

วิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับการปรับสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สาม
ระดับแบบตริงจุดนิวทรัลโดยใช้ทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์



นายอภิชาติ แสงสีทอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A NEW MODULATION STRATEGY FOR CAPACITOR VOLTAGE BALANCING IN
THREE-LEVEL NEUTRAL-POINT-CLAMPED INVERTERS
BASED ON MATRIX CONVERTER THEORY



Mr.Apichart Saengseetong

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับการปรับสมดุลแรงดันคร่อม
ตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล
โดยใช้ทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

โดย

นายอภิชาติ แสงสีทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

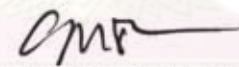
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

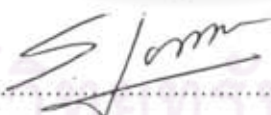
อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุธนา กุลวิฑิต)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณวิน)

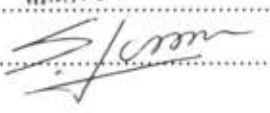

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.สมภพ ผลไม้)

อภิชาติ แสงสีทอง : วิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับการปรับสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลโดยใช้ทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (A NEW MODULATION STRATEGY FOR CAPACITOR VOLTAGE BALANCING IN THREE-LEVEL NEUTRAL-POINT-CLAMPED INVERTERS BASED ON MATRIX CONVERTER THEORY)
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์, 88 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับการปรับสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับโดยนำทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันจุดกึ่งกลางบัลและกระแสนิวทรัล วิธีการที่นำเสนอสามารถควบคุมกระแสนิวทรัลได้โดยไม่กระทบกับการสร้างแรงดันและกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ลักษณะการมอดูเลตที่เกิดขึ้นจะเป็นการมอดูเลตแบบซัฟต์สวิตชิ่ง 2 เฟสผสมกับแบบซัฟต์สวิตชิ่ง 1 เฟส ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทำให้สามารถกำหนดผลตอบสนองของเชิงเวลาของการเข้าสู่ภาวะสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้โดยการควบคุมแบบวงรอบปิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
 ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต..... อภิชาติ แสงสีทอง
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

507 06390 21 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD : THREE-LEVEL NEUTRAL-POINT-CLAMPED INVERTERS

APICHART SAENGSEETONG : A NEW MODULATION STRATEGY FOR CAPACITOR VOLTAGE BALANCING IN THREE-LEVEL NEUTRAL-POINT-CLAMPED INVERTERS BASED ON MATRIX CONVERTER THEORY. THESIS ADVISOR : SOMBOON SANGWONGWANICH, D. Eng., 88 pp.

This thesis presents a new modulation strategy for capacitor voltage balancing in three-level neutral-point-clamped inverters by applying the matrix converter theory to eliminate the low frequency oscillation of the neutral-point voltage and current. The proposed modulation method controls the neutral-point current without affecting the output voltage and current. The behavior of the new modulation technique turns out to be a combination of two-phase unipolar PWM and one-phase dipolar PWM. Using the analytical result, the response time of the closed-loop capacitor voltage balancing can be designed a priori.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Electrical Engineering
Field of Study : Electrical Engineering
Academic Year : 2008

Student's Signature..... อธิชาติ แซ่สีทอง.....
Advisor's Signature..... *S. Sangwongwanich*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความเอาใจใส่อย่างดีเยี่ยมจากอาจารย์ ดร.สมบุญธรรม แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา ขอขอบคุณอาจารย์และคุณครูทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ผู้เขียนตั้งแต่ต้นอดีตจนถึงปัจจุบัน ขอขอบคุณบริษัทแพนโดรฟิส จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และสถานที่ในการทำงานวิจัย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสร็จสมบูรณ์ไม่ได้ถ้าขาดบุคคลดังต่อไปนี้ ขอขอบคุณ คุณณัฏฐา สายนาค สำหรับคำแนะนำในเรื่องต่างๆ คุณสาคร โพธิ์งาม สำหรับ JTAG EMULATOR และ คุณวรวิทย์ เทียววัฒนรัฐติกาล สำหรับอินเวอร์เตอร์ในส่วนของตัวจำลองโหลด ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ และข้อเสนอแนะที่มีคุณค่าทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ที่ให้ชีวิต โอกาส และขอขอบคุณญาติพี่น้อง ของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจที่ดีให้กับข้าพเจ้าเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเบื้องต้น.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 นิยามสัญลักษณ์.....	4
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2. พื้นฐานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	7
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน.....	7
2.2 สเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	8
2.3 การมอดูเลตโดยใช้เวกเตอร์เสมือนสามตัวที่ใกล้ที่สุด (Nearest Three Virtual Space Vector PWMs).....	11
2.4 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	16
2.5 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะเพื่อควบคุมกระแสในวงจรงานวิจัยที่ผ่านมา.....	17
3. การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์และการควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อม ตัวเก็บประจุด้วยการควบคุมกระแสในวงจร.....	21
3.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	21
3.2 การควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยการควบคุมกระแสในวงจร.....	31

บทที่	หน้า
4. ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองการทำงาน.....	37
4.1 ผลการจำลองการทำงาน.....	37
4.1.1 ผลการจำลองการทำงานด้วยวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่นำเสนอ.....	37
4.1.2 ผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	46
4.2 การทดลองการทำงานกับระบบจริง.....	57
4.2.1 ผลการทดลองการทำงานกับโหนดตัวด้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ.....	59
4.2.2 ผลการทดลองการทำงานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหนด.....	64
4.2.3 ผลการทดลองการทำงานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำงานในย่านขับเคลื่อน.....	70
4.2.4 ผลการทดลองการทำงานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำงานในย่านคืนพลังงาน...	77
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	88

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สถานะของสวิตช์กับแรงดันขั้วในแต่ละเฟสเมื่อ $i=\{u,v,w\}$	8
2.2 กลุ่มเวกเตอร์แรงดันและสถานการณ์สวิตช์ของเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	10
2.3 เวกเตอร์แรงดันกับกระแสนิวทรัลของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	10
2.4 การเลือกเวกเตอร์ในเซกเตอร์ที่ 1 โดยใช้เวกเตอร์ที่ใกล้เวกเตอร์แรงดันคำสั่งที่สุด.....	12
2.5 การเลือกเวกเตอร์เสมือนในเซกเตอร์ที่ 1 โดยใช้เวกเตอร์เสมือนที่ใกล้ที่สุด.....	14



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์สองระดับ.....	1
1.2 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	2
1.3 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสเหนี่ยวนำเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบมาตรฐานที่ไม่มีการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ.....	2
1.4 วงจรเรียงกระแส (a) แบบเฉื่อยงาน 12 พัลส์ (b) แบบไวงาน 3 ระดับ.....	3
2.1 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	7
2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับในความเป็นจริง.....	8
2.3 เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับเมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมดุล.....	9
2.4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อวงจรของสถานการณ์สวิตช์ของเวกเตอร์แรงดันที่ทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำ (a) เวกเตอร์ขนาดเล็กบวก $v_{S1}(onn)$ (b) เวกเตอร์ขนาดเล็กลบ $v_{S1}(poo)$ (c) เวกเตอร์ขนาดกลาง $v_{M1}(pon)$	11
2.5 สเปซเวกเตอร์ในเซกเตอร์ที่ 1 ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	12
2.6 สเปซเวกเตอร์เสมือนในเซกเตอร์ที่ 1 ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	13
2.7 ตัวอย่างฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up} และ m_{um}	15
2.8 ไดอะแกรมการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับในแต่ละเฟสเมื่อ $\{i=u,v,w\}$	16
2.9 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของการมอดูเลตแต่ละรูปแบบ (a) แบบสองขั้ว (b) แบบขั้วเดียว (c) แบบขั้วคู่.....	18
2.10 ขอบเขตการควบคุมกระแสเหนี่ยวนำให้เป็นศูนย์ภายใต้การสวิตช์แบบขั้วเดียวทั้งสามเฟส.....	19
2.11 ตัวอย่างลักษณะฟังก์ชันการมอดูเลตสำหรับบัสบวกและบัสลบในเฟสหนึ่ง ๆ ตามงานวิจัย [6] โดยในย่านมุม 60-120 องศา และ 240-300 องศาจะมีการปรับชดเชยฟังก์ชันการมอดูเลตแบบขั้วคู่ เพื่อควบคุมกระแสเหนี่ยวนำ.....	21
3.1 อินเวอร์เตอร์สามระดับเมื่อพิจารณาจากมุมมองของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	22
3.2 ไดอะแกรมของการควบคุมสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง.....	33
3.3 ไดอะแกรมของการควบคุมสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ.....	33
3.4 ไดอะแกรมขั้นตอนการคำนวณเมื่อควบคุมผ่านกำลังจริงในแต่ละครั้งของการสุ่ม.....	35

ภาพประกอบ	หน้า
3.5 ไตอะแกรมขั้นตอนการคำนวณเมื่อควบคุมผ่านกำลังจินตภาพในแต่ละครั้งของการสู่ม.....	36
4.1 วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถดับกับโหลดตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทาน.....	37
4.2 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} พารามิเตอร์อิสระ a และ กระแสด้านออก i_u, i_v, i_w ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง).....	39
4.3 ฟังก์ชันการมอดูเลต $(m_{up}, m_{un}), (m_{vp}, m_{vn})$ และ (m_{wp}, m_{wn}) ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง).....	39
4.4 กระแสที่ไหลออกจากบัสบวก i_p , กระแสนิวทรัล i_o และกระแสที่ไหลออกจากบัสลบ i_n ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง).....	40
4.5 กระแสบัสบวกเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{p,av}$ กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ และกระแสบัสลบเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{n,av}$ ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง).....	40
4.6 แรงดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง).....	41
4.7 แรงดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ภาพขยายที่เวลา 0.01-0.011 วินาที) (ผลการจำลอง).....	41
4.8 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} พารามิเตอร์อิสระ a และ กระแสด้านออก i_u, i_v, i_w ตามลำดับเมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง).....	42
4.9 ฟังก์ชันการมอดูเลต $(m_{up}, m_{un}), (m_{vp}, m_{vn})$ และ (m_{wp}, m_{wn}) ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง).....	42
4.10 กระแสที่ไหลออกจากบัสบวก i_p , กระแสนิวทรัล i_o และกระแสที่ไหลออกจากบัสลบ i_n ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง).....	43

ภาพประกอบ	หน้า	
4.11	กระแสบัสบวกเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{p,av}$ กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ และกระแสบัสลบเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{n,av}$ ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง).....	43
4.12	แรงดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง).....	44
4.13	แรงดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ภาพขยายที่เวลา 0.01-0.011 วินาที) (ผลการจำลอง).....	44
4.14	รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ที่เวลา 0.14-0.18 วินาทีเมื่อควบคุมสมมูลผ่านกำลังจริงในกรณีที่โหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน (ผลการจำลอง).....	45
4.15	รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ที่เวลา 0.14-0.18 วินาทีเมื่อควบคุมสมมูลผ่านกำลังจินตภาพในกรณีที่โหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน (ผลการจำลอง).....	45
4.16	วงจรรีเลย์เตอร์สามารถดับกับโหลดที่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน.....	46
4.17	จุดทำงานของการจำลองเปรียบเทียบระหว่างวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอกับวิธีที่น่าเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมา.....	47
4.18	แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง ที่จุดทำงานที่ 1 โดยบัสไม่สมดุลในสภาวะเริ่มต้น (ผลการจำลอง).....	48
4.19	แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.18 (ผลการจำลอง).....	49
4.20	แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [5] ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.18 (ผลการจำลอง).....	49

ภาพประกอบ

หน้า

- 4.21 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [6] ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.18 (ผลการจำลอง)..... 50
- 4.22 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง ที่จุดทำงานที่ 2 โดยบัสไม่สมดุลในสภาวะเริ่มต้น (ผลการจำลอง)..... 51
- 4.23 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.22 (ผลการจำลอง)..... 52
- 4.24 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [5] ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.22 (ผลการจำลอง)..... 52
- 4.25 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [6] ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.22 (ผลการจำลอง)..... 53
- 4.26 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง ที่จุดทำงานที่ 3 โดยที่บัสมีความสมดุลในสภาวะเริ่มต้น (ผลการจำลอง)..... 54
- 4.27 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.26 (ผลการจำลอง)..... 55

ภาพประกอบ	หน้า
4.28 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{um} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [5] ที่จุดทำงาน เดียวกันกับรูปที่ 4.26 (ผลการจำลอง).....	55
4.29 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{um} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [6] ที่จุดทำงาน เดียวกันกับรูปที่ 4.26 (ผลการจำลอง).....	56
4.30 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	57
4.31 ฟังก์ชันการมอดูเลต $m_{up}, -m_{um}$ และแรงดันด้านออก v_{uo} ในการทดลองจริง.....	58
4.32 แรงดันด้านออก v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ในการทดลองจริง.....	59
4.33 แรงดันด้านออก v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ในการทดลองจริง (ภาพขยาย).....	59
4.34 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมมูลแรงดันเมื่อ ควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณีโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ).....	60
4.35 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อควบคุม สมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณีโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ).....	61
4.36 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณีโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ).....	61
4.37 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมมูลแรงดัน เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณีโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ).....	62

ภาพประกอบ	หน้า
4.38 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อควบคุม สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณีไหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ).....	63
4.39 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณีไหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ).....	63
4.40 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับเมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อม ตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25Hz$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีไหลด).....	66
4.41 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25Hz$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีไหลด).....	66
4.42 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อม ตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ(กรณี $f = 25Hz$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีไหลด)..	67
4.43 กระแสนิวทรัล i_o และสเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25Hz$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีไหลด).....	67
4.44 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับเมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อม ตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง(กรณี $f = 50Hz$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีไหลด).....	68
4.45 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50Hz$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีไหลด).....	68
4.46 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อม ตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ(กรณี $f = 50Hz$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีไหลด)..	69

ภาพประกอบ

- 4.47 กระแสนิวทรัล i_o และสเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด)..... 69
- 4.48 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดันเมื่อ ควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)..... 71
- 4.49 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษาสมดุล ของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)..... 71
- 4.50 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)..... 72
- 4.51 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดัน เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)..... 72
- 4.52 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษาสมดุล ของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)..... 73
- 4.53 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)..... 73
- 4.54 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อม ตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)..... 75

ภาพประกอบ

หน้า

- 4.55 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา
สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง
(กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)..... 75
- 4.56 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$
แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อม
ตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน).. 76
- 4.57 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา
สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ
(กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)..... 76
- 4.58 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$
แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดัน
เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง
(กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์นำทำงานในย่านคืนพลังงาน)..... 78
- 4.59 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$
แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษาสมดุล
ของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง
(กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์นำทำงานในย่านคืนพลังงาน)..... 78
- 4.60 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา
สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง
(กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)..... 79
- 4.61 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$
แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดัน
เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ
(กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)..... 79
- 4.62 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$
แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษาสมดุล
ของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ
(กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)..... 80

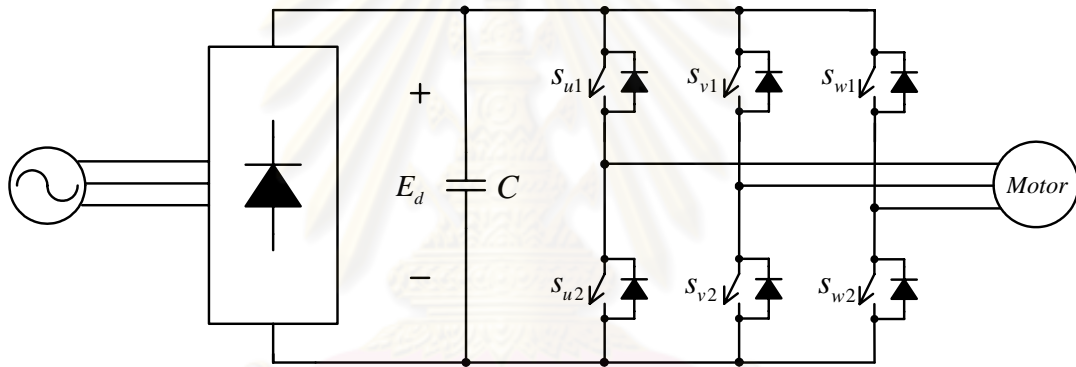
ภาพประกอบ	หน้า
4.63 กระแสนิวทริล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทริล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน).....	80
4.64 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อม ตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน).....	82
4.65 กระแสนิวทริล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทริล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน).....	82
4.66 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อม ตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ(กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)	83
4.67 กระแสนิวทริล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทริล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษา สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน).....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเบื้องต้น

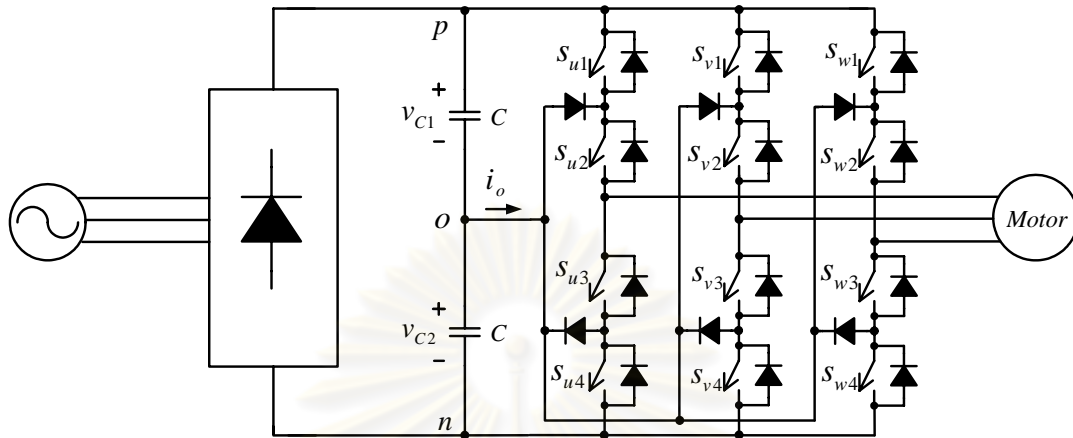
ในงานวิจัยจากอดีตถึงปัจจุบัน แม้ว่าจะมีความพยายามที่จะนำอินเวอร์เตอร์ทั่วไป (อินเวอร์เตอร์สองระดับ) ดังรูปที่ 1.1 มาใช้งานระบบขับเคลื่อนกำลังและแรงดันสูง แต่ด้วยข้อจำกัดพิกัดแรงดันที่ทนได้ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและตัวเก็บประจุประกอบกับกำลังสูญเสียที่เพิ่มขึ้นอันเกิดจากการใช้ความถี่สวิตช์ที่สูงขึ้นเพื่อลดฮาร์มอนิก ทำให้ไม่สามารถนำอินเวอร์เตอร์สองระดับไปใช้งานแรงดันสูงได้



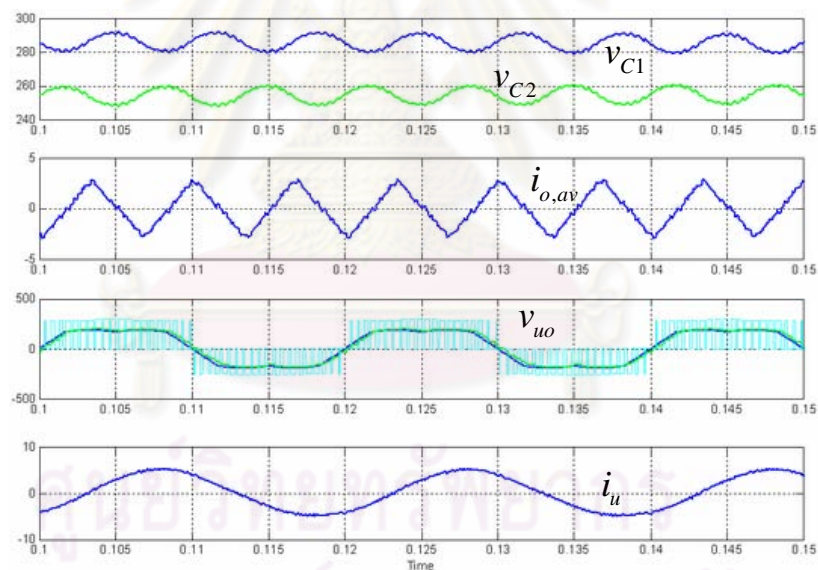
รูปที่ 1.1 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์สองระดับ

ดังนั้นอินเวอร์เตอร์สามระดับจึงเป็นแนวคิดหนึ่งที่สามารถสนองต่อการใช้งานดังกล่าว โดยมีวงจรกำลังดังรูปที่ 1.2 ซึ่งจะเห็นว่าแหล่งจ่ายไฟตรงสามระดับเกิดจากการนำตัวเก็บประจุจำนวนสองตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดันออกเป็นสามระดับ ทำให้ตัวเก็บประจุมีแรงดันตกคร่อมเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรง และเช่นเดียวกันการสร้างสัญญาณแรงดันแต่ละระดับจะทำให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแต่ละตัวมีแรงดันตกคร่อมเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงด้วย ผลดีที่ได้รับอีกอย่างหนึ่งคือรูปคลื่นสัญญาณแรงดันออกจากอินเวอร์เตอร์สามระดับจะมีฮาร์มอนิกต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับที่ความถี่สวิตช์เดียวกันเนื่องจากมีจำนวนระดับของแรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้การเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์สามระดับในการสวิตช์หนึ่งครั้งมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์สองระดับจึงทำให้แรงดันโหมคร่วมที่เกิดจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับ ส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแส

รู้ว่ามอเตอร์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์สองระดับที่ความถี่สวิตช์เดียวกัน นอกจากนั้นอินเวอร์เตอร์สามระดับยังช่วยลดปัญหาเรื่องค่าแรงดันดันเค้นที่มีต่อฉนวนของมอเตอร์และสายเคเบิล



รูปที่ 1.2 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

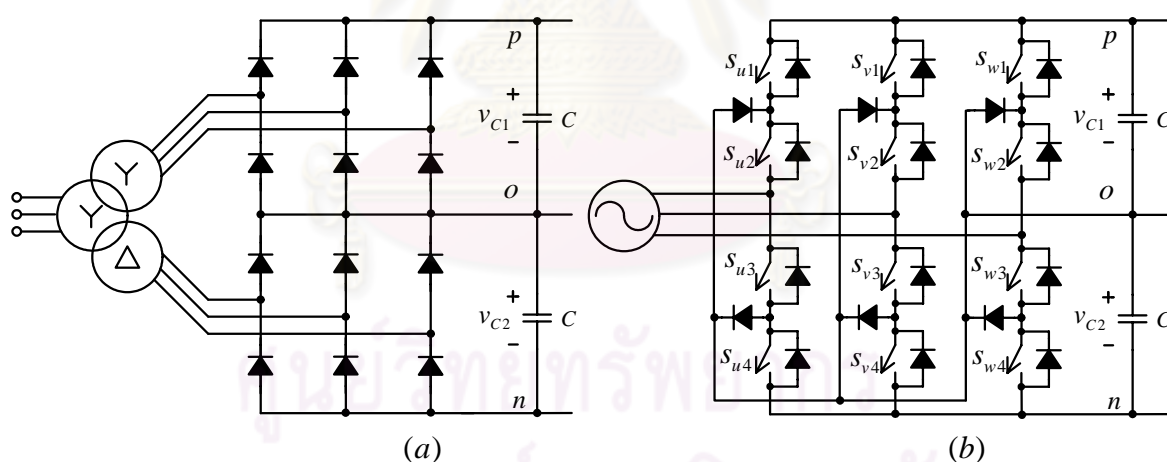


รูปที่ 1.3 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิ่วรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบมาตรฐานที่ไม่มีการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้นมีปัญหาที่สำคัญคือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองตัวอาจไม่สมดุลเนื่องจากการทำงานที่ไม่สมมาตรของวงจรกำลังและการแกว่งที่ความถี่ต่ำของ

แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลของแรงดันด้านออกในภาวะอยู่ตัวซึ่งจะมีผลมากหากทำงานที่ค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำและมีดรรชนีการมอดูเลตที่สูง [3-7] การแกว่งของแรงดันจุดกึ่งกลางบัสส่งผลให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อกับบัสบวกและบัสลบมีจุดการทำงานที่อยู่นอกย่านการทำงานที่ปลอดภัยและยังทำให้อุปกรณ์ที่ต่ออยู่บัสบวกและลบได้รับแรงดันเกินไม่เท่ากันซึ่งส่งผลกระทบต่ออินเวอร์เตอร์ในระยะยาวอีกด้วย

การแก้ปัญหาดังกล่าวของอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้นสามารถทำได้โดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบเชื่อมงานสองชุดเพื่อลดปัญหาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่สมดุลและเพิ่มขนาดตัวเก็บประจุที่บัสเพื่อลดการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ อีกแนวทางหนึ่งของการแก้ไขที่วงจรเรียงกระแสคือการใช้วงจรเรียงกระแสแบบโวลงานที่มีโครงสร้างเหมือนอินเวอร์เตอร์สามระดับซึ่งจะช่วยลดปัญหาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่สมดุลและการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้ [8] วิธีการแก้ปัญหาโดยการแก้ที่วงจรเรียงกระแสแบบนี้สามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นและใช้งานได้จริงแต่ไม่สามารถกำจัดปัญหาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่สมดุลและการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้โดยสมบูรณ์เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นการแก้ไขปัญหาที่ปลายเหตุและยังเป็นการเพิ่มความซับซ้อนของวงจรด้วย



รูปที่ 1.4 วงจรเรียงกระแส (a) แบบเชื่อมงาน 12 พัลส์ (b) แบบโวลงาน 3 ระดับ

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จึงพยายามแก้ไขปัญหาวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับที่เป็นต้นเหตุของปัญหาดังกล่าวด้วยการปรับปรุงวิธีการมอดูเลต วิธีที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งคือการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสผ่านกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสด้วยการปรับค่าแรงดันลำดับศูนย์ [4] วิธีดังกล่าวจะควบคุมให้ค่าเฉลี่ยของต่อคาบความถี่หลักมูลของกระแสนิวทรัลเป็นศูนย์ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีความสมดุลในเชิงค่าเฉลี่ยที่ภาวะอยู่ตัว แต่หากพิจารณาในขณะหนึ่งจะพบว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุยังคงแกว่งด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล ทำ

ให้มีความจำเป็นต้องเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่ค่าสูงเพื่อลดทอนการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ถึงแม้จะมีงานวิจัยที่เสนอการควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้มีความสมดุลได้ตลอดเวลาด้วยการควบคุมกระแสนิวทรัลในขณะหนึ่ง[5] แต่พิธีกรรมการทำงานมีขีดจำกัด โดยเฉพาะเมื่อตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำและดรอปนี้การมอดูเลตมีค่าสูง และงานวิจัยยังมีความไม่สมบูรณ์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของกระแสนิวทรัลของวงจรทำให้วิธีการมอดูเลตที่เสนอมีความซับซ้อน

ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการมอดูเลตที่สามารถแก้ไขข้อบกพร่องที่กล่าวมาในข้างต้นทั้งหมดอย่างเป็นระบบภายใต้กรอบทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยจะควบคุมกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตซ์ให้มีค่าตามต้องการโดยไม่ขึ้นกับค่าตัวประกอบกำลัง และแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์และกลไกในการควบคุมกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตซ์ผ่านค่ากำลังจริงและกำลังจินตภาพของวงจรอย่างชัดเจน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาวิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับการควบคุมสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลโดยนำทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันจุดกึ่งกลางตัวเก็บประจุและกระแสนิวทรัล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับขนาด 3 kVA 380 V ซึ่งใช้วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ได้พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งทำการทดสอบกับโหลดชนิดต่างๆ ได้แก่ โหลดความต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ โหลดมอเตอร์ที่ทำงานทั้งในย่านขับเคลื่อนและคืนพลังงาน เพื่อตรวจสอบผลของโหลดที่มีต่อสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

1.4 นิยามสัญลักษณ์

v_p, v_o, v_n	: แรงดันที่บัส p, o, n เทียบกับจุดนิวทรัลเสมือนของบัสไฟตรง
i_p, i_o, i_n	: กระแสที่ไหลจากบัส p, o, n
i_p^*, i_o^*, i_n^*	: กระแสคำสั่งที่บัส p, o, n
v_{C1}, v_{C2}	: แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_1, C_2
v_u, v_v, v_w	: แรงดันด้านออกของเฟส u, v, w

v_{uo}, v_{vo}, v_{wo}	: แรงดันที่ขั้วของเฟส u, v, w เทียบกับจุด o
v_u^*, v_v^*, v_w^*	: ค่าคำสั่งของแรงดันด้านออกของเฟส u, v, w
$v_{uo}^*, v_{vo}^*, v_{wo}^*$: ค่าคำสั่งของแรงดันที่ขั้วของเฟส u, v, w เทียบกับจุด o
i_u, i_v, i_w	: กระแสด้านออกเฟสของเฟส u, v, w
\underline{v}_{REF}	: เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง
\underline{v}_S	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดเล็ก
\underline{v}_M	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดกลาง
\underline{v}_L	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดใหญ่
\underline{v}_Z	: เวกเตอร์แรงดันศูนย์
\underline{v}_{Si}	: เวกเตอร์แรงดันขนาดเล็กเมื่อ $i=\{1,2,3,4,5,6\}$
\underline{v}_{Mi}	: เวกเตอร์แรงดันขนาดกลางเมื่อ $i=\{1,2,3,4,5,6\}$
\underline{v}_{Li}	: เวกเตอร์แรงดันขนาดใหญ่เมื่อ $i=\{1,2,3,4,5,6\}$
\underline{v}_{ZSi}	: เวกเตอร์แรงดันเสมือนขนาดเล็กเมื่อ $i=\{1,2,3,4,5,6\}$
\underline{v}_{ZMi}	: เวกเตอร์แรงดันเสมือนขนาดกลางเมื่อ $i=\{1,2,3,4,5,6\}$
\underline{v}_{ZLi}	: เวกเตอร์แรงดันเสมือนขนาดใหญ่เมื่อ $i=\{1,2,3,4,5,6\}$
\underline{v}_I	: เวกเตอร์แรงดันด้านเข้า
\underline{v}_O	: เวกเตอร์แรงดันด้านออก
\underline{i}_I	: เวกเตอร์กระแสด้านเข้า
\underline{i}_O	: เวกเตอร์กระแสด้านออก
s_{up}, s_{vp}, s_{wp}	: ฟังก์ชันการสวิตช์ของบัส p ไปยังเฟส u, v, w
s_{uo}, s_{vo}, s_{wo}	: ฟังก์ชันการสวิตช์ของบัส o ไปยังเฟส u, v, w
s_{un}, s_{vn}, s_{wn}	: ฟังก์ชันการสวิตช์ของบัส n ไปยังเฟส u, v, w
m_{up}, m_{vp}, m_{wp}	: ฟังก์ชันการมอดูเลตของบัส p ไปยังเฟส u, v, w
m_{uo}, m_{vo}, m_{wo}	: ฟังก์ชันการมอดูเลตของบัส o ไปยังเฟส u, v, w
m_{un}, m_{vn}, m_{wn}	: ฟังก์ชันการมอดูเลตของบัส n ไปยังเฟส u, v, w
m_u, m_v, m_w	: ฟังก์ชันการมอดูเลตของเฟส u, v, w เมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมมูล
f_s, T_s	: ความถี่การสวิตช์และคาบการสวิตช์
f	: ความถี่หลักมูล

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการทำงานและปัญหาในการใช้งานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ
2. สรุปแนวทางแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นในข้อ 1 จากงานวิจัยที่ผ่านมา
3. นำเสนอแนวคิดใหม่ที่ใช้ทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์
4. จำลองระบบและทดสอบวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK
5. ออกแบบและทดสอบสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับขึ้นทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์จากนั้นทำการทดสอบวิธีการที่นำเสนอ
6. เก็บข้อมูลและสรุปผล
7. เขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เรียนรู้ถึงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ
2. สามารถพัฒนาวิธีการควบคุมของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ให้ผลตอบสนองที่ดี
3. สามารถนำผลการศึกษา วิจัย และพัฒนาที่ได้ ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ เช่น ระบบขับเคลื่อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง ระบบขับเคลื่อนขนาดใหญ่ที่ใช้แรงดันสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

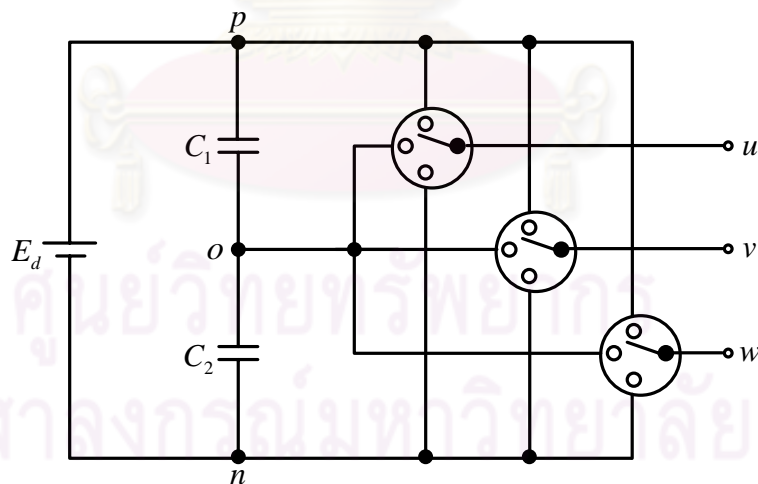
พื้นฐานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับโดยจะอธิบายถึงวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ หลักการทำงาน สเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ การมอดูเลตด้วยคลื่นพาหะ และงานวิจัยที่ผ่านมาในการปรับสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน

วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับมีลักษณะคล้ายกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป (อินเวอร์เตอร์สองระดับ) ที่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟตรง หากแต่มีข้อแตกต่างที่อินเวอร์เตอร์สามระดับจะใช้แรงดันไฟตรงสามระดับ ที่ได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งครึ่งแรงดันบัสไฟตรง วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามระดับดังรูปที่ 2.1 แบ่งแรงดันบัสไฟตรงเป็น 3 ระดับได้แก่

1. แรงดันบัสบวก เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของจุด p ของบัสไฟตรง
2. แรงดันจุดกึ่งกลางบัส เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของจุด o ของบัสไฟตรง
3. แรงดันบัสลบ เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของจุด n ของบัสไฟตรง

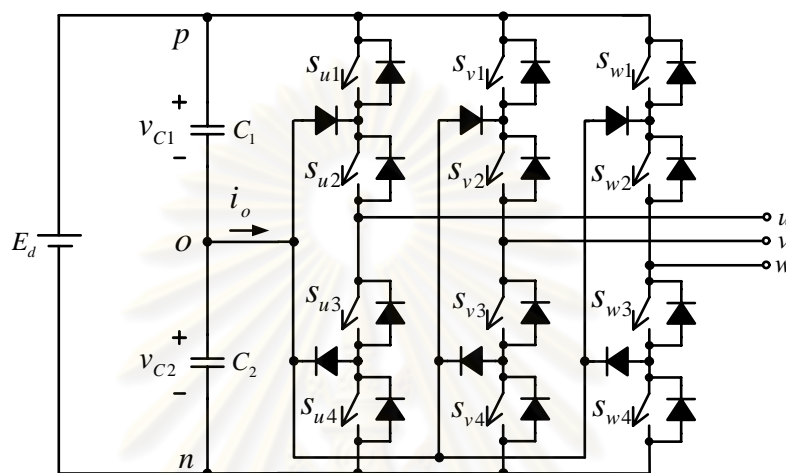


รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

เป็นผลให้ในแต่ละเฟสสามารถสร้างแรงดันออกได้ 3 ค่า วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับในความเป็นจริงเป็นดังรูปที่ 2.2 สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับในแต่ละเฟสจะประกอบด้วยสวิตช์กำลัง 4 ตัว และ ไดโอดที่ทำหน้าที่ตรึงจุดนิวทรัล 2 ตัว รวมทั้งหมดสามเฟสจะมีสวิตช์กำลัง 12 ตัว และ ไดโอด 6 ตัว สวิตช์กำลังในแต่ละเฟสจะนำกระแสเป็นคู่เพื่อเชื่อมต่อบัสบวก (p) บัสลบ (n)

หรือจุดกึ่งกลางบัส (o) ไปยังสายเฟสด้านออกตามความสัมพันธ์ที่แสดงในตารางที่ 2.1 กล่าวคือ เมื่อต้องการแรงดันออกมีค่าเท่ากับ

- แรงดันบัสบวก (p) จะต่อสวิตช์กำลัง 2 ตัวบนสุดและตัดสวิตช์กำลัง 2 ตัวล่างสุด
- แรงดันกึ่งกลางบัส (o) จะต่อสวิตช์กำลัง 2 ตัวกลางและตัดสวิตช์กำลัง 2 ตัวที่เหลือ
- แรงดันบัสลบ (n) จะต่อสวิตช์กำลัง 2 ตัวล่างสุดและตัดสวิตช์กำลัง 2 ตัวบนสุด



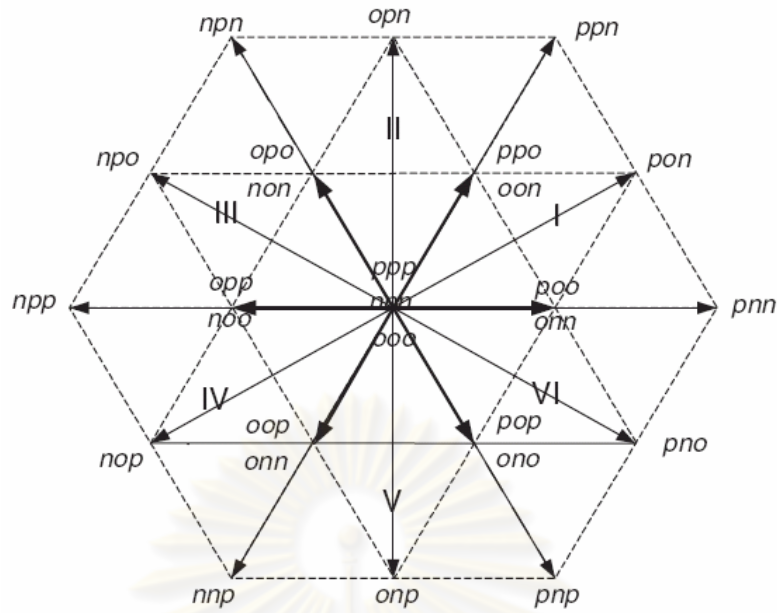
รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับในความเป็นจริง

ตารางที่ 2.1 สถานะของสวิตช์กับแรงดันขั้วในแต่ละเฟสเมื่อ $i = \{u, v, w\}$

บัสที่เชื่อมต่อ	แรงดันขั้วของเฟส i เทียบกับจุด o (v_{io})	s_{i1}	s_{i2}	s_{i3}	s_{i4}
p	v_{C1}	On	On	Off	Off
o	0	Off	On	On	Off
n	$-v_{C2}$	Off	Off	On	On

2.2 สเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

เนื่องจากแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์สามระดับ มีสถานะการสวิตช์อยู่สามสถานะ ดังนั้นเมื่อพิจารณาการมอดูเลตความกว้างพัลส์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับในมุมมองของสเปซเวกเตอร์ อินเวอร์เตอร์สามระดับจึงสามารถสร้างสถานะการสวิตช์ได้ทั้งหมด $3^3 = 27$ สถานะ ในกรณีที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมดุลเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะมีความซ้ำซ้อนกันในบางตำแหน่งทำให้ได้เวกเตอร์แรงดันที่แตกต่างกันทั้งหมดเพียง 19 เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่เวกเตอร์แรงดันมีนิยามดังสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.3 เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับเมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมมูล

$$\underline{v}_o = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{uo} \\ v_{vo} \\ v_{wo} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เราสามารถแสดงสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์แต่ละตัวได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งใช้ตัวอักษร p o หรือ n จำนวน 3 ตัวแทนระดับแรงดันขาออกของแต่ละเฟส เรียงตามลำดับเฟสคือเฟส u เฟส v และเฟส w ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ขนาดกลาง \underline{v}_{MI} (pon) หมายความว่าเฟส u จะต่อสวิตช์ที่จุด p เฟส v จะต่อสวิตช์ที่จุด o และเฟส w จะต่อสวิตช์ที่จุด n ตามลำดับ เป็นต้น

กลุ่มของเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับสามารถแบ่งตามขนาดของเวกเตอร์และทิศทางของกระแสในทรานซิสเตอร์ได้ 5 กลุ่ม ดังแสดงแต่ละสถานะในตารางที่ 2.2 คือ

1. กลุ่มเวกเตอร์ศูนย์ \underline{v}_z ซึ่ง $|\underline{v}_z| = 0$
2. กลุ่มเวกเตอร์ขนาดเล็กบวก \underline{v}_s ซึ่ง $|\underline{v}_s| = \sqrt{2/3} \cdot E_d / 2$ เมื่อ $v_{C1} = v_{C2}$ และทิศทางของกระแสในทรานซิสเตอร์มีเครื่องหมายเป็นบวกเมื่อเขียนในรูปของกระแสด้านนอก
3. กลุ่มเวกเตอร์ขนาดเล็กลบ \underline{v}_s ซึ่ง $|\underline{v}_s| = \sqrt{2/3} \cdot E_d / 2$ เมื่อ $v_{C1} = v_{C2}$ และทิศทางของกระแสในทรานซิสเตอร์มีเครื่องหมายเป็นลบเมื่อเขียนในรูปของกระแสด้านนอก
4. กลุ่มเวกเตอร์ขนาดกลาง \underline{v}_M ซึ่ง $|\underline{v}_M| = 1/\sqrt{2} \cdot E_d$ เมื่อ $v_{C1} = v_{C2}$
5. กลุ่มเวกเตอร์ขนาดใหญ่ \underline{v}_L ซึ่ง $|\underline{v}_L| = \sqrt{2/3} \cdot E_d$

ตารางที่ 2.2 กลุ่มเวกเตอร์แรงดันและสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

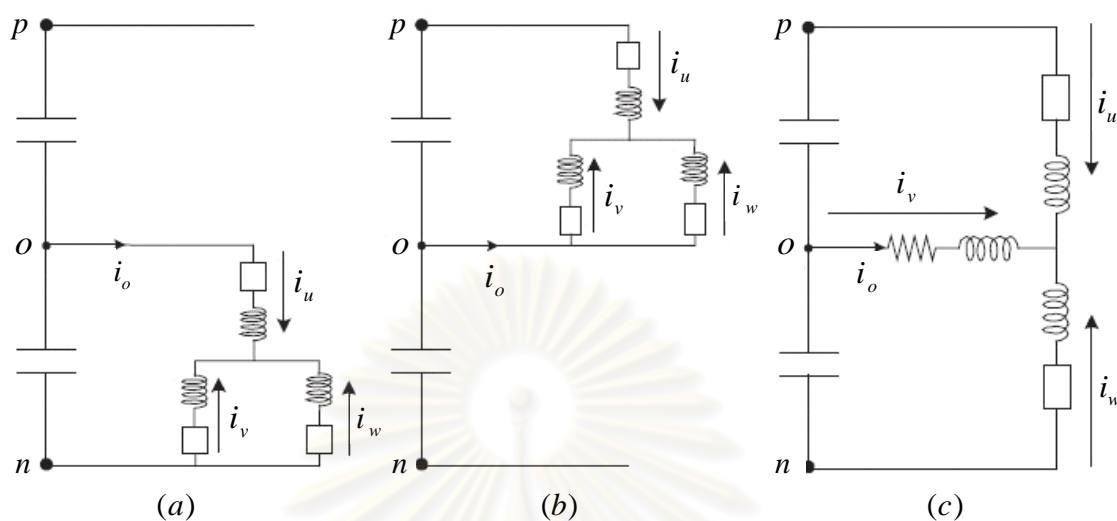
กลุ่มเวกเตอร์แรงดัน	เวกเตอร์แรงดัน(สถานะ)
เวกเตอร์ศูนย์ v_z	$v_z(ppp), v_z(ooo), v_z(nnn)$
เวกเตอร์ขนาดเล็กบวก v_s	$v_{s1}(onn), v_{s2}(ppo), v_{s3}(non),$ $v_{s4}(opp), v_{s5}(nno), v_{s6}(pop)$
เวกเตอร์ขนาดเล็กลบ v_s	$v_{s1}(poo), v_{s2}(oon), v_{s3}(opo),$ $v_{s4}(noo), v_{s5}(oop), v_{s6}(ono)$
เวกเตอร์ขนาดกลาง v_m	$v_{m1}(pon), v_{m2}(opn), v_{m3}(npo),$ $v_{m4}(nop), v_{m5}(onp), v_{m6}(pno)$
เวกเตอร์ขนาดใหญ่ v_L	$v_{L1}(ppn), v_{L2}(ppn), v_{L3}(npn),$ $v_{L4}(npp), v_{L5}(nnp), v_{L6}(pnp)$

เมื่อพิจารณาตารางที่ 2.2 จะพบว่า กลุ่มของเวกเตอร์ที่เชื่อมต่อเข้ากับจุดกึ่งกลางบัส (o) และทำให้มีกระแสไหลออกจากจุดกึ่งกลางบัส (o) หรือกระแสนิวทรัล ได้แก่ กลุ่มเวกเตอร์ขนาดเล็กบวก v_s กลุ่มเวกเตอร์ขนาดเล็กลบ v_s และกลุ่มเวกเตอร์ขนาดกลาง v_m ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนิวทรัลและเวกเตอร์ที่ใช้เป็นไปตามตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันจุดกึ่งกลางตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับจึงเกิดขึ้นเมื่อมีการเลือกใช้กลุ่มเวกเตอร์เหล่านี้

ตารางที่ 2.3 เวกเตอร์แรงดันกับกระแสนิวทรัลของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

เวกเตอร์ ขนาดเล็ก บวก v_s	กระแส นิวทรัล i_o	เวกเตอร์ ขนาดเล็ก ลบ v_s	กระแส นิวทรัล i_o	เวกเตอร์ ขนาดกลาง v_m	กระแส นิวทรัล i_o
$v_{s1}(onn)$	i_u	$v_{s1}(poo)$	$-i_u$	$v_{m1}(pon)$	i_v
$v_{s2}(ppo)$	i_w	$v_{s2}(oon)$	$-i_w$	$v_{m2}(opn)$	i_u
$v_{s3}(non)$	i_v	$v_{s3}(opo)$	$-i_v$	$v_{m3}(npo)$	i_w
$v_{s4}(opp)$	i_u	$v_{s4}(noo)$	$-i_u$	$v_{m4}(nop)$	i_v
$v_{s5}(nno)$	i_w	$v_{s5}(oop)$	$-i_w$	$v_{m5}(onp)$	i_u
$v_{s6}(pop)$	i_v	$v_{s6}(ono)$	$-i_v$	$v_{m6}(pno)$	i_w

สถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์ที่เป็นสมาชิกของกลุ่มเวกเตอร์ทั้งสามในตารางที่ 2.3 สามารถแสดงด้วยลักษณะการเชื่อมต่อของวงจรอินเวอร์เตอร์กับโหลดได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อของวงจรของสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์แรงดันที่ทำให้เกิดกระแสในทรีเฟส (a) เวกเตอร์ขนาดเล็กบวก $v_{s1}(onn)$ (b) เวกเตอร์ขนาดเล็กลบ $v_{s1}(poo)$ (c) เวกเตอร์ขนาดกลาง $v_{M1}(pon)$

อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 2.2 หากแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในขณะหนึ่งไม่สมดุล จะทำให้เวกเตอร์แรงดันในกลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดเล็กเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งที่ทับซ้อนกันตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 ส่งผลให้แรงดันชั่วที่ได้จากการมอดูเลตความกว้างพัลส์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ใช้มุมมองของสเปซเวกเตอร์มีค่าเฉลี่ยในคาบการสวิตช์ไม่เท่ากับค่าคำสั่ง ดังนั้นการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์จะมีความซับซ้อนมากขึ้นในกรณีที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่สมดุล

2.3 การมอดูเลตโดยใช้เวกเตอร์เสมือนสามตัวที่ใกล้ที่สุด (Nearest Three Virtual Space Vector PWMs)

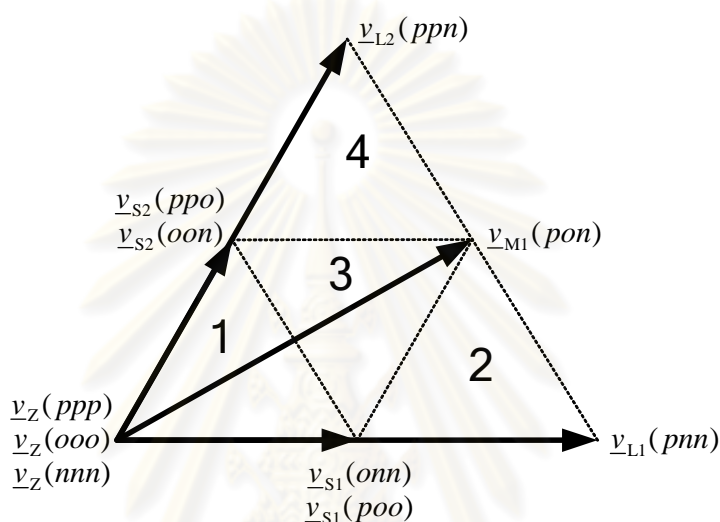
เมื่อพิจารณาโดยใช้มุมมองของสเปซเวกเตอร์ การมอดูเลตความกว้างพัลส์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบมาตรฐานนั้น จะสร้างแรงดันเฉลี่ยโดยใช้องค์ประกอบเวกเตอร์แรงดันที่ใกล้เวกเตอร์แรงดันคำสั่งที่สุดจำนวน 3 ตัว รูป 2.5 แสดงตัวอย่างพื้นที่ภายในเซกเตอร์ที่ 1 ของสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับโดยการเลือกเวกเตอร์แรงดันที่ใช้ในการสร้างแรงดันเฉลี่ยเป็นตามตารางที่ 2.4 ภายใต้เงื่อนไขตามสมการที่ (2.2) โดยที่ d_j คือวิถีจังก์ชันงานของเวกเตอร์แรงดัน v_j เมื่อ $j = \{1, 2, 3\}$

เมื่อ

$$\underline{v}_{REF} = d_1 \underline{v}_1 + d_2 \underline{v}_2 + d_3 \underline{v}_3 \quad (2.2)$$

$$0 \leq d_j \leq 1, \quad d_1 + d_2 + d_3 = 1$$

แนวความคิดการเลือกเวกเตอร์ที่ใกล้ที่สุดนั้นมีข้อดีคือทำให้มีค่าระลอกของแรงดันและกระแสต่ำ แต่มีข้อเสียคือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจุดกึ่งกลางตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับ เนื่องจากกระแสในทรานส์เซิลล์ต่อคาบการสวิตช์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์



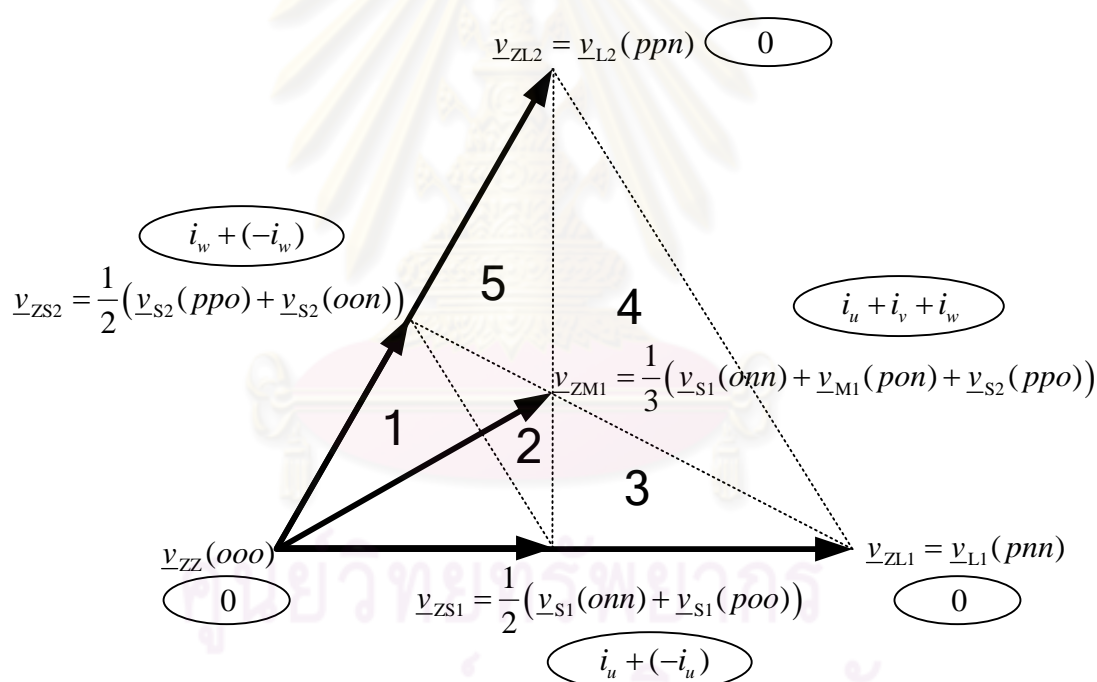
รูปที่ 2.5 สเปซเวกเตอร์ในเซกเตอร์ที่ 1 ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

ตารางที่ 2.4 การเลือกเวกเตอร์ในเซกเตอร์ที่ 1 โดยใช้เวกเตอร์ที่ใกล้เวกเตอร์แรงดันคำสั่งที่สุด

พื้นที่	เวกเตอร์ที่เลือก $\underline{v}_1, \underline{v}_2, \underline{v}_3$	พื้นที่	เวกเตอร์ที่เลือก $\underline{v}_1, \underline{v}_2, \underline{v}_3$
1	$\underline{v}_{S1}, \underline{v}_{S2}, \underline{v}_Z$	3	$\underline{v}_{S1}, \underline{v}_{S2}, \underline{v}_{M1}$
2	$\underline{v}_{S1}, \underline{v}_{M1}, \underline{v}_{L1}$	4	$\underline{v}_{S2}, \underline{v}_{M1}, \underline{v}_{L2}$

จากข้อมูลของเวกเตอร์แรงดันคำสั่งในหนึ่งคาบการสวิตช์ เมื่อเลือกเวกเตอร์แรงดันที่ใกล้แรงดันคำสั่งที่สุดได้แล้วจะพบว่า ในกรณีแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมมูลนั้นการเลือกใช้เวกเตอร์ศูนย์และเวกเตอร์ขนาดเล็กมีได้มากกว่าหนึ่งรูปแบบเนื่องจากมีความซ้ำซ้อนของเวกเตอร์ ทำให้มีอิสระในการเลือกใช้เวกเตอร์ที่มีความซ้ำซ้อนนี้ นำไปสู่การเสนอแนวความคิดที่เรียกว่า “สเปซเวกเตอร์เสมือน (Virtual space vector)” เพื่อให้การสร้างแรงดันในมุมมองของสเปซเวกเตอร์มีค่ากระแสในทรานส์เซิลล์ต่อคาบการสวิตช์เป็นศูนย์เสมอ ดังจะได้อธิบายต่อไปนี้

จากข้อมูลในตารางที่ 2.3 ทำให้ทราบว่า กระแสนิวทรัลในขณะหนึ่งจะเป็นฟังก์ชันของ กระแสด้านออกและพบว่าด้วยคุณสมบัติของเวกเตอร์ขนาดเล็กจะทำให้กระแสนิวทรัลเฉลี่ยที่เกิด จากเวกเตอร์ขนาดเล็กเป็นศูนย์ได้โดยใช้งานเวกเตอร์ขนาดเล็กบวกและเวกเตอร์ขนาดเล็กลบ ด้วยวิถัจกรงานเท่ากันเพื่อสร้างเวกเตอร์ขนาดเล็กเสมือน v_{ZS1}, v_{ZS2} ตามต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.6 ดังนั้นสเปซเวกเตอร์เสมือนขนาดเล็กของเซกเตอร์ที่ 1 จะให้กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการ สวิตช์เป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามการใช้เวกเตอร์ขนาดกลางยังคงทำให้กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการ สวิตช์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยนิยามเวกเตอร์ขนาดกลางเสมือน v_{ZM1} ที่ สร้างจากผลบวกของเวกเตอร์ขนาดเล็กบวก v_{S1}, v_{S2} สองตัวและเวกเตอร์ขนาดกลาง v_{M1} โดย กำหนดให้มีวิถัจกรงานเท่ากันทุกเวกเตอร์ เมื่ออาศัยคุณสมบัติของกระแสไหลดแบบสามเฟสสาม สายที่มีผลรวมของกระแสเป็นศูนย์ จะพบว่ากระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ที่เกิดจากการใช้ เวกเตอร์ขนาดกลางเสมือนจะมีค่าเท่ากับศูนย์ [9]



รูปที่ 2.6 สเปซเวกเตอร์เสมือนในเซกเตอร์ที่ 1 ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.6 จะพบว่าเวกเตอร์เสมือนทุกตัวจะทำให้กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบ การสวิตช์มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อใช้องค์ประกอบของเวกเตอร์เสมือนที่ใกล้เวกเตอร์แรงดัน คำสั่งที่สุด 3 ตัวสร้างแรงดันเฉลี่ยตามแนวคิดของสเปซเวกเตอร์ กระแสนิวทรัลเฉลี่ยจึงมีค่าเป็น ศูนย์และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจุดกึ่งกลางบัส โดยสรุปแล้วพื้นที่ภายในเซกเตอร์ที่ 1 สามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยการเลือกใช้เวกเตอร์เสมือนเป็นดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การเลือกเวกเตอร์เสมือนในเซกเตอร์ที่ 1 โดยใช้เวกเตอร์เสมือนที่ใกล้ที่สุด

พื้นที่	เวกเตอร์เสมือนที่เลือก $\underline{v}_{v1}, \underline{v}_{v2}, \underline{v}_{v3}$
1	$\underline{v}_{zS1}, \underline{v}_{zS2}, \underline{v}_{zZ}$
2	$\underline{v}_{zS1}, \underline{v}_{zS2}, \underline{v}_{zM1}$
3	$\underline{v}_{zS1}, \underline{v}_{zM1}, \underline{v}_{zL1}$
4	$\underline{v}_{zL1}, \underline{v}_{zM1}, \underline{v}_{zL2}$
5	$\underline{v}_{zS1}, \underline{v}_{zM1}, \underline{v}_{zL2}$

ในกรณีแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมดุล จากข้อมูลของเวกเตอร์แรงดันคำสั่งในหนึ่งคาบการสวิตช์ สามารถเลือกเวกเตอร์เสมือนที่ใกล้แรงดันคำสั่งที่สุด ภายใต้เงื่อนไขตามสมการที่ (2.3) โดยที่ d_{vj} คือตัวจักษ์กรงานของเวกเตอร์เสมือน \underline{v}_{vj} เมื่อ $j = \{1, 2, 3\}$

$$\begin{aligned} \underline{v}_{REF} &= d_{v1}\underline{v}_{v1} + d_{v2}\underline{v}_{v2} + d_{v3}\underline{v}_{v3} \\ \text{เมื่อ} \quad 0 &\leq d_{vj} \leq 1, \quad d_{v1} + d_{v2} + d_{v3} = 1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

เมื่อได้เวกเตอร์เสมือนและค่าตัวจักษ์กรงานที่ต้องใช้งานแล้ว สามารถคำนวณหาค่าตัวจักษ์กรงานของเวกเตอร์จริงในเซกเตอร์ที่ 1 ของแต่ละสถานะการสวิตช์ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} d_{poo} &= \frac{1}{2} d_{vzS1} \\ d_{oon} &= \frac{1}{2} d_{vzS2} \\ d_{pon} &= \frac{1}{3} d_{vzM1} \\ d_{onn} &= \frac{1}{2} d_{vzS1} + \frac{1}{3} d_{vzM1} \\ d_{ppo} &= \frac{1}{2} d_{vzS2} + \frac{1}{3} d_{vzM1} \\ d_{ooo} &= d_{vzZ}, d_{ppn} = d_{vzL2}, d_{pnn} = d_{vzL1} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

ในทางปฏิบัตินั้นสัญญาณควบคุมการสวิตช์เพื่อเชื่อมต่อบัส p, o, n ไปยังแต่ละเฟสด้านออก จะคำนวณจากค่าตัวจักษ์กรงาน (2.4) ได้เป็นค่าฟังก์ชันการมอดูเลตของบัสหนึ่งไปยังเฟสด้านออกหนึ่ง ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะก็จะได้สัญญาณสำหรับควบคุมสวิตช์ในแต่ละเฟส

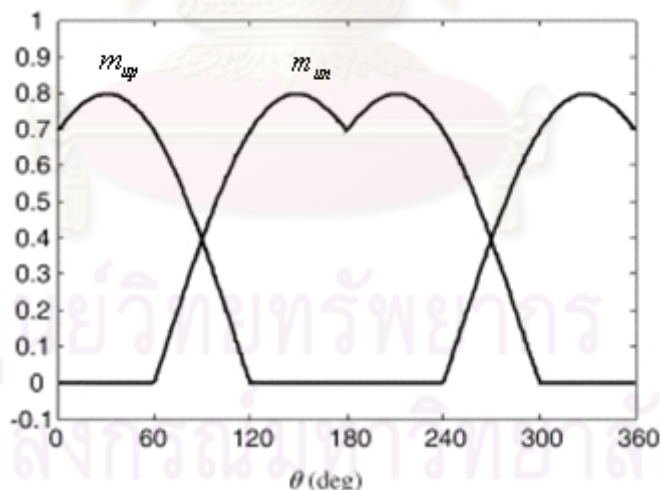
ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 จะได้ฟังก์ชันการมอดูเลตตั้งสมการที่ (2.5 a)-(2.5 c) ในสมการที่ (2.5 b) จะพบว่าการสวิตช์ในเฟส v มีการใช้งานทั้งบัสบวกและบัสลบซึ่งแตกต่างจากสองเฟสที่เหลือ เราจะอธิบายถึงวิธีการสวิตช์ที่ต่างกันในหัวข้อ 2.4

$$\left. \begin{aligned} m_{up} &= d_{poo} + d_{pnn} + d_{ppn} + d_{pon} + d_{ppo} \\ m_{uo} &= d_{oon} + d_{onn} + d_{ooo} \\ m_{un} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.5 a)$$

$$\left. \begin{aligned} m_{vp} &= d_{ppn} + d_{ppo} \\ m_{vo} &= d_{poo} + d_{oon} + d_{pon} + d_{ooo} \\ m_{vn} &= d_{onn} + d_{pnn} \end{aligned} \right\} \quad (2.5 b)$$

$$\left. \begin{aligned} m_{wp} &= 0 \\ m_{wo} &= d_{poo} + d_{ppo} + d_{ooo} \\ m_{wn} &= d_{ppn} + d_{pon} + d_{oon} + d_{onn} + d_{pnn} \end{aligned} \right\} \quad (2.5 c)$$

เมื่อคำนวณในลักษณะเดียวกันครบทุกเซกเตอร์ หากแรงดันคำสั่งเป็นฟังก์ชันไซน์ จะได้ฟังก์ชันการมอดูเลตของบัส p ไปยังเฟส u และฟังก์ชันการมอดูเลตของบัส n ไปยังเฟส u ตามรูปที่ 2.7

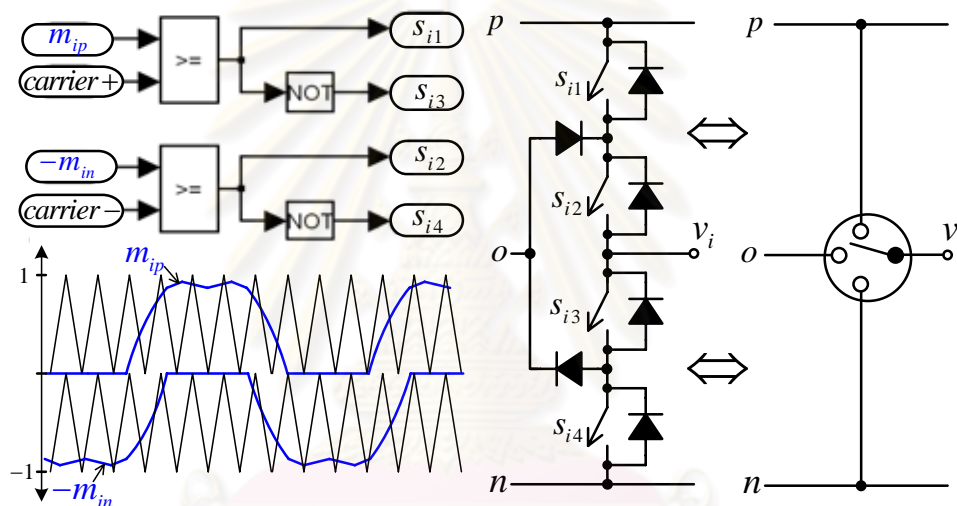


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up} และ m_{un}

ถึงแม้ว่าแนวคิดในการใช้สเปซเวกเตอร์ของเวกเตอร์เสมือนจะสามารถอธิบายและควบคุมให้กระแสอินเวอร์ตเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ให้เป็นศูนย์ได้ แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีการคำนวณที่ซับซ้อนและยังคงมีความไม่ชัดเจนในการควบคุมกระแสอินเวอร์ตเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ให้มีค่าตามต้องการเพื่อควบคุมสมดุลของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในกรณีที่แรงดันไม่สมดุล

2.4 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

นอกจากวิธีการมอดูเลตด้วยมุมมองเชิงสเปซเวกเตอร์ที่กล่าวมาแล้ว การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในอินเวอร์เตอร์สองระดับและสามระดับ ในวิธีนี้ตำแหน่งและช่วงเวลาในการสวิตช์ของสวิตช์ในแต่ละเฟสถูกกำหนดโดยการนำคลื่นพาหะมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณฟังก์ชันการมอดูเลต อย่างไรก็ตาม สำหรับในกรณีอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้น วิธีการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะแตกต่างจากในกรณีอินเวอร์เตอร์สองระดับตรงที่คลื่นพาหะและสัญญาณอ้างอิงที่นำมาเปรียบเทียบจะมีจำนวนอย่างละ 2 ตัว ทั้งนี้ก็เพราะว่ามีระดับแรงดันใช้งานสามระดับ

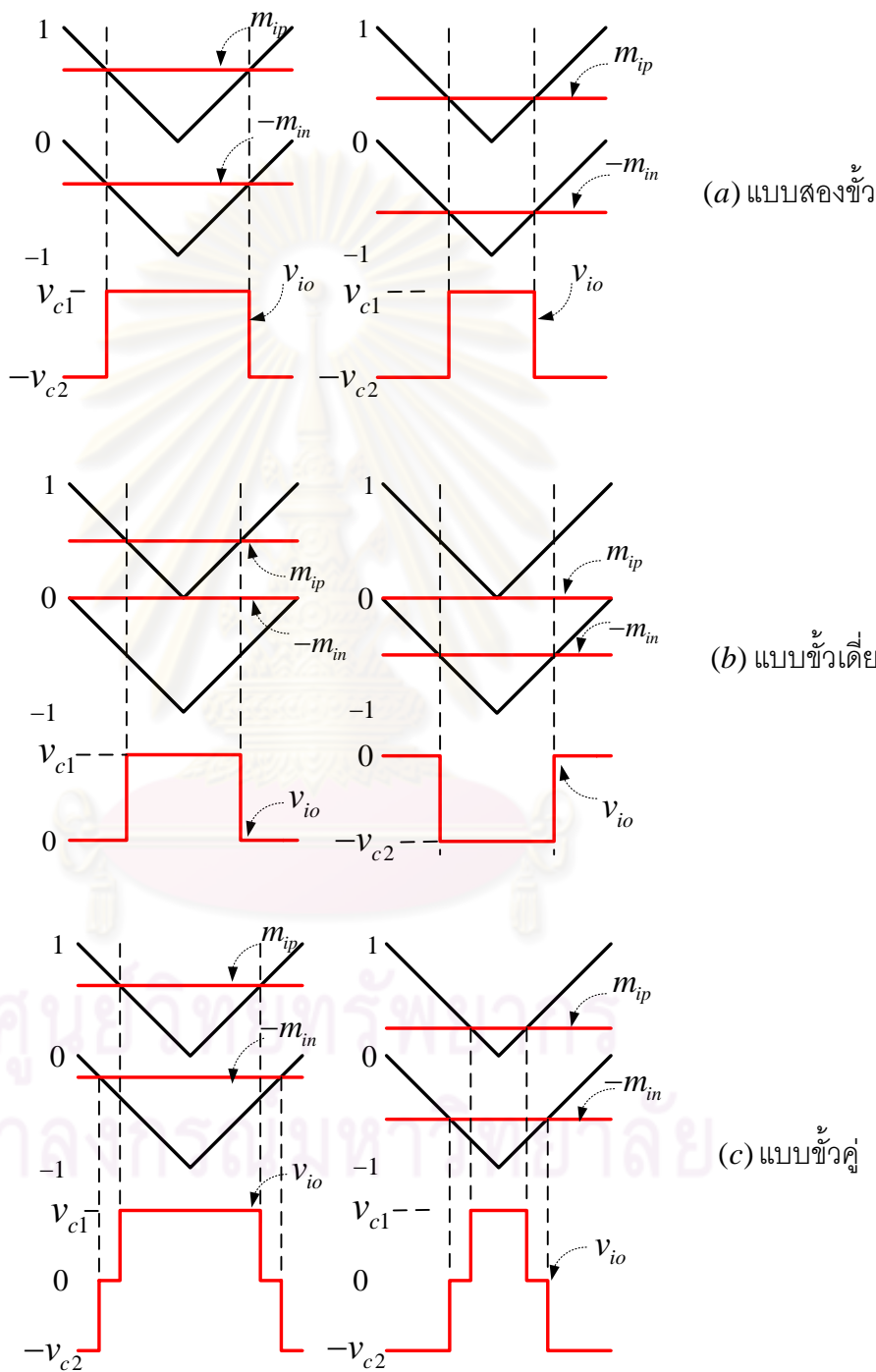


รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับในแต่ละเฟสเมื่อ $i=\{u,v,w\}$

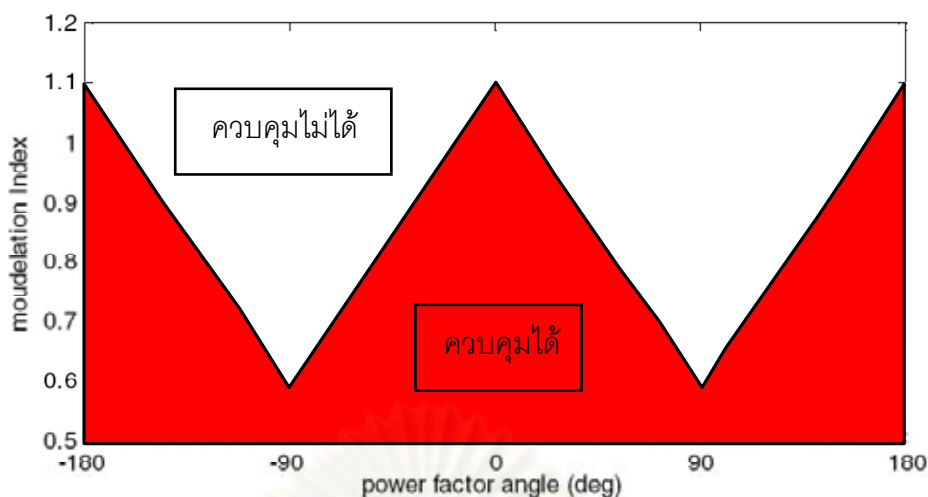
เมื่อพิจารณาไดอะแกรมของการมอดูเลตในรูปที่ 2.8 จะพบว่า การสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สามระดับในแต่ละเฟสให้ได้ค่าเฉลี่ยตามต้องการนั้น สามารถเลือกใช้แรงดันบัสไฟตรงได้ทั้งบัสบวกและบัสลบ (ในที่นี้หมายถึงแรงดัน v_{C1} และแรงดัน $-v_{C2}$ ตามลำดับ) รวมทั้งแรงดันที่จุดกึ่งกลางบัสประกอบกัน จึงสามารถเขียนสมการแรงดันด้านออกในรูปแบบสมการทั่วไปของฟังก์ชันการมอดูเลตได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\begin{bmatrix} v_{uo}^* \\ v_{vo}^* \\ v_{wo}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{up} \\ m_{vp} \\ m_{wp} \end{bmatrix} v_{C1} + \begin{bmatrix} m_{uo} \\ m_{vo} \\ m_{wo} \end{bmatrix} (0) + \begin{bmatrix} m_{un} \\ m_{vn} \\ m_{wn} \end{bmatrix} (-v_{C2}) \quad (2.6)$$

สวิตช์แบบซัวเดี่ยวทั้งสามเฟสและได้ขอบเขตความเป็นไปได้ของการควบคุมกระแสเหนี่ยวนำ
 ต่อคาบการสวิตช์ให้เป็นศูนย์เป็นฟังก์ชันของตัวประกอบกำลังและดรรชนีการมอดูเลตดังแสดงใน
 รูปที่ 2.10 วิธีการนี้จึงมีข้อจำกัดในการใช้งาน



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของการมอดูเลตแต่ละรูปแบบ



รูปที่ 2.10 ขอบเขตการควบคุมกระแสรีฟลักซ์ให้เป็นศูนย์ภายใต้การสวิตช์แบบซั้วเดียว ทั้งสามเฟส [5]

งานวิจัย[6] เสนอการมอดูเลตแบบซั้วเดียว 2 เฟส และแบบซั้วคู่ 1 เฟส เพื่อควบคุมกระแสรีฟลักซ์เฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ให้เป็นศูนย์ทุกเงื่อนไขตัวประกอบกำลังและดรรชนีการมอดูเลตโดยทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมดุล งานวิจัย [6] ได้กำหนดให้สัญญาณการมอดูเลตเพื่อสร้างแรงดันรูปคลื่นไซน์สามเฟสสมดุลเมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมดุลไว้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} m_u &= m_{\text{SPWM}} \cos(\omega t) \\ m_v &= m_{\text{SPWM}} \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ m_w &= m_{\text{SPWM}} \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

และได้เพิ่มพิสัยการมอดูเลตที่เป็นเชิงเส้นด้วยการบวกสัญญาณลำดับศูนย์ตามสมการที่ (2.8) ทำให้ได้ค่าดรรชนีการมอดูเลตสูงสุดในย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้น (m_{SPWM}) เท่ากับ 1.1547

$$\left. \begin{aligned} m'_u &= m_u - m_0 \\ m'_v &= m_v - m_0 \\ m'_w &= m_w - m_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

โดยที่ค่าสัญญาณลำดับศูนย์สามารถหาได้ด้วยสมการที่ (2.9)

$$m_0 = (\max(m_u, m_v, m_w) + \min(m_u, m_v, m_w))/2 \quad (2.9)$$

โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการมอดูเลตในสมการที่ (2.8) กับค่าฟังก์ชันการมอดูเลตสำหรับบัสบวกและบัสลบที่ใช้ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะ เป็นดังสมการที่ (2.10)

$$\left. \begin{aligned} m'_u &= m_{up} - m_{un} \\ m'_v &= m_{vp} - m_{vn} \\ m'_w &= m_{wp} - m_{wn} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

และได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์กับฟังก์ชันการมอดูเลตเป็นดังสมการที่ (2.11) และ (2.12)

$$i_o = (1 - m_{un} - m_{up})i_u + (1 - m_{vn} - m_{vp})i_v + (1 - m_{wn} - m_{wp})i_w \quad (2.11)$$

$$i_o = m_{uo}i_u + m_{vo}i_v + m_{wo}i_w \quad (2.12)$$

จากคุณสมบัติของกระแสไหลดแบบสามเฟสสามสายเงื่อนไขที่ทำให้กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์เป็นศูนย์ก็คือฟังก์ชันการมอดูเลต $m_{uo} = m_{vo} = m_{wo}$ เมื่อพิจารณาร่วมกับสมการที่ (2.8)-(2.10) จะได้ข้อสรุปว่าฟังก์ชันการมอดูเลตของบัสบวกและบัสลบเป็นดังสมการที่ (2.13) เมื่อ $i = \{u, v, w\}$ ลักษณะของฟังก์ชันการมอดูเลตที่ได้จะมีรูปร่างเป็นดังรูปที่ 2.11 โดยในเฟสหนึ่ง ๆ จะมีทั้งย่านการมอดูเลตที่เป็นแบบขั้วเดียวและย่านที่เป็นแบบขั้วคู่ผสมกัน และเมื่อพิจารณาทั้ง 3 เฟสพร้อมกันจะพบว่า ในขณะหนึ่งจะมีการมอดูเลตแบบขั้วเดียว 2 เฟสและแบบขั้วคู่ 1 เฟส

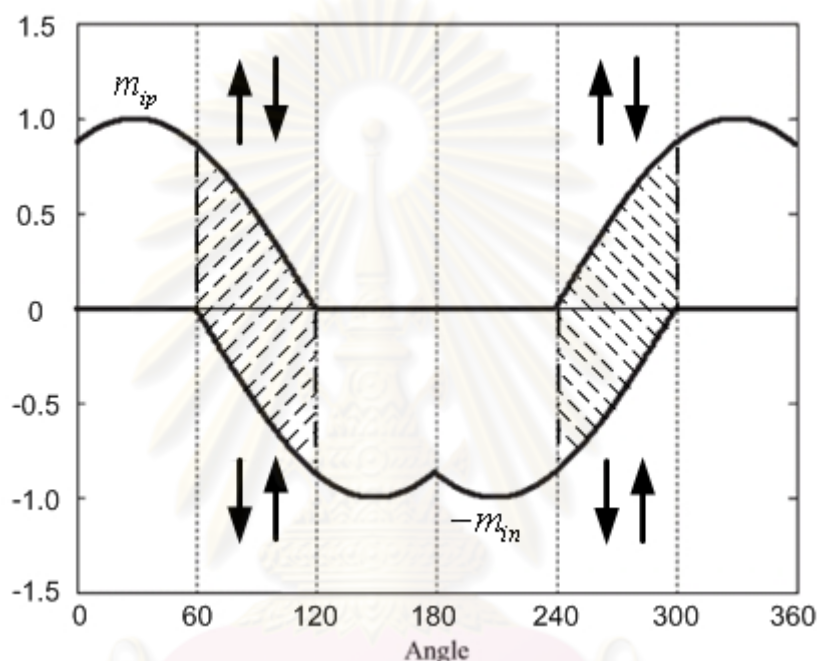
$$\left. \begin{aligned} m_{ip} &= \frac{m_i - \min(m_u, m_v, m_w)}{2} \\ m_{in} &= \frac{m_i - \max(m_u, m_v, m_w)}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

ในกรณีที่มีความไม่สมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอยู่และต้องการควบคุมให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุกลับมาสมดุล สามารถทำได้โดยการปรับค่าฟังก์ชันการมอดูเลตของบัสบวกและบัสลบเฉพาะในเฟสที่มีการมอดูเลตแบบขั้วคู่ตามสมการที่ (2.14) ซึ่งการปรับค่าฟังก์ชันการมอดูเลตในลักษณะนี้จะไม่ทำให้แรงดันด้านออกในเฟสนั้นเปลี่ยนแปลงแต่กระแสนิวทรัลจะมีค่าไม่เป็นศูนย์อีกต่อไป ทั้งนี้ค่าการชดเชย m_{i-off} จะมีขนาดแปรผันกับความไม่สมดุล

$\Delta v_C = v_{C1} - v_{C2}$ และขึ้นกับเครื่องหมายของกระแสด้านนอก ดังแสดงในสมการที่ (2.15) ซึ่งจะทำให้กระแสนิวทรัลมีทิศทางที่เหมาะสมที่ปรับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้เข้าสู่สมดุลตามต้องการ

$$\left. \begin{aligned} m_{ip-mew} &= m_{ip} + m_{i-off} \\ m_{in-mew} &= m_{in} + m_{i-off} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

$$m_{i-off} = k_p |\Delta v_C| \cdot \text{sgn}(\Delta v_C i_i) \cdot \text{sgn}(m_{ip} + m_{in} - 1) \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างลักษณะฟังก์ชันการมอดูเลตสำหรับบัสบวกและบัสลบในเฟสหนึ่ง ๆ ตามงานวิจัย [6] โดยในย่านมุม 60-120 องศา และ 240-300 องศา จะมีการปรับชดเชยฟังก์ชันการมอดูเลตแบบชั่วครู่ เพื่อควบคุมกระแสนิวทรัล

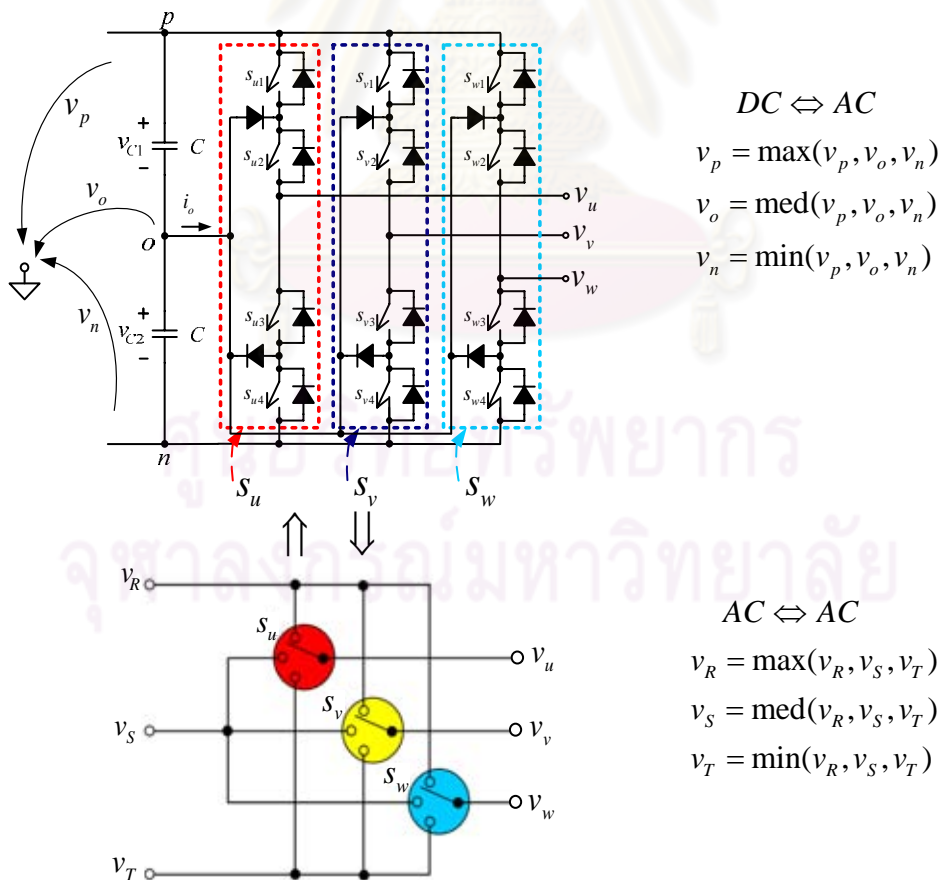
ถึงแม้ว่างานวิจัย[6] จะสามารถเสนอวิธีการมอดูเลตที่สามารถปรับสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับได้ แต่วิธีการดังกล่าวสามารถใช้อธิบายถึงกลไกการควบคุมได้เฉพาะในกรณีที่ต้องการควบคุมให้กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์เท่านั้น และไม่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในกรณีทั่วไประหว่างสัญญาณการมอดูเลตแบบชั่วครู่เมื่อมีการชดเชยกับกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ ซึ่งความสัมพันธ์นี้มีความสำคัญในการออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ นอกจากนี้วิธีการปรับสมดุลที่เสนอยังให้ผลตอบแทนในการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยทำให้ยากต่อการออกแบบอัตราการขยายป้อนกลับในวงรอบการควบคุม

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์และการควบคุมสมดุลแรงดัน คร่อมตัวเก็บประจุด้วยการควบคุมกระแสไนทรัล

3.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์สามระดับในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนได้ใหม่ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยแรงดันบัสไฟตรงด้านเข้า v_p, v_o, v_n ของอินเวอร์เตอร์สามระดับทำหน้าที่เสมือนแรงดันไฟสลับสามเฟสด้านเข้าของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ณ ขณะเวลาหนึ่ง มุมมองนี้ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ผลงานวิจัยของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์กับอินเวอร์เตอร์สามระดับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการนำเอาทฤษฎีการควบคุมกระแสด้านเข้าของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มาใช้ในการควบคุมกระแสไนทรัลและควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับ



รูปที่ 3.1 อินเวอร์เตอร์สามระดับเมื่อพิจารณาจากมุมมองของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

จุดนิวทรัลเสมือนที่แสดงในรูปที่ 3.1 เป็นจุดที่นิยามขึ้นสำหรับใช้อ้างอิงของแรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์สามระดับเพื่อให้แรงดันด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์สามระดับมีผลรวมเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับแรงดันด้านเข้าของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่เป็นแรงดันไฟสลับสามเฟสสมดุล ในที่นี้ กำหนดให้ v_p, v_o, v_n คือแรงดันด้านเข้าเทียบกับจุดนิวทรัลเสมือน และ v_{c0} คือแรงดันลำดับศูนย์ ที่คำนวณจากค่าศักย์ไฟฟ้าของบัสบวก บัสลบ และจุดกึ่งกลางบัส ดังสมการที่ (3.1)

$$v_{c0} = \frac{v_{c1} + 0 + (-v_{c2})}{3} \quad (3.1)$$

แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์สามระดับเมื่อเทียบกับจุดนิวทรัลเสมือนจะมีค่าสัมพันธ์กับค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุดังสมการที่ (3.2) และแรงดันลำดับศูนย์ v_{c0} จะมีค่าเท่ากับ ค่าแรงดันที่วัดจากจุดนิวทรัลเสมือนมายังจุดกึ่งกลางบัส (o)

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{c1} \\ 0 \\ -v_{c2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_{c0} \quad (3.2)$$

กำหนดให้ฟังก์ชันการสวิตช์ $s_{ij} \in \{0,1\}$ แสดงถึงสถานะของสวิตช์ที่เชื่อมต่อระหว่างเฟสด้านออก $i = \{u, v, w\}$ กับเฟสด้านเข้า (บัส) $j = \{p, o, n\}$ และผลรวมของฟังก์ชันการสวิตช์สอดคล้องตามสมการที่ (3.3)

$$s_{ip} + s_{io} + s_{in} = 1 \quad (3.3)$$

ความสัมพันธ์เชิงเมทริกซ์ของแรงดันและกระแสทั้งด้านเข้าและด้านออกในขณะหนึ่ง ในรูปของฟังก์ชันการสวิตช์เป็นดังสมการที่ (3.4) และ (3.5)

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{up} & s_{uo} & s_{un} \\ s_{vp} & s_{vo} & s_{vn} \\ s_{wp} & s_{wo} & s_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_n \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_o \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{up} & s_{vp} & s_{wp} \\ s_{uo} & s_{vo} & s_{wo} \\ s_{un} & s_{vn} & s_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \mathbf{S}^T \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

ฟังก์ชันการมอดูเลตเป็นค่าเฉลี่ยต่อคาบความถี่การสวิตช์ของฟังก์ชันการสวิตช์ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงวัฏจักรงานของการสวิตช์ระหว่างเฟสด้านออก $i = \{u, v, w\}$ กับเฟสด้านเข้า (บัส) $j = \{p, o, n\}$ แสดงได้ดังสมการที่ (3.6)

$$m_{ij} = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t s_{ij} d\tau \quad ; 0 \leq m_{ij} \leq 1 \quad (3.6)$$

ความสัมพันธ์เชิงเมทริกซ์ของแรงดันและกระแสเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ทั้งด้านเข้าและด้านออก ในรูปของฟังก์ชันการมอดูเลตเป็นดังสมการที่ (3.7) และ (3.8) ในที่นี้เพื่อลดความยุ่งยากของสัญลักษณ์ที่ใช้ เราจะใช้สัญลักษณ์เดียวกันแทนทั้งค่าในขณะหนึ่งและค่าเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถตีความได้จากบริบทของเนื้อหา สมการที่ (3.7) เป็นสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สามระดับกับแรงดันด้านเข้าเทียบกับจุดนิวทรัลเสมือนในเชิงเมทริกซ์ หากจัดรูปสมการที่ (3.7) โดยเขียนให้เป็นสมการของแรงดันไฟฟ้าเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส(จุด o) ก็จะได้เป็นสมการที่ (2.6) นั่นเอง ส่วนสมการที่ (3.8) เป็นสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเฉลี่ยที่ไหลออกจากบัสของอินเวอร์เตอร์สามระดับกับกระแสด้านออกในเชิงเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{up} & m_{uo} & m_{un} \\ m_{vp} & m_{vo} & m_{vn} \\ m_{wp} & m_{wo} & m_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_n \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_p^* \\ i_o^* \\ i_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_p \\ i_o \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{up} & m_{vp} & m_{wp} \\ m_{uo} & m_{vo} & m_{wo} \\ m_{un} & m_{vn} & m_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \mathbf{M}^T \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$m_{ip} + m_{io} + m_{in} = 1 \quad (3.9)$$

เมื่อพิจารณาในแง่ใด ๆ ของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} ในสมการที่ (3.7) จะมีความสัมพันธ์ว่า ผลรวมของฟังก์ชันการมอดูเลตภายในแฉกจะมีค่าเท่ากับหนึ่งตามสมการที่ (3.9) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าในเฟสใด ๆ จะต้องมีผลรวมของวัฏจักรงานของสวิตช์ที่ทำงานเชื่อมต่อกันระหว่างสายด้านออกและด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง ถ้าผลรวมมีค่าน้อยกว่าหนึ่งจะพบว่าเกิดการเปิดวงจรของแรงดันด้านออกในคาบการสวิตช์นั้น ในทางตรงกันข้ามถ้าผลรวมมีค่ามากกว่าหนึ่งจะพบว่าเกิดการลัดวงจรของแรงดันด้านเข้าในคาบการสวิตช์นั้น จากการแสดงสมการการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ทำให้สามารถประยุกต์ความรู้เรื่องการมอดูเลตของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มาใช้ได้ดังที่จะอธิบายต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาการสร้างแรงดันของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} จะสามารถพิสูจน์ได้ว่ารูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตเป็นดังสมการที่ (3.10)-(3.12) ซึ่งจะพบว่าถ้าสมการที่ (3.11) และ (3.12) เป็นจริงจะทำให้เงื่อนไขของสมการที่ (3.9) เป็นจริงด้วย จากสมการที่ (3.10) แรงดันด้านออกที่ได้จากการมอดูเลตจะมีองค์ประกอบอยู่สองส่วนคือ (1) ส่วนแรงดันด้านออกที่เกิดจากเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M}' ซึ่งมีผลรวมของฟังก์ชันการมอดูเลตในแต่ละแฉกของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M}' เป็นศูนย์ดังสมการที่ (3.11) และ (2) ส่วนสร้างแรงดันลำดับศูนย์ที่เกิดจากเมทริกซ์การมอดูเลตแรงดันลำดับศูนย์ \mathbf{M}_0 ซึ่งไม่ปรากฏในแรงดันด้านออกระหว่างสาย โดยค่า x, y, z เป็นตัวแปรอิสระในการมอดูเลตที่เพิ่มเข้ามาภายใต้เงื่อนไขในสมการที่ (3.12)

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}' + \mathbf{M}_0 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} m_{up} & m_{uo} & m_{un} \\ m_{vp} & m_{vo} & m_{vn} \\ m_{wp} & m_{wo} & m_{wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{up} & m_{uo} & m_{un} \\ m_{vp} & m_{vo} & m_{vn} \\ m_{wp} & m_{wo} & m_{wn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x & y & z \\ x & y & z \\ x & y & z \end{bmatrix}$$

$$m_{ip} + m_{io} + m_{in} = 0 \quad (3.11)$$

$$x + y + z = 1 \quad (3.12)$$

งานวิจัย [10] ได้แสดงให้เห็นถึงวิธีการคำนวณหาค่าเมทริกซ์การมอดูเลตโดยใช้แนวคิดการแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric transformations) โดยเริ่มจากการแปลงแรงดันและกระแสด้านเข้าและด้านออก รวมทั้งเมทริกซ์การมอดูเลตให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์แรงดัน เวกเตอร์กระแสด้านเข้าและด้านออก และเมทริกซ์การมอดูเลตขนาด 2×2 โดยใช้เมทริกซ์การแปลงตามสมการที่ (3.13) กับสมการที่ (3.7) และ (3.8) ได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ

$$\mathbf{T} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\underline{v}_O = \mathbf{M}_{2 \times 2} \underline{v}_I \quad (3.14)$$

$$\underline{i}_I = \mathbf{M}_{2 \times 2}^T \underline{i}_O \quad (3.15)$$

ในที่นี้เวกเตอร์แรงดันด้านเข้าและด้านออกแสดงได้ดังสมการที่ (3.16) และ (3.17) โดยที่ α_1 และ α_0 คือมุมของเวกเตอร์แรงดัน \underline{v}_I และ \underline{v}_O ตามลำดับ

$$\underline{v}_I = \mathbf{T} [v_p \quad v_o \quad v_n]^T \triangleq \|\underline{v}_I\| \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 \\ \sin \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\underline{v}_O = \mathbf{T} [v_u \quad v_v \quad v_w]^T \triangleq \|\underline{v}_O\| \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 \\ \sin \alpha_0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

และเวกเตอร์กระแสด้านเข้าและด้านออกแสดงได้ดังสมการที่ (3.18) และ (3.19) โดยที่ β_1 และ β_0 คือมุมของเวกเตอร์กระแส \underline{i}_I และ \underline{i}_O ตามลำดับ

$$\underline{i}_I = \mathbf{T} [i_p \quad i_o \quad i_n]^T \triangleq \|\underline{i}_I\| \begin{bmatrix} \cos \beta_1 \\ \sin \beta_1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\underline{i}_O = \mathbf{T} [i_u \quad i_v \quad i_w]^T \triangleq \|\underline{i}_O\| \begin{bmatrix} \cos \beta_0 \\ \sin \beta_0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) สามารถมองได้ว่าการทำงานของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์คือการแปลงเชิงเรขาคณิตที่แปลงเวกเตอร์แรงดันด้านเข้า \underline{v}_I และเวกเตอร์กระแสด้านออก \underline{i}_O ไปเป็นเวกเตอร์แรงดันด้านออก \underline{v}_O และเวกเตอร์กระแสด้านเข้า \underline{i}_I ด้วยเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ โดยที่เมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ มีความสัมพันธ์กับเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} ดังสมการที่ (3.20)

$$\mathbf{M}_{2 \times 2} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{T}^T = \mathbf{T} \cdot \mathbf{M}' \cdot \mathbf{T}^T \quad (3.20)$$

โจทย์ที่พิจารณาในที่นี้คือ การคำนวณหาค่าเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ เมื่อกำหนดค่า
 เวกเตอร์แรงดันด้านเข้า \underline{v}_1 และเวกเตอร์แรงดันด้านออก \underline{v}_o จากสมการที่ (3.14), (3.16)-(3.17)
 และสมการที่ (3.20) เมื่อใช้พีชคณิตของเมทริกซ์จะได้คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต
 $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ ดังสมการที่ (3.21) โดยที่ a และ b คือพารามิเตอร์อิสระ

$$\mathbf{M}_{2 \times 2} = \frac{\underline{v}_o \underline{v}_1^T}{\|\underline{v}_1\|^2} + \frac{a \underline{v}_o (\mathbf{J} \underline{v}_1)^T}{\|\underline{v}_1\|^2} + \frac{b \mathbf{J} \underline{v}_o (\mathbf{J} \underline{v}_1)^T}{\|\underline{v}_1\|^2} \quad (3.21)$$

โดยที่

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อแทนค่าเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ จากสมการที่ (3.21) ลงในสมการที่ (3.14) และ
 สมการที่ (3.15) จะได้เวกเตอร์ของแรงดันด้านออกและเวกเตอร์กระแสด้านเข้าดังนี้

$$\underline{v}_o = \left\{ \frac{\underline{v}_o \underline{v}_1^T}{\|\underline{v}_1\|^2} + \frac{a \underline{v}_o (\mathbf{J} \underline{v}_1)^T}{\|\underline{v}_1\|^2} + \frac{b \mathbf{J} \underline{v}_o (\mathbf{J} \underline{v}_1)^T}{\|\underline{v}_1\|^2} \right\} \underline{v}_1 \quad (3.22)$$

$$\underline{i}_1 = \left\{ \frac{\underline{v}_1 \underline{v}_o^T}{\|\underline{v}_1\|^2} + \frac{a \mathbf{J} \underline{v}_1 \underline{v}_o^T}{\|\underline{v}_1\|^2} + \frac{b \mathbf{J} \underline{v}_1 (\mathbf{J} \underline{v}_o)^T}{\|\underline{v}_1\|^2} \right\} \underline{i}_o \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.22) เมื่อกระจายพจน์ต่าง ๆ ภายในวงเล็บโดยคูณเวกเตอร์แรงดันด้าน
 เข้า \underline{v}_1 กับเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ จะพบว่าเวกเตอร์แรงดันด้านออกนั้นกำหนดโดยพจน์แรก
 เท่านั้นโดยเป็นอิสระจากพารามิเตอร์อิสระ a และพารามิเตอร์อิสระ b

$$\underline{v}_o = \frac{\underline{v}_o \underline{v}_1^T \underline{v}_1}{\|\underline{v}_1\|^2} + \frac{a \underline{v}_o (\mathbf{J} \underline{v}_1)^T \underline{v}_1}{\|\underline{v}_1\|^2} + \frac{b \mathbf{J} \underline{v}_o (\mathbf{J} \underline{v}_1)^T \underline{v}_1}{\|\underline{v}_1\|^2} \quad (3.24)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (3.23) เมื่อกระจายพจน์ต่าง ๆ ภายในวงเล็บโดยคูณ
 เวกเตอร์กระแสด้านออกกับเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ จะพบว่าองค์ประกอบของเวกเตอร์กระแส
 ด้านเข้าในส่วนที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ของแรงดันด้านเข้าหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือกระแสด้านเข้าที่
 สร้างกำลังจินตภาพ(Reactive current component) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพารามิเตอร์อิสระ

a และพารามิเตอร์อิสระ b ดังแสดงในสมการที่ (3.26) ซึ่งจะได้ข้อสรุปว่ากำลังจินตภาพด้านเข้า มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังจริงด้านออกผ่านพารามิเตอร์อิสระ a และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังจินตภาพด้านออกผ่านพารามิเตอร์อิสระ b

$$\left. \begin{aligned} \underline{i}_I &= \underbrace{\frac{\overbrace{v_I v_O^T}^{p_o} \underline{i}_O}{\|v_I\|^2}}_{\text{Active Current}} + \underbrace{\frac{a \overbrace{J v_I v_O^T}^{p_o} \underline{i}_O}{\|v_I\|^2}}_{\text{Reactive Current}} + \underbrace{\frac{b \overbrace{J v_I (J v_O)^T}^{-q_o} \underline{i}_O}{\|v_I\|^2}}_{\text{Reactive Current}} \\ p_i &\leftarrow p_o \\ q_i &\leftarrow p_o \\ q_i &\leftarrow q_o \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

$$\underline{i}_I = \underbrace{\frac{\overbrace{v_I v_O^T}^{p_i} \underline{i}_O}{\|v_I\|^2}}_{\text{Active Current}} + \underbrace{J \frac{\overbrace{v_I (ap_o - bq_o)}^{q_i}}{\|v_I\|^2}}_{\text{Reactive Current}} \quad (3.26)$$

คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} สามารถหาได้จากคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ ในสมการที่ (3.21) โดยการแปลงกลับจากสมการที่ (3.20) ได้เป็นดังสมการที่ (3.27) และ (3.28)

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{M}' + \mathbf{M}_0 \\ \mathbf{M}' &= \mathbf{T}^T \mathbf{M}_{2 \times 2} \mathbf{T} = \mathbf{M}_u + \mathbf{M}_p + \mathbf{M}_q \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_u &= \frac{1}{\|v_I\|^2} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p & v_o & v_n \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_p &= \frac{a}{\sqrt{3} \|v_I\|^2} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n - v_o & v_p - v_n & v_o - v_p \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_q &= \frac{b}{3 \|v_I\|^2} \begin{bmatrix} v_w - v_v \\ v_u - v_w \\ v_v - v_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n - v_o & v_p - v_n & v_o - v_p \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

สมการที่ (3.27) และ (3.28) ซึ่งให้เห็นว่าเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} แสดงได้ในรูปของผลรวมของเมทริกซ์ 4 พจน์ ได้แก่ (1) เมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M}_u ซึ่งเป็นส่วนที่สร้างองค์ประกอบของเวกเตอร์กระแสด้านเข้าที่ขนานกับเวกเตอร์แรงดันด้านเข้า (Active current component) (2) เมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M}_p ที่สร้างองค์ประกอบของเวกเตอร์กระแสด้านเข้าที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์แรงดันด้านเข้าโดยมีขนาดแปรตามกำลังจริงด้านออก (3) เมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M}_q ที่สร้างองค์ประกอบของเวกเตอร์กระแสด้านเข้าที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์แรงดันด้านเข้าโดยมีขนาดแปรตามกำลังจินตภาพด้านออก และ (4) เมทริกซ์การมอดูเลตลำดับศูนย์ \mathbf{M}_0 ที่เป็นส่วนที่สร้างแรงดันลำดับศูนย์แต่ไม่มีผลต่อกระแสด้านเข้า

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่กล่าวมาทั้งหมดและคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} มาประยุกต์ใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับ และปรับรูปสมการที่ (3.10) ให้คล้ายคลึงกับสมการที่ (2.6) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{up} & 1 - m_{up} - m_{un} & m_{un} \\ m_{vp} & 1 - m_{vp} - m_{vn} & m_{vn} \\ m_{wp} & 1 - m_{wp} - m_{wn} & m_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$\begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_o = \begin{bmatrix} m_{up} \\ m_{vp} \\ m_{wp} \end{bmatrix} v_p + \begin{bmatrix} -m_{up} - m_{un} \\ -m_{vp} - m_{vn} \\ -m_{wp} - m_{wn} \end{bmatrix} v_o + \begin{bmatrix} m_{un} \\ m_{vn} \\ m_{wn} \end{bmatrix} v_n \quad (3.30)$$

และจะได้ฟังก์ชันการมอดูเลตที่สร้างแรงดันด้านออก v_u, v_v, v_w เทียบกับกับบัส (o) ดังสมการที่ (3.31) เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.31) ประกอบกับรูปที่ 3.1 จะพบว่าสมการที่ (3.31) ตรงกับสมการที่ (2.6) เนื่องจาก $v_p - v_o = v_{C1}$ และ $v_n - v_o = -v_{C2}$

$$\begin{bmatrix} v_{uo}^* \\ v_{vo}^* \\ v_{wo}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{up} \\ m_{vp} \\ m_{wp} \end{bmatrix} (v_p - v_o) + \begin{bmatrix} m_{uo} \\ m_{vo} \\ m_{wo} \end{bmatrix} (0) + \begin{bmatrix} m_{un} \\ m_{vn} \\ m_{wn} \end{bmatrix} (v_n - v_o) \quad (3.31)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (3.31) ใหม่โดยแยกพจน์ของฟังก์ชันการมอดูเลตแรงดันลำดับศูนย์ออกจากฟังก์ชันการมอดูเลตดังสมการที่ (3.32) และจากเมทริกซ์การมอดูเลตในสมการที่ (3.27) - (3.28) และ (3.10) จะได้ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{ij}^* ของบัสบวกและบัสลบดังสมการที่ (3.33) และ (3.34) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} v_{uo}^* \\ v_{vo}^* \\ v_{wo}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_o \\ v_o \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{m}_{up} + x \\ \dot{m}_{vp} + x \\ \dot{m}_{wp} + x \end{bmatrix} (v_p - v_o) + \begin{bmatrix} \dot{m}_{un} + z \\ \dot{m}_{vn} + z \\ \dot{m}_{wn} + z \end{bmatrix} (v_n - v_o) \quad (3.32)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_{up} \\ \dot{m}_{vp} \\ \dot{m}_{wp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_u}{\|y_I\|^2} \left(v_p + \frac{a}{\sqrt{3}} (v_n - v_o) \right) + \frac{b}{3\|y_I\|^2} (v_w - v_v) (v_n - v_o) \\ \frac{v_v}{\|y_I\|^2} \left(v_p + \frac{a}{\sqrt{3}} (v_n - v_o) \right) + \frac{b}{3\|y_I\|^2} (v_u - v_w) (v_n - v_o) \\ \frac{v_w}{\|y_I\|^2} \left(v_p + \frac{a}{\sqrt{3}} (v_n - v_o) \right) + \frac{b}{3\|y_I\|^2} (v_v - v_u) (v_n - v_o) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_{un} \\ \dot{m}_{vn} \\ \dot{m}_{wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_u}{\|y_I\|^2} \left(v_n + \frac{a}{\sqrt{3}} (v_o - v_p) \right) + \frac{b}{3\|y_I\|^2} (v_w - v_v) (v_o - v_p) \\ \frac{v_v}{\|y_I\|^2} \left(v_n + \frac{a}{\sqrt{3}} (v_o - v_p) \right) + \frac{b}{3\|y_I\|^2} (v_u - v_w) (v_o - v_p) \\ \frac{v_w}{\|y_I\|^2} \left(v_n + \frac{a}{\sqrt{3}} (v_o - v_p) \right) + \frac{b}{3\|y_I\|^2} (v_v - v_u) (v_o - v_p) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\text{โดยที่} \quad \|y_I\|^2 = v_p^2 + v_o^2 + v_n^2 \quad (3.35)$$

สมการที่ (3.33) และ (3.34) คือ สมการหลักที่ใช้ในการมอดูเลตที่นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้ โดย a, b คือค่าพารามิเตอร์อิสระที่สามารถเลือกได้ภายใต้ขอบเขตที่ไม่ทำให้เกิดการมอดูเลตเกิน ซึ่งเราสามารถใช้ความเป็นอิสระนี้ในการควบคุมแรงดันจุดกึ่งกลางบัสดำเนินการควบคุมกระแสในวงจรเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ได้ดังจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

ในส่วนเมทริกซ์การมอดูเลตลำดับศูนย์นั้น จากเงื่อนไข $m_{ip} \geq 0, m_{in} \geq 0$ ค่าฟังก์ชันการมอดูเลตลำดับศูนย์ (x, y) ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้เงื่อนไขนี้เป็นจริง แสดงได้ดังสมการที่ (3.36) ซึ่งเมื่อเลือกใช้ฟังก์ชันการมอดูเลตลำดับศูนย์ตามสมการที่ (3.36) จะได้ลักษณะการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นแบบข้าวเดียว 2 เฟส และ แบบข้าวคู่ 1 เฟสเสมอ

$$\left. \begin{aligned} x &= -\min(m'_{up}, m'_{vp}, m'_{wp}) \\ z &= -\min(m'_{un}, m'_{vn}, m'_{wn}) \end{aligned} \right\} \quad (3.36)$$

3.2 การควบคุมสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยการควบคุมกระแสนิวทรัล

สมการทั่วไปของกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตช์หาได้โดยการแทนสมการที่ (3.25) ลงไปในสมการที่ (3.37)

$$\begin{bmatrix} i_p & i_o & i_n \end{bmatrix}^T = \mathbf{T}^T \underline{i}_I \quad (3.37)$$

จะได้สมการทั่วไปของกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตช์ดังสมการที่ (3.38)

$$i_o = \frac{1}{\|\underline{v}_I\|^2} \left\{ v_o p_o + \frac{a}{\sqrt{3}} (v_p - v_n) p_o - \frac{b}{\sqrt{3}} (v_p - v_n) q_o \right\} \quad (3.38)$$

โดยที่กำลังจริงและกำลังจินตภาพทางด้านออกมีค่าดังนี้

$$p_o = \begin{bmatrix} v_u & v_v & v_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$q_o = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_v - v_w & v_w - v_u & v_u - v_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

สมการที่ (3.38) ซึ่งให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตช์ที่ไหลเข้าหรือออกจากจุดกึ่งกลางบัส กับค่ากำลังจริงและกำลังจินตภาพของโหลด และสามารถนำความสัมพันธ์นี้มาใช้ในการควบคุมกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตช์ได้ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์อิสระ a, b อย่างเหมาะสม

ในการควบคุมกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตช์ให้มีค่าเป็นศูนย์ ($i_o = 0$) ในทุกเงื่อนไขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับทั้งในกรณีที่สมดุลและไม่สมดุลทำได้โดยกำหนดพารามิเตอร์อิสระ a, b ให้เป็นดังสมการที่ (3.41)

$$\left. \begin{aligned} a = a_0 &= -\frac{v_o \sqrt{3}}{v_p - v_n} \\ b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

ในกรณีที่ต้องการควบคุมให้กระแสนิวทริลมีค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์เพื่อปรับสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ จะต้องปรับค่าพารามิเตอร์อิสระ a, b เพิ่มเติมจากที่คำนวณได้ในสมการที่ (3.41) โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์อิสระแต่ละตัวจะมีผลต่อกระแสนิวทริลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตช์ผ่านค่าสัมประสิทธิ์ตามสมการที่ (3.42) และ (3.43) ที่ชี้ให้เห็นว่าเครื่องหมายหรือทิศทางของกระแสนิวทริลที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับเครื่องหมายของกำลังจริงและกำลังจินตภาพในขณะนั้น

$$\frac{\partial i_o}{\partial a} = K_a = \frac{p_o (v_p - v_n)}{\sqrt{3} \|v_L\|^2} = \frac{p_o E_d}{\sqrt{3} \|v_L\|^2} \quad (3.42)$$

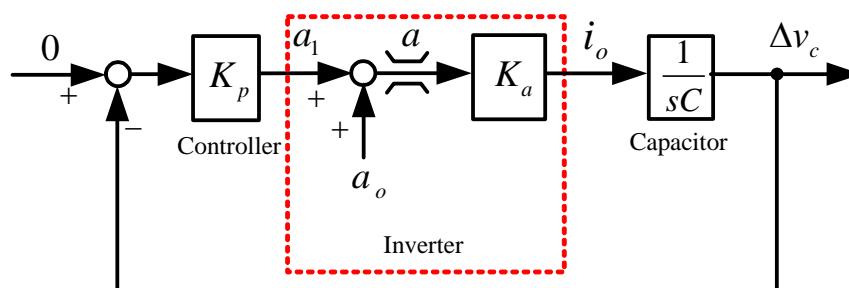
$$\frac{\partial i_o}{\partial b} = K_b = -\frac{q_o (v_p - v_n)}{\sqrt{3} \|v_L\|^2} = -\frac{q_o E_d}{\sqrt{3} \|v_L\|^2} \quad (3.43)$$

ถ้าสมมติให้ตัวเก็บประจุของบัสบวกและบัสลบมีค่าเท่ากันจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนิวทริลกับผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุดังสมการที่ (3.45)

$$\frac{i_o}{2} = C \frac{dv_{C1}}{dt} = -C \frac{dv_{C2}}{dt} \quad (3.44)$$

$$i_o = C \frac{d(v_{C1} - v_{C2})}{dt} \quad (3.45)$$

สมการที่ (3.42) - (3.43) และ (3.45) สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมของการควบคุมกระแส นิวทริลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตช์เป็นศูนย์ผ่านค่าพารามิเตอร์อิสระได้ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ โดยที่ $\Delta v_C = v_{C1} - v_{C2}$ และ a_0 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้กระแสนิวทริลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตช์เป็นศูนย์ตามสมการที่ (3.41)



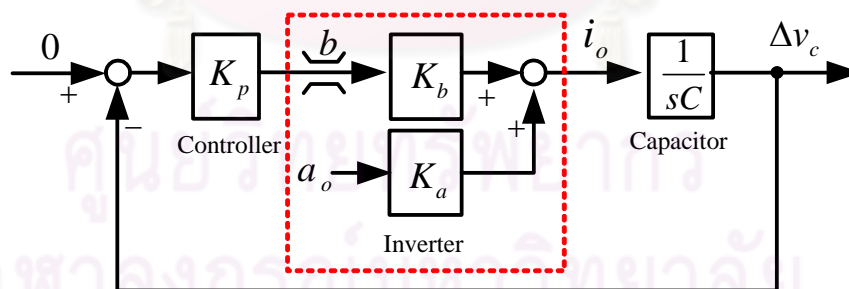
รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมของการควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง

จากรูปที่ 3.2 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของการควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงโดยใช้พารามิเตอร์อิสระ a ดังสมการที่ (3.46)

$$\frac{\Delta v_c}{\Delta v_{c.ref}} = \frac{1}{1+s/\omega_b} = \frac{1}{1+sC/K_a K_p} \quad (3.46)$$

และได้อัตราขยายป้อนกลับ (K_p) ของการควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงโดยใช้พารามิเตอร์อิสระ a ดังสมการที่ (3.47)

$$K_p = \frac{\omega_b C}{K_a} \quad (3.47)$$



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมของการควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ

ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 3.3 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของการควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพโดยใช้พารามิเตอร์อิสระ b ดังสมการที่ (3.48)

$$\frac{\Delta v_c}{\Delta v_{c.ref}} = \frac{1}{1+s/\omega_b} = \frac{1}{1+sC/K_b K_p} \quad (3.48)$$

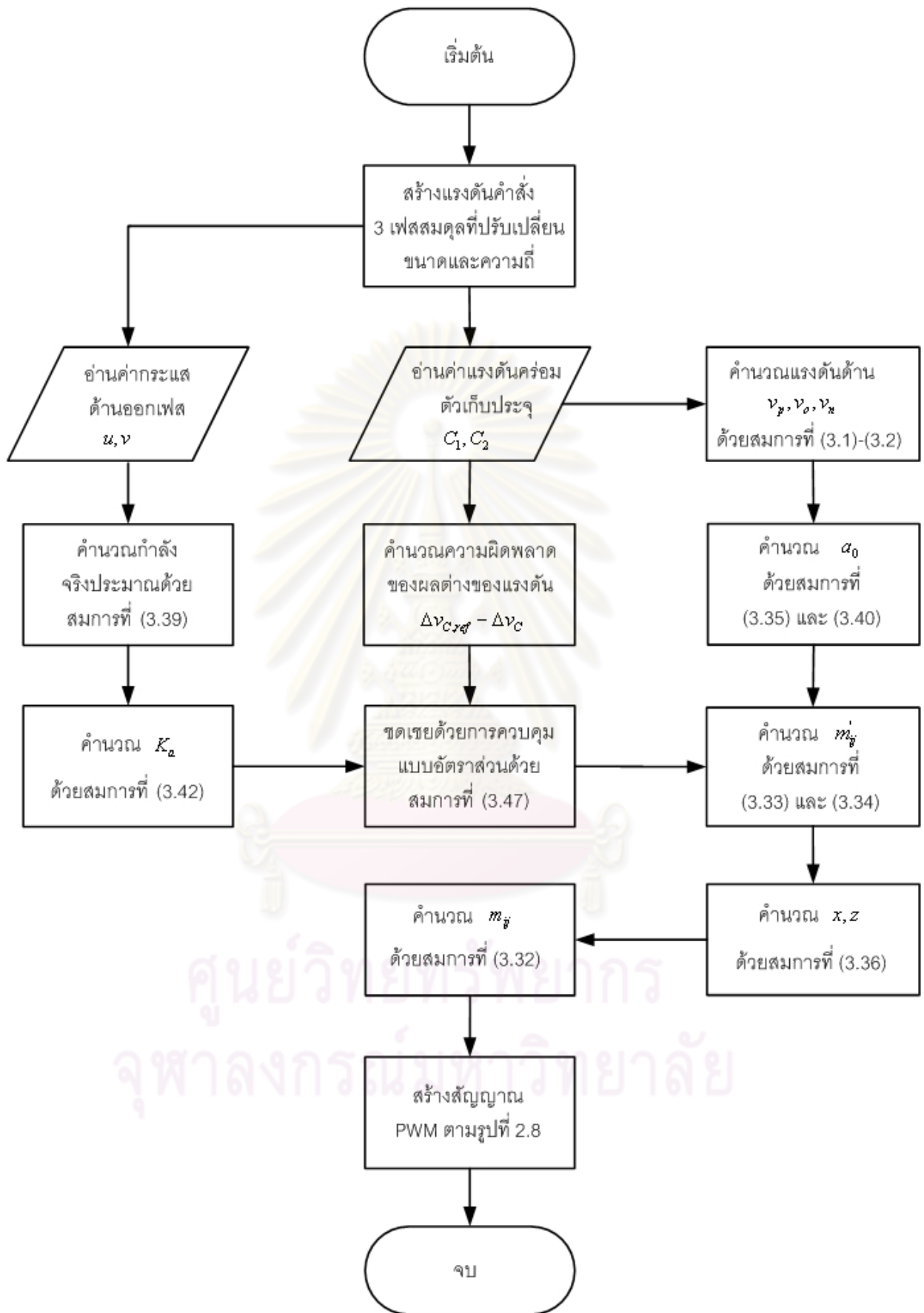
และได้อัตราขยายป้อนกลับ (K_p) ของการควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพโดยใช้พารามิเตอร์อิสระ b ดังสมการที่ (3.49)

$$K_p = \frac{\omega_b C}{K_b} \quad (3.49)$$

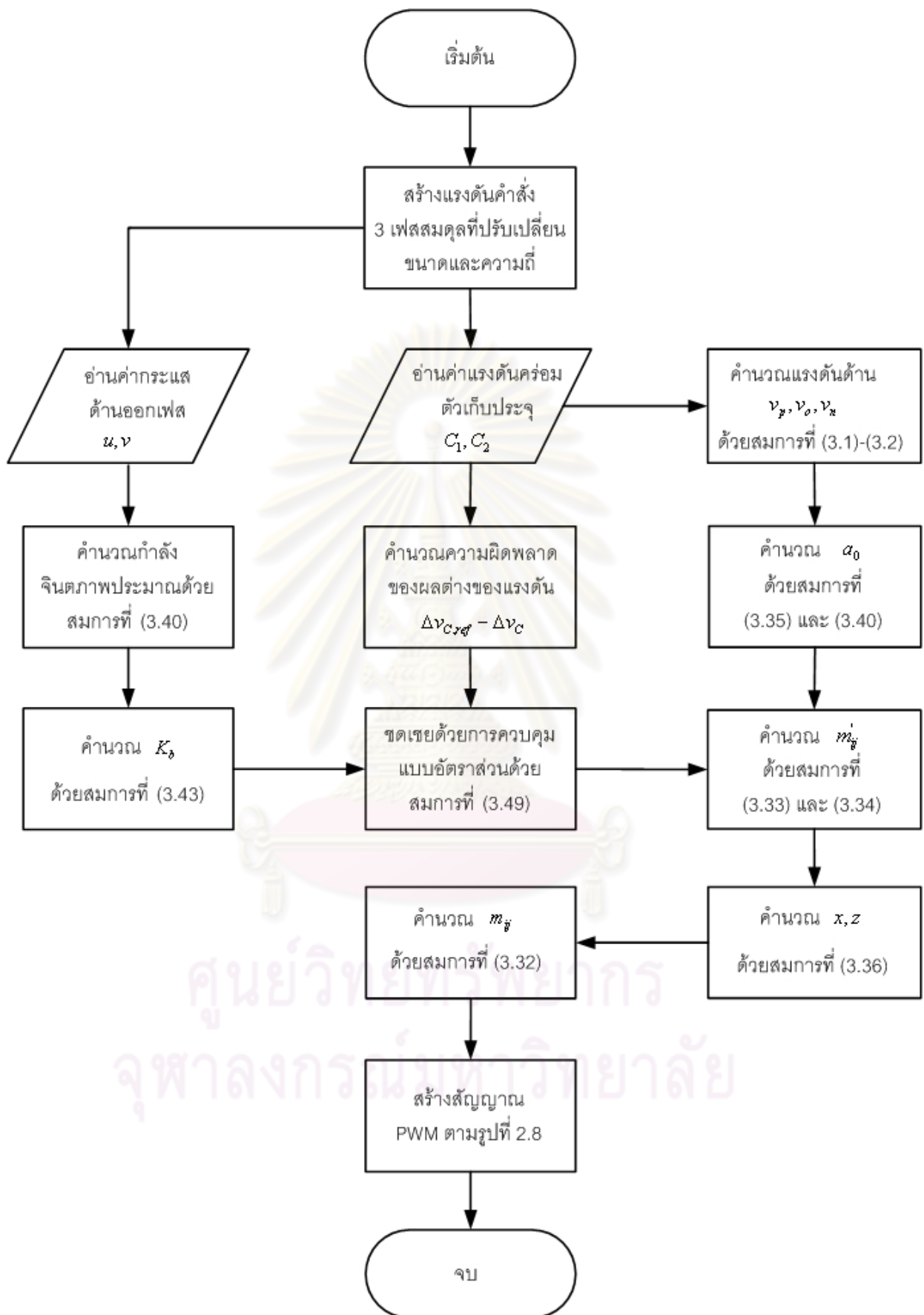
เนื่องด้วย ณ สภาวะการทำงานหนึ่ง ๆ ค่ากำลังด้านออกจะมีค่าคงที่ ดังนั้นการออกแบบอัตราขยายป้อนกลับ (K_p) เพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ (ω_b) ของการควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในรูปที่ 3.2 หรือ รูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นตัวกำหนดความเร็วในการควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุตามต้องการ จึงทำได้โดยง่ายโดยอาศัยสมการที่ (3.46) - (3.49)

โดยสรุปขั้นตอนการคำนวณในแต่ละครั้งของการสุ่มตัวอย่างเพื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงหรือกำลังจินตภาพสามารถเขียนเป็นแผนภาพไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.4 หรือ 3.5 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 ไตอะแกรมขั้นตอนการคำนวณเมื่อควบคุมผ่านกำลังจริงในแต่ละครั้งของการสุ่ม



รูปที่ 3.5 ไตอะแกรมขั้นตอนการคำนวณเมื่อควบคุมผ่านกำลังจินตภาพในแต่ละครั้งของการสุ่ม

บทที่ 4

ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองการทำงาน

4.1 ผลการจำลองการทำงาน

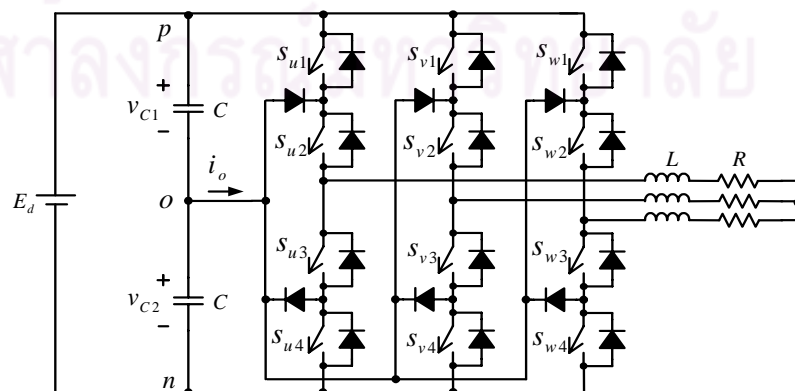
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อทดสอบความถูกต้องของวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอและตรวจสอบความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง ในการจำลองนั้นจะกำหนดให้แรงดันคำสั่งเป็นแรงดันสามเฟสสมดุลที่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังสมการที่ (4.1)

$$\begin{aligned}v_u^* &= \sqrt{2}V_{rms} \cos(2\pi f \cdot t) \\v_v^* &= \sqrt{2}V_{rms} \cos(2\pi f \cdot t - 2\pi/3) \\v_w^* &= \sqrt{2}V_{rms} \cos(2\pi f \cdot t + 2\pi/3)\end{aligned}\quad (4.1)$$

4.1.1 ผลการจำลองการทำงานด้วยวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอ

การจำลองในหัวข้อนี้ อินเวอร์เตอร์สามระดับจะมีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทานดังแสดงในรูปที่ 4.1 และใช้วิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอ เพื่อทดสอบความสามารถในการควบคุมสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากสภาวะไม่สมดุลไปสู่สภาวะสมดุล โดยอาศัยการควบคุมกระแสไหลผ่านกำลังจริงหรือกำลังจินตภาพ โดยมีข้อมูลที่ใช้ในการจำลองดังนี้คือ พารามิเตอร์ในการจำลองกรณีโหลดตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน

แรงดันคำสั่ง (V_{rms}) 156 V , ความถี่หลักมูล (f) 50 Hz , แรงดันบัล (E_d) 540 V ,
แบนด์วิดท์ (ω_b) 50 rad/sec , ตัวเก็บประจุที่บัล (C) 220 μ F , ความถี่การสวิตช์ (f_{sw}) 4 kHz ,
ตัวต้านทานที่โหลด (R) 30 Ω , ตัวเหนี่ยวนำที่โหลด (L) 65 mH



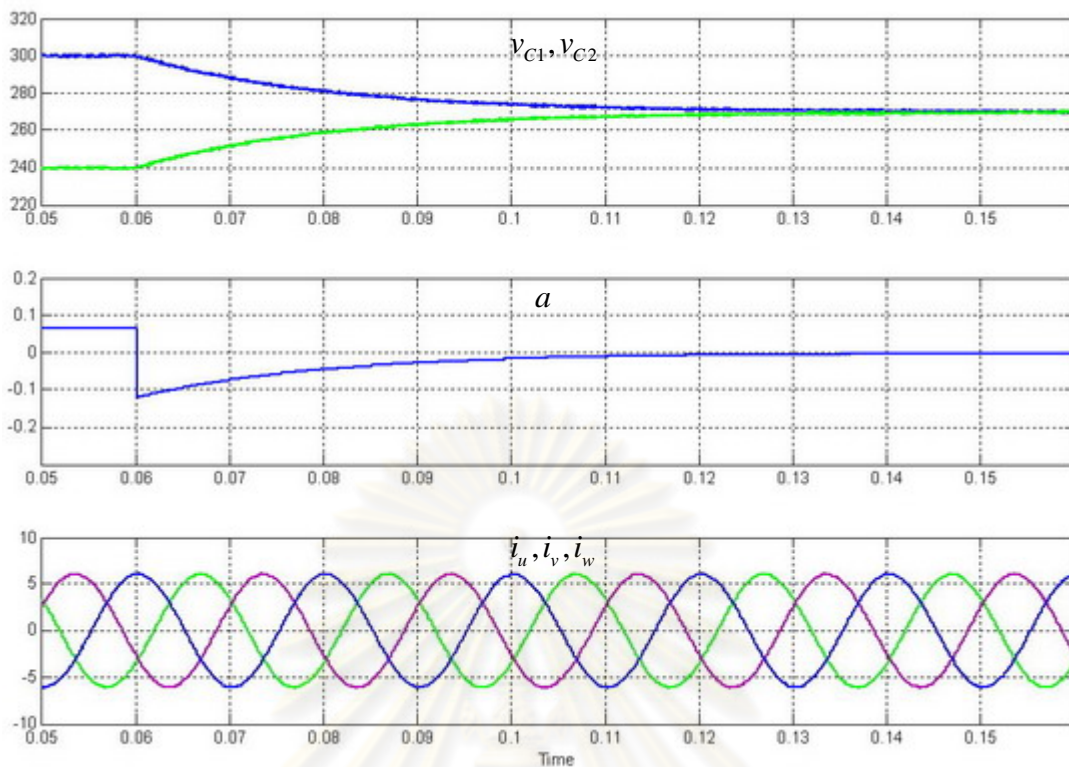
รูปที่ 4.1 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับกับโหลดตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน

รูปที่ 4.2 – 4.7 และรูปที่ 4.14 เป็นผลการจำลองการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะเข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 20 msec สอดคล้องกับค่าแบนด์วิดท์ที่กำหนด และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล จากลักษณะรูปคลื่นฟังก์ชันการมอดูเลตในรูปที่ 4.3 จะพบว่าในขณะหนึ่งจะมีเพียงหนึ่งเฟสที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของการมอดูเลตแบบซัฟฟ์ ส่วนอีกสองเฟสที่เหลือจะมีลักษณะตรงตามเงื่อนไขของการมอดูเลตแบบซัฟฟ์เดียว รูปคลื่นในรูปที่ 4.4, 4.5 และสเปกตรัมในรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ที่ไหลออกจากจุดกึ่งกลางบัสจะไม่มีค่าฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ และจากลักษณะการสวิตช์ของแรงดันในรูปที่ 4.6-4.7 จะพบว่าแรงดันที่ซัฟฟ์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะมีเพียงหนึ่งเฟสที่มีการสวิตช์แบบซัฟฟ์ ส่วนสองเฟสที่เหลือมีการสวิตช์แบบซัฟฟ์เดียว สอดคล้องกับค่าฟังก์ชันการมอดูเลตในรูปที่ 4.3

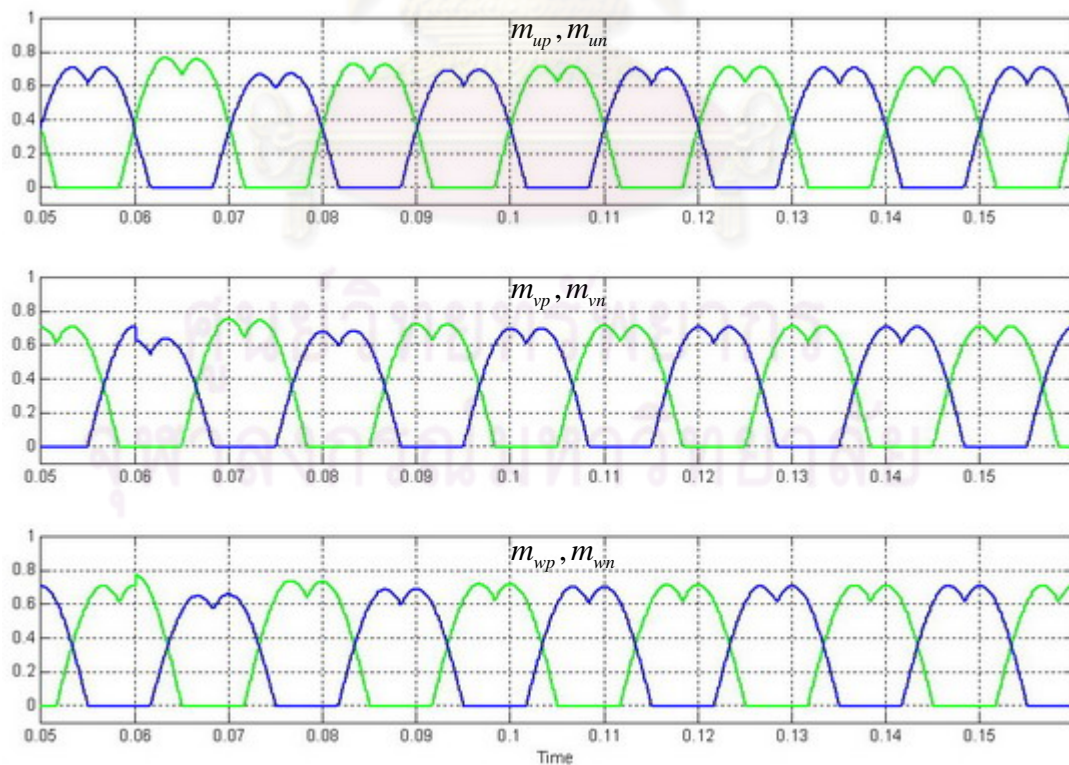
ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 4.8 – 4.13 และรูปที่ 4.15 เป็นผลการจำลองการควบคุมสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ ซึ่งผลที่ได้จะเหมือนกับกรณีที่ควบคุมผ่านกำลังจริงที่ได้กล่าวมาแล้ว ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะเข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 20 msec ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล รูปที่ 4.9, 4.12, และ 4.13 แสดงให้เห็นว่าแรงดันที่ซัฟฟ์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะมีเพียงหนึ่งเฟสที่มีการสวิตช์แบบซัฟฟ์ ส่วนสองเฟสที่เหลือมีการสวิตช์แบบซัฟฟ์เดียว รูปที่ 4.11 และสเปกตรัมในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่ากระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ที่ไหลออกจากบัสจะไม่มีค่าฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล

ดังนั้นโดยสรุปจากผลการจำลองการทำงานที่ได้แสดงมาทั้งหมด จะยืนยันได้ว่าวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอสามารถควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทุกประการ

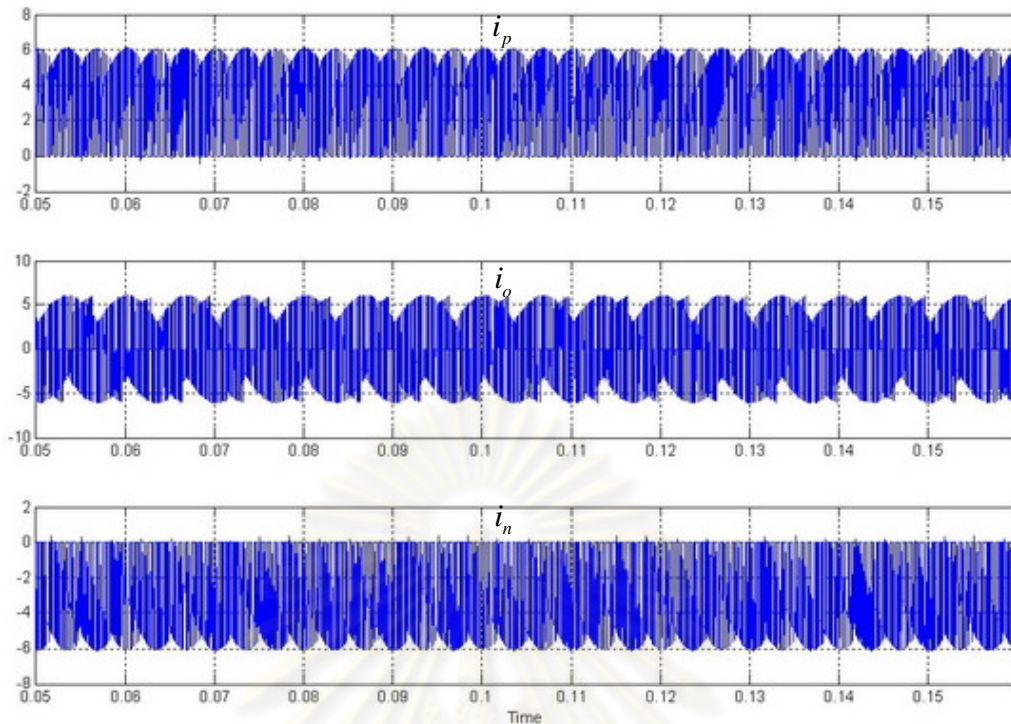
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



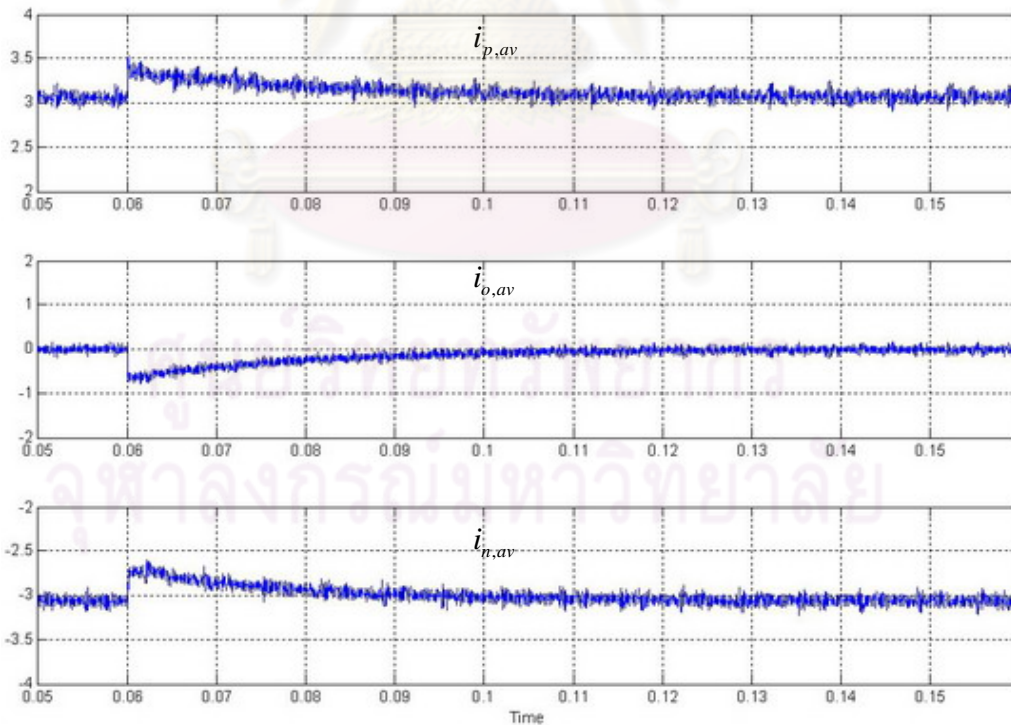
รูปที่ 4.2 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} พารามิเตอร์อิสระ a กระแสด้านออก i_u, i_v, i_w ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง)



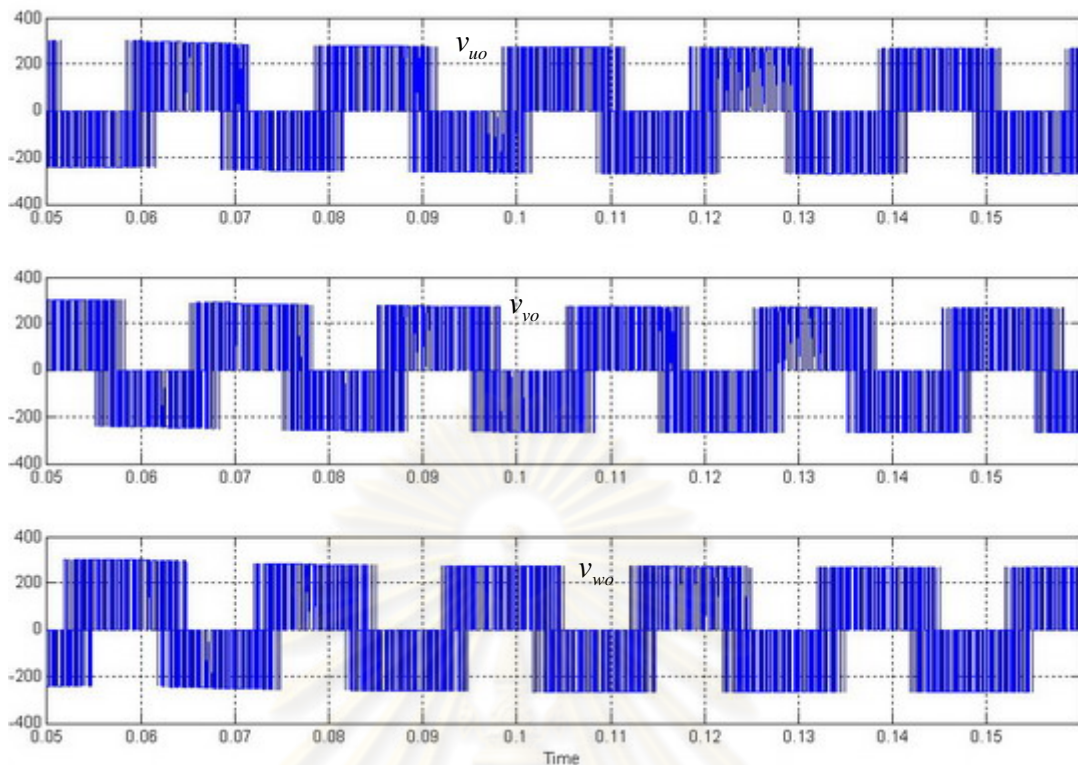
รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันการมอดูเลต $(m_{up}, m_{un}), (m_{vp}, m_{vn})$ และ (m_{wp}, m_{wn}) ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง)



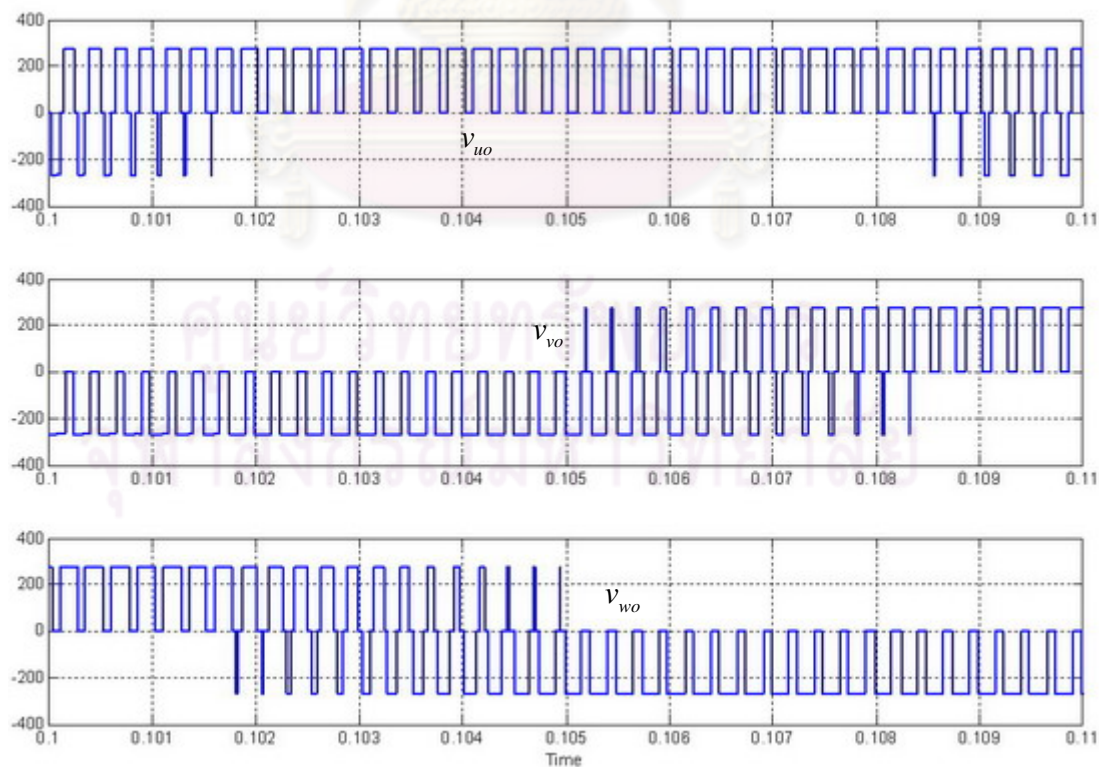
รูปที่ 4.4 กระแสที่ไหลออกจากบัสบวก i_p , กระแสนิวทรัล i_o และกระแสที่ไหลออกจากบัสลบ i_n ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง)



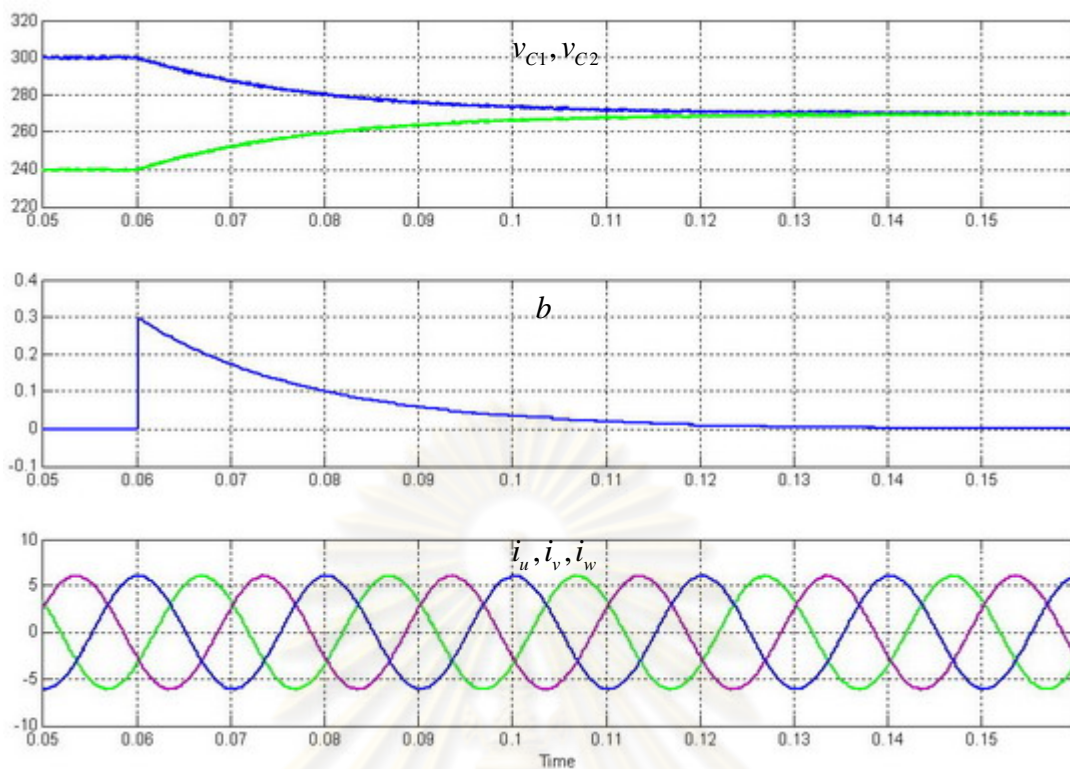
รูปที่ 4.5 กระแสบัสบวกเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{p,av}$ กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ และกระแสบัสลบเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{n,av}$ ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง)



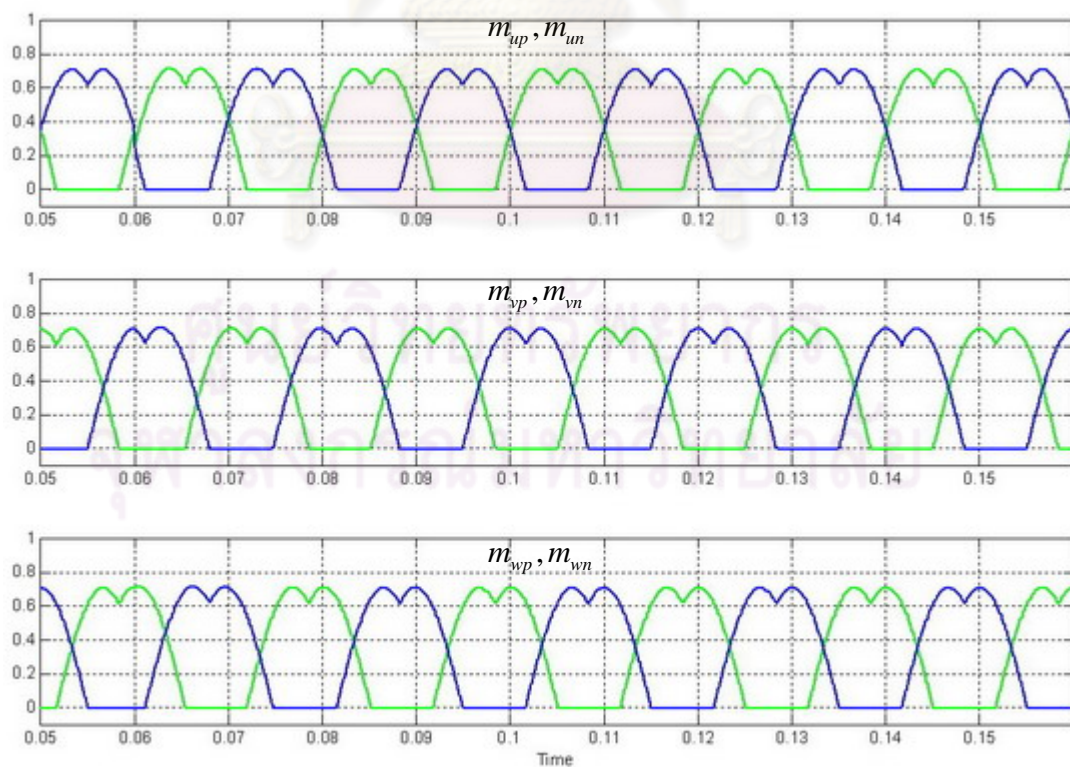
รูปที่ 4.6 แรงดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ผลการจำลอง)



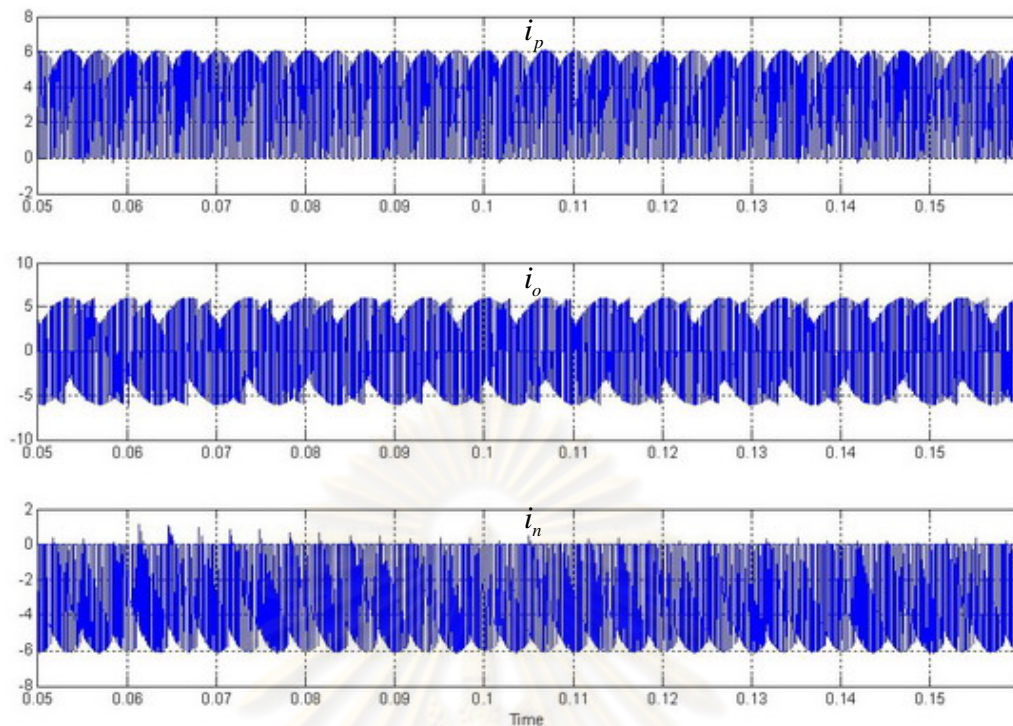
รูปที่ 4.7 แรงดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (ภาพขยายที่เวลา 0.01-0.011 วินาที) (ผลการจำลอง)



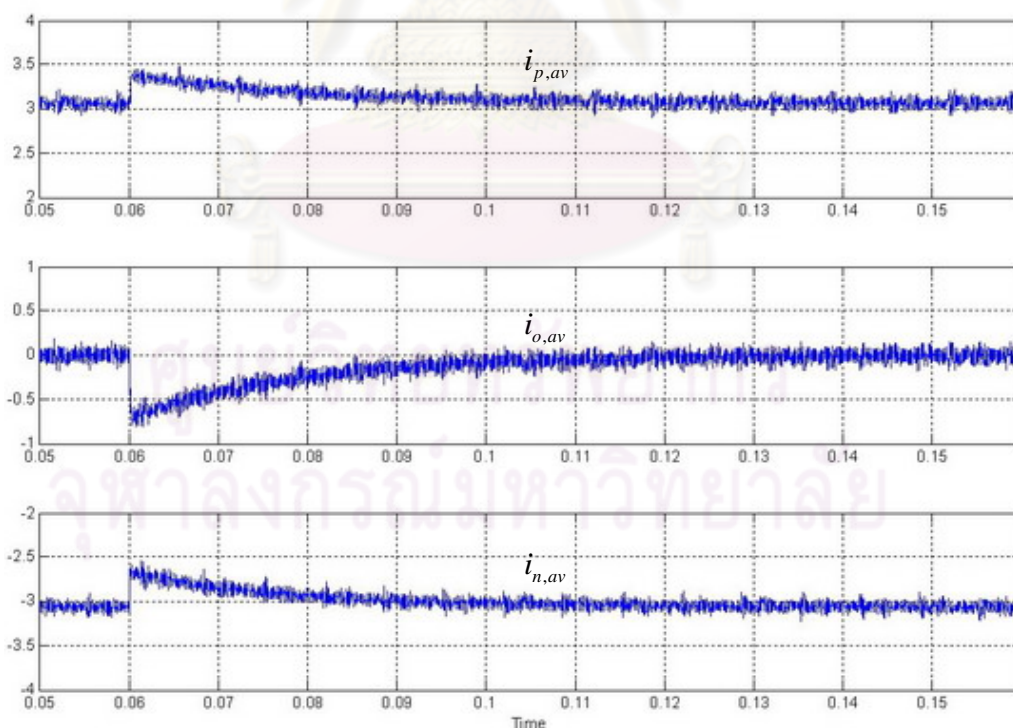
รูปที่ 4.8 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} พารามิเตอร์อิสระ b และ กระแสด้านออก i_u, i_v, i_w ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง)



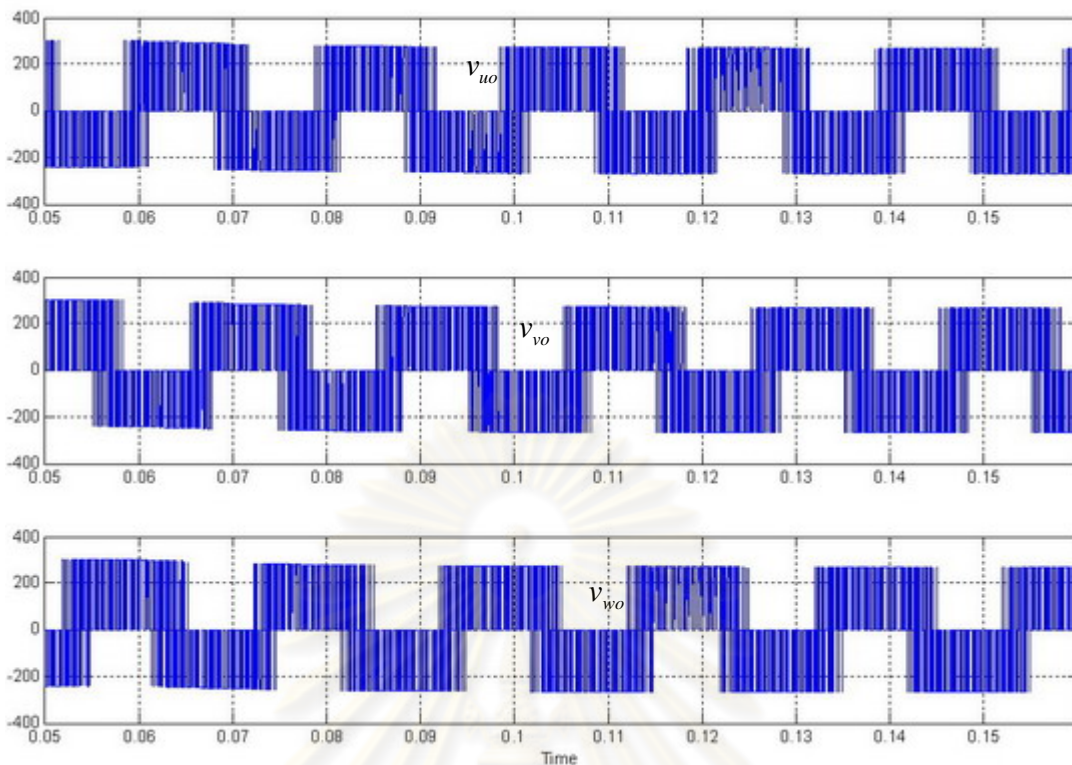
รูปที่ 4.9 ฟังก์ชันการมอดูเลต (m_{up}, m_{un}), (m_{vp}, m_{vn}) และ (m_{wp}, m_{wn}) ตามลำดับเมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง)



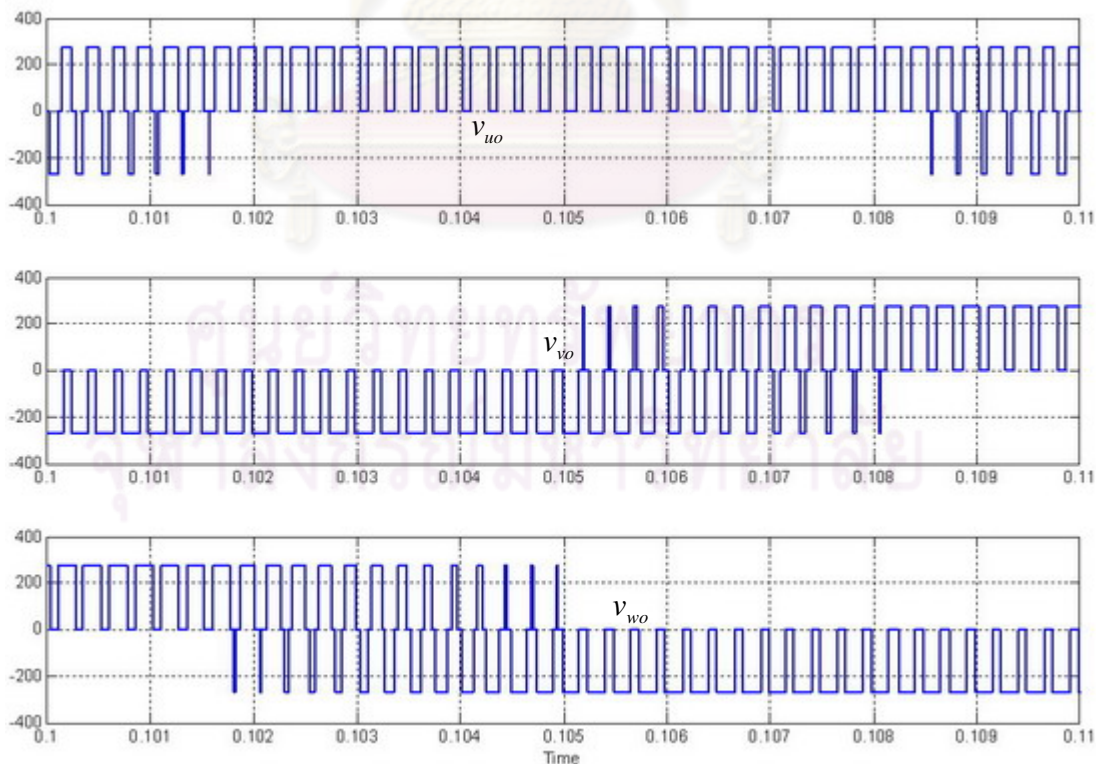
รูปที่ 4.10 กระแสที่ไหลออกจากขั้วบวก i_p กระแสนิวทรัล i_o และกระแสที่ไหลออกจากขั้วลบ i_n ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง)



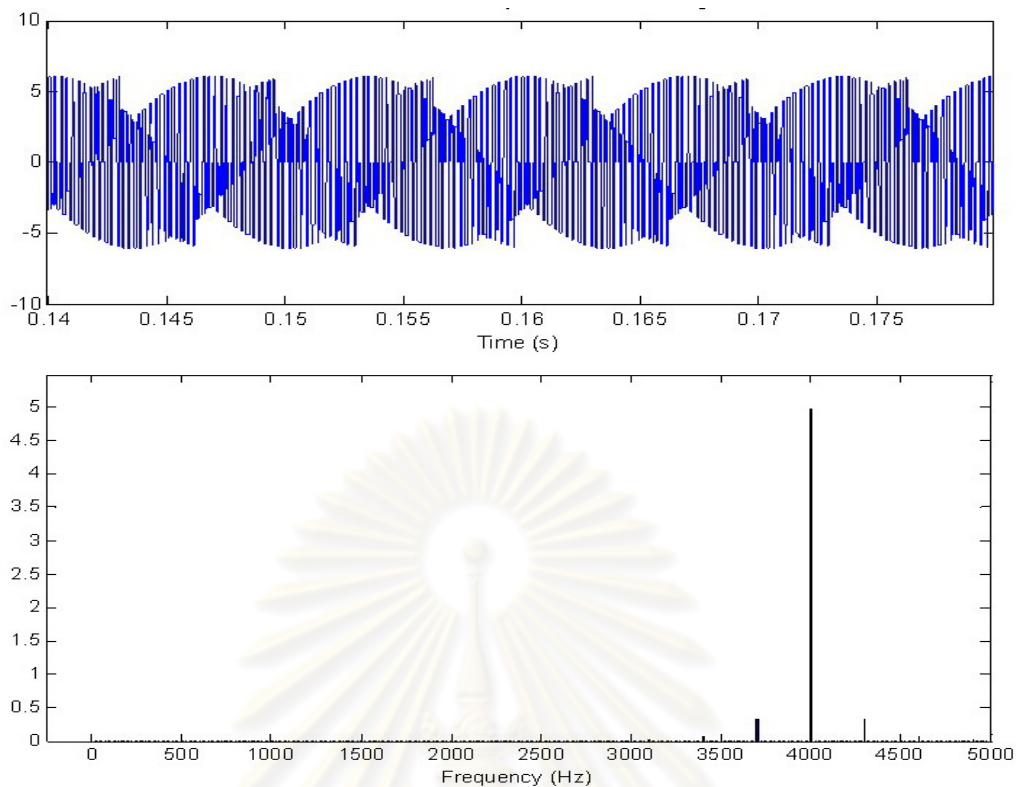
รูปที่ 4.11 กระแสขั้วบวกเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{p,av}$ กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ และกระแสขั้วลบเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{n,av}$ ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุขของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง)



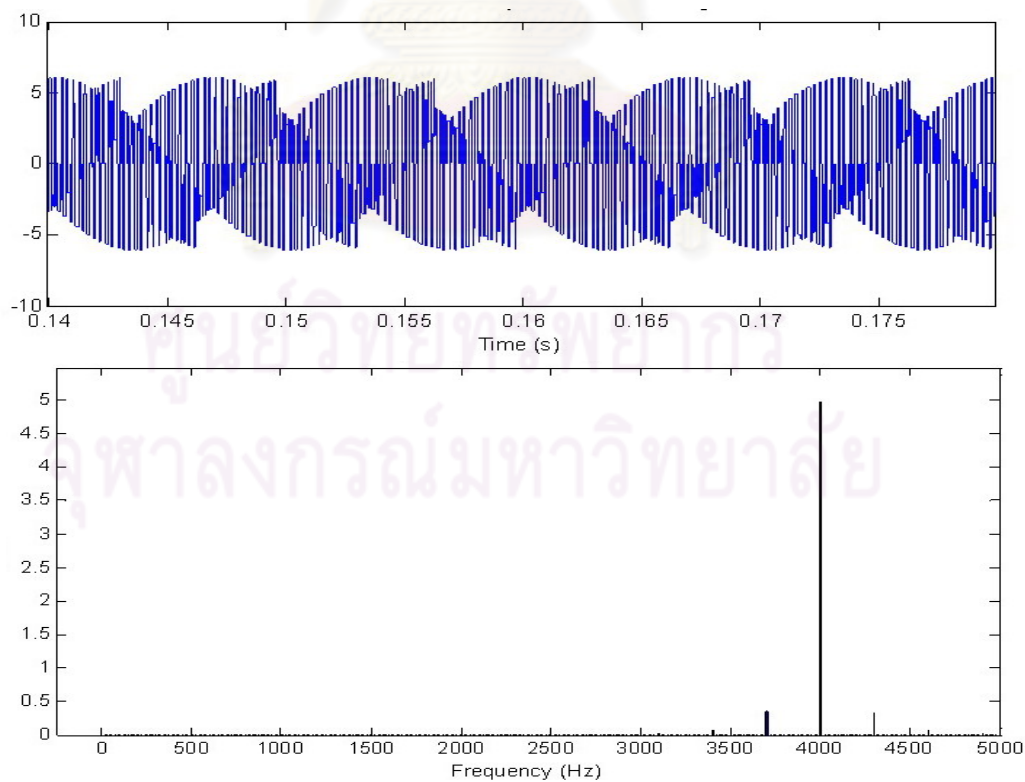
รูปที่ 4.12 แรงแดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของ
 แรงแดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ผลการจำลอง)



รูปที่ 4.13 แรงแดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส v_{uo}, v_{vo}, v_{wo} ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของ
 แรงแดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (ขยายที่เวลา 0.01-0.011 วินาที) (ผลการจำลอง)



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสไนวรัล i_o ที่เวลา 0.14-0.18 วินาทีเมื่อควบคุมสมดุลงผ่านกำลังจริง ในกรณีทีไหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน (ผลการจำลอง)

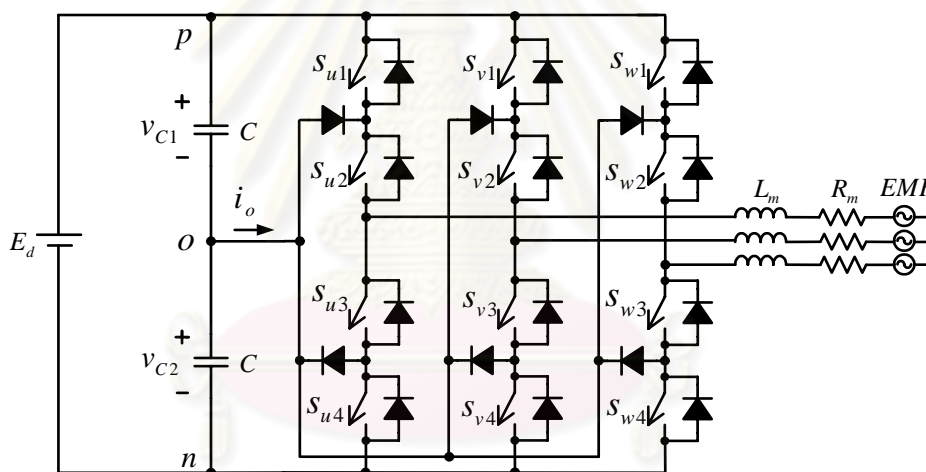


รูปที่ 4.15 รูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสไนวรัล i_o ที่เวลา 0.14-0.18 วินาทีเมื่อควบคุมสมดุลงผ่านกำลังจินตภาพ ในกรณีทีไหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน (ผลการจำลอง)

4.1.2 ผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองเปรียบเทียบการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับภายใต้เงื่อนไขโหลดที่อยู่ภายในและภายนอกขอบเขตที่ควบคุมได้ของกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อหนึ่งคาบการสวิตช์สำหรับการสวิตช์แบบซั้วเดี่ยวทั้งสามเฟสดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 โดยจะเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอกับวิธีที่น่าเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมา [5-6] ทั้งนี้ในการจำลองการทำงานจะใช้โหลดที่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน และมีการเปลี่ยนค่าแรงดันคำสั่งและแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายในโหลด เพื่อให้ได้ผลการจำลองที่มีค่ากำลังจริงและกำลังจินตภาพ(หรือตัวประกอบกำลัง)ที่ต้องการ โดยมีข้อมูลที่ใช้ในการจำลองดังนี้คือ พารามิเตอร์ในการจำลองกรณีโหลดมีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน

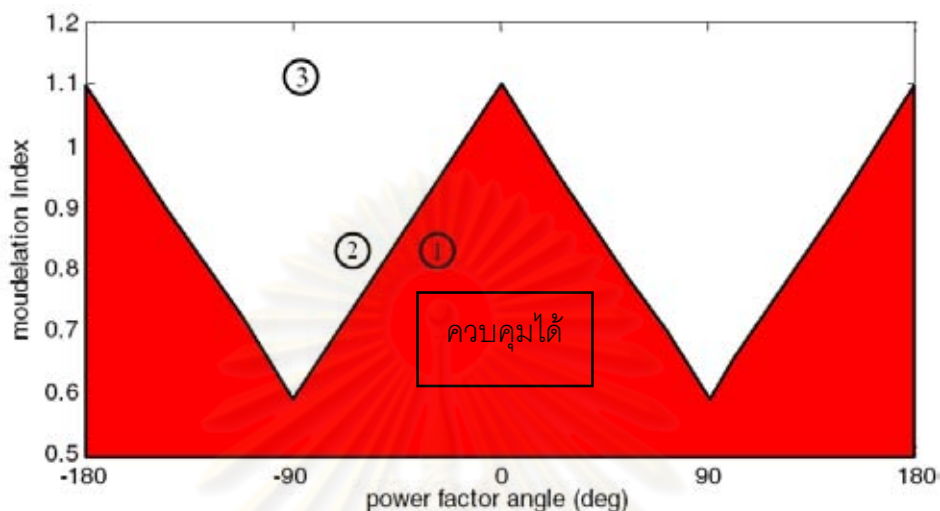
แบนด์วิดท์ (ω_b) 50 rad/sec , แรงดันบัส (E_d) 540 V , ตัวเก็บประจุที่บัส (C) 220 μF , ความถี่การสวิตช์ (f_{sw}) 4 kHz , ความถี่หลักมูล (f) 50 Hz , ตัวต้านทานที่โหลด (R_m) 2 Ω , ตัวเหนี่ยวนำที่โหลด (L_m) 24 mH



รูปที่ 4.16 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับกับโหลดที่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำภายใน

ในการจำลองเปรียบเทียบวิธีที่น่าเสนอกับงานวิจัยที่ผ่านมา นั้นจะกำหนดจุดทำงานภายใต้เงื่อนไขโหลดและดรรชนีการมอดูเลตที่ต่างกันจำนวน 3 จุดดังแสดงในรูปที่ 4.17 สำหรับแต่ละจุดทำงานนั้นจะทำการจำลองควบคุมสมดุลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีแบบใหม่ที่น่าเสนอโดยควบคุมผ่านกำลังจริงและควบคุมผ่านกำลังจินตภาพ เปรียบเทียบกับวิธีที่น่าเสนอในงานวิจัย [5] และงานวิจัย [6] จุดทำงานที่ 1 และ 2 จะมีสภาวะเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ไม่สมดุล ส่วนจุดทำงานที่ 3 มีสภาวะเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่สมดุล ข้อมูลรายละเอียดของแต่ละจุดทำงานเป็นดังต่อไปนี้คือ

จุดทำงาน 1 แรงดันคำสั่ง V_{rms} 156 V กำลังจินตภาพ q_o 970 Var กำลังจริง p_o 1300 W
 จุดทำงาน 2 แรงดันคำสั่ง V_{rms} 156 V กำลังจินตภาพ q_o 1300 Var กำลังจริง p_o 970 W
 จุดทำงาน 3 แรงดันคำสั่ง V_{rms} 220 V กำลังจินตภาพ q_o 2300 Var กำลังจริง p_o 200 W



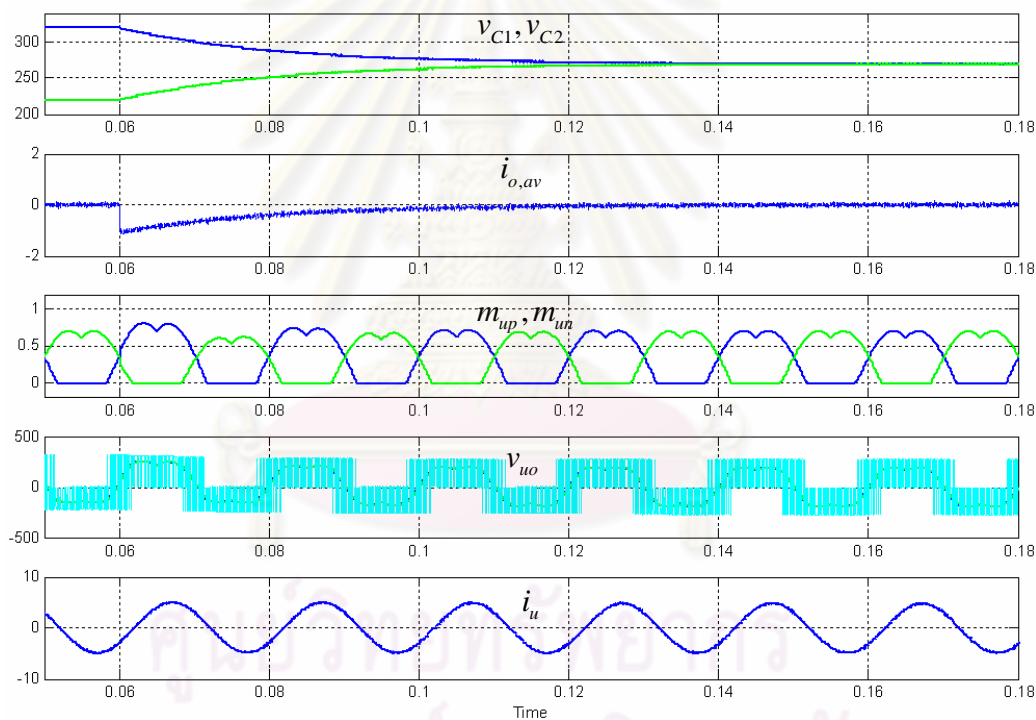
รูปที่ 4.17 จุดทำงานของการจำลองเปรียบเทียบระหว่างวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอ
 กับวิธีที่น่าเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมา

รูปที่ 4.18-4.19 เป็นผลการจำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขตัวประกอบกำลังที่สูงและมี
 ค่าดัชนีการมอดูเลตที่ไม่สูง โดยที่จุดทำงานของการจำลองนี้อยู่ในย่านการทำงานที่ควบคุมกระแส
 นิวัตริลให้เป็นศูนย์ได้ของการมอดูเลตแบบซัวต์เดี่ยวทั้งสามเฟส จากสถานะเริ่มต้นที่แรงดันคร่อมตัว
 เก็บประจุไม่สมดุล การปรับสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะกระทำผ่านกำลังจริงในรูปที่
 4.18 และผ่านกำลังจินตภาพในรูปที่ 4.19 ซึ่งจะพบว่าผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะ
 เข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 20 msec และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดัน
 คร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล

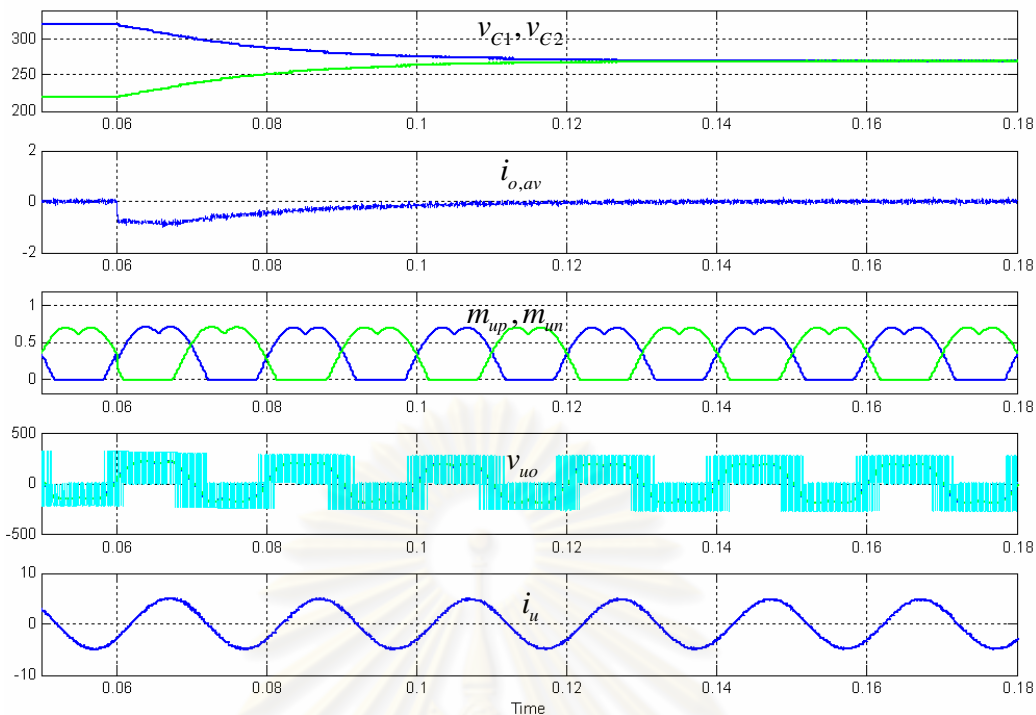
รูปที่ 4.20-4.21 เป็นผลการจำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขตัวประกอบกำลังที่สูงและมี
 ค่าดัชนีการมอดูเลตที่สูงซึ่งเป็นจุดการทำงานเดียวกันกับการจำลองในรูปที่ 4.18-4.19 โดยที่
 สถานะเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่สมดุลเช่นกัน การควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัว
 เก็บประจุใช้วิธีที่น่าเสนอในงานวิจัย[5] จากผลในรูปที่ 4.20 จะพบว่าผลต่างของแรงดันคร่อมตัว
 เก็บประจุจะเข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 20 msec และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่
 ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล ส่วนรูปที่ 4.21
 ใช้วิธีการควบคุมที่เสนอในงานวิจัย[6] ซึ่งจะพบว่าผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะเข้าสู่
 ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 20 msec และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดัน

คร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลแต่จะพบว่ากระแสในทรานซิสเตอร์เฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์มีผลตอบสนองที่ไม่ต่อเนื่อง ทำให้ยากต่อการออกแบบตัวควบคุม ในการจำลองนี้ได้ทดลองปรับตัวควบคุมจนได้ค่าที่ให้ผลตอบสนองที่เข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 20 msec ตามที่ต้องการ

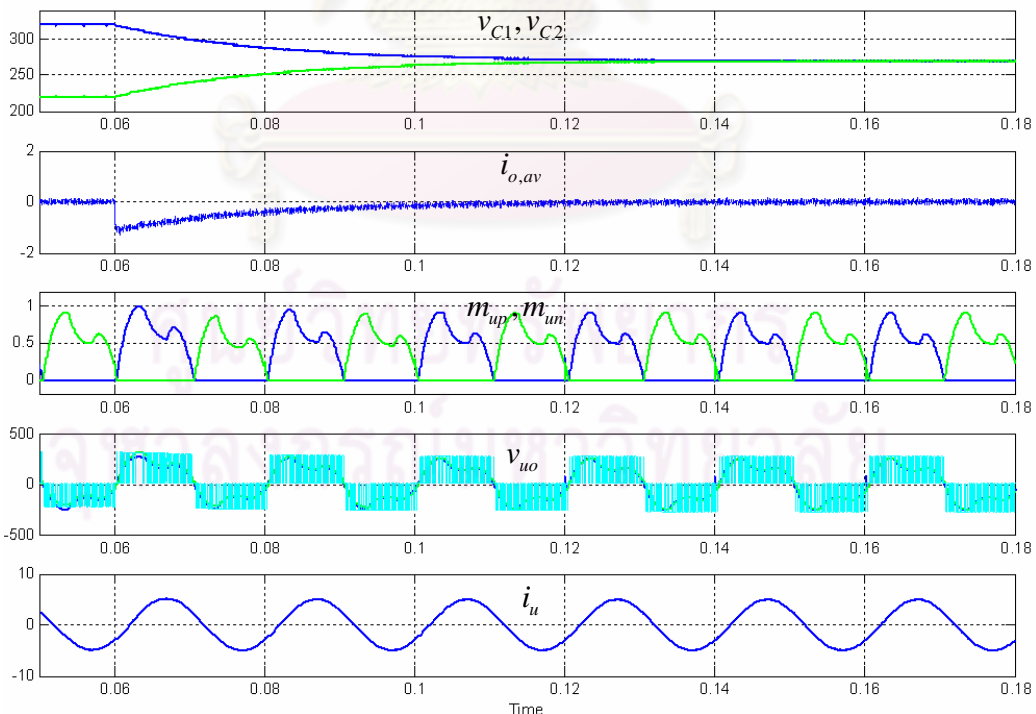
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.18-4.21 สามารถสรุปได้ว่า สำหรับจุดทำงานในย่านนี้ วิธีการมอดูเลตทุกวิธีที่พิจารณาสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี โดยสามารถปรับให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุกลับมาสมดุลได้ และกระแสในทรานซิสเตอร์ก็ไม่มีองค์ประกอบที่ความถี่ต่ำปะปนด้วยเหมือนในกรณีการมอดูเลตแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่อาจมีความแตกต่างกันในแง่ความยากง่ายของการออกแบบตัวควบคุมให้ได้ผลตอบสนองของวงรอบการควบคุมตามที่ต้องการ



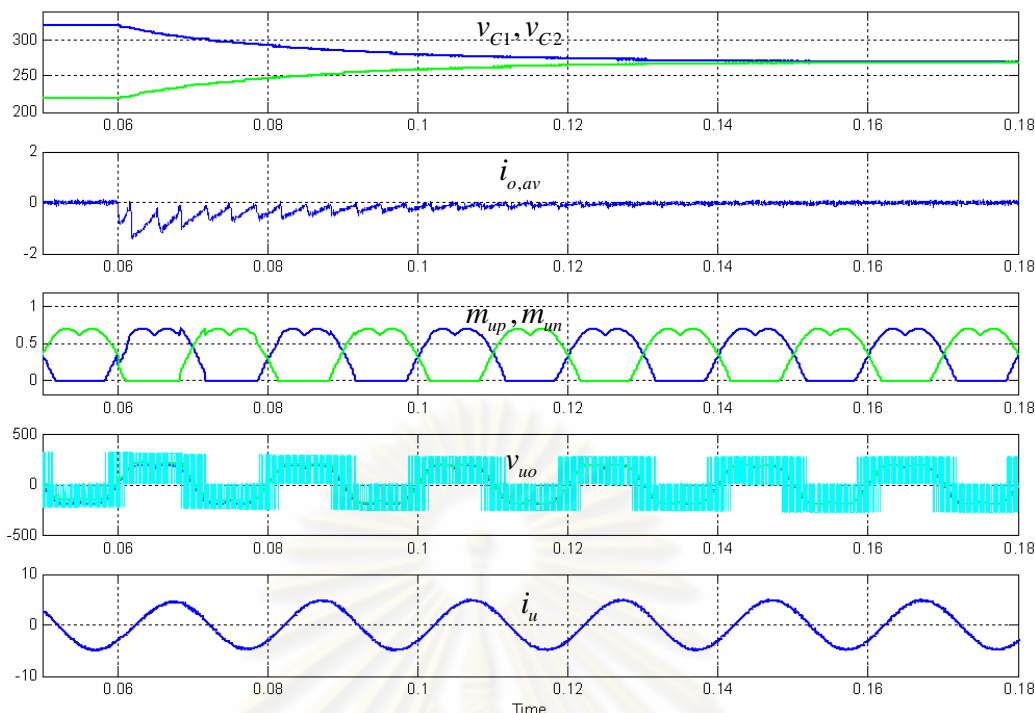
รูปที่ 4.18 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสในทรานซิสเตอร์เฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง ที่จุดทำงานที่ 1 โดยบัสไม่สมดุลในสภาวะเริ่มต้น (ผลการจำลอง)



รูปที่ 4.19 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.18 (ผลการจำลอง)



รูปที่ 4.20 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [5] ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.18 (ผลการจำลอง)



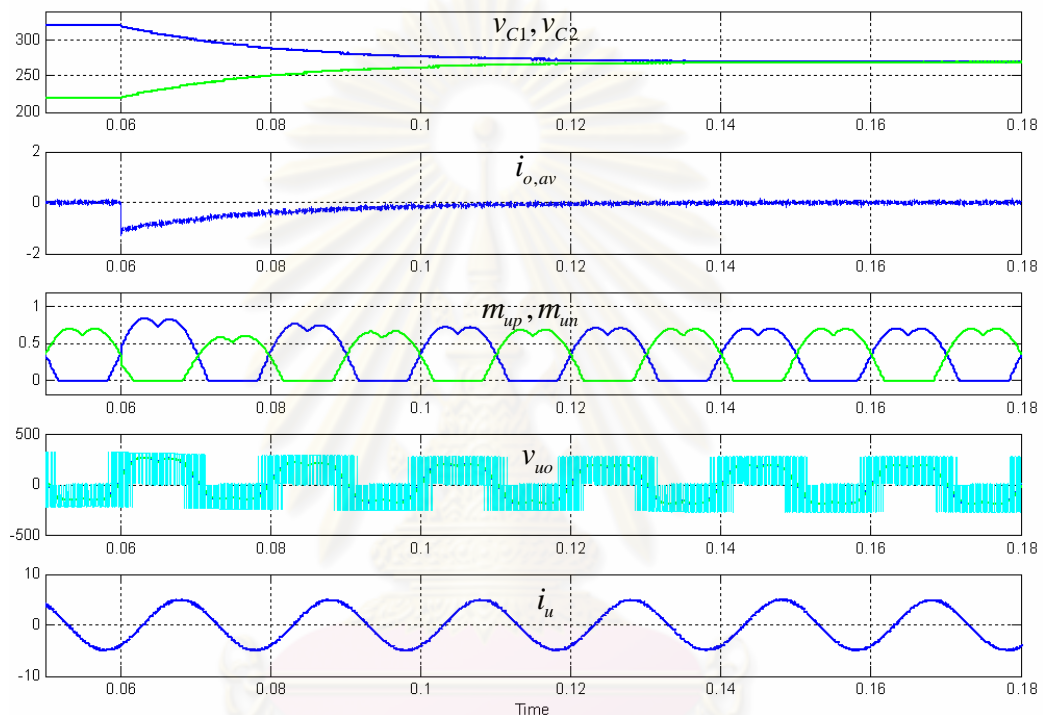
รูปที่ 4.21 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [6] ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.18 (ผลการจำลอง)

รูปที่ 4.22-4.23 เป็นผลการจำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขตัวประกอบกำลังที่ต่ำและมีดรอปในการมอดูเลตที่ไม่สูง โดยที่จุดทำงานของการจำลองนี้อยู่บนย่านการทำงานที่ควบคุมกระแสนิวทรัลให้เป็นศูนย์ได้ของการมอดูเลตแบบชั่วเดียวทั้งสามเฟส และในการจำลองกำหนดให้ที่สภาวะเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่สมดุล ผลการจำลองการควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงและผ่านกำลังจินตภาพแสดงได้ในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ จากรูปจะพบว่าผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะลู่เข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 20 msec ตามที่ออกแบบ และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล

รูปที่ 4.24-4.25 เป็นผลการจำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขตัวประกอบกำลังที่ต่ำและมีดรอปในการมอดูเลตที่ไม่สูงโดยเป็นจุดทำงานเดียวกันกับการจำลองในรูปที่ 4.22-4.23 และในสภาวะเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่สมดุล ผลการจำลองการควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้วิธีที่นำเสนอในงานวิจัย [5] แสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งจะพบว่าผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะไม่สามารถควบคุมได้และเกิดการมอดูเลตเกิน ส่วนรูปที่ 4.25 เป็นกรณีที่ใช้วิธีที่เสนอในงานวิจัย [6] ซึ่งจะพบว่าผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะลู่เข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 20 msec และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

ด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลแต่จะพบว่ากระแสในทรานส์เจิลล์ต่อคาบการสวิตช์มีผลตอบสนองที่ไม่ต่อเนื่องทำให้ยากต่อการออกแบบตัวควบคุม

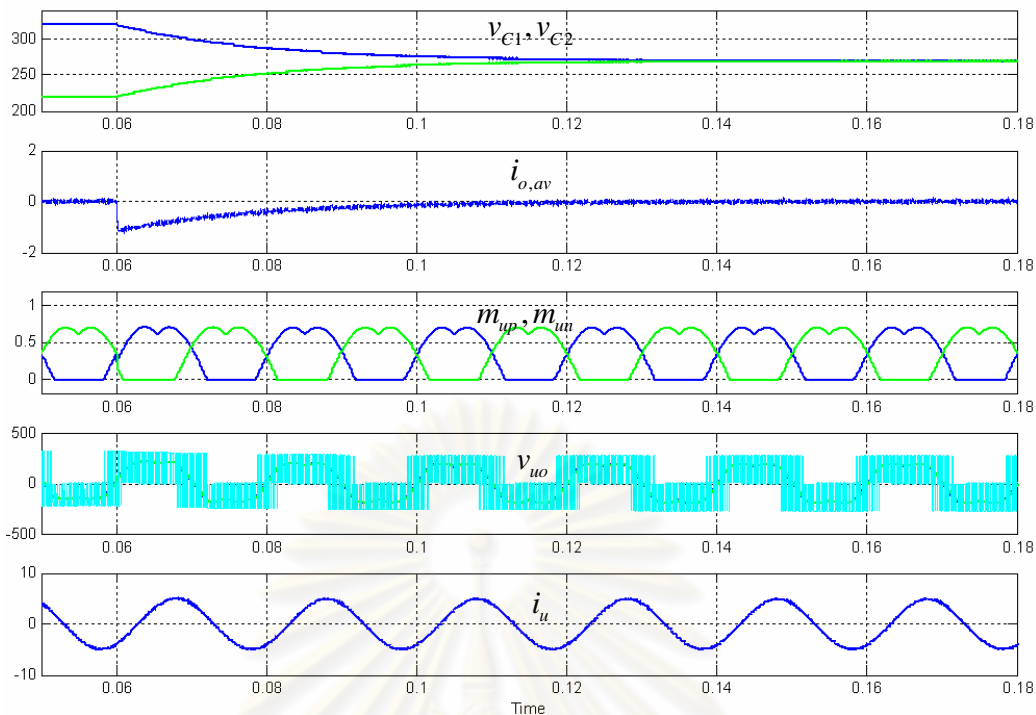
จากผลการจำลองในรูปที่ 4.22-4.25 สามารถสรุปได้ว่า วิธีการมอดูเลตที่นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้ ยังคงทำงานได้ดี ในขณะที่วิธีการในงานวิจัย [5] ไม่สามารถทำงานได้ ส่วนวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย [6] นั้นถึงแม้จะยังทำงานได้แต่การทำงานก็มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่เช่นเดิม



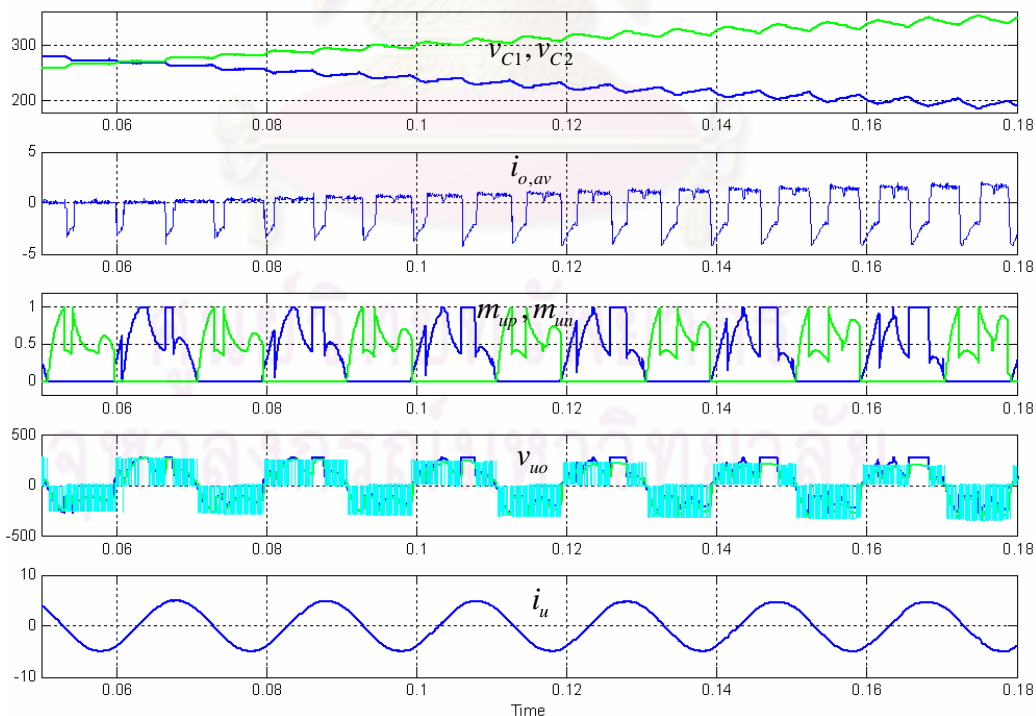
รูปที่ 4.22 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสในทรานส์เจิลล์ต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$

แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง ที่จุดทำงานที่ 2 โดยที่บัสไม่สมดุลในสภาวะเริ่มต้น (ผลการจำลอง)

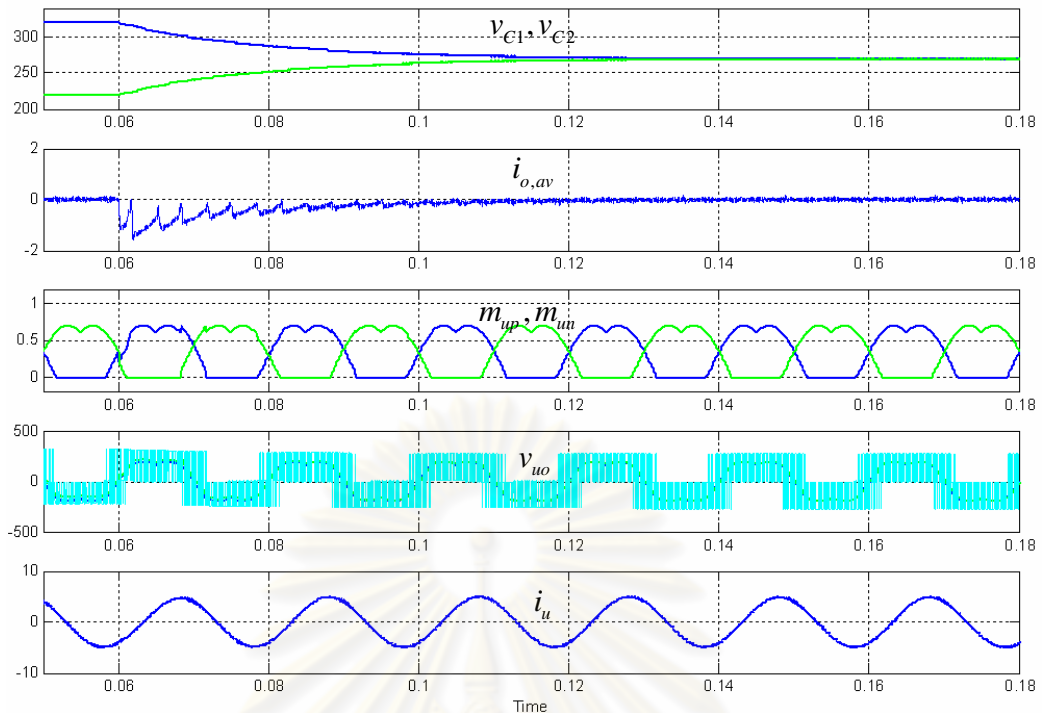
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.23 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.22 (ผลการจำลอง)



รูปที่ 4.24 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [5] ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.22 (ผลการจำลอง)

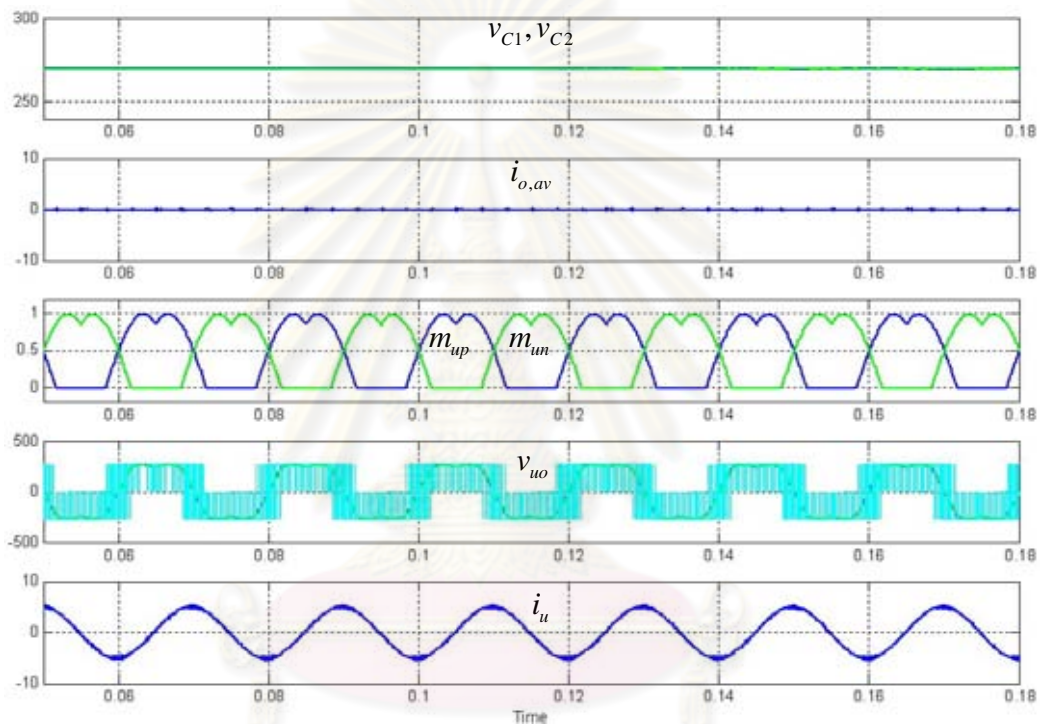


รูปที่ 4.25 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [6] ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.22 (ผลการจำลอง)

รูปที่ 4.26-4.27 เป็นผลการจำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขตัวประกอบกำลังที่ต่ำมาก และมีดรรชนีการมอดูเลตในย่านการทำงานที่เป็นเชิงเส้นสูงสุด ($m_{PWM} = 1.1547$) โดยที่จุดทำงานของการจำลองนี้อยู่นอกย่านการทำงานที่ควบคุมกระแสนิวทรัลให้เป็นศูนย์ได้ของการมอดูเลตแบบซัฟต์เดี่ยวทั้งสามเฟส และในสภาวะเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ในสภาวะสมดุล ผลการจำลองควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงและผ่านกำลังจินตภาพแสดงได้ในรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ จากรูปจะพบว่าวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอยังคงทำงานได้เป็นอย่างดีที่ค่าดรรชนีการมอดูเลตสูงสุดและสามารถรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้ตลอดเวลาโดยไม่เกิดการมอดูเลตเกินและไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล

รูปที่ 4.28 เป็นผลการจำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขตัวประกอบกำลังที่ต่ำมากและมีดรรชนีการมอดูเลตที่เป็นเชิงเส้นสูงสุด ($m_{PWM} = 1.1547$) โดยเป็นจุดทำงานเดียวกันกับการจำลองในรูปที่ 4.26 และในสภาวะเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมดุล ผลการจำลองการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้วิธีที่เสนอในงานวิจัย [5] แสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งจะพบว่าระบบไม่สามารถรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้และปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล

รูปที่ 4.29 เป็นผลการจำลองการทำงานภายใต้เงื่อนไขตัวประกอบกำลังที่ต่ำมากและมีดรรชนีการมอดูเลตที่เป็นเชิงเส้นสูงสุด ($m_{PWM} = 1.1547$) โดยเป็นจุดทำงานเดียวกันกับการจำลองในรูปที่ 4.26 และในสภาวะเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมดุล ผลการจำลองการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโดยใช้วิธีที่นำเสนอในงานวิจัย[6] แสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งจะพบว่าระบบสามารถรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้เป็นอย่างดีและไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล

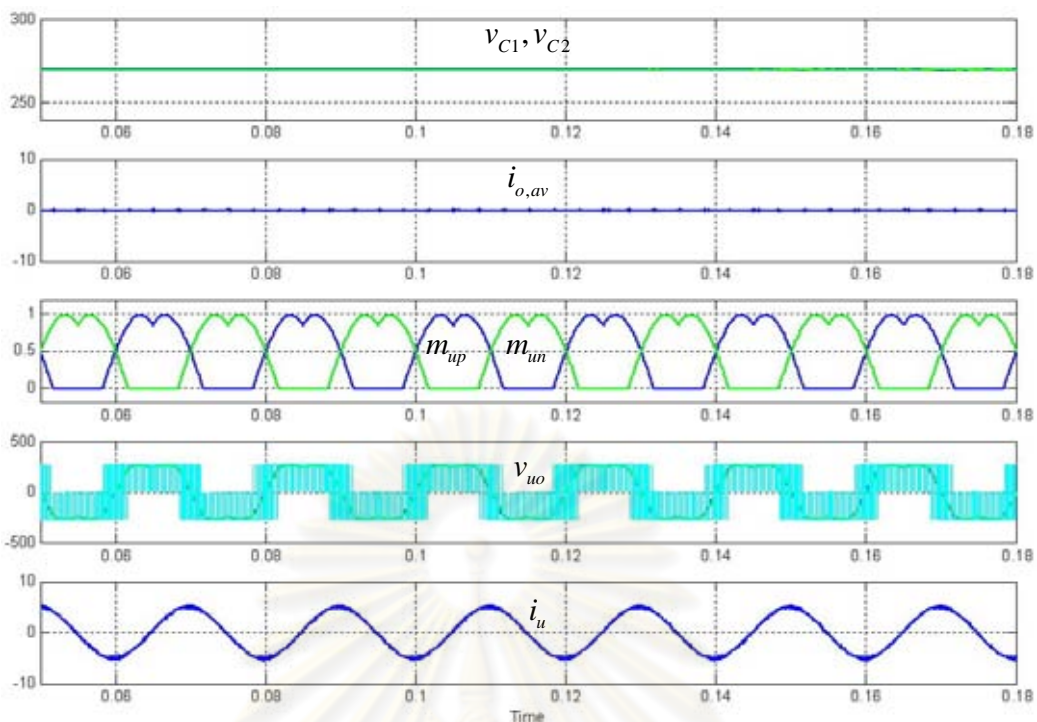


รูปที่ 4.26 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$

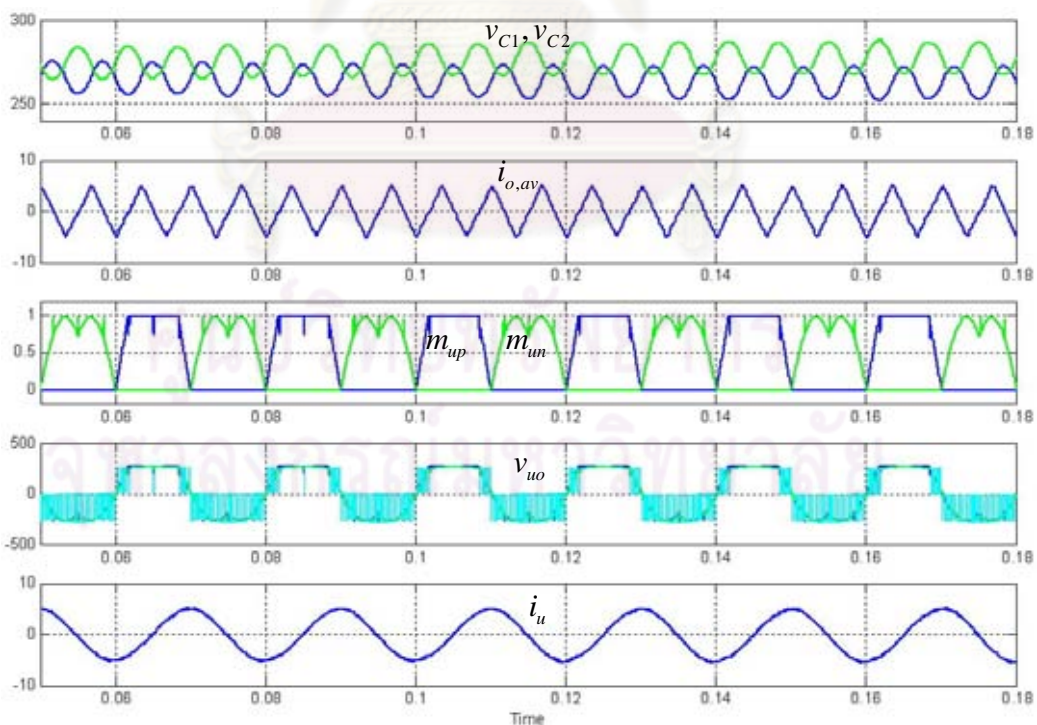
แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{um} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ

เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง ที่จุดทำงานที่ 3

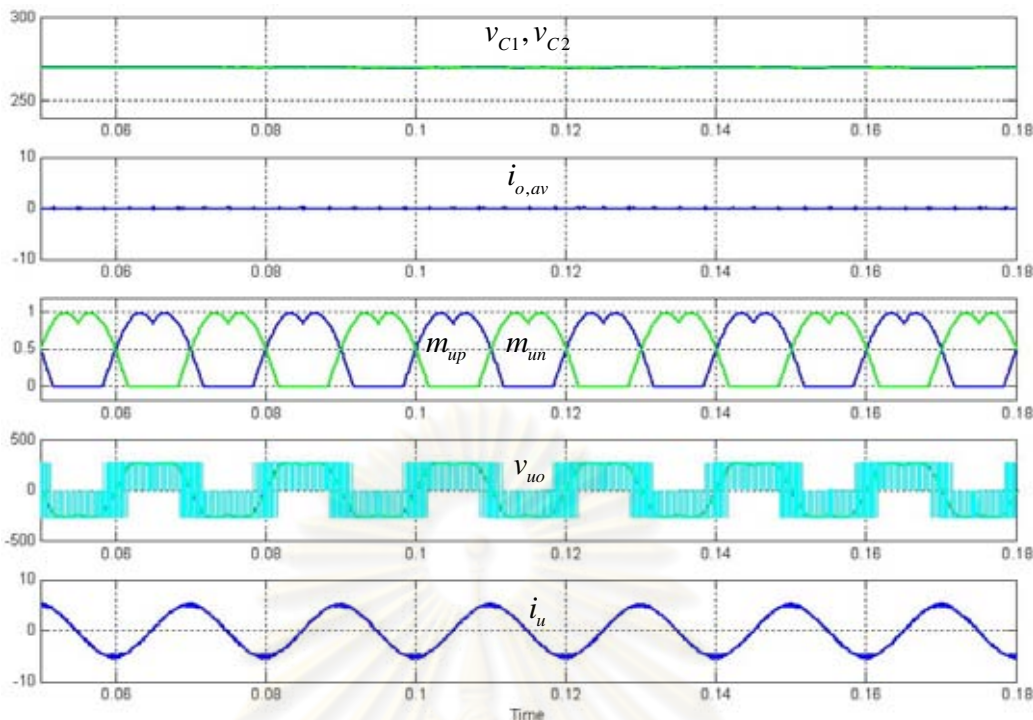
โดยที่บัสมีความสมดุลในสภาวะเริ่มต้น (ผลการจำลอง)



รูปที่ 4.27 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.26 (ผลการจำลอง)



รูปที่ 4.28 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$ แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยวิธีในงานวิจัย [5] ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.26 (ผลการจำลอง)



รูปที่ 4.29 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ $i_{o,av}$

แรงดันด้านออก v_{uo} ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up}, m_{un} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ

เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโดยวิธีเสนอในงานวิจัย [6]

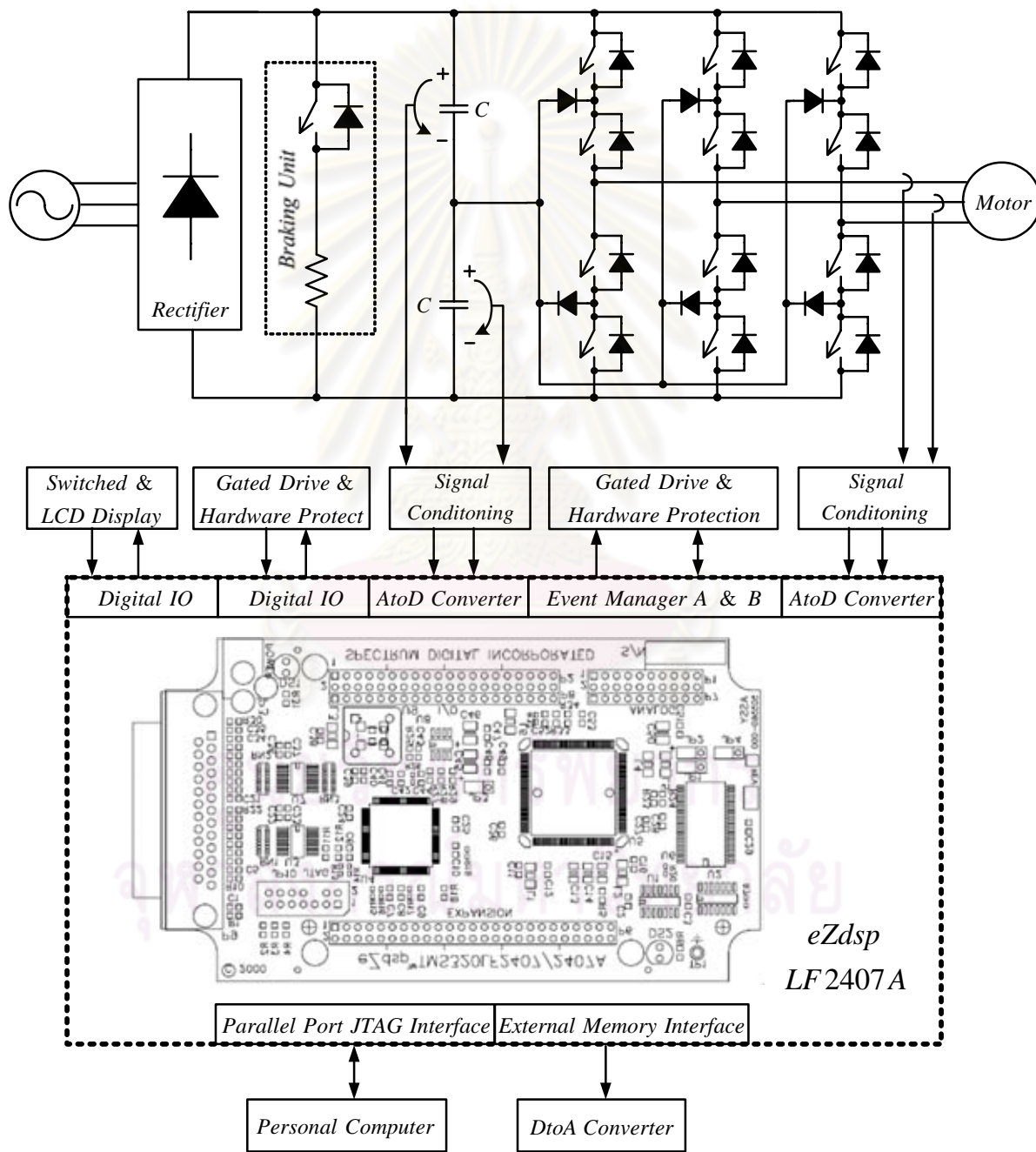
ที่จุดทำงานเดียวกันกับรูปที่ 4.26 (ผลการจำลอง)

ข้อสรุปจากผลการจำลอง

จากผลการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับด้วยวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอเปรียบเทียบกับวิธีการมอดูเลตที่น่าเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าวิธีที่น่าเสนอให้ผลตอบสนองของการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นระบบล้าหลังอันดับหนึ่งตามผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี และสามารถกำหนดผลตอบสนองในการควบคุมได้ทั้งในกรณีจุดทำงานอยู่ภายในขอบเขตหรืออยู่นอกขอบเขตการควบคุมกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ให้เป็นศูนย์ภายใต้การมอดูเลตแบบชั่วเดียวทั้งสามเฟส ดังนั้นวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอจึงมีความชัดเจนในทางทฤษฎีและมีคุณสมบัติการควบคุมสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ดีกว่าวิธีการในอดีต

4.2 การทดลองการทำงานกับระบบจริง

ในการทดลองกับอินเวอร์เตอร์สามระดับจริง ได้เลือกตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320LF2407A มาใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล และได้เลือก IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) เป็นสวิตช์กำลัง โครงสร้างของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง

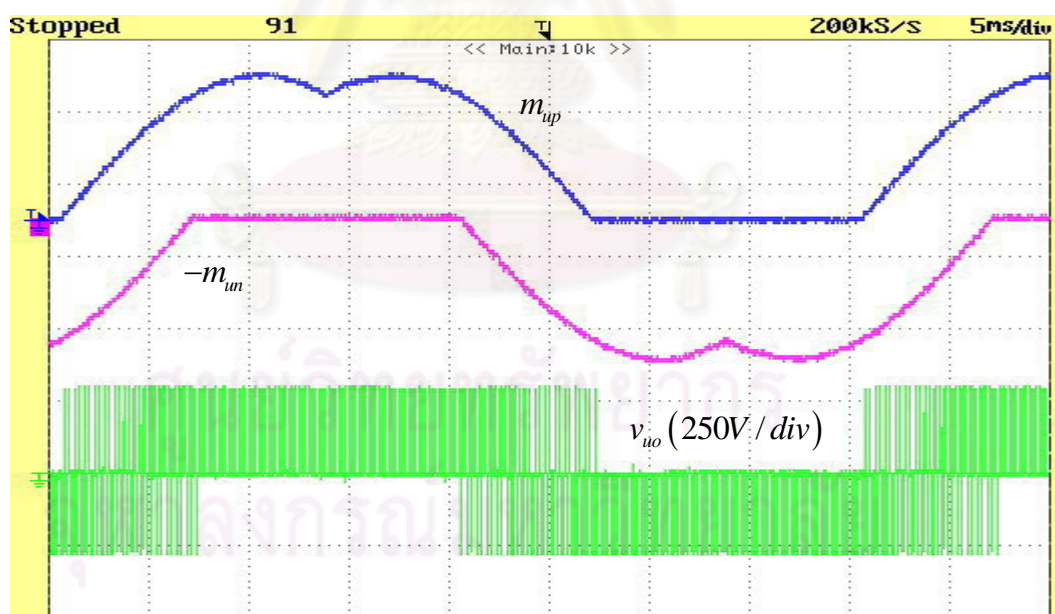
ในการทดลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะทดสอบความสามารถในการควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้มีค่าสมดุลและกำจัดปรากฏการณ์แกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล โดยจะทำการทดสอบในเงื่อนไขโหลดที่ต่างกัน ได้แก่ โหลดความต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ โหลดมอเตอร์ที่ทำงานทั้งในย่านขับเคลื่อนและคืนพลังงาน ในการทดลองแต่ละการทดลองจะมีพารามิเตอร์ร่วมกันดังนี้

พารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมในทุกการทดลอง

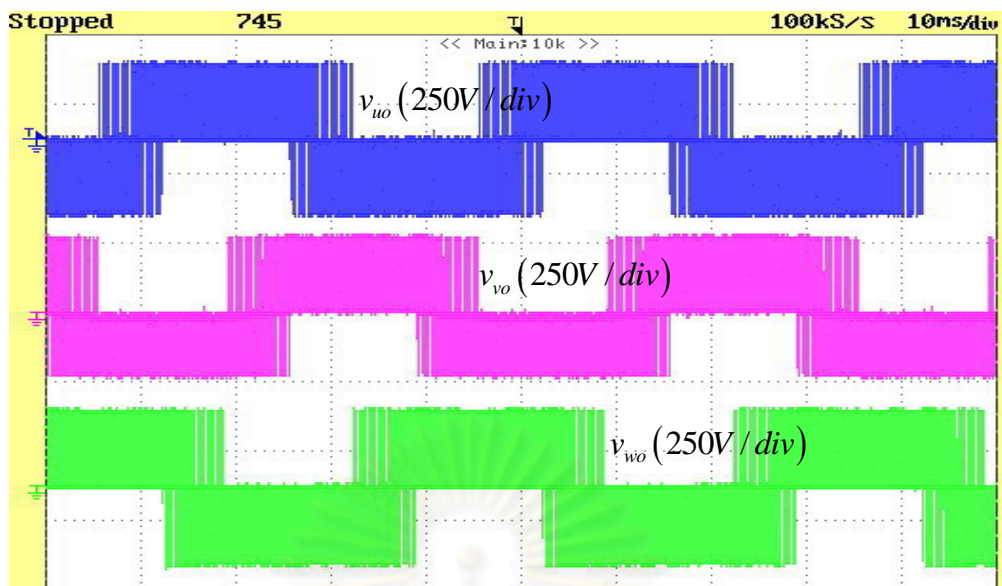
แบนด์วิดท์ (ω_b) 20 rad/sec , แรงดันบัล (E_d) 560–590 V , ตัวเก็บประจุ (C) 750 μ F ,

ความถี่การสวิตช์ (f_{sw}) 4 kHz , เวลาเว้นว่าง (dead time) 4 μ sec

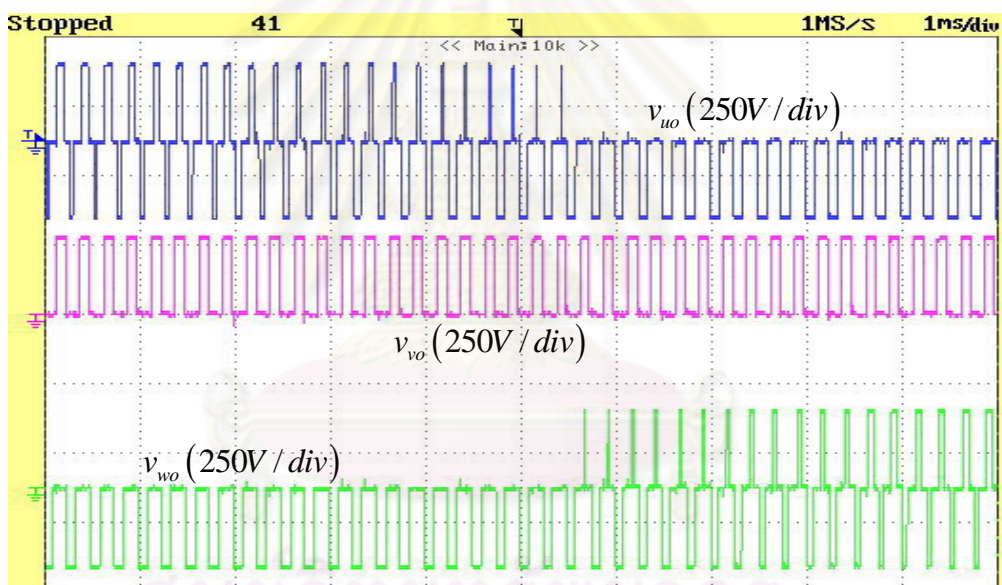
รูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up} และ $-m_{un}$ ที่ใช้ควบคุมการทำงานของสวิตช์ในเฟส u จะพบว่าแรงดันขั้ว v_{uo} จะทำการสวิตช์แบบขั้วเดียวในช่วงที่ $m_{up} = 0$ หรือ $m_{un} = 0$ และทำการสวิตช์แบบขั้วคู่ในช่วงที่ $m_{up} + m_{un} < 1$ และ $m_{un}, m_{up} \neq 0$ ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 รูปที่ 4.32 - 4.33 แสดงให้เห็นว่าเมื่อพิจารณาทั้งสามเฟสพร้อมกัน ในขณะหนึ่งนั้นแรงดันขั้วสามเฟสจะมีการสวิตช์แบบขั้วเดียว 2 เฟส และแบบขั้วคู่ 1 เฟส



รูปที่ 4.31 ฟังก์ชันการมอดูเลต m_{up} , $-m_{un}$ และแรงดันด้านออก v_{uo} ในการทดลองจริง



รูปที่ 4.32 แรงดันด้านออก v_{uo} , v_{vo} , v_{wo} ในการทดลองจริง

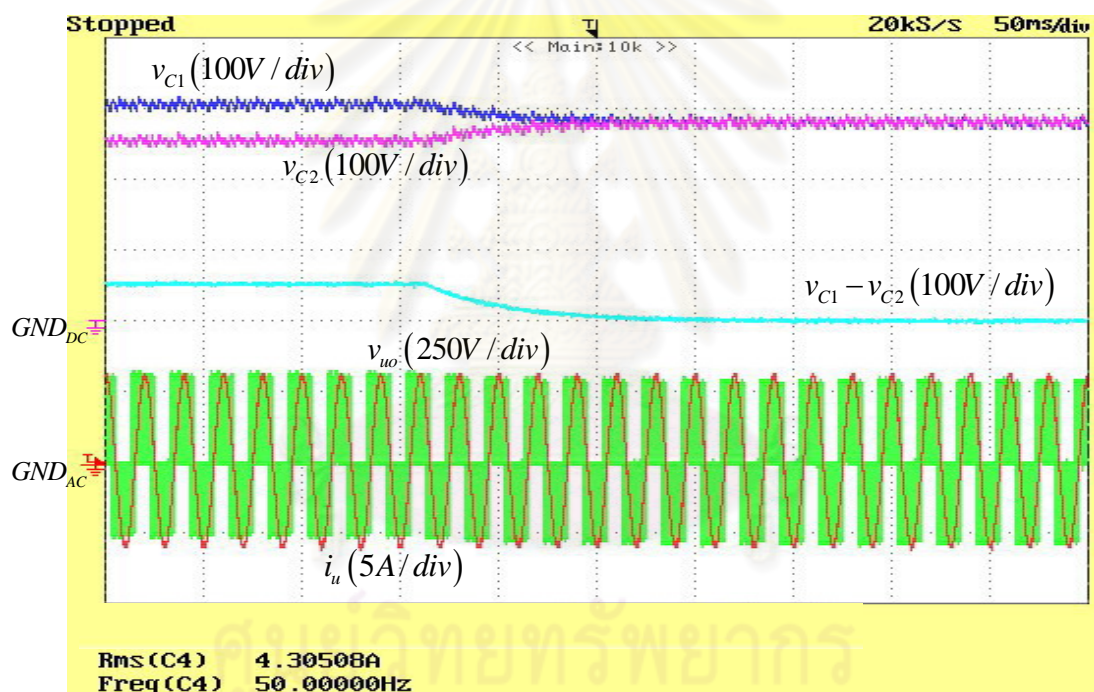


รูปที่ 4.33 แรงดันด้านออก v_{uo} , v_{vo} , v_{wo} ในการทดลองจริง (ภาพขยาย)

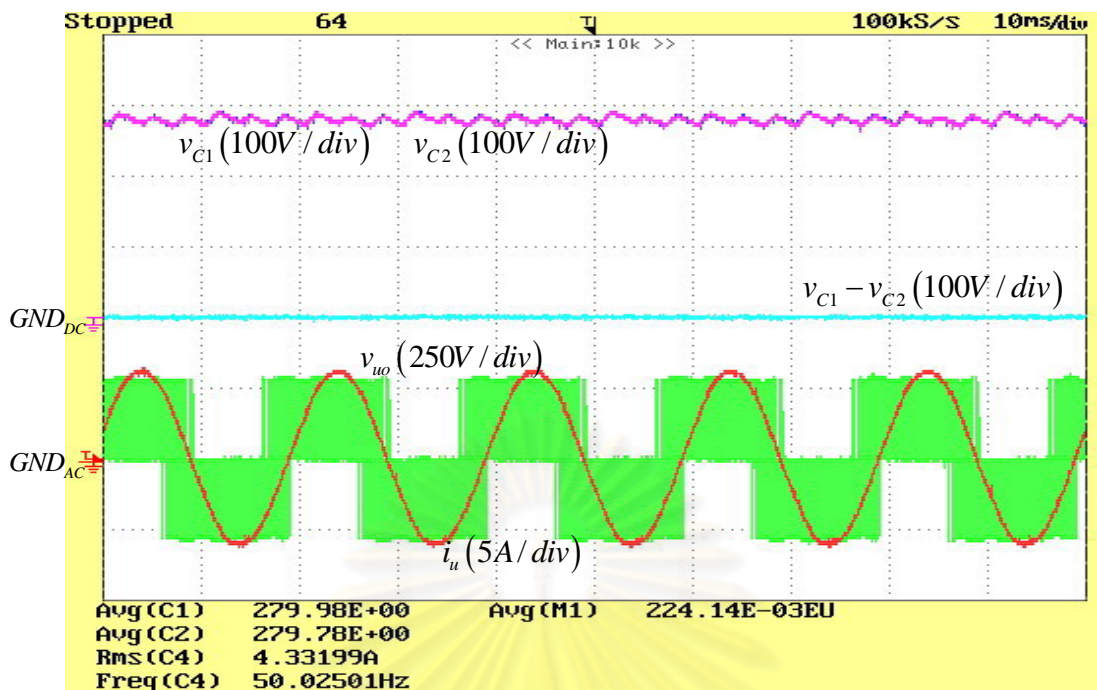
4.2.1 ผลการทดลองการทำงานกับโหลดตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ในการทดลองนี้ระบบจะควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงและผ่านกำลังจินตภาพโดยกำหนดให้ในสภาวะเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีความไม่สมดุล พารามิเตอร์ในการทดลองกับโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ตัวต้านทานที่โหลด (R) 34.5Ω , ตัวเหนี่ยวนำที่โหลด (L) 65.75 mH , แรงดันคำสั่ง (V_{rms}) $250/\sqrt{2} \text{ V}$, ความถี่หลักมูล (f) 50 Hz

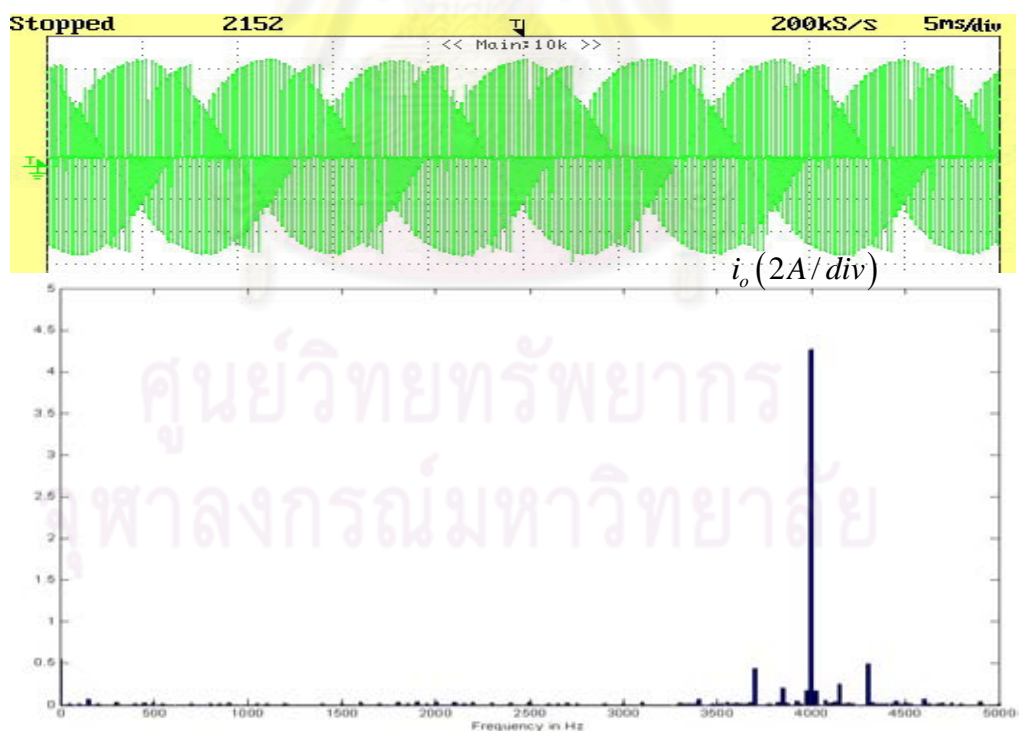
รูปที่ 4.34 – 4.35 แสดงให้เห็นความสามารถในการควบคุมและรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง รูปที่ 4.34 เป็นผลการทดลองในกรณีที่สภาวะเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่สมดุล จะพบว่าผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะเข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 50 msec ซึ่งสอดคล้องกับค่าแบนด์วิดท์ที่ออกแบบไว้ที่ 20 rad/sec สำหรับผลในสภาวะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 4.35 จะพบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลและกำลังด้านออกคงที่ ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณเป็นศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล ทั้งนี้ก็สามารถอธิบายได้จากการพิจารณาสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 4.36 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลของกระแสในรูปที่ 4.36 มีขนาดต่ำมาก



รูปที่ 4.34 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1} , v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดันเมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณีไหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ)

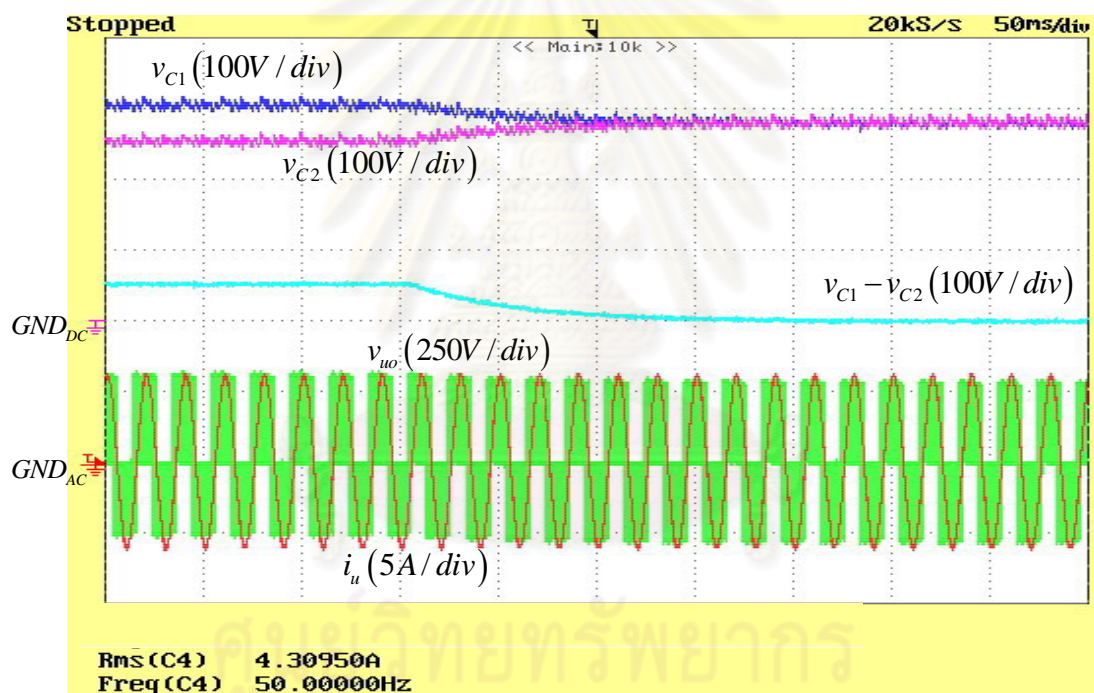


รูปที่ 4.35 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณีโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ)

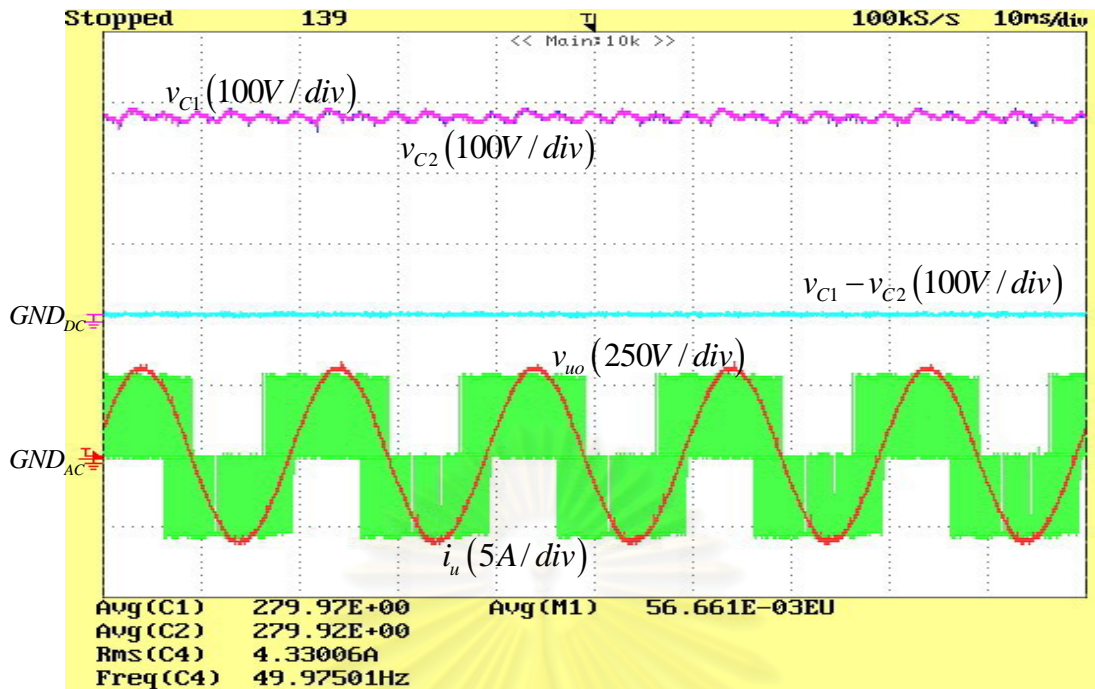


รูปที่ 4.36 กระแสนิวทรีด i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรีด i_o ในสภาวะอยู่ตัว ขณะรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณีโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ)

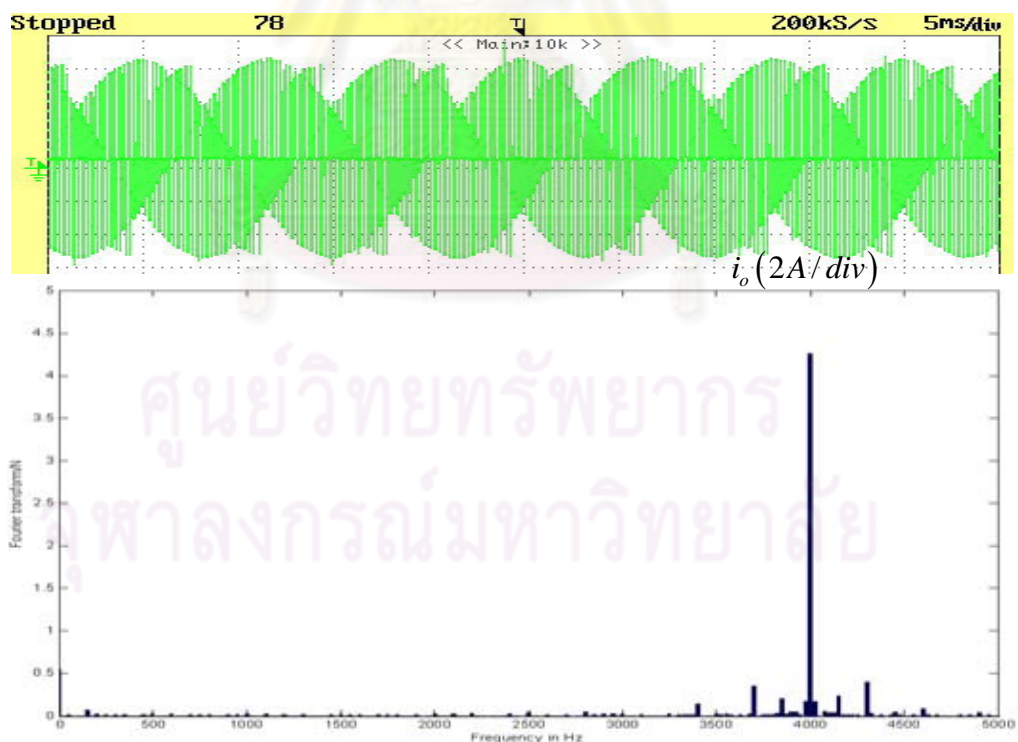
รูปที่ 4.37 – 4.38 แสดงให้เห็นความสามารถในการควบคุมและรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ รูปที่ 4.37 เป็นผลการทดลองในกรณีที่สภาวะเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุไม่สมดุล จะพบว่าผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะเข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 50 msec ซึ่งสอดคล้องกับค่าแบนด์วิดท์ที่ออกแบบไว้ที่ 20 rad/sec สำหรับผลในสภาวะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 4.38 จะพบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลและกำลังด้านออกคงที่ ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณเป็นศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล ทั้งนี้ก็สามารถอธิบายได้จากการพิจารณาสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 4.9 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลของกระแสในรูปที่ 4.9 มีขนาดต่ำมาก



รูปที่ 4.37 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1} , v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดันเมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณีไหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ)



รูปที่ 4.38 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1} , v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อควบคุมสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณีโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ)



รูปที่ 4.39 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัว ขณะรักษาสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณีโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ)

4.2.2 ผลการทดลองการทำงานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด

การทดลองการทำงานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลดซึ่งจะมีค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำมากทำให้มีจุดทำงานอยู่นอกย่านที่สามารถควบคุมกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ให้เป็นศูนย์ได้ในกรณีการมอดูเลตแบบซัฟต์สวิตชิ่งทั้งสามเฟส ผลการทดลองจะแสดงให้เห็นความสามารถในการรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเมื่อมีสถานะเริ่มต้นที่สมดุลและไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล ค่าแรงดันคำสั่งและความถี่หลักมูลตามรูปแบบของการซัฟต์สวิตชิ่งแบบ V/f จะมีค่าแรงดันคำสั่ง (V_{rms}) 114.45 V ที่ความถี่หลักมูล (f) 25 Hz และมีค่าแรงดันคำสั่ง (V_{rms}) 220 V ที่ความถี่หลักมูล (f) 50 Hz โดยข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้เป็นดังนี้คือ

พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กำลังทางกล (P_{mech}) 3 HP , ความเร็วพิกัด (N_{rated}) 1420 RPM , ความถี่พิกัด (f_{rated}) 50 Hz , แรงดันพิกัด ($V_{ll-rated}$) 380 V , กระแสพิกัด (I_{rated}) 5 A , จำนวนขั้วแม่เหล็ก 4 pole

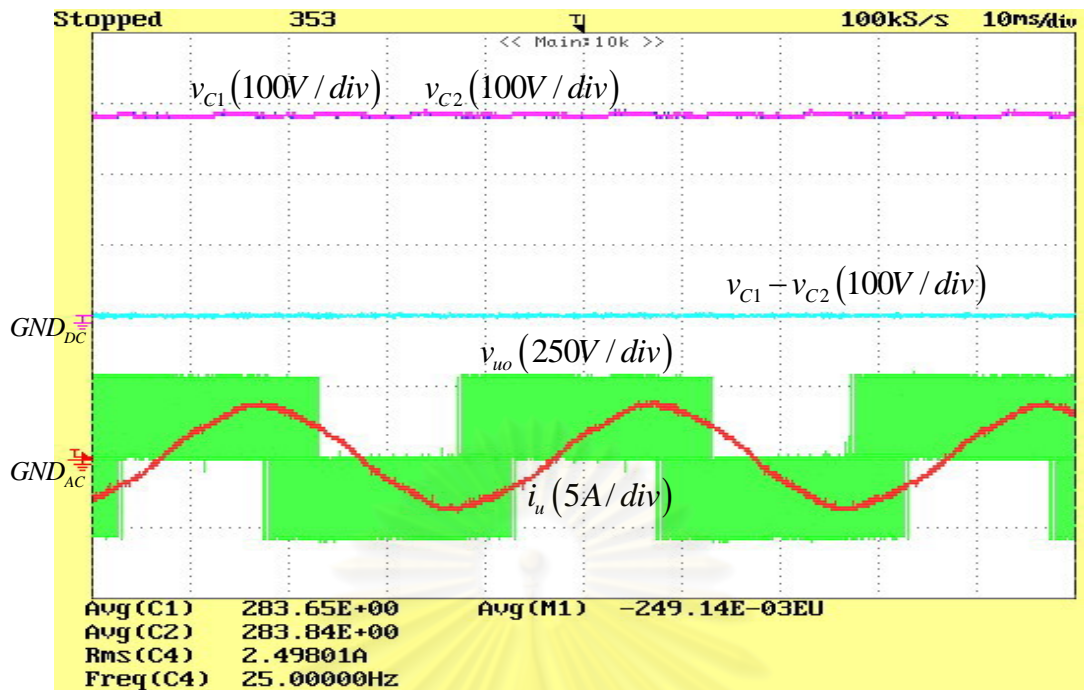
ผลการทดลองในรูปที่ 4.40-4.47 แสดงให้เห็นความสามารถในการรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในขณะมอเตอร์ไม่มีโหลดที่ความถี่ทำงานต่างกัน ในกรณีที่ควบคุมสมดุลผ่านค่ากำลังจริงจะได้ผลในรูปที่ 4.40,4.41,4.44,4.45 ในรูปที่ 4.40 มอเตอร์ทำงานที่ความถี่ 25 Hz ไม่มีโหลด ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล สอดคล้องกับผลในรูปที่ 4.41 ที่ชี้ว่าองค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลของกระแส นิวทรัลมีขนาดต่ำมาก ผลการทดลองเมื่อความถี่ทำงานของมอเตอร์เปลี่ยนเป็น 50 Hz แสดงในรูปที่ 4.44 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์สามารถยังคงทำงานได้ดีและรักษาสมดุลของบัสไว้ได้เช่นเดิม โดยผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล จากรูปที่ 4.45 องค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลของกระแส นิวทรัลก็มีขนาดต่ำกว่าองค์ประกอบที่ความถี่สวิตช์ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการทดลองอื่น เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์กอบปรกับมีตัวประกอบกำลังที่ต่ำและดรรชนีการมอดูเลตที่สูง

ในทำนองเดียวกันเมื่อเปลี่ยนมาควบคุมสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพแทน จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.42,4.43,4.46,4.47 ผลในรูปที่ 4.42 เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ 25 Hz ไม่มีโหลด แสดงให้เห็นว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บ

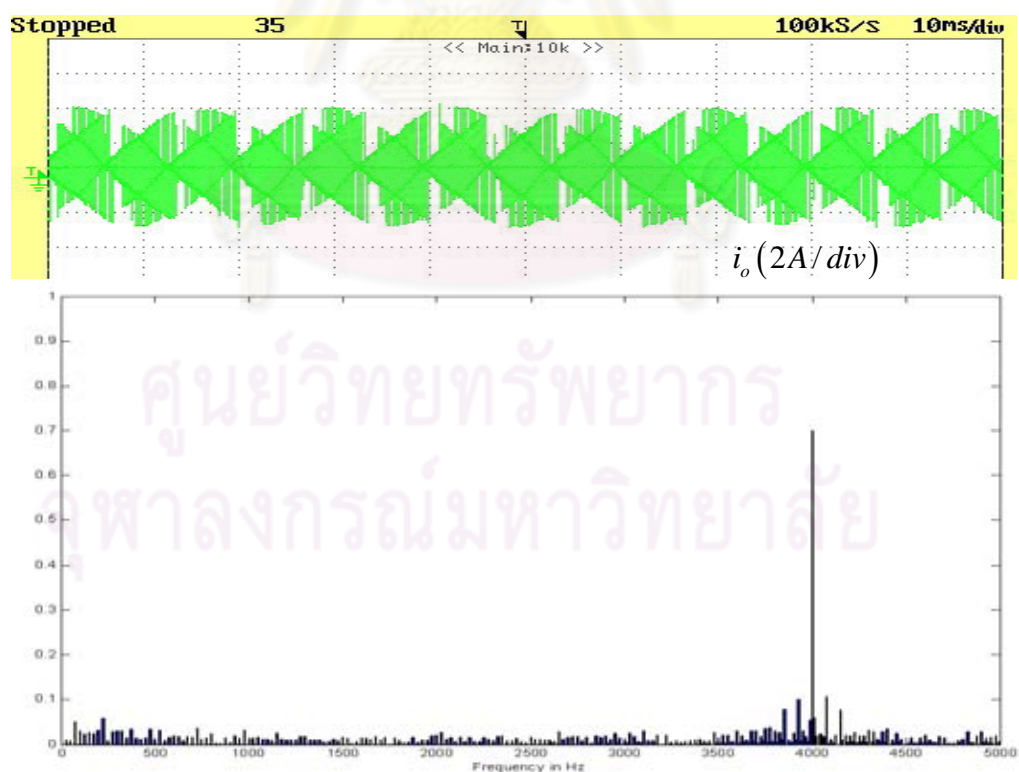
ประจักษ์ด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลเนื่องจากองค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลของกระแสนิวทรัลมีขนาดต่ำมากเมื่อพิจารณารูปที่ 4.43 เมื่อเปลี่ยนความถี่ทำงานของมอเตอร์เป็น 50 Hz ผลในรูปที่ 4.46 และ 4.47 ก็ยืนยันได้ว่าอินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานได้ดี โดยรักษาผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้เป็นศูนย์ได้ตลอดเวลาและไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล และจากรูปที่ 4.47 องค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลของกระแสนิวทรัลมีขนาดต่ำกว่าองค์ประกอบที่ความถี่สวิตช์ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการทดลองอื่น เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์กึ่งปรกซ์มีตัวประกอบกำลังที่ต่ำและดรรชนีการมอดูเลตที่สูง จากผลการทดลองที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่า วิธีการมอดูเลตที่นำเสนอสามารถควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้ดี เมื่อใช้ขั้วมอเตอร์ในสถานะไม่มีโหลด ไม่ว่าจะอาศัยการควบคุมกระแส นิวทรัลผ่านกำลังจริงหรือกำลังจินตภาพก็ตาม



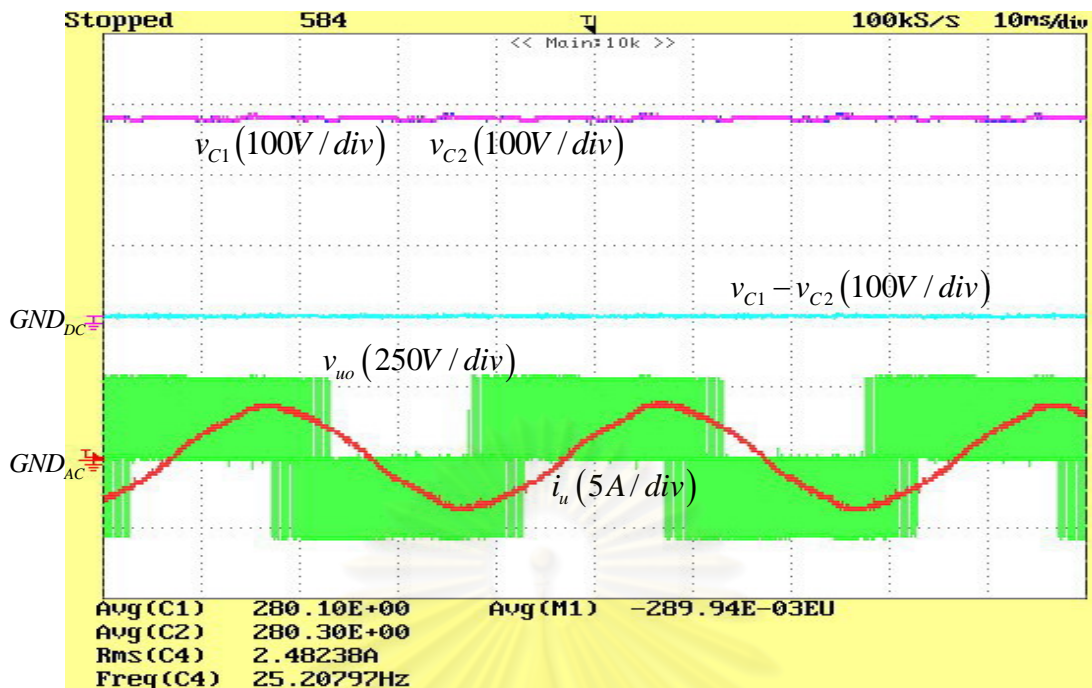
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



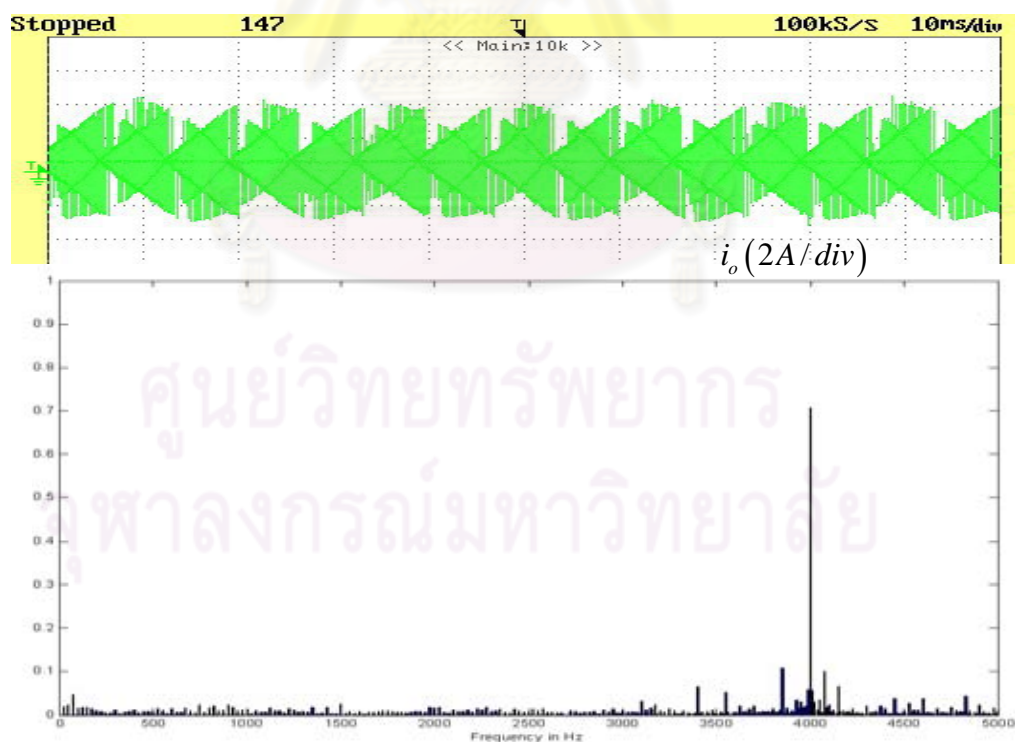
รูปที่ 4.40 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด)



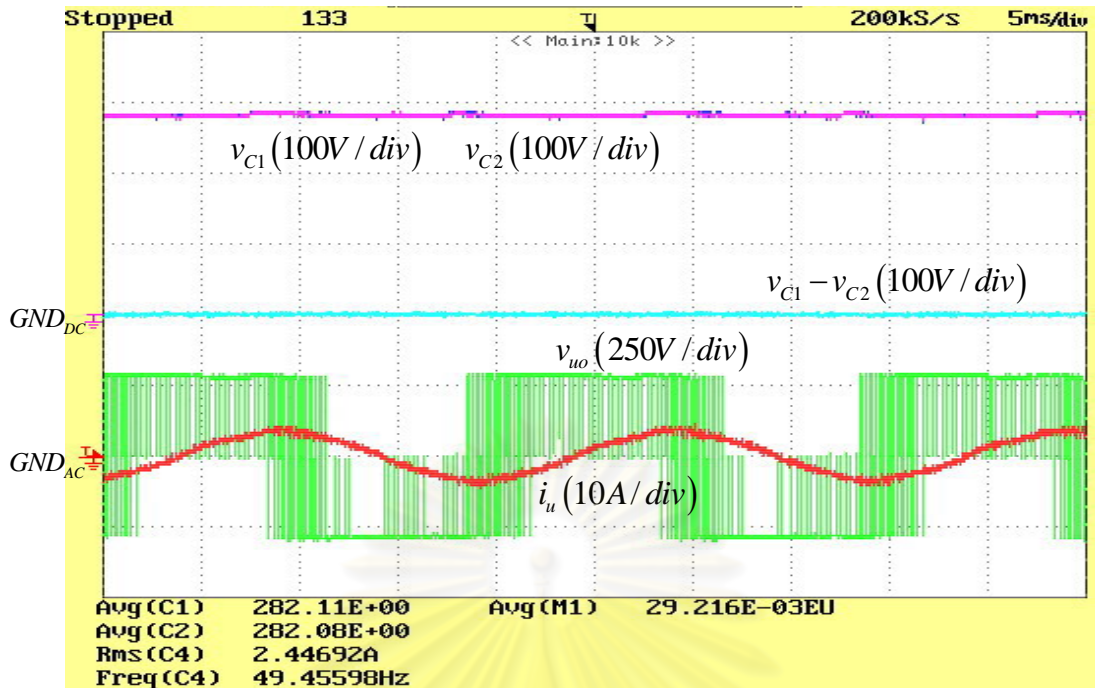
รูปที่ 4.41 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด)



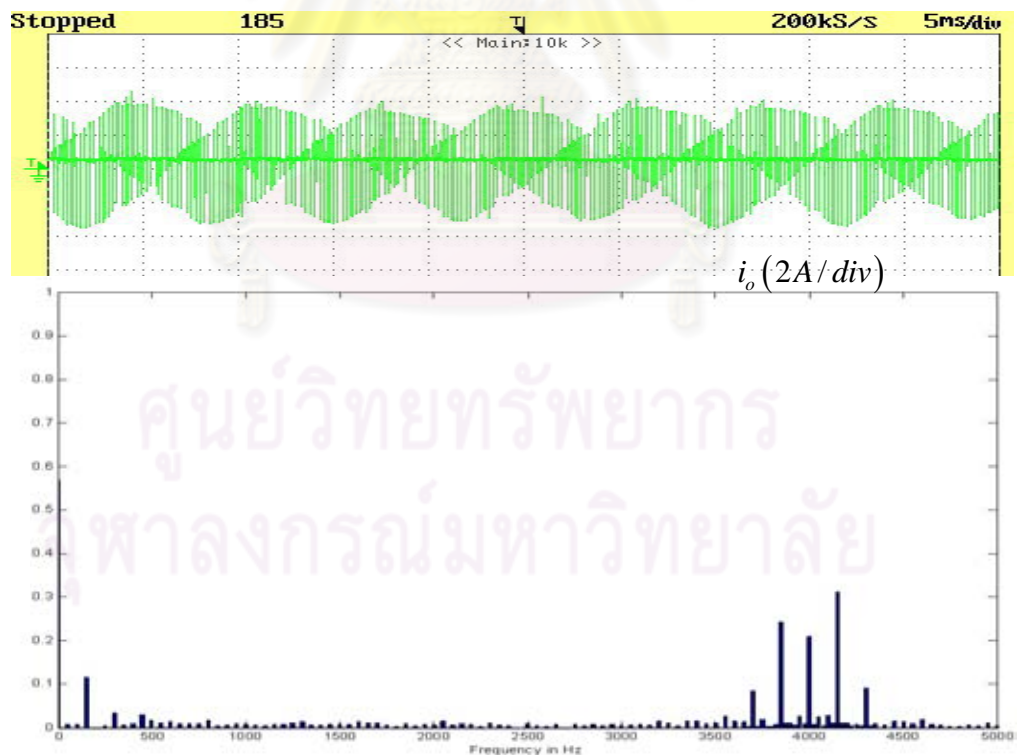
รูปที่ 4.42 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด)



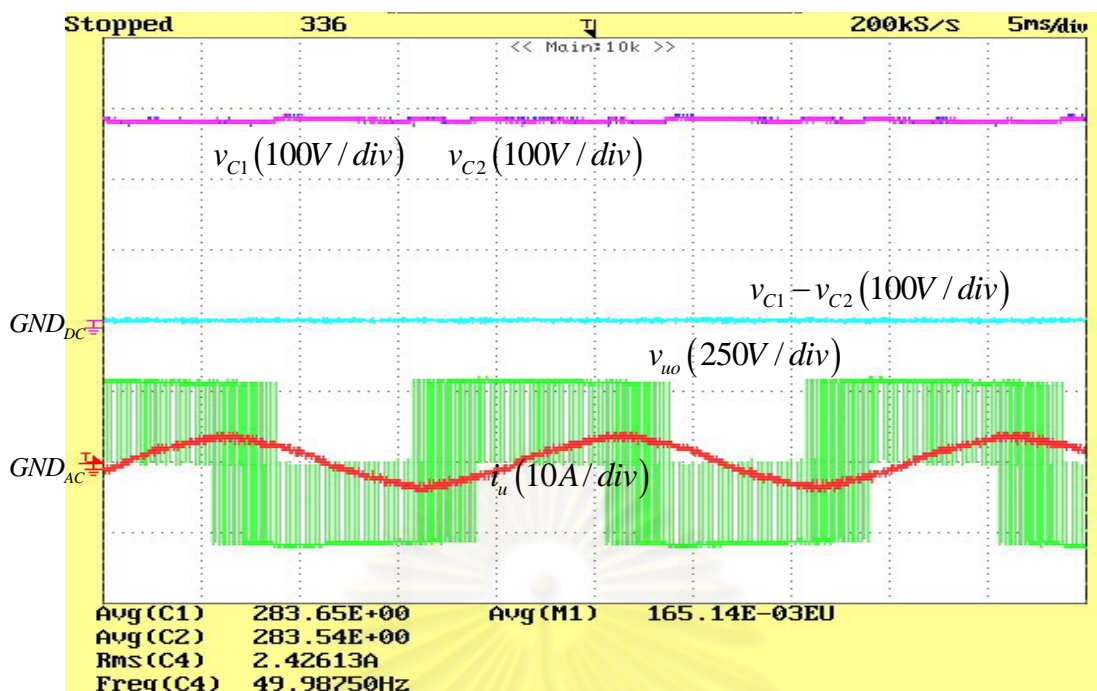
รูปที่ 4.43 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด)



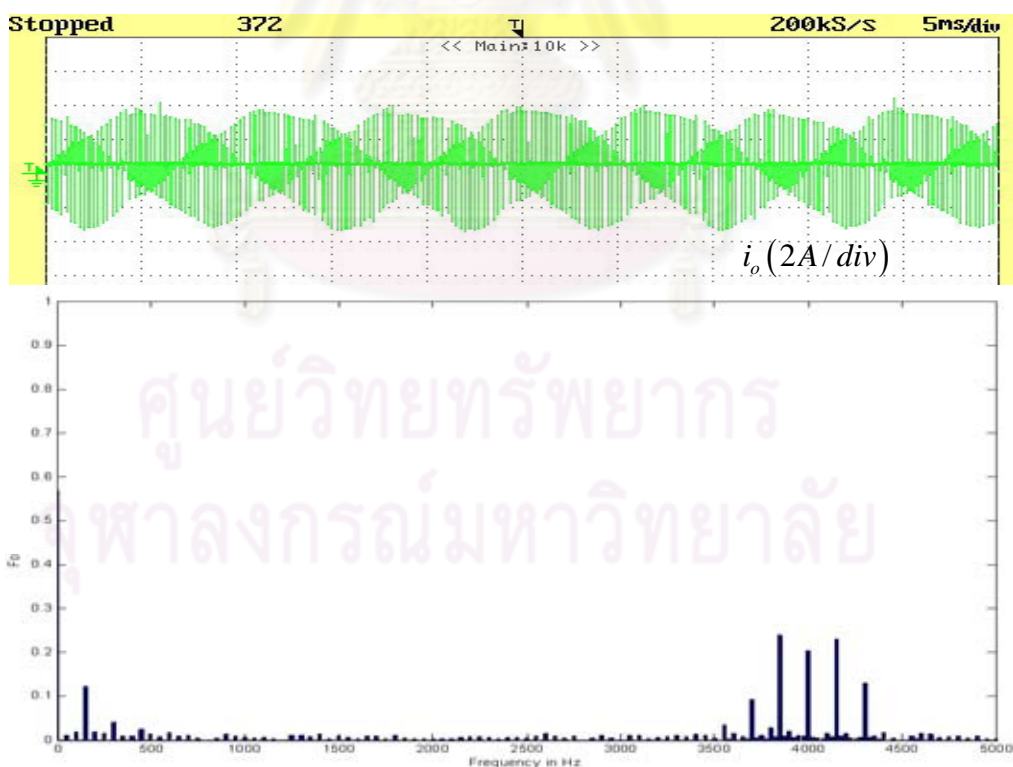
รูปที่ 4.44 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1} , v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด)



รูปที่ 4.45 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด)



รูปที่ 4.46 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด)



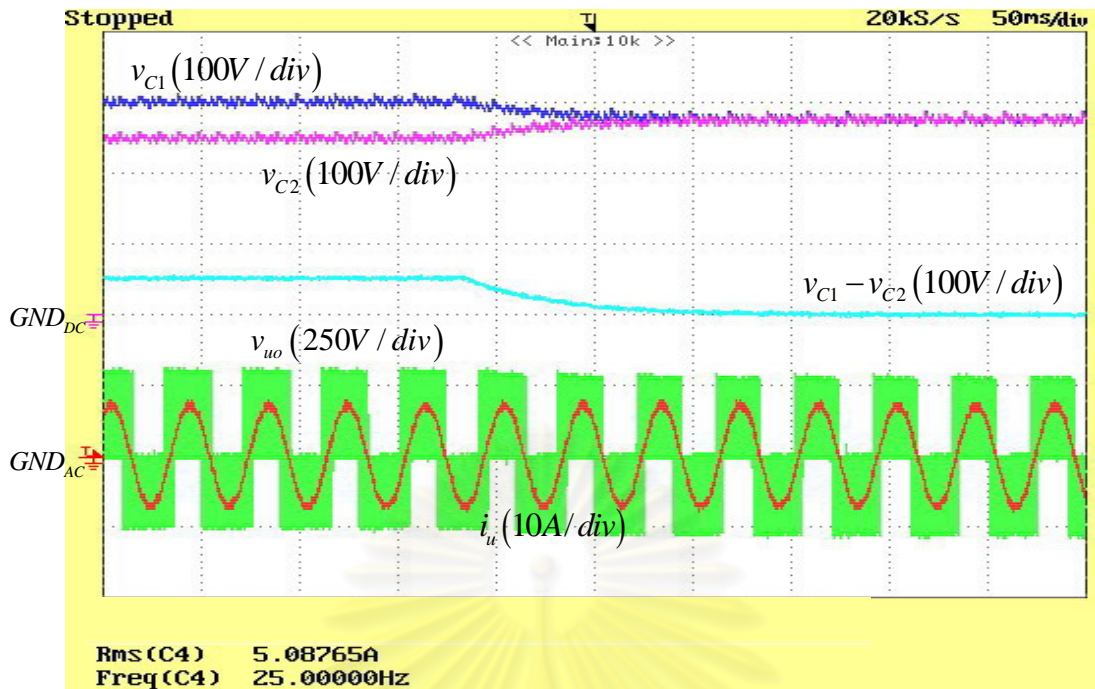
รูปที่ 4.47 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสถานะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด)

4.2.3 ผลการทดลองการทำงานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำงานในย่านขับเคลื่อน

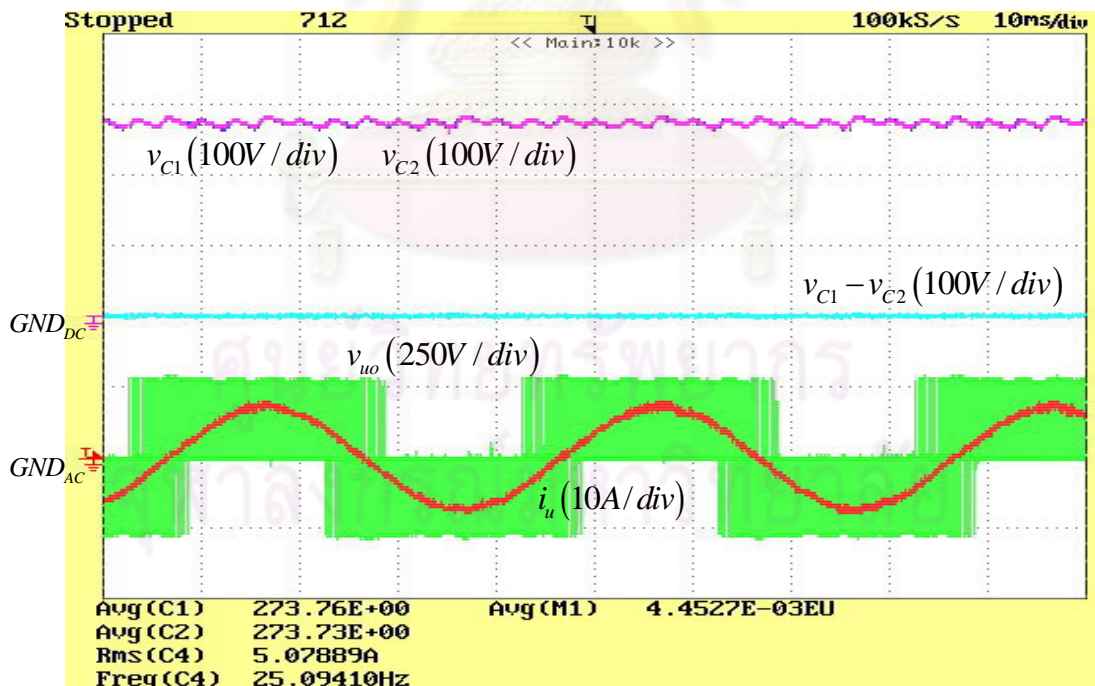
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองการทำงานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในย่านขับเคลื่อนและมีโหลดทางกล โดยจุดทำงานในลักษณะนี้จะมีค่าตัวประกอบกำลังที่สูงและอยู่ในย่านที่ควบคุมกระแสไนวรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ให้เป็นศูนย์ได้สำหรับการมอดูเลตแบบซั้วเดี่ยวทั้งสามเฟส ผลการทดลองจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในเงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ ทั้งนี้ค่าแรงดันคำสั่งและความถี่หลักมูลของมอเตอร์จะเป็นไปตามรูปแบบของการขับเคลื่อนแบบ V/f โดยจะมีค่าแรงดันคำสั่ง (V_{rms}) 114.45 V ที่ความถี่หลักมูล (f) 25 Hz และมีค่าแรงดันคำสั่ง (V_{rms}) 220 V ที่ความถี่หลักมูล (f) 50 Hz

รูปที่ 4.48 – 4.49 แสดงให้เห็นความสามารถในการควบคุมและรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงเมื่อมอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อนที่ความถี่ 25 Hz และมีโหลด ในรูปที่ 4.48 สภาวะเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ในสภาวะไม่สมดุล ผลการทดลองควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงพบว่า ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะเข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 50 msec สอดคล้องกับค่าแบนด์วิดท์ที่ได้ออกแบบไว้และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล รูปที่ 4.49 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลสอดคล้องกับผลสเปกตรัมของกระแสไนวรัลที่แสดงในรูปที่ 4.50

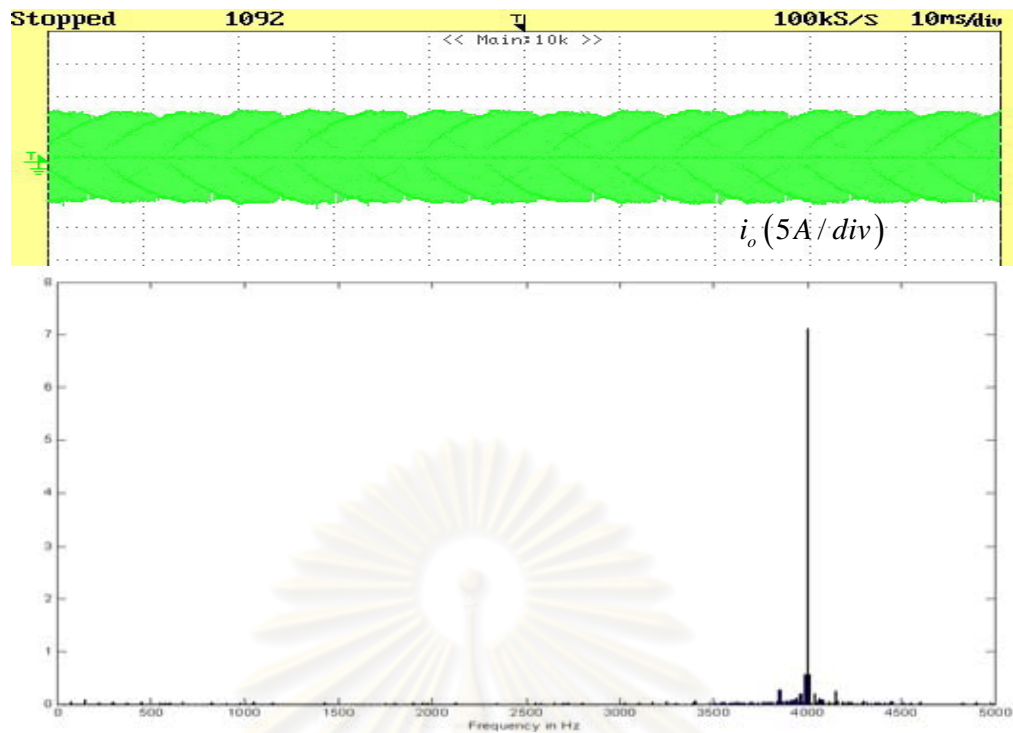
รูปที่ 4.51 – 4.52 แสดงให้เห็นความสามารถในการควบคุมและรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพเมื่อมอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อนที่ความถี่ 25 Hz และมีโหลด ในรูปที่ 4.51 สภาวะเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ในสภาวะไม่สมดุล ผลการทดลองควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงพบว่า ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะเข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 50 msec สอดคล้องกับค่าแบนด์วิดท์ที่ได้ออกแบบไว้และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล รูปที่ 4.52 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลสอดคล้องกับผลสเปกตรัมของกระแสไนวรัลที่แสดงในรูปที่ 4.53



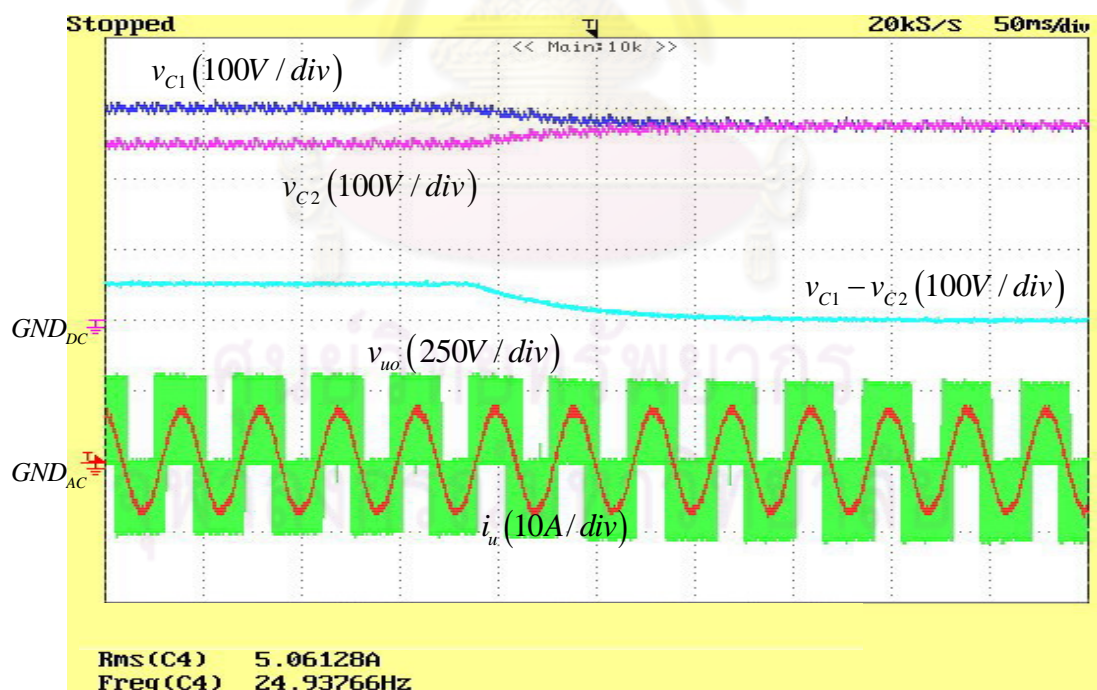
รูปที่ 4.48 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดันเมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)



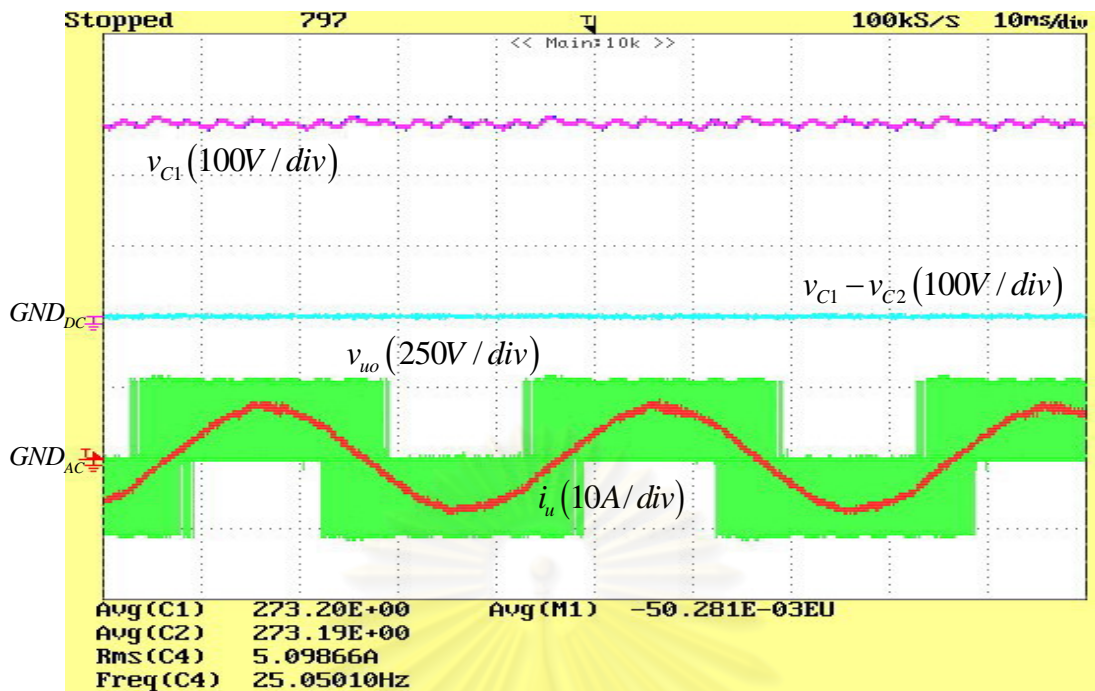
รูปที่ 4.49 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)



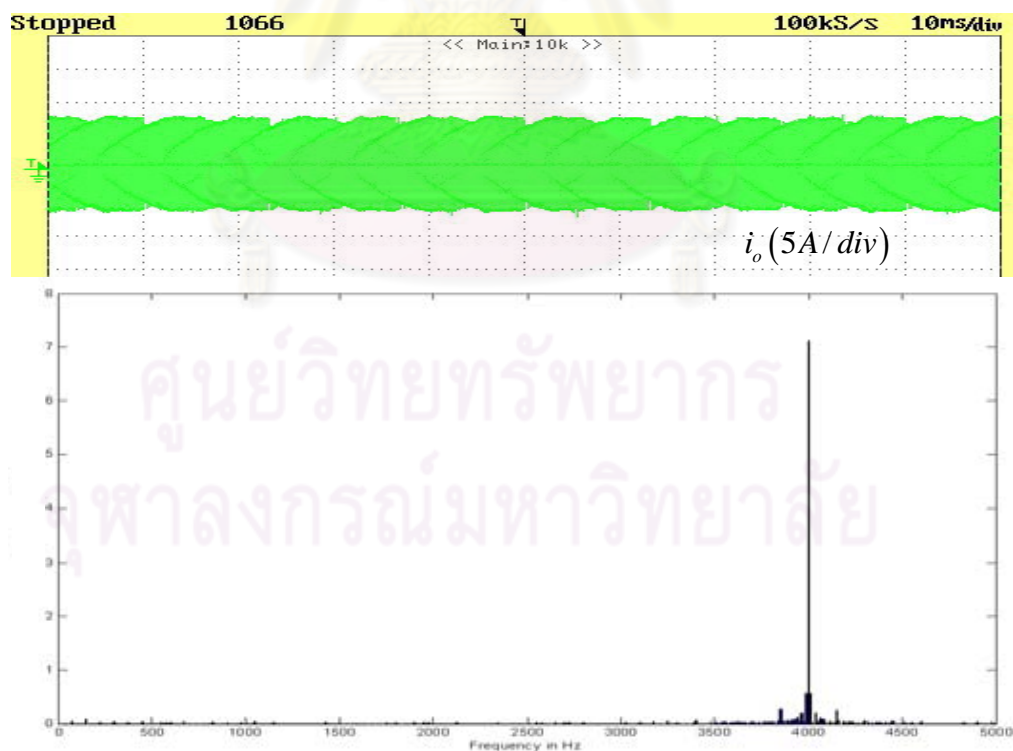
รูปที่ 4.50 กระแสเหนิวทรีด i_o และ สเปกตรัมของกระแสเหนิวทรีด i_o ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)



รูปที่ 4.51 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1} , v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดัน เมื่อควบคุมสมดุลขอแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)



รูปที่ 4.52 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)

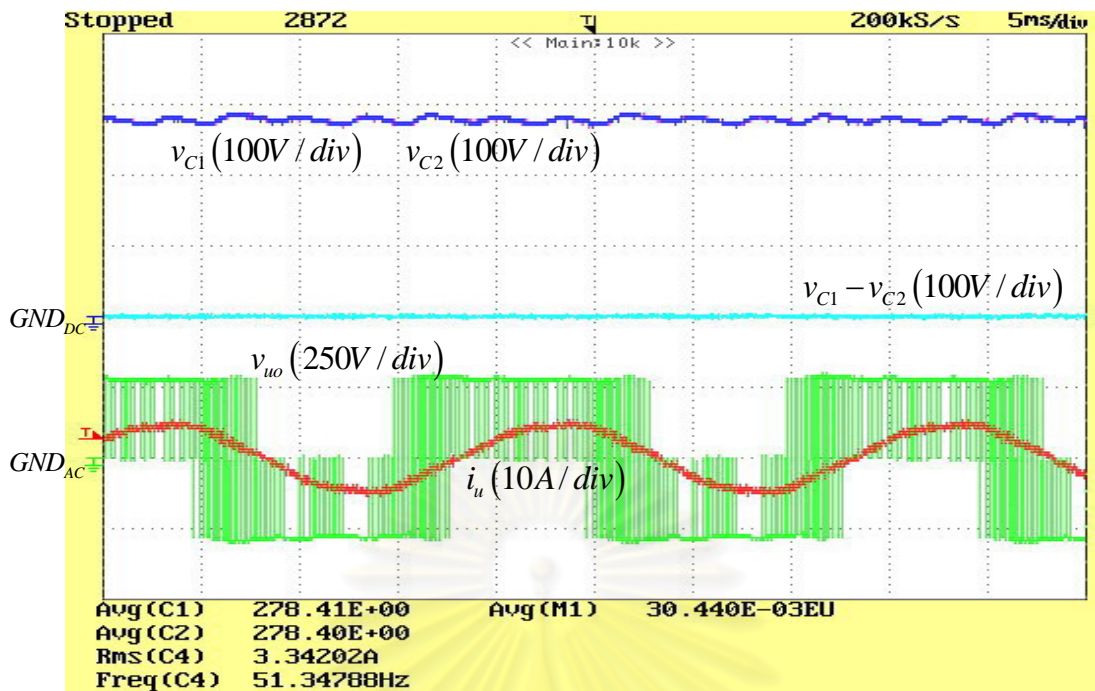


รูปที่ 4.53 กระแสนิวรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)

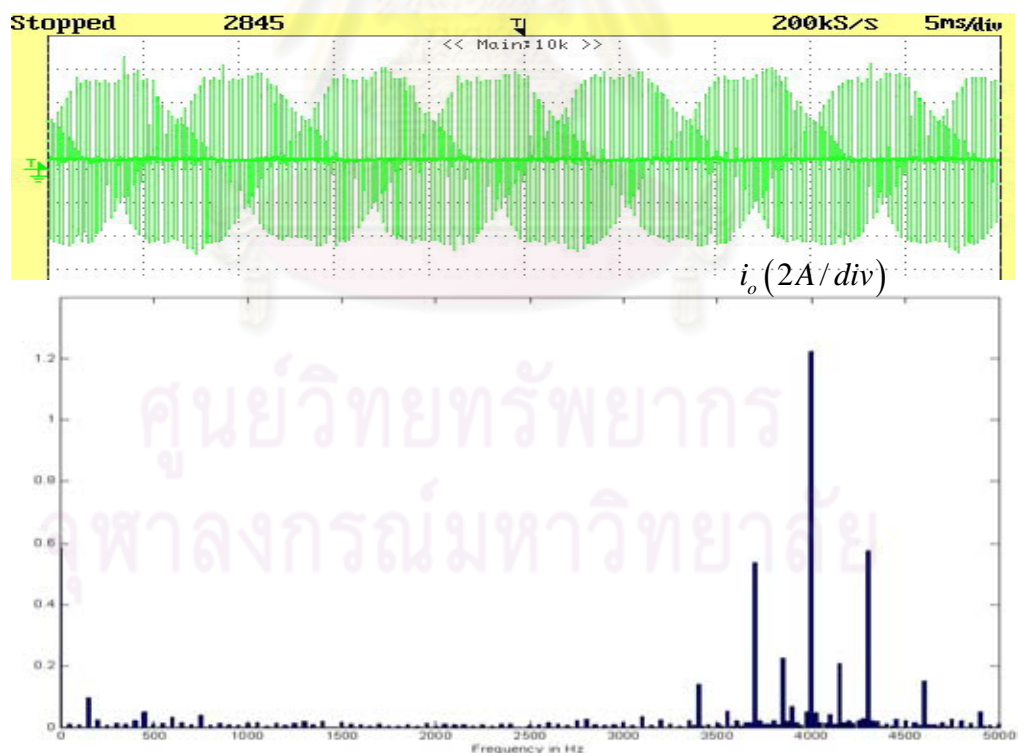
รูปที่ 4.54-4.57 เป็นผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนความถี่ทำงานของมอเตอร์เป็น 50 Hz ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระบบยังคงสามารถรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงหรือกำลังจินตภาพได้ดีเหมือนเดิม ในรูปที่ 4.54 ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักสอดคล้องกับข้อมูลสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 4.55 ในทำนองเดียวกันเมื่อเปลี่ยนมาควบคุมสมดุลผ่านกำลังงานจินตภาพ จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.56-4.57 ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักสอดคล้องกับข้อมูลสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 4.57

จากผลการทดลองกับมอเตอร์ในขณะมีโหลด สามารถสรุปได้ว่า วิธีการมอดูเลตที่นำเสนอสามารถควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับได้เป็นอย่างดี และสามารถปรับหรือรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้เป็นศูนย์ได้แม้ที่ความถี่ทำงานต่างกัน รวมทั้งพฤติกรรมการตอบสนองที่สังเกตได้ก็สอดคล้องในเชิงตัวเลขกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

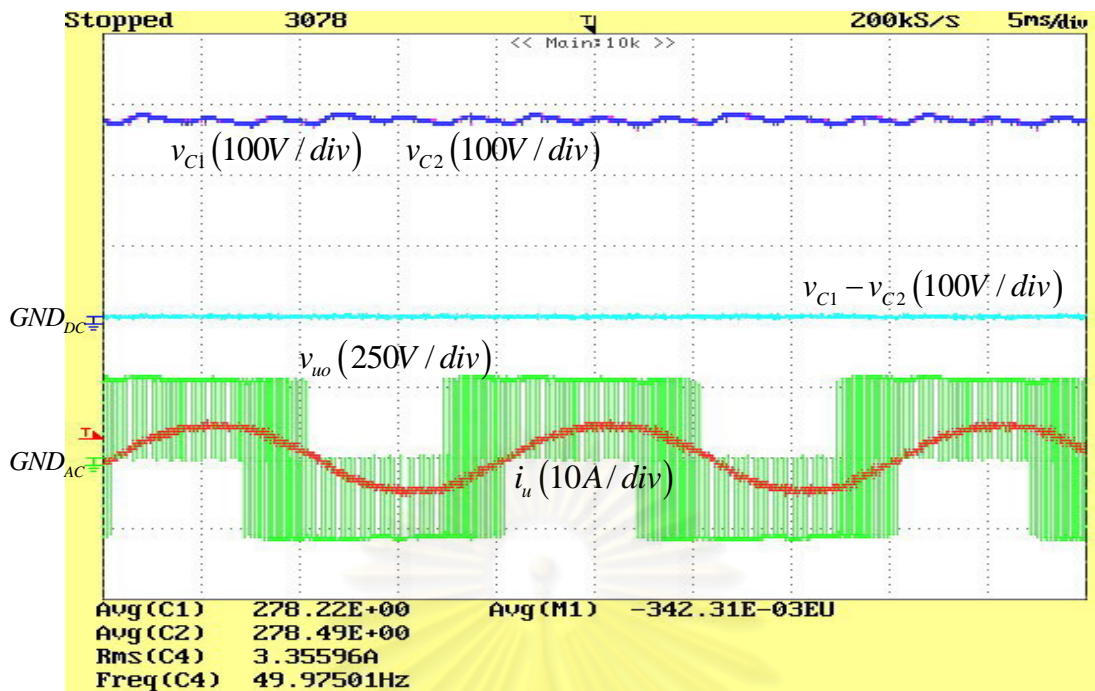
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



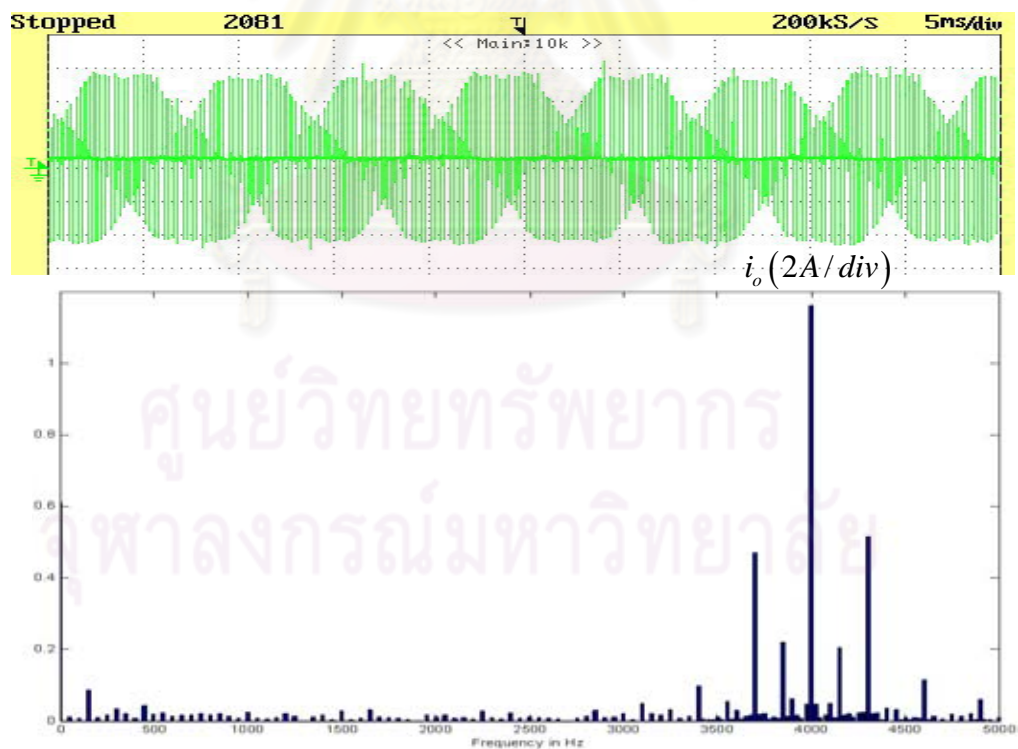
รูปที่ 4.54 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)



รูปที่ 4.55 กระแสเหนี่ยวนำ i_o และ สเปกตรัมของกระแสเหนี่ยวนำ i_o ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)



รูปที่ 4.56 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)



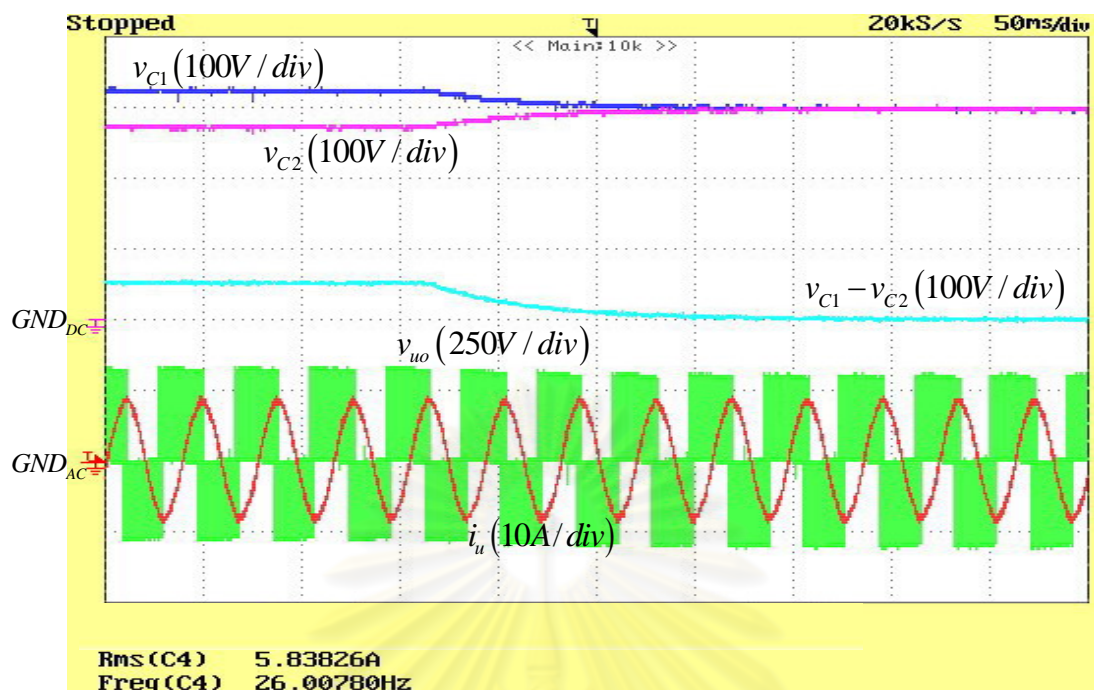
รูปที่ 4.57 กระแสเหนี่ยวนำ i_o และ สเปกตรัมของกระแสเหนี่ยวนำ i_o ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านขับเคลื่อน)

4.2.4 ผลการทดลองการทำงานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำงานในย่านคีนพลังงาน

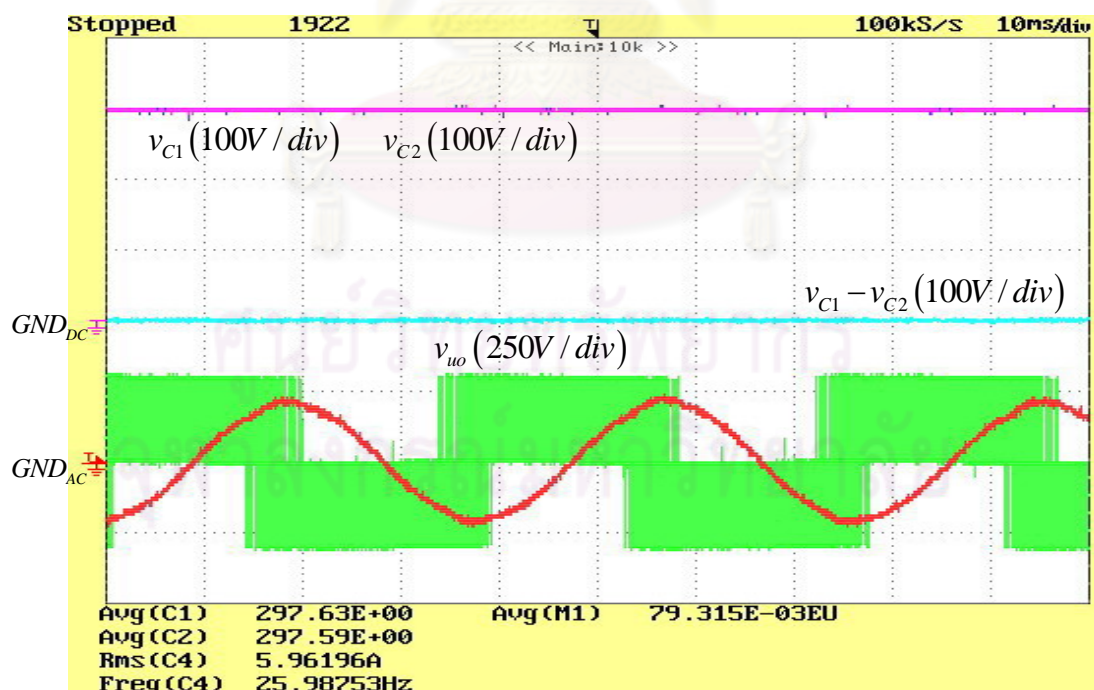
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองการทำงานกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในย่านคีนพลังงาน โดยจุดทำงานในลักษณะนี้จะมีค่าตัวประกอบกำลังที่สูงและอยู่ในย่านที่ควบคุมกระแส นิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิทช์ให้เป็นศูนย์ได้สำหรับการมอดูเลตแบบซั้วเดี่ยวทั้งสามเฟส ผลการทดลองจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในเงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ ทั้งนี้ค่าแรงดันคำสั่งและความถี่หลักมูลของมอเตอร์จะเป็นไปตามรูปแบบของการขับเคลื่อนแบบ V/f โดยจะมีค่าแรงดันคำสั่ง (V_{rms}) 114.45 V ที่ความถี่หลักมูล (f) 25 Hz และมีค่าแรงดันคำสั่ง (V_{rms}) 220 V ที่ความถี่หลักมูล (f) 50 Hz

รูปที่ 4.58 – 4.59 แสดงให้เห็นความสามารถในการควบคุมและรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงเมื่อมอเตอร์ทำงานในย่านคีนพลังงานที่ความถี่ 25 Hz ในรูปที่ 4.58 สภาวะเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ในสภาวะไม่สมดุล ผลการทดลองควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงพบว่า ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะเข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 50 msec สอดคล้องกับค่าแบนด์วิดท์ที่ได้ออกแบบไว้และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล รูปที่ 4.59 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลสอดคล้องกับผลสเปกตรัมของกระแสนิวทรัลที่แสดงในรูปที่ 4.60

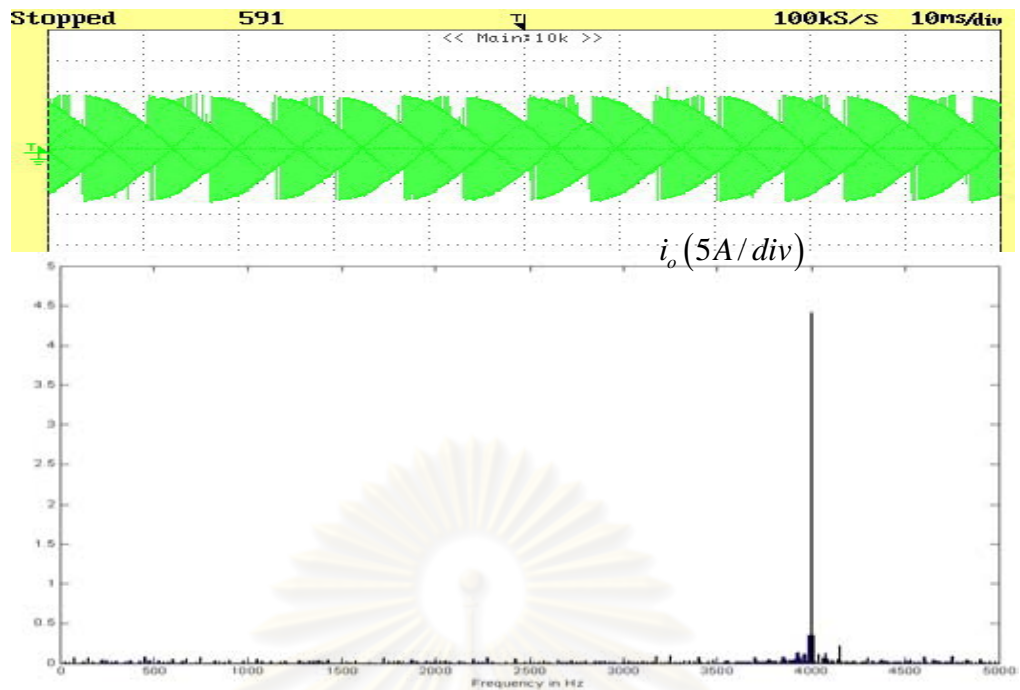
รูปที่ 4.61 – 4.62 แสดงให้เห็นความสามารถในการควบคุมและรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพเมื่อมอเตอร์ทำงานในย่านคีนพลังงานที่ความถี่ 25 Hz ในรูปที่ 4.61 สภาวะเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ในสภาวะไม่สมดุล ผลการทดลองควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงพบว่า ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะเข้าสู่ศูนย์ด้วยค่าคงตัวเชิงเวลาประมาณ 50 msec สอดคล้องกับค่าแบนด์วิดท์ที่ได้ออกแบบไว้และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูล รูปที่ 4.62 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลสอดคล้องกับผลสเปกตรัมของกระแสนิวทรัลที่แสดงในรูปที่ 4.63



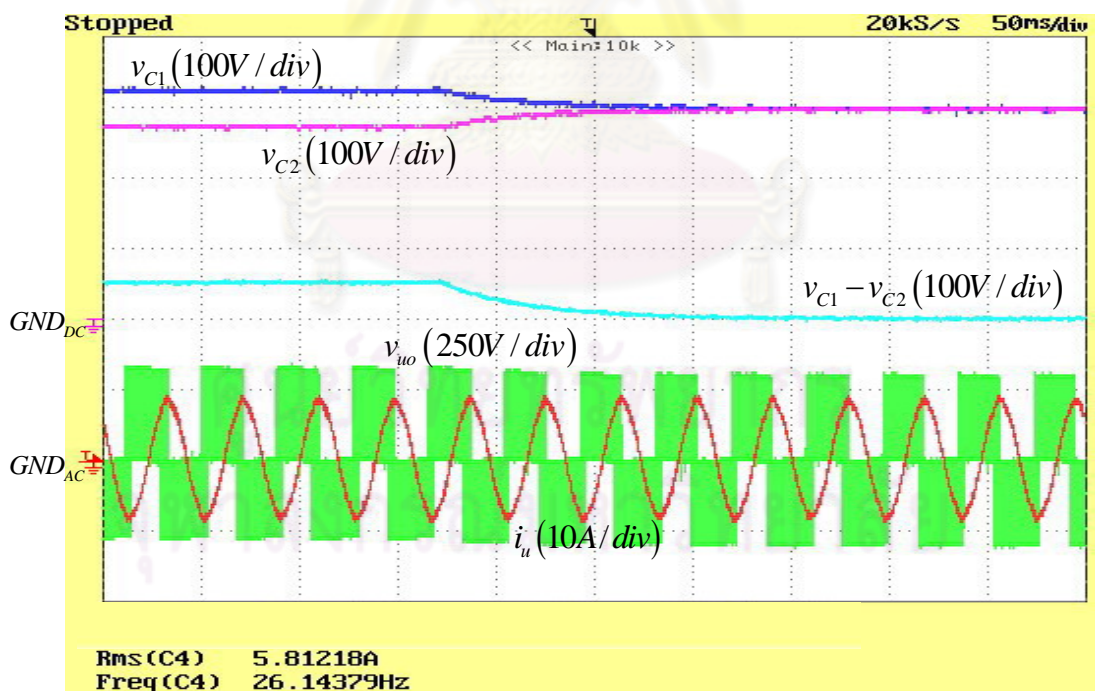
รูปที่ 4.58 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดัน เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์นำทำงานในย่านคืนพลังงาน)



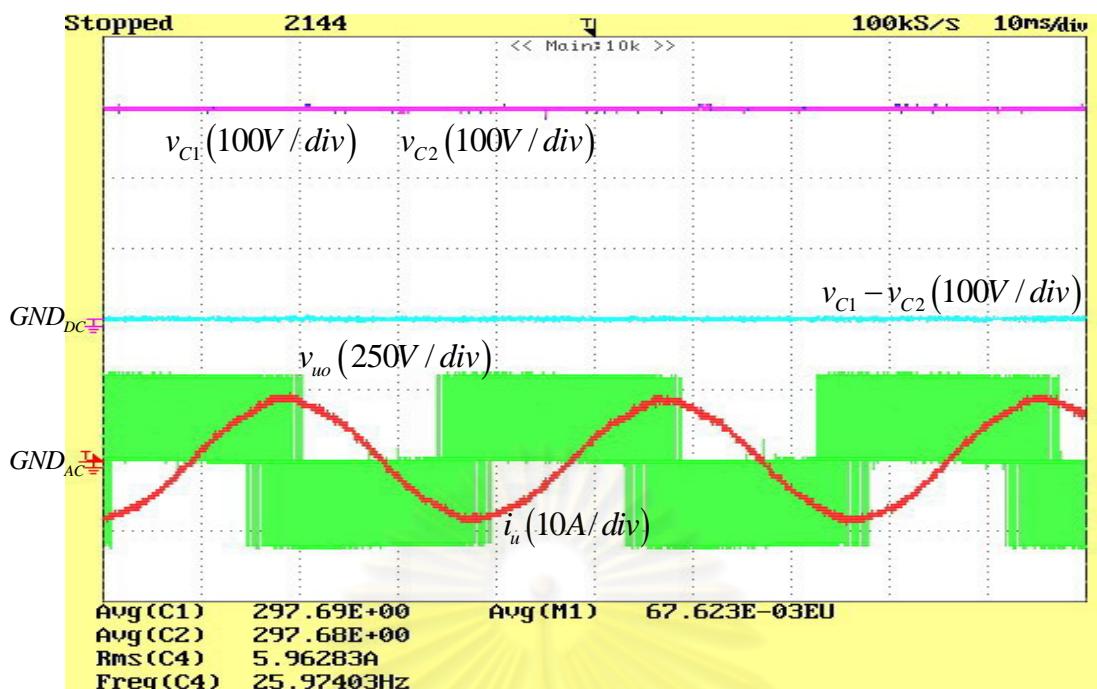
รูปที่ 4.59 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อรักษาสสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์นำทำงานในย่านคืนพลังงาน)



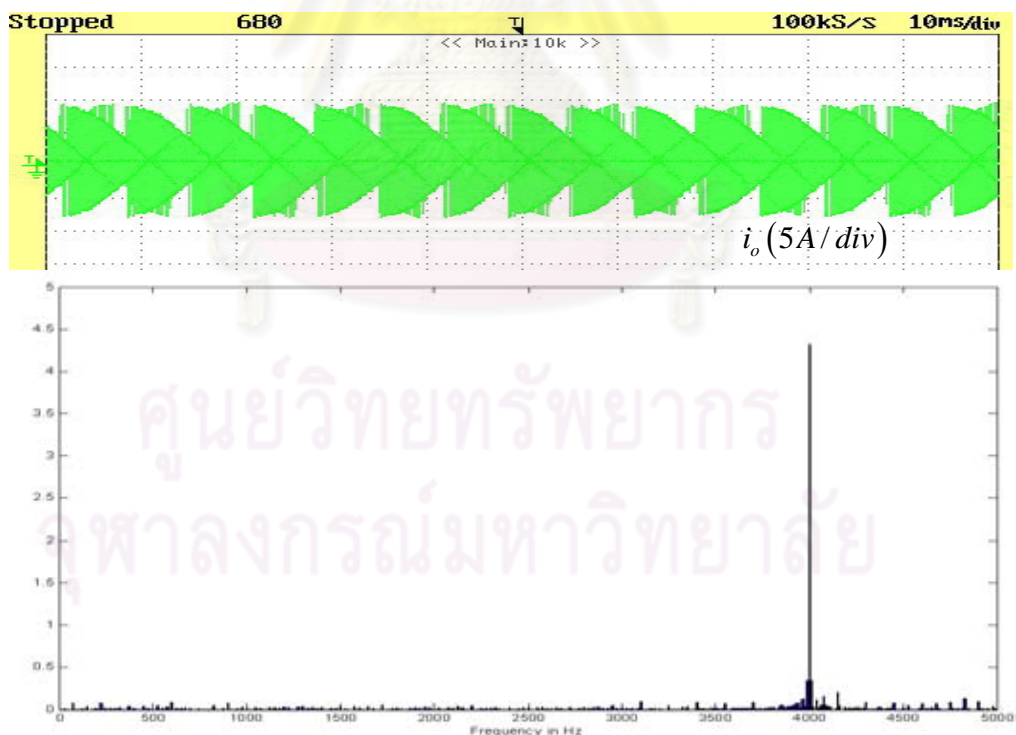
รูปที่ 4.60 กระแสนิวทรีด i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรีด i_o ในสภาวะหยุดตัว เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)



รูปที่ 4.61 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในช่วงปรับสมดุลแรงดัน เมื่อควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)



รูปที่ 4.62 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1} , v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)



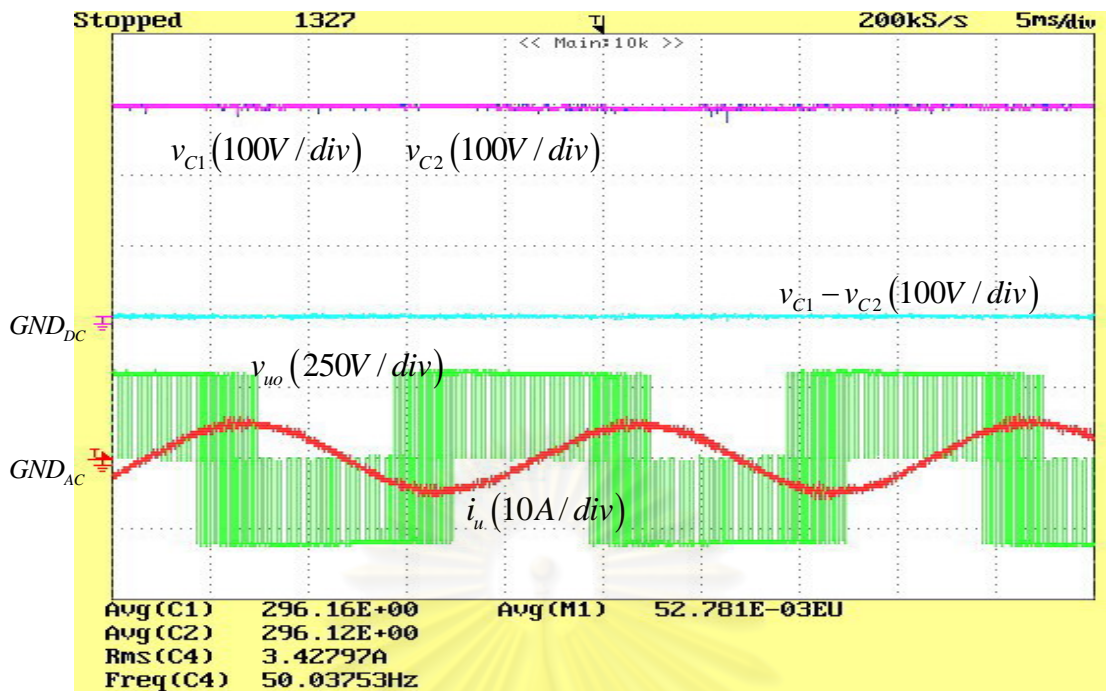
รูปที่ 4.63 กระแสนิวทริล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทริล i_o ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 25\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)

รูปที่ 4.64-4.67 เป็นผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนความถี่ทำงานของมอเตอร์เป็น 50 Hz ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระบบยังคงสามารถรักษาสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริงหรือกำลังจินตภาพได้ดีเหมือนเดิม ในรูปที่ 4.64 ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมุลสอดคล้องกับข้อมูลสเปกตรัมของกระแสไนวทรลในรูปที่ 4.65 ในทำนองเดียวกันเมื่อเปลี่ยนมาควบคุมสมดุลผ่านกำลังงานจินตภาพ จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.66-4.67 ผลต่างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์และไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมุลสอดคล้องกับข้อมูลสเปกตรัมของกระแสไนวทรลในรูปที่ 4.67

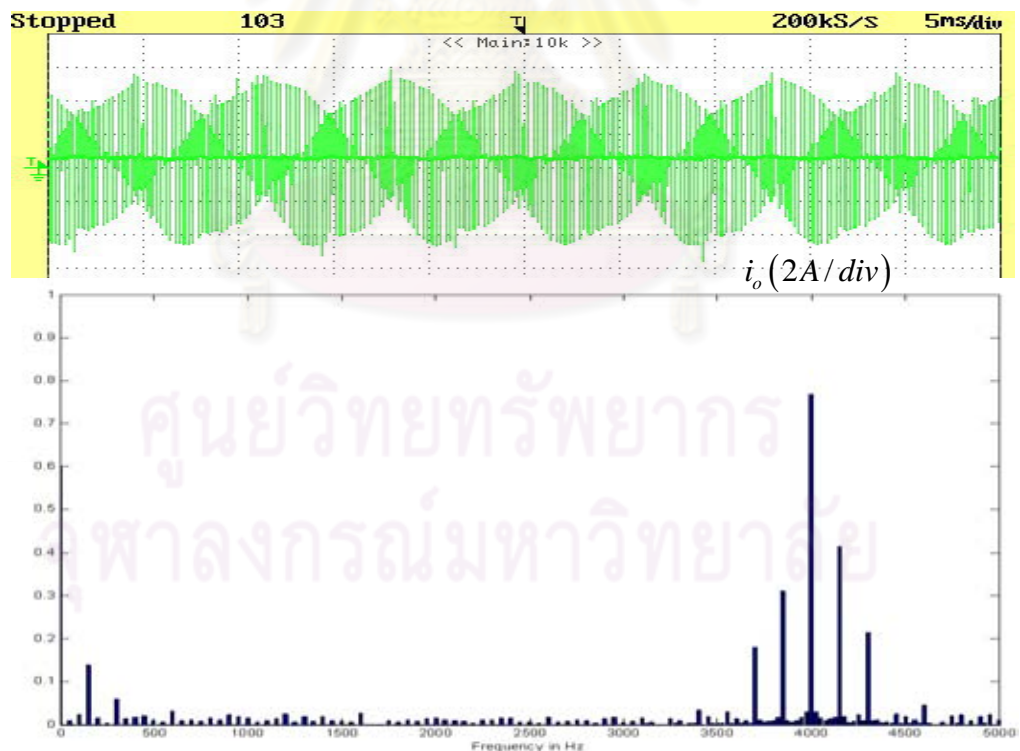
จากผลการทดลองกับมอเตอร์ในขณะที่ทำงานในย่านคืนพลังงาน สามารถสรุปได้ว่า วิธีการมอดูเลตที่นำเสนอสามารถควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับได้เป็นอย่างดี และสามารถปรับหรือรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้เป็นศูนย์ได้แม้ที่ความถี่ทำงานต่างกัน รวมทั้งพฤติกรรมตอบสนองที่สังเกตได้ก็สอดคล้องใจเชิงตัวเลขกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

จากผลการจำลองและผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในบทนี้ ซึ่งได้ทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับเมื่อขับโหลดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ หรือเมื่อขับโหลดมอเตอร์ทั้งในขณะมีและไม่มีโหลดทางกล รวมทั้งในย่านคืนพลังงานด้วย ยืนยันได้ว่า วิธีการมอดูเลตที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถควบคุมและรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้อย่างมีประสิทธิภาพตรงตามทฤษฎีทุกประการ และการวิเคราะห์ที่นำเสนอก็มีความถูกต้องเช่นกัน

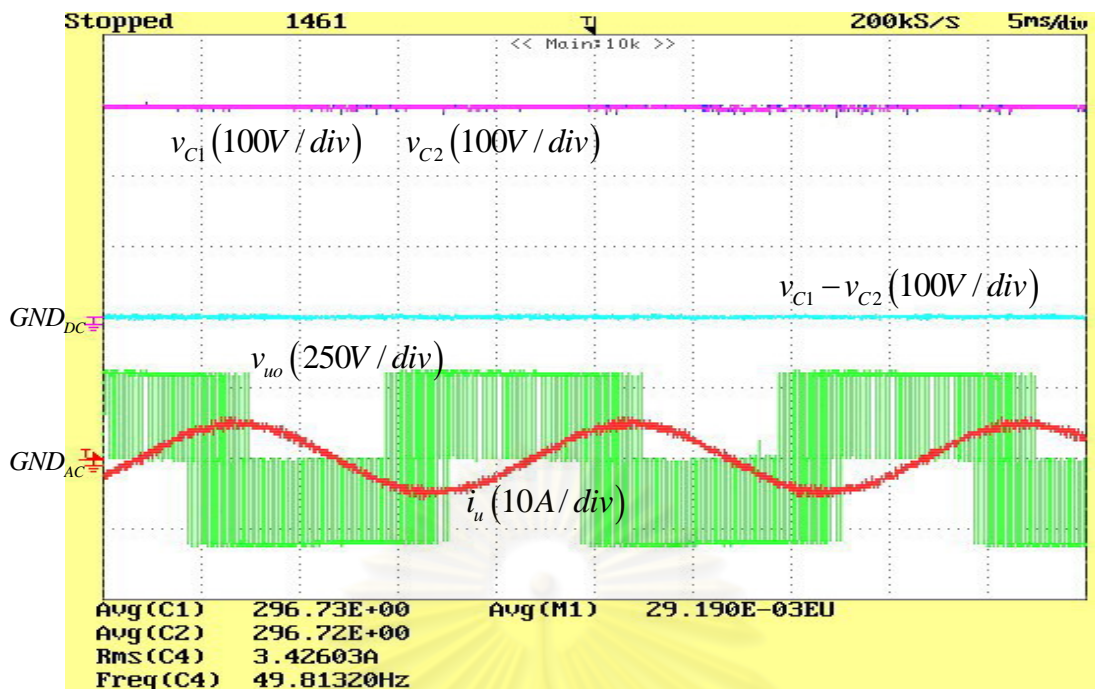
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



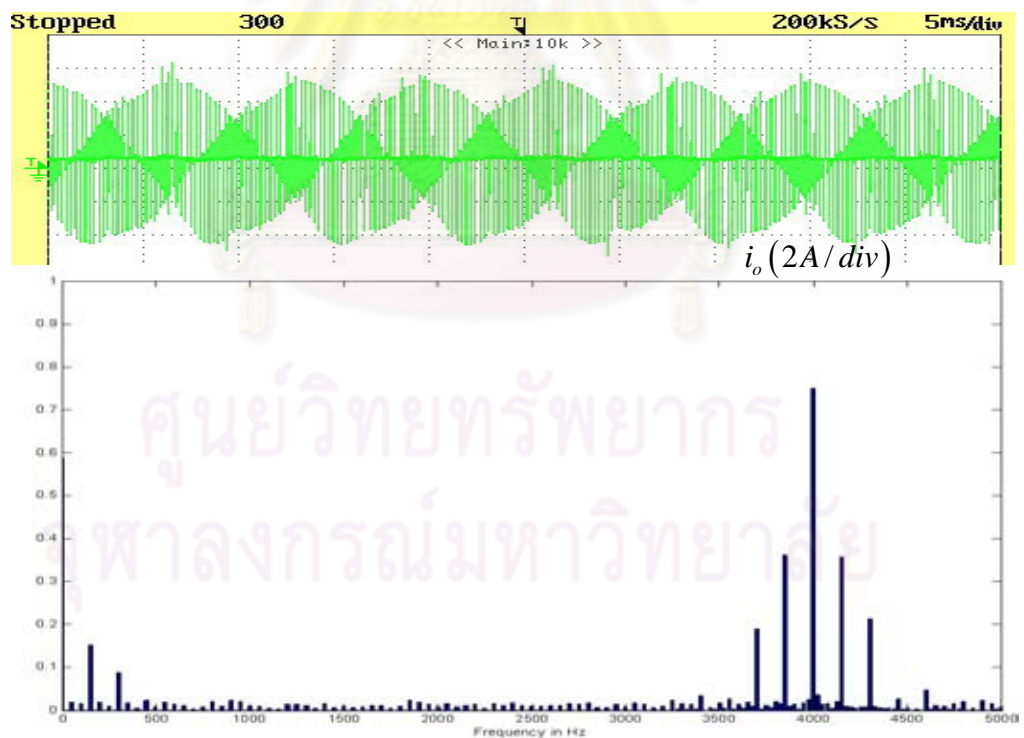
รูปที่ 4.64 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1}, v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)



รูปที่ 4.65 กระแสเหนี่ยวนำ i_o และ สเปกตรัมของกระแสเหนี่ยวนำ i_o ในสถานะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจริง (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)



รูปที่ 4.66 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ v_{C1} , v_{C2} ผลต่างแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $v_{C1} - v_{C2}$ แรงดันด้านออก v_{uo} กระแสด้านออก i_u ตามลำดับ เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)



รูปที่ 4.67 กระแสนิวทรัล i_o และ สเปกตรัมของกระแสนิวทรัล i_o ในสภาวะอยู่ตัว เมื่อรักษาสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านกำลังจินตภาพ (กรณี $f = 50\text{Hz}$ มอเตอร์ทำงานในย่านคืนพลังงาน)

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับการปรับสมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลโดยใช้ทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์และได้ทำการออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลเพื่อทดสอบวิธีที่นำเสนอโดยมีขนาดของวงจรในการออกแบบเท่ากับ 3.3 kVA 380 V

วิธีการมอดูเลตที่นำเสนอใหม่นี้ สามารถใช้ควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับได้ในทุกสภาวะการทำงานโดยไม่มีข้อจำกัดเหมือนวิธีการที่เคยมีการเสนอในงานวิจัยก่อนหน้า ลักษณะการมอดูเลตที่นำเสนอจะเป็นการผสมผสานระหว่างการมอดูเลตแบบซั้วเดี่ยว 2 เฟสและแบบซั้วคู่ 1 เฟสอันเป็นผลมาจากการเลือกใช้ฟังก์ชันการมอดูเลตลำดับศูนย์ที่มีค่าน้อยที่สุด ผลจากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทำให้สามารถวิเคราะห์ค่ากระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ได้อย่างเป็นรูปธรรมในเชิงสมการ และนำไปสู่แนวทางในการควบคุมกระแสนิวทรัลผ่านค่ากำลังจริงหรือกำลังจินตภาพได้ ส่งผลให้เราสามารถออกแบบวงจรควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้โดยง่ายและสามารถกำหนดความเร็วในการเข้าสู่จุดสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้

ความถูกต้องของทฤษฎีที่นำเสนอยืนยันได้อย่างชัดเจนจากผลการจำลองและผลการทดลองอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการจำลองและทฤษฎีซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการควบคุมสมดุลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้มีผลตอบสนองเชิงเวลาตามที่ออกแบบ และสามารถควบคุมกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ให้มีค่าเป็นศูนย์เมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมดุลและไม่ปรากฏการแกว่งที่ความถี่สามเท่าของความถี่หลักมูลของกระแสด้านออก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัลด้วยวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่นำเสนอมีจำนวนครั้งของการสวิตช์ต่อหนึ่งคาบการสวิตช์ทั้งหมด 8 ครั้ง ซึ่งมีจำนวนของการสวิตช์มากกว่าวิธีการมอดูเลตแบบซั้วเดี่ยวสามเฟสอยู่ 2 ครั้ง จึงควรพัฒนาวิธีการมอดูเลตแบบใหม่โดยใช้ทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ให้มีจำนวนครั้งการสวิตช์ต่อหนึ่งคาบการสวิตช์ทั้งหมด 6 ครั้ง โดยที่ยังสามารถควบคุมกระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์ได้ตลอดพิสัยการทำงานเช่นเดิม

2. การทดลองวิธีการมอดูเลตแบบใหม่ที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้ ไม่ได้ทดสอบการทำงานในช่วงมอดูเลตเกิน ดังนั้นจึงควรที่จะมีการศึกษาแนวทางการมอดูเลตแบบใหม่ในย่านการมอดูเลตเกินด้วย เพื่อให้ทฤษฎีมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาอังกฤษ

- [1] Nabae, A.; Takahashi, I. and Akagi, H. A new neutral-point-clamped PWM inverter. IEEE Transactions on Industry Applications 17. 5 (1981):518-523.
- [2] Velaerts, B.; Bingen, G.; Mathys, P. and Tatakis, E. A novel approach to the generation and optimization of three-level PWM waveforms for three-level inverters. Conference Record of IEEE-PESC. 2 (1988):1255-1262.
- [3] Celanovic, N. and Boroyevich, D. A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters. IEEE Transactions on Power Electronics 15. 2 (2000):242-249.
- [4] Newton, C. and Sumner, M. Neutral point control for multilevel inverters: Theory, design and operational limitations. Conference Record IAS Annual Meeting (1997):1336-1343.
- [5] Song, Q.; Liu, W.; Yu, Q.; Xie, X. and Wang, Z. A neutral-point potential balancing algorithm for three-level NPC inverters using analytically injected zero-sequence voltage. Proceedings of APEC. 1 (2003):1572-1580.
- [6] Pou, J.; Zaragoza, J.; Rodriguez, P.; et al. Fast Processing Modulation Strategy for the Neutral Point Clamped Converter Elimination of Low Frequency Voltage oscillation in the neutral point. IEEE Transactions on Industrial Electronics 54. 4 (2007):2288-2294.
- [7] Tallam, R.M.; Naik, R. and Nondahl, T.A. A carrier-based PWM scheme for neutral-point voltage balancing in three-level inverters. IEEE Transactions on Industry Applications 41. 6 (2005):1734-1743.
- [8] Sommer, R.; Mertens, A.; Griggs, M.; Bruckmann, M.; et al. New Medium Voltage Drive Systems using Three-Level Neutral Point Clamped Inverter with High Voltage IGBT. Conf. Rec. IAS Annu. Meeting (1999):1513-1519.
- [9] Busquets-Monge, S.; Bordonau, J.; Boroyevich, D. and Somavilla, S. The Nearest Three Virtual Space Vector PWM - A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter. IEEE Power Electronics Letters 2 (2004):11-15.

ภาษาไทย

[10] ไพบูลย์ เกียรติสุขคนาทร และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. วิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับ เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์โดยอาศัยการแปลงเชิงเรขาคณิต. การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31 (2551):513-516.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอภิชาติ แสงสีทอง เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2524 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2546 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

อภิชาติ แสงสีทอง สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิช “วิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับการปรับ สมดุลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สามระดับโดยใช้ทฤษฎีของเมทริกซ์คอนเวอร์ เตอร์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31, ตุลาคม 2551, หน้า 517–520.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย