



การพัฒนาอินเวอร์เตอร์จากแหล่งจ่ายกระแสตรง โดยใช้ตัวแปลงบัค-บูสต์ แบบเลือกขั้วได้
ด้วยสัญญาณพื่นเลื่อยดัดแปลง



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต
ปีการศึกษา 2567



**DEVELOPMENT OF INVERTER FROM A DC SOURCE USING A POLARITY
SELECTABLE BUCK-BOOST CONVERTER WITH MODIFIED
SAWTOOTH SIGNAL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
COLLEGE OF ENGINEERING**

**GRADUATE SCHOOL RANGSIT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2024**

วิทยานิพนธ์เรื่อง

การพัฒนาอินเวอร์เตอร์จากแหล่งจ่ายกระแสตรง โดยใช้ตัวแปลงบัค-บูสต์ แบบเลือกขั้วได้
ด้วยสัญญาณฟันเลื่อยตัดแปลง

โดย

จักรกฤษณ์ ขุนแก้ว

ได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2567

ศ.ดร. เมธีพนธ์ พัฒนศักดิ์

ประธานกรรมการสอบ

ผศ.ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์

กรรมการ

ผศ.ดร. สุพัฒน์ นีระกมนารณ์

กรรมการ

ผศ.ดร. สมบูรณ์ สุขสาตร

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ศ.ดร. สือจิตต์ เพ็ชรประสาน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

4 เมษายน 2568

Thesis entitled

**DEVELOPMENT OF INVERTER FROM A DC SOURCE USING A POLARITY SELECTABLE
BUCK-BOOST CONVERTER WITH MODIFIED SAWTOOTH SIGNAL**

by

JAKKRIT KHUNKAEW

was submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering in Electrical and Computer Engineering

Rangsit University
Academic Year 2024

Prof. Matheepot Phattanasak, Ph.D.
Examination Committee Chairperson

Asst. Prof. Wanchai Subsingha, Ph.D.
Member

Asst. Prof. Supattana Nirukkanaporn, Ph.D.
Member

Asst. Prof. Somboon Sooksatra, Ph.D.
Member and Advisor

Approved by Graduate School

(Prof. Suejit Pechprasarn, Ph.D.)

Dean of Graduate School

April 4, 2025

กิตติกรรมประกาศ

“ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่าน อาจารย์สมบูรณ์ สุขสาคร ที่ได้กรุณามอบองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมไฟฟ้า การออกแบบและวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า ทักษะการจำลองผลลัพธ์ด้วยคอมพิวเตอร์ และแนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์ที่มีคุณค่าอย่างยิ่งให้กับข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้เป็นอย่างมากจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ยังมีความเมตตาให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้งานภาษาอังกฤษเพื่อการสื่อสาร เพื่อให้ง่ายต่อการเรียนการสอนภายในชั้นเรียน และการค้นคว้าข้อมูลประกอบการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการใช้นำเสนอบทความสำหรับการประชุมเชิงวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้านานาชาติ ประจำปี พ.ศ.2567 (ICPEI 2024)

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คณะกรรมการผู้สอบวิทยานิพนธ์ที่ได้พิจารณาและแก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีคุณค่าอย่างยิ่ง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ได้มอบวิชาความรู้ให้กับข้าพเจ้าเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคลากรที่ทำหน้าที่ด้านธุรการของวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ได้เอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกต่างๆ ทั้งในขั้นตอนการนำเสนอวิทยานิพนธ์และการเรียนในระดับปริญญาโทของข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณสถาบันวิชาการป้องกันประเทศ ที่ได้พิจารณามอบทุนการศึกษาในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ให้กับข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้าได้รับองค์ความรู้เพิ่มเติมจากการศึกษาเพื่อนำไปบูรณาการร่วมกับแผนการพัฒนาบุคลากรและกองทัพบก ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์กับผู้อ่านและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ในอนาคต

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดาและมารดา รวมถึงผู้บังคับบัญชาที่มีเมตตา และกรุณาอนุญาตให้ใช้เวลาราชการบางส่วนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ข้าพเจ้ามีความซาบซึ้งใจ เป็นอย่างยิ่งขอขอบพระคุณครับ”

จักรกฤษณ์ ขุนแก้ว

ผู้วิจัย

6609077 : จักรกฤษณ์ ขุนแก้ว
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การพัฒนาอินเวอร์เตอร์จากแหล่งจ่ายกระแสตรง โดยใช้ตัวแปลง
 บัค-บูสต์ แบบเลือกขั้วได้ ด้วยสัญญาณพื้นเลื่อยดัดแปลง
 หลักสูตร : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. สมบูรณ์ สุขสาตร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการพัฒนาอินเวอร์เตอร์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ตัวแปลงบัค-บูสต์ แบบเลือกขั้วได้ เนื่องจากความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างระดับสัญญาณอ้างอิงกับอัตราขยายของตัวแปลงที่เพิ่มขึ้น เมื่อใช้กับสัญญาณพื้นเลื่อยทั่วไป การสร้างการปรับความกว้างพัลส์, สัญญาณพื้นเลื่อยดัดแปลง จึงได้มีการพัฒนาในการวิจัยนี้ โดยการประยุกต์ฟังก์ชันสัญญาณ พื้นเลื่อยที่ทำการปรับปรุงด้วยวิธีการประมาณเอ็กซ์โพเนนเชียล สำหรับใช้กับคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ นอกจากนี้ งานวิจัยแสดงให้เห็นว่า ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ด้านเอาต์พุตสูงกว่าค่าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุตได้และจ่ายกระแสเอาต์พุตสูงสุด 1 A โดยมีแรงดันอินพุต 156 V และความถี่สวิตช์ 20 kHz สุดท้ายนี้ การออกแบบและการจำลองผลลัพธ์ของสัญญาณเอาต์พุตเพื่อยืนยันการตรวจสอบความถูกต้องการออกแบบการวิเคราะห์งานวิจัยนี้ด้วยคอมพิวเตอร์

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 79 หน้า)

คำสำคัญ: คอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์, สัญญาณพื้นเลื่อย, การประมาณค่าเอ็กซ์โพเนนเชียล, แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ลายมือชื่อนักศึกษา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

6609077 : Jakkrit Khunkaew
 Thesis Title : Development of Inverter from a DC Source Using a Polarity Selectable Buck-Boost Converter with Modified Sawtooth Signal
 Program : Master of Engineering in Electrical and Computer Engineering
 Thesis Advisor : Asst.Prof. Somboon Sooksatra, Ph.D.

Abstract

This research presents the development of an inverter from a DC source using a polarity-selectable buck-boost converter. Due to the nonlinear relationship between the reference signal level and the converter gain when using the ordinary sawtooth signal to generate pulse-width modulation, the newly modified sawtooth signal was developed in this research. The exponential approximation is applied to the sawtooth function used for the proposed converter. This research shows that the peak value of the output sinusoidal voltage can be higher than that of the input DC source. It provides a maximum output current at 1 A, an input voltage of 156 V, and a switching frequency of 20 kHz. Finally, a design example and computer simulation were also given in this research to validate the analytical work.

(Total 79 pages)

Keywords: Buck-boost converter, Sawtooth signal, Exponential Approximation, Sinusoidal voltage.

Student's Signature..... Thesis Advisor's Signature

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1	บทนำ
	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
	1
	1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย
	2
	1.3 สมมติฐานการวิจัย
	2
	1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย
	3
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
	4
	1.6 นิยามศัพท์
	5
บทที่ 2	ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
	7
	2.1 บัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter)
	7
	2.2 บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter)
	14
	2.3 บัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง (Bidirectional Buck-Boost Converter)
	21
	2.4 หลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย (Circuit Simplification Approach)
	24
	2.5 การควบคุมความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM)
	30
	2.6 ทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์
	32
บทที่ 3	การวิเคราะห์การทำงานในสถานะคงตัว
	36
	3.1 การวิเคราะห์โหมดการทำงาน
	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าในสถานะคงตัว	47
3.3 การวิเคราะห์ห้วงจรด้วยคอมพิวเตอร์	55
บทที่ 4	การออกแบบและการจำลองผลลัพธ์
4.1 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์	57
4.2 การออกแบบความกว้างพัลส์แบบ PWM	62
4.3 การจำลองผลลัพธ์	64
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการวิจัย	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม	76
ประวัติผู้วิจัย	79

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	อุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับพัลส์วิชฌ์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป ตามหลักการลครูปวงจรอย่างง่าย	29
3.1	การตั้งค่าสวิตช์สำหรับการทํางานที่โหมคแตกต่างกัน	38



สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	กรอบแนวคิดการวิจัย	4
2.1	วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	7
2.2	โหมดที่ 1 ขณะมอสเฟตนำกระแสของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	8
2.3	โหมดที่ 2 ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	8
2.4	สัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	11
2.5	สัญญาณกระแสเหนี่ยวนำของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	11
2.6	การใช้สัญญาณกระแสเหนี่ยวนำระลอก เพื่อคำนวณค่าความเปลี่ยนแปลง ประจุของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์	12
2.7	วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	15
2.8	โหมดที่ 1 ขณะมอสเฟตนำกระแสของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	15
2.9	โหมดที่ 2 ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	16
2.10	สัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	18
2.11	สัญญาณกระแสเหนี่ยวนำระลอกของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	18
2.12	สัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์	19
2.13	วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง	21
2.14	วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง ขณะทำงานเป็นวงจรบัค ในโหมดที่ 1	22
2.15	วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง ขณะทำงานเป็นวงจรบัค ในโหมดที่ 2	23
2.16	วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง ขณะทำงานเป็นวงจรบูสต์ ในโหมดที่ 1	23
2.17	วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง ขณะทำงานเป็นวงจรบูสต์ ในโหมดที่ 2	24
2.18	การกำหนดให้กระแสเหนี่ยวนำและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่	25
2.19	การลดรูปวงจรตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันแบบอนุกรม โดยตรงให้กลายเป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแส	26

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.20	การลดรูปวงจรตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อกับตัวต้านทานแบบขนานโดยตรง ให้กลายเป็นวงจรภาระโหลดแรงดัน	27
2.21	การลดรูปวงจรตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับตัวต้านทานแบบอนุกรมโดยตรง ให้กลายเป็นวงจรภาระโหลดกระแส	27
2.22	การลดรูปวงจรตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายและภาระโหลด ให้กลายเป็นวงจรบัฟเฟอร์แรงดัน	28
2.23	การลดรูปวงจรตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายและภาระโหลด ให้กลายเป็นวงจรบัฟเฟอร์กระแส	28
2.24	ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานของหลักการลดรูปอย่างง่าย	30
2.25	วงจรอุปแอมป์เปรียบเทียบแรงดัน สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์วิดธ์ มอดูเลชัน	31
2.26	การสร้างสัญญาณพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน	32
2.27	อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกึ่ง	33
2.28	วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีสถานการณ์ทำงานเป็น (ก) 2 ระดับ (ข) 3 ระดับ และ (ค) n ระดับ	35
3.1	วงจรของคอนเวอร์เตอร์บัก-บูสต์	36
3.2	วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการตั้งค่าสวิตช์ไม่กลับขั้ว คอนเวอร์เตอร์บัก-บูสต์	37
3.3	วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการตั้งค่าสวิตช์กลับขั้ว คอนเวอร์เตอร์บัก-บูสต์	37
3.4	แผนภาพลอจิกสำหรับสัญญาณการขับเคลื่อนเกท	38
3.5	ทิศทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา สำหรับคอนเวอร์เตอร์ ที่ทำงานในโหมดไม่กลับขั้ว	39
3.6	ทิศทางการไหลของกระแสในช่วงเวลา สำหรับคอนเวอร์เตอร์ ที่ทำงานในโหมดกลับขั้ว	39
3.7	คลื่นของกระแสตัวเหนี่ยวนำในสถานะคงตัว	40
3.8	ลักษณะการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ ดำเนินการใน CCM พร้อมตัวเหนี่ยวนำแบบสูญเสีย	43

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.9	ทิศทางการไหลของกระแสในช่วงเวลาการสลับ สำหรับ คอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดไม่กลับขั้ว โหมดที่ 1	44
3.10	ทิศทางการไหลของกระแสในช่วงเวลาการสลับ สำหรับ คอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดไม่กลับขั้ว โหมดที่ 2	45
3.11	ทิศทางการไหลของกระแสในช่วงเวลาการสลับ สำหรับ คอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดกลับขั้ว โหมดที่ 1	45
3.12	ทิศทางการไหลของกระแสในช่วงเวลาการสลับ สำหรับ คอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดกลับขั้ว โหมดที่ 2	46
3.13	วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบัค ในทิศทางตรง	48
3.14	วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบัค ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟต นำกระแส	48
3.15	วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบัค ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟต หยุดนำกระแส	49
3.16	วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบูสต์ ในทิศทางตรง	50
3.17	วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบูสต์ ในทิศทางตรง ขณะ มอสเฟต นำกระแส	51
3.18	วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบูสต์ ในทิศทางตรง ขณะ มอสเฟต หยุดนำกระแส	51
3.19	วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ ในทิศทางตรง	53

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.20	วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟต นำกระแส	53
3.21	วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟต หยุดนำกระแส	54
3.22	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์การทำงานแบบบัค-บูสต์ ที่มีการตั้งค่าสวิตช์	55
4.1	สัญญาณพื้นเลื้อยแบบเดิม	61
4.2	แรงดันไฟฟ้าขาเข้า จากการจำลองตัวแปลงสัญญาณพื้นเลื้อยแบบเดิม	61
4.3	แรงดันไฟฟ้าขาออก จากการจำลองตัวแปลงสัญญาณพื้นเลื้อยแบบเดิม	61
4.4	วงจรอปแอมป์จะเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเพื่อสร้างสัญญาณมอดูเลชันความกว้างพัลส์	62
4.5	การสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์	63
4.6	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ POS = 1	63
4.7	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ POS = 0	63
4.8	แผนภาพลอจิกคัดแปลงสำหรับการใช้งานอินเวอร์เตอร์	65
4.9	สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_1	65
4.10	สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_2	66
4.11	สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_3	66
4.12	สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_4	66
4.13	สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_5	67
4.14	สัญญาณพื้นเลื้อยแบบเดิม	67
4.15	แรงดันไฟฟ้าขาออก จากการจำลองคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้วงจรสัญญาณพื้นเลื้อยแบบเดิม	68

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	กราฟความสัมพันธ์ของค่า D ที่เพิ่มขึ้นระหว่างค่า $0 - 0.7$ ระหว่าง V_{saw} และ m ด้วยวิธีการประมาณค่าพหุนาม (Polynomial)	69
4.17	ผลลัพธ์ค่า k_2 ที่ได้จากการใช้โปรแกรมประยุกต์ GNU Octave	71
4.18	สัญญาณฟันเลื่อยที่ดัดแปลง	72
4.19	กราฟความสัมพันธ์ของค่า D ที่เพิ่มขึ้นระหว่างค่า $0 - 0.7$ ระหว่าง V_{saw} และ m ด้วยวิธีเอ็กซ์โพเนนเชียล Exponential Approximation	72
4.20	แรงดันไฟฟ้าขาออกเป็นสัญญาณไซน์ จากการจำลองคอนเวอร์เตอร์ วงจรสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้รับการดัดแปลง โดยใช้วิธี Exponential Approximation	73



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้น ซึ่งเห็นได้จากการดำเนินชีวิตประจำวัน ส่วนเกี่ยวข้องกับพลังงานไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นการทำงาน อุปกรณ์เครื่องมือ เครื่องอำนวยความสะดวกต่างๆ จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น แต่แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมัน และพลังงานจากน้ำ มาผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งพลังงานเหล่านี้ นับวันจะยิ่งลดน้อยลงไปเรื่อยๆ จึงเกิดแนวคิดพลังงานทดแทน เพื่อเป็นพลังงานทางเลือก ตัวอย่างเช่น พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานเชื้อเพลิง และพลังงานลม สำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ก่อนจะนำมาใช้งาน จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ นั่นก็คือ อินเวอร์เตอร์ (มณฑล นาวงษ์, 2559, น.1) โดยถ้าหากสามารถทำการสร้างให้อินเวอร์เตอร์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เป็นลักษณะของรูปคลื่นไซน์เวฟ (Sine Wave) เป็นรูปคลื่นที่เหมือนกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ทั่วไป

อินเวอร์เตอร์ได้พัฒนาอย่างรวดเร็วและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในงานควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากอินเวอร์เตอร์สามารถที่จะใช้ในการควบคุมมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบแรงบิดตามต้องการและมีประสิทธิภาพสูง อินเวอร์เตอร์ (Inverter) หมายถึง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ ชนิดที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supplies) ซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ เช่น ระบบป้องกันกำลังไฟฟ้าขาดช่วง (Uninterruptible Power Supplies) และอีกประเภทหนึ่งคือ ชนิดที่ใช้กับโหลดที่มีการเคลื่อนที่ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น จุดประสงค์ที่เหมือนของทั้ง 2 ชนิด คือ ต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่

ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอการพัฒนาอินเวอร์เตอร์จากแหล่งจ่ายกระแสตรง โดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบบัส-บูสต์ แบบเลือกขั้วได้ ด้วยสัญญาณพัลส์เปลี่ยน ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยสวิตช์ จำนวน 5 ตัว ที่สามารถกำหนดค่าได้ทั้งเอาต์พุตที่ไม่กลับขั้วและกลับขั้ว

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ สามารถทำหน้าที่เป็นคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ ที่มีอัตราขยายของตัวแปลงสามารถปรับให้ต่ำหรือสูงได้ และแสดงให้เห็นว่าค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าไซน์เอาต์พุตมีค่าสูงกว่าค่าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้ มีความเหมาะสมในการใช้งานกับพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานเชื้อเพลิง และพลังงานลม โดยไม่แยกกราวด์กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตัวอย่างการออกแบบและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในบทความนี้ เพื่อยืนยันการวิเคราะห์การกำหนดค่าคอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์การออกแบบและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ การวิเคราะห์โหมดการทำงาน และการออกแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์โหมดการทำงาน อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าและทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์

1.2.3 เพื่อออกแบบวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์

1.2.4 เพื่อออกแบบสร้างสัญญาณฟันเลื่อยดัดแปลง

1.2.5 เพื่อออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

1.2.6 เพื่อจำลองผลลัพธ์ ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าไซน์เอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยคอมพิวเตอร์

1.3 สมมติฐานการวิจัย

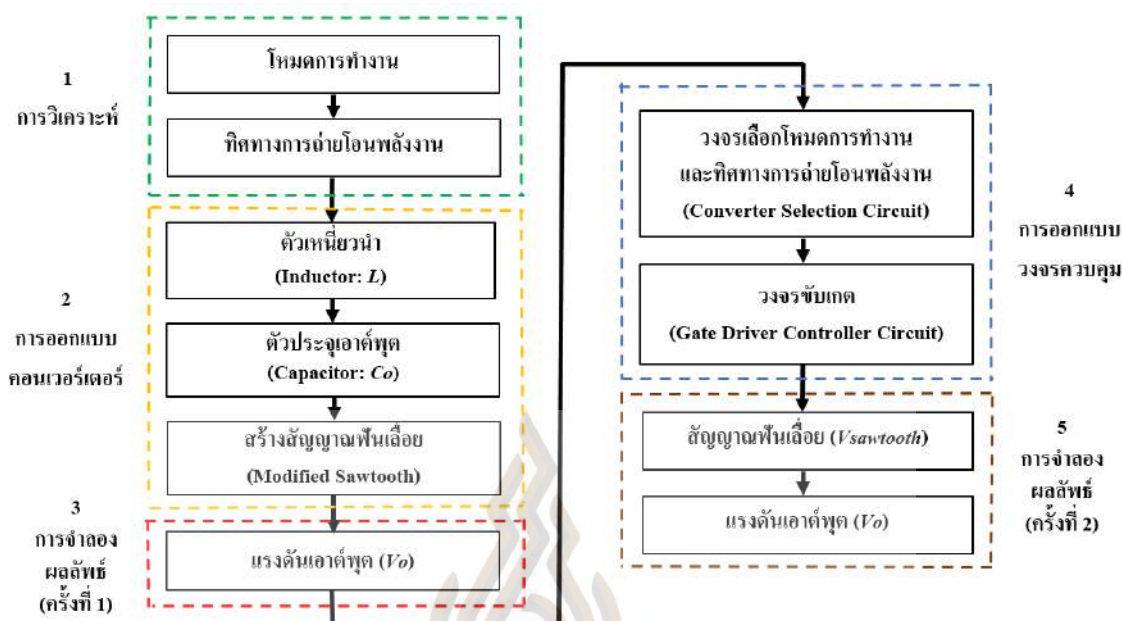
1.3.1 สามารถใช้หลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์โหมดการทำงาน และอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์

1.3.2 การวิเคราะห์โหมดการทำงานและอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า สามารถทำได้ในทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบโดยตรงและแบบย้อนกลับ ด้วยวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว ที่มีความสมมาตรกัน

1.3.3 จากการออกแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว การออกแบบสร้างสัญญาณฟันเลื่อย ขนาดอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่มีค่าสูงสุดสามารถนำไปประกอบเป็นวงจร โหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ ได้อย่างสมบูรณ์

1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ มีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์และออกแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ ด้วยหลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย โดยมีกรอบแนวคิด คือ ต้องการวิเคราะห์โหมมการทำงาน ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า การออกแบบสร้างสัญญาณฟันเลื่อย คัดแปลงและอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ จากนั้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาทำการออกแบบวงจรและอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กักเก็บและคายพลังงาน ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวเก็บประจุเอาต์พุต (Capacitor Output) โดยการออกแบบครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ภายใต้โหมมการทำงานนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) ในสภาวะคงตัว (Steady State) และไม่คิดอัตราสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบทั้งหมด จากการทำงานของสวิตช์กำลัง (Switch Loss) ผลจากการวิเคราะห์และออกแบบโหมมการทำงานแบบบัค-บูสต์ จะถูกนำมาใช้ในการเลือกขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เอาต์พุตที่มีค่าสูงสุดและครอบคลุมการทำงาน มาใช้สำหรับการประกอบวงจรขึ้นต่อไป เป็นการจำลองผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ โดยคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม ซึ่งสิ่งที่ดำเนินการจำลองผลลัพธ์ ได้แก่ แรงดันเอาต์พุต (V_o) เพื่อเป็นการตรวจสอบและยืนยันว่าขนาดอุปกรณ์ ที่ได้จากการออกแบบนั้นถูกต้อง สามารถทำงานได้จริง ในขั้นตอนต่อไป เพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการด้านการใช้งาน จึงทำการออกแบบควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ด้วยเทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชันแบบลูปเปิด (Open Loop) ซึ่งรูปแบบการควบคุมสามารถกระทำได้ด้วยซอฟต์แวร์ (Software Controlled) ส่งผลให้ง่ายต่อการควบคุมและการใช้งานคอนเวอร์เตอร์ขั้นสุดท้าย คือ การจำลองผลลัพธ์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อวงจรควบคุมร่วมกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ เพื่อยืนยันว่าวงจรควบคุมที่ได้ทำการออกแบบสามารถทำงานได้จริง โดยภาพรวมของกรอบแนวคิดการวิจัย แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบหลักการและข้อกำหนดของทฤษฎีการลดรูปวงจรอย่างง่าย
- 1.5.2 ทราบหลักการควบคุมโหมคการทำงานและทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า
- 1.5.3 ทราบหลักการวิเคราะห์โหมคการทำงาน ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า และอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ด้วยหลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย ภายใต้โหมคการนำกระแสต่อเนื่องในสถานะคงตัว
- 1.5.4 ทราบหลักการออกแบบพัลส์วิดธ์มอดูเลชั่นคอนเวอร์เตอร์ชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว ให้สามารถทำงานในโหมคแบบบัค-บูสต์ และถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ทิศทาง
- 1.5.5 ทราบหลักการออกแบบสร้างสัญญาณฟันเลื่อยดัดแปลง
- 1.5.6 ทราบหลักการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว ด้วยเทคนิคพัลส์วิดธ์มอดูเลชั่น
- 1.5.7 ทราบหลักการเขียนโปรแกรมและจำลองผลลัพธ์ด้วยคอมพิวเตอร์
- 1.5.8 เป็นต้นแบบในการสร้างและพัฒนาพัลส์วิดธ์มอดูเลชั่นคอนเวอร์เตอร์แบบชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว ด้วยหลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย

1.6 นิยามศัพท์

โหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) คือ โหมดการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่เกิดขึ้น ในขณะที่สวิตช์กำลังนำกระแส พลังงานจะถูกส่งจากแหล่งจ่ายด้านอินพุตผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังภาระโหลดด้านเอาต์พุตโดยตรง และเมื่อสวิตช์กำลังหยุดนำกระแส เวลานี้ภาระโหลดจะยังได้พลังงานที่ถ่ายเทคืนมาจากตัวเหนี่ยวนำแทนกระแสเอาต์พุต จึงมีลักษณะต่อเนื่องและไม่เป็นศูนย์ ส่วนมากใช้กับวงจรที่มีกำลังไฟฟ้าปานกลางถึงสูง เนื่องจากการทำงานในโหมดนี้มีกระแสกระเพื่อมด้านอินพุตต่ำ ทำให้สามารถลดทอนอุปกรณ์กรองสัญญาณด้านเอาต์พุตได้

ประเภทแยกกราวด์ (Isolation Type) คือ ประเภทของคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่มีวงจรหรืออุปกรณ์ป้องกันระหว่างด้านอินพุตกับด้านเอาต์พุต ดังนั้น รูปแบบการเชื่อมต่อด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตจะแยกการใช้งานกราวด์ออกจากกัน

ประเภทไม่แยกกราวด์ (Non-Isolation Type) คือ ประเภทของคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่มีวงจรหรืออุปกรณ์ป้องกันระหว่างด้านอินพุตกับด้านเอาต์พุต ดังนั้น รูปแบบการเชื่อมต่อด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตจะใช้งานกราวด์ร่วมกัน

ทิศทางตรง (Forward) คือ ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากด้านอินพุตไปยังด้านเอาต์พุตในทิศทางตรง (จากด้านซ้ายไปด้านขวาของวงจร)

ทิศทางย้อนกลับ (Backward) คือ ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากด้านอินพุตไปยังด้านเอาต์พุตในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางตรง (จากด้านขวาไปยังด้านซ้ายของวงจร)

หลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย (Circuit Simplification Approach) คือ หลักการลดรูปอุปกรณ์ที่ไม่มีความสำคัญกับการวิเคราะห์ห่อออกจากวงจรและทำการเปลี่ยนรูปหรือยุบรวมอุปกรณ์ที่ต่อร่วมกันเพื่อทำหน้าที่ใดหน้าที่หนึ่งในที่หนึ่งภายในวงจร จุดประสงค์เพื่อลดความซับซ้อน ในการวิเคราะห์โหมดการทำงานและการออกแบบของคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) คือ การแปลงค่าแอมพลิจูดของสัญญาณให้อยู่ในรูปของความกว้างพัลส์ โดยถ้าสัญญาณมีแอมพลิจูดต่ำความกว้างพัลส์จะแคบ ถ้าสัญญาณมีแอมพลิจูดสูงความกว้างพัลส์ก็จะกว้าง ค่าแอมพลิจูดที่นำมาแปลงเป็นความกว้างพัลส์จะได้มาจากการแซมปลิง (Sampling) สัญญาณ แล้วนำค่าแซมปลิงที่ได้นั้น ไปสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีแอมพลิจูดคงที่ ซึ่งความกว้างของสัญญาณพัลส์แปรผันตรงกับขนาดสัญญาณที่ถูกแซมปลิง

พัลส์วิธึมมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ (PWM Converter) คือ คอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการทำงาน โดยใช้เทคนิคการควบคุมความกว้างพัลส์ ซึ่งเป็นการควบคุม โดยเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่มีมอสเฟตนำกระแส นั่น เป็นผลให้เกิดแรงดันควบคุม เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาดังกล่าวเทียบกับคาบเวลา เรียกว่า วัฏจักรงาน (Duty Cycle: D)

วัฏจักรงาน (Duty Cycle) คือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงคาบเวลาหรืออัตราส่วนระหว่างช่วงความกว้างสัญญาณพัลส์ต่อหนึ่งคาบเวลาของสัญญาณพัลส์ทั้งหมด

พัลส์วิธึมมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ชนิดไม่กลับขั้ว (Non-Inverting PWM Converter) คือ คอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการทำงาน โดยใช้เทคนิคการควบคุมความกว้างพัลส์ และคุณสมบัติเป็นเอกลักษณ์ ซึ่งแตกต่างจากคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป คือ ขั้วไฟฟ้านำเข้าเอาต์พุตจะเหมือนกับขั้วไฟฟ้านำเข้า (ไม่กลับขั้ว) และสามารถถ่ายโอนพลังงานได้ 2 ทิศทาง คือ ทิศทางตรงและทิศทางย้อนกลับ

วงจรเลือกโหมดการทำงานและทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า (Converter Selection Circuit) คือ วงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ โดยมีหน้าที่เลือกให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดบัส-บูสต์ ที่มีทิศทางในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าแบบทิศทางตรง หรือทิศทางย้อนกลับตามต้องการ

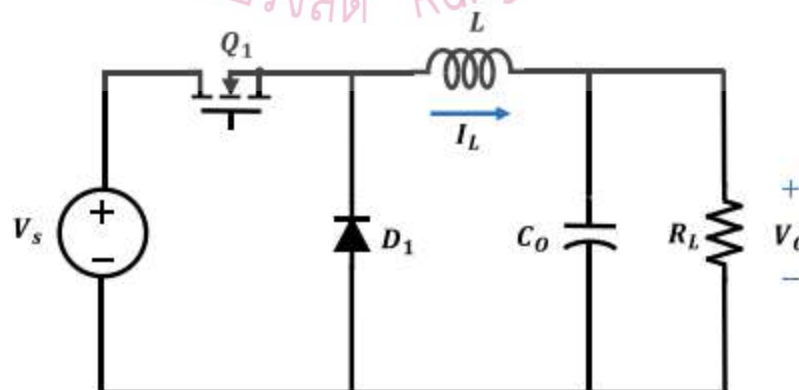
บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์และการออกแบบพัลส์วิดธ์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว จำเป็นต้องทราบหลักการทำงานพื้นฐาน หลักการออกแบบและหลักการควบคุมการทำงานของพัลส์วิดธ์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบไม่แยกกราวด์ รวมถึงหลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย ที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบพัลส์วิดธ์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 บัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter)

บัคคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้า โดยทำหน้าที่ลดระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุตและนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF: Low Pass Filter) เชื่อมต่อทางด้านเอาต์พุต เพื่อให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตมีความเรียบตามความต้องการของภาระโหลด ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานด้วยสวิตช์กำลัง (Q_1) เช่น ทรานซิสเตอร์ และมอสเฟต เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีส่วนประกอบอื่น คือ ตัวเก็บประจุ (C_o) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และไดโอด (D_1) (อาภา สารศิริ, 2564, น.1) วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.1

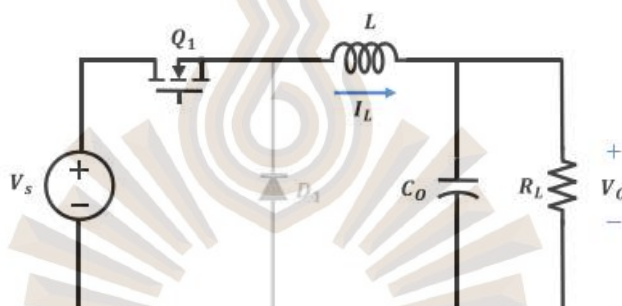


รูปที่ 2.1 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

ที่มา: รัชัญญ์ เหลืองอมรศิริ 2560, น.32

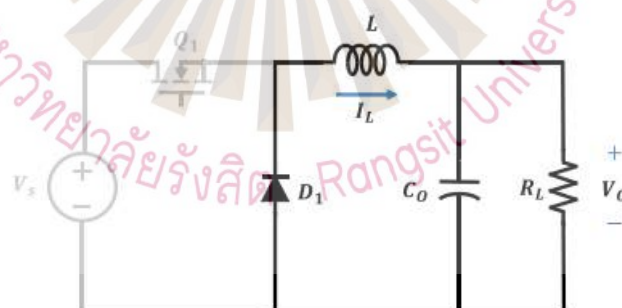
2.1.1 การวิเคราะห์การทำงานของบัคคอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ในที่นี้จะพิจารณาภายใต้ โหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) ในสภาวะคงตัว (Steady State) และอุปกรณ์ภายในวงจรเป็นแบบอุดมคติ โดยไม่คิดค่าสูญเสีย ซึ่งการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ เกิดจากการควบคุมการนำกระแส (Turned On) และหยุดนำกระแส (Turned Off) ของมอสเฟต ซึ่งสามารถจำแนกได้ 2 โหมด (ชนาธรณ์ ศรีมณฑล, 2564, น.18) แสดงดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 โหมดที่ 1 ขณะมอสเฟตนำกระแสของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

ที่มา: รัชัญฐ์ เหลืองอมรสิริ 2560, น.32



รูปที่ 2.3 โหมดที่ 2 ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

ที่มา: รัชัญฐ์ เหลืองอมรสิริ 2560, น.32

โหมดที่ 1 ($0 \leq t < t_1$) มอสเฟตทำงานในสถานะนำกระแส แสดงดังรูปที่ 2.2 ไดโอดได้รับการไบอัสกลับ (Reverse Bias) กระแสอินพุต (I_L) ไหลผ่านมอสเฟตไปยังตัวเหนี่ยวนำ และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านหรือภาระโหลดด้านเอาต์พุตตามลำดับ ตัวเหนี่ยวนำเกิดการชาร์จพลังงาน เนื่องจากกระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยรอบตัว

เหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ตัวเหนี่ยวนำกลายเป็นแหล่งจัดเก็บพลังงานชั่วขณะ ซึ่งกระแสเฉลี่ยไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านภาระโหลด (R_L) และแรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำบวกกับแรงดันที่ตกคร่อมภาระโหลด ดังสมการที่ (2-1)

$$V_S = V_L + V_O$$

$$V_L = V_S + V_O \quad (2-1)$$

แทนค่า $V_L = L di_L / dt$ ในสมการจะได้

$$\frac{L di_L}{dt} = V_S + V_O$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S + V_O}{L}$$

กรณี มอสเฟตอยู่ในสถานะนำกระแส [$dt = DT_S$]; สามารถหาค่ากระแสเหนี่ยวนำระลอกในช่วงมอสเฟตนำกระแส ($\Delta I_{L,on}$) ดังสมการ (2-2)

$$\Delta I_{L,on} = \left(\frac{V_S + V_O}{L} \right) DT_S \quad (2-2)$$

โหมดที่ 2 ($t_1 < t \leq t_2$) มอสเฟตทำงานในสถานะหยุดนำกระแส แสดงดังรูปที่ 2.3 ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตถูกตัดออกจากวงจร ไดโอดจะได้รับไบอัสตรง (Forward Bias) พลังงานที่สะสมอยู่ภายในตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะกลายเป็นพลังงานสำรองชั่วขณะ ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับ ส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำเอาต์พุตสามารถไหลไปยังภาระโหลดทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น ดังสมการที่ (2-3)

$$V_{D1} = V_L + V_O \quad (2-3)$$

แรงดันตกคร่อมไดโอดขณะไบอัสตรงมีค่าเท่ากับศูนย์ ; แทนค่า $V_{Di} = 0$ ในสมการ (2-3) จะได้

$$V_L = -V_O$$

แทนค่า $V_L = L di_L / dt$ ในสมการ จะได้

$$\frac{L di_L}{dt} = -V_O$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_O}{L}$$

กรณี มอสเฟตอยู่ในสถานะหยุดนำกระแส [$dt = (1 - D)T_S$]; สามารถหาค่ากระแสเหนี่ยวนำระลอกในช่วงมอสเฟตหยุดนำกระแส ($\Delta I_{L,off}$) ดังสมการ (2-4)

$$\Delta I_{L,off} = \left(\frac{V_O}{L} \right) (1 - D) T_S \quad (2-4)$$

จากหลักการแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ขณะมอสเฟตนำกระแสมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสในสภาวะคงตัว (Inductor Volt-Second Balance) หรือหากทำการวิเคราะห์จากกราฟสัญญาณแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2.4 จะพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเฉลี่ยในหนึ่งคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (2-2) และ (2-4) สามารถนำมาวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ได้ ดังสมการที่ (2-5)

$$\Delta V_{L,on} T_{on} + V_{L,off} T_{off} = 0$$

$$(V_S + V_O) D T_S + (-V_O) (1 - D) T_S = 0$$

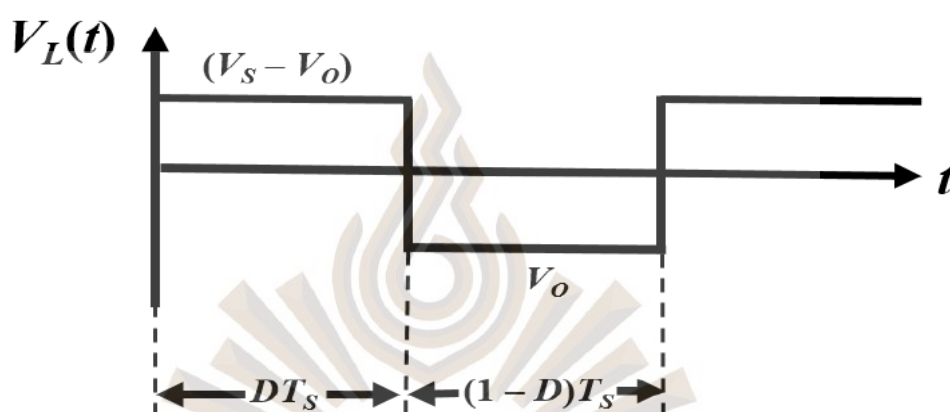
$$V_S D - V_O D - V_O + V_O D = 0$$

$$V_S D - V_O = 0$$

$$\left(\frac{V_O}{V_S} \right) = D \quad (2-5)$$

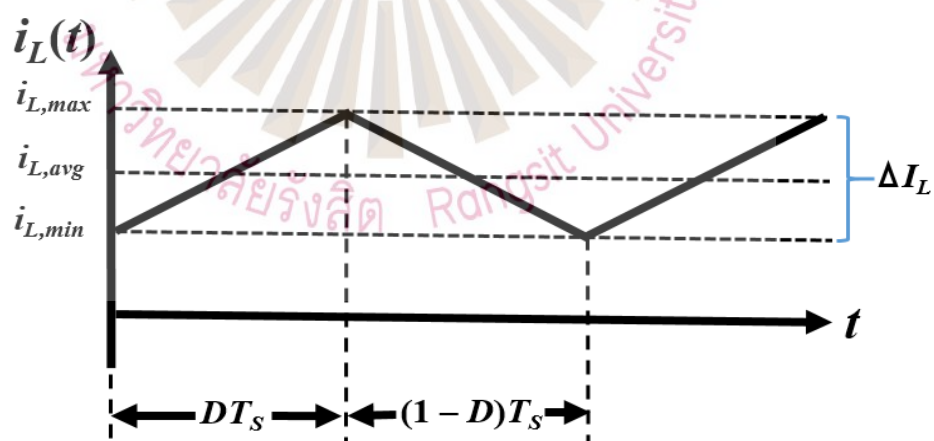
ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ (2-5) คือ ค่าวัฏจักรงาน (Duty Cycle : D) ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในการควบคุมอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าของบัคคอนเวอร์เตอร์

จากการทำงานของบัคคอนเวอร์เตอร์ในหนึ่งคาบเวลา สามารถเขียนสัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำระลอก แสดงดังรูปที่ 2.4 ถึง 2.6 ตามลำดับ



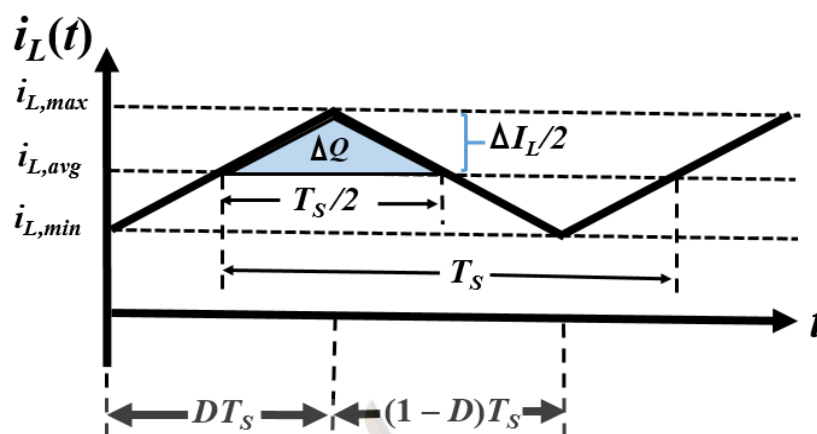
รูปที่ 2.4 สัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

ที่มา: ชาญธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.14



รูปที่ 2.5 สัญญาณกระแสเหนี่ยวนำของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

ที่มา: ชาญธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.14



รูปที่ 2.6 การใช้สัญญาณกระแสเหนี่ยวนำระลอกเพื่อคำนวณค่าความเปลี่ยนแปลงประจุ
ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.14

2.1.2 การออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

2.1.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor: L)

ตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อภายในวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์มีหน้าที่ลดค่าความกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตให้ตรงความต้องการของภาระโหลด ซึ่งการออกแบบขนาดตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ สามารถทำได้โดยการคำนวณจากค่าขดถึงขดของกระแสเหนี่ยวนำหรือค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ (ΔI_L) เนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำเฉลี่ยในหนึ่งคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ หรือผลรวมของค่าความเปลี่ยนแปลงของกระแสเหนี่ยวนำขณะมอสเฟตนำกระแสและขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ (รัชณัฐ เหลืองอมรสิริ, 2560, น.32) ส่งผลให้สมการที่ (2-2) มีค่าเท่ากับสมการที่ (2-4) ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$\Delta I_{L,on} = \Delta I_{L,off}$$

$$\Delta I_L = \left(\frac{V_s + V_o}{L} \right) DT_s = \left(\frac{V_o}{L} \right) (1 - D) T_s$$

แทนค่า $T_s = 1/f_s$ ในสมการ จะได้

$$\Delta I_L = \left(\frac{V_S + V_O}{L f_s} \right) D = \left(\frac{V_O}{L f_s} \right) (1 - D) \quad (2-6)$$

ดังนั้น สามารถหาขนาดตัวเหนี่ยวนำ ได้ดังสมการที่ (2-7)

$$L = \left(\frac{V_S + V_O}{\Delta I_L f_s} \right) = \left(\frac{V_O (1-D)}{\Delta I_L f_s} \right) \quad (2-7)$$

2.1.2.2 ขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุต (Output Capacitor: C_o)

ตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อทางด้านเอาต์พุตของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ มีหน้าที่ลดค่าความกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้ตรงความต้องการของภาระโหลด ซึ่งการออกแบบขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุตของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ สามารถกระทำได้โดยการคำนวณจากค่าความเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเอาต์พุต (ΔV_{co}) ที่ได้จากสมการความจุไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-8) โดยการใช้กราฟสัญญาณกระแสเหนี่ยวนำเป็นตัวช่วยในการคำนวณ ซึ่งพิจารณาในช่วงเวลาที่ตัวเหนี่ยวนำชาร์จพลังงาน คือ ช่วงเวลาเดียวกันกับที่ตัวเก็บประจุเอาต์พุตทำการประจุนั่นก็คือ สัญญาณครึ่งบวกในช่วงครึ่งคาบเวลา ($T_s/2$) ตามรูปที่ 2.6

$$Q = C_o V \quad (2-8)$$

$$\Delta V_{co} = \frac{\Delta Q}{C_o}$$

จากภาพที่ 2.5 สามารถคำนวณหาค่าความเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า (ΔQ) จากพื้นที่สามเหลี่ยมเหนือแกนกระแสเหนี่ยวนำเฉลี่ย ($I_{L,avg}$) ในช่วงครึ่งคาบเวลา ($T_s/2$) ดังสมการที่ (2-9)

$$\Delta V_{co} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{T_s}{2} \right) \left(\frac{\Delta I_L}{2} \right)}{C_o}$$

$$\Delta V_{CO} = \frac{\Delta I_L T_S}{8C_O} \quad (2-9)$$

เมื่อแทนค่า ΔI_L จากสมการที่ (2-6) จะได้

$$\Delta V_{CO} = \frac{\left(\frac{V_S+V_O}{Lf_S}\right)DT_S}{8C_O} = \frac{\left(\frac{V_O}{Lf_S}\right)(1-D)T_S}{8C_O}$$

$$\Delta V_{CO} = \frac{(V_S+V_O)DT_S}{8C_O Lf_S} = \frac{(V_O)(1-D)T_S}{8C_O Lf_S}$$

เมื่อแทนค่า $T_S = 1/f_S$ จะได้

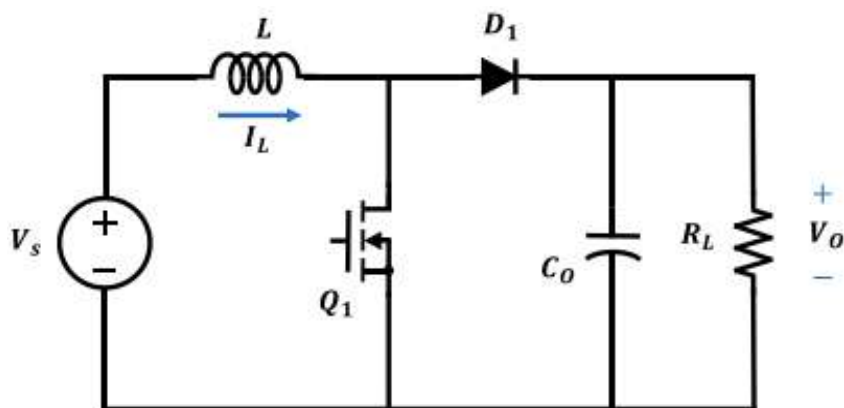
$$\Delta V_{CO} = \frac{(V_S+V_O)DT_S}{8C_O Lf_S^2} = \frac{(V_O)(1-D)T_S}{8C_O Lf_S}$$

ดังนั้น สามารถหาขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุตได้ ดังสมการที่ (2-10)

$$C_O = \frac{(V_S+V_O)D}{8\Delta V_{CO} Lf_S^2} = \frac{(V_O)(1-D)}{8\Delta V_{CO} Lf_S^2} \quad (2-10)$$

2.2 บูลต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter)

วงจรบูลต์คอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่ใช้สำหรับการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ให้มีค่ามากกว่าแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้ามาในวงจรหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-up Converter) ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานด้วยสวิตช์กำลัง (Q_1) เช่น ทรานซิสเตอร์ และ มอสเฟต เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีส่วนประกอบอื่น คือ ตัวเก็บประจุ (C_O) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และ ไดโอด (D_1) (อาภา สารศิริ, 2564, น.1) วงจรบูลต์คอนเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.7

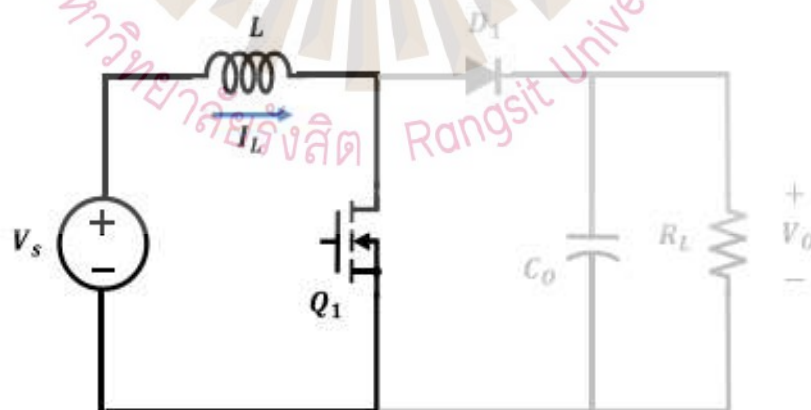


รูปที่ 2.7 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

ที่มา: รัชัญญ์ เหลืองอมรศิริ 2560, น.36

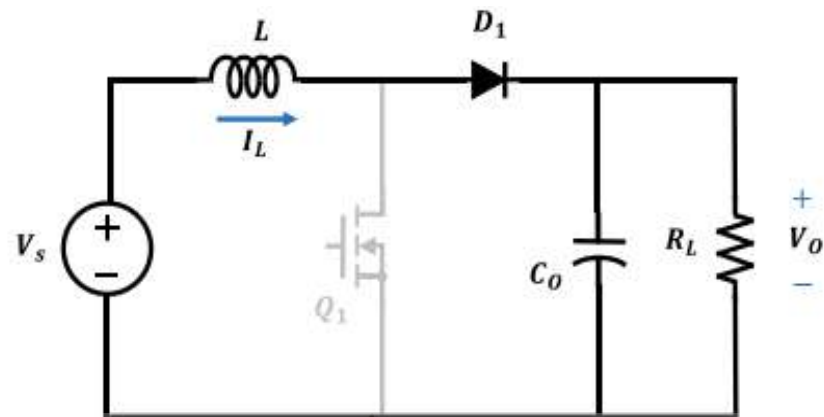
2.2.1 การวิเคราะห์การทำงานของบูสต์คอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ในที่นี้จะพิจารณาภายใต้โหมดการนำกระแสต่อเนื่องในสภาวะคงตัวและอุปกรณ์ภายในวงจรเป็นแบบอุดมคติโดยไม่คิดค่าสูญเสีย ซึ่งการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เกิดจากการควบคุมการนำกระแสและหยุดนำกระแสของมอสเฟต ซึ่งสามารถจำแนกได้ 2 โหมด (รัชัญญ์ เหลืองอมรศิริ, 2560, น.32) แสดงดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 โหมดที่ 1 ขณะมอสเฟตนำกระแสของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

ที่มา: รัชัญญ์ เหลืองอมรศิริ 2560, น.36



รูปที่ 2.9 โหมดที่ 2 ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

ที่มา: รัชัญญ์ เหลืองอมรสิริ 2560, น.36

โหมดที่ 1 ($0 \leq t < t_p$) มอสเฟตทำงานในสถานะนำกระแส แสดงดังรูปที่ 2.8 ไดโอดได้รับการไบอัสกลับ กระแสอินพุตไหลจากแหล่งจ่ายผ่านไปยังตัวเหนี่ยวนำและมอสเฟต ตามลำดับ ตัวเหนี่ยวนำเกิดการชาร์จพลังงาน เนื่องจากกระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยรอบตัวเหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ตัวเหนี่ยวนำ กลายเป็นแหล่งจัดเก็บพลังงานชั่วขณะโดยแรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ (2-11)

$$V_S = V_L \quad (2-11)$$

แทนค่า $V_L = L di_L / dt$ ในสมการ จะได้

$$\frac{L di_L}{dt} = V_S$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S}{L}$$

กรณี มอสเฟตอยู่ในสถานะนำกระแส [$dt = DT_S$]; สามารถหาค่ากระแสเหนี่ยวนำระลอกในช่วงมอสเฟตนำกระแส ($\Delta I_{L,on}$) ดังสมการ (2-12)

$$\Delta I_{L,on} = \left(\frac{V_S}{L} \right) DT_S \quad (2-12)$$

โหมดที่ 2 ($t_1 \leq t < t_2$) มอสเฟตทำงานในสถานะหยุดนำกระแส แสดงดังรูปที่ 2.9 ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตและตัวเหนี่ยวนำถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงจรภาระโหลด ใดโอดจะได้รับไบอัสตรง พลังงานจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตรวมกับพลังงานที่สะสมอยู่ภายในตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะไหลไปยังภาระโหลดทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น โดยแรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำบวกกับแรงดันตกคร่อมภาระโหลด ดังสมการที่ (2-13)

$$V_S = V_L + V_O \quad (2-13)$$

แทนค่า $V_L = L di_L / dt$ ในสมการ จะได้

$$L \frac{di_L}{dt} = V_S - V_O$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(V_S - V_O)}{L}$$

กรณี มอสเฟตอยู่ในสถานะหยุดนำกระแส [$dt = (1 - D)T_S$]; สามารถหาค่ากระแสเหนี่ยวนำระลอกในช่วงมอสเฟตหยุดนำกระแส ($\Delta I_{L,off}$) ดังสมการ (2-14)

$$\Delta I_{L,off} = \frac{(V_S - V_O)(1 - D)T_S}{L} \quad (2-14)$$

จากหลักการแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ขณะมอสเฟตนำกระแสมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสในสภาวะคงตัว (Inductor Volt - Second Balance) หรือหากทำการวิเคราะห์จากกราฟสัญญาณแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ จะพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเฉลี่ยในหนึ่งคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (2-12) และ (2-14) สามารถนำวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ได้ ดังสมการที่ (2-15)

$$V_{L,on}T_{on} + V_{L,off}T_{off} = 0$$

$$V_S D T_S + (V_S - V_O)(1 - D)T_S = 0$$

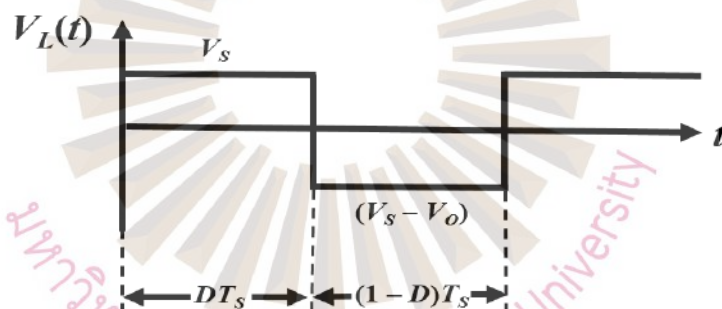
$$V_S D + V_S - V_S D - V_O + V_O D = 0$$

$$V_S - (1 - D)V_O = 0$$

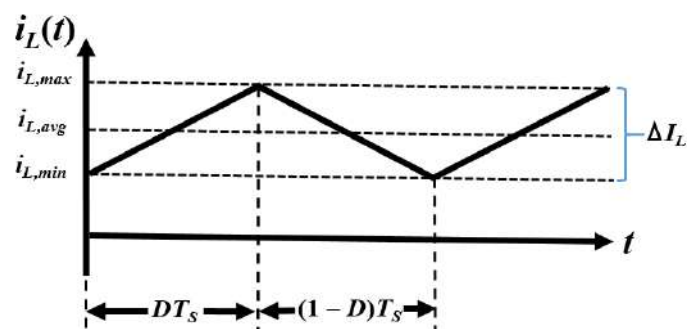
$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (2-15)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ (2-15) คือ ค่าวัฏจักรงาน (Duty Cycle: D) ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในการควบคุมอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของบัสต์คอนเวอร์เตอร์

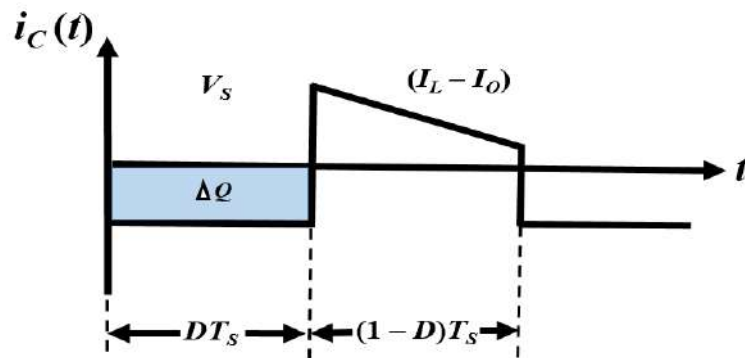
จากการทำงานของบัสต์คอนเวอร์เตอร์ ในหนึ่งคาบเวลา สามารถเขียนสัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ กระแสเหนี่ยวนำระลอก และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ แสดงดังรูปที่ 2.10 ถึง 2.12 ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 สัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์
ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.21



รูปที่ 2.11 สัญญาณกระแสเหนี่ยวนำระลอกของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์
ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.21



รูปที่ 2.12 สัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.21

2.2.2 การออกแบบวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

2.2.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor: L)

ตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อภายในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์มีหน้าที่ลดค่าความกระเพื่อมของกระแสเหนี่ยวนำให้ตรงความต้องการของภาระโหลด ซึ่งการออกแบบขนาดตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ สามารถกระทำได้โดยการคำนวณจากค่ายอดถึงยอดของกระแสเหนี่ยวนำหรือค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ (ΔI_L) เนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำเฉลี่ยในหนึ่งคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์หรือผลรวมของค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเหนี่ยวนำขณะมอสเฟตนำกระแสและขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ (ธนาธรณ์ ศรีมณฑล, 2564, น.21) ส่งผลให้สมการที่ (2-12) มีค่าเท่ากับสมการที่ (2-14) ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$\Delta I_{L,on} = \Delta I_{L,off}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_s}{L} D T_s = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) (1 - D) T_s$$

แทนค่า $T_s = 1/f_s$ ในสมการ จะได้

$$\Delta I_L = \frac{V_s D}{L f_s} = \frac{(V_s - V_o)(1 - D)}{L f_s} \quad (2-16)$$

ดังนั้น สามารถหาขนาดตัวเก็บประจุ ได้ดังสมการที่ (2-17)

$$L = \frac{V_S D}{\Delta I_L f_s} = \frac{(V_S - V_O)(1-D)}{\Delta I_L f_s} \quad (2-17)$$

2.2.2.2 ขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุต (Output Capacitor: C_O)

ตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อทางด้านเอาต์พุตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ มีหน้าที่ลดค่าความกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้ตรงความต้องการของภาระโหลด ซึ่งการออกแบบขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ สามารถกระทำได้โดยการคำนวณจากค่าความเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเอาต์พุต (ΔV_C) ที่ได้จากสมการความจุไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-18) ซึ่งพิจารณาในช่วงเวลาที่ตัวเหนี่ยวนำชาร์จพลังงาน คือ ช่วงเวลาเดียวกันกับที่ตัวเก็บประจุเอาต์พุตทำการประจุนั้นก็คือ สัญญาณครึ่งลบในช่วงครึ่งคาบเวลา ($T_S/2$) ตามรูปที่ 2.12

$$Q = C_O V \quad (2-18)$$

$$\Delta V_{CO} = \frac{\Delta Q}{C_O}$$

จากรูปที่ 2.12 สามารถคำนวณหาค่าความเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า (ΔQ) จากพื้นที่สี่เหลี่ยมใต้แกนเวลาในช่วงครึ่งคาบเวลา ($T_S/2$) ดังสมการที่ (2-19)

$$\Delta V_{CO} = \frac{\Delta I_L T_S}{8 C_O} \quad (2-19)$$

เมื่อแทนค่า $I_O = V_O / R_L$ จะได้

$$\Delta V_{CO} = \frac{\left(\frac{V_O}{R_L}\right) D T_S}{C_O}$$

เมื่อแทนค่า $T_s = 1/f_s$ จะได้

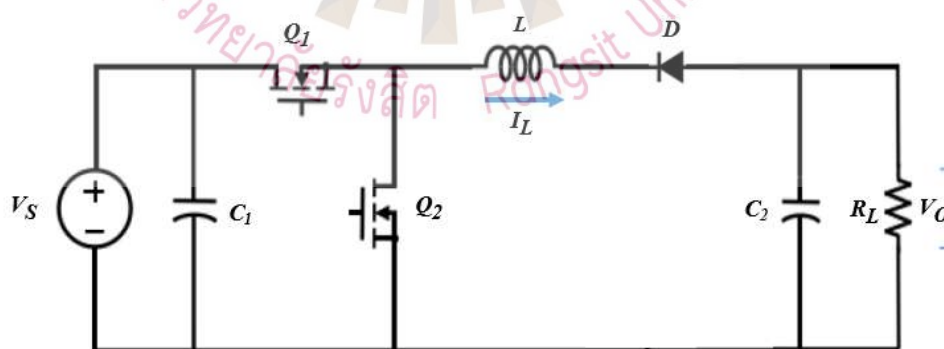
$$\Delta V_{CO} = \frac{\left(\frac{V_O}{R_L}\right)D}{C_O f_s}$$

ดังนั้น สามารถหาขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุต ได้ดังสมการที่ (2-20)

$$C_O = \frac{V_O D}{\Delta V_{CO} R_L f_s} \quad (2-20)$$

2.3 บัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง (Bidirectional Buck-Boost Converter)

บัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง เป็นวงจรที่มีความสามารถระดับแรงดันเอาต์พุต ให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุตเมื่อถูกควบคุมให้ทำงานในทิศทางตรง (Forward) และเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้มากกว่าแรงดันอินพุต เมื่อถูกควบคุมให้ทำงานในทิศทางย้อนกลับ (Backward) ซึ่งนิยมประยุกต์ใช้ในวงจรชาร์จและคายประจุของแบตเตอรี่และวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Voltage Bus) และสามารถควบคุมการทำงานด้วยสวิตช์กำลัง จำนวน 2 ตัว (Q_1 และ Q_2) ให้มีสถานะนำกระแสและหยุดนำกระแสแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่น คือ ตัวเก็บประจุ จำนวน 2 ตัว (C_1 และ C_2) และตัวเหนี่ยวนำ จำนวน 1 ตัว (L) (ชนาธรณ์ ศรีมณฑล, 2564, น.24) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง

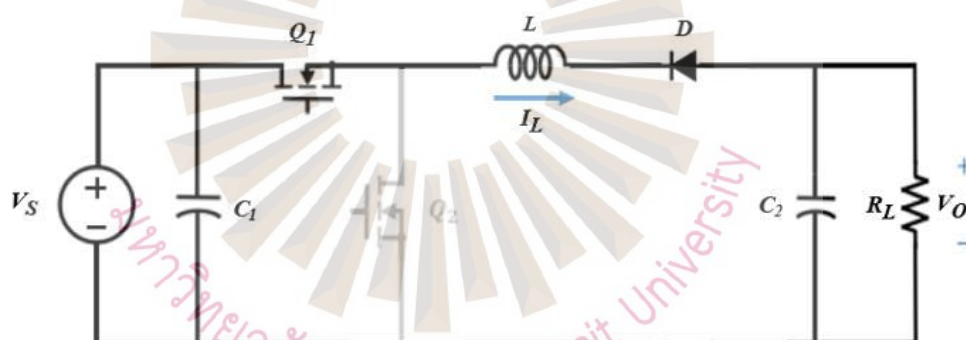
ที่มา: ชนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.24

2.3.1 การวิเคราะห์การทำงานของบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง

การวิเคราะห์การทำงานของบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง สามารถกระทำ ได้ภายใต้โหมดการนำกระแสต่อเนื่องในสภาวะคงตัว โดยอนุมานให้อุปกรณ์ภายในวงจรเป็นแบบอุดมคติไม่คิดค่าสูญเสีย ซึ่งสามารถจำแนกการทำงานได้ 2 โหมด ดังนี้

2.3.1.1 โหมดการทำงานแบบบัคในทิศทางตรง

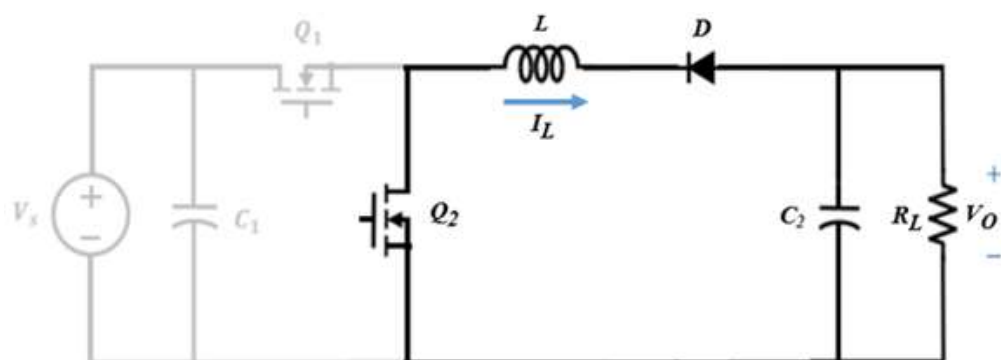
โหมดที่ 1 สวิตช์ตัวที่ 1 (Q_1) มีสถานะนำกระแส และสวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) มีสถานะหยุดนำกระแส กระแสอินพุตไหลจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ตัวที่ 1 ไปยังตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิด การชาร์จพลังงาน เนื่องจากกระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยรอบตัว เหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ตัวเหนี่ยวนำกลายเป็นแหล่งจัดเก็บพลังงานชั่วขณะจากการทำงานดังกล่าว ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย แสดงดังรูปที่ 2.14 ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง ขณะทำงานเป็นวงจรบัคในโหมดที่ 1

ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.25

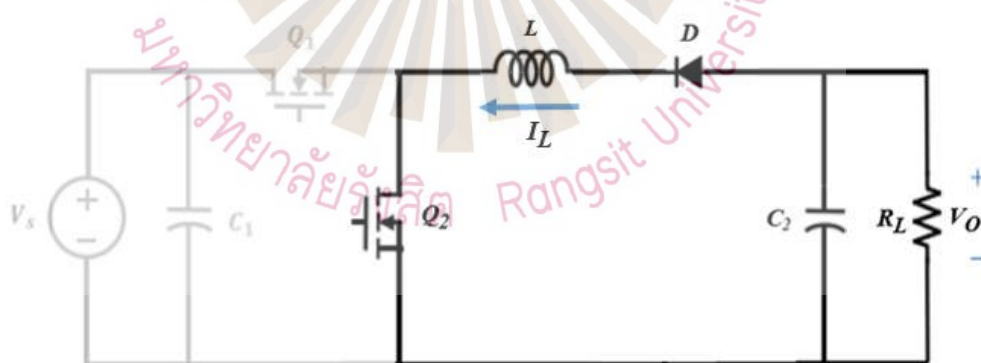
โหมดที่ 2 สวิตช์ตัวที่ 1 (Q_1) มีสถานะหยุดนำกระแส และสวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) มีสถานะนำกระแส แหล่งจ่ายแรงดันถูกตัดออกจากวงจร พลังงานที่สะสมอยู่ภายใน ตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะกลายเป็นพลังงานสำรองชั่วขณะทำให้เกิดแรงดัน เหนี่ยวนำย้อนกลับ ส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำเอาต์พุตสามารถไหลไปยังภาระโหลดทำให้แรงดัน เอาต์พุตมีค่ามากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง ขณะทำงานเป็นวงจรบัคในโหมดที่ 2
ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.25

2.3.1.2 โหมดการทำงานแบบบูสต์ในทิศทางย้อนกลับ

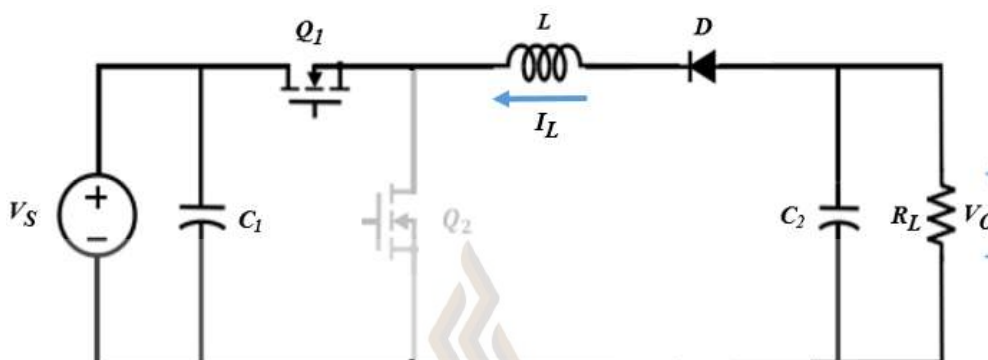
โหมดที่ 1 สวิตช์ตัวที่ 1 (Q_1) มีสถานะหยุดนำกระแส และสวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) มีสถานะนำกระแส กระแสอินพุตไหลจากแหล่งจ่ายผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังสวิตช์ตัวที่ 2 ทำให้ตัวเหนี่ยวนำเกิดการชาร์จพลังงาน เนื่องจากกระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยรอบตัวเหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ตัวเหนี่ยวนำกลายเป็นแหล่งจัดเก็บพลังงานชั่วขณะ จากการทำงานดังกล่าว ส่งผลให้แรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง ขณะทำงานเป็นวงจรบูสต์ในโหมดที่ 1
ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.26

โหมดที่ 2 สวิตช์ตัวที่ 1 (Q_1) มีสถานะนำกระแส และสวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) มีสถานะหยุดนำกระแส ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตและตัวเหนี่ยวนำถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงจรภาระโหลดพลังงานจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตรวมกับพลังงานที่สะสมอยู่ภายในตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะไหลไปยังภาระโหลดทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น

โดยแรงดันที่แหล่งจ่าย จะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำบวกกับแรงดันตกคร่อมภาระโหลด แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง ขณะทำงานเป็นวงจรบูสต์ในโหมดที่ 2
ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.26

2.3.2 การออกแบบวงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทาง

การวิเคราะห์การทำงานของบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศ สำหรับโหมดการทำงานแบบบัคในทิศทางตรง และแบบบูสต์ในทิศทางย้อนกลับของวงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทางจะสังเกตเห็นได้ว่าการทำงานดังกล่าว คล้ายกับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ และวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่กล่าวมา ดังนั้น สามารถใช้หลักการวิเคราะห์และคำนวณของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 (C_2) และสามารถใช้หลักการวิเคราะห์และคำนวณของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุตัวที่ 1 (C_1) เนื่องจากวงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทิศทางมีตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบอยู่ในวงจรเพียง 1 ตัว ดังนั้น ควรเลือกตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดสูงสุดที่คำนวณได้จากการทำงานแบบบัคและแบบบูสต์ ในการประกอบเป็นวงจรและจำลองผลลัพธ์ด้วยคอมพิวเตอร์

2.4 หลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย (Circuit Simplification Approach)

หลักการลดรูปวงจรอย่างง่ายถูกคิดค้นขึ้น เพื่อลดความซับซ้อนในขั้นตอนการวิเคราะห์โหมดการทำงานและทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า รวมถึงอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรพัลส์วิดิร์มมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป (ธนาธรณ์ ศรีมณฑล, 2564, น.27) ซึ่งหลักการพื้นฐานและกฎเกณฑ์การถ่ายโอนพลังงาน สามารถอธิบายได้ ดังนี้

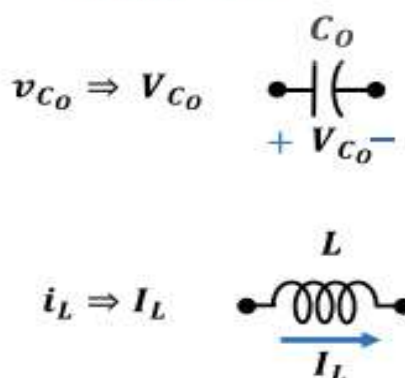
2.4.1 หลักการพื้นฐาน

การลดรูปวงจรอย่างง่ายต้องดำเนินการภายใต้โหมดการนำกระแสต่อเนื่องในสภาวะคงตัว โดยอนุमानให้อุปกรณ์ทุกชนิดเป็นอุปกรณ์ในอุดมคติไม่คิดค่าความสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการทำงาน (Switching Loss) โดยมีแนวคิด คือ สัญญาณที่เกิดขึ้นต้องเป็นสัญญาณที่เกิดซ้ำกันในคาบเวลาใดๆ (Periodic) โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ดังสมการที่ (2-21) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน ดังสมการที่ (2-22)

$$\frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} v_L dt = 0; \quad V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-21)$$

$$\frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} i_C dt = 0; \quad I_C = C \frac{dv_C}{dt} \quad (2-22)$$

อุปกรณ์สำคัญที่มีหน้าที่สะสมและคายพลังงาน คือ ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุเอาต์พุต (C_o) อุปกรณ์ทั้งสองถูกใช้เพื่อกรองกระแสและแรงดันเอาต์พุตให้เรียบตามความต้องการขอภาระโหลด ดังนั้น การวิเคราะห์ภายใต้โหมดการนำกระแสต่อเนื่องในสภาวะคงตัวจึงอนุमानได้ว่า แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่เช่นกัน แสดงดังรูปที่ 2.18



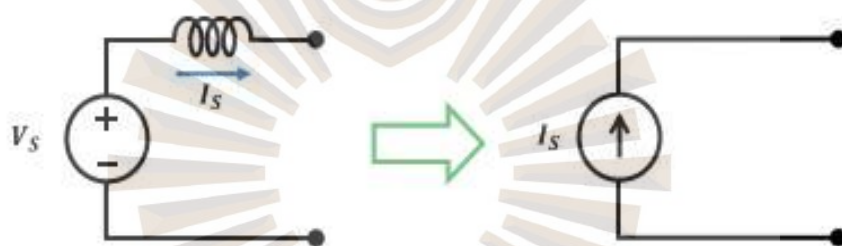
รูปที่ 2.18 การกำหนดให้กระแสเหนี่ยวนำและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่

ที่มา: ชนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.28

โดยหลักการลดรูปวงจรอย่างง่ายทำให้เกิดวงจรหรืออุปกรณ์ใหม่ สามารถจำแนกได้ 5 แบบ ดังนี้

2.4.1.1 แหล่งจ่ายกระแส (Current Source)

การเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำกับแหล่งจ่ายแรงดันแบบอนุกรมโดยตรง ส่งผลให้กระแสที่ไหลจากแหล่งจ่ายผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ ดังนั้น อนุมานได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลออกจากแหล่งจ่าย เรียกว่า “กระแสแหล่งจ่าย (I_s)” จึงสามารถลดรูปวงจรตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันแบบอนุกรมโดยตรงให้กลายเป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแส แสดงดังรูปที่ 2.19

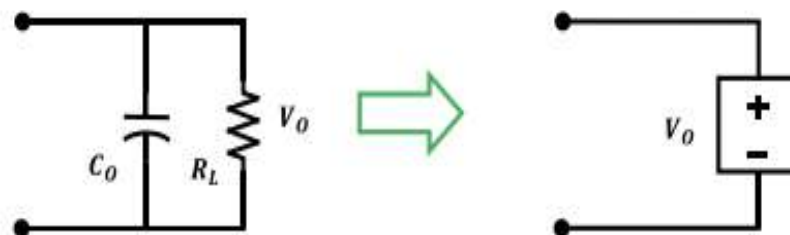


รูปที่ 2.19 การลดรูปวงจรตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันแบบอนุกรมโดยตรงให้กลายเป็นวงแหล่งจ่ายกระแส

ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.28

2.4.1.2 ภาระโหลดแรงดัน (Voltage Sink)

การเชื่อมต่อตัวเก็บประจุกับภาระโหลดชนิดตัวต้านทานแบบขนานโดยตรงในด้านเอาต์พุต ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ดังนั้น อนุมานได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าคงที่ เรียกว่า “แรงดันเอาต์พุต (V_s)” เนื่องจากการเชื่อมต่อกันด้านเอาต์พุตจึงทำให้วงจรดังกล่าว กลายเป็นวงจรเสมือนภาระโหลดที่ทำหน้าที่ใช้พลังงานเท่านั้น ไม่สามารถเป็นแหล่งจ่ายหรือแหล่งสะสมพลังงานได้ จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น สามารถลดรูปให้กลายเป็นวงจรภาระโหลดแรงดัน แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การลดรูปวงจรตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อกับตัวต้านทานแบบขนานโดยตรง

ให้กลายเป็นวงจรภาระโวลตแรงดัน

ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.29

2.4.1.3 ภาระโวลตกระแส (Current Sink)

การเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำกับภาระโวลตชนิดตัวต้านทานแบบอนุกรมโดยตรงในด้านเอาต์พุต ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ดังนั้น อนุมาณได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ เรียกว่า “กระแสเอาต์พุต (I_0)” เนื่องจากการเชื่อมต่อกันด้านเอาต์พุต จึงทำให้วงจรดังกล่าวกลายเป็นวงจรเสมือนภาระโวลตที่ทำหน้าที่ใช้พลังงานเท่านั้น ไม่สามารถเป็นแหล่งจ่ายหรือแหล่งสะสมพลังงานได้จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น สามารถลดรูปให้กลายเป็นวงจรภาระโวลตกระแส แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การลดรูปวงจรตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับตัวต้านทานแบบอนุกรมโดยตรง

ให้กลายเป็นวงจรภาระโวลตกระแส

ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.29

2.4.1.4 บัฟเฟอร์แรงดัน (Voltage Buffer)

ตัวเก็บประจุที่ถูกเชื่อมต่ออยู่ระหว่างด้านอินพุตกับเอาต์พุต ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันการรบกวนกันระหว่างด้านอินพุตและเอาต์พุต ในขณะเดียวกันยังเป็นเสมือนแหล่งพลังงานชั่วขณะให้กับวงจรที่ทำหน้าที่สะสมพลังงานจากแหล่งจ่ายในรูปแบบสนามไฟฟ้าและคายพลังงานไปยังภาระโหลดในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า เรียกว่า “แรงดันบัฟเฟอร์ (V_B)” จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น สามารถลดรูปให้กลายเป็นวงจรบัฟเฟอร์แรงดัน แสดงดังรูปที่ 2.22



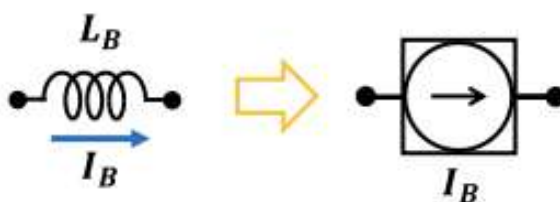
รูปที่ 2.22 การลดรูปวงจรตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายและภาระโหลด

ให้กลายเป็นวงจรบัฟเฟอร์แรงดัน

ที่มา: ชาญธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.30

2.4.1.5 บัฟเฟอร์กระแส (Current Buffer)

ตัวเหนี่ยวนำที่ถูกเชื่อมต่ออยู่ระหว่างด้านอินพุตกับเอาต์พุต ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันการรบกวนกันระหว่างด้านอินพุตและเอาต์พุต ในขณะเดียวกันยังเป็นเสมือนแหล่งพลังงานชั่วขณะให้กับวงจรที่ทำหน้าที่สะสมพลังงานจากแหล่งจ่ายในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและคายพลังงานไปยังภาระโหลดในรูปแบบกระแสไฟฟ้า เรียกว่า “กระแสบัฟเฟอร์ (I_B)” จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น สามารถลดรูปให้กลายเป็นวงจรบัฟเฟอร์กระแส แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การลดรูปวงจรตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายและภาระโหลด

ให้กลายเป็นวงจรบัฟเฟอร์กระแส

ที่มา: ชาญธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.30

จากหลักการลวดรูปวงจรรอย่างง่ายที่กล่าวมาข้างต้น สามารถจำแนกประเภทการใช้งานและสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้งานร่วมกับพัลส์วิดธ์มอดูเลชั่นคอนเวอร์เตอร์ทั่วไป แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับพัลส์วิดธ์มอดูเลชั่นคอนเวอร์เตอร์ทั่วไปตามหลักการลวดรูปวงจรรอย่างง่าย

	Source	Sink	Buffer
Current	 I_S	 I_O	 I_B
Voltage	 V_S	 V_O	 V_B

ที่มา: ชนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.31

2.4.2 กฎเกณฑ์การถ่ายโอนพลังงาน (Rules of Energy Transfer)

การวิเคราะห์การทำงานของพัลส์วิดธ์มอดูเลชั่นคอนเวอร์เตอร์ชนิดทั่วไป โดยใช้หลักการลวดรูปวงจรรอย่างง่ายนั้น จำเป็นต้องมีกฎเกณฑ์ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งกฎเกณฑ์ดังกล่าว ถูกกำหนดบนพื้นฐานของการถ่ายโอนพลังงานจากแหล่งจ่ายไปยังภาระโหลด (ชนาธรณ์ ศรีมณฑล, 2564, น.31) สามารถจำแนกได้ 6 ข้อ ดังนี้

2.4.2.1 พลังงานไม่สามารถถ่ายโอนจากแหล่งจ่ายกระแสไปยังภาระโหลดกระแสและบัฟเฟอร์กระแสได้

2.4.2.2 พลังงานไม่สามารถถ่ายโอนจากแหล่งจ่ายแรงดันไปยังภาระโหลดแรงดันและบัฟเฟอร์แรงดันได้

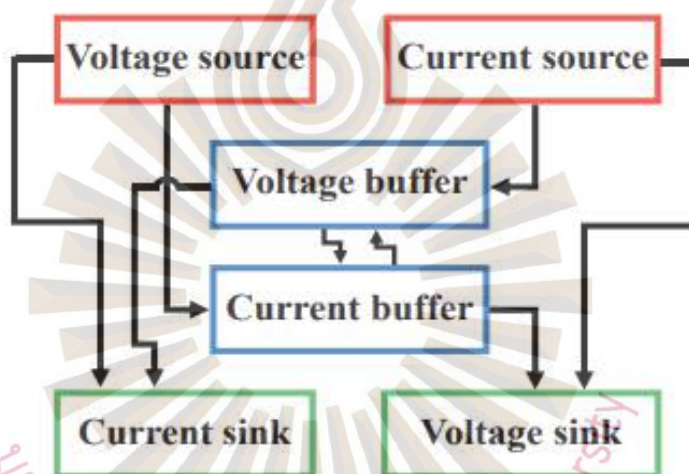
2.4.2.3 แหล่งจ่ายแรงดัน และแหล่งจ่ายกระแสสามารถถ่ายโอนพลังงานไปยังภาระโหลดและบัฟเฟอร์เท่านั้น ไม่สามารถรับพลังงานได้

2.4.2.4 ภาระโหลดแรงดันและภาระโหลดกระแสสามารถรับพลังงานได้เท่านั้น ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้

2.4.2.5 บัฟเฟอร์แรงดันและบัฟเฟอร์กระแสสามารถรับพลังงานจากแหล่งจ่ายและถ่ายโอนพลังงานไปยังภาระโหลดได้

2.4.2.6 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ช่วง 1 ช่วงเวลาในสภาวะคงตัว พลังงานที่รับเข้าต้องมีค่าเท่ากับพลังงานที่จ่ายออก ($E_{in} = E_{out}$)

แนวคิดเรื่องการถ่ายโอนพลังงานสามารถทำได้ โดยใช้ทั้งโหมดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว จากกฎเกณฑ์การถ่ายโอนพลังงานของหลักการลดรูปวงจรอย่างง่ายที่กล่าวมาข้างต้น สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงทิศทางการถ่ายโอนพลังงานได้ แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ทิศทางการถ่ายโอนพลังงานของหลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย

ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.32

2.5 การควบคุมความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM)

ในเนื้อหาก่อนหน้านี้ได้อธิบายถึงพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์อัตราขยาย การควบคุมมอสเฟต เพื่อให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดและทิศทางต่างๆ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น ต้องมีสัญญาณควบคุมการทำงานของมอสเฟต เพื่อให้คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานในโหมดต่างๆ ตามความต้องการ ปัจจุบันมีหลากหลายวิธีที่ใช้ในการควบคุม สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธี Phase Shifted PWM มาใช้ในการควบคุมการทำงานของพัลส์วิตช์มอดูเลชัน คอนเวอร์เตอร์ชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว (ธนาธรณ์ ศรีมณฑล, 2564, น.32) ซึ่งหน้าที่และการออกแบบวงจรพัลส์วิตช์มอดูเลชัน มีดังนี้

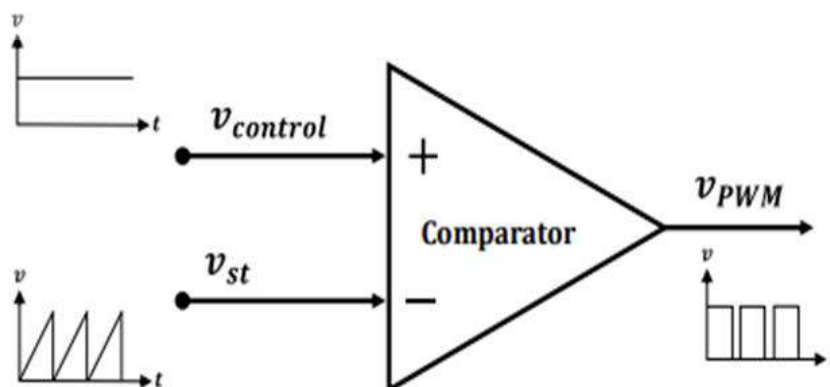
2.5.1 หน้าที่ของวงจรพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน

หน้าที่ของวงจรพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน คือ การสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้มีลักษณะสี่เหลี่ยมหรือเรียกว่าสัญญาณพัลส์ เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้มีสถานะนำกระแสและหยุดนำกระแส โดยอัตราส่วนระหว่างเวลาที่มอเตอร์นำกระแส (t_{on}) กับคาบเวลา (T_s) เรียกว่า วัฏจักรงาน (Duty Cycle: D) จากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่าวัฏจักรงาน ดังสมการที่ (2-23)

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2-23)$$

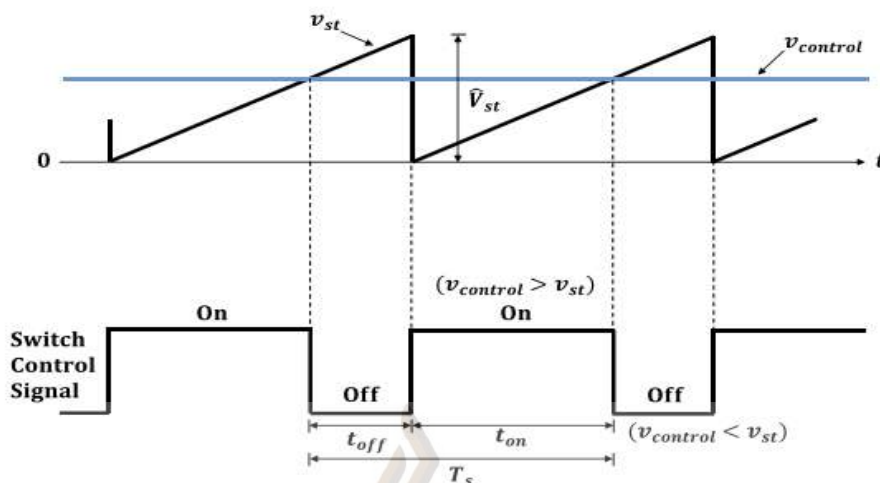
2.5.2 การออกแบบวงจรพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน

สำหรับการควบคุมความกว้างพัลส์ด้วยเทคนิค Phase Shifted เกิดขึ้นจากการนำสัญญาณแรงดันควบคุม (Control Voltage: $\hat{V}_{control}$) ไปเปรียบเทียบกับค่าสูงสุดของสัญญาณฟันเลื่อย (Peak of Sawtooth Waveform: V_{st}) โดยวงจรออปแอมป์เปรียบเทียบแรงดัน (Op-Amp Voltage Comparator) เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมการทำงานของมอเตอร์ เมื่อวิเคราะห์การทำงานใน 1 ช่วงเวลา หากแรงดันควบคุมมีค่ามากกว่าแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อย สัญญาณเอาต์พุตของวงจรพัลส์วิดธ์มอดูเลชันจะมีค่าต่ำ (“0 หรือ Low”) ส่งผลให้มอเตอร์หยุดนำกระแส และเมื่อแรงดันควบคุมมีค่าน้อยกว่าแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อย สัญญาณเอาต์พุตของวงจรพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน จะมีค่าสูง (“1 หรือ High”) ส่งผลให้มอเตอร์นำกระแส แสดงดังรูปที่ 2.25 และ 2.26



รูปที่ 2.25 วงจรออปแอมป์ เปรียบเทียบแรงดันสำหรับสร้างสัญญาณพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน

ที่มา: ธาราธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.33



รูปที่ 2.26 การสร้างสัญญาณพัลส์วัดซ์มอดูเลชั่น

ที่มา: ธนาธรณ์ ศรีมณฑล 2564, น.34

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับค่าสูงสุดของสัญญาณฟันเลื่อยของการควบคุมความกว้างพัลส์ด้วยเทคนิค Phase Shifted ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถคำนวณหาตัวคูณการดังสมการที่ (2-24)

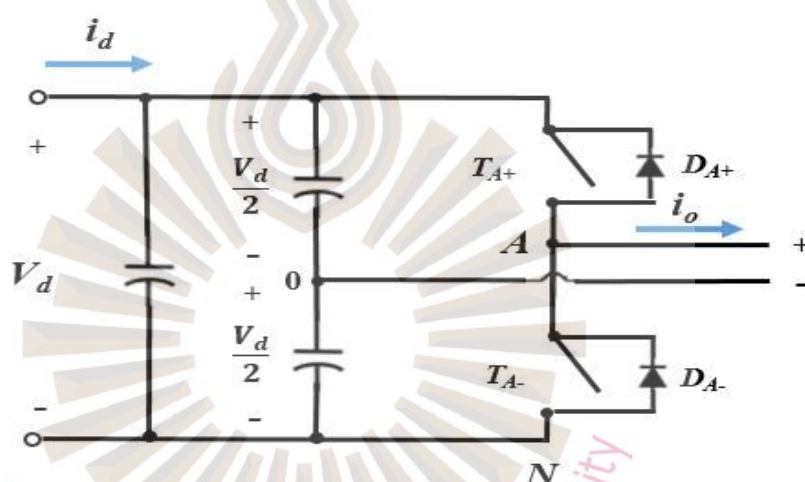
$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{V_{control}}{\hat{V}_{saw}} ; 0 \leq D \leq 1 \quad (2-24)$$

2.6 ทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ทำการแปลงพลังงานกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) กับ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน มักจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอาจจะแบ่งเป็น 2 ประเภทที่นิยมนำไปใช้งาน คือ อินเวอร์เตอร์แบบฟีดแบ็คเบิธูเอม (Pulse Width Modulation Inverter : PWM Inverter) ส่วนอีกประเภทที่นิยม คือ อินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-wave Inverter) ซึ่งโครงสร้างไม่ซับซ้อน (ปฎิวัติ บุญมาและสยามรัฐ เพิกอาภรณ์, 2555, น.4) แต่มีข้อเสีย คือ ขนาดของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ จะมีค่าสูง

2.6.1 การสวิตช์ด้วยการมอดูเลตกว้างพัลส์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation : SPWM)

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Control Signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Waveform) เพื่อเข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ (ปฏิวดี บุญมา และสยามรัฐ เพิกอาภรณ์, 2555, น.5) แสดงดังรูปที่ 2.27 จะแสดงเพียงหนึ่งกิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์ คือ กิ่ง A หรือเฟส A ที่สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้ามีค่าคงที่ และกำหนดให้การสวิตช์ทำงาน แบบ PWM



รูปที่ 2.27 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกิ่ง

ที่มา: ปฏิวดี บุญมา และสยามรัฐ เพิกอาภรณ์ 2555, น.6

คำย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม มีดังต่อไปนี้

$V_{control}$	สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านขาออก
V_{tr}	สัญญาณสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตช์
f_1	ความถี่หลักมูลฐานทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
f_s	ความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์
m_a	อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
m_f	อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

ค่า m_a และ m_f นิยามได้จากสมการที่ (2-25) และ (2-26)

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2-25)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2-26)$$

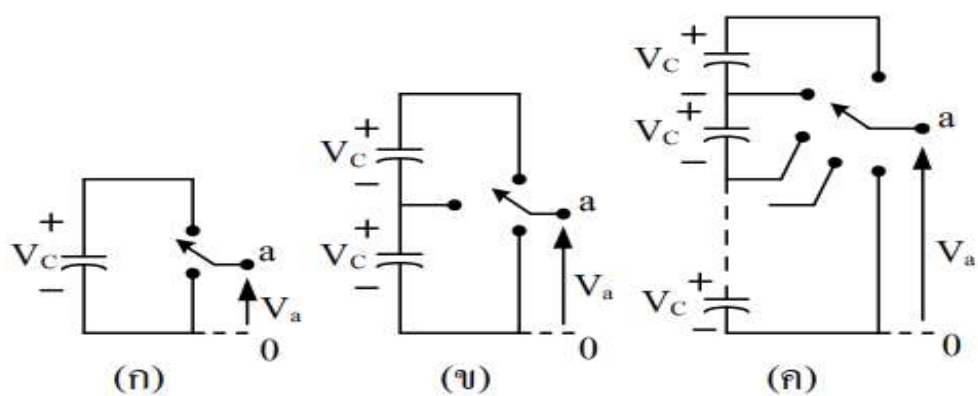
เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือ ค่ายอดควบคุมสัญญาณไซน์
 $\hat{V}_{tri}$ คือ ค่ายอดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

2.6.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit)

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ผ่านการกรองจากวงจรเชื่อมโยงทางแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรกำลังประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ทำหน้าที่ตัดต่อกระแสไฟฟ้า เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เทคนิค PWM การแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง และแปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับอีกครั้ง คือ การแปลงกระแสสลับโดยตรงนั้น ความถี่ทางด้านขาออกจะไม่เกินความถี่ทางด้านขาเข้า ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มากกว่าความเร็วพิกัดได้ แต่การเปลี่ยนจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง และแปลงกลับมาเป็นกระแสสลับอีกครั้ง จะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างความถี่ที่สูงกว่าความถี่ทางด้านขาเข้า (ปฎิวัติ บุญมา และสยามรัฐ เพิกอาภรณ์ 2555, น.12) ดังนั้น จึงสามารถที่จะปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มากกว่าความเร็วพิกัดได้

2.6.3 วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverters) คือ การรวมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและแหล่งจ่ายแรงดันจากตัวเก็บประจุ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเป็นขั้นๆ การสับเปลี่ยนกระแสของสวิตช์จะทำให้ตัวเก็บประจุต่อกับแรงดันไฟฟ้าสูงด้านขาออก ในขณะที่ตัวสวิตช์จะได้รับแรงดันน้อยลง วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สามารถแบ่งออกได้ตามระดับ (ปฎิวัติ บุญมา และสยามรัฐ เพิกอาภรณ์ 2555, น.13) แสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 วงจรรีนาเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีสถานการณ์ทำงานเป็น (ก) 2 ระดับ (ข) 3 ระดับ และ (ค) n ระดับ

ที่มา: ปฏิวัติ บุญมา และสยามรัฐ เพิกอาภรณ์ 2555, น.14



บทที่ 3

การวิเคราะห์การทำงานในสถานะคงตัว

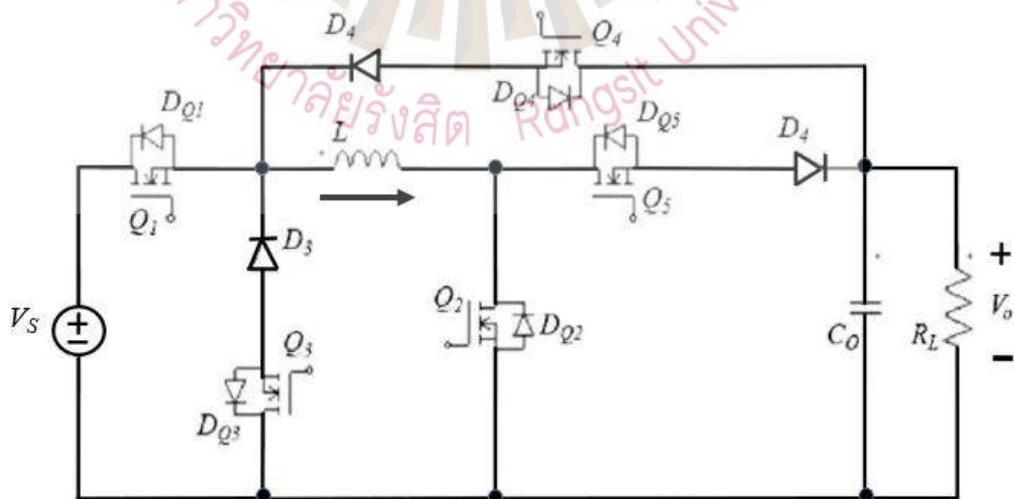
ในบทนี้จะนำเสนอหลักการวิเคราะห์โหมดการทำงานและทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน รวมถึงการวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของพัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว ในสถานะคงตัว ซึ่งสามารถจำแนกได้ 2 ส่วน ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์โหมดการทำงาน

3.2 การวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า

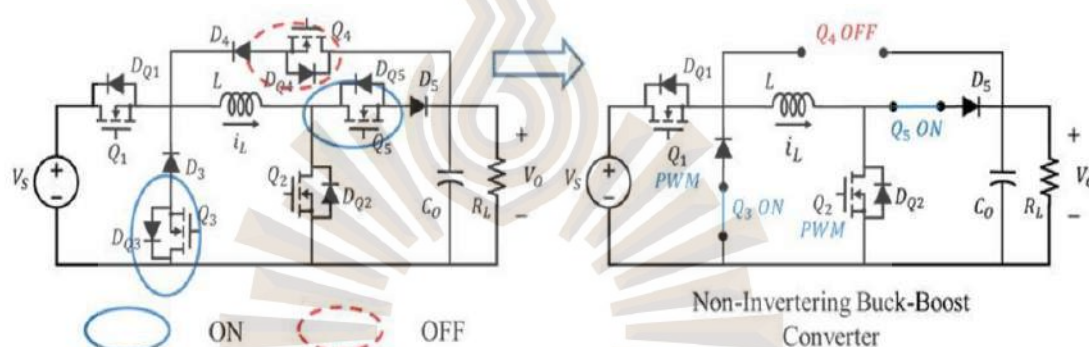
3.1 การวิเคราะห์โหมดการทำงาน

คอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์ ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ที่สำคัญคอนเวอร์เตอร์นี้มีอัตราขยายสามารถปรับให้ต่ำหรือสูงกว่าได้ คอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์ วงจรนี้ประกอบด้วยสวิตช์ 5 ตัว ที่ทำการเปิดและปิดพร้อมกันได้ ตามแผนภาพวงจรแสดงดังรูปที่ 3.1 สามารถกำหนดค่าให้เป็นแบบใดแบบหนึ่งได้ ขึ้นอยู่กับวิธีกำหนดค่าของสวิตช์ทั้ง 5 ตัว

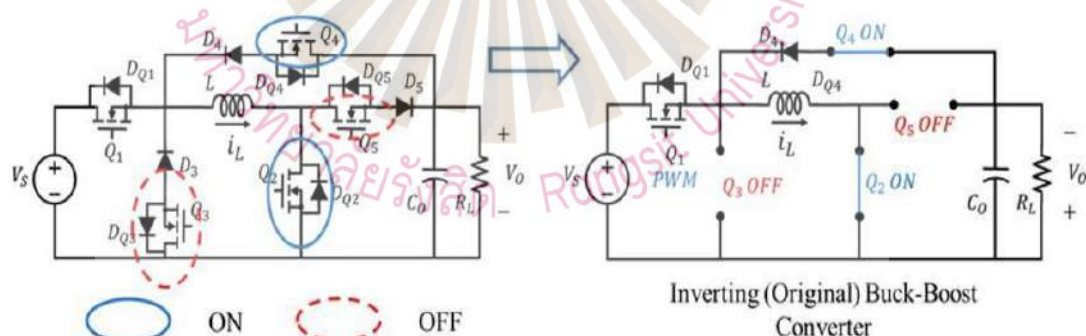


รูปที่ 3.1 วงจรของคอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์

วงจรของคอนเวอร์เตอร์แบบชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว แสดงดังรูปที่ 3.1 เป็นวงจรต้นแบบที่ถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อพิสูจน์ทราบว่าจะสามารถปรับตั้งค่าโหมดการทำงานเป็นแบบบัค-บูสต์ ซึ่งสามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ทิศทาง ได้แก่ทิศทางตรง (Forward) และทิศทางย้อนกลับ (Backward) ได้จริง สำหรับการวิเคราะห์จะดำเนินการแบบแบ่งโหมด โดยขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการลดรูปอุปกรณ์ภายในวงจรที่ไม่มีความสำคัญและไม่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ในโหมดนั้นๆ เพื่อให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์ หลังจากนั้น จะทำการควบคุมการทำงานของมอสเฟต จำนวน 5 ตัว เพื่อวิเคราะห์และพิสูจน์ทราบถึงทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าและโหมดการทำงานตามสมมติฐาน แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการตั้งค่าสวิตช์ไม่กลับขั้ว คอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์



รูปที่ 3.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการตั้งค่าสวิตช์กลับขั้ว คอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์

3.1.1 การกำหนดค่าสวิตช์

ได้กล่าวไปแล้ว สวิตช์ทั้ง 5 ตัว ในงานวิจัยนี้ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ สามารถกำหนดค่าได้ทั้งค่าเอาต์พุตบวกและเอาต์พุตลบ การตั้งค่าสวิตช์จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

สวิตช์ที่มี PWM ในตารางจะขับเคลื่อนด้วยสัญญาณ PWM เอาต์พุตที่เป็นบวกและเอาต์พุตที่เป็นลบ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบไม่กลับขั้วและกลับขั้ว

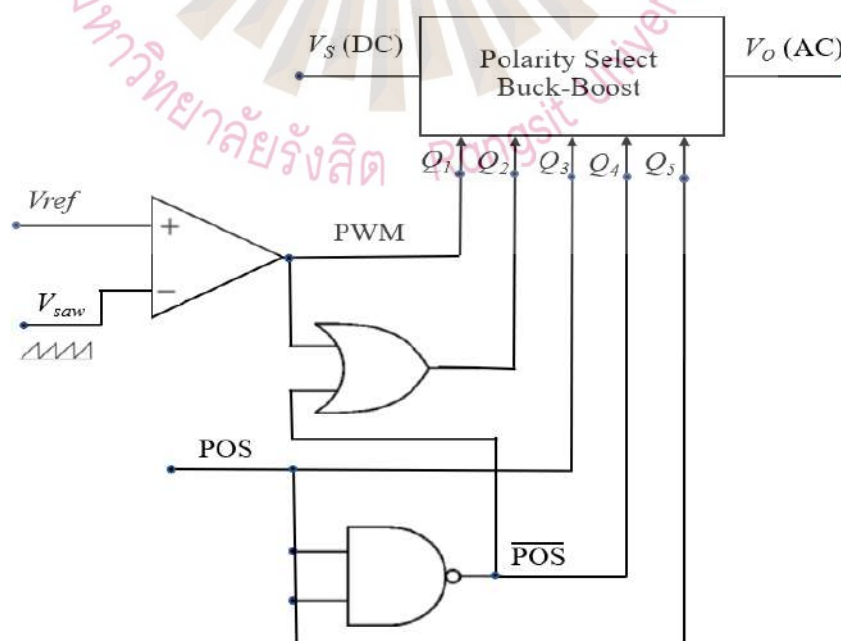
ตารางที่ 3.1 การตั้งค่าสวิตช์สำหรับการทำงานที่โหมดแตกต่างกัน

Polarity	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Positive output	PWM	PWM	ON	OFF	ON
Negative output	PWM	ON	OFF	ON	OFF

แผนภาพของวิธีการใช้ gate drive สัญญาณสำหรับ MOSFET ทั้งหมด สามารถหาได้จากตารางที่ 3.1 และในรูปสัญญาณ PWM จะถูกสร้างขึ้นจากการเปรียบเทียบระหว่าง V_{ref} กับ $V_{saw,p}$ สามารถแสดงได้ดังนี้

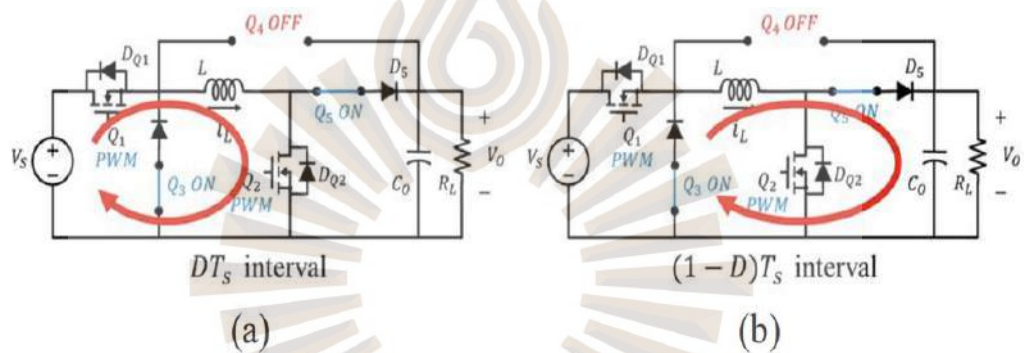
$$D = \frac{V_{ref}}{V_{saw,p}} \quad (3-1)$$

ค่าสูงสุดของสัญญาณ POS บ่งชี้โหมดการทำงาน เมื่อ POS = “1” คอนเวอร์เตอร์จะดำเนินการในโหมดไม่กลับขั้ว เมื่อ POS = “0” ตัวแปลงจะทำงานในโหมดกลับขั้ว



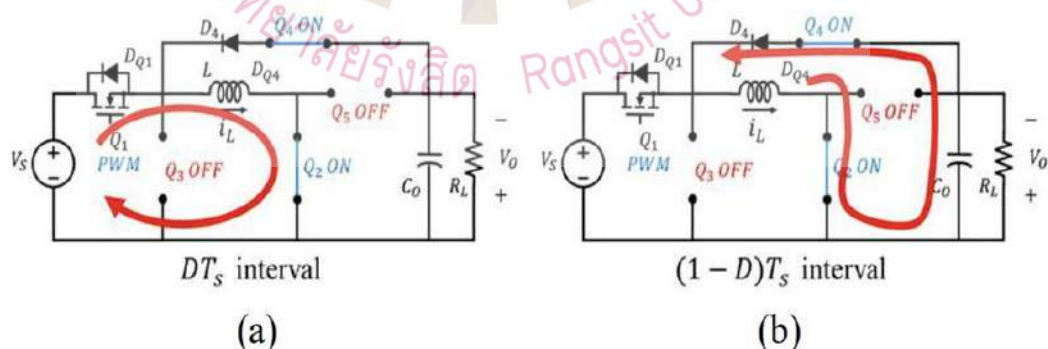
รูปที่ 3.4 แผนภาพลอจิกสำหรับสัญญาณการขับเคลื่อนเกท

การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ นั้น คล้ายคลึงกับตัวแปลง PWM อื่นๆ ในช่วงเปลี่ยนผ่านอยู่ 2 ช่วงเวลา ช่วงเวลาในการเปิดเครื่อง DT_s และช่วงเวลาปิดเครื่อง $(1-D)T_s$ การดำเนินงานและการวิเคราะห์ สำหรับทั้งโหมดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว ระหว่างช่วงเวลา DT_s พลังงานจะถูกถ่ายโอนจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังตัวเหนี่ยวนำ L ระหว่างช่วงเวลา DT_s หลังจากนั้น ตัวเหนี่ยวนำ L จะถ่ายโอนพลังงานไปยังวงจรเอาต์พุต ประกอบด้วย R_L และ C_o ใน 1 ช่วงเวลา $(1-D)T_s$ พลังงานที่ถ่ายโอนมาจากตัวเหนี่ยวนำ L ให้กับวงจรโหลด จะอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า i_L เข้าไปที่ขั้วบวกของวงจรโหลด สำหรับโหมดที่ไม่กลับขั้วไปยังขั้วลบ สำหรับโหมดทิศทางการไหลย้อนกลับของกระแสในสวิตช์ ระยะเวลาสำหรับโหมดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว จะแสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ทิศทางของการไหลของกระแสในช่วงเวลาสำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดไม่กลับขั้ว

a) ระหว่างช่วงเวลา DT_s และ b) ระหว่าง 1 ช่วงเวลา $(1-D)T_s$

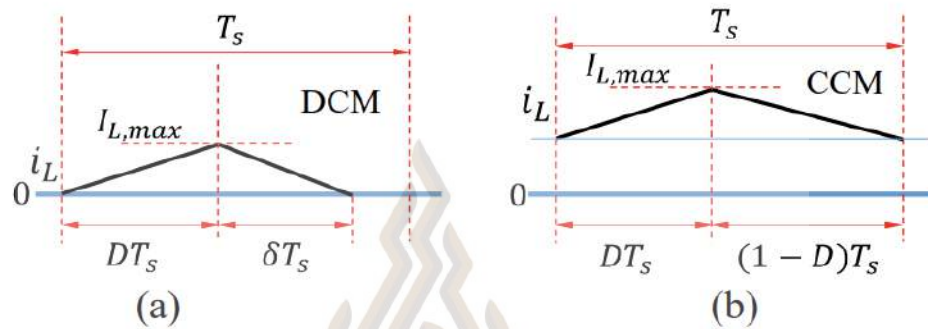


รูปที่ 3.6 ทิศทางของการไหลของกระแสในช่วงเวลา สำหรับตัวแปลงทำงานในโหมดกลับขั้ว

a) ระหว่างช่วงเวลา DT_s และ b) ระหว่าง 1 ช่วงเวลา $(1-D)T_s$

ในแง่ของการไหลของกระแสเหนี่ยวนำ ถ้าขนาดตัวเหนี่ยวนำไม่ได้มีขนาดใหญ่ กระแสไฟเหนี่ยวนำอาจไม่ต่อเนื่อง ก่อนสิ้นสุดระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงการดำเนินการ ในกรณีนี้

เรียกว่า โหมดการนำไฟฟ้าไม่ต่อเนื่อง โหมดการทำงาน DCM หากกระแสไฟเหนี่ยวนำไม่ถึงศูนย์ ในช่วงสภาวะคงตัว ซึ่งเรียกว่าการนำไฟฟ้าต่อเนื่อง โหมดการทำงาน CCM แสดงดังรูปที่ 3.7 แสดงกระแสเหนี่ยวนำรูปคลื่นในช่วงเวลาการสลับ สำหรับโหมดการทำงานของ DCM และ CCM



รูปที่ 3.7 คลื่นของกระแสตัวเหนี่ยวนำในสภาวะคงตัว a) โหมดการนำไม่ต่อเนื่อง DCM และ b) โหมดการนำต่อเนื่อง CCM

3.1.2 โหมดการนำไฟฟ้าไม่ต่อเนื่อง DCM

ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (a) กระแสไฟเหนี่ยวนำจะกลายเป็นศูนย์ก่อนสิ้นสุดช่วง เปลี่ยนแต่ละช่วง ในกรณีนี้ อัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$m = \frac{V_O}{V_S} = \frac{D}{\delta} \quad (3-2)$$

สำหรับคอนเวอร์เตอร์นี้ กระแส I_L ไหลเข้าวงจรโหลด หลังจากปิดสวิตช์แล้ว สำหรับกระแสเอาต์พุต ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$I_O = \frac{I_{L,max}\delta}{2} \quad (3-3)$$

การใช้คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ สามารถหาได้ดังนี้

$$I_{L,max} = \frac{V_O \delta T_s}{L} \quad (3-4)$$

จากสมการ (3-3) และ (3-4) สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\delta = \sqrt{\frac{2L}{R_L T_S}}, \quad (3-5)$$

ความต้านทานโหลด แทนค่าในสมการ (3-6) สามารถกำหนดอัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์ สำหรับ DCM ได้ดังนี้

$$m = D \sqrt{\frac{R_L T_S}{2L}}. \quad (3-6)$$

R_L , T_S และ L จะคงที่ในระหว่างสภาวะคงตัว คอนเวอร์เตอร์ที่ได้รับสำหรับ DCM นั้น เนื่องจาก D อยู่ในความสัมพันธ์เชิงเส้น V_{ref} ตามที่ระบุไว้ในรูปที่ 3.8 อัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์ มีความสัมพันธ์เชิงเส้น V_{ref}

จากรูปที่ 3.7 (a) เป็นการดำเนินการในโหมด DCM ความสัมพันธ์นี้ ซึ่งเงื่อนไขสำหรับ โหมด DCM สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sqrt{\frac{2L}{R_L T_S}} < (1 - D). \quad (3-7)$$

ให้ r_{nL} เป็นฟังก์ชัน โดย R_L และพารามิเตอร์อื่นๆ แสดงได้ดังนี้

$$r_{nL} = \frac{R_L T_S}{L}, \quad (3-8)$$

ดังนั้น หลักเกณฑ์ในการให้ตัวแปลงทำงานใน DCM ตามสมการ (3-9)

$$r_{nL} > \frac{2}{(1-D)^2}. \quad (3-9)$$

3.1.3 โหมดการนำไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง CCM

โหมดการนำไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง CCM จะถูกนำมาใช้เป็นส่วนใหญ่โดยแอปพลิเคชัน ซึ่งสามารถเพิ่มกระแสสูงสุดให้กับโหลด $I_{L,avg}$ เป็นค่าเฉลี่ยของ I_L ในช่วงเปลี่ยนผ่าน ดังนั้น พลังงานจึงถูกถ่ายเทจากแหล่งจ่ายและโหลดในช่วงเวลาสลับได้มาเป็น $V_S I_{L,avg} DT_S$ และ $V_O I_{L,avg} (1-D)T_S$ เนื่องจากตัวแปลงที่นำเสนอจะถือว่าไม่มีการสูญเสียทั้ง 2 สิ่งนี้ ซึ่งทำให้ปริมาณพลังงานจะต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้น คอนเวอร์เตอร์ สำหรับ CCM สามารถหาได้ดังนี้

$$m = \frac{V_O}{V_S} = \frac{D}{1-D} \quad (3-10)$$

แนวคิดเรื่องการถ่ายโอนพลังงานสามารถทำได้ โดยใช้ทั้งโหมดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว ดังนั้น ทั้ง 2 โหมด สามารถใช้การคำนวณหาอัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์ จะเห็นได้ว่าอัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังนั้น อัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์ จึงไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ V_{ref} ซึ่งจะทำให้ลักษณะของ CCM แตกต่างจาก DCM

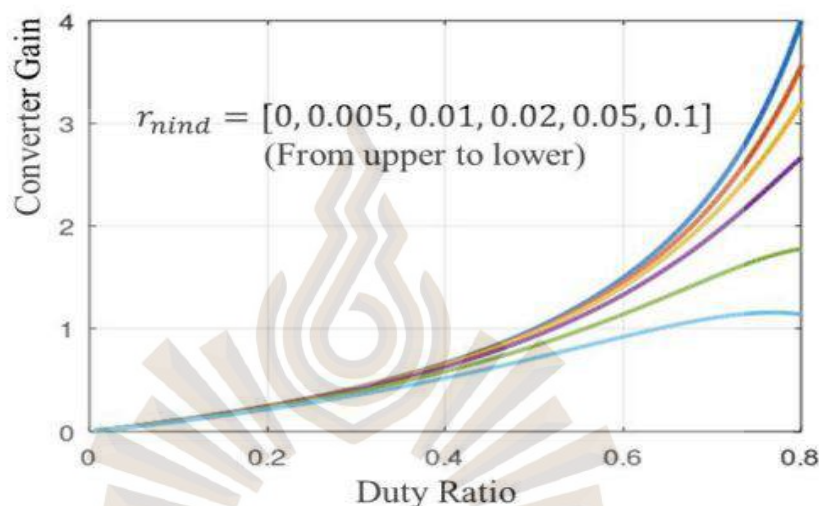
สำหรับกรณีในอุดมคติ ลวดทองแดงที่ใช้ทำตัวเหนี่ยวนำ ถือว่ามีความต้านทานเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม ความต้านทานในลวดทองแดงใดๆ ปริมาณความต้านทานขึ้นอยู่กับคุณภาพและขนาดของลวดทองแดงแต่ละเส้น ความต้านทานในตัวเหนี่ยวนำความต้านทานจะไม่เพียงส่งผลต่อประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์เท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อลักษณะของคอนเวอร์เตอร์ วงจรเชื่อมต่อบบอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ จึงเกิดการสูญเสียพลังงานในการอนุรักษ์พลังงาน จึงเกิดการสูญเสียพลังงานตามความสัมพันธ์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$DV_S I_{L,avg} = (1-D)V_O I_{L,avg} + I_{L,avg}^2 R_{ind} \quad (3-11)$$

สมการอัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์สำหรับ CCM ได้ดังนี้

$$m = \frac{V_O}{V_S} = \frac{D(1-D)}{(1-D)^2 + r_{ind}} \quad (3-12)$$

โดยที่ $r_{nind} = R_{nind} / R_L$ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความต้านทานในตัวย่นวนนำและความต้านทานโหลด การใช้อัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์ ได้ค่าที่แตกต่างกันของ r_{nind} ดังนั้นลักษณะการควบคุมสำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่มีตัวย่นวนนำแบบสูญเสีย แสดงดังรูปที่ 3.8 พบว่าเส้นลักษณะเฉพาะที่มี $r_{nind} = 0$ คือ กรณีที่เหมาะสมที่สุด สำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอไว้



รูปที่ 3.8 ลักษณะการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอดำเนินการใน CCM

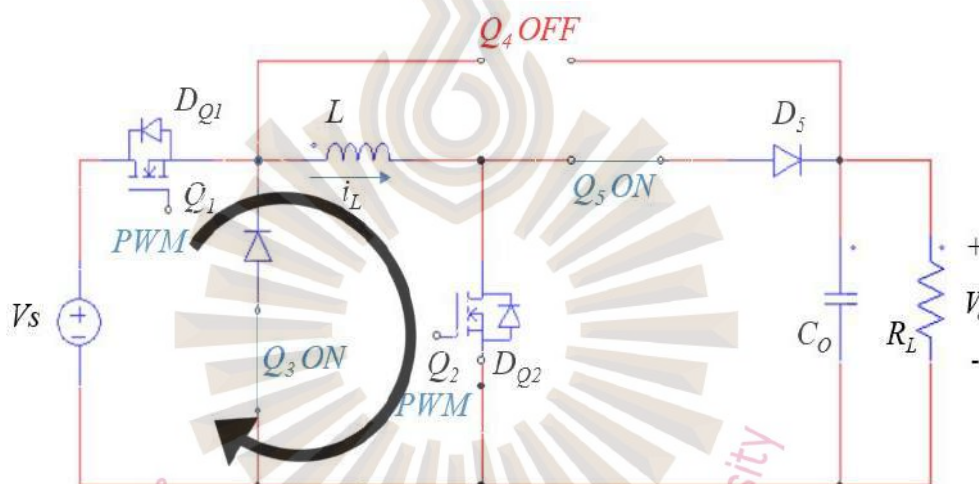
พร้อมตัวย่นวนนำแบบสูญเสีย

ที่มา: Sooksatra and Subsingha, 2022, p.3

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้โหมดการนำไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง CCM เนื่องจากโหมดการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่เกิดขึ้น ในขณะที่สวิตช์กำลังนำกระแส พลังงานจะถูกส่งจากแหล่งจ่ายด้านอินพุตผ่านตัวย่นวนนำไปยังภาระโหลดด้านเอาต์พุตโดยตรง และเมื่อสวิตช์กำลังหยุดนำกระแส เวลานี้ภาระโหลดจะยังได้พลังงานที่ถ่ายเทคืนมาจากตัวย่นวนนำแทนกระแสเอาต์พุต จึงมีลักษณะต่อเนื่องและไม่เป็นศูนย์ ส่วนมากใช้กับวงจรที่มีกำลังไฟฟ้าปานกลางถึงสูง เนื่องจากการทำงานในโหมดนี้มีกระแสกระเพื่อมด้านอินพุตต่ำ ทำให้สามารถลดทอนอุปกรณ์กรองสัญญาณด้านเอาต์พุตได้ และคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์เป็นวงจรที่มีความสามารถลดระดับแรงดันเอาต์พุต ให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุต เมื่อถูกควบคุมให้ทำงานในทิศทางตรง (Forward) และเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้มากกว่าแรงดันอินพุต เมื่อถูกควบคุมให้ทำงานในทิศทางย้อนกลับ (Backward)

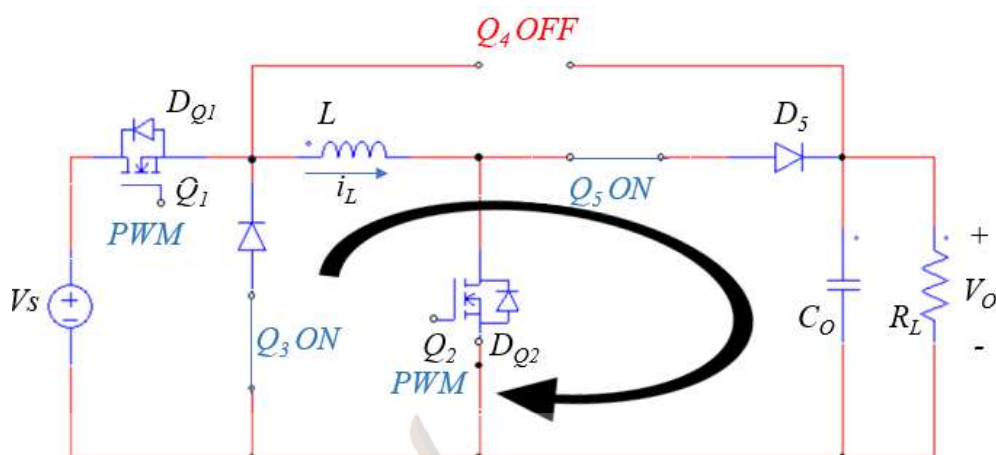
3.1.5 โหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ ในทิศทางตรง

โหมดที่ 1 สวิตช์ตัวที่ 1 (Q_1) สวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) และสวิตช์ตัวที่ 3 (Q_3) มีสถานะนำกระแส และสวิตช์ตัวที่ 4 (Q_4) มีสถานะหยุดนำกระแส กระแสอินพุตไหลจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ตัวที่ 1 (Q_1) และสวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) ไปยังตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดการชาร์จพลังงานเนื่องจากกระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยรอบตัวเหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ตัวเหนี่ยวนำกลายเป็นแหล่งจัดเก็บพลังงานชั่วขณะ จากการทำงานดังกล่าว ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ทิศทางของการไหลของกระแสในช่วงเวลาการสลับ สำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดไม่กลับขั้ว

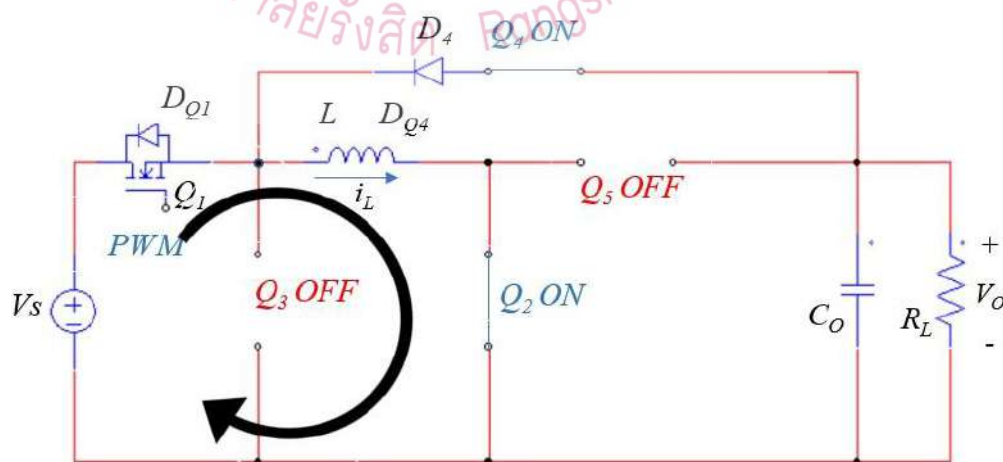
โหมดที่ 2 สวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) และสวิตช์ตัวที่ 5 (Q_5) มีสถานะนำกระแส และสวิตช์ตัวที่ 4 (Q_4) มีสถานะหยุดนำกระแส กระแสอินพุตไหลจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ตัวที่ 5 (Q_5) และสวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) ไปยังตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะกลายเป็นพลังงานสำรองชั่วขณะ ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับ ส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำเอาต์พุตสามารถไหลไปยังภาระโหลดทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ทิศทางของการไหลของกระแสในช่วงเวลาการสลับ สำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดไม่กลับขั้ว

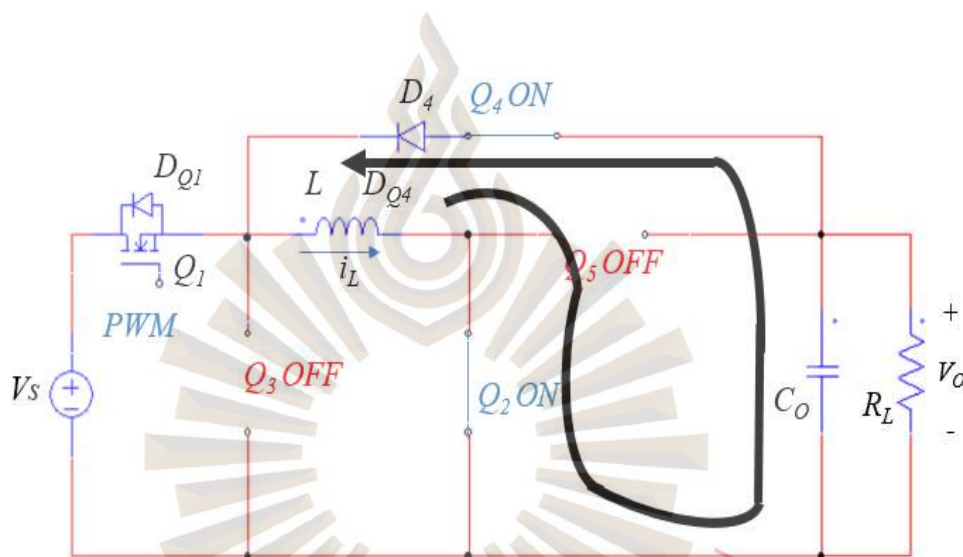
3.1.6 โหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ในทิศทางย้อนกลับ

โหมดที่ 1 สวิตช์ตัวที่ 1 (Q_1) และสวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) มีสถานะนำกระแส และสวิตช์ตัวที่ 3 (Q_3) มีสถานะหยุดนำกระแส กระแสอินพุตไหลจากแหล่งจ่ายผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังสวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) ทำให้ตัวเหนี่ยวนำเกิดการชาร์จพลังงาน เนื่องจากกระแสของตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยรอบตัวเหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ตัวเหนี่ยวนำกลายเป็นแหล่งจัดเก็บพลังงานชั่วขณะจากการทำงานดังกล่าว ส่งผลให้แรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ทิศทางของการไหลของกระแสในช่วงเวลาการสลับ สำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดกลับขั้ว

โหมดที่ 2 สวิตช์ตัวที่ 1 (Q_1) สวิตช์ตัวที่ 2 (Q_2) และสวิตช์ตัวที่ 4 (Q_4) มีสถานะนำกระแส และสวิตช์ตัวที่ 3 (Q_3) สวิตช์ตัวที่ 5 (Q_5) มีสถานะหยุดนำกระแส ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตและตัวเหนี่ยวนำถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงจรภาระโหลดพลังงานจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุตรวมกับพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะไหลไปยังภาระโหลดทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้น โดยแรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำบวกกับแรงดันตกคร่อมภาระโหลด แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ทิศทางของการไหลของกระแสในช่วงเวลาการสลับ สำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดกลับขั้ว

การวิเคราะห์การทำงานของบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ สำหรับโหมดการทำงานแบบบัคในทิศทางตรง และแบบบูสต์ในทิศทางย้อนกลับของวงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ จะสังเกตเห็นได้ว่า การทำงานดังกล่าว คล้ายกับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์และวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่กล่าวมา ดังนั้น สามารถใช้หลักการวิเคราะห์และคำนวณของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) และสามารถใช้หลักการวิเคราะห์และคำนวณของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ เนื่องจากวงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ มีตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบอยู่ในวงจรเพียง 1 ตัว ดังนั้น ควรเลือกตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดสูงสุดที่คำนวณได้จากการทำงานแบบบัคและแบบบูสต์ในการประกอบเป็นวงจรและการจำลองผลลัพธ์ด้วยคอมพิวเตอร์

3.2 การวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าในสถานะคงตัว

การวิเคราะห์อัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain: m) ของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ มีหลากหลายวิธี แต่สำหรับเอกสารวิจัยฉบับนี้ ต้องการนำเสนอการวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์เอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้ว โดยนำหลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย (Circuit Simplification Approach) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์

หลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย (Circuit Simplification Approach) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดัน เพื่อลดความซับซ้อนที่เกิดขึ้นจากคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ประกอบกันอยู่ในวงจร รวมถึงเป็นการลดจำนวนอุปกรณ์ที่ไม่สำคัญ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ในโหมดการทำงานและทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์อัตราขยายแรงดัน สำหรับวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์เอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้ว สามารถวิเคราะห์ได้ทั้ง 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางตรงและทิศทางย้อนกลับ แต่สำหรับการวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันที่ได้นำเสนอในเอกสารวิจัยฉบับนี้ จะเป็นเพียงการวิเคราะห์อัตราขยายในทิศทางตรง เนื่องจากวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์เอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้วที่ถูกนำเสนอในเอกสารวิจัยฉบับนี้ มีความสมมาตรกัน ทั้งนี้การวิเคราะห์ต้องดำเนินการภายใต้เงื่อนไข 2 ประการ ได้แก่

- 1) โหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM)
- 2) สถานะคงที่ (Steady State)

การวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันในทิศทางตรงของวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์เอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้ว สำหรับโหมดการทำงานที่แตกต่างกัน สามารถจำแนกได้ 3 แบบ ดังนี้

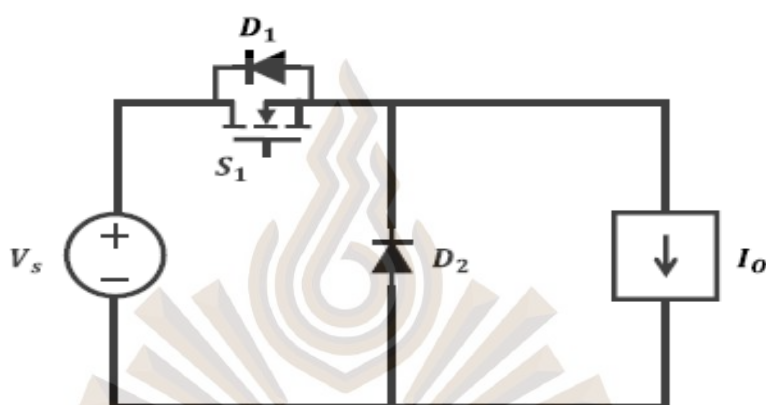
3.2.1 โหมดการทำงานแบบบัค (Buck Mode)

จากรูปที่ 3.10 แสดงวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้ว ที่ผ่านการลดจำนวนอุปกรณ์ที่ไม่มีเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ จากนั้นทำให้อยู่ในรูปวงจรวงจรอย่างง่าย โดยใช้หลักการลดรูปวงจรอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 3.13 โดยหลักการที่ใช้ในการลดรูปวงจรสำหรับโหมดการทำงานแบบบัค ประกอบด้วย 3 ประการ ดังนี้

3.2.1.1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมด้านเอาต์พุตส่งผลให้ “กระแสไฟฟ้าคงที่” จึงสามารถลดรูปให้กลายเป็นภาระโหลดกระแสคงที่ (I_o)

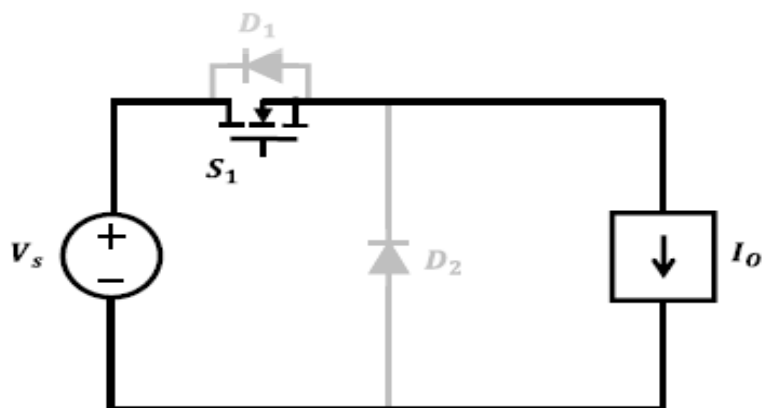
3.2.1.2 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็น “ศูนย์”

3.2.1.3 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่า “คงที่”

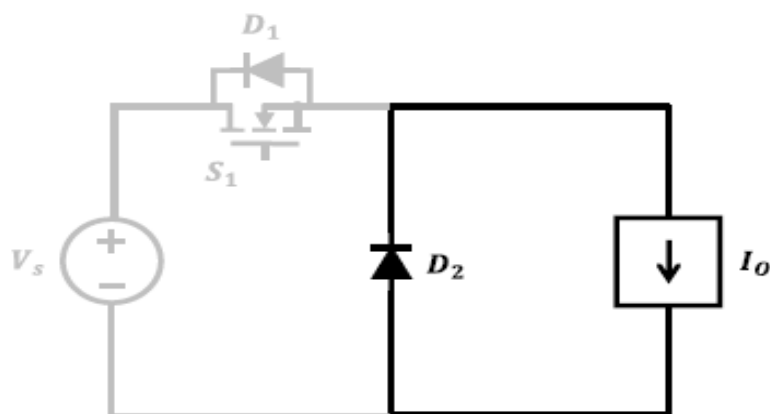


รูปที่ 3.13 วงจรรอย่างง่ายของฟัลส์วิธึมมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสค์ชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบัค ในทิศทางตรง

