

การลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์สำหรับอินเวอร์เตอร์พีวี
ชนิดสองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย



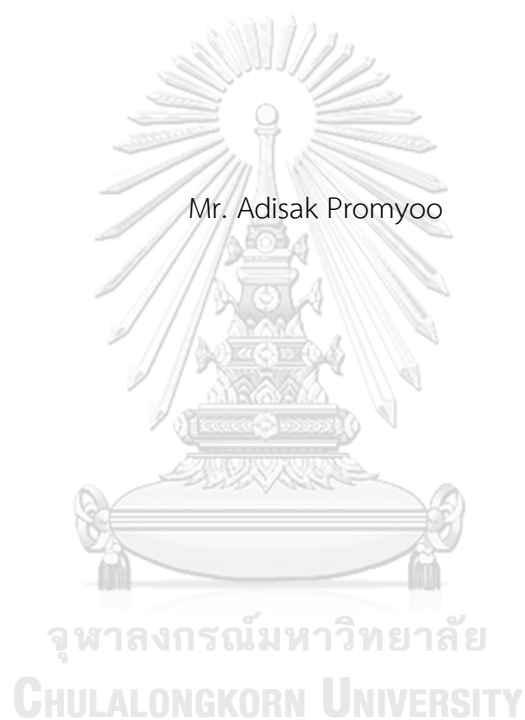
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Common-Mode Voltage Reduction by Zero-Voltage Selection for Two-Stage
Three-Phase Grid-Connected PV Inverters

Mr. Adisak Promyoo



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

อดิศักดิ์ พรหมอยู่ : การลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์สำหรับอินเวอร์เตอร์พีวีชนิดสองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย (Common-Mode Voltage Reduction by Zero-Voltage Selection for Two-Stage Three-Phase Grid-Connected PV Inverters) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภวิน, หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการลดทอนแรงดันโหมตร่วมสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย โดยงานวิจัยนี้จะพิจารณาแรงดันโหมตร่วมทั้งจากวงจรทระดับและวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสไปพร้อมๆกัน ในเบื้องต้นจะนำเสนอถึงวงจรสมมูลที่มีความแม่นยำสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ วงจรสมมูลนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อกันและลักษณะของรูปคลื่นของแรงดันโหมตร่วม ณ ขณะใดขณะหนึ่งของอินเวอร์เตอร์และของวงจรทระดับ หลังจากนั้นนำเสนอวิธีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์แบบใหม่ที่นำสถานะการสวิตช์ของวงจรทระดับมาพิจารณาเพื่อให้เกิดการหักล้างกันของแรงดันโหมตร่วม แนวคิดของการมอดูเลตดังกล่าวจะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือจะเกี่ยวข้องกับสัญญาณคลื่นพาห์ของวงจรทระดับและของอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะต้องซิงโครไนซ์ที่ใช้คาบการสวิตช์เดียวกันและมีการกลับเฟสซึ่งกันและกัน ส่วนที่สองคือการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ของอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้จังหวะการสวิตช์ของวงจรทระดับตรงกับจังหวะการสวิตช์ของแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันของวงจรทระดับมากที่สุด

ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของวงจรสมมูลที่นำเสนอ โดยให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องเหมือนกับของวงจรจริงที่มีวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวิธีการลดทอนแรงดันโหมตร่วมที่นำเสนอ โดยสามารถลดทอนแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลได้อย่างมีนัยสำคัญ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5870387521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: COMMON-MODE VOLTAGE REDUCTION / ZERO-VOLTAGE SELECTION / TWO-STAGE THREE-PHASE GRID-CONNECTED PV INVERTERS

ADISAK PROMYOO: Common-Mode Voltage Reduction by Zero-Voltage Selection for Two-Stage Three-Phase Grid-Connected PV Inverters. ADVISOR: ASST. PROF. SURAPONG SUWANKAWIN, Ph.D., pp.

This thesis proposes a common-mode voltage reduction method for two-stage three-phase grid connected PV inverter systems. The common-mode voltages from boost converter and three-phase inverter are considered simultaneously. First, the exact common-mode equivalent circuit of PV system is analyzed, the resultant equivalent circuit can explain well the connection of the common-mode voltages in the circuit and the exhibited instantaneous waveforms of the common-mode voltages. Second, a novel modulation method of inverter is proposed; this method takes the switching state of boost converter into consideration to obtain the cancellation of common-mode voltages. The proposed modulation method comprises two main procedures. The first one is concerned with the carrier signals of boost converter and inverter; both carrier signals are synchronized with the same switching period and are out-of-phase to each other. The latter is the selection of zero voltage for inverter in order to align the switching timing of boost converter with a phase voltage of inverter which is nearest to the boost-converter voltage.

The simulation results show the correctness of the exact equivalent circuit; the response of resultant equivalent circuit is similar to the real circuit with boost converter and inverter. Moreover, the experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed common-mode voltage reduction method; the common-mode voltage and the leakage current can be significantly attenuated.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือของ ผศ.ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่างๆตลอดการทำวิจัย รวมถึงบริษัท เอ.พี.วาย. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่ช่วยเหลือด้านฟิวเจอร์เตอร์ในงานวิจัยและคุณ เกรียงไกร ปลาสาครที่ช่วยในการพัฒนาซอฟต์แวร์

ขอขอบคุณคำแนะนำและกำลังใจของคณาจารย์และพี่น้องแห่งห้องปฏิบัติการวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำให้ผมมีแรงผลักดันในด้านการงานวิจัยจนประสบผลสำเร็จ สุดท้ายขอขอบคุณพระคุณมารดา และครอบครัวที่ให้โอกาสและสนับสนุนให้ศึกษาหาความรู้เท่าที่ ต้องการและเป็นกำลังใจให้ผ่านพ้นอุปสรรคและปัญหาต่างๆ มาโดยตลอด



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ผ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาจากแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิ้ลยูเอ็ม (PWM).....	2
1.1.1 การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ (Conducted Electromagnetic Interference; EMI) และปัญหาความปลอดภัย	2
1.1.2 อันตรายจากกระแสสัมผัสหรือไฟฟ้าดูดในกรณีแผงพีวีไม่ได้ต่อลงกราวด์และมาตรฐาน	3
1.2 ตัวเก็บประจุแฝงของพีวี (Stray Capacitor, Parasitic Capacitor).....	4
1.3 วิธีการลดแรงดันโหมตร่วมของงานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	7
1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.7 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	7
บทที่ 2 ลักษณะสมบัติของแรงดันโหมตร่วมสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย.....	8
2.1 ลักษณะแรงดันต้านออกและแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์	8
2.2 ลักษณะการสร้างแรงดันและแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับ	11

2.3	พฤติกรรมและทิศทางของกระแสรั่วไหล	13
2.4	วงจรกรองการแทรกสอดทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	14
บทที่ 3	วงจรสมมูลที่แม่นยำสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคแบบเชื่อมต่อโครงข่าย	19
3.1	สมการแรงดันและสมการกระแสในโหมดรวมและโหมดผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อย .	21
3.1.1	สมการวงจรด้านพีวี (PV Side)	21
3.1.2	สมการวงจรทบระดับ (Boost Converter)	23
3.1.2.1	สมการแรงดันที่ด้านเข้าและด้านออกของวงจรทบระดับ	23
3.1.2.2	สมการกระแสที่ด้านเข้าและด้านออกของวงจรทบระดับ	25
3.1.3	วงจรบัสไฟตรง (DC Bus)	25
3.1.4	วงจรอินเวอร์เตอร์	27
3.1.4.1	สมการแรงดันโหมดรวมและโหมดผลต่างของวงจรอินเวอร์เตอร์	28
3.1.4.2	สมการกระแสโหมดรวมและโหมดผลต่างของวงจรอินเวอร์เตอร์	29
3.1.5	วงจรกรอง EMI ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์	30
3.1.6	สมการวงจรโครงข่าย (Grid)	32
3.1.7	วงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง	33
3.2	วงจรสมมูลโหมดรวมที่แม่นยำของอินเวอร์เตอร์	37
3.2.1	วงจรสมมูลโหมดรวมของระบบ	37
3.2.1.1	วงจรสมมูลโหมดรวมที่ด้านเข้าของแหล่งจ่ายพีวี	37
3.2.1.2	วงจรสมมูลโหมดรวมที่ด้านเข้าและด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ($v_{o,c}$)	39
3.3	ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของวงจรสมมูลโหมดรวม	42
บทที่ 4	การลดทอนแรงดันโหมดรวมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์	47
4.1	การมอดูเลตโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์	48
4.2	ผลการจำลองการลดทอนแรงดันโหมดรวมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์	50

4.3	เปรียบเทียบสเปคตรัมผลการจำลองระหว่างการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ การกลับ คลื่นพหุวัจนระดับและการมอดูเลตโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์	53
บทที่ 5	ผลการทดลองการลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์	55
5.1	โครงสร้างของระบบทดสอบ	55
5.1.1	ระบบวงจรภาคกำลัง	56
5.1.2	อุปกรณ์ตรวจวัด	56
5.2	ผลการทดลองกรณีกำลังไฟฟ้า 33% ของพิกัดกำลังไฟฟ้า 10kW	57
5.2.1	กรณี 1 แรงดันพีวี 680 Vdc และแรงดันบัสไฟตรง 750Vdc	57
5.2.2	กรณี 2 แรงดันพีวี 500 Vdc และแรงดันบัสไฟตรง 750Vdc	60
5.3	ผลการทดลองการเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้า 66% ของกำลังพิกัด 10kW	63
5.3.1	กรณี 3 แรงดันพีวี 680Vdc แรงดันบัสไฟตรง 750Vdc.....	63
5.3.2	กรณี 4 แรงดันพีวี 500 แรงดันบัสไฟตรง 750Vdc	66
5.4	ผลการทดลองกรณีกำลังไฟฟ้า 100% ของพิกัดกำลังไฟฟ้า 10kW	69
5.4.1	กรณี 5 แรงดันพีวี 680Vdc แรงดันบัสไฟตรง 750Vdc.....	69
5.4.2	กรณี 6 แรงดันพีวี 500Vdc แรงดันบัสไฟตรง 750Vdc.....	72
บทที่ 6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	75
6.1	บทสรุปผลการวิจัย	75
6.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	76
	รายการอ้างอิง	77
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	79

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 เวลาการตัดวงจรตรวจพบกระแสรั่วไหลตามมาตรฐาน VDE-0126-01-01.....	3
ตารางที่ 2.1 ลักษณะแรงดันโหมคร่วมที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์.....	11
ตารางที่ 3.1 สมการสัญญาณโหมคร่วมและโหมคผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อยของวงจรทั้งหมด.....	35
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน.....	42



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย	1
รูปที่ 1.2	รูปจำลองตัวเก็บประจุแฝงของพีวีเซลล์ [11]	4
รูปที่ 1.3	โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์ภาคเดียว [2]	5
รูปที่ 1.4	วงจรสมมูลโหมตร่วมของพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย [3].....	6
รูปที่ 1.5	โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคแบบ CL-SSBI [5].....	6
รูปที่ 2.1	ลักษณะการสวิตช์แรงดันโหมตปกติและแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์	8
รูปที่ 2.2	ลักษณะแรงดันโหมตปกติที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์	9
รูปที่ 2.3	ลักษณะแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ($V_{inv,C}$)	10
รูปที่ 2.4	ลักษณะแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ ใน 1 คาบการสวิตช์..	11
รูปที่ 2.5	โครงสร้างวงจรทบระดับเชื่อมต่อพีวี	12
รูปที่ 2.6	ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมร่วม (Coupling Inductor)	12
รูปที่ 2.7	ลักษณะสัญญาณการมอดูเลตของวงจรทบระดับ	13
รูปที่ 2.8	สัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรทบระดับ	13
รูปที่ 2.9	ทางเดินกระแสรั่วไหลในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์แบบสองภาคสามเฟส	14
รูปที่ 2.10	ทิศทางการแสโหมตร่วมและโหมตผลต่างของวงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 2.11	วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมตร่วม	15
รูปที่ 2.12	วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมตผลต่าง	16
รูปที่ 2.13	ตัวเหนี่ยวนำโหมตร่วมและโหมตผลต่าง	16
รูปที่ 2.14	ทิศทางการแสโหมตร่วมและโหมตผลต่างของวงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
รูปที่ 2.15	วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมตร่วม	17

รูปที่ 2.16 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสไหลผลต่าง	17
รูปที่ 2.17 ตัวเหนี่ยวนำโหมคร่วมสามเฟส.....	18
รูปที่ 3.1 วงจรพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	20
รูปที่ 3.2 วงจรด้านพีวี.....	22
รูปที่ 3.3 วงจรทบระดับแบบตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance).....	23
รูปที่ 3.4 วงจรบัลไฟตรง	25
รูปที่ 3.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อ $S_{inv} = [1 \ 0 \ 0]$	27
รูปที่ 3.6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟกระแสสลับ.....	30
รูปที่ 3.7 วงจรโครงข่าย	32
รูปที่ 3.8 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟกระแสตรง.....	33
รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลโหมคร่วมด้านพีวี	37
รูปที่ 3.10 วงจรโหมคร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง	38
รูปที่ 3.11 แรงแม่เหล็กที่เกิดจากวงจรทบระดับ.....	39
รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลโหมคร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์.....	39
รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลโหมคร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ.....	40
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลโหมคร่วมวงจรด้านโครงข่าย.....	41
รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลโหมคร่วมของพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟส.....	41
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองเปรียบเทียบบวจริงกับวงจรสมมูลโหมคร่วม.....	43
รูปที่ 3.17 ภาพขยายผลการจำลองเปรียบเทียบบวจริงกับวงจรสมมูลโหมคร่วม.....	44
รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลโหมคร่วมเมื่อละลาย C_h	45
รูปที่ 3.19 ภาพขยายผลการจำลองเปรียบเทียบบวจริงกับวงจรสมมูลโหมคร่วมเมื่อละลาย C_h ...	46
รูปที่ 4.1 ลักษณะการมอดูเลต	47
รูปที่ 4.2 วงจรพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	49

รูปที่ 4.3 ผลการจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์กรณีละเอียด C_h	51
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์กรณีไม่มี C_h	52
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์เมื่อมอดูเลต เกิน	52
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบสเปคตรัมแรงดันโหมตร่วมระหว่างแบบสเปซเวกเตอร์ทั่วไปกับแบบที่ นำเสนอ.....	53
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบสเปคตรัมกระแสโหมตร่วมระหว่างแบบสเปซเวกเตอร์ทั่วไปกับแบบที่ นำเสนอ.....	54
รูปที่ 5.1ระบบใช้ทดสอบการทำงานของมอดูเลตของงานวิจัย.....	55
รูปที่ 5.2 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 1	57
รูปที่ 5.3 ส่วนขยายแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 1.....	58
รูปที่ 5.4 สเปคตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมกรณี 1	58
รูปที่ 5.5 สเปคตรัมสัญญาณกระแสโหมตร่วมกรณี 1.....	59
รูปที่ 5.6 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 2.....	60
รูปที่ 5.7 ส่วนขยายแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 2.....	61
รูปที่ 5.8 สเปคตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมกรณี 1	61
รูปที่ 5.9 สเปคตรัมสัญญาณกระแสโหมตร่วมกรณี 1.....	62
รูปที่ 5.10 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 3.....	63
รูปที่ 5.11 ส่วนขยายแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 3.....	64
รูปที่ 5.12 สเปคตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมกรณี 3.....	64
รูปที่ 5.13 สเปคตรัมสัญญาณกระแสโหมตร่วมกรณี 3.....	65
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 4.....	66
รูปที่ 5.15 ส่วนขยายแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 4.....	67
รูปที่ 5.16 สเปคตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมกรณี 4.....	67

รูปที่ 5.17 สเปกตรัมสัญญาณกระแสไหลรวมกรณี 4.....	68
รูปที่ 5.18 ผลการทดลองแรงดันและกระแสไหลรวมกรณี 5.....	69
รูปที่ 5.19 รูปขยายแรงดันและกระแสไหลรวมกรณี 5.....	70
รูปที่ 5.20 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันไหลรวมกรณี 5.....	70
รูปที่ 5.21 สเปกตรัมสัญญาณกระแสไหลรวมกรณี 5.....	71
รูปที่ 5.22 ผลการทดลองแรงดันและกระแสไหลรวมกรณี 6.....	72
รูปที่ 5.23 รูปขยายแรงดันและกระแสไหลรวมกรณี 6.....	73
รูปที่ 5.24 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันไหลรวมกรณี 6.....	73
รูปที่ 5.25 สเปกตรัมสัญญาณกระแสไหลรวมกรณี 6.....	74



รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

C_B	: ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่บัสไฟตรง
C_h	: ตัวเก็บประจุแฝงระหว่างบัสไฟตรงและซิงก์ระบายความร้อน
C_K, C_m	: ตัวเก็บประจุไฟฟ้าของวงจรกรอง EMI ด้านไฟกระแสสลับ
C_{PV}	: ตัวเก็บประจุประลิตระหว่างแผงพีวีกับกราวด์
C_{x1}, C_{x2}	: ตัวเก็บประจุไฟฟ้าโหมดปกติของวงจรกรอง EMI ด้านไฟกระแสตรง
C_Y, C_{Y1}	: ตัวเก็บประจุไฟฟ้าโหมดร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟกระแสตรง
f_{SW}	: ความถี่การสวิตช์
$i_{BUS,D}$: กระแสโหมดผลต่างที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_B
$i_{BUS,C}$: กระแสโหมดรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_h
$i_{i,C}$: กระแสโหมดรวมที่ไหลผ่าน C_{PV}
$i_{X,C}$: กระแสโหมดรวมที่ไหลผ่าน L_{CM} ของวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง
$i_{y,C}$: กระแสโหมดรวมที่ไหลผ่านวงจรทบระดับ
$i_{O,C}$: กระแสโหมดรวมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
i_{K1}, i_{K2}, i_{K3}	: กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ
$i_{u,D}, i_{v,D}, i_{w,D}$: กระแสโหมดผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
i'_u, i'_v, i'_w	: กระแสเฟสที่ด้านเข้าวงจรโครงข่าย
$i'_{u,D}, i'_{v,D}, i'_{w,D}$: กระแสโหมดผลต่างที่ไหลเข้าออกโครงข่าย
i_P, i'_P	: กระแสบัสไฟตรงที่ขั้วบวกของบัสไฟตรงก่อนและหลังตัวเก็บประจุ
$i_{P,D}, i_{N,D}$: กระแสโหมดผลต่างที่บัสไฟตรงก่อนตัวเก็บประจุ
$i'_{P,C}, i'_{N,C}$: กระแสโหมดรวมที่บัสไฟตรงหลังตัวเก็บประจุ
i_u, i_v, i_w	: กระแสเฟสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
i_S, i_C	: กระแสเฟสที่ไหลเข้าวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง
$S_{inv} = [S_u \ S_v \ S_w]^T$: ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์

$T_{1\phi}$: เมตริกซ์การแปลงปริมาณเฟสให้เป็นสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างสำหรับวงจร 1 เฟส 2 สาย
$T_{3\phi}$: เมตริกซ์การแปลงปริมาณเฟสให้เป็นสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างสำหรับวงจร 3 เฟส 3 สาย
$V_{BUS,C}$: แรงดันโหมตร่วมที่บัสไฟตรง
$V_{BUS,D}$: แรงดันโหมตผลต่างที่บัสไฟตรง
V_{CM}	: แรงดันโหมตร่วมรวม
V_d	: แรงดันบัสไฟตรง
$V_{S,C}$: แรงดันโหมตร่วมที่พีวีเทียบกราวด์
$V_{CX2,C}$: แรงดันโหมตร่วมที่วงจรกรอง EMI ด้านไฟกระแสตรงเทียบกราวด์
$V_{g,C}$: แรงดันโหมตร่วมที่วงจรโครงข่ายเทียบกราวด์
$V_{O,C}$: แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกราวด์
V_{NE}	: แรงดันโหมตที่ขั้วลบบัสไฟตรงเทียบกราวด์
V_a, V_b, V_c	: แรงดันด้านโครงข่ายเฟส A, B, และ C ตามลำดับ
V_u, V_v, V_w	: แรงดันเฟสที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์
$V_{u,D}, V_{v,D}, V_{w,D}$: แรงดันโหมตผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์
$V'_{u,D}, V'_{v,D}, V'_{w,D}$: แรงดันโหมตผลต่างต้นโครงข่าย
$V_{P,D}, V_{P,C}$: แรงดันโหมตผลต่างและโหมตผลรวมที่ขั้วบวกบัสไฟตรง
$V_{N,D}, V_{N,C}$: แรงดันโหมตผลต่างและโหมตผลรวมที่ขั้วลบบัสไฟตรง
$V_{inv,C}$: แรงดันโหมตร่วมวัดที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบขั้วลบบัสไฟตรง
$V_{B,C}$: แรงดันโหมตร่วมวัดที่วงจรบัสเทียบขั้วลบบัสไฟตรง
V_{PE}	: แรงดันขั้วบวกบัสไฟตรงเทียบกราวด์
V_{NE}	: แรงดันขั้วลบบัสไฟตรงเทียบกราวด์
V_{PV}	: แรงดันของพีวี
V^*_u, V^*_v, V^*_w	: แรงดันคำสั่งในการมอดูเลต
Z_b	: อิมพีแดนซ์ของ C_B
Z_h	: อิมพีแดนซ์ของ C_h
Z_g	: อิมพีแดนซ์ของสายส่งโครงข่าย

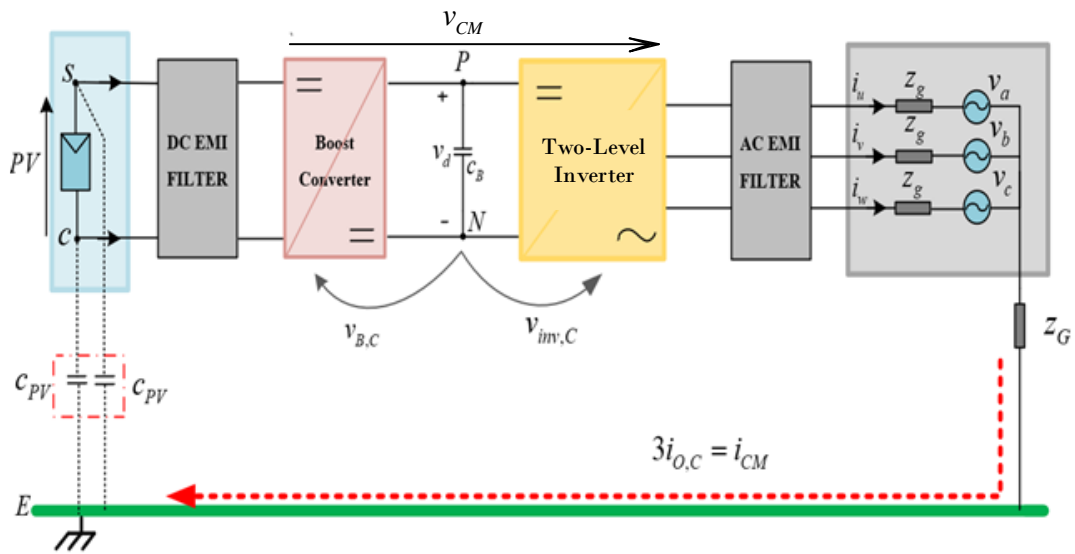
Z_G	:	อิมพีแดนซ์ของสายกราวด์โครงข่าย
Z_{PV}	:	อิมพีแดนซ์ของ C_{PV}
Z_{CY}	:	อิมพีแดนซ์ของ C_Y
Z_{CY1}	:	อิมพีแดนซ์ของ C_{Y1}
Z_K	:	อิมพีแดนซ์ของ C_K
Z_m	:	อิมพีแดนซ์ของ C_m



บทที่ 1

บทนำ

ระบบพีวีเชื่อมต่อโครงข่ายแบบไม่มีหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformerless PV system) ถูกนำมาใช้มากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและประสิทธิภาพสูง [1]-[7] รูปที่ 1.1 แสดงถึงระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาค ที่ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟสเชื่อมต่อโครงข่ายและวงจรทบทระดับที่ต่อกับโมดูลโฟโตโวลแตอิก โดยกระบวนการแปลงผันกำลังจะอาศัยวิธีมอดูเลตแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation ; PWM) ทั้งในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรทบทระดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแรงดันฉับพลัน dv/dt ทำให้เกิดแรงดันโหมคร่วมภายในระบบมากกว่าระบบพีวีอินเวอร์เตอร์หนึ่งภาคที่มีเฉพาะอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อโครงข่ายเท่านั้น แรงดันโหมคร่วมสูงนี้สามารถกระตุ้นให้เกิดกระแสรั่วไหล (Leakage Current ; i_{CM}) ไหลวนภายในระบบผ่านตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic Capacitor ; C_{PV}) ระหว่างแผงพีวีกับกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย

สามารถแยกพิจารณาองค์ประกอบของแรงดันโหมคร่วมรวม (V_{CM}) ได้จากที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ($V_{inv,C}$) และแรงดันโหมคร่วมของวงจรทบทระดับ ($V_{B,C}$) ดังสมการที่ (1.1)

$$V_{CM} = V_{inv,C} - V_{B,C} \tag{1.1}$$

- I) $V_{B,C}$ เป็นองค์ประกอบแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการมอดูเลตแบบสวิตซ์ช่วงจรทบระดับวัตต์เทียบชั่วลบบัสไฟตรง มีลักษณะเป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นรายคาบขึ้นกับความถี่การสวิตซ์
- II) $V_{inv,C}$ เป็นองค์ประกอบแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์วัตต์เทียบกับชั่วลบบัสไฟตรง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสถานะการสวิตซ์ขึ้นกับรูปแบบการมอดูเลต

1.1 ปัญหาจากแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีเอ็ม (PWM)

1.1.1 การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ (Conducted Electromagnetic Interference; EMI) และปัญหาความปลอดภัย

ค่าตัวเก็บประจุแฝงอาจมีค่าสูงขึ้นซึ่งมีหลายปัจจัย เช่น วัสดุในการผลิต รูปแบบการติดตั้งและสภาพแวดล้อม กระแสรั่วไหลจะมีขนาดสูงขึ้นเมื่อค่าตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic Capacitor) ระหว่างแผงพีวีกับกราวด์เพิ่มขึ้นจากนาโนฟารัดเป็นไมโครฟารัด [2], [5] ซึ่งอาจทำให้แผงพีวีเสียหายหรือมีอายุการใช้งานสั้นลง รวมถึงส่งผลกระทบต่ออินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่ติดตั้งอยู่รายรอบได้ จากบทความที่ [10] ได้กล่าวถึงปัญหาแรงดันโหมตร่วมได้แก่ 1) การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ (Conducted Electromagnetic Interference ; EMI) และ 2) ปัญหาด้านความปลอดภัย (Safety Problem)

อุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่รายรอบอินเวอร์เตอร์อาจทำงานผิดพลาดได้เนื่องจากการรบกวนของกระแสรั่วไหล ซึ่งมีวงรอบการไหลจากอินเวอร์เตอร์ผ่านตัวเก็บประจุแฝงผ่านกริดลงกราวด์และจากกราวด์ผ่านตัวเก็บประจุแฝงพีวีกลับเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 1.1 เนื่องจากกระแสรั่วไหลเป็นสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) กว้างครอบคลุมตั้งแต่ความถี่สวิตซ์ (1-10 kHz) ไปจนถึงย่านที่เป็นการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ (150kHz-30MHz) ปัญหาการรบกวนของกระแสรั่วไหลจึงมีได้หลายรูปแบบ กระแสรั่วที่มีขนาดใหญ่ซึ่งสามารถรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ตรวจสอบความผิดปกติของดินได้ เช่น ตัวชี้บอกความผิดปกติของดิน และอุปกรณ์ตัดวงจรรั่วลงดิน (Earth-Leakage Circuit Breaker) ในขณะเดียวกันกระแสโหมตร่วมในย่านความถี่สูง (150kHz - 30MHz) อาจเกิดการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำส่งผลกระทบต่อเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ ทำงานผิดพลาดได้

สำหรับประเด็นปัญหาความปลอดภัยนั้นจะพิจารณาจากผลกระทบต่อแผงโซลาเซลล์ โดยแผงโซลาเซลล์ทั้งแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline) และแบบหลายผลึก (Polycrystalline) จะมีค่าตัวเก็บประจุแฝงภายในระหว่างพีวีเซลล์กับแผ่นโครงเหล็กครอบแผง ซึ่งแผ่นโครงเหล็กครอบแผงนี้ต้องต่อกราวด์เพื่อความปลอดภัย [2]-[4] และจุดนิวทรัลของกริดถูกต่อลงกราวด์ด้วย จึงทำให้กระแสรั่วไหลความถี่สูงสามารถไหลผ่านแผงพีวีได้ โดยผ่านทางค่าตัวเก็บประจุแฝงซึ่งอยู่ระหว่างแผงพีวีกับกราวด์ [2] ดังแสดงในรูปที่ 1.1

โดยสรุปแล้วปัญหาดังกล่าวข้างต้นมีปัจจัยหลักมาจากแรงดันโหมตร่วมที่เกิดขึ้นจากวงจรระดับและวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่นำเสนอถึงวิธีการลดทอนแรงดันโหมตร่วมเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์

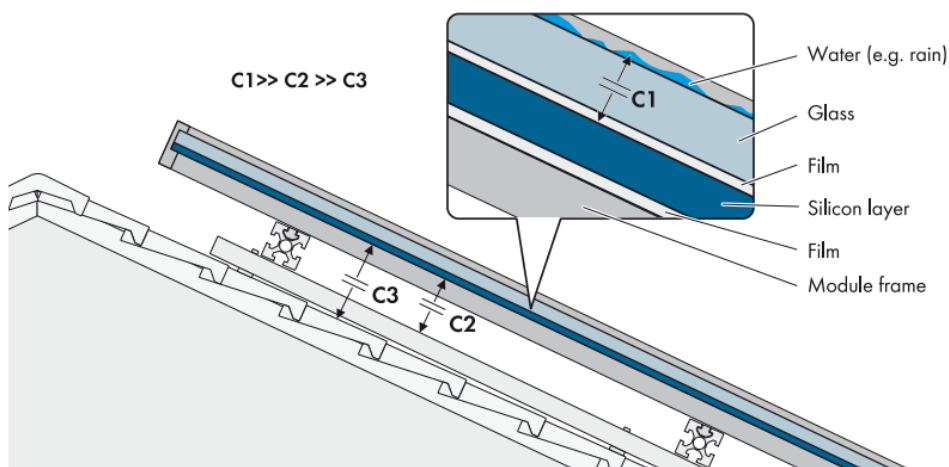
1.1.2 อันตรายจากกระแสสัมผัสหรือไฟฟ้าดูดในกรณีแผงพีวีไม่ได้ต่อลงกราวด์และมาตรฐาน

เมื่อมีการใช้งานในสถานะที่แผงพีวีไม่ได้ต่อลงกราวด์ จะมีแรงดันสูงตกคร่อมระหว่างแผงพีวีและกราวด์ซึ่งสามารถก่อให้เกิดอันตรายจากการสัมผัสหรือไฟฟ้าดูดเมื่อสัมผัสแผงพีวีได้ ดังนั้นตามมาตรฐานแผงพีวีจึงต้องต่อลงกราวด์ ซึ่งทำให้เกิดเส้นทางของกระแสรั่วไหลขึ้นจากกราวด์ไหลกลับเข้าไปที่แผงพีวีโดยกระแสดังกล่าวจะต้องมีขนาดไม่เกิน 300mA (p-p) ตามมาตรฐาน VDE-0126-01 [2]-[4] ในการวัดกระแสรั่วไหลนี้จะใช้ Residual Current Monitoring Unit (RCMU) ซึ่งสามารถตัดวงจรออกจากระบบโครงข่ายได้ทันทีเมื่อกระแสรั่วไหลเกิน 300mA (p-p) โดยมีระยะเวลาในการตัดสินใจในการตัดวงจรออกจากระบบโครงข่ายโดยขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสรั่วไหลดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เวลาการตัดวงจรตรวจพบกระแสรั่วไหลตามมาตรฐาน VDE-0126-01-01

กระแสรั่วไหล (Leakage Current) [mA rms]	เวลาการตัดวงจร (Disconnect Time) [s]
30	0.3
60	0.15
100	0.04

1.2 ตัวเก็บประจุแฝงของพีวี (Stray Capacitor, Parasitic Capacitor)



รูปที่ 1.2 รูปจำลองตัวเก็บประจุแฝงของพีวีเซลล์ [11]

การเกิดขึ้นของตัวเก็บประจุแฝงที่แผงพีวีนั้นเกิดขึ้นทั้งระหว่างพีวีเซลล์กับโครง (C1) ซึ่งอาจจะเป็นแก้วหรือแผ่นโลหะและแบบฟิล์ม และเกิดขึ้นระหว่างพีวีเซลล์กับแผ่นติดตั้งบนหลังคา (C2) และ เกิดขึ้นระหว่างเซลล์พีวีกับหลังคา (C3) ดังรูปที่ 1.2 โดยสามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุแฝงได้ดังสมการ (1.2)

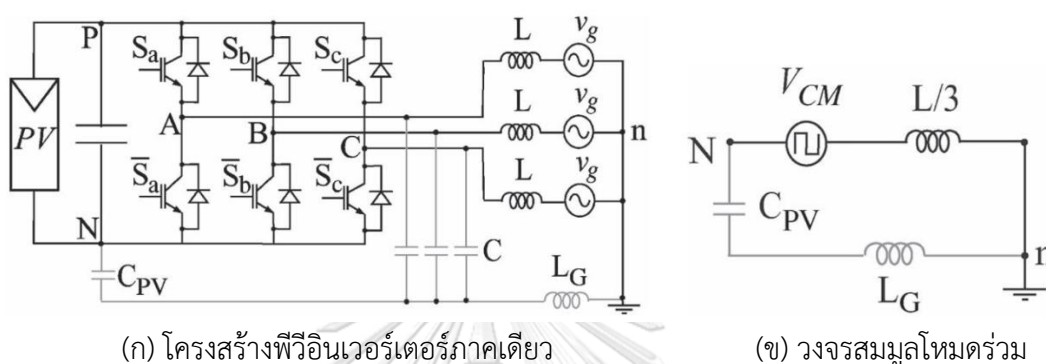
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (1.2)$$

ค่าตัวเก็บประจุแฝงอาจจะมีค่าสูงขึ้นจากหลายปัจจัยเช่น สภาพอากาศ รูปแบบการติดตั้ง และวัสดุในการผลิต เช่นพีวีแบบฟิล์ม พีวีแบบแก้วกระจก เป็นต้น จาก [2] กล่าวว่าวัสดุการผลิต โดยเฉพาะฉากเคลือบพีวีเซลล์นั้นจะมีค่าตัวเก็บประจุผลิตต่างกันโดยได้มีการประมาณไว้ดังนี้ 1) ฉากเคลือบแก้วมีค่าตัวเก็บประจุแฝงประมาณ 7-220nF/kW 2) ฉากเคลือบแบบฟิล์มมีค่าตัวเก็บประจุแฝงประมาณ $1\mu F / kW$ สำหรับสภาพอากาศปกติ

1.3 วิธีการลดแรงดันโหมตร่วมของงานวิจัยที่ผ่านมา

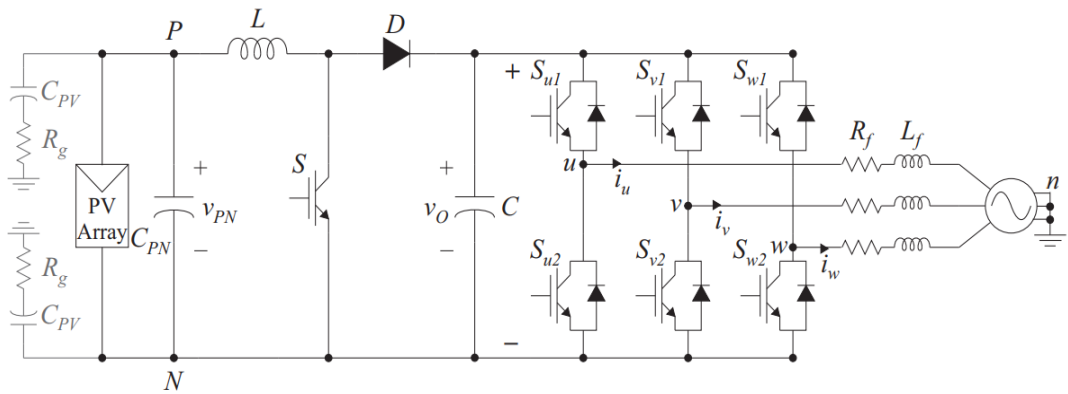
สำหรับแรงดันโหมตร่วมสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์ภาคเดียวจะขึ้นกับแต่ละรูปแบบการมอดูเลตของพีวีอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะได้แรงดันโหมตร่วมที่แตกต่างกัน จากงานวิจัย [2] เป็นพีวีอินเวอร์เตอร์หนึ่งภาคได้แสดงโครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์และเส้นทางของกระแสรั่วไหลรวมถึงวงจรสมมูลโหมตร่วมดังรูปที่ 1.3 ซึ่งแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมโดยทั่วไปนี้เกิดมาจากการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ (Space-Vector PWM ; SVPWM) จะได้แรงดันโหมตร่วมที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวน 6 ชั้น

ในหนึ่งคาบการสวิตช์ที่ความถี่สูงซึ่งจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหล โดยงานวิจัยดังกล่าวสามารถลดกระแสรั่วไหลได้โดยการออกแบบการมอดูเลตที่เรียกว่า Remote Stage Pulse Width Modulation (RSPWM) แต่ก็มีข้อเสียคือทำให้เพิ่มโอกาสการติดมอดูเลตเกินสูงขึ้นเนื่องจากวิธีดังกล่าวสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ต่ำลงดังนั้นจึงต้องเพิ่มขนาดแรงดันบัสไฟตรง โดยใช้แรงดันบัสไฟตรงถึง 650Vdc ขณะที่แรงดันโครงข่ายเท่ากับ 110Vrms เท่านั้น

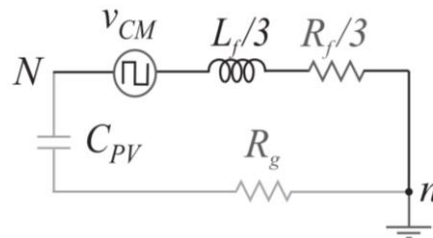


รูปที่ 1.3 โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์ภาคเดียว [2]

สำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคจะมีวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไปตรงอยู่ระหว่างแผงพีวีกับอินเวอร์เตอร์ โดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้วงจรทระดับด้วยเหตุผลดังนี้ 1) สามารถทำงานหาจุดทำงานกำลังสูงสุด (MPPT) 2) รักษาแรงดันบัสไฟตรงให้คงที่มากขึ้นเมื่อเกิดการผันผวนของแรงดันด้านพีวีซึ่งงานวิจัย [3] ดังกล่าวได้แสดงโครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์แบบสองภาคสามเฟส เส้นทางของกระแสรั่วไหลและวงจรสมมูลโหมตร่วมดังรูปที่ 1.4 พบว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรสมมูลโหมตร่วมของงานวิจัยดังกล่าวมีเพียงแหล่งกำเนิดที่มาจากอินเวอร์เท่านั้นและงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะลดแรงดันโหมตร่วมที่กำเนิดมาจากอินเวอร์เตอร์ส่วนเดียวเท่านั้น จากงานวิจัย [7] แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของวงจรทระบบแบบดั้งเดิมนั้นสามารถเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันโหมตร่วมได้ด้วยซึ่งจะทำให้ระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคมีแรงดันโหมตร่วม 2 ส่วน ประกอบด้วยแรงดันโหมตร่วมจากวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์



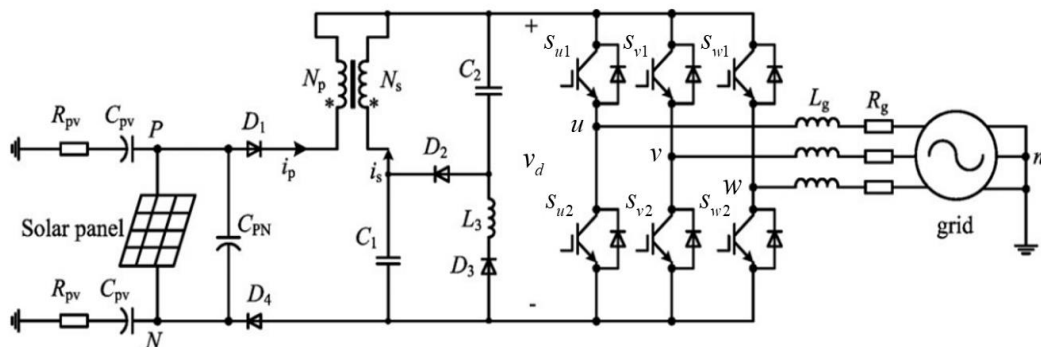
(ก) โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟส



(ข) วงจรสมมูลโหมดร่วม

รูปที่ 1.4 วงจรสมมูลโหมดร่วมของพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย [3]

ดังที่ได้กล่าวมาในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคนั้นส่วนใหญ่จะละเลยแรงดันโหมดร่วมของวงจรระดับ และในบทความ [5] งานวิจัยนี้ลดแรงดันโหมดร่วมโดยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวงจรระดับมีชื่อว่า Coupled-Inductor Single-Stage Boost Inverter (CL-SSBI) ดังรูปที่ 1.5 และเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ที่เรียกว่า Near-Stage Pulse Width Modulation (NSPWM) ซึ่งบทความนี้สามารถลดแรงดันโหมดร่วมได้ดีแต่ต้องเพิ่มจำนวนไดโอด ตัวเหนี่ยวนำและกำลังสูญเสียในระบบเมื่อเทียบกับวงจรทระดับแบบดั้งเดิม และยังทำให้วงจรมีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย



รูปที่ 1.5 โครงสร้างพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคแบบ CL-SSBI [5]

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะนำเสนอวงจรสมมูลโหมตร่วมที่มีความแม่นยำที่สามารถแสดงแรงดันโหมตร่วมทั้งจากอินเวอร์เตอร์และวงจรทบระดับด้วยขบวนการคำนวณทางคณิตศาสตร์จากสมการ-ของบทความ [10] ได้แสดงสมการในการแปลงโหมตสัญญาณจากสัญญาณปริมาณเฟสให้อยู่ในรูปสัญญาณโหมตผลต่างและโหมตร่วม โดยอาศัยความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันผ่านรูปแบบการสวิตช์ วิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่ายเพื่อวิเคราะห์หาวงจรมูลโหมตร่วมที่มีความแม่นยำ

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. หาวงจรมูลโหมตที่มีความแม่นยำสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาแรงดันโหมตร่วมทั้งด้านไฟตรงและด้านไฟสลับ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง ไปพร้อม ๆ กัน
2. ลดทอนแรงดันโหมตร่วมด้วยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อให้เกิดการลดทอนกันของแรงดันโหมตร่วมระหว่างของวงจรทบระดับและของอินเวอร์เตอร์

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. จำลองวงจรมูลโหมตร่วมได้อย่างแม่นยำด้วยขบวนการทางคณิตศาสตร์
2. การลดทอนของแรงดันโหมตร่วมโดยการบวกแรงดันลำดับศูนย์
3. ทดสอบความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดสอบกับระบบจริง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์ห้วงจรและสามารถเขียนวงจรมูลโหมตร่วมที่แม่นยำได้
2. สามารถออกแบบการมอดูเลตสำหรับการลดทอนของแรงดันโหมตร่วมได้
3. สามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้

1.7 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

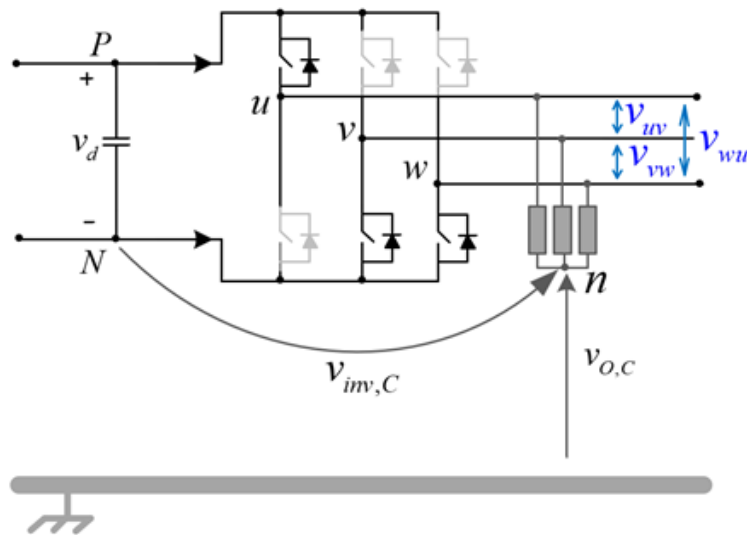
1. ศึกษาสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างแบบการนำ
2. ศึกษาการเขียนวงจรมูลของงานวิจัยที่ผ่านมาและศึกษาการจำลองวงจรมูลแบบที่นำเสนอ
3. จำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างวงจรจริงกับวงจรมูลโหมตร่วม
4. ออกแบบการลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์
5. ทดสอบการทำงานในเชิงปฏิบัติ
6. เก็บข้อมูลการทดลอง ประเมินผลและสรุปผลการทดลอง
7. เขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ลักษณะสมบัติของแรงดันโหมตร่วมสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟส แบบเชื่อมต่อโครงข่าย

จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการลดแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากวงจรทบทระดับและอินเวอร์เตอร์ เพื่อที่จะลดกระแสรั่วไหลหรือกระแสโหมตร่วมในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาพฤติกรรมกระแสรั่วไหลในระบบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงประเด็นต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของกระแสรั่วไหลได้แก่ 1) ลักษณะแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปลักษณะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์กับแรงดันโหมตปกติและแรงดันโหมตร่วมซึ่งเป็นสาเหตุการเกิดกระแสรั่วไหล 2) ลักษณะการสร้างแรงดันด้านออกและแรงดันโหมตร่วมของวงจรทบทระดับ 3) ทิศทางการไหลของกระแสรั่วไหลภายในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดสองภาค 4) วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter)

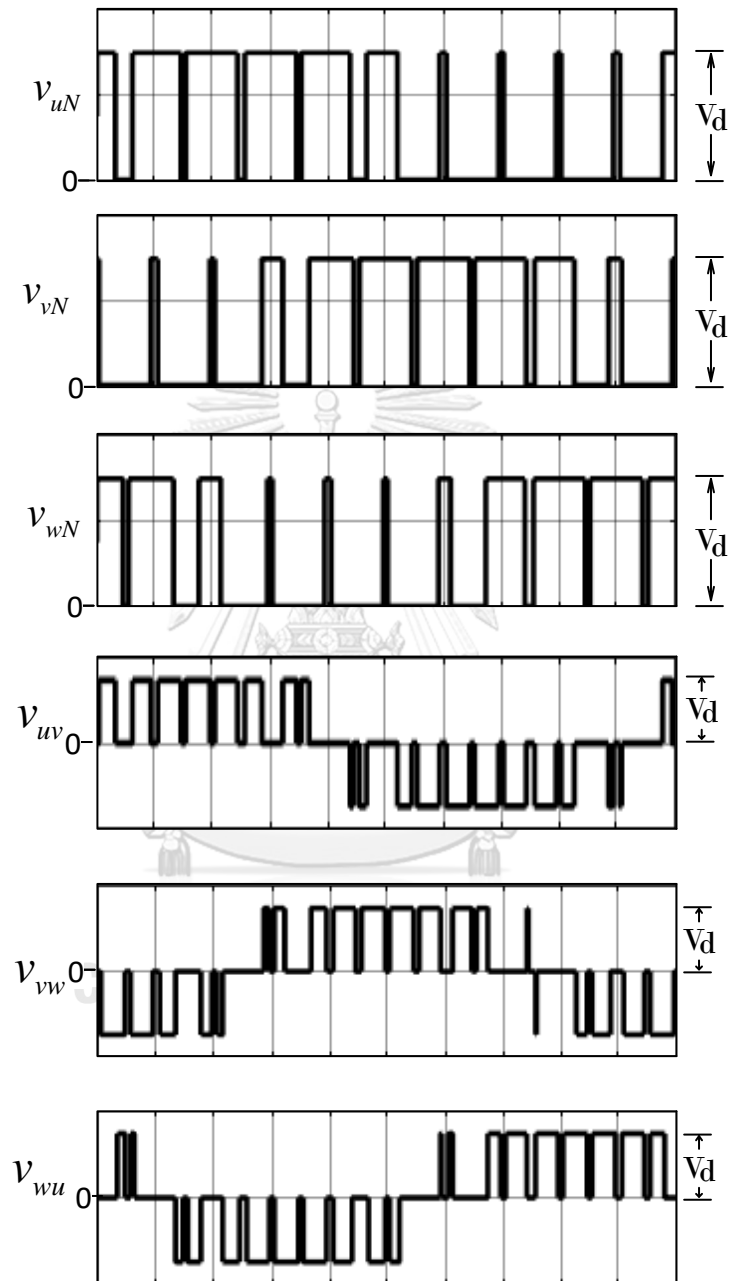
2.1 ลักษณะแรงดันด้านออกและแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.1 ลักษณะการสวิตช์แรงดันโหมตปกติและแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

ลักษณะแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เกิดจากการสับสวิตช์กำลังของแต่ละเฟสกับบัสไฟตรงโดยใช้วิธีมอดูเลตแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ทำให้ได้ลักษณะแรงดันเป็นพัลส์ที่เปลี่ยนแปลงค่าตามจังหวะการสวิตช์ รูปที่ 2.1 แสดงการวัดแรงดันปกติและแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์สามารถอธิบายได้ว่าแรงดันโหมตปกติเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างสายคือ v_{uv} , v_{vw} , v_{wu} และ

แรงดันเฟสวัดเทียบกับขั้วลบัสไฟตรงคือ V_{uN} , V_{vN} , V_{wN} ซึ่งลักษณะของแรงดันจะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 2.2

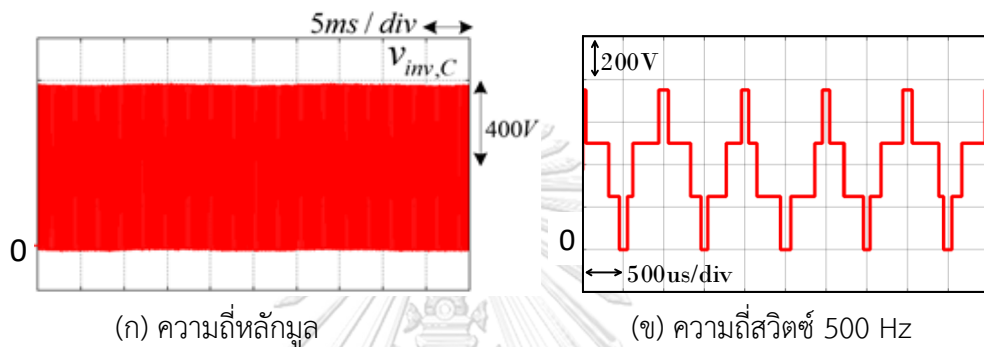


รูปที่ 2.2 ลักษณะแรงดันโหมตปกติที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

ส่วนแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งได้กล่าวไว้บทที่ 1 โดยเกิดจากแรงดันลำดับศูนย์ จะเป็นค่าที่จุด n ของตัวความต้านทานที่มีค่าสูงที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับขั้วลบัสไฟตรงดังแสดงรูปที่ 2.1 และมีลักษณะรูปคลื่นดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 2.3 และสามารถ

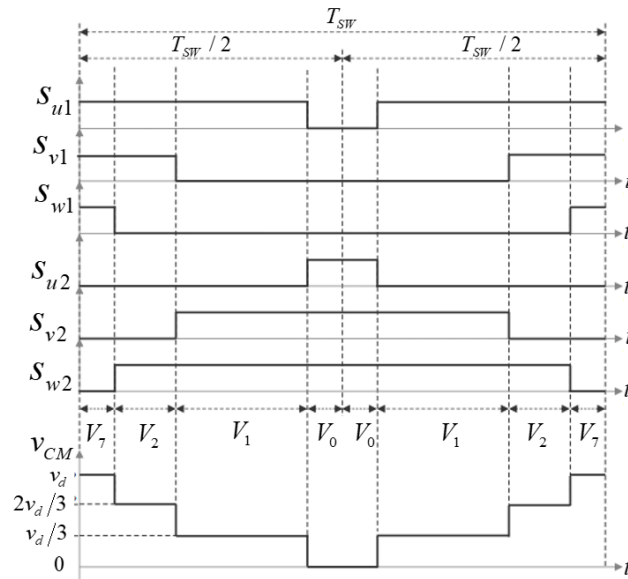
คำนวณค่าแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ($v_{inv,C}$) เทียบชั่วัลบัสไฟตรงดังในสมการที่ (2.1)

$$v_{inv,C} = \frac{v_{uN} + v_{vN} + v_{wN}}{3} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.3 ลักษณะแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ($v_{inv,C}$)

จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าแรงดันโหมตร่วมจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ เกิดจากองค์ประกอบแรงดันที่ความถี่การสวิตช์ซึ่งครอบคลุมถึงองค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูป 2.3 (ข) ลักษณะของแรงดันโหมตร่วมส่วนนี้มีความสัมพันธ์กับสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4 และตารางที่ 2.1 สามารถเปรียบเทียบให้เห็นถึงแรงดันโหมตร่วมที่สถานะการสวิตช์ต่างๆ



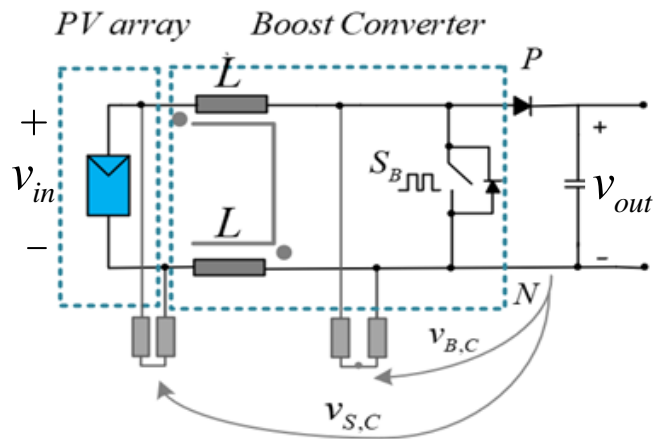
รูปที่ 2.4 ลักษณะแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ ใน 1 คาบการสวิตช์

ตารางที่ 2.1 ลักษณะแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์

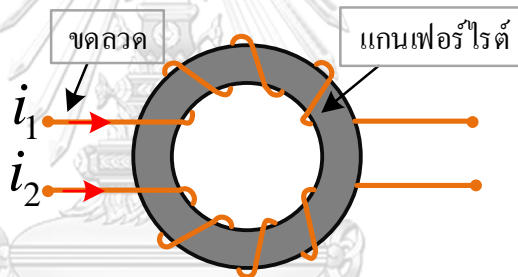
Vector	S _u	S _v	S _w	CMV
V ₀	0	0	0	0
V ₁	1	0	0	$\frac{1}{3}v_d$
V ₂	1	1	0	$\frac{2}{3}v_d$
V ₃	0	1	0	$\frac{1}{3}v_d$
V ₄	0	1	1	$\frac{2}{3}v_d$
V ₅	0	0	1	$\frac{1}{3}v_d$
V ₆	1	0	1	$\frac{2}{3}v_d$
V ₇	1	1	1	v_d

2.2 ลักษณะการสร้างแรงดันและแรงดันโหมตร่วมของวงจรทระดับ

วงจรทระดับเป็นวงจรเป็นวงจรเพิ่มแรงดันให้แรงดันด้านออกสูงกว่าแรงดันด้านเข้า ลักษณะวงจรทระดับแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยทั่วไปตัวเหนี่ยวนำของวงจรทระดับมี 2 ประเภทที่นิยม 1) มีตัวเหนี่ยวนำด้านเดียว 2) ตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) แต่งานวิจัยนี้จะใช้ตัวเหนี่ยวนำร่วม โดยการพันขดลวดทั้งที่ขั้วบวกและขั้วลบบนแกนแบบเฟอร์ไรต์มีลักษณะการพันขดลวดแสดงดังรูป 2.6



รูปที่ 2.5 โครงสร้างวงจรทบทระดับเชื่อมต่อพีวี

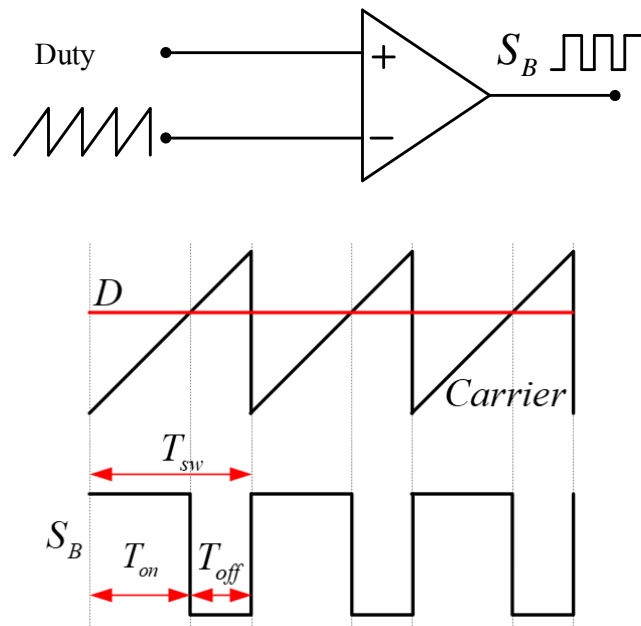


รูปที่ 2.6 ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมร่วม (Coupling Inductor)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

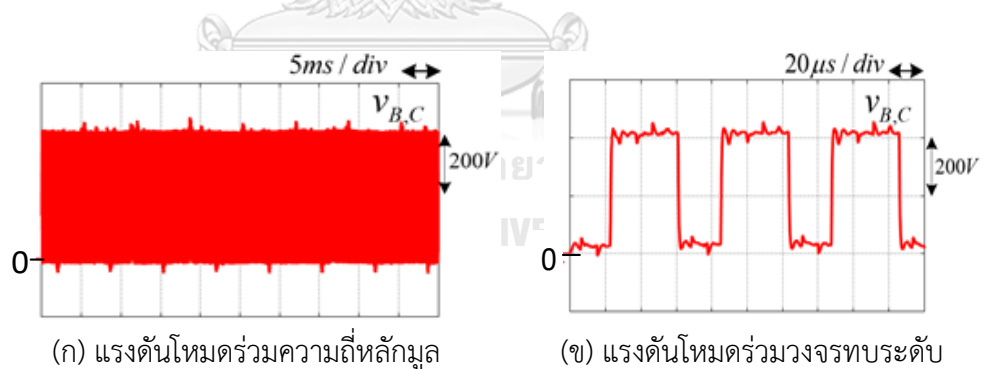
จากรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณแรงดันด้านเข้าและแรงดันด้านออกของวงจรทบทระดับได้โดยการปรับความกว้างพัลส์ในการมอดูเลต (Duty Cycle ; D) ดังสมการ (2.2) โดยกำหนด V_{out} หมายถึงแรงดันด้านออกและ V_{in} หมายถึงแรงดันเข้า เมื่อนำตัวตีมาเทียบกับคลื่นพาห์จะทำให้เกิดสัญญาณเป็นแบบพัลส์ซึ่งมีจังหวะเปิดและปิดสวิตช์เพื่อควบคุมแรงดันด้านออกของวงจรทบทระดับโดยการควบคุมการเปิดและปิดของสวิตช์ดังสมการ (2.2) และแสดงดังรูปที่ 2.7 จากรูป 2.6 มีการแบ่งตัวเหนี่ยวนำไว้ 2 ข้างเพื่อต้องการสมดุลอิมพีแดนซ์ (Balance Impedance) และการเลือกใช้แกนร่วม (Common Core) เพื่อที่จะลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำในระบบ กำหนดทิศทางของกระแส $i_1 = -i_2$ ซึ่งจะมีแต่ตัวเหนี่ยวนำร่วมโหมดปกติเท่านั้นโดยจะไม่มีตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมในวงจรเลย

$$v_{out} = \frac{1}{1-D} v_{in} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.7 ลักษณะสัญญาณการมอดูเลตของวงจรถบระดับ

ในส่วนแรงดันโหมตร่วมนั้นเกิดจากการเปิดและปิดของสวิตช์ โดยสามารถวัดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมด้วยการวัดผ่านค่าความต้านทานสูงซึ่งมีวิธีวัดแรงดันโหมตร่วมของวงจรถบระดับ ($V_{B,C}$) ได้ดังรูป 2.5 และได้แสดงสัญญาณแรงดันโหมตร่วมวงจรถบระดับดังรูปที่ 2.8



(ก) แรงดันโหมตร่วมความถี่หลักมูล

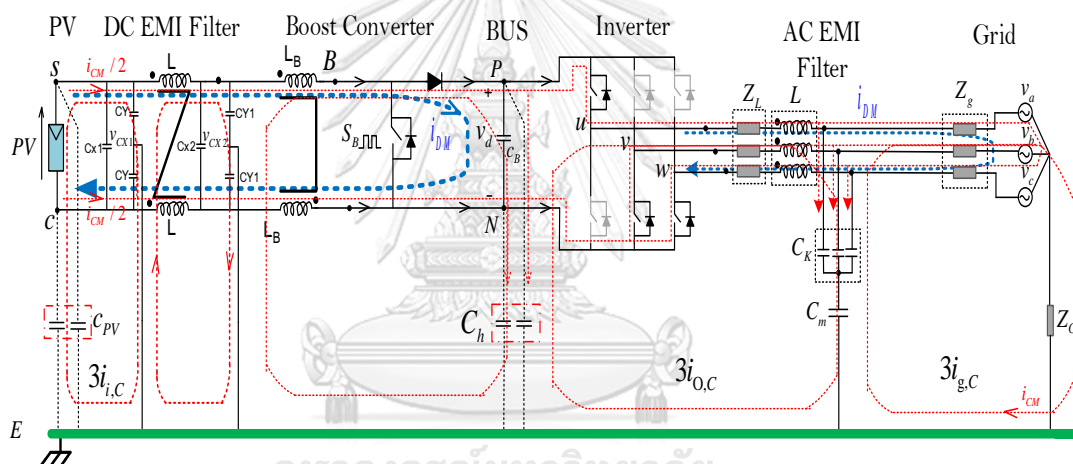
(ข) แรงดันโหมตร่วมวงจรถบระดับ

รูปที่ 2.8 สัญญาณแรงดันโหมตร่วมของวงจรถบระดับ

2.3 พฤติกรรมและทิศทางของกระแสรั่วไหล

กลไกการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อโครงข่ายสามเฟสเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันโหมตร่วมที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแผงหรือตัวเก็บประจุปรสิตระหว่างโครงของพีวีและโครงของพีวีอินเวอร์เตอร์ จึงทำให้เกิดการอัดและคายประจุเกิดเป็นกระแสรั่วไหลจากค่าตัวเก็บประจุแผงลงสู่กราวด์ อีกประเด็นหนึ่ง

