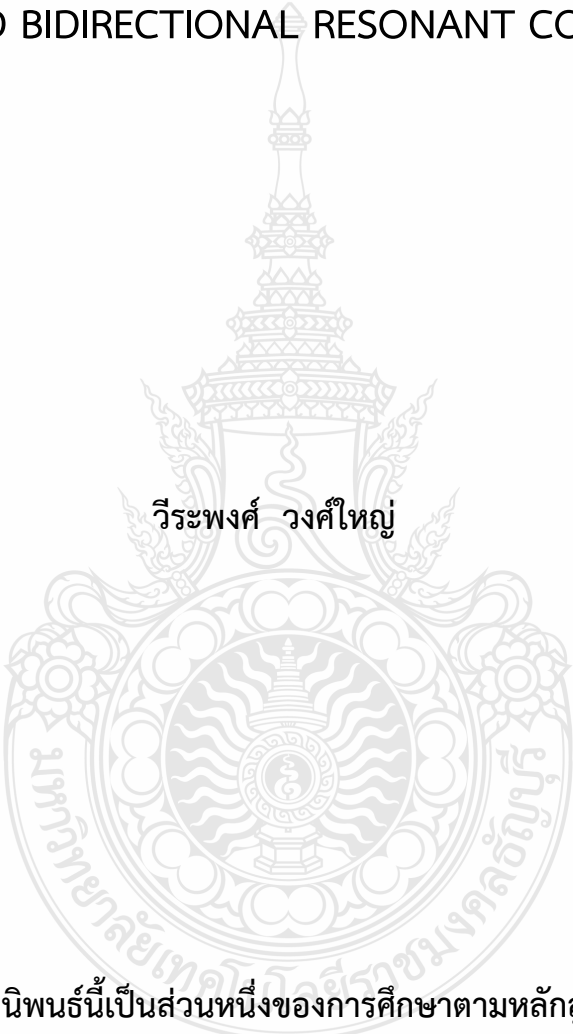


ระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรม
วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง

PHOTOVOLTAIC CELL ENERGY TRANSFER SYSTEM USING SERIES
CONNECTED BIDIRECTIONAL RESONANT CONVERTERS



วีระพงศ์ วงศ์ใหญ่

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรม
วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง

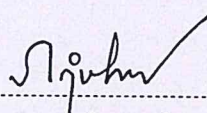
วีระพงศ์ วงศ์ใหญ่

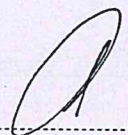
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

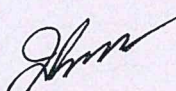
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง
Photovoltaic Cell Energy Transfer System Using Series Connected Bidirectional Resonant Converters

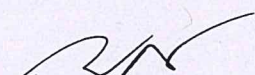
ชื่อ - นามสกุล นายวีระพงษ์ วงศ์ใหญ่
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.
ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สายชล ชุตเจื้อจิ้น, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนตรี นาวงษ์, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 21 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง
ชื่อ - นามสกุล	นายวีระพงศ์ วงศ์ใหญ่
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น และมีการส่งเสริมให้ติดตั้งตามที่พักอาศัยเพื่อเป็นพลังงานทดแทนร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อใช้เป็นระบบไฟฟ้าสำรอง และเนื่องจากคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปมักจะเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้า โดยจะเกิดในช่วงระหว่างการสวิตช์ ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ค่อนข้างต่ำ ซึ่งสามารถลดการเกิดค่าความสูญเสียได้โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ นอกจากนี้ระบบไฟฟ้าที่ใช้ตามที่พักอาศัยโดยทั่วไปจะมีแรงดัน 220 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าพิกัดแรงดันของแบตเตอรี่ ดังนั้นการนำพลังงานจากแบตเตอรี่มาใช้จะต้องเพิ่มระดับแรงดันให้สูงขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ แบตเตอรี่ และระบบกริดอินเวอร์เตอร์ โดยใช้ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทางนำมาต่ออนุกรมจำนวน 2 ชุด เพื่อศึกษาการเพิ่มระดับแรงดันและการควบคุมแรงดันด้านเข้าของระบบกริดอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าพลังงานคงที่ด้วยวิธีการปรับค่าวัฏจักรการทำงานและความถี่ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาวิเคราะห์การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทางด้วยการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปทำการทดสอบจริง

ผลจากการทดสอบจริงจะเห็นได้ว่าการปรับค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50 วัดแรงดันด้านเข้าของระบบกริดอินเวอร์เตอร์ได้ 48.2 โวลต์ เมื่อปรับค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 10 จะสามารถเพิ่มแรงดันด้านเข้าของระบบกริดอินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งวัดแรงดันได้เท่ากับ 150.4 โวลต์ และสามารถควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานในย่านที่เหมาะสมได้ โดยสวิตช์เป็นแบบนำกระแสขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ ทำให้ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการสวิตช์นี้มีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลให้วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทางสามารถถ่ายเทพลังงานและควบคุมแรงดันด้านเข้าระบบกริดอินเวอร์เตอร์ตามต้องการได้

คำสำคัญ : คอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง การสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ ระบบการถ่ายเทพลังงาน

Thesis Title Photovoltaic Cell Energy Transfer System Using Series Connected Bidirectional Resonant Converters
Name - Surname Mr. Weerapong Wongyai
Program Electrical Engineering
Thesis Advisor Assistant Professor Nathabhat Phankong, Ph.D.
Academic Year 2019

ABSTRACT

The use of solar-powered panels for electricity generation as a renewable energy option is increasing. Thus, solar-powered panels and batteries were installed in more residences. Using normal converters, the efficiency of the solar panels were usually reduced because of a switching loss; however, a zero-voltage switching system could be used to reduce the loss. For domestic use, the supply voltage was 220V that was higher than the rated voltage of the solar batteries so the battery voltage needed to be increased.

This thesis introduced an energy transfer system using a series connected bidirectional resonant converter for a photovoltaic module including solar-powered panels, a battery, and a grid tie inverter. The purpose of the study was to investigate the use of asymmetrical duty cycle control and frequency control techniques in increasing and controlling input voltage of the grid tie inverter in order to obtain the desired voltage. The performance of the bidirectional resonant converter was analyzed using a simulation program before the experiment.

It was found that the input voltage of the grid inverter was 48.2 V when the asymmetrical duty cycle was adjusted by 50 percent. While the input voltage of the grid inverter was 150.4 V when the asymmetrical duty cycle was adjusted by 10 percent. Moreover, the converter circuit was controlled and worked in a suitable frequency range when the zero voltage switch mode was operated. This resulted in no switching losses. Therefore, the bidirectional resonant converter could transfer the energy and control the input voltage of the grid inverter to the desired level.

Keywords: bidirectional converter, zero voltage switching system, energy transfer system

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือและคำแนะนำจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนชี้แนะทางในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง และกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนทล นาวงษ์ กรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจื้อจิ้น ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณห้องวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเพื่อ สถานที่ วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่เป็น กำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา และรวมถึงพี่น้องๆ ที่ม งานวิจัย ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้กำลังใจและร่วมแรงร่วมใจอยู่ด้วยกันในการปฏิบัติงานตลอดมา

วีระพงศ์ วงศ์ใหญ่



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	15
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	15
1.4 วิธีการดำเนินการ.....	15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell).....	16
2.2 ดิซีสทูตีสคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter).....	17
2.3 การออกแบบวงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์.....	24
2.4 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	32
2.5 วงจรขับเคลื่อน.....	34
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	34
2.7 รีเลย์ (Relay).....	35
2.8 เรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์.....	37
2.9 การควบคุมการไหลของพลังงานด้วยคอนเวอร์เตอร์สองทิศทาง.....	38
2.10 อินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	38
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์.....	42
3.1 การดำเนินการวิทยานิพนธ์.....	42
3.2 การวิเคราะห์วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	43
3.3 การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	44
3.4 แนวทางการควบคุมของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง.....	44
3.5 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	45
3.6 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.7 การออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	46
3.8 แบบจำลอง (Simulation).....	50
3.9 ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	52
4.1 ผลการทดลองที่ได้แบบจำลอง (Simulation Results).....	52
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Experimental Results).....	54
4.3 สรุป.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการทำวิทยานิพนธ์.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	72

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย.....	46
ตารางที่ 4.1 PARAMETERS OF THE SYSTEM	54
ตารางที่ 4.2 แรงดันด้านออก และการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน.....	62



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	วงจรคอนเวอร์เตอร์โดยทั่วไป..... 12
รูปที่ 1.2	ลักษณะสัญญาณของสวิตช์..... 12
รูปที่ 1.3	วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์..... 13
รูปที่ 1.4	ลักษณะสัญญาณของสวิตช์วงจรเรโซแนนซ์..... 13
รูปที่ 1.5	การควบคุมการทำงานของสวิตช์แบบปรับค่าวัฏจักรการทำงาน..... 13
รูปที่ 1.6	ระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรม วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง..... 14
รูปที่ 2.1	หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์..... 17
รูปที่ 2.2	วงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันกระแสตรง..... 18
รูปที่ 2.3	วงจรการทำงานของวงจรทระดับแรงดันกระแสตรง..... 18
รูปที่ 2.4	วงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันกระแสตรง..... 22
รูปที่ 2.5	วงจรการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันกระแสตรง..... 22
รูปที่ 2.6	ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์ในรูปทรงต่างๆ..... 25
รูปที่ 2.7	เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแกนเฟอร์ไรต์..... 26
รูปที่ 2.8	ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ของเนื้อสารชนิด 6H20 7H20 และ 7H10..... 27
รูปที่ 2.9	โครงสร้างและคุณลักษณะของมอสเฟตกำลัง..... 33
รูปที่ 2.10	โครงสร้างและคุณลักษณะของไอจีบีที..... 33
รูปที่ 2.11	วงจรภายในไอซีเบอร์ TLP250..... 34
รูปที่ 2.12	โครงสร้างและสัญลักษณ์ของชุดหน้าสัมผัสแบบ 4 PST..... 36
รูปที่ 2.13	การควบคุมมอเตอร์เฟสลับด้วยสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์..... 39
รูปที่ 2.14	การควบคุมมอเตอร์เฟสลับด้วยสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้า..... 39
รูปที่ 3.1	สวิตช์ทำงานแบบฮาร์ดสวิตซ์ซิ่ง (Hard Switching)..... 42
รูปที่ 3.2	สวิตช์ทำงานแบบซอร์ฟสวิตซ์ซิ่ง (Soft Switching)..... 43
รูปที่ 3.3	การต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์และให้สวิตช์ทำงานแบบซอร์ฟสวิตซ์ซิ่ง..... 43

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.4 การต่อวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	44
รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมแบบ Feedback Circuit	45
รูปที่ 3.6 เพาเวอร์มอสเฟต เบอร์ IRF3205	49
รูปที่ 3.7 วงจรจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	50
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชุดควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง	51
รูปที่ 4.1 ระบบถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์	52
รูปที่ 4.2 การทำงานของสวิตช์ S1 และ สวิตช์ S2	53
รูปที่ 4.3 การทำงานของสวิตช์ S3 และ สวิตช์ S4	53
รูปที่ 4.4 ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์	54
รูปที่ 4.5 การต่อแบตเตอรี่กับใช้โหลดเป็นความต้านทานขนาด 1,000 โอห์ม	55
รูปที่ 4.6 สัญญาขั้วเกิดของสวิตช์ S1 และ สวิตช์ S2	55
รูปที่ 4.7 สัญญาขั้วเกิดของสวิตช์ S3 และ สวิตช์ S4	56
รูปที่ 4.8 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S1	56
รูปที่ 4.9 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S2	57
รูปที่ 4.10 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S3	57
รูปที่ 4.11 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S4	57
รูปที่ 4.12 การต่อระบบถ่ายเทพลังงานกับกริดอินเวอร์เตอร์และโซลาร์เซลล์	58
รูปที่ 4.13 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S1 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50	58
รูปที่ 4.14 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S2 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50	59
รูปที่ 4.15 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S3 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50	59
รูปที่ 4.16 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S4 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50	59

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S1 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 40	60
รูปที่ 4.18 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S2 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 40	60
รูปที่ 4.19 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S3 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 40	60
รูปที่ 4.20 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S4 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 40	61
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออก กับการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน	61

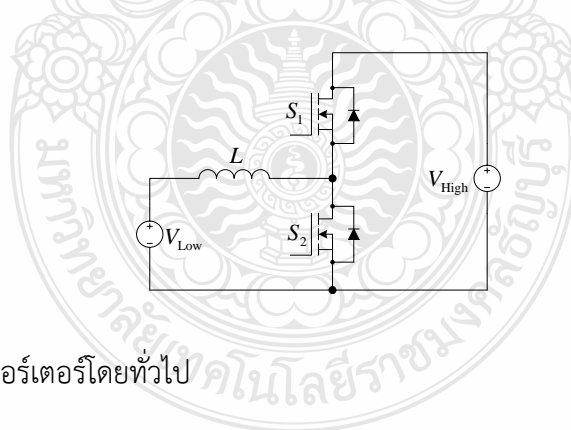


บทที่ 1

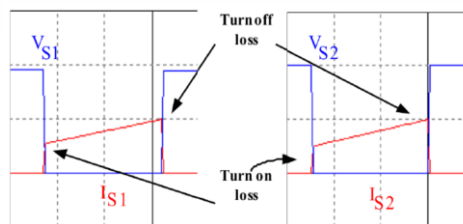
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยแหล่งพลังงานจากธรรมชาติมีอยู่อย่างจำกัดและความต้องการในการใช้พลังงานของประเทศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ต้องมีการจัดหาแหล่งพลังงานเพื่อมาทดแทน โดยมีแหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นตัวเลือกเพื่อมาลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของประเทศ การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานภาครัฐและเอกชน ต้นทุนของระบบการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง มีการส่งเสริมงานวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีความก้าวหน้ามากยิ่งขึ้นด้วยแต่ระบบจัดเก็บพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีประสิทธิภาพต่ำ ระบบการถ่ายเทพลังงานที่ใช้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ระบบต้องไม่เกิดความสูญเสียหรือเกิดความสูญเสียให้น้อยที่สุดในช่วงระหว่างการถ่ายเทพลังงาน วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการถ่ายเทพลังงานจึงควรมีความสูญเสียน้อยที่สุด และโดยทั่วไปความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขณะที่อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเปลี่ยนสถานะการทำงาน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สูญเสียขณะนำกระแส (Conduction Loss) และขณะสวิตซ์ซิ่ง (Switching Loss) ซึ่งการสูญเสียขณะนำกระแส จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์สวิตซ์ที่เลือกใช้ แต่การสูญเสียขณะสวิตซ์ซิ่ง จะขึ้นอยู่กับความถี่การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ โดยคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบทั่วไปจะเป็นแบบสองทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และมีลักษณะสัญญาณของสวิตซ์ซิ่งทำงานดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งจะเรียกการสวิตซ์แบบนี้ว่าการสวิตซ์แบบฮาร์ดสวิตซ์ (Hard Switching)

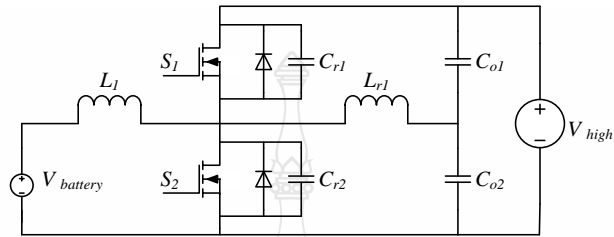


รูปที่ 1.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์โดยทั่วไป

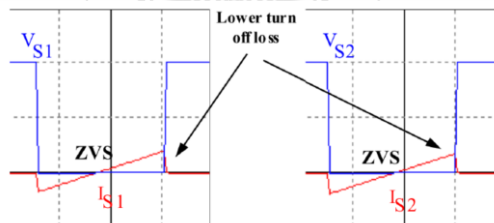


รูปที่ 1.2 ลักษณะสัญญาณของสวิตซ์

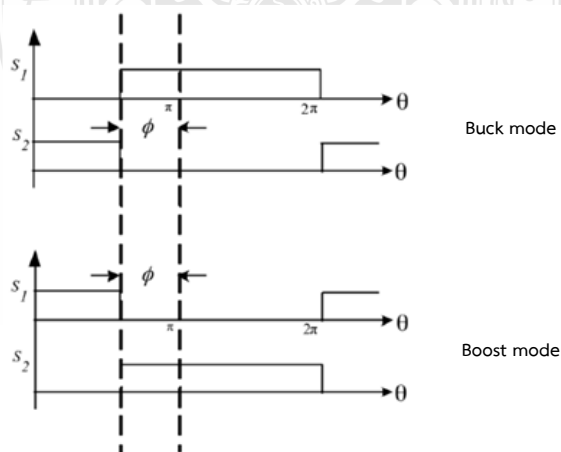
ความสูญเสียขณะสวิตช์ซิ่ง (Switching Loss) สามารถลดการเกิดค่าความสูญเสียนี้ได้โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบซอฟต์สวิตช์ (Soft Switching) โดยเลือกวิธีการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching : ZVS) ซึ่งจะใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยมีลักษณะสัญญาณของสวิตช์ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 และมีการควบคุมการทำงานของสวิตช์แบบปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์

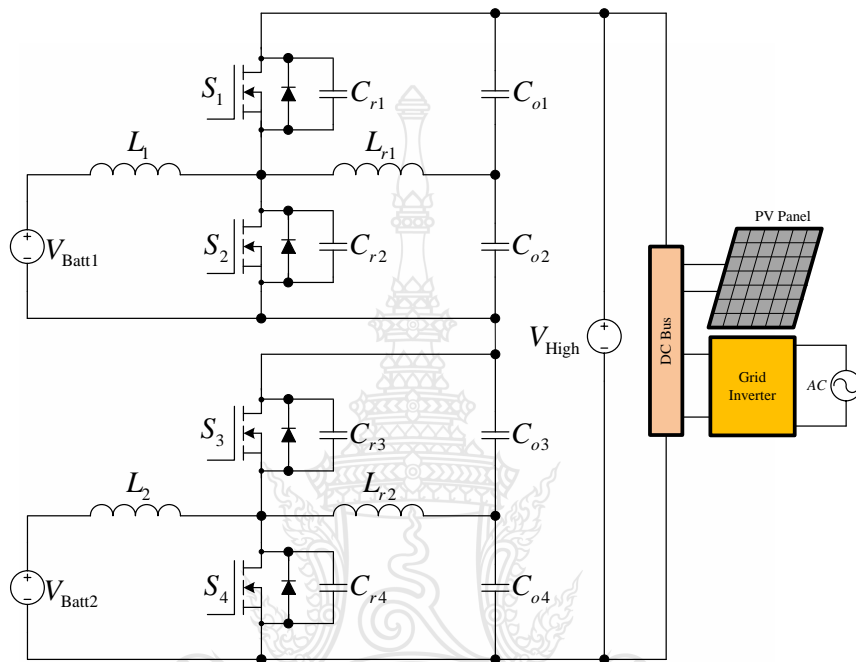


รูปที่ 1.4 ลักษณะสัญญาณของสวิตช์วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์



รูปที่ 1.5 การควบคุมการทำงานของสวิตช์แบบปรับวัฏจักรการทำงาน

นอกจากนี้ ระบบการจัดเก็บพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ โดยพิกัดของแบตเตอรี่จะต่ำกว่าระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าที่ใช้ตามที่พกอาศัย ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาการเพิ่มระดับแรงดันของระบบให้สูงขึ้น การวิจัยครั้งนี้จึงนำเสนอการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์จำนวน 2 ชุด เพื่อเพิ่มระดับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง

วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง ใช้ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทางนำมาต่ออนุกรมจำนวน 2 ชุด เพื่อศึกษาการเพิ่มระดับแรงดันและการควบคุมแรงดันด้านเข้าของระบบกริดอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าพลังงานคงที่ด้วยวิธีการปรับค่าวัฏจักรการทำงานและความถี่ โดยควบคุมให้สวิตช์ทำงานในช่วงที่นำกระแสขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ จะเห็นได้ว่าสวิตช์มีการสูญเสียลดลง โดยแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากคาปาซิเตอร์ที่ต่อคร่อมอยู่กับสวิตช์ การควบคุมแรงดันด้านเข้าของระบบกริดอินเวอร์เตอร์จะพิจารณาเมื่อแรงดันด้านแรงดันต่ำ (ด้านแบตเตอรี่) มีค่าต่ำลง วงจรจะมีการประจุกระแสอย่างรวดเร็วจากแหล่งจ่ายพลังงานโซลาร์เซลล์ และเมื่อแรงดันด้านแรงดันสูง (ด้านกริดอินเวอร์เตอร์) มีค่าต่ำลง วงจรจะมีการจ่ายกระแสอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ระบบการถ่ายเทพลังงานดังกล่าวนี้จึงถูกนำเสนอเพื่อถ่ายเทพลังงานระหว่างด้านแบตเตอรี่กับด้านกริดอินเวอร์เตอร์ และจะควบคุมแรงดันด้านเข้าของกริดอินเวอร์เตอร์ให้ได้ตามพิกัดที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง

1.2.2 เพื่อศึกษาการควบคุมกระแสของวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทางโดยให้สวิตช์นำกระแสในขณะที่แรงดันเป็นศูนย์

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 สร้างแบบจำลองระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง

1.3.2 ออกแบบ สร้าง และทดสอบวงจรจริง ของระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง

1.3.3 พิกัดกำลังต่อหนึ่งชุดของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ไม่น้อยกว่า 100 วัตต์

1.4 วิธีการดำเนินการ

1.4.1 ค้นคว้า ศึกษาและสรุปรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง

1.4.2 จำลองผลการทำงานของระบบถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง

1.4.3 จัดหาอุปกรณ์ เครื่องมือวัดที่จำเป็น สำหรับงานวิจัย และออกแบบระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง

1.4.4 สร้างและทดสอบจริง ระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการอนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง

1.4.5 สร้างและทดสอบการควบคุมกระแสของระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง

1.4.6 วิเคราะห์และเก็บผลการทดลอง

1.4.7 สรุปผลการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถใช้เป็นวงจรต้นแบบในการวิจัยพัฒนาหรือการนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมของประเทศ

1.5.2 สามารถนำผลงานที่สำเร็จตีพิมพ์เป็นวารสารงานวิจัยในระดับประเทศและต่างประเทศ

1.5.3 สามารถลดการนำเข้าวัสดุอุปกรณ์จากต่างประเทศได้

1.5.4 สามารถจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

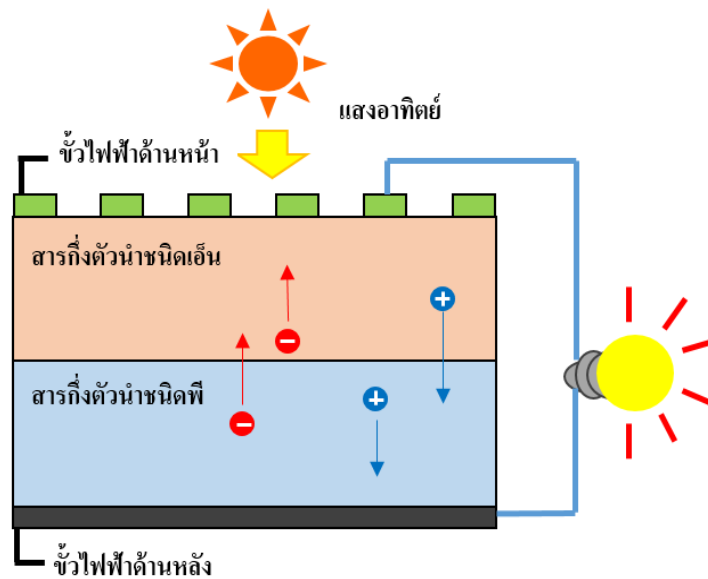
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการถ่ายเทพลังงานของวงจรถอมนเวอ์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในส่วนที่เป็นงานวิจัยในระดับประเทศและผลงานวิจัยระดับนานาชาติที่ได้ดำเนินการไปแล้วเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาปรับปรุงพัฒนาการดำเนินการวิจัยให้ได้รับผลสำเร็จและเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งประกอบด้วยหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่สำคัญ

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้สารกึ่งตัวนำมาเป็นส่วนประกอบ เช่น ซิลิคอน เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ จะมีราคาถูกที่สุดและสามารถหาได้มากที่สุด นำมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางและบริสุทธิ์ โดยมีหลักการทำงานคือเมื่อแสงตกกระทบบริเวณพื้นผิวบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ รังสีของแสงนี้จะมีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน จะมีการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำ ถ่ายเทพลังงานจนทำให้มีพลังงานมากเพียงพอที่จะสามารถหลุดพ้นออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอมได้ และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรแล้วก็จะเกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เมื่อพิจารณาจากลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะช่วยในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันได้

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เมื่อแสงอาทิตย์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ และจะเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำ และเมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและช่องว่างที่มีอยู่ในโมเลกุลของอะตอม (โฮล) จะสามารถเกิดการเคลื่อนที่หากมีพลังงานเพียงพอ ทั้งอิเล็กตรอนและโฮล จะวิ่งเข้าหากันเพื่อเกิดการจับคู่ อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้นสารกึ่งตัวนำที่เป็นชนิดเอ็น ส่วนโฮล จะวิ่งไปยังชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 อิเล็กตรอนจะวิ่งไปรวมกันที่ขั้วไฟฟ้าด้านหน้า และโฮลจะวิ่งไปรวมกันที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง หากทำการต่อวงจรไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้ครบวงจรแล้วก็จะสามารถเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นได้



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

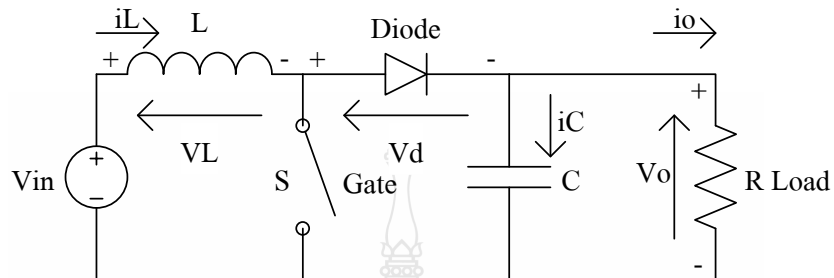
2.2 ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter)

ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันกระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ ให้ได้แรงดันกระแสตรงด้านออก ที่สามารถปรับค่าได้ตามที่ต้องการ โดยใช้หลักการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ สำหรับอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์นี้จะมีวิธีการอยู่ 2 แบบ ได้แก่ แบบแรก จะเป็นแบบ Constant - frequency จะเป็นวงจรที่ควบคุมให้ Time Period (T) คงที่ จากนั้นจะทำการปรับเวลา ON Time การควบคุมในกระบวนการนี้จะเรียกว่า Pulse-Width-Modulation (PWM) แบบที่สองจะเป็นแบบ Variable - frequency ซึ่งเป็นวงจรที่ปรับ Time Period (T) โดยทำการปรับ ON Time หรือ OFF Time การควบคุมในลักษณะนี้จะเรียกว่า Frequency-modulation แต่เนื่องจากการความถี่จะมีการเปลี่ยนแปลงในย่านกว้าง ทำให้การควบคุมในลักษณะนี้ จะยากต่อการฟิลเตอร์ ในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ที่ปกติจะใช้ในวงจรนั้น สามารถแบ่งชนิดได้อีก 2 แบบ ได้แก่ แบบแรกจะเป็นแบบที่ทำให้กระแสหยุดไหลด้วยการบีบบังคับ (Forced Commutation) คือ เอสซีอาร์ การใช้งานจะนำมาใช้ในงานในย่านความถี่ต่ำ ส่วนแบบที่สอง จะเป็นแบบที่ทำให้กระแสหยุดไหลได้ด้วยตัวเอง (Self Commutation) คือ เพาเวอร์มอสเฟต จีทีโอ และ ไอจีบีที จะนำมาใช้ในงานในย่านความถี่สูง

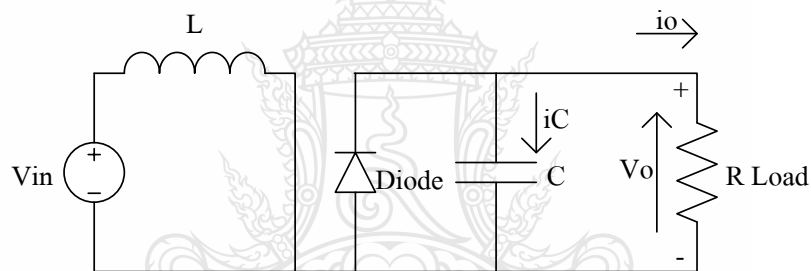
2.2.1 คอนเวอร์เตอร์แบบทบระดับแรงดันกระแสตรง (Boost Converter)

คอนเวอร์เตอร์แบบทบระดับแรงดันกระแสตรงเป็นสวิตช์ซึ่งชนิดหนึ่งที่ทำงานได้โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ความถี่สูงทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันด้านออก ให้สูงกว่าระดับแรงดันด้านเข้า โดยอาศัยคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงในการเก็บและคายพลังงาน การทำให้ระดับแรงดันด้านออกสูงกว่าระดับแรงดันด้านเข้าจึงเรียกว่า สเต็ปอัพคอนเวอร์เตอร์ (Step - up Converter) จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนวงจรกำลัง ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

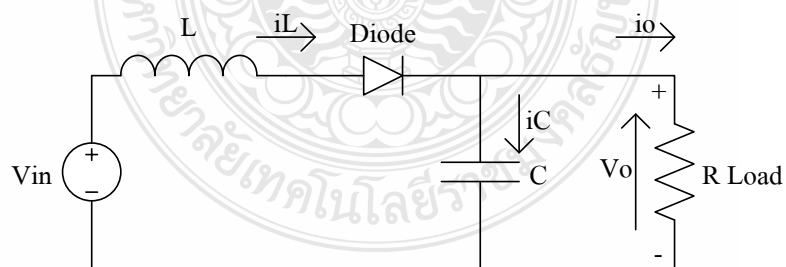
ตัวเก็บประจุด้านออก ไดโอดกำลังซึ่งทำหน้าที่สวิตช์ และอีกส่วนคือ วงจรกรองแรงดัน เป็นวงจรทำหน้าที่ควบคุมการทำงานคอนเวอร์เตอร์ เพื่อรักษาระดับแรงดันด้านออกให้คงที่ วงจรสมมูลของวงจรทบทระดับแรงดันกระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.2 การทำงานวงจรทบทระดับแรงดันกระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวงจรทบทระดับแรงดันกระแสตรง



โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด



โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด

รูปที่ 2.3 วงจรการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันกระแสตรง

2.2.1.1 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์ปิด

จากรูปที่ 2.3 โหมดที่ 1 ($0 < t \leq t_{on}$) มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์ปิด ($t = 0$) กระแสด้านเข้าไหลผ่านมอสเฟต Q_1 และตัวเหนี่ยวนำทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจาก I_1 ที่ $t = t_0$ เป็น I_2 ที่ $t = t_1$ โดยไดโอด D_M จะถูกไบอัสกลับ ตัวเก็บประจุจะดิสชาร์จประจุให้แก่โหลดในช่วงเวลา $0 < t \leq t_{on}$ ค่าแรงดันด้านเข้ามีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.1)

$$V_S = V_L = L \frac{I_2 - I_1}{t_{on}} = \frac{L\Delta I}{t_{on}} \quad (2.1)$$

สมการที่จะหาค่าเวลาในช่วงที่เพาเวอร์มอสเฟต นำกระแส ได้จากสมการที่ (2.2)

$$t_{on} = \frac{L\Delta I}{V_S} \quad (2.2)$$

พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$E = \frac{1}{2} L(\Delta I)^2 = \frac{1}{2L} V_S^2 t_{on}^2 \quad (2.3)$$

2.2.1.2 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์เปิด

จากรูปที่ 2.3 โหมดที่ 2 ($0 < t \leq t_{on}$) มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์เปิด ($t = t_1$) แรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของตัวเหนี่ยวนำซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับแรงดันด้านเข้า ทำให้แรงดันด้านออกมีค่ามากขึ้นจนทำให้ D_M ทำงานกระแสด้านเข้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยกระแสด้านเข้า (I_S) และกระแสของตัวเหนี่ยวนำ (I_L) ซึ่งกระแสของตัวเหนี่ยวนำเกิดจากพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำ ขณะที่มอสเฟต Q_1 ทำงานผ่านไดโอด D_M จ่ายให้กับโหลดและชาร์จประจุให้แก่ตัวเก็บประจุเป็นผลให้ I_L ตกลงในช่วงเวลา t_2

$$V_S - V_o = L \frac{I_2 - I_1}{t_{off}} \quad (2.4)$$

$$V_o - V_S = L \frac{\Delta I}{t_{off}} \quad (2.5)$$

สามารถที่จะหาค่าเวลาในช่วงที่เพาเวอร์มอสเฟต ไม่นำกระแส ได้จากสมการนี้

$$t_{off} = L \frac{\Delta I}{V_o - V_s} \quad (2.6)$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสของตัวเหนี่ยวนำระหว่างค่ากระแส ค่ายอดสุด (Peak - to - Peak) คือ กระแสกระเพื่อมเมื่อพิจารณาที่สภาวะคงที่โดยให้ช่วงเวลา t_{on} และ t_{off} จากสมการที่ (2.2) และ (2.6) มีค่าเท่ากัน คำนวณหากกระแสกระเพื่อมได้ดังนี้

$$\Delta I = \frac{V_s t_{on}}{L} = \frac{(V_o - V_s) t_{off}}{L} \quad (2.7)$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = 1 - DT$ ลงในสมการที่ (2.7)

$$V_s DT = (V_o - V_s)(1 - D)T = V_o(1 - D)T - V_s(1 - D)T \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) เมื่อทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้

$$V_s DT = V_o(1 - D)T - V_s T + V_s T \quad (2.9)$$

$$V_s = V_o(1 - D) \quad (2.10)$$

ดังนั้น แรงดันด้านออกเฉลี่ยจากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทบระดับแรงดันกระแสตรงจะได้ดังสมการที่ (2.11)

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \quad (2.11)$$

สมการที่ (2.11) แสดงถึงแรงดันด้านออก ถ้าสวิตช์เปิดตลอดเวลาและ D มีค่าเป็นศูนย์แรงดันด้านออก จะมีค่าเหมือนกับแรงดันด้านเข้า ขณะที่ค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) มีค่าเพิ่มขึ้น ตัวส่วนในสมการที่ (2.11) จะมีขนาดเล็กลงและแรงดันด้านออกจะมีค่าแรงดันมากกว่าด้านเข้า แรงดันด้านออกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันด้านเข้าและค่าวัฏจักรการทำงาน ขณะที่ค่าวัฏจักรการทำงานมีค่าเข้าใกล้ 1 แรงดันด้านออกจะมีค่าเข้าใกล้อนันต์ (Infinity) หากพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับด้านออกจะได้ว่า

$$V_s I_s = V_o I_o \quad (2.12)$$

แทนค่าแรงดันด้านออกจากสมการที่ (2.11)

$$V_s I_s = \frac{V_o I_o}{1-D} \quad (2.13)$$

ดังนั้น กระแสด้านเข้าเฉลี่ย จะได้

$$I_s = \frac{I_o}{1-D} \quad (2.14)$$

สวิตซ์ซิงเพาเวอร์ซัพพลาย จะทำงานในรูปของคาบเวลา ในหนึ่งคาบเวลาจะประกอบไปด้วยช่วงเวลา t_{on} และ t_{off} ดังนั้น ค่าของคาบเวลา จะได้

$$T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off} = \frac{L\Delta I}{V_s} + \frac{L\Delta I}{V_o - V_s} + \frac{L(\Delta I)V_o}{V_s(V_o - V_s)} \quad (2.15)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.15) ใหม่ จะได้ค่ากระแสเพื่อมของตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2.16)

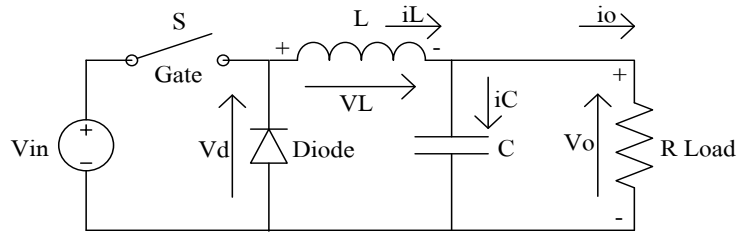
$$\Delta I = \frac{V_s(V_o - V_s)T}{LV_s} = \frac{V_s \left[\frac{V_s}{(1-D) - V_o} \right]}{fLV_o} \quad (2.16)$$

และจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรทบทแรงดันคอนเวอร์เตอร์ดังสมการที่ (2.17)

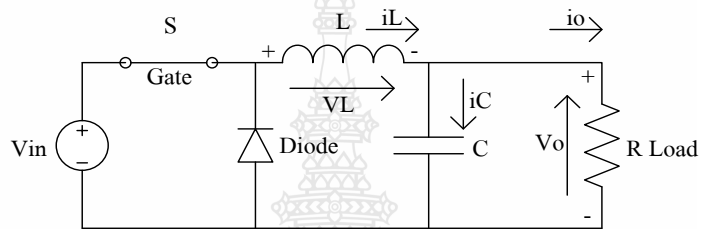
$$L = \frac{V_s D}{f \Delta I} \quad (2.17)$$

2.2.2 คอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันกระแสตรง (Buck Converter)

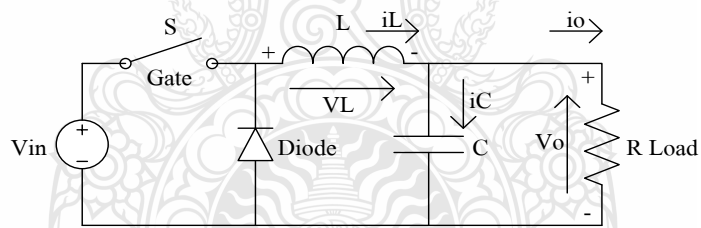
หลักการการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบทอนระดับแรงดันกระแสตรง เป็นการออกแบบเพื่อให้แรงดันด้านออกมีค่าต่ำกว่าด้านเข้า และมีค่าแรงดันตามที่ต้องการ โดยเริ่มต้นจากเงื่อนไขแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตซ์ในแต่ละโหมด จะต้องวิเคราะห์ในสถานะอยู่ตัว วงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันกระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.4 และวงจรการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันกระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันกระแสตรง



โหมดที่ 1 สวิตช์ปิด



โหมดที่ 2 สวิตช์เปิด

รูปที่ 2.5 วงจรการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันกระแสตรง

2.2.2.1 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์ปิด

จากรูปที่ 2.5 โหมดที่ 1 มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์ปิด ($t = 0$) กระแสด้านเข้าไหลผ่าน Q_1 และตัวเหนี่ยวนำ ทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจาก I_1 ที่ $t = 0$ เป็นเวลา I_2 ที่ $t = t_1$ โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จะเท่ากับกระแสที่ไหลผ่าน R และแรงดันที่แหล่งจ่ายจะเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำบวกกับแรงดันที่ตกคร่อม R ดังสมการที่ (2.19)

$$V_S = V_L = V_O \quad (2.18)$$

หรือ $V_L = V_S = V_O$

แต่ $V_L = L \frac{d_{iL}}{dt}$

จะได้ $L \frac{d_{iL}}{dt} = V_S - V_O$

$$\frac{d_{iL}}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (2.19)$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ $dt = DT$

$$\Delta_{iL,on} = \left(\frac{V_S - V_O}{L} \right) DT \quad (2.20)$$

2.2.2.2 วิเคราะห์เมื่อสวิตช์เปิด

จากรูปที่ 2.5 โหมดที่ 2 มอสเฟต Q_1 ทำงานสวิตช์เปิด ($t = t_1$) แรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน R ทำให้แรงดันต้านออกมีค่ามากขึ้นจนทำให้ D_M ทำงานจึงทำให้ตัวเหนี่ยวนำคายพลังงานออกมาเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายตัวหนึ่งทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน ดังสมการที่ (2.21)

$$V_D = V_L + V_O \quad (2.21)$$

แต่ $V_D = 0$ จะได้

$$V_L + V_O = 0$$

$$V_L = -V_O$$

$$V_L = -V_O = L \frac{d_{iL}}{dt}$$

$$L \frac{d_{iL}}{dt} = \frac{\Delta_{iL,off}}{\Delta t} = \frac{-V_O}{L} \quad (2.22)$$

dt ในกรณี อยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ $dt = (1-D)T$ สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.23)

$$\Delta_{iL,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.23)$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1-D)T$ ลงในสมการที่ (2.23) จะได้

$$\Delta_{iL,on} + \Delta_{iL,off} = 0$$

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT + \left[\left(\frac{-V_o}{L}\right)(1-D)T\right] = 0$$

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

$$(V_s - V_o)D - (V_o)(1-D)T = 0$$

$$V_s D - V_o D - V_o(1-D) = 0$$

$$V_s D - V_o D - V_o + V_o D = 0$$

$$V_s D - V_o = 0$$

$$V_s D = V_o$$

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

(2.24)

2.3 การออกแบบวงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์

2.3.1 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

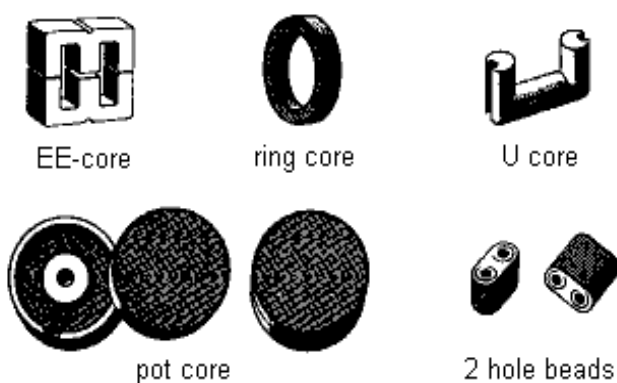
ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าการที่จะเข้าใจการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตัวเหนี่ยวนำมีหน้าที่สำคัญมากในการเก็บพลังงานและคายพลังงานในคอนเวอร์เตอร์แบบทบทแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2.3.1.1 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์ จะมีผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก แกนเฟอร์ไรต์มีค่าอิมิตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูง ประมาณในช่วง 3,000–6,000 เกาส์ และเกิดการสูญเสียในตัวแกนเฟอร์ไรต์ต่ำที่ความถี่สูง ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำในวงจรสวิทชิงจึงนิยมใช้แกนเฟอร์ไรต์มากที่สุด เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนของตัวเหนี่ยวนำสวิทชิงจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานในการออกแบบ

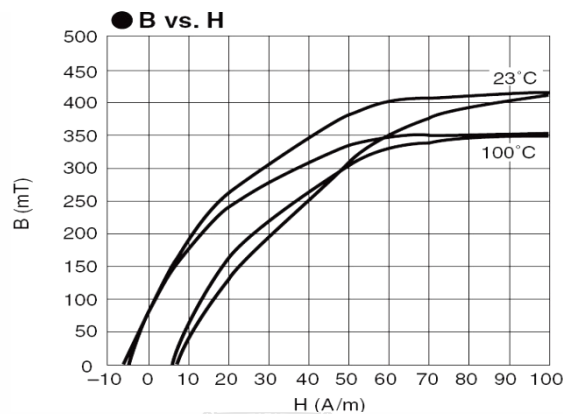
สารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนแม่เหล็กมักจะเป็นอัลลอยของเหล็ก สารที่นิยมใช้ที่ความถี่ต่ำ (< 1 kHz) ได้แก่ เหล็กผสมซิลิกอนเจือจาง ($\text{Si} < 1\%$) ซึ่งมีความหนาแน่นฟลักซ์อิมิตัวค่าสูง แต่จะมีการสูญเสียมาก ถ้าส่วนผสมซิลิกอนมีมากขึ้นก็มักจะเป็นชนิด Grain Oriented การสูญเสียจะน้อยลงแต่ราคาก็จะแพง นอกจากจะผสมซิลิกอนแล้วยังมีสารแม่เหล็กที่ผสมสารอื่นๆ เช่น โคบอลต์ นิกเกิล โมลิบดีนัม เป็นต้น ซึ่งทำงานได้ถึงความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่มีราคาแพงกว่าเหล็กผสมซิลิกอนมาก เฟอร์ไรต์เป็นเซรามิคประกอบไปด้วยออกไซด์ของเหล็ก สังกะสี แมงกานีส หรือนิกเกิล เฟอร์ไรต์ชนิด MnZn มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าชนิด NiZn แต่ทำงานได้ถึงความถี่ประมาณ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งต่ำกว่าชนิด NiZn ซึ่งทำงานได้ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เฟอร์ไรต์มีหลากหลายชนิดตามแต่ละสูตรผสมและมีเลขรหัสต่าง ๆ เช่น 6H20 และ 7H10 เป็นต้น

แกนเฟอร์ไรต์สำหรับแหล่งจ่ายไฟสวิทชิงโดยทั่วไปจะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่าง ๆ เช่น แกนแบบ EI EE EER หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะการประกบคู่กัน เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบอบบิ้น การประกบแกนเฟอร์ไรต์บนบอบบิ้นนั้นจะทำให้ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้



รูปที่ 2.6 ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์ในรูปทรงต่างๆ

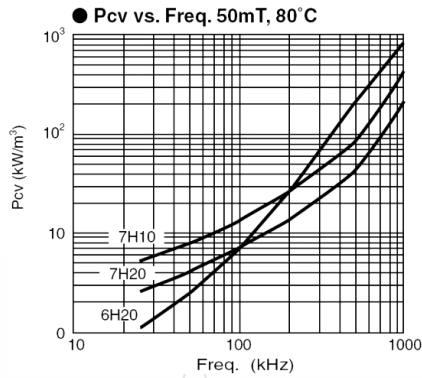
ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์ โดยเนื้อสารแกนเฟอร์ไรต์มีคุณลักษณะที่ต่างกันอย่างมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์ที่ต่างกันอย่าง ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการก็ตาม ในแผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ให้กับแกนเฟอร์ไรต์นั้น จะต้องมีการรายละเอียดคุณสมบัติของเนื้อสารแสดงไว้เสมอข้อมูลที่สำคัญควรทำความเข้าใจและศึกษาไว้ คือ เส้นโค้งฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Curve) และ ค่าการสูญเสียของแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแกนเฟอร์ไรต์

เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวด ที่พันบนแกนเฟอร์ไรต์ ดังรูปที่ 2.7 จะแสดงเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแกนเฟอร์ไรต์จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มจนถึงจุดหนึ่งซึ่งค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มของสนามแม่เหล็กแล้วก็ตาม จากจุดดังกล่าวจะเห็นว่าแกนเริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยปกติผู้ผลิตจะแสดงกราฟของเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสเพียงครั้งเดียวเนื่องจากอีกครั้งหนึ่งของเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการเพียงแต่จะมีลักษณะกลับทิศทางกันเท่านั้นดังนั้นการใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์ในตัวเหนี่ยวนำจึงควรกำหนดค่าความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนขณะทำงานมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดก่อนอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์เพื่อความปลอดภัย

ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์จะทำให้แกนเฟอร์ไรต์มีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งมีสาเหตุอยู่ 2 ประการ คือ การสูญเสียที่เกิดจากลักษณะฮิสเทอรีซิสของแกน (Hysteresis Loss) และการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนในแกนเฟอร์ไรต์ (Eddy Current Loss) โดยมีความถี่ที่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ การสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นการสูญเสียที่ก่อให้เกิดความร้อนในแกนอาจพิจารณาได้จากการสูญเสียทางฮิสเทอรีซิส ของแกนเพียงอย่างเดียวตัวอย่างกราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์แสดงไว้ใน รูปที่ 2.8 โดยปกติค่ากำลังสูญเสียจะถูกระบุไว้เป็นกิโลวัตต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร (kW/m^3) และมีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ความถี่ในการใช้งาน รวมถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์



รูปที่ 2.8 ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ของเนื้อสารชนิด 6H20 7H20 และ 7H10

2.3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ จะมีข้อกำหนดและขีดจำกัดสำหรับการออกแบบสำหรับตัวเหนี่ยวนำสวิตซ์ซิ่ง ดังนี้

- 2.3.2.1 ขนาดและรูปร่างรวมทั้งความถี่ของกระแสและแรงดัน
- 2.3.2.2 กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพ หรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
- 2.3.2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและเชิงกลอื่นๆ
- 2.3.2.4 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนเหล็ก
- 2.3.2.5 กำลังงานสูญเสียในลวดทองแดงหรือแกนเหล็ก
- 2.3.2.6 คุณสมบัติอื่นๆ เช่น Permeability (μ) เป็นต้น

โดยมีสมการของการออกแบบดังนี้

$$B_{\max} = \frac{\Phi_{\max}}{S} = \frac{\lambda_{\max}}{SN} = \frac{LI_{\text{peak}}}{SN} \quad (2.25)$$

จากขีดจำกัดของลวดทองแดง โดยคำนึงถึงความสูญเสีย (Copper loss : P_{cu})

$$P_{cu} = I_{\text{rms}}^2 R \quad (2.26)$$

โดยที่ค่า R หาได้จาก

$$R = \rho \frac{l}{A_w} \quad (2.27)$$

2.3.3 การเลือกขนาดแกนเหล็กโดยใช้วิธีการคำนวณแบบ A_p (Area Approach)

วิธีการนี้เป็นการออกแบบโดยที่ใช้ค่า T_{rise} ซึ่งอาศัยความหนาแน่นของกระแสของลวดตัวนำ ($J = 100 - 1000 A/cm^2$) จะคำนวณหาขนาดของแกนเหล็กได้ดังนี้

$$N = \frac{LI_{peak}}{B_{max} S} \quad (2.28)$$

$$kW = \frac{NI_{rms}}{J} = NA_w \quad (2.29)$$

$$kW = \frac{LI_{peak} I_{rms}}{B_{max} JS} \quad (2.30)$$

$$A_p = WS = \frac{LI_{peak} I_{rms}}{B_{max} Jk} \quad (2.31)$$

โดยมีการออกแบบจากข้อกำหนดและขีดจำกัดที่คำนวณหาค่า A_p จากสมการที่ (2.31) จากนั้น เลือกขนาดของแกนให้มีขนาดมากกว่า A_p ที่ได้จากการคำนวณ แล้วใช้สมการที่ (2.28) ทำการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ (N) โดยที่คำนวณหาขนาดของลวดตัวนำ A_w จากสมการที่ (2.29) สุดท้ายให้เลือกเบอร์ลวดทองแดงโดยเลือกให้มี A_w ขนาดใหญ่กว่า A_p ที่คำนวณซึ่งทำได้โดยการเลือกเบอร์ลวดที่รัศมีน้อยกว่าค่าความลึกผิวทองแดงที่มีความถี่สูงสุดที่จะใช้งานแล้วนำมาตีเกลียวให้มี A_w ตามขนาดที่เลือกไว้

$$\xi(m) = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu W}} \quad (2.32)$$

เมื่อกำหนดให้

$\xi(m)$ คือ ค่าความลึกผิวทองแดง

ρ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{56 \times 10^6} \Omega$

μ มีค่าเท่ากับ $\mu_o \mu_r$

คำนวณหาค่า P_{cu} จากนั้นให้ปรับค่า J ใหม่จนได้ค่า P_{cu} ที่เหมาะสม แล้วคำนวณหาขนาดของช่องอากาศ (Air gap : l_g) และทำการปรับช่องอากาศจนได้ค่าตามที่ต้องการ

2.3.4 ขั้นตอนการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยจะต้องกำหนด L, I และ $\% \Delta I$ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดความหนาแน่นของกระแส (J) ในช่วง $2.5-10 A/mm^2$ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการระบายความร้อน กำหนดค่า k อยู่ในช่วง $0.3 - 0.6$ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฉนวนที่หุ้มลวดและพื้นที่ช่องว่างระหว่างลวด

$$\text{หาค่า } \Delta I \text{ โดยที่กำหนดให้ } \Delta I = 2(I_{\max} - I)$$

$$\text{หาค่า } \Delta B \text{ โดยที่กำหนดให้ } \Delta B = \Delta I \times \Delta B_{\max}$$

$$(\text{สำหรับแกนเฟอร์ไรต์ } \Delta B_{\max} = 0.3 T)$$

$$\text{หาค่า } B_{\max} \text{ โดยที่กำหนดให้ } B_{\max} = \Delta B_{\max} - \frac{\Delta B}{2}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหา A_p

$$A_p = \frac{LI_{\text{peak}} I_{\text{rms}}}{B_{\max} Jk} \quad (2.33)$$

โดยที่ L มีหน่วยเป็น Henry, I มีหน่วยเป็น Ampere, B มีหน่วยเป็น Tesla, J มีหน่วยเป็น A/m^2 และ A_p มีหน่วยเป็น mm^3 หรือ mm^4 (ตามขนาดของแกน)

ขั้นตอนที่ 3 เลือกขนาดของแกนเหล็กที่มี A_p ใกล้เคียงกับค่า A_p ที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณจำนวนรอบของขดลวดจากสมการที่ (2.34)

$$N = \frac{LI_{\text{peak}}}{B_{\max} S} \quad (2.34)$$

เมื่อ S มีหน่วยเป็น mm^2

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวด โดยเลือกใช้ลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกันค่าที่คำนวณได้

$$A_w = \frac{I_{\text{rms}}}{J} \quad (2.35)$$

$$d = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \quad (2.36)$$

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบว่าสามารถผันขดลวดลงใน W ได้หรือไม่ จากสมการที่ (2.37)

$$W = (N \times \text{พื้นที่หน้าตัดขดลวดที่ใช้จริง}) / k \quad (2.37)$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่าความกว้างของ Air Gab (l_g)

$$l_g = \frac{\mu_o N^2 S}{2L} \quad (2.38)$$

2.3.5 เพาเวอร์มอสเฟต (Power Mosfet)

เพาเวอร์มอสเฟตสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงตั้งแต่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ไปจนถึงช่วงประมาณ 200 - 400 กิโลเฮิร์ตซ์ ระยะเวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น ปัจจุบันมีแนวโน้มให้ทำงานได้ที่ความถี่สูงมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดขนาดของคอนเวอร์เตอร์ได้ วงจรขับของเพาเวอร์มอสเฟตสามารถทำได้ง่ายโดยควบคุมมอสเฟตได้จากไอซี TLP250 โดยตรง โครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตจะเป็นไปได้ทั้ง N-Channel และ P-Channel มอสเฟตประกอบไปด้วยขาจำนวน 3 ขา ได้แก่ เกต (Gate) เดรน (Drain) และซอร์ส (Source)

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงานมี 2 ลักษณะคือ กำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส เพาเวอร์มอสเฟตจะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้น เนื่องจากตามโครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตจะไม่มีกระแสสมประจุเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามเพาเวอร์มอสเฟตจะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสค่อนข้างสูง กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสจึงสูงกว่าไบโพลาร์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ถึงแม้ว่าช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจะค่อนข้างสั้น แต่โดยทั่วไปเพาเวอร์มอสเฟตมักใช้งานที่ความถี่สูงกว่า การคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจึงจำเป็นต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn off Time) กับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn on Time) ของเพาเวอร์มอสเฟตมีค่าใกล้เคียงกันจึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลา ดังนั้นกำลังงานสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน P_D จะมีค่าเท่ากับ

$$P_D = P_{sw(on)} + P_{sw(off)} + P_c \quad (2.39)$$

$$P_{sw(on)} = \frac{0.5 I_{PK(on)} V_{in} t_r}{T} \quad (2.40)$$

$$P_{sw(off)} = \frac{0.5 I_{PK(off)} V_{in} t_f}{T} \quad (2.41)$$

$$P_c = I_{D_{rms}}^2 \times R_{DS(on)} T_{(j)} \quad (2.42)$$

- เมื่อ $P_{SW(on)}$ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
 $P_{SW(off)}$ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแส
 P_c คือ กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
 $I_{PK(on)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มนำกระแส
 $I_{D_{rms}}$ คือ ค่ากระแส rms
 R_{DS} คือ ค่าความต้านทานระหว่างเดรนกับซอร์ส
 $T_{(j)}$ คือ อุณหภูมิรอยต่อสูงสุดขณะทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต
 t_r คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต
 t_f คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต

2.3.6 ไดโอด (Diode)

ไดโอดเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ชนิดสองขั้วคือขั้ว P และขั้ว N ที่ออกแบบและควบคุมทิศทางการไหลของประจุไฟฟ้า มันจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียว และกั้นการไหลในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อก้าวถึงไดโอด มักจะหมายถึงไดโอดที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor diode) ซึ่งก็คือผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ต่อกันได้ขั้วทางไฟฟ้าสองขั้ว ส่วนไดโอดแบบหลอดสุญญากาศ (Vacuum tube diode) ถูกใช้เฉพาะทางในเทคโนโลยีไฟฟ้าแรงสูงบางประเภท เป็นหลอดสุญญากาศที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว ซึ่งจะคือแผ่นตัวนำ (plate) และแคโทด (cathode) ส่วนใหญ่เราจะใช้ไดโอดในการยอมให้กระแสไปในทิศทางเดียว โดยยอมให้กระแสไฟในทางใดทางหนึ่ง ส่วนกระแสที่ไหลทิศทางตรงข้ามกันจะถูกกั้น ดังนั้นจึงอาจถือว่าไดโอดเป็นวาล์วตรวจสอบแบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ซึ่งนับเป็นประโยชน์อย่างมากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้เป็นตัวเรียงกระแสไฟฟ้าในวงจรแหล่งจ่ายไฟ เป็นต้น อย่างไรก็ตามไดโอดมีความสามารถมากกว่าการเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปิด-ปิดกระแสได้ง่ายๆ ไดโอดมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นมันยังสามารถปรับปรุงโดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของพวกมันที่เรียกว่ารอยต่อ p-n มันถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานที่มีวัตถุประสงค์พิเศษ ทำให้ไดโอดมีรูปแบบการทำงานได้หลากหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น ซีเนอร์ไดโอด เป็นไดโอดชนิดพิเศษที่ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันให้คงที่ วาริแอกไดโอดใช้ในการปรับแต่งสัญญาณในเครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์ ไดโอดอุโมงค์หรือทันเนลไดโอดใช้ในการสร้างสัญญาณความถี่วิทยุ และไดโอดเปล่งแสงเป็นอุปกรณ์ที่สร้างแสงขึ้น

สำหรับชนิดและการเลือกใช้ไดโอดนั้น เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าความถี่ในการทำงานของวงจรตั้งแต่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ไดโอดที่ใช้ในคอนเวอร์เตอร์ จึงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติได้แก่ มีแรงดันขณะนำกระแสต่ำ มีช่วงเวลาในการคืนตัว (Reverse Recovery Time: trr) ที่สั้นสามารถทนกำลังไฟฟ้าได้สูง ด้วยเหตุนี้ซิลิกอนไดโอดที่ใช้ในวงจรเรียงกระแสทั่วไปจึงไม่สามารถนำมาใช้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการคืนตัวมาก กำลังสูญเสียในรูปความร้อนก็จะเกิดขึ้นสูงและทำให้มีประสิทธิภาพต่ำ โดยไดโอดที่ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์สามารถเลือกใช้ได้ใน 3 ชนิด

คือ ชนิดแรก ฟาสต์ - รีคัฟเวอรีไดโอด (Fast Recovery Diode) ชนิดที่สอง อัลตราฟาสต์ - รีคัฟเวอรีไดโอด (Ultra Fast Recovery Diode) และชนิดที่สาม ซอตกกีไดโอด (Schottky Diode) ซึ่งไดโอดชนิด ฟาสต์ - รีคัฟเวอรีไดโอด จะมีช่วงเวลาคืนตัวประมาณ 200 - 750 นาโนวินาที ซึ่งสั้นกว่าซิลิคอนไดโอด มีอัตราทนแรงดันไบอัสกลับได้สูงถึง 1,000 โวลต์ ส่วนไดโอดชนิด อัลตราฟาสต์ - รีคัฟเวอรีไดโอดจะมีช่วงเวลาคืนตัวประมาณ 25 - 100 นาโนวินาที มีอัตราทนแรงดันไบอัสกลับได้ 1,000 โวลต์ แรงดันตกคร่อมขณะที่น่ากระแสของไดโอดทั้งสองชนิดนี้ มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.6 - 1.5 โวลต์

2.3.7 ตัวเก็บประจุในวงจรกำลังของวงจรทบทแรงดันดีซีทูตีสคอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

ตัวเก็บประจุมีหน้าที่เก็บพลังงานในรูปของประจุไฟฟ้า และจ่ายแรงดันด้านออกหรือคายประจุไฟฟ้าเมื่อมอสเฟต อยู่ในช่วงเวลาน่ากระแสและเก็บประจุเมื่ออยู่ในช่วงเวลาที่หยุดนำกระแส ซึ่งจะต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้เท่ากับแรงดันทางด้านออก หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะช่วยลดแรงดันกระเพื่อมทางด้านออกได้ ตัวเก็บประจุในวงจรกำลังหากพิจารณาในโหมดกระแสต่อเนื่องของวงจรทบทแรงดันดีซีทูตีสคอนเวอร์เตอร์ ค่าของตัวเก็บประจุ พิจารณาได้จากสมการที่ (2.43) แรงดันกระเพื่อมทางด้านออก (ΔV_o) และ กระแสด้านออก (I_o) ที่ใช้งาน ค่าตัวที่ไซเคิลสูงสุดที่ใช้งาน ความถี่ในการสับสวิตซ์ของคอนเวอร์เตอร์ (f) ดังสมการจะใช้คำนวณหาตัวเก็บประจุที่จะใช้งาน

$$C = \frac{I_{O(\max)} D_{(\max)}}{f \Delta V_o} \quad (2.43)$$

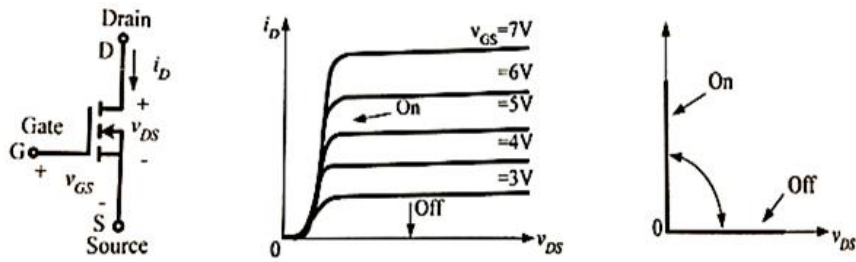
ค่าความต้านทานสมมูลอนุกรมของตัวเก็บประจุ (Equivalent Series Resistance: ESR) หาได้จาก

$$ESR = \frac{\Delta V_o}{\left[\frac{I_{O(\max)}}{1 - D_{(\max)}} + \frac{\Delta I_L}{2} \right]} \quad (2.44)$$

2.4 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

2.4.1 มอสเฟตกำลัง (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)

มอสเฟตกำลังที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีสัญลักษณ์ของมอสเฟตกำลังคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว คุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ แสดงดังรูปที่ 2.9

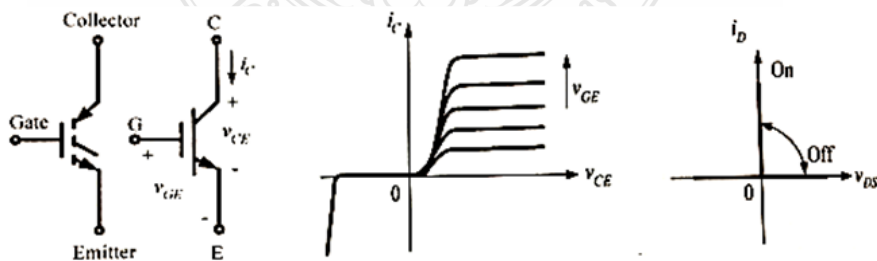


รูปที่ 2.9 โครงสร้างและคุณลักษณะของมอสเฟตกำลัง

เมื่อต้องการให้มอสเฟตกำลังนำกระแสจะต้องมีการป้องกันแรงดันไฟฟ้าระหว่างขาเกตกับขาซอสอย่างต่อเนื่อง ช่วงเวลาการสวิตช์ซึ่งของมอสเฟตกำลังจะมีค่าอยู่ระหว่างหลักสิบของนาโนวินาทีถึงหลักร้อยนาโนวินาที ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดพิกัดของมอสเฟตกำลัง ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอสนี้จะขึ้นอยู่กับพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า หากทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงก็ยิ่งทำให้ค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอสมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อกำลังสูญเสียจากการนำกระแส เช่น มอสเฟตกำลังมีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ จะมีค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอสมากกว่ามอสเฟตกำลังที่มีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้าได้ 200 โวลต์ ดังนั้น การสูญเสียจากการนำกระแสของมอสเฟตกำลังที่ทนได้ 1,000 โวลต์ จะมีกำลังสูญเสียที่เกิดจากการนำกระแสมากกว่ามอสเฟตกำลังที่ทนแรงดันไฟฟ้าได้ 200 โวลต์ ในปัจจุบันมอสเฟตกำลังมีค่าพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 1,000 โวลต์ แต่มีพิกัดกระแสไฟฟ้าได้ไม่เกิน 100 แอมแปร์ จุดเด่นที่สุดของมอสเฟตกำลัง คือ การมีความถี่ของการสวิตช์มีค่ามากถึงหลักหลายร้อยกิโลเฮิรตซ์

2.4.2 ไอจีบีที (Isolate Gate Bipolar Transistors)

ไอจีบีทีจัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถควบคุมให้นำกระแส และควบคุมให้หยุดนำกระแสได้โดยการควบคุมจากแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต ไอจีบีทีมีสัญลักษณ์ และคุณลักษณะของกระแส และแรงดันไฟฟ้าขณะสภาวะอยู่ตัว และคุณลักษณะของกระแส และแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติแสดงดังรูปที่ 2.10

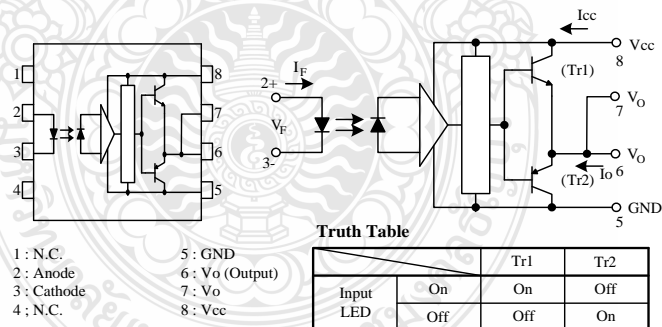


รูปที่ 2.10 โครงสร้างและคุณลักษณะของไอจีบีที

ไอจีบีทีได้รวมข้อดีของมอสเฟตกำลัง ทรานซิสเตอร์กำลัง และจีทีโอไธริสเตอร์ (Gate Turn-Off Thyristors) มารวมอยู่ด้วยกันกล่าว คือ ไอจีบีทีจะมีค่าของอิมพีแดนซ์ขาเกตที่มีค่าสูงคล้ายมอสเฟตกำลัง ซึ่งต้องการพลังงานน้อยมากในการควบคุมการสวิตช์ควบคุมการนำ และหยุดนำกระแสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกต รวมทั้งสามารถใช้งานการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่สูง นอกจากนี้ ไอจีบีทีจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำกว่าคล้ายทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งมีค่า 2 ถึง 3 โวลต์ สำหรับพิกัดแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์ นอกจากนั้นไอจีบีทีจะออกแบบให้ทนแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้คล้ายกับจีทีโอไธริสเตอร์ช่วงเวลานำกระแส และหยุดนำกระแสมีค่าประมาณ 1 ไมโครวินาที มีขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้าถึง 2,000 แอมแปร์ และพิกัดแรงดันไฟฟ้าถึง 5,000 โวลต์

2.5 วงจรขับเกต

สวิตช์ไอจีบีทีที่ต้องการแรงดันมาขับเคลื่อนเพื่อให้สามารถทำงานในสภาวะนำกระแส และหยุดนำกระแสได้ซึ่งวงจรขับนำเกตที่แสดงดังรูปที่ 2.11 เป็นวงจรขับเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 ซึ่งใช้ตัวเชื่อมโยงสัญญาณทางแสงเพื่อแยกโดดสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างวงจรถูกขับ และวงจรถูกขับสัญญาณจากวงจรถูกขับจะเป็นตัวขับแอลอีดีที่อยู่ภายในตัวแยกโดดสัญญาณทางแสง ซึ่งทำหน้าที่เพื่อไบแอสทรานซิสเตอร์ (Tr1) (NPN) และทรานซิสเตอร์ (Tr2) (PNP) ซึ่ง ทรานซิสเตอร์ (Tr1) เป็นชนิด NPN ต้องการสัญญาณไบแอสเป็นสัญญาณไฟบวก และทรานซิสเตอร์ (Tr2) เป็นชนิด PNP ต้องการสัญญาณไบแอสเป็นสัญญาณไฟลบ เมื่อทรานซิสเตอร์ (Tr1) และทรานซิสเตอร์ (Tr2) ได้รับสัญญาณไบแอสเป็นสัญญาณไฟบวก ทำให้ทรานซิสเตอร์ (Tr1) นำกระแสและในขณะเดียวกันทรานซิสเตอร์ (Tr2) หยุดนำกระแส



รูปที่ 2.11 วงจรภายในไอซีเบอร์ TLP250

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์

ในการควบคุมระดับแรงดันให้คงที่ของแหล่งจ่ายไฟสวิตช์ซิง โดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งเป็นการควบคุมโดยเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่ถูกเปิดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เช่นทรานซิสเตอร์ มอสเฟต หรืออื่น ๆ นั้นนำกระแส เป็นผลให้เกิดการควบคุมแรงดันที่ด้านออกให้ได้ค่าที่ต้องการ ซึ่งข้อดีของการควบคุมแรงดันแบบสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์

คือ สามารถรักษาระดับแรงดันให้มีความคงที่สูงเพราะมีการป้อนกลับระดับแรงดันจากด้านออกมาใช้ในการควบคุมด้วย รวมทั้งทำให้เกิดความสูญเสียกำลังงานในการควบคุมแรงดันต่ำส่งผลให้มีเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะใช้งานสูง ลักษณะการทำงานของสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยทั่วไปมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ ลักษณะที่หนึ่ง เปลี่ยนแปลงทั้งความถี่และความกว้างของพัลส์ (Variation of Both Frequency and Pulse width) ลักษณะที่สอง เปลี่ยนแปลงความถี่โดยความกว้างของพัลส์คงที่ (Constant Pulse Width with Variable Frequency) และลักษณะที่สาม เปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์โดยความถี่คงที่ (Constant Frequency with Variable Pulse Width)

การทำงานทั้ง 3 ลักษณะนี้ มีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกันไป การทำงานในลักษณะที่สอง และลักษณะที่สาม จะดีกว่าการทำงานในลักษณะที่หนึ่ง เนื่องจากสามารถกำหนดความถี่หรือช่วงเวลาที่จะทำให้สวิตซ์ซึ่งเรกกูเรเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดได้ แต่ในแบบลักษณะที่หนึ่งนั้นความถี่และความกว้างของสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์กำหนดขึ้นเองจากวงจรจึงอาจจะไม่ใช่ความถี่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานก็ได้ ดังนั้น วงจรสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ส่วนใหญ่จึงใช้การทำงานในลักษณะที่สอง หรือลักษณะที่สาม เป็นส่วนใหญ่ในปัจจุบันวงจรสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ได้ถูกพัฒนาให้เป็นวงจรสำเร็จรูปในไอซีตัวเดียวเหมาะสำหรับใช้งานในด้านแหล่งจ่ายไฟตรงโดยเฉพาะ ซึ่งการใช้งานของไอซีเหล่านี้สามารถใช้งานได้ง่าย โดยต่ออุปกรณ์เพิ่มเติมภายนอกเพียงเล็กน้อย เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดจุดทำงานของการสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์นั้นๆ เพื่อให้การทำงานของแหล่งจ่ายไฟตรงสวิตซ์ซึ่งมีความสมบูรณ์มากขึ้น อาจจะมีการเพิ่มเติมวงจรสำหรับระบบต่างๆ เช่น วงจรเปรียบเทียบสำหรับป้องกันกระแสหรือแรงดันเกิน เป็นต้น

2.7 รีเลย์ (Relay)

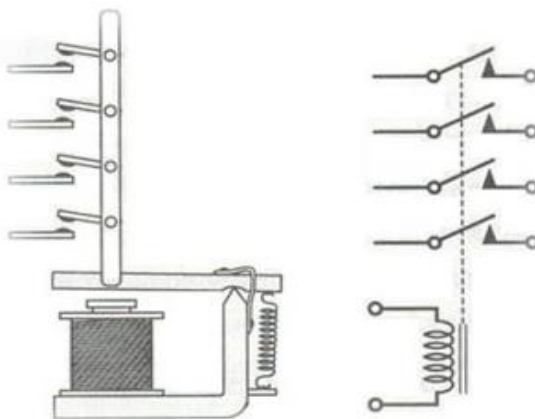
รีเลย์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการดึงดูดหน้าสัมผัสของคอนแทกให้เปลี่ยนสถานะ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อทำการปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสคล้ายกับสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเราสามารถนำรีเลย์ไปประยุกต์ใช้ ในการควบคุมวงจรต่าง ๆ ในงานช่างอิเล็กทรอนิกส์มากมาย และเป็นอุปกรณ์ที่นิยมนำมาทำเป็นสวิตซ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะต้องป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านขดลวดจำนวนหนึ่ง เพื่อนำไปควบคุมวงจรถูกกำลังงานสูง ๆ ที่ต่ออยู่กับหน้าสัมผัสหรือคอนแทกของรีเลย์

2.7.1 หลักการเบื้องต้น

หลักการทำงานเบื้องต้นของรีเลย์คือการทำงานเริ่มจากปิดสวิตซ์ เพื่อป้อนกระแสให้กับขดลวด (Coil) โดยทั่วไปจะเป็นขดลวดพันรอบแกนเหล็ก ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไปดูดเหล็กอ่อนที่เรียกว่าอาร์เมเจอร์ (Armature) ให้ต่ำลงมา ที่ปลายของอาร์เมเจอร์ด้านหนึ่งมักยึดติดกับสปริง (Spring) และปลายอีกด้านหนึ่งยึดติดกับหน้าสัมผัส (Contacts) การเคลื่อนที่ของอาร์เมเจอร์ จึงเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัส ให้แยกจากหรือแตะกับหน้าสัมผัสอีกอันหนึ่งซึ่งยึดติดอยู่กับที่ เมื่อเปิดสวิตซ์อาร์เมเจอร์ ก็จะกลับสู่ตำแหน่งเดิม เราสามารถนำหลักการนี้ไปควบคุมโหลด (Load) หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้ตามต้องการ

2.7.2 หน้าสัมผัสของรีเลย์

ปัจจุบันรีเลย์ที่มีขดลวดชุดเดียวสามารถควบคุมหน้าสัมผัสได้หลายชุดอาร์เมเจอร์อันเดียวถูกยึดอยู่กับหน้าสัมผัสที่เคลื่อนที่ได้ 4 ชุด ดังนั้นรีเลย์ตัวนี้จึงสามารถควบคุมการแตะหรือจากกันของหน้าสัมผัสได้ถึง 4 ชุด



รูปที่ 2.12 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของชุดหน้าสัมผัสแบบ 4 PST

บริเวณหน้าสัมผัสที่เคลื่อนที่ได้มีชื่อเรียกว่าขั้ว (Pole) รีเลย์ในรูปที่ 2.12 มี 4 ขั้ว จึงเรียกหน้าสัมผัสแบบนี้ว่าเป็นแบบ 4PST (Four Pole Single Throw) ถ้าแต่ละขั้วที่เคลื่อนที่แล้วแยกจากหน้าสัมผัสอันหนึ่งไปแตะกับหน้าสัมผัสอีกอันหนึ่งเหมือนกับสวิตช์โยก โดยเป็นการเลือกหน้าสัมผัสที่ขนาบอยู่ทั้งสองด้าน หน้าสัมผัสแบบนี้มีชื่อว่า SPDT (Single Pole Double Throw) ในกรณีที่ไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดของรีเลย์ สภาวะ NO (Normally Open) คือสภาวะปกติหน้าสัมผัสกับขั้วแยกจากกัน ถ้าต้องการให้สัมผัสกันจะต้องป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวด ส่วนสภาวะ NC (Normally Closed) คือสภาวะปกติหน้าสัมผัสกับขั้วสัมผัสกัน ถ้าต้องการให้แยกกันจะต้องป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวด นอกจากนี้ยังมีแบบแยกก่อนแล้วสัมผัส (Break-Make) หมายถึงหน้าสัมผัสระหว่าง 1 และ 2 จะแยกจากกันก่อนที่หน้าสัมผัส 1 และ 3 จะสัมผัสกัน แต่ถ้าหากตรงข้ามกันคือ หน้าสัมผัส 1 และ 2 จะสัมผัสกัน และจะไม่แยกจากกัน จนกว่าหน้าสัมผัส 1 และ 3 จะสัมผัสกัน (Make-Break)

2.7.3 ชนิดของรีเลย์

รีเลย์ที่ผลิตในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด ผู้เรียบเรียงจะขอแนะนำรีเลย์ที่นิยมใช้งานและรู้จักกันแพร่หลาย 4 ชนิด ได้แก่ อาร์เมเจอร์รีเลย์ (Armature Relay) รีดรีเลย์ (Reed Relay) รีดสวิตช์ (Reed Switch) และ โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid-State Relay)

2.8 เรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์

การแปลงพลังงานจากสัญญาณการควบคุมสัญญาณความกว้างพัลส์ (PWM) ให้ทำงานในสวิตช์โหมด ซึ่งการสวิตช์สัญญาณความถี่สูงด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานและหยุดทำงาน (On/Off Switch) จะส่งผลให้เกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูง ซึ่งสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทนต่อแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่สูงได้ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียในอุปกรณ์สวิตช์กำลัง ดังนั้น การพัฒนาการทำงานของวงจรโดยเพิ่มวงจร snubber (Snubbers Circuit) เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (Voltage Transients) ที่เกิดขึ้นของตัวอุปกรณ์สวิตช์กำลัง และลดการสูญเสียของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง โดยการสูญเสียของอุปกรณ์สวิตช์กำลังเป็นสัดส่วนกับกับความถี่สวิตช์ (Switching Frequency) การเพิ่มความถี่สวิตช์ที่ค่าสูง จะส่งผลให้ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในวงจรมีขนาดเล็กและต้นทุนต่ำ ทั้งนี้ สัดส่วนขนาดอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับ การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของการสวิตช์ในอุปกรณ์สวิตช์กำลัง การเพิ่มความถี่ในการสวิตช์และข้อได้เปรียบที่ได้รับจากความถี่ของเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ วงจรเรโซแนนท์คอนเวอร์เตอร์ ประกอบไปด้วยวงจรแท่งเรโซแนนท์ที่กำเนิดความถี่ (ปกติจะเป็นสัญญาณไซน์) สัญญาณแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าให้มีค่าเป็นศูนย์ เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ หรือกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ สำหรับโหลดเรโซแนนท์ โดยทั่วไปยกตัวอย่างเช่น เครื่องชุบแข็งผิวโลหะ เครื่องหลอมโลหะ เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องเชื่อมความถี่สูง เป็นต้น โดยจะมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ ลดการสูญเสียในการสวิตช์เมื่อสวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ (ZCS) หรือสวิตช์วงจรที่แรงดันศูนย์ (ZVS) และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจรเรโซแนนท์ คือ ที่ตำแหน่งใกล้จุดความถี่เรโซแนนท์กระแสในวงจรมีค่ามากส่งผลให้แรงดันตกคร่อมวงจรมีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้น สวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะปิดได้สูง และ ค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุในวงจรที่เลือกใช้ จะต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะสามารถเก็บพลังงานได้

2.8.1 เรโซแนนท์อนุกรม

เรโซแนนท์อนุกรมมีข้อดีคือ สร้างง่ายราคาถูก สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์โดยไม่ต้องมีวงจรปรับแรงดันกำลังไฟฟ้าที่จ่ายสามารถปรับควบคุมได้ง่าย โดยการปรับความถี่ที่วงจรอินเวอร์เตอร์ และมีข้อเสียคือขณะป้อนสัญญาณเพื่อขับวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโหลดจะเปิดวงจรออกไม่ได้ ไม่สามารถทนการลัดวงจรที่โหลดได้ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่ที่สวิตช์ให้เลื่อนออกจากความถี่เรโซแนนท์ทำให้กระแสไม่ค่อเป็นชายน ซึ่งทำให้มีฮาร์โมนิกเกิดขึ้น

2.8.2 เรโซแนนท์แบบขนาน

เรโซแนนท์แบบขนานมีข้อดีคือ ในที่ขณะป้อนวงจรเพื่อขับสัญญาณวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรโหลดสามารถเปิดวงจรออกได้ ทนการลัดวงจรที่โหลดได้ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเรโซแนนท์ไม่จำเป็นต้องมีขนาดพิกัดแรงดันสูง เนื่องจากกระแสเป็นรูปคลื่นสแควร์ จึงมีค่าสูงสุด (peak) คงที่ที่ตำแหน่งเรโซแนนท์ ข้อเสียของเรโซแนนท์แบบขนานคือ ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากวงจรไดโอดเรกติฟายเออร์ ต้องมีการปรับแรงดันจากการใช้สวิตช์ควบคุม จำเป็นต้องมี choke เนื่องจากเป็น constant current และวงจรมีขนาดใหญ่เนื่องจากมี choke และวงจรควบคุมแรงดันดีซีอินพุตให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์

2.9 การควบคุมการไหลของพลังงานด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

สำหรับการควบคุมการไหลของพลังงานนั้น เราจะอาศัยการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่ โดยแรงดันบัสไฟตรงนี้ต้องมีค่าสูงพอที่คอนเวอร์เตอร์จะสามารถสร้างแรงดันเพื่อใช้ในการควบคุมกระแสได้ การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงหรือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะอาศัยหลักการของความสมดุลพลังงานโดยมีกลไก คือ ในขณะที่อินเวอร์เตอร์ของชุดควบคุมแรงบิดของโหลดทำงานในย่านมอเตอร์ แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด คอนเวอร์เตอร์ก็จะถูกควบคุมให้ดึงกำลังงานจากแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์เพื่อนำไปสะสมในตัวเก็บประจุทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกันขณะที่อินเวอร์เตอร์ทำงานในย่านรีเจนเนอเรทีฟกำลังงานจากโหลดก็จะถูกป้อนกลับมาสะสมที่ตัวเก็บประจุ ทำให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงกว่าที่กำหนด คอนเวอร์เตอร์ก็ถูกควบคุมให้ดึงกำลังงานออกจากตัวเก็บประจุและป้อนกำลังงานกลับคืนไปยังสายกำลัง ทำให้แรงดันบัสมีค่าต่ำลงเท่ากับค่าคำสั่งในที่สุด

2.10 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟตรง ให้เป็นแรงดันไฟสลับที่ขนาดแรงดันและความถี่ตามต้องการ แรงดันด้านออก สามารถตั้งค่าให้คงที่หรือปรับค่าได้ตามต้องการที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง หรือเปลี่ยนความถี่ไปก็ได้ โดยมีอัตราการขยายของอินเวอร์เตอร์เป็นตัวปรับเปลี่ยนค่าแรงดันด้านเข้าและด้านออกได้ ซึ่งหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านออก ต่อค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟสลับ ที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งไม่มีส่วนเคลื่อนที่ เช่น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบป้องกันไฟฟ้าขาดช่วง (Un-interruption Power Supply หรือ UPS) และชนิดที่ใช้กับโหลดที่มีการหมุนหรือเคลื่อนที่ (Dynamic) เช่น มอเตอร์ชนิดต่างๆ อีกทั้งอินเวอร์เตอร์ที่ดีควรมีสมรรถนะในสภาวะการทำงานที่สูง และไม่ก่อให้เกิดปัญหารบกวนแก่ระบบไฟฟ้าข้างเคียงอีกด้วย อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามขนาดกำลังไฟฟ้าของโหลด อินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงและกินกระแสมาก มักเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI) ส่วนอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับงานที่มีกำลังไฟฟ้าไม่สูงนัก จะเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ อินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave Inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตตามความกว้างพัลส์ หรืออีกชื่อหนึ่งว่า อินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีลิวเอ็ม (Pulse Width Modulation Inverter : PWM Inverter) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟสลับ และงานอุตสาหกรรมทั่วไป

2.10.1 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

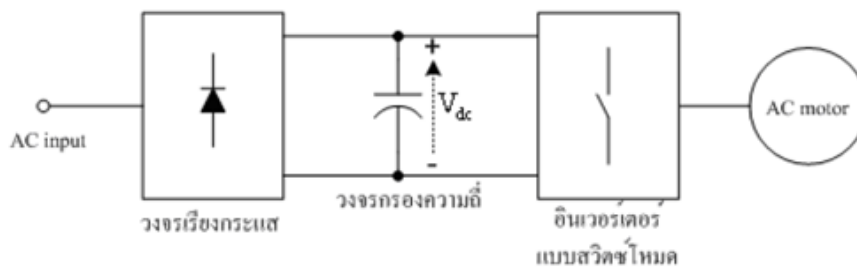
อินเวอร์เตอร์ (Inverter) จะแปลงไฟกระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ ให้เป็นไฟกระแสตรง (DC) โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit)

จากนั้นไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น โดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีรูปคลื่นไซน์ แต่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปคลื่น แตกต่างจากรูปไซน์ นอกจากนี้ยังมีชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของ 3-Phase Induction Motor

2.10.2 โครงสร้างภายในของอินเวอร์เตอร์ ประกอบไปด้วย ชุดคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) ทำหน้าที่แปลงไฟกระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟ AC Power Supply (50 Hz) ให้เป็นไฟกระแสตรง (DC Voltage) ชุดอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) ทำหน้าที่แปลงไฟกระแสตรง (DC Voltage) ให้เป็นไฟกระแสสลับ (AC Voltage) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้ และชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์และชุดอินเวอร์เตอร์

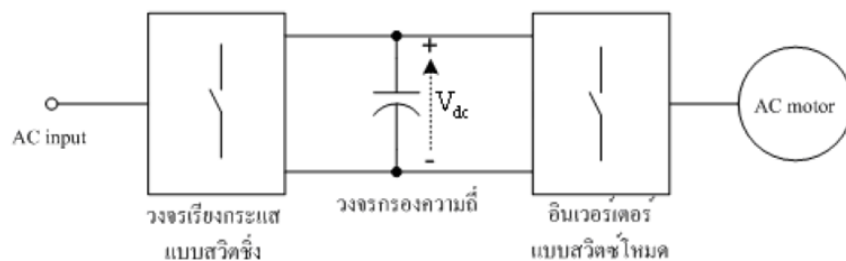
2.10.3 การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟตรงเป็นไฟสลับที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม โดยทั่วไปต้องการปรับค่าได้ทั้งขนาดแรงดันและความถี่ขาออก ทั้งนี้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด ยังแบ่งได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

แบบแรก เป็นแบบที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ขนาดเล็กในงานอุตสาหกรรมทั่วไป คือมีการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดได้เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การควบคุมมอเตอร์ไฟสลับด้วยสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์

แบบที่สอง นิยมใช้ในการควบคุมมอเตอร์ขนาดใหญ่ เมื่อมอเตอร์ทำงานผิดปกติจะมีการส่งกำลังไฟฟ้ากลับจากโหลดไปยังแหล่งจ่ายได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรเรียงกระแสจะเป็นแบบสวิตซ์ซิงโครนัส



รูปที่ 2.14 การควบคุมมอเตอร์ไฟสลับด้วยสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mohitha Venkit. S และคณะ (2016) ได้นำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่ โดยได้พัฒนาการทำ ZCS (Zero-current Switching) แบบ buck-boost คอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ สามารถลดความสูญเสียแบบ Switching Loss และสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้เร็ว มีค่าประสิทธิภาพใกล้เคียง 99% ภายใต้เงื่อนไข Soft-Switching

Yiran Lu และคณะ (2016) ได้นำเสนอแนวคิด วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ กระแสตรง โดยการทำ ZVS (Zero-voltage Switching) สำหรับแบตเตอรี่ เพื่อถ่ายเทพลังงานระหว่างด้านแรงดันต่ำกับแรงดันสูง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ เปรียบเทียบ DAB (Dual-active-bridge) ซึ่งเป็นทดลองที่ 500 วัตต์ วงจรที่งานไม่ซับซ้อน สามารถควบคุมพลังงานได้ อีกทั้งยังลดการใช้วงจรซับซ้อน ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย

Rajesh Thumma และคณะ (2016) ได้นำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทางที่ประยุกต์ใช้สำหรับแบตเตอรี่รถยนต์ โดยได้พัฒนาการทำ ZCS (Zero-current Switching) แบบ buck-boost DC-DC คอนเวอร์เตอร์ สามารถลดความสูญเสียแบบ Switching Losses และปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้น ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้งานได้

Amin Mirzaei และคณะ (2012) ได้นำเสนอการออกแบบทดลอง non-isolated แบบสองทิศทาง ประสิทธิภาพสูง โดยวิเคราะห์ที่ อุปกรณ์ hardware ขนาด 100 วัตต์ ความถี่ 100 kHz โดยการทำ ZVT (Zero-voltage Transition) แบบ buck-Boost dc-dc คอนเวอร์เตอร์สามารถควบคุมวงจรได้และมีค่าประสิทธิภาพขณะโหลดเต็มพิกัดที่ 96%

Y. C. Chuang และคณะ (2010) ได้นำเสนอวงจรทอนแรงดัน หรือ บั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับชาร์จแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนโดยได้พัฒนาการทำ ZCS (Zero-current Switching) แบบ buck dc-dc คอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ ซึ่งเป็นวงจรที่งานไม่ซับซ้อน สามารถควบคุมทั้งพลังงานและกระบวนการได้ในช่วงเวลา ZCS และสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้เร็ว มีค่าประสิทธิภาพที่ 90.3%

B. R. Lin and J. J. Chen และคณะ (2009) นำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดฟลายแบค และวงจรซีต้าที่มีเทคนิคสวิตช์ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ โดยได้นำเสนอหลักการ ใช้ Flyback and zeta converter ด้วยการเปิด ZCS (Zero-current Switching) สามารถลดความสูญเสียจากการรีเซตค่าพลังงานที่เก็บไว้จากสวิตช์เกจอินดักแตนซ์

Schuch, L. และคณะ (2006) ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบการทำงานเปิดปิดสวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่เป็นการสำรองพลังงานจากแบตเตอรี่ในกรณีที่ไฟฟ้าจากหน่วยงานดับ มีระบบ boost จ่ายไฟให้แบตเตอรี่ และ buck เพื่อ back up คอนเวอร์เตอร์ โดยทำการทดลองที่ 580 watt ซึ่งใช้กระบวนการ iZVT (integrated zero-voltage transition) และมีการนำการควบคุมการไหลของพลังงานด้วยคอนเวอร์เตอร์สองทิศทางมาดำเนินการด้วย ผลคือสามารถลดพลังงานที่สูญเสียจากระบบได้

F. Z. Peng และคณะ (2004) ได้นำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทางที่ถูกใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่ ใช้กระบวนการ Zero-voltage switching (ZVS) แบบ

คอนเวอร์เตอร์สองทิศทาง ที่นำมาเปรียบเทียบกับคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลและแบบฮาล์ฟบริด ซึ่งในบทความนี้จะมีข้อดีคือ ใช้งานง่ายไม่ซับซ้อนมีราคาถูกลงกว่า น้ำหนักก็เบากว่าและซึ่งไม่ใช่ total device rating (TDR) penalty และได้ทำการทดสอบที่กำลัง 1.6kW ความถี่ 20 kHz มีประสิทธิภาพที่วัดได้มากกว่า 94% ของอัตรากำลัง

Chan, H.L., และคณะ (2003) ได้นำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการเปิดปิดสวิตช์เป็นศูนย์ โดยใช้การควบคุมแบบเฟสชิฟ บทความนี้ วิเคราะห์ที่ การควบคุมแบบ Phase-shifted ของ DC-DC คอนเวอร์เตอร์ สำหรับการควบคุมแรงดันโพลดชนิด non-linear ซึ่งจำเป็นต้องใช้สวิตซ์ถึง 4 ตัว

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้นตลอดจนหลักการที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย ทำให้เกิดแนวคิดในการดำเนินการเพื่อนำเอาแบตเตอรี่มาต่อทางด้านแรงดันต่ำและมีการดำเนินการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อทางด้านแรงดันสูงและเชื่อมโยงกับระบบกริดอินเวอร์เตอร์ จึงต้องทำการทอนแรงดันเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าระบบทางด้านแรงดันต่ำเพื่อที่จะประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ และทบแรงดันทางด้านแรงดันสูงเพื่อช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ากับระบบกริดอินเวอร์เตอร์ ดังจะมีขั้นตอนการดำเนินการตามที่กล่าวในบทต่อไป



บทที่ 3

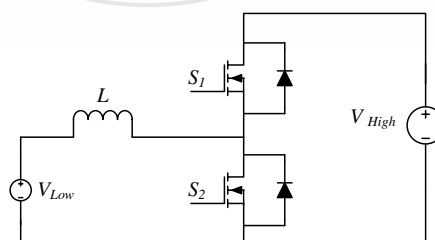
วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทาง โดยทำการศึกษาและออกแบบให้การสูญเสียของสวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์มีน้อยที่สุด จึงมีวิธีกำจัดกำลังสูญเสียจากการสวิตช์ที่มีความถี่สูง ให้ทำงานแบบซอร์ฟสวิตซ์ซิง (Soft Switching) หรือการทำงานโดยการสวิตซ์ขณะแรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching : ZVS) ดังนั้นในการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS จึงมีความสำคัญและมีความจำเป็นต้องมีความเข้าใจหลักการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ รวมทั้งเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการทำงานในสภาวะนี้ด้วย

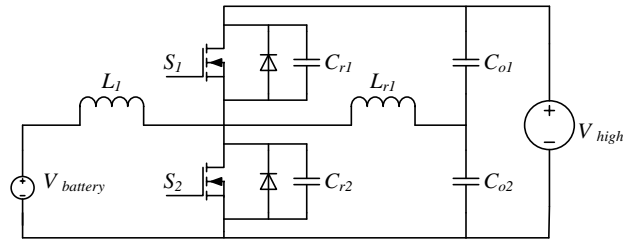
3.1 การดำเนินการวิทยานิพนธ์

เนื่องด้วยประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นค่อนข้างต่ำ ทำให้การประยุกต์ใช้พลังงานและการจัดเก็บพลังงานที่สะสมไว้ในแบตเตอรี่ จะต้องทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุด วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ถ่ายเทพลังงานจะต้องมีการสูญเสียที่น้อยที่สุด ในส่วนของการควบคุมกระแสสามารถทำได้โดยการปรับความกว้างของพัลส์ซึ่งผลการปรับนี้จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียขณะสวิตช์เปิดปิดวงจรได้ ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของการควบคุมนี้ให้อยู่ในโหมดการทำงานและทิศทางที่ถูกต้อง

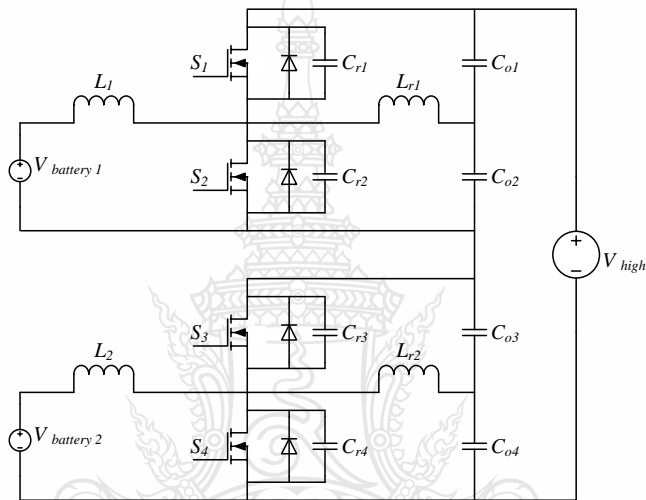
วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษา สร้าง และทดสอบระบบที่มีการปรับกำลัง โดยการปรับแบบวัฏจักรการทำงาน (ดิวตีไซเคิล) แบบอสมมาตรสำหรับซาร์จประจุซูเปอร์คาปาซิเตอร์จากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะควบคุมการทำงานของวงจรสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์ให้นำกระแสขณะแรงดันเป็นศูนย์ตลอดย่านการทำงาน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทางให้ทำงานที่ความถี่สูง เพื่อสร้างแรงดันและกระแสความถี่สูง วิธีนี้อาจก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียบางส่วน เนื่องจากการที่สวิตช์ทำงานแบบฮาร์ดสวิตซ์ซิง (Hard Switching) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แต่สามารถกำจัดกำลังสูญเสียดังกล่าวได้ โดยการแทนที่ด้วยวงจรเรโซแนนท์ ซึ่งทำงานแบบซอร์ฟสวิตซ์ซิง (Soft Switching) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สำหรับวิธีการเพิ่มแรงดันให้ระบบมีค่าพิกัดแรงดันสูงขึ้นจะใช้วิธีการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวจำนวน 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อทำการศึกษาให้ได้ขนาดพิกัดแรงดันตามที่ต้องการในเบื้องต้นก่อนและจะพัฒนาระบบให้สามารถเพิ่มพิกัดแรงดันสูงต่อไป



รูปที่ 3.1 สวิตซ์ทำงานแบบฮาร์ดสวิตซ์ซิง (Hard Switching)



รูปที่ 3.2 สวิตช์ทำงานแบบซอร์ฟสวิตช์ซิง (Soft Switching)



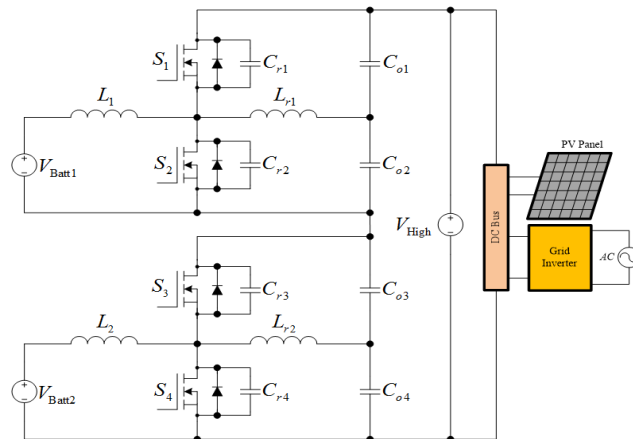
รูปที่ 3.3 การต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์และให้สวิตช์ทำงานแบบซอร์ฟสวิตช์ซิง

3.2 การวิเคราะห์วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

จากรูปที่ 3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการทำงานแบบฮาร์ดสวิตช์ซิง (Hard Switching) โดยทั่วไปจะเกิดความสูญเสียในช่วงของการสวิตช์ เป็นสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความเครียดสูง อีกทั้งยังทำให้เกิดความร้อนสะสมค่อนข้างมาก ซึ่งการแก้ไขปัญหาที่กล่าวข้างต้นนี้ ทำได้โดยการใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่เป็นแอลซีเรโซแนนท์มาปรับปรุงให้วงจรคอนเวอร์เตอร์ลดความสูญเสียดังกล่าวได้ ซึ่งจะมีหลักการทำงานคล้ายกับวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ ขดลวดเรโซแนนท์ที่เพิ่มเข้ามาในวงจรนี้จะทำหน้าที่เป็นวงจร snubber ทำหน้าที่ป้องกันกระแสเกินในระบบ ลดการสูญเสียในตัวสวิตช์ในช่วงเวลาการเปิดปิดการทำงานได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามาในวงจรคอนเวอร์เตอร์ จะส่งผลให้การทำงานของสวิตช์ S1 สวิตช์ S2 สวิตช์ S3 และ สวิตช์ S4 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 สามารถทำงานในสภาวะแรงดันเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switching) ซึ่งการใช้ขดลวดแอลซีเรโซแนนท์มีข้อดีหลายด้าน เช่น มีความได้เปรียบในด้านของอุปกรณ์ ที่ไม่ต้องมีการออกแบบวงจรที่ต้องมีการเพิ่มรายการอุปกรณ์ เป็นต้น ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้

3.3 การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

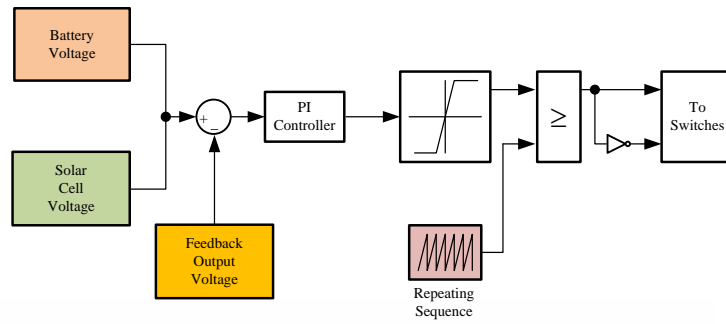
การทำงานของระบบการถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง จะรับพลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ ที่มีแบตเตอรี่ต่อเข้าด้านแรงดันต่ำ เพื่อถ่ายเทพลังงาน โดยที่จจะรักษาระดับแรงดันด้านกริดอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่ จากรูปที่ 3.4 สวิตช์ S1 และ สวิตช์ S2 จะควบคุมให้ทำงานไม่พร้อมกัน โดยปกติแล้วจะให้ สวิตช์ S2 เริ่มทำงานก่อน เพื่อให้ตัวเหนี่ยวนำเกิดการประจุพลังงาน ซึ่งวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีสวิตช์ S3 และ สวิตช์ S4 ก็จะทำงาในลักษณะเดียวกัน สำหรับการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้เป็นการเพิ่มแรงดันโดยในทางปฏิบัติสามารถเพิ่มแรงดันได้ 2 เท่า ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่เลือกวิธีการเพิ่มแรงดันของระบบโดยใช้หม้อแปลง เนื่องจากหม้อแปลงมีค่าสนามแม่เหล็กค่อนข้างสูงจะส่งผลกระทบต่อวงจร ทำให้ค่าความน่าเชื่อถือของวงจรลดลง สำหรับการใช่วงจรคอนเวอร์เตอร์ต่ออนุกรมกันจำนวน 2 ชุด จะให้ทำงานในโหมด Interleaved จะเป็นการช่วยกันจ่ายพลังงานให้กับระบบ นอกจากนี้ การปรับค่าวัฏจักรการทำงาน ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่าวัฏจักรการทำงานเริ่มต้นที่ร้อยละ 50 เพื่อศึกษาและปรับปรุงหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวงจร หากปรับค่าวัฏจักรการทำงานสูงหรือต่ำเกินไป จะส่งผลให้ชุดวงจรชำรุดและเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 3.4 การต่อวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

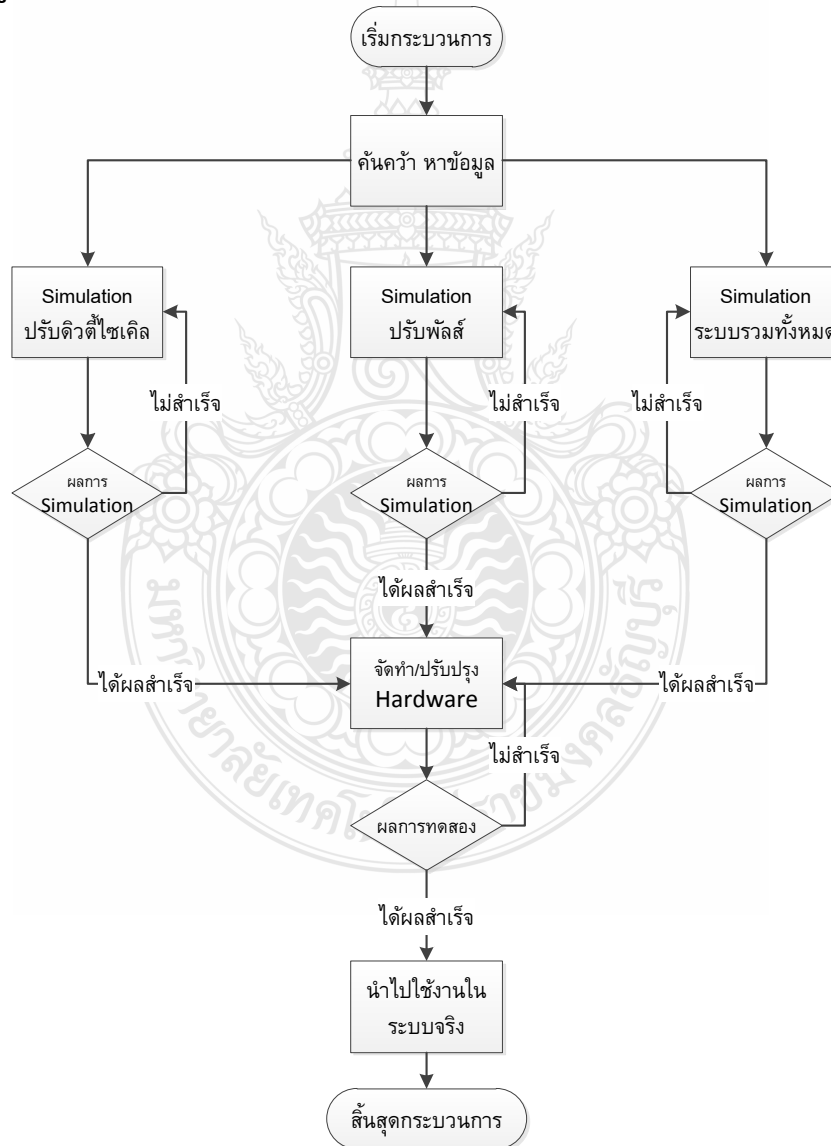
3.4 แนวทางการควบคุมของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

สำหรับการควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์จะมีการวางจวงจรควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เป็นแบบ Feedback Circuit โดยจะควบคุมให้ระดับแรงดันด้านแรงสูง (ด้านกริดอินเวอร์เตอร์) ให้มีค่าคงที่ และควบคุมกระแสโดยการควบคุมกระแสแบบพีไอ (PI Control) การเชื่อมต่อแบตเตอรี่เข้ากับวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้เพื่อให้มีการเก็บสะสมพลังงานในช่วงเวลากลางวันที่มีปริมาณพลังงานจากโซลาร์เซลล์เพียงพอ และสามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเก็บสะสมในแบตเตอรี่มาใช้เพื่อจ่ายให้กับระบบกริดอินเวอร์เตอร์ในช่วงเวลากลางคืนได้



รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมแบบ Feedback Circuit

3.5 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



3.6 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

- 3.6.1 ค้นคว้า ศึกษาและสรุปรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อจัดทำระบบการถ่ายเทพลังงาน
- 3.6.2 จำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 3.6.3 จัดหาอุปกรณ์ เครื่องมือวัดที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย และออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์
- 3.6.4 สร้างและทดสอบวงจรคอนเวอร์เตอร์
- 3.6.5 สร้างและทดสอบระบบการควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์
- 3.6.6 วิเคราะห์และเก็บผลการทดลอง
- 3.6.7 สรุปผลการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ที่	การดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	ค้นคว้า หาข้อมูล และสรุปงานที่เกี่ยวข้อง	■												
2	ออกแบบและจำลองทำงานระบบ			■										
3	จัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองระบบ						■							
4	สร้างและทดสอบวงจรคอนเวอร์เตอร์							■						
5	สร้างและทดสอบระบบที่ใช้ในการควบคุม									■				
6	วิเคราะห์และเก็บผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง											■		
7	สรุปผลการศึกษาวิจัย												■	

3.7 การออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์

3.7.1 ชุดดีซี ฟู ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

3.7.1.1 ภาคควบคุมวัฏจักรการทำงาน (ดีวีทีไอเซลล์) ทำหน้าที่ ควบคุมการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (ค่าดีวีทีไอเซลล์) ได้ตามความเหมาะสม โดยจะสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ ควบคุมการสวิตช์ที่เพาเวอร์มอสเฟตให้มีการทำงานสลับกันระหว่างโหมตทบแรงดัน กับ โหมตทอนแรงดัน โดยสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

3.7.1.2 ภาคชุดขับเคลื่อน ทำหน้าที่ ขับสวิตช์เพาเวอร์มอสเฟตทั้งสองตัวให้ทำงานตาม สัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ได้จากภาคควบคุมวัฏจักรการทำงาน (ตัวตีไซเคิล)

3.7.1.3 ภาคกำลัง ทำหน้าที่ เป็นส่วนของภาควงจรกำลัง ซึ่งทำหน้าที่ในการส่งจ่าย พลังงานไปยังวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง โดยอาศัยหลักการทำงานของวงจรถิซึทูตีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

3.7.1.4 ภาคแรงดันสูง ทำหน้าที่ เป็นส่วนแรงดันด้านเข้าหรือแรงดันด้านออกของ วงจรคอนเวอร์เตอร์แล้วแต่กรณีการใช้งาน

3.7.1.5 ดีซีบัค ทำหน้าที่เป็นส่วนที่จะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจร คอนเวอร์เตอร์ ให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา เพื่อที่จะจ่ายให้กับภาคชุดกริดอินเวอร์เตอร์ และ ภาคชุดเก็บพลังงาน หรือ คาปาซิเตอร์ต่อไป

3.7.2 ภาคชุดกริดอินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ เป็น โหลดของวงจร

3.7.3 ภาคชุดเก็บพลังงานหรือคาปาซิเตอร์

ทำหน้าที่ เป็นส่วนที่เก็บพลังงาน หรือ คาปาซิเตอร์ ของวงจร โดยส่วนนี้จะใช้ แบตเตอรี่เป็นตัวเก็บพลังงานหรือคาปาซิเตอร์

3.7.4 ภาคชุดเซลล์แสงอาทิตย์

ทำหน้าที่ เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจรโดยจะจ่ายไฟให้กับกริดอินเวอร์เตอร์ให้ทำงาน และจะชาร์จแบตเตอรี่ด้วย

3.7.5 ภาคชุดควบคุมการ ตัด-ต่อ วงจร

ทำหน้าที่เป็นตัว ตัด-ต่อ การทำงานของแหล่งจ่ายต่างๆ ที่ป้อนให้กับดีซีบัคและส่วน ต่างๆ ของวงจร ให้มีความเหมาะสมตามช่วงเวลาในการใช้งาน

3.7.6 วงจรคอนเวอร์เตอร์ชุดแหล่งจ่ายพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับกริดอินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วย อุปกรณ์ที่สำคัญ คือ ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจร ตัวเก็บ ประจุเรโซแนนท์ ตัวเก็บประจุทางด้านออก อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ วงจรกำลังซึ่งต้องมีความสามารถ ทำงานได้ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมในการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์

3.7.7 การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ ในวงจรทอนแรงดัน – ทบแรงดันของวงจร ดีซีทูตีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากเนื่องจากมี หน้าที่เก็บและคายพลังงาน เพื่อที่จะทบพลังงานและทอนพลังงานให้เหมาะสมกับการใช้งาน เป็นผลให้ ระดับแรงดันทางด้านออกมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันที่ด้านเข้า สามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$L_r = \left[\frac{[\Delta V \times (\Delta V + 2V)] \times C}{I^2} \right] \quad (3.1)$$

แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์

$$L_r = \left[\frac{[(8)(8 + (2 \times 5))](8.68 \times 10^{-9})}{(0.5)^2} \right] = 5 \mu H \quad (3.2)$$

3.7.8 การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด โดยตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่เก็บและคายกำลังงาน ซึ่งเป็นผลให้ระดับแรงดันทางด้านออกมีค่าสูงกว่าระดับแรงดันทางด้านเข้า การคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรคำนวณได้จากสมการที่ (3.3)

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (3.3)$$

D คือ วัฏจักรการทำงาน (ดิวิตีไซเคิล)

$$D = \frac{(V_o - V_s)}{V_o} = \frac{(8-5)}{8} = 0.38 \quad (3.4)$$

แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด

$$L_{\min} = \frac{(1-0.38)(10)}{(2)(20 \times 10^3)} = 155 \mu H \quad (3.5)$$

3.7.9 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.6)

$$C_r = \left[\frac{LI^2}{\Delta V \times (\Delta V + 2V)} \right] \quad (3.6)$$

แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์

$$C_r = \left[\frac{(5 \times 10^{-6})(0.5)^2}{(8)(8 + (2 \times 5))} \right] = 8.68 nF \quad (3.7)$$

ดังนั้น ควรเลือกขนาดตัวเก็บประจุทางด้านออกของวงจรที่มีค่าสูงกว่า 8.68 นาโนฟารัด และแรงดันที่ทนได้ ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าแรงดันด้านออก วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ขนาดตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ 10 นาโนฟารัด สามารถทนแรงดันได้ 63 โวลต์

3.7.10 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุด้านออก ซึ่งในวงจรกำลังของวงจรทอนแรงดัน-ทบแรงดัน ดิซิจูติซีคอนเวอร์เตอร์ ตัวเก็บประจุด้านออกของวงจรมีหน้าที่ในการเก็บพลังงานรูปของประจุไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันออกให้กับโหลดหรือคายประจุไฟฟ้าเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ Turn ON และทำการเก็บประจุเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ Turn OFF ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันได้

เท่าหรือมากกว่าแรงดันด้านออก หากเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ จะมีส่วนช่วยในการลดแรงดันกระเพื่อมทางด้านออก การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านออก จากสมการที่ (3.8)

$$C_o = \frac{I_o D}{f \Delta V_o} \quad (3.8)$$

แทนค่าเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุทางด้านออก

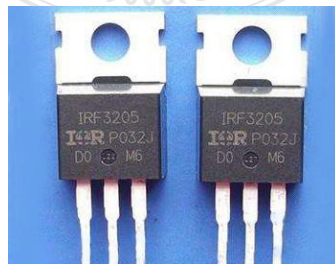
$$C_o = \frac{0.5 \times 38}{20 \times 10^3 \times 8} = 118.75 \mu F \quad (3.9)$$

ดังนั้นควรเลือกขนาดตัวเก็บประจุทางด้านออกของวงจรที่มีค่าสูงกว่า 118.75 ไมโครฟารัด และแรงดันที่ทนได้ต้องไม่ต่ำกว่าแรงดันด้านออก วิทยาลัยพณิชน์นี้เลือกใช้ขนาดตัวเก็บประจุทางด้านออก 220 ไมโครฟารัด ทนแรงดันได้ 63 โวลต์ ในการเลือกค่าตัวเก็บประจุหากใช้ค่าที่มีความจุยิ่งสูงจะทำให้แรงดันกระเพื่อมทางด้านออกมีคาลดลง แต่ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะต้องไม่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ ถ้าเลือกตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุและอัตราทนแรงดันสูง ราคา ก็จะสูงตามไปด้วยจึงต้องพิจารณาเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน

3.7.11 การเลือกอุปกรณ์สวิตซ์

อุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรทอนแรงดัน-ทบแรงดัน ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ ควรเลือกอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้น ในวิทยาลัยพณิชน์นี้เลือกใช้เพาเวอร์มอสเฟต ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ เวลาที่ใช้ในการสับสวิตซ์ อยู่ในช่วงนาโนวินาที และในวงจรซัพเพาเวอร์มอสเฟตนั้น สามารถทำได้ง่าย เพราะสามารถควบคุมได้ด้วยแรงดันและกระแส ด้านเข้า ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ

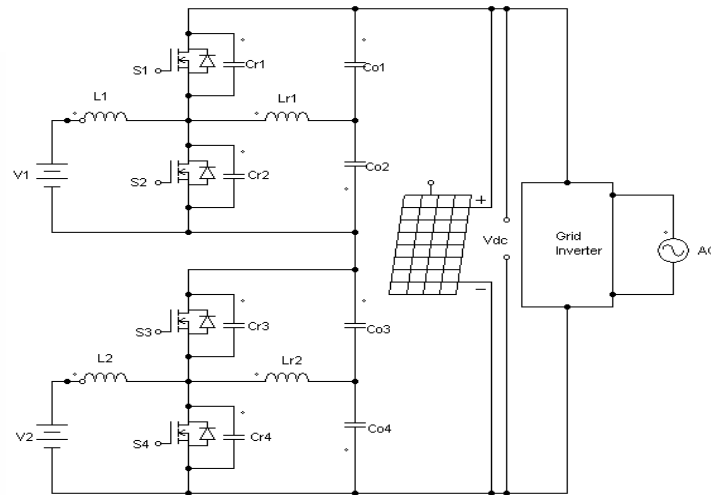
โดยได้เลือกใช้เพาเวอร์มอสเฟต เบอร์ IRF3205 ของบริษัท International Rectifier ซึ่งมีคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ที่สำคัญ ดังนี้ ความต้านทานระหว่างขาเดรนและซอร์ส ขณะนำกระแส $R_{DS(on)} = 0.008$ โอห์ม ซึ่งมีค่าต่ำมาก แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส (V_{DS}) ที่ทนได้ 55 โวลต์ กระแสเดรน (I_D) สูงสุดที่สามารถไหลผ่านได้ 110 แอมแปร์



รูปที่ 3.6 เพาเวอร์มอสเฟต เบอร์ IRF3205

3.8 แบบจำลอง (Simulation)

3.8.1 แบบจำลองการทำงานของระบบถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรม วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทางโดยประยุกต์ใช้โปรแกรม POWER SIMULATION (PSIM) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.8.2 จากแบบจำลองการทำงานของระบบถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วย POWER SIMULATION (PSIM) สามารถหาสมการที่ใช้ควบคุมและรักษาระดับแรงดัน หรือควบคุมแรงดันที่บัส V_{dc} ได้ตามสมการ ดังนี้

$$V_{dc} = \left(\frac{V_1}{D}\right) + \left(\frac{V_2}{D}\right) \quad (3.10)$$

$$V_{dc} = \left(\frac{V_1 + V_2}{D}\right) \quad (3.11)$$

$$V_{dc} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{D} \quad (3.12)$$

$$V_1 = V_n \quad (3.13)$$

$$V_{dc} = \frac{nV_n}{D} \quad (3.14)$$

$$i_L(t) = -\frac{V_o}{L}(t) + I_2 \quad (3.15)$$

$$i_{Lr1,2}(t) = \frac{V_{o1}}{L}(t) \quad (3.16)$$

3.8.3 จากจำลองการทำงานของระบบถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรม วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทางโดยประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะวิเคราะห์ช่วงที่ สวิตซ์วงจรคอนเวอร์เตอร์นำกระแสโดยพบว่า สวิตซ์จะมีการสูญเสียเป็นศูนย์เพราะสวิตซ์นำกระแส ขณะที่มีแรงดันเป็นศูนย์ และเมื่อสวิตซ์วงจรคอนเวอร์เตอร์หยุดนำกระแส จะเห็นได้ว่าการสูญเสียมีค่า ลดลงด้วยเพราะแรงดันที่ตกคร่อมสวิตซ์นั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้น ผลที่เกิดขึ้นนี้ เนื่องจากคาปาซิเตอร์ที่ต่อ คร่อมอยู่กับสวิตซ์นั่นเอง สำหรับการควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ จะควบคุมให้แรงดันด้านเข้าของกริด อินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่

3.9 ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง

วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ที่ทำงานแบบซอร์ฟสวิตซ์ซิง (Soft Switching) สำหรับการ เพิ่มแรงดันนั้นจะใช้วิธีต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวเพื่อศึกษาให้เกิดแรงดันที่มีประสิทธิภาพ สูงสุด ซึ่งมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชุดควบคุมสำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชุดควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง

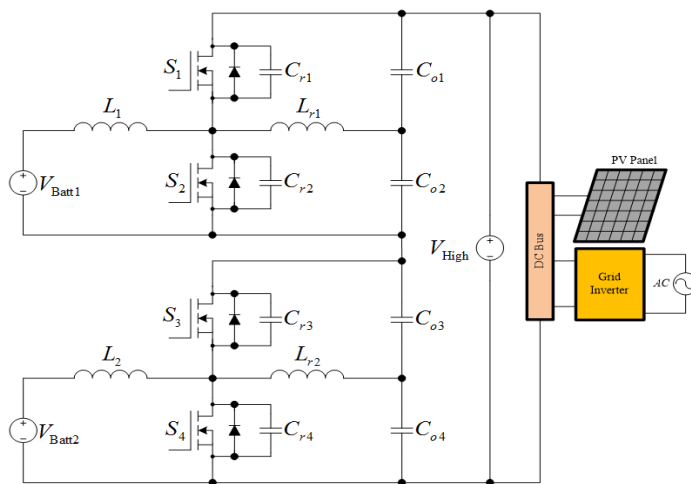
บทที่ 4

ผลการทดลอง

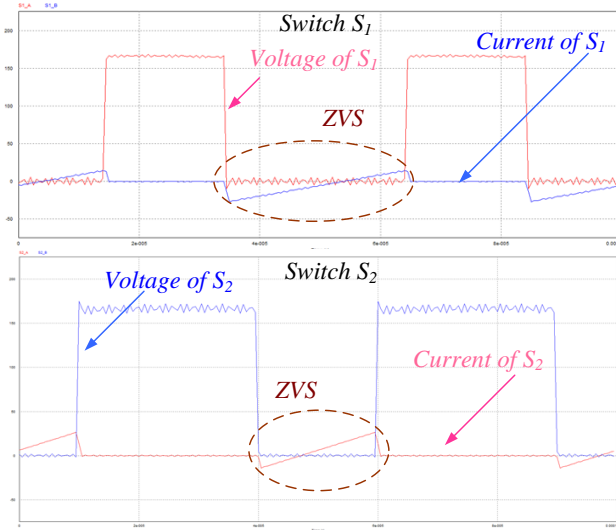
ระบบถ่ายเทพลังงานที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นสวิตช์วงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ทำงานแบบซอร์ฟสวิตซ์ซิง (Soft Switching) เทคนิคการเพิ่มแรงดัน จะใช้วิธีการนำวงจรคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวจำนวน 2 วงจร ต่ออนุกรมกันเพื่อศึกษาการเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น และสามารถใช้งานกับโหลดได้เบื้องต้นก่อน โดยมีรายละเอียดผลการทดลองทั้งที่ได้จากแบบจำลอง (Simulation Results) และผลการทดลองที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Experimental Results) มีผลการทดลอง ดังนี้

4.1 ผลการทดลองที่ได้แบบจำลอง (Simulation Results)

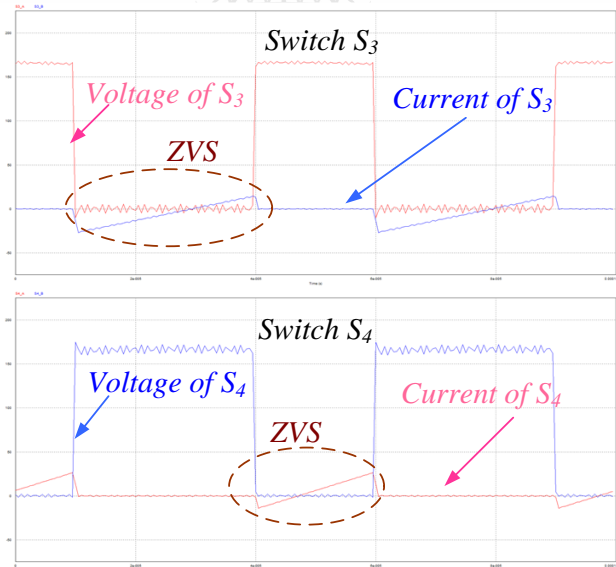
ผลจากการจำลองการทำงานของระบบถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง ช่วงที่สวิตช์วงจรคอนเวอร์เตอร์นำกระแส นั้น จะมีการสูญเสียเป็นศูนย์เพราะสวิตช์นำกระแสขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ และเมื่อสวิตช์วงจรคอนเวอร์เตอร์หยุดนำกระแส จะเห็นได้ว่าการสูญเสียมีค่าลดลงด้วยเพราะแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์นั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้น ผลที่เกิดขึ้นนี้ เนื่องจากคาปาซิเตอร์ที่ต่อคร่อมอยู่กับสวิตช์นั่นเอง สำหรับการควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ จะควบคุมให้แรงดันด้านเข้าของกริดอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ กล่าวคือเมื่อแรงดันทางด้านแรงดันต่ำ (ด้านแบตเตอรี่) มีค่าต่ำลง ระบบถ่ายเทพลังงานจะประจุกระแสเข้าไปอย่างรวดเร็ว และเมื่อแรงดันทางด้านแรงดันสูง (ด้านกริดอินเวอร์เตอร์) มีค่าต่ำลง ระบบถ่ายเทพลังงานก็จะจ่ายกระแสที่เก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ จ่ายไปยังด้านแรงดันสูงอย่างรวดเร็วด้วย ซึ่งระบบถ่ายเทพลังงานนี้จะแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง



รูปที่ 4.2 การทำงานของสวิตช์ S1 และ สวิตช์ S2

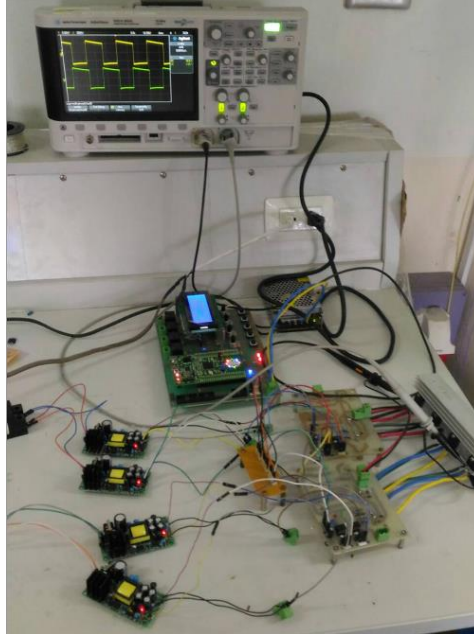


รูปที่ 4.3 การทำงานของสวิตช์ S3 และ สวิตช์ S4

ผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ จะแสดงรูปแรงดันและกระแส ขณะที่สวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงาน โดยสวิตช์ S2 และ สวิตช์ S4 เริ่มทำงานก่อน ซึ่งจะเห็นว่าขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์นั้น จะไม่มีกระแสไหลผ่าน โดยที่สวิตช์จะนำกระแสในขณะที่มีค่าเป็นศูนย์ การไหลของกระแสจะเริ่มนำกระแสในช่วงที่ไดโอดด้านลบก่อน หลังจากนั้น เมื่อถึงจุดที่แรงดันเป็นศูนย์ สวิตช์ก็จะเริ่มนำกระแสในช่วงที่เป็นด้านบวก ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3

4.2 ผลการทดลองที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Experimental Results)

4.2.1 ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบสองทิศทางดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนท์ที่ทำงานแบบซอร์ฟสวิตซ์ซิง (Soft Switching) สำหรับการเพิ่มแรงดันนั้นจะใช้วิธีต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวเพื่อศึกษาให้เกิดแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งได้กำหนดตัวแปรเบื้องต้นสำหรับการทดลองในครั้งนี้ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 PARAMETERS OF THE SYSTEM

Item	Symbol	Value
DC voltage from DC Bus	V_{High}	48 V
DC voltage from batteries	$V_{Batt 1,2}$	12 V
Switching Frequency	f	35 kHz
Resonant capacitor	$C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, C_{r4}$	1 μ F
Resonant inductor	L_{r1}, L_{r2}	36 μ H
Output capacitor	$C_{o1}, C_{o2}, C_{o3}, C_{o4}$	220 μ F
Choke Inductor	L_1, L_2	2.6mH
Switches	$S_1 S_2 S_3 S_4$	IRF3205

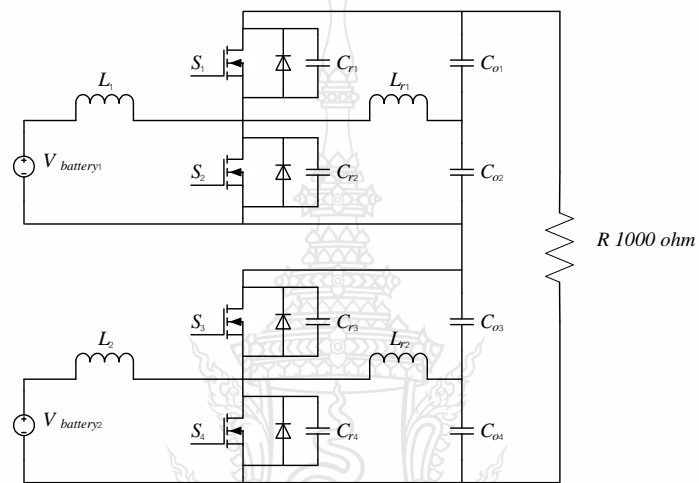
4.2.2 ผลการทดลองโดยการต่อแบตเตอรี่เข้ากับวงจรคอนเวอร์เตอร์ และเบื้องต้นจะใช้โหลดเป็นความต้านทานที่มีขนาด 1,000 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยมีอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

4.2.2.1 ออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS2004C

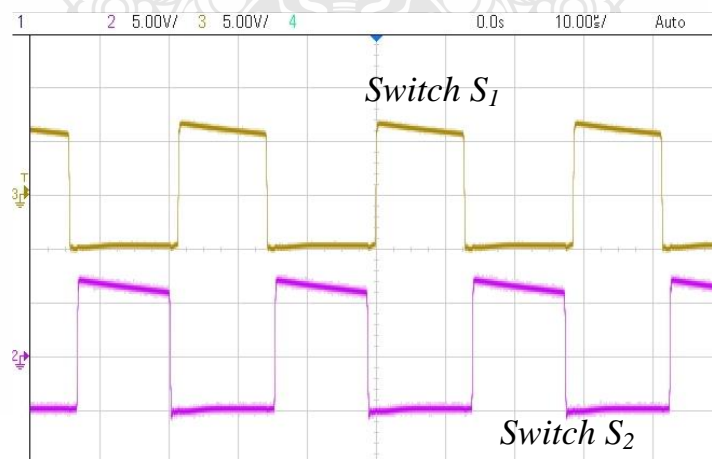
4.2.2.2 เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับโปรแกรม Keil uVision 5

4.2.2.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

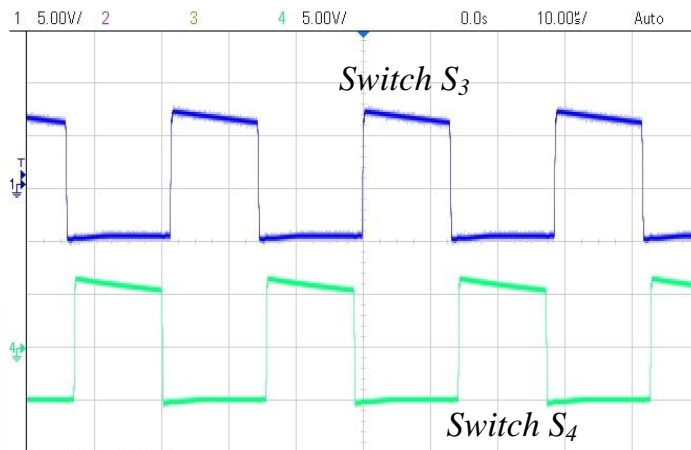
4.2.2.4 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟาเรด ยี่ห้อ pro'skit รุ่น mt-4002



รูปที่ 4.5 การต่อแบตเตอรี่กับใช้โหลดเป็นความต้านทานขนาด 1,000 โอห์ม

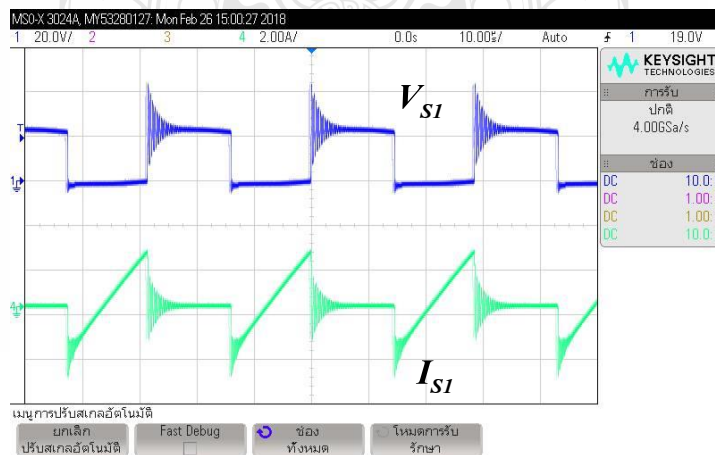


รูปที่ 4.6 สัญญาณขั้วเกิดของสวิตช์ S1 และ สวิตช์ S2

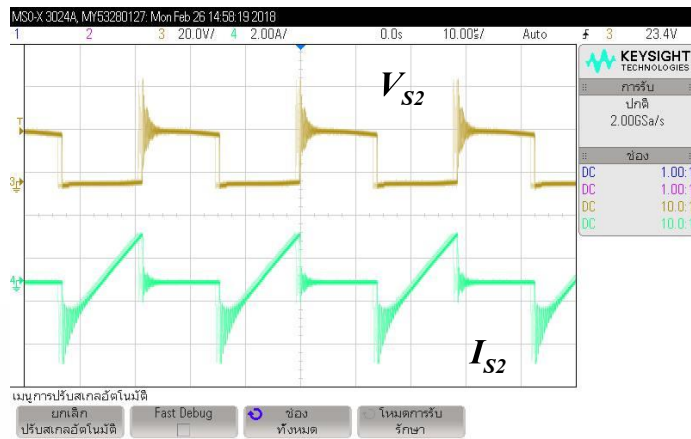


รูปที่ 4.7 สัญญาณขั้บเกิดของสวิตช์ S3 และ สวิตช์ S4

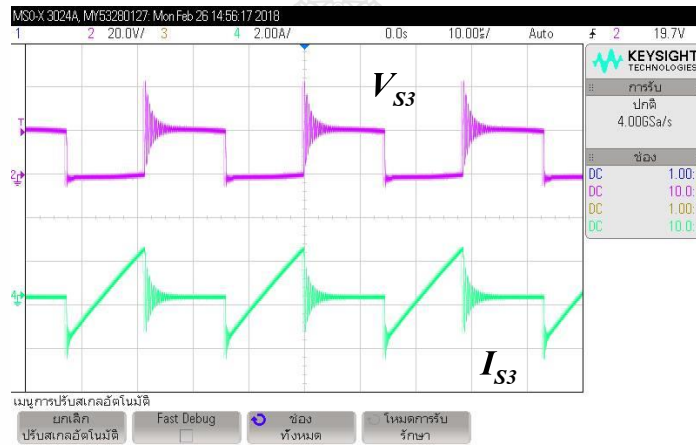
จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 จะแสดงรูปสัญญาณขั้บเกิดของสวิตช์ โดยสวิตช์ S2 และ สวิตช์ S4 เริ่มทำงานก่อน โดยที่สวิตช์ S1 และสวิตช์ S3 จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อ สวิตช์ S2 และสวิตช์ S4 หยุดทำงานแล้ว จะเห็นได้ว่าขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์จะไม่มีกระแสไหลผ่าน โดยกระแสจะไหลผ่านได้ก็ต่อเมื่อสวิตช์มีแรงดันเป็นศูนย์ การไหลของกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์นั้นจะเริ่มนำกระแสในช่วงที่ไดโอดด้านลบก่อน หลังจากนั้นเมื่อถึงจุดที่แรงดันของสวิตช์เป็นศูนย์ สวิตช์จะเริ่มนำกระแสในช่วงที่เป็นด้านบวก โดยมีรูปแสดงลักษณะการทำงานของสวิตช์ S1 สวิตช์ S2 สวิตช์ S3 และ สวิตช์ S4 ตามรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.11 สำหรับการทดลองสัญญาณขั้บเกิดของสวิตช์ทั้งสองตัวนั้น จะต้องมีช่องว่างของช่วงเวลาวิกฤต อยู่เล็กน้อย เพื่อป้องกันการลัดวงจรของอินเวอร์เตอร์ โดยในวิทยานิพนธ์นี้มีค่าอยู่ประมาณ 2.2 ไมโครวินาที ซึ่งเหมาะกับค่าการทำงานและหยุดทำงานของสวิตช์



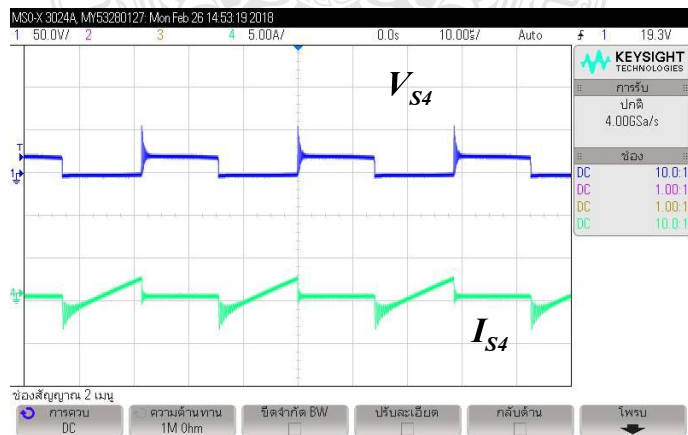
รูปที่ 4.8 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S1 โหลด R 1,000 โอห์ม และค่าวิญัจกรการทำงานร้อยละ 50



รูปที่ 4.9 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S2 โหลด R 1,000 โอห์ม และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50

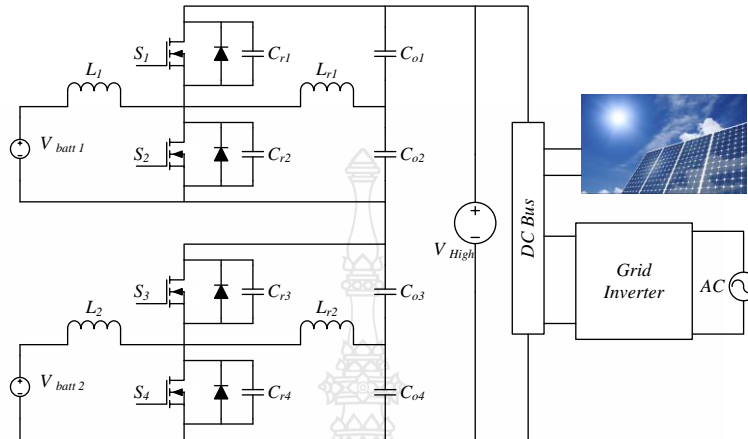


รูปที่ 4.10 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S3 โหลด R 1,000 โอห์ม และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50



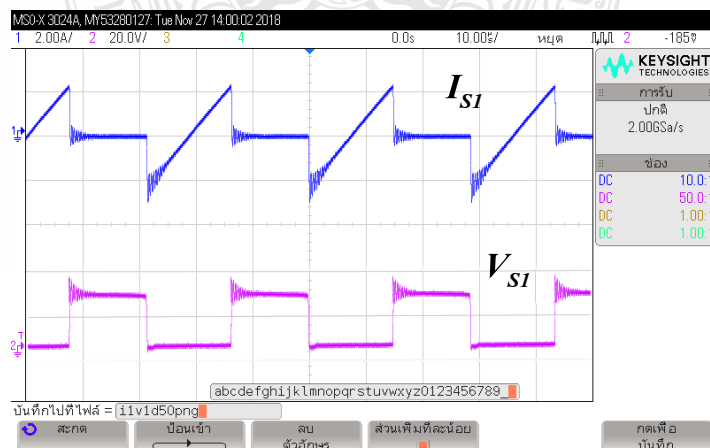
รูปที่ 4.11 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S4 โหลด R 1,000 โอห์ม และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50

4.2.3 ผลการทดลองของการต่อแบตเตอรี่เข้ากับวงจรคอนเวอร์เตอร์ พร้อมทั้งเชื่อมต่อกับระบบกริดอินเวอร์เตอร์ โดยมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ต่อเข้าด้านแรงดันสูง (ด้านกริดอินเวอร์เตอร์) ดังแสดงในรูปที่ 4.12

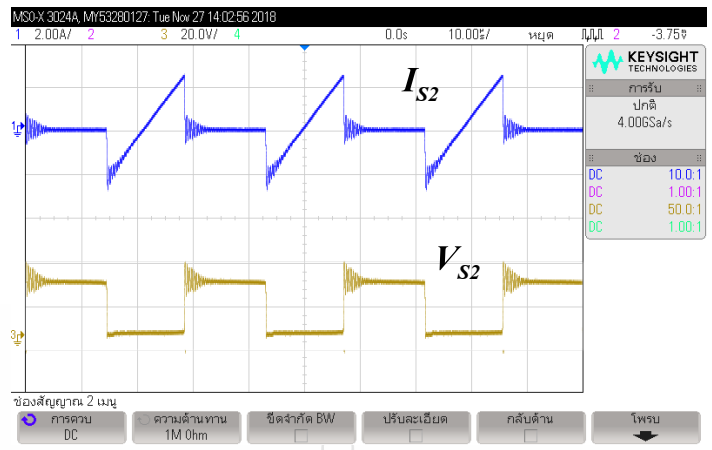


รูปที่ 4.12 การต่อระบบถ่ายเทพลังงานกับกริดอินเวอร์เตอร์และโซลาร์เซลล์

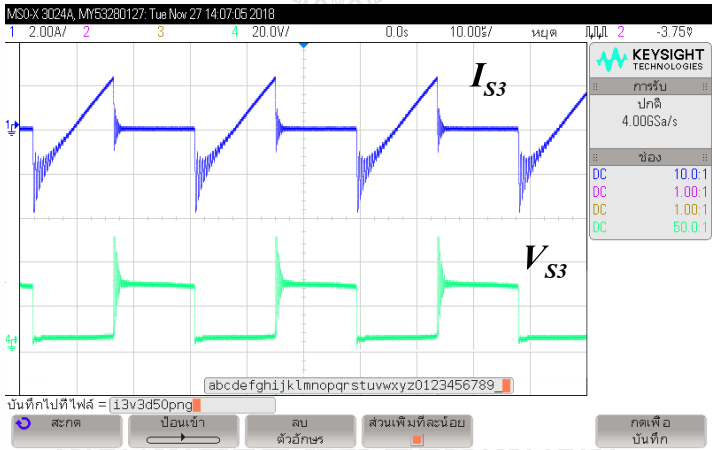
จากรูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.20 เป็นการทดลองการทำงานจริงของระบบถ่ายเทพลังงาน วงจรคอนเวอร์เตอร์ในโหมดทบทแรงดัน และโหมดทอนแรงดัน มีการปรับค่าวิญจักรการทำงานที่ ร้อยละ 50 และร้อยละ 40 ตามลำดับ โดยจะแสดงรูปกระแสและแรงดันขณะสวิตซ์อยู่ในโหมดการทำงาน โดยการไหลของกระแสจะเริ่มนำกระแสที่ไดโอดในด้านลบ เมื่อถึงจุดที่แรงดันเป็นศูนย์ สวิตซ์ก็จะเริ่มนำกระแสในด้านบวก ในการทดลองการทำงานจริงที่รูปคลื่นแรงดันจะเกิดสัญญาณรบกวน มีสาเหตุเกิดจากตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรและการสวิตซ์ซิ่ง ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรแต่อย่างใด



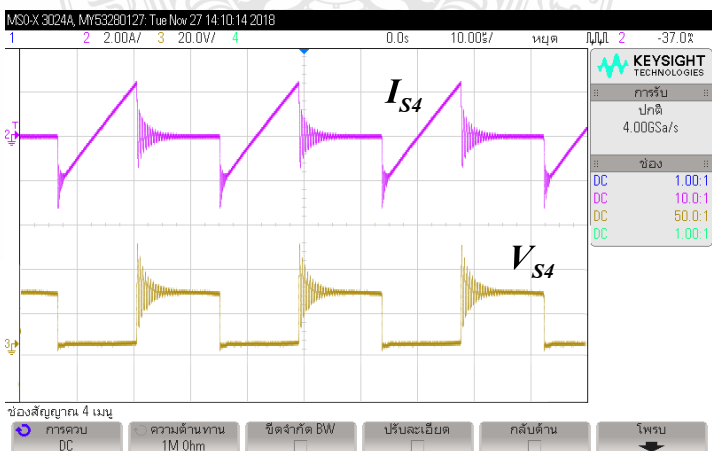
รูปที่ 4.13 กระแสและแรงดันของสวิตซ์ S1 และค่าวิญจักรการทำงานร้อยละ 50



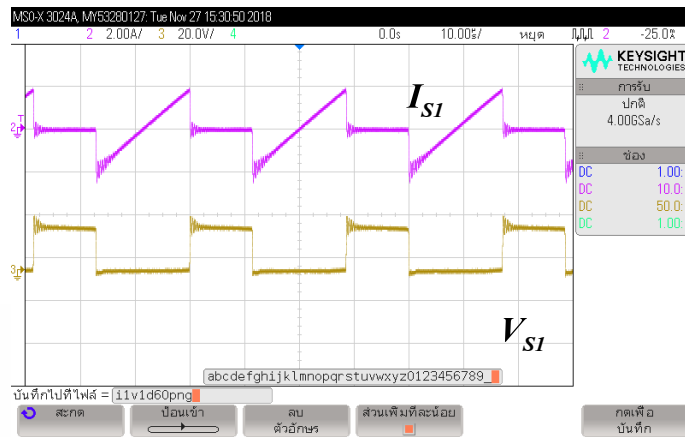
รูปที่ 4.14 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S2 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50



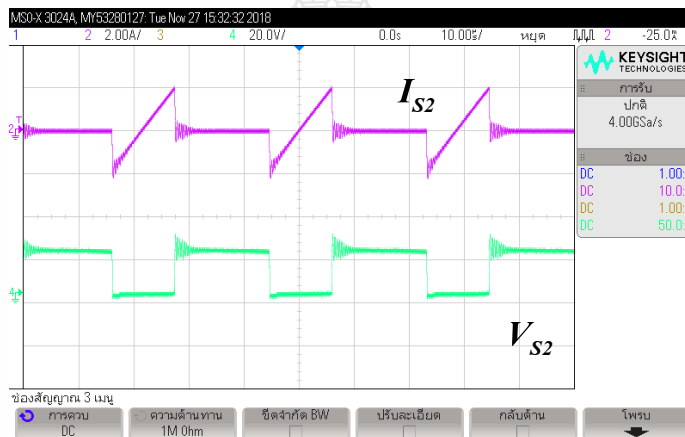
รูปที่ 4.15 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S3 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50



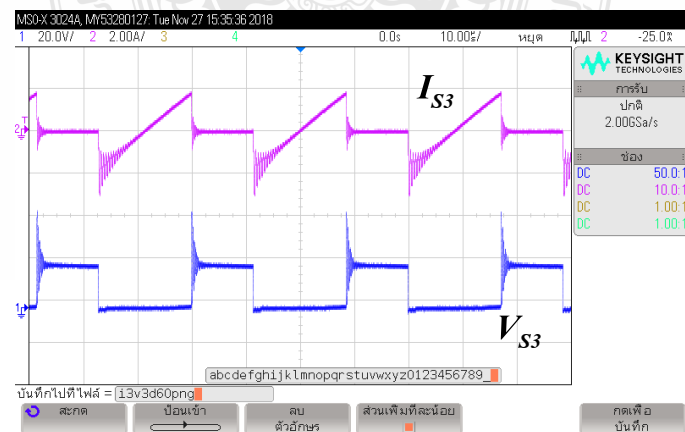
รูปที่ 4.16 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S4 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50



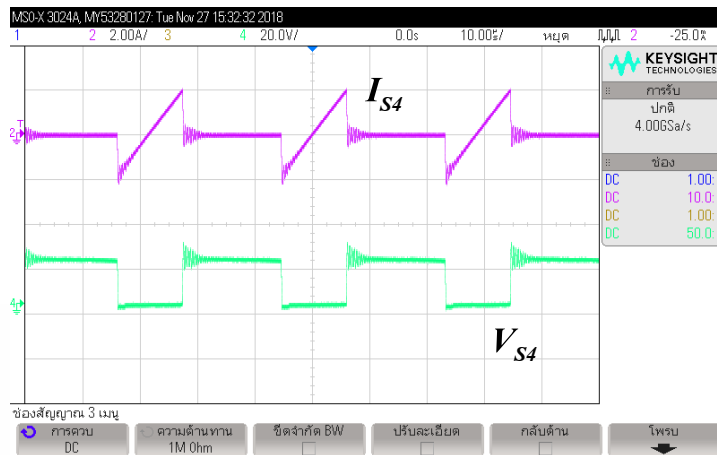
รูปที่ 4.17 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S1 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 40



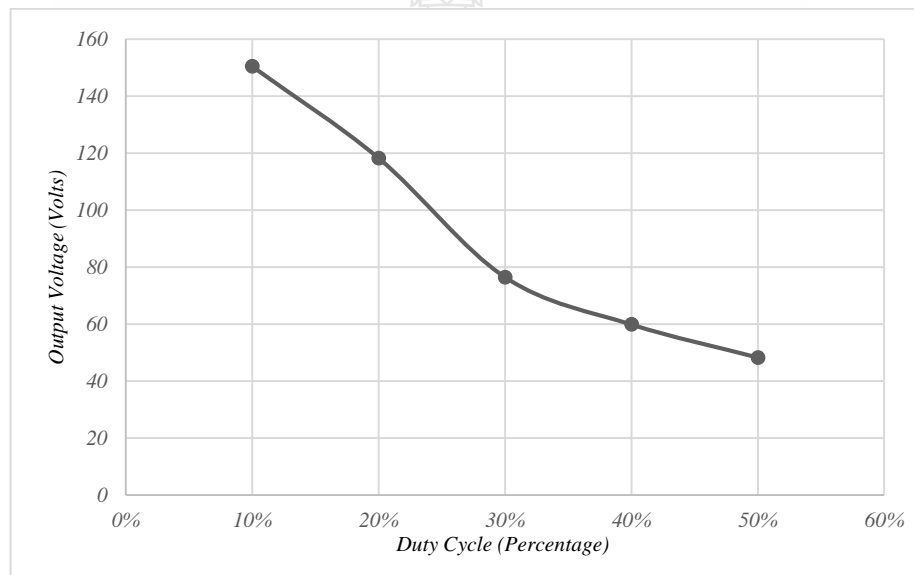
รูปที่ 4.18 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S2 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 40



รูปที่ 4.19 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S3 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 40



รูปที่ 4.20 กระแสและแรงดันของสวิตช์ S4 และค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 40



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออก กับการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน

จากรูปที่ 4.21 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับการปรับค่าวัฏจักรการทำงานจะเห็นว่าเมื่อค่าวัฏจักรการทำงานมีค่าน้อย แรงดันด้านออกจะมีค่ามาก สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้แรงดันด้านออก คือ แรงดันด้านกริดอินเวอร์เตอร์ โดยทดลองปรับค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 10 สามารถวัดแรงดันด้านแรงสูง (ด้านกริดอินเวอร์เตอร์) เท่ากับ 150.4 โวลต์ และเมื่อค่าวัฏจักรการทำงานให้มีค่ามาก แรงดันด้านออกจะมีค่าน้อย ซึ่งการทดลองปรับค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50 สามารถวัดแรงดันได้ 48.2 โวลต์

ตารางที่ 4.2 แรงดันด้านออก และการค่าวัฏจักรการทำงาน

Duty Cycle (Percentage)	Output Voltage (Volts)
50%	48.2
40%	59.8
30%	76.4
20%	118.2
10%	150.4

4.3 สรุป

ผลการทดลองของระบบถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง จะทำการศึกษาวิเคราะห์การทำงาน การควบคุมวงจร รวมไปถึงการทดลองเชื่อมต่อทั้งแบตเตอรี่และโซลาร์เซลล์เข้าด้วยกัน ซึ่งจะนำผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์และปรับปรุงข้อมูลให้เหมาะสมเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปทำการทดลองจริงกับอุปกรณ์สวิตซ์วงจรคอนเวอร์เตอร์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลจากการทดลองจริงจะเห็นได้ว่าการปรับค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 50 วัตต์แรงดันด้านเข้าของระบบกริดอินเวอร์เตอร์ได้ 48.2 โวลต์ เมื่อปรับค่าวัฏจักรการทำงานร้อยละ 10 จะสามารถเพิ่มแรงดันด้านเข้าของระบบกริดอินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งวัตต์แรงดันได้เท่ากับ 150.4 โวลต์ และสามารถควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานในย่านที่เหมาะสมได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาระบบถ่ายเทพลังงานจากโซลาร์เซลล์ด้วยการต่ออนุกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทาง พิจารณาเงื่อนไขการทดลองโดยกำหนดให้ระบบถ่ายเทพลังงานเชื่อมต่อแหล่งจ่ายพลังงานจากโซลาร์เซลล์พร้อมทั้งเชื่อมต่อแบตเตอรี่เพื่อทำงานร่วมกัน และทำการศึกษาระบบถ่ายเทพลังงานนี้ สามารถรักษาระดับแรงดันด้านกริดอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสม ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถสรุปได้ ดังนี้

5.1 สรุปผลการทำวิทยานิพนธ์

5.1.1 ในการศึกษาการถ่ายเทพลังงานวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทางด้วยการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น สามารถศึกษาลักษณะสัญญาณขับเคลื่อน ลักษณะแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ ลักษณะของกระแสที่ไหลผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์ รวมไปถึงการศึกษาเพื่อปรับค่าตัวจูนการทำงานในย่านต่างๆ โดยกำหนดให้มีการทดลองที่ใช้โหลดเป็นความต้านทานขนาด 1,000 โอห์ม ผลจากการจำลองที่ได้สามารถกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้นและหาค่าที่เหมาะสมเพื่อใช้สำหรับการทดลองได้

5.1.2 ในการศึกษาการถ่ายเทพลังงานวงจรคอนเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบสองทิศทางด้วยการต่อแบตเตอรี่ขนาดพิกัด 12 โวลต์ ต่อเข้ากับชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีขนาดพิกัดต่อ 1 ชุด ไม่น้อยกว่า 100 วัตต์ และในเบื้องต้นนี้จะใช้โหลดที่เป็นความต้านทานขนาด 1,000 โอห์ม และทำการศึกษาระบบการถ่ายเทพลังงานโดยการเชื่อมต่อบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดพิกัด 600 วัตต์ และใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ที่มีขนาดพิกัด 150 วัตต์ ต่อเข้าด้านแรงดันสูง (ด้านกริดอินเวอร์เตอร์) ระบบถ่ายเทพลังงานวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้จะทำงานในโหมดทบแรงดันและโหมดทอนแรงดัน ซึ่งทดลองปรับค่าตัวจูนการทำงานร้อยละ 50 วัตต์แรงดันด้านแรงสูง (ด้านกริดอินเวอร์เตอร์) เท่ากับ 48.2 โวลต์ และทดลองปรับค่าตัวจูนการทำงานร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันด้านแรงสูงจะเพิ่มขึ้น โดยวัดได้เท่ากับ 150.4 โวลต์ ผลจากการศึกษานี้สามารถรักษาระดับแรงดันด้านแรงสูงได้โดยสวิตช์เป็นแบบนำกระแสขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงที่สวิตช์นำกระแสจะมีการสูญเสียเป็นศูนย์เพราะนำกระแสที่สถานะเป็นศูนย์ และเมื่อสวิตช์หยุดนำกระแสแล้วการสูญเสียจะลดลงเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลจากการต่อคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานอยู่กับสวิตช์ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกให้มีการควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ให้ประจุกระแสอย่างรวดเร็ว หากตรวจพบว่าแรงดันทางด้านแรงดันต่ำ (ด้านแบตเตอรี่) มีค่าต่ำลงมาก และในขณะเดียวกันก็จะควบคุมให้วงจรคอนเวอร์เตอร์สามารถถ่ายเทพลังงานจากแบตเตอรี่ไปยังระบบกริดอินเวอร์เตอร์ได้โดยให้มีการจ่ายกระแสอย่างรวดเร็วเพื่อรักษาระดับแรงดันด้านระบบกริดอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่และเหมาะสมตามความต้องการได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

นอกจากนี้ระบบไฟฟ้าที่ใช้ตามที่พักอาศัยโดยทั่วไปจะมีแรงดัน 220 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าพิกัดแรงดันของแบตเตอรี่ ดังนั้นการนำพลังงานจากแบตเตอรี่มาใช้จะต้องเพิ่มระดับแรงดันให้สูงขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทดลองเพิ่มแรงดันโดยการต่ออนุกรมคอนเวอร์เตอร์จำนวน 2 ชุด เพื่อศึกษาหลักการและกระบวนการทำงานในการเพิ่มระดับแรงดันในเบื้องต้น ซึ่งสามารถเพิ่มพิกัดแรงดันของระบบได้สูงสุดที่ 150.4 โวลต์ ดังนั้น หากต้องการเพิ่มระดับแรงดันสูงขึ้นอีก ก็สามารถเพิ่มจำนวนชุดของวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้แต่ควรระวังกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่จะเกิดขึ้นในระบบต่อไป

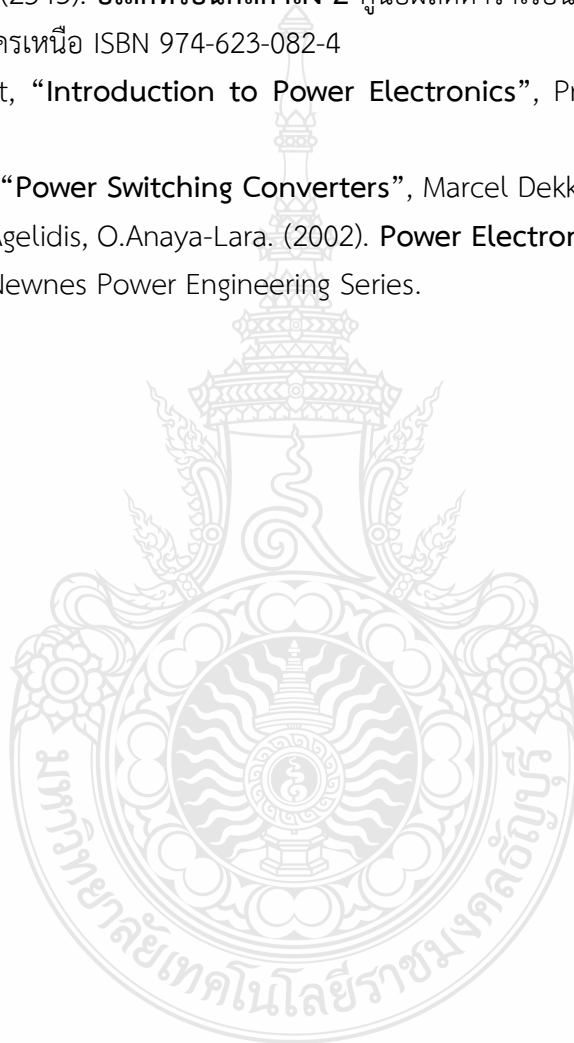


บรรณานุกรม

- [1] เจิดกุล โสภานิตย์. (2557). **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (หน้า 13-59). ISBN 978-974-03-3231-2.
- [2] รศ.ดร.วีระเชษฐ ชื่นเงิน/วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์. (2547). **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)**สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง (หน้า 481-534). ISBN 974-92440-9-5.
- [3] รศ.ดร.โคทม อารียา. (2544). **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1** สำนักพิมพ์ บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน) (หน้า 473-597). ISBN 974-354-314-5.
- [4] รศ.ดร.โคทม อารียา. (2544). **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2** สำนักพิมพ์ บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน) (หน้า 449-587). ISBN 974-534-403-6.
- [5] F. Z. Peng H. Li G.-J. Su J. S. Lawler "A new ZVS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application," IEEE Trans Power Electron. vol. 19 no. 1 pp. 54-65 Jan. 2004.
- [6] M. D. Jain P. Jain "A bidirectional DC-DC converter topology for low power application," IEEE Trans. Power Electron. vol. 15 no. 4 pp. 595-606 Jul. 2000.
- [7] P. Das B. Laan S. A. Mousavi G. Moschopoulos "A nonisolated bidirectional ZVS-PWM active clamped DCDC converter," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 24 no. 2 pp. 553-558 Feb. 2009.
- [8] H. Li F.-Z. Peng J. S. Lawler "A natural ZVS medium-power bidirectional DC-DC converter with minimum number of devices," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 39 no. 2 pp. 525-535 Mar. 2003.
- [9] K. Ma Y. Lee "An integrated flyback converter for DC uninterruptible power supplies," IEEE Trans. Power Electron. vol. 11 no. 2 pp. 318-327 Mar. 1996.
- [10] S. Inoue H. Akagi "A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium voltage power conversion system," IEEE Trans. Power Electron. vol. 22 no. 2 pp. 535-542 Mar. 2007.
- [11] L. Schuch C. Rech H. L. Hey H. A. Grudlinggrundling H. Pinheiro J. R. Pinheiro "Analysis and design of a new high-efficiency bidirectional integrated ZVT PWM converter for DC-bus and battery-bank interface," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 42 no. 5 pp. 1321-1332 Sep. 2006.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] อุเทน คำน่าน. (2558). ตำรา อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เล่มที่ 1 ตอนเครื่องแปลงผันไฟฟ้า กระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง. ISBN 978-974-625-718-3.
- [13] สุวัฒน์ แซ่ตัน. (2537). เทคนิคและการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย. สำนักพิมพ์หุ่นไข่ไก่ ISBN 978-616-91228-2-1.
- [14] ดำรง จินขาวขำ (2543). อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2 ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ISBN 974-623-082-4
- [15] Daniel W. Hart, “Introduction to Power Electronics”, Prentice Hall, 1st edition, 1997.
- [16] Simon S. Ang, “Power Switching Converters”, Marcel Dekker, Inc, 1st edition, 1995
- [17] E. Acha, V.G. Agelidis, O.Anaya-Lara. (2002). Power Electronic Control in Electrical System. Newnes Power Engineering Series.



ภาคผนวก



The Series Connected Bidirectional Resonant Converter for Energy Storage Applications

Weerapong Wongyai and Nathabhat Phankong*
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pathumthani, Thailand
weerapong_w@mail.rmutt.ac.th, nathabhat.p@en.rmutt.ac.th

Abstract—This paper proposes the series connected bidirectional soft switching resonant converter (BSRC). The BSRC is composed of 4 switches to increase the DC bus voltage for transferring the energy of PV and energy storage. The modes of operation divide in two modes for operating bidirectional voltages. The first part is the boost mode which is controlled for the constant 48 volts from batteries ($V_{\text{Batt } 1,2}$) to the DC voltage buses (V_{High}) and second is buck mode at 24 volts for charging the batteries. The asymmetrical duty cycle control techniques (ADC) is proposed to control the constant input voltage for charging battery and DC voltage buses. The simulation and experimental results were given to verify the operation principles of the proposed BSRC and to evaluate its power regulation.

Keywords—bidirectional resonant converter, soft switching, zero voltage switching (ZVS)

I. INTRODUCTION

This is due to the limited availability of natural energy sources and the ever increasing demand for energy. There is a need for renewable energy sources to reduce energy costs in the country. It has supported the installation of solar power systems from the government and very small power producer (VSPP). In addition, other factors, such as the price of the system (solar panels and power electronics devices) that continued to reduce. The use of solar energy as a source of renewable energy is increasingly popular. But the relatively low efficiency of solar cells, energy storage should be maximized where the energy transfer system should have the least loss. There are two losses of switch in the converter circuit that has the loss of conduction and switching. The both losses depend on the current that through the switch and the turned on characteristics of switches. In practical, the switching losses can be reduced by using the LC resonant circuit [1], [2]. Resonant converters are used in power electronic applications because their characteristics are better than the non-resonant converters, including soft-switching in all switches, low EMI, high frequency operation for reducing the filter and high efficiency.

The zero voltage switching (ZVS) [3] is the soft switching method making the zero voltage across the switch when the switches are turn on. The ZVS eliminates capacitive turn-on losses, and decreases turn-off switching losses by slowing down the rise in voltage, reducing the crossing between the current through switch and the voltage across it. The bidirectional resonant converter [4] is the new adopted for high

efficiency of power energy conversion in applications such as DC power system or UPS off grid inverter. The soft switched should have ZVS in two transferring buck and boost modes.

The general bidirectional converter is available to transfer the power in bidirectional direction between input and output of converter. The input refers to the batteries connected to the low voltage bus with bidirectional converter. It allows them to be transferred to higher DC bus. The BSRC is classified in two types between including and without transformer. The circuit of bidirectional converter needs to reduce the sizing; therefore, the switching frequency have to adjust higher. However, the increment of operating frequency results in losses of switching at the switch. The soft switching technique needs to use resonant tank in the bidirectional converters.

In some applications, resonant converter is used in the higher voltage level applications such as power system of renewable energy. They must be use the transformer that may be heat and losses. Therefore, it is necessary to study the increasing of DC bus voltage. The series converters will be used to increase the voltage such as UPS of off grid inverter or DC voltage transferring.

This paper proposes the series connected bidirectional ZVS DC-DC resonant converter. The proposed goals to increase the DC bus voltage for transferring the energy of PV and energy storage. The operation mode of the converter can be classified to two modes for operating bidirectional voltages. Firstly, it is operated into the boost mode, which is controlled for the constant 48 volts from batteries ($V_{\text{Batt } 1,2}$) to the DC voltage buses (V_{High}). And then, it is controlled into buck mode at 24 volts for charging the batteries. The asymmetrical duty cycle control techniques (ADC) is proposed to control the constant input voltage for charging battery and DC voltage buses. The simulation and experimental results are given to verify the operating principles of the proposed BSRC and to evaluate its power regulation.

II. PROPOSED BIDIRECTIONAL CONVERTER

A. Conventional Bidirectional Converter

Fig. 1 shows the conventional bidirectional converter, which is prepared to operate for transferring the power between the low voltage (V_{Low}) and high voltage (V_{High}). The converter can be operated into boost mode and buck mode by adjusting the duty cycle of switches S_1 and S_2 .

This research paper was supported by National Research Council of Thailand and Rajamangala University of Technology Thanyaburi by Grant Project Number: 349535.

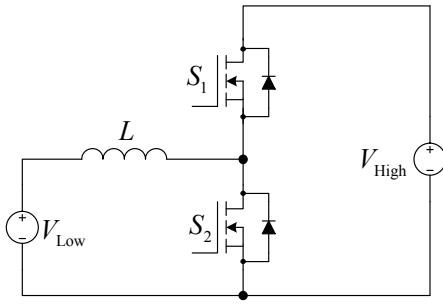


Fig. 1. Conventional Bidirectional converter.

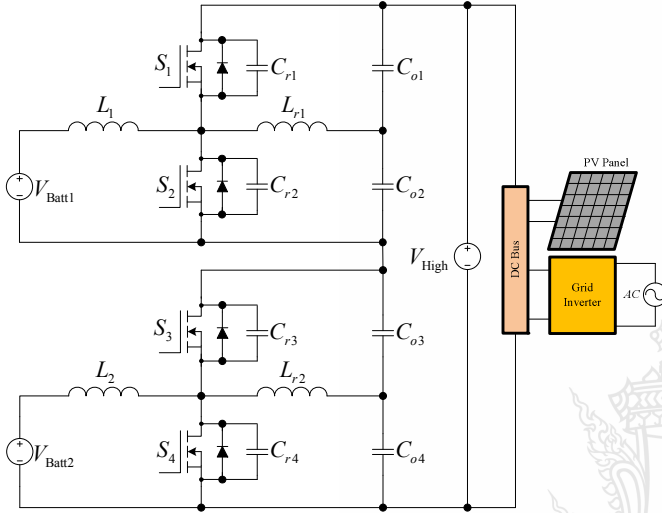


Fig. 2. Circuit configuration of the BSRC.

However, this topology has the high switching loss during turn-on and turn-off. And also, the inductor current has high ripple ratio because of the hard switching control in the converter.

B. The Series Connected Bidirectional Soft Switching Resonant Converter

Fig. 2 shows the proposed series connected BSRC, which consists of the two bidirectional resonant converters. They are connected in series for boosting DC bus voltage level. Another converter comprises the two switch (MOSFETs), an inductor (L_s), resonant inductor (L_r), two resonant capacitors (C_r) and two parallel capacitors (C_o). Through utilizing these elements, All switches are performed as ZVS during turn-on or turn-off period. Consequently, the switching losses are not occur on the operation of the converter.

The operation of series connecting of BSRC can be divided 2 modes as boost mode and buck mode. In the boost mode, the converter transfers the power from V_{Batt1} and V_{Batt2} to V_{High} . In this mode, the switch S_2 and S_4 are operated as a main switch, and switch S_1 and S_3 are used as an auxiliary switch. On the other hand, the switch S_1 and S_3 are behaved as a main switch, and S_2 and S_4 are operated as an auxiliary switch. The anti-parallel diodes receive the forward bias when the reverse current occurs on the switch (MOSFET). By the way, the characteristics of MOSFET has usually small conduction losses

because its ON resistance (R_{DSon}) is very low. The storage energy is used as the lower bus. The energy source (V_{High}) is connected to the DC-Bus of the grid connected inverter system and PV power source.

The mode operation of the BSRC is a procedure to increase the efficiency to be higher than the conventional converter by allowing the power devices (MOSFETs and IGBTs), which are behaved as ZVS. Furthermore, the most problem of the power devices have two issues causing switching loss in their devices. The main issues are the switching losses in a MOSFET because of the diode restoration charge and output capacitance. And also, the characteristics of an IGBT have the current tailing problem and stray inductances, which cause the switching losses. Therefore, the ZVS and/or ZCS can moderate these losses [6].

The switch procedure of the BSRC generates the square wave voltages that contains odd harmonics as in the traditional PWM converters at switching frequency. It is similar to sinusoidal current and filter, which occur at same frequency with the switching frequency. It appears the flowing over the switches while a resonant tank is implemented to circuit. By changing at switching frequency, the phase of the current with respect to switch voltage and the magnitude of the load current and voltage can be changed [1],[2],[7].

In this paper, a photovoltaic energy transfer system with a bi-directional resonant circuit series converter is proposed. It is shown in Fig. 6. The switching current is zero because of the zero current switch. It can be seen that the switch has lost its power due to the voltage drop across the switch. This is because the capacitor is stuck to the switch. At control circuit, when the low voltage level is low, the circuit charges rapidly. Conversely, when the high voltage level is low, the circuit needs to supply electricity rapidly. Therefore, the photovoltaic system with bi-directional resonant converter circuits was proposed to allow the system to transfer energy on both sides. It will control the converter to perform into the switch area while the voltage level is zero.

The output voltage V_{High} relationship with the low voltage V_{Batt1} , V_{Batt2} , and the duty cycle (D), which are expressed by Eqs. (1) and (2) :

$$V_{High} = \left(\frac{V_{Batt1}}{D} \right) + \left(\frac{V_{Batt2}}{D} \right), \quad (1)$$

$$V_{High} = \frac{nV_n}{D}. \quad (2)$$

While the converter is started to operate in the mode 3, the direction of resonant inductor current (i_{Lr}) is changed to the opposite side due to the current flowing through main inductor. The main inductor current will be decreased. it can be represented as Eq. (3). On the other hand, the resonant inductor current will be increased. It also can be expressed as Eq. (4). This operation mode will be finished, while the magnitude of current i_L and i_{Lr} becomes equal to each other.

$$i_L(t) = -\frac{V_O}{L}(t) + I_2, \quad (3)$$

$$i_{Lr1,2}(t) = \frac{V_{O1}}{L}(t). \quad (4)$$

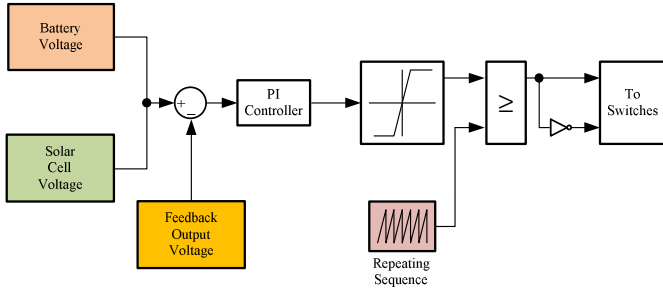


Fig. 3. Feedback Circuit

From the operation of BSRC, the proposed converter requires a closed-loop control strategy to regulate the DC voltage of the system. In this paper, the PI controller, which is shown in Fig. 3, is used for controlling the battery and solar cell voltages. The controller has 2 parameters as expressed in Eq. (5).

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt, \quad (5)$$

where k_p is the proportional gain constant and k_i the integral gain constant.

III. SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS

A. Simulation Results

To confirm the above analysis, the series connected bidirectional soft switching converter (BSRC) is modeled by using the simulation program. The output power of the series connected BSRC is approximately equal to 200 W. The parameters of the system for the simulation are shown in Tab. I. Confirmed replication results that the soft-switching operations are obtained. The simulations are accomplished for the ZVS turn-on and the ZVS turn-on operation independently by utilizing the same supplementary resonant elements.

TABLE I. PARAMETERS OF THE SYSTEM

Item	Symbol	Value
DC voltage from DC Bus	V_{High}	48 V
DC voltage from batteries	$V_{Batt1,2}$	12 V
Switching Frequency	f	35 kHz
Resonant capacitor	$C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, C_{r4}$	1 μF
Resonant inductor	L_{r1}, L_{r2}	36 μH
Output capacitor	$C_{o1}, C_{o2}, C_{o3}, C_{o4}$	220 μF
Choke Inductor	L_1, L_2	2.6 mH
Switches	S_1, S_2, S_3, S_4	IRFP4710

Figs. 4 and 5 show the graph that representing as a waveform of boost mode. All switches can be operated in ZVS suitably.

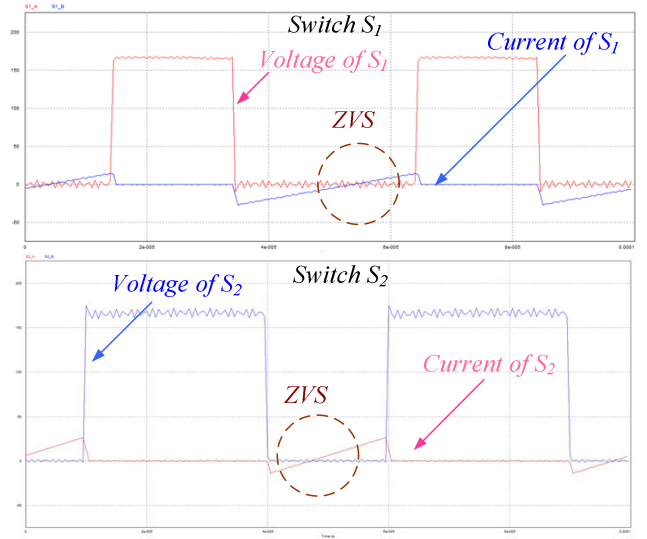


Fig. 4. Current and voltage waveform at the switch S_1 and S_2

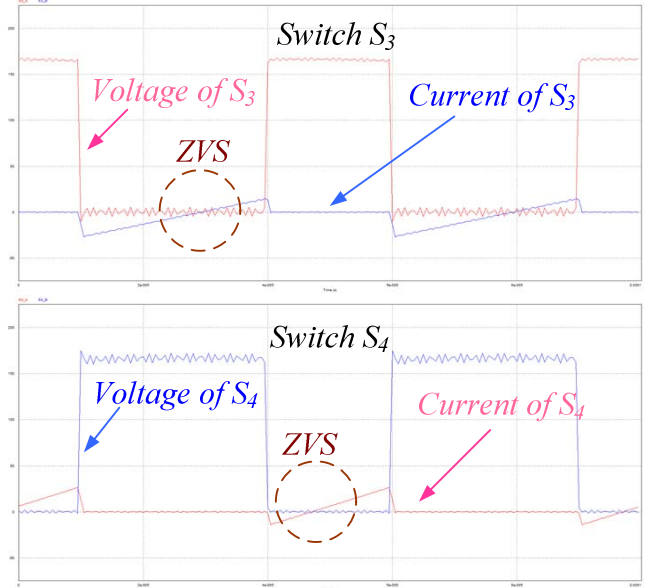


Fig. 5. Current and voltage waveform at the switch S_3 and S_4

B. Experimental Results

For the experiment, the BSRC was examined by varying DC input voltage (V_{Batt1} and V_{Batt2}). Figs. 6-8 show the experimental results with asymmetrical duty cycle control. Obviously, the duty cycle of the switches (S_1, S_3), which is shown in Fig. 9, is changed for high DC voltage bus control.

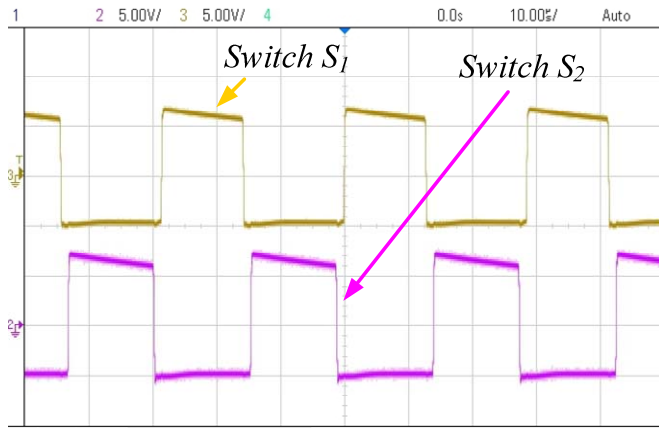


Fig. 6. Voltage waveform at the switch S_1 and S_2

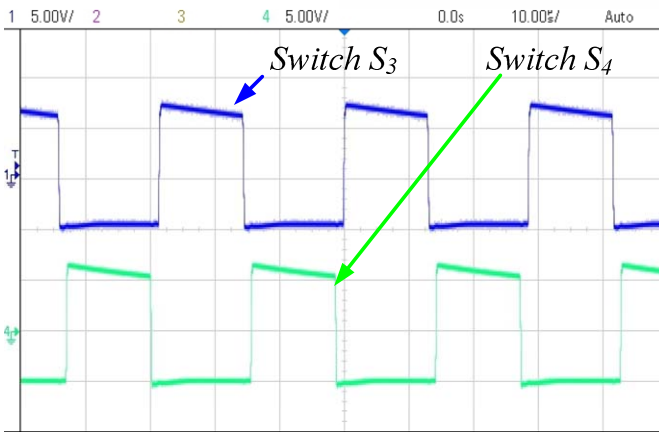


Fig. 7. Voltage waveform at the switch S_3 and S_4

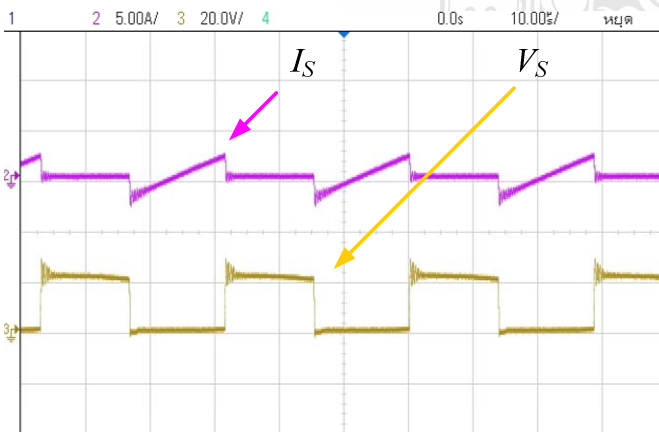


Fig. 8. Current and voltage waveform at the switch

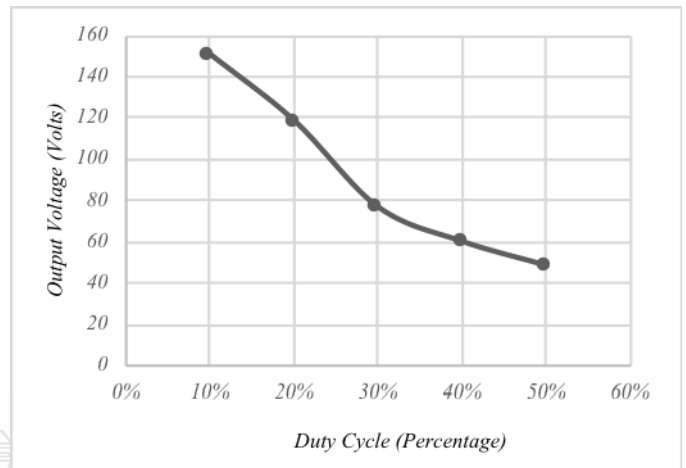


Fig. 9. Output voltage and percentage of duty cycle of S_1 and S_3

IV. CONCLUSION

In this paper, the series connected bidirectional soft switching resonant converter (BSRC) for solar energy saving with asymmetrical duty cycle control techniques is proposed. The proposed converter can be operated with constant switching frequency at 35 kHz and adjusted the duty cycle. The energy trapped in the resonant capacitor and inductor can be recovered. The ZVS features can also be achieved as well as the voltage spike was able to suppress effectively. Both simulation and experimental results show the results to verify and validity of the proposed circuit.

REFERENCES

- [1] F. Z. Peng, H. Li, G.-J. Su, and J. S. Lawler, "A new ZVS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application," *IEEE Trans Power Electron.*, vol. 19, no. 1, pp. 54-65, Jan. 2004.
- [2] M. D. Jain and P. Jain, "A bidirectional DC-DC converter topology for low power application," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 4, pp. 595-606, Jul. 2000.
- [3] P. Das, B. Laan, S. A. Mousavi, G. Moschopoulos, "A nonisolated bidirectional ZVS-PWM active clamped DCDC converter", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 24, no. 2, pp.553-558, Feb. 2009.
- [4] H. Li, F.-Z. Peng, and J. S. Lawler, "A natural ZVS medium-power bidirectional DC-DC converter with minimum number of devices," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 2, pp. 525-535, Mar. 2003.
- [5] K. Ma and Y. Lee, "An integrated flyback converter for DC uninterruptible power supplies," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 11, no. 2, pp. 318-327, Mar. 1996.
- [6] S. Inoue and H. Akagi, "A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 535-542, Mar. 2007.
- [7] L. Schuch, C. Rech, H. L. Hey, H. A. Grunding, H. Pinheiro, and J. R. Pinheiro, "Analysis and design of a new high-efficiency bidirectional integrated ZVT PWM converter for DC-bus and battery-bank interface," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 5, pp. 1321-1332, Sep. 2006.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล นายวีระพงศ์ วงศ์ใหญ่
วัน เดือน ปีเกิด 4 พฤษภาคม 2531
ที่อยู่ 601/279 หมู่บ้านพฤษภา รังสิต-บางพูน หมู่ที่ 4 ตำบลบางพูน
อำเภอเมืองปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี 12000
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ประสบการณ์การทำงาน วิศวกร การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (สำนักงานใหญ่) พ.ศ. 2554 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์ 02-590-5824 , 08-9511-0113
อีเมล weerapong_w@mail.rmutt.ac.th , weerapong.won@pea.co.th



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้น งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of
Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright
owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.



(นายวีระพงศ์ วงศ์ใหญ่)