modules โดยที่แรงดันอินพุต ( $V_{in}$ ) ของวงจรได้จากแผง PV Modules ในขณะที่แรงดันเอาต์พุต ( $V_{out}$ ) คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์

อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พิจารณาได้จากสมการที่ (2-1) [6]

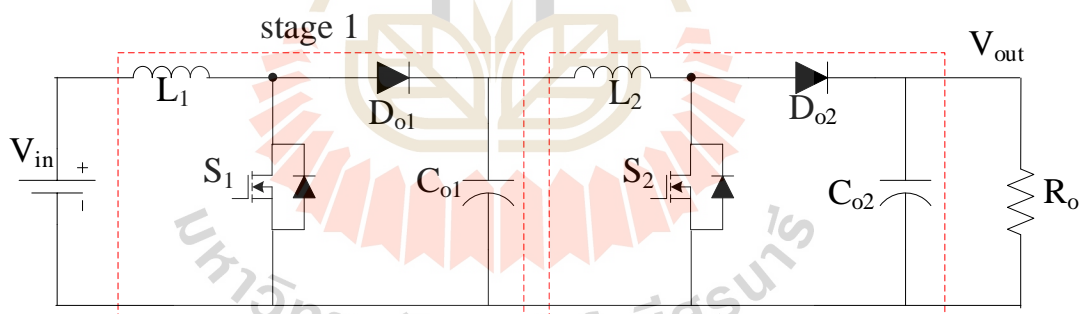


$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (2-1)$$

โดยที่  $D$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ (duty cycle)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2-1) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ขึ้นอยู่กับการปรับค่า  $D$  โดยแรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $D$  เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การให้วงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ค่า  $D$  สูงๆ จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของทางพลวัตของระบบที่มีต่อโหลด [7] และทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง [6] เนื่องจากกระแสกระเพื่อม (current ripple) ที่ไหลในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงนำกระแส (conduction loss) สูง รวมถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงสวิตช์ (switching loss) และช่วงฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse-recovery loss) จะมีค่าสูงด้วย [8]

จากข้อจำกัดด้านอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของวงจรเพื่อให้สามารถเพิ่มระดับของแรงดันเอาต์พุตได้สูงขึ้น โดยนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์มาต่อเรียงกันสองชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สองชั้น

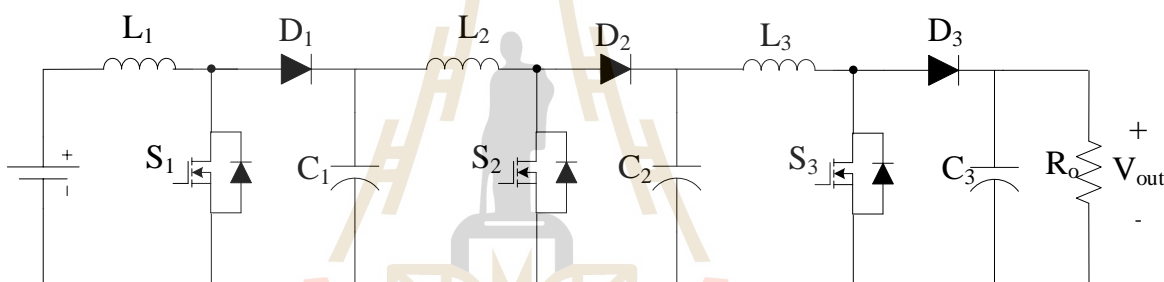
อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สองชั้น ดังแสดงในรูปที่ 7 พิจารณาได้จากสมการที่ (2-2)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)^2} \quad (2-2)$$

ดังนั้นในกรณีที่มีการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มาต่อเรียงกัน  $n$  ชั้น จะช่วยเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงยิ่งขึ้น ดังความสัมพันธ์ที่ปรากฏในสมการที่ (2-3)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)^n} \quad (2-3)$$

รูปที่ 2.3 แสดงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น ซึ่งสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 400 Vdc เมื่อแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าไม่สูงมากนักประมาณ 20 Vdc โดยค่าวัฏจักรหน้าที่สำหรับสวิตช์แต่ละตัวมีค่าไม่สูงเกินไป ซึ่งช่วยหลีกเลี่ยงข้อจำกัดต่างๆ ในทางปฏิบัติดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น

นอกจากนี้ จากการค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009 [9]	Wuhua Li, Xiaodong Lv, Yan Deng, Jun Liu, Xiangning He	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไม่แยกกราวด์ สำหรับใช้ในระบบพลังงานทดแทน เพื่อแสดงวิธีแก้ปัญหาต่าง ๆ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้านวัตกรรมใหม่
2014 [10]	Kuo-Ching Tseng and Chi-Chih Huang	บทความนี้เสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลิฟท์กับเซลล์คูณแรงดัน สำหรับระบบพลังงาน

		ทดแทน เพื่อให้อัตราขยายแรงดันสูง และเพิ่มประสิทธิภาพ วงจรให้ดียิ่งขึ้น
2014 [11]	Roger Gules, Walter Meneghette dos Santos, Flavio Aparecido dos Reis, Eduardo Felix Ribeiro Romaneli, and Alceu Andr�e Badin	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่นำวงจรเซปิก มาประยุกต์ใช้สำหรับระบบพลังงานทดแทน โดยจะแบ่งเป็น แบบไม่มีการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และมีการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ซึ่งแบบไม่มีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสามารถขยายแรงดันเป็น 10 เท่า ส่วนแบบมีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสามารถขยายแรงดันเป็น 20 เท่า
2015 [12]	M. Mohammadi, J. S. Moghani, J. Milimonfared and N. Safari	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบซอพต์ สวิตช์โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกัน เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวงจรดังกล่าว
2015 [13]	Mohammad Lotfi Nejad , Behzad Poorali, Ehsan Adib, Ali Akbar Motie Birjandi	บทความนี้ นำเสนอโครงสร้างการต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ เพื่อลดกำลังงานสูญเสียลง โดยอาศัยวงจรบูสต์แบบเรียงต่อกันสองชั้นเป็นต้นแบบ
2015 [14]	Andre Elias Lucena da Costa, Romero Leandro Andersen Cabrera, and R. Ibarra	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ประยุกต์ใช้ วงจรบูสต์กับวงจรบูสต์-ฟลายแบ็ครวมกัน เพื่อลดค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ และกำลังงานสูญเสียลง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น
2016 [15]	Annop Nakpin, Sudarat Khwan-on	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรทระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาจากการนำเอาวงจรทระดับแรงดันแบบเซลล์คู่ณมารวมกับวงจรทระดับแรงดันแบบตั้งเดิน ทำให้วงจรสามารถมีอัตราขยายได้สูงประมาณ 20 เท่า

2016 [16]	Hongchen Liu, Fei Li, and Jian Ai	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์สองตัว กับตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกันและเซลล์คู่ขนานแรงดัน สำหรับใช้ในระบบพลังงานทดแทน โดยที่ใช้สวิตช์สองตัวเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแส ส่วนตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกันและเซลล์คู่ขนานแรงดันจะเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น
2016 [17]	Mahajan Sagar Bhasker, Rishi M. Kulkarni, Sanjeevikumar Padmanaban, Pierluigi Siano, and Frede Blaabjerg	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่นำเอาวงจรอินเทอร์ลิฟกับวงจรบูสต์แบบหลายชั้นมารวมกัน ซึ่งคือการเพิ่มตัวเก็บประจุและไดโอดเข้าในวงจรเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแส
2016 [18]	Masoume Amirbande, Keyvan Yari, Mojtaba Forouzesh, Alfred Baghrmian	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ตัวเดียว โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกันและเทคนิคสวิตช์ตัวเก็บประจุ สำหรับระบบพลังงานทดแทน เพื่อให้มีอัตราขยายที่สูงขึ้น และการกระเพื่อมของแรงดันลดลง
2016 [19]	Bin Wu , Shouxiang Li, Yao Liu, and Keyue Ma Smedley Cabrera, and R. Ibarra	บทความนี้ นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไฮบริดบูสต์ ที่ใช้สำหรับระบบพลังงานทดแทน เพื่อให้วงจรสามารถเพิ่มระดับแรงดันสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 2.3 ปรัชมนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง

จากการค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่องภายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

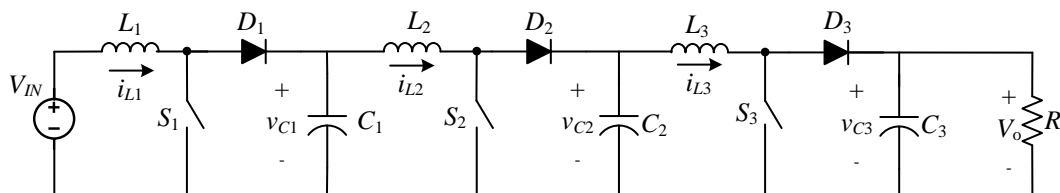
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติ

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011 [20]	T. Park, and T. Kim	บทความนี้แนะนำเสนอการตรวจจับความผิดปกติสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ต่ออยู่กับ วงจร AC/DC และ วงจร DC/AC โดยอาศัยการหาความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่ง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับความชันค่าต่อไป เพื่อตรวจจับความผิดปกติ
2012 [21]	Mahmoud Shahbazi, Ehsan Jamshidpour, Philippe Poure, Shahrokh Saadate and Mohammad Reza Zolghadri	บทความนี้แนะนำเสนอการตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดและปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบไม่แยกกราวด์ โดยอาศัยวิธี FPGA หาความชันกระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำ เพื่อตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในวงจร
2013 [22]	Eunice Ribeiro, Antonio J. Marques Cardoso, and Chiara Boccaletti	นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่าย โดยจะอาศัยการพิจารณาอุณหภูมิที่แผงโซลาร์เซลล์ และการฉายรังสีดวงอาทิตย์ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองตัวและหาผลต่างของแรงดันทั้งสอง เพื่อตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยนำไปเปรียบเทียบกับค่าโวลทจ์มันน์
2013 [23]	E. Jamshidpour, M. Shahbazi, P. Poure, E. Gholipour, and S. Saadate	นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดและปิดสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบไม่แยกกราวด์ โดยอาศัยวิธี FPGA และแบ่งอัลกอริทึมเป็น 2 แบบ ซึ่งแบบแรกจะหาความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณการสวิตช์ เพื่อตรวจจับ ส่วนอีกแบบจะทำการเทียบคล้ายกับอันแรกแต่จะเปลี่ยนสัญญาณการสวิตช์เป็นสัญญาณการทริกของสวิตช์
2014 [24]	E. Ribeiro, A. J. Marques Cardoso, and C. Boccaletti	บทความนี้แนะนำเสนอการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

		กระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบไม่แยกกราวด์ โดยอาศัยการนำกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำกับสัญญาณการสวิตช์มาใช้วิธีสุ่มค่าและคงค่า เพื่อหาขอบเขตกระแสที่เปรียบเทียบกับกัน เพื่อใช้ตรวจจับความผิดปกติ
2014 [25]	E. Ribeiro, A. J. Marques Cardoso, and C. Boccaletti	บทความนี้เสนอการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบฮาล์ฟบริดจ์ไม่แยกกราวด์ โดยอาศัยการนำกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำกับสัญญาณการสวิตช์มาใช้วิธีสุ่มค่าและคงค่า เพื่อหาขอบเขตกระแสที่เปรียบเทียบกับกัน เพื่อใช้ตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ทั้ง 2 ตัว
2014 [26]	E. Jamshidpour, M. Shahbazi, S. Saadate, P. Poure, and E. Gholipour	นำเสนอการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง โดยอาศัยการหาความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แล้วสร้างขอบเขตด้วยฟังก์ชันซิกนัมเพื่อใช้ตรวจจับความผิดปกติภายในวงจร
2016 [27]	Yigeng Huangfu, Shengrong Zhuo, Fuxi Chen, and Shengzhao Pang	บทความนี้นำเสนอความคงทนต่อความผิดปกติของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้วิธีคูณผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเพื่อตรวจจับความผิดปกติของระบบ
2017 [28]	Elham Pazouki , Jose Alexis De Abreu- Garcia , Yilmaz Sozer	บทความนี้นำเสนอความคงทนต่อความผิดปกติสำหรับวงจรอินเวอร์ตลิฟที่มีตัวควบคุม ทั้งความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรและปิดวงจร โดยใช้วิธีสังเกตค่ากระแสอินพุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพื่อตรวจจับความผิดปกติของวงจร และเมื่อตรวจจับพบความผิดปกติจะทำการปรับอัตราส่วนของตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมสวิตช์ตัวที่เหลือให้เหมาะสม

## 2.4 สรุป

ในการศึกษาประสิทธิภาพการลดการสูญเสียและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ทั้งโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดันสูงและวิธีการตรวจจับความผิดปกติภายในวงจร เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างวงจรเพิ่มค่าแรงดันสำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายแรงดันที่ค่อนข้างต่ำ และพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยจากการศึกษาในงานวิจัยในอดีตช่วยให้ทราบถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดันสูงในรูปแบบต่าง ๆ โดยได้นำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่เรียงต่อกันสองชั้นมาเป็นแนวทางสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามชั้นบูสต์ ซึ่งรายละเอียดจะถูกกล่าวถึงในบทที่ 3 และจากการศึกษาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรในรูปแบบต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าสามารถนำเอาพฤติกรรมการทำงานของวงจรมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรได้ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 5

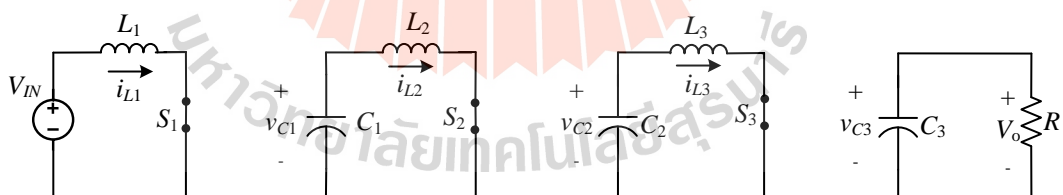


รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้น

### 3.3 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้น

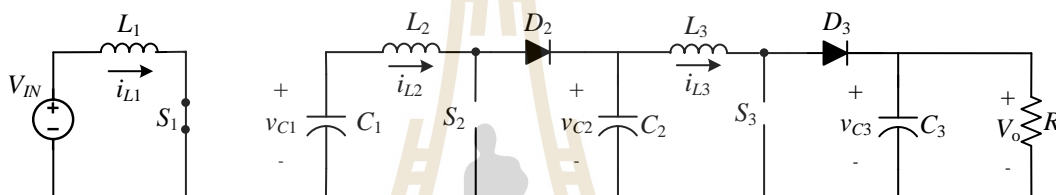
เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นประกอบด้วยสวิตช์ 3 ตัว จึงสามารถพิจารณาโหมดการทำงานของวงจรได้ 8 โหมด ขึ้นอยู่กับการนำกระแสและไม่นำกระแสของสวิตช์แต่ละตัว ซึ่งการทำงานของวงจรในแต่ละโหมดสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

*โหมดที่ 1* สวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  นำกระแส พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  นำกระแส แสดงดังรูปที่ 3.2 พบว่า ตัวเก็บประจุ  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด  $D_1$ ,  $D_2$  และ  $D_3$  ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{IN}$  จะจ่ายพลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$  ตามลำดับ และตัวเก็บประจุ  $C_3$  จะคายพลังงานไปยังโหลดตัวต้านทาน  $R$

รูปที่ 3.2 สวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  นำกระแส

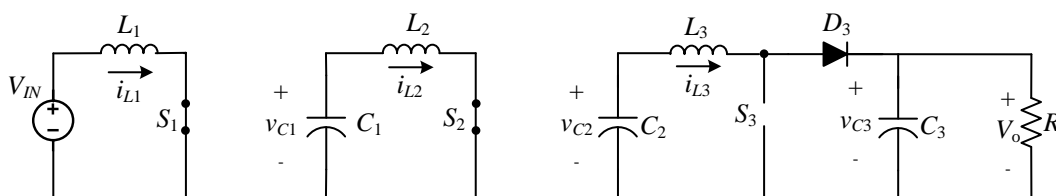


โหมดที่ 2 สวิตช์  $S_1$  นำกระแส และ  $S_2, S_3$  ไม่นำกระแส พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์  $S_1$  นำกระแส และ  $S_2, S_3$  ไม่นำกระแส แสดงดังรูปที่ 3.3 พบว่า ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน  $C_2$  และ  $C_3$  จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด  $D_1$  ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ โดยไดโอด  $D_2$  และ  $D_3$  สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{IN}$  จะจ่ายพลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$



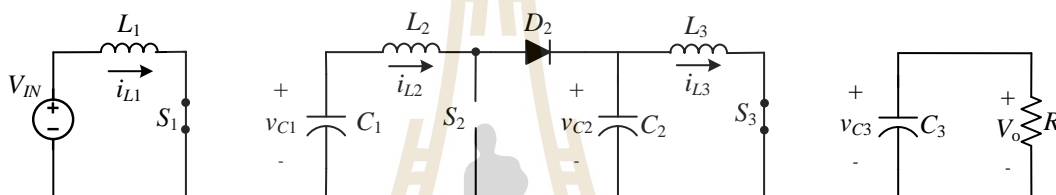
รูปที่ 3.3 สวิตช์  $S_1$  นำกระแส และ  $S_2, S_3$  ไม่นำกระแส

โหมดที่ 3 สวิตช์  $S_1, S_2$  นำกระแส และ  $S_3$  ไม่นำกระแส พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์  $S_1, S_2$  นำกระแส และ  $S_3$  ไม่นำกระแส แสดงดังรูปที่ 3.4 พบว่า ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน  $C_3$  จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่  $D_3$  สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{IN}$  จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$



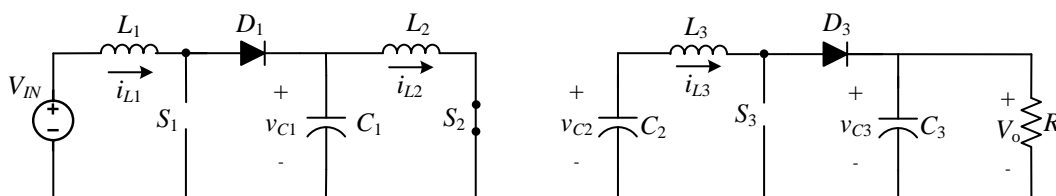
รูปที่ 3.4 สวิตช์  $S_1, S_2$  นำกระแส และ  $S_3$  ไม่นำกระแส

โหมดที่ 4 สวิตช์  $S_1, S_3$  นำกระแส และ  $S_2$  ไม่นำกระแส พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์  $S_1, S_3$  นำกระแส และ  $S_2$  ไม่นำกระแส แสดงดังรูปที่ 3.5 พบว่า ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_3$  จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน  $C_2$  จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด  $D_1$  และ  $D_3$  ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่  $D_2$  สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{IN}$  จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และตัวเก็บประจุ  $C_3$  จะคายพลังงานไปยังโหลดตัวต้านทาน  $R$



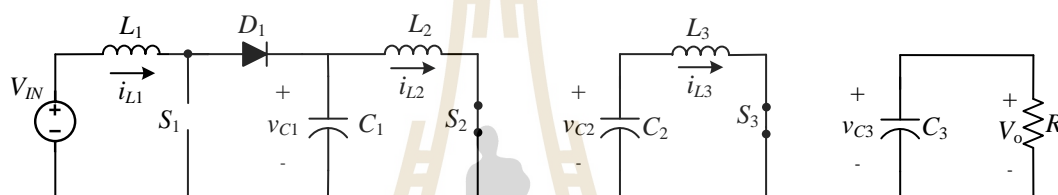
รูปที่ 3.5 สวิตช์  $S_1, S_3$  นำกระแส และ  $S_2$  ไม่นำกระแส

โหมดที่ 5 สวิตช์  $S_2$  นำกระแส และ  $S_1, S_3$  ไม่นำกระแส พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์  $S_2$  นำกระแส และ  $S_1, S_3$  ไม่นำกระแส แสดงดังรูปที่ 3.6 พบว่า ตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน  $C_1$  และ  $C_3$  จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด  $D_2$  ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่  $D_1$  และ  $D_3$  สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{IN}$  จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_3$



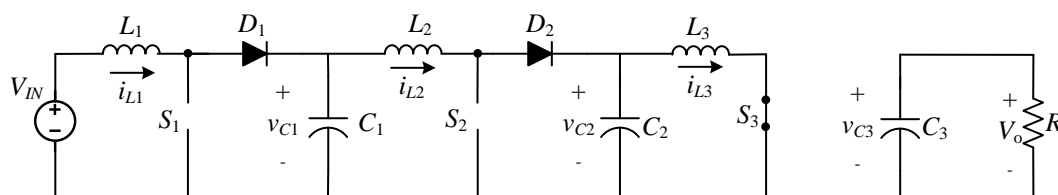
รูปที่ 3.6 สวิตช์  $S_2$  นำกระแส และ  $S_1, S_3$  ไม่นำกระแส

โหมดที่ 6 สวิตช์  $S_2, S_3$  นำกระแส และ  $S_1$  ไม่นำกระแส พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์  $S_2, S_3$  นำกระแส และ  $S_1$  ไม่นำกระแส แสดงดังรูปที่ 3.7 พบว่า ตัวเก็บประจุ  $C_2$  และ  $C_3$  จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน  $C_1$  จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด  $D_2$  และ  $D_3$  ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่  $D_1$  สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{IN}$  จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_3$  และตัวเก็บประจุ  $C_3$  จะคายพลังงานไปยังโหลดตัวต้านทาน  $R$



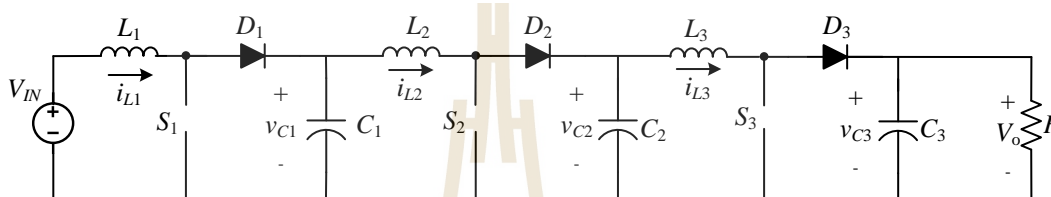
รูปที่ 3.7 สวิตช์  $S_2, S_3$  นำกระแส และ  $S_1$  ไม่นำกระแส

โหมดที่ 7 สวิตช์  $S_3$  นำกระแส และ  $S_1, S_2$  ไม่นำกระแส พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์  $S_3$  นำกระแส และ  $S_1, S_2$  ไม่นำกระแส แสดงดังรูปที่ 3.8 พบว่า ตัวเก็บประจุ  $C_3$  จะคายประจุเพื่อทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วน  $C_1$  และ  $C_2$  จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด  $D_3$  ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ แต่  $D_1$  และ  $D_2$  สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับการไบอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{IN}$  จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_3$  จะคายพลังงานไปยังโหลดตัวต้านทาน  $R$



รูปที่ 3.8 สวิตช์  $S_3$  นำกระแส และ  $S_1, S_2$  ไม่นำกระแส

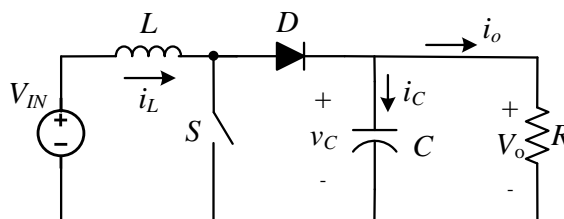
โหมดที่ 8 สวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  ไม่นำกระแส พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  ไม่นำกระแส แสดงดังรูปที่ 3.9 พบว่า ตัวเก็บประจุ  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นได้ว่า ไดโอด  $D_1$ ,  $D_2$  และ  $D_3$  สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากการไปอัสตรง โดยในช่วงเวลานี้แหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{IN}$  จะให้พลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$ ,  $L_2$  และ  $L_3$



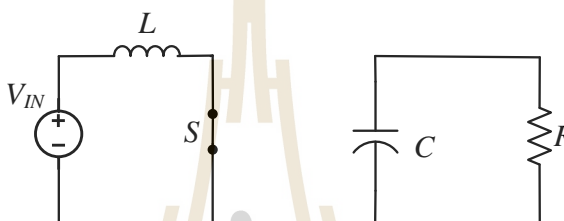
รูปที่ 3.9 สวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  ไม่นำกระแส

จากการพิจารณาโหมดการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นทั้ง 8 โหมด พบว่าการนำกระแสและไม่นำกระแสของสวิตช์ในวงจร จะส่งผลต่อการสะสมพลังงานและคายพลังงานของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในวงจร ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าสูงขึ้นได้ ในลำดับต่อมาจะพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่ขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์แต่ละตัว ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นเกิดจากการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมมาเรียงต่อกันสามขั้น ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของวงจรขั้นแรกจะทำหน้าที่เป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรในขั้นที่สอง และแรงดันเอาต์พุตของวงจรในขั้นที่สองจะทำหน้าที่เป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรในขั้นที่สามต่อไป ด้วยเหตุนี้ จึงสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันที่ได้จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นต่อไป

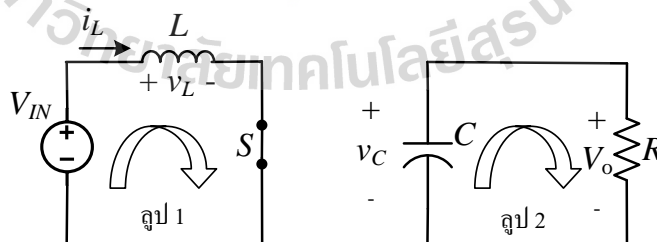
โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมแสดงดังรูปที่ 3.10 ประกอบด้วยสวิตช์กำลัง  $S$  ตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ตัวเก็บประจุ  $C$  ไดโอด  $D$  และโหลดความต้านทาน  $R$  ในช่วงที่สวิตช์  $S$  นำกระแส จะมีการสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่ตัวเก็บประจุจะคายประจุ ทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับโหลดตัวต้านทาน ซึ่งแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะมีค่าสูงกว่าทางด้านอินพุต ส่งผลให้ไดโอดได้รับการไปอัสย้อนกลับ ไม่สามารถนำกระแสต่อไปได้ โครงสร้างการทำงานของวงจรในกรณีที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส แสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม

รูปที่ 3.11 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมในช่วงที่สวิตช์  $S$  นำกระแส

จากนั้นอาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) เข้าช่วยในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสในวงจร จะได้ว่าเมื่อใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมในขณะที่สวิตช์  $S$  นำกระแส สามารถพิจารณาloopแรงดันได้ 2 loop ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จะได้สมการในแต่ละloopดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.12 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์พิจารณาการทำงานของวงจร ช่วงที่สวิตช์  $S$  นำกระแส

$$\text{loop ที่ 1 :} \quad -V_{IN} + v_L = 0$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{IN}}{L}$$

รูปที่ 2 :  $V_o = v_C$

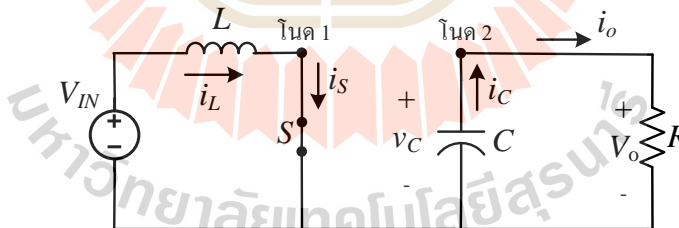
โดยในช่วงที่สวิตช์  $S$  นำกระแส จะได้ว่า  $dt = DT$  โดยที่  $D$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์  $S$  และ  $T$  คือ คาบการทำงานของสวิตช์ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{IN}}{L}$$

ดังนั้น การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ในช่วงเวลานี้แสดงดังสมการที่ (3-1)

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_{IN}}{L} DT \quad (3-1)$$

จากนั้นอาศัยกฎกระแสเคอร์ซอพฟ์พิจารณาโนด 1 และ โหนด 2 ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมในขณะที่สวิตช์  $S$  นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะได้สมการของกระแสในแต่ละโนดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 ใช้กฎกระแสของเคอร์ซอพฟ์พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์  $S$  นำกระแส

โนด 1 :  $i_L = i_S$

โนด 2 :  $i_C = i_o$

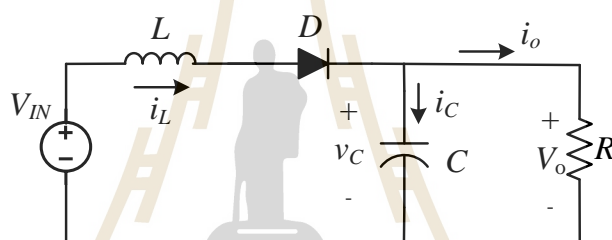
$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{V_o}{RC}$$

ดังนั้น การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C$  แสดงได้ดังสมการที่ (3-2)

$$\frac{\Delta v_C}{\Delta t} = \frac{\Delta v_C}{DT} = \frac{V_o}{RC}$$

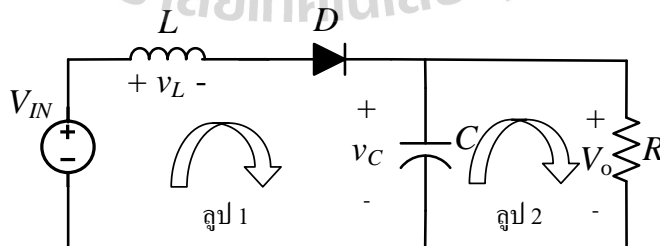
$$\Delta v_{C,on} = \frac{V_o}{RC} DT \quad (3-2)$$

จากนั้นพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิม ขณะที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ในช่วงเวลานี้ ตัวเหนี่ยวนำจะคายพลังงาน ตัวเก็บประจุจะได้รับการอัดประจุ มีการเก็บสะสมพลังงาน ไดโอดนำกระแส เนื่องจากการไบอัสตรง



รูปที่ 3.14 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิม ช่วงที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส

เมื่อใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิม ในขณะที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส สามารถพิจารณาloopแรงดันได้ 2 loop ดังแสดงในรูปที่ 3.15 จะได้สมการในแต่ละloop ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส

loop ที่ 1 : 
$$-V_{IN} + v_L + v_C = 0$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{IN} - v_C}{L}$$

รูปที่ 2 :  $V_o = v_C$

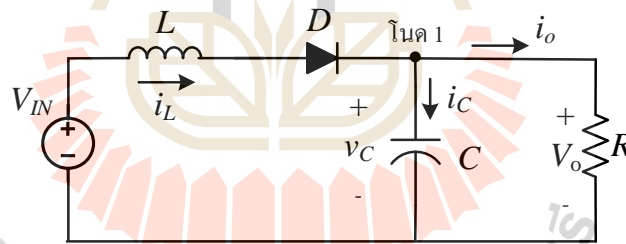
ในช่วงที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส จะได้ว่า  $dt = (1-D)T$  จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_{IN} - v_C}{L}$$

ดังนั้น การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ในช่วงเวลานี้แสดงดังสมการที่ (3-3)

$$\Delta i_{L,off} = \frac{V_{IN} - v_C}{L} (1-D)T \quad (3-3)$$

เมื่อใช้กฎกระแสเคอร์ซอพฟ์พิจารณาโนด 1 ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมในขณะสวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.16 จะได้สมการของกระแสดังนี้



รูปที่ 3.16 ใช้กฎกระแสของเคอร์ซอพฟ์พิจารณาการทำงาน ช่วงที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส

โนด 1 :  $i_L = i_C + i_o$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L - i_o}{C}$$

ดังนั้น การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C$  แสดงได้ดังสมการที่ (3-4)

$$\frac{\Delta v_C}{\Delta t} = \frac{\Delta v_C}{(1-D)T} = \frac{i_L - i_o}{C}$$



$$\Delta v_{C,off} = \frac{i_L - i_O}{C} (1-D)T \quad (3-4)$$

การเฟือมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนียวนำในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแสและไม่นำกระแสจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (3-1) และ (3-3) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} = \Delta i_{L,off}$$

$$\frac{V_{IN}}{L} DT = \frac{V_{IN} - v_C}{L} (1-D)T$$

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $v_C$ ) จะมีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุต ( $V_O$ ) ที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตที่ขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ดังแสดงในสมการที่ (3-5)

$$V_O = \frac{V_{IN}}{1-D} \quad (3-5)$$

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม สามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตในแต่ละขั้นของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้น ได้ดังต่อไปนี้

$$v_{C1} = \frac{V_{IN}}{(1-D_1)} \quad (3-6)$$

$$v_{C2} = \frac{v_{C1}}{(1-D_2)} \quad (3-7)$$

$$v_{C3} = \frac{v_{C2}}{(1-D_3)} \quad (3-8)$$

เมื่อ  $D_1$ ,  $D_2$  และ  $D_3$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์  $S_1, S_2, S_3$  ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้น ได้ดังสมการที่ (3-9)

$$V_o = \frac{V_{IN}}{(1-D_1)(1-D_2)(1-D_3)} \quad (3-9)$$

### 3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามขั้น

ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามขั้น จะอาศัยการวิเคราะห์ท่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์ดั้งเดิมเข้าช่วย ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ เมื่อพิจารณาสมการ (3-3) การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่าหากตัวเหนี่ยวนำมีค่ามาก จะช่วยให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีขนาดลดลงได้ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องออกแบบเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสม เพื่อให้การกระเพื่อมของกระแสอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวมีขนาดไม่ใหญ่มากเกินไป เนื่องจากจะมีราคาที่สูงมากขึ้น การออกแบบเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม พิจารณาได้จากสมการที่ (3-10) นอกจากนี้จากสมการ (3-4) การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต จะเห็นได้ว่า ถ้าเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม จะส่งผลให้การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตอยู่ภายในขอบเขตที่ต้องการได้ ทั้งนี้การออกแบบเลือกค่าตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์ดั้งเดิม แสดงได้ดังสมการที่ (3-11)

$$L = \frac{DV_{IN}}{f_s \Delta i_L} \quad (3-10)$$

$$C = \frac{Di_o}{f_s \Delta v_C} \quad (3-11)$$

โดยที่  $f_s$  คือ ความถี่สวิตซ์

$\Delta i_L$  คือ การกระเพื่อมของกระแสในขอบเขตที่กำหนด

$\Delta v_C$  คือ การกระเพื่อมของแรงดันในขอบเขตที่กำหนด

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามขั้น แสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$L_1 = \frac{D_1 V_{IN}}{f_s \Delta i_{L1}} \quad (3-12)$$

$$L_2 = \frac{D_2 v_{C1}}{f_s \Delta i_{L2}} \quad (3-13)$$

$$L_3 = \frac{D_3 v_{C2}}{f_s \Delta i_{L3}} \quad (3-14)$$

$$C_1 = \frac{i_{L2} D_1}{f_s \Delta v_{C1}} \quad (3-15)$$

$$C_2 = \frac{i_{L3} D_2}{f_s \Delta v_{C2}} \quad (3-16)$$

$$C_3 = \frac{i_o D_3}{f_s \Delta v_{C3}} \quad (3-17)$$

จากนั้นทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น โดยอาศัยสมการที่ (3-12)-(3-17) จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรที่ใช้ในการออกแบบแสดงในตารางที่ 3.2 ทั้งนี้จะพิจารณาวงจรดังกล่าวเป็นวงจรในอุดมคติ ไม่มีกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้นภายในวงจร

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
$L_1$	ตัวเหนี่ยวนำ	15mH
$L_2$		18.75mH
$L_3$		70mH
$C_1, C_2, C_3$	ตัวเก็บประจุ	500uF

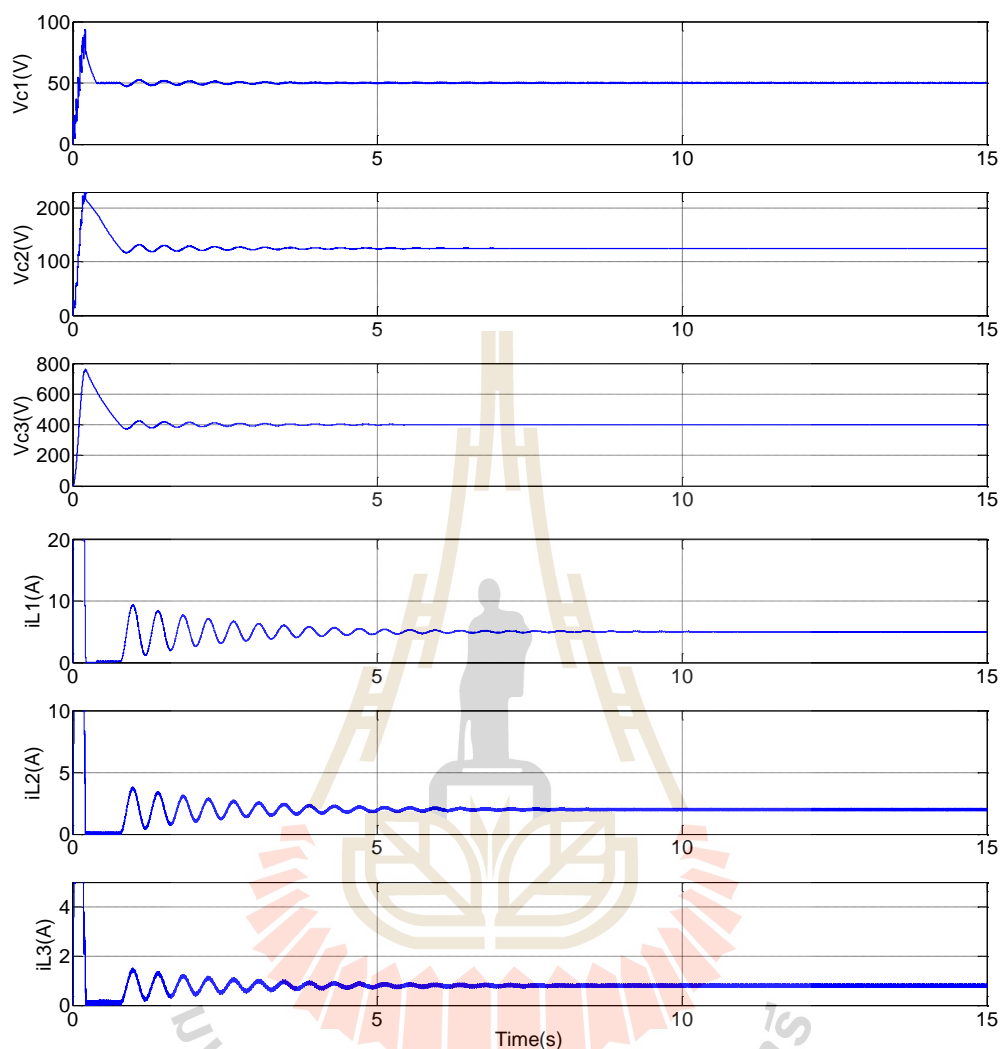
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
$V_{IN}$	แรงดันอินพุต	20V
$V_O$	แรงดันเอาต์พุต	400V
$P_O$	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	100W
$R$	โหลดตัวต้านทาน	1600Ω
$D_1$	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์	0.6
$D_2$		0.6
$D_3$		0.6875
$i_{L1}$	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ	5A
$i_{L2}$		2A
$i_{L3}$		0.8A
$v_{C1}$	แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	50V
$v_{C2}$		125V
$v_{C3}$		400V
$\Delta i_{L1}$	ค่าการกระเพื่อมของกระแส	0.08A (1.6% $i_{L1}$ )
$\Delta i_{L2}$		0.16A (8% $i_{L2}$ )
$\Delta i_{L3}$		0.12A (15% $i_{L3}$ )
$\Delta v_{C1}$	ค่าการกระเพื่อมของแรงดัน	0.24V (0.48% $v_{C1}$ )
$\Delta v_{C2}$		0.096V (0.077% $v_{C2}$ )
$\Delta v_{C3}$		0.034V (0.085% $v_{C3}$ )

### 3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

หลังจากที่ได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น เพื่อให้การกระเพื่อมของกระแสและการกระเพื่อมของแรงดันอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด ในลำดับต่อมาจะดำเนินการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรดังกล่าว โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เพื่อแสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงตามที่ต้องการ เมื่อมีแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างต่ำ รวมถึงแสดงการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอยู่ในขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ ทั้งนี้การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นจะอาศัยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังที่ปรากฏในตารางที่ 3.1 และ 3.2

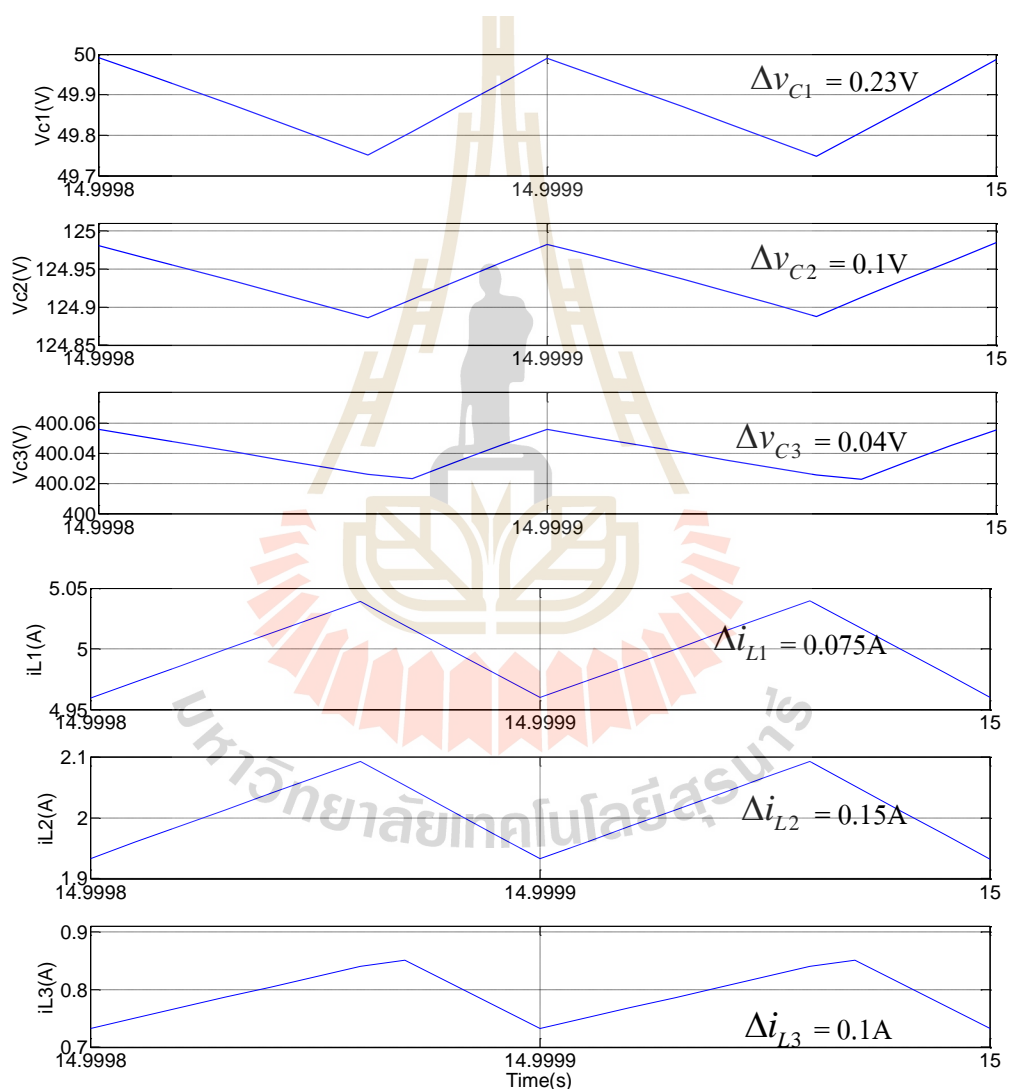
รูปที่ 3.17 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น เมื่อแรงดันอินพุตที่จ่ายให้วงจรเท่ากับ 20 V โดยที่สวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  ทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.6, 0.6 และ 0.6875 ตามลำดับ พบว่าในสถานะอยู่ตัวแรงดัน  $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$  และ  $v_{C3}$  ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  มีค่าประมาณ 50 V, 125 V และ 400 V ตามลำดับ ซึ่งแรงดันทั้งสามดังกล่าวคือแรงดันเอาต์พุตของวงจรในแต่ละขั้น จะเห็นได้มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากสมการที่ (3-6)-(3-8) โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้ถึง 400 V ค่ากระแส  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$ ,  $L_2$  และ  $L_3$  มีค่าประมาณ 5 A, 2 A และ 0.8 A ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่ากระแสอินพุตหรือกระแส  $i_{L1}$  มีค่าประมาณ 5 A ซึ่งสอดคล้องกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 100 W เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 20 V



รูปที่ 3.17 แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

จากนั้นพิจารณาการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวและการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.18 พบว่าค่าการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  คือ  $\Delta v_{C1}$ ,  $\Delta v_{C2}$  และ  $\Delta v_{C3}$  มีค่าใกล้เคียงกับค่าขอบเขตการกระเพื่อมของแรงดันที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุทั้งสาม ค่าการกระเพื่อมของกระแส  $\Delta i_{L1}$ ,  $\Delta i_{L2}$  และ  $\Delta i_{L3}$  มีค่าสอดคล้องกับขอบเขตที่ได้กำหนดไว้เช่นกัน ดังนั้นจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามขั้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงตามที่ต้องการในสถานะอยู่ตัว และค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ได้ออกแบบไว้มีความเหมาะสม ทำให้การกระเพื่อม

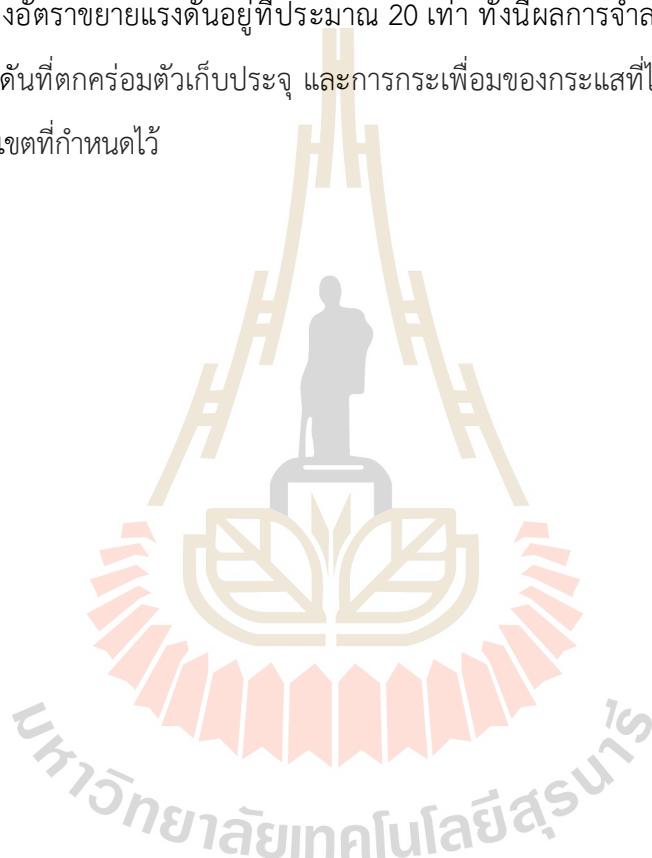
ของการกระแสและการกระเพื่อมของแรงดันในวงจรอยู่ภายในขอบเขตใกล้เคียงกับที่ได้กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม ผลตอบสนองของแรงดันและกระแสในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นมีการพุ่งเกินและมีการสั้นไกวที่ค่อนข้างสูง จำเป็นต้องอาศัยตัวควบคุมเพื่อให้วงจรดังกล่าวสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นในลำดับต่อไป



รูปที่ 3.18 การกระเพื่อมของแรงดันและการกระเพื่อมของกระแส

### 3.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น โดยมีการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำให้อยู่ในขอบเขตที่พึงพอใจ รวมถึงแสดงผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงตามต้องการ ซึ่งอัตราขยายแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้ผลการจำลองสถานการณ์ยังแสดงการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ พบว่าสอดคล้องกับขอบเขตที่กำหนดไว้





## บทที่ 3

### วงจรผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น

#### 3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น โดยได้อธิบายถึงหลักการทำงานของวงจรดังกล่าว การหาอัตราขยายแรงดัน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ปรากฏในวงจร เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันกระแสที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ รวมถึงได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรดังกล่าว โดยมีอัตราขยายแรงดันสูงถึงประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ได้ออกแบบ ช่วยให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด

#### 3.2 โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น

เนื่องจากแรงดันกระแสตรงที่ได้จากแผง PV modules มีค่าไม่สูงมากนัก จำเป็นต้องอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง เข้าช่วยในการเพิ่มระดับแรงดันให้สูงพอกับการนำไปใช้งานต่อไป แนวทางหนึ่งคือการใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ (boost converter) เพื่อทบระดับแรงดันอินพุตให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิม (conventional boost converter) ไม่สามารถขยายแรงดันได้สูงเพียงพอ อาจมีข้อจำกัดสำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตค่อนข้างต่ำแต่ต้องการแรงดันเอาต์พุตสูง ดังนั้นจึงอาจนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิมมาเรียงต่อกันหลายขั้น จะได้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายขั้น (multi-stage boost converter) เพื่อได้ระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงขึ้นตามต้องการ รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น ซึ่งสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 400V เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 20V โดยที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของสวิตช์แต่ละตัวมีค่าไม่สูงมากนัก ทั้งนี้โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน ( $V_M$ ) , สวิตช์สามตัว ( $S_1, S_2, S_3$ ) , ไดโอดสามตัว ( $D_1, D_2, D_3$ ) , ตัวเก็บประจุสามตัว ( $C_1, C_2, C_3$ ) , ตัวเหนี่ยวนำสามตัว ( $L_1, L_2, L_3$ ) และโหลดตัวต้านทาน ( $R$ )

## บทที่ 4

### การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามชั้น

#### 4.1 บทนำ

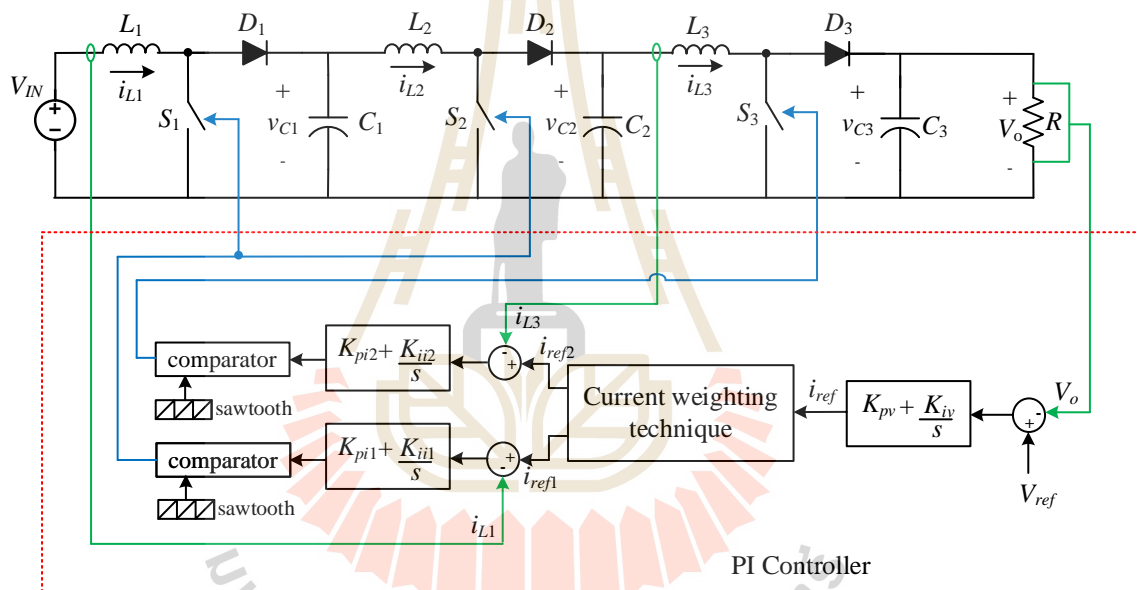
จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามชั้นเพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น ในบทที่ 4 ได้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามชั้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ เข้าช่วยในการควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้มีค่าคงที่ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การทำงานที่แตกต่างกัน โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตหนึ่งลูป (PI Voltage Loop) และลูปควบคุมกระแสสองลูป (PI Current Loops) เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์แต่ละตัว และอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique) เข้าช่วยปรับค่ากระแสอ้างอิงให้เหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป เพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามชั้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามชั้นสามชั้นอาศัย

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามชั้นสามชั้นอาศัยหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์ดั้งเดิม โดยจะมีตัวตรวจจับแรงดันเพื่อวัดค่าแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) และตัวตรวจจับกระแสสำหรับวัดค่ากระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  เพื่อส่งค่าที่วัดได้ไปยังตัวควบคุมพีไอที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบด้วย ลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตหนึ่งลูป เพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการ และลูปควบคุมกระแสสองลูปเพื่อควบคุมกระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  โดยสร้างสัญญาณการสวิตช์ด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสม สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์ ( $S_1, S_2, S_3$ ) จนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตที่คงที่ตามต้องการ นอกจากนี้ยังอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสเข้าช่วยปรับค่ากระแสอ้างอิงให้มีค่าเหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป

โครงสร้างการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามชั้นสามชั้น แสดงดังรูปที่ 4.1 กระบวนการควบคุมเริ่มจากการวัดค่าแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ก่อนนำเข้าสู่ลูปควบคุมแรงดัน ซึ่งลูปควบคุมแรงดันจะสร้างกระแสอ้างอิงสำหรับลูปควบคุมกระแส ( $i_{ref}$ ) แต่เนื่องจากวิธีการควบคุมที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยลูปควบคุมกระแสสองลูป ดังนั้นจำเป็นต้องมีการถ่วงน้ำหนักกระแสอ้างอิงให้เหมาะสม โดยอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อ

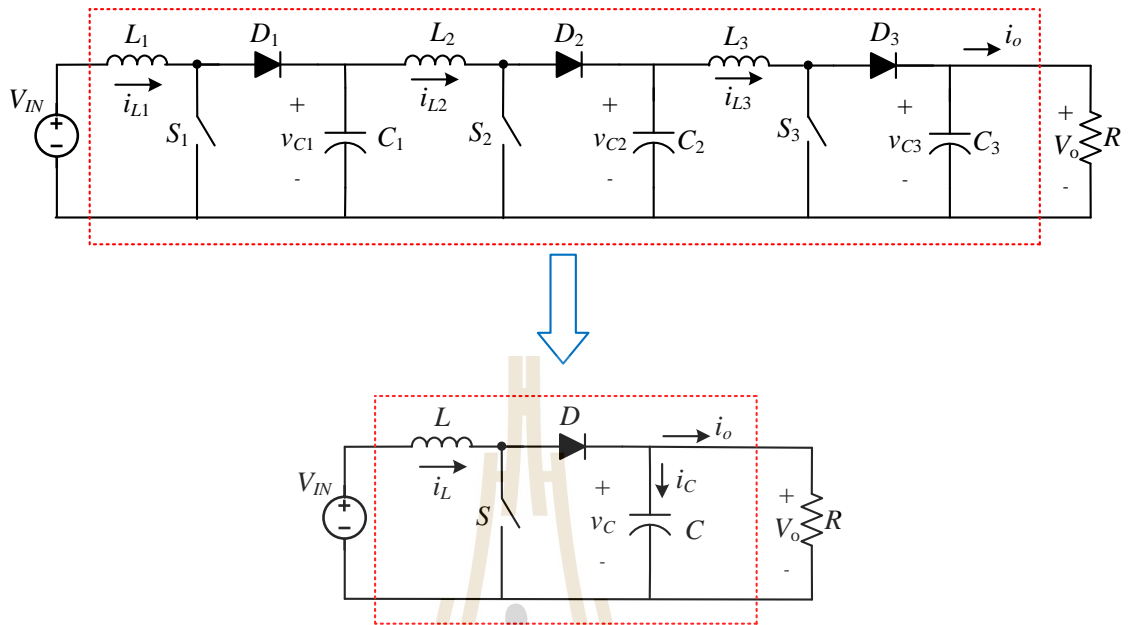
ปรับกระแสอ้างอิงให้มีค่าเหมาะสมสำหรับลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูป ( $i_{ref1}$ ,  $i_{ref2}$ ) ค่ากระแสอ้างอิงดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสทั้งสองตัว ( $i_{L1}$ ,  $i_{L3}$ ) ตามลำดับ ซึ่งลูปควบคุมกระแสแต่ละลูปจะสร้างสัญญาณควบคุมสำหรับเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (sawtooth) โดยลูปควบคุมกระแสลูปที่หนึ่งจะได้สัญญาณสำหรับการควบคุมการทำงานสวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  ส่วนลูปควบคุมกระแสลูปที่สองจะได้สัญญาณสำหรับการควบคุมการทำงานสวิตช์  $S_3$  ทั้งนี้จะได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ การออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดัน และการออกแบบตัวควบคุมลูปกระแส อธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นสามขั้น

#### การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปควบคุมแรงดัน (PI Voltage Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นได้อาศัยหลักการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม โดยพิจารณาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นและโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม

จากรูปที่ 4.2 พิจารณาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิม เพื่อใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) อธิบายการทำงานของวงจรในขณะที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$i_L(t) = i_C(t) + i_o(t)$$

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = (1 - D(t))i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R}$$

เมื่อ  $D = 0$  จะได้

$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R} \quad (4-1)$$

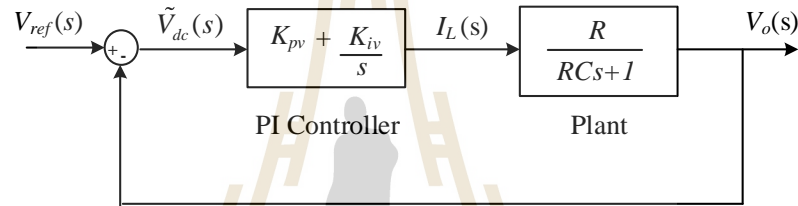
ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (4-1) จะได้ดังสมการที่ (4-2)

$$CsV_o(s) = I_L(s) - \frac{V_o(s)}{R} \quad (4-2)$$

จากนั้นทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (4-2) จะได้พลานต์ของวงจรถัดสมการที่ (4-3) โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูประดัน แสดงได้ดังสมการที่ (4-4) จะได้แผนภาพการควบคุมลูประดันด้วยตัวควบคุมพีไอ ดังรูปที่ 4.3

$$\frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{RCs+1} \quad (4-3)$$

$$G_{CV}(s) = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \quad (4-4)$$



รูปที่ 4.3 แผนภาพการควบคุมลูประดันด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพในรูปที่ 4.3 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอในลูประดัน แสดงดังสมการที่ (4-5)

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s}\right)\left(\frac{R}{RCs+1}\right)}{1 + \left(\frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s}\right)\left(\frac{R}{RCs+1}\right)}$$

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_{pv}Rs + K_{iv}R}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}R+1}{RC}\right)s + \left(\frac{K_{iv}R}{RC}\right)} \quad (4-5)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์  $K_{pv}$  และ  $K_{iv}$  ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูประดัน จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดกับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (4-5) และ (4-6) ตามลำดับ

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4-6)$$

โดย  $\zeta$  คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)

$$\omega_n \text{ คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ โดยที่ } \omega_n = \frac{1}{RC}$$

ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอของลู่วควบคุมแรงดัน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-7) และ (4-8) ตามลำดับ

$$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - \frac{1}{R} \quad (4-7)$$

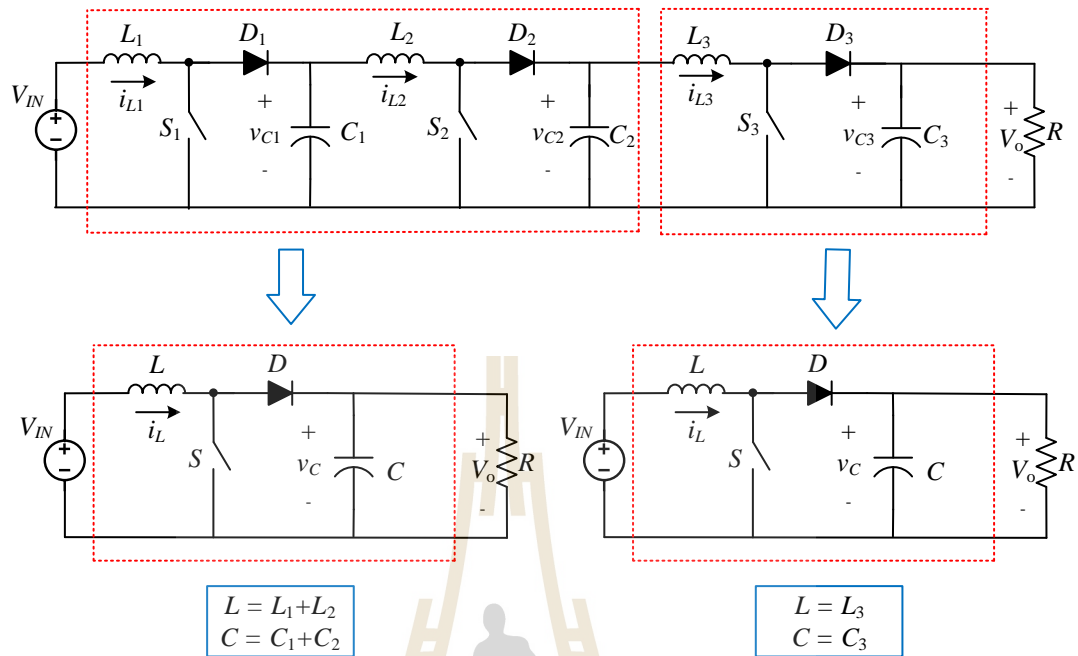
$$K_{iv} = \omega_n^2 C \quad (4-8)$$

#### การออกแบบตัวควบคุมพีไอลู่วควบคุมกระแส (PI Current Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลู่วกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นจะดำเนินการในลักษณะเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลู่วแรงดัน การพิจารณาลู่วควบคุมกระแสทั้งสองลู่วของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นเทียบเคียงกับโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิม แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยที่ลู่วควบคุมกระแสลู่วที่หนึ่งจะพิจารณาตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$ ,  $L_2$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$ ,  $C_2$  เข้าร่วมในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลู่วควบคุมกระแสลู่วแรก ในขณะที่ลู่วควบคุมกระแสที่สองจะพิจารณาตัวเหนี่ยวนำ  $L_3$  กับตัวเก็บประจุ  $C_3$  เมื่อใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) เข้าช่วยในการพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์ดั้งเดิม ขณะที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$v_{IN}(t) = (1 - D(t))v_o(t) + v_L(t)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{IN}(t) - (1 - D(t))v_o(t)$$



รูปที่ 4.4 ลูปควบคุมกระแสทั้งสองลูปของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น

พิจารณาเมื่อ  $D = 0$  จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-9)

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{IN}(t) - v_O(t) \quad (4-9)$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (4-9) ได้ดังสมการที่ (4-10)

$$LsI_L(s) = V_{IN}(s) - V_O(s) \quad (4-10)$$

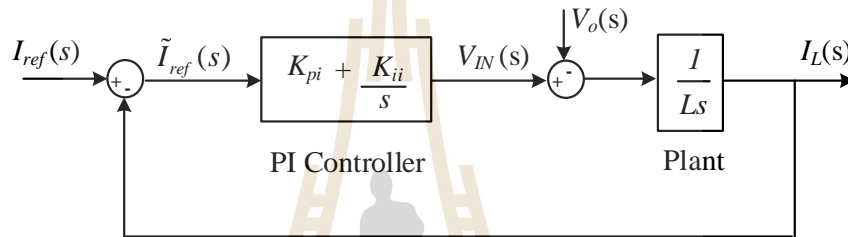
จากนั้นดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (4-10) จะได้พลานต์ในลูปควบคุมกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น ดังสมการที่ (4-11) และฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับตัวควบคุมพีไอในลูปควบคุมกระแส แสดงได้ดังสมการที่ (4-12)

$$\frac{I_L(s)}{V_{IN}(s) - V_O(s)} = \frac{1}{Ls} \quad (4-11)$$

$$G_{CC} = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \quad (4-12)$$

แผนภาพการควบคุมลูกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงในรูปที่ 4.5 จากนั้นทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของลูกระแส จะได้ดังสมการที่ (4-13) เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอในลูกระแส

$$\frac{I_L(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{K_{pi}V_{IN}s + K_{ii}V_{IN}}{s^2 + K_{pi}\left(\frac{V_{IN}}{L}\right)s + K_{ii}\left(\frac{V_{IN}}{L}\right)} \quad (4-13)$$



รูปที่ 4.5 แผนภาพการควบคุมลูกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์  $K_{pi}$  และ  $K_{ii}$  ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูกระแส จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์เช่นเดียวกับลูประแรงดัน โดยจะเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดดังแสดงในสมการ (4-13) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานที่ปรากฏในสมการที่ (4-14) จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูกระแสดังสมการที่ (4-15) และ (4-16)

$$G(s) = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \quad (4-14)$$

$$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L}{V_{IN}} \quad (4-15)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2L}{V_{IN}} \quad (4-16)$$



โดยที่  $\omega_{ni}$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของลูกระแส มีค่าเท่ากับ  $\omega_{ni} = N\omega_n$  หน่วยเป็น rad/s

$N$  คือ จำนวนเท่าของความถี่ธรรมชาติสำหรับลูกระแส เมื่อเทียบกับลูประดัง

$\zeta$  คือ อัตราส่วนการหน่วง

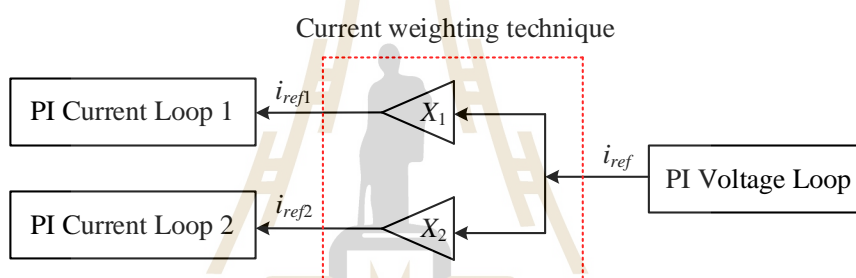
จากการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์ดั้งเดิมจะได้ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้น แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอสำหรับลูประดังและลูกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้น

วงจบบัสต์ดั้งเดิม	วงจบบัสต์สามชั้น
$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - \frac{1}{R}$	$K_{pv} = 2\zeta\omega_n (C_1 + C_2 + C_3) - \frac{1}{R}$
$K_{iv} = \omega_n^2 C$	$K_{iv} = \omega_n^2 (C_1 + C_2 + C_3)$
$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni} L}{V_{IN}}$	$K_{pi1} = \frac{2\zeta\omega_{ni} (L_1 + L_2)}{V_{IN}}$
	$K_{pi2} = \frac{2\zeta\omega_{ni} L_3}{V_{IN}}$
$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{IN}}$	$K_{ii1} = \frac{\omega_{ni}^2 (L_1 + L_2)}{V_{IN}}$
	$K_{ii2} = \frac{\omega_{ni}^2 L_3}{V_{IN}}$

### เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอลูบควบคุมกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสสามขั้น ประกอบด้วยลูบควบคุมกระแสสองลูบ ซึ่งค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากลูบควบคุมแรงดันอาจยังมีค่าที่ไม่เหมาะสมสำหรับลูบควบคุมกระแสทั้งสองลูบ เนื่องจากลูบควบคุมกระแสลูบที่หนึ่งนั้นจะนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวที่หนึ่งและสอง ( $S_1, S_2$ ) ในขณะที่ลูบควบคุมกระแสลูบที่สองจะนำไปใช้สร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ตัวที่สาม ( $S_3$ ) เท่านั้น ดังนั้นจึงได้อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique) เพื่อช่วยปรับกระแสอ้างอิงให้เหมาะสมยิ่งขึ้นสำหรับลูบควบคุมกระแสทั้งสองลูบ โดยโครงสร้างของเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

จากรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นโครงสร้างเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เห็นได้ว่าการรับค่ากระแสอ้างอิง ( $i_{ref}$ ) จากลูบควบคุมแรงดันเอาต์พุตนำมาปรับคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก ( $X_1, X_2$ ) เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่ได้รับการถ่วงน้ำหนักแล้ว ( $i_{ref1}, i_{ref2}$ ) และจะถูกส่งไปยังลูบควบคุมกระแสทั้งสองลูบตามลำดับ โดยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4-17) และ (4-18) โดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักคำนวณได้ดังสมการที่ (4-19) และ (4-20)

$$i_{ref1} = X_1 i_{ref} \quad (4-17)$$

$$i_{ref2} = X_2 i_{ref} \quad (4-18)$$

$$X_1 = \frac{i_{L1} + i_{L2}}{i_{total}} \quad (4-19)$$

$$X_2 = \frac{i_{L3}}{i_{total}} \quad (4-20)$$

โดยที่  $X_1$  คือ ค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิง  $i_{ref1}$

$X_2$  คือ ค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับกระแสอ้างอิง  $i_{ref2}$

โดยที่ค่ากระแส  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L3}$  ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัว และค่ากระแสทั้งหมด ( $i_{total}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

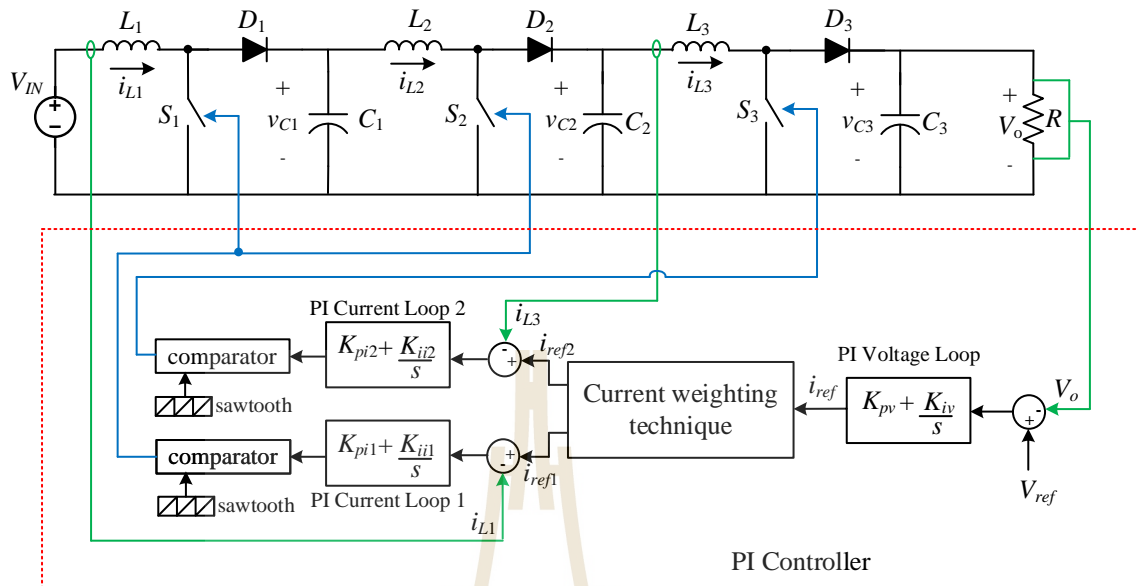
$$i_{L1} = \frac{V_o}{(1-D_1)(1-D_2)(1-D_3)R} \quad (4-21)$$

$$i_{L2} = \frac{V_o}{(1-D_2)(1-D_3)R} \quad (4-22)$$

$$i_{L3} = \frac{V_o}{(1-D_3)R} \quad (4-23)$$

$$i_{total} = i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} \quad (4-24)$$

ในการออกแบบหาอัตราส่วนอ้างอิงหรือค่าถ่วงน้ำหนักอ้างอิงสำหรับการแบ่งกระแสให้เหมาะสม และการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอจะอาศัยข้อมูลต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับรูปกระแส และลูปรแรงดัน รวมถึงค่าถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับลูปรควบคุมกระแสทั้งสองลูปร ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ดังนั้น โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นที่มีตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นที่มีตัวควบคุมพีไอพร้อมกับเทคนิคถ่วงน้ำหนักกระแส

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอพร้อมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
$V_{IN}$	แรงดันอินพุต	20V
$V_O$	แรงดันเอาต์พุต	400V
$L_1, L_2, L_3$	ตัวเหนี่ยวนำ	15mH, 18.75mH, 70mH
$C_1, C_2, C_3$	ตัวเก็บประจุ	560 $\mu$ F
$D_1$	วงจกรักษาที่ของสวิตช์ $S_1$	0.6
$D_2$	วงจกรักษาที่ของสวิตช์ $S_2$	0.6
$D_3$	วงจกรักษาที่ของสวิตช์ $S_3$	0.6875
$R$	โหลดตัวต้านทาน	1600 $\Omega$
$f_s$	ความถี่สวิตช์	10kHz

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีโอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
$K_{pv} = 2\zeta\omega_n(C_1 + C_2 + C_3) - \frac{1}{R}$	0.000625
$K_{iv} = K\omega_n^2(C_1 + C_2 + C_3)$	0.046502
$K_{pi1} = \frac{2\zeta\omega_{ni}(L_1 + L_2)}{V_{IN}}$	0.1883
$K_{ii1} = \frac{\omega_{ni}^2(L_1 + L_2)}{V_{IN}}$	5.2549
$K_{pi2} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L_3}{V_{IN}}$	0.7813
$K_{ii2} = \frac{\omega_{ni}^2L_3}{V_{IN}}$	43.5965
$X_1$	0.85
$X_2$	0.15

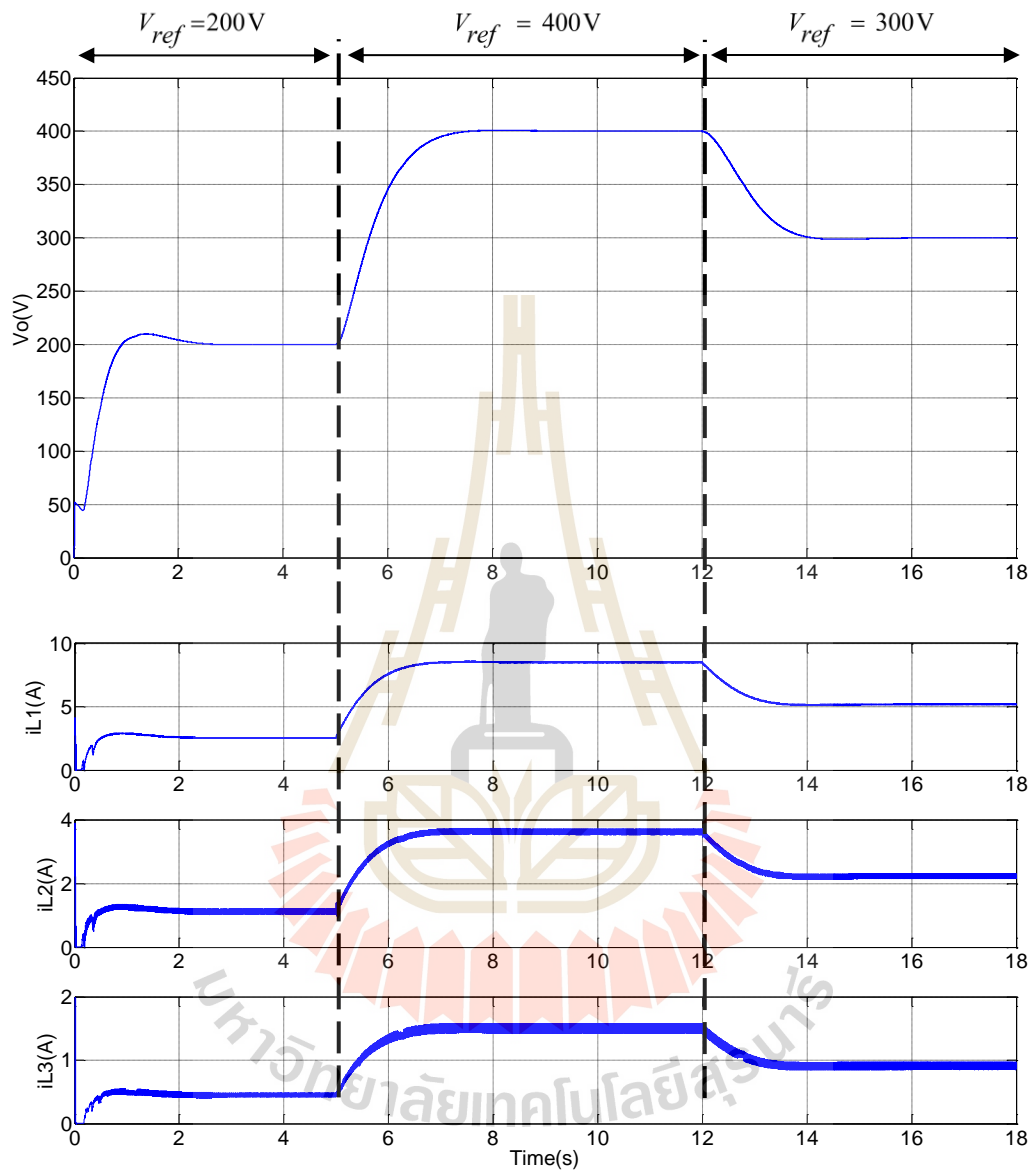
โดยที่  $K$  คือ ค่าอัตราขยายที่เกิดจากการปรับจูน เพื่อช่วยให้ได้ผลตอบสนองที่รวดเร็วขึ้น ( $K = 200$ )

#### 4.3 ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นที่มีตัวควบคุมพีโอ อาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วย เพื่อแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีโอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ รวมถึงมีการแบ่งกระแสอ้างอิงได้อย่างเหมาะสม โดยการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นที่มีตัวควบคุมจะอาศัยค่าพารามิเตอร์

ของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 4.3 โดยการจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังต่อไปนี้

การจำลองสถานการณ์กรณีที่ 1 เป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจร โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) เท่ากับ 200 V 400 V และ 300 V ที่เวลา  $t = 0$ ,  $t = 5$  และ  $t = 12$  วินาที ตามลำดับ ทั้งนี้มีค่าแรงดันอินพุต ( $V_{IN}$ ) เท่ากับ 20 V ซึ่งจากการจำลองสถานการณ์ผลของแรงดันเอาต์พุต ( $V_O$ ) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L3}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าในช่วงวินาทีที่ 0 ถึง 5 ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตเป็น 200 V ตามที่ได้กำหนดไว้ ส่วนกระแส  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าอยู่ที่ประมาณ 2.5 A, 1 A และ 0.5 A ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถแบ่งกระแสได้อย่างเหมาะสม จากนั้นปรับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเพิ่มขึ้นเป็น 400 V ตัวควบคุมที่โอยังคงสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ โดยกระแส  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันและยังมีการแบ่งกระแสได้อย่างเหมาะสมเช่นเดิม ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 8 A 3.8 A และ 1.5 A ตามลำดับ และเมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงลดลงกลับไป 300 V ที่วินาทีที่ 12 ตัวควบคุมที่โอยังร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการ ทั้งนี้จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าถ้าแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นด้วย และถ้าแรงดันเอาต์พุตลดลงก็ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตรวมถึงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำลดลงเช่นกัน