วงจรรอย่างง่ายของฟัลส์วิธึมมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสค์ชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบัคในทิศทางตรง สามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันได้ โดยพิจารณาจากสถานะที่มอสเฟตนำกระแส DT_s และหยุดนำกระแส $(1-D)T_s$ ในหนึ่งคาบเวลา แสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 วงจรรอย่างง่ายของฟัลส์วิธึมมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสค์ชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบัค ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟตนำกระแส



รูปที่ 3.15 วงจรรอย่างง่ายของพัลส์วิธรีมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบัก ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแส

จากรูปที่ 3.14 คือ สภาวะที่มอสเฟตนำกระแส ส่งผลให้พลังงานไหลเข้าสู่วงจร (E_{in}) ดังนั้น สามารถ คำนวณหาพลังงานไหลเข้าได้จากสมการที่ (3-13)

$$E_{in} = V_S I_O D T_S \quad (3-13)$$

จากรูปที่ 3.15 คือ สภาวะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส หากพิจารณากระแสไหลดกระแสที่เชื่อมต่อทางด้าน เอาต์พุต จะสังเกตได้ว่ากระแสถูกจ่ายไปยังภาระโหลดตลอดในช่วงหนึ่งคาบเวลา ส่งผลให้พลังงานไหลออกไปยังภาระโหลด (E_{out}) มีค่าคงที่ ดังนั้น สามารถคำนวณหาพลังงานไหลออกได้จากสมการที่ (3-14)

$$E_{out} = V_O I_O T_S \quad (3-14)$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation of Energy) พลังงานไหลเข้ามีค่าเท่ากับพลังงานไหลออก ส่งผลให้สมการ (3-13) มีค่าเท่ากับ (3-14) ดังนั้น สามารถคำนวณหาอัตราขยายแรงดันของโหมดการทำงานแบบบัก ได้ดังสมการที่ (3-15)

$$E_{in} = E_{out}$$

$$V_S I_O D T_S = V_O I_O T_S$$

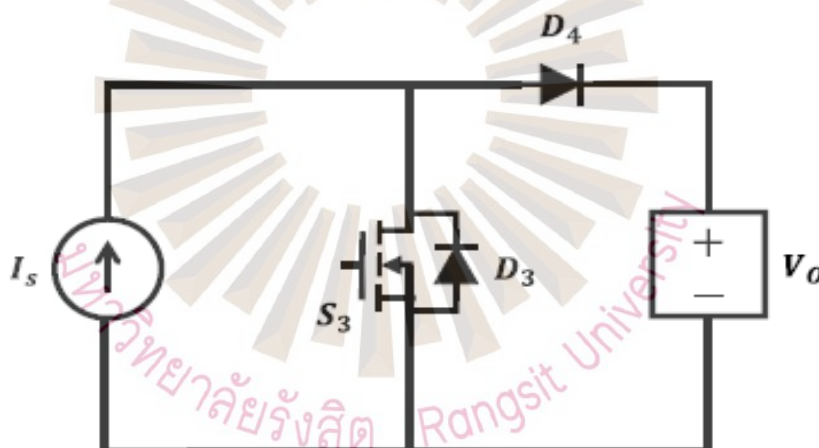
$$m = V_O V_S = D \quad (3-15)$$

3.2.2 โหมดการทำงานแบบบูสต์ (Boost Mode)

จากรูปที่ 3.11 แสดงวงจรพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบูสต์ในทิศทางตรง ซึ่งผ่านการลดจำนวนอุปกรณ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ จากนั้นทำให้อยู่ในรูปวงจรอย่างง่าย โดยใช้หลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย แสดงดังรูปที่ 3.16 สำหรับโหมดการทำงานแบบบูสต์ ประกอบด้วย 2 ประการ ดังนี้

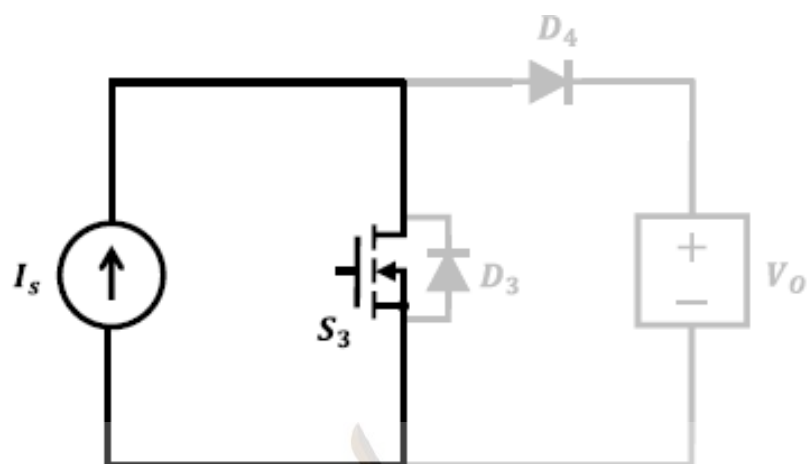
3.2.2.1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมด้านอินพุตส่งผลให้ “กระแสไฟฟ้าคงที่” จึงสามารถลดรูปให้กลายเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (I_s)

3.2.2.2 ในหนึ่งคาบเวลาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่า “คงที่” ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตคงที่

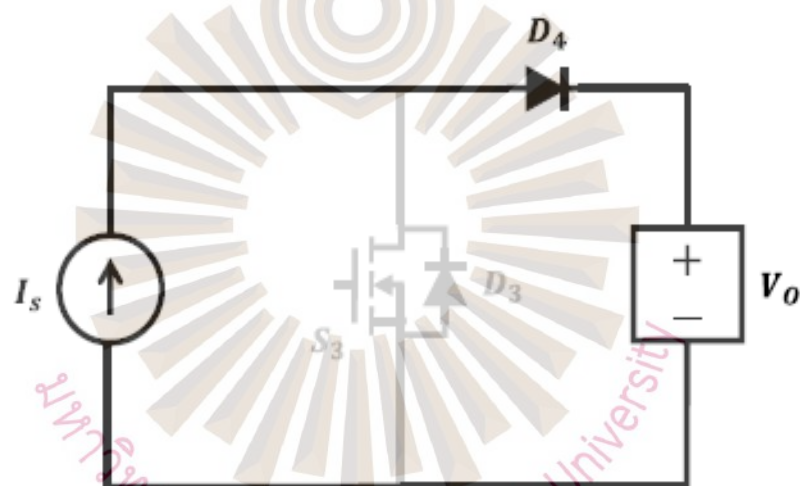


รูปที่ 3.16 วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบูสต์ ในทิศทางตรง

วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบูสต์ในทิศทางตรง สามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันได้ โดยพิจารณาจากสถานะที่มอสเฟตนำกระแส $[DT_s]$ และหยุดนำกระแส $[(1 - D)T_s]$ ในหนึ่งคาบเวลา แสดงดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ



รูปที่ 3.17 วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิธรีมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้ว
ที่มีโหมดการทำงานแบบบูสต์ ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟตนำกระแส



รูปที่ 3.18 วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิธรีมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้ว
ที่มีโหมดการทำงานแบบบูสต์ ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแส

จากรูปที่ 3.18 คือ สภาวะที่มอสเฟตนำกระแส หากพิจารณาแหล่งจ่ายแรงดันที่เชื่อมต่อโดยตรงกับตัวเหนี่ยวนำทางด้านอินพุตจะสังเกตได้ว่า กระแสอินพุตมีค่าคงที่และถูกจ่ายไปยังวงจรตลอดในช่วงหนึ่งคาบเวลา ส่งผลให้พลังงานไหลเข้าสู่ตัวจอร์ (E_{in}) ดังนั้น สามารถคำนวณหาพลังงานไหลเข้าได้ จากสมการที่ (3-16)

$$E_{in} = V_S I_S T_S \quad (3-16)$$

จากรูปที่ 3.18 คือ สภาวะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส ส่งผลให้พลังงานไหลออกไปยังภาระโหลด (E_{out}) ดังนั้นสามารถคำนวณหาพลังงานไหลออกได้ จากสมการที่ (3-17)

$$E_{out} = V_O I_O (1 - D) T_s \quad (3-17)$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation of Energy) พลังงานไหลเข้ามีค่าเท่ากับพลังงานไหลออก ส่งผลให้สมการ (3-16) มีค่าเท่ากับ (3-17) ดังนั้น สามารถคำนวณหาอัตราขยายแรงดันของโหมดการทำงานแบบบูสต์ได้ ดังสมการที่ (3-18)

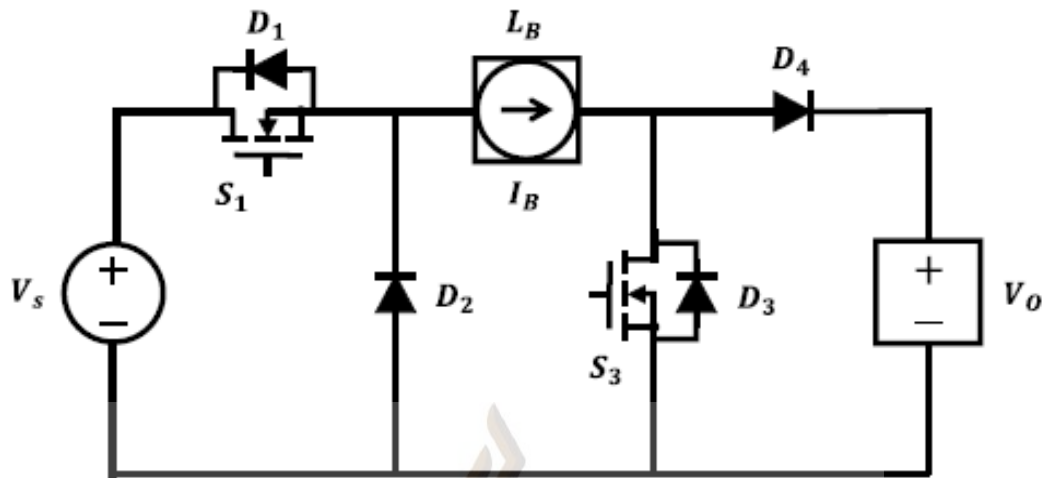
$$\begin{aligned} E_{in} &= E_{out} \\ V_S I_S T_S &= V_O I_O (1 - D) T_S \\ m &= V_O V_S = 1(1 - D) \end{aligned} \quad (3-18)$$

3.2.3 โหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ (Buck-Boost Mode)

จากรูปที่ 3.18 แสดงวงจรวงจรพัลส์วิดธึมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ในทิศทางตรง ซึ่งผ่านการลดจำนวนอุปกรณ์ที่ไม่มีเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เรียบร้อย จากนั้นทำให้อยู่ในรูปวงจรง่าย ๆ โดยใช้หลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย แสดงดังรูปที่ 3.19 โดยหลักการที่ใช้ในการลดรูปวงจรสำหรับโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ ประกอบด้วย 2 ประการ ดังนี้

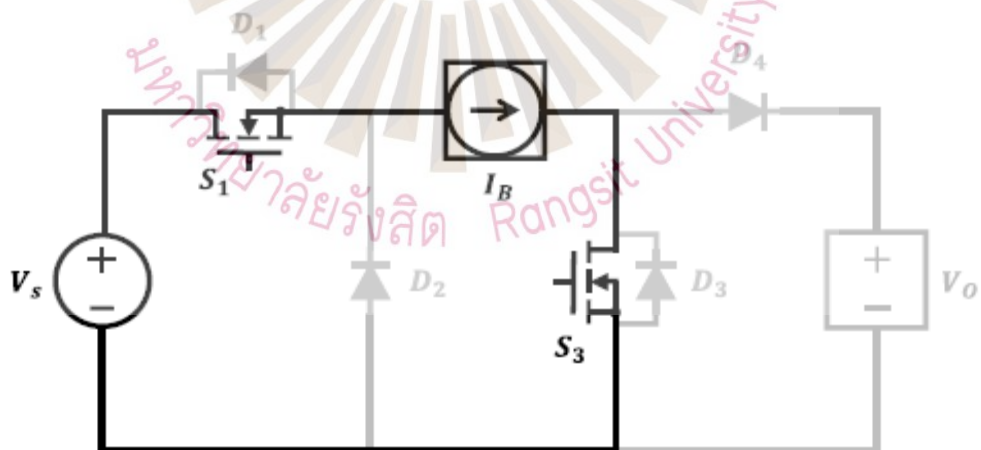
3.2.3.1 ตัวเหนี่ยวนำ (L_B) มีหน้าที่ชำระพลังงานจากแหล่งจ่าย และคลายพลังงานให้กับภาระโหลด ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ คือ กระแสบัฟเฟอร์ (I_B)

3.2.3.2 ในหนึ่งคาบเวลาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{co}) มีค่า “คงที่” ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุต (V_O) มีค่าคงที่

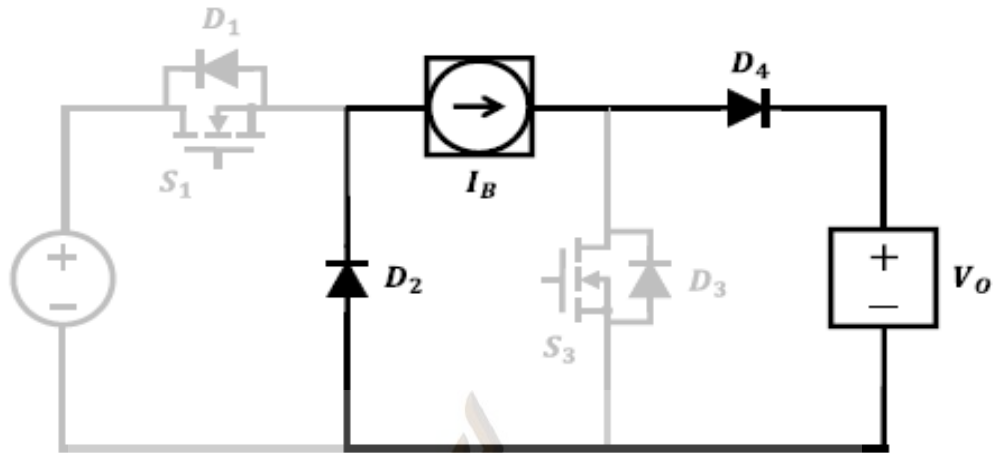


รูปที่ 3.19 วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ ในทิศทางตรง

วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้ว ที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ในทิศทางตรง สามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันได้ โดยพิจารณาจากสถานะที่มอสเฟตนำ กระแส DT_s และหยุดนำกระแส $(1-D)T_s$ ในหนึ่งคาบเวลา แสดงดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ



รูปที่ 3.20 วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟตนำกระแส



รูปที่ 3.21 วงจรอย่างง่ายของพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ ชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ ในทิศทางตรง ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแส

จากรูปที่ 3.15 คือ สภาวะที่มอสเฟตนำกระแส ส่งผลให้พลังงานไหลเข้าสู่ วงจร (E_{in}) ดังนั้น สามารถคำนวณหาพลังงานไหลเข้าได้จากสมการที่ (3-19)

$$E_{in} = V_S I_B D T_S \quad (3-19)$$

จากรูปที่ 3.16 คือ สภาวะที่มอสเฟตหยุด ส่งผลให้พลังงานไหลออกไปยังภาระ โหลด (E_{out}) ดังนั้น สามารถคำนวณหาพลังงานไหลออกได้ จากสมการที่ (3-20)

$$E_{out} = V_O I_B (1 - D) T_S \quad (3-20)$$

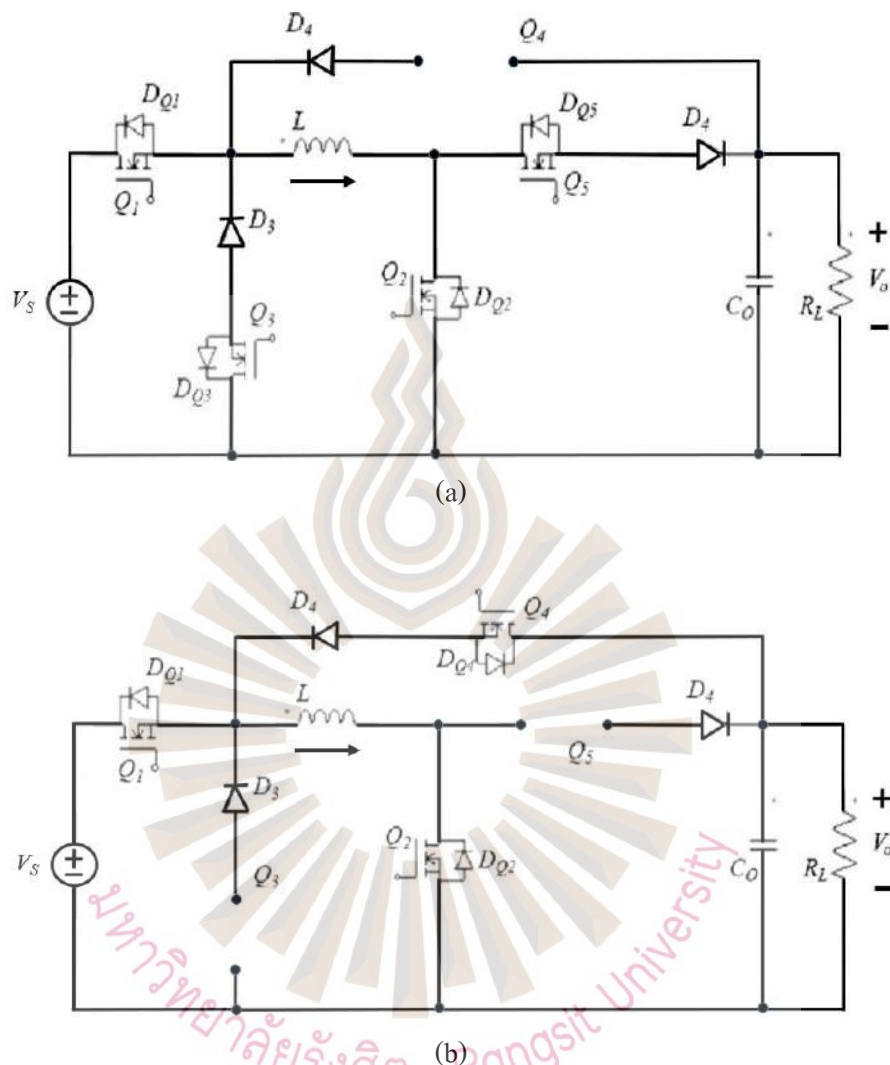
จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation of Energy) พลังงาน ไหลเข้ามีค่าเท่ากับพลังงานไหลออก ส่งผลให้สมการ (3-19) มีค่าเท่ากับสมการ (3-20) ดังนั้น สามารถคำนวณหาอัตราขยายแรงดันของการทำงานแบบโหมดบัค-บูสต์ ได้ดังสมการที่ (3-21)

$$E_{in} = E_{out}$$

$$V_S I_B D T_S = V_O I_B (1 - D) T_S$$

$$m = \frac{V_O}{V_S} = \frac{D}{1 - D} \quad (3-21)$$

3.3 การวิเคราะห์ห้วงจรด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.22 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์การทำงานแบบบัค-บูสต์ ที่มีการตั้งค่าสวิตช์

a) ชนิดไม่กลับขั้ว และ b) ชนิดกลับขั้ว

การวิเคราะห์ห้วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองวงจรไฟฟ้า และระบบไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ วิเคราะห์ห้วงจรที่มีการกำหนดค่า MOSFET ในโหมดชนิดไม่กลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ และโหมดชนิดกลับขั้วที่มีโหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ แสดงดังรูปที่ 3.22 สามารถทำได้โดยการสร้างวงจร และใช้เครื่องมือวิเคราะห์ห้วงจรที่มีให้ เช่น การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ (Frequency Response Analysis) หรือการวิเคราะห์สถานะคงที่ (Steady-state Analysis)

3.3.1 ขั้นตอนพื้นฐานในการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์

3.3.1.1 การสร้างวงจร: ใช้เครื่องมือวาดวงจร เพื่อสร้างวงจรตามที่ต้องการ วิเคราะห์กำหนดค่าพารามิเตอร์: กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับแต่ละองค์ประกอบในวงจร เช่น ค่าความต้านทาน ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้า

3.3.1.2 การเลือกวิเคราะห์: เลือกประเภทการวิเคราะห์ที่ต้องการทำ เช่น การวิเคราะห์เวลา (Time-domain Analysis) หรือการวิเคราะห์ความถี่ (Frequency-domain Analysis)

3.3.1.3 การจำลอง: การจำลองและตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ เช่น กราฟแสดงค่าแรงดัน และกระแสไฟฟ้า



บทที่ 4

การออกแบบและการจำลองผลลัพธ์

ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบคอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์ แบบเลือกขั้วได้ การออกแบบวงจรสำหรับสร้างสัญญาณฟันเลื่อย การออกแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน โดยอธิบายหลักการคำนวณหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุเอาต์พุต (C_o) โดยใช้หลักการวงจรอย่างง่ายเป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบ นอกจากนี้ ยังนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ด้วยสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อเป็นการยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบคอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์ แบบเลือกขั้วได้ โดยการจำลองผลลัพธ์ด้วยคอมพิวเตอร์ สัญญาณที่ทำการจำลองผลลัพธ์ ได้แก่ สัญญาณแรงดันเอาต์พุต (V_o) แสดงค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าไซน์เอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

4.1 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์

เนื่องจากการดำเนินการในสถานะคงตัว สำหรับทั้งแบบไม่กลับขั้วและแบบกลับขั้ว มีลักษณะเหมือนกัน การออกแบบจะเหมือนกันสำหรับทั้งสองโหมด เมื่อดูที่แผนภาพลอจิกแสดงดังรูปที่ 3.4 ในบทที่ 3 สัญญาณ POS จะถูกใช้เพื่อตั้งค่าว่าตัวแปลงจะอยู่ในแบบไม่กลับขั้วหรือแบบกลับขั้ว โดย POS มีลอจิก “1” ตัวแปลงจะดำเนินการในแบบไม่กลับขั้ว และการดำเนินการจะอยู่ในแบบกลับขั้ว โดย POS มีลอจิก “0” สามารถตั้งค่าด้วยตนเองหรือด้วยซอฟต์แวร์ผ่านพอร์ต I/O ของคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์

การออกแบบจะดำเนินการตามข้อกำหนด ด้านล่างนี้

Input voltage	156	V	Output voltage	311	V
Switching frequency	20	kHz	Load current	16	A

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input voltage) มีค่า = 156 V เป็นการกำหนดเพื่อรองรับกับระบบโซลาร์เซลล์ (Solar Cell) และอัตราขยายของตัวแปลงคอนเวอร์เตอร์ คือ $m = 2$ ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออก มีค่า = 311 V และตามข้อกำหนดข้างต้น สามารถคำนวณความต้านทานโหลดได้ ($R_L = 20 \Omega$) และระยะเวลา ($T_s = 0.05 \text{ ms}$ ($T_s = 1/f$))

$$T_s = \frac{1}{20 \text{ kHz}} = 0.05 \text{ ms}$$

การออกแบบวงจรสำหรับสัญญาณพื้นเลื่อยดั้งเดิม และการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อสร้างสัญญาณพื้นเลื่อยคดแปลง โดยใช้วิธีเอ็กซ์โพเนนเชียล ในการวิจัยนี้

จากแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input Voltage) มีค่าเท่ากับ 156 V ด้วยแรงดันไฟฟ้า 1% มีค่าเท่ากับ 1.56 V เพื่อใช้ในการแทนค่าของตัวแปรในสมการที่ (4-1) และ (4-2) ดังนี้

$$C_o \frac{\Delta V_o}{DT_s} = I_o \quad (4-1)$$

ถ้า $D = 0.7$;

$$C_o = I_o \times D \times T_s / \Delta V_o$$

$$C_o = 1 \text{ A.} \times 0.7 \times (0.05 \times 10^{-3}) / 1.56 \text{ V}$$

$$C_o = 22.43 \times 10^{-6} \text{ F หรือ } 22.43 \text{ } \mu\text{F}$$

ถ้า $D = 0.3$;

$$C_o = I_o \times D \times T_s / \Delta V_o$$

$$C_o = 1 \text{ A.} \times 0.3 \times (0.05 \times 10^{-3}) / 1.56 \text{ V}$$

$$C_o = 9.62 \times 10^{-6} \text{ F หรือ } 9.62 \text{ } \mu\text{F}$$

$$m = D \sqrt{\frac{R_L T_S}{2L}}. \quad (4-2)$$

ถ้า $D = 0.7$;

$$2 = 0.7 \times \frac{\sqrt{(20 \times (0.05 \times 10^{-3}))}}{\sqrt{2L}}$$

$$2 \times \sqrt{2L} = 0.7 \times \sqrt{10^{-3}}$$

$$\sqrt{2L} = \frac{0.7 \times \sqrt{10^{-3}}}{2}$$

$$\sqrt{2L} = \frac{0.7 \times 0.0316}{2}$$

$$\sqrt{2L} = 0.35 \times 0.0158$$

$$\sqrt{2L} = 5.53 \times 10^{-3}$$

$$(\sqrt{2L})^2 = (5.53 \times 10^{-3})^2$$

$$2L = 30.58 \times 10^{-6}$$

$$L = \frac{30.58 \times 10^{-6}}{2}$$

$$L = 15.29 \times 10^{-4} \text{ H หรือ } 153 \text{ } \mu\text{H}$$

ถ้า $D = 0.3$;

$$2 = 0.3 \times \frac{\sqrt{(20 \times (0.05 \times 10^{-3}))}}{\sqrt{2L}}$$

$$2 \times \sqrt{2L} = 0.3 \times \sqrt{10^{-3}}$$

$$\sqrt{2L} = \frac{0.3 \times \sqrt{10^{-3}}}{2}$$

$$\sqrt{2L} = \frac{0.3 \times 0.0316}{2}$$

$$\sqrt{2L} = 0.15 \times 0.0158$$

$$\sqrt{2L} = 2.37 \times 10^{-3}$$

$$(\sqrt{2L})^2 = (2.37 \times 10^{-3})^2$$

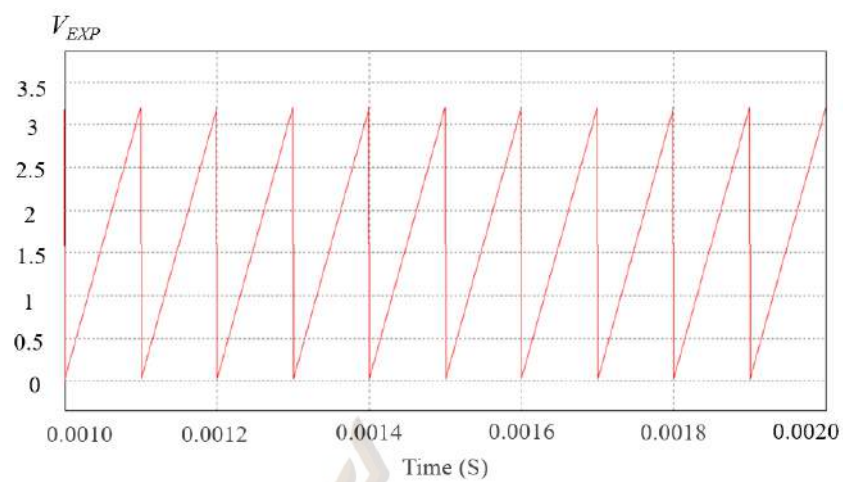
$$2L = 5.62 \times 10^{-6}$$

$$L = (5.62 \times 10^{-6}) / 2$$

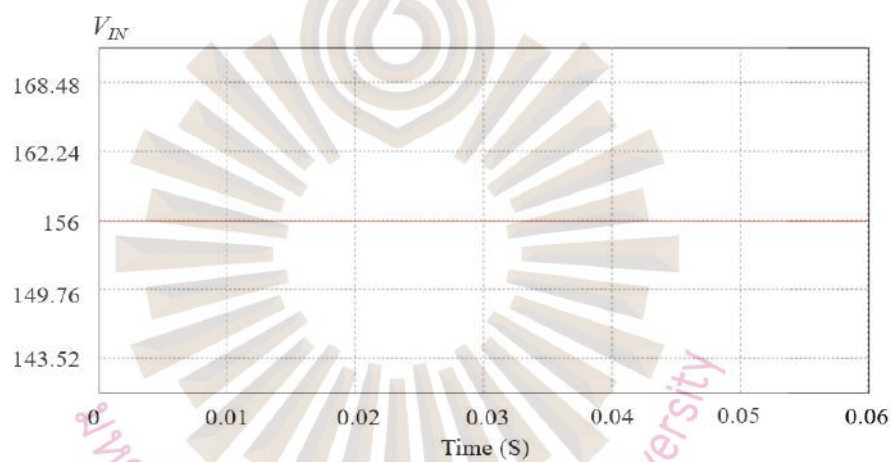
$$L = 2.81 \times 10^{-4} \text{ H หรือ } 281 \mu\text{H}$$

ดังนั้น จากสมการ (4-1) และ (4-2) ได้ค่า C_o และ L คือ $C_o = 22 \mu\text{F}$ และ $L = 250 \mu\text{H}$ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ ในงานวิจัยนี้

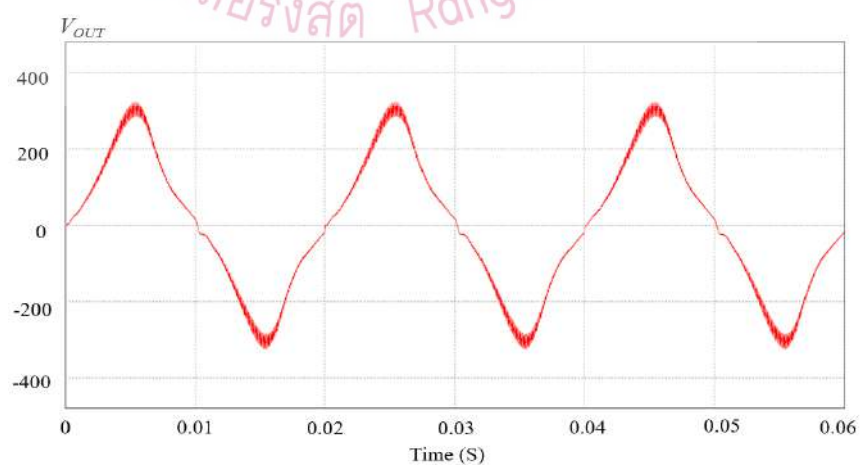
เพื่อยืนยันการวิเคราะห์และการออกแบบคอมพิวเตอรืจะจำลองวงจร จากการออกแบบ ด้วยคอมพิวเตอรื ผลการจำลองวงจรสัญญาณพื้นเลื้อยแบบดั้งเดิม สำหรับชนิดไม่กลับขั้วและ ชนิดกลับขั้ว แสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 สัญญาณฟันเลื่อยแบบเดิม



รูปที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าขาเข้า จากการจำลองตัวแปลงสัญญาณฟันเลื่อยแบบเดิม



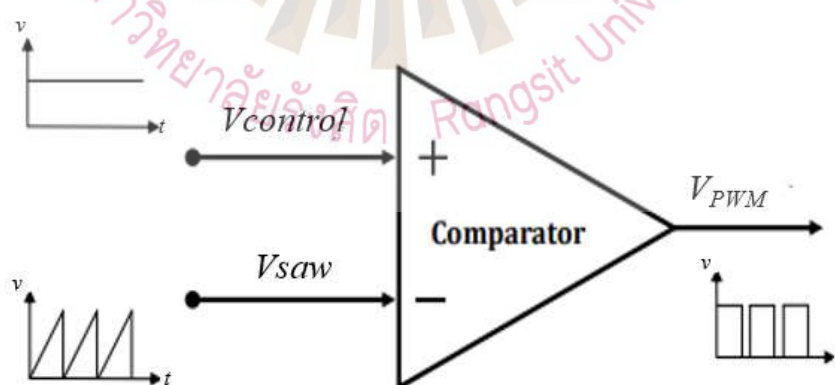
รูปที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าขาออก จากการจำลองด้วยตัวแปลง

สัญญาณฟันเลื่อยแบบเดิม

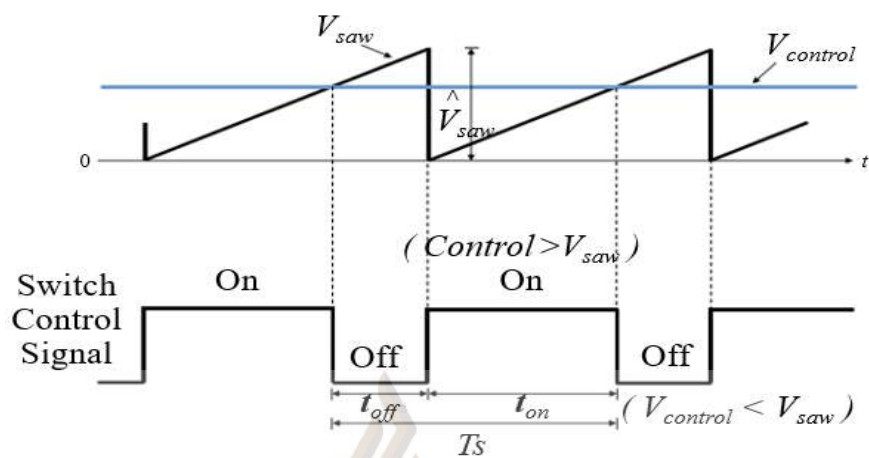
ผลลัพธ์การจำลองวงจรแสดงดังรูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ตัวแปลงนำเสนองานใช้งาน ตามวงจรสัญญาณพื้นฐานแบบเดิม จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมายังไม่เป็นสัญญาณไซน์ เนื่องจากยังไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือเป็นเชิงเส้น ระหว่างระดับสัญญาณอ้างอิงกับค่าของตัวแปลงที่เพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงหาวิธีในการทำให้ความสัมพันธ์ดังกล่าว เพื่อให้มีความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงหรือเป็นเชิงเส้นต่อไป

4.2 การออกแบบความกว้างพัลส์แบบ PWM

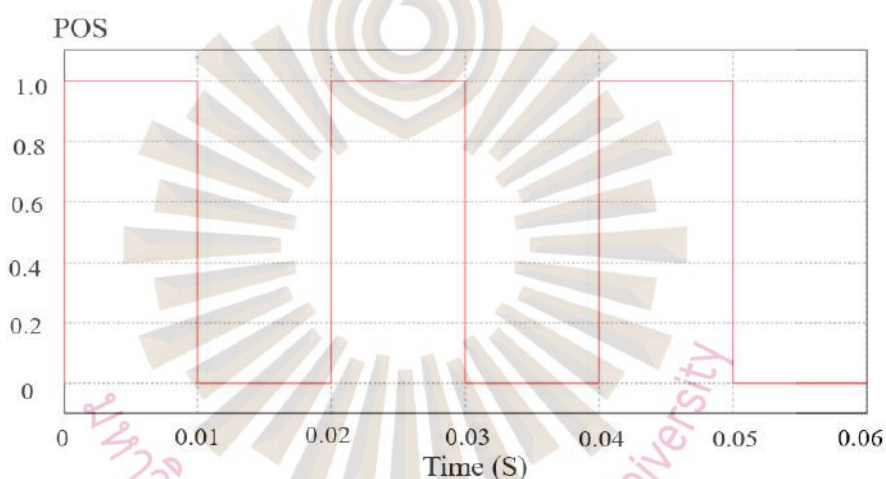
สำหรับการควบคุมความกว้างพัลส์ด้วยเทคนิค Phase Shifted นั้นเกิดขึ้น โดยการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันควบคุม (Control Voltage) กับค่าพีคของสัญญาณ Sawtooth Waveform (V_{ST}) โดยใช้วงจรออปแอมป์ เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า (Op-Amp Voltage Comparator) เพื่อรับสัญญาณควบคุมการทำงานของ MOSFET เมื่อวิเคราะห์การทำงานในช่วงเวลาหนึ่ง หากแรงดันควบคุมมากกว่าแรงดันสัญญาณพื้นฐาน ดังนั้น พารามิเตอร์ทั้งหมด จึงสามารถสรุปได้เป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์มีค่าต่ำ (“0 หรือต่ำ”) ทำให้ MOSFET หยุดนำกระแส และเมื่อแรงดันควบคุมน้อยกว่าแรงดันสัญญาณพื้นฐาน สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์จะมีค่าสูง (“1 หรือสูง”) ทำให้ MOSFET นำกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.6



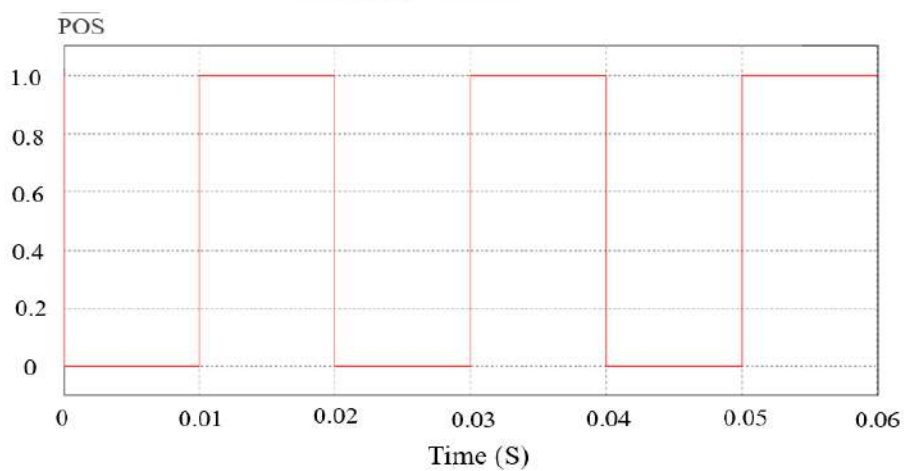
รูปที่ 4.4 วงจรออปแอมป์จะเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า เพื่อสร้างสัญญาณมอดูเลชันความกว้างพัลส์



รูปที่ 4.5 การสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์



รูปที่ 4.6 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ $POS = 1$



รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์ $POS = 0$

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับค่าพีคของสัญญาณพื้นเลื้อยของการควบคุม ความกว้างพัลส์โดยใช้เทคนิค Phase Shifted ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถคำนวณค่ารอบการทำงานได้ ดังแสดงในสมการ (4-3)

$$D = \frac{t_{on}}{T_S} = \frac{V_{control}}{\hat{V}_{saw}}; 0 \leq D \leq 1 \quad (4-3)$$

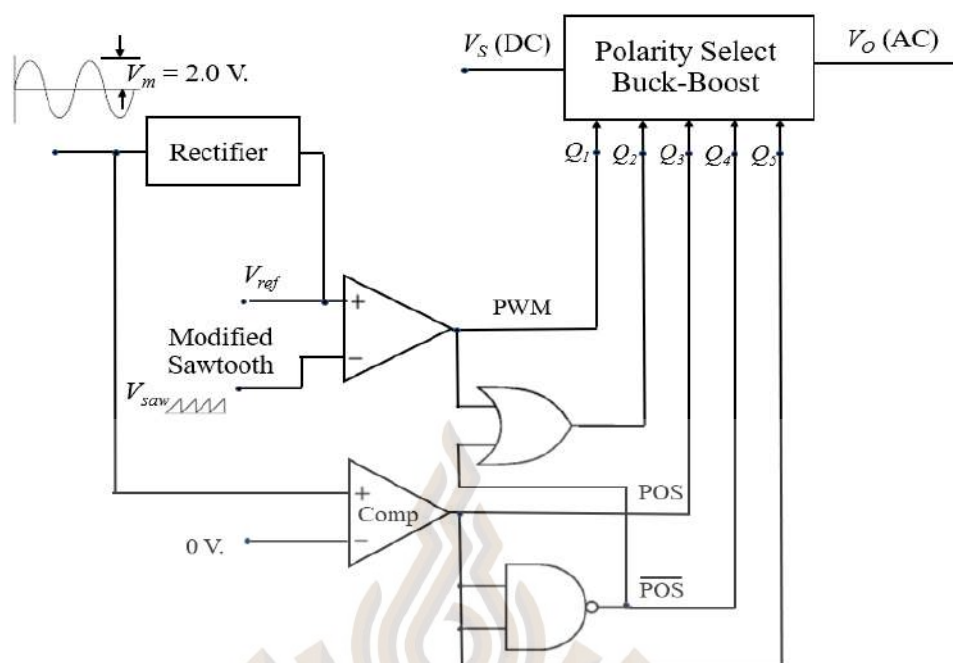
การออกแบบที่ทำไว้ก่อนหน้านี้ ถูกนำมาใช้กับการใช้งานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เกิด กระแสสลับที่ความถี่ 50 Hz ทำให้ผู้วิจัยสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Input voltage} &= 156 \text{ V} & V_{ref} &= 2 \sin 2\pi 50t \\ \text{Peak of } V_{saw} &= 3.3525 \text{ V} & L &= 250 \text{ } \mu\text{H} \\ C_O &= 22 \text{ } \mu\text{F} & R_L &= 20 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

4.3 การจำลองผลลัพธ์

ในงานวิจัยนี้ มีตัวแปลงบัก-บูสต์ แบบเลือกขั้วได้ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยตนเองหรือ ด้วยซอฟต์แวร์ในการควบคุม และการควบคุมความกว้างพัลส์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นนั้น โดยการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าควบคุมกับค่าสูงสุดของสัญญาณพื้นเลื้อย มีการจำลอง การใช้งานด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ เนื่องจากเอาต์พุตสามารถตั้งค่าเป็นบวก และลบได้ โดยใช้ตัวแปลงแบบบัก-บูสต์ นี้ เพื่อใช้ในการคิดแปลงสำหรับการใช้งานอินเวอร์เตอร์

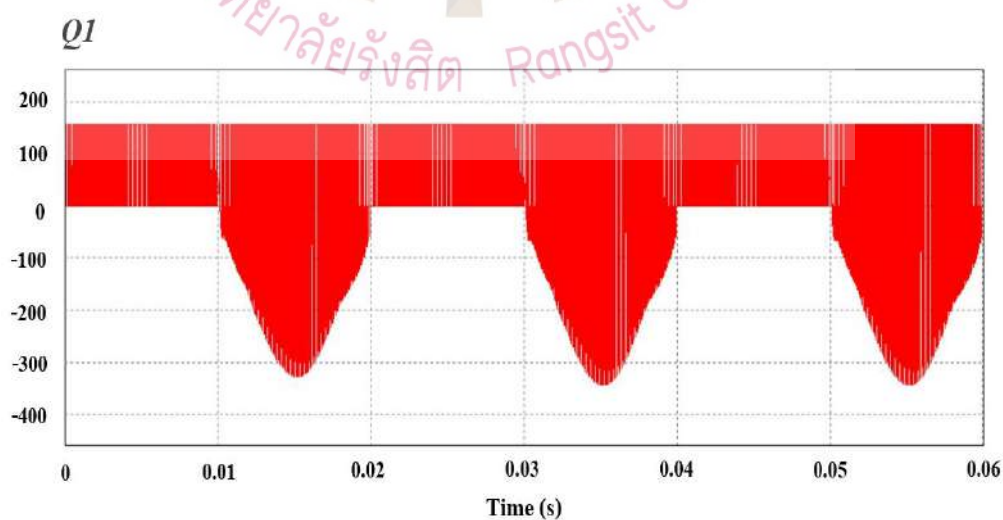
งานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอการพัฒนาอินเวอร์เตอร์จากแหล่งจ่ายกระแสตรง โดยใช้คอนเวอร์เตอร์ แบบบัก-บูสต์ แบบเลือกขั้วได้ ด้วยสัญญาณพื้นเลื้อยดัดแปลง ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยสวิตช์ จำนวน 5 ตัว ที่สามารถกำหนดค่าได้ทั้งเอาต์พุตที่ไม่กลับขั้วและกลับขั้ว วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ สามารถทำหน้าที่เป็นคอนเวอร์เตอร์แบบบัก-บูสต์ ที่มีอัตราขยายของตัวแปลงสามารถปรับให้ต่ำหรือ สูงได้ และแสดงให้เห็นว่าค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าไซน์เอาต์พุตมีค่าสูงกว่าค่าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงได้ มีความเหมาะสมในการใช้งานกับพลังงานทางเลือก เช่น พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานเชื้อเพลิง และพลังงานลม โดยไม่แยกกราวด์กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.7



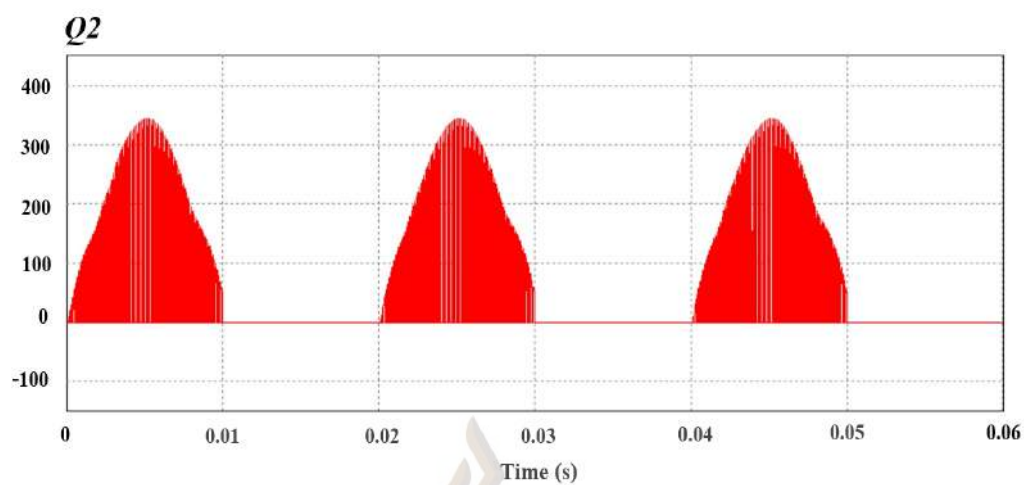
รูปที่ 4.8 แผนภาพลอจิกดัดแปลงสำหรับการใช้งานอินเวอร์เตอร์

4.3.1 การควบคุมสวิตช์ตามโหมดการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์

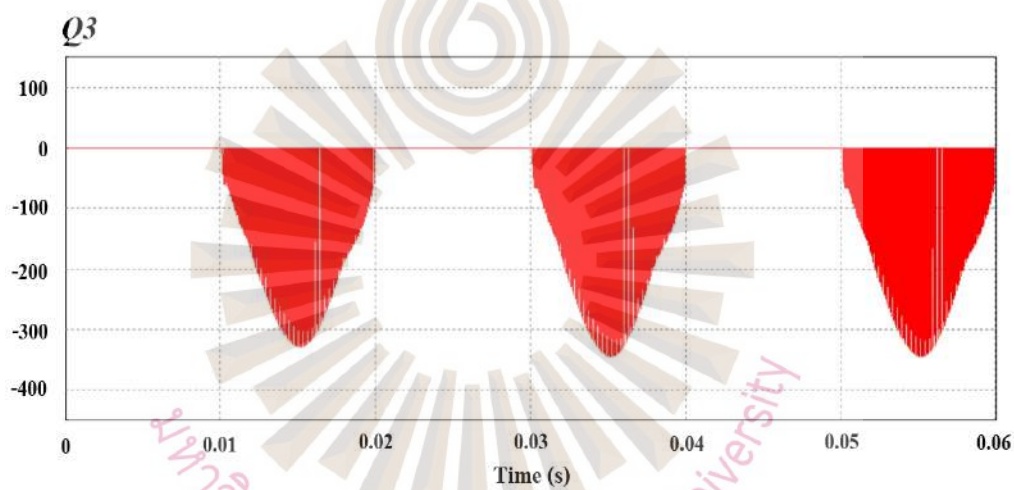
จากรูปที่ 4.8 ในการจำลองผลลัพธ์รูปร่างสัญญาณควบคุมสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัค-บูสต์ มีจำนวน 5 สวิตช์ สามารถแยกสัญญาณควบคุม คือ Q_1 ถึง Q_5 ตามโหมดการทำงานในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.13



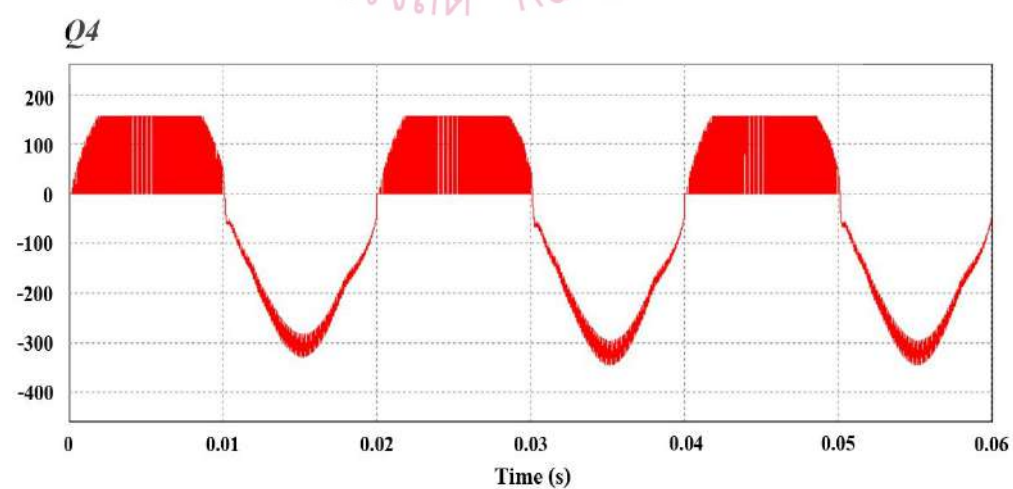
รูปที่ 4.9 สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_1



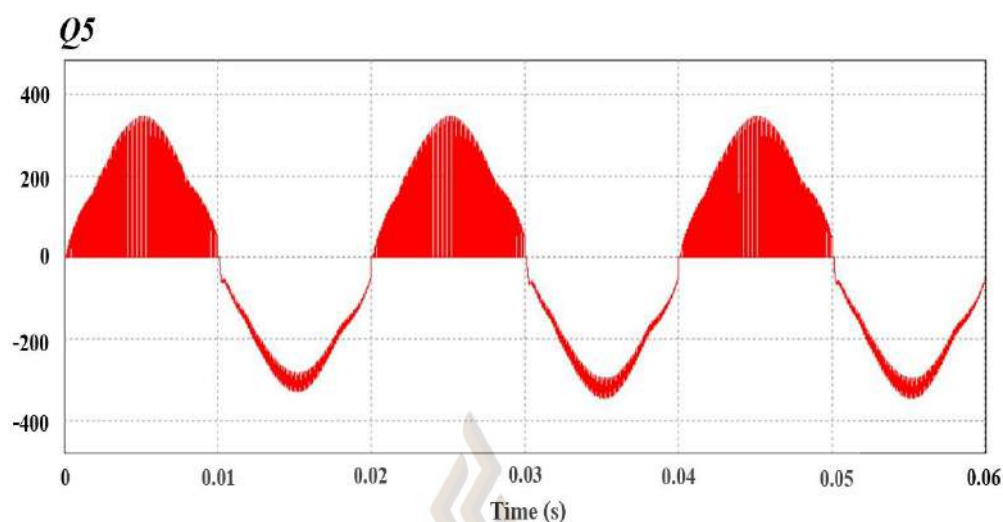
รูปที่ 4.10 สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_2



รูปที่ 4.11 สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_3

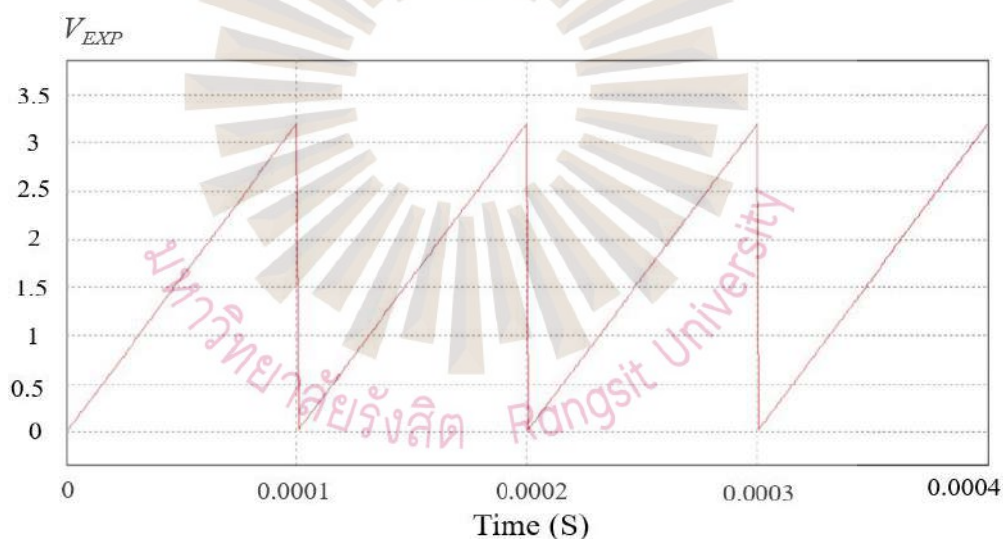


รูปที่ 4.12 สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_4



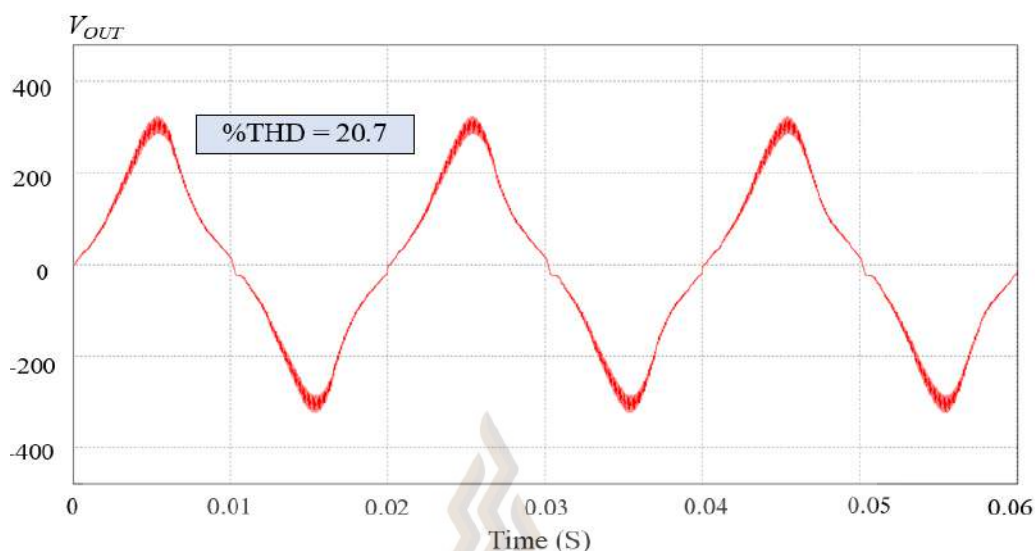
รูปที่ 4.13 สัญญาณควบคุมสวิตช์ Q_5

4.3.2 อินเวอร์เตอร์ใช้สัญญาณฟันเลื่อยแบบเดิม



รูปที่ 4.14 สัญญาณฟันเลื่อยแบบเดิม

การจำลองวงจรคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้สัญญาณฟันเลื่อยแบบเดิม แสดงดังรูปที่ 4.14 ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้ จากการจำลองคอนเวอร์เตอร์ สัญญาณดังกล่าว ยังไม่ใช่สัญญาณไซน์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับสัญญาณอ้างอิงกับค่าวัฏจักรงานของตัวแปลงที่เพิ่มขึ้นยังไม่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นหรือเป็นเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าขาออก จากการจำลองคอนเวอร์เตอร์
โดยใช้วงจรสัญญาณพื้นเลื่อยแบบเดิม

ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาใช้วิธีการประมาณค่าพหุนาม (Polynomial) และวิธีเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Approximation) เพื่อใช้ในการพิจารณากำหนดหาวิธีที่เหมาะสมในการสร้างความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือเป็นเชิงเส้นระหว่างระดับสัญญาณอ้างอิงกับอัตราขยายของตัวแปลงที่เพิ่มขึ้น สร้างการปรับความกว้างพัลส์ และสัญญาณพื้นเลื่อยที่ต้องได้รับการดัดแปลงขึ้นมาใหม่ สำหรับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกมีค่าสูงกว่าค่าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้า โดยสามารถหาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากสมการ (4-4) ถึง (4-6)

4.3.2.1 วิธีการประมาณค่าพหุนาม (Polynomial)

$$m = a_1(D) + a_2(D)^2 \quad (4-4)$$

โดยกำหนดให้ ค่า $m = 1.7$ และ $m = 0.85$

จาก $D = m / (1 + m)$

ดังนั้น ให้ $m = 1.7$ ค่า $D = 1.7 / (1 + 1.7) = 0.63$

ให้ $m = 0.85$ ค่า $D = 0.85 / (1 + 0.85) = 0.46$

ให้ค่า $D = 0.63$; $m = 1.7$ และ 0.85

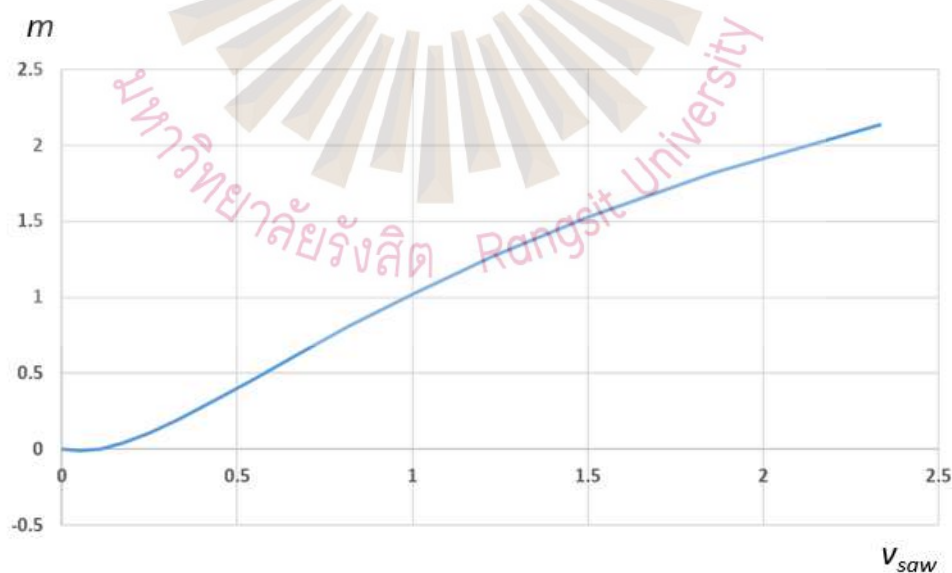
แทนค่า D และค่า m ในสมการที่ (4-4) $m = a_1(D) + a_2(D)^2$ ได้ดังนี้

$$1.7 = a_1(0.63) + a_2(0.63)^2$$

$$0.85 = a_1(0.46) + a_2(0.46)^2$$

ดังนั้น ได้ค่า $a_1 = -0.46$ และ $a_2 = 5.01$

จากสมการ (4-4) กำหนดให้ ค่าวัฏจักรงาน (D) = 0.7 ค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (m) = 2.333 และได้ค่า $V_{saw} = 2.132$ ค่าวัฏจักรงาน (D) = 0.3 ค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (m) = 0.428 และได้ค่า $V_{saw} = 0.313$ ผู้วิจัยสามารถหาค่า $a_1 = -0.46$ และ $a_2 = 5.01$ ซึ่งค่าที่ได้นั้น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรงาน (D) ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 0.7 โดยกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง V_{saw} และ m แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ของค่า D ที่เพิ่มขึ้นระหว่างค่า 0 ถึง 0.7 ระหว่าง V_{saw} และ m
ด้วยวิธีการประมาณค่าพหุนาม (Polynomial)

4.3.2.2 วิธีเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Approximation)

$$V_{saw} = k_1(e^{k_2 D} - 1) \quad (4-5)$$

โดยกำหนดให้ ค่า $m = D / (1 - D)$; (ค่า $D = 0.7$ ค่า $m = 2.333$ ค่า $D = 0.3$ และ $m = 0.428$)

ค่า $D = 0.7$;

$$2.333 = k_1(e^{0.7k_2} - 1)$$

ค่า $D = 0.3$;

$$0.428 = k_1(e^{0.3k_2} - 1)$$

$$k_1(e^{0.7k_2} - 1) / k_1(e^{0.3k_2} - 1)$$

$$= 2.333 / 0.428$$

$$= 5.451$$

$$f(k_2) = e^{0.7k_2} - 5.451 e^{0.3k_2} + 4.451 \quad (4-6)$$

จากสมการ (4-6) รหัสคำสั่งที่ใช้โปรแกรมประยุกต์ GNU Octave เพื่อการจำลองผลลัพธ์ในการหาค่า k_2 จากสมการ (4-5) ด้วยวิธีเอ็กซ์โพเนนเชียล ผลลัพธ์ของ k_2 แสดงดังรูปที่ 4.17

```
% test
```

```
k2min = 3.35258;
```

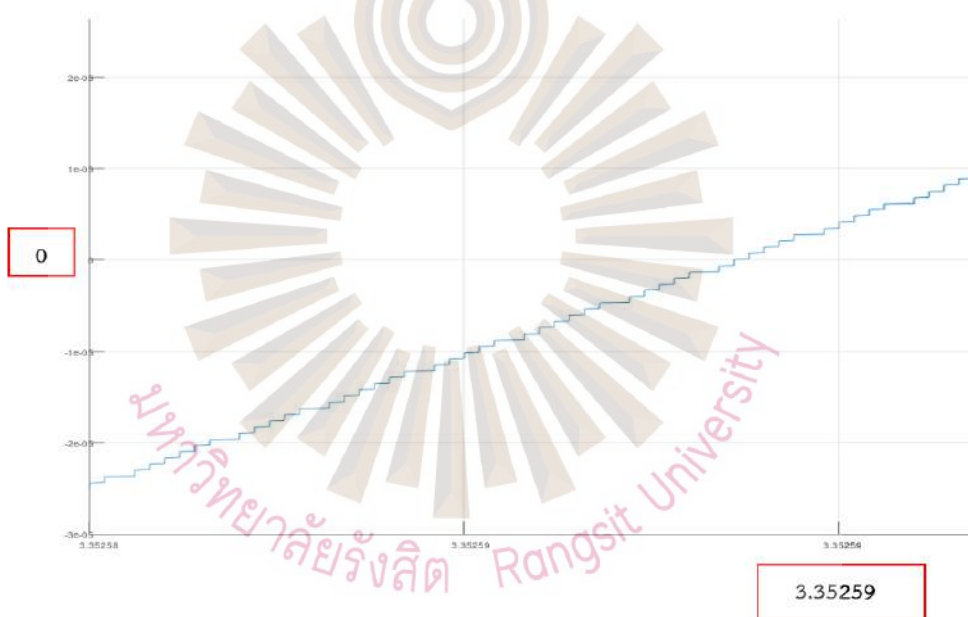
```
k2max = 3.3526;
```

```
npoint = 1000;
```

```

k2 = zeros (1 ,npoint) ;
ff= zeros (1 ,npoint) ;
for (n1 = 1 ,npoint) ;
    k2 (n1) = k2min + (k2max - k2min) / npoint*n1 ;
    k = k2(n1) ;
    ff (n1) = e^(0.7*k) - 5.451*e^(0.3*k) + 4.451 ;
endfor
plot (k2, ff) ;
grid on ;

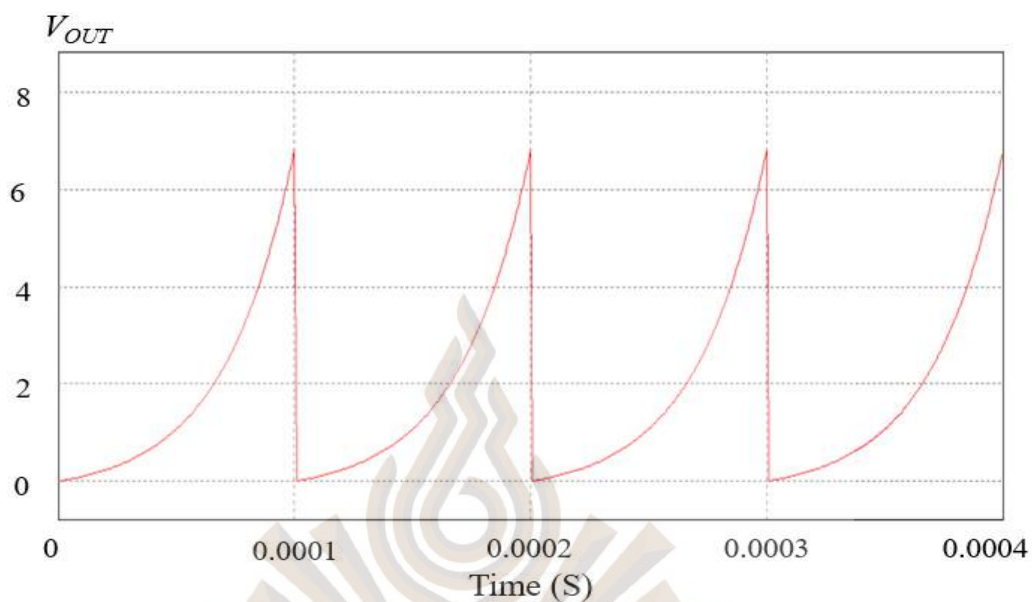
```



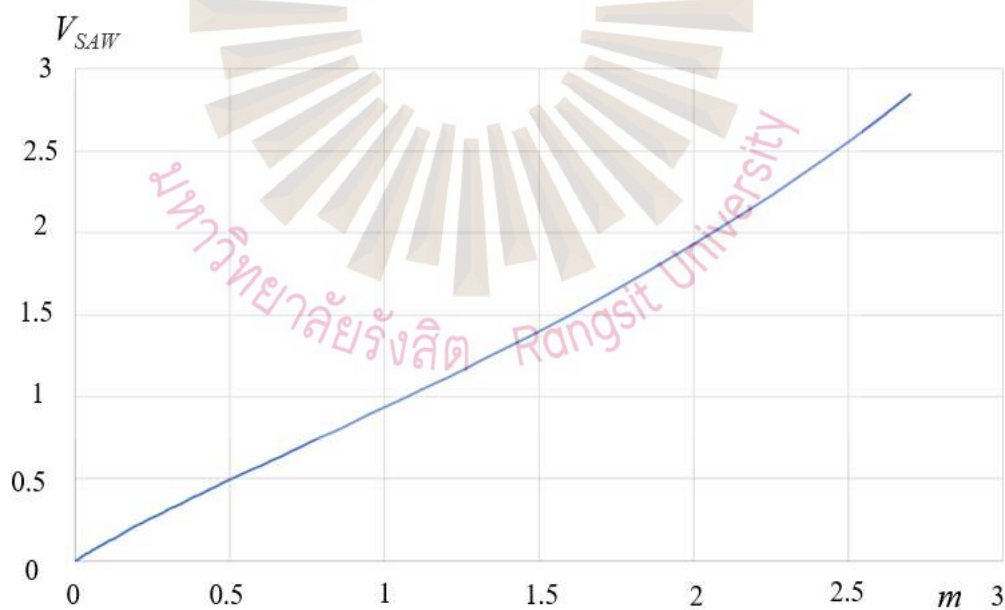
รูปที่ 4.17 ผลลัพธ์ค่า k_2 ที่ได้จากการใช้โปรแกรมประยุกต์ GNU Octave

จากสมการ (4-5) โดยให้ค่าวัฏจักรงาน (D) = 0.7 มีค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (m) = 2.333 และค่า V_{saw} = 2.332 ค่าวัฏจักรงาน (D) = 0.3 มีค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (m) = 0.4285 และค่า V_{saw} = 0.4279 ดังนั้น ผู้วิจัยสามารถหาค่า k_1 = 0.24682 และค่า k_2 = 3.35259 แสดงดังรูปที่ 4.16 ค่าที่ได้นำไปใช้สร้างสัญญาณพื้นเลื่อยที่ดัดแปลงขึ้นมาใหม่ ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 4.18

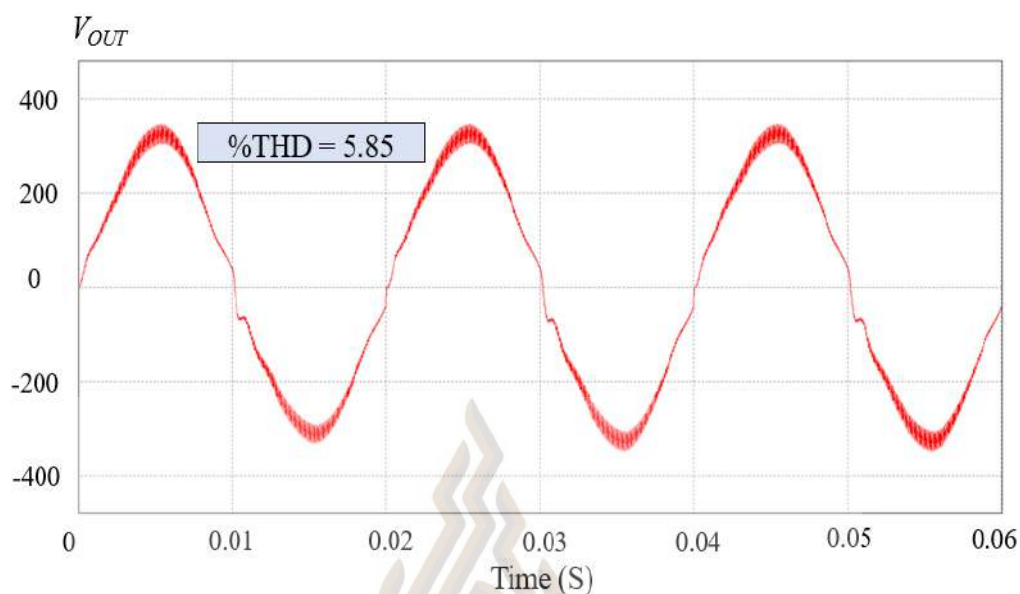
4.3.3 อินเวอร์เตอร์ใช้สัญญาณฟันเลื่อยที่ดัดแปลง



รูปที่ 4.18 สัญญาณฟันเลื่อยที่ดัดแปลง



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ของค่าวัฏจักรงาน (D) ที่เพิ่มขึ้นระหว่างค่า 0 ถึง 0.7 ระหว่างค่า V_{saw} และค่า m ด้วยวิธีเอ็กซ์โพเนนเชียล Exponential Approximation



รูปที่ 4.20 แรงดันไฟฟ้าขาออกเป็นสัญญาณไซน์ จากการจำลองคอนเวอร์เตอร์
วงจรสัญญาณพื่นเลื้อยที่ได้รับการตัดแปลง โดยใช้วิธี Exponential Approximation

สัญญาณพื่นเลื้อยที่ตัดแปลงขึ้นมาใหม่นั้น ผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกใช้วิธี Exponential Approximation เนื่องจากวิธีนี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือเป็นเชิงเส้นระหว่างระดับสัญญาณอ้างอิงกับอัตราขยายของตัวแปลงที่เพิ่มขึ้นมากกว่าวิธี Polynomial แสดงดังรูปที่ 4.19 โดยกำหนดให้ค่าวัฏจักรงาน (D) ที่เพิ่มขึ้นอยู่ระหว่างค่า 0 ถึง 0.7 ซึ่งส่งผลให้ค่าของ V_{sw} กับ m เกิดการ Linear กัน คือ มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงหรือเป็นเชิงเส้น ดังนั้น เมื่อทำการป้อนสัญญาณขาเข้าที่เป็นสัญญาณไซน์ ทำให้สัญญาณขาออกที่ได้ออกมานั้น จะต้องเป็นสัญญาณไซน์เช่นกัน และผลลัพธ์จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ได้แสดงให้เห็นถึงค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าไซน์เอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 4.20

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาวิธีการควบคุมโหมดการทำงานและทิศทางการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของพัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์ โดยการควบคุมการนำกระแสและหยุดนำกระแสของมอสเฟต ผลลัพธ์ที่ได้ คือ พัลส์วิดิธมอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบชนิดไม่กลับขั้วและกลับขั้ว สามารถทำงานในโหมดบัค-บูสต์ และสามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าได้ 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางตรง และทิศทางย้อนกลับ อีกทั้งยังได้วิเคราะห์อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าในโหมดการทำงานต่างๆ โดยใช้หลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย (Circuit Simplification Approach) ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าว กระทำภายใต้สภาวะคงตัว (Steady State) ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าในโหมดการทำงานต่างๆ ทั้งทิศทางตรงและทิศทางย้อนกลับ คือ โหมดการทำงานแบบบัค-บูสต์ มีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $D/(1-D)$ การวิเคราะห์ดังกล่าว เพื่อเป็นการออกแบบอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่กักเก็บและคายพลังงานไฟฟ้า ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวเก็บประจุเอาต์พุต (Output Capacitor) ให้มีขนาดเหมาะสมกับการทำงาน ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 250 μH และ 22 μF ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในโหมดการทำงานบัค-บูสต์ ที่มีการถ่ายโอนพลังงานทั้งทิศทางตรงและทิศทางย้อนกลับ เมื่อภาระโหลดคงที่และเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน (Duty Cycle)

ผู้วิจัยเสนอให้มีการพัฒนางานในอนาคตต่อไป คือ การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบลูปปิด (Closed-Loop Control) เพื่อให้คอนเวอร์เตอร์ สามารถรับรู้ความเปลี่ยนแปลงของภาระโหลด แรงดันเอาต์พุตผ่านวงจรตรวจสอบแรงดัน (Voltage Sensor) และมีวงจรชดเชยสัญญาณ (Compensator) ที่มีตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งมีหน้าที่ชดเชย โดยทำการเปรียบเทียบ

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้ากับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก และแรงดันอ้างอิง ให้ได้เป็นสัญญาณควบคุมที่ผ่านการชดเชย เพื่อใช้สำหรับควบคุมการนำกระแสและการหยุดนำกระแสของมอสเฟต โหมดการทำงานและทิศทางการถ่ายโอนพลังงาน โดยการปรับตั้งค่าวัฏจักรงานได้ด้วยตนเอง และทำการลดฮาร์มอนิกของสัญญาณไฟฟ้าขาออกที่ได้ สามารถใช้ในการแก้ปัญหาเรื่องคุณภาพของไฟฟ้า เป็นประโยชน์ที่ได้รับจากการลดฮาร์มอนิก เช่น ช่วยลดต้นทุนพลังงานไฟฟ้า เพราะว่าการสูญเสียที่อยู่ในรูปความร้อนจะลดลง และช่วยเพิ่มสมรรถนะผลผลิตของเครื่องจักรทำงานได้ราบรื่นขึ้น ทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 5% ถึง 20% โดยเฉพาะในเรื่องของการยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า และสายไฟ เป็นต้น



บรรณานุกรม

- พิทยา ปานนิล, อาภาพร สายธิไชย, ไสว พงศ์สวัสดิ์ และประภาส อุคคกิมพันธ์. (2550). เทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM แบบดิจิทัลด้วย FPGA. *วิศวกรรมสาร มช.*, 34(3), 333-341. สืบค้นจาก <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/download/1825/1521/3476>
- ปฎิวัติ บุญมา และสยามรัฐ เพิกอาภรณ์. (2555). รายงานการวิจัยเพื่อการเรียนรู้วงจรอินเวอร์เตอร์ *Inverter Toolkit*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ. สืบค้นจาก <https://research.rmutsb.ac.th/fullpaper/2555/25552391441202.pdf>
- มนทล นาวงษ์. (2559). รายงานการวิจัยเรื่องการสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต. doi: 10.14458/DPU.res.2016.11
- เสาวนีย์ กันตะ. (2559). การศึกษาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางสี่เฟส ด้วยเทคนิคอินเวอร์ตลิฟ (Master's thesis). สืบค้นจาก <http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/3145>
- รัชณัฐ เหลืองอมรสิริ. (2560). การออกแบบระบบการจัดการพลังงานสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์โดยรวมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่แบบ 3 ขั้นตอน (Master's thesis). สืบค้นจาก <http://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2016/11657>
- ธนธรณ์ ศรีมณฑล. (2564). การวิเคราะห์และออกแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชันคอนเวอร์เตอร์แบบเอนกประสงค์ชนิดไม่กลับขั้วด้วยหลักการลดรูปวงจรอย่างง่าย (Master's thesis). สืบค้นจาก <https://rsuir-library.rsu.ac.th/handle/123456789/2003>
- อำภา สารศิริ. (2564). วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. สืบค้นจาก <https://sites.google.com/site/powermut/phost-him/wngcrbakhkhxnwexrtexr>
- Pan, C., Chuang, C. & Chu, C. (2014). A Novel Transformerless Interleaved High Step-Down Conversion Ratio DC-DC Converter with Low Switch Voltage Stress. *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol. 61, no. 10, pp. 5290-5299, Oct 2014.
- Miao, S. & Wang, F. (2016). A New Transformerless Buck-Boost Converter with Positive Output Voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.30, no.4, Feb 2016

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Kim, K., Cha, H. & Kim, G. (2017). A New Single-Phase Switched-Coupled-Inductor DC-AC Inverter for Photovoltaic System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 7, pp. 5016–5022, July. 2017, doi: 10.1109/TPEI.2016.2606489.
- Paul, K., Paul, S. & Paul, B. (2017). Transformerless Buck-Boost Converter with Positive Output Voltage and Feedback. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 6, Issue 06, June. 2017
- Jung, H., Kim, S., Moon, B. & Lee, S. (2018). A New Circuit Design of Two-Switch Buck-Boost Converter. *Vol. 6*, pp.47415-47423, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2866886
- Siwakoti, Y. & Blaabjerg, F. (2018). Common-Ground-Type Transformerless Inverters for Single-Phase Solar Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2100–2111, Aug. 2018.
- Vosoughi, N., Hosseini, S. & Sabahi, M. (2020). A New Single-Phase Transformerless Grid-Connected Inverter With Boosting Ability and Common Ground Feature. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 11, pp. 9313-9325, Nov. 2020, doi:10.1109/TIE.2019.2952781.
- Ahmed, H., Moursi, M., Zahawi, B. & Hosani, K. (2021). Single-Phase Photovoltaic Inverters with Common-Ground and Wide Buck-Boost Voltage Operation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 17, no. 12, pp. 8275–8287, Mar. 2021, doi: 10.1109/TII.2021.3066511.
- Sooksatra, S. & Subsingha, W. (2022). Transformerless Polarity Selectable Buck-Boost Converter with Common Ground. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Chiang Mai, Thailand, 2022, pp. 1-6, doi:10.1109/ICEMS56177.2022.9982821
- Taniguchi, K., Ogino, Y. & Irie, H. (2022). PWM Technique for Power MOSFET Inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 3, pp. 328-334, July 1988, doi: 10.1109/63.17951.
- Wang, L. & Shan, M. (2022). A Novel Single-Stage Common-Ground Zeta-Based Inverter With Non-electrolytic Capacitor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 37, no. 9, pp. 0885-8993, Sep. 2022

บรรณานุกรม (ต่อ)

Sooksatra, S. & Subsingha, W. (2023). Four-Quadrant Supply Using Buck-Boost Converter with Common Ground and Non-Isolation. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Chiang Mai, Thailand, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/APPEEC57400.2023.10561907



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	จักรกฤษณ์ ขุนแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	14 มิถุนายน 2519
สถานที่เกิด	จังหวัดนครสวรรค์ ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	43/367 ซอยพหลโยธิน 49/2 ถนนพหลโยธิน แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220
สถานที่ทำงาน	กรมการทหารสื่อสาร กองทัพบก
ตำแหน่งปัจจุบัน	หัวหน้าแผนกจัดหาที่ 2 แผนกจัดหา กองจัดหา กรมการทหารสื่อสาร กองทัพบก

