

วงจรรีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราการผลิตแรงดันสูง
DC-DC CONVERTER WITH LARGE STEP-DOWN RATIO

จตุโชติ อุทัยเพชร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง
DC-DC CONVERTER WITH LARGE STEP-DOWN RATIO

จตุโชติ อุทัยเพชร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

DC-DC CONVERTER WITH LARGE STEP-DOWN RATIO

JUTHICHOT UTHIPETCH

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHATRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราการลดทอนแรงดันสูง
DC-DC CONVERTER WITH LARGE STEP-DOWN RATIO

ผู้จัดทำ นายจตุโชติ อุทัยเพชร 57010212


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณะนามสรณ์)

วงจรรีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราการผลิตทองแดงต้นสูง

โดย

นายจตุโชติ อุทัยเพชร 57010212

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณะนามุสรณ์

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิจัยวงจรถูกผลิตทองแดงต้นที่มีอัตราการผลิตทองแดงต้นสูง และออกแบบวงจรและสร้างแบบจำลองขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป โดยได้ศึกษาวงจร และ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำให้วงจรมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจากตำราต่างๆ รวมถึงปริญญานิพนธ์ และ วิทยานิพนธ์ของรุ่นพี่ปีก่อนรวมไปถึงงานวิจัยที่มีออกมา โดยได้ศึกษาจากวงจรรีซีคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นพื้นฐาน และได้วิเคราะห์เจาะลึกหาข้อดีข้อเสีย จากนั้นจึงได้เปรียบเทียบวิธีการทำให้วงจรมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นที่มีอัตราการผลิตทองแดงต้นสูง และมีค่าตัวชี้วัดที่อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม จากนั้นได้วิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ ของอุปกรณ์ จำลองการทำงานของวงจรเพื่อดูค่ากระแสและแรงดันต่างๆ ของแต่ละอุปกรณ์ และเป็นการตรวจสอบว่าค่าที่ได้จากการออกแบบมีความถูกต้องหรือไม่ และได้มีการจัดทำวงจรขึ้นมา และได้ตรวจสอบผลการดำเนินงานของวงจรเปรียบเทียบกับสมมติฐาน ที่ตั้งไว้กับผลการทดลองที่เกิดขึ้นว่าเป็นอย่างไรโดยอ้างอิงจากความรู้ทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ

DC-DC CONVERTER WITH LARGE STEP-DOWN RATIO

By

Mr.Juthichot Uthipetch 57010212

Advisor

Assoc. Prof. Dr. Chanin Bunlaksananusorn

Academic Year 2017

ABSTRACT

A DC-DC Converter with Large Step-down Ratio are more voltage-reducing than conventional converters. It is suitable for applications that need to be converted to lower voltages such as charging the battery to convert the voltage from the power supply to suit the application. The thesis studies the operating principle, dynamic modeling, and circuit design of the DC-DC Converter with Large Step-down Ratio, including the Tapped Inductor Buck converter (TIBC). Based on the obtained model, a feedback controller is designed to regulate the output voltage against the input voltage or load current change. The Simulation and prototype testing results confirm that the converters operate satisfactorily and meet the design specification.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณ์านุสรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ คณะผู้จัดทำโครงการนัฐศึกษาซึ่งในความอนุเคราะห์จากอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องในภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำ ให้ความอบอุ่นต่อกันเสมอมา

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้คณะผู้จัดทำโครงการสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำโครงการขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ผู้จัดทำ

นายจตุโชติ อุทัยเพชร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญปริญญาานิพนธ์	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 คอนเวอร์เตอร์พื้นฐาน	3
2.3 ข้อจำกัดในการแปลงแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	11
2.3.1 การวิเคราะห์ห้วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	12
บทที่ 3 การออกแบบวงจรภาคกำลังและวงจรควบคุม	20
3.1 บทนำ	20
3.2 สมการการออกแบบวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	20
3.3 การออกแบบวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	22
3.4 ผลการชิมูเลชันวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	24
3.5 การควบคุมแรงดันเอาต์พุต (Output Voltage Control)	28
3.6 การเลือกตัวควบคุมสำหรับวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	29
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	31
4.1 บทนำ	31
4.2 การทดสอบความสามารถในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต	31
4.3 การวัดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2	34
4.4 การวัดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D และกระแสไฟฟ้ามอสเฟต I_{sw}	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5 การวัดรูปสัญญาณตัวตีเซเคิลกระแสไฟฟ้าอินพุต I_{In} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o	40
4.6 การทดสอบวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันสวิทช์ V_{Sw} และแรงดันไดโอด V_D	43
4.7 การทดสอบประสิทธิภาพ	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	48
5.1 สรุป	48
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก	51

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้า	5
2.2 วงจรสมมูลเมื่ออุปกรณ์สวิตช์นำกระแสไฟฟ้า	5
2.3 วงจรสมมูลเมื่ออุปกรณ์ไม่นำกระแสไฟฟ้า	6
2.4 รูปคลื่นการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้า	9
2.5 รูประลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้า	10
2.6 วงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	12
2.7 วงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า	13
2.8 วงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า	15
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคิวตี้ไซเคิล (D) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Transfer Function)	17
3.1 วงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	20
3.2 วงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ใน PSICE Simulation	24
3.3 ผลซิมูเลชันแรงดันเอาต์พุตของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	25
3.4 ผลซิมูเลชันกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} และ i_{L2} ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	26
3.5 ผลซิมูเลชันกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{in} และกระแสไฟฟ้าไดโอด i_D ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	26
3.6 ผลซิมูเลชันแรงดันไดโอด V_D และแรงดันสวิตช์ V_{sw} ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	27
3.7 การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	28
3.8 ตัวควบคุมที่เลือกใช้สำหรับวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	29
3.9 วงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบพร้อมวงจรควบคุม	30
3.10 ภาพถ่ายวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ	30
4.1 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	32
4.2 รูปสัญญาณแรงดันตัวเก็บประจุ (CH1) ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A	33
4.3 รูปสัญญาณแรงดันตัวเก็บประจุ (CH1) ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ L_1 และตัวเหนี่ยวนำ L_2 ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์	34
4.5 รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_{L1} , I_{In} , I_{Sw} (CH1) และสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_{L2} (CH2) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A	36
4.6 รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_{L1} , I_{In} , I_{Sw} (CH1) และสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_{L2} (CH2) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A	36
4.7 การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D และกระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{Sw} ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์	37
4.8 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D (CH1) และกระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{L1} , I_{In} , I_{Sw} (CH2) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A	39
4.9 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D (CH1) และกระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{L1} , I_{In} , I_{Sw} (CH2) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A	39
4.10 การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดรูปคลื่นสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลกระแสไฟฟ้าอินพุต I_{In} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์	40
4.11 รูปคลื่นสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียล D (CH1) กระแสไฟฟ้าอินพุต $I_{In} = I_{Sw} = I_{L1}$ (CH2) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o (CH3) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A	42
4.12 รูปคลื่นสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียล D (CH1) กระแสไฟฟ้าอินพุต $I_{In} = I_{Sw} = I_{L1}$ (CH2) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o (CH3) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A	42
4.13 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันสวิตช์ V_{Sw} และแรงดันไดโอด V_D ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันสวิตช์ V_{Sw} (CH1) และแรงดันไดโอด V_D (CH2) ของวงจร แท็บอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A	45
4.15 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันสวิตช์ V_{Sw} (CH1) และแรงดันไดโอด V_D (CH2) ของวงจร แท็บอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A	45
4.16 การจับชุดทดลองสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของวงจรแท็บอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	46

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์	32
4.2 ผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยตัวเหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี	35
4.3 ผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{Sw} และกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี	38
4.4 ผลการวัดค่าดิฟฟิไซเคิลกระแสไฟฟ้าอินพุต I_{In} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี	41
4.5 ผลการวัดค่าสัญญาณแรงดันสวิทช์ V_{Sw} และแรงดันไดโอด V_D เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี	44
4.6 ผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณหา ประสิทธิภาพของวงจรเมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลง	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์สามารถแปลงแรงดันอินพุตดีซีให้เป็นแรงดันเอาต์พุตดีซี ที่มีขนาดมากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันอินพุตได้ ตัวอย่างเช่น วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) และ วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) ในทางทฤษฎีอัตราส่วนการแปลงแรงดัน (Conversion Ratio) ของวงจรเหล่านี้มีค่าไม่จำกัดโดยขึ้นอยู่กับค่าดิวตี้ไซเคิลของสวิตช์ แต่ในทางปฏิบัติถ้าอัตราส่วนการแปลงแรงดันมีค่าสูงหรือต่ำมากเกินไป ค่าดิวตี้ไซเคิลก็จะมีค่าสูงหรือต่ำมากเกินไปด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องการอัตราส่วนการลดทอนแรงดันสิบเท่า ค่าดิวตี้ไซเคิลของสวิตช์จะมีค่าเท่ากับ 0.1 ที่ความถี่สวิตช์ 100 kHz สัญญาณพัลส์ขับสวิตช์จะมีความกว้างเพียง 1 μ s ซึ่งสัญญาณขับสวิตช์ที่มีความกว้างพัลส์แคบๆ นี้ จะมีความไวต่อสัญญาณรบกวนทำให้การขับสวิตช์เกิดความผิดพลาด และวงจรไม่สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการนอกจากนี้ ช่วงเวลาในการนำกระแสไฟฟ้าที่สั้นนี้ (1 μ s) อาจจะทำให้สวิตช์ทำงานผิดพลาดได้โดยอย่างยิ่ง ถ้าสวิตช์ที่เลือกใช้มี Turn-on Time และ Turn-off Time มากเกินไป

โดยจะมุ่งวิจัยวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) เพื่อที่จะแก้ปัญหาอัตราส่วนการแปลงแรงดันที่จำกัดนี้ ได้นำเอาวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์พื้นฐาน มาต่อไดโอดเข้ากับตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ทำให้สามารถลดทอนแรงดันได้มากกว่าวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบพื้นฐาน และสามารถคงค่าดิวตี้ไซเคิลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้อีกด้วย โดยวงจรใหม่นี้จะถูกเรียกว่า แท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ (Tapped Inductor Buck Converter) ซึ่งอัตราส่วนการแปลงแรงดันจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนการพันของตัวเหนี่ยวนำ (Turn Ratio) และค่าดิวตี้ไซเคิล

ปริญญาานิพนธ์นี้ศึกษาการทำงานของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ และนำผลการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ และสร้างวงจรทดลองต้นแบบขึ้นมา ในส่วนท้ายของปริญญาานิพนธ์นำเสนอผลการทดสอบวงจรต้นแบบที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาหลักการทำงานของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ และนำมาประยุกต์ออกแบบวงจร
2. ออกแบบและสร้างวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์
3. ทดลองและทดสอบสมรรถนะของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาหลักการทำงานและออกแบบวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Specification) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ที่ศึกษาคือแรงดันอินพุต 48V แรงดันเอาต์พุต 5V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A ถึง 10A ความถี่สวิตช์ 100 kHz

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มอัตราการลดแรงดันลงได้โดยค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) อยู่ในช่วงที่เหมาะสม
2. สามารถหาวิธีใหม่ที่ดีกว่าที่สามารถใช้งานแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบพื้นฐานได้
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่อได้

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาหลักการทำงานของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์
2. ออกแบบวงจรต้นแบบ
3. สร้างและทดสอบสมรรถนะวงจรต้นแบบ
4. วิจารณ์ผลการทดลอง
5. สรุปผลการทดลอง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ ได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากเพราะการใช้งานของอุปกรณ์และระบบอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ ต้องการที่จะมีขนาดเล็กน้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพสูงและมีย่านการแปลงแรงดันไฟฟ้าที่กว้างเช่น วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) ที่สามารถแปลงแรงดันอินพุตให้มีขนาดที่มากกว่าแรงดันเอาต์พุตได้ โดยในทางทฤษฎี อัตราส่วนการแปลงแรงดัน (Conversion Ratio) ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์มีค่าไม่จำกัดโดยขึ้นอยู่กับค่าตัวรีซิสเคิลของสวิตช์ แต่ในทางปฏิบัติอัตราส่วนการแปลงแรงดันจะถูกจำกัดไว้ไม่เกินสิบเท่า เนื่องจากถ้ามากกว่านี้วงจรอาจจะทำงานผิดพลาดหรือไม่สามารถทำงานได้ จากปัญหาข้อจำกัดการแปลงแรงดันไฟฟ้าของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์นี้ สามารถแก้ปัญหาก็ได้โดยนำวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์พื้นฐานมาต่อไดโอดเข้ากับตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงข้อจำกัดในการแปลงแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อไดโอดเข้ากับตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ซึ่งเรียกววงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

2.2. คอนเวอร์เตอร์พื้นฐาน

วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนคือ วงจรที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต และเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตมีความเป็นกระแสตรงมากๆ จึงนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ซึ่งโดยมากจะใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะมีอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ ผกผันกับกำลังสองของความถี่เนื่องจากการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้า มีดังต่อไปนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t + T) = i_L(t) \quad (2.1)$$

หมายถึง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งเดียวกันในทุกคาบเวลา

2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.2)$$

หมายถึง ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-Second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

3. กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(\lambda t) dt = 0 \quad (2.3)$$

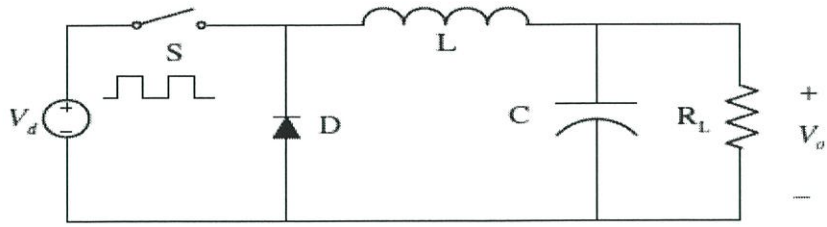
หมายถึง ประจุที่ถูกเก็บ (Charged) และคาย (Discharged) ของตัวเก็บประจุในคาบเวลาจะต้องเท่ากัน

4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต

$$P_s = P_{Out} \quad (2.4)$$

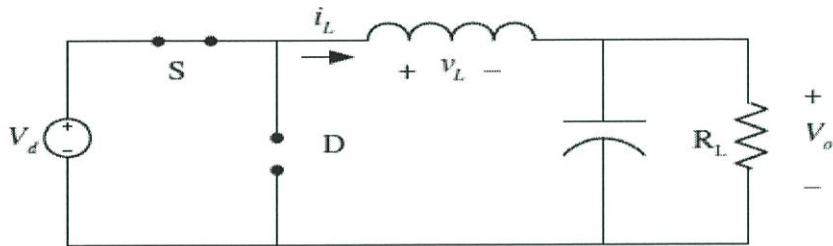
กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นแบบอุดมคติทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจรประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

หลักการการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อออกแบบให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตตามที่ต้องการคือ ต้องเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์จากนั้นก็สมารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (2.7) การวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ในแต่ละโหมดจะต้องวิเคราะห์ให้อยู่ในสภาวะคงตัวดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.1 ขณะที่อุปกรณ์สวิตช์นำกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงจะไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บที่ตัวเก็บประจุ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์สามารถเขียนเป็นสมการแรงดันได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลเมื่ออุปกรณ์สวิตช์นำกระแสไฟฟ้า

$$-V_d + V_L + V_o = 0$$

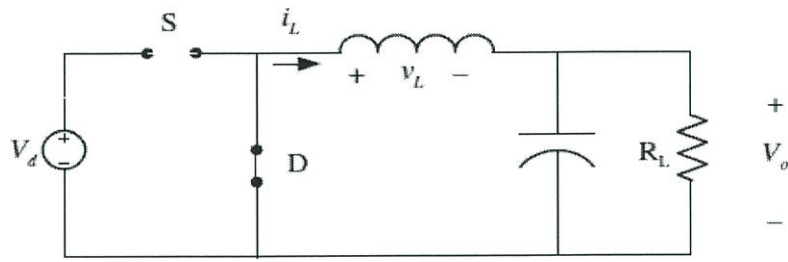
$$V_L = V_d - V_o \quad (2.5)$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.6)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_d - V_o}{L} \quad (2.7)$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแสไฟฟ้าคือ $dt = DT$

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_d - V_o}{L} \right) DT \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลเมื่ออุปกรณ์ไม่นำกระแสไฟฟ้า

เมื่ออุปกรณ์ไม่นำกระแสไฟฟ้าไดโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้า (Forward Bias) ให้นำกระแสไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง และจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$v_L = -v_o \quad (2.9)$$

$$v_L = -V_o = L \frac{di}{dt} \quad (2.10)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.11)$$

ความหมายของสมการที่ (2.11) คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าค่อยๆ ลดเพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสตัวเหนี่ยวนำต่อคาบเวลาเป็นลบ ในกรณีที่กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วงหยุดนำกระแสคือ $dt = (1 - D)T$ ดังสมการที่ (2.12) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1 - D)T \quad (2.12)$$

การหาค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้าจากเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในสมการที่ (2.1) กล่าวคือ ในช่วงสภาวะคงตัวการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่อุปกรณ์สวิตช์นำกระแสไฟฟ้า จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่อุปกรณ์สวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (2.8) และสมการที่ (2.12) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.13)$$

$$\left(\frac{V_d - V_o}{L}\right) DT + \left(-\left(\frac{V_o}{L}\right)(1 - D)T\right) = 0 \quad (2.14)$$

$$\left(\frac{V_d - V_o}{L}\right) DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1 - D)T = 0$$

$$(V_d - V_o)DT - V_o(1 - D) = 0$$

$$V_d D - V_o D - V_o + V_o D = 0$$

$$D = \frac{V_o}{V_d} \quad (2.15)$$

ในสมการที่ (2.15) อัตราขยายแรงดันจะมีค่าสูงสุดไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ ตามค่าดิวิตีไซเคิล วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นวงจร ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตน้อยกว่า หรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าดิวิตีไซเคิลสามารถปรับได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง เช่น ถ้าแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตเท่ากับ 100 โวลต์ ซึ่งในทางทฤษฎีวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้าก็จะสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตได้ตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง 100 โวลต์ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถปรับได้ถึง 100 โวลต์ เพราะเกิดแรงดันตกคร่อมสวิตช์และตัวเหนี่ยวนำทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตที่ได้จริงมีค่าน้อยกว่า 100 โวลต์เล็กน้อย จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตต่อแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต หรือที่เรียกว่าอัตราขยาย (Voltage Gain) สามารถหาได้อีกวิธีหนึ่งโดยการกล่าวได้ว่าสมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์จะได้

$$V_{L,av} = v_{L,on}(t_{on}) + v_{L,off}(t_{off}) \quad (2.16)$$

$$V_{L,av} = (V_d - V_o)(t_{on}) + (-V_o)(t_{off}) = 0 \quad (2.17)$$

$$(V_d - V_o)(DT) - V_o(1 - D)T = 0$$

$$D = \frac{V_o}{V_d}$$

เมื่อ $V_{L,av}$ คือ แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

$V_{L,on}$ คือ แรงดันเฉลี่ยตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า

$V_{L,off}$ คือ แรงดันเฉลี่ยตัวเหนี่ยวนำขณะอุปกรณ์สวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า

ลำดับต่อไปคือการหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่จะทำให่วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้าทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นจากการหากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากอยู่ในขณะที่อยู่ในสภาวะทำงานคงตัวกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

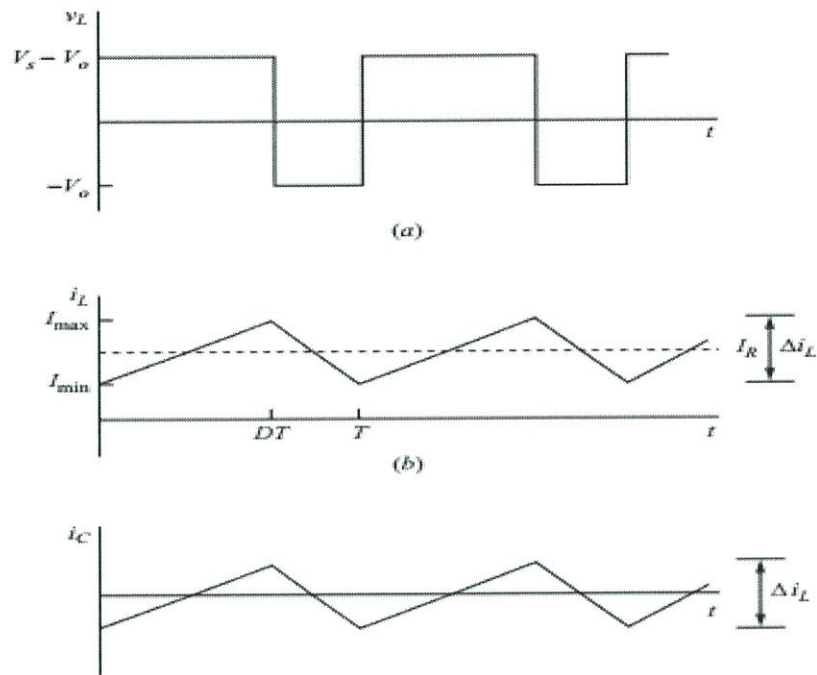
$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.4 (b) จะสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดได้จากสมการช่วงอุปกรณ์สวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้างดังนี้

$$I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.19)$$

$$I_{L,max} = \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1 - D) T \right]$$

$$I_{L,max} = V_o \left[\frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2L_f} \right] \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้า

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด

$$I_{L,\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1-D)T \right] \quad (2.21)$$

$$I_{L,\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1-D)T \right]$$

$$I_{L,\min} = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \quad (2.22)$$

เงื่อนไขที่สำคัญ สำหรับการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แบบต่อเนื่องคือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นกระแสบวกเสมอ สมการที่ (2.22) สามารถนำมาใช้หาค่าความเหนี่ยวนำและความถี่ในการสวิตช์ ในขั้นตอนนี้จะยังไม่กล่าวถึงการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง

$$I_{L,\min} = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$$

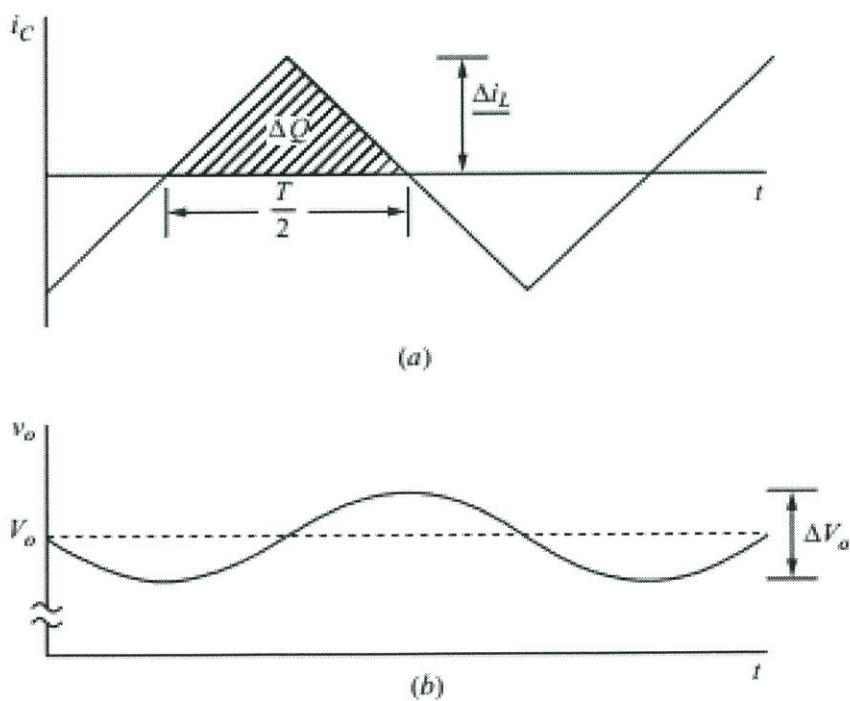
$$0 = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$$

$$0 = \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf}$$

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.23)$$

$$f = \frac{(1-D)R}{2L_{\min}} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.22) ใช้ในการหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรยังสามารถทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ซึ่งจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดดังสมการที่ (2.23)



รูปที่ 2.5 รูปประลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าประจุบวก ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุสะสมประจุ โดยสามารถคำนวณหาได้จาก

$$Q = CV_0 \quad (2.25)$$

$$\Delta Q = C\Delta V_0$$

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.26)$$

เมื่อ ΔQ คือ ค่าประจุที่เปลี่ยนแปลงน้อย ๆ

ΔV_0 คือ ค่าระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยๆ ระหว่าง
ยอดถึงยอด

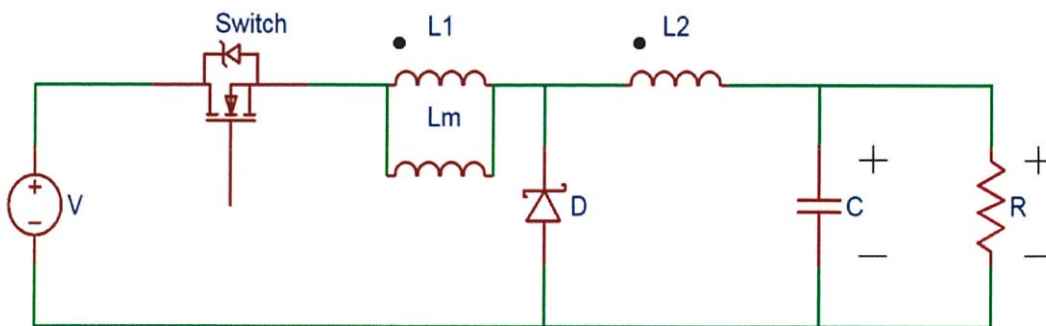
จะได้สมการในการหาค่าตัวเก็บประจุ คือ

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2.27)$$

2.3 ข้อจำกัดในการแปลงแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

เมื่อวงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode, CCM) อัตราส่วนแรงดันเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุตหรือที่เรียกว่า อัตราส่วนการลดทอนแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าดิวิตีไซเคิลของสวิตช์ดังแสดงในสมการที่ (2.15) โดยค่าดิวิตีไซเคิล D มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ในทางทฤษฎีจะสามารถกำหนดแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าน้อยกว่าแรงดันอินพุตเท่าไรก็ได้ โดยการเลือกค่า D ให้เหมาะสมจากสมการที่ (2.15) แต่ในทางปฏิบัติอัตราส่วนการลดทอนแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จะถูกจำกัดไว้ไม่เกินสิบเท่าหรือ D มีค่าไม่น้อยกว่า 0.1 เนื่องจากถ้าน้อยกว่านี้ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสจะมีค่าน้อยมาก ตัวอย่างเช่น วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่มีอัตราส่วนการลดทอนแรงดันสิบเท่า ($D = 0.1$) และทำงานที่ความถี่สวิตช์ 100 kHz สวิตช์จะมีช่วงเวลาการนำกระแสเพียง $1\mu s$ เนื่องจากสวิตช์มีเวลาในการนำกระแสและหยุดนำกระแสที่จำกัดอยู่ค่าหนึ่ง (Finite Turn-on And Turn-off Time) ดังนั้นถ้าสวิตช์ที่เลือกใช้มี Turn-on Time และ Turn-off Time มากเกินไป วงจรอาจจะทำงานผิดพลาดหรือไม่สามารถทำงานได้ นอกจากนี้สัญญาณพัลส์ขับสวิตช์ที่มีความกว้างแคบๆ จะมีความไวต่อสัญญาณรบกวน (Electro-Magnetic Interference, EMI) ทำให้การขับสวิตช์เกิดความผิดพลาดและวงจรไม่สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ

เพื่อที่จะแก้ปัญหาอัตราส่วนการลดทอนแรงดันที่จำกัดดังกล่าว ได้มีการนำเอาวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบพื้นฐานต่อไดโอดเข้ากับตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ดังรูปที่ 2.6



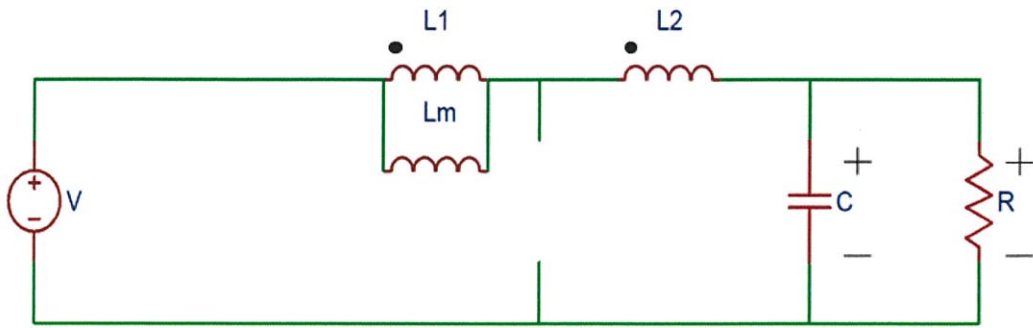
รูปที่ 2.6 วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

โดยวงจรใหม่นี้ถูกเรียกว่าเรียกว่า วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ (Tapped Inductor Buck Converter) ที่จะทำให้ค่าดิวตี้ไซเคิลอยู่ช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งาน และสามารถลดทอนแรงดันได้มากขึ้น

2.3.1 การวิเคราะห์วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.6 ประกอบไปด้วยสวิทช์ MOSFET (Switch) ไดโอด (D_1) ตัวเก็บประจุ (C) ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2) ตัวต้านทานโหลด (R) ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานแฝง คือ R_C, R_{L1} และ R_{L2} ตามลำดับ โดยตัวต้านทานแฝงเหล่านี้ในทางปฏิบัติมีค่าน้อยมาก

โดยจะเริ่มทำการวิเคราะห์ในโหมดที่สวิทช์นำกระแสก่อน โดยเมื่อสวิทช์นำกระแสไดโอดจะทำงานตรงกันข้ามกับสวิทช์กล่าวคือ ไดโอดจะไม่นำกระแสจะมีรูปวงจรดัง รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรแก้ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า

จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้

$$i_{In} = i_{Lm} - i_1 = i_2 = i_C + i_o \quad (2.28)$$

จะพิจารณาค่ากระแสที่เปลี่ยนไปของ i_{Lm} และจะนำค่านี้ไปหาค่าตัวแปรอื่นๆ ต่อไปได้

จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้

$$V_{In} = V_1 + V_2 + V_o$$

$$V_{In} - V_o = V_1 + \frac{V_1 N_2}{N_1}$$

$$V_1 = (V_{In} - V_o) \left(\frac{N_1}{N_1 + N_2} \right)$$

$$V_1 = V_{Lm} \quad (2.29)$$

และจากแรงดันในตัวเหนี่ยวนำจะได้

$$V_{Lm} = L_{Lm} \frac{di_{Lm}}{dt}$$

$$\frac{V_{Lm}}{L_{Lm}} = \frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{DT}$$

$$\Delta i_{Lm} = (V_{In} - V_o) \left(\frac{N_1}{N_1 + N_2} \right) \frac{DT}{L_{Lm}}$$

$$\Delta i_{Lm} = (V_{In} - V_o) \left(\frac{n}{n+1} \right) \frac{DT}{L_{Lm}} \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.30) จะได้ค่ากระแส Δi_{Lm} ในช่วงสวิตช์นำกระแสมาแล้ว และจะนำค่านี้ไปหาค่าอื่นๆ ต่อไปโดยจะหา V_{Diode} จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้

$$V_{In} = V_1 + V_{Diode}$$

$$V_{In} - V_1 = V_{Diode}$$

$$V_{Diode} = V_{In} - \left[(V_{In} - V_o) \left(\frac{N_1}{N_1 + N_2} \right) \right]$$

$$V_{Diode} = \frac{nV_o + V_{In}}{n+1} \quad (2.31)$$

หากระแส i_1 จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้

$$i_1 = i_{Lm} - i_{In}$$

$$i_1 = i_{Lm} + i_{Lm} \left(\frac{n}{n+1} \right)$$

$$i_1 = \frac{i_{Lm}}{n+1} \quad (2.32)$$

หากระแส i_{In} จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้

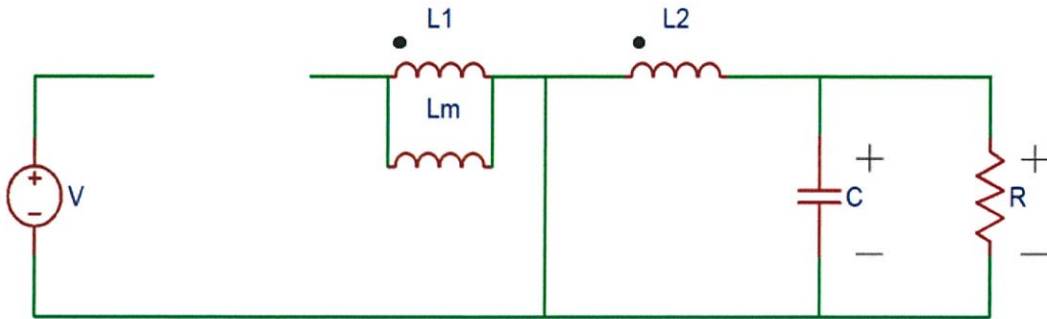
$$i_{In} = i_{Sw} = i_{Lm} - i_1 = i_2$$

$$i_{Lm} = i_2 + i_1 = i_2 + \frac{i_2 N_2}{N_1}$$

$$i_{Lm} \left(\frac{N_1}{N_1 + N_2} \right) = i_{In} = i_2$$

$$i_{In} = i_{Lm} \left(\frac{n}{n+1} \right) = i_2 \quad (2.33)$$

ต่อมาจะเริ่มทำการวิเคราะห์ในโหมดที่สวิตช์ไม่นำกระแส โดยเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสไดโอดจะทำงานนำกระแสจะมีรูปวงจรดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรแก้ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า

จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้ว่า

$$i_{Lm} + i_{\text{Diode}} = i_2 + i_1 = i_C + i_o \quad (2.34)$$

สามารถหากระแส i_1 ได้จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์

$$i_{\text{Diode}} = i_C + i_o = i_2$$

$$i_1 = i_{Lm} \quad (2.35)$$

สามารถหากระแส i_{Diode} ได้จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์

$$i_{\text{Diode}} = i_2 = i_1 \frac{N_1}{N_2} = i_{Lm} \frac{N_1}{N_2}$$

$$i_{\text{Diode}} = n i_{Lm} \quad (2.36)$$

จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้

$$V_o = -V_2 = -\frac{V_1 N_2}{N_1}$$

$$V_1 = V_{Lm} = -\frac{V_o N_1}{N_2} \quad (2.37)$$

และจากแรงดันในตัวเหนี่ยวนำจะได้

$$V_{Lm} = L_{Lm} \frac{di_{Lm}}{dt}$$

$$\frac{V_{Lm}}{L_{Lm}} = \frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{(1-D)T}$$

$$\Delta i_{Lm} = -\frac{V_o N_1 (1-D)T}{N_2 L_{Lm}}$$

$$\Delta i_{Lm} = -nV_o \frac{(1-D)T}{L_{Lm}} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ (2.38) จะได้ค่ากระแส Δi_{Lm} ในช่วงสวิตช์ไม่นำกระแสมาแล้ว และจะนำค่านี้ไปหาค่าอื่นๆ ต่อไป โดยจะหา V_{Sw} จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้ว่า

$$V_{In} = V_{Sw} + V_1$$

$$V_{In} - V_1 = V_{Sw}$$

$$V_{Sw} = V_{In} - (-nV_o)$$

$$V_{Sw} = V_{In} + nV_o \quad (2.39)$$

ในการพิจารณาวจรจะมุ่งพิจารณาในช่วงที่อยู่ในสถานะคงตัว หรือ (Steady State Require) ในช่วงสภาวะคงตัวการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่อุปกรณ์สวิตช์นำกระแสไฟฟ้า จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่อุปกรณ์สวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเป็นศูนย์จะได้ตั้งสมการที่ (2.40)

$$(\Delta i_{Lm})_{close} + (\Delta i_{Lm})_{open} = 0 \quad (2.40)$$

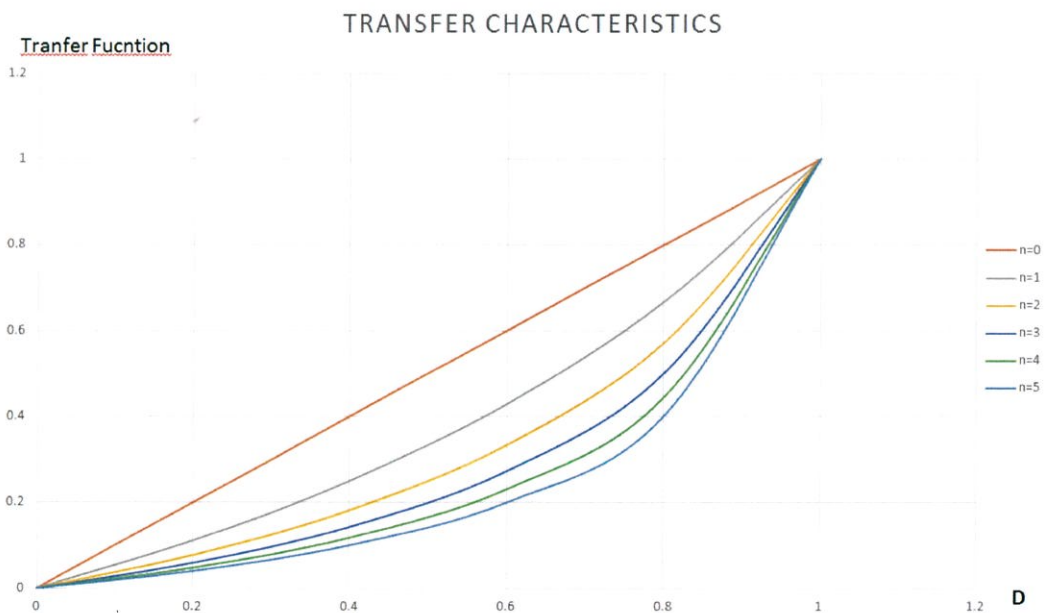
แทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ (2.40) จะได้ค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดัน Transfer Function ดังสมการที่ (2.41)

$$\text{Transfer Function} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{D+(n+1)(1-D)} \quad (2.41)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.41) Transfer Function ให้อยู่ในรูปของ n (Turn Ratio) ได้ดังสมการที่ (2.42)

$$n = \frac{V_{in}-V_o}{V_o} \left(\frac{D}{1-D} \right) - 1 \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.41) นำสมการมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิวตี้ไซเคิล (D) เป็นแกนนอน กับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Transfer Function) เป็นแกนตั้ง ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดิวตี้ไซเคิล (D) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Transfer Function)

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดีวีไอซีเคิล (D) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Transfer Function) จะพบว่าเมื่อ $n = 0$ อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันจะเป็นแบบเชิงเส้นนั้นหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันเป็นแบบวงจรถักคอนเวอร์เตอร์แบบธรรมดา แต่เมื่อค่า n มีค่ามากขึ้นค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันจะลดลง จึงส่งผลให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าน้อยลงด้วย กล่าวคือ สามารถลดทอนแรงดันได้มากขึ้นนั่นเอง ยกตัวอย่างเช่น $n = 5$ จะทำให้วงจรมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันลดลง เมื่อเทียบกับ $n = 1$ จึงส่งผลให้วงจรที่มีค่า $n = 5$ มีการลดทอนแรงดันมากกว่าวงจรที่มีค่า $n = 1$

สมมติว่าไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจะได้สมการกระแส I_{LM} จากสมการที่ (2.43)

$$I_{LM} = \frac{V_o I_o}{V_{In}} \left(\frac{n+1}{nD} \right) \quad (2.43)$$

สามารถหาค่ากระแส i_{LM} สูงสุดได้จากสมการที่ (2.44)

$$\begin{aligned} i_{LM,max} &= I_{LM} + \frac{\Delta i_{LM}}{2} \\ i_{LM,max} &= \frac{V_o I_o}{V_{In}} \left(\frac{n+1}{nD} \right) + nV_o \frac{(1-D)T}{2L_{Lm}} \\ i_{LM,max} &= V_o \left[\frac{I_o}{V_{In}} \left(\frac{n+1}{nD} \right) + n \frac{(1-D)}{2L_{Lm}f} \right] \end{aligned} \quad (2.44)$$

สามารถหาค่ากระแส i_{LM} ต่ำสุดได้จากสมการที่ (2.45)

$$\begin{aligned} i_{LM,min} &= I_{LM} - \frac{\Delta i_{LM}}{2} \\ i_{LM,min} &= \frac{V_o I_o}{V_{In}} \left(\frac{n+1}{nD} \right) - nV_o \frac{(1-D)T}{2L_{Lm}} \\ i_{LM,min} &= V_o \left[\frac{I_o}{V_{In}} \left(\frac{n+1}{nD} \right) - n \frac{(1-D)}{2L_{Lm}f} \right] \end{aligned} \quad (2.45)$$

ในที่นี้การทำงานของวงจรต้องการให้ทำงานเป็นแบบโหมดนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode, CCM) จึงต้องพิจารณาเงื่อนไขที่ทำให้วงจรสามารถทำงานในโหมดที่นำกระแสต่อเนื่องได้ดังสมการที่ (2.46)

$$i_{Lm,min} = 0 \quad (2.46)$$

จากเงื่อนไขดังสมการที่ (2.46) จะสามารถหาค่า i_{LM} ที่ต่ำที่สุดที่สามารถใช้งานในโหมดนำกระแสต่อเนื่องได้

$$i_{Lm,crit} = \frac{n^2(1-D)DV_{in}}{2fL_o(n+1)} \quad (2.47)$$

จากนั้นสามารถหาค่าตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (2.48)

$$C = \frac{(1-D)T(nI_{Lm}-I_o)}{\Delta V_o} \quad (2.48)$$

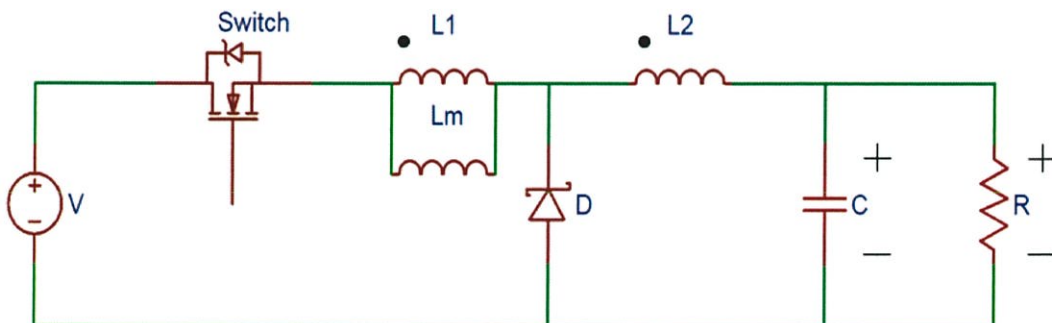
บทที่ 3

การออกแบบวงจรภาคกำลังและวงจรควบคุม

3.1 บทนำ

วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์นั้นจะประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ วงจรภาคกำลังและวงจรควบคุม ในบทนี้จะอธิบายวงจรภาคกำลังและวงจรควบคุม โดยที่มาของสมการการออกแบบวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ (Tapped Inductor Buck Converter) ประยุกต์มาจากวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์พื้นฐานที่นำไดโอดมาต่อเข้ากับตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และในวงจรควบคุมที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ โดยเทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation-PWM) และการออกแบบวงจรควบคุมเพื่อให้วงจรคอนเวอร์เตอร์มีเสถียรภาพและการรักษาแรงดันที่ดี โดยจะออกแบบเป็นระบบควบคุมวงเปิด (Open-Loop Control) ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2

3.2 สมการการออกแบบวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.1 วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์แสดงดังในรูปที่ 3.1 จะสังเกตมีไดโอดต่ออยู่ตรงกลางระหว่างตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) จากบทที่ 2 จะมีสมการที่ใช้หาค่าตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$n = \frac{V_{In} - V_o}{V_o} \left(\frac{D}{1-D} \right) - 1 \quad (3.1)$$

$$L_m = \frac{n^2(1-D)DV_{In}}{2f_{i_{Out}}(n+1)} \quad (3.2)$$

$$I_{Lm} = \frac{V_o I_o}{V_{In}} \left(\frac{n+1}{nD} \right) \quad (3.3)$$

$$\Delta i_{Lm} = \left| -nV_o \frac{(1-D)T}{L_m} \right| \quad (3.4)$$

$$i_{Lm,max} = I_{Lm} + \frac{\Delta i_{Lm}}{2} \quad (3.5)$$

$$i_{Lm,min} = I_{Lm} - \frac{\Delta i_{Lm}}{2} \quad (3.6)$$

$$C = \frac{(1-D)T(nI_{Lm} - I_o)}{2\Delta V_o} \quad (3.7)$$

$$V_{Diode,max} = \frac{nV_o + V_{In}}{n+1} \quad (3.8)$$

$$V_{DS,max} = V_{In} + nV_o \quad (3.9)$$

3.3 การออกแบบวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

ข้อกำหนดทางไฟฟ้า (Electrical Specification) ของวงจรที่ต้องการออกแบบเป็นดังนี้

- แรงดันดีซีอินพุต $V_{In} = 48V$
- แรงดันดีซีเอาต์พุต $V_O = 5V$
- ดิวตี้ไซเคิล $D = 0.32$
- กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต $I_O = 5A - 10A$
- โหลดตัวต้านทาน $R = 0.5\Omega - 1\Omega$
- กำลังงานไฟฟ้า $P_O = 25W - 50W$
- ความถี่สวิตช์ $f_s = 100kHz$
- ริปเปิลกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ L_1 ม่าค่าไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ของกระแสเอาต์พุตสูงสุด $\Delta i_{L1} \leq 10\% i_{O,max}$
- ริปเปิลกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ L_2 ม่าค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด $\Delta i_{L2} \leq 10\% i_{O,max}$
- ริปเปิลแรงดันของตัวเก็บประจุ C_1 ม่าค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันเอท์ดีซี $\Delta V_{C1} \leq 10\% V_{C1}$

จาก Specification ที่กำหนดสามารถออกแบบวงจรได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คำนวณค่า Turn Ratio จากสมการที่ (3.1)

$$n = \frac{V_{In}-V_o}{V_o} \left(\frac{D}{1-D} \right) - 1 = \frac{48-5}{5} \left(\frac{0.32}{1-0.32} \right) - 1 \rightarrow n = 3.04 \quad (3.10)$$

2. คำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำจากสมการที่ (3.2)

$$L_m = \frac{n^2(1-D)DV_{In}}{2f_{iOut}(n+1)} = \frac{3.04^2(1-0.32)0.32 \times 48}{2 \times 10^5 \times 10 \times (3.04+1)} \rightarrow L_m = 11.98 \times 10^{-6} \text{ H} \quad (3.11)$$

3. คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสมการที่ (3.3) ถึงสมการที่ (3.6)

$$I_{Lm} = \frac{V_o I_o (n+1)}{V_{In} n D} = \frac{5 \times 10 (3.04+1)}{48 \times 3.04 \times 0.32} \rightarrow I_{Lm} = 4.3235 \text{ A} \quad (3.12)$$

$$\Delta i_{Lm} = \left| -n V_o \frac{(1-D)T}{L_{Lm}} \right| = \left| -3.02 \times 5 \frac{(1-0.32)}{98 \times 10^{-6} \times 10^5} \right| \rightarrow \Delta i_{Lm} = 1.0571 \text{ A} \quad (3.13)$$

$$i_{Lm,max} = I_{LM} + \frac{\Delta i_{Lm}}{2} = 4.3235 + \frac{1.0571}{2} \rightarrow i_{Lm,max} = 4.8521 \text{ A} \quad (3.14)$$

$$i_{Lm,min} = I_{LM} - \frac{\Delta i_{Lm}}{2} = 4.3235 - \frac{1.0571}{2} \rightarrow i_{Lm,min} = 3.7949 \text{ A} \quad (3.15)$$

4. คำนวณค่าตัวเก็บประจุจากสมการที่ (3.7)

$$C = \frac{(1-D)T(nI_{Lm}-I_o)}{2\Delta V_o} = \frac{(1-0.32) \times (3.04 \times 4.3235 - 10)}{2 \times 0.1 \times 100} \rightarrow C = 107 \times 10^{-6} \text{ F} \quad (3.16)$$

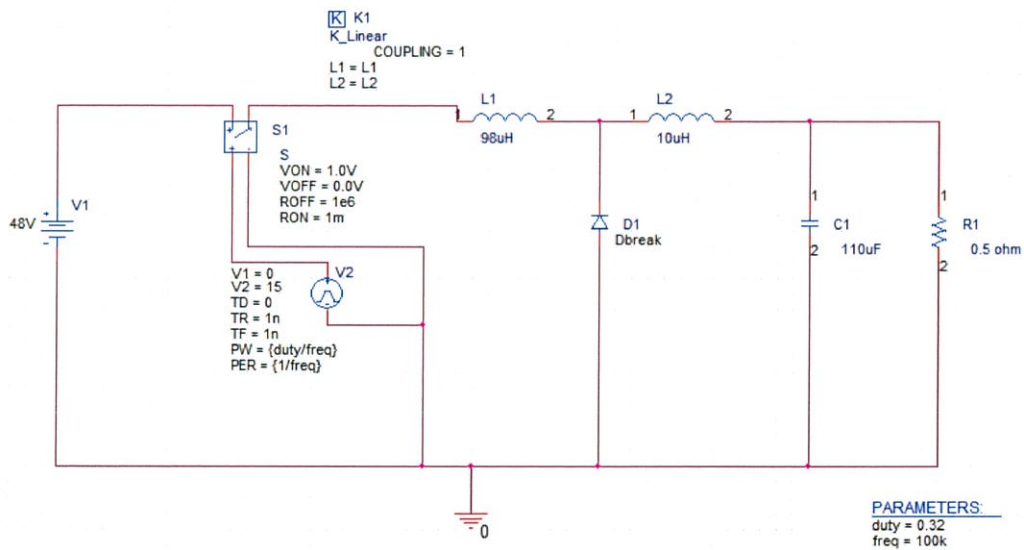
5. คำนวณค่าแรงดันไดโอดและสวิตช์จากสมการที่ (3.8) และสมการที่ (3.9)

$$V_{\text{Diode,max}} = \frac{nV_o + V_{\text{In}}}{n+1} = \frac{3.04 \times 5 + 48}{3.04 + 1} \rightarrow V_{\text{Diode,max}} = 15.6250\text{V} \quad (3.17)$$

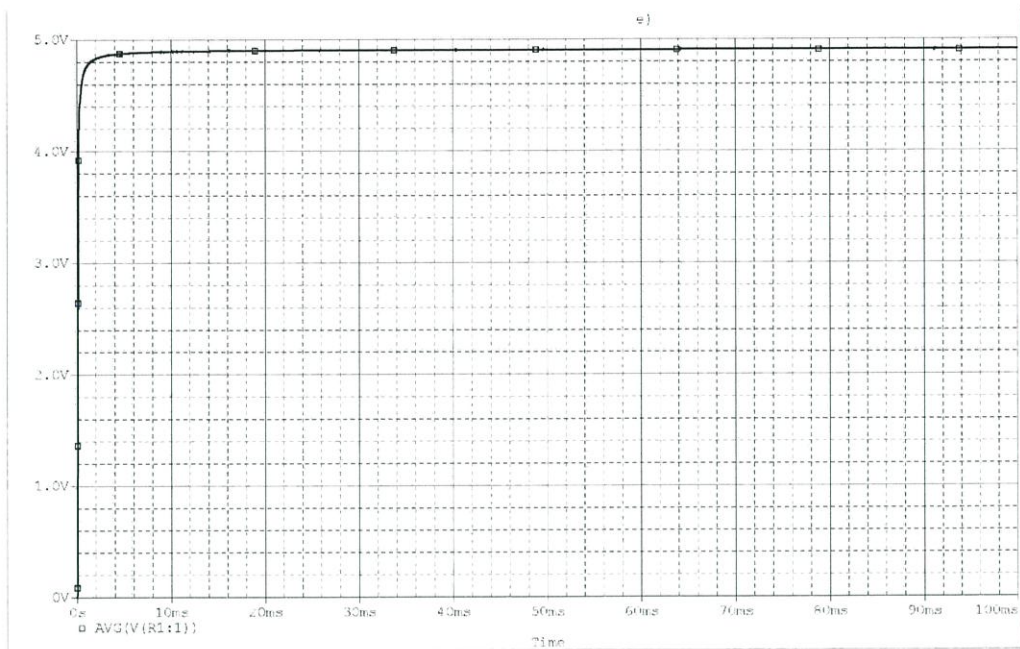
$$V_{\text{DS,max}} = V_{\text{In}} + n V_o = 48 + 3.04 \times 5 \rightarrow V_{\text{DS,max}} = 63.2353\text{V} \quad (3.18)$$

ในการสร้างวงจรจริงเลือกใช้ $L_1 = 98\mu\text{H}$ $L_2 = 10\mu\text{H}$ $C = 110\mu\text{F}$ โดย C ใช้ตัวเก็บประจุขนาด $22\mu\text{F}$ หัวตัวต่อขนานกันและมีค่า ESR รวมเท่ากับ 0.09Ω

3.4 ผลการซิมูเลชันวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

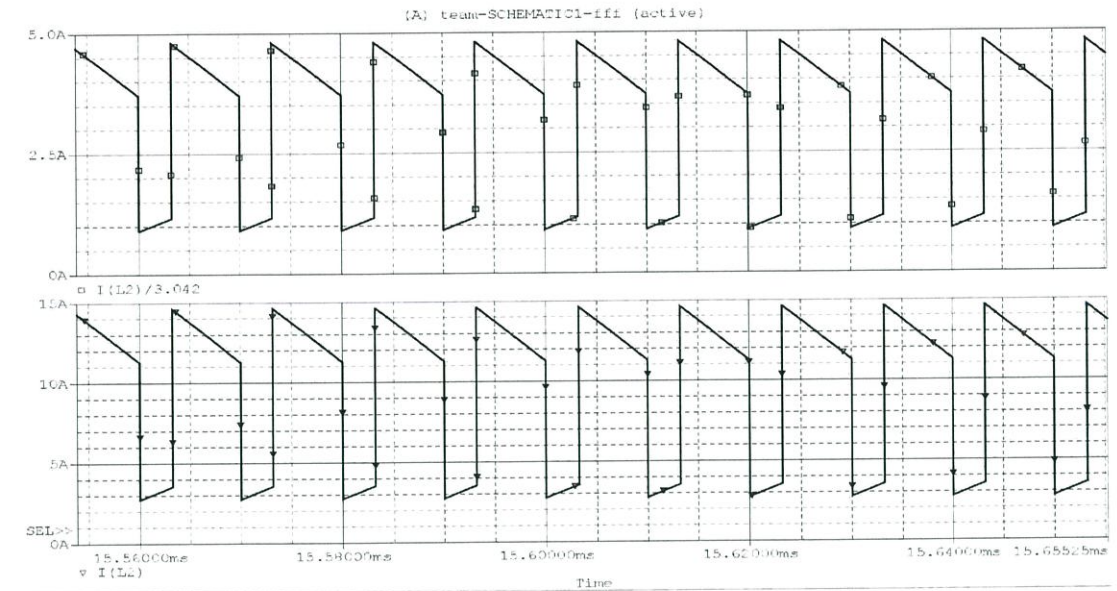


รูปที่ 3.2 วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ใน PSPICE Simulation

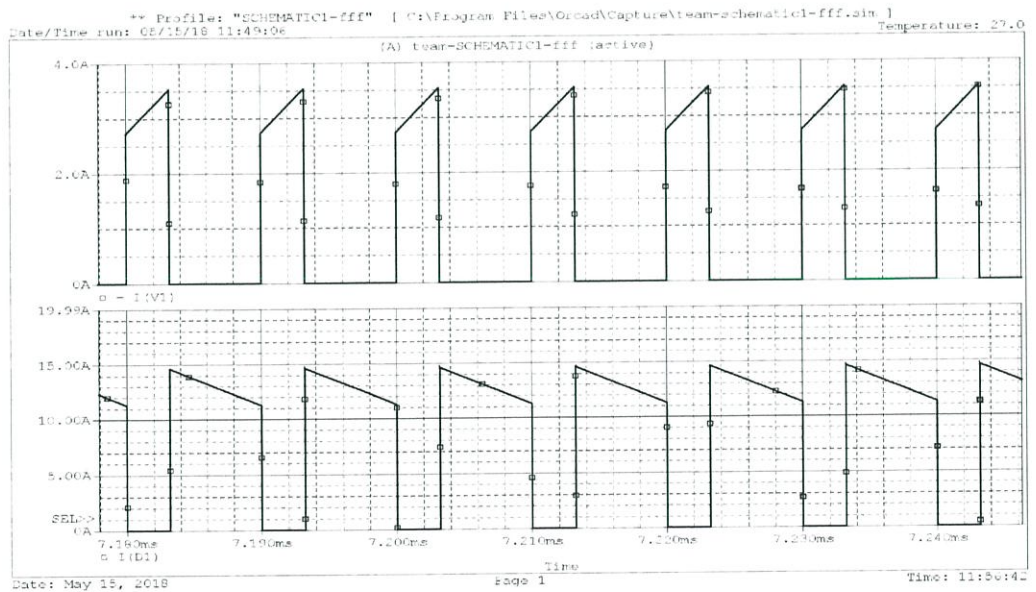


รูปที่ 3.3 ผลซิมูเลชันแรงดันเอาต์พุตของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์

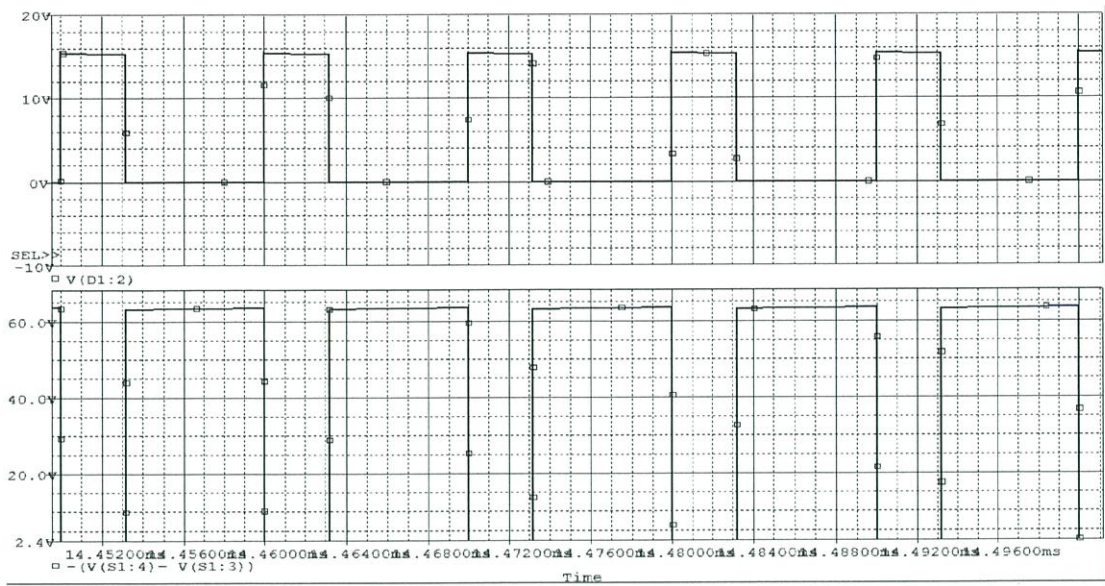
วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบถูกนำมาซิมูเลท โดยโปรแกรม PSPICE รูปที่ 3.2 เพื่อยืนยันว่าผลการออกแบบเป็นไปตาม Specification ในการซิมูเลทใช้แรงดันอินพุตเท่ากับ 48V ค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.32 และโหลดเท่ากับ 0.5 Ω รูปที่ 3.3 แสดงแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่ได้จากการซิมูเลชัน รูปที่ 3.4 แสดงกระแสเหนี่ยวนำ รูปที่ 3.5 แสดงกระแสอินพุตและกระแสไดโอด และรูปที่ 3.6 แสดงแรงดันไดโอดและแรงดันสวิตช์ จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 5V โดยใช้เวลาประมาณ 5ms



รูปที่ 3.4 ผลชึมูลเลชันกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} และ i_{L2} ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์

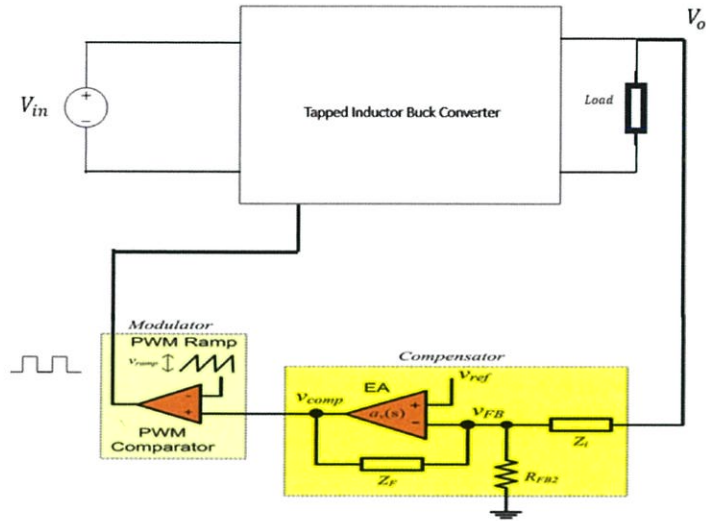


รูปที่ 3.5 ผลชึมูลเลชันกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{in} และกระแสไฟฟ้าไดโอด i_D ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์

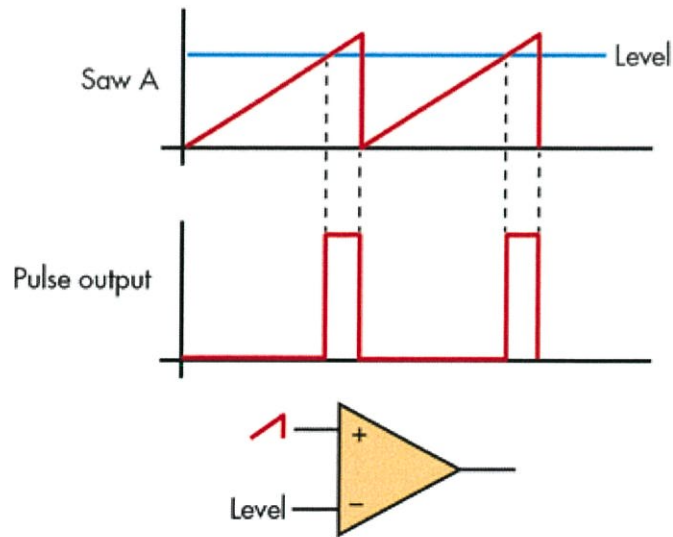


รูปที่ 3.6 ผลชิมูละเส้นแรงดันไดโอด V_D และแรงดันสวิตช์ V_{Sw} ของวงจรแก้ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

3.5 การควบคุมแรงดันเอาต์พุต (Output Voltage Control)



(ก) วงจรควบคุม



(ข) รูปคลื่นการทำงานของวงจรควบคุม

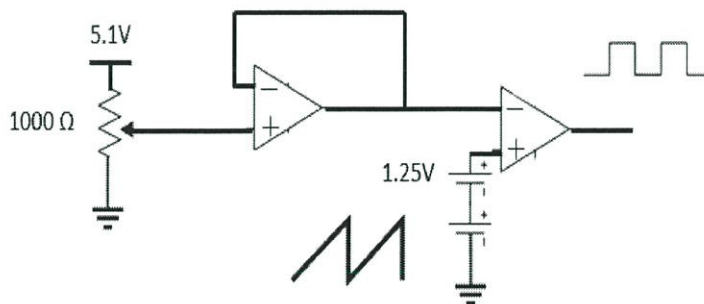
รูปที่ 3.7 การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 3.6(ก) แรงดันเอาต์พุต V_o จะถูกป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} ผลต่างระหว่าง V_{ref} และ V_o จะถูกขยายโดยตัวควบคุม (Controller) ได้สัญญาณควบคุม V_c จากนั้นสัญญาณควบคุม V_c จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย V_{saw} ที่ PWM Comparator ได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์ขับเกทสวิตช์มอสเฟส การทำงานของ PWM Comparator แสดงดังรูปที่ 3.7(ข) เมื่อ V_c มีค่ามากกว่า V_{saw} เอาต์พุตของ PWM Comparator จะมีค่าสูงทำให้สวิตช์มอสเฟสนำกระแส ในทางตรงกันข้ามเมื่อ V_c มีค่าน้อยกว่า V_{saw} เอาต์พุตของ PWM Comparator จะมีค่าต่ำทำให้มอสเฟสหยุดนำกระแส

จากหลักการทำงานดังกล่าวจะพบว่า เมื่อค่า V_o มีการเบี่ยงเบนจากค่า V_{ref} สัญญาณควบคุม V_c และความกว้างพัลส์ของสัญญาณขับเกทจะเกิดเปลี่ยนแปลงลงเพื่อให้ ค่า V_o กลับมาเท่ากับ V_{ref} อีกครั้งหนึ่ง

3.6 การเลือกตัวควบคุมสำหรับวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

การเลือกตัวควบคุมได้มีตัวควบคุมที่เลือกใช้งานไว้แล้วดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวควบคุมที่เลือกใช้สำหรับวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

วงจรต้นแบบแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์พร้อมวงจรควบคุม UC3825 แสดงในรูปที่ 3.9 เลือกใช้วงจรควบคุมเป็นแบบวงจรควบคุมวงเปิด (Open-Loop Control) ซึ่งจะสามารถป้อนค่าตัวตีไซเคิลได้เลย สัญญาณพัลส์เอาต์พุตได้จากขา 14 โดยสัญญาณพัลส์นี้จะถูกบัฟเฟอร์โดยไอซี CD4050 เพื่อผ่านไปยังวงจรขับเกทมอสเฟสแบบพัลส์ทรานเฟอร์เมอร์ รูปที่ 3.10 แสดงภาพถ่ายของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ที่ได้สร้างขึ้น

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

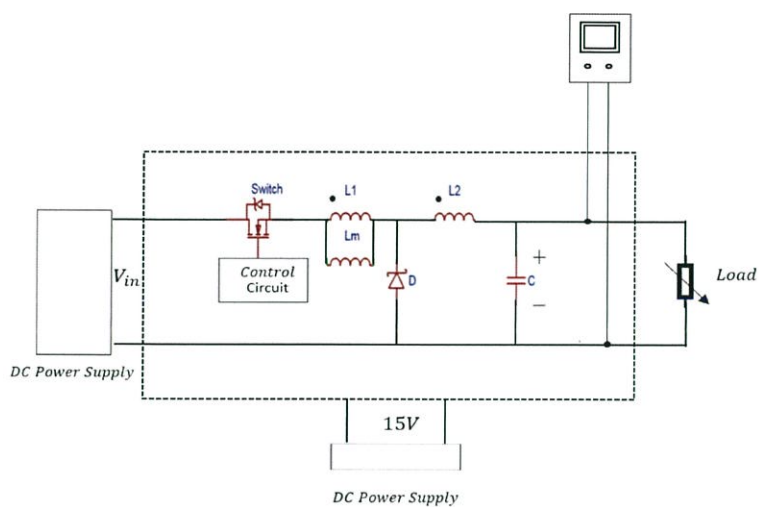
บทนี้นำเสนอผลการทดสอบการทำงานของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ ที่สร้างขึ้นโดยจะพิจารณาความสามารถในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง และวัดรูปคลื่นในวงจร อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

1. Digital Oscilloscope ของ YOKOGAWA รุ่น DL1520 จำนวน 1 เครื่อง
2. DC Power Supply ของ ESCORT รุ่น 3060TD จำนวน 1 เครื่อง
3. DC Power Supply ของ ANALAB รุ่น APS-1 จำนวน 1 เครื่อง
4. DC Power Supply ของ SYSTRON DONNER จำนวน 1 เครื่อง
5. Digital Multi Meter ของ FLUKE รุ่น 179 จำนวน 2 เครื่อง
6. Differential Probe ของ YOKOGAWA รุ่น 700925 จำนวน 1 เครื่อง

4.2 การทดสอบความสามารถในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 4.1
2. จ่ายแรงดัน 15V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดัน 48V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตที่กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A ถึง 10A ตามลำดับ

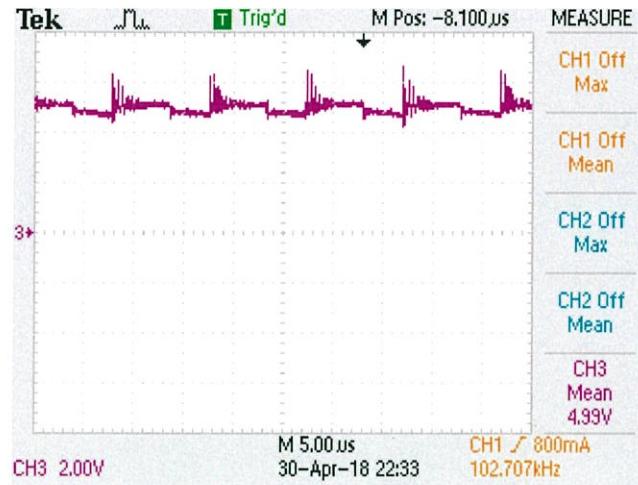


รูปที่ 4.1 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแท็ปอินดักเตอร์
บัคคอนเวอร์เตอร์

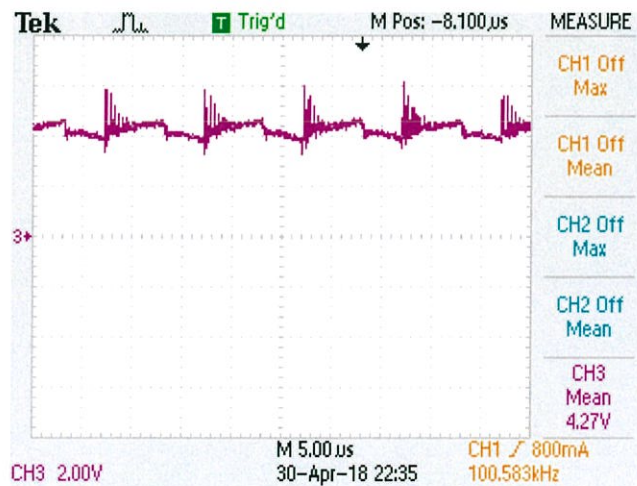
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

I_o	$V_{In} = 48V$
	$V_o = V_c$
$I_o = 5A$	5.141V
$I_o = 6A$	4.944V
$I_o = 7A$	4.790V
$I_o = 8A$	4.651V
$I_o = 9A$	4.482V
$I_o = 10A$	4.321V

จากผลการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแท็ปปินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V และค่ากระแสโหลดต่างๆ ตามตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าวงจรแท็ปปินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้นแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลง ในย่านการทำงานของวงจรดังรูปที่ 4.2 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันตัวเก็บประจุ V_C ที่กระแสเอาต์พุต 5A และรูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันตัวเก็บประจุ V_C ที่กระแสเอาต์พุต 10A ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 รูปสัญญาณแรงดันตัวเก็บประจุ (CH1) ของวงจรแท็ปปินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A

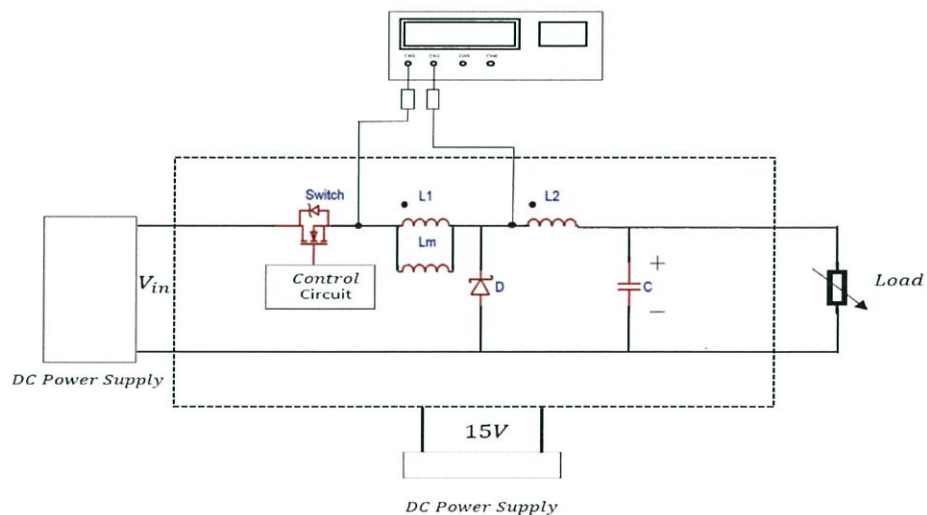


รูปที่ 4.3 รูปสัญญาณแรงดันตัวเก็บประจุ (CH1) ของวงจรแท็ปปินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A

4.3 การวัดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 4.4
2. จ่ายแรงดัน 15V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดัน 48V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. วัดรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ที่กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A และ 10A ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ L_1 และตัวเหนี่ยวนำ L_2 ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

ผลการวัดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ L_1 ซึ่งในวงจรจะมีความสัมพันธ์ดังนี้ $I_{In} = I_{Sw} = I_{L1}$ และ L_2 ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 5A และ 10A แสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ ผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยตัวเหนี่ยวนำ เปรียบเทียบกับทางทฤษฎีแสดงในตารางที่ 4.2

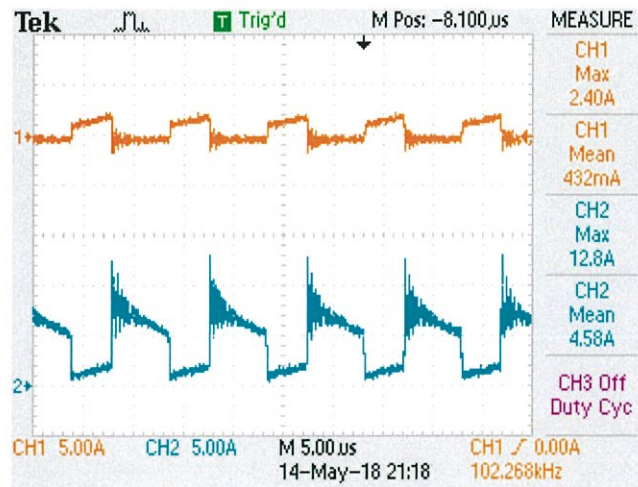
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยตัวเหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี

I_{L1}, L_{L2} I_O	I_{L1}		I_2	
	ค่าจากการวัด	ค่าจากกคำนวณ*	ค่าจากการวัด	ค่าจากกาคำนวณ**
$I_O = 5A$	0.432A	0.521A	4.58A	5A
$I_O = 10A$	1.71A	1.041A	8.3A	10A

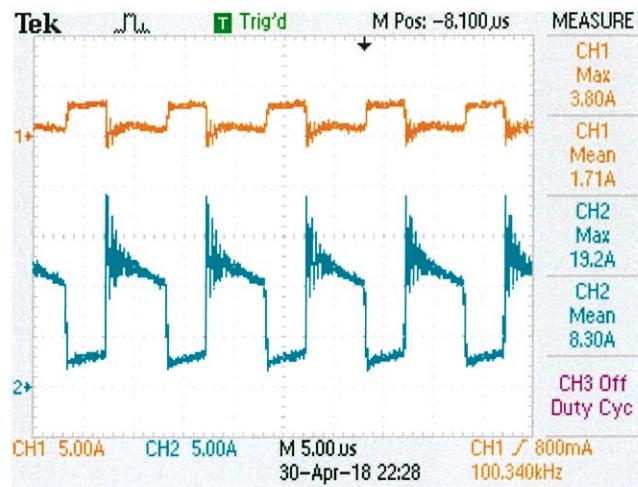
หมายเหตุ ในการคำนวณใช้ $D = 0.32$

* จากสมการ $I_{In} = I_{Sw} = I_{L1} = \frac{nDI_{Lm}}{n+1}$

** จากสมการ $I_{In} = I_O$



รูปที่ 4.5 รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_{L1} , I_{Im} , I_{Sw} (CH1) และสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_{L2} (CH2) ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A

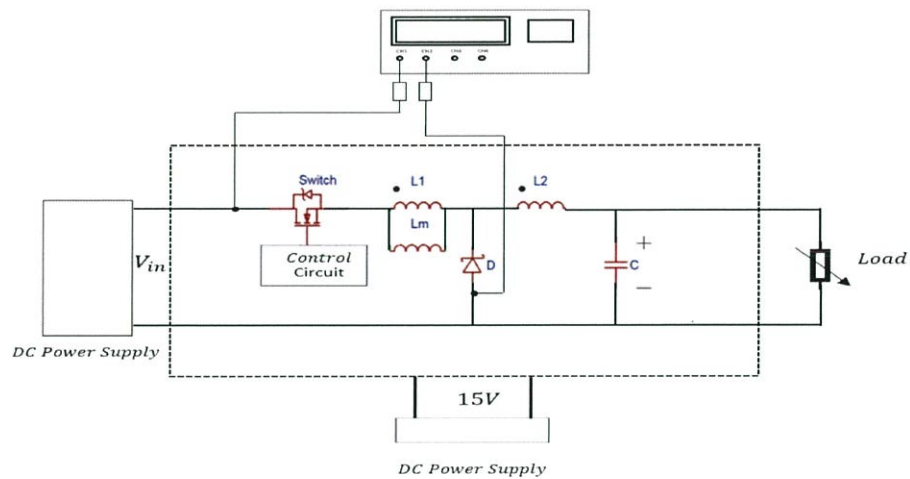


รูปที่ 4.6 รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_{L1} , I_{Im} , I_{Sw} (CH1) และสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_{L2} (CH2) ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A

4.4 การวัดรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D และกระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{sw}

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 4.7
2. จ่ายแรงดัน 15V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดัน 48V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. วัดรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{sw} และกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D ที่กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A และ 10A ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{sw} และกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์

ผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณค่ากระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{sw} และค่ากระแสไฟฟ้าไดโอด I_D ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 5A และ 10A แสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ ผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{sw} และกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D เปรียบเทียบกับทางทฤษฎีแสดงในตารางที่ 4.3

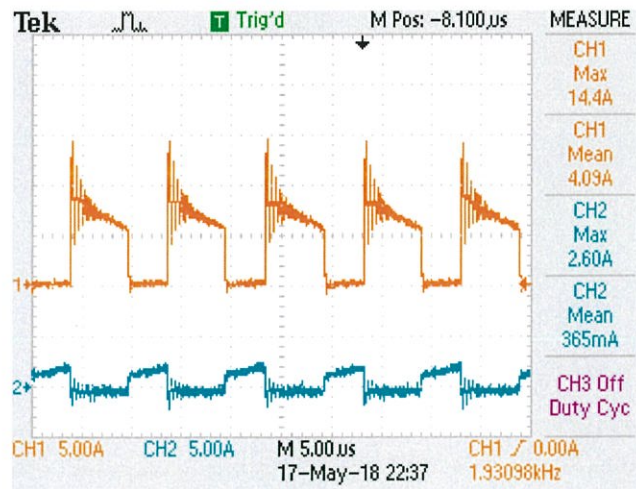
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{Sw} และกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี

$I_{Sw} \cdot L_{L2}$ I_o	I_{Sw}		I_D	
	ค่าจากการวัด	ค่าจากกคำนวณ*	ค่าจากการวัด	ค่าจากกาคำนวณ**
$I_o = 5A$	0.365A	0.521A	4.090A	4.479A
$I_o = 10A$	0.854A	1.041A	7.090A	8.958A

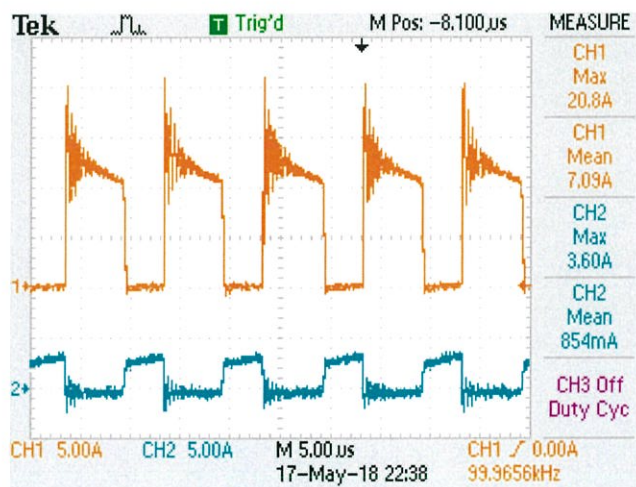
หมายเหตุ ในการคำนวณใช้ $D = 0.32$

* จากสมการ $I_{In} = I_{Sw} = I_{L1} = \frac{nDI_{Lm}}{n+1}$

** จากสมการ $I_D = nI_{Lm}$



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D (CH1) และกระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{L1} , I_{In} , I_{Sw} (CH2) ของวงจรแท่นป้อนดักเตอร์บuckคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A

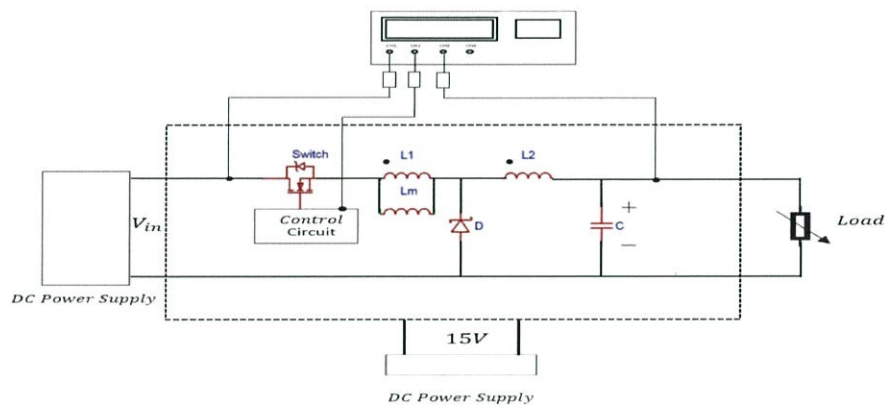


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D (CH1) และกระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{L1} , I_{In} , I_{Sw} (CH2) ของวงจรแท่นป้อนดักเตอร์บuckคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A

4.5 การวัดรูปสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียล D กระแสไฟฟ้าอินพุต I_{in} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 4.10
2. จ่ายแรงดัน 15V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดัน 48V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. วัดรูปคลื่นสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลกระแสไฟฟ้าอินพุต I_{in} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o ที่กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A และ 10A ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดรูปคลื่นสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลกระแสไฟฟ้าอินพุต I_{in} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o ของวงจรแท่นป้อนดีคองเวอร์เตอร์

ผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลกระแสไฟฟ้าอินพุต I_{in} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o ของวงจรแท่นป้อนดีคองเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 5A และ 10A แสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ ผลการวัดค่าดิฟเฟอเรนเชียลกระแสไฟฟ้าอินพุต I_{in} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o เปรียบเทียบกับทางทฤษฎีแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพอินพุต I_{In} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี

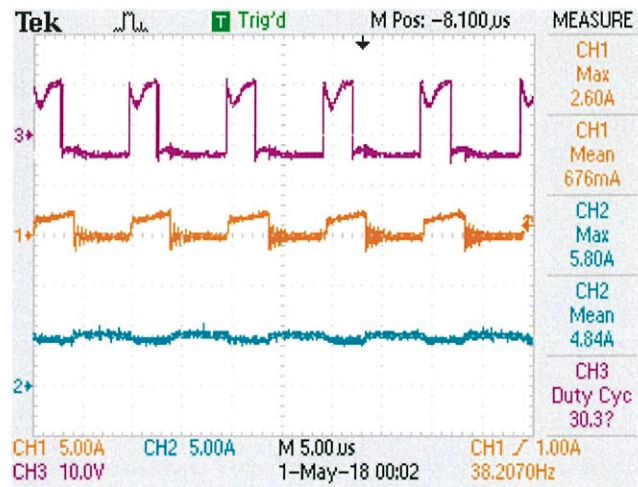
D, I_{In}, I_o	Duty Cycle		I_{In}		I_o	
	ค่าจากการวัด	ค่าจากการคำนวณ*	ค่าจากการวัด	ค่าจากการคำนวณ**	ค่าจากการวัด	ค่าจากการคำนวณ***
$I_o = 5A$	0.330	0.32	0.68A	0.521A	4.84A	5A
$I_o = 10A$	0.298	0.32	1.13A	1.04A	8.26A	10A

หมายเหตุ ในการคำนวณใช้ $D = 0.32$

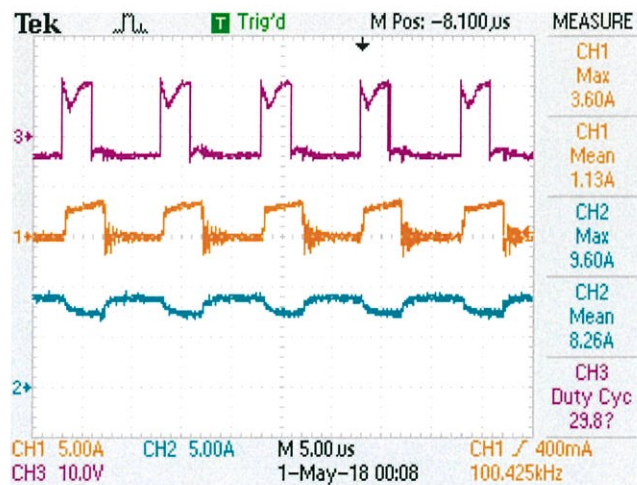
* จากสมการ $D = \frac{V_o n + V_o}{V_{in} + nV_o}$

** จากสมการ $I_{In} = I_{Sw} = I_{L1} = \frac{nDI_{Lm}}{n+1}$

*** จากสมการ $I_o = \frac{V_o}{R}$



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นสัญญาณดิวิตซ์เซลล์ D (CH3) กระแสไฟฟ้าอินพุต $I_{In} = I_{Sw} = I_{L1}$ (CH1) และ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o (CH2) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A



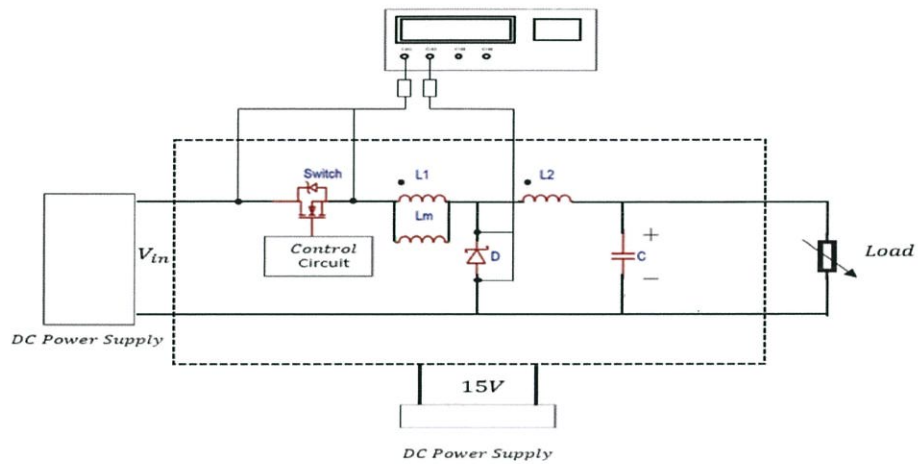
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นสัญญาณดิวิตซ์เซลล์ D (CH3) กระแสไฟฟ้าอินพุต $I_{In} = I_{Sw} = I_{L1}$ (CH1) และ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o (CH2) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A

4.6 การทดสอบวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันสวิตช์ V_{SW} และแรงดันไดโอด V_D

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 4.13
2. จ่ายแรงดัน 15V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดัน 48V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. บันทึกค่าแรงดันสวิตช์ V_{SW} และแรงดันไดโอด V_D ที่กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A ถึง 10A

ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันสวิตช์ V_{SW} และแรงดันไดโอด V_D ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์

ผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันสวิตช์ V_{SW} และแรงดันไดโอด V_D ของวงจรแก้ป้อนดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 5A และ 10A แสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ ผลการวัดค่าแรงดันสวิตช์ V_{SW} และแรงดันไดโอด V_D เปรียบเทียบกับทางทฤษฎีแสดงในตารางที่ 4.5

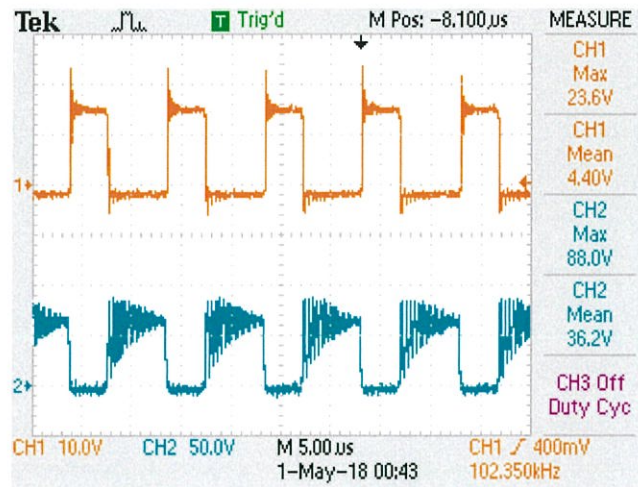
ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าสัญญาณแรงดันสวิตช์ V_{Sw} และแรงดันไดโอด V_D เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี

V_{Sw}, V_D I_o	V_{Sw}		V_D	
	ค่าจากการวัด	ค่าจากกคำนวณ*	ค่าจากการวัด	ค่าจากกาคำนวณ**
$I_o = 5A$	88.0V	63.235V	23.6V	15.625V
$I_o = 10A$	88.0V	63.235V	24.0V	63.235V

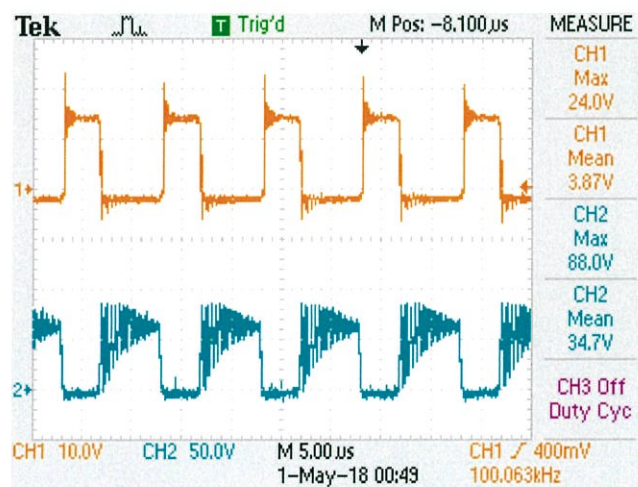
หมายเหตุ ในการคำนวณใช้ $D = 0.32$

* จากสมการ $V_{Sw} = V_{In} + n V_o$

** จากสมการ $V_D = \frac{nV_o + V_{In}}{n+1}$



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไดโอด V_D (CH1) และแรงดันสวิตช์ V_{sw} (CH2) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 5A

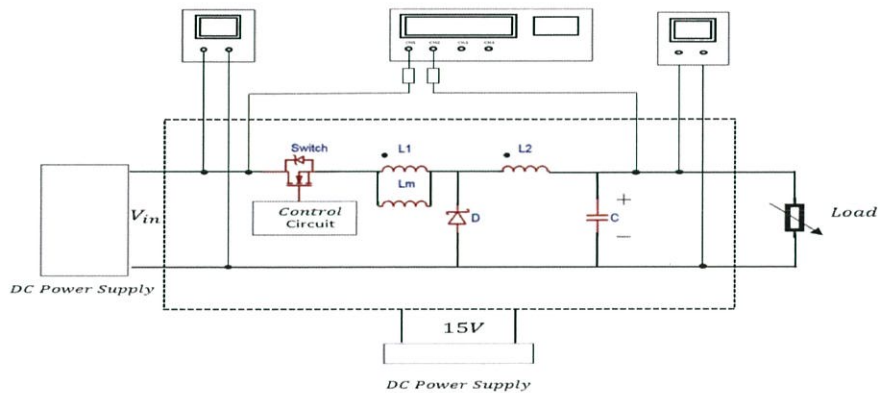


รูปที่ 4.15 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไดโอด V_D (CH1) และแรงดันสวิตช์ V_{sw} (CH2) ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ที่แรงดันอินพุต 48V กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10A

4.7 การทดสอบประสิทธิภาพ

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองดังรูปที่ 4.16
2. จ่ายแรงดัน 15V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดัน 48V จาก DC Power Supply ให้กับวงจรกำลัง
4. บันทึกสัญญาณแรงดันอินพุต (V_{in}) กระแสไฟฟ้ายินพุต (I_{in}) แรงดันเอาต์พุต (V_{out}) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_{out}) เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนจาก 5A เป็น 10A



รูปที่ 4.16 การจัดชุดทดลองสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของวงจรแท่นป้อนดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์

จากผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพ ของวงจรแท่นป้อนดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ที่แรงดัน 48V และค่ากระแสไหลตต่างๆ ตามตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าวงจรแท่นป้อนดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ มีค่าประสิทธิภาพที่ยังไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องมาจากพื้นฐานของวงจรแท่นป้อนดักเตอร์เป็นการประยุกต์ใช้หม้อแปลงมาช่วย เพื่อให้มีการลดแรงดันได้มากขึ้น และหม้อแปลงเป็นตัวที่เก็บสะสมพลังงานเอาไว้ที่บริเวณแอร์แก๊ป (Air Gap) และยิ่งผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในวงจรทำให้ไม่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้ดีเท่าที่ควร จึงทำให้เกิดการสูญเสียมากกว่าวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ปกติ

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรเมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลง

I_O	$I_{In,avg}$	V_{In}	$I_{Out,avg}$	V_{Out}	P_{In}	P_{Out}	$\eta(\%)$
$I_O = 5A$	0.676	48.47	4.84	5.141	32.76	24.88	75.9463
$I_O = 6A$	0.797	48.47	5.64	4.944	38.63	27.884	77.1822
$I_O = 7A$	0.836	48.47	6.39	4.790	40.52	30.608	75.538
$I_O = 8A$	0.936	48.47	6.99	4.651	45.37	32.51	71.655
$I_O = 9A$	1.030	48.47	7.65	4.482	49.92	34.289	68.689
$I_O = 10A$	1.113	48.47	8.26	4.321	54.77	35.6914	65.1659

หมายเหตุ สมการที่ใช้คำนวณหาประสิทธิภาพ

$$\eta = \frac{P_{Out}}{P_{In}} \times 100$$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการออกแบบ และหาแบบจำลองวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ในส่วนของการออกแบบวงจรภาคกำลังได้ประยุกต์ใช้ไดโอดมาต่อเข้ากับตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ทำให้สามารถลดทอนแรงดันได้มากกว่าวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบพื้นฐาน จะถูกเรียกว่า แท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ (Tapped Inductor Buck Converter) แบบจำลองที่ศึกษาจะใช้ตัวควบคุมแบบควบคุมวงเปิด (Open-Loop Control) ซึ่งจะสามารถส่งป้อนค่าตัวชี้ไขเคลได้เลย จากการทดสอบวงจรต้นแบบ อัตราส่วนการแปลงแรงดันจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนการพันของตัวเหนี่ยวนำ (Turn Ratio) และค่าตัวชี้ไขเคล จากการทดสอบวงจรต้นแบบแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ได้ข้อสรุปดังนี้

วงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ที่แรงดันอินพุต 48V และค่ากระแสไหลดต่างๆตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ ไม่สามารถรักษาแรงดันเอาต์พุตที่ 5V เอาไว้ได้ เนื่องจากจากโหลดมีค่าลดลงจะส่งผลให้แรงดันตก ในงานการทำงานของวงจร รูปที่ 4.2 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันตัวเก็บประจุ V_C ที่กระแสเอาต์พุต 5A และรูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันตัวเก็บประจุ V_C ที่กระแสเอาต์พุต 10A ตามลำดับ

ผลการวัดรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ L_1 ซึ่งในวงจรจะมีความสัมพันธ์ดังนี้ $I_{In} = I_{Sw} = I_{L1}$ และ L_2 ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 5A และ 10A จะสังเกตว่ากระแสไฟฟ้า L_2 มีค่ามากกว่า L_1 เนื่องจากด้าน L_1 เป็นด้านโวลต์สูงทำให้มีกระแสไฟฟ้าน้อย ส่วนด้าน L_2 เป็นด้านโวลต์ต่ำทำให้กระแสไฟฟ้าสูง รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยตัวเหนี่ยวนำเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี ตารางที่ 4.2

ผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณค่ากระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{Sw} และค่ากระแสไฟฟ้าไดโอด I_D ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 5A และ 10A รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 จะสังเกตว่ากระแสไฟฟ้าของไดโอดมีค่าสูงสุดมากกว่าสวิตช์ เนื่องจากจากกระแสไฟฟ้าด้านโวลต์ต่ำของหม้อแปลงจะมีกระแสไฟฟ้าสูง ทำให้เมื่อสวิตช์ไม่ทำงานส่งผลให้ทำงานนำกระแส ผลการวัดค่ากระแสไฟฟ้ามอสเฟส I_{Sw} และกระแสไฟฟ้าไดโอด I_D เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี ตารางที่ 4.3

ผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณตัวชี้ไขเคลกระแสไฟฟ้าอินพุต I_{In} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บัคคอนเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 5A และ 10A แสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 จะสังเกตว่าค่ากระแสอินพุตเป็นไปตามที่เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าจ่ายออกมาส่วน

กระแสเอาต์พุตเป็นไปตามช่วงที่กำหนดไว้และค่าตัวชี้ไขเคลคองที่ ผลการวัดค่าตัวชี้ไขเคลคองกระแสไฟฟ้าอินพุต I_{in} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_o เปรียบเทียบกับทางทฤษฎีแสดงในตารางที่ 4.4

ผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันสวิตช์ V_{sw} และแรงดันไดโอด V_D ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 5A และ 10A แสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ ค่าแรงดันสวิตช์มีค่ามากกว่าแรงดันไดโอด เนื่องจากต้องทนรับแรงดันจากแหล่งจ่ายโดยตรงจึงมีค่ามากกว่าแรงดันที่ไดโอด ไม่ว่าโหลดจะเปลี่ยนไปเท่าไรค่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดและสวิตช์จะมีค่าคงเดิม ผลการวัดค่าแรงดันสวิตช์ V_{sw} และแรงดันไดโอด V_D เปรียบเทียบกับทางทฤษฎีแสดงในตารางที่ 4.5

จากผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพ ของวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ที่แรงดัน 48V และค่ากระแสโหลดต่างๆ ตามตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าวงจรแท็ปอินดักเตอร์บักคอนเวอร์เตอร์ มีค่าประสิทธิภาพที่ยังไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากพื้นฐานของวงจรแท็ปอินดักเตอร์เป็นการประยุกต์ใช้หม้อแปลงมาช่วย เพื่อให้มีการลดแรงดันได้มากขึ้น และหม้อแปลงเป็นตัวที่เก็บสะสมพลังงานเอาไว้ที่บริเวณแอร์แก๊ป (Air Gap) และยิ่งผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในวงจรทำให้ไม่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้ดีเท่าที่ควร จึงทำให้เกิดการสูญเสียมากกว่าวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ปกติ

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

ในการออกแบบวงจรได้ออกแบบวงจรผิดพลาดบ่อยครั้ง ทำให้เสียเวลาในการออกแบบวงจรใหม่ และอุปกรณ์ในวงจรบางอย่างหาได้ยาก และการทดลองวงจรต้องใช้ความระมัดระวัง และถ้าต่อวงจรผิดอาจชำรุดเสียหายได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, **Fundamentals of Power Electronics**, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [2] L. Umanand, S. R. Bhat. **Design of Magnetic Components for Switched Mode Power Converters**. Wiley Eastern Limited. 1992.
- [3] Daniel W. Hart, “**Power Electronics Irwin Electronics & Computer Engineering**”, McGraw-Hill, 2011.
- [4] Grant Darroman, "Watkins-Johnson converter completes tapped inductor converter matrix", *Electronics Letters*, Vol. 39, Issue 3, 6 Feb. 2003
- [5] เกศสุดา การเกษ, “การจำลองและออกแบบวงจรควอดเทรทิก ดีซี – ดีซี คอนเวอร์เตอร์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556
- [6] Dr. Zainal Salam, “**Power Electronics and Drives**” ,Version 3, 2003.
- [7] Cheng, “**Tapped Inductor for Switched-Mode Power**” , Power Electronics Research Centre, Department of Electrical Engineering The Hong Kong Polytechnic University, 2006.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

DATASHEET

●Series

Super Fast Recovery

●Applications

General rectification

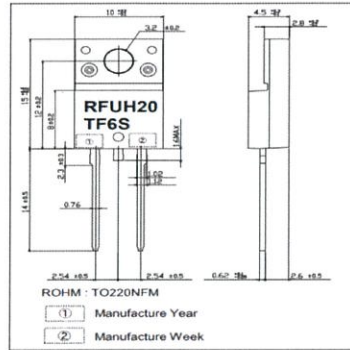
●Features

- 1) Ultra low switching loss
- 2) High current overload capacity

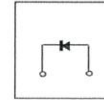
●Construction

Silicon epitaxial planer type

●Dimensions(Unit : mm)



●Structure



●Absolute Maximum Ratings(Tc=25°C)

Parameter	Symbol	Conditions	Limits	Unit
Repetitive peak reverse voltage	V_{RM}	Duty ≤ 0.5	600	V
Reverse voltage	V_R	Direct voltage	600	V
Average rectified forward current	I_O	60Hz half sin wave, Resistive load, Tc=27°C	20	A
Forward current surge peak	I_{FSM}	60Hz half sin wave, Non-repetitive at Tj=25°C	100	A
Junction temperature	Tj		150	°C
Storage temperature	Tstg		-55 to +150	°C



R6047ENZ1

Nch 600V 47A Power MOSFET

Data Sheet

V_{DSS}	600V
$R_{DS(on)}$ (Max.)	0.072Ω
I_D	47A
P_D	120W

●Features

- 1) Low on-resistance.
- 2) Fast switching speed.
- 3) Gate-source voltage (V_{GSS}) guaranteed to be $\pm 20V$.
- 4) Drive circuits can be simple.
- 5) Parallel use is easy.
- 6) Pb-free lead plating ; RoHS compliant

●Application

Switching Power Supply

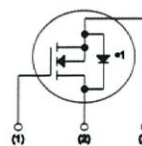
●Absolute maximum ratings (T = 25°C)

●Outline

TO-247



●Inner circuit



(1) Gate
(2) Drain
(3) Source

*1 BODY DIODE

●Packaging specifications

Type	Packaging	Tube
	Reel size (mm)	-
	Tape width (mm)	-
	Basic ordering unit (pcs)	450
	Taping code	C9
	Marking	R6047ENZ1

CD4049UB and CD4050B CMOS Hex Inverting Buffer and Converter
1 Features

- CD4049UB Inverting
- CD4050B Noninverting
- High Sink Current for Driving 2 TTL Loads
- High-to-Low Level Logic Conversion
- 100% Tested for Quiescent Current at 20 V
- Maximum Input Current of 1 μ A at 18 V Over Full Package Temperature Range; 100 nA at 18 V and 25°C
- 5-V, 10-V, and 15-V Parametric Ratings

2 Applications

- CMOS to DTL or TTL Hex Converters
- CMOS Current Sink or Source Drivers
- CMOS High-to-Low Logic Level Converters

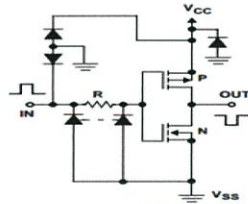
3 Description

The CD4049UB and CD4050B devices are inverting and noninverting hex buffers, and feature logic-level conversion using only one supply voltage (V_{CC}). The input-signal high level (V_{IH}) can exceed the V_{CC} supply voltage when these devices are used for logic-level conversions. These devices are intended for use as CMOS to DTL or TTL converters and can drive directly two DTL or TTL loads. ($V_{CC} = 5$ V, $V_{OL} \leq 0.4$ V, and $I_{OL} \geq 3.3$ mA.)

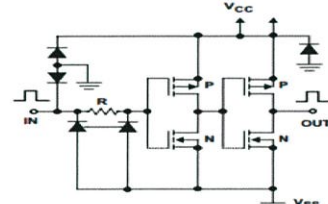
Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
CD4049UBE, CD4050BE	PDIP (16)	3.90 mm × 19.30 mm
CD4049UBD, CD4050BD	SOIC (16)	9.90 mm × 3.91 mm
CD4049UBDW, CD4050BDW	SOIC (16)	10.30 mm × 7.50 mm
CD4049UBNS, CD4050BNS	SO (16)	19.30 mm × 6.35 mm
CD4049UBPW, CD4050BPW	TSSOP (16)	5.00 mm × 4.40 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Schematic Diagram of CD4049UB


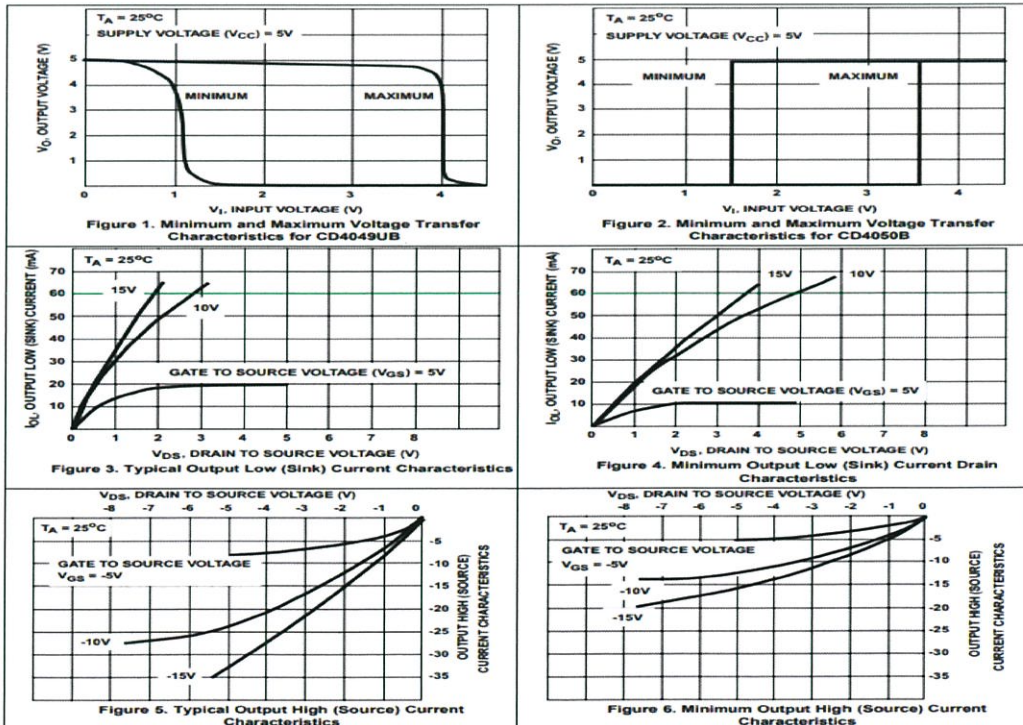
Copyright © 2016,
Texas Instruments Incorporated
1 of 6 Identical Units

Schematic Diagram of CD4050B


Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated
1 of 6 Identical Units

CD4049UB, CD4050B

SCHS046J – AUGUST 1998 – REVISED SEPTEMBER 2016

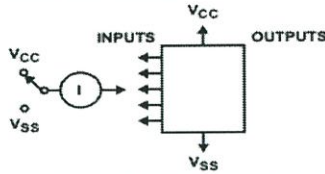
6.7 Typical Characteristics


CD4049UB, CD4050B

SCHS046J – AUGUST 1998 – REVISED SEPTEMBER 2016

www.ti.com

Test Circuits (continued)



Measure inputs sequentially, to both VCC and VSS connect all unused inputs to either VCC or VSS.

Figure 12. Input Current Test Circuit

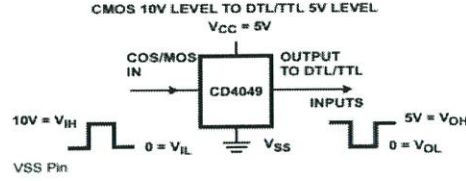
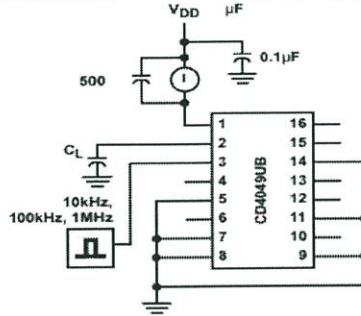


Figure 13. Logic Level Conversion Application



CL includes fixture capacitance.

Figure 14. Dynamic Power Dissipation Test Circuits

UC1825
UC2825
UC3825

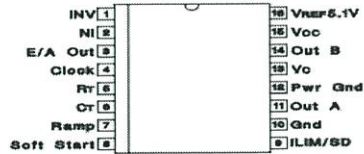
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

Supply Voltage (Pins 13, 15)	30V
Output Current, Source or Sink (Pins 11, 14)	0.5A
DC	2.0A
Pulse (0.5 s)	5mA
Analog Inputs	-0.3V to 7V
(Pins 1, 2, 7)	-0.3V to 6V
Clock Output Current (Pin 4)	-5mA
Error Amplifier Output Current (Pin 3)	5mA
Soft Start Sink Current (Pin 8)	20mA
Oscillator Charging Current (Pin 5)	5mA
Power Dissipation	1W
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	300°C

Note 1: All voltages are with respect to GND (Pin 10); all currents are positive into, negative out of part; pin numbers refer to DIL-16 package.

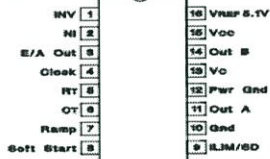
Note 3: Consult Unitrode Integrated Circuit Databook for thermal limitations and considerations of package.

SOIC-16 (Top View)
DW Package

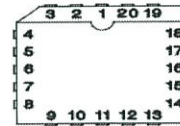


CONNECTION DIAGRAMS

DIL-16 (Top View)
J or N Package



PLCC-20 & LCC-20
(Top View)
Q & L Packages



PACKAGE PIN FUNCTION	FUNCTION	PIN
	N/C	1
	INV	2
	NI	3
	E/A Out	4
	Clock	5
	N/C	6
	Rt	7
	Ct	8
	Ramp	9
	Soft Start	10
	N/C	11
	ILIM/SD	12
	Gnd	13
	Out A	14
	Pwr Gnd	15
	N/C	16
	Vc	17
	Out B	18
	Vcc	19
	VREF 5.1V	20

THERMAL RATINGS TABLE

Package	θ_{JA}	θ_{JC}
DIL-16J	80-120	28 ⁽²⁾
DIL-16N	90 ⁽¹⁾	45
PLCC-20	43-75 ⁽¹⁾	34
LCC-20	70-80	20 ⁽²⁾
SOIC-16	50-120 ⁽¹⁾	35

(1) Specified θ_{JA} (junction to ambient) is for devices mounted to 5in² FR4 PC board with one ounce copper where noted. When resistance range is given, lower values are for 5in² aluminum PC board. Test PWB was 0.062in thick and typically used 0.635mm trace widths for power packages and 1.3mm trace widths for non-power packages with 100 x 100 mil probe land area at the end of each trace.

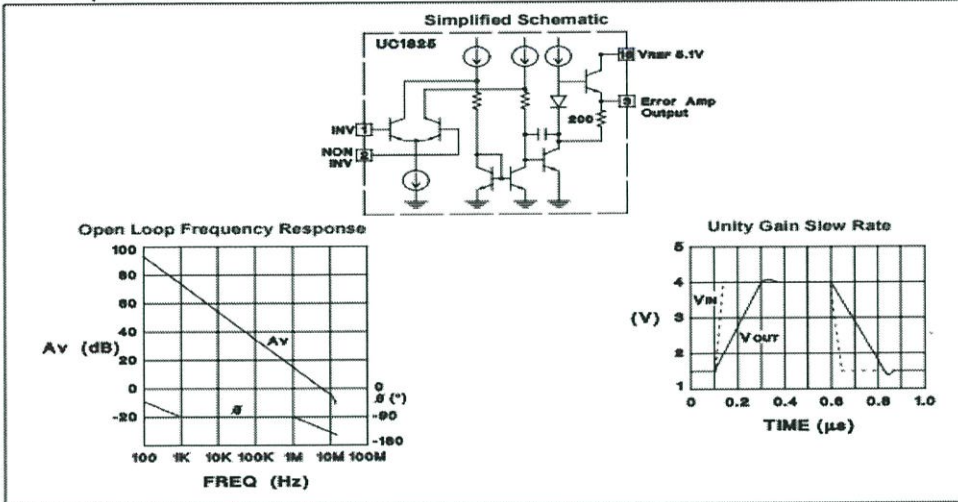
UC1825
UC2825
UC3825

Printed Circuit Board Layout Considerations

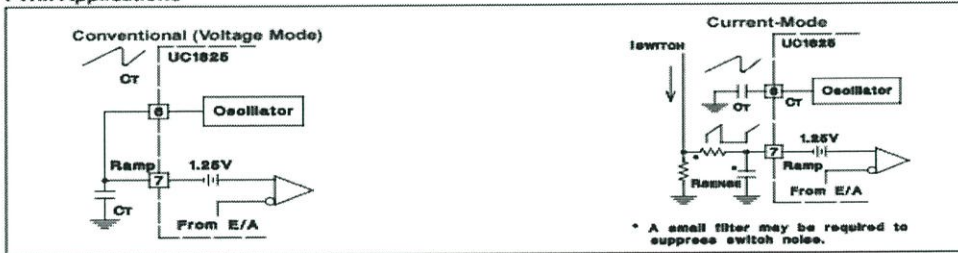
High speed circuits demand careful attention to layout and component placement. To assure proper performance of the UC1825 follow these rules: 1) Use a ground plane. 2) Damp or clamp parasitic inductive kick energy from the gate of driven MOSFETs. Do not allow the output pins to ring below ground. A series gate resistor or a shunt 1 Amp Schottky diode at the output pin will serve

this purpose. 3) Bypass VCC, VC, and VREF. Use 0.1µF monolithic ceramic capacitors with low equivalent series inductance. Allow less than 1 cm of total lead length for each capacitor between the bypassed pin and the ground plane. 4) Treat the timing capacitor, CT, like a bypass capacitor.

Error Amplifier Circuit



PWM Applications



ภาคผนวก ข

ลายวงจร