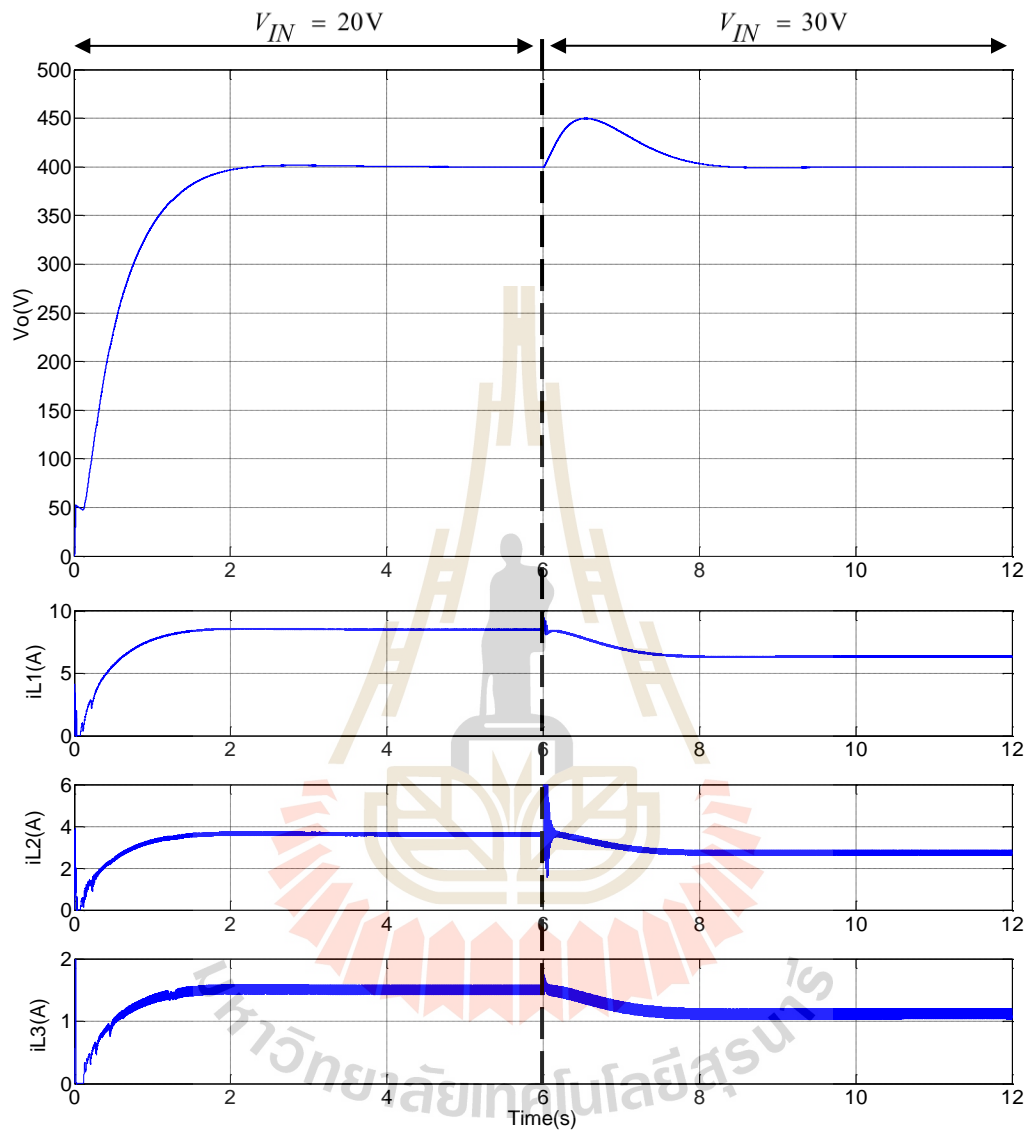


รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_{ref}$ )

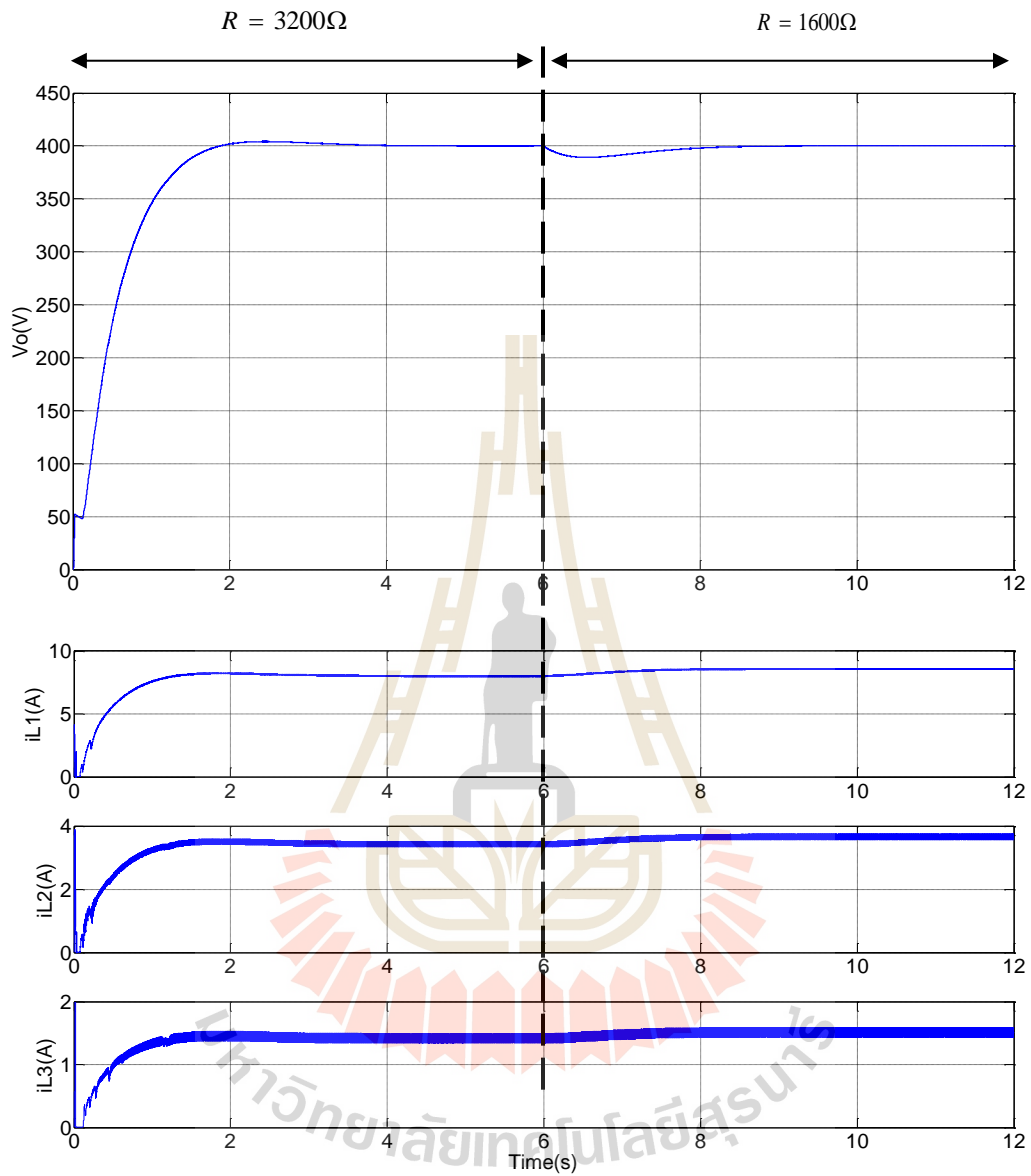
การจำลองสถานการณ์กรณีที่ 2 เป็นการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตของวงจร โดยจะปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตที่ 20 V และ 30 V ที่วินาทีที่ 0 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400 V ผลการจำลองสถานการณ์ของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 โดยในช่วงแรงดันอินพุตที่ 20 V จะเห็นว่าตัวควบคุมสามารถเพิ่มและรักษาแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงที่ 400 V ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตในวินาทีที่ 6 จาก 20 V ไปเป็น 30 V พบว่าในสถานะชั่วคราวแรงดันเอาต์พุตจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นก่อนจะกลับเข้าสู่ค่าเดิมในสถานะอยู่ตัวที่ 400 V ทั้งนี้เมื่อเพิ่มแรงดันอินพุตขึ้น แต่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเท่าเดิม จะส่งผลให้กระแส  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าลดลง

การจำลองสถานการณ์กรณีที่ 3 จะทำการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน ( $R$ ) โดยจะกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400 V ทำการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานเป็น 3200 $\Omega$  และ 1600 $\Omega$  ที่วินาที 0 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.10 สังเกตเห็นว่าเมื่อทำการปรับโหลดตัวต้านทานลดลงจาก 3200 $\Omega$  และ 1600 $\Omega$  ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการที่ 400 V โดยในสถานะชั่วคราวแรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงลดลงเพียงเล็กน้อยก่อนจะกลับเข้าสู่ค่าเดิมที่สถานะอยู่ตัวเท่ากับ 400 V รวมถึงกระแส  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโหลดตัวต้านทานที่ลดลงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวก็มีผลที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันภายใต้สถานะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป





รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต ( $V_{IN}$ )



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน ( $R$ )

#### 4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอโครงสร้างการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ ที่ได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมสำหรับลู่วควบคุมแรงดันและลู่วควบคุมกระแสทั้งสองลู่ว ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส โดยมีการปรับค่ากระแสอ้างอิงให้เหมาะสมกับลู่วควบคุมกระแสทั้งสองลู่ว เพื่อควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ โดยได้ทำการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น ในสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปในกรณีต่าง ๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น ให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป ในบทถัดไปจะกล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นที่มีตัวควบคุมเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรขึ้น เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร และให้วงจรดังกล่าวสามารถทำงานได้ต่อเนื่องในสภาวะความคงทนต่อความผิดพลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ



## บทที่ 5

### การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น

#### 5.1 บทนำ

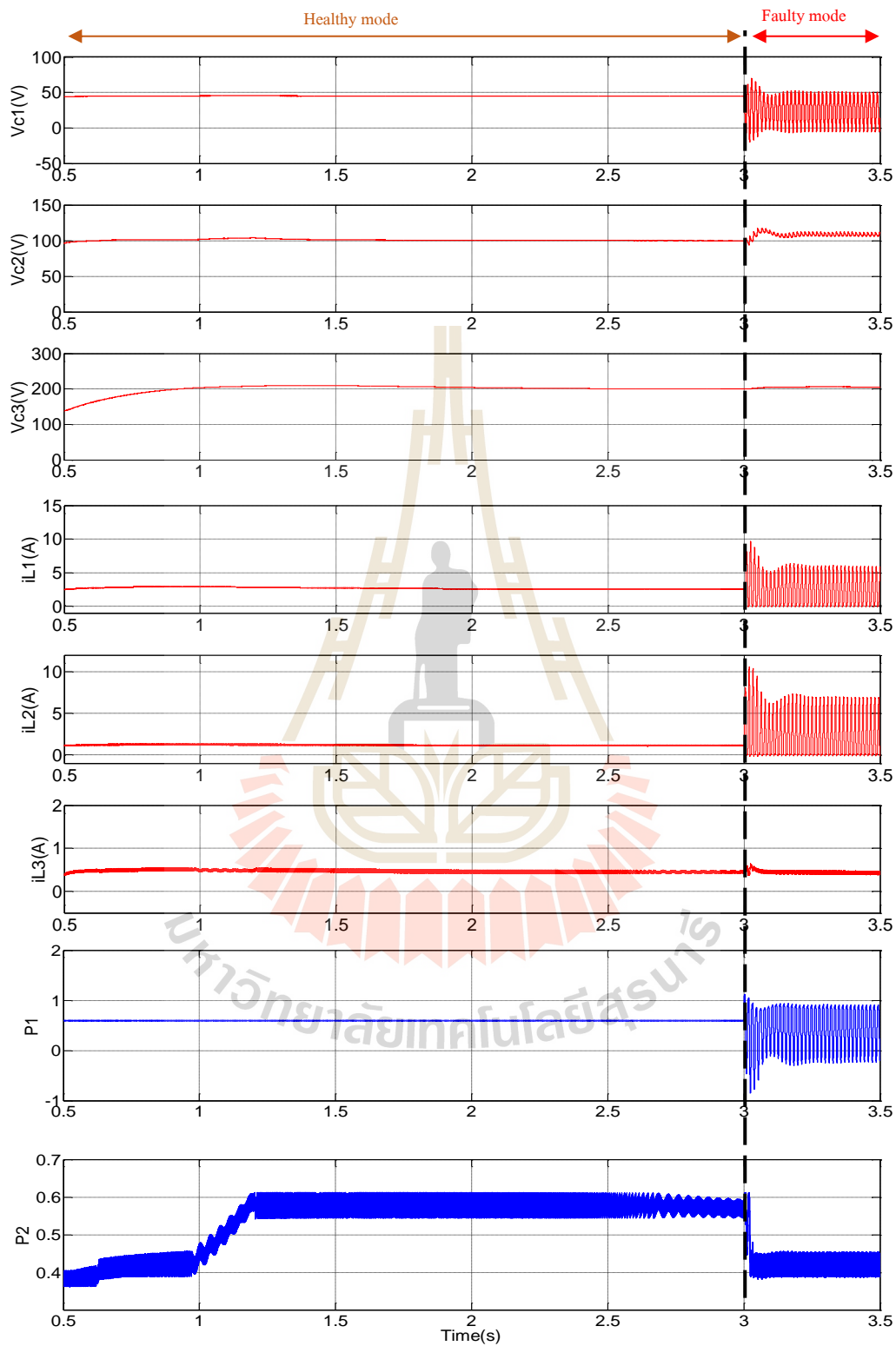
ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้นที่มีตัวควบคุม โดยวิธีการตรวจจับความผิดปกติจะอาศัยการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้นที่มีตัวควบคุมในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ซึ่งจะสังเกตพฤติกรรมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์กระแสทั้งสองคู่ แล้วนำพฤติกรรมดังกล่าวไปใช้เป็นแนวทางเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้น เพื่อลดผลกระทบที่มีต่อวงจรให้น้อยลงได้ โดยวงจรดังกล่าวยังคงสามารถทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

#### 5.2 พฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้นในสภาวะปกติและเกิดความผิดปกติ

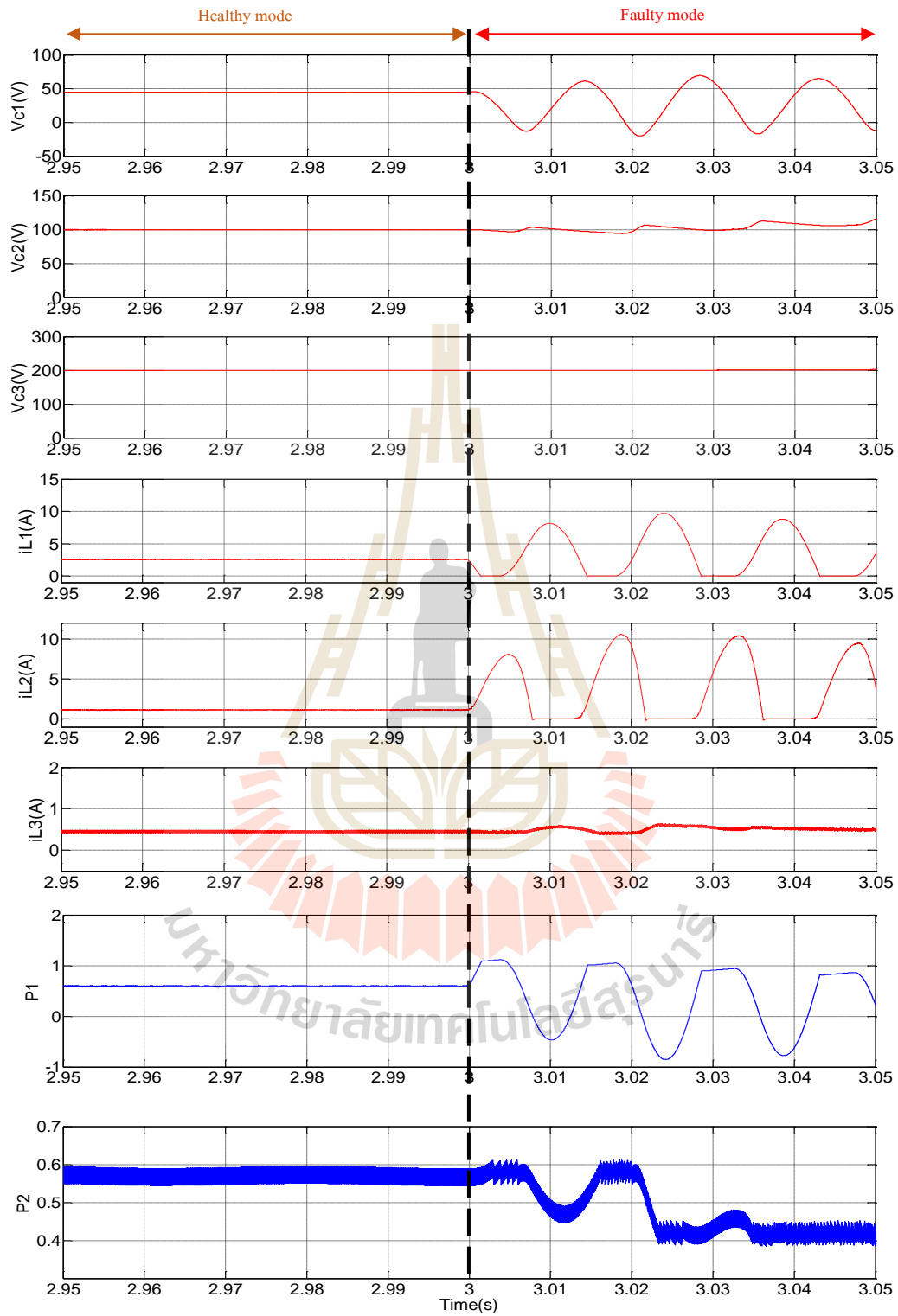
ในการสังเกตพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้นที่มีตัวควบคุมพีไอภายใต้ความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร จะพิจารณาการทำงานในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้นภายใต้การทำงานในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ โดยใช้ตัวควบคุมพีไอที่พัฒนาขึ้นในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้น การสังเกตพฤติกรรมของวงจรเมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรนี้ จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรได้ เพื่อช่วยลดผลกระทบที่มีต่อวงจรดังกล่าวได้ โดยโครงสร้างวงจรที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เพื่อศึกษาพฤติกรรมในสภาวะเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรแสดงดังรูปที่ 5.1 ในการจำลองสถานการณ์จะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งในวงจรเกิดความผิดปกติ โดยทำการจำลองสถานการณ์ 3 กรณี ได้แก่ กรณีแรกเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  กรณีต่อมาเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_2$  และกรณีสุดท้ายเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_3$  โดยกำหนดให้ทุกกรณีมีค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 200 V

ในการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  จะทำการสร้างสถานการณ์ให้เกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่วินาทีที่ 3 โดยจะแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$ ,  $v_{C3}$ ) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L3}$ ) และสัญญาณควบคุมการสวิตช์ ( $P_1$ ,  $P_2$ ) ที่ปรากฏในรูปที่ 5.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติ จากนั้นนำผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวมาวิเคราะห์หาแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  ต่อไป

ผลจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  แสดงดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 เป็นภาพขยายให้เห็นพฤติกรรมความแตกต่างระหว่างสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติได้ชัดเจนขึ้น จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นในสภาวะปกติ (Healthy mode) ตัวควบคุมที่ไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการที่ 200 V ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีผลที่สอดคล้องกันในช่วงสภาวะปกติหรือช่วงก่อนวินาทีที่ 3 แต่ในสภาวะเกิดความผิดปกติ (Faulty mode) หรือหลังจากวินาทีที่ 3 จะเห็นได้ว่า  $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$ ,  $i_{L1}$  และ  $i_{L2}$  นั้นเกิดการสั่นไหวเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ค่าแรงดัน  $v_{C1}$  มีการสั่นไหวค่อนข้างสูง และกระแส  $i_{L1}$  มีค่าลดลงจนถึง 0 A ก่อนมีการพุ่งสูงถึง 10 A และเกิดการสั่นไหวอย่างต่อเนื่อง รวมถึงกระแส  $i_{L2}$  ก็มีการสั่นไหวเกิดขึ้นคล้ายกับกระแส  $i_{L1}$  ในขณะที่กระแส  $i_{L3}$  มีลักษณะไม่แตกต่างจากสภาวะปกติ ส่วนแรงดันเอาต์พุตหรือ  $v_{C3}$  นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นนั้นพยายามที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์  $P_1$  และ  $P_2$  ก็มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดย  $P_1$  มีการสั่นไหวค่อนข้างมาก ในขณะที่  $P_2$  นั้นมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 0.6 เป็น 0.4 ดังนั้นในการสังเกตพฤติกรรมความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่  $S_1$  สามารถนำผลการเปลี่ยนแปลงของ  $v_{C1}$ ,  $v_{C2}$ ,  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $P_1$  และ  $P_2$  ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเป็นอย่างมาก มาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์  $S_1$  ได้ อย่างไรก็ตามในการควบคุมการทำงานของวงจรมีเพียงตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต และตัวตรวจจับกระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  เท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงอาศัยค่ากระแส  $i_{L1}$  เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติสำหรับสวิตช์  $S_1$  ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 5.2 พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$

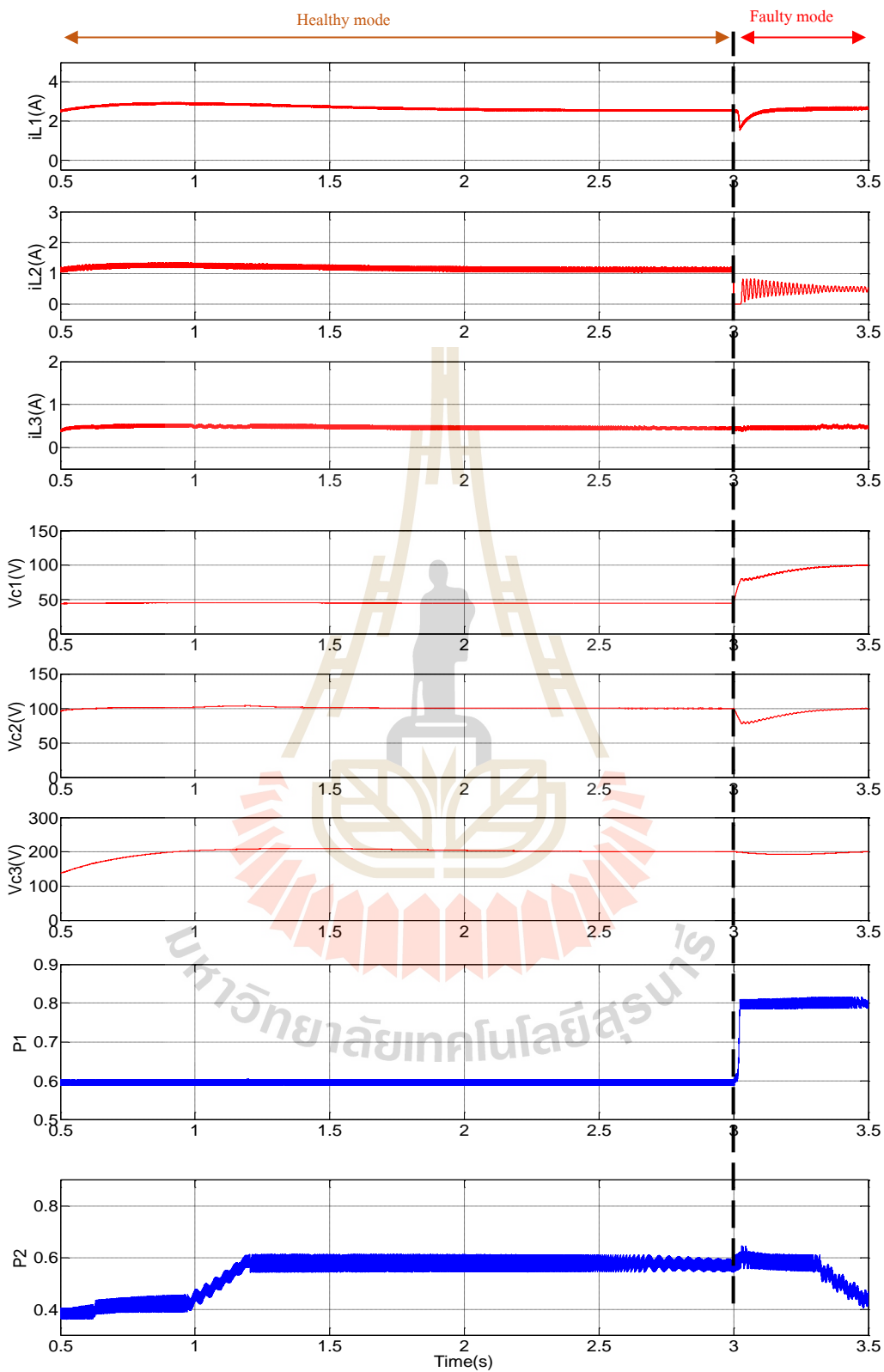


รูปที่ 5.3 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_1$

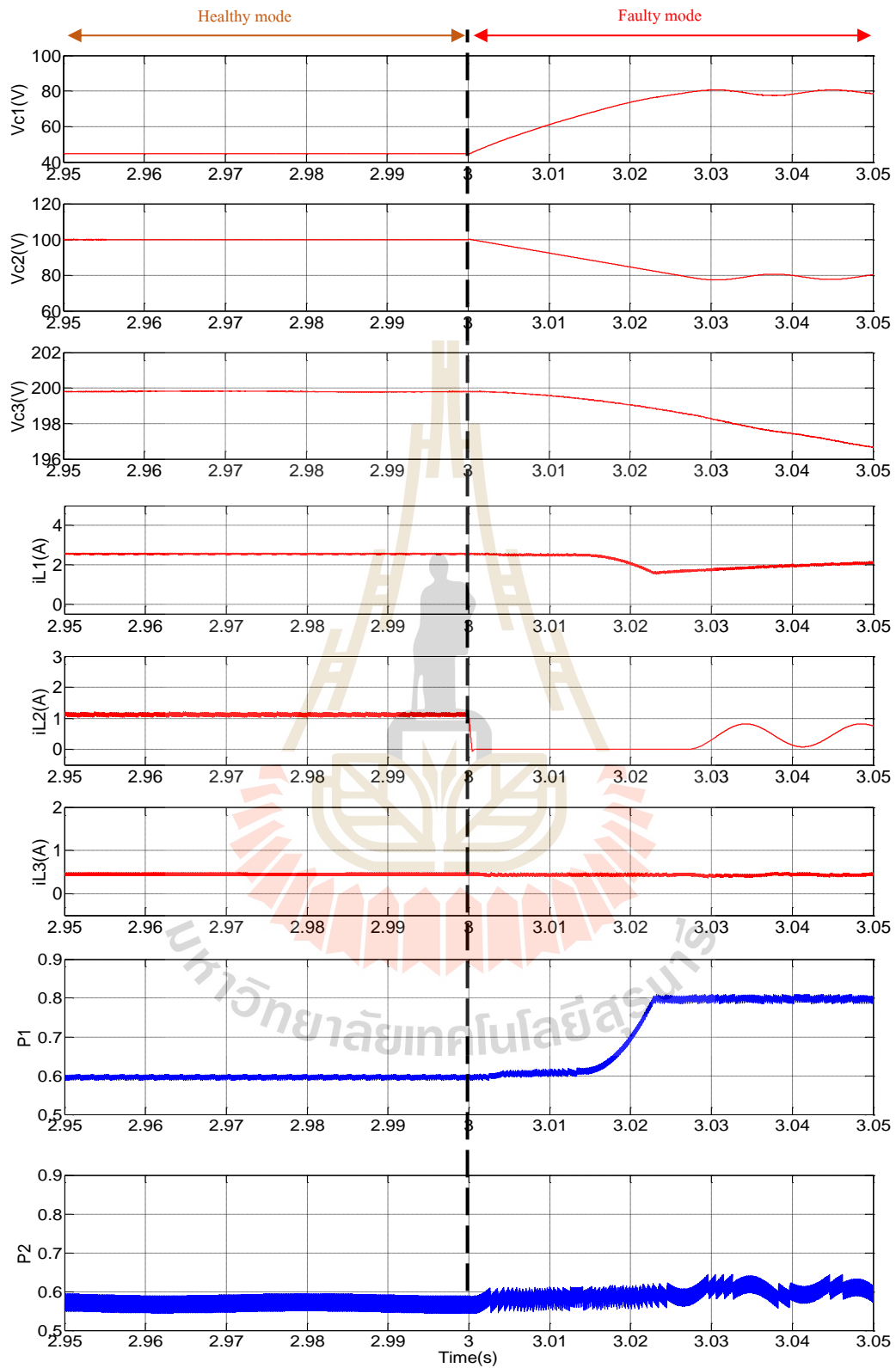
ในกรณีถัดมาเป็นการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นขณะเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_2$  ที่วินาทีที่ 3 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 จะสังเกตเห็นได้ว่า ในช่วงสภาวะปกติตัวควบคุมพีไอสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ และเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสก็สามารถแบ่งกระแสได้อย่างเหมาะสม ในสภาวะเกิดความผิดปกติหรือหลังจากวินาทีที่ 3 เมื่อสวิตช์  $S_2$  มีการเปิดวงจร จะส่งผลให้แรงดัน  $v_{C1}$  มีการเพิ่มระดับแรงดันสูงขึ้นจาก 40V เป็น 100V และแรงดัน  $v_{C2}$  มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 100V ไปเป็น 80V ก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมในเวลาถัดมา ในขณะที่  $v_{C3}$  มีลักษณะไม่แตกต่างจากในสภาวะปกติ ในส่วนกระแส  $i_{L1}$  หลังจากเกิดความผิดปกติพร่องจะมีการลดลงต่ำกว่า 2A และกลับเข้าสู่ใกล้เคียงค่าเดิม มีเพียงกระแส  $i_{L2}$  เท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงและเกิดการสั่นไหวอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กระแส  $i_{L3}$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับในสภาวะปกติ จากผลการจำลองสถานการณ์ยังพบว่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์  $P_1$  มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก 0.6 ไปเป็น 0.8 ทันทีหลังจากเกิดความผิดปกติพร่องขึ้น ในขณะที่  $P_2$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรก หลังจากเกิดความผิดปกติพร่อง เมื่อเวลาผ่านไปจึงมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ดังนั้นจึงสามารถอาศัยพฤติกรรมของ  $i_{L1}$ ,  $i_{L3}$ ,  $P_1$  และ  $P_2$  ในการวิเคราะห์เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติพร่องในสวิตช์  $S_2$  ได้

ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_3$  แสดงดังได้รูปที่ 5.6 และ 5.7 จากผลการจำลองสถานการณ์จะสังเกตเห็นว่า ในสภาวะเกิดความผิดปกติพร่องหลังจากวินาทีที่ 3 แรงดัน  $v_{C1}$  กับ  $v_{C2}$  มีการเพิ่มระดับแรงดันที่สูงขึ้น โดยที่แรงดัน  $v_{C2}$  เพิ่มระดับแรงดันจาก 100V เป็น 200V เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงกำหนดไว้ที่ 200V จึงส่งผลให้ตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นพยายามที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ ในส่วนของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$  จะมีลักษณะคล้ายกับในสภาวะปกติ ในขณะที่กระแส  $i_{L2}$  มีการปรับตัวลดลงเพียงเล็กน้อย และกระแส  $i_{L3}$  มีการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยพฤติกรรมคล้ายกับค่ากระแส  $i_{L2}$  ในกรณีเกิดความผิดปกติพร่องที่สวิตช์  $S_2$  แต่จะมีค่ากระแสที่เป็น 0A ในช่วงระยะเวลาที่นานกว่า จึงส่งผลให้ค่าแรงดันเอาต์พุตกลับเข้าสู่ 200V ได้ช้ากว่ากรณีเกิดความผิดปกติพร่องที่สวิตช์  $S_2$  นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนนี้อีกสัญญาณควบคุมการสวิตช์  $P_2$  ซึ่งมีการปรับเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังนั้นในการสังเกตพฤติกรรมกรณีเกิดความผิดปกติพร่องที่สวิตช์  $S_3$  แสดงให้เห็นว่าสามารถนำพฤติกรรมของ  $i_{L3}$  และ  $P_2$  ไปพิจารณาเพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติพร่องในสวิตช์  $S_3$  ได้

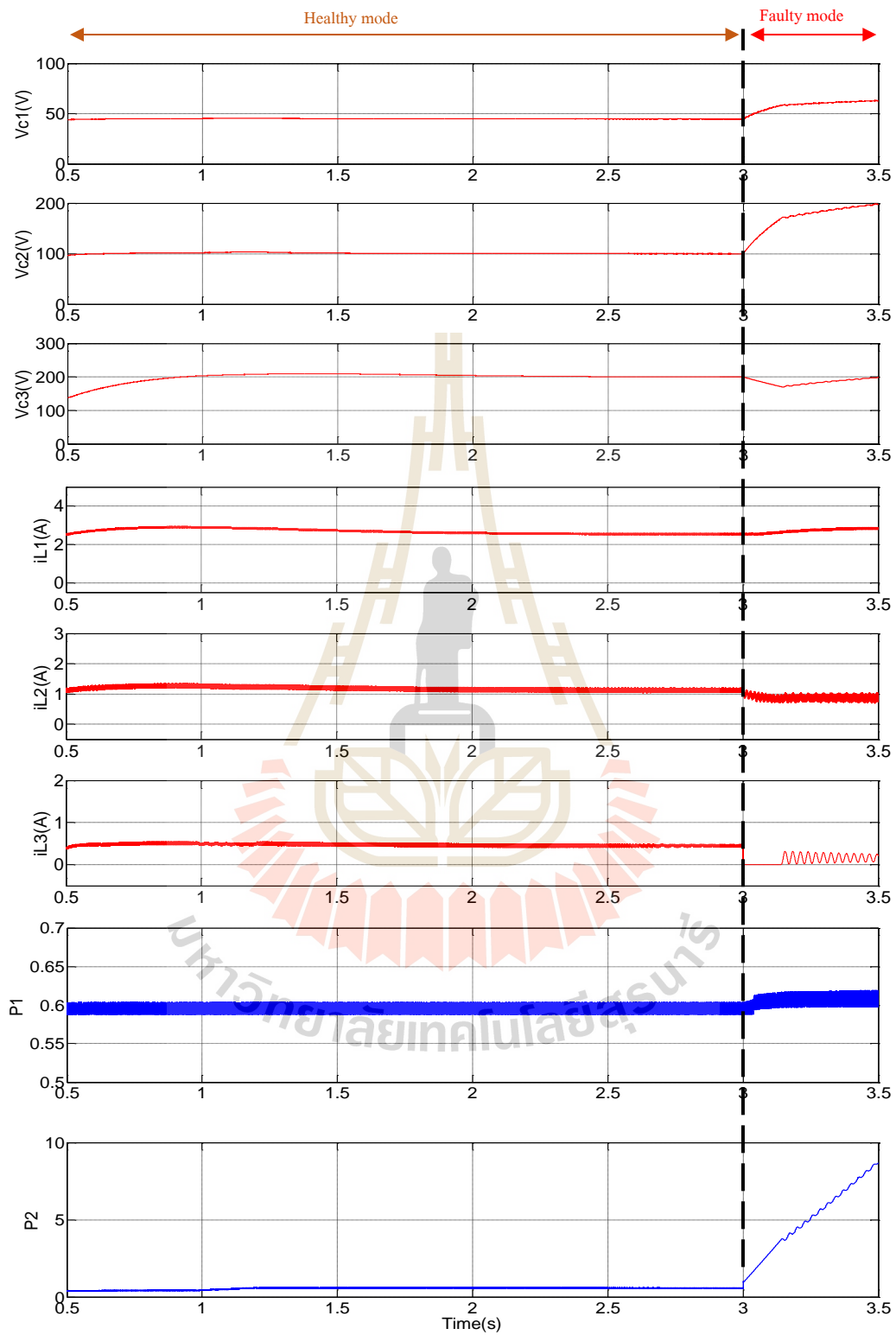




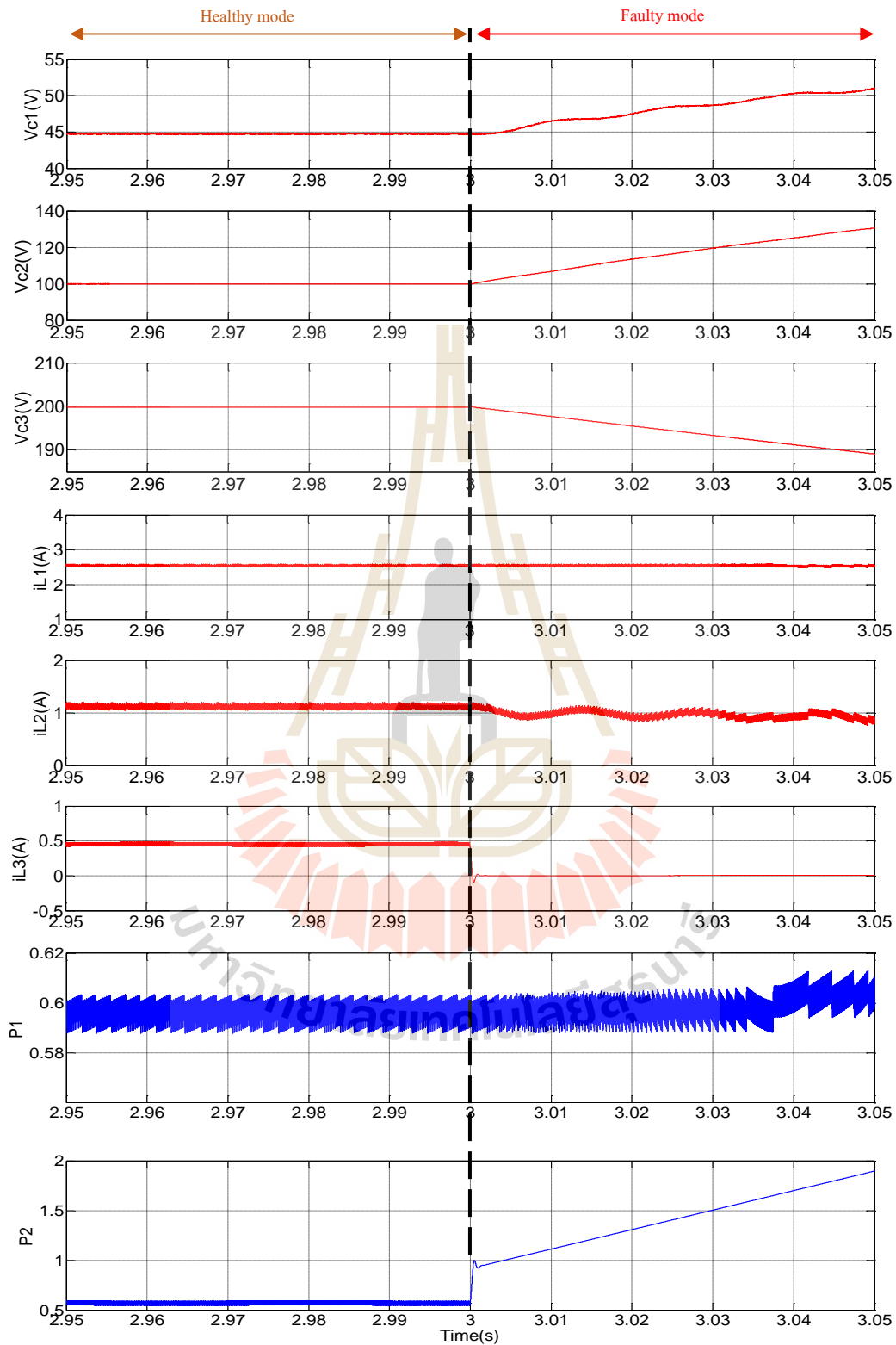
รูปที่ 5.4 พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_2$



รูปที่ 5.5 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรนี้เกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_2$



รูปที่ 5.6 พฤติกรรมการทำงานของวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$



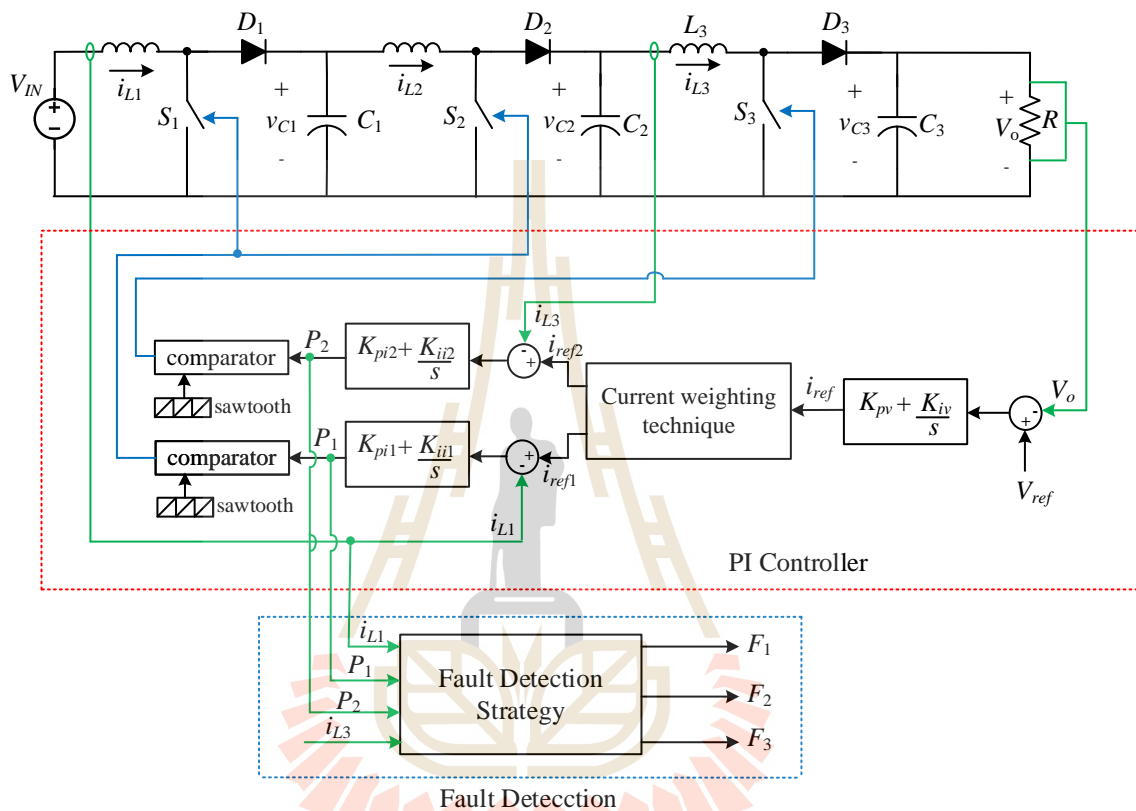
รูปที่ 5.7 ภาพขยายพฤติกรรมการทำงานของวงจรนี้เกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$

จากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้นขณะมีตัวควบคุมพีไอ ภายใต้การทำงานในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรทั้งสามกรณี พบว่าพฤติกรรมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงและเกิดการสั่นไหวขึ้นอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงสัญญาณควบคุมการสวิตช์ก็มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนเช่นกัน โดยมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันเมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์แต่ละตัว ดังนั้นจึงสามารถนำพฤติกรรมเหล่านี้ไปวิเคราะห์ เพื่อหาแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นและให้วงจรสามารถทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ

### 5.3 วิธีการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์

วิธีการตรวจจับความผิดปกติ (Fault Detection Strategy) แบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้นขณะมีตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ซึ่งจะพิจารณากรณีที่สวิตช์ตัวใดตัวหนึ่ง ( $S_1, S_2, S_3$ ) เกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร หลังจากที่เราตรวจพบว่าสวิตช์ตัวใดเกิดความผิดปกติจะทำให้สวิตช์ตัวสำรอง ( $S'_1, S'_2, S'_3$ ) ที่ต่อขนานกับสวิตช์ที่เปิดวงจรทำงานแทนทันที เพื่อให้วงจรสามารถทำงานต่อไปได้อย่างต่อเนื่องภายใต้ความผิดปกติดังกล่าว (Fault Tolerance) โดยวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้นขณะมีตัวควบคุมพีไอ จะอาศัยการพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของวงจрдังกล่าว เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่อาจเกิดขึ้นกับสวิตช์แต่ละตัว จากการสังเกตการทำงานของวงจรพบว่าในการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  และ  $S_3$  สามารถอาศัยพฤติกรรมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  ตามลำดับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยกระแสทั้งสองนี้จะทราบค่าได้จากตัวตรวจจับกระแสเพื่อใช้ในกระบวนการควบคุมอยู่ก่อนแล้ว ในขณะที่การตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_2$  ไม่สามารถทราบค่า  $i_{L2}$  ได้เนื่องจากไม่มีตัวตรวจจับกระแสสำหรับวัฏกระแส  $i_{L2}$  ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  จึงจำเป็นต้องอาศัยพฤติกรรมสัญญาณควบคุมการสวิตช์  $P_1$  และ  $P_2$  รวมถึงกระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  เข้าช่วยในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ในการพิจารณาค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะดำเนินการหาค่าความชันปกติ (Slope Normalization) ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  โดยจะนำค่าความชันปกติดังกล่าวร่วมกับสัญญาณควบคุมการสวิตช์ เพื่อพิจารณาว่าเกิดความผิดปกติ ( $F_1, F_2, F_3$ ) ที่สวิตช์ตัวใด

หลังจากนั้นจะดำเนินการสั่งให้สวิตช์ตัวที่ได้สำรองกับสวิตช์ตัวที่เกิดความผิดปกติให้สามารถทำงานต่อได้  
อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นมีความคงทนต่อความผิดปกติ สามารถ  
ทำงานต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้



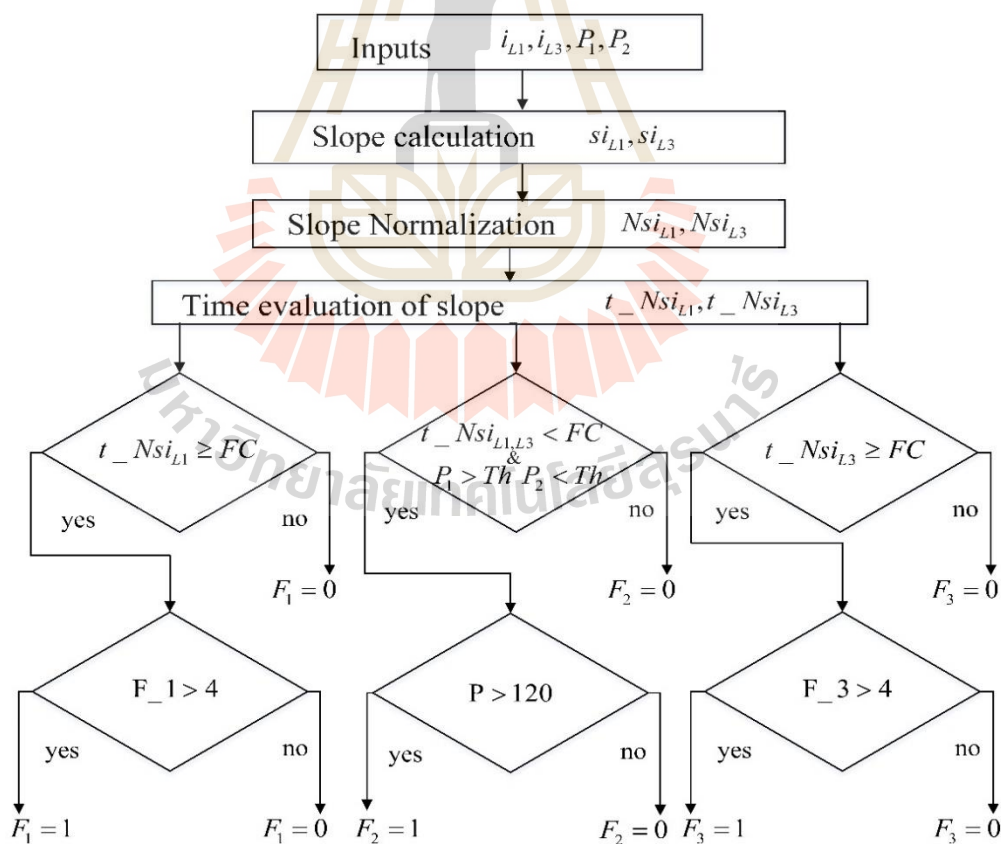
รูปที่ 5.8 โครงสร้างวงจรที่มีตัวควบคุมและวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร

จากรูปที่ 5.8  $F_1$ ,  $F_2$  และ  $F_3$  คือ สถานะตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  ตามลำดับ โดยที่ “0” หมายถึง สถานะปกติ ในขณะที่ “1” หมายถึง สถานะเกิดความผิดปกติ ในกระบวนการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร จะนำค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  มาหาค่าความชันของกระแสดังกล่าว แสดงด้วย  $si_{L1}$  และ  $si_{L3}$  ตามลำดับ จากนั้นจึงนำไปหาค่าความชันปกติ  $Nsi_{L1}$  และ  $Nsi_{L3}$  เป็นลำดับต่อมา ซึ่งค่าความชันปกติสามารถหาได้จากสมการที่ (5-1) และ (5-2) โดยที่  $Nsi_{L1}$  และ  $Nsi_{L3}$  มีค่าเป็น 1 หรือ -1 เท่านั้น

$$Nsi_{L1} = \frac{si_{L1}}{|si_{L1}|} \quad (5-1)$$

$$Nsi_{L3} = \frac{si_{L3}}{|si_{L3}|} \quad (5-2)$$

จากนั้นจะพิจารณาว่าในหนึ่งคาบเวลาสวิตช์ (100µs) สำหรับความถี่สวิตช์ 10kHz ค่าความชันปกติของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวอยู่ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของวงจรในสภาวะใด โดยกรณีแรกเป็นสภาวะปกติ พบว่าในหนึ่งคาบเวลาจะมีค่าความชันปกติทั้ง 1 และ -1 เนื่องจากในขณะที่วงจรทำงานได้อย่างปกติกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในหนึ่งคาบการสวิตช์ในจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเสมอ และกรณีที่สองคือสภาวะเกิดความผิดปกติ โดยในหนึ่งคาบเวลาจะปรากฏค่าความชันปกติเป็น 1 หรือ -1 เพียงค่าเดียวเท่านั้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าในกระบวนการนี้เป็นการตรวจสอบว่ามีความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้าไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้น  $F_1$ ,  $F_2$  และ  $F_3$  จะแสดงสถานะเป็น “0” ซึ่งแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติ

โดยที่  $t\_Nsi_{L1}$  คือ จำนวนจุดข้อมูลของค่าความชันปกติของกระแส  $i_{L1}$  ที่มีค่าเป็น -1 หรือ 1 เพียงค่าเดียวในหนึ่งคาบเวลาสวิตช์

$t\_Nsi_{L3}$  คือ จำนวนจุดข้อมูลของค่าความชันปกติของกระแส  $i_{L3}$  ที่มีค่าเป็น -1 หรือ 1 เพียงค่าเดียวในหนึ่งคาบเวลาสวิตช์

$FC$  คือ จำนวนจุดข้อมูล sampling ในหนึ่งคาบเวลาการสวิตช์

$F_1$  คือ จำนวนคาบเวลาที่เกิดความผิดพลาดในสวิตช์  $S_1$

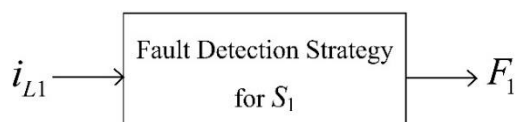
$F_3$  คือ จำนวนคาบเวลาที่เกิดความผิดพลาดในสวิตช์  $S_3$

$P$  คือ จำนวนจุดข้อมูลของสัญญาณควบคุมสวิตช์  $P_1$  ที่มีค่ามากกว่า 0.8

พิจารณาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดดังแสดงในรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่า การตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  จะอาศัยค่าความชันปกติ  $Nsi_{L1}$  ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$  โดยตรวจสอบจำนวนจุดข้อมูล  $t\_Nsi_{L1}$  ที่ปรากฏค่าความชันปกติค่าเดียวเปรียบเทียบกับจำนวนจุดข้อมูลในหนึ่งคาบการสวิตช์ ( $FC$ ) แสดงดังสมการที่ (44)

$$t\_Nsi_{L1} \geq FC \quad (5-3)$$

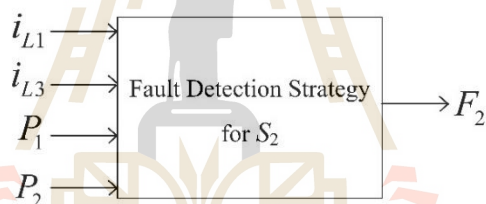
หากช่วงเวลาที่ค่าความชันปกติค่าเดียวยาวนานกว่าหนึ่งคาบการสวิตช์ คาดว่ามีความผิดพลาดแบบเปิดสวิตช์เกิดขึ้นที่สวิตช์  $S_1$  อย่างไรก็ตามเพื่อการระบุตำแหน่งสวิตช์ที่เกิดความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องแม่นยำ จะทำการตรวจสอบค่าความชันปกติของกระแส  $i_{L1}$  ต่อไปอีกสี่คาบเวลา หากค่าความชันปกติที่มีเพียงค่าเดียวดังกล่าวมีช่วงเวลาที่ยาวนานเกินกว่าสี่คาบเวลาการสวิตช์ แสดงว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นที่สวิตช์  $S_1$  อย่างแน่นอน ส่งผลให้สถานะการเกิดความผิดพลาด  $F_1 = 1$  และจะทำให้สวิตช์ตัวที่สำรองไว้ทำงานแทนทันที ทั้งนี้การพิจารณาตรวจจับความผิดพลาดถึงสี่คาบเวลาเพื่อลดความผิดพลาดในการตรวจจับความผิดพลาด โดยแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_1$  แสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 วิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_1$

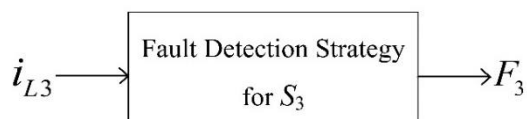


จากการสังเกตพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้นขณะมีตัวควบคุมพีไอ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_2$  พบว่าสามารถอาศัยค่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์  $P_1$  และ  $P_2$  เข้าช่วยในการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ดังกล่าว เมื่อพิจารณาแผนภาพการตรวจจับความผิดปกติที่แสดงในรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าหลังจากที่ตรวจสอบพบว่าค่าความชันปกติของทั้งกระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าทั้ง -1 และ 1 ในหนึ่งคาบเวลาการสวิตช์ แสดงว่าค่ากระแสทั้งสองอยู่ในกรณีสภาวะปกติ รวมทั้ง  $P_1$  มีค่ามากกว่าค่า  $Th$  ที่กำหนด และ  $P_2$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $Th$  ที่กำหนดไว้ ให้ทำการนับจำนวนจุดข้อมูลที่  $P_1$  มากกว่า  $Th$  ที่กำหนด หากจำนวนจุดข้อมูลดังกล่าวมากกว่า 120 จุดขึ้นไป แสดงว่าตรวจพบความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_2$  ส่งผลให้สถานะการเกิดความผิดปกติ  $F_2 = 1$  ทั้งนี้กำหนดให้  $Th$  คือ ค่าที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมความผิดปกติในสวิตช์  $S_2$  ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.8 ซึ่งแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์  $S_2$  แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 วิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์  $S_2$

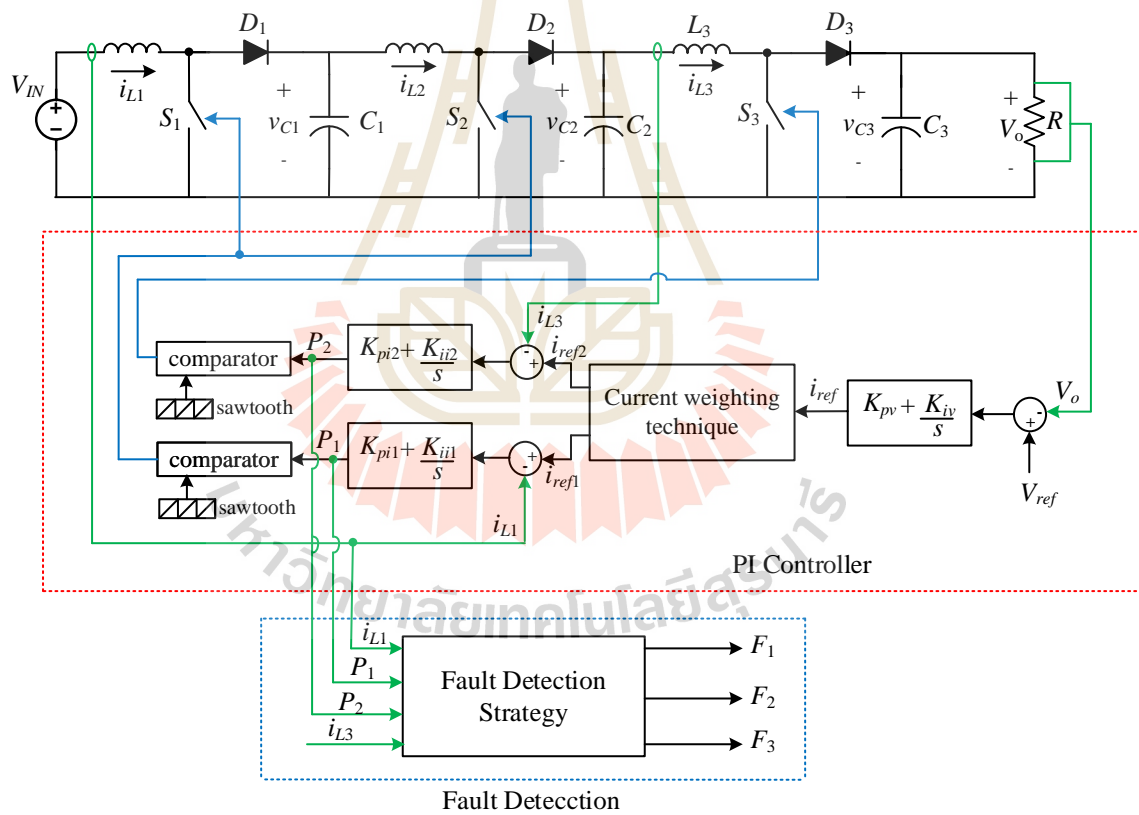
ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_3$  จะพิจารณาค่าที่คล้ายกับกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$  โดยจะอาศัยค่าความชันปกติของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L3}$  เมื่อค่าความชันปกติ  $Nsi_{L3}$  อยู่ในสภาวะเกิดความผิดปกติเกินสี่คาบเวลาแสดงว่าตรวจพบความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$  ส่งผลให้สถานะการเกิดความผิดปกติ  $F_3 = 1$  โดยแผนภาพวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$  แสดงดังรูปที่ 5.12 ซึ่งจะอาศัยเพียงค่ากระแส  $i_{L3}$  ในการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่สวิตช์  $S_3$



รูปที่ 5.12 วิธีการตรวจจับความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$

#### 5.4 จำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจร

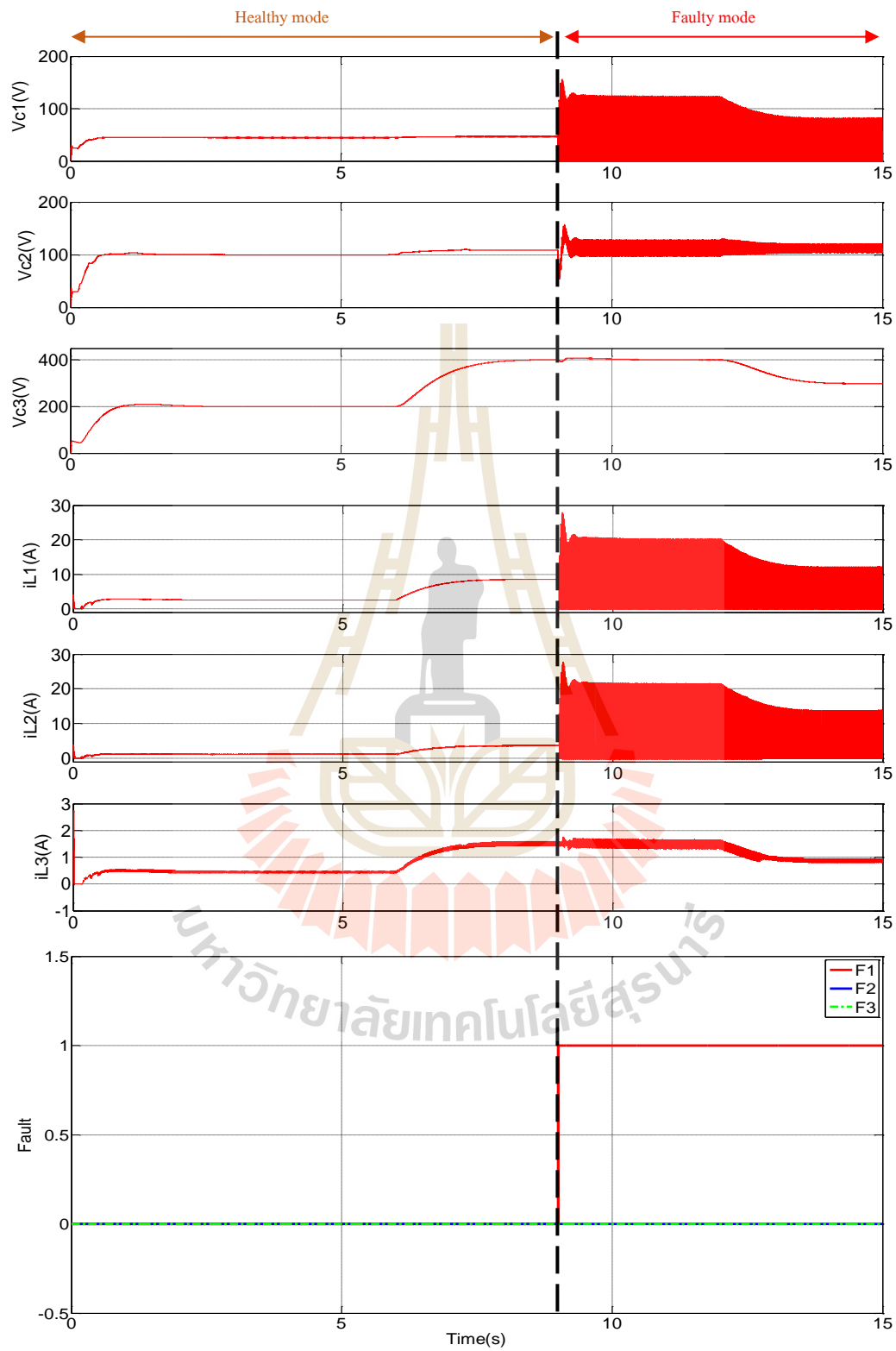
เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น ได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ในกรณีแรกทำการจำลองสถานการณ์เมื่อมีปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง โดยเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$  ในกรณีต่อมาทำการจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต โดยเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_2$  และในกรณีสุดท้ายทำการจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน โดยเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$  ทั้งนี้โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.13



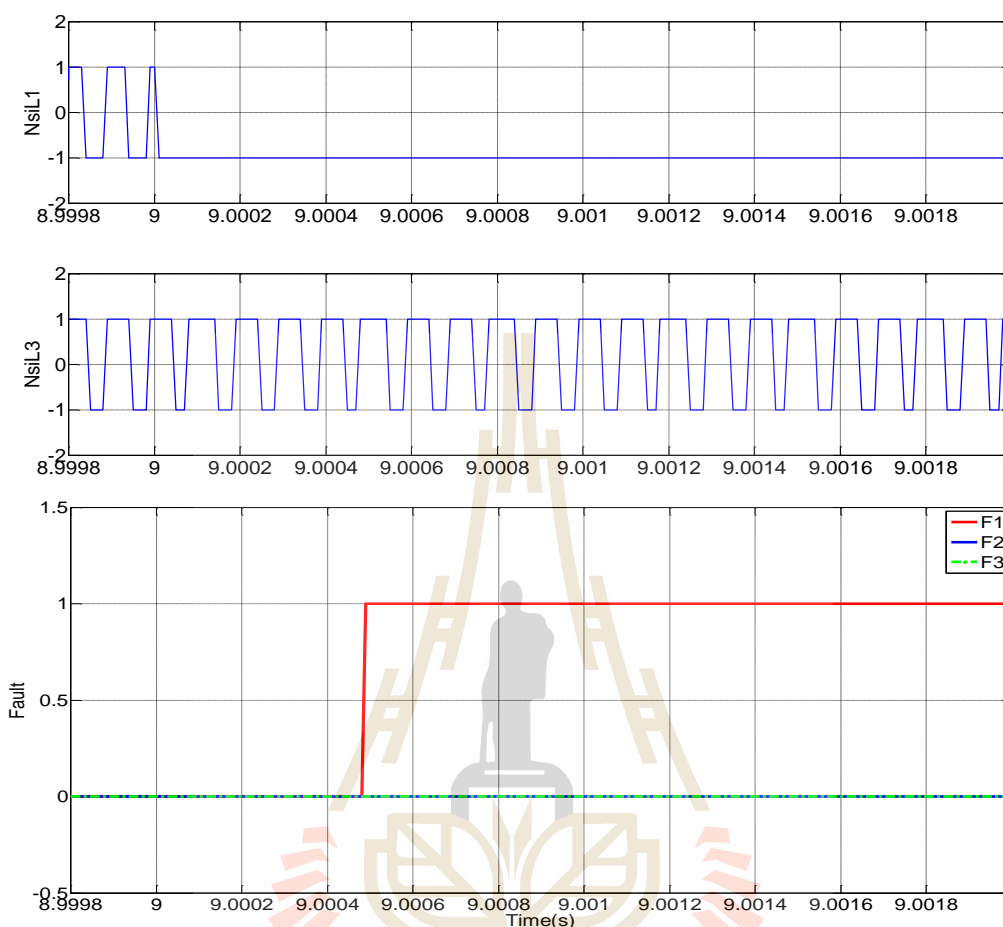
รูปที่ 5.13 โครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดปกติ

ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) เมื่อเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  ที่วินาทีที่ 9 โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 200V 400V และ 300V ที่วินาทีที่ 0, 6 และ 12 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.14 จะสังเกตเห็นได้ว่า ในช่วงก่อนเกิดความผิดปกติ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวมีผลสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน โดยตัวควบคุมสามารถควบคุมให้วงจรเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต ( $v_{C3}$ ) ให้ได้ 200V และเพิ่มเป็น 400V ที่วินาทีที่ 6 ตามต้องการ โดยวิธีการตรวจจับความผิดปกติไม่มีการตรวจจับผิดพลาดกรณีเปลี่ยนจุดการทำงานดังกล่าว และในช่วงหลังจากเกิดความผิดปกติหรือหลังจากวินาทีที่ 9 จะพบว่าแรงดัน  $v_{C1}$  และ  $v_{C2}$  กระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L2}$  มีการสั่นไหวเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมในสถานะอยู่ตัว เนื่องจากตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นพยายามที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ ทั้งนี้วิธีการตรวจจับความผิดปกติสามารถตรวจจับพบความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง โดยสังเกตได้จากค่าสัญญาณ Fault แสดง  $F1 = 1$  ซึ่งใช้แทนสถานะความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$  โดยค่าดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจาก “0” ในสภาวะปกติ เป็น “1” ในสภาวะที่เกิดความผิดปกติ แสดงดังรูปที่ 5.14

จากนั้นพิจารณาการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  ได้อาศัยค่ากระแส  $i_{L1}$  เพื่อหาค่าความชันปกติ  $Nsi_{L1}$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.15 พบว่าหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นที่สวิตช์  $S_1$  ในวินาทีที่ 9 ค่าความชันปกติ  $Nsi_{L1}$  จะมีค่าเป็น -1 เพียงค่าเดียว ซึ่งแตกต่างจากค่าความชันปกติ  $Nsi_{L3}$  ที่มีลักษณะเหมือนกับในสภาวะปกติ นั่นคือมีค่า -1 และ 1 ในแต่ละคาบเวลาการสวิตช์ ทั้งนี้ค่าความชันปกติ  $Nsi_{L1}$  มีลักษณะตรงตามวิธีการตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์  $S_1$  ที่พัฒนาขึ้น กล่าวคือมีค่าช่วงหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นเป็น 1 หรือ -1 เพียงค่าเดียวมากกว่า 4 คาบเวลา ดังนั้นจึงสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ โดยใช้เวลาในตรวจจับประมาณ 500 $\mu$ s หรือ 0.5ms และไม่มีการตรวจจับความผิดปกติที่ผิดพลาดในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

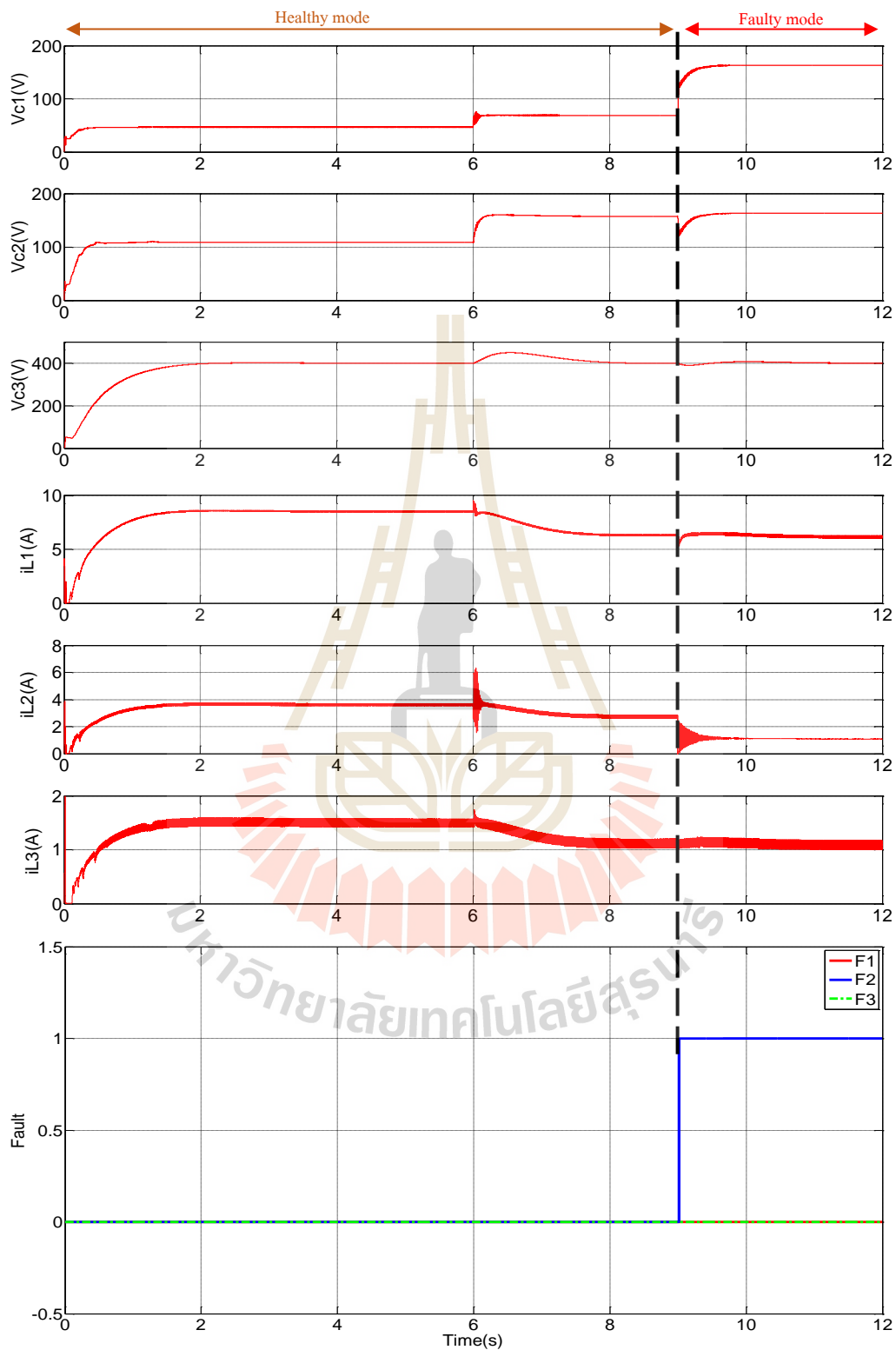


รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงและเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$

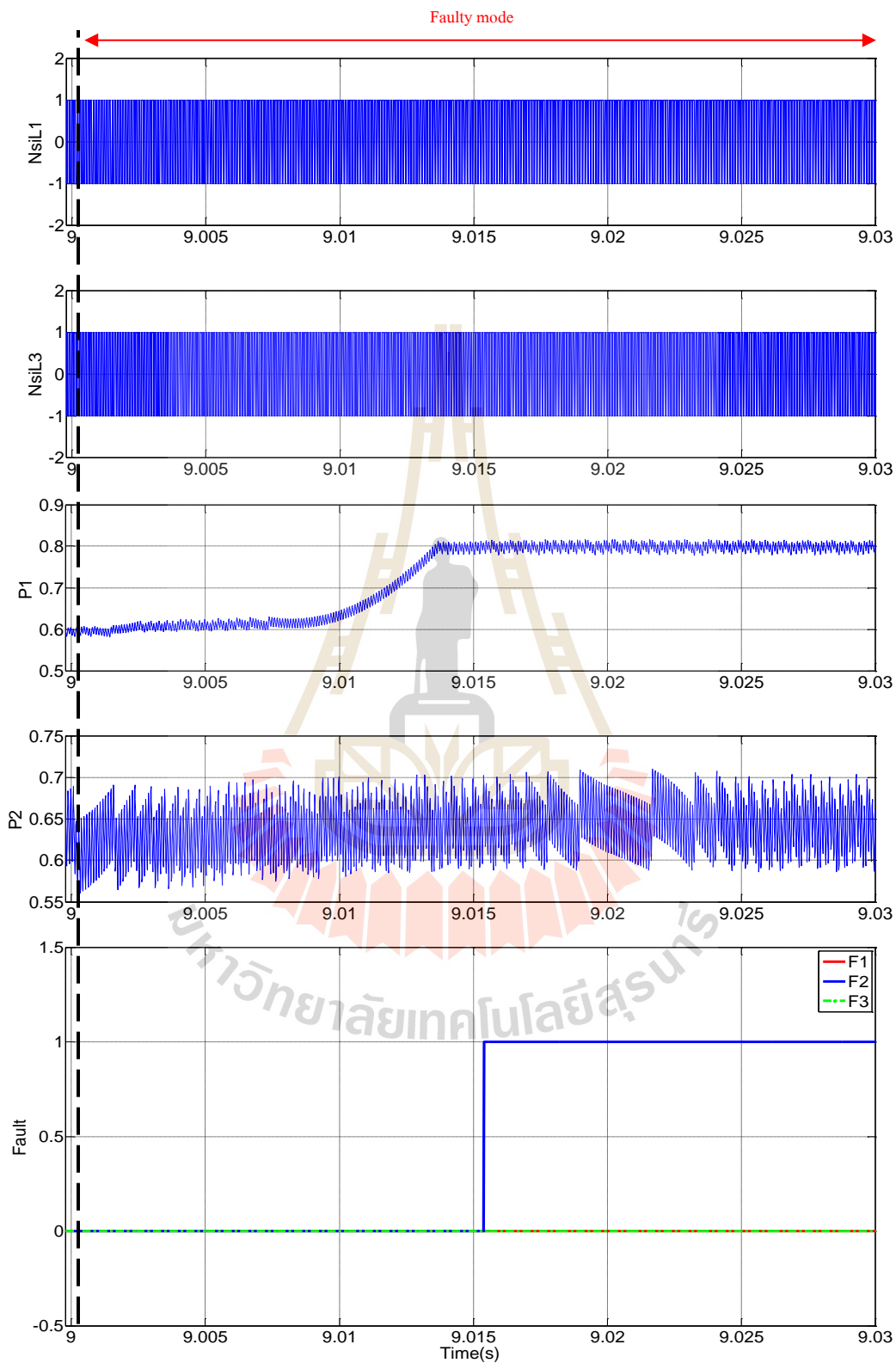


รูปที่ 5.15 การตรวจจับความผิดปกติเมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$

ในการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต ( $V_{IN}$ ) โดยในช่วงแรกแรงดันอินพุตเท่ากับ 20V และทำการปรับเปลี่ยนเป็น 30V ที่วินาทีที่ 6 จากนั้นกำหนดให้มีความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์  $S_2$  ในวินาทีที่ 9 ทั้งนี้กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400V ผลการจำลองสถานการณ์ดังแสดงในรูปที่ 5.16 จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวพบว่าในสภาวะการทำงานปกติตัวควบคุมพีไอที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการที่ 400V แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตที่วินาทีที่ 6 และเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่วินาทีที่ 9 จะสังเกตเห็นว่าแรงดัน  $v_{C1}$  จะมีการปรับตัวเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสวิตช์  $S_2$  หยุดทำงาน ส่วนแรงดันเอาต์พุต ( $v_{C3}$ ) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และยังคงสามารถรักษาระดับแรงดันให้ได้ตามต้องการ กระแส  $i_{L2}$  มีการเปลี่ยนแปลงค่าลดลง และเกิดการสั่นไกวอย่างมากหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้น



รูปที่ 5.16 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตและเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_2$

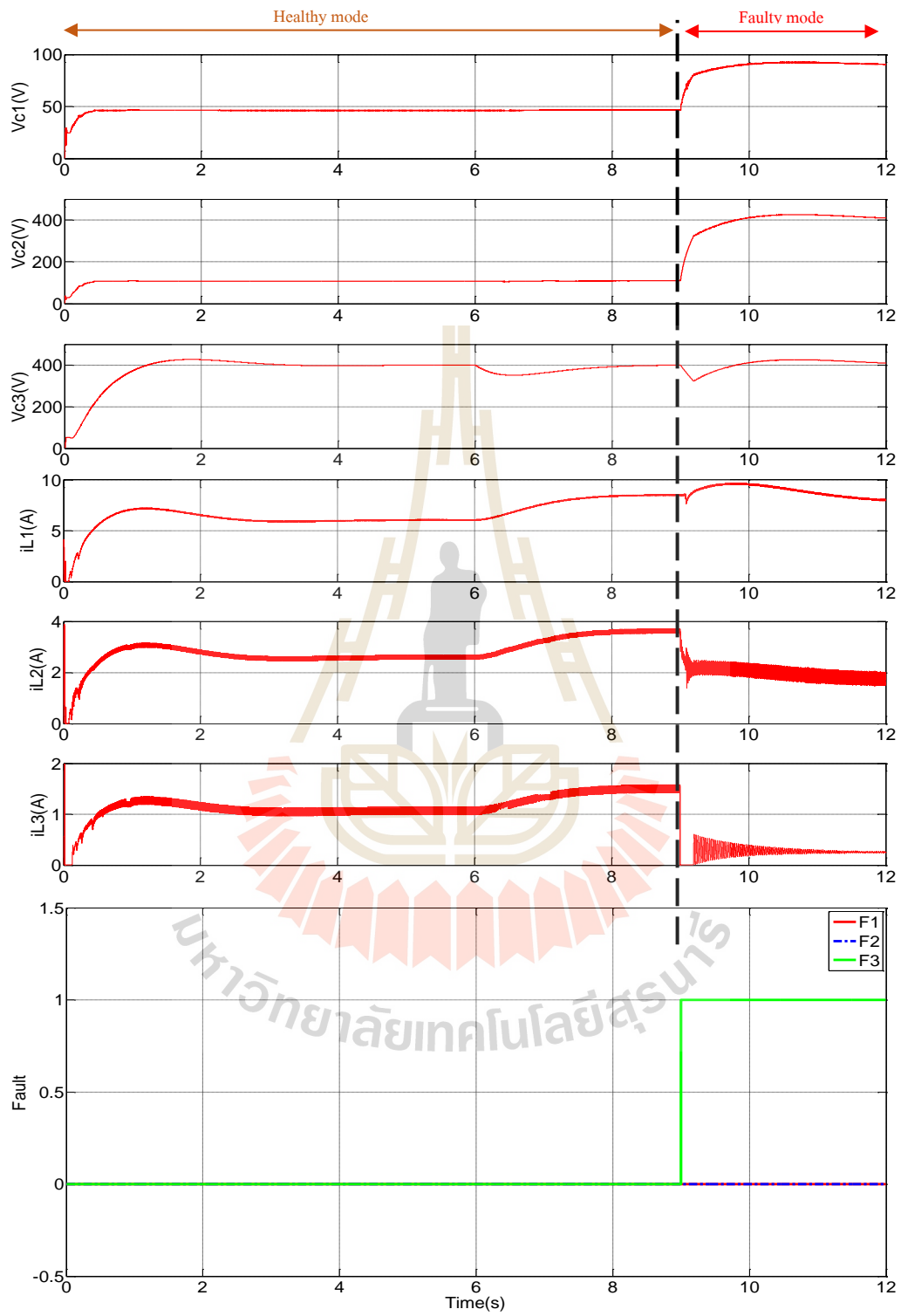


รูปที่ 5.17 การตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_2$

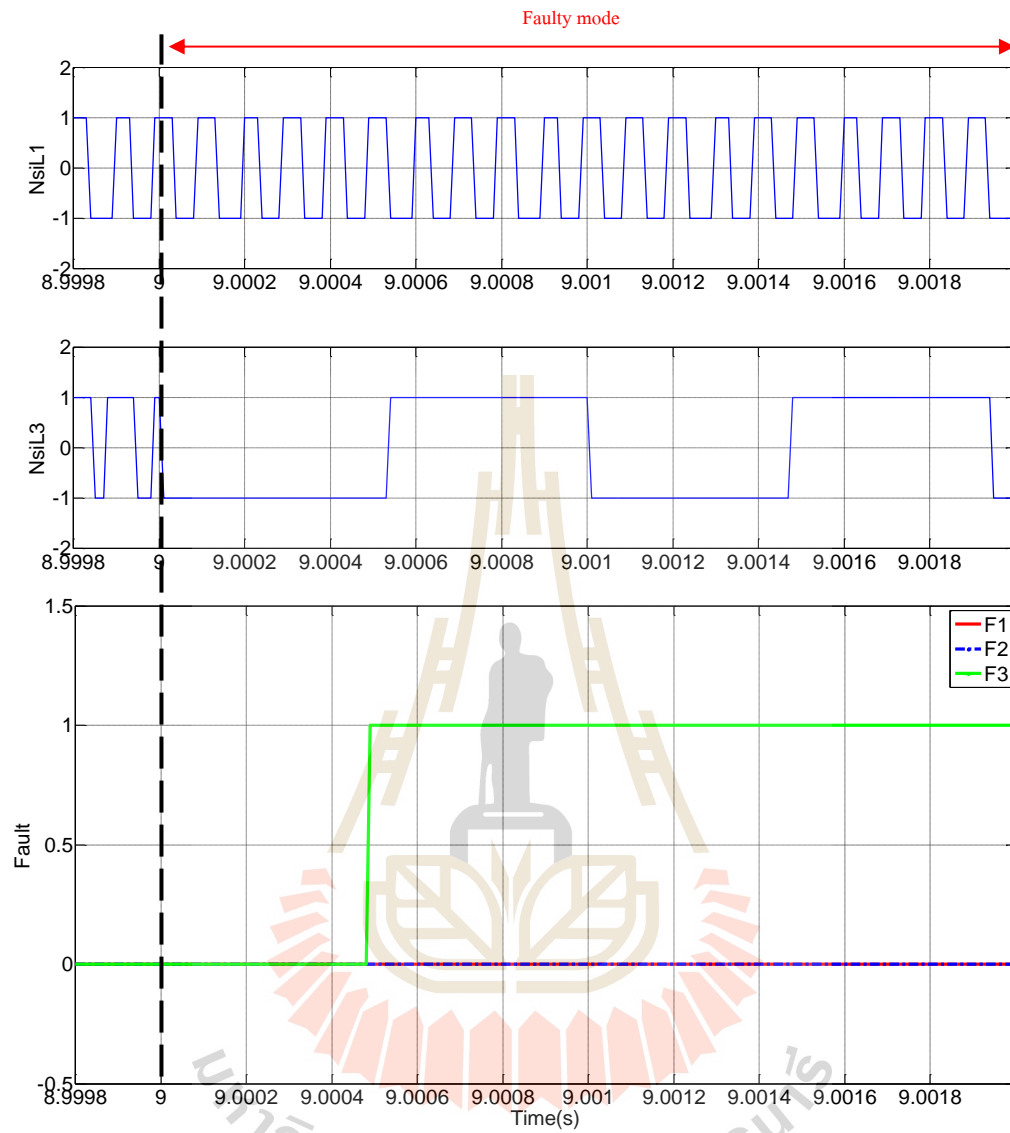
ในการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรในสวิตช์  $S_2$  จะอาศัยค่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์  $P_1$ ,  $P_2$  ค่าความชันปกติ  $Nsi_{L1}$  และ  $Nsi_{L3}$  โดยจากรูปที่ 5.17 แสดงให้เห็นว่าค่าความชันปกติ  $Nsi_{L1}$  และ  $Nsi_{L3}$  มีค่าทั้ง 1 และ -1 ในหนึ่งคาบเวลาหลังจากเกิดความผิดพลาดขึ้นหรือมีลักษณะเหมือนในสภาวะปกติ ส่วนค่าสัญญาณควบคุมการสวิตช์  $P_1$  มีค่าที่มากกว่า 0.8 เนื่องจากสวิตช์  $S_2$  หยุดทำงาน จึงส่งผลให้สวิตช์  $S_1$  รับภาระหน้าที่ที่หนักขึ้น และ  $P_2$  มีค่าที่น้อยกว่า 0.8 หรือมีค่าใกล้เคียงค่าเดิมในสภาวะปกติ จากค่าดังกล่าวมีลักษณะตามวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรในสวิตช์  $S_2$  ที่พัฒนาขึ้น ดังนั้นจึงสามารถตรวจจับความผิดพลาดโดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 15ms ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดพลาดในสวิตช์  $S_2$  จะใช้เวลาตรวจจับนานกว่าสวิตช์ตัวอื่น ๆ เนื่องจากมีเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดพลาดมากกว่าสวิตช์ตัวอื่น ๆ ทั้งนี้ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว รวมถึงไม่มีการตรวจจับความผิดพลาดที่ผิดพลาดภายใต้สถานะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป

ผลการจำลองสถานการณ์การปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน ( $R$ ) เมื่อกำหนดให้โหลดตัวต้านทานเท่ากับ  $3200\Omega$  และ  $1600\Omega$  ที่วินาทีที่ 0 และ 6 ตามลำดับ และเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_3$  ที่วินาทีที่ 9 แสดงดังรูปที่ 5.18 ทั้งนี้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 400V จะเห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นที่มีตัวควบคุมพีไอ สามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต ( $v_{C3}$ ) ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 400V ได้ตามต้องการได้ จากนั้นพิจารณาวงจรในสภาวะเกิดความผิดพลาดหรือหลังจากวินาทีที่ 9 จะสังเกตเห็นว่าแรงดัน  $v_{C1}$  และ  $v_{C2}$  มีการปรับตัวเพิ่มขึ้นจนถึง 400V เนื่องจากสวิตช์  $S_3$  เปิดวงจร และแรงดันเอาต์พุต ( $v_{C3}$ ) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในสถานะชั่วคราวก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมที่ 400V ในสถานะอยู่ตัว เมื่อพิจารณากระแส  $i_{L2}$  พบว่ามีการลดลงและเกิดการสั้นไกว ในขณะที่กระแส  $i_{L3}$  มีค่าลดลงและเกิดการสั้นไกวอย่างชัดเจนเช่นกัน ในการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรในสวิตช์  $S_3$  จะอาศัยค่าความชันปกติ  $Nsi_{L3}$  ในการตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยจากรูปที่ 5.19 แสดงให้เห็นว่าค่าความชันปกติ  $Nsi_{L3}$  มีค่าเป็น 1 หรือ -1 เพียงค่าเดียวในหนึ่งคาบเวลาการสวิตช์ ซึ่งมีลักษณะตรงตามวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_3$  ที่พัฒนาขึ้น ดังนั้นจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดสามารถตรวจจับได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ  $500\mu s$  หรือ 0.5ms รวมถึงแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการภายใต้สภาวะเกิดความผิดพลาด





รูปที่ 5.18 ผลการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงโหลดตัวด้านทานเมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$

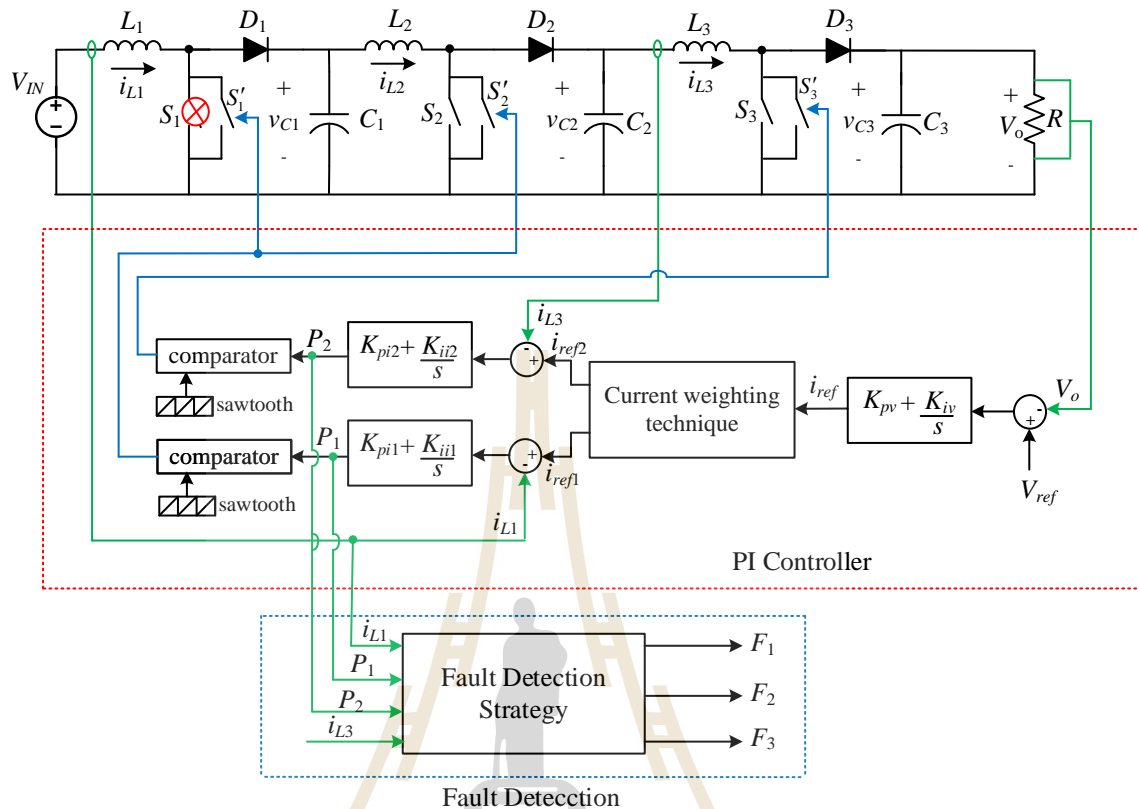


รูปที่ 5.19 การตรวจจับความผิดปกติกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$

## 5.5 การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด

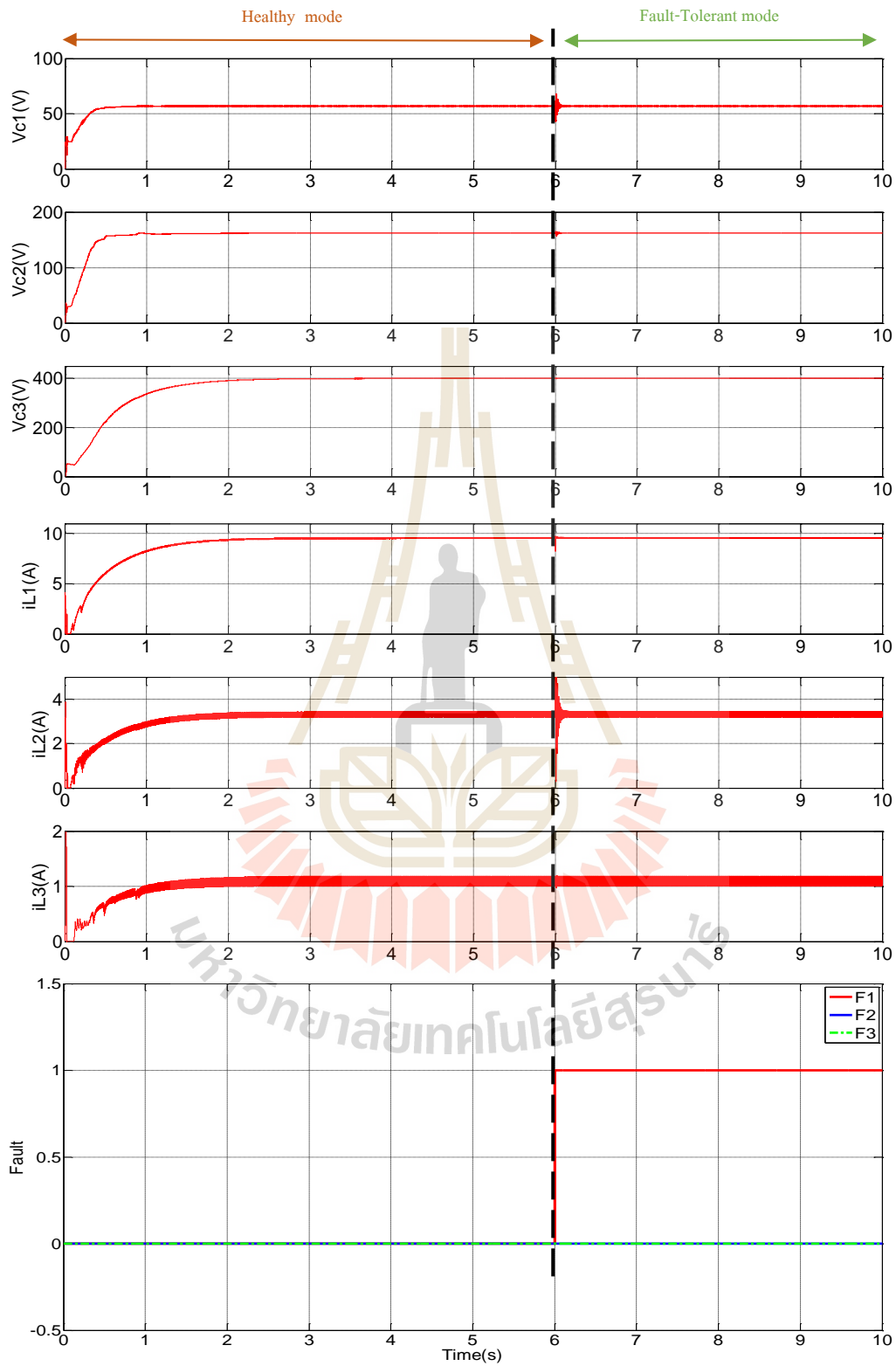
ดำเนินการจำลองสถานการณ์วงจรสำหรับแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด โดยทำการตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องและยังคงทำให้วงจรดังกล่าวสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อมีสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพลาดขึ้นในวงจร โดยหลังจากตรวจพบว่าสวิตช์ตัวใดเกิดความผิดพลาดขึ้นจะทำการสั่งให้สวิตช์ตัวสำรองทำงานแทนทันที เพื่อให้วงจรสามารถทำงานต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง โดยที่อุปกรณ์ในวงจรไม่ต้องรับภาระหนักจนเกินไป ซึ่งสามารถสังเกตภาวะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในวงจรได้จากผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามชั้น เมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  โดยสวิตช์สำรอง  $S_1'$  จะถูกสั่งให้ทำงานแทนทันทีหลังจากตรวจพบความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งโครงสร้างวงจรสำหรับจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.20 โดยจะพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $v_{C1}, v_{C2}, v_{C3}$ ) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}$ ) รวมถึงสถานะการตรวจจับความผิดพลาด ( $F_1, F_2, F_3$ ) ทั้งการทำงานในสภาวะปกติ (Healthy mode) สภาวะเกิดความผิดพลาด (Faulty mode) และสภาวะความคงทนต่อความผิดพลาด (Fault-Tolerant mode) โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400V และแรงดันอินพุตเท่ากับ 20V

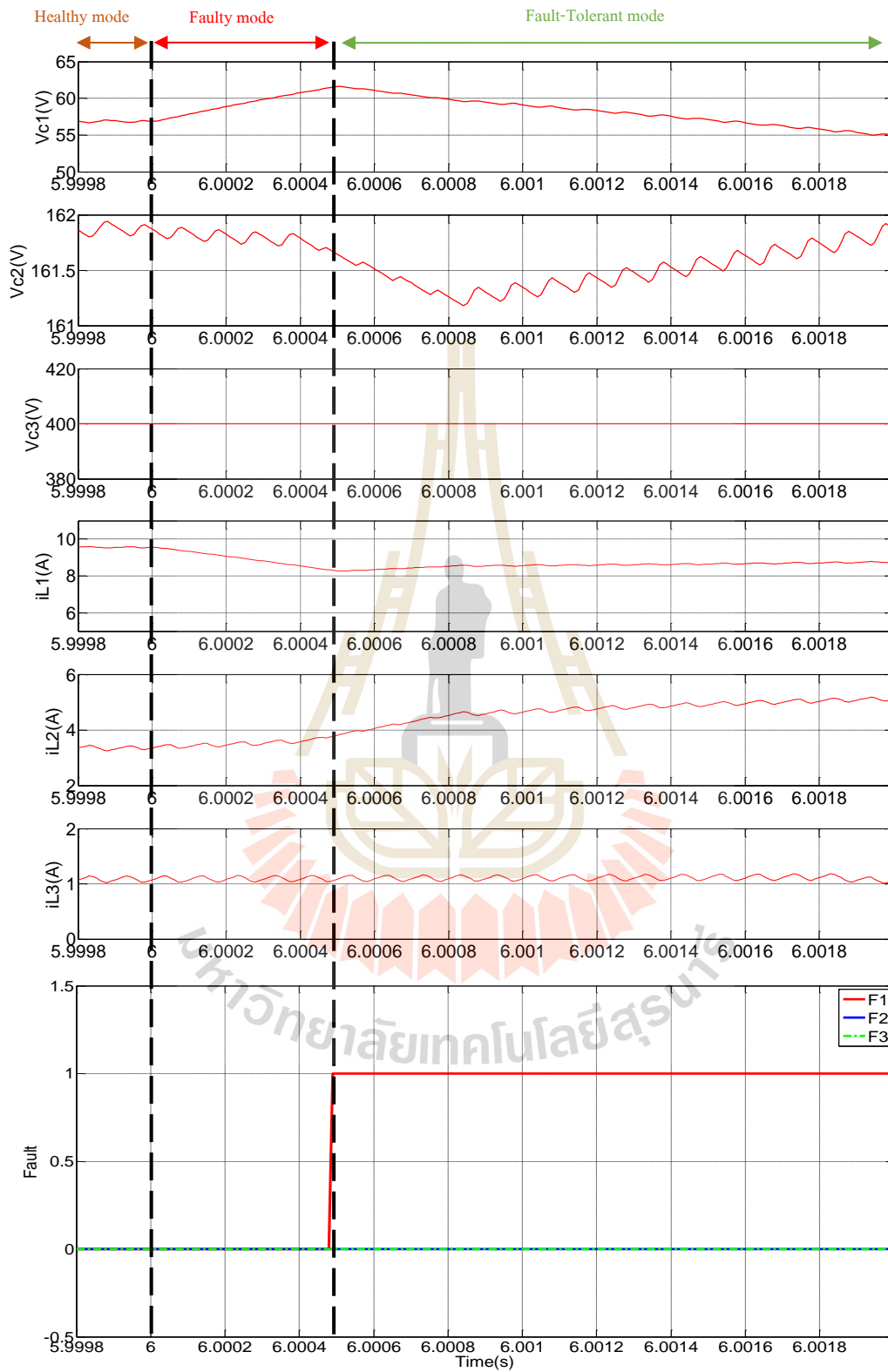


รูปที่ 5.20 โครงสร้างวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดพลาดที่  $S_1$

จากการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_1$  ที่วินาทีที่ 6 โดยใช้สวิตช์สำรอง  $S'_1$  แสดงดังรูปที่ 5.21 สังเกตพบว่าแรงดัน  $v_{C1}$  กระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L2}$  มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหลังจากเกิดความผิดพลาดขึ้น นอกจากนี้พบว่าแรงดัน  $v_{C2}$   $v_{C3}$  และกระแส  $i_{L3}$  มีความใกล้เคียงกับในสภาวะปกติ ซึ่งจากรูปที่ 5.22 แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  ที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาประมาณ  $500\mu\text{s}$  หรือ  $0.5\text{ms}$  จึงส่งผลให้สามารถสั่งสวิตช์สำรอง  $S'_1$  ทำงานแทนได้อย่างรวดเร็วทันที โดยที่สวิตช์สำรอง  $S'_1$  ได้รับสัญญาณควบคุมการทำงานจาก  $P_1$  จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_1$  จะมีผลกระทบต่อวงจรเพียงเล็กน้อย และวงจรสามารถทำงานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

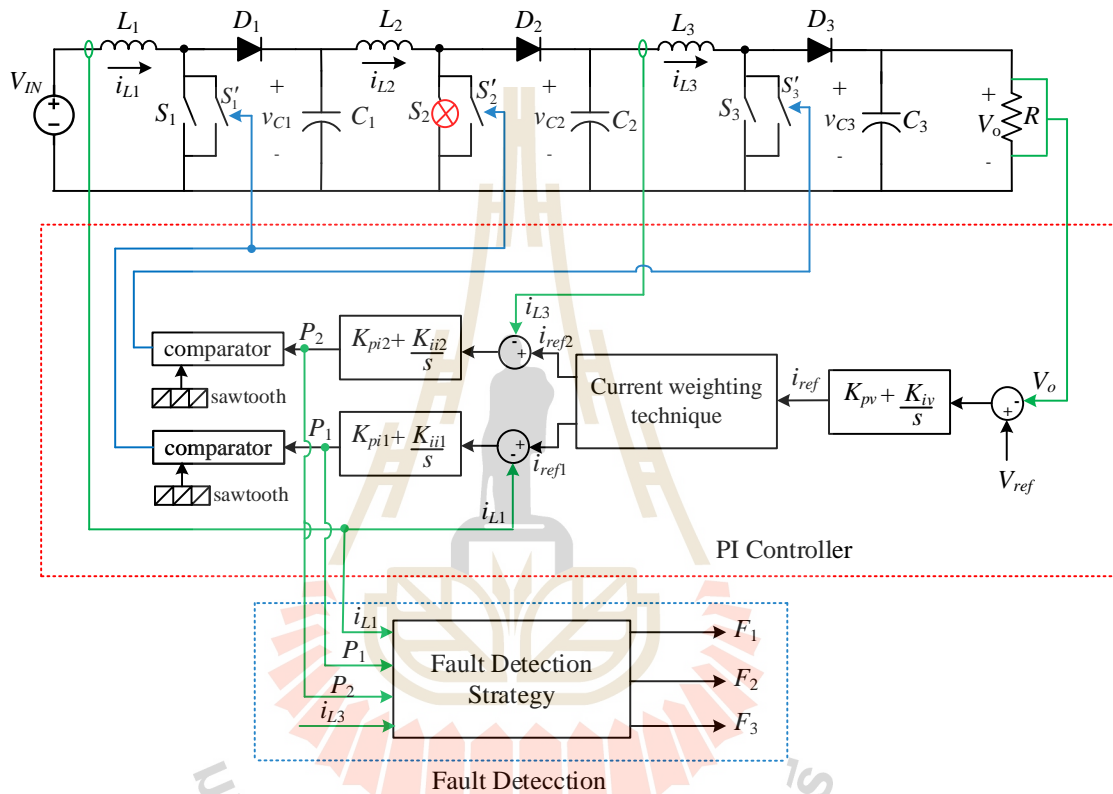


รูปที่ 5.21 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$  ในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ



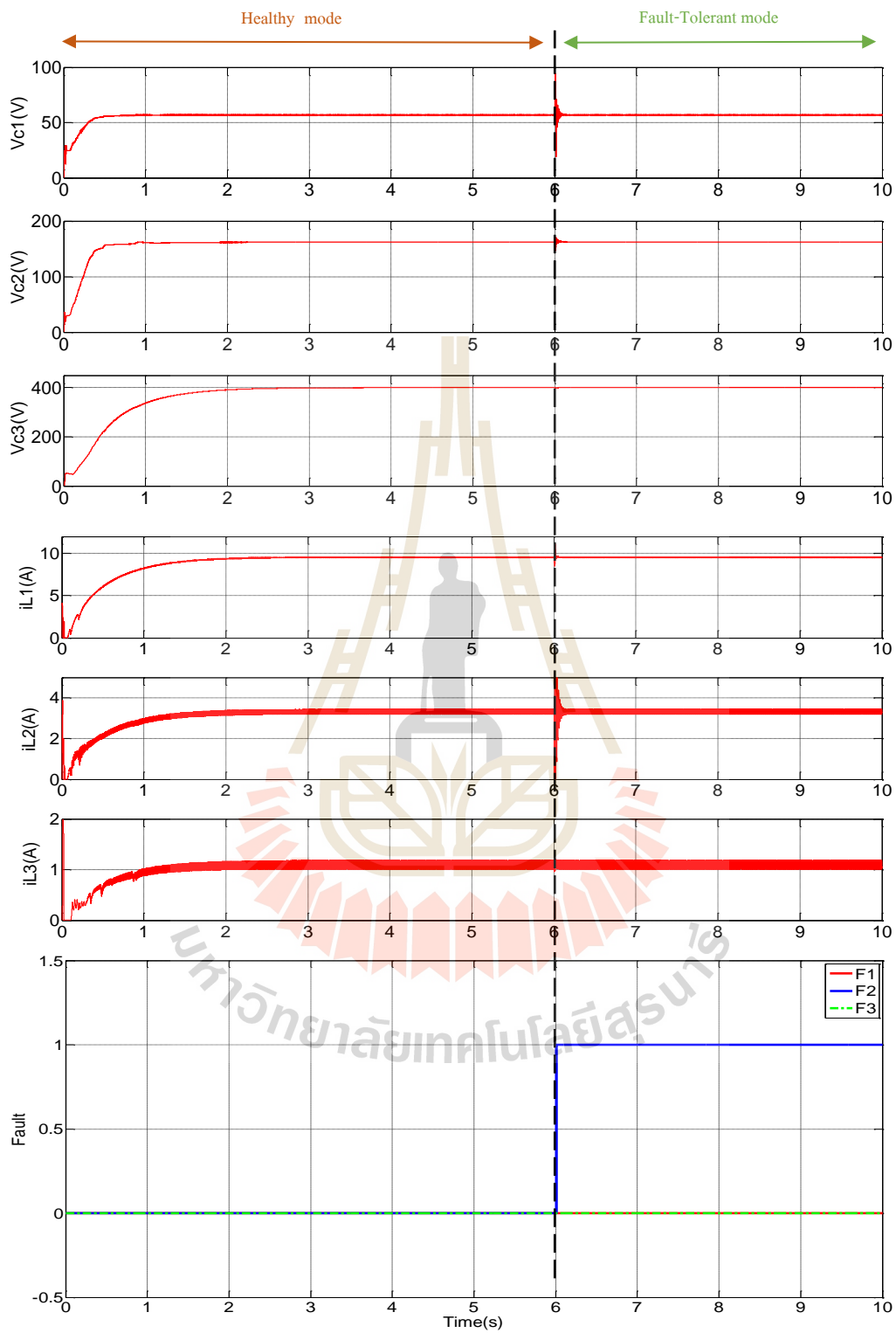
รูปที่ 5.22 ภาพขยายกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_1$  ในสภาวะคงทนต่อความผิดพลาด

การจำลองสถานการณ์ฉนวนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_2$  ที่วินาทีที่ 6 โดยให้สวิตช์สำรอง  $S_2'$  ทำงานแทนทันที เมื่อมีการตรวจจับความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_2$  โครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.23 โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400V



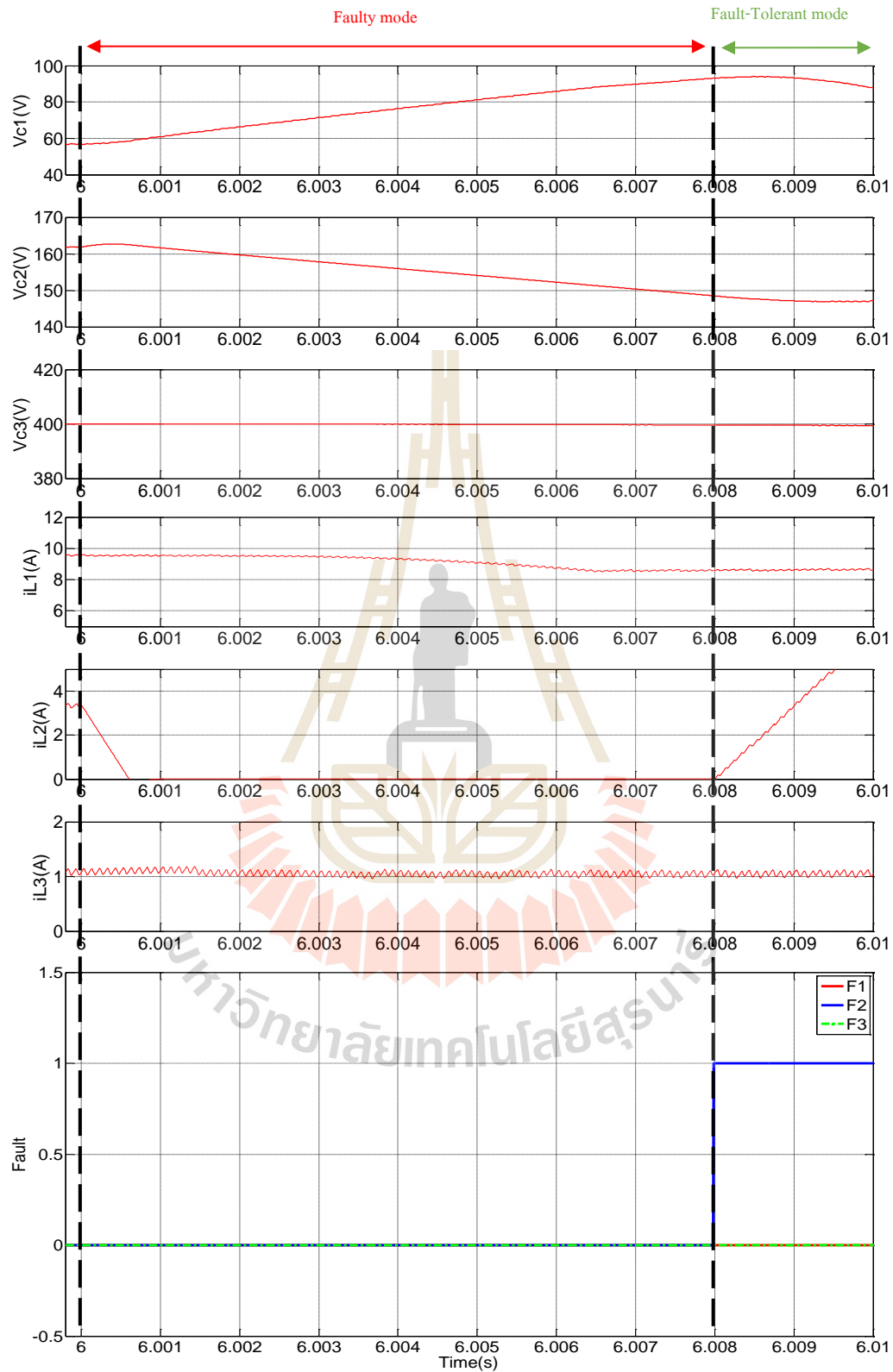
รูปที่ 5.23 โครงสร้างวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดพลาดที่  $S_2$

ผลการจำลองสถานการณ์ฉนวนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_2$  ที่วินาทีที่ 6 โดยใช้สวิตช์สำรอง  $S_2'$  แสดงดังรูปที่ 5.24 พบว่าแรงดัน  $v_{C1}$  กระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L2}$  มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหลังจากเกิดความผิดพลาดขึ้น และในส่วน  $v_{C2}$   $v_{C3}$  และ  $i_{L3}$  มีผลที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับในสภาวะปกติ โดยมีลักษณะคล้ายกับกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_1$  จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_2$  ที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาประมาณ 8ms แสดงดังรูปที่ 5.25



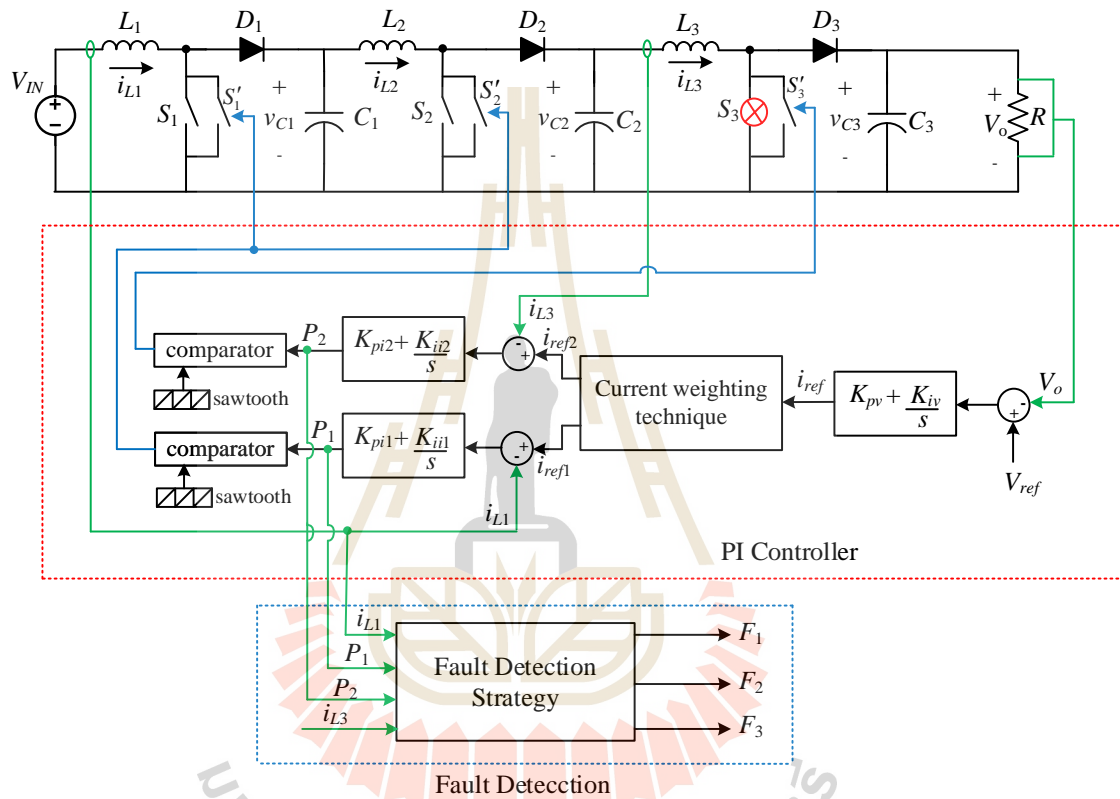
รูปที่ 5.24 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_2$  ในสภาวะคงทนต่อความผิดพลาด





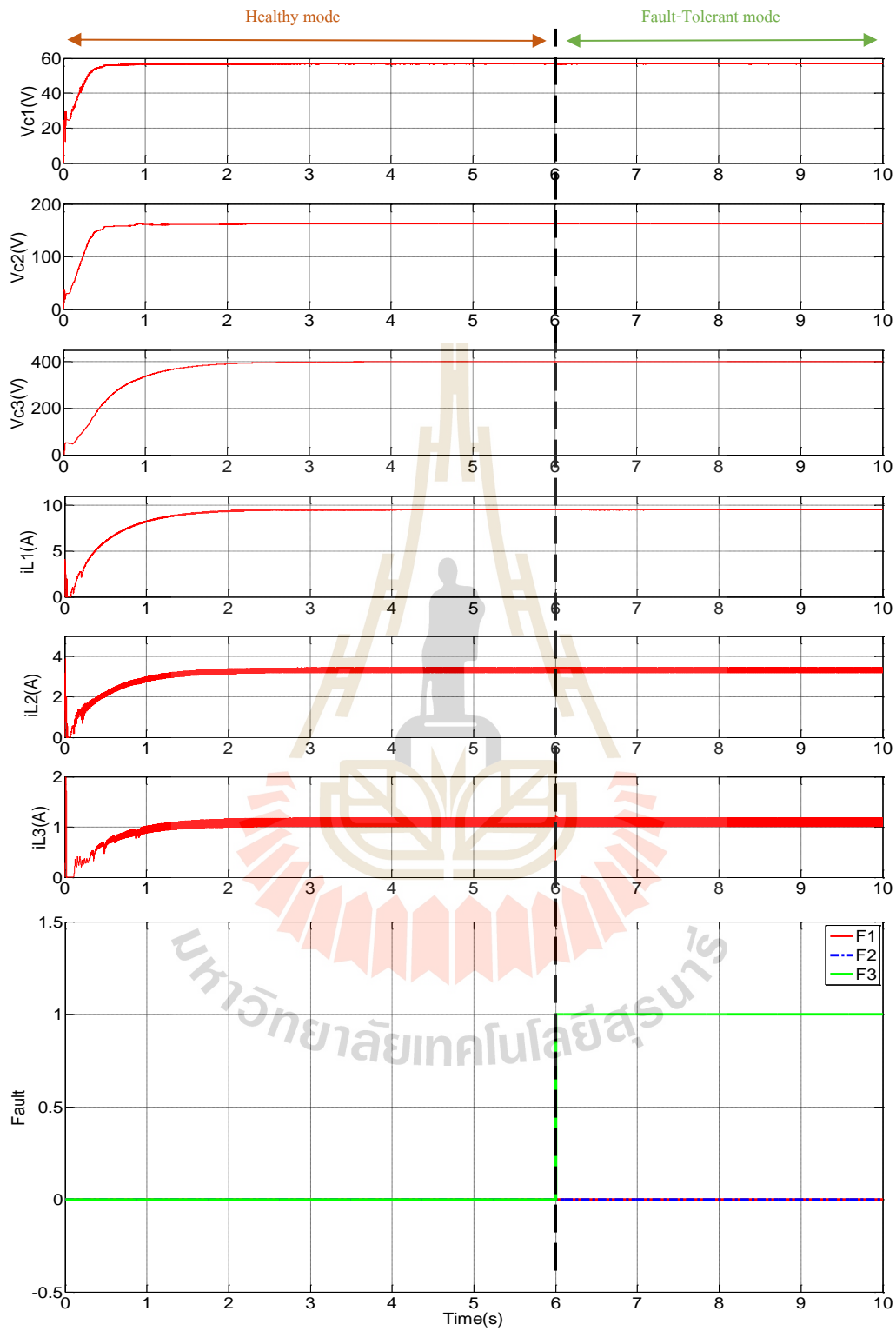
รูปที่ 5.25 ภาพขยายกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_2$  ในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

ในการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$  ที่วินาทีที่ 6 แล้วใช้สวิตช์สำรอง  $S'_3$  ทำงานแทนหลังจากเกิดความผิดปกติ จะอาศัยโครงสร้างสำหรับการจำลองสถานการณ์ที่แสดงดังรูป 5.26 โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง เท่ากับ 400V

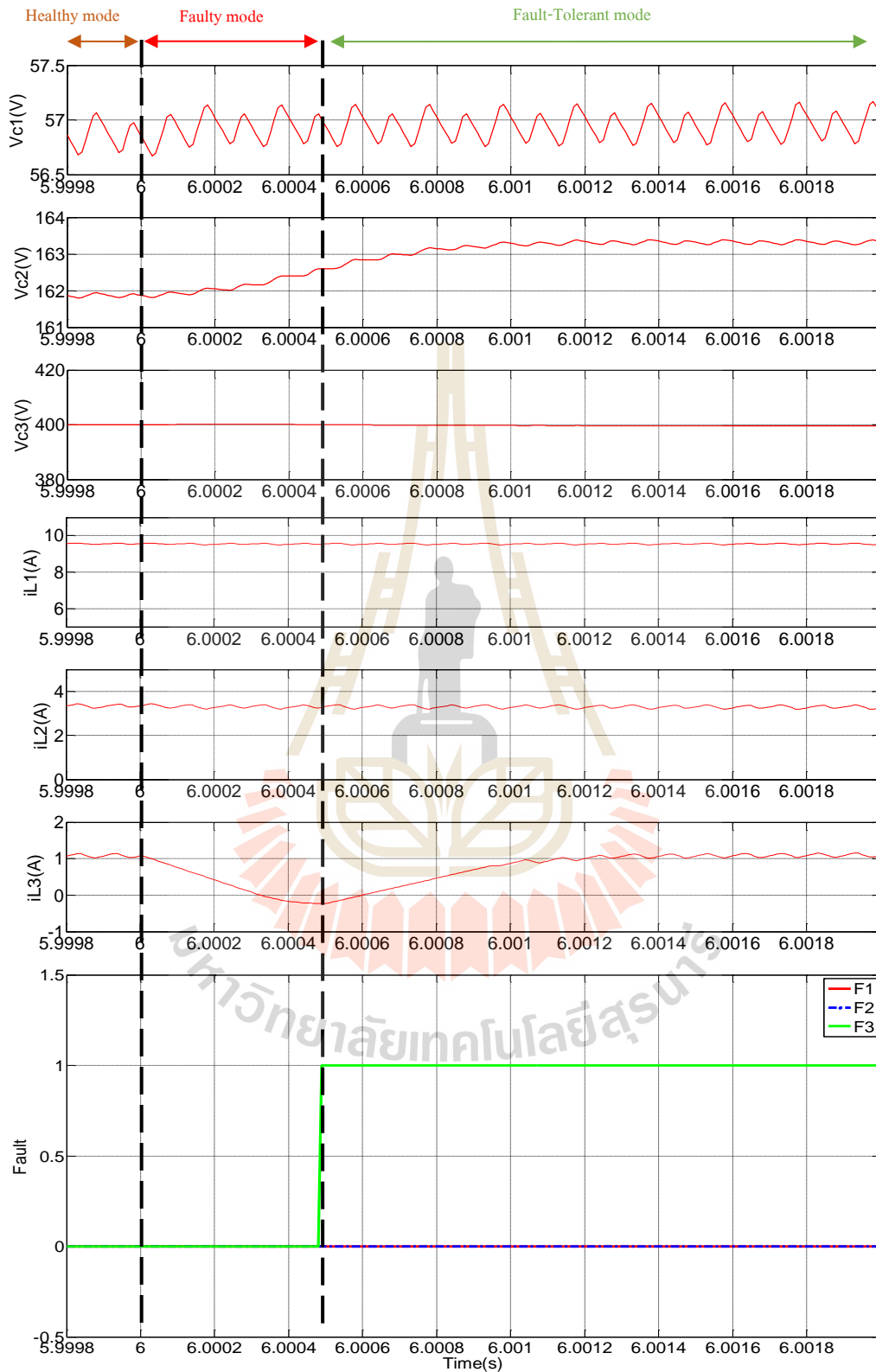


รูปที่ 5.26 โครงสร้างวงจรสำหรับกรณีเกิดความผิดปกติที่  $S_3$  ภายใต้สภาวะคงทนต่อความผิดปกติ

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดปกติ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$  ที่วินาทีที่ 6 และใช้สวิตช์สำรอง  $S'_3$  แสดงดังรูปที่ 5.27 ดังนั้นเมื่อตรวจพบความผิดปกติจะเห็นได้ว่าทั้งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลังจากเกิดความผิดปกติขึ้นมีผลที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับในสภาวะปกติ แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_3$  ที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยใช้เวลาประมาณ  $500\mu\text{s}$  หรือ  $0.5\text{ms}$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.28 จึงทำให้มีผลกระทบต่อวงจรเพียงเล็กน้อย และวงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อเนื่อง



รูปที่ 5.27 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_3$  ในสภาวะคงทนต่อความผิดปกติ



รูปที่ 5.28 ภาพขยายกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_3$  ในสภาวะคงทนต่อความผิดพลาด

## 5.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นขณะมีตัวควบคุม เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรภายใต้สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ เพื่อนำมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรถูกกล่าว ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นอาศัยการพิจารณาค่าความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งและสาม ร่วมกับการพิจารณาสัญญาณควบคุมการสวิตช์ที่ได้จากกลุ่มควบคุมกระแสทั้งสองรูป จากผลการจำลองสถานการณ์วิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นขณะมีตัวควบคุม แสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยสวิตช์สำรองจะทำงานแทนสวิตช์ที่เกิดความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นสามารถทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมีความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น

## บทที่ 6

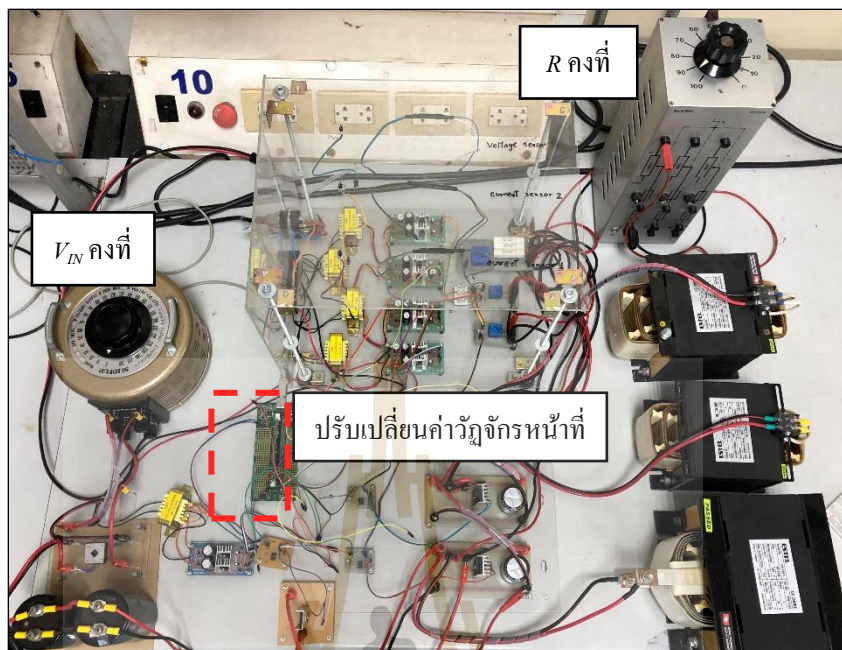
### ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น

#### 6.1 บทนำ

ในบทนี้จะดำเนินการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นขณะไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุมพีไอ เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ รวมถึงวิธีการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร และดำเนินการให้สวิตช์สำรองทำงานแทนสวิตช์ที่เกิดความผิดพร่องทันทีที่ตรวจจับพบความผิดพร่อง เพื่อให้วงจรดังกล่าวมีความคงทนต่อความผิดพร่อง สามารถทำงานต่อไปได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการทดสอบชุดทดสอบ จะพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์กับผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ณ จุดการทำงานต่าง ๆ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้ การทดสอบชุดทดสอบขณะที่ไม่มีตัวควบคุม การทดสอบชุดทดสอบขณะใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ ภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป และการทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์แต่ละตัว โดยใช้วิธีการตรวจจับความผิดพร่องที่พัฒนาขึ้น รวมถึงการทำให้วงจรมีความคงทนต่อความผิดพร่อง เพื่อสามารถทำงานได้ต่อไปแม้มีความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้น

#### 6.2 การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นขณะที่ไม่มีตัวควบคุม

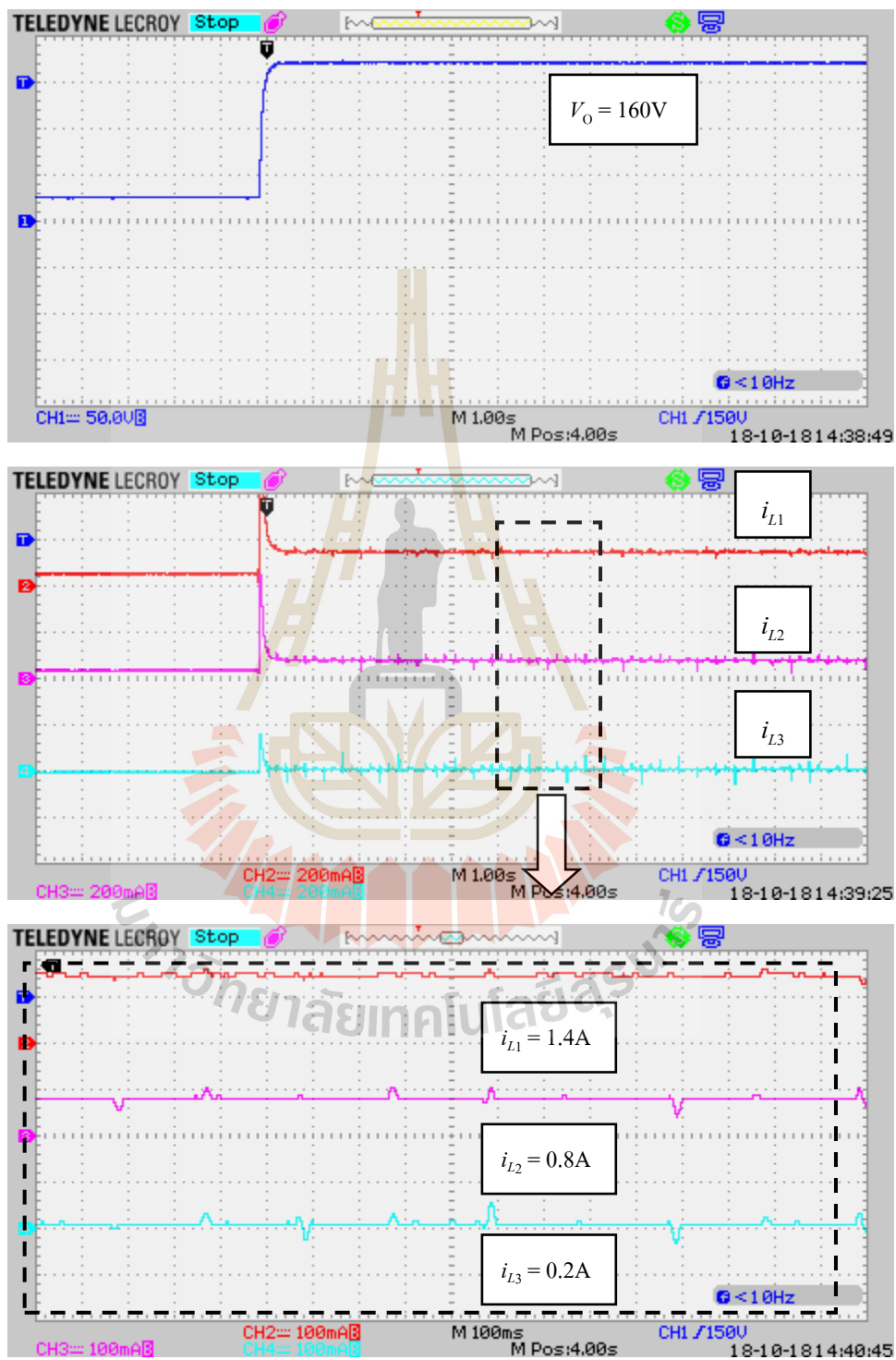
การทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นกรณีไม่มีตัวควบคุม จะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMSDOCK28335 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น กำหนดให้สัญญาณพัลส์มีค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.5 และ 0.6 ที่ความถี่ 10kHz เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าคงที่เท่ากับ 20V โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์และผลทดสอบ เพื่อพิจารณาผลตอบสนองของวงจร ได้แก่ แรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ชุดทดสอบวงจรกรณีไม่มีตัวควบคุม

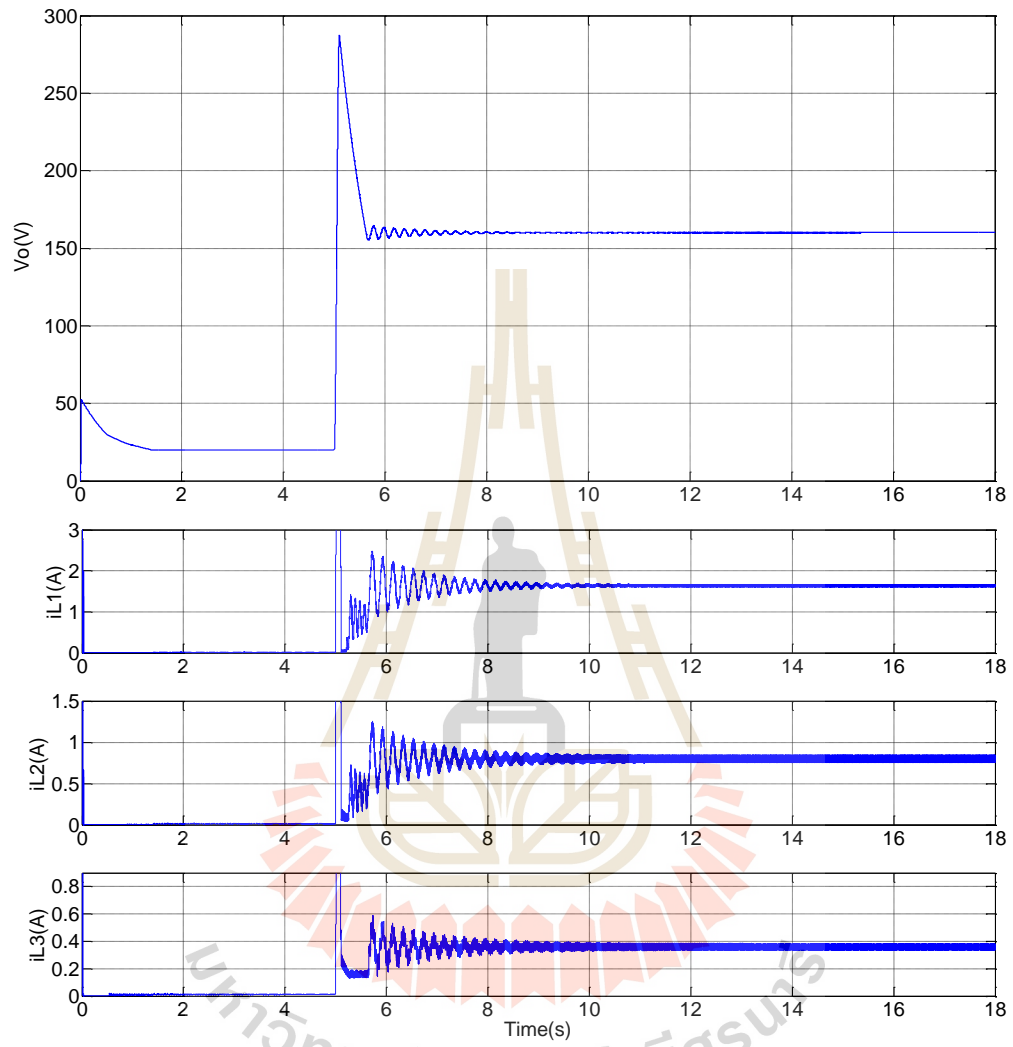
ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้น เมื่อมีการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.5 แสดงได้ดังรูปที่ 6.2 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทดสอบวงจรในช่วงเวลาที่ชุดทดสอบยังไม่ได้รับสัญญาณพัลส์ แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรคือประมาณ 20V และเมื่อชุดทดสอบได้รับค่าสัญญาณพัลส์สั่งให้สวิตซ์ทำงานที่วัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.5 แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในสภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 160V และในส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  ค่าจะมีการพุ่งเกินในสภาวะชั่วคราว ก่อนจะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวโดยมีค่าประมาณ 1.4A, 0.8A และ 0.2A ตามลำดับ

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้น เมื่อมีการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.5 แสดงดังรูปที่ 6.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินในสภาวะชั่วคราวก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ซึ่งที่สภาวะอยู่ตัวแรงดันเอาต์พุตมีค่าประมาณ 165V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว พบว่ามีการพุ่งเกินในช่วงสภาวะชั่วคราวก่อนกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ค่าประมาณ 1.5A, 0.8A และ 0.35A ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบวงจรมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการจำลองสถานการณ์



รูปที่ 6.2 ผลการทดสอบวงจรกรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5





รูปที่ 6.3 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5

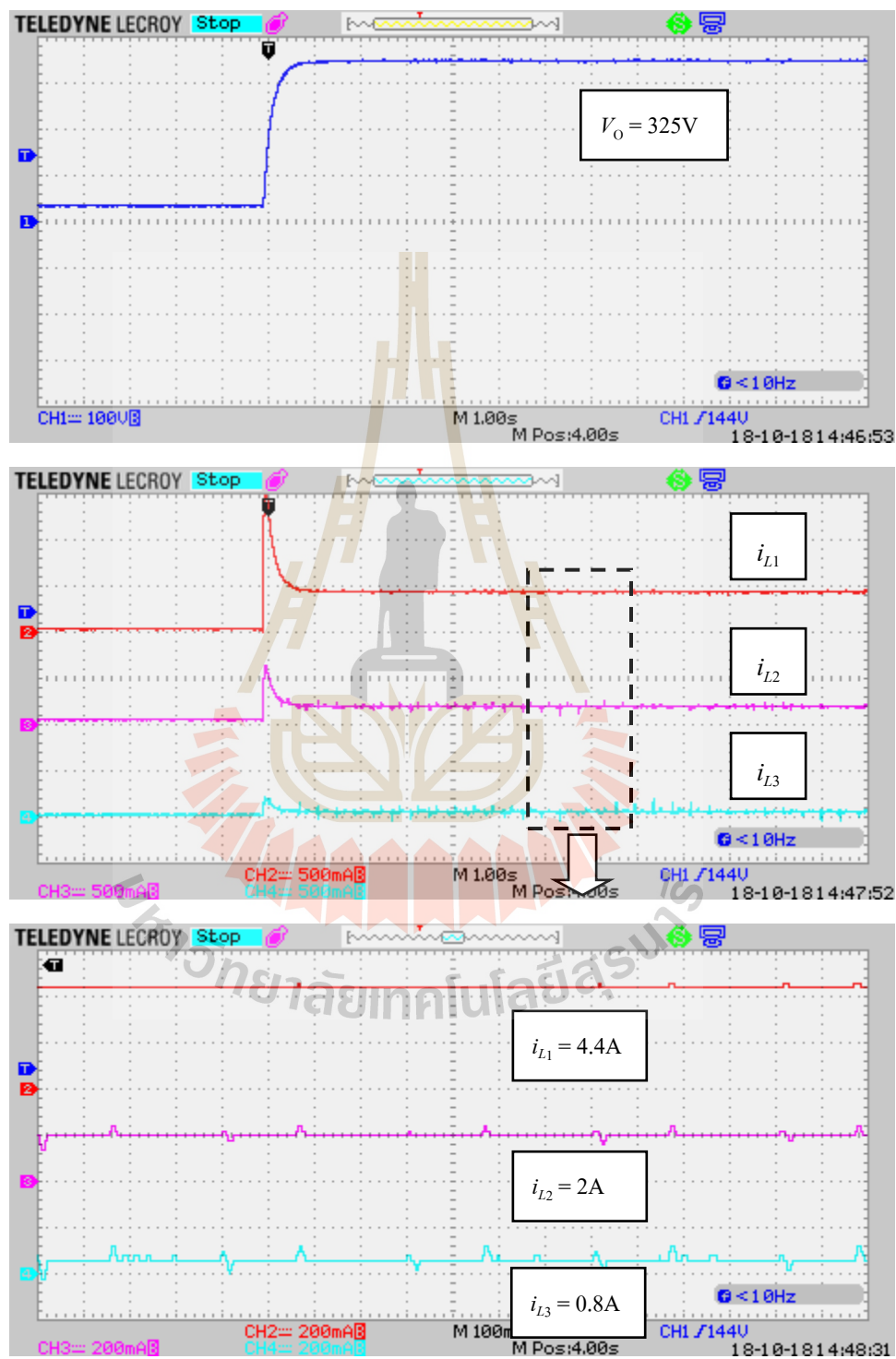
จากนั้นทำการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น โดยเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 0.5 เป็น 0.6 สำหรับสวิตช์ทั้งสามตัว ซึ่งกำหนดให้แรงดันอินพุตเท่ากับ 20V สำหรับผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นขั้นกรณีไม่มีตัวควบคุม เมื่อมีการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.6 แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่า เมื่อชุดทดสอบได้รับค่าสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ค่าแรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่ากรณีที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5 ซึ่งในสถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 325V โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีการพุ่งเกินในสถานะชั่วคราว ก่อนจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ซึ่งมีค่าประมาณ 4.4A, 2A และ 0.8A ตามลำดับ

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้น เมื่อมีการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.6 แสดงดังรูปที่ 6.5 ซึ่งผลการทดสอบวงจรมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการจำลองสถานการณ์ โดยสังเกตได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินในสถานะชั่วคราวก่อนเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ซึ่งที่สถานะอยู่ตัวแรงดันเอาต์พุตมีค่าประมาณ 315V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว จะมีการพุ่งเกินในช่วงสถานะชั่วคราวก่อนกลับเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ค่าประมาณ 5.5A, 2.3A และ 0.8A ตามลำดับ

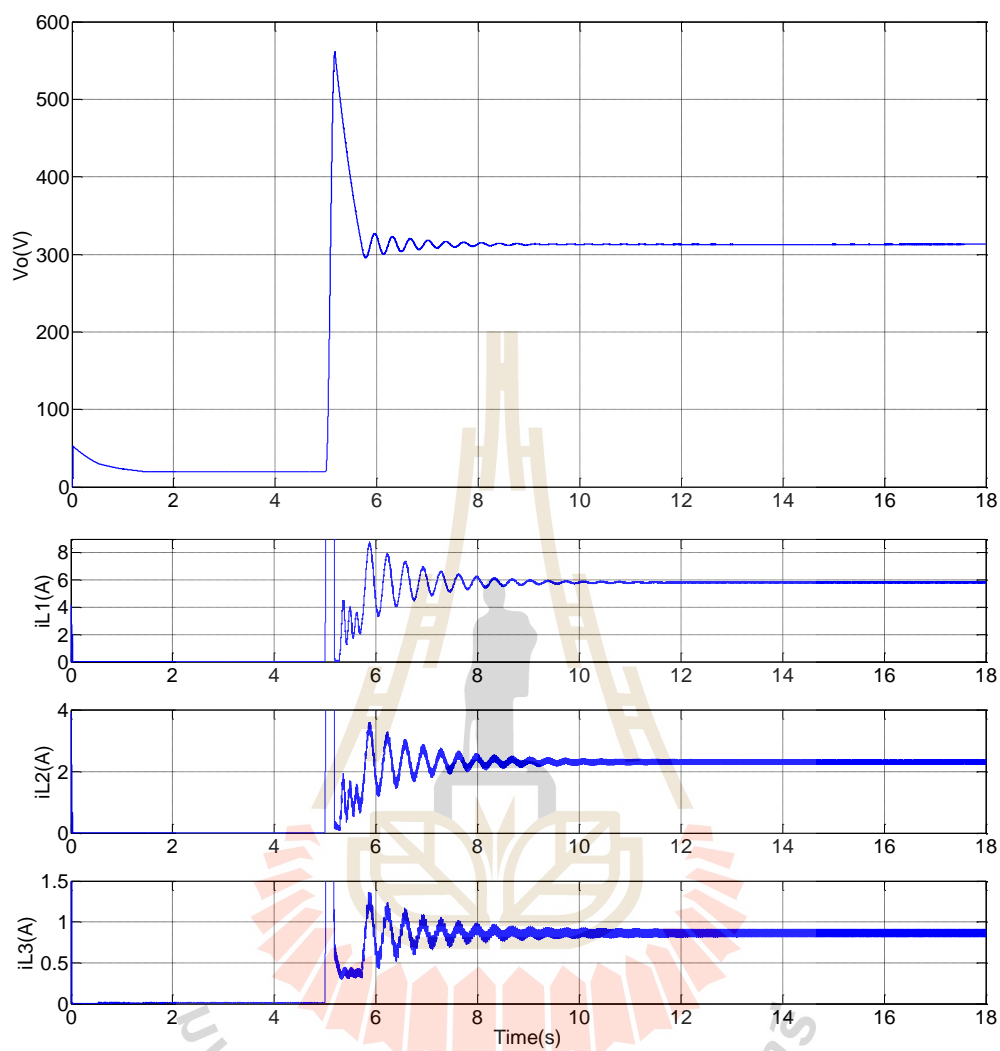
จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบ แสดงได้ดังตารางที่ 6.1 ซึ่งจากตารางดังกล่าวจะสังเกตเห็นได้ว่าผลการทดสอบจากชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์มีแนวโน้มที่สอดคล้องใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบ

ค่าวัฏจักรหน้าที่ (D)	สัญลักษณ์	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการทดสอบ
0.5	$V_o$	165V	160V
	$i_{L1}$	1.5A	1.4A
	$i_{L2}$	0.8A	0.8A
	$i_{L3}$	0.35A	0.2A
0.6	$V_o$	315V	325V
	$i_{L1}$	5.5A	4.4A
	$i_{L2}$	2.3A	2A
	$i_{L3}$	0.8A	0.8A



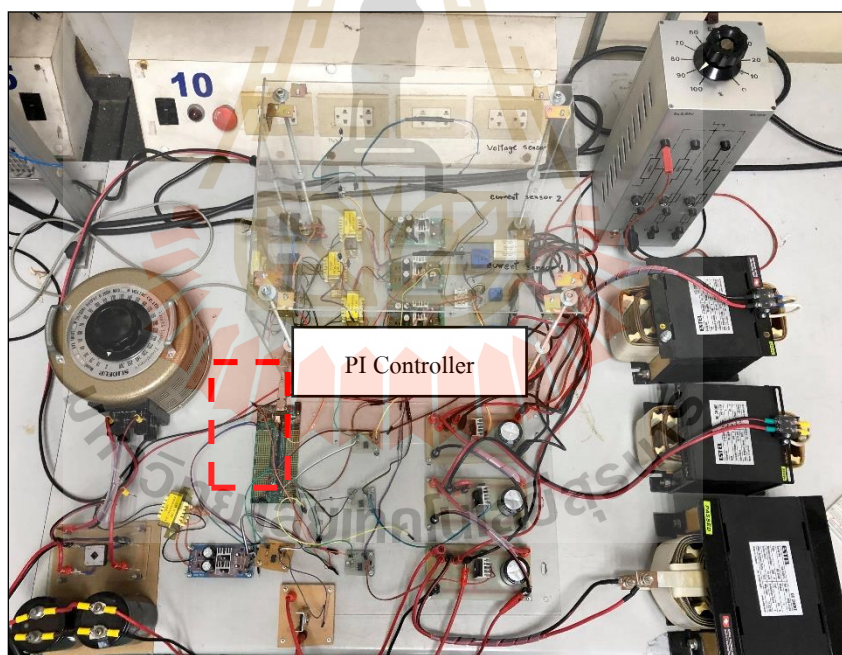
รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบวงจรกรณีมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.6



รูปที่ 6.5 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีมีค่าตัวคูณที่หน้า 0.6

### 6.3 การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นขณะที่มีตัวควบคุมพีไอ

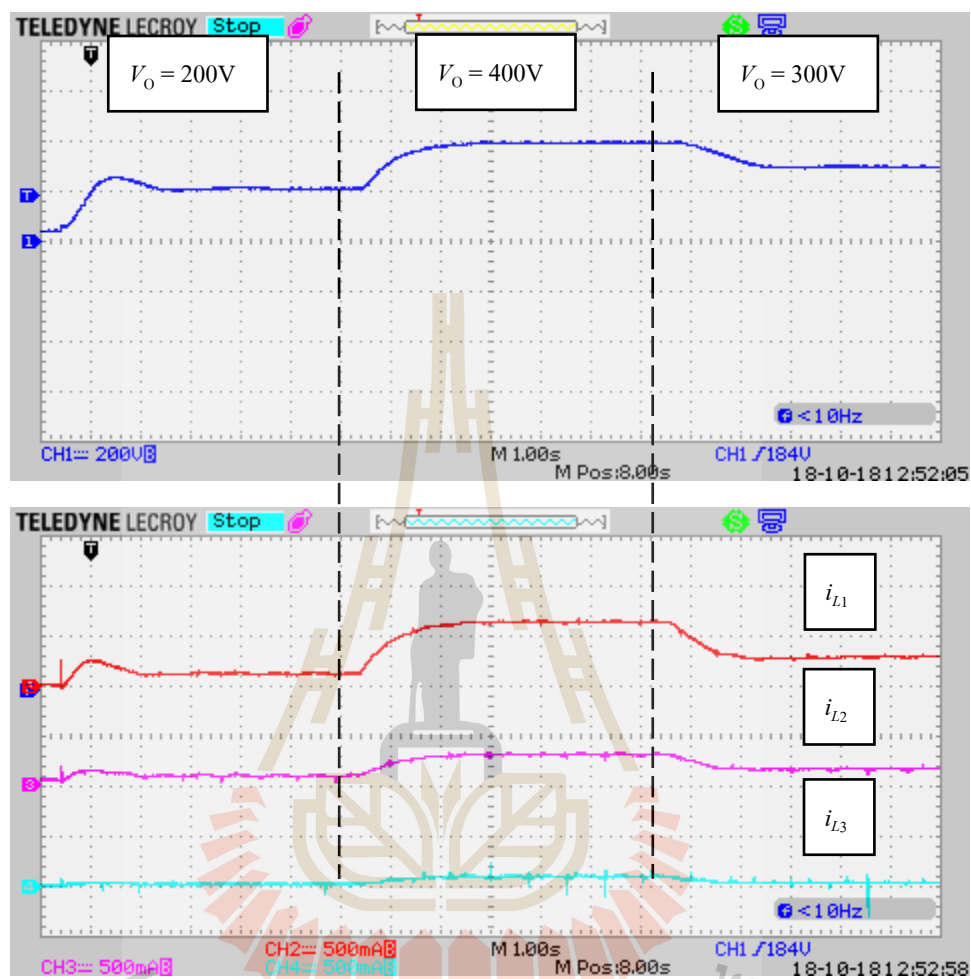
การทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ จะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMSD0CK28335 เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ โดยใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ 4 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณีดังนี้ การทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง การทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต และการทดสอบวงจรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ทั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อพิจารณาผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ รวมถึงการแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถทำให้วงจรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้จะอาศัยชุดทดสอบดังรูปที่ 6.6



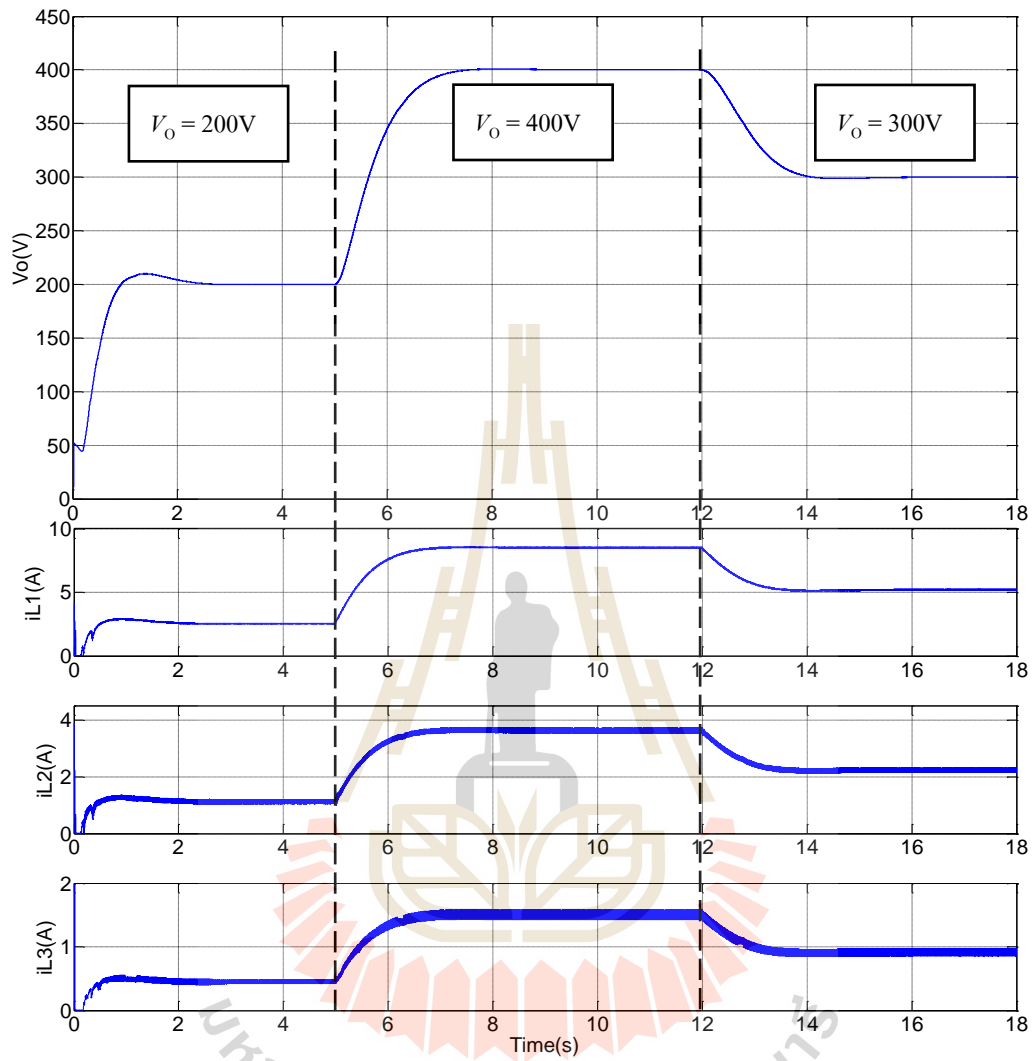
รูปที่ 6.6 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นกรณีที่มีตัวควบคุม

ในการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นกรณีมีตัวควบคุม เมื่อมีการปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ได้กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 200V ไปเป็น 400V และ 300V ตามลำดับ และกำหนดให้แรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V ผลการทดสอบชุดทดสอบ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง แสดงได้ดังรูปที่ 6.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทดสอบวงจร ตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 200V ในสถานะอยู่ตัวตามค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงที่กำหนดไว้มีค่าเท่ากับ 200V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 2A, 1A และ 0.5A ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนกระแสในแต่ละขั้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นมีความเหมาะสมตามอัตราส่วนการถ่วงน้ำหนักที่ได้ ออกแบบไว้ กล่าวคือเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นในแต่ละขั้น จะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลง เนื่องจากกำลังไฟมีค่าเท่ากัน จากนั้นทำการปรับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเพิ่มขึ้นจาก 200V เป็น 400V จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตปรับเพิ่มสูงขึ้นตามค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 400V กระแส  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามแรงดันเอาต์พุตและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 7A, 3A และ 1A ตามลำดับ ต่อมาทำการปรับค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงลดลงจาก 400V เป็น 300V จะเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 300V ค่ากระแส  $i_{L1}$   $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าลดลงตามแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 3A, 2A และ 0.5A ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมและรักษา ระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ

จากผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นที่มีตัวควบคุมแสดงดังรูปที่ 6.8 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากชุดทดสอบ โดยมีการปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 6.7 จะเห็นได้ว่าผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลทดสอบทั้งแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถควบคุมและรักษา ระดับแรงดันเอาต์พุตสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นให้ได้ตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6.7 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันโหนดพัทอ้างอิง  $V_{ref}$

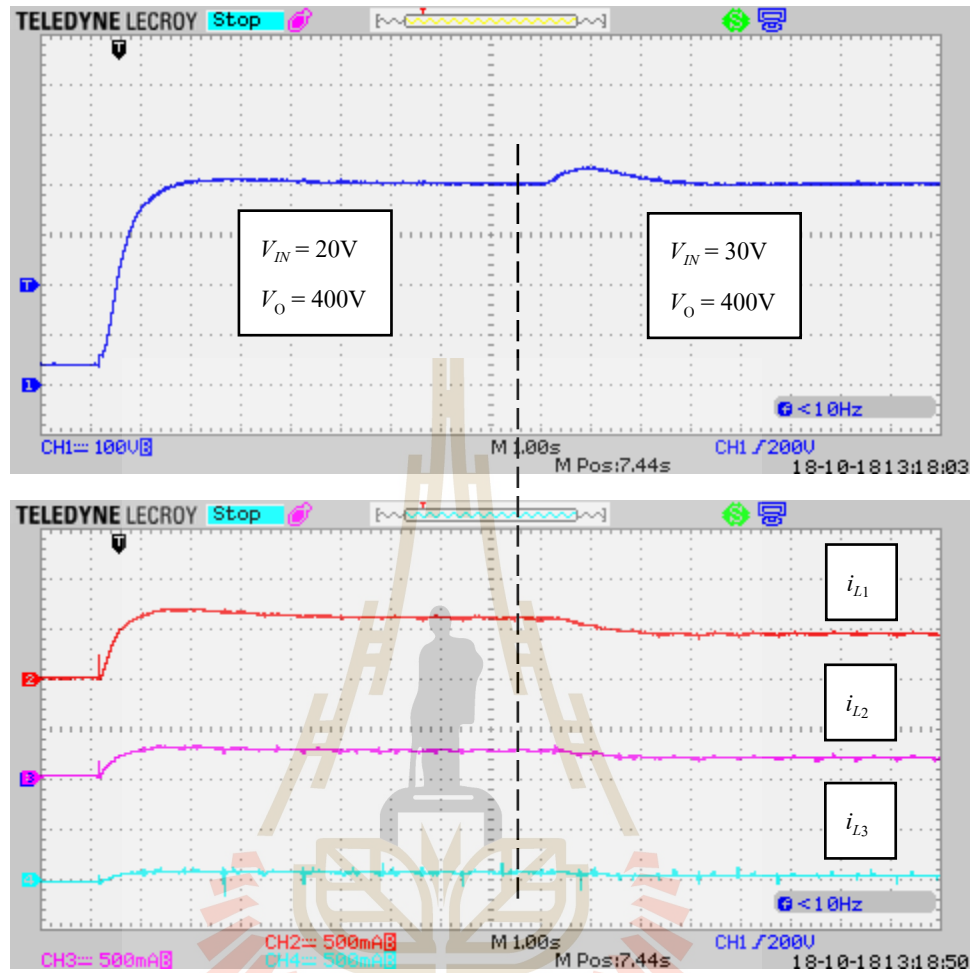


รูปที่ 6.8 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง  $V_{ref}$

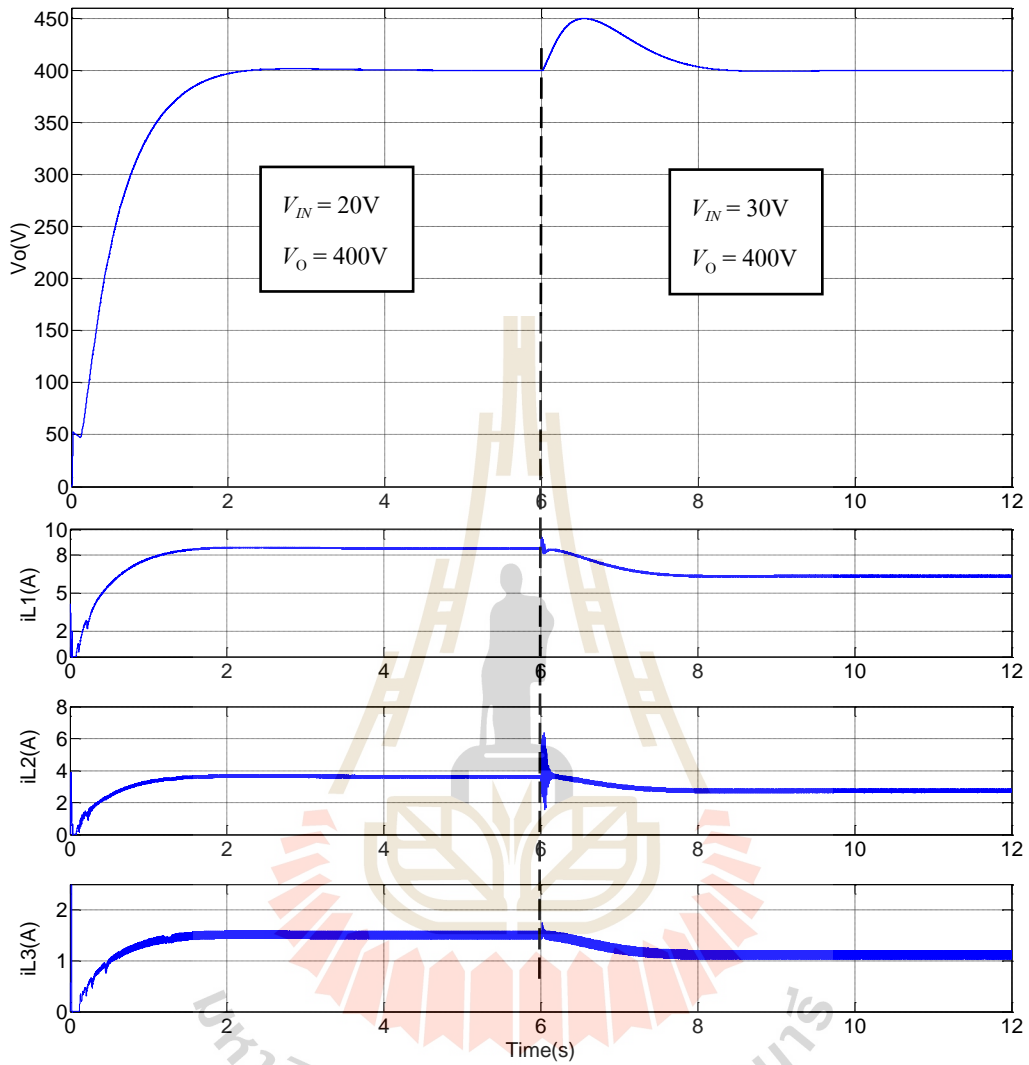


จากนั้นทำการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม เมื่อทำการทดสอบปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต ( $V_{IN}$ ) ที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น โดยเริ่มแรกกำหนดให้แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 20V แล้วปรับเพิ่มขึ้นเป็น 30V และกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงให้มีค่าเท่ากับ 400V สำหรับผลการทดสอบชุดทดสอบ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้วงจรแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อปรับแรงดันอินพุตเท่ากับ 20V โดยมีแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400V ตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัวให้มีค่าเท่ากับ 400V ได้ตามต้องการ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 6A, 3A และ 1A ตามลำดับ ในช่วงถัดมาทำการปรับแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นจาก 20V เป็น 30V จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมในสถานะอยู่ตัวตามค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้ที่ 400V ส่วนกระแส  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าลดลงจากเดิมและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 4.5A, 2A และ 0.5A ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเท่าเดิม จึงส่งผลให้ค่ากระแสมีค่าลดลง

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นที่มีตัวควบคุม และทำการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต โดยกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400V แสดงดังรูปที่ 6.10 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 6.9 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลทดสอบทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัวสำหรับแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว อาจมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยของกระแส เนื่องจากการปรับค่าแรงดันอินพุตของชุดทดสอบ ทั้งนี้จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอพร้อมทั้งเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่ได้ออกแบบไว้ สามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นให้ได้ตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 6.9 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต  $V_{IN}$

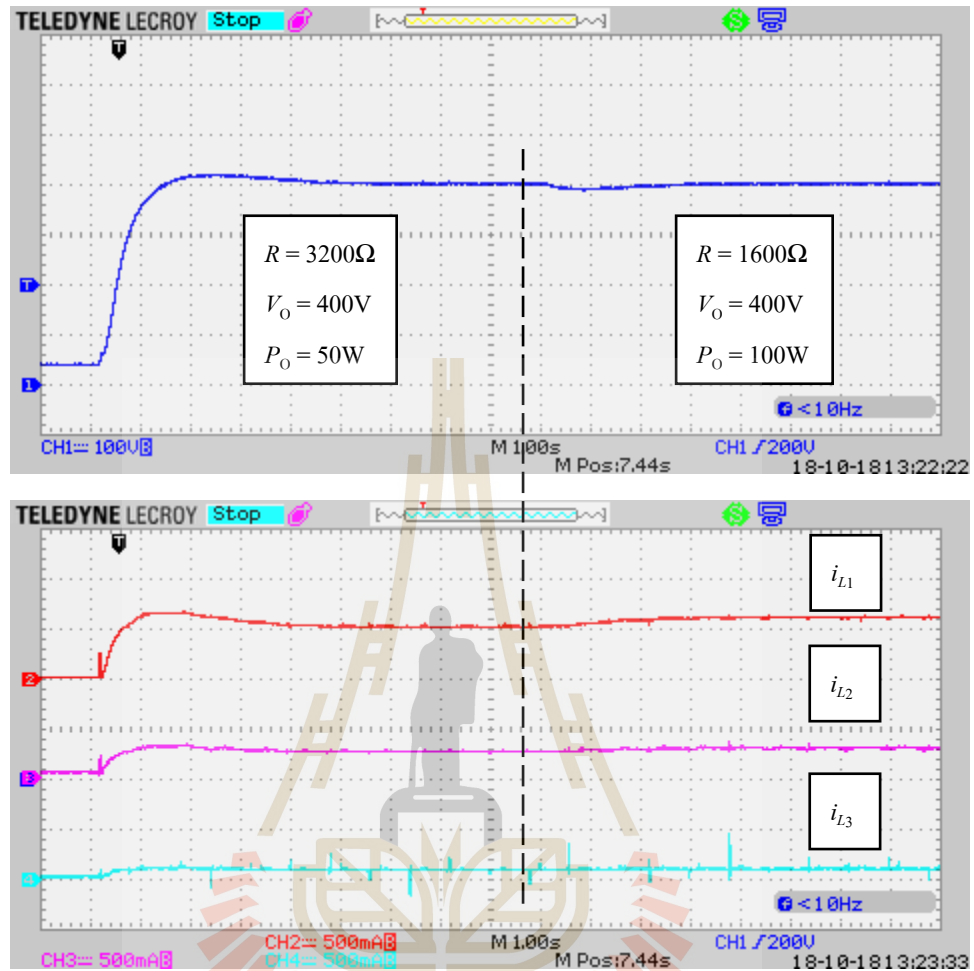


รูปที่ 6.10 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต  $V_{IN}$

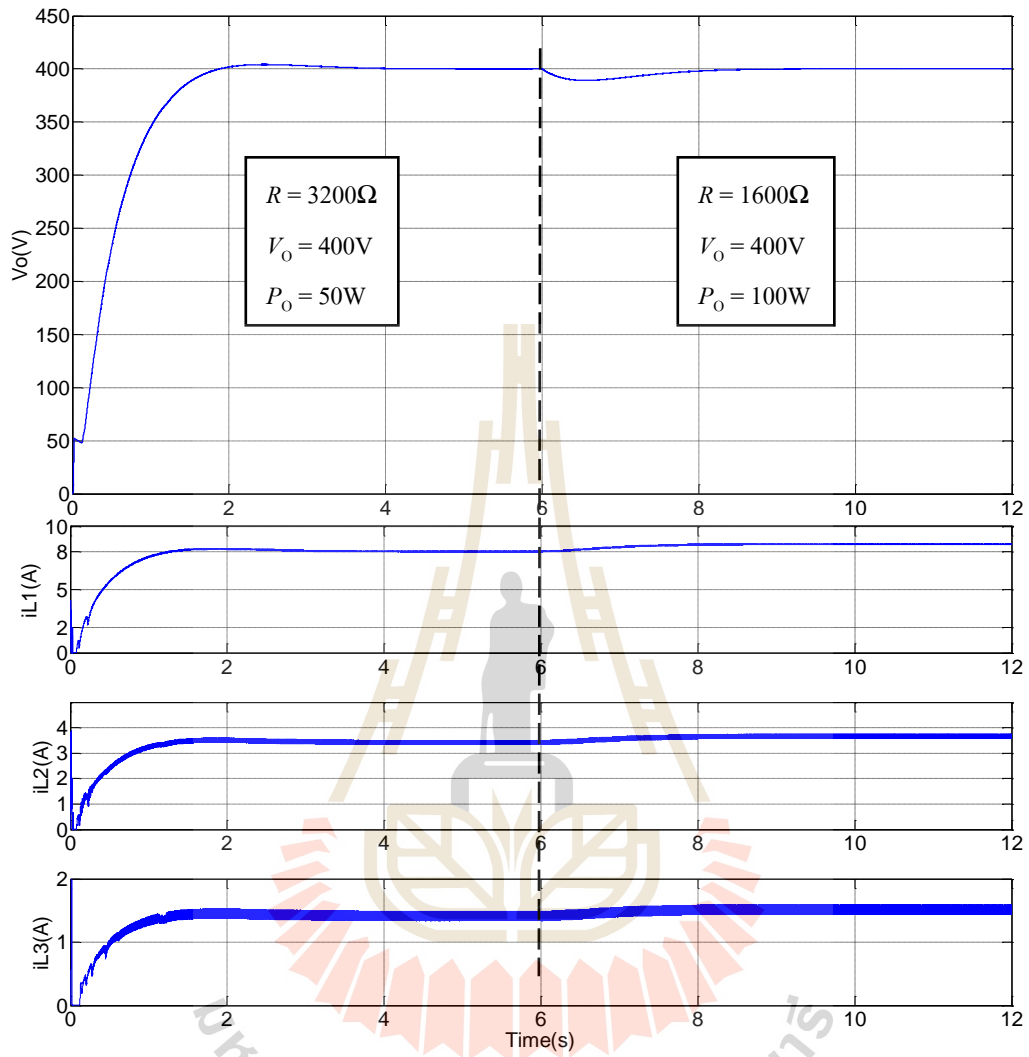
ในลำดับต่อมาทำการทดสอบโดยปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยปรับโหลดตัวต้านทาน ( $R$ ) ให้มีค่าเท่ากับ  $3200\Omega$  ในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็น  $1600\Omega$  ในช่วงเวลาถัดมา ซึ่งการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าภายในวงจร โดยโหลดตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ  $3200\Omega$  จะมีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ  $50W$  และที่  $1600\Omega$  จะมีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ  $100W$  ทั้งนี้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตมีเท่ากับ  $20V$  ให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงอยู่ที่  $400V$

ผลการทดสอบชุดทดสอบ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน แสดงได้ดังรูปที่ 6.11 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทดสอบวงจร ที่โหลดตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ  $3200\Omega$  แรงดันเอาต์พุตมีการเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบไว้ทำการควบคุมแรงดันให้ได้ตามแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงที่กำหนดไว้ โดยในสภาวะอยู่ตัวมีค่าเท่ากับ  $400V$  และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ  $5A$ ,  $2.9A$  และ  $1A$  ตามลำดับ โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่  $50W$  จากนั้นทำการปรับโหลดตัวต้านทานลดลงเหลือ  $1600\Omega$  จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ก่อนกลับเข้าสู่ค่าเดิมในสภาวะอยู่ตัวที่  $400V$  ส่วนกระแส  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ  $6A$ ,  $3.2A$  และ  $1.1A$  ตามลำดับ โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่  $100W$  ทั้งนี้เมื่อกำลังไฟฟ้ามียังเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการ

ในส่วนของผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามขั้นที่มีตัวควบคุม โดยทำการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานหรือปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าภายในวงจร แสดงดังรูปที่ 6.12 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากชุดทดสอบที่แสดงดังรูปที่ 6.11 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบυσต์สามขั้นกรณีเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลทดสอบทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวสำหรับทั้งแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ทั้งนี้จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอพร้อมทั้งเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป



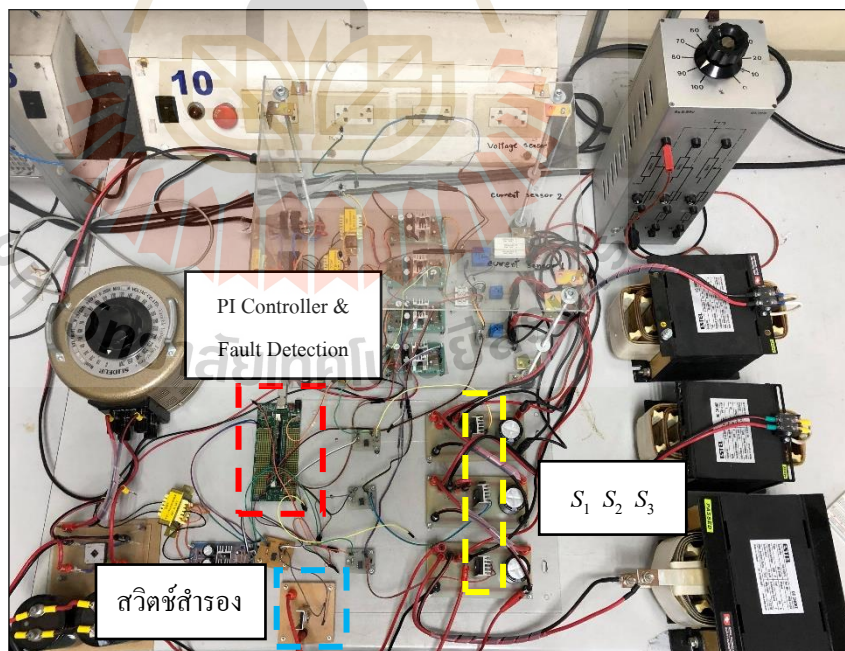
รูปที่ 6.11 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน  $R$



รูปที่ 6.12 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน  $R$

#### 6.4 การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามชั้นที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น

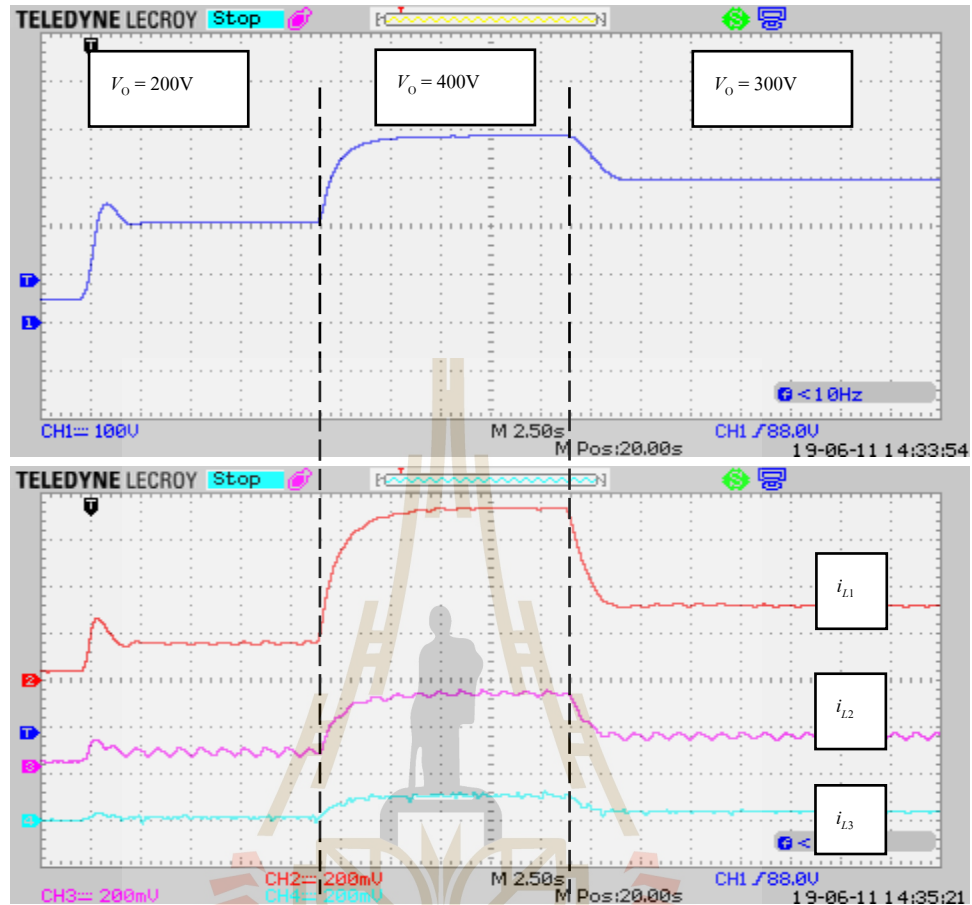
การทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร แสดงดังรูปที่ 6.13 โดยอาศัยการเขียนโปรแกรมลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMSDLOCK28335 เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการพร้อมทั้งตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับสวิตช์แต่ละตัว โดยใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส และวิธีตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ได้พัฒนาขึ้น โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 กรณีดังนี้ กรณีแรกทำการทดสอบวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงโดยไม่มี การเกิดความผิดพลาด เพื่อยืนยันว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรมันสามารถทำงานได้ อย่างถูกต้องตรวจจับไม่ผิดพลาด กรณีต่อมาทำการทดสอบวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่ สวิตช์  $S_1$ ,  $S_2$  และ  $S_3$  ตามลำดับ โดยมีการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์เพื่อ พิจารณาความรวดเร็วและความถูกต้องในการตรวจจับความผิดพลาด เป็นการแสดงประสิทธิผลของวิธีการ ตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้เมื่อตรวจจับพบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้แล้ว จะ ทำการสั่งให้สวิตช์ตัวที่สำรองไว้ทำงานแทนทันที เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้ต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6.13 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร

ในการทดสอบชุดทดสอบกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) โดยกำหนดให้ไม่มีการเกิดความผิดพลาดขึ้นภายในวงจร เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิทช์เปิดวงจรว่าไม่ตรวจจับผิดพลาด ซึ่งกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 200V ไปเป็น 400V และ 300V ตามลำดับ และกำหนดให้แรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V ผลการทดสอบชุดทดสอบในขณะที่ยังทำงานในสภาวะปกติ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง โดยไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 6.14, 6.15, และ 6.16 โดยรูปที่ 6.14 แสดงผลทดสอบของแรงดันและกระแส จะเห็นว่าเมื่อเริ่มการทดสอบวงจร ตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 200V และทำการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตไปที่ 400V แล้วกลับไปที่ 300V ได้ตามต้องการ โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีผลที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้จากรูปที่ 6.15 และ 6.16 จะสังเกตเห็นว่า จะมีสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นสัญญาณการสวิทช์สำหรับควบคุมการทำงานของสวิทช์ทั้งสามตัว เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุต 200, 400 และ 300V ตามตามต้องการ ในขณะที่ไม่ปรากฏสัญญาณพัลส์ของสวิทช์ตัวที่สำรอง เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิทช์เปิดวงจร ตรวจจับไม่พบความผิดพลาด จึงส่งผลให้ไม่มีการทำงานของสวิทช์ตัวที่สำรองไว้ ( $S_1'$ ,  $S_2'$ ,  $S_3'$ ) ดังนั้นแม้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัสต์สามขั้นจะทำงานในสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป วิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นก็สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

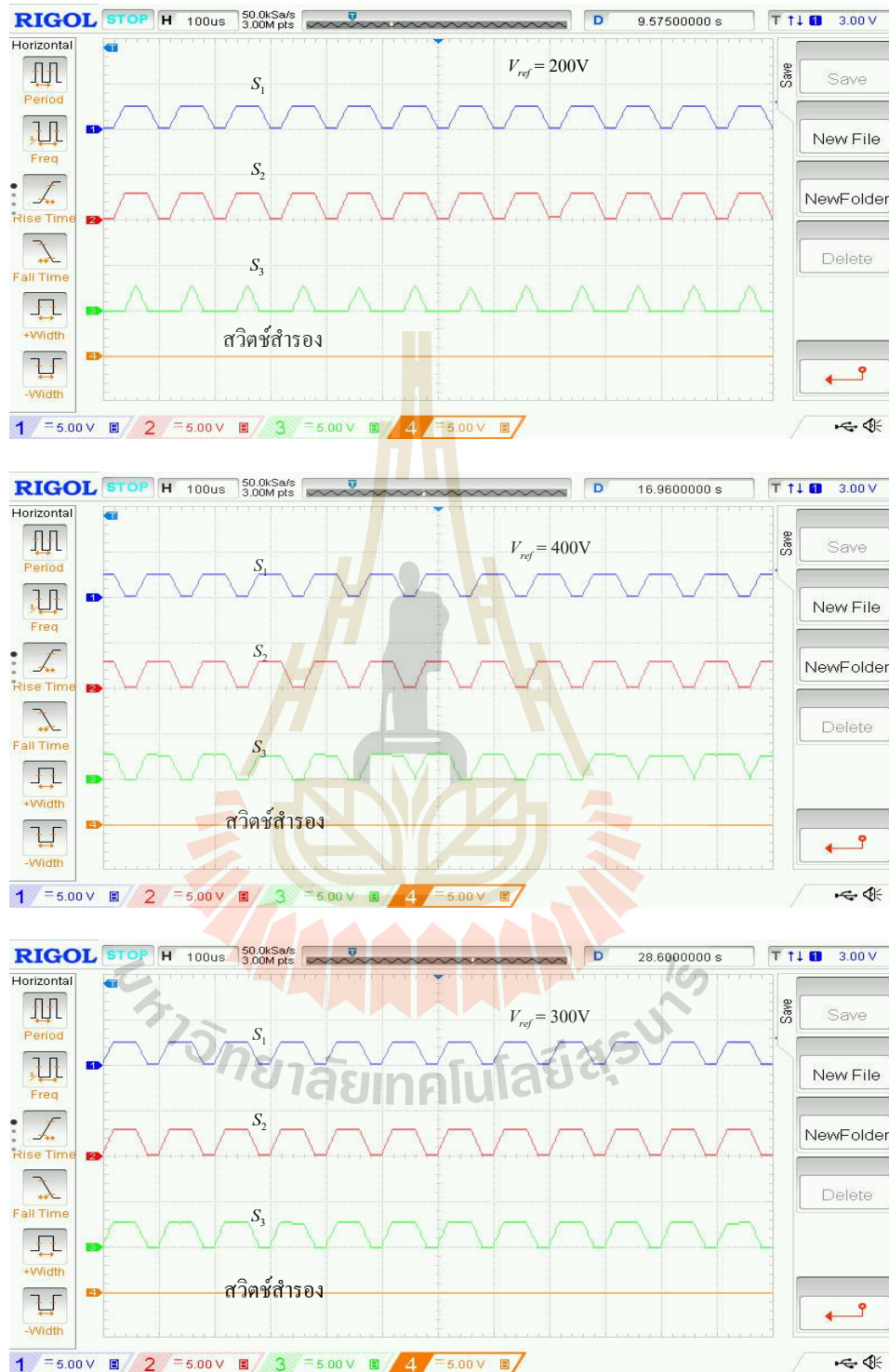




รูปที่ 6.14 ผลการทดสอบวงจรกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง

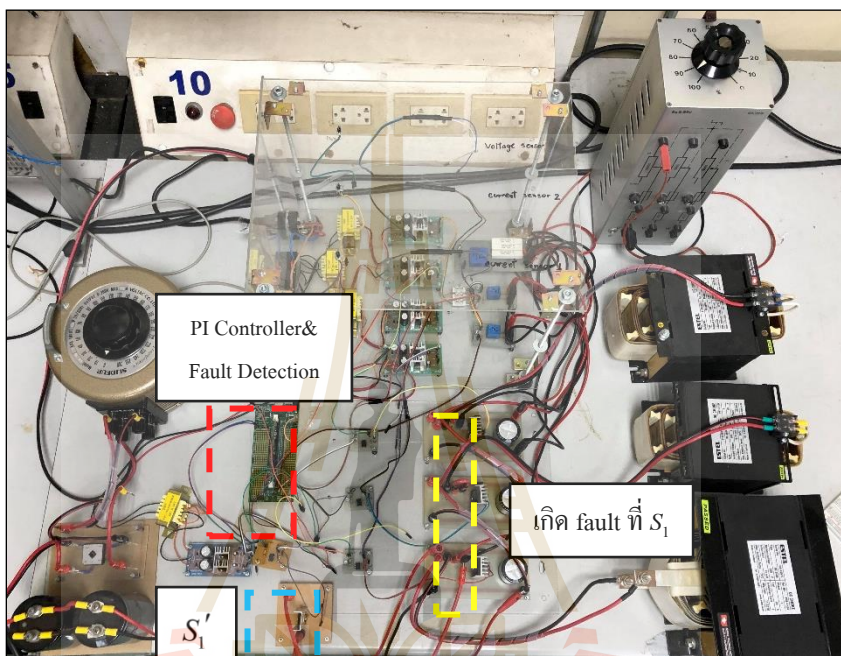


รูปที่ 6.15 สัญญาณพัลส์ที่ควบคุมการทำงานของสวิตซ์



รูปที่ 6.16 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบ โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 200 400 และ 300V ตามลำดับ

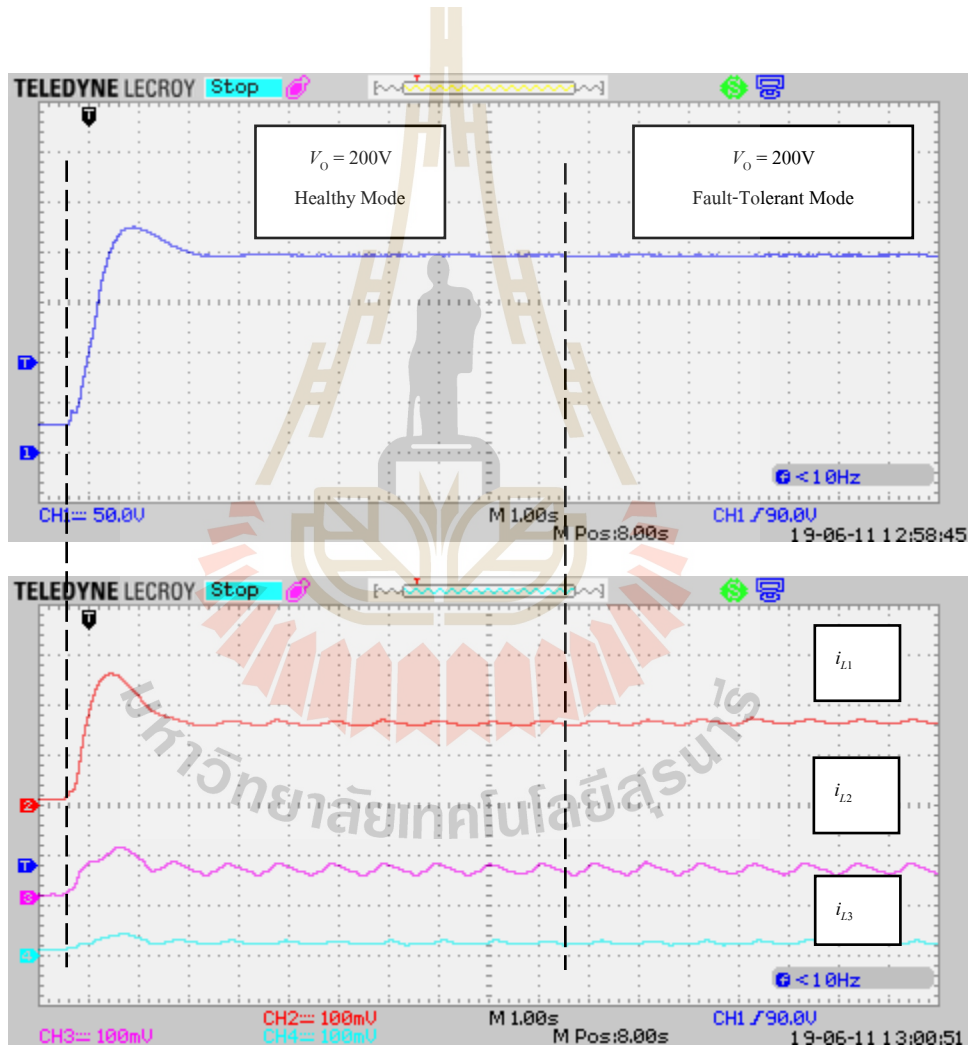
ในลำดับต่อมาจะทำการทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_1$  ซึ่งกำหนดให้เกิดความผิดปกติที่ประมาณวินาทีที่ 10 โดยแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 200V และ 300V กำหนดให้แรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V ทั้งนี้จะอาศัยชุดทดสอบดังรูปที่ 6.17



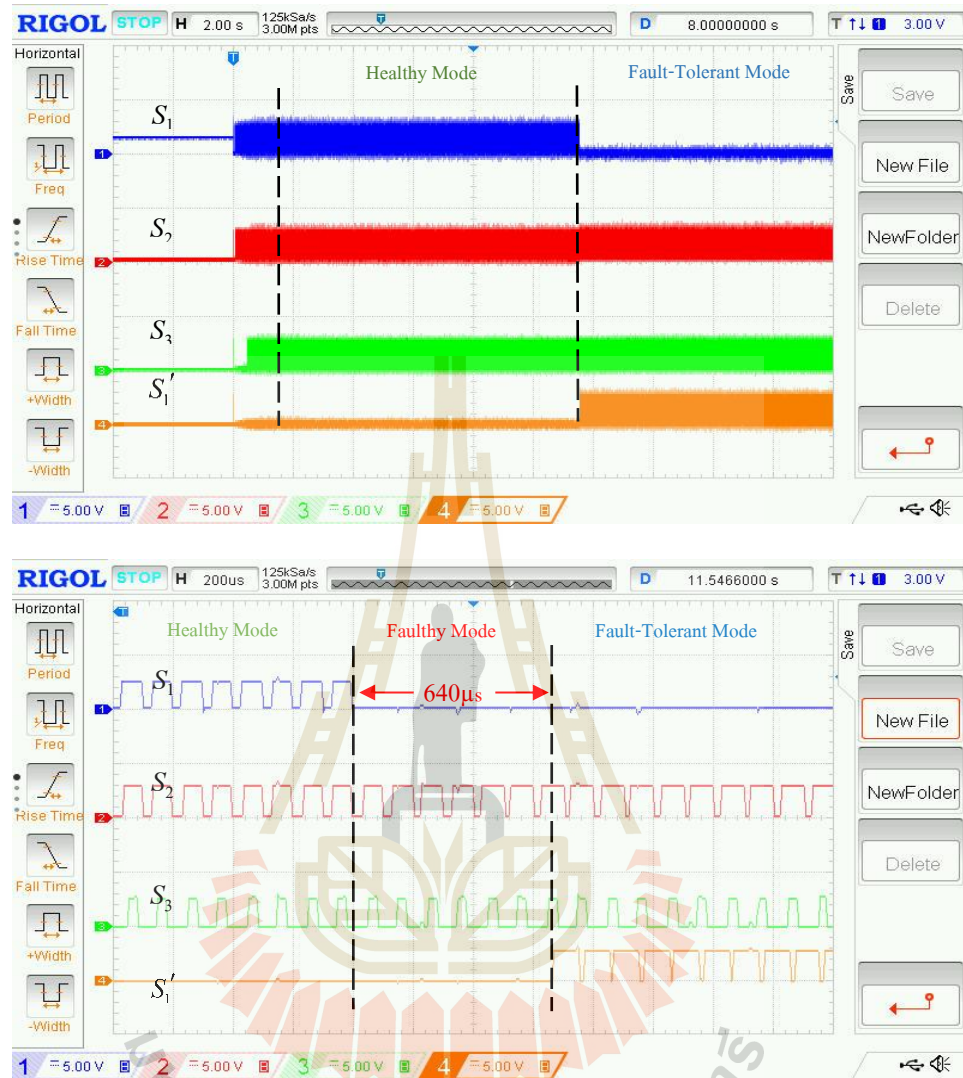
รูปที่ 6.17 ชุดทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่  $S_1$

จากผลการทดสอบชุดทดสอบ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$  เมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 200V แสดงได้ดังรูปที่ 6.18 และ 6.19 โดยรูปที่ 6.18 แสดงผลการทดสอบแรงดันและกระแส จะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงสภาวะปกติหรือช่วงก่อนวินาทีที่ 10 ตัวควบคุมสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 200V ตามที่ต้องการ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.7A, 0.8A และ 0.3A ตามลำดับ ในช่วงเวลาหลังจากวินาทีที่ 10 หรือช่วงที่เกิดความผิดปกติขึ้นแล้ว จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง จึงส่งผลให้ทำการสั่งสวิตช์  $S_1'$  ที่ได้สำรองไว้ทำงานแทนทันที โดยสังเกตจากรูปที่ 6.19 ซึ่งแสดงสัญญาณพัลส์ควบคุมการทำงานของสวิตช์ เมื่อเกิดความผิดปกติที่สวิตช์

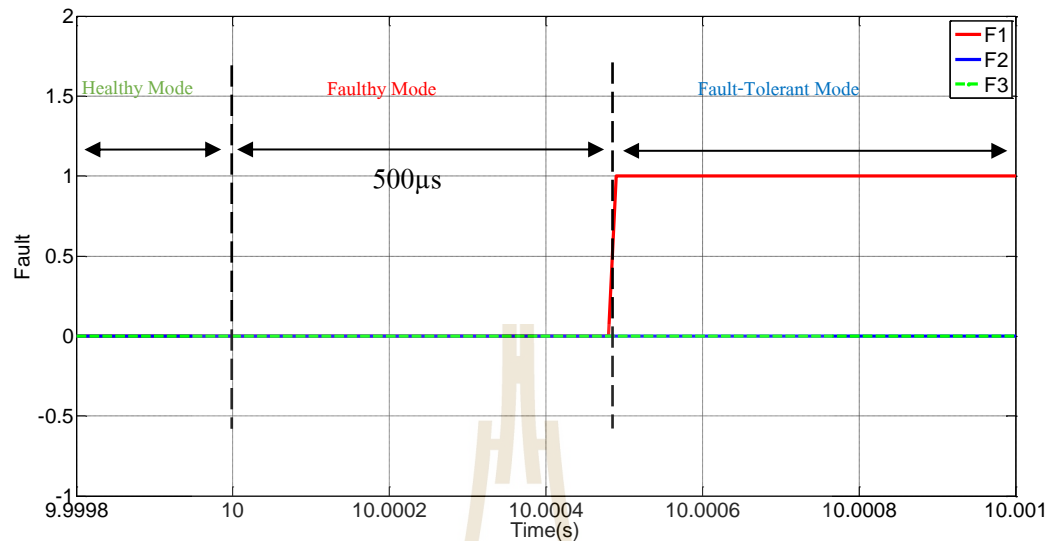
$S_1$  แล้วสัญญาณพัลส์ของสวิตช์  $S_1$  จะหายไป หลังจากนั้นวิธีการตรวจจับจะทำการตรวจจับความผิดปกติพร่องแล้วสั่งให้สวิตช์  $S_1'$  ทำงานแทน โดยใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ  $640\mu s$  หรือ  $0.64ms$  ส่งผลให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติพร่องที่เกิดขึ้น รูปที่ 6.20 แสดงผลการจำลองสถานการณ์สถานะการเกิดความผิดปกติพร่องของสวิตช์  $S_1$  จะเห็นว่าใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ  $500\mu s$  หรือ  $0.5ms$  ซึ่งเป็นเวลาที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบ



รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติพร่องที่  $S_1$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ  $200V$

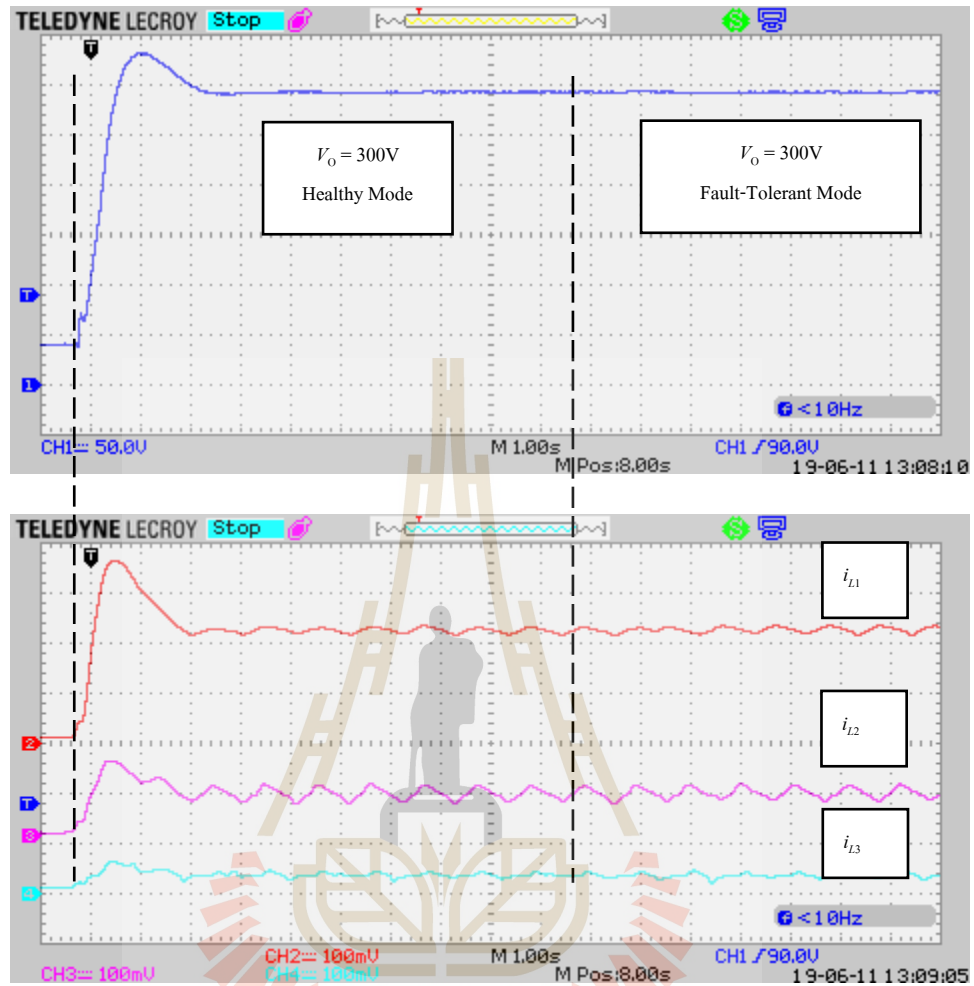


รูปที่ 6.19 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่  $S_1$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 200V

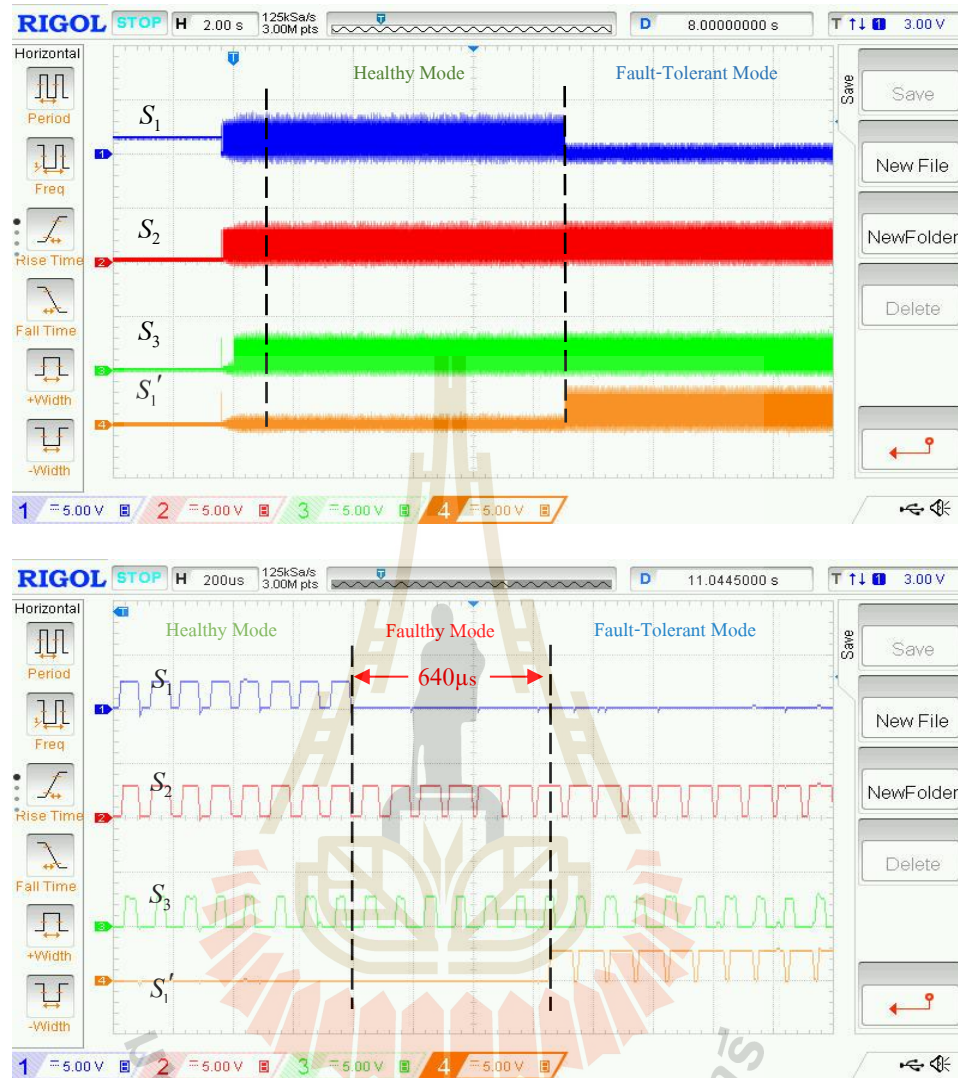


รูปที่ 6.20 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่  $S_1$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 200V

ในส่วนของการทดสอบชุดทดสอบ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$  โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 300V และเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_1$  ที่วินาทีที่ 10 แสดงได้ดังรูปที่ 6.21 และ 6.22 จะเห็นว่าตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้น สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ 300V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าในสถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 2.3A, 1A และ 0.4A ตามลำดับ โดยหลังจากวินาทีที่ 10 หรือช่วงสถานะเกิดความผิดปกติก็มีผลการทดสอบที่ไม่แตกต่างจากกรณีแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 200V กล่าวคือไม่มีผลกระทบหรือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ส่งผลให้วงจรสามารถทำงานภายใต้สภาวะความคงทนต่อความผิดปกติที่เกิดขึ้น เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับสวิตช์  $S_1$  สามารถตรวจจับได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง โดยใช้เวลาประมาณ  $640\mu\text{s}$  หรือ  $0.64\text{ms}$  ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ใช้เวลาประมาณ  $500\mu\text{s}$  หรือ  $0.5\text{ms}$  แสดงดังรูปที่ 6.23

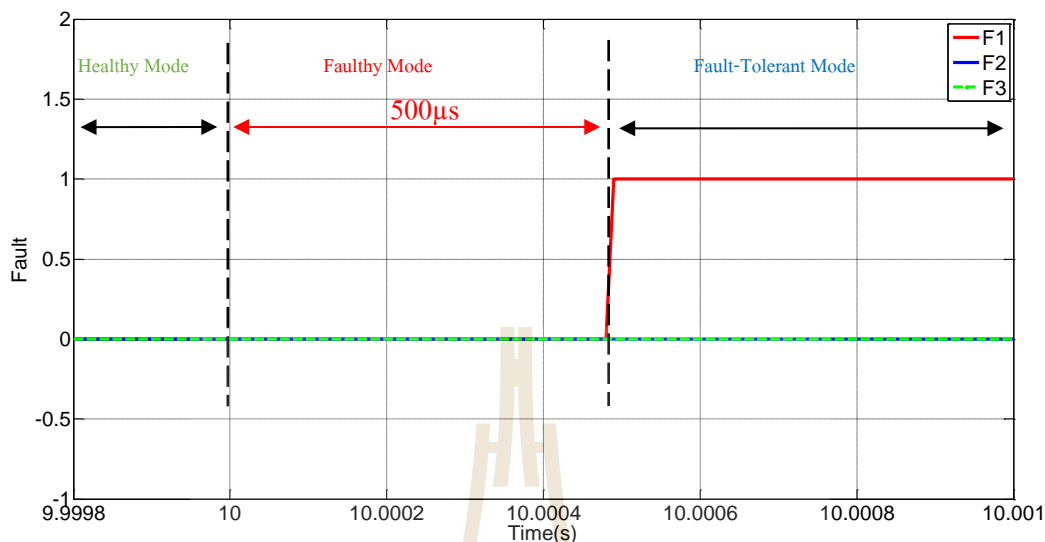


รูปที่ 6.21 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่  $S_1$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 300V



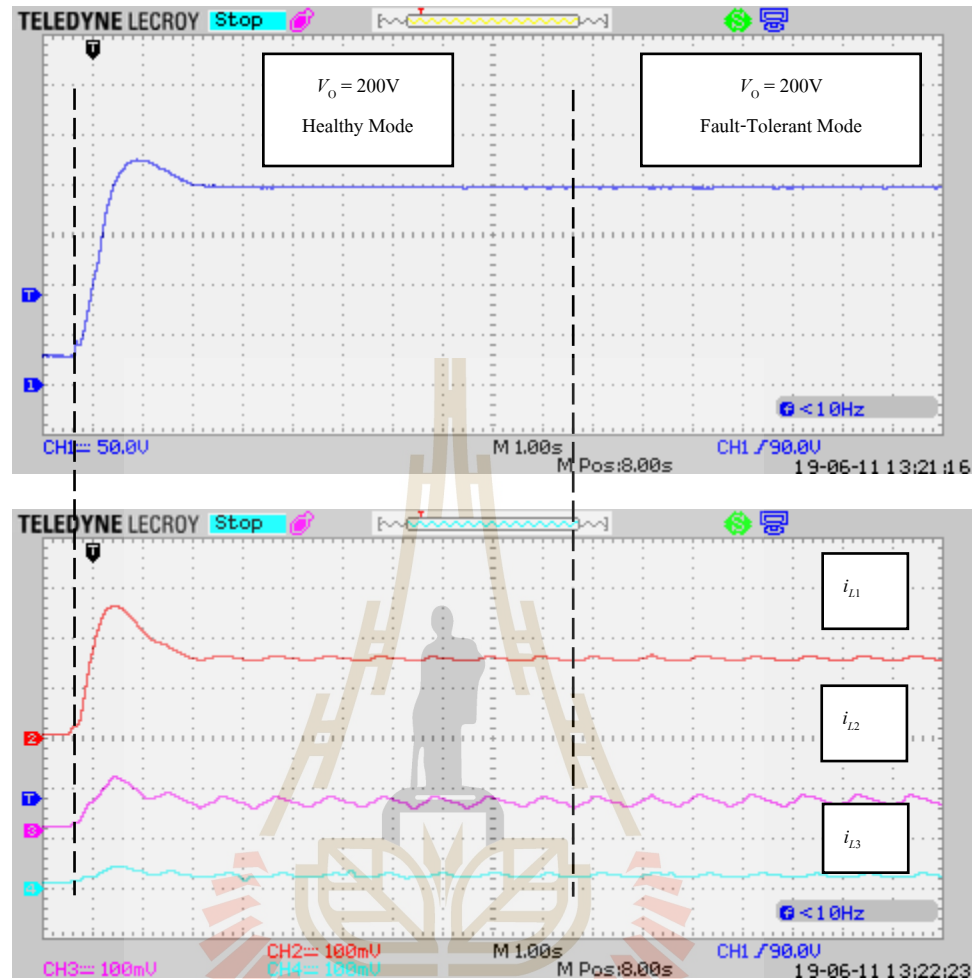
รูปที่ 6.22 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่  $S_1$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 300V





รูปที่ 6.23 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดปกติที่  $S_1$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 300V

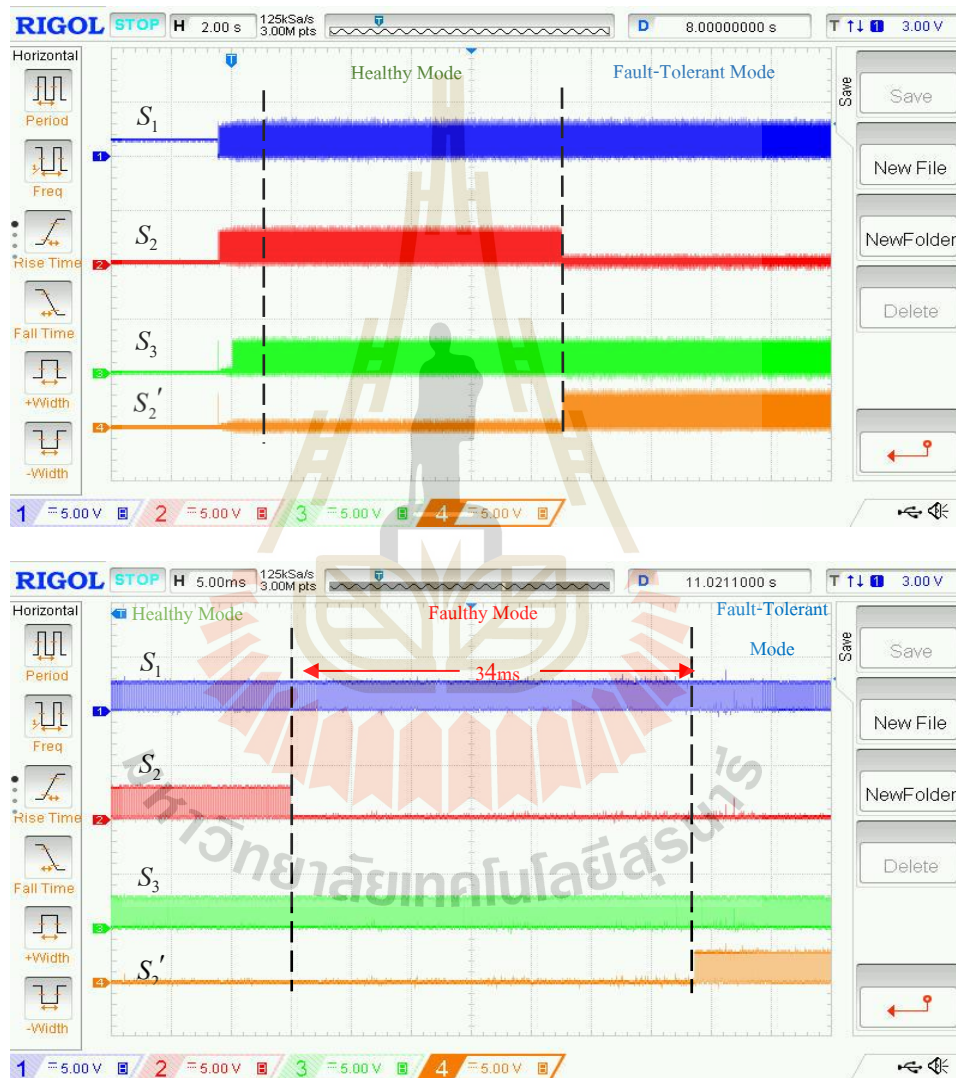
ผลการทดสอบชุดทดสอบ กรณีเกิดความผิดปกติที่สวิตช์  $S_2$  โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 200V รูปที่ 6.24 แสดงผลการทดสอบแรงดันและกระแส รูปที่ 6.25 แสดงสัญญาณพัลส์ของสวิตช์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มทำการทดสอบชุดทดสอบในช่วงสภาวะปกติหรือช่วงก่อนวินาทีที่ 10 ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตและแบ่งกระแสได้อย่างเหมาะสม โดยแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ 200V และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีค่าในสภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.7A, 0.8A และ 0.3A ตามลำดับ จากนั้นในช่วงเวลาหลังจากวินาทีที่ 10 หรือช่วงที่เกิดความผิดปกติขึ้น จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ไม่มีผลกระทบเกิดขึ้น เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรสามารถตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์  $S_2$  ได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง



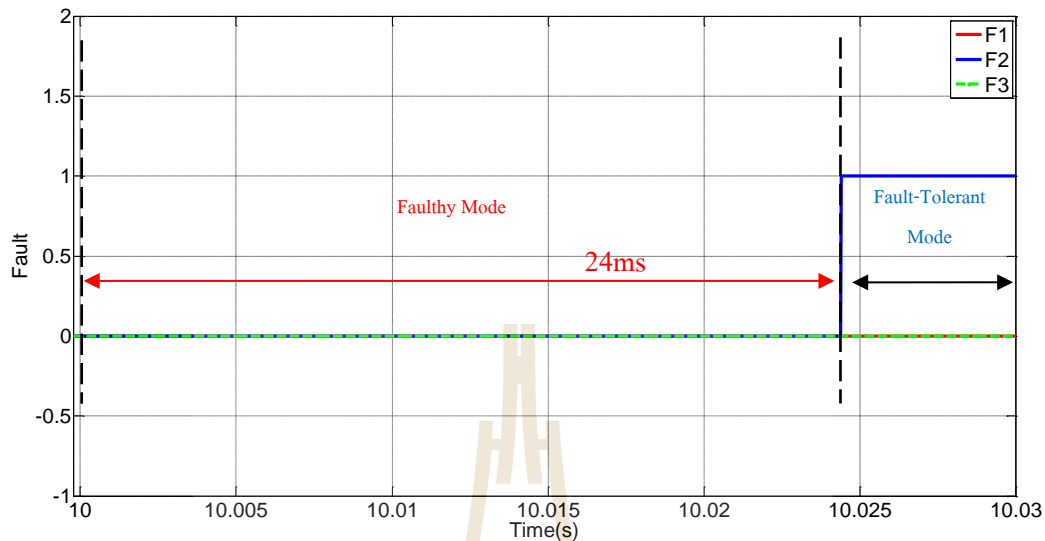
รูปที่ 6.24 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดปกติที่  $S_2$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 200V

จากรูปที่ 6.25 จะเห็นได้ว่า วิธีการตรวจจับความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดปกติในสวิตช์  $S_2$  โดยใช้เวลาในการตรวจจับความผิดปกติประมาณ 34ms ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_2$  ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ส่งผลให้สวิตช์สำรอง  $S_2'$  ทำงานแทนได้รวดเร็ว และวงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพในสภาวะความคงทนต่อความผิดปกติที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ในการตรวจจับความผิดปกติแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_2$  จะใช้เวลาในการตรวจจับนานกว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติของสวิตช์ตัวอื่น ๆ เนื่องจากการตรวจจับความผิดปกติแบบเปิดวงจรที่  $S_1$  กับ  $S_3$  นั้นใช้การพิจารณาค่ากระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  ที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสโดยตรง ในขณะที่  $S_2$  ไม่มีตัวตรวจจับ

กระแส  $i_{L2}$  เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นจึงต้องอาศัยสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ควบคุมกระแสทั้งสองรูป และพิจารณาค่ากระแสที่ได้จากตัวตรวจจับกระแส  $i_{L1}$  และ  $i_{L3}$  ส่งผลให้มีการใช้เวลาในการตรวจจับนานกว่าสวิตซ์อื่น ๆ รูปที่ 6.26 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับความผิดพลาด พบว่าใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 24ms ซึ่งผลดังกล่าวมีสอดคล้องกันกับผลชุดทดสอบ

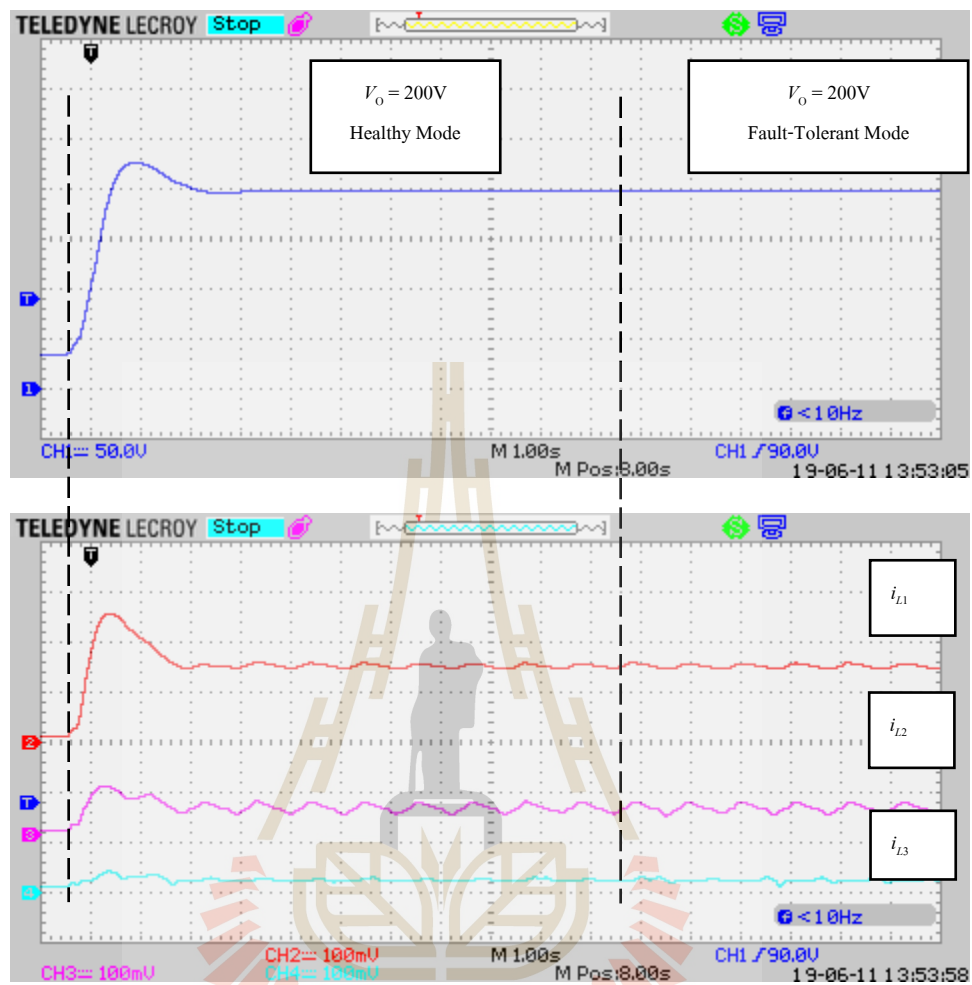


รูปที่ 6.25 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่  $S_2$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 200V

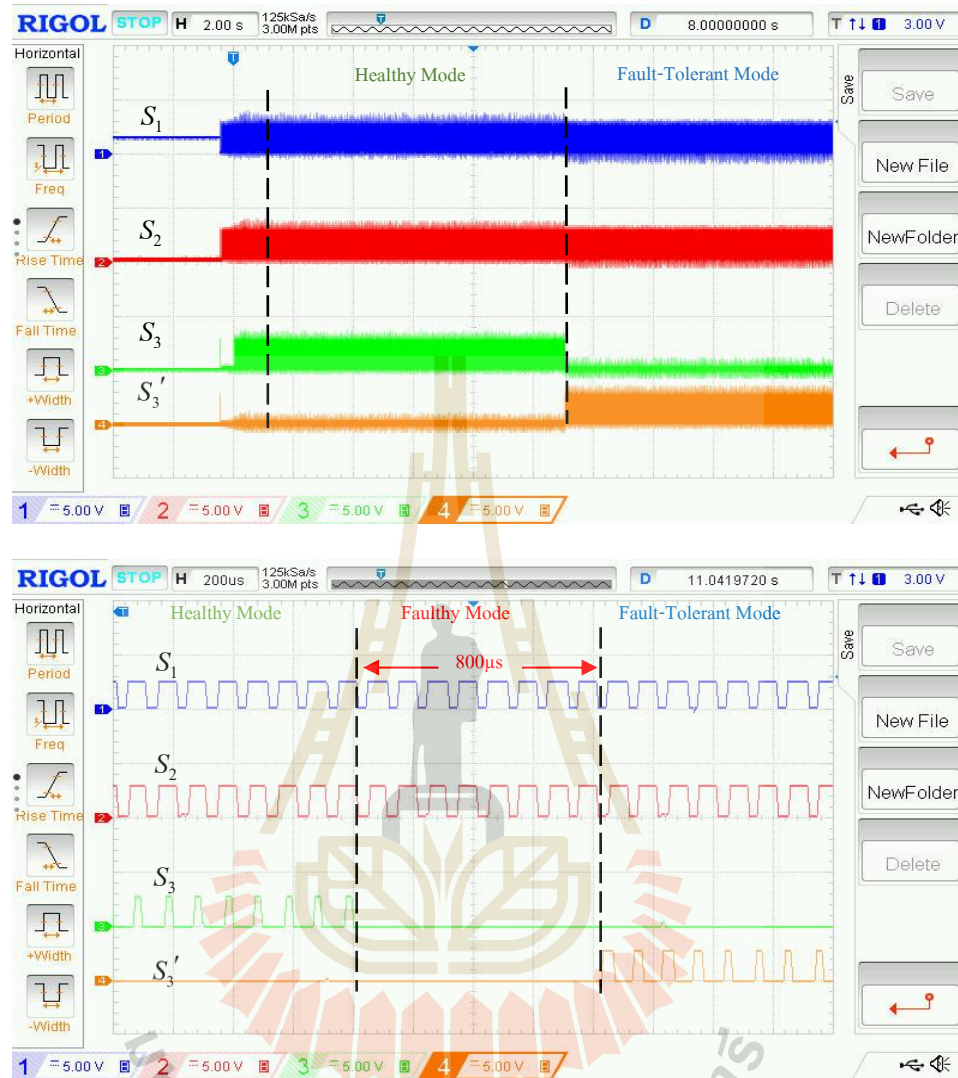


รูปที่ 6.26 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่  $S_2$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 200V

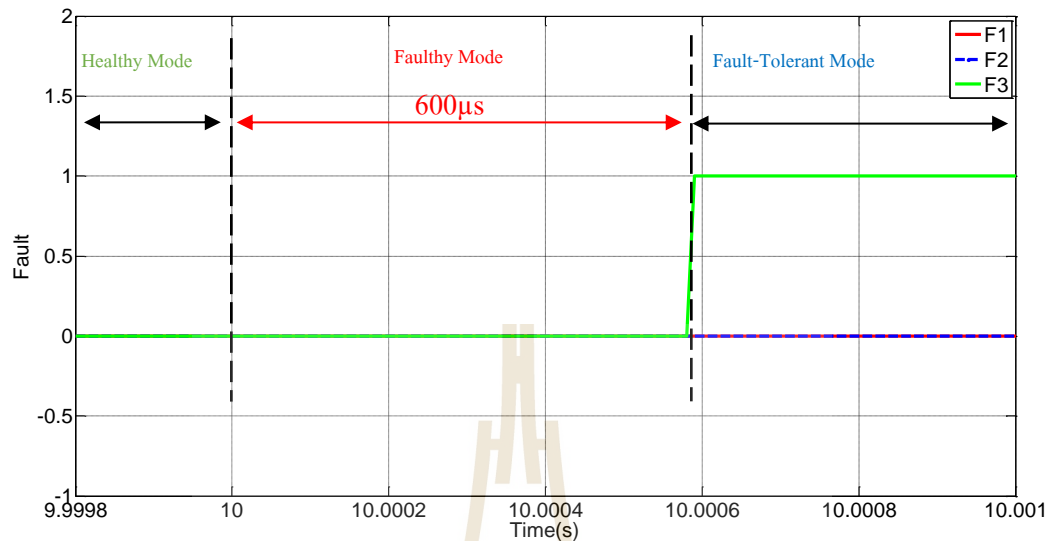
ผลการทดสอบชุดทดสอบ กรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์  $S_3$  โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงอยู่ที่ 200V แสดงได้ดังรูปที่ 6.27 จะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงสภาวะปกติตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเท่ากับ 200V ตามค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงที่กำหนดไว้ตามต้องการ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  และ  $i_{L3}$  มีการปรับตัวสูงขึ้น โดยในสถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 1.7A, 0.8A และ 0.3A ตามลำดับ และในช่วงเวลาหลังจากวินาทีที่ 10 หรือช่วงที่เกิดความผิดพลาดขึ้น จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เช่นเดียวกันกับกรณีก่อนหน้า จากรูปที่ 6.28 จะเห็นได้ว่าไม่ปรากฏสัญญาณพัลส์ของสวิตช์  $S_3$  หลังจากเกิดความผิดพลาดขึ้น ในขณะที่จะมีสัญญาณพัลส์เกิดขึ้นที่สวิตช์สำรอง  $S_3'$  แทน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสามารถตรวจจับความผิดพลาดในสวิตช์  $S_3$  ได้อย่างถูกต้องและสั่งให้สวิตช์  $S_3'$  ตัวที่สำรองไว้ทำงานแทนทันที ส่งผลให้วงจรมีสถานะความคงทนต่อความผิดพลาด โดยใช้เวลาในการตรวจจับความผิดพลาดประมาณ 800 $\mu$ s หรือ 0.8ms ซึ่งมีผลที่สอดคล้องใกล้เคียงกันกับผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงดังรูปที่ 6.29 โดยจากผลการจำลองสถานการณ์ใช้เวลาประมาณ 600 $\mu$ s หรือ 0.6ms ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์  $S_3$  ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ส่งผลให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6.27 ผลการทดสอบวงจรกรณีเกิดความผิดพลาดที่  $S_3$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 200V



รูปที่ 6.28 สัญญาณพัลส์ของชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่  $S_3$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 200V



รูปที่ 6.29 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพลาดที่  $S_3$  โดย  $V_{ref}$  เท่ากับ 200V

## 6.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น ซึ่งแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดการทำงานเดียวกัน โดยแสดงการเปรียบเทียบทั้งกรณีที่ไม่มีความผิดปกติ, มีความผิดปกติ และสถานะเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นที่สร้างขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตตามค่าวัฏจักรหน้าที่กำหนดไว้ ในส่วนของผลการทดสอบกรณีที่มีความผิดปกติ ได้อาศัยตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้นได้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ โดยมีการทดสอบเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน ตัวควบคุมสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดพลาดที่สวิตช์แต่ละตัว แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ทำให้สวิตช์สำรองทำงานแทนสวิตช์ที่เกิดความผิดพลาดได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วงจรสามารถทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นมีความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น

## บทที่ 7

### บทสรุป

#### 7.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์หลายชั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยได้นำเสนอการควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้น เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้น ซึ่งประกอบด้วยลู่วควบคุมแรงดันหนึ่งลู่ว และลู่วควบคุมกระแสสองลู่ว เพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงถึง 400 V เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 20 V นอกจากนี้ได้พัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้น โดยเริ่มจากการปรับทัศนวรรณกรรม เพื่อศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องดังแสดงในบทที่ 2 ซึ่งได้กล่าวถึงงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มแรงดันสูง และวิธีการตรวจจับความผิดพลาด เพื่อศึกษาแนวทางในการประยุกต์โครงสร้างวงจรที่มีความคงทนต่อความผิดพลาดและพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดในการทำงานจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตทั้งสองหัวข้อทำให้ได้ทราบถึงโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สองชั้น ซึ่งได้นำโครงสร้างวงจรถูกกล่าวมาพัฒนาเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้น และอาศัยการศึกษาพฤติกรรมการทำงานภายในวงจรสำหรับพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรที่เกิดขึ้น

โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้น แสดงในบทที่ 3 โดยมีการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ รวมถึงแสดงผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อให้เห็นถึงความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงตามต้องการเมื่อมีแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งอัตราขยายแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้ผลการจำลองสถานการณ์ยังแสดงการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ พบว่าสอดคล้องกับขอบเขตที่กำหนดไว้

ในบทที่ 4 ได้นำเสนอโครงสร้างการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามชั้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ ที่ได้การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมสำหรับลู่วควบคุมแรงดันและลู่วควบคุมกระแสทั้งสองลู่ว ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส โดยมีการปรับค่ากระแสอ้างอิงให้เหมาะสมกับลู่วควบคุม



กระแสทั้งสองรูป เพื่อควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ โดยได้ทำการจำลองสถานการณ์การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น ในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิผลของตัวควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น ให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป

ในบทที่ 5 ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นขณะมีตัวควบคุม เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ โดยได้ศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดพลาดภายใต้สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ เพื่อนำมาพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรมุ่งกล่าว ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดพลาดที่พัฒนาขึ้นอาศัยพฤติกรรมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่หนึ่งและสาม มาพิจารณาหาค่าความชันทั่วไป และอาศัยพฤติกรรมของสัญญาณควบคุมการสวิตช์ที่ได้จากคู่ควบคุมกระแสทั้งสองรูป ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตพฤติกรรมการทำงานของวงจร แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของกระแสขณะเกิดความผิดพลาดมีการสั้นไกวหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด จึงสามารถนำเอาพฤติกรรมดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดได้ และจากผลการจำลองสถานการณ์วิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นขณะมีตัวควบคุม แสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจจับความผิดพลาดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ทำให้สวิตช์สำรองทำงานแทนสวิตช์เกิดความผิดพลาดขึ้นได้รวดเร็ว จึงทำให้มีผลกระทบต่อวงจรเพียงเล็กน้อย และสามารถทำงานได้ต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ

ในบทที่ 6 ได้นำเสนอผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้น ซึ่งแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดการทำงานเดียวกัน โดยแสดงการเปรียบเทียบทั้งกรณีที่ชุดทดสอบไม่มีตัวควบคุม มีตัวควบคุม และสภาวะเกิดความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิดวงจร ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบวสต์สามขั้นที่สร้างขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตตามค่าวัฏจักรหน้าที่กำหนดไว้ ในส่วนของผลการทดสอบกรณีมีตัวควบคุม ได้อาศัยตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสที่พัฒนาขึ้น ได้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ โดยมีการทดสอบเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง เปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน ตัวควบคุมสามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การทำงานที่

เปลี่ยนแปลงไป และผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีเกิดความผิดปกติที่สวิทช์แต่ละตัว แสดงให้เห็นว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง สวิทช์สำรองทำงานแทนสวิทช์ที่เกิดความผิดปกติแบบเปิดวงจรได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์สามขั้นมีความคงทนต่อความผิดปกติ สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพในสภาวะที่มีความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรเกิดขึ้นได้

## 7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจจะมีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมประเภทอื่น ๆ สำหรับควบคุมการทำงานของวงจร
2. สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจจะมีการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมหรือควบคุมการทำงานของวงจรภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป
3. สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจจะมีการศึกษาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรที่สามารถตรวจจับความผิดปกติของสวิทช์ได้มากกว่าหนึ่งตัวพร้อมกัน
4. สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจจะมีการนำวิธีการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิทช์เปิดวงจรที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าอื่น ๆ

## รายการอ้างอิง

- [1] A. W. N. Husna, S. F. Siraj, and M. Z. Muin, "Modelling of DC-DC Converter for Solar Energy Applications," in *Proc. IEEE Computer and Informatics*, 2012, pp. 125-129.
- [2] T. Shimizu, K. Wada, and N. Nakamura, "Flyback-Type Single-Phase Utility Interactive Inverter with Power Pulsation Decoupling on the DC Input for AC Photovoltaic Module System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, January 2006, pp. 1264-1272.
- [3] J-S. Yoo, J-Y. Choi, M-K. Yang and W-Y. Choi, "Dual Active-Clamped Step-Up DC-DC Converter with Reduced Voltage Stress for Low-DC Renewable Sources," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2012, pp. 1303-1306.
- [4] F. Locment, M. Sechilariu, and I. Houssamo, "DC Load and Batteries Control Limitations for Photovoltaic Systems; Experiment Validation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 9, September 2012, pp. 4030-4038.
- [5] C. Zhang, Z. Zhang, M. Chen and Z. Qian, "An Impromved Variable Step-Size Maximum Power Point Tracking (MPPT) Based On Extremum Seeking Control (ESC) in Grid- Connected Photovoltaic Micro- Converter System," in *Proc IEEE Industrial Electronics*, 2012, pp. 1765-1770.
- [6] L-W. Zhou, B-X. Zhu and Q-M. Luo, "High Step-Up Converter with Capacity of Multiple Input," *IET Power Electron.*, vol. 5, no. 5, 2012, pp. 524-531.
- [7] Y. Park, B. Jung, and S. Choi, "Nonisolated ZVZCS Resonant PWM DC-DC Converter for High Step-Up and High-Power Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 8, August 2012, pp. 3568-3575.
- [8] W. Li and X. He, "Review of Nonisolated High- Step- Up DC/ DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, April 2011, pp. 1239-1250.

- [9] Wuhua Li, Xiaodong Lv, Yan Deng, Jun Liu, Xiangning He (2009) “A Review of Non-Isolated High Step-Up DC/DC Converters in Renewable Energy Applications” IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition.
- [10] Kuo-Ching Tseng and Chi-Chih Huang (2014) “High Step-up High-Efficiency Interleaved Converter with Voltage Multiplier Module for Renewable Energy System” in IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL 61, NO3, MARCH.
- [11] Roger Gules, Walter Meneghette dos Santos, Flavio Aparecido dos Reis, Eduardo Felix Ribeiro Romaneli, and Alceu André Badin (2014) “A Modified SEPIC Converter with High Static Gain for Renewable Application” in IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 29, NO. 11, NOVEMBER.
- [12] M. Mohammadi, J. S. Moghani, J. Milimonfared and N. Safari (2015) “A Non-Isolated High Step-up DC-DC Converter with Soft Switching Using coupled Inductor” in 6th International Power Electronics Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2015), 3-4 Feb 2015, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- [13] Mohammad Lotfi Nejad, Behzad Poorali, Ehsan Adib, and Ali Akbar Motie Birjandi (2016) “New cascade boost converter with reduced losses” in IET Power Electronics., Vol. 9, Iss. 6, pp. 1213–1219.
- [14] Andre Elias Lucena da Costa, Romero Leandro Andersen (2015) “HIGH-GAIN BOOST-BOOST-FLYBACK CONVERTER FOR RENEWABLE” in IEEE Trans. on Power Electronic.
- [15] Annop Nakpin and Sudarat Khwan-on (2016) “A Novel High Step-Up DC-DC Converter for Photovoltaic Applications” Procedia Computer Science 86 (2016), pp. 409-412.
- [16] Hongchen Liu, Fei Li, and Jian Ai (2016) “A Novel High Step-Up Dual Switches Converter with Coupled Inductor and Voltage Multiplier Cell for a Renewable Energy System” IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL 31, NO.7, JULY.

- [17] Mahajan Sagar Bhasker, Rishi M. Kulkarni, Sanjeevikumar Padmanaban, Pierluigi Siano, and Frede Blaabjerg (2016) “Hybrid Non-Isolated and Non Inverting Nx Interleaved DC-DC Multilevel Boost Converter for Renewable Energy Application” in IEEE Trans. on Power Electronic.
- [18] Masoume Amirbande, Keyvan Yari, Mojtaba Forouzesh, Alfred Baghrmian (2016) “A Novel Single Switch High Gain DC-DC Converter Employing Coupled Inductor and Diode Capacitor” 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2016) 16- 18 Feb 2016, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
- [19] Bin Wu, Shouxiang Li, Yao Liu, and Keyue Ma Smedley (2016). “A New Hybrid Boosting Converter for Renewable Energy Applications” in IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL 31, NO.2, FEBRUARY.
- [20] T. Park, and T. Kim (2011) “Novel Fault Tolerant Power Conversion System for Hybrid Electric Vehicles” in IEEE Trans.
- [21] Mahmoud Shahbazi, Ehsan Jamshidpour, Philippe Poure, Shahrokh Saadate, and Mohammad Reza Zolghadri (2013). “Open- and Short-Circuit Switch Fault Diagnosis for Nonisolated DC–DC Converters Using Field Programmable Gate Array” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 60, NO. 9, SEPTEMBER.
- [22] Eunice Ribeiro, Antonio J. Marques Cardoso, and Chiara Boccaletti (2013) “Fault-Tolerant Strategy for a Photovoltaic DC–DC Converter” IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 28, NO. 6, JUNE.
- [23] E. Jamshidpour, M. Shahbazi, P. Poure, E. Gholipour, and S. Saadate “Fault tolerant operation of single-ended non-isolated DC-DC converters under open and short-circuit switch faults” International Symposium on Power Electronics,Electrical Drives, Automation and Motion.

- [24] E. Ribeiro, A. J. Marques Cardoso, and C. Boccaletti (2014) “Fault Diagnosis in Unidirectional Non-Isolated DC-DC Converters” in IEEE Trans.
- [25] E. Ribeiro, A. J. Marques Cardoso, and C. Boccaletti (2014) “Fault Diagnosis in Non-Isolated Bidirectional Half-Bridge DC-DC Converters” in IEEE Trans.
- [26] E. Jamshidpour, M. Shahbazi, S. Saadate, P. Poure, and E. Gholipour (2014) “FPGA Based Fault Detection and Fault tolerance Operation in DC- DC Converters” International Symposium on Power Electronics,Electrical Drives, Automation and Motion.
- [27] Yigeng Huangfu, Shengrong Zhuo, Fuxi Chen, and Shengzhao Pang (2016) “Evaluation and Fault Tolerant Control of a Floating Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Systems” in IEEE Trans.
- [28] Elham Pazouki, Jose Alexis De Abreu-Garcia and Yilmaz Sozer (2017) “Fault Tolerant Control Method for Interleaved DCDC Converters under Open and Short Circuit Switch Faults” in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1-5 Oct.

## ภาคผนวก

### บทความที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่จากโครงการวิจัย

1. ศุภณัฐ เตียวสุรินทร์ สุदारัตน์ ขวัญอ่อน และกองพัน อารีรักษ์ “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้นโดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ” การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (EECON-40) ณ.โรงแรม เดอะชาयน์ จังหวัดชลบุรี วันที่ 15-17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 จำนวน 4 หน้า
2. ศุภณัฐ เตียวสุรินทร์ และสุदारัตน์ ขวัญอ่อน “การควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้นสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (EECON-40) ณ.โรงแรม เดอะชาयน์ จังหวัดชลบุรี วันที่ 15-17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 จำนวน 4 หน้า
3. S. Khwan-on and S. Diewsurin “An Open-Circuit Switch Fault Detection Strategy for a Three-Stage Cascaded Boost Converter” 2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON) , Krabi, 2018.
4. ศุภณัฐ เตียวสุรินทร์ และสุदारัตน์ ขวัญอ่อน “การสังเกตพฤติกรรมความผิดพลาดแบบสวิตช์เปิด วงจรสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบเรียงต่อกันสามชั้นที่มีตัวควบคุม” การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 41 (EECON-41) ณ.โรงแรมสุนีย์ แกรนด์ โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี วันที่ 21-23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 จำนวน 4 หน้า

## ประวัติผู้เขียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุदारัตน์ ขวัญอ่อน สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี และปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2545 และ 2548 ตามลำดับ จากนั้นสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก ทางด้าน Electrical and Electronic Engineering จาก The University of Nottingham ประเทศอังกฤษ ในปี พ.ศ. 2554 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า การขับเคลื่อนเครื่องจักรกล ระบบที่มีความคงทนต่อความผิดพลาด วิธีการตรวจจับความผิดพลาด และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์

