

วงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงแบบสวิทช์เดียว



นายรณกร คำบุยา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**A HIGH STEP-DOWN SINGLE-SWITCH
DC-DC CONVERTER**

Ronnakorn Khambuya



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2015**

วงจรถอดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงแบบสวิทช์เดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.ศุภรัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รณกร คำบุยา : วงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงแบบสวิทช์เดียว

(A HIGH STEP-DOWN SINGLE-SWITCH DC-DC CONVERTER) อาจารย์ที่ปรึกษา :

อาจารย์ ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน, 193 หน้า

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ โครงสร้างใหม่ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า สำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายแรงดันสูง โดยวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะทำหน้าที่ลดระดับแรงดันอินพุตจากระบบแหล่งจ่ายแรงดันสูงประมาณ 400 V ให้ได้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ที่ 20 V เพื่อใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการแรงดันต่ำหรือต่อเข้ากับแบตเตอรี่เพื่อเก็บสะสมพลังงาน โดยวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะใช้สวิทช์กำลังเพียงตัวเดียว เพื่อลดกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการใช้สวิทช์กำลังหลายตัว รวมถึงง่ายต่อการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ทั้งนี้การควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ จะอาศัยตัวควบคุมพีไอ ในงานวิจัยนี้จะอธิบายโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น หลักการทำงานของวงจรการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเพื่อเลือกขนาดของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสม รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของวงจร และโดยการออกแบบตัวควบคุมพีไออย่างง่ายที่ใช้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่พัฒนาขึ้น พิจารณาวงจรทำงานภายใต้โหมดนำกระแสต่อเนื่อง นอกจากนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ ที่มีการประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 เพื่อให้ระบบการจำลองสถานการณ์มีความสมจริงมากขึ้น จากนั้นทำการสร้างชุดทดสอบของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบของชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรที่พัฒนาขึ้นมีอัตราลดทอนแรงดันได้สูงถึงประมาณ 20 เท่า สำหรับระบบที่มีแรงดันอินพุตสูงและแรงดันเอาต์พุตต่ำ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

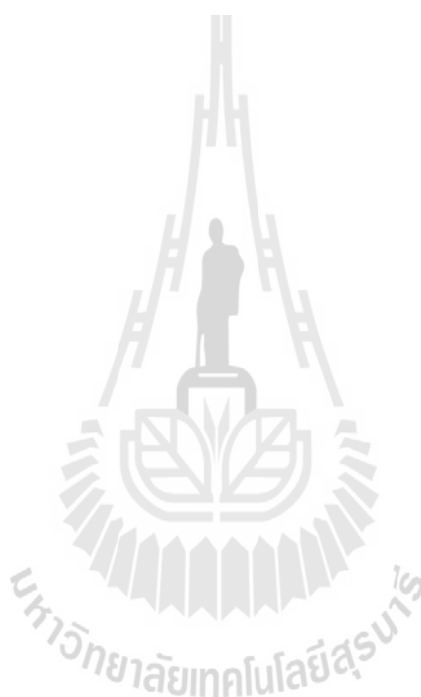
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

RONNAKORN KHAMBUYA : A HIGH STEP-DOWN SINGLE-SWITCH
DC-DC CONVERTER. THESIS ADVISOR : SUDARAT KHWAN-ON,
Ph.D., 193 PP.

DC-DC CONVERTER/ HIGH STEP-DOWN RATIO/ SINGLE SWITCH

This thesis proposes a new topology of a high step-down buck converter with a high conversion ratio of approximately 20 times for high-input and low-output voltage applications. The proposed converter can step down the high input voltage, about 400 V, to the lower output voltage level of approximately 20 V, in order to supply the DC load or to charge the battery for energy storage. The proposed converter employs only one power switch, resulting in the power loss reduction compared to the case that there are many power switches located in the converter. The simple control strategy with the PI controller can be achieved to regulate the output voltage at the constant desired level. In this thesis, the proposed step down converter configuration is presented and the principle of operation for the proposed converter is topological analyzed. The efficiency of the proposed converter is also evaluated. The converter parameters are designed in order to select the proper size of the capacitors and the inductors, operating under the continuous conduction mode (CCM). The parameter gains of the PI controller for the proposed converter are simply designed to obtain the desired output voltage. The simulation results are shown to demonstrate the performance of the proposed converter. In addition, the hardware in loop (HIL) simulation using eZdsp™F28335 is applied to implement the PI controller for the real system. The laboratory prototype of the proposed converter is built for the

experimental testing. Simulation and experimental results show that the proposed converter can achieve the high step-down conversion ratio of approximately 20 for high-input and low-output voltage applications.



School of Electrical Engineering

Student's Signature_____

Academic Year 2015

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร.สุตารัตน์ ขวัญอ่อน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งยังได้ช่วยสละเวลาเพื่อตรวจทาน แก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนกระทั่งมีความสมบูรณ์ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีพร้อมทั้งข้อคิดสำหรับการดำเนินชีวิตให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณนายถาวร หินขุข นายอรรถพล นาคปิ่น ที่ได้คำปรึกษาวิทยานิพนธ์ และที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านในกลุ่มวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ความช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิชาการ และให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา ผู้มีพระคุณ รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนในการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

รณกร คำบุญยา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขีดกลางเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรลดทอนระดับแรงดัน.....	6
2.3 โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดัน.....	9
2.4 สรุป.....	12
3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดทอนแรงดัน	13
3.1 บทนำ.....	13
3.2 โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น.....	13
3.3 หลักการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น.....	14
3.3.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตซ์ตัวเดียว.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ.....	15
3.3.3	วงจรถอดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น.....	15
3.4	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น.....	24
3.4.1	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ.....	24
3.4.2	การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ.....	26
3.5	ผลการจำลองสถานการณ์.....	30
3.5.1	อัตราลดทอนแรงดันของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น.....	30
3.5.2	ความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภายในวงจร.....	32
3.5.3	การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรถอดทอน ระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น.....	38
3.5.4	อัตราลดทอนแรงดันของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ.....	40
3.5.5	ประสิทธิภาพของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น.....	42
3.6	สรุป.....	44
4	การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น.....	45
4.1	บทนำ.....	45
4.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น.....	45
4.2.1	การควบคุมลูปแรงดัน (Voltage Controller Loop).....	46
4.2.2	การควบคุมลูปกระแส (Current Controller Loop).....	46
4.3	ผลการจำลองสถานการณ์.....	53
4.4	สรุป.....	62
5	การสร้างชุดทดสอบ.....	62
5.1	บทนำ.....	63
5.2	โครงสร้างของชุดทดสอบ.....	63
5.3	วงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น.....	65
5.4	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคัลสัญญาณ	70
5.6 วงจรตรวจจับสัญญาณ	71
5.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์	78
5.8 การทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น	79
5.8 สรุป	85
6 ผลการทดสอบ	86
6.1 บทนำ	86
6.2 การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น	86
6.3 การทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น กรณีไม่มีตัวควบคุม	87
6.4 การทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น กรณีมีตัวควบคุม	99
6.5 สรุป	110
7 สรุปและข้อเสนอแนะ	112
7.1 สรุป	112
7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต	113
รายการอ้างอิง	115
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบตั้งเดิม	119
ภาคผนวก ข วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเคสเคดที่ใช้สวิตช์เดียว	128
ภาคผนวก ค วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ	135
ภาคผนวก ง การจำลองสถานการณ์การวิเคราะห์โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง	141
ภาคผนวก จ ความรู้พื้นฐานของบอร์ด DSP	148
ภาคผนวก ฉ โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp TM F28335	151
ภาคผนวก ช ความรู้เบื้องต้นการใช้งานฮาร์ดแวร์ในรูป	169
ภาคผนวก ซ บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา	179
ประวัติผู้เขียน	193

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง	6
3.1 ค่าความเครียดแรงดัน และการประมาณค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	23
3.2 การกำหนดค่าเพื่อคำนวณเลือกพารามิเตอร์ภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	27
3.3 ผลอัตราลดทอนแรงดันจากการวิเคราะห์การทำงานและผลอัตราลดทอนแรงดันจากการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	31
3.4 ค่าความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากการวิเคราะห์การทำงาน และจากการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	33
3.5 ค่าการประมาณพิกัดกระแสจากการวิเคราะห์การทำงาน และค่าพิกัดกระแสจากการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	36
3.6 ผลการเปรียบเทียบค่าการกระเพื่อมของกระแส และแรงดันของวงจรลดทอนแรงดันที่พัฒนาขึ้น	38
3.7 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ	41
3.8 เปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ	43
4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอ	53
4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมชนิดพีไอของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	53
4.3 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการปรับเปลี่ยน	58
5.1 เบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบ	68
5.2 ตารางทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	74
5.3 ตารางทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า	77
6.1 พารามิเตอร์ของชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น กรณีไม่มีตัวควบคุม	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.2 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุต.....	99
6.3 การประเมินประสิทธิภาพ.....	97
6.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับชุดทดสอบและการจำลองสถานการณ์ กรณีมีตัวควบคุม.....	100



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างระบบการแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ต้องการอัตราลดทอนแรงดันสูง..... 2
2.1	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม..... 9
2.2	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส..... 9
2.3	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ..... 10
2.4	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟสองเฟส..... 10
2.5	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ..... 11
2.6	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันสองชั้น..... 11
2.7	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันโดยใช้สวิตช์ตัวเดียว..... 11
3.1	โครงสร้างวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น..... 14
3.2	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว..... 15
3.3	วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ..... 15
3.4	วงจรถอดทอนแรงดันที่พัฒนาขึ้นที่พัฒนาขึ้น..... 16
3.5	วงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์นำกระแส..... 17
3.6	กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์วงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์กำลังนำกระแส..... 17
3.7	วงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส..... 18
3.8	กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์กำลังไม่นำกระแส..... 18
3.9	กระแสและแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรถอดทอนแรงดันที่พัฒนาขึ้นที่พัฒนาขึ้น
(ก)	รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน..... 19
(ข)	ผลการจำลองสถานการณ์รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน..... 19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 อัตราลวดทองแดงคั้นของวงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พัฒนาขึ้นกับค่าวัฏจักรหน้าที่	21
3.11 อัตราขยายแรงคั้นของวงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พิจารณา	22
3.12 กระแส i_{L1} ของวงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พัฒนาขึ้น	24
3.13 กระแส $i_{L2,3}$ ของวงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พัฒนาขึ้น	25
3.14 วงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พัฒนาขึ้น ขณะที่สวิตช์กำลัง ไม่นำกระแส	26
3.15 พารามิเตอร์ของวงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พัฒนาขึ้น	29
3.16 การเปรียบเทียบอัตราขยายแรงคั้นระหว่างผลจากการคำนวณกับ ผลการจำลองสถานการณ์	31
3.17 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงค่าเอาต์พุต ณ จุดทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ	32
3.18 แรงคั้นที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของ วงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พัฒนาขึ้น	34
3.19 แรงคั้นที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พัฒนาขึ้น	35
3.20 ผลการจำลองสถานการณ์ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำภายในวงจร	36
3.21 ผลการจำลองสถานการณ์ค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจร ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25	37
3.22 การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยการออกแบบ เลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่พัฒนาขึ้น	39
3.23 การกระเพื่อมของแรงคั้นที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ โดยการออกแบบ เลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่พัฒนาขึ้น	40
3.24 ผลการจำลองสถานการณ์อัตราลวดทองแดงคั้นวงจรถดทองระดับแรงคั้นแบบต่าง ๆ	41
3.25 ประสิทธิภาพของวงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พิจารณา	42
3.26 ประสิทธิภาพของวงจรถดทองระดับแรงคั้นที่ค่ากำลังงานเอาต์พุตต่าง ๆ	44
4.1 โครงสร้างการควบคุมของวงจรถดทองระดับแรงคั้นที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมพีไอ	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	โครงสร้างวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอในรูปการควบคุมแรงดัน 47
4.3	การควบคุมรูปแรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอ 48
4.4	โครงสร้างวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอในรูปการควบคุมกระแส 50
4.5	การควบคุมรูปกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ 51
4.6	โครงสร้างการควบคุมวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น 52
4.7	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น 54
4.8	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเมื่อปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุต 55
4.9	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต 56
4.10	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน 57
4.11	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น 58
4.12	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเมื่อลดขนาดตัวเหนี่ยวนำเป็น 10 mH 59
4.13	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดตัวเหนี่ยวนำเป็น 20 mH 60
4.14	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเมื่อลดขนาดตัวเก็บประจุเป็น 100 μ F 61
4.15	ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเมื่อลดขนาดตัวเก็บประจุเป็น 400 μ F 61
5.1	โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบ 64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 ชุดทดสอบวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	64
5.3 โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	65
5.4 มอดูลของมอสเฟตเบอร์ IXFR32N80P	65
5.5 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	66
5.6 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	66
5.7 ไดโอดที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	67
5.8 โหลดตัวต้านทานสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	67
5.9 หม้อแปลงปรับแรงดันสามเฟส	68
5.10 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส	69
5.11 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองแรงดัน	70
5.12 วงจรแหล่งจ่ายกระแสตรง	70
5.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด	74
5.14 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคสัญญาณ	71
5.15 ชุดตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	72
5.16 วงจรทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับแรงดัน	73
5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ	75
5.18 ชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้า	76
5.19 วงจรทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับกระแส	76
5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ	81
5.21 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335	80
5.22 ไดอะแกรมการเขียนโปรแกรมของการควบคุม	80
5.23 แผนภาพการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335	81
5.24 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ	82
5.25 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 ผลตอบสนองของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูป	83
5.27 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	84
5.28 การเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป และการจำลองสถานการณ์	85
6.1 การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น	87
6.2 โครงสร้างวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น กรณีไม่มีตัวควบคุม	88
6.3 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15, 0.20 และ 0.25	89
6.4 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15	90
6.5 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15	91
6.6 ผลการทดสอบกระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15	91
6.7 ผลการจำลองสถานการณ์กระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15	92
6.8 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20	92
6.9 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20	92
6.10 ผลการทดสอบกระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20	92
6.11 ผลการจำลองสถานการณ์กระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20	93
6.12 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25	93
6.13 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25	94
6.14 ผลการทดสอบกระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25	94
6.15 ผลการจำลองสถานการณ์กระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25	95
6.16 การเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตจากวิธีต่าง ๆ	96
6.17 การเปรียบเทียบกระแสอินพุต	98
6.18 การเปรียบเทียบกระแสเอาต์พุต	98
6.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพพวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น	99
6.20 โครงสร้างวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น กรณีมีตัวควบคุม	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.21 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 15 V.....	101
6.22 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 15 V.....	101
6.23 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 15 V เป็น 20 V.....	102
6.24 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 15 V เป็น 20 V.....	102
6.25 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 25 V และ จาก 25 V เป็น 20 V.....	103
6.26 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 25 V และ จาก 25 V เป็น 20 V.....	103
6.27 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 15 V และ จาก 15 V เป็น 20 V.....	104
6.28 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 15 V และ จาก 15 V เป็น 20 V.....	104
6.29 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเป็น 20 V.....	105
6.30 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตเป็น 20 V.....	105
6.31 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 100 V เป็น 20 V.....	106
6.32 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมเอาต์พุตจาก 100 V เป็น 20 V.....	106
6.33 ผลทดสอบการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 400 V เป็น 200 V.....	107
6.34 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 400 V เป็น 200 V.....	107
6.35 ผลทดสอบการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 200 V เป็น 400 V.....	108
6.36 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 200 V เป็น 400 V.....	109
6.37 ผลทดสอบการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน.....	110
6.38 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน.....	110

บทที่ 1

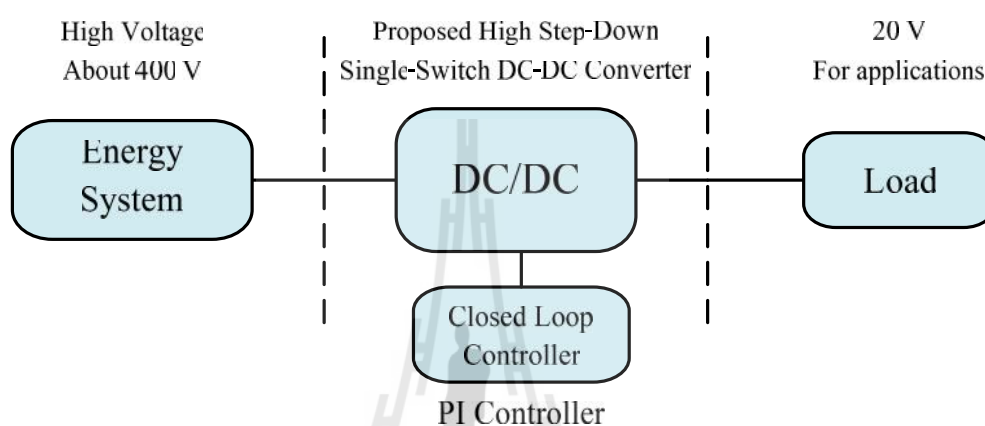
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์ (buck converter) เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้ต่ำกว่าแรงดันอินพุต เป็นวงจรที่นิยมนำมาใช้งาน ในระบบที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าต่ำเมื่อแรงดันอินพุตสูง ซึ่งวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคค์มี ข้อจำกัดในการทำงาน หากต้องการลดทอนระดับแรงดันมาก ๆ โดยวงจรลดทอนระดับแรงดัน แบบบัคค์มีอัตราลดทอนแรงดันต่ำ เมื่อต้องการลดทอนแรงดันให้สูงขึ้น จำเป็นต้องมีวงจรลดทอน ระดับแรงดันแบบบัคค์มาต่ออนุกรมกันหลาย ๆ ชั้น ทำให้ต้องใช้สวิทช์และอุปกรณ์อื่น ๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้กำลังสูญเสียในอุปกรณ์ต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง และหาก ต้องการลดทอนแรงดันได้สูง สวิทช์กำลังจำเป็นต้องทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำมาก ๆ เพื่อที่จะได้อัตราลดทอนแรงดันที่สูง แต่การทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำจะส่งผลให้ประสิทธิภาพ ของวงจรลดลง รวมทั้งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ (Song Xiong, Siu-Chung Wong 2014) เนื่องจาก วงจรสวิทช์กำลังจะมีช่วงเวลาการนำกระแสสั้น และส่งผลให้เกิดการทำงานในโหมดสถานะ กระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Conduction Mode :DCM)

งานวิจัยนี้จะนำเสนอ โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่ พัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งมีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบที่มีแรงดันอินพุต สูงอยู่ที่ประมาณ 400 V โดยต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำประมาณ 20 V โดยสวิทช์กำลังในวงจร ดังกล่าวจะทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่ต่ำเกินไป ดังมีโครงสร้างระบบแสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่งแรงดัน เอาต์พุตที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ในงานที่ต้องการแรงดันต่ำหรือการเก็บสะสมพลังงานในแบตเตอรี่ ในการดำเนินงานจะศึกษาวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ เพื่อหาข้อเด่นข้อด้อยของวงจร ลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ นำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาวงจรลดทอนระดับแรงดันขึ้นมาใหม่ ทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้น การออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ ที่ เป็นส่วนประกอบของ โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น การออกแบบตัวควบคุม พีโอทีใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามที่ต้องการของวงจรที่พัฒนาขึ้น รวมทั้งการ

สร้างชุดทดสอบ เพื่อทดสอบวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ผ่าน โปรแกรม Simulink ใน MATLAB กับผลทดสอบของชุดทดสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น รวมถึงประเมินประสิทธิภาพของวงจร



รูปที่ 1.1 โครงสร้างระบบการแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ต้องการอัตราลดทอนแรงดันสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานและสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงบนโปรแกรม MATLAB
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง
- 1.2.4 เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น
- 1.2.5 เพื่อสร้างชุดทดสอบ สำหรับยืนยันประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้น
- 1.2.6 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวงจร โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยอาศัยการพิจารณากำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 กำหนดแรงดันอินพุตเป็นไฟกระแสตรงเท่ากับ 400 V โดยใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

1.3.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ถูกควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 20 V โดยมีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า

1.3.3 การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์พึ่งพาโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems

1.3.4 สร้างชุดทดสอบเพื่อแสดงประสิทธิภาพของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

1.3.5 การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นใช้ตัวควบคุมพีไอ

1.3.6 ประสิทธิภาพของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นพิจารณาจากผลการจำลองสถานการณ์และผลจากชุดทดสอบ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะโหมดต่อเนื่อง (CCM) เท่านั้น สำหรับวิเคราะห์การทำงานของวงจรและพิจารณาอัตราลดทอนแรงดัน

1.4.2 ประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้นมุ่งเน้นที่อัตราลดทอนแรงดันของวงจรเป็นสำคัญ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง

1.5.2 ได้องค์ความรู้ด้านการออกแบบวงจรลดทอนระดับแรงดันและการควบคุมพีไอ

1.5.3 ได้องค์ความรู้ด้านการสร้างชุดทดสอบวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง

1.5.4 บทความวิจัยได้เผยแพร่ในระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

รายงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงการทำงานพื้นฐานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม จุดเด่นและจุดด้อยของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ รวมถึงการพิจารณาวจรต่าง ๆ เพื่อนำมาพัฒนา วงจรที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงโครงสร้างของวงจรที่พัฒนาขึ้น แนวทางในการพัฒนาวงจรให้มีอัตราลดทอนแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า สำหรับประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำ โดยระบบมีแรงดันอินพุตอยู่ที่ประมาณ 400 V การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น การประเมินประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้น โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ รวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ การเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตคงที่อยู่ที่ 20 V โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นขณะที่มีตัวควบคุมพีไอ ภายใต้การทำงานในสถานการณ์ต่าง ๆ

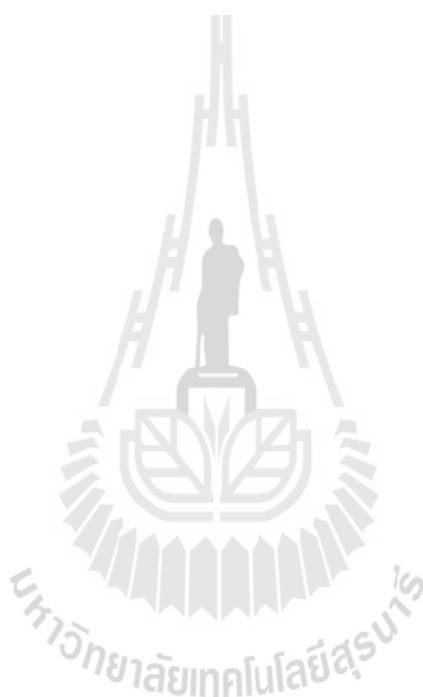
บทที่ 5 กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบประกอบด้วย การสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น วงขยายแรงดันแบบแยกโคดสัญญาณ วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแส และการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335

บทที่ 6 กล่าวถึงการทดสอบของชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น ทั้งกรณีไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุม รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้น แสดงผลการทดสอบวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นทั้งสองกรณี และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้จุดทำงานเดียวกัน

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกประกอบด้วย 7 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม ข. แสดงรายละเอียดของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์เดียว ค. แสดงรายละเอียดของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ภาคผนวก ง. แสดง

รายละเอียดการวิเคราะห์การทำงานสถานะกระแสไม่ต่อเนื่อง ภาคผนวก จ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 ภาคผนวก ฉ. แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 ภาคผนวก ช. แสดงรายละเอียดความรู้เบื้องต้นการใช้งานฮาร์ดแวร์ในรูป และภาคผนวก ซ. นำเสนอบทความที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงาน



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาวงจรถอดทอนระดับแรงดัน ซึ่งในอดีตมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบต่างๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการสำรวจและศึกษางานวิจัยในแขนงดังกล่าว เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาและประยุกต์ใช้กับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ในบทนี้ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอปีที่ตีพิมพ์งานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงอธิบายสาระสำคัญที่ได้ในแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรถอดทอนระดับแรงดัน

ผู้วิจัยได้ดำเนินการค้นคว้าเกี่ยวกับองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยในอดีต ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2002	Kaiwei Yao, Yu Meng and Fred C. Lee	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลิฟแบบสองเฟสเพื่อใช้ในระบบที่มีแรงดันต่ำ ที่ใช้ความถี่ในการสวิตช์สูง
2005	Kaiwei Yao, Yu Meng and Fred C. Lee	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส ในส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจร
2005	Kaiwei Yao, Mao Ye, Ming Xu, and Fred C. Lee	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบช่วยเพิ่มอัตราลดทอนแรงดันตามจำนวนขดลวด

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2005	M. Veerachary	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันสองชั้น เพื่อเพิ่มอัตราลดทอนแรงดันได้เป็นสองเท่า การวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจรเพื่อนำไปสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2007	Sondeep Bassan and Gerry Moschopoulos	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์หลักการทํางานวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันโดยใช้สวิตช์ตัวเดียว นำไปใช้ร่วมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟส นำมาซึ่งการทำงานที่ความถี่สูง
2008	Ortiz-Lopez	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันโดยใช้สวิตช์ตัวเดียว ช่วยให้การลดกำลังการสูญเสียภายในสวิตช์ แสดงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2008	Mohamed El-Zanaty	บทความนี้เสนอโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส ในส่วนของการวิเคราะห์หลักการทํางาน การออกแบบวงจรเพื่อนำไปใช้ในงานที่ต้องการแรงดันต่ำ กระแสสูง
2009	Jinbin zhao	บทความนี้เสนอหลักการทํางานวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควม รวมถึงอธิบายอัตราขยายแรงดันสูง การทํางานภายใต้สภาวะ ZVS
2010	J. Leyva-Ramos, L. H. Diaz-Saldierna and M. G. Ortiz-Lopez	บทความนี้เสนอโครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันโดยใช้สวิตช์ตัวเดียวและการหาตัวควบคุมของวงจร
2011	Iman Rezaei, Mahdi Akhbari	บทความนี้เสนอโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ การวิเคราะห์การทํางาน รวมถึงอัตราลดทอนแรงดัน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง (ต่อ)

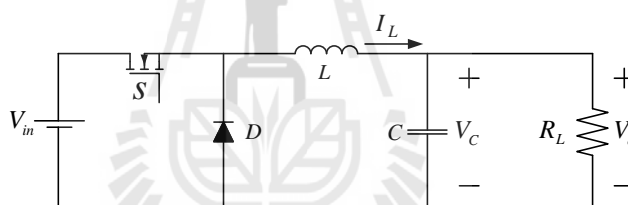
2012	Yan Zhang, Chaoyi Zhang, Jinjun Liu and Yujie Cheng	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือการหาประสิทธิภาพของวงจรเปรียบเทียบกับแบบดั้งเดิม
2012	Rohan Dayal and Leila Parsa	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ การหาพารามิเตอร์ของวงจร
2012	Octavian Cornea, Ovidiu Pelan and Nicolae Muntean	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ การวิเคราะห์หลักการทางาน การออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร
2013	Ovidiu Pelan, Nicolae Muntean, Octavian Cornea and Frede Blaabjerg	บทความนี้เสนอการผสมผสานของวงจรลดทอนระดับแรงดันสองแบบเข้าด้วยกัน ส่งผลให้อัตราลดทอนแรงดันสูงขึ้น
2014	Song Xiong, Siu-Chung Wong	บทความนี้เสนอวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม มีข้อจำกัดอย่างไร ผลที่เกิดจากสถานะกระแสไม่ต่อเนื่อง

จากตารางที่ 2.1 ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงหลากหลายวิธี พบว่า การผสมผสานวงจรลดทอนระดับแรงดันสองแบบเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มอัตราลดทอนแรงดันให้มากขึ้น (Ovidiu Pelan, Nicolae Muntean, Octavian Cornea and Frede Blaabjerg 2012) เป็นวิธีการที่น่าสนใจที่เหมาะสมแก่การนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นที่อัตราลดทอนแรงดันของวงจร และการเลือกใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวรวมถึงจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรเป็นสำคัญ จากนั้นศึกษาโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย จากการสำรวจและศึกษาพบว่า วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (Agasthya Ayachit and Marian K. Kazimierczuk 2013) เป็นวงจรที่มีการนำชุดตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพิ่มเข้ามาในวงจรลดทอนระดับแรงดันทางด้านอินพุต ทำให้สามารถลดทอนระดับแรงดันได้หลายเท่า และอีกหนึ่งวงจรที่น่าสนใจ คือ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ (Iman Rezaei and Mahdi Akhbari 2011) เป็นการนำชุดตัวเหนี่ยวนำและไดโอดมาเพิ่มในวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม

ทางด้านเอาต์พุตของวงจร สำหรับเพิ่มอัตราลดทอนแรงดันให้กับวงจรและลดการกระเพื่อมของกระแสเอาต์พุต ซึ่งในแต่ละวงจรที่ได้กล่าวมานั้นมีจุดเด่นข้อดีของวงจรแตกต่างกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีการประยุกต์ใช้วงจรลดทอนระดับแรงดันมาผสมผสานกันเพื่อให้ได้อัตราลดทอนแรงดันตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

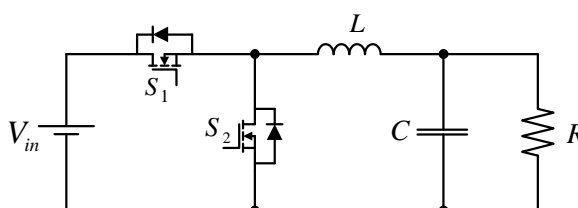
2.3 โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดัน

วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม (conventional buck converter) เป็นวงจรแปลงผันแรงดันกระแสตรงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้ต่ำกว่าแรงดันอินพุต โครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบดั้งเดิมแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 วงจรประกอบไปด้วยสวิตช์ อาจเป็น BJT หรือ MOSFET ทำหน้าที่ตัดต่อวงจร ไดโอด ทำหน้าที่เป็นทางไหลของกระแสในช่วงสวิตช์เปิดวงจร ตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองแรงดันเอาต์พุตให้เรียบขึ้น และตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่สะสมพลังงานและจ่ายพลังงานในช่วงที่สวิตช์ปิดและเปิดวงจรตามลำดับ



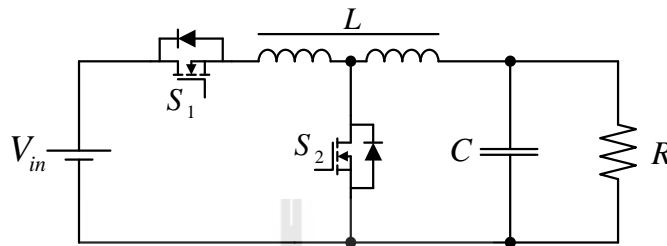
รูปที่ 2.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม

จากข้อจำกัดด้านอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.1 งานวิจัยในอดีตได้มีปรับปรุงโครงสร้างของวงจรเพื่อให้สามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้มากขึ้น โดยรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส (Synchronous buck converter) เป็นการนำสวิตช์มาใช้แทนไดโอด ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ได้มากกว่าวงจรแบบดั้งเดิม เนื่องจากวงจรแบบดั้งเดิมเกิดกำลังสูญเสียภายในไดโอดสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรต่ำ (Kaiwei Yao, Yu Meng and Fred C. Lee 2002)



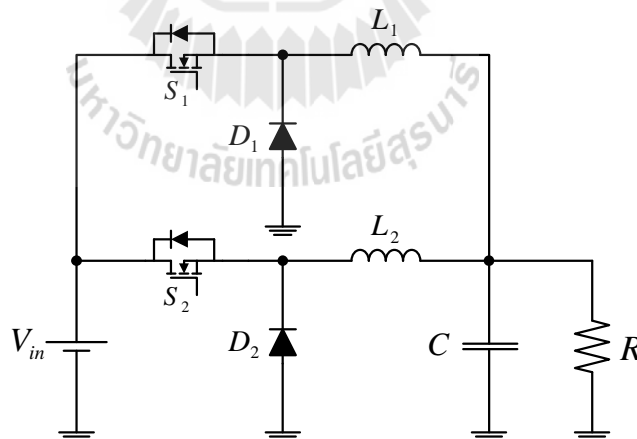
รูปที่ 2.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบซิงโครนัส

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ (Tapped-inductor buck converter) นำตัวเหนี่ยวนำแบบคู่ควบมาใช้เพื่อให้สามารถลดทอนแรงดันมากขึ้น อาศัยหลักการเดียวกันกับจำนวนขดลวดในหม้อแปลง (Kaiwei Yao, Mao Ye, Ming Xu, and Fred C. Lee 2005)



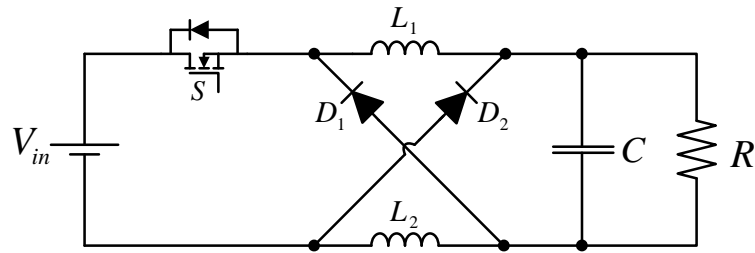
รูปที่ 2.3 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบใช้ตัวเหนี่ยวนำคู่ควบ

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลีฟสองเฟส (Multi-phase interleaved buck converter) เป็นการนำวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมสองวงจรมาต่อขนานกัน ซึ่งช่วยเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า ลดการกระเพื่อมของกระแส และลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (Kaiwei Yao, Yu Meng and Fred C. Lee 2002)



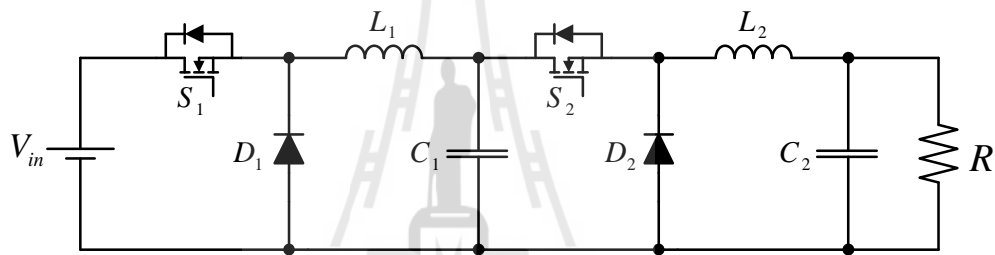
รูปที่ 2.4 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบอินเทอร์ลีฟสองเฟส

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลื่อ (Diode-assisted buck converter) ประกอบด้วย ไดโอดและตัวเหนี่ยวนำอย่างละสองตัว (Iman Rezaei, Mahdi Akhbari 2011)



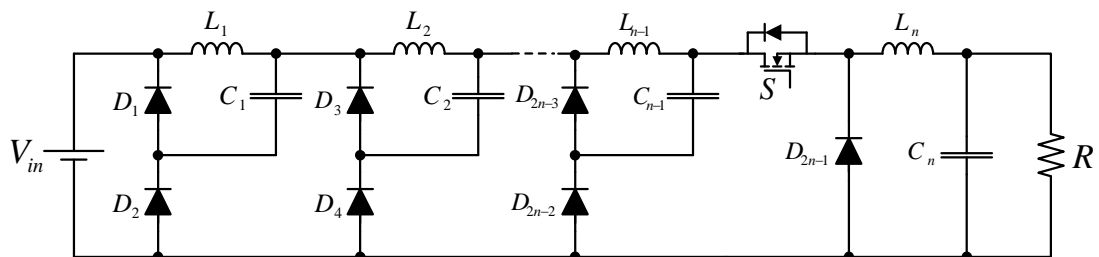
รูปที่ 2.5 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันสองขั้น (cascade buck converter) เป็นการนำวงจรลดทอนแรงดันแบบดั้งเดิมสองวงจรมาค่อเรียงกัน เพื่อให้สามารถได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ (M. Veerachary 2005)



รูปที่ 2.6 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันสองขั้น

รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันโดยใช้สวิตช์ตัวเดียว (Cascade buck converter with a single active switch) วงจรดังกล่าวมีการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด จำนวนมาก และรวมเข้ากับโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม (Ortiz-Lopez 2008)



รูปที่ 2.7 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันโดยใช้สวิตช์ตัวเดียว

2.4 สรุป

งานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาวงจรลดทอนระดับแรงดันที่ทำหน้าที่ลดทอนระดับแรงดันอินพุต เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ โดยดำเนินการศึกษาวงจรลดทอนระดับแรงดันในรูปแบบต่างๆ ที่ปรากฏในงานวิจัยในอดีตเพื่อประมวลข้อดีข้อด้อยของวงจรดังกล่าว ซึ่งงานวิจัยนี้จะประยุกต์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง โดยในงานวิจัยนี้จะดำเนินการลดทอนระดับแรงดันอินพุต 400 V ให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ 20 V โดยในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการพัฒนาโครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันให้มีอัตราลดทอนแรงดันให้สูงขึ้น โดยที่สวิตช์ในวงจรดังกล่าวทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่ต่ำจนเกินไป ดำเนินการวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้น ทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรที่พัฒนาขึ้น จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ของระบบพึ่งพาโปรแกรม Simulink ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystems รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น



บทที่ 3

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดทอนแรงดัน

3.1 บทนำ

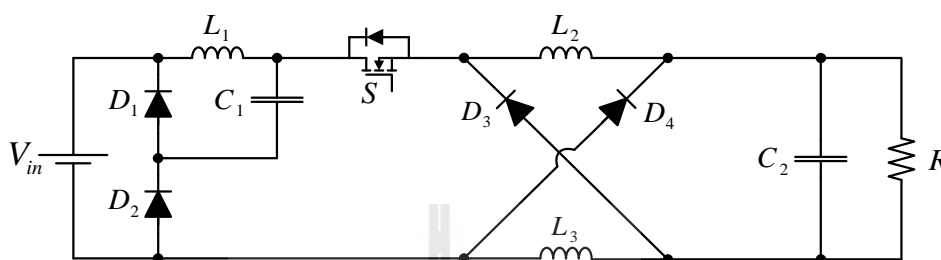
จากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดทอนแรงดันที่มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 พบว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวเป็นทางเลือกที่น่าสนใจที่จะนำมาพัฒนา เนื่องจากสามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการใช้สวิตช์กำลังหลายตัว รวมทั้งช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของวงจร เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของวงจรที่พัฒนาขึ้น แนวทางการพัฒนาวงจรให้มีอัตราลดทอนแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า สำหรับประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำ โดยระบบมีแรงดันอินพุตอยู่ที่ประมาณ 400 V ทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้น ประเมินประสิทธิภาพ รวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจร พร้อมทั้งการเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ

3.2 โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่มาแล้วในอดีต วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบสวิตช์ตัวเดียวถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของวงจร ช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอันเกิดจากการสวิตช์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรอยู่ในระดับที่น่าพอใจ (Song Xiong, Siu-Chung Wong 2014)

โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยวงจรสำคัญสองส่วน คือ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (Cascade buck converter with a single active switch) และวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ (Diode-assisted buck converter) ดังนั้นวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้จึงเป็นการผสมผสาน

การทำงานของแต่ละวงจรข้างต้น เพื่อสามารถลดระดับแรงดันอินพุต จนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ โดยอัตราลดทอนแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า เมื่อมีแรงดันอินพุตอยู่ที่ 400 V ภายใต้การทำงานของสวิตช์กำลังตัวเดียว หลักการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป



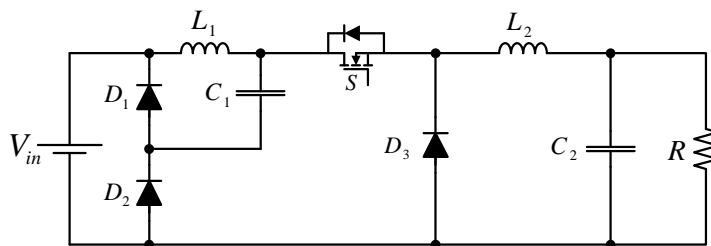
รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

3.3 หลักการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เป็นการนำวงจร 2 วงจรมาผสมผสานใช้งานร่วมกัน คือ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว และวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

3.3.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว

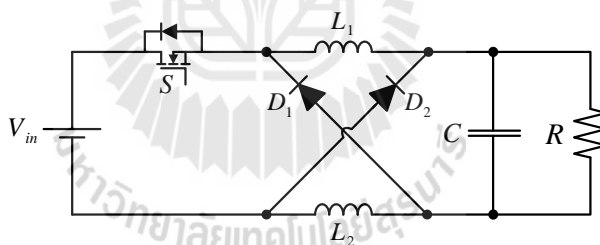
วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว เป็นวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด เข้ากับโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม ทำให้สามารถลดทอนระดับแรงดันได้สูงเป็น 2 เท่าของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม โครงสร้างของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งโครงสร้างของวงจรประกอบไปด้วย สวิตช์กำลัง (S), ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2), ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2) และไดโอด (D_1, D_2, D_3) แสดงรายละเอียดหลักการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวแสดงใน ภาคผนวก ข



รูปที่ 3.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว

3.3.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ เป็นการนำตัวเหนี่ยวนำและไดโอดเข้ามาเพิ่มในวงจรลดทอนระดับแบบดั้งเดิม ซึ่งทำให้สามารถลดระดับแรงดันได้มากกว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สามารถแสดงโครงสร้างของวงจรได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งโครงสร้างของวงจรประกอบไปด้วยสวิตช์กำลัง (S), ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2), ตัวเก็บประจุ (C) และไดโอด (D_1, D_2) แสดงรายละเอียดหลักการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือแสดงใน ภาคผนวก ค

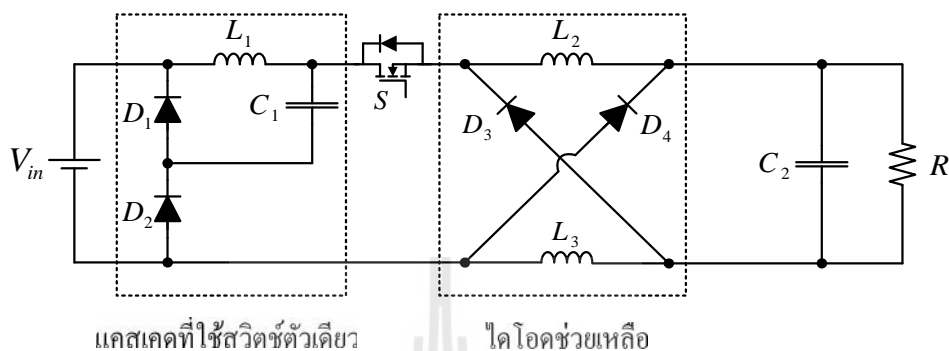


รูปที่ 3.3 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

3.3.3 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น

โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ประยุกต์มาจากวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวและวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ แสดงโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 3.4 ซึ่งโครงสร้างของวงจรประกอบไปด้วยสวิตช์กำลัง (S), ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2, L_3), ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2) และไดโอด (D_1, D_2, D_3, D_4) โดยวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะมีข้อดีตรงที่มีอัตรา

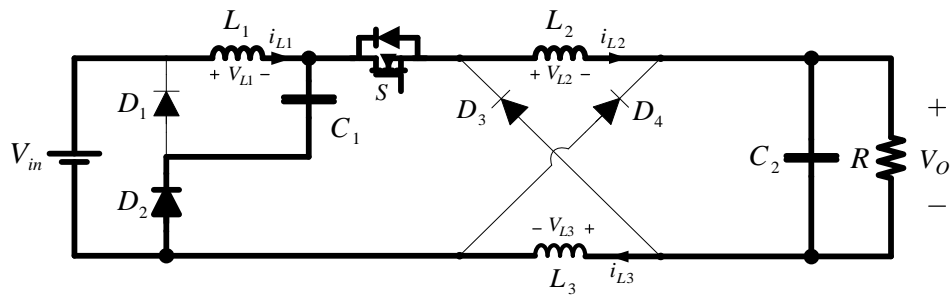
ลดทอนแรงดันสูงเนื่องจากการผสมผสาน วงจรลดทอนระดับแรงดันรวมถึงวงจรมีสวิตช์กำลัง เพียงตัวเดียวทำให้ลดความซับซ้อนในการควบคุมวงจร



รูปที่ 3.4 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

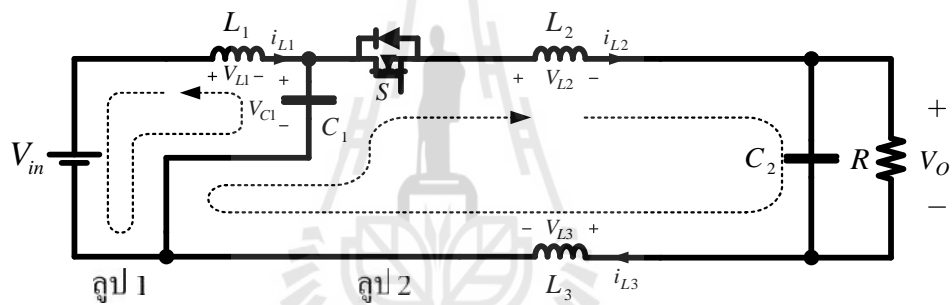
การวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น สามารถพิจารณาการทำงานของวงจรได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสและไม่นำกระแส โดยกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 มีขนาดเท่ากัน

ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส : พบว่าตัวเก็บประจุ C_2 จะเก็บสะสมประจุ ส่วนตัวเก็บประจุ C_1 จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนกับแหล่งจ่ายแรงดัน เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของตัวเก็บประจุดังกล่าวพบว่า ส่งผลต่อลักษณะการทำงานของไดโอด สังเกตได้ว่าไดโอด D_2 สามารถนำกระแสได้เนื่องจากไดโอด D_2 ได้รับการไบอัสตรงจากตัวเก็บประจุ C_1 เพื่อนำกระแสเข้าสู่สวิตช์กำลัง S และอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_2 ที่เก็บสะสมประจุ ในขณะที่ไดโอด D_1 , D_3 และ D_4 ไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากไดโอด D_1 ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_1 ทำให้แรงดันที่ขั้วแอโนดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ($V_{D2} < V_{in}$) ส่วนไดโอด D_3 ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_1 ซึ่งทำให้แรงดันที่ขั้วแอโนดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ($V_{L3} < V_{C1}$) และในลักษณะเดียวกันไดโอด D_4 ได้รับการไบอัสย้อนกลับจากตัวเก็บประจุ C_1 ที่คายประจุ ทำให้แรงดันที่ขั้วแอโนดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ($0 < V_o$) ดังนั้นในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส จึงมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 , L_3 ไดโอด D_2 สวิตช์กำลัง S ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และโหลดต้านทาน R ซึ่งช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุ C_1 จะคายประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_2 และคายประจุไปยังโหลดต้านทาน R



รูปที่ 3.5 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) สามารถพิจารณากฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 2 ลูปการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์กำลังนำกระแส

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

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

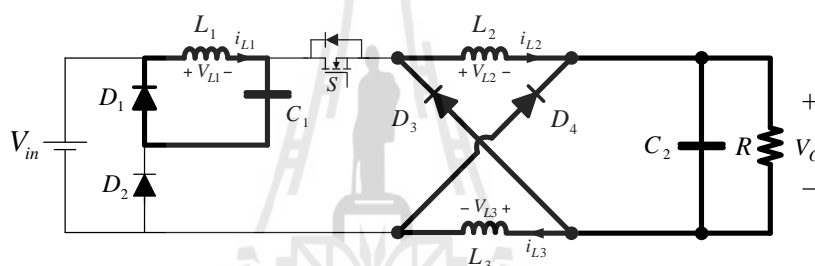
$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = \frac{V_{in} - V_{C1}}{L_1} \quad (3.1)$$

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

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

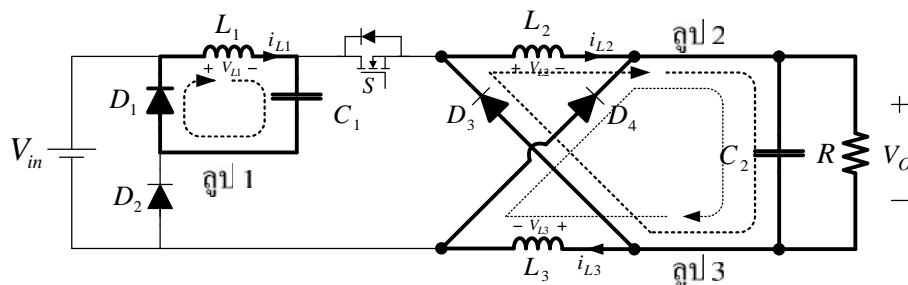
$$\frac{di_{L2,3}}{dt} = \frac{\Delta i_{L2,3}}{\Delta t} = \frac{V_{C1} - V_O}{2L} \quad (3.2)$$

ช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส : พบว่าตัวเก็บประจุ C_1 จะเก็บสะสมประจุ ส่วนตัวเก็บประจุ C_2 จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนกับแหล่งจ่ายแรงดัน เมื่อพิจารณาลักษณะการทำงานของไดโอดพบว่า D_1 , D_3 และ D_4 สามารถนำกระแสได้ โดยที่ไดโอด D_1 จะได้รับการไบอัสตรงจากตัวเก็บประจุ C_1 ซึ่งอยู่ในช่วงสะสมประจุ ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วแอนโอดมีค่ามากกว่าขั้วแคโทด ($V_{C1} > V_{in}$) ส่วนไดโอด D_3 และ D_4 ได้รับการไบอัสตรงจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_2 ซึ่งทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน และไดโอด D_2 จะไม่สามารถนำกระแส เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับจากตัวเก็บประจุ C_1 ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วแอนโอดมีค่าน้อยกว่าขั้วแคโทด ($0 < V_{C1}$) ทำให้ไดโอด D_2 ไม่ทำงาน ดังนั้นในช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส จึงมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3 ไดโอด D_1, D_3, D_4 ตัวเก็บประจุ C_1, C_2 และโหลดตัวต้านทาน R ซึ่งช่วงเวลานี้ตัวเก็บประจุ C_1 จะสะสมประจุ ส่วนตัวเก็บประจุ C_2 จะคายประจุให้กับโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 3.7 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) สามารถพิจารณากฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นออกเป็น 3 ลูปการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ช่วงที่สวิตช์กำลัง ไม่นำกระแส

ลูป 1 ; $V_{L1} + V_{C1} = 0$

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

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = -\frac{V_{C1}}{L_1} \quad (3.3)$$

รูป 2 ; $V_{L2} + V_{C2} = 0$

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

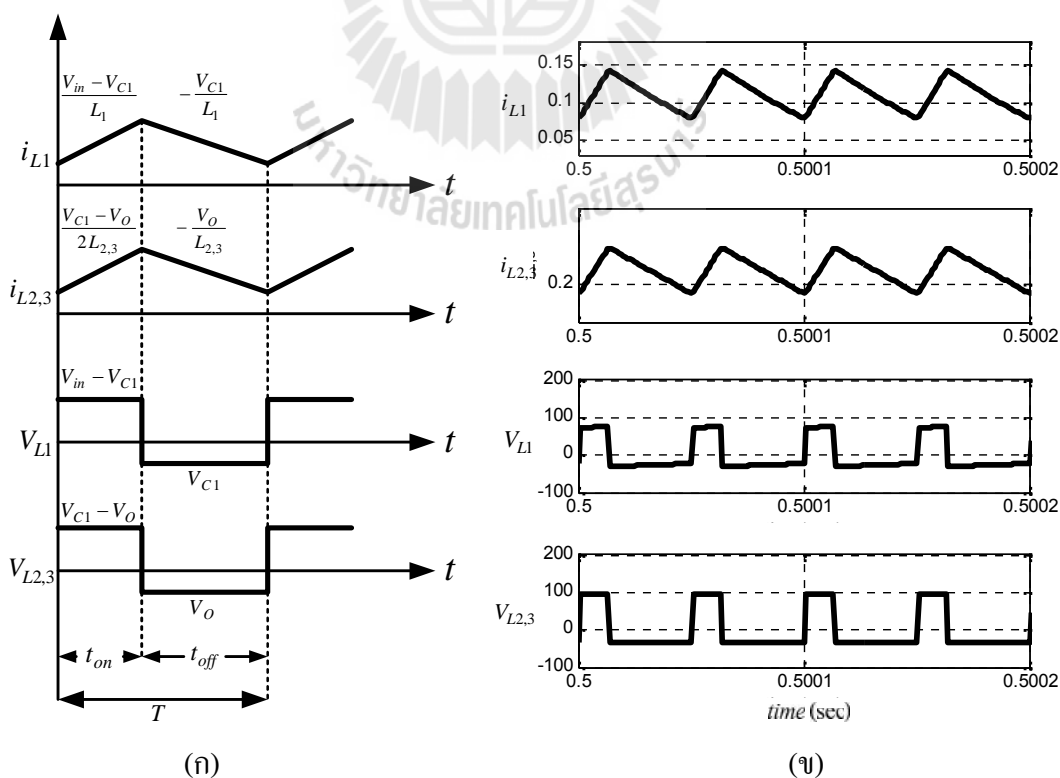
$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{\Delta i_{L2}}{\Delta t} = -\frac{V_O}{L_2} \quad (3.4)$$

รูป 3 ; $V_{L3} + V_{C2} = 0$

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

$$\frac{di_{L3}}{dt} = \frac{\Delta i_{L3}}{\Delta t} = -\frac{V_O}{L_3} \quad (3.5)$$

จากการพิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส และในช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กระแสและแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

(ก) รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน

(ข) ผลการจำลองสถานการณ์รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน

พิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 ในสถานะคงตัว ดังความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.9 เพื่อหาอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

$$L_1 \quad ; \quad (V_{in} - V_{C1})D + (-V_{C1})(1 - D) = 0 \quad (3.6)$$

$$L_2, L_3 \quad ; \quad \left(\frac{V_{C1} - V_o}{2} \right) D + (-V_o)(1 - D) = 0 \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.6) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 กับแรงดันอินพุต แสดงได้ดังนี้

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

$$V_{C1} = V_{in}D \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.7) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 กับแรงดันเอาต์พุต แสดงได้ดังนี้

$$\frac{V_{C1}}{2}D - \frac{V_o}{2}D - V_o + V_oD = 0$$

$$\frac{V_{C1}}{2}D - \left(+\frac{1}{2}D + 1 - D \right) V_o = 0$$

$$\frac{V_{C1}}{2}D - \left(1 - \frac{1}{2}D \right) V_o = 0$$

$$V_o = \left(\frac{D}{2 - D} \right) V_{C1} \quad (3.9)$$

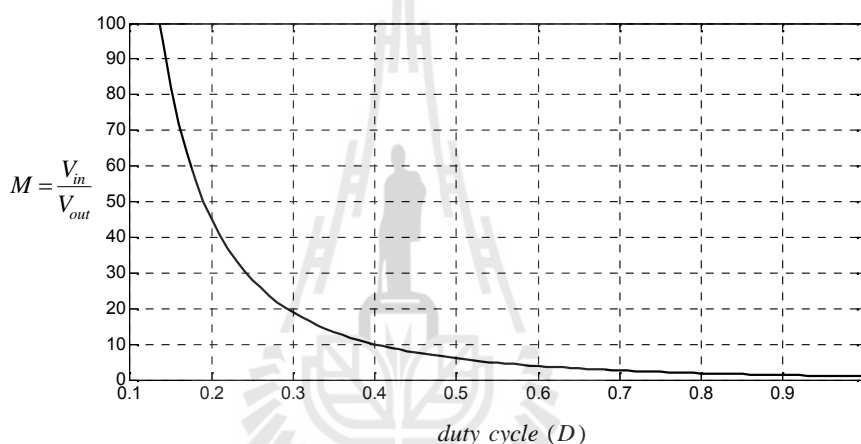
จากสมการที่ (3.9) สามารถหาอัตราลดทอนแรงดัน (M) ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังนี้

$$V_{C1} = \left(\frac{2 - D}{D} \right) V_o$$

โดยที่ $V_{Cl} = V_{in}D$

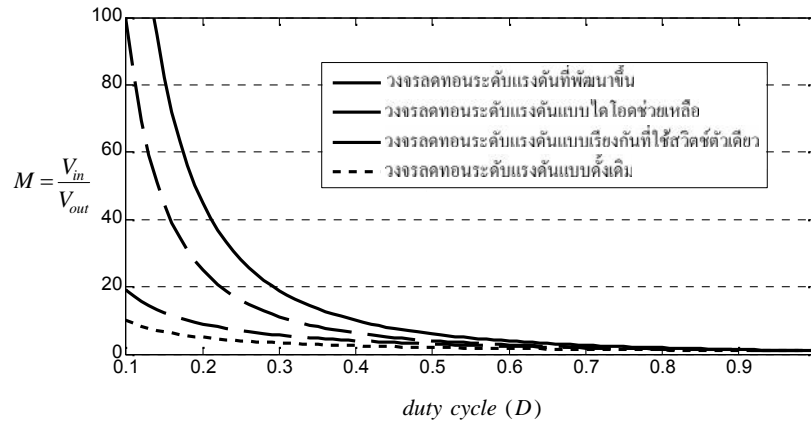
$$M = \frac{V_{in}}{V_o} = \left(\frac{2-D}{D^2} \right) \quad (3.10)$$

จากอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นดังสมการที่ (3.10) สามารถแสดงความสัมพันธ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นและค่าวัฏจักรหน้าที่ได้ดังรูปที่ 3.10 พบว่าเมื่อแรงดันอินพุต 400 V ต้องกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่อยู่ที่ประมาณ 0.3 จึงจะสามารถลดทอนระดับแรงดันเอาต์พุตได้ประมาณ 20 เท่า



รูปที่ 3.10 อัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกับค่าวัฏจักรหน้าที่

จากนั้นพิจารณาอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.11 พบว่าที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ประมาณ 0.3 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีอัตราลดทอนแรงดันอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า ขณะที่วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ และวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว มีข้อจำกัดเรื่องอัตราลดทอนแรงดันในแต่ละวงจร ทำให้วงจรทั้งสามวงจรต้องทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่น้อยมากถึงได้อัตราลดทอนแรงดันเป็น 20 เท่า แสดงให้เห็นว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นที่เกิดจากการนำวงจรลดทอนระดับแรงดันสองวงจรมาผสมผสานกัน ช่วยเพิ่มความสามารถในการลดทอนแรงดัน ทำให้วงจรสามารถลดทอนแรงดันได้สูงขึ้น โดยวงจรทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ไม่ต่ำมาก



รูปที่ 3.11 อัตราลดทอนแรงดันของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พิจารณา

จากนั้นทำการพิจารณาลักษณะการทำงานของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสและหยุดนำกระแสดังรูปที่ 3.5 และ 3.7 ตามลำดับ เพื่อประมาณค่า พิกัดกระแสสูงสุดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของ วงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดย ไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะได้ความสัมพันธ์ของ กำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรดังนี้

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

$$i_{in}V_{in} = i_oV_o$$

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

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

โดยไดโอด D_1 และ D_2 ซึ่งอยู่ฝั่งเดียวกับแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตจะได้รับการไบอัสตรง จากกระแสอินพุต ดังนี้

$$i_{D1} = i_s - i_{in} \quad (3.11)$$

$$i_{D2} = i_s - i_{in} \quad (3.12)$$

ขณะที่ไดโอด D_3 และ D_4 ที่อยู่ฝั่งแรงดันเอาต์พุตได้รับการไบอัสตรงจากตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 ซึ่งกระแสฝั่งเอาต์พุตจะมีค่ามากกว่าฝั่งอินพุต ดังนี้

$$i_{D3} = i_{L2} - i_{L1} \quad (3.13)$$

$$i_{D4} = i_{L3} - i_{L1} \quad (3.14)$$

จากนั้น พิจารณาประมาณค่าพิกัดกระแสของสวิตช์กำลัง S ที่มีค่าประมาณกระแสอินพุต
 ดังสมการ

$$i_s = i_{L1} \quad (3.15)$$

จากการพิจารณาความเครียดแรงดัน (V_{stress}) ของ (Ping Yang, Jianping Xu, Guohua Zhou and Shiyu Zhang, 2012) นำมาประยุกต์ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ขณะสวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส จะได้ความเครียดแรงดัน (V_{stress}) ที่ตกคร่อมสวิตช์กำลัง S และ ไดโอด D_2

$$V_S = \frac{2+D}{2-D} V_{in} \quad (3.16)$$

$$V_{D2} = V_{in} \quad (3.17)$$

เมื่อทำการพิจารณาการทำงานของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ขณะสวิตช์กำลัง S นำกระแส จะได้ความเครียดแรงดัน (V_{stress}) ที่ตกคร่อมไดโอด D_1 , D_3 และ D_4 ดังนี้

$$V_{D1} = V_{in} \quad (3.18)$$

$$V_{D3} = \frac{V_o}{D} \quad (3.19)$$

$$V_{D4} = \frac{V_o}{D} \quad (3.20)$$

ดังนั้น จึงสามารถสรุปความสัมพันธ์ของความเครียดแรงดัน และพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความเครียดแรงดัน และการประมาณค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
 ภายในวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

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

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

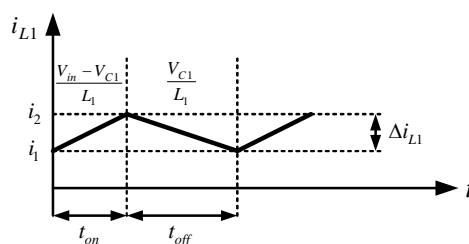
การออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เพื่อหาขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสอินพุตและการกระเพื่อมของแรงดันในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแส และแรงดันจะส่งผลถึงประสิทธิภาพของวงจร โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3 และตัวเก็บประจุ C_1, C_2 เพื่อให้เข้าใจหลักการออกแบบเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3 และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_1, C_2 ซึ่งการออกแบบค่าพารามิเตอร์แสดงได้ตามลำดับดังนี้

3.4.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีผลต่อการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ หากการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าลดลง เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีช่วงที่กระแสเป็นศูนย์ หรือที่เรียกว่าภายใต้การทำงานโหมดสถานะกระแสต่อเนื่อง ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 และ L_3

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L_1 พิจารณาจากกระแส i_{L1} ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.12 จะได้สมการความสัมพันธ์ของช่วงเวลาการไหลของกระแส i_{L1} และสมการสำหรับหาค่าตัวเหนี่ยวนำ L_1 ดังนี้



รูปที่ 3.12 กระแส i_{L1} ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

จาก $T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off}$ แทนค่า $t_{on,L1} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{V_{in} - V_{C1}}$ และ $t_{off,L1} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{V_{C1}}$

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

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

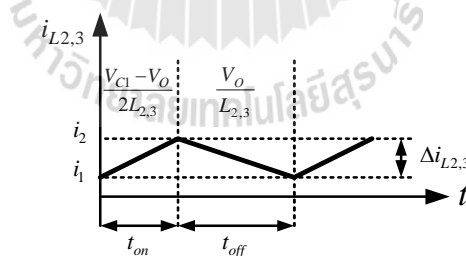
เมื่อแทนค่า $V_{C1} = DV_{in}$ จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 ที่มีค่าน้อยที่สุดที่สามารถนำมาใช้ได้ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นดังนี้

$$L_1 \geq \frac{D(V_{in} - DV_{in})}{\Delta i_{L1} \times f} \quad (3.21)$$

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

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 โดยกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นสามารถแสดงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 แสดงดังรูปที่ 3.13 จะได้ความสัมพันธ์ของช่วงเวลาการไหลของกระแส $i_{L2,3}$ และสมการสำหรับหาค่าตัวเหนี่ยวนำ L_2, L_3 ดังนี้



รูปที่ 3.13 กระแส $i_{L2,3}$ ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

จาก $T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off}$ แทนค่า $t_{on} = 2L_{2,3} \frac{\Delta i_{L2,3}}{V_{C1} - V_O}$ และ $t_{off} = L_{2,3} \frac{\Delta i_{L2,3}}{V_O}$

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

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

เมื่อแทนค่า $V_{C1} = DV_{in}$ จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 น้อยที่สุดที่สามารถนำมาใช้ได้ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นดังนี้

$$L_{2,3} \geq \frac{V_O(DV_{in} - V_O)}{\Delta i_{L2,3} \times f \times (V_O + DV_{in})} \quad (3.22)$$

3.4.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีผลต่อการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ซึ่งหากแรงดันมีการกระเพื่อมสูงจะส่งผลให้กับตัวเก็บประจุเสียหายได้ และหากขนาดตัวเก็บประจุไม่เหมาะสมแรงดันเอาต์พุตจะมีการกระเพื่อมมากเกินไปทำให้ไม่เป็นผลดีสำหรับการนำไปใช้งาน ดังนั้นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_1

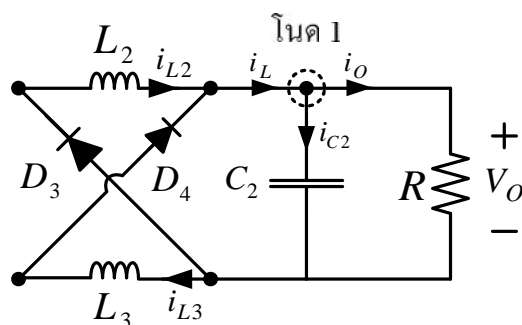
การออกแบบตัวเก็บประจุ C_1 พิจารณาจากการออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (Agasthya Ayachit and Marian K. Kazimierczuk, 2013) จะพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบตัวเก็บประจุ C_1 น้อยที่สุดที่สามารถนำมาใช้ได้

$$C_1 \geq \frac{(1-D)}{D} \frac{V_O}{4 \times L_1 \times \Delta v_{C1} \times f^2} \quad (3.23)$$

การออกแบบเลือกพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ C_2

การออกแบบตัวเก็บประจุ C_2 จะพิจารณาช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส แสดงดังรูป

3.14



รูปที่ 3.14 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ขณะที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส

เมื่อพิจารณากระแส i_{C2} ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในช่วงสวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส เพื่อทำการหาค่าของตัวเก็บประจุ C_2

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

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

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

จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ C_2 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น
ดังนี้

$$C_2 \geq \frac{i_L \times D}{f \times \Delta V_{C2}} \quad (3.24)$$

สำหรับการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์จะถูกกำหนดขึ้น โดยวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะถูกสมมติให้เป็นวงจรในอุดมคติ คือไม่มีกำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นภายในวงจร ค่าที่เลือกใช้ในการคำนวณเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์แสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าเพื่อคำนวณเลือกพารามิเตอร์ภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

กำหนดค่าที่ใช้ในการคำนวณเลือกพารามิเตอร์			
V_{in}	400 V		
R	20 Ω		
f	20 kHz		
D	0.3		
I_{in}	0.056 A	i_{L1}	0.168 A
I_o	1.058 A	i_{L2}	0.539 A
V_{C1}	120 V	i_{L3}	0.539 A
V_o	21.17 V	Δi_{L1}	0.148 A
ΔV_{C1}	0.12 V	Δi_{L2}	0.107 A
ΔV_o	0.21 V	Δi_{L3}	0.107 A

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ส่งผลต่อการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะทำให้วงจรที่พัฒนาขึ้นทำงานภายใต้การทำงานโหมดสภาวะกระแสต่อเนื่อง (CCM) เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจากโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นพบว่า ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 คือกระแสที่มาจากฝั่งอินพุต ซึ่งกระแสอินพุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีค่าน้อยอยู่แล้ว และการกำหนดกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ให้มีค่าน้อยจึงทำให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีขนาดที่ใหญ่ตามไปด้วย รวมถึงราคาของตัวเหนี่ยวนำมีราคาค่อนข้างสูง หากเลือกขนาดพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 ที่ใหญ่เกินไป ส่วนค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีผลต่อประสิทธิภาพรวมไม่มากนัก ดังนั้นค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 จะมีการกระเพื่อมอยู่ที่ 90% ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 จากการกำหนดค่าการกระเพื่อมของกระแส i_{L1} ไว้ที่ 90% ผู้วิจัยได้คำนึงถึงขนาดที่เหมาะสมควบคู่ไปกับราคาของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งหากกำหนดค่าการกระเพื่อมของกระแส i_{L1} ที่น้อยกว่านี้จะทำให้ราคาของตัวเหนี่ยวนำ L_1 ค่อนข้างสูง ไม่เหมาะสมสำหรับสร้างชุดทดสอบ และค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 อยู่ที่ 20% ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 การออกแบบเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 แสดงได้ดังต่อไปนี้

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 พิจารณาได้จากสมการที่ (3.21)

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

$$L_1 \geq \frac{0.3(400 - 120)}{0.148 \times 20 \times 10^3}$$

$$L_1 \geq 28.25 \text{ mH}$$

และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 เป็นตัวเหนี่ยวนำในชุดไดโอดช่วยเหลือที่ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน พิจารณาได้จากสมการที่ (3.22) ดังนี้

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

$$L_{2,3} \geq \frac{21.17(120 - 21.17)}{0.108 \times 20 \times 10^3 \times (21.17 + 120)}$$

$$L_{2,3} \geq 6.87 \text{ mH}$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นนั้น ส่งผลต่อการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ การออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 แสดงได้ดังนี้

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_1 พิจารณาได้จากสมการที่ (3.23) ดังนี้

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

$$C_1 \geq \frac{(1-0.3)}{0.3} \frac{21.17}{4 \times 28.25 \times 10^{-3} \times 0.12 \times (20 \times 10^3)^2}$$

$$C_1 \geq 9.1 \text{ } \mu\text{F}$$

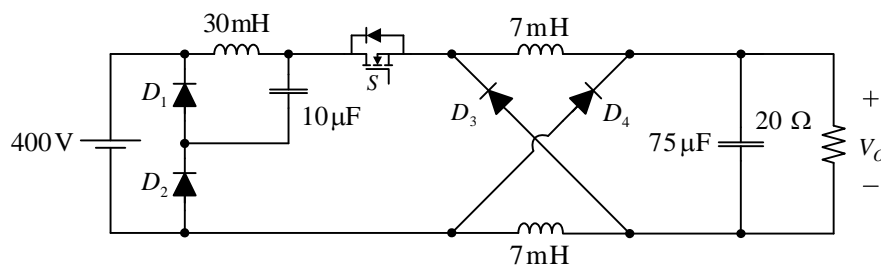
และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ C_2 พิจารณาได้จากสมการที่ (3.24) ดังนี้

$$C_2 = \frac{i_L \times D}{f \times \Delta V_{C2}}$$

$$C_2 = \frac{1.058 \times 0.3}{20 \times 10^3 \times 0.211}$$

$$C_2 = 75 \text{ } \mu\text{F}$$

จากการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ สามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3 และตัวเก็บประจุ C_1, C_2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 พารามิเตอร์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

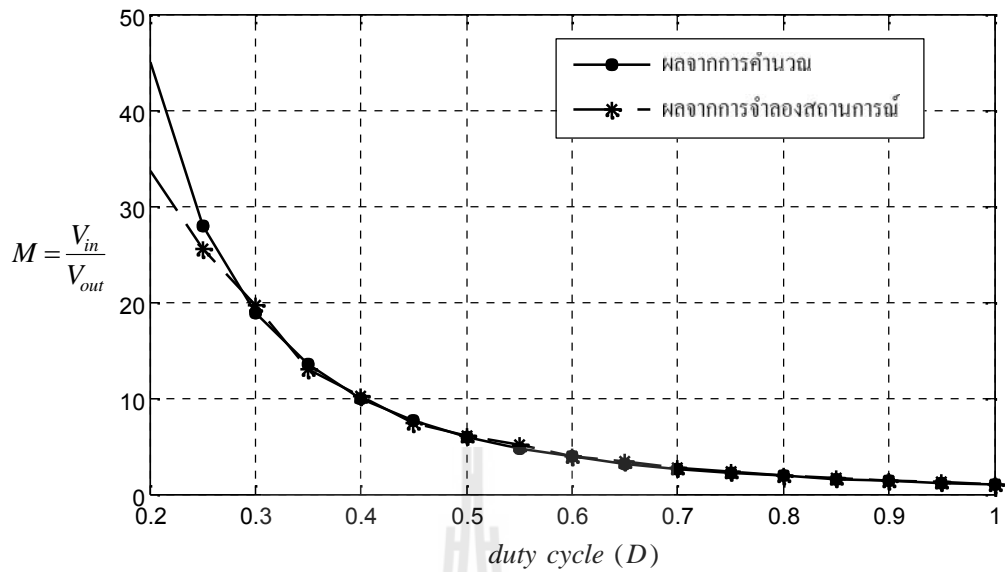
3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น จำเป็นต้องทำการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบมา ว่ามีค่าเหมาะสมกับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดแรงดันอินพุตเป็น 400 V และค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้แสดงไว้ในรูปที่ 3.15 ทำการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่เป็น 0.25 , 0.50 และ 0.75 เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของอัตราลดทอนแรงดัน ความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรที่ได้วิเคราะห์ไว้ข้างต้นและการประมาณค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจร จากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราลดทอนระดับแรงดันระหว่างผลการคำนวณจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกับผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันว่าค่าที่ทำการเปรียบเทียบนั้นมีความสอดคล้องกัน

3.5.1 อัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

จากการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ได้ความสัมพันธ์ของอัตราลดทอนระดับแรงดันดังสมการที่ (3.25) จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกับผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 พบว่าค่าอัตราลดทอนแรงดัน (M) ที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่วิเคราะห์ไว้ข้างต้น และค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Simulink ใน MATLAB ค่าอัตราลดทอนแรงดันทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ตั้งแต่ 0.3 ลงไปจะเห็นว่าค่าอัตราลดทอนแรงดันของผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีอัตราลดทอนแรงดันน้อยกว่าผลจากการคำนวณ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ไม่เป็นอุดมคติ รวมถึงเมื่อวงจรทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำส่งผลให้สวิตช์กำลังมีช่วงเวลาการนำกระแสสั้นๆ ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Conduction Mode :DCM) ส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียภายในวงจร ผลการจำลองสถานการณ์ขณะที่เกิดสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่องแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ง.

$$M = \frac{V_{in}}{V_o} = \frac{(2-D)}{D^2} \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันระหว่างผลจากการคำนวณกับผลการจำลองสถานการณ์

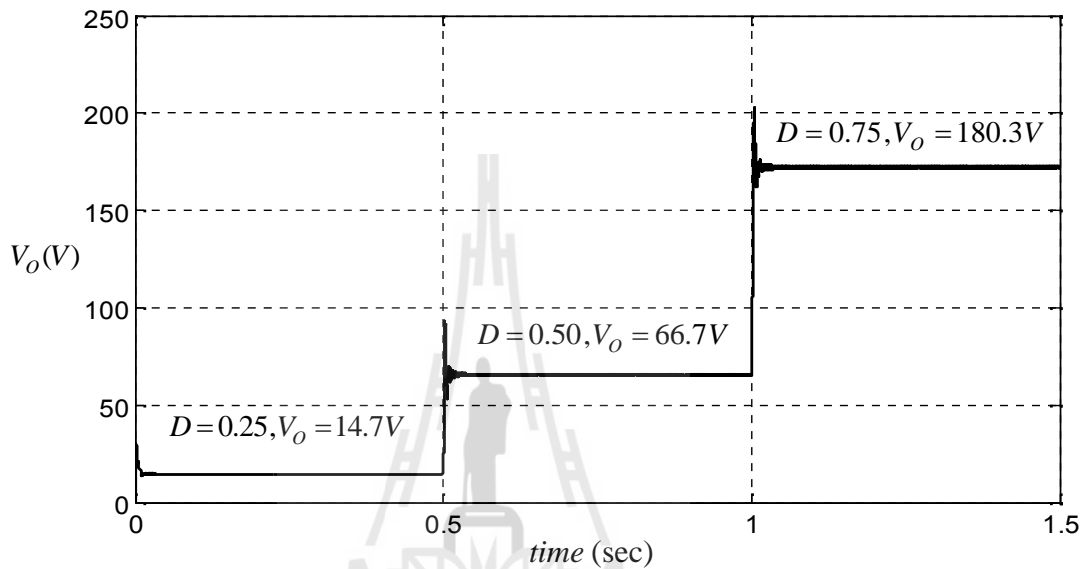
จากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันและแรงดันเอาต์พุต ระหว่างผลการคำนวณจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังตารางที่ 3.3 พบว่าค่าอัตราลดทอนแรงดันและแรงดันเอาต์พุตของผลการคำนวณจากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกับผลการจำลองสถานการณ์นั้น มีความใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3.3 ผลอัตราลดทอนแรงดันจากการวิเคราะห์การทำงานและผลอัตราลดทอนแรงดันจากการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

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

ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อหาค่าแรงดันเอาต์พุต ณ จุดการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า ณ จุดทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.5 แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น 66.7 V และ 0.75 แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น 180.3 V

แรงดันเอาต์พุตที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการอัตราลดทอนแรงดัน ดังสมการที่ (3.25) และเมื่อพิจารณาที่จุดการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25 แรงดันเอาต์พุตมีค่าคลาดเคลื่อน เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ไม่เป็นอุดมคติและผลของกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อมีค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำ



รูปที่ 3.17 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงค่าเอาต์พุต ณ จุดทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ

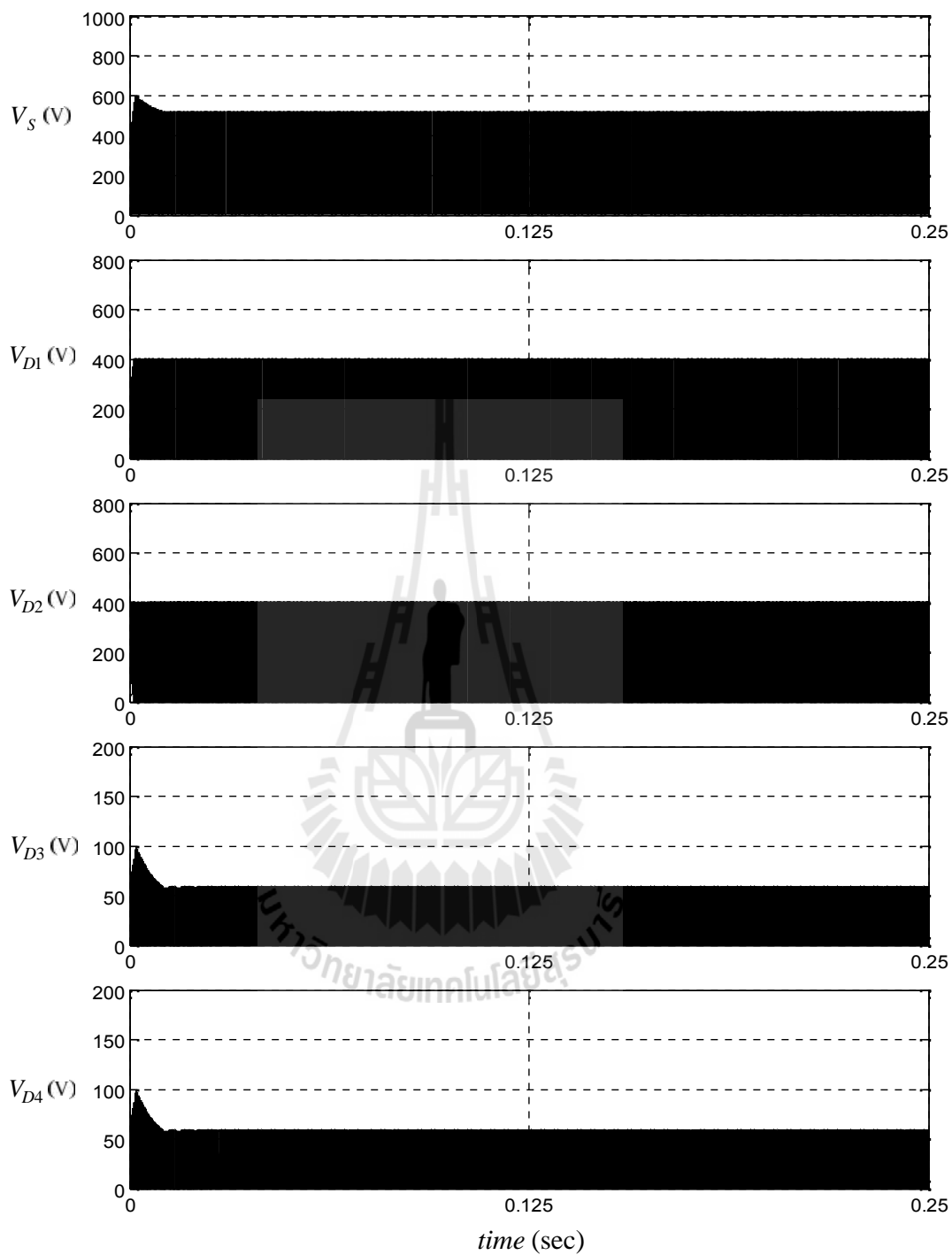
3.5.2 ความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจร

จากการวิเคราะห์หลักการทำงาน โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น และการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.15 ทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโครงสร้างดังกล่าว เพื่อแสดงผลค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยทำการตรวจสอบแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อเป็นแนวทางพิจารณาเลือกพิกัดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อไม่ให้ชุดทดสอบเกิดความเสียหายในกรณีที่มีความเครียดแรงดันตกคร่อมเกินกว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทนได้ แสดงการจำลองสถานการณ์ โดยกำหนดให้แรงดันอินพุตเท่ากับ 400 V ทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.18 และ 3.19 ส่วนผลการจำลอง

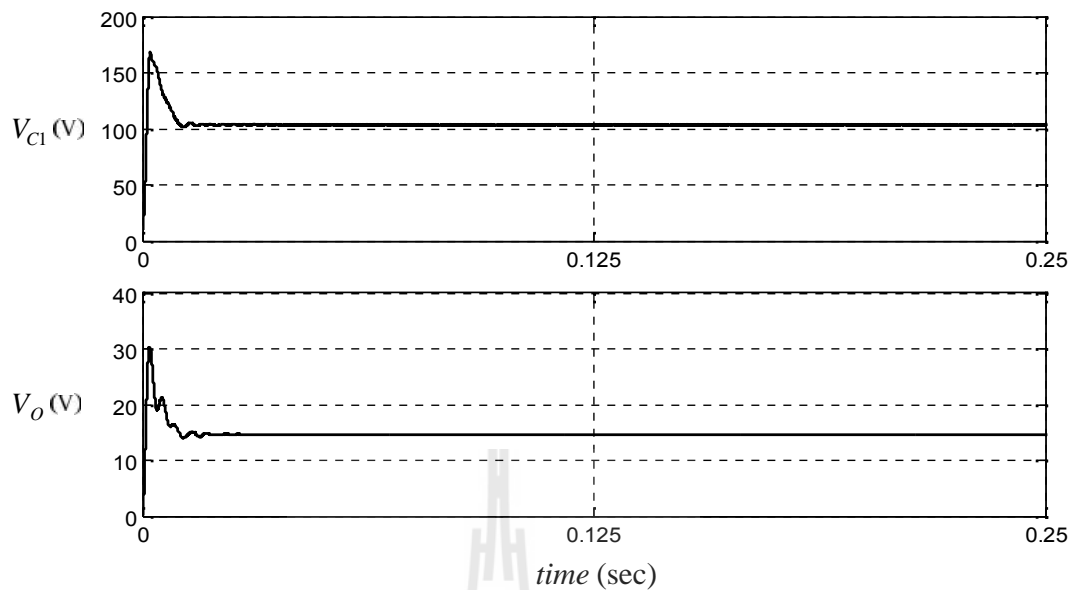
สถานการณ์การประมาณพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจร แสดงได้ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันและกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นที่ได้ เปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น แสดงได้ดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 โดยผลการเปรียบเทียบความเครียดแรงดันและกระแสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นระหว่างผลจากการคำนวณกับผลจากการจำลองสถานการณ์นั้นมีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกัน อาจมีค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ไม่เป็นค่าอุดมคติ และผลของความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เมื่อมีการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความเครียดแรงดันของสวิตช์กำลัง S ไดโอด D_3 , D_4 และตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 เพิ่มสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 3.4 ค่าความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากการวิเคราะห์การทำงาน และจากการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

ผลจากการคำนวณ				ผลการจำลองสถานการณ์			
พารามิเตอร์	ค่าวัฏจักรหน้าที่			พารามิเตอร์	ค่าวัฏจักรหน้าที่		
	0.25	0.50	0.75		0.25	0.50	0.75
M	28	6	2.22	M	27.2	6.07	2.22
V_S	514.3 V	666.7 V	880 V	V_S	520 V	668 V	871 V
V_{D1}	400 V	400 V	400 V	V_{D1}	400 V	400 V	400 V
V_{D2}	400 V	400 V	400 V	V_{D2}	400 V	400 V	400 V
V_{D3}	57.12 V	133.3 V	240 V	V_{D3}	58.6 V	132.2 V	233 V
V_{D4}	57.12 V	133.3 V	240 V	V_{D4}	58.6 V	132.2 V	233 V
V_{C1}	100 V	200 V	300 V	V_{C1}	103.6 V	200 V	296.4 V
V_O	14.3 V	66.7 V	180 V	V_O	14.7 V	66.7 V	180.3 V



รูปที่ 3.18 แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรตอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

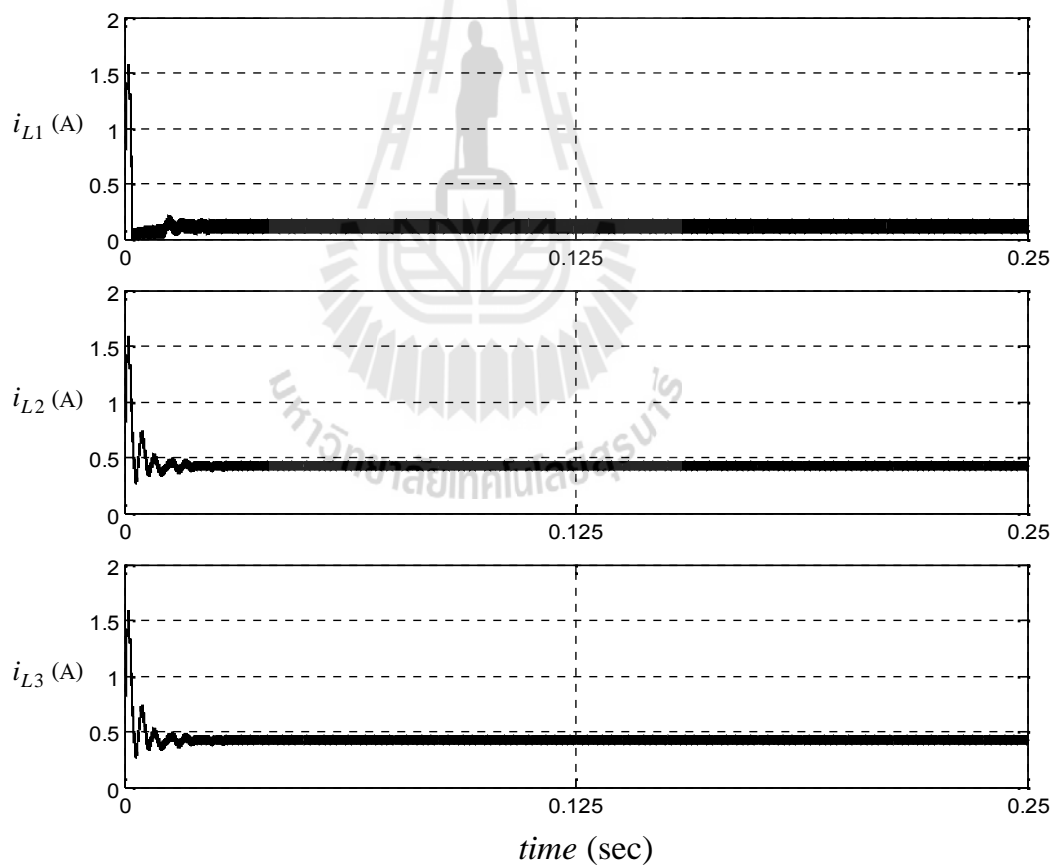


รูปที่ 3.19 แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

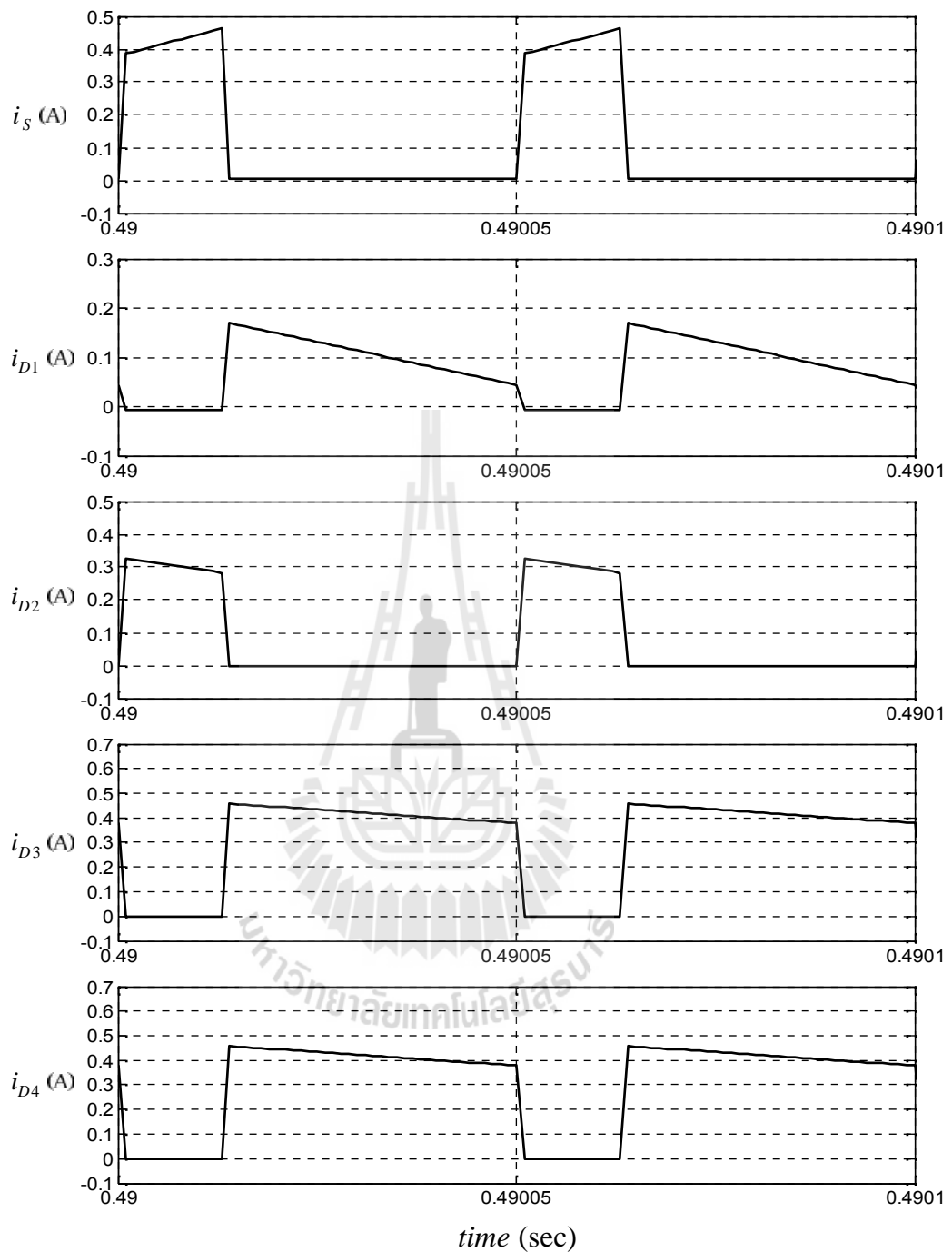
การประมาณพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรได้ทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเช่นเดียวกับการหาความเครียดแรงดันตกคร่อม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกพิกัดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับสร้างชุดทดสอบ และเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของชุดทดสอบเกิดความเสียหาย จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากการวิเคราะห์การทำงานกับผลการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังตารางที่ 3.6 พบว่ากระแสที่ไหลผ่านสวิทช์กำลัง (i_s) ผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ อาจมีค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ไม่เป็นค่าอุดมคติ รวมถึงสมการที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรไม่คำนึงถึงกำลังสูญเสียภายในวงจร จากนั้นแสดงทำการจำลองสถานการณ์การทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เป็น 0.25 โดยกำหนดแรงดันอินพุตเท่ากับ 400 V ผลการจำลองสถานการณ์ค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจร แสดงดังรูปที่ 3.20 และผลการจำลองสถานการณ์ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำภายในวงจร แสดงดังรูปที่ 3.21 พบว่าที่สภาวะคงตัวกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 เป็นการทำงานภายใต้โหมดสภาวะกระแสต่อเนื่อง (CCM) และเมื่อพิจารณากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 พบว่ากระแส i_{L1} มีค่าน้อย อาจส่งผลให้เกิดการทำงานภายใต้โหมดสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่อง (DCM) หากเลือกขนาดตัวเหนี่ยวนำ L_1 ไม่เหมาะสม และหากทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สูงขึ้นกระแสที่ไหลสวิทช์กำลัง S และไดโอด D_1, D_2, D_3, D_4 จะมีค่ากระแสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้ต้องคำนึงถึงช่วงการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่สูงด้วย

ตารางที่ 3.5 ค่าการประมาณพิกัดกระแสจากกรวิเคราะห์การทำงาน และค่าพิกัดกระแสจากการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

ผลจากการคำนวณ				ผลการจำลองสถานการณ์			
พารามิเตอร์	ค่าวัฏจักรหน้าที่			พารามิเตอร์	ค่าวัฏจักรหน้าที่		
	0.25	0.50	0.75		0.25	0.50	0.75
i_s	0.12 A	1.09 A	5.66 A	i_s	0.12 A	1.08 A	5.55 A
i_{D1}	0.08 A	0.53 A	1.33 A	i_{D1}	0.08 A	0.55 A	1.44 A
i_{D2}	0.08 A	0.53 A	1.33 A	i_{D2}	0.08 A	0.53 A	1.33 A
i_{D3}	0.33 A	1.1 A	1.78 A	i_{D3}	0.33 A	1.11 A	1.89 A
i_{D4}	0.34 A	1.1 A	1.79 A	i_{D4}	0.34 A	1.12 A	1.89 A



รูปที่ 3.20 ผลการจำลองสถานการณ์ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำภายในวงจร



รูปที่ 3.21 ผลการจำลองสถานการณ์ค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายใน วงจร ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25

เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์แรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของ วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น สังเกตเห็นว่าค่าแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กำลังภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น มีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกันระหว่างผลการ

จำลองสถานการณ์กับผลทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยการวิเคราะห์หาความเครียดแรงดันไฟฟ้า และการประเมินค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ ภายในวงจร เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับสร้างชุดทดสอบซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 5 ต่อไป

3.5.3 การออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

พิจารณาผลการจำลองสถานการณ์แรงดันที่ตกคร่อมที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น พบว่าพิกัดของแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ง่ายนำไปสร้างการทดสอบจริงได้ ทำการจำลองสถานการณ์โดยกำหนดให้แรงดันอินพุตเป็น 400 V ทำงานมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.3 ผลการจำลองสถานการณ์สามารถสรุปผลการกระเพื่อมได้ดังตารางที่ 3.6 และสามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของกระแสและแรงดันที่ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23 ตารางที่ 3.6 ผลการเปรียบเทียบค่าการกระเพื่อมของกระแส และแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	ค่าการกระเพื่อมที่กำหนดใช้ในการออกแบบ	ค่าการกระเพื่อมจากการจำลองสถานการณ์ (max-min)
i_{L1}	0.18 A	90 % = 0.162 A	0.26 - 0.1 = 0.16 A
i_{L2}	0.59 A	20 % = 0.118 A	0.65 - 0.55 = 0.1 A
i_{L3}	0.59 A	20 % = 0.118 A	0.65 - 0.55 = 0.1 A
V_{C1}	119.7 V	0.1 % = 0.1197	119.95 - 119.35 = 0.6 V
V_O	20.28 V	1 % = 0.2028	20.32 - 20.24 = 0.08 V

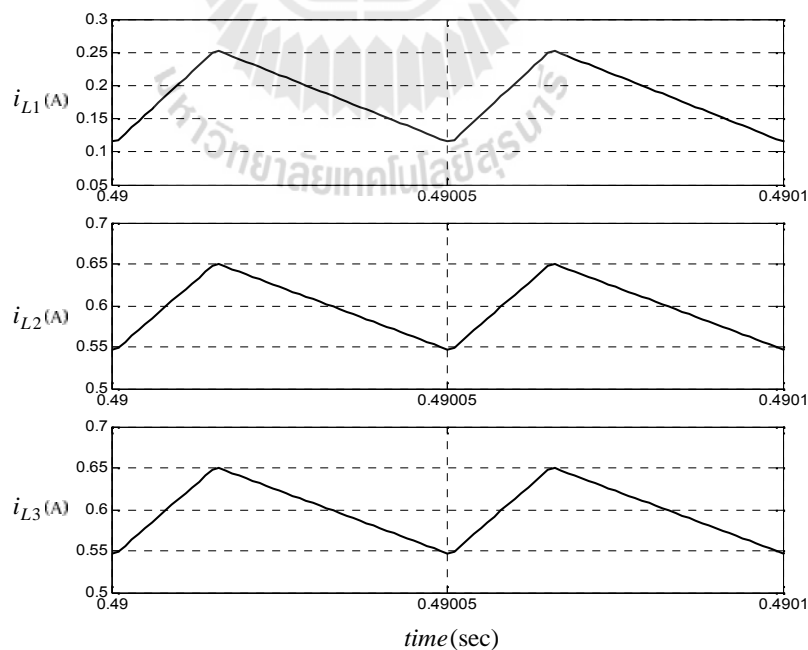
จากรูปที่ 3.22 และ 3.23 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของกระแสและแรงดันที่ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แสดงเงื่อนไขการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

ตัวเหนี่ยวนำ L_1 : ตัวเหนี่ยวนำ L_1 กำหนดค่าการกระเพื่อมของกระแสไม่เกิน 90% ของกระแส i_{L1} ทั้งหมด โดยเลือกตัวเหนี่ยวนำขนาด 30 mH ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 พบว่าค่ากระแส i_{L1} มีค่าการกระเพื่อมอยู่ที่ 0.16 A คิดเป็น 88.89% ของกระแส i_{L1}

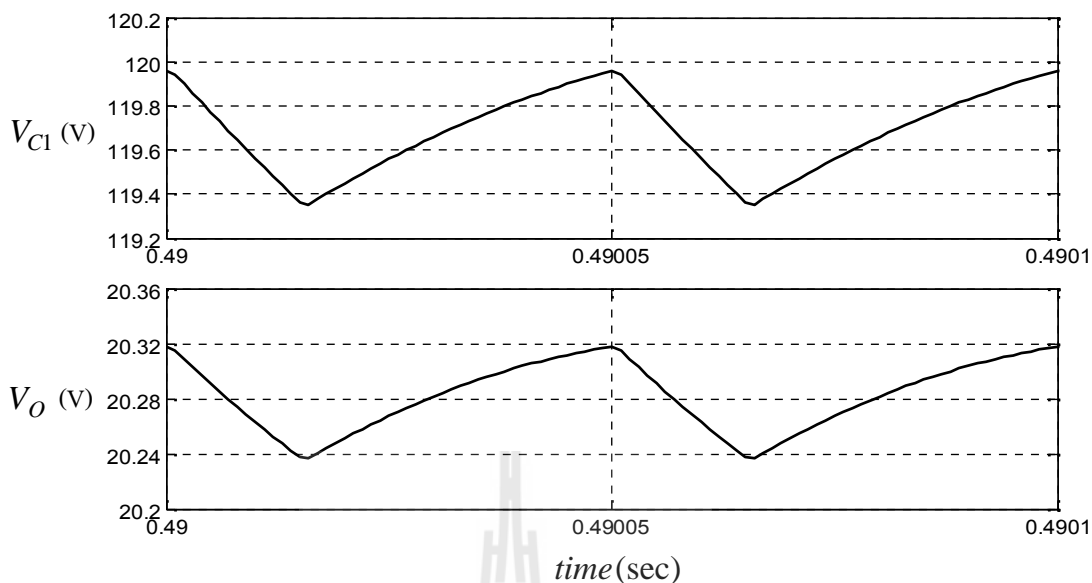
ตัวเหนี่ยวนำ L_2 , L_3 : การออกแบบเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำจากสมการที่ (3.22) เลือกตัวเหนี่ยวนำทั้งสองให้มีขนาดเท่ากันที่ 7 mH กำหนดค่าการกระเพื่อมของกระแสไม่เกิน 20% ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์พบว่าค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองมีค่าการกระเพื่อมอยู่ที่ 0.1 A คิดเป็น 16.95% ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3

ตัวเก็บประจุ C_1 : การออกแบบตัวเลือกค่าตัวเก็บประจุ C_1 จากสมการที่ (3.23) ตัวเก็บประจุ C_1 จะต้องมีขนาดมากกว่า 9.1 μF เลือกใช้ 10 μF โดยกำหนดค่าการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ที่ 0.1% ของแรงดัน V_{C1} ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 มีค่าการกระเพื่อมของแรงดัน V_{C1} อยู่ที่ประมาณ 0.6 V คิดเป็น 0.5% ซึ่งถือว่าการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 ยังอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

ตัวเก็บประจุ C_2 : การออกแบบตัวเลือกค่าตัวเก็บประจุ C_2 จากสมการที่ (3.24) โดยกำหนดค่าการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่เกิน 1% ของแรงดัน V_o เลือกตัวเก็บประจุ C_2 ให้มีขนาด 75 μF ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 มีค่าการกระเพื่อมของแรงดัน V_{C1} อยู่ที่ประมาณ 0.08 V คิดเป็น 0.39% ซึ่งอยู่ภายใต้ข้อกำหนด คือ ไม่เกิน 1%



รูปที่ 3.22 การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.23 การกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ โดยการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่พัฒนาขึ้น

จากผลการจำลองสถานการณ์การกระเพื่อมของกระแส และแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ ภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการออกแบบเลือกนั้นมีค่าสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้ข้อกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบเลือกใช้นี้จะถูกนำไปพิจารณาเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์สร้างชุดทดสอบจริง ซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 5

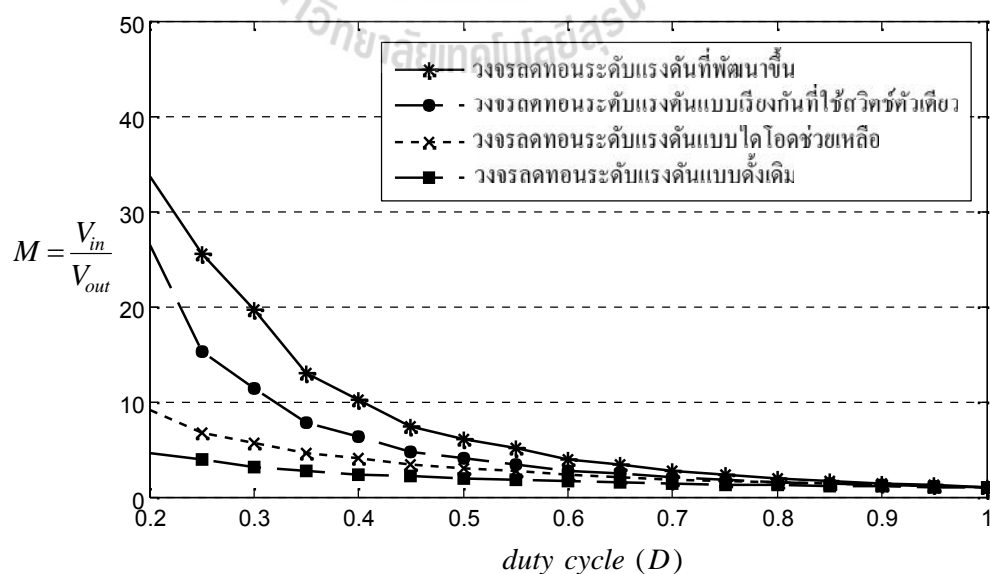
3.5.4 อัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ

ทำการเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ โดยวงจรลดทอนระดับแรงดันที่นำมาเปรียบเทียบกันจะใช้ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรเหมือนกันทั้งหมด โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ แสดงดังตารางที่ 3.7 พิจารณาสมรรถนะของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยการตรวจสอบผลที่ได้เปรียบเทียบกับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดัน จำนวนอุปกรณ์ รวมถึงประสิทธิภาพของวงจรลดทอนแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ

พารามิเตอร์	วงจรลดทอนระดับแรงดัน			
	ที่พัฒนาขึ้น	แบบดั้งเดิม	แบบไดโอดช่วยเหลือ	แบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว
V_{in}	20 V			
f_{sw}	20 kHz			
L_1	15 mH	15 mH	15 mH	15 mH
L_2	15 mH	-	15 mH	15 mH
L_3	15 mH	-	-	-
C_1	180 μ F	180 μ F	180 μ F	180 μ F
C_2	180 μ F	-	-	180 μ F
R	20 Ω			

จากผลการเปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ ณ ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25 แสดงให้เห็นถึงอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีอัตราลดทอนแรงดันที่สูงกว่าแบบอื่น ๆ จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ ณ จุดการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ เพื่อคุณภาพรวมของอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันเปรียบเทียบกับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.24 พบว่า ณ จุดการทำงานของค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีอัตราลดทอนแรงดันที่สูงกว่าแบบอื่น ๆ

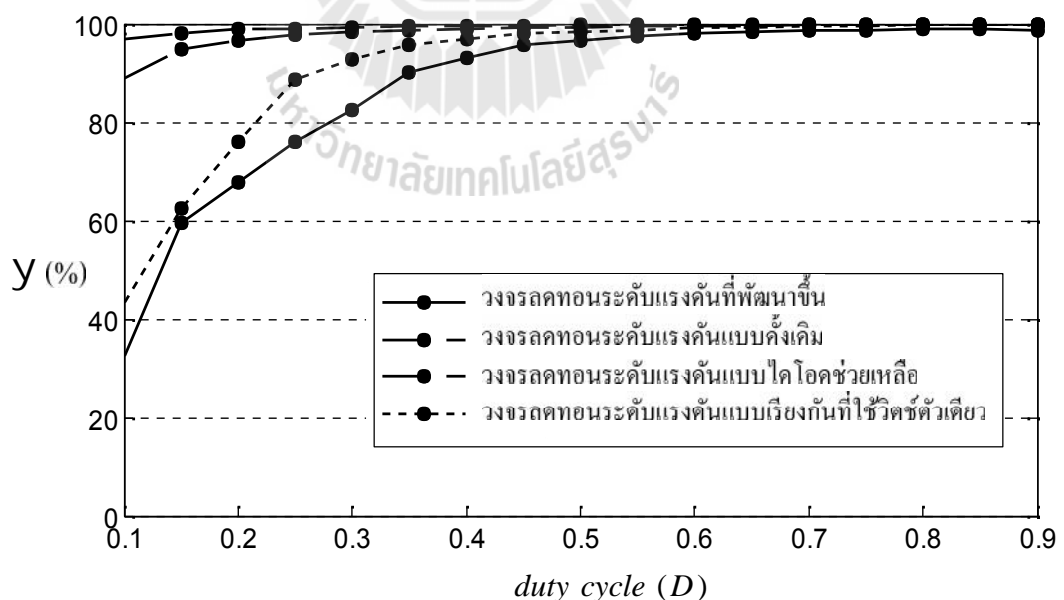


รูปที่ 3.24 ผลการจำลองสถานการณ์อัตราลดทอนแรงดันวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ

3.5.5 ประสิทธิภาพของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

ทำการประเมินประสิทธิภาพของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น สามารถพิจารณาประสิทธิภาพได้ดังสมการที่ (3.26) เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของวงจรเปรียบเทียบกับที่จุดการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรเหมือนกันทั้งหมดดังตารางที่ 3.8 ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 3.25 พบว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีค่าประสิทธิภาพน้อยกว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบอื่น ๆ เนื่องจากวงจรที่พัฒนาขึ้นมีจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มากกว่าวงจรอื่น ๆ จึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพมีค่าน้อยกว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ แต่เมื่อพิจารณาอัตราลดทอนระดับแรงดันวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นยังมีอัตราลดทอนแรงดันที่สูงกว่าแบบอื่น และเมื่อพิจารณาที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.3 แรงดันเอาต์พุตที่ได้ประมาณ 20 V ซึ่งมีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า ประสิทธิภาพของวงจรจะอยู่ที่ประมาณ 83.55 % แม้ว่าประสิทธิภาพจะน้อยกว่าวงจรแบบอื่น ๆ แต่ค่าประสิทธิภาพของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

$$y = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{i_o V_o}{i_{in} V_{in}} \times 100\% \quad (3.26)$$



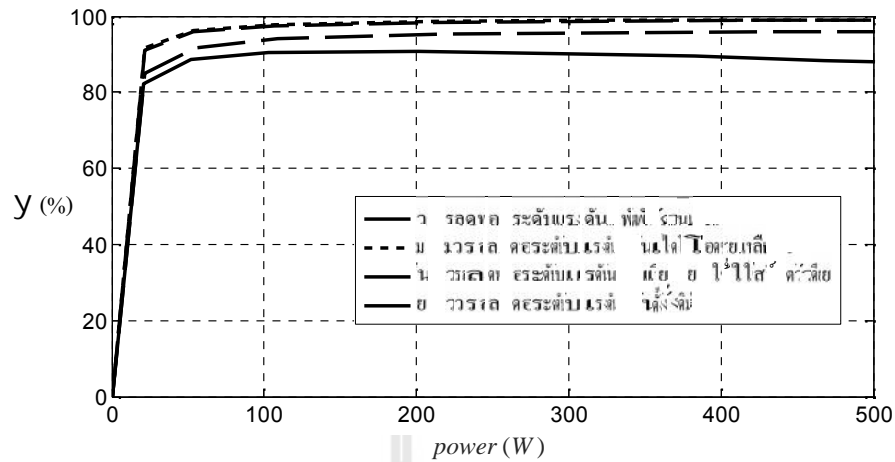
รูปที่ 3.25 ประสิทธิภาพของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พิจารณา

สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 3.8 จะเห็นว่าวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ณ จุดการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25 มีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 25 เท่า เมื่อเทียบกับวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีอัตราลดทอนแรงดันดีกว่า ในส่วนของประสิทธิภาพวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 75.88 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของวงจรถดทอนที่พัฒนาขึ้นมีค่าประสิทธิผลน้อยกว่าวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบอื่น ๆ เนื่องจากวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีจำนวนอุปกรณ์มากกว่าในแบบอื่น ๆ ทำให้เกิดกำลังสูญเสียภายในวงจรสูงมากกว่าวงจรถดทอนอื่น ๆ

ตารางที่ 3.8 เปรียบเทียบอัตราลดทอนแรงดันของวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ

วงจรถดทอนระดับแรงดัน	กำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25			
	จำนวนอุปกรณ์	อัตราลดทอนแรงดัน(เท่า)	แรงดันเอาต์พุต (V)	ค่าประสิทธิภาพ (%)
แบบดั้งเดิม	4	3.87	103.39	99.09
แบบไดโอดช่วยเหลือ	6	6.77	59.08	97.77
แบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว	7	15.31	26.13	88.72
พัฒนาขึ้น	10	25.47	15.71	75.88

จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์โดยปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นที่ค่ากำลังงานเอาต์พุตต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.26 จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวพบว่า ค่ากำลังงานเอาต์พุตของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีค่าประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ เนื่องจากจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีจำนวนมากกว่าวงจรถดทอนอื่น ๆ ส่งผลทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในวงจรสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพมีค่าน้อยกว่าวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบอื่น ๆ



3.26 ประสิทธิภาพของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่ค่ากำลังงานเอาต์พุตต่าง

3.6 สรุป

จากการศึกษาวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบต่าง ๆ นำมาสู่การพัฒนาวงจรถอดทอนระดับแรงดัน 20 เหว ซึ่งได้นำเสนอโครงสร้างของวงจร การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจร และการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับเลือกค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในวงจร รวมทั้งประเมินประสิทธิภาพของวงจร หาความเครียดแรงดันที่ตกคร่อมและการประมาณพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

พิจารณาเลือกค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงาน พัฒนาขึ้นรวมถึงเป็นพื้นฐานสำหรับการเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับสร้างชุดทดสอบจริง จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นว่าวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 20 เหว ในแรงดันที่ตกคร่อมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีค่าสอดคล้องเป็นไปตามทฤษฎีวิเคราะห์ข้างต้น ทั้งนี้จะสังเกตว่ากระแส และแรงดันภายในอุปกรณ์กำลังที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ในช่วงสภาวะชั่วครู่จะมีการพุ่งเกินของทั้งกระแสและแรงดันสูงมากก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งการพุ่งเกินเหล่านี้อาจส่งผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรเกิดความเสียหาย ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 20 V และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการพุ่งเกินของกระแสและแรงดัน โดยการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะนำเสนอในบทต่อไป

บทที่ 4

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

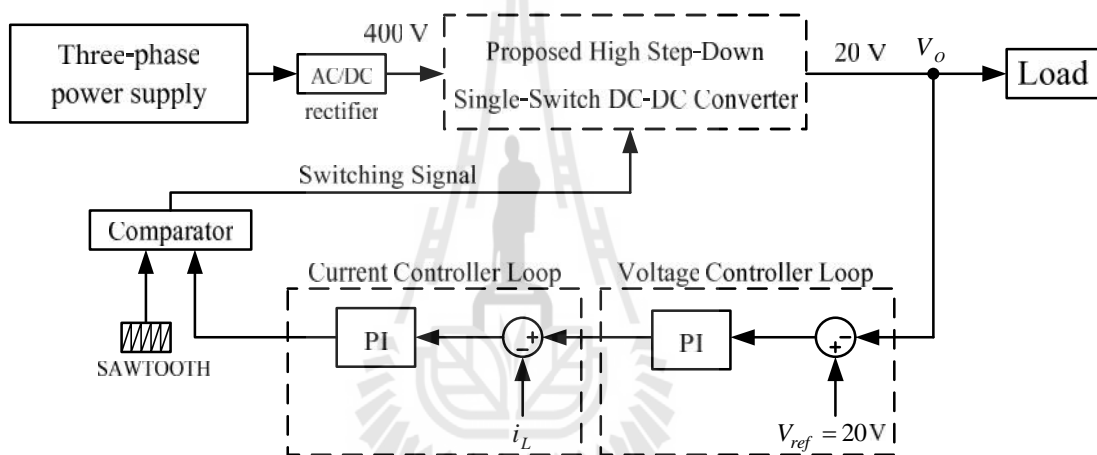
4.1 บทนำ

จากการนำเสนอการวิเคราะห์หลักการทำงานและการออกแบบเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น รวมถึงการจำลองสถานการณ์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ในบทที่ผ่านมา ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นขณะไม่มีตัวควบคุม โดยวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีแรงดันอินพุตเป็น 400 V ซึ่งสวิตช์ทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ประมาณ 0.25 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้ประมาณ 15 V เป็นอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 26 เท่า ทั้งนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต้องการวงจรลดทอนระดับแรงดันที่สามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้ที่ประมาณ 20 V สำหรับงานที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำ และต้องการระดับแรงดันที่คงที่ จากผลการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นขณะไม่มีตัวควบคุมในบทที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า กระแสและแรงดันเอาต์พุตภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะมีการพุ่งเกิน ณ สภาวะชั่วคราว ซึ่งการพุ่งเกินของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับกระแสและแรงดันในสภาวะคงตัว ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตคงที่อยู่ที่ 20 V และลดการพุ่งเกินในสภาวะชั่วคราว โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นขณะที่มีตัวควบคุมพีไอ

4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

โครงสร้างการควบคุมของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมพีไอแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า แรงดันอินพุตกระแสสลับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผ่านวงจรเรียงกระแสจนกระทั่งได้แรงดันกระแสตรง 400 V ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสูง เพื่อทำหน้าที่เป็นแรงดันอินพุตสูงให้แก่วงจรลดทอน

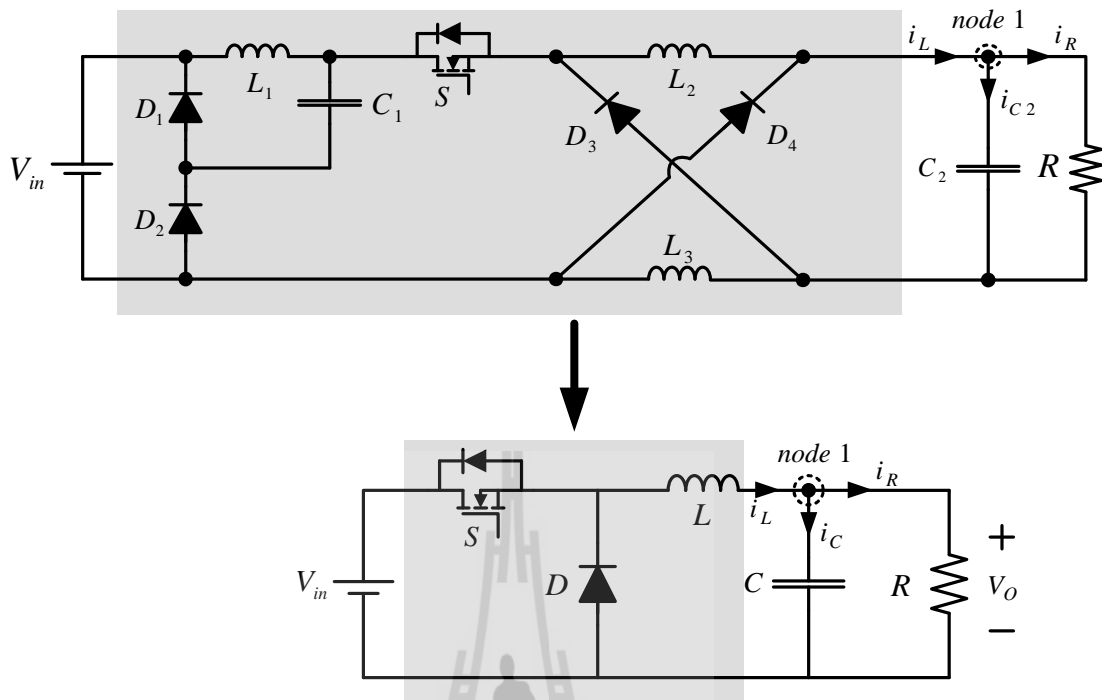
ระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นสำหรับลดทอนระดับแรงดันลงจนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตคงที่อยู่ที่ประมาณ 20 V โดยจะอาศัยตัวควบคุมพีไอลูปแรงดัน (Voltage controller loop) และลูปกระแส (Current-controller loop) ทำการรับสัญญาณแรงดัน (V_o) และลูปกระแส (i_L) ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เพื่อประมวลผลให้ได้สัญญาณควบคุมสำหรับเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่สวิตช์ และได้สัญญาณพัลส์ส่งไปยังสวิตช์เพื่อให้ทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสม จนกระทั่งได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ ทั้งนี้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรที่พัฒนาขึ้น จะอาศัยแนวทางการออกแบบที่ได้จากวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม (K.M. Tsang , W.L. Chan 2005)



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมพีไอ

4.2.1 การควบคุมลูปแรงดัน (Voltage Controller Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปการควบคุมแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น พิจารณาจากโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมแสดงรูปที่ 4.2 ทั้งนี้จะใช้การเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม เพื่อพิจารณาเทียบเคียงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สำคัญสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปแรงดัน การเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรทระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกับวงจรทระดับแรงดันแบบดั้งเดิม โดยที่วงจรลดทอนรับแรงดันที่พัฒนาขึ้นตัวเก็บประจุ C_2 จะเทียบเคียงกับตัวเก็บประจุ C ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.2 โครงสร้างวงจรลวดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรลวดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูบการควบคุมแรงดัน

พิจารณาโครงสร้างของวงจรลวดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรลวดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) พิจารณาการทำงานของวงจรลวดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

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

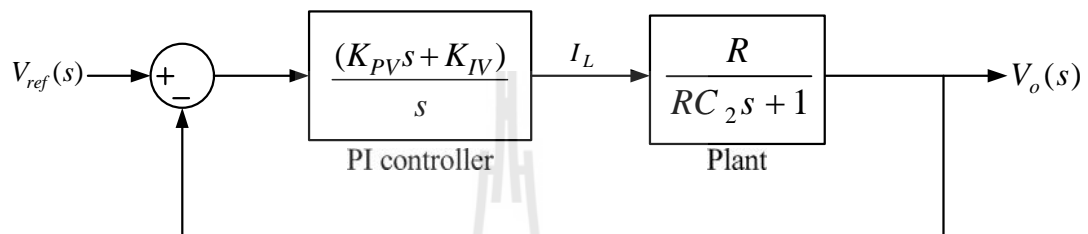
$$C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{V_o(t)}{R} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังนี้

$$CsV_o(s) = I_L(s) - \frac{V_o(s)}{R} \quad (4.2)$$

สำหรับวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น C_2 เทียบได้กับ C ของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม จากสมการที่ (4.2) ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลานต์ในส่วนของการควบคุมแรงดันแสดงดังสมการที่ (4.3)

$$\frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{RC_2s+1} \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.3 การควบคุมลูปแรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอ

รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างลูปการควบคุมแรงดันโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ระบบควบคุมพีไอมีตัวควบคุมย่อย 2 ตัว คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control) ซึ่งจะอยู่ในรูป K_{PV} และตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) อยู่ในรูป K_{IV} สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดังสมการที่ (4.4)

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s}\right)\left(\frac{R}{RC_2s+1}\right)}{1 + \left(\frac{K_{PV}s + K_{IV}}{s}\right)\left(\frac{R}{RC_2s+1}\right)}$$

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_{PV}Rs + K_{IV}R}{s^2 + \left(\frac{1 + K_{PV}R}{RC_2}\right)s + \frac{K_{IV}R}{RC_2}} \quad (4.4)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PV} และ K_{IV} จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (4.5)

$$G(s) = \frac{\tilde{S}_n^2}{s^2 + 2' \tilde{S}_n s + \tilde{S}_n^2} \quad (4.5)$$

โดยค่าความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ $\tilde{S}_n = \frac{1}{RC}$ rad/s และกำหนดให้อัตราส่วนการหน่วงของลูปแรงดัน $' = 1$ เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการที่ (4.4) และ (4.5) จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในลูปแรงดัน ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7)

$$\frac{1 + K_{PV}R}{RC_2} = 2' \tilde{S}_n$$

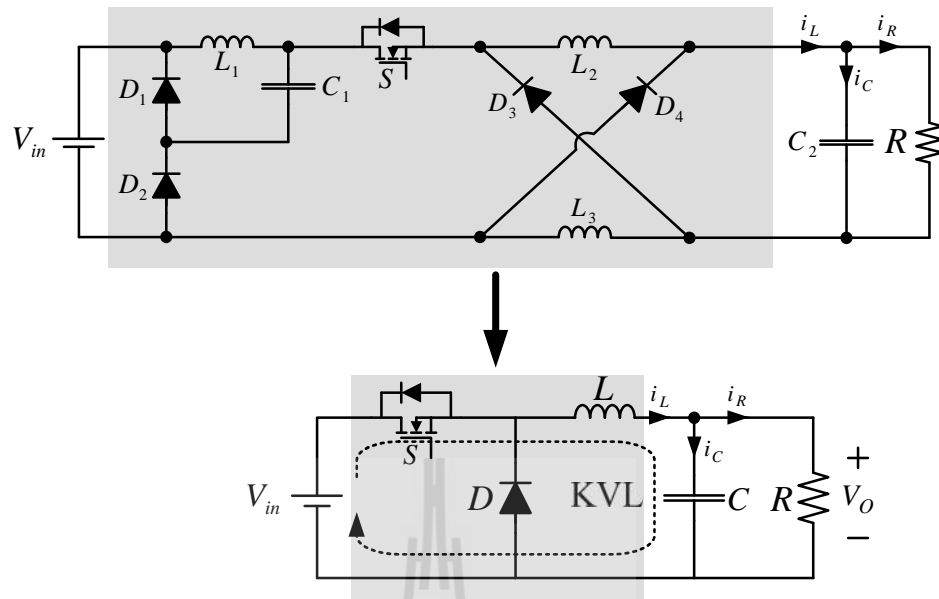
$$K_{PV} = 2' \tilde{S}_n C_2 - \frac{1}{R} \quad (4.6)$$

$$\frac{K_{IV}}{C_2} = \tilde{S}_n^2$$

$$K_{IV} = \tilde{S}_n^2 C_2 \quad (4.7)$$

4.2.2 การควบคุมลูปกระแส (Current Controller Loop)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปการควบคุมกระแสของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น พิจารณาจากโครงสร้างของวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมแสดงรูปที่ 4.4 คือทำการเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกับวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม เพื่อพิจารณาเทียบเคียงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สำคัญสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอในลูปกระแส ซึ่งการเทียบเคียงโครงสร้างของวงจรระหว่างวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกับวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม โดยที่วงจรถดทอนรับแรงดันที่พัฒนาขึ้นตัวเหนี่ยวนำ L_2 จะเทียบเคียงกับตัวเก็บประจุ L ของวงจรถดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.4 โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเทียบเคียงวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สำหรับออกแบบตัวควบคุมพีไอในรูปการควบคุมกระแส

พิจารณาโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

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

$$L \frac{di_L(t)}{dt} + (1 - D)V_o(t) = V_{in}(t) \quad (4.8)$$

พิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่เป็นศูนย์ จะได้สมการที่ (4.10)

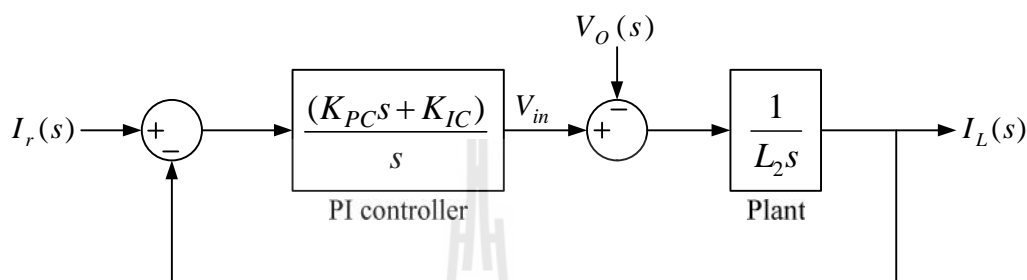
$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{in}(t) - V_o(t) \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.10) ทำการแปลงลาปลาซได้ดังนี้

$$LsI_L = V_{in}(s) - V_o(s) \quad (4.10)$$

สำหรับวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น L_2 เทียบได้กับ L ของวงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม จากสมการที่ (4.10) ดำเนินการหาฟังก์ชันถ่ายโอน จะได้พลานต์ในส่วนของการควบคุมกระแสแสดงดังสมการที่ (4.11)

$$\frac{I_L(s)}{V_{in}(s) - V_O(s)} = \frac{1}{L_2 s} \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.5 การควบคุมลูปกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ

รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพบล็อกของลูปการควบคุมกระแสโดยอาศัยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดัง สมการที่ (4.12)

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

$$\frac{I_L(s)}{I_r(s)} = \frac{K_{PC}V_{in} + K_{IC}V_{in}}{s^2 + \left(\frac{K_{PC}V_{in}}{L_2}\right)s + \frac{K_{IC}V_{in}}{L_2}} \quad (4.12)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IC} จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์เช่นเดียวกับลูปแรงดัน แต่ค่าความถี่ธรรมชาติในลูปกระแสจะสูงกว่าลูปแรงดันประมาณ 100 เท่า จะได้ว่าความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ $S_{ni} = NS_n$ rad/s โดยค่า N คือจำนวนเท่าของความถี่ธรรมชาติที่ลูปกระแสทำงานต่างจากลูปแรงดัน จากนั้นทำการเลือกค่า N ที่เหมาะสม โดยการเลือกค่า N จะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองของระบบ ดังนั้นจะเลือกใช้ N เท่ากับ 100 ซึ่งที่ค่า N ดังกล่าวค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองของระบบจะอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม และ

อัตราส่วนการหน่วงของลูกระแส $\nu = 1$ เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการที่ (4.5) และ (4.12) จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในลูกระแส ดังสมการที่ (4.13) และ (4.14)

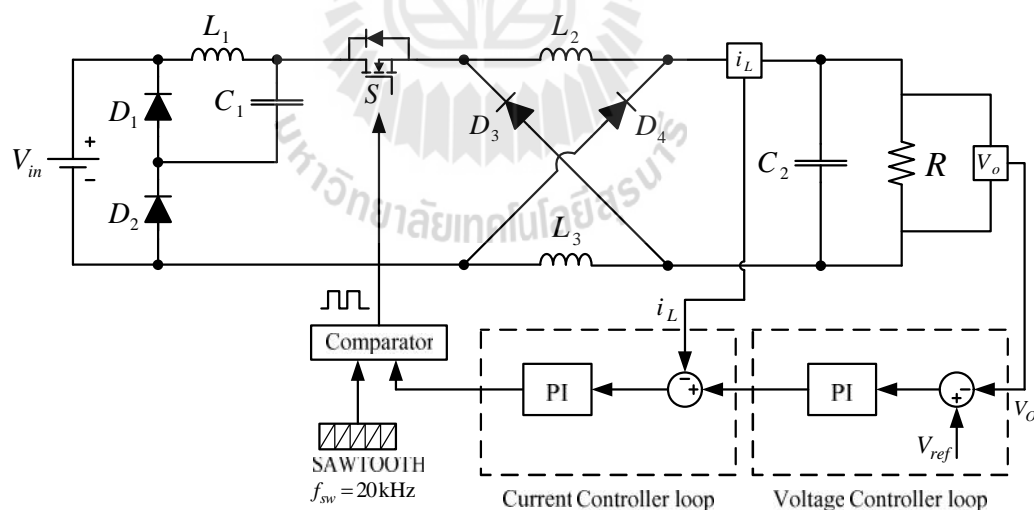
$$\frac{K_{PC}V_{in}}{L_2} = 2' \dot{S}_{ni}$$

$$K_{PC} = \frac{2' \dot{S}_{ni}L_2}{V_{in}} \quad (4.13)$$

$$\frac{K_{IC}V_{in}}{L_2} = \dot{S}_{ni}^2$$

$$K_{IC} = \frac{\dot{S}_{ni}^2 L_2}{V_{in}} \quad (4.14)$$

จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้งลูประแรงดันและลูกระแสของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ดังแสดง โครงสร้างการควบคุมวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างการควบคุมวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นได้แสดงการออกแบบไว้ในบทที่ 3 ทั้งนี้จะมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้อง

กับค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์กำลังที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอ แสดงค่าดังตารางที่ 4.1 จากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้งรูปแรงดันและรูปกระแส จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้งรูปแรงดันและรูปกระแส ดังตารางที่ 4.2 โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบ

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
V_{in}	แรงดันอินพุต	400 V
L_1, L_2 และ L_3	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH
C_1, C_2	ตัวเก็บประจุ	180 μ F
R	โหนดความต้านทาน	100 Ω
f_{sw}	ความถี่สวิตช์	20 kHz

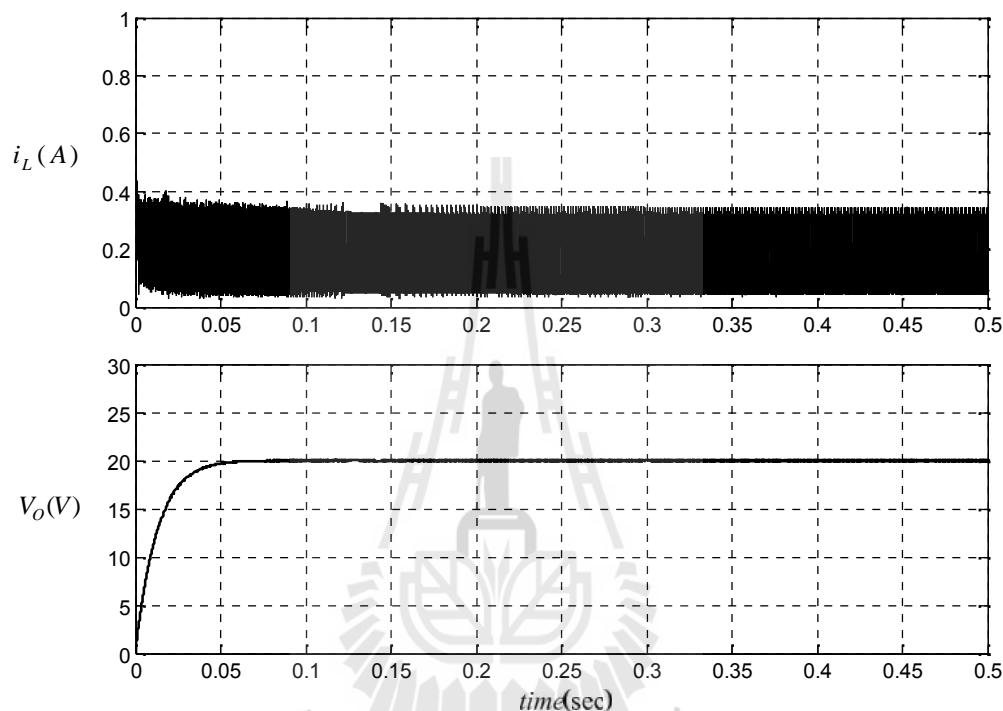
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
K_{PV}	0.014
K_{IV}	0.8
K_{PC}	1.44
K_{IC}	9600
\dot{S}_n	55.56
\dot{S}_{ni}	5556

4.3 ผลการจำลองสถานการณ์

เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอ ทำการจำลองสถานการณ์ให้วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นรับแรงดันอินพุต 400 V ควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V เพื่อดูผลการทำงานของตัวควบคุมว่าสามารถควบคุมแรงเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V ด้วยตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบ แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของกระแส i_L

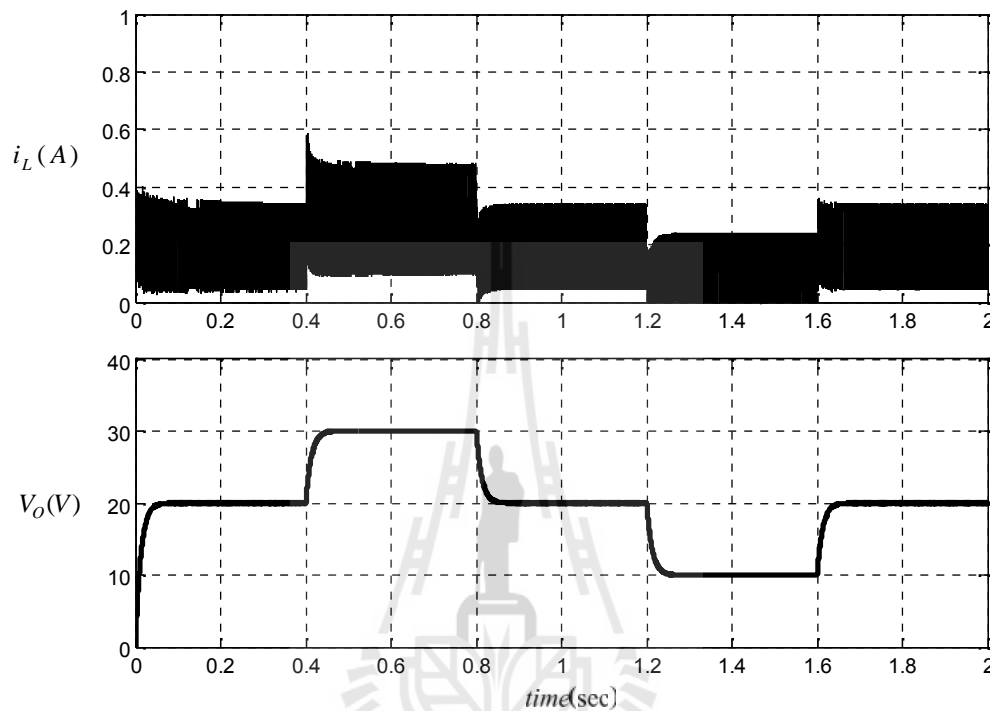
และแรงดันเอาต์พุต V_o ดังรูปที่ 4.7 จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นสามารถระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V เมื่อถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอที่ได้ ออกแบบ ซึ่งสังเกตว่าช่วงเวลาสถานะชั่วคราวไม่มีการพุ่งเกินของทั้งกระแส i_L และแรงดันเอาต์พุต V_o ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

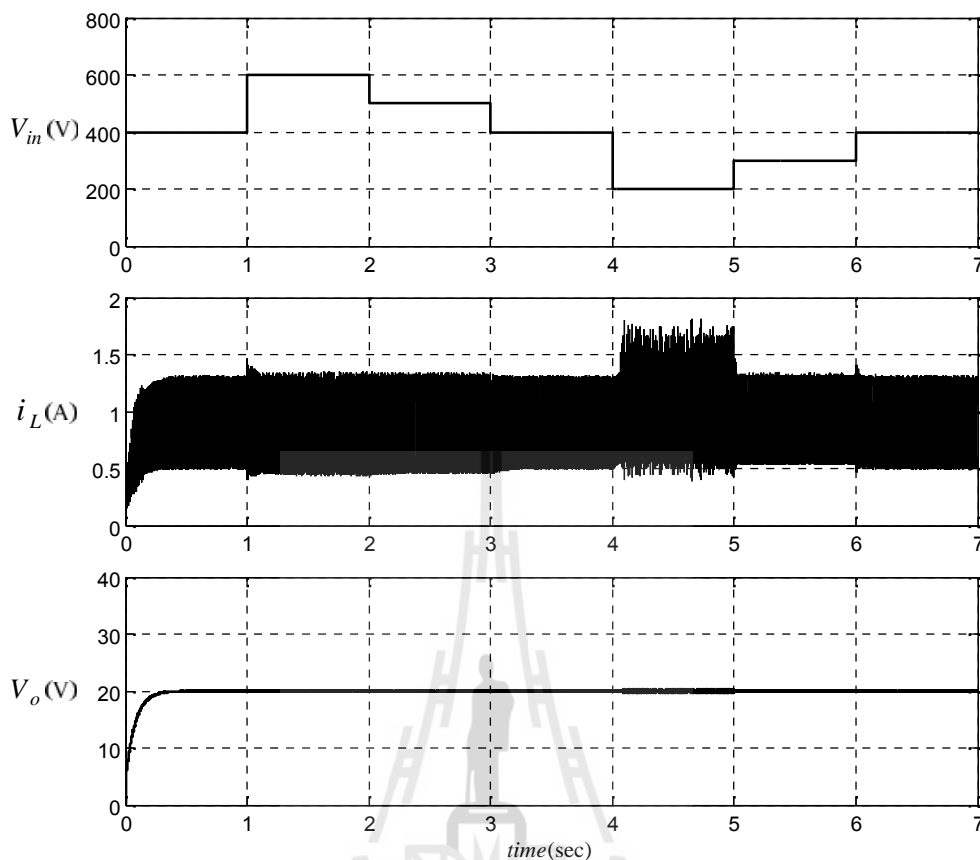
จากผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V นำมาสู่การจำลองสถานการณ์ที่มีการปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุต เพื่อแสดงสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอ โดยทำการเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เปลี่ยนแรงดันทุก ๆ 0.4 sec โดยทำการควบคุมแรงดันเป็นค่าต่าง ๆ แสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูป 4.8 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มลดแรงดันเอาต์พุตวงจรมีความสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ โดยเมื่อบังคับระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเริ่มทำงานควบคุมแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ 20 V และเมื่อแรงดันเอาต์พุตอยู่ในสถานะคงตัวเรียบร้อยแล้วจึงทำการกำหนดแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 30 V ที่ช่วงเวลา 0.4 sec เมื่อแรงดันคงที่อยู่ที่ 30 V เรียบร้อยแล้วทำการกำหนดแรงดันเอาต์พุตใหม่ให้กับมาคงที่อยู่ที่ 20 V ในช่วงเวลาที่ 0.8 sec จากนั้นทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 10 V ให้เริ่มควบคุมอยู่ที่ช่วงเวลา 1.2 sec

และเมื่อแรงดันเอาต์พุตคงอยู่ที่ 10 V ก็ทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตกลับมาที่ 20 V ในวินาทีที่ 1.6 sec ผลการจำลองสถานการณ์ได้ยืนยันว่าตัวควบคุมพีไอที่ทำการออกแบบสามารถควบคุมแรงเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถลตอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เมื่อปรับเปลี่ยนเอาต์พุต

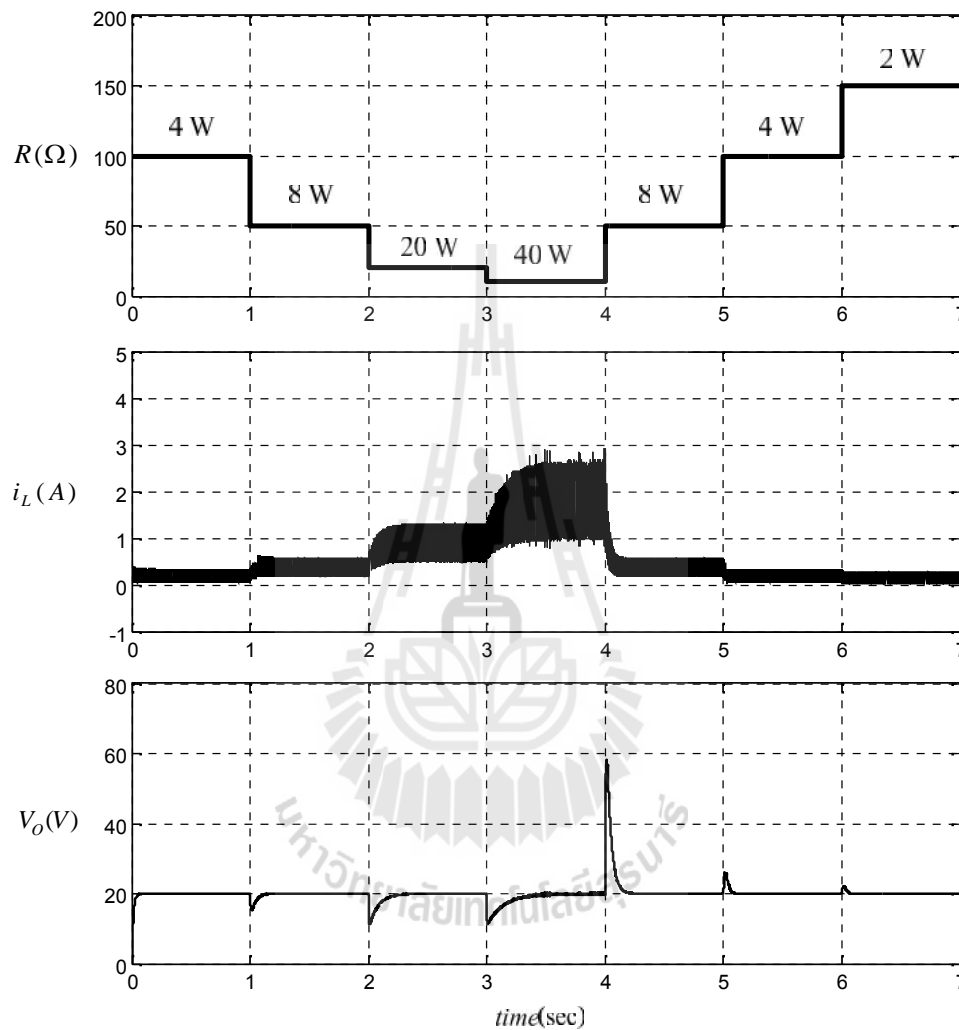
จากการจำลองสถานการณ์ของวงจรที่ให้คงที่ค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ที่ 20 V นำไปสู่การจำลองสถานการณ์เมื่อวงจรมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตในช่วง 300 - 600 V เพื่อยืนยันความสามารถของวงจรถลตอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นและตัวควบคุมพีไอ โดยกำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตเริ่มต้นอยู่ที่ 400 V และมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตทุก ๆ 1 sec ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อวงจรมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตในแนวโน้มนที่เพิ่มขึ้นและลดลง วงจรสามารถคงที่ค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ที่ 20 V ได้ตามปกติ แต่จะมีการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตเล็กน้อยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตที่ 200 V เนื่องจากเมื่อแรงดันอินพุตมีค่าลดลงในขณะที่ตัวควบคุมยังคงค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ที่ 20 V ตัวควบคุมจำเป็นต้องทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สูงขึ้นเพื่อที่จะได้คงที่ค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ที่ 20 V รวมถึงกระแส i_L ก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

จากผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตได้แล้ว ยังสามารถทดสอบสมรรถนะการทำงาน โดยการเปลี่ยนแปลงโหลดของวงจรได้อีกด้วย เพื่อแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงกำลังงานของวงจรว่าวงจรสามารถทำงานได้เมื่อมีกำลังงานที่เปลี่ยนไป โดยการจำลองสถานการณ์ให้แรงดันอินพุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นคงที่อยู่ที่ 400 V โหลดความต้านทานเริ่มต้นอยู่ที่ 100 Ω จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานเป็น 100, 50, 20, 10, 50, 100 และ 150 Ω ในทุก ๆ 1 sec ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 พบว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอ สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้คงที่ที่ 20 V ได้ โดยช่วงเวลาที่โหลดความต้านทานลดลง จะเกิดแรงดัน V_o จะตกในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน ส่วนกระแส i_L จะเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดความต้านทานมีค่าลดลง และช่วงวินาทีที่ 4 โหลดความต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 20 Ω

เปลี่ยนเป็น 50Ω จะทำให้กำลังงานลดลงจาก 40 W เป็น 8 W ทำให้แรงดัน V_o เกิดการพุ่งเกิน ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานเนื่องจากกำลังงานมีการลดลงทันที รวมถึงกระแส i_L จะลดลงเมื่อโหลดความต้านทานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน

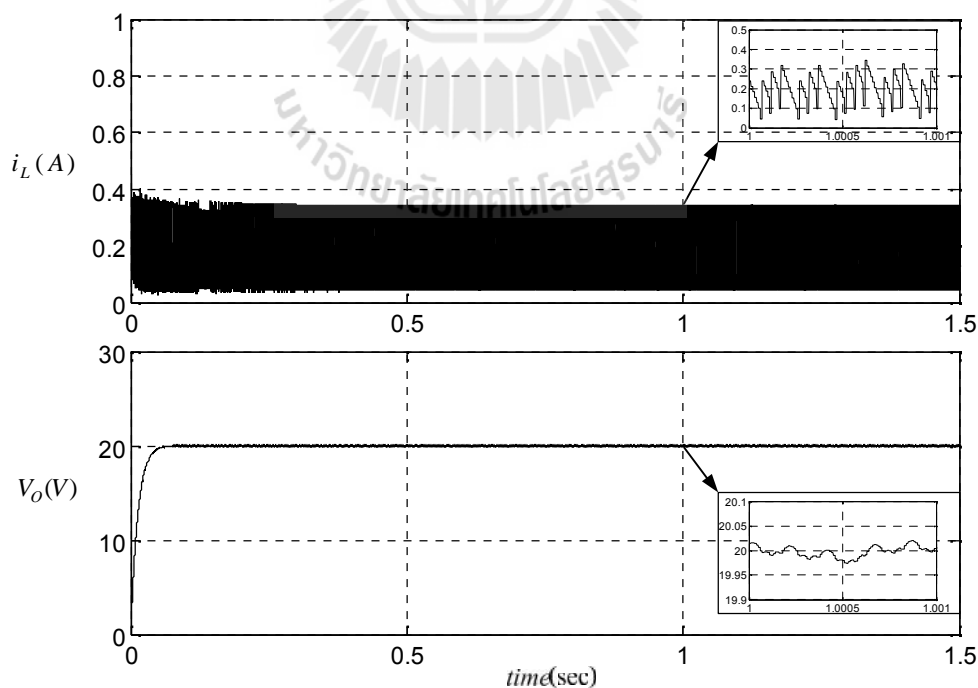
การตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอยังสามารถทำได้อีกหนึ่งวิธี คือการปรับเปลี่ยนขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจร โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นให้มีขนาดเพิ่มขึ้นและลดลง เพื่อเป็นการยืนยันว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สามารถนำมาประยุกต์ใช้ใน

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นได้ โดยในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้ 2 กรณี คือ การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำและการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ โดยค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ปรับเปลี่ยนแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการปรับเปลี่ยน

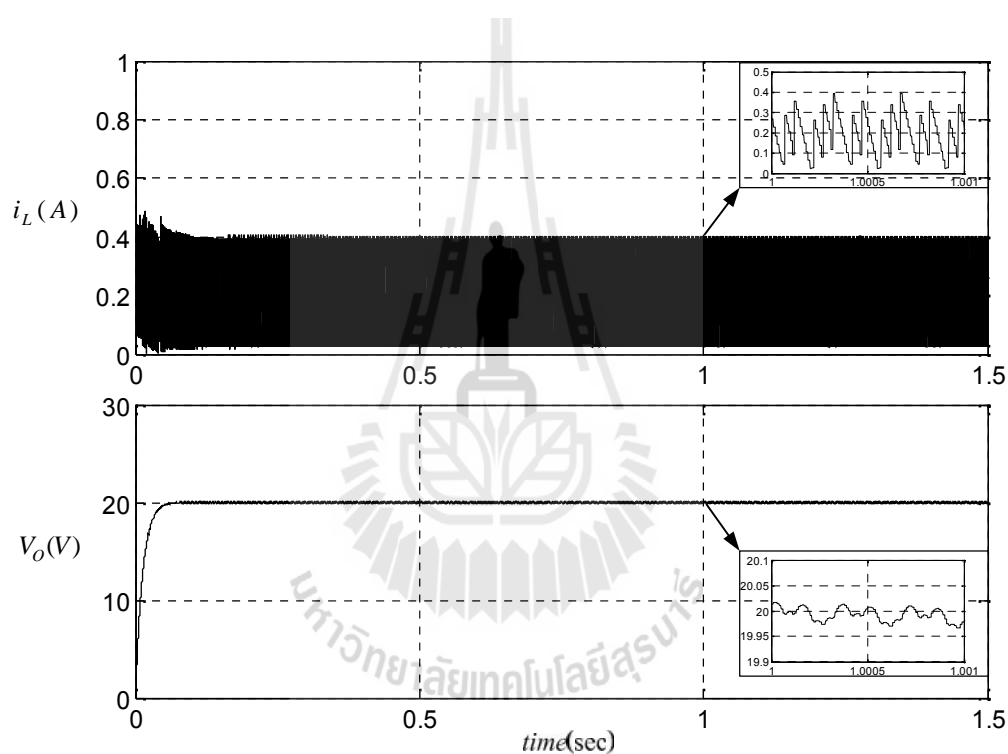
สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาดลดลง	ขนาดที่ใช้จริง	ขนาดเพิ่มขึ้น
V_{in}	แรงดันอินพุต	20 V		
L_1, L_2	ตัวเหนี่ยวนำ	10 mH	15 mH	20 mH
C_1, C_2	ตัวเก็บประจุ	100 μ F	180 μ F	400 μ F
R	โหลดความต้านทาน	100 Ω		
f_{sw}	ความถี่สวิตช์	20 kHz		

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของขนาดพารามิเตอร์ที่ใช้จริงเพื่อนำผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ขณะที่มีการเพิ่มลดขนาดของพารามิเตอร์ภายในวงจร

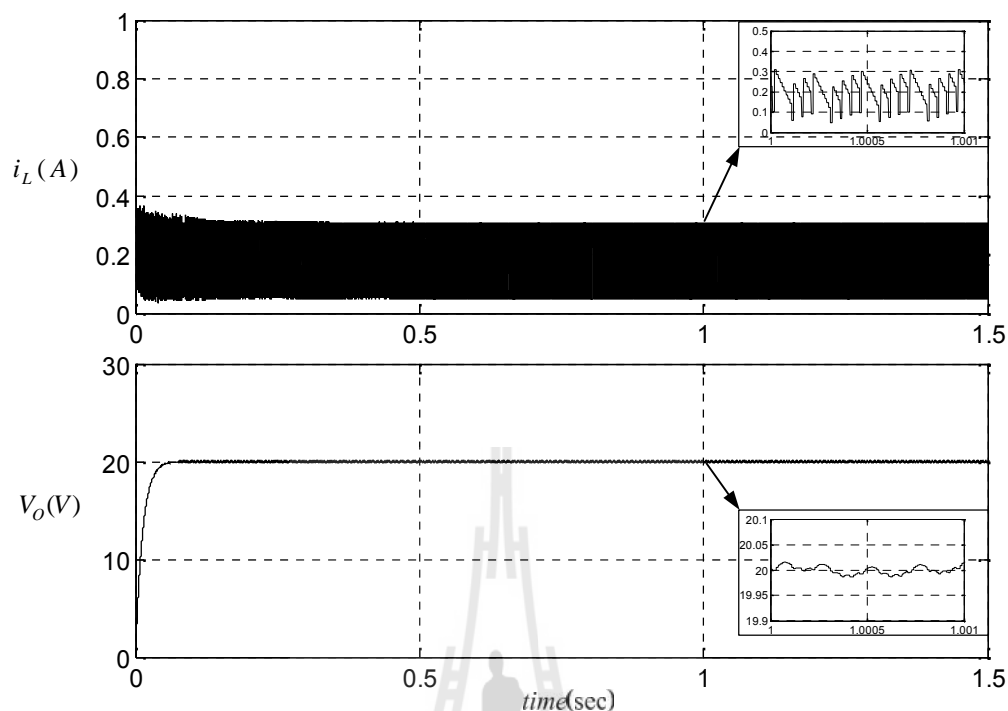


รูปที่ 4.11 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นพบว่าผลการจำลองสถานการณ์เมื่อทำการลดขนาดตัวเหนี่ยวนำจาก 15 mH เป็น 10 mH ดังรูปที่ 4.12 พบว่าการกระเพื่อมของกระแส i_L จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาดที่ใช้งานจริงและในส่วนของแรงดันเอาต์พุตพบว่า ตัวควบคุมพีไอยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V ได้ และเมื่อทำการเพิ่มขนาดตัวเหนี่ยวนำจาก 15 mH เป็น 20 mH ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าการกระเพื่อมของกระแส i_L จะมีขนาดลดลงเล็กน้อยและในส่วนของแรงดันเอาต์พุตพบว่า ตัวควบคุมพีไอยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตในคงที่อยู่ที่ประมาณ 20 V ได้เป็นอย่างดี

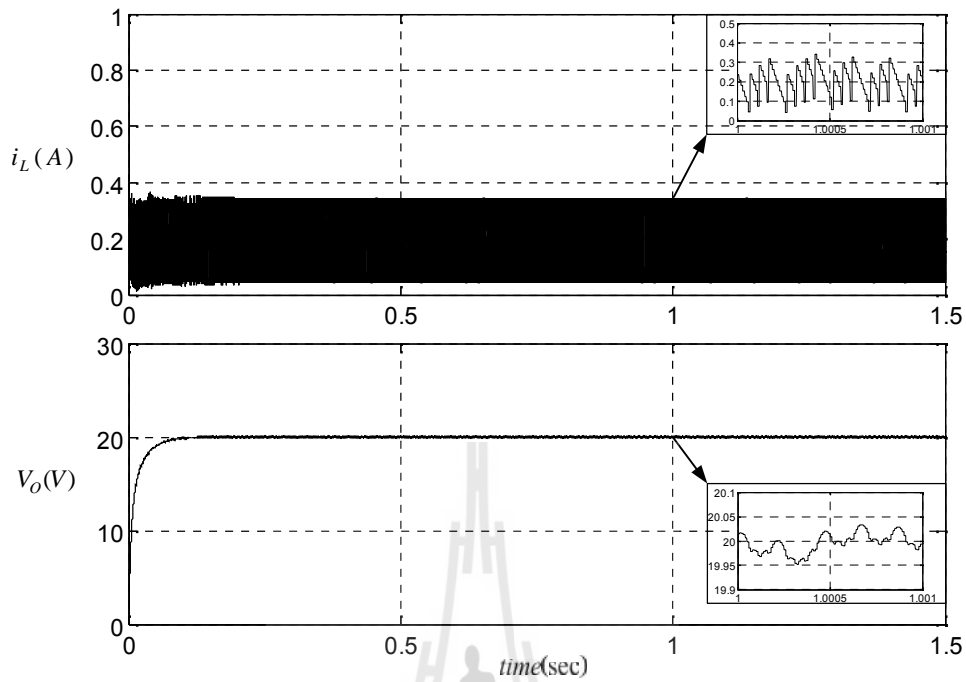


รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น
เมื่อลดขนาดตัวเหนี่ยวนำเป็น 10 mH

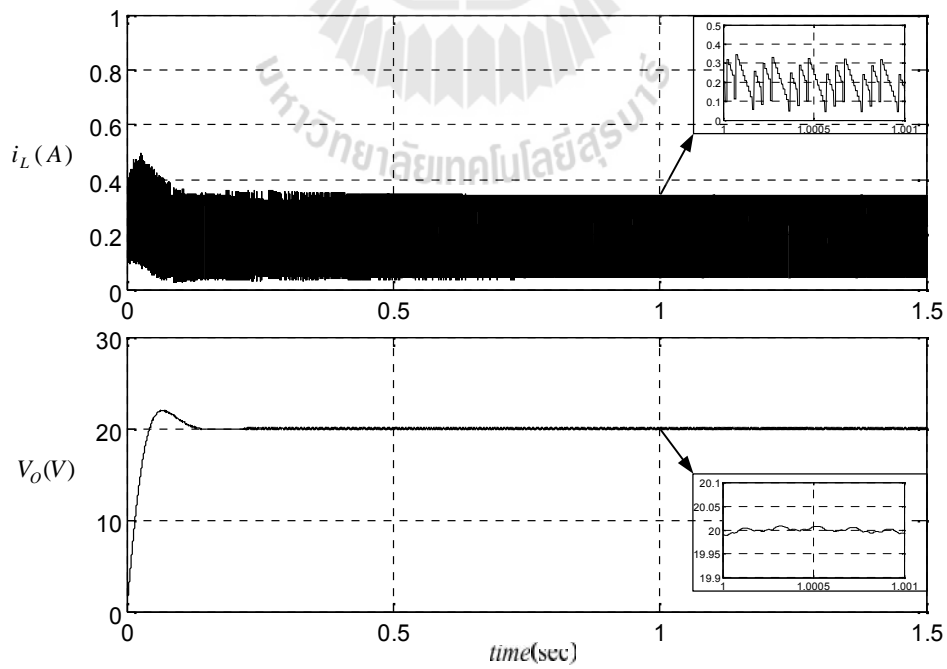


รูปที่ 4.13 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น
เมื่อเพิ่มขนาดตัวเหนี่ยวนำเป็น 20 mH

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุ โดยการลดขนาดตัวเก็บประจุจาก 180 μF เป็น 100 μF ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าผลการจำลองสถานการณ์ของกระแส i_L ยังทำงานได้ปกติ และในส่วนของแรงดันเอาต์พุตตัวควบคุมพีไอยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V ได้แม้ว่าจะมีการเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุ และเมื่อทำการปรับเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุพบว่า เมื่อเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุจาก 180 μF เป็น 400 μF ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 4.15 กระแส i_L มีผลการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงที่วงจรเริ่มทำงาน และเมื่อพิจารณาที่แรงดันเอาต์พุตพบว่าตัวควบคุมยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V ได้ แต่ผลการทำงานมีการฟุ้งเกินเล็กน้อยในช่วงสภาวะชั่วคราวเนื่องจากขนาดของค่าพารามิเตอร์มีขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการควบคุมแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น
เมื่อลดขนาดตัวเก็บประจุเป็น $100 \mu\text{F}$



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น
เมื่อเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุเป็น $400 \mu\text{F}$

จากการจำลองสถานการณ์การลดหรือเพิ่มขนาดของพารามิเตอร์ภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบอย่างง่าย โดยอ้างอิงการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.4 สรุป

บทนี้ได้นำมาแสดงการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ซึ่งได้อาศัยหลักการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน เพื่อตรวจสอบให้เห็นถึงสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบ ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อดูผลการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ในสถานะต่าง ๆ เช่น การควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V การเพิ่มลดแรงดันเอาต์พุตและการปรับเปลี่ยนขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจร ผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงสมรรถนะของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบมานั้น สามารถควบคุมแรงดันให้คงที่อยู่ที่ 20 V ได้ แม้วงจรมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะต่าง ๆ การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมพีไอนั้นยังสามารถทำงานตามเงื่อนไขได้ คือควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 20 V

บทที่ 5

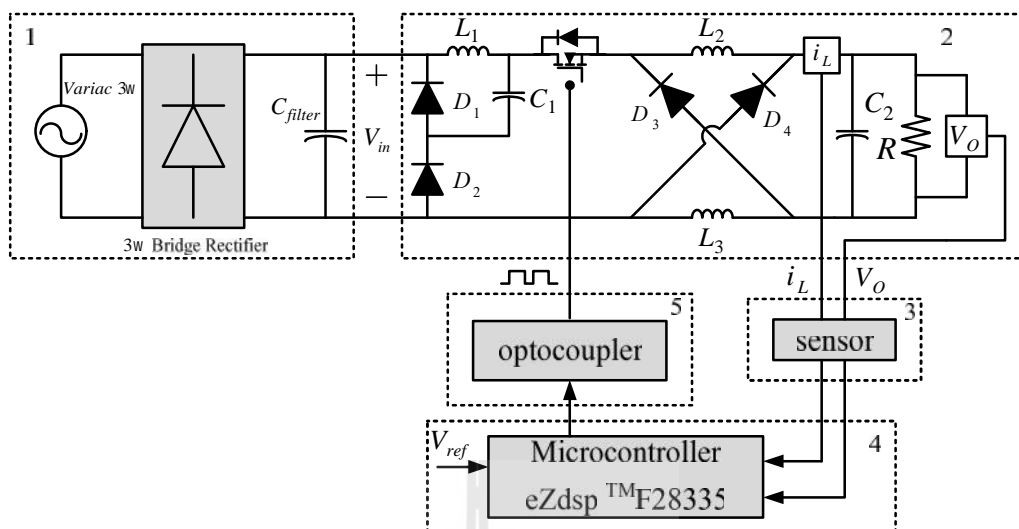
การสร้างชุดทดสอบ

5.1 บทนำ

จากบทที่ 3 จนถึงบทที่ 4 ได้นำเสนอวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น การออกแบบวงจรลดทอนที่พัฒนาขึ้นและการออกแบบตัวควบคุมพีไอ รวมถึงการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ในสภาวะต่าง ๆ เพื่อยืนยันสมรรถนะของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นที่สามารถมีอัตราลดทอนแรงดันได้ถึง 20 เท่า ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ยืนยันผลการทดสอบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย การสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคัลสัญญาณ วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแส และการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335

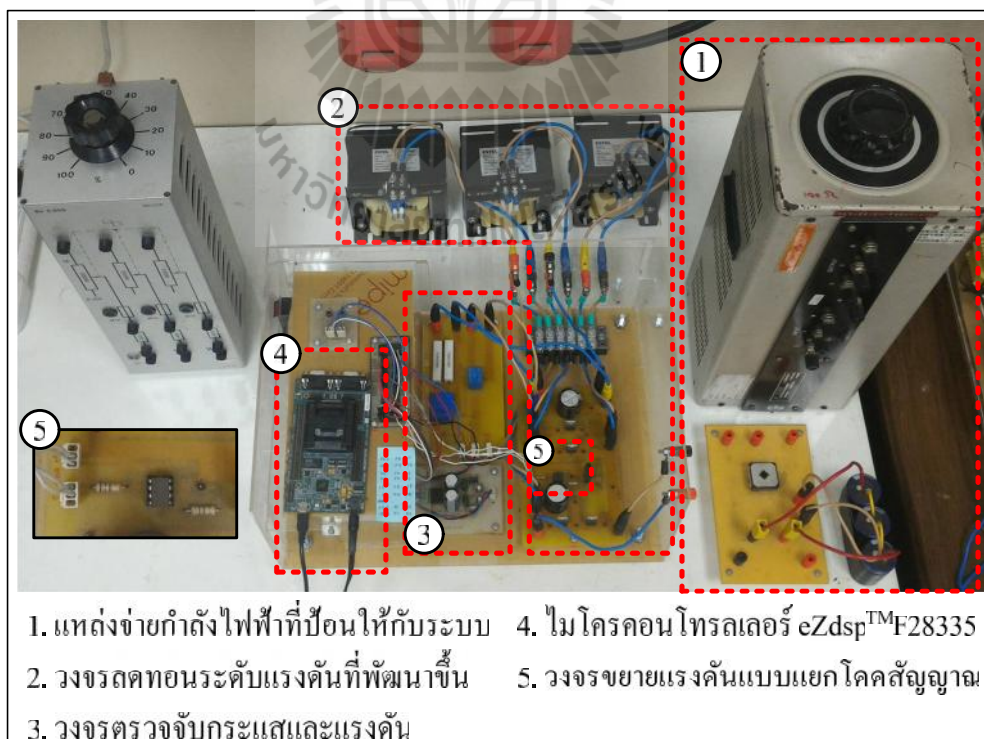
5.2 โครงสร้างของชุดทดสอบ

โครงสร้างของชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.1 สามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ส่วนที่ 1 แสดงในส่วนของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ในส่วนที่ 2 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ โดยแบ่งออกเป็นตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุต V_o และตัวตรวจจับกระแส i_L ส่วนที่ 4 เป็นส่วนของการควบคุมซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ และส่วนที่ 5 จะเป็นในส่วนของวงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคัลสัญญาณ



รูปที่ 5.1 โครงสร้างภาพรวมของชุดทดสอบ

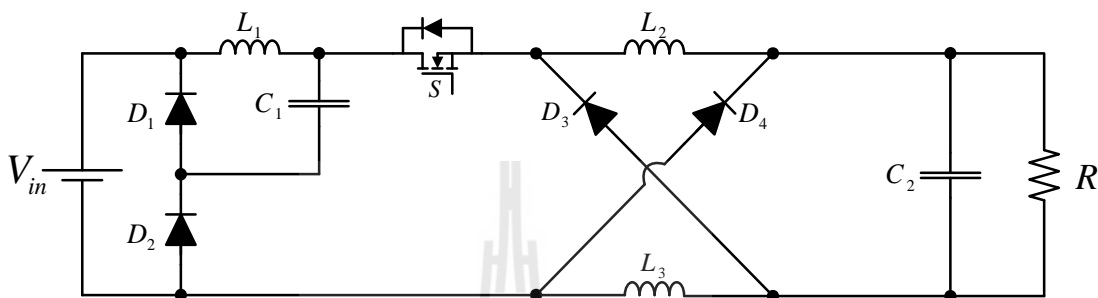
สำหรับชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 สำหรับรายละเอียดในการสร้างชุดทดสอบ ได้นำเสนอในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 5.2 ชุดทดสอบวงจรตดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

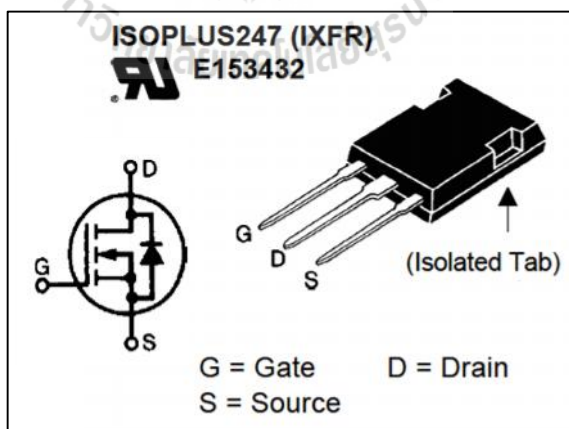
5.3 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

การสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เพื่อใช้สำหรับการทดสอบจำเป็นอย่างที่จะต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจร ซึ่งโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ดังนี้



รูปที่ 5.3 โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

สำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้จะเป็นแบบมอดูล การเลือกอุปกรณ์จะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ โดยค่าแรงดันที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าเท่ากับ 400 V ส่วนค่าพิกัดกระแสมีค่าไม่เกิน 6 A ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอดูลของมอสเฟตเบอร์ IXFR32N80P โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 800 V ค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 13 A ซึ่งมอดูลดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 มอดูลของมอสเฟตเบอร์ IXFR32N80P

การเลือกตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีขนาดเท่ากับ 30 mH ส่วนตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 มีขนาดเท่ากับ 7 mH แต่การสร้างทดสอบในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 ที่มีขนาด 15 mH และมีฟิวส์กระแส 10 A ฟิวส์แรงดัน 500 V ซึ่งตัวเหนี่ยวนำทั้งสามที่ใช้มีอยู่ในห้องปฏิบัติการเพื่อลดรายจ่ายในการซื้อตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาค่อนข้างสูง ทั้งนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นเมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำทั้งสามเป็น 15 mH ปรากฏว่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 มีค่าลดลง เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็กลง ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.5



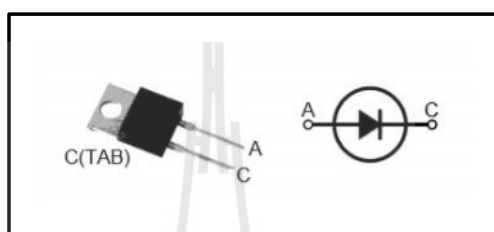
รูปที่ 5.5 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

สำหรับการเลือกตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ได้ทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ ซึ่งนำเสนอในบทที่ 3 โดยมีกรเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุให้มีขนาดที่สามารถซื้อได้ทั่วไป โดยตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ 180 μF ฟิวส์แรงดัน 450 V ตัวเก็บประจุที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.6



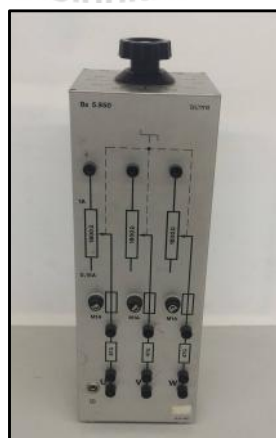
รูปที่ 5.6 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

การเลือกไดโอดกำลัง พิจารณาจากวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยดูจากแรงดันอินพุตที่ใช้ในงานวิจัยเท่ากับ 400 V และค่ากระแสของวงจรไม่เกิน 6 A ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ MUR1560 ที่มีค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 600 V พิกัดกระแสเท่ากับ 25 A เป็นไดโอดกำลัง (Power Diode) ชนิดไดโอดที่มีช่วงกลับคืนตัวเร็ว (Ultrafast Recovery Diodes) โดยเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery time) อยู่ที่ 60 ns ช่วยให้มีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นในช่วงท้ายของการไบอัสตรงเพียงระยะเวลาสั้น ๆ ไดโอดกำลังเบอร์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูป 5.7



รูปที่ 5.7 ไดโอดที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

และส่วนสุดท้ายของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นคือ โหลดตัวต้านทาน แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 โดยโหลดตัวต้านทานนี้มีชุดตัวต้านทานภายใน 3 ชุด แต่ละชุดสามารถปรับค่าความต้านทานตั้งแต่ 0 – 1800 Ω พิกัดกระแสอยู่ที่ 1 A ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต่อชุดโหลดตัวต้านทานเป็นแบบขนานเพื่อที่จะให้โหลดตัวต้านทานมีพิกัดกระแสอยู่ที่ 1 A และใช้ค่าโหลดตัวต้านทานที่อยู่ในช่วง 20 – 200 Ω



รูปที่ 5.8 โหลดตัวต้านทานสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปเบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างชุดทดสอบ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เบอร์ ขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้สร้างชุดทดสอบ

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

5.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

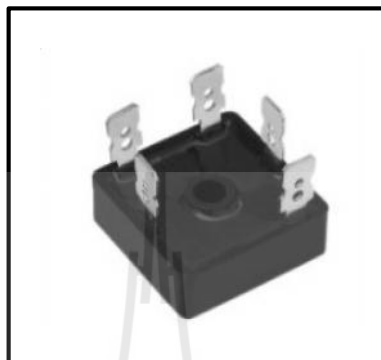
การทดสอบชุดทดสอบในงานวิจัยจำเป็นต้องป้อนแรงดันอินพุต 400 V ให้กับวงจรที่พัฒนา เพื่อป้อนให้กับวงจรทดสอบเพื่อให้ได้แรงดันอินพุตตามต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ หม้อแปลงปรับแรงดันสามเฟส (variac) ที่มีพิกัดอยู่ในช่วง 0 – 480 V_{rms} แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์



รูปที่ 5.9 หม้อแปลงปรับแรงดันสามเฟส

เนื่องจากวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 400 V ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบสามเฟสแบบบริดจ์ สามารถแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 400 V ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบสามเฟสเบอร์ 36MT160 พิกัดแรงดันอยู่ที่ 1600 V และพิกัดกระแส 35 A แสดงได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 มอดูลของวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

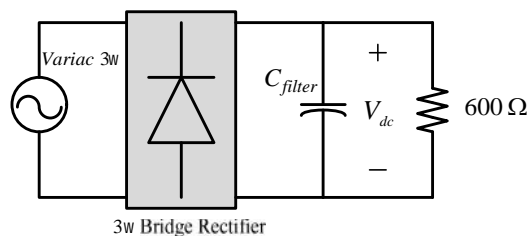
สำหรับตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังจากผ่านวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสเพื่อกรองสัญญาณแรงดันให้เรียบขึ้น โดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า 200 μF มีพิกัดแรงดันอยู่ที่ พิกัด 1350 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองแรงดัน

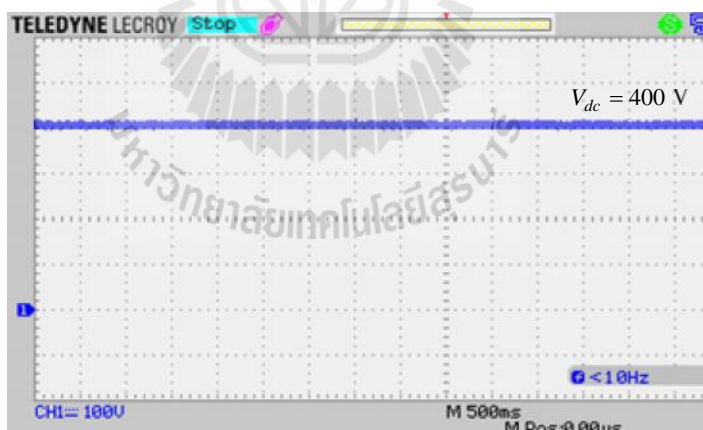
สำหรับการทดสอบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 5.12 โดยจะป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสลับสามเฟสเข้าห้หม้อแปลงปรับแรงดันสามเฟส ผ่านวงจรเรียงกระแส

สามเฟสแบบบริดจ์เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทาน 600Ω



รูปที่ 5.12 วงจรแหล่งจ่ายกระแสตรง

ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 จากรูปแสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดที่ประมาณ 400 V ซึ่งรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้านั้นมีแรงดันคงที่และไม่มีการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด ดังนั้นจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้สร้างขึ้นนั้นสามารถใช้งานได้ และเหมาะสมสำหรับจ่ายให้กับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น สำหรับการทดสอบต่อไป



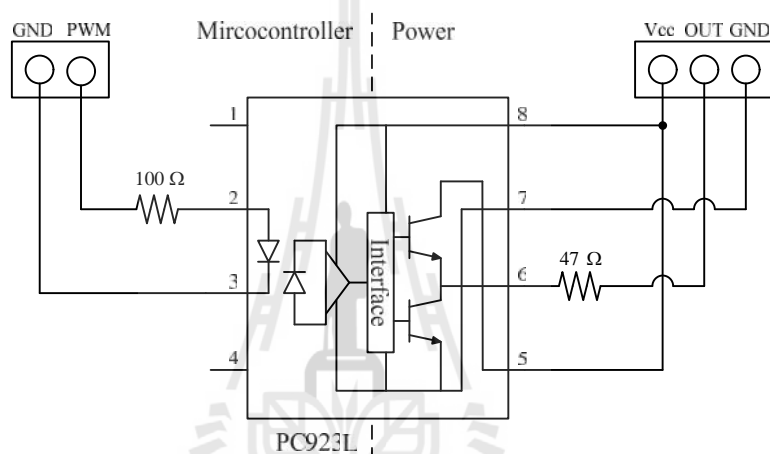
รูปที่ 5.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด

5.5 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคตสัญญาณ

วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคตสัญญาณเป็นส่วนของที่จะขยายสัญญาณแรงดันจากไมโครคอนโทรลเลอร์และแยกกราวด์แรงดันต่ำกับแรงดันสูงออกจากกัน เนื่องจากระดับแรงดัน

เอาท์พุทของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าแรงดันต่ำซึ่งไม่เพียงพอในการขับสวิตช์ให้ทำงานได้ และทำให้ระบบกราวด์ถูกแยกจากกันโดยสิ้นเชิง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับวงจรควบคุมขณะส่งสัญญาณขับสวิตช์ให้กับวงจรกำลัง

วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคสัญญาณใช้ไอซีออปโตคัปเปิลอร์ เบอร์ PC923L เป็นวงจรขยายแรงดันที่มีการแยกโคคสัญญาณในตัววงจร ทำให้เกิดความสะอาดมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้มีอัตราขยาย 2 เท่า เพื่อให้สัญญาณแรงดันเพียงพอที่จะไปขับสวิตช์ให้ทำงานได้ มีลักษณะการต่อวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 5.14



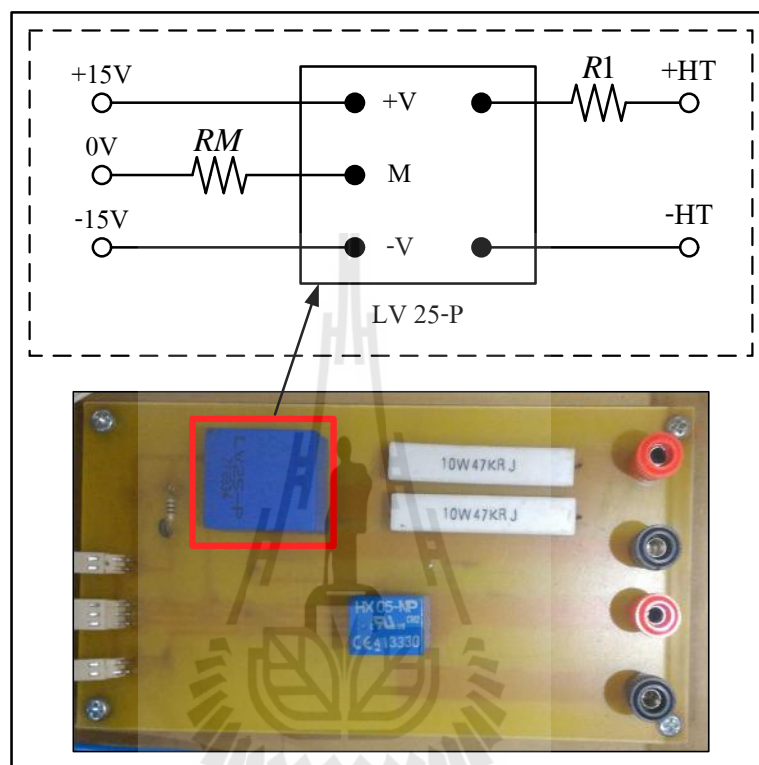
รูปที่ 5.14 วงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคสัญญาณ

5.6 วงจรตรวจจับสัญญาณ

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อตรวจจับสัญญาณที่ป้อนให้กับชุดควบคุมสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง โดยแบ่งออกเป็นตัวตรวจจับสัญญาณ 2 วงจรได้แก่ ตัวตรวจจับแรงดันที่ตกรวมโหลด V_o และตัวตรวจจับกระแส i_L สำหรับขั้นตอนการออกแบบชุดตรวจจับสัญญาณสามารถแสดงได้ดังนี้

ตัวตรวจจับแรงดัน

การสร้างตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P พิกัด 500 V และกระแสพิกัดที่ 10 mA วงจรตรวจจับต้องการไฟเลี้ยง +15V , 0 V และ -15 V แสดงได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ชุดตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

พิจารณาทางด้านแรงดันสูง

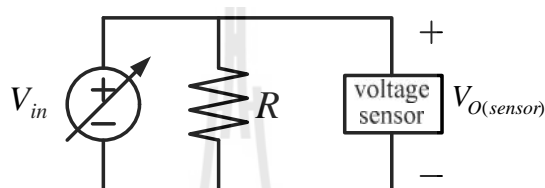
จะต้องทำการออกแบบค่า $R1$ ซึ่งอยู่ด้านแรงดันสูง โดยจะกำหนดให้แรงดันฝั่งด้านแรงดันสูง 250 V พิกัดกระแสไฟฟ้า 10 mA เพื่อลดความเสียหายต่อวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า จะได้สมการสำหรับออกแบบ $R1$ ดังสมการที่ (5.1)

$$R1 = \frac{V_p}{I_p} = \frac{250}{10 \times 10^{-3}} = 25 \text{ k}\Omega \quad (5.1)$$

พิจารณาทางด้านแรงดันต่ำ

จะต้องทำการปรับจูนค่าความต้านทาน RM เพื่อปรับสัญญาณแรงดันแอนาลอกที่จะเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้มีค่าไม่เกิน 3 V ซึ่งผลการทดสอบการปรับจูนจะต้องใช้ค่าความต้านทาน RM เท่ากับ 100 Ω

สำหรับการใช้งานตัวตรวจจับแรงดัน ต้องสร้างวงจรไฟฟ้าขึ้นมาแสดงดังรูปที่ 5.16 เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต V_{in} กับแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับกระแส $V_{O(sensor)}$ เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรง



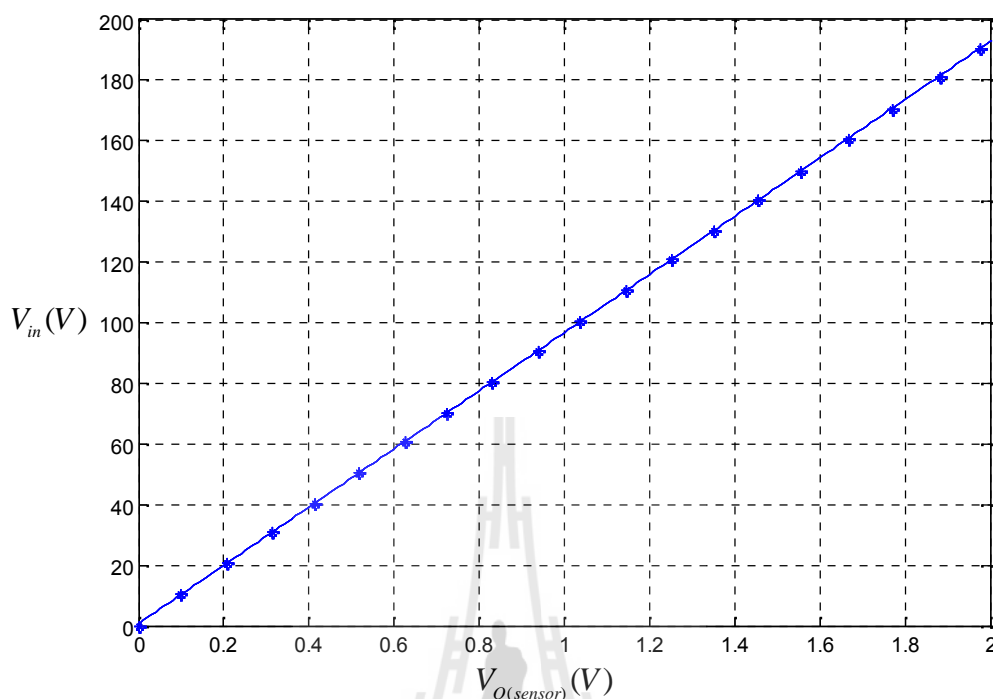
รูปที่ 5.16 วงจรทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับแรงดัน

การทดสอบ จะทำการเพิ่มค่าแรงดันอินพุต V_{in} จาก 0 V – 200 V เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.2 ดังนี้

ตารางที่ 5.2 ตารางทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

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
10.46	10.54	10.05	10.35	0.101	0.103	0.097	0.100
20.21	20.84	20.74	20.60	0.202	0.210	0.208	0.207
31.34	30.18	31.45	30.99	0.318	0.308	0.320	0.315
40.28	40.71	40.35	40.45	0.410	0.418	0.412	0.413
50.20	51.23	50.00	50.48	0.515	0.528	0.512	0.518
61.00	61.40	60.18	60.86	0.627	0.634	0.619	0.627
70.60	70.40	69.60	70.20	0.726	0.728	0.717	0.724
80.20	80.80	80.10	80.37	0.826	0.836	0.825	0.829
90.90	91.80	89.50	90.73	0.939	0.951	0.924	0.938
99.40	100.60	101.1	100.37	1.026	1.040	1.044	1.037
110.00	111.10	111.00	110.70	1.136	1.153	1.149	1.146
120.70	121.00	121.10	120.93	1.245	1.257	1.253	1.252
130.40	130.80	130.10	130.43	1.350	1.357	1.347	1.351
140.30	140.30	140.40	140.33	1.453	1.458	1.455	1.455
149.80	150.30	149.90	150.00	1.552	1.561	1.552	1.555
159.80	161.40	160.60	160.60	1.658	1.678	1.667	1.668
169.50	170.50	170.70	170.23	1.760	1.777	1.773	1.770
181.70	181.10	180.80	181.20	1.885	1.883	1.877	1.882
190.50	189.50	191.20	190.40	1.978	1.970	1.986	1.978
200.70	199.00	199.80	199.83	2.085	2.073	2.072	2.077

จากตารางที่ 5.2 นำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.17



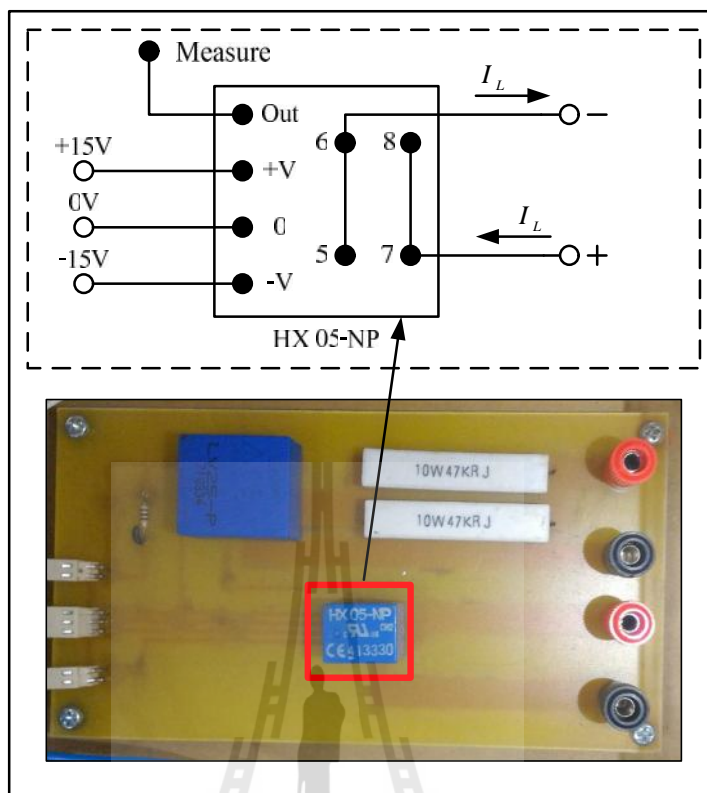
รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ

จากรูปที่ 5.17 สามารถหาสมการเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ ดังสมการที่ (5.2)

$$V_{in} = 96.0014 V_{O(sensor)} + 0.7221 \quad (5.2)$$

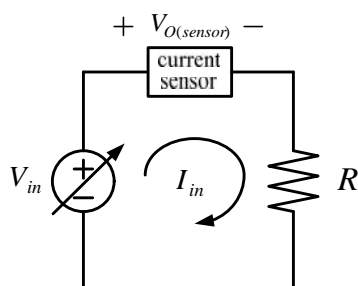
ตัวตรวจจับกระแส

การสร้างชุดตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัดกระแส 5 A วงจรตรวจจับต้องการไฟเลี้ยง +15 V , 0 V และ -15 V ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.18 สำหรับวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้านี้ จะมีการต่อได้สองแบบคือต่อแบบอนุกรม และต่อแบบขนาน ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ต่อแบบขนานซึ่งจะทำให้พิกัดของกระแสไฟฟ้าเพิ่มเป็น 2 เท่า จากทนได้ 5 A จะสามารถทนได้ถึง 10 A เพื่อป้องกันกระแสช่วงสภาวะชั่วคราวของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 5.18 ชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้า

การนำตัวตรวจจับกระแสมาใช้งาน จำเป็นที่จะต้องทราบความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลเข้าวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า I_{in} และแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า $V_{O(sensor)}$ เพื่อนำไปสร้างเป็นสมการเส้นตรง ทำการสร้างวงจรไฟฟ้าขึ้นมาแสดงดังรูปที่ 5.19



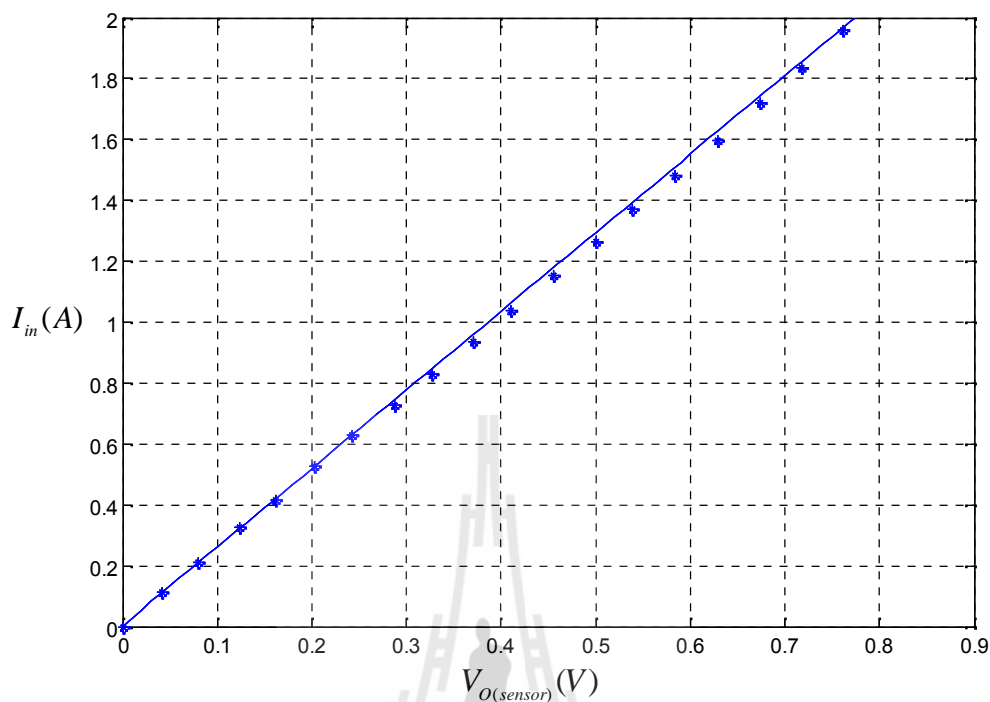
รูปที่ 5.19 วงจรทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์สมการเส้นตรงของตัวตรวจจับกระแส

สำหรับการทดสอบ จะทำการเพิ่มค่ากระแสอินพุต I_{in} จาก 0 A - 2 A เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.3 ดังนี้

ตารางที่ 5.3 ตารางทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

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
0.126	0.11	0.103	0.113	0.043	0.04	0.041	0.041
0.224	0.202	0.203	0.210	0.084	0.076	0.081	0.080
0.372	0.304	0.303	0.326	0.134	0.116	0.121	0.124
0.441	0.404	0.407	0.417	0.168	0.156	0.163	0.162
0.572	0.506	0.499	0.526	0.213	0.196	0.200	0.203
0.673	0.604	0.606	0.628	0.254	0.234	0.242	0.243
0.767	0.711	0.708	0.729	0.300	0.277	0.283	0.287
0.874	0.807	0.806	0.829	0.343	0.316	0.322	0.327
0.986	0.914	0.915	0.938	0.387	0.359	0.366	0.371
1.082	1.014	1.02	1.039	0.428	0.398	0.408	0.411
1.227	1.114	1.114	1.152	0.482	0.438	0.446	0.455
1.359	1.219	1.216	1.265	0.535	0.479	0.486	0.500
1.486	1.315	1.317	1.373	0.581	0.510	0.527	0.539
1.613	1.417	1.421	1.484	0.626	0.558	0.568	0.584
1.742	1.527	1.527	1.599	0.674	0.602	0.611	0.629
1.896	1.631	1.629	1.719	0.728	0.642	0.652	0.674
2.034	1.736	1.735	1.835	0.775	0.686	0.694	0.718
2.187	1.842	1.848	1.959	0.818	0.728	0.739	0.762
2.226	1.936	1.943	2.035	0.869	0.766	0.777	0.804
2.340	2.046	2.045	2.144	0.914	0.810	0.818	0.847

จากตารางที่ 5.3 นำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตที่วัดเข้าตัวตรวจจับ และแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ

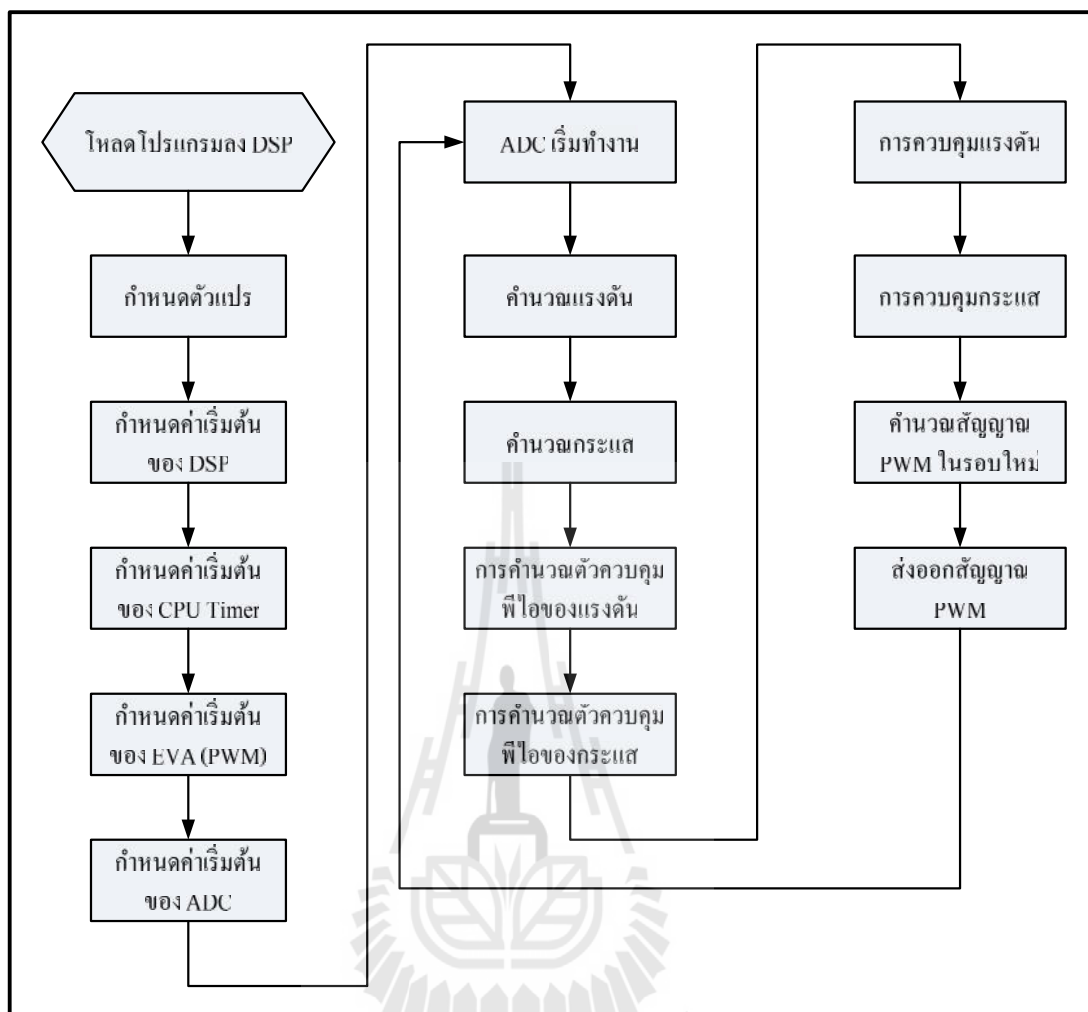
จากรูปที่ 5.20 สามารถหาสมการเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตที่วัดเข้าตัวตรวจจับและแรงดันเอาต์พุตของตัวตรวจจับ ดังสมการที่ (5.3)

$$I_{in} = 2.5808 V_{O(sensor)} + 0.0038 \quad (5.3)$$

5.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนของการควบคุมที่จะใช้สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นจะใช้ตัวควบคุมพีไอ สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 สำหรับคำนวณประมวลผลสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุต บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 แสดงได้ดังรูปที่ 5.21 และลักษณะสำคัญของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถดูได้จากภาพผนวก จ.





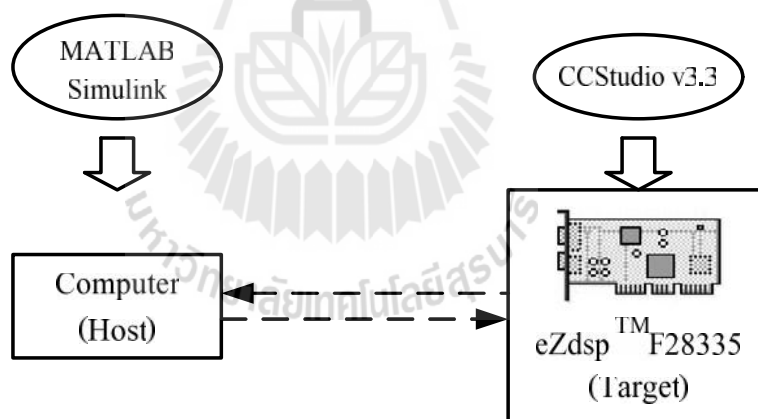
รูปที่ 5.22 ไคอะแกรมการเขียนโปรแกรมของการควบคุม

โปรแกรมภาษาซีของการควบคุมฟิโที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงการเขียนโปรแกรมตัวควบคุมฟิโ ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมสำหรับการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น สามารถดูได้จากภาคผนวก ฉ.

เพื่อเป็นการทดสอบว่าโปรแกรมภาษาซีของการควบคุมฟิโที่ใช้ในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น จะใช้การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In Loop : HIL) ที่เป็นการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ร่วมกับโปรแกรม Simulink โดยจะสร้างตัวควบคุมฟิโด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 เพื่อจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น การจำลอง

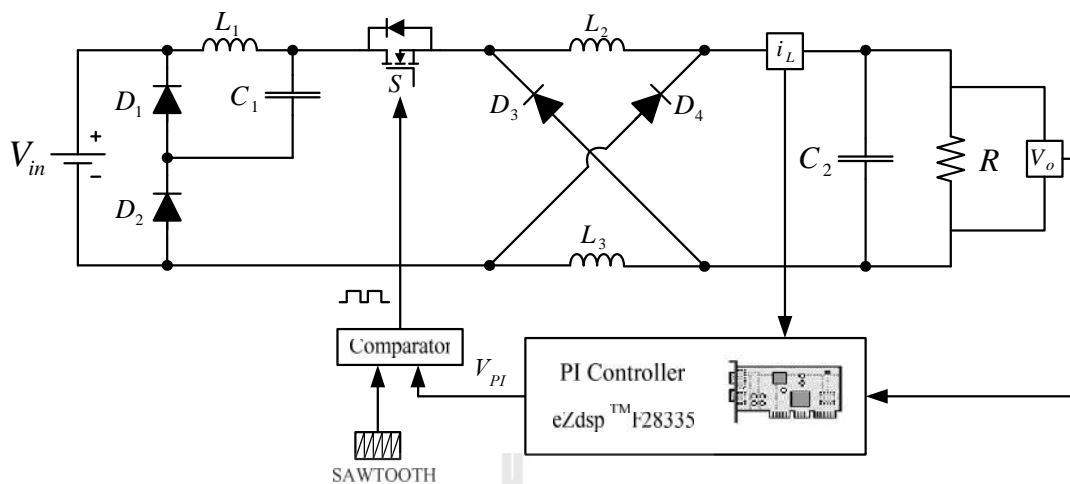
สถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่จะนำเสนอ จะเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบดังที่นำเสนอในบทที่ 4

เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP โดยบริษัท MathWork ได้พัฒนาโปรแกรม Code Composer Studio สามารถเชื่อมโยงใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ MATLAB เวอร์ชัน 2011 ขึ้นไป และรองรับกับคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการ Windows XP โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ที่ใช้โปรแกรม Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCStudio v3.3) ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ดังกล่าว สามารถเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB หลักการทำงานของฮาร์ดแวร์ในรูปจะเป็นการรับและส่งข้อมูลผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchang) เชื่อมโยงกับโปรแกรม Simulink (Host) กับ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 โดยแผนภาพการเชื่อมโยงรับส่งข้อมูลแสดงได้ดังรูปที่ 5.23 ส่วนรายละเอียดการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป สามารถดูได้จากภาคผนวก ฉ



รูปที่ 5.23 แผนภาพการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335

โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังรูปที่



รูปที่ 5.24 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ

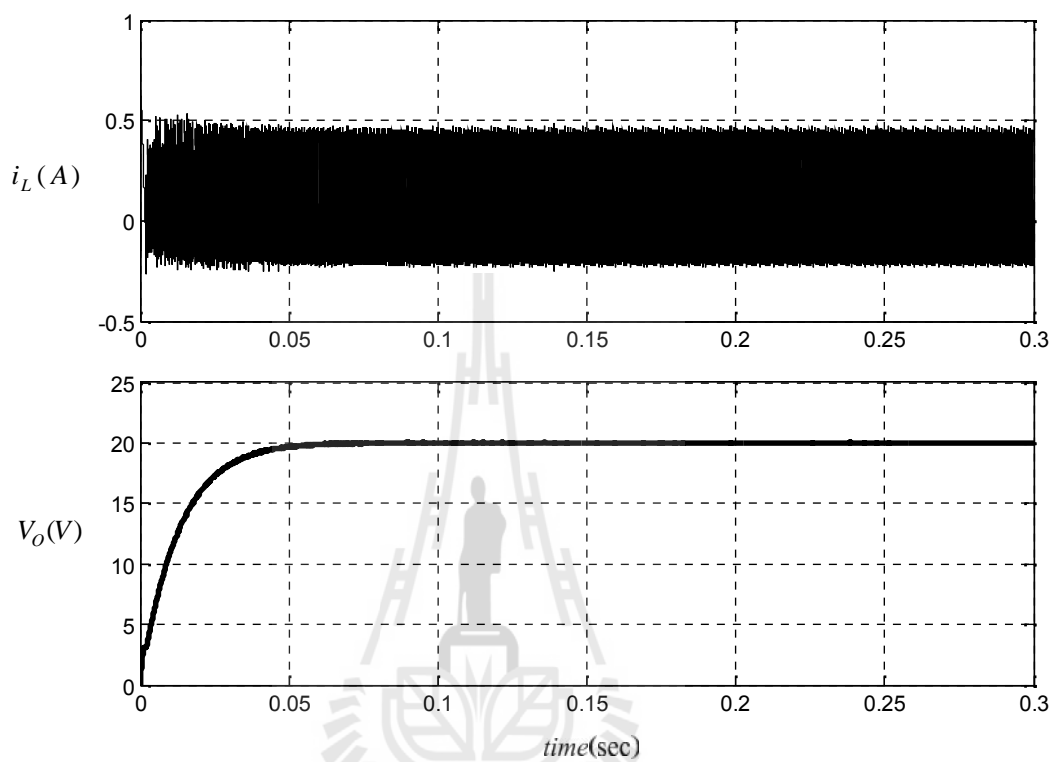
การทดสอบการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปของระบบดังกล่าว สามารถแสดงการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ที่เป็นโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 แสดงได้ดังรูปที่ 5.25



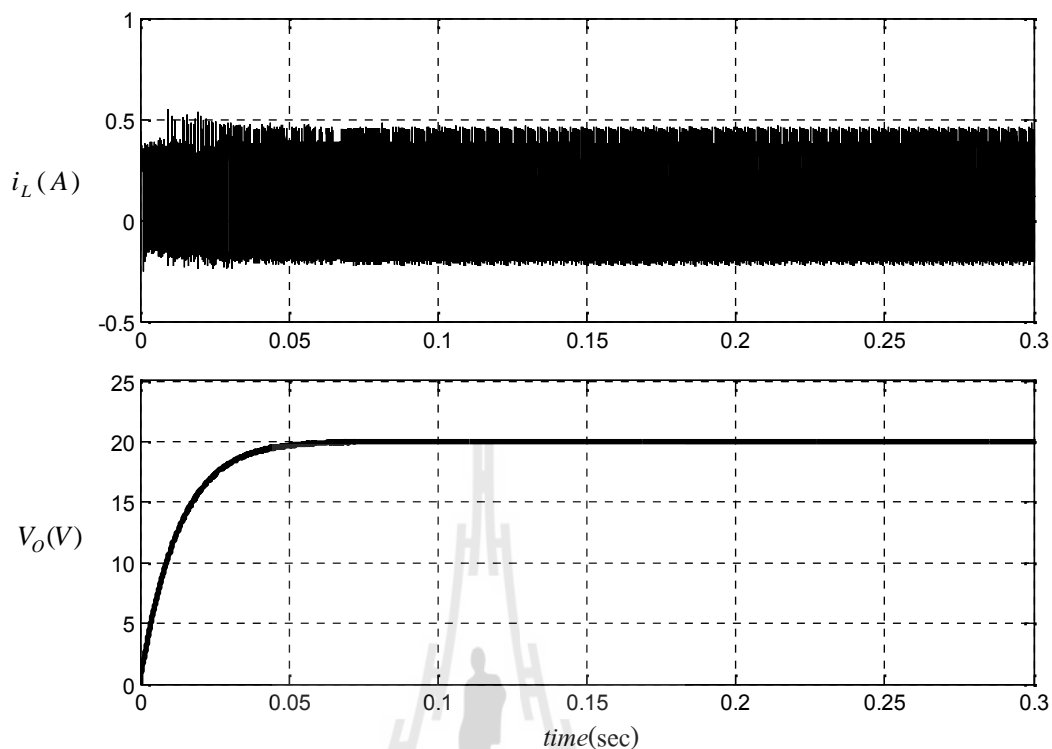
รูปที่ 5.25 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335

ทำการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 20 V แบ่งการจำลองสถานการณ์เป็น 2 กรณี โดยกรณีแรกจำลองสถานการณ์แบบ

ฮาร์ดแวร์ในรูปผังรูปที่ 5.26 และกรณีที่สองจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม Simulink ในการประมวลผลทั้งหมด แสดงผลการจำลองสถานการณ์ผังรูปที่ 5.27

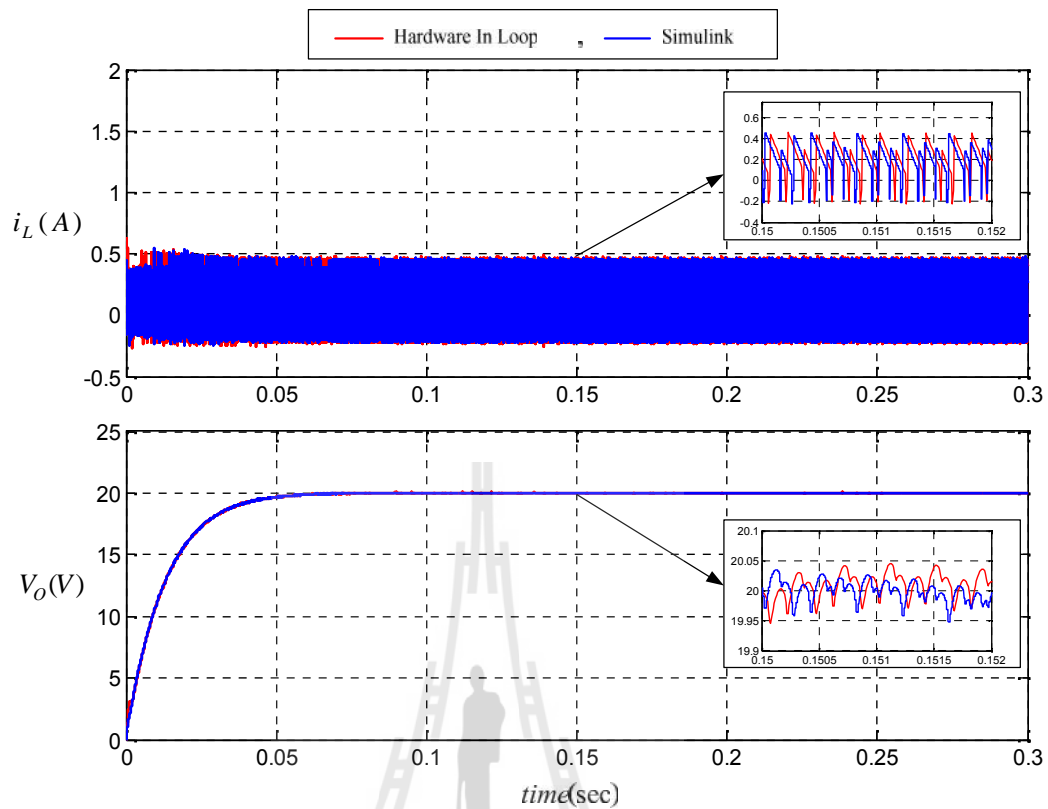


รูปที่ 5.26 ผลตอบสนองของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูป



รูปที่ 5.27 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

จากนั้นนำผลตอบสนองของแรงดัน V_o และ กระแส i_L มาเปรียบเทียบกัน แสดงได้ดังรูปที่ 5.28 ซึ่งผลการตอบสนองของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นแบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ เมื่อวงจรรับแรงดันอินพุต 400 V โดยที่วงจรสามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้ถึง 20 V และถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่ประมวลผลอยู่บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTM F28335 และเมื่อเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าจากผลการจำลองทั้งสองแบบให้ผลตอบสนองของกระแส i_L และแรงดัน V_o ที่มีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกัน จึงสามารถยืนยันว่าผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป และการจำลองสถานการณ์

5.8 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เริ่มตั้งแต่การสร้างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อป้อนแรงดันให้กับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น การเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น การสร้างวงจรขยายแรงดันแบบแยกโคคัลสัญญาณเพื่อขยายสัญญาณ PWM จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และการสร้างวงจรตรวจจับทั้งกระแสและแรงดัน จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเพื่อให้มั่นใจว่าชุดทดสอบที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้จริงร่วมกับตัวควบคุมพีไอ ในบทที่ 6 จะนำเสนอผลการทดสอบของชุดทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ ณ จุดการทำงานต่าง ๆ

บทที่ 6

ผลการทดสอบ

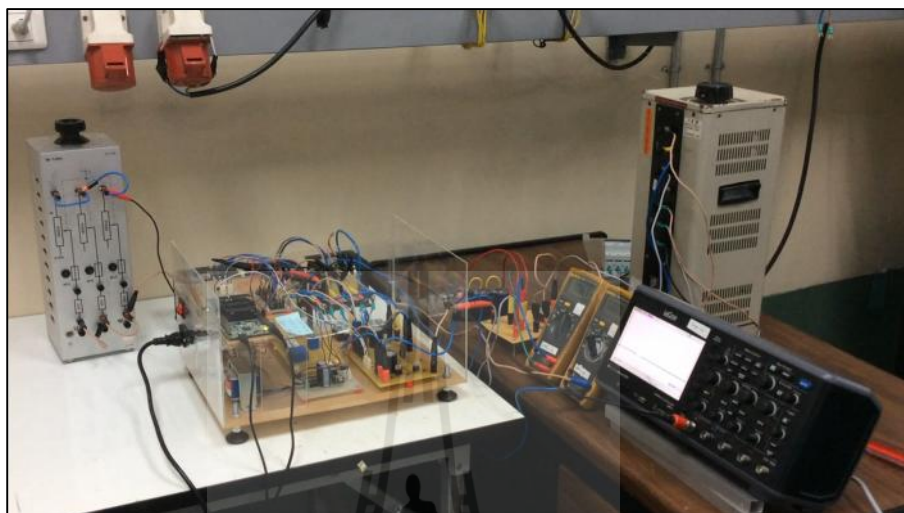
6.1 บทนำ

จากบทที่ 5 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบวงจรลวดตอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เริ่มตั้งแต่การสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรที่พัฒนาขึ้น การเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในวงจรลวดตอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น การสร้างตัวตรวจจับแรงดันเอาต์พุตและกระแส และการสร้างวงจรขยายแรงดันและแยกโคคสัญญาณเพื่อขยายสัญญาณแรงดันที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 รวมถึงการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมว่าสามารถนำมาใช้งานกับวงจรทดสอบได้ ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบของวงจรที่พัฒนาขึ้น ทั้งกรณีไม่มีตัวควบคุม การประเมินประสิทธิภาพของวงจรที่พัฒนาขึ้น และทดสอบกรณีมีตัวควบคุม ทำการทดสอบสมรรถนะในส่วนที่มีตัวควบคุมชนิดพีไอ จะมีการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ ที่ 20 V ทำการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมในเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อดูผลการตอบสนองการทำงานของชุดทดสอบวงจรลวดตอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2 การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้นนั้นจะทำการทดสอบชุดทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกทดสอบการทำงาน โดยไม่มีตัวควบคุม ทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของชุดทดสอบ ณ การทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ รวมถึงประเมินประสิทธิภาพของชุดทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อประเมินผลชุดทดสอบ และกรณีที่สองชุดทดสอบทำงานร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอ เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ 20 V ทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ณ สถานะการทำงานต่าง ๆ สำหรับการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งผลจากชุดทดสอบทั้งสองกรณีจะ

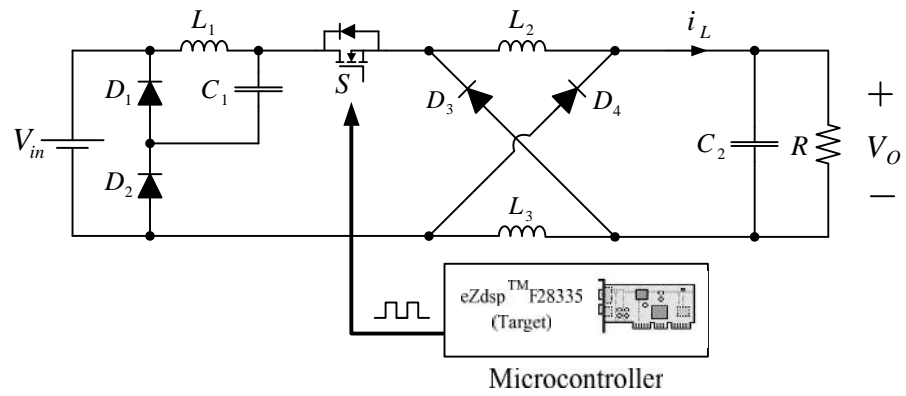
ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ที่สภาวะการทำงาน ณ จุดทำงานเดียวกัน ทั้งนี้ การทดสอบชุดทดสอบขณะไม่มีตัวควบคุม และขณะมีตัวควบคุม แสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้



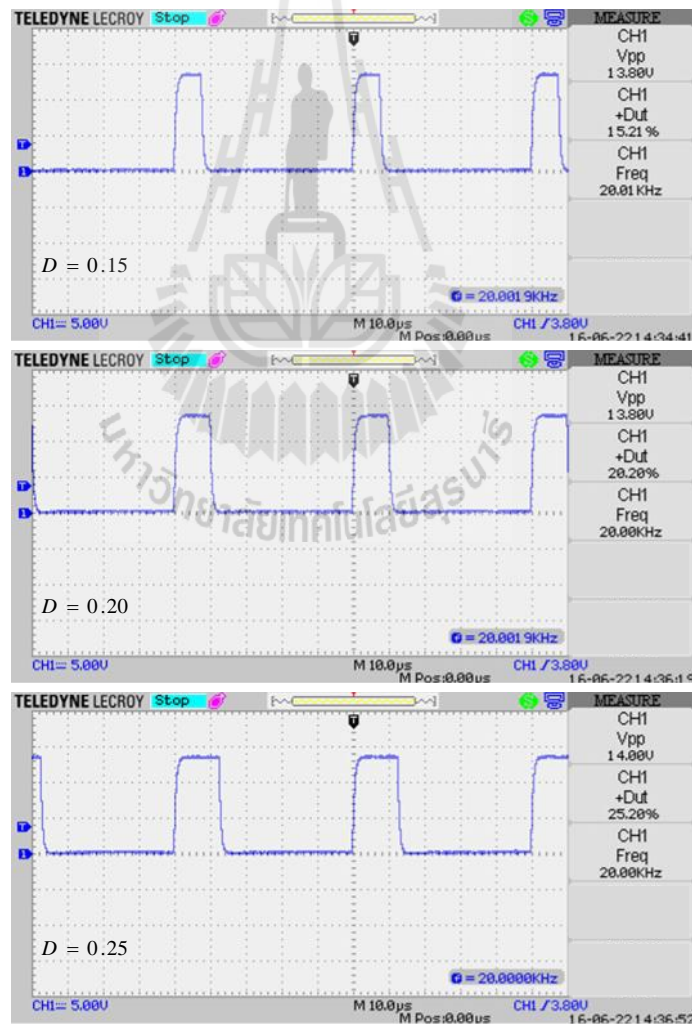
รูปที่ 6.1 การทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น

6.3 การทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น กรณีไม่มีตัวควบคุม

โครงสร้างวงจรที่พัฒนาขึ้น กรณีไม่มีตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 6.2 ทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่เพื่อดูผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต กำหนดแรงดันอินพุตเป็น 200 V เนื่องจากการทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุม การทำงานที่สภาวะชั่วคราวแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในวงจรจะมีการพุ่งเกิน อาจส่งผลให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการทดสอบกรณีไม่มีตัวควบคุมจึงทำการลดแรงดันอินพุตจาก 400 V เป็น 200 V จากนั้นทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ตั้งแต่ 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ ผลทดสอบที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น กรณีไม่มีตัวควบคุม แสดงดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.2 โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น กรณีไม่มีตัวควบคุม



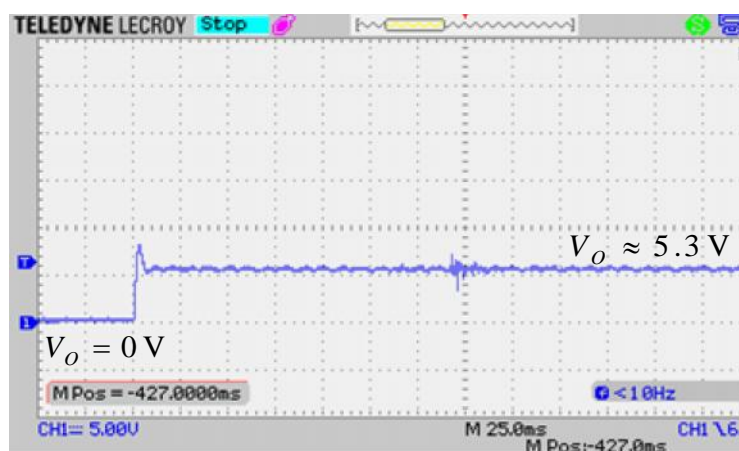
รูปที่ 6.3 สัญญาณพัลส์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15, 0.20 และ 0.25

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น กรณีไม่มีตัวควบคุม

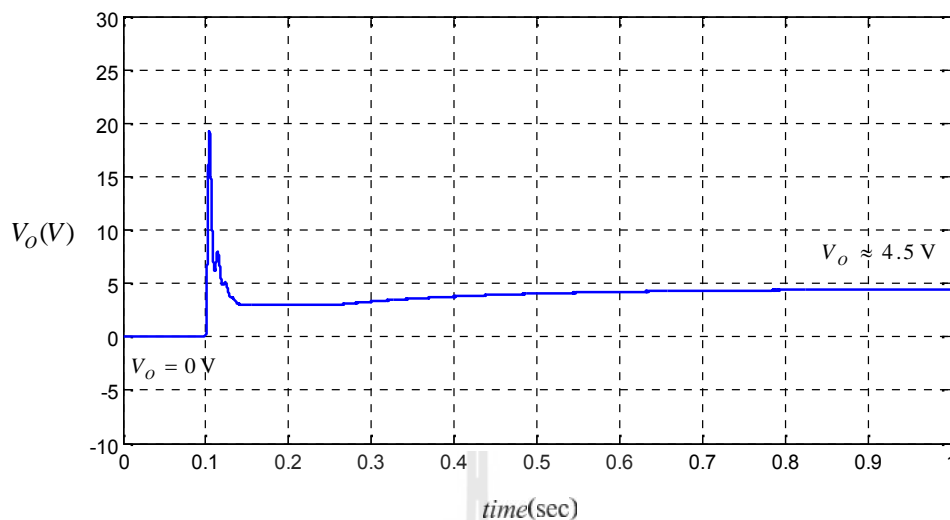
สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด
V_{in}	แรงดันอินพุต	200 V
L_1, L_2, L_3	ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH
C_1, C_2	ตัวเก็บประจุ	180 μ F
R	โหลดความต้านทาน	20 Ω
f_{sw}	ความถี่สวิตช์	20 kHz

การทดสอบที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15 ผลการทดสอบของชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.4 จะเห็นว่าเมื่อวงจรเริ่มการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15 ที่สภาวะชั่วคราวแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินอยู่ที่ประมาณ 9 V และเมื่อแรงดันเอาต์พุตเข้าสู่ช่วงสภาวะอยู่ตัวแรงดันเอาต์พุตจะอยู่ที่ประมาณ 5.3 V ในส่วนของผลการจำลองสถานการณ์ แสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 6.5 จากรูปจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ประมาณ 10.2 V และเมื่อทำการคำนวณจากสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานดังสมการ (6.1) ได้แรงดันเอาต์พุตเป็น 2.43 V พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากผลการทดสอบและการจำลองสถานการณ์ลดทอนแรงดันได้น้อยกว่าสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจร เนื่องจากที่ค่าวัฏจักรหน้าที่น้อย ๆ การทำงานของสวิตช์กำลังช่วงที่ไม่นำกระแส (t_{off}) มาก ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดสภาวะการทำงานไม่ต่อเนื่อง ทำให้เกิดกำลังการสูญเสียภายในวงจร รายละเอียดการวิเคราะห์การทำงานช่วงกระแสไม่ต่อเนื่องแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

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



รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15

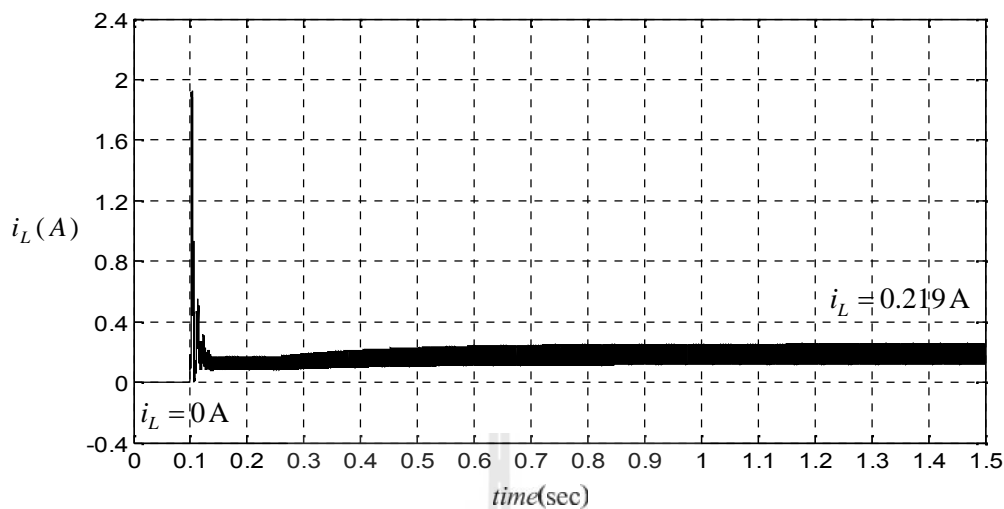


รูปที่ 6.5 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15

จากนั้นทำการสังเกตผลการทดสอบกระแส i_L ทดสอบการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15 แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.6 จากรูปจะเห็นว่าช่วงสภาวะชั่วครู่ กระแสมีการพุ่งเกินประมาณ 1 A และเมื่อเวลาผ่านไปก็สภาวะอยู่ตัวกระแสมีค่าประมาณ 0.299 A และจะสังเกตเห็นว่ากระแสมีสัญญาณรบกวนทุก ๆ 0.2 sec เนื่องสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ภายในวงจรต่าง ๆ รวมถึงการแสดงผลของเครื่องมือวัด ในส่วนของผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.7 ช่วงสภาวะชั่วครู่ กระแสมีการพุ่งเกินประมาณ 1.2 A เมื่อเวลาผ่านไปก็สภาวะอยู่ตัวกระแสมีค่าประมาณ 0.219 A เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ไม่มีการรบกวนจากอุปกรณ์ผลของกระแสที่ออกมาจึงไม่มีการรบกวนที่เกิดในผลทดสอบ

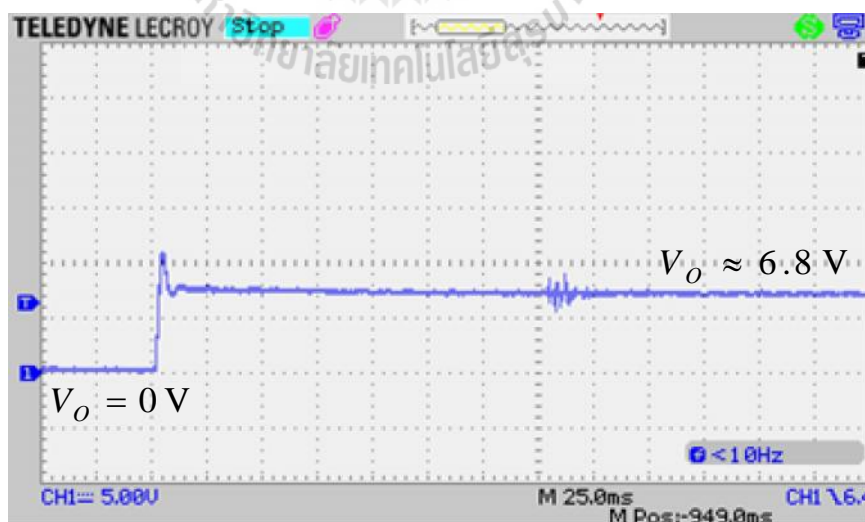


รูปที่ 6.6 ผลการทดสอบกระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15

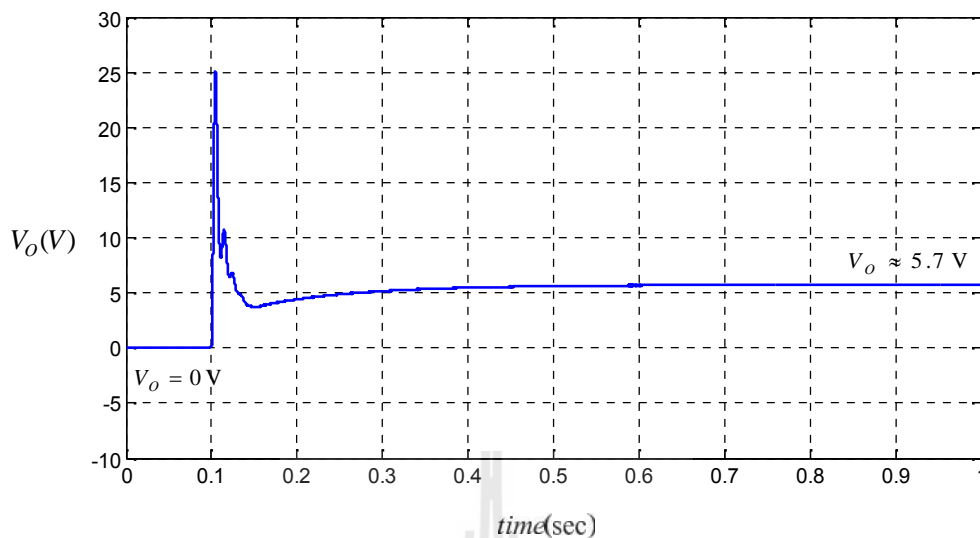


รูปที่ 6.7 ผลการจำลองสถานการณ์กระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15

การทดสอบที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20 แสดงผลทดสอบดังรูปที่ 6.8 จากรูปที่สภาวะอยู่ตัว แรงดันเอาต์พุตที่ได้ประมาณ 6.8 V และเมื่อพิจารณาช่วงสภาวะชั่วคราวแรงดันเอาต์พุตมีแรงดันพุ่งเกินประมาณ 11 V ในส่วนของผลการจำลองสถานการณ์ แสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 6.9 จากรูปจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ประมาณ 5.7 V และเมื่อทำการคำนวณจากสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานได้แรงดันเอาต์พุตเป็น 4.44 V



รูปที่ 6.8 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20

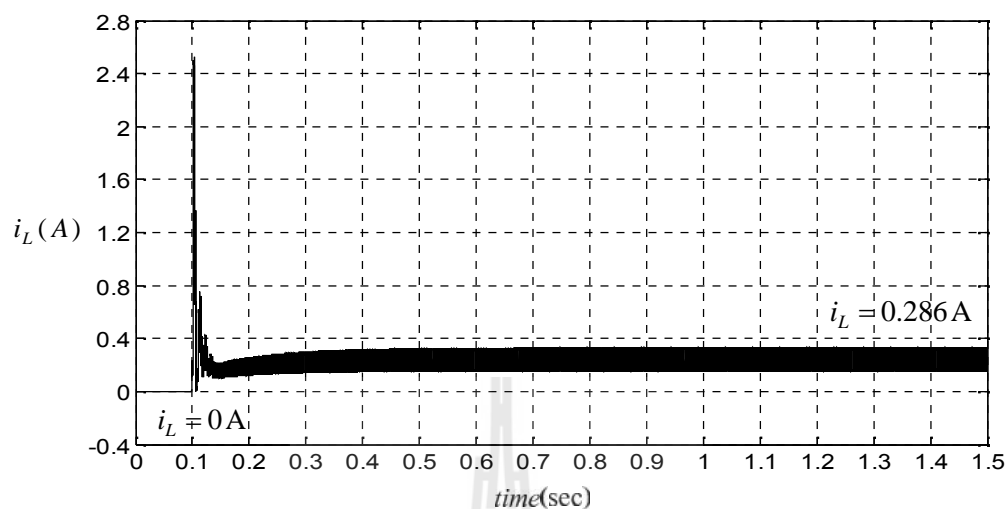


รูปที่ 6.9 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20

ผลการทดสอบกระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20 แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.10 จากรูปจะเห็นว่าช่วงสภาวะชั่วครู่ กระแสมีการพุ่งเกินประมาณ 1.2 A และเมื่อเวลาผ่านไปก็สภาวะอยู่ตัว กระแสมีค่าประมาณ 0.383 A และจะสังเกตเห็นว่ากระแสมีสัญญาณรบกวนทุก ๆ 0.2 sec และในส่วนการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.11 ช่วงสภาวะชั่วครู่ กระแสมีการพุ่งเกินประมาณ 1.4 A เมื่อเวลาผ่านไปก็สภาวะอยู่ตัวกระแสมีค่าประมาณ 0.286 A



รูปที่ 6.10 ผลการทดสอบกระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20

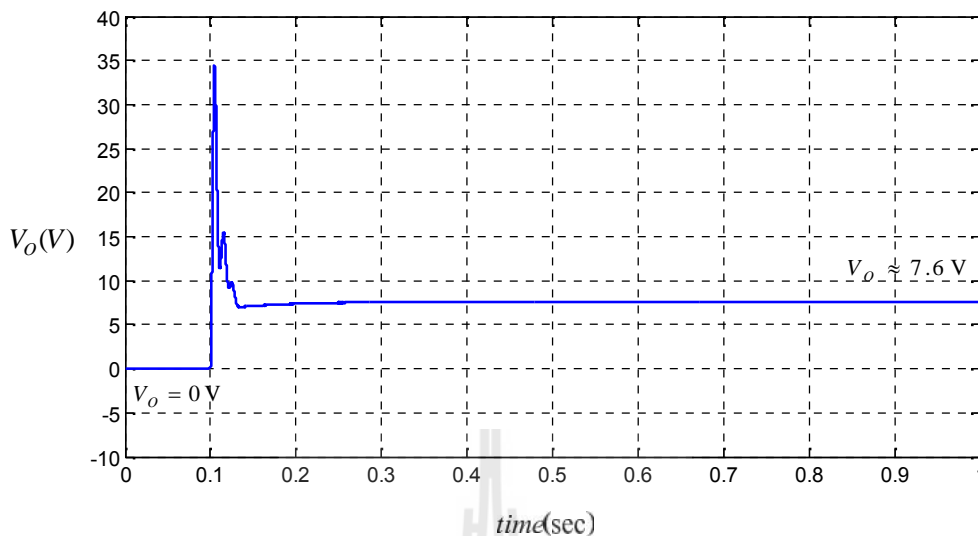


รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสถานการณ์กระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.20

การทดสอบที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25 แสดงผลทดสอบดังรูปที่ 6.12 จากรูปจะเห็นว่าที่สถานะอยู่ตัวแรงดันเอาต์พุตที่ได้ประมาณ 8.6 V ในส่วนของผลการจำลองสถานการณ์ แสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 6.13 จากรูปจะเห็นว่าที่สถานะอยู่ตัวแรงดันเอาต์พุตที่ได้ประมาณ 7.6 V และเมื่อทำการคำนวณจากสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานได้แรงดันเอาต์พุตเป็น 7.14 V



รูปที่ 6.12 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25

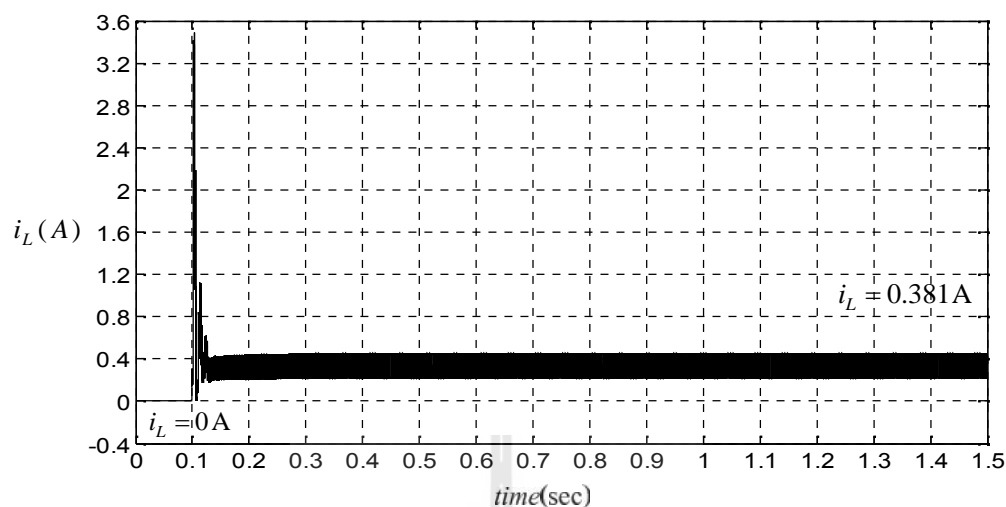


รูปที่ 6.13 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25

ทดสอบการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25 แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.14 จากรูปจะเห็นว่าช่วงสภาวะชั่วคราว กระแสมีการพุ่งเกินประมาณ 1.2 A และเมื่อเวลาผ่านไปทีสภาวะอยู่ตัวกระแสมีค่าประมาณ 0.482 A และจะสังเกตเห็นว่ากระแสมีสัญญาณรบกวนทุก ๆ 0.2 sec และการรบกวนที่เกิดขึ้นจะมีผลการรบกวนมากกว่าที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่น้อยกว่าเนื่องจากการดึงกำลังงานจากแหล่งจ่ายมากขึ้น ในส่วนการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.15 ช่วงสภาวะชั่วคราว กระแสมีการพุ่งเกินประมาณ 1.4 A เมื่อเวลาผ่านไปทีสภาวะอยู่ตัวกระแสมีค่าประมาณ 0.381 A



รูปที่ 6.14 ผลการทดสอบกระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25



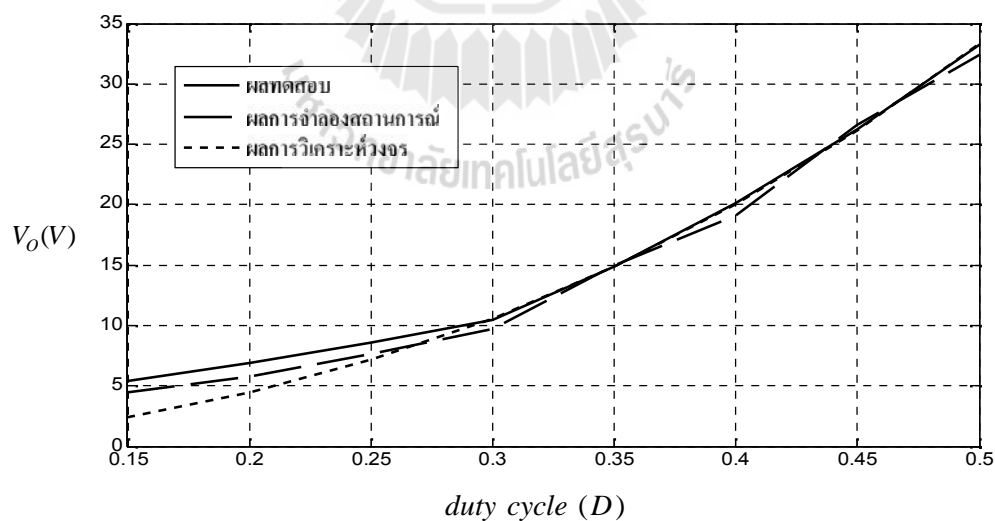
รูปที่ 6.15 ผลการจำลองสถานการณ์กระแส i_L ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25

จากผลการทดสอบวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกรณีไม่มีตัวควบคุม จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตระหว่างผลทดสอบของชุดสอบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกัน รวมทั้งค่าผลทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์ยังมีแนวโน้มเป็นไปตามสมการการวิเคราะห์ห้วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น จากผลทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นกรณีไม่มีตัวควบคุมทำให้ทราบถึงแนวโน้มแรงดันเอาต์พุตว่าเป็นจริงดังสมการที่ (6.1) ที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้น ตารางที่ 6.2 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุต โดยมีการเปรียบเทียบผลของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากผลทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์ เปรียบเทียบกับสมการอัตราลดทอนแรงดันที่ได้ศึกษามาแล้ว จากตารางที่ 6.2 พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากผลทดสอบและการจำลองสถานการณ์จะมีค่าคลาดเคลื่อนกับสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นช่วงที่มีการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่น้อย ๆ แต่เมื่อมีค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แรงดันเอาต์พุตของวิธีทั้งสามจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งผลทดสอบชุดทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่ 0.30 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ประมาณ 10.42 เเท่ หรือมีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 19.1 เเท่ แสดงให้เห็นว่าชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถที่จะลดทอนแรงดันได้ถึง 20 เเท่ ตามเงื่อนไขในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุต

ค่าวัฏจักร หน้าที่ (D)	แรงดันอินพุต 200 V					
	ผลทดสอบ		ผลการจำลองสถานการณ์		ผลการวิเคราะห์ห้วงจร	
	แรงดัน เอาต์พุต (V)	อัตราคตอน แรงดัน (M)	แรงดัน เอาต์พุต (V)	อัตราคตอน แรงดัน (M)	แรงดัน เอาต์พุต (V)	อัตราคตอน แรงดัน (M)
0.15	5.39	37.3	4.47	44.7	2.43	82.2
0.20	6.87	29.1	5.73	34.9	4.44	45
0.25	8.55	23.5	7.63	26.2	7.14	28
0.30	10.42	19.1	9.72	20.6	10.59	19
0.35	14.88	13.5	14.93	13.4	14.85	13.5
0.40	20.12	9.9	19.12	10.5	20.00	10
0.45	26.27	7.6	26.58	7.5	26.13	7.7
0.50	33.25	6.0	32.43	6.1	33.33	6

จากตารางที่ 6.2 สามารถเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตได้ดังรูปที่ 6.16 จากรูปแสดงให้เห็นแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากผลการทดสอบชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการวิเคราะห์ห้วงจร



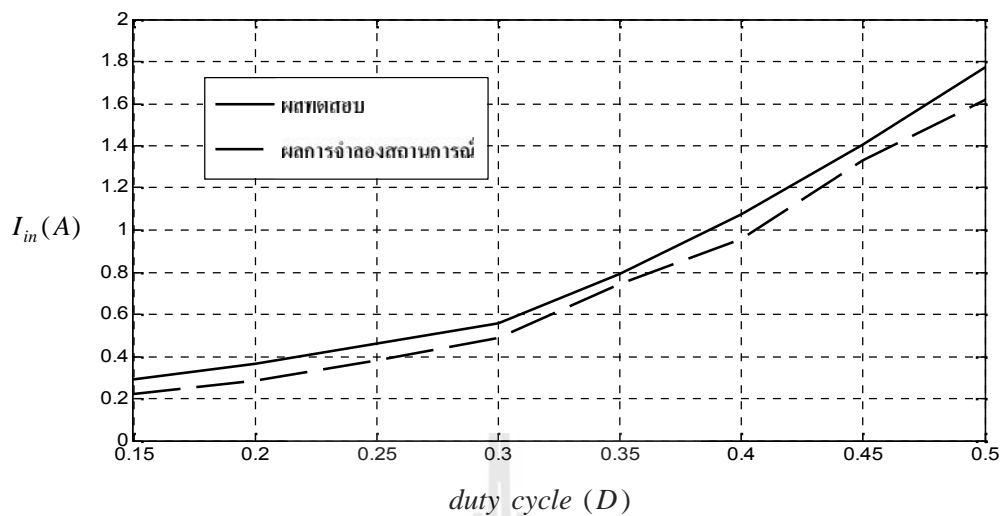
รูปที่ 6.16 การเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตจากวิธีต่าง ๆ

จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพของชุดทดสอบวงจรลวดทองระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น
เทียบกับผลประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสดงดังตารางที่ 6.3

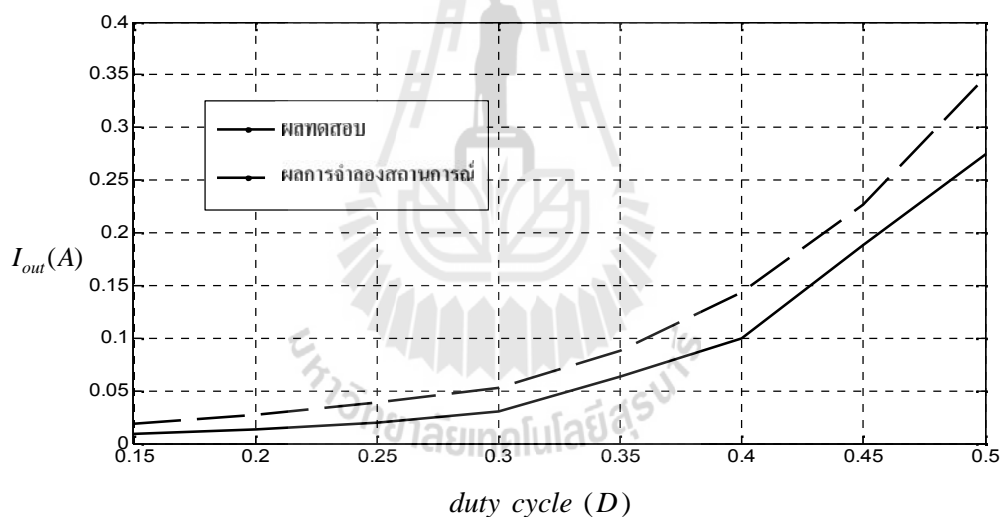
ตารางที่ 6.3 การประเมินประสิทธิภาพ

ค่าวัฏจักร หน้าที่ (D)	แรงดันอินพุต 200 V							
	กระแสอินพุต (A)		กระแสเอาต์พุต (A)		แรงดันเอาต์พุต (V)		ประสิทธิภาพ (%)	
	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ	จำลอง
0.15	0.009	0.019	0.289	0.224	5.39	4.47	40.77	54.52
0.20	0.013	0.027	0.368	0.286	6.87	5.73	46.79	63.31
0.25	0.020	0.039	0.459	0.381	8.55	7.63	50.04	71.91
0.30	0.030	0.053	0.559	0.486	10.42	9.72	55.14	78.56
0.35	0.064	0.088	0.791	0.746	14.88	14.93	66.81	87.59
0.40	0.100	0.143	1.077	0.956	20.12	19.12	75.77	91.03
0.45	0.188	0.227	1.405	1.329	26.27	26.58	81.06	94.19
0.50	0.275	0.348	1.771	1.621	33.25	32.43	85.46	95.50

จากตารางที่ 6.3 สามารถเปรียบเทียบกระแสอินพุตระหว่างผลการทดสอบเทียบกับผลการ
จำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.17 พบว่าแนวโน้มของกระแสอินพุตทั้งสองมีแนวโน้ม
ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกระแสเอาต์พุตระหว่างผลการทดสอบเทียบกับผลการจำลอง
สถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.18 แนวโน้มของกระแสเอาต์พุตมีความใกล้เคียงกัน กระแสเอาต์พุต
ที่ได้จากผลการทดสอบอาจจะมีค่าน้อยกว่าผลการจำลองสถานการณ์เล็กน้อยเนื่องจากเกิดกำลังการ
สูญเสียภายในอุปกรณ์ทดสอบ

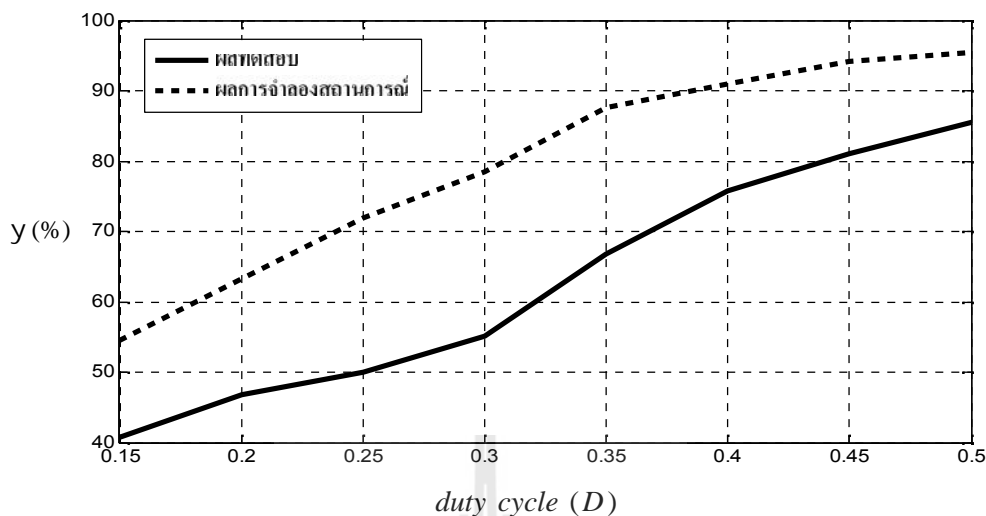


รูปที่ 6.17 การเปรียบเทียบกระแสอินพุต



รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบกระแสเอาต์พุต

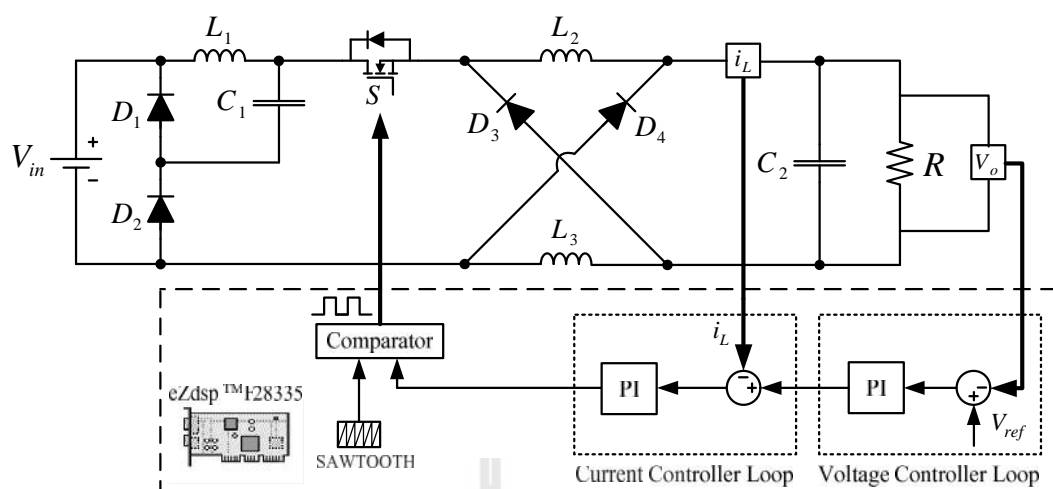
จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรลดทอนระดับแรงดันระหว่างผลทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.19 พบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากผลทดสอบที่จุดการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่าง ๆ ประสิทธิภาพของชุดทดสอบมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ อาจเกิดจากการกำลังการสูญเสียภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ความคลาดเคลื่อนจากการที่อุปกรณ์ไม่เป็นอุดมคติ



รูปที่ 6.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

6.4 การทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น กรณีมีตัวควบคุม

การทดสอบชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นกรณีมีตัวควบคุมแสดง โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นกรณีมีตัวควบคุมดังรูปที่ 6.20 โดยใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอที่ได้ออกแบบอย่างง่ายดังที่นำเสนอในบทที่ 4 สำหรับการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของชุดทดสอบ โดยเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 สำหรับประมวลผลตัวควบคุมพีไอเพื่อสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามที่ตามเงื่อนไขงานวิจัยคือ มีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้ผลการทดสอบชุดทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต จะใช้ค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทั้งหมด ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงดังตารางที่ 6.4 ซึ่งการทดสอบชุดทดสอบกรณีมีตัวควบคุมจะทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตในสถานะต่าง ๆ ทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุตรวมถึงการทดสอบการปรับเปลี่ยนโหลดความต้านทานโดยควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของตัวควบคุมชนิดพีไอที่ทำการออกแบบอย่างง่ายสามารถใช้ได้กับชุดทดสอบอย่างมีประสิทธิภาพ

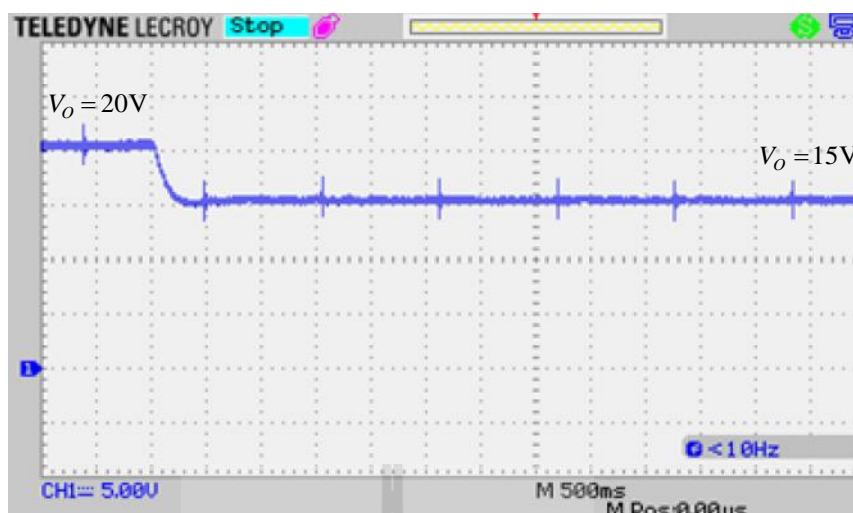


รูปที่ 6.20 โครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น กรณีมีตัวควบคุม

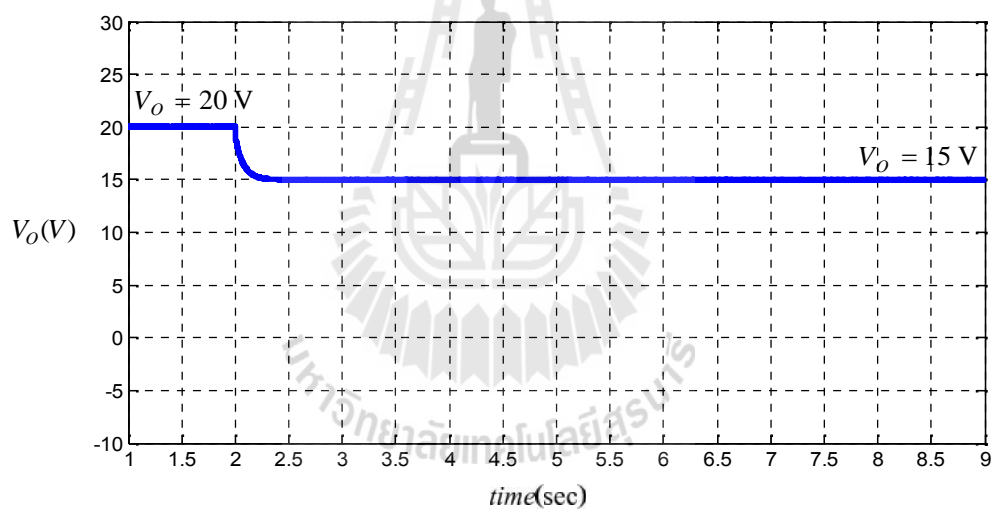
ตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับชุดทดสอบและการจำลองสถานการณ์ กรณีมีตัวควบคุม

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

การทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุต จะทำทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุต จาก 20 V ไปเป็น 15 V แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.21 จากรูปแสดงการควบคุมแรงดันจากแรงดันเอาต์พุตเริ่มต้นอยู่ที่ 20 V ควบคุมแรงดันเป็น 15 V จากรูปจะเห็นว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนแรงดันใช้เวลาไป 0.5 sec และผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.22 จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V ไปเป็น 15 V ใช้เวลาไป 0.5 sec เช่นเดียวกับผลทดสอบของชุดทดสอบ

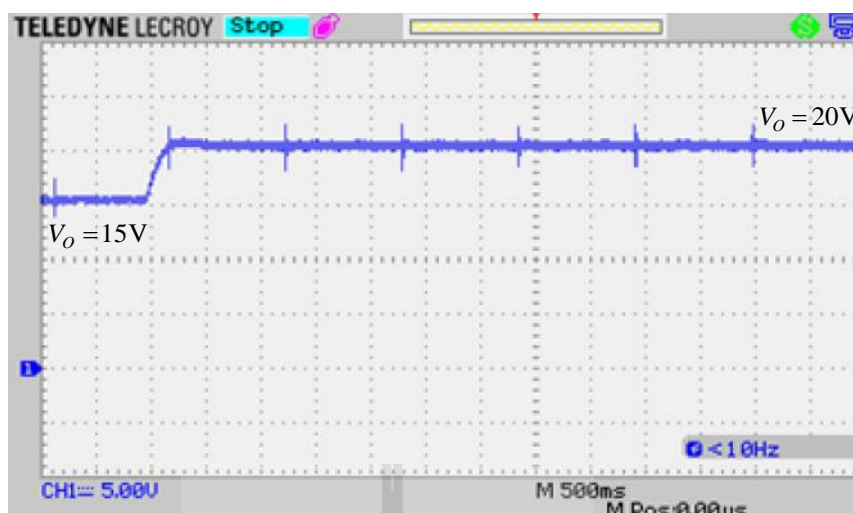


รูปที่ 6.21 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 15 V

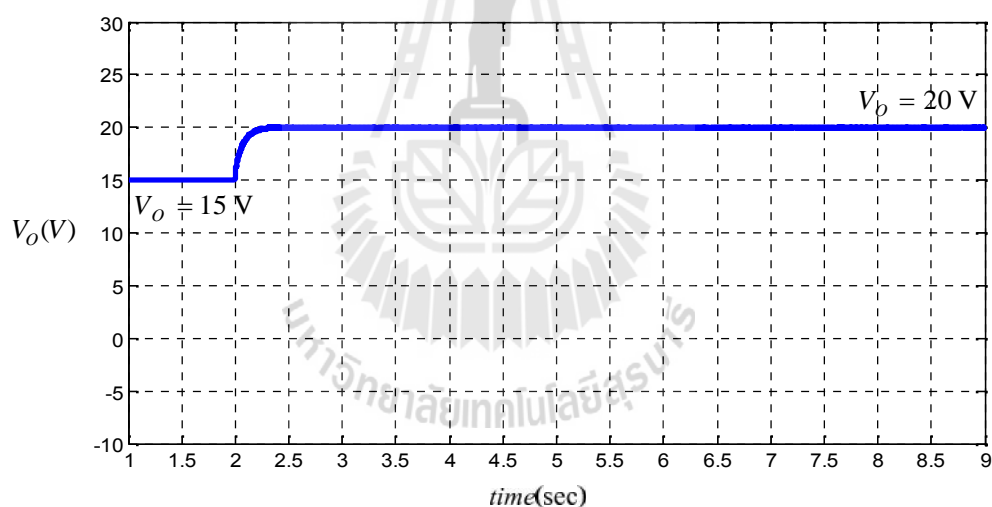


รูปที่ 6.22 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 15 V

การทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุต แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.23 จากรูปแสดงการควบคุมแรงดันจากแรงดันเอาต์พุตเริ่มต้นอยู่ที่ 15 V ควบคุมแรงดันเป็น 20 V จากรูปจะเห็นว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนแรงดันใช้เวลาไป 0.5 sec และผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.24 จะเห็นว่าผลทดสอบของชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์

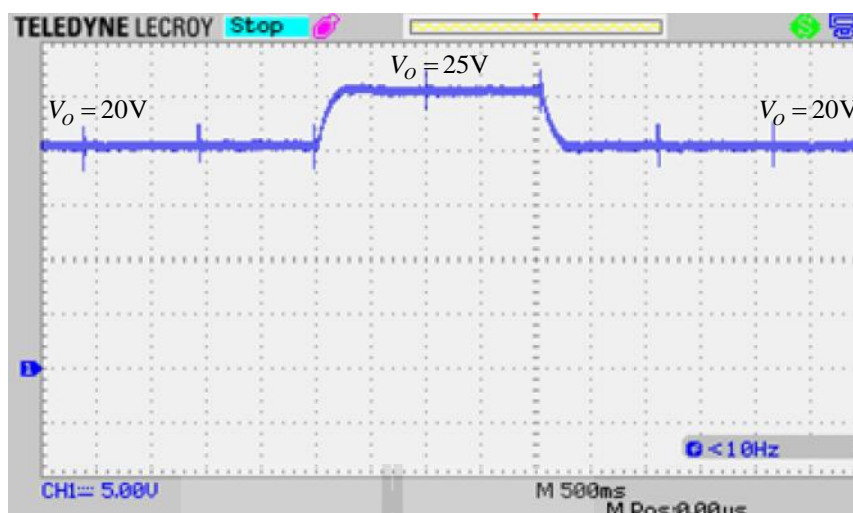


รูปที่ 6.23 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 15 V เป็น 20 V

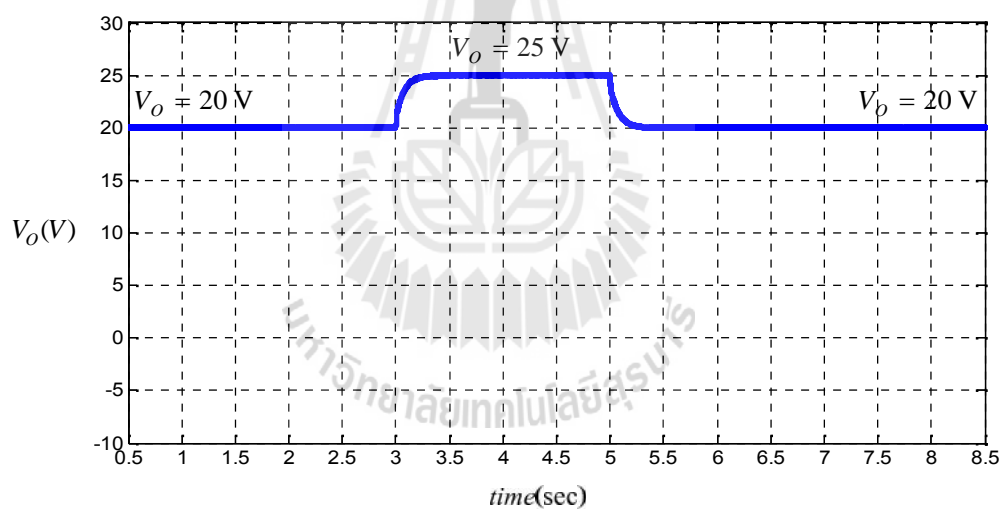


รูปที่ 6.24 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 15 V เป็น 20 V

การทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุต แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.25 จากรูปแสดงการควบคุมแรงดันจากแรงดันเอาต์พุตเริ่มต้นอยู่ที่ 20 V ควบคุมแรงดันเป็น 25 V จากนั้นควบคุมแรงดันเอาต์พุตกลับมาที่ 20 V จากรูปจะเห็นว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนแรงดันใช้เวลาไป 0.5 sec และผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.26 จะเห็นว่าผลทดสอบของชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์

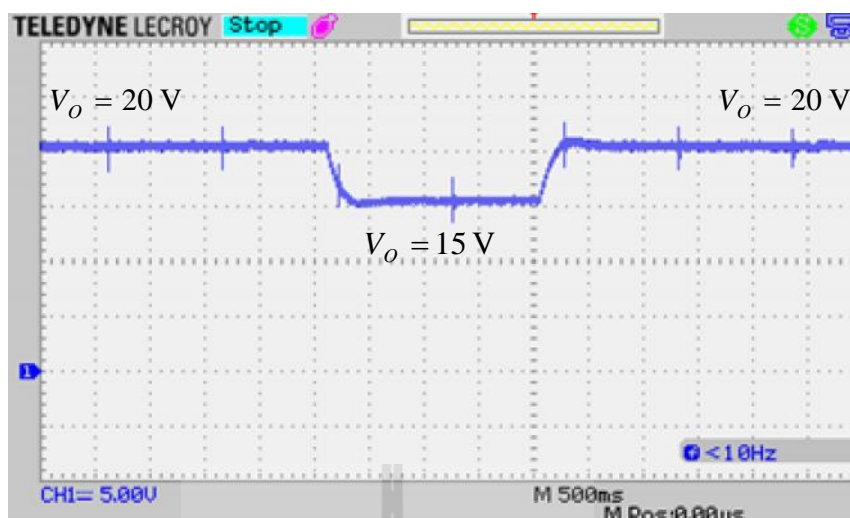


รูปที่ 6.25 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 25 V และ จาก 25 V เป็น 20 V

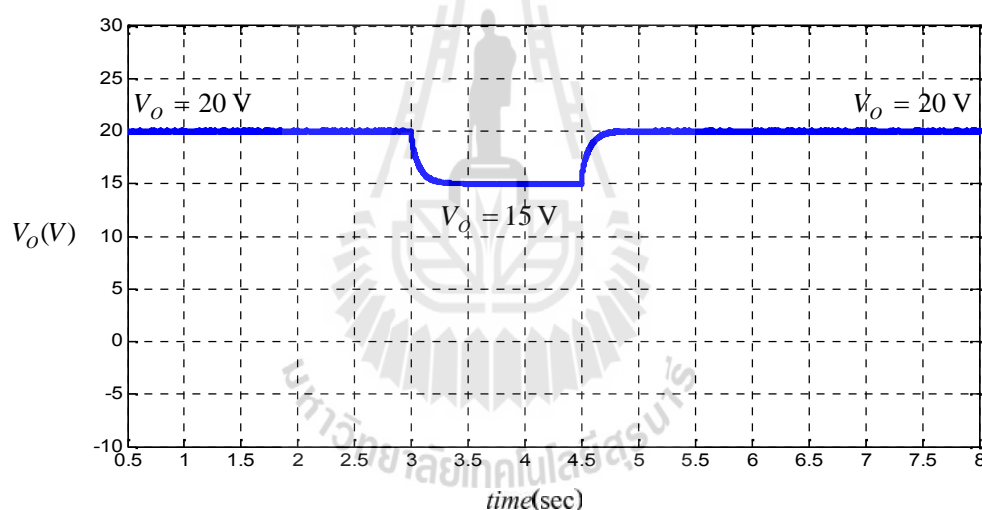


รูปที่ 6.26 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 25 V และ จาก 25 V เป็น 20 V

จากนั้นทำการทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุต แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.27 จากรูปแสดงการควบคุมแรงดันจากแรงดันเอาต์พุตเริ่มต้นอยู่ที่ 20 V ควบคุมแรงดันเป็น 15 V จากนั้นควบคุมแรงดันเอาต์พุตกลับมาที่ 20 V จากรูปจะเห็นว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนแรงดันใช้เวลาไป 0.5 sec และผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.28 จะเห็นว่าผลทดสอบของชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์

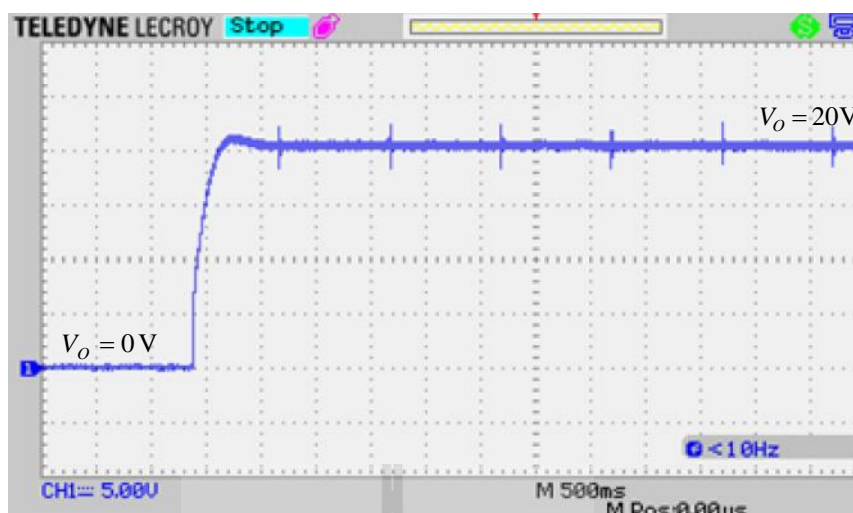


รูปที่ 6.27 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 15 V และ จาก 15 V เป็น 20 V

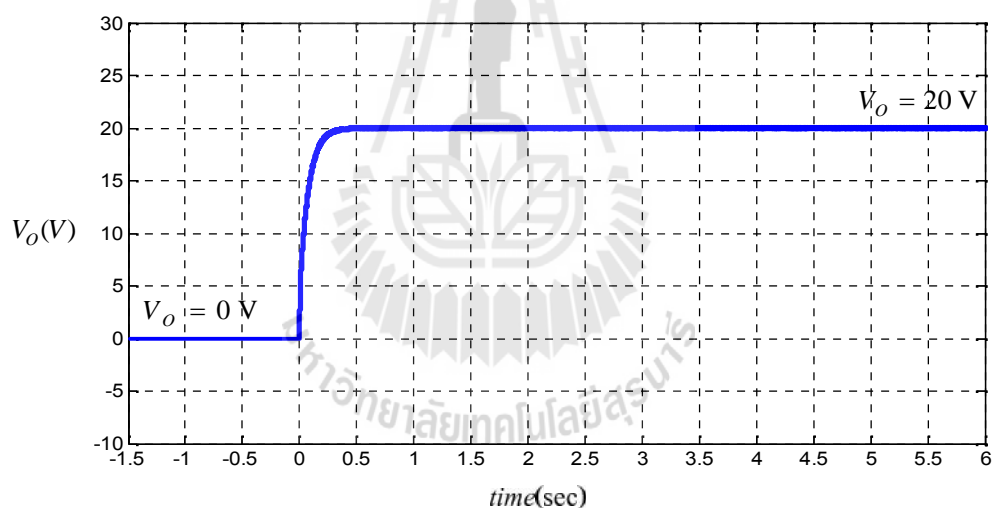


รูปที่ 6.28 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 20 V เป็น 25 V และ จาก 25 V เป็น 20 V

การทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตกำหนดให้แรงดันอินพุตเป็น 400 V โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ที่ 20 V จากนั้นเริ่มทำการทดสอบชุดทดสอบ แสดงผลการทดสอบชุดทดสอบ ดังรูปที่ 6.29 และผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 6.30 จากรูปแสดงการควบคุมแรงดันจากแรงดันเอาต์พุตเมื่อวงจรยังไม่เริ่มทำงานแรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ 0 V และเมื่อทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเป็น 20 V ตัวควบคุมจะเริ่มควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 20 V ใช้เวลาในการควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตคงที่อยู่ที่ 20 V ประมาณ 0.5 sec ตัวควบคุมจึงสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้เข้าสู่สภาวะคงตัว

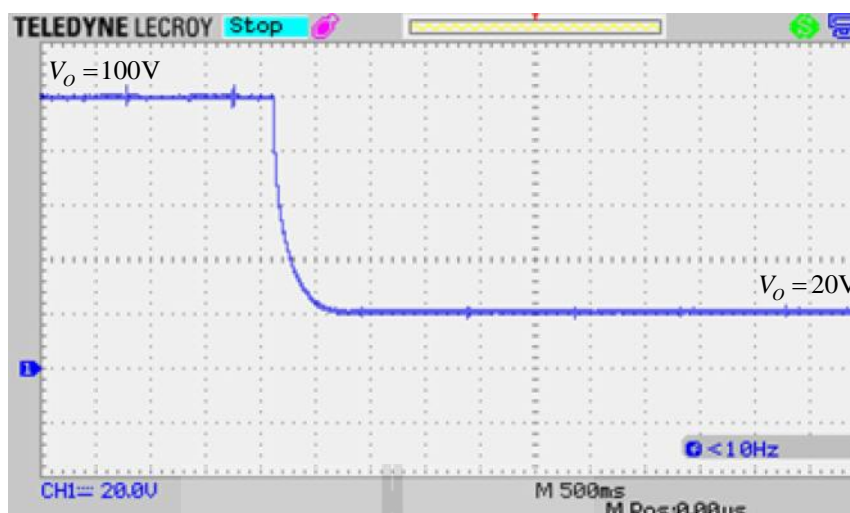


รูปที่ 6.29 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเป็น 20 V

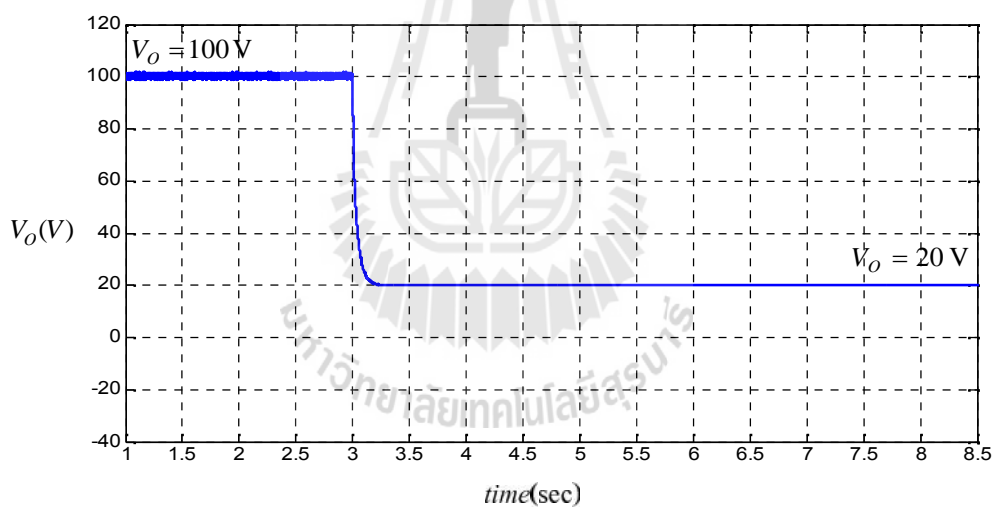


รูปที่ 6.30 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันเอาต์พุตเป็น 20 V

การทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุต แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.31 จากรูปแสดงการควบคุมแรงดันจากแรงดันเอาต์พุตเริ่มต้นอยู่ที่ 100 V ควบคุมแรงดันเป็น 20 V จากรูปจะเห็นว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนแรงดันใช้เวลาไป 0.5 sec เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.32 จะเห็นว่าผลทดสอบของชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์



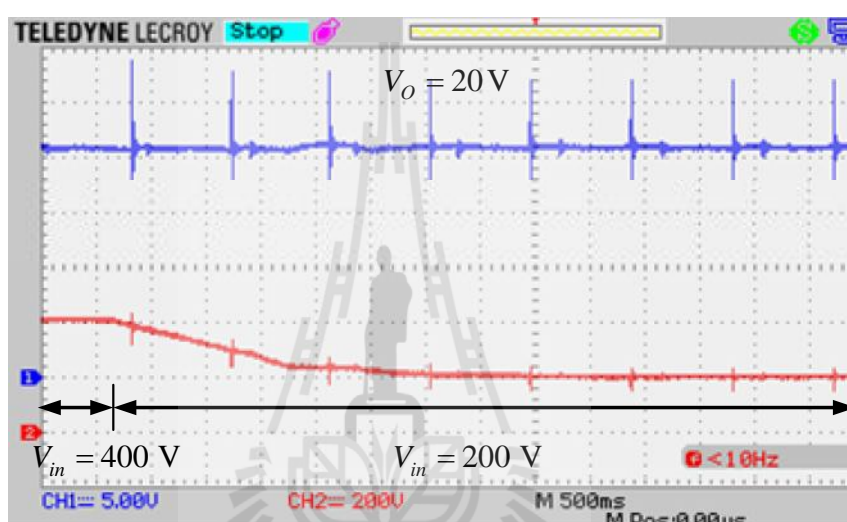
รูปที่ 6.31 ผลทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจาก 100 V เป็น 20 V



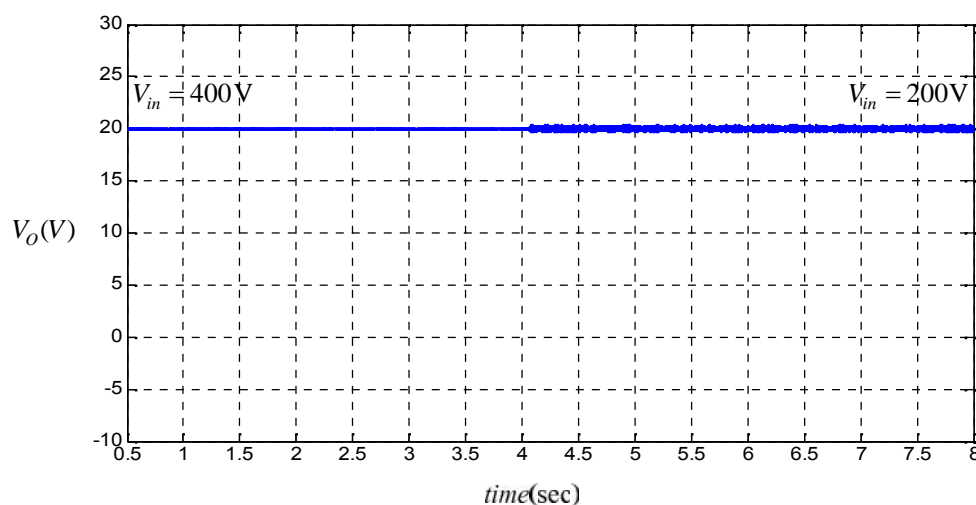
รูปที่ 6.32 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมเอาต์พุตจาก 100 V เป็น 20 V

การทดสอบการควบคุมแรงดันเอาต์พุต แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.33 จากรูปแสดงการควบคุมแรงดันจากแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V ทำการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 400 V เป็น 200 V จากรูปจะเห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบยังสามารถควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 20 V ได้ ช่วงเวลาที่ปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจะส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีการแกว่งเล็กน้อย จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ภายใต้ข้อกำหนดเดียวกันผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 6.34 เมื่อทำการเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุตจาก 400 V เป็น 200 V ในวินาทีที่ 4 เป็นการเปลี่ยนแรงดัน

อินพุตแบบทันที พบตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ 20 V ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อพิจารณาการกระเพื่อมที่เกิดขึ้นในช่วงที่แรงดันอินพุตอยู่ที่ 200 V มีการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตที่สูงกว่าช่วงที่มีแรงดันอินพุต 400 V เนื่องจากช่วงที่มีแรงดันอินพุตอยู่ที่ 200 V เพื่อที่จะคงที่ค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ที่ 20 V ตัวควบคุมพีไอจึงต้องควบคุมการทำงานให้ค่าวัฏจักรหน้าที่เพิ่มขึ้นไปด้วยเพื่อที่จะควบคุมแรงเอาต์พุตให้คงที่ ที่ 20 V เช่นเดิม ซึ่งค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

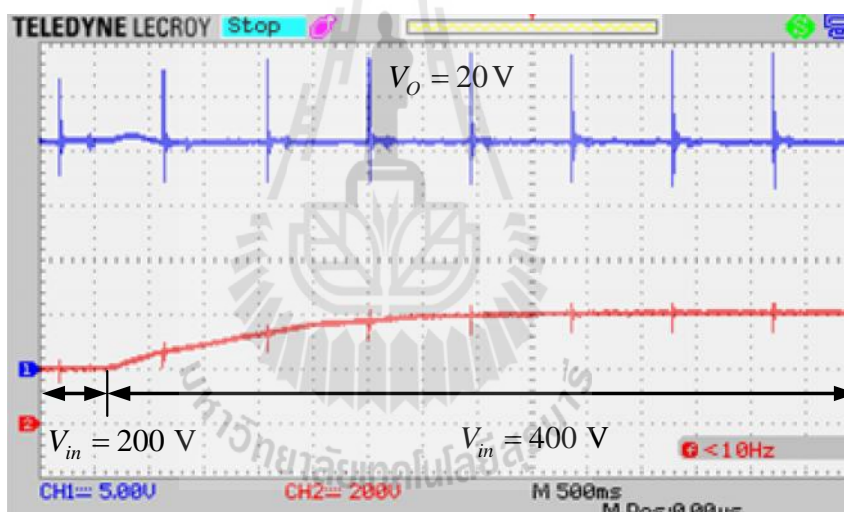


รูปที่ 6.33 ผลทดสอบการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 400 V เป็น 200 V

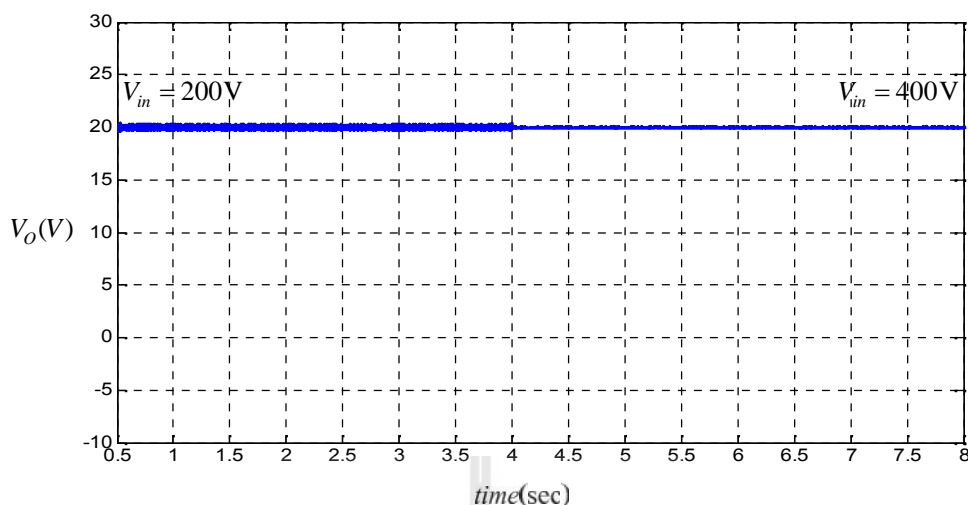


รูปที่ 6.34 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 400 V เป็น 200 V

จากนั้นทำการทดสอบโดยทำการโดยการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 200 V เป็น 400 V ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.35 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 200 V กลับไปที่ 400 V จากรูปพบว่าตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบยังสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 20 V ได้ อาจจะมีแรงดันเอาต์พุตแกว่งขึ้นเล็กน้อยในช่วงที่มีการปรับแรงดันอินพุตจาก 200 V เป็น 400 V จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ภายใต้ข้อกำหนดเดียวกัน ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.36 ทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 200 V เป็น 400 V ในวินาทีที่ 4 โดยมีการเปลี่ยนแรงดันอินพุตทันที จะเห็นว่าผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุตยังคงที่ที่ 20 V เช่นเดิม แต่ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตลดลงเมื่อแรงดันอินพุตกลับมาอยู่ที่ 400 V เนื่องจากมีการทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่น้อยลงทำให้การกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตลดน้อยลงไปด้วย

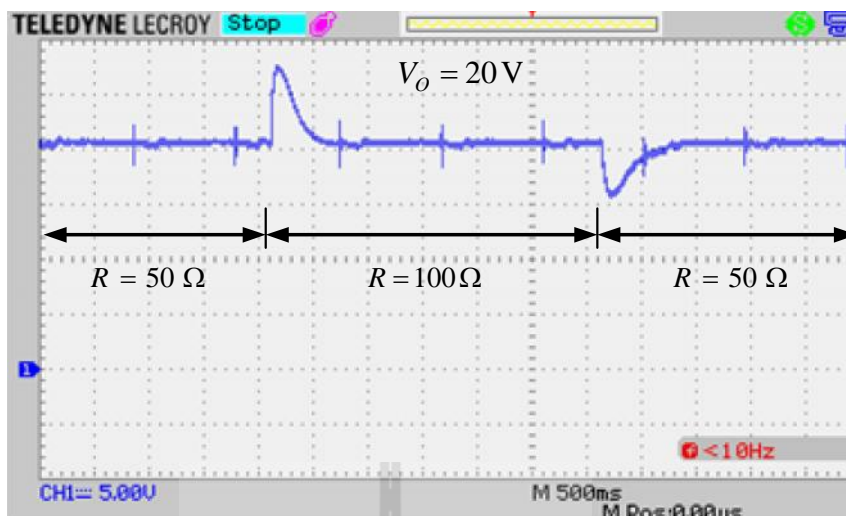


รูปที่ 6.35 ผลทดสอบการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 200 V เป็น 400 V

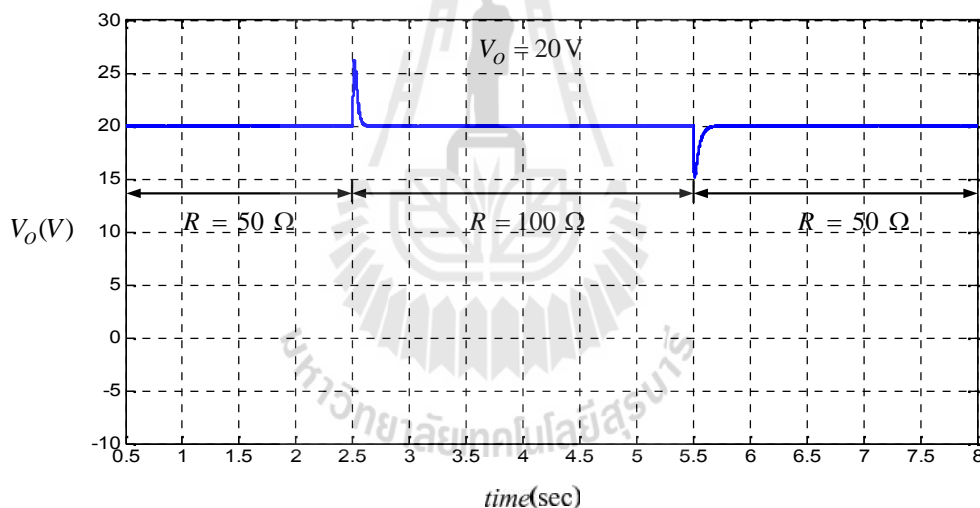


รูปที่ 6.36 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตจาก 200 V เป็น 400 V

จากนั้นทดสอบชุดทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ ที่ 20 V แสดงผลการทดสอบของชุดทดสอบดังรูปที่ 6.37 จากรูปแสดงการควบคุมแรงดันจากแรงดันเอาต์พุตให้คงที่อยู่ที่ 20 V ทำการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานจาก 50 Ω เป็น 100 Ω พบว่าช่วงเวลาที่ทำการปรับโหลดตัวต้านทานแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินประมาณ 5 V ก่อนที่แรงดันเอาต์พุตจะถูกควบคุมให้แรงดันกลับมากังที่ 20 V จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนโหลดความต้านทานจาก 100 Ω กลับมาที่ 50 Ω จากรูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของชุดทดสอบพบว่าแรงดันเอาต์พุตมีแรงดันตกประมาณ 5 V ในช่วงที่มีการปรับโหลดตัวต้านทานจาก 100 Ω เปลี่ยนเป็น 50 Ω จากนั้นแรงดันเอาต์พุตจะกลับมากังที่ 20 V จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ภายใต้ข้อกำหนดเดียวกัน ผลการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 6.38 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทานในวินาทีที่ 2.5 จากโหลดตัวต้านทาน 50 Ω ให้เพิ่มขึ้นเป็น 100 Ω จากนั้นทำการลดโหลดตัวต้านทานเหลือ 50 Ω ในวินาทีที่ 5.5 จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าแรงดันเอาต์พุตมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลของชุดทดสอบคือตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้โดยมีประสิทธิภาพ อาจมีช่วงที่แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 6.37 ผลทดสอบการปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 6.38 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับเปลี่ยนโหลดตัวต้านทาน

6.5 สรุป

ในบทนี้แนะนำผลการทดสอบที่ได้จากชุดสอบของวงจรที่พัฒนาขึ้น สามารถลดทอนระดับแรงดันได้ถึง 20 เท่า รวมถึงแสดงผลการทดสอบทั้งกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุมเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับผลการจำลองสถานการณ์ เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของชุดทดสอบกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมแสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบการลดทอนระดับแรงดันของชุดทดสอบว่าสามารถลดทอนแรงดันได้สูงถึง 20 เท่า รวมถึงประสิทธิภาพรวมของชุดทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบ

ชุดทดสอบอาจมีการคลาดเคลื่อนเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในชุดทดสอบ มีค่าไม่เป็นอุดมคติ และกรณีที่มีตัวควบคุมชนิดพีไอที่ได้ออกแบบอย่างง่ายแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ที่ 20 V เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตมีค่าเป็น 400 V จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมชนิดพีไอ โดยการควบคุมแรงดันเอาต์พุตไปที่ค่าต่าง ๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตและเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทาน ซึ่งผลการทดสอบ ณ สภาวะการทำงานต่าง ๆ พบว่า ชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นมีการทำงานเป็นไปตามผลการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นสามารถลดทอนระดับแรงดันได้สูงถึง 20 เท่า รวมถึงความสามารถของตัวควบคุมชนิดพีไอที่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้เป็นไปตามต้องการได้เป็นอย่างดี



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวงจรลดทอนระดับแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวสำหรับประยุกต์ใช้งานกับระบบที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำ โดยเริ่มต้นจากศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงในรูปแบบต่างๆ เพื่อพิจารณาข้อดีข้อด้อยของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบต่างๆ จากการค้นคว้าพบว่าโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบแยกกราวด์ (isolated type) และแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) โดยในปัจจุบันวงจรลดทอนระดับแรงดันยังมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีอัตราลดทอนแรงดันสูง ซึ่งรายละเอียดการค้นคว้าต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

โครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันสูงแบบสวิตช์ที่พัฒนาขึ้น เป็นการผสมผสานโครงสร้างของวงจรที่สำคัญ 2 วงจร คือ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (Cascade buck converter with a single active switch) และวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ (Diode-assisted buck converter) การผสมผสานโครงสร้างของวงจรทั้งสอง ทำให้สามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับที่พัฒนาขึ้นได้ประมาณ 20 เท่า ภายใต้การทำงานของสวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว ซึ่งการเลือกใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว ช่วยลดความซับซ้อนในการควบคุมการทำงาน และลดกำลังการสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์กำลังหลายตัว รายละเอียดของโครงสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น หลักการทำงาน รวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น และผลการจำลองสถานการณ์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่างๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระดับแรงดันได้สูงประมาณ 20 เท่า สำหรับประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการแรงดันต่ำ หรือนำไปลดระดับแรงดันสูงเพื่อนำไปสะสมไว้ในแบตเตอรี่ ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่นำมาใช้งานนั้นต้องเป็นแรงดันเอาต์พุตที่คงที่ จึงจำเป็นต้องทำการควบคุมวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ การควบคุมแรงดันเอาต์พุตนั้นใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่อยู่ที่ 20 V โดยอาศัยแนวทางการออกแบบที่ได้จากวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบ

ดั้งเดิมเป็นพื้นฐาน จากนั้นจำลองสถานการณ์ในสถานะต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบนั้น สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามที่ต้องการ ดังแสดงผลการจำลองสถานการณ์ไว้ในบทที่ 4 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าการทำงานของตัวควบคุมพีไอที่ได้ทำการออกแบบมานั้น สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ที่ 20 V ได้

จากการพัฒนาโครงสร้างของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่มีการลดค่าแรงดันสูง รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น จากนั้นเป็นการสร้างชุดทดสอบของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นดังแสดงไว้ในบทที่ 5 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ป้อนให้กับวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น การเลือกขนาดอุปกรณ์ภายในวงจรที่พัฒนาขึ้น การสร้างวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดันเอาต์พุต รวมถึงการสร้างวงจรถดทอนแรงดันและแยกโคดสัญญาณ อีกทั้งยังทำการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อยืนยันสมรรถนะการทำงานของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น และความสามารถของตัวควบคุมพีไอที่สามารถประมวลผลบนบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากนั้นทำการทดสอบชุดทดสอบของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เพื่อยืนยันสมรรถนะการทำงานของชุดทดสอบที่สร้างขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ในสถานะการทำงานต่างๆ ที่มีจุดการทำงานเดียวกัน ซึ่งการเปรียบเทียบผลการทดสอบชุดทดสอบกับผลการจำลองสถานการณ์แสดงไว้ในบทที่ 6 แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของชุดทดสอบที่สร้างขึ้นว่ามีผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ และชุดทดสอบของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระดับแรงดันได้สูงถึง 20 เท่า

7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมประเภทอื่นๆ สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น
2. ควรมีการใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรถดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น
3. ควรมีการลดขนาดพารามิเตอร์ให้มีขนาดน้อยลง เพื่อให้ต้นทุนในการสร้างวงจรมีราคาถูก

4. ควรหาวิธีการลดกำลังการสูญเสียภายในวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เพื่อปรับปรุงให้ประสิทธิภาพของวงจรดียิ่งขึ้น

5. ควรพิจารณาขนาดพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ L_1 เมื่อพิจารณาการทำงานที่โหมคนำกระแสต่อเนื่อง (CCM)



รายการอ้างอิง

- Agasthya Ayachit and Marian K. Kazimierczuk (2013) "Steady-State Analysis of PWM Quadratic Buck Converter in CCM". **IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)** : 49-52.
- B. P. Divakar and D. Sutanto (1999) "Optimum buck converter with a single switch". **IEEE Transactions on Power Electronics.** : 636-642.
- Boris Axelrod, Yefim Berkovich and Adrian Ioinovici (2008) "Switched-Capacitor/Switched-Inductor Structures for Getting Transformerless Hybrid DC-DC PWM Converters". **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers.** : 687-696.
- Chih-Hsien Hsieh, Tsorng-Juu Liang, Lung-Sheng Yang, Ray-Lee Lin and Kai-Hui Chen (2010) "Analysis and implementation of a DC-DC step-down converter for low output-voltage and high output-current applications". **Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems.** : 3697-3700.
- Ci-Ming Hong, Lung-Sheng Yang, Tsorng-Juu Liang and Jiann-Fuh Chen (2009) "Novel bidirectional DC-DC converter with high step-up/down voltage gain". **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.** : 60-66.
- D. Maksimovic and S. Cuk (1991) "Switching converters with wide DC conversion range". **IEEE Transactions on Power Electronics.** :151-157.
- E. E. Carbajal-Gutierrez, J. A. Morales-Saldana and J. Leyva-Ramos (2005) "Average Current-Mode Control for a Quadratic Buck Converter". **IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference.** : 2146-2150.
- Fei Zhang, Jianping Xu, Ping Yang and Zhangyong Chen (2011) "Single-phase two-switch PCCM buck-boost PFC converter with fast dynamic response for universal input voltage". **Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE).** : 205-209.

- Iman Rezaei and Mahdi Akhbari (2011) "Transformerless hybrid buck converter with wide conversion ratio". **Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)**. : 599-603.
- J. Leyva-Ramos, L. H. Diaz-Saldierna and M. G. Ortiz-Lopez (2011) "Control of high-step down voltage converters for voltage regulator modules". **Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE)**. : 1-6.
- Jiann-Jong Chen, Bo-Han Hwang, Che-Min Kung, Wei-Yu Tai and Yuh-Shyan Hwang (2010) "A new single-inductor quadratic buck converter using average-current-mode control without slope-compensation". **IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications**. : 1082-1087.
- Jinbin zhao (2009) "Non-isolation soft-switching buck converter for high-step-down conversion". **INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference**. : 1-6.
- Juan Paulo Robles Balestero, Fernando Lessa Tofoli, Grover Victor Torrico-Bascopé and Falcondes José Mendes de Seixas (2013) "A DC-DC Converter Based on the Three-State Switching Cell for High Current and Voltage Step-Down Applications". **IEEE Transactions on Power Electronics**. : 398-407.
- K. M. Tsang and W. L. Chan (2005) "Cascade controller for DC/DC buck convertor". **IEE Proceedings - Electric Power Applications**. : 827-831.
- Kaiwei Yao, Mao Ye, Ming Xu and F. C. Lee (2005) "Tapped-inductor buck converter for high-step-down DC-DC conversion". **IEEE Transactions on Power Electronics**. : 775-780.
- Kaiwei Yao, Yang Qiu, Ming Xu and F. C. Lee (2005) "A novel winding-coupled buck converter for high-frequency, high-step-down DC-DC conversion". **IEEE Transactions on Power Electronics**. : 1017-1024.
- Ketsuda Karaket and Chanin Bunlaksananusorn (2011) "Modeling of a quadratic buck converter". **Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**. : 764-767.

- Lung-Sheng Yang and Tsorng-Juu Liang (2012) "Analysis and Implementation of a Novel Bidirectional DC-DC Converter". **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. : 422-434.
- Luowei Zhou , Xiong Du and Quanming Luo (2005) "A novel buck converter topology with double frequency". **IEEE International Conference on Industrial Technology**. : 1069-1074.
- M. G. Ortiz-Lopez, J. Leyva-Ramos, E. E. Carbajal-Gutierrez and J. A. Morales-Saldana (2008) "Modelling and analysis of switch-mode cascade converters with a single active switch". **IET Power Electronics**. : 478-487.
- M. Gavris, N. Muntean and O. Cornea (2011) "A new dual-input hybrid buck DC-DC converter". **International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference**. : 109-114.
- M. Veerachary (2005) "Modelling and analysis of cascade step-down converters". **IEE Proceedings - Electric Power Applications**. : 41-50.
- Mihaela Gavris, Octavian Cornea and Nicolae Muntean (2011) "Multiple input DC-DC topologies in renewable energy systems - A general review". **Exploitation of Renewable Energy Sources (EXPRES)**. : 123-128.
- Mohamed El-Zanaty, Mohamed Orabi and M. Z. El-Sadek (2008) "Review of synchronous buck converter design optimization". **Power System Conference, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle-East**. : 588-592.
- Octavian Cornea, Ovidiu Pelan and Nicolae Muntean (2012) "Comparative study of buck and hybrid buck "switched-inductor" DC-DC converters". **Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)**. : 853-858.
- Ovidiu Pelan, Nicolae Muntean, Octavian Cornea and Frede Blaabjerg (2013) "High voltage conversion ratio, switched C & L cells, step-down DC-DC converter". **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. : 5580-5585.
- P. Alou, J. Oliver, J.A. Cobos, O. Garcia and J. Uceda (2001) "Buck + Half Bridge (d = 50%) Topology Applied to very Low Voltage Power Converters". **IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2001)**. : 715-721.

- Peng Li, Wuhua Li, Yi Zhao, Huan Yang and Xiangning He (2011) “ZVS three-level phase-shift high step-down DC/DC converter with two transformers”. **Power Electronics and Applications (EPE 2011)**. : 1-10.
- Rohan Dayal and Leila Parsa (2012) “Non-isolated topologies for high step-down offline LED driver applications”. **IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. : 988-993.
- Shulin Liu, Jian Liu, Yinling Yang and Jiuming Zhong (2005) “Design of intrinsically safe buck DC/DC converters”. **International Conference on Electrical Machines and Systems**. : 1327-1331.
- Sondeep Bassan and Gerry Moschopoulos (2007) “Properties and Applications of Quadratic Converters”. **Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada**. : 123-127
- Yan Zhang, Chaoyi Zhang, Jinjun Liu and Yujie Cheng (2012) “Comparison of conventional dc-dc converter and a family of diode-assisted dc-dc converter”. **Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)**. : 1718-1723.
- Yingqi Zhang and P. C. Sen (2003) “A New Soft Switching Technique for Buck, Boost and Buck- Boost Converters”. **IEEE Transactions on Industry Applications**. : 1775-1782.

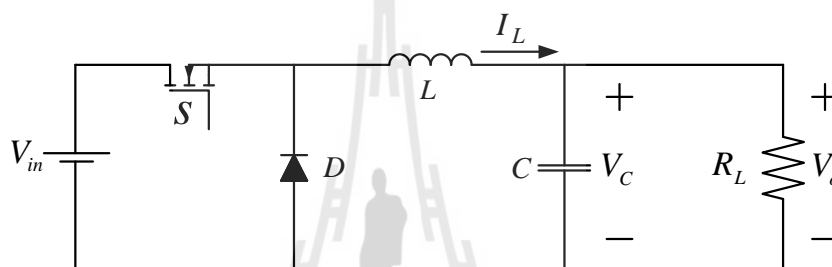
ภาคผนวก ก

วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

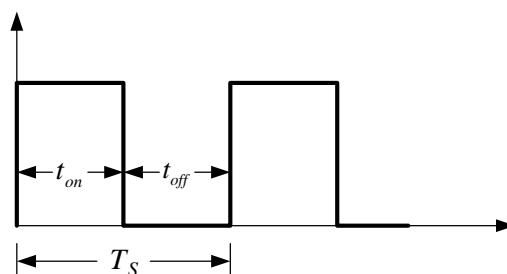
ก.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม

วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม (conventional buck converter) เป็นวงจรแปลงผันแรงดันกระแสตรงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้ต่ำกว่าแรงดันอินพุต โครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบดั้งเดิมแสดงได้ดังรูปที่ ก.1 วงจรประกอบไปด้วยสวิทช์ อาจเป็น BJT หรือ MOSFET ทำหน้าที่ตัดต่อวงจร ไดโอด ทำหน้าที่เป็นทางไหลของกระแสในช่วงสวิทช์เปิดวงจร ตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองแรงดันเอาต์พุตให้เรียบขึ้น และตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่สะสมพลังงานและจ่ายพลังงานในช่วงที่สวิทช์ปิดและเปิดวงจรตามลำดับ



รูปที่ ก.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม

การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม มี 2 สถานะ คือ สวิทช์ปิดและสวิทช์เปิดของอุปกรณ์สวิทช์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์สวิทช์คือ MOSFET ถูกควบคุมด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ที่สร้างจากวงจรจูดชนวน แสดงสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแสดงได้ดังรูปดังรูปที่ ก.2 อธิบายการเชื่อมโยงกันระหว่างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มและช่วงเวลาที่สวิทช์เปิดและปิด



รูปที่ ก.2 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

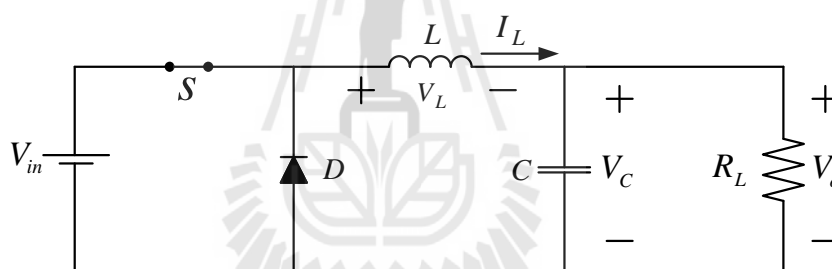
จากรูปที่ ก.2 จะสามารถหาค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle) ได้ดังนี้

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (\text{ก.1})$$

โดย $T_s = t_{on} + t_{off}$ เมื่อ D คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่
 t_{on} คือ ค่าช่วงเวลาการ turn on
 t_{off} คือ ค่าช่วงเวลาการ turn off
 T_s คือ ค่าคาบเวลา

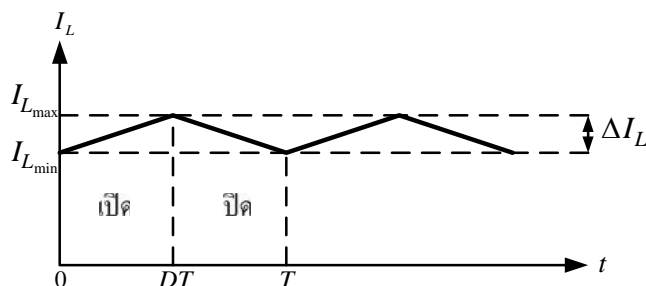
หลักการการทำงานของวงจรจะพิจารณาเป็น 2 โหมดการทำงาน คือ

ก.1.1 ช่วงที่อุปกณ์สวิตช์นำกระแส (ช่วงสวิตช์ปิด)



รูปที่ ก.3 วงจรลดทอนระดับแรงดันในโหมดนำกระแส

ในขณะที่สวิตช์ต่อวงจร แรงดันตกคร่อมไดโอดจะมีค่าเท่ากับ V_{in} และไดโอดไม่มีกระแสไหลผ่านเนื่องจากถูกไบอัสย้อนกลับ ดังรูปที่ ก.3 เป็นผลให้มีการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในตัวเหนี่ยวนำ ทำให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูป ก.4



รูปที่ ก.4 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

รูปที่ ก.3 จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์จะให้ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสดังสมการ(ก.2) และ (ก.3) ให้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันใหม่ดังสมการ (ก.4)

$$V_{in} - V_o = V_L \quad (ก.2)$$

แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ หาได้จาก $V_L = L \frac{di}{dt} \approx L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

$$V_{in} - V_o = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (ก.3)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (ก.4)$$

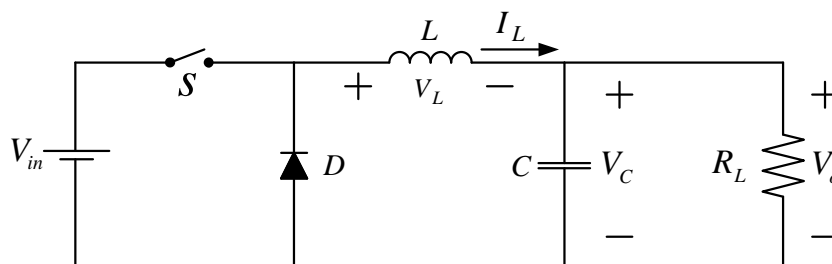
เมื่อพิจารณาช่วงที่สวิตช์ทำงาน จะได้ $\Delta t = t_{on}$ ดังนั้น

$$V_{in} - V_o = L \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad (ก.5)$$

$$t_{on} = L \frac{i_{off} - i_{on}}{V_{in} - V_o} \quad (ก.5)$$

$$\Delta I = t_{on} \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (ก.6)$$

ก.1.2 ช่วงที่อุปกรณ์สวิตช์ไม่นำกระแส (ช่วงสวิตช์เปิด)



รูปที่ ก.5 วงจรลดทอนระดับแรงดันในโหมดไม่นำกระแส

ในช่วงที่สวิตช์เปิดวงจร ทำให้แรงดันอินพุตถูกตัดออกจากวงจร ดังรูปที่ ก.5 กระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำไม่สามารถหยุดไหลได้ทันที ได้แต่ค่อยๆ ลดลง ดังรูปที่ ก.4 และในโหมดนี้ตัวเหนี่ยวนำจะเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายให้กับโหลดและตัวเก็บประจุ แทนแรงดันอินพุตที่ถูกตัดออกไป

จากรูปที่ ก.5 พิจารณากฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ได้ความสัมพันธ์ตามสมการ (ก.7) - (ก.10)

$$-V_L + V_o = 0 \quad (\text{ก.7})$$

$$V_L = V_o \quad (\text{ก.8})$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (\text{ก.9})$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{V_o}{L} \quad (\text{ก.10})$$

เมื่อพิจารณาช่วงที่สวิตช์เปิดวงจร จะได้ $\Delta t = t_{off}$ ดังนั้น

$$\frac{\Delta I}{t_{off}} = \frac{V_o}{L}$$

$$t_{off} = L \frac{i_{off} - i_{on}}{V_o} \quad (\text{ก.11})$$

$$\Delta I = t_{off} \frac{V_o}{L} \quad (\text{ก.12})$$

จากสมการที่ (ก.5) และ สมการที่ (ก.11) กระแสที่เพิ่มขึ้นในช่วงสวิตช์ต่อวงจรกับกระแสที่ลดลงในช่วงที่สวิตช์เปิดวงจรจะต้องเท่ากัน ดังนั้น

$$\Delta I = t_{on} \frac{V_{in} - V_o}{L} = t_{off} \frac{V_o}{L}$$

แทนค่า $t_{on} = DT_s$ และ $t_{off} = (1-D)T_s$ จะได้

$$DT_s \frac{V_{in} - V_o}{L} = (1-D)T_s \frac{V_o}{L}$$

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

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

$$DV_{in} - DV_o - V_o + DV_o = 0$$

$$V_o = DV_{in} \tag{ก.13}$$

จากสมการ (ก.13) จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตขึ้นอยู่กับค่าการปรับค่า ค่าวัฏจักรหน้าที่ (D) ซึ่งหากค่าวัฏจักรหน้าที่มีค่าสูงจะส่งผลให้ระดับแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง ตารางที่ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรหน้าที่ และอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบคั้งเดิม

ตารางที่ ก.1 อัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบคั้งเดิม

ค่าวัฏจักรหน้าที่	อัตราลดทอนแรงดัน
0	Infinity
0.1	10
0.2	5
0.3	3.33
0.4	2.5
0.5	2
0.6	1.67
0.7	1.43
0.8	1.25
0.9	1.11
1.0	1

จากตารางที่ ก.1 จะพบว่าค่าแรงดันเอาต์พุต จะขึ้นอยู่กับการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่ โดยเมื่อแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลงเมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่ลดลง ทั้งนี้การทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำๆ เน้นว่าที่ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิมจะลดแรงดันได้ประมาณสิบเท่า อย่างไรก็ตามการที่วงจรทำงานที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ต่ำๆ จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของวงจร กล่าวคือทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง เนื่องจากจะทำให้กำลังสูญเสียในขณะสวิตซ์ทำงาน (switching loss) เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของวงจรลดลง (Song Xiong, Siu-Chung Wong 2014) รวมทั้งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากวงจรสวิตซ์กำลังจะมีช่วงเวลาการนำกระแสสั้นๆ และส่งผลให้เกิดการทำงานในโหมดสถานะกระแสไม่ต่อเนื่อง



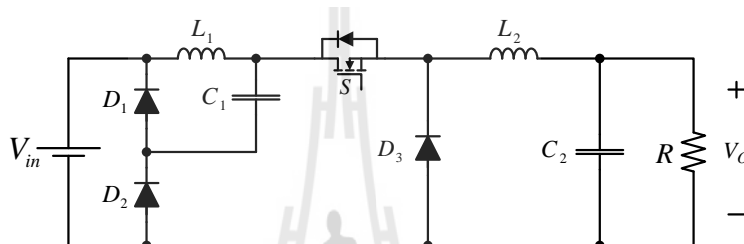
ภาคผนวก ข

วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์เดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว

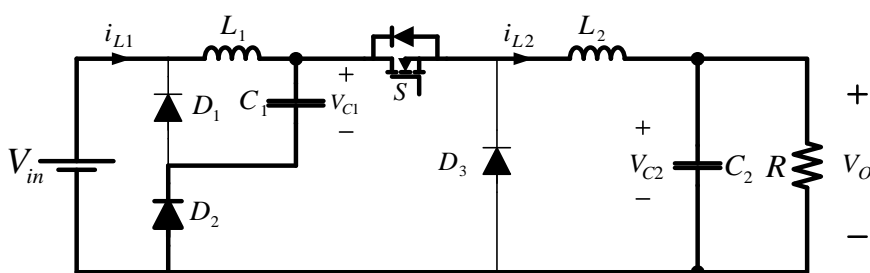
วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (Cascade buck converter with a single active switch) เป็นวงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอดจำนวนมาก และรวมเข้ากับโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดั้งเดิม สามารถแสดงโครงสร้างของวงจรได้ดังรูปที่ ข.1 ซึ่งโครงสร้างของวงจรประกอบไปด้วย สวิตช์กำลัง (S), ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2), ตัวเก็บประจุ (C_1, C_2) และไดโอด (D_1, D_2, D_3)



รูปที่ ข.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว

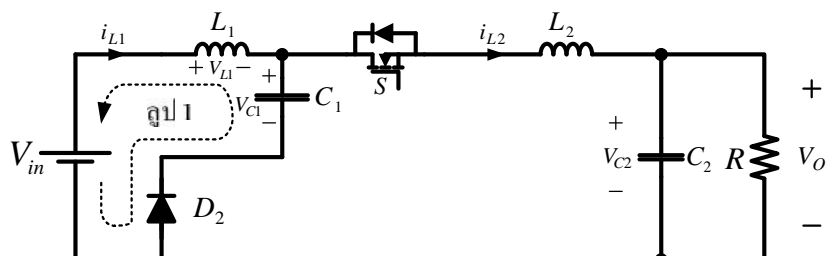
การวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว สามารถพิจารณาการทำงานของวงจรได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสและไม่นำกระแส

ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส : การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข.2 ตัวเหนี่ยวนำ L_1 จะเก็บพลังงานที่ได้จากแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in} ไดโอด D_2 จะไบอัสตรง ขณะที่ไดโอด D_1 และ D_3 จะไม่ทำงาน ส่งผลให้ตัวเก็บประจุ C_1 คายประจุ และตัวเหนี่ยวนำ L_2 จะเก็บพลังงาน



รูปที่ ข.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสใน รูป 1 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) แสดงได้ดังรูป ข.3

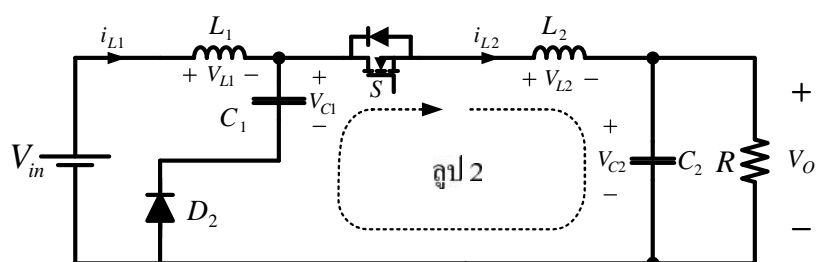


รูปที่ ข.3 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์รูป 1 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ช่วงที่สวิตช์กำลังนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวใน รูป 1 ดังรูปที่ ข.3 สามารถแสดงความสัมพันธ์แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 ในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแสได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{รูป 1} \quad ; \quad & -V_{in} + V_{L1} + V_{C1} = 0 \\ & L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} - V_{C1} \\ & \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = \frac{V_{in} - V_{C1}}{L_1} \end{aligned} \quad (\text{ข.1})$$

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสใน รูป 2 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) แสดงได้ดังรูป ข.4



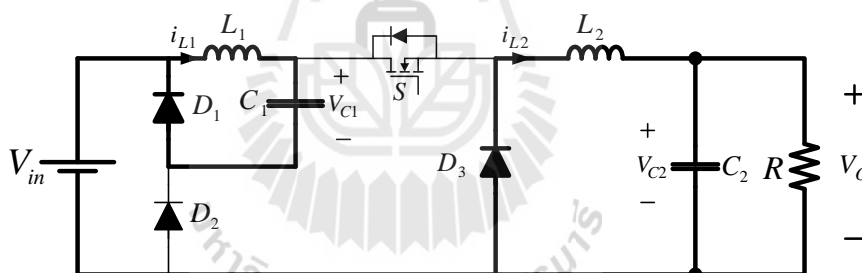
รูปที่ ข.4 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์รูป 2 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว

ช่วงที่สวิตช์กำลังนำกระแส

สามารถแสดงความสัมพันธ์แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_2 ในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแสได้ดังนี้

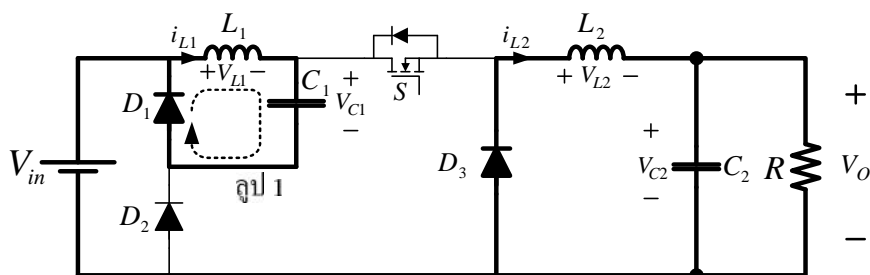
$$\begin{aligned} \text{รูป 2} \quad ; \quad & -V_{C1} + V_{L2} + V_{C2} = 0 \\ & L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = V_{C1} - V_O \\ & \frac{di_{L2}}{dt} = \frac{\Delta i_{L2}}{\Delta t} = \frac{V_{C1} - V_O}{L_2} \end{aligned} \quad (\text{ข.2})$$

ช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส : การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข.5 เมื่อสวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส ไดโอด D_1 และ D_3 จะทำงาน ส่วนไดโอด D_2 ดังนั้นภายใต้โหมดการทำงานนี้ตัวเก็บประจุ C_1 จะอยู่ในช่วงเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ L_2 จะอยู่ในช่วงคายพลังงาน



รูปที่ ข.5 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ช่วงที่สวิตช์กำลังไม่นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแสใน รูป 1 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) แสดงได้ดังรูปที่ ข.6 พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียวใน รูป 1 สามารถแสดงความสัมพันธ์แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 ในช่วงที่สวิตช์ S ไม่นำกระแสได้ดังนี้



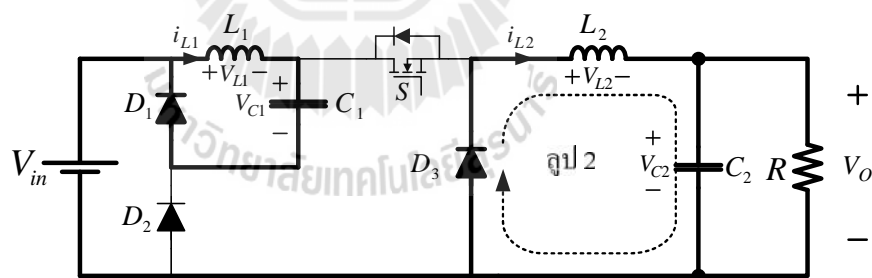
รูปที่ ข.6 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ลูป 1 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกัน
ช่วงที่สวิตช์กำลังไม่นำกระแส

ลูป 1 ; $V_{L1} + V_{C1} = 0$

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

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

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ช่วงที่
สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแสใน ลูป 2 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) แสดงได้ดังรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ลูป 2 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว
ช่วงที่สวิตช์กำลังไม่นำกระแส

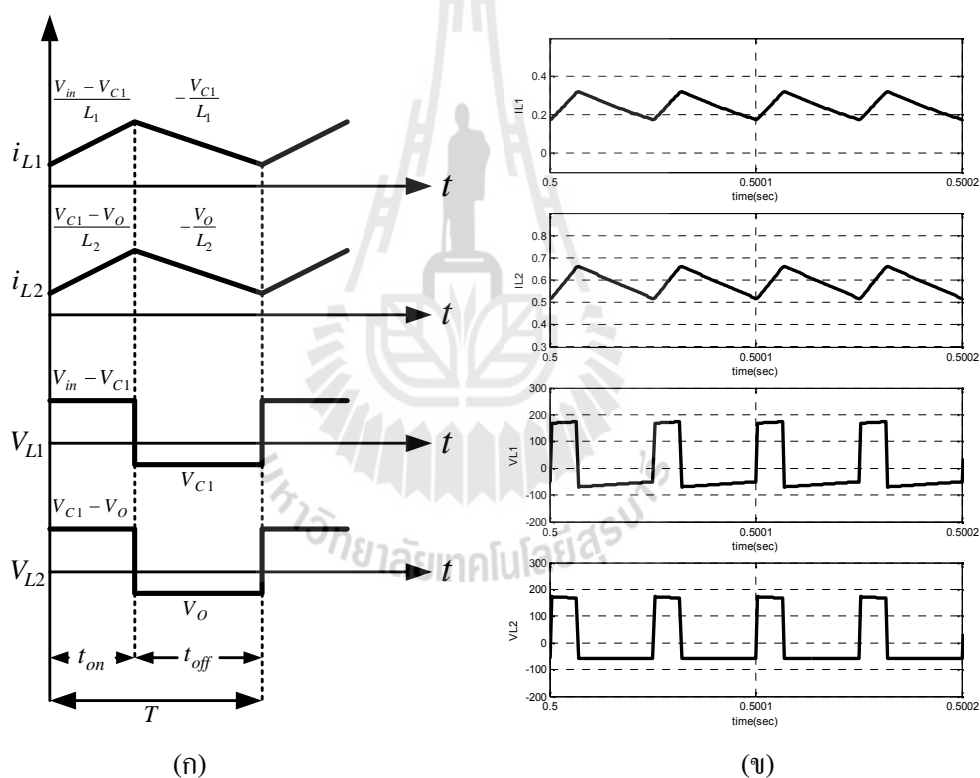
สามารถแสดงความสัมพันธ์แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_2 ในช่วงที่สวิตช์ S ไม่นำกระแสได้ดังนี้

ลูป 2 ; $V_{L2} + V_{C2} = 0$

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

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{\Delta i_{L2}}{\Delta t} = -\frac{V_o}{L_2} \quad (\text{ข.4})$$

จากการพิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส และในช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว แสดงในรูปที่ ข.8



รูปที่ ข.8 กระแสและแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว

(ก) รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน

(ข) ผลการจำลองสถานการณ์รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน

พิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ในสถานะคงตัว ดังความสัมพันธ์ในรูปที่ ข.8 เพื่อหาอัตราลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว ดังนี้

$$L_1 \quad ; \quad (V_{in} - V_{C1})DT + (-V_{C1})(1-D)T = 0 \quad (\text{ข.5})$$

$$L_2 \quad ; \quad (V_{C1} - V_o)DT + (-V_o)(1-D)T = 0 \quad (\text{ข.6})$$

จากสมการที่ (ข.5) ทำการปรับสมการจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 กับแรงดันอินพุต แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{in}D - V_{C1}D - V_{C1} + V_{C1}D &= 0 \\ V_{in}D - V_{C1} &= 0 \\ V_{C1} &= V_{in}D \end{aligned} \quad (\text{3.7})$$

จากสมการที่ (ข.6) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 กับแรงดันเอาต์พุต แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{C1}D - V_oD - V_o + V_oD &= 0 \\ V_{C1}D - V_o &= 0 \\ V_o &= V_{C1}D \end{aligned} \quad (\text{ข.8})$$

จากสมการที่ (ข.8) สามารถหาอัตราลดทอนแรงดัน (M) ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบเรียงกันที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_o &= (V_{in}D)D \\ V_o &= V_{in}D^2 \\ M &= \frac{V_o}{V_{in}} = D^2 \end{aligned} \quad (\text{ข.9})$$

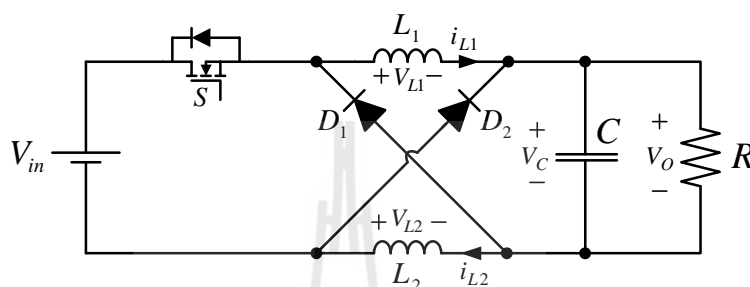
ภาคผนวก ค

วงจรถอดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

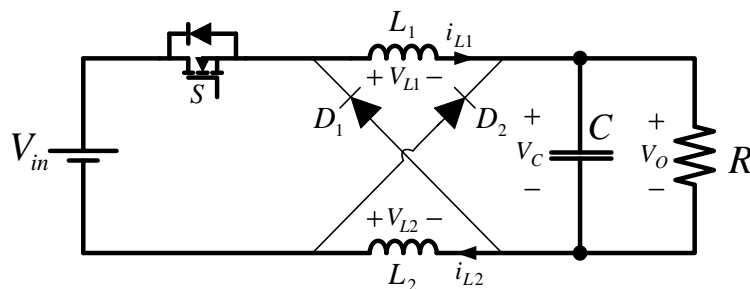
วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ (Diode-assisted buck converter) สามารถแสดงโครงสร้างของวงจรได้ดังรูปที่ ค.1 ซึ่งโครงสร้างของวงจรประกอบไปด้วยสวิตช์กำลัง (S), ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2), ตัวเก็บประจุ (C) และไดโอด (D_1, D_2)



รูปที่ ค.1 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

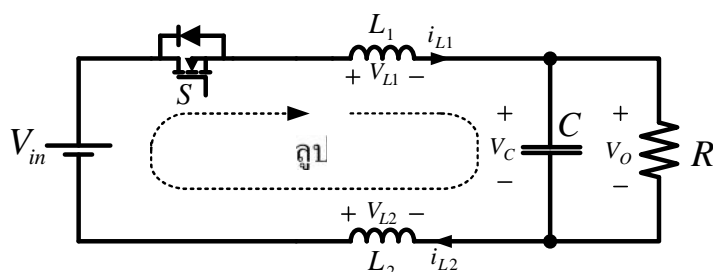
การวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือสามารถพิจารณาการทำงานของวงจรได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแสและไม่นำกระแส

ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส : การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ค.2 พบว่าไดโอด D_1 และ D_2 ไม่สามารถนำกระแสได้ ดังนั้นในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีกระแสไหลผ่าน คือ ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 และตัวเก็บประจุ C จะอัดพลังงานที่ได้จากแหล่งจ่าย



รูปที่ ค.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ช่วงที่สวิตช์กำลังนำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) แสดงได้ดังนี้



รูปที่ ค.3 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ช่วงสวิตช์กำลัง นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ใน รูป ดังรูปที่ ค.3 สามารถแสดงความสัมพันธ์แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ในช่วงที่สวิตช์ S นำกระแสได้ดังนี้

ลูป 1 ; $-V_{in} + V_{L1} + V_C + V_{L2} = 0$

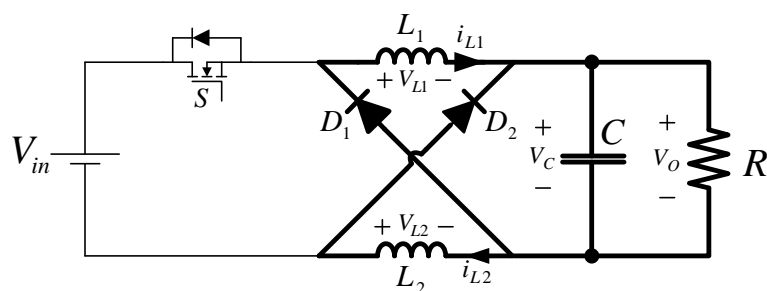
$$-V_{in} + L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + V_o + L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = 0$$

โดยที่ $L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt}$

$$2L \frac{di_{L1,L2}}{dt} = V_{in} - V_o$$

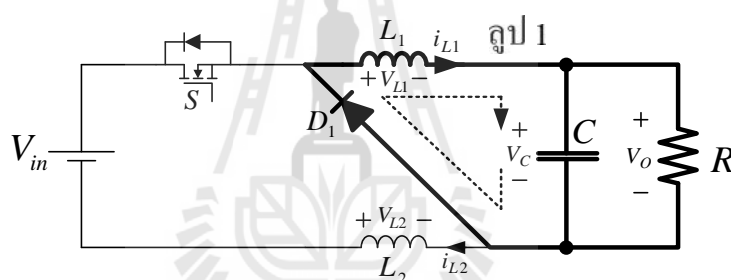
$$\frac{di_{L1,L2}}{dt} = \frac{\Delta i_{L1,L2}}{\Delta t} = \frac{V_{in} - V_o}{2L} \quad (\text{ค.1})$$

ช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส : การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ค.4 พบว่าไดโอด D_1 และ D_2 สามารถนำกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ได้ โดยไดโอด D_1 จะนำกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ D_2 จะนำกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 ส่งผลให้ตัวเหนี่ยวนำทั้งสองจะคายพลังงาน และตัวเก็บประจุ C จึงคายพลังงานให้กับตัวต้านทาน



รูปที่ ค.4 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ช่วงที่สวิตช์กำลังไม่นำกระแส

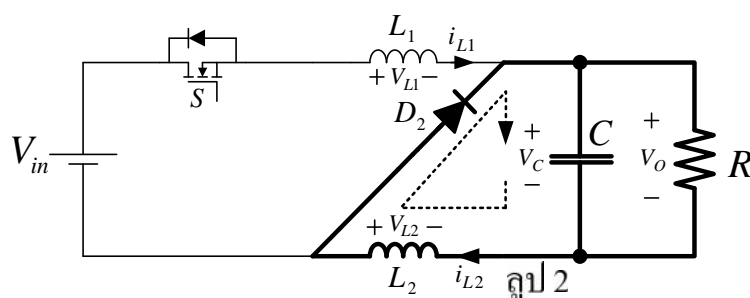
พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) แสดงได้ดังนี้



รูปที่ ค.5 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์ลูป 1 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ช่วงที่สวิตช์กำลัง ไม่นำกระแส

พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ ในลูป 1 ดังรูปที่ ค.5 สามารถแสดงความสัมพันธ์แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 ในช่วงที่สวิตช์ S ไม่นำกระแส ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ลูป 1} \quad ; \quad & V_{L1} + V_C = 0 \\ & L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + V_o = 0 \\ & \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{\Delta i_{L1}}{\Delta t} = -\frac{V_o}{L_1} \end{aligned} \quad (\text{ค.2})$$



รูปที่ ค.6 กฎแรงดันเคอร์ชอฟฟ์รูป 2 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ
ช่วงที่สวิตช์กำลังไม่นำกระแส

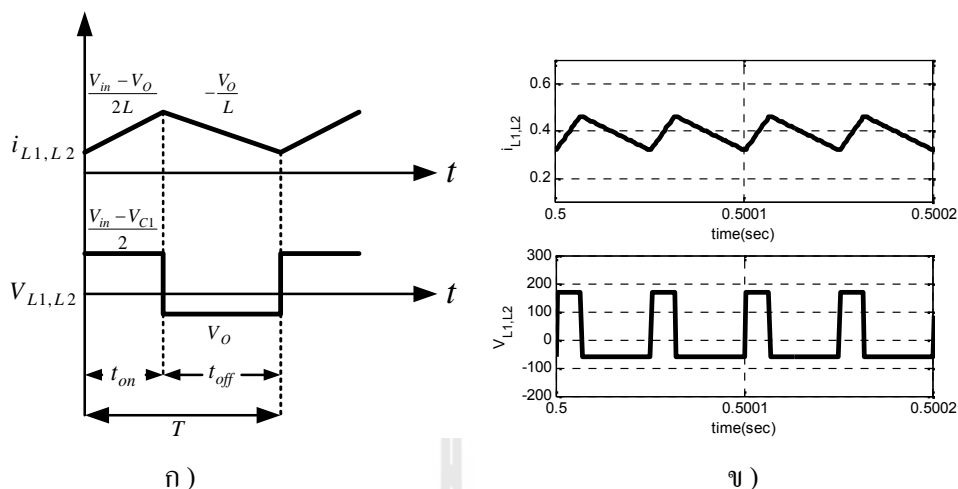
พิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือในรูป 2 ดังรูปที่ ค.6 สามารถแสดงความสัมพันธ์แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_2 ในช่วงที่สวิตช์ S ไม่นำกระแสได้ดังนี้

รูป 2 ;
$$V_{L2} + V_C = 0$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} + V_O = 0$$

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

จากการพิจารณาการทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ในช่วงที่สวิตช์กำลัง S นำกระแส และในช่วงที่สวิตช์กำลัง S ไม่นำกระแส จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ แสดงในรูปที่ ค.7



รูปที่ ค.7 กระแสและแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรคทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

(ก) รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน

(ข) ผลการจำลองสถานการณ์รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดัน

พิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ในสถานะคงตัว ดังความสัมพันธ์ในรูปที่ ค.7 เพื่อหาอัตราคทอนแรงดันของวงจรคทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

$$L_1, L_2 ; \quad \left(\frac{V_{in} - V_o}{2} \right) DT + (-V_o)(1 - D)T = 0 \quad (ค.4)$$

จากสมการที่ (ค.4) อัตราขยายแรงดัน (M) ของวงจรคทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{V_{in}}{2} D - \frac{V_o}{2} D - V_o + V_o D &= 0 \\ \frac{V_{in}}{2} D + \left(-\frac{1}{2} D - 1 + D \right) V_o &= 0 \\ M = \frac{V_o}{V_{in}} &= \frac{D}{2 - D} \end{aligned} \quad (ค.5)$$

ภาคผนวก ง

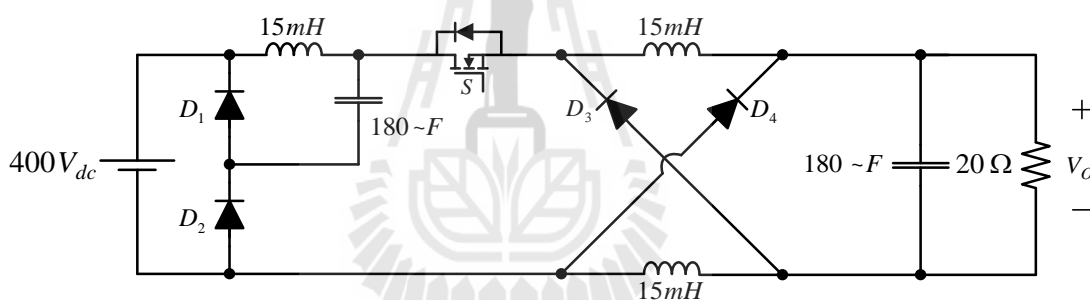
การจำลองสถานการณ์การวิเคราะห์ที่หมุดกระแสน้ำต่อเนื่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การจำลองสถานการณ์การวิเคราะห์โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

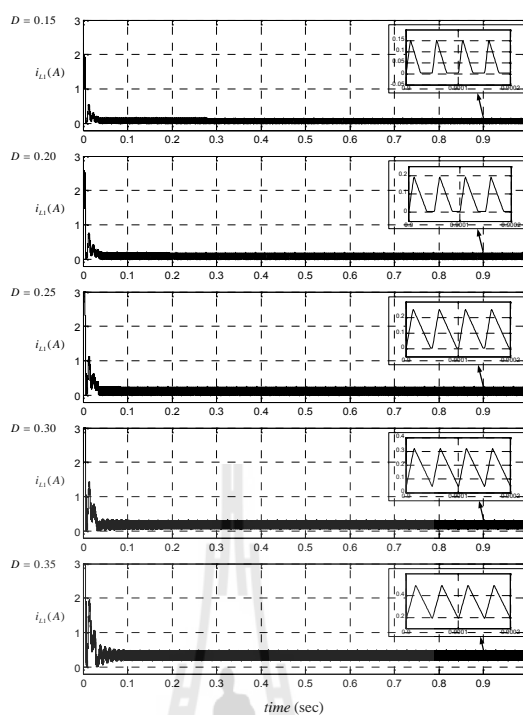
สภาวะกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Conduction Mode :DCM) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีช่วงที่กระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้วงจรเกิดกำลังการสูญเสีย รวมถึงการทำงานของวงจรมีความคลาดเคลื่อน วงจรไม่สามารถลดทอนระดับแรงดันได้ตามทฤษฎีที่ได้ทำการวิเคราะห์ ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นอยู่ในโหมดการทำงานที่สภาวะกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode :CCM) โดยทำการจำลองสถานการณ์ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ ที่ 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 และ 0.35 เพื่อวิเคราะห์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 ว่าเกิดสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่องหรือไม่ รวมทั้งตรวจสอบแรงดันเอาต์พุตด้วยว่าได้รับผลกระทบจากการทำงานในโหมดสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่อง

ทำการจำลองสถานการณ์วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ ง.1

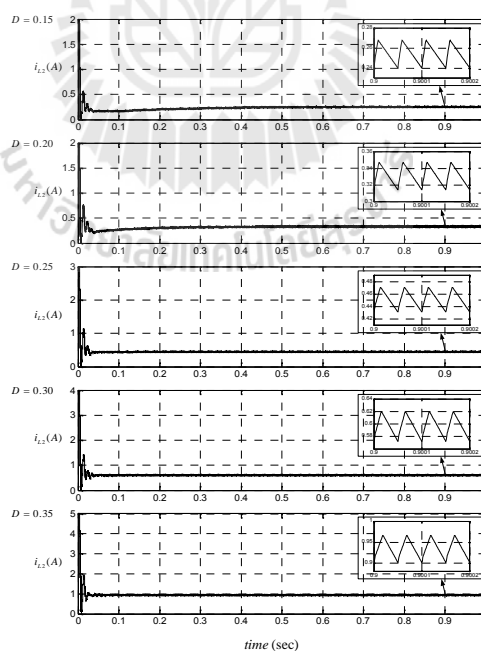


รูปที่ ง.1 พารามิเตอร์ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

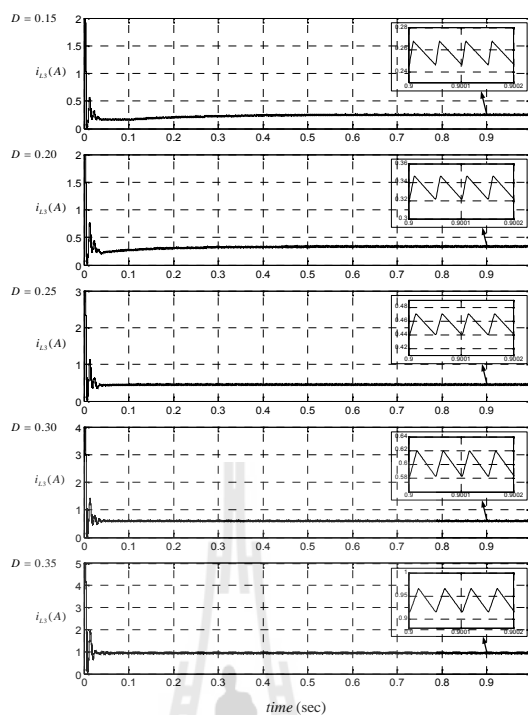
ผลการจำลองสถานการณ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 แสดงได้ดังรูปที่ ง.2 ถึง ง.4 จากรูปพบว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 อยู่ในสภาวะกระแสต่อเนื่อง ส่วนตัวเหนี่ยวนำ L_1 ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15, 0.20 และ 0.25 เกิดสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่อง อาจส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตไม่เป็นไปตามสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น แต่ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.30 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 อยู่ในสภาวะต่อเนื่อง แรงดันเอาต์พุตที่ได้มีค่าประมาณ 20 V หรือมีอัตราลดทอนแรงดันประมาณ 20 เท่า



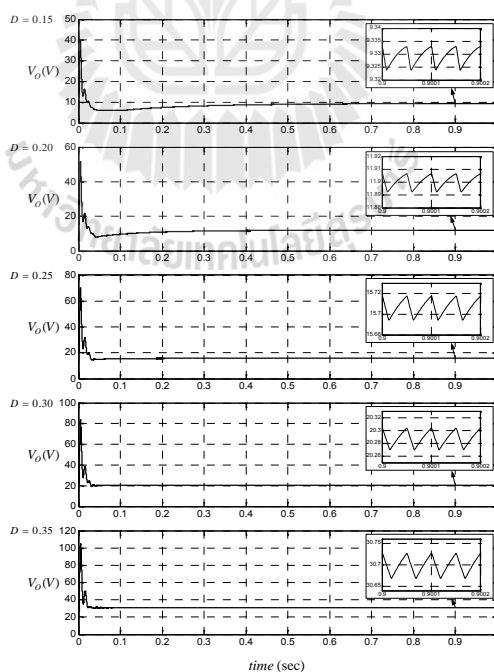
รูปที่ ๒ ผลการจำลองสถานการณ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1



รูปที่ ๓ ผลการจำลองสถานการณ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2

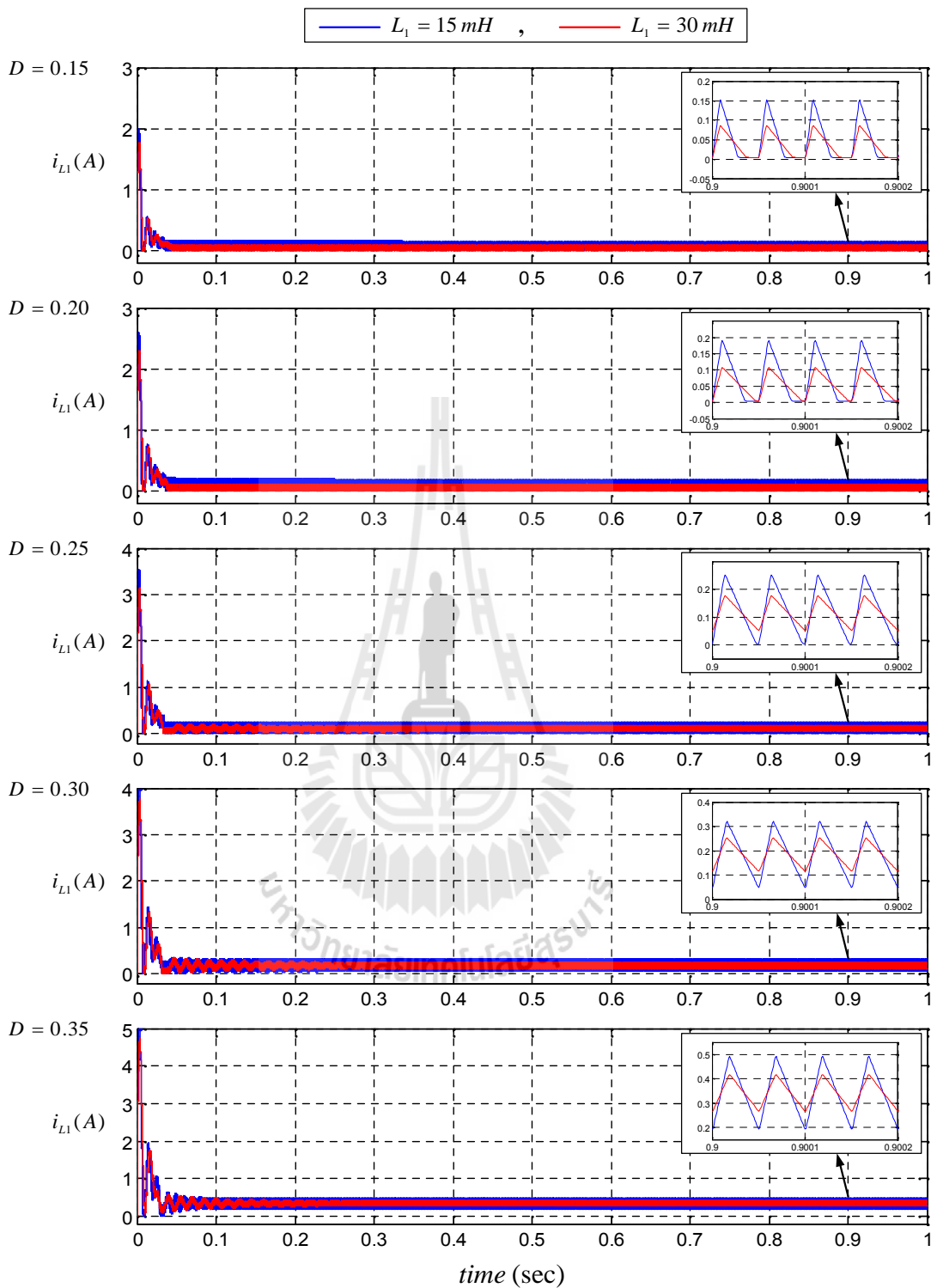


รูปที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3

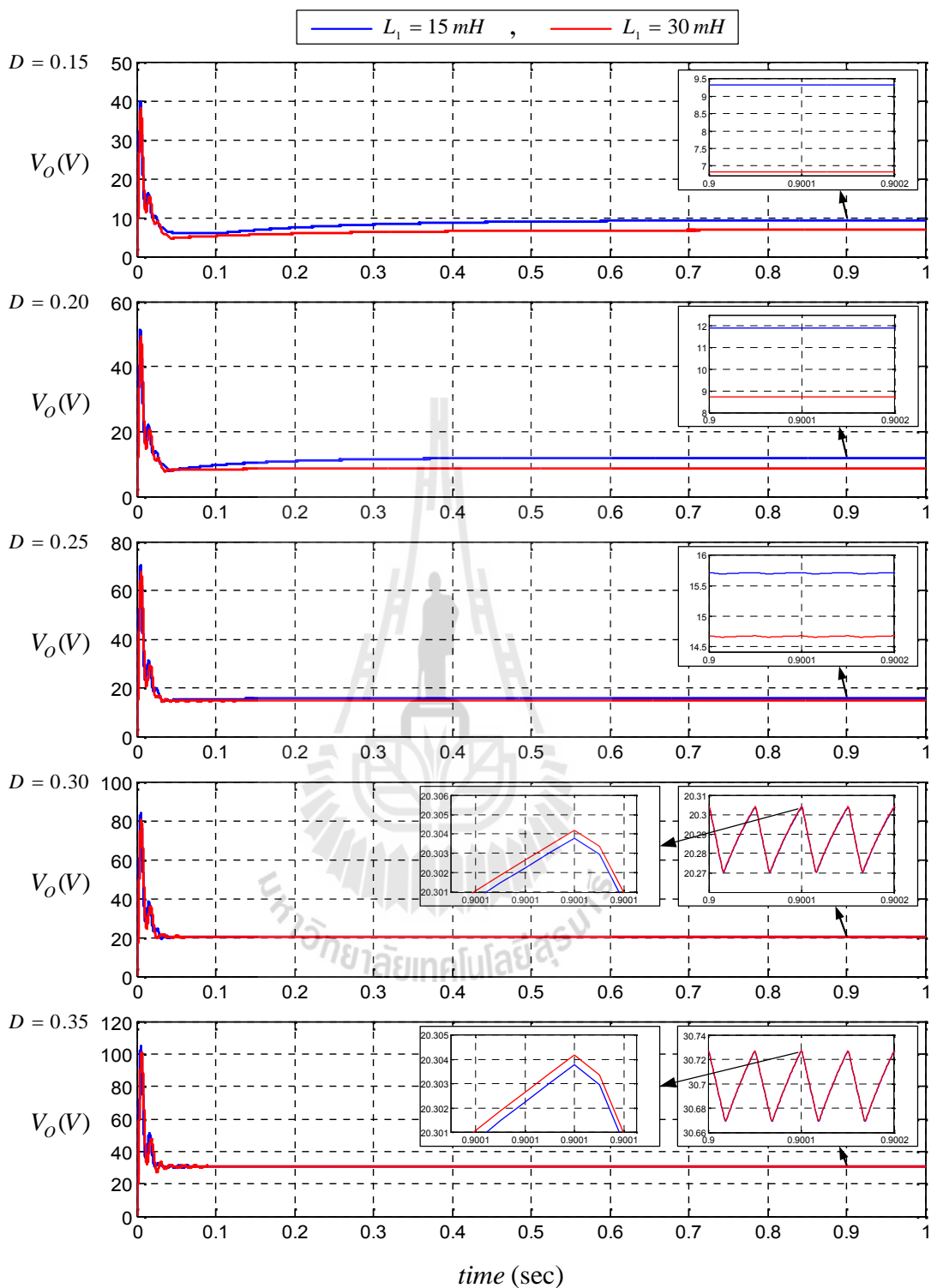


รูปที่ 5 ผลการจำลองสถานการณ์แรงดันเอาต์พุต V_o

จากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อวิเคราะห์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 , L_2 และ L_3 พบว่าตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีการทำงานช่วงสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่องเมื่อมีค่าวัฏจักรหน้าที่น้อยกว่า 0.25 ส่งผลให้การลดทอนแรงดันเอาต์พุตมีความคลาดเคลื่อนและเกิดกำลังการสูญเสียภายในวงจร เพื่อตรวจสอบการทำงานช่วงสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่องของตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีผลต่อการลดทอนแรงดันแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่พัฒนาขึ้น จึงทำการเพิ่มขนาดตัวเหนี่ยวนำ L_1 จาก 15 mH เป็น 30 mH เพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ระหว่างขนาดของตัวเหนี่ยวนำ L_1 ที่ 15 mH กับตัวเหนี่ยวนำ L_1 ที่ 30 mH ผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ ๖.6 พบว่าที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.25 ผลของการเพิ่มขนาดตัวเหนี่ยวนำ L_1 ทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะกระแสต่อเนื่อง ในส่วนที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15 และ 0.20 ที่ตัวเหนี่ยวนำขนาด 30 mH พบว่าช่วงเวลาที่เกิดสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่องมีระยะเวลาเกิดขึ้นหลังจากที่เกิดกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 15 mH และเมื่อพิจารณาแรงดันเอาต์พุตจากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ ๖.7 ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.15, 0.20 และ 0.25 แรงดันเอาต์พุตของตัวเหนี่ยวนำ L_1 ที่มีการเพิ่มขนาดเป็น 30 mH วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีการลดทอนแรงดันได้มากกว่าเมื่อเทียบกับตัวเหนี่ยวนำ L_1 ที่ขนาด 15 mH และที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 0.30 และ 0.35 ตัวเหนี่ยวนำ L_1 ทั้งสองขนาดทำงานช่วงสภาวะกระแสต่อเนื่อง ซึ่งผลของแรงดันเอาต์พุตมีค่าแรงดันที่ตรงกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าหากเกิดการดำเนินงานที่สภาวะกระแสไม่ต่อเนื่อง จะส่งผลให้การลดทอนแรงดันเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนจากสมการการวิเคราะห์การทำงานของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ ๖.6 ผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1



รูปที่ ง.7 ผลการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุต V_o

ภาคผนวก จ

ความรู้พื้นฐานของบอร์ด DSP

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทเท็กซัสอินสตรูเมน (Texas Instruments) คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 มีดังต่อไปนี้

- มี TMS320F28335 สำหรับประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
- มีความเร็วของสัญญาณนาฬิกา 150 MHz หรือ 6.67 ns ต่อหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา
- หน่วยประมวลผลกลางประสิทธิภาพสูงขนาด 32 บิต ใช้สถาปัตยกรรมบัสแบบฮาร์วาร์ด (Harvard Bus Architecture) ปฏิบัติการแบบ 16x16 และ 32x32 มีกระบวนการตอบสนองอินเทอร์รัพที่รวดเร็ว
- หน่วยความจำ RAM ขนาด 68 กิโลไบต์ในตัวชิพ
- หน่วยความจำแบบ Flash ขนาด 512 กิโลไบต์ในตัวชิพ
- หน่วยความจำชนิด SRAM ขนาด 256 กิโลไบต์นอกตัวชิพ
- มีตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลความละเอียด 12 บิต 16 ช่องสัญญาณอินพุต โดยมีลักษณะเป็นแบบมัลติเพล็กซ์ 2 ชุดๆ ละ 8 ช่องสัญญาณ
- ตัวรับสัญญาณจากเอ็น โค้ดเดอร์ (Quadrature Encoder Pulse)
- รองรับสัญญาณอินเทอร์รัพจากอุปกรณ์รอบข้างจำนวน 45 แหล่ง
- มี PWM จำนวน 16 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 32 บิต
- มีขาของอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 96 พิน

การใช้งานมอดูลแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™F28335 มีมอดูลสำหรับแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล หรือ ADC (analog to digital converter) ซึ่งมีความละเอียด 12 บิต โดยสามารถรับแรงดันได้ไม่เกิน 3.3 V หมายถึงเมื่อรับสัญญาณแรงดันดังกล่าวเข้ามาแล้วจะทำการแปลงดิจิทัลตัวเลขที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 4095 สำหรับมอดูล ADC มี 16 ช่องสัญญาณอินพุต โดยมีลักษณะเป็นแบบมัลติเพล็กซ์ 2 ชุดๆ ละ 8 ช่องสัญญาณ คือ (ADCA0 – ADCA7) และ (ADCB0 – ADCB7) สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ 2 ช่องสัญญาณ คือ ADCA0 และ ADCA1 (ADCA0 สำหรับรับ

สัญญาณแรงดัน V_o ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น และ ADCA1 รับสัญญาณกระแส i_L) โดยสมการที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล แสดงได้ดังสมการที่ (จ.1)

$$ADC = \frac{V_{IN} \times 4095}{V_{REF}} \quad (จ.1)$$

โดยที่ V_{IN} คือ สัญญาณแรงดันด้านขาอินพุต (รับสัญญาณได้อยู่ระหว่าง 0 – 3.3 V)

V_{REF} คือ แรงดันอ้างอิง (จะถูกกำหนดไว้ที่ 3.3 V ตามคุณสมบัติของบอร์ด)





ภาคผนวก ฉ

โปรแกรมภาษาซีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335

จ.1 โปรแกรมภาษาซีการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP

```

// #####
//
//          MCU: Voltage & Current controller
//          โปรแกรมภาษาซีการควบคุมแรงดันเอาต์พุต
//
// #####
#include "DSP28x_Project.h" // โหลด Device Headerfile และ Examples Include File
#include "IQmathLib.h"     // โหลด IQmath Library
#include "Solar_F.h"       // โหลด Solar Library: SPL, Data-Logger, INV controller

// ===== Module Enable =====
// 0 Disable, 1 Enable
// =====

//เปิดการใช้งานอินเตอร์รัพต์ (Interrupt Enable) และฟังก์ชันอื่นๆของโปรแกรม
// ***** EPWM Module Enable -----
#define EPWM2_DB_ENABLE 0 // Enable EPWM2 Dead-band
#define EPWM3_DB_ENABLE 0 // Enable EPWM3 Dead-band
#define EPWM1_SOCA_ENABLE 1 // Enable EPWM1 SOCA Trigger

// ***** Interrupt Enable -----
#define CPU_TINT0_ENABLE 0 // Enable Timer 0 Interrupt
#define Ext_INT_ENABLE 1 // Enable External Interrupt
#define EPWM1_INT_ENABLE 1 // Enable EPWM1 Timer INT
#define Flash_boot_ENABLE 0 // Enable boot on Flash

```



```

// ===== ADC start parameters =====
#if (CPU_FRQ_150MHZ)      // กรณี 150 MHz SYSCLKOUT (Default)
    #define ADC_MODCLK 0x3
#endif

#if (CPU_FRQ_100MHZ)     // กรณี 100 MHz SYSCLKOUT (Default)
    #define ADC_MODCLK 0x2
#endif

#define ADC_CKPS  0x1    // ADC module clock = HSPCLK/(2*1) = 12.5MHz
#define ADC_SHCLK 0x1    // S/H width in ADC module periods =(1+ADC_SHCLK)= 2
ADC clock
// -----
//=====
//
//                               Parameter & Function Prototype
//=====

//ประกาศฟังก์ชันภายนอก (ฟังก์ชันพื้นฐานที่อยู่ใน Headerfile)
extern void InitSysCtrl(void);      // ฟังก์ชันกำหนดค่าพื้นฐานของ CPU
extern void InitPieCtrl(void);      // ฟังก์ชันการควบคุม Peripheral Interrupt Expansion
extern void InitPieVectTable(void); // ฟังก์ชันตาราง Peripheral Interrupt Expansion
interrupt void xint1_isr(void);     // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT1
interrupt void xint2_isr(void);     // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ XINT2
void xint_initial(void);           // ฟังก์ชันเริ่มต้นของอินเทอร์รัพต์ภายนอก

#if Ext_INT_ENABLE                // ฟังก์ชันอินเทอร์รัพต์ภายนอกที่สร้างขึ้น
    extern interrupt void xint1_isr(void);
    extern interrupt void xint2_isr(void);
    extern void xint_initial(void);
#endif

#endif

```

```

extern void InitFlash(void);           // ฟังก์ชันการบันทึกโปรแกรมใน Flash memory
extern unsigned int RamfuncsLoadStart;
extern unsigned int RamfuncsLoadEnd;
extern unsigned int RamfuncsRunStart;
#endif

// ประกาศฟังก์ชันภายใน (ฟังก์ชันที่สร้างขึ้นเองและอยู่ในไฟล์นี้)
void Gpio_setup(void);                 // ฟังก์ชันกำหนดหน้าที่ของขา Input / Output
void ePWM1_setup(void);                // ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM1 Timer
void ePWM2_setup(void);                // ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM2
void ePWM3_setup(void);                // ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM3

// ISR Prototype statements.
interrupt void epwm1_timer_isr(void); // ฟังก์ชัน โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ ePWM1 INT

// ประกาศตัวแปรและกำหนดค่าคงที่
//=====
#define PI 3.1415927                    // ค่าคงที่  $\pi$ 
#define ISR_FREQUENCY 20000            // ความถี่ของ ISR 20 kHz
float Vdc_ref = 20;                    // แรงดันดีซี ( $V_{dc}$ ) ที่ต้องการควบคุมให้คงที่ 20 V
float A=6.25,B=1875.0;

// ค่าคงที่สำหรับการแปลงเอชูดี (ADC scaling)
#define ADC_A_Fullscale 3.00           // แรงดันแอนาล็อกเต็มสเกล (analog voltage full-scale)
#define ADC_A_Offset 1.50             // แรงดันแอนาล็อกออฟเซต (analog voltage offset)
#define ADC_D_Fullscale 4095.0        // ค่าดิจิทัลอลเดีซีเต็มสเกล (ADC digital full-scale)
#define ADC_D_Offset 2047.0          // ค่าดิจิทัลอลเดีซีครึ่งสเกล (ADC digital half-scale)
#define Gain_Vdc 96.0014              // ค่าเกนของวงจรเซ็นเซอร์แรงดัน

```

```

#define Gain_Idc 3.3333333 // ค่าเกณฑ์ของวงจรเซ็นเซอร์กระแส
#define PWM_CMPA 375.0 // คาบของสัญญาณ PWM อ้างอิง
// ตัวแปรประเภทโครงสร้างสำหรับ SPLL ตัวควบคุมแรงดันและตัวควบคุมกระแส
CNTL_VC_F cntl_vc; // ประกาศตัวแปรสำหรับตัวควบคุมแรงดัน
CNTL_CC_F cntl_cc; // ประกาศตัวแปรสำหรับตัวควบคุมกระแส

// Global variable prototypes =====
int16 Vadc_a0; // ตัวแปรเก็บค่าดิจิตอลที่ได้จากการแปลงเอทูดิของ ADCINA0
int16 Vadc_a1; // ตัวแปรเก็บค่าดิจิตอลที่ได้จากการแปลงเอทูดิของ ADCINA1
float32 V_dc; // PV array voltage
float32 I_dc; // PV array current
float32 V_grid; // Low-side grid voltage
float32 V_grid_pu; // Low-side grid voltage [pu.]
float32 I_L; // Low-side grid current
float32 IL_ref; // Igrid reference = I*sin(wt)
float32 U_ref_P,U_ref_N; // Reference signal For PWM compare

//=====
// โปรแกรมหลัก (Main function)
//=====

void main(void){
//กำหนดค่าพื้นฐานของ TMS320F28335 (Initialize system control)
InitSysCtrl(); // โหลด PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
#if Flash_boot_ENABLE // อนุญาตให้บันทึกโปรแกรมลงใน Flash memory
memcpy(&RamfuncsRunStart, &RamfuncsLoadStart, &RamfuncsLoadEnd -
&RamfuncsLoadStart);
InitFlash(); // บันทึกโปรแกรมลงใน RAM (SARAM - L0)
#endif
#endif

```

```

// กำหนดสัญญาณนาฬิกาสำหรับการแปลงเอชดี
// HSPCLK = SYSCLKOUT/(2*ADC_MODCLK) = 25 MHz
EALLOW;
SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK; // HSPCLK =
SYSCLKOUT/(2*ADC_MODCLK)= 25 MHz
EDIS;

Gpio_setup();          // กำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO Initialize)
// กำหนดอินเตอร์รัพต์ Peripheral Interrupt Expansion (PIE)
// =====
DINT;                  // หยุดการทำงานของอินเตอร์รัพต์ทั้งหมด (Disable CPU interrupts)
InitPieCtrl();         // เริ่มต้น PIE control registers
                        // หยุดการทำงานของ PIE interrupts และเคลียร์ interrupts flags
// หยุดการทำงานของ CPU interrupt flags และเคลียร์ interrupts flags
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;
// เริ่มต้น PIE vector table สำหรับ โปรแกรมบริการอินเตอร์รัพต์
// อนุญาตให้ Interrupt service routines (ISR) เริ่มทำงานเมื่อเกิดอินเตอร์รัพต์ตาม Priority
InitPieVectTable();
#if CPU_TINT0_ENABLE
    EALLOW;
    PieVectTable.TINT0 = &cpu_timer0_isr;
    EDIS;
#endif
#if EPWM1_INT_ENABLE // เริ่มต้น ePWM1 timer ISR เมื่อเกิดอินเตอร์รัพต์
    EALLOW;
    PieVectTable.EPWM1_INT = &epwm1_timer_isr;
    EDIS;
#endif

```

```

#if Ext_INT_ENABLE           // เริ่มต้น XINT1 / XINT2 ISR เมื่อเกิดอินเทอร์รัพต์

    EALLOW;

    PieVectTable.XINT1 = &xint1_isr;
    PieVectTable.XINT2 = &xint2_isr;

    EDIS;

#endif

// กำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับ โมดูลพิเศษ (Device Peripherals)
// =====
// โมดูลการแปลงเอทูดิ (Initialize ADC module)

InitAdc();                  // โหลดค่าเริ่มต้นพื้นฐานของการแปลงเอทูดิ
// กำหนดสัญญาณนาฬิกา (ADC clock) และระยะเวลาในการซั๊กตัวอย่าง (Sampling Time)
AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = ADC_CLKPS; // set to FCLK = HSPCLK/2 = 12.5 MHz
// FCLK = HSPCLK/1                For ADCCLKPS = 0000b
// FCLK = HSPCLK/(2*ADCCLKPS)    For ADCCLKPS = xxxxb
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CPS = 0;     // Set to ADCCLK = FCLK/(CPS+1) = 12.5 MHz [80ns]
// กำหนดความเร็วในการแปลงเอทูดิ (Conversion rate) 1.25 MSPS
AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = ADC_SHCLK; // Set to 4.17 MSPS Conversion rate
// Sample rate or Sample Time    = 1/((2+1)*80ns) = 4.17 MHz
// Acquisition window(s)= (ACQ_PS + 1) ADC clock
// Sequential mode: = 1/[(2+ACQ_PS)*[(1/ADCCLK)in ns]],
// S/H clock (1 ADC cycle)= (2 + ACQ_PS) ADC clock

// กำหนดลักษณะของการแปลงเอทูดิ
AdcRegs.ADCTRL3.bit.SMODE_SEL = 0; // เลือกวิธีการซั๊กตัวอย่างแบบ Sequential
AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1;  // เลือกโหมดการแปลงเอทูดิแบบ Cascaded
AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0; // หยุดการแปลงเอทูดิแบบต่อเนื่อง

```

```

// กำหนดช่องสัญญาณสำหรับการแปลงเอชดี (ADC channel select configuration )
AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0001; // จำนวนช่องสัญญาณ = 1 + 1 = 2 ช่อง
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; // ADCINA0 as 1st. of SEQ
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; // ADCINA1 as 2nd. of SEQ
// กำหนดให้เริ่มการแปลงเอชดีด้วยสัญญาณ ePWM SOCA trigger
AdcRegs.ADCTRL2.bit.EPWM_SOCA_SEQ1 = 1; // อนุญาตให้ SOCA เริ่ม SEQ1
AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 0; // ไม่อนุญาต SEQ1 interrupt
// โมดูลการสร้างสัญญาณ ePWM (EPWM Initialize configuration)
EALLOW;
SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0; // Stop all the EPWM TB clocks
EDIS;
ePWM1_setup(); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับ ePWM1 Timer (50  $\mu$ s)
ePWM2_setup(); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับ ePWM2 (unipolar PWM output)
EALLOW;
SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1; // Start all EPWM TB clocks synced
EDIS;
// เปิดการทำงานของอินเทอร์รัพต์ (Enable Interrupt)
// =====
#if Ext_INT_ENABLE // เลือกการใช้งานอินเทอร์รัพต์ภายนอก
    xint_initial();
#endif
// ค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต
CNTL_VC_F_init(&cntl_vc); // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมพีไอของแรงดัน
cntl_vc.Kp = (0.05); // ค่าเกนสัดส่วนของตัวควบคุมแรงดัน
cntl_vc.Ki = (20.0); // ค่าเกนอินทิกรัลของตัวควบคุมแรงดัน
cntl_vc.Umax = (5.0); // จำกัดค่าสูงสุดเอาต์พุตของตัวควบคุมแรงดัน
cntl_vc.Umin = (0.0); // จำกัดค่าต่ำสุดเอาต์พุตของตัวควบคุมแรงดัน
cntl_vc.Ts = (0.00001); // เวลาอินทิกรัลที่ใช้ในการคำนวณ

```

```

// ค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า
CNTL_CC_F_init(&cntl_cc);           // โหลดค่าเริ่มต้นสำหรับตัวควบคุมพีไอของกระแส
cntl_cc.Kp = (0.42);                 // ค่าเกนสัดส่วนของตัวควบคุมกระแส
cntl_cc.Ki = (2400.0);               // ค่าเกนอินทิกรัลของตัวควบคุมกระแส
cntl_cc.Umax = (5.0);                // จำกัดค่าสูงสุดเอาต์พุตของตัวควบคุมกระแส
cntl_cc.Umin = (-5.0);               // จำกัดค่าต่ำสุดเอาต์พุตของตัวควบคุมกระแส
cntl_cc.Ts = (0.00001);              // เวลาอินทิกรัลที่ใช้ในการคำนวณ

// เปิดการทำงานของอินเทอร์รัพต์ (Enable Interrupt)
// =====

#if Ext_INT_ENABLE
    IER |= M_INT1;                    // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ INT4 (XINT1) และ INT5 (XINT2)
#endif

#if EPWM1_INT_ENABLE
    IER |= M_INT3;                    // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ INT3 สำหรับ ePWM1 - 6 INT
#endif

// Enable Peripheral Interrupt Expansion [PIE]
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = CPU_TINT0_ENABLE;           // Enable TINT0 in the PIE:
Group 1
PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx1 = EPWM1_INT_ENABLE;
    // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 3 INT2 สำหรับ EPWM2_INT
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx4 = Ext_INT_ENABLE;
    // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 1 INT4 สำหรับ XINT1
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx5 = Ext_INT_ENABLE;
    // อนุญาตอินเทอร์รัพต์ PIE กลุ่มที่ 1 INT5 สำหรับ XINT2

EINT;                                // Enable global Interrupt
ERTM;                                 // Enable higher priority real-time debug event

```

```

for(;;)
    {
        // ลูปการทำงานหลัก (Background loop)
        // โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์ทำงานตามเวลาของ ePWM Timer
    }
}
// โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และฟังก์ชันที่สร้างขึ้นเอง
// EPWM1 Timer ISR: โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์อัลกอริทึม
interrupt void cpu_timer0_isr(void){
    CpuTimer0.InterruptCount++;
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}
// EPWM1 Timer ISR: โปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์หน่วยเอ็มพีพีที
// =====
interrupt void epwm1_timer_isr(void){
    // อ่านค่าดิจิตอลที่ได้จากการแปลงเอทูดิในช่องสัญญาณ ADCINA0 และ ADCINA1
    Vadc_a0 = AdcMirror.ADCRESULT0;
    Vadc_a1 = AdcMirror.ADCRESULT1;
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; //รีเซ็ต SEQ1 กลับสู่สถานะเริ่มต้น (initial state)
    // แปลงค่าดิจิตอลที่ได้จากการแปลงเอทูดิเป็นแรงดันและกระแสไฟฟ้า
    V_dc = Gain_Vdc*(Vadc_a0*0.000732601)+0.7721;
    I_L = Gain_Igrid*(Vadc_a1*0.000732601)+0.0038;

    // เรียกใช้งานตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต
    cntl_vc.Vref = (Vdc_ref); // อินพุต 1: แรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ
    cntl_vc.Vfbk = (V_dc); // อินพุต 2: แรงดันที่รับเข้ามาจากเซนเซอร์แรงดัน
    CNTL_VC_F_FUNC(&cntl_vc); // เริ่มฟังก์ชันตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต
    // เอาต์พุตของตัวควบคุมแรงดัน คือ .Out ชนิด float32

```



```

IL_ref = cntl_vc.Out; // ส่งค่าจากตัวควบคุมแรงดันเข้าสู่ตัวควบคุมกระแส
// เรียกใช้งานตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า
cntl_cc.Iref = (IL_ref); // อินพุต 1: แรงดันที่รับมาจากกลุ่มแรงดัน
cntl_cc.Ifbk = (I_L); // อินพุต 2: กระแสที่รับเข้ามาจากเซนเซอร์กระแส
CNTL_CC_F_FUNC(&cntl_cc); // เริ่มฟังก์ชันตัวควบคุมแรงดันดีซี
    // เอาต์พุตของตัวควบคุมกระแส คือ .Out ชนิด float32
// เปลี่ยนแปลงค่า U_ref_P และ U_ref_N สำหรับการเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณ PWM
U_ref_P = (-cntl_cc.Out*13.02)+3750;
// เปรียบเทียบแรงดันอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณ PWM
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = U_ref_P; // อัปเดต ePWM2A, ePWM2B

//-----
// สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพต์และเคลียร์ Interrupt flag
EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT = 1;
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP3;
}

// ฟังก์ชันกำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO setup)
//=====

void Gpio_setup(void){
    EALLOW;
    // กำหนดหน้าที่ของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO multiplex configuration)
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0; // GPIO15-GPIO0 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.all = 0; // GPIO31-GPIO16 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0; // GPIO47-GPIO32 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPBMUX2.all = 0; // GPIO63-GPIO48 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPCMUX1.all = 0; // GPIO79-GPIO64 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O
    GpioCtrlRegs.GPCMUX2.all = 0; // GPIO87-GPIO80 ทำหน้าที่เป็น General Purpose I/O

```

```

// กำหนดทิศทางของขาอินพุต/เอาต์พุต (GPIO Direction) และเปิดใช้งาน ePWM
GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0;           // กำหนดให้ GPIO31 - GPIO0 เป็นขาอินพุต
GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0;           // กำหนดให้ GPIO63 - GPIO32 เป็นขาอินพุต
GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0;           // กำหนดให้ GPIO87 - GPIO64 เป็นขาอินพุต
GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO2 = 1;     // เปิดใช้งาน ePWM2A
GpioCtrlRegs.GPxMUXn.bit.GPIOn = 0;
GpioCtrlRegs.GPxDIR.bit.GPIOn = 0;
GpioCtrlRegs.GPxPUD.bit.GPIOn = 0;
GpioCtrlRegs.GPxQSELn.bit.GPIOn = 0;
GpioCtrlRegs.GPxCTRL.bit.QUALPRDn = 0xFF;
GpioCtrlRegs.GPxDAT.bit.GPIOn = 0;
GpioCtrlRegs.GPxSET.bit.GPIOn = 0;
GpioCtrlRegs.GPxCLEAR.bit.GPIOn = 0;
GpioCtrlRegs.GPxTOGGLE.bit.GPIOn = 0;

    EDIS;
}

// ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM1 Timer
//=====

void ePWM1_setup(void){
    // กำหนดสัญญาณนาฬิกา 20 kHz (50  $\mu$ s) ชนิดขึ้น - ลง (up - down Timer based)
    // TBCLK = SYSCLKOUT/(HSPCLKDIV*CLKDIV)
    // TBPRD = (1/2)*[SYSCLKOUT/(Fpwm*HSPCLKDIV*CLKDIV)]
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1;           // HSPCLKDIV = /1
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;             // CLKDIV = /1
    EPwm1Regs.TBPRD = 7500;                            // กำหนดคาบเวลา = 7500 TBCLK [20 kHz]
    EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;                   // กำหนดเฟสเริ่มต้น = 0 TBCLK
    EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000;                          // เคลียร์ time - base counter
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;

```

```

// ตั้งค่าเกี่ยวกับการซิงค์โครไนซ์สัญญาณนาฬิกาและมุมเฟสเริ่มต้น
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;           // ปิดการซิงค์โครไนซ์เฟส
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PRDL = TB_SHADOW;           // โหลด Period Shadow Register
EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_CTR_ZERO;

// กำหนดให้โหลด CMPA Shadow registers เมื่อ CTR = ZERO
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO;
EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO;

// กำหนดลักษณะเอาต์พุต (Action Qualifier) ของ ePWM เมื่อมีการเปรียบเทียบ CTR
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 1875;                // กำหนด CMPA 50% duty cycle
EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTEN = 1;
EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTSEL = ET_CTR_PRD;
EPwm1Regs.ETPS.bit.INTPRD = ET_1ST
#endif

// กำหนดค่าสำหรับการสร้างสัญญาณทริกซ์ของการแปลงเอทูดี้ (SOCA Trigger)
#if EPWM1_SOCA_ENABLE
EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 1;                // เปิดการใช้งาน EPWM1 SOCA Trigger
// กำหนดให้เกิดสัญญาณทริกซ์ (SOCA trigger) เมื่อ CTRU = ZERO

EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = ET_CTR_ZERO;
EPwm1Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = ET_1ST;
#endif
}

```

```

// ฟังก์ชันกำหนดค่าสำหรับ ePWM2
// =====
void ePWM2_setup(void){
    // กำหนดสัญญาณนาฬิกา 20 kHz (50  $\mu$ s) ชนิดขึ้น - ลง (up - down Timer based)
    // TBCLK = SYSCLKOUT/(HSPCLKDIV*CLKDIV)
    // TBPRD = (1/2)*[SYSCLKOUT/(Fpwm*HSPCLKDIV*CLKDIV)]
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1;      // HSPCLKDIV = /1
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;        // CLKDIV = /1
    EPwm2Regs.TBPRD = 7500;                      // กำหนดคาบเวลา = 7500 TBCLK [20 kHz]
    EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;             // กำหนดเฟสเริ่มต้น = 0 TBCLK
    EPwm2Regs.TBCTR = 0x0000;                   // เคลียร์ time - base counter
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
    // ตั้งค่าเกี่ยวกับการซิงค์โครไนซ์สัญญาณนาฬิกาและมุมเฟสเริ่มต้น
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE;
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.PRDLN = TB_SHADOW;
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCSEL = TB_SYNC_IN;
    // กำหนดให้โหลด CMPA Shadow registers เมื่อ CTR = ZERO
    EPwm2Regs.CMPCTL.bit.SHDWAMODE = CC_SHADOW;
    EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO;
    EPwm2Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO;
    // กำหนดค่าเกี่ยวกับระยะแถบตาย (Dead-band) 2  $\mu$ s
    #if EPWM2_DB_ENABLE
    EPwm2Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // เปิดใช้ Dead-band
    EPwm2Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC;     // เลือกลโหมด
    EPwm2Regs.DBCTL.bit.IN_MODE = DBA_ALL;        // กำหนดสัญญาณอ้างอิง
    EPwm2Regs.DBRED = 60;
    //Rising edge delay (sec.) = (1/TBCLK)* DBRED (s)

```

```

EPwm2Regs.DBFED = 60;

    //Falling edge delay (sec.) = (1/TBCLK)* DBFED (s)

    #endif

// กำหนดลักษณะเอาต์พุต (Action Qualifier) ของ ePWM เมื่อมีการเปรียบเทียบ
CTREPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750;           // กำหนด CMPA 50% duty cycle duty
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET;           // เปิดเอาต์พุต ePWM2
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;        // เปิดเอาต์พุต ePWM2
}

// ฟังก์ชันเริ่มต้นของอินเทอร์รัพต์ภายนอก
void xint_initial(void)
{
// กำหนดขา GPIO13 และ GPIO14 เป็นขาจิจิตอลอินพุตสำหรับสวิตช์ 1 และ 2
    EALLOW;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO13 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO13 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO13 = 2;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO14 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPADIR.bit.GPIO14 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL1.bit.GPIO14 = 2;
    GpioCtrlRegs.GPACTRL.bit.QUALPRD1 = 0xFF;
    EDIS;
    EALLOW;
// เลือกขา GPIO13 เป็นสวิตช์ของ XINT1 และ GPIO14 เป็นสวิตช์ของ XINT2
    GpioIntRegs.GPIOXINT1SEL.bit.GPIOSEL = 13;
    GpioIntRegs.GPIOXINT2SEL.bit.GPIOSEL = 14;
    EDIS;
    XIntruptRegs.XINT1CR.bit.POLARITY = 1;

```

```
XIntruptRegs.XINT2CR.bit.POLARITY = 1;
XIntruptRegs.XINT1CR.bit.ENABLE = 1;
XIntruptRegs.XINT2CR.bit.ENABLE = 1;
}

interrupt void xint1_isr(void)
{
    Vdc_ref+=5;
    if (Vdc_ref>60){Vdc_ref=60;}
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}

interrupt void xint2_isr(void)
{
    Vdc_ref-=5;
    if (Vdc_ref<5){Vdc_ref=5;}
    // Acknowledge this interrupt to get more from group 1
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}

//=====
// End of SourceCode.
//=====
```

จ.2 โปรแกรมการสร้างตัวควบคุมพีไอ

```

#####
//
//          PI_controller.c
//          โปรแกรมตัวควบคุมพีไอ
//=====
#include "Solar_F.h"          //โหลด Solar Library (SPLL, Data-Logger, Sine Analyzer)
//กำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้น
float errv=0;   float Upv=0;   float Uiv=0;   float Uiv_1=0;   float UV=0;
float erri=0;   float Upi=0;   float Uii=0;   float Uii_1=0;   float UI=0;

void CNTL_VC_F_init(CNTL_VC_F *k){
/* Initialize variables */
k->Vref = 0;   k->Vfbk = 0;   k->Out = 0;   k->Kp = 0;   k->Ki = 0;
k->Ts = 0;   k->Umax = (1.0);   k->Umin = (0.0);   k->up = 0;
k->ui = 0;   k->v1 = 0;   k->i1 = 0;
}

void CNTL_CC_F_init(CNTL_CC_F *k){
/* Initialize variables */
k->Iref = 0;   k->Ifbk = 0;   k->Out = 0;   k->Kp = 0;   k->Ki = 0;
k->Ts = 0;   k->Umax = (5.0);   k->Umin = (-5.0);   k->up = 0;
k->ui = 0;   k->v1 = 0;   k->i1 = 0;
}

```

```

//***** Function Definition *****/
void CNTL_VC_F_FUNC(CNTL_VC_F *v){
//คำนวณการทำงานตัวควบคุมพีไอในลูปแรงดัน
errv=v->Vref - v->Vfbk;           // คำนวณค่าแรงดันคลาดเคลื่อน
Upv=0.014*errv;                   // ตัวควบคุมพีลูปแรงดัน
Uiv=0.8*0.00001*errv + Uiv_1;     // ตัวควบคุมไอลูปแรงดัน
UV=Upv+Uiv;                       // เอาต์พุตลูปแรงดัน สำหรับเป็นอินพุตของลูปกระแส
Uiv_1=Uiv;                         // เก็บค่าตัวควบคุมไอสำหรับการคำนวณในรอบต่อไป
v->Out = UV;                       // ส่งค่าเอาต์พุตให้ลูปกระแส
}

void CNTL_CC_F_FUNC(CNTL_CC_F *v){
//คำนวณการทำงานตัวควบคุมพีไอในลูปกระแส
erri=v->Iref - v->Ifbk;           // คำนวณค่ากระแสคลาดเคลื่อน
Upi=1.44*erri;                    // ตัวควบคุมพีลูปกระแส
Uii=9600*0.00001*erri + Uii_1;    // ตัวควบคุมไอลูปกระแส
UI=Upi+Uii;                       // เอาต์พุตลูปกระแส
Uii_1=Uii;                        // เก็บค่าตัวควบคุมไอสำหรับการคำนวณในรอบต่อไป
v->Out = UI;                       // ส่งค่าเอาต์พุตสำหรับเป็นสัญญาณอ้างอิงในการ
// เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม
}

```

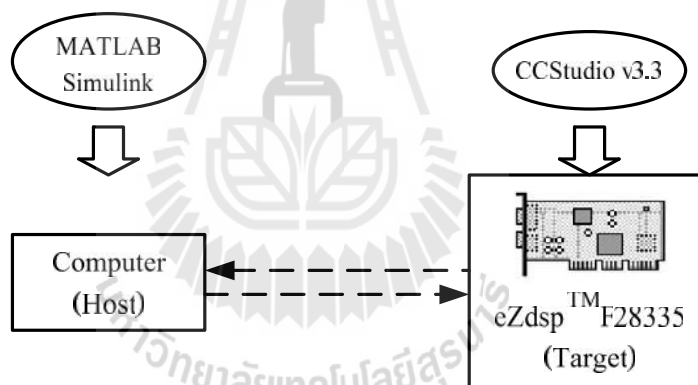



ภาคผนวก ข

ความรู้เบื้องต้นการใช้งานฮาร์ดแวร์ในรูป

ข.1 เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In Loop : HIL)

เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP โดยบริษัท MathWork ได้พัฒนาโปรแกรม Code Composer Studio สามารถเชื่อมโยงใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ MATLAB เวอร์ชัน 2011 ขึ้นไป และรองรับกับคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการ Windows XP โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ที่ใช้โปรแกรม Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCStudio v3.3) ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ดังกล่าว สามารถเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB หลักการทำงานของฮาร์ดแวร์ในลูปจะเป็นการรับและส่งข้อมูลผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchang) เชื่อมโยงกับโปรแกรม Simulink (Host) กับ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 โดยแผนภาพการเชื่อมโยงรับส่งข้อมูลแสดงได้ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แผนภาพการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335

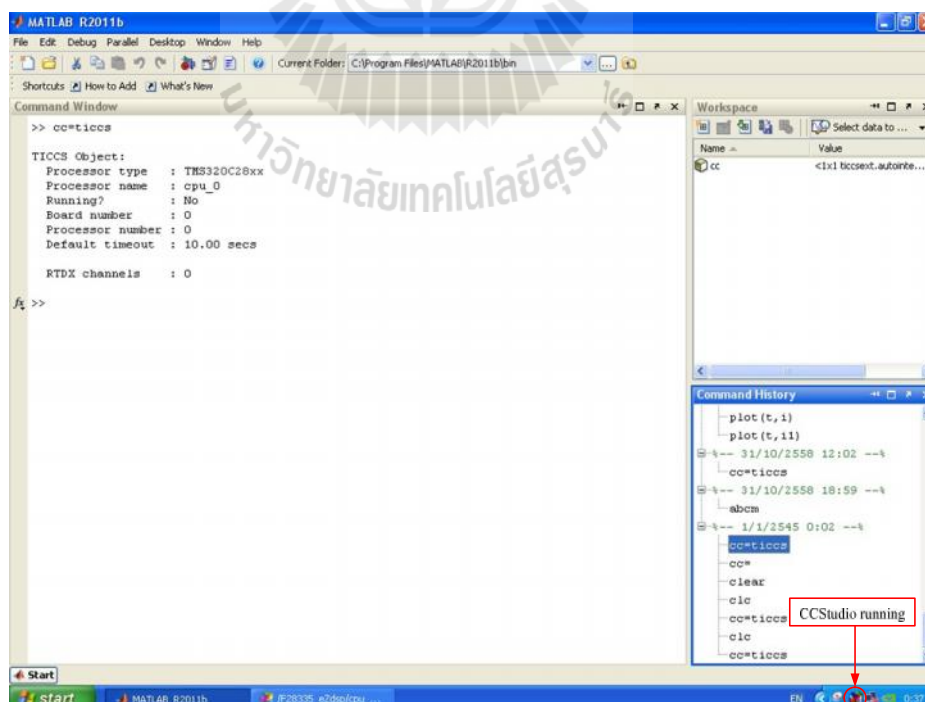
ข.1.1 การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335

การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdspTMF28335 ในลำดับแรกต้องทำการติดตั้งซอฟต์แวร์ MATLAB และ โปรแกรม CCStudio v3.3 เมื่อทำการติดตั้งซอฟต์แวร์ MATLAB และ โปรแกรม CCStudio v3.3 จะปรากฏไอคอนการเข้าใช้งานแสดงดังรูปที่ ข.2 โดยโปรแกรม CCStudio v3.3 จะปรากฏไอคอน Setup CCStudio v3.3 ที่ใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติของบอร์ด DSP รุ่น eZdspTMF28335

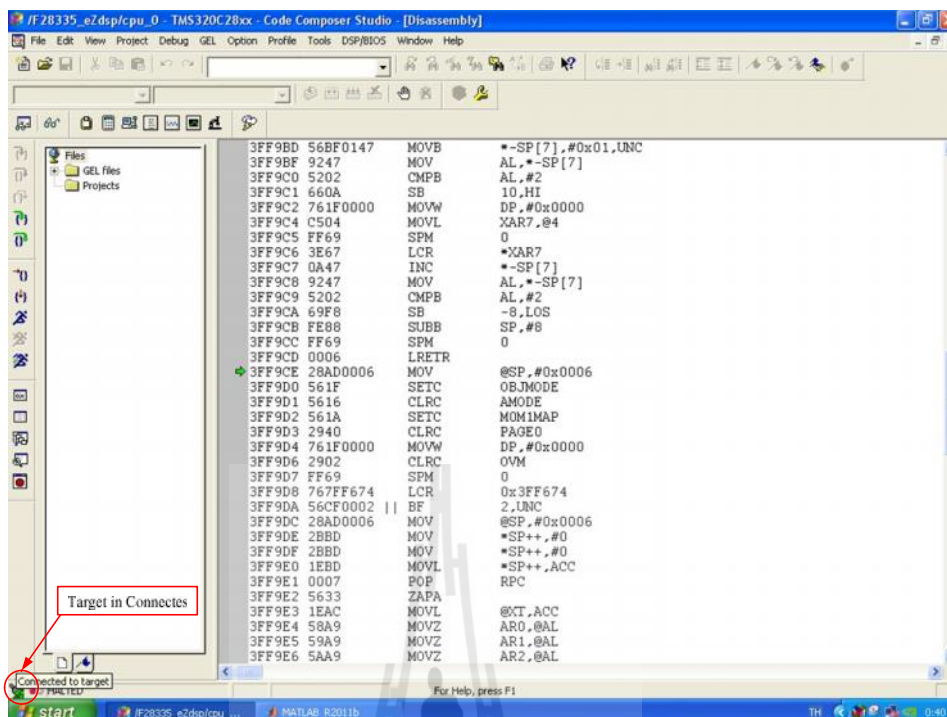


รูปที่ ข.2 ไอคอนการเข้าใช้งานซอฟต์แวร์ MATLAB และโปรแกรม CCStudio v3.3

การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับ บอร์ด eZdsp™ F28335 ทำได้โดยการเชื่อมต่อพอร์ต USB เข้ากับคอมพิวเตอร์ จากนั้นเปิดซอฟต์แวร์ MATLAB ทำการคีย์คำสั่ง `cc = ticcs` เพื่อทดสอบว่าบอร์ด eZdsp™ F28335 เชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์ MATLAB เรียบร้อยแล้ว โดยจะปรากฏการเชื่อมต่อ แสดงได้ดังรูปที่ ข.3 ทำการเปิดโปรแกรม CCStudio v3.3 สำหรับสร้างไฟล์โปรเจกต์การทำงาน หน้าต่างของโปรแกรม CCStudio v3.3 แสดงได้ดังรูปที่ ข.4 หลังจากเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335 แล้ว จะปรากฏการเชื่อมต่อบอร์ด eZdsp™ F28335 กับโปรแกรม CCStudio v3.3 บริเวณมุมล่างซ้ายของหน้าต่าง ดังรูปที่ ข.4 ลำดับต่อไปจะนำเสนอการเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในหัวข้อที่ ข.1.2



รูปที่ ข.3 การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ MATLAB กับบอร์ด eZdsp™ F28335



รูปที่ ข.4 หน้าต่าง โปรแกรม CCStudio v3.3

ข.1.2 การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335

การเชื่อมโยงโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 (ทศพร ฌรงค์ฤทธิ์) สำหรับสร้างระบบจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของการรัน และการส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านช่องทางสื่อสารแบบ RTDX สามารถแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ การส่งข้อมูลจากโปรแกรม Simulink ไปยังบอร์ด eZdsp™ F28335 การรับข้อมูลของโปรแกรม Simulink จากบอร์ด eZdsp™ F28335 การส่งข้อมูลจากบอร์ด eZdsp™ F28335 มายังโปรแกรม Simulink และการรับข้อมูลของบอร์ด eZdsp™ F28335 จากโปรแกรม Simulink ซึ่งในแต่ละกรณีสามารถอธิบายได้ดังนี้

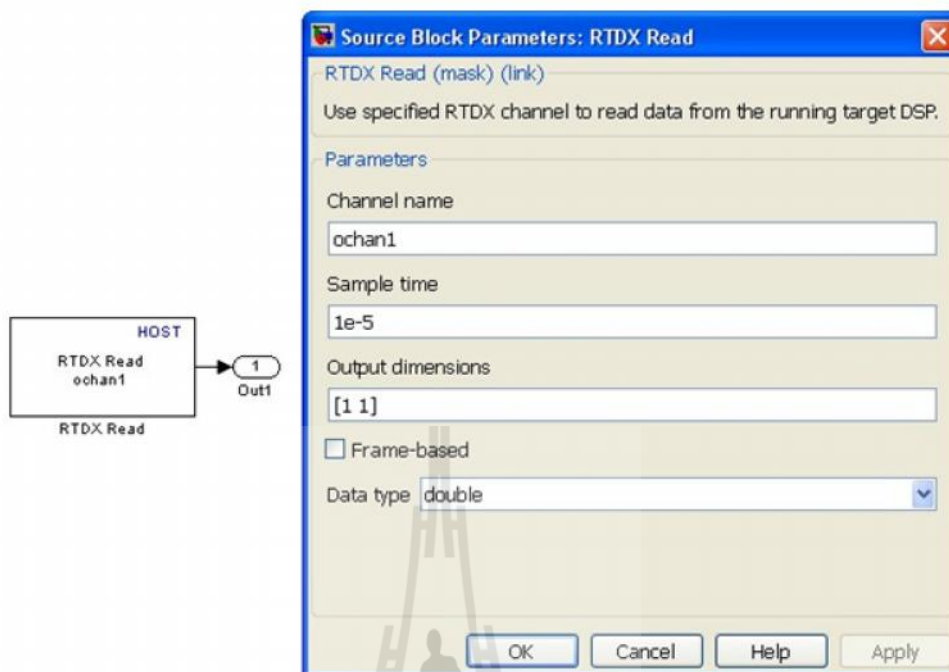
กรณีที่ 1 การส่งข้อมูลจากโปรแกรม Simulink ไปยังบอร์ด eZdsp™ F28335 ทำได้โดยใช้บล็อกอินพุต RTDX Write ที่สามารถเรียกใช้ได้จากไลบรารี RTDX simulation block ซึ่งจะอยู่ในบล็อกเครื่องมือภายในซอฟต์แวร์ MATLAB การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกอินพุต RTDX Write มีเพียงชื่อของช่องอินพุต (Channel name) ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างการกำหนดชื่อช่องอินพุตสำหรับระบบการทดสอบรับ และส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335

ผ่านทางช่องสื่อสารแบบ RTDX แสดงได้ดังรูปที่ ข.5 เป็นการรับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink มาเก็บไว้ในชื่อ ichan1



รูปที่ ข.5 การกำหนดค่าบล็อก RTDX Write

กรณีที่ 2 การรับข้อมูลของโปรแกรม Simulink จากบอร์ด eZdsp™F28335 สามารถทำได้ โดยการใช้บล็อกเอาต์พุต RTDX Read ซึ่งอยู่ในไลบรารี RTDX simulation block การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของบล็อกเอาต์พุต RTDX Read ได้แก่ ชื่อของช่องเอาต์พุต (Channel name) ช่วงเวลาในการชักตัวอย่างสำหรับการรับข้อมูล (Sample time) ขนาดของข้อมูลที่ส่งมาจากบอร์ด eZdsp™F28335 (Output dimensions) และชนิดของข้อมูล (Data type) แสดงได้ดังรูปที่ ข.6 (double คือ ชนิดข้อมูลแบบตัวเลขทศนิยมละเอียด (float))



รูปที่ ๖.6 การกำหนดค่าบล็อก RTDX Read

กรณีที่ 3 การส่งข้อมูลจากบอร์ด eZdsp™ F28335 มายังโปรแกรม Simulink สามารถทำได้ โดยการใช้ฟังก์ชันชุดคำสั่งภาษาซี บนโปรแกรม CCStudio v3.3 ดังนี้

- RTDX_CreateOutChannel(ochan1);
- RTDX_enableOutput(&ochan1);
- RTDX_write(&ochan1,dout1,nbuf*sizeof(long))

ในบรรทัดที่ 1 คือ ฟังก์ชันคำสั่งการสร้างช่องเอาต์พุต RTDX สำหรับใช้ส่งข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink โดยชื่อของช่องเอาต์พุตดังกล่าวจะต้องกำหนดให้เหมือนกับชื่อของช่องการรับข้อมูลของโปรแกรม Simulink ในกรณีที่ 2 บรรทัดที่ 2 คือ ฟังก์ชันคำสั่งเปิดใช้งานช่องเอาต์พุต RTDX ที่ชื่อ ochan1 สำหรับใช้ส่งข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink และบรรทัดที่ 3 คือ ฟังก์ชันคำสั่งเขียนส่งข้อมูลมายังโปรแกรม Simulink ผ่านทางช่องเอาต์พุต RTDX ที่ชื่อ ochan1 โดยจะต้องกำหนดค่าข้อมูล ขนาดของข้อมูล และชนิดของข้อมูลในวงเล็บฟังก์ชันดังกล่าว

กรณีที่ 4 การรับข้อมูลของบอร์ด eZdsp™ F28335 จากโปรแกรม Simulink ทำได้โดยการใช้ฟังก์ชันชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCStudio v3.3 ดังนี้

- RTDX_CreateInputChannel(ichan1);
- RTDX_enableInput(&ichan1);

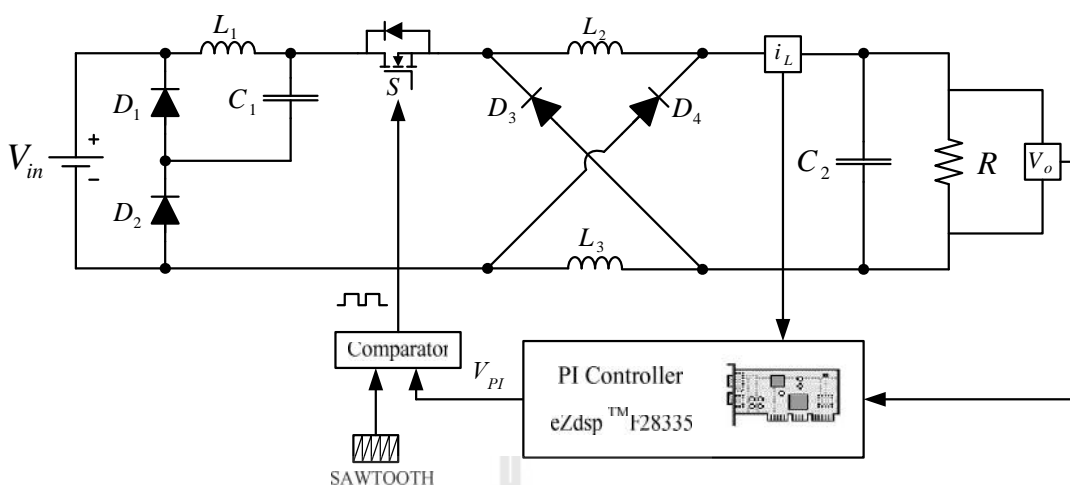
- RTDX_read(&ichan1,din1,nbuf*sizeof(long))

บรรทัดที่ 1 คือ ฟังก์ชันคำสั่งการกำหนดสร้างช่องอินพุต RTDX สำหรับใช้รับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink โดยจะต้องกำหนดชื่อของช่องอินพุตให้เหมือนกับชื่อของช่องการส่งข้อมูลของโปรแกรม Simulink ซึ่งได้กำหนดไว้ในกรณีที่ 1 บรรทัดที่ 2 คือ ฟังก์ชันคำสั่งเปิดใช้งานช่องอินพุต RTDX ที่ชื่อ ichan1 สำหรับใช้รับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink และบรรทัดที่ 3 คือ ฟังก์ชันคำสั่งอ่านข้อมูลที่รับมาจากช่องอินพุต RTDX ที่ชื่อ ichan1

เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป เป็นการจำลองสถานการณ์ที่ใช้บอร์ด eZdsp™ F28335 ทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลระหว่างซอฟต์แวร์ที่เป็นโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์กับฮาร์ดแวร์ที่เป็นบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบ RTDX มีจุดประสงค์เพื่อทำให้การจำลองสถานการณ์มีความเสมือนจริง โดยในบทนี้จะทำการเขียนคำสั่งที่เป็นตัวควบคุมชนิดพีไอลงบนบอร์ด eZdsp™ F28335 ทำหน้าที่ในการประมวลผลของตัวควบคุม เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรถอดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

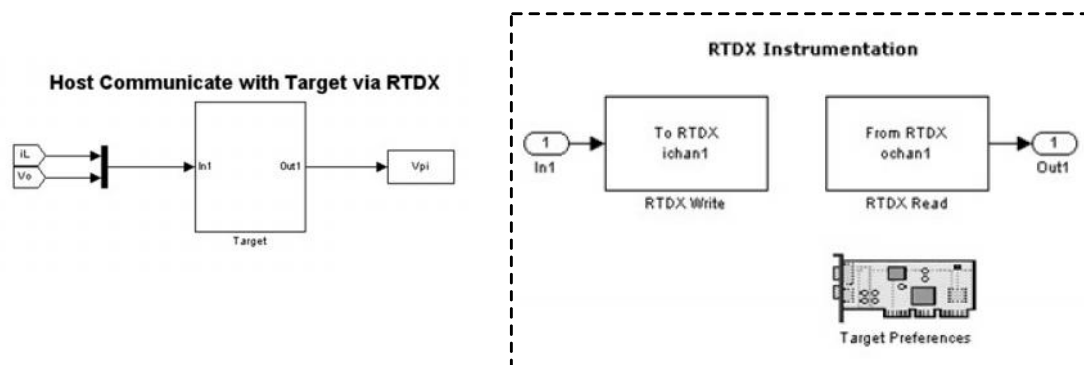
ช.2 การประยุกต์เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ

จากการอธิบายเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปในหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จะทำการประยุกต์การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ โดยในการจำลองสถานการณ์จะให้ตัวควบคุมชนิดพีไอทำงานอยู่บนบอร์ด eZdsp™ F28335 ที่เขียนคำสั่งการทำงานด้วยภาษาซี และทำการรับส่งข้อมูลระหว่างระบบซอฟต์แวร์ (MATLAB, Simulink) กับระบบฮาร์ดแวร์ (บอร์ด eZdsp™ F28335) ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบ RTDX โดยโครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ ช.7

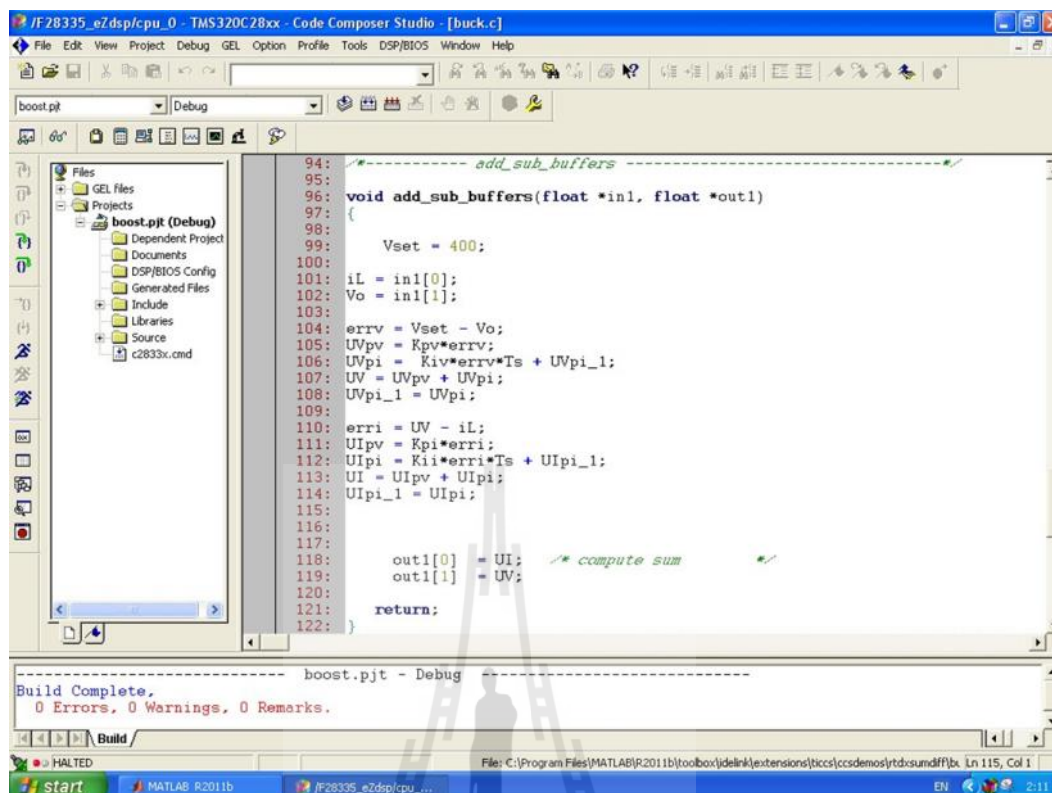


รูปที่ ๗.7 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ

จากโครงสร้างการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอ ในรูปที่ ๗.7 ระบบจะทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™ F28335 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมชนิดพีไอ โดยอินพุตของบอร์ด eZdsp™ F28335 จะได้มาจากโปรแกรม Simulink ที่เป็นกระแสอินพุต (i_L) และแรงดันเอาต์พุต (V_o) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยเอาต์พุตที่จะออกจากบอร์ด eZdsp™ F28335 จะเป็นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมชนิดพีไอ (V_{PI}) จากรูปที่ ๗.7 การรับส่งข้อมูลผ่านช่องทางการสื่อสารแบบ RTDX ของบอร์ด eZdsp™ F28335 แสดงแผนภาพภายในของบล็อกดังกล่าวได้ดังรูปที่ ๗.8 ซึ่งตัวควบคุมชนิดพีไอจะถูกสร้างลงบนบอร์ด eZdsp™ F28335 ด้วยภาษาซีบนโปรแกรม CCSstudio v3.3 หน้าต่างของโปรเจกต์ของตัวควบคุมชนิดพีไอแสดงได้ดังรูปที่ ๗.9

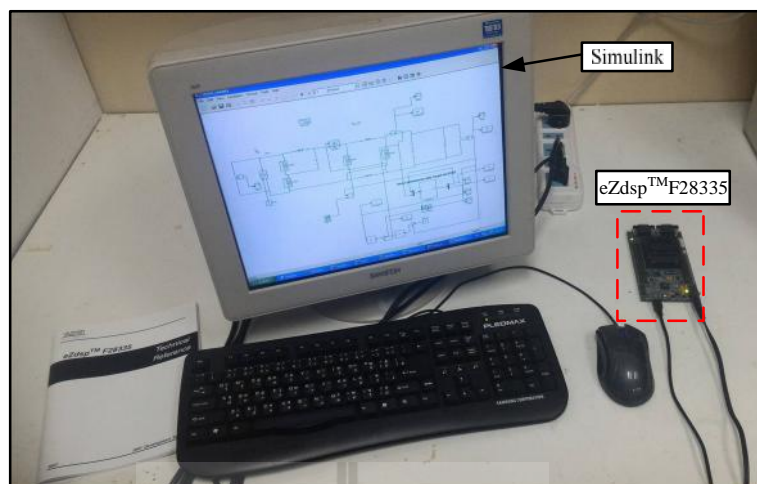


รูปที่ ๗.8 แผนภาพระบบ RTDX การรับส่งข้อมูลบน โปรแกรม Simulink



รูปที่ ข.9 โปรแกรมตัวควบคุมชนิดพีโอ ที่สร้างบน โปรแกรม CCStudio v3.3

จากการอธิบายระบบ RTDX ข้างต้น การทดสอบการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ใน
 ลูปของระบบดังกล่าว สามารถแสดงการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ที่เป็น โปรแกรม Simulink
 กับบอร์ด eZdspTM F28335 แสดงได้ดังรูปที่ ข.10



รูปที่ ช.10 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด eZdsp™F28335



ภาคผนวก ซ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

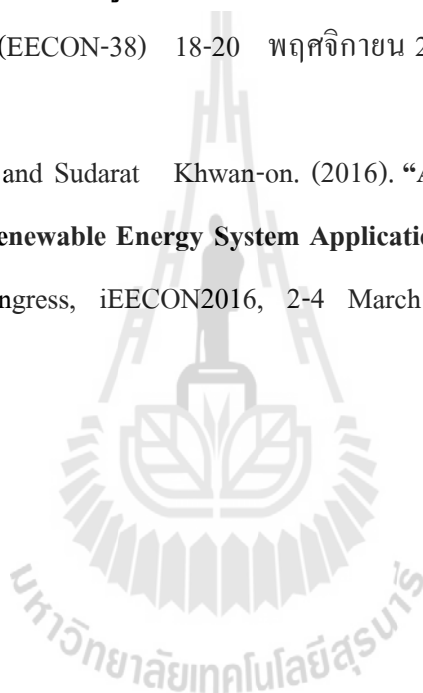
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รณกร คำบุยา และ สุดารัตน์ ขวัญอ่อน (2557) “วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียว” การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19-21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น จำนวน 4 หน้า

รณกร คำบุยา และ สุดารัตน์ ขวัญอ่อน (2558) “วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียวและวิธีการควบคุม” การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18-20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย จำนวน 4 หน้า

Ronnakorn Khambuya and Sudarat Khwan-on. (2016). “**A New High Step-Down DC-DC Converter for renewable Energy System Applications**”. 2016 International Electrical Engineering Congress, iEECON2016, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand. pp. 349-352.



วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิทช์เดียว A High Step-Down Single-Switch DC-DC Converter

วณกร คำบุญ และ สุदारัตน์ ขวัญอ่อน*

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และกรควบคุม
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี *email: sudarat_kh@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโครงสร้างใหม่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง ซึ่งมีอัตราลดทอนแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำ เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าสูง ซึ่งวงจรที่พัฒนาขึ้นจะใช้สวิทช์กำลังเพียงตัวเดียวเท่านั้น ในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้น และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราลดทอนแรงดันกับค่าวัฏจักรหน้าที่ ผลการจำลองสถานการณ์ได้แสดงประสิทธิภาพของวงจรลดทอนแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้จากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นได้อินยืนยันสมรรถนะของวงจรที่พัฒนาขึ้นในการลดทอนแรงดันได้สูง

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดัน อัตราการลดทอนแรงดันสูง สวิตช์เดียว

Abstract

This paper proposes a new topology of a high step-down dc-dc converter with a conversion ratio of approximately 20 times for low-output high-input voltage system applications. This proposed converter employs only one single switch. In this paper, the operating principle of the proposed converter topology is analyzed. The relationship between the step-down voltage ratio and the duty cycle is presented. The simulation results are shown to demonstrate the effectiveness of the proposed high step-down single-switch dc-dc converter. In addition, the experimental results obtained from the laboratory phototype are shown to confirm the performance of the proposed high step-down single-switch dc-dc converter.

Keywords: step-down dc-dc converter, high step-down ratio, single switch

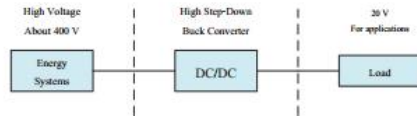
1. บทนำ

วงจรลดทอนแรงดันแบบบัค (buck converter) เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้ต่ำกว่าแรงดันอินพุต เป็นวงจรที่นิยมนำมาใช้งานใน

ระบบที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าต่ำ ทั้งนี้วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคก็ยังคงมีข้อจำกัดเมื่อนำไปใช้งานที่ต้องการการลดทอนระดับแรงดันสูง เนื่องจากวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบบัคก็มีอัตราลดทอนแรงดันที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นหากต้องการลดทอนระดับแรงดันได้สูง จึงจำเป็นต้องนำวงจรบัคหลายๆ ชุดมาต่ออนุกรมกันหลายๆ ชั้น ทำให้ต้องใช้สวิทช์และอุปกรณ์อื่นๆ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังสูญเสียในวงจรเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง

ด้วยเหตุดังกล่าวข้างต้นจึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดทอนระดับแรงดันขึ้นใหม่ เพื่อสามารถลดทอนระดับแรงดันในอัตราที่สูงตามต้องการได้ ทั้งนี้ในการทบทวนงานวิจัยในอดีต พบว่าสามารถแบ่งวงจรลดทอนระดับแรงดันได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบแยกกราวด์ (Isolated type) และแบบไม่แยกกราวด์ (Non-isolated type) โดยแบบแยกกราวด์จำเป็นต้องใช้หม้อแปลง เพื่อแยกกราวด์ระหว่างฝั่งแรงดันสูงและฝั่งแรงดันต่ำ โดยหม้อแปลงจะมีอัตราพันขดลวดที่สูงมาก ซึ่งความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage inductance) และตัวเก็บประจุแบบแฝง (Parasitic capacitance) ที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง จะส่งผลให้เกิดการพุ่งเกิน (Spike) ของแรงดันและกระแสในวงจร ส่งผลให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบลดลง รวมทั้งอาจทำให้วงจรได้รับความเสียหาย [1] ในขณะที่แบบไม่แยกกราวด์ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานของวงจรสูงกว่าแบบแยกกราวด์ ดังนั้นในการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดทอนระดับแรงดันที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูง จะอาศัยโครงสร้างของวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไม่แยกกราวด์

โครงสร้างระบบของงานวิจัยเพื่อพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดทอนระดับแรงดันแสดงดังรูปที่ 1 ทั้งนี้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นสามารถลดทอนระดับแรงดันอินพุตสูงเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่ต่ำกว่าประมาณ 20 เท่า ซึ่งอาจนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำๆ [2] หรือการเก็บสะสมพลังงานในแบตเตอรี่

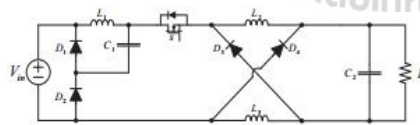


รูปที่ 1 โครงสร้างระบบการแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ต้องการอัตราการลดทอนแรงดันสูง

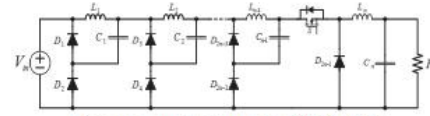
ในบทความนี้ ส่วนแรกจะนำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่กระแสดังกล่าวเป็นกระแสแบบลดทอนแรงดันที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีการอัตราการลดทอนแรงดันที่สูง โดยใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวเท่านั้น ในส่วนถัดมาจะเป็นการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นในแต่ละโหมดการทำงานของสวิตช์กำลัง จากนั้นจะเป็นการจำลองสถานการณ์ของวงจรที่พัฒนาขึ้นในการลดทอนระดับแรงดันรวมทั้งทำการเปรียบเทียบความสามารถในการลดทอนระดับแรงดันของวงจรที่พัฒนาขึ้นกับวงจรที่ปรากฏมาแล้วในงานวิจัยในอดีต จากนั้นเป็นการทดสอบผลจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น และส่วนสุดท้ายจะเป็นการสรุป

2. โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

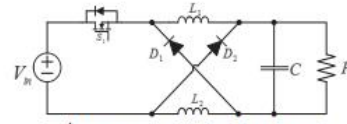
โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่กระแสดังกล่าวเป็นกระแสแบบลดทอนแรงดันที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยสวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว โดยทำงานร่วมกับไดโอดตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ เพื่อสามารถลดระดับแรงดันอินพุตจนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ ซึ่งวงจรที่พัฒนาขึ้นเป็นการผสมผสานการทำงานร่วมกันของวงจรสำคัญสองส่วน คือ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบแคสเคดที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (Cascade buck converter with a single active switch) [3] และวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ (Diode-assisted buck converter) [4] ดังแสดงโครงสร้างของวงจรดังกล่าวในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ โดยวงจรทั้งสองนี้มีการลดทอนแรงดันที่ยังไม่สูงมากพอตามต้องการ



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่กระแสดังกล่าวเป็นกระแสที่มีการลดทอนแรงดันสูง



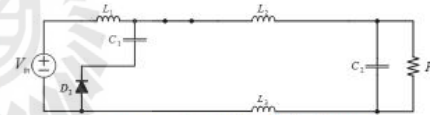
รูปที่ 3 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบแคสเคดที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว



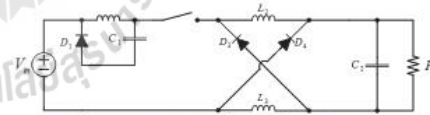
รูปที่ 4 วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหลือ

3. หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่กระแสดังกล่าวเป็นกระแสแบบลดทอนแรงดันที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2 จะพิจารณาการทำงานในช่วงที่กระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) เท่านั้น สามารถพิจารณาช่วงการทำงานของวงจรได้สองโหมด ได้แก่ โหมดที่สวิตช์นำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกสวิตช์นำกระแสจะสะสมพลังงานที่ได้รับมาจากแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต ต่อมาตัวเก็บประจุจะได้รับภาระอัดประจุ และมีเพียง D_2 เท่านั้นที่นำกระแส ส่วนไดโอดตัวอื่นที่เหลือไม่นำกระแส ส่วนโหมดที่สวิตช์ไม่นำกระแส แสดงได้ดังรูปที่ 6 พบว่าสวิตช์นำกระแส L_1 , L_2 และ L_3 จะคายพลังงานไว้ในวงจรนำไดโอด D_1 , D_3 และ D_4 ตามลำดับ



รูปที่ 5 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เมื่อสวิตช์นำกระแส



รูปที่ 6 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

จากรูปที่ 5 ได้ความสัมพันธ์ของ L_1 , L_2 และ L_3 ดังสมการ (1) และ (2)

$$L_1; \quad \Delta I = \frac{t_{on}(V_{in} - V_{C1})}{L} \quad (1)$$

$$L_2, L_3; \quad \Delta I = \frac{t_{on}(V_{C1} - V_O)}{2L} \quad (2)$$

จากรูปที่ 6 ได้ความสัมพันธ์ของ L_1 , L_2 และ L_3 ดังสมการ (3) และ (4)

$$L_1; \quad \Delta I = \frac{t_{off}V_{C1}}{L} \quad (3)$$

$$L_2, L_3; \quad \Delta I = \frac{t_{off}V_O}{L} \quad (4)$$

เมื่อ t_{on} คือ ช่วงเวลาที่สวิชต์นำกระแส และ t_{off} คือ ช่วงเวลาที่สวิชต์ไม่นำกระแส

จากสมการที่ (1) ถึง (4) จะได้อัตราการขยายแรงดัน (M) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle: D) ดังสมการ (5) โดยที่อัตราการลดทอนแรงดันจะเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราการขยายแรงดัน

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{(2-D)^2} \quad (5)$$

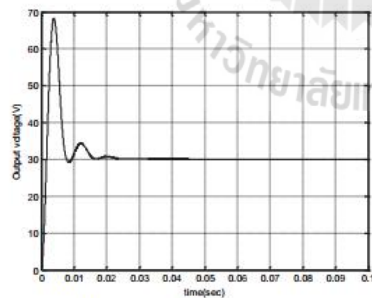
4. ผลการจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดทอนแรงดันที่พัฒนาขึ้น จะอาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วยเพื่อแสดงประสิทธิผลของวงจรในการลดทอนแรงดัน ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ต่างๆในการจำลองสถานการณ์

ความถี่สวิชต์	$f_s = 10 \text{ kHz}$
ตัวเก็บประจุ	$C_1, C_2 = 125 \text{ }\mu\text{F}$
ตัวเหนี่ยวนำ	$L_1, L_2 \text{ and } L_3 = 15 \text{ mH}$
โหลดต้านทาน	$R = 100 \text{ }\Omega$

โดยในขั้นต้นนี้จะทำการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อให้ค่าวัฏจักรหน้าที่เท่ากับ 0.25 และแรงดันอินพุตเท่ากับ 400 โวลต์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีการทู่ทึงกันในช่วงสถานะชั่วครู่ เนื่องจากยังมีใช้ตัวควบคุมโวลต์ แต่ในสถานะอยู่ตัวแรงดันเอาต์พุตคงที่ประมาณ 30 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องใกล้เคียงกับแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ (5)



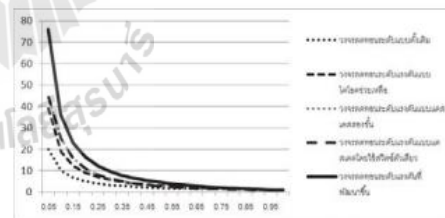
รูปที่ 7 แรงดันเอาต์พุตเมื่อ $D=0.25$ และ $V_{in}=400\text{V}$

จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ด้วยเงื่อนไขเดียวกันข้างต้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันในโครงสร้างแบบต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบอัตราการลดทอนแรงดัน และประสิทธิภาพ รวมถึงจำนวนอุปกรณ์ทั้งหมดในวงจร ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า วงจรลดทอนแรงดันแบบดั้งเดิมสามารถลดทอนแรงดันได้ไม่มาก แต่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากวงจรดังกล่าวมีเพียงสวิชต์และไดโอดอย่างละหนึ่งตัว ที่ส่งผลกับกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ดังนั้นเพื่อให้ได้อัตราการลดทอนแรงดันที่สูงขึ้น จำเป็นต้องนำวงจรลดทอนแรงดันแบบดั้งเดิมมาต่อแคสเคดกัน ส่งผลให้จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพลดลง ในขณะที่วงจรที่พัฒนาขึ้นมีอัตราการลดทอนแรงดันและมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าแบบการต่อแบบแคสเคด

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบอัตราการลดทอนแรงดันของวงจรลดทอนแรงดันในรูปแบบต่างๆ

วงจรลดทอนแรงดัน	จำนวนอุปกรณ์	อัตราการลดทอนแรงดัน(เท่า)	แรงดันเอาต์พุต (V)	ค่าประสิทธิภาพ (%)
แบบดั้งเดิม	4	4	103.25	92.70
แบบไดโอดช่วยเอาต์	6	7	59.05	83.82
แบบแคสเคดสองชั้น	8	15	26.25	36.26
แบบแคสเคดสองชั้นโดยใช้สวิชต์ตัวเดียว	7	14	28.32	50.05
วงจรที่พัฒนาขึ้น	9	14	29.93	68.86

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการลดทอนแรงดันที่ได้จากวงจรลดทอนแรงดันในโครงสร้างแบบต่างๆ เมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่เปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่าวงจรลดทอนแรงดันที่พัฒนาขึ้นมีอัตราการลดทอนแรงดันที่สูง

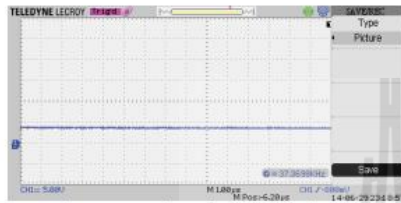


รูปที่ 8 การเปรียบเทียบอัตราการลดทอนแรงดันของวงจรแบบต่างๆ

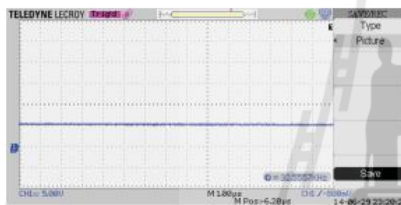
5. ผลทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนแรงดันที่พัฒนาขึ้นถูกสร้างเป็นชุดทดสอบด้วยค่าพารามิเตอร์ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้บอร์ด DSP ตระกูล TMS320F28335 เข้าช่วยในการกำหนดสัญญาณ

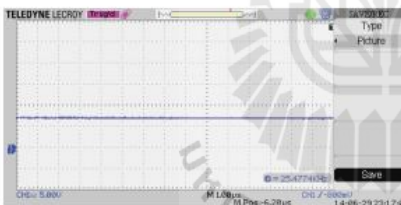
เพื่อให้กับสวิตช์กำลังที่ค่าวัฏจักรหนึ่งทีค่าต่างๆ ตามต้องการ การทดสอบการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นนั้น ในขั้นต้นจะดำเนินการพิจารณาความสามารถในการลดทอนระดับแรงดันที่ค่าวัฏจักรหนึ่งทีค่าต่างๆ โดยทดสอบที่ระดับแรงดันอินพุตเท่ากับ 100 โวลต์ เมื่อค่าวัฏจักรหนึ่งทีมีค่าเป็น 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 ผลการทดสอบที่สถานะอยู่ตัวแสดงได้ดังรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12 ตามลำดับ



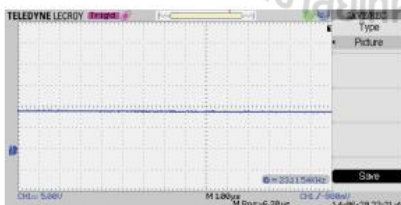
รูปที่ 9 ผลทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อค่าวัฏจักรหนึ่งทีเป็น 0.10



รูปที่ 10 ผลทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อค่าวัฏจักรหนึ่งทีเป็น 0.15



รูปที่ 11 ผลทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อค่าวัฏจักรหนึ่งทีเป็น 0.2



รูปที่ 12 ผลทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อค่าวัฏจักรหนึ่งทีเป็น 0.25

ตารางที่ 3 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบและจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ และอัตราการลดทอนแรงดันที่ค่าวัฏจักรหนึ่งทีค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่าวงจรที่พัฒนาขึ้นสามารถลดทอนระดับแรงดันได้สูง และได้ผลการทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์ที่สอดคล้องกัน

ตารางที่ 3 ผลทดสอบจากชุดทดสอบของวงจรที่พัฒนาขึ้น

ค่าวัฏจักรหนึ่งที	แรงดันเอาต์พุต (ทดสอบ) (โวลต์)	แรงดันเอาต์พุต (จำลองผล) (โวลต์)	อัตราการลดทอนแรงดัน (เท่า)
0.10	3.87	3.3	27
0.15	5.64	5.4	19
0.20	7.45	7.5	14
0.25	9.37	9.8	11

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอโครงสร้างใหม่ที่พัฒนาขึ้นของวงจรแปลงต้นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดียว เพื่อสามารถนำไปใช้งานที่ต้องการลดทอนระดับแรงดันสูงๆ ทั้งนี้ได้อธิบายหลักการทำงานของวงจร รวมถึงความสัมพันธ์ของอัตราการลดทอนแรงดันกับค่าวัฏจักรหนึ่งที เพื่อลดทอนระดับแรงดันอินพุตที่สูงขึ้นได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าน้อยลง จากผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบของวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อกำหนดค่าวัฏจักรหนึ่งทีค่าต่างๆ พบว่า วงจรที่พัฒนาขึ้นสามารถลดทอนระดับแรงดันได้สูงเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhou, L.-W. , Zhu, B.-X. and Luo Q.-M., 2012. "High step-up converter with capacity of multiple input", in Proc. IEEE Power Electronics, pp. 524- 531.
- [2] Pelan, O. , Muntean, N. , Cornea, O. and Blaabjerg, F., 2013. "High voltage conversion ratio, switched C & L cells, step-down DC-DC converter", in Proc. IEEE Power Electronics, pp. 5580- 5585.
- [3] Jiann-Jong Chen , Bo-Han Hwang , Che-Min Kung , Wei-Yu Tai and Yuh-Shyan Hwang, 2010. "A New Single-Inductor Quadratic Buck Converter using Average-Current-Mode Control without Slope-Compensation", in Proc. IEEE Power Electronics, pp. 1082- 1087.
- [4] Rezaei, I. and Akhbari, M., 2011. "Transformerless hybrid buck converter with wide conversion ratio" , in Proc. IEEE Power Electronics, pp. 599- 603.
- [5] Tsang, K.M. and Chan, W.L., 2005. "Cascade controller for DC/DC buck converter", in Proc. IEEE Power Electronics, pp. 827- 831.

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดี่ยวที่ลดทอนแรงดันได้สูงและวิธีการควบคุม A High Step-Down Single-Switch DC-DC Converter with Its Control Strategy

รณกร คำบุญ และ สุดารัตน์ ขวัญอ่อน*

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี *email: sudarat_kh@sut.ac.th

PE.09

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันได้สูงร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอเพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ ซึ่งสามารถลดทอนแรงดันสูงถึงประมาณ 20 เท่า สำหรับประยุกต์ในระบบที่มีแรงดันอินพุตสูงและแรงดันเอาต์พุตต่ำ วงจรที่พัฒนาขึ้นใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวเท่านั้นจึงจำเป็นต้องให้สวิตช์ทำงานอย่างเหมาะสมเพื่อลดระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ ในบทความนี้ได้อธิบายการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรที่พัฒนาขึ้น และทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นด้วยตัวควบคุมที่ได้ออกแบบขึ้น ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น รวมทั้งแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการด้วยตัวควบคุมที่ได้ออกแบบขึ้น

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบลดทอนระดับแรงดัน อัตราการลดทอนแรงดันสูง สวิตช์เดี่ยว ตัวควบคุมชนิดพีไอ

Abstract

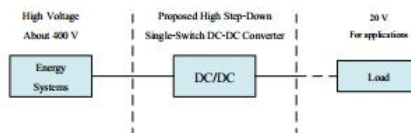
This paper proposes a new topology of a high step-down dc-dc converter with its control strategy using the design of the PI controller in order to achieve the desired output voltage level. The proposed converter with an appropriate control technique can generate the voltage conversion ratio of approximately 20 times for low-output high-input voltage system applications. Since the proposed converter employs only one single switch. In order to obtain the desired output voltage, this switch need to be operate properly. In this paper, the design of the PI control for the proposed converter is described and a laboratory prototype of the developed with the designed controller is tested. The simulation and experimental results are shown to demonstrate the effective of the proposed high step-down single-switch dc-dc converter with its control strategy. The results show that the desired output voltage can be achieve using the desired proper controller.

Keywords: step-down dc-dc converter, high step-down ratio, single switch, PI controller

1. บทนำ

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดี่ยวที่มีการลดทอนระดับแรงดันได้สูงที่พัฒนาขึ้นนั้น เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้ต่ำกว่าแรงดันอินพุต ซึ่งมีอัตราการลดทอนแรงดันได้สูงประมาณ 20 เท่า เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบที่มีแรงดันอินพุตสูงแต่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำ โดยพิจารณาแหล่งจ่ายอินพุตแรงดันสูง อยู่ที่ประมาณ 400 โวลต์ โดยต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำประมาณ 20 โวลต์ ดังนั้นจึงมีโครงสร้างระบบแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะนำไปประยุกต์ในงานที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตต่ำ [1] หรือการเก็บสะสมพลังงานในแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตาม การควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ จำเป็นต้องควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นอย่างเหมาะสม เพื่อสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ แม้ว่าสถานการณ์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นอาจเปลี่ยนแปลงไป เช่น เมื่อแรงดันอินพุตของวงจรแตกต่างกันไปจากเดิม เป็นต้น

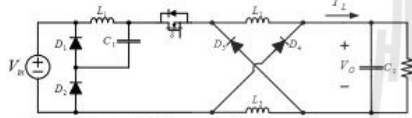
ในบทความนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีการอัตราการลดทอนแรงดันที่สูง โดยใช้สวิตช์กำลังเพียงตัวเดียวเท่านั้น จากนั้นได้อธิบายวิธีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรดังกล่าว โดยอาศัยการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอเข้าช่วยสำหรับรูปการควบคุมกระแสและรูปการควบคุมแรงดันของวงจรที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตในระดับที่ต้องการ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้แล้ว นอกจากนี้ยังได้สร้างชุดทดสอบของวงจรที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอ โดยใช้บอร์ด DSP เข้าช่วยในกระบวนการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ทั้งผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบการแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ต้องการอัตราการลดทอนแรงดันสูง

2. วงจรแปลงกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

วงจรแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบลดระดับแรงดันที่มีการลดทอนแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยสวิตช์กำลังเพียงตัวเดียว โดยทำงานร่วมกับไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ เพื่อสามารถลดระดับแรงดันอินพุตจนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการ ซึ่งวงจรที่พัฒนาขึ้นเป็นการผสมผสานการทำงานร่วมกันของวงจรสวิตช์สองส่วน คือ วงจรลดทอนระดับแรงดันแบบแคสเคดที่ใช้สวิตช์ตัวเดียว (Cascade buck converter with a single active switch) [2] และวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบไดโอดช่วยเหนี่ยวนำ (Diode-assisted buck converter) [3] โดยวงจรทั้งสองนี้ มีอัตราการลดทอนแรงดันที่อิงไม่สูงมากพอสมควร



รูปที่ 2 วงจรแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูง

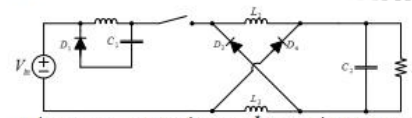
สำหรับหลักการการทำงานของวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยแบ่งเป็น 2 โหมดการทำงานดังนี้

โหมด 1 : สวิตช์ S ปิดวงจร วงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 3 เมื่อสวิตช์ S เริ่มนำกระแส ตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 และ L_3 จะเก็บพลังงานที่ได้จากแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in} ไดโอด D_2 จะนำกระแส ขณะที่ไดโอด D_3 และ D_4 จะไม่ทำงาน ส่งผลให้ตัวเก็บประจุ C_1 ปลายประจุ และตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 จะเก็บพลังงาน

โหมด 2 : สวิตช์ S เปิดวงจร วงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อสวิตช์ S หยุดนำกระแส ไดโอด D_1 จะทำงาน ส่วนไดโอด D_2 และ D_3 จะทำงาน ดังนั้นภายใต้โหมดการทำงานนี้ตัวเก็บประจุ C_1 จะอยู่ในช่วงเก็บพลังงาน และตัวเหนี่ยวนำ L_2 และ L_3 จะอยู่ในช่วงคายพลังงาน



รูปที่ 3 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่ ขณะที่สวิตช์นำกระแส



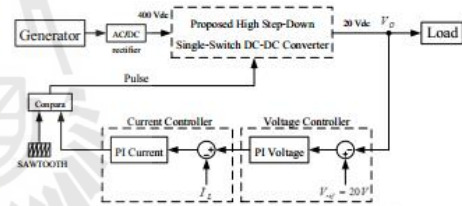
รูปที่ 4 วงจรลดทอนระดับแรงดันที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่ ขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถหาอัตราลดทอนแรงดันได้ดังสมการ

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

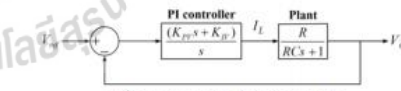
3. การออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอโอ

เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ เมื่อพิจารณาให้แรงดันอินพุตมีค่าคงที่ ดังนั้นหากให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการจำเป็นต้องควบคุมให้สวิตช์ทำงานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสม โดยในบทความนี้คือการควบคุมแรงดันเอาต์พุตคงที่และแสดงที่ได้ดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า แรงดันอินพุตกระแสสลับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผ่านวงจรเรียงกระแสจนกระทั่งได้แรงดันกระแสตรง 400 โวลต์ เพื่อทำหน้าที่เป็นอินพุตแรงดันสูงให้แก่วงจรแปลงกำลังไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสำหรับลดทอนระดับแรงดันลงจนกระทั่งได้แรงดันเอาต์พุตอยู่ที่ประมาณ 20 โวลต์ โดยจะอาศัยตัวควบคุมชนิดพีไอโอสำหรับอุปการะและอุปการะแรงดันเพื่อให้สัญญาณควบคุมในการเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่สวิตช์ และได้สัญญาณพัลส์ส่งไปยังสวิตช์เพื่อให้งานด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสม จนกระทั่งได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการ ทั้งนี้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรที่พัฒนาขึ้น จะอาศัยแนวทางการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรลดทอนระดับแรงดันแบบดังเดิม [4]



รูปที่ 5 โครงสร้างการควบคุมของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

3.1 การควบคุมอุปรงดัน



รูปที่ 6 การควบคุมอุปรงดันด้วยตัวควบคุมพีไอโอ

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างการควบคุมแรงดันโดยใช้ตัวควบคุมชนิดพีไอโอ สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอโอได้สมการ (2)

$$\frac{V_o}{V_{ref}} = \frac{K_{PV}Rs + K_{PI}R}{s^2 + \left(1 + \frac{K_{PV}R}{RC}\right)s + \frac{K_{PI}R}{RC}} \quad (2)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PV} และ K_{IV} จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (3)

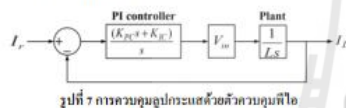
$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

โดยที่ความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ $\omega_n = \frac{1}{RC}$ rad/s และกำหนดให้อัตราส่วนการหน่วงของอุปแรงดัน $\zeta = 1$ เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการที่ (2) และ (3) จะได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมที่ใช้ในอุปแรงดัน ดังสมการที่ (4) และ (5)

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

$$K_{IV} = \omega_n^2 C \quad (5)$$

3.2 การควบคุมอุปกระแส



รูปที่ 7 การควบคุมอุปกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ

รูปที่ 7 แสดงแผนภาพบล็อกของอุปการควบคุมกระแสโดยอาศัยตัวควบคุมชนิดพีไอ ซึ่งสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด เพื่อนำไปออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดังสมการ (6)

$$\frac{I_L}{I_r} = \frac{K_{PC}V_{in}s + K_{IV}V_{in}}{s^2 + \left(\frac{K_{PC}V_{in}}{L}\right)s + \frac{K_{IV}V_{in}}{L}} \quad (6)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{PC} และ K_{IV} จะอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์เช่นเดียวกับอุปแรงดัน แต่ค่าความถี่ธรรมชาติในอุปกระแสจะสูงกว่าอุปแรงดันประมาณ 100 เท่า จะได้ว่าความถี่ธรรมชาติมีค่าเท่ากับ $\omega_n = 100\omega_n$ rad/s และอัตราส่วนการหน่วงของอุปกระแส $\zeta = 1$ เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการที่ (3) และ (6) จะได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมชนิดพีไอที่ใช้ในอุปกระแส ดังสมการที่ (7) และ (8)

$$K_{PC} = \frac{2\zeta\omega_n L}{V_{in}} \quad (7)$$

$$K_{IV} = \frac{\omega_n^2 L}{V_{in}} \quad (8)$$

ในการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอสำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟที่กระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดียวจะพิจารณาให้ $V_{in} = 400$ V, $L = 15$ mH, $C = C2 = 125$ μ F และตัวต้านทาน $R = 100$ Ω จะได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมชนิดพีไอ ดังนี้ $K_{PV} = 0.01$, $K_{IV} = 0.8$, $K_{PC} = 0.6$ และ $K_{IC} = 2400$

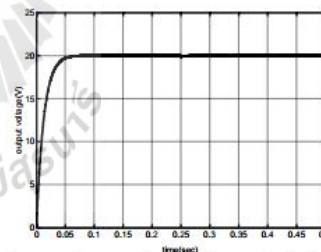
4. ผลการจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟที่กระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้น จะอาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วยเพื่อแสดงประสิทธิภาพของวงจรร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอดังที่ได้ออกแบบไว้สำหรับลดระดับแรงดันเอาต์พุต โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณอิเล็กทรอนิกส์ที่ปรากฏในโครงสร้างของวงจรที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ต่างๆในการจำลองสถานการณ์

ความถี่สวิตช์	$f_s = 20$ kHz
ตัวเก็บประจุ	$C_1, C_2 = 125$ μ F
ตัวเหนี่ยวนำ	L_1, L_2 and $L_3 = 15$ mH
โหลดตัวต้านทาน	$R = 100$ Ω

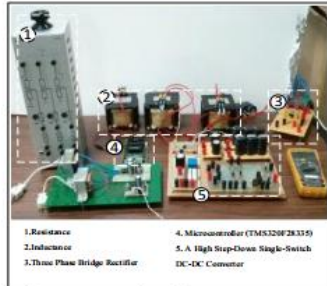
ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นเมื่อมีตัวควบคุมชนิดพีไอเข้าช่วยในการลดระดับแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างสูง ให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่อยู่ที่ 20 โวลต์ แสดงได้ดังรูปที่ 8 โดยในช่วงต้นของการทำงานกำหนดให้แรงดันอินพุตของวงจรเท่ากับ 400 โวลต์ จากนั้นที่เวลา 0.25 วินาที ได้ทำการลดระดับแรงดันอินพุตอย่างทันทีทันใด เพื่อพิจารณาสมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบขึ้นในการควบคุมแรงดันให้คงที่ 20 โวลต์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า สามารถควบคุมให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตตามต้องการได้โดยไม่เกิดการฟุ้งของแรงดัน แม้ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอินพุตของวงจร แรงดันเอาต์พุตยังคงกลับมากังที่ระดับ 20 โวลต์ ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ พบว่า วงจรที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมที่ออกแบบไว้มีอัตราการลดทอนแรงดันได้สูงถึง 20 เท่า



รูปที่ 8 แรงดันเอาต์พุตของวงจรที่พัฒนาขึ้น เมื่อควบคุมให้คงที่อยู่ที่ 20 โวลต์

5. ผลทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น

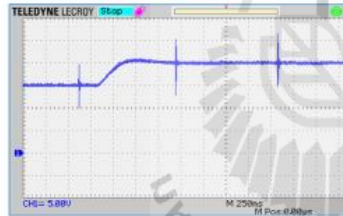
วงจรแปลงผันกำลังไฟที่แบบสวิตช์เดียวที่พัฒนาขึ้นถูกสร้างเป็นชุดทดสอบด้วยค่าพารามิเตอร์ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้บอร์ด DSP ตระกูล TMS320F28335 เข้าช่วยในการกำเนิดสัญญาณพัลส์ให้กับสวิตช์กำลังที่ตัวจุกหนันที่ที่เหมาะสมสัมพันธ์กับตัวควบคุมชนิดพีไอที่ได้ออกแบบไว้ ชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอ

การทดสอบการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมที่ออกแบบไว้ในเบื้องต้นจะพิจารณาแรงดันอินพุต 300 โวลต์ เพื่อทำการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ 15 โวลต์ จากนั้นเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตที่ต้องการเป็น 20 โวลต์ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 11 พบว่าสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ โดยมีอัตราลดทอนแรงดันสูงถึงประมาณ 20 เท่า

จากนั้นทำการเปลี่ยนระดับแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ จาก 20 โวลต์ เป็น 15 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่ายังคงควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการและไม่มีการฟุ้งเกินของแรงดัน เมื่อสถานการณ์ในการควบคุมการทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งตรงตามเงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุมดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว

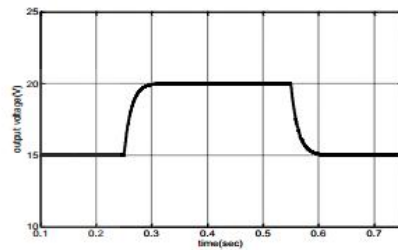


รูปที่ 11 ผลทดสอบเมื่อระดับแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการเปลี่ยนจาก 15 โวลต์ เป็น 20 โวลต์



รูปที่ 12 ผลทดสอบเมื่อระดับแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการเปลี่ยนจาก 20 โวลต์ เป็น 15 โวลต์

รูปที่ 13 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ เมื่อระดับแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการเปลี่ยนจาก 15 โวลต์ โดยเพิ่มเป็น 20 โวลต์ และลดระดับลงมาที่ 15 โวลต์ พบว่า ผลการทดสอบและผลการจำลองสถานการณ์จะสอดคล้องกันภายใต้การทำงานของวงจรในสถานการณ์เดียวกัน วงจรแปลงผันกำลังไฟที่กระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบสวิตช์เดี่ยวร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอที่ได้ออกแบบขึ้นยังสามารถลดทอนระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ



รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อระดับแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนจาก 15 โวลต์ เป็น 20 โวลต์ และ 15 โวลต์

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟที่กระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีการลดทอนแรงดันสูงแบบสวิตช์เดี่ยวร่วมกับวิธีการควบคุมแรงดันเอาต์พุต เพื่อสามารถประยุกต์ใช้ในระบบที่มีแรงดันอินพุตสูงและแรงดันเอาต์พุตต่ำ ทั้งนี้ได้อธิบายการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอที่จะใช้การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจร ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบชุดทดสอบที่สร้างขึ้น แสดงให้เห็นว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟแบบสวิตช์เดี่ยวที่พัฒนาขึ้นร่วมกับตัวควบคุมชนิดพีไอ สามารถควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ โดยมีอัตราลดทอนแรงดันที่สูงถึงประมาณ 20 เท่า

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pelan, O., Muntean, N., Comea, O. and Blaabjerg, F., 2013. "High voltage conversion ratio, switched C & L cells, step-down DC-DC converter", IEEE Power Electronics, pp. 5580- 5585.
- [2] Jiann-Jong Chen , Bo-Han Hwang , Che-Min Kung , Wei-Yu Tai and Yuh-Shyan Hwang, 2010. "A New Single-Inductor Quadratic Buck Converter using Average-Current-Mode Control without Slope-Compensation", IEEE Power Electronics, pp. 1082- 1087.
- [3] Rezaei, I and Akhbari, M., 2011. "Transformerless hybrid buck converter with wide conversion ratio", IEEE Power Electronics, pp.599- 603.
- [4] Tsang, K.M. and Chan, W.L., 2005. "Cascade controller for DC/DC buck converter", IEEE Power Electronics, pp. 827- 831.



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Procedia Computer Science 86 (2016) 349 – 352

Procedia
Computer Science

2016 International Electrical Engineering Congress, IEECON2016, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand

A New High Step-Down DC-DC Converter for Renewable Energy System Applications

Ronnakorn Khambuya^a, Sudarat Khwan-on^{a*}

^aSchool of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

Abstract

This paper proposes a new topology of a high step-down dc-dc converter with a conversion ratio of approximately 20 times for high-input and low-output voltage applications such as renewable system applications. This proposed converter employs only one single switch with low control complexity. In this paper, the converter configuration is presented and its operating principle under continuous conduction mode (CCM) is described. The relationship between the step-down voltage ratio and the duty cycle is also presented in order to illustrate the performance of the proposed converter. In addition, the laboratory phototype of the proposed converter is implemented. The simulation and experimental results are shown to demonstrate the effectiveness of the proposed high step-down single-switch dc-dc converter.

© 2016 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the Organizing Committee of IEECON2016

Keywords: DC-DC converter; High step-down conversion ratio; Renewable energy; Single switch

1. Introduction

Due to the energy shortage and the environmental problems, the renewable energy sources, such as photovoltaic (PV) arrays and wind turbine generators, have received increasingly attentions [1]. The electric power generated from these renewable energy sources can be connected to the grid through the proper power converters. In addition, the stand-alone power system based on renewable energy and storage devices is an alternative solution to provide

* Corresponding author. Tel.: +66-44-224-400; fax: +66-44-224-601.
E-mail address: sudarat_kh@sut.ac.th

electricity for the remote areas [2]. The stand-alone renewable energy system typically requires the battery for energy storage to supply the load power when the renewable energy sources are not available due to the climatic operating conditions [3]. For storing energy in the battery the conventional buck converter is commonly used because of its simple structure and low control complexity. The battery output voltage is lower than the input voltage generated from such renewable energy sources. However, for the high-input and low-output voltage systems the conventional buck converter needs to operate under the extreme duty cycle to achieve the desired output voltage with high step-down voltage conversion ratio. Consequently, the active power device suffers from the voltage and current stress and the power loss of the buck converter increases significantly. As a result, the converter efficiency is deteriorated.

To overcome the limitation of the conventional buck converter for the high-input and low-output voltage applications, several step-down dc-dc converter topologies have been proposed to achieve the high step-down voltage conversion ratio. The n-stage cascaded buck converter configurations are employed to obtain the higher voltage gains compared with the conventional buck converter. However, the use of the n-stage buck converter needs more active power switches and components including the more gate drive circuits, which not only increase the cost and the power losses of the converter but also decrease the efficiency [4]. In addition, the coupled inductor is introduced to the step-down dc-dc converter to provide a high voltage conversion ratio. Unfortunately, the energy stored in the leakage inductor of the coupled inductor causes high voltage spikes on the power switches, thereby reducing the corresponding efficiency [5]. The isolated step-down dc-dc converter with a transformer can provide the high voltage-conversion ratio by properly adjusting the turn ratio of the isolated transformer [6]. However, the converter efficiency is relatively low because of its voltage stress and leakage inductance energy. In addition, the cost and the size of the converter increase due to the added transformer.

In this paper the high step-down single-switch dc-dc converter is proposed for high-input and low-output voltage applications such as renewable energy systems. The proposed converter provides a much higher step-down voltage conversion ratio compared with the conventional buck converter without adopting the extremely short duty cycle. The proposed converter topology is presented in the next section. The operating principle of the proposed converter under the continuous conduction mode is described. A 100-W prototype of the proposed converter was implemented. Simulation and experimental results are shown in order to illustrate the effectiveness of the proposed converter.

2. High Step-Down DC-DC Converter Topology

The proposed high step-down dc-dc converter configuration is shown in Fig. 1. This proposed topology uses only one active power switch to increase the step-down conversion ratio without employing an extremely low duty cycle. As can be seen in Fig. 1, the proposed converter consists of two capacitors, three inductors and four diodes. The proposed converter topology can be derived from the combination of a cascaded quadratic buck converter and a diode-assisted buck converter. By integrating both converters, the high step-down conversion ratio can be achieved.

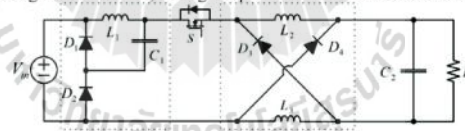


Fig.1: The proposed high step-down dc-dc converter configuration

There is only one power switch located in the proposed converter topology. Therefore, the operating principle of the proposed converter can be basically classified into two operation modes; switch S is turned on and switch S is turned off, in one switching period. Detailed explanation of each operating mode is given as follows:

Mode 1: the power switch S is turned on. The identical inductors, L_1 , L_2 and L_3 , are linearly charged in series by the input voltage source V_{in} . The diode D_2 is forward biased whereas the diodes D_3 and D_4 are blocked. As a result, the capacitor C_1 is discharged and the inductors, L_2 and L_3 , are charged in series. In a charging phase, the inductor currents, i_{L1} , i_{L2} and i_{L3} increase linearly.

Mode 2: the power switch S is switched off. The diode D_1 is turned on simultaneously providing a path for the inductor current i_{L1} through the capacitor C_1 . The diodes D_3 and D_4 are turned on simultaneously, providing a path for the inductor currents, i_{L2} and i_{L3} , through the output capacitor, C_2 . All the inductor currents are linearly decreasing during the switching-off time. Thus, under this operating mode, the capacitor C_1 is in a charging phase and the inductors, L_2 and L_3 , are in a discharging phase.

In order to consider the performance of the proposed high step-down dc-dc converter, the voltage step-down conversion ratio (M) under the steady-state operating condition is analyzed. By applying volt-second balance on the inductors, L_1 , L_2 and L_3 , the voltage step-down conversion ratio M , which D is the switch duty cycle, can be expressed as

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

The voltage step-down ratio of the proposed converter is compared with that of the conventional buck converter, quadratic buck converter and diode-assisted buck converter, as shown in Fig. 2. It is clear that the proposed converter has higher step-down ratio than the other step-down converters over a range of the duty cycle.

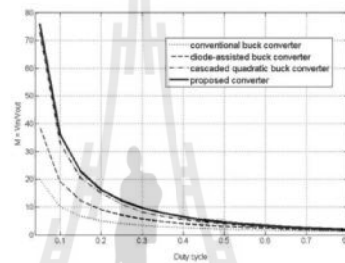


Fig. 2 The step-down conversion ratios of the proposed converter

3. Experimental and Simulation Results

In order to verify the effectiveness of the proposed high step-down dc-dc converter the simulation model has been developed using MATLAB SIMULINK. In addition, a 100-W prototype of the proposed high step-down converter, as shown in Fig. 3, was built in the laboratory to verify the analytical description and simulation results. The converter parameters constructed in Fig. 1 for both experimental setup and simulations are selected as L_1 , L_2 and $L_3 = 15\text{mH}$, C_1 and $C_2 = 180\mu\text{F}$ and $R = 100\Omega$. The power MOSFET, namely, IXFR32N80P, and ultrafast-recovery diodes, namely, MUR1560, are adopted. The switching frequency is chosen at 10 kHz. The Arduino UNO R3 microcontroller board, as shown in Fig. 3, is used to generate the switching signal to the power switch. For experimental setup the input of the converter is supplied by the single-phase diode rectifier generating the maximum voltage level of 400V to be considered as the high-voltage power source. The output voltage of the converter is the voltage across the load resistor, expecting much lower voltage level compared with the input voltage side.



Fig. 3 A 100-W prototype of the proposed converter and a microcontroller board

To validate the step-down conversion ratios of the proposed converter, simulation and experimental results are considered under different duty cycle operating conditions. However, the scale-down input voltage of 200V is employed in order to avoid the severe impacts on converter due to the large transient overvoltages in the open loop operating conditions. For future work the input voltage of 400V will be supplied to the proposed converter operating with the appropriate controller in order to obtain the desired level of the step-down output voltage.

Fig. 4 shows the experimental and simulation results in both transient and steady-state operations of the proposed converter with duty cycle of 0.15. The simulated output voltage is about 10 V while the experimental one is about 10.5 V. It is clear that the output voltages obtained from the experiment and simulation are in a good agreement, providing the step-down conversion ratio of approximately 20. In Fig. 5 the duty cycle of the power switch is 0.25. The tested- and simulated output voltages are about 16.5 V and 16.7 V, respectively. As it can be seen from the obtained results, the high step-down conversion ratios can be achieved from the proposed converter.

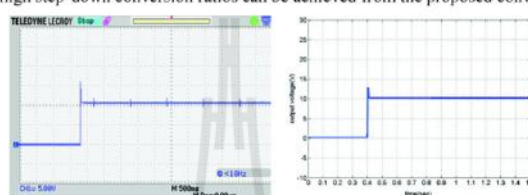


Fig. 4 Output voltage waveforms obtained from experiment and simulation when $D = 0.15$

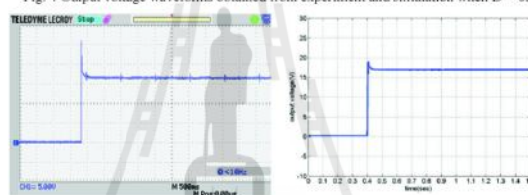


Fig. 5 Output voltage waveforms obtained from experiment and simulation when $D = 0.25$

4. Conclusion

This paper has presented a new topology of high step-down dc-dc converters for renewable energy applications, requiring high step-down conversion ratio. The proposed converter provides a high step-down conversion ratio by employing only one single power switch. The operating principle of the proposed converter during each topological mode has been described. The step-down voltage conversion ratio of the propose converter has been analyzed. The simulation and experimental results obtained from the prototype are in a good agreement, indicating that the proposed topology, with only one power switch employed, is suitable for high-input and low-output voltage applications.

References

- [1] K.-C., Tseng, C.-C. Huang and W.Y. Shih, A high step-up converter with a voltage multiplier module for a photovoltaic system. *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(6), pp. 3047-3057, 2013.
- [2] E. Ribeiro, A.J.M. Cardoso and C. Boccaletti, Fault-tolerant strategy for a photovoltaic dc-dc converter. *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(6), pp. 3008-3018, 2013.
- [3] N.M. Thao, T.V. Thang, S. M. Mohana, and J.-H. Park, Steady-state analysis of the buck converter for renewable energy systems. (*IPEMC*), pp. 2245-2249, 2012.
- [4] Y.T. Yau and K.I. Hwu, Ultra high step-down converter. (*ECCE-ASIA*), pp.3392-3396, 2014.
- [5] C.-T. Pan, C.-F. Chuang and C.-C. Chu, A novel transformerless interleaved high step-down conversion ratio dc-dc converter with low switch voltage stress. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 61(10), pp. 5290-5299, 2014.
- [6] U. Masatoshi, High step-down converter integrating switched capacitor converter and PWM synchronous buck converter. (*INTELEC*), pp.1-6, 2013.

ประวัติผู้เขียน

นายรณกร คำบุยา เกิดเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม พ.ศ. 2532 ที่อำเภอเมืองเลย จังหวัดเลย สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนเมืองเลย จังหวัดเลย ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนเลยพิทยาคม จังหวัดเลย และระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเลยพิทยาคม จังหวัดเลย ในปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2555 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะศึกษาระดับปริญญาโท ได้ปฏิบัติหน้าที่ดังนี้

1. เป็นผู้สอนรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการระบบควบคุม (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้ามูลฐาน (3) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 และ (4) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2
2. เป็นผู้สอนรายวิชาเขียนแบบวิศวกรรม (Engineering Graphics I) และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ข. ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุมอัตโนมัติ การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษาซี และการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์