



## รายงานการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง

แบบสวิตช์เดียวสำหรับระบบพลังงานทดแทน

(A High Step-Down Single-Switch DC-DC Converter for  
Renewable Energy Systems)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง

แบบสวิตช์เดียวสำหรับระบบพลังงานทดแทน

(A High Step-Down Single-Switch DC-DC Converter for  
Renewable Energy Systems)

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุदारัตน์ ขวัญอ่อน

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2564

## บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโครงสร้างใหม่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดี่ยวที่มีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า สำหรับระบบพลังงานทดแทน โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะทำหน้าที่ลดระดับแรงดันอินพุตจากระบบแหล่งจ่ายแรงดันสูงประมาณ 400 V ให้ได้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ 20 V เพื่อใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการแรงดันต่ำหรือต่อเข้ากับแบตเตอรี่เพื่อเก็บสะสมพลังงาน โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว เพื่อลดกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการใช้สวิตช์กำลังหลายตัว รวมถึงง่ายต่อการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้การควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ จะอาศัยตัวควบคุมพีไอ ในงานวิจัยนี้จะอธิบายโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น หลักการทำงานของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเพื่อเลือกขนาดของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสม รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของวงจร ทำการออกแบบตัวควบคุมพีไออย่างง่ายที่ใช้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่พัฒนาขึ้น จากนั้นทำการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบของชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรที่พัฒนาขึ้นมีอัตราลดทอนแรงดันได้สูงถึงประมาณ 20 เท่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอสามารถทำงานได้อย่างน่าพอใจยิ่ง ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ

## Abstract

This research proposes a new topology of a high step-down single-switch dc-dc converter with a high conversion ratio of approximately 20 times for renewable energy systems. The proposed converter can step down the high input voltage, about 400 V, to the lower output voltage level of approximately 20 V, in order to supply the DC load or to charge the battery for energy storage. The proposed converter employs only one power switch, resulting in the power loss reduction compared to the case that there are many power switches located in the converter. The simple control strategy with the PI controller can be achieved to regulate the output voltage at the constant desired level. In this research, the proposed step-down converter configuration is presented and the principle of operation for the proposed converter is topological analyzed. The efficiency of the proposed converter is also evaluated. The converter parameters are designed in order to select the proper size of the capacitors and the inductors. The parameter gains of the PI controller for the proposed converter are simply designed to obtain the desired output voltage. The laboratory prototype of the proposed converter is built for the experimental testing. Simulation and experimental results show that the proposed converter can achieve the high step-down conversion ratio of approximately. The proposed high step-down single-switch dc-dc converter operates satisfactorily to generate the desired constant output voltage under different operating conditions.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวสำหรับระบบพลังงานทดแทน สามารถสำเร็จจุล่งไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายรณกร คำบุยา และ นายเกื้อกุล กองกาญจนะ ผู้ช่วยวิจัย ที่ดำเนินงานด้วยความทุ่มเทและเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือให้การดำเนินงานเป็นไปด้วยความเรียบร้อย

สุตารัตน์ ขวัญอ่อน

พฤษภาคม 2564



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 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.....	5
1.5 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย.....	6
<b>บทที่ 2 การสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง</b> .....	<b>8</b>
2.1 บทนำ.....	8
2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง.....	8
2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการ ลดทอนแรงดันสูง.....	12
2.4 สรุป.....	15
<b>บทที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง แบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น</b> .....	<b>16</b>
3.1 บทนำ.....	16
3.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอน แรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น.....	16

3.3	หลักการดำเนินงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น.....	17
3.4	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น.....	28
3.5	ผลการจำลองสถานการณ์.....	34
3.6	สรุป .....	39
<b>บทที่ 4</b>	<b>การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น.....</b>	<b>40</b>
4.1	บทนำ.....	40
4.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น.....	40
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์.....	48
4.4	สรุป.....	59
<b>บทที่ 5</b>	<b>ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น.....</b>	<b>60</b>
5.1	บทนำ.....	60
5.2	โครงสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น.....	60
5.3	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น.....	62
5.4	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	65
5.5	วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคตสัญญาณ.....	67
5.6	วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแส.....	67
5.7	ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	71
5.8	สรุป .....	71
<b>บทที่ 6</b>	<b>ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่สร้างขึ้น.....</b>	<b>72</b>
6.1	บทนำ.....	72
6.2	การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นขณะที่ไม่มีตัวควบคุม.....	72
6.3	การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นขณะที่มีตัวควบคุมพีไอ.....	86
6.4	สรุป .....	95
<b>บทที่ 7</b>	<b>สรุป.....</b>	<b>96</b>
7.1	สรุป.....	96

7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	97
รายการอ้างอิง .....	98
ภาคผนวก .....	101
ประวัติผู้เขียน .....	102





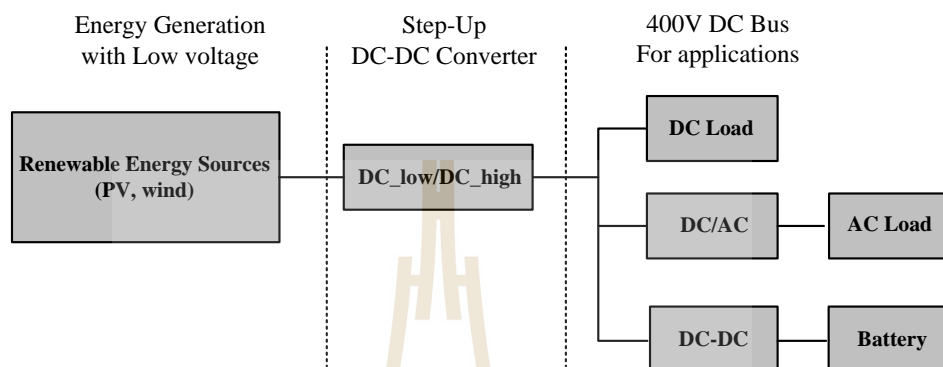
## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ทรัพยากรธรรมชาติในประเทศที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และ ถ่านหิน มีปริมาณลดลงซึ่งอาจหมดสิ้นในที่สุด ดังนั้นแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy Sources) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจอย่างมาก เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคตอย่างยั่งยืน โดยแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้า ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) พลังงานลม (wind energy) พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell energy) และพลังงานชีวมวล (biomass energy) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พลังงานลม และ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานที่น่าสนใจมาก เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่ได้มาจากธรรมชาติ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และไม่มีทางหมดสิ้นไป อย่างไรก็ตาม การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ ขึ้นอยู่กับปัจจัยเงื่อนไขทางสิ่งแวดล้อมด้วย [1] เช่น สภาพอากาศ สภาพภูมิประเทศ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแหล่งพลังงานดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (power converter) จึงมีบทบาทสำคัญในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานลม หรือ พลังงานแสงอาทิตย์ ให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง และเหมาะสมกับโหลด นอกจากนี้ ระบบผสมผสานของพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ (hybrid PV/wind system) ร่วมกับการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC converter) สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังโหลดได้มากขึ้น [2] ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงจะทำหน้าที่ในการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นประมาณ 400 Vdc เมื่อแรงดันอินพุตที่ได้จากแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าค่อนข้างต่ำ เพื่อประยุกต์ในการขับโหลดกระแสตรงที่ต้องการแรงดันค่อนข้างสูง หรือขับโหลดกระแสสลับโดยอาศัยวงจรอินเวอร์เตอร์ [3] โดยแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง จะเป็นอินพุตให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC-AC inverter) เพื่อผลิตไฟฟ้าแรงดันกระแสสลับ สำหรับเชื่อมต่อเข้าระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Grid-connected system) และพร้อมจ่ายกำลังงานให้กับโหลดกระแสสลับ หรืออาจนำแรงดันกระแสสลับที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในลักษณะระบบอิสระ (PV stand-alone system) เพื่อใช้ในภาคครัวเรือนหรือชนบทที่ห่างไกลจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า

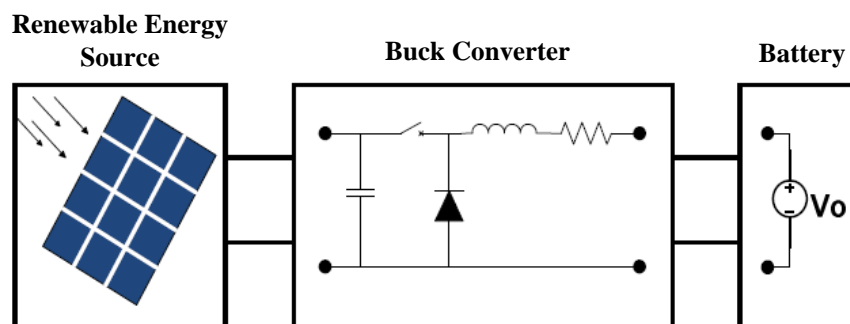
นอกจากนี้พลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์และพลังงานลมสามารถใช้ประจุแบตเตอรี่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดกระแสตรง รวมทั้งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง [4] กรณีที่แหล่งพลังงานทดแทนดังกล่าวไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจเกิดจากสภาพอากาศ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน

เมื่อพิจารณาโครงสร้างการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มความน่าเชื่อถือ (reliability) ให้กับระบบพลังงานทดแทน เมื่อแหล่งพลังงานทดแทนทั้งสองไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม ซึ่งอาจเนื่องมาจากปัจจัยทางธรรมชาติ เช่น ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก แสงอาทิตย์ไม่สามารถส่องมายังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างเต็มที่ หรือในช่วงเวลากลางคืน เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการสะสมพลังงานที่ได้จากพลังงานทดแทนไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อเป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับส่วนอื่นของระบบในกรณีที่จำเป็นดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างการสะสมพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเก็บไว้ในแบตเตอรี่ โดยอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคค์ (buck converter) เข้าช่วยในการลดระดับแรงดันอินพุต เพื่อได้แรงดันเอาต์พุตที่ระดับต่ำและเหมาะสมกับแบตเตอรี่ [5]

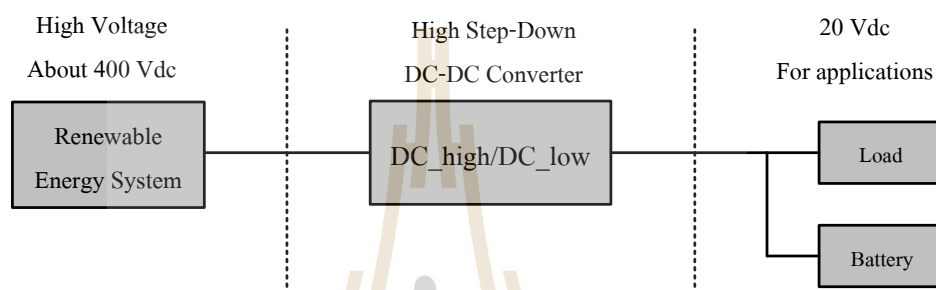


รูปที่ 1.2 การเก็บสะสมพลังงานทดแทนไว้ในแบตเตอรี่

เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบักก์ที่ปรากฏในรูปที่ 1.2 มีอัตราการลดทอนแรงดันค่อนข้างต่ำ จึงมีข้อจำกัดเมื่อต้องการการลดทอนระดับแรงดันสูงๆ ทำให้จำเป็นต้องนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบักก์มาต่ออนุกรมกันหลายชั้น (multi-stage buck converter) ซึ่งส่งผลให้ต้องใช้สวิทช์กำลังและอุปกรณ์อื่นๆ จำนวนเพิ่มมากขึ้น นำไปสู่การเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดทอนแรงดัน ที่สามารถลดทอนระดับแรงดันได้ในอัตราที่สูง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการพัฒนาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงยิ่ง ซึ่งมีอัตราการลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า เพื่อนำไปประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน สำหรับการเก็บสะสมพลังงานในแบตเตอรี่ และใช้กับโหลดที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยแรงดันอินพุตของวงจรที่จะพัฒนาขึ้นนี้มีค่าประมาณ 400 Vdc ซึ่งได้จากระบบพลังงานทดแทนที่สอดคล้องกับโครงสร้างของระบบในรูปที่ 1.1 ทั้งนี้ในการพัฒนาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง จะใช้สวิทช์กำลังเพียงตัวเดียว เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเกิดจากการใช้อุปกรณ์สวิทช์กำลังจำนวนหลายตัว รวมทั้งช่วยในการควบคุมการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นไม่ยุ่งยากซับซ้อน จากนั้นจะดำเนินการวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้น ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร ได้แก่ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ ความถี่ในการสวิทช์ เป็นต้น รวมถึงทำการควบคุมการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ ซึ่งจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการ

วิเคราะห์ และควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้น ก่อนนำไปสร้างชุดทดสอบ และทำการทดสอบ เพื่อแสดงประสิทธิผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงยิ่งที่ได้พัฒนาขึ้น



รูปที่ 1.3 โครงสร้างการลดทอนระดับแรงดันในระบบพลังงานทดแทน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดทอนระดับแรงดันในรูปแบบต่างๆ ทำให้ทราบข้อเด่นข้อด้อยของวงจรต่างๆ เหล่านั้น
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง โดยใช้สวิตช์เพียงตัวเดียวในการลดทอนระดับแรงดัน สำหรับระบบพลังงานทดแทน
- 1.2.4 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น
- 1.2.5 เพื่อสร้างชุดทดสอบ สำหรับแสดงประสิทธิผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่ได้พัฒนาขึ้น
- 1.2.6 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบ วิเคราะห์ และควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวสำหรับระบบพลังงานทดแทน

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ระบบพลังงานทดแทนที่พิจารณาในโครงการวิจัยคือ ระบบพลังงานทดแทนแบบผสมผสานระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ที่มีการเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตประมาณ 400 Vdc โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบเพิ่มค่าแรงดัน ในการดำเนินงานจะใช้วงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสเพื่อกำเนิดแรงดันกระแสตรง 400 Vdc เพื่อทำหน้าที่เสมือนแรงดันอินพุตสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น
- 1.3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียว ถูกพัฒนาโครงสร้างวงจรและออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรให้สามารถลดทอนระดับแรงดันได้ประมาณ 20 เท่า เพื่อลดระดับแรงดันกระแสตรงจาก 400 Vdc เป็น 20 Vdc
- 1.3.3 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียว จะพิจารณาจากผลการจำลองสถานการณ์ระบบดังกล่าวด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB และผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ได้จากการสร้างชุดทดสอบจริง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้ด้านการพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวสำหรับระบบพลังงานทดแทน
- 1.4.2 ได้องค์ความรู้ด้านการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่ได้พัฒนาขึ้น
- 1.4.3 ได้องค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียว โดยศึกษาจากการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.4 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียว โดยใช้บอร์ดดีเอสพีคอนโทรลเลอร์
- 1.4.5 ได้ต้นแบบชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวสำหรับระบบพลังงานทดแทน

- 1.4.6 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ
- 1.4.7 ผลที่ได้จากการวิจัย สามารถนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าทั้งระดับปริญญาตรีและปริญญาโท เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยในอนาคตต่อไป

## 1.5 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้มีการนำเสนอเนื้อหาดังต่อไปนี้

*บทที่ 1* เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

*บทที่ 2* นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมบทความที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง

*บทที่ 3* กล่าวถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น รวมถึงวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรดังกล่าว แสดงการเปรียบเทียบอัตราการลดทอนแรงดันที่ได้จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบต่าง ๆ และออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น แสดงผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันว่าสามารถลดทอนแรงดันได้ถึงประมาณ 20 เท่า

*บทที่ 4* อธิบายหลักการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอ สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยการออกแบบตัวควบคุมของลูประดัน การออกแบบตัวควบคุมของลูกระแส และผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นเมื่อต้องการแรงดันเอาต์พุตคงที่ 20 V<sub>dc</sub> ภายใต้การทำงานในสภาวะต่าง ๆ

*บทที่ 5* กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 400V ให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่พัฒนาขึ้น วงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันและวงจรตรวจจับสัญญาณกระแส โดยอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp<sup>TM</sup>F28335 ในกระบวนการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 6 กล่าวถึงการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น ทั้งกรณีไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุมพีไอ ภายใต้การทำงานของวงจรในสถานการณ์ต่าง ๆ รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้น แสดงผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นในกรณีต่าง ๆ เช่น การปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลด เพื่อแสดงประสิทธิผลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอ นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้เงื่อนไขการทำงานเดียวกันด้วย

บทที่ 7 บทสรุป



## บทที่ 2

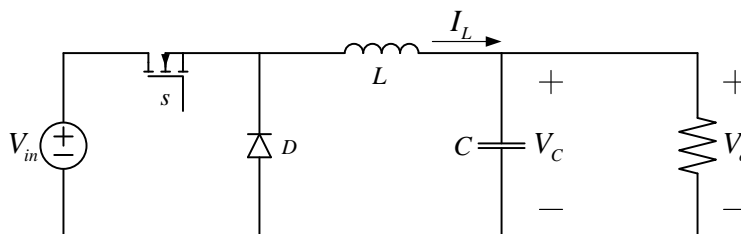
### การสำรวจประสิทธิภาพการแปลงที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน เช่น ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้มีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทนี้ จึงเป็นการนำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งดำเนินการสำรวจประสิทธิภาพการแปลงที่มีปรากฏในอดีต ซึ่งเกี่ยวข้องกับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง เพื่อศึกษาข้อเด่นและข้อด้อยของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงในโครงสร้างแบบต่าง ๆ และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงสำหรับงานวิจัยนี้

#### 2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง

วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ (buck converter) เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้ต่ำกว่าแรงดันอินพุต โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 วงจรนี้ประกอบไปด้วยสวิตช์กำลัง ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรกับส่วนแรงดันด้านอินพุต ไดโอด ทำหน้าที่เป็นทางไหลของกระแสในช่วงสวิตช์เปิดวงจร ตัวเก็บประจุ ทำหน้าที่กรองแรงดันเอาต์พุตให้เรียบขึ้น และตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่สะสมพลังงานและจ่ายพลังงานในช่วงที่สวิตช์ปิดและเปิดวงจรตามลำดับ



รูปที่ 2.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์



ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตที่ได้จากวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์เป็นดังสมการที่ (2-1)

$$V_o = DV_{in} \quad (2-1)$$

เมื่อ  $D$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ สำหรับสวิตช์ จะเห็นได้ว่าการลดทอนระดับแรงดันอินพุตเพื่อให้ระดับแรงดันเอาต์พุตที่ลดลงขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่ ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรหน้าที่ และอัตราลดทอนแรงดันของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์

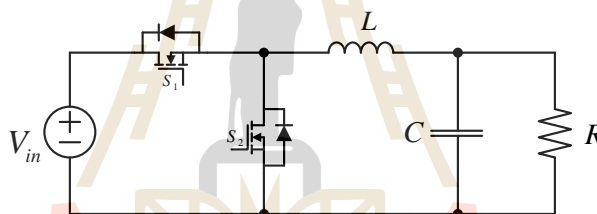
ตารางที่ 2.1 อัตราการลดทอนแรงดันของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์

Duty cycle (D)	อัตราลดทอนแรงดัน
0	Infinity
0.1	10
0.2	5
0.3	3.33
0.4	2.5
0.5	2
0.6	1.67
0.7	1.43
0.8	1.25
0.9	1.11
1.0	1

จากตารางที่ 2.1 จะพบว่าค่าแรงดันเอาต์พุต จะขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่ โดยแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลงเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่ลดลง ทั้งนี้การทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำ ๆ เช่น ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.1 วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์จะลดแรงดันได้ประมาณสิบเท่า อย่างไรก็ตามการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำ ๆ จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของวงจร กล่าวคือทำให้

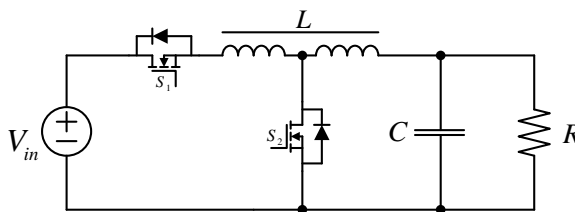
ประสิทธิภาพของวงจรลดลง เนื่องจากจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขณะสวิตช์ทำงาน (switching loss) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง รวมทั้งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัตินัก เนื่องจากหากช่วงเวลาที่สวิตช์เปิด ( $t_{on}$ ) น้อยๆ อาจทำให้คอนโทรลเลอร์ทำงานผิดพลาดได้ หากมีความเร็วในการประมวลผลไม่เพียงพอ

จากข้อจำกัดด้านอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบักค์ พบว่ามีงานวิจัยในอดีตที่ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างของวงจรเพื่อให้สามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้มากขึ้น โดยรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส (Synchronous buck converter) เป็นการนำสวิตช์มาทำหน้าที่แทนไดโอด ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรให้สูงขึ้นได้ เนื่องจากการใช้ไดโอดในวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบักค์จะเกิดกำลังสูญเสียภายในไดโอดค่อนข้างสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง [1]



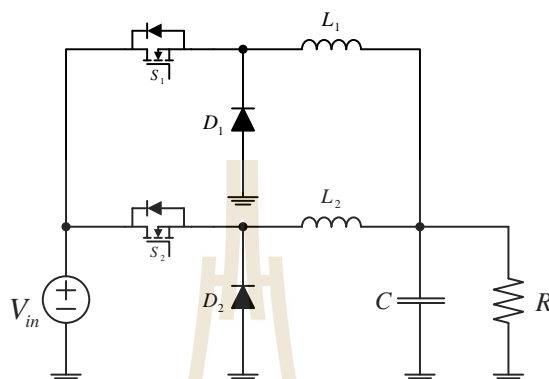
รูปที่ 2.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ (Tapped-inductor buck converter) การใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบคู่ควบ จะช่วยให้สามารถลดทอนแรงดันได้มากขึ้น อาศัยหลักการเดียวกันกับจำนวนขดลวดในหม้อแปลง [2]



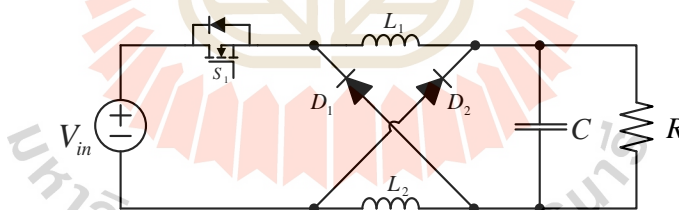
รูปที่ 2.3 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลีฟสองเฟส (Two-phase interleaved buck converter) เป็นการนำวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคส์สองวงจรมาต่อขนานกัน ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังไฟฟ้า ลดการกระเพื่อมของกระแส และลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ [3]



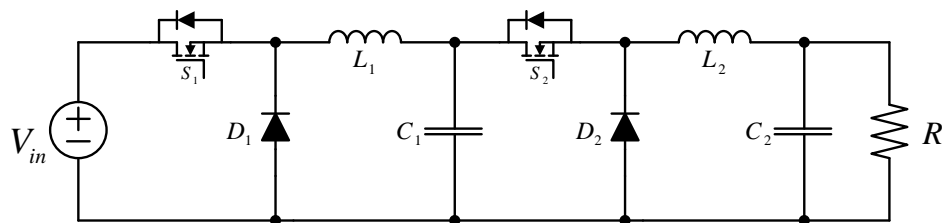
รูปที่ 2.4 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลีฟสองเฟส

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ (Diode-assisted buck converter) ประกอบด้วย ไดโอดและตัวเหนี่ยวนำอย่างละสองตัว [4]



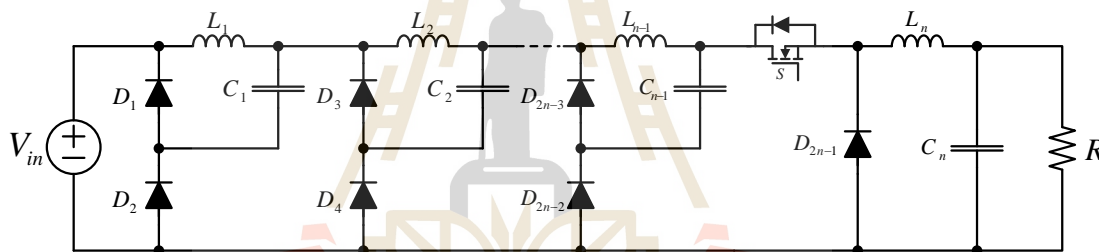
รูปที่ 2.5 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบแคสเคดสองชั้น (cascade buck converter) เป็นการนำวงจรลดทอนแรงดันแบบบัคส์สองวงจรมาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้สามารถลดทอนระดับแรงดันเอาต์พุตได้มากขึ้น [5]



รูปที่ 2.6 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบแคสเคดสองขั้น

รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบแคสเคดโดยใช้สวิตช์ตัวเดียว (Cascade buck converter with a single active switch) วงจรดังกล่าวมีการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด จำนวนมาก ผสมผสานกับโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบักก์ [6]



รูปที่ 2.7 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบแคสเคดโดยใช้สวิตช์ตัวเดียว

### 2.3 ปรัชญาธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการค้นคว้างานวิจัยในอดีต เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

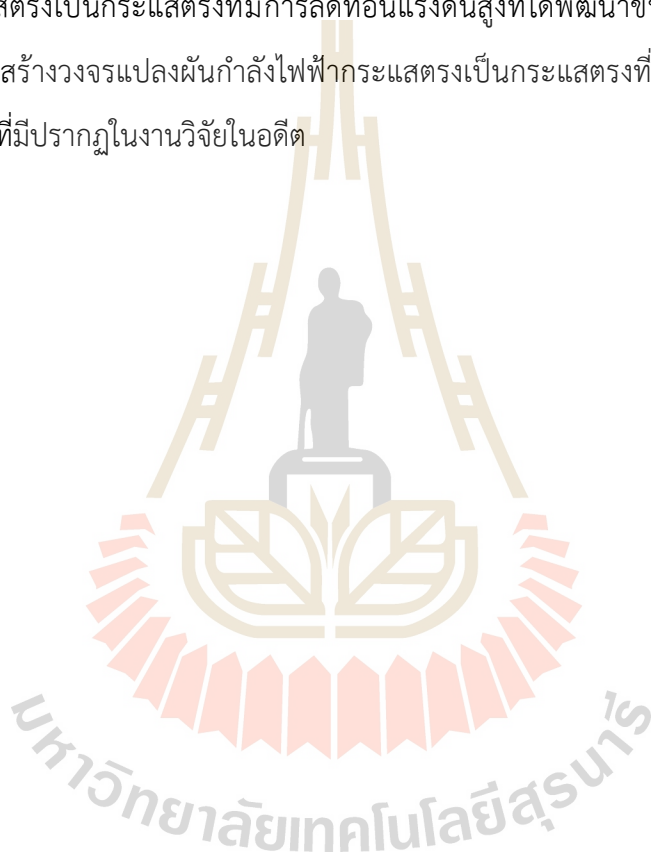
ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2002 [7]	Kaiwei Yao, Yu Meng and Fred C. Lee	บทความนี้แนะนำเสนอโครงสร้างวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟแบบสองเฟส เพื่อใช้ในระบบที่มีแรงดันต่ำ ที่ใช้ความถี่ในการสวิตซ์สูง
2005 [6]	Kaiwei Yao, Yu Meng and Fred C. Lee	บทความนี้แนะนำเสนอโครงสร้างของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส ในส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจร
2005 [8]	Kaiwei Yao, Mao Ye, Ming Xu, and Fred C. Lee	บทความนี้แนะนำเสนอโครงสร้างวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบช่วยเพิ่มอัตราลดทอนแรงดันตามจำนวนขดลวด
2005 [12]	M. Veerachary	บทความนี้แนะนำเสนอโครงสร้างของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันสองชั้น เพื่อเพิ่มอัตราลดทอนแรงดันได้เป็นสองเท่า การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเพื่อนำไปสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2007 [13]	Sondeep Bassan and Gerry Moschopoulos	บทความนี้แนะนำเสนอการวิเคราะห์หลักการทำงานวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันโดยใช้สวิตซ์ตัวเดียว นำไปใช้ร่วมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสนำ ณ การทำงานที่ความถี่สูง
2008 [14]	Ortiz-Lopez	บทความนี้แนะนำเสนอโครงสร้างของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันโดยใช้สวิตซ์ตัวเดียว ช่วยให้ได้กำลังการสูญเสียภายในสวิตซ์ แสดงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2008	Mohamed El-Zanaty	บทความนี้แนะนำเสนอโครงสร้างของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส ในส่วนของการวิเคราะห์

[15]		หลักการทํางาน การออกแบบวงจรเพื่อนําไปใช้ในงานที่ต้องการแรงดันต่ำ กระแสสูง
2009 [16]	Jinbin zhao	บทความนี้แนะนําหลักการทํางานวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนําคู่ควบ รวมถึงอธิบายอัตราขยายแรงดันสูง การทํางานภายใต้สภาวะ ZVS
2010 [17]	J. Leyva-Ramos, L. H. Diaz-Saldierna and M. G. Ortiz-Lopez	บทความนี้แนะนําเสนอโครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันโดยใช้สวิตช์ตัวเดียวและ การหาตัวควบคุมของวงจร
2011 [18]	Iman Rezaei, Mahdi Akhbari	บทความนี้แนะนําเสนอโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ การวิเคราะห์การทํางาน รวมถึงอัตราลดทอนแรงดัน
2012 [19]	Yan Zhang, Chaoyi Zhang, Jinjun Liu and Yujie Cheng	บทความนี้แนะนําเสนอโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือการหาประสิทธิภาพของวงจรเปรียบเทียบกับแบบดั้งเดิม
2012 [20]	Rohan Dayal and Leila Parsa	บทความนี้แนะนําเสนอโครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนําคู่ควบ การหาพารามิเตอร์ของวงจร
2012 [21]	Octavian Cornea, Ovidiu Pelan and Nicolae Muntean	บทความนี้แนะนําเสนอโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ การวิเคราะห์หลักการทํางาน การออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร
2013 [22]	Ovidiu Pelan, Nicolae Muntean, Octavian Cornea and Frede Blaabjerg	บทความนี้แนะนําเสนอการผสมผสานของวงจรลดทอนระดับแรงดันสองแบบเข้าด้วยกัน ส่งผลให้อัตราลดทอนแรงดันสูงขึ้น

## 2.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ ได้นำเสนอการปฏิวัติวิศวกรรมบทความที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง ซึ่งเป็นประโยชน์และเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาโครงสร้างใหม่สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ 3 ทั้งนี้ในบทนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง ในรูปแบบต่าง ๆ ดังที่มีปรากฏในงานวิจัยในอดีต



### บทที่ 3

## วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

### 3.1 บทนำ

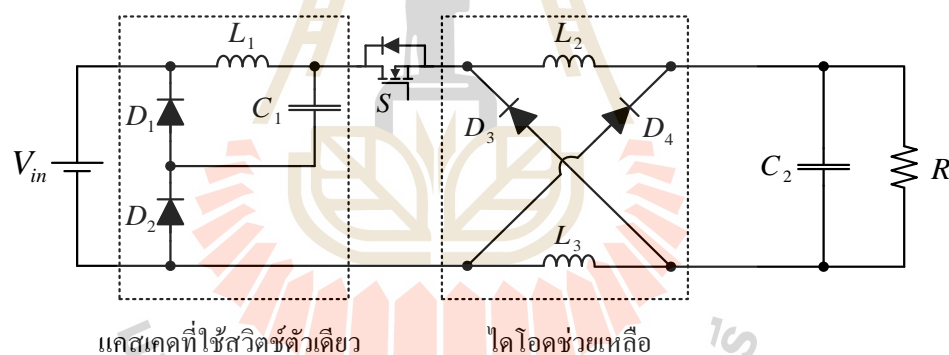
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงในบทที่ผ่านมา พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจร และช่วยลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ทำหน้าที่ลดทอนระดับแรงดันอินพุต เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ โดยจะใช้สวิตช์เพียงตัวเดียวร่วมกับอุปกรณ์อื่น เพื่อลดทอนระดับแรงดันได้สูงประมาณ 20 เท่า สำหรับประยุกต์ใช้งานกับระบบพลังงานทดแทน เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น การวิเคราะห์หลักการการทำงาน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ รวมทั้งยังนำเสนอการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

### 3.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงโดยทั่วไป สามารถลดระดับแรงดันได้ระดับหนึ่ง เช่น วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคคั้งเดิม วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการลดทอนระดับแรงดันอินพุต 400 Vdc ให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ 20 Vdc นั่นคือมีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะนำไปสู่โครงสร้างแบบใหม่ ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดียวที่มีการลดทอนแรงดันได้สูง เพื่อประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน สำหรับการสะสมพลังงานในแบตเตอรี่ หรือสำหรับโหลดที่ต้องการแรงดันกระแสตรงในระดับต่ำ เมื่อแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าค่อนข้างสูง โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ดัง



แสดงในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วยวงจรสำคัญสองส่วน คือ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (Cascade buck converter with a single active switch) และ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ (Diode-assisted buck converter) ดังนั้นวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้จึงเป็นการผสมผสานการทำงานของทั้งสองวงจรข้างต้น ประกอบไปด้วย สวิตช์กำลัง ( $S$ ) , ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1, L_2, L_3$ ) ตัวเก็บประจุ ( $C_1, C_2$ ) และไดโอด ( $D_1, D_2, D_3, D_4$ ) เพื่อสามารถลดระดับแรงดันอินพุต จนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ โดยอัตราลดทอนแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า เมื่อมีระดับแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างสูงประมาณ 400 V ภายใต้การทำงานของสวิตช์กำลังตัวเดียว ทั้งนี้วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีข้อดี คือมีอัตราการลดทอนแรงดันที่สูง โดยอาศัยการทำงานของสวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวทำให้ลดความซับซ้อนในการควบคุมวงจรได้

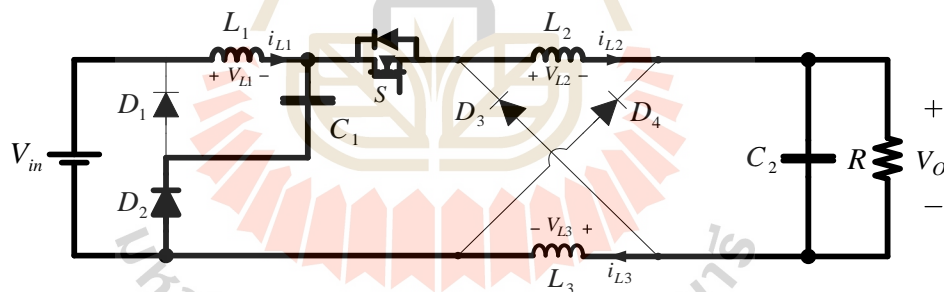


รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น

### 3.3 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

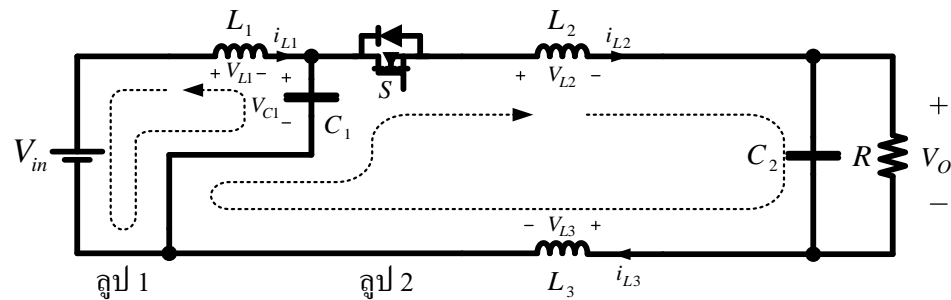
การวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น สามารถพิจารณาการทำงานของวงจรในหนึ่งคาบการทำงานของสวิตช์ได้ เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  นำกระแส และช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  ไม่นำกระแส ดังต่อไปนี้

**ช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  นำกระแส :** วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงขณะที่สวิตช์  $S$  นำกระแส แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 พบว่าตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะเก็บสะสมประจุ ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนกับแหล่งจ่ายแรงดัน เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของตัวเก็บประจุดังกล่าวพบว่า ส่งผลต่อการทำงานของไดโอด ทำให้ไดโอด  $D_2$  สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากไดโอด  $D_2$  ได้รับการไบอัสตรงจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพื่อนำกระแสเข้าสู่สวิตช์กำลัง  $S$  และอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_2$  ในขณะที่ไดโอด  $D_1, D_3$  และ  $D_4$  ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากไดโอด  $D_1$  ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำให้แรงดันที่ขั้วแอโนดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ( $V_{D2} < V_{in}$ ) ส่วนไดโอด  $D_3$  ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ซึ่งทำให้แรงดันที่ขั้วแอโนดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ( $V_{L3} < V_{C1}$ ) และในลักษณะเดียวกันไดโอด  $D_4$  ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่คายประจุ ทำให้แรงดันที่ขั้วแอโนดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ( $0 < V_0$ ) ดังนั้นในช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  นำกระแส จึงมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1, L_2, L_3$  ไดโอด  $D_2$  สวิตช์กำลัง  $S$  ตัวเก็บประจุ  $C_1, C_2$  และโหลดต้านทาน  $R$



รูปที่ 3.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์นำกระแส

จากนั้นใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) เข้าช่วยในการอธิบายความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง สามารถพิจารณากฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ในขณะที่สวิตช์  $S$  นำกระแสได้ 2 ลูปการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ดังแสดงในสมการที่ (3-1) และ (3-2)



รูปที่ 3.3 กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในขณะที่สวิตช์  $S$  นำกระแส

ลูป 1 ;  $-V_{in} + V_{L1} + V_{C1} = 0$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} - V_{C1}$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = \frac{V_{in} - V_{C1}}{L_1} \quad (3-1)$$

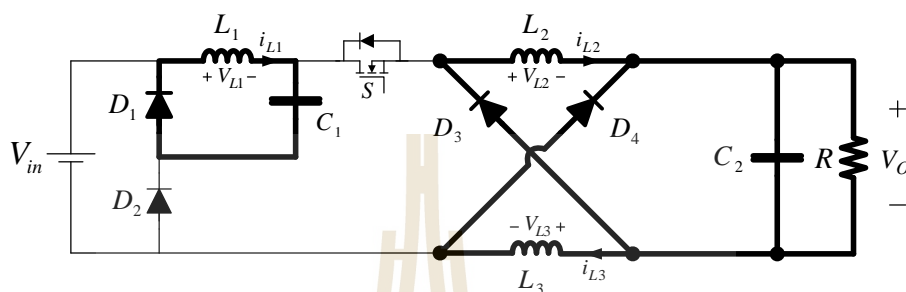
ลูป 2 ;  $-V_{C1} + V_{L2} + V_{C2} + V_{L3} = 0$

$$2L \frac{di_{L2,3}}{dt} = V_{C1} - V_O$$

$$\frac{di_{L2,3}}{dt} = \frac{\Delta i_{L2,3}}{\Delta t} = \frac{V_{C1} - V_O}{2L} \quad (3-2)$$

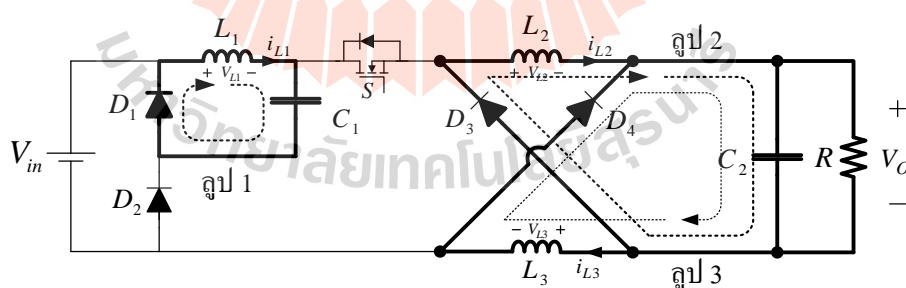
**ช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  ไม่นำกระแส :** วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงขณะที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 พบว่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเก็บสะสมประจุ ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนกับแหล่งจ่ายแรงดัน เมื่อพิจารณาการทำงานของไดโอดพบว่า  $D_1$ ,  $D_3$  และ  $D_4$  สามารถนำกระแสได้ โดยที่ไดโอด  $D_1$  จะได้รับการไบอัสตรงจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  ซึ่งอยู่ในช่วงสะสมประจุ ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วแอนโอดมีค่ามากกว่าขั้วแคโทด ( $V_{C1} > V_{in}$ ) ส่วนไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  ได้รับการไบอัสตรงจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_2$  ซึ่งทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน และไดโอด  $D_2$  จะไม่สามารถนำกระแส เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วแอนโอดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ( $0 < V_{C1}$ ) ทำให้ไดโอด  $D_2$  ไม่ทำงาน ดังนั้น

ในช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  ไม่นำกระแส จึงมีกระแสไหลผ่านอุกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  ไดโอด  $D_1$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  ตัวเก็บประจุ  $C_1$ ,  $C_2$  และโหลดตัวต้านทาน  $R$  ซึ่งช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะสะสมประจุ ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะคายประจุให้กับโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 3.4 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส

จากนั้นใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) เข้าช่วยในการอธิบายความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง สามารถพิจารณา กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ในขณะที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแสได้ 2 ลูปการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ดังแสดงในสมการที่ (3-3), (3-4) และ (3-5)



รูปที่ 3.5 กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ในขณะที่สวิตช์  $S$  ไม่นำกระแส

รูป 1 ;  $V_{L1} + V_{C1} = 0$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = -V_{C1}$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = -\frac{V_{C1}}{L_1} \quad (3-3)$$

รูป 2 ;  $V_{L2} + V_{C2} = 0$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = -V_O$$

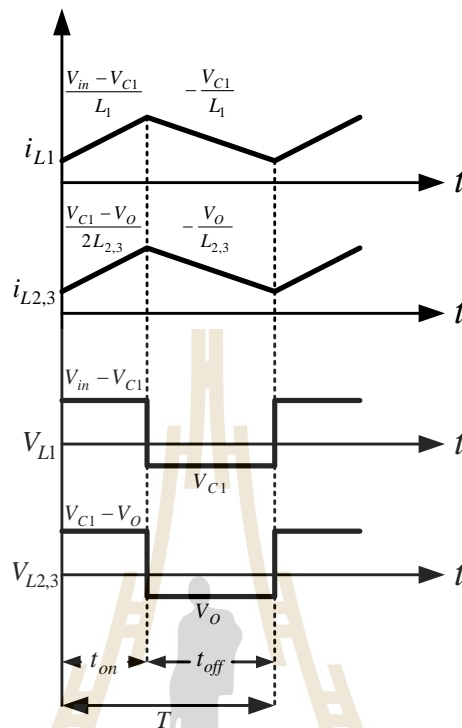
$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{\Delta i_{L2}}{\Delta t} = -\frac{V_O}{L_2} \quad (3-4)$$

รูป 3 ;  $V_{L3} + V_{C2} = 0$

$$L_3 \frac{di_{L3}}{dt} = -V_O$$

$$\frac{di_{L3}}{dt} = \frac{\Delta i_{L3}}{\Delta t} = -\frac{V_O}{L_3} \quad (3-5)$$

จากการพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ในช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  นำกระแส และในช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  ไม่นำกระแส จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$ ,  $L_2$  และ  $L_3$  ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กระแสและแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

จากรูปที่ 3.6 พิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$ ,  $L_2$  และ  $L_3$  ในสภาวะอยู่ เพื่อหาอัตราลดทอนแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-6) และ (3-7)

$$L_1 \quad ; \quad (V_{in} - V_{C1})D + (-V_{C1})(1 - D) = 0 \quad (3-6)$$

$$L_2, L_3 \quad ; \quad \left( \frac{V_{C1} - V_o}{2} \right) D + (-V_o)(1 - D) = 0 \quad (3-7)$$

จากสมการที่ (3-6) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  กับแรงดันอินพุต แสดงได้ดังสมการที่ (3-8)

$$V_{in}D - V_{C1}D - V_{C1} + V_{C1}D = 0$$

$$V_{C1} = V_{in}D \quad (3-8)$$

จากสมการที่ (3-7) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  กับแรงดันเอาต์พุต แสดงได้ดังสมการที่ (3-9)

$$\begin{aligned} \frac{V_{C1}}{2}D - \frac{V_o}{2}D - V_o + V_oD &= 0 \\ \frac{V_{C1}}{2}D - \left(+\frac{1}{2}D + 1 - D\right)V_o &= 0 \\ \frac{V_{C1}}{2}D - \left(1 - \frac{1}{2}D\right)V_o &= 0 \\ V_o &= \left(\frac{D}{2-D}\right)V_{C1} \end{aligned} \quad (3-9)$$

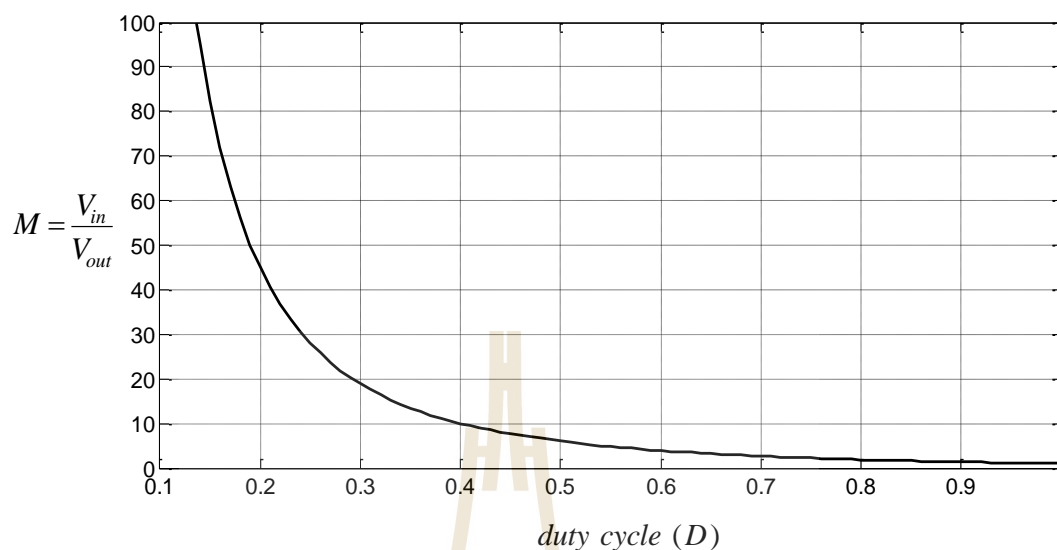
จากสมการที่ (3-9) สามารถหาอัตราลดทอนแรงดัน ( $M$ ) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง แสดงได้ดังสมการที่ (3-10)

$$\begin{aligned} V_{C1} &= \left(\frac{2-D}{D}\right)V_o \\ M = \frac{V_{in}}{V_o} &= \left(\frac{2-D}{D^2}\right) \end{aligned} \quad (3-10)$$

โดยที่

$$V_{C1} = V_{in}D$$

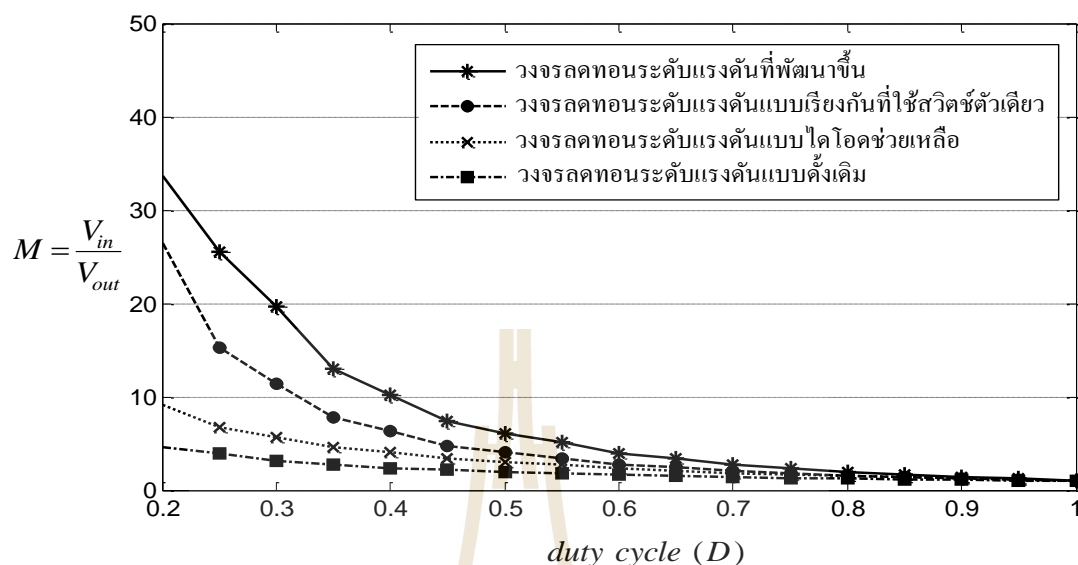
จากอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นดังสมการที่ (3-10) สามารถแสดงความสัมพันธ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นและค่าวัฏจักรหน้าที่ได้ดังรูปที่ 3.7 เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 400 V จะเห็นได้ว่าวงจรดังกล่าวทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ประมาณ 0.3 เพื่อสามารถลดทอนระดับแรงดันเอาต์พุตได้ประมาณ 20 เท่า



รูปที่ 3.7 อัตราลดทอนแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 พบว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีอัตราลดทอนแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า เมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่ประมาณ 0.3 ในขณะที่วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ และวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ยังคงมีข้อจำกัดเรื่องอัตราลดทอนแรงดัน กล่าวคือวงจรทั้งสามต้องทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำมาก เพื่อสามารถลดทอนแรงดันได้ถึง 20 เท่า ซึ่งการทำงานของสวิตช์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำมากนั้น อาจดำเนินการได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากข้อจำกัดของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ต้องใช้กระบวนการประมวลผลที่รวดเร็วมาก เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ นอกจากนี้การที่สวิตช์ทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำมาก จะส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง





รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

จากนั้นพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง ในช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  นำกระแสและหยุดนำกระแส ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และ 3.4 ตามลำดับ เพื่อประมาณค่าพิกัดกระแสสูงสุดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง ทั้งนี้พิจารณาว่าไม่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจร จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรดังนี้

$$P_{in} = P_{out}$$

$$i_{in} V_{in} = i_o V_o$$

โดยที่

$$M = \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

จะได้

$$i_o = i_{in} \frac{V_{in}}{V_{out}} = i_{in} M$$

ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  ซึ่งอยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตจะได้รับการไบอัสตรงจากกระแสอินพุต จะได้ว่ากระแสที่ไหลผ่าน ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  แสดงดังสมการที่ (3-11) และ (3-12)

$$i_{D1} = i_s - i_{in} \quad (3-11)$$

$$i_{D2} = i_s - i_{in} \quad (3-12)$$

ในขณะที่ไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  ที่อยู่ใกล้ด้านแรงดันเอาต์พุตได้รับการไบอัสตรงจากตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$  ซึ่งกระแสด้านเอาต์พุตจะมีค่ามากกว่ากระแสด้านอินพุต ดังนั้น จะได้ว่ากระแสที่ไหลผ่าน ไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  แสดงดังสมการที่ (3-13) และ (3-14)

$$i_{D3} = i_{L2} - i_{L1} \quad (3-13)$$

$$i_{D4} = i_{L3} - i_{L1} \quad (3-14)$$

จากนั้นพิจารณาค่าพิกัดกระแสของสวิตช์กำลัง  $S$  โดยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตช์ ดังกล่าวเท่ากับกระแสอินพุต ซึ่งก็คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ดังแสดงในสมการที่ (3-15)

$$i_s = i_{L1} \quad (3-15)$$

การพิจารณาความเครียดแรงดัน ( $V_{stress}$ ) ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Ping Yang, Jianping Xu, Guohua Zhou and Shiyu Zhang, 2012) จะอาศัยการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง ขณะสวิตช์กำลัง  $S$  ไม่นำกระแส จะได้ความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์กำลัง  $S$  และ ไดโอด  $D_2$  ดังสมการที่ (3-16) และ (3-17)

$$V_s = \frac{2+D}{2-D} V_{in} \quad (3-16)$$

$$V_{D2} = V_{in} \quad (3-17)$$

จากนั้นพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง ในขณะที่สวิตช์กำลัง  $S$  นำกระแส จะได้ความเครียดแรงดันที่ตกร่วมไดโอด  $D_1$ ,  $D_3$  และ  $D_4$  ดังต่อไปนี้

$$V_{D1} = V_{in} \quad (3-18)$$

$$V_{D3} = \frac{V_o}{D} \quad (3-19)$$

$$V_{D4} = \frac{V_o}{D} \quad (3-20)$$

จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ในช่วงที่สวิตช์  $S$  นำกระแส และไม่นำกระแส สามารถสรุปความสัมพันธ์ของความเครียดแรงดัน ( $V_{stress}$ ) และพิกัดกระแส ( $i_{rated}$ ) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรดังกล่าว แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าความเครียดแรงดัน และการประมาณค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อุปกรณ์	$V_{stress}$	$i_{rated}$
$S$	$V_S = \frac{2+D}{2-D} V_{in}$	$i_S = i_{L1}$
$D_1$	$V_{D1} = V_{in}$	$i_{D1} = i_s - i_{in}$
$D_2$	$V_{D2} = V_{in}$	$i_{D2} = i_s - i_{in}$
$D_3$	$V_{D3} = \frac{V_o}{D}$	$i_{D3} = i_{L2} - i_{L1}$
$D_4$	$V_{D4} = \frac{V_o}{D}$	$i_{D4} = i_{L3} - i_{L1}$
$C_1$	$V_{C1} = D V_{in}$	-
$C_2$	$V_{C2} = V_o$	-

### 3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

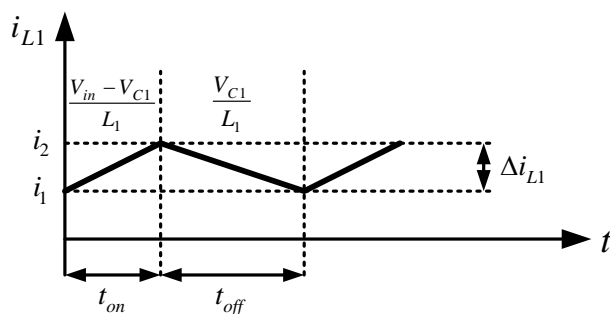
การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1, L_2, L_3$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C_1, C_2$ ) ที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง เนื่องจากช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสอินพุตและการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยลง ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1, L_2, L_3$  และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ  $C_1, C_2$  อธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

#### การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง มีผลต่อการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ หากการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าลดลง ดังนั้น การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1, L_2$  และ  $L_3$  สามารถพิจารณาได้ดังนี้

#### การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ $L_1$

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  พิจารณาจากกระแส  $i_{L1}$  ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบ ( $T$ ) การทำงานของสวิตช์ กระแส  $i_{L1}$  ที่ไหลผ่าน  $L_1$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา  $t_{on}$  ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สวิตช์กำลัง  $S$  นำกระแส และกระแส  $i_{L1}$  จะมีค่าลดลงในช่วงเวลา  $t_{off}$  ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สวิตช์กำลัง  $S$  ไม่นำกระแส ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในการหาค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$

$$t_{on,L1} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{V_{in} - V_{C1}}$$

$$t_{off,L1} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{V_{C1}}$$

โดยที่  $T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off}$  เมื่อ  $f$  คือ ความถี่การสวิตช์ จะได้ว่า

$$\frac{1}{f} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{V_{in} - V_{C1}} + L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{V_{C1}}$$

$$L_1 = \frac{V_{C1}(V_{in} - V_{C1})}{\Delta i_{L1} \times f \times V_{in}}$$

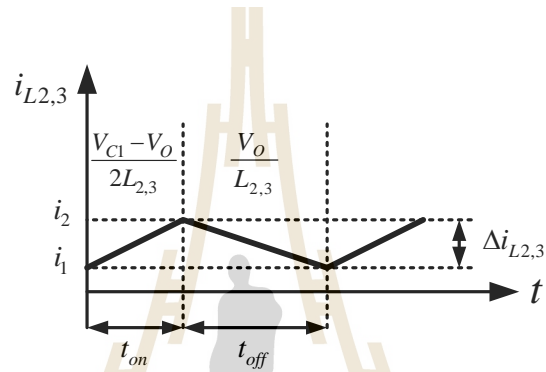
จากความสัมพันธ์  $V_{C1} = DV_{in}$  จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ที่มีค่าน้อยที่สุดที่สามารถนำมาใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง ดังแสดงในสมการที่ (3-21)

$$L_1 \geq \frac{D(V_{in} - DV_{in})}{\Delta i_{L1} \times f} \quad (3-21)$$

โดยที่  $\Delta i_{L1}$  คือ ค่าการกระเพื่อมของกระแส  $i_{L1}$

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$

ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$  จะกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำทั้งสองมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นสามารถแสดงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$  ในช่วงเวลาที่สวิตช์กำลัง  $S$  นำกระแส และไม่นำกระแส ได้ดังรูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในการหาค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L_2, L_3$  แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.10 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$

$$t_{on} = 2L_{2,3} \frac{\Delta i_{L2,3}}{V_{C1} - V_O}$$

$$t_{off} = L_{2,3} \frac{\Delta i_{L2,3}}{V_O}$$

จาก

$$T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off} \quad \text{จะได้ว่า}$$

$$\frac{1}{f} = 2L_{2,3} \frac{\Delta i_{L2,3}}{V_{C1} - V_O} + L_{2,3} \frac{\Delta i_{L2,3}}{V_O}$$

$$L_{2,3} = \frac{V_O (V_{C1} - V_O)}{\Delta i_{L2,3} \times f \times (V_O + V_{C1})}$$

จาก  $V_{C1} = DV_{in}$  จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$  ที่มีค่าน้อยที่สุดที่สามารถนำมาใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง ดังแสดงในสมการที่ (3-22)

$$L_{2,3} \geq \frac{V_o(DV_{in} - V_o)}{\Delta i_{L2,3} \times f \times (V_o + DV_{in})} \quad (3-22)$$

### การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ

ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง จะช่วยให้การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อยลงได้ หากเกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่ค่อนข้างสูงจะส่งผลให้ตัวเก็บประจุได้รับความเสียหาย ทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง การออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  อธิบายได้ดังต่อไปนี้

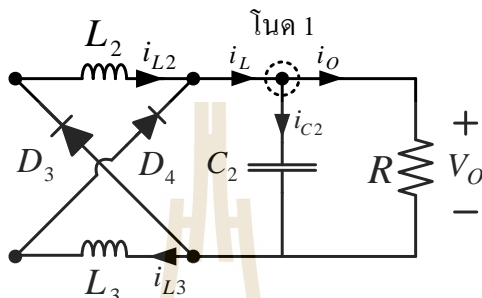
### การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ $C_1$

การออกแบบตัวเก็บประจุ  $C_1$  พิจารณาแนวทางจากการออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (Agasthya Ayachit and Marian K. Kazimierczuk, 2013) สามารถพิจารณาค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่สามารถนำมาใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง แสดงได้ดังสมการที่ (3-23)

$$C_1 \geq \frac{(1-D)}{D} \frac{V_o}{4 \times L_1 \times \Delta v_{C1} \times f^2} \quad (3-23)$$

การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ  $C_2$

การออกแบบเลือกค่าตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะพิจารณาช่วงที่สวิตช์กำลัง  $S$  ไม่นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.11 วงจรขณะสวิตช์กำลัง  $S$  ไม่นำกระแส

$$V_{C2} - V_{C2}(t=0) = \frac{1}{C_2} \int_{t_{off}}^T i_L dt$$

$$\Delta V_{C2} = \frac{i_L \times D \times t_{off}}{(1-D)C_2}$$

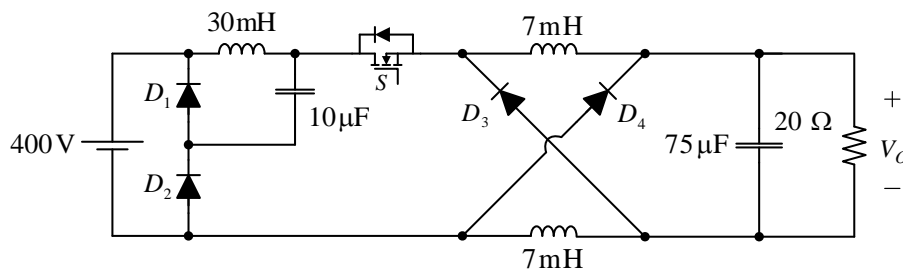
$$t_{off} = \frac{i_L \times D \times \Delta V_{C2}}{(1-D)C_2}$$

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ที่สามารถนำมาใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง แสดงได้ดังสมการที่ (3-24)

$$C_2 \geq \frac{i_L \times D}{f \times \Delta V_{C2}} \quad (3-24)$$



ในการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง จะพิจารณาให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรเป็นอุปกรณ์ในอุดมคติ ไม่มีกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้นภายในวงจร ทั้งนี้การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ จะส่งผลต่อการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทำให้วงจรสามารถทำงานในโหมดนำกระแสต่อเนื่อง (CCM) เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น พบว่าค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  คือกระแสอินพุต ซึ่งมีค่าค่อนข้างน้อยเนื่องจากแรงดันอินพุตมีค่าสูง ดังนั้นการกำหนดขอบเขตการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ให้มีค่าน้อยจะทำให้ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลโดยตรงต่อขนาดพื้นที่ของวงจร รวมถึงราคาของตัวเหนี่ยวนำมีราคาค่อนข้างสูง ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  จะมีค่าการกระเพื่อมอยู่ที่ 90% ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ในขณะที่กำหนดให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$  อยู่ที่ 20% ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$  จากแนวทางการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1, L_2$  และ  $L_3$  และการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ร่วมกับข้อมูลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงที่ใช้ในการออกแบบดังที่ปรากฏในตารางที่ 3.4 สามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ  $L_1, L_2, L_3$  และตัวเก็บประจุ  $C_1, C_2$  สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.12



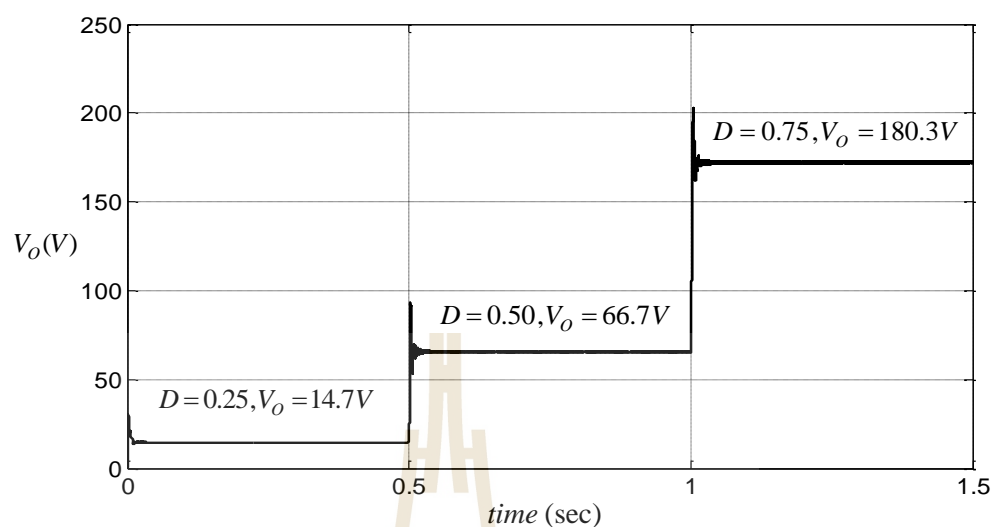
รูปที่ 3.12 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง

กำหนดค่าที่ใช้ในการคำนวณเลือกพารามิเตอร์			
$V_{in}$	400 V		
$R$	20 $\Omega$		
$f$	20 kHz		
$D$	0.3		
$I_{in}$	0.056 A	$i_{L1}$	0.168 A
$I_o$	1.058 A	$i_{L2}$	0.539 A
$V_{C1}$	120 V	$i_{L3}$	0.539 A
$V_o$	21.17 V	$\Delta i_{L1}$	0.148 A
$\Delta V_{C1}$	1.2 V	$\Delta i_{L2}$	0.107 A
$\Delta V_o$	0.2 V	$\Delta i_{L3}$	0.107 A

### 3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น จะดำเนินการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบ โดยกำหนดแรงดันอินพุตเป็น 400 V<sub>dc</sub> และค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 โดยดำเนินการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB Simulink ภายใต้การทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.13 พบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัวที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการอัตราการลดทอนแรงดัน ดังที่ได้แสดงในสมการที่ (3.10) ทั้งนี้ ผลการเปรียบเทียบอัตราการลดทอนแรงดันจากการวิเคราะห์การทำงานและการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ในตารางที่ 3.5

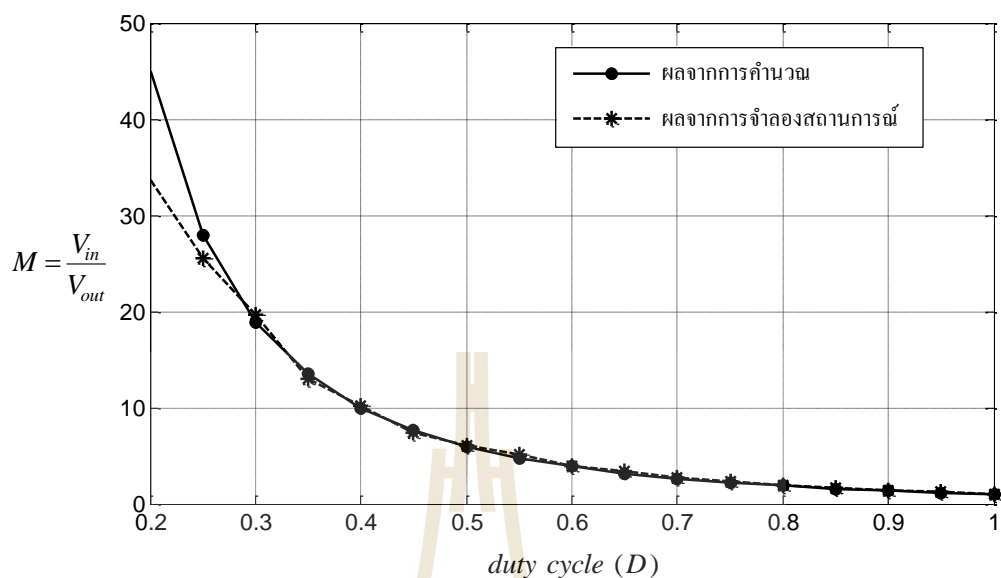


รูปที่ 3.13 แรงดันเอาต์พุตเมื่อวงจรทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ

ตารางที่ 3.5 ผลเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันจากสมการ (3-10) และจากการจำลองสถานการณ์

ผลการวิเคราะห์การทำงาน				ผลการจำลองสถานการณ์			
พารามิเตอร์	ค่าวัฏจักรหน้าที่			พารามิเตอร์	ค่าวัฏจักรหน้าที่		
	0.25	0.50	0.75		0.25	0.50	0.75
$M$	28	6	2.22	$M$	27.2	6	2.22
$V_o$	14.3 V	66.7 V	180 V	$V_o$	14.7 V	66.7 V	180.3 V

รูปที่ 3.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราลดทอนแรงดันของวงจรระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณและผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ในการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง

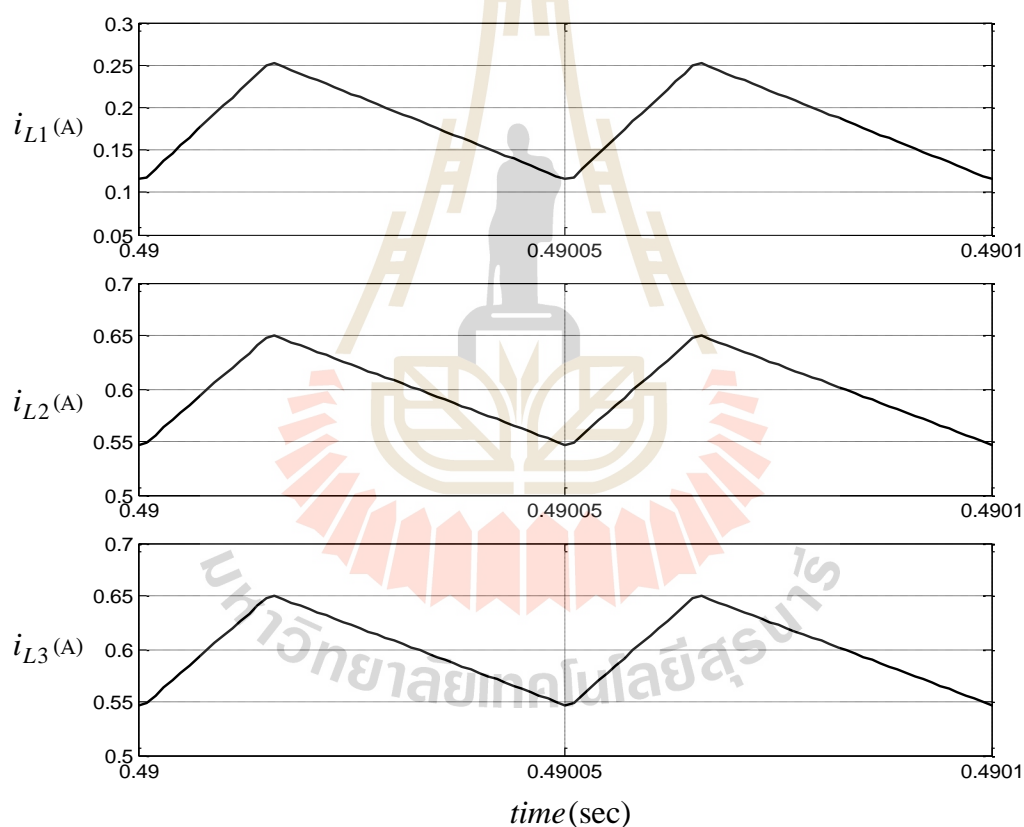


รูปที่ 3.14 การเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันระหว่าง การคำนวณและการจำลองสถานการณ์

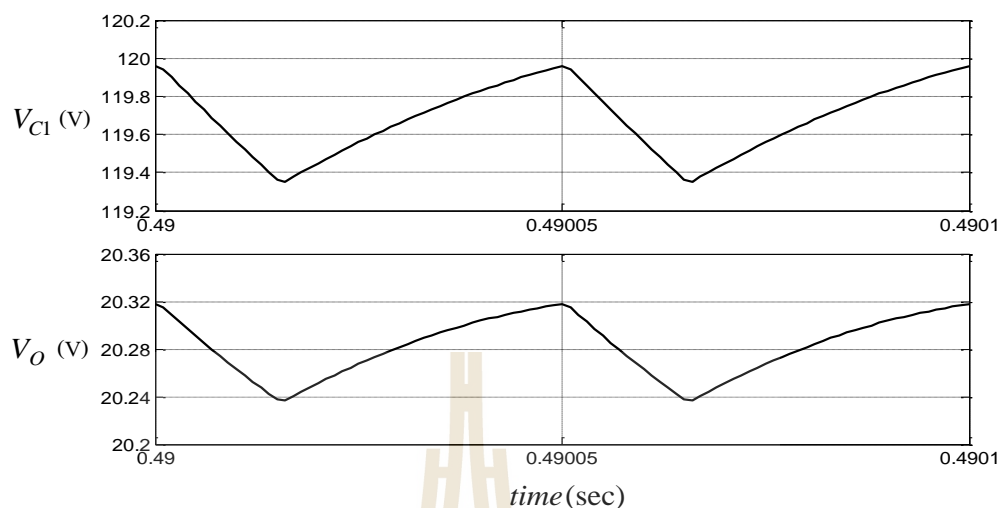
จากนั้นดำเนินการพิจารณาการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 3.15 พบว่า กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  มีค่าการกระเพื่อมอยู่ที่ 0.16 A คิดเป็น 88.89% ของกระแส  $i_{L1}$  ซึ่งในเงื่อนไขการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ได้กำหนดให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสไม่เกิน 90% ของกระแส  $i_{L1}$  โดยเลือกตัวเหนี่ยวนำขนาด 30 mH ดังนั้นค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ในขณะที่ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2, L_3$  มีค่าการกระเพื่อมอยู่ที่ 0.1 A คิดเป็น 16.95% ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$  ซึ่งในเงื่อนไขการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  และ  $L_3$  ได้กำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำทั้งสองมีขนาดเท่ากันและมีค่าเท่ากับ 7mH และมีค่าการกระเพื่อมของกระแสไม่เกิน 20% ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังกล่าว ดังนั้นจากผลการจำลองสถานการณ์ที่ปรากฏในรูปที่ 3.15 แสดงให้เห็นว่า ค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_1, L_2$  และ  $L_3$  เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้

พิจารณาผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่า การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีค่าประมาณ 0.6 V คิดเป็น 0.5% ซึ่งในการออกแบบเลือกค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  เท่ากับ  $10\ \mu\text{F}$  ได้กำหนดค่าการกระเพื่อมของแรงดันไว้ที่ 1% ของแรงดัน  $V_{C1}$  ในขณะที่การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_2$  มีค่าประมาณ 0.08 V คิดเป็น 0.39% ซึ่งในการออกแบบเลือกค่าตัวเก็บประจุ  $C_2$  เท่ากับ  $75\ \mu\text{F}$  ได้กำหนดค่าการกระเพื่อมของแรงดันไว้ที่ 1% ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_2$  ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.15 การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

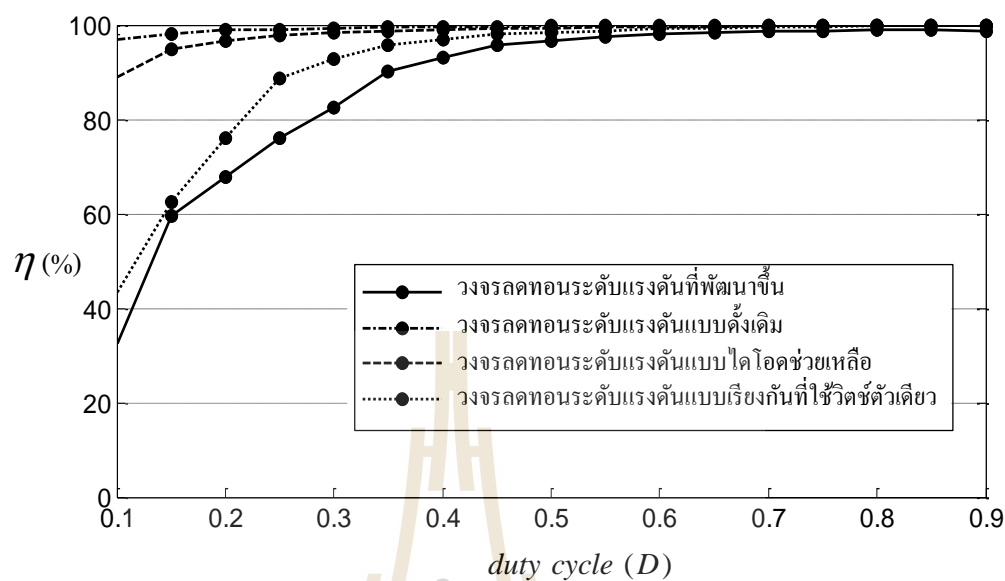


รูปที่ 3.16 การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

นอกจากนี้ได้ดำเนินการประเมินประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ดังแสดงในสมการที่ (3-25)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{i_o V_o}{i_{in} V_{in}} \times 100\% \quad (3-25)$$

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้นกับวงจรลดทอนแรงดันรูปแบบอื่น ขณะทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 พบว่าเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่ค่อนข้างต่ำ ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจะค่อนข้างน้อยกว่าวงจรอื่น เนื่องจากวงจรที่พัฒนาขึ้นมีจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มากกว่าวงจรอื่น ๆ จึงส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในอุปกรณ์เหล่านั้น เมื่อพิจารณาที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.3 จะได้แรงดันเอาต์พุตประมาณ 20V โดยที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 400V ซึ่งมีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า พบว่าประสิทธิภาพของวงจรจะอยู่ที่ประมาณ 85%



รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้นกับวงจรอื่น

### 3.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดียวที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีอัตราการลดทอนแรงดันสูงถึง 20 เท่า โดยนำเสนอโครงสร้างของวงจรที่พัฒนาขึ้น การวิเคราะห์หลักการทำงาน และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจร เพื่อออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงาน จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น แสดงให้เห็นว่าวงจรที่พัฒนาขึ้นดังกล่าวสามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 20 เท่า อย่างไรก็ตาม พบว่าค่ากระแสและแรงดันภายในวงจรที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ในช่วงสภาวะชั่วคราวจะมีการพุ่งเกินค่อนข้างสูงก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งการพุ่งเกินเหล่านี้อาจส่งผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรเกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 20 V และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการพุ่งเกินของกระแสและแรงดัน โดยการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดียวที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจะนำเสนอในบทต่อไป

## บทที่ 4

### การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

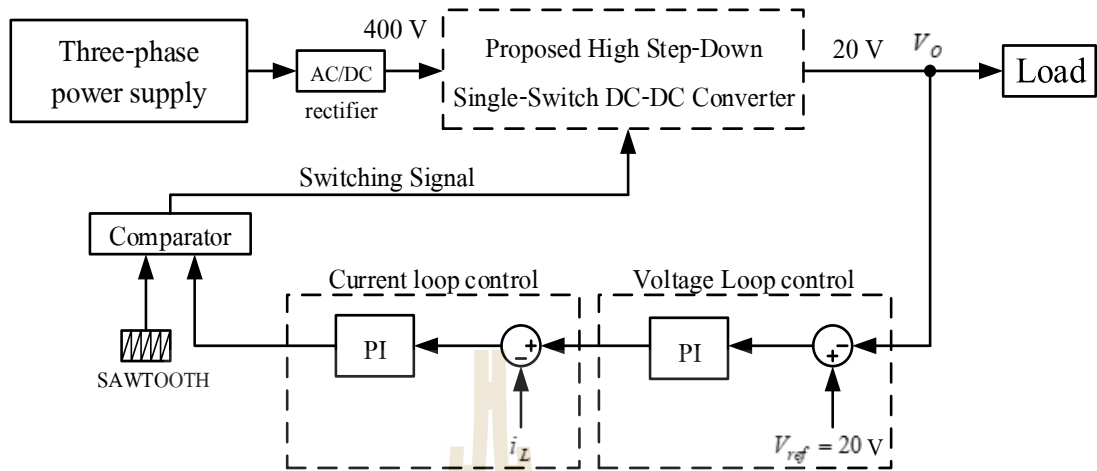
#### 4.1 บทนำ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่มุ่งเน้นในการพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า สำหรับประยุกต์ในวงจรที่แรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างสูงประมาณ  $400\text{ V}_{dc}$  โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นต้องสามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้ต่ำประมาณ  $20\text{ V}_{dc}$  ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ ที่  $20\text{ V}_{dc}$  โดยเนื้อหาภายในบทนี้ประกอบไปด้วย หลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ภายใต้สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ เพื่อพิจารณาสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอที่ทำการออกแบบ รายละเอียดจะนำเสนอต่อไปนี้

#### 4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

โครงสร้างการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยควบคุมการทำงานของวงจรให้สามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ระดับ  $20\text{ V}_{dc}$  เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าประมาณ  $400\text{ V}_{dc}$  ทั้งนี้จะอาศัยวงจรเรียงกระแสสามเฟสเข้าช่วยทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันสูงให้แก่วงจรที่พัฒนาขึ้น กระบวนการควบคุมประกอบด้วยตัวควบคุมพีโอลูบแรงดัน (Voltage controller loop) และลูบกระแส (Current-controller loop) โดยทำการวัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) และกระแสอินพุต ( $i_L$ ) เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น อาศัยพื้นฐานการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมเข้าช่วย เพื่อให้สวิตช์กำลังของวงจรทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ ( $D$ ) ที่เหมาะสม เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ระดับ  $20\text{ V}_{dc}$





รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมพีไอ

#### การควบคุมลูประแรงดัน (Voltage-loop control)

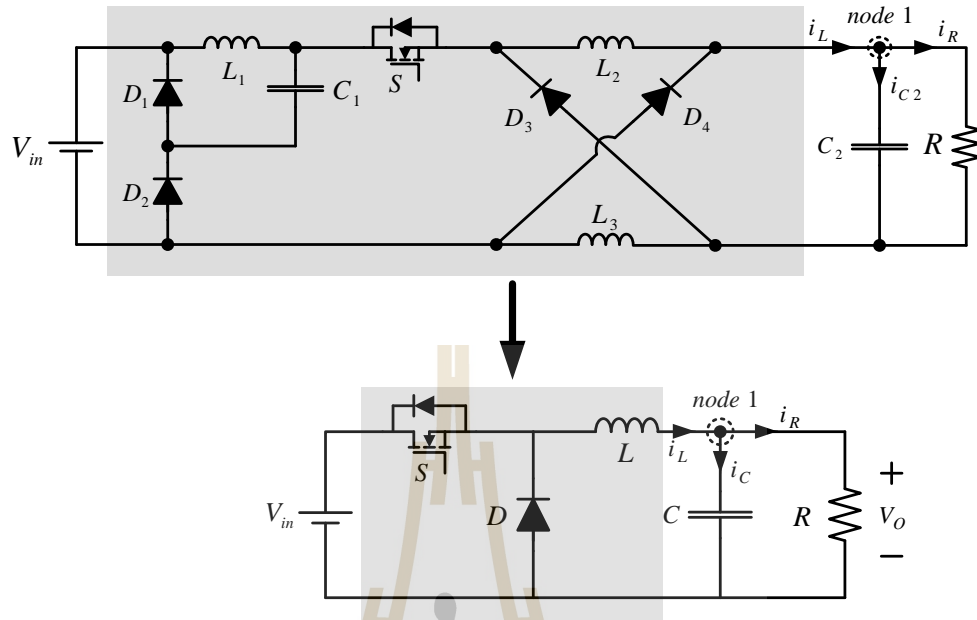
การออกแบบตัวควบคุมพีไอในรูปการควบคุมแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นอาศัยแนวทางในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมเข้าช่วย ดังมีโครงสร้างแสดงรูปที่ 4.2 ทั้งนี้จะใช้การเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรทั้งสองในส่วนที่เกี่ยวข้องกับแรงดันเอาต์พุตในการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูประแรงดัน จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเทียบเคียงโครงสร้างของทั้งสองวงจรตัวเก็บประจุ  $C_2$  ในวงจรที่พัฒนาขึ้นจะมีหน้าที่เช่นเดียวกับตัวเก็บประจุ  $C$  ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม

จากรูปที่ 4.2 อาศัยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-1) เมื่อทำการแปลงลาปลาซจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-2)

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

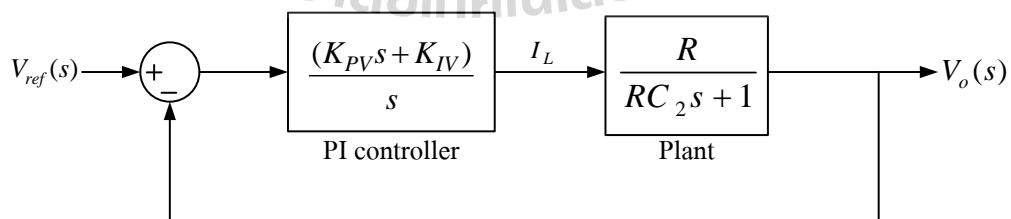
$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{V_o(t)}{R} \quad (4-1)$$

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



รูปที่ 4.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นและวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมสำหรับ  
ออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูการควบคุมแรงดัน

เนื่องจากตัวเก็บประจุ  $C_2$  ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถเทียบเคียงได้กับตัวเก็บประจุ  $C$  ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม จากสมการที่ (4-2) ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลานต์ในส่วนของการควบคุมแรงดัน แสดงดังสมการที่ (4-3) โครงสร้างการควบคุมลูประดันด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การควบคุมลูประดันด้วยตัวควบคุมพีไอ

$$\frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{RC_2s+1} \quad (4-3)$$

พิจารณารูปที่ 4.3 ตัวควบคุมพีไอประกอบด้วยตัวควบคุมย่อย 2 ตัว คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control) ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็น  $K_{PV}$  และตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) จะมีค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็น  $K_{IV}$  ดังนั้นจากรูปที่ 4.3 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูบควบคุมแรงดัน ได้ดังสมการที่ (4-4)

$$\begin{aligned} \frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} &= \frac{\left( \frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s} \right) \left( \frac{R}{RC_2s+1} \right)}{1 + \left( \frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s} \right) \left( \frac{R}{RC_2s+1} \right)} \\ \frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} &= \frac{K_{PV}Rs + K_{IV}R}{s^2 + \left( \frac{1 + K_{PV}R}{RC_2} \right)s + \frac{K_{IV}R}{RC_2}} \end{aligned} \quad (4-4)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์  $K_{PV}$  และ  $K_{IV}$  จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (4-5)

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4-5)$$

โดยค่าความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ  $\omega_n = \frac{1}{RC}$  rad/s และกำหนดให้อัตราส่วนการหน่วงของลูบแรงดัน  $\zeta = 1$  เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการที่ (4-4) และ (4-5) จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในลูบแรงดัน ดังสมการที่ (4-6) และ (4-7)

$$\frac{1 + K_{PV}R}{RC_2} = 2\zeta\omega_n$$

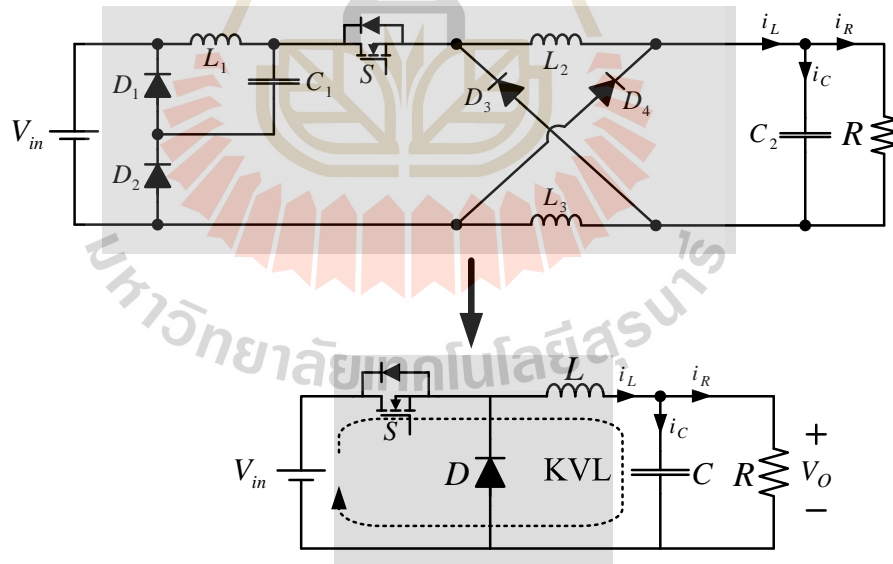
$$K_{PV} = 2\zeta\omega_n C_2 - \frac{1}{R} \quad (4-6)$$

$$\frac{K_{IV}}{C_2} = \omega_n^2$$

$$K_{IV} = \omega_n^2 C_2 \quad (4-7)$$

### การควบคุมลูประแส (Current loop control)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในรูปการควบคุมกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ยังคงอาศัยการพิจารณาเทียบเคียงกับโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทั้งนี้จะพิจารณาให้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีหน้าที่เช่นเดียวกับตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.4 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นและวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมสำหรับ ออกแบบตัวควบคุมพีไอในรูปการควบคุมกระแส

พิจารณาโครงสร้างของวงจรลวดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{in}(t) = (1-D)V_o(t) + V_L(t)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-D)V_o(t) = V_{in}(t)$$

พิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่เป็นศูนย์ จะได้ดังสมการที่ (4-8) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังสมการที่ (4-9)

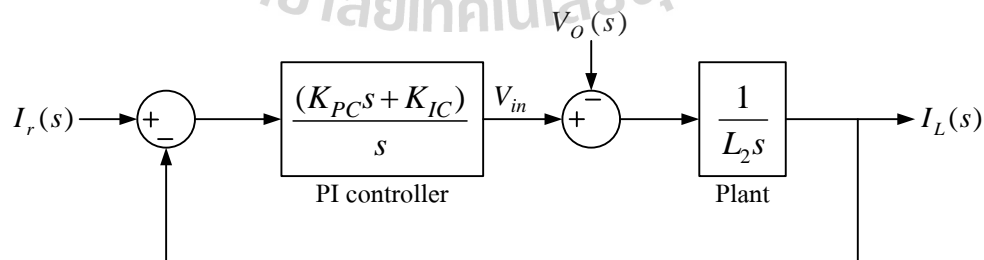
$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{in}(t) - V_o(t) \quad (4-8)$$

$$LsI_L = V_{in}(s) - V_o(s) \quad (4-9)$$

สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  เทียบเคียงได้กับตัวเหนี่ยวนำ  $L$  ของวงจรลวดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม จากสมการที่ (4-9) ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้ พลานต์ในส่วนของการควบคุมกระแสแสดงดังสมการที่ (4-10)

$$\frac{I_L(s)}{V_{in}(s) - V_o(s)} = \frac{1}{L_2s} \quad (4-10)$$

ในลำดับต่อมา พิจารณาโครงสร้างการควบคุมลูกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การควบคุมลูกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงแผนภาพบล็อกของลูบการควบคุมกระแสโดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ได้ดังสมการที่ (4-11)

$$\frac{I_L(s)}{I_r(s)} = \frac{\left(\frac{K_{PC}s + K_{IC}}{s}\right)(V_{in})\left(\frac{1}{L_2s}\right)}{1 + \left(\frac{K_{PC}s + K_{IC}}{s}\right)(V_{in})\left(\frac{1}{L_2s}\right)}$$

$$\frac{I_L(s)}{I_r(s)} = \frac{K_{PC}V_{in} + K_{IC}V_{in}}{s^2 + \left(\frac{K_{PC}V_{in}}{L_2}\right)s + \frac{K_{IC}V_{in}}{L_2}} \quad (4-11)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์  $K_{PC}$  และ  $K_{IC}$  ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูบควบคุมกระแสจะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์พจน์พหุนามลักษณะเฉพาะเช่นเดียวกับกรณีของลูบแรงดัน ทั้งนี้ค่าความถี่ธรรมชาติในลูบกระแสจะมีค่ามากกว่าลูบแรงดันประมาณ 100 เท่า เพื่อมีผลตอบสนองในลูบกระแสที่รวดเร็วยิ่งขึ้น จะได้ว่าความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ  $\omega_{ni} = N\omega_n$  rad/s โดยค่า  $N$  คือจำนวนเท่าของความถี่ธรรมชาติในลูบกระแสที่ทำงานได้รวดเร็วกว่าลูบแรงดัน โดยอัตราส่วนการหน่วงของลูบกระแส  $\zeta = 1$  เมื่อดำเนินการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (4-11) และพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของระบบอันดับสองมาตรฐาน จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในลูบกระแส ดังสมการที่ (4-12) และ (4-13)

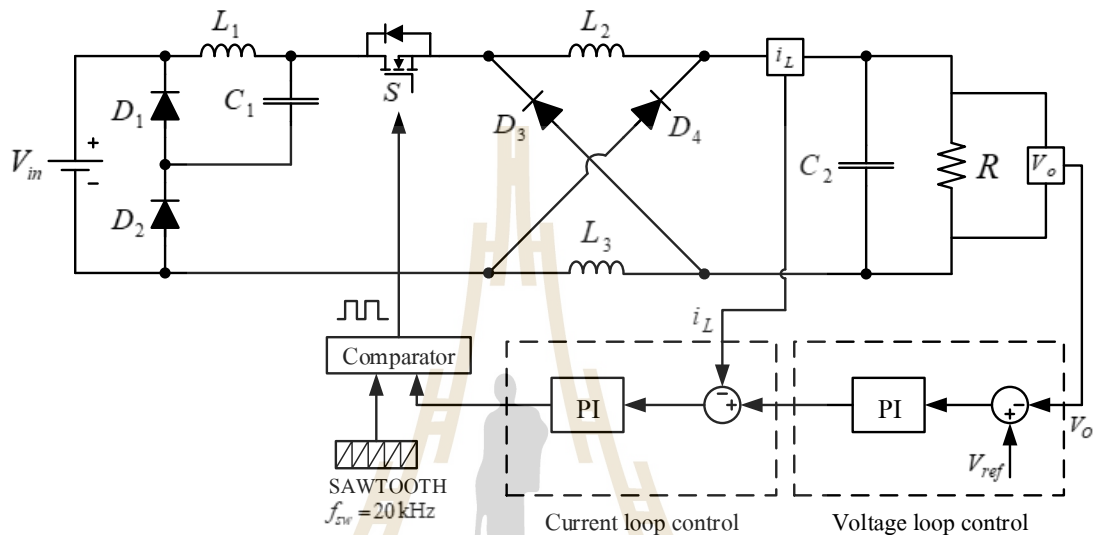
$$\frac{K_{PC}V_{in}}{L_2} = 2\zeta\omega_{ni}$$

$$K_{PC} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L_2}{V_{in}} \quad (4-12)$$

$$\frac{K_{IC}V_{in}}{L_2} = \omega_{ni}^2$$

$$K_{IC} = \frac{\omega_{ni}^2L_2}{V_{in}} \quad (4-13)$$

จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้งลูบแรงดันและลูบกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง สามารถแสดงโครงสร้างการควบคุมการทำงานของวงจรดังกล่าว ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

ทั้งนี้จะมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์กำลังที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอ แสดงค่าดังตารางที่ 4.1 จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้งลูบแรงดันและลูบกระแส ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากนั้นจะเป็นการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้แล้ว เพื่อแสดงประสิทธิผลของตัวควบคุมในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
$V_{in}$	แรงดันอินพุต	400 V
$L_1$ ,	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH
$L_2$ และ $L_3$	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH
$C_1, C_2$	ตัวเก็บประจุ	180 $\mu$ F
$R$	โหลดความต้านทาน	100 $\Omega$
$f_{sw}$	ความถี่สวิตช์	20 kHz

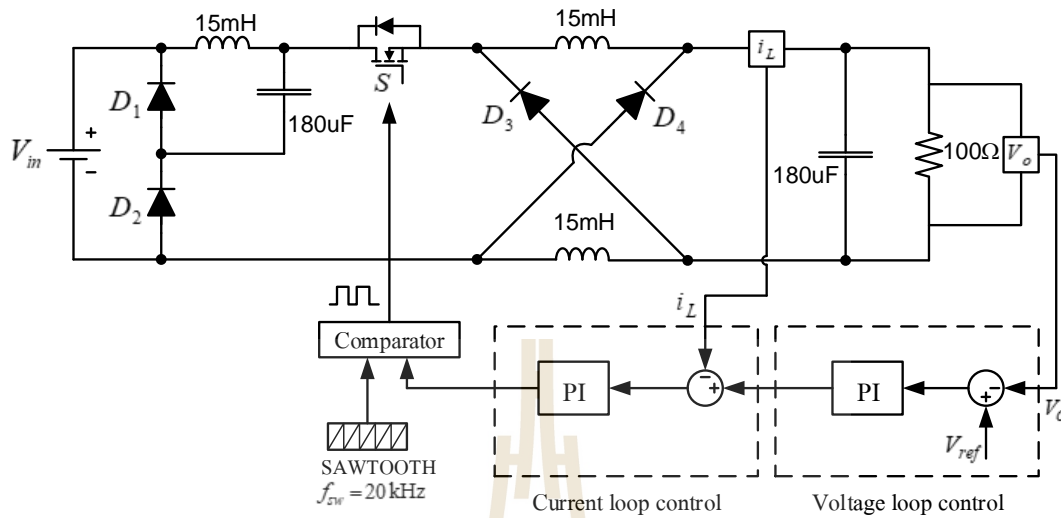
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
$K_{PV}$	0.014
$K_{IV}$	0.8
$K_{PC}$	1.44
$K_{IC}$	9600
$\omega_n$	55.56
$\omega_{ni}$	5556

### 4.3 ผลการจำลองสถานการณ์

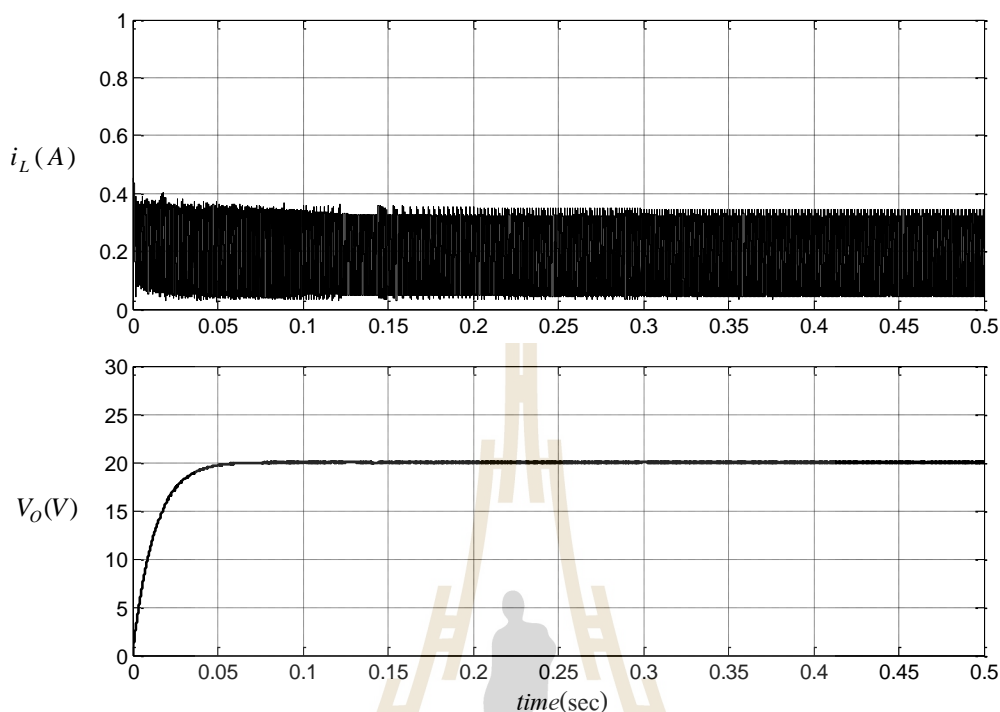
เพื่อพิจารณาถึงสมรรถนะของวงจรการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอ ดังโครงสร้างในรูปที่ 4.7 ดำเนินการจำลองสถานการณ์ให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นรับแรงดันอินพุต 400 V<sub>dc</sub> สำหรับทดสอบสมรรถนะของวงจรในกรณีที่มีค่าแรงดันอินพุตค่อนข้างสูง เพื่อลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้ต่ำถึง 20 V<sub>dc</sub> และสามารถควบคุมเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการโดยอาศัยตัวควบคุมชนิดพีไอที่ได้ออกแบบไว้แล้ว





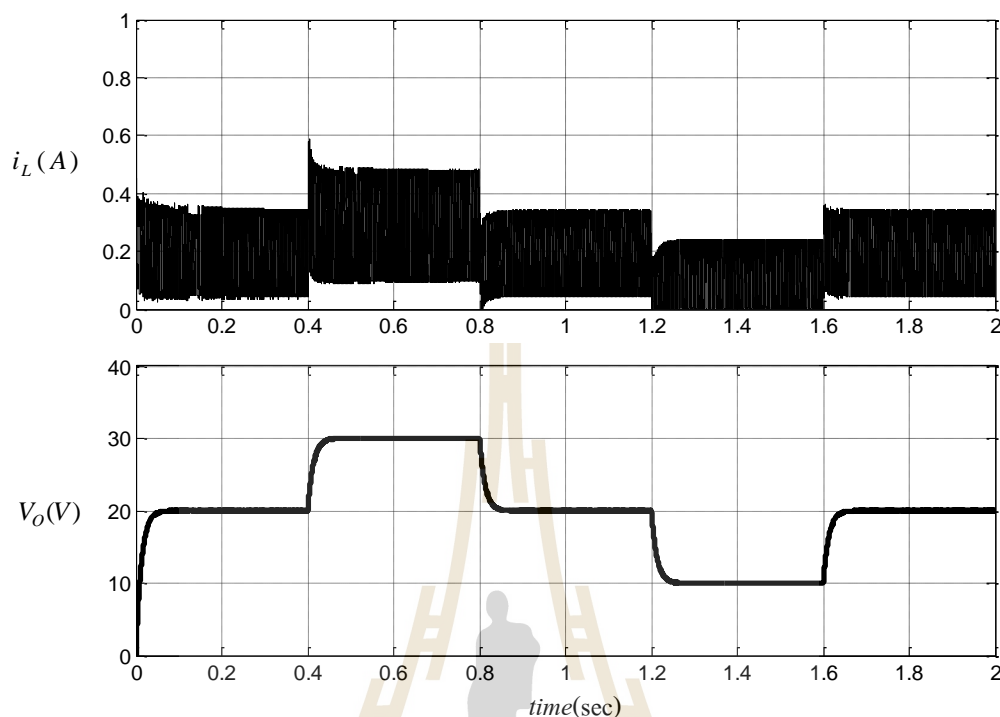
รูปที่ 4.7 โครงสร้างการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอ ดำเนินการจำลองสถานการณ์เมื่อแรงดันอินพุตเท่ากับ 400V โดยต้องการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ อยู่ที่ 20V ผลการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น สามารถลดระดับแรงดันอินพุตจนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตที่คงที่ 20V ตามต้องการ ในขณะที่กระแส อินพุต  $i_L$  มีค่าค่อนข้างน้อย เนื่องจากวงจรทำงานด้วยแรงดันอินพุตค่อนข้างสูงและมีกำลังไฟฟ้าค่อนข้าง ต่ำ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองในสถานะชั่วครู่ของแรงดันเอาต์พุตไม่มีการพุ่งเกิน และเข้าสู่ สถานะอยู่ตัวที่ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

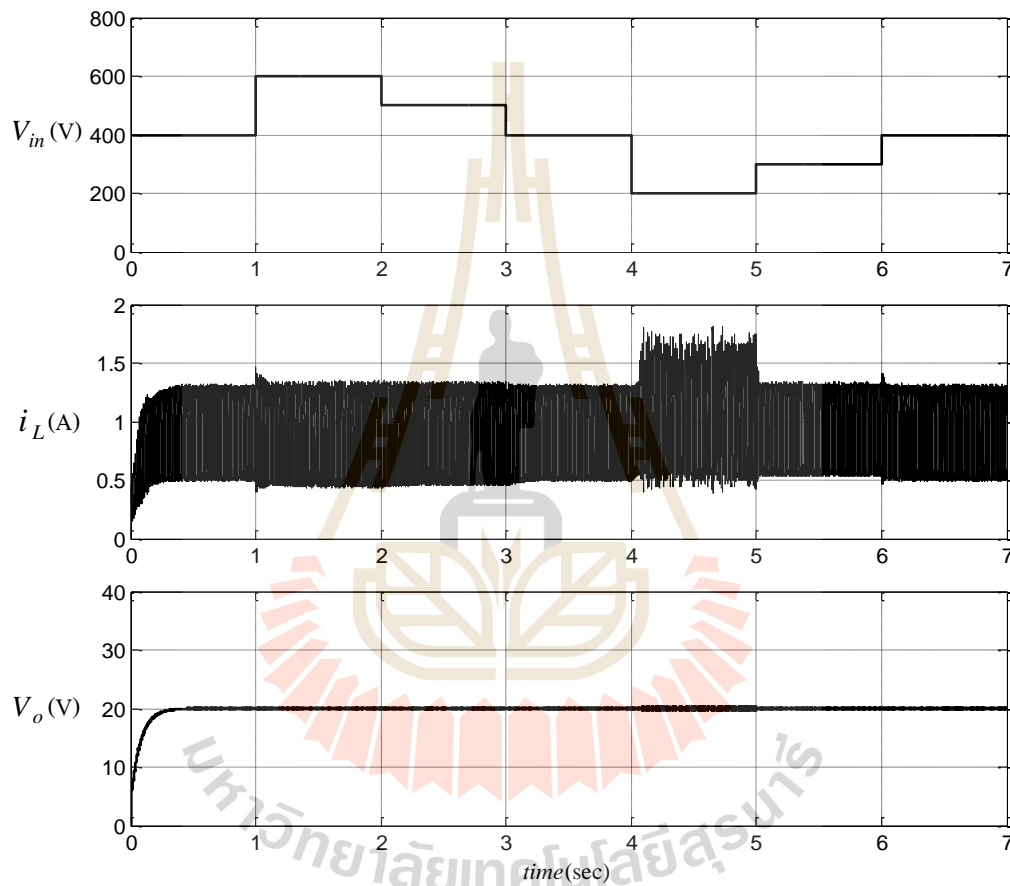
จากนั้นดำเนินการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจร โดยปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง เพื่อแสดงสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอเมื่อมีการเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 โดยในช่วงแรกกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 20V จากนั้นที่เวลา 4 วินาที ทำการปรับเพิ่มแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเป็น 30V จะเห็นได้ว่า สามารถควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตได้อย่างรวดเร็ว และสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ประมาณ 30V ต่อมาที่เวลา 0.8 วินาที ทำการปรับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเป็น 20V ดังเดิม ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวยังคงสามารถควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตได้เท่ากับ 20V หลังจากนั้นที่เวลา 1.2 วินาที ทำการปรับลดแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเป็น 10V จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้ สามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการเท่ากับ 10V ในขณะที่ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงสอดคล้องกับระดับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง

นอกจากนี้ทำการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าคงที่เท่ากับ 20V ดำเนินการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตในช่วง 300V ถึง 600 V เพื่อยืนยันสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นและตัวควบคุมพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยในช่วงแรกกำหนดให้แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 400V หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงเพิ่มค่าแรงดันอินพุตเป็น 600V, 500V และ 400V ที่เวลา 1, 2 และ 3 วินาที ตามลำดับ จากนั้นที่เวลา 4, 5 และ 6 วินาที ทำการเปลี่ยนแปลงลดค่าแรงดันอินพุตเป็น 200V, 300V และ 400V ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นขณะทำงานโดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ สามารถควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการเท่ากับ 20V ได้แม้มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรดังกล่าว อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าในขณะที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นทำงานด้วยแรงดันอินพุต 200V จะเกิดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตที่ค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากวงจรดังกล่าวกำลังทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่

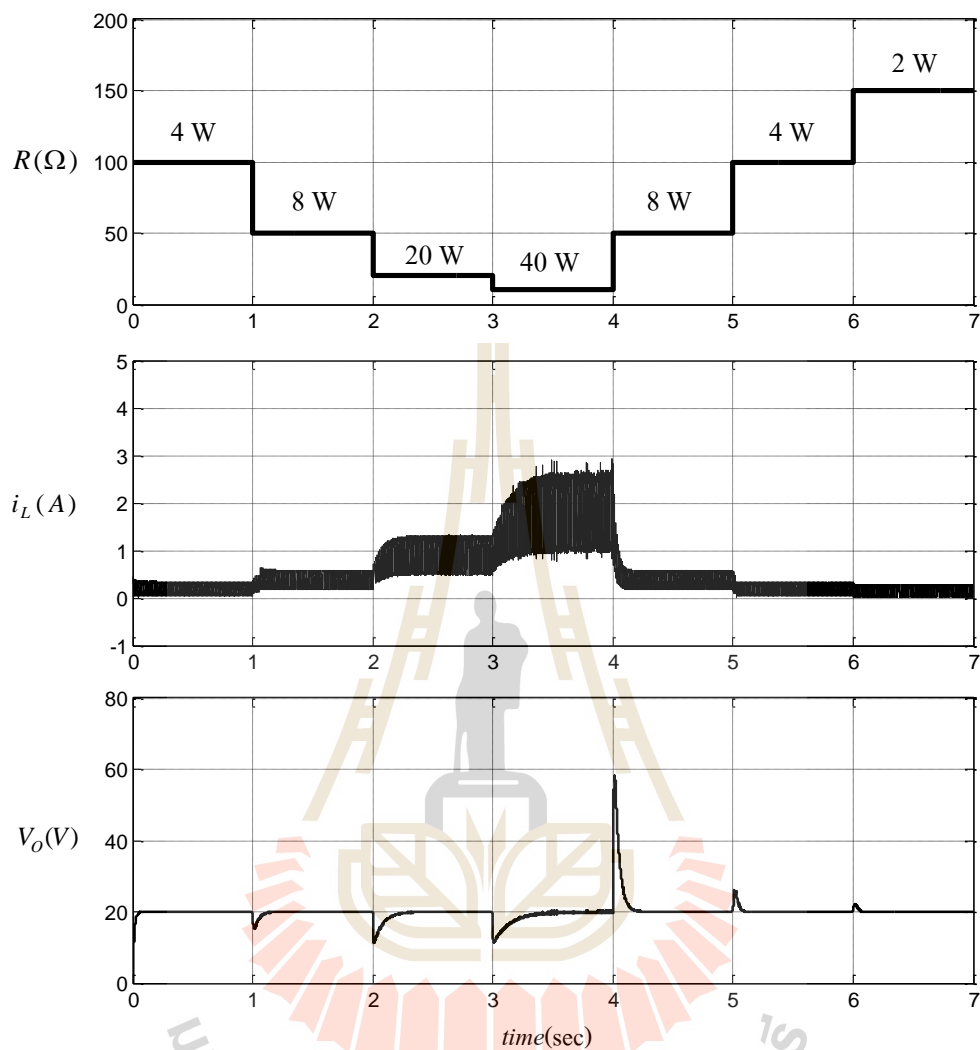
ที่การออกแบบเพื่อเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุตั้งที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ใช้ค่าวัฏจักรหน้าที่ประมาณ 0.3 ซึ่งจะทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นมีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตในช่วงการทำงานที่แรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างน้อย



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอินพุต

ในลำดับต่อมาดำเนินการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจร โดยการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน เพื่อแสดงประสิทธิผลของวงจรที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่เท่ากับ 20V เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลด ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.11 ในช่วงแรกกำหนดให้โหลดความต้านทานเป็น  $100\ \Omega$  โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าคงที่เท่ากับ 400V จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานเป็น  $50\ \Omega$ ,  $20\ \Omega$ ,  $10\ \Omega$ ,  $50\ \Omega$ ,  $100\ \Omega$  และ  $150\ \Omega$  ที่เวลา 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 วินาที ตามลำดับ โดยค่าโหลดความต้านทานที่ปรับเปลี่ยนไปสอดคล้องกับกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการเท่ากับ 8W, 20W, 40W, 8W, 4W และ 2W ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน พบว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้ สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่เท่ากับ 20V ตามต้องการได้ นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นว่า เมื่อโหลดตัวต้านทานมีค่าลดลงจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสไฟฟ้า  $i_L$  ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลงในสถานะชั่วคราว โดยที่ตัวควบคุมพีไอพยายามรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้กลับมาคงที่ดังเดิมในสถานะอยู่ตัว และเมื่อโหลดตัวต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นในวินาทีที่ 4 เป็นต้นไป จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลงด้วย เมื่อพิจารณาแรงดันเอาต์พุตจะเห็นได้ว่าการพุ่งเกินในสถานะชั่วคราว และสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่เท่ากับ 20V ได้อย่างรวดเร็วในสถานะอยู่ตัว

นอกจากนี้ ยังได้ตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อมีความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเกิดขึ้นในวงจรดังกล่าว เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุถูกใช้ในกระบวนการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ รวมถึงมีผลกระทบต่อการทำงานของกระแสและการกระเพื่อมของแรงดันในวงจร ดังนั้นจึงดำเนินการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุให้มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทั้งนี้ยังคงอาศัยตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้แล้วในการจำลองสถานการณ์



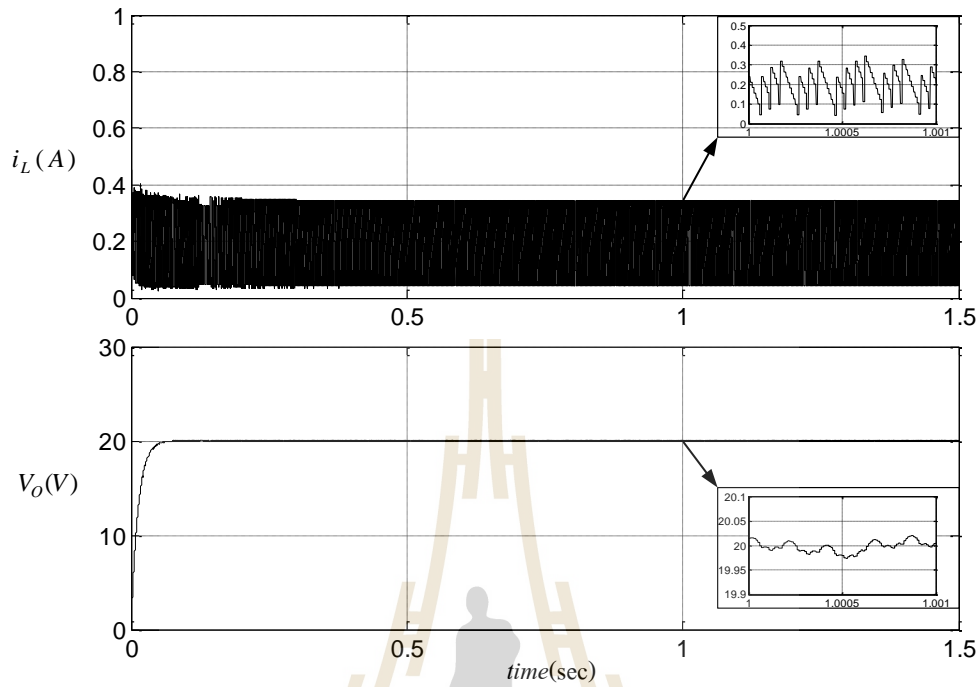
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน

จากตารางที่ 4.3 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ เมื่อมีความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำเกิดขึ้น ในขณะที่กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุมีค่าเท่าเดิมคือ 180 $\mu$ F ได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจร 3 กรณี โดยในกรณีแรกเป็นการใช้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุค่าเดิม กล่าวคือ ตัวเหนี่ยวนำทั้งสามค่าเท่ากับ 15mH ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการเท่ากับ 20V ได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ค่าการ

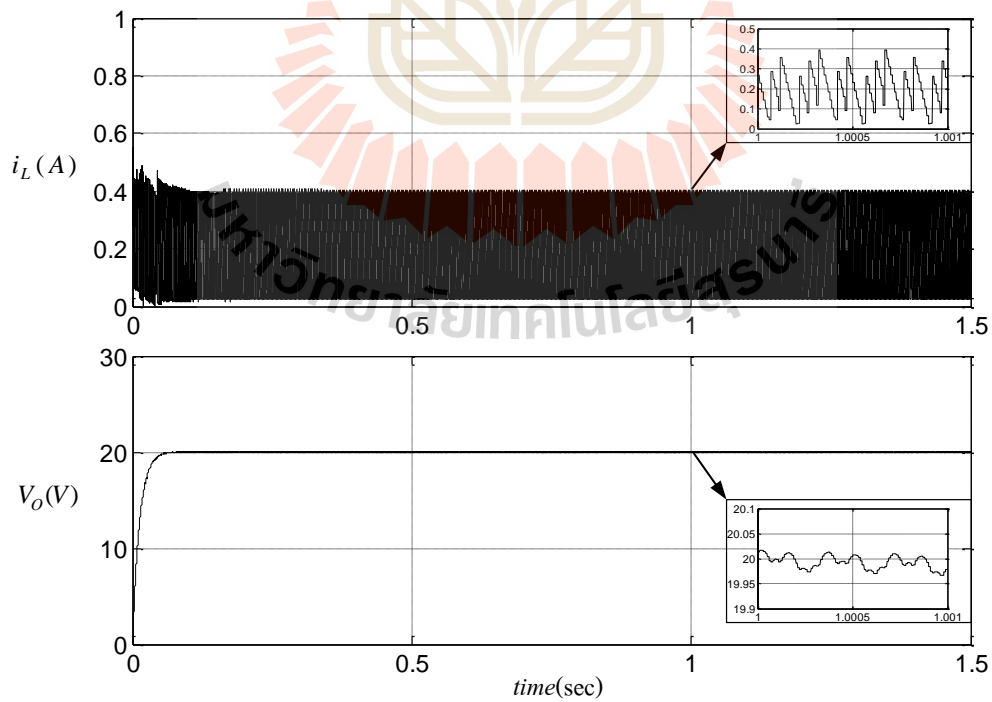
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าประมาณ 0.2A กรณีที่สอง ดำเนินการปรับลดค่าตัวเหนี่ยวนำทั้งสามเป็น 10mH ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าตัวควบคุมพีไอยังคงสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการเท่ากับ 20V ในขณะที่ค่าการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.4A กรณีสุดท้าย ทำการปรับเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำทั้งสามเป็น 20mH ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าตัวควบคุมพีไอยังคงสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการเท่ากับ 20V ในขณะที่ค่าการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าประมาณ 0.2A

