

วิธีการใหม่ในการกำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา  
โดยพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขา พร้อมกัน



นายนครศ ชูดวง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A NOVEL PWM SIGNAL GENERATING METHOD FOR 3 PHASE 4 LEG INVERTERS  
CONSIDERING ALL 4 POLE VOLTAGES SIMULTANEOUSLY



Mr.Nakharet Chudoung

สถาบันวิทยบริการ  
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 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วิธีการใหม่ในการกำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา โดยพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขาพร้อมกัน

โดย

นายนครศ ชูดวง

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

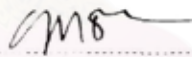
อาจารย์ที่ปรึกษา


อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

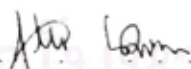
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาโท

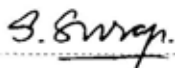
  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุษณา กุลวิฑิต)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพิระบุต)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

นภเรศ ชูดวง : วิธีการใหม่ในการกำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขาโดยพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขา พร้อมกัน ( A NOVEL PWM SIGNAL GENERATING METHOD FOR 3 PHASE 4 LEG INVERTERS CONSIDERING ALL 4 POLE VOLTAGES SIMULTANEOUSLY ) อ. ที่ปรึกษา: อ. ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์ วาณิชย์, 84 หน้า.

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 4 ขาสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายโดยนำเสนอแนวคิดใหม่ในการกำเนิดสัญญาณ PWM ที่อาศัยวิธีการบวกสัญญาณอ้างอิงของแรงดัน ด้วยค่าแรงดันศูนย์ที่ได้มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขาพร้อมกัน ทำให้การกำเนิดสัญญาณ PWM สามารถทำได้ง่าย และ ปราศจากเงื่อนไขที่ซับซ้อนเกินความจำเป็นเหมือนผลงานวิจัยในอดีต อีกทั้งยังสามารถอาศัยแนวคิดเดียวกันนี้เชื่อมโยงไปสู่การทำมอดูเลชันแบบ 3 ขา ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขาได้โดยง่าย

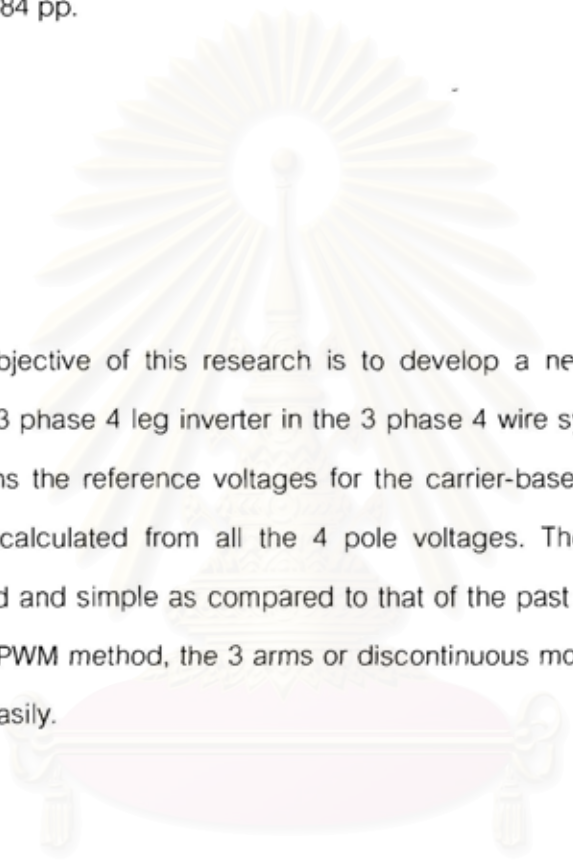
## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2549.....

## 467 03405 21 : MAJOR POWER ELECTRONIC

KEY WORD: 4 LEG 4 WIRE INVERTER / PWM

NAKHARET CHUDOUNG : A NOVEL PWM SIGNAL GENERATING METHOD FOR 3 PHASE 4 LEG INVERTERS CONSIDERING ALL 4 POLE VOLTAGES SIMULTANEOUSLY. THESIS ADVISOR : SOMBOON SANGWONGWANICH, Ph.D., 84 pp.



The objective of this research is to develop a new PWM signal generating method for a 3 phase 4 leg inverter in the 3 phase 4 wire system. The proposed PWM method obtains the reference voltages for the carrier-based modulation by adding a zero voltage calculated from all the 4 pole voltages. The PWM algorithm is more straightforward and simple as compared to that of the past research works. Moreover, with this new PWM method, the 3 arms or discontinuous modulation of the inverter can be obtained easily.

# สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department...ELECTRICAL ENGINEERING Student's signature .....  
Field of study...ELECTRICAL ENGINEERING Advisor's signature.....  
Academic year .....2006.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัย เป็นอย่างดีตลอดมาขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ผู้เขียนตั้งแต่ต้นอดีตจนถึงปัจจุบัน และวิทยานิพนธ์นี้จะเสร็จสมบูรณ์ไม่ได้ถ้าขาดบุคคลดังต่อไปนี้ ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน ที่ช่วยดูแลการทำวิจัยและให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ รวมถึงขอบคุณรุ่นพี่รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างงานวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ที่ให้ชีวิต โอกาส ความช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกๆ ด้านและเป็นกำลังใจที่ดีให้กับผู้เขียนเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์ .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	4
2 การกำเนิดสัญญาณมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 3 ขา .....	5
2.1 วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ .....	6
2.2 วิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ .....	8
3 การกำเนิดสัญญาณมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา .....	10
3.1 วิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ที่มาจากการพิจารณาแรงดันชั่วโดยที่ไม่พิจารณาค่าแรงดันชั่วของกิ่งสวิตช์ที่ควบคุมสายนิวตรอน (ไม่นำแรงดันศูนย์มาคิด) .....	10
3.2 วิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ที่มาจากการพิจารณาแรงดันชั่วทั้ง 4 ขาพร้อมกัน .....	12
3.3 Three-Dimensional SpaceVector Modulation ( 3D-SVM ) .....	13
3.4 วิธีการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา .....	19
4 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง .....	24
4.1 ผลการจำลองการทำงาน .....	24
4.1.1 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....	24



4.1.2	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาด ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส .....	31
4.1.3	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรง ดันสูงสุดเท่ากันทั้ง 3 เฟสแต่มีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา.....	34
4.1.4	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรง ดันไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟสและมีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา.....	37
4.2	ผลการทดลองการทำงาน .....	41
4.2.1	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....	41
4.2.2	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาด ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส .....	47
4.2.3	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรง ดันสูงสุดเท่ากันทั้ง 3 เฟสแต่มีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา.....	53
4.2.4	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรง ดันไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟสและมีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา.....	59
4.3	ผลการจำลองการทำงานเมื่อเพิ่มส่วนการประวิงเวลาของสวิตช์ .....	65
4.4	ผลการทดลองการทำงานเมื่อชดเชยแรงดันในส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์...	67
4.4.1	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....	68
4.4.2	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาด ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส.....	71
4.4.3	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรง ดันสูงสุดเท่ากันทั้ง 3 เฟสแต่มีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา.....	74
4.4.4	เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรง ดันไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟสและมีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา.....	78
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	82
5.1	สรุปผลงานวิจัย .....	82
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	82
	รายการอ้างอิง .....	83
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	84



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 4 สาย .....	2
3.1 ค่าของเมทริก X ที่ค่าแวกเตอร์แรงดันหลักต่าง ๆ .....	6



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา ที่มีการเชื่อมต่อ นิวทรัลกับกึ่งกลางแรงดันบัสไฟตรง .....	1
1.2 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา ที่เพิ่มกึ่งสวิตช์กึ่งที่ 4 มาควบคุมสายนิวทรัล.....	2
2.1 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา .....	5
2.2 สเปซเวกเตอร์ของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 3 ขา.....	6
2.3 การคำนวณแรงดันเฉลี่ยสำหรับเซกเตอร์ใด ๆ .....	7
2.4 รูปแบบการสวิตช์ของแรงดัน PWM ของเซกเตอร์ที่ 1 ใน 1 คาบการสวิตช์.....	8
3.1 วงจรของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา .....	10
3.2 ค่าแรงดันที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM เมื่อ $v_{fn} \neq 0$ .....	11
3.3 ค่าแรงดันที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM เมื่อ $v_{fn} \neq 0$ (พิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขา) .....	12
3.4 ขอบเขตบนและล่างของค่าแรงดันที่ใช้ในการทำ PWM .....	13
3.5 สเปซเวกเตอร์ของแรงดันอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา .....	15
3.6 รูปแบบการสวิตช์ของแรงดัน PWM ของ Prism I Tetrahedron 1 ใน 1 คาบการสวิตช์ .....	17
3.7 รูปแบบการสวิตช์ของแรงดัน PWM เมื่อใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (nnnn) .....	19
3.8 รูปแบบการสวิตช์ของแรงดัน PWM เมื่อใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (pppp) .....	21
3.9 ความเชื่อมโยงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ไปสู่ การทำ 3D-SVM และ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 4 ขา .....	23
4.1 ค่าแรงดันคำสั่ง 3 เฟสสมดุล .....	26
4.2 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....	26
4.3 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....	27
4.4 ค่าแรงดันไหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง( $v_{fn} = 0$ ) เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล.....	27
4.5 ค่าแรงดันไหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อ ZOOM ( $v_{fn} = 0$ ) เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....	27
4.6 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{V_{max} + V_{min}}{2})$ ) เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล.....	28