คือการต่อโครงพีวีลิ่งกราวด์เพื่อปัญหาด้านความปลอดภัยจากการสัมผัสถูกตัวโครงพีวีทำให้เกิดวงรอบทางเดินของกระแสรั่วไหล รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงกระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านตัวนำโครงพีวีที่ถูกต่อกราวด์ และยังแสดงให้เห็นถึงเส้นทางเดินของกระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านตัวนำหากโครงพีวีอินเวอร์เตอร์ต่อลงกราวด์อีกด้วย ซึ่งภายในพีวีอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย วงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง วงจรทบระดับ บัสไฟตรง อินเวอร์เตอร์และวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับอยู่ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ จากรูป 2.9 ยังแสดงให้เห็นอีกว่าการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าลิ่งกราวด์ของทั้งวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรงและด้านไฟสลับ ทำให้เกิดวงรอบและเป็นเส้นทางการไหลของกระแสรั่วไหลด้วย ในขณะที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายังสามารถเกิดขึ้นได้เองซึ่งเกิดขึ้นระหว่างบัสไฟตรงและซึ่งกระแสระบายความร้อนแม้จะมีค่าน้อยมาก (ประมาณ 1-3nF) เมื่อเทียบกับค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่พีวี (50-150nF/Wp) แต่ก็สามารถทำให้เกิดเป็นวงรอบของกระแสรั่วไหลได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.9 ทางเดินกระแสรั่วไหลในระบบพีวีอินเวอร์เตอร์แบบสองภาคสามเฟส

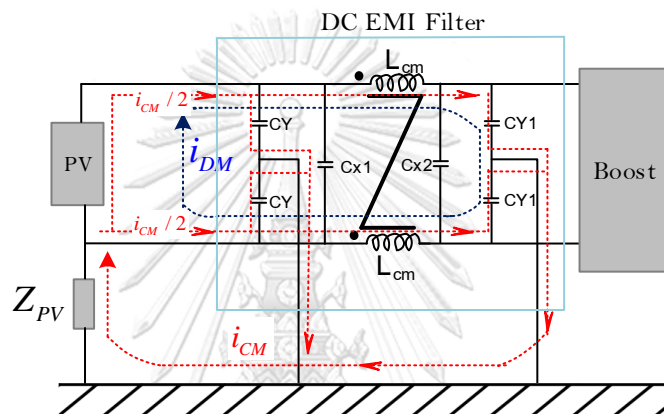
2.4 วงจรกรองการแทรกสอดทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

วงจรกรองสัญญาณรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI Filter) คือวงจรกรองที่ใช้สำหรับลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ที่เกิดจากการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ หรืออุปกรณ์กำลังไฟฟ้า อยู่ในย่านความถี่ตั้งแต่ 150kHz ถึง 30MHz และวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีโครงสร้างที่ต่างกัน แต่โดยทั่วไปจะมีโครงสร้างเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) ซึ่งประกอบอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (Passive Component) การเขียนวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับโหมดร่วมและโหมดผลต่างจะไม่เหมือนกัน เนื่องจากทิศทางการไหลของกระแสสัญญาณรบกวนทั้งสองโหมดไม่เหมือนกัน งานวิจัยจะจำแนก

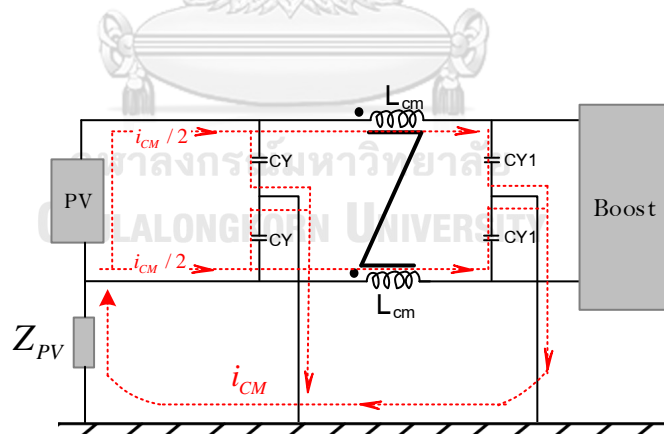
วงจรกรองออกเป็นสองส่วนได้แก่ วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟตรงและวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟสลับ 3 เฟส

2.4.1) วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟตรง

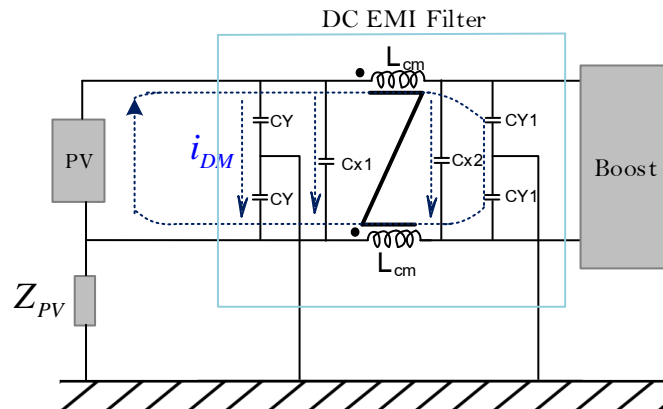
วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟตรงในงานวิจัยนี้ถูกเชื่อมต่อระหว่างพีวีกับวงจรทบระดับโดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.10 ได้แสดงเส้นทางการไหลของกระแสโหมดผลต่างและโหมดร่วมและเมื่อพิจารณาแยกกระแสโหมดร่วมและโหมดผลต่างสามารถแสดงเส้นทางของกระแสได้ดังรูปที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ



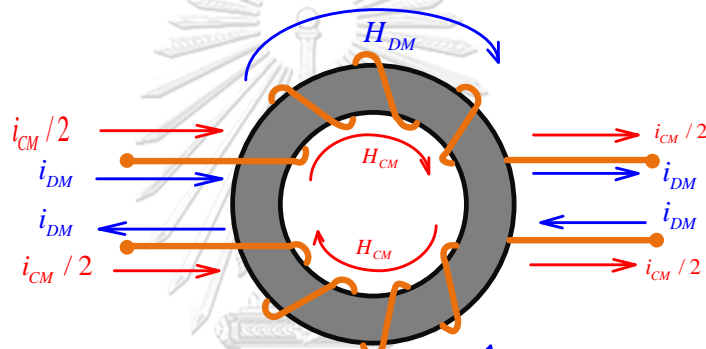
รูปที่ 2.10 ทิศทางกระแสโหมดร่วมและโหมดผลต่างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดร่วม



รูปที่ 2.12 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง

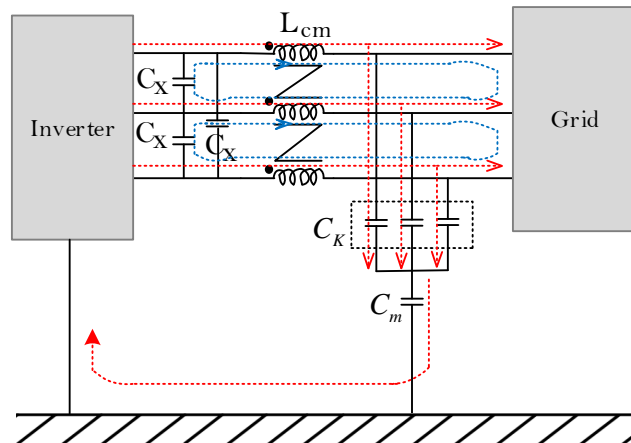


รูปที่ 2.13 ตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมและโหมดผลต่าง

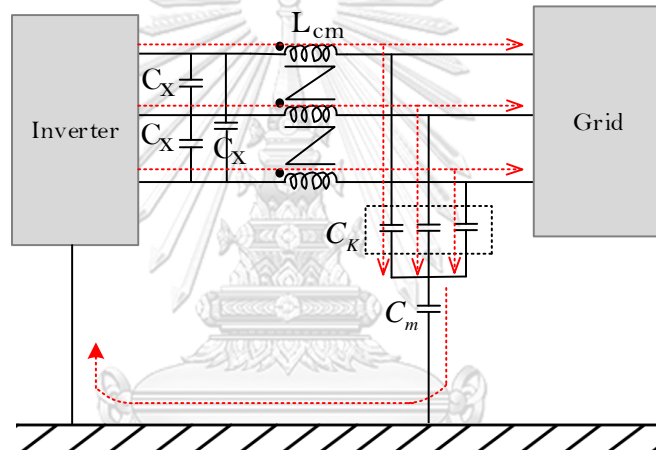
เมื่อพิจารณาตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมในรูป 2.10 สามารถเขียนลักษณะการพันขดลวดและทิศทางของกระแสโหมดผลต่างและโหมดร่วมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำร่วมได้ดังรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นการเสริมกันของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) เมื่อกระแสไหลไปในทิศทางเดียวกันในที่นี้คือกระแสรั่วไหลและหักล้างกันเมื่อกระแสมีทิศทางตรงข้ามกันในที่นี้คือกระแสโหมดผลต่าง

2.4.2) วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟสลับ

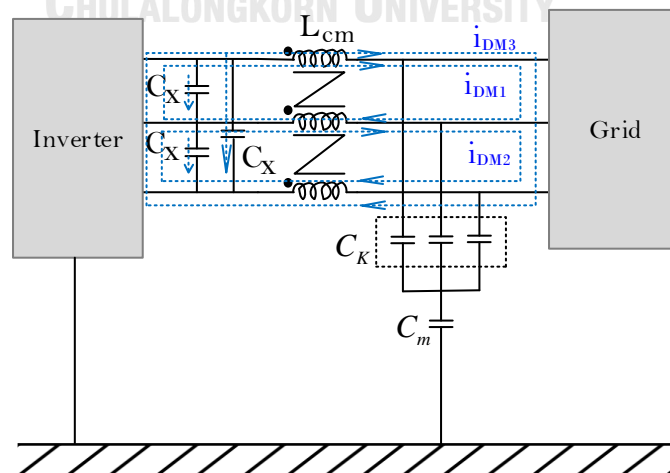
ทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นวงจรสามเฟสดังรูปที่ 2.14 ได้แสดงเส้นทางการไหลซึ่งมีทั้งกระแสโหมดผลต่างและกระแสรั่วไหล เมื่อพิจารณาแยกโหมดกระแสสามารถเขียนเส้นทางการไหลของกระแสรั่วไหลและกระแสโหมดผลต่างได้ดังรูปที่ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ รวมถึงพิจารณาลักษณะของกระแสรั่วไหลในตัวเหนี่ยวนำร่วมสามเฟสดังรูปที่ 2.17



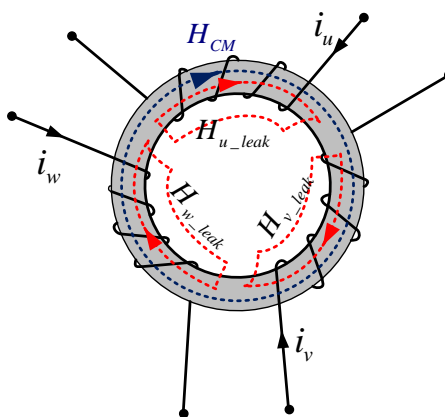
รูปที่ 2.14 ทิศทางกระแสโหมตรงร่วมและโหมดผลต่างของวงจรกรองสัญญาณรบกวนระบบแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมตรงร่วม



รูปที่ 2.16 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณากระแสโหมดผลต่าง



รูปที่ 2.17 ตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมสามเฟส

เมื่อพิจารณาตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมแบบสามเฟส (Common Mode Choke; Lcm) เกิดจากการพันขดลวดในทิศทางเดียวกันบนแกนเดียวกันโดยเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูง โดยทั่วไปจะนิยมใช้โครงสร้างแกนแม่เหล็กเป็นแบบ toroidal core ชนิดเฟอร์ไรต์ เพราะแกนเหล็กชนิดนี้จะมีค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์สูง มีขนาดเล็กและกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็กต่ำ จากรูป 2.16 แสดงทิศทางของกระแสโหมดร่วมรวมทั้งทิศทางเส้นแรงแม่เหล็ก จะเห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กโหมดร่วมมีทิศทางที่เสริมกันซึ่งต่างกับทิศทางแม่เหล็กโหมดผลต่างที่หักล้างกันดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อพิจารณาทิศทางกระแสโหมดร่วม (Common Mode Current; i_{CM}) ซึ่งกระแสไฟฟ้าโหมดร่วมจะเป็นกระแสไฟฟ้าที่จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วมและตัวเก็บประจุ C_Y (ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ต่อลงกราวด์) ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และผ่านตัวเก็บประจุแฝงลงกราวด์ ดังรูปที่ 2.11 และ 2.13 ทั้งสายตัวนำและสายนิวตรอนจะเห็นตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} 1 ตัวที่มีขนาดใหญ่และเมื่อกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_{CM} ทำให้มีผลในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูง เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับ $i = V/Z$ เมื่อ $Z = |X_L| = 2\pi fL$ เมื่อมีความถี่มากก็จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ Z มีค่ามากขึ้นด้วยจึงส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าน้อย ส่วนตัวเก็บประจุ C_Y จะพบว่ากระแสโหมดร่วมสามารถไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_Y ได้ทั้ง 2 ตัวลงกราวด์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณากระแสโหมดร่วมพบว่ามืองค์ประกอบ 2 ตัวที่สามารถช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดร่วมคือ ตัวเหนี่ยวนำโหมดร่วม (L_{CM}) และตัวเก็บประจุ (C_Y) แต่เนื่องจากวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโหมดร่วมมีโครงสร้างแบบพาสซีฟจึงทำให้วงจรกรองมีน้ำหนักมากและมีขนาดใหญ่

บทที่ 3

วงจรมุมที่แม่นยำสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคแบบเชื่อมต่อโครงข่าย

การวิเคราะห์ห้วงจรมุมที่นำเสนอจะใช้กรอบความคิดที่จะแยกพิจารณาส่วนต่างๆ ของระบบที่ต่อเรียงกัน [10] ดังรูป 3.1 ซึ่งในที่นี้สามารถแบ่งเป็น 7 ส่วน ได้แก่ 1)วงจрд้านพีวี 2)วงจรรอง EMI ด้านไฟตรง 3)วงจรถบระดับ 4)วงจรบัสไฟตรง 5)วงจอินเวอร์เตอร์ 6) วงจรรองEMI ด้านไฟสลับและ 7)วงจрд้านโครงข่าย สมการโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างของวงจรแต่ละส่วนสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรมุมโหมตผลร่วมและโหมตผลต่างของวงจรได้ สมการแรงดันและสมการกระแสที่ด้านเข้าและด้านออกของวงจรแต่ละส่วนเป็นตัวแปรให้เห็นถึงการเชื่อมต่อกันระหว่างจรแต่ละส่วน การสร้างสมการสัญญาณโหมตสามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนดังนี้

1) สร้างสมการแรงดันเฟสเทียบกราวด์ E และกระแสของวงจรแต่ละส่วนในรูปของสมการเมตริกซ์ สำหรับวงจรถบระดับและอินเวอร์เตอร์จะแสดงสมการด้วยความสัมพันธ์ของสัญญาณระหว่างที่ด้านเข้ากับด้านออก ซึ่งอยู่ในเทอมของฟังก์ชันสวิตช์ S_B และ S_{inv} ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบอื่นคือวงจрд้านแหล่งจ่าย วงจรบัสไฟตรงและวงจรโครงข่าย จะแสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของวงจรซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยอิมพีแดนซ์ของวงจร

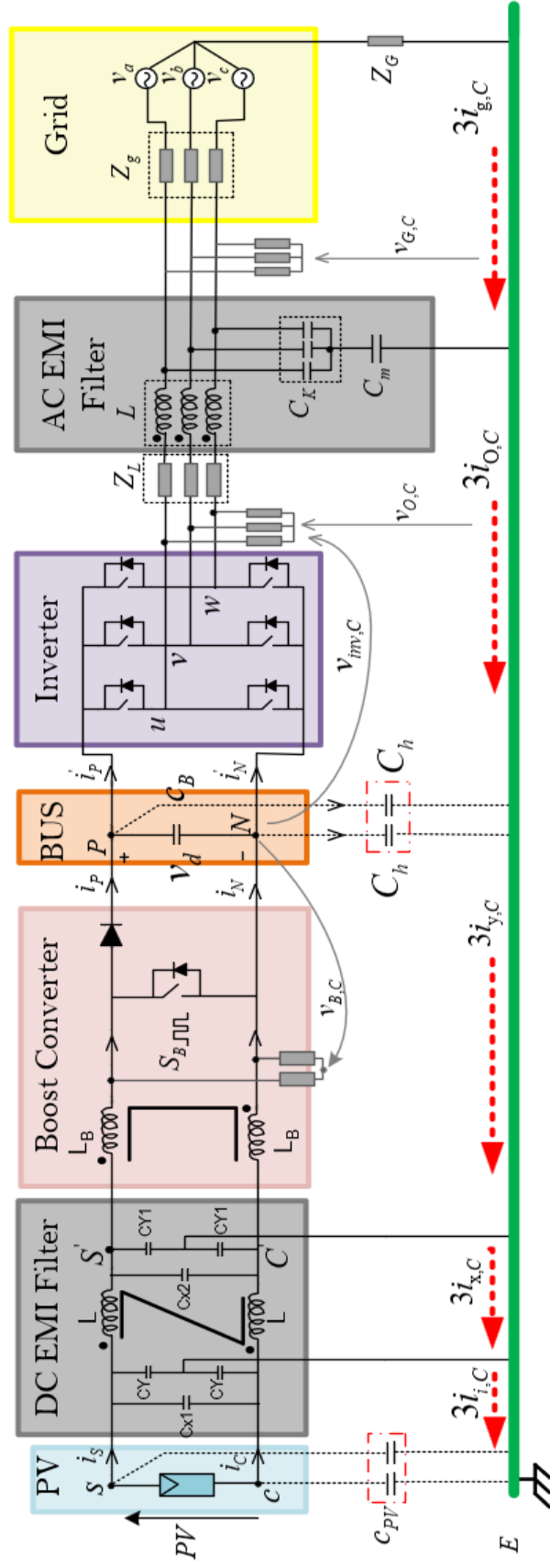
2) แปลงจากสมการในขั้นตอนที่ 1) ซึ่งอยู่ในปริมาณเฟส $(X)_j$ ให้อยู่ในรูปสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่าง โดยกำหนดสัญญาณโหมตร่วม (X_C) และโหมตผลต่างในแต่ละเฟส $(X_{j,D})$ มีนิยามตามสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$X_C \equiv \sum_{j=1}^P X_j / P \quad (3.1)$$

$$X_{j,D} = X_j - X_C \quad \text{โดยที่} \quad \sum_{j=1}^P X_{j,D} = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ P แทนจำนวนสายหรือเฟส โดย $P=3$ สำหรับวงจрд้านเข้าหรือด้านออกที่เป็นวงจร 3 เฟสและ $P=2$ สำหรับวงจร 1 เฟสหรือ 2 สาย



รูปที่ 3.1 วงจรพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากนิยามในสมการที่ (3.1) และ สมการที่ (3.2) ปริมาณเฟสสามารถแปลงเป็นสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างผ่านเมตริกซ์การแปลง $T_{1\phi}$ และ $T_{3\phi}$ ได้ดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} X_{1,D} \\ X_{2,D} \\ \hline X_C \end{bmatrix} = T_{1\phi} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad \text{เมื่อ} \quad T_{1\phi} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ \hline 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

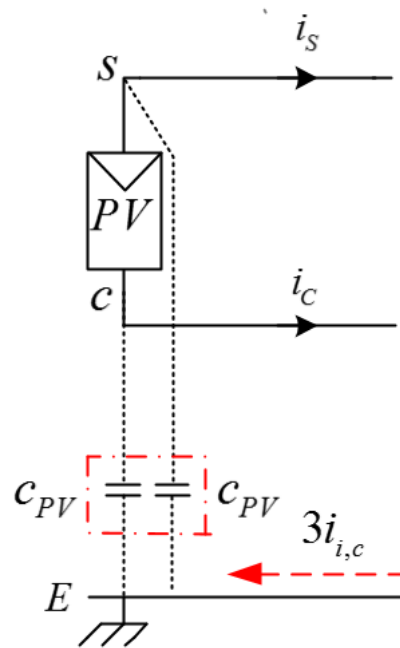
$$\begin{bmatrix} X_{1,D} \\ X_{2,D} \\ X_{3,D} \\ \hline X_C \end{bmatrix} = T_{3\phi} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad \text{เมื่อ} \quad T_{3\phi} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ \hline 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.1 สมการแรงดันและสมการกระแสในโหมตร่วมและโหมตผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อย

การวิเคราะห์สมการสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างของวงจรส่วนต่าง ๆ จะมีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 สมการวงจรด้านพีวี (PV Side)

พีวีมีหน้าที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงในวงจร เพื่อความปลอดภัยจึงต้องต่อสายกราวด์ระหว่างแผงกับกราวด์ ทำให้กระแสรั่วไหลสามารถไหลเข้าสู่ระบบได้และอาจมีขนาดสูงขึ้นเมื่อค่าตัวเก็บประจุแผง C_{PV} เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรด้านพีวี

จากรูป 3.2 พฤติกรรมของวงจรพีวีแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของวงจรผ่านอิมพีแดนซ์ภายในวงจร สามารถเขียนได้ดังสมการ (3.5)

$$\begin{bmatrix} v_{SE} \\ v_{CE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_{SC} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{CE} \quad (3.5)$$

สามารถแปลงสมการ (3.5) ให้อยู่ในรูปสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างด้วยการคูณ $T_{1\phi}$ จะได้ดังสมการที่ (3.6)

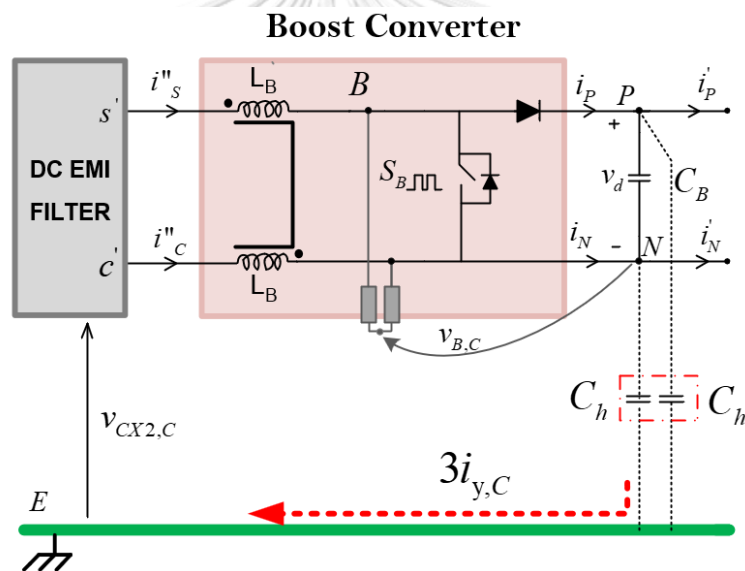
$$\begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{S,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{SC} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_{CE} \quad (3.6)$$

เนื่องจาก $v_{CE} = \frac{3}{2} i_{i,c} Z_{PV}$ จากสมการ (3.6) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{S,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{SC} + \frac{Z_{PV}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} (3i_{i,C}) \quad (3.7)$$

3.1.2 สมการวงจรทบทระดับ (Boost Converter)

วงจรทบทระดับมีหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันด้านออกให้สูงขึ้นตามการมอดูเลตโดยการปรับดิวตี้ (Duty Cycle) เทียบกับคลื่นพาห์จะทำให้ได้สัญญาณพัลส์ขับนำสวิตช์ S_B เมื่อ S_B มีสถานะเป็น '1' หมายถึงสวิตช์ปิดและเมื่อ S_B มีสถานะเป็น '0' หมายถึงสวิตช์เปิด ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์กระแสและแรงดันที่ด้านเข้าและด้านออกของวงจรตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยกำหนด Z_B แทนค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำวงจรทบทระดับ (L_B) และ Z_M แทนอิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำร่วม (M)



รูปที่ 3.3 วงจรทบทระดับแบบตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

3.1.2.1 สมการแรงดันที่ด้านเข้าและด้านออกของวงจรทบทระดับ

$$\begin{bmatrix} v'_{SE} \\ v'_{CE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_B & -Z_M \\ -Z_M & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i''_s \\ i''_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1-S_B & S_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

สามารถเขียนสมการ (3.8) ใหม่ได้ดังสมการที่ (3.9)

$$\begin{bmatrix} v'_{SE} \\ v'_{CE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_B & -Z_B \\ -Z_B & Z_B \end{bmatrix} \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc|c} 1 & -1 & 3 \\ -1 & 1 & 3 \end{array} \right] \begin{bmatrix} i''_{S,D} \\ i''_{C,D} \\ i_{y,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc|c} 1-2S_B & -(1-2S_B) & 2 \\ -1 & 1 & 2 \end{array} \right] \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

จัดสมการที่ (3.9) โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมร่วม (Coupling Coefficient; k) เท่ากับ 1 จากสมการ $M = k\sqrt{L_1L_2}$ ดังนั้นจะได้ $Z_B = Z_M$ จะได้ตั้งสมการที่ (3.10)

$$\begin{bmatrix} v'_{SE} \\ v'_{CE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_B & -Z_M & 0 \\ -Z_M & Z_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i''_{S,D} \\ i''_{C,D} \\ i_{y,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc|c} 1-2S_B & -(1-2S_B) & 2 \\ -1 & 1 & 2 \end{array} \right] \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

แปลงสมการที่ (3.10) ให้อยู่ในรูปสัญญาณโหมตรงร่วมและโหมตผลต่างด้วยการคูณเมตริกซ์การแปลง $T_{1\phi}$ จะได้ตั้งสมการที่ (3.11)

$$\begin{bmatrix} v'_{S,D} \\ v'_{C,D} \\ v_{CX2,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_B & -Z_M & 0 \\ -Z_M & Z_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i''_{S,D} \\ i''_{C,D} \\ i_{y,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \left[\begin{array}{cc|c} (1-S_B) & -(1-S_B) & 0 \\ -(1-S_B) & (1-S_B) & 0 \\ -S_B & S_B & 2 \end{array} \right] \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.1.2.2 สมการกระแสที่ด้านเข้าและด้านออกของวงจรทระดับ

$$\begin{bmatrix} i_P \\ i_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-S_B & 0 \\ S_B & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i''_S \\ i''_C \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

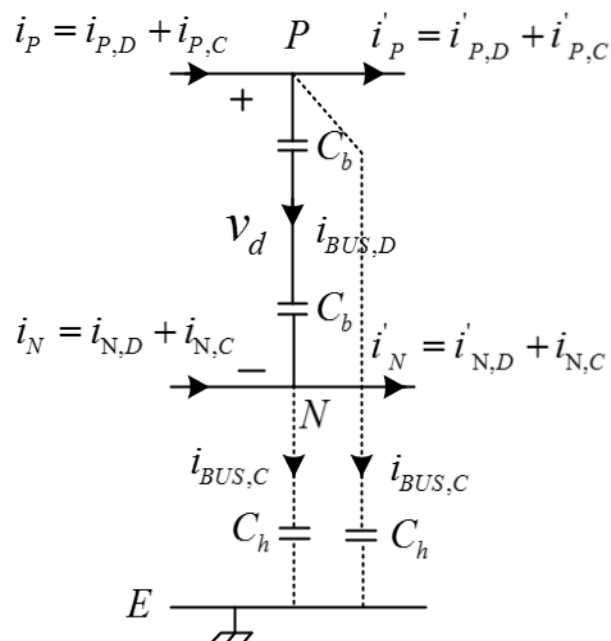
จัดสมการ (3.12) ใหม่สามารถเขียนได้ดังสมการ (3.13)

$$\begin{bmatrix} i_P \\ i_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-S_B & 0 & \frac{3}{2}(1-S_B) \\ S_B & 1 & \frac{3}{2}(1+S_B) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i''_{S,D} \\ i''_{C,D} \\ i_{y,C} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

แปลงสมการที่ (3.13) ให้อยู่ในรูปสัจญาณโหมตรงร่วมและโหมตรงผลต่างด้วยการคูณเมตริกซ์การแปลง $T_{1\phi}$ จะได้ดังสมการที่ (3.14)

$$\begin{bmatrix} i_{P,D} \\ i_{N,D} \\ i_{P,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1-2S_B & -1 & -3S_B \\ -(1-2S_B) & 1 & 3S_B \\ 1 & 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i''_{S,D} \\ i''_{C,D} \\ i_{y,C} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

3.1.3 วงจรบัสไฟตรง (DC Bus)



รูปที่ 3.4 วงจรบัสไฟตรง

จากวงจรรูปที่ 3.4 กระแสที่ไหลเข้าออกขั้วบวกและลบของบัสไฟตรงประกอบด้วยส่วนที่เป็น โหมดร่วมและโหมดผลต่าง กระแสโหมดผลต่างซึ่งเป็นกระแสระหว่างสาย ซึ่งจะไหลจากขั้วบวกของ บัสไฟตรงผ่าน C_B ไปยังขั้วลบของบัสไฟตรงหรือในทำนองกลับกัน ดังนั้นจะได้ $i_{P,D} = -i_{N,D}$ และ $i'_{P,D} = -i'_{N,D}$ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_B จะมีค่าดังสมการที่ (3.15) ในขณะที่กระแสโหมด ร่วมจะไหลลงกราวด์โดยผ่าน C_h สามารถคำนวณดังสมการที่ (3.16)

$$i_{BUS,D} = i_{P,D} - i'_{P,D} = -(i_{N,D} - i'_{N,D}) \quad (3.15)$$

$$i_{BUS,C} = i_{P,C} - i'_{P,C} = i_{N,C} - i'_{N,C} \quad (3.16)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่บัสไฟตรงแยกตามโหมดคำนวณได้ดังต่อไปนี้ จาก รูปที่ 2.4 จะเขียนสมการแรงดันที่บัสไฟตรงได้ดังสมการที่ (3.17) และ (3.18) ตามลำดับ

$$v_{PE} = v_d + v_{NE} \quad (3.17)$$

$$v_{NE} = v_{NE}$$

$$\begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{NE} \quad (3.18)$$

เมื่อคูณสมการที่ (3.18) ด้วยเมตริกซ์การแปลงโหมด $T_{1\phi}$ จะแสดงสมการโหมดร่วมและ โหมดต่างที่บัสไฟตรงดังสมการที่ (3.19)

$$\begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_{NE} \quad (3.19)$$

เมื่อ Z_b คืออิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ C_b และ Z_h คืออิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุแฝง C_h จากรูปวงจรที่ 2.4 จะได้ $v_d = Z_b i_{BUS,D}$ และ $v_{NE} = Z_h i_{BUS,C}$ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่บัสไฟตรงแยกตามโหมดได้ดังสมการที่ (3.20)

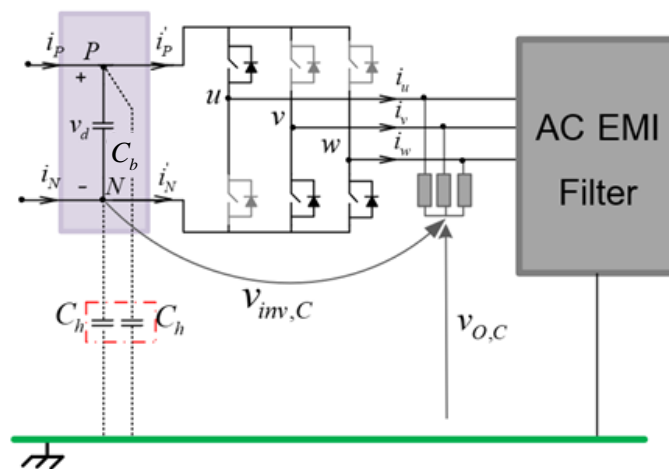
$$\begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_b & -Z_b & 0 \\ -Z_b & Z_b & 0 \\ Z_b & -Z_b & 2Z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{BUS,D} / 2 \\ -i_{BUS,D} / 2 \\ i_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

3.1.4 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณกระแสไฟตรงให้เป็นกระแสไฟสลับ โดยอาศัยการตัดวงจรของคู่สวิตช์กำลังในแต่ละเฟส ซึ่งมีฟังก์ชันสวิตช์เป็น

$$S_{inv} = [s_u \quad s_v \quad s_w]^T ; s_u, s_v, s_w = \begin{cases} 1 & ; \text{upper switch} = \text{on} \\ 0 & ; \text{lower switch} = \text{on} \end{cases} \quad (3.21)$$

ฟังก์ชันการสวิตช์อินเวอร์เตอร์ S_{inv} จะเป็นไปตามการมอดูเลตเพื่อสร้างแรงดัน ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่จะสะท้อนถึงแรงดันที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์ ดังตัวอย่างในรูป 2.5 เมื่ออินเวอร์เตอร์มีสถานะการสวิตช์ $S_{inv} = [1 \quad 0 \quad 0]$ แรงดันเฟสที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงจะมีค่าเป็น $[v_{u0} \quad v_{v0} \quad v_{w0}]^T = \frac{1}{2} [v_d \quad -v_d \quad -v_d]^T$ และสำหรับการหาสมการแรงดันและกระแสที่เชื่อมโยงปริมาณที่ด้านเข้าและที่ด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะพิจารณาโดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อ $S_{inv} = [1 \quad 0 \quad 0]$

3.1.4.1 สมการแรงดันโหมตร่วมและโหมตผลต่างของวงจรอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.5 แรงดันเฟสเทียบกราวด์ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงดันที่บัสไฟตรง และเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.22) และสมการที่ (3.23) ตามลำดับ

$$\begin{aligned}v_{uE} &= v_{PE} \\v_{vE} &= v_{NE} \\v_{wE} &= v_{NE}\end{aligned}\quad (3.22)$$

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix}\quad (3.23)$$

สมการที่ (3.23) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปในเทอมของฟังก์ชันการสวิตช์ S_{inv} ได้ดังสมการที่ (3.24) และ (3.25) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_u & 1-s_u \\ s_v & 1-s_v \\ s_w & 1-s_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{PE} \\ v_{NE} \end{bmatrix}\quad (3.24)$$

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2s_u - 1 & -(2s_u - 1) \\ 2s_v - 1 & -(2s_v - 1) \\ 2s_w - 1 & -(2s_w - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix}\quad (3.25)$$

เมื่อคูณสมการที่ (3.25) ด้วยเมตริกซ์การแปลง $T_{3\phi}$ จะได้สมการแรงดันโหมตร่วมและโหมตผลต่างที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่ (3.26)

$$\begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{O,C} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|c} s_u - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & -\left(s_u - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) & 0 \\ s_v - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & -\left(s_v - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) & 0 \\ s_w - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & -\left(s_w - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) & 0 \\ \hline \left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} \right) & -\left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} \right) & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

3.1.4.2 สมการกระแสโหมตรงร่วมและโหมตผลต่างของวงจรอินเวอร์เตอร์

จากตัวอย่างรูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่บัสไฟตรงหลังตัวเก็บประจุ i_p, i_N และกระแสที่ด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.27) ซึ่งเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.28)

$$\begin{aligned} i_p' &= i_u \\ i_N' &= i_v + i_w \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{bmatrix} i_p' \\ i_N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

สมการที่ (3.28) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการสวิตช์ได้ตามสมการที่ (3.29)

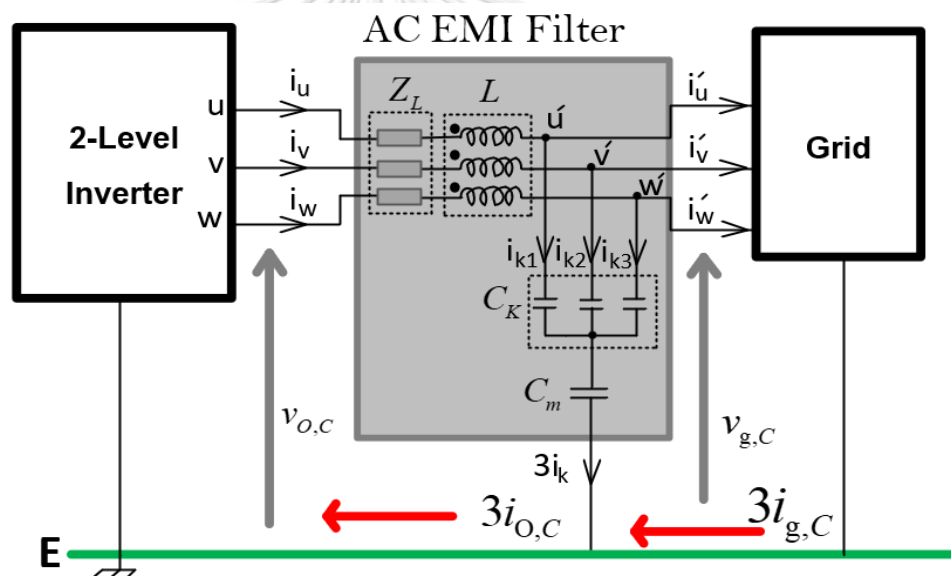
$$\begin{bmatrix} i_p' \\ i_N' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_u & s_v & s_w \\ 1-s_u & 1-s_v & 1-s_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} s_u & s_v & s_w & \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \\ 1-s_u & 1-s_v & 1-s_w & 3 - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \end{array} \right] \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (3.29) โดยการคูณเมตริกซ์การแปลง $T_{1\phi}$ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่บัสไฟตรงและกระแสที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์แยกตามโหมตได้ดังสมการที่ (3.30)

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{P,D} \\ \dot{i}_{N,D} \\ \dot{i}_{P,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_u & s_v & s_w & \left(\sum_{n=u,v,w} s_n - \frac{3}{2} \right) \\ -s_u & -s_v & -s_w & -\left(\sum_{n=u,v,w} s_n - \frac{3}{2} \right) \\ \hline 0 & 0 & 0 & 3/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

โดยสรุปจะได้สัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างของวงจรอินเวอร์เตอร์มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.26) และสมการกระแสที่ (3.30)

3.1.5 วงจรกรอง EMI ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.6 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟกระแสสลับ

พฤติกรรมของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟสลับได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของวงจรผ่านอิมพีแดนซ์ภายในวงจรดังสมการที่ (3.31) และเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ดังสมการ (3.32) ตามลำดับโดยกำหนด Z_i แทนอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ

$$\begin{aligned}
v_{uE} &= z_L i_u + Z_l i_u + Z_M i_v + Z_M i_w + v_{u'E} \\
v_{vE} &= z_L i_v + Z_M i_u + Z_l i_v + Z_M i_w + v_{v'E} \\
v_{wE} &= z_L i_w + Z_M i_u + Z_M i_v + Z_l i_w + v_{w'E}
\end{aligned} \tag{3.31}$$

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = z_L \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_l & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_l & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{u'E} \\ v_{v'E} \\ v_{w'E} \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

จัดสมการ (3.32) ใหม่โดยกำหนดให้ $k=1$ ดังนั้นจะได้ $Z_l = Z_M$ สามารถเขียนได้
 ดังสมการ (3.33)

$$\begin{bmatrix} v_{uE} \\ v_{vE} \\ v_{wE} \end{bmatrix} = z_L \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 3Z_l \\ 0 & 0 & 0 & 3Z_l \\ 0 & 0 & 0 & 3Z_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{u'E} \\ v_{v'E} \\ v_{w'E} \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

แปลงสมการที่ (3.33) โดยการคูณเมตริกซ์การแปลง $T_{3\phi}$ จะได้ความสัมพันธ์
 ระหว่างแรงดันที่ด้านเข้าของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันแยกตามโหมดได้ดัง
 สมการที่ (3.34)

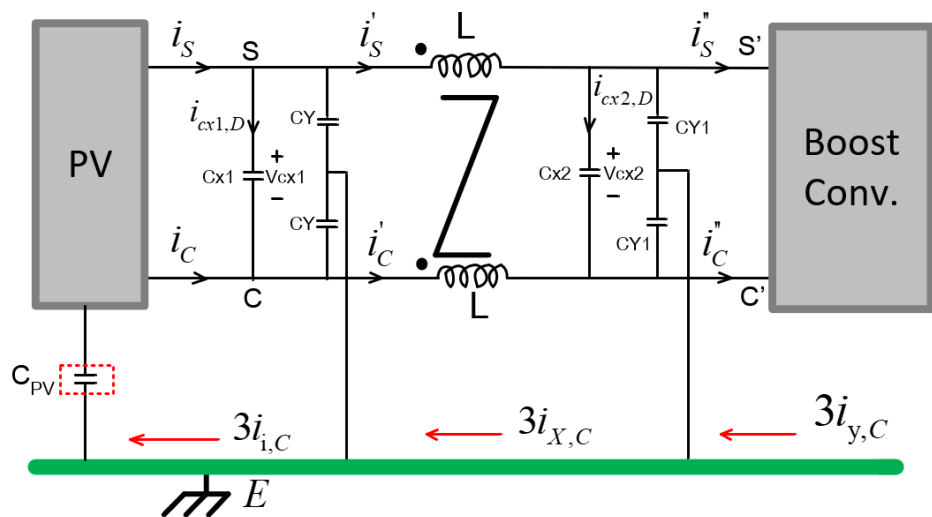
$$\begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{O,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (Z_L + 3Z_l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u',D} \\ v_{v',D} \\ v_{w',D} \\ v_{g,C} \end{bmatrix} \tag{3.34}$$

เมื่อพิจารณาการต่อลงกราวด์ของพีวีอินเวอร์เตอร์ทำให้เกิดเส้นทางกระแสโหมด
 ร่วมลงกราวด์ผ่านวงจรกรอง EMI สามารถวิเคราะห์ที่ได้ดังสมการ (3.35)

$$\begin{bmatrix} v_{u',D} \\ v_{v',D} \\ v_{w',D} \\ v_{g,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{K1,D} \\ i_{K2,D} \\ i_{K3,D} \\ i_{K,C} \end{bmatrix} + 3Z_m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} i_{K,C} \tag{3.35}$$

$$\begin{bmatrix} i'_{u,D} \\ i'_{v,D} \\ i'_{w,D} \\ i_{g,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/z_g & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & 1/z_g & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & 1/z_g & | & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1/(z_g + 3z_G) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{g,C} \end{bmatrix} - \frac{1}{z_g} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

3.1.7 วงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง



รูปที่ 3.8 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้านไฟกระแสตรง

จากรูปที่ 3.8 ในกรณีฟิวอินเวอร์เตอร์ต่อลงกราวด์ CY และ CY1 ที่วงจรกรอง EMI จะเสมือนถูกต่อกราวด์ด้วยจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดเส้นทางของกระแสไหลร่วมกัน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์แรงดันและกระแสโดยผ่านอิมพีแดนซ์ลงกราวด์ได้ดังสมการ(3.39) โดยกำหนดให้ Z_F แทนค่าอิมพีแดนซ์ตัวเหนี่ยวนำโหมตรงร่วม (L) ของวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง

$$\begin{bmatrix} v_{SE} \\ v_{CE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & Z_M \\ Z_M & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_S \\ i'_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{S'E} \\ v_{C'E} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

จากสมการ (3.39) สามารถเขียนในรูปแบบใหม่ โดยกำหนดให้ $k=1$ ดังนั้น $Z_F = Z_M$ จะได้ดังสมการที่ (3.40)

$$\begin{bmatrix} v_{SE} \\ v_{CE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 6Z_F \\ 0 & 0 & 6Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{S,D} \\ i'_{C,D} \\ i_{X,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_{CX2} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{C'E} \quad (3.40)$$

แปลงสมการ (3.40) ให้อยู่ในรูปสัจญาณโหมตผลต่างและโหมตร่วมโดยการคูณเมตริกซ์การแปลง $T_{1\phi}$ จะได้ดังสมการ (3.41)

$$\begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{S,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{S,D} \\ i'_{C,D} \\ i_{X,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{CX2} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_{C'E} \quad (3.41)$$

เนื่องจาก $v_{CX2} = i_{CX2,D} Z_{CX2}$ และ $v_{C'E} = i_{CX2,C} Z_{CY1}$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกระแสและอิมพีแดนซ์ดังสมการ (3.42)

$$\begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{S,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{S,D} \\ i'_{C,D} \\ i_{X,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_{CX2} & -Z_{CX2} & 0 \\ -Z_{CX2} & Z_{CX2} & 0 \\ Z_{CX2} & -Z_{CX2} & 2Z_{CY1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{CX2,D} \\ -i_{CX2,D} \\ i_{CX2,C} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

ตารางที่ 3.1 สมการสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อยของวงจรทั้งหมด

องค์ประกอบย่อย	สมการสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่าง
ด้านพีวี	$\begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{S,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{SC} + \frac{Z_{PV}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} (3i_{i,C}) \quad (3.43)$
วงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง	$\begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{S,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{S,D} \\ i_{C,D} \\ i_{X,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_{CX2} & -Z_{CX2} & 0 \\ -Z_{CX2} & Z_{CX2} & 0 \\ Z_{CX2} & -Z_{CX2} & 2Z_{CV1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{CX2,D} \\ -i_{CX2,D} \\ i_{CX2,C} \end{bmatrix} \quad (3.44)$ <p>โดยที่ $v_{S,C} = 1/2(v_{CX1}) + v_{CE}$ และ $v_{CX2,C} = 1/2(v_{CX2}) + v_{C'E}$</p>
วงจรทบระดับ	$\begin{bmatrix} v_{S,D} \\ v_{C,D} \\ v_{CX2,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_B & -Z_M & 0 \\ -Z_M & Z_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{S,D} \\ i_{C,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1-S_B) & -(1-S_B) & 0 \\ -(1-S_B) & (1-S_B) & 0 \\ -S_B & S_B & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.45)$ $\begin{bmatrix} i_{P,D} \\ i_{N,D} \\ i_{P,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1-2S_B & -1 & -3S_B \\ -(1-2S_B) & 1 & 3S_B \\ 1 & 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{S,D} \\ i_{C,D} \\ i_{i,C} \end{bmatrix} \quad (3.46)$
บัสไฟฟตรง	$\begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_b & -Z_b & 0 \\ -Z_b & Z_b & 0 \\ Z_b & -Z_b & 2Z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{BUS,D}/2 \\ -i_{BUS,D}/2 \\ i_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.47)$ <p>$i_{BUS,C} = i_{P,C} - i_{P,C}$ และ $i_{BUS,D} = i_{P,D} - i_{P,D}$</p>

ตารางที่ 3.1(ต่อ) สมการสัญญาณโหมตร่วมและโหมตผลต่างของแต่ละองค์ประกอบย่อย
ของวงจรทั้งหมด

<p>วงจร อินเวอร์เตอร์</p>	$\begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{O,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_u - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & -\left(s_u - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) & 0 \\ s_v - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & -\left(s_v - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) & 0 \\ s_w - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 & -\left(s_w - \sum_{n=u,v,w} s_n / 3 \right) & 0 \\ \left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} \right) & -\left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{P,D} \\ v_{N,D} \\ v_{BUS,C} \end{bmatrix} \quad (3.48)$
	$\begin{bmatrix} i_{P,D} \\ i_{N,D} \\ i_{P,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_u & s_v & s_w & \left(\sum_{n=u,v,w} s_n - \frac{3}{2} \right) \\ -s_u & -s_v & -s_w & -\left(\sum_{n=u,v,w} s_n - \frac{3}{2} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 3/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{bmatrix} \quad (3.49)$
<p>วงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ</p>	$\begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{O,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (Z_L + 3Z_l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u',D} \\ v_{v',D} \\ v_{w',D} \\ v_{g,C} \end{bmatrix} \quad (3.50)$
<p>วงจรด้าน โครงข่าย</p>	$\begin{bmatrix} i_{u,D} \\ i_{v,D} \\ i_{w,D} \\ i_{O,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/z_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/z_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/z_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(z_g + 3z_G) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u,D} \\ v_{v,D} \\ v_{w,D} \\ v_{O,C} \end{bmatrix} - \frac{1}{z_g} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.51)$

3.2 วงจรสมมูลโหมคร่วมที่แม่นยำของอินเวอร์เตอร์

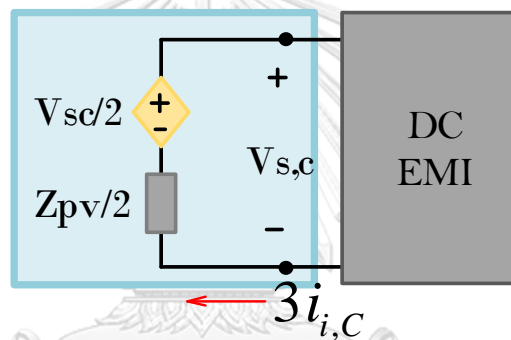
สมการแรงดันและกระแสขององค์ประกอบย่อยของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่สรุปดังตารางที่ 2.1 สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลโหมคร่วมและโหมคผลต่างได้ดังนี้

3.2.1 วงจรสมมูลโหมคร่วมของระบบ

3.2.1.1 วงจรสมมูลโหมคร่วมที่ด้านเข้าของแหล่งจ่ายพีวี

จากสมการ (3.43) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (3.52) และเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.9

$$v_{s,c} = 1/2v_{sc} + \left(\frac{Z_{pv}}{2}\right)(3i_{i,c}) \quad (3.52)$$



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลโหมคร่วมด้านพีวี

กำหนดให้ Z_{CY} และ Z_{CY1} เป็นอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ CY และ CY1 ตามลำดับซึ่งเป็นส่วนที่ถูกต่อลงกราวด์ของวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรงที่อยู่ระหว่างวงจรพีวีกับวงจรทบระดับจากสมการ (3.44) สามารถเขียนสมการโหมคร่วมใหม่ได้ดังสมการ (3.53)

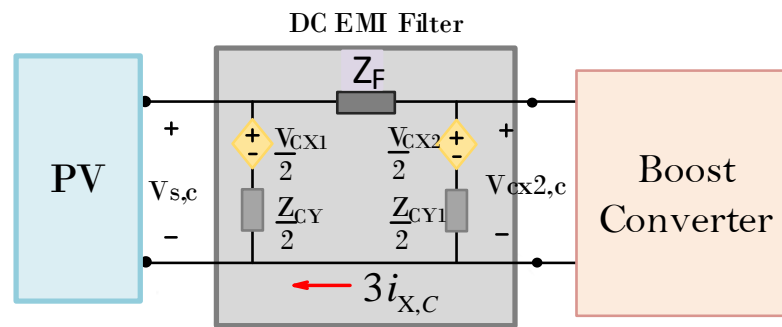
$$v_{s,c} = Z_F(3i_{i,c}) + v_{cx2,c} \quad (3.53)$$

สามารถหาสมการแรงดันโหมคร่วมที่ด้านเข้าและด้านออก ของวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรงได้ดังสมการ (3.54) และ (3.55) ตามลำดับ

$$v_{s,c} = v_{cx1} + (Z_{CY}/2)(3i_{i,c}) \quad (3.54)$$

$$v_{CX2,C} = v_{CX2} + (Z_{CY1} / 2)(3i_{X,C}) \quad (3.55)$$

จากสมการ (3.53) (3.54) และ (3.55) สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลโหนดร่วมได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรโหนดร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง

พิจารณาแรงดันโหนดร่วมที่เกิดจากวงจรทบระดับ ซึ่งอยู่ระหว่างวงจรกรอง EMI ไฟตรงกับ บัสไฟตรงจากสมการ (3.45) กระบอกับ (3.47) สามารถเขียนสมการแรงดันโหนดร่วมได้ดังสมการ (3.56)

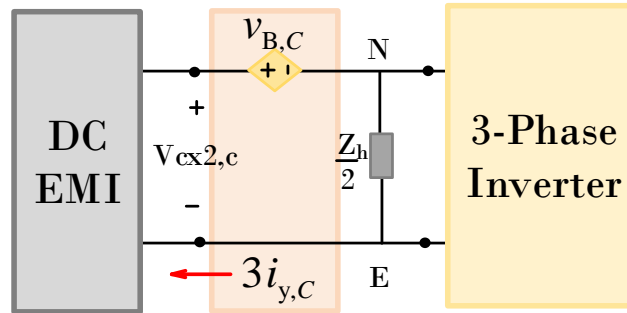
$$v_{CX2,C} = \frac{1}{2} [-S_B v_{P,D} + S_B v_{N,D}] + v_{BUS,C} \quad (3.56)$$

เนื่องจาก $v_{P,D} = -v_{N,D} = (v_d) / 2$ แทนในสมการที่ (3.56) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3.57)

$$v_{CX2,C} = \frac{1}{2} (1 - S_B) v_d + v_{NE} \quad (3.57)$$

นิยามให้ $v_{B,C} = (1 - S_B) v_d / 2$

เมื่อนำสมการ (3.56) และสมการ (3.57) มาเขียนเป็นวงจรสมมูลได้รูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แรงโหมตร่วมที่เกิดจากวงจรทบระดับ

3.2.1.2 วงจรสมมูลโหมตร่วมที่ด้านเข้าและด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ($v_{o,c}$)

ประกอบด้วยสมการที่ (3.47) และ (3.48) สามารถเขียนเป็นสมการโหมตร่วมได้ดังนี้

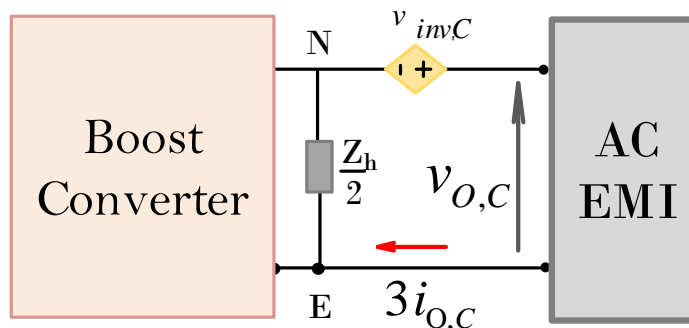
$$v_{O,C} = \left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} \right) v_{P,D} - \left(\sum_{n=u,v,w} s_n / 3 - \frac{1}{2} \right) v_{N,D} + v_{BUS,C} \quad (3.58)$$

เนื่องจาก $v_{P,D} = -v_{N,D} = \frac{v_d}{2}$ สมการที่ (3.58) จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ (3.59)

$$v_{O,C} = v_{NE} + \sum_{n=u,v,w} (S_n / 3) v_d = v_{NE} + v_{inv,C} \quad (3.59)$$

เมื่อนิยามให้ $v_{inv,C} = \sum_{n=u,v,w} (S_n / 3) v_d$

เมื่อนำสมการที่ (3.58) และ (3.59) เขียนเป็นวงจรสมมูลโหมตร่วมได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลโหมตร่วมของวงจรอินเวอร์เตอร์

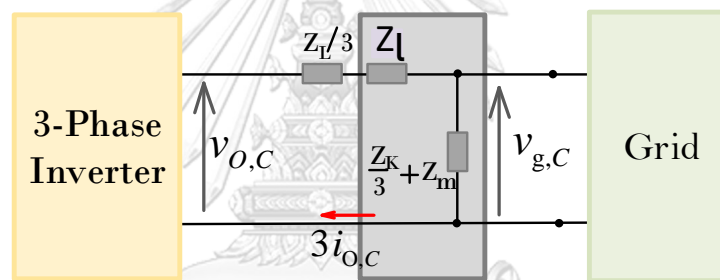
พิจารณาวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับจากสมการ (3.50) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสัญญาณ โหมดร่วมได้ดังสมการ (3.60)

$$v_{o,c} = Z_L i_{o,c} + 3Z_l i_{o,c} + v_{g,c} \quad (3.60)$$

จากสมการ (3.35) สามารถเขียนเป็นสมการสัญญาณโหมดร่วมได้ดังสมการ (3.61)

$$v_{g,c} = z_K (i_{K,c}) + z_m (3i_{K,c}) = \left(\frac{z_K}{3} + z_m \right) 3i_{K,c} \quad (3.61)$$

สามารถนำสมการ (3.60) และ (3.61) มาเขียนเป็นวงจรสมมูลโหมดร่วมได้ดังรูปที่ 3.13

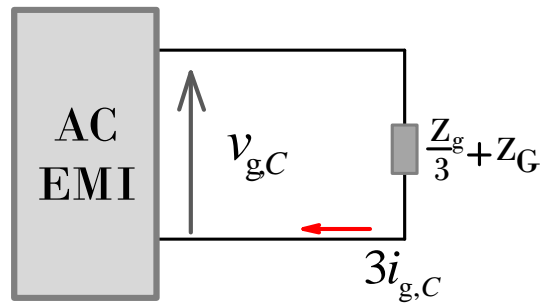


รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลโหมดร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ

พิจารณาสมการสัญญาณด้านโครงข่าย จากสมการ (3.51) สามารถนำมาเขียนสมการ สัญญาณโหมดร่วมได้ดังสมการ (3.62)

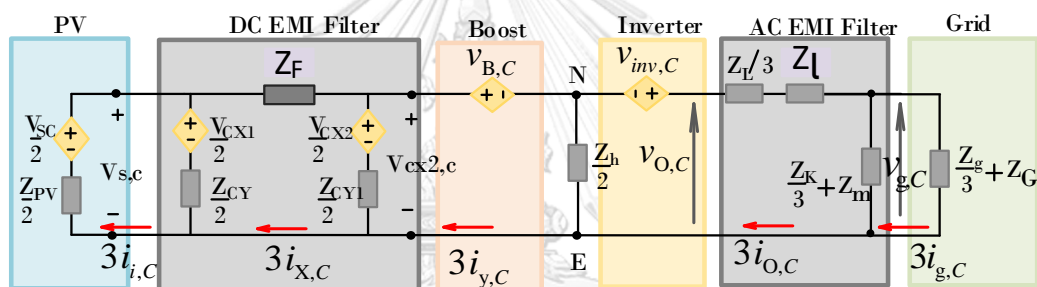
$$v_{g,c} = z_g i_{g,c} + 3z_G i_{g,c} = \left(\frac{z_g}{3} + z_G \right) 3i_{g,c} \quad (3.62)$$

สามารถนำสมการที่ (3.62) มาเขียนเป็นวงจรสมมูลโหมดร่วมได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลโหมตร่วมวงจรด้านโครงข่าย

เมื่อนำแต่ละองค์ประกอบมาประกอบกัน ซึ่งประกอบด้วย 1) ด้านแหล่งจ่ายพีวี 2) วงจรกรอง EMI ด้านไฟตรง 3) วงจรทบระดับ 4) บัสไฟตรง 5) อินเวอร์เตอร์ 6) วงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ และ 7) วงจรด้านโครงข่าย จะได้วงจรสมมูลโหมตร่วมของทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลโหมตร่วมของพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟส

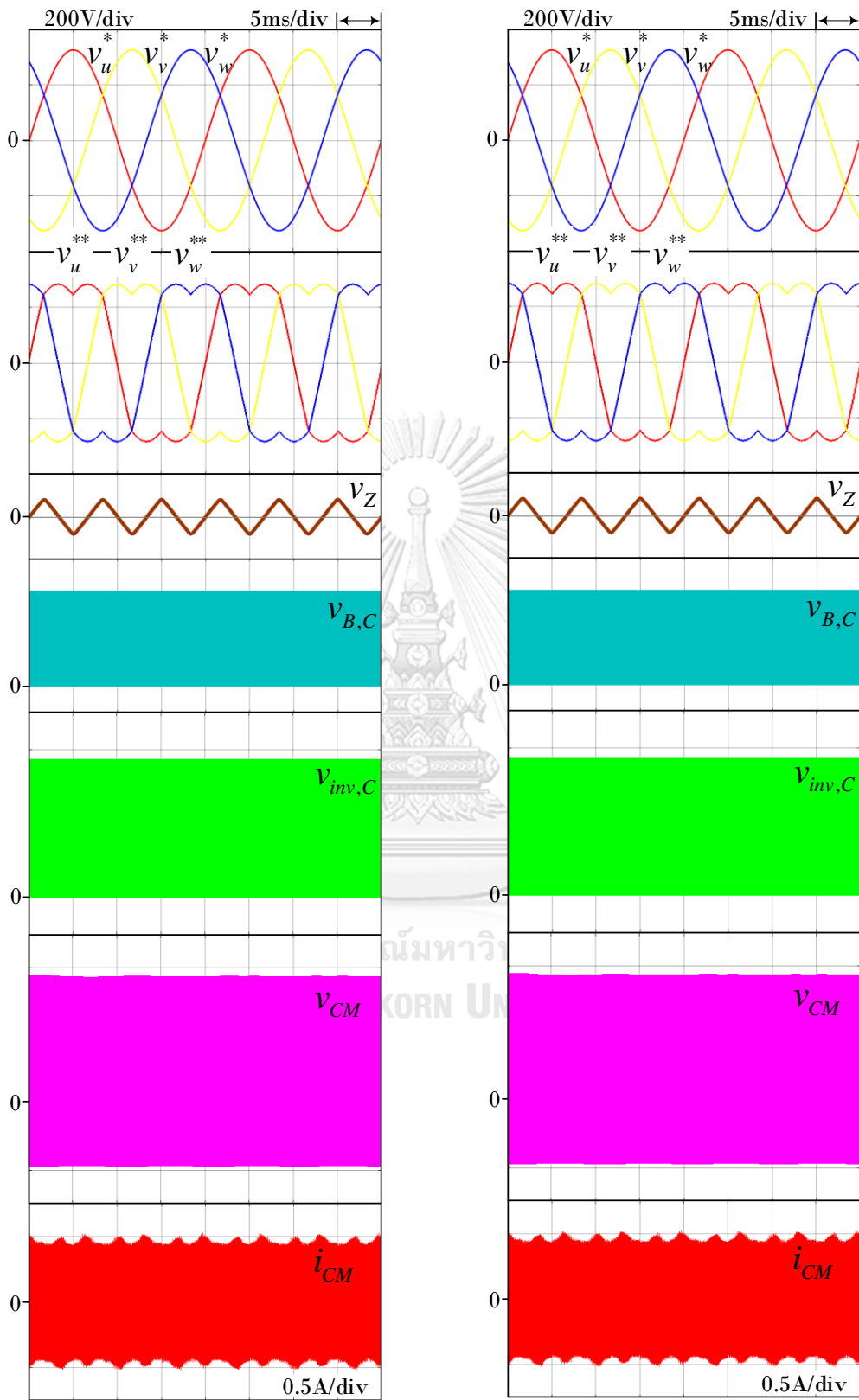
3.3 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของวงจรสมมูลโหมตร่วม

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ในการจำลองการทำงานโดยมีการจำลองพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน

แหล่งจ่ายไฟฟ้วี	680Vdc
แรงดันที่บัสไฟตรง	750Vdc
แรงดันด้านโครงข่ายและความถี่	400VLL(rms) และ 50Hz
อิมพีแดนซ์ด้านโครงข่าย (Z_g)	1m Ω
ตัวเหนี่ยวนำของวงจรทบระดับ (L_B)	4.7mH
ค่าตัวเก็บประจุบัสไฟตรง (C_b)	800uF
ค่าตัวเก็บประจุแฝงที่บัสไฟตรง (C_h)	1.5nF
ค่าตัวเก็บประจุแฝงที่แผงโซลาเซลล์ (Z_{pv})	$C_{PV} = 110nF$ $R_{PV} = 1\Omega$
อิมพีแดนซ์กริด (Z_G)	10 Ω
ความถี่การสวิตช์วงจรบัส	16kHz
ความถี่การสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์	16kHz
ตัวเหนี่ยวนำร่วมของวงจรกรอง EMI ไฟตรง (Lcm)	820uH
ตัวเหนี่ยวนำร่วมของวงจรกรอง EMI ด้านไฟสลับ (Lcm)	920uH
ตัวเหนี่ยวนำวงจรทบระดับ (L_B)	4.7mH
ตัวเหนี่ยวนำที่ด้านออกอินเวอร์เตอร์ (Z_L)	4.7mH
ตัวเก็บประจุ CY , CY1 และ Ck และ Cm	5nF และ 1.1uF และ 22nF
กำลังไฟฟ้าพิกัดของพีวีอินเวอร์เตอร์	10kVA

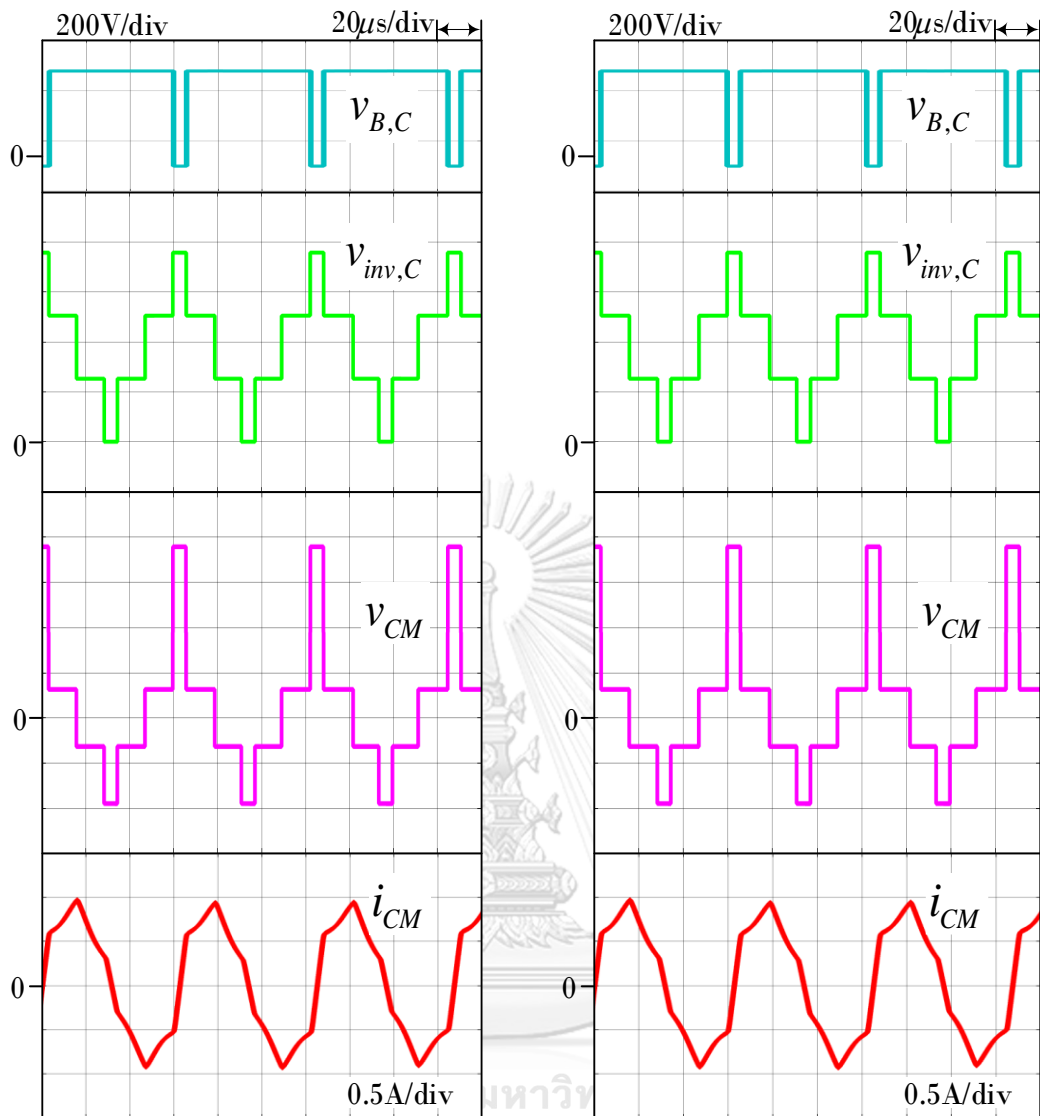
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ในตาราง 3.2 ลงโปรแกรม MATLAB Simulink ในวงจรจริง (รูปที่ 3.1) และวงจรสมมูลโหมตร่วม (รูปที่ 3.15) โดยใช้รูปแบบการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Pulse Width Modulation : SVPWM) ซึ่งการมอดูเลตระหว่างวงจรทบระดับและอินเวอร์เตอร์นั้นจะเป็นอิสระต่อกันแสดงดังรูปที่ 3.16 และภาพขยายรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



(ก) วงจรจริง

(ข) วงจรสมมูลโหมตร่วม

รูปที่ 3.16 ผลการจำลองเปรียบเทียบวงจรถจริงกับวงจรสมมูลโหมตร่วม



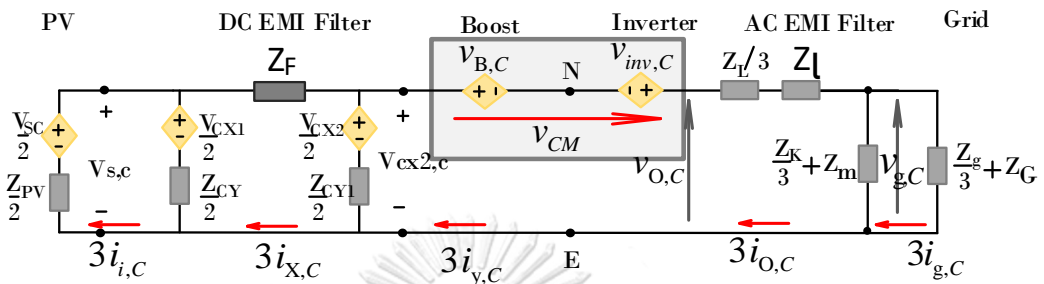
(ก) วงจรจริง

(ข) วงจรสมมูลโหมตร่วม

รูปที่ 3.17 ภาพขยายผลการจำลองเปรียบเทียบวงจรจริงกับวงจรสมมูลโหมตร่วม

จากผลการการจำลองดังรูปที่ 3.16 และ รูปที่ 3.17 ผลการจำลองยืนยันว่าสัญญาณแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลทั้งวงจรจริงและวงจรสมมูลโหมตร่วมเหมือนกันทุกๆ คาบการสวิตช์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวงจรสมมูลโหมตร่วม (รูปที่ 3.15) ที่งานวิจัยนี้เสนอมีความแม่นยำอีกทั้งยังสามารถพิจารณาแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมทั้งด้านไฟตรงและด้านไฟสลับ ณ ขณะใดขณะหนึ่งไปพร้อมๆกันได้

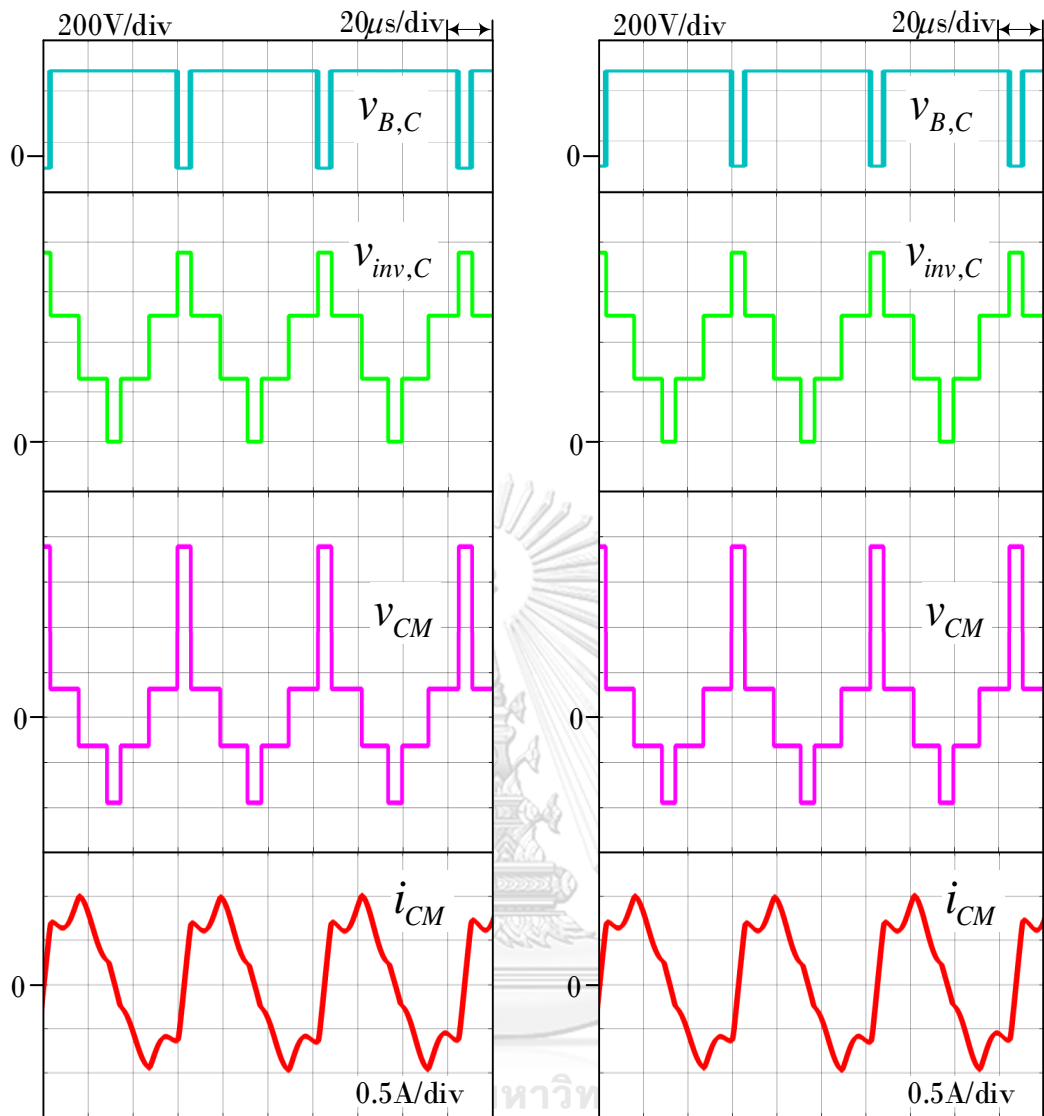
เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุแฝงที่เกิดขึ้นระหว่างบัสไฟตรงกับซึ่งกระบายความร้อนที่พีวีอินเวอร์เตอร์ (C_h) มีค่าประมาณอยู่ในช่วง 1-3nF มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $C_{PV} = 110\text{nF}$ ดังนั้นจึงสามารถละเลยค่า C_h ได้ดังแสดงรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลโหมดร่วมเมื่อละเลย C_h

เมื่อละเลยตัวเก็บประจุแฝง C_h พบว่าแหล่งกำเนิดแรงดันโหมดร่วมของวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ต่ออนุกรมกัน ซึ่งการต่อแบบอนุกรมกันอาจจะทำให้แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมดร่วมทั้งสองอาจเกิดการเสริมกันก็ได้ เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพิจารณาเพียงแหล่งกำเนิดจากอินเวอร์เตอร์เพียงภาคเดียวเท่านั้น จากรูปผลการทดลองที่ 3.17 พบว่าแรงดันโหมดร่วมทั้งสองระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีการมอดูเลตที่มีอิสระต่อกันนั้นมีลักษณะเสริมกันของแรงดันโหมดร่วมจะได้แรงดันโหมดร่วมรวม (v_{CM}) เมื่ออินเวอร์เตอร์มีการมอดูเลตแบบทั่วไปแบบวิธีสเปซเวกเตอร์ การเสริมกันของแรงดันโหมดร่วมรวมนั้นส่งผลให้กระแสรั่วไหลนั้นมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 3.19 เปรียบเทียบผลตอบสนองของสัญญาณต่างๆ ของแรงดันโหมดร่วมระหว่างวงจรจริงในรูปที่ 3.1 โดยละเลยค่า C_h จะได้ดังวงจรสมมูลในรูปที่ 3.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของวงจรสมมูลโหมดร่วมที่นำเสนอ (รูปที่ 3.19(ข)) มีความแม่นยำโดยมีผลตอบสนองของแรงดันโหมดร่วมและกระแสโหมดร่วมหรือกระแสรั่วไหลเหมือนกับวงจรจริงในรูปที่ 3.19(ก)



(ก) วงจรจริง

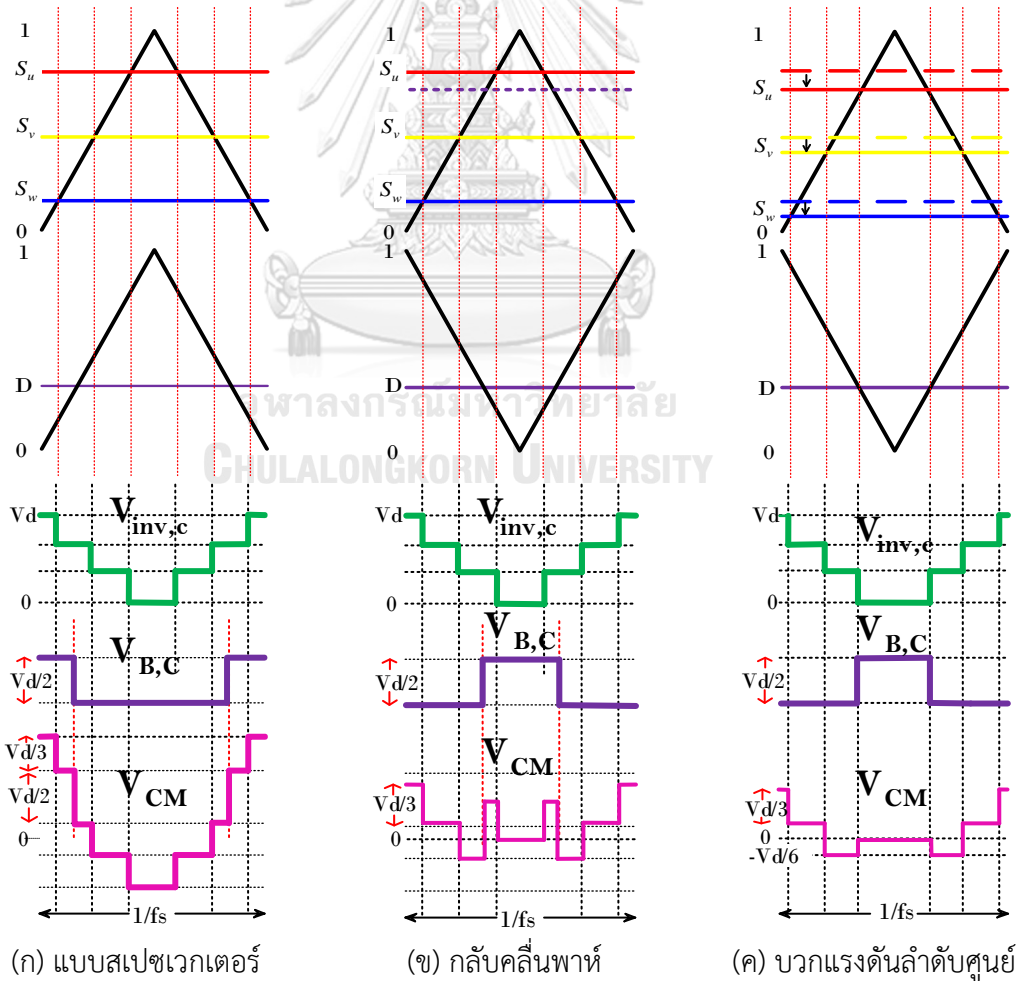
(ข) วงจรสมมูลโหมดร่วม

รูปที่ 3.19 ภาพขยายผลการจำลองเปรียบเทียบวงจรจริงกับวงจรสมมูลโหมดร่วมเมื่อละลาย C_h

บทที่ 4

การลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์

จากวงจรสมมูลโหมตร่วมที่แม่นยำดังรูปที่ 3.18 จะพบว่า มีแหล่งกำเนิดแรงดันโหมตร่วม 2 ส่วนคือ อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และวงจรทบทวนที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรงและแผงพีวี ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟตรง ซึ่งสามารถออกแบบให้แรงดันโหมตร่วมทั้ง 2 แหล่งหักล้างกันได้ โดยมี 2 ขั้นตอน 1) การกลับคลื่นพาร์ของวงจรทบทวน 2) การเลือกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อปรับดิวิตีไซเคิล การมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์มีสถานะการสวิตช์ตรงกับดิวิตีไซเคิลของวงจรทบทวนซึ่งจะมีสถานะสวิตช์ ปิด-เปิด ตรงกับแรงดันเฟส ๆใดเฟสหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ทุกๆ คาบของการสวิตช์ แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงการมอดูเลตดังนี้



รูปที่ 4.1 ลักษณะการมอดูเลต

4.1 การมอดูเลตโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์

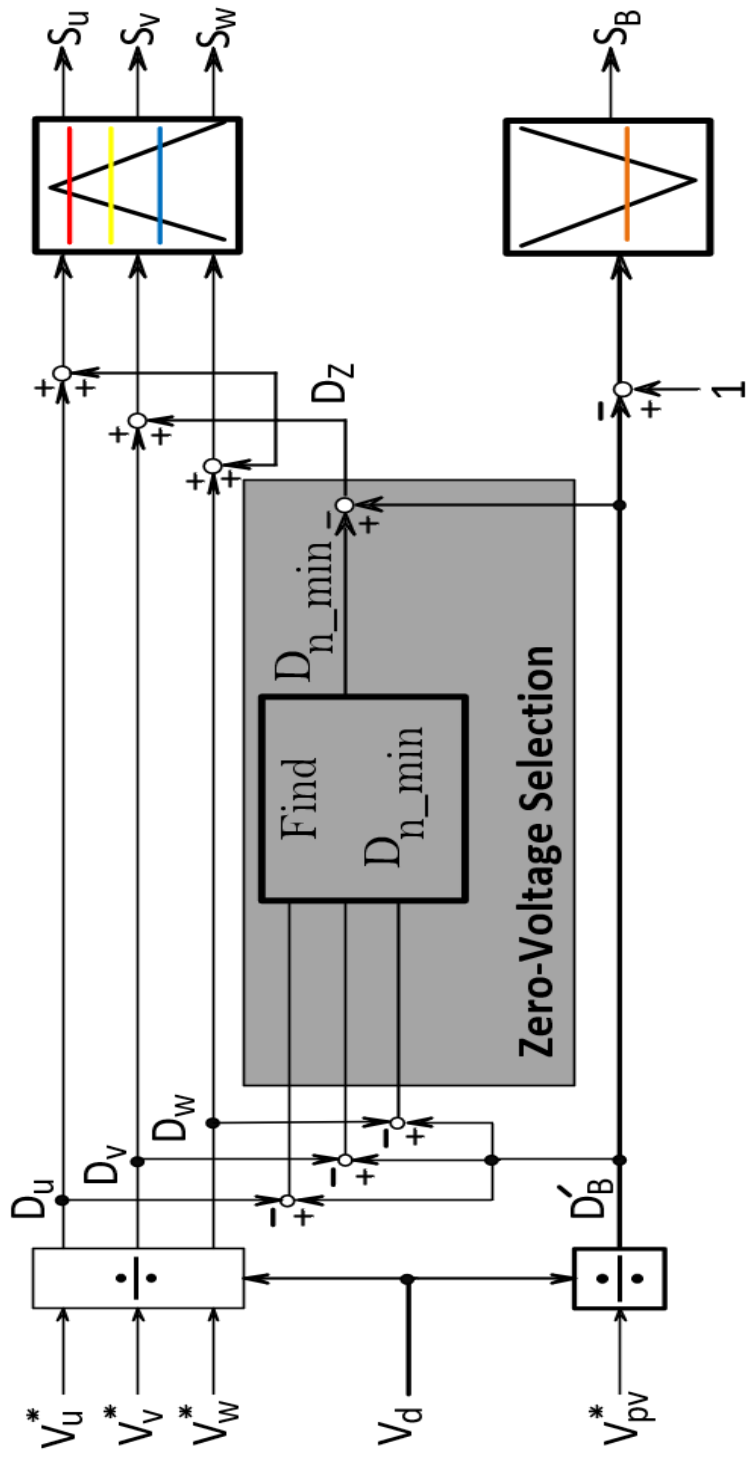
งานวิจัยนำเสนอวิธีการลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยรวม v_{CM} โดยอาศัยแนวคิดให้เกิดการหักล้างกันระหว่างแรงดันโหมตร่วมของวงจรทบระดับและของอินเวอร์เตอร์ [6] ทั้งนี้ได้เปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่มีการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ D_z เพื่อให้สัญญาณอ้างอิงเฟสใดเฟสหนึ่งอยู่ในระดับเดียวกันกับของวงจรทบพร้อมกันกับการปรับคลื่นพาห์ของวงจรทบระดับให้มีเฟสตรงกันข้ามดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข) และ 4.1(ค) ผลการเปรียบเทียบการมอดูเลตด้วยวิธีดั้งเดิม (รูปที่ 4.1(ก)) และวิธีที่นำเสนอในรูปที่ 4.1(ค) จะเห็นได้ว่าแรงดันโหมตร่วมของวงจรทบระดับ $-v_{B,C}$ จะมีเฟสตรงกันข้ามกับของอินเวอร์เตอร์ $v_{inv,C}$ ทำให้เกิดการหักล้างกัน และแรงดันโหมตร่วมโดยรวม v_{CM} ถูกลดทอนลงได้

จากรูปที่ 4.1(ค) จะเห็นได้ว่าการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่เสนอทำให้การกำหนดสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับการสภาวะการสวิตช์ของวงจรทบระดับ โดยจะมีการมอดูเลตแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งของอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้มันเปลี่ยนสถานะการสวิตช์พร้อมกันกับของวงจรทบระดับ ยังผลให้ช่วยลดจำนวนขั้นของแรงดันโหมตร่วมโดยรวมลงได้ ทั้งนี้การลดจำนวนขั้นของแรงดันโหมตร่วมจะช่วยลดความถี่ในการเกิดกระแสรั่วไหลที่ความถี่สูงได้ การเลือกแรงดันลำดับศูนย์จะพิจารณาจากแรงดันเฟสของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าวัฏจักรงาน (D_u, D_v หรือ D_w) ที่ใกล้เคียงกับค่าวัฏจักรงานของวงจรทบระดับ ($D' = 1 - D$) มากที่สุด ทั้งนี้เพื่อช่วยไม่ให้เกิดการทำงานในช่วงมอดูเลตเกิน และยังช่วยลดระลอกของกระแสเฟสอีกด้วย ค่าวัฏจักรงานของแรงดันลำดับศูนย์สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.1)

$$D_z = \min \{ D'_B - D_{n_min} \} \quad (4.1)$$

$$\text{โดยที่} \quad \min_{n=u,v,w} |D'_B - D_n| = |D'_B - D_{n_min}| \quad (4.2)$$

รูปที่ 4.2 แสดงถึงวิธีการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่นำเสนอด้วยสมการ (4.1) และการมอดูเลตพีดับบิวเอ็มด้วยคลื่นพาห์ของอินเวอร์เตอร์และวงจรทบระดับสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาค 2 ระดับ



รูปที่ 4.2 วงจรพีอีเอ็มแวนเออร์เตอร์สองเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์

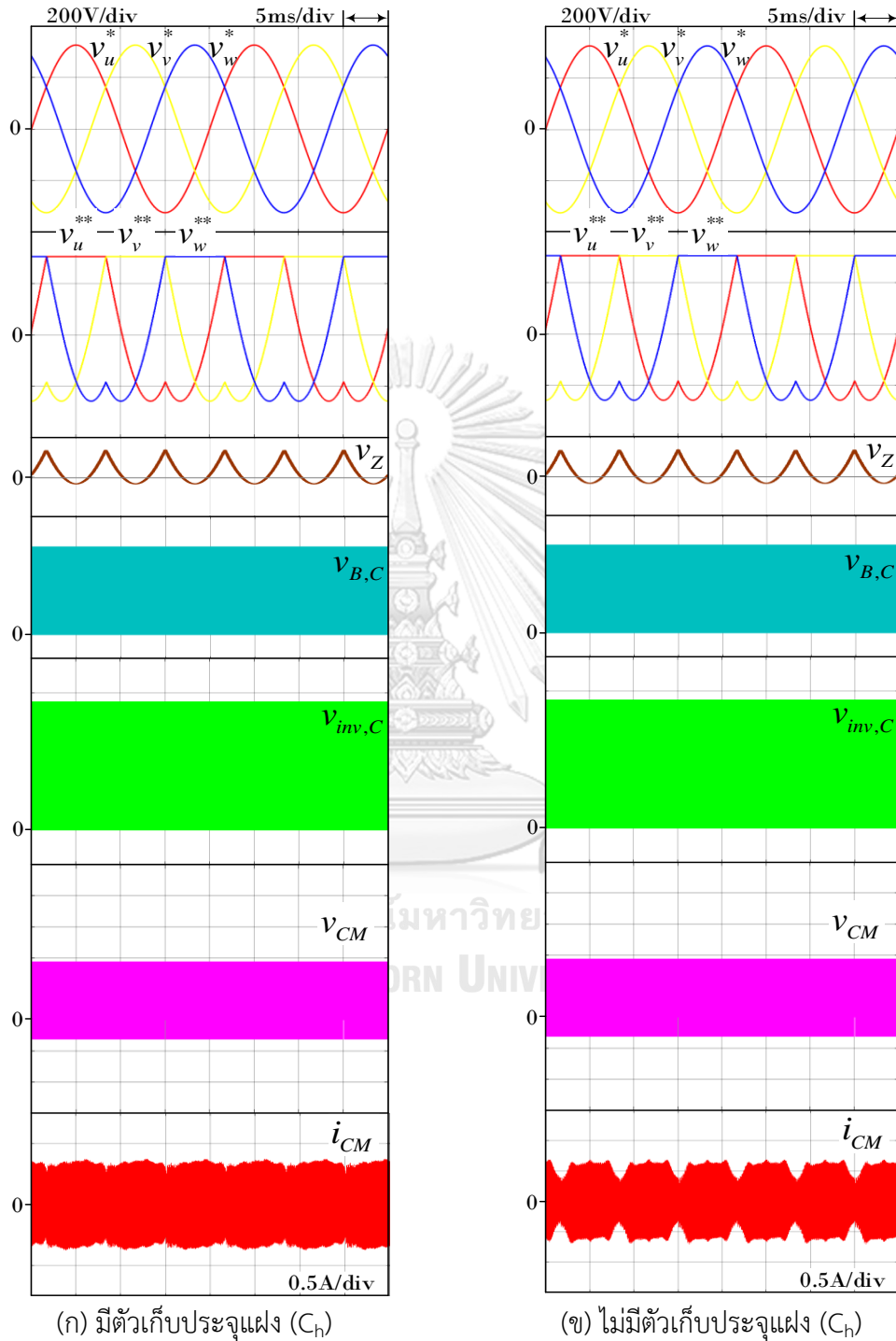
เนื่องจากการมอดูเลตที่นำเสนอเกิดจากวงจรสมมูลโหมตร่วมซึ่งได้มีการละลายผลของตัวเก็บประจุแฝง (c_h) จากรูปที่ 3.18 ซึ่งพบว่าแหล่งกำเนิดแรงดันโหมตร่วมระหว่างวงจรระดับและอินเวอร์เตอร์มีลักษณะต่ออนุกรมกัน จากรูปที่ 4.2 การออกแบบการมอดูเลตที่งานวิจัยนี้นำเสนอจะพบว่าการมอดูเลตระหว่างวงจรระดับกับอินเวอร์เตอร์จะไม่มีอิสระต่อกันเมื่อเทียบกับการมอดูเลตแบบทั่วไปซึ่งจะมีการมอดูเลตที่อิสระต่อกันกล่าวคือการมอดูเลตทั้งวงจรระดับและอินเวอร์เตอร์จะไม่เกี่ยวข้องกัน ผลการจำลองจากรูปที่ 4.3(ก) พบว่าการมอดูเลตโดยการบวกแรงดันลำดับศูนย์ที่นำเสนอขึ้นทำให้เกิดการลดทอนกันระหว่างวงจรระดับกับอินเวอร์เตอร์จริงซึ่งจากเดิมการมอดูเลตแบบทั่วไปแรงดันโหมตร่วมจะมีลักษณะการเสริมกัน(รูปที่ 3.17 และ 3.19) กลายมาเป็นการหักล้างกันเอง และยังแสดงขนาดค่าน้อยลงของกระแสรั่วไหลที่มีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับแบบทั่วไป

4.2 ผลการจำลองการลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์

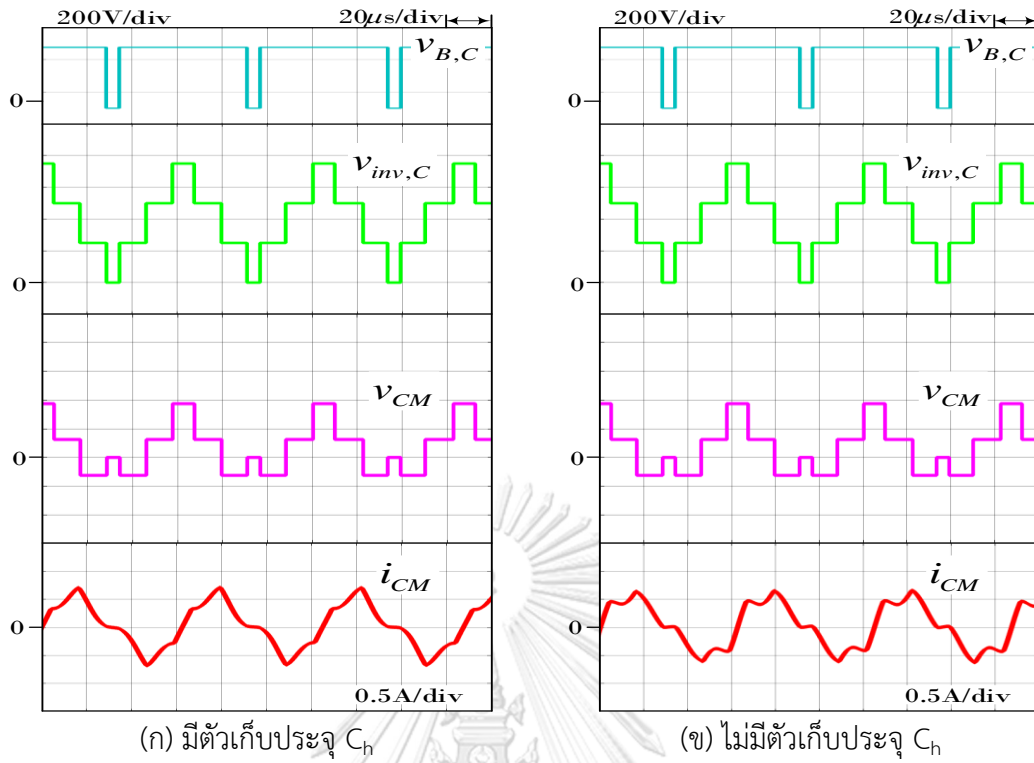
เมื่อพิจารณาวิธีการในการหักล้างระหว่างวงจรระดับและอินเวอร์เตอร์เมื่อมีตัวเก็บประจุ (c_h) ที่บัสไฟตรงจากรูปที่ 4.3(ข) พบว่ายังคงสามารถใช้หลักการการลดทอนกัน ยังสามารถทำงานได้แม้แหล่งจ่ายแรงดันโหมตร่วมทั้งสองจะไม่ต่อกับแบบอนุกรมดังรูปที่ 3.16 ก็ตาม ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าหลักการการลดทอนกันระหว่างวงจรระดับและอินเวอร์เตอร์นั้นยังสามารถทำงานได้แม้ว่าจะมีตัวเก็บประจุแฝงที่บัสไฟตรงด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรสมมูลโหมตร่วมในกรณีไม่มีตัวเก็บประจุ c_h

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงลักษณะของแรงดันโหมตร่วมของวงจรระดับที่ถูกกลับคลื่นพาห์ ($v_{B,C}$) และสัญญาณแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์ ($v_{inv,C}$) เกิดจากการบวกแรงดันลำดับศูนย์และแสดงการลดทอนเมื่อวัดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมรวม (v_{CM}) ซึ่งสามารถลดได้ทั้งจำนวนครั้งใน 1 คาบ (จากเดิม 8 ชั้นใน 1 คาบการสวิตช์เหลือเพียง 6 ชั้นใน 1 คาบการสวิตช์) และลดขนาดของแรงดันโหมตร่วมรวมจากเดิม(มีขนาด $V_d/3$ จำนวน 6 ชั้น และ $V_d/2$ จำนวน 2 ชั้น) กับที่นำเสนอ ($V_d/3$ จำนวน 4 ชั้น และ $V_d/6$ จำนวน 2 ชั้น) ในกรณีที่แรงดันพีวีมีค่าต่ำลงเหลือเพียงแรงดันเท่ากับ 500 โวลต์อาจจะทำให้ค่าแรงดันลำดับศูนย์จากผลต่างของสมการ (4.1) อาจมีค่าสูงจนทำให้เกิดการมอดูเลตเกินที่อินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อแรงดันพีวีต่ำทำให้แรงดันลำดับศูนย์มีค่าสูงขึ้นแม้จะเลือกค่าน้อยที่สุดก็ตามส่งผลให้เกิดการมอดูเลตเกินซึ่งคล้ายการมอดูเลตแบบสองแขน โดยจะสร้างแรงดันโหมตร่วมที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์เพียง 4 ชั้นเท่านั้น และในขณะที่เดียวกันด้านวงจรระดับเนื่องจากต้องปรับดีวีทีให้มีการเปิดสวิตช์มากขึ้นเพื่อรักษาระดับแรงดันด้านนอกที่บัสไฟตรงให้คงที่จึงทำให้แรงดันโหมตร่วมวงจรระดับมีเนื้อแรงดันเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้การลดทอน

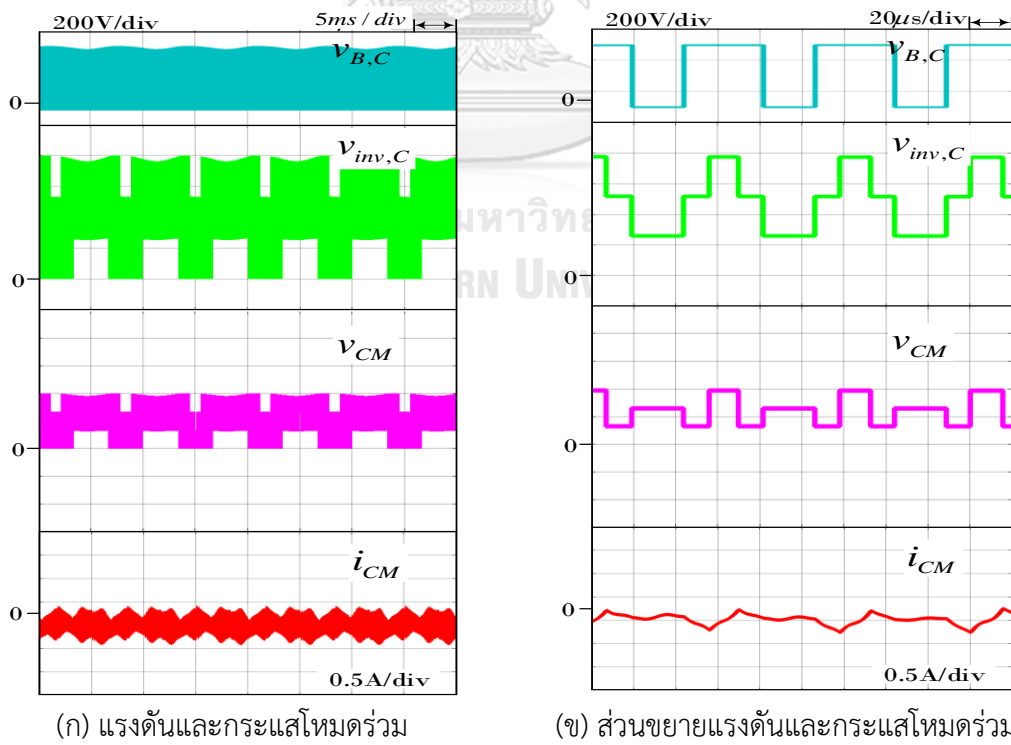
กั้นระหว่างแรงดันโหมตร่วมวงจรถบระดับและแรงดันโหมตร่วมของอินเวอร์เตอร์มีการลดได้ทั้งขนาดและจำนวนขึ้นมากขึ้นดังรูปที่ 4.5(ข)



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์กรณีละเลย C_h



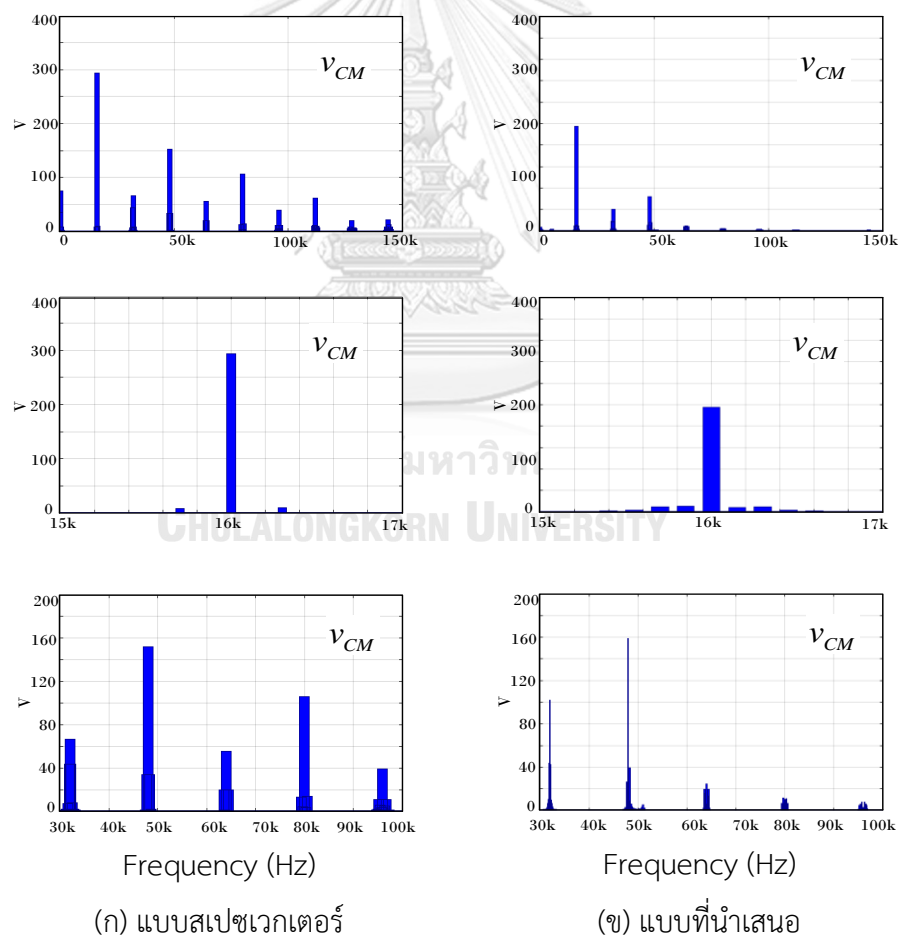
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองแรงดันและกระแสโหมตรงร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์กรณีไม่มี C_h



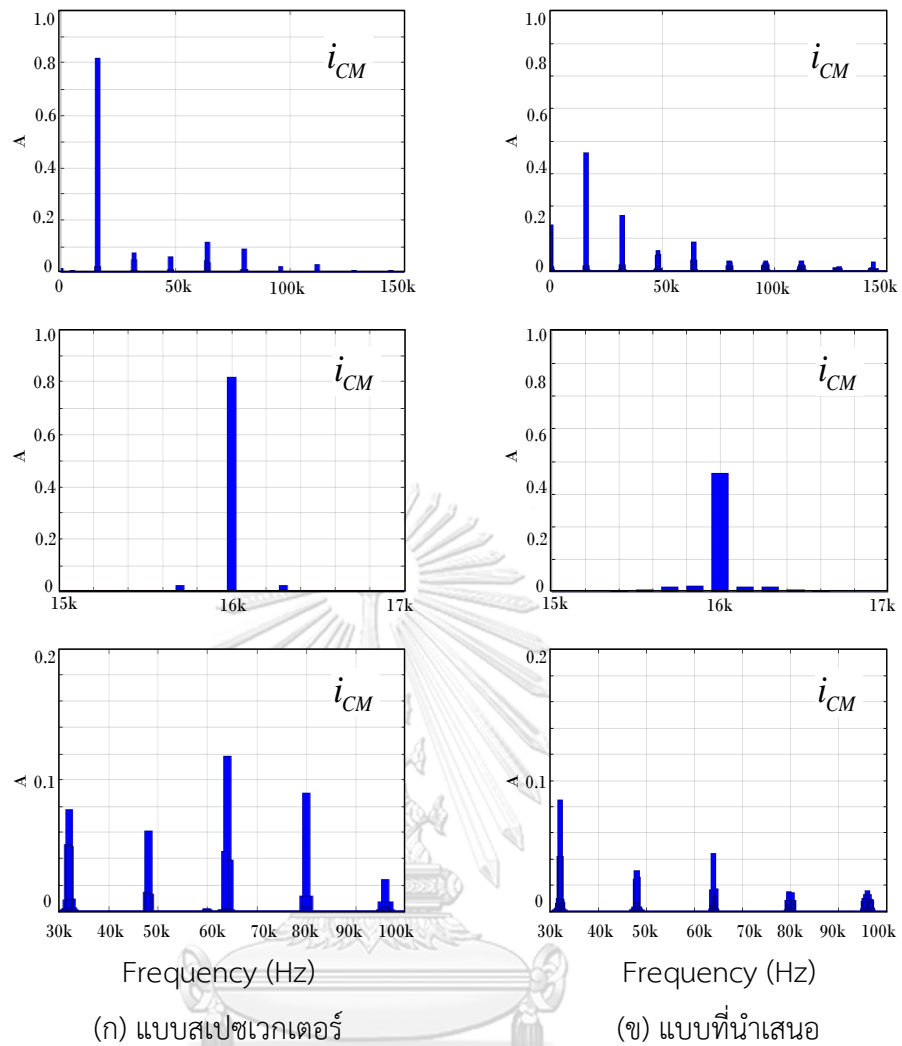
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองแรงดันและกระแสโหมตรงร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์เมื่อมอดูเลตเกิน

4.3 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลการจำลองระหว่างการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ การกลับคลื่นพาห้วงจรทระดับและการมอดูเลตโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์

เนื่องจากวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอสามารถลดทอนแรงดันโหมตร่วมซึ่งเกิดจากการหักล้างกันเองระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์นั้นสามารถลดได้ทั้งขนาดและจำนวนขั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันโหมตร่วม โดยคาดหวังว่าจะสามารถลดองค์ประกอบความถี่สูงให้ลดลง ผลการจำลองแสดงให้เห็นสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันโหมตร่วมรวมและกระแสโหมตร่วมที่มีความถี่วิตซ์มีขนาดลดลง โดยจะเปรียบเทียบการมอดูเลตเป็น 3 กรณีดังนี้ 1) แบบทั่วไปคือการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ การมอดูเลตระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์เป็นอิสระต่อกัน 2) แบบกลับคลื่นพาห้วงจรทระดับกับแบบทั่วไปแต่กลับคลื่นพาห้วงจรทระดับ 3) แบบที่นำเสนอคือการเลือกแรงดันลำดับศูนย์การมอดูเลตระหว่างวงจรทระดับและอินเวอร์เตอร์ไม่อิสระต่อกันดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบสเปกตรัมแรงดันโหมตร่วมระหว่างแบบสเปซเวกเตอร์ทั่วไปกับแบบที่นำเสนอ



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสโหมดร่วมระหว่างแบบสเปซเวกเตอร์ทั่วไปกับแบบที่นำเสนอ

บทที่ 5

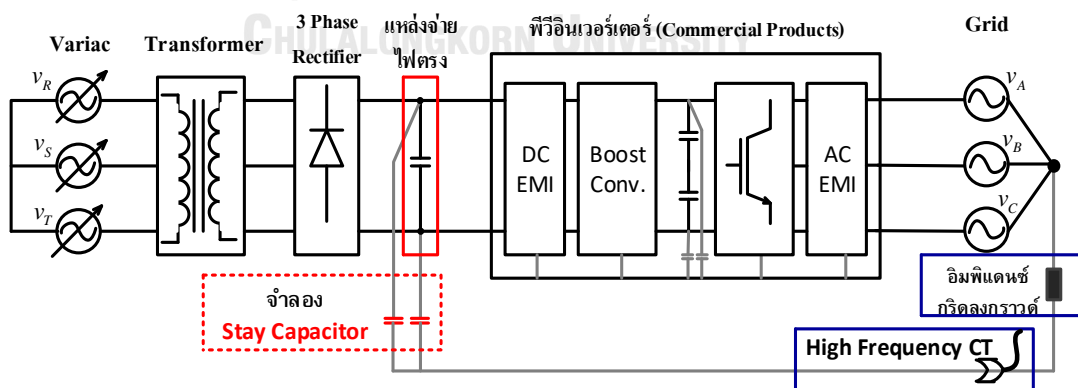
ผลการทดลองการลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองการลดทอนแรงดันโหมตร่วมโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์สำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขการทำงานที่แรงดันพีวีเท่ากับ 680Vdc อินเวอร์เตอร์เมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์แล้วไม่ถูกจำกัด และแรงดันพีวีเท่ากับ 500Vdc ซึ่งทำให้แรงดันลำดับศูนย์ถูกจำกัด (ไม่มีเหตุการณ์มอดูเลตเกินในกรณีแรงดันลำดับศูนย์มีค่ามากจนทำให้เกิดแรงดันคำสั่งสูงกว่าแรงดันที่บัสไฟตรง) ที่อินเวอร์เตอร์เมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์โดยกำหนดแรงดันที่บัสไฟตรงให้มีค่าคงที่เท่ากับ 750Vdc

การทดลองจะทำงานในแบบการทำงาน 3 โหมตร่วมการทำงาน ได้แก่ 1) การมอดูเลตแบบทั่วไปด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ 2) การมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์และกลับคลื่นพาทซ์ของวงจรถบระดับ 3) การมอดูเลตโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ เพื่อที่จะยืนยันว่าวิธีการมอดูเลตที่ได้นำเสนอสามารถลดทอนแรงดันโหมตร่วมสามารถทำงานได้ทุกย่านพิกัดการทำงานทางกำลังไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้จะทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ 33% 66% และ 100% ของพีวีอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 10kW

5.1 โครงสร้างของระบบทดสอบ

ภาพรวมของระบบที่ทดสอบการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ระบบภาควงจรกำลัง 2) อุปกรณ์ตรวจวัด



รูปที่ 5.1 ระบบใช้ทดสอบการทำงานของมอดูเลตของงานวิจัย

5.1.1 ระบบวงจรภาคกำลัง

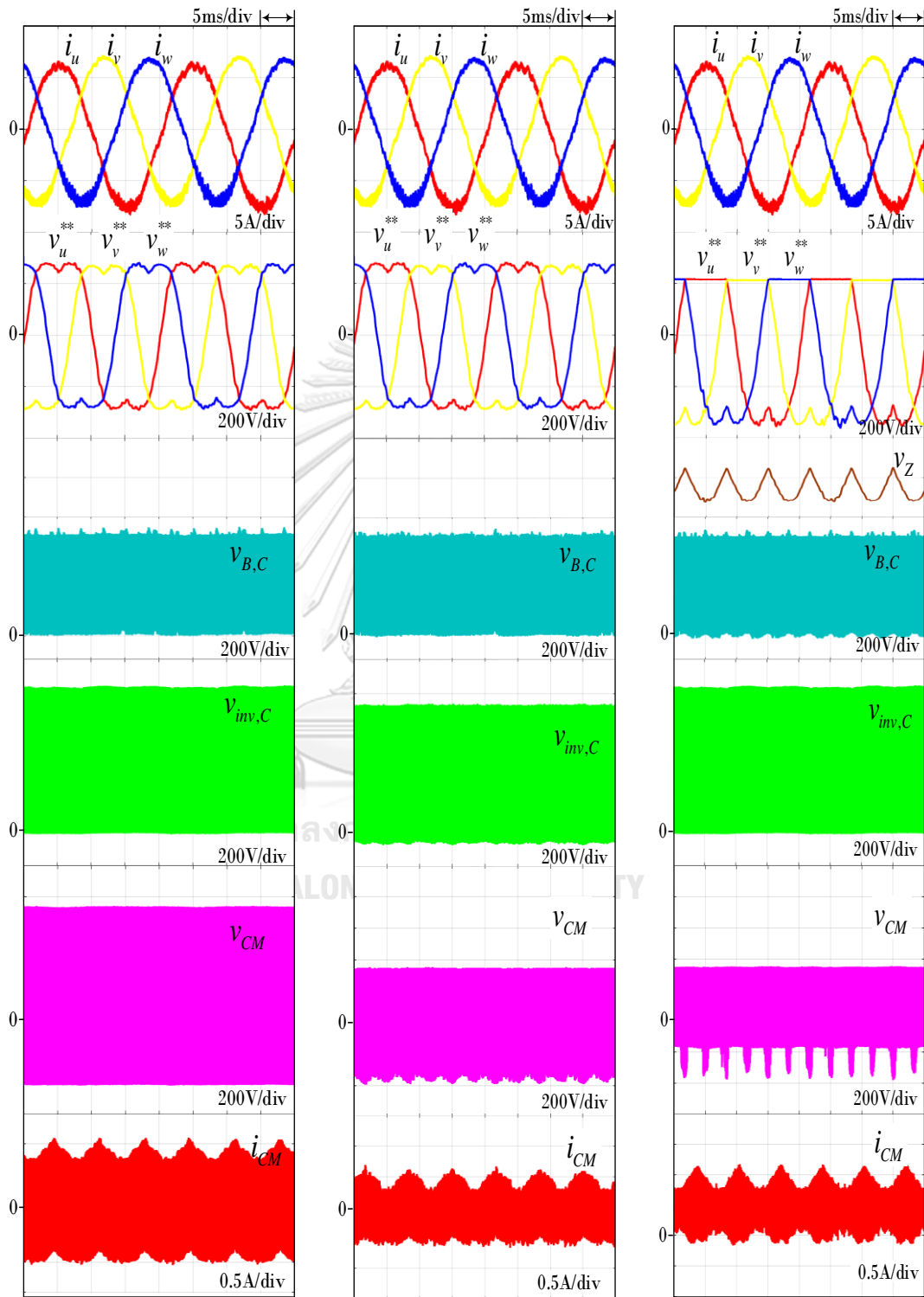
การออกแบบแหล่งจ่ายไฟตรงในงานวิจัยนี้เนื่องจากการทำงานไม่ได้ต่อกับระบบพีวีจริงแต่ใช้วิธีจำลองแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงโดยการใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอด (SANREX DF100A160) และต่อตัวเก็บประจุที่ด้านออกเพื่อกรองสัญญาณแรงดันกระเพื่อมโดยใช้ขนาดตัวเก็บประจุเท่ากับ 2200 μ F ทนแรงดัน 450V ใช้ 2 ตัวต่ออนุกรมกัน ในส่วนของอินเวอร์เตอร์งานวิจัยใช้พีวีอินเวอร์เตอร์ที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด (Commercial Products) มาแก้ไขในส่วนของโปรแกรมเท่านั้นโดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้ 1) ปรับแก้แรงดันลำดับศูนย์ให้ตรงกับแบบที่นำเสนอในรูปแบบที่ 4.2 และ 2) ชดเชยผลของ dead time เนื่องจากในทางปฏิบัติของสวิตช์กำลัง (รุ่นPM50CL1A120) ที่ด้านอินเวอร์เตอร์จะต้องมีเฟื่อ dead time ด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องชดเชยผลของ dead time ด้วยเช่นกัน

5.1.2 อุปกรณ์ตรวจวัด

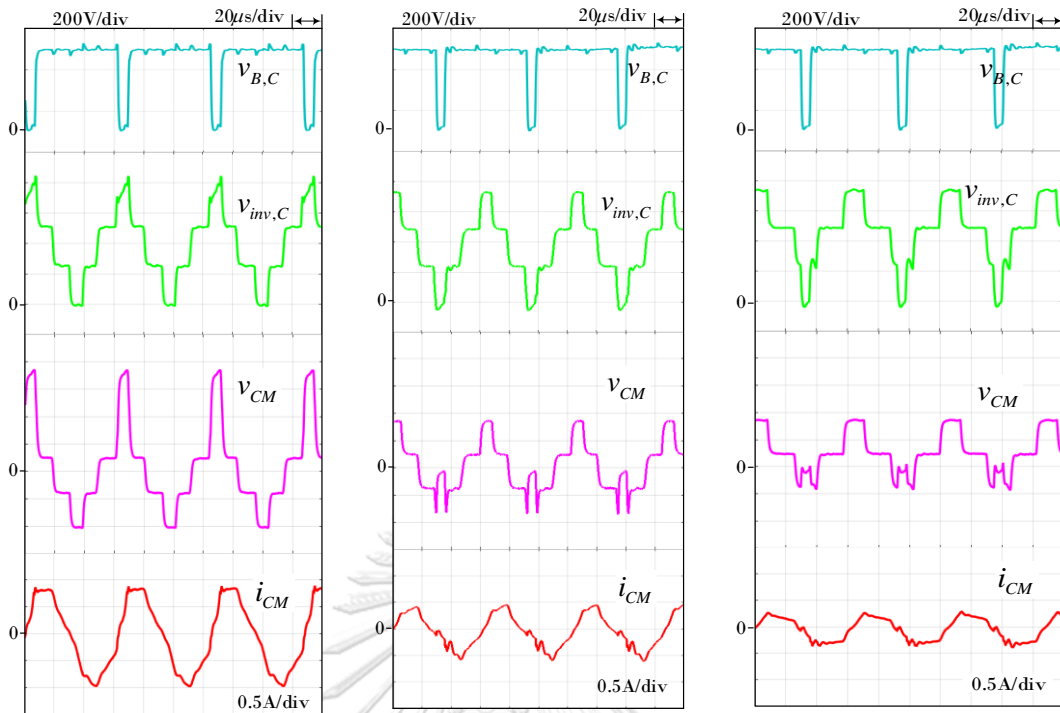
จากรูป 5.1 การตรวจวัดจะมี 2 ส่วนคือ 1) การตรวจวัดแรงดันโหมตร่วมโดยงานวิจัยใช้ Differential Probe Model สามารถวัดแรงดันได้สูงสุด 1400Vpeak และ 2) การวัดกระแสรั่วไหลนี้ งานวิจัยจะใช้อุปกรณ์ซึ่งเป็น High Frequency CT ของ CTL-28-S90-05Z-1R1 YOKOGAWA สามารถวัดกระแสได้ตั้งแต่ 10mA ถึง 10A [rms] มีย่านความถี่ 2kHz ถึง 100MHz ซึ่งสามารถนำมาวัดกระแสรั่วไหลได้อย่างดีจากนั้นวัดสัญญาณกระแสรั่วไหลและแสดงผลโดยสโคปของ Agilent Technologies InfiniiVistion DSO-X 3024A ในการแสดงผลสัญญาณทั้งแรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหล

5.2 ผลการทดลองกรณีกำลังไฟฟ้า 33% ของพิกัดกำลังไฟฟ้า 10kW

5.2.1 กรณี 1 แรงดันพีวี 680 Vdc และแรงดันบัสไฟตรง 750Vdc



รูปที่ 5.2 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 1

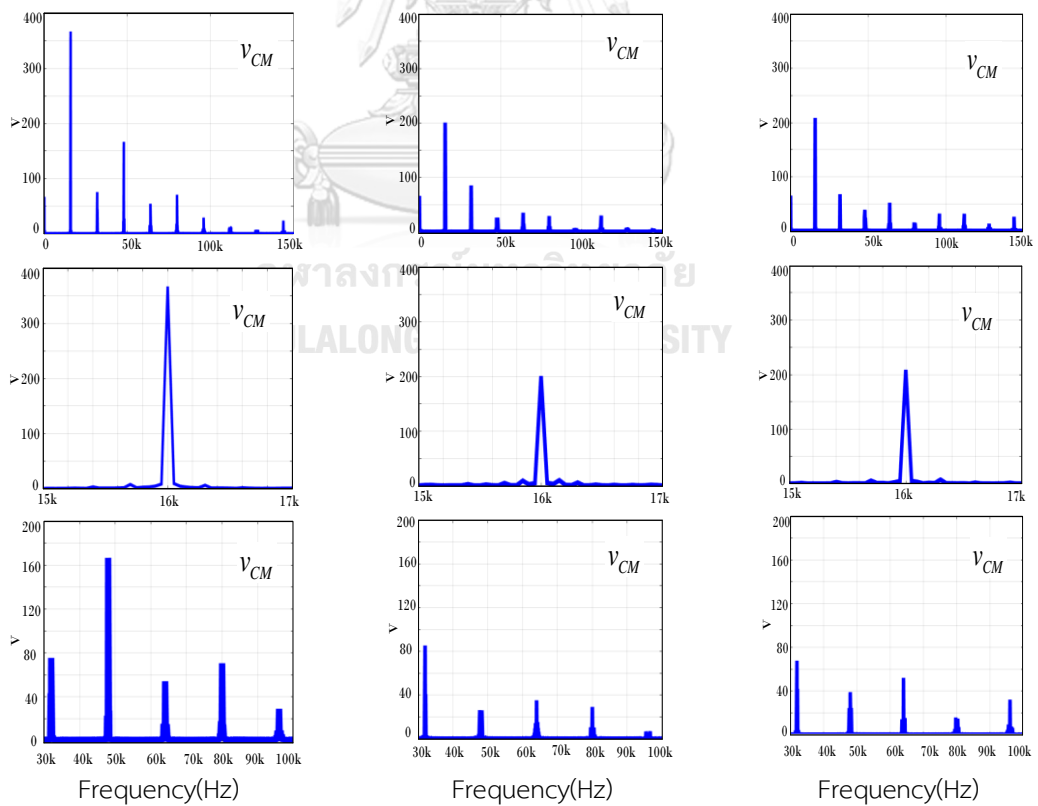


(ก)แบบสเปซเวกเตอร์

(ข)กลับคลื่นพาร์

(ค)แบบที่นำเสนองาน

รูปที่ 5.3 ส่วนขยายแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 1

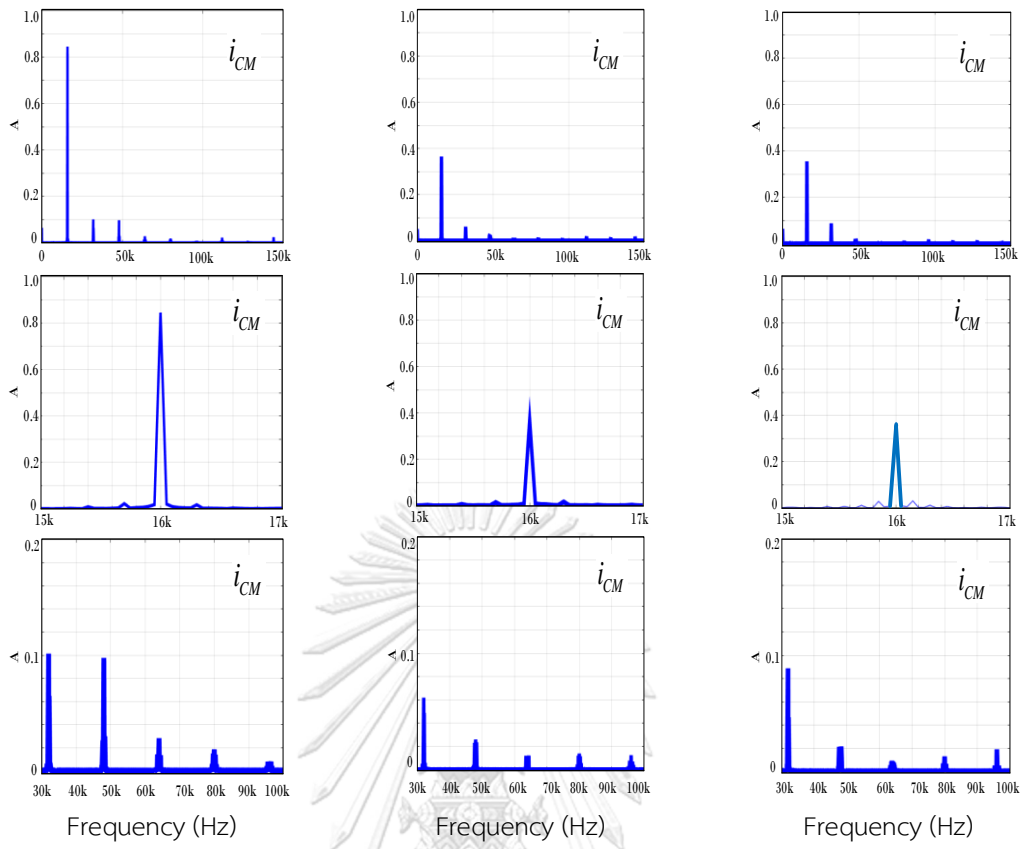


(ก) แบบสเปซเวกเตอร์

(ข) กลับคลื่นพาร์

(ค) แบบที่นำเสนองาน

รูปที่ 5.4 สเปคตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมกรณี 1



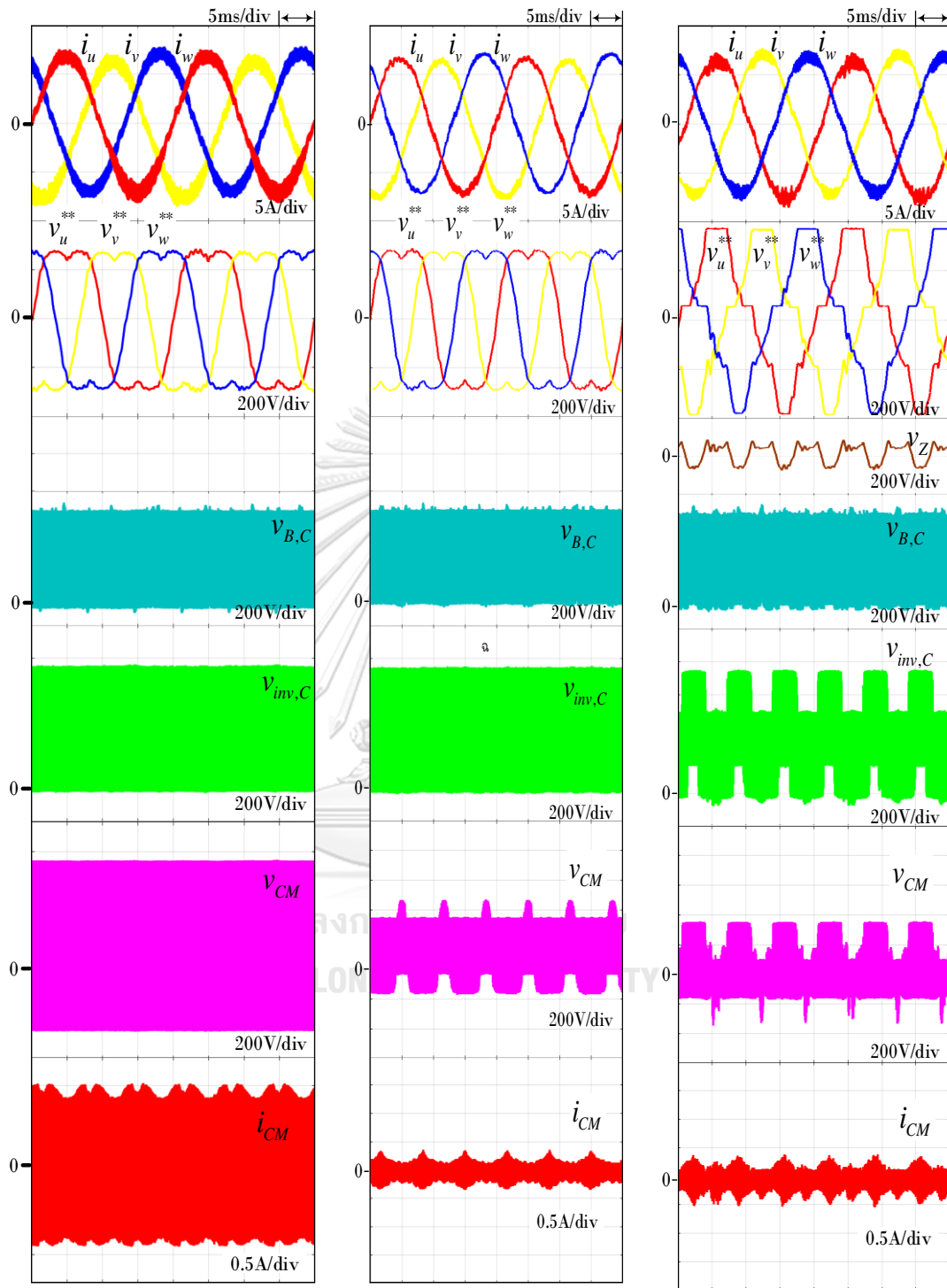
(ก) แบบสเปซเวกเตอร์

(ข) กลับคลื่นพาท

(ค) แบบที่นำเสนอ

รูปที่ 5.5 สเปกตรัมสัญญาณกระแสโหมตร์รวมกรณี 1

5.2.2 กรณี 2 แรงดันพีวี 500 Vdc และแรงดันบัสไฟตรง 750Vdc

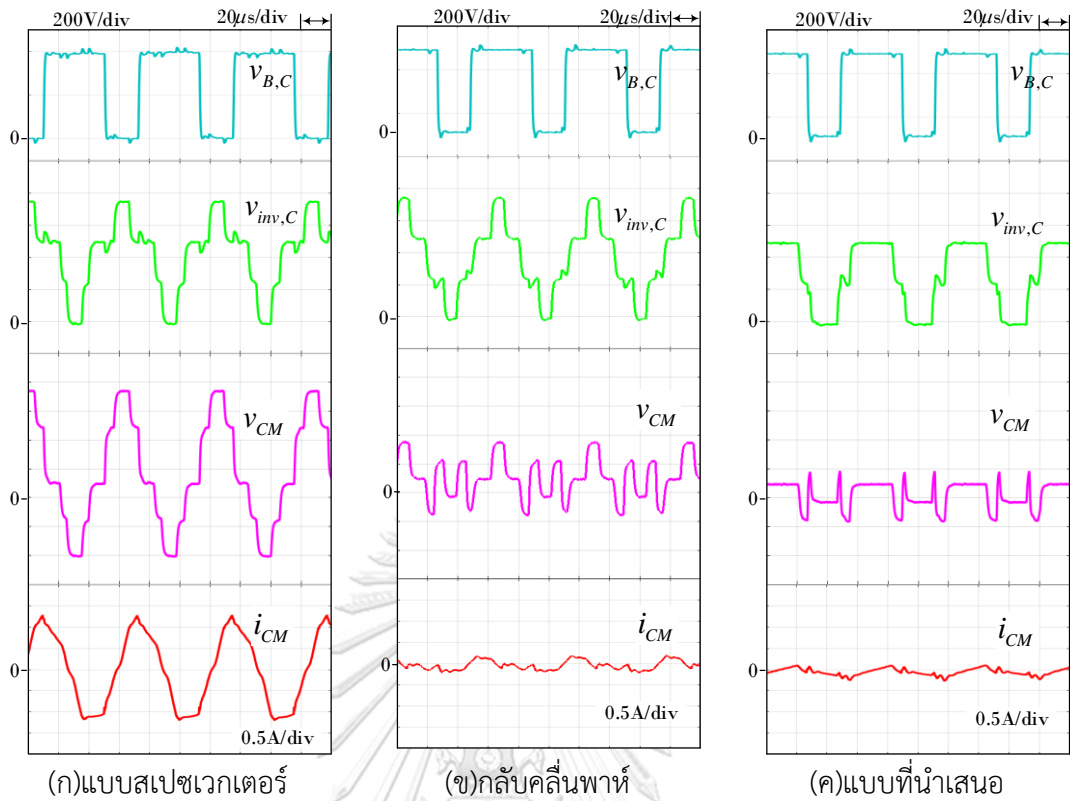


(ก)แบบสเปซเวกเตอร์

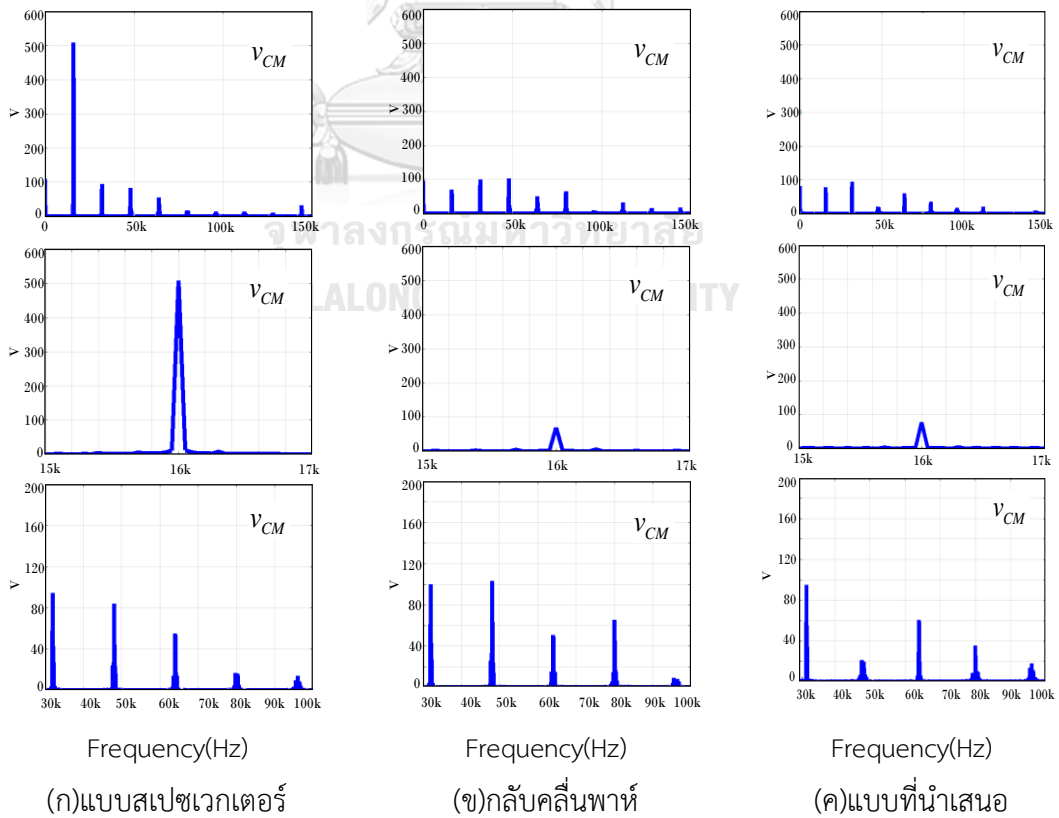
(ข)กลั้บคลื่นพาร์ท

(ค)แบบที่นำเสนอสอน

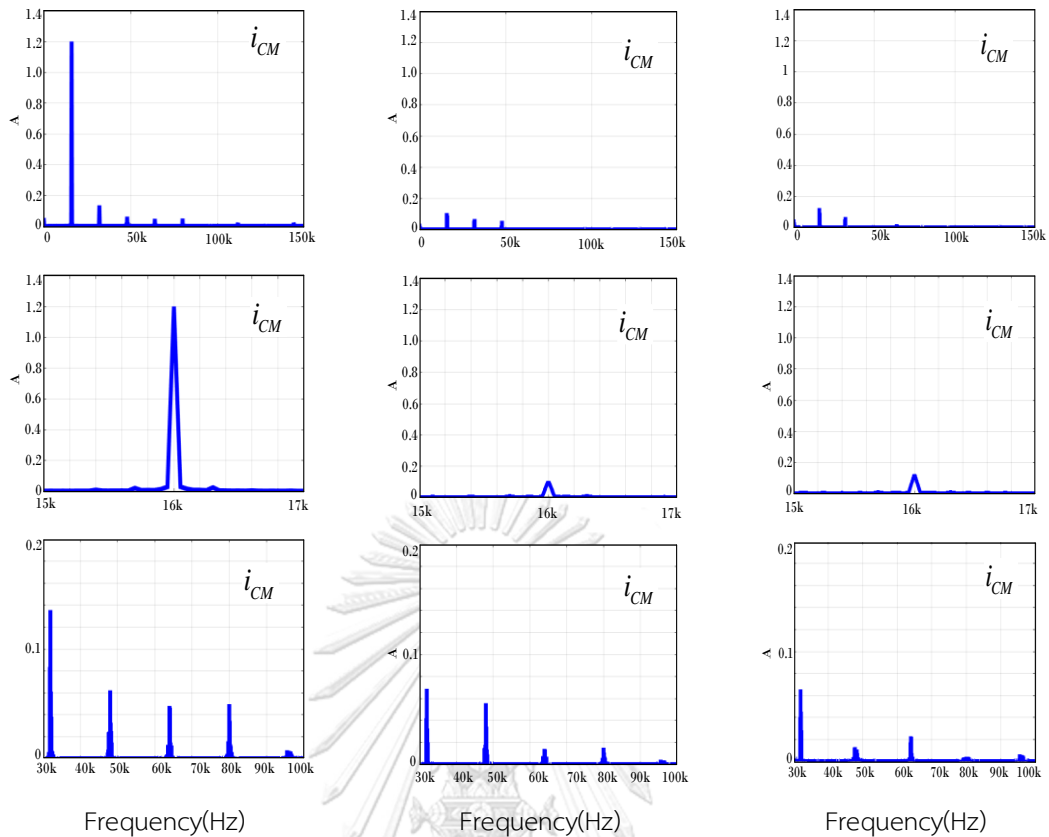
รูปที่ 5.6 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 2



รูปที่ 5.7 ส่วนขยายแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 2



รูปที่ 5.8 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมกรณี 1



(ก) แบบสเปซเวกเตอร์

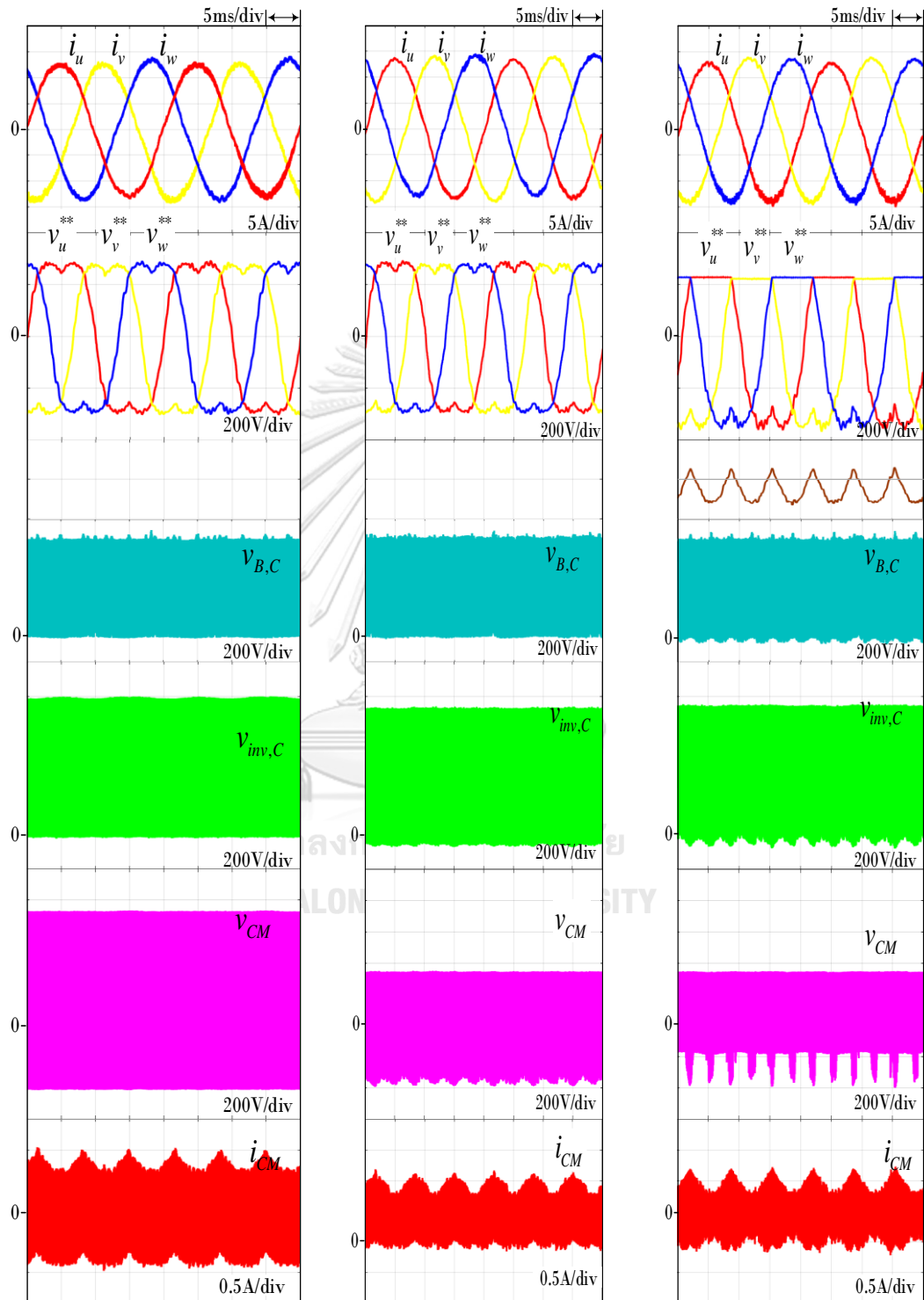
(ข) กลับคลื่นพาท

(ค) แบบที่นำเสนอ

รูปที่ 5.9 สเปกตรัมสัญญาณกระแสโหมตรงรวมกรณี 1

5.3 ผลการทดลองการเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้า 66% ของกำลังพิกัด 10kW

5.3.1 กรณี 3 แรงดันพีวี 680Vdc แรงดันบัลไฟตรง 750Vdc

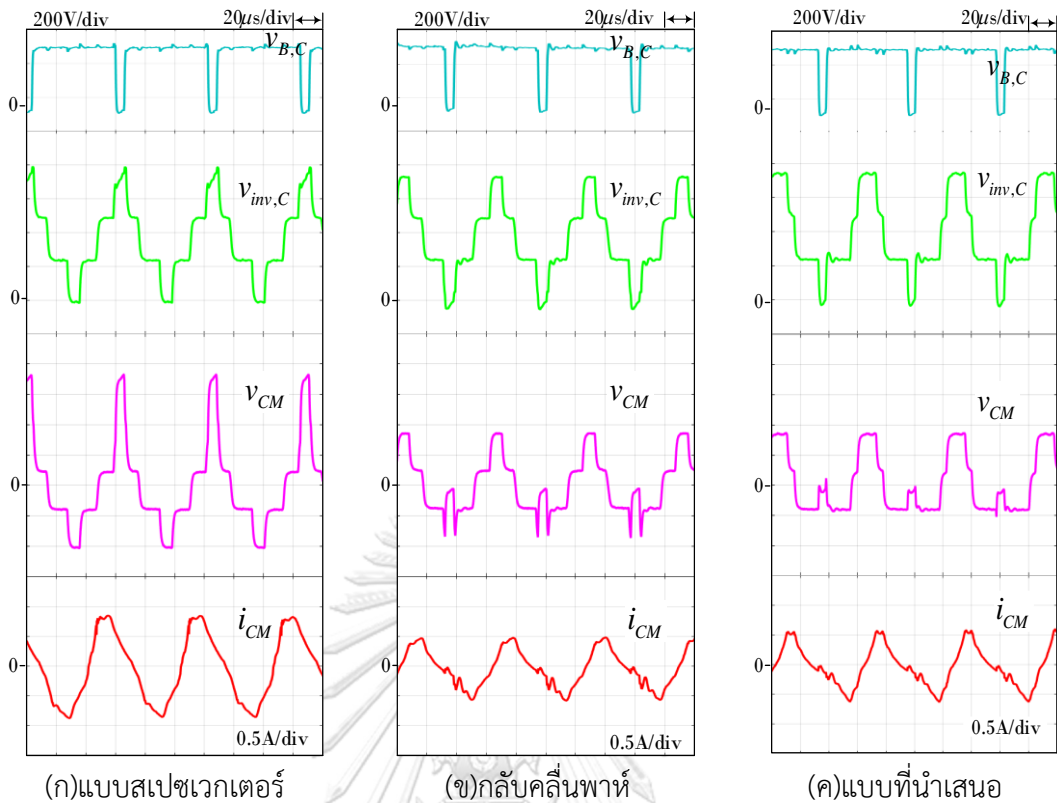


(ก)แบบสเปซเวกเตอร์

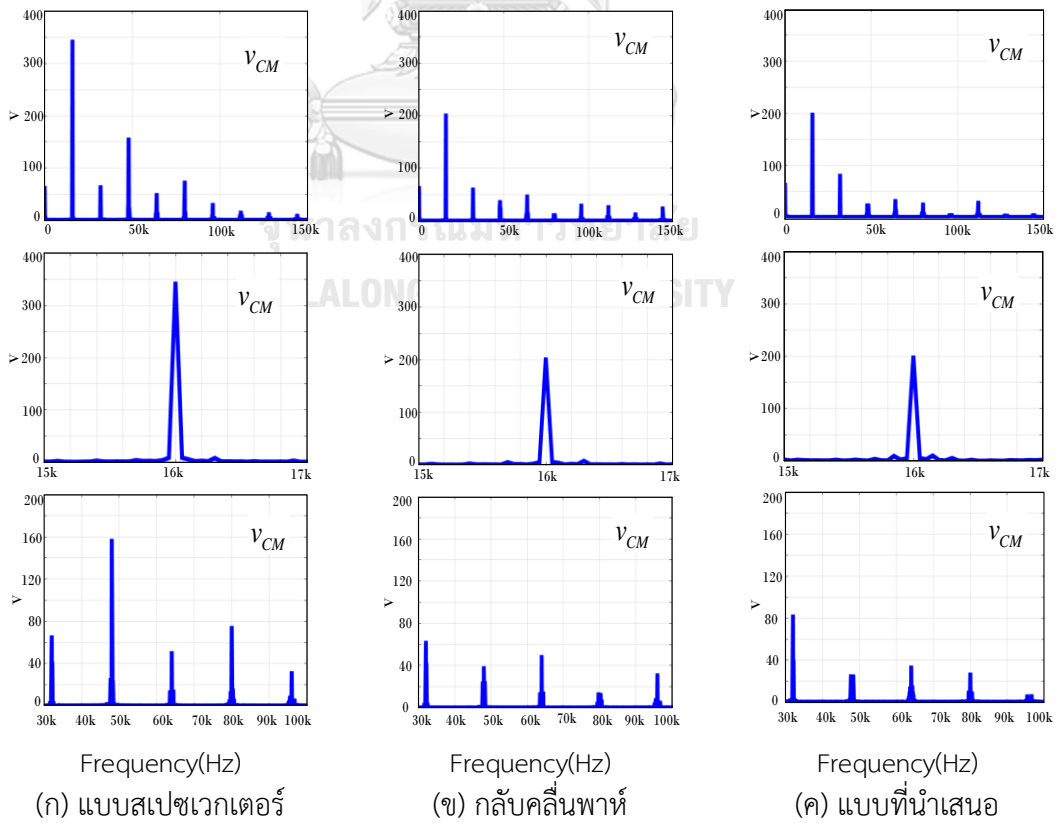
(ข)กลับคลื่นพาร์ท

(ค)แบบที่นำเสนอ

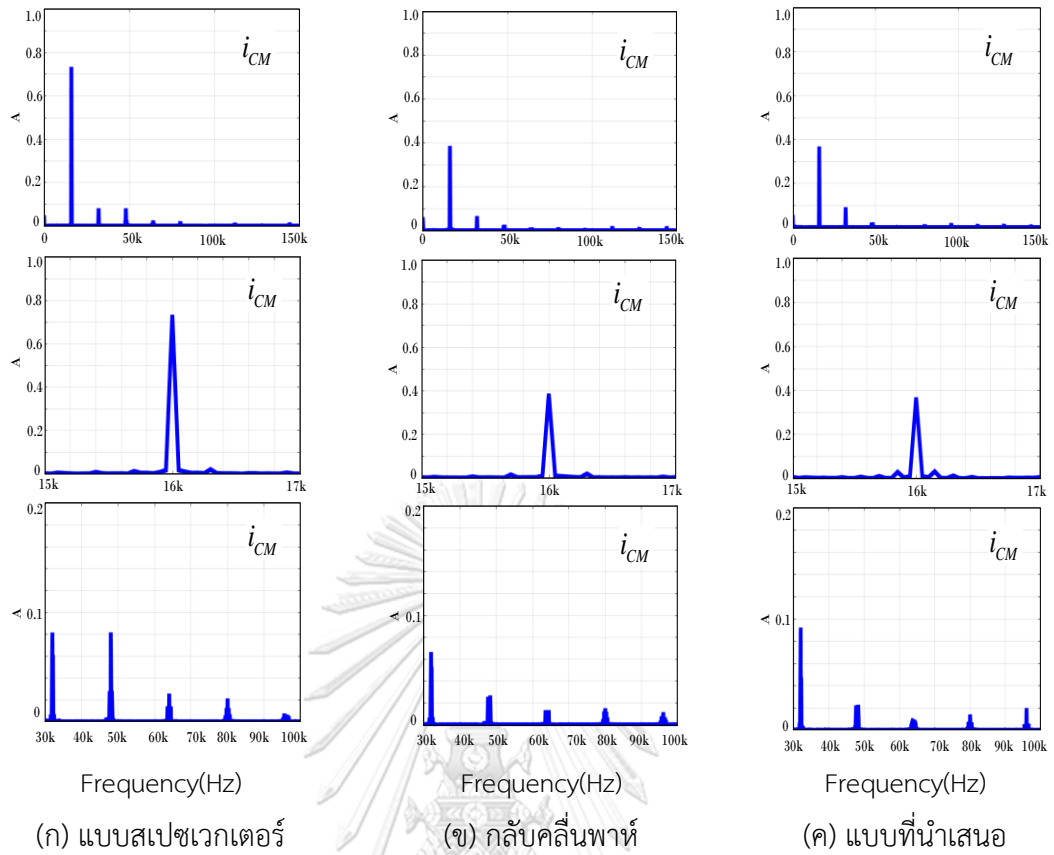
รูปที่ 5.10 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 3



รูปที่ 5.11 ส่วนขยายแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 3

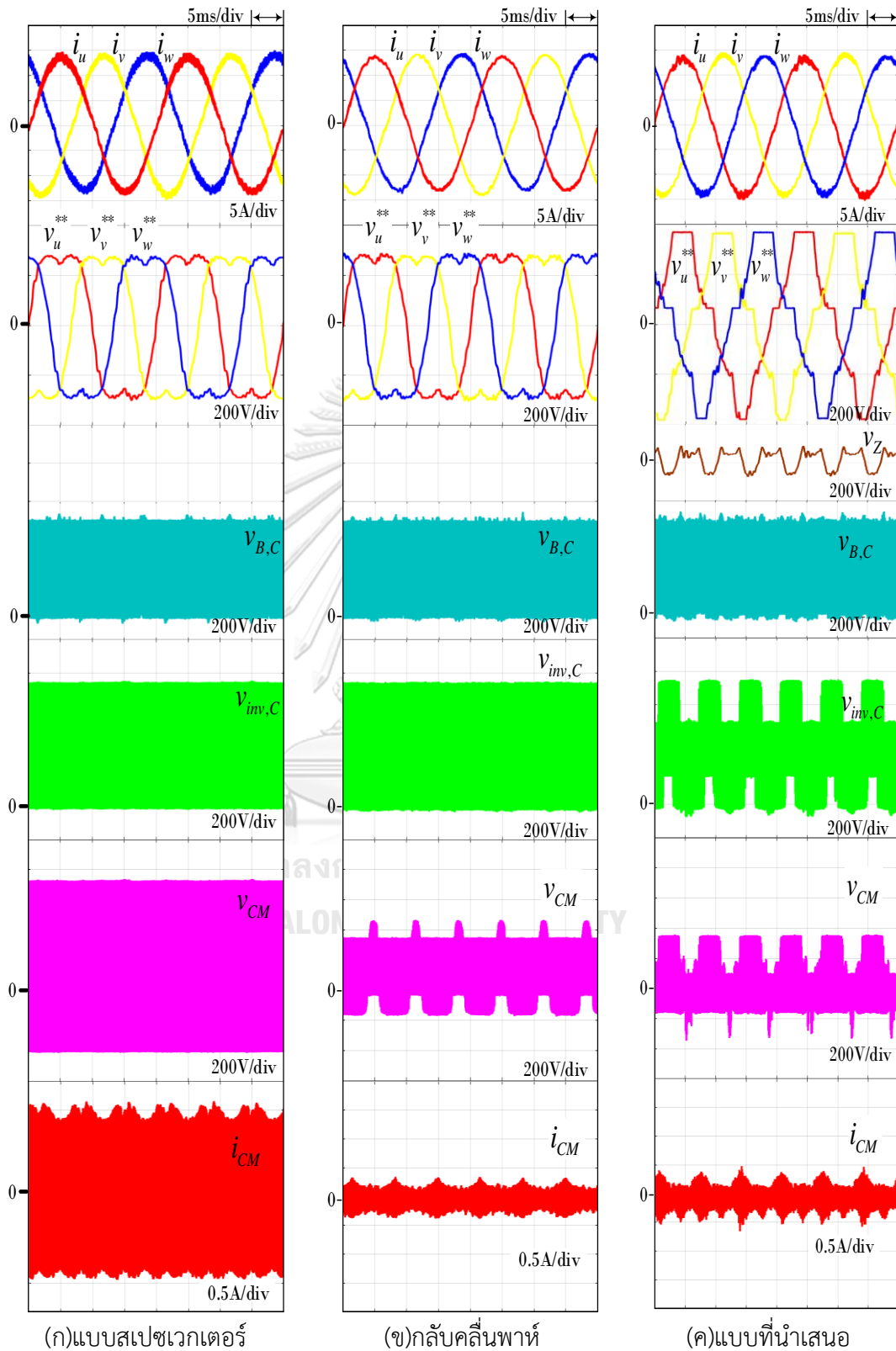


รูปที่ 5.12 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมกรณี 3

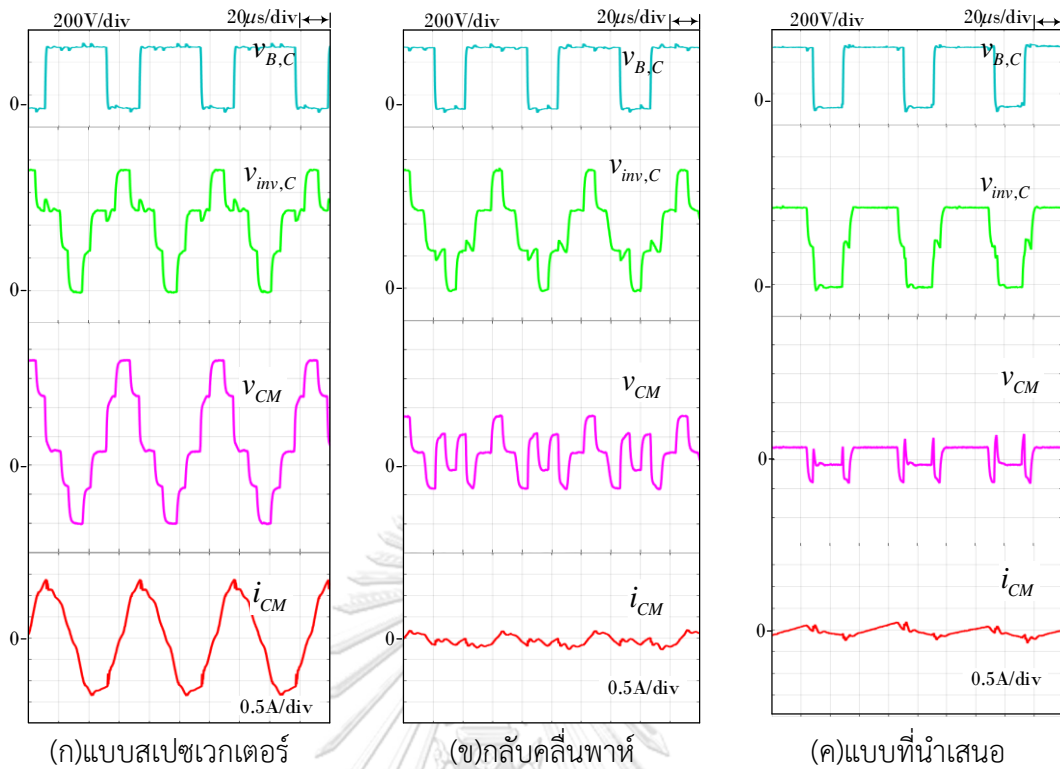


รูปที่ 5.13 สเปคตรัมสัญญาณกระแสโหมตร่วมกรณี 3

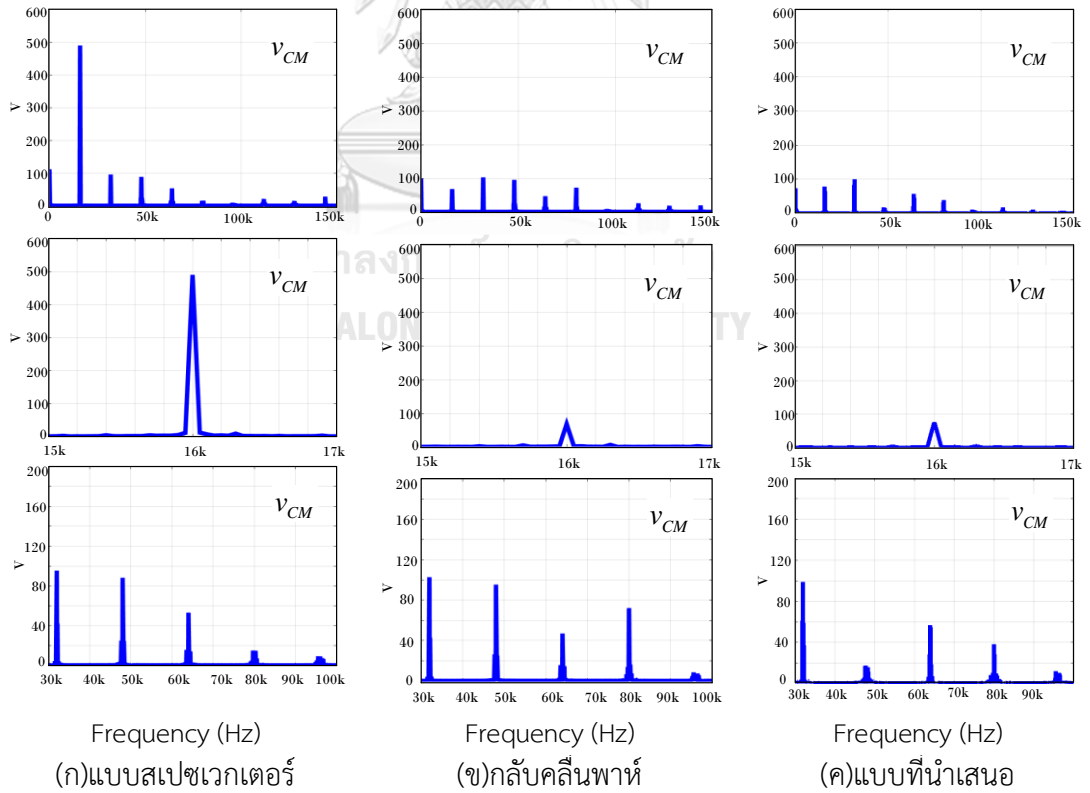
5.3.2 กรณี 4 แรงดันพีวี 500 แรงดันบัสไฟตรง 750Vdc



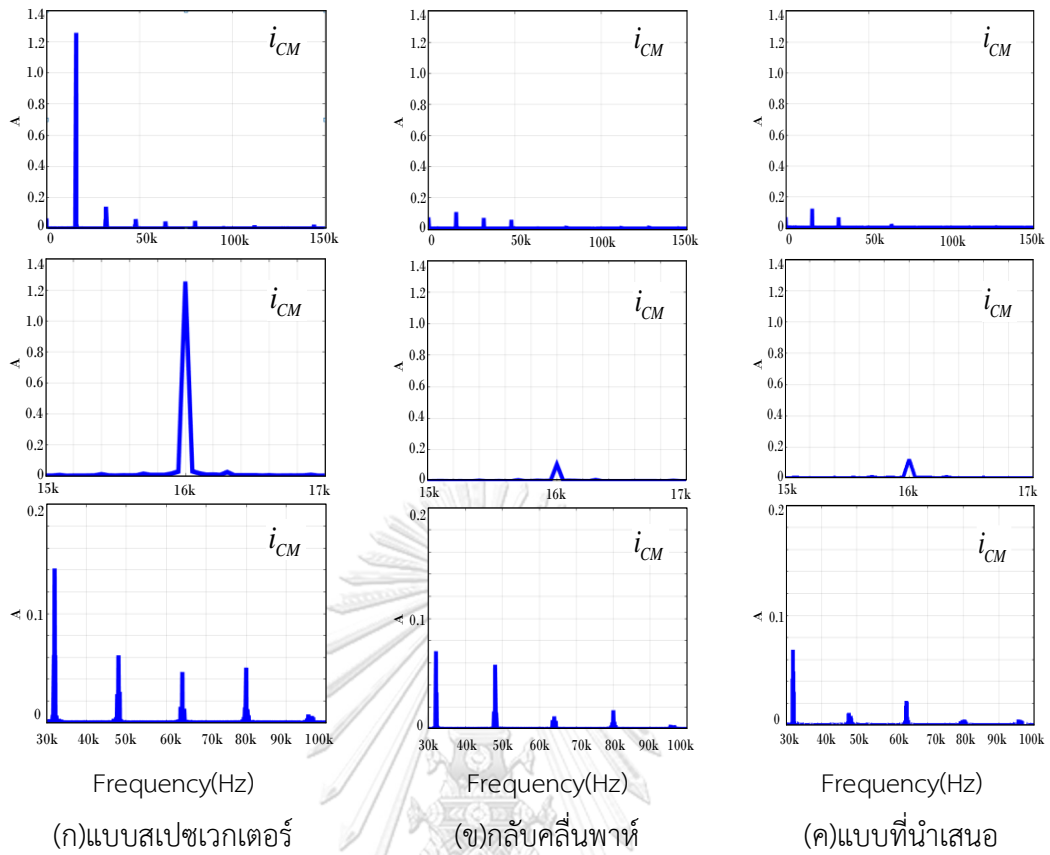
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 4



รูปที่ 5.15 ส่วนขยายแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 4



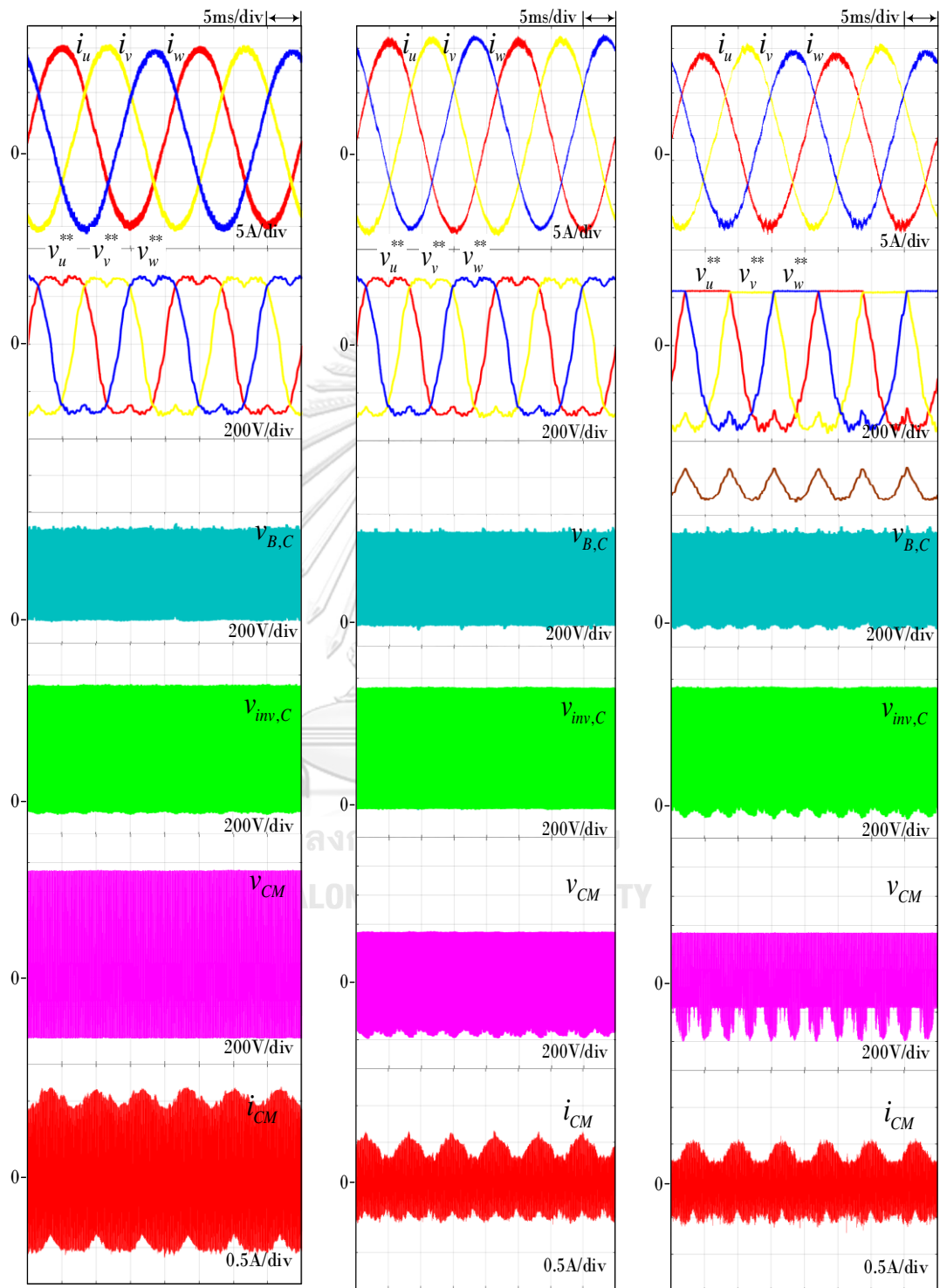
รูปที่ 5.16 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมกรณี 4



รูปที่ 5.17 สเปกตรัมสัญญาณกระแสโหมดรวมกรณี 4

5.4 ผลการทดลองกรณีกำลังไฟฟ้า 100% ของพิกัดกำลังไฟฟ้า 10kW

5.4.1 กรณี 5 แรงดันพีวี 680Vdc แรงดันบัลไฟตรง 750Vdc

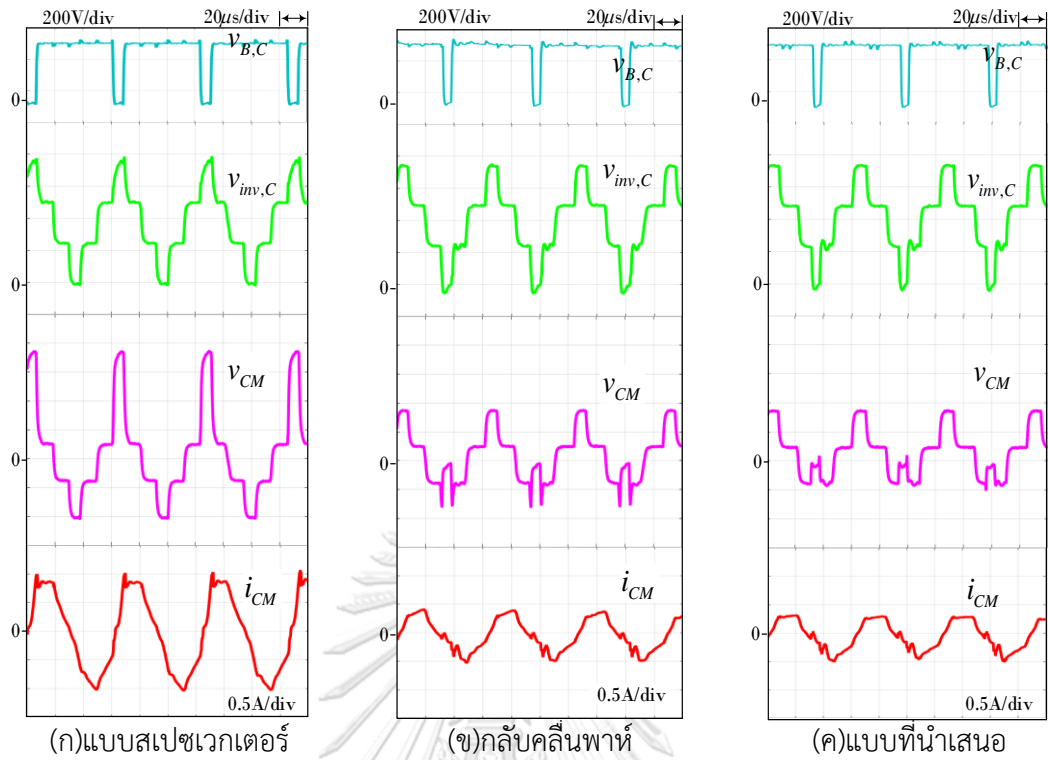


(ก)แบบสเปซเวกเตอร์

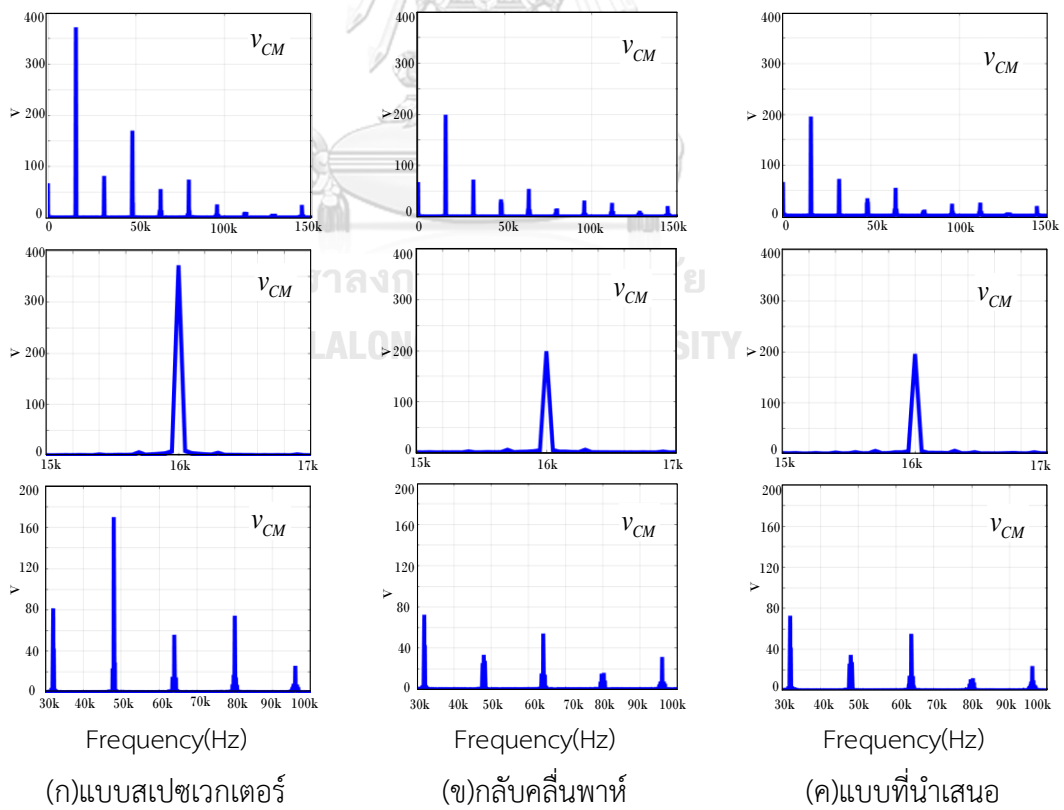
(ข)กลีบคลื่นพาร์

(ค)แบบที่นำเสนอ

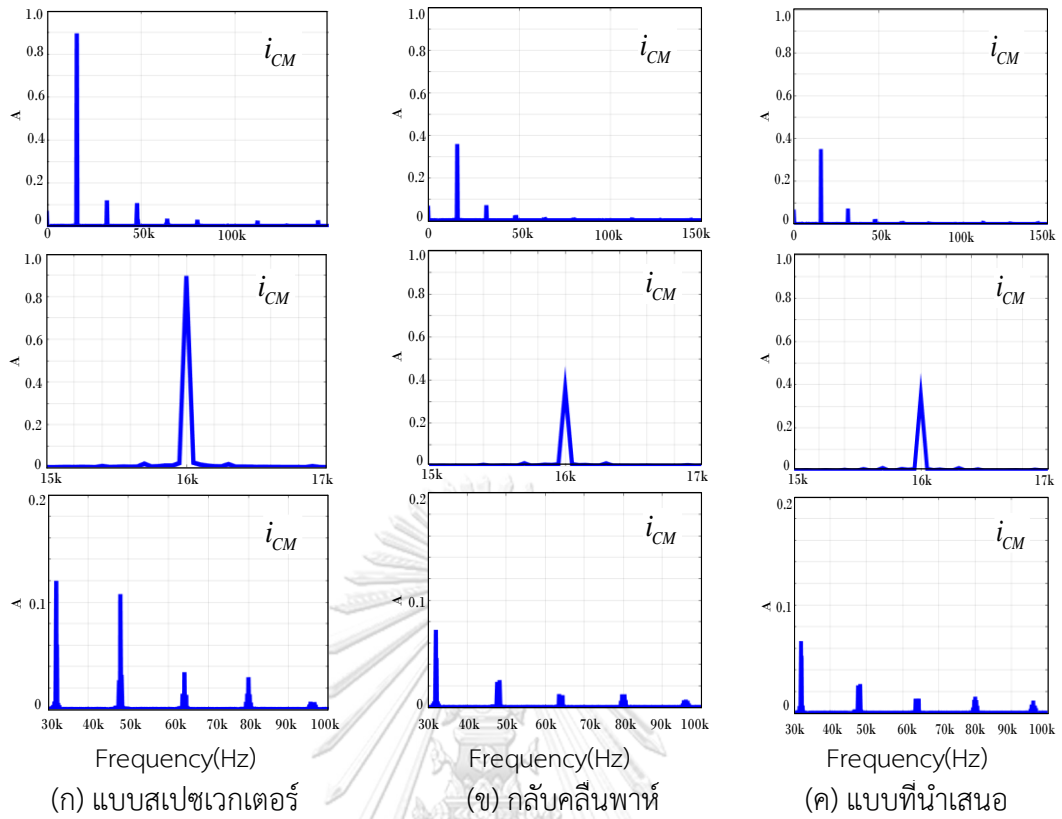
รูปที่ 5.18 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 5



รูปที่ 5.19 รูปขยายแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 5

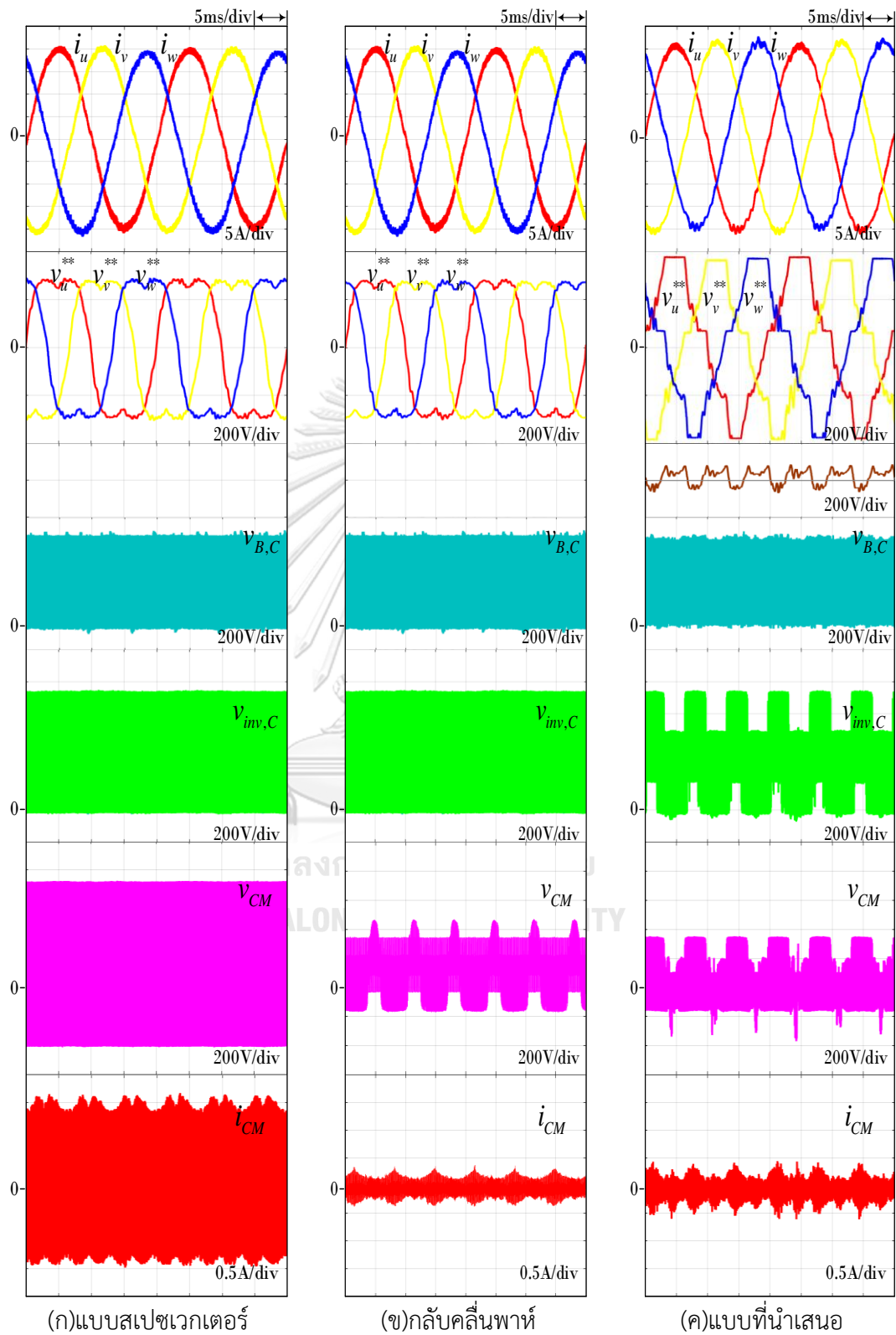


รูปที่ 5.20 สเปกตรัมสัญญาณแรงดันโหมตร่วมกรณี 5

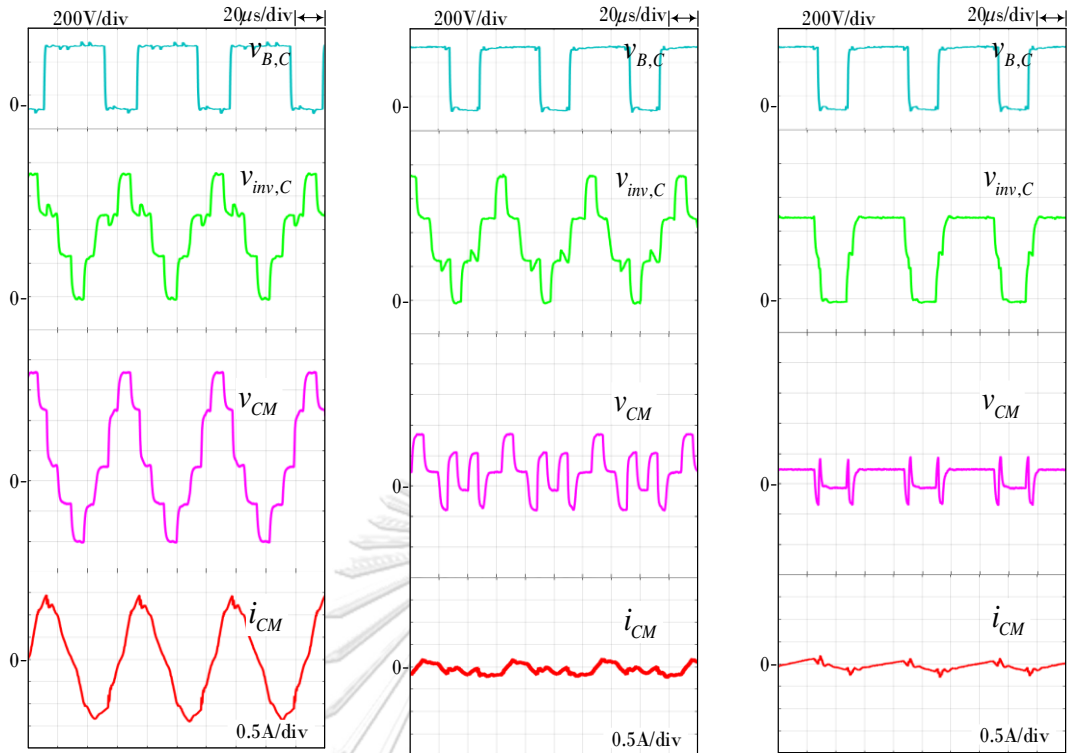


รูปที่ 5.21 สเปกตรัมสัญญาณกระแสโหมตร่วมกรณี 5

5.4.2 กรณี 6 แรงดันพีวี 500Vdc แรงดันบัลไฟตรง 750Vdc



รูปที่ 5.22 ผลการทดลองแรงดันและกระแสโหมตร่วมกรณี 6

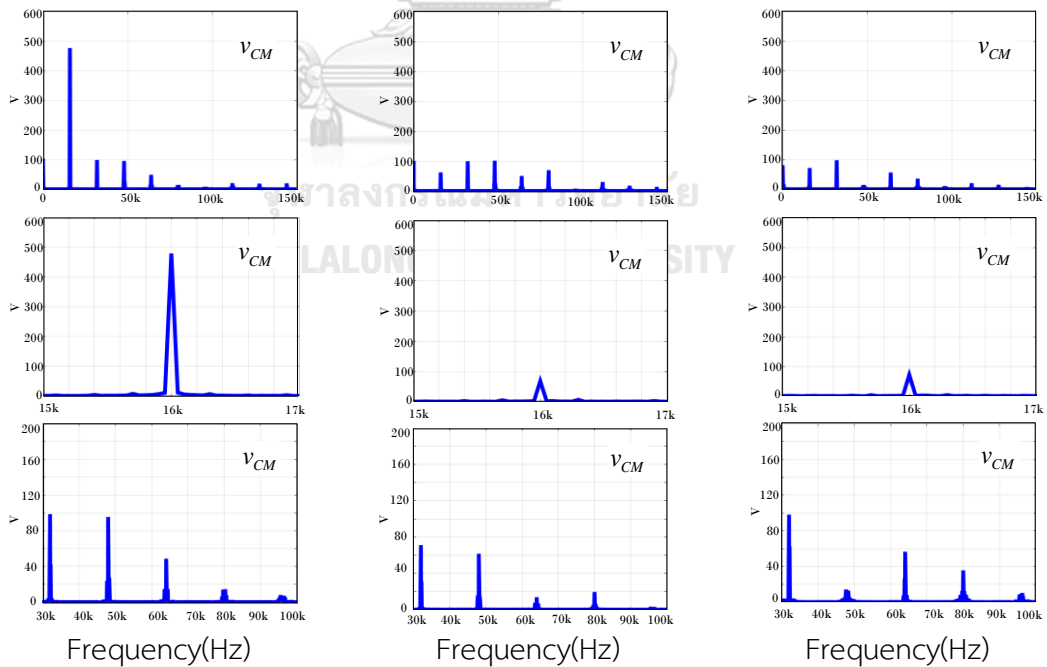


(ก)แบบสเปซเวกเตอร์

(ข)กลับคลื่นพาร์ท

(ค)แบบที่นำเสนอ

รูปที่ 5.23 รูปขยายแรงดันและกระแสโหมตรงร่วมกรณี 6



Frequency(Hz)

Frequency(Hz)

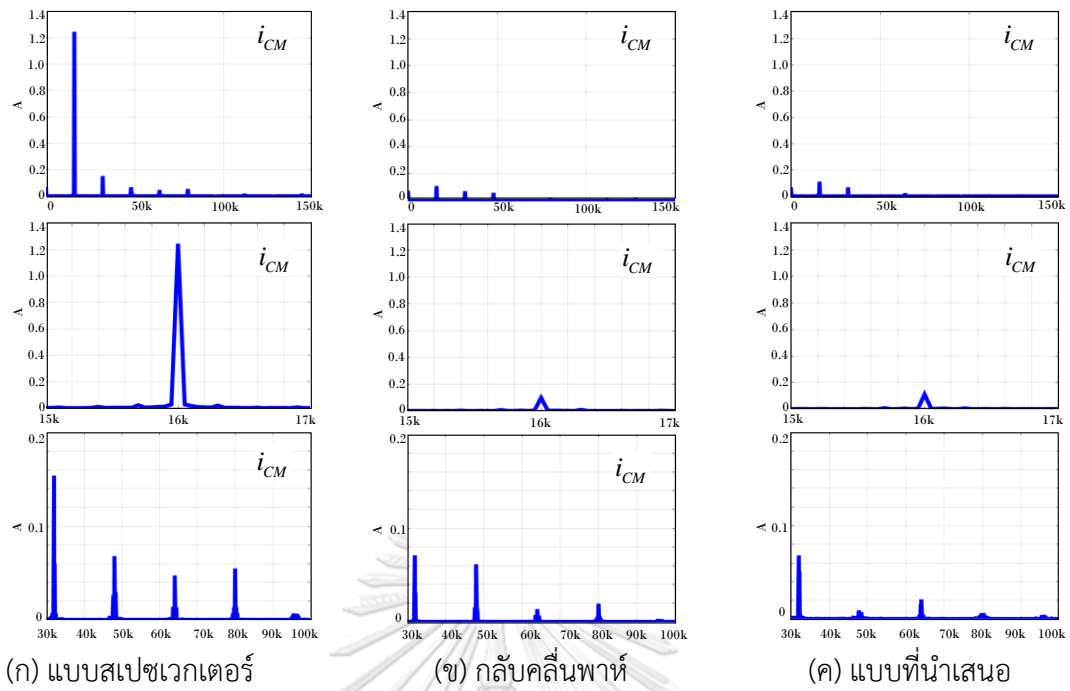
Frequency(Hz)

(ก)แบบสเปซเวกเตอร์

(ข)กลับคลื่นพาร์ท

(ค)แบบที่นำเสนอ

รูปที่ 5.24 สเปคตรัมสัญญาณแรงดันโหมตรงร่วมกรณี 6



รูปที่ 5.25 สเปกตรัมสัญญาณกระแสโหมตร่วมกรณี 6

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมตร่วมที่เกิดวงจรถบระดับและที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ และยังวิเคราะห์หาวงจรมูลโหมตร่วมที่สมบูรณ์ของระบบพีวีอินเวอร์เตอร์แบบสองภาคสามเฟสโดยแสดงให้เห็นว่าการสวิตช์ของวงจรถบระดับและวงจรถบอินเวอร์เตอร์ทำให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างแรงดันโหมตร่วม รวมถึงออกแบบการลดทอนแรงดันโหมตร่วมซึ่งจะสรุปเป็นประเด็นดังนี้

- 1) นำเสนอวงจรมูลโหมตร่วมสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่ายด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำ สามารถพิจารณาและศึกษาพฤติกรรมแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันโหมตร่วมทั้งด้านไฟกระแสตรงและด้านไฟกระแสสลับ ณ ขณะใดขณะหนึ่งไปพร้อมๆ กันได้
- 2) นำเสนอวิธีการลดทอนแรงดันโหมตร่วมสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์สองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่ายโดยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ การลดทอนแรงดันโหมตร่วมนั้นเกิดจากการหักล้างกันเองระหว่างวงจรถบระดับและอินเวอร์เตอร์โดยที่ยังคงใช้โครงสร้างแบบดั้งเดิม ผลการจำลองสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอสามารถทำให้แรงดันโหมตร่วมรวมถูกลดทอนได้จริงโดยเกิดจากการหักล้างกันเองซึ่งจากเดิมการมอดูเลตแบบทั่วไป (มี 8 ชั้น ประกอบด้วย $V_d/2$ มี 2 ชั้น และ $V_d/3$ มี 6 ชั้น) เหลือ $V_d/6$ มี 2 ชั้นและ $V_d/3$ มี 4 ชั้นเมื่อเทียบกับการมอดูเลตที่นำเสนอ ถึงแม้ว่าในทางปฏิบัติจะมีปัญหาเรื่อง dead time ของสวิตช์กำลังซึ่งงานวิจัยนี้ได้บอกชัดเจนผลของ dead time ด้วยเช่นกัน ซึ่งผลในทางปฏิบัตินั้นจะมีบางช่วงที่สามารถลดชั้นเหลือ 6 ชั้นเท่านั้นเนื่องจากผลของ delay time ในขณะที่กระแสไหลผ่านสวิตช์กำลังเป็นกระแสเป็นบวกหรือกระแสเป็นลบ
- 3) การมอดูเลตที่นำเสนอยังสามารถลดแรงดันโหมตร่วมได้ดีแม้เกิดปัญหาการติดลิมิตการมอดูเลต ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า เมื่อแรงดันพีวีมีค่าเท่ากับ 500Vdc จะทำให้แรงดันลำดับศูนย์มีค่ามากขึ้นทำให้เกิดการมอดูเลตติดลิมิตที่อินเวอร์เตอร์โดยอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งขอบบนและขอบล่างของแรงดันบัสไฟตรง ทำให้เกิดสภาวะการเปิดและปิดสวิตช์ค้ำที่สวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ที่เฟสนั้นๆ ส่งผลให้แรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เหลือเพียง 4 ระดับ (จากเดิม 6 ระดับ) ซึ่งวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอ

ยังคงสามารถลดทอนแรงดันโหมตร่วมได้เป็นอย่างดีแม้แรงดันลำดับศูนย์จะติดลิมิตก็ตาม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอนี้สามารถลดทอนแรงดันโหมตร่วมได้แม้แรงดันลำดับศูนย์จะติดลิมิต

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- 1) สามารถนำขั้นตอนวิธีการและการเขียนวงจรสมมูลโหมตร่วมไปประยุกต์ใช้กับพีวีอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multi-Level Inverter) ได้
- 2) สามารถนำวงจรสมมูลโหมตร่วมที่ได้นำไปใช้ออกแบบวงจรกรองสัญญาณโหมตร่วมได้



รายการอ้างอิง

1. Cavalcanti, M.C., et al., *Eliminating Leakage Currents in Neutral Point Clamped Inverters for Photovoltaic Systems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012. 59(1): p. 435-443.
2. 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.
3. Ferraz, P.E.P., et al. *Two-stage converter with reduced leakage currents for transformerless photovoltaic systems*. in *2013 Brazilian Power Electronics Conference*. 2013.
4. Chen, W., et al., *Leakage Current Calculation for PV Inverter System Based on a Parasitic Capacitor Model*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016. 31(12): p. 8205-8217.
5. 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.
6. Xiao, H. and S. Xie, *Leakage Current Analytical Model and Application in Single-Phase Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Inverter*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2010. 52(4): p. 902-913.
7. Shoyama, M., L. Ge, and T. Ninomiya, *Balanced switching converter to reduce common-mode conducted noise*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003. 50(6): p. 1095-1099.
8. Videt, A., et al., *PWM Strategy for the Cancellation of Common-Mode Voltage Generated by Three-Phase Back-to-Back Inverters*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017. 32(4): p. 2675-2686.
9. Rahimi, R., et al., *H8 Inverter to Reduce Leakage Current in Transformerless Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic systems*. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018. 6(2): p. 910-918.

10. Pairodamonchai, 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.
11. Mallik, A., W. Ding, and A. Khaligh, *A Comprehensive Design Approach to an EMI Filter for a 6-kW Three-Phase Boost Power Factor Correction Rectifier in Avionics Vehicular Systems*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017. 66(4): p. 2942-2951.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอดิศักดิ์ พรมอยู่ เกิดเมื่อวันที่ 3 มกราคม พ.ศ.2536 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยนเรศวร ในปีการศึกษา 2557 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคการศึกษาต้นปีการศึกษา 2558

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1) อดิศักดิ์ พรมอยู่, สุรพงศ์ สุวรรณกวิน การตัดออกของแรงดันโหมคร่วมสำหรับระบบพีวีอินเวอร์เตอร์ ชนิดสองภาคสามเฟสแบบเชื่อมต่อโครงข่าย. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 (2560)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY