



การวิเคราะห์รูปแบบต่าง ๆ ของการต่อร่วมกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีที
Analysis of Different Configurations of MOSFET and IGBT Integration

ธิดาทิพย์ พรหมทา
Tidatip Prommata

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2567



การวิเคราะห์รูปแบบต่าง ๆ ของการต่อร่วมกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีที
Analysis of Different Configurations of MOSFET and IGBT Integration

ธิดาทิพย์ พรหมทา
Tidatip Prommata

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

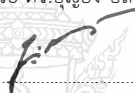
ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์รูปแบบต่าง ๆ ของการต่อร่วมกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีที
ชื่อ นามสกุล	ธิดาทิพย์ พรหมทา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์นี้แล้ว



ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์)

วันที่ 16 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์รูปแบบต่างๆ ของการต่อร่วมกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีที
ชื่อ นามสกุล	ธิดาทิพย์ พรหมทา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของสวิตช์ประเภทต่างๆ ในวงจรพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ โดยการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกำลังสูญเสียของสวิตช์ซึ่งประกอบด้วยมอสเฟตหรือไอจีบีทีในลักษณะการทำงานเพียงตัวเดียว รวมถึงการนำมาต่อร่วมกันเพื่อเป็นสวิตช์ผสมทั้งแบบขนานและอนุกรม การทดลองนี้ถูกดำเนินการในสองลักษณะ ได้แก่ การปรับความถี่ของสวิตช์ในขณะที่วัฏจักรงานคงที่ และการปรับวัฏจักรงานในขณะที่ความถี่ของสวิตช์คงที่ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการสร้างชุดทดลองเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพจริง ผลลัพธ์ที่ได้รับแสดงให้เห็นว่าสวิตช์ผสมแบบอนุกรมมีกำลังสูญเสียน้อยกว่าสวิตช์รูปแบบอื่นๆ ที่ทำการทดสอบ โดยเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับสวิตช์ผสมแบบขนานที่มีจำนวนสวิตช์เท่ากัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้มอสเฟตหรือไอจีบีทีเพียงตัวเดียว สวิตช์ผสมแบบอนุกรมจะแสดงให้เห็นข้อดีในด้านกำลังสูญเสียเท่านั้น แต่มีข้อเสียคือใช้จำนวนสวิตช์มากกว่าสองเท่า ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการพิจารณาเพื่อเลือกสวิตช์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ได้

คำสำคัญ : พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์, มอสเฟต, ไอจีบีที, สวิตช์ผสม

Thesis Title	Analysis of Different Configurations of MOSFET and IGBT Integration
Author	Tidatip Prommata
Degree	Master of Engineering (Electrical Engineering)
Major Program	Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Advisor	Assoc.Prof. Dr.Sakhon Woothipatanapan
Co-Advisor	Assoc.Prof. Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep
Academic Year	2024

ABSTRACT

This thesis focuses on studying and evaluating the efficiency of different types of switches in a forward converter circuit by analyzing and comparing power losses of switches, which consist of MOSFETs or IGBTs in single operation, as well as combining them to form a hybrid switch in both parallel and series configurations. The experiments were conducted in two approaches: adjusting the switching frequency while keeping the duty cycle constant; and adjusting the duty cycle while keeping the switching frequency constant. This was done by using computer simulations and creating experimental setups to verify actual performance. The results showed that the series hybrid switch has less power losses than other tested switch configurations, particularly when compared to the parallel hybrid switch with the same number of switches. However, when compared to using a single MOSFET or IGBT, the series hybrid switch showed advantages only in terms of power loss, but has the disadvantages of using more than twice the number of switches. Therefore, this thesis can be used as a database for consideration in selecting the appropriate switch for use in forward converters.

Keywords : Forward Converter, MOSFET, IGBT, Hybrid Switch

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะไม่สามารถสมบูรณ์และประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ได้หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำสำหรับการเขียนบทความวิชาการ บทความวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ในการถ่ายทอดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณอาจารย์รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์คำแนะนำและตรวจสอบจุดบกพร่องของวิทยานิพนธ์ รวมถึงความช่วยเหลือจากคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาการ องค์ความรู้ และคุณธรรมจริยธรรมแก่ข้าพเจ้าและเพื่อน ๆ ที่ให้ความร่วมมือและความช่วยเหลือ ซึ่งส่งผลทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ ข้าพเจ้าหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยมา ณ ที่นี้

ธิดาทิพย์ พรหมทา

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 กรอบแนวคิด	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 แผนการดำเนินงาน	3
1.7 นิยามศัพท์	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์	4
2.1.1 หลักการทำงานของพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์	4
2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้	7
2.2 มอสเฟต	12
2.2.1 คุณสมบัติของมอสเฟต	14
2.2.2 การทำงานของมอสเฟตในพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์	18
2.3 ไอจีบีที	20
2.3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของไอจีบีที	20
2.3.2 การเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้า	23
2.3.3 การประยุกต์ใช้งานในวงจรพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์	25
2.3.4 การลดการสูญเสียการสวิตช์	26

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.4 รูปแบบการต่อมอสเฟตร่วมกับไอจีบีที	29
2.4.1 การต่อแบบขนาน	30
2.3.2 การต่อแบบอนุกรม	33
3. การจำลองการทำงาน	37
3.1 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	37
3.1.1 พารามิเตอร์ของระบบ	37
3.1.2 การสร้างโมเดลใน MATLAB Simulink	41
3.1.3 การจำลอง	42
3.1.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์	43
3.1.5 สร้างรายงานการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์	43
3.2 การทดลองด้วยชุดทดลอง	44
3.2.1 อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	44
3.1.2 การสร้างชุดทดลอง	46
3.1.3 การทดลอง	47
3.1.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์	47
3.1.5 สร้างรายงานการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์	47
4. ผลการทดลอง	48
4.1 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	48
4.1.1 มอสเฟต	48
4.1.2 ไอจีบีที	49
4.1.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบเมื่อใช้มอสเฟตหรือไอจีบีทีเป็นสวิตช์	50
4.1.4 สวิตช์ผสมแบบขนาน	54
4.1.5 สวิตช์ผสมแบบอนุกรม	55
4.1.6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสวิตช์ผสมแบบขนานและอนุกรม	56
4.2 การทดลองด้วยอุปกรณ์	59
4.2.1 มอสเฟต	59
4.2.2 ไอจีบีที	60

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบเมื่อใช้มอสเฟตหรือไอจีบีทีเป็นสวิตช์	61
4.2.4 สวิตช์ผสมแบบขนาน	65
4.2.5 สวิตช์ผสมแบบอนุกรม	66
4.2.6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสวิตช์ผสมแบบขนานและอนุกรม	67
5. สรุปผลการทดลอง	70
บรรณานุกรม	72
ภาพผนวก ก	74
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	75
ภาพผนวก ข	86
ข้อมูลจำเพาะอุปกรณ์สำคัญ	87
ประวัติการศึกษา	94



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของไอจีบีทีและมอสเฟต	52
2.2	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการใช้ไอจีบีทีและมอสเฟต	53
2.3	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ ZVS และ ZCS	53
4.1	การปรับความถี่สวิตช์ของมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB	82
4.2	การปรับวัฏจักรงานของมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB	83
4.3	การปรับความถี่สวิตช์ของไอจีบีทีโดยใช้โปรแกรม MATLAB	83
4.4	การปรับวัฏจักรงานของไอจีบีทีโดยใช้โปรแกรม MATLAB	84
4.5	การปรับความถี่สวิตช์ของสวิตช์ผสมแบบขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB	88
4.6	การปรับวัฏจักรงานของสวิตช์ผสมแบบขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB	89
4.7	การปรับความถี่สวิตช์ของสวิตช์ผสมแบบอนุกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB	89
4.8	การปรับวัฏจักรงานของสวิตช์ผสมแบบอนุกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB	90
4.9	การปรับความถี่สวิตช์ของมอสเฟตโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ	93
4.10	การปรับวัฏจักรงานของมอสเฟตโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ	94
4.11	การปรับความถี่สวิตช์ของไอจีบีทีโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ	94
4.12	การปรับวัฏจักรงานของไอจีบีทีโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ	95
4.13	การปรับความถี่สวิตช์ของสวิตช์ผสมแบบขนานโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ	99
4.14	การปรับวัฏจักรงานของสวิตช์ผสมแบบขนานโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ	100
4.15	การปรับความถี่สวิตช์ของสวิตช์ผสมแบบอนุกรมโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ	100
4.16	การปรับวัฏจักรงานของสวิตช์ผสมแบบอนุกรมโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ	101

สารบัญภาพ

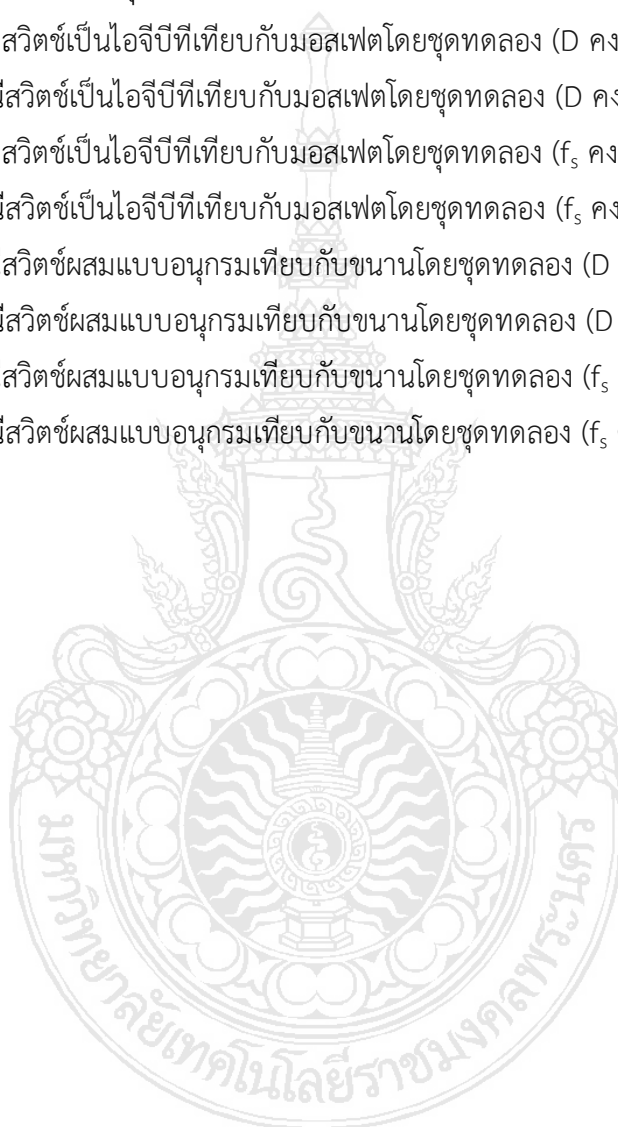
ภาพที่	หน้า
2.1 วงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์	4
2.2 รูปคลื่นสัญญาณการสวิตช์ของไอจีบีที	6
2.3 แหล่งจ่ายพลังงานสำหรับคอมพิวเตอร์	8
2.4 ระบบความเย็นในอุตสาหกรรม	8
2.5 คอมเพรสเซอร์อุปกรณ์ทำความเย็น	9
2.6 แบตเตอรี่ UPS	10
2.7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์	10
2.8 โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน	11
2.9 เสาสัญญาณโทรศัพท์มือถือ	12
2.10 สัญลักษณ์มอสเฟต	12
2.11 สัญลักษณ์แสดงลูกศรของมอสเฟต	13
2.12 อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟต	13
2.13 การสร้างช่องทางเดินกระแสให้มอสเฟต	15
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดัน	16
2.15 กระแสและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟต	16
2.16 โครงสร้างของมอสเฟตและไอจีบีที	20
2.17 สัญลักษณ์ไอจีบีที	21
2.18 อุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที	21
2.19 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของไอจีบีที	22
2.20 Zero-Voltage Switching	27
2.21 Zero-Current Switching	28
2.22 วงจรการทำงานแบบขนานของมอสเฟตและไอจีบีที	31
2.23 วงจรการทำงานแบบอนุกรมในสภาวะเปิดของไอจีบีที	34
3.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าใน MATLAB	37
3.2 ค่าโหลดใน MATLAB	38
3.3 ค่าขดลวดใน MATLAB)	38
3.4 ค่าตัวเก็บประจุใน MATLAB	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.5	ค่าไดโอดใน MATLAB	39
3.6	ค่าหม้อแปลงใน MATLAB	39
3.7	ค่ามอสเฟตใน MATLAB	40
3.8	ค่าไอจีบีทีใน MATLAB	40
3.9	ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ใน MATLAB Simulink	41
3.10	สัญญาณ PWM ใน MATLAB	41
3.11	ตัวเก็บข้อมูลใน MATLAB	42
3.12	ค่า PWM ใน MATLAB	42
3.13	โมเดล MATLAB Simulink	43
3.14	แหล่งจ่ายในชุดทดลอง	44
3.15	แผงวงจรในชุดทดลอง	44
3.16	หม้อแปลงในชุดทดลอง	45
3.17	มอสเฟตในชุดทดลอง	45
3.18	ไอจีบีทีในชุดทดลอง	45
3.19	PWM ในชุดทดลอง	46
3.20	ออสซิลโลสโคปในชุดทดลอง	46
3.21	ชุดทดลองฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์	47
4.1	รูปคลื่นสัญญาณมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB	56
4.2	รูปคลื่นสัญญาณไอจีบีทีโดยใช้โปรแกรม MATLAB	56
4.3	กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB (D คงที่)	57
4.4	แรงดันโหนดกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB (D คงที่)	57
4.5	กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB (f_s คงที่)	58
4.6	แรงดันโหนดกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB (f_s คงที่)	58
4.7	กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB (D คงที่)	62
4.8	แรงดันโหนดกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB (D คงที่)	62
4.9	กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB (f_s คงที่)	63
4.10	แรงดันโหนดกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB (f_s คงที่)	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 รูปคลื่นสัญญาณมอสเฟตของชุดทดลอง	67
4.12 รูปคลื่นสัญญาณไอจีบีทีของชุดทดลอง	67
4.13 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยชุดทดลอง (D คงที่)	68
4.14 แรงดันโวลตกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยชุดทดลอง (D คงที่)	68
4.15 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยชุดทดลอง (f_s คงที่)	69
4.16 แรงดันโวลตกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยชุดทดลอง (f_s คงที่)	69
4.17 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยชุดทดลอง (D คงที่)	73
4.18 แรงดันโวลตกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยชุดทดลอง (D คงที่)	73
4.19 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยชุดทดลอง (f_s คงที่)	74
4.20 แรงดันโวลตกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยชุดทดลอง (f_s คงที่)	74



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ อุปกรณ์สวิตช์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับขับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงกำลังงานสูง และความถี่สวิตช์สูงที่นิยมใช้กันมากคือ มอสเฟต และไอจีบีที ซึ่งอุปกรณ์สวิตช์สองตัวนี้ต่างก็มีคุณสมบัติเฉพาะตัวทั้งข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน ดังนั้นหากนำอุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวมาต่อวงจรร่วมกันเพื่อใช้งานเป็นสวิตช์ผสม สวิตช์ผสมนี้จะสามารถดึงข้อดีและลดข้อเสียของมอสเฟตและไอจีบีทีด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การใช้ ASIC ควบคุมสวิตช์ [1] การใช้วงจรและเทคนิคที่มีความซับซ้อน [2-5] และใช้ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ [6-7]

โดยการต่อวงจรร่วมกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีทีเพื่อใช้เป็นสวิตช์ผสมจะมีสองรูปแบบหลัก คือ แบบขนาน และ แบบอนุกรม ซึ่งการต่อวงจรทั้งสองแบบนี้จะได้คุณสมบัติในการทำงานที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องศึกษาและวิเคราะห์การต่อวงจรทั้งสองรูปแบบนี้เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

โหลดที่ใช้เพื่อทดสอบสวิตช์ผสมจะเลือกใช้โหลดความต้านทานและโหลดตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นโหลดที่ใช้งานในชีวิตประจำวัน หัวข้อที่ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของรูปแบบการต่อของสวิตช์ผสมนี้ได้แก่ กำลังสูญเสีย และแรงดันโหลด เนื่องจากหัวข้อเหล่านี้มีผลสำคัญต่อการทำงานของวงจรและความคุ้มค่าของการใช้สวิตช์ผสมหรือไม่ รวมทั้งมีผลต่อการตัดสินใจว่าการต่อวงจรของสวิตช์ผสมในรูปแบบใดควรเลือกใช้ งานลักษณะใดจึงจะเหมาะสมที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

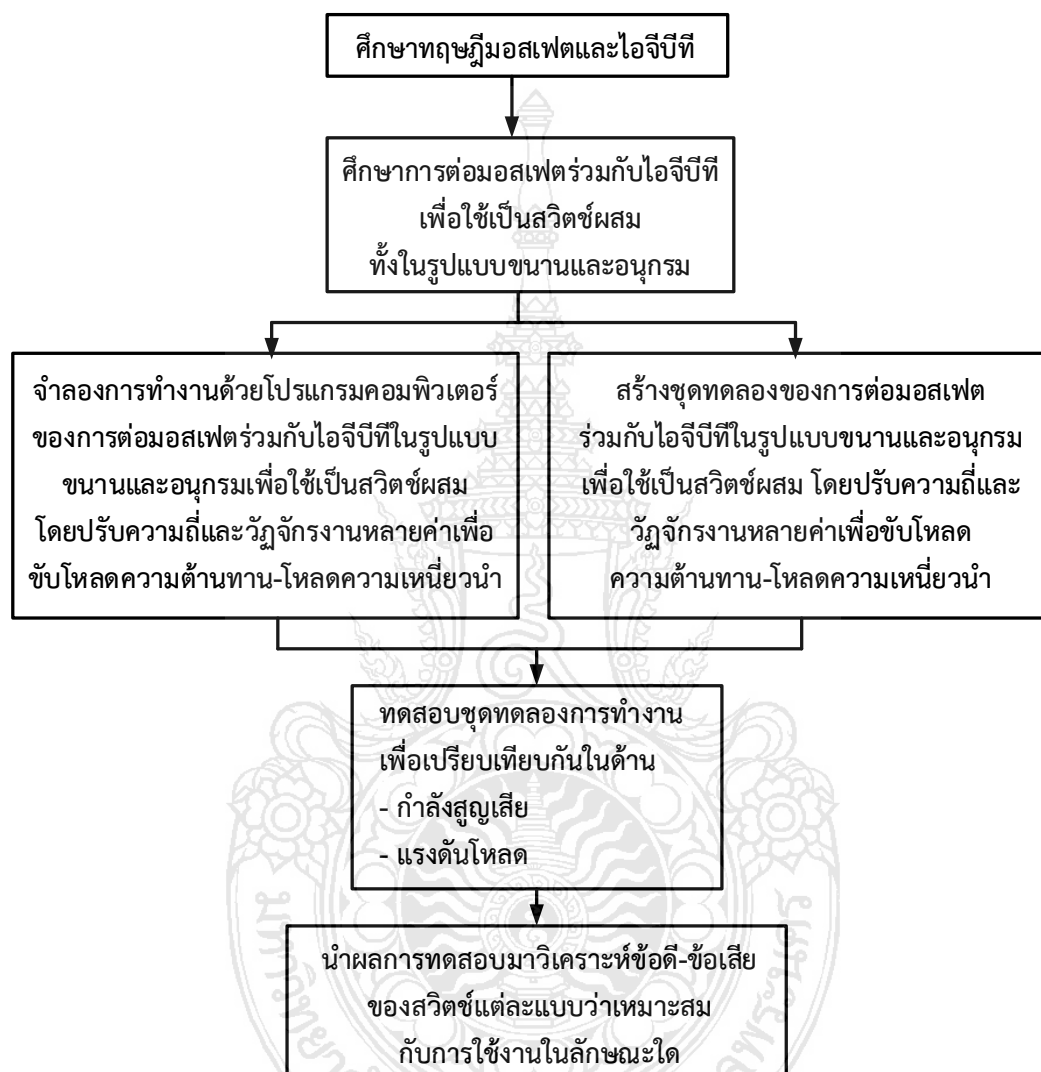
- 1.2.1 เข้าใจคุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต
- 1.2.2 เข้าใจคุณสมบัติและการทำงานของไอจีบีที
- 1.2.3 เข้าใจและประยุกต์การต่อวงจรร่วมกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีทีในแบบขนานและแบบอนุกรมเพื่อใช้เป็นสวิตช์ผสม ในการขับโหลดความต้านทาน-โหลดความเหนี่ยวนำ
- 1.2.4 เข้าใจและเปรียบเทียบผลลัพธ์เมื่อต่อวงจรร่วมกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีทีในแบบขนานและแบบอนุกรมเพื่อใช้เป็นสวิตช์ผสม ในด้านกำลังสูญเสียและแรงดันโหลด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต
- 1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของไอจีบีที
- 1.3.3 ต่อวงจรร่วมกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีทีในแบบขนานและแบบอนุกรมเพื่อใช้เป็นสวิตช์ผสม ในการขับโหลดความต้านทาน-โหลดความเหนี่ยวนำ

1.3.4 ต่อย่างร่วร่วมกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีทีในแบบขนานและแบบอนุกรมเพื่อใช้เป็นสวิตช์ผสม และทำการทดสอบในด้านกำลังสูญเสีย และแรงดันโหลด

1.4 กรอบแนวคิด



1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบคุณสมบัติของมอสเฟตทั้งในด้านข้อดีและข้อเสีย
- 1.5.2 ทราบคุณสมบัติของไอจีบีทีทั้งในด้านข้อดีและข้อเสีย
- 1.5.3 สามารถนำข้อดีและลดข้อเสียของมอสเฟตและไอจีบีทีเมื่อต่อย่างร่วกันในรูปแบบขนานและอนุกรมเพื่อใช้เป็นสวิตช์ผสม ในการขับโหลดความต้านทาน-โหลดความเหนี่ยวนำ
- 1.5.4 ทราบข้อมูลในด้านกำลังงานสูญเสีย และแรงดันที่โหลด เมื่อต่อย่างร่วกันระหว่างมอสเฟตและไอจีบีที ในแบบขนานและแบบอนุกรม เพื่อใช้เป็นสวิตช์ผสม

1.6 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรมและขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา 16 เดือน															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←→															
2. ออกแบบการทดลอง			←→													
3. ทดลองด้วยโปรแกรมและบันทึกผล					←→											
4. ทดลองจริงและบันทึกผล								←→								
5. ประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูล											←→					
6. สรุปผลการวิจัย												←→				
7. จัดทำรายงานการวิจัยเป็นรูปเล่ม															←→	

1.7 นิยามศัพท์

จำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ การสร้างแบบจำลองและทดสอบการทำงานของระบบที่จะทำการศึกษาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับตรวจสอบสนองของระบบว่าเป็นอย่างไร มีความสอดคล้องกับทฤษฎีหรือข้อสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่ เพื่อประกอบการตัดสินใจในการสร้างระบบดังกล่าวขึ้นมาใช้ต่อไป

ชุดทดลองการทำงาน คือ ระบบที่จะทำการศึกษาที่สร้างขึ้นมาจากอุปกรณ์จริง เพื่อใช้ทดสอบการทำงานว่ามีผลตอบสนองอย่างไร มักจะสร้างตามรูปแบบของแบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นมาก่อน ทั้งนี้ผลตอบสนองที่ได้จากชุดทดลองการทำงานจะยืนยันยืนยันว่ามีความสอดคล้องกับผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรือไม่

บท 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converter) มีบทบาทสำคัญในการปรับเปลี่ยนระดับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เหมาะสมกับโหลด เช่น วงจรบัก (Buck Converter), วงจรบูสต์ (Boost Converter) และ วงจรบัก-บูสต์ (Buck-Boost Converter) ถูกออกแบบขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ เช่น ประสิทธิภาพ ขนาด และต้นทุน

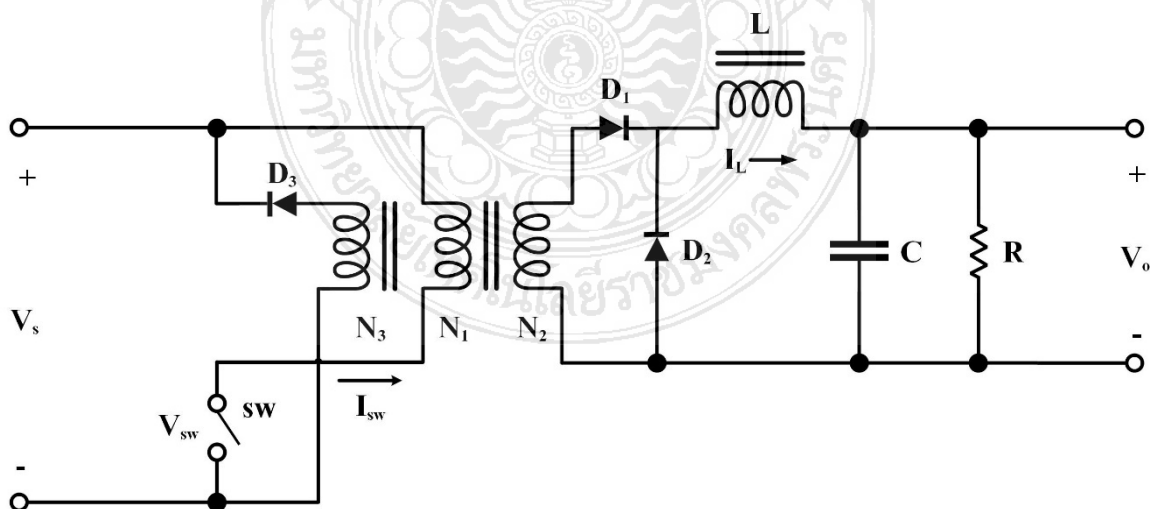
2.1 ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงอีกประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่มีความต้องการแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สามารถปรับได้ทั้งแบบเพิ่มและลด ขึ้นอยู่กับการออกแบบและกลไกการควบคุม ประสิทธิภาพและความแม่นยำของแรงดันไฟฟ้าขาออกเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ

ในหัวข้อถัดไป จะทำการวิเคราะห์เชิงลึกถึงหลักการทำงาน ข้อดีข้อเสีย เทคนิคการวิเคราะห์วงจร และกลไกการควบคุมของฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ เพื่อสร้างพื้นฐานความรู้ที่จำเป็นต่อการทำความเข้าใจเนื้อหาในส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป

2.1.1 หลักการทำงานของฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่ใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้เพื่อลดแรงดันไฟฟ้า แต่สามารถออกแบบให้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้เช่นกัน ขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรและการควบคุม [8-10]



ภาพที่ 2.1 วงจรฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

องค์ประกอบหลักของฟอ์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ หลักประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Input Source) แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจร

สวิตช์ (Switch) โดยทั่วไปเป็นมอสเฟตหรือไอจีบีทีทำหน้าที่เปิดและปิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ควบคุมโดยสัญญาณ PWM

หม้อแปลง (Transformer) ใช้สำหรับแยกไฟฟ้าและปรับอัตราส่วนแรงดัน

ไดโอด (Diode) ทำหน้าที่แก้ไขทิศทางการกระแสไฟฟ้า ป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟ

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ใช้ในการสะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก ช่วยทำให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่อง

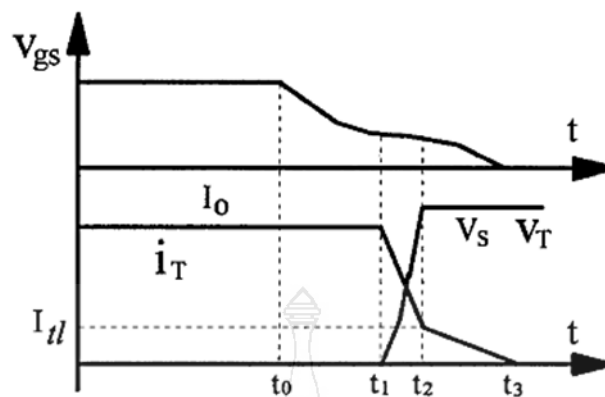
ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ใช้ในการกรองสัญญาณ ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีความเสถียร

โหลด (Load) ภาระที่ต้องการรับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจร

กระบวนการแปลงพลังงานของสวิตช์มี 2 สถานะ ได้แก่ สถานะสวิตช์เปิดและสถานะสวิตช์ปิด

สถานะสวิตช์เปิด (Turn On) ในฟอ์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์จะนำไฟฟ้า ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายโอนพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟไปยังตัวเหนี่ยวนำและโหลด เมื่อสวิตช์ถูกเปิด กระแสไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟผ่านสวิตช์เข้าสู่ตัวเหนี่ยวนำ และไหลต่อไปยังโหลด เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ไม่ใช่การเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟจะถูกสะสมไว้ในตัวเหนี่ยวนำในรูปของสนามแม่เหล็ก ปริมาณพลังงานที่สะสมจะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ และระยะเวลาที่สวิตช์เปิดอยู่ (ความกว้างของพัลส์) ยิ่งความกว้างของพัลส์มาก พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำก็จะมากขึ้น ในขณะที่สวิตช์เปิดอยู่ โหลดจะได้รับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟโดยตรง และจากพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำด้วย ทำให้โหลดได้รับพลังงานอย่างต่อเนื่อง

สถานะสวิตช์ปิด (Turn Off) อธิบายกระบวนการไหลของกระแสไฟฟ้า การปล่อยพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำผ่านไดโอดไปยังโหลด และการชาร์จพลังงานในตัวเก็บประจุ ตัวอย่างดังรูปคลื่น 2.2 นี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในวงจรเมื่อไอจีบีทีเปิดและปิด โดยเน้นให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุมกับกระแสที่ไหลผ่านไอจีบีที และกระแสโหลดกับช่วงเวลาที่สำคัญต่างๆ [8]



ภาพที่ 2.2 รูปคลื่นสัญญาณการสวิตช์ของไอจีบีที

โดยกำหนดให้

V_{gs} แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วของไอจีบีทีเป็นสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการเปิดและปิดไอจีบีที
เมื่อ V_{gs} สูงเพียงพอ ไอจีบีทีจะนำไฟฟ้า เมื่อ V_{gs} ต่ำ ไอจีบีทีจะไม่นำไฟฟ้า

I_o กระแสโหลด

i_T กระแสทรานซิสเตอร์ หรือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไอจีบีที

I_{LL} กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะปิดสวิตช์ไอจีบีที

V_s แรงดันไฟฟ้าขาออก หรือ แรงดันที่โหลด

V_T แรงดันไฟฟ้าสวิตช์ที่จำเป็นในการสวิตช์เปิด

t_0 เวลาเริ่มนำกระแส

t_1 เวลาที่ไอจีบีทีนำกระแส

t_2 เวลาไอจีบีทีเริ่มหยุดนำกระแส

t_3 เวลาไอจีบีทีหยุดนำกระแส

แรงดันเอาต์พุต แรงดันเอาต์พุต (V_{out}) หรือแรงดันโหลด สามารถหาได้จาก

$$V_{out} = D \cdot V_s \quad (1)$$

กำหนดให้

D = วัฏจักรงาน

V_s = แรงดันไฟฟ้าขาเข้า

กระแสเอาต์พุต (I_{out})

$$I_{out} = \frac{V_{in} \cdot D}{R_{load}} \quad (2)$$

$$I_{out} = C \cdot \frac{dV_{out}}{dt} \quad (3)$$

กำหนดให้

R_{load} = ความต้านทานของโหลด

C = ความจุของตัวเก็บประจุ

$\frac{dV_{out}}{dt}$ = การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตต่อเวลา

วัฏจักรงาน (D) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 (หรือ 0% ถึง 100%)

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (4)$$

t_{on} = เวลาเมื่อเปิดสวิตช์

T = ระยะเวลาทั้งหมดใน 1 คาบ

เนื่องจากฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ควบคุมแรงดันเอาต์พุต V_{out} ผ่านการปรับ D ขณะเดียวกัน ความถี่ในการสวิตช์ f_{sw} ก็มีผลโดยตรงต่อพลังงานและประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

ประสิทธิภาพหรือกำลังสูญเสีย (P)

$$P = V \cdot I \quad (5)$$

$$P = I^2 R \quad (6)$$

2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้

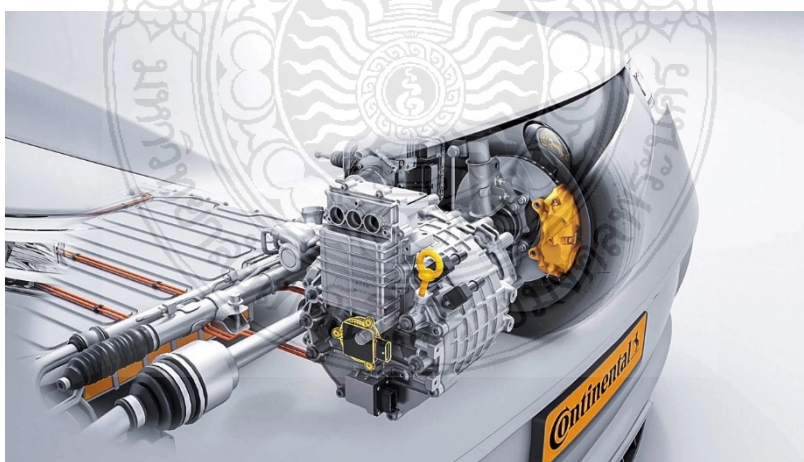
ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปแล้วมันถูกใช้เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง มีการประยุกต์ใช้งานหลากหลาย ดังต่อไปนี้

2.1.2.1 แหล่งจ่ายพลังงาน (Power Supply Unit) ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ถูกนำไปใช้เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่เสถียรให้เป็นแรงดันที่เสถียรและเหมาะสมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ สมาร์ทโฟน และเครื่องจักรในอุตสาหกรรม การแปลงนี้ช่วยให้ระบบสามารถจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการสูญเสียพลังงาน และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่ผันผวน ข้อดีของการใช้ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์รวมถึงความเสถียร ความน่าเชื่อถือ การออกแบบที่ยืดหยุ่น และการบำรุงรักษาที่ต่ำ ทำให้เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการจ่ายพลังงานที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 2.3 แหล่งจ่ายพลังงานสำหรับคอมพิวเตอร์
ที่มา: ticlacima.blogspot (2024)

2.1.2.2 การควบคุมมอเตอร์ ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ถูกประยุกต์ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ เพื่อจัดการพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่วยแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้เหมาะสม กับความต้องการของมอเตอร์ การควบคุมสวิตช์ในฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ช่วยให้สามารถปรับ ความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ได้ง่ายและแม่นยำ นอกจากนี้ การใช้ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ยัง สามารถลดการสูญเสียพลังงานและปรับแรงดันให้มีเสถียรภาพ ทำให้การทำงานของมอเตอร์เป็นไป อย่างราบรื่นและประหยัดพลังงาน ในขณะเดียวกันยังช่วยป้องกันมอเตอร์จากความเสียหายที่อาจเกิด จากแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม การประยุกต์ใช้ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ในระบบควบคุมมอเตอร์จึง เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการพัฒนาการทำงานในอุตสาหกรรม



ภาพที่ 2.4 มอเตอร์ในรถยนต์ไฟฟ้า
ที่มา: autowoke/e-motor rotor position sensor (2023)

2.1.2.3 อุปกรณ์ทำความเย็น พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าและพลังงานที่จำเป็นสำหรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้เหมาะสมกับคอมเพรสเซอร์และอุปกรณ์ทำความเย็นอื่นๆ พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ช่วยให้การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทำความเย็นได้อย่างแม่นยำ โดยสามารถปรับความเร็วของคอมเพรสเซอร์ได้ตามความต้องการของอุณหภูมิและโหลด ซึ่งส่งผลดีต่อการประหยัดพลังงานและลดการสูญเสียพลังงานในระบบ นอกจากนี้ การใช้พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ยังช่วยให้แรงดันไฟฟ้ามีความเสถียร ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ทำความเย็น ทำให้พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เป็นตัวเลือกที่ดีในการพัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์



ภาพที่ 2.5 คอมเพรสเซอร์อุปกรณ์ทำความเย็น
ที่มา: refrigerationdevice (2024)

2.1.2.4 แหล่งจ่ายไฟที่ไม่มีการควบคุม (UPS) พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในแหล่งจ่ายไฟที่ไม่มีการควบคุมเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่เสถียรให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพและเหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การใช้งานในลักษณะนี้จะช่วยให้พลังงานถูกส่งต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการสูญเสียพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แหล่งจ่ายไฟแบบอนาล็อกทั่วไป พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ยังสามารถให้แรงดันขาออกที่มั่นคงแม้ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงในแรงดันขาเข้าหรือโหลด ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 2.6 แบตเตอรี่ UPS
ที่มา: refrigerationdevice (2024)

2.1.2.5 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อแปลงพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่เสถียรให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมและมีเสถียรภาพสำหรับการใช้งานหรือการจัดเก็บในแบตเตอรี่ การใช้งานพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยลดการสูญเสียพลังงานและทำให้การจ่ายพลังงานมีคุณภาพสูงขึ้น ทั้งยังสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการของโหลดในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่องตลอดทั้งวัน



ภาพที่ 2.7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์
ที่มา: refrigerationdevice (2024)

2.1.2.6 การใช้งานในระบบกำลังไฟสูง พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงให้เหมาะสมกับการใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ การใช้งานพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ในบริบทนี้ช่วยลดการสูญเสียพลังงานและปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้เป็นอย่างดี ทั้งยังสามารถจัดการกับโหลดและแรงดันที่ไม่เสถียรอันมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ในการเพิ่มความเสถียรให้กับแรงดันไฟฟ้าขาออก การออกแบบที่เหมาะสมทำให้พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่ท้าทาย



ภาพที่ 2.8 โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน
ที่มา: prachachat (2023)

2.1.2.6 การใช้งานในเครื่องมือวัด พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องมือวัดเพื่อให้สามารถจัดการกับแรงดันไฟฟ้าที่หลากหลายและเปลี่ยนแปลงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังช่วยในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่เสถียรให้เป็นแรงดันขาออกที่คงที่และเหมาะสมกับการทำงานของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์วัดต่างๆ มีความสามารถในการปรับแรงดันไฟฟ้าให้สอดคล้องกับค่าที่ต้องการ ซึ่งสำคัญต่อความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการวัด

2.1.2.8 ระบบโทรคมนาคม พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบโทรคมนาคมเพื่อจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ เช่น อุปกรณ์สื่อสาร เซิร์ฟเวอร์ และอุปกรณ์ไร้สาย การใช้พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ช่วยให้แรงดันไฟฟ้ามีความเสถียร ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อการทำงานอย่างต่อเนื่องของอุปกรณ์ เนื่องจากแรงดันที่ไม่เสถียรอาจทำให้เกิดปัญหาหรือความผิดพลาดในการทำงานได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงาน ทำให้ระบบโทรคมนาคมสามารถรักษาคุณภาพการบริการได้สูงสุด



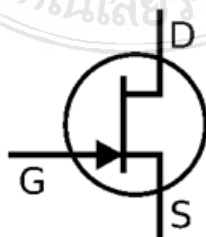
ภาพที่ 2.9 เสาสัญญาณโทรศัพท์มือถือ

ที่มา: consumerthai (2014)

จากข้อความที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่า พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์สามารถจัดการและควบคุมพลังงานให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากแหล่งหนึ่งไปเป็นพลังงานที่ใช้งานได้ในระดับที่ต้องการ มีความยืดหยุ่นในการใช้งานในระบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในแหล่งจ่ายพลังงาน ระบบโทรคมนาคม เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ทำความเย็น การใช้พอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดการสูญเสียและสนับสนุนการใช้พลังงานที่สะอาดและยั่งยืน ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะเติบโตและพัฒนาไปในอนาคตตามความต้องการเทคโนโลยีใหม่ๆ ในอุตสาหกรรมต่างๆ

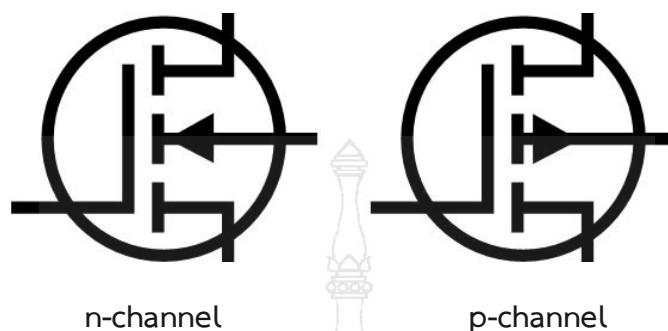
2.2 มอสเฟต

มอสเฟต (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) เป็นอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยสนามไฟฟ้าที่ใช้กับขั้วเกต (Gate) เพื่อควบคุมการนำไฟฟ้าระหว่างขั้วซอร์ส (Source) และขั้วเดรน (Drain)



ภาพที่ 2.10 สัญลักษณ์มอสเฟต

มอสเฟตมี 3 ขั้วหลัก ได้แก่ ขั้วเกต (G) ขั้วซอร์ส (S) และขั้วเดรน (D) สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบ n-channel และ p-channel จะแตกต่างกันเล็กน้อย โดยจะแสดงทิศทางของการไหลของกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 2.11 สัญลักษณ์แสดงลูกศรของมอสเฟต

n-channel MOSFET สัญลักษณ์จะแสดงลูกศรชี้จากซอร์สไปยังเดรน

p-channel MOSFET สัญลักษณ์จะแสดงลูกศรชี้จากเดรนไปยังซอร์ส

มอสเฟตจะทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่เกตสูงพอ (เกินแรงดันเกณฑ์ V_{th}) มอสเฟตจะเปิด อนุญาตให้กระแสไฟฟ้าไหลได้อย่างอิสระระหว่างซอร์สไปยังเดรน เมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้าที่เกต หรือมีแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า V_{th} มอสเฟตจะปิด ไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน [9]

มอสเฟตถูกนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลากหลายประเภท ดังนี้

สวิตช์ ควบคุมการเปิดและปิดวงจร

แอมพลิฟายเออร์ ขยายสัญญาณไฟฟ้า

วงจรแปลงกำลัง แปลงระดับแรงดันไฟฟ้า เช่น ในวงจรพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นหัวข้อหลักที่ใช้ในการทดลองในบทต่อไป



ภาพที่ 2.12 อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟต

ที่มา: manualsplus (2024)

2.2.1 คุณสมบัติของมอสเฟต

2.2.1.1 คุณสมบัติของมอสเฟตที่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นสวิตช์

มอสเฟตมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นสวิตช์ในวงจรแปลงกำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงจรพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ หัวใจสำคัญของการเลือกมอสเฟตสำหรับการใช้งานนี้คือการหาสมดุลระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ดังคุณสมบัติสำคัญที่ควรพิจารณาต่อไปนี้

ค่าความต้านทานในการเปิด ($R_{DS(on)}$) นี่คือนค่าความต้านทานระหว่างซอร์ส (Source, S) และซั้ดเร้น (Drain, D) เมื่อมอสเฟตอยู่ในช่วงนำกระแส ค่า ($R_{DS(on)}$) ที่ต่ำจะทำให้การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความร้อนลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น การเลือกมอสเฟตที่มีค่า ($R_{DS(on)}$) ต่ำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับวงจรที่มีกระแสไฟฟ้าสูง

ความสามารถในการรับกระแส (Current Handling Capability) มอสเฟตต้องมีความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าสูงได้โดยไม่เกิดความเสียหาย กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มอสเฟตสามารถรับได้จะขึ้นอยู่กับขนาดทางกายภาพและการออกแบบของมอสเฟต การเลือกมอสเฟตที่มีความสามารถในการรับกระแสสูงกว่ากระแสไฟฟ้าที่คาดว่าจะไหลผ่านในวงจร เพื่อป้องกันความเสียหายและการทำงานที่ไม่เสถียร

ความสามารถในการรับแรงดัน (Voltage Handling Capability) มอสเฟตต้องมีความสามารถในการรับแรงดันไฟฟ้าสูงได้โดยไม่เกิดความเสียหาย แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่มอสเฟตสามารถรับได้จะขึ้นอยู่กับขนาดทางกายภาพและการออกแบบของมอสเฟต การเลือกมอสเฟตที่มีความสามารถในการรับแรงดันสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในวงจร เพื่อป้องกันความเสียหายและการทำงานที่ไม่เสถียร

ความเร็วในการสวิตช์ (Switching Speed) ความเร็วในการสวิตช์หมายถึงความเร็วในการเปลี่ยนสถานะจากเปิดเป็นปิด และจากปิดเป็นเปิด มอสเฟตที่มีความเร็วในการสวิตช์สูงจะลดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการสวิตช์ และช่วยให้วงจรสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของวงจร

ความจุเกต (Gate Capacitance) ความจุเกตคือความจุไฟฟ้าระหว่างเกตและแหล่งจ่าย ความจุเกตสูงจะทำให้การเปลี่ยนสถานะของมอสเฟตช้าลง และเพิ่มการสูญเสียพลังงาน จึงควรเลือกมอสเฟตที่มีความจุเกตต่ำเพื่อลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มความเร็วในการสวิตช์

อุณหภูมิในการทำงาน (Operating Temperature) มอสเฟตควรมีความสามารถในการทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ควรเลือกมอสเฟตที่มีช่วงอุณหภูมิในการทำงานที่เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานจริง

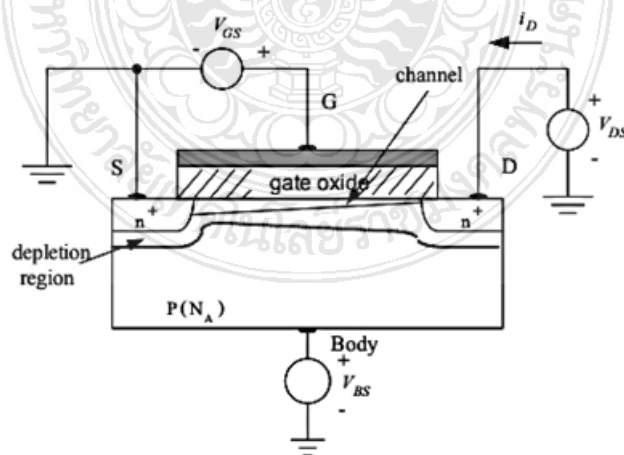
ค่าความจุตัวเก็บประจุ (Capacitance) การมีค่าความจุตัวเก็บประจุที่ต่ำ จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอสเฟต

นอกจากคุณสมบัติเหล่านี้แล้ว ควรพิจารณาปัจจัยอื่นๆ เช่น ขนาด ราคา และความพร้อมใช้งาน การเลือกมอสเฟตที่เหมาะสมนั้นต้องพิจารณาคุณสมบัติทั้งหมดเหล่านี้ร่วมกัน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรฟอ์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

2.2.1.2 การสวิตช์ของมอสเฟต

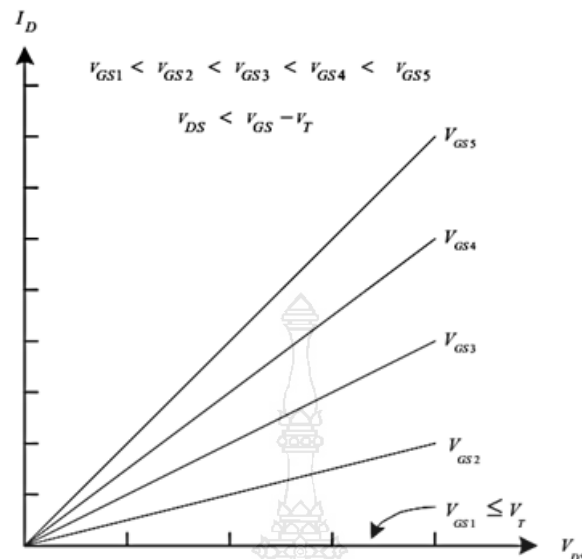
มอสเฟตทำงานเป็นสวิตช์โดยการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วซอร์สและขั้วเดรน โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกต การทำงานแบ่งออกเป็น 2 สถานะ คือ ช่วงนำกระแส และช่วงหยุดนำกระแส

ช่วงนำกระแส (Turn On) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกต (V_{GS}) สูงกว่าแรงดันเกณฑ์ (V_{th}) สนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างเกตและซอร์ส ทำให้ช่องทางการนำ (channel) เกิดขึ้นระหว่างซอร์สและเดรน ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้อย่างอิสระ (คล้ายกับการปิดสวิตช์) ในช่วงเริ่มนำกระแสจะมีกระแสไหลสูงชั่วขณะ เนื่องจากความจุของเกตกำลังถูกชาร์จ หลังจากนั้นกระแสจะลดลงเหลือค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับค่า $R_{DS(on)}$ และแรงดันไฟฟ้าระหว่างเดรนและซอร์ส (V_{DS}) เมื่อนำกระแส มอสเฟตจะมีความต้านทานต่ำระหว่างซอร์สและเดรน $R_{DS(on)}$ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้อย่างสะดวก แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟต (V_{DS}) จะต่ำมากใกล้เคียงกับศูนย์ หากไม่มีโหลด กระแสที่ไหลผ่านจะขึ้นอยู่กับความสามารถของแหล่งจ่ายไฟ



ภาพที่ 2.13 ช่องทางเดินกระแสของมอสเฟต

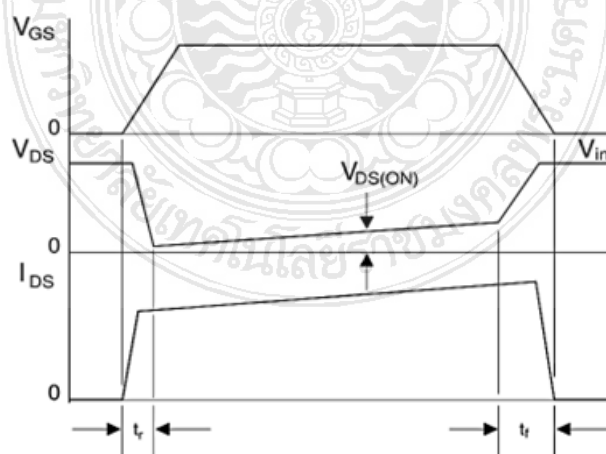
ที่มา: Introduction to Electronic Circuit Design (2003)



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

ที่มา: Introduction to Electronic Circuit Design (2003)

ช่วงหยุดนำกระแส (Turn Off) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกต (V_{GS}) ต่ำกว่าแรงดันเกณฑ์ (V_{GS}) สนามไฟฟ้าระหว่างเกตและซอร์สจะหายไป ช่องทางการนำจะปิดลง ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้ (คล้ายกับการเปิดสวิตช์) ในช่วงเริ่มหยุดนำกระแส อาจมีกระแสไหลสูงชั่วขณะ เนื่องจากความจุของเกตกำลังถูกปล่อยประจุ เมื่อหยุดนำกระแส มอสเฟตจะมีความต้านทานสูงระหว่างซอร์สและเดรน ทำให้กระแสไฟฟ้าแทบไม่ไหลผ่าน แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟต (V_{DS}) จะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร



ภาพที่ 2.15 กระแสและแรงดันตกคร่อมมอสเฟต

ที่มา: Introduction to Electronic Circuit Design (2003)

การเปลี่ยนจากสถานะเริ่มนำกระแสไปยังสถานะหยุดนำกระแสหรือการสวิตช์ความเร็วในการสวิตช์นี้เป็นคุณสมบัติสำคัญของมอสเฟต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงจรแปลงกำลัง ความเร็วในการสวิตช์ที่สูงจะช่วยลดการสูญเสียพลังงาน และช่วยให้วงจรทำงานได้ที่ความถี่สูง

การสูญเสียพลังงานในมอสเฟตเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของวงจรพอร์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์ กำลังสูญเสียเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภทหลัก ได้แก่

2.2.1.3 การสูญเสียพลังงานในมอสเฟต

ก. การสูญเสียความต้านทานในการนำไฟฟ้า (Conduction Losses)

เมื่อมอสเฟตอยู่ในช่วงนำกระแส จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานในการนำ $R_{DS(on)}$ ระหว่างซอร์สและเดรน การสูญเสียพลังงานนี้เกิดจากการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อน ตามสมการที่ 7

$$P = I^2 R_{DS(on)} \quad (7)$$

ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสีย ได้แก่

ค่า $R_{DS(on)}$ การเลือกมอสเฟตที่มีค่า $R_{DS(on)}$ ที่ต่ำจะลดการสูญเสียพลังงาน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอสเฟต จากสมการที่ 7 สังเกตได้ว่า กำลังสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมีผลแปรผันตามปริมาณกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต

อุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่า $R_{DS(on)}$ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น

ข. การสูญเสียในการสวิตช์ (Switching Losses)

การสูญเสียในการสวิตช์เกิดขึ้นในช่วงที่มอสเฟตเปลี่ยนสถานะจากนำกระแสเป็นหยุดนำกระแส และหยุดนำกระแสเป็นนำกระแสในช่วงเวลาสั้นๆ นี้ มอสเฟตจะอยู่ในสถานะที่ไม่ใช่ นำหรือหยุดอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน การสูญเสียพลังงานนี้ประกอบด้วย 2 ช่วงหลัก ได้แก่ การสูญเสียเนื่องจากการนำกระแส (Turn-on losses) เกิดขึ้นในช่วงที่มอสเฟตกำลังเปลี่ยนจากสถานะหยุดนำกระแสไปสู่ช่วงนำกระแส และการสูญเสียเนื่องจากการหยุดนำกระแส (Turn-off losses) เกิดขึ้นในช่วงที่มอสเฟตกำลังเปลี่ยนจากช่วงนำกระแสไปสู่ช่วงหยุดนำกระแส

ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสีย ได้แก่ ความเร็วในการสวิตช์ที่เร็วจะลดเวลาที่มอสเฟตอยู่ในสถานะเปลี่ยนผ่านจึงสามารถลดการสูญเสียพลังงานได้ ความจุเกตสูงมีผลให้การเปลี่ยนสถานะช้าลง ส่งผลกระทบต่อกำลังสูญเสียที่เพิ่มมากขึ้น แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงมีผลให้ค่ากำลังสูญเสียในช่วงเปลี่ยนสถานะการสวิตช์เพิ่มขึ้น

ค. การสูญเสียเกต (Gate Losses)

การสูญเสียเกตเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่เกต เพื่อชาร์จและปล่อยประจุความจุเกต การสูญเสียพลังงานนี้เกิดจากการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนในวงจรควบคุม การสูญเสียพลังงานนี้จะเกิดขึ้นในขาเกตที่ใช้ควบคุมมอสเฟต

ปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสีย ได้แก่ ความจุเกต ความต้านทานของขาเกต และความเร็วในการสวิตช์

การลดการสูญเสียพลังงานในมอสเฟตมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ การเลือกมอสเฟตที่มีคุณสมบัติเหมาะสม และการออกแบบวงจรควบคุมที่เหมาะสม จะช่วยลดการสูญเสียพลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรได้

2.2.2 การทำงานของมอสเฟตในฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

2.2.2.1 การวิเคราะห์ในสถานะคงที่ (Steady-State Analysis)

กำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจร เช่น แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{in}) แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_o) ความถี่ในการสวิตช์ (f_s) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุ (C) แบ่งการทำงานของวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ออกเป็นช่วงเวลาต่างๆ โดยขึ้นอยู่กับสถานะของมอสเฟต และแบ่งเป็นสองช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาที่มอสเฟตเปิด (ON-time) มอสเฟตจะนำกระแสไฟฟ้าพลังงานจะถูกถ่ายโอนไปยังตัวเก็บประจุ และช่วงเวลาที่มอสเฟตปิด (OFF-time) มอสเฟตจะตัดการนำกระแสไฟฟ้า ตัวเก็บประจุจะจ่ายพลังงานให้กับโหลด

วิเคราะห์ห้วงจรในแต่ละช่วงเวลา เพื่อหาค่ากระแสและแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ห้วงจร เช่น KVL (Kirchhoff's Voltage Law) และ KCL (Kirchhoff's Current Law)

คำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมมอสเฟต ตลอดหนึ่งรอบการทำงาน ค่าเฉลี่ยเหล่านี้จะใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวงจร และการสูญเสียพลังงาน

2.2.2.2 การวิเคราะห์ในสถานะเปลี่ยนผ่าน

การวิเคราะห์ในสถานะเปลี่ยนผ่านจะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสวิตช์ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มอสเฟตกำลังเปลี่ยนสถานะจากเปิด-ปิดหรือปิด-เปิด ช่วงเวลานี้จะเกิดการสูญเสียพลังงานหรือการสูญเสียในการสวิตช์ (switching losses) ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของวงจรอย่างมากดังต่อไปนี้

การสูญเสียพลังงาน ส่วนใหญ่ในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ การสูญเสียพลังงานจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสวิตช์ การวิเคราะห์นี้จะช่วยให้เราสามารถประเมินและลดการสูญเสียพลังงานได้

การออกแบบวงจร การวิเคราะห์ในสถานะเปลี่ยนผ่าน ช่วยในการออกแบบวงจรให้มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง โดยเฉพาะการออกแบบขาเกต และวงจรป้องกันต่างๆ

เทคนิคการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ในสถานะเปลี่ยนผ่านสามารถทำได้ด้วยวิธีต่างๆ เช่น การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองพฤติกรรมของวงจรในช่วงเวลาสวิตช์ วิธีนี้มีความซับซ้อน ต้องอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง และการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ ใช้ซอฟต์แวร์จำลองวงจร เช่น PSIM, MATLAB/Simulink หรือ LTSpice เพื่อจำลองพฤติกรรมของวงจร วิธีนี้ง่ายกว่า และให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ โดยเฉพาะเมื่อวงจรมีความซับซ้อน

ปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณา มีดังต่อไปนี้

ความเร็วในการสวิตช์ของมอสเฟต มีผลต่อความยาวของช่วงเวลาเปลี่ยนผ่าน และมีผลโดยตรงต่อการสูญเสียพลังงาน มอสเฟตที่มีความเร็วสูง จะลดช่วงเวลาเปลี่ยนผ่าน และลดการสูญเสียพลังงาน

ความจุเกตของมอสเฟต มีผลต่อเวลาในการชาร์จและปล่อยประจุเกต ซึ่งส่งผลต่อความเร็วในการสวิตช์ ความจุเกตสูง จะทำให้การสวิตช์ช้าลง และเพิ่มการสูญเสียพลังงาน

การสูญเสียในการเปลี่ยนสถานะ (Turn-on and Turn-off losses) การสูญเสียพลังงานในช่วงเปลี่ยนสถานะ เกิดจากการไหลของกระแสและแรงดันที่ซ้อนทับกัน ในช่วงเวลาสั้นๆ การสูญเสียพลังงานนี้สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้เส้นโค้งของกระแสและแรงดัน

การใช้เทคนิค soft-switching: เทคนิค soft-switching เช่น Zero Voltage Switching (ZVS) และ Zero Current Switching (ZCS) สามารถใช้เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในการสวิตช์ โดยการลดการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันอย่างรวดเร็ว

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ในสถานะเปลี่ยนผ่าน จะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของมอสเฟตในช่วงเวลาสวิตช์ และประเมินการสูญเสียพลังงาน ข้อมูลนี้จะใช้ในการออกแบบวงจร และเลือกส่วนประกอบต่างๆ ให้เหมาะสม เพื่อลดการสูญเสียพลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพของวงจร

2.3 ไอจีบีที

หลังจากศึกษาคุณสมบัติและการใช้งานของมอสเฟต อุปกรณ์สวิตช์กำลังอีกชนิดหนึ่ง นั่นคือ ไอจีบีที แม้ว่าทั้งสองอุปกรณ์นี้จะใช้เป็นสวิตช์กำลังได้ แต่ก็มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านโครงสร้าง หลักการทำงาน และลักษณะทางไฟฟ้า หัวข้อย่อยถัดไปจะอธิบายโครงสร้างและหลักการทำงานของไอจีบีที เพื่อให้เห็นภาพความแตกต่างดังกล่าว

2.3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของไอจีบีที

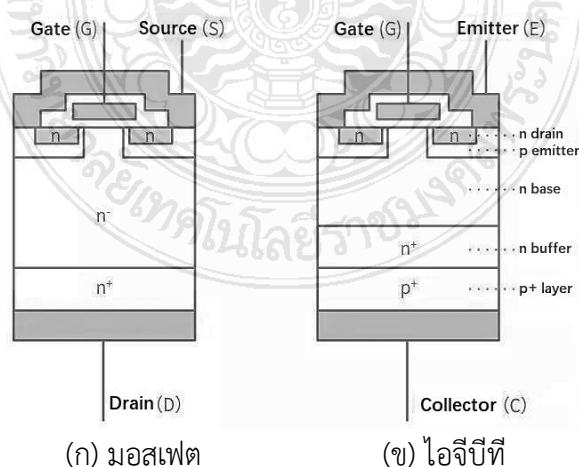
ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor) เป็นอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์กำลังที่ใช้เป็นสวิตช์ โดยผสมผสานคุณสมบัติของมอสเฟตและทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor - BJT) เข้าด้วยกัน ทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีทั้งข้อดีของมอสเฟต และ BJT โครงสร้างและกลไกการทำงานมีความแตกต่างจากมอสเฟตอย่างมีนัยสำคัญ

ไอจีบีทีมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

ส่วนมอสเฟต (MOSFET) ทำหน้าที่เป็นเกตควบคุม (Gate Control) แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะควบคุมการเปิดและปิดของไอจีบีที คล้ายกับมอสเฟต แต่แตกต่างที่ไอจีบีทีใช้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าในส่วน BJT ไม่ใช่ควบคุมกระแสโดยตรงเหมือนมอสเฟต

ส่วน P-channel MOSFET ทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมการเปิดปิดของไอจีบีที คล้ายกับมอสเฟต แต่แตกต่างที่ไอจีบีทีใช้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าในส่วน BJT ไม่ใช่ควบคุมกระแสโดยตรงเหมือนมอสเฟต

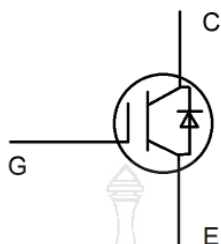
ส่วนไบโพลาร์ (BJT) ทำหน้าที่เป็นส่วนที่นำกระแสไฟฟ้า (Current Path) เมื่อไอจีบีทีเปิด กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านส่วน BJT ซึ่งสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้มาก และมีความต้านทานในการนำต่ำ



ภาพที่ 2.16 โครงสร้างของมอสเฟตและไอจีบีที

ที่มา: shunlongwei (2023)

ไอจีบีที มีสามขา ประกอบด้วยขาอินพุต คือ เกต (Gate, G) ขาเอาต์พุต คือ คอลเลกเตอร์ (Collector, C) และอิมิตเตอร์ (Emitter, E)



ภาพที่ 2.17 สัญลักษณ์ไอจีบีที

หลักการทำงาน

การเปิด (Turn-on) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่เกตสูงพอ (เกินแรงดันเกณฑ์) ส่วนมอสเฟตจะเปิด ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจาก Collector ไปยัง Emitter ในส่วน BJT กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านส่วน BJT นี้จะทำหน้าที่เป็นกระแสฐาน (Base Current) ทำให้ส่วน BJT เปิดอย่างสมบูรณ์ และกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ จึงสามารถไหลผ่านไอจีบีทีได้ ลักษณะนี้คล้ายกับการใช้แรงดันไฟฟ้าที่เกตเพื่อควบคุมสวิตช์เหมือนมอสเฟต แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านส่วนหลักของไอจีบีที (Collector-Emitter) มาจากส่วน BJT

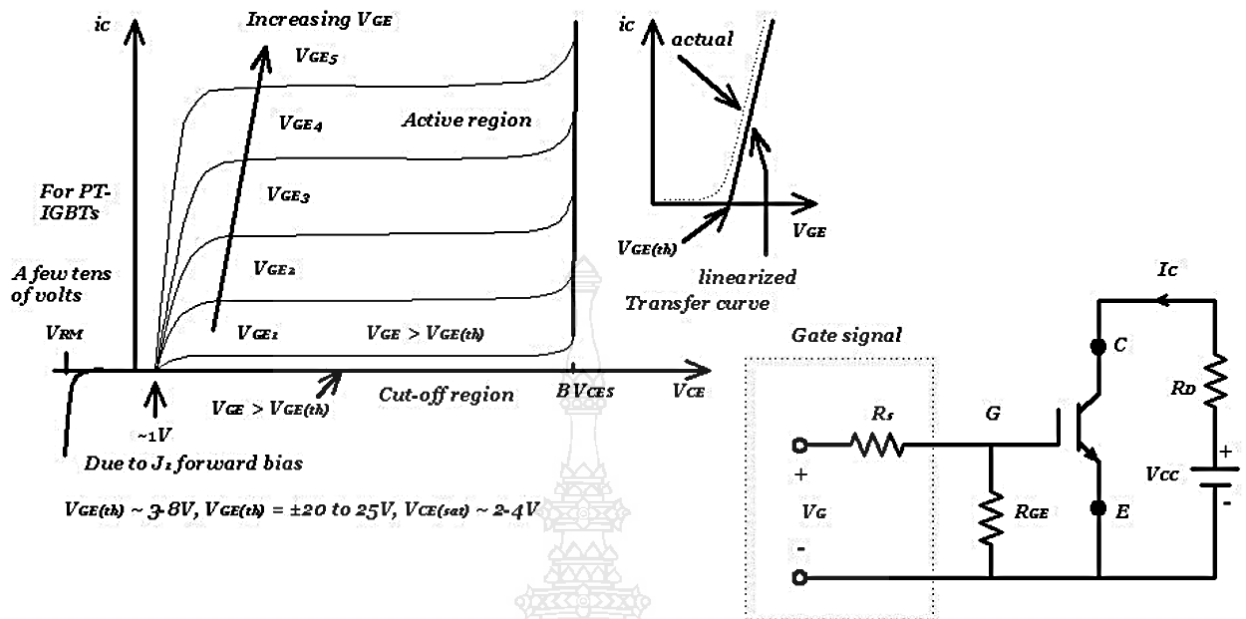
การปิด (Turn-off) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่เกตต่ำกว่าแรงดันเกณฑ์ ส่วนมอสเฟตจะปิด ทำให้กระแสไฟฟ้าในส่วน BJT ลดลง และในที่สุดก็ปิดลงเช่นกัน กลไกนี้ต่างจากมอสเฟต ที่การปิดเกิดจากการลดแรงดันที่เกตโดยตรง



ภาพที่ 2.18 อุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที

ที่มา: nstrumentationtools (2003)

ลักษณะทางกระแสและแรงดันของ ไอจีบีที จะคล้ายกลับมอสเฟตกำลังค่อนข้างมาก จากวงจรการทดสอบหาคุณลักษณะและรูปคลื่นแรงดันและกระแสของไอจีบีที ที่แสดงในภาพที่ 2.19 จะเห็นว่าเมื่อ V_{GE} เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้กระแสที่ผ่านไอจีบีทีมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยกระแสไหลหรือกระแสที่ผ่านขา C (I_C) ของไอจีบีที ส่วนวงจรด้าน C และ E นั้นคือวงจรกำลังต่อโหลดต่ออยู่ และวงจรด้านขาเกต คือ อินพุตของไอจีบีทีที่รับสัญญาณควบคุมการเปิดและปิดจากวงจรกำเนิดสัญญาณภายนอก



ภาพที่ 2.19 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของไอจีบีที

ที่มา: อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเบื้องต้น

ความแตกต่างจากมอสเฟต

กลไกการนำไฟฟ้า มอสเฟตใช้สนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างซอร์สและเดรน ส่วนไอจีบีทีใช้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดเพื่อควบคุมการเปิด และปิดของส่วน BJT ซึ่งเป็นส่วนที่นำกระแสไฟฟ้า

การนำกระแส มอสเฟตสามารถนำกระแสได้จำกัด เมื่อเทียบกับไอจีบีที ซึ่งสามารถนำกระแสได้สูง得多 เนื่องจากส่วน BJT มีความสามารถในการนำกระแสสูง

ไอจีบีทีมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่ามอสเฟต โดยมีทั้งส่วนมอสเฟตและ BJT รวมในโครงสร้างเดียว ทำให้ไอจีบีทีมีคุณสมบัติเฉพาะตัว เช่น ความสามารถในการรับแรงดันสูง และกระแสสูง

โดยสรุปไอจีบีทีเป็นสวิตช์ที่ทำงานได้ในย่านความถี่สูงกว่าทรานซิสเตอร์ แต่ต่ำกว่ามอสเฟต คือ ทำงานที่ความถี่ระหว่าง 1kHz-100kHz แต่พิกัดของกระแสและแรงดันไฟฟ้าสูงกว่ามอสเฟตกำลังคือ 500A/2000 V ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์กำลังที่รวมข้อดีของมอสเฟต (การควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าที่เกิด) และ BJT (ความสามารถในการนำกระแสสูง) เข้าด้วยกัน ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในวงจรแปลงกำลัง ที่มีทั้งแรงดันสูง และกระแสสูง

2.3.2 การเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้า

การเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้าของไอจีบีทีและมอสเฟตเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับงานเฉพาะ โดยเฉพาะในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ตาราง 2.1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของไอจีบีทีและมอสเฟต โดยเน้นถึงความแตกต่าง และผลกระทบต่อประสิทธิภาพของวงจร และตาราง 2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการใช้ไอจีบีทีและมอสเฟต ในแง่ของประสิทธิภาพ ขนาด และต้นทุน สำหรับระดับกำลังไฟฟ้าต่างๆ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของไอจีบีทีและมอสเฟต

ลักษณะทางไฟฟ้า	ไอจีบีที	มอสเฟต	ผลกระทบต่อประสิทธิภาพ
แรงดันไฟฟ้าทนทาน (V_{CES}/V_{DSS})	สูงมาก เหมาะสำหรับ แรงดันไฟฟ้าสูง	สูง แต่โดยทั่วไป ต่ำกว่าไอจีบีที	ไอจีบีทีเหมาะสำหรับงานแรงดันสูง มอสเฟตอาจจำกัดในงาน แรงดันสูงมาก
กระแสไฟฟ้าทนทาน (I_C/I_D)	สูงมาก เหมาะสำหรับ กระแสไฟฟ้าสูง	สูง แต่โดยทั่วไป ต่ำกว่าไอจีบีที	ไอจีบีทีเหมาะสำหรับงานกระแสสูง มอสเฟตอาจจำกัดใน งานกระแสสูงมาก
ความต้านทานการนำ ($R_{CE(on)}/R_{DS(on)}$)	สูงกว่ามอสเฟต	ต่ำกว่าไอจีบีที	มอสเฟตมีประสิทธิภาพการนำสูงกว่า กำลังสูญเสียการนำของไอจีบีทีสูงกว่า
ความเร็วการสวิตช์ (Switching Speed)	ต่ำกว่ามอสเฟต	สูงกว่าไอจีบีที	การสูญเสียพลังงานในการสวิตช์ของ ไอจีบีทีสูงกว่า มอสเฟตเหมาะสำหรับ งานความถี่สูง
กำลังสูญเสียการสวิตช์ (Switching Losses)	สูงกว่ามอสเฟต โดยเฉพาะที่ ความถี่สูง	ต่ำกว่าไอจีบีที โดยเฉพาะที่ ความถี่สูง	ไอจีบีทีอาจไม่เหมาะสมกับงาน ความถี่สูงมาก มอสเฟตมี ประสิทธิภาพดีกว่าที่ความถี่สูง
Soft-Switching	ใช้ได้ แต่มี ความซับซ้อน มากกว่า	ใช้ได้ง่ายกว่า มีเทคนิคเยอะ	การใช้เทคนิค soft-switching ช่วยลดการสูญเสียพลังงานใน การสวิตช์ ทั้งในไอจีบีทีและมอสเฟต แต่ความซับซ้อนแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการใช้ไอจีบีทีและมอสเฟต

ประสิทธิภาพ	กำลังไฟฟ้าน้อย ($<100\text{W}$)	ประสิทธิภาพอาจต่ำกว่า มอสเฟตเนื่องจากการสูญเสีย ในการสวิตช์ที่สูงกว่า	ประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากการสูญเสียใน การสวิตช์ที่ต่ำกว่า และ $R_{DS(on)}$ ต่ำกว่า
	กำลังไฟฟ้าปานกลาง ($100-1000\text{W}$)	ประสิทธิภาพใกล้เคียงมอสเฟต หรือสูงกว่าเล็กน้อย ที่กระแสไฟฟ้าสูง	ประสิทธิภาพสูง แต่ความเร็วในการสวิตช์ อาจเป็นข้อจำกัด ที่ กำลังไฟฟ้าสูง
	กำลังไฟฟ้าสูง ($>1000\text{W}$)	ประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับกระแสไฟฟ้าสูง	ประสิทธิภาพอาจลดลง เนื่องจาก $R_{DS(on)}$ สูงขึ้น ที่กระแสไฟฟ้าสูง
ขนาด	กำลังไฟฟ้าน้อย ($<100\text{W}$)	อาจมีขนาดใหญ่กว่า มอสเฟตเล็กน้อย	ขนาดเล็ก
	กำลังไฟฟ้าปานกลาง ($100-1000\text{W}$)	ขนาดใกล้เคียงมอสเฟต	ขนาดปานกลาง
	กำลังไฟฟ้าสูง ($>1000\text{W}$)	ขนาดอาจใหญ่กว่ามอสเฟต เนื่องจากต้องรับกระแสไฟฟ้าสูง	ขนาดอาจใหญ่ขึ้น เนื่องจากต้องใช้มอสเฟต หลายตัวขนานกัน
ต้นทุน	กำลังไฟฟ้าน้อย ($<100\text{W}$)	ต้นทุนอาจสูงกว่า มอสเฟตเล็กน้อย	ต้นทุนต่ำ
	กำลังไฟฟ้าปานกลาง ($100-1000\text{W}$)	ต้นทุนใกล้เคียงมอสเฟต	ต้นทุนปานกลาง
	กำลังไฟฟ้าสูง ($>1000\text{W}$)	ต้นทุนอาจสูงกว่ามอสเฟต เนื่องจากต้องใช้ไอจีบีที หลายตัวขนานกัน	ต้นทุนอาจสูงขึ้น เนื่องจากต้องใช้มอสเฟต หลายตัวขนานกัน

สรุปส่วนกำลังไฟฟ้าน้อย มอสเฟตเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ขนาดเล็ก และต้นทุนต่ำ กำลังไฟฟ้าปานกลาง ทั้งไอจีบีทีและมอสเฟต สามารถใช้งานได้ ขึ้นอยู่กับความถี่ในการสวิตช์ และข้อจำกัดอื่นๆ และกำลังไฟฟ้าสูง ไอจีบีทีเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า เนื่องจากมีความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าสูง และมีประสิทธิภาพสูงที่กระแสไฟฟ้าสูง แม้มีขนาดใหญ่ และต้นทุนสูงกว่า

2.3.3 การประยุกต์ใช้งานในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

ไอจีบีทีและมอสเฟตต่างก็สามารถนำมาใช้เป็นสวิตช์ ในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ได้ แต่การเลือกใช้อุปกรณ์ขึ้นอยู่กับข้อดี-ข้อเสีย ข้อจำกัดของอุปกรณ์ และความต้องการเฉพาะของงาน

2.3.3.1 ข้อดีของการใช้ไอจีบีทีในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

ความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าสูง ไอจีบีทีมีความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าสูงกว่ามอสเฟต ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ที่มีกระแสไฟฟ้าโหลดสูง เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์แปลงกำลัง ที่มีกำลังไฟฟ้าสูง

ความสามารถในการรับแรงดันไฟฟ้าสูง ไอจีบีทีมีความสามารถในการรับแรงดันไฟฟ้าสูงกว่ามอสเฟต ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ที่มีแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสูง

การสูญเสียพลังงานต่ำที่กระแสไฟฟ้าสูง แม้ว่าไอจีบีทีจะมีกำลังสูญเสียในการสวิตช์สูงกว่ามอสเฟต แต่ที่กระแสไฟฟ้าสูง การสูญเสียพลังงานในการนำ ของไอจีบีทีจะต่ำกว่ามอสเฟต ทำให้ไอจีบีทีมีประสิทธิภาพสูงกว่ามอสเฟต ที่กระแสไฟฟ้าสูง

2.3.3.2 ข้อเสียของการใช้ไอจีบีทีในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

ความเร็วในการสวิตช์ต่ำ ไอจีบีทีมีความเร็วในการสวิตช์ต่ำกว่ามอสเฟต ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ที่มีความถี่ในการสวิตช์สูง การสวิตช์ช้าจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน ในการสวิตช์สูง และลดประสิทธิภาพของวงจร

การสูญเสียพลังงานในการสวิตช์สูง ไอจีบีทีมีการสูญเสียพลังงานในการสวิตช์สูงกว่ามอสเฟต โดยเฉพาะที่ความถี่สูง การสูญเสียพลังงานนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง และอาจทำให้เกิดความร้อนสูงเกินไปได้

ความซับซ้อนของวงจรควบคุม ไอจีบีทีต้องการวงจรควบคุมที่ซับซ้อนกว่ามอสเฟต เพื่อให้สามารถควบคุมการเปิดและปิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.3.3 การประยุกต์ใช้งาน

โดยทั่วไปไอจีบีทีจะเหมาะสมสำหรับการใช้งานในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ที่มีกำลังไฟฟ้าสูง และความถี่ในการสวิตช์ต่ำ เช่น วงจรชาร์จแบตเตอรี่ วงจรจ่ายไฟสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ที่มีกำลังไฟฟ้าสูงอื่นๆ ในขณะที่มอสเฟตจะเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่มีความถี่ในการสวิตช์สูง เช่น วงจรแปลงกำลังในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก

2.3.4 การลดการสูญเสียการสวิตช์ (Soft-Switching Techniques)

เป้าหมายหลักของเทคนิค soft-switching คือการลดการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สวิตช์เปลี่ยนสถานะ โดยการทำให้กระแสหรือแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนสถานะ เทคนิคหลัก 2 แบบ ได้แก่ ZVS และ ZCS โดยเทคนิคนี้ใช้ได้ทั้งมอสเฟตและไอจีบีที

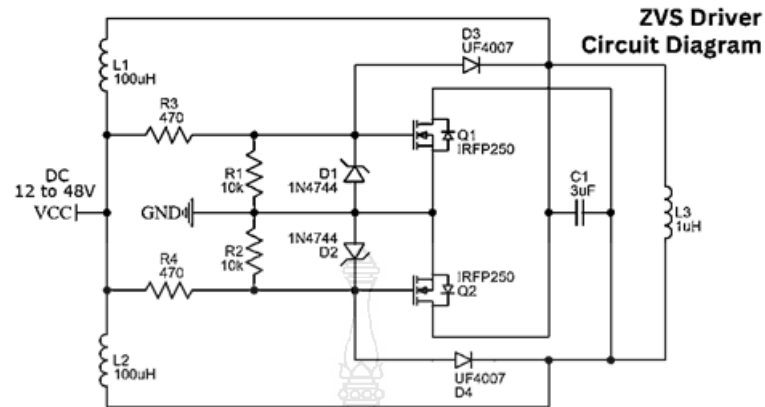
2.3.4.1 Zero-Voltage Switching (ZVS)

หลักการทำงาน ZVS เป็นเทคนิคที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟตเป็นศูนย์ ก่อนที่จะมีการเปิดสวิตช์ โดยการใช้ตัวเก็บประจุหรือวงจรรีโซแนนท์ เพื่อชาร์จหรือปล่อยประจุ ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟตเป็นศูนย์ ก่อนที่กระแสจะเริ่มไหลผ่าน จึงลดการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากกระแสและแรงดันที่ซ้อนทับกัน ในช่วงเปลี่ยนสถานะ

ข้อดี ลดการสูญเสียในการสวิตช์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น ลดการสูญเสียในการสวิตช์ นี่เป็นข้อดีที่สำคัญที่สุดของ ZVS การทำให้แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ก่อนที่จะเปิดมอสเฟต จะลดการสูญเสียพลังงาน ที่เกิดจากกระแสและแรงดันที่ซ้อนทับกัน อย่างมาก เพิ่มประสิทธิภาพของวงจร การลดการสูญเสียพลังงาน จะเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรแปลงกำลัง ทำให้สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดความร้อน การลดการสูญเสียพลังงาน จะลดการเกิดความร้อนในมอสเฟต และส่วนประกอบอื่นๆ ในวงจร ทำให้วงจรมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

ข้อเสีย วงจรมีความซับซ้อนมากขึ้น และอาจต้องใช้ส่วนประกอบเพิ่มเติม เช่น ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ การออกแบบวงจรต้องคำนึงถึงค่าเรโซแนนซ์ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟตเป็นศูนย์ ในช่วงเวลาที่เหมาะสม ความซับซ้อนของวงจร การนำ ZVS มาใช้ จะทำให้วงจรมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากต้องมีการเพิ่มส่วนประกอบต่างๆ เช่น ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เข้าไปในวงจร การออกแบบที่ซับซ้อน การออกแบบวงจร ZVS จำเป็นต้องมีความรู้ และประสบการณ์ ในการออกแบบวงจรเรโซแนนท์ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟต เป็นศูนย์ ในช่วงเวลาที่เหมาะสม ต้นทุนที่สูงขึ้น การเพิ่มส่วนประกอบ และความซับซ้อนของวงจร อาจทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

ตัวอย่างวงจร ZVS ในภาพที่ 2.20 นี้ใช้มอสเฟตแบบ N-channel สองตัว (Q1, Q2) เป็นองค์ประกอบสวิตช์หลัก โดยทั้งสองตัวจะสลับการเปิดและปิด วงจรทำงานด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 12-48 โวลต์ ไดโอดซีเนอร์ 15 โวลต์ (D1, D2) ทำหน้าที่ป้องกันเกตของมอสเฟตจากแรงดันไฟฟ้าเกิน ตัวต้านทาน (R1, R2) จำกัดกระแสเกตเพื่อป้องกันมอสเฟต ในขณะที่ตัวต้านทานดึงลง (pull-down resistors) (R3, R4) ช่วยระบายประจุเกตของมอสเฟต เมื่ออยู่ในสถานะปิด



ภาพที่ 2.20 Zero-Voltage Switching

ที่มา: electrothinks (2024)

เมื่อมอสเฟต Q_1 เปิด กระแสจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 ไปยังกราวด์ สะสมพลังงานในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้แรงดันเกตลดลงเป็นศูนย์ ทำให้ Q_1 ปิด พลังงานแม่เหล็กที่สะสมใน L_1 จะถูกแปลงกลับเป็นพลังงานไฟฟ้า และไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3 ไดโอด D_3 และตัวต้านทาน R_1 เพื่อระบายความร้อน

ในทำนองเดียวกัน เมื่อมอสเฟต Q_2 เปิด กระแสจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 ไปยังกราวด์ สะสมพลังงานในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้แรงดันเกตลดลงเป็นศูนย์ ทำให้ Q_2 ปิด พลังงานแม่เหล็กที่สะสมใน L_2 จะถูกแปลงกลับเป็นพลังงานไฟฟ้า และไหลในทิศทางตรงกันข้ามผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_3 ไดโอด D_4 และตัวต้านทาน R_2 เพื่อระบายความร้อน

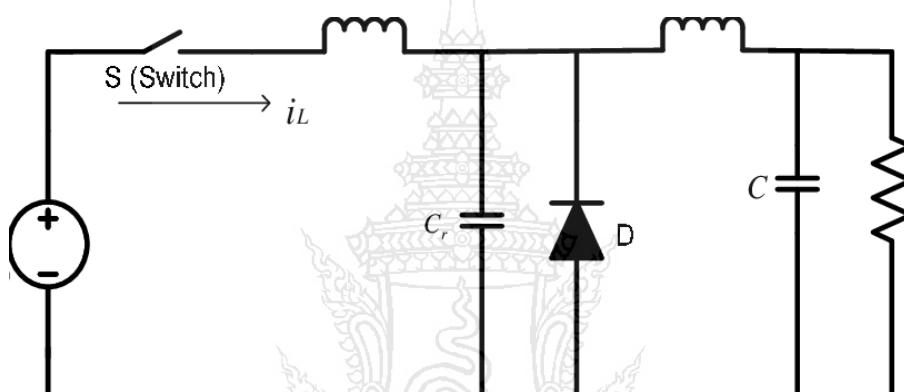
ตัวเก็บประจุ C_1 และตัวเหนี่ยวนำ L_3 ทำงานร่วมกันเป็นวงจรเรโซแนนท์ กำหนดความถี่ในการสั่นของวงจร การสั่นนี้สร้างสนามแม่เหล็กสลับอย่างรวดเร็วรอบตัวเหนี่ยวนำ L_3 เมื่อวัตถุโลหะนำไฟฟ้าอยู่ใกล้สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสวน (eddy currents) ภายในโลหะ กระแสวนเหล่านี้ไหลผ่านความต้านทานของโลหะ ทำให้โลหะร้อนขึ้นเนื่องจากผลจูล (Joule effect) หรือความร้อนจากความต้านทาน

วงจรขับเคลื่อน ZVS นี้ยังมีข้อดี คือ ประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ และสร้างง่าย เหมาะสำหรับการใช้งานต่างๆ เช่น การสร้างแรงดันสูง การสร้างอาร์ค การส่งพลังงานแบบไร้สาย และการเหนี่ยวนำความร้อน

2.3.4.2 Zero-Current Switching (ZCS)

หลักการทำงาน ZCS เป็นเทคนิคที่ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอสเฟตเป็นศูนย์ ก่อนที่จะมีการปิดสวิตช์ โดยการใช้ตัวเหนี่ยวนำหรือวงจรเรโซแนนท์ เพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ก่อนที่มอสเฟตจะปิด จึงลดการสูญเสีย

พลังงานที่เกิดจากกระแสและแรงดันที่ซ้อนทับกัน ในช่วงเปลี่ยนสถานะในวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์แบบ ZCS ที่แสดงในรูป 2.21 กระแสไฟฟ้าจะเริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และไหลผ่านสวิตช์อย่างควบคุม โดยในขณะที่สวิตช์ถูกปิด กระแสจะยังคงอยู่จนกระทั่งเมื่อมีการเปิดสวิตช์ในช่วงที่กระแสเป็นศูนย์ ซึ่งจะช่วยให้การเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดแรงดันกระชากและทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด จากนั้นกระแสที่ไหลจะเดินทางไปยังโหลดเพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าที่มีคุณภาพสูง โดยกระแสไฟจะเปลี่ยนทิศทางในระหว่างการสลับสวิตช์ ทำให้การทำงานของวงจรมีประสิทธิภาพมากขึ้นและช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ในวงจรได้



ภาพที่ 2.21 Zero-Current Switching

ข้อดี ลดการสูญเสียในการสวิตช์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น ลดการสูญเสียในการสวิตช์ โดยเฉพาะการสูญเสียในการปิดสวิตช์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ก่อนปิดสวิตช์ เพิ่มประสิทธิภาพของวงจร เนื่องจากลดการสูญเสียพลังงาน จึงเพิ่มประสิทธิภาพของวงจร ลดความร้อน ลดการเกิดความร้อนในโมสเฟต และส่วนประกอบอื่นๆ

ข้อเสีย วงจรมีความซับซ้อนมากขึ้น และอาจต้องใช้ส่วนประกอบเพิ่มเติม เช่น ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ การออกแบบวงจรต้องคำนึงถึงความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ในช่วงเวลาที่เหมาะสม อาจมีปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือนของกระแส ในบางกรณี ความซับซ้อนของวงจร วงจร ZCS มีความซับซ้อนมากกว่าวงจรแบบธรรมดา การออกแบบที่ซับซ้อน การออกแบบวงจร ZCS ต้องคำนึงถึงความถี่เรโซแนนซ์ และพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างละเอียด อาจมีปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือนของกระแส ในบางกรณี อาจทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของกระแส ที่ต้องมีการออกแบบวงจรให้สามารถควบคุมได้

ตาราง 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ ZVS และ ZCS

คุณสมบัติ	ZVS	ZCS
หลักการ	ทำให้แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ก่อนเปิด	ทำให้กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ก่อนปิด
การสูญเสีย	ลดการสูญเสียในการเปิดสวิตช์	ลดการสูญเสียในการปิดสวิตช์
ความซับซ้อน	สูง	สูง
ความเหมาะสม	วงจรที่มีแรงดันสูง	วงจรที่มีกระแสสูง

ZCS และ ZVS ต่างก็เป็นเทคนิค soft-switching แต่ ZCS เน้นการลดการสูญเสียในการปิดสวิตช์ ในขณะที่ ZVS เน้นการลดการสูญเสียในการเปิดสวิตช์ การเลือกใช้เทคนิคใด ขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจร และข้อจำกัดต่างๆ

ทั้ง ZVS และ ZCS เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียพลังงานในการสวิตช์ แต่การเลือกใช้เทคนิคใด ขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจร และข้อจำกัดต่างๆ การออกแบบวงจร soft-switching จำเป็นต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ในการออกแบบวงจรเรโซแนนท์ และการเลือกส่วนประกอบต่างๆ อย่างเหมาะสม ควรศึกษา Datasheet ของมอสเฟต และส่วนประกอบอื่นๆ อย่างละเอียด เพื่อให้ได้การออกแบบวงจรที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.4 รูปแบบการต่อมอสเฟตร่วมกับไอจีบีที

ในหัวข้อนี้จะเน้นไปที่การต่อร่วมกันในรูปแบบขนานและแบบอนุกรม การรวมศักยภาพของทั้งสองอุปกรณ์ในระบบควบคุมพลังงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นในการทำงานในงานต่างๆ โดยมีมอสเฟตมีคุณสมบัติในการเปิดหรือปิดที่รวดเร็ว และมีความต้านทานต่ำ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการควบคุมกระแสที่สูง ในขณะที่ไอจีบีทีมีความสามารถในการจัดการแรงดันสูง โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการพลังงานสูงและการควบคุมโหลดที่มีความซับซ้อน การรวมสวิตช์ทั้งสองจะช่วยลดการสูญเสียพลังงานในช่วงการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์ และทำให้วงจรทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ การออกแบบควรพิจารณาถึงการจัดการความร้อนและการประสานงานระหว่างมอสเฟตและไอจีบีทีเพื่อให้แน่ใจว่าระบบทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีเสถียรภาพมากที่สุด การวิจัยและพัฒนาในด้านการต่อมอสเฟตร่วมกับไอจีบีทียังมีความสำคัญในการตอบสนองต่อความต้องการด้านพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นในยุคปัจจุบัน

2.4.1 การต่อแบบขนาน (Mixed Parallel)

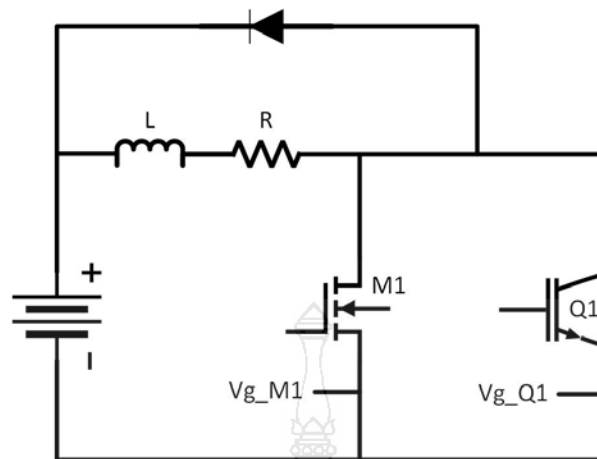
การต่อมอเตอร์ร่วมกับไอจีบีทีในลักษณะขนานมีข้อดีที่สำคัญหลายประการ เช่น การกระจายโหลด ซึ่งช่วยให้แต่ละอุปกรณ์สามารถรับภาระที่เท่าเทียมกัน ลดความเสี่ยงจากการทำงานหนักเกินไปของอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่ง นอกจากนี้ การกระจายโหลดยังทำให้ระบบสามารถรองรับการไหลของกระแสสูงได้ดียิ่งขึ้น โดยที่ไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับความล้มเหลวของอุปกรณ์หนึ่งอุปกรณ์ใด ส่วนการเพิ่มความสามารถในการจัดการกับกระแสสูง เกิดจากการที่การต่อแบบขนานช่วยแบ่งเบาภาระของทรานซิสเตอร์แต่ละตัว ทำให้สามารถใช้งานในสภาพที่มีการไหลของกระแสสูงได้โดยไม่เกิดความร้อนเกินขีดจำกัด ซึ่งส่งผลให้อุปกรณ์ทำงานได้อย่างเสถียรและลดโอกาสในการเกิดความเสียหายจากการทำงานหนักเกินไป อีกทั้งยังเพิ่มความปลอดภัยและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ในระยะยาว นอกจากการกระจายโหลดและการเพิ่มความสามารถในการจัดการกับกระแสสูงแล้ว การต่อแบบขนานยังช่วยให้ระบบมีความยืดหยุ่นและสามารถขยายขีดความสามารถได้ง่ายขึ้น เช่น หากต้องการเพิ่มกำลังการจ่ายพลังงาน สามารถทำได้โดยการเพิ่มมอเตอร์หรือไอจีบีทีเข้าไปในวงจรโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบอื่นๆ [10-15] นอกจากนี้ การต่อแบบขนานยังช่วยให้การบำรุงรักษาหรือตรวจสอบอุปกรณ์เป็นไปได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสามารถแยกตรวจสอบการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ได้อย่างชัดเจน ในกรณีที่เกิดปัญหาก็สามารถนำออกซ่อมหรือเปลี่ยนได้โดยไม่กระทบต่อการทำงานของระบบโดยรวม สุดท้าย การต่อแบบขนานยังสามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการทำงานในโหมดสวิตช์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงทำให้ระบบโดยรวมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

การนำมอเตอร์และไอจีบีทีต่อขนานกันดังในภาพที่ 2.22 เป็นตัวอย่างของการต่อแบบขนานระหว่าง มอเตอร์ (M_1) และไอจีบีที (Q_1) ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการควบคุมการจ่ายพลังงาน โดยเฉพาะในงานที่ต้องการทั้งความเร็วในการเปิดหรือปิดจากมอเตอร์ และความสามารถในการจัดการกับแรงดันสูงจากไอจีบีที

แหล่งจ่ายไฟ (V_f) แหล่งจ่ายไฟที่มีผิวอิเล็กทรอนิกส์ให้พลังงานแก่วงจร โดยพลังงานนี้จะถูกใช้เพื่อขับเคลื่อนโหลด (L และ R) ที่เชื่อมต่ออยู่ในวงจร

โหลด (L และ R) โหลดในวงจรประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ (Inductor, L) และเรซิสเตอร์ (R) ซึ่งทำหน้าที่ซัพพลายพลังงานให้กับอุปกรณ์ที่ทำงานในวงจร เช่น มอเตอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ โหลดเหล่านี้จะดึงพลังงานจากมอเตอร์และไอจีบีทีตามความต้องการ

มอเตอร์ (M_1) ทำงานเป็นสวิตช์ที่เปิดและปิดกระแสไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว เหมาะสำหรับใช้งานในความถี่สูง คุณสมบัติที่โดดเด่นคือการตัดกระแสที่รวดเร็วและการสูญเสียพลังงานที่ต่ำ ทำให้สามารถใช้ในวงจรที่ต้องการความเร็วในการสลับกระแส เช่น ในวงจรแปลงพลังงาน



ภาพที่ 2.22 รูปวงจรการทำงานแบบขนานของมอสเฟตและไอจีบีที

ไอจีบีที (Q_1) จะทำงานที่แรงดันสูงและมีความสามารถในการจัดการกับกระแสที่สูง โดยปกติแล้วจะใช้ในระบบที่มีโหลดมากหรือระบบที่ต้องการควบคุมพลังงานที่มีประสิทธิภาพ เช่น วงจรอินเวอร์เตอร์ในระบบพลังงานทดแทน

การควบคุมประจุ (V_{g_M1} และ V_{g_Q1}) ส่วนนี้จะใช้ควบคุมการเปิด-ปิดของมอสเฟตและไอจีบีที โดยสามารถปรับแต่งให้เหมาะสมกับการทำงานในสภาวะต่างๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด เช่น การปรับความกว้างของพัลส์ในการเปิดหรือปิดสวิตช์

วงจรนี้สามารถใช้ได้ในหลายงานที่ต้องการการควบคุมพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่

วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานทดแทนอื่นๆ เพื่อแปลงพลังงานจาก ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ

มอเตอร์ควบคุม ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อน เช่น รถยนต์ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการการควบคุมที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

ข้อดีของการต่อแบบขนาน

การกระจายโหลด ช่วยแบ่งเบาภาระของแต่ละอุปกรณ์ ทำให้ไม่เกิดการทำงานหนักเกินไป

ประสิทธิภาพสูง ลดการสูญเสียพลังงานในระหว่างการสลับ ทำให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ความน่าเชื่อถือ หากมีอุปกรณ์ใดที่เกิดความเสียหาย ระบบยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องหยุดทำงานทั้งหมด

โดยรวมแล้ว การต่อแบบนี้สามารถทำให้ระบบมีความยืดหยุ่น ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูง ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในงานอุตสาหกรรมและระบบพลังงานที่ต้องการการควบคุมที่เที่ยงตรงและมีประสิทธิภาพ

การควบคุมวงจรที่ใช้มอสเฟตและไอจีบีทีที่ต่อร่วมกันแบบขนาน มีวิธีการควบคุมที่สำคัญและควรพิจารณาเพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้น เช่น ความไม่สมดุล ดังนี้

การควบคุมอุณหภูมิ ควรติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิในวงจรเพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีอุปกรณ์ใดร้อนเกินไป การควบคุมพัลสหรือระบบระบายความร้อนจะช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพ

การใช้ PWM (Pulse Width Modulation) การควบคุมค่า PWM ช่วยในการเปิดและปิดมอสเฟตและไอจีบีทีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถปรับความกว้างของพัลส์เพื่อควบคุมความเร็วหรือแรงดันที่จ่ายให้กับโหลด

เปิดและปิดตามลำดับ การควบคุมให้แต่ละอุปกรณ์เปิดหรือปิดในลำดับที่เหมาะสม เช่น การเปิด มอสเฟตก่อนที่จะเปิดไอจีบีที เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกระแสที่ไม่ต้องการในช่วงสลับ

การสังเกตและตรวจสอบ ใช้ระบบตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์เพื่อให้สามารถติดตามสถานะการทำงานได้ตลอดเวลา เพื่อตรวจสอบว่ามีการทำงานอย่างเหมาะสมและระบุปัญหาที่อาจเกิดขึ้น

ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น ความไม่สมดุลในการเปิด หากมอสเฟตและไอจีบีทีไม่เปิดหรือปิดในลำดับที่ถูกต้อง อาจเกิดกระแสที่ไหลออกมาไม่เท่ากัน ซึ่งอาจทำให้เกิดความร้อนสูงและทำให้เกิดความเสียหายได้ การเกิดกระแสย้อนกลับ อาจเกิดกระแสย้อนกลับเมื่อเปิดและปิดอุปกรณ์ที่ไม่ถูกต้อง ทำให้เกิดการรบกวนในวงจรและอาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ การควบคุมความร้อน หากไม่สามารถจัดการกับความร้อนได้ดี อุปกรณ์อาจร้อนเกินไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงและอาจทำให้เกิดอันตรายในการทำงาน การตรวจจับความผิดปกติ จำเป็นต้องมีระบบตรวจสอบเพื่อระบุว่ามีอุปกรณ์ใดที่ทำงานไม่ถูกต้อง เพื่อให้สามารถทำการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนได้ทันที

การป้องกันปัญหา การออกแบบวงจรอย่างรอบคอบ ควรให้ความสำคัญกับการออกแบบวงจรเพื่อลดความไม่สมดุล การใช้ตัวต้านทานสมดุล อาจมีการติดตั้งตัวต้านทานสมดุลที่ช่วยในการกระจายโหลดในแต่ละอุปกรณ์ให้เท่ากัน การตรวจสอบและการบำรุงรักษา การตรวจสอบอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ และการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมจะช่วยลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต และ การควบคุมที่เหมาะสมและการรักษาสมดุลในวงจรที่ใช้มอสเฟตและไอจีบีทีจะช่วยทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์

2.3.2 การต่อแบบอนุกรม (Emitter Open)

การต่อมอสเฟตร่วมกับไอจีบีทีในลักษณะอนุกรมมีข้อดีหลายประการที่สำคัญ โดยเฉพาะในการเพิ่มแรงดันและความสามารถในการจัดการกับโหลดสูง ดังนี้

การเพิ่มแรงดัน เมื่อมอสเฟตและไอจีบีทีถูกต่อในลักษณะอนุกรม แรงดันที่แต่ละอุปกรณ์รับจะรวมกัน ส่งผลให้สามารถเพิ่มแรงดันรวมของระบบได้ หากมีมอสเฟตหรือไอจีบีทีหลายตัวต่อกันในอนุกรม แรงดันจ่ายขาออกจึงสูงขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูง เช่น ระบบส่งไฟฟ้าทำให้สามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมที่มีแรงดันสูงได้อย่างปลอดภัย

ความสามารถในการจัดการกับโหลดสูง การต่อแบบอนุกรมช่วยให้ระบบสามารถจัดการกับโหลดที่ต้องการพลังงานมากได้ดีขึ้น โดยแต่ละอุปกรณ์จะช่วยกันจัดการกระแสและแรงดันที่ไหลผ่านโหลด ซึ่งทำให้สามารถขยายขีดความสามารถในการรองรับรองรับการทำงานในโหลดที่สูงขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ การต่อแบบอนุกรมช่วยให้การทำงานของมอสเฟตและไอจีบีทีสอดคล้องกัน เช่น ในกรณีที่โหลดมีความต้องการพลังงานสูง อุปกรณ์ในวงจรจะทำงานร่วมกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยที่ให้ออกแรงดันอย่างต่อเนื่อง

ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในสภาพโหลดสูง การต่อในลักษณะอนุกรมทำให้สามารถรักษาประสิทธิภาพในการทำงานได้ในช่วงโหลดสูง เนื่องจากระบบสามารถยังคงทำงานได้อย่างเสถียรแม้ในสภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลง

การเปลี่ยนแปลงโหลดได้ง่าย ด้วยการต่อแบบอนุกรม หากระบบต้องการเปลี่ยนแปลงในการรองรับโหลด สามารถเพิ่มเติมหรือเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ใหม่ โดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของส่วนประกอบอื่นๆ ซึ่งประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

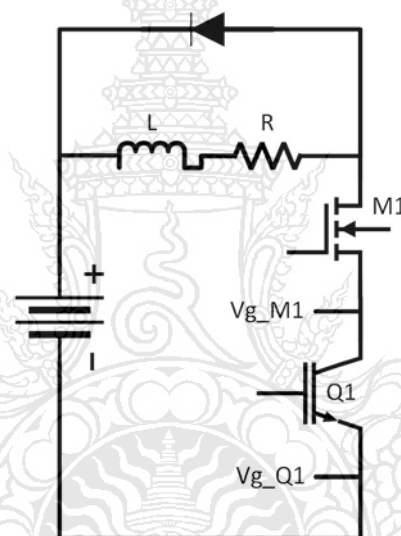
การต่อมอสเฟตและไอจีบีทีในลักษณะอนุกรมสร้างความสามารถในการจัดการกับแรงดันสูงและทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีความยืดหยุ่นและสามารถขยายขีดความสามารถตามความต้องการใช้งานได้ดี ทั้งนี้ จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานในแอปพลิเคชันที่ต้องการพลังงานที่สูงและการควบคุมที่เที่ยงตรง

วงจรที่แสดงในรูป 2.23 เป็นตัวอย่างการต่อแบบอนุกรมระหว่างมอสเฟตและไอจีบีที ซึ่งมีบทบาทสำคัญในระบบควบคุมพลังงานที่ต้องการแรงดันสูงและกระแสไหลที่มั่นคง โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

ในวงจรนี้ แหล่งจ่ายไฟ (V_d) จะช่วยจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่างๆ โดยที่มอสเฟต (M_1) จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่เปิดและปิดอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ไอจีบีที (Q_1) มีความสามารถในการจัดการแรงดันสูงได้ดี

การเปิดและปิดของมอสเฟตและไอจีบีที เมื่อสัญญาณควบคุม (V_{g_M1}) ถูกส่งไปยังมอสเฟต (M_1) ทำให้เปิด กระแสจะเริ่มไหลจากแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่โหลด (L และ R) ซึ่งโหลดจะมีทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานเพื่อลดการกระชากของกระแสในระบบ

เมื่อกระแสถูกควบคุมได้แล้ว สามารถเปิดไอจีบีที (Q_1) โดยใช้สัญญาณควบคุม (V_{g_Q1}) ซึ่งทำให้สามารถรักษาแรงดันที่สูงในวงจรได้อย่างต่อเนื่องด้วยการเพิ่มแรงดัน โดยการต่อแบบอนุกรมอนุญาตให้แรงดันที่เกิดจากมอสเฟตและไอจีบีทีรวมกันส่งถึงโหลดได้ เช่น หากมอสเฟตมีแรงดัน 30V และไอจีบีทีมีแรงดัน 50V จะแรงดันรวมที่ปล่อยออกมาเป็น 80V ซึ่งเหมาะสำหรับการขับเคลื่อนอุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันสูง และการจัดการกับโหลดสูง การต่ออย่างอนุกรมนี้ทำให้สามารถจัดการกระแสไหลผ่านวงจรที่สูงได้ กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ทั้งสองจะต้องเท่ากัน ซึ่งหมายความว่าสามารถขยายขีดความสามารถของวงจรเมื่อเปลี่ยนหรือเพิ่มโหลดได้



ภาพที่ 2.23 วงจรการทำงานแบบอนุกรมของมอสเฟตและไอจีบีที

การประยุกต์ใช้ ระบบควบคุมพลังงาน วงจรนี้มักใช้ในระบบควบคุมพลังงานที่ต้องการแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เช่น ในระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานลม มอเตอร์ไฟฟ้า ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ในอุตสาหกรรม เช่น มอเตอร์ที่ใช้ในงานในเครื่องจักรหรือรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งต้องการแรงดันสูงและความสามารถในการปรับความเร็วได้อย่างแม่นยำ ระบบไฟฟ้าแรงสูง การใช้งานในอุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันสูง เช่น เครื่องเชื่อมไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่ต้องการพลังงานมากๆ โดยสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การควบคุมไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรนี้สามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการการควบคุมที่รวดเร็วและแม่นยำเช่น ระบบสเตรียโอหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการพลังงาน

ข้อดีของการต่อแบบอนุกรม การเพิ่มแรงดัน สามารถทำให้ระบบมีแรงดันที่สูงพอที่จะรองรับการทำงานในสถานะที่ต้องการได้ ยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้ สะดวกต่อการขยายระบบหรือเปลี่ยนแปลงการทำงานเพียงแค่ปรับเปลี่ยนการควบคุม ให้ผลลัพธ์ที่เสถียร โดยสามารถรักษาแรงดันและกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงเวลาที่โหลดเปลี่ยนแปลง

วงจรนี้ยังมีการปรับตัวที่ดีในสถานะการทำงานที่เปลี่ยนแปลง เช่น การใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการใช้พลังงานสูงหรือโหลดที่มีความผันผวนสูง โดยการออกแบบและการควบคุมที่เหมาะสมจะช่วยให้ระบบยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในด้านต่างๆ เช่น การใช้งานที่หลากหลาย วงจรนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ ทั้งในพื้นที่อุตสาหกรรม และในอาคารที่ต้องการการควบคุมพลังงานที่ละเอียดและแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ ในงานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมพลังงานที่เป็นลักษณะขับเคลื่อน ระบบนี้สามารถให้ความน่าเชื่อถือได้สูง สาเหตุที่เกิดจากการที่อุปกรณ์สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ การบำรุงรักษาและการตรวจสอบ ควรคำนึงถึงการบำรุงรักษาและการตรวจสอบสภาพของอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้แน่ใจว่าทุกอุปกรณ์ทำงานได้อย่างเหมาะสม และไม่มีการเกิดความเสียหายจากการทำงานหนักเกินไป ควรมีการติดตั้งเซ็นเซอร์ต่างๆ เพื่อเฝ้าระวังอุณหภูมิและปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน

ในการควบคุมวงจรที่ใช้มอสเฟตและไอจีบีทีต่อร่วมกันแบบอนุกรม มีหลายวิธีการควบคุมที่จะช่วยให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงความท้าทายที่อาจเกิดขึ้น เช่น การจัดการความร้อน และอื่นๆ ดังนี้

การควบคุมสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) การควบคุมความกว้างพัลส์ (PWM) ถูกนำมาใช้เพื่อเปิดและปิดมอสเฟตและไอจีบีทีตามความต้องการของโหลด ช่วยให้การจัดการกระแสเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อสัญญาณ PWM ถูกปรับ จะสามารถควบคุมกำลังที่จ่ายให้กับโหลดได้

การตรวจสอบอุณหภูมิ ใช้เซ็นเซอร์ต่างๆ เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิของมอสเฟตและไอจีบีที โดยสามารถสร้างกลไกควบคุมเพื่อปิดอุปกรณ์หรือจำกัดกำลังเมื่ออุณหภูมิสูงเกินไป

การควบคุมการเปิดและปิดอย่างประสาน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาจากโหลดและแรงดัน ควรออกแบบการควบคุมที่ให้นับใจว่าการเปิด-ปิดของมอสเฟตและไอจีบีที เกิดขึ้นในลำดับที่ถูกต้อง เช่น เปิดมอสเฟตก่อนไอจีบีที เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกระแสวนกลับ

การควบคุมไฟฟารวม (Integrated Control) การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือ DSP (Digital Signal Processor) เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรอย่างรวมให้เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยลง และสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการ

การจัดการความร้อน ทั้งมอสเฟตและไอจีบีทีที่สามารถสร้างความร้อนสูงจากการทำงานเมื่อโหลดสูง ดังนั้นการใช้ระบบระบายความร้อน (Cooling System) เช่น พัดลม ระบายอากาศ หรือตัวระบายความร้อนจะมีความสำคัญ เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายจากความร้อน

การเกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ระบบไฟฟ้าที่มีสัญญาณ PWM อาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่สามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ในวงจรอื่น ๆ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบตัวกรองสัญญาณเพื่อลดผลกระทบ

ความไม่สมดุลในการเปิดและปิด หากสวิตช์ไม่ได้เปิดหรือปิดในลำดับที่ถูกต้อง อาจทำให้เกิดกระแสที่ไม่ต้องการหรือกระแสนอนกลับ ซึ่งอาจทำให้ระบบทำงานผิดปกติได้

การตรวจสอบอุปกรณ์ ต้องมีกระบวนการตรวจสอบสถานะการทำงานของอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ เพื่อระบุความผิดปกติก่อนที่จะเกิดความเสียหาย

ควรป้องกันปัญหาโดยออกแบบที่ช่วยให้การระบายความร้อนทำได้มีประสิทธิภาพ เช่น การใช้ฮีตซิงค์ ตรวจสอบอุปกรณ์ในระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความผิดปกติ ออกแบบวงจรที่เหมาะสม คำนึงถึงการเลือกใช้โครงสร้างที่สามารถลดการเกิดปัญหาต่างๆ และปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงาน และควบคุมที่เหมาะสมและการจัดการกับความท้าทายที่เกิดขึ้นในวงจรจะช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูงสุด

สรุป การต่อแบบอนุกรมระหว่างมอสเฟตและไอจีบีทีในวงจรนี้เป็นการผสมผสานที่มีประสิทธิภาพระหว่างการเปิดและปิดที่รวดเร็วของมอสเฟตและความสามารถในการจัดการแรงดันสูงจากไอจีบีที ส่งผลให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของโหลดได้ดีอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ การใช้งานในหลายด้านที่สัมพันธ์กับพลังงาน ทำให้วงจรนี้มีความสำคัญและเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมและการพัฒนาทางเทคโนโลยีพลังงานในอนาคต

บทที่ 3 การจำลองการทำงาน

บทนี้จะเน้นไปที่การทดลองด้วยโปรแกรมและชุดทดลอง เราจะมุ่งเน้นการทดลองวงจรที่ได้อธิบายไว้ในบทก่อนหน้านี้ การทดลองในบทนี้จะช่วยให้เราได้รับความเข้าใจที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นเกี่ยวกับประสิทธิภาพของมอสเฟตและไอจีบีที การใช้โปรแกรมจำลองจะช่วยให้เราสามารถดำเนินการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยโดยไม่ต้องเสี่ยงกับการเกิดอันตรายหรือความเสียหายต่ออุปกรณ์จริง

การนำเสนอเนื้อหาแบ่งเป็น 2 หัวข้อย่อย ได้แก่ การทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่การจำลองการทำงานของวงจรผ่านโปรแกรม MATLAB และการสร้างชุดทดลอง โดยใช้ฮาร์ดแวร์เพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบที่ได้ออกแบบไว้

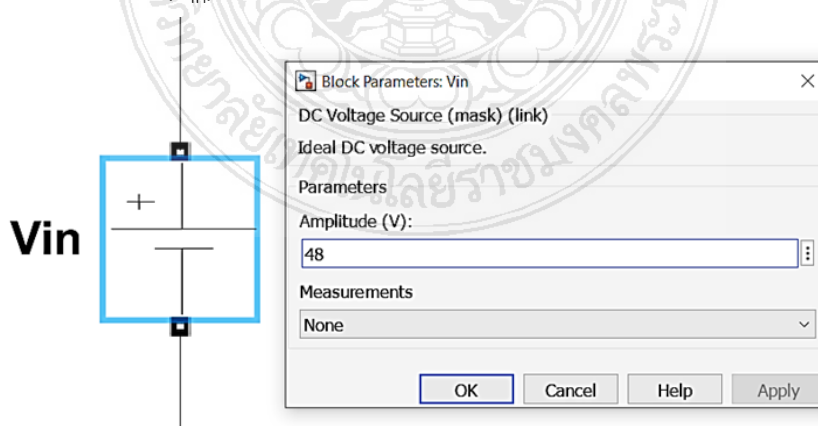
3.1 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการจำลองด้วยโปรแกรมนี้ จะใช้ฟลอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรทดสอบ โดยการจำลองการทำงานของวงจรนี้ผ่านโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีข้อดีมากมายในการวิเคราะห์และจำลองระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่ซับซ้อน และการสร้างกราฟเพื่อแสดงผลอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ฟลอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่เหมาะสมในการวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์เพียงตัวเดียว ซึ่งทำให้เราได้มีโอกาสเน้นการศึกษาประสิทธิภาพและพฤติกรรมของสวิตช์ มอสเฟตและไอจีบีที ได้อย่างละเอียด การใช้สวิตช์เพียงตัวเดียวในวงจรช่วยลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ และทำให้สามารถเข้าใจกลไกการควบคุมและตอบสนองต่อโหลดได้ดียิ่งขึ้น

การออกแบบฟลอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ใน MATLAB เป็นขั้นตอนที่สำคัญ สำหรับการศึกษาทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานจริง โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้

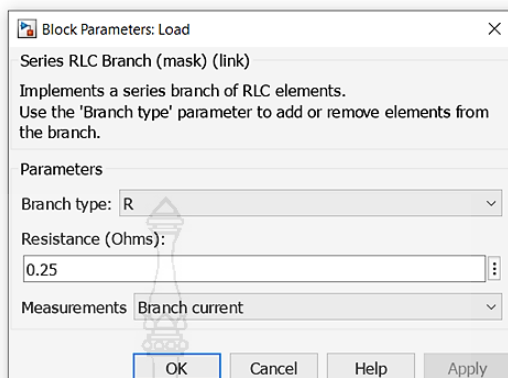
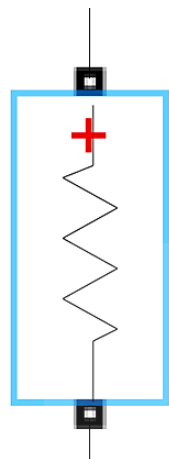
3.1.1 การกำหนดพารามิเตอร์ของระบบ

ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{in}) = 48 โวลต์



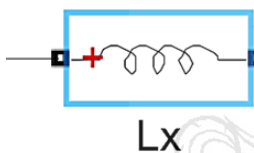
ภาพที่ 3.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าใน MATLAB

ค่าของโหลด (R) = 0.25 โอห์ม

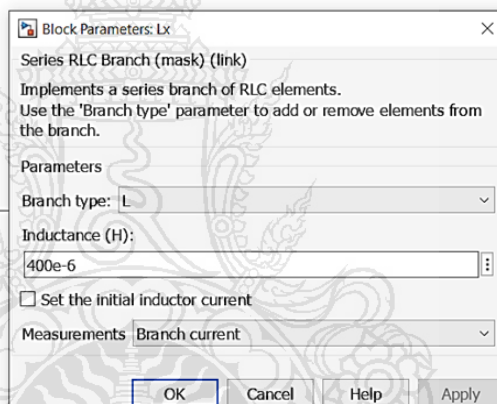


ภาพที่ 3.2 ค่าโหลดใน MATLAB

ขดลวด (L) = 400 ไมโครเฮนรี่

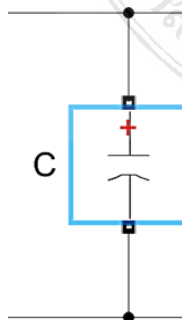


Lx

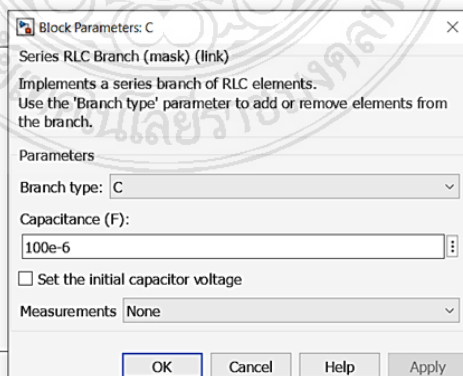


ภาพที่ 3.3 ค่าขดลวดใน MATLAB

ตัวเก็บประจุ (C) = 100 ไมโครฟารัด

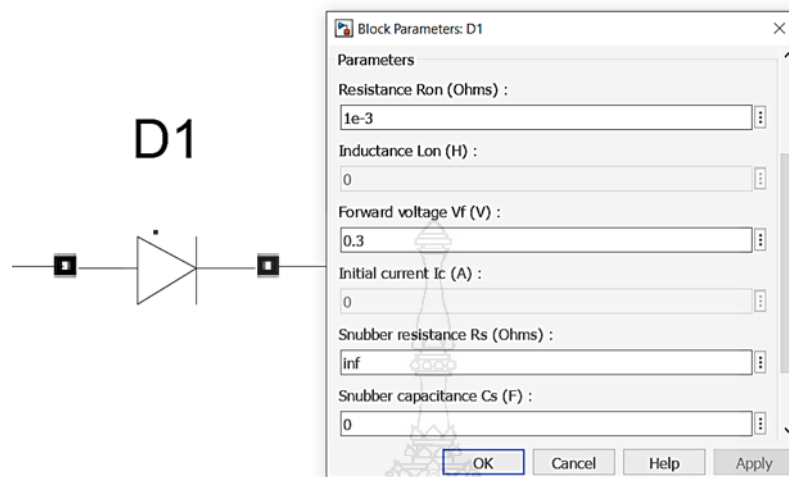


C



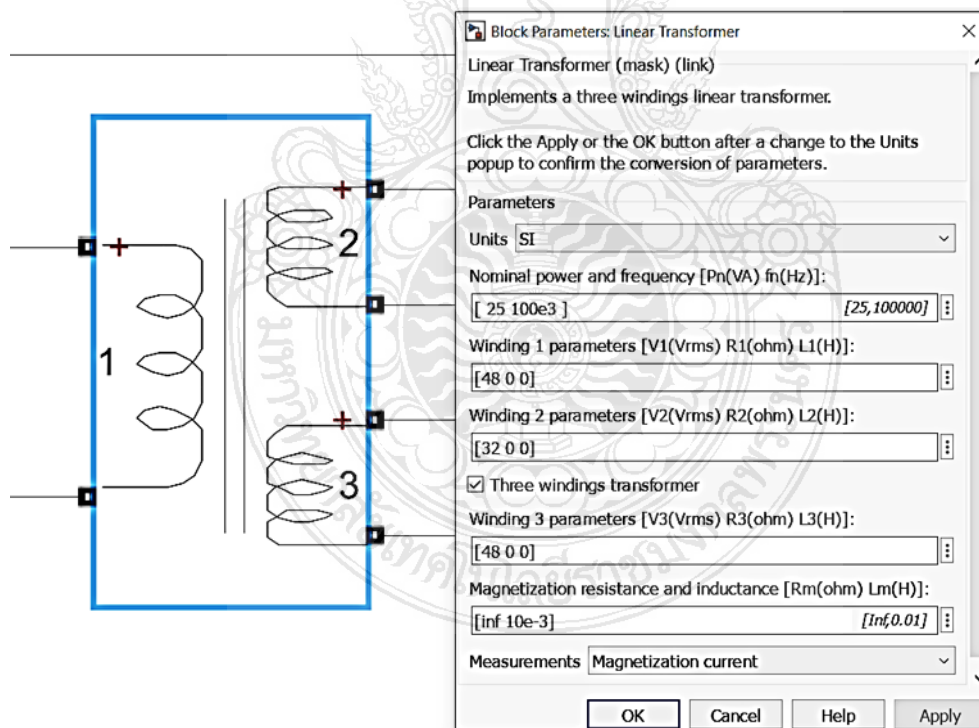
ภาพที่ 3.4 ค่าตัวเก็บประจุใน MATLAB

ไดโอด Forward voltage (V_f) = 0.3 โวลต์



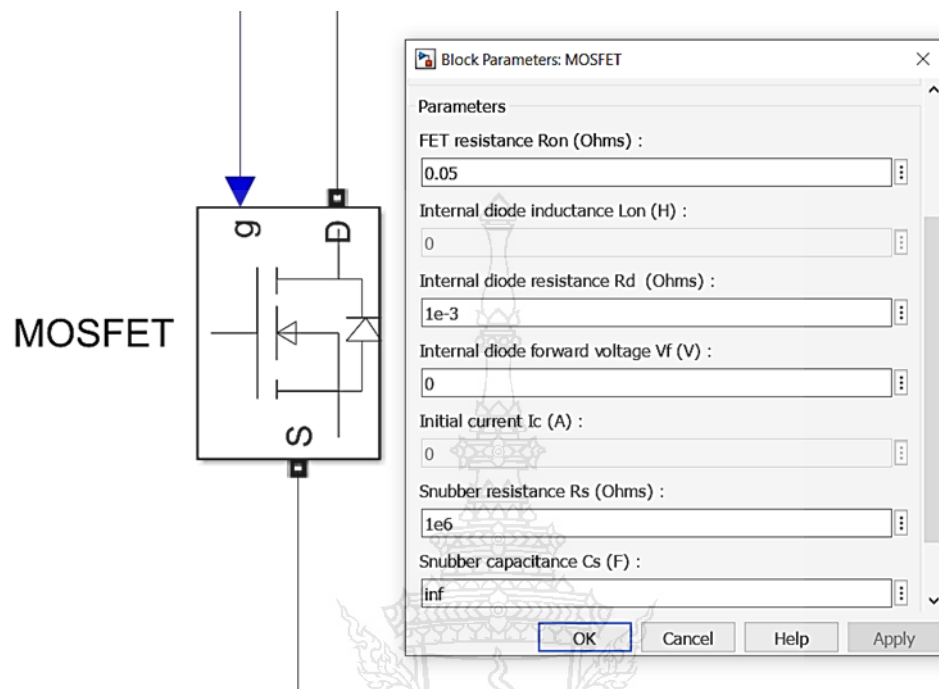
ภาพที่ 3.5 ค่าไดโอดใน MATLAB

หม้อแปลง กำลังไฟฟ้า = 25 VA, ที่ความถี่ 100 kHz, ขดลวด1 = 48 โวลต์, ขดลวด2 = 32 โวลต์, ขดลวด3 = 48 โวลต์



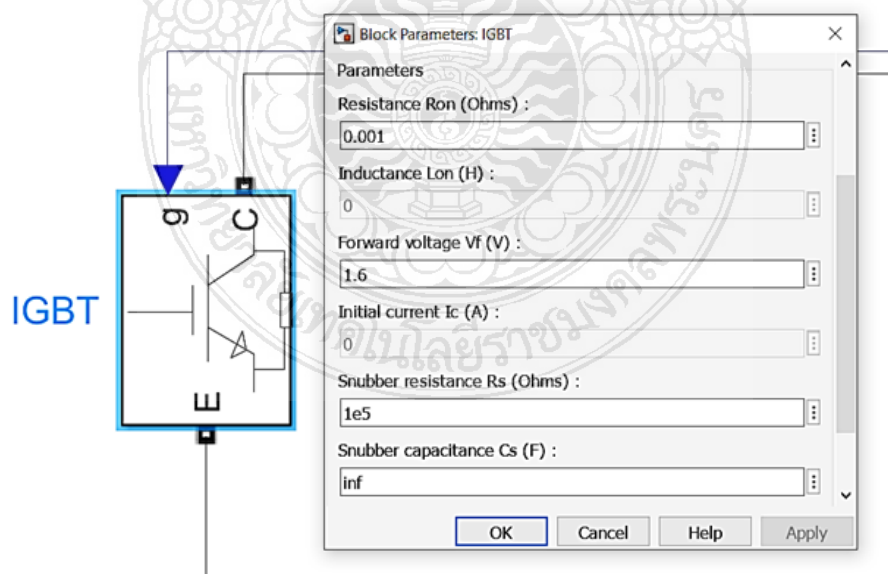
ภาพที่ 3.6 ค่าหม้อแปลงใน MATLAB

มอสเฟต ค่าความต้านทานขณะนำกระแส (R_{on}) = 0.05 โอห์ม



ภาพที่ 3.7 ค่ามอสเฟตใน MATLAB

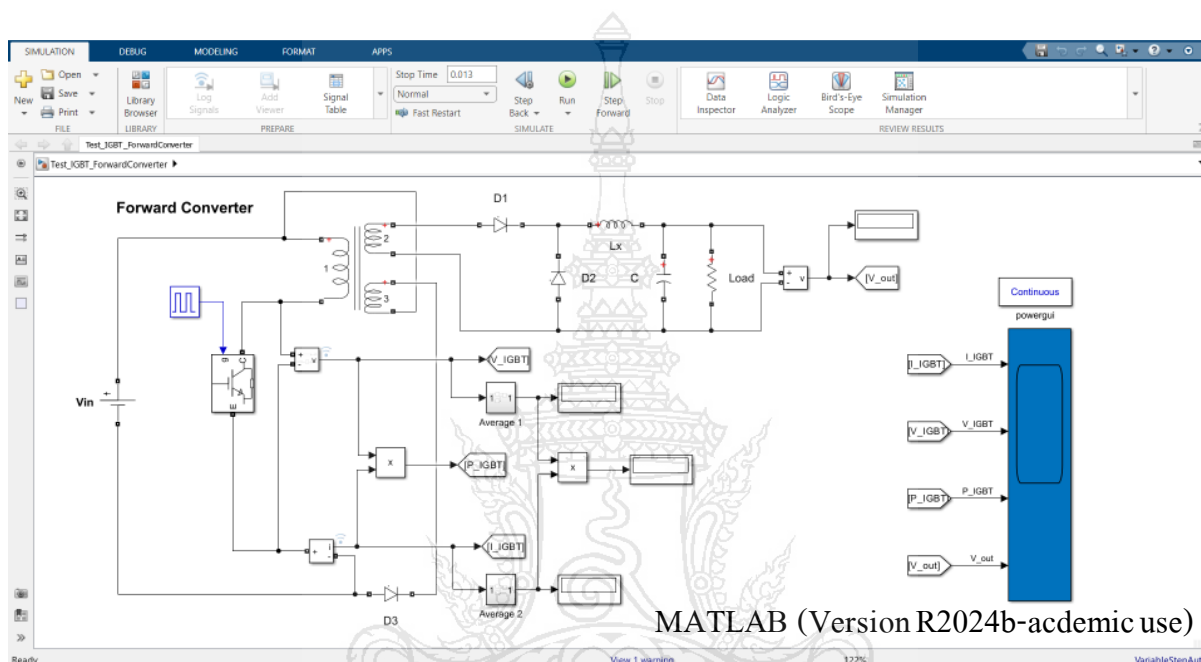
ไอจีบี Forward voltage (V_f) = 1.6 โวลต์



ภาพที่ 3.8 ค่าไอจีบีทีใน MATLAB

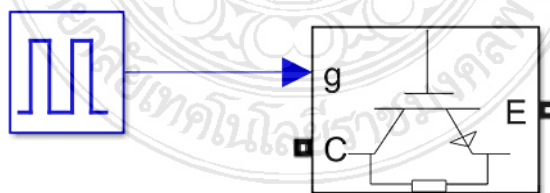
3.1.2 การสร้างโมเดลใน MATLAB Simulink

วงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ในภาพที่นำเสนอต่อไปนี้ถูกสร้างเป็นโมเดลจำลองในโปรแกรม MATLAB Simulink โดยการเชื่อมต่อองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรเข้าด้วยกัน เพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้ในการวิเคราะห์พลังงานในระบบไฟฟ้า การจัดการกับอุปกรณ์ต่างๆ จะช่วยให้สามารถศึกษาพฤติกรรมการทำงานและประสิทธิภาพของวงจรได้อย่างละเอียด



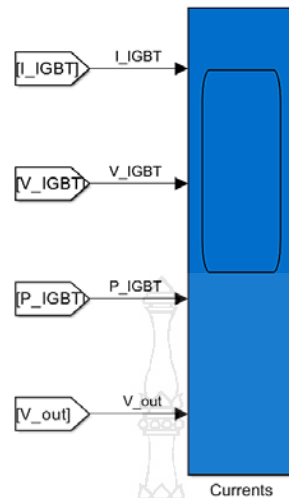
ภาพที่ 3.9 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ใน MATLAB Simulink

เชื่อมต่อส่วนประกอบต่าง ๆ ตามลำดับในการทำงานของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ และกำหนดสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟตและไอจีบีที โดยต่อเข้ากับขาเกต



ภาพที่ 3.10 สัญญาณ PWM ใน MATLAB

ตั้งค่าตัวเก็บข้อมูล (scope) เพื่อแสดงการตอบสนองของวงจรในรูปแบบคลื่นสัญญาณ ได้แก่ กระแสที่สวิตช์ แรงดันที่สวิตช์ กำลังสูญเสียที่สวิตช์ และแรงดันที่โหลด



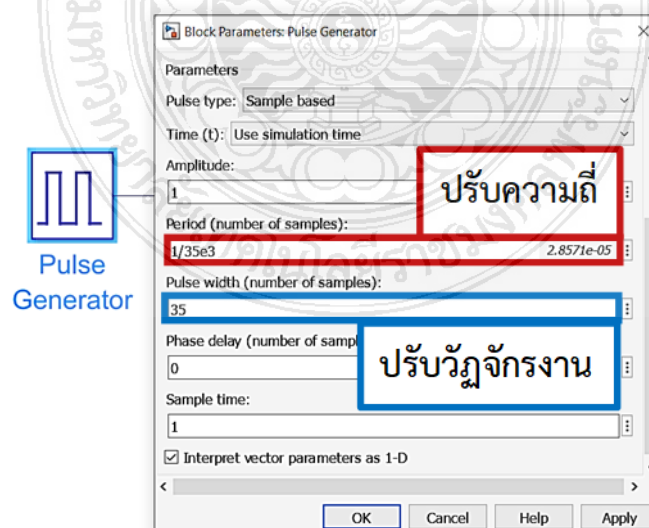
ภาพที่ 3.11 ตัวเก็บข้อมูลใน MATLAB

3.1.3 การจำลอง

ทำการจำลองโดยนำสวิตช์ ได้แก่ มอสเฟต ไอจีบีที สวิตช์ผสมแบบขนานและสวิตช์ผสมแบบอนุกรมมาใช้ในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ โดยปรับความถี่สวิตช์ (f_s) หรือวัฏจักรงาน (D) เพื่อหา กำลังสูญเสียที่สวิตช์ และแรงดันที่โหลด

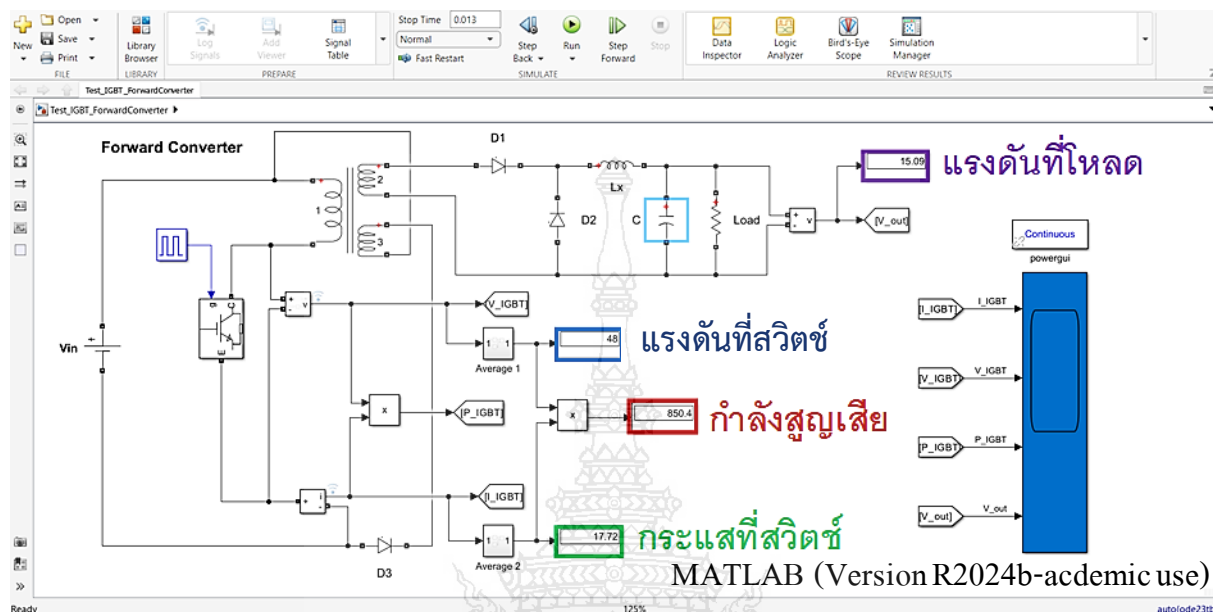
กรณีปรับความถี่สวิตช์ กำหนดให้วัฏจักรงานคงที่ 0.5 มีแรงดันขาเข้า 48 โวลต์ และทำการปรับความถี่สวิตช์ขั้นละ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ ตั้งแต่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 50 กิโลเฮิร์ตซ์

กรณีปรับวัฏจักรงาน กำหนดให้ความถี่สวิตช์คงที่ 35 กิโลเฮิร์ตซ์ มีแรงดันขาเข้า 48 โวลต์ และทำการปรับวัฏจักรงานขั้นละ 0.1 ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9



ภาพที่ 3.12 ค่า PWM ใน MATLAB

เริ่มการทำงาน (Run) การจำลองเพื่อตรวจสอบการทำงานของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์และตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้



ภาพที่ 3.13 โมเดล MATLAB Simulink

3.1.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง เช่น กระแสที่สวิตช์ แรงดันที่สวิตช์ กำลังสูญเสียที่สวิตช์ และแรงดันที่โหลด

3.1.5 สร้างรายงานการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์

การออกแบบฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ใน MATLAB ช่วยให้สามารถศึกษาการทำงานของวงจรได้อย่างละเอียดโดยไม่ต้องใช้ฮาร์ดแวร์จริง ลดความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดพลาดในการทดลองจริง นอกจากนี้ MATLAB ยังมีเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์ผลลัพธ์อย่างแม่นยำ เช่น การสร้างรูปคลื่นสัญญาณและการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ การจำลองยังช่วยให้การปรับปรุงและแก้ไขวงจรทำได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาโครงการทางวิศวกรรมไฟฟ้า

3.2 การทดลองด้วยชุดทดลอง

การสร้างชุดทดลองจะนำไปสู่การได้รับผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งสามารถนำมาทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎีได้อย่างมีประสิทธิภาพ การจัดทำชุดทดลองดังกล่าวเปิดโอกาสให้สามารถวัดค่าและตรวจสอบพฤติกรรมของอุปกรณ์ภายใต้สภาวะการทำงานจริง ซึ่งจะช่วยในการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของวงจรได้ดียิ่งขึ้นกว่าการจำลองเพียงอย่างเดียว

3.2.1 อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{in}) = 48 โวลต์



ภาพที่ 3.14 แหล่งจ่ายในชุดทดลอง

ค่าของโหลด (R) = 0.25 โอห์ม

ขดลวด (L) = 400 ไมโครเฮนรี่

ตัวเก็บประจุ (C) = 100 ไมโครฟารัด

ไดโอด Forward voltage (V_f) = 0.3 โวลต์

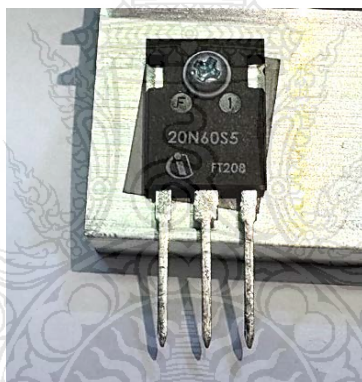


ภาพที่ 3.15 แผงวงจรในชุดทดลอง

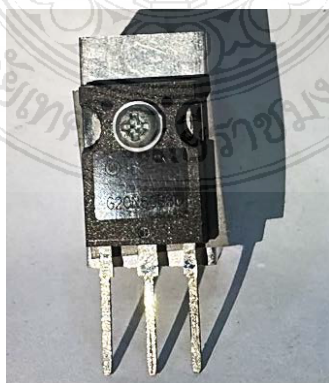
หม้อแปลง กำลังไฟฟ้า = 25 VA, ที่ความถี่ 100 kHz, ขดลวด1 = 48 โวลต์,
ขดลวด2 = 32 โวลต์, ขดลวด3 = 48 โวลต์



ภาพที่ 3.16 หม้อแปลงในชุดทดลอง
มอสเฟต ค่าความต้านทานขณะนำกระแส (R_{on}) = 0.19 โอห์ม



ภาพที่ 3.17 มอสเฟตในชุดทดลอง
ไอจีบี Forward voltage (V_f) = 1.8 โวลต์



ภาพที่ 3.18 ไอจีบีทีในชุดทดลอง

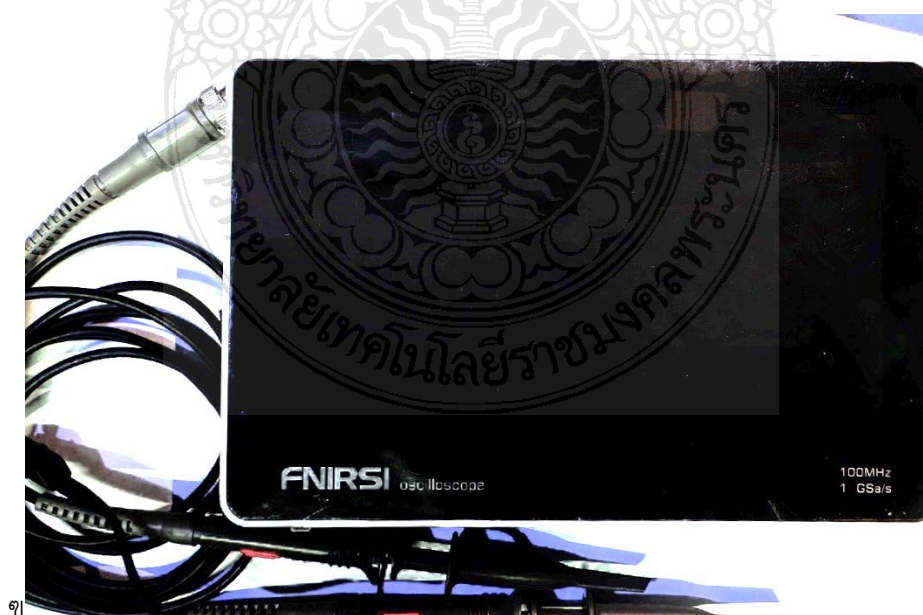
3.1.2 การสร้างชุดทดลอง

ดำเนินการเชื่อมต่อองค์ประกอบต่างๆ ของวงจร โดยยึดตามแผนผังวงจรที่ออกแบบไว้ เพื่อให้แน่ใจว่าการทำงานของระบบจะมีความแม่นยำและสอดคล้องกับทฤษฎีที่ศึกษามา ขั้นตอนนี้ ประกอบด้วยการติดตั้งอุปกรณ์หลักและกำหนดสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ และไอจีบีที ตามข้อกำหนดทางไฟฟ้าและการวิเคราะห์ที่จะดำเนินการ



ภาพที่ 3.19 PWM ในชุดทดลอง

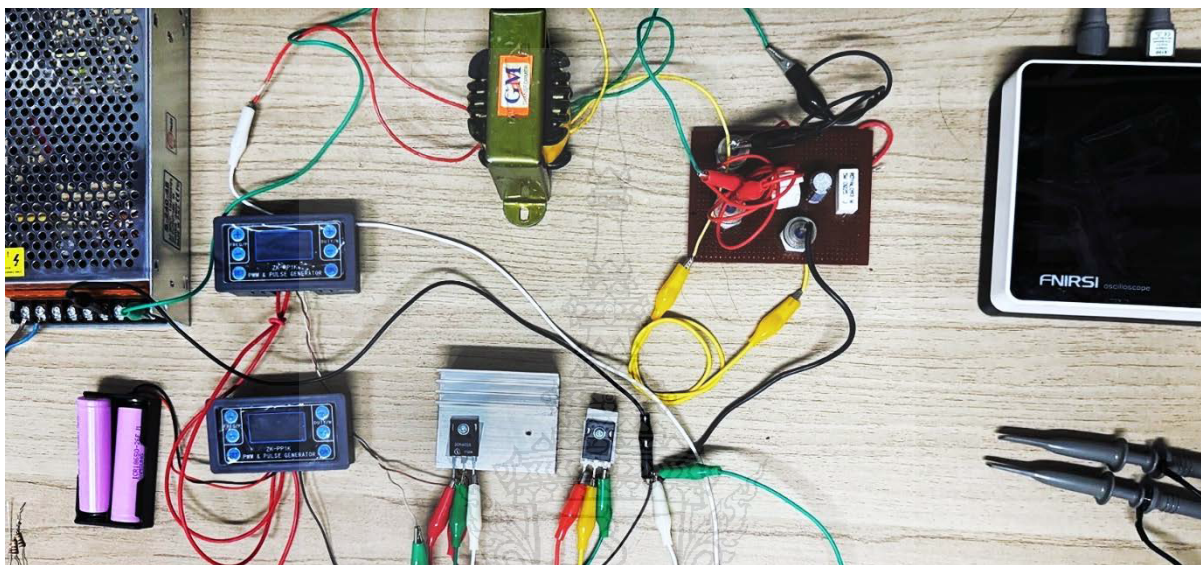
นำออสซิลโลสโคปมาวัด เพื่อแสดงการตอบสนองของวงจรในรูปแบบคลื่นสัญญาณ ได้แก่ แรงดันที่สวิตช์ และแรงดันที่โหลด



ภาพที่ 3.20 ออสซิลโลสโคปในชุดทดลอง

3.1.3 การทดลอง

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการจำลองก่อนหน้า โดยนำสวิตช์ ได้แก่ มอสเฟต ไอจีบีที สวิตช์ ผสมแบบขนานและสวิตช์ผสมแบบอนุกรมมาใช้ในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ มาปรับความถี่สวิตช์ (f_s) หรือวัฏจักรงาน (D) เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียที่สวิตช์ และแรงดันที่โหลด และตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้



ภาพที่ 3.21 ชุดทดลองฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

3.1.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง เช่น กระแสที่สวิตช์ แรงดันที่สวิตช์ กำลังสูญเสียที่สวิตช์ และแรงดันที่โหลด

3.1.5 สร้างรายงานการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์

การสร้างชุดทดลองวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์มีข้อดีหลายประการที่สำคัญ โดยชุดทดลองช่วยให้สามารถตรวจสอบและยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นการประเมินความแม่นยำและน่าเชื่อถือของโมเดลในการจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การทดลองจริงยังเปิดโอกาสในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวงจรภายใต้สภาวะการทำงานจริงที่อาจไม่สามารถจำลองได้ทั้งหมด รวมถึงการเก็บข้อมูลที่แท้จริง เช่น แรงดันไฟฟ้าและกระแส ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่คาดการณ์จากการจำลองได้ การสร้างชุดทดลองยังช่วยให้สามารถปรับแต่งและปรับปรุงวงจรได้ง่ายขึ้น และการเรียนรู้ที่เกิดจากการสังเกตและวิเคราะห์กลไกการทำงานในขณะทดลองจะช่วยให้เข้าใจการตอบสนองต่อโหลดและการควบคุมของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ได้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 4 ผลการทดลอง

ผลของการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และชุดทดลอง เมื่อนำไข่มอสเฟต ไอจีบีที สวิตช์ผสม แบบขนานและสวิตช์ผสมแบบอนุกรมมาใช้ในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียสวิตช์ และ แรงดันที่โหลด โดยกรณีปรับความถี่สวิตช์ กำหนดให้วัฏจักรงานคงที่ 0.5 มีแรงดันขาเข้า 48 โวลต์ และ ทำการปรับความถี่สวิตช์ขึ้นละ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ ตั้งแต่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 50 กิโลเฮิร์ตซ์ หรือกรณีปรับวัฏจักรงาน กำหนดให้ความถี่สวิตช์คงที่ 35 กิโลเฮิร์ตซ์ มีแรงดันขาเข้า 48 โวลต์ และทำการปรับวัฏจักรงานขึ้นละ 0.1 ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9

4.1 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.1.1 มอสเฟต

กรณีปรับความถี่สวิตช์ จากข้อมูลในตาราง 4.1 แสดงให้เห็นว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์คงที่ที่ 48 โวลต์ กระแสสวิตช์มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยลดลงเล็กน้อยเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น กำลังสูญเสียที่ สวิตช์ลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น และแรงดันที่โหลดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ ความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 การปรับความถี่สวิตช์ของมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB

f_s (kHz)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
5	48	48	17.76	852.4	15.03
10	48	48	17.76	852.4	15.03
15	48	48	17.74	851.4	15.07
20	48	48	17.73	851	15.08
25	48	48	17.72	850.7	15.08
30	48	48	17.72	850.5	15.09
35	48	48	17.72	850.4	15.09
40	48	48	17.71	850.3	15.09
45	48	48	17.71	850.2	15.09
50	48	48	17.71	850.1	15.09

กรณีปรับวัฏจักรงาน จากข้อมูลในตาราง 4.2 แสดงให้เห็นว่าแรงดันสวิตช์ลดลงเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น กระแสสวิตช์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของวัฏจักรงาน กำลังสูญเสียที่สวิตช์เพิ่มขึ้น

อย่างมีนัยสำคัญตามวัฏจักรงาน แต่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยที่วัฏจักรงานสูง และแรงดันที่โหลดเพิ่มขึ้นตามวัฏจักรงาน

ตารางที่ 4.2 การปรับวัฏจักรงานของมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB

D (%)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
10	48	48	0.673	32.3	2.859
20	48	48	2.809	134.9	5.963
30	48	48	6.376	306.1	9.016
40	48	48	11.34	544.4	12.02
50	48	48	17.68	848.4	14.97
60	48	39.94	28.42	1135	17.7
70	48	30.98	41.82	1296	20.3
80	48	22.14	57.5	1273	22.79
90	48	13.4	75.42	1011	25.18

4.1.2 ไอจีบีที

กรณีปรับความถี่สวิตช์ จากข้อมูลในตาราง 4.3 แสดงให้เห็นว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์ยังคงที่ 48 โวลต์ กระแสสวิตช์ลดลงเล็กน้อยเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น กำลังสูญเสียที่สวิตช์ลดลงเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น และแรงดันที่โหลดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 การปรับความถี่สวิตช์ของไอจีบีทีโดยใช้โปรแกรม MATLAB

f_s (kHz)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
5	48	48	17.78	853.4	14.72
10	48	48	17.72	850.4	14.91
15	48	48	17.7	849.5	14.95
20	48	48	17.69	849	14.96
25	48	48	17.68	848.7	14.97
30	48	48	17.68	848.6	14.97
35	48	48	17.68	848.4	14.97
40	48	48	17.67	848.3	14.97
45	48	48	17.67	848.3	14.97
50	48	48	17.67	848.2	14.97

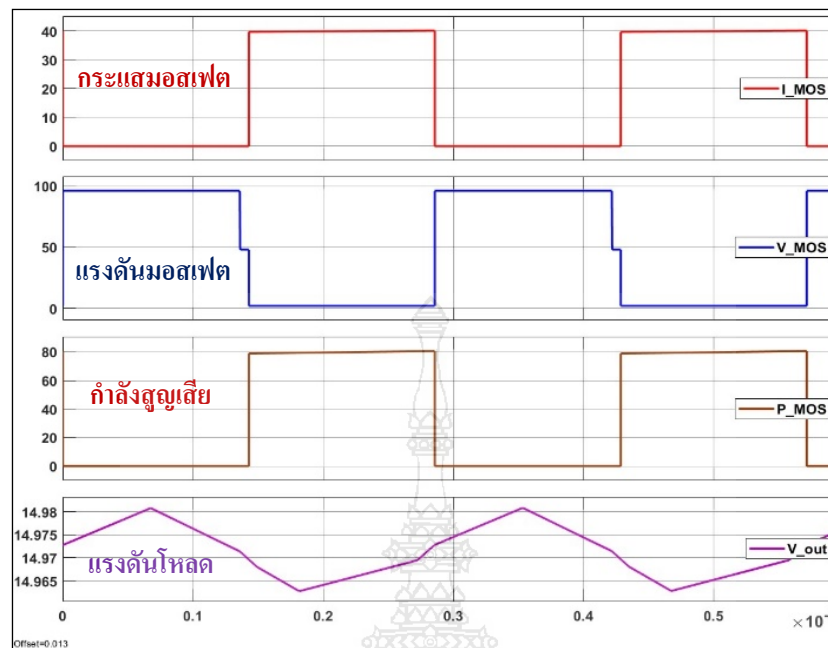
กรณีปรับวัฏจักรงาน จากข้อมูลในตาราง 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น แรงดันตกคร่อม สวิตช์จะลดลง กระแสสวิตช์จะเพิ่มขึ้น กำลังสูญเสียที่สวิตช์จะเพิ่มขึ้นแต่มีแนวโน้มชะลอตัวหรือลดลงเล็กน้อย ในช่วงวัฏจักรงานสูง และแรงดันที่โหลดจะเพิ่มขึ้นตามวัฏจักรงาน

ตารางที่ 4.4 การปรับวัฏจักรงานของไอจีบีทีโดยใช้โปรแกรม MATLAB

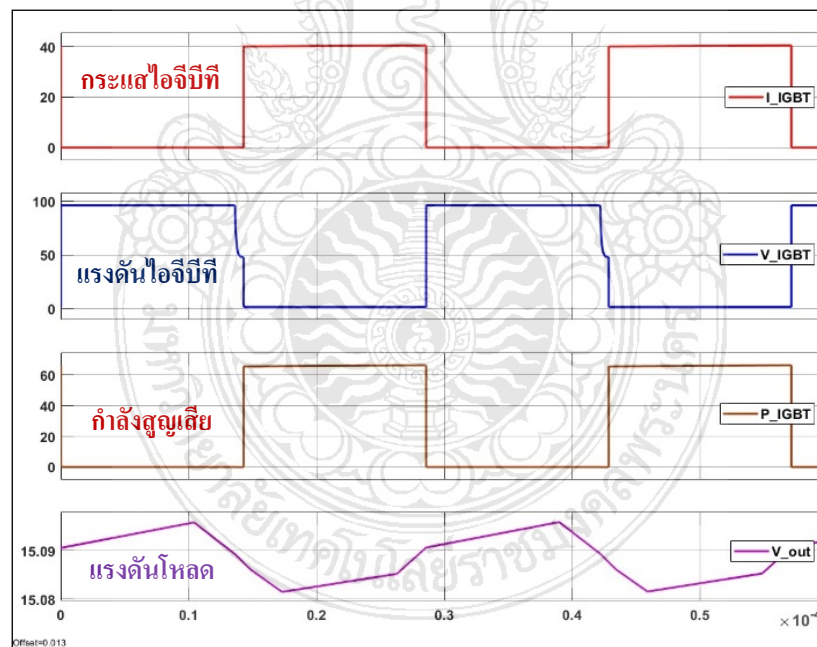
D (%)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
10	48	48	0.6536	31.37	2.777
20	48	48	2.752	132.1	5.854
30	48	48	6.296	302.2	8.932
40	48	48	11.28	541.6	12.01
50	48	48	17.72	850.4	15.09
60	48	39.51	28.89	1142	18.16
70	48	30.06	43.05	1294	21.23
80	48	20.6	59.87	1234	24.3
90	48	11.15	79.36	885	27.36

4.1.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบเมื่อใช้มอสเฟตหรือไอจีบีทีเป็นสวิตช์

วิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณของมอสเฟตและไอจีบีทีจากรูปคลื่นสัญญาณในภาพที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.2 ทั้งขณะใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์ สังเกตว่าช่วงเริ่มนำกระแส ช่วงนำกระแส และ ช่วงหยุดนำกระแสมีลักษณะใกล้เคียงกัน จึงทำให้กำลังสูญเสียเมื่อใช้สวิตช์ทั้งสองชนิดมีความใกล้เคียงกันด้วย แต่แรงดันที่โหลดมีความต่างกันเล็กน้อย จึงถือว่าวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์นั้น จะใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์ก็สามารถทำงานได้ไม่ต่างกันมาก

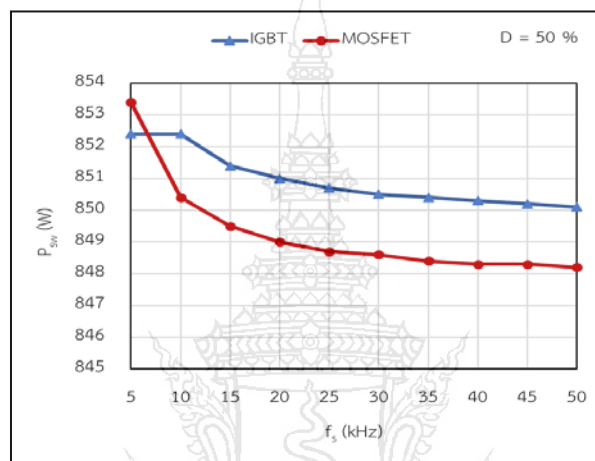


ภาพที่ 4.1 รูปคลื่นสัญญาณมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB

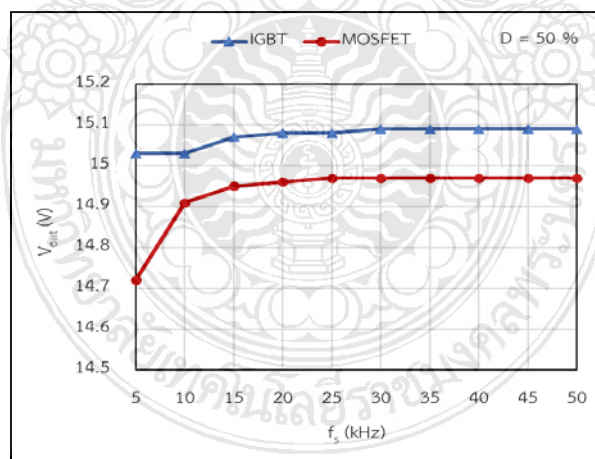


ภาพที่ 4.2 รูปคลื่นสัญญาณไจบีทีโดยใช้โปรแกรม MATLAB

เมื่อทำการปรับความถี่ ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.3 พบว่าที่ความถี่สวิตช์ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์ กำลังสูญเสียจะต่ำกว่ามอสเฟต และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น กำลังสูญเสียเมื่อใช้ ไอจีบีทีเป็นสวิตช์จะมีแนวโน้มสูงกว่าเมื่อใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์เล็กน้อย ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.4 พบว่าแรงดันที่โหลดเมื่อใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์มีแนวโน้มสูงกว่ามอสเฟตเล็กน้อย และสังเกตได้ว่าความถี่ สวิตช์จะแปรผกผันกับกำลังสูญเสีย แต่แรงดันที่โหลดจะค่อนข้างคงที่เมื่อความถี่สวิตช์มีค่าเกิน 20 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป



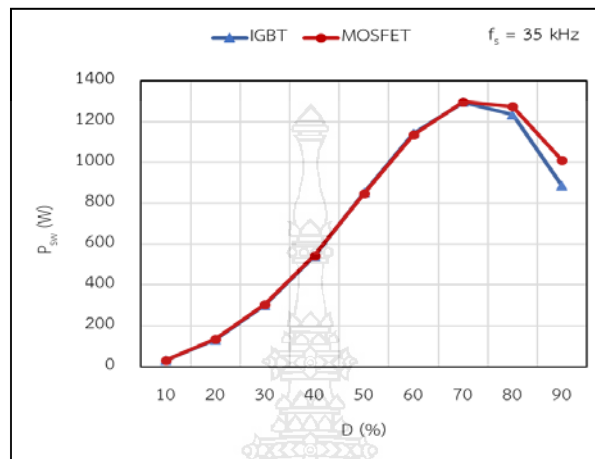
ภาพที่ 4.3 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB (D คงที่)



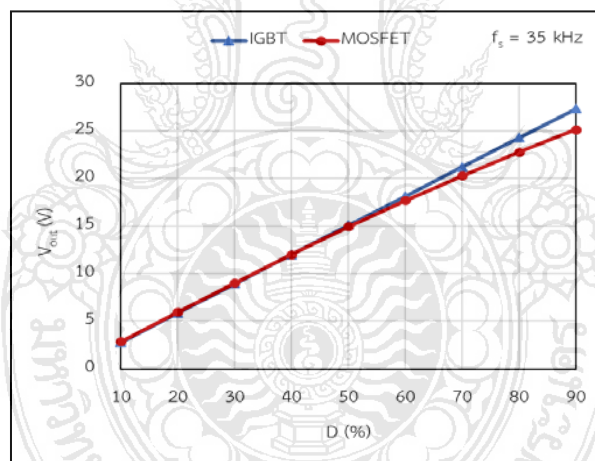
ภาพที่ 4.4 แรงดันโหลดกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB (D คงที่)

เมื่อปรับวัฏจักรงาน ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.5 พบว่าที่วัฏจักรงาน 0.1 ถึง 0.7 กำลังสูญเสียเมื่อ ใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์จะมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อวัฏจักรงานมากกว่า 0.7 กำลัง สูญเสียกลับมีแนวโน้มลดลง และเมื่อใช้มอสเฟตจะมีกำลังสูญเสียสูงกว่าไอจีบีทีเล็กน้อย จากผลการจำลองใน

กราฟภาพที่ 4.6 พบว่าที่วัฏจักรงาน 0.1 ถึง 0.5 แรงดันที่โหลดเมื่อใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์จะใกล้เคียงกันโดยมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อวัฏจักรงานมากกว่า 0.6 เมื่อใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์จะได้แรงดันโหลดสูงกว่าเมื่อใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ และวัฏจักรงานจะแปรผันตรงกับแรงดันโหลดเสมอ



ภาพที่ 4.5 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB (f_s คงที่)



ภาพที่ 4.6 แรงดันโหลดกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยใช้โปรแกรม MATLAB (f_s คงที่)

จากการทดลอง กล่าวได้ว่ามอสเฟตและไอจีบีทีมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันในด้านการควบคุมกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่รองรับ ทำให้สามารถนำมาใช้ร่วมกันเป็นสวิตช์ผสมได้ทั้งในลักษณะการต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน การเลือกใช้สวิตช์ทั้งสองประเภทนี้ในการออกแบบวงจรพอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์จะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นในการทำงาน ตอบสนองต่อข้อกำหนดที่หลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถจัดการกับแรงดันสูงและคุณสมบัติการเปิด-ปิดได้อย่างเหมาะสม

4.1.4 สวิตช์ผสมแบบขนาน

กรณีปรับความถี่สวิตช์ จากข้อมูลในตาราง 4.5 แสดงให้เห็นว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์คงที่ประมาณ 48 โวลต์ และกระแสสวิตช์คงที่ประมาณ 17.77-17.88 แอมแปร์ กำลังสูญเสียที่สวิตช์ลดลงเล็กน้อยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แรงดันที่โหลดคงที่ประมาณ 15.1 โวลต์ และการเปลี่ยนแปลงความถี่สวิตช์ไม่ส่งผลต่อค่าที่ได้

ตารางที่ 4.5 การปรับความถี่สวิตช์ของสวิตช์ผสมแบบขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB

f_s (kHz)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
5	48	48	17.88	858.4	14.85
10	48	48	17.82	855.3	15.04
15	48	48	17.8	854.3	15.08
20	48	48	17.79	853.9	15.09
25	48	48	17.78	853.6	15.1
30	48	48	17.78	853.4	15.1
35	48	48	17.78	853.3	15.1
40	48	48	17.77	853.2	15.1
45	48	48	17.77	853.1	15.1
50	48	48	17.77	853	15.1

กรณีปรับวัฏจักรงาน จากข้อมูลในตาราง 4.6 แสดงให้เห็นว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์ลดลงเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของการกระจายแรงดัน ขณะที่กระแสสวิตช์และกระแสโหลดเพิ่มขึ้นตามวัฏจักรงาน กำลังสูญเสียที่สวิตช์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวัฏจักรงานต่ำ แต่ลดลงเล็กน้อยในช่วงวัฏจักรงานสูง ซึ่งอาจเกิดจากจุดประสิทธิภาพสูงสุดและการสูญเสียในส่วนประกอบอื่นๆ สุดท้าย แรงดันขาออกมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับวัฏจักรงาน

ตารางที่ 4.6 การปรับวัฏจักรงานของสวิตช์ผสมแบบขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB

D (%)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
10	48	48	0.6735	32.33	2.858
20	48	48	2.81	134.9	5.963
30	48	48	6.377	306.1	9.016
40	48	48	11.34	544.5	12.02
50	48	48	17.78	853.3	15.1
60	48	39.45	29	1144	18.17
70	48	29.99	43.17	1295	21.25
80	48	20.54	60.01	1233	24.31
90	48	11.08	79.52	881.3	27.38

4.1.5 สวิตช์ผสมแบบอนุกรม

การปรับความถี่สวิตช์ จากข้อมูลในตาราง 4.7 แสดงให้เห็นว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์คงที่ที่ 48 โวลต์ กระแสสวิตช์มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 17.06-17.16 แอมแปร์ กำลังสูญเสียที่สวิตช์ลดลงเล็กน้อยเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น และแรงดันที่โหลดคงที่ที่ประมาณ 14.45 โวลต์

ตารางที่ 4.7 การปรับความถี่สวิตช์ของสวิตช์ผสมแบบอนุกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB

f_s (kHz)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
5	48	48	17.16	823.8	14.2
10	48	48	17.1	820.9	14.39
15	48	48	17.08	820	14.43
20	48	48	17.07	819.6	14.44
25	48	48	17.07	819.3	14.45
30	48	48	17.07	819.1	14.45
35	48	48	17.06	819	14.45
40	48	48	17.06	818.9	14.45
45	48	48	17.06	818.8	14.45
50	48	48	17.06	818.8	14.45

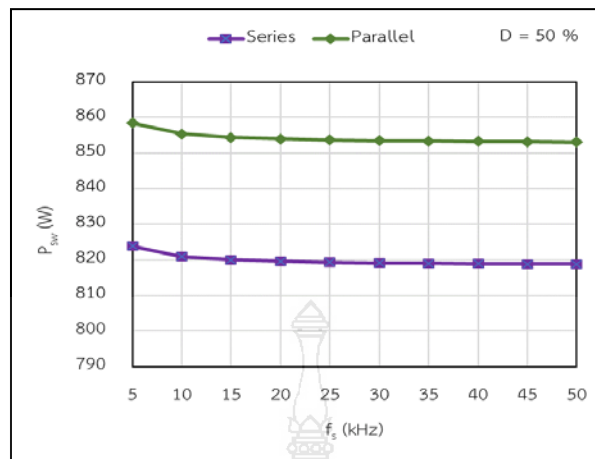
กรณีปรับวัฏจักรงาน จากข้อมูลในตารางแสดง 4.8 แสดงให้เห็นว่าแรงดันที่สวิตช์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของวัฏจักรงาน กระแสสวิตช์เพิ่มขึ้นตามวัฏจักรงาน กำลังสูญเสียที่สวิตช์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ก่อนลดลงเล็กน้อยที่วัฏจักรงานสูง ซึ่งอาจเกิดจากจุดประสิทธิภาพสูงสุดหรือการสูญเสียในส่วนประกอบอื่นๆ แรงดันที่โหลดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับวัฏจักรงาน

ตารางที่ 4.8 การปรับวัฏจักรงานของสวิตช์ผสมแบบอนุกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB

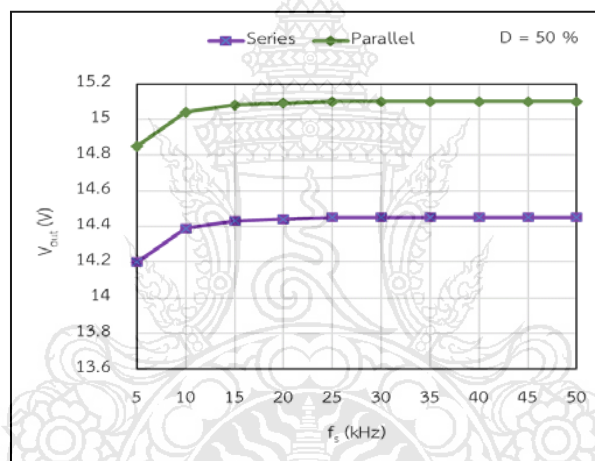
D (%)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
10	48	48	0.6481	31.11	2.753
20	48	48	2.71	130.1	5.752
30	48	48	6.154	295.4	8.701
40	48	48	10.95	525.5	11.6
50	48	48	17.06	819	14.45
60	48	40.87	27.19	1111	17.09
70	48	32.06	40.15	1287	19.59
80	48	23.36	55.33	1293	21.99
90	48	14.78	72.67	1074	24.28

4.1.6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสวิตช์ผสมแบบขนานและอนุกรม

กรณีปรับความถี่สวิตช์ จากการวิเคราะห์กราฟในภาพที่ 4.7 ซึ่งแสดงผลการจำลองภายใต้เงื่อนไขวัฏจักรงานคงที่ พบว่าสวิตช์ผสมแบบขนานมีกำลังสูญเสียสูงกว่าแบบอนุกรมอย่างมีนัยสำคัญในทุกช่วงความถี่สวิตช์ ขณะที่กราฟในภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าแรงดันที่โหลดของสวิตช์ผสมแบบขนานสูงกว่าแบบอนุกรมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยในทุกระดับความถี่สวิตช์ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนความถี่สวิตช์มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อทั้งกำลังสูญเสียและแรงดันที่โหลดเมื่อใช้สวิตช์ผสม

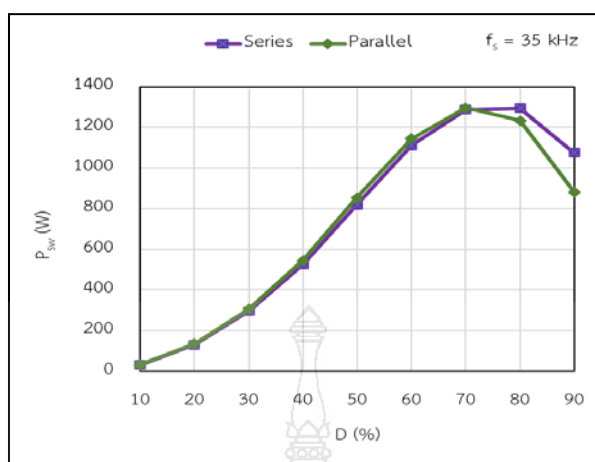


ภาพที่ 4.7 กำลังสูญเสียการณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB (D คงที่)

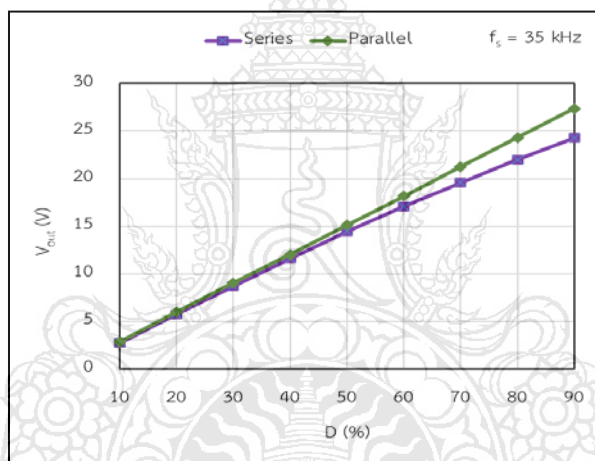


ภาพที่ 4.8 แรงดันโหลดการณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB (D คงที่)

กรณีปรับวัฏจักรงาน ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงวัฏจักรงาน 0.1 ถึง 0.7 กำลังสูญเสียของสวิตช์ผสมทั้งแบบอนุกรมและขนานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ในช่วงวัฏจักรงาน 0.7 ถึง 0.9 กำลังสูญเสียมีแนวโน้มลดลง โดยสวิตช์ผสมแบบขนานมีค่ากำลังสูญเสียต่ำกว่าแบบอนุกรม และผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าในช่วงวัฏจักรงาน 0.1 ถึง 0.4 แรงดันที่โหลดของสวิตช์ผสมทั้งสองแบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างใกล้เคียงกัน แต่เมื่อวัฏจักรงานมากกว่า 0.5 สวิตช์ผสมแบบขนานจะให้แรงดันที่โหลดสูงกว่าแบบอนุกรม



ภาพที่ 4.9 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB (f_s คงที่)



ภาพที่ 4.10 แรงดันโหลดกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยใช้โปรแกรม MATLAB (f_s คงที่)

การวิเคราะห์ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่โหลดกับค่าของวัฏจักรงาน โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวปรากฏอย่างสอดคล้องกันทั้งในกรณีที่ใช้สวิตช์ผสมแบบอนุกรมและแบบขนาน นั่นคือ เมื่อค่าของวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่โหลดก็จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน และความสัมพันธ์นี้ไม่ขึ้นอยู่กับการต่อวงจรแบบอนุกรมหรือขนานของสวิตช์ผสม ซึ่งบ่งชี้ถึงลักษณะการทำงานพื้นฐานของวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ที่คงที่ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการต่อวงจรของสวิตช์

การสร้างชุดทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลลัพธ์ เมื่อต่อมอสเฟตร่วมกับไอจีบีทีในรูปแบบขนานและแบบอนุกรมเพื่อใช้เป็นสวิตช์ผสม ในด้านกำลังสูญเสียและแรงดันโหลด ในกรณีปรับความถี่สวิตช์หรือปรับวัฏจักรงาน เพื่อยืนยันความถูกต้องแม่นยำของผลการจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา

4.2 การทดลองด้วยอุปกรณ์

4.2.1 มอสเฟต

กรณีปรับความถี่สวิตช์ จากข้อมูลในตาราง 4.9 แสดงให้เห็นว่าแรงดันที่สวิตช์มีค่าใกล้เคียงกันโดยเฉลี่ยประมาณ 45 โวลต์ กระแสสวิตช์และกำลังสูญเสียที่สวิตช์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น และแรงดันที่โหลดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.9 การปรับความถี่สวิตช์ของมอสเฟตโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ

f_s (kHz)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
5	48	45.4	0.12	5.448	24.16
10	48	45.04	0.13	5.8552	23.36
15	48	44.4	0.12	5.328	20.46
20	48	45.69	0.12	5.4828	17.97
25	48	45.22	0.11	4.9742	15.89
30	48	45.95	0.1	4.595	13.37
35	48	45.82	0.07	4.34	9.47
40	48	45.72	0.09	4.1148	9.76
45	48	45.52	0.08	3.6416	8.52
50	48	45.95	0.09	4.1355	7.93

กรณีปรับวัฏจักรงาน จากข้อมูลในตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น แรงดันที่สวิตช์จะลดลง กระแสสวิตช์และกำลังสูญเสียที่สวิตช์จะเพิ่มขึ้น แต่แรงดันที่โหลดจะเพิ่มขึ้น ก่อนที่จะลดลงในช่วงวัฏจักรงานสูง

ตารางที่ 4.10 การปรับวัฏจักรงานของมอสเฟตโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ

D (%)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
10	48	48.89	0.01	0.4889	0.01
20	48	48.17	0.02	0.9634	0.24
30	48	47.88	0.02	0.9576	0.93
40	48	46.83	0.05	2.3415	6.85
50	48	45.82	0.07	3.2074	9.47
60	48	45.21	0.09	4.0689	12.65
70	48	44.56	0.11	4.9016	14.68
80	48	42.98	0.15	6.447	11.23
90	48	39.85	0.26	10.361	7.83

4.2.2 ไอจีบีที

กรณีปรับความถี่สวิตช์ จากข้อมูลในตาราง 4.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น แรงดันที่สวิตช์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กระแสสวิตช์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย กำลังสูญเสียที่สวิตช์ลดลง และแรงดันที่โหลดลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.11 การปรับความถี่สวิตช์ของไอจีบีทีโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ

f_s (kHz)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
5	48	44.27	0.09	3.9843	23.98
10	48	44.09	0.09	3.9681	27.89
15	48	43.81	0.1	4.381	20.65
20	48	43.45	0.1	4.345	18.1
25	48	43.42	0.09	3.9078	17.34
30	48	43.89	0.09	3.9501	14.78
35	48	44.01	0.09	3.9609	12.04
40	48	44.43	0.08	3.5544	9.94
45	48	44.92	0.07	3.1444	8.42
50	48	45.34	0.06	2.7204	6.39

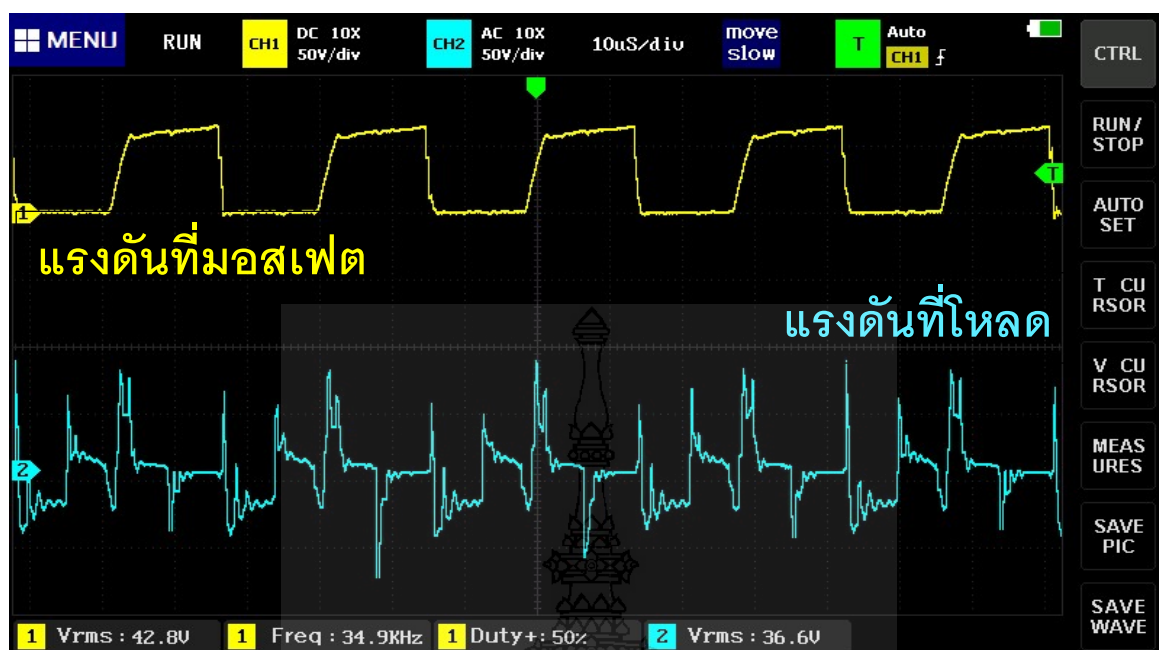
กรณีปรับวัฏจักรงาน จากข้อมูลในตาราง 4.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น แรงดันที่สวิตช์จะลดลง กระแสสวิตช์และกำลังสูญเสียที่สวิตช์จะเพิ่มขึ้น และแรงดันที่โหลดก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อวัฏจักรงานสูงมาก แรงดันที่โหลดจะลดลง

ตารางที่ 4.12 การปรับวัฏจักรงานของไอจีบีทีโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ

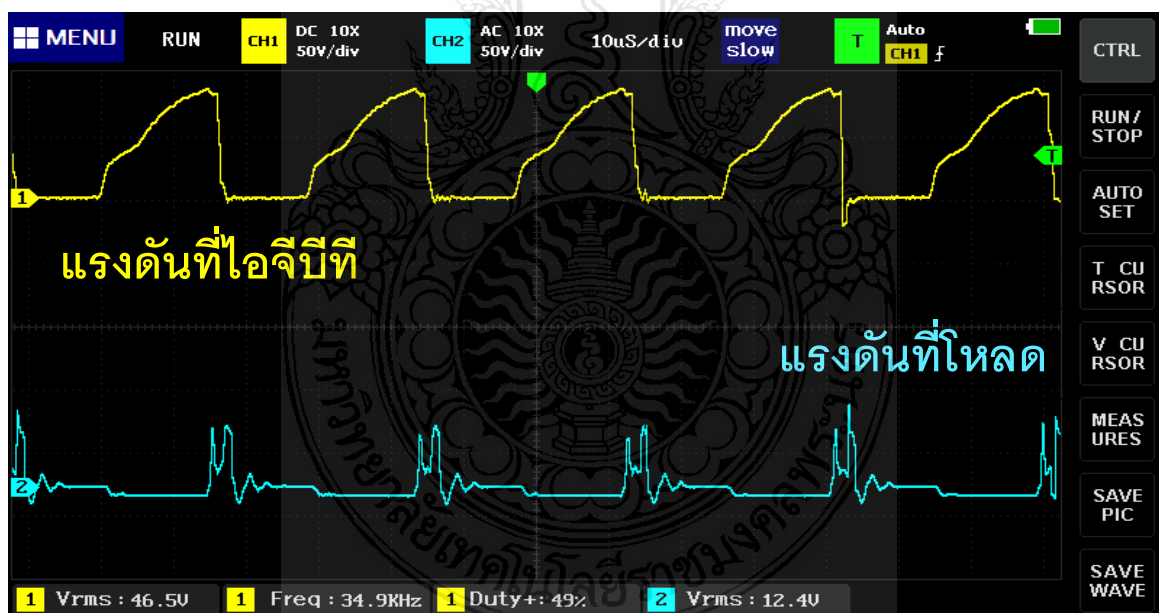
D (%)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
10	48	48.66	0.02	0.9732	0.01
20	48	47.13	0.02	0.9426	0.84
30	48	46.21	0.03	1.3863	3.73
40	48	45.12	0.05	2.256	7.24
50	48	44.09	0.08	3.5272	9.88
60	48	43.02	0.11	4.7322	12.87
70	48	41.25	0.17	7.0125	15.45
80	48	33.72	0.68	22.9296	13.96
90	48	26.72	0.95	25.384	10.67

4.2.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบเมื่อใช้มอสเฟตหรือไอจีบีทีเป็นสวิตช์

รูปคลื่นสัญญาณของมอสเฟตและไอจีบีทีจากรูปคลื่นสัญญาณในภาพที่ 4.11 และภาพที่ 4.12 ทั้งขณะใช้มอสเฟตหรือไอจีบีทีเป็นสวิตช์ สังเกตว่ามอสเฟตจะเริ่มนำกระแสได้ไวกว่าไอจีบีที และช่วงหยุดนำกระแสมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่แรงดันที่โหลดมีความต่างกัน สอดคล้องกับรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

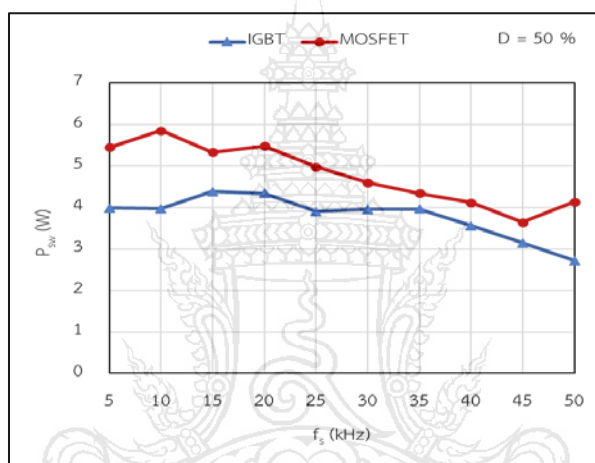


ภาพที่ 4.11 รูปคลื่นสัญญาณมอสเฟตของชุดทดลอง

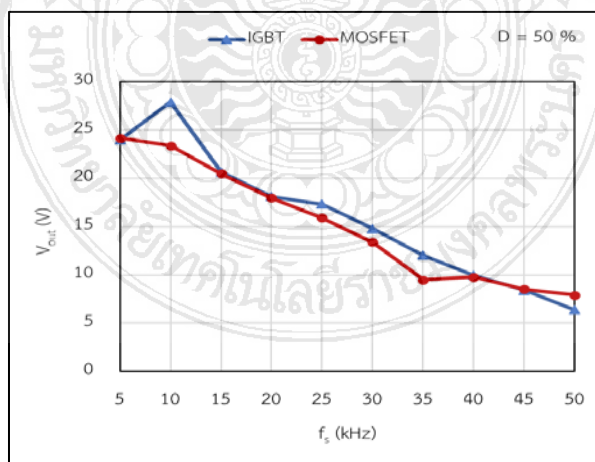


ภาพที่ 4.12 รูปคลื่นสัญญาณไอบีทีของชุดทดลอง

เมื่อทำการปรับความถี่ ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.13 พบว่าทั้งไอจีบีทีและมอสเฟตแสดงแนวโน้มการลดลงของกำลังสูญเสียที่สวิตช์เมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังสูญเสียของมอสเฟตสูงกว่าไอจีบีทีเล็กน้อยในช่วงความถี่สวิตช์ต่ำ และเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มสูงขึ้น ค่ากำลังสูญเสียของทั้งสองอุปกรณ์มีแนวโน้มที่จะเข้าใกล้กันมากขึ้น ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.14 พบว่าแรงดันที่โหลดของทั้งไอจีบีทีและมอสเฟตมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มสูงขึ้น แรงดันที่โหลดของไอจีบีทีจะสูงกว่ามอสเฟตเล็กน้อยที่ความถี่สวิตช์ต่ำ แต่เมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น ความแตกต่างของแรงดันที่โหลดระหว่างไอจีบีทีและมอสเฟตจะลดลง และที่ความถี่สูง แรงดันที่โหลดของทั้งสองอุปกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

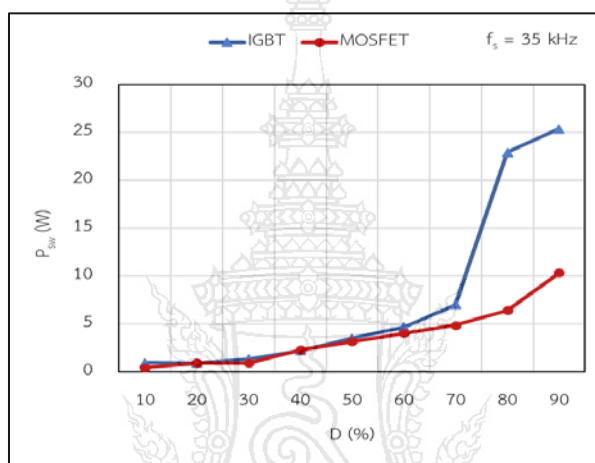


ภาพที่ 4.13 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยชุดทดลอง (D คงที่)

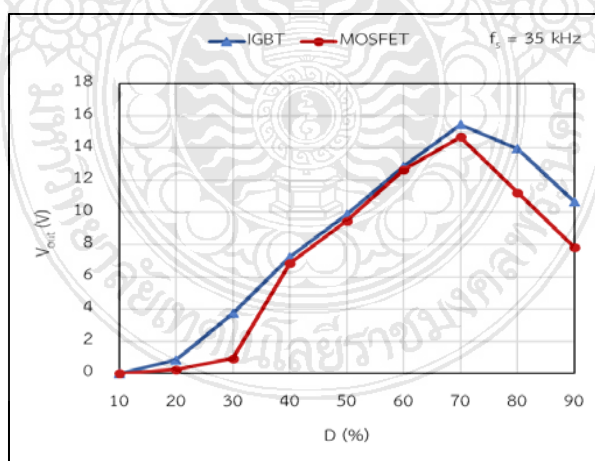


ภาพที่ 4.14 แรงดันโหลดกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยชุดทดลอง (D คงที่)

เมื่อปรับวัฏจักรงาน ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.15 พบว่ากำลังสูญเสียที่สวิตช์ทั้งไอจีบีทีและมอสเฟตเพิ่มขึ้นเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น แต่ที่วัฏจักรงานต่ำ มอสเฟตมีกำลังสูญเสียต่ำกว่าไอจีบีที อย่างไรก็ตาม เมื่อวัฏจักรงานสูงขึ้น กำลังสูญเสียของไอจีบีทีจะสูงกว่ามอสเฟตอย่างเห็นได้ชัด จากผลการจำลองในกราฟภาพที่ 4.16 พบว่าแรงดันที่โหลดของทั้งไอจีบีทีและมอสเฟตเพิ่มขึ้นเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น โดยแรงดันที่โหลดของไอจีบีทีสูงกว่ามอสเฟตเล็กน้อยในช่วงวัฏจักรงานต่ำ และเมื่อวัฏจักรงานสูงขึ้น ความแตกต่างของแรงดันที่โหลดระหว่างไอจีบีทีและมอสเฟตจะลดลง ก่อนที่แรงดันที่โหลดของมอสเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงวัฏจักรงาน 0.7 เป็นต้นไป



ภาพที่ 4.15 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยชุดทดลอง (f_s คงที่)



ภาพที่ 4.16 แรงดันโหลดกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตโดยชุดทดลอง (f_s คงที่)

จากการทดลอง ผลการทดลองด้วยชุดอุปกรณ์ทดสอบแสดงให้เห็นว่ามอสเฟตและไอจีบีทีมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันในแง่ของแรงดันโวลต์และกำลังสูญเสียที่สวิตช์ สอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถนำมาใช้ร่วมกันเป็นสวิตช์ผสมได้ทั้งในลักษณะการต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนานในวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพ และความยืดหยุ่นในการทำงาน

4.2.4 สวิตช์ผสมแบบขนาน

กรณีปรับความถี่สวิตช์ จากข้อมูลในตาราง 4.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น แรงดันที่สวิตช์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความถี่ต่ำก่อนลดลงในช่วงความถี่สูง กระแสสวิตช์มีค่าใกล้เคียงกัน กำลังสูญเสียที่สวิตช์ลดลงก่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความถี่สูง และแรงดันที่โวลต์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.13 การปรับความถี่สวิตช์ของสวิตช์ผสมแบบขนานโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ

f_s (kHz)	V_{in} (V)	V_{sw} (V)	I_{sw} (A)	P_{sw} (W)	V_{OUT} (V)
5	48	43.38	0.11	4.7718	21.98
10	48	43.14	0.12	5.1768	21.35
15	48	42.7	0.13	5.551	20.28
20	48	42.4	0.13	5.512	19.18
25	48	42.23	0.13	5.4899	17.78
30	48	42.34	0.11	4.6574	15.58
35	48	42.91	0.12	5.1492	15.54
40	48	42.98	0.1	4.298	11.58
45	48	43.64	0.09	3.9276	10.12
50	48	43.86	0.09	3.9474	8.88

กรณีปรับวัฏจักรงาน จากข้อมูลในตาราง 4.14 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น แรงดันที่สวิตช์จะลดลง กระแสสวิตช์และกำลังสูญเสียที่สวิตช์จะเพิ่มขึ้น และแรงดันที่โวลต์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อวัฏจักรงานสูงมาก แรงดันที่โวลต์จะลดลง

ตารางที่ 4.14 การปรับวัฏจักรงานของสวิตช์ผสมแบบขนานโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ

D (%)	V _{in} (V)	V _{SW} (V)	I _{SW} (A)	P _{SW} (W)	V _{OUT} (V)
10	48	48.14	0.05	2.407	0.003
20	48	47	0.05	2.35	2.57
30	48	46	0.07	3.22	6.11
40	48	44.76	0.09	4.0284	10.42
50	48	43.43	0.12	5.2116	14.18
60	48	42	0.14	5.88	16.67
70	48	37.76	0.34	12.8384	17.74
80	48	29.32	0.78	22.8696	14.58
90	48	25.59	0.94	24.0546	12.29

4.2.5 สวิตช์ผสมแบบอนุกรม

การปรับความถี่สวิตช์ จากข้อมูลในตาราง 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น แรงดันที่สวิตช์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความถี่ต่ำจากนั้นคงที่ กระแสสวิตช์ลดลงเล็กน้อย กำลังสูญเสียสวิตช์ลดลงอย่างต่อเนื่อง และแรงดันที่โหลดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.15 การปรับความถี่สวิตช์ของสวิตช์ผสมแบบอนุกรมโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ

f _s (kHz)	V _{in} (V)	V _{SW} (V)	I _{SW} (A)	P _{SW} (W)	V _{OUT} (V)
5	48	44.55	0.09	4.0095	23.84
10	48	44.32	0.09	3.9888	22.62
15	48	44.5	0.08	3.56	18.03
20	48	45.01	0.07	3.1507	11.84
25	48	45.67	0.06	2.7402	6.74
30	48	46.32	0.05	2.316	2.97
35	48	47	0.05	2.35	0.46
40	48	46.66	0.05	2.333	0.024
45	48	46.78	0.05	2.339	0.024
50	48	46.82	0.05	2.341	0.024

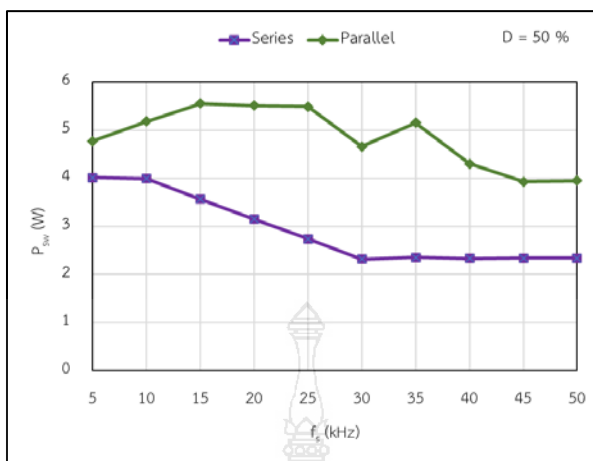
กรณีปรับวัฏจักรงาน จากข้อมูลในตาราง 4.16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น แรงดันที่สวิตช์ลดลงเล็กน้อยในช่วงต้น จากนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กระแสสวิตช์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย กำลังสูญเสียที่สวิตช์เพิ่มขึ้น และแรงดันที่โหลดเพิ่มขึ้นก่อนจะลดลงเล็กน้อยในช่วงวัฏจักรงานสูง

ตารางที่ 4.16 การปรับวัฏจักรงานของสวิตช์ผสมแบบอนุกรมโดยชุดอุปกรณ์ทดสอบ

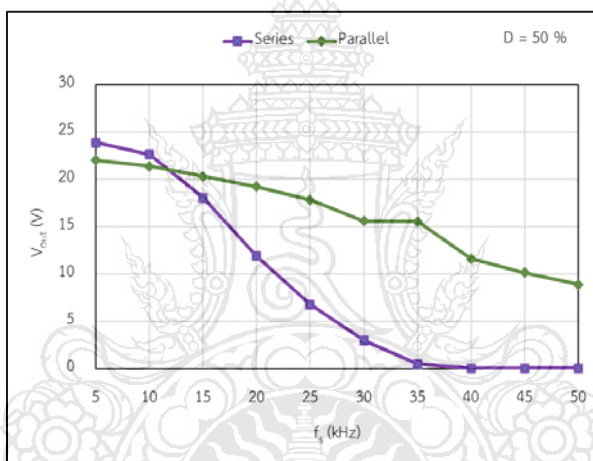
D (%)	V_{in} (V)	V_{SW} (V)	I_{SW} (A)	P_{SW} (W)	V_{OUT} (V)
10	48	47.18	0.05	2.359	0.34
20	48	47.12	0.05	2.356	2.83
30	48	47.12	0.05	2.356	8.14
40	48	46.1	0.05	2.305	11.07
50	48	46.29	0.06	2.7774	13.64
60	48	49.87	0.06	2.9922	14.56
70	48	44.68	0.08	3.5744	15.42
80	48	43.97	0.09	3.9573	14.24
90	48	42.13	0.11	4.6343	14.12

4.2.6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสวิตช์ผสมแบบขนานและอนุกรม

กรณีปรับความถี่สวิตช์ จากการวิเคราะห์กราฟในภาพที่ 4.17 กำลังสูญเสียที่สวิตช์ผสมแบบขนานสูงกว่าแบบอนุกรมตลอดช่วงความถี่ที่ทดสอบ กำลังสูญเสียของสวิตช์ผสมแบบอนุกรมลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังสูญเสียของสวิตช์ผสมแบบขนานมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความถี่กลางก่อนลดลงเล็กน้อยในช่วงความถี่สูง ขณะที่กราฟในภาพที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าแรงดันที่โหลดของสวิตช์ทั้งสองแบบลดลงเมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้น โดยสวิตช์ผสมแบบขนานให้แรงดันที่โหลดสูงกว่าแบบอนุกรม และแรงดันที่โหลดของสวิตช์ผสมแบบขนานลดลงช้ากว่าแบบอนุกรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความถี่สวิตช์สูง

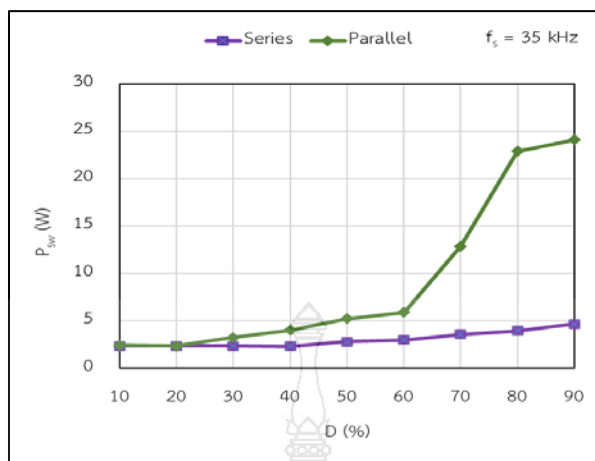


ภาพที่ 4.17 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยชุดทดลอง (D คงที่)

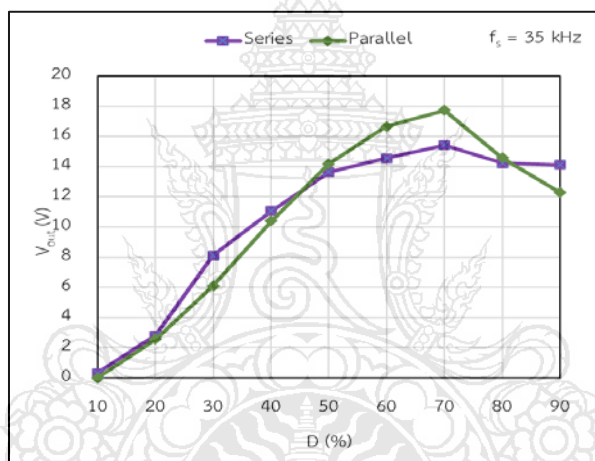


ภาพที่ 4.18 แรงดันโวลต์กรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยชุดทดลอง (D คงที่)

กรณีปรับวัฏจักรงาน ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่ากำลังสูญเสียทั้งสวิตช์ผสมแบบอนุกรมและแบบขนานเพิ่มขึ้นเมื่อวัฏจักรงานเพิ่มขึ้น โดยสวิตช์ผสมแบบขนานมีกำลังสูญเสียสูงกว่าแบบอนุกรมในทุกระดับ และที่วัฏจักรงานสูง กำลังสูญเสียของสวิตช์ผสมแบบขนานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าแบบอนุกรม ผลที่ได้จากกราฟในภาพที่ 4.20 แรงดันที่โวลต์ของทั้งสองแบบเพิ่มขึ้นตามวัฏจักรงาน แต่แรงดันที่โวลต์ของสวิตช์ผสมแบบขนานสูงกว่าแบบอนุกรมเล็กน้อยในช่วงวัฏจักรงานต่ำถึงกลาง และที่วัฏจักรงานสูง แรงดันที่โวลต์ของสวิตช์ผสมแบบขนานลดลงช้ากว่าแบบอนุกรม ก่อนที่จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงวัฏจักรงานสูงสุด



ภาพที่ 4.19 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยชุดทดลอง (f_s คงที่)



ภาพที่ 4.20 แรงดันโหลดกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนานโดยชุดทดลอง (f_s คงที่)

การวิเคราะห์ผลการจำลองกรณีปรับความถี่สวิตช์ เมื่อความถี่สวิตช์เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงดันที่โหลดลดลง แต่ช่วยลดกำลังสูญเสีย สวิตช์ผสมแบบขนานให้แรงดันที่โหลดสูงกว่าแต่มีกำลังสูญเสียสูงกว่าแบบอนุกรม กรณีปรับวัฏจักรงาน การเพิ่มวัฏจักรงานส่งผลให้แรงดันที่โหลดเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด จากนั้นจึงลดลงขณะที่กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยสวิตช์ผสมแบบขนานมีกำลังสูญเสียสูงกว่าแบบอนุกรม ดังนั้นการเลือกใช้สวิตช์จึงขึ้นอยู่กับการประเมินสมดุลระหว่างแรงดันที่โหลดและกำลังสูญเสียในวงจร

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้วิเคราะห์รูปแบบสวิตช์สำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ใน 4 รูปแบบ คือ สวิตช์ที่ใช้ไอจีบีทีตัวเดียว สวิตช์ที่ใช้มอสเฟตตัวเดียว สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟต และสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต ผ่านการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และสร้างชุดทดลอง ซึ่งทดสอบในสองกรณี คือ วัฏจักรงานคงที่แต่ปรับความถี่สวิตช์และความถี่สวิตช์คงที่แต่ปรับวัฏจักรงาน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้สวิตช์ผสมแบบอนุกรมมีกำลังสูญเสียน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ ดังนี้

เมื่อใช้การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กรณีเทียบกับสวิตช์ผสมแบบขนานจะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่าอยู่ 34.3 วัตต์ (ตัวอย่างที่ $f_s = 35 \text{ kHz/D} = 0.5$) กรณีเทียบกับการใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์จะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่า 39.4 วัตต์ (ตัวอย่างที่ $f_s = 35 \text{ kHz/D} = 0.5$) กรณีเทียบกับการใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์จะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่า 31.4 วัตต์ (ตัวอย่างที่ $f_s = 35 \text{ kHz/D} = 0.5$)

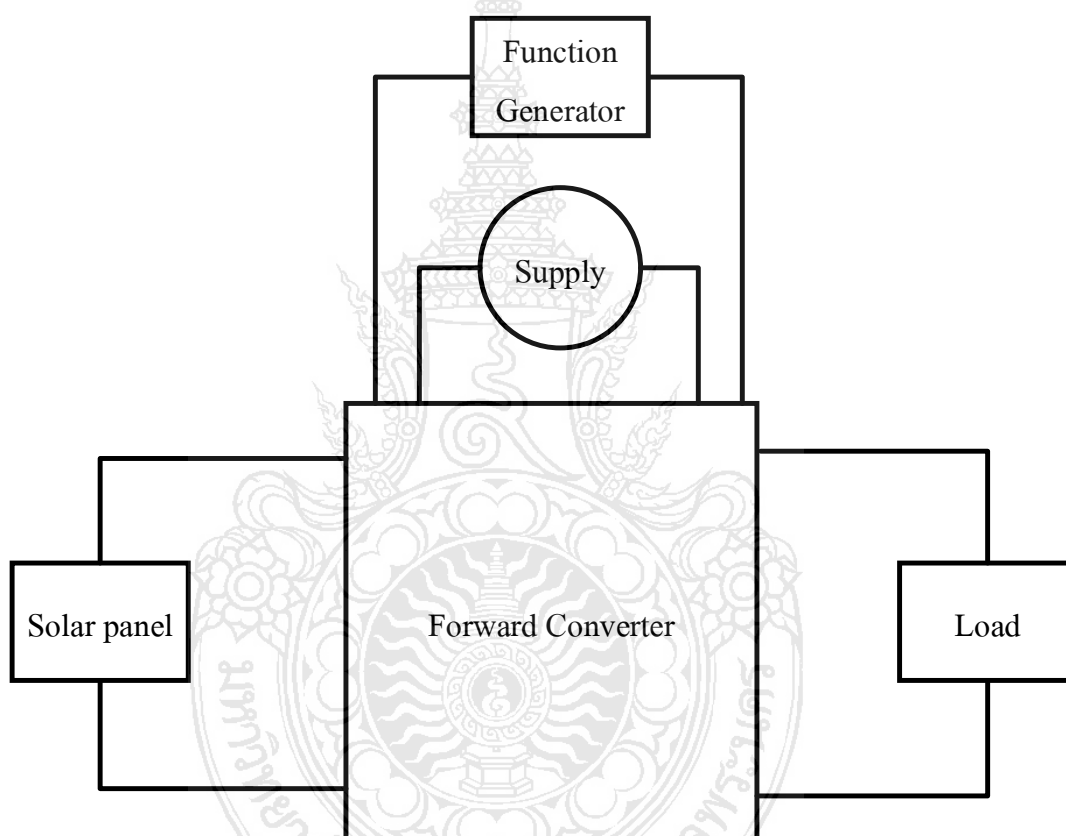
เมื่อใช้การสร้างชุดทดลองกรณีเทียบกับสวิตช์ผสมแบบขนานจะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่าอยู่ 2.8 วัตต์ (ตัวอย่างที่ $f_s = 35 \text{ kHz/D} = 0.5$) กรณีเทียบกับการใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์จะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่า 2 วัตต์ (ตัวอย่างที่ $f_s = 35 \text{ kHz/D} = 0.5$) กรณีเทียบกับการใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์จะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่า 1.6 วัตต์ (ตัวอย่างที่ $f_s = 35 \text{ kHz/D} = 0.5$)

สำหรับกรณีวัฏจักรงานคงที่แต่ปรับความถี่สวิตช์นั้น ความถี่สวิตช์แทบไม่มีผลต่อกำลังสูญเสียที่สวิตช์และแรงดันที่โหลด เมื่อใช้สวิตช์ผสมแบบมอสเฟตขนานกับไอจีบีทีจะมีกำลังสูญเสียที่สวิตช์มากที่สุด เพราะขณะนำกระแสไอจีบีทีจะนำกระแสส่วนใหญ่ และมอสเฟตนำกระแสส่วนน้อย มี $R_{DS,on}$ สูง ทำให้ค่ากำลังสูญเสียมีลักษณะตามไอจีบีทีเป็นหลัก และเมื่อใช้สวิตช์ผสมแบบมอสเฟตอนุกรมกับไอจีบีทีจะมีกำลังสูญเสียที่สวิตช์น้อยที่สุด เนื่องจากเมื่อมอสเฟตหยุดนำกระแสจะทำให้พาหะข้างน้อยในไอจีบีทีรวมตัวกัน โดยไอจีบีทียังคงอยู่ในสถานะนำกระแส และ $V_{CE,on}$ จะถูกบล็อกโดยมอสเฟต จากนั้นไอจีบีทีจึงหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะการสวิตช์ที่กระแสศูนย์ (Zero Current Switching, ZCS) เป็นผลให้กำลังสูญเสียขณะหยุดนำกระแสมีค่าลดลง รวมทั้งความถี่สวิตช์จะมีผลต่อกำลังสูญเสียเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

กรณีความถี่สวิตช์คงที่แต่ปรับวัฏจักรงาน กำลังสูญเสียที่สวิตช์และแรงดันที่โหลดจะแปรผันตรงกับวัฏจักรงาน ซึ่งสอดคล้องตามสมการที่ (1) และในกรณีนี้ควรปรับวัฏจักรงานในช่วง 0.1 ถึง 0.7 จึงเหมาะสมที่สุดในฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นการวิเคราะห์รูปแบบสวิตช์ในงานวิจัยนี้มีส่วนในการช่วยเลือกใช้สวิตช์ที่เหมาะสมสำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เมื่อทำงานในกรณีวัฏจักรงานคงที่แต่ปรับความถี่สวิตช์ และกรณีความถี่สวิตช์คงที่แต่ปรับวัฏจักรงาน

สรุป สวิตช์ผสมแบบอนุกรมมีข้อดีกว่าแบบขนานอย่างชัดเจน เนื่องจากใช้จำนวนสวิตช์เท่ากันแต่มีกำลังสูญเสียน้อยกว่า แต่เมื่อเทียบกับการใช้เพียงมอสเฟตหรือไอจีบีทีเป็นสวิตช์แล้ว สวิตช์ผสมแบบอนุกรมจะมีข้อดีกว่าในด้านกำลังสูญเสียเท่านั้น แต่มีข้อเสียคือใช้จำนวนสวิตช์มากกว่าสองเท่า

ข้อเสนอแนะ สวิตช์ผสมแบบอนุกรมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบพลังงานโซลาร์เซลล์ ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการจัดการกับแรงดันที่สูงกว่า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานและให้แรงดันที่สม่ำเสมอแก่โหลดได้ ดังภาพที่ 5.1 [17] นอกจากนี้ การใช้งานในระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ายังช่วยให้การจ่ายกระแสมีความแม่นยำและเสถียรภาพ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ และในด้านของอุปกรณ์สื่อสารโทรคมนาคม การมีสวิตช์สองตัวยังสามารถช่วยกระจายภาระและลดการสูญเสียพลังงานภายในระบบที่ต้องการการทำงานอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นการเสริมสร้างความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้



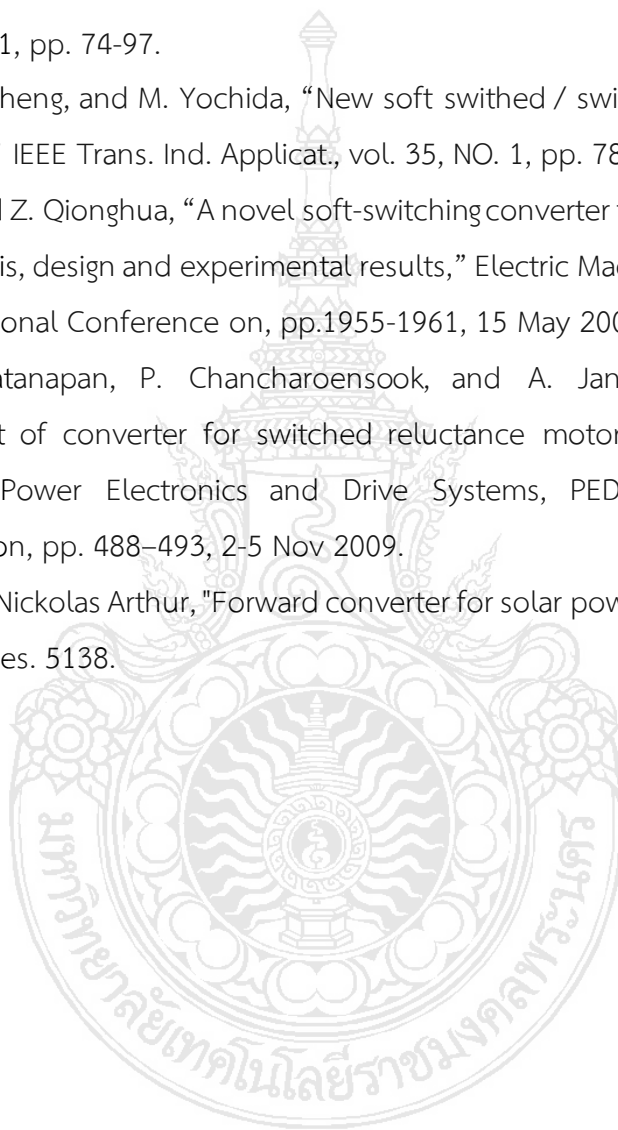
ภาพที่ 5.1 การใช้ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ในโซลาร์เซลล์

บรรณานุกรม

- [1] H.P. Yee and D. Liu, "An ASIC to control the paralleling of an IGBT with a MOSFET," Proc. IEEE-APEC, vol. 1, pp. 151-155, 23-27 February 1997.
- [2] J. P. Kaerst and K. F. Hoffmann, "High speed complimentary drive of a hybrid MOSFET and IGBT power switch," in European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-9, 2005.
- [3] N. Machin and T. Vescovi, "Very high efficiency techniques and their selective application to the design of a 70A rectifier," in Proc. INTELEC'93, pp. 126-133, 1993.
- [4] J. Qian, A. Khan, and I. Batarseh, "Turn-off switching loss model and analysis of IGBT under different switching operation modes," Proc. IEEE-IECON, pp. 240-245, 6-10 November 1995.
- [5] S. Woothipatanapan, A. Jangwanitlert, and P. Chancharoensook, "Efficiency improvement of converter for switched reluctance motor drives by mixed operation of IGBT and MOSFET," in Proc. TENCON 2010, pp. 1841-1846, 2010.
- [6] ศาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์, จิตาทิพย์ พรหมทา และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ, "การวิเคราะห์กำลังสูญเสียที่สวิตช์ของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เมื่อใช้ไอจีบีทีและมอสเฟตเป็นสวิตช์," The 15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023), Nakhon Phanom, 1-3 May 2023, pp. 776-779
- [7] จิตาทิพย์ พรหมทา, ศาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ, "การวิเคราะห์รูปแบบสวิตช์ที่เหมาะสมสำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์โดยการจำลองการทำงาน," The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46), Krabi, 15-17 November 2023, pp. 546-549
- [8] ศิศิโรตม์, เกตุแก้ว. การออกแบบและการสร้างอินเวอร์เตอร์แรงดันสูงขนาดเล็กแบบปรับค่าแรงดันได้. งานวิจัยมหาวิทยาลัยรามคำแหง, (2555). หน้า 8-9.
- [9] Machin, N., & Vescovi, T. (2009). Very high efficiency techniques and their selective application to the design of a 70A rectifier. In IEEE Xplore. Retrieved January 26, 2009
- [10] Daniel W. Hart, "Introduction to Power Electronics", Prentice Hall, 1st edition, 1997.
- [11] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", John Wiley & Sons, 2nd edition, 1995.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Handbook", Academic Press, pp. 663-727, 2001.
- [13] T.J.E. Miller, Electronic Control of Switched Reluctance Machines, 1st ed. Oxford: Newnes, 2001, pp. 74-97.
- [14] Y. Murai, J. Cheng, and M. Yochida, "New soft swithed / switchedreluctance motor drive circuit," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 35, NO. 1, pp. 78-85, January 1999.
- [15] L. Jianwu and Z. Qionghua, "A novel soft-switching converter for switched reluctance motor analysis, design and experimental results," Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on, pp.1955-1961, 15 May 2005.
- [16] S. Woothipatanapan, P. Chanchaoensook, and A. Jangwanitlert, "Efficiency improvement of converter for switched reluctance motor drives at low speed operation," Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2009. International Conference on, pp. 488-493, 2-5 Nov 2009.
- [17] McFowland, Nickolas Arthur, "Forward converter for solar power applications" (2012). Masters Theses. 5138.



ภาพผนวก ก



บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาตินานาชาติ

1. สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ ธิดาทิพย์ พรหมทา และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ “การวิเคราะห์กำลังสูญเสียที่สวิตช์ของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เมื่อใช้ไอจีบีทีและมอสเฟตเป็นสวิตช์,” The 15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023), Nakhon phanom, Thailand, 1-3 May 2023, pp.776-779
2. ธิดาทิพย์ พรหมทา สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ “การวิเคราะห์รูปแบบสวิตช์ที่เหมาะสมสำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์โดยการจำลองการทำงาน,” The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46), Krabi, Thailand, 15-17 November 2023, pp.546-549





ยานยนต์ไฟฟ้าและรถไฟฟ้าระบบรางอนาคตการเดินทางใหม่ของประเทศไทย
Next Generation of Electric Vehicles and Railway Transit in Thailand

Abstract

Conference Topic

1. Electrical Power (PW)
ไฟฟ้ากำลัง
2. Electronics, Circuit and Communication (EC)
อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร
3. Power Electronics (PE)
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
4. Computer and Information Technology (CP)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
5. Control Systems and Instrumentation (CT)
ระบบควบคุมและการวัด
6. Digital Signal Processing (DS)
ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
7. Energy and Conservation of Energy (ES)
พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน
8. Innovation and Invention (IN)
นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
9. General Electrical Engineering (GN)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า
10. Special Session on Electric Vehicles and Railway Transit (SS)
หัวข้อพิเศษทางยานยนต์และรถไฟฟ้าระบบราง



บริษัท นีโอ ไดแดกติก จำกัด
NEO DIDACTIC CO., LTD.



บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

การวิเคราะห์กำลังสูญเสียที่สวิตช์ของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เมื่อใช้ไอจีบีทีและมอสเฟตเป็นสวิตช์

Analysis of Power Loss at Switching Device of Forward Converter

when Using IGBT and MOSFET As Switching Device

ศาสตราจารย์ ดร. วุฒินันท์ ชิดาพิทย พรหมทา และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาชื่นรังสิต แขวงวงษ์สว่าง เขตบางซื่อ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10800 E-mail: sakchon.w@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองของวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์กำลังสูญเสียของสวิตช์ที่ใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเพียงตัวเดียว และของสวิตช์ที่ใช้ไอจีบีทีและมอสเฟตต่อร่วมกันแบบอนุกรมและขนานเพื่อทำงานเป็นสวิตช์ผสม การจำลองจะทำงานในสองลักษณะ คือ ปรับความถี่สวิตช์เมื่อวัฏจักรงานคงที่ และปรับวัฏจักรงานเมื่อความถี่สวิตช์คงที่ ผลการจำลองแสดงให้เห็นกำลังสูญเสียที่สวิตช์ตามรูปแบบที่ทดสอบ ซึ่งจะช่วยให้การเลือกสวิตช์ที่เหมาะสมกับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ได้

คำสำคัญ: ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์, ไอจีบีที, มอสเฟต, สวิตช์ผสม

Abstract

This paper presents a simulation of a forward converter circuit using MATLAB program to analyze the power dissipation of a switch using a single IGBT or MOSFET, and of the switch where the IGBT and MOSFET are connected in series and parallel to work as a hybrid switch. There are two types of simulation: adjusting the switching frequency when the duty cycle is constant, and adjust the duty cycle when the switching frequency is constant. The simulation results show the power dissipation at the switch according to the tested pattern, which help in selecting suitable switch for forward converters.

Keywords: forward converter, IGBT, MOSFET, hybrid switch

1. บทนำ

อุปกรณ์สวิตช์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมใช้กันมากก็คือ ไอจีบีทีและมอสเฟต โดยไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์แบบไบโพลาร์ที่มีค่าสูญเสียขณะนำกระแสต่ำ แต่มีค่าสูญเสียขณะสวิตช์สูง เพราะมีช่วงเปลี่ยนสถานะสวิตช์ช้า ส่วนมอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์แบบยูนิโพลาร์ มีช่วงเปลี่ยนสถานะสวิตช์เร็ว จึงมีค่าสูญเสียขณะสวิตช์ต่ำ แต่มีค่าสูญเสียขณะนำกระแสสูง เมื่อนำไอจีบีทีและมอสเฟตมาทำเป็นสวิตช์ผสมโดยต่อร่วมกันแบบขนานสามารถทำให้สวิตช์ผสมนั้นทำงานที่ความถี่สวิตช์สูงขึ้นและลดกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ แต่จะจริงมีความซับซ้อนมาก [1-2]

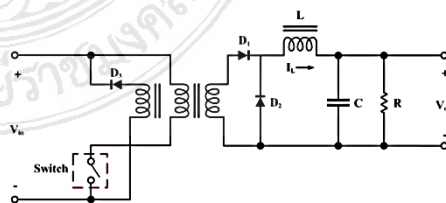
เมื่อนำสวิตช์ผสมนั้นไปใช้ในวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่มีรูปแบบวงจรไม่ซับซ้อน จะช่วยลดกำลังสูญเสียในช่วงหยุดนำกระแสเท่านั้น [3-5]

บทความนี้ใช้โปรแกรม MATLAB สร้างแบบจำลองวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เพื่อวิเคราะห์กำลังสูญเสียที่สวิตช์เมื่อใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเพียงตัวเดียว รวมทั้งเมื่อใช้ไอจีบีทีและมอสเฟตเป็นสวิตช์ผสมโดยต่อร่วมกันแบบอนุกรมและขนาน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ากำลังสูญเสียของสวิตช์แต่ละรูปแบบที่ทำการจำลองนั้นจะมีความแตกต่างกัน

2. กำลังสูญเสียเมื่อใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์

บทความนี้ใช้ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter) ในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของอุปกรณ์สวิตช์ โดยมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 1 เมื่อกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงมากจนถือว่ากระแสที่ไหลผ่านมีความต่อเนื่อง หม้อแปลงของวงจรนี้ประกอบด้วยขดลวดสามชุด ขดลวดที่หนึ่งและสองทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานจากแหล่งจ่ายไปยังโหลด เมื่ออุปกรณ์สวิตช์นำกระแส ขดลวดที่สามทำหน้าที่เป็นทางเดินของกระแสที่แม่เหล็ก เมื่ออุปกรณ์สวิตช์ไม่นำกระแสเพื่อให้กระแสที่แม่เหล็กลดลงเป็นศูนย์ก่อนเข้าสู่สวิตช์ชุดต่อไป

ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์สามารถใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ก็ได้ จึงจำลองการทำงานของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB การจำลองครั้งแรกจะใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์ ได้รูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 2 ซึ่งแสดงกระแสที่ไอจีบีที แรงดันที่ไอจีบีที กำลังสูญเสียที่ไอจีบีที และแรงดันที่โหลด ส่วนการจำลองครั้งที่สองใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ ได้รูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงกระแสที่มอสเฟต แรงดันที่มอสเฟต กำลังสูญเสียที่มอสเฟต และแรงดันที่โหลด



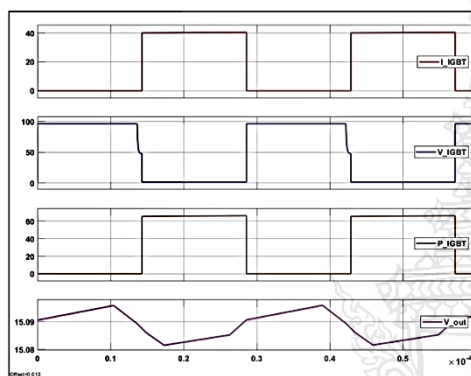
รูปที่ 1 วงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

บทความวิจัย

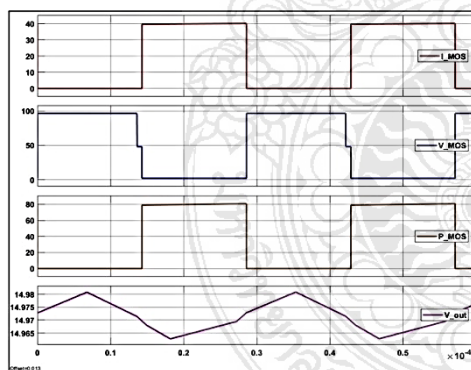
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

จากรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ทั้งขณะใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์ สังเกตว่าช่วงเริ่มนำกระแส ช่วงนำกระแส และช่วงหยุดนำกระแสมีลักษณะใกล้เคียงกัน จึงทำให้กำลังสูญเสียเมื่อใช้สวิตช์ทั้งสองชนิดมีความใกล้เคียงกันด้วย แต่แรงดันที่โหลดมีความต่างกันเล็กน้อย จึงถือว่าวงจรพอร์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์นั้นจะใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์ก็สามารถทำงานได้ไม่ต่างกันมาก



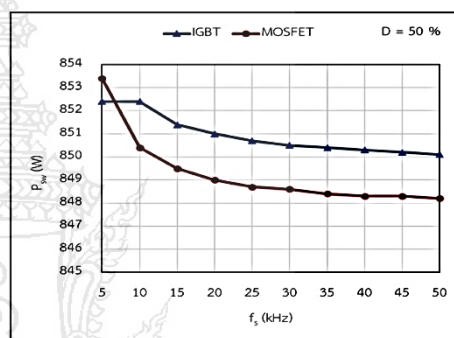
รูปที่ 2 กระแสที่ไอจีบีที แรงดันที่ไอจีบีที กำลังสูญเสียที่ไอจีบีที และแรงดันโหลด ($D = 50\%$, $f_s = 35$ kHz)



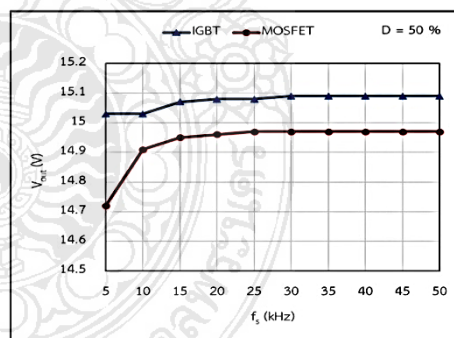
รูปที่ 3 กระแสที่มอสเฟต แรงดันที่มอสเฟต กำลังสูญเสียที่มอสเฟต และแรงดันโหลด ($D = 50\%$, $f_s = 35$ kHz)

เมื่อทำการปรับความถี่สวิตช์ (f_s) และวัฏจักรงาน (D) เพื่อหาลำดับสูญเสียที่สวิตช์ และแรงดันที่โหลด ขณะที่ใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์ โดยการจำลองครั้งแรกกำหนดให้วัฏจักรงานคงที่ 0.5 มี

แรงดันขาเข้า 48 โวลต์ และทำการปรับความถี่สวิตช์ขึ้นละ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ ตั้งแต่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 4 พบว่าที่ความถี่สวิตช์ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์ กำลังสูญเสียจะต่ำกว่ามอสเฟต และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น กำลังสูญเสียเมื่อใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์จะมีแนวโน้มสูงกว่าเมื่อใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์เล็กน้อย ผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 5 พบว่าแรงดันที่โหลดเมื่อใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์มีแนวโน้มสูงกว่ามอสเฟตเล็กน้อย และสังเกตได้ว่าความถี่สวิตช์จะแปรผกผันกับกำลังสูญเสีย แต่แรงดันที่โหลดจะค่อนข้างคงที่เมื่อความถี่สวิตช์มีค่าเกิน 20 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป



รูปที่ 4 กำลังสูญเสียที่สวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟต (D คงที่)



รูปที่ 5 แรงดันโหลดที่สวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟต (D คงที่)

ต่อมาทำการจำลองโดยกำหนดให้ความถี่สวิตช์คงที่ 35 กิโลเฮิร์ตซ์ มีแรงดันขาเข้า 48 โวลต์ และทำการปรับวัฏจักรงานขึ้นละ 0.1 ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9 ผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 6 พบว่าที่วัฏจักรงาน 0.1 ถึง 0.7 กำลังสูญเสียเมื่อใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์จะมีค่า

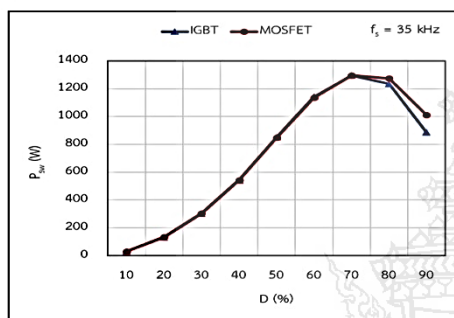
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

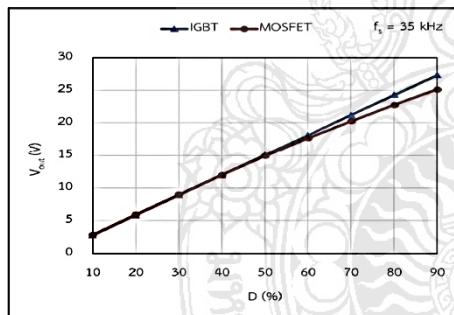
15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



ใกล้เคียงกัน โดยมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อวัฏจักรงานมากกว่า 0.7 กำลังสูญเสียกลับมีแนวโน้มลดลง และเมื่อใช้มอสเฟตจะมีกำลังสูญเสียสูงกว่า ไอจีบีทีเล็กน้อย จากผลการจำลองในกราฟรูปที่ 7 พบว่าที่วัฏจักรงาน 0.1 ถึง 0.5 แรงดันที่โหลดเมื่อใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์จะใกล้เคียงกัน โดยมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อวัฏจักรงานมากกว่า 0.6 เมื่อใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์จะได้แรงดันโหลดสูงกว่าเมื่อใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ และวัฏจักรงานจะแปรผันตรงกับแรงดันโหลดเสมอ



รูปที่ 6 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟต (f_s คงที่)

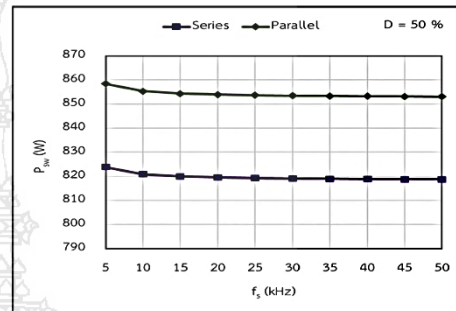


รูปที่ 7 แรงดันโหลดกรณีสวิตช์เป็นไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟต (f_s คงที่)

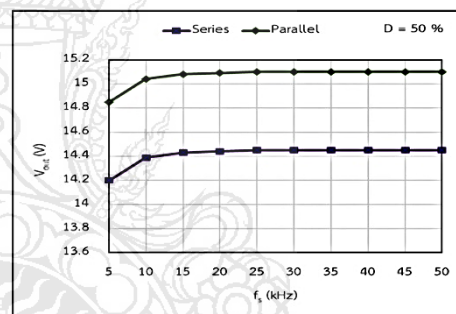
3. กำลังสูญเสียเมื่อใช้ไอจีบีทีและมอสเฟตเป็นสวิตช์ผสม

ไอจีบีทีและมอสเฟตสามารถต่อรวมกันเป็นสวิตช์ผสมได้ทั้งแบบอนุกรมและขนาน การจำลองครั้งแรกกำหนดให้วัฏจักรงานคงที่ 0.5 แรงดันขาเข้า 48 โวลต์ และปรับความถี่สวิตช์ขึ้นละ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ ตั้งแต่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 8 พบว่ากรณีให้วัฏจักรงานคงที่ สวิตช์ผสมแบบขนานมีกำลังสูญเสียสูงกว่าแบบอนุกรมค่อนข้างมากในทุกความถี่สวิตช์ และผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 9 พบว่าแรงดันที่โหลดของสวิตช์ผสมแบบขนานจะมีค่าสูงกว่าแบบ

อนุกรมเพียงเล็กน้อยในทุกความถี่สวิตช์ สังเกตได้ว่าเมื่อใช้สวิตช์ผสมนั้น การปรับความถี่สวิตช์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังสูญเสียและแรงดันที่โหลดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 8 กำลังสูญเสียกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนาน (D คงที่)



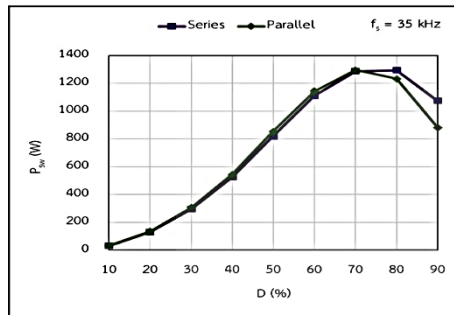
รูปที่ 9 แรงดันโหลดกรณีสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนาน (D คงที่)

เมื่อจำลองโดยกำหนดให้ความถี่สวิตช์คงที่ 35 กิโลเฮิร์ตซ์ มีแรงดันขาเข้า 48 โวลต์ และปรับวัฏจักรงานขึ้นละ 0.1 ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9 ผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 10 พบว่าที่วัฏจักรงาน 0.1 ถึง 0.7 กำลังสูญเสียของสวิตช์ผสมทั้งสองแบบมีแนวโน้มสูงขึ้นแต่ค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อวัฏจักรงานอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 0.9 กำลังสูญเสียของสวิตช์ผสมทั้งสองแบบจะมีแนวโน้มลดลง แต่สวิตช์ผสมแบบขนานจะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่าแบบอนุกรม และผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 11 พบว่าวัฏจักรงานที่ 0.1 ถึง 0.4 แรงดันที่โหลดเมื่อใช้สวิตช์ผสมทั้งสองแบบมีแนวโน้มสูงขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มวัฏจักรงานมากกว่า 0.5 เมื่อใช้สวิตช์ผสมรูปแบบขนาน แรงดันที่โหลดจะสูงกว่าเมื่อใช้สวิตช์ผสมรูปแบบอนุกรม สังเกตได้ว่าวัฏจักรงานจะแปรผันตรงกับแรงดันที่โหลดเสมอไม่ว่าสวิตช์ผสมจะต่อรวมกันแบบอนุกรมหรือแบบขนาน

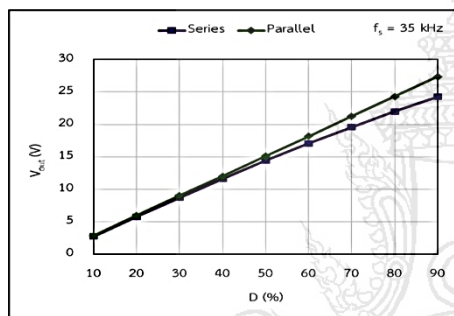
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



รูปที่ 10 กำลังสูญเสียการสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนาน (f_s คงที่)



รูปที่ 11 แร่งดันโวลตจการสวิตช์ผสมแบบอนุกรมเทียบกับขนาน (f_s คงที่)

4. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์กำลังสูญเสียที่สวิตช์ของฟอรัเวอร์คคอนเวอร์เตอร์เมื่อใช้ไอจีบีทีและมอสเฟตเป็นสวิตช์ ด้วยการจำลองทั้งกรณีใช้ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์เพียงตัวเดียว และกรณีใช้ไอจีบีทีและมอสเฟตต่อร่วมกันเป็นสวิตช์ผสม ผลจากการทำงานพบว่าเมื่อใช้สวิตช์ผสมแบบอนุกรมมีกำลังสูญเสียที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ ดังนี้

กรณีเทียบกับสวิตช์ผสมแบบขนานจะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่าอยู่ 34.3 วัตต์ (ตัวอย่างที่ $f_s = 35 \text{ kHz}/D = 0.5$) กรณีเทียบกับการใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์จะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่า 31.4 วัตต์ (ตัวอย่างที่ $f_s = 35 \text{ kHz}/D = 0.5$) กรณีเทียบกับการใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์จะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่า 39.4 วัตต์ (ตัวอย่างที่ $f_s = 35 \text{ kHz}/D = 0.5$)

เนื่องจากไอจีบีทีมีความเร็วในการสวิตช์ที่ช้า ขณะเริ่มหยุดนำกระแส กระแสจะลดลงในลักษณะเป็นหางยาวจนกระแสเป็นศูนย์ แต่แรงดันที่ตกคร่อมขา C-E ($V_{CE, on}$) จะเพิ่มขึ้นทันทีขณะหยุดนำกระแส เมื่อนำพื้นที่ของหางกระแสคูณกับ $V_{CE, on}$ จะเกิดเป็นกำลังสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแส ส่วนมอสเฟตมีข้อจำกัดเรื่องความต้านทานระหว่างขา

D-S ขณะนำกระแส ($R_{DS, on}$) ที่สูง และค่าความต้านทานนี้จะขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดัน ด้านมอสเฟตมีพิกัดแรงดันสูงจะมี $R_{DS, on}$ สูง จึงทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมีค่าสูงด้วย

เมื่อใช้สวิตช์ผสมแบบขนาน ขณะนำกระแสไอจีบีทีจะนำกระแสส่วนใหญ่ และมอสเฟตนำกระแสส่วนน้อยเพราะมี $R_{DS, on}$ สูง ทำให้กำลังสูญเสียมีลักษณะตามไอจีบีทีเป็นหลัก ส่วนเมื่อใช้สวิตช์ผสมแบบอนุกรม ขณะหยุดนำกระแส เมื่อมอสเฟตหยุดนำกระแสจะทำให้พาหะข้างน้อยในไอจีบีทีรวมตัวกันอีก โดยไอจีบีทียังคงอยู่ในสถานะนำกระแส และ $V_{CE, on}$ จะถูกบล็อกโดยมอสเฟต จากนั้นไอจีบีทีจึงหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะการสวิตช์ที่กระแสศูนย์ (Zero Current Switching : ZCS) เป็นผลให้กำลังสูญเสียขณะหยุดนำกระแสมีค่าลดลง รวมทั้งความถี่สวิตช์จะมีผลต่อกำลังสูญเสียเพียงเล็กน้อย

ในงานวิจัยนี้ สวิตช์ผสมแบบอนุกรมจะมีข้อดีกว่าแบบขนานอย่างชัดเจน เนื่องจากใช้จำนวนสวิตช์เท่ากันแต่มีกำลังสูญเสียน้อยกว่า แต่ถ้าเทียบกับการใช้เพียงไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นสวิตช์แล้ว สวิตช์ผสมแบบอนุกรมจะมีข้อดีกว่าในด้านกำลังสูญเสียเท่านั้น แต่มีข้อเสียคือใช้จำนวนสวิตช์มากกว่าสองเท่า ดังนั้นผลการจำลองที่ได้จึงมีส่วนช่วยพิจารณาเลือกใช้สวิตช์ของฟอรัเวอร์คคอนเวอร์เตอร์ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนบทความวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] H.P. Yee and D. Liu, "An ASIC to control the paralleling of an IGBT with a MOSFET," Proc. IEEE-APEC, vol. 1, pp. 151-155, 23-27 February 1997.
- [2] J. P. Kaerst and K. F. Hoffmann, "High speed complimentary drive of a hybrid MOSFET and IGBT power switch," in European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-9, 2005.
- [3] N. Machin and T. Vescovi, "Very high efficiency techniques and their selective application to the design of a 70A rectifier," in Proc. INTELEC'93, pp. 126-133, 1993.
- [4] J. Qian, A. Khan, and I. Batarseh, "Turn-off switching loss model and analysis of IGBT under different switching operation modes," Proc. IEEE-IECON, vol. 1, pp. 240-245, 6-10 November 1995.
- [5] S. Woothipatanapan, A. Jangwanitert, and P. Chanchareonsook, "Efficiency improvement of converter for switched reluctance motor drives by mixed operation of IGBT and MOSFET," in Proc. TENCON 2010, pp. 1841-1846, 2010.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๖

The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)



จัดการประชุมโดย
สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ระหว่างวันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566
ณ โรงแรมดิวาน่า พลาซ่า กระบี่ อำเภอนาง จังหวัดกระบี่

(PW) ไฟฟ้ากำลัง

(PH) โฟโตนิกส์

(CM) ไฟฟ้าสื่อสาร

(BE) วิศวกรรมชีวการแพทย์

(ETC) นวัตกรรมอัจฉริยะ

(DS) การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

(CT) ระบบควบคุมและการวัดคุม

(CP) คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

(GN) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

(PE) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

(EL) อิเล็กทรอนิกส์

(RE) พลังงานหมุนเวียน

(HS) ระดับมัธยมศึกษา

สนับสนุนโดย





การวิเคราะห์รูปแบบสวิตช์ที่เหมาะสมสำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์โดยการจำลองการทำงาน

Analysis of Suitable Switch Formats for A Forward Converter by Simulation

ธิดาทิพย์ พรหมทา สารกร วุฒิพัฒน์พันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร tidatip-pr@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ทำการวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมของสวิตช์สำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ระหว่าง ไอจีบีทีตัวเดียว มอสเฟตตัวเดียว สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟต และสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต โดยในงานนี้จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งทำการทดสอบดังนี้ ให้วัฏจักรงานคงที่โดยปรับความถี่สวิตช์ และให้ความถี่สวิตช์คงที่โดยปรับวัฏจักรงาน ผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟตจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้สวิตช์ในรูปแบบอื่น ๆ ที่ทำการทดสอบ

คำสำคัญ: ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ ไอจีบีที มอสเฟต สวิตช์ผสม

Abstract

This article analyzes to determine the suitable switch layout of forward converter between single IGBT, single MOSFET, hybrid switch in format of IGBT parallel with MOSFET and hybrid switch in format of IGBT series with MOSFET. In this work, the operation was simulated with program MATLAB/ Simulink which tested as follows: adjusting the switching frequency by setting the duty cycle constant and adjusting the duty cycle by setting the switching frequency constant. The simulation results showed that the hybrid switch in format of IGBT series with MOSFET has better results than other switch formats used in the test.

Keywords: Forward Converter, IGBT, MOSFET, Hybrid Switch

1. บทนำ

อุปกรณ์สวิตช์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมใช้กันมากก็คือ ไอจีบีทีและมอสเฟต โดย ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์ที่มีกำลังสูงและแรงดันนำกระแสต่ำ แต่มีกำลังสูญเสียขณะสวิตช์สูง ส่วนมอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ที่มีช่วงเปลี่ยนสถานะสวิตช์เร็ว จึงมีกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ต่ำ แต่มีกำลังสูญเสียขณะนำกระแสสูง เมื่อนำ ไอจีบีทีและมอสเฟตมาต่อร่วมกันเป็นสวิตช์ผสม [1-5] สวิตช์ผสมนั้นจึงสามารถทำงานที่ความถี่สวิตช์สูงขึ้นและลดกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ได้ [6]

บทความนี้มีแนวคิดในการหารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับสวิตช์ของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ โดยเปรียบเทียบระหว่างการนำสวิตช์ที่มาจาก ไอจีบีทีตัวเดียว มอสเฟตตัวเดียว สวิตช์ผสมแบบ ไอจีบีทีขนานกับ

มอสเฟต และสวิตช์ผสมแบบ ไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต เริ่มจากจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อสร้างวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียที่ตัวสวิตช์ทั้งสี่รูปแบบ และแรงดันที่โหลด แล้วนำผลการจำลองมาวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบสวิตช์ที่เหมาะสมสำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

2. ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter) สามารถใช้ ไอจีบีทีหรือมอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ก็ได้ จะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 กำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงมากจนถือว่ากระแสที่ไหลผ่านมีความต่อเนื่อง หม้อแปลงของวงจรประกอบด้วยขดลวดสามชุด ขดลวดชุดที่หนึ่งและสองทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงาน จากแหล่งจ่ายไปยังโหลดเมื่ออุปกรณ์สวิตช์นำกระแส ชุดที่สามทำหน้าที่เป็นทางเดินของกระแสที่แม่เหล็กเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ไม่นำกระแส เพื่อให้กระแสที่แม่เหล็กลดลงเป็นศูนย์ก่อนเข้าสู่คาบสวิตช์ถัดไป

ขณะอุปกรณ์สวิตช์นำกระแส แรงดันตกคร่อมขดลวด มีค่าดังนี้

$$v_1 = V_s \quad (1)$$

$$v_2 = v_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right) = V_s \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (2)$$

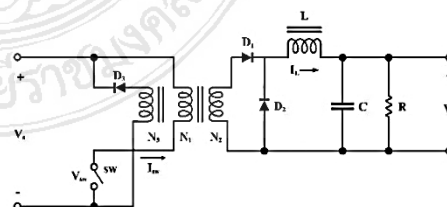
$$v_3 = v_1 \left(\frac{N_3}{N_1} \right) = V_s \left(\frac{N_3}{N_1} \right) \quad (3)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่แม่เหล็กเทียบกับเวลาคือ

$$\frac{di_{Lm}}{dt} = - \frac{V_s}{L_m} \left(\frac{N_3}{N_2} \right) \quad (4)$$

กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L จะมีค่าลดลงขณะอุปกรณ์สวิตช์ไม่นำกระแส และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสดังกล่าวที่สภาวะคงตัวต่อหนึ่งคาบการสวิตช์ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันที่โหลดจะได้

$$V_o = V_s D \left(\frac{N_2}{N_3} \right) \quad (5)$$



รูปที่ 1 วงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46

The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)

วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ คิวน่า พลาซ่า กระบี่ อ่าวนาง จังหวัดกระบี่



3. กำลังสูญเสียที่ตัวสวิตช์

จากรูปที่ 2 กำลังสูญเสียของสวิตช์ทั้ง 4 รูปแบบ สามารถหาได้ดังนี้

กำลังสูญเสียของไอจีบีที คือ

$$P_{IGBT} = V_{CE,on} \cdot I_{IGBT} \quad (6)$$

กำลังสูญเสียของมอสเฟต คือ

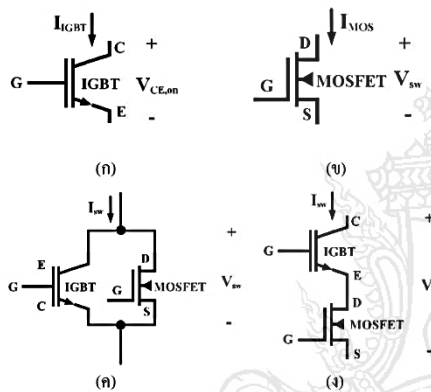
$$P_{MOS} = I_{MOS}^2 \cdot R_{DS,on} \quad (7)$$

กำลังสูญเสียของสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟต คือ

$$P_{parallel} = V_{SW} \cdot I_{SW} \quad (8)$$

กำลังสูญเสียของสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต คือ

$$P_{series} = V_{SW} \cdot I_{SW} \quad (9)$$



รูปที่ 2 รูปแบบสวิตช์เมื่อใช้ไอจีบีทีและมอสเฟต

(ก) สวิตช์ที่ใช้ไอจีบีทีตัวเดียว

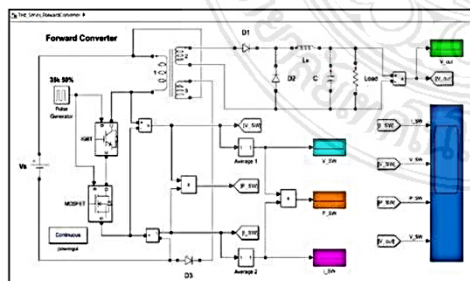
(ข) สวิตช์ที่ใช้มอสเฟตตัวเดียว

(ค) สวิตช์ผสมไอจีบีทีขนานกับมอสเฟต

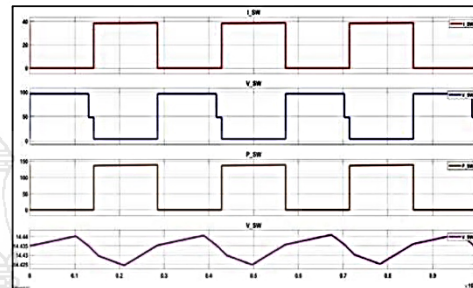
(ง) สวิตช์ผสมไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต

4. การจำลองและผลจำลองการทำงาน

จากวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ในหัวข้อที่ 2 กำลังสูญเสียในหัวข้อที่ 3 รวมทั้งแรงดันที่โหลดสามารถหาได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยในรูปที่ 3 เป็นการยกตัวอย่างแบบจำลองการใช้สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต



รูปที่ 3 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต

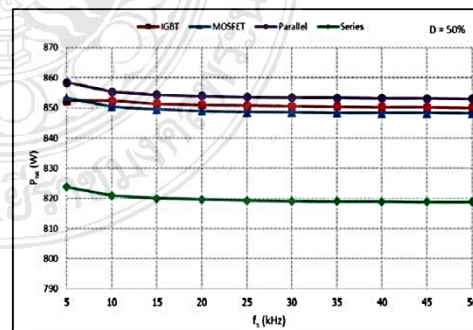


รูปที่ 4 รูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ กรณีใช้สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต

จากการจำลองกรณีใช้สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต ซึ่งมาจากรูปที่ 3 โดยมีความถี่สวิตช์ (f) 35 กิโลเฮิร์ตซ์ และวัฏจักรงาน (D) 0.5 จะได้รูปคลื่นสัญญาณช่วงเริ่มนำกระแส ช่วงนำกระแส และช่วงหยุดนำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อทำการจำลองกับสวิตช์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ ไอจีบีทีตัวเดียว มอสเฟตตัวเดียว สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟต และสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต พบว่าเมื่อทำการปรับความถี่สวิตช์และวัฏจักรงาน จะได้แรงดันโหลดที่มีค่าใกล้เคียงกันเสมอ แต่กำลังสูญเสียที่สวิตช์จะมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำการจำลองในสองกรณี คือ วัฏจักรงานคงที่แต่ปรับความถี่สวิตช์ และความถี่สวิตช์คงที่แต่ปรับวัฏจักรงาน เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการใช้สวิตช์ในแต่ละรูปแบบ

การจำลองกรณีแรก กำหนดให้วัฏจักรงานคงที่ 0.5 มีแรงดันอินพุต 48 โวลต์ ปรับความถี่สวิตช์ตั้งแต่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 5 พบว่ากรณีให้วัฏจักรงานคงที่ สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟตมีกำลังสูญเสียน้อยกว่าสวิตช์ที่ใช้ไอจีบีทีตัวเดียว มอสเฟตตัวเดียว และสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟต อย่างชัดเจนในทุกความถี่สวิตช์ (ประมาณ 30 วัตต์)

ส่วนผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 6 พบว่าสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟตมีแรงดันที่โหลดน้อยกว่าการต่อสวิตช์ 3 รูปแบบที่เหลือเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในทุกความถี่สวิตช์ (ประมาณ 0.4 โวลต์)

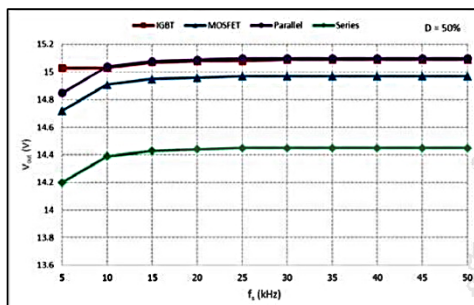


รูปที่ 5 กำลังสูญเสียของสวิตช์เมื่อใช้สวิตช์ในรูปแบบต่าง ๆ กรณีให้วัฏจักรงานคงที่

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46

The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)

วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ โรงแรมอิมพีเรียล จันทบุรี



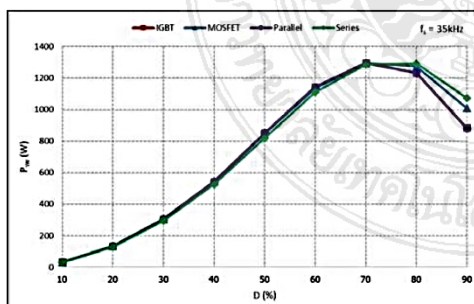
รูปที่ 6 แรงดันที่โหลดเมื่อใช้สวิตช์ในรูปแบบต่าง ๆ กรณีวัฏจักรงานคงที่

การจำลองกรณีที่สอง กำหนดให้ความถี่สวิตช์คงที่ 35 กิโลเฮิร์ตซ์ มีแรงดันอินพุต 48 โวลต์ ทำการปรับวัฏจักรงานขึ้นลง 0.1 ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9 ผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 7 พบว่าแรงดันที่โหลดเมื่อใช้สวิตช์งาน 0.1 ถึง 0.7 สวิตช์แบบ ไอจีบีทีตัวเดียว มอสเฟตตัวเดียว สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟต และสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต นั้น กำลังสูญเสียของสวิตช์มีแนวโน้มสูงขึ้นโดยมีค่าใกล้เคียงกันทั้งหมด

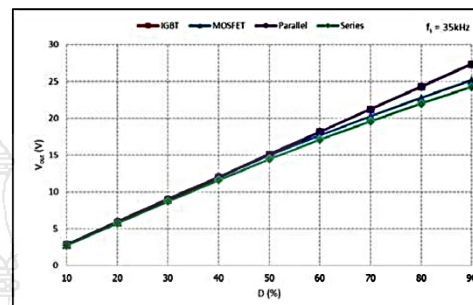
แต่เมื่อวัฏจักรงานอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 0.9 กำลังสูญเสียของสวิตช์ทุกรูปแบบมีแนวโน้มลดลง โดยจัดลำดับกำลังสูญเสียที่มีค่าต่ำสุดไปยังค่าสูงสุดดังนี้ สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟตซึ่งใกล้เคียงมากกับสวิตช์แบบ ไอจีบีทีตัวเดียว สวิตช์แบบมอสเฟตตัวเดียว และสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต

ผลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 8 พบว่าที่วัฏจักรงาน 0.1 ถึง 0.4 แรงดันที่โหลดของสวิตช์ทุกรูปแบบมีแนวโน้มสูงขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกันมาก

แต่เมื่อวัฏจักรงานมากกว่า 0.5 ขึ้นไป แรงดันที่โหลดเมื่อใช้สวิตช์ทุกรูปแบบมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยจัดลำดับแรงดันที่โหลดที่มีค่าต่ำสุดไปยังค่าสูงสุดดังนี้ สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต สวิตช์แบบมอสเฟตตัวเดียว และสวิตช์แบบ ไอจีบีทีตัวเดียวซึ่งใกล้เคียงมากกับสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟต



รูปที่ 7 กำลังสูญเสียของสวิตช์เมื่อใช้สวิตช์ในรูปแบบต่าง ๆ กรณีความถี่สวิตช์คงที่



รูปที่ 8 แรงดันที่โหลดเมื่อใช้สวิตช์ในรูปแบบต่าง ๆ กรณีความถี่สวิตช์คงที่

5. สรุป

งานวิจัยนี้วิเคราะห์รูปแบบสวิตช์สำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ใน 4 รูปแบบ คือ สวิตช์ที่ใช้ไอจีบีทีตัวเดียว สวิตช์ที่ใช้มอสเฟตตัวเดียว สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟต และสวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟต ผ่านการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ให้คอนเวอร์เตอร์มีแรงดันอินพุต 48 โวลต์ โดยทดสอบใน 2 กรณี คือ วัฏจักรงานคงที่แต่ปรับความถี่สวิตช์ และความถี่สวิตช์คงที่แต่ปรับวัฏจักรงาน

สำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ กรณีวัฏจักรงานคงที่แต่ปรับความถี่สวิตช์นั้น ความถี่สวิตช์แทบไม่มีผลต่อกำลังสูญเสียที่สวิตช์และแรงดันที่โหลด โดยเมื่อใช้สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีขนานกับมอสเฟตจะมีกำลังสูญเสียที่สวิตช์มากที่สุด เพราะขณะนำกระแสในไอจีบีทีจะนำกระแสส่วนใหญ่ และมอสเฟตนำกระแสส่วนน้อยมี $R_{DS(on)}$ สูง ทำให้ค่ากำลังสูญเสียมีลักษณะตามไอจีบีทีเป็นหลัก และเมื่อใช้สวิตช์ผสมแบบไอจีบีทีอนุกรมกับมอสเฟตจะมีกำลังสูญเสียที่สวิตช์น้อยที่สุด เนื่องจากเมื่อมอสเฟตหยุดนำกระแสจะทำให้พาหะข้างน้อยในไอจีบีทีรวมตัวกันอีก โดยไอจีบีทียังคงอยู่ในสถานะนำกระแส และ $V_{CE(sat)}$ จะถูกบล็อกโดยมอสเฟต จากนั้นไอจีบีทีจึงหยุดนำกระแสภายใต้สภาวะการสวิตช์ที่กระแสศูนย์ (Zero Current Switching: ZCS) เป็นผลให้กำลังสูญเสียขณะหยุดนำกระแสมีค่าลดลง รวมทั้งความถี่สวิตช์จะมีผลต่อกำลังสูญเสียเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กรณีความถี่สวิตช์คงที่แต่ปรับวัฏจักรงาน กำลังสูญเสียที่สวิตช์และแรงดันที่โหลดจะแปรผันตรงกับวัฏจักรงานในช่วง 0.1 ถึง 0.7 แต่วัฏจักรงานในช่วง 0.7 ถึง 0.9 กำลังสูญเสียจะแปรผกผันกับวัฏจักรงาน ส่วนแรงดันที่โหลดจะแปรผันตรงกับวัฏจักรงาน ซึ่งสอดคล้องตามสมการที่ 5 ดังนั้นฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ในกรณีนี้ควรปรับวัฏจักรงานในช่วง 0.1 ถึง 0.7 จึงเหมาะสมที่สุด ดังนั้นการวิเคราะห์รูปแบบสวิตช์ในงานวิจัยนี้มีส่วนในการช่วยเลือกใช้สวิตช์ที่เหมาะสมสำหรับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เมื่อทำงานในกรณีวัฏจักรงานคงที่แต่ปรับความถี่สวิตช์ และกรณีความถี่สวิตช์คงที่แต่ปรับวัฏจักรงาน

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46

The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)

วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ คิวน่า พลาซ่า กระบี่ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่



6. ภาคผนวก

พารามิเตอร์ในบล็อกของไอจีบีที และมอสเฟต ที่ใช้ในการจำลองการทำงานได้แสดงไว้ดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ

รูปที่ 9 พารามิเตอร์ของไอจีบีทีที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

รูปที่ 10 พารามิเตอร์ของมอสเฟตที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนบทความวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] H.P. Yee and D. Liu, "An ASIC to control the paralleling of an IGBT with a MOSFET," Proc. IEEE-APEC, vol. 1, pp. 151-155, 23-27 February 1997.
- [2] J. P. Kaerst and K. F. Hoffmann, "High speed complimentary drive of a hybrid MOSFET and IGBT power switch," in European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-9, 2005.
- [3] N. Machin and T. Vescovi, "Very high efficiency techniques and their selective application to the design of a 70A rectifier," in Proc. INTELEC'93, pp. 126-133, 1993.
- [4] J. Qian, A. Khan, and I. Batarseh, "Turn-off switching loss model and analysis of IGBT under different switching operation modes," Proc. IEEE-IECON, vol. 1, pp. 240-245, 6-10 November 1995.
- [5] S. Woothipatanapan, A. Jangwanitert, and P. Chanchaenook, "Efficiency improvement of converter for switched reluctance motor drives by mixed operation of IGBT and MOSFET," in Proc. TENCON 2010, pp. 1841-1846, 2010.
- [6] ศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย วัฒนพันธุ์ อธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และ นวัตกรรม รัชฎาภรณ์ รัชฎาภรณ์, "การวิเคราะห์กำลังสูญเสียที่สวิตช์ของฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์เมื่อใช้ไอจีบีทีและมอสเฟตเป็นสวิตช์," การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 (EENET2023), หน้า 776-779, 2566.

ภาพผนวก ข



ข้อมูลจำเพาะอุปกรณ์สำคัญ

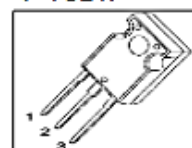
1. มอสเฟต หมายเลข SPW20N60S5



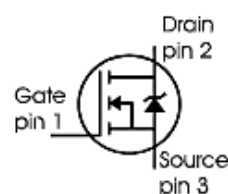

SPW20N60S5
Cool MOS™ Power Transistor
Feature

- New revolutionary high voltage technology
- Ultra low gate charge
- Periodic avalanche rated
- Extreme dv/dt rated
- Ultra low effective capacitances
- Improved transconductance

V_{DS}	600	V
$R_{DS(on)}$	0.19	Ω
I_D	20	A

P-T0247


Type	Package	Ordering Code	Marking
SPW20N60S5	P-T0247	Q67040-S4238	20N60S5


Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Continuous drain current	I_D	20	A
$T_C = 25^\circ\text{C}$		13	
$T_C = 100^\circ\text{C}$			
Pulsed drain current, t_p limited by T_{jmax}	$I_{D\text{ puls}}$	40	
Avalanche energy, single pulse	E_{AS}	690	mJ
$I_D = 10\text{ A}$, $V_{DD} = 50\text{ V}$			
Avalanche energy, repetitive t_{AR} limited by T_{jmax} ¹	E_{AR}	1	
$I_D = 20\text{ A}$, $V_{DD} = 50\text{ V}$			
Avalanche current, repetitive t_{AR} limited by T_{jmax}	I_{AR}	20	A
Gate source voltage	V_{GS}	± 20	V
Gate source voltage AC ($f > 1\text{ Hz}$)	V_{GS}	± 30	
Power dissipation, $T_C = 25^\circ\text{C}$	P_{tot}	208	W
Operating and storage temperature	T_j, T_{stg}	-55... +150	$^\circ\text{C}$



SPW20N60S5

Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Drain Source voltage slope $V_{DS} = 480\text{ V}$, $I_D = 20\text{ A}$, $T_J = 125\text{ °C}$	dv/dt	20	V/ns

Thermal Characteristics

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
Thermal resistance, junction - case	R_{thJC}	-	-	0.6	K/W
Thermal resistance, junction - ambient, leaded	R_{thJA}	-	-	50	
Soldering temperature, 1.6 mm (0.063 in.) from case for 10s	T_{sold}	-	-	260	°C

Electrical Characteristics, at $T_J = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			min.	typ.	max.	
Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DSS}$	$V_{GS} = 0\text{ V}$, $I_D = 0.25\text{ mA}$	600	-	-	V
Drain-Source avalanche breakdown voltage	$V_{(BR)DS}$	$V_{GS} = 0\text{ V}$, $I_D = 20\text{ A}$	-	700	-	
Gate threshold voltage	$V_{GS(th)}$	$I_D = 1000\text{ }\mu\text{A}$, $V_{DS} = V_{GS}$	3.5	4.5	5.5	
Zero gate voltage drain current	I_{DSS}	$V_{DS} = 600\text{ V}$, $V_{GS} = 0\text{ V}$, $T_J = 25\text{ °C}$,	-	0.5	5	μA
		$T_J = 150\text{ °C}$	-	-	250	
			-	-	-	
Gate-source leakage current	I_{GSS}	$V_{GS} = 20\text{ V}$, $V_{DS} = 0\text{ V}$	-	-	100	nA
Drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}$, $I_D = 13\text{ A}$, $T_J = 25\text{ °C}$	-	0.16	0.19	Ω
		$T_J = 150\text{ °C}$	-	0.43	-	
			-	-	-	
Gate input resistance	R_G	$f = 1\text{ MHz}$, open Drain	-	12	-	



SPW20N60S5

Electrical Characteristics, at $T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			min.	typ.	max.	
Characteristics						
Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} \geq 2 \cdot I_D \cdot R_{DS(on)max}$, $I_D = 13A$	-	12	-	S
Input capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0V$, $V_{DS} = 25V$, $f = 1MHz$	-	3000	-	pF
Output capacitance	C_{oss}		-	1170	-	
Reverse transfer capacitance	C_{rss}		-	28	-	
Effective output capacitance, ²⁾ energy related	$C_{o(er)}$	$V_{GS} = 0V$, $V_{DS} = 0V$ to 480V	-	83	-	pF
Effective output capacitance, ³⁾ time related	$C_{o(tr)}$		-	160	-	
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 350V$, $V_{GS} = 0/10V$, $I_D = 20A$, $R_G = 3.6\Omega$	-	120	-	ns
Rise time	t_r		-	25	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	130	195	
Fall time	t_f		-	30	45	

Gate Charge Characteristics

Gate to source charge	Q_{gs}	$V_{DD} = 350\text{V}$, $I_D = 20\text{A}$	-	21	-	nC
Gate to drain charge	Q_{gd}		-	47	-	
Gate charge total	Q_g	$V_{DD} = 350\text{V}$, $I_D = 20\text{A}$, $V_{GS} = 0 \text{ to } 10\text{V}$	-	79	103	
Gate plateau voltage	$V_{(plateau)}$	$V_{DD} = 350\text{V}$, $I_D = 20\text{A}$	-	8	-	V

¹ Repetitive avalanche causes additional power losses that can be calculated as $P_{AV} = E_{AR} \cdot f$.

² $C_{o(er)}$ is a fixed capacitance that gives the same stored energy as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DSS} .

³ $C_{o(tr)}$ is a fixed capacitance that gives the same charging time as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DSS} .

ข้อมูลจำเพาะอุปกรณ์สำคัญ (ต่อ)

2. ไอจีบีที หมายเลข G20N60B3D



FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

HGTG20N60B3D

Data Sheet

December 2001

**40A, 600V, UFS Series N-Channel IGBT
with Anti-Parallel Hyperfast Diode**

The HGTG20N60B3D is a MOS gated high voltage switching device combining the best features of MOSFETs and bipolar transistors. The device has the high input impedance of a MOSFET and the low on-state conduction loss of a bipolar transistor. The much lower on-state voltage drop varies only moderately between 25°C and 150°C. The diode used in anti-parallel with the IGBT is the RHRP3060.

The IGBT is ideal for many high voltage switching applications operating at moderate frequencies where low conduction losses are essential.

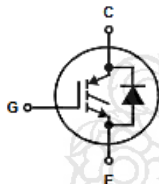
Formerly developmental type TA49016.

Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
HGTG20N60B3D	TO-247	G20N60B3D

NOTE: When ordering, use the entire part number.

Symbol

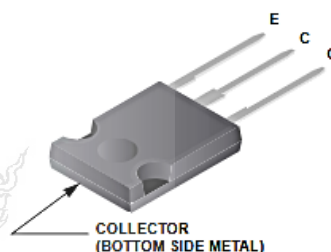


Features

- 40A, 600V at $T_C = 25^\circ\text{C}$
- Typical Fall Time. 140ns at 150°C
- Short Circuit Rated
- Low Conduction Loss
- Hyperfast Anti-Parallel Diode

Packaging

JEDEC STYLE TO-247



FAIRCHILD SEMICONDUCTOR IGBT PRODUCT IS COVERED BY ONE OR MORE OF THE FOLLOWING U.S. PATENTS

4,364,073	4,417,385	4,430,792	4,443,931	4,466,176	4,516,143	4,532,534	4,587,713
4,598,461	4,605,948	4,620,211	4,631,564	4,639,754	4,639,762	4,641,162	4,644,637
4,682,195	4,684,413	4,694,313	4,717,679	4,743,952	4,783,690	4,794,432	4,801,986
4,803,533	4,809,045	4,809,047	4,810,665	4,823,176	4,837,606	4,860,080	4,883,767
4,888,627	4,890,143	4,901,127	4,904,609	4,933,740	4,963,951	4,969,027	

HGTG20N60B3D

Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

	HGTG20N60B3D	UNITS
Collector to Emitter Voltage	BV_{CES}	600 V
Collector to Gate Voltage, $R_{GE} = 1\text{M}\Omega$	BV_{CGR}	600 V
Collector Current Continuous	I_{C25}	40 A
At $T_C = 110^\circ\text{C}$	I_{C110}	20 A
Average Diode Forward Current at 110°C	$I_{(AVG)}$	20 A
Collector Current Pulsed (Note 1)	I_{CM}	160 A
Gate to Emitter Voltage Continuous	V_{GES}	± 20 V
Gate to Emitter Voltage Pulsed	V_{GEM}	± 30 V
Switching Safe Operating Area at $T_C = 150^\circ\text{C}$	SSOA	30A at 600V
Power Dissipation Total at $T_C = 25^\circ\text{C}$	P_D	165 W
Power Dissipation Derating $T_C > 25^\circ\text{C}$		1.32 W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{STG}	-40 to 150 $^\circ\text{C}$
Maximum Lead Temperature for Soldering	T_L	260 $^\circ\text{C}$
Short Circuit Withstand Time (Note 2) at $V_{GE} = 15\text{V}$	t_{SC}	4 μs
Short Circuit Withstand Time (Note 2) at $V_{GE} = 10\text{V}$	t_{SC}	10 μs

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTES:

1. Repetitive Rating: Pulse width limited by maximum junction temperature.
2. $V_{CE} = 360\text{V}$, $T_C = 125^\circ\text{C}$, $R_G = 25\Omega$.

Electrical Specifications $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Collector to Emitter Breakdown Voltage	BV_{CES}	$I_C = 250\mu\text{A}$, $V_{GE} = 0\text{V}$	600	-	-	V
Collector to Emitter Leakage Current	I_{CES}	$V_{CE} = BV_{CES}$, $T_C = 25^\circ\text{C}$	-	-	250	μA
		$T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	2.0	mA
Collector to Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(SAT)}$	$I_C = I_{C110}$, $V_{GE} = 15\text{V}$, $T_C = 25^\circ\text{C}$	-	1.8	2.0	V
		$T_C = 150^\circ\text{C}$	-	2.1	2.5	V
Gate to Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(TH)}$	$I_C = 250\mu\text{A}$, $V_{CE} = V_{GE}$	3.0	5.0	6.0	V
Gate to Emitter Leakage Current	I_{GES}	$V_{GE} = \pm 20\text{V}$	-	-	± 100	nA
Switching SOA	SSOA	$T_C = 150^\circ\text{C}$, $V_{CE} = 480\text{V}$	100	-	-	A
		$V_{GE} = 15\text{V}$, $R_G = 10\Omega$, $L = 45\mu\text{H}$, $V_{CE} = 600\text{V}$	30	-	-	A
Gate to Emitter Plateau Voltage	V_{GEP}	$I_C = I_{C110}$, $V_{CE} = 0.5 BV_{CES}$	-	8.0	-	V
On-State Gate Charge	$Q_{G(ON)}$	$I_C = I_{C110}$, $V_{GE} = 15\text{V}$	-	80	105	nC
		$V_{CE} = 0.5 BV_{CES}$, $V_{GE} = 20\text{V}$	-	105	135	nC
Current Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	$T_C = 150^\circ\text{C}$, $I_{CE} = I_{C110}$	-	25	-	ns
Current Rise Time	t_{rl}	$V_{CE} = 0.8 BV_{CES}$	-	20	-	ns
Current Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$	$V_{GE} = 15\text{V}$	-	220	275	ns
Current Fall Time	t_{fl}	$R_G = 10\Omega$	-	140	175	ns
Turn-On Energy	E_{ON}	$L = 100\mu\text{H}$	-	475	-	μJ
Turn-Off Energy (Note 3)	E_{OFF}		-	1050	-	μJ
Diode Forward Voltage	V_{EC}	$I_{EC} = 20\text{A}$	-	1.5	1.9	V
Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$I_{EC} = 20\text{A}$, $dI_{EC}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	55	ns
		$I_{EC} = 1\text{A}$, $dI_{EC}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	45	ns
Thermal Resistance	$R_{\theta JC}$	IGBT	-	-	0.76	$^\circ\text{C}/\text{W}$
		Diode	-	-	1.2	$^\circ\text{C}/\text{W}$

NOTE:

3. Turn-Off Energy Loss (E_{OFF}) is defined as the integral of the instantaneous power loss starting at the trailing edge of the input pulse and ending at the point where the collector current equals zero ($I_{CE} = 0\text{A}$). The HGTG20N60B3D was tested per JEDEC standard No. 24-1 Method for Measurement of Power Device Turn-Off Switching Loss. This test method produces the true total Turn-Off Energy Loss. Turn-On losses include diode losses.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล	นางสาวธิดาทิพย์ พรหมทา	
วัน เดือน ปีเกิด	7 มิถุนายน พ.ศ. 2539	
ภูมิลำเนา	อำเภอบึงบอระเพ็ด จังหวัดศรีสะเกษ	
ประวัติการศึกษา		
วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2562
ผลงานดีเด่น และรางวัลทางวิชาการ		
เผยแพร่บทความวิจัยในงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 (EENET 2023)		
เผยแพร่บทความวิจัยในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46 (EECON 2023)		