4.7 ค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....28

4.8 ค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อ ZOOM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....28

4.9 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล..... 29

4.10 ค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....29

4.11 ค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อ ZOOM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล..... 29

4.12 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....30

4.13 ค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....30

4.14 ค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อ ZOOM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....30

4.15 ค่าแรงดันคำสั่ง ไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....32

4.16 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล  
 (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน).....32

4.17 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)..... 33

4.18 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)..... 33

4.19 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)..... 33

4.20 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....34

4.21 ค่าแรงดันคำสั่ง 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....35

4.22 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล  
 (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....36

4.23 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )..... 36

4.24 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....36

4.25 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....37

4.26 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )..... 37

4.27 ค่าแรงดันคำสั่ง 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม) .....39

4.28 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล  
 (ต่างทั้งขนาดและมุม).....39

4.29 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม) .....39

4.30 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม) .....40

4.31 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม) .....40

4.32 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม) .....40

4.33 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....43

4.34 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....43

4.35 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....43

4.36 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....44

4.37 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....44

4.38 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = 0$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....44

4.39 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....45

4.40 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....45

4.41 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....45

4.42 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....46

4.43 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....46

## ภาพประกอบ

หน้า

- 4.44 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล .....46
- 4.45 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....49
- 4.46 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน).....49
- 4.47 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....49
- 4.48 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....50
- 4.49 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....50
- 4.50 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = 0$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....50
- 4.51 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....51
- 4.52 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....51
- 4.53 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....51
- 4.54 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....52
- 4.55 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....52



- 4.56 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน) .....52
- 4.57 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....55
- 4.58 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....55
- 4.59 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....55
- 4.60 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....56
- 4.61 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....56
- 4.62 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = 0$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....56
- 4.63 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....57
- 4.64 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....57
- 4.65 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....57
- 4.66 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....58
- 4.67 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....58



- 4.68 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....58
- 4.69 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีค่าแรงดัน  
 คำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....61
- 4.70 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{(V_{\max} + V_{\min})}{2}$  ในกรณีค่าแรงดัน  
 คำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....61
- 4.71 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีค่าแรงดัน  
 คำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....61
- 4.72 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีค่าแรงดัน  
 คำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....62
- 4.73 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่าแรงดัน  
 คำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....62
- 4.74 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่าแรงดัน  
 คำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....62
- 4.75 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{(V_{\max} + V_{\min})}{2}$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....63
- 4.76 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{(V_{\max} + V_{\min})}{2}$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....63
- 4.77 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....63
- 4.78 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....64
- 4.79 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....64

- 4.80 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) .....64
- 4.81 ค่าแรงดันคำสั่ง 3 เฟสไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )  
 เมื่อเพิ่มส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์ .....66
- 4.82 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
 เมื่อเพิ่มส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์ .....66
- 4.83 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล  
 (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) เมื่อเพิ่มส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์ .....66
- 4.84 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
 เมื่อทำการชดเชยแรงดันส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์ .....67
- 4.85 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล  
 (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) เมื่อทำการชดเชยแรงดันส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์ .....67
- 4.86 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน  
 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....68
- 4.87 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$  ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็น  
 แรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....69
- 4.88 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็น  
 แรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....69
- 4.89 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็น  
 แรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....69
- 4.90 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่าแรงดันคำสั่ง  
 เป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....70
- 4.91 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$ ) ในกรณีค่า  
 แรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว.....70
- 4.92 ค่าแรงดันที่ใช้พิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ ) ในกรณีค่าแรง  
 ดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว.....70

- 4.93 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันจากผลของการประวิง  
 เวลาของสวิตช์แล้ว.....71
- 4.94 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน  
 และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....72
- 4.95 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$  ในกรณีค่าแรงดันสูงสุด  
 ไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....72
- 4.96 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีค่าแรงดันสูงสุด  
 ไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....72
- 4.97 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีค่าแรงดันสูงสุด  
 ไม่เท่ากันและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....73
- 4.98 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่าแรงดัน  
 สูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....73
- 4.99 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$ ) ในกรณี  
 ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว.....73
- 4.100 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิง  
 เวลาของสวิตช์แล้ว.....74
- 4.101 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิง  
 เวลาของสวิตช์แล้ว.....74
- 4.102 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$   
 และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....75
- 4.103 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$  ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกัน  
 ไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....75

4.104 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกัน  
 ไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....76

4.105 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกัน  
 ไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....76

4.106 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่ามุมต่าง  
 เฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....76

4.107 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ )  
 ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการ  
 ประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....77

4.108 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการ  
 ประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว.....77

4.109 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการ  
 ประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว.....77

4.110 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและ  
 มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....78

4.111 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$  ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาด  
 และมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....79

4.112 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาด  
 และมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....79

4.113 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาด  
 และมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....79

4.114 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีไม่เท่ากัน  
 ทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว .....80

ภาพประกอบ

หน้า

- 4.115 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ )  
 ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลของการ  
 ประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว.....80
- 4.116 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
 ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลของการ  
 ประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว.....80
- 4.117 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )  
 ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลของการ  
 ประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว.....81



สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

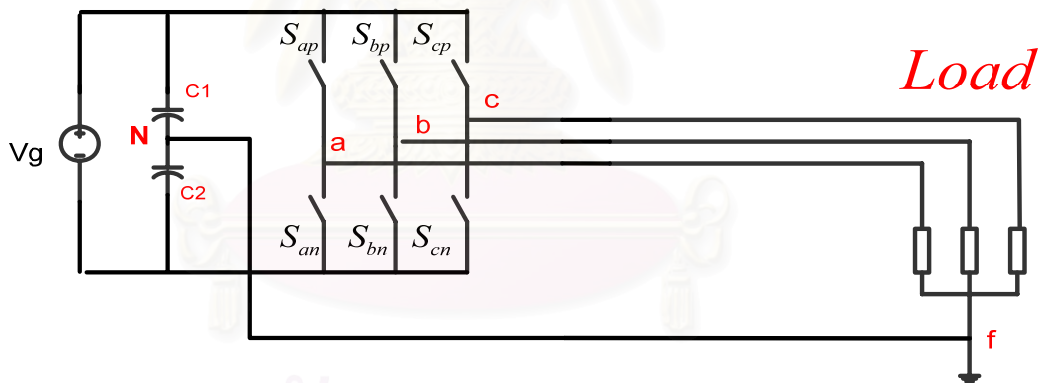
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทางอุตสาหกรรมรวมถึงอาคารสำนักงาน ซึ่งอาจจะประกอบด้วยโหลด ที่สมดุล หรือ โหลดไม่สมดุล ก็ได้ เช่น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำรอง (UPS) , วงจรกรองแอคทีฟ ( Active filter ) และ วงจรเรียงกระแสแบบปรับความกว้างพัลส์ (PWM-Rectifier) เป็นต้น สำหรับในกรณีที่ระบบ 3 เฟส 4 สาย อินเวอร์เตอร์ที่ประยุกต์ใช้ก็จะมีโครงสร้างในรูปแบบลักษณะที่เป็นแบบ 3 เฟส 4 สาย ด้วยเช่นกัน โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย สามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะดังนี้คือ

1.) อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา ที่มีการเชื่อมต่อสายนิวทรัล กับกึ่งกลางแรงดันต้นบัสไฟตรง ดังแสดงในรูปที่ 1.1

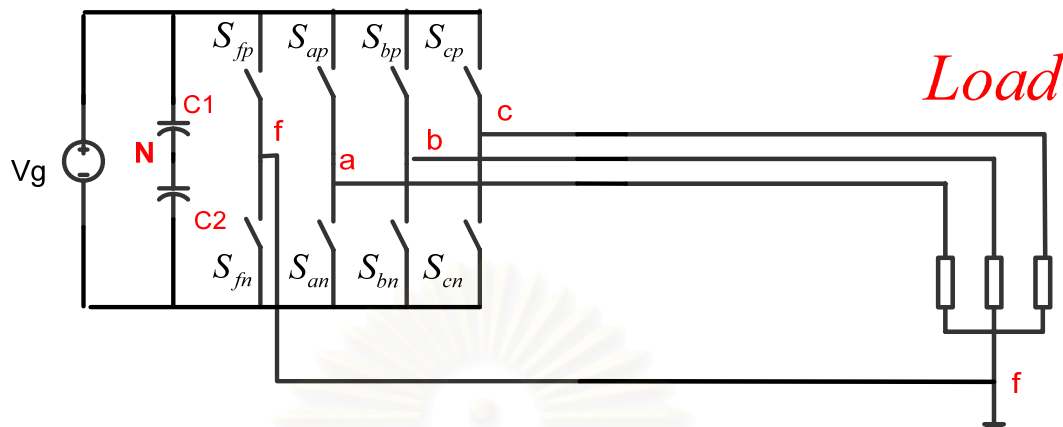


รูปที่ 1.1 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา ที่มีการเชื่อมต่อ นิวทรัลกับกึ่งกลางแรงดันต้นบัสไฟตรง

วิธีนี้มีข้อดีตรงที่อัลกอริทึมในการกำเนิดสัญญาณ PWM ยังคงเหมือนเช่นเดียวกันกับในกรณี อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา ดังเดิม แต่ข้อเสียก็คือ ไม่สามารถสร้างแรงดันด้วยการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ได้ และ ตัวเก็บประจุที่แรงดันบัสไฟตรงจะมีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เพื่อรองรับกระแสลำดับศูนย์ ( Zero- sequence ) ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุนี้ นอกจากนี้ยังเกิดข้อจำกัด จากการเลื่อนของแรงดันที่จุดกึ่งกลางของแรงดันบัสไฟตรง อันเนื่องมาจากความไม่สมมาตรของตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติอีกด้วย



2.) อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา (Four Leg Inverter) เพิ่มกึ่งสวิตช์กึ่งที่ 4 มาควบคุมสายนิวทรัล ซึ่ง สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา ที่เพิ่มกึ่งสวิตช์กึ่งที่ 4 มาควบคุมสายนิวทรัล

อินเวอร์เตอร์ประเภทนี้ จะเพิ่มสวิตช์กึ่งที่ 4 เข้ามา เพื่อเพิ่มอิสระในการควบคุมแรงดันลำดับศูนย์ ซึ่งทำให้กระแสลำดับศูนย์สามารถไหลวนผ่านกึ่งสวิตช์ที่ 4 นี้ได้ ด้วยเหตุนี้ ตัวเก็บประจุที่แรงดันบัสไฟตรง จึงมีขนาดเล็กลง โดยจะรองรับเพียงเฉพาะค่าระลอกคลื่นความถี่สูงของกระแสของโหลด นอกจากนี้ยังสามารถสร้างขนาดแรงดันระหว่างสาย และ นิวทรัลได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ วิธีที่เชื่อมต่อจุดนิวทรัลเข้ากับกึ่งกลางบัสไฟตรง อย่างไรก็ตามการกำเนิดสัญญาณ PWM ก็จะมีคามซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากกึ่งสวิตช์ที่มากยิ่งขึ้น โดยตารางที่ 1.1 จะเปรียบเทียบให้เห็นถึงข้อดี และข้อด้อย ระหว่างอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา และ อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 4 สาย

	Three Leg Four Wire	Four Leg Four Wire
DC link capacitor	ขนาดใหญ่ เพราะต้องควบคุมกระแส Zero-sequence	ขนาดเล็ก เพราะควบคุมเฉพาะ Ripple เท่านั้น
วิธีการทำ PWM	ง่าย	ค่อนข้างซับซ้อน
ค่าสูงสุดของแรงดัน Line to neutral	0.5 Vg	0.577 Vg



ดังนั้นประเด็นสำคัญในการพัฒนาอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 4 ขา ก็คือวิธีการกำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับสวิตช์ทั้ง 4 ขา ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมายังให้ผลที่ยังซับซ้อน และยากต่อการทำความเข้าใจ เช่น วิธี การมอดูเลตสเปซเวกเตอร์แบบ 3 มิติ ( Three-Dimensional Space Vector Modulation ) ซึ่งมีความยุ่งยากในการคำนวณค่อนข้างมาก และ วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยการบวกสัญญาณอ้างอิงของแรงดัน ด้วยแรงดันศูนย์ที่ได้มาจากการหาค่ากลางของแรงดันขั้ว ทั้ง 3 เฟส โดยที่ไม่พิจารณาค่าแรงดันขั้วของกิ่งสวิตช์ที่ควบคุมสายนิวทรัล (ไม่นำแรงดันศูนย์มาคิด ) ทำให้การกำเนิดสัญญาณ PWM มีเงื่อนไขที่ซับซ้อน อีกทั้งยังทำให้การเชื่อมโยงไปสู่การทำมอดูเลชันแบบ 3 ขา (3 arm modulation) ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 4 ขาเป็นไปได้ยากอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา สำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย โดยนำเสนอแนวคิดใหม่ ในการกำเนิดสัญญาณ PWM ที่อาศัยวิธีการบวกสัญญาณอ้างอิงของแรงดัน ด้วยค่าแรงดันศูนย์ที่ได้มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขา พร้อมกัน ( นำแรงดันศูนย์มาคิดด้วย ) ซึ่งทำให้การให้กำเนิดสัญญาณ PWM สามารถทำได้ง่าย และปราศจากเงื่อนไขที่ซับซ้อนเกินความจำเป็น อีกทั้งยังสามารถอาศัยแนวคิดเดียวกันนี้เพื่อเชื่อมโยงไปสู่การทำ 3 arm modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขาได้ ซึ่งทำให้การทำ 3 arm modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา สามารถทำได้โดยง่าย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาวิธีการกำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา เพื่อให้ง่ายในการนำไปใช้งาน

## 1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์

1. พัฒนาอัลกอริทึมการทำ PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขาที่มีแนวคิดสอดคล้องกับการทำ PWM ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา
2. พัฒนาอัลกอริทึมการทำ 3 Arm modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขาที่ไม่ซับซ้อน
3. สร้างอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา เพื่อทดสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น ไปใช้ในการกำเนิดสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา ในอุตสาหกรรมจริง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้น

#### 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีการให้กำเนิดสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา จากบทความในอดีต
2. พัฒนาอัลกอริทึมการให้กำเนิดสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา
3. จำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น
4. สร้างเครื่องต้นแบบของอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการทดสอบ
5. เก็บข้อมูลและสรุปผล
6. เขียนวิทยานิพนธ์

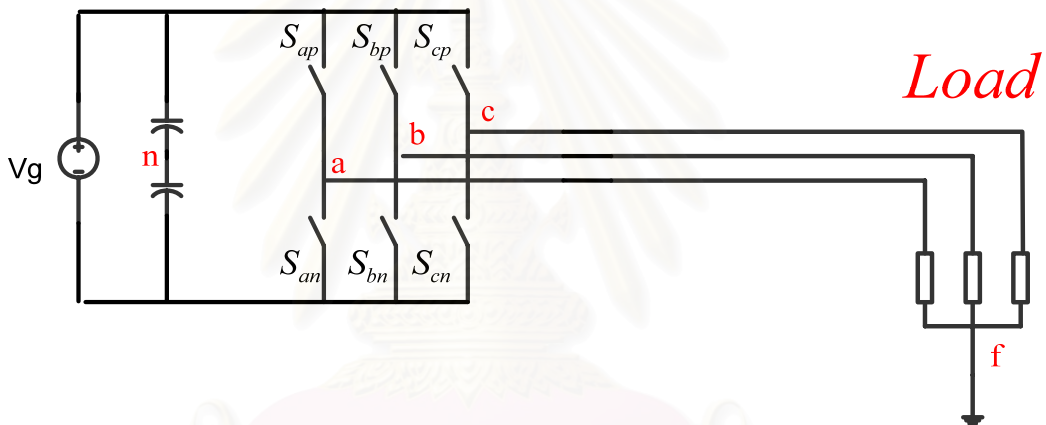


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การกำเนิดสัญญาณมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา

เนื่องจากวิธีการ กำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา จะอาศัย  
กรอบความคิดเดียวกันกับในกรณีของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา ดังนั้นในเบื้องต้น จะขอ  
กล่าวโดยสังเขปถึงหลักการพื้นฐานของวิธีการกำเนิดสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส  
แบบ 3 ขา หลังจากนั้นจึงพัฒนาแนวคิดพื้นฐานดังกล่าว สำหรับในกรณีอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4  
ขา ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา

จากรูปที่ 2.1 แสดงถึงอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 3 ขา ซึ่งเราสามารถแสดงความสัมพันธ์  
ของแรงดันที่จุดต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ถึงสมการที่ (2.3)

$$v_{an} = v_{af} + v_{fn} \quad (2.1)$$

$$v_{bn} = v_{bf} + v_{fn} \quad (2.2)$$

$$v_{cn} = v_{cf} + v_{fn} \quad (2.3)$$

โดยการทำงานของ อินเวอร์เตอร์นั้นเราจะกำหนดแรงดันคำสั่งผ่าน  $v_{af}$ ,  $v_{bf}$  และ  $v_{cf}$  ดังนี้

$$v_{af}^* = \frac{2}{3} A \cos \theta \quad (2.4)$$

$$v_{bf}^* = \frac{2}{3} A \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.5)$$

$$v_{cf}^* = \frac{2}{3} A \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.6)$$

## 2.1 วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์

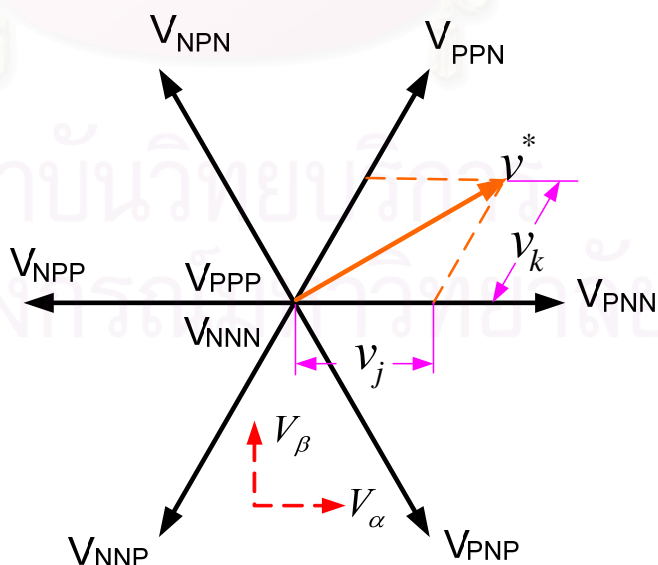
ในเบื้องต้นเราจะนำเสนอวิธีการกำเนิดสัญญาณ PWM แบบสเปซเวกเตอร์ โดยเราสามารถนิยามแรงดันคำสั่ง ในสมการที่ (2.4) ถึงสมการที่(2.6) ในรูปแบบของสเปซเวกเตอร์ได้ดังสมการ (2.7)

$$v^* = \begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{af}^* \\ v_{bf}^* \\ v_{cf}^* \end{bmatrix} \triangleq A \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

จากรูปลักษณะของสวิตช์ทั้ง 6 ตัวของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันได้ด้วยกันทั้งหมด 8 รูปแบบ โดยเราสามารถแสดงเวกเตอร์แรงดันของแรงดัน  $v_{an}$ ,  $v_{bn}$  และ  $v_{cn}$  ตามตำแหน่งของการสวิตช์ได้ดังรูปที่ 2.2 ทั้งนี้เราจะกำหนดให้

- ตัวอักษร P แสดงถึง สถานการณ์ปิดวงจรของสวิตช์ตัวบนของเฟสหนึ่ง ๆ  
 ตัวอักษร N แสดงถึง สถานการณ์ปิดวงจรของสวิตช์ตัวล่างของเฟสหนึ่ง ๆ

โดยมีลำดับของเฟสคือ  $a, b, c$  ตามลำดับ สำหรับ PPP เป็นกรณีที่สวิตช์ตัวบนทั้ง 3 ตัวปิดวงจรพร้อมกัน และ NNN เป็นกรณีที่สวิตช์ตัวล่างทั้ง 3 ตัวปิดวงจรพร้อมกัน ซึ่งเรานิยามเป็นเวกเตอร์ศูนย์



รูปที่ 2.2 สเปซเวกเตอร์ของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 3 ขา

หลักในการสร้างเวกเตอร์แรงดันจากแรงดันคำสั่ง  $v^*$  จะอาศัยการเฉลี่ยแรงดันจากรูปแบบของเวกเตอร์แรงดันหลักทั้ง 8 รูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง  $v^*$  ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะใช้เวกเตอร์แรงดัน PNN และ PPN และคำนวณช่วงระยะเวลาในการใช้เวกเตอร์นั้นๆ ดังนี้

$$t_a = \frac{|v_j|}{|V_{PNN}|} * T \quad (2.8)$$

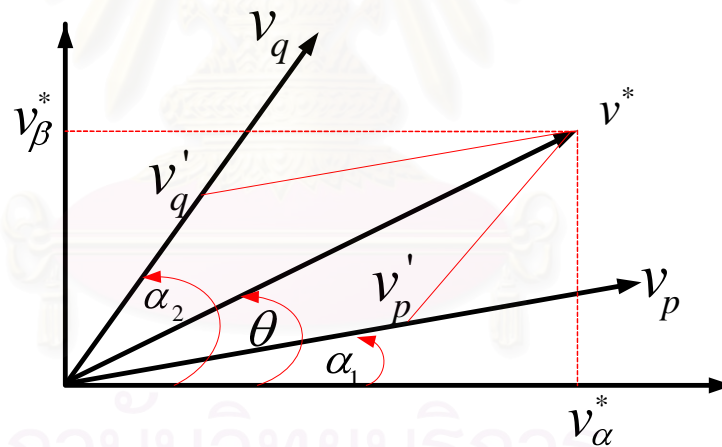
$$t_b = \frac{|v_k|}{|V_{PPN}|} * T \quad (2.9)$$

$$t_0 = T - t_a - t_b \quad (2.10)$$

โดยนิยามให้  $T$  คือ คาบเวลาของการสวิตช์

$t_0$  คือ ระยะเวลา ในการใช้เวกเตอร์ศูนย์

และเราสามารถคำนวณหาค่าเวลา  $t_a, t_b$  สำหรับกรณีทั่วไปได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 การคำนวณแรงดันเฉลี่ยสำหรับเซกเตอร์ใด ๆ

รูปที่ 2.3 แสดงถึงเซกเตอร์ใด ๆ เซกเตอร์หนึ่ง ที่มีแรงดันหลักคือ เวกเตอร์  $v_p$  และ  $v_q$  โดยที่  $\alpha_2 - \alpha_1 = 60^\circ$  จากรูปที่ 2.3 และ สมการที่ (2.8) ถึงสมการที่ (2.10) เราสามารถคำนวณได้ว่า

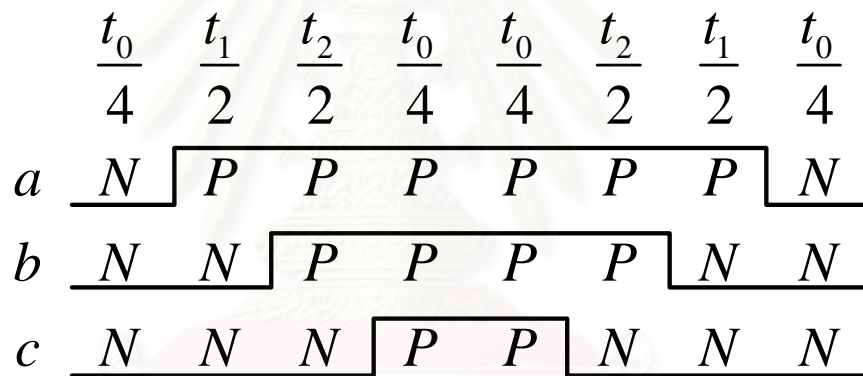
$$\begin{bmatrix} v'_p \\ v'_q \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin \alpha_2 & -\cos \alpha_2 \\ -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{t_a}{T} \\ \frac{t_b}{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_p}{V_g} \\ \frac{v_q}{V_g} \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}V_g} \begin{bmatrix} \sin \alpha_2 & -\cos \alpha_2 \\ -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

จากสมการ (2.7) จะได้

$$\begin{bmatrix} \frac{t_a}{T} \\ \frac{t_b}{T} \end{bmatrix} = \frac{2A}{\sqrt{3}V_g} \begin{bmatrix} \sin(\alpha_2 - \theta) \\ \sin(\theta - \alpha_1) \end{bmatrix} = \frac{2A}{\sqrt{3}V_g} \begin{bmatrix} \sin(\alpha_1 + \frac{\pi}{3} - \theta) \\ \sin(\theta - \alpha_1) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

เพื่อเป็นการลดผลของกำลังสูญเสียจากจำนวนครั้งในการสวิตช์ และ ความผิดพลาดของแรงดันที่เกิดจากการเฉลี่ยเราจะเรียงลำดับการทำงานของเซกเตอร์ที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 2.4 รูปแบบการสวิตช์ของแรงดัน PWM ของเซกเตอร์ที่ 1 ใน 1 คาบการสวิตช์

จากรูปที่ 2.4 เราสามารถคำนวณหาค่าแรงดันที่ใช้ในการมอดูเลตได้ดังสมการที่ (2.14) ถึงสมการที่ (2.16)

$$\bar{v}_{an} = \frac{t_1 + t_2}{T} * \frac{V_g}{2} = \frac{A}{\sqrt{3}} \left[ 2 * \sin \frac{\pi}{6} \cos \left( \frac{\pi}{6} - \theta \right) \right] = \frac{A}{\sqrt{3}} \cos \left( \theta - \frac{\pi}{6} \right) \quad (2.14)$$

$$\bar{v}_{bn} = \frac{t_2 - t_1}{T} * \frac{V_g}{2} = \frac{A}{\sqrt{3}} \left[ 2 * \cos \frac{\pi}{6} \sin \left( \theta - \frac{\pi}{6} \right) \right] = A \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.15)$$

$$\bar{v}_{cn} = -\left( \frac{t_1 + t_2}{T} \right) * \frac{V_g}{2} = -\frac{A}{\sqrt{3}} \cos \left( \theta - \frac{\pi}{6} \right) \quad (2.16)$$

## 2.2 วิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ ( Zero Voltage)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง วิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยใช้การบวกแรงดันศูนย์เข้าไปในค่าแรงดันคำสั่ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการใช้สเปซเวกเตอร์ในหัวข้อที่แล้ว

จากสมการที่ (2.1) ถึงสมการที่ (2.3) เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของแรงดันเราจะได้ว่า

$$\bar{v}_{an} = \bar{v}_{af} + \bar{v}_{fn} \quad (2.17)$$

$$\bar{v}_{bn} = \bar{v}_{bf} + \bar{v}_{fn} \quad (2.18)$$

$$\bar{v}_{cn} = \bar{v}_{cf} + \bar{v}_{fn} \quad (2.19)$$

ในกรณีที่

$$v_{af} + v_{bf} + v_{cf} = 0 \quad (2.20)$$

และเนื่องจาก

$$\bar{v}_{af} = v_{af}^* \quad , \quad \bar{v}_{bf} = v_{bf}^* \quad , \quad \bar{v}_{cf} = v_{cf}^* \quad (2.21)$$

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์แรงดันคำสั่งในเซกเตอร์ที่ 1 และจากสมการที่ (2.11),(2.14)-(2.16),(2.17)- (2.21) เราสามารถคำนวณแรงดันศูนย์ได้เท่ากับ

$$v_{fn}^* = \bar{v}_{fn} = \frac{1}{3}(\bar{v}_{an} + \bar{v}_{bn} + \bar{v}_{cn}) = \frac{1}{3}\bar{v}_{bn} = \frac{A}{3} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) = \frac{1}{2}v_{bf}^* \quad (2.22)$$

กล่าