

การลดทอนกระแสรั่วไหลความถี่สูงสำหรับระบบอินเวอร์เตอร์พีวีชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อ
แปลง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A High-Frequency Leakage-Current Reduction for Transformerless Grid-Connected PV
Inverter Systems



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดทอนกระแสรั่วไหลความถี่สูงสำหรับระบบ
	อินเวอร์เตอร์พีวีชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง
โดย	นายปวเรศ อ่ำไพ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณภวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์เจตกุล โสภานิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณภวิน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปวเรศ อำไพ : การลดทอนกระแสรั่วไหลความถี่สูงสำหรับระบบอินเวอร์เตอร์พีวีชนิด
 เชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง. (A High-Frequency Leakage-Current
 Reduction for Transformerless Grid-Connected PV Inverter Systems) อ.ที่
 ปริญญาหลัก : รศ. ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการลดกระแสรั่วไหลความถี่สูงในระบบอินเวอร์เตอร์พีวีชนิด
 เชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง ผ่านการลดทอนขนาดของแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบ ณ
 องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ อันเกิดจากวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยอาศัย
 แบบจำลองโหมตร่วมที่มีความแม่นยำที่แสดงแรงดันโหมตร่วมจากทั้งสองวงจรด้วยแหล่งจ่าย
 แรงดัน 2 แหล่งต่ออนุกรมกัน ในเบื้องต้นงานวิจัยนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์แรงดันโหมตร่วมของ
 ทั้งสองวงจรด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ หลังจากนั้นจะนำเสนอแนวคิดการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบใหม่ที่
 นำค่าวัฏจักรงานของสวิตช์ในวงจรทระดับมาพิจารณาร่วมกับของอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เกิดการ
 หักล้างกันเองของแหล่งจ่ายแรงดันโหมตร่วมทั้งสอง แนวคิดดังกล่าวจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน
 ส่วนแรกคือการกลับเฟสกันของสัญญาณคลื่นพาห์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจร
 ทระดับและอินเวอร์เตอร์เพื่อให้แรงดันโหมตร่วมหักล้างในคาบการสวิตช์เดียวกัน และส่วนที่สอง
 คือการเลือกค่าแรงดันลำดับศูนย์เพื่อสร้างการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2 แชนแบบดัดแปลงที่จะ
 เลือการทำงานระหว่างโหมตร่วมการมอดูเลต 2 แชนชนิดเปิดตลอดหรือชนิดปิดตลอด แนวทางการ
 เลือกโหมตร่วมการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชนิด จะพิจารณาจากผลต่างของแรงดันโหมตร่วม
 ร่วมระหว่างอินเวอร์เตอร์และวงจรทระดับ และจะใช้โหมตร่วมการมอดูเลต 2 แชนที่ทำให้ผลต่างของ
 แรงดันโหมตร่วมมีค่าน้อยที่สุด ผลการจำลองการทำงานยืนยันความถูกต้องของแนวคิดที่นำเสนอ
 อีกทั้งผลทดลองยังแสดงถึงความสามารถในการลดทอนแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลโดย
 เฉพาะที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970445321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Leakage-current reduction, Fourier's series analysis, Common-mode voltage cancellation, Zero-voltage selection, Grid-connected PV inverters

Pawaret Ampai : A High-Frequency Leakage-Current Reduction for Transformerless Grid-Connected PV Inverter Systems. Advisor: Assoc. Prof. SURAPONG SUWANKAWIN, Ph.D.

This thesis presents a reduction technique of leakage-current in transformerless grid-connected 2-stage PV inverter system, which consists of boost converter and three-phase inverter. The leakage-current is reduced by the cancellation between common-mode voltages; at switching frequency, generated from boost converter and inverter. First, the Fourier series is used to analyze the common-mode voltages. Next, a novel modulation method of inverter is proposed by taking into account the duty cycle of boost converter, by which the common-mode voltage generated from inverter can help cancel the common-mode voltage from boost converter. As a result, the total common-mode voltage can be successfully reduced. The cancellation concept consists of two parts, the first one is to make the carriers of boost converter and of inverter to be out of phase. The second part is the selection of optimum zero voltage from two 2-arm modulation schemes; the zero voltage is selected so that the total common-mode voltage, at the switching frequency, is minimum.

The simulation results confirm the validity of the cancellation concept. In addition, the experimental results show the performance of the concept of reduction technique; the leakage-current at switching-frequency component can be significantly attenuated.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จไม่ได้ ถ้าขาดความช่วยเหลือและเอาใจใส่เป็นอย่างดีมาโดยตลอดของ รศ.ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกรวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่มอบความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติรวมถึงอำนวยความสะดวกด้านต่าง ๆ ในการทำงานวิจัย และปลูกฝังแนวคิดสำหรับการพัฒนาตนเองให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวมในอนาคต อีกทั้งความช่วยเหลือด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยจากบริษัท เอ.พี.วาย. เอ็นจิเนียริง โดยเฉพาะ คุณเกรียงไกร ที่เป็นพี่เลี้ยงคอยให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิคต่าง ๆ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ในห้องวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ดูแลเป็นอย่างดีและให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนเพื่อน พี่ และ น้อง ในห้องวิจัยที่คอยช่วยเหลือ ปรึกษา และแก้ไขปัญหาซึ่งกันและกัน เป็นกำลังใจให้ผ่านอุปสรรคต่าง ๆ งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณมารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนและอำนวยความสะดวกมาตลอด ทั้งยังเป็นกำลังใจสำคัญให้ก้าวข้ามผ่านอุปสรรคต่าง ๆ โดยเสมอมา

ปวเรศ อำไพ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการลดแรงดันโหมตร่วม	3
1.1.1 การลดทอนแรงดันโหมตร่วมด้วยวิธีการปรับมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	3
1.1.2 การลดทอนแรงดันโหมตร่วมด้วยการปรับโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสโดยเพิ่ม อุปกรณ์แอกทีฟ.....	3
1.1.3 การลดทอนแรงดันโหมตร่วมด้วยการปรับโครงสร้างของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์โดยเพิ่ม อุปกรณ์พาสซีฟ	5
1.2 แนวคิดที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้.....	6
1.3 วัตถุประสงค์.....	7
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	7
บทที่ 2 แบบจำลองที่มีความแม่นยำและการวิเคราะห์ฟูริเยร์	8
2.1 แบบจำลองโหมตร่วมของระบบอินเวอร์เตอร์พีวีชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลงชนิด 2 ภาค.....	8
2.1.1 สมการสัญญาณโหมตผลต่างผลและโหมตผลร่วมจากวงจรแหล่งจ่ายพีวี (PV array).....	10

2.1.2	สมการสัญญาณโหมตผลต่างผลและโหมตผลร่วมจากวงจรทบระดับ (Boost converter)	11
2.1.3	สมการสัญญาณโหมตผลต่างผลและโหมตผลร่วมของวงจรบัสไฟตรง (DC bus)	12
2.1.4	สมการสัญญาณโหมตผลต่างผลและโหมตผลร่วมจากอินเวอร์เตอร์สามเฟส 2 ระดับ	13
2.1.5	สมการสัญญาณโหมตผลต่างผลและโหมตผลร่วมของวงจрд้านโครงข่าย (Grid side)	15
2.1.6	วงจรสมมูลโหมตร่วมที่แม่นยำของอินเวอร์เตอร์	18
2.2	ลักษณะของแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วม	19
2.2.1	แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทบระดับ	19
2.2.2	แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์	21
2.2.2.1	3-Arm Modulation	21
2.2.2.2	2-Arm Modulation	24
2.3	การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันโหมตร่วมโดยใช้อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series)	26
2.3.1	การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทบระดับด้วยอนุกรมฟูรีเยร์	27
2.3.2	การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์	30
บทที่ 3	การลดทอนแรงดันโหมตร่วมด้วยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ของอินเวอร์เตอร์	36
3.1	ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง	36
3.2	แนวคิดหลักในการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบ	38
3.3	การลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยใช้การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม	39
3.3.1	การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แขนแบบดั้งเดิม (Conventional 3-arm modulation)	40
3.3.2	การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดั้งเดิม (Conventional 2-arm modulation)	43
3.4	การลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยใช้การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบดัดแปลง	48
3.4.1	การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แขน แบบดัดแปลง (3-arm Modified)	48
3.4.2	การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขน แบบดัดแปลง (2-arm Modified)	56
3.5	ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบดัดแปลง	63

3.5.1	ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แชนแบบตัดแปลง	63
3.5.2	ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แชนแบบตัดแปลง	63
3.5.2.1	การกระชากของกระแสรั่วไหลในช่วงเปลี่ยนโหมดทำงาน	63
3.5.2.2	ข้อจำกัดทางสมรรถนะของวิธีมอดูเลตแบบตัดแปลง เมื่อพิจารณาในคาบสเกลเวลา ของความถี่มูลฐาน	75
บทที่ 4	ผลการทดลองการลดกระแสรั่วไหลความถี่สูงที่องค์ประกอบการสวิตช์	80
4.1	โครงสร้างของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	80
4.1.1	วงจรภาคกำลัง	81
4.1.2	ภาคเครื่องมือวัด	81
4.2	ผลการทดลองกรณีกำลังไฟฟ้า 100% ของกำลังพิกัดพีวีอินเวอร์เตอร์ 10 kVA แรงดันพีวี 670 Vdc และแรงดันบัสไฟตรง 700 Vdc	82
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	86
5.1	บทสรุปผลการวิจัย	86
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	87
บรรณานุกรม	88
ประวัติผู้เขียน	91

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ข้อจำกัดของงานวิจัยในอดีต	6
ตารางที่ 2.1 แสดงสถานะการสวิตช์พร้อมขนาดแรงดันโหมตร่วมอินเวอร์เตอร์ของการมอดูเลต 2-arm (on-state).....	26
ตารางที่ 2.2 แสดงสถานะการสวิตช์พร้อมขนาดแรงดันโหมตร่วมอินเวอร์เตอร์ของการมอดูเลต 2-arm (off-state).....	26
ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ a_n ของการมอดูเลตแบบต่าง ๆ	35
ตารางที่ 3.1 ข้อสรุปของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ต่าง ๆ.....	48
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แขนแบบดัดแปลง	52
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดัดแปลง	52
ตารางที่ 3.4 ขนาดของตัวแทนแรงดันโหมตร่วมรวมจากการวิเคราะห์ฟูริเยร์ ของแต่ละเซกเตอร์ ใน 1 คาบการสวิตช์.....	57
ตารางที่ 3.5 ขนาดของตัวแทนแรงดันโหมตร่วมรวมจากการวิเคราะห์ฟูริเยร์ ของแต่ละเซกเตอร์ ใน 1 คาบการสวิตช์.....	62
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดัดแปลง ตามระบบทดสอบจริง	71
ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงผลจำลองจุดทำงานแรงดันบัลไฟตรง 700 V	75
ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงผลจำลองจุดทำงานแรงดันบัลไฟตรง 750 V	75
ตารางที่ 3.9 ตารางแสดงผลจำลองจุดทำงานแรงดันบัลไฟตรง 800 V	76

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แรงดันโหมคร่วมและกระแสรั่วไหลในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบ ไร้หม้อแปลง	1
รูปที่ 1.2 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์พีวี	2
รูปที่ 1.3 โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์แบบ 4 ขา [9]	3
รูปที่ 1.4 โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์ที่มีวงจรเรียงแรงดัน [10].....	4
รูปที่ 1.5 โครงสร้างวงจรหลายระดับแบบเรียงต่อกัน [11]	4
รูปที่ 1.6 โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์แบบ CL-SSBI และมีการเพิ่มไดโอดและตัวเหนี่ยวนำ [12]	5
รูปที่ 1.7 ระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับที่ใช้ออกแบบวงจรรอง [13].....	5
รูปที่ 2.1 ระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง [7].....	9
รูปที่ 2.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟพีวี	10
รูปที่ 2.3 แรงดันโหมคร่วมที่เกิดจากวงจรทบระดับ	11
รูปที่ 2.4 วงจรบัลไฟตรง	13
รูปที่ 2.5 แรงดันโหมคร่วมที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์.....	14
รูปที่ 2.6 วงจรด้านโครงข่าย.....	15
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลโหมคร่วมของพีวีอินเวอร์เตอร์สามเฟส 2 ภาค.....	18
รูปที่ 2.8 วงจรทบระดับในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์.....	19
รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรทบระดับ	19
รูปที่ 2.10 ลักษณะแรงดันโหมคร่วมของวงจรทบระดับ.....	20
รูปที่ 2.11 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันโหมคร่วมของวงจรทบระดับ	20
รูปที่ 2.12 อินเวอร์เตอร์ในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์.....	21
รูปที่ 2.13 แผนภาพการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์บนฐานคลื่นพาห์	22

รูปที่ 2.14 กราฟแสดงการเกิดค่าสูงสุด ค่ากลาง และ ค่าต่ำสุดของสัญญาณ.....	22
รูปที่ 2.15 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์	23
รูปที่ 2.16 แผนภาพการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state).....	24
รูปที่ 2.17 แผนภาพการมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state).....	24
รูปที่ 2.18 ลักษณะของแรงดันโหมตร่วมอินเวอร์เตอร์จากการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state).....	25
รูปที่ 2.19 ลักษณะของแรงดันโหมตร่วมอินเวอร์เตอร์จากการมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state).....	25
รูปที่ 2.20 การสร้างแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับใน 1 คาบการสวิตช์	28
รูปที่ 2.21 แรงดันโหมตร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์ใน 1 คาบการสวิตช์	31
รูปที่ 2.22 การสร้างแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state).....	32
รูปที่ 2.23 การสร้างแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการมอดูเลตแบบ 2 arms (off)	33
รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลโหมตร่วมอย่างง่ายของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสชนิดเชื่อมต่อ โครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง [7].....	36
รูปที่ 3.2 สัญญาณคลื่นพาร์ที่ใช้สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์.....	37
รูปที่ 3.3 ขนาดแรงดันโหมตร่วมของทั้งสองวงจรที่ซ่อนอยู่ ณ องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ หลังจาก กลับคลื่นพาร์ของวงจรทระดับ	38
รูปที่ 3.4 การใช้อิสระของแรงดันลำดับศูนย์ในงานวิจัยนี้.....	39
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แขน และวงจรทระดับ	40
รูปที่ 3.6 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมด้วยการมอดูเลต 3 แขนแบบดั้งเดิม พร้อมการใช้ คลื่นพาร์กลับเฟสระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์.....	41
รูปที่ 3.7 ผลจำลองสเปกตรัมของแรงดันและกระแสโหมตร่วมด้วยการมอดูเลต 3 แขนแบบดั้งเดิม พร้อมการใช้คลื่นพาร์กลับเฟสระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์	42
รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (on-state) และวงจรทระดับ	43
รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (off-state) และวงจรทระดับ	44
รูปที่ 3.10 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมด้วยการมอดูเลต 2 แขนแบบดั้งเดิม ในสเกลเวลา ของความถี่มูลฐาน พร้อมการใช้คลื่นพาร์กลับเฟสระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์	45

รูปที่ 3.11 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมด้วยการมอดูเลต 2 แชนแบบดั้งเดิม ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ พร้อมการใช้คลื่นพาร์กกลับเฟสระหว่างวงจรถบระดับและอินเวอร์เตอร์	46
รูปที่ 3.12 ผลจำลองสเปกตรัมของแรงดันและกระแสโหมตร่วมด้วยการมอดูเลตแบบ 2 แชน พร้อมการใช้คลื่นพาร์กกลับเฟสระหว่างวงจรถบระดับและอินเวอร์เตอร์	47
รูปที่ 3.13 การกำเนิดแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเพิ่มเข้ามาของแรงดันลำดับศูนย์เป็นค่าคงที่ใด ๆ	49
รูปที่ 3.14 แผนภาพการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แชนแบบดัดแปลง ด้วยวิธีการเลือก แรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสม	51
รูปที่ 3.15 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมรวมของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แชน ในสเกลเวลาของความถี่มูลฐาน	53
รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมรวมของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แชน ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์	54
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณแรงดันและกระแสโหมตร่วมรวมของ การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แชน	55
รูปที่ 3.18 การพิจารณาขนาดของแรงดันโหมตร่วมรวมของแต่ละเซกเตอร์ ใน 1 คาบการสวิตช์	56
รูปที่ 3.19 แผนภาพแสดงการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของการมอดูเลต อินเวอร์ 2 แชนแบบดัดแปลง	58
รูปที่ 3.20 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ	59
รูปที่ 3.21 สเปกตรัมของแรงดันโหมตร่วมรวมของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ	60
รูปที่ 3.22 สเปกตรัมของกระแสรั่วไหลของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ	61
รูปที่ 3.23 กระแสรั่วไหลที่เกิดจากการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แชนแบบดัดแปลง	63
รูปที่ 3.24 แรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลที่ใช้ในการพิจารณากระแสกระชากที่เกิดขึ้น	64
รูปที่ 3.25 การเปรียบเทียบแรงดันลำดับศูนย์ของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แชนแบบดัดแปลง ก่อนและหลังใช้ Ramp limiter	65
รูปที่ 3.26 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter	66

รูปที่ 3.27 ภาพขยายการเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสไหลรวมจาก การมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter 67

รูปที่ 3.28 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันไหลรวมรวมจาก การมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter 68

รูปที่ 3.29 สเปกตรัมสัญญาณกระแสรั่วไหลจาก การมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter 69

รูปที่ 3.30 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสไหลรวมจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 588 \text{ V}$ 72

รูปที่ 3.31 สเปกตรัมสัญญาณกระแสรั่วไหลจาก การมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 588 \text{ V}$ 73

รูปที่ 3.32 สเปกตรัมสัญญาณกระแสรั่วไหลจาก การมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 588 \text{ V}$ 74

รูปที่ 3.33 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 350 \text{ V}$, $V_d = 750 \text{ V}$ 76

รูปที่ 3.34 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 550 \text{ V}$, $V_d = 750 \text{ V}$ 76

รูปที่ 3.35 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 300 \text{ V}$, $V_d = 700 \text{ V}$ 77

รูปที่ 3.36 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 350 \text{ V}$, $V_d = 700 \text{ V}$ 77

รูปที่ 3.37 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 375 \text{ V}$, $V_d = 750 \text{ V}$ 78

รูปที่ 3.38 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 550 \text{ V}$, $V_d = 800 \text{ V}$ 78

รูปที่ 3.39 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 550 \text{ V}$, $V_d = 800 \text{ V}$ 79

รูปที่ 4.1 ระบบที่ใช้ทดลองการลดกระแสรั่วไหลความถี่สูง 80

รูปที่ 4.2 ผลการทดลองแรงดันและกระแสไหลรวมจากการมอดูเลตรูปแบบต่าง ๆ ในเชิงสเกลเวลาของความถี่มูลฐาน 82

รูปที่ 4.3 ผลการทดลองแรงดันและกระแสไหลรวมจากการมอดูเลตรูปแบบต่าง ๆ ในเชิงสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ 83

รูปที่ 4.4 สเปกตรัมแรงดันไหลรวมรวมจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state) 84

รูปที่ 4.5 สเปกตรัมแรงดันไหลรวมรวมจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state) 84

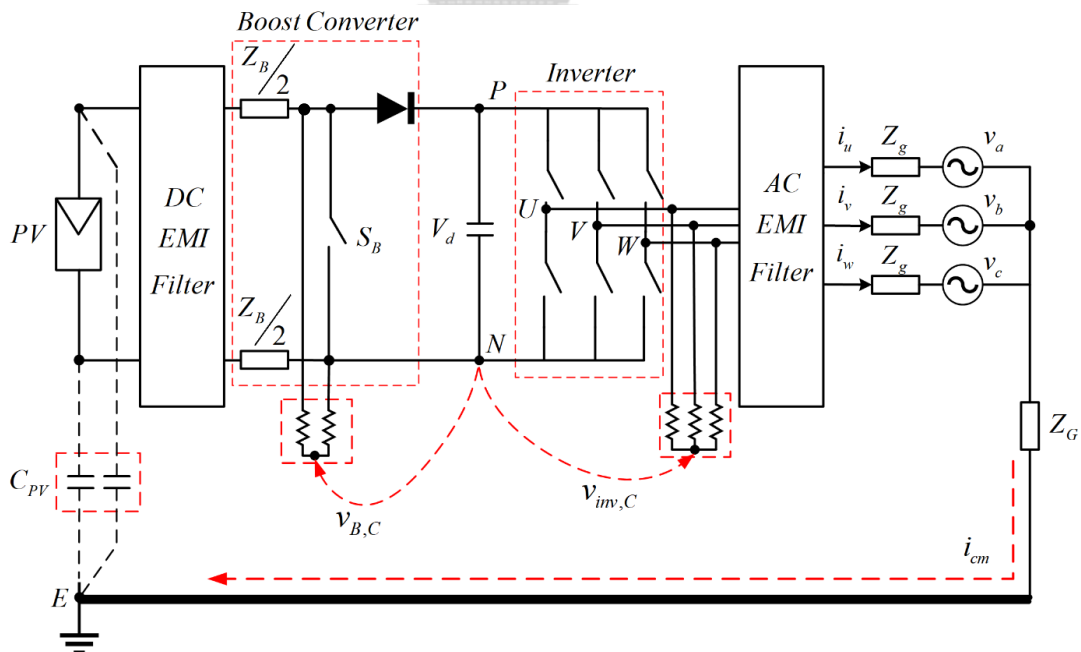
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมแรงดันโหมตรงรวมรวมจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (Modified)	84
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state)	85
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state)	85
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (Modified)	85



บทที่ 1

บทนำ

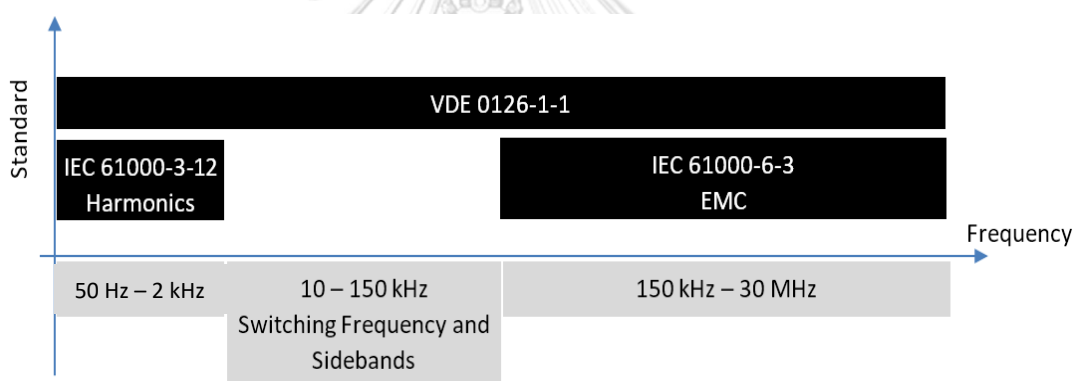
ระบบอินเวอร์เตอร์พีวีชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง (Transformerless Grid-Connected PV Inverter System) เป็นอุปกรณ์หลักที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์เข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า เนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และราคาถูกรวมทั้งมีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย [1-3] อย่างไรก็ตามการปรับปรุงอินเวอร์เตอร์ให้มีคุณภาพไฟฟ้าสูงขึ้นยังคงเป็นประเด็นที่สำคัญที่ต้องศึกษา เช่น การลดทอนแรงดันโหมตร่วม (Common-Mode Voltage) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการแทรกสอดแบบการนำ รูปที่ 1.1 แสดงถึงระบบอินเวอร์เตอร์พีวีชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลงชนิด 2 ภาค มีแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันฉับพลันของวงจรทบระดับ (Boost Converter) $v_{B,C}$ และวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส (3-Phase Pulse Width Modulation (PWM) Inverter) $v_{inv,C}$ ซึ่งกระตุ้นให้เกิดกระแสรั่วไหลความถี่สูงไหล (i_{cm}) เป็นวงรอบระหว่างโครงข่ายไฟฟ้า (Grid) และตัวเก็บประจุแผง (C_{PV}) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV array) และวงจรทั้งสองดังกล่าว กระแสรั่วไหลนี้ทำให้เกิดการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และยังทำให้อายุการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงอีกด้วย [4]



รูปที่ 1.1 แรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง

รูปที่ 1.2 แสดงถึงข้อกำหนดหรือมาตรฐานทางคุณภาพไฟฟ้าในย่านความถี่ต่าง ๆ สำหรับการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์พีวีกับโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อป้องกันอันตรายจากการสัมผัสหรือไฟฟ้าลัดวงจร เมื่อสัมผัสแผงพีวี จะเห็นได้ว่ามาตรฐาน VDE 0126-1-1 จะกำหนดค่าสูงสุดของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจากการต่อลงกราว์ไหลกลับเป็นวงรอบไปที่แผงพีวีซึ่งมีขนาดไม่เกิน 300mA [1, 5] ซึ่งครอบคลุมในทุกย่านความถี่ ในขณะที่มาตรฐาน IEC 61000 จะเป็นมาตรฐานที่นำมาใช้พิจารณาในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงแบ่งเป็น 2 มาตรฐาน คือ IEC 61000-3-12 จะครอบคลุมในย่านความถี่มูลฐานถึงย่านความถี่ 2 kHz และ IEC 61000-6-3 จะจำกัดการแทรกสอดทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบการนำ (Conducted Electromagnetic Interference (EMI)) ในย่านความถี่ 150 kHz-30 MHz

วิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาถึงกระแสรั่วไหลความถี่สูง โดยจะนำเสนอการลดทอนกระแสรั่วไหลในย่านความถี่การสวิตช์ (Switching frequency (f_{sw})) โดยใช้มาตรฐาน VDE 0126-1-1 เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของวิธีลดทอนที่จะนำเสนอ



รูปที่ 1.2 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าสำหรับอินเวอร์เตอร์พีวี

กระแสรั่วไหลมีองค์ประกอบหลักที่ความถี่การสวิตช์และไซด์แบนด์ของความถี่การสวิตช์ [1],[6-7] ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ 1-150 kHz วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการลดทอนกระแสรั่วไหลความถี่สูง โดยอาศัยการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วมจากวงจรทบระดับและอินเวอร์เตอร์ ให้เกิดการลดทอนขนาดของกระแสรั่วไหลในย่านความถี่การสวิตช์ ซึ่งค่ายอดของกระแสรั่วไหลในย่านความถี่การสวิตช์จะเป็นตัวแปรที่ส่งผลในการออกแบบวงจรกรอง EMI อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จะช่วยให้ลดขนาดของวงจรกรอง EMI โดยรวมของอินเวอร์เตอร์พีวีลงได้

1.1 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการลดแรงดันโหมตร่วม

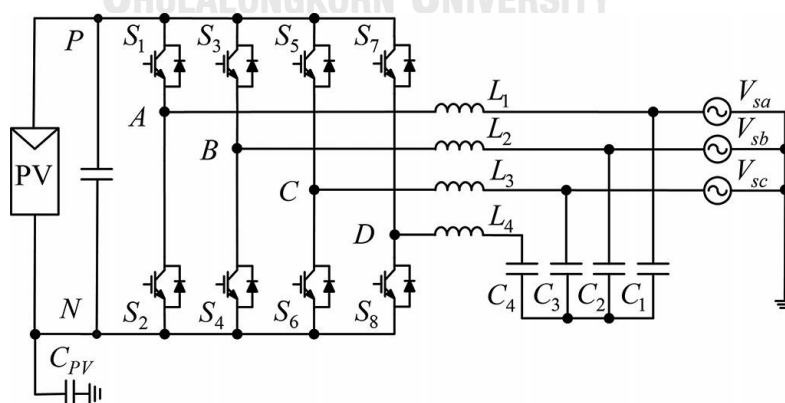
จากการสำรวจงานวิจัยการลดทอนแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลสำหรับระบบอินเวอร์เตอร์พีวี ประกอบไปด้วย 3 กลุ่ม ได้แก่

1.1.1 การลดทอนแรงดันโหมตร่วมด้วยวิธีการปรับมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

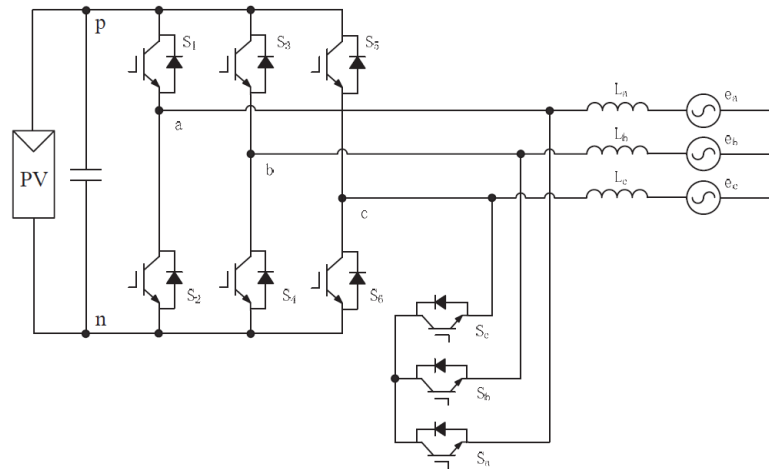
งานวิจัย [6, 8] เสนอวิธีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับและอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับด้วยการเลือกเวกเตอร์แรงดันรูปแบบต่าง ๆ โดยยึดรูปแบบการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ (Space-Vector PWM (SVPWM)) แล้วต่างกันว่าวิธีเลือกเวกเตอร์แรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสม ซึ่งมีข้อดีคือทำให้ดัชนีการมอดูเลตสูงสุดลดลง และงานวิจัย [7] เป็นการลดแรงดันโหมตร่วมโดยรวมทั้งหมด ผ่านการนำเสนอวงจรสมมูลโหมตร่วมที่มีความแม่นยำซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของแรงดันโหมตร่วมทั้งจากวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส พร้อมทั้งเสนอวิธีการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดหักล้างกันเองของแรงดันโหมตร่วมระหว่างวงจรทระดับและวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แต่เกิดข้อจำกัดทางด้านปฏิบัติด้วยการหน่วงเวลาของสวิตช์กำลัง

1.1.2 การลดทอนแรงดันโหมตร่วมด้วยการปรับโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสโดยเพิ่มอุปกรณ์แอคทีฟ

งานวิจัย [9-12] เสนอการปรับโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่แตกต่างไปจากโครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น งานวิจัย [9] ดัดแปลงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับเป็นโครงสร้างแบบ 4 ขา (4-Leg Structure) ดังรูปที่ 1.3 หรือบทความ [10] ได้เพิ่มวงจรเรียงแรงดัน ดังรูปที่ 1.4 เพื่อแก้ไขข้อดีทางด้านดัชนีการมอดูเลตที่ลดลงจากการปรับวิธีมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบพื้นฐาน

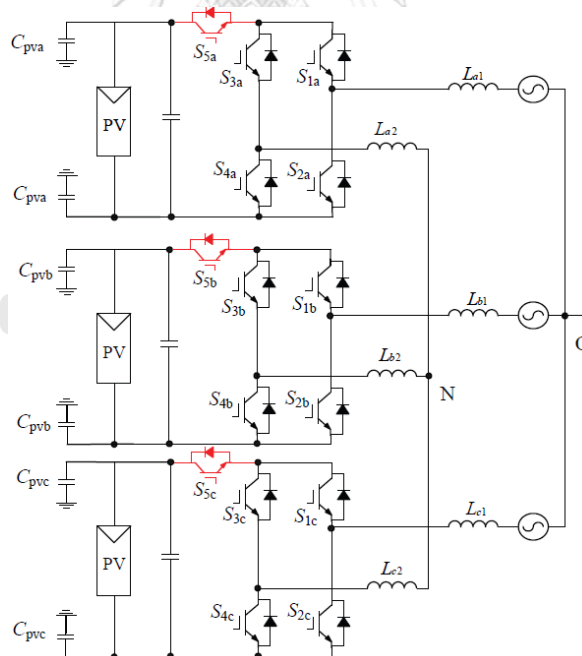


รูปที่ 1.3 โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์แบบ 4 ขา [9]



รูปที่ 1.4 โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์ที่มีวงจรถึงแรงดัน [10]

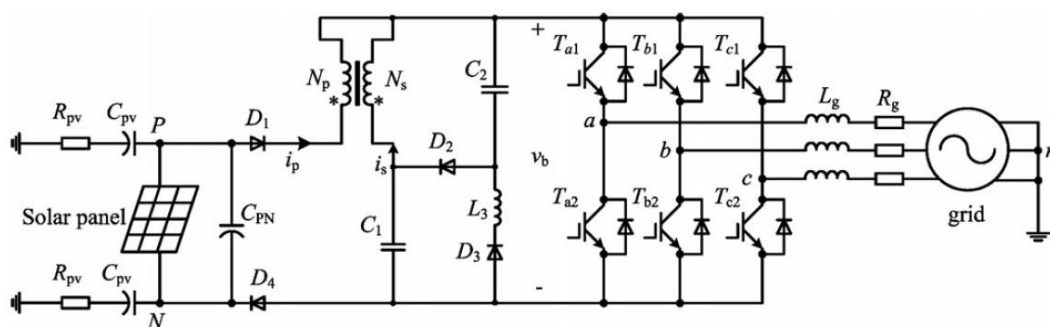
งานวิจัย [11] ดัดแปลงวงจรหลายระดับแบบเรียงต่อกัน ให้มีโครงสร้างเป็นวงจรถึงอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบเต็มคลื่นชนิด H5 ดังรูปที่ 1.5 สำหรับการประยุกต์ใช้กับกำลังงานสูง โดยจากงานวิจัยที่กล่าวในหัวข้อนี้มีข้อด้อยร่วมกัน คือ โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์จะไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากมีจำนวนสวิตช์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียในระบบมากขึ้น



รูปที่ 1.5 โครงสร้างวงจรหลายระดับแบบเรียงต่อกัน [11]

งานวิจัย [12] เสนออินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่าย Z (Z-source inverter) ที่มีวงจรถึงระดับแบบตัวเหนี่ยวนำเชื่อมร่วม (Coupled Inductor Boost Inverter) ดังรูปที่ 1.6 โดยงานวิจัยนี้

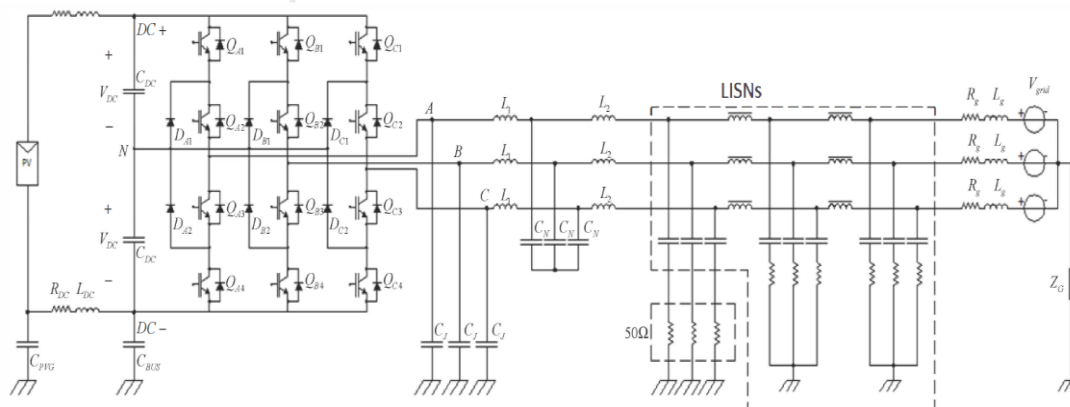
นำเสนอการลดทอนแรงดันโหมตร่วมที่พิจารณาถึงการทำงานของวงจรแหล่งจ่าย Z และวงจรอินเวอร์เตอร์ไปพร้อม ๆ กัน แต่มีการเพิ่มเข้ามาของไดโอด ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เพื่อให้เกิดให้การทำงานเสมือนเป็นวงจรทบระดับที่มีการลดหรือเพิ่มแรงดันจากแหล่งจากแผงจ่ายพีวีด้านเข้า ทำให้มีข้อดี คือลดการสูญเสียของระบบในส่วนของวงจรทบระดับได้ แต่ทำให้เกิดข้อด้อย คือ วงจรมีความซับซ้อน และไม่มีการควบคุมอัตราขยายหรือลดทอนในวงจรแหล่งจ่าย Z ได้ ถ้าอัตราขยายสูงแรงดันและกระแสในวงจรจะสูงตามไปด้วย ส่งผลต่ออุณหภูมิของอุปกรณ์ในวงจร และกำลังสูญเสียในระบบโดยรวมมากขึ้นเมื่อเทียบกับวงจรทบระดับแบบดั้งเดิม



รูปที่ 1.6 โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์แบบ CL-SSBI และมีการเพิ่มไดโอดและตัวเหนี่ยวนำ [12]

1.1.3 การลดทอนแรงดันโหมตร่วมด้วยการปรับโครงสร้างของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์โดยเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟ

งานวิจัย [13, 14] นำเสนอการออกแบบวงจรกรองสำหรับอินเวอร์เตอร์พีวีชนิด 1 ภาค (Single Stage) เท่านั้น ดังรูปที่ 1.7 ซึ่งไม่ครอบคลุมในกรณีของอินเวอร์เตอร์พีวีชนิด 2 ภาค



รูปที่ 1.7 ระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับที่ใช้ออกแบบวงจรกรอง [13]

งานวิจัย [15] พิจารณาการออกแบบสำหรับอินเวอร์เตอร์พีวีชนิด 2 ภาค แต่มีมุมมองแยกส่วนกันระหว่างด้านไฟตรงที่เชื่อมต่อกับแผงโซลาเซลล์และด้านไฟสลับที่เชื่อมต่อกับโครงข่าย ทำให้มี

วงจรกรองทั้ง 2 ชุดสำหรับแต่ละด้าน ส่งผลให้วงจรกรองโดยรวมมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสม แม้ว่าบทความวิจัยนี้ จะชี้ให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ของแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลระหว่างทั้งสองด้าน แต่ก็ไม่สามารถเขียนวงจรสมมูลที่แม่นยำได้ ยังผลให้การออกแบบวงจรกรองยังไม่เหมาะสมเท่าที่ควร อาจกล่าวได้ว่าอุปสรรคที่สำคัญในการพิจารณาวงจรทางด้านไฟตรงและวงจรทางด้านไฟสลับแบบองค์รวม ก็คือการขาดเครื่องมือการวิเคราะห์ที่ช่วยให้สามารถเขียนวงจรสมมูลที่แม่นยำได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการลดกระแสรั่วไหลของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ข้างต้น สามารถสรุปข้อจำกัดของวิธีต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ข้อจำกัดของงานวิจัยในอดีต

แนวคิดของงานวิจัยที่ผ่านมา	ข้อจำกัด
1. ปรับวิธีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	1. ดัชนีการมอดูเลตลดลง 2. พิจารณาเฉพาะอินเวอร์เตอร์ด้านไฟสลับ ซึ่งไม่ครอบคลุมกรณีพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิด 2 ภาค (2-Stage PV Inverter) ส่งผลให้วงจรกรองยังมีขนาดไม่เหมาะสม
2. การเพิ่มเข้ามาของอุปกรณ์แอคทีฟ	1. การตัดแปลงโครงสร้างที่ของอินเวอร์เตอร์เป็นอุปสรรคต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม
3. การเพิ่มเข้ามาของอุปกรณ์พาสซีฟ	1. พิจารณาเฉพาะอินเวอร์เตอร์ด้านไฟสลับ (Single-Stage PV Inverter) 2. ถึงแม้จะมีงานวิจัยกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์ชนิด 2 ภาคแต่ก็ยังคงใช้พิจารณาออกแบบวงจรกรองแยกส่วนกันทางด้านไฟตรงและไฟสลับ ส่งผลให้วงจรกรองมีขนาดไม่เหมาะสม

1.2 แนวคิดที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการลดกระแสรั่วไหลความถี่สูงผ่านการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง ด้วยการใช่วงจรสมมูลโหมตร่วมที่มีความแม่นยำพิจารณาด้านไฟตรงและวงจรด้านไฟสลับไปพร้อม ๆ กัน [4] โดยอาศัยการปรับวิธีการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แต่เนื่องจากองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมตร่วม จะเป็นองค์ประกอบที่มีนัยสำคัญต่อขนาดของกระแสรั่วไหล วิทยานิพนธ์นี้จึงให้ความสำคัญต่อการลดทอนแรงดันโหมตร่วมที่ความถี่การสวิตช์ โดยนำเสนอการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันโหมตร่วมด้วย

อนุกรมฟูรีเยร์ เพื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบความถี่ การสวิตช์ของวงจรทระดับและวงจรอินเวอร์เตอร์ พร้อมกับนำเสนอวิธีเลือกแรงดันลำดับศูนย์ในการมอดูเลตพีดับบีวเอ็มของอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เกิดการหักล้างซึ่งกันและกันขององค์ประกอบแรงดันโหมตรงรวมที่ความถี่การสวิตช์

1.3 วัตถุประสงค์

1. สามารถออกแบบการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟส 2 ระดับ เพื่อให้เกิดการลดทอนของแรงดันโหมตรงรวมในระบบที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์
2. ลดทอนกระแสรั่วไหลความถี่สูงในย่านความถี่การสวิตช์โดยการอาศัยการหักล้างของแรงดันโหมตรงรวมระหว่างวงจรทระดับและวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. ลดกระแสรั่วไหลในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาค 2 ระดับชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง โดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อให้เกิดการหักล้างกันของแรงดันโหมตรงรวมระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์
2. ทดสอบเทียบความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอด้วยการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink กับการทดสอบอุปกรณ์จริง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รู้ถึงพฤติกรรมของแรงดันโหมตรงรวมและกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในระบบ
2. สามารถออกแบบการมอดูเลตทั้งอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แชน และ 2 แชน ที่สอดคล้องกับแนวทางการลดทอนแรงดันโหมตรงรวมในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดสองภาคได้
3. ลดกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นได้ เพียงการปรับรูปแบบมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามเฟส ด้วยวิธีการวิเคราะห์อนุกรมฟูรีเยร์

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาหลักการเกิดแรงดันโหมตรงรวมในระบบ
2. ศึกษาวิธีการลดแรงดันโหมตรงรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมา
3. ออกแบบการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมในการลดทอนแรงดันโหมตรงรวม
4. จำลองการทำงานเปรียบเทียบกับทดสอบในเชิงปฏิบัติ
5. เก็บข้อมูลและเปรียบเทียบผลการทดลอง
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

แบบจำลองที่มีความแม่นยำและการวิเคราะห์ฟูรีเยร์

เนื่องด้วยแนวคิดในการลดทอนแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลดังกล่าวจากบหน้าข้างต้น จะอาศัยแบบจำลองที่แม่นยำ เนื้อหาในหัวข้อนี้จะนำเสนอแบบจำลองวงจรสมมูลโหมตร่วมที่แม่นยำ สำหรับระบบอินเวอร์เตอร์พีวีชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลงชนิด 2 ภาค ของงานวิจัย [4] ที่ แสดงสมการโหมตผลต่างและสมการโหมตผลร่วมของวงจรย่อยแต่ละส่วน แล้วนำวงจรย่อยแต่ละส่วน นี้มาเขียนเป็นวงจรสมมูลของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวได้ ผ่านความสัมพันธ์ของสมการแรงดัน กระแส และอิมพีแดนซ์ด้านเข้าและด้านออกที่เกิดขึ้นในแต่ละวงจรย่อยเป็นตัวเชื่อมเข้าด้วยกัน และ อธิบายการเกิดแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ พร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์ แรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจรโดยใช้นุกรมฟูรีเยร์เพื่อศึกษาองค์ประกอบขนาดของแรงดันโหมตร่วม ของวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์

2.1 แบบจำลองโหมตร่วมของระบบอินเวอร์เตอร์พีวีชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลงชนิด 2 ภาค

จากผลงานวิจัยใน [4, 16] เป็นการนำเสนอแบบจำลองที่มีความแม่นยำ แสดงถึง ความสัมพันธ์ของแรงดันโหมตร่วม ณ ขณะใดขณะหนึ่ง ที่เกิดจากวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับในช่วงเวลาเดียวกัน โดยอาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ วิเคราะห์แยกปริมาณโหมตร่วม (X_C) และปริมาณโหมตผลต่าง ($X_{j,D}$) โดยใช้นิยามดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ดังนี้

$$X_C = \sum_{j=1}^P X_j / P \quad (2.1)$$

$$X_{j,D} = X_j - X_C ; \sum_{j=1}^P X_{j,D} = 0 \quad (2.2)$$

เมื่อ X_j คือ ปริมาณเฟสเทียบกราวด์ และ P คือ จำนวนสายหรือเฟสของวงจร เช่น $P = 2$ จะใช้ สำหรับวิเคราะห์วงจรทระดับหรือวงจรไฟฟ้า 1 เฟส และ $P = 3$ จะใช้สำหรับวิเคราะห์ อินเวอร์เตอร์หรือวงจรไฟฟ้า 3 เฟส

จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) แสดงปริมาณเฟสเทียบกราวด์ ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในเทอม ของสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างได้โดยใช้เมทริกซ์การแปลง $T_{1\phi}$ สำหรับวงจรไฟฟ้า 1 เฟส และ $T_{3\phi}$ สำหรับวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ได้ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} X_{1,D} \\ X_{2,D} \\ \dots \\ X_C \end{bmatrix} = T_{1\phi} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

โดยที่

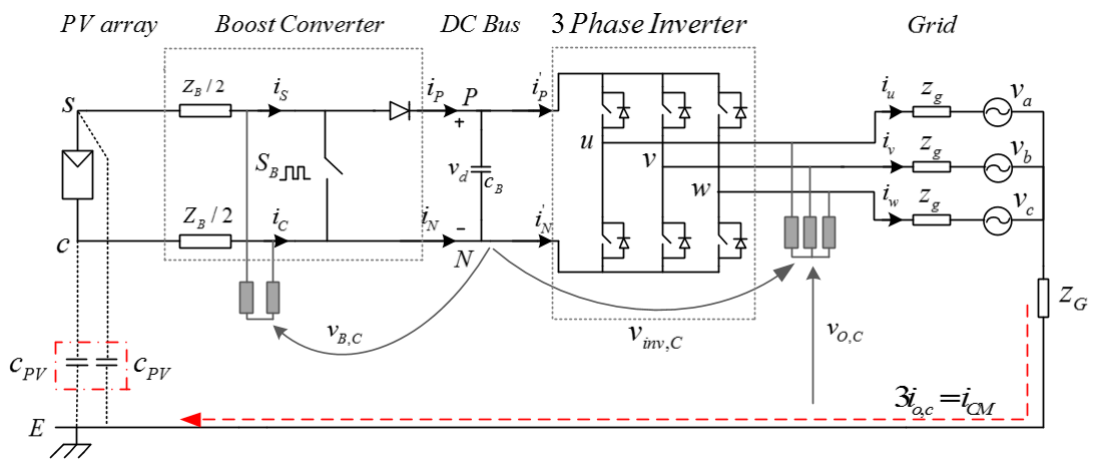
$$T_{1\phi} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ \dots & \dots \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_{1,D} \\ X_{2,D} \\ X_{3,D} \\ \dots \\ X_C \end{bmatrix} = T_{3\phi} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

โดยที่

$$T_{3\phi} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

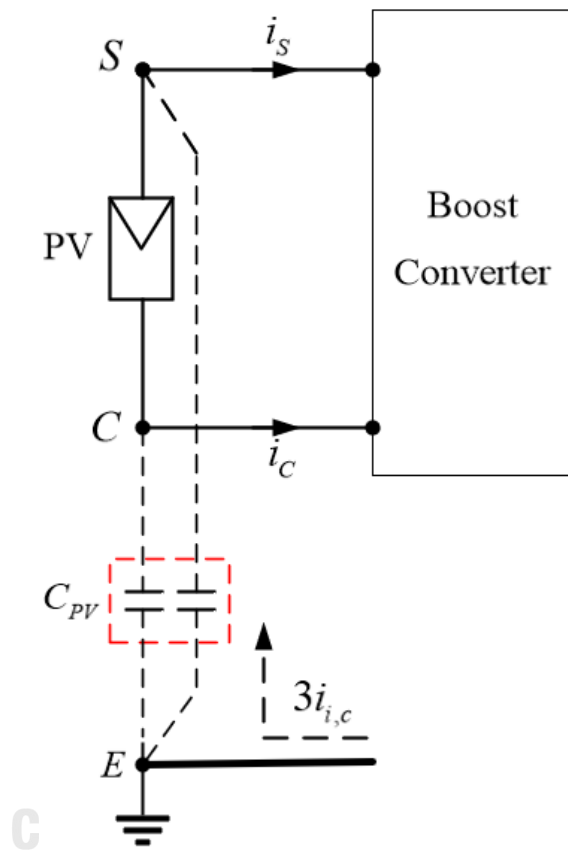
จากรูปที่ 2.1 ระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง ชนิด 2 ภาค อย่างง่ายโดยไม่มีการใช้วงจรกรองด้านไฟตรงและไฟสลับ [7] สามารถแบ่งการวิเคราะห์สมการโหมดร่วมและโหมดผลต่างของแต่ละวงจรร้อยได้ 5 ส่วน ได้แก่ 1) วงจรแหล่งจ่ายพีวี 2) วงจรทบระดับ 3) วงจรบัสไฟตรง 4) วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส 2 ระดับและ 5) วงจรด้านโครงข่าย โดยแต่ละวงจรร้อยมีการสร้างสมการสัญญาณโหมดดังนี้



รูปที่ 2.1 ระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง [7]

2.1.1 สมการสัญญาณโหมดผลต่างผลและโหมดผลร่วมจากวงจรแหล่งจ่ายพีวี (PV array)

แผงพีวีมีหน้าที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงหรืออีกนัยหนึ่งคือทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในวงจร และด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัยต่อผู้ใช้ที่แผงพีวีจึงต้องมีการต่อลงกราวด์ ทำให้เกิดตัวเก็บประจุแฝง C_{PV} ขึ้นระหว่างแผงพีวีกับกราวด์ ดังรูปที่ 2.2 ส่งผลให้เกิดกระแสรั่วไหลความถี่สูงสามารถไหลเข้าสู่ระบบได้



รูปที่ 2.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟพีวี

จากรูปที่ 2.2 สามารถเขียนความสัมพันธ์ในวงจรของปริมาณเฟสเทียบกราวด์ของแรงดันจุดต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (2.5) และแปลงสมการนี้ผ่านการคูณเมทริกซ์ $T_{1\phi}$ เพื่อสร้างสัญญาณโหมดร่วม (Common mode) และโหมดผลต่างหรือโหมดปกติ (Normal mode) ได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\begin{bmatrix} v_{SE} \\ v_{CE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_{SC} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{CE} \quad (2.5)$$

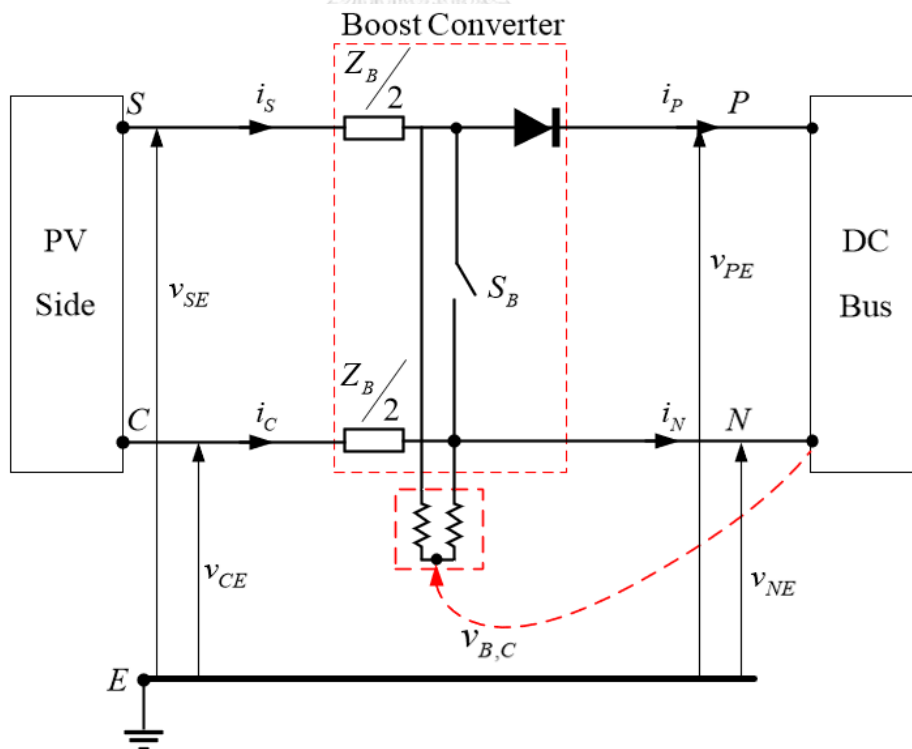
$$\begin{bmatrix} \text{Normal} \\ \text{Mode} \\ \text{-----} \\ \text{Common} \\ \text{Mode} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{S,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{SC} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_{CE} \quad (2.6)$$

และ $v_{CE} = 3i_{i,c} \left(\frac{Z_{PV}}{2} \right)$ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสผ่านอิมพีแดนซ์ในวงจรแหล่งจ่ายไฟพีวีได้ดังสมการที่ (2.7)

$$\begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{S,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{SC} + \frac{Z_{PV}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} 3i_{i,c} \quad (2.7)$$

โดยที่ v_{SE} คือ แรงดันจุด S เทียบกราวด์, v_{CE} คือ แรงดันจุด C เทียบกราวด์, v_{SC} คือ แรงดันโหมตร่วมที่แผงพีวีเทียบกราวด์, Z_{PV} คือ อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุแผงที่แผงพีวี, $i_{i,c}$ คือ กระแสโหมตร่วมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุแผงที่แผงพีวี

2.1.2 สมการสัญญาณโหมตผลต่างและโหมตผลร่วมจากวงจรทบระดับ (Boost converter)



รูปที่ 2.3 แรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากวงจรทบระดับ

วงจรทบระดับ (Boost converter) มีหน้าที่ยกระดับแรงดันด้านเข้าให้มีขนาดสูงขึ้น ผ่านการปรับวัฏจักรงานของวงจร (Duty cycle ; D) ในขั้นตอนการมอดูเลตสร้างสัญญาณขับนำสวิทช์ S_B โดยสัญญาณขับนำสวิทช์นี้จะมีค่าดังสมการที่ (2.8) หรือเป็นฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงตามสถานะเปิด-ปิดของวงจร

$$S_B = \begin{cases} 1; \text{switch=on} \\ 0; \text{switch=off} \end{cases} \quad (2.8)$$

จากรูปที่ 2.3 สามารถเขียนความสัมพันธ์ในวงจรของปริมาณเฟสเทียบกราวด์ของสัญญาณแรงดันด้านเข้า (v_{SE}, v_{CE}), แรงดันด้านออกของวงจรทบระดับ (v_{PE}, v_{NE}) พร้อมทั้งกระแสผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรหรือตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรทบระดับ (Z_B) ได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\begin{bmatrix} v_{SE} \\ v_{CE} \end{bmatrix} = \frac{Z_B}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1-S_B & S_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

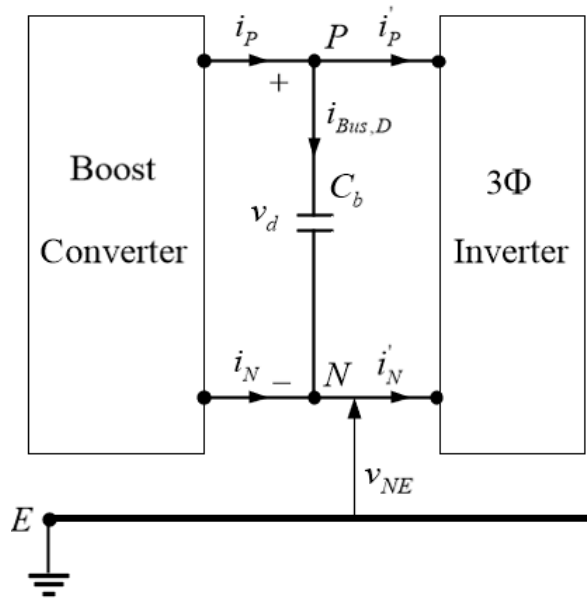
เมื่อใช้เมทริกซ์การแปลงวงจร 1 เฟส (T_ϕ) สามารถเขียนความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.9) ให้อยู่ในเทอมของสัญญาณโหมดร่วม (Common mode) และโหมดผลต่างหรือโหมดปกติ (Normal mode) ได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\left. \begin{array}{l} \text{Normal} \\ \text{Mode} \\ \text{-----} \\ \text{Common} \\ \text{Mode} \end{array} \right\} \begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{S,C} \end{bmatrix} = \frac{Z_B}{4} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{S,D} \\ i_{C,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1-S_B) & -(1-S_B) & 0 \\ -(1-S_B) & (1-S_B) & 0 \\ -S_B & S_B & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.1.3 สมการสัญญาณโหมดผลต่างผลและโหมดผลร่วมของวงจรบัสไฟตรง (DC bus)

จากรูปที่ 2.4 เขียนความสัมพันธ์ในวงจรของปริมาณเฟสเทียบกราวด์ของสัญญาณแรงดันที่บัสไฟตรง (v_{PE}, v_d, v_{CE}) ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{NE} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.4 วงจรบัสไฟตรง

เมื่อใช้เมทริกซ์การแปลงวงจร 1 เฟส ($T_{1\phi}$) สามารถเขียนความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.11) ให้อยู่ในเทอมของสัญญาณโหมตร่วม และโหมตผลต่างหรือโหมตปกติ ได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\begin{bmatrix} \text{Normal} \\ \text{Mode} \\ \text{-----} \\ \text{Common} \\ \text{Mode} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{Bus,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_{NE} \quad (2.12)$$

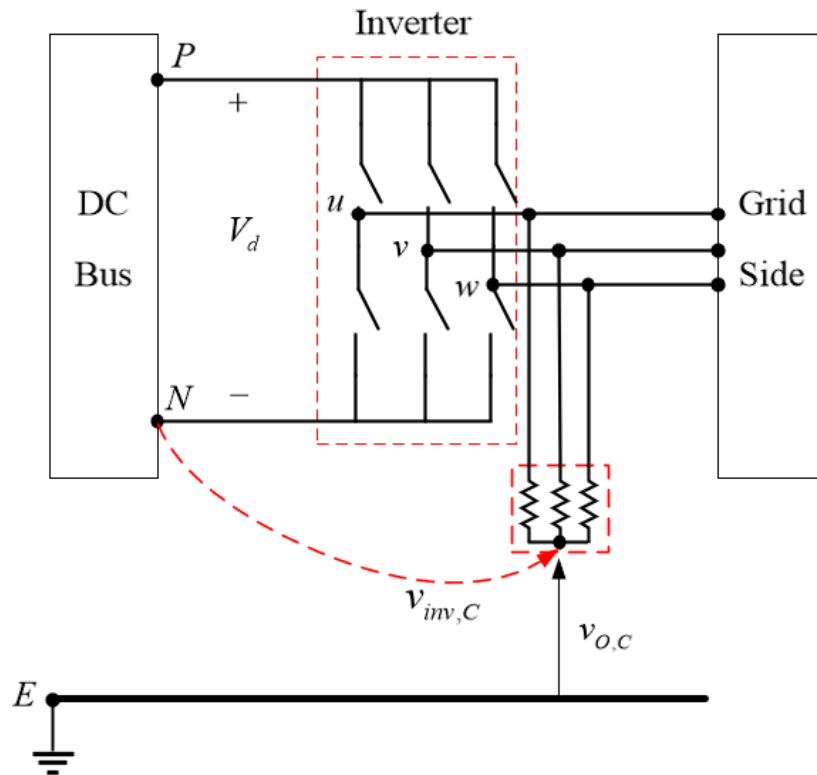
โดยที่ v_d คือ แรงดันบัสไฟตรง และ $v_{Bus,C}$ คือ แรงดันโหมตร่วมที่บัสไฟตรง

2.1.4 สมการสัญญาณโหมตผลต่างผลและโหมตผลร่วมจากอินเวอร์เตอร์สามเฟส 2 ระดับ

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับผ่านการมอดูเลตสร้างสัญญาณขับนำคู่สวิตซ์ในแต่ละเฟส (S_u, S_v, S_w) ซึ่งมีลักษณะเปิด-ปิดวงจรเป็นไปตามฟังก์ชันการสวิตซ์ S_{inv} ดังสมการที่ (2.13)

$$S_{inv} = [S_u \quad S_v \quad S_w]^T \quad (2.13)$$

โดยที่ $S_u, S_v, S_w = \begin{cases} 1; \text{upper switch} = \text{on} \\ 0; \text{lower switch} = \text{on} \end{cases}$



รูปที่ 2.5 แรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.5 สามารถเขียนความสัมพันธ์ในวงจรของปริมาณเฟสเทียบกราวด์ของแรงดันด้านเข้า (v_{PE}, v_{NE}) และ แรงดันด้านออก (v_{uE}, v_{vE}, v_{wE}) ในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ได้ดังสมการที่ (2.14) และสมการที่ (2.15) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_u & 1-S_u \\ S_v & 1-S_v \\ S_w & 1-S_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2S_u - 1 & -(2S_u - 1) & 2 \\ 2S_v - 1 & -(2S_v - 1) & 2 \\ 2S_w - 1 & -(2S_w - 1) & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{Bus,C} \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

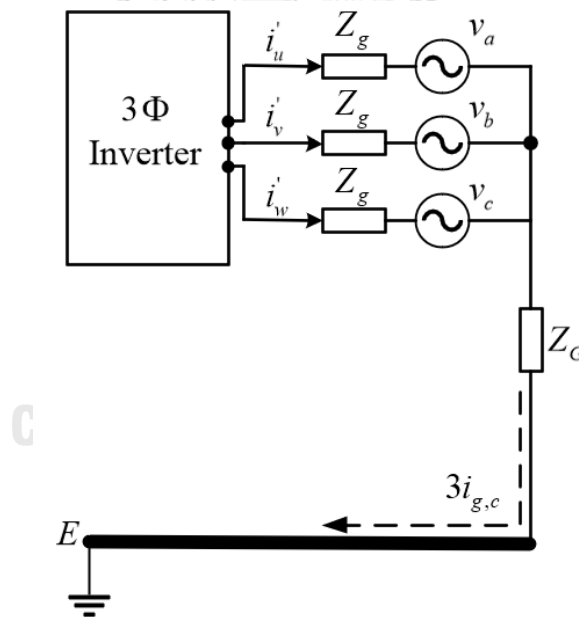
เมื่อใช้เมทริกซ์การแปลงวงจร 3 เฟส ($T_{3\phi}$) สามารถเขียนความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.15) ให้อยู่ในเทอมของสัญญาณโหมตร่วม และโหมตผลต่างหรือโหมตปกติ ได้ดังสมการที่ (2.16)

$$\begin{array}{c} \text{Normal} \\ \text{Mode} \\ \text{-----} \\ \text{Common} \\ \text{Mode} \end{array} \begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{O,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_u - \sum_{n=u,v,w} S_n/3 & -\left(S_u - \sum_{n=u,v,w} S_n/3\right) & 0 \\ S_v - \sum_{n=u,v,w} S_n/3 & -\left(S_v - \sum_{n=u,v,w} S_n/3\right) & 0 \\ S_w - \sum_{n=u,v,w} S_n/3 & -\left(S_w - \sum_{n=u,v,w} S_n/3\right) & 0 \\ \left(\sum_{n=u,v,w} \left(S_n/3\right) - \frac{1}{2}\right) & -\left(\sum_{n=u,v,w} \left(S_n/3\right) - \frac{1}{2}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

โดยที่ $v_{O,C}$ คือ แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกราวด์

2.1.5 สมการสัญญาณโหมตผลต่างผลและโหมตผลร่วมของวงจรด้านโครงข่าย (Grid side)

โครงข่ายไฟฟ้าเป็นวงจรส่วนสุดท้ายที่เชื่อมกับอินเวอร์เตอร์และต่อลงกราวด์ ประกอบด้วย อิมพีแดนซ์สายส่ง แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับและอิมพีแดนซ์ของกราวด์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรด้านโครงข่าย

เขียนความสัมพันธ์ของปริมาณเฟสเทียบกราวด์ของแรงดันกับกระแสผ่านอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ในวงจรด้านโครงข่ายได้ดังสมการที่ (2.17) และในรูปของเมทริกซ์ดังสมการที่ (2.18) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} v_{uE} &= i_u Z_g + v_a + 3i_{g,c} Z_G \\ v_{vE} &= i_v Z_g + v_b + 3i_{g,c} Z_G \\ v_{wE} &= i_w Z_g + v_c + 3i_{g,c} Z_G \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_g} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_g} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \frac{Z_G}{Z_g} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} 3i_{g,C} \quad (2.18)$$

เมื่อใช้เมทริกซ์การแปลงวงจร 3 เฟส ($T_{3\phi}$) สามารถเขียนความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.18) ให้อยู่ในเทอมของสัญญาณโหมดร่วม และโหมดผลต่างหรือโหมดปกติ ได้ดังสมการที่ (2.19)

$$\left. \begin{array}{l} \text{Normal} \\ \text{Mode} \\ \text{-----} \\ \text{Common} \\ \text{Mode} \end{array} \right\} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{g,C} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} 1/Z_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_g & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1/(Z_g + 3Z_G) \end{array} \right] \begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{g,C} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_g} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

โดยที่ Z_g คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งโครงข่าย, Z_G คือ อิมพีแดนซ์ของสายกราวด์โครงข่าย, $v_{g,C}$ คือ แรงดันโหมดร่วมที่วงจรโครงข่ายเทียบกราวด์ และ $i_{g,C}$ คือ กระแสโหมดร่วมที่ไหลผ่านโครงข่าย

จากหัวข้อ 2.1.1-2.1.5 สามารถสรุปสมการโหมดร่วมของแต่ละวงจรได้ดังสมการที่ (2.20-2.29)

$$v_{s,C} = \frac{1}{2} v_{sC} + \frac{Z_{PV}}{2} (3i_{i,c}) \quad (2.20)$$

สมการที่ (2.20) แสดงเฉพาะเทอมสัญญาณโหมดร่วมในส่วนของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ เมื่อ Z_{PV} คือ อิมพีแดนซ์ระหว่างแผงฟ้และกราวด์หรือตัวเก็บประจุแผง C_{PV} ดังรูปที่ 2.2

$$v_{s,C} = 3i_{i,c} \left(\frac{Z_B}{4} \right) + \frac{1}{2} [-S_B v_{P,D} + S_B v_{N,D}] + v_{BUS,C} \quad (2.21)$$

สมการที่ (2.21) แสดงเฉพาะเทอมสัญญาณโหมดร่วมในส่วนของวงจรทบระดับ เมื่อ Z_B คือ อิมพีแดนซ์ของวงจรทบระดับหรือตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรทบระดับ L_B ดังรูปที่ 2.3

$$v_{P,D} = -v_{N,D} = \frac{v_d}{2} \quad (2.22)$$

$$v_{BUS,C} = \frac{v_d}{2} + v_{NE} \quad (2.23)$$

แทนค่า $v_{P,D}$, $v_{N,D}$, และ $v_{BUS,C}$ ในสมการที่ (2.21) จะสร้างสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.24)

$$\left. \begin{aligned} v_{S,C} &= 3i_{i,C} \left(\frac{Z_B}{4} \right) + (1 - S_B) \frac{v_d}{2} + v_{NE} \\ &= 3i_{i,C} \left(\frac{Z_B}{4} \right) + v_{B,C} + v_{NE} \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

โดยนิยามให้

$$v_{B,C} = (1 - S_B) \frac{v_d}{2} \quad (2.25)$$

สมการที่ (2.25) แสดงนิยามเทอมสัญญาณแรงดันโหมคร่วมที่เกิดจากวงจรทระดับ ($v_{B,C}$) ซึ่งขึ้นกับสถานะการเปิด-ปิดของสวิตช์ในวงจรทระดับและมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรง

$$v_{O,C} = \left(\sum_{n=u,v,w} S_n / 3 - \frac{1}{2} \right) v_{P,D} - \left(\sum_{n=u,v,w} S_n / 3 - \frac{1}{2} \right) v_{N,D} + v_{BUS,C} \quad (2.26)$$

สมการที่ (2.26) แสดงเฉพาะเทอมสมการโหมคร่วมในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์และจากสมการที่ (2.22) และ (2.23) สามารถเขียนสมการที่ (2.27) ใหม่ได้ดังสมการ (2.28)

$$\left. \begin{aligned} v_{O,C} &= v_{NE} + \sum_{n=u,v,w} \left(\frac{S_n}{3} \right) v_d \\ &= v_{NE} + v_{inv,C} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

โดยนิยามให้

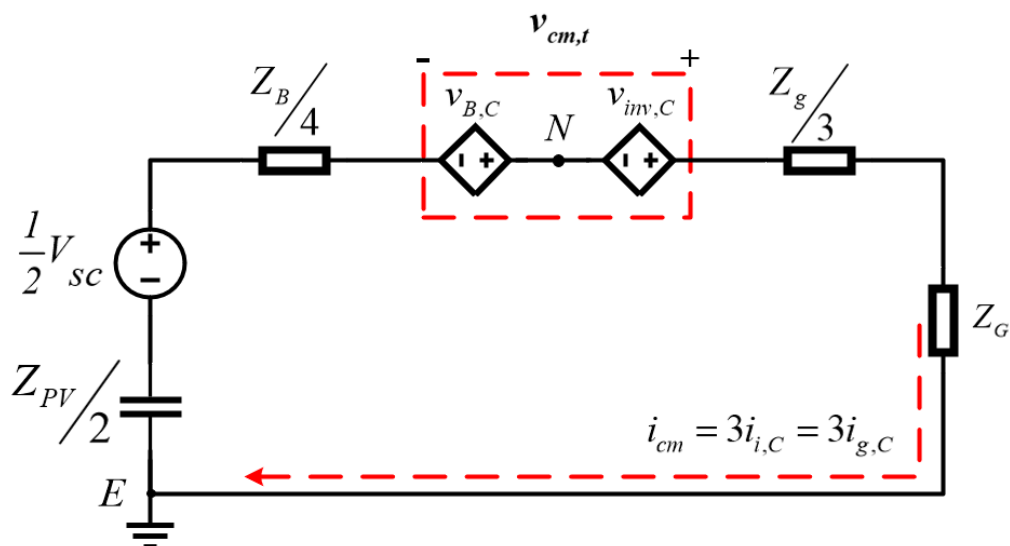
$$v_{inv,C} = \sum_{n=u,v,w} \left(\frac{S_n}{3} \right) v_d \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.28) แสดงนิยามเทอมสัญญาณแรงดันโหมคร่วมที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ ซึ่งขึ้นกับสถานะการเปิด-ปิดคู่สวิตช์กำลังแต่ละเฟสในวงจรอินเวอร์เตอร์และมีขนาดเป็น $\frac{1}{3}$ เท่าของแรงดันบัสไฟตรง และสมการที่ (2.29) แสดงเทอมสัญญาณแรงดันโหมคร่วมในส่วนของวงจรด้านโครงข่าย

$$\left. \begin{aligned} v_{g,C} &= Z_g i_{g,C} + 3Z_G i_{g,C} \\ &= \left[\left(\frac{Z_g}{3} \right) + Z_G \right] 3i_{g,C} \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

2.1.6 วงจรสมมูลโหมตร่วมที่แม่นยำของอินเวอร์เตอร์

จากการวิเคราะห์สมการสัญญาณโหมตร่วมของวงจรย่อยทั้ง 5 ส่วน สามารถนำความสัมพันธ์ของสัญญาณโหมตร่วมของแรงดันและกระแสผ่านอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ในแต่ละวงจรย่อยมาสร้างเป็นวงจรสมมูลโหมตร่วมของระบบโดยไม่มีการพิจารณาวงจรกรองด้านไฟตรงและไฟสลับได้ดังนี้



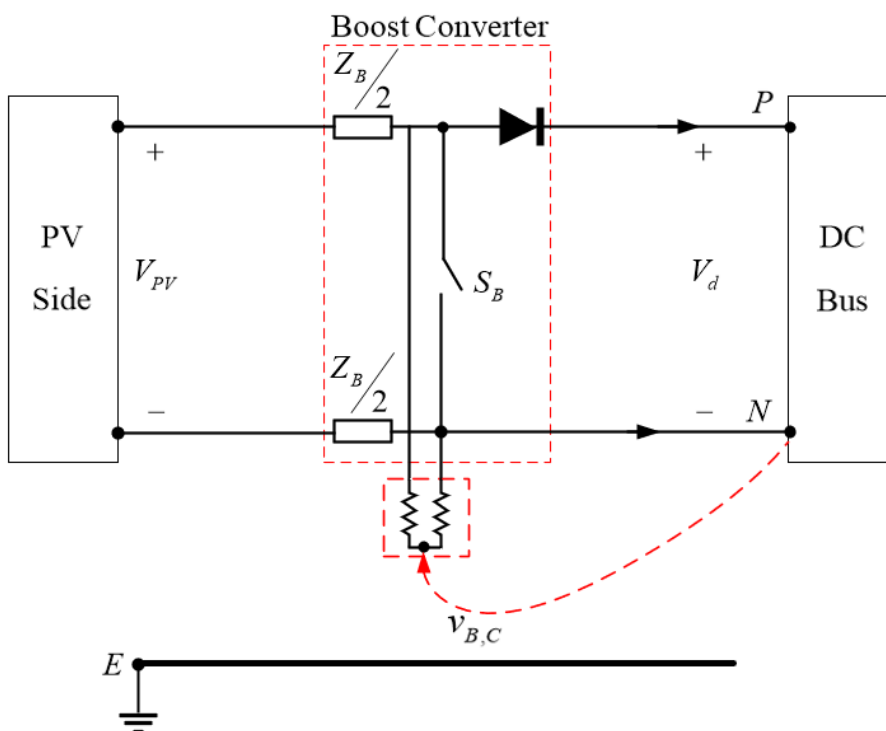
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลโหมตร่วมของพีวีอินเวอร์เตอร์สามเฟส 2 ภาค

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.7 พบว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับ ($v_{B,C}$) และวงจรอินเวอร์เตอร์ ($v_{inv,C}$) เชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าผ่านจุด N ของบัสไฟตรงในลักษณะอนุกรม ทำให้สามารถดัดแปลงการมอดูเลตสร้างแรงดัน เพื่อให้แรงดันโหมตร่วมรวมของระบบ ($v_{cm,t}$) เกิดการเสริมหรือหักล้างกันของแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมทั้งสองได้ ซึ่งส่งผลกับการเกิดกระแสรั่วไหล (i_{cm}) ได้โดยตรง โดยจะกล่าวถึงลักษณะของสัญญาณแรงดันโหมตร่วมทั้งสองนี้ในส่วนถัดไป

2.2 ลักษณะของแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วม

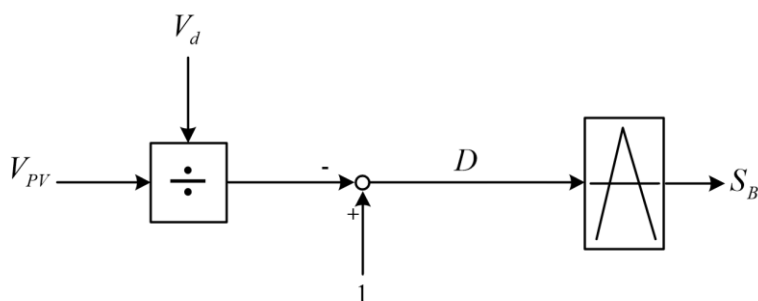
จากวงจรสมมูลโหมตร่วมที่กล่าวมาข้างต้น แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ดังนี้

2.2.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทบระดับ



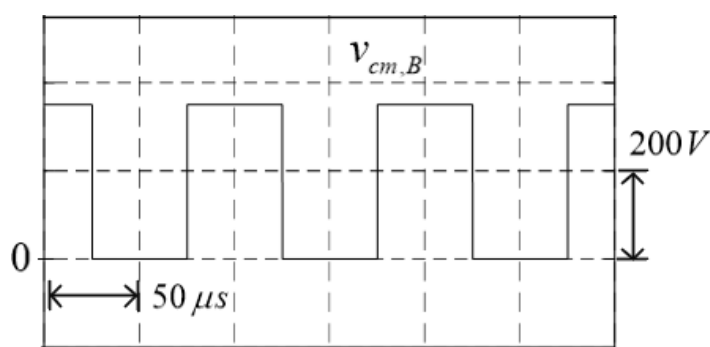
รูปที่ 2.8 วงจรทบระดับในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์

วงจรทบระดับมีหน้าที่ยกแรงดันด้านออก (V_d) ให้มีขนาดสูงกว่าแรงดันด้านเข้า (V_{PV}) ผ่านการปรับความกว้างพัลส์ (*Duty cycle; D*) เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ S_B ดังรูปที่ 2.9

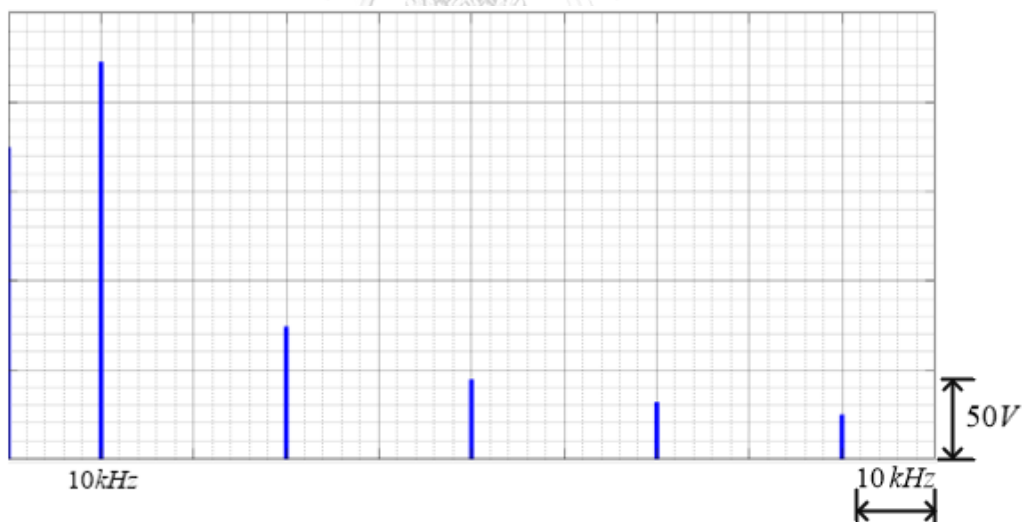


รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรทบระดับ

จากนิยามในสมการที่ (2.25) สามารถอธิบายลักษณะโดยทั่วไปของแรงดันโหมตร่วมจากวงจรทระดับได้ว่า แรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับจะเกิดตามสถานะการเปิด-ปิดสวิตช์ S_B เช่นเดียวกับการสร้างแรงดันด้านออกในโหมตปกติและมีขนาดเป็น $\frac{1}{2}$ เท่าของแรงดันบั๊สไฟตรงสามารถแสดงสัญญาณรายคาบของแรงดันโหมตร่วมนี้จากการจำลองเบื้องต้นได้ดังรูปที่ 2.10 โดยวิธีการวัดค่าแรงดันโหมตร่วมนั้นมีหลากหลาย [4], [5] แต่ในงานวิจัยนี้นำเสนอการวัดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมผ่านตัวต้านทานค่าสูงเทียบกับจุด N ของบั๊สไฟตรงตามงานวิจัยที่ [4] เนื่องจากสะดวกและไม่ซับซ้อน ดังรูปที่ 2.8



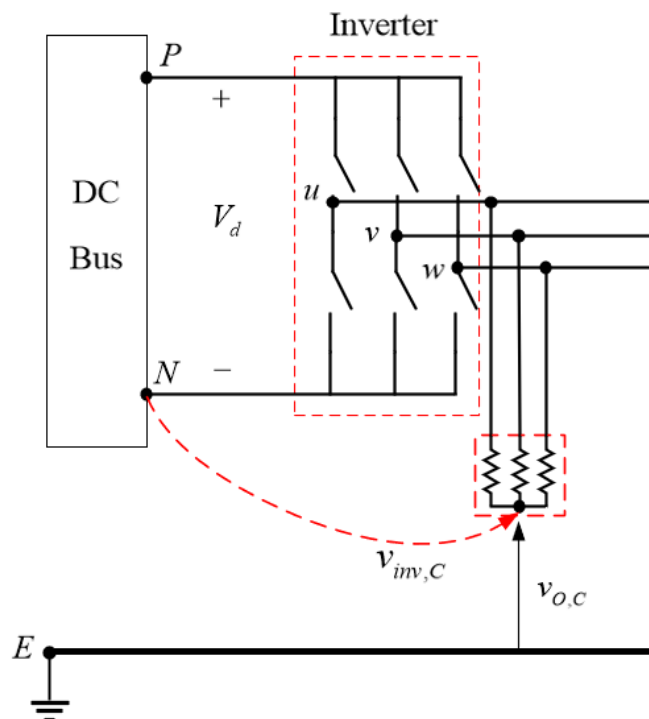
รูปที่ 2.10 ลักษณะแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับ



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับ

เมื่อวิเคราะห์สเปกตรัมของแรงดันโหมตร่วมจากวงจรทระดับดังรูปที่ 2.11 พบว่าขนาดของแรงดันมีค่าสูงที่องค์ประกอบความถี่ 10 kHz ซึ่งการจำลองผลเบื้องต้นนี้ กำหนดให้สวิตช์กำลังทำงานที่ความถี่ 10 kHz ทั้งในวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับจะมีขนาดสูงที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์

2.2.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.12 อินเวอร์เตอร์ในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์

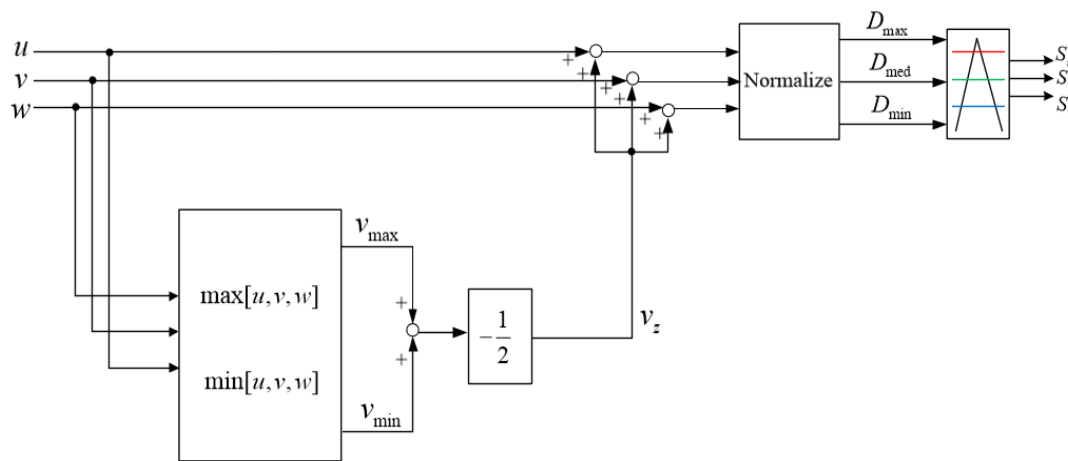
อินเวอร์เตอร์มีหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้าจากบัสไฟตรงแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับในรูปของแรงดันและกระแสที่ด้านออกของวงจร ผ่านการทำงานของคู่สวิตช์กำลังในแต่ละเฟสโดยใช้การมอดูเลตแบบพัลส์บิวดิม (PWM) หรือการปรับความกว้างสัญญาณพัลส์ สร้างค่าเฉลี่ยแรงดันด้านออกตามที่ต้องการ

จากนิยามในสมการที่ (2.28) พบว่า ตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์คือการทำงานของคู่สวิตช์กำลังในแต่ละเฟส จึงสามารถจำแนกประเภทของแรงดันโหมตร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์ตามการทำงานของสวิตช์กำลังในแต่ละเฟสได้ 2 ประเภท คือ 1) 3-Arm modulation และ 2) 2-Arm modulation โดยวิธีการวัดค่าแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์จะวัดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมผ่านตัวต้านทานค่าสูงเทียบกับจุด N ของบัสไฟตรงเช่นเดียวกับวงจรทบระดับ ดังรูปที่ 2.12

2.2.2.1 3-Arm Modulation

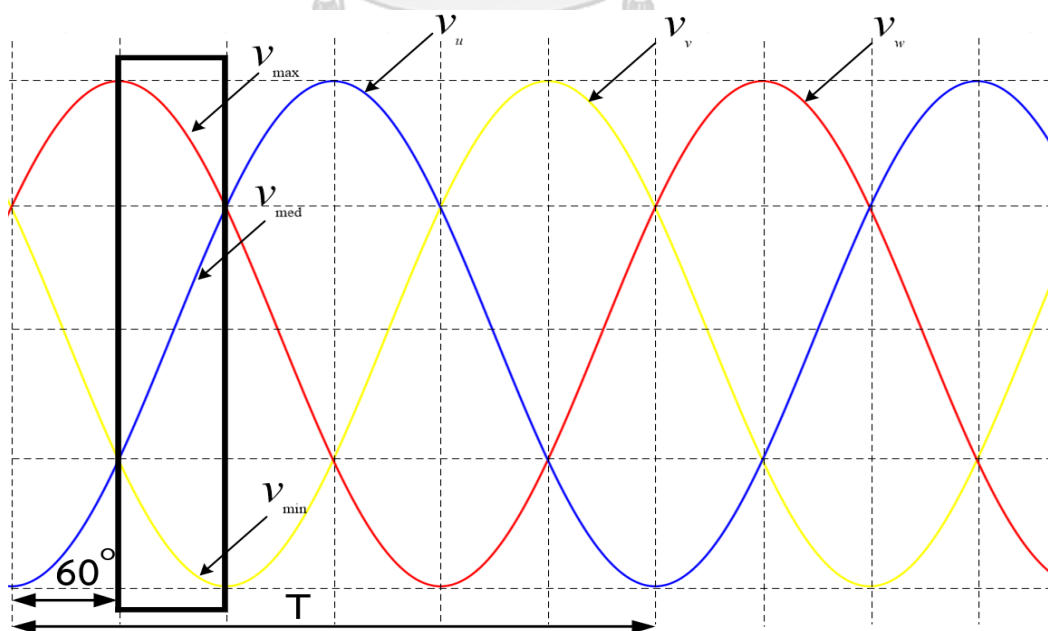
การมอดูเลตแบบ 3-arm เรียกตามลักษณะการทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีสถานะการสวิตช์เปิด-ปิดทั้ง 3 เฟส เพื่อสร้างค่าเฉลี่ยแรงดันด้านออกที่ต้องการ โดยผ่านการปรับความกว้างพัลส์หรือค่าวัฏจักรงาน (Duty cycle; D) แล้วนำไปสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ต่อไปโดย

ผ่านวิธีการมอดูเลตรูปแบบต่าง ๆ แต่ที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน คือ การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห้ (Carrier-Based PWM Modulation) ซึ่งมีขั้นตอนการสร้างสัญญาณขับนำสวิตซ์ตามรูปที่ 2.13



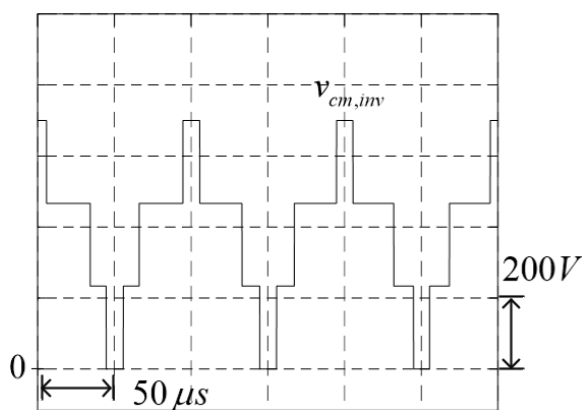
รูปที่ 2.13 แผนภาพการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์บนฐานคลื่นพาห้

จากรูปที่ 2.13 แสดงขั้นตอนการสร้างสัญญาณขับนำสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ โดยการใช้การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห้เทียบเท่าวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์พีดีบีบลิวเอ็ม (Space Vector PWM (SVPWM)) ซึ่งใช้เวกเตอร์แรงดันลำดับศูนย์ (v_z) เป็นตัวแปรอิสระในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตซ์ และมีการใช้ค่าวัฏจักรงาน 3 ค่าคือ ค่าสูงสุด (D_{max}) ค่ากลาง (D_{med}) และ ค่าต่ำสุด (D_{min}) ซึ่งเป็นค่าคงที่ ณ ขณะใดขณะหนึ่งของสัญญาณแรงดันคำสั่ง แสดงได้ดังรูปที่ 2.14

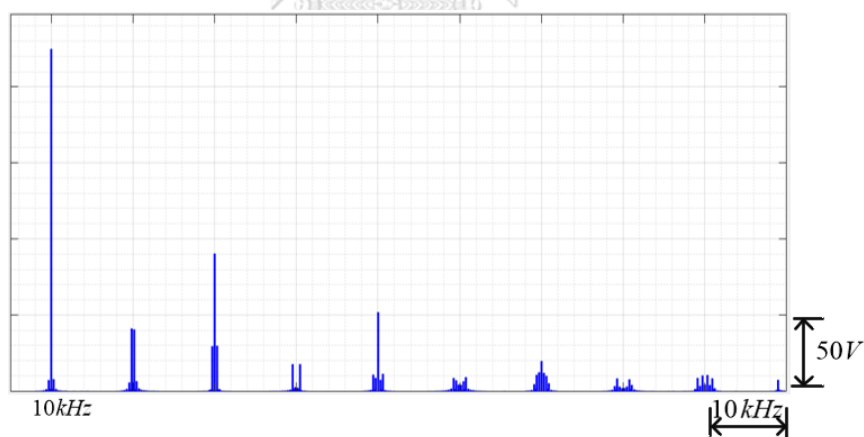


รูปที่ 2.14 กราฟแสดงการเกิดค่าสูงสุด ค่ากลาง และ ค่าต่ำสุดของสัญญาณ

โดยค่าสูงสุด ค่ากลาง และ ค่าต่ำสุด จะเกิดสลับเฟสกันทุก 60 องศาจนครบหนึ่งคาบการทำงาน และจากรูปที่ 2.10 ณ ช่วงเวลาที่แรก ค่าสูงสุด ค่ากลาง และ ค่าต่ำสุด จะเป็นจังหวะการเกิดของแรงดันเฟส V, แรงดันเฟส U และ แรงดันเฟส W ตามลำดับ โดยค่าวัฏจักรงานนี้จะเป็นตัวกำหนดสถานะการทำงานของสวิตช์คู่กำลังให้กับอินเวอร์เตอร์ ส่งผลให้แรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้การมอดูเลตแบบ 3-arm มีลักษณะเป็นฟังก์ชันรายคาบแบบขั้นบันไดตามสถานะการสวิตช์เปิด-ปิดจำนวน 6 ครั้ง ใน 1 คาบการสวิตช์ แสดงผ่านผลการจำลองเบื้องต้นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์

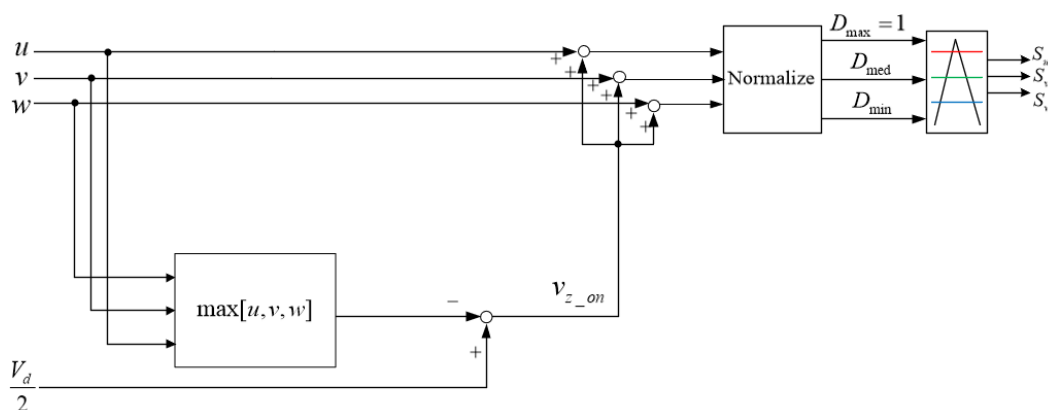


รูปที่ 2.15 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์

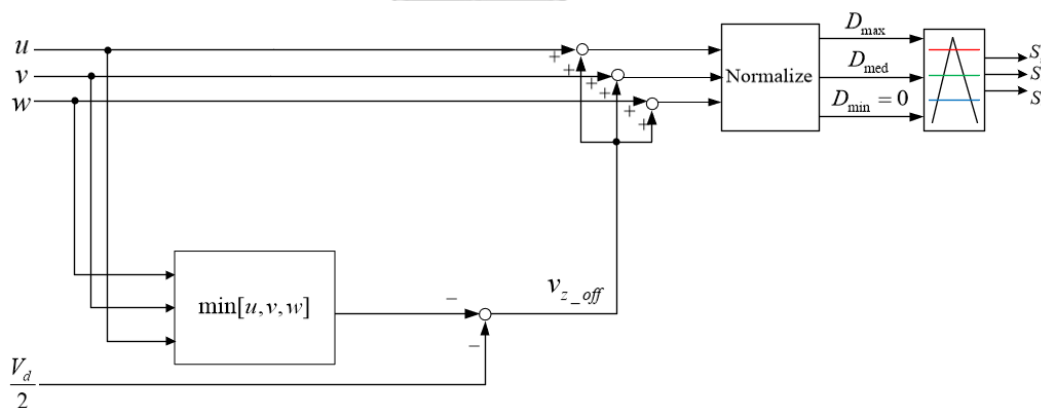
จากรูปที่ 2.15 แสดงผลจำลองการวิเคราะห์หอนุกรมฟูริเยร์ของสัญญาณแรงดันโหมตร่วมจากอินเวอร์เตอร์ พบว่าที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ 10 kHz จะมีค่าขนาดแรงดันสูงสุดเช่นเดียวกับวงจรทบระดับ

2.2.2.2 2-Arm Modulation

การมอดูเลตแบบ 2-arm เป็นการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยใช้สวิตช์คู่กำลังเพียง 2 เฟสและมีเฟสใดเฟสหนึ่งเปิดหรือปิดวงจรตลอดการทำงาน ผ่านการเลือกค่าแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมในการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ เรียกการทำงานปิดหรือเปิดวงจรของคู่สวิตช์คู่กำลัง 1 เฟสนั้นว่า 2-arm (on-state) และ 2-arm (off-state) ตามลำดับ และมีขั้นตอนการสร้างสัญญาณขับสวิตช์ของการมอดูเลต 2-arm ทั้ง 2 รูปแบบ ดังกล่าว ดังรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.17



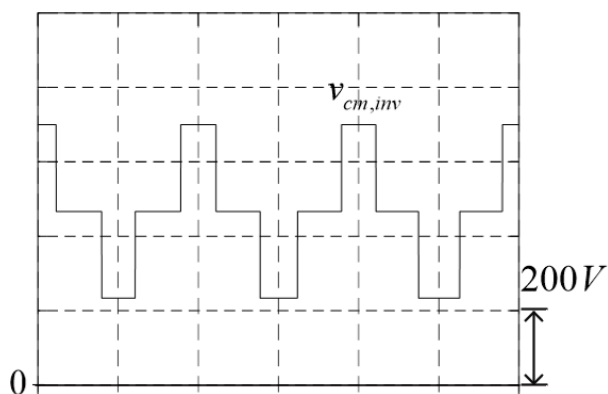
รูปที่ 2.16 แผนภาพการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state)



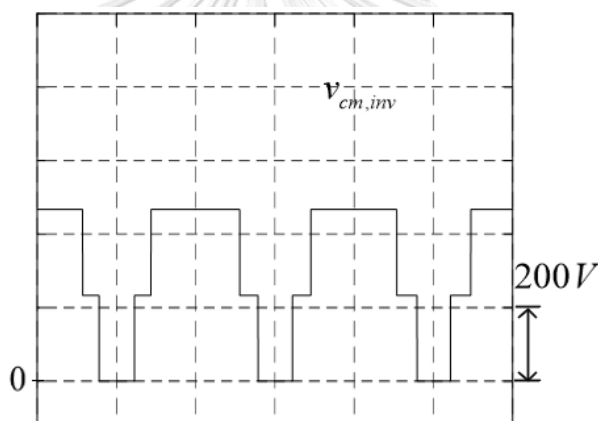
รูปที่ 2.17 แผนภาพการมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state)

จากรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่าเป็นการใช้แรงดันลำดับศูนย์เพื่อยืดให้สวิตช์เฟสใดเฟสหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ทำงานในสถานะปิดวงจรตลอดช่วงเวลาการมอดูเลต ส่งผลให้แรงดันโหมตรวมที่ได้มีลักษณะเป็นขั้นบันได ตามสถานะเปิด-ปิดสวิตช์ที่เหลืออีก 2 เฟส จำนวน 4 ขั้น ใน 1 คาบการสวิตช์ ดังรูปที่ 2.18 ตรงกันข้ามกับรูปที่ 2.17 จะเป็นการใช้แรงดันลำดับศูนย์ในการยืดให้สวิตช์เฟสใดเฟส

หนึ่งของอินเวอร์เตอร์ทำงานในสถานะเปิดวงจรตลอดตลอดช่วงการมอดูเลต ได้ลักษณะของแรงดันโหมตร่วมดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 ลักษณะของแรงดันโหมตร่วมอินเวอร์เตอร์จากการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state)



รูปที่ 2.19 ลักษณะของแรงดันโหมตร่วมอินเวอร์เตอร์จากการมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state)

จากการจำลองเบื้องต้นของแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state) และ 2-arm (off-state) โดยใช้แรงดันบัสไฟตรง $v_d = 700\text{ V}$ ในการจำลอง พบว่ารูปคลื่นแรงดันโหมตร่วมนี้เป็นไปตามนิยามในสมการที่ (2.28) กล่าวคือ ในการมอดูเลตสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ สวิตช์จะทำงานเพียง 2 เฟสและขนาดของแรงดันโหมตร่วมที่เกิดขึ้นมีค่าแวกเตอร์แรงดันตามสถานะการสวิตช์ในแต่ละรูปแบบของการมอดูเลตแบบ 2-arm ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงสถานะการสวิตช์พร้อมขนาดแรงดันโหมตร่วมอินเวอร์เตอร์ของการมอดูเลต

2-arm (on-state)

Vector	S_u	S_v	S_w	$v_{inv,C}$
\mathbf{V}_7	1	1	1	v_d
\mathbf{V}_2	1	1	0	$\frac{2}{3}v_d$
\mathbf{V}_1	1	0	0	$\frac{1}{3}v_d$

ตารางที่ 2.2 แสดงสถานะการสวิตช์พร้อมขนาดแรงดันโหมตร่วมอินเวอร์เตอร์ของการมอดูเลต

2-arm (off-state)

Vector	S_u	S_v	S_w	$v_{inv,C}$
\mathbf{V}_0	0	0	0	0
\mathbf{V}_2	1	1	0	$\frac{2}{3}v_d$
\mathbf{V}_1	1	0	0	$\frac{1}{3}v_d$

จากการพิจารณาลักษณะและการเกิดแรงดันโหมตร่วมทั้ง 2 ส่วนหลักในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง คือ แรงดันโหมตร่วมในส่วนของวงจรทบระดับและส่วนของอินเวอร์เตอร์พบว่าขนาดของแรงดันโหมตร่วมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์จะมีค่าสูงสุด และจากวงจรสมมูลโหมตร่วมแสดงให้เห็นว่า แรงดันโหมตร่วมรวมของระบบเป็นตัวกระตุ้นตัวเก็บประจุแผงที่แผงพีวีให้เกิดกระแสรั่วไหลความถี่สูงไหลเป็นวงรอบกลับเข้าระบบ ดังนั้นถ้าต้องการลดกระแสรั่วไหลความถี่สูงผ่านการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบที่มีขนาดสูงที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ จำเป็นจะต้องใช้การวิเคราะห์อนุกรมฟูริเยร์เป็นเครื่องมือในการศึกษาพฤติกรรมของแรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจรเป็นแนวทางต่อไป

2.3 การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันโหมตร่วมโดยใช้อนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series)

เนื่องจากแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบ $v_{cm,t}$ เกิดจากแรงดันโหมตร่วมของทั้งวงจรทบระดับ $v_{B,C}$ และอินเวอร์เตอร์สามเฟส $v_{inc,C}$ โดยที่ความถี่การสวิตช์ f_{sw} จะเป็นองค์ประกอบที่มีค่าสูงอย่างมีนัยสำคัญต่อกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นและจากรูปแสดงผลการจำลองเบื้องต้นของสัญญาณ

แรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจรจะเห็นได้ว่ามีลักษณะฟังก์ชันทางเวลาเป็นแบบรายคาบ จึงสามารถวิเคราะห์แรงดันโหมตร่วมทั้งสองนี้ที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ได้ ตามสมการที่ (2.30)

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_o t + b_n \sin n\omega_o t) \quad (2.30)$$

จากอนุกรมฟูรีเยร์ ประกอบไปด้วยเทอมสัมประสิทธิ์ (coefficient) สำคัญดังนี้

$$a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(t) dt$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \cos\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt$$

โดยที่

L คือ ครึ่งคาบเวลาของที่ใช้พิจารณาสัญญาณ

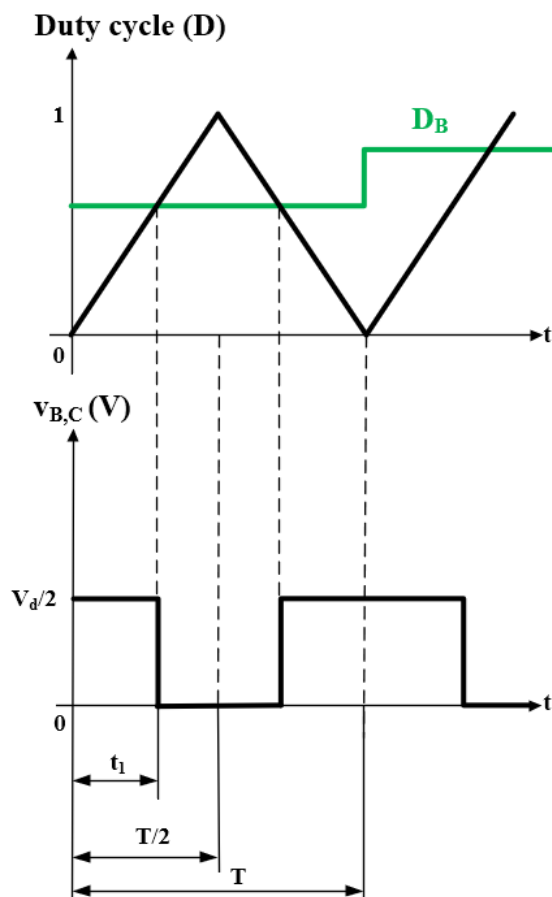
a_0 คือ องค์ประกอบของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

a_n คือ องค์ประกอบของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับฮาร์มอนิกลำดับที่ n

b_n คือ องค์ประกอบของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับฮาร์มอนิกลำดับที่ n

2.3.1 การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับด้วยอนุกรมฟูรีเยร์

การเกิดแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 การสร้างแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับใน 1 คาบการสวิตช์ การมอดูเลตสร้างแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับจะใช้สัญญาณคลื่นพาสสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับค่าวัฏจักรงานของแรงดันโหมตร่วมจากวงจรทระดับ เกิดพัลส์แรงดันโหมตร่วมเป็นจังหวะเปิด-ปิดเพื่อสร้างค่าเฉลี่ยแรงดันด้านออกของวงจรตามต้องการ



รูปที่ 2.20 การสร้างแรงดันโหมตรง่วมของวงจรระดับใน 1 คาบการสวิตช์

เมื่อพิจารณารูปคลื่นของสัญญาณแรงดันโหมตรง่วมของวงจรระดับในช่วงเวลาครึ่งคาบการสวิตช์ ($T/2$) สามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 , a_n และ b_n ของวงจรระดับ ได้ดังนี้

พิจารณาสัมประสิทธิ์ a_0 จะได้

$$\begin{aligned}
 a_{0,Boost} &= \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} f(x) dx \\
 &= \frac{1}{T/2} \left(\int_0^{t_1} \frac{v_d}{2} dx + \int_{t_1}^{T/2} 0 dx \right) \\
 \therefore a_{0,Boost} &= \frac{v_d}{2} \left(\frac{t_1}{T/2} \right)
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์ a_n จะได้

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \\
 &= \frac{2}{T/2} \int_0^{T/2} f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx \\
 &= \frac{2}{T/2} \left[\int_0^{t_1} \frac{1}{2} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx + 0 \right] \\
 &= \frac{2}{T/2} \left[\frac{1}{2} v_d \left(\frac{\sin\left(\frac{n\pi t_1}{T/2}\right) - \sin\left(\frac{n\pi(0)}{T/2}\right)}{\frac{n\pi}{T/2}} \right) \right]
 \end{aligned}$$

จะได้

$$a_{n,Boost} = \frac{v_d}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi t_1}{T/2}\right) \quad (2.32)$$

เมื่อนิยามเทอมวัฏจักรงานในครึ่งคาบเวลา คือ $Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$ จะสามารถเขียนสมการที่ (2.32) ให้อยู่ในเทอมของวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ได้ดังสมการที่ (2.33)

$$a_{n,Boost} = \frac{v_d}{n\pi} \sin(n\pi D_B) \quad (2.33)$$

เมื่อ D_B คือ ค่าวัฏจักรงานของแรงดันโหมตร่วมในวงจรทระดับที่ใช้ในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์

พิจารณาสัมประสิทธิ์ b_n ใน 1 คาบเวลา จะได้ $b_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{n\pi t}{T/2}\right) dt$ และเมื่อพิจารณารูป

คลื่นสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับพบว่า มีลักษณะซ้ำคาบและสมมาตรตามแนวแกน y ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของฟังก์ชันคู่ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ b_n ของวงจรทระดับ $b_{n,Boost} = 0$

จากรูปสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทและวงจรอินเวอร์เตอร์ พบว่าทั้งสองวงจรทำงานที่ความถี่สูงและมีลักษณะสัญญาณสมมาตรกันแบบฟังก์ชันคู่ ดังนั้นในการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันโหมตร่วมโดยใช้อนุกรมฟูรีเยร์จะพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบ a_n ของสัญญาณเท่านั้น เนื่องจาก a_0 เป็นองค์ประกอบของความถี่ไฟฟ้ากระแสตรงและ $b_n = 0$

2.3.2 การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยอนุกรมฟูรีเยร์

การเกิดแรงดันโหมตร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการสวิตช์ทั้ง 3 เฟสของอินเวอร์เตอร์ตามตารางที่ 2.3 จึงแบ่งการวิเคราะห์แรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ได้ 3 แบบ คือ 1) การมอดูเลตแบบ 3-arm 2) การมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state) และ 3) การมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state)

รูปที่ 2.21 แสดงการมอดูเลตแบบ 3-arm สร้างแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ด้วยค่าวิฏจักรงานสูงสุด (D_{\max}) ค่ากลาง (D_{med}) และค่าต่ำสุด (D_{\min}) เมื่อพิจารณารูปคลื่นของสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ในช่วงเวลาครึ่งคาบการสวิตช์ ($T/2$) สามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ a_n ของอินเวอร์เตอร์ ($a_{n,\text{inv}}$) ได้ดังสมการที่ (2.34)

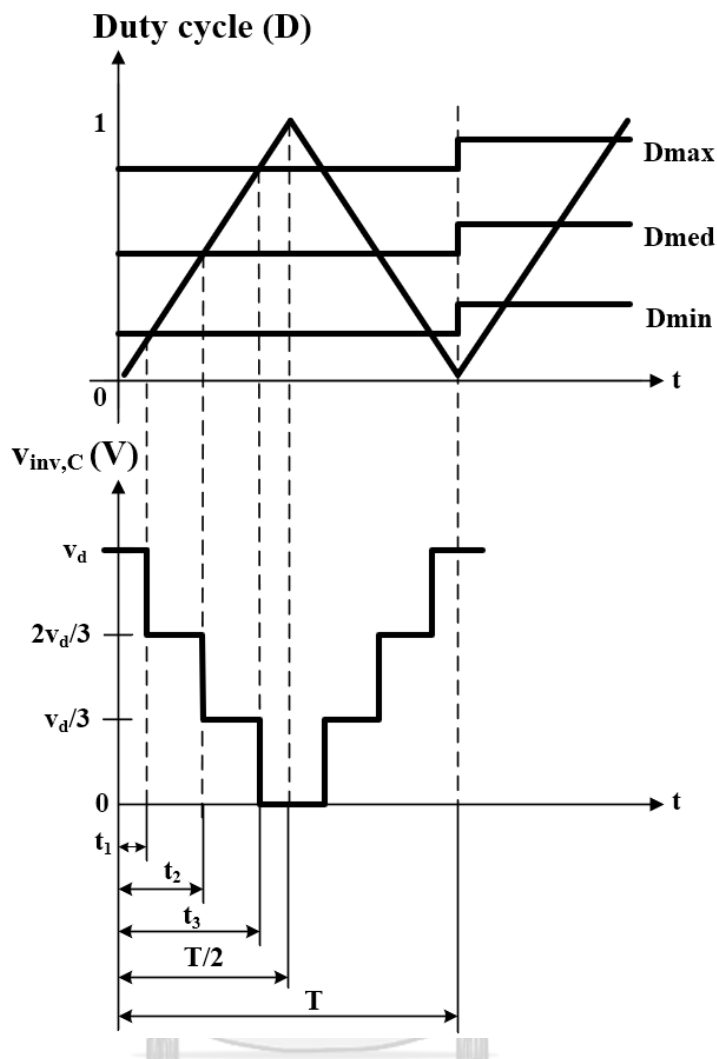
$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \\ &= \frac{2}{T/2} \int_0^{T/2} f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx \\ &= \frac{2}{T/2} \left[\int_0^{t_1} 0 dx + \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{3} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx + \int_{t_2}^{t_3} \frac{2}{3} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx + \int_{t_3}^{T/2} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx \right] \end{aligned}$$

จะได้

$$a_{n,\text{inv}} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin\left(\frac{n\pi t_1}{T/2}\right) + \sin\left(\frac{n\pi t_2}{T/2}\right) + \sin\left(\frac{n\pi t_3}{T/2}\right) \right] \quad (2.34)$$

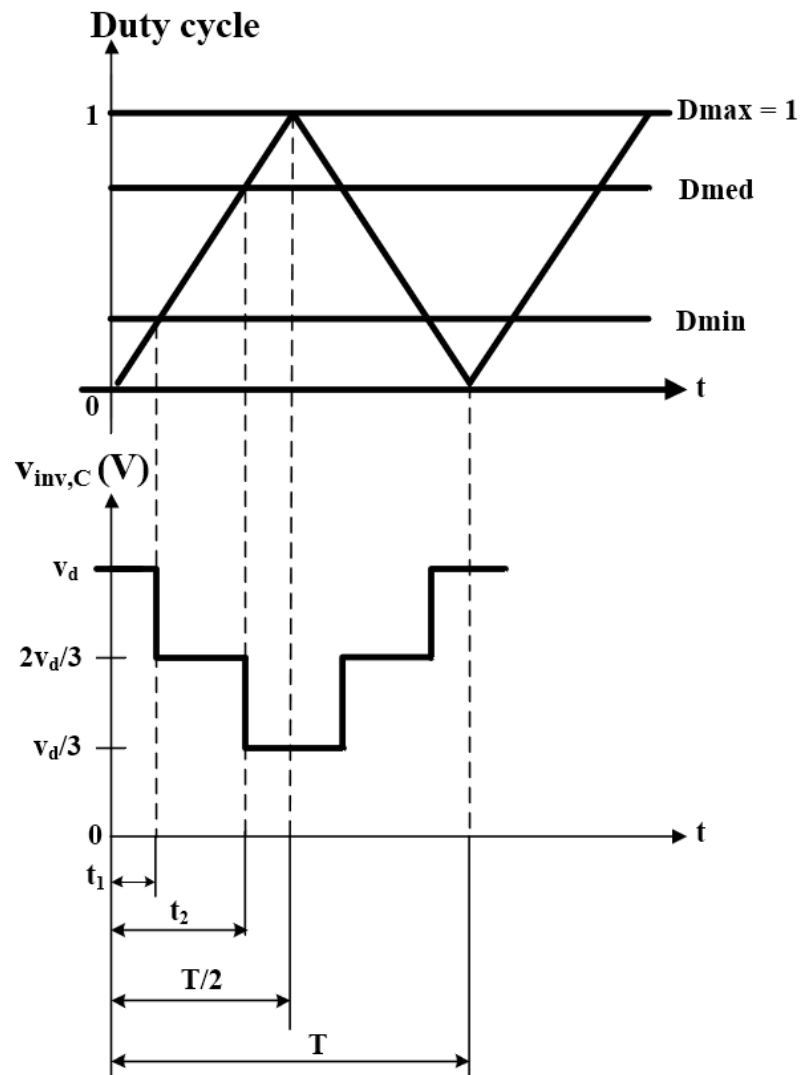
และสามารถเขียนสมการที่ (2.34) ให้อยู่ในเทอมของวิฏจักรการทำงานของสวิตช์ (Duty Cycle, D) ได้ดังสมการที่ (2.35)

$$a_{n,\text{inv}} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin(n\pi D_{\max}) + \sin(n\pi D_{\text{med}}) + \sin(n\pi D_{\min}) \right] \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.21 แรงดันโหมตร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์ใน 1 คาบการสวิตช์

จากรูปที่ 2.22 แสดงการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state) สร้างแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ด้วยวัฏจักรงานค่ากลาง (D_{med}) และค่าต่ำสุด (D_{min}) เนื่องจากค่าสูงสุด (D_{max}) ถูกแรงดันลำดับศูนย์ดึงให้อยู่ในสถานะปิดวงจรตลอด โดยในช่วงเวลาครึ่งคาบการสวิตช์ ($T/2$) สามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ a_n ของอินเวอร์เตอร์ที่เกิดจากการมอดูเลตลักษณะนี้ ($a_{n,On}$) ได้ดังสมการที่ (2.36)



