



รายงานการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบ

พลังงานทดแทน

(Power Converters with High Voltage Gain for Applications in

Renewable Energy Systems)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบ

พลังงานทดแทน

(Power Converters with High Voltage Gain for Applications in
Renewable Energy Systems)

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุदारัตน์ ขวัญอ่อน

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2560

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโครงสร้างใหม่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเพิ่มระดับแรงดันซึ่งสูงประมาณ 20 เท่า สำหรับระบบพลังงานทดแทนที่มีแหล่งจ่ายแรงดันต่ำ โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะทำหน้าที่เพิ่มแรงดันอินพุตจากระบบแหล่งจ่ายแรงดันต่ำ ให้ได้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ ที่ $400 V_{dc}$ สำหรับทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการแรงดันสูงหรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบหนึ่งเฟสสำหรับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจะใช้สวิทช์กำลังเพียงตัวเดียว เพื่อลดกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการใช้สวิทช์กำลังหลายตัว รวมถึงง่ายต่อการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้ระบบแหล่งจ่ายแรงดันต่ำจะมีแรงดันอินพุตประมาณ $20 V_{dc}$ โดยแรงดันเอาต์พุตจะถูกควบคุมระดับแรงดันให้คงที่ ที่ $400 V_{dc}$ ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอ ทั้งนี้ได้นำเสนอหลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร การประเมินประสิทธิภาพ และการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่พัฒนาขึ้น ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อแสดงสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น จากนั้นทำการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ผลการจำลองสถานการณ์และผลทดสอบยืนยันประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าได้สูงถึง 20 เท่า สำหรับระบบพลังงานทดแทน

Abstract

This research proposes a new topology of a high step-up boost converter with a high voltage conversion ratio, approximately 20, for renewable energy systems with low-voltage sources. The developed converter can boost up the low input voltage to the high output voltage level of approximate $400 V_{dc}$, which acts as a dc power supply feeding a high voltage DC load or a single-phase inverter for the AC load. The proposed converter employs only a single power switch instead of using several switches, providing the decrease in power loss and the simple control strategy to obtain the constant output voltage. The proposed converter can step up the low input voltage, about $20 V_{dc}$, to the high output voltage of approximately $400 V_{dc}$ by using the PI controller. In this research, the proposed converter configuration is presented and the operation principle of the proposal converter is analyzed. The converter parameters are designed. The converter efficiency is evaluated. Also, the control strategy for the proposed converter is described. The simulation results are presented to show the performance of the proposed converter. In addition, the laboratory prototype of the proposed converter is implemented for the experimental testing. Simulation and experimental results confirm the effectiveness of the proposed converter to achieve the high voltage conversion ratio, approximately 20, for renewable energy systems.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณนายอรรถพร นาคปิ่น ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย และดำเนินการสร้างชุดทดสอบ ด้วยความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่ง สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณพนักงานศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3 และอาคารเครื่องมือ 5 ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

สุภารัตน์ ขวัญอ่อน

มิถุนายน 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	4
1.5 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 การสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มี อัตราขยายแรงดันสูง	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง.....	7
2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มี อัตราขยายแรงดันสูง.....	14
2.4 สรุป.....	17
บทที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่ พัฒนาขึ้น	18
3.1 บทนำ.....	18

3.2	โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบสวิทช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น	18
3.3	หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบสวิทช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น	19
3.3.1	ช่วงที่สวิทช์กำลัง S นำกระแส	21
3.3.2	ช่วงที่สวิทช์กำลัง S หยุดนำกระแส	25
3.3.3	อัตราขยายแรงดัน และความเครียดแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	31
3.3.4	ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น	34
3.4	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	37
3.4.1	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ	37
3.4.2	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำเก็บประจุ	39
3.5	ผลการจำลองสถานการณ์	43
3.5.1	อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	43
3.5.2	การกระเพื่อมของกระแสและแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	46
3.6	สรุป	50
บทที่ 4	การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น	51
4.1	บทนำ	51
4.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น	52
4.2.1	การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปแรงดัน (Voltage Controller Loop)	53
4.2.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปกระแส (Current Controller Loop)	55
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์	60
4.4	สรุป	67
บทที่ 5	การสร้างชุดทดสอบ	68
5.1	บทนำ	68
5.2	โครงสร้างของชุดทดสอบ	68
5.3	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	70

5.4	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น.....	72
5.5	วงจรตรวจจับสัญญาณ.....	75
5.5.1	ตัวตรวจจับกระแส.....	75
5.5.2	ตัวตรวจจับแรงดัน.....	77
5.6	วงจรรขยายแรงดันแบบแยกโคดสัญญาณ.....	80
5.7	การควบคุมแรงดันเอาต์พุต.....	81
5.7.1	การโปรแกรมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335.....	82
5.8	สรุป.....	84
บทที่ 6 ผลการทดสอบ.....		85
6.1	บทนำ.....	85
6.2	การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น.....	85
6.3	ผลทดสอบชุดทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุม.....	86
6.4	ผลทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม.....	98
6.5	สรุป.....	106
บทที่ 7 สรุป.....		107
7.1	สรุป.....	107
รายการอ้างอิง.....		109
ประวัติผู้เขียน.....		114
ภาคผนวก.....		115

บทที่ 1

บทนำ

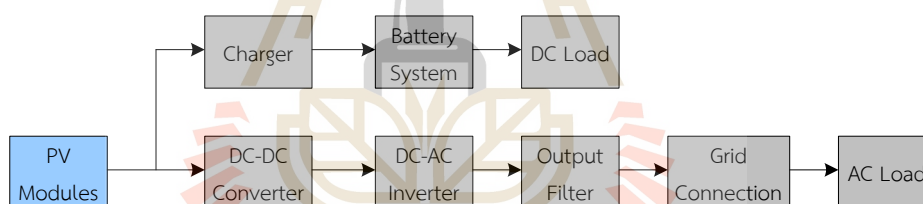
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

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

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรครอบคลุมกับลักษณะทางภูมิประเทศและภูมิอากาศ ทำให้ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวันอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง รวมทั้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาด (clean energy) ไม่สร้างมลภาวะให้กับสภาพแวดล้อม อีกทั้งเป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในประเทศอย่างยั่งยืน

รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อจ่ายโหลดกระแสตรงและโหลดกระแสสลับ โดยที่แผง Photovoltaic (PV) module ซึ่งสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำ จะรับพลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง แต่เนื่องจากเอาต์พุตที่ได้ในแต่ละ module มีค่าไม่มากนักเพียงประมาณ 16 Vdc ในช่วงเวลาที่แสงอาทิตย์ส่องมายังแผง PV module อย่างเต็มที่ [1] ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องนำ PV modules จำนวนมากมาต่ออนุกรมกันเพื่อ

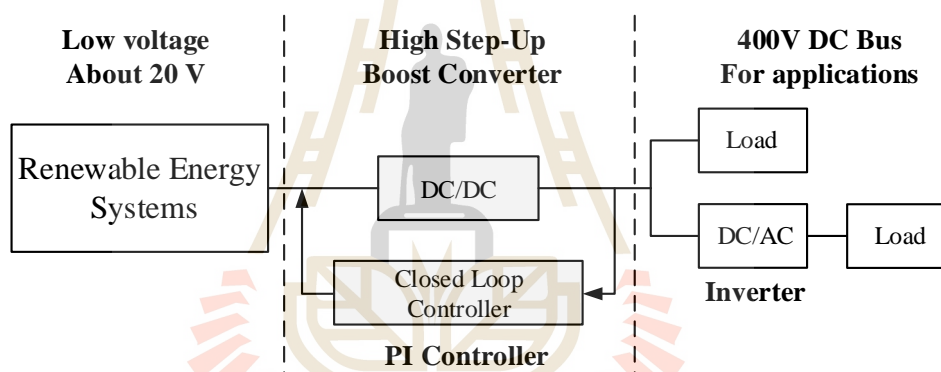
เพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงให้สูงขึ้น [2] จากนั้นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC converter) จะเพิ่มระดับแรงดันกระแสตรงอีกครั้งและควบคุมให้คงที่ประมาณ 350 Vdc [3] และเป็นอินพุตให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC-AC inverter) เพื่อผลิตไฟฟ้าแรงดันกระแสสลับ โดยวงจรกรองเอาต์พุต (Output filter) จะทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงอันเนื่องมาจากการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ได้แรงดันกระแสสลับ 220 Vrms, 50 Hz เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Grid-connected system) และพร้อมจ่ายกำลังงานให้กับโหลดกระแสสลับ หรืออาจนำแรงดันกระแสสลับที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในลักษณะระบบอิสระ (PV stand-alone system) เพื่อใช้ในภาคครัวเรือนหรือชนบทที่ห่างไกลจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า นอกจากนี้พลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์สามารถใช้ประจุแบตเตอรี่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดกระแสตรง รวมทั้งเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรอง [4]



รูปที่ 1.1 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

เนื่องจากต้องนำ PV modules จำนวนมากมาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงก่อนเข้าสู่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรง ทำให้ต้องจัดหาพื้นที่บริเวณกว้างใหญ่มากสำหรับติดตั้งแผง PV modules ในการรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสม และต้องใช้สารกึ่งตัวนำปริมาณมากในการผลิตแผง PV modules จำนวนมากดังกล่าว รวมถึงการดูแลรักษาที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง (high step-up boost converter) เพื่อสามารถขยายระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงได้สูงถึง 400 Vdc เมื่อระดับแรงดันอินพุตกระแสตรงที่ได้จากแผง PV modules มีค่าน้อยประมาณ 20-50 Vdc ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานทดแทนในประเทศไทยอย่างยั่งยืน รวมทั้งลด

ปริมาณการใช้แผง PV modules และพื้นที่ในการติดตั้งแผงดังกล่าว โครงการวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงและมีประสิทธิภาพ เพื่อประยุกต์ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงที่ได้จากแผง PV modules มีค่าไม่สูงนัก และแรงดันเอาต์พุตดังกล่าวแปรเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังแผง PV modules ทั้งนี้จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง จากนั้นเมื่อได้วงจรที่เหมาะสมแล้วจะทำการสร้างและทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงประสิทธิภาพของวงจรดังกล่าวสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน โดยโครงสร้างของระบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน แสดงได้ดังรูป 1.2



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของระบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงในรูปแบบต่างๆ ทำให้ทราบข้อเด่นข้อด้อยของวงจรต่างๆ เหล่านั้น ซึ่งเหมาะสำหรับประยุกต์ในระบบที่แตกต่างกัน
- 1.2.2 เพื่อหาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ซึ่งเหมาะสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์

- 1.2.3 เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เมื่อแรงดันอินพุตกระแสตรงของวงจรมีค่าน้อยและไม่คงที่
- 1.2.4 เพื่อสร้างชุดทดสอบ สำหรับแสดงประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง
- 1.2.5 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบ วิเคราะห์ และควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทนในรูปแบบอื่นๆ เช่น พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง พลังงานลม พลังงานชีวมวล หรืออาจเป็นระบบพลังงานทดแทนแบบผสมผสาน (Hybrid Renewable Energy System)

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ระบบพลังงานทดแทนที่ใช้ในโครงการวิจัยคือระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะใช้แหล่งจ่ายกระแสตรง (DC power supply) ที่ปรับค่าได้แทนแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแผง PV modules
- 1.3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน จะพิจารณาเพียงส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงเท่านั้น
- 1.3.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง จะถูกออกแบบเพื่อทำการเพิ่มแรงดันกระแสตรงจาก 20-50 Vdc เป็น 400 Vdc
- 1.3.4 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่น่าสนใจ จะถูกแสดงโดยผลการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB และผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ได้จากการสร้างชุดทดสอบจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้ด้านการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน

- 1.4.2 ได้องค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ กระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง โดยศึกษาจากการจำลอง สถานการณ์ของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.3 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ กระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง โดยใช้บอร์ดดีเอสพี คอนโทรลเลอร์ เมื่อแรงดันอินพุตกระแสตรงมีค่าน้อยและแปรเปลี่ยนค่าได้
- 1.4.4 ได้ต้นแบบชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแส ตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง สำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน
- 1.4.5 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ
- 1.4.6 ผลที่ได้จากการวิจัย สามารถนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าทั้งระดับปริญญา ตรีและปริญญาโท เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยในอนาคตต่อไป

1.5 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้มีการนำเสนอเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และ ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงในรูปแบบ ต่างๆ รวมทั้งการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมบทความที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 3 กล่าวถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มี อัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น รวมถึงวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรดังกล่าว แสดงการ เปรียบเทียบอัตราขยายแรงดันที่ได้จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นกับวงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบต่าง ๆ และออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร แปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น แสดงผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันว่าสามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันที่สูงถึงประมาณ 20 เท่า

บทที่ 4 อธิบายหลักการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอ สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยการ ออกแบบตัวควบคุมของลูปแรงดัน การออกแบบตัวควบคุมของลูปกระแส และผลการจำลอง สถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นเมื่อต้องการ แรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ $400 V_{dc}$ ภายใต้การทำงานในสภาวะต่าง ๆ

บทที่ 5 กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบ แบ่งเป็น ส่วนของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุตและตัวตรวจจับกระแสอินพุต การควบคุมแรงดันเอาต์พุต รวมถึงวงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคัลสัญญาณ จากนั้นจึงนำมาใช้งานร่วมกันเพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการทดสอบชุดทดสอบ ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นขณะไม่มีตัวควบคุม ผลการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นที่มีตัวควบคุม และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้จุดทำงานเดียวกัน

บทที่ 7 บทสรุป



บทที่ 2

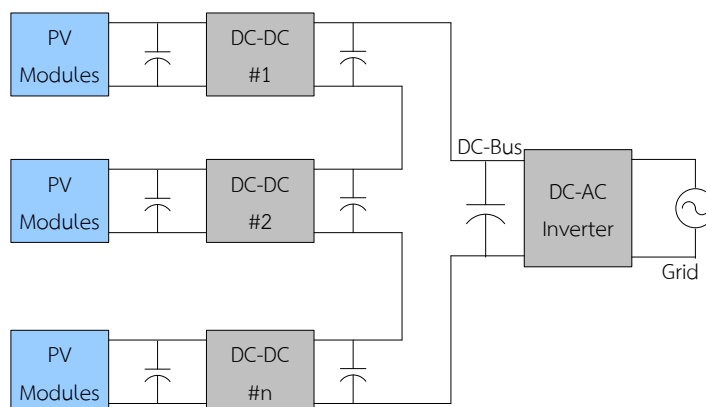
การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

2.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน เช่น ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้มีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทนี้ จึงเป็นการนำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่มีปรากฏในอดีต ซึ่งเกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อศึกษาข้อเด่นและข้อด้อยของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงในโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับงานวิจัยนี้

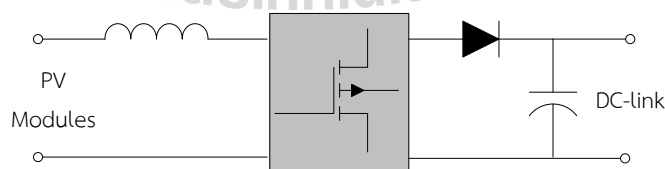
2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

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



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อพลังงานจากแผง PV modules เข้ากับระบบกริด

โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบแยกกราวด์ (isolated type) และแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) โดยแบบแรกจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงกัลวานิก (galvanic Transformer) เพื่อแยกกราวด์ระหว่างด้านแรงดันต่ำและแรงดันสูง โดยหม้อแปลงดังกล่าวจะมีอัตราส่วนการพันขดลวดสูง (large turn ratio) ซึ่งความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance) และตัวเก็บประจุแอบแฝง (parasitic capacitance) ที่เกิดขึ้นในขดลวดทุกขดของหม้อแปลงจะส่งผลให้เกิดการพุ่งเกิน (Spike) ของแรงดันและกระแสในวงจร ทำให้สมรรถนะของระบบลดลง รวมทั้งทำให้วงจรได้รับความเสียหาย [6] ในขณะที่แบบไม่แยกกราวด์ไม่ต้องใช้หม้อแปลงทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าแบบแยกกราวด์ [7] รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated boost DC-DC converter) ที่ต่อเชื่อมกับแผง PV modules โดยที่แรงดันอินพุต (V_{in}) ของวงจรได้จากแผง PV Modules ในขณะที่แรงดันเอาต์พุต (V_{out}) คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบไม่แยกกราวด์

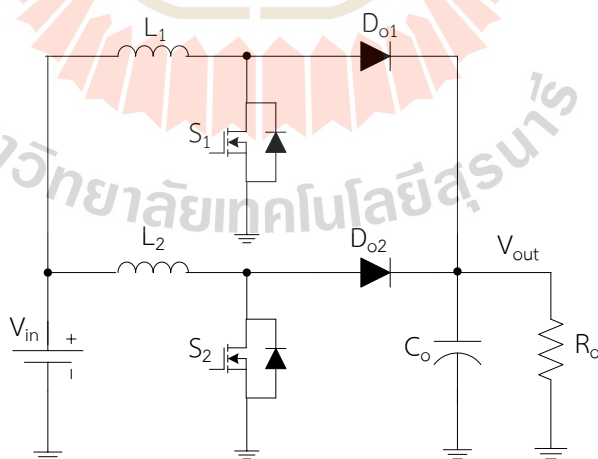
อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 2.2 พิจารณาได้จากสมการที่ (2.1) [6]

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.1)$$

โดยที่ D คือ duty cycle ของสวิตช์

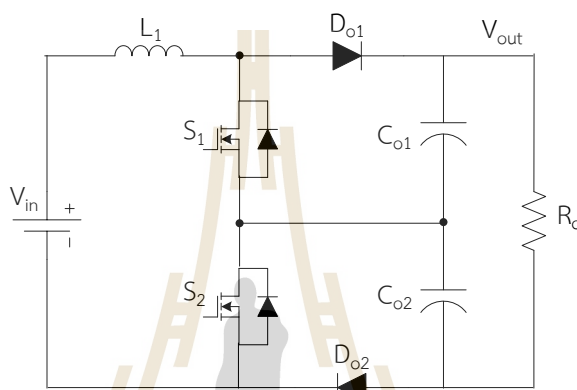
เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.1) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} ขึ้นอยู่กับการปรับค่า D โดยแรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า D เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การให้วงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ค่า D สูงๆ จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของทางพลวัตของระบบที่มีต่อโหลด [8] และทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง [6] เนื่องจากกระแสกระเพื่อม (current ripple) ที่ไหลในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงนำกระแส (conduction loss) สูง รวมถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงสวิตช์ (switching loss) และช่วงฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse-recovery loss) จะมีค่าสูงด้วย [9]

จากข้อจำกัดด้านอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.2 ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของวงจรเพื่อให้สามารถเพิ่มระดับของแรงดันเอาต์พุตได้สูงขึ้น โดยรูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงอินเทอร์ลีฟแบบสองเฟส (two-phase interleaved boost converter) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมสองวงจรมาต่อขนานกัน ซึ่งช่วยเพิ่มระดับกำลังไฟฟาลดการกระเพื่อมของกระแส และลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ [10]

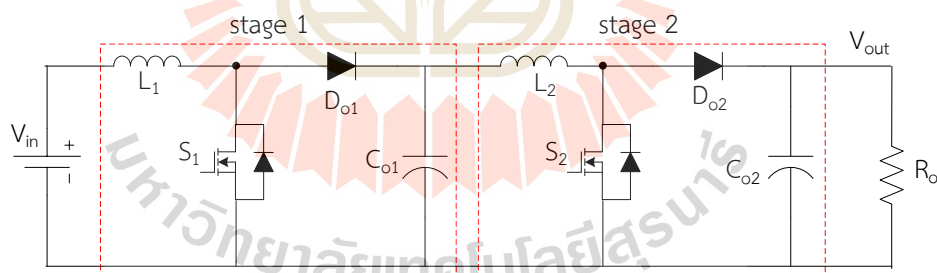


รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงอินเทอร์ลีฟแบบสองเฟส

รูปที่ 2.4 แสดงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ (three-level boost converter) [11] ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันได้สองเท่า นอกจากนี้การนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมหลายๆ วงจรมาต่ออนุกรมกัน ซึ่งเรียกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบแคสเคด (cascade boost converter) [12] ยังสามารถช่วยเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้นได้ รวมทั้งช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ โดยรูปที่ 2.5 แสดงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบแคสเคดสองชั้น



รูปที่ 2.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

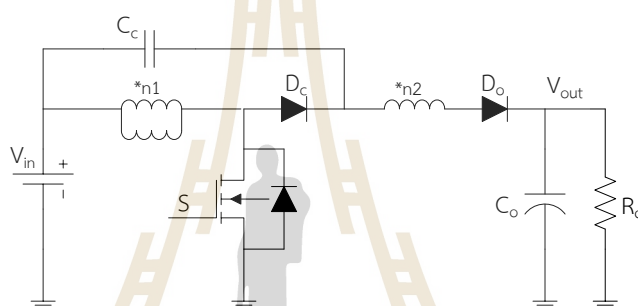


รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบแคสเคดสองชั้น

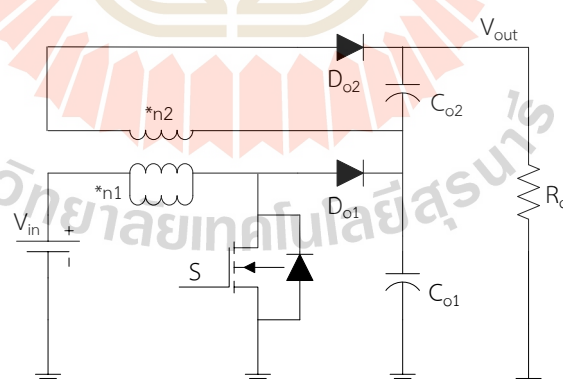
นอกจากนี้ยังมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงใน โครงสร้างแบบอื่น ๆ เช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบคู่อัลแอกทีฟแคลมป์ (active-clamp dual-boost converter) [13] และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฟูลบริดจ์แอคทีฟแคลมป์ (active-clamp full-bridge boost converter) [14] ซึ่งวงจรเหล่านี้จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแยกกราวด์ โดยอัตราขยายแรงดันของวงจรจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดที่พันในหม้อแปลง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบไม่แยกกราวด์ แบ่งตาม โครงสร้างของวงจรได้หลากหลายรูปแบบดังต่อไปนี้

1. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ (coupled Inductor) [15] โดยตัวเหนี่ยวนำคู่ควบจะทำหน้าที่เสมือนหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น ทั้งนี้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบประกอบด้วยขดลวดสองชุด ซึ่งการขยายแรงดันจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดที่ออกแบบอย่างเหมาะสม รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ รูปที่ 2.7 เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฟลายแบค (flyback converter) มาใช้งานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำคู่ควบเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงให้สูงขึ้น [16]



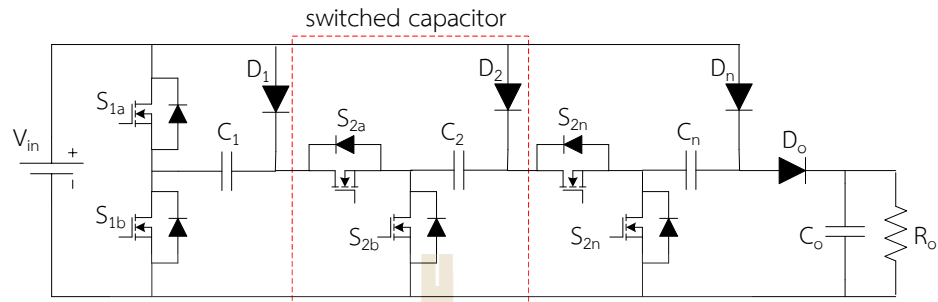
รูปที่ 2.6 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ



รูปที่ 2.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฟลายแบคร่วมกับตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ

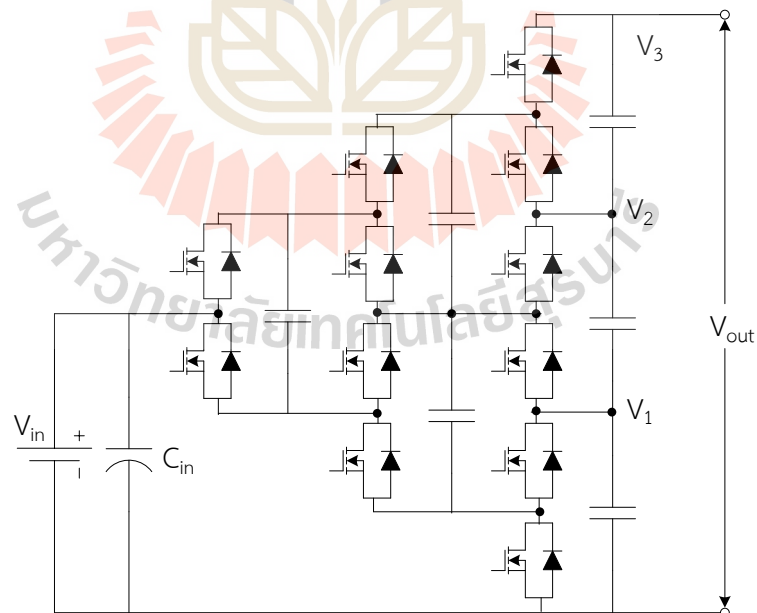
2. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ (switched capacitor) [17]-[18] ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เป็นเสมือนอีกหนึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น รูปที่ 2.8 แสดง โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ ซึ่งต่ออนุกรมกัน n ชุด เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันเอาต์พุต โดยตัวเก็บประจุสวิตช์ในแต่ละชุด

ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ไดโอด และอุปกรณ์สวิตช์สองตัว จะเห็นได้ว่าไม่มีตัวเหนี่ยวนำหรือหม้อแปลงไฟฟ้าต่อรวมในวงจรดังกล่าว ทำให้ขนาดและน้ำหนักของวงจรลดลง



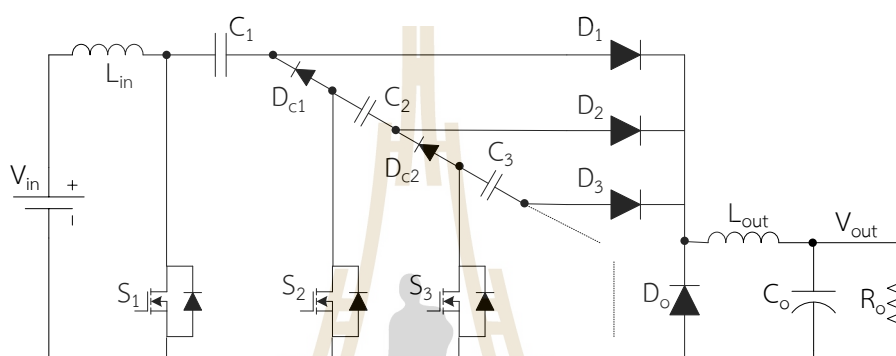
รูปที่ 2.8 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์

นอกจากนี้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบที่ใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ยังสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตโดยการนำตัวเก็บประจุสวิตช์แต่ละชุดมาต่ออนุกรมร่วมกับการต่อขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบหลายระดับ (multi-level boost converter)



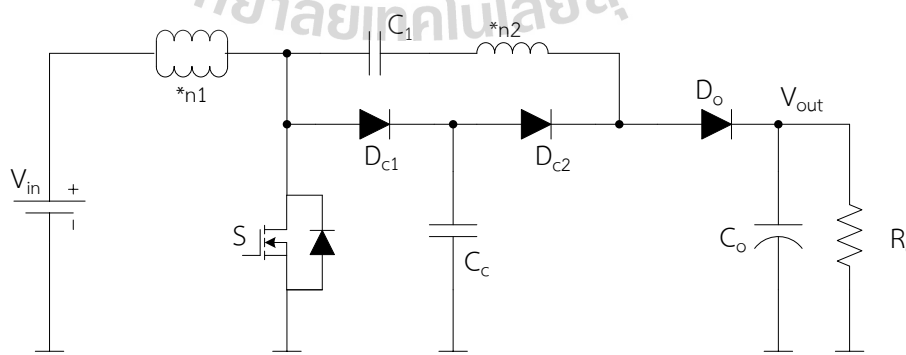
รูปที่ 2.9 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบหลายระดับร่วมกับตัวเก็บประจุสวิตช์

3. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสวิตช์ (Inductor and switched capacitor) [19] เป็นการผสมผสานระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบคูก (Cuk converter) เพื่อทำให้อัตราขยายสูงขึ้น ดังแสดงโครงสร้างวงจรในรูปที่ 2.10 ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำสองตัวเพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสทางด้านอินพุตและทางด้านเอาต์พุต โดยตัวเก็บประจุสวิตช์ n ชุดจะแทรกอยู่ในวงจรคูก เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 2.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสวิตช์

4. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบและตัวเก็บประจุสวิตช์ (coupled inductor and switched capacitor) [20] เป็นการผสมผสานระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบและแบบใช้ตัวเก็บประจุสวิตช์ เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันและประสิทธิภาพของวงจร โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำตัวคู่ควบและตัวเก็บประจุสวิตช์

2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มี อัตราขยายแรงดันสูง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการค้นคว้าเกี่ยวกับองค์ความรู้ที่จำเป็นจากงานวิจัยในอดีต ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงอัตราขยายแรงดันสูง

ปีที่พิมพ์ (ลำดับเอกสารอ้างอิง)	คณะผู้วิจัย	องค์ความรู้ที่ได้จากบทความ
2002 [23]	G. R. Walker and P. C. Sernia	บทความนี้ นำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบคั้งเดิมมาต่ออนุกรมกัน เพื่อขยายแรงดันอินพุตที่ได้จากแผงโซลาร์ให้สูงขึ้น
2003 [24]	L. C. Franco, L. L. Pfitcher, and R. Gules	บทความนี้ นำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง โดยนำวงจรทวีแรงดันแบบหลายเฟส (multiphase voltage multiplier) มาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต
2005 [25]	S.V. G. Oliveira, and I. Barbi	บทความนี้ นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามเฟส โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงแบบสามเฟสเข้าร่วมเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุต และลดการกระเพื่อมของกระแส
2005 [26]	M. Prudente, L.L. Pfitscher and R. Gules	บทความนี้ นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบเซลล์คู่แรงดัน ซึ่งชุดคู่แรงดันที่เพิ่มขึ้นในวงจรแบบคั้งเดิมจะทำให้สามารถเพิ่มแรงดันจากวงจรคั้งเดิมได้เป็นสองเท่าของวงจรคั้งเดิม
2006 [27]	H. Broeck, and I. Tezcan	บทความนี้ นำเสนอ โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบคู่อินเทอร์ลีฟ (dual interleaved boost converter) เพื่อใช้ใน ระบบ ที่มีแรงดันอินพุตต่ำ
2007 [28]	S.V. Araujo, P. Zacharia, B. Sahan, R. P. Torrico, and F. Antunes	บทความนี้ ทำการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงในรูปแบบต่างๆ ทั้ง

		แบบแยกกราวด์และไม่แยกกราวด์เพื่อใช้เชื่อมต่อกับแผง PV modules
2008 [29]	R-J. Wai, W-H. Wang, and C-Y. Lin	บทความนี้ใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้น เป็นการช่วยลดจำนวนแผง PV modules ที่ต้องนำมาต่ออนุกรมกันเป็นจำนวนมาก
2008 [30]	B. Axelrod, Y. Berkovich, and A. Ioinovici	บทความนี้รวบรวมโครงสร้างของวงจรที่ใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสวิตช์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่ไม่ใช้หม้อแปลง เป็นการรวบรวมวิธีการเพิ่มอัตราขยายแรงดันในรูปแบบต่าง ๆ
2008 [31]	M. Prudente, L.L. Pfitscher, R. Gules G. Emmendoerfer, and E.F. Romaneli	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบเซลล์คู่ขนานแรงดัน ซึ่งชุดคูณแรงดันที่เพิ่มขึ้นในวงจรแบบดั้งเดิมจะทำให้สามารถเพิ่มแรงดันได้สองเท่าของวงจรดั้งเดิม
2009 [32]	J-M. Kwon, B-H. Kwon, and K-H, Nam	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง โดยใช้การทำงานร่วมกันของวงจรเรียงกระแสรีโซแนนซ์อนุกรมแบบดิวอัล (dual series resonant rectifier circuit) และวงจรแคลมป์แบบแอคทีฟ (active clamp circuit)
2011 [33]	J-H. Lee, J-H. Park, and J. H. Jeon	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิดฟอร์เวิร์ดฟลายแบคแบบต่ออนุกรม (series-connected forward-flyback converter) เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันให้สูงขึ้น
2011 [34]	G. Siazzi, P. Mattavelli, and A. Costabeber	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบฟลายแบคร่วมกับวงจรแอคทีฟแคลมป์และวงจรทวีแรงดันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นมาก ๆ
2011 [35]	W. Li, and X. He	บทความนี้รวบรวมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบไม่แยกกราวด์เพื่อเชื่อมต่อกับแผง PV Modules เป็นการรวบรวมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบต่าง ๆ เมื่อต้องการใช้งานร่วมกับแผง PV Modules

2012 [36]	K-J. Lee, B-G. Park, R-Y. Kim, and D-S. Hyun	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำสองตัวร่วมกับตัวเหนี่ยวนำรีโซแนนซ์ เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดัน
2012 [37]	Y. Park, B. Jung and S. Choi	บทความนี้เสนอวิธีการสวิตช์ในช่วงแรงดันและกระแสเป็นศูนย์ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบรีโซแนนซ์ที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรดังกล่าว
2013 [38]	S. M. Chen, T. J. Liang, L. S. Yang, and J. F. Chen	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงอัตราขยายแรงดันสูงโดยใช้การเพิ่มแรงดันจากตัวเก็บประจุเข้าช่วย ทำให้ได้อัตราขยายแรงดันสูงขึ้นและลดการกระเพื่อมของกระแส อีกทั้งยังง่ายต่อการควบคุม
2015 [39]	M. S. S. Andrade, L. Schuch, and M. L. S. Martins	บทความนี้เสนอการออกแบบและวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงอัตราขยายแรงดันสูงบูรณาการแบบกำลังสองเซต้า (Quadratic-Boost-Zeta) เป็นการวิเคราะห์หาค่าความเครียดแรงดันและกระแสที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจร

จากตารางที่ 2.1 พบว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่สามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันได้สูงนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น การนำชุดเซลล์คู่แรงดันมาต่อผสมผสานกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ซึ่งชุดเซลล์คู่แรงดันที่เพิ่มเข้าไปในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงจะทำให้สามารถเพิ่มแรงดันได้เป็นสองเท่า การใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบและตัวเก็บประจุสวิตช์เพิ่มเข้าไปในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงเนื่องจากตัวเก็บประจุสวิตช์ที่เพิ่มเข้าไป รวมถึงการใช้หม้อแปลงเพื่อเพิ่มแรงดัน จะทำการปรับแก้ปของหม้อแปลงเพื่อเพิ่มแรงดันเอาต์พุตโดยตรง เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีก็มีจุดเด่นที่แตกต่างกัน ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะมุ่งเน้นที่อัตราขยายแรงดันของวงจร และจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรเป็นสำคัญ

2.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ ได้นำเสนอการปรัทศน์วรรณกรรมบทความที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นประโยชน์และเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาโครงสร้างใหม่สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายสูงสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นในบทที่ 3 ทั้งนี้ในบทนี้ได้ทำการศึกษาข้อเด่น ข้อด้อย ของโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ในรูปแบบต่าง ๆ ดังที่มีปรากฏในงานวิจัยในอดีต



บทที่ 3

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ที่พัฒนาขึ้น

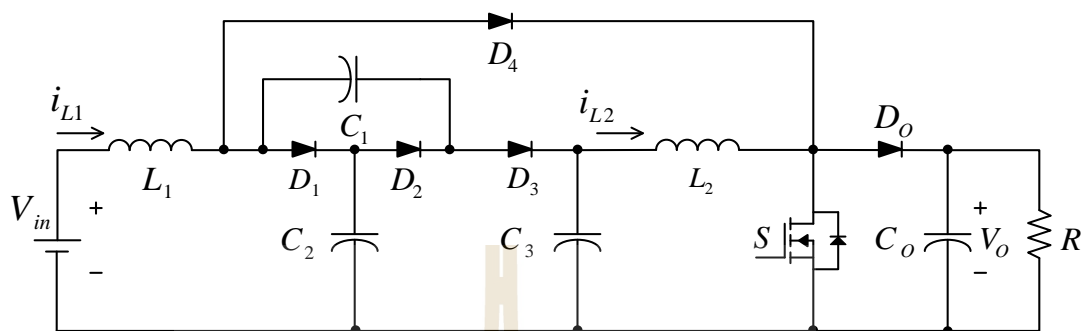
3.1 บทนำ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงในบทที่ผ่านมา พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ในวงจร ช่วยลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์ และลดความซับซ้อนในการสร้างชุดทดสอบ ดังนั้นเพื่อพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่ต้องการอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า สำหรับประยุกต์ใช้งานกับระบบพลังงานทดแทน ซึ่งมีค่าแรงดันอินพุตประมาณ $20 V_{dc}$ โดยโครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วยสวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวเท่านั้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น การวิเคราะห์หลักการทำงาน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ทำการประเมินประสิทธิภาพ รวมทั้งยังนำเสนอการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

3.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น

เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม ไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันได้สูงมากพอในกรณีที่โหลดต้องการแรงดันเอาต์พุตสูงที่ประมาณ $400 V_{dc}$ เมื่อมีแรงดันอินพุตค่อนข้างต่ำ ดังนั้นต้องอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบต่าง ๆ จากงานวิจัยในอดีต เช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสอง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คูณแรงดัน มาประยุกต์เพื่อพัฒนาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อใช้งานกับระบบพลังงานทดแทนที่มีแรงดันอินพุตต่ำประมาณ $20 V_{dc}$ ที่ต้องการเพิ่มแรงดันเอาต์พุตให้สูงถึง $400 V_{dc}$ โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่ง โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

กำลังจำนวน 12 ตัว คือ สวิตช์กำลัง (S) ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2) ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2, C_3, C_o) และ ไดโอดกำลัง (D_1, D_2, D_3, D_4, D_o)



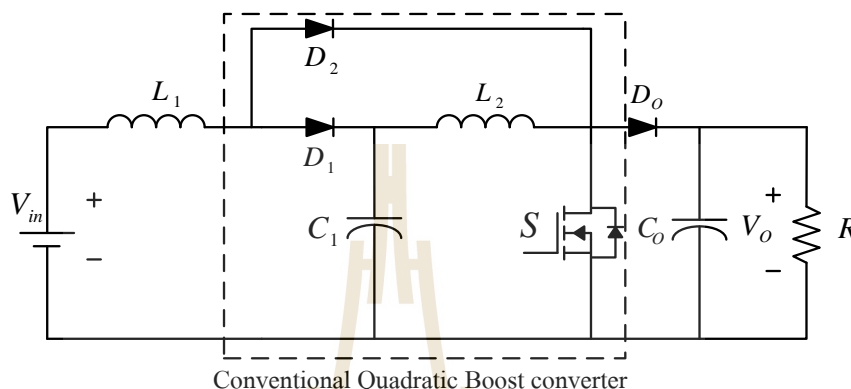
รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นเป็นการผสมผสานกัน ระหว่าง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสอง (Conventional Quadratic Boost Converter) และ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่แบบเซลล์คูณแรงดัน (Voltage Multiplier Cell Boost Converter) ซึ่งวงจรทั้งสองมีข้อดีคือ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสองเป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมมาต่อเรียงกันสองวงจร ทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสองสามารถเพิ่มแรงดันได้สูงขึ้นอีกระดับหนึ่ง ส่วนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คูณแรงดันสามารถเพิ่มระดับแรงดันสูงถึงสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม ดังนั้น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นการผสมผสานข้อดีของแต่ละวงจร เพื่อให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้มากกว่าแรงดันอินพุตประมาณ 20 เท่า โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจะใช้สวิตช์ในการทำงานเพียงตัวเดียว ทั้งนี้หลักการการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.3 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น

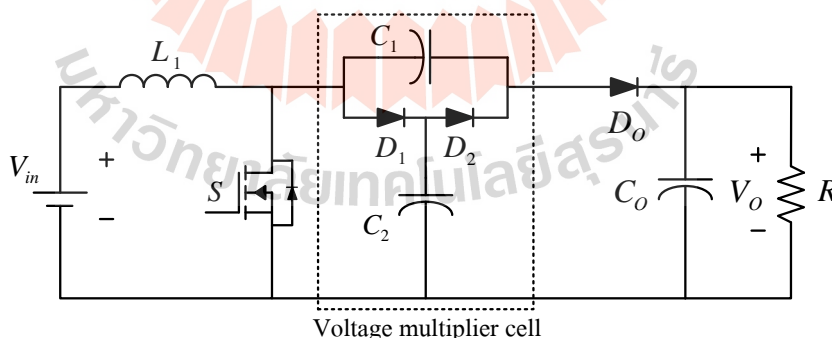
โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น เป็นการนำวงจรสองวงจรมาผสมผสานใช้งานร่วมกัน ประกอบด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสอง และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คูณ

แรงดัน โดยใช้เพียงสวิตช์กำลังตัวเดียวในการทำงาน ทั้งนี้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสองทำงานเสมือนวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมสองวงจรมาต่อเรียงกัน ทำให้สามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันได้สูงขึ้น และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์กำลังสองตัว โครงสร้างของวงจรแสดงได้ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสอง

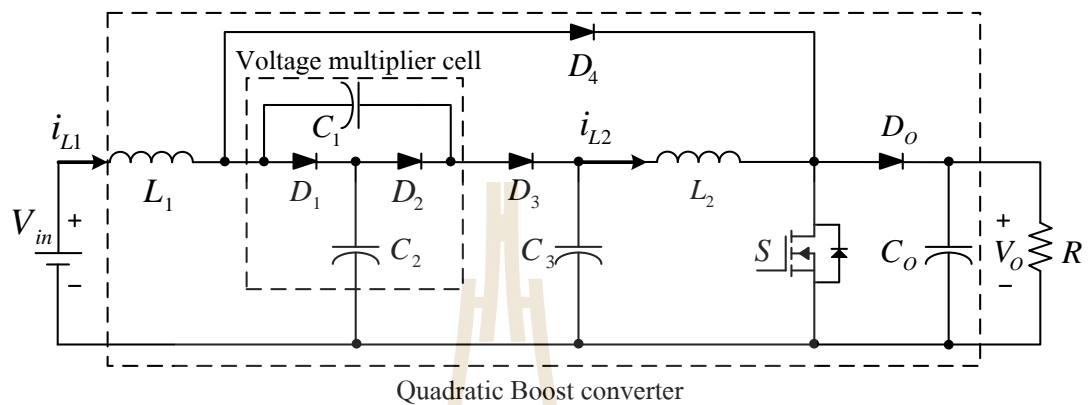
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คูณแรงดัน เป็นการนำชุด ที่เรียกว่า ชุดเซลล์คูณแรงดัน เข้ามาเพิ่มในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันได้จากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมได้ถึงสองเท่า โครงสร้างวงจรดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คูณแรงดัน

การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น จะอาศัยแนวทางการพิจารณาหลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสองและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบเซลล์คูณแรงดัน เพื่อเป็นแนวทางไปสู่การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

กระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ซึ่งโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.4 ประกอบด้วย สวิตช์กำลัง (S) ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2) ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2, C_3, C_o) และไดโอดกำลัง (D_1, D_2, D_3, D_4, D_o)



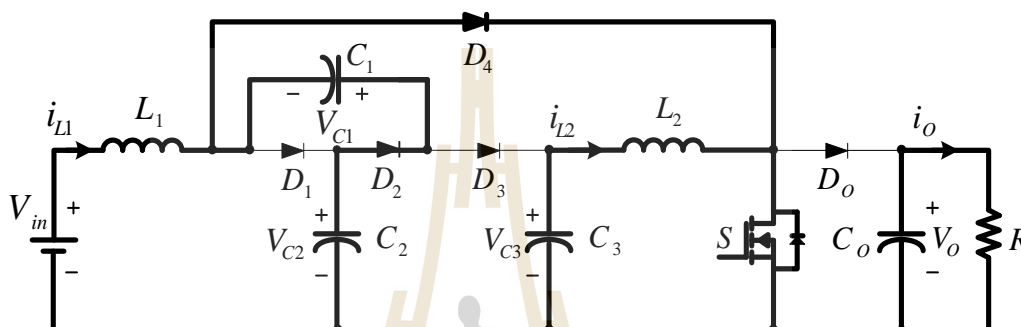
รูปที่ 3.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น

โดยหลักการการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น สามารถแบ่งการทำงานได้ 2 โหมด คือ โหมดสวิตช์กำลังนำกระแส และ โหมดสวิตช์กำลังหยุดนำกระแส ดังนี้

3.3.1 ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 พบว่าช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_2, C_3 และ C_o จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนกับแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งพฤติกรรมการทำงานของตัวเก็บประจุดังกล่าวจะส่งผลต่อลักษณะการทำงานของไดโอด สังเกตเห็นว่าไดโอด D_2 และ D_4 สามารถนำกระแสได้เนื่องจากไดโอด D_4 ได้รับการไบอัสตรงจากแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต เพื่อนำกระแสเข้าสู่สวิตช์กำลัง S และไดโอด D_2 ได้รับการไบอัสตรงจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_2 เพื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_1 ที่เก็บสะสมพลังงาน ในขณะที่ไดโอด D_1, D_3 และ D_o ไม่สามารถนำกระแส เนื่องจากไดโอด D_1 ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_2 ทำให้มีแรงดันที่ขั้วแอนโอดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ($V_{in} < V_{C2}$) ส่วนไดโอด D_3 ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_3 ซึ่งทำให้มีแรงดันที่ขั้วแอนโอดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ($V_{C2} < V_{C3}$) และในลักษณะเดียวกันไดโอด D_o ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากตัวเก็บประจุ C_o ที่คายประจุ และทำให้มีแรงดันที่ขั้วแอนโอดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ($V_{C3} < V_o$) ดังนั้นในช่วงที่

สวิตช์กำลัง S นำกระแส จึงมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง คือ ตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 ไดโอด D_2, D_4 สวิตช์กำลัง S ตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3, C_o และโหลดตัวต้านทาน R โดยในช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุ C_2 จะคายประจุผ่านไดโอด D_2 เพื่ออัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 จนกระทั่งตัวเก็บประจุทั้งสองมีค่าแรงดันตกคร่อมเท่ากัน ($V_{C1}=V_{C2}$) ส่วนตัวเก็บประจุ C_3 ซึ่งทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดันอีกหนึ่งแหล่งจ่ายในวงจรจะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 ส่วนตัวเก็บประจุ C_o จะคายพลังงานไปยังโหลดตัวต้านทาน R

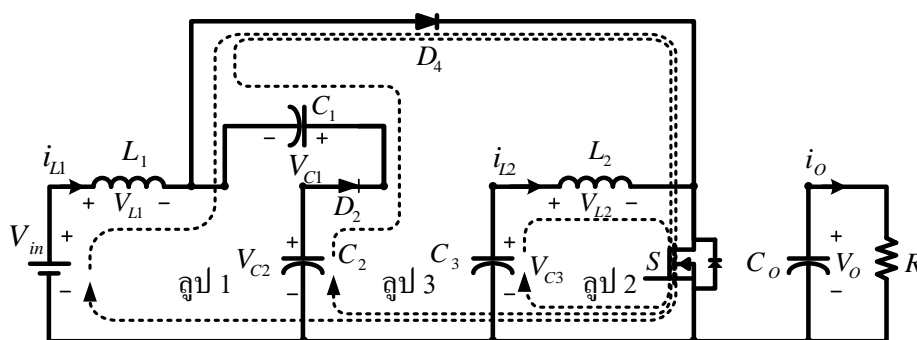


รูปที่ 3.5 การทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์กำลังนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ตามลำดับดังนี้

กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) :

ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส สามารถพิจารณากฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 3 รูปการทำงาน ดังแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์พิจารณาการทำงานของวงจร ขณะสวิตช์กำลังนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นโดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ดังรูปที่ 3.6 ในรูป 1 และรูป 2 สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ส่วนรูป 3 หาความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{รูป 1 ;} \quad & -V_{in} + V_{L1} = 0 \\ & L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} \\ & \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{in}}{L_1} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \text{รูป 2 ;} \quad & -V_{C3} + V_{L2} = 0 \\ & L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{C3} \\ & \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{C3}}{L_2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{รูป 3 ;} \quad & -V_{C2} + V_{C1} = 0 \\ & V_{C1} = V_{C2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

พิจารณาช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส $dt=DT$ โดยที่ D คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ และ T คือ คาบของการสวิตช์ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L1}}{DT} = \frac{V_{in}}{L_1} \quad (3.4)$$

$$\frac{\Delta i_{L2}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L2}}{DT} = \frac{V_{C3}}{L_2} \quad (3.5)$$

จะได้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ดังนี้

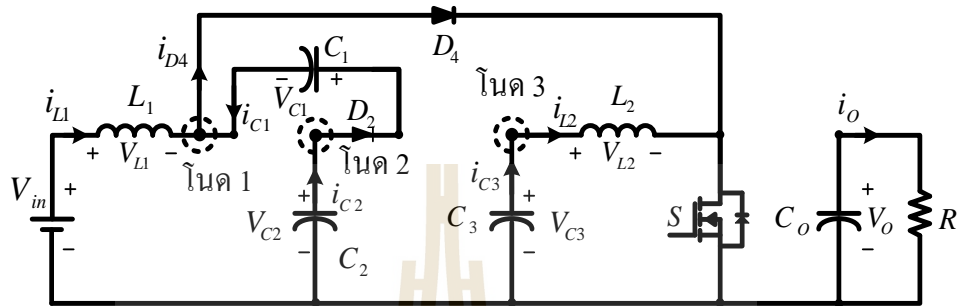
$$\Delta i_{L1,on} = \frac{V_{in}DT}{L_1} \quad (3.6)$$

$$\Delta i_{L2,on} = \frac{V_{C3}DT}{L_2} \quad (3.7)$$

โดยที่ $\Delta i_{L1,on}$ และ $\Delta i_{L2,on}$ คือ การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 เมื่อสวิตช์กำลัง S นำกระแส ตามลำดับ

กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) :

ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส สามารถพิจารณากฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 3 จุดการทำงาน ดังแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์พิจารณาการทำงานของวงจร ขณะที่สวิตช์กำลังนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสโดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ดังรูปที่ 3.7 ที่โนด 1, โหนด 2 และโนด 3 สามารถหาความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 ตามลำดับ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{โนด 1 ;} \quad & i_{L1} = i_{D4} - i_{C1} \\ & C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_{D4} - i_{L1} \\ & \frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{i_{D4} - i_{L1}}{C_1} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \text{โนด 2 ;} \quad & i_{C2} = i_{C1} \quad \text{โดยที่} \quad i_{C1} = i_{D4} - i_{L1} \\ & C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} = i_{D4} - i_{L1} \\ & \frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{i_{D4} - i_{L1}}{C_2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \text{โนด 3 ;} \quad & i_{L2} = i_{C3} \\ & C_3 \frac{dv_{C3}}{dt} = i_{L2} \\ & \frac{dv_{C3}}{dt} = \frac{i_{L2}}{C_3} \end{aligned} \quad (3.10)$$

จะได้การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 ดังนี้

$$\Delta V_{C1,on} = \frac{i_{D4} - i_{L1}}{C_1} DT \quad (3.11)$$

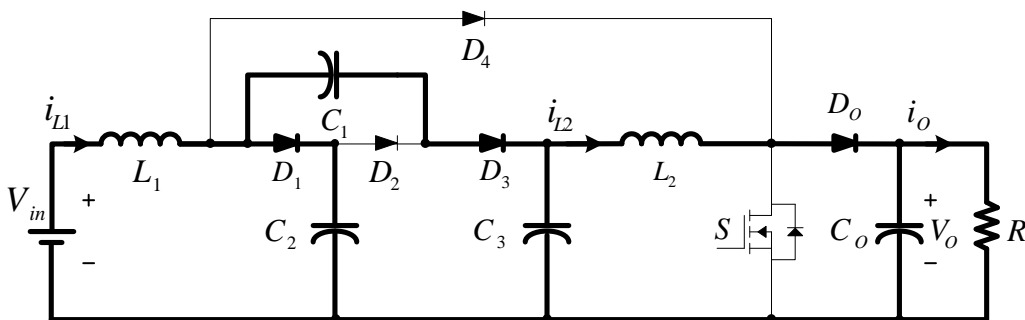
$$\Delta V_{C2,on} = \frac{i_{D4} - i_{L1}}{C_2} DT \quad (3.12)$$

$$\Delta V_{C3,on} = \frac{i_{L2}}{C_3} DT \quad (3.13)$$

โดยที่ $\Delta V_{C1,on}$, $\Delta V_{C2,on}$ และ $\Delta V_{C3,on}$ คือ การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 เมื่อสวิตช์กำลัง S นำกระแส ตามลำดับ

3.3.2 ช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 พบว่าช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C_2 , C_3 และ C_o จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_1 จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนกับแหล่งจ่ายแรงดัน ส่งผลให้ไดโอดมีลักษณะการทำงานดังนี้ ไดโอด D_1 , D_3 และ D_o สามารถนำกระแสได้เนื่องจากไดโอดทั้งสามได้รับการไบอัสตรง โดยไดโอด D_1 ได้รับการไบอัสตรงจากแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต เพื่ออัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_2 ส่วนไดโอด D_3 ได้รับการไบอัสตรงจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_1 เพื่ออัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_3 และไดโอด D_o ได้รับการไบอัสตรงจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_1 เช่นกันสำหรับอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_o ส่วนไดโอดที่ไม่นำกระแส คือ ไดโอด D_2 ซึ่งได้รับการไบอัสย้อนกลับจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_1 ทำให้แรงดันที่ขั้วแอโนดมีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ขั้วแคโทด ($V_{C2} < V_{C1}$) และไดโอด D_4 ไม่นำกระแสเนื่องจากช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส แรงดันที่ขั้วแอโนดของไดโอด D_4 มีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ขั้วแคโทด ($V_{in} < V_o$) ทำให้ไดโอด D_4 ไม่ทำงาน ดังนั้นในช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส จึงมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 ไดโอด D_1 , D_3 , D_o ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 , C_o และโหลดตัวต้านทาน R ซึ่งช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุ C_2 จะได้รับการอัดประจุจากแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตผ่านไดโอด D_1 ส่วนตัวเก็บประจุ C_1 จะคายพลังงานที่กักเก็บไว้ผ่านทางไดโอด D_3 เพื่ออัดประจุให้ตัวเก็บประจุ C_3 ซึ่งตัวเก็บประจุ C_3 ทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดันอีกหนึ่งแหล่งจ่ายในวงจร ส่วนตัวเก็บประจุ C_o จะได้รับการอัดประจุจากตัวเก็บประจุ C_1 ผ่านทางไดโอด D_3 และ D_o ก่อนไหลผ่านไปยังโหลดตัวต้านทาน R

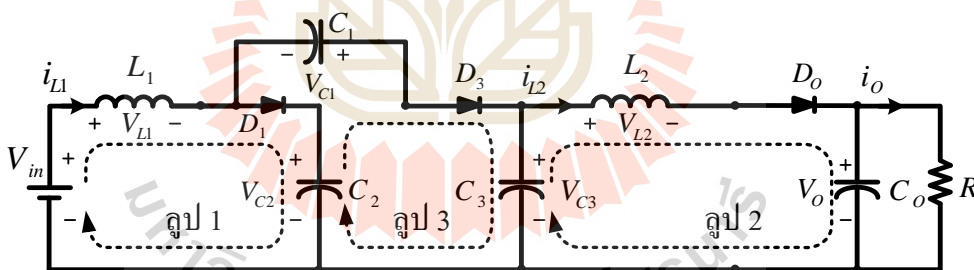


รูปที่ 3.8 การทำงานของวงจรในช่วงที่สวิตช์กำลังหยุดนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ตามลำดับดังนี้

กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) :

ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส สามารถพิจารณากฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 3 ลูปการทำงาน ดังแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ ขณะที่สวิตช์กำลังหยุดนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ดังรูปที่ 3.9 ในลูป 1 และลูป 2 สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ส่วนลูป 3 หาความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ลูป 1 ;} \quad & -V_{in} + V_{L1} + V_{C2} = 0 \\ & L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} - V_{C2} \end{aligned}$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_{in} - V_{C2}}{L_1} \quad (3.14)$$

รูป 2 ;

$$-V_{C3} + V_{L2} + V_o = 0$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{C3} - V_o$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_{C3} - V_o}{L_2} \quad (3.15)$$

รูป 3 ;

$$-V_{C1} - V_{C2} + V_{C3} = 0$$

$$V_{C1} + V_{C2} = V_{C3} \quad (3.16)$$

ขณะที่สวิตช์กำลังหยุดนำกระแส $dt=(1-D)T$ การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 มีค่าคงที่ จะได้ความสัมพันธ์ในสถานะอยู่ตัวดังนี้

$$\frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L1}}{(1-D)T} = \frac{V_{in} - V_{C2}}{L_1} \quad (3.17)$$

$$\frac{\Delta i_{L2}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L2}}{(1-D)T} = \frac{V_{C3} - V_o}{L_2} \quad (3.18)$$

จะได้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ดังนี้

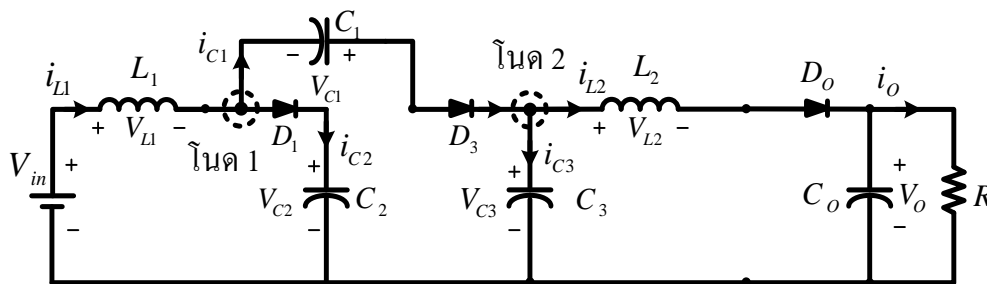
$$\Delta i_{L1,off} = \frac{V_{in} - V_{C2}}{L_1} (1-D)T \quad (3.19)$$

$$\Delta i_{L2,off} = \frac{V_{C3} - V_o}{L_2} (1-D)T \quad (3.20)$$

โดยที่ $\Delta i_{L1,off}$ และ $\Delta i_{L2,off}$ คือ การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 เมื่อสวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส ตามลำดับ

กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) :

ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส สามารถพิจารณากฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 2 จุดการทำงาน ดังแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ขณะที่สวิตช์กำลังหยุดนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นในช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแสโดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ดังรูปที่ 3.10 โดยที่โนด 1 สามารถหาความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และโนด 2 สามารถหาความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_3 แสดงได้ดังนี้

หาความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1

$$\begin{aligned} \text{โนด 1 ;} \quad i_{L1} &= i_{C1} + i_{C2} \\ C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} &= i_{L1} - i_{C2} \\ \frac{dv_{C1}}{dt} &= \frac{i_{L1} - i_{C2}}{C_1} \end{aligned} \quad (3.21)$$

หาความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_2

$$\begin{aligned} \text{โนด 1 ;} \quad i_{C2} &= i_{L1} - i_{C1} \\ C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} &= i_{L1} - i_{C1} \\ \frac{dv_{C2}}{dt} &= \frac{i_{L1} - i_{C1}}{C_2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

หาความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_3

$$\begin{aligned} \text{โนด 2 ;} \quad i_{C1} &= i_{L2} + i_{C3} \\ C_3 \frac{dv_{C3}}{dt} &= i_{C1} - i_{L2} \\ \frac{dv_{C3}}{dt} &= \frac{i_{C1} - i_{L2}}{C_3} \end{aligned} \quad (3.23)$$

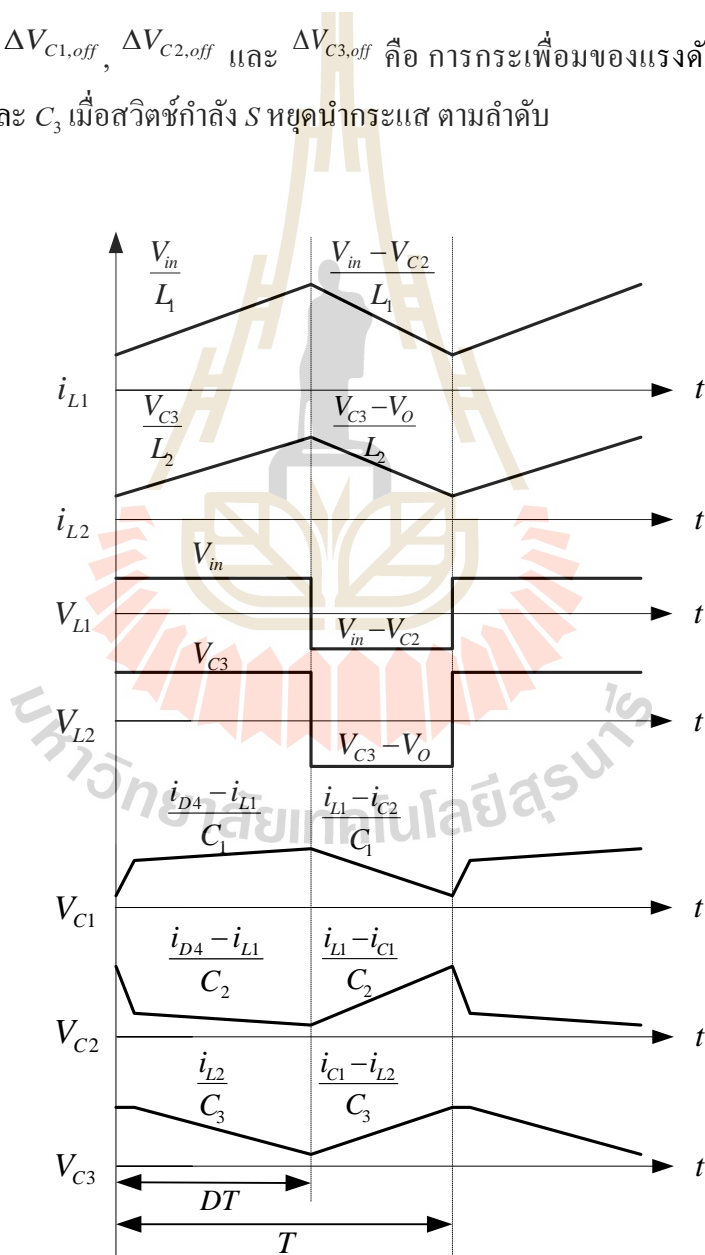
จะได้การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 ดังนี้

$$\Delta V_{C1,off} = \frac{i_{L1} - i_{C2}}{C_1} (1-D)T \quad (3.24)$$

$$\Delta V_{C2,off} = \frac{i_{L1} - i_{C1}}{C_2} (1-D)T \quad (3.25)$$

$$\Delta V_{C3,off} = \frac{i_{C1} - i_{L2}}{C_3} (1-D)T \quad (3.26)$$

โดยที่ $\Delta V_{C1,off}$, $\Delta V_{C2,off}$ และ $\Delta V_{C3,off}$ คือ การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3 เมื่อสวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นสัญญาณกระแส และแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

จากการพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส และในช่วงที่สวิตช์กำลัง S หยุดนำกระแส จึงได้ความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่าน และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.11 พิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ในสภาวะคงตัว ดังความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.11 เพื่อหาอัตราขยายของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ดังนี้

$$L_1 \quad ; \quad V_{in}(DT) + (V_{in} - V_{C2})(1-D)T = 0 \quad (3.27)$$

$$L_2 \quad ; \quad V_{C3}(DT) + (V_{C3} - V_o)(1-D)T = 0 \quad (3.28)$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากัน ดังสมการ (3.3) ทำให้สมการ (3.27) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ $C_{1,2}$ กับแรงดันอินพุต แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{in}D + V_{in} - V_{in}D - V_{C1,2} + V_{C1,2}D &= 0 \\ V_{in} - (1-D)V_{C1,2} &= 0 \\ V_{C1,2} &= \frac{V_{in}}{1-D} \end{aligned} \quad (3.29)$$

ทำให้ความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_3 กับตัวเก็บประจุ C_1, C_2 ดังสมการ (3.16) มีค่าแสดงได้ดังนี้

$$V_{C1,2} = \frac{V_{C3}}{2} \quad (3.30)$$

สามารถหาอัตราขยายแรงดัน (M) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ได้จาก (3.28)

$$V_{C3}D + V_{C3} - V_{C3}D - V_o + V_oD = 0$$

$$V_{C3} - (1-D)V_o = 0$$

$$\text{โดยที่} \quad V_{C3} = 2V_{C1,2} = \frac{2V_{in}}{1-D}$$

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

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2}{(1-D)^2} \quad (3.31)$$

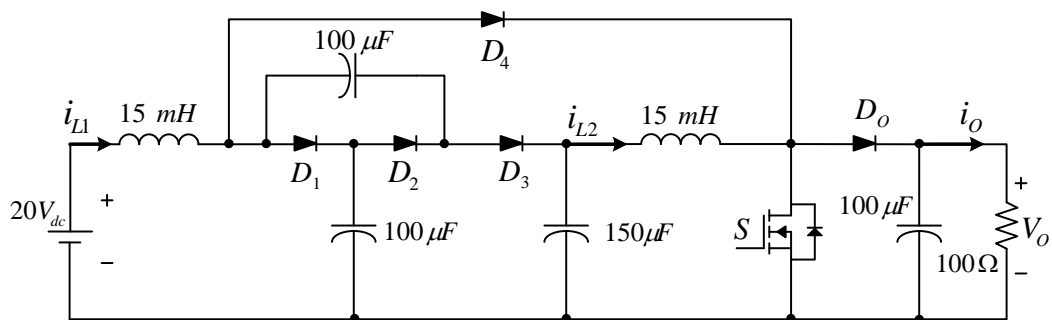
3.3.3 อัตราขยายแรงดันและความเครียดแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นดั่งเสนอในข้างต้น รวมถึงการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสอง และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คู่ขนานแรงดัน หลังจากวิเคราะห์การทำงานของทั้งสามวงจรแล้ว ได้พิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะในการขยายแรงดันของแต่ละวงจร เพื่อแสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะในการขยายแรงดันได้มากกว่าทั้งสองวงจรที่นำมาเปรียบเทียบ เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นเป็นวงจรที่เกิดจากการผสมผสานระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสองกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คู่ขนานแรงดัน อีกทั้งยังพิจารณาเปรียบเทียบความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรของทั้งสามวงจร พบว่าความเครียดแรงดันที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น คือความเครียดแรงดันที่เกิดขึ้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสองและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คู่ขนานแรงดันผสมผสานกัน ซึ่งสามารถสรุปแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีความเครียดแรงดันตกคร่อม คือ ไดโอดกำลัง สวิตช์กำลัง และตัวเก็บประจุ

ทำการเปรียบเทียบอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงทั้งสามวงจร โดยทั้งสามวงจรจะใช้ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรเหมือนกันทั้งหมด ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เพื่อหาอัตราขยายแรงดันแสดงดังรูปที่ 3.12 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับจำลองสถานการณ์ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 อัตราขยายแรงดัน และความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์กำลังต่าง ๆ

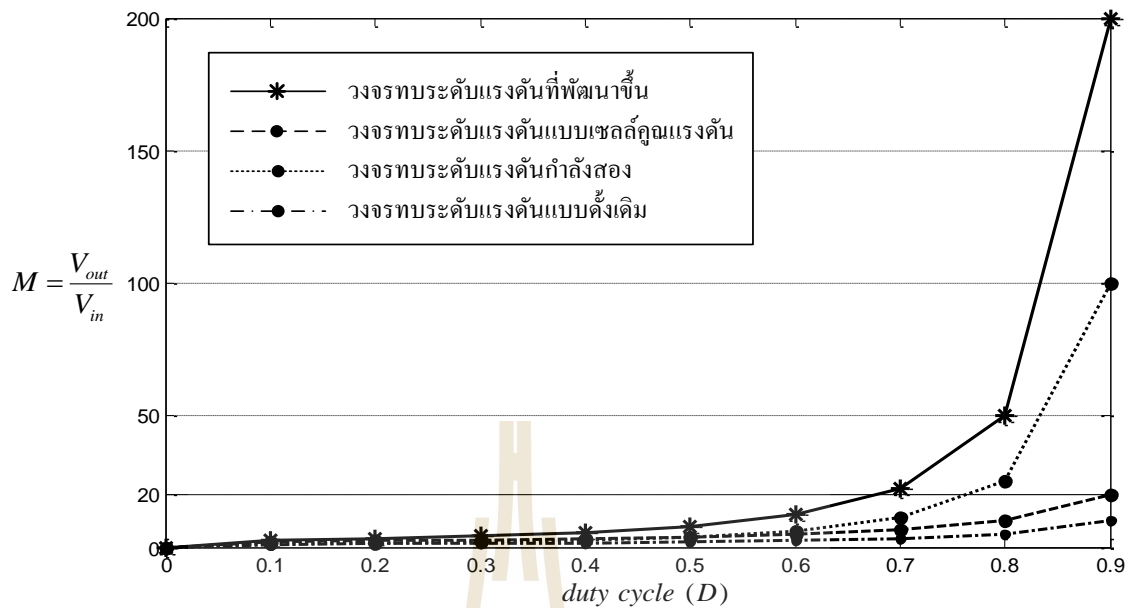
สัญลักษณ์	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงที่มีอัตราขยาย แรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงแบบเซลล์คู่ แรงดัน	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า กระแสตรงแบบกำลังสอง
M	$\frac{2}{(1-D)^2}$	$\frac{2}{1-D}$	$\frac{1}{(1-D)^2}$
V_S	V_o	$\frac{V_o}{2}$	V_o
V_{D1}	$(1-D)\frac{V_o}{2}$	$\frac{V_o}{2}$	$(1-D)V_o$
V_{D2}	$(1-D)\frac{V_o}{2}$	$\frac{V_o}{2}$	-
V_{D3}	$(1-D)\frac{V_o}{2}$	-	-
V_{D4}	V_o	-	V_o
V_{DO}	V_o	V_o	$(1-D)V_o$
V_{C1}	$(1-D)\frac{V_o}{2}$	$\frac{V_o}{2}$	$(1-D)V_o$
V_{C2}	$(1-D)\frac{V_o}{2}$	$\frac{V_o}{2}$	-
V_{C3}	$(1-D)V_o$	-	-
V_{CO}	V_o	V_o	V_o



รูปที่ 3.12 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบต่าง ๆ

พารามิเตอร์	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คู่แรงดัน	วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสอง
V_{in}		20 V_{dc}	
f_{sw}		20 kHz	
L_1	15 mH	15 mH	15 mH
L_2	15 mH	-	15 mH
C_1	100 μF	100 μF	100 μF
C_2	100 μF	100 μF	-
C_3	150 μF	-	-
C_o	100 μF	100 μF	100 μF
R	100 Ω	100 Ω	100 Ω



รูปที่ 3.13 อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พิจารณา

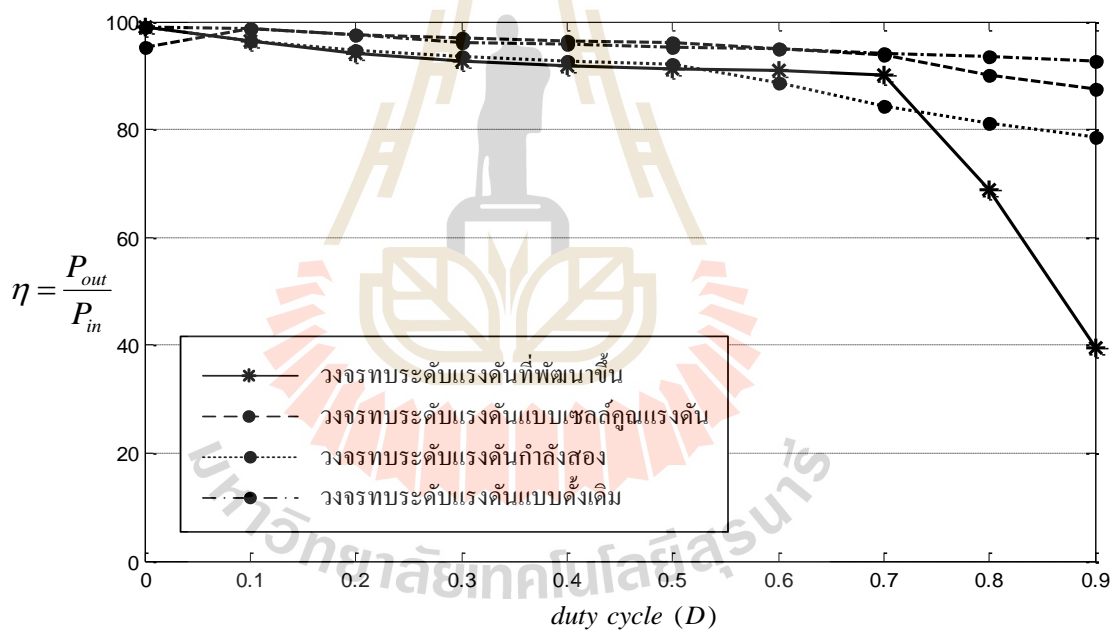
พิจารณาอัตราขยายแรงดันดังรูปที่ 3.13 พบว่าที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ประมาณ 0.684 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นมีอัตราขยายแรงดันเป็น 20 เท่า ในขณะที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คู่แรงดัน และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบกำลังสอง ที่มีข้อจำกัดเรื่องอัตราขยายแรงดันในแต่ละวงจร ทำให้วงจรทั้งสามวงจรต้องทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่สูงมากจึงจะทำให้ได้อัตราขยายแรงดันเป็น 20 เท่า แสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถในการขยายแรงดัน ทำให้วงจรสามารถเพิ่มระดับแรงดันได้สูงขึ้น โดยวงจรทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่สูงมาก

3.3.4 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

ทำการจำลองผลสถานการณ์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น สามารถพิจารณาประสิทธิภาพได้ดังสมการ (3.32) เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงทั้งสี่แบบเปรียบเทียบกับที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรเหมือนกันทั้งหมด ซึ่งค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.2 จะพบว่าที่จุดการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.684 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นมีค่าประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจคืออยู่ที่ประมาณ 90.3 % และเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผัน

กำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากช่วงเวลาที่สวิตช์กำลังทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สูง ๆ ประกอบกับจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มากกว่าวงจรอื่น ๆ จึงส่งผลให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจึงค่อนข้างต่ำเมื่อวงจรทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สูง ๆ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.14

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{i_o V_o}{i_{L1} V_{in}} \times 100\% \quad (3.32)$$

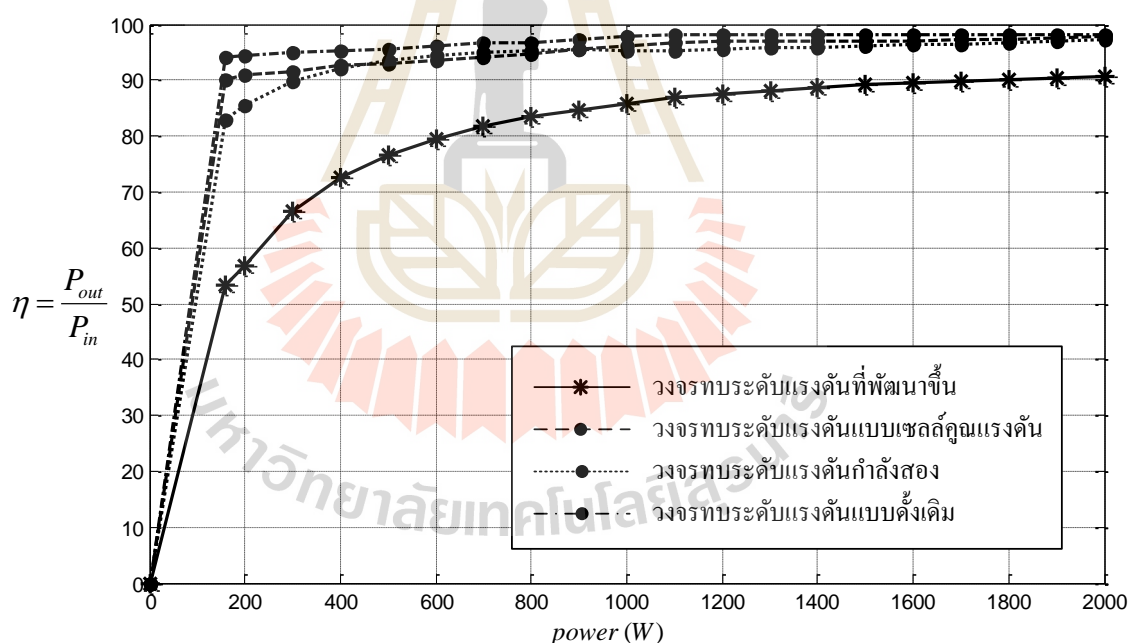


รูปที่ 3.14 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

จากนั้นทำการจำลองผลสถานการณ์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นที่ค่ากำลังงานเอาต์พุตต่าง ๆ โดยทำการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานเพื่อให้ได้ค่ากำลังงานเอาต์พุตตามต้องการ แสดงได้ดังรูป 3.15 พบว่าเมื่อทำการลดค่าโหลดตัวต้านทานลง ซึ่งส่งผลให้กำลังงานเอาต์พุตเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงทุกวงจรจะเพิ่มสูงขึ้นที่ค่ากำลังงานเอาต์พุตสูง ๆ แต่เนื่องจากจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยาย

แรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นที่มีมากกว่าวงจรอื่น ๆ ส่งผลทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรสูง ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นมีค่าน้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบอื่น ๆ

หลังจากการประเมินสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นในด้านต่าง ๆ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะด้านอัตราขยายแรงดันที่สูงถึง 20 เท่า อีกทั้งประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ เพื่อแสดงให้เห็นสมรรถนะโดยรวมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3 ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการเพิ่มระดับแรงดันได้สูงมากกว่า 20 เท่า และประสิทธิภาพของวงจรอยู่ที่ 90.3 %



รูปที่ 3.15 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่ากำลังงานเอาต์พุตต่าง ๆ

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบอัตราขยายแรงดัน จำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในวงจร และ ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแบบต่าง ๆ

วงจรแปลงผัน กำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ มีอัตราขยายแรงดันสูง	กำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.7			
	จำนวน อุปกรณ์ (ตัว)	อัตราขยายแรงดัน (เท่า)	แรงดันเอาต์พุต (V)	ค่าประสิทธิภาพ (%)
แบบดั้งเดิม	4	3.33	66.6	97.7
กำลังสอง	8	11.11	222.2	85
แบบเซลล์คู่แรงดัน	8	6.67	133.4	96.2
ที่พัฒนาขึ้น	12	22.22	444.4	90.3

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

การออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น เป็นการหาขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสอินพุต และการกระเพื่อมของแรงดันในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแส และแรงดันจะส่งผลถึงประสิทธิภาพของวงจร โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 , C_o เพื่อให้เข้าใจหลักการออกแบบเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 , C_o ซึ่งการออกแบบนั้นมีข้อกำหนดขอบเขตการกระเพื่อมของกระแสอินพุต และการกระเพื่อมของแรงดัน การออกแบบค่าพารามิเตอร์แสดงได้ตามลำดับดังนี้

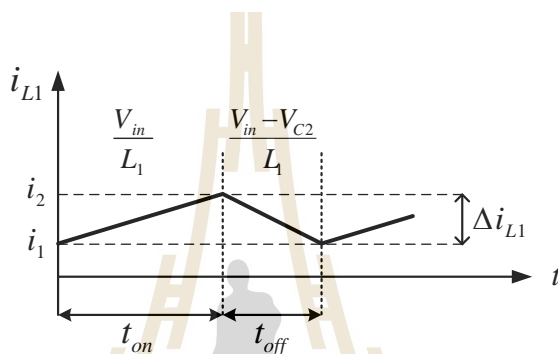
3.4.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น มีผลต่อการกระเพื่อมของกระแสอินพุตเป็นอย่างมาก ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 :

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L_1 พิจารณาจากกระแส i_{L1} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ในช่วงเวลาที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสแสดงดังรูปที่ 3.16 จะได้สมการความสัมพันธ์ของช่วงเวลาการทำงาน และค่าตัวเหนี่ยวนำ L_1 ดังนี้

$$t_{on} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{V_{in}} \quad (3.33)$$



รูปที่ 3.16 กระแส i_{L1} ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นดังนี้

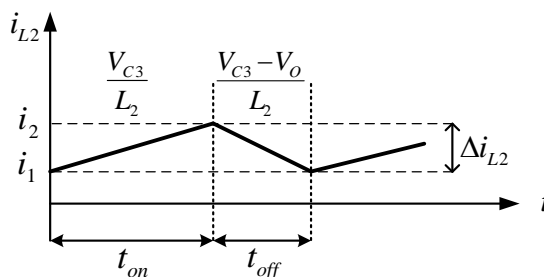
$$L_1 = \frac{V_{in} D}{f_{sw} \Delta i_{L1}} \quad (3.34)$$

โดยที่ Δi_{L1} คือ ค่าการกระเพื่อมของกระแส i_{L1} ที่ยอมรับได้

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_2 :

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L_2 พิจารณาเช่นเดียวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 จากกระแส i_{L2} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ในช่วงเวลาที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสแสดงดังรูปที่ 3.17 จะได้สมการความสัมพันธ์ของช่วงเวลาการทำงาน และค่าตัวเหนี่ยวนำ L_2 ดังนี้

$$t_{on} = L_2 \frac{\Delta i_{L2}}{V_{C3}} \quad (3.35)$$



รูปที่ 3.17 กระแส i_{L2} ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นดังนี้

$$L_2 = \frac{V_{C3}D}{f_{sw}\Delta i_{L2}} \quad (3.36)$$

โดยที่ Δi_{L2} คือ ค่าการกระเพื่อมของกระแส i_{L2} ที่ยอมรับได้

3.4.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น มีผลต่อการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งหากแรงดันมีการกระเพื่อมสูงจะส่งผลให้ตัวเก็บประจุเสียหายได้ ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 และ C_o

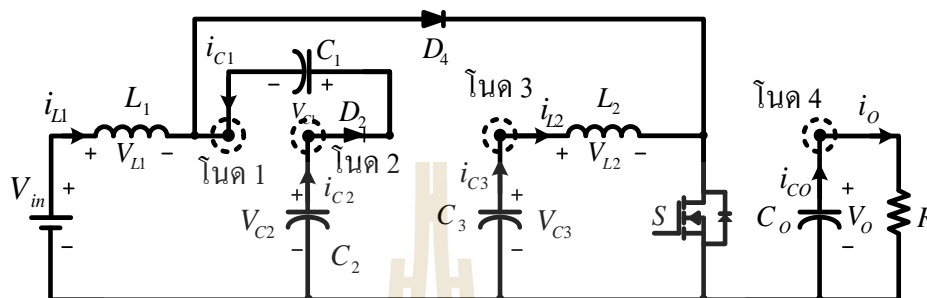
การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 :

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นมีค่าตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 เท่ากัน การออกแบบตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะพิจารณาโดยอาศัยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด ($P_{O,max}$) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบจะเป็นค่าตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 น้อยที่สุดที่สามารถนำมาใช้ได้

$$C_{1,2} \geq \frac{P_{O,max}}{V_{C1}^2 f_{sw}} \quad (3.37)$$

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_3 :

การออกแบบตัวเก็บประจุ C_3 จะพิจารณาช่วงสวิตช์กำลัง S นำกระแส แสดงดังรูป 3.18 ดังเกตได้ว่าที่ node 3 ตัวเก็บประจุ C_3 จะจ่ายกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 ($i_{C3} = i_{L2}$) ก่อนไหลผ่านสวิตช์กำลัง S



รูปที่ 3.18 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ขณะที่สวิตช์กำลังนำกระแส

เมื่อพิจารณากระแส i_{C3} ในช่วงสวิตช์กำลัง S นำกระแส ($0-t_{on}$) เท่านั้น เพื่อทำการหาค่าของตัวเก็บประจุ C_3

$$V_{C3} - V_{C3}(t = 0) = \frac{1}{C_3} \int_0^{t_{on}} i_{L2} dt$$

$$\Delta V_{C3} = \frac{i_{L2} \cdot t_{on}}{C_3}$$

$$t_{on} = C_3 \frac{\Delta V_{C3}}{i_{L2}} \tag{3.38}$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ C_3 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นดังนี้

$$C_3 = \frac{i_{L2} D}{f_{sw} \Delta V_{C3}} \tag{3.39}$$

โดยที่ ΔV_{C3} คือ ค่าการกระเพื่อมของแรงดัน V_{C3} ที่ยอมรับได้

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_o :

การออกแบบตัวเก็บประจุ C_o จะพิจารณาเช่นเดียวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_3 คือพิจารณาช่วงสวิตช์กำลัง S นำกระแส แสดงดังรูปที่ 3.18 ในข้างต้นที่ node 4 พบว่า

ตัวเก็บประจุ C_o จะจ่ายกระแสให้กับโหลดตัวต้านทาน R ($i_{co} = i_o$) จะได้ความสัมพันธ์ของช่วงเวลาการทำงาน และค่าตัวเก็บประจุ C_o ดังนี้

$$t_{on} = C_o \frac{\Delta V_o}{i_o} \quad (3.40)$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ C_o ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นดังนี้

$$C_o = \frac{i_o D}{f_{sw} \Delta V_o} \quad (3.41)$$

โดยที่ ΔV_o คือ ค่าการกระเพื่อมของแรงดัน V_o ที่ยอมรับได้

สำหรับการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์จะถูกกำหนดขึ้น ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การกำหนดค่าเพื่อคำนวณเลือกพารามิเตอร์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

กำหนดค่าที่ใช้ในการคำนวณเลือกพารามิเตอร์			
R			500 Ω
f_{sw}			20 kHz
D			0.7
$P_{O,max}$			394.3 W
V_{in}	20 V	i_{L1}	19.71 A
V_{C1}	66.7 V	i_{L2}	2.96 A
V_{C3}	133.3 V	i_o	0.888 A
ΔV_{C3}	1 V	Δi_{L1}	0.1971 A
ΔV_{CO}	1 V	Δi_{L2}	0.444 A

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 พิจารณาได้จาก (3.34) ดังนี้

$$L_1 = \frac{V_{in} D}{f_{sw} \Delta i_{L1}}$$

$$L_1 = \frac{20 \times 0.7}{20 \times 10^3 \times 0.1971} = 3.551 \text{ mH}$$

และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_2 พิจารณาได้จาก (3.36) ดังนี้

$$L_2 = \frac{V_{C3} D}{f_{sw} \Delta i_{L2}}$$

$$L_2 = \frac{133.3 \times 0.7}{20 \times 10^3 \times 0.444} = 10.508 \text{ mH}$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 พิจารณาได้จาก (3.37) ดังนี้

$$C_{1,2} \geq \frac{P_{o,\max}}{V_{C1}^2 f_{sw}}$$

$$C_{1,2} \geq \frac{\left(\frac{V_o^2}{R}\right)}{V_{C1}^2 f_{sw}} \geq \frac{394.3}{66.7^2 \times 20 \times 10^3} \geq 4.431 \mu\text{F}$$

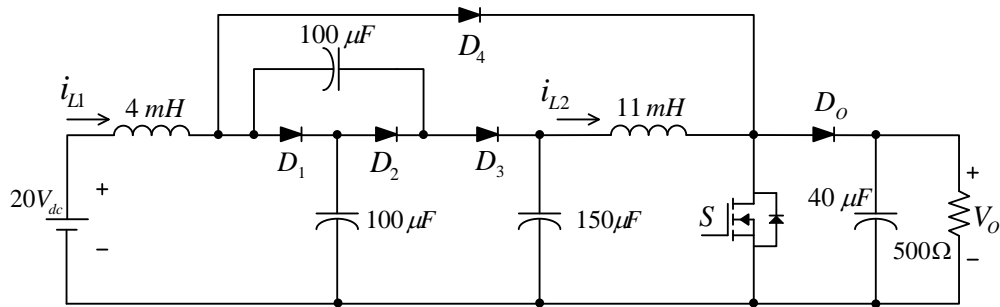
การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_3 พิจารณาได้จาก (3.39) ดังนี้

$$C_3 = \frac{i_{L2} D}{f_{sw} \Delta V_{C3}} = \frac{2.96 \times 0.7}{20 \times 10^3 \times 1} = 103.6 \mu\text{F}$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_o พิจารณาได้จาก (3.41) ดังนี้

$$C_o = \frac{i_o D}{f_{sw} \Delta V_o} = \frac{0.888 \times 0.7}{20 \times 10^3 \times 1} = 31.08 \mu\text{F}$$

จากการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นที่นำเสนอในข้างต้นเป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ ดังนั้นจึงสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 พารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น จะดำเนินการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบมา ว่ามีค่าเหมาะสมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดแรงดันอินพุตเป็น $20 V_{dc}$ และค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19 ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่เป็น 0.3, 0.5 และ 0.7 เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของอัตราขยายแรงดันในวงจรที่ได้วิเคราะห์ข้างต้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นกับผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันว่าค่าที่ทำการเปรียบเทียบนั้นมีความใกล้เคียงสอดคล้องกัน

3.5.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

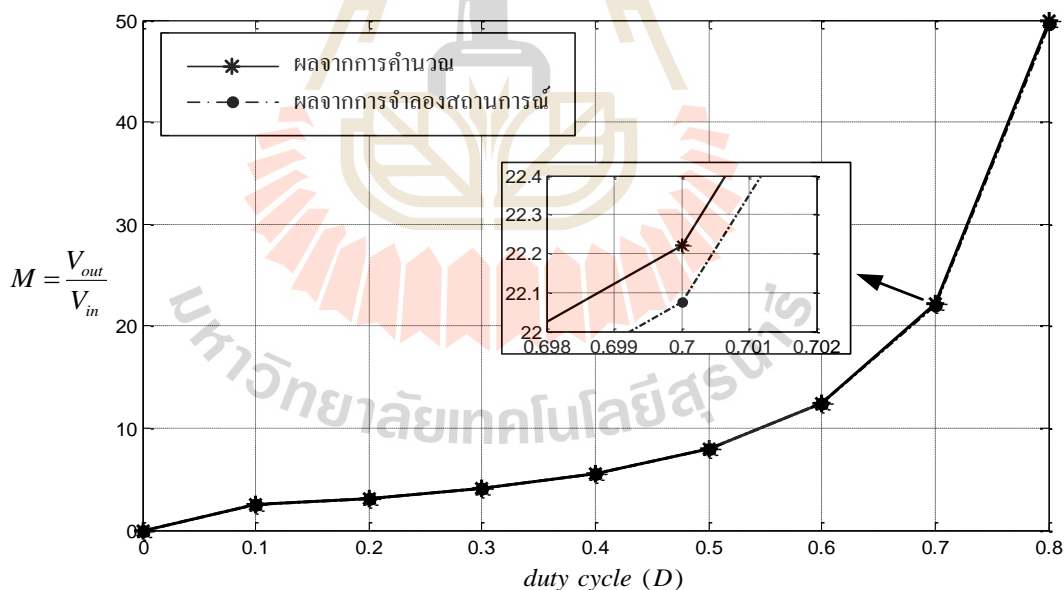
จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ได้ความสัมพันธ์ของอัตราขยายแรงดัน ดังสมการที่ (3.42) จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นกับผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังตารางที่ 3.5 พบว่าค่าอัตราขยายแรงดัน (M) ค่าแรงดันเอาต์พุต (V_o) ที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่วิเคราะห์ไว้ข้างต้น และค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink นั้นมีความใกล้เคียงสอดคล้องกัน รูปที่ 3.20 เป็นผลการจำลองสถานการณ์แสดงค่าอัตราขยายแรงดัน ณ จุดทำงานที่

ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณด้วยสมการ 3.42 พบว่าค่าจากผลการจำลองสถานการณ์และผลจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมาก

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2}{(1-D)^2} \tag{3.42}$$

ตารางที่ 3.5 ผลการคำนวณอัตราขยายแรงดันและผลอัตราขยายแรงดันจากการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

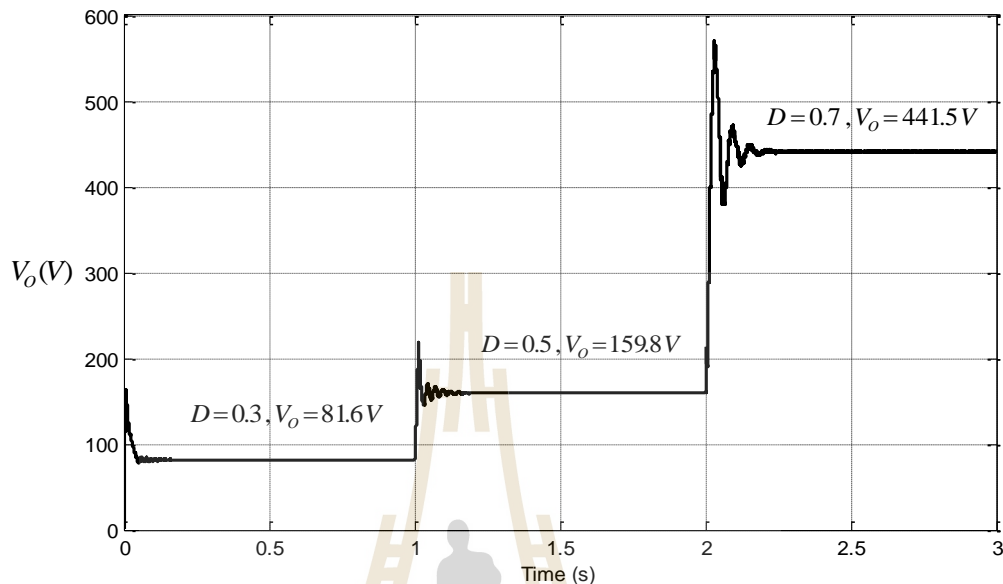
ผลจากการคำนวณ				ผลการจำลองสถานการณ์			
พารามิเตอร์	ค่าวัฏจักรหน้าที่			พารามิเตอร์	ค่าวัฏจักรหน้าที่		
	0.3	0.5	0.7		0.3	0.5	0.7
M	4.08	8	22.22	M	4.08	8	22.08
V_o	81.6 V	160 V	444.4 V	V_o	81.6 V	159.8 V	441.5 V



รูปที่ 3.20 อัตราขยายแรงดันระหว่างผลจากการคำนวณกับผลการจำลองสถานการณ์

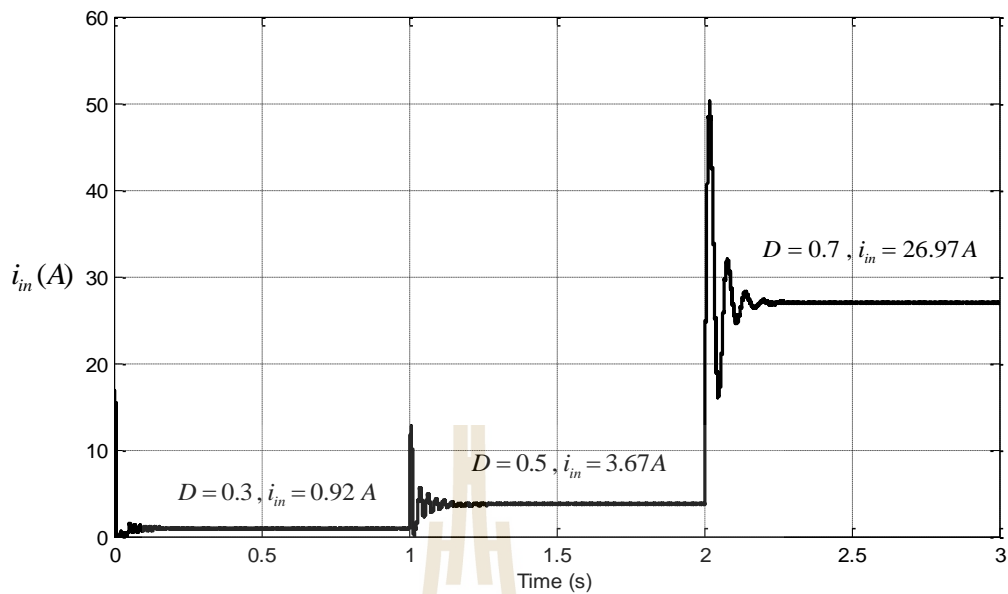
ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าแรงดันเอาต์พุต ณ จุดทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.21 พบว่าที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.3 แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น 81.6 V จากนั้นเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่เป็น 0.5 แรงดันเอาต์พุตเพิ่มเป็น 159.8 V และเมื่อเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่เป็น 0.7 ได้แรงดันเอาต์พุตเป็น 441.5 V ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ให้สูงขึ้น

แรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์เป็นไปตามสมการอัตราขยายแรงดัน ดังสมการ 3.42



รูปที่ 3.21 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงค่าแรงดันเอาต์พุต ณ จุดทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาค่าแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ แล้วทำการตรวจสอบค่ากระแสอินพุต (i_{in}) โดยกระแสอินพุตจะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ($i_{in} = i_{L1}$) ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่ให้สูงขึ้นกระแสอินพุตจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งรูปที่ 3.22 เป็นผลการจำลองสถานการณ์แสดงค่ากระแสอินพุต ณ จุดทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์พบว่าที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.3 มีกระแสอินพุตเป็น 0.92 A เมื่อเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่เป็น 0.5 กระแสอินพุตจะมีค่าเพิ่มเป็น 3.67 A และเมื่อเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่เป็น 0.7 กระแสอินพุตจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 26.97 A ดังนั้นเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มสูงขึ้นกระแสอินพุตจะเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับแรงดันเอาต์พุต ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าอินพุตและกำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุต คือ เมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่สูงขึ้นค่าแรงดันเอาต์พุตจะสูงขึ้นตามในขณะที่โหลดตัวต้านทานคงที่ ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้กำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในลักษณะเดียวกันคือเมื่อกำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตเพิ่มขึ้น กำลังงานไฟฟ้าอินพุตต้องเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อแรงดันอินพุตมีค่าคงที่ ในขณะที่กำลังงานไฟฟ้าอินพุตต้องเพิ่มสูงขึ้น ทำให้กระแสอินพุตต้องเพิ่มสูงขึ้นแทน จึงสามารถสรุปได้ว่ากระแสอินพุตจะเพิ่มสูงขึ้นตามค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ทั้งนี้ในสภาวะคงตัว ณ จุดทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ กระแสอินพุตที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีการนำกระแสแบบต่อเนื่อง ซึ่งถือว่าวงจรที่พัฒนาขึ้นทำงานภายใต้โหมดนำกระแสต่อเนื่อง (CCM)



รูปที่ 3.22 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงค่ากระแสอินพุต ณ จุดทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ

3.5.2 การกระเพื่อมของกระแสและแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการออกแบบเลือก แสดงดังรูปที่ 3.19 เพื่อพิจารณาค่าการกระเพื่อมของกระแส และการกระเพื่อมของแรงดันที่ได้จากการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ในหัวข้อ 3.4 เปรียบเทียบกับค่าจากผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อตรวจสอบว่าการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์นั้นเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 รวมถึงแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 และ C_o โดยสามารถสรุปผลการตรวจสอบการกระเพื่อมของกระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ 3.6 พบว่าเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ไปทำการจำลองสถานการณ์ ค่าการกระเพื่อมของกระแส และแรงดันที่ได้นั้นอยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่ได้ออกแบบไว้

รูปที่ 3.23 แสดงผลการจำลองสถานการณ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ในขณะที่รูปที่ 3.24 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ พบว่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ มีความสอดคล้องภายใต้เงื่อนไขในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ คือ

ตารางที่ 3.6 ผลการเปรียบเทียบค่าการกระเพื่อมของกระแส และแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจากการจำลองสถานการณ์

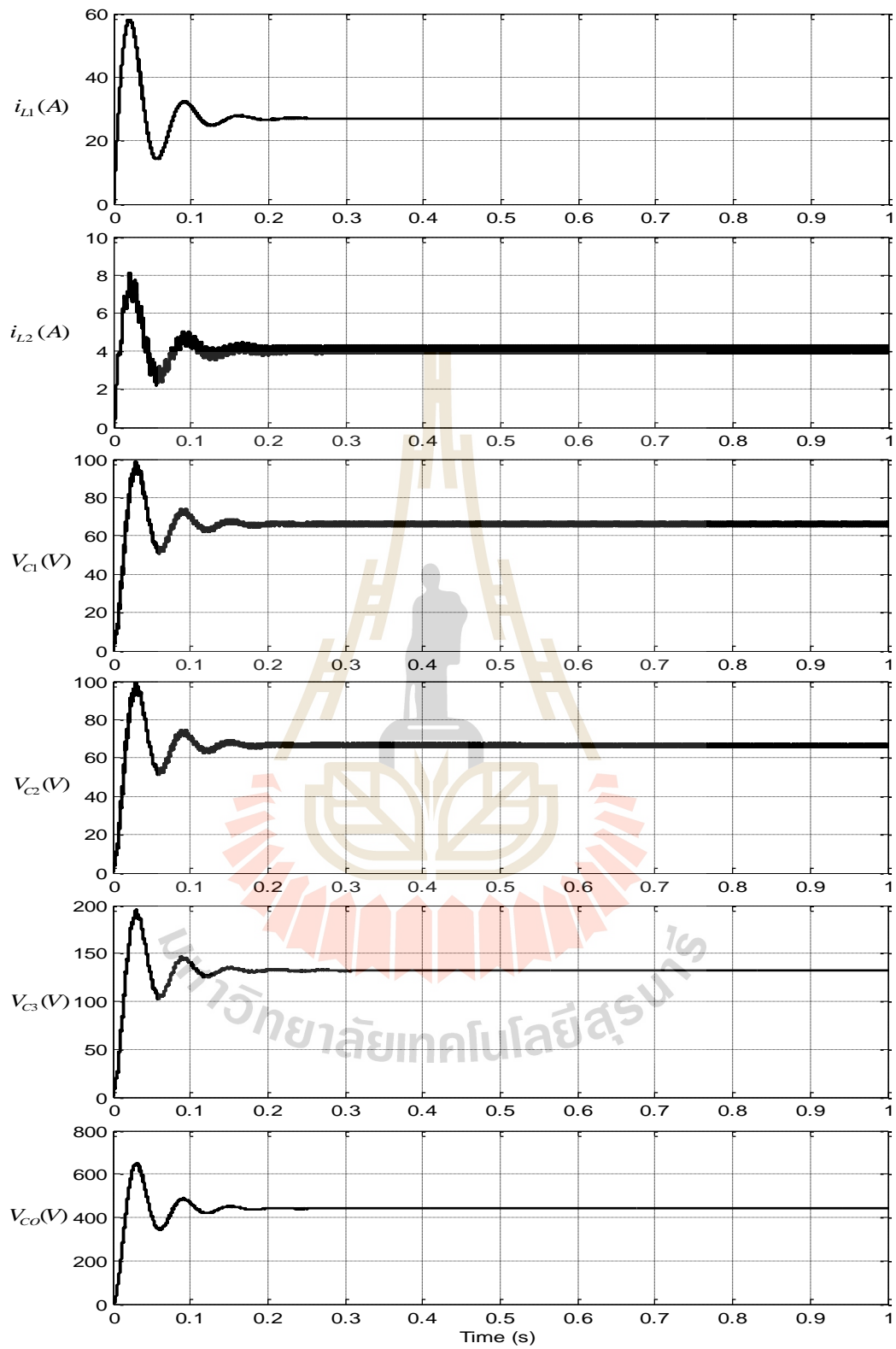
พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	ค่าการกระเพื่อมที่กำหนดใช้ใน ในการออกแบบ	ค่าการกระเพื่อมจาก ผลการจำลองสถานการณ์ (max-min)
i_{L1}	26.97 A	1 % = 0.2697 A	27.05 – 26.89 = 0.16 A
i_{L2}	4.1 A	15 % = 0.615 A	4.29 – 3.88 = 0.41 A
V_{C1}	66.5 V	-	67.1 – 65.09 = 2.01 V
V_{C2}	66 V	-	67.66 – 65.68 = 1.98 V
V_{C3}	132.3 V	0.75 % = 1 V	132.77 – 131.83 = 0.94 V
V_o	441 V	0.23 % = 1 V	441.5 – 440.5 = 1 V

ตัวเหนี่ยวนำ L_1 : การออกแบบเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำมีการกำหนดค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ต้องไม่เกิน 1% ของกระแส i_{L1} ทั้งหมด โดยเลือกตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 mH ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์พบว่าค่ากระแส i_{L1} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีการกระเพื่อมอยู่ที่ 0.16 A คิดเป็น 0.59% ของกระแส i_{L1}

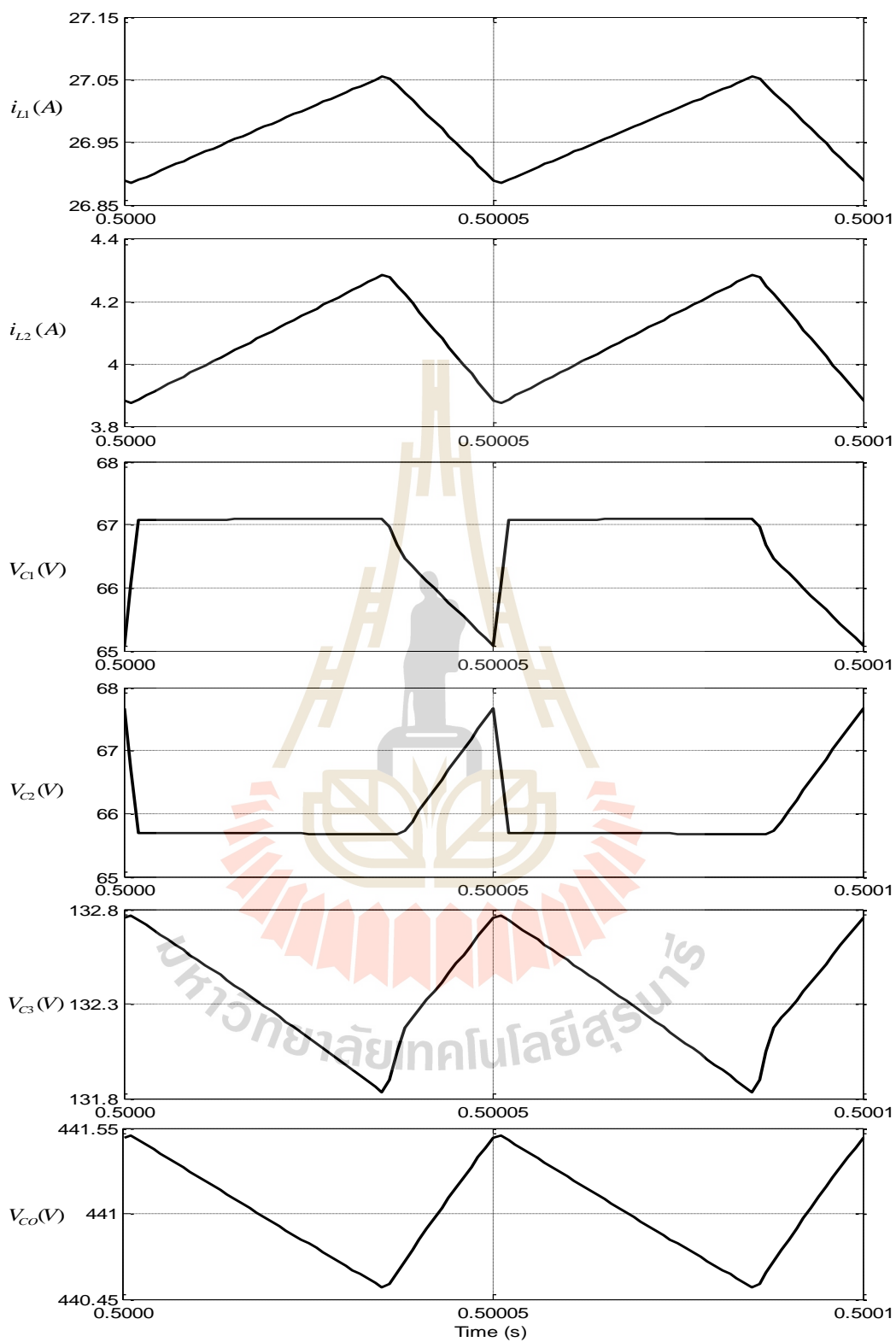
ตัวเหนี่ยวนำ L_2 : การออกแบบเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำมีการกำหนดค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 ต้องไม่เกิน 15% ของกระแส i_{L2} ทั้งหมด โดยเลือกตัวเหนี่ยวนำขนาด 11 mH ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์พบว่าค่ากระแส i_{L2} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 มีการกระเพื่อมอยู่ที่ 0.56 A คิดเป็น 0.67% ของกระแส i_{L2}

ตัวเก็บประจุ C_1, C_2 : การออกแบบเลือกค่าตัวเก็บประจุจาก (3.37) เลือกตัวเก็บประจุทั้งสองให้มีขนาดเท่ากันที่ $100\text{ }\mu\text{F}$ โดยการเลือกค่าพารามิเตอร์นั้นกำหนดให้สอดคล้องกับตัวเก็บประจุ C_3 ด้วย จากผลการจำลองสถานการณ์ดังรูป 3.24 พบว่าเกิดการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองตัวประมาณ 2V ซึ่งเป็นผลที่ยอมรับได้

ตัวเก็บประจุ C_3 : การออกแบบเลือกค่าตัวเก็บประจุจาก (3.39) เลือกตัวเก็บประจุให้มีขนาด $150\text{ }\mu\text{F}$ กำหนดค่าการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_3 ต้องไม่เกิน 1V จากผลการจำลองสถานการณ์ดังรูป 3.24 พบว่าเกิดการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_3 อยู่ที่ประมาณ 0.94V ซึ่งอยู่ภายใต้ของกำหนด คือไม่เกิน 1V



รูปที่ 3.23 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.24 การกระเพื่อมของกระแสและแรงดัน

ตัวเก็บประจุ C_o : การออกแบบเลือกค่าตัวเก็บประจุจาก (3.41) เลือกตัวเก็บประจุให้มีขนาด $40 \mu F$ กำหนดค่าการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_o ต้องไม่เกิน 1V จากผลการจำลองสถานการณ์ดังรูป 3.24 พบว่าเกิดการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_o อยู่ที่ประมาณ 1V ซึ่งอยู่ภายใต้ของกำหนด คือไม่เกิน 1V

จากผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ภายในวงจรแปลงผันกำลัง ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการออกแบบเลือกนั้นมีค่าสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้ข้อกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบเลือกนี้จะถูกนำไปพิจารณาเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์สร้างชุดทดสอบจริงต่อไป

3.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ ได้กล่าวถึงวงจรแปลงผันกำลัง ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น โดยมีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า ซึ่งได้นำเสนอโครงสร้างของวงจร การวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจร และการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในวงจร รวมทั้งประเมินประสิทธิภาพของวงจร จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลัง ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น แสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลัง ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงถึง 20 เท่า ทั้งนี้จะสังเกตว่ากระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงสภาวะชั่วคราวจะมีการพุ่งเกินของกระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุตสูงก่อนข้างมากก่อนการเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งการพุ่งเกินนี้อาจส่งผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรเกิดความเสียหาย ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ $400 V_{dc}$ และให้มีการพุ่งเกินของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตเพียงเล็กน้อยจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันกำลัง ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นจะนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 4

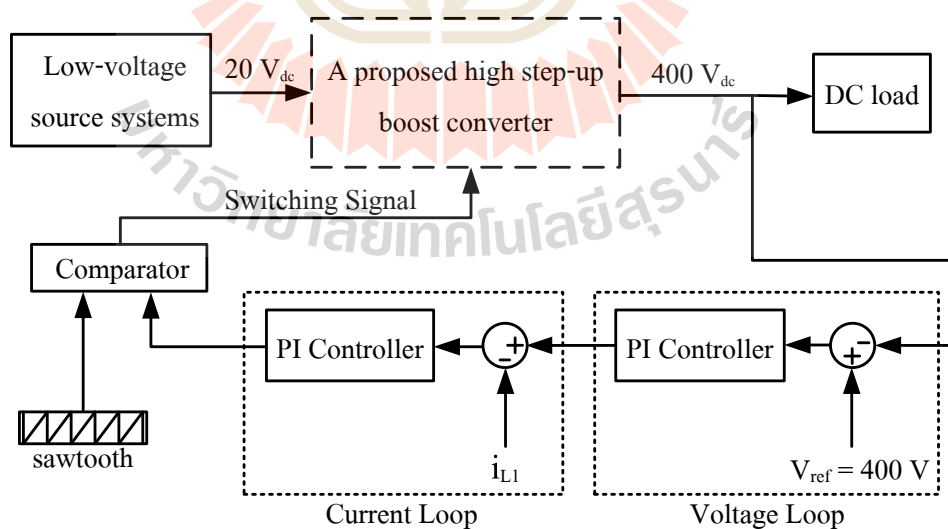
การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

4.1 บทนำ

จากบทที่ผ่านมาได้นำเสนอ การวิเคราะห์หลักการทำงาน และออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ สำหรับตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น รวมถึงการจำลองสถานการณ์เมื่อสวิตช์ทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นขณะไม่มีตัวควบคุม โดยมีแรงดันอินพุตเป็น $20 V_{dc}$ ซึ่งที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง $441 V_{dc}$ เป็นอัตราขยายแรงดันประมาณ 22 เท่า ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ต้องการวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ $400 V_{dc}$ เพื่อทำหน้าที่เสมือนแรงดันกระแสตรงเชื่อมต่อ (DC-link voltage) ให้กับอินเวอร์เตอร์หนึ่ง เฟสที่ต้องการแรงดันกระแสตรงที่มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ และจากการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นขณะไม่มีตัวควบคุมใน บทที่ผ่านมา กระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นจะมีการพุ่งเกินเกิดขึ้นในสภาวะชั่วคราว ซึ่งการพุ่งเกินของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตในสภาวะคงตัว ในกรณีที่นำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นไปสร้างชุดทดสอบอาจเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในชุดทดสอบ เนื่องจากการพุ่งเกินของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องทำการควบคุมกระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุตไม่ให้มีการพุ่งเกินสูงเกิดขึ้นด้วย โดยเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นให้คงที่ หลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นในสภาวะแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง และสภาวะโหลดตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอ รายละเอียดจะนำเสนอดังต่อไปนี้

4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

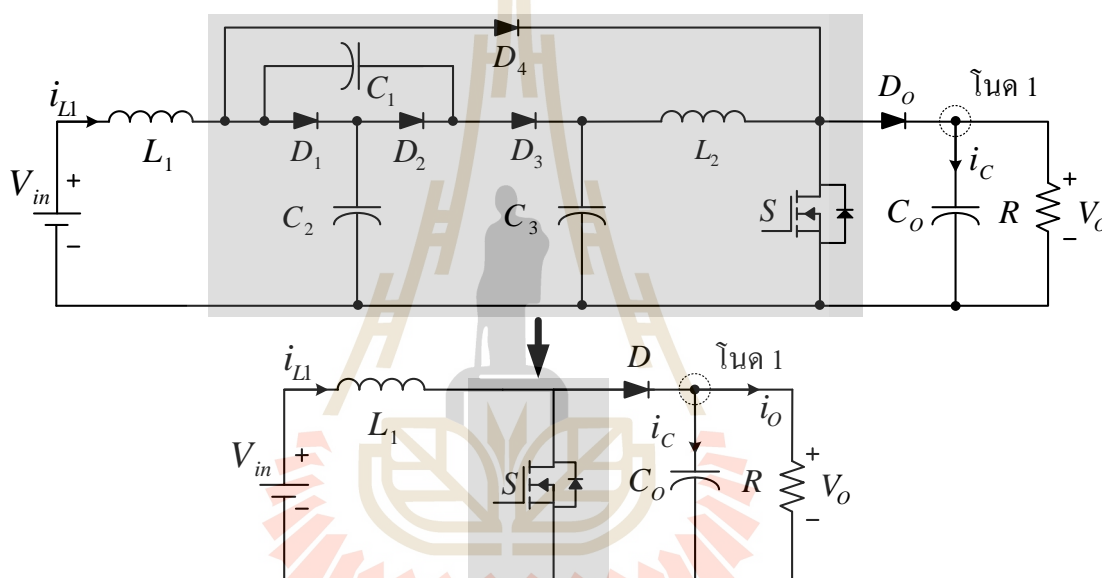
โครงสร้างการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงดังรูปที่ 4.1 เป็นการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่ที่ 400 V_{dc} จากระบบพลังงานทดแทนที่เป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันต่ำ โดยแรงดันอินพุตประมาณ 20 V_{dc} การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นนั้น จะสร้างตัวควบคุมพีไอสำหรับลูประดันและลูประแส เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมสำหรับเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (sawtooth) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของสวิตช์กำลัง ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการเปรียบเทียบจะถูกส่งไปยังสวิตช์กำลังเพื่อสั่งให้สวิตช์กำลังทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้า (D) ที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไออย่างง่าย โดยอาศัยแนวทางการออกแบบที่ได้จากวิธีการออกแบบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน ดังนั้นหัวข้อนี้ จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอจากโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมลูประดัน และการออกแบบตัวควบคุมลูประแส สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

4.2.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูประแรงดัน (Voltage Controller Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูประแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ได้อาศัยการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูประแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน ทั้งนี้จะทำการเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม เพื่อพิจารณาเทียบเคียงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูประแรงดัน การเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูประแรงดัน

พิจารณาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$i_{L1}(t) = i_c(t) + i_o(t)$$

$$C_o \frac{dv_o(t)}{dt} = (1 - d(t))i_{L1}(t) - \frac{V_o(t)}{R} \quad (4.1)$$

จาก (4.1) พิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่เป็นศูนย์

$$C_o \frac{dv_o(t)}{dt} = i_{L1}(t) - \frac{V_o(t)}{R} \quad (4.2)$$

จาก (4.2) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังนี้

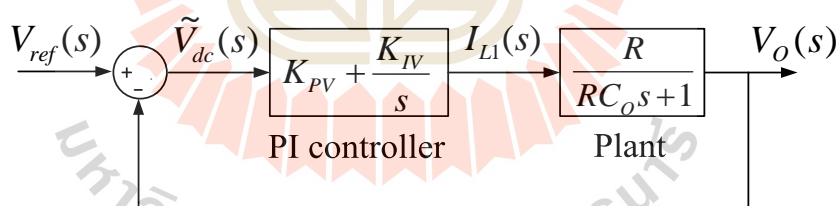
$$C_o s V_o(s) = I_{L1}(s) - \frac{V_o(s)}{R} \quad (4.3)$$

ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลานต์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ในส่วนของการควบคุมแรงดัน (4.4) สังเกตว่าตัวเก็บประจุ C_o และโหลดตัวต้านทาน R เป็นพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญส่งผลต่อการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจร

$$\frac{V_o(s)}{I_{L1}(s)} = \frac{R}{RC_o s + 1} \quad (4.4)$$

จากสมการตัวควบคุมพีไอที่อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (4.5) จะได้แผนภาพการควบคุมแรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงดังรูปที่ 4.3

$$G_{CV}(s) = K_{PV} + \frac{K_{IV}}{s} \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.3 แผนภาพการควบคุมลูปแรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพที่แสดงดังรูปที่ 4.3 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอในลูปแรงดัน

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s} \right) \left(\frac{R}{RC_o s + 1} \right)}{1 + \left(\frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s} \right) \left(\frac{R}{RC_o s + 1} \right)} \quad (4.6)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_{pV}Rs + K_{IV}R}{s^2 + \left(\frac{K_{pV}R + 1}{RC_o}\right)s + \frac{K_{IV}R}{RC_o}} \quad (4.7)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{pV} และ K_{IV} ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปแรงดัน จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดในสมการที่ (4.7) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานในสมการที่ (4.8)

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.8)$$

โดยค่าความถี่ธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ $\omega_n = \frac{1}{RC}$ rad/s 4 และค่าอัตราการหน่วง $\zeta = 1$

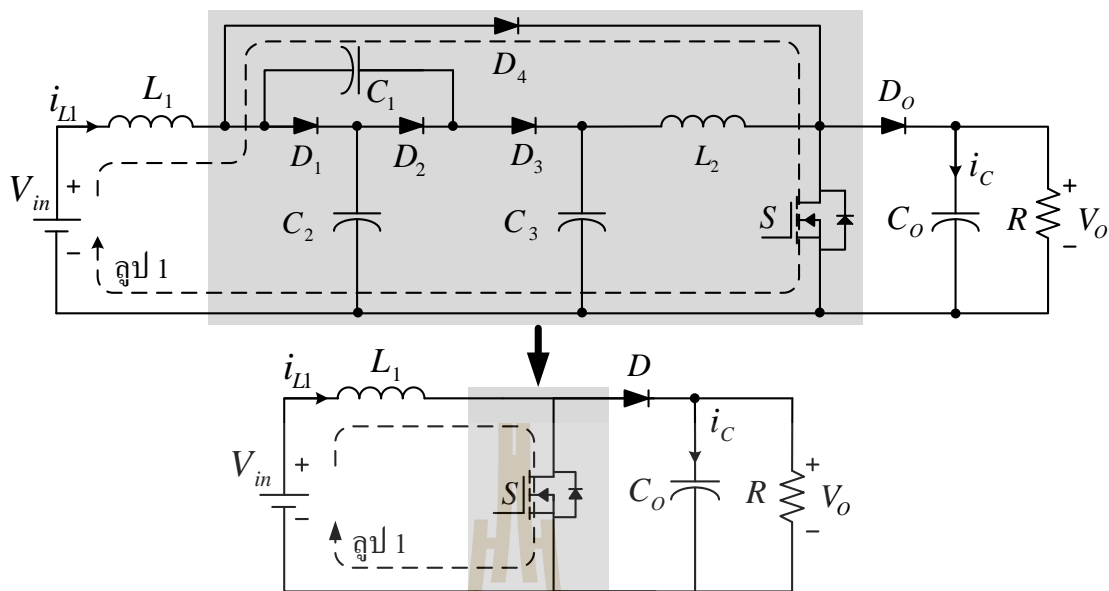
เพื่อให้การตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤต (critically damped response) สำหรับการออกแบบให้การตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤตเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีการพุ่งเกินเกิดขึ้น ซึ่งการพุ่งเกินของแรงดันอาจส่งผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรเกิดความเสียหายได้ในกรณีนำไปทดสอบกับชุดทดสอบ ความสัมพันธ์ในการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการควบคุมลูปแรงดันดังสมการ (4.9) และ (4.10)

$$K_{pV} = 2\zeta\omega_n C_o - \frac{1}{R} \quad (4.9)$$

$$K_{IV} = \omega_n^2 C_o \quad (4.10)$$

4.2.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอลูปกระแส (Current Controller Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น จะทำการออกแบบคล้ายกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปแรงดัน คือทำการเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม เพื่อพิจารณาเทียบเคียงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปกระแส ซึ่งการเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอดูปกระแส

พิจารณาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) พิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{in}(t) = (1 - d(t))V_o(t) + V_{L1}(t)$$

$$L_1 \frac{di_{L1}(t)}{dt} = V_{in}(t) - (1 - d(t))V_o(t) \quad (4.11)$$

พิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่เป็นศูนย์ จะได้ (4.12)

$$L_1 \frac{di_{L1}(t)}{dt} = V_{in}(t) - V_o(t) \quad (4.12)$$

จาก (4.12) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังนี้

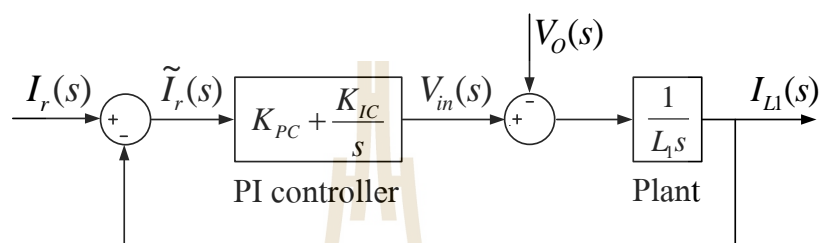
$$L_1 s I_{L1}(s) = V_{in}(s) - V_o(s) \quad (4.13)$$

จากสมการ (4.13) ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลานต์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ในส่วนของการควบคุมกระแส ดังสมการ (4.14)

$$\frac{I_{L1}(s)}{V_{in}(s) - V_o(s)} = \frac{1}{L_1 s} \quad (4.14)$$

จากสมการตัวควบคุมฟีดแบ็คที่อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (4.15) จะได้แผนภาพการควบคุม กระแสด้วยตัวควบคุมฟีดแบ็ค แสดงดังรูปที่ 4.5

$$G_{CC}(s) = K_{PC} + \frac{K_{IC}}{s} \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.5 แผนภาพการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมฟีดแบ็ค

จากแผนภาพที่แสดงดังรูปที่ 4.5 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบ ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมฟีดแบ็คในรูปกระแส

$$\frac{I_{L1}(s)}{I_r(s)} = \frac{\left(\frac{K_{PC}s + K_{IC}}{s}\right)\left(V_{in}\right)\left(\frac{1}{L_1s}\right)}{1 + \left(\frac{K_{PC}s + K_{IC}}{s}\right)\left(V_{in}\right)\left(\frac{1}{L_1s}\right)} \quad (4.16)$$

$$\frac{I_{L1}(s)}{I_r(s)} = \frac{K_{PC}V_{in}s + K_{IC}V_{in}}{s^2 + K_{PC}\left(\frac{V_{in}}{L_1}\right)s + K_{IC}\left(\frac{V_{in}}{L_1}\right)} \quad (4.17)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} ของตัวควบคุมฟีดแบ็คสำหรับรูปกระแส จะอาศัย การเทียบสัมประสิทธิ์เช่นเดียวกับรูปแรงดัน โดินจะเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนาม ลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (4.17) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่าย โอนอันดับสองมาตรฐาน (4.18)

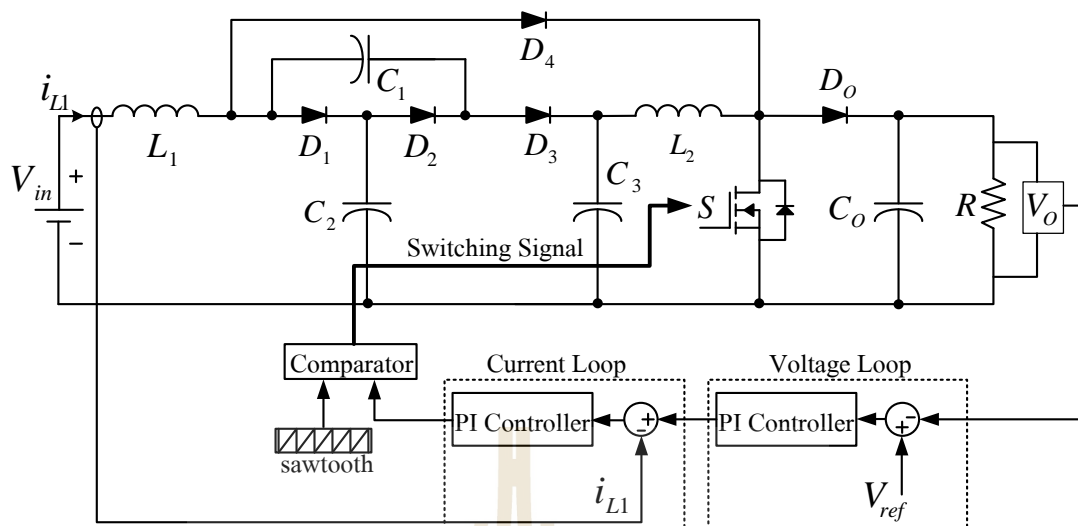
$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_{ni}^2} \quad (4.18)$$

ค่าความถี่ธรรมชาติของลูกระแส โดยปกติลูกระแสจะมีความเร็วมากกว่าลูประดังประมาณ 4 เท่า เพื่อให้ลูกระแสได้คำนวณค่าผลตอบแทนของระบบในสถานะคงตัวก่อนจะเข้าสู่การคำนวณใหม่ ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติของลูกระแส มีค่าเท่ากับ $\omega_{ni} = N\omega_n$ rad/s โดยค่า N คือจำนวนเท่าของความถี่ธรรมชาติที่ลูกระแสทำงานต่างจากลูประดัง จากนั้นทำการเลือกค่า N ที่เหมาะสม โดยการเลือกค่า N จะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับผลตอบแทนของระบบ ดังนั้นจะเลือกใช้ N เท่ากับ 100 ซึ่งที่ค่า N ดังกล่าวค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับผลตอบแทนของระบบจะอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ส่วนค่าอัตราการหน่วงเลือกใช้ $\zeta = 1$ ทำให้ผลตอบแทนของระบบเป็นแบบหน่วงวิกฤต (critically damped response) เช่นเดียวกับลูประดังเพื่อไม่ให้ผลตอบแทนของระบบมีการพุ่งเกินเกิดขึ้น ซึ่งการพุ่งเกินของกระแสอาจส่งผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรเช่นกัน ความสัมพันธ์ในการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการควบคุมลูกระแสดังสมการ (4.19) และ (4.20)

$$K_{PC} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L_1}{V_{in}} \quad (4.19)$$

$$K_{IC} = \frac{\omega_{ni}^2 L_1}{V_{in}} \quad (4.20)$$

จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้งลูประดัง และลูกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม สามารถนำตัวควบคุมพีไอที่ทำการออกแบบมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น โดยโครงสร้างภาพรวมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเมื่อประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ คือ ตัวเหนี่ยวนำ L , ตัวเก็บประจุ C_o และโหลดตัวต้านทาน R เช่นเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.6 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์การควบคุมที่โวลจเจอร์แปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ทั้งนี้จะมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในจำนวนเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอ แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยค่าพารามิเตอร์ที่มีการปรับเปลี่ยน คือ ตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 ตัวเก็บประจุ C_o และโหลดตัวต้านทาน R

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
V_{in}	แรงดันอินพุต	20 V
L_1, L_2	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH
C_1, C_2, C_o	ตัวเก็บประจุ	100 μ F
C_3	ตัวเก็บประจุ	150 μ F
R	โหลดตัวต้านทาน	320 Ω
f_{sw}	ความถี่สวิตช์	20 kHz

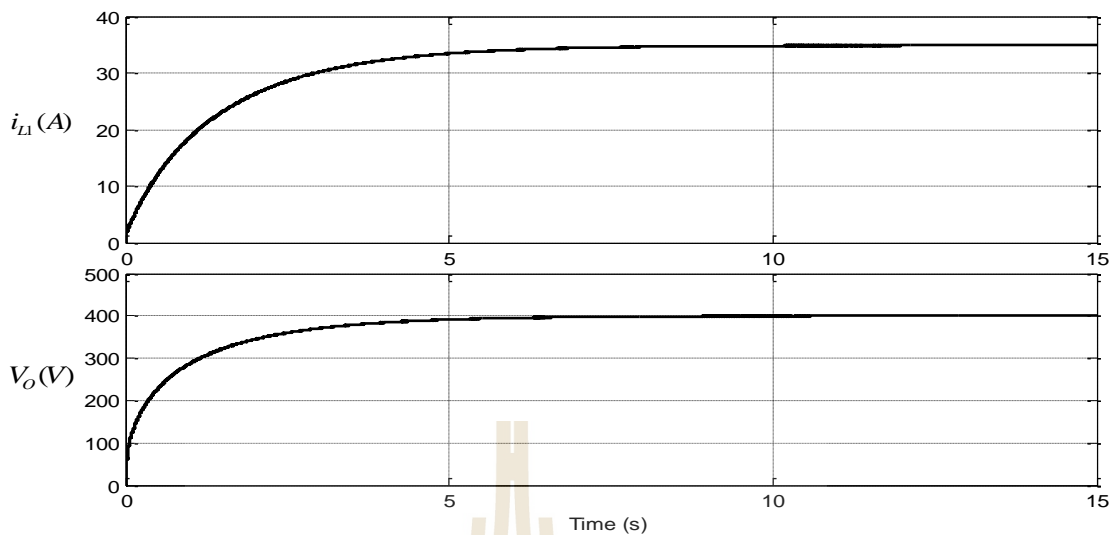
หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สำหรับคำนวณเพื่อ ออกแบบตัวควบคุมพีไอแล้ว ทำการคำนวณเพื่อหาค่าตัวควบคุมพีไอทั้งลูบแรงดัน และลูบกระแส โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้งลูบแรงดัน และลูบกระแส แสดงดังตารางที่ 4.2 จากนั้นทำ การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองของระบบ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ พัฒนาขึ้น

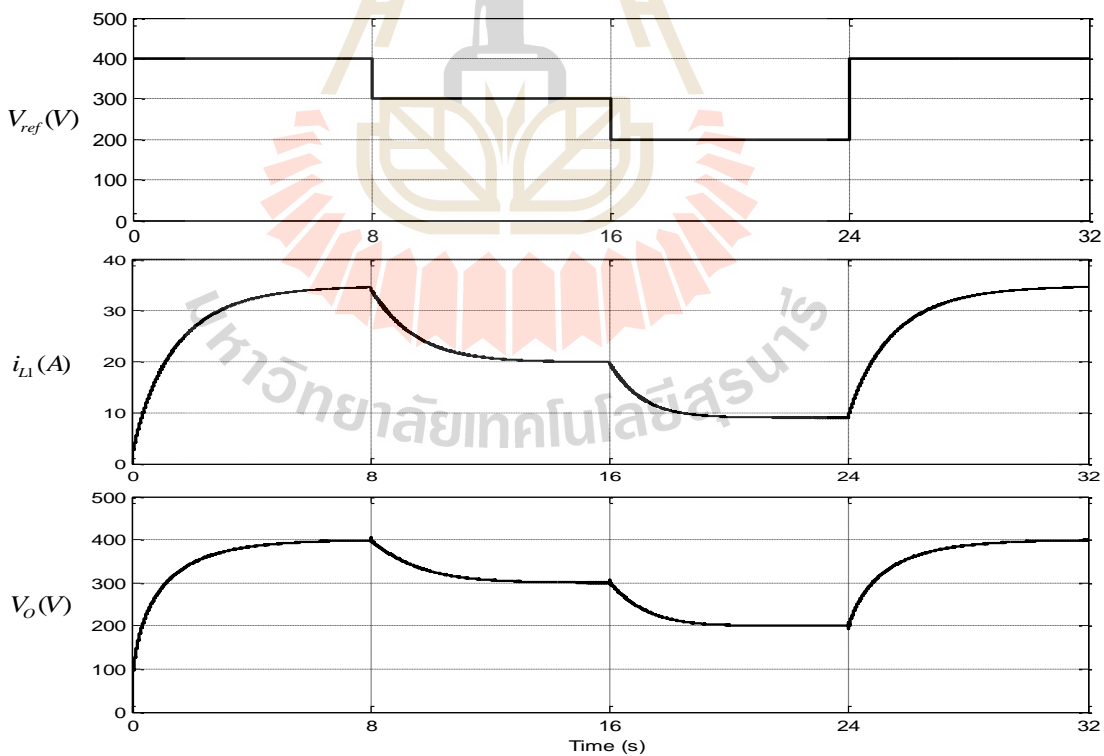
สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
ω_n	31.25
K_{PV}	0.003125
K_{IV}	0.09766
ω_{ni}	3125
K_{PC}	4.6875
K_{IC}	7327.22

4.3 ผลการจำลองสถานการณ์

ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเมื่อมีตัวควบคุม พีไอ เพื่อพิจารณาสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับตัว ควบคุมพีไอ โดยให้แรงดันอินพุตเป็น 20 V_{dc} และแรงดันเอาต์พุตเป็น 400 V_{dc} เพื่อตรวจสอบว่าตัว ควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบมานั้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 400 V_{dc} ได้หรือไม่ ทั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ผลการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันจากแรงดันอินพุต 20 V_{dc} ให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ 400 V_{dc} เมื่อถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบมา สังเกตว่าในช่วงเวลาสถานะช่วงครุไม่มีการพุ่ง เเกินของทั้งกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบตัว ควบคุมพีไอ โดยกระแสอินพุต i_{LI} อยู่ที่ประมาณ 35 A และแรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ 400 V_{dc} ที่สถานะ อยู่ตัว



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น
ร่วมกับตัวควบคุมพีไอ

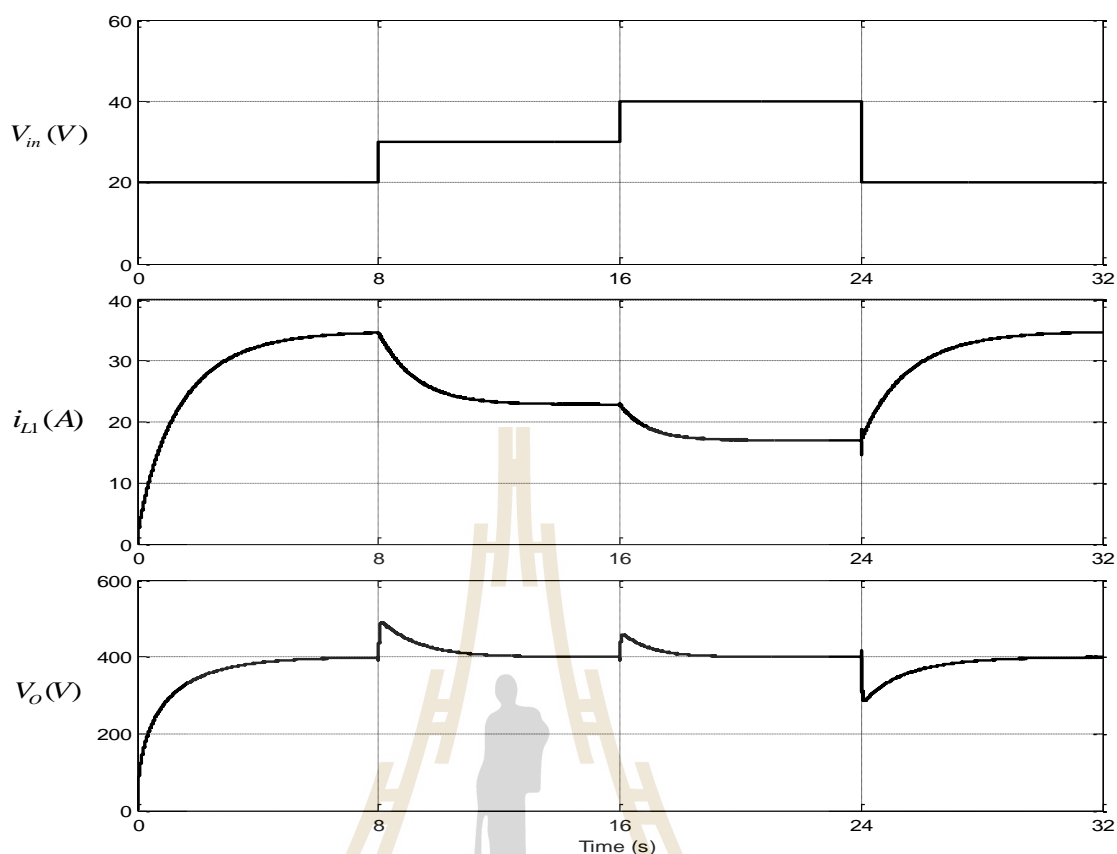


รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง (V_{ref}) เพื่อตรวจสอบตัวควบคุมพีไอที่ได้ ออกแบบมานั้นยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ ผลการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.8

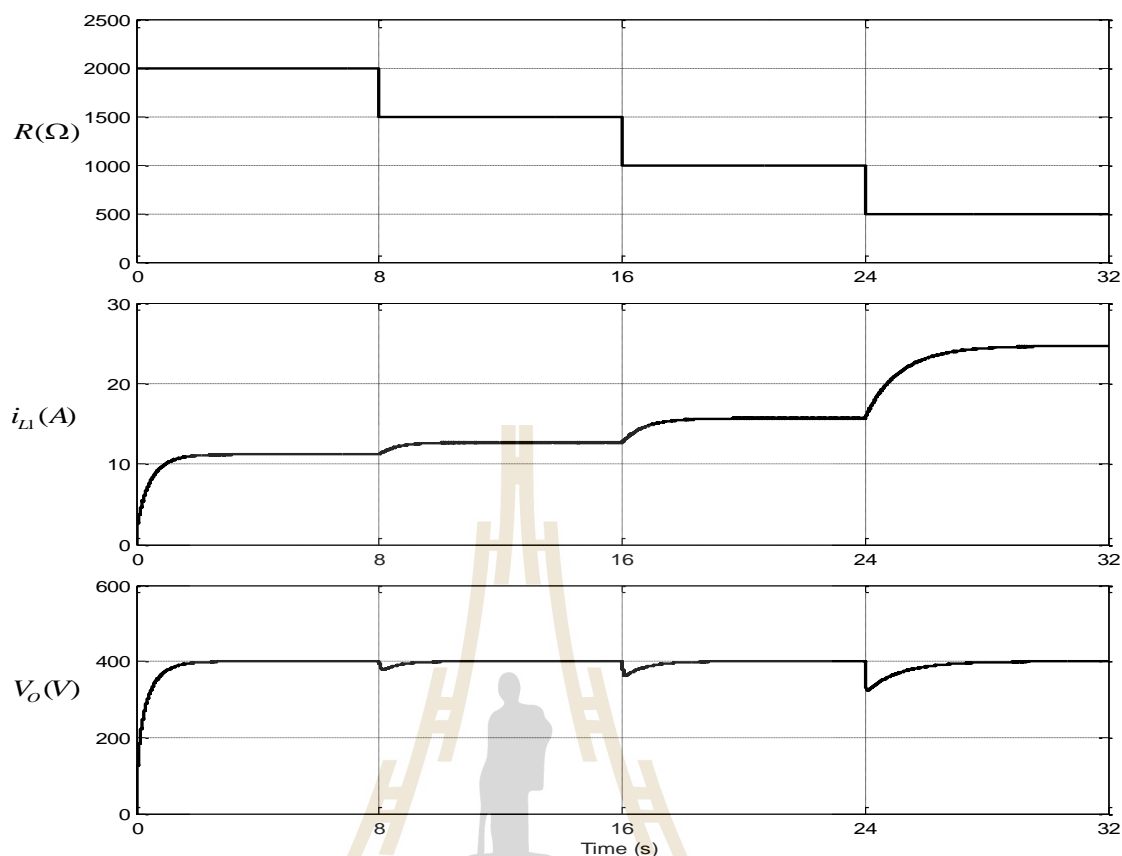
จากผลการจำลองสถานการณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ดังรูปที่ 4.8 สังเกตว่าวินาที ที่ 8 และ 16 กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงลดลงทีละ $100 V_{dc}$ หลังจากนั้นในวินาที ที่ 24 ทำการเพิ่มแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเป็น $400 V_{dc}$ ผลจากการจำลองสถานการณ์ได้ยืนยันว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบอย่างง่าย โดยอาศัยแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน ตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ อีกทั้งยังไม่มี การฟุ้งเกินของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตเกิดขึ้นตามข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วย ส่วนกระแสอินพุต i_{LL} นั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรเมื่อได้รับแรงดันอินพุต $20 V_{dc}$ เพื่อเป็นการยืนยันความสามารถของตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบมา จะทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุตให้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง $20-40 V_{dc}$ โดยกำหนดค่าแรงดันอินพุตเริ่มต้นที่ $20 V_{dc}$ จากนั้นทำการเพิ่มระดับแรงดันอินพุตครั้งละ $10 V_{dc}$ ในวินาทีที่ 8 และ 16 จากนั้นกำหนดให้แรงดันอินพุตลดลง $20 V_{dc}$ ในวินาทีที่ 24 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันอินพุต วงจรควบคุมพีไอยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ $400 V_{dc}$ ได้ ซึ่งช่วงเวลาที่แรงดันอินพุตเพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุตจะเกิดการฟุ้งเกิน เนื่องจากได้รับแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้น ก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว และเกิดแรงดันตกในช่วงเวลาที่ระดับแรงดันอินพุตลดลงก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ส่วนกระแสอินพุต i_{LL} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_L จะเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันอินพุต คือเมื่อแรงดันอินพุตต่ำค่ากระแสอินพุตจะสูง และเมื่อแรงดันอินพุตสูงค่ากระแสอินพุตจะต่ำ ตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอ เมื่อค่าแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง

นอกจากการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุตแล้ว การตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอยังสามารถทำได้ โดยการปรับเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน ซึ่งเมื่อโหลดตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตก็มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นให้แรงดันอินพุตเป็น $20 V_{dc}$ กำหนดให้โหลดตัวต้านทานเริ่มต้นที่ 2000Ω จากนั้นกำหนดให้โหลดตัวต้านทานลดลงครั้งละ 500Ω ทุก ๆ 8 วินาที จนกระทั่ง โหลดตัวต้านทานอยู่ที่ 500Ω ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อโหลดตัวต้านทานลดลงวงจรควบคุมพีไอยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ $400 V_{dc}$ ได้ และช่วงเวลาที่โหลดตัวต้านทานลดลง จะเกิดแรงดันตกในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน ส่วนกระแสอินพุต i_{L1} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 จะเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดตัวต้านทานมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต



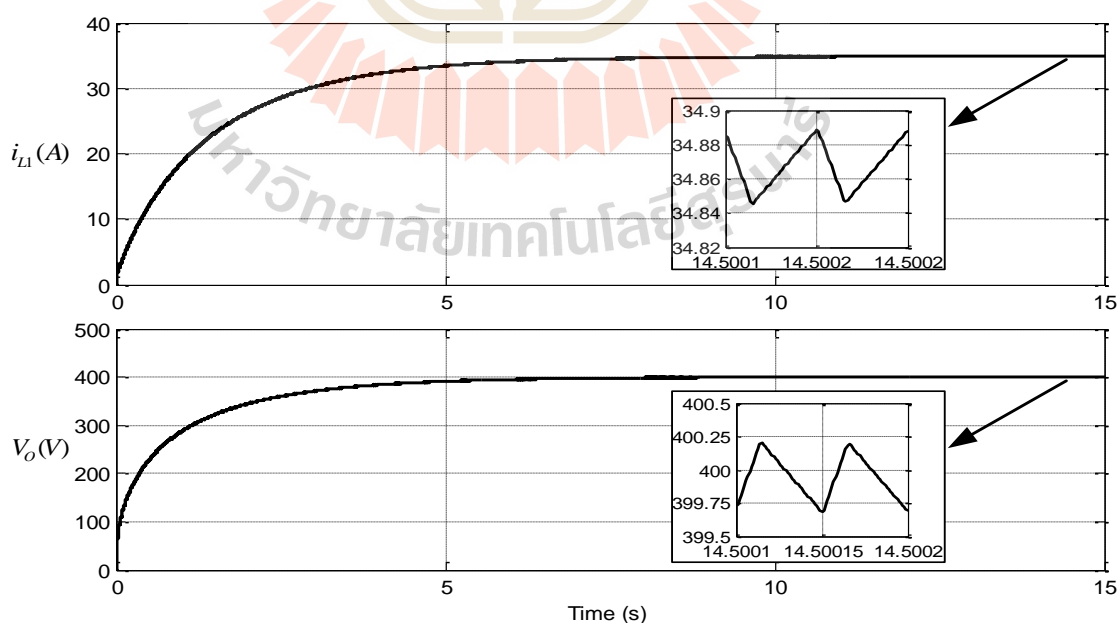
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอ เมื่อโหลดตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง

จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นให้มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ปรับเปลี่ยนแสดงดังตารางที่ 4.3 เป็นการลดและเพิ่มขนาดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 30 % ซึ่งการลดและเพิ่มขนาดของค่าพารามิเตอร์ 30 % นั้น ค่าพารามิเตอร์ถูกปรับเปลี่ยนให้น้อยลงหรือเพิ่มขนาดขึ้นอย่างชัดเจน จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอชุดเดิม ดังตาราง 4.2 เพื่อสังเกตว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นมีการเปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้หรือไม่

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการปรับเปลี่ยน

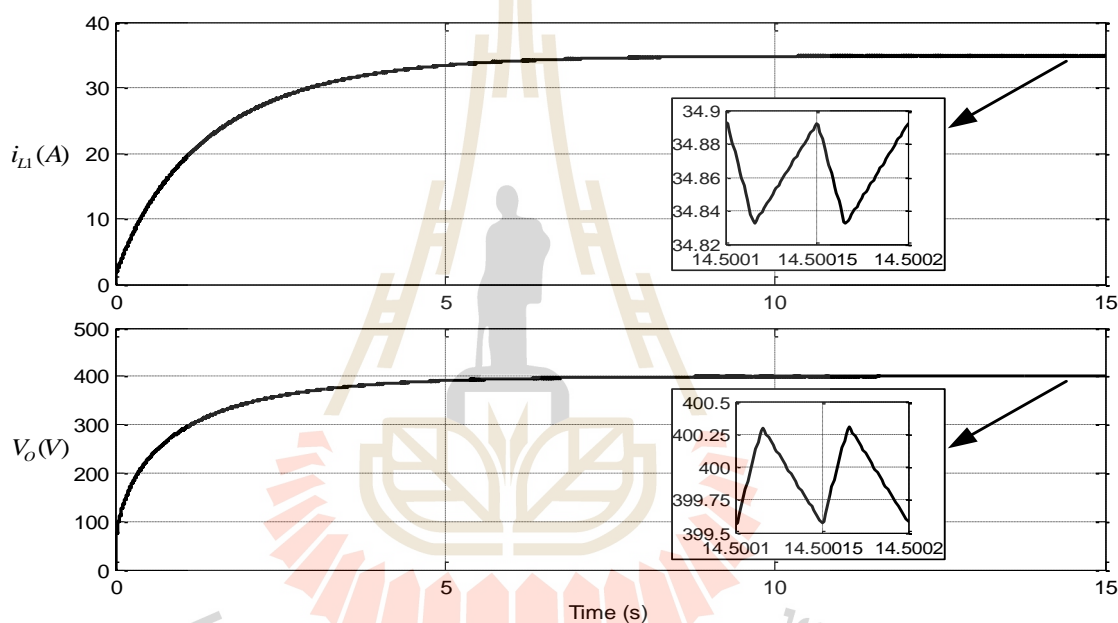
สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด (100%)	ขนาดลดลง (30%)	ขนาดเพิ่มขึ้น (30%)
V_{in}	แรงดันอินพุต	20 V		
L_1, L_2	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH	10.5 mH	19.5 mH
C_1, C_2, C_o	ตัวเก็บประจุ	100 μ F	70 μ F	130 μ F
C_3	ตัวเก็บประจุ	150 μ F	105 μ F	195 μ F
R	โหลดตัวต้านทาน	320 Ω		
f_{sw}	ความถี่สวิตช์	20 kHz		

จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นยังไม่มีมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกำหนดให้แรงดันอินพุตเป็น 20 V_{dc} และกำหนดแรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ 400 V_{dc} ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.11 พบว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ 400 V_{dc} ได้ ส่วนกระแสอินพุต i_{L1} มีค่าประมาณ 34.87 A



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อขนาดของพารามิเตอร์ยังไม่มีมีการเปลี่ยนแปลง

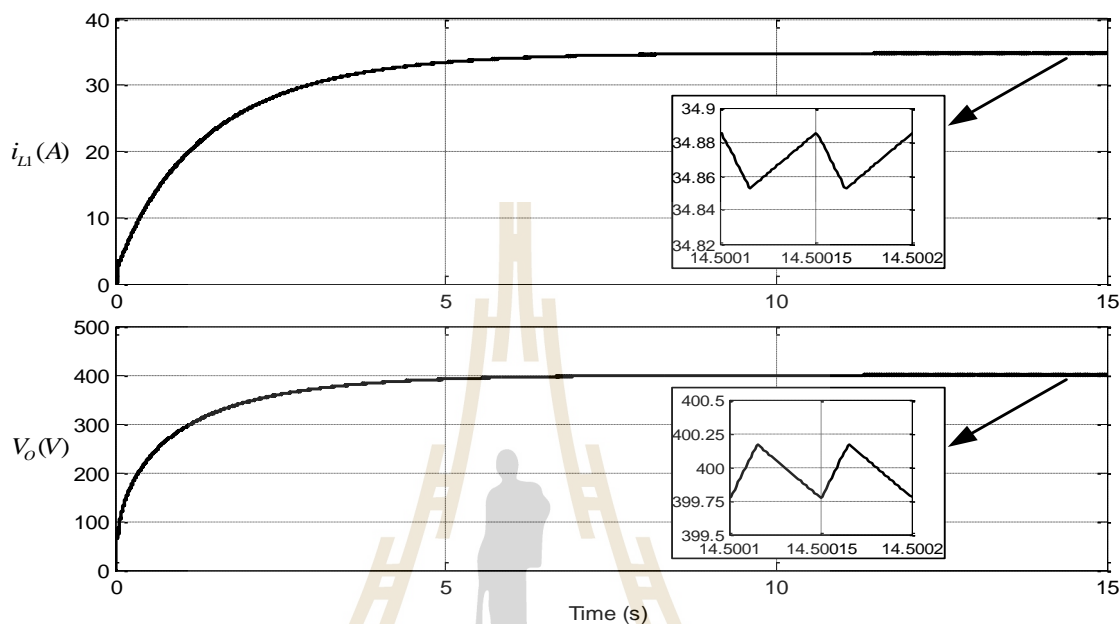
จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ โดยลดค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นลง 30 % ทั้งนี้กำหนดให้แรงดันอินพุตเป็น 20 V_{dc} และกำหนดแรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ 400 V_{dc} ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อลดขนาดพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นลง 30% แสดงได้ดังรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตัวควบคุมพีไอยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ 400 V_{dc} ได้ ส่วนกระแสอินพุต i_{L1} มีค่าประมาณ 34.86 A ซึ่งทั้งกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงคือ มีการกระเพื่อมของทั้งกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดของค่าพารามิเตอร์มีขนาดลดลงนั่นเอง



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อลดขนาดของพารามิเตอร์ลง 30 %

จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเพิ่มขนาดพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นให้สูงขึ้น 30% แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตัวควบคุมพีไอยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ 400 V_{dc} ได้ และกระแสอินพุต i_{L1} มีค่าประมาณ 34.87 A ซึ่งค่ากระแสอินพุตทั้งสามกรณีมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยทั้งกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงสลับกับกรณีก่อนหน้านี้คือ มีการกระเพื่อมของทั้งกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตลดลง เนื่องจากขนาดของค่าพารามิเตอร์มีขนาดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การลดหรือเพิ่มขนาดของพารามิเตอร์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ตัว

ควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบอย่างง่าย โดยอ้างอิงการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อเพิ่มขนาดของพารามิเตอร์ขึ้น 30 %

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ซึ่งได้อาศัยหลักการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน เพื่อตรวจสอบถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเมื่อใช้งานร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ทำการออกแบบ ใช้การจำลองสถานการณ์ในสถานะต่าง ๆ เช่น เมื่อค่าแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง โหลดตัวต้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลง และค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นมีการเปลี่ยนแปลง ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าการทำงานของตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบมานั้น สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 400 V_{dc} ได้ แม้วงจรมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะต่าง ๆ การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอนั้นยังสามารถทำตามเงื่อนไขได้ คือควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 400 V_{dc}

บทที่ 5

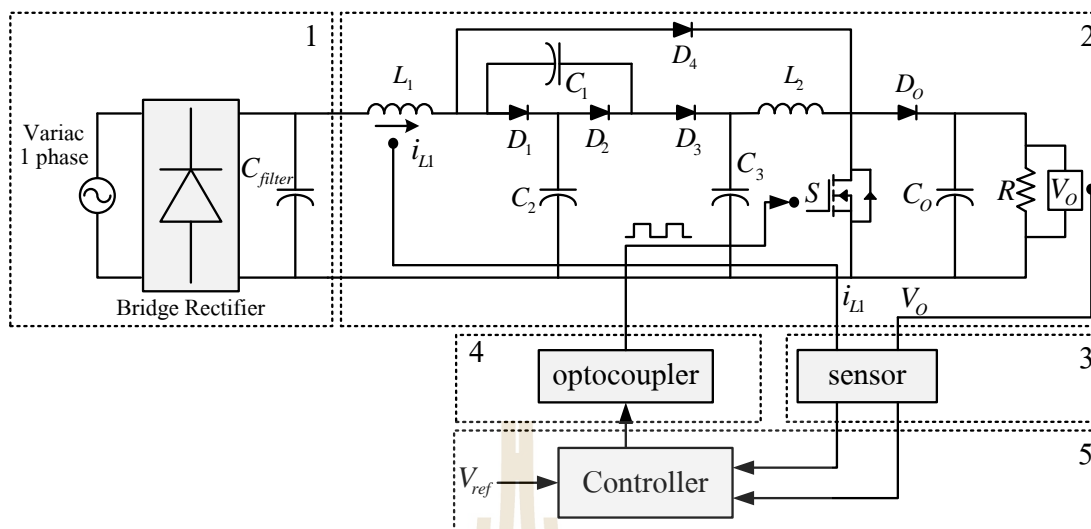
การสร้างชุดทดสอบ

5.1 บทนำ

จากบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้นำเสนอการวิเคราะห์หลักการทำงาน และการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นในสถานะต่าง ๆ เพื่อยืนยันสมรรถนะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นที่สามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันได้สูง 20 เท่า รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์เมื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ $400 V_{dc}$ ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ยืนยันผลการทดสอบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ตัวตรวจจับกระแสอินพุตรวมไปถึงตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคดสัญญาณ และการควบคุมแรงดันเอาต์พุต

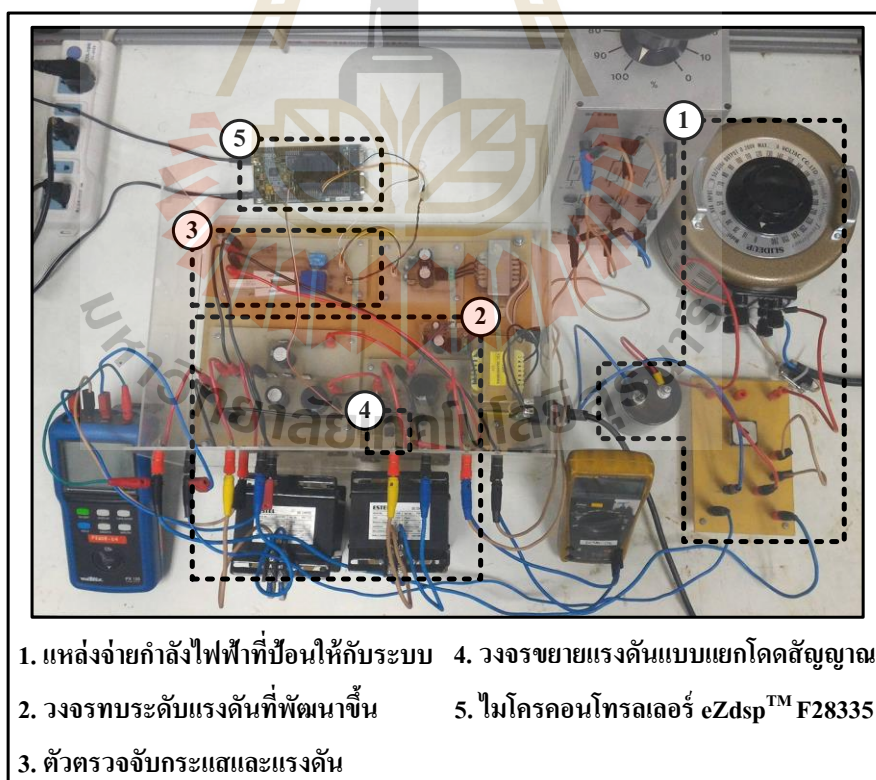
5.2 โครงสร้างของชุดทดสอบ

โครงสร้างของชุดทดสอบที่สร้างขึ้นสามารถแบ่งได้ดังนี้ ส่วนที่ 1 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ส่วนที่ 2 คือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ในส่วนที่ 3 คือตัวตรวจจับ ซึ่งมีตัวตรวจจับกระแสอินพุต i_{L1} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต V_o ที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน R ส่วนที่ 4 เป็นวงจรขยายแรงดันแบบแยกโคดสัญญาณ และส่วนที่ 5 เป็นการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้เป็นตัวควบคุมพีไอทำการประมวลผลเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ซึ่งโครงสร้างของชุดทดสอบที่สร้างขึ้นแบ่งเป็น 5 ส่วนที่สำคัญ แสดงได้ดังรูปที่



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 สำหรับรายละเอียดในการสร้างชุดทดสอบ ได้นำเสนอในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

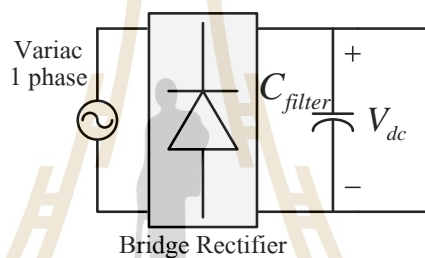


1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ
2. วงจรทบระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น
3. ตัวตรวจจ็ับกระแสและแรงดัน
4. วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคตสัญญาณ
5. ไมโครคอนโทรลเลอร์ eZdsp™ F28335

รูปที่ 5.2 ชุดทดสอบจริงของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

5.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

สำหรับการทดสอบชุดทดสอบนั้น แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่พร้อมใช้งานนั้นมีข้อจำกัดเรื่องพิกัดของกระแสที่ต่ำ ซึ่งสามารถจ่ายกระแสได้ไม่เกิน 6 A ทำให้ความสามารถในการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก จึงจำเป็นต้องสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความสามารถในการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นเพื่อป้อนให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น โดยการออกแบบเพื่อสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 5.3 ประกอบด้วย หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟสที่จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟสเพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนจะนำไปใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันต่ำ



รูปที่ 5.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

งานวิจัยนี้ เลือกใช้หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส (variac) พิกัดแรงดันอยู่ในช่วง 0 - 250 V_{rms} พิกัดกระแส 10 A เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้กับระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 หม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส

โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเป็นวงจรที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายแรงดันต่ำ ประมาณ $20 V_{dc}$ จึงเลือกใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟส 36MT160 ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการแล้วนำมาประยุกต์ใช้เป็นแบบเฟสเดียวต่อกับหม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส ซึ่งมีค่าพิกัดที่สามารถรองรับการใช้งานได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้หม้อแปลงเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟส มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1600 V และพิกัดกระแส 35 A แสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 หม้อแปลงของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟส 36MT160

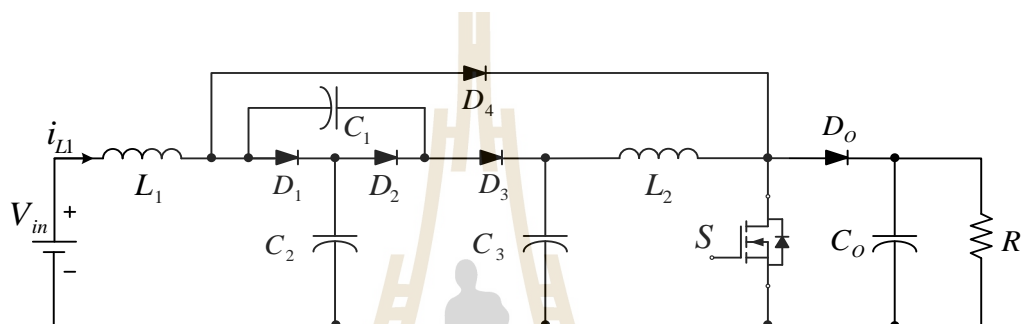
หลังจากได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟสที่ประยุกต์ใช้เป็นแบบเฟสเดียวแล้ว ต่อมาใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่มีการกระเพื่อมไม่สูงมากและใกล้เคียงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าพิกัด $400 V_{dc}$, $2200\mu F$ แสดงได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

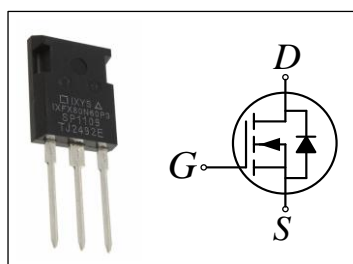
5.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

การสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น โดยการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ ภายในวงจร ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 ตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3, C_o ไดโอดกำลัง D_1, D_2, D_3, D_4, D_o สวิตช์กำลัง S และโหลดตัวต้านทาน R



รูปที่ 5.7 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นจะใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังที่เป็นลักษณะมอดูล ซึ่งจะคำนึงถึงพิกัดของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเป็นสำคัญ โดยค่าพิกัดของกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์มีค่าเท่ากับ 10 A และค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์มีค่าเท่ากับ 400 V ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอดูลของมอสเฟต IXFX80N60P3 เป็นมอสเฟตที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 600 V และค่าพิกัดกระแสเท่ากับ 80 A มอดูลของมอสเฟตดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 มอดูลของมอสเฟตสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

การเลือกตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ต้องคำนึงถึงค่าการกระเพื่อมของกระแส โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งตัวเหนี่ยวนำทั้งสองที่ใช้จะใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเท่ากันคือ 15 mH ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการเพื่อลดรายจ่ายในการซื้อตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาค่อนข้างสูง ทั้งนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำทั้งสองเป็น 15 mH ปรากฏว่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองมีค่าลดลง ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.9 โดยมีขนาด 15 mH พิกัดกระแส 10 A พิกัดแรงดัน 500 V



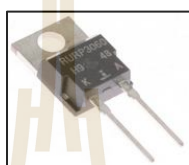
รูปที่ 5.9 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

สำหรับการเลือกตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 , C_3 และ C_o ได้ทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุตัวต่าง ๆ ซึ่งนำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 เช่นกัน โดยมีการเปลี่ยนขนาดของตัวเก็บประจุให้มีขนาดความใกล้เคียงกับตัวเก็บประจุที่มีขายทั่วไป ซึ่งตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 ที่ใช้มีค่าเท่ากันที่พิกัด $100\ \mu\text{F}$, 400 V ส่วนตัวเก็บประจุ C_3 ใช้ที่พิกัด $150\ \mu\text{F}$, 400 V และตัวเก็บประจุ C_o เลือกใช้ที่พิกัด $100\ \mu\text{F}$, 450 V ทั้งนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุตามที่ระบุไว้ ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามปกติ ตัวเก็บประจุต่าง ๆ ที่ใช้ แสดงดังรูปที่ 5.10



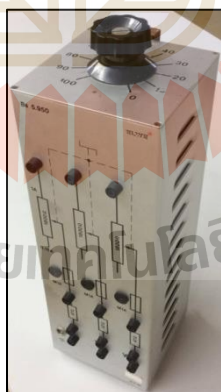
รูปที่ 5.10 ตัวเก็บประจุต่าง ๆ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

การเลือกไดโอดกำลัง D_1, D_2, D_3, D_4 และ D_o นั้นในชุดทดสอบจะใช้ไดโอดกำลังเบอร์เดียวกันทั้งหมด ไดโอดกำลังที่เลือกใช้เบอร์ RURP3060 มีค่าพิกัดกระแส 30 A และพิกัดแรงดัน 600 V เป็นไดโอดกำลังที่มีการฟื้นฟูลย้อนกลับเร็วมาก (Ultrafast Diode) โดยเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery time) อยู่ที่ 60 ns ช่วยให้มีกระแสไฟฟ้าย้อนกลับที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายของการไบอัสตรงเพียงระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งไดโอดกำลังเบอร์ดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติเพียงพอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ไดโอดกำลังที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ไดโอดกำลังที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

ส่วนสุดท้ายของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นคือ โหลดตัวต้านทาน ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้ค่าโหลดตัวต้านทานที่อยู่ในช่วง 2500 - 2000 Ω เพื่อกำหนดให้กระแสอินพุตมีค่าไม่เกิน 10 A เนื่องจากหม้อแปลงปรับแรงดันหนึ่งเฟส (variac) มีค่าพิกัดการจ่ายกระแสสูงสุดที่ 10 A ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าโหลดตัวต้านทานดังกล่าว โดยโหลดตัวต้านทานแสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 โหลดตัวต้านทานสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น

โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปเบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบ

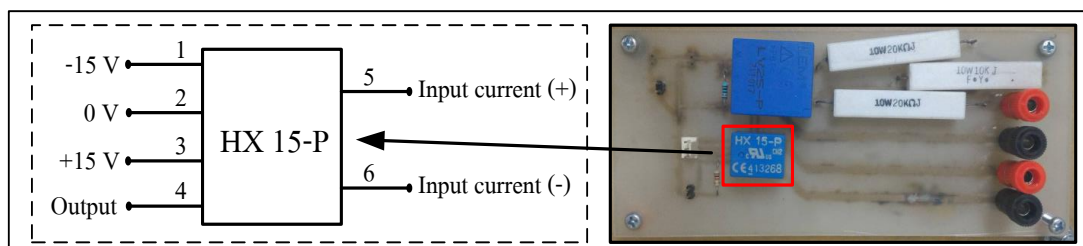
อุปกรณ์	สัญลักษณ์	เบอร์	ขนาด	พิกัด
มอสเฟต	S	IXFX80N60P3	-	80 A, 600 V
ตัวเหนี่ยวนำ	L_1, L_2	-	15 mH	10 A, 500 V
ตัวเก็บประจุ	$C_1, C_2,$	-	100 μ F	400 V
ตัวเก็บประจุ	C_3	-	150 μ F	400 V
ตัวเก็บประจุ	C_o	-	100 μ F	450 V
ไดโอด	D_1, D_2, D_3, D_4, D_o	RURP3060	-	30 A, 600 V
โหลดตัวต้านทาน	R	-	2000 - 2500 Ω	120 W

5.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ

วงจรตรวจจับสัญญาณสร้างขึ้นสำหรับตรวจจับสัญญาณซึ่งจะถูกส่งไปประมวลผลยังชุดควบคุมเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตซ์กำลัง โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณ 2 ตัว คือ ตัวตรวจจับกระแสอินพุต i_{L1} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต V_o

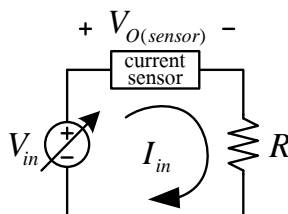
5.5.1 ตัวตรวจจับกระแส

ตัวตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 เลือกใช้ตัวตรวจจับกระแสเบอร์ HX 15-P มีพิกัดการวัดกระแส 15 A โดยงานวิจัยนี้ใช้กระแสอินพุตไม่เกิน 10 A ซึ่งตัวตรวจจับกระแสที่เลือกใช้มีความสามารถเพียงพอ โครงสร้างตัวตรวจจับกระแสเบอร์ HX 15-P แสดงได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 โครงสร้างตัวตรวจจับกระแสเบอร์ HX 15-P

การเปรียบเทียบตัวตรวจับกระแส นั้น ทำการสร้างวงจรไฟฟ้าขึ้นมาแสดงดังรูปที่ 5.14 เพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแส I_{in} ที่ไหลผ่านตัวตรวจับกระแส โดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจับกระแส $V_{O(sensor)}$ เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรงต่อไป

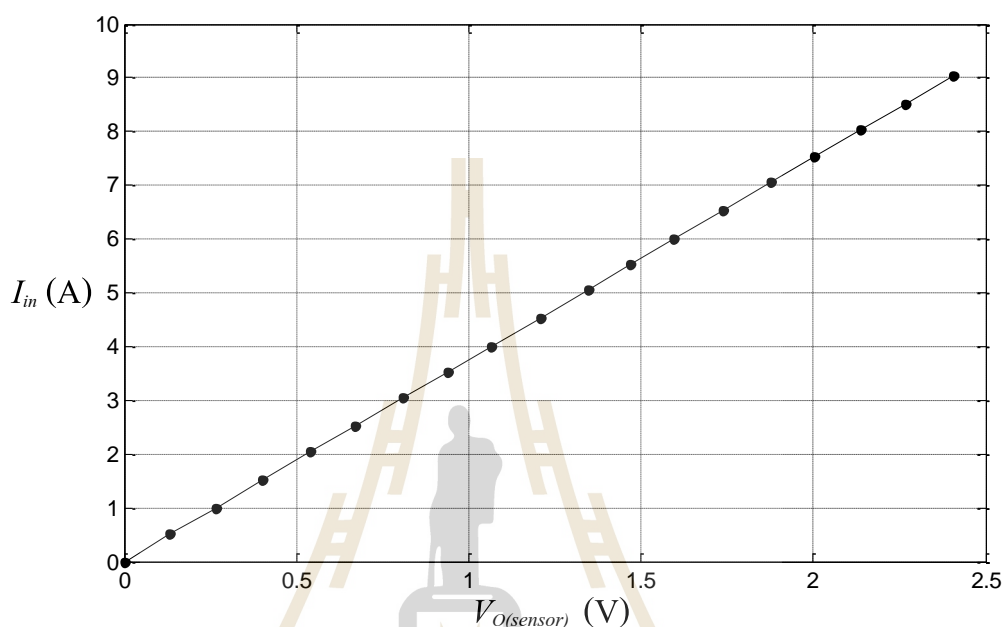


รูปที่ 5.14 วงจรทดสอบเพื่อสร้างหาความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจับกระแส

ตารางที่ 5.2 ตารางการทดสอบวงจรตัวตรวจับกระแสไฟฟ้า

I_{in} (A)				$V_{O(sensor)}$ (V)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0	0	0	0
0.489	0.501	0.522	0.504	0.129	0.132	0.138	0.133
0.975	0.996	1.033	1.001	0.258	0.264	0.274	0.265
1.469	1.530	1.517	1.505	0.390	0.406	0.403	0.400
1.989	2.077	2.036	2.034	0.529	0.552	0.541	0.541
2.551	2.544	2.488	2.527	0.678	0.676	0.662	0.672
2.977	3.084	3.069	3.043	0.792	0.820	0.816	0.809
3.552	3.517	3.522	3.530	0.945	0.936	0.937	0.939
4.011	3.899	4.102	4.004	1.067	1.037	1.092	1.065
4.561	4.517	4.529	4.536	1.214	1.202	1.205	1.207
5.088	5.023	5.062	5.058	1.354	1.337	1.347	1.346
5.571	5.489	5.496	5.519	1.483	1.461	1.463	1.469
6.024	5.955	5.987	5.989	1.604	1.585	1.594	1.594
6.518	6.570	6.512	6.533	1.735	1.749	1.734	1.739
7.029	7.098	7.056	7.061	1.871	1.889	1.878	1.879
7.480	7.523	7.561	7.521	1.991	2.003	2.013	2.002
8.090	7.960	8.054	8.035	2.154	2.119	2.144	2.139
8.515	8.569	8.449	8.511	2.267	2.282	2.250	2.266
9.112	8.996	9.005	9.038	2.426	2.395	2.398	2.406

ขั้นตอนการทดสอบนั้น ทำการปรับแรงดันอินพุต V_{in} เพื่อให้กระแสที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้น โดยกำหนดโหลดตัวต้านทานเป็น 20Ω ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 จากตารางที่ 5.2 สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.15



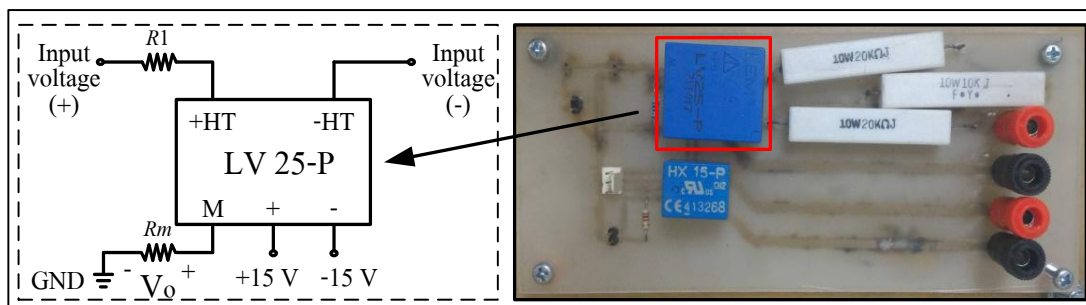
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ

จากรูปที่ 5.15 สามารถหาสมการเส้นตรงของความสัมพันธระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ แสดงได้ดังนี้

$$I_{in} = 3.7536 V_{O(sensor)} + 0.0049 \quad (5.1)$$

5.5.2 ตัวตรวจจับแรงดัน

สำหรับตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต เลือกใช้ตัวตรวจจับแรงดันเบอร์ LV 25-P มีพิกัดแรงดัน 500 V โดยงานวิจัยนี้มีแรงดันเอาต์พุตประมาณ 400 V ซึ่งตัวตรวจจับแรงดันดังกล่าวมีความคุณสมบัติเพียงพอในการตรวจจับแรงดัน ที่อยู่ในช่วง 0 – 500 V โครงสร้างตัวตรวจจับแรงดันเบอร์ LV 25-P แสดงได้ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 โครงสร้างตัวตรวจจับแรงดันเบอร์ LV 25-P

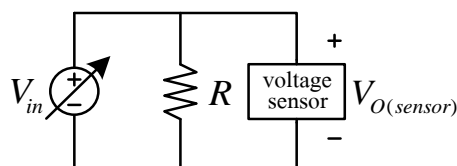
จากนั้นทำการออกแบบค่า $R1$ ซึ่งอยู่ทางด้านอินพุต เพื่อไม่ให้กระแสทางด้านอินพุตไหลเกิน 10 mA เมื่อพิจารณาแรงดันอินพุตเท่ากับ 500 V การออกแบบ $R1$ ดังสมการ (5.2)

$$R1 = \frac{500 \text{ V}}{10 \times 10^{-3} \text{ A}} = 50 \text{ k}\Omega \quad (5.2)$$

ส่วนการออกแบบค่า Rm ซึ่งอยู่ทางด้านเอาต์พุต เพื่อปรับแรงดันของสัญญาณอนาลอกที่จะเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้มีค่าไม่เกิน 3 V โดยกระแสทางด้านเอาต์พุตมีค่า 25 mA การออกแบบ Rm ดังสมการ (5.3)

$$Rm = \frac{3 \text{ V}}{25 \times 10^{-3} \text{ A}} = 120 \Omega \quad (5.3)$$

สำหรับการใช้งานตัวตรวจจับแรงดันนั้นทำเช่นเดียวกับตัวตรวจจับกระแส คือสร้างวงจรไฟฟ้าขึ้นมาแสดงดังรูปที่ 5.17 เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต V_{in} กับแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับกระแส $V_{O(sensor)}$ เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรง



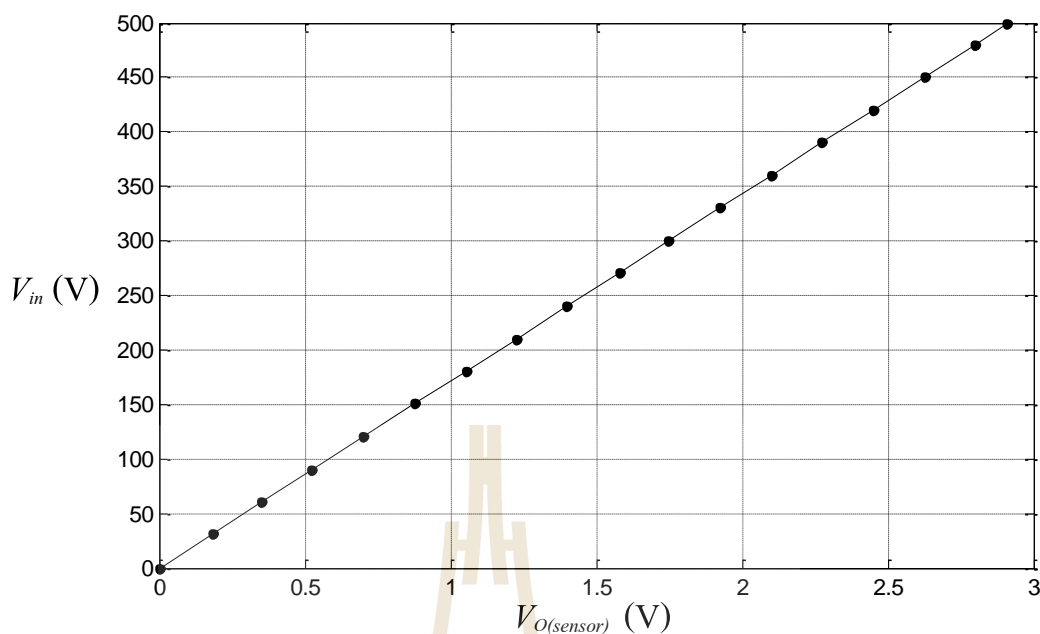
รูปที่ 5.17 วงจรทดสอบเพื่อสร้างความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับแรงดัน

ขั้นตอนการทดสอบนั้น ทำการปรับแรงดันอินพุต V_{in} จาก 30 V - 500 V เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตารางการทดสอบวงจรตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

V_{in} (V)				$V_{O(sensor)}$ (V)			
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0	0	0	0	0	0	0
32.41	29.87	31.14	31.14	0.191	0.176	0.184	0.184
60.56	60.77	60.12	60.48	0.355	0.356	0.352	0.354
89.68	89.90	90.32	89.97	0.525	0.526	0.528	0.526
120.34	120.59	119.89	120.27	0.703	0.705	0.700	0.703
150.71	150.87	150.23	150.60	0.880	0.881	0.877	0.879
180.34	180.80	181.31	180.82	1.052	1.055	1.058	1.055
208.97	209.91	210.24	209.71	1.219	1.225	1.227	1.224
240.24	240.45	239.89	240.19	1.401	1.403	1.399	1.401
270.68	270.89	270.86	270.81	1.579	1.580	1.580	1.580
299.55	299.89	300.05	299.83	1.747	1.749	1.750	1.748
330.12	330.58	330.98	330.56	1.925	1.927	1.930	1.927
360.89	359.79	360.65	360.44	2.104	2.097	2.103	2.101
390.19	390.17	390.70	390.35	2.275	2.274	2.278	2.276
420.20	420.34	419.98	420.17	2.449	2.450	2.448	2.449
450.78	450.89	450.14	450.60	2.627	2.628	2.624	2.626
480.53	480.39	479.91	480.27	2.801	2.800	2.797	2.799
498.98	499.11	499.87	499.32	2.908	2.908	2.913	2.910

จากตารางที่ 5.3 สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ

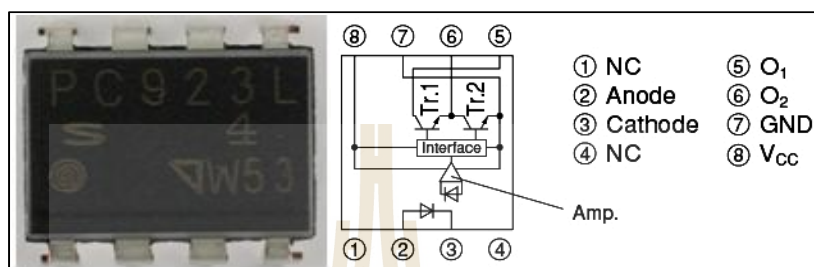
จากรูปที่ 5.18 สามารถหาสมการเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ แสดงได้ดังนี้

$$V_{in} = 171.715 V_{O(\text{sensor})} - 0.3876 \quad (5.4)$$

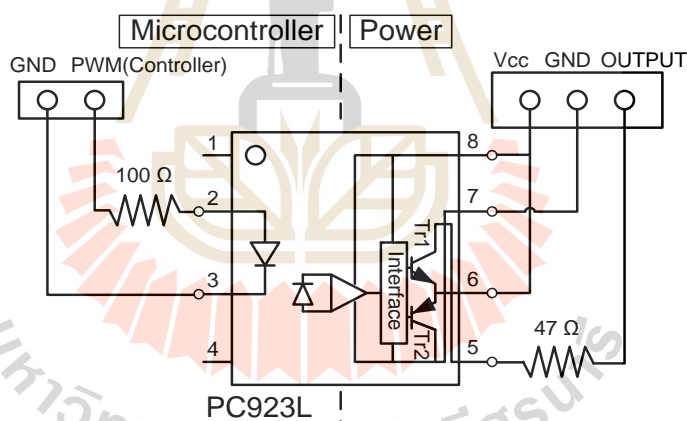
5.6 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคดสัญญาณ

วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคดสัญญาณเป็นวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อขยายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และแยกกราวด์ฝั่งแรงดันต่ำกับฝั่งแรงดันสูงออกจากกัน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรควบคุมขณะส่งสัญญาณขับขาเกตของสวิทช์กำลังให้กับวงจรกำลัง หลังจากได้รับสัญญาณ PWM ที่ได้จากการประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิทช์กำลังเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ จะติดปัญหาที่ทำให้สวิทช์กำลังไม่ทำงานคือ แรงดันเอาต์พุตของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าแรงดันต่ำไม่เพียงพอในการขับขาเกตของสวิทช์กำลังให้ทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรที่สามารถขยายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สวิทช์กำลังในวงจรสามารถทำงานได้

วงจรแยกโศดแบบขยายสัญญาณใช้ไอซีออปโตเบอร์ PC923L เป็นวงจรแยกโศดที่มีการขยายสัญญาณในตัววงจร โดยในงานวิจัยนี้สวิทซ์กำลังที่เลือกใช้ต้องการสัญญาณขนาด 13 V เพื่อขับให้ขาเกตของสวิทซ์กำลังทำงาน โครงสร้างของไอซีออปโตเบอร์ PC923L แสดงดังรูปที่ 5.19 สำหรับการใ้ใช้งานวงจรแยกโศดแบบขยายสัญญาณ คอวงจรตามรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.19 โครงสร้างของไอซีออปโตเบอร์ PC923L



รูปที่ 5.20 การต่อวงจรของวงจรแยกโศดแบบขยายสัญญาณ

5.7 การควบคุมแรงดันเอาต์พุต

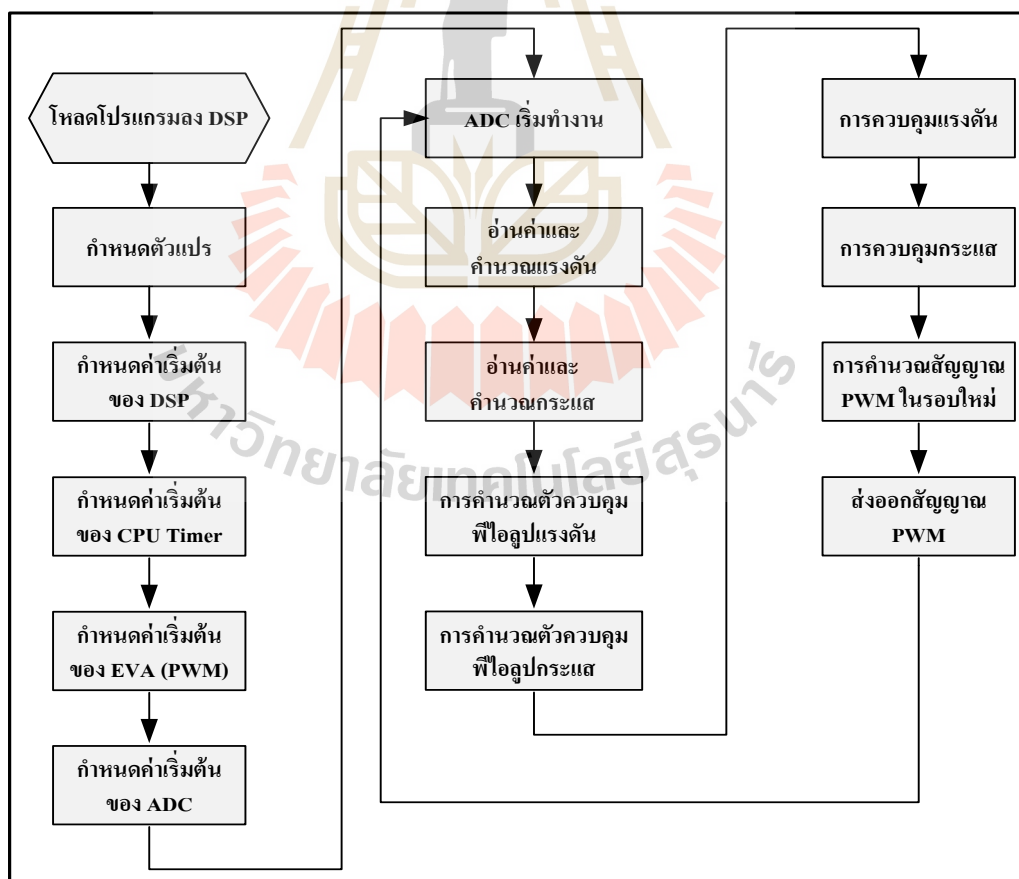
สำหรับการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยเลือกใ้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 สำหรับคำนวณประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุต บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 แสดงได้ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335

5.7.1 การโปรแกรมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335

การเขียนโค้ดโปรแกรมสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น อาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 ใช้ภาษาซีในการเขียนโค้ดโปรแกรม การเขียนโปรแกรมสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ไคอะแกรมการเขียนโปรแกรมของตัวควบคุม

จากไดอะแกรมลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมภาษาซีในรูปที่ 5.22 จะอธิบายการเขียนโปรแกรมเพียงส่วนที่สำคัญเท่านั้น เนื่องจาก โปรแกรมบางอย่างเป็นเพียงค่าเริ่มต้นของการประกาศใช้ฟังก์ชัน

โปรแกรมภาษาซีสำหรับอ่านค่าและคำนวณค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลง ADC ของแรงดันเอาต์พุต V_o และกระแสอินพุต i_L แสดงการเขียนโปรแกรมได้ดังนี้

```
Vadc_a0 = AdcMirror.ADCRESULT0; // อ่านค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลง ADC ของแรงดัน
Iadc_a1 = AdcMirror.ADCRESULT1; // อ่านค่าดิจิทัลที่ได้จากการแปลง ADC ของกระแส
V_dc = 171.715*(Vadc_a0*0.000732601)-0.3876; // คำนวณแรงดันในรูปสัญญาณดิจิทัล
I_dc = 3.7536*(Iadc_a1*0.000732601)+0.0049; // คำนวณกระแสในรูปสัญญาณดิจิทัล
```

จากนั้นนำค่าแรงดันและกระแสที่ถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลไปคำนวณเพื่อหาตัวควบคุมพีไอในรูปแรงดันและกระแส สามารถเขียนโปรแกรมแสดงดังนี้

```
// PI controller for voltage loop //
errorv = Vref-V_dc; // คำนวณค่าความผิดพลาดของแรงดัน
Upv=0.003125*errorv; // คำนวณค่า Upv จากตัวควบคุมแบบพีไอ
Uiv=0.09766*Ts*errorv + Uiv_1; // คำนวณค่า Uiv จากตัวควบคุมแบบพีไอ
UV=Upv+Uiv; // เอาต์พุตของลูปแรงดัน สำหรับเป็นอินพุตของลูปกระแส
Uiv_1=Uiv; // ค่า Uiv_1 สำหรับใช้คำนวณ Uiv ในรอบใหม่

// PI controller for current loop //
errori = UV-I_dc; // คำนวณค่าความผิดพลาดของกระแส
Upc=4.6875*errori; // คำนวณค่า Upc จากตัวควบคุมแบบพีไอ
Uic=7327.22*Ts*errori + Uic_1; // คำนวณค่า Uic จากตัวควบคุมแบบพีไอ
UC=Upc+Uic; // เอาต์พุตของลูปกระแส สำหรับเป็นสัญญาณอ้างอิงในการ
// เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม
Uic_1=Uic; // ค่า Uic_1 สำหรับใช้คำนวณ Uic ในรอบใหม่
```

หลังจากได้สัญญาณอ้างอิงจากตัวควบคุมพีไอ ต่อมนำสัญญาณอ้างอิงนั้นไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จะได้สัญญาณ PWM สำหรับสั่งให้สวิตช์กำลังทำงาน สามารถเขียนโปรแกรมแสดงดังนี้

```

U_ref_P = (-UC*1.831)+3750; // เปลี่ยนค่า U_ref_P สำหรับเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณ
                                PWM
if(U_ref_P<=750){U_ref_P=750;}; // เปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณ PWM โดย
                                กำหนดให้ค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าไม่เกิน 0.8
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = U_ref_P; // อัปเดต ePWM2A, ePWM2B เพื่อส่งสัญญาณ
                                PWM ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

```

5.8 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น เริ่มตั้งแต่การสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง การเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น การเลือกและใช้งานตัวตรวจจับทั้งกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตรวมถึงการสร้างตัวควบคุมพีไอเพื่อสร้างสัญญาณ PWM จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และสร้างวงจรขยายแรงดันแบบแยกโดดสัญญาณเพื่อขยายสัญญาณจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ในบทที่ 6 จะนำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างผลจากชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ ณ จุดทำงานต่างๆ

บทที่ 6

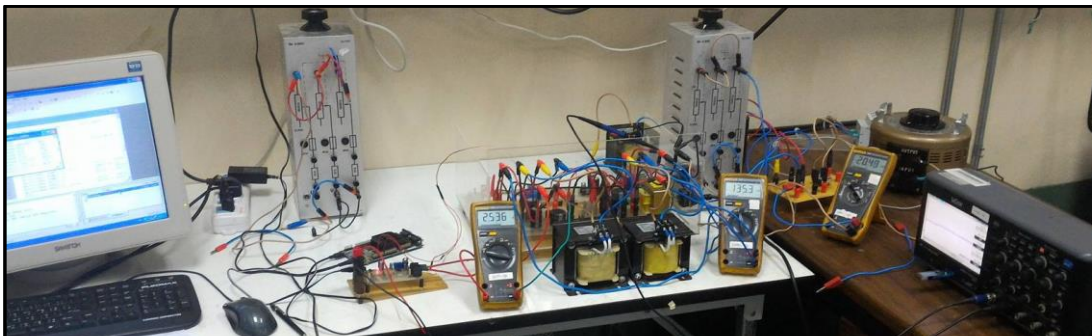
ผลการทดสอบ

6.1 บทนำ

จากบทที่ผ่านมาได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น เริ่มตั้งแต่การสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ การเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น การเลือกตัวตรวจจับกระแสอินพุตและตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต การสร้างและใช้งานวงจรขยายแรงดันแบบแยกโคดสัญญาณเพื่อขยายสัญญาณที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ รวมถึงการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 400 V_{dc} โดยใช้ตัวควบคุมจากการออกแบบตัวควบคุมพีไออย่างง่าย และเพื่อยืนยันประสิทธิภาพผลของชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ในบทที่ 6 นี้ จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ณ จุดการทำงานต่าง ๆ โดยแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้ การทดสอบชุดทดสอบขณะที่ไม่มีตัวควบคุม และการทดสอบชุดทดสอบขณะใช้ตัวควบคุมพีไอเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 400 V_{dc} ทั้งนี้การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์กับผลการทดสอบจากชุดทดสอบ จะทำการเปรียบเทียบภายใต้สภาวะการทำงาน ณ จุดทำงานเดียวกัน ผลการทดสอบชุดทดสอบ ณ จุดการทำงานต่าง ๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2 การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้นนั้นจะทำการทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกชุดทดสอบทำงานโดยไม่มีตัวควบคุม ซึ่งทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ เพื่อสังเกตผลตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบเมื่อชุดทดสอบทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ และกรณีที่สองชุดทดสอบทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอ เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 400 V_{dc} ซึ่งตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบอย่างง่ายแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการทำงานร่วมกับชุดทดสอบจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตตามต้องการได้ สำหรับการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งผลจากชุดทดสอบทั้งสองกรณีจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่สภาวะการทำงาน ณ จุดทำงานเดียวกัน ทั้งนี้การทดสอบชุดทดสอบขณะไม่มีตัวควบคุม และขณะมีตัวควบคุม สามารถแสดงรายละเอียด ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.1 การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

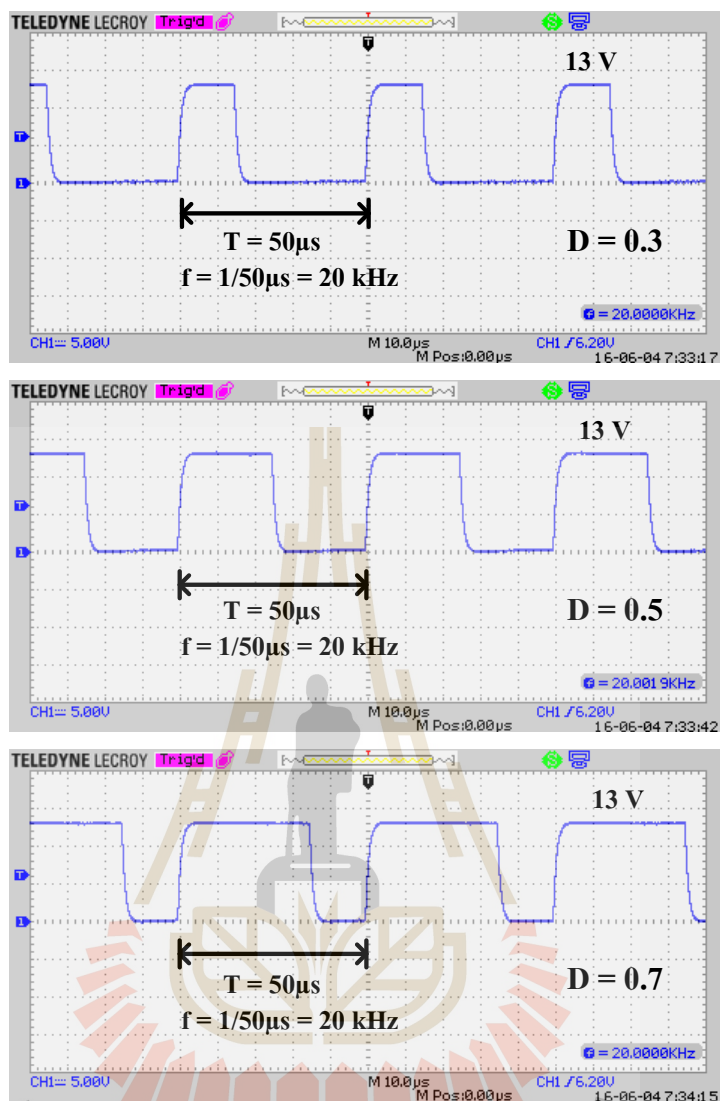
6.3 ผลทดสอบชุดทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุม

การทดสอบชุดทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุม จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ตามต้องการ โดยสัญญาณพัลส์ที่สร้างขึ้นด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 6.2 ซึ่งรูปดังกล่าวแสดงสัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.3, 0.5 และ 0.7 ที่ความถี่ 20 kHz สัญญาณพัลส์ดังกล่าวเป็นสัญญาณที่ผ่านวงจรขยายแรงดันแบบแยกโคจสัญญาณแล้ว ทำให้สัญญาณมีขนาด 13 V เพื่อขับขาเกตของสวิตช์กำลังภายในชุดทดสอบ ทั้งนี้ผลการทดสอบชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต จะใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งหมด ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงดังตารางที่ 6.1 จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นระหว่างผลจากชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์ นอกจากนี้ได้นำผลการคำนวณจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรมาเปรียบเทียบกับ โดยสมการที่ใช้คำนวณหาแรงดันเอาต์พุต และกระแสอินพุต แสดงได้ดังสมการ (6.1) และ (6.2) ตามลำดับ

$$V_o = \frac{2 V_{in}}{(1-D)^2} \quad (6.1)$$

จากสมการหาประสิทธิภาพของวงจร $P_{in} = P_{out}$ สามารถหากระแสอินพุตได้ดังนี้

$$i_{L1} = \frac{V_o^2}{R V_{in}} \quad (6.2)$$

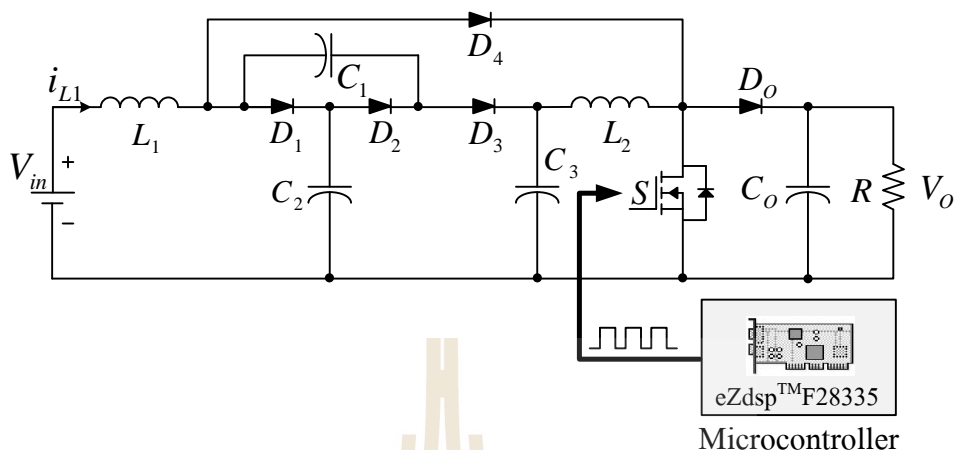


รูปที่ 6.2 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.3, 0.5 และ 0.7

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับชุดทดสอบและการจำลองสถานการณ์

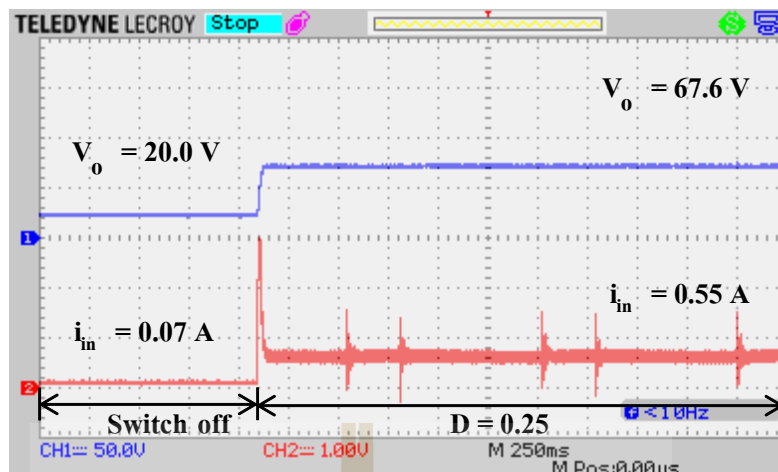
สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
V_{in}	แรงดันอินพุต	20 V
L_1, L_2	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH
C_1, C_2, C_0	ตัวเก็บประจุ	100 μF
C_3	ตัวเก็บประจุ	150 μF
R	โหลดตัวต้านทาน	500 Ω
f_{sw}	ความถี่สวิตช์	20 kHz

การทดสอบชุดทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 6.3

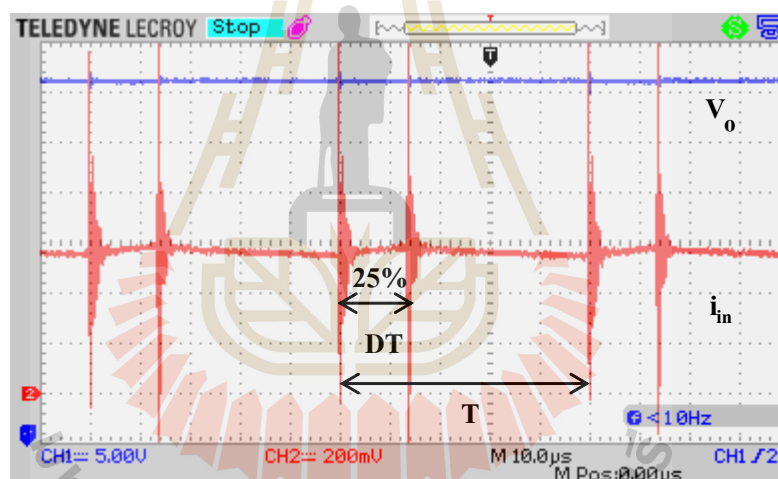


รูปที่ 6.3 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น กรณีไม่มีตัวควบคุม

การทดสอบชุดทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุม จะทำการทดสอบเริ่มตั้งแต่กรณีที่ชุดทดสอบยังไม่ได้รับสัญญาณพัลส์ จากนั้นจ่ายสัญญาณพัลส์ให้ชุดทดสอบทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25 ผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 พบว่าช่วงเวลาที่ชุดทดสอบยังไม่รับสัญญาณพัลส์ชุดทดสอบจะเปรียบเสมือนโหลดตัวต้านทานดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่ตกรวมจะมีขนาดใกล้เคียงกับแรงดันอินพุต คือประมาณ 20 V และเมื่อชุดทดสอบเริ่มทำงานจะไม่มี การฟุ้งเกินของแรงดันเอาต์พุตในสภาวะชั่วคราว ในขณะที่สภาวะคงตัวมีแรงดันเอาต์พุตประมาณ 67.6 V กระแสอินพุตที่สภาวะชั่วคราวมีการฟุ้งเกินไปที่ 3 A ก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยกระแสอินพุตที่สภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 0.55 A จากนั้นขยายรูปสัญญาณของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต แสดงได้ดังรูปที่ 6.5 จากรูปจะสังเกตเห็นว่าช่วงเวลาที่กระแสอินพุตไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีช่วงเวลาที่สวิตช์กำลังทำงาน (DT) ประมาณ 25% ของช่วงเวลาทั้งหมด (T) โดยพฤติกรรมการทำงานของสวิตช์กำลังตรงกับค่าวัฏจักรหน้าที่ ที่กำหนดไว้ข้างต้นนั่นเอง



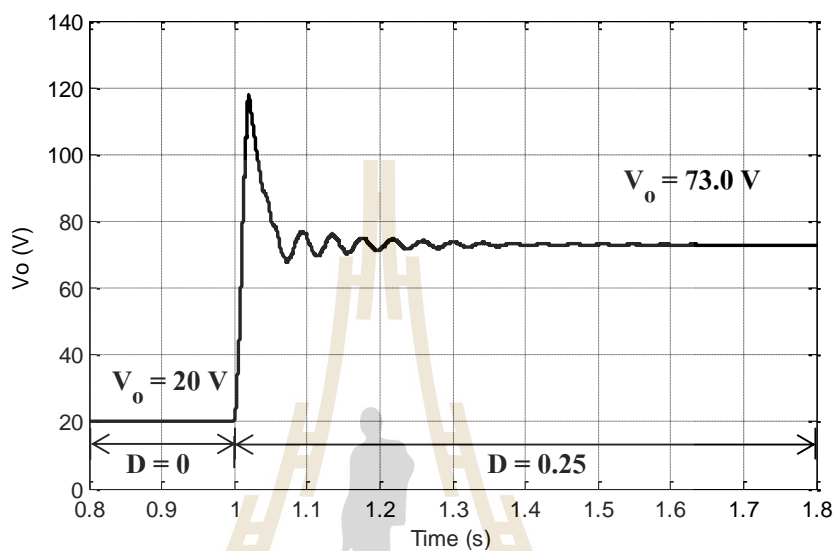
รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบหาค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0 เป็น 0.25



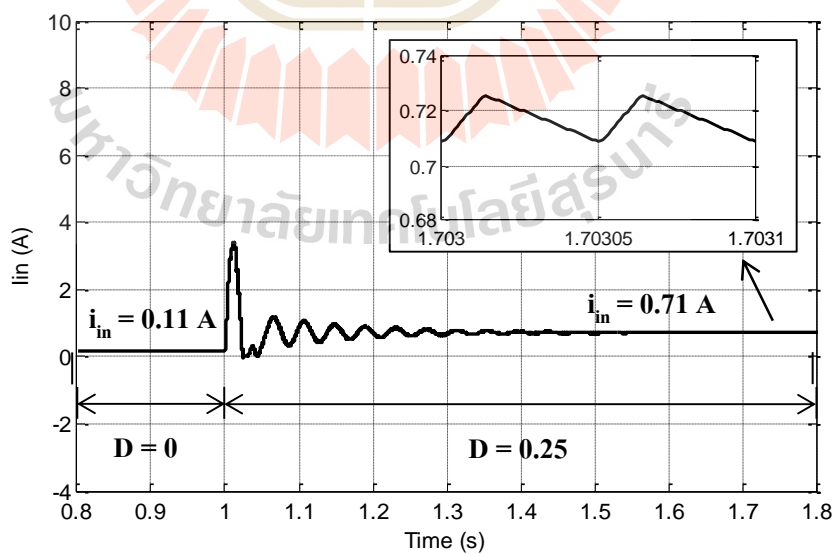
รูปที่ 6.5 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25

ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรดังตารางที่ 6.1 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจร แสดงดังรูปที่ 6.6 พบว่าช่วงแรกวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นยังไม่ได้รับสัญญาณพัลส์ วงจรจะเปรียบเสมือนโหลดตัวต้านทาน ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมจะมีขนาดเท่ากับแรงดันอินพุต คือประมาณ 20 V จากนั้นจ่ายสัญญาณพัลส์ให้วงจรทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25 พบว่าแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินในสภาวะชั่วคราวก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งที่สภาวะคงตัวแรงดันเอาต์พุตมีค่าประมาณ 73.0 V

รูปที่ 6.7 แสดงค่ากระแสอินพุต พบว่ากระแสอินพุตมีการพุ่งเกินของกระแสในสภาวะชั่วครู่ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวเช่นเดียวกับแรงดันเอาต์พุต โดยกระแสอินพุตที่สภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 0.71 A ซึ่งผลจากชุดทดสอบและผลจากการจำลองสถานการณ์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

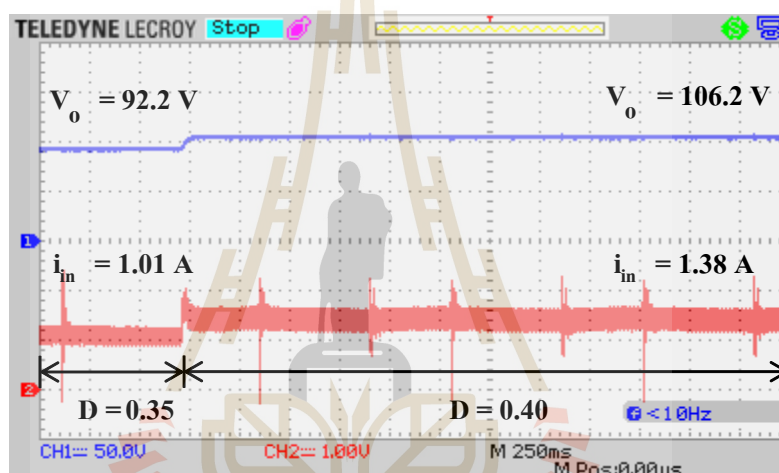


รูปที่ 6.6 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุต ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0 เป็น 0.25

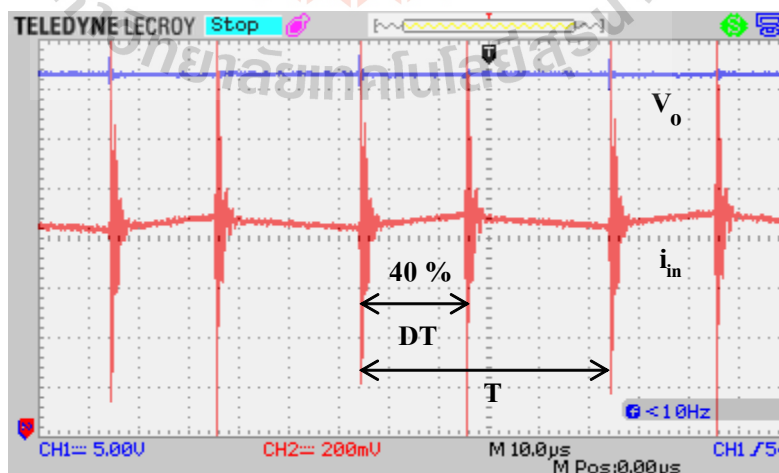


รูปที่ 6.7 ผลการจำลองสถานการณ์กระแสอินพุต ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0 เป็น 0.25

จากนั้นทำการทดสอบชุดทดสอบ โดยเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 0.35 เป็น 0.40 ซึ่งรูปที่ 6.8 แสดงผลของชุดทดสอบที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0.35 เป็น 0.40 ซึ่งสังเกตว่าเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้น โดยแรงดันเอาต์พุตที่สภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 106.2 V ส่วนค่ากระแสอินพุตเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มขึ้น จะเกิดการพุ่งเกินของกระแสเกิดขึ้นเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว กระแสอินพุตในสภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 1.38 A จากนั้นทำการขยายรูปสัญญาณเพื่อสังเกตการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต แสดงดังรูป 6.9 พบว่าช่วงเวลาที่กระแสอินพุตไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีช่วงเวลาที่สวิตช์กำลังทำงาน ประมาณ 40% ซึ่งพฤติกรรมการทำงานของสวิตช์กำลังดังกล่าว ตรงกับค่าวัฏจักรหน้าที่ ที่กำหนดไว้ข้างต้น คือ 0.40

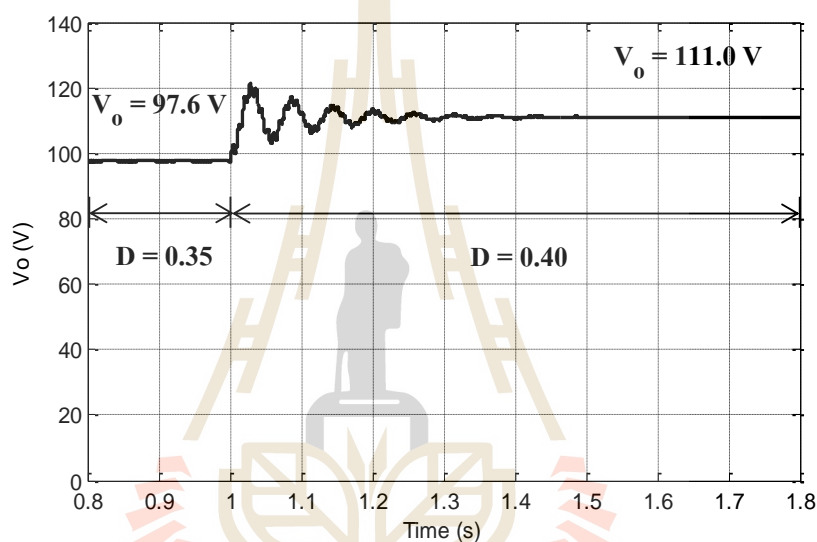


รูปที่ 6.8 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0.35 เป็น 0.40

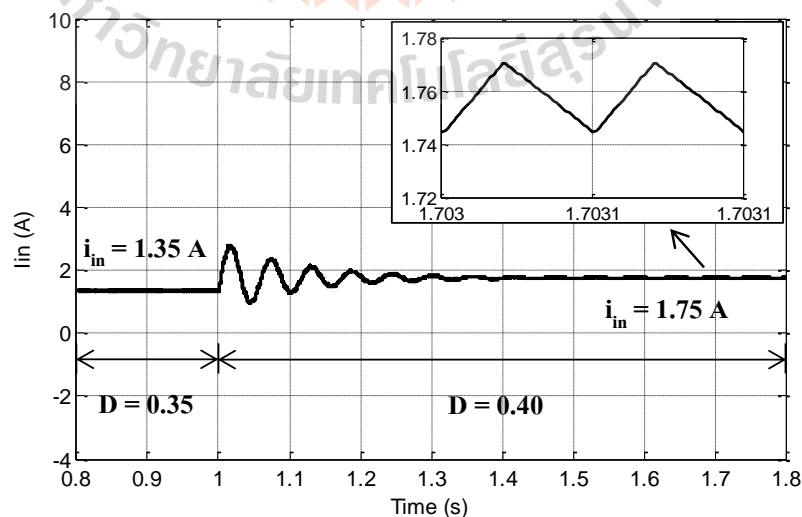


รูปที่ 6.9 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.40

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น โดยเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 0.35 เป็น 0.40 แสดงได้ดังรูปที่ 6.10 จะพบว่าในสภาวะชั่วคราวมีการพุ่งเกินของแรงดันเอาต์พุตเกิดขึ้นเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งที่สภาวะคงตัวแรงดันเอาต์พุตมีค่าประมาณ 111.0 V ส่วนกระแสอินพุต แสดงดังรูปที่ 6.11 สังเกตเห็นว่าเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มขึ้น กระแสอินพุตจะมีการพุ่งเกินเกิดขึ้นในสภาวะชั่วคราวก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวเช่นเดียวกับแรงดันเอาต์พุต โดยกระแสอินพุตที่สภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 1.75 A ซึ่งผลจากชุดทดสอบและผลจากการจำลองสถานการณ์ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

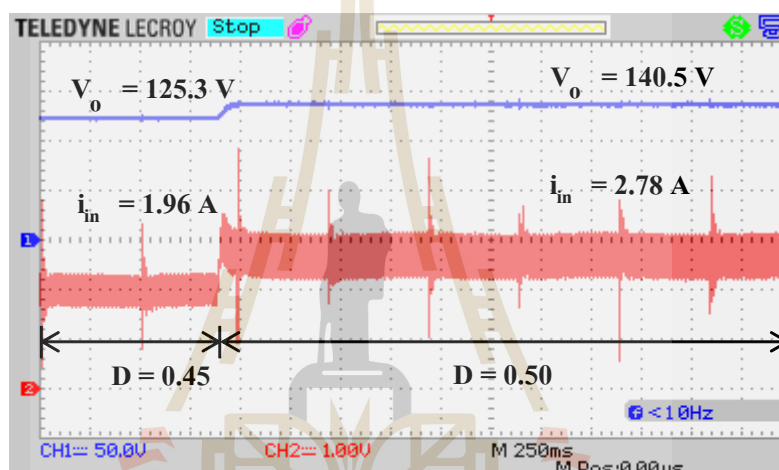


รูปที่ 6.10 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุต ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0.35 เป็น 0.40

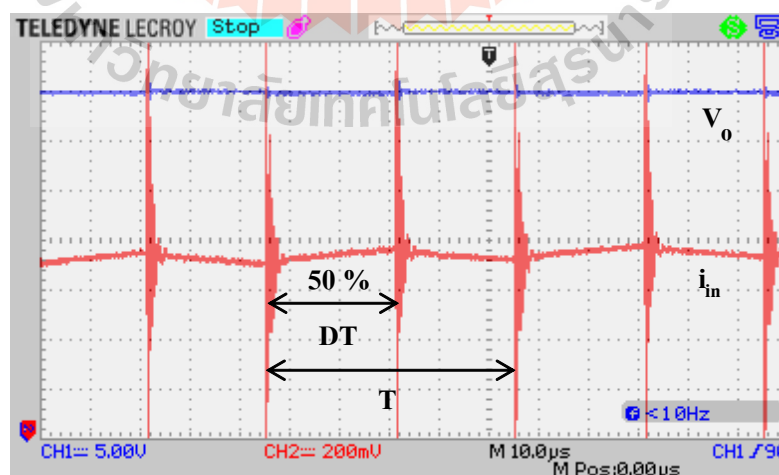


รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสถานการณ์กระแสอินพุต ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0.35 เป็น 0.40

เมื่อทำการทดสอบชุดทดสอบ โดยเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 0.45 เป็น 0.50 พบว่า ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่สภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 140.5 V แสดงดังรูปที่ 6.12 ส่วน ค่ากระแสอินพุตจะเกิดการพุ่งเกินของกระแสเกิดขึ้นเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยกระแส อินพุตในสภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 2.78 A ทำการขยายรูปสัญญาณของแรงดันเอาต์พุตและกระแส อินพุต เพื่อสังเกตการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต แสดงได้ดังรูป 6.13 สังเกตเห็นว่าช่วงเวลาที่กระแสอินพุตไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีช่วงเวลาที่สวิตช์กำลังทำงาน ประมาณ 50% ซึ่งช่วงเวลางานของสวิตช์กำลังมีค่าใกล้เคียงกับค่าวัฏจักรหน้าที่ คือ 0.50 เช่นเดียวกัน

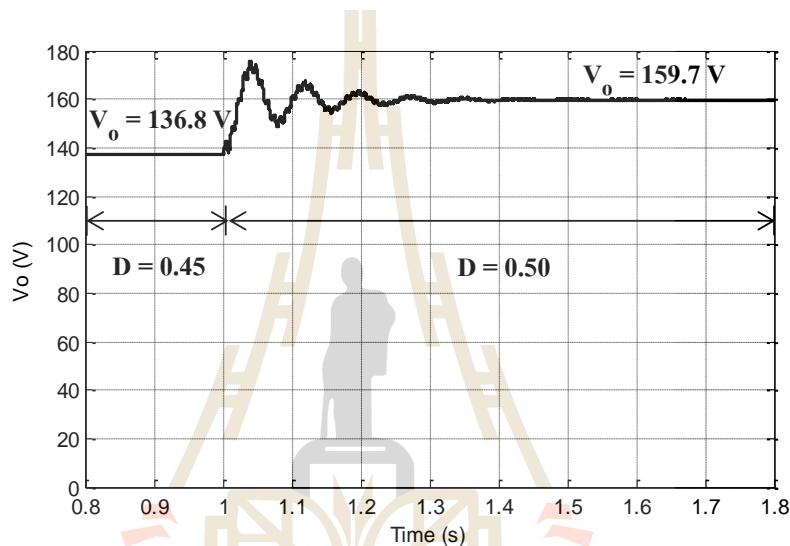


รูปที่ 6.12 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0.45 เป็น 0.50

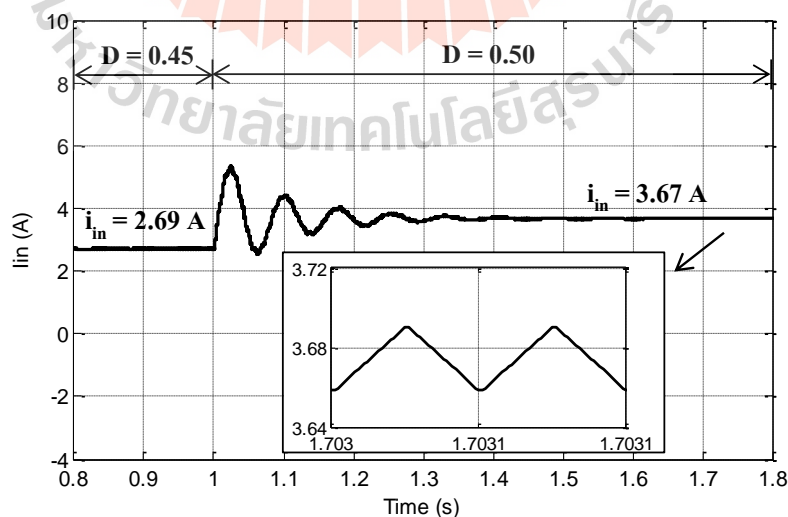


รูปที่ 6.13 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.50

ทำการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น โดยเพิ่มค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 0.45 เป็น 0.50 ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต แสดงได้ดังรูปที่ 6.14 พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่สภาวะชั่วคราวมีการพุ่งเกินเกิดขึ้นก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งที่สภาวะคงตัวแรงดันเอาต์พุตมีค่าประมาณ 159.7 V ส่วนผลตอบสนองของกระแสอินพุต แสดงดังรูปที่ 6.15 สังเกตเห็นว่ากระแสอินพุตจะมีการพุ่งเกินเกิดขึ้นในสภาวะชั่วคราวเช่นกันก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยกระแสอินพุตที่สภาวะคงตัวมีค่าประมาณ 3.67 A ซึ่งผลจากชุดทดสอบและผลจากการจำลองสถานการณ์ยังมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.14 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุต ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0.45 เป็น 0.50

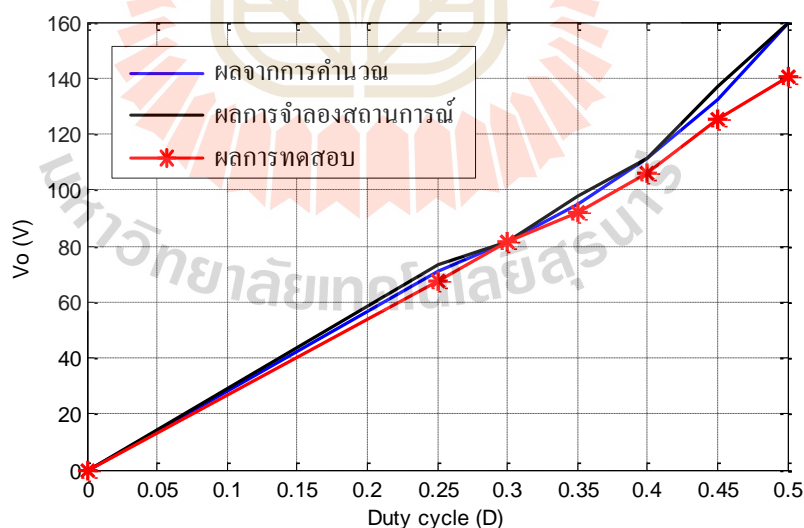


รูปที่ 6.15 ผลการจำลองสถานการณ์กระแสอินพุต ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มจาก 0.45 เป็น 0.50

จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุต ระหว่างผลการคำนวณแรงดันเอาต์พุตดังสมการ (6.1) ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบ แสดงได้ดังตารางที่ 6.2 และทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบ แสดงได้ดังรูปที่ 6.16 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบ ผลจากการจำลองสถานการณ์ และจากผลการคำนวณตามทฤษฎีมีความใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุต ระหว่างผลจากการคำนวณ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบ

ค่าวัฏจักรหน้าที่ (D)	แรงดันเอาต์พุต (V)		
	ผลจากการคำนวณ	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการทดสอบ
0.25	71.1	73.0	67.6
0.30	81.6	81.5	81.6
0.35	94.7	97.6	92.2
0.40	111.1	111.0	106.2
0.45	132.2	136.8	125.3
0.50	160.0	159.7	140.5

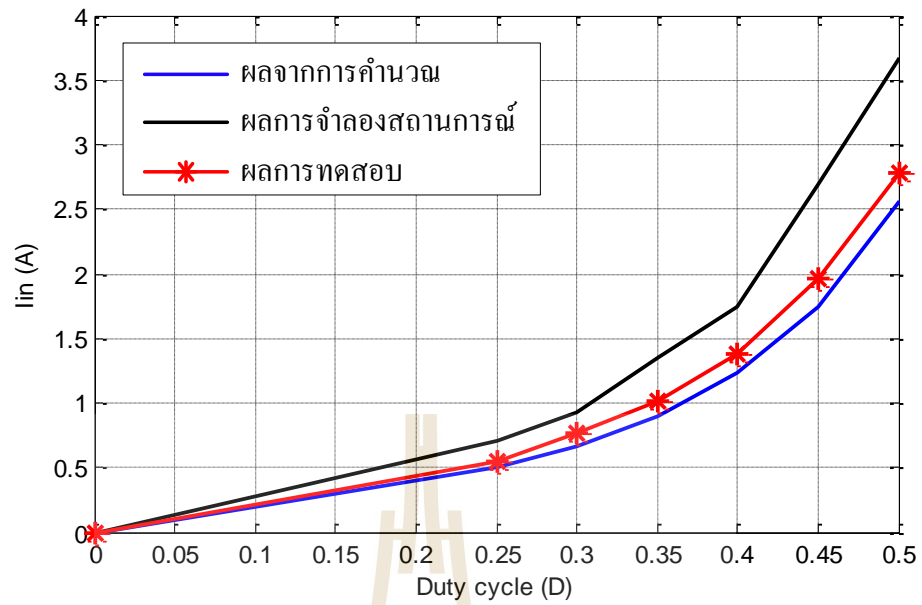


รูปที่ 6.16 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุต ระหว่างผลจากการคำนวณผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบ

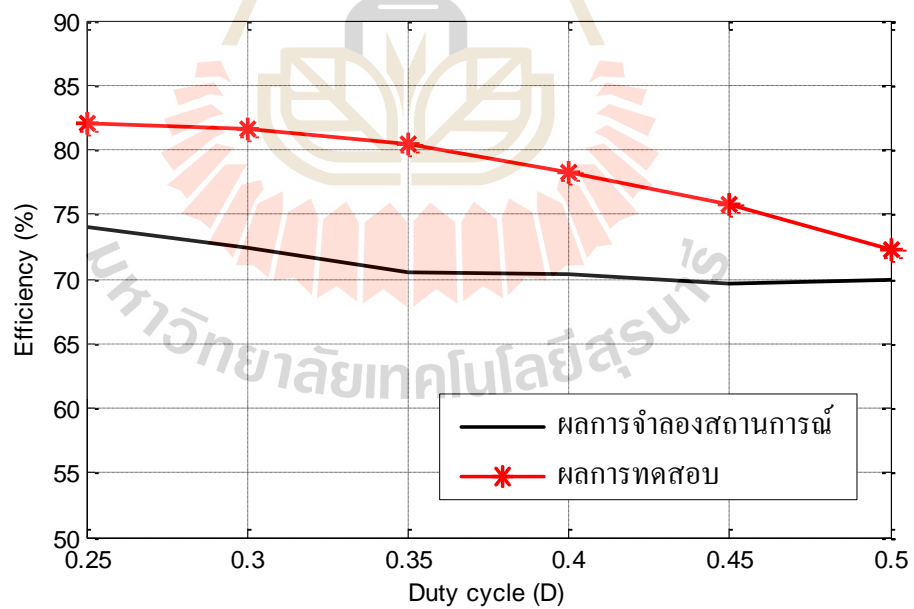
สำหรับการเปรียบเทียบค่ากระแสอินพุตและค่าประสิทธิภาพ แสดงได้ดังตารางที่ 6.3 พบว่าผลตอบแทนของกระแสอินพุตที่ได้จากชุดทดสอบเป็น โหมมการทำงานแบบต่อเนื่อง (CCM) และเมื่อสังเกตผลของชุดทดสอบที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สูงขึ้นกระแสอินพุตจะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ ซึ่งอาจเกิดจากค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าไม่เป็นอุดมคติ ในส่วนของการวัดกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุตเพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดสอบ พบว่าค่าประสิทธิภาพของชุดทดสอบมากกว่าค่าประสิทธิภาพของผลการจำลองสถานการณ์ ซึ่งอาจเกิดจากการคลาดเคลื่อนของกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของชุดทดสอบ แต่เมื่อค่าวัฏจักรการทำงานสูงขึ้น ประสิทธิภาพของผลการทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์ จะมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน ทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบกระแสอินพุต แสดงดังรูปที่ 6.17 จากรูปจะสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของกระแสอินพุตจากชุดทดสอบเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นคล้ายกับผลจากการคำนวณกระแสอินพุตดังสมการ (6.2) และผลการจำลองสถานการณ์ ส่วนค่าประสิทธิภาพทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบ แสดงดังรูปที่ 6.18 พบว่าเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่สูงขึ้นจะมีกำลังงานสูญเสียมากขึ้น ทำให้ผลจากการจำลองสถานการณ์และผลจากการทดสอบที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งผลจากการจำลองสถานการณ์และผลจากชุดทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบค่ากระแสอินพุตและประสิทธิภาพ ระหว่างผลจากการคำนวณ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบ

ค่าวัฏจักร หน้าที่ (D)	กระแสอินพุต (A)			ประสิทธิภาพ (%)	
	ผลจากการ คำนวณ	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการทดสอบ	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการทดสอบ
0.25	0.51	0.71	0.55	74.03	82.05
0.30	0.67	0.92	0.77	72.39	81.62
0.35	0.90	1.35	1.01	70.56	80.42
0.40	1.23	1.75	1.38	70.40	78.21
0.45	1.75	2.69	1.96	69.57	75.81
0.50	2.56	3.67	2.78	69.87	72.31



รูปที่ 6.17 การเปรียบเทียบค่ากระแสอินพุต ระหว่างผลจากการคำนวณ
ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบ



รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ ระหว่างผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบ

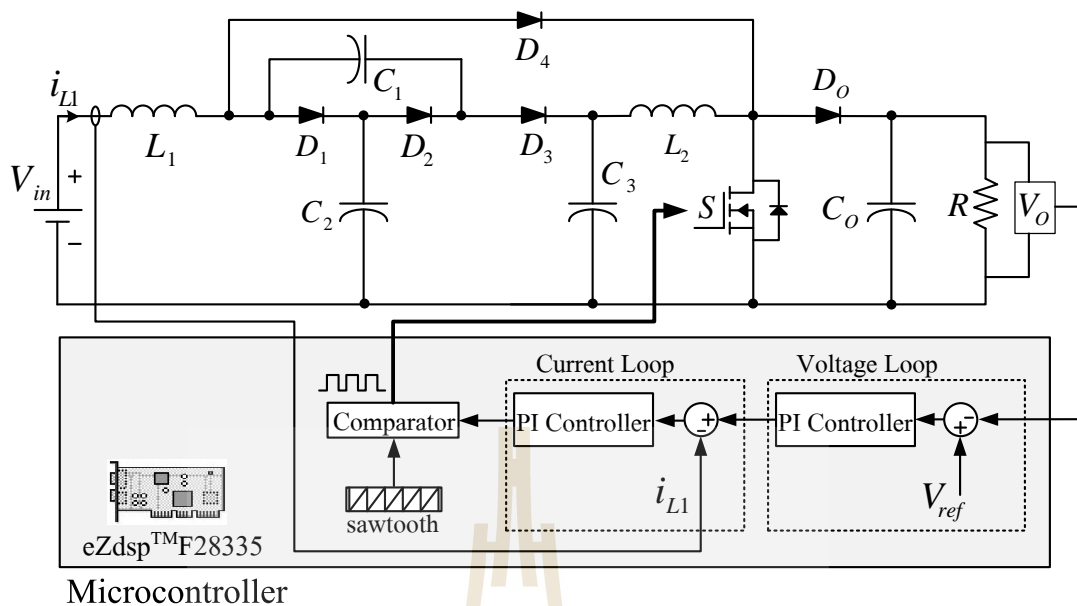
6.4 ผลทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม

การทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง (V_{ref}) ให้มีค่าคงที่ตามต้องการ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ออกแบบอย่างง่ายดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 สำหรับการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของชุดทดสอบนี้ใช้ตัวควบคุมพีไอโดยเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 สำหรับคำนวณประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ซึ่งการเขียนโค้ดโปรแกรมสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของชุดทดสอบใช้ภาษาซีในการเขียนโค้ดโปรแกรม ทั้งนี้ผลการทดสอบชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุต จะใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งหมด ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงดังตารางที่ 6.4 ซึ่งผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุมทำให้มั่นใจได้ว่าตัวควบคุมพีไอที่ทำการออกแบบอย่างง่ายสามารถใช้ได้กับชุดทดสอบจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับชุดทดสอบและการจำลองสถานการณ์

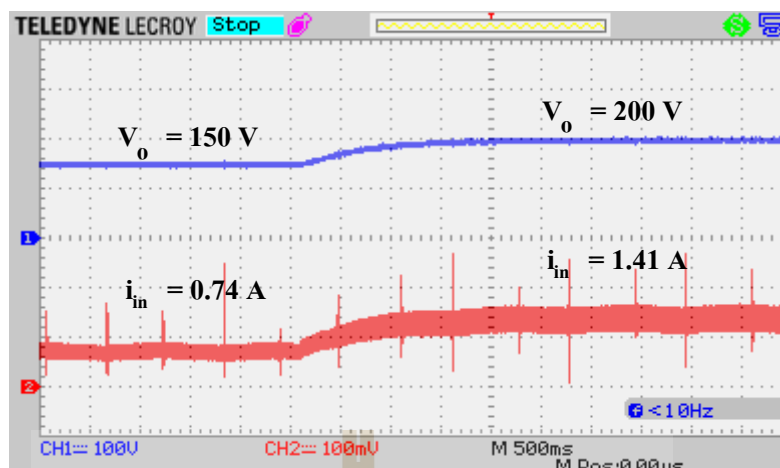
สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
V_{in}	แรงดันอินพุต	20 V
L_1, L_2	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH
C_1, C_2, C_O	ตัวเก็บประจุ	100 μ F
C_3	ตัวเก็บประจุ	150 μ F
R	โหลดตัวต้านทาน	2000 Ω
f_{sw}	ความถี่สวิตช์	20 kHz

โดยการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 6.19 การทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม จะทำการทดสอบโดยปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง (V_{ref}) เพิ่มขึ้น ครั้งละ 50 V_{dc} เริ่มจาก 0 V_{dc} ถึง 400 V_{dc} เนื่องจากเมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเพิ่มขึ้น แรงดันอินพุตที่ออกจากชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นจะมีการกระเพื่อมของแรงดันอินพุตเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้แรงดันอินพุตมีค่าลดลง ทำให้ผู้วิจัยต้องปรับแรงดันอินพุตให้คงไว้ที่ 20 V_{dc} ตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ดังนั้นการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม จะทำการทดสอบโดยการเพิ่มแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเพิ่มขึ้น ครั้งละ 50 V_{dc} จนกระทั่งถึง 400 V_{dc}

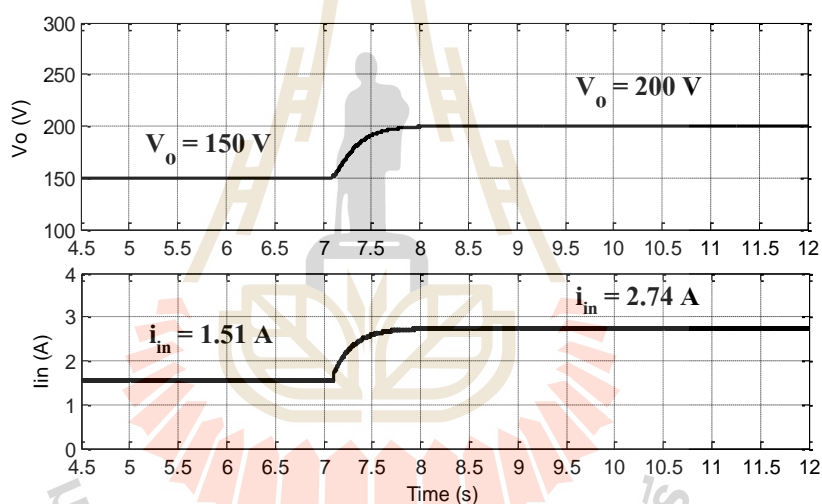


รูปที่ 6.19 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น กรณีมีตัวควบคุม

จากนั้นทำการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุม โดยปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเพิ่มขึ้น จาก 150 V_{dc} ไปเป็น 200 V_{dc} ผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูป 6.20 พบว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบอย่างง่ายสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 150 V_{dc} เป็น 200 V_{dc} ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และกระแสอินพุตจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเพิ่มขึ้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ ดังรูป 6.21 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบอย่างง่ายสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 150 V_{dc} เป็น 200 V_{dc} ได้ โดยกระแสอินพุตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลจากชุดทดสอบ ทั้งนี้ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตทั้งจากการทดสอบชุดทดสอบและการจำลองสถานการณ์ แรงดันเอาต์พุตไม่มีการฟุ้งเกินเกิดขึ้นในสถานะชั่วคราว ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุม

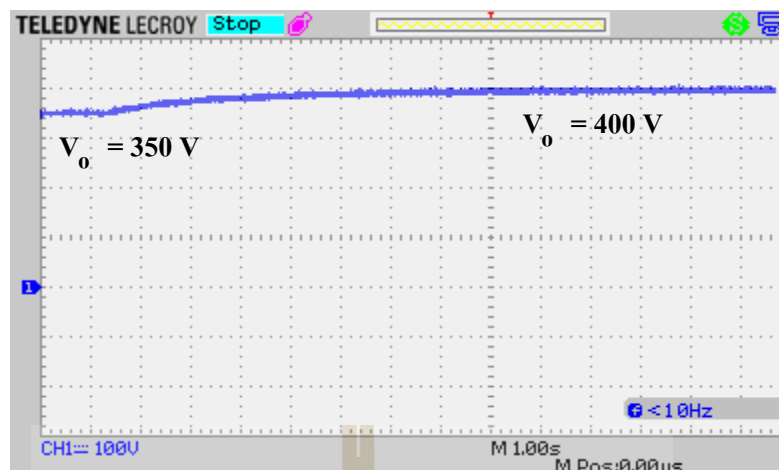


รูปที่ 6.20 ผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีควบคุมแรงดันเอาต์พุต 150 V_{dc} เป็น 200 V_{dc}

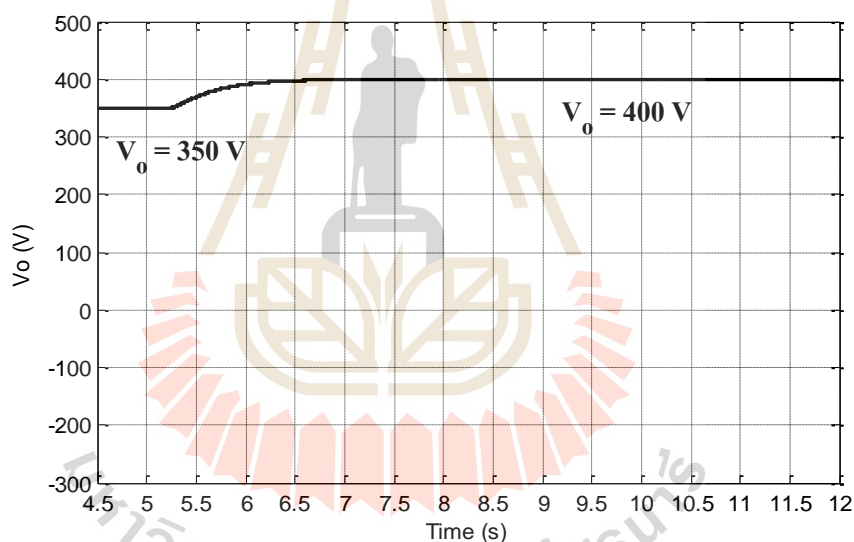


รูปที่ 6.21 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีควบคุมแรงดันเอาต์พุต 150 V_{dc} เป็น 200 V_{dc}

ต่อมาทำการทดสอบชุดทดสอบ โดยปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตจากอ้างอิงจาก 350 V_{dc} เพิ่มขึ้นเป็น 400 V_{dc} ผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูป 6.22 พบว่าตัวควบคุมพีไอยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 350 V_{dc} เป็น 400 V_{dc} ได้ และไม่มีการพุ่งเกินของแรงดันเอาต์พุตเกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดเบื้องต้นในการออกแบบเพื่อป้องกันชุดทดสอบที่อาจเกิดการเสียหาย เนื่องจากการพุ่งของแรงดันเกิน จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ ดังรูป 6.23 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบอย่างง่ายสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 350 V_{dc} เป็น 400 V_{dc} ได้ และไม่มีการพุ่งเกินของแรงดันเอาต์พุตเช่นเดียวกัน ซึ่งทั้งตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตจากชุดทดสอบและจากการจำลองสถานการณ์มีแนวโน้มสอดคล้องใกล้เคียงกัน

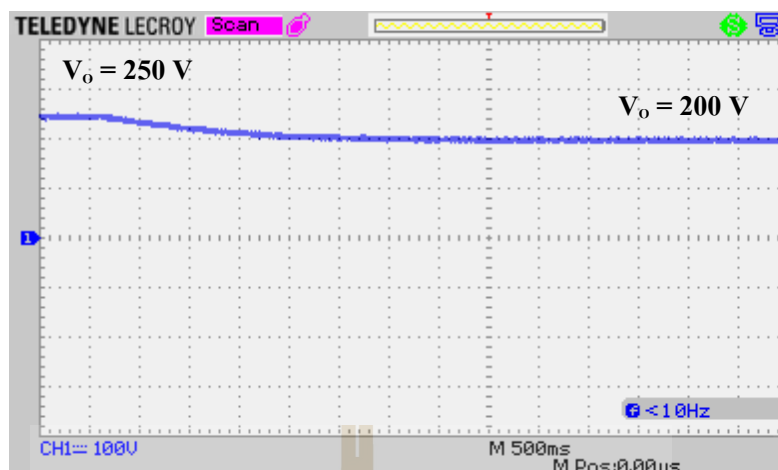


รูปที่ 6.22 ผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีควบคุมแรงดันเอาต์พุต 350 V_{dc} เป็น 400 V_{dc}

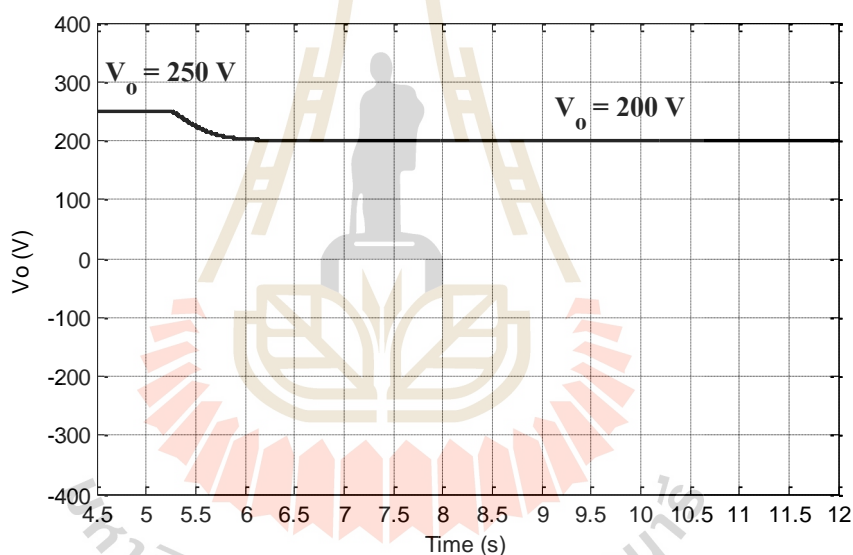


รูปที่ 6.23 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีควบคุมแรงดันเอาต์พุต 350 V_{dc} เป็น 400 V_{dc}

จากผลการทดสอบชุดทดสอบที่นำเสนอในข้างต้น ถือเป็นการยืนยันสมรรถนะในการเพิ่มอัตราขยายแรงดันของชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งชุดทดสอบดังกล่าวสามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันได้สูง 20 เท่า จากนั้นทำการทดสอบชุดทดสอบเพื่อตรวจสอบตัวควบคุมพีไอกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงลดลง โดยทำการปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงลดลงจาก 250 V_{dc} เป็น 200 V_{dc} ผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูป 6.24 พบว่าตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 250 V_{dc} เป็น 200 V_{dc} ได้ และทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ดังรูป 6.25 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 250 V_{dc} เป็น 200 V_{dc} ได้เช่นเดียวกับผลจากชุดทดสอบ

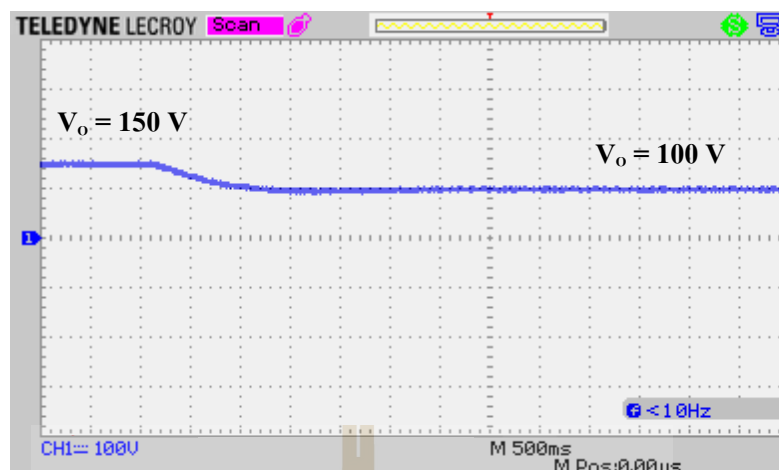


รูปที่ 6.24 ผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีควบคุมแรงดันเอาต์พุต 250 V_{dc} เป็น 200 V_{dc}

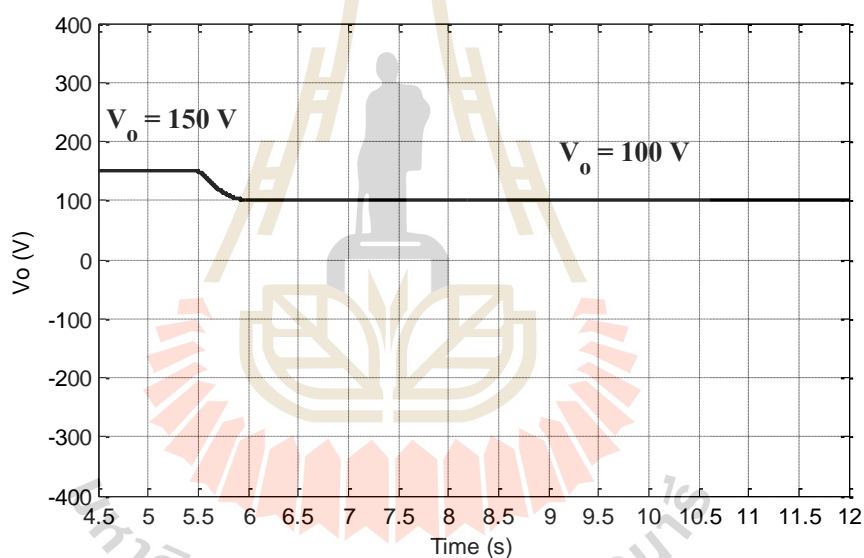


รูปที่ 6.25 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีควบคุมแรงดันเอาต์พุต 250 V_{dc} เป็น 200 V_{dc}

ต่อมาทำการทดสอบชุดทดสอบเพื่อตรวจสอบตัวควบคุมพีไอกรณีปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงลดลงเช่นกัน โดยทำการปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงจาก 150 V_{dc} ลดลงเป็น 100 V_{dc} ผลการทดสอบชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูป 6.26 พบว่าตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 150 V_{dc} เป็น 100 V_{dc} ได้ จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ ดังรูป 6.27 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 150 V_{dc} เป็น 100 V_{dc} ได้เช่นกัน ทั้งนี้ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตในกรณีที่ปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงลดลงทั้งจากชุดทดสอบและจากการจำลองสถานการณ์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



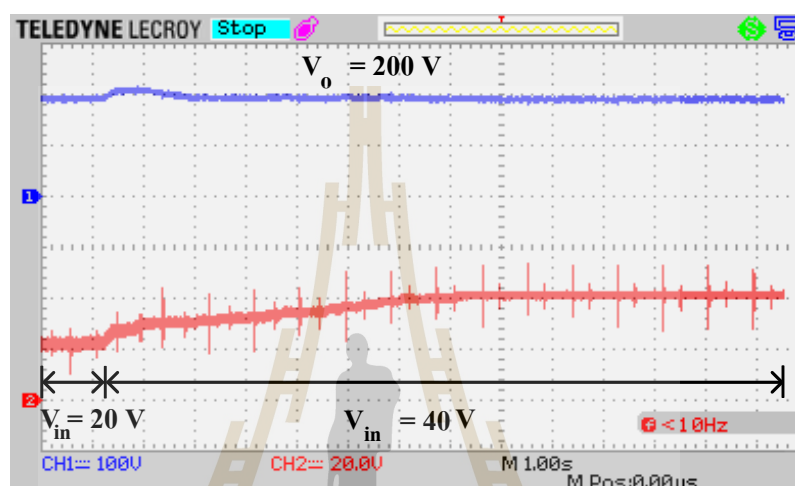
รูปที่ 6.26 ผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีควบคุมแรงดันเอาต์พุต 150 V_{dc} เป็น 100 V_{dc}



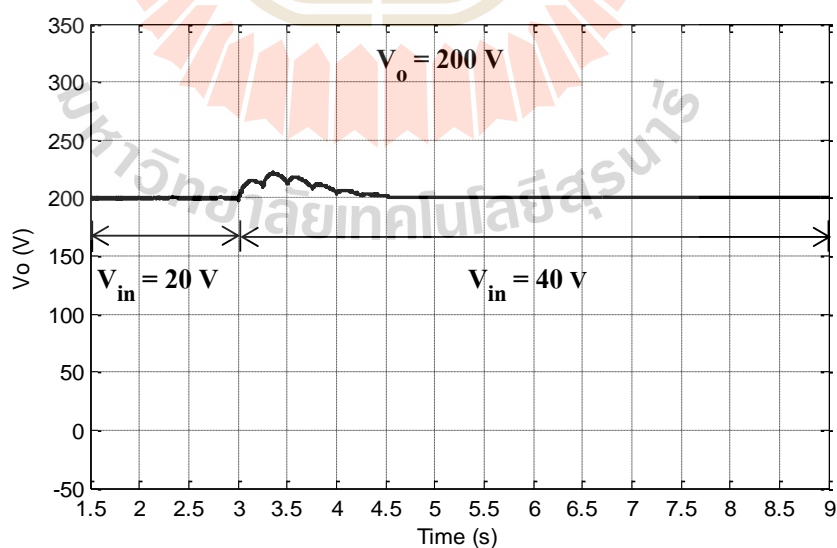
รูปที่ 6.27 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีควบคุมแรงดันเอาต์พุต 150 V_{dc} เป็น 100 V_{dc}

เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบ ทำการทดสอบชุดทดสอบ โดยกำหนดแรงดันเอาต์พุตคงที่ที่ 200 V_{dc} โดยมีแรงดันอินพุตเริ่มต้นเป็น 20 V_{dc} จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันอินพุตเป็น 40 V_{dc} ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตจากชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 6.28 พบว่าการเพิ่มแรงดันอินพุตจาก 20 V_{dc} เป็น 40 V_{dc} ตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบยังสามารถระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 200 V_{dc} ได้ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ภายใต้ข้อกำหนดเดียวกัน ผลการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังรูป 6.29 พบว่าที่ค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่ที่ 200 V_{dc} เมื่อทำการเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุตในวินาทีที่ 3 จากแรงดันอินพุต 20 V_{dc} ให้เพิ่มขึ้นเป็น 40 V_{dc} ตัวควบคุม

ยังคงรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้อยู่ที่ 200 V_{dc} ได้เช่นกัน ซึ่งผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต จากชุดทดสอบและการจำลองสถานการณ์มีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้แรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง

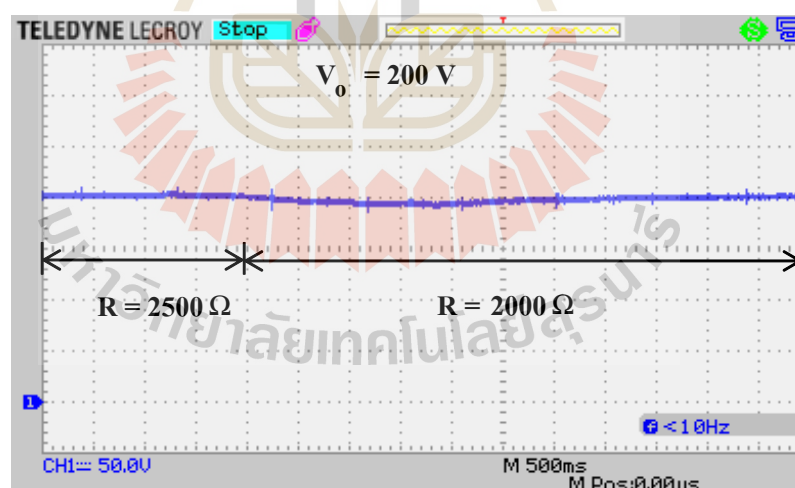


รูปที่ 6.28 ผลการทดสอบการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตเมื่อค่าแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง

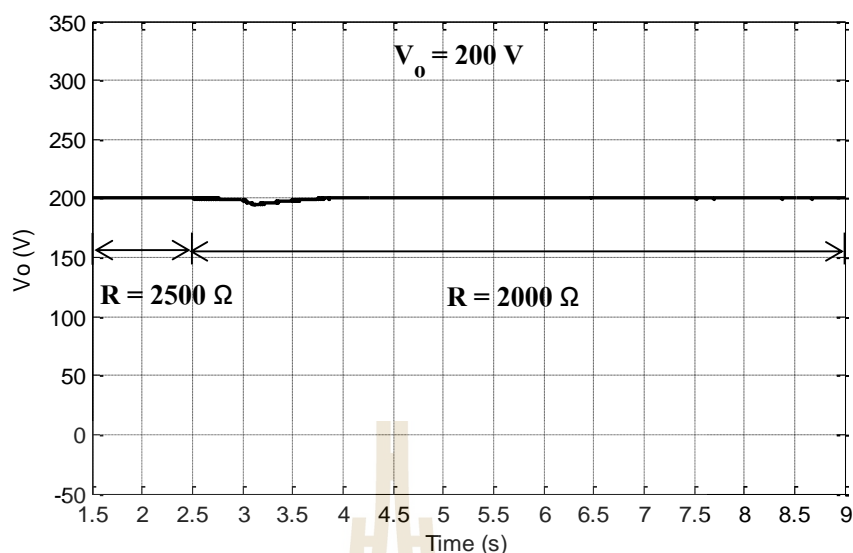


รูปที่ 6.29 ผลการจำลองสถานการณ์การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตเมื่อค่าแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง

ต่อมาทำการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบอีกวิธี คือ การเปลี่ยนแปลงค่าโหลดตัวต้านทาน ซึ่งทำการทดสอบชุดทดสอบ โดยกำหนดแรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ 200 V_{dc} แรงดันอินพุตเป็น 20 V_{dc} และค่าโหลดตัวต้านทานเริ่มต้นเป็น $2500\ \Omega$ จากนั้นค่อย ๆ ลดค่าโหลดตัวต้านทานจาก $2500\ \Omega$ ให้เหลือเพียง $2000\ \Omega$ ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตของชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.30 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดตัวต้านทานจาก $2500\ \Omega$ เป็น $2000\ \Omega$ ตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบยังสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ 200 V_{dc} ได้เช่นเดิม จากนั้นทำการจำลองผลสถานการณ์ภายใต้ข้อกำหนดเดียวกัน ผลการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังรูป 6.31 พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดตัวต้านทานในวินาทีที่ 2.5 จากโหลดตัวต้านทาน $2500\ \Omega$ ให้ลดลงเหลือ $2000\ \Omega$ ตัวควบคุมก็ยังสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ 200 V_{dc} ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตจากชุดทดสอบและการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ค่าโหลดตัวต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.30 ผลการทดสอบการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตเมื่อโหลดตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.31 ผลการจำลองสถานการณ์การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตเมื่อโหลดตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง

6.5 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งแสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ ในสภาวะการทำงานภายใต้จุดการทำงานเดียวกัน โดยเปรียบเทียบทั้งกรณีที่ชุดทดสอบไม่มีตัวควบคุมและในกรณีที่ชุดทดสอบมีตัวควบคุม ซึ่งผลการทดสอบชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบอย่างง่ายแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ $400 V_{dc}$ เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตมีค่าเป็น $20 V_{dc}$ จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอโดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตและเปลี่ยนแปลงค่าโหลดตัวต้านทาน ซึ่งผลจากการทดสอบตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบนั้นยังสามารถทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตตามข้อกำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุมกับผลการจำลองสถานการณ์พบว่า ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตทั้งสองกรณีมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบอย่างง่ายสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ $400 V_{dc}$ ได้ และชุดทดสอบที่สร้างขึ้นยังแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการขยายแรงดันได้สูงถึง 20 เท่า

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดี่ยวที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ใช้งานกับระบบพลังงานทดแทน ซึ่งมีแรงดันค่อนข้างต่ำ โดยโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดี่ยวที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น เป็นการผสมผสานโครงสร้างของวงจรที่สำคัญสองวงจรคือ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงกำลังสอง (Conventional Quadratic Boost Converter) และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบเซลล์คูณแรงดัน (Voltage Multiplier Cell Boost Converter) โดยการผสมผสานโครงสร้างของวงจรทั้งสองนั้น ทำให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นให้สูงมากกว่า 20 เท่าภายใต้การทำงานของสวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว ซึ่งการเลือกใช้สวิตช์กำลังตัวเดียว จะช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของวงจร และลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์กำลังหลายตัว รายละเอียดของโครงสร้าง หลักการทำงาน รวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น และผลการจำลองสถานการณ์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถเพิ่มระดับแรงดันได้สูงมากกว่า 20 เท่า สำหรับประยุกต์ใช้กับโหลดกระแสตรงที่ต้องการแรงดันสูง หรือต่อเข้ากับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับแบบหนึ่งเฟสเพื่อใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่นำไปใช้งานนั้นต้องเป็นแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าคงที่ จึงจำเป็นต้องทำการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ การควบคุมแรงดันเอาต์พุตนั้นใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ ที่ $400 V_{dc}$ โดยอาศัยหลักการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน จากนั้นจำลองสถานการณ์ในสภาวะต่าง ๆ เช่น เมื่อค่าแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง โหลดตัวต้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลง และค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นมีการเปลี่ยนแปลง เป็นต้น ดังแสดงผลการจำลองสถานการณ์ไว้ในบทที่ 4 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าการทำงานของตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบมานั้น สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ $400 V_{dc}$ ได้

จากการพัฒนาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการเพิ่มค่าแรงดันสูง รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น ต่อมาเป็นการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นดังแสดงไว้ในบทที่ 5 เป็นการแสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับสร้างชุดทดสอบ

ผลการทดสอบชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันสมรรถนะการทำงานของชุดทดสอบที่สร้างขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่มีจุดการทำงานเดียวกัน ซึ่งการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์แสดงไว้ในบทที่ 6 แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของชุดทดสอบที่สร้างขึ้นว่ามีผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ และชุดทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มระดับแรงดันได้สูง 20 เท่า



รายการอ้างอิง

- [1] A. W. N. Husna, S. F. Siraj, and M. Z. Muin, "Modelling of DC-DC Converter for Solar Energy Applications," in *Proc. IEEE Computer and Informatics*, 2012, pp. 125-129.
- [2] T. Shimizu, K. Wada, and N. Nakamura, "Flyback-Type Single-Phase Utility Interactive Inverter with Power Pulsation Decoupling on the DC Input for AC Photovoltaic Module System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, January 2006, pp. 1264-1272.
- [3] J-S. Yoo, J-Y. Choi, M-K. Yang and W-Y. Choi, "Dual Active-Clamped Step-Up DC-DC Converter with Reduced Voltage Stress for Low-DC Renewable Sources," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2012, pp. 1303-1306.
- [4] F. Locment, M. Sechilariu, and I. Houssamo, "DC Load and Batteries Control Limitations for Photovoltaic Systems; Experiment Validation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 9, September 2012, pp. 4030-4038.
- [5] C. Zhang, Z. Zhang, M. Chen and Z. Qian, "An Improved Variable Step-Size Maximum Power Point Tracking (MPPT) Based On Extremum Seeking Control (ESC) in Grid-Connected Photovoltaic Micro-Converter System," in *Proc IEEE Industrial Electronics*, 2012, pp. 1765-1770.
- [6] L-W. Zhou, B-X. Zhu and Q-M. Luo, "High Step-Up Converter with Capacity of Multiple Input," *IET Power Electron.*, vol. 5, no. 5, 2012, pp. 524-531.
- [7] J-P. Lee, B-D. Min, D-W. Yoo, T-J. Kim, and J-Y. Yoo, "A New Topology for PV DC/DC Converter with High Efficiency under Wide Load Range," in *Proc European Power Electronics and Applications*, 2007, pp. 1-6.
- [8] Y. Park, B. Jung, and S. Choi, "Nonisolated ZVZCS Resonant PWM DC-DC Converter for High Step-Up and High-Power Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 8, August 2012, pp. 3568-3575.

- [9] W. Li and X. He, "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 4, April 2011, pp. 1239-1250.
- [10] K. I. Hwu and Y. T. Yau, "An Interleaved AC-D Converter Based on Current Tracking," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, May 2009, pp. 1456-1463.
- [11] B. R. Lin, H. H. Lu, and Y. L. Hou, "Single-Phase Power Factor Correction Circuit with Three-Level Boost Converter," in *Proc. IEEE Industrial Electronics 1999*, pp. 445-450.
- [12] S. Vighetti, J-P. Ferrieux, and Y. Lembeye, "Optimization and Design of a Cascade DC/DC Converter Devoted to Grid- Connected Photovoltaic Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, April 2014, pp. 2018-2027.
- [13] J. M. Kwon and B. H. Won, "High Step-Up Active-Clamp Converter with Input-Current Doubler and Output-Voltage Doubler for Fuel Cell Power Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 1, January 2009, pp. 108-115.
- [14] L. Zhu, "A Novel Soft-Commutating Isolated Boost Full-Bridge ZVS-PWM DC-DC Converter for Bidirectional High Power Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 2, March 2006, pp. 422-429.
- [15] Q. Zhao, and F. C. Lee, "High-Efficiency, High Step-Up DC-DC Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 1, January 2003, pp. 65-73.
- [16] T. F. Wu, Y. S. Lai, J. C. Hung, and Y. M. Chen, "Boost Converter with Coupled Inductors and Buck-Boost Type of Active Clamp," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, January 2008, pp. 154-162.
- [17] H. S. Chung, A. Ioinovici, and W. L. Cheung, "Generalized Structure of Bi-Directional Switched-Capacitor DC/DC Converters," *IEEE Trans. Circuits and Syst.*, vol. 50, no. 6, June 2003, pp. 743-753.

- [18] F. Peng, F. Zhang, and Z. Qian, "A magnetic-less DC-DC Converter for Dual Voltage Automotive Systems," *IEEE Trans. Indust. Applic.*, vol. 39, no. 2, March-April 2003, pp. 511-518.
- [19] R. D. Middlebrook, "Transformerless DC-to-DC Converters with Large Conversion Ratios," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, October 1988, pp. 484-488.
- [20] R. J. Wai, and R. Y. Duan, "High-Efficiency Power Conversion for Low Power Fuel Cell Generation System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, July 2005, pp. 847-856.
- [21] R. Gules, L. L. Pfitscher, and L. C. Franco, "An Interleaved Boost DC-DC Converter with Large Conversion Ratio," in *Proc. IEEE Industrial Electronics*, 2003, pp. 411-416.
- [22] G. A. L. Henn, R. N. A. L. Silva, P. P. Prace, L. H. C. Barreto, and D. S. Oliveira, "Interleaved-Boost Converter with high Voltage Gain," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 11, November 2010, pp. 2753-2761.
- [23] G. R. Walker and P. C. Sernia, "Cascade DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules," in *Proc. IEEE Power Electronic Specialists 2002*, pp. 24-29.
- [24] L. C. Franco, L. L. Pfitscher, and R. Gules, "A New High Static Gain Nonisolated DC-DC Converter," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists 2003*, pp. 1367-1372.
- [25] S. V. G. Oliveira, and I. Barbi, "A Three-Phase Step-Up DC-DC Converter with a Three-Phase High Frequency Transformer," in *Proc. Industrial Electronics 2005*, pp. 571-576.
- [26] M. Prudente, L.L. Pfitscher and R. Gules (2005) "A boost converter with Voltage multiplier cells" in **Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference**, pp. 2716-2721.
- [27] H. Broeck, and I. Tezcan, "1KW Dual Interleaved Boost Converter for Low Voltage Applications," in *Proc. IEEE Power Electronics and Motion Control 2006*, pp. 1-5.
- [28] S. V. Araujo, P. Zacharias, B. Sahan, R. P. Torrico, and F. Antunes, "Analysis and Proposition of a PV Module Integrated Converter with High Voltage Gain Capability in a Non-Isolated Topology," in *Proc. Power Electronics 2007*, pp. 511-517.

- [29] R-J. Wai, W-H. Wang and C-Y. Lin, "High-Performance Stand-Alone Photovoltaic Generation System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, January 2008, pp. 240-250.
- [30] B. Axelrod, Y. Berkovich, and A. Ioinovici (2008) "Switched-Capacitor/Switched-Inductor Structures for Getting Transformerless Hybrid DC-DC PWM Converters" in *Proc. IEEE Circuits and Systems I: Regular Papers*, pp. 687 – 696.
- [31] M. Prudente, L. L. Pfitscher, G. Emmendoerfer, E. F. Romaneli, and R. Gules (2008) "Voltage Multiplier Cells Applied to Non-Isolated DC-DC Converters" in *Proc. IEEE Power Electronics*, pp. 871-877.
- [32] J-M. Kwon, B-H. Kwon, and K-H. Nam, "High-Efficiency Module-Integrated Photovoltaic Power Conditioning System," *IEE Power Electron 2009*, pp. 410-420.
- [33] J-H. Lee, J-H. Park, and J. H. Jeon, "Series-Connected Forward-Flyback Converter for High-Step-Up Power Conversion," *IEEE Power Electron.*, vol. 26, no. 12, December 2011, pp. 3629-2641.
- [34] G. Spiazzi, P. Mattavelli, and A. Costabeber, "High Step-Up Ratio Flyback Converter with Active Clamp and Voltage Multiplier," *IEEE Power Electron.*, vol. 26, no. 11, November 2011, pp. 3205-3214.
- [35] W. Li, and X. He (2011) "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," in *Proc. IEEE Industrial Electronics*, pp. 1239-1250.
- [36] K-J. Lee, B-G. Park, R-Y. Kim and D-S. Hyun, "Nonisolated ZVT Two-Inductor for High Step-Up Applications," *IEEE Power Electron.*, vol. 27, no. 4, April 2012, pp. 1966-1973.
- [37] Y. Park, B. Jung and S. Choi, "Nonisolated ZVZCS Resonant PWM DC-DC Converter for High Step-Up and High-Power Applications," *IEEE Power Electron.*, vol. 27, no. 8, August 2012, pp. 3568-3575.

- [38] S. M. Chen, T. J. Liang, L. S. Yang, and J. F. Chen (2013) “A Boost Converter With Capacitor Multiplier and Coupled Inductor for AC Module Applications” in *Proc. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1503-1511.
- [39] M. S. S. Andrade, L. Schuch, and M. L. S. Martins (2015), “Very high voltage step-up integrated Quadratic-Boost-Zeta converter” in *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 422-427.



ประวัติผู้เขียน

ดร.สุชาติรัตน์ 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



ภาคผนวก

บทความที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่จากโครงการวิจัย

1. A. Nakpin and S. **Khwan-on**, “A high step-up single-switch boost converter for low-voltage source systems,” The 37th Electrical Engineering Conference (EECON37) 2014, pp. 377-380.
2. A. Nakpin and S. **Khwan-on**, “A High Step-Up Single-Switch Boost Converter with Controlled Output Voltage,” The 38th Electrical Engineering Conference (EECON38) 2015, pp. 429-435
3. Annop Nakpin and **Sudarat Khwan-on**, “A Novel High Step-Up DC-DC Converter for Photovoltaic Applications,” *Procedia Computer Science*, 86, 409-412, 2016.
4. จดลิขสิทธิ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์วงจรทบระดับแรงดันแบบสวิตช์เดี่ยวอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายแรงดันต่ำ เลขที่คำขอ 351043 วันที่รับรอง วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2560