ตารางที่ 4.3 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาดที่ใช้จริง	ขนาดที่ลดลง	ขนาดที่เพิ่มขึ้น
$V_{in}$	แรงดันอินพุต		20 V	
$L_1, L_2, L_3$	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH	10 mH	20 mH
$C_1, C_2$	ตัวเก็บประจุ	180 $\mu$ F	100 $\mu$ F	400 $\mu$ F
$R$	โหลดความต้านทาน		100 $\Omega$	
$f_{sw}$	ความถี่สวิตซ์		20 kHz	

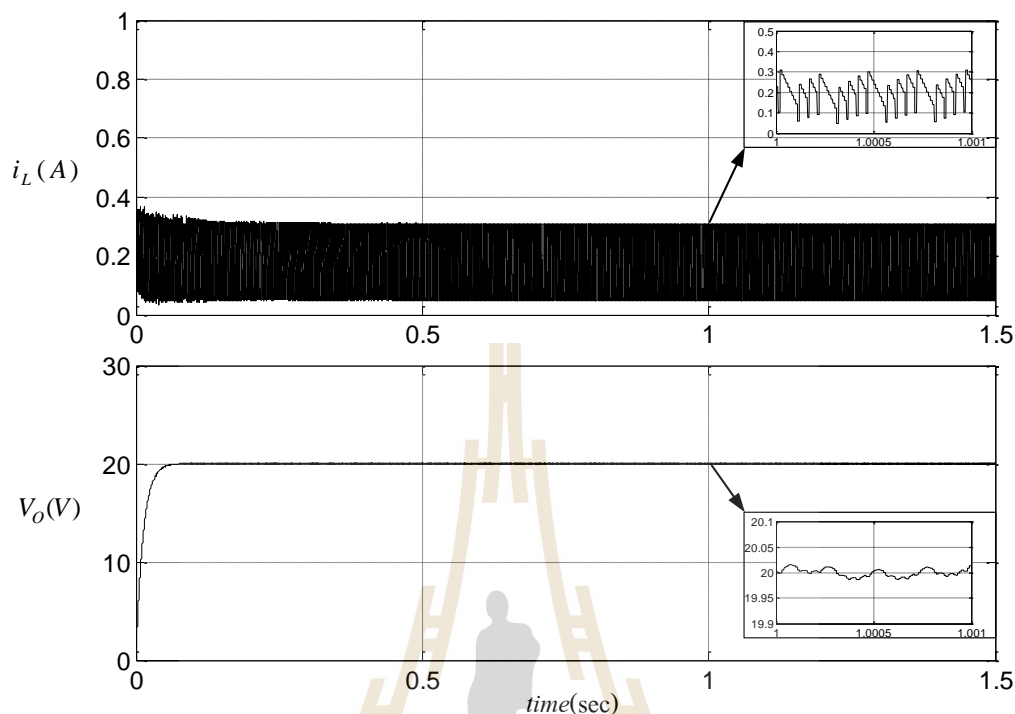


รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำเท่าเดิมเท่ากับ 15mH



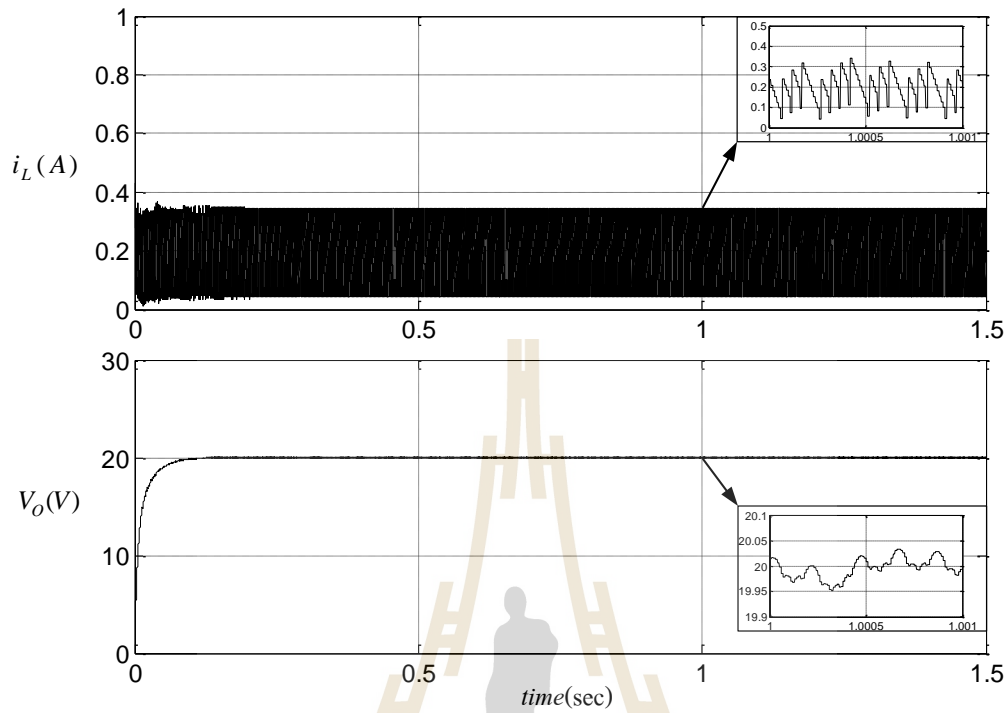
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำลดลงเป็น 10mH



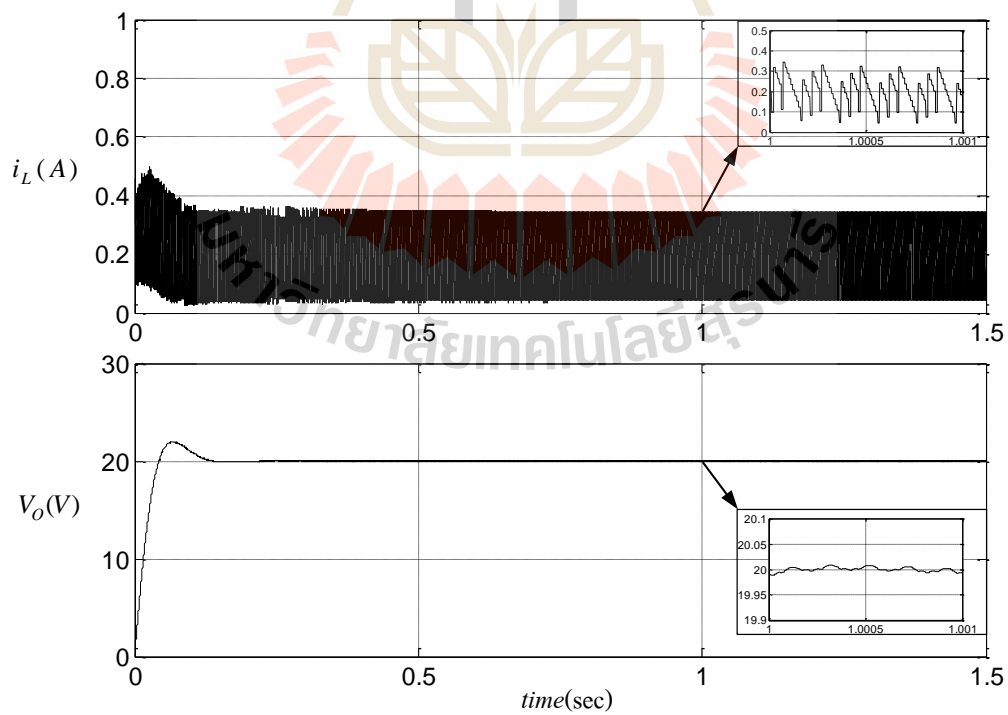


รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นเป็น 20mH

ลำดับต่อมา ดำเนินการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ โดยกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำทั้งสามมีค่าเท่ากับ 15mH และอาศัยข้อมูลที่ปรากฏในตารางที่ 4.3 ในการจำลองสถานการณ์ โดยทำการลดขนาดตัวเก็บประจุจากเดิม 180  $\mu\text{F}$  เป็น 100  $\mu\text{F}$  ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่า ตัวควบคุมพีไอยังคงสามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดทอนระดับแรงดันอินพุต จนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตที่คงที่เท่ากับ 20V ตามต้องการ โดยการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตมีค่าประมาณ 0.1V จากนั้น ทำการเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุจากเดิม 180  $\mu\text{F}$  เป็น 400  $\mu\text{F}$  ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่า ตัวควบคุมพีไอยังคงสามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ จากผลการจำลองสถานการณ์จะสังเกตเห็นว่า มีการฟุ้งเกินของแรงดันเอาต์พุตในสถานะชั่วคราว และกลับเข้าสู่ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ 20V ได้อย่างรวดเร็วในสถานะอยู่ตัว โดยมีการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตค่อนข้างน้อย อันเนื่องมาจากตัวเก็บประจุมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อค่าตัวเก็บประจุลดลงเป็น 100 $\mu$ F



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อค่าตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นเป็น 400 $\mu$ F

#### 4.4 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้เห็นถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว จึงได้ทำการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรมุ่งกล่าวภายใต้การทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะต่าง ๆ กล่าวคือการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ 20 V เมื่อวงจรมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต การปรับเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง การทำงานของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน รวมถึงการปรับเปลี่ยนขนาดพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในวงจร จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นทำงานร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอสามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้ถึง 20 V<sub>dc</sub> เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างสูง กล่าวคือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นสามารถลดทอนระดับแรงดันได้สูงถึง 20 เท่า และสามารถควบคุมให้ได้แรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของวงจรในสภาวะต่าง ๆ ดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนนี้แล้ว

## บทที่ 5

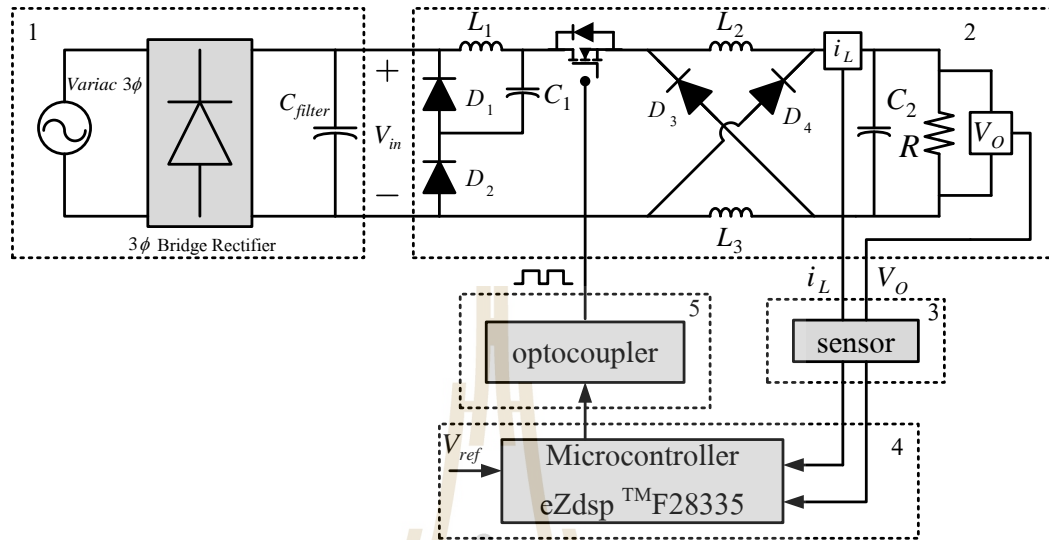
# ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอน แรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

### 5.1 บทนำ

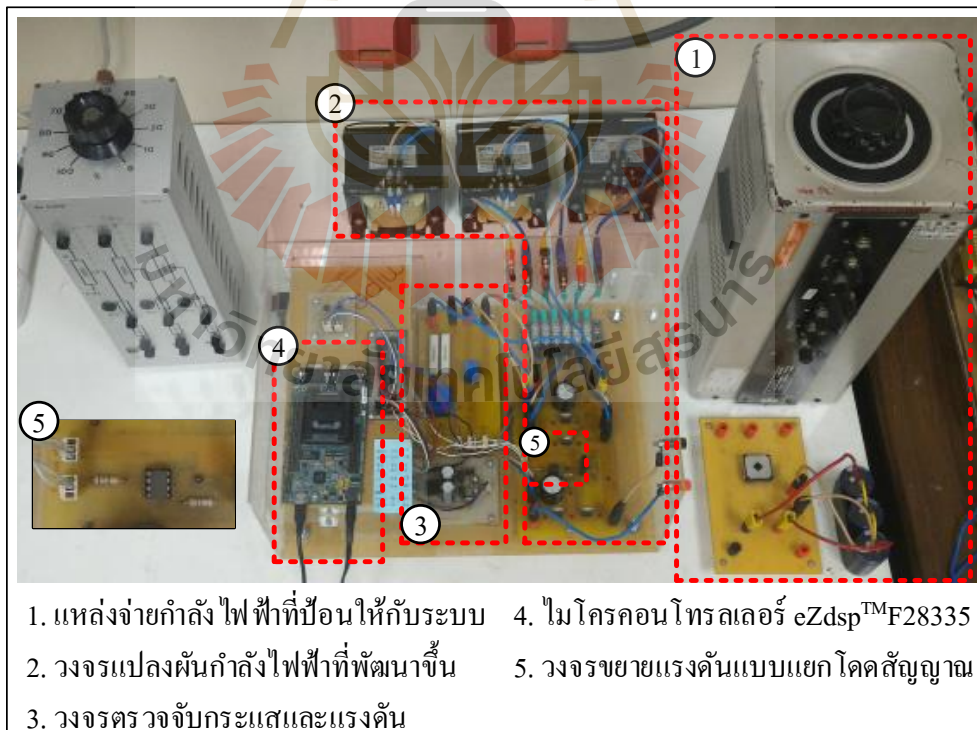
ในบทนี้จะนำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น สำหรับใช้ยืนยันผลการทดสอบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดี่ยวที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ดังมีโครงสร้างแสดงรายละเอียดในบทที่ 3 รวมถึงการสร้างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 400V ให้กับวงจรที่พัฒนาขึ้น วงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแส และการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp<sup>TM</sup>F28335 สำหรับกระบวนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอได้้อธิบายการออกแบบไว้แล้วในบทที่ 4

### 5.2 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

โครงสร้างของชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น แสดงในรูปที่ 5.1 ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจะใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เข้าช่วยในการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง เพื่อให้ได้แรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรเท่ากับ 400V ส่วนที่ 2 เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ส่วนที่ 3 เป็นตัวตรวจจับสัญญาณโดยแบ่งออกเป็น ตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  และตัวตรวจจับกระแส  $i_L$  ส่วนที่ 4 เป็นส่วนของการควบคุมซึ่งใช้ตัวควบคุมพีไอ อาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp<sup>TM</sup>F28335 และส่วนที่ 5 เป็นวงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ สำหรับชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



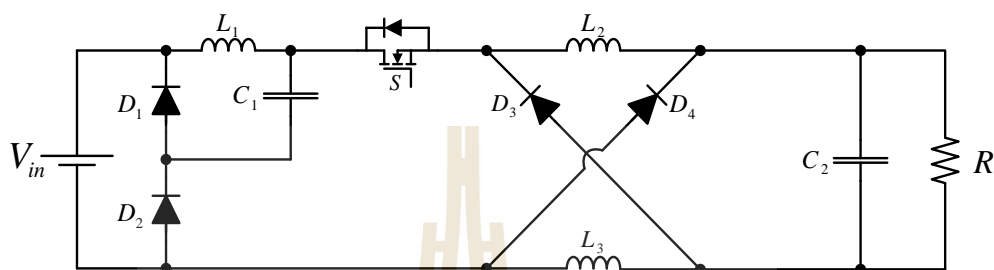
รูปที่ 5.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบ



รูปที่ 5.2 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

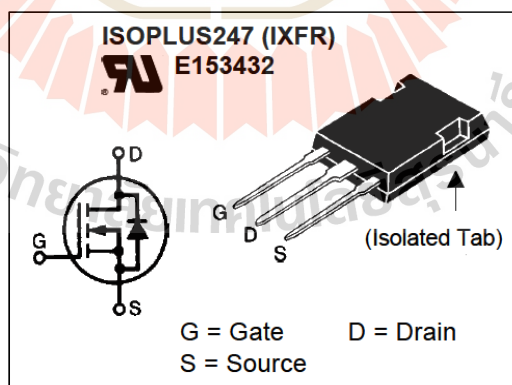
### 5.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

การสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น จะอาศัยโครงสร้างของวงจрдังแสดงในรูปที่ 5.3 ดังนี้



รูปที่ 5.3 โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

อุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบมอดูล การเลือกสวิตช์กำลังจะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสในวงจรเป็นสำคัญ โดยค่าแรงดันที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าเท่ากับ 400 V และค่าพิกัดกระแสมีค่าไม่เกิน 6 A ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอดูลของมอสเฟตเบอร์ IXFR32N80P โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 800 V และค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 13 A ซึ่งมอดูลดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 5.4

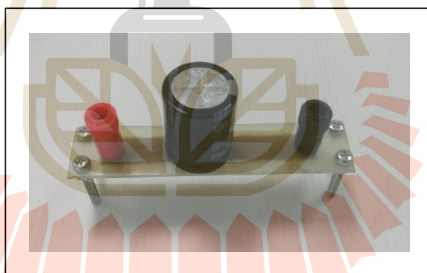


รูปที่ 5.4 มอดูลของมอสเฟตเบอร์ IXFR32N80P

การเลือกตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$ ,  $L_2$  และ  $L_3$  สำหรับชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะใช้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$ ,  $L_2$  และ  $L_3$  ที่มีขนาด 15 mH และมีพิกัดกระแส 10 A พิกัดแรงดัน 500 V ซึ่งตัวเหนี่ยวนำทั้งสามที่ใช้นี้ มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ แสดงดังรูปที่ 5.5 ในขณะที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  มีค่าเท่ากับ 180  $\mu$ F พิกัดแรงดัน 450 V แสดงดังรูปที่ 5.6

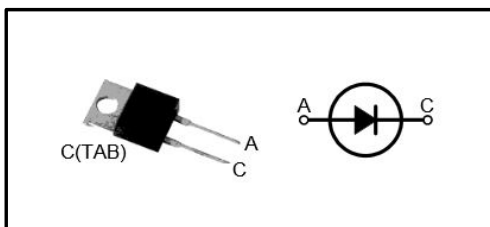


รูปที่ 5.5 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 5.6 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

การเลือกไดโอดกำลังในงานวิจัยนี้ใช้ไดโอดเบอร์ MUR1560 ที่มีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 600 V พิกัดกระแสเท่ากับ 25 A เป็นไดโอดกำลัง ที่มีช่วงกลับคืนตัวเร็ว (Ultrafast Recovery Diodes) โดยเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery time) อยู่ที่ 60 ns ช่วยให้มีกระแสไฟไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายของการไบอัสตรงเพียงระยะเวลาสั้น ๆ ไดโอดกำลังดังกล่าวแสดงได้ดังรูป 5.7



รูปที่ 5.7 ไดโอดที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

ส่วนสุดท้ายของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นคือ โหลดตัวต้านทาน แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 โดยโหลดตัวต้านทานนี้ประกอบด้วยตัวต้านทานภายใน 3 ชุด แต่ละชุดสามารถปรับค่าความต้านทานตั้งแต่ 0 – 1800Ω มีพิกัดกระแสเท่ากับ 1 A ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการต่อชุดโหลดตัวต้านทานเป็นแบบขนาน มีค่าโหลดตัวต้านทานอยู่ในช่วง 20 – 600Ω



รูปที่ 5.8 โหลดตัวต้านทานสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปเบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างชุดทดสอบ ดังตารางที่ 5.1



ตารางที่ 5.1 เบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบ

อุปกรณ์	สัญลักษณ์	เบอร์	ขนาด	พิกัด
มอสเฟต	S	IXFR32N80P	-	13 A , 800 V
ตัวเหนี่ยวนำ	$L_1, L_2, L_3$	-	15 mH	10 A , 500 V
ตัวเก็บประจุ	$C_1, C_2$	-	180 $\mu$ F	450 V
ไดโอด	$D_1, D_2, D_3, D_4$	MUR1560	-	25 A , 600 V
โหลดตัวต้านทาน	R	-	20 – 600 $\Omega$	120 W

#### 5.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ในการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นภายใต้เงื่อนไขการทำงานในสถานการณ์ต่าง ๆ จำเป็นต้องจ่ายแรงดันอินพุตกระแสตรง 400 V ให้กับวงจรที่พัฒนาขึ้น โดยจะทำการสร้างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ เพื่อได้ระดับแรงดันกระแสตรงเท่ากับ 400V ในงานวิจัยนี้ จะใช้หม้อแปลงปรับแรงดันสามเฟส (variac) ที่มีพิกัดอยู่ที่ในช่วง 0 – 480  $V_{rms}$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และเลือกใช้หม้อดูลเรียงกระแสแบบสามเฟสเบอร์ 36MT160 มีพิกัดแรงดัน 1600 V และมีพิกัดกระแส 35 A แสดงได้ดังรูปที่ 5.10

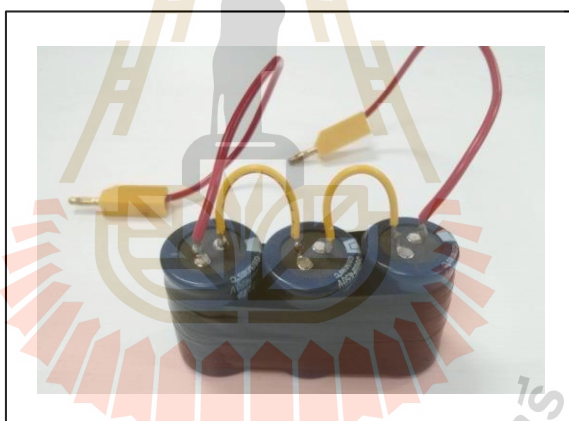


รูปที่ 5.9 หม้อแปลงปรับแรงดันสามเฟส

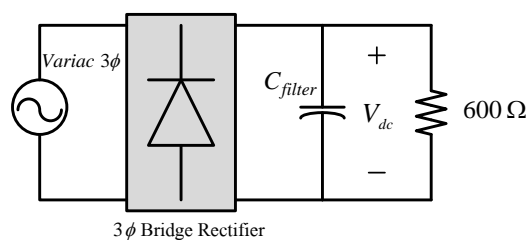


รูปที่ 5.10 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสเพื่อกรองสัญญาณแรงดันให้เรียบขึ้น มีค่าเท่ากับ  $200 \mu\text{F}$  มีพิกัดแรงดัน  $1350 \text{ V}$  แสดงได้ดังรูปที่ 5.11 โดยวงจรแหล่งจ่ายกระแสตรงที่ทำหน้าที่สร้างแรงดันอินพุต  $400 \text{ V}$  ให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 5.12



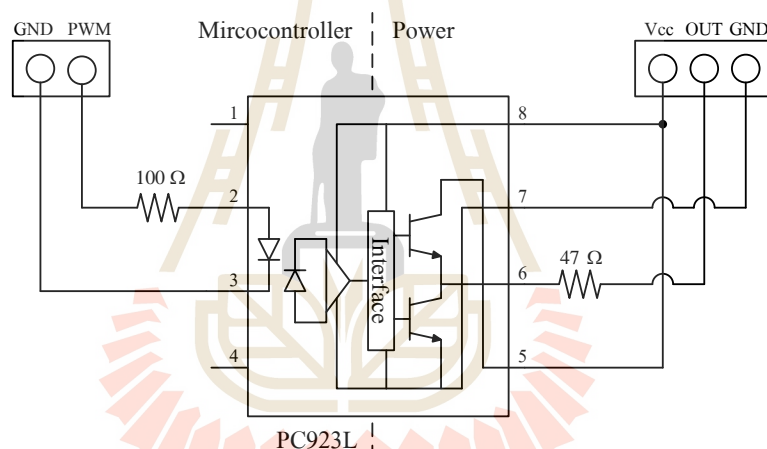
รูปที่ 5.11 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองแรงดัน



รูปที่ 5.12 วงจรแหล่งจ่ายกระแสตรง

## 5.5 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ

วงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณใช้สำหรับขยายสัญญาณแรงดันที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากระดับแรงดันเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าแรงดันต่ำซึ่งไม่เพียงพอในการขับสวิตช์กำลังให้ทำงานได้ รวมทั้งใช้ในการแยกกราวด์ด้านแรงดันต่ำกับแรงดันสูงออกจากกัน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรควบคุมขณะส่งสัญญาณขับสวิตช์ให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ทั้งนี้ได้ใช้ไอซีออปโตคัปเปิลเลอร์ เบอร์ PC923L เป็นวงจรขยายแรงดันที่มีการแยกโดดสัญญาณสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีอัตราขยาย 2 เท่า เพื่อให้ได้สัญญาณแรงดันเพียงพอที่ใช้ขับสวิตช์ให้วงจรสามารถทำงานได้ ลักษณะการต่อวงจรแบบแยกโดดสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 5.13



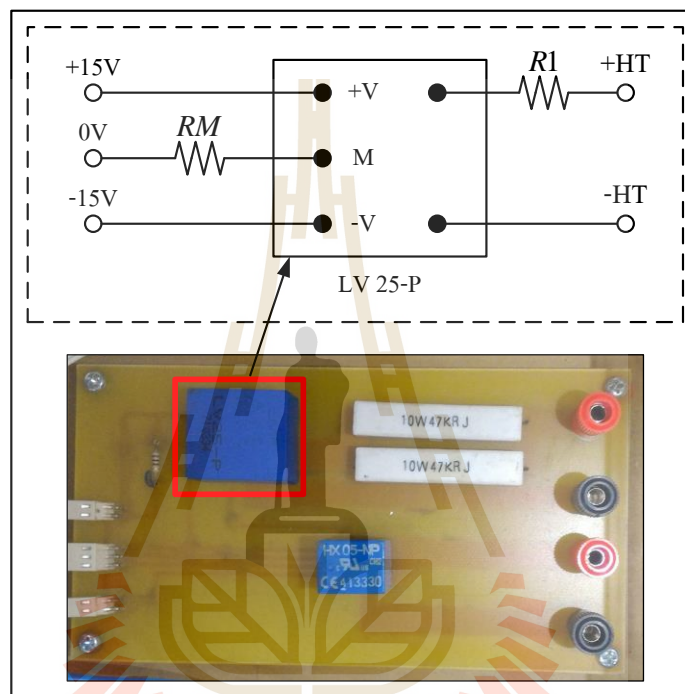
รูปที่ 5.13 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณ

## 5.6 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแส

ในกระบวนการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้แล้วนั้น จำเป็นต้องตรวจจับค่าแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดและค่ากระแสอินพุตที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีค่าวัฏจักรหน้าที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง โดยพิจารณาตัวตรวจจับสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลด  $V_o$  และตัวตรวจจับสัญญาณกระแสอินพุต  $i_L$  ได้ดังต่อไปนี้

### ตัวตรวจจับสัญญาณแรงดัน

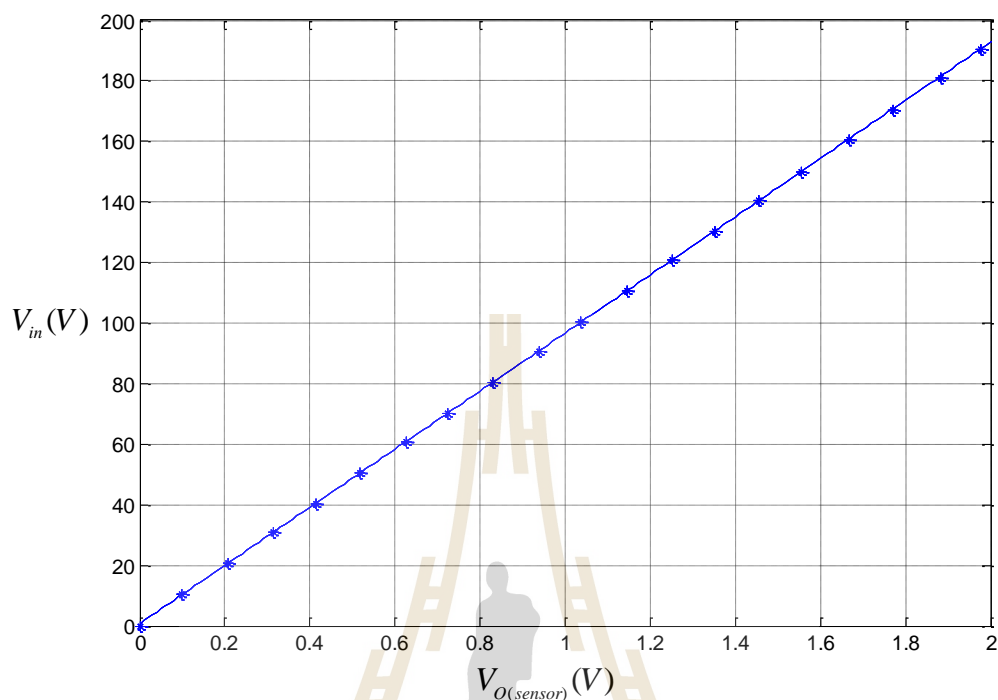
การสร้างตัวตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด เลือกใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า LV 25-P พิกัด 500 V และกระแสพิกัดที่ 10 mA วงจรตรวจจับต้องการไฟเลี้ยง +15V , 0 V และ -15 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ชุดตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

จากนั้นทำการทดสอบโดยเพิ่มค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  จาก 0 V – 200 V ให้กับวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.15 สามารถหาสมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ ดังสมการที่ (5-1)

$$V_{in} = 96.0014 V_{O(sensor)} + 0.7221 \quad (5-1)$$

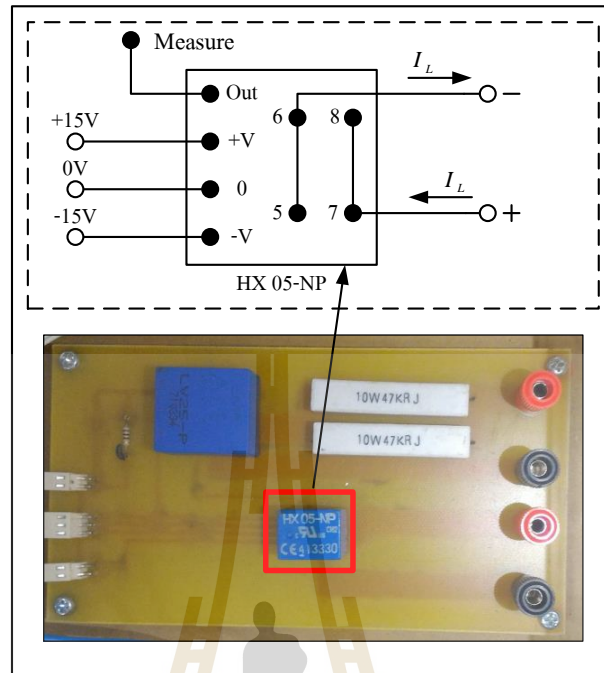


รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ

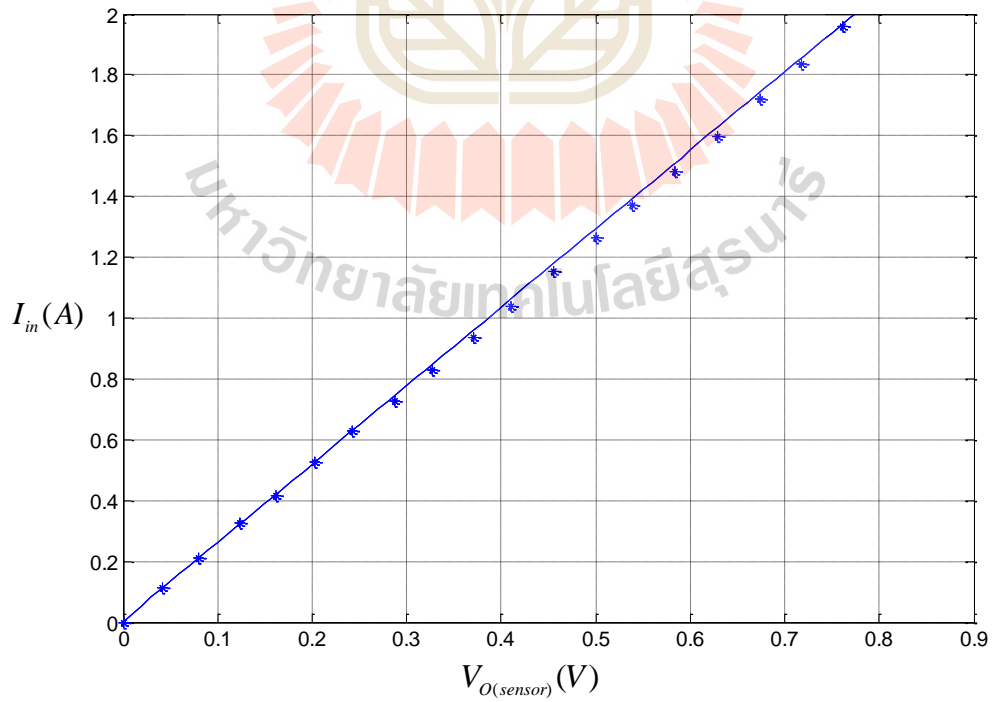
#### ตัวตรวจจับสัญญาณกระแส

การสร้างชุดตรวจจับสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ได้เลือกใช้ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัดกระแส 5 A วงจรตรวจจับต้องการไฟเลี้ยง +15 V , 0 V และ -15 V ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.16 จากนั้นทำการทดสอบวงจรตรวจจับสัญญาณกระแส โดยทำการเพิ่มค่ากระแสอินพุต  $I_{in}$  จาก 0 A – 2 A เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.17 สามารถหาสมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตที่เข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณกระแสและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับสัญญาณกระแสแสดงดังสมการที่ (5-2)

$$I_{in} = 2.5808 V_{O(sensor)} + 0.0038 \quad (5-2)$$



รูปที่ 5.16 ชุดตรวจจับสนุมญาณกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนุม

## 5.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในกระบวนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมพีไอ จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp<sup>TM</sup>F28335 สำหรับประมวลผลสร้างสัญญาณการสวิตช์ที่มีค่าวัฏจักรหน้าที่ที่ที่เหมาะสมให้กับสวิตช์กำลัง เพื่อได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp<sup>TM</sup>F28335 แสดงได้ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp<sup>TM</sup>F28335

## 5.8 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น ได้ดำเนินการสร้างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 400V สำหรับจ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น การสร้างวงจรขยายแรงดันแบบแยกโหนดสัญญาณเพื่อขับสวิตช์ให้ทำงานสอดคล้องกับสัญญาณการสวิตช์ที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ รวมทั้งได้กล่าวถึงการสร้างวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสอินพุตและวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันเอาต์พุต เพื่อใช้ในกระบวนการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้น หลังจากที่ได้ชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น จะดำเนินการทดสอบวงจรดังกล่าวภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ ซึ่งจะได้อีกกล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 6 ต่อไป

## บทที่ 6

### ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่สร้างขึ้น

#### 6.1 บทนำ

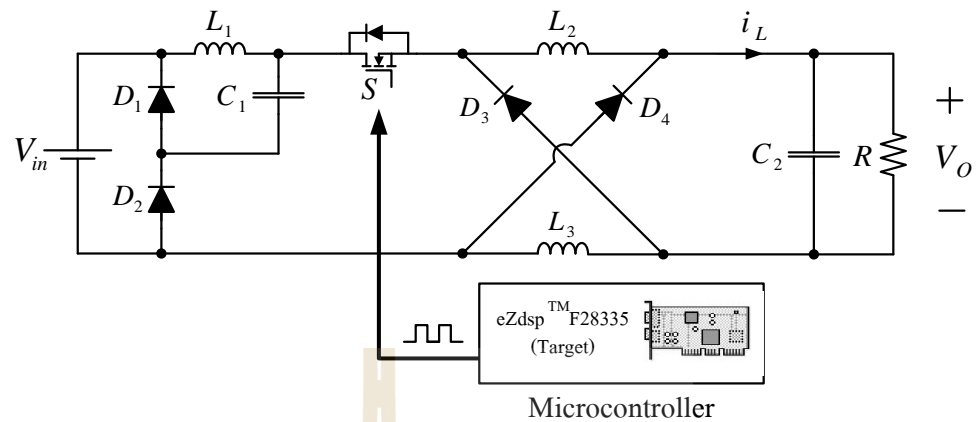
ในบทนี้จะทำการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้นแบ่งเป็น 2 กรณี ในกรณีแรกจะเป็นการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงขณะที่ไม่มีตัวควบคุมพีไอ กล่าวคือ จะทำการทดสอบวงจรเพื่อสังเกตผลตอบสนองเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ในการทำงานของสวิตช์ รวมทั้งประเมินประสิทธิภาพของชุดทดสอบ ในกรณีที่สองจะเป็นการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงขณะที่มีตัวควบคุมพีไอ เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการ ภายใต้สภาวะการทำงานของวงจรที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน โดยมีรายละเอียดการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทั้งสองกรณี ดังต่อไปนี้

#### 6.2 การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นขณะที่ไม่มีตัวควบคุม

โครงสร้างการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นขณะที่ไม่มีตัวควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อพิจารณาผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้กำหนดให้แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 400 V และโหลดความต้านทานมีค่าเท่ากับ  $20\ \Omega$  เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าสูงขึ้นไปประมาณ 20W จากนั้นทำการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ จะได้สัญญาณการสวิตช์ปรากฏดังรูปที่ 6.2

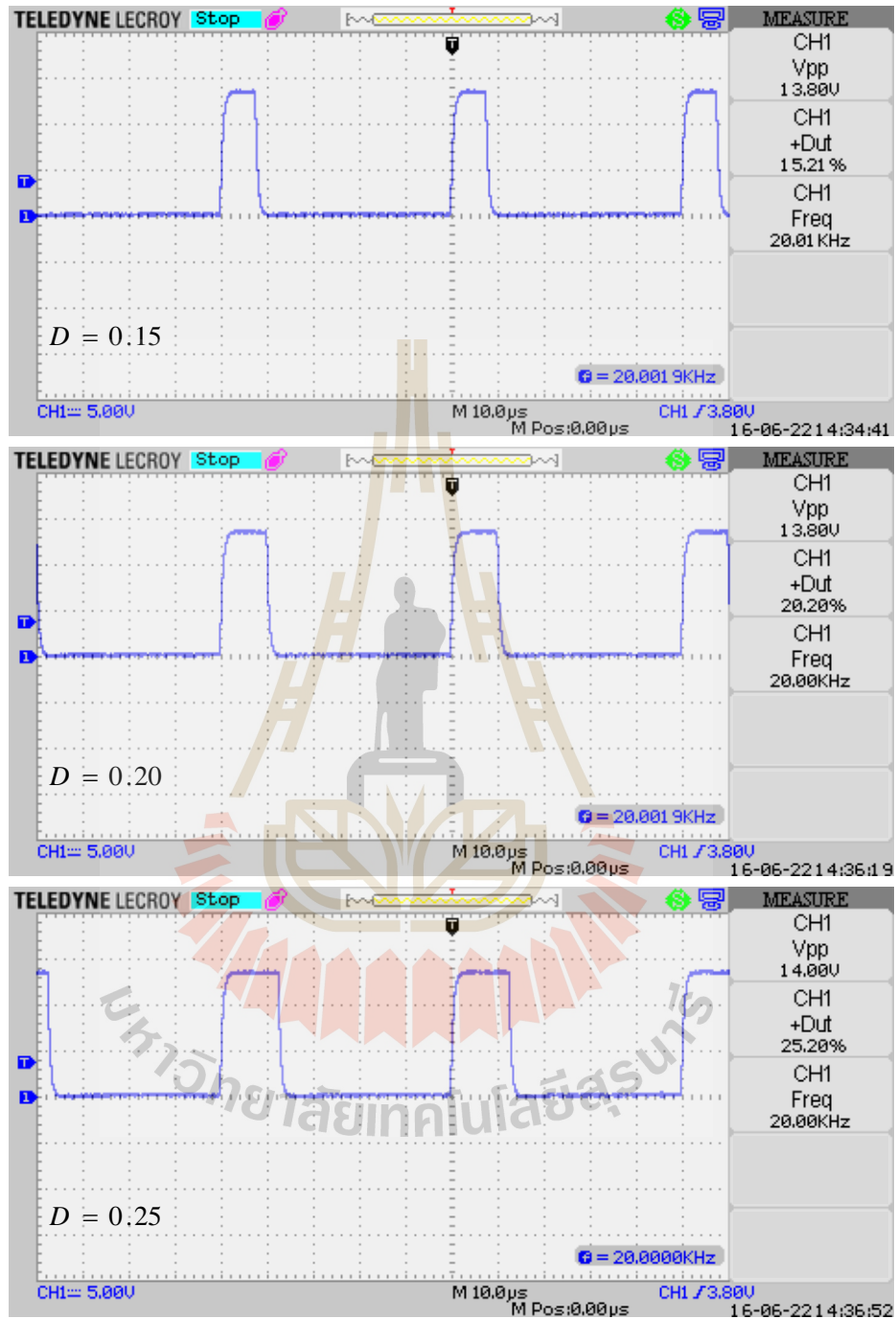
เมื่อทำการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยกำหนดให้วงจรดังกล่าวทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.15 จะได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.3 พบว่าการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุต จะปรากฏการพุ่งของแรงดันประมาณ 10 V จากนั้นแรงดันเอาต์พุตดังกล่าวจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 6.4 V ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ขณะที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นขณะทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.15 แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 6.8 V ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบในสภาวะการทำงานเดียวกัน



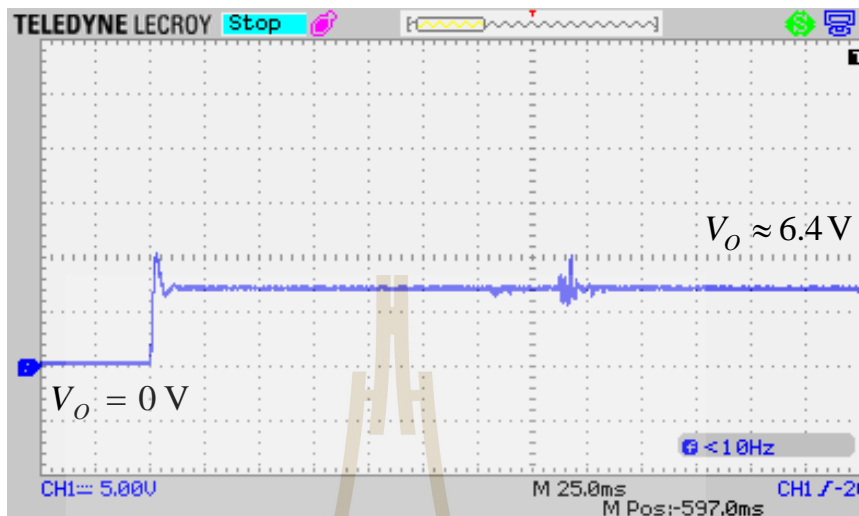


รูปที่ 6.1 โครงสร้างการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นขณะไม่มีตัวควบคุม

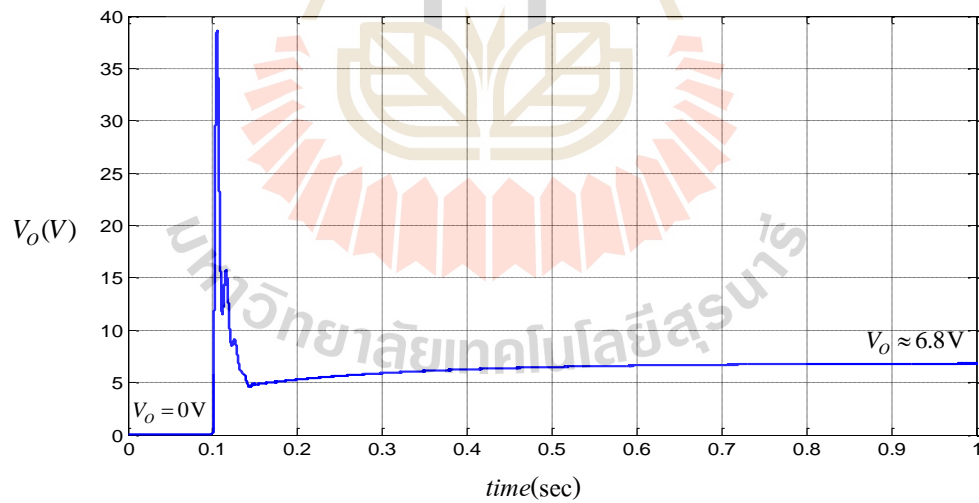
จากนั้นพิจารณาค่ากระแส  $i_L$  ที่ได้จากการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าขณะที่ทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.15 ดังปรากฏในรูปที่ 6.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าในสภาวะชั่วคราวมีการพุ่งเกินของกระแสประมาณ 1.5 A และเมื่อเวลาผ่านไปค่ากระแสดังกล่าวเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 0.55 A นอกจากนี้ พบว่ามีสัญญาณรบกวนในส่วนของสัญญาณกระแส อาจเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจรทดสอบ รวมถึงสมรรถนะของเครื่องมือวัดในการแสดงผลของกระแสที่วัดได้ จากนั้นพิจารณาค่ากระแส  $i_L$  ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในสภาวะการทำงานเดียวกัน พบว่า ในสภาวะชั่วคราวค่ากระแสมีการพุ่งเกินประมาณ 1.2 A และในสภาวะอยู่ตัวค่ากระแสดังกล่าวมีค่าประมาณ 0.34 A ดังแสดงในรูปที่ 6.6



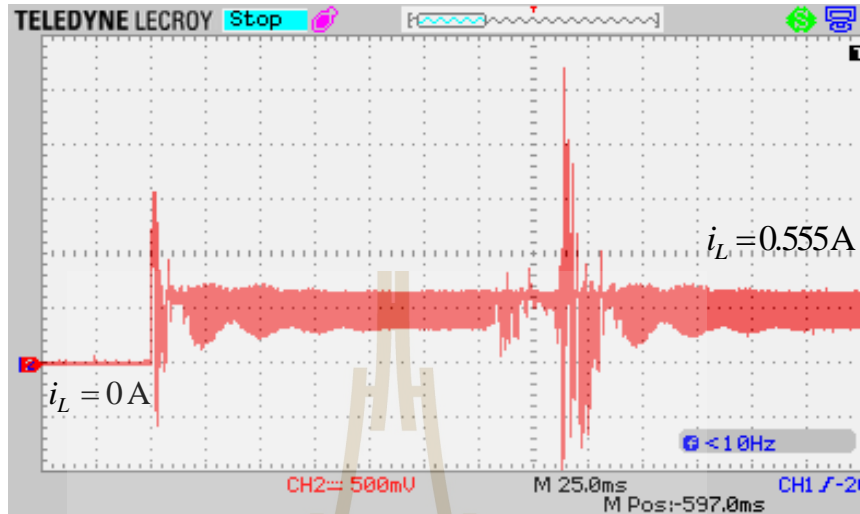
รูปที่ 6.2 สัญญาณการสวิตช์เมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.15, 0.20 และ 0.25



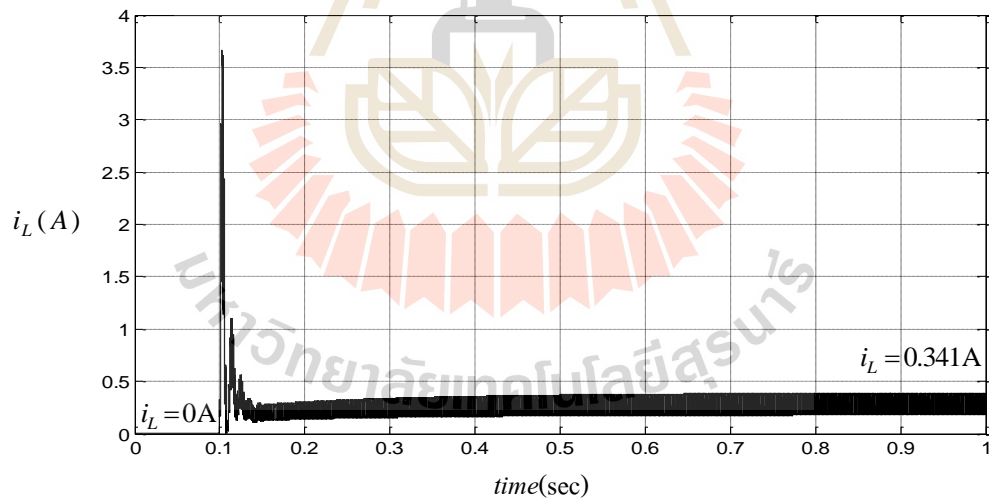
รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15



รูปที่ 6.4 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15



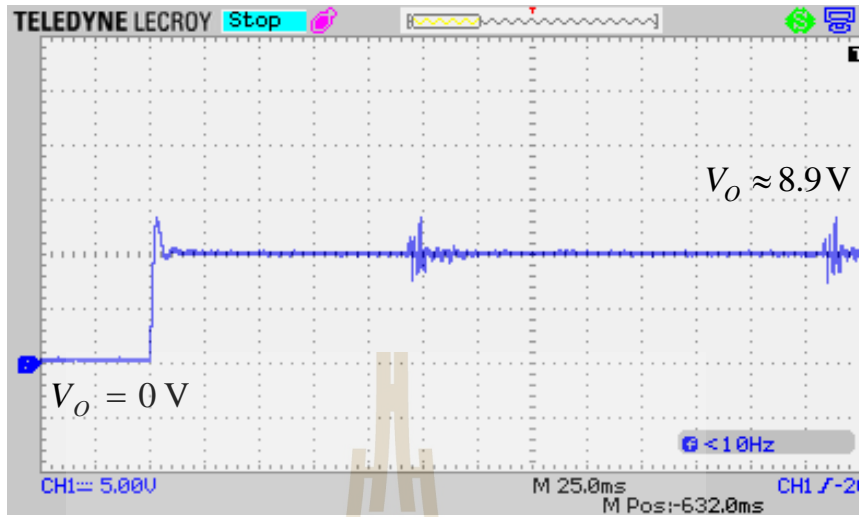
รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบกระแส  $i_L$  ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15



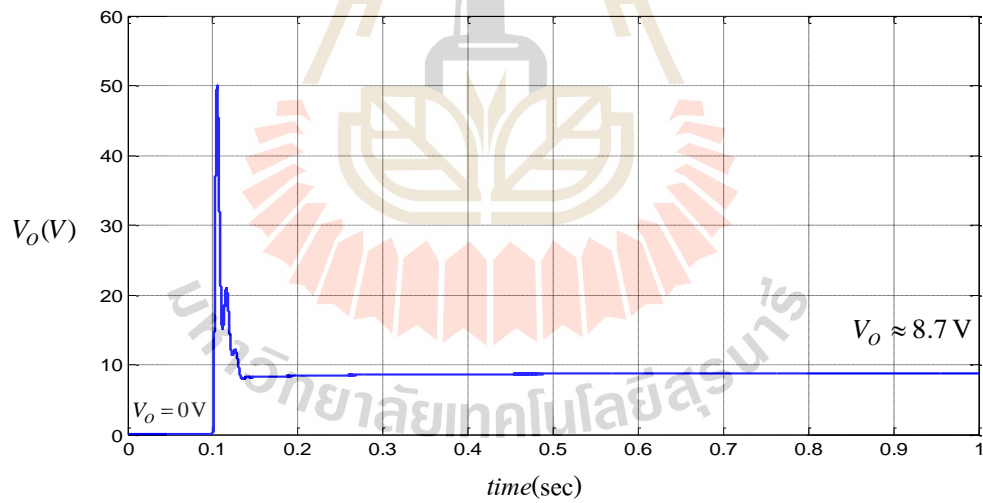
รูปที่ 6.6 ผลการจำลองสถานการณ์กระแส  $i_L$  ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15

ต่อมาทำการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยกำหนดให้วงจรดังกล่าวทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.20 จะได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.7 พบว่าการตอบสนองในสถานะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุต จะปรากฏการพุ่งของแรงดันประมาณ 14 V จากนั้นแรงดันเอาต์พุตดังกล่าวจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 8.9 V ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ขณะที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นขณะทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.20 แสดงได้ดังรูปที่ 6.8 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 8.7 V ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบในสถานะการทำงานเดียวกัน

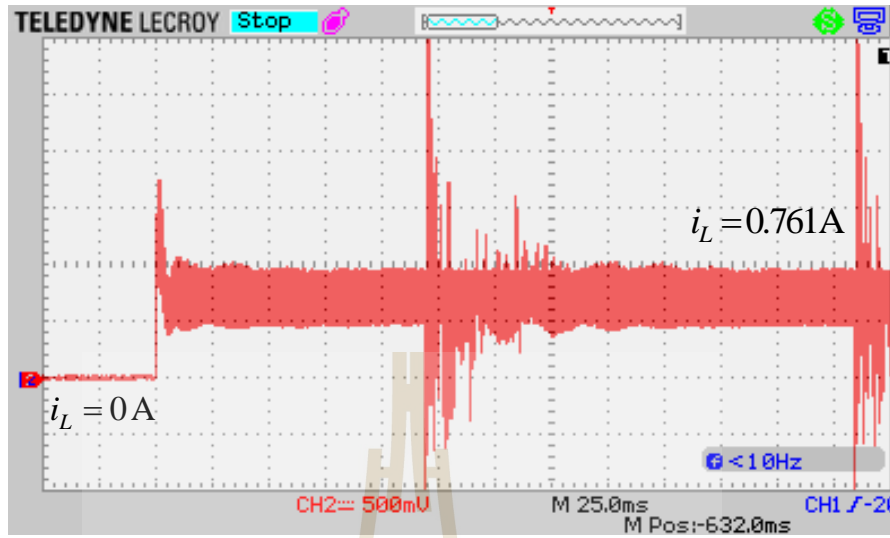
จากนั้นพิจารณาค่ากระแส  $i_L$  ที่ได้จากการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าขณะที่ทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.20 ดังปรากฏในรูปที่ 6.9 จะสังเกตเห็นได้ว่าในสถานะชั่วคราวมีการพุ่งเกินของกระแสประมาณ 1.8 A และเมื่อเวลาผ่านไปค่ากระแสดังกล่าวเข้าสู่สถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 0.76 A นอกจากนี้ พบว่ายังมีสัญญาณรบกวนในส่วนของสัญญาณกระแส อาจเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจรทดสอบ รวมถึงสมรรถนะของเครื่องมือวัดในการแสดงผลของกระแสที่วัดได้ จากนั้นพิจารณาค่ากระแส  $i_L$  ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในสถานะการทำงานเดียวกัน พบว่า ในสถานะชั่วคราวค่ากระแสมีการพุ่งเกินประมาณ 4.8 A และในสถานะอยู่ตัวค่ากระแสดังกล่าวมีค่าประมาณ 0.44 A ดังแสดงในรูปที่ 6.10



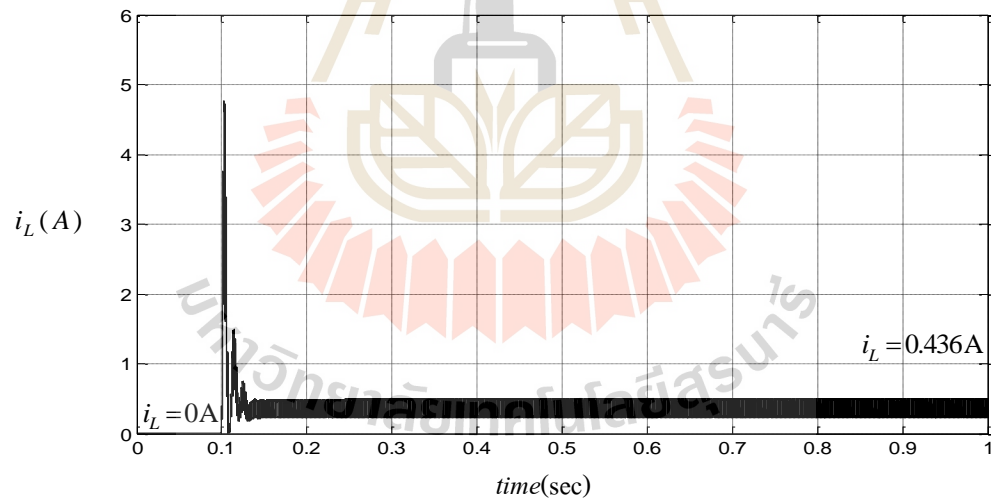
รูปที่ 6.7 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20



รูปที่ 6.8 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20



รูปที่ 6.9 ผลการทดสอบกระแส  $i_L$  ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20



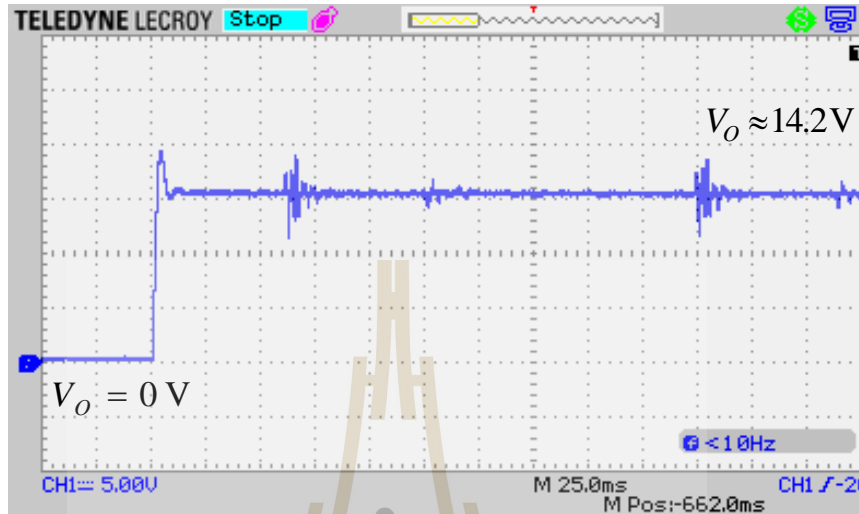
รูปที่ 6.10 ผลการจำลองสถานการณ์กระแส  $i_L$  ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20

ในลำดับต่อมาทำการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยกำหนดให้วงจรดังกล่าวทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.25 จะได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.11 พบว่าการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุต จะปรากฏการพุ่งของแรงดันประมาณ 20 V จากนั้นแรงดันเอาต์พุตดังกล่าวจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 14.2 V ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ขณะที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นขณะทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.25 แสดงได้ดังรูปที่ 6.12 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตในสถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 14.6 V ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบในสภาวะการทำงานเดียวกัน

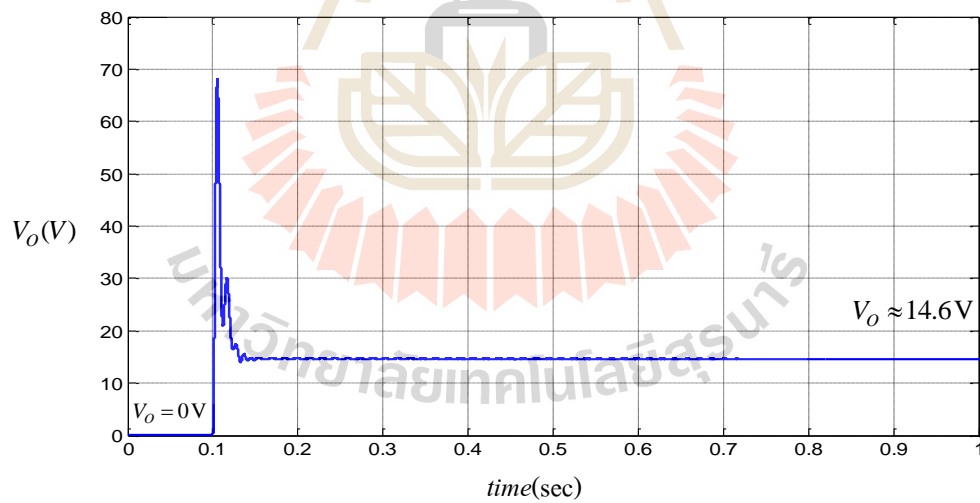
จากนั้นพิจารณาค่ากระแส  $i_L$  ที่ได้จากการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าขณะทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.25 ดังปรากฏในรูปที่ 6.13 จะสังเกตเห็นได้ว่าในสภาวะชั่วคราวมีการพุ่งเกินของกระแสประมาณ 2.5 A และเมื่อเวลาผ่านไปค่ากระแสดังกล่าวเข้าสู่สถานะอยู่ตัวมีค่าประมาณ 1.22 A นอกจากนี้ พบว่ายังมีสัญญาณรบกวนในส่วนของสัญญาณกระแส อาจเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจรทดสอบ รวมถึงสมรรถนะของเครื่องมือวัดในการแสดงผลของกระแสที่วัดได้ จากนั้นพิจารณาค่ากระแส  $i_L$  ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในสภาวะการทำงานเดียวกัน พบว่า ในสภาวะชั่วคราวค่ากระแสมีการพุ่งเกินประมาณ 5.5 A และในสถานะอยู่ตัวค่ากระแสดังกล่าวมีค่าประมาณ 0.73 A ดังแสดงในรูปที่ 6.14

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นโดยไม่มีตัวควบคุม โดยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ทั้งสามกรณี จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกัน รวมทั้งมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณตามสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรดังที่ได้อธิบายไว้ในตอนต้น ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบชุดทดสอบ ผลการจำลองสถานการณ์ และผลการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจร เมื่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 6.1 นอกจากนี้ยังแสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 6.15 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามียุคใกล้เคียงกันทั้งสามกรณี รวมทั้งแสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถลดทอนแรงดันได้ถึง 20 เท่า

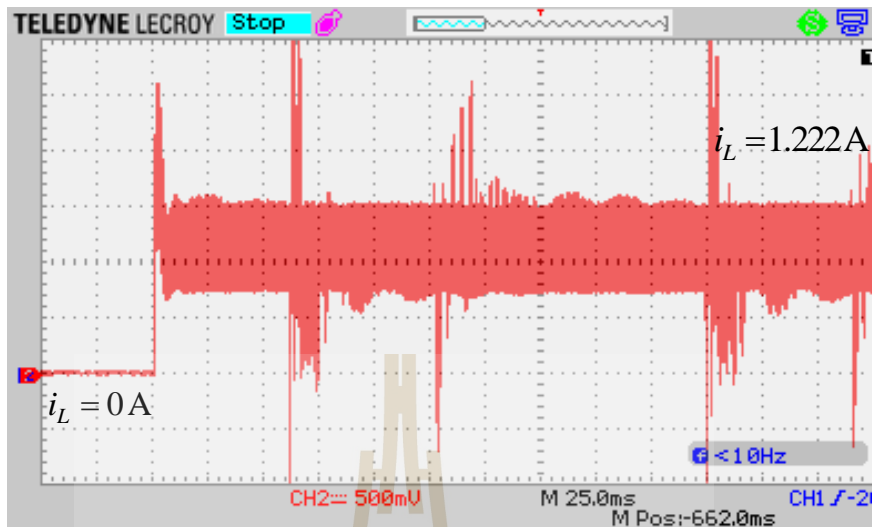




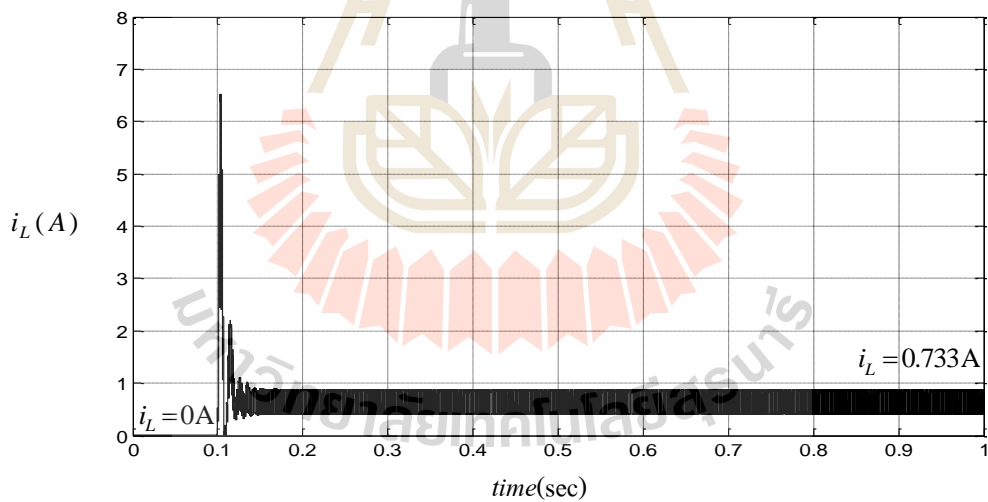
รูปที่ 6.11 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25



รูปที่ 6.12 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25



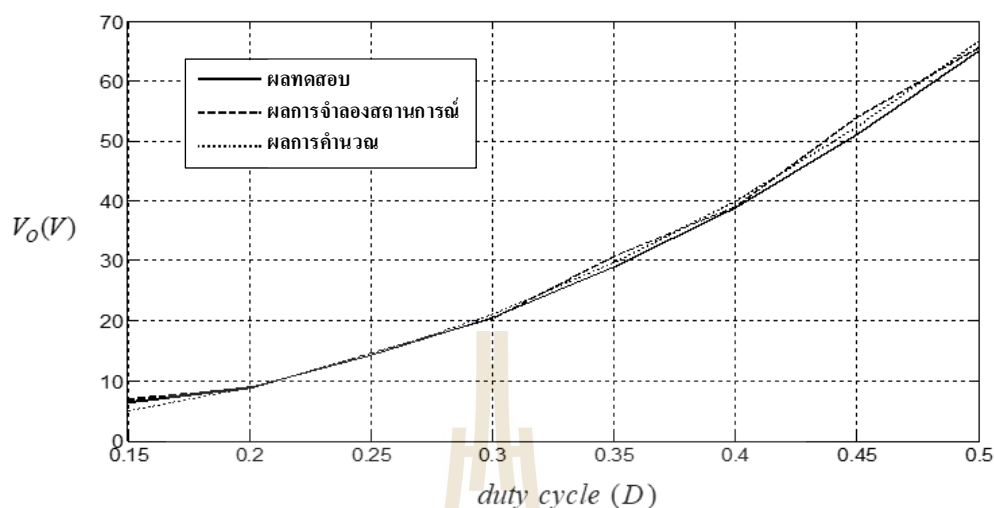
รูปที่ 6.13 ผลการทดสอบกระแส  $i_L$  ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25



รูปที่ 6.14 ผลการจำลองสถานการณ์กระแส  $i_L$  ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตทั้งสามกรณีเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่

ค่าวัฏจักร หน้าที่ (D)	แรงดันอินพุต 400 V					
	ผลทดสอบ		ผลการจำลอง สถานการณ์		ผลการคำนวณ	
	แรงดัน เอาต์พุต (V)	อัตรา ลดทอน แรงดัน (M)	แรงดัน เอาต์พุต (V)	อัตรา ลดทอน แรงดัน (M)	แรงดัน เอาต์พุต (V)	อัตรา ลดทอน แรงดัน (M)
0.15	6.46	61.92	6.82	58.64	4.86	82.22
0.20	8.95	44.69	8.72	45.86	8.89	45.00
0.25	14.26	28.05	14.66	27.29	14.29	28.00
0.30	20.64	19.38	20.29	19.71	21.18	18.89
0.35	28.94	13.82	30.70	13.03	29.70	13.47
0.40	38.86	10.29	39.07	10.24	40.00	10.00
0.45	51.10	7.83	53.99	7.41	52.26	7.65
0.50	65.00	6.15	65.65	6.09	66.67	6.00

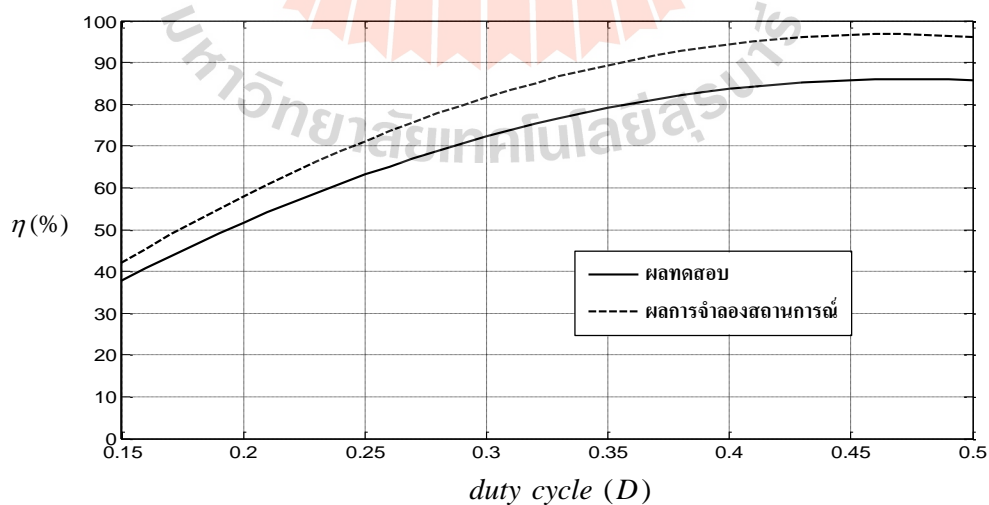


รูปที่ 6.15 การเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตจากทั้งสามกรณี

จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพของชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยการพิจารณากำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ดำเนินการทดสอบชุดทดสอบขณะทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสอินพุต กระแสเอาต์พุต และแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากชุดทดสอบ รวมทั้งทำการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรดังกล่าวภายใต้ค่าวัฏจักรหน้าที่เดียวกับการทดสอบชุดทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟระหว่างผลทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 6.16 พบว่า ประสิทธิภาพที่ได้จากผลทดสอบมีแนวโน้มเดียวกันกับประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 6.2 การประเมินประสิทธิภาพวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

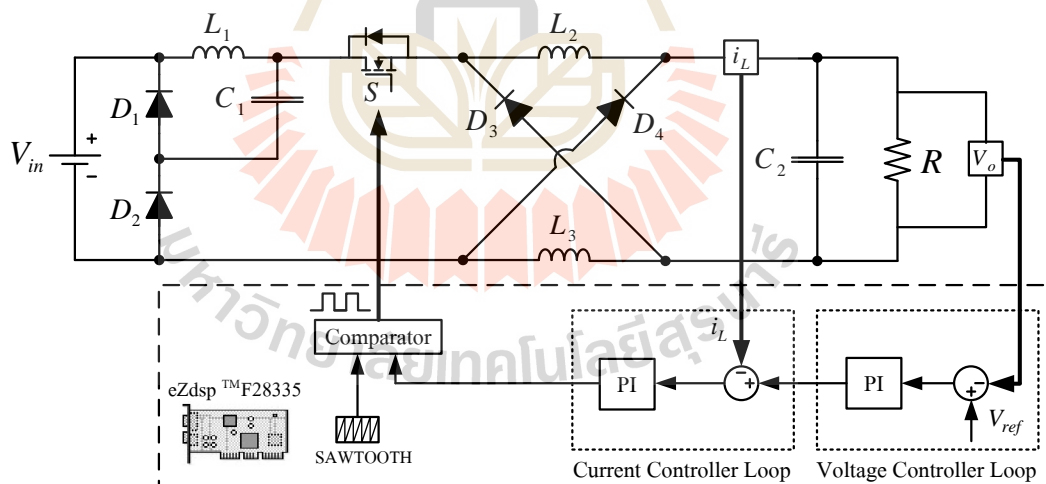
ค่าวัฏจักร หน้าที่ (D)	แรงดันอินพุต 400 V							
	กระแสอินพุต (A)		กระแสเอาต์พุต (A)		แรงดันเอาต์พุต (V)		ประสิทธิภาพ (%)	
	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง
0.15	0.023	0.013	0.555	0.341	6.46	6.82	38.79	43.87
0.20	0.034	0.018	0.761	0.436	8.95	8.72	49.96	53.52
0.25	0.068	0.037	1.222	0.733	14.26	14.66	63.81	73.40
0.30	0.128	0.062	1.773	1.015	20.64	20.29	71.26	82.49
0.35	0.220	0.130	2.483	1.535	28.94	30.70	81.45	90.35
0.40	0.395	0.205	3.350	1.954	38.86	39.07	81.98	93.19
0.45	0.660	0.380	4.490	2.700	51.10	53.99	86.48	95.77
0.50	1.061	0.557	5.580	3.284	65.00	65.65	85.40	96.81



รูปที่ 6.16 การประเมินประสิทธิภาพวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

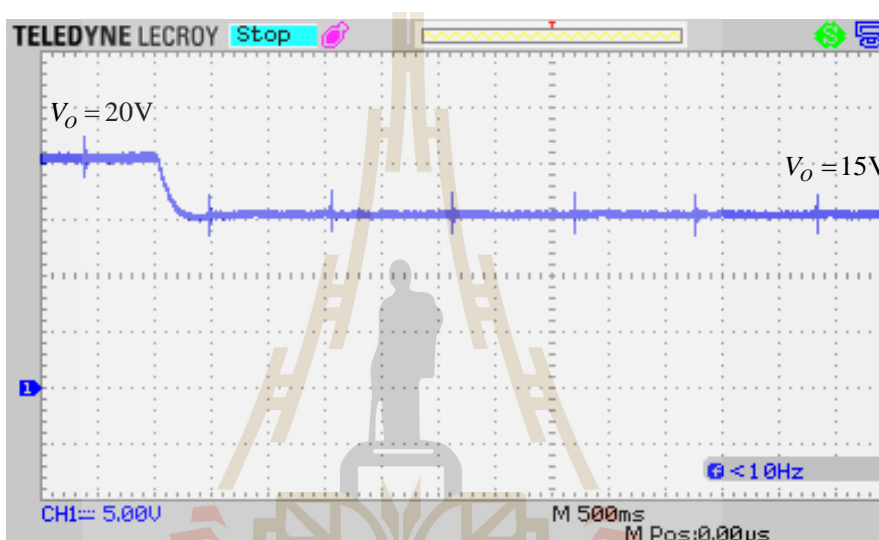
### 6.3 การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นขณะมีตัวควบคุมพีไอ

โครงสร้างการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกรณีมีตัวควบคุมพีไอ แสดงดังรูปที่ 6.17 โดยใช้ตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของชุดทดสอบจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 สำหรับประมวลผลตัวควบคุมพีไอ เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ส่งสัญญาณการสวิตช์ให้กับสวิตช์กำลังในวงจรดังกล่าว เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามที่ตามต้องการ รวมทั้งสามารถลดระดับแรงดันด้วยอัตราลดทอนแรงดันที่ค่อนข้างสูงประมาณ 20 เท่า เพื่อแสดงประสิทธิผลของตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง จะดำเนินการทดสอบชุดทดสอบภายใต้เงื่อนไขการทำงานในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น การปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง การปรับเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุต การปรับเปลี่ยนค่าโพลความต้านทาน รวมทั้งได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าขณะมีตัวควบคุมพีไอ เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีต่าง ๆ

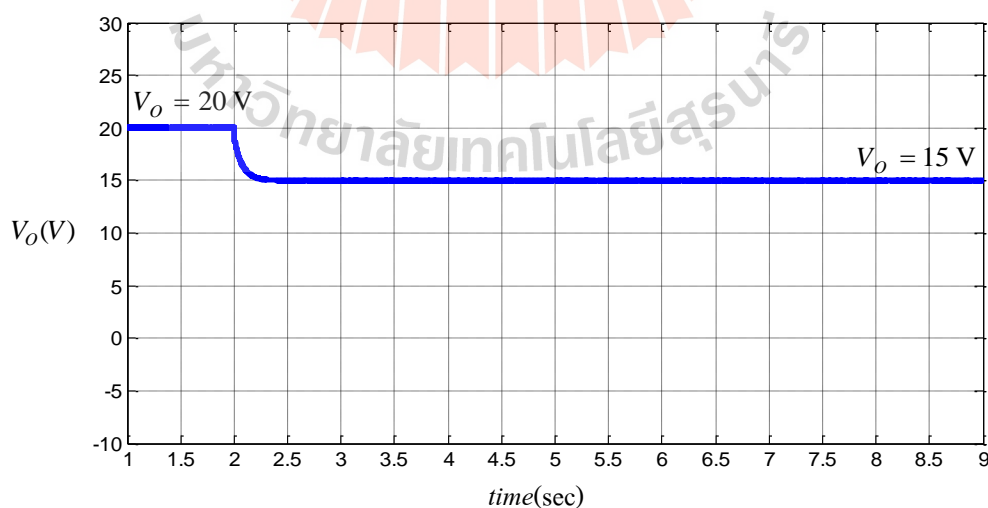


รูปที่ 6.17 โครงสร้างการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นขณะมีตัวควบคุมพีไอ

ผลการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง จาก 20 V เป็น 15 V แสดงได้ดังรูปที่ 6.18 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรได้ตามต้องการ ในขณะที่ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีเดียวกันนี้แสดงได้ดังรูปที่ 6.19 จะเห็นว่า ผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบวงจรและผลการจำลองสถานการณ์มีค่าใกล้เคียงกันมากทั้งในสภาวะชั่วคราว และในสภาวะอยู่ตัว

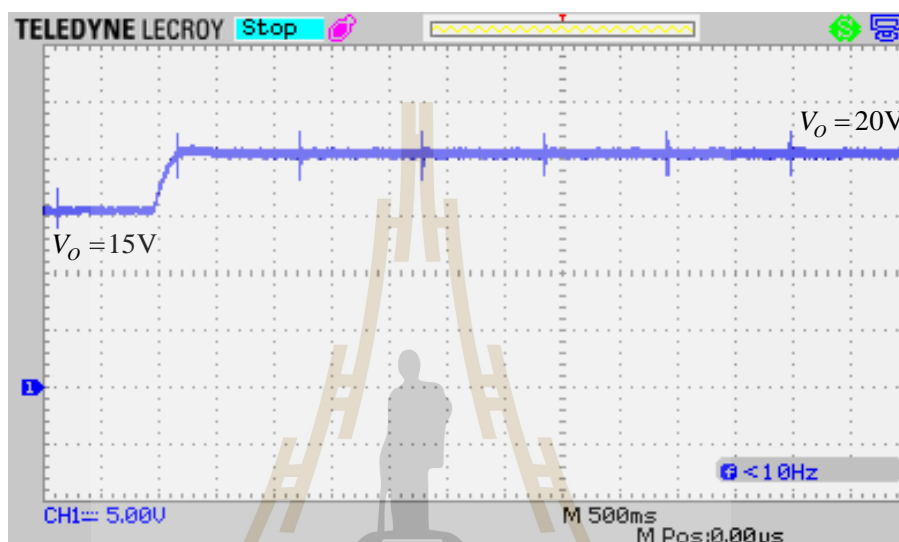


รูปที่ 6.18 ผลทดสอบเมื่อทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 15 V

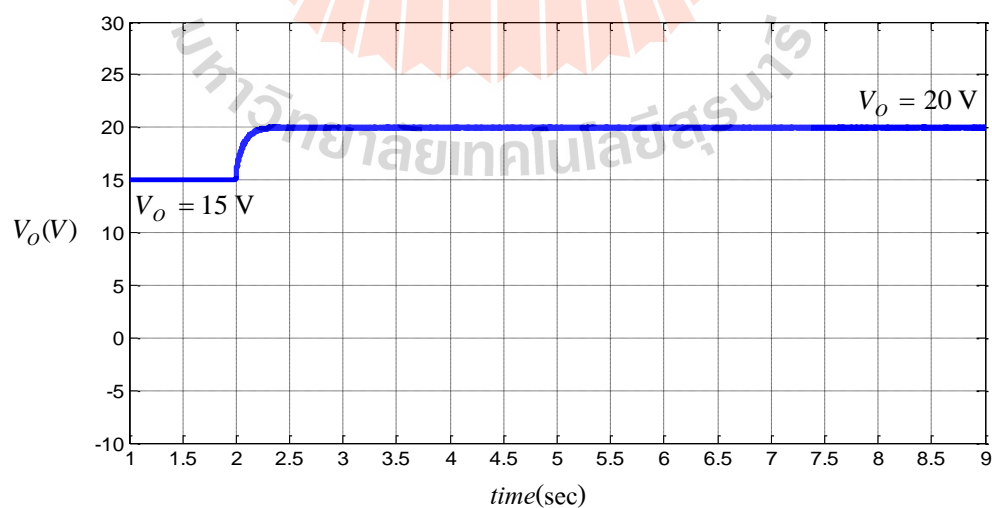


รูปที่ 6.19 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 15 V

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจากเดิม 15 V เป็น 20 V ผลการทดสอบชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์กรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 6.20 และ 6.21 ตามลำดับ ซึ่งยังคงเห็นได้ว่า ผลการทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก



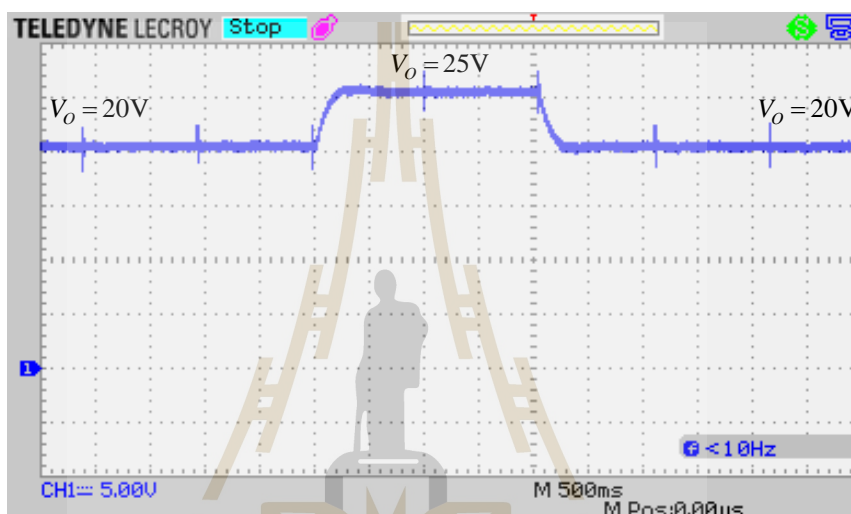
รูปที่ 6.20 ผลทดสอบเมื่อทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 15 V เป็น 20 V



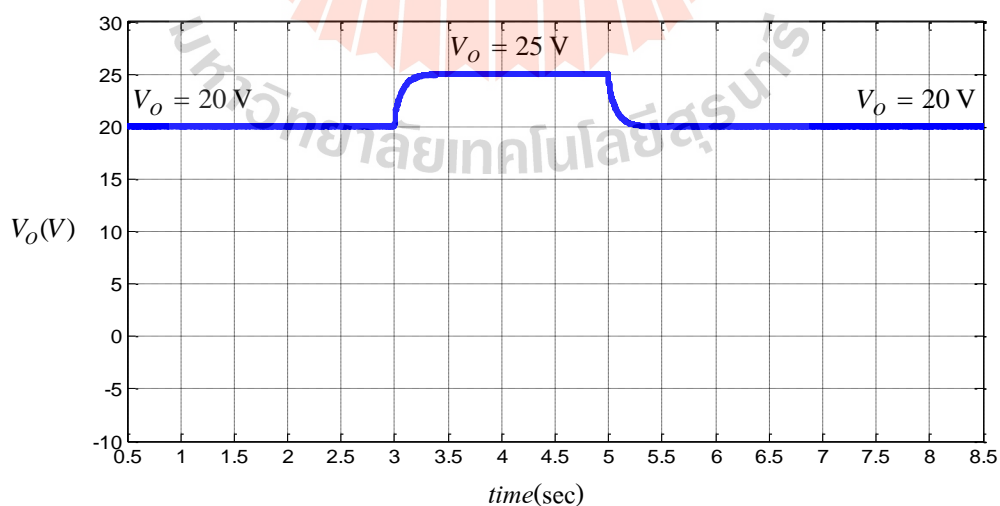
รูปที่ 6.21 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 15 V เป็น 20 V



จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงโดยเริ่มจาก 20V เพิ่มขึ้นเป็น 25V และลดลงเป็น 20V ตามลำดับ ผลการทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.22 และ 6.23 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว

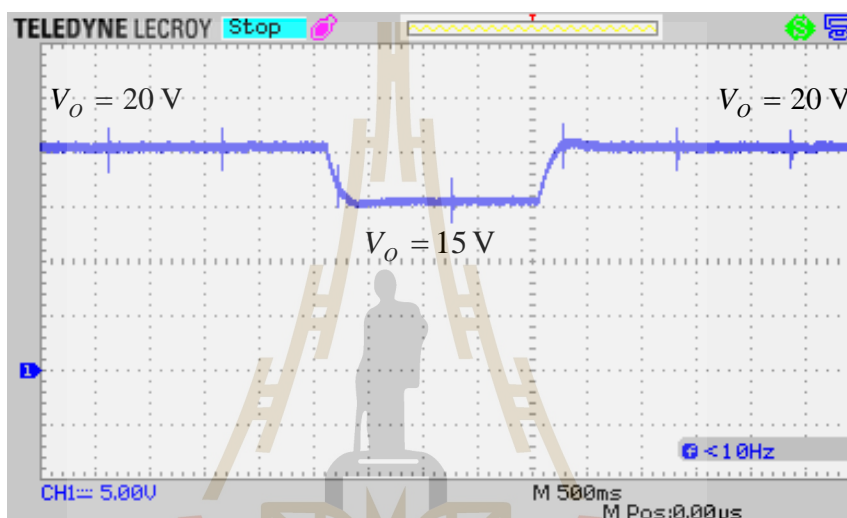


รูปที่ 6.22 ผลทดสอบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก 20V เป็น 25V และ 20V

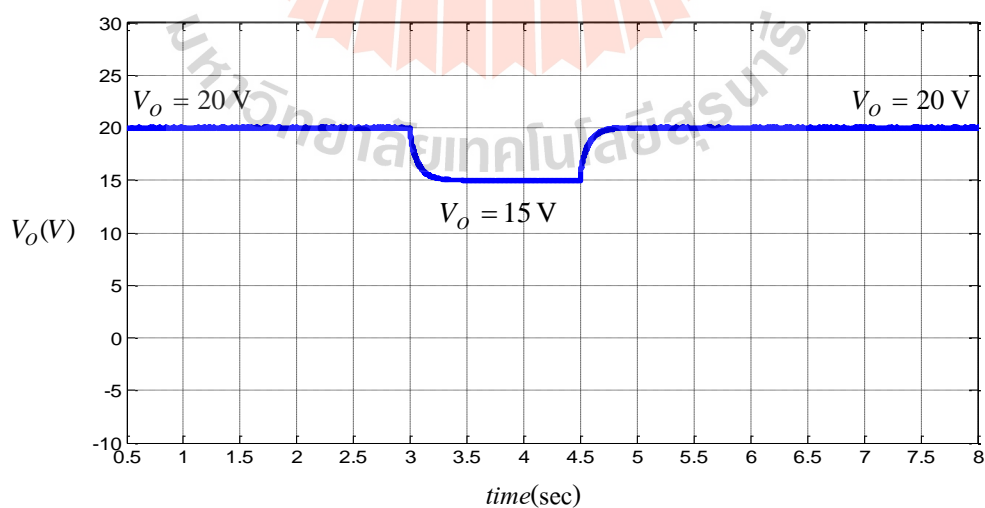


รูปที่ 6.23 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก 20V เป็น 25V และ 20V

ต่อมาทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงโดยเริ่มจาก 20 V ลดลงเป็น 15 V และเพิ่มขึ้นเป็น 20 V ตามลำดับ ผลการทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.24 และ 6.25 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว

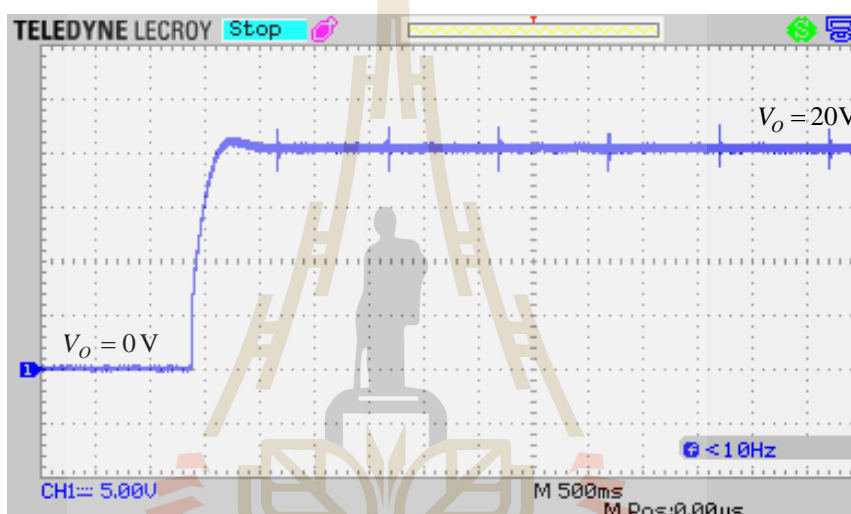


รูปที่ 6.24 ผลทดสอบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก 20V เป็น 15V และ 20V

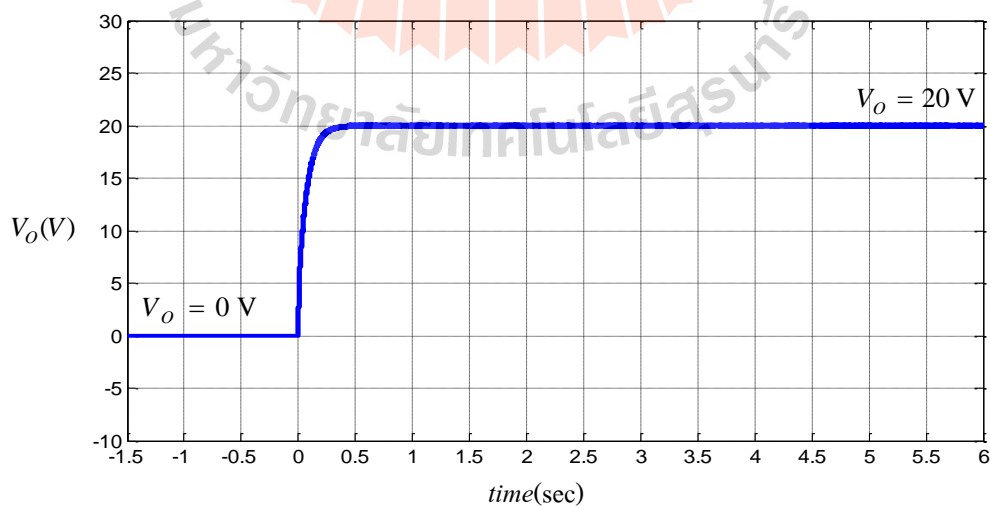


รูปที่ 6.25 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก 20V เป็น 15V และ 20V

ในลำดับต่อมาจะเป็นการพิจารณาผลตอบสนองในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่เท่ากับ 20 V เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าสูงเท่ากับ 400 V ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.26 จะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีไอใช้เวลาประมาณ 0.5 วินาที ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่เท่ากับ 20 V ตามต้องการ ในขณะที่ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.27 ซึ่งผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ยังมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการทดสอบทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว

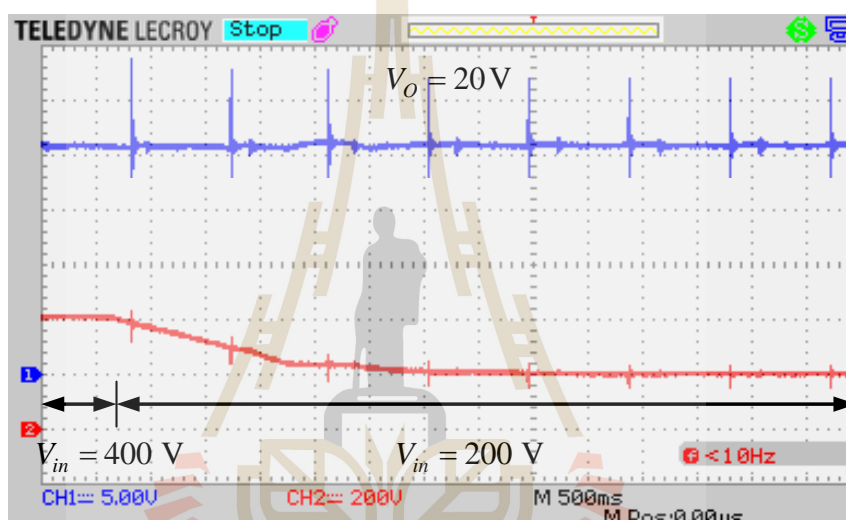


รูปที่ 6.26 ผลทดสอบเมื่อค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 20V

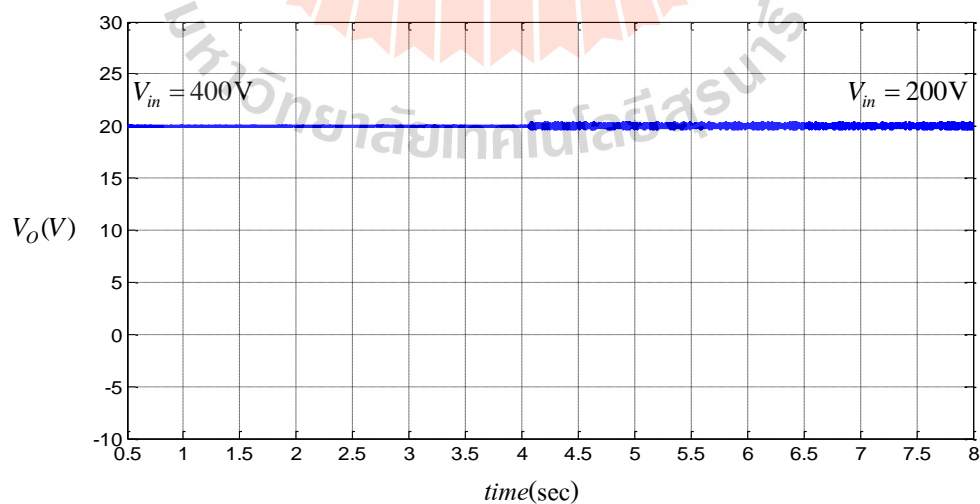


รูปที่ 6.27 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 20V

จากนั้นดำเนินการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจร โดยต้องการควบคุมให้ได้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 20 V ในช่วงเริ่มต้นแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 400V จากนั้นทำการปรับลดค่าแรงดันอินพุตเป็น 200 V ผลการทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์แสดงในรูปที่ 6.28 และ 6.29 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมพีไอยังคงสามารถควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 20 V

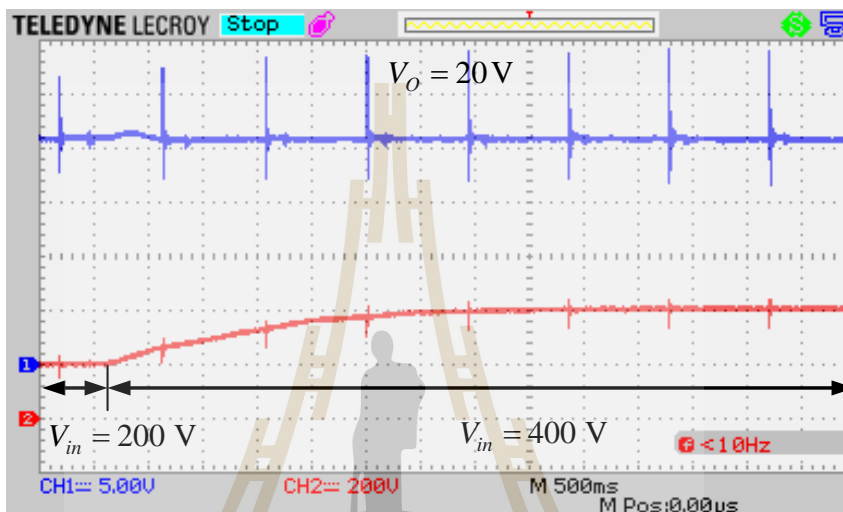


รูปที่ 6.28 ผลทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตจาก 400 V เป็น 200 V

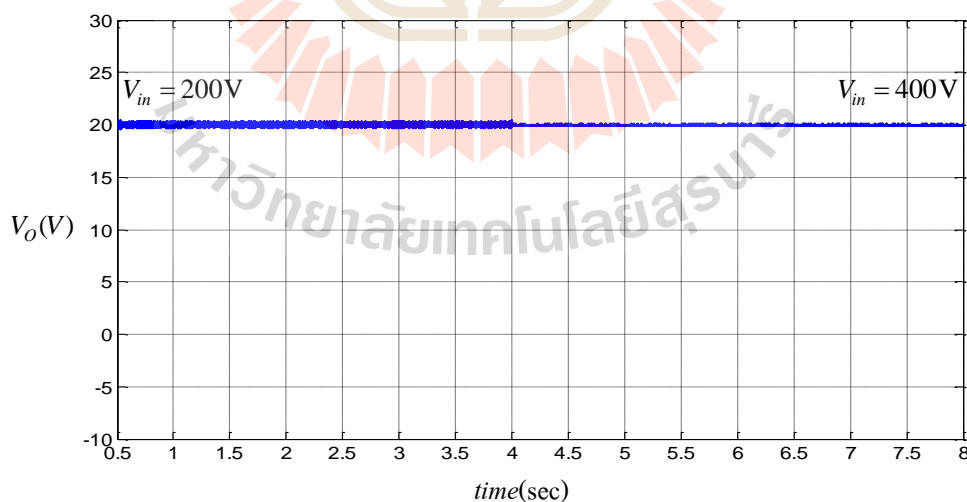


รูปที่ 6.29 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตจาก 400V เป็น 200V

จากนั้นทำการทดสอบวงจรโดยการปรับเพิ่มแรงดันอินพุตจาก 200 V เป็น 400 V ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.30 ในขณะที่ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจร

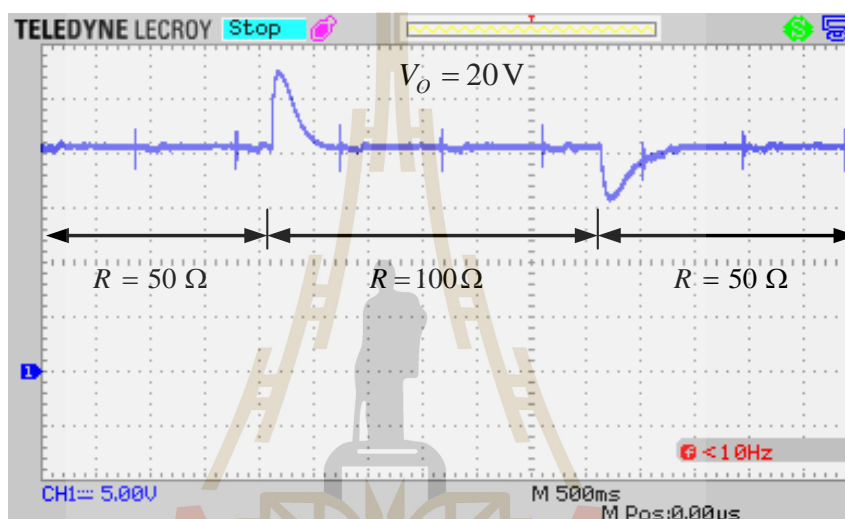


รูปที่ 6.30 ผลทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตจาก 200V เป็น 400V

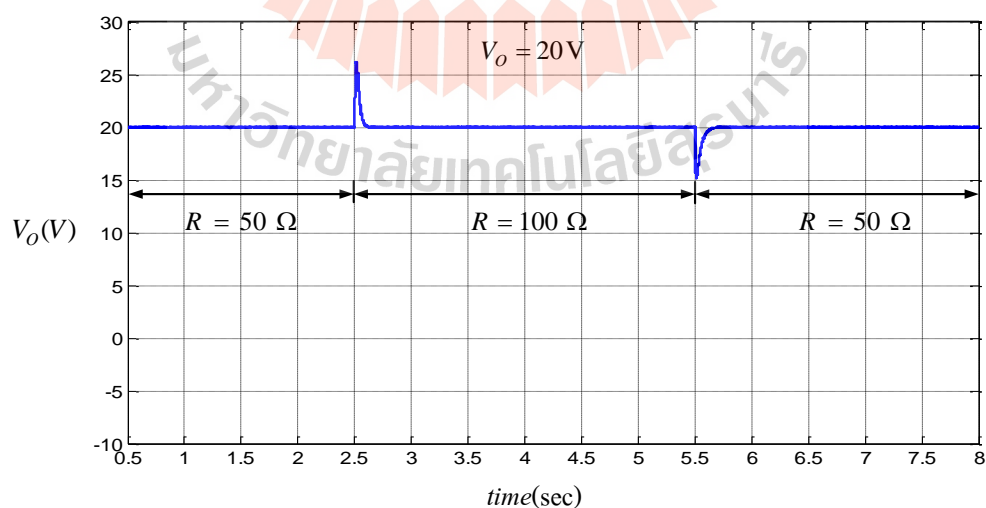


รูปที่ 6.31 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตจาก 200 V เป็น 400 V

นอกจากนี้ได้ดำเนินการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน โดยต้องการควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 20 V เมื่อแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรมีค่าเท่ากับ 400 V ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.32 ในช่วงแรกโหลดความต้านทานมีค่าเท่ากับ 50  $\Omega$  ต่อมาทำการปรับเพิ่มโหลดความต้านทานเป็น 100  $\Omega$  พบว่าแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินประมาณ 5 V ในสถานะชั่วคราว และเข้าสู่ค่าคงที่ 20 V ในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 6.32 ผลทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน



รูปที่ 6.33 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน

จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนโหลดความต้านทานจาก  $100\ \Omega$  กลับมาที่  $50\ \Omega$  จากผลการทดสอบ แสดงในรูปที่ 6.32 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีการปรับลดลงประมาณ  $5\ \text{V}$  ในสถานะชั่วคราว โดยตัวควบคุมพีไอพยายามควบคุมการทำงานของวงจรเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการ เท่ากับ  $20\ \text{V}$  ในสถานะอยู่ตัว ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.33 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบวงจรดังกล่าว

#### 6.4 สรุป

ในบทนี้นำเสนอผลการทดสอบที่ได้จากชุดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็น กระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น โดยดำเนินการทดสอบชุดทดสอบวงจร ดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขการทำงานในสถานการณ์ต่าง ๆ ทั้งนี้ได้ดำเนินการทดสอบชุดทดสอบทั้งในกรณีที่ ไม่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ พบว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น สามารถลดระดับแรงดันได้ถึง  $20\ \text{V}$  เท่า เมื่อแรงดันอินพุตของวงจรมีค่าค่อนข้างสูงประมาณ  $400\ \text{V}$  โดยตัว ควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้ สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ได้ แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ ภายใต้การทำงานของวงจรในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น การปรับเปลี่ยนค่า แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง การแปรเปลี่ยนของค่าแรงดันอินพุต การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเมื่อค่าความ ต้านทานของโหลดเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผล การจำลองสถานการณ์ ณ สภาวะการทำงานของวงจรเดียวกัน พบว่า ผลการทดสอบและผลการจำลอง สถานการณ์การทำงานของวงจรมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันมาก วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอ สามารถ ลดทอนระดับแรงดันได้สูงถึง  $20\ \text{V}$  และสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้มีค่าคงที่ตาม ต้องการได้ ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของวงจรในสถานการณ์ต่าง ๆ

## บทที่ 7

### บทสรุป

#### 7.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทนที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำ เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างสูง โดยเริ่มต้นจากศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงในโครงสร้างแบบต่าง ๆ ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2

ในบทที่ 3 ได้นำเสนอการพัฒนาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยว ที่สามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้ประมาณ 20 เท่า ภายใต้การทำงานของวงจรที่ใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของวงจรกรณีมีสวิตช์กำลังหลายตัว รวมทั้งช่วยลดกำลังการสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์กำลังหลายตัว นอกจากนี้ยังได้อธิบายหลักการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้น รวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันและประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกับวงจรลดทอนแรงดันในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวจักษ์กรหน้าที่ค่าต่าง ๆ

ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น โดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ ที่ประกอบด้วยลู่วควบคุมแรงดันเอาต์พุตและลู่วควบคุมกระแสอินพุต ได้อธิบายการออกแบบตัวควบคุมพีไอ เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ เมื่อต้องการลดระดับแรงดันอินพุตที่มีค่าค่อนข้างสูงประมาณ 400 V ให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตประมาณ 20 V ซึ่งมีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า สำหรับประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการแรงดันต่ำ หรือนำไปลดระดับแรงดันสูงเพื่อนำไปสะสมไว้ในแบตเตอรี่ จากนั้นได้จำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นในสถานะต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิผลของวงจรที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบไว้ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวงจรที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ สามารถลดทอนระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้ ภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ของวงจรที่พัฒนาขึ้น



จากการพัฒนาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรดังกล่าว ได้ทำการสร้างชุดทดสอบของวงจรที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงไว้ในบทที่ 5 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้จ่ายให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น การเลือกขนาดอุปกรณ์ภายในวงจรที่พัฒนาขึ้น การสร้างวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดันเอาต์พุต รวมถึงการสร้างวงจรขยายแรงดันและแยกโดดสัญญาณ ในกระบวนการควบคุมการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมพีไอ จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp<sup>TM</sup>F28335

ในบทที่ 6 ได้ทำการทดสอบชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันสมรรถนะการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดทอนแรงดันได้สูงถึง 20 เท่า เมื่อระดับแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างสูงและต้องการระดับแรงดันเอาต์พุตที่ค่อนข้างต่ำ โดยที่ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมการทำงานของวงจรให้มีสมรรถนะที่ดีทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ นอกจากนี้ยังได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น การปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุต รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลด จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์พบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดทอนระดับแรงดันได้สูง รวมทั้งสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ ภายใต้สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ

## 7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

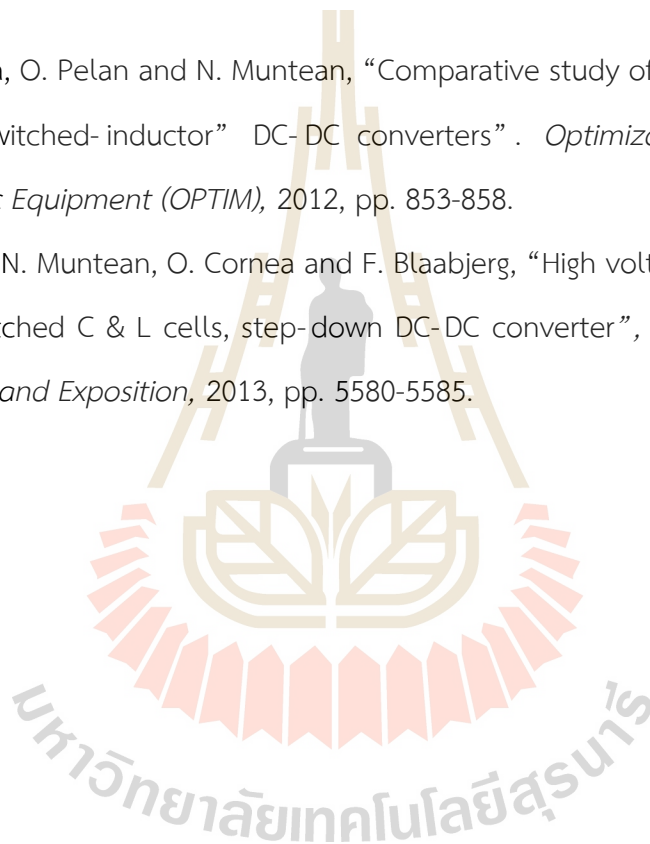
1. ควรมีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมประเภทอื่นๆ สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น
2. ควรมีการใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น
3. ควรหาวิธีการลดกำลังการสูญเสียภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น เพื่อปรับปรุงให้ประสิทธิภาพของวงจรดียิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] N. Muntean, M. Gavris and O. Cornea, "Dual Input, Small Power, PV and Wind Energy Conversion System," in *Proc. IEEE Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2012, pp. 906-911.
- [2] B. Hu and S. Sathiakumar, "Modeling of a New Multiple Input Converter Configuration for PV/ Battery System with MPPT," in *Proc. IEEE Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT)*, 2011, pp. 1209-1214.
- [3] K.-C. Tseng and C.-C. Huang, "High Step-Up High-Efficiency Interleaved Converter with Voltage Multiplier Module for Renewable Energy System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, March 2014, pp. 1311-1319.
- [4] O. Cornea, N. Muntean, R. Teodorescu and M. L. Gavris, "Dual Input Hybrid Buck LC Converter for a Mixed Wind and PV Array Generation System," in *Proc. IEEE Power Electronics and Motion Control (EPE/PEMC)*, 2012
- [5] N.M. Thao, T.V. Thang, M.S. Manoharan, P. Joung-Hu, "Steady-State Analysis of the Buck Converter for Renewable Energy Systems," in *Proc. IEEE Power Electronics and Motion Control (IPEMC)*, 2012, pp. 2245-2249.
- [6] K. Yao, and F. C. Lee, "A Novel Resonant Gate Driver for High Frequency Synchronous Buck Converters," *IEEE Journals & Magazines*, vol. 17, no. 2, 2002, pp. 180-186.
- [7] K. Yao, M. Ye, M. Xu, and F. C. Lee, "Tapped-Inductor Buck Converter for High-Step-Down DC-DC Conversion," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, April 2005, pp. 775-780.
- [8] K. Yao, Y. Meng and F. C. Lee, "A Novel Winding Coupled-Buck Converter for High-Frequency, High Step-Down DC/DC Conversion," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists*, 2002, pp. 651-656.

- [9] I. Rezaei and M. Akhbari, "Transformerless Hybrid Buck Converter with Wide Conversion Ratio," in *Proc. IEE Power Electronics Drive Systems and Technologies (PEDSTC), 2011*, pp. 599-603.
- [10] M. Veerachary, "Two-Loop Voltage-Mode Control of Coupled Inductor Step-Down Buck Converter," *IET Journals & Magazines*, vol. 152, no. 6, 2005, pp. 1516-1524.
- [11] M. G. Ortiz-Lopez, J. Leyva-Ramos, E. E. Carbajal-Gutierrez and J. A. Morales-Saldana, "Modelling and Analysis of Switch-Mode Cascade Converters with a Single Active Switch," *IEEE Journals & Magazines*, vol. 1, no. 4, 2008, pp. 478-487.
- [12] M. Veerachary "Modelling and analysis of cascade step-down converters". *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 2005, pp. 41-50.
- [13] S. Bassan and G. Moschopoulos, "Properties and Applications of Quadratic Converters" *Electrical Power Conference*, 2007, pp. 123-127.
- [14] M. G. Ortiz-Lopez, J. Leyva-Ramos, E. E. Carbajal-Gutierrez and J. A. Morales-Saldana, "Modelling and analysis of switch-mode cascade converters with a single active switch". *IET Power Electronics*, 2008, pp. 478-487.
- [15] M. El-Zanaty, M. Orabi and M. Z. El-Sadek, "Review of synchronous buck converter design optimization". *Power System Conference*, 2008, pp. 588-592.
- [16] J. zhao, "Non-isolation Soft-Switching Buck Converter for High-Step-Down Conversion" in *Proc. IEEE Telecommunications Energy*, 2009, pp. 1-6.
- [17] J. Leyva-Ramos, M. G. Ortiz-Lopez, and L. H. Diaz-Saldierna, "Disturbance Rejection Control Scheme for Optical Disk Drive Systems," *IEEE Journals & Magazines*, vol. 46, no. 10, 2010, pp. 3772-3777.
- [18] I. Rezaei and M. Akhbari, "Transformerless hybrid buck converter with wide conversion ratio". *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2011, pp. 599-603.

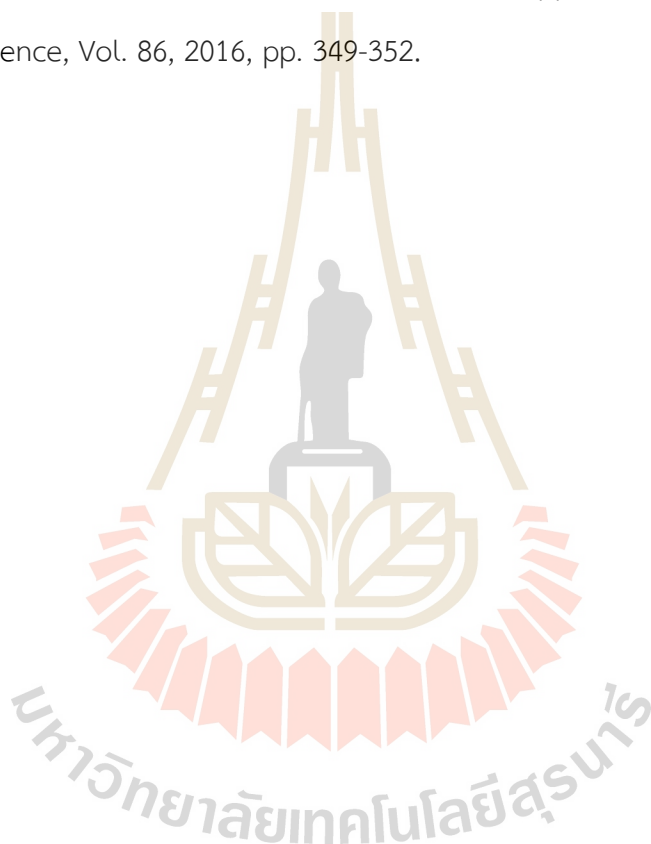
- [19] Y. Zhang, C. Zhang, J. Liu and Y. Cheng, "Comparison of Conventional DC-DC Converter and a Family of Diode-Assisted DC-DC Converter" in *Proc. IEEE Power Electronics and Motion Control (IPEMC)*, 2012, pp.1718-1723.
- [20] R. Dayal and L. Parsa, "Non-isolated Topologies for High Step-down Offline LED Driver Applications" in *Proc. IEEE Applied Power Electronics (APEC)*, 2012, pp.988-993.
- [21] O. Cornea, O. Pelan and N. Muntean, "Comparative study of buck and hybrid buck "switched-inductor" DC-DC converters". *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2012, pp. 853-858.
- [22] O. Pelan, N. Muntean, O. Cornea and F. Blaabjerg, "High voltage conversion ratio, switched C & L cells, step-down DC-DC converter", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 5580-5585.



## ภาคผนวก

บทความที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่จากโครงการวิจัย

1. Ronnakorn Khambuya and Sudarat Khwan-on. “ A New High Step-Down DC-DC Converter for renewable Energy System Applications”. Procedia Computer Science, Vol. 86, 2016, pp. 349-352.



## 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