รูปที่ 2.22 การสร้างแรงดันโหมคร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state)

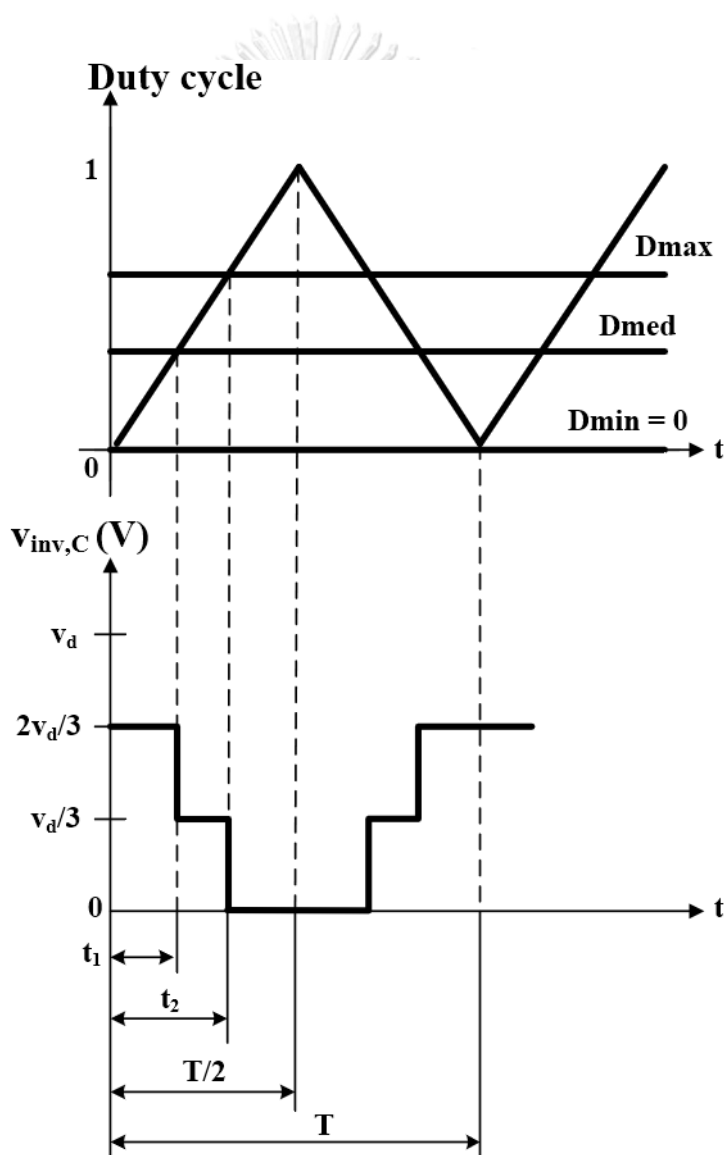
$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \\
 &= \frac{2}{T/2} \int_0^{T/2} f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx \\
 &= \frac{2}{T/2} \left[\int_0^{t_1} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx + \int_{t_1}^{t_2} \frac{2}{3} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx + \int_{t_2}^{T/2} \frac{1}{3} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx \right]
 \end{aligned}$$

จะได้

$$a_{n,On} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin\left(\frac{n\pi t_1}{T/2}\right) + \sin\left(\frac{n\pi t_2}{T/2}\right) \right] \quad (2.36)$$

และสามารถเขียนสมการที่ (2.36) ให้อยู่ในเทอมของวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (Duty Cycle, D) ได้ดังสมการที่ (2.37)

$$a_{n,On} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin(n\pi D_{\min}) + \sin(n\pi D_{\text{med}}) \right] \quad (2.37)$$



รูปที่ 2.23 การสร้างแรงดันโหมตรง่วมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการมอดูเลตแบบ 2 arms (off)

จากรูปที่ 2.23 แสดงการมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state) สร้างแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ด้วยค่าวัฏจักรงานสูงสุด (D_{\max}) และค่ากลาง (D_{med}) เนื่องจากค่าต่ำสุด (D_{\min}) ถูกแรงดันลำดับศูนย์ยึดให้อยู่ในสถานะเปิดวงจรตลอด โดยในช่วงเวลาครึ่งคาบการสวิตช์ ($T/2$) สามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ a_n ของอินเวอร์เตอร์ที่เกิดจากการมอดูเลตลักษณะนี้ ($a_{n,\text{off}}$) ได้ดังสมการที่ (2.38)

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \\ &= \frac{2}{T/2} \int_0^{T/2} f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx \\ &= \frac{2}{T/2} \left[\int_0^{t_1} \frac{2}{3} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx + \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{3} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx + \int_{t_2}^{T/2} 0 dx \right] \end{aligned}$$

จะได้

$$a_{n,\text{off}} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin\left(\frac{n\pi t_1}{T/2}\right) + \sin\left(\frac{n\pi t_2}{T/2}\right) \right] \quad (2.38)$$

และสามารถเขียนสมการที่ (2.38) ให้อยู่ในเทอมของวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (Duty Cycle, D) ได้ดังสมการที่ (2.39)

$$a_{n,\text{off}} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin(n\pi D_{\text{med}}) + \sin(n\pi D_{\max}) \right] \quad (2.39)$$

จากการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทบระดับและอินเวอร์เตอร์โดยใช้อนุกรมฟูรีเยร์ได้สัมประสิทธิ์ a_n ของการมอดูเลตรูปแบบต่าง ๆ สรุปได้ดังตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ a_n ของการมอดูเลตแบบต่าง ๆ ซึ่งจะนำไปใช้ในการพิจารณาเพื่อเลือกแรงดันลำดับศูนย์ (D_z) ในการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เกิดการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมสำหรับระบบอินเวอร์เตอร์พีวีชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลงในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ a_n ของการมอดูเลตแบบต่าง ๆ

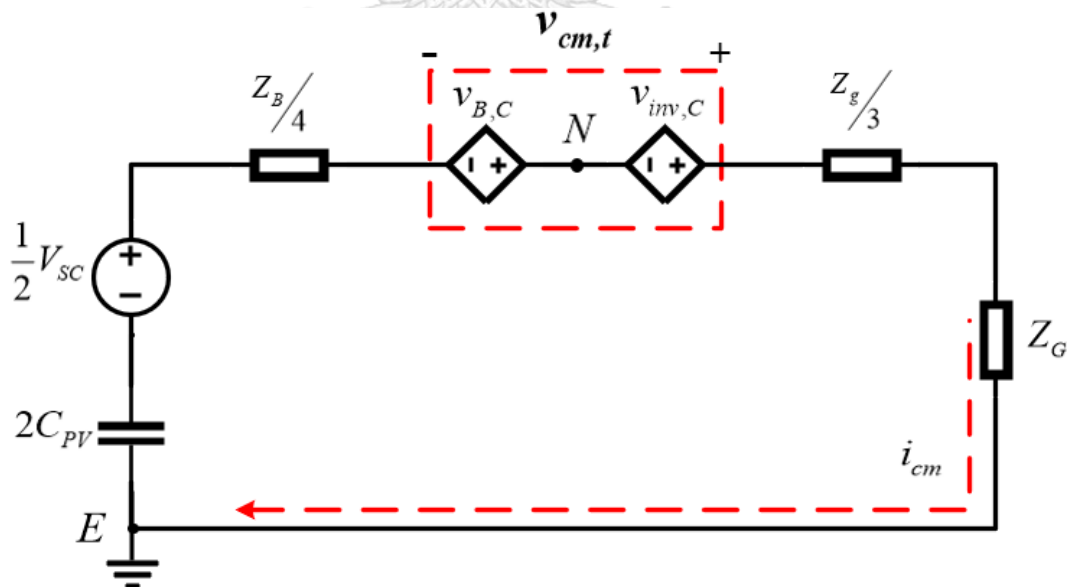
รูปแบบการมอดูเลต	ค่าสัมประสิทธิ์ a_n
วงจรถบระดับ	$a_{n,Boost} = \frac{v_d}{n\pi} \sin(n\pi D_B)$
อินเวอร์เตอร์แบบ 3-arm	$a_{n,inv} = \frac{2v_d}{3n\pi} [\sin(n\pi D_{max}) + \sin(n\pi D_{med}) + \sin(n\pi D_{min})]$
อินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (on-state)	$a_{n,on} = \frac{2v_d}{3n\pi} [\sin(n\pi D_{med}) + \sin(n\pi D_{min})]$
อินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (off-state)	$a_{n,off} = \frac{2v_d}{3n\pi} [\sin(n\pi D_{med}) + \sin(n\pi D_{max})]$

บทที่ 3

การลดทอนแรงดันโหมตร่วมด้วยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ของอินเวอร์เตอร์

หลังจากศึกษาวงจรสมมูลโหมตร่วมของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดสองภาคสามเฟส ชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลงที่แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดแรงดันโหมตร่วมจากวงจรระดับกับอินเวอร์เตอร์ และศึกษาการวิเคราะห์อนุกรมฟูรีเยร์ของแรงดันโหมตร่วมทั้งสองดังกล่าวแล้ว สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการลดกระแสรั่วไหลความถี่สูงผ่านการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบ โดยพิจารณาจากการมอดูเลตวงจรระดับและอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เกิดการหักล้างกันเองของแรงดันโหมตร่วมทั้งสอง การมอดูเลตจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ 1) การมอดูเลตวงจรระดับโดยการกลับเฟสสัญญาณคลื่นพาห์ 2) การมอดูเลตวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แขน (3-arm modulation) และ 2 แขน (2-arm modulation) ทั้งแบบดั้งเดิม (conventional method) และ แบบดัดแปลงที่จะนำเสนอ (modified method) อีกทั้งยังกล่าวถึงข้อจำกัดของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบดัดแปลงที่นำเสนอในที่สุดท้ายอีกด้วย

3.1 ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลโหมตร่วมอย่างง่ายของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง [7]

จากรูปที่ 3.1 วงจรสมมูลโหมตร่วมอย่างง่ายโดยไม่พิจารณาผลของวงจรกรองทางด้านไฟตรง และไฟสลับของงานวิจัย [7] แสดงถึงการเชื่อมต่อกันระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณโหมตร่วมทั้งสอง คือ แรงดันโหมตร่วมจากวงจรทระดับและแรงดันโหมตร่วมจากวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ Kirchhoff's voltage law พิจารณาวงจรสมมูลโหมตร่วมดังกล่าวจะพบความสัมพันธ์ของแรงดันโหมตร่วมทั้งสองดังสมการ (3.1)

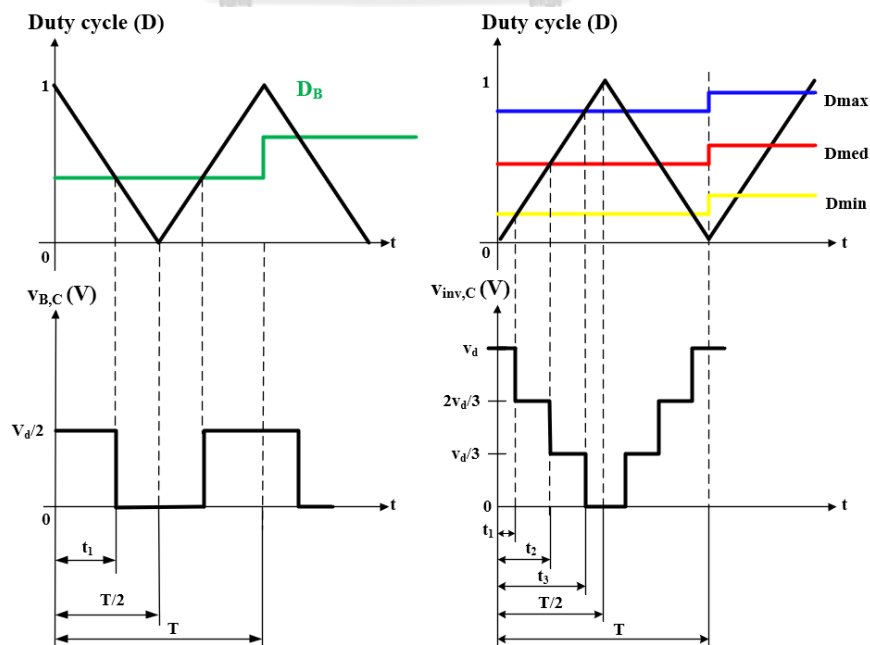
$$v_{cm,t} = v_{B,C} + v_{inv,C} \quad (3.1)$$

หรือกล่าวได้ว่า แรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับและวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถหักล้างกันเพื่อให้แรงดันโหมตร่วมรวมของระบบลดลง ทั้งยังส่งผลต่อขนาดที่ลดลงของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยไม่มีการเพิ่มอุปกรณ์อื่น ๆ เข้ามาในระบบ ปรับเพียงการมอดูเลตสัญญาณเท่านั้น ซึ่งตัวแปรสำคัญมี 2 ประการ คือ

1) อิสระของการใช้สัญญาณคลื่นพาสสามเหลี่ยมของวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์โดยจะต้องมีลักษณะของสัญญาณที่ซิงโครไนซ์ในคาบการสวิตช์เดียวกันและมีการกลับเฟสกัน เพื่อให้ทิศทางของแหล่งจ่ายสัญญาณโหมตร่วมทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน

2) อิสระของการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ที่ใช้ในการออกแบบการมอดูเลตสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้แรงดันโหมตร่วมทั้งสองแหล่งกำเนิดดังกล่าวหักล้างกันที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์

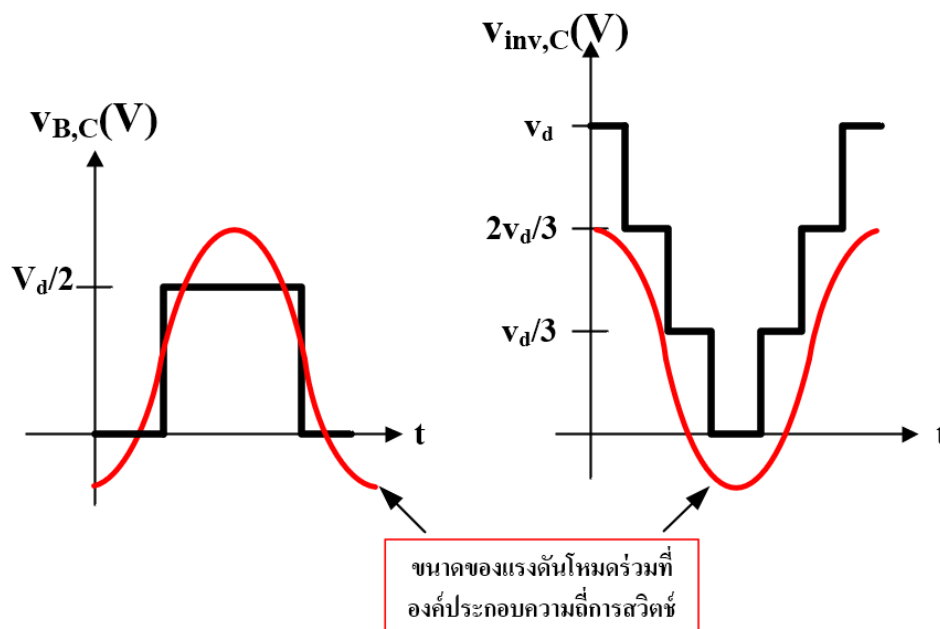
จากอิสระทั้งสองประการที่กล่าวไว้ข้างต้น งานวิจัยนี้จะเลือกใช้การกลับสัญญาณคลื่นพาสสามเหลี่ยมให้มีมุมเฟสตรงข้ามกันระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สัญญาณคลื่นพาสสามเหลี่ยมที่ใช้สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์

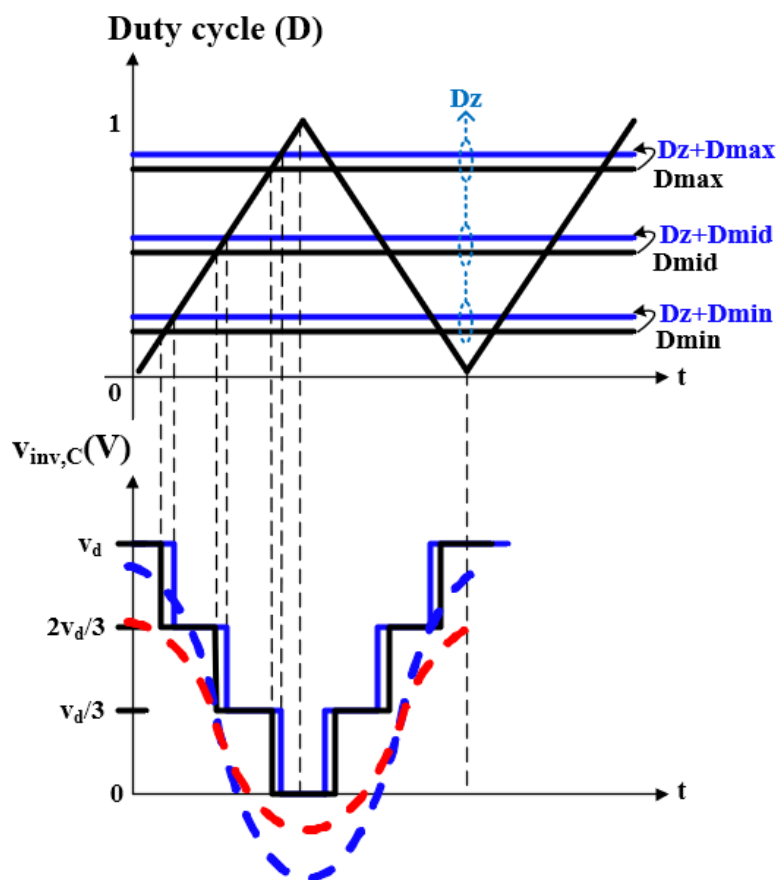
3.2 แนวคิดหลักในการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบ

จากการศึกษาวงจรสมมูลและสัญญาณแรงดันโหมตร่วมรวมในบทที่ 2 พบว่าองค์ประกอบแรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจรที่ความถี่การสวิตช์จะมีขนาดสูงและส่งผลกระทบต่อ การเกิดกระแสรั่วไหลอย่างมีนัยสำคัญ [1],[6, 7] ดังนั้นแนวคิดการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของงานวิจัยนี้ จะมุ่งเน้นไปที่การปรับวิธีมอดูเลตสร้างแรงดันด้านออกของทั้งสองวงจร เพื่อให้เกิดหักล้างกันเองของแรงดันโหมตร่วมระหว่างวงจรทบระดับและอินเวอร์เตอร์ โดยเฉพาะที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ โดยส่วนแรกจะ ใช้การกลับสัญญาณคลื่นพาห์ของวงจรทบระดับ ส่งผลให้แรงดันโหมตร่วมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์มีทิศตรงข้ามกับอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขนาดแรงดันโหมตร่วมของทั้งสองวงจรที่ซ่อนอยู่ ณ องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ หลังจากกลับคลื่นพาห์ของวงจรทบระดับ

จากการใช้อิสรระที่มี คือ การกลับสัญญาณคลื่นพาห์สามเหลี่ยมในวงจรทบระดับไปแล้วนั้น ยังเหลือประเด็นในส่วนของขนาดแรงดันโหมตร่วมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสม เพื่อทำให้เกิดการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วมทั้งสองอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นอิสรระอีกประการหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การใช้แรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมปรับความกว้างในการมอดูเลตสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้ขนาดแรงดันโหมตร่วมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีขนาดเท่ากับขนาดแรงดันโหมตร่วมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ของวงจรทบระดับ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การใช้อิสระของแรงดันลำดับศูนย์ในงานวิจัยนี้

หรือกล่าวโดยสรุป คือ การลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบในงานวิจัยนี้จะใช้อิสระ 2 ประการ คือ การกลับสัญญาณคลื่นพาห์สามเหลี่ยมในขั้นตอนการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรทระดับให้มีมุมเฟสตรงข้ามกับสัญญาณคลื่นพาห์สามเหลี่ยมที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ และการเลือกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อให้เกิดการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วมอย่างเหมาะสมซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.4.1

การลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดสองภาคสามเฟสเชื่อมต่อกับโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง ในงานวิจัยนี้จะแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ คือ 1) การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แขน และ 2) การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2 แขน โดยแบ่งการนำเสนอเป็นการมอดูเลตแบบดั้งเดิมและการมอดูเลตแบบดัดแปลง

3.3 การลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยใช้การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม

เนื้อหาในส่วนนี้จะนำเสนอการลดทอนแรงดันโหมตร่วมของระบบ เมื่อใช้การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม (Conventional modulation) แบ่งตามลักษณะการทำงานของสวิตช์เปิด-ปิดอินเวอร์เตอร์ แบบ 3 แขน (3-arm) และ 2 แขน (2-arm) ได้ดังนี้

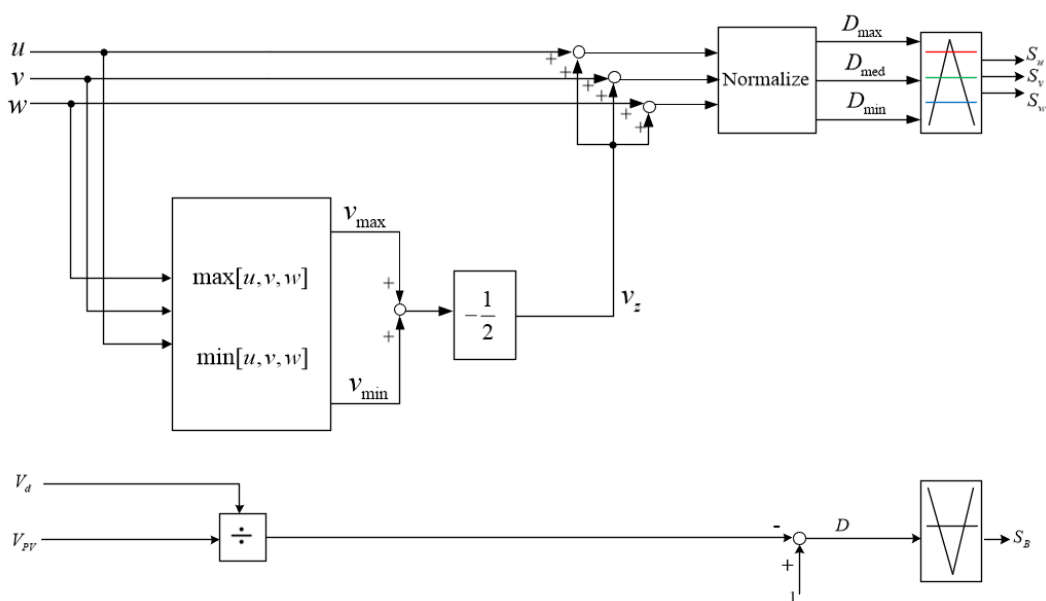
3.3.1 การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แขนแบบดั้งเดิม (Conventional 3-arm modulation)

การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แขน ในงานวิจัยนี้จะใช้เรียกลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีสถานะสวิตช์เปิด-ปิด ทั้ง 3 เฟส และใช้วิธีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ (Carrier-Based PWM Modulation) สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ โดยใช้แรงดันลำดับศูนย์ดังสมการที่ (3.2)

$$\bar{v}_z = -\frac{1}{2}[\max(v_{uN}, v_{vN}, v_{wN}) + \min(v_{uN}, v_{vN}, v_{wN})] \quad (3.2)$$

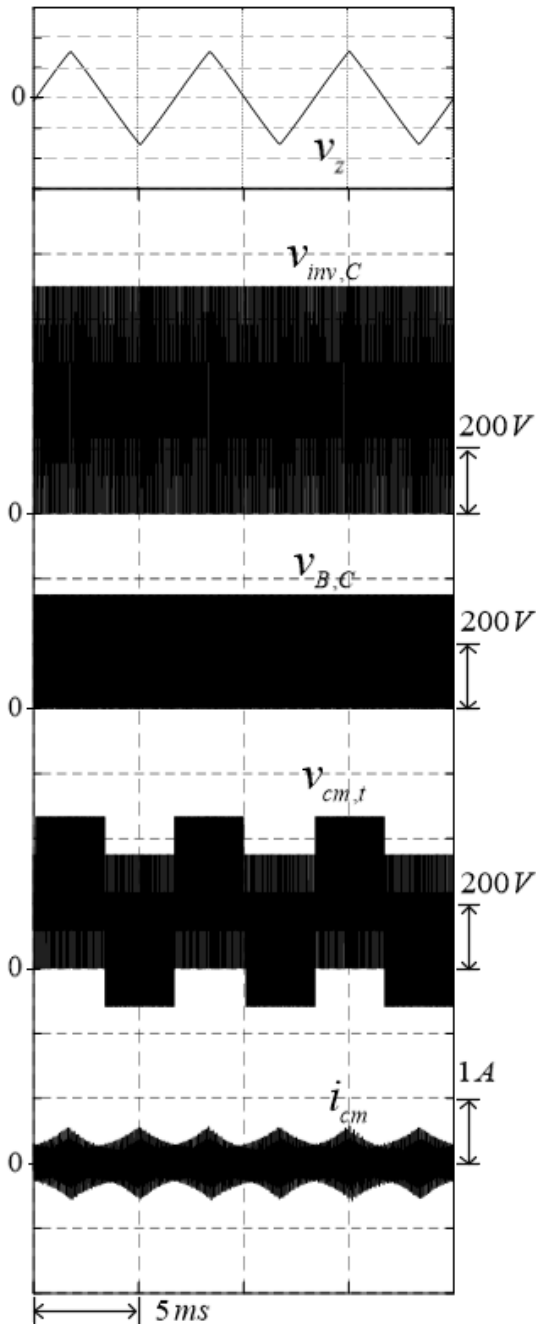
หรือเป็นการใช้แรงดันลำดับศูนย์ที่เป็นค่ากลางของสัญญาณแรงดันคำสั่งทั้ง 3 เฟส เพิ่มเข้าไปในขั้นตอนการมอดูเลตเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

จากหลักการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แขน แบบดั้งเดิม เมื่อพิจารณาพร้อมกับการมอดูเลตวงจรทระดับ สามารถแสดงผ่านแผนภาพการมอดูเลตสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ดังรูปที่ 3.5

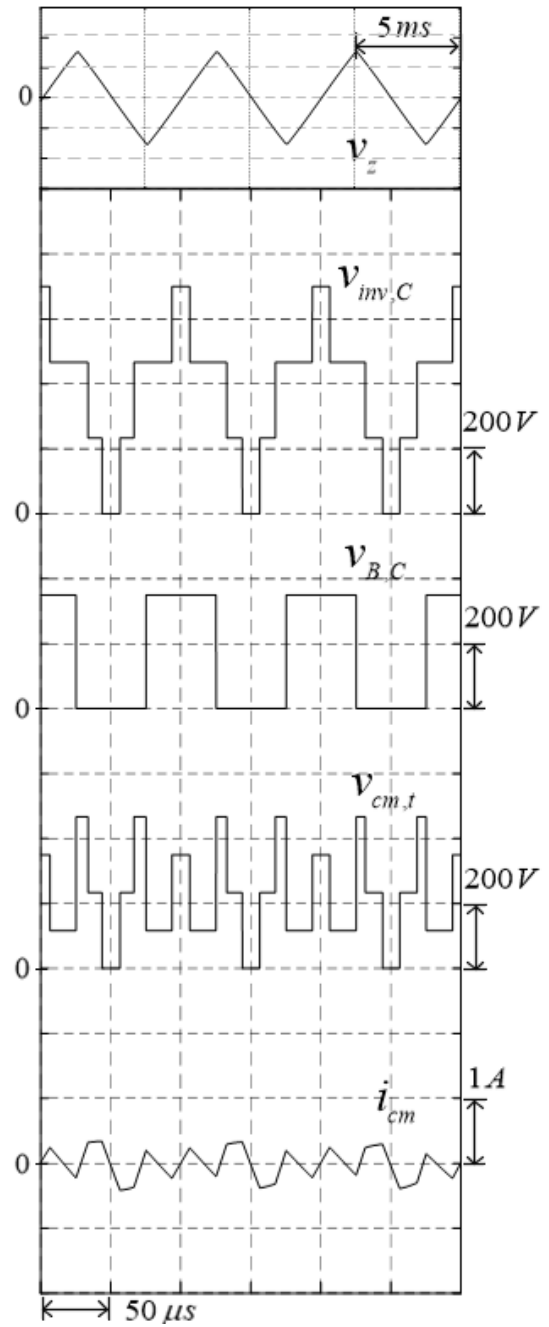


รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แขน และวงจรทระดับ

และสามารถแสดงผลการจำลองระบบพืวีอินเวอร์เตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อศึกษาสัญญาณแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลจากมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แขนแบบดั้งเดิม โดยกำหนดให้แรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 700 V, แรงดันที่แมงพืวีเท่ากับ 350 V และความถี่การสวิตช์ของทั้งสองวงจรเท่ากับ 10 kHz ได้ผลจำลองดังรูปที่ 3.6 และสเปกตรัมของแรงดันโหมตร่วมรวมและกระแสรั่วไหลดังรูปที่ 3.7



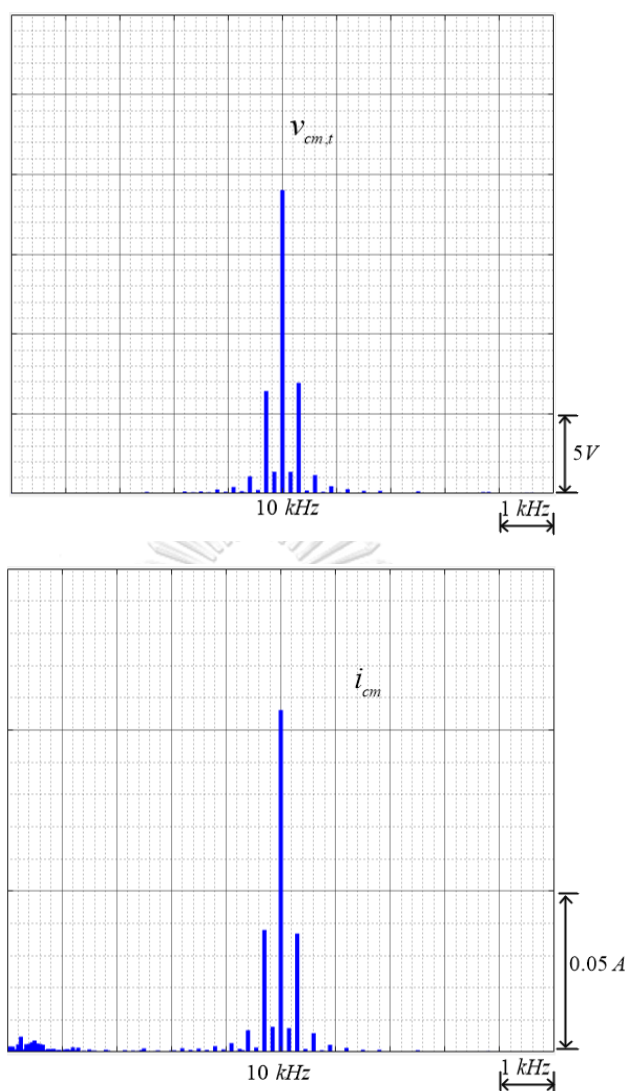
(ก) พิจารณาในสเกลเวลาของความถี่มูลฐาน



(ข) พิจารณาในสเกลเวลาของความถี่สวิตช์

รูปที่ 3.6 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมด้วยการมอดูเลต 3 แชนแบบดั้งเดิม พร้อมการใช้

คลื่นพาร์กกลับเฟสระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.7 ผลจำลองสเปกตรัมของแรงดันและกระแสโหมดร่วมด้วยการมอดูเลต 3 แชนแบบดั้งเดิม พร้อมการใช้คลื่นพาร์กกลับเฟสระหว่างวงจรระดับและอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.6 (ข) เมื่อใช้คลื่นพาร์กกลับเฟสระหว่างวงจรระดับและอินเวอร์เตอร์พบว่า แรงดันโหมดร่วมของวงจรระดับและอินเวอร์เตอร์เกิดการหักล้างกันจริง ทำให้แรงดันโหมดรวมรวมลดลง ทั้งยังส่งผลต่อกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 3.7 สเปกตรัมของแรงดันโหมดรวมรวมและกระแสรั่วไหล ณ องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ 10 kHz ยังไม่เกิดการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์

3.3.2 การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดั้งเดิม (Conventional 2-arm modulation)

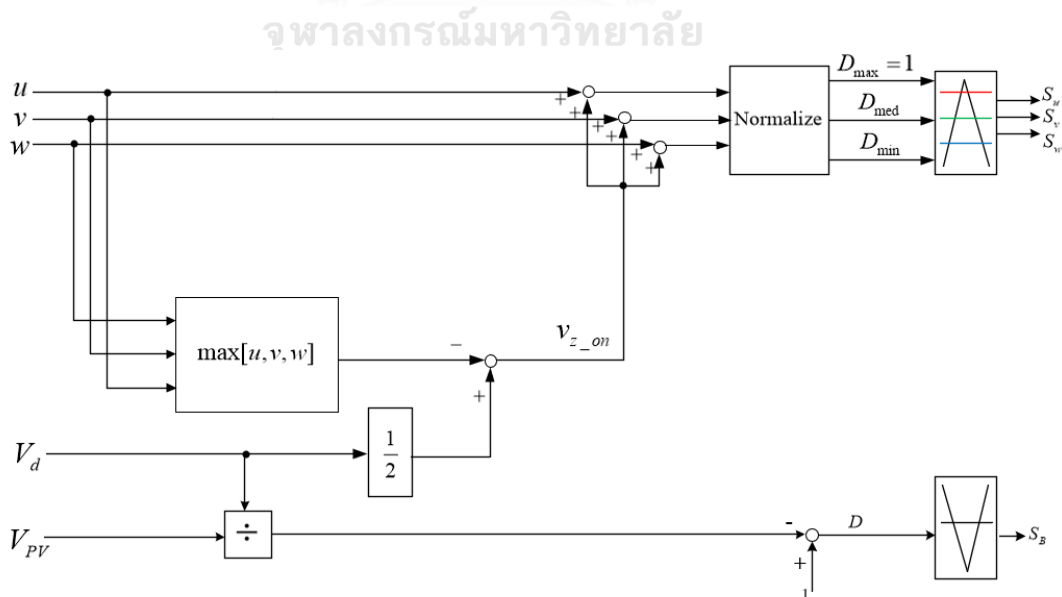
การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดั้งเดิม ในงานวิจัยนี้จะใช้เรียกการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ที่มีสถานะสวิตช์ทำงานเปิด-ปิด เพียง 2 เฟส และมีเฟสใดเฟสหนึ่งเปิดหรือปิดวงจรตลอดการทำงาน โดยใช้วิธีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์สสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ เช่นเดียวกันกับการมอดูเลตแบบ 3 แขน แต่ใช้แรงดันลำดับศูนย์ดังสมการ (3.3) และ (3.4) ตามลักษณะการเปิดและปิดวงจรของสวิตช์เฟสหนึ่งเฟสใดตลอดการทำงาน ตามลำดับ

$$\overline{v_{z,on}} = \frac{V_d}{2} - \max[v_{uN}, v_{vN}, v_{wN}] \quad (3.3)$$

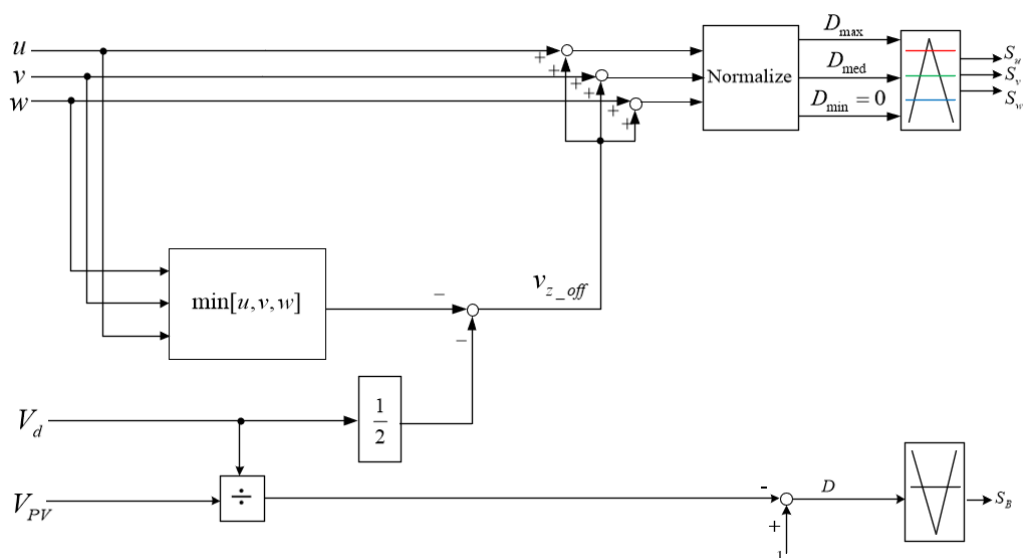
$$\overline{v_{z,off}} = -\frac{V_d}{2} - \min[v_{uN}, v_{vN}, v_{wN}] \quad (3.4)$$

จากหลักการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขน แบบดั้งเดิม เมื่อพิจารณาพร้อมกับการการมอดูเลตวงจรทบระดับ สามารถแสดงผ่านแผนภาพการมอดูเลตสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.3) และ (3.4) จะเห็นว่า การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm นั้นไม่สามารถกำหนดอิสระแรงดันลำดับศูนย์ได้ เนื่องจากติดขัดจำกัดของแรงดันบัสไฟตรงทางด้านบวกและทางด้านลบ ทำให้อิสระของการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ของการมอดูเลตแบบ 2 แขน ถูกจำกัดเหลือเพียงรูปแบบการทำงานสลับโหมตระหว่าง 2-arm (on-state) และ 2-arm (off-state) ที่เหมาะสมเท่านั้น

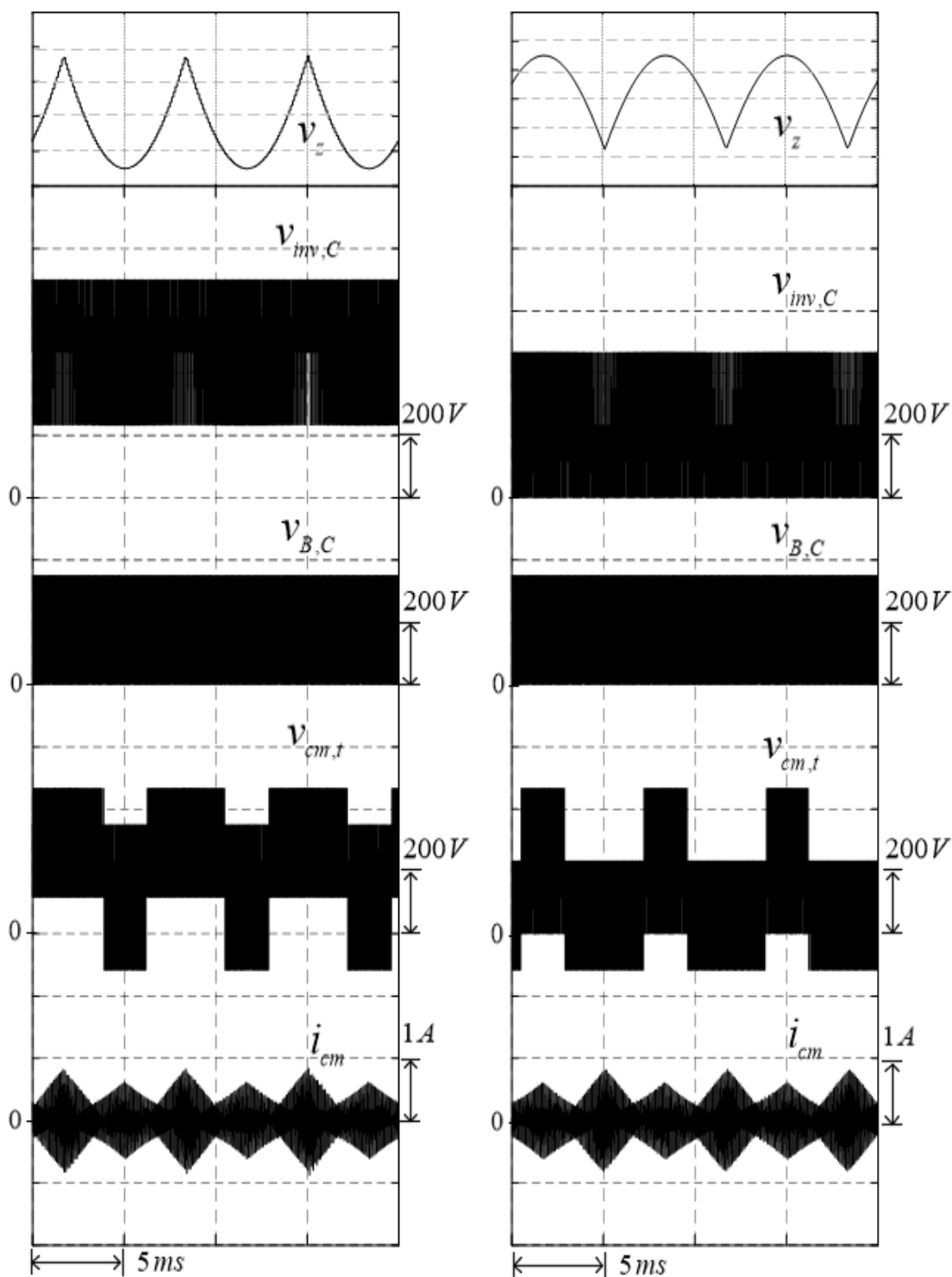


รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (on-state) และวงจรทบระดับ



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (off-state) และวงจรทบระดับ

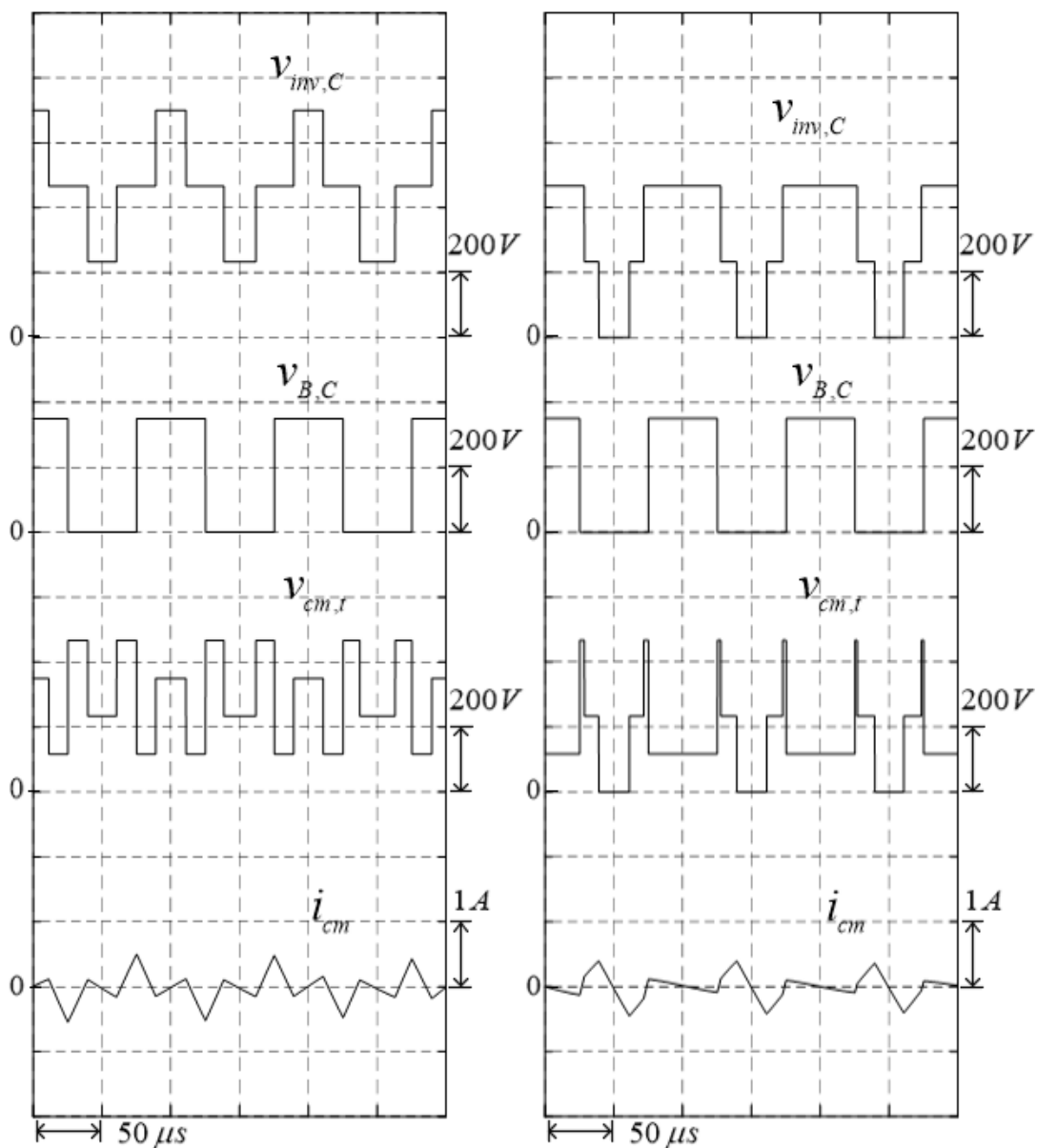
และสามารถแสดงผลการจำลองระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อศึกษาสัญญาณแรงดันโหมตรวมและกระแสรั่วไหลจากมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดั้งเดิม โดยใช้เงื่อนไขเดียวกับการจำลองของวิธีมอดูเลต 3 แขน แบบดั้งเดิม ได้ผลจำลองดังรูปที่ 3.10-รูปที่ 3.11 และสเปกตรัมของแรงดันโหมตรวมรวมและกระแสรั่วไหล ดังรูปที่ 3.12



(ก) 2-arm (on-state) Modulation

(ข) 2-arm (off-state) Modulation

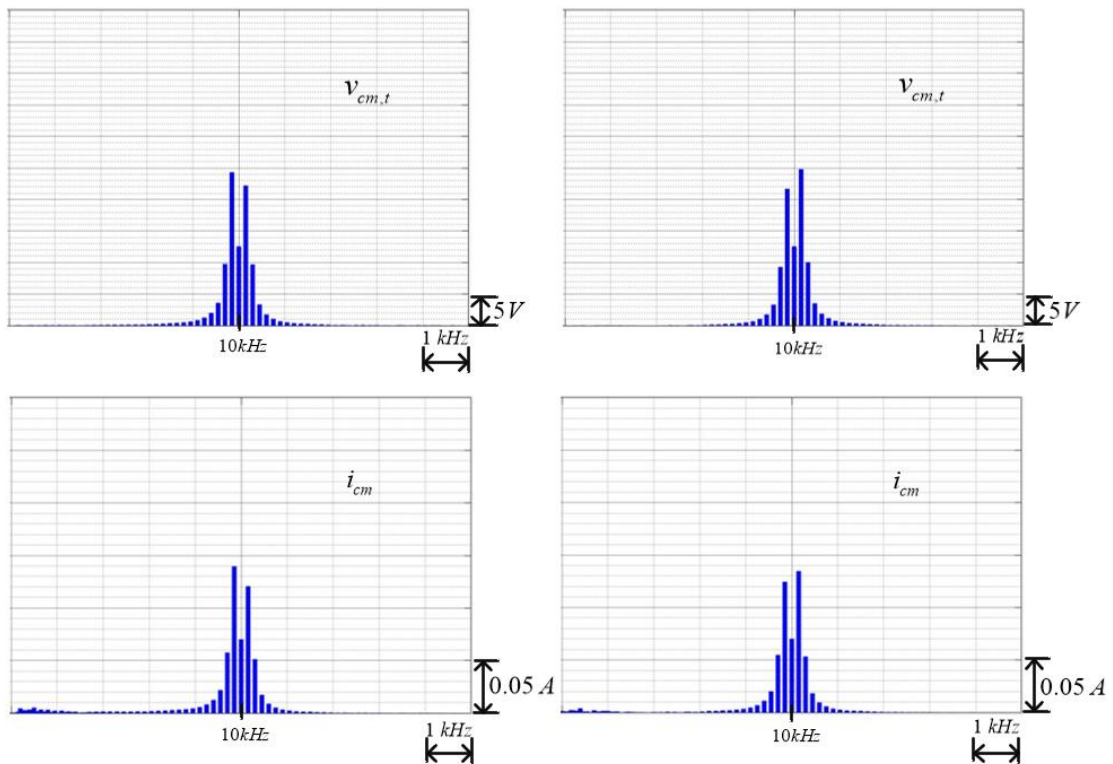
รูปที่ 3.10 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมด้วยการมอดูเลต 2 แขนแบบดั้งเดิม ในสเกลเวลาของความถี่มูลฐาน พร้อมการใช้คลื่นพาร์กกลับเฟสระหว่างวงจรทบระดับและอินเวอร์เตอร์



(ก) 2-arm (on-state) Modulation

(ข) 2-arm (off-state) Modulation

รูปที่ 3.11 ผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมด้วยการมอดูเลต 2 แขนแบบดั้งเดิม ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ พร้อมการใช้คลื่นพาร์กกลับเฟสระหว่างวงจรทบระดับและอินเวอร์เตอร์



(ก) 2-arm (on-state) Modulation

(ข) 2-arm (off-state) Modulation

รูปที่ 3.12 ผลจำลองสเปกตรัมของแรงดันและกระแสโหมตรงร่วมด้วยการมอดูเลตแบบ 2 แขน พร้อมการใช้คลื่นพาทกลับเฟสระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.11 เมื่อใช้คลื่นพาทกลับเฟสระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์พบว่าแรงดันโหมตรงร่วมของวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์เกิดการหักล้างกันจริง ทำให้แรงดันโหมตรงรวมลดลง ทั้งยังส่งผลต่อกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน และพิจารณารูปที่ 3.12 สเปกตรัมของแรงดันและกระแสโหมตรงรวมจากการมอดูเลต 2-arm แบบดั้งเดิมพบว่า ที่ความถี่การสวิตช์ 10 kHz แรงดันโหมตรงรวมและกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลต 2-arm (on-state) และ 2-arm (off-state) จะมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะกระแสรั่วไหลในรูปที่ รูปที่ 3.10 พบว่า ลักษณะของการเกิดกระแสรั่วไหลจะมีค่ายอดสลับช่วงสูงช่วงต่ำกันไปมา กล่าวคือ ในช่วงเวลาเดียวกัน การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (on-state) จะเกิดค่ายอดสูงสุดของกระแสรั่วไหล แต่ในทางกลับกันจะเกิดค่ายอดต่ำสุดของกระแสรั่วไหลขึ้นในการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (off-state)

ข้อสรุปของแรงดันโหมตรงร่วมและกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจากการปรับวิธีมอดูเลตสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้สัญญาณคลื่นพาทในลักษณะกลับเฟสระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ และศึกษาผลของแรงดันโหมตรงร่วมและกระแสรั่วไหลจากการปรับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาทของอินเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมทั้ง 2 ประเภท

คือ การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แขน และการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2 แขน สามารถสรุปข้อจำกัดและการดัดแปลงการมอดูเลตที่เป็นได้ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อสรุปของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ต่าง ๆ

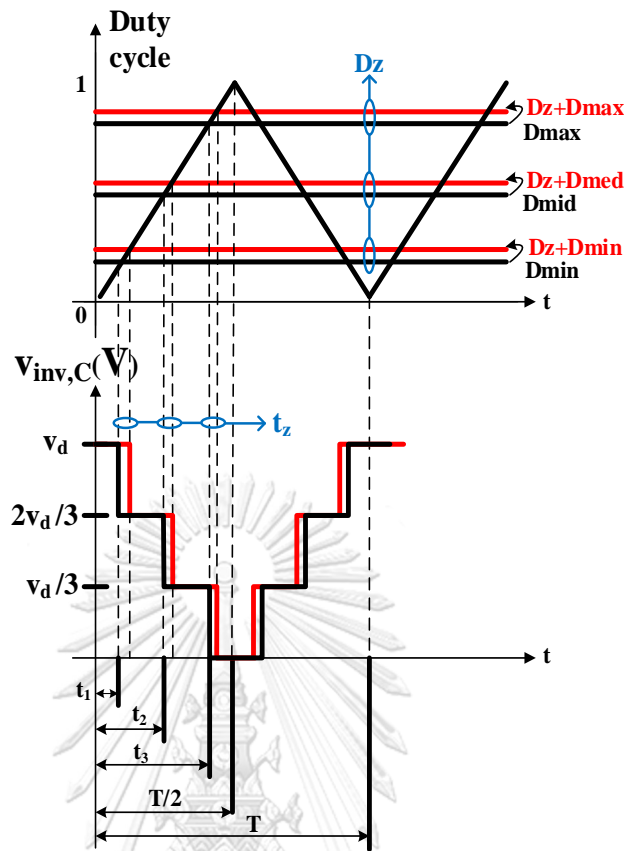
รูปแบบการมอดูเลต	ข้อสรุป	
	จำนวนการสวิตช์ (เฟส)	อิสระในการใช้แรงดันลำดับศูนย์
3-arm Modulation	3	สามารถดัดแปลงแรงดันลำดับศูนย์เพื่อให้เกิดการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วมอย่างสมบูรณ์ที่ความถี่การสวิตช์ได้
2-arm Modulation	2	ไม่สามารถปรับแรงดันลำดับศูนย์ได้ เนื่องจากขีดจำกัดของแรงดันบัสไฟตรงทางด้านบวกและทางด้านลบ แต่ยังสามารถดัดแปลงเลือกช่วงการทำงานในแต่ละโหมตของ 2-arm เพื่อให้กระแสรั่วไหลมีค่าน้อยสุดได้

3.4 การลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยใช้การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบดัดแปลง

เนื้อหาในส่วนนี้จะนำเสนอการลดทอนแรงดันโหมตร่วมของระบบ เมื่อใช้การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบดัดแปลง (Modified modulation) แบ่งตามลักษณะการทำงานของสวิตช์เปิด-ปิดอินเวอร์เตอร์ แบบ 3 แขน และ 2 แขน ได้ดังนี้

3.4.1 การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แขน แบบดัดแปลง (3-arm Modified)

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการมอดูเลตแบบ 3 แขนแบบดัดแปลงที่มีการเพิ่มเข้ามาของแรงดันลำดับศูนย์เป็นค่าใด ๆ ให้กับแรงดันคำสั่งทั้ง 3 เฟส เพื่อให้เกิดการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมตร่วมทั้งสอง โดยจะทำการวิเคราะห์อนุกรมฟูรีเยร์พิจารณาหาแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การกำเนิดแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเพิ่มเข้ามาของแรงดันลำดับศูนย์เป็นค่าคงที่ใด ๆ

จากรูปที่ 3.13 การกำเนิดแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเพิ่มเข้ามาของแรงดันลำดับศูนย์เป็นค่าคงที่ใด ๆ เมื่อพิจารณารูปคลื่นของสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเพิ่มเข้ามาของแรงดันลำดับศูนย์ในเทอมของวิถีจักรงาน (D_z) ในช่วงเวลาครึ่งคาบการสวิตช์ ($T/2$) สามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ a_n ของอินเวอร์เตอร์ ($a_{n,inv}$) ได้ดังสมการที่ (3.5)

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \\
 &= \frac{2}{T/2} \int_0^{T/2} f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx \\
 &= \frac{2}{T/2} \left[\int_0^{t_1+t_z} 0 dx + \int_{t_1+t_z}^{t_2+t_z} \frac{1}{3} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx + \int_{t_2+t_z}^{t_3+t_z} \frac{2}{3} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx + \int_{t_3+t_z}^{T/2} v_d \cos\left(\frac{n\pi x}{T/2}\right) dx \right]
 \end{aligned}$$

จะได้

$$a_{n,inv} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin\left(\frac{n\pi t_1 + t_z}{T/2}\right) + \sin\left(\frac{n\pi t_2 + t_z}{T/2}\right) + \sin\left(\frac{n\pi t_3 + t_z}{T/2}\right) \right] \quad (3.5)$$

เมื่อ $Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$ จะสามารถเขียนสมการที่ (3.5) ให้อยู่ในเทอมของวัฏจักรการทำงาน ของสวิตช์ ได้ดังสมการที่ (3.6)

$$a_{n,inv} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin(n\pi(D_{max} + D_z)) + \sin(n\pi(D_{med} + D_z)) + \sin(n\pi(D_{min} + D_z)) \right] \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) จะได้ตัวแปรอิสระ คือ ค่าวัฏจักรของแรงดันลำดับศูนย์ (D_z) ที่บวกเข้าไปทั้ง 3 เฟสของแรงดันคำสั่งพร้อมกัน ซึ่งสามารถใช้ตัดแปลงการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เกิดการหักล้าง กับสัญญาณโหมตร่วมที่มาจากวงจรทบระดับที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ได้

จากสมการที่ (3.1) เพื่อทำให้เกิดการหักล้างกันโดยสมบูรณ์ของแรงดันโหมตร่วมทั้งสอง จะกำหนดให้สัมพันธ์ของแรงดันโหมตร่วมของวงจรทบระดับในสมการที่ (2.33) เท่ากับของวงจร อินเวอร์เตอร์ใน (3.6) ดังแสดงในสมการที่ (3.7) – (3.8)

$$a_{n,Boost} = a_{n,Inverter} \quad (3.7)$$

$$\sin(n\pi D_B) = \frac{2}{3} \left[\sin n\pi(D_{max} + D_z) + \sin n\pi(D_{med} + D_z) + \sin n\pi(D_{min} + D_z) \right] \quad (3.8)$$

เนื่องจากองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมตร่วมมีนัยสำคัญต่อกระแสรั่วไหล ดังนั้นจะ พิจารณาในกรณี $n = 1$ ในสมการที่ (3.8) เพื่อแก้สมการหาแรงดันลำดับศูนย์ในเทอมของวัฏจักรงาน (D_z) ที่แปรตามจุดทำงานของวงจรทบระดับและวงจรอินเวอร์เตอร์ได้ในเทอมของ D_B และ $D_{max}, D_{med}, D_{min}$, ตามลำดับ ดังแสดงในสมการที่ (3.9) - (3.12)

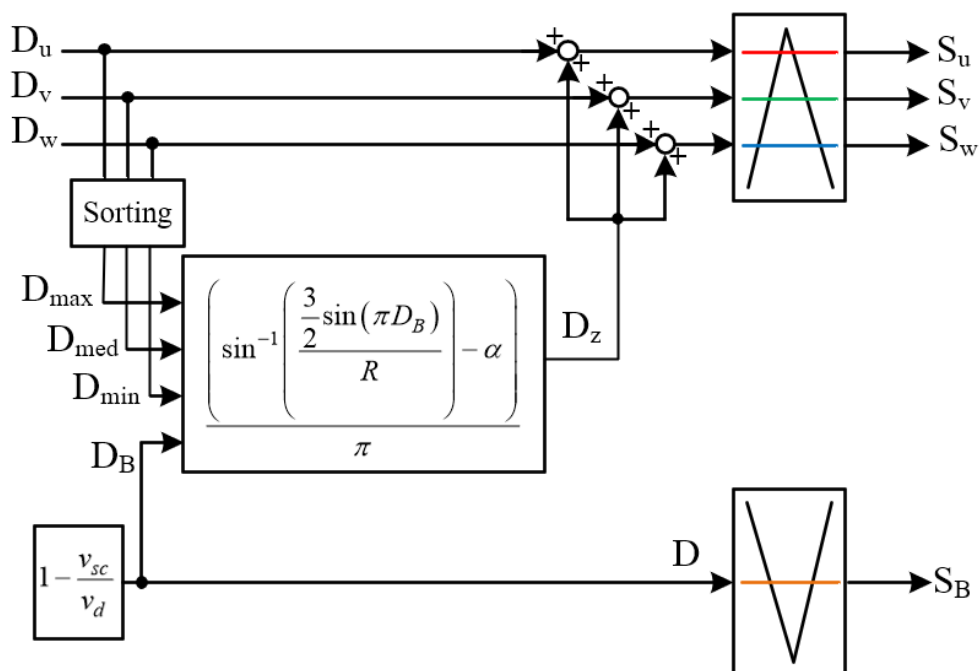
$$D_z = \frac{\left(\sin^{-1} \left(\frac{\frac{3}{2} \sin(\pi D_B)}{R} \right) - \alpha \right)}{\pi} \quad (3.9)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \alpha = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (3.10)$$

$$x = \cos(\pi D_{max}) + \cos(\pi D_{min}) + \sin(\pi(-D_{max} - D_{min})) \quad (3.11)$$

$$y = \sin(\pi D_{max}) + \sin(\pi D_{min}) - \cos \pi(-D_{max} - D_{min}) \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.9) จะได้ค่าแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ในทอมมวักจกรงาน โดยแรงดันลำดับศูนย์ที่ได้นี้ จะแปรตามค่าวักจกรงานของแรงดันทบระดับตามจุดทำงาน MPPT ของแผงพีวีเพื่อให้สร้างสัญญาณแรงดันโหมตรง่วมจากอินเวอร์เตอร์มาหักล้างอย่างสมบูรณ์กับสัญญาณโหมตรง่วมจากวงจรทบระดับ



รูปที่ 3.14 แผนภาพการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แชนแบบดัดแปลง ด้วยวิธีการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสม

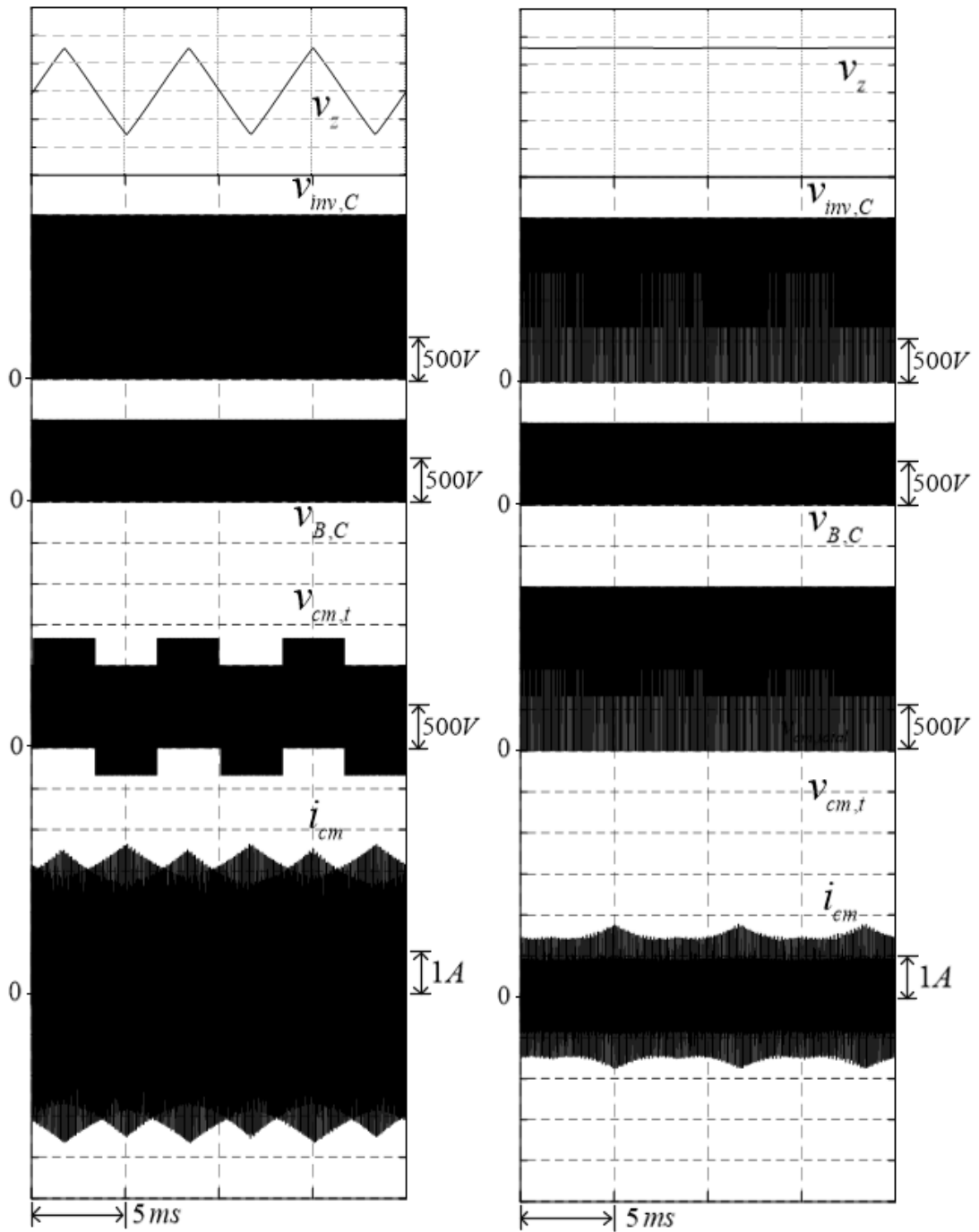
รูปที่ 3.14 แสดงถึงวิธีการมอดูเลตพีดับบิวเอ็มด้วยแรงดันลำดับศูนย์จากสมการที่ (3.9) โดยใช้การกลับสัญญาณคลื่นพาสสามเหลี่ยมในวงจรทบระดับ เพื่อทำให้เกิดการหักล้างกันของแรงดันโหมตรง่วมทั้งสอง ซึ่งจะนำไปทดสอบโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink จำลองการทำงานกับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ชนิด 2 ภาคเชื่อมต่อกับโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง โดยจำลองเปรียบเทียบกับมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แชนแบบดั้งเดิม ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2 และให้ผลจำลองเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แขนแบบตัดแปลง

แหล่งกำเนิดไฟตรงจากแผงโซลาร์ (V_{sc})	1,000 V
แรงดันบัสไฟตรง (V_d)	2,000 V
แรงดันและความถี่ของโครงข่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อ	380 V _{L-L} / 50Hz
อิมพีแดนซ์กริด (Z_G)	10 Ω
ค่าตัวเก็บประจุแผงที่แผงโซลาร์ (Z_{pv})	$C_{pv} = 110\text{nF}, R_{pv} = 1\Omega$
ตัวเหนี่ยวนำของวงจรบดระดับ (L_B)	4.7 mH
ตัวเหนี่ยวนำร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง	820 μH
ตัวเหนี่ยวนำร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ	920 μH
ตัวเหนี่ยวนำที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (Z_L)	6 mH
ความถี่การสวิตช์ของวงจรบดระดับ	10 kHz
ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	10 kHz
กำลังไฟฟ้าพิกัดของอินเวอร์เตอร์	10kVA

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบตัดแปลง

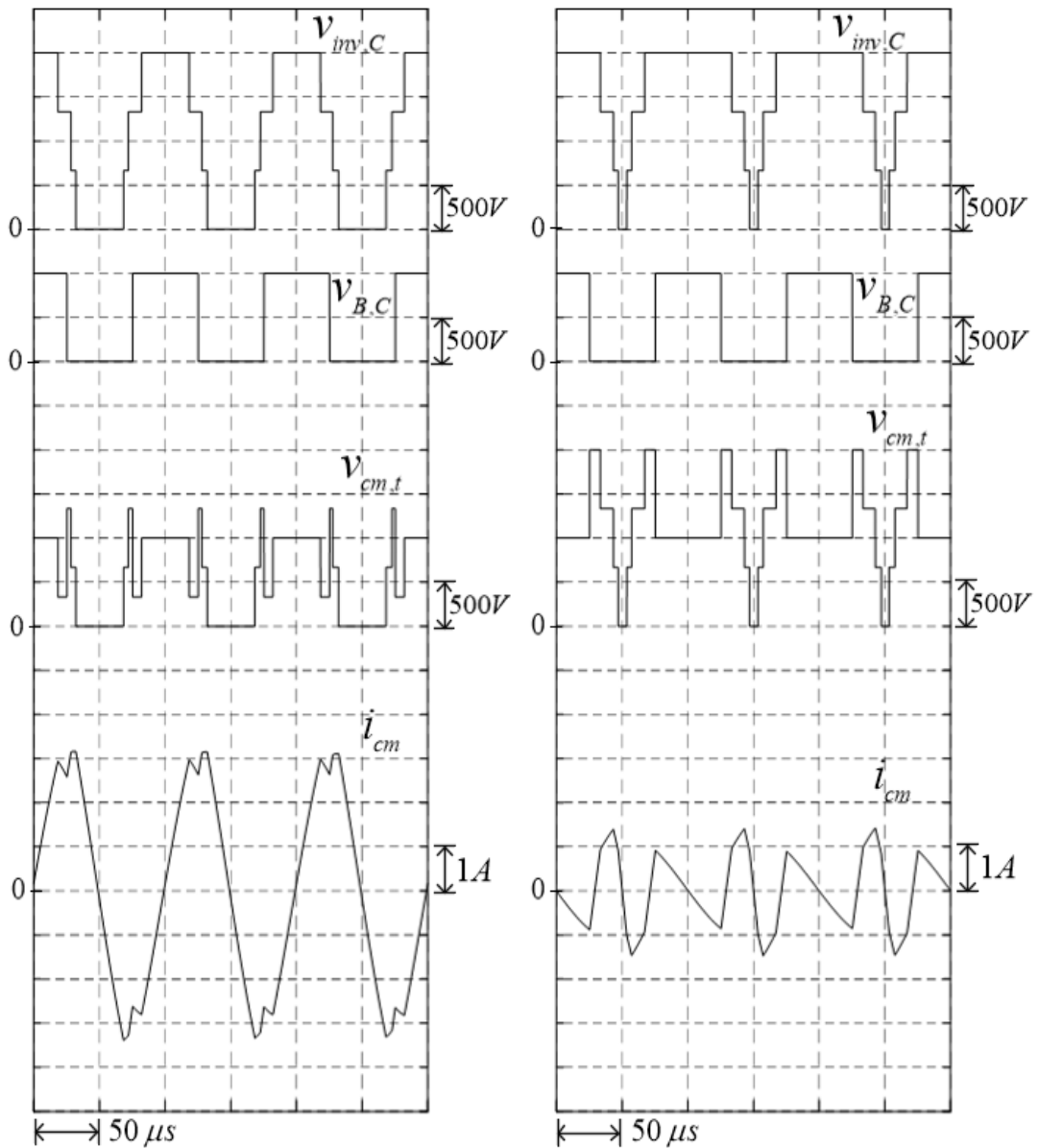
แหล่งกำเนิดไฟตรงจากแผงโซลาร์ (V_{sc})	350 V
แรงดันบัสไฟตรง (V_d)	700 V
แรงดันและความถี่ของโครงข่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อ	380 V _{L-L} / 50Hz
อิมพีแดนซ์กริด (Z_G)	10 Ω
ค่าตัวเก็บประจุแผงที่แผงโซลาร์ (Z_{pv})	$C_{pv} = 110\text{nF}, R_{pv} = 1\Omega$
ตัวเหนี่ยวนำของวงจรบดระดับ (L_B)	4.7 mH
ตัวเหนี่ยวนำร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง	820 μH
ตัวเหนี่ยวนำร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ	920 μH
ตัวเหนี่ยวนำที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (Z_L)	6 mH
ความถี่การสวิตช์ของวงจรบดระดับ	10 kHz
ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	10 kHz
กำลังไฟฟ้าพิกัดของอินเวอร์เตอร์	10kVA



(ก) การมอดูเลต 3 แชนแบบดั้งเดิม

(ข) การมอดูเลต 3 แชนแบบดัดแปลง

รูปที่ 3.15 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสรีโหมตร์ร่วมรวมของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แชน ในสเกลเวลาของความถี่มูลฐาน

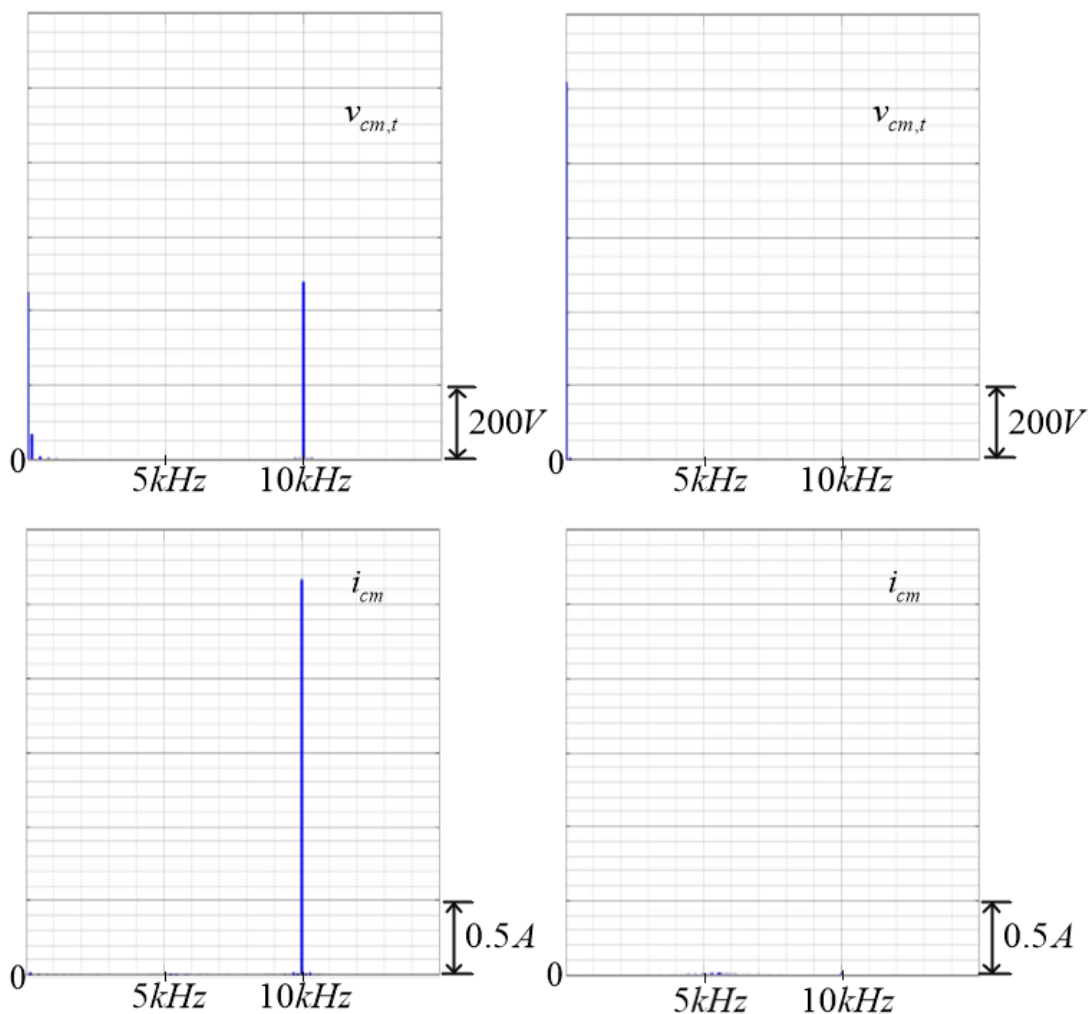


(ก) การมอดูเลต 3 แชนแบบดั้งเดิม

(ข) การมอดูเลต 3 แชนแบบดัดแปลง

รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสรั่วไหลพร้อมรวมของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แชน ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์

จากรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 แสดงผลการจำลองเปรียบเทียบการมอดูเลตทั้งสองแบบพบว่า แรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจรเกิดการหักล้างกันและส่งผลโดยตรงกับกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น โดยกระแสรั่วไหลที่เกิดจากการมอดูเลตแบบดัดแปลง จะมีขนาดค่าน้อยลงประมาณ 50% เมื่อเทียบกับกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบดั้งเดิม



(ก) การมอดูเลต 3 แชนแบบดั้งเดิม (ข) การมอดูเลต 3 แชนแบบดัดแปลง

รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณแรงดันและกระแสโหมตร่วมรวมของ

การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 3 แชน

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของแรงดันโหมตร่วมรวมและกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลต 3 แชนแบบดัดแปลงในรูปที่ 3.17 (ข) พบว่า ณ องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ 10kHz ขนาดของแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบถูกหักล้างได้อย่างสมบูรณ์ เป็นไปตามแนวคิดที่นำเสนอ และส่งผลโดยตรงต่อกระแสรั่วไหลที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ถูกลดลงได้อย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกัน สอดคล้องกับผลของการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจรดังกล่าวข้างต้น แต่จากรูปที่ 3.16 พบว่าการมอดูเลต 3 แชนแบบดัดแปลง ต้องใช้แรงดันบัลไฟตรงสูงถึง 2 kV ระบบจึงจะทำงานได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ต้องแลกมาเพื่อให้เกิดการหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ โดยจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.5

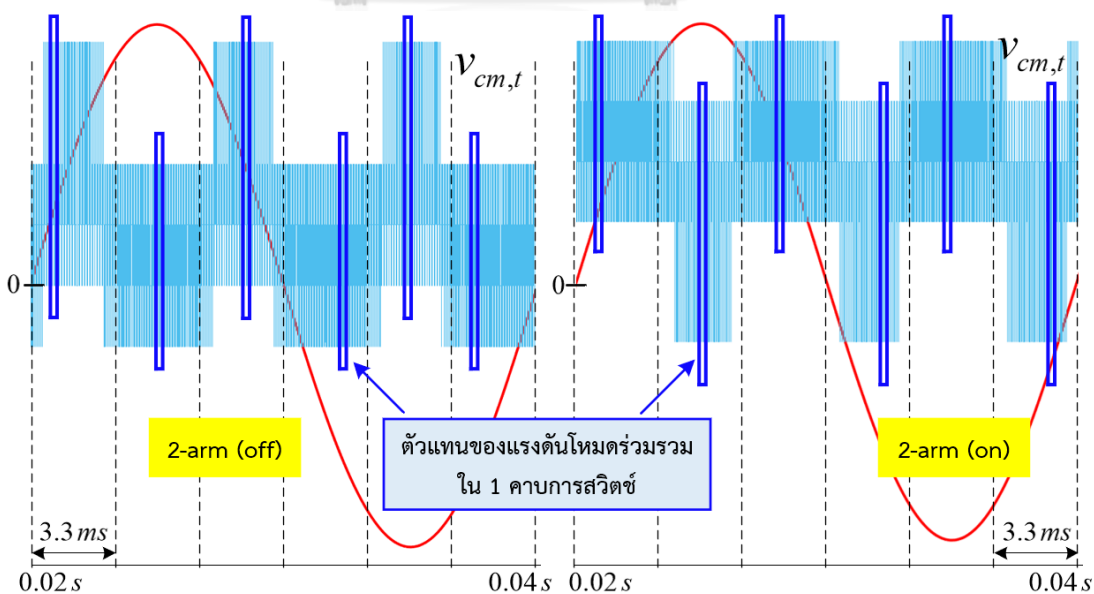
3.4.2 การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขน แบบดัดแปลง (2-arm Modified)

จากที่กล่าวมาข้างต้น แรงดันลำดับศูนย์ของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2 แขน ถูกจำกัดด้วยแรงดันบัสไฟตรงทางด้านบวกและทางด้านลบมีค่าดังสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.4) ทำให้ไม่สามารถดัดแปลงค่าแรงดันลำดับศูนย์ที่ทำให้เกิดการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วมจากวงจรพบระดับและอินเวอร์เตอร์ได้อย่างสมบูรณ์

$$\overline{v_{z,on}} = \frac{V_d}{2} - \max[v_{uN}, v_{vN}, v_{wN}] \quad (3.3)$$

$$\overline{v_{z,off}} = -\frac{V_d}{2} - \min[v_{uN}, v_{vN}, v_{wN}] \quad (3.4)$$

แต่เนื่องจากข้อดีของการมอดูเลตแบบ 2 แขน คือ ใช้จำนวนสวิตช์น้อยกว่าการมอดูเลตแบบ 3 แขน ซึ่งส่งผลโดยตรงกับกำลังความสูญเสียของระบบจะลดลง 1/3 เท่าของการมอดูเลตแบบ 3 แขน ประกอบกับผลการจำลองกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจากการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดั้งเดิมทั้งสองรูปแบบ ดังรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่า ณ ช่วงเวลาเดียวกัน ค่ายอดสูงสุดของกระแสรั่วไหลจะเกิดจากการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (on-state) แต่ในทางกลับกันจะเกิดค่ายอดต่ำสุดของกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบ 2-arm (off-state) หรือกล่าวโดยสรุปคือ กระแสรั่วไหลที่เกิดจากการมอดูเลตทั้งสองรูปแบบจะมีค่ายอดสูง-ต่ำสลับกัน โดยกระแสรั่วไหลนี้เป็นผลมาจากแรงดันโหมตร่วมรวมจากการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจร และเมื่อพิจารณาตัวแทนขนาดแรงดันโหมตร่วมรวมใน 1 คาบเวลาของความถี่มูลฐาน ดังรูปที่ 3.18 ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ จะได้ค่าดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.18 การพิจารณาขนาดของแรงดันโหมตร่วมรวมของแต่ละเซกเตอร์ ใน 1 คาบการสวิตช์

ตารางที่ 3.4 ขนาดของตัวแทนแรงดันโหมตร่วมรวมจากการวิเคราะห์ฟูริเยร์ ของแต่ละเซกเตอร์
ใน 1 คาบการสวิตช์

Modulation	Time (s)					
	0.021	0.025	0.028	0.032	0.035	0.038
2-arm (off-state) (V)	18.59	100.9	19.21	73.75	19.18	73.75
2-arm (on-state) (V)	48.44	19.18	73.75	19.21	101.8	19.21

จากตารางที่ 3.4 พบว่าแรงดันโหมตร่วมรวมของแต่ละโหมตการทำงานของมอดูเลตแบบ 2 แขนในคาบเวลาการสวิตช์จะมีค่ามาก-น้อยสลับกัน

จากข้อสังเกตข้างต้น จึงเกิดสมมติฐานที่ว่า ถ้าสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ที่เกิดจากการมอดูเลตร่วมกันของ 2-arm ทั้งสองรูปแบบ แล้วจะส่งผลให้เกิดค่ายอดต่ำสุดของกระแสรั่วไหลที่มีลักษณะสอดคล้องกับค่ายอดต่ำสุดของการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state) และ 2-arm (off-state) ดังนั้นแนวคิดของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบตัดแปลง คือ การนำแต่ละช่วงของโหมตทำงานแบบ 2 แขน ที่เกิดกระแสรั่วไหลต่ำสุด มาสร้างการมอดูเลตแบบใหม่ โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ฟูริเยร์ ที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมตร่วมจากอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 รูปแบบ เพื่อสร้างสมการการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วมในเชิงความถี่การสวิตช์กับวงจรทบระดับ แล้วเลือกค่าผลต่างน้อยสุด (Δa_n) ในแต่ละโหมตทำงานของ 2-arm ดังสมการที่ (3.13) มากำหนดช่วงการใช้แรงดันลำดับศูนย์ในการสร้างสัญญาณขับสวิตช์ สุดท้ายจะส่งผลให้กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีค่ายอดน้อยที่สุดตามการมอดูเลต 2-arm (on-state) และ 2-arm (off-state)

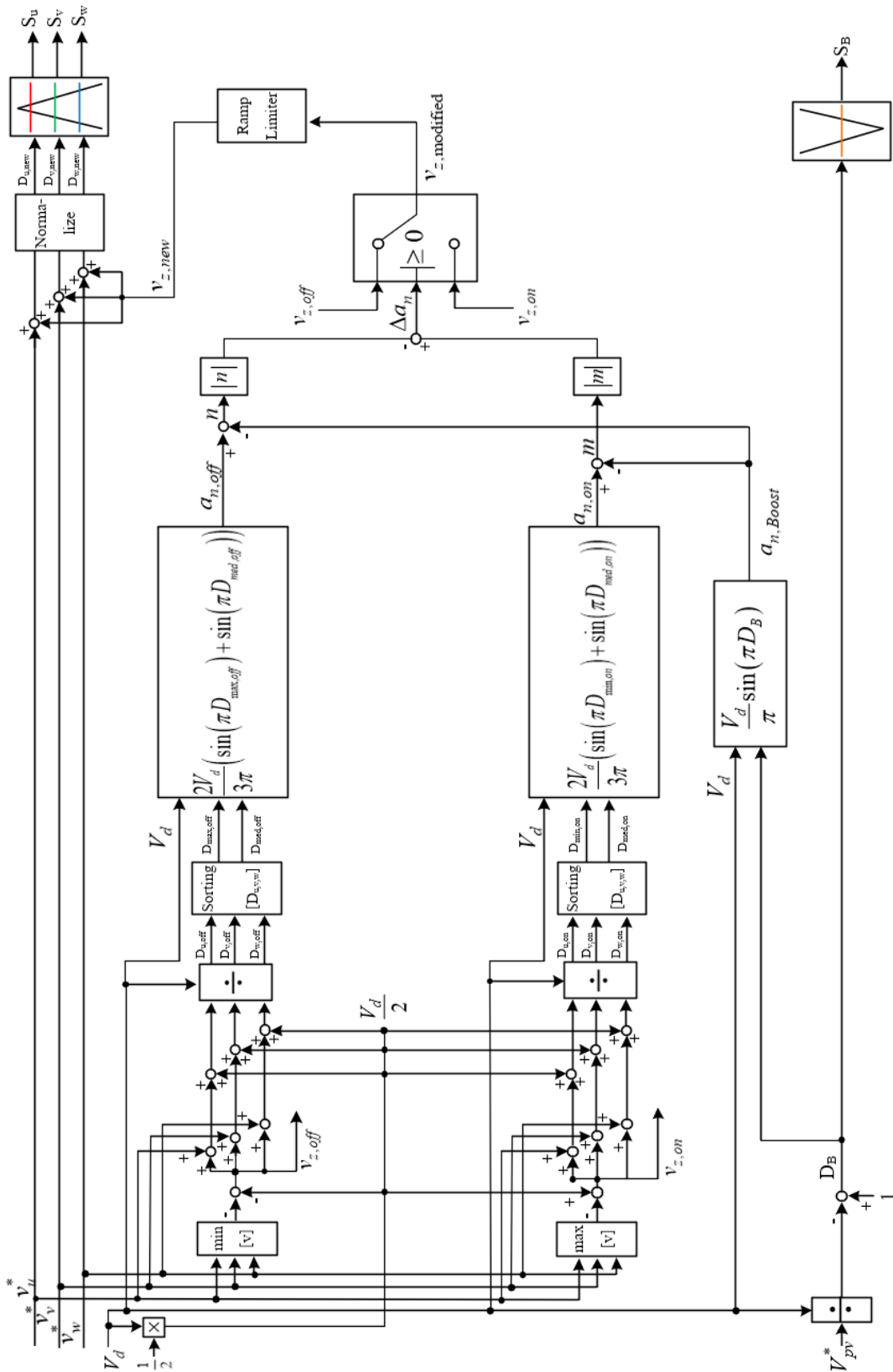
$$\min \left\{ \left| a_{n,Off} - a_{n,Boost} \right|, \left| a_{n,On} - a_{n,Boost} \right| \right\} \quad (3.13)$$

โดยที่ $a_{n,On}$ และ $a_{n,Off}$ มีค่าดังสมการที่ (2.37) และ (2.39)

$$a_{n,On} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin(n\pi D_{med}) + \sin(n\pi D_{min}) \right] \quad (2.37)$$

$$a_{n,Off} = \frac{2v_d}{3n\pi} \left[\sin(n\pi D_{med}) + \sin(n\pi D_{max}) \right] \quad (2.39)$$

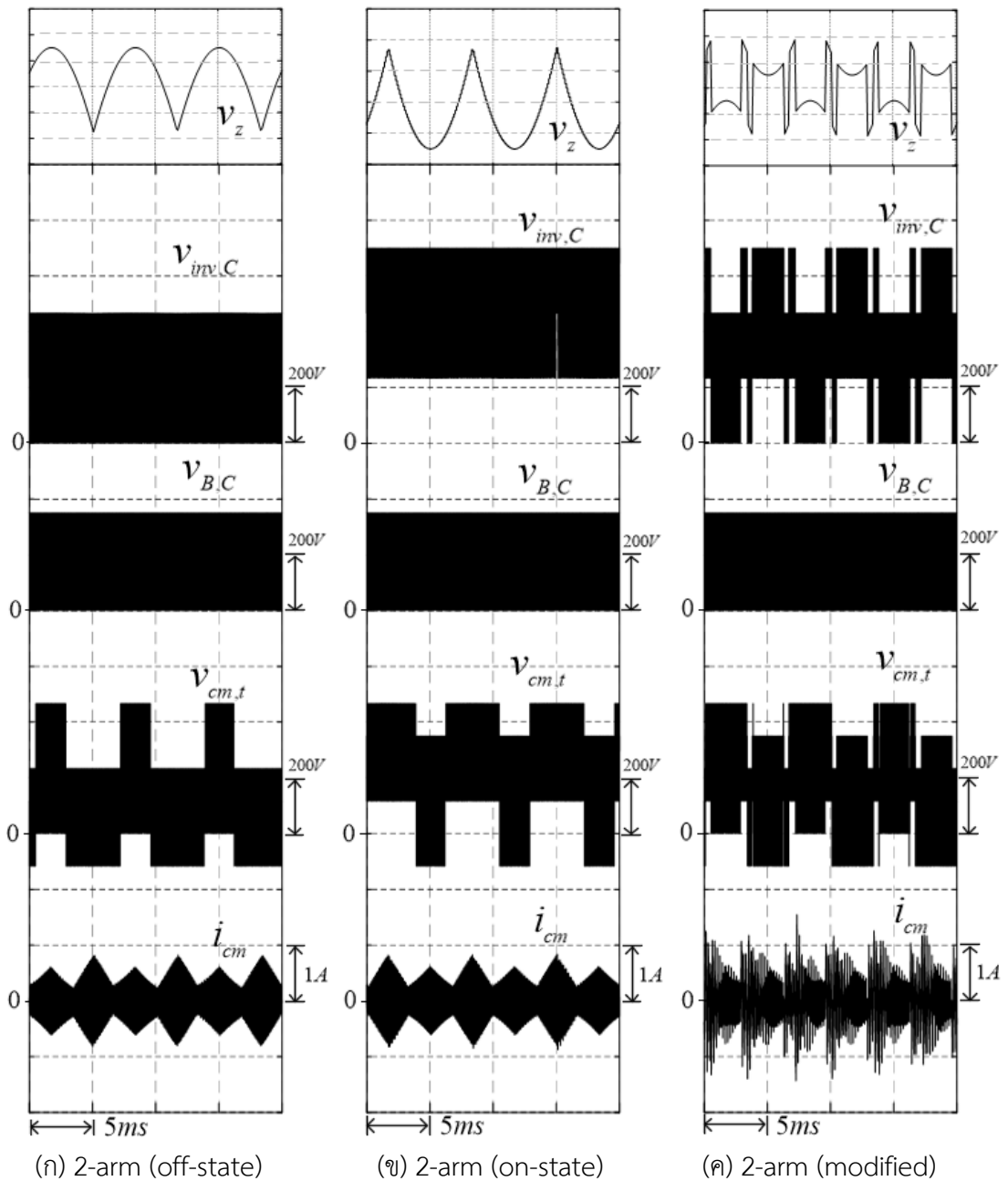
จากเงื่อนไขในสมการ (3.13) สามารถสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของการมอดูเลต 2 แขนแบบตัดแปลงได้ดังรูปที่ 3.19



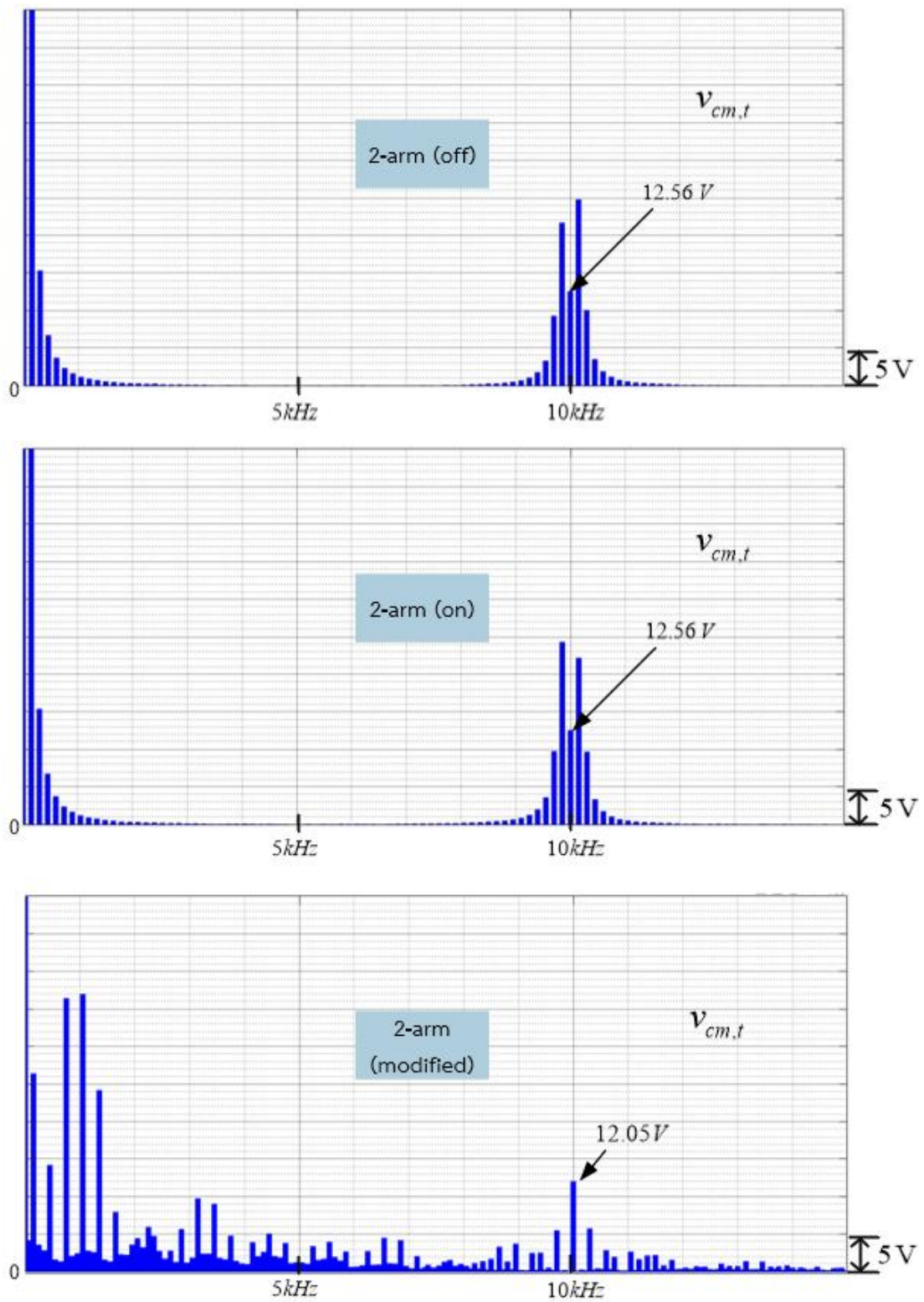
รูปที่ 3.19 แผนภาพแสดงการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของการมอดูเลต

อินเวอร์ 2 เฟสแบบดัดแปลง

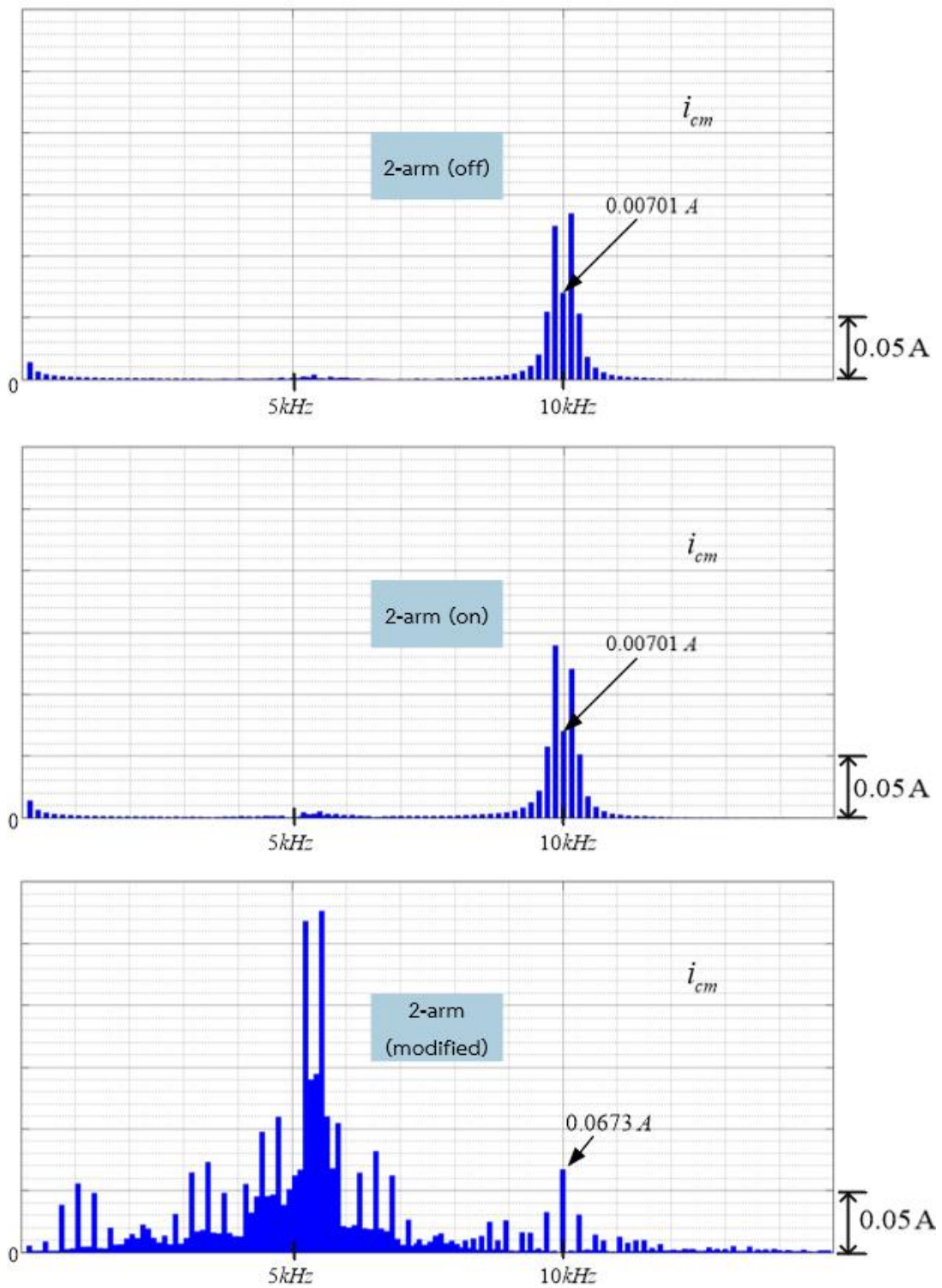
จากรูปที่ 3.19 แสดงถึงวิธีการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบตัดแปลง โดยมีหลักสำคัญในการเลือกรูปแบบการมอดูเลต คือ ผลต่างขององค์ประกอบความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมตร่วมทั้งสองที่น้อยสุด (Δa_n) มาเป็นตัวกำหนด ซึ่งนำไปทดสอบด้วยการจำลองการทำงานกับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ชนิด 2 ภาคเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง โดยจำลองเปรียบเทียบกันทั้ง 3 รูปแบบ คือ การมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state), 2-arm (on-state), และ 2-arm (modified) ใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3 ให้ผลการจำลองเทียบกันดังรูปที่ 3.20 และผลจำลองในส่วนของการวิเคราะห์ฟูริเยร์ที่องค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.20 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ



รูปที่ 3.21 สเปกตรัมของแรงดันโหมตรงร่วมรวมของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ



รูปที่ 3.22 สเปกตรัมของกระแสรั่วไหลของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ

ตารางที่ 3.5 ขนาดของตัวแทนแรงดันโหมตร่วมรวมจากการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ ของแต่ละเซกเตอร์
ใน 1 คาบการสวิตช์

Modulation	Time (s)					
	0.021	0.025	0.028	0.032	0.035	0.038
2-arm (off-state) (V)	18.59	100.9	19.21	73.75	19.18	73.75
2-arm (on-state) (V)	48.44	19.18	73.75	19.21	101.8	19.21
2-arm (modified) (V)	18.59	19.18	19.21	19.21	19.18	19.21
โหมตการทำงานของ 2-arm (modified)	off	on	off	on	off	on

จากรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22 พบว่าที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ (10 kHz) ทั้งแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบ ($v_{cm,t}$) และกระแสรั่วไหล (i_{cm}) จากการมอดูเลต 2 แขนแบบดัดแปลงจะมีค่าน้อยที่สุด อีกทั้งความถี่แถบข้างยังลดลงอีกด้วย และจากตารางที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดัดแปลง เลือกโหมตการทำงาน on และ off ตามขนาดแรงดันโหมตร่วมรวมที่มีค่าน้อยสุดจากแต่ละโหมตการทำงานใน 1 คาบการสวิตช์ ซึ่งตรงตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ แต่จะเห็นว่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจากการมอดูเลตแบบดัดแปลงมีลักษณะกระชากสูงขึ้นในบางช่วงเวลา ซึ่งจะกล่าวในส่วนของข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขต่อไป

3.5 ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์แบบตัดแปลง

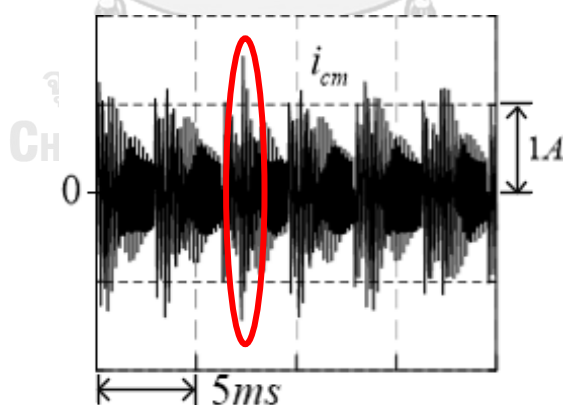
3.5.1 ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 3 แขนแบบตัดแปลง

จากผลการจำลองระบบดังรูปที่ 3.16 พบว่า ต้องใช้แรงดันบัสไฟตรงสูงถึง 2,000 V ในการสั่งให้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันด้านออก 230 V เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด overmodulation ในขั้นตอนการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ เนื่องจากมีการบวกของแรงดันลำดับศูนย์ที่ได้จากการตัดแปลงให้กับแรงดันคำสั่งทั้ง 3 เฟสเท่ากัน ทำให้โอกาสติดลิมิตของการมอดูเลตได้ง่ายขึ้น จึงต้องใช้แรงดันบัสไฟตรงที่สูงกว่าปกติมากถึง 3 เท่า

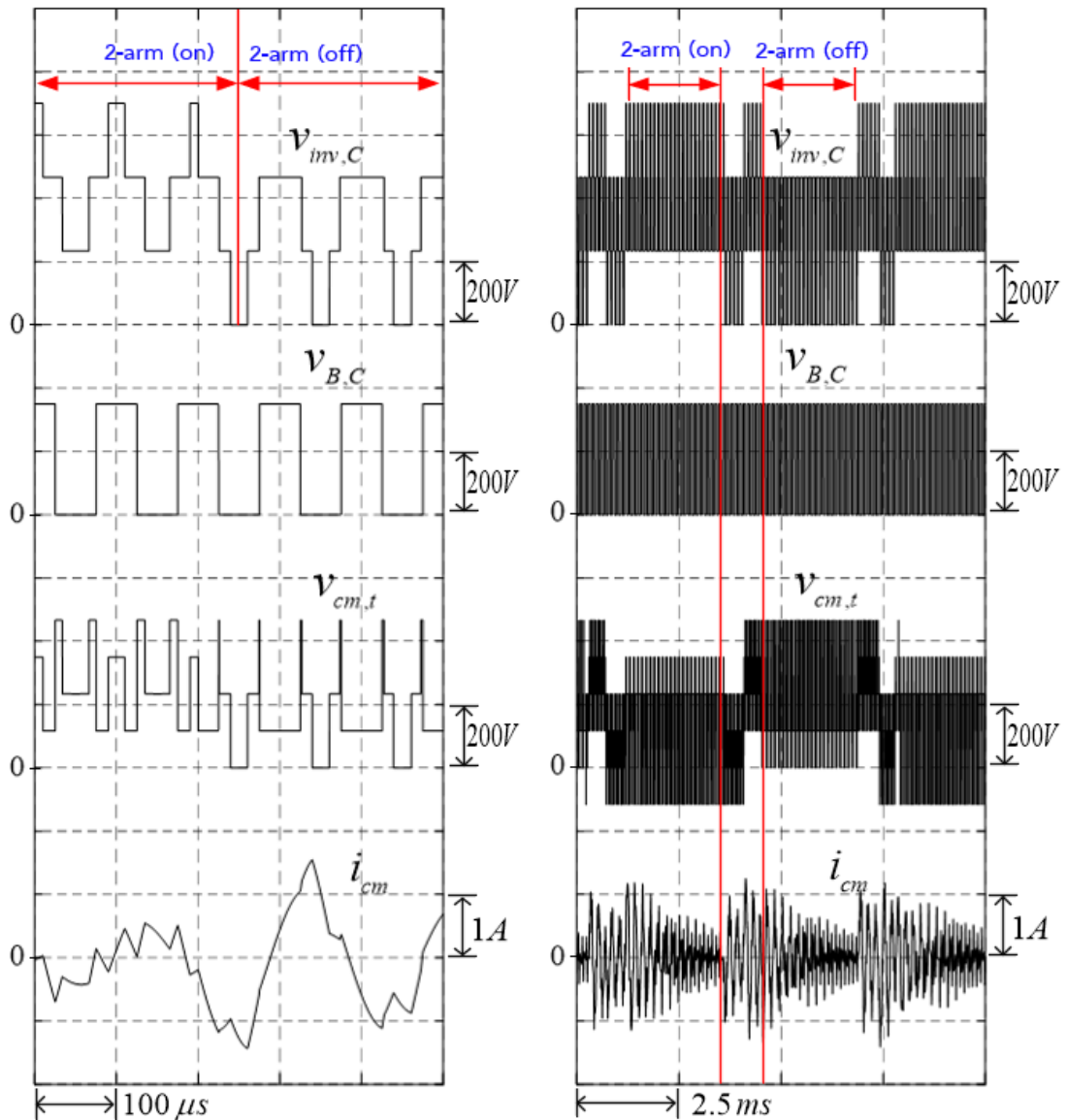
3.5.2 ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบตัดแปลง

3.5.2.1 การกระชากของกระแสรั่วไหลในช่วงเปลี่ยนโหมตทำงาน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นถึงปัญหากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 3.23 เมื่อวิเคราะห์ส่วนขยายบริเวณดังกล่าวตามรูปที่ 3.24 (ก) พบว่า กระแสรั่วไหลจะเกิดตามแรงดันโหมตรวมรวมของระบบซึ่งมาจากการหักล้างกันที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมตรวมจากวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ โดยขณะที่กระแสรั่วไหลเริ่มเกิดการกระชากนั้นจะเห็นว่า อินเวอร์เตอร์กำลังเปลี่ยนโหมตการทำงานจาก 2-arm (on-state) เป็น 2-arm (off-state) และแกว่งเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว โดยจะเกิดการกระชากขึ้นอีกครั้งในช่วงการเปลี่ยนโหมตการทำงานจาก 2-arm (off-state) เป็น 2-arm (on-state) วนเป็นวงรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนโหมตทำงานของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบตัดแปลง ทำให้เกิดการกระชากในสภาวะชั่วคราวของกระแสรั่วไหลขึ้น



รูปที่ 3.23 กระแสรั่วไหลที่เกิดจากการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบตัดแปลง

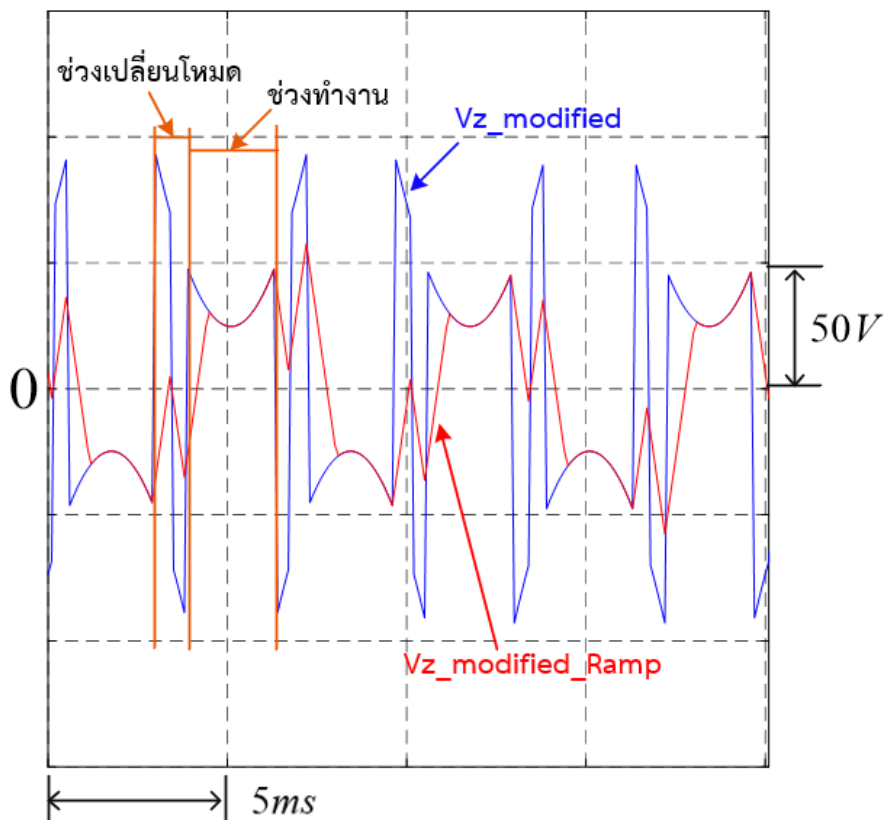


(ก) ภาพขยายขณะเริ่มเกิดกระแสกระชาก

(ข) ช่วงการเกิดกระแสกระชาก

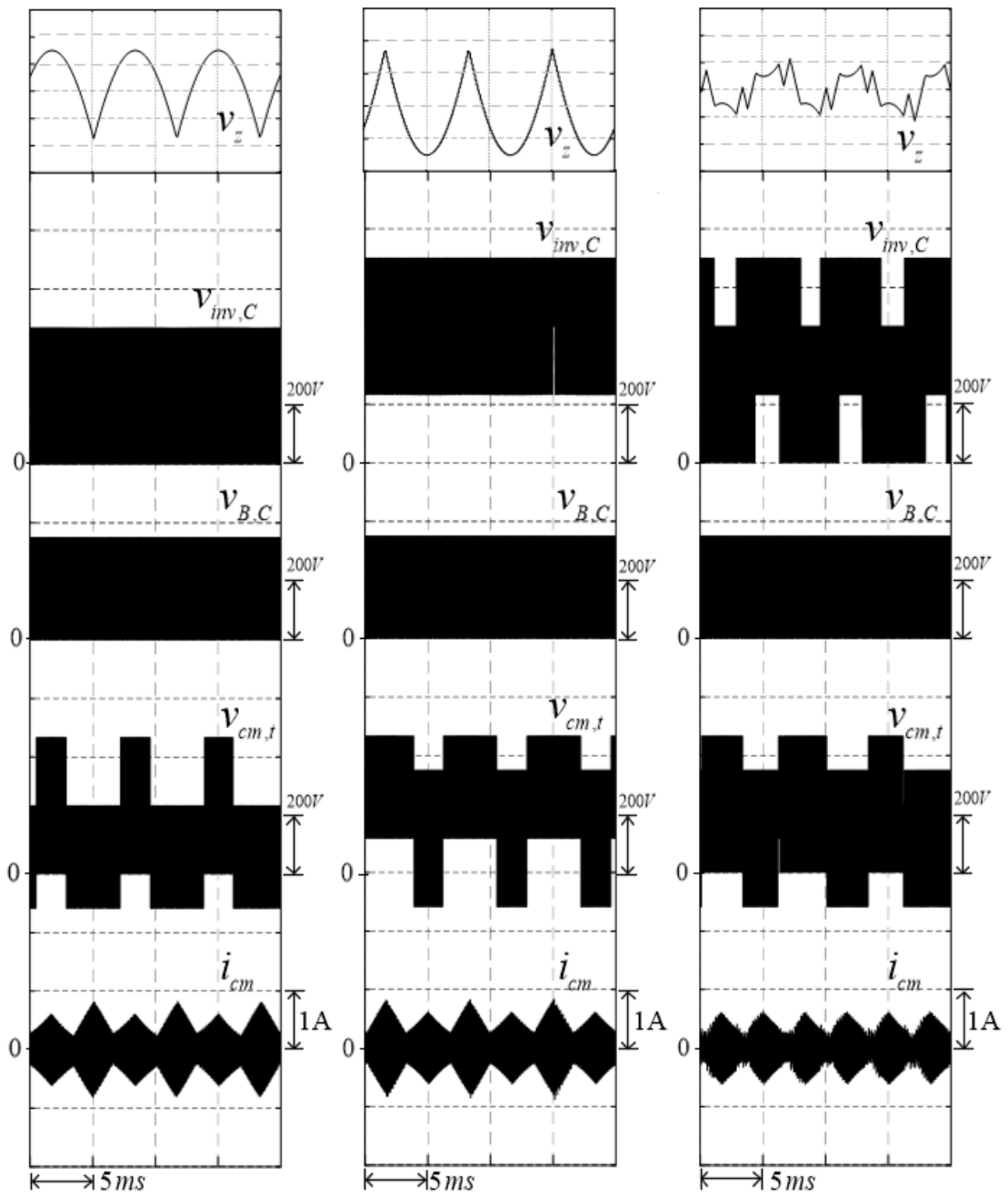
รูปที่ 3.24 แรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลที่ใช้ในการพิจารณากระแสกระชากที่เกิดขึ้น

สำหรับแนวทางแก้ปัญหากระแสกระชากที่เกิดขึ้น เมื่อวิเคราะห์สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ได้จากการเลือกโหมตการทำงานแล้ว ดังรูปที่ 3.25 (สีน้ำเงิน) พบว่า เกิดช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนโหมตการทำงานระหว่างการมอดูเลตแบบ 2-arm ทั้งสอง เพื่อกำหนดค่าแรงดันลำดับศูนย์ในการมอดูเลตแบบตัดแปลง ดังนั้นจึงต้องลดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันดังกล่าว โดยใช้ฟังก์ชัน Ramp limiter เข้ามาช่วยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน จากเดิมที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได ให้อยู่ในรูปเส้นตรง ทั้งขาขึ้นและขาลง ดังรูปที่ 3.25 (สีแดง) โดยจากการจำลองพบว่าค่า ramp limiter ที่เหมาะสมจะอยู่ช่วง $100,000 - 300,000 \text{ V/s}$ จะทำให้รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันลำดับศูนย์เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงขอบขาขึ้นและขาลง แต่ยังคงรักษาช่วงที่ต้องการใช้งานไว้ได้อยู่



รูปที่ 3.25 การเปรียบเทียบแรงดันลำดับศูนย์ของการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 เฟสแบบดัดแปลง ก่อนและหลังใช้ Ramp limiter

จากข้อสรุปข้างต้น เลือกใช้ค่า ramp limiter ที่ $100,000 \text{ V/s}$ แล้วนำไปทดสอบด้วยการจำลองการทำงานกับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ระดับ ชนิด 2 ภาค โดยจำลองเปรียบเทียบกัน ทั้ง 3 รูปแบบ คือ การมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state), 2-arm (on-state) และ 2-arm (modified) ที่มีการเพิ่มเข้ามาของ ramp limiter และใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 3.3 ให้ผลจำลองเปรียบเทียบดังรูปที่ 3.26 และรูปที่ 3.27 และผลจำลองในส่วนของการวิเคราะห์ฟูริเยร์ที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ ดังรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29



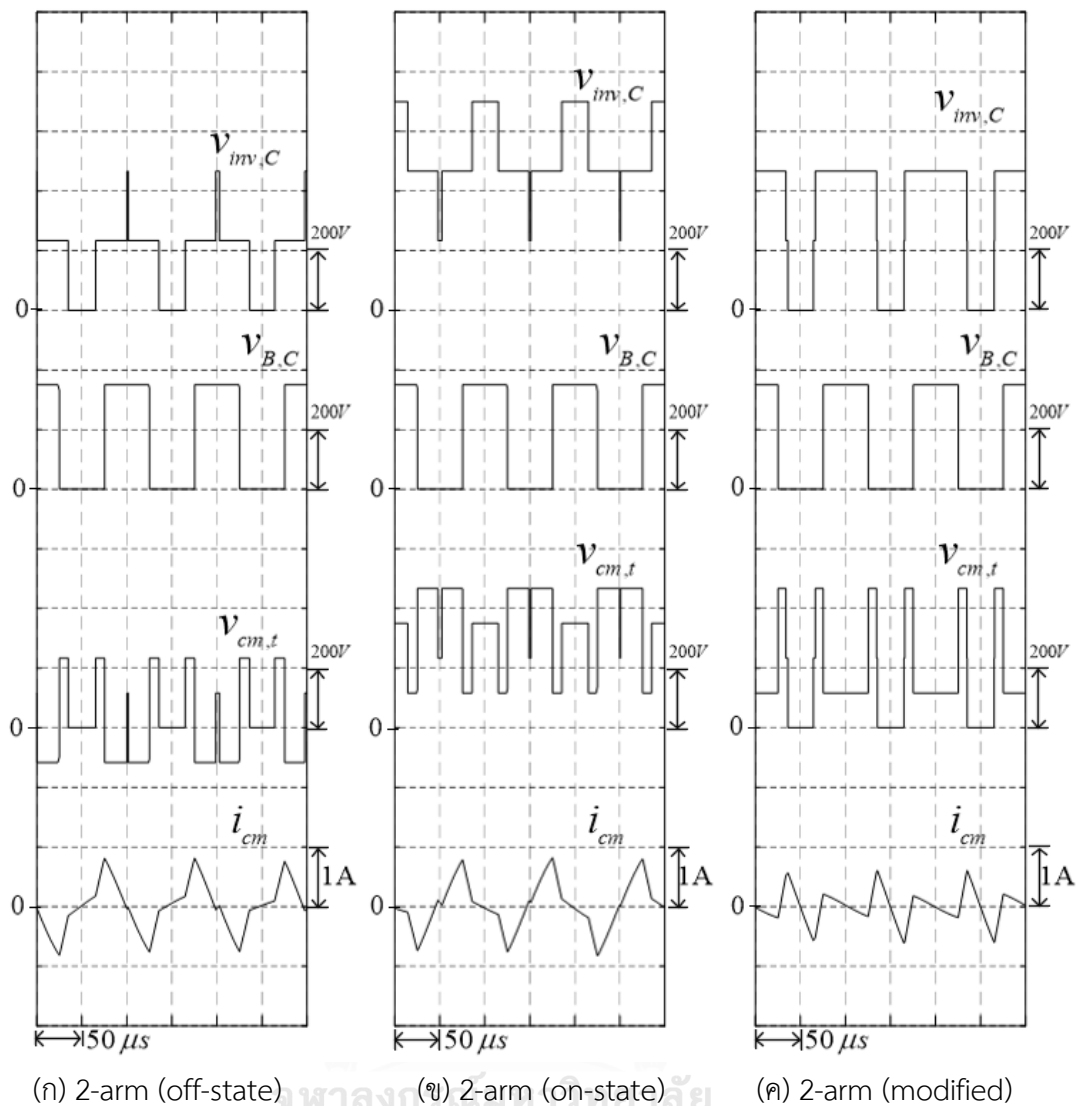
(ก) 2-arm (off-state)

(ข) 2-arm (on-state)

(ค) 2-arm (modified)

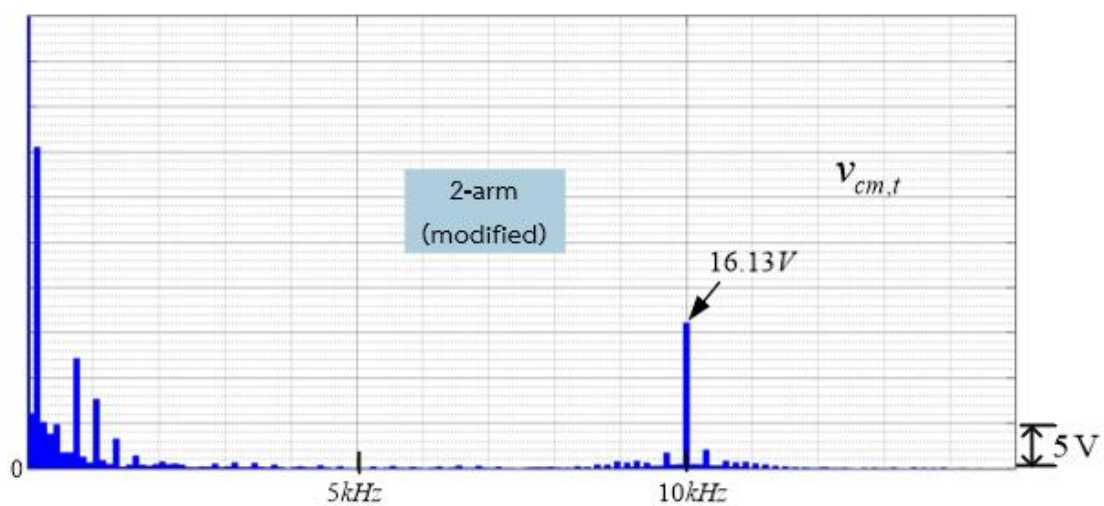
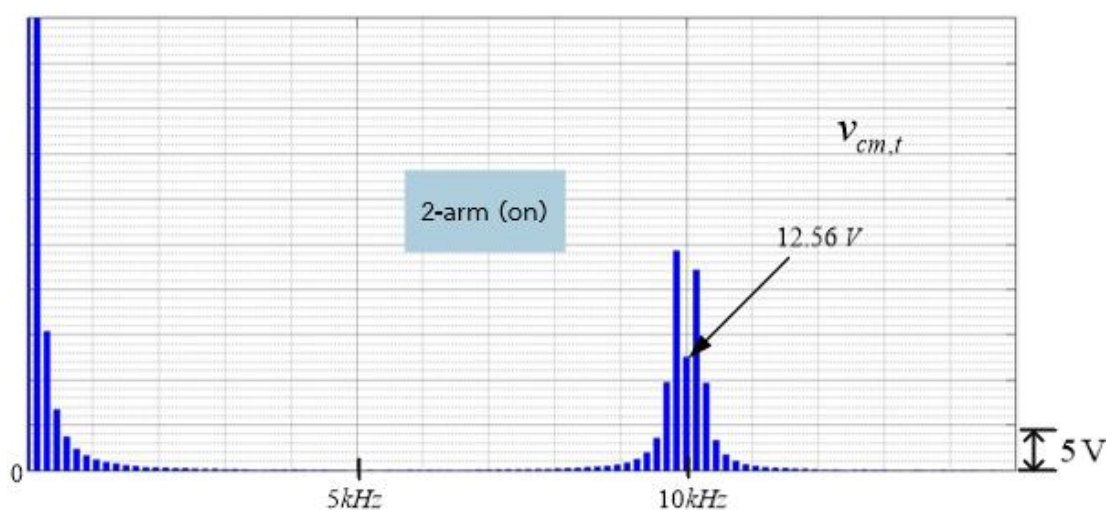
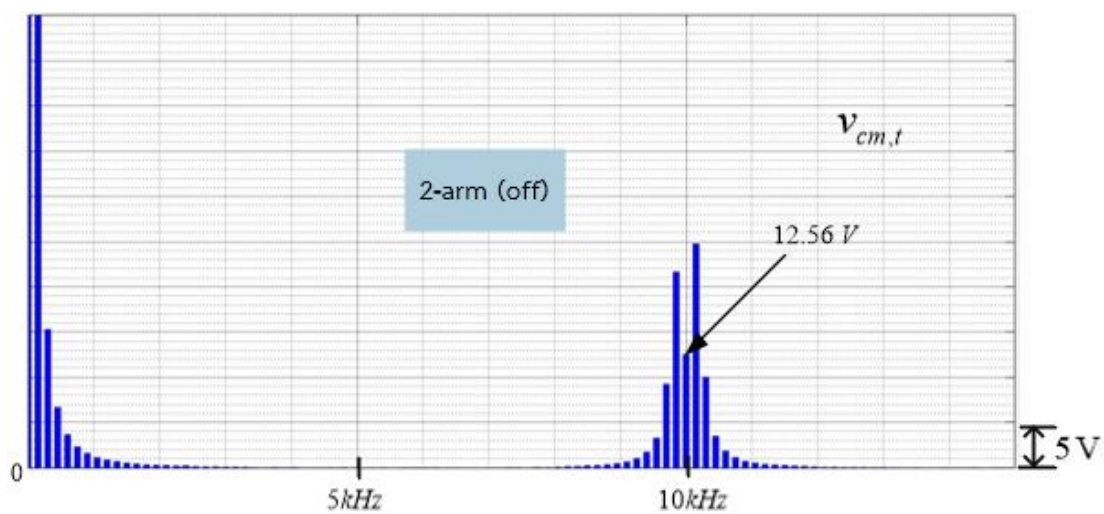
รูปที่ 3.26 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ

โดยมีผลของ Ramp limiter

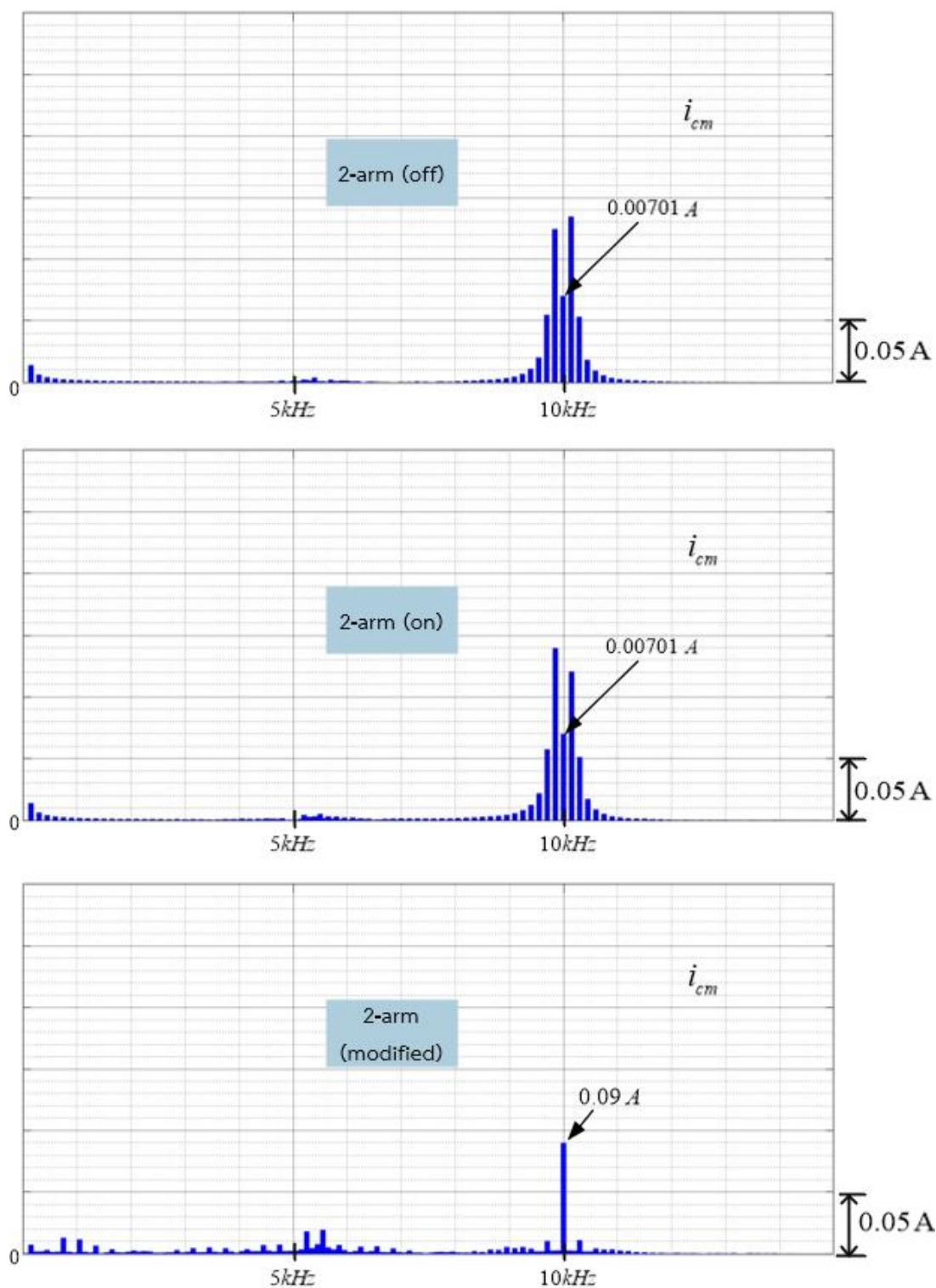


รูปที่ 3.27 ภาพขยายการเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter

จากรูปที่ 3.26 จะเห็นว่าเมื่อใช้ ramp limiter ในการมอดูเลตแบบดัดแปลง จะทำให้การกระชากของกระแสรั่วไหลหายไป และกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นค่ายอดต่ำสุดของการมอดูเลต 2 แชนทั้งสองรูปแบบ เช่นเดียวกับรูปที่ 3.27 (ก) และ (ข) เป็นส่วนขยายของสัญญาณต่าง ๆ ในช่วงที่เกิดค่ายอดสูงสุดของกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบ 2 แชนเทียบกับรูปที่ 3.27 (ค) เป็นส่วนขยายในช่วงที่เกิดค่ายอดสูงสุดจากการมอดูเลต 2 แชนแบบดัดแปลง แสดงให้เห็นว่าค่ายอดของกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบดัดแปลงจะมีขนาดน้อยกว่า เป็นไปตามแนวคิดที่นำเสนอ



รูปที่ 3.28 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมรวมจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter



รูปที่ 3.29 สเปกตรัมสัญญาณกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter

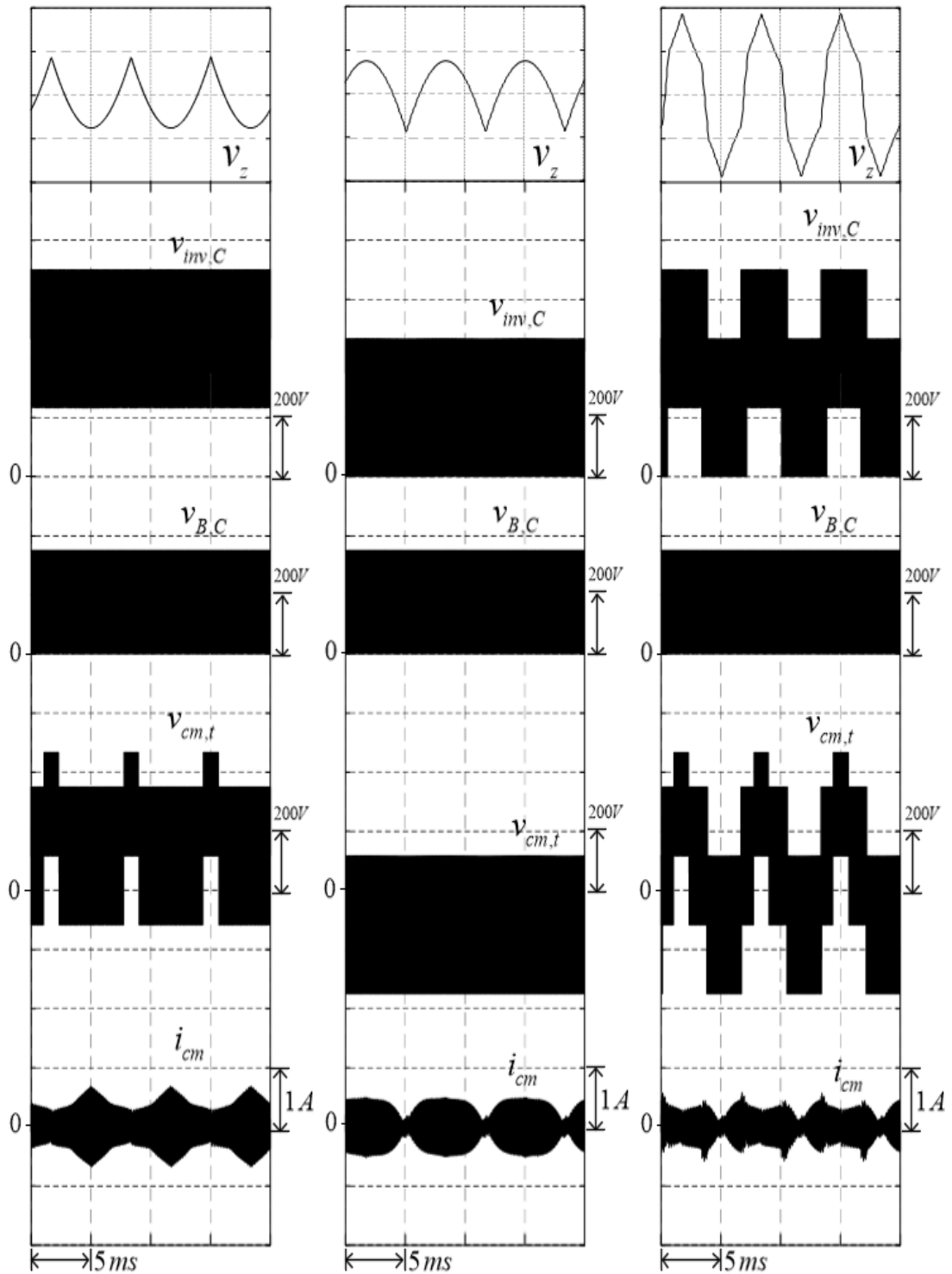
จากรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29 แสดงให้เห็นถึงแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบและกระแสรั่วไหลที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ (10 kHz) พบว่า แรงดันโหมตร่วมรวมและกระแสรั่วไหลที่เกิดจากการมอดูเลตแบบตัดแปลงและใช้ Ramp limiter ณ จุดทำงานดังกล่าว จะมีขนาดมากกว่าการมอดูเลตแบบ 2 แขนทั้งสองโหมต ซึ่งเป็นผลของ Ramp limiter แต่มีข้อดีคือ ทำให้กระแสกระชากลดลง และผลของสเปกตรัมดีกว่าที่ความถี่แถบข้าง

เพื่อยืนยันแนวคิดการลดกระแสรั่วไหลที่ความถี่การสวิตช์ จึงเลือกจุดทำงานใหม่ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปตามตารางที่ 3.6 ซึ่งเป็นเงื่อนไขจุดทำงานเดียวกับการทดสอบระบบจริง และกำหนดให้ Ramp limiter เท่ากับ 300,000 V/s ได้ผลการจำลองเทียบกันดังรูปที่ 3.30 และผลจำลองในส่วนของการวิเคราะห์ฟูริเยร์ ดังรูปที่ 3.31 และรูปที่ 3.32

พิจารณาผลจำลองที่จุดทำงานดังกล่าวพบว่า ที่จุดทำงานนี้จะให้ผลจำลองที่เป็นไปตามแนวคิดที่นำเสนอ คือ 1) การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบตัดแปลง พิจารณาได้จากลักษณะของแรงดันโหมตร่วมจากอินเวอร์เตอร์ซึ่งแสดงทั้งโหมต 2-arm (on-state) และ 2-arm (off-state) โดยมีช่วงเปลี่ยนโหมตทำงานตามค่า Ramp limiter ส่งผลให้กระแสกระชากลดลง แต่ยังเหลืออยู่เนื่องจากถ้าต้องการให้กระแสกระชากหายไปจะต้องใช้ค่า Ramp limiter ที่ส่งผลให้ลักษณะสัญญาณแรงล้าดับศูนย์เปลี่ยนแปลงมากเกินไป ไม่คงสภาพของแรงดันล้าดับศูนย์ตามที่ตัดแปลงไว้, 2) แรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจรเกิดการหักล้างกัน ส่งผลให้กระแสรั่วไหลลดลง โดยการมอดูเลต 2 แขนแบบตัดแปลงให้ผลดีกว่าการมอดูเลต 2 แขนแบบดั้งเดิมทั้งในสเกลเวลาของความถี่มูลฐาน ดังรูปที่ 3.30 และเกิดการหักล้างกันจริงในสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์ระหว่างแรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจร ดังรูปที่ 3.31 เช่นเดียวกันกับกระแสรั่วไหลที่เกิดจากการมอดูเลต 2 แขนแบบตัดแปลง ณ องค์ประกอบความถี่การสวิตช์จะมีขนาดน้อยที่สุด

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการจำลองการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แชนแบบดัดแปลง
ตามระบบทดสอบจริง

แหล่งกำเนิดไฟตรงจากแผงพีวี (V_{sc})	588 V
แรงดันบัลไฟตรง (V_d)	700 V
แรงดันและความถี่ของโครงข่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อ	380 V _{L-L} / 50 Hz
อิมพีแดนซ์กริด (Z_G)	10 Ω
ค่าตัวเก็บประจุแผงที่แผงพีวี (Z_{pv})	$C_{pv} = 110nF, R_{pv} = 1\Omega$
ตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบระดับ (L_B)	4.7 mH
ตัวเหนี่ยวนำร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง	820 μ H
ตัวเหนี่ยวนำร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ	920 μ H
ตัวเหนี่ยวนำที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (Z_L)	6 mH
ความถี่การสวิตช์ของวงจรทบระดับ	16 kHz
ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	16 kHz
กำลังไฟฟ้าพิกัดของอินเวอร์เตอร์	10 kVA



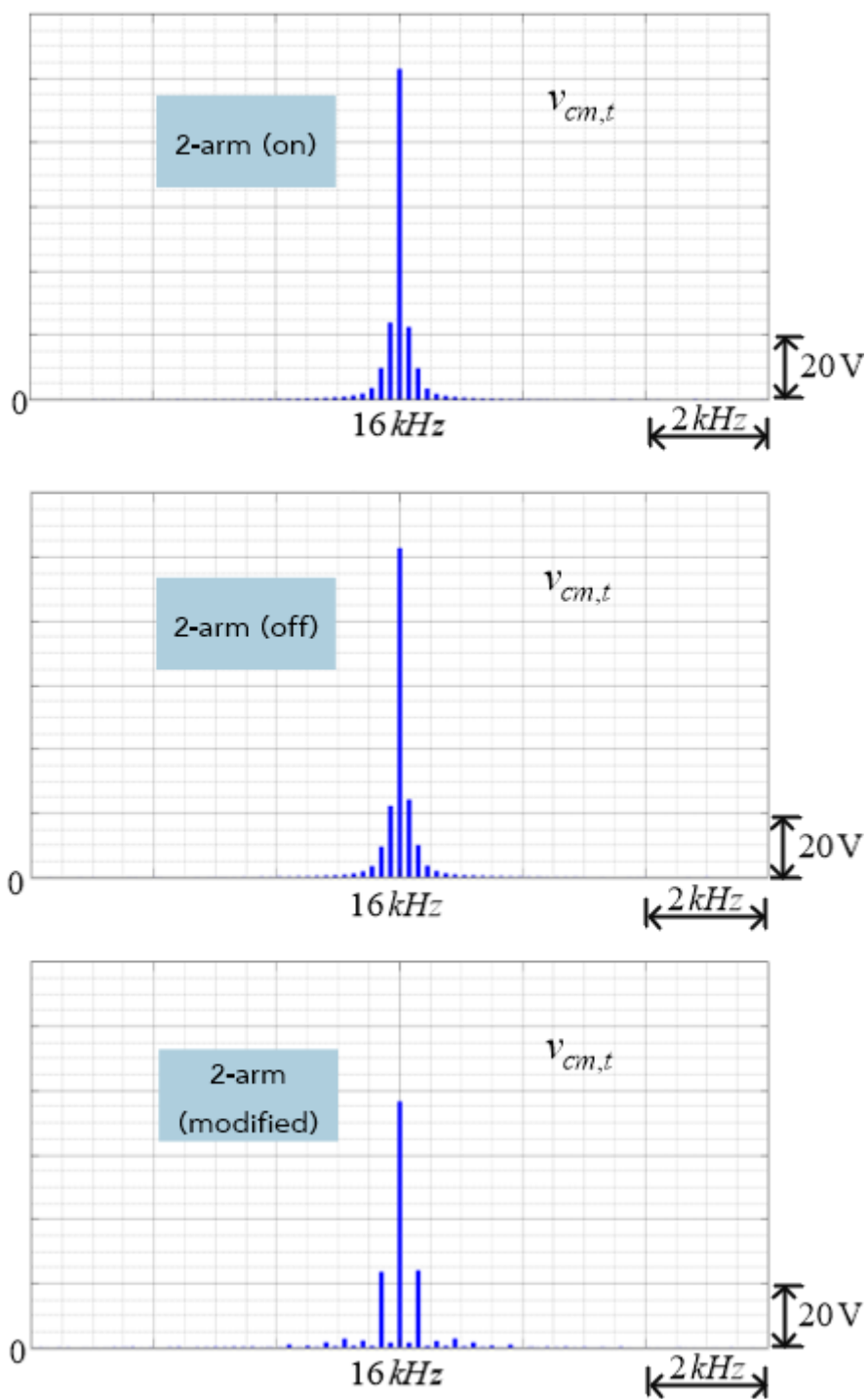
(ก) 2-arm (off-state)

(ข) 2-arm (on-state)

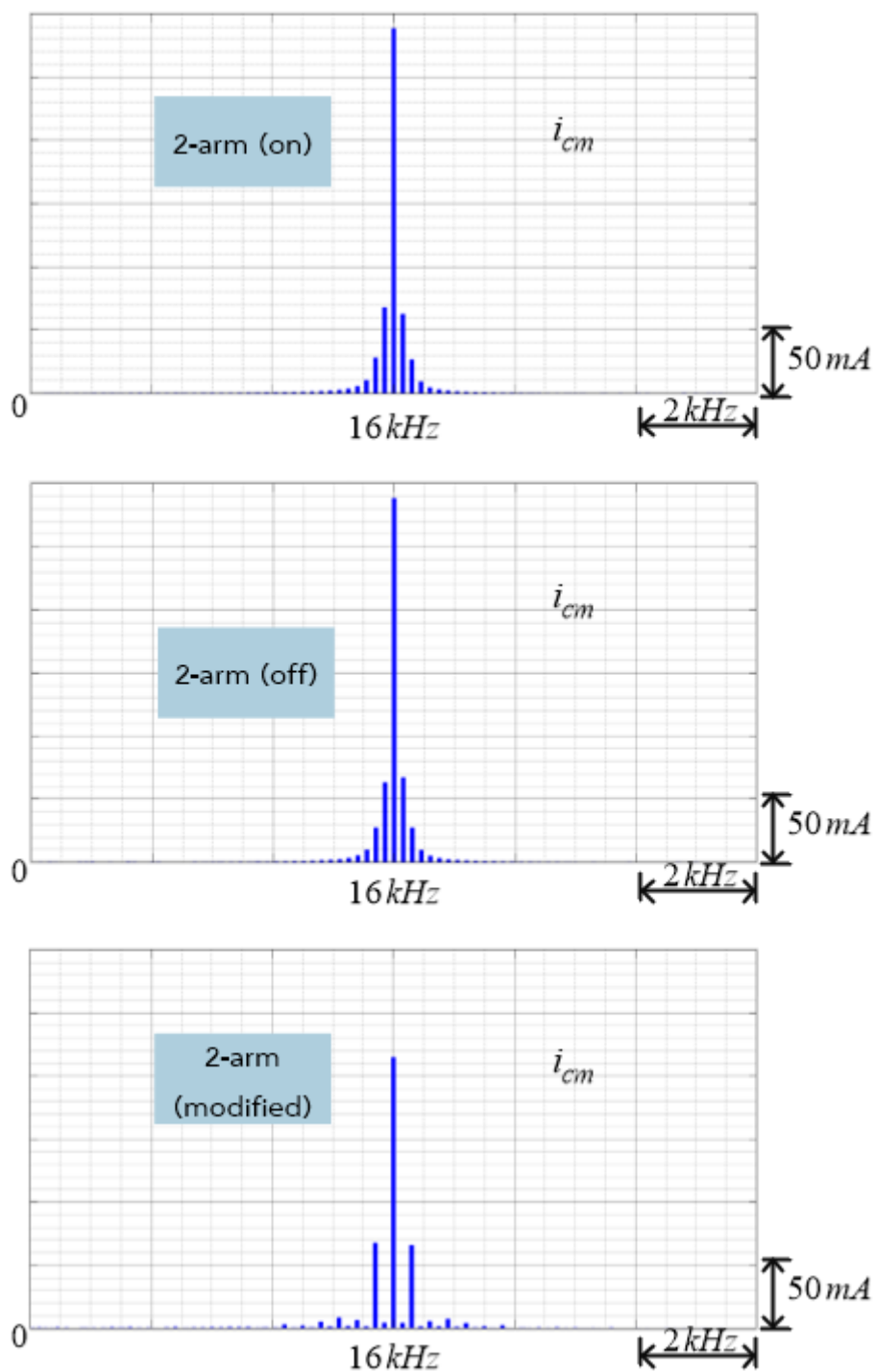
(ค) 2-arm (modified)

รูปที่ 3.30 การเปรียบเทียบผลจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ

โดยมีผลของ Ramp limiter ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 588V$



รูปที่ 3.31 สเปกตรัมสัญญาณกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 588\text{ V}$



รูปที่ 3.32 สเปกตรัมสัญญาณกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยมีผลของ Ramp limiter ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 588 \text{ V}$

3.5.2.2 ข้อจำกัดทางสมรรถนะของวิธีมอดูเลตแบบดัดแปลง เมื่อพิจารณาในคาบสเกลเวลา

ของความถี่มูลฐาน

การจำลองต่อไปจะเป็นการจำลองเปลี่ยนจุดทำงานของระบบ จะเปลี่ยนทั้งค่าวัฏจักรงานที่ทำให้เกิดแรงดันโหมตร่วมในวงจรทบระดับ (D_B) โดยการปรับแรงดันด้านเข้าพีวี (V_{SC}) และเปลี่ยนค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_d) เพื่อศึกษาจุดทำงานต่าง ๆ ของการมอดูเลต 2-arm แบบดัดแปลง ซึ่งมีประเด็นศึกษาตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ข้างต้น คือ ขนาดของแรงดันโหมตร่วมรวมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์จากการมอดูเลต 2-arm แบบดัดแปลง จะต้องน้อยกว่าแรงดันโหมตร่วมรวมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์จากการมอดูเลต 2-arm ให้ผลการจำลองตามจุดทำงานต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.7-ตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงผลจำลองจุดทำงานแรงดันบัสไฟตรง 700 V

$V_d = 700 \text{ V}$		
V_{SC} (V)	แรงดันโหมตร่วมรวมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ (10 kHz)	
	2-arm (V)	2-arm modified (V)
300	6.95	12.61
350	12.56	12.05
450	9.52	10.43
550	70.96	42.6
600	113.5	85.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

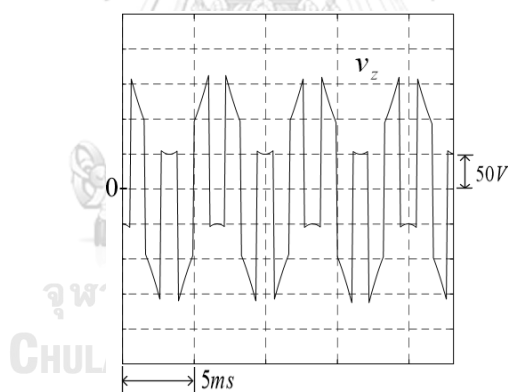
ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงผลจำลองจุดทำงานแรงดันบัสไฟตรง 750 V

$V_d = 750 \text{ V}$		
V_{SC} (V)	แรงดันโหมตร่วมรวมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ (10 kHz)	
	2-arm (V)	2-arm modified (V)
350	4.95	11.03
375	3.7	11.47
400	4.9	10.98
550	64.78	30.52
600	102	67.76

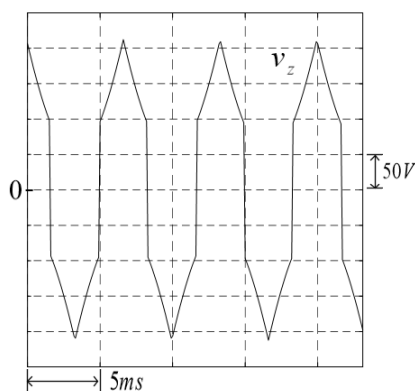
ตารางที่ 3.9 ตารางแสดงผลจำลองจุดทำงานแรงดันบัลไฟตรง 800 V

$V_d = 800 \text{ V}$		
V_{SC} (V)	แรงดันโหมตรงรวมรวมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ (10 kHz)	
	2-arm (V)	2-arm modified (V)
350	20.91	0.99
400	15.96	4.095
450	20.86	1.01
550	58.63	19.36
600	90.52	51.23

จากตารางที่ 3.1-3.3 พบว่ามีจุดทำงานที่ไม่สอดคล้องกับแนวคิดที่นำเสนอ (จุดทำงานสีแดง) เมื่อวิเคราะห์แรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ในการมอดูเลต จะจำแนกรูปสัญญาณได้ 2 ประเภทดังรูปที่ 3.33 และ 3.34



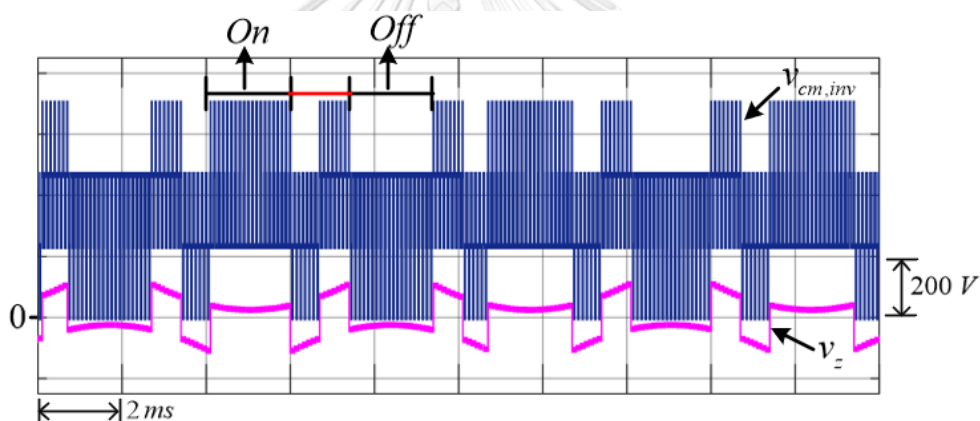
รูปที่ 3.33 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 350 \text{ V}$, $V_d = 750 \text{ V}$



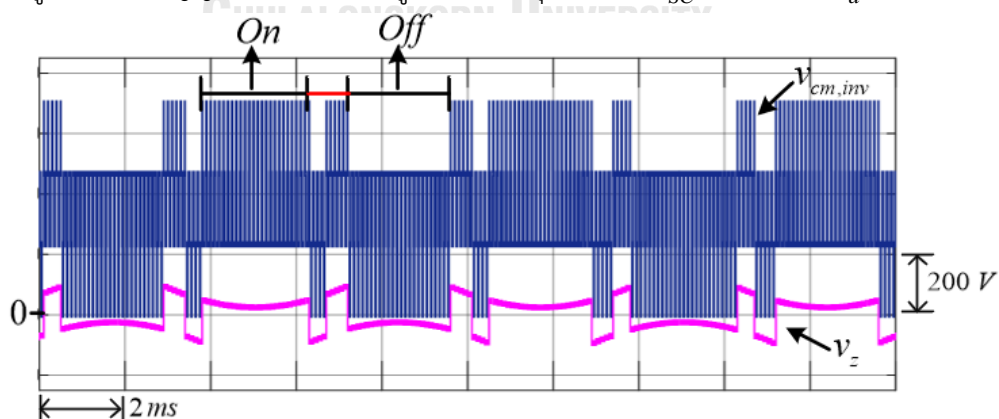
รูปที่ 3.34 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 550 \text{ V}$, $V_d = 750 \text{ V}$

รูปที่ 3.34 แสดงถึงแรงดันลำดับศูนย์ที่มีองค์ประกอบของความถี่การสวิตช์เท่ากับ $3n$ เท่าของแรงดันที่มีความถี่มูลฐาน โดยมีช่วงผ่านศูนย์ 6 ครั้ง และเมื่อพิจารณาช่วงเวลาของการทำงานของโหมต 2-arm จะทำงานสลับกันระหว่าง 2-arm (on-state) กับ 2-arm (off-state) ทุก ๆ 60 องศาอย่างต่อเนื่อง และทำงาน 3 ครั้งใน 1 คาบของความถี่มูลฐาน

แต่เมื่อเงื่อนไขการทำงานเปลี่ยนไป ทำให้วิธีมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดัดแปลงสร้างแรงดันลำดับศูนย์ในรูปที่ รูปที่ 3.33 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นของแรงดันลำดับศูนย์เปลี่ยนแปลงไป โดยมีช่วงสลับโหมตการทำงานระหว่าง 2-arm (on-state) กับ 2-arm (off-state) มากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปที่ 3.34 ซึ่งสังเกตได้จากช่วงผ่านศูนย์มีจำนวนครั้งมากขึ้นเป็น 18 ครั้ง ลักษณะดังกล่าวสะท้อนว่ามีการมอดูเลตสัญญาณที่มีความถี่ $6n$ เท่าของความถี่มูลฐานเพิ่มเข้าไปที่แรงดันลำดับศูนย์ ซึ่งส่งผลให้แรงดันโหมตรวมรวมที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์มีขนาดมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3.7 และตารางที่ 3.8 และทำให้สมรรถนะในการลดทอนแรงดันโหมตรวมรวมของวิธีการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดัดแปลงด้วยลง

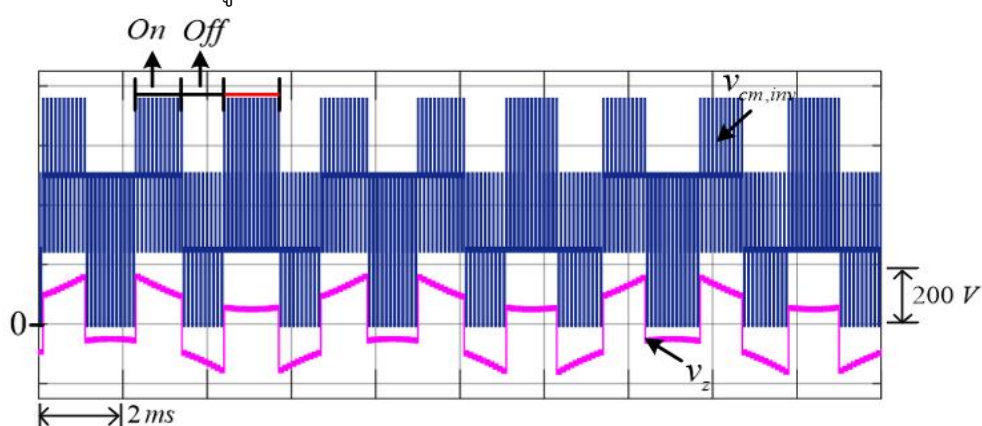


รูปที่ 3.35 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 300 \text{ V}$, $V_d = 700 \text{ V}$

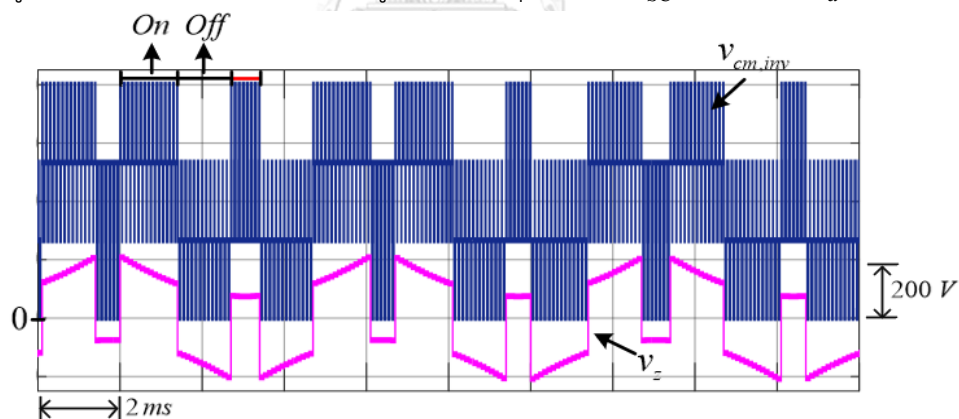


รูปที่ 3.36 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 350 \text{ V}$, $V_d = 700 \text{ V}$

พิจารณารูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่เกิดจากการใช้แรงดันลำดับศูนย์ในลักษณะซ้ำคาบ 6n เท่าของความถี่มูลฐาน ณ จุดทำงานที่ไม่สอดคล้องและสอดคล้องกับแนวคิดที่นำเสนอตามลำดับ พบว่า ในหนึ่งคาบเวลาของความถี่มูลฐาน จะเกิดช่วงเวลาสั้น ๆ ที่มีการเปลี่ยนโหมตการทำงานทั้ง 2-arm (on-state) และ 2-arm (off-state) ก่อนจะเปลี่ยนเป็นโหมตการทำงานหลัก 2-arm (on-state) หรือ 2-arm (off-state) จะเห็นว่าถ้าช่วงเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนโหมตการทำงานสั้น ๆ ดังกล่าวเกิดขึ้นในระยะเวลาที่เหมาะสมดังรูปที่ 3.36 แล้วจะทำให้การมอดูเลต 2-arm แบบดัดแปลงนี้ทำงานได้เป็นไปตามแนวคิดที่นำเสนอ

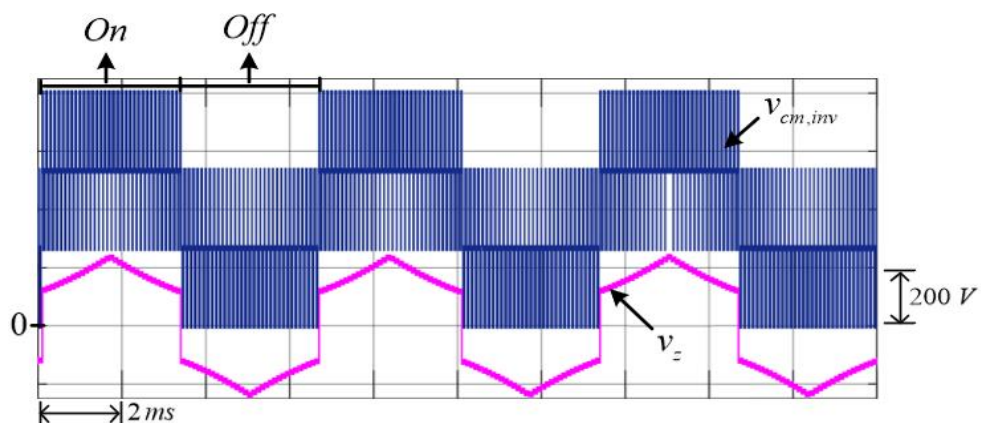


รูปที่ 3.37 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 375 \text{ V}$, $V_d = 750 \text{ V}$



รูปที่ 3.38 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 550 \text{ V}$, $V_d = 800 \text{ V}$

พิจารณารูปที่ 3.37 และรูปที่ 3.38 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่เกิดจากการใช้แรงดันลำดับศูนย์ในลักษณะซ้ำคาบ 6n เท่าของความถี่มูลฐาน ณ จุดทำงานที่ไม่สอดคล้องและสอดคล้องกับแนวคิดที่นำเสนอตามลำดับ พบว่า ช่วงเวลาเปลี่ยนโหมตการทำงานสั้น ๆ ดังรูปที่ 3.35 นั้นหายไป ลดเหลือการเปลี่ยนโหมตเป็นเพียง 2-arm (on-state) หรือ 2-arm (off-state) โดยถ้าช่วงเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนโหมตการทำงานดังกล่าว เกิดขึ้นในระยะเวลาที่เหมาะสมดังรูปที่ 3.38 แล้วจะทำให้การมอดูเลต 2-arm แบบดัดแปลงนี้ทำงานได้เป็นไปตามแนวคิดที่นำเสนอ



รูปที่ 3.39 สัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่ใช้ ณ จุดทำงาน $V_{SC} = 550 \text{ V}$, $V_d = 800 \text{ V}$

พิจารณารูปที่ 3.39 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ที่เกิดจากการใช้แรงดันลำดับศูนย์ในลักษณะซ้ำคาบ 3k เท่าของความถี่มูลฐาน ณ จุดทำงานที่สอดคล้องกับแนวคิดที่นำเสนอ พบว่า ช่วงเวลาเปลี่ยนโหมตการทำงานสั้น ๆ ดังรูปที่ 3.35-รูปที่ 3. รูปที่ 3.38 นั้นหายไป เกิดช่วงเวลาของโหมตการทำงานหลัก 2-arm (on-state) หรือ 2-arms (off) ตลอดคาบการทำงาน ส่งผลให้เกิดสมมติฐานการใช้งานของวิธีมอดูเลต 2-arm แบบดัดแปลงว่า ถ้าใช้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ที่มีลักษณะ 3k เท่า แล้วจะทำให้การมอดูเลต 2 แขนแบบดัดแปลงทำงานได้ดี และมีบางจุดทำงานของระบบที่ใช้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ในลักษณะ 6k แต่ต้องเกิดช่วงเปลี่ยนโหมตการทำงานสั้น ๆ ระหว่างการมอดูเลต 2 แขนอย่างเหมาะสม แล้วการมอดูเลต 2-arm แบบดัดแปลงจึงจะสามารถทำงานได้ตามแนวคิดที่นำเสนอ

บทที่ 4

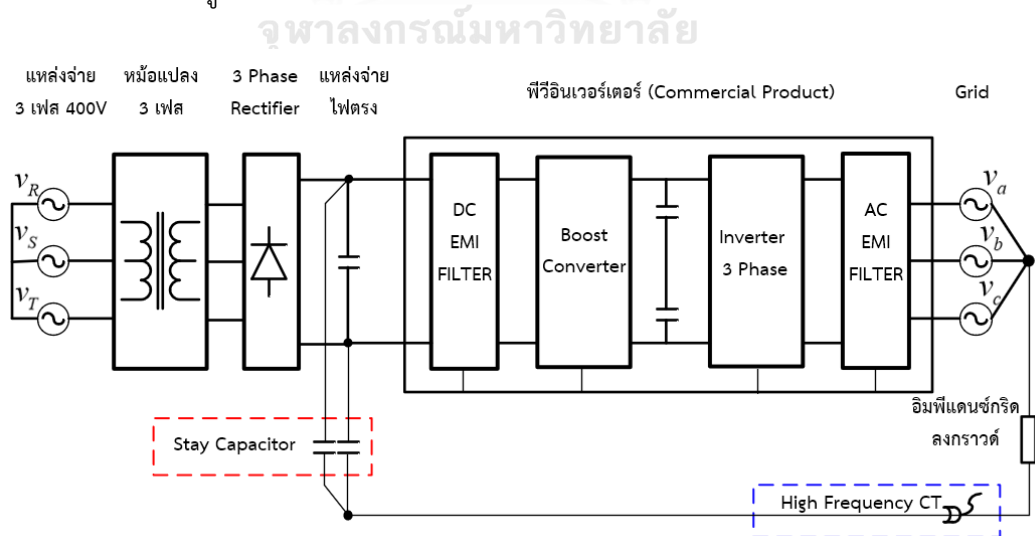
ผลการทดลองการลดกระแสรั่วไหลความถี่สูงที่องค์ประกอบการสวิตช์

จากการจำลองที่ผ่านมาได้แสดงถึงความเป็นไปได้และข้อจำกัดของการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอ เนื้อหาในส่วนนี้จะนำเสนอผลการทดลองการลดกระแสรั่วไหลที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์จากการเลือกแรงดันลำดับศูนย์สำหรับอินเวอร์เตอร์พีวีสองภาคสามเฟสชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง โดยมีเงื่อนไขจุดทำงานที่แรงดันพีวี $V_{PV} = 670\text{ V}$ และแรงดันที่บัสไฟตรง $V_d = 700\text{ V}$ เป็นจุดทำงานที่เห็นความเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนของกระแสรั่วไหลความถี่สูงที่เกิดจากวิธีการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2-arm แบบดัดแปลง

การทดลองจะเป็นการเปรียบเทียบของวิธีการมอดูเลตพีวีอินเวอร์เตอร์ 3 แบบคือ 1) การมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state), 2) การมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state) และ 3) การมอดูเลต 2-arm (Modified) เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดกระแสรั่วไหลความถี่สูงโดยเฉพาะที่ความถี่การสวิตช์ของการมอดูเลต 2-arm แบบดัดแปลง โดยจะทำการทดลองที่กำลังไฟฟ้า 100% ของอินเวอร์เตอร์พีวีที่มีกำลังไฟฟ้าพิกัดเท่ากับ 10 kVA

4.1 โครงสร้างของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองระบบพีวีอินเวอร์เตอร์จะใช้ระบบคล้ายกับงานวิจัยที่ [4] หรือเป็นอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟส 2 ระดับ โดยมีพิกัดกำลังเท่ากับ 10 kVA แต่ต่างกันที่การจำลองแหล่งจ่ายพีวีด้านเข้า โดยมีภาพรวมดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบที่ใช้ทดลองการลดกระแสรั่วไหลความถี่สูง

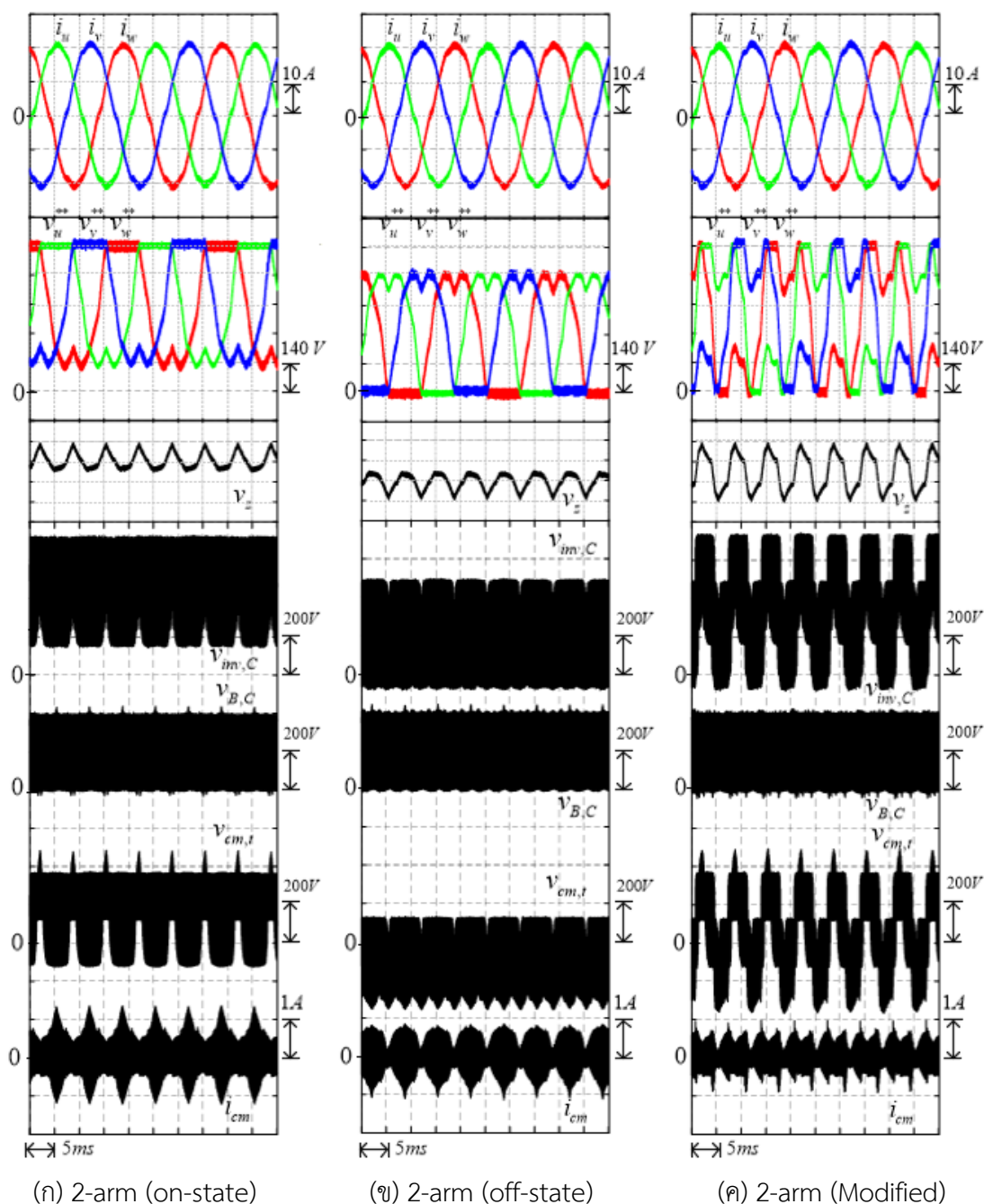
4.1.1 วงจรภาคกำลัง

ในการทดลองใช้วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ไดโอด จำลองแหล่งจ่ายไฟพีวี โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 400 V จ่ายเข้าหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสที่ปรับแรงดันด้านออกได้ 3 ค่า คือ 1) 400/480 V 2) 400/440 V และ 3) 400/400 V หรือสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกได้ 40% ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ จะใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีอยู่ทั่วไปตามภาคอุตสาหกรรม นำมาแก้ไขเพียงวิธีการมอดูเลตเลือกแรงดันลำดับศูนย์ให้เป็นไปตามแผนภาพการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบตัดแปลง ดังรูปที่ 3.19 เท่านั้น และส่วนสุดท้ายที่บัสไฟตรง จะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 110 nF ซึ่งเลือกจากวัสดุสำหรับการผลิตภาคเคลื่อนที่พีวีเซลล์ประเภทภาคเคลื่อนที่แล้วจะมีค่าตัวเก็บประจุแฝงประมาณ 7-220 nF/kW จำนวน 2 ตัว ต่อเข้ากับบัสไฟตรง ดังรูปที่ 4.1 เพื่อจำลองผลของตัวเก็บประจุแฝงที่แผงพีวี

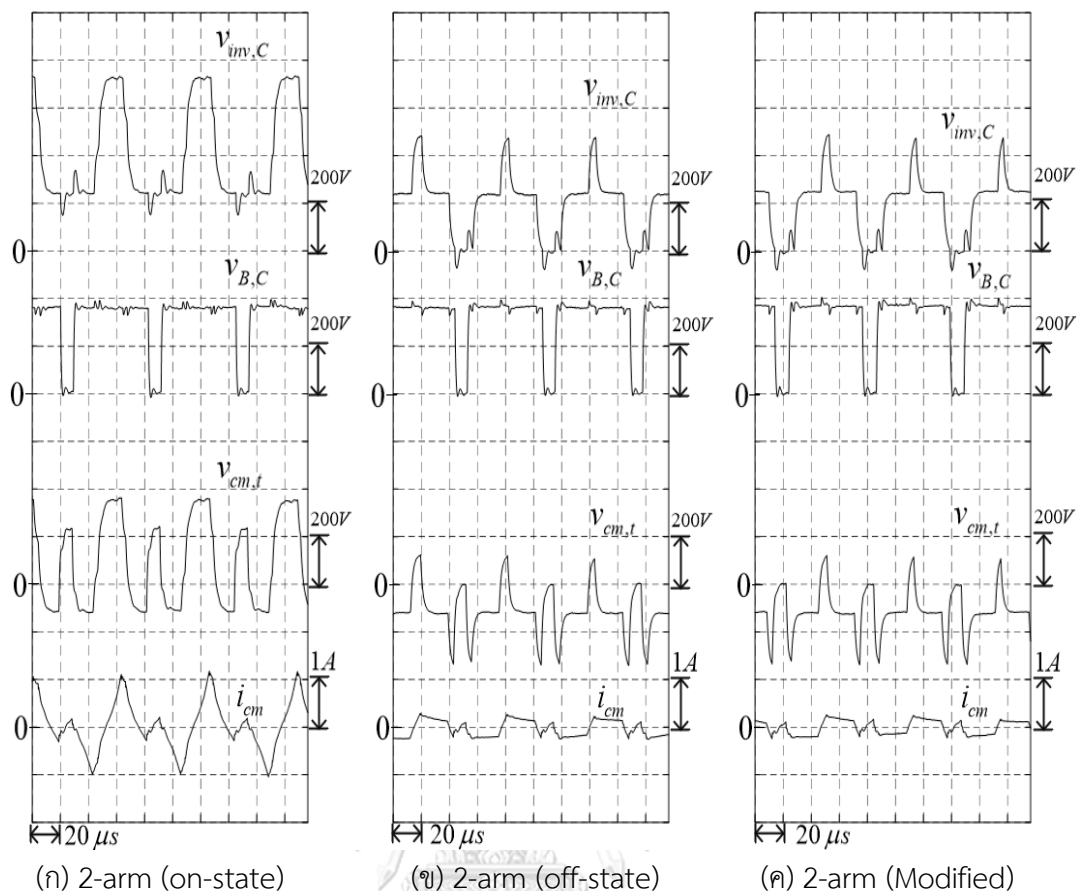
4.1.2 ภาคเครื่องมือวัด

ในการทดลองจะแบ่งเครื่องมือวัดออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) เครื่องมือสำหรับวัดแรงดันโหมตร่วม จะใช้ Differential Probe 100 MHz รองรับการวัดแรงดันโหมตร่วมได้สูงสุด 1400 V_{peak} 2) เครื่องมือสำหรับตรวจจับกระแสรั่วไหลความถี่สูง จะใช้เครื่องมือวัดหม้อแปลงกระแสความถี่สูง (High Frequency CT) YOKOGAWA รุ่น CTL-28-S90-05Z-1R มีย่านการทำงานตั้งแต่ 10 mA ถึง 10 A ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 100 MHz และ 3) เครื่องมือที่ใช้ในการแสดงผลสัญญาณแรงดันต่าง ๆ และกระแสรั่วไหลความถี่สูง จะใช้สโคป รุ่น YOKOGAWA DL 1640

4.2 ผลการทดลองกรณีกำลังไฟฟ้า 100% ของกำลังพิกัดพีวีอินเวอร์เตอร์ 10 kVA แรงดันพีวี 670 Vdc และแรงดันบัลไฟตรง 700 Vdc

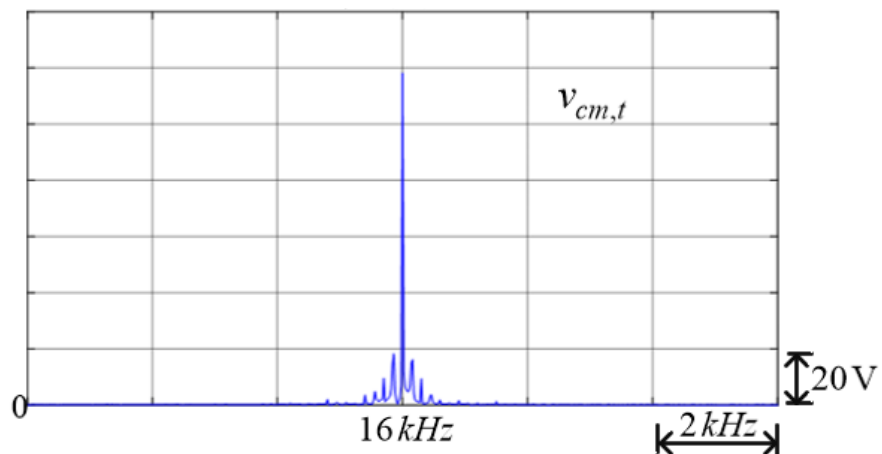


รูปที่ 4.2 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมจากการมอดูเลตรูปแบบต่าง ๆ ในเชิงสเกลเวลาของความถี่มูลฐาน

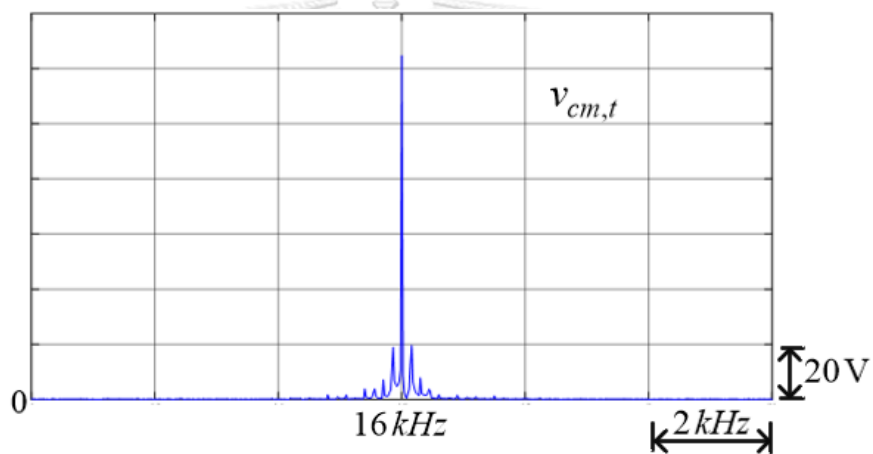


รูปที่ 4.3 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมจากการมอดูเลตรูปแบบต่าง ๆ ในเชิงสเกลเวลาของความถี่การสวิตช์

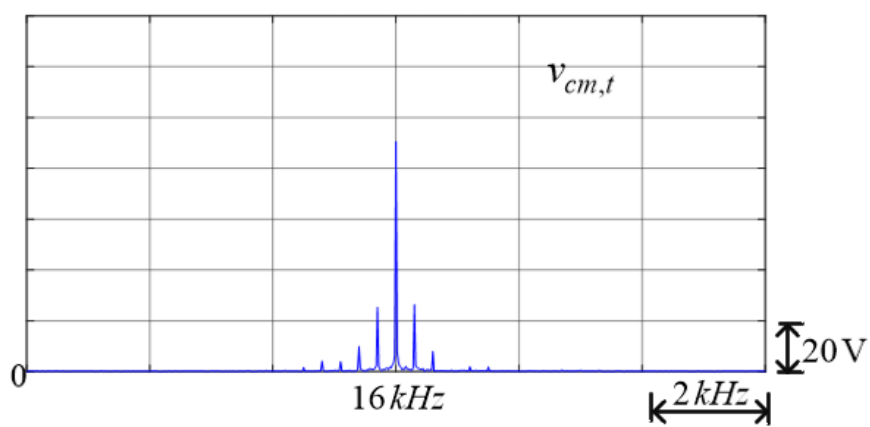
จากผลการทดลองรูปที่ 4.2 พบว่าสอดคล้องกับผลการจำลองในรูปที่ 3.30 ยืนยันแนวคิดจากภาคทฤษฎีสู่ภาคปฏิบัติ โดยรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นในสเกลของสัญญาณว่า เกิดการหักล้างกันจริงของแรงดันโหมตร่วมระหว่างอินเวอร์เตอร์และวงจรพรีระดับ และยังส่งผลต่อการเกิดกระแสรั่วไหลโดยตรง เป็นผลให้กระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แขนแบบดัดแปลง มีขนาดลดลงจากการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ 2 แบบแขนแบบดั้งเดิม ทั้งในเชิงสเกลเวลาและเชิงสเกลความถี่ โดยเฉพาะที่องค์ประกอบความถี่สวิตช์ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งกระแสรั่วไหลของการมอดูเลตสองแขนแบบดัดแปลงลดลงประมาณ 25% จากการมอดูเลตสองแขนปกติ อีกทั้งการมอดูเลตสองแขนแบบดัดแปลงนี้สามารถทำงานได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.2



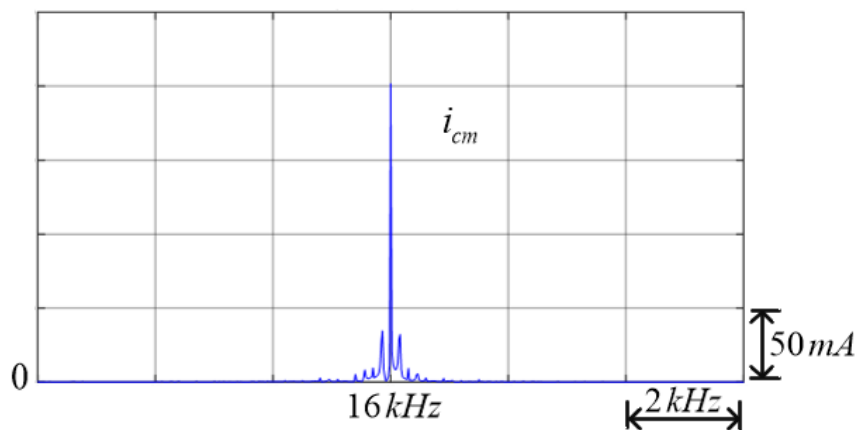
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมแรงดันโหมตร่วมรวมจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state)



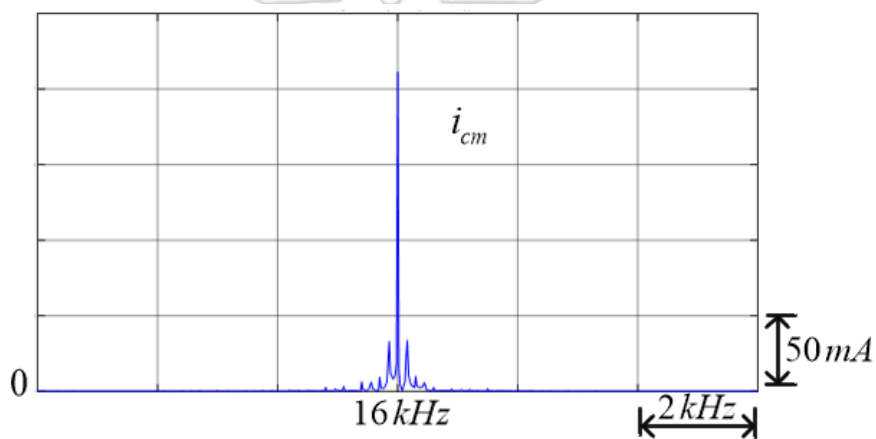
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมแรงดันโหมตร่วมรวมจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state)



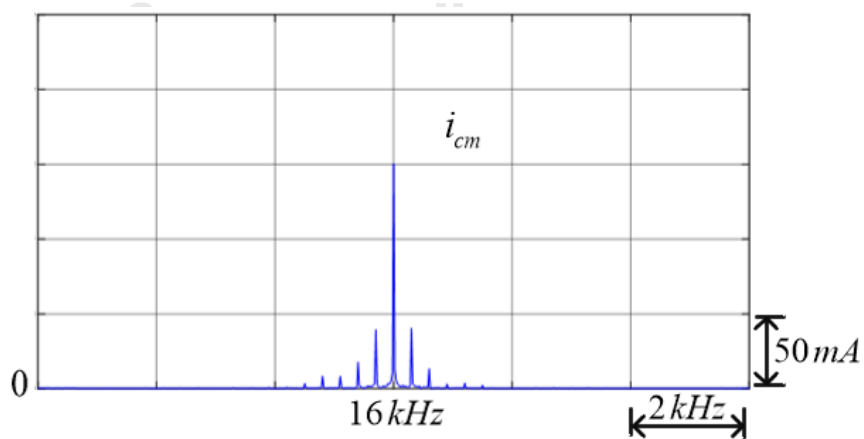
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมแรงดันโหมตร่วมรวมจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (Modified)



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (on-state)



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (off-state)



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมกระแสรั่วไหลจากการมอดูเลตแบบ 2-arm (Modified)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาปัญหาในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดสองภาคสามเฟส 2 ระดับชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลงในประเด็นของกระแสรั่วไหลความถี่สูงในระบบเป็นหลัก โดยกระแสรั่วไหลนี้เกิดจากแรงดันโหมตร่วมจาก 2 วงจร คือ วงจรทบทระดับและอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นธรรมชาติของพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดสองภาคเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง โดยงานวิจัยนี้จะนำความเป็นธรรมชาติของระบบที่มีอยู่ มาดัดแปลงในส่วนของการมอดูเลตวงจรทบทระดับและอินเวอร์เตอร์เพื่อให้แรงดันโหมตร่วมทั้งสองเกิดการหักล้างกันเอง สามารถสรุปเป็นประเด็นสำคัญได้ดังนี้

- 1) นำเสนอการวิเคราะห์แรงดันโหมตร่วมของวงจรทบทระดับและอินเวอร์เตอร์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ เพื่อศึกษาขนาดของแรงดันโหมตร่วมทั้งสองวงจรที่องค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ และจากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบความถี่การสวิตช์จะเป็นองค์ประกอบที่มีขนาดแรงดันโหมตร่วมสูงสุด
- 2) นำเสนอแนวความคิดการมอดูเลตของวงจรทบทระดับและอินเวอร์เตอร์ทั้งชนิดสองแขนและสามแขน เพื่อให้เกิดการลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสชนิดเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตที่นำเสนอสามารถลดทอนแรงดันโหมตร่วมรวมโดยการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วมจากวงจรทบทระดับและอินเวอร์เตอร์และลดกระแสรั่วไหลได้จริง โดยเฉพาะที่องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ แต่สำหรับการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์สามแขนแบบดัดแปลง ถึงแม้ว่าแรงดันโหมตร่วมรวมจะถูกหักล้างจนหมดที่ความถี่การสวิตช์ แต่ต้องใช้แรงดันบัสไฟตรงสูงถึง 3 เท่าของแรงดันบัสไฟตรงปกติ และสำหรับการมอดูเลตสองแขนแบบดัดแปลงจะเกิดกระแสกระชากในช่วงเปลี่ยนโหมตการทำงานระหว่างการมอดูเลตแบบสองแขนเปิดหรือปิดวงจรตลอด จึงต้องอาศัย ramp limiter ในการปรับแรงดัน ณ ช่วงการเปลี่ยนโหมตให้ไม่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด ส่งผลให้ไม่เกิดการหักล้างอย่างสมบูรณ์ดังเช่นการมอดูเลตแบบสามแขน แต่ยังมีความสามารถในการลดกระแสรั่วไหลได้ ดังแสดงผ่านผลการทดสอบทางปฏิบัติกับระบบจริง ส่งผลให้ขนาดวงจรกรองที่ใช้เล็กลงตามขนาดกระแสรั่วไหลที่ลดลง ณ องค์ประกอบความถี่การสวิตช์ ผลสุดท้ายกระแสรั่วไหลความถี่สูงที่เกิดขึ้นจะมีขนาดอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- 1) สามารถนำวิธีการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์สามแขนแบบดัดแปลงไปศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการปรับใช้ให้เหมาะสมกับขนาดแรงดันบัลไฟตรงปกติได้
- 2) สามารถนำวิธีการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอทั้งแบบสองแขนดัดแปลงและสามแขนดัดแปลงไปปรับใช้กับพีวีอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อโครงข่ายแบบไร้หม้อแปลงชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น พีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามระดับและอินเวอร์เตอร์แบบหลายสตริง (Multi-string Inverter) เป็นต้น



บรรณานุกรม

1. Kerekes, T., et al., Evaluation of Three-Phase Transformerless Photovoltaic Inverter Topologies. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009. **24**(9): p. 2202-2211.
2. Gonzalez, R., et al., Transformerless Single-Phase Multilevel-Based Photovoltaic Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008. **55**(7): p. 2694-2702.
3. Cavalcanti, M.C., et al., Modulation Techniques to Eliminate Leakage Currents in Transformerless Three-Phase Photovoltaic Systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010. **57**(4): p. 1360-1368.
4. Promyoo, A., Common-Mode Voltage Reduction by Zero-Voltage Selection for Two-Stage Three-Phase Grid-Connected PV Inverters, in Electrical Engineering. 2560, Chulalongkorn University.
5. Kerekes, T., D. Séra, and L. Máthé. Leakage current measurement in transformerless PV inverters. in 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). 2012.
6. Hou, C., et al., Common-Mode Voltage Reduction Pulsewidth Modulation Techniques for Three-Phase Grid-Connected Converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013. **28**(4): p. 1971-1979.
7. Promyoo, A. and S. Suwankawin. A Common-Mode Voltage Reduction for Two-Stage Three-Phase Transformerless PV Inverters. in 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). 2018.
8. Lee, J. and K. Lee, New Modulation Techniques for a Leakage Current Reduction and a Neutral-Point Voltage Balance in Transformerless Photovoltaic Systems Using a Three-Level Inverter. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014. **29**(4): p. 1720-1732.
9. Guo, X., et al., Leakage Current Elimination of Four-Leg Inverter for Transformerless Three-Phase PV Systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016. **31**(3): p. 1841-1846.

10. Zhou, L., et al. Low leakage current transformerless three-phase photovoltaic inverter. in 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2016.
11. Xiaoqiang, G., et al. Leakage current reduction of transformerless three-phase cascaded multilevel PV inverter. in 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2015.
12. Zhou, Y., et al., A Transformerless Grid-Connected Photovoltaic System Based on the Coupled Inductor Single-Stage Boost Three-Phase Inverter. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014. **29**(3): p. 1041-1046.
13. Cougo, B., et al. Comparative Evaluation of Individual and Coupled Inductor Arrangements for Input Filters of PV Inverter Systems. in 2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS). 2012.
14. Huan, Z., W. Shuo, and J. Puukko. Common mode EMI noise modeling and prediction for a three-phase, three-level, grid tied photovoltaic inverter. in 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 2016.
15. Dong, D., et al. Common-mode EMI noise reduction for grid-interface converter in low-voltage DC distribution system. in 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2012.
16. Pairodomchai, P. and S. Sangwongwanich. Exact common-mode and differential-mode equivalent circuits of inverters in motor drive systems taking into account input rectifiers. in 2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 2011.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายปวเรศ อำไพ
วัน เดือน ปี เกิด	29 มิถุนายน พ.ศ.2537
สถานที่เกิด	พิษณุโลก
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 4 หมู่ 2 ตำบลปากน้ำ อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย 64110
ผลงานตีพิมพ์	- การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 (EECON-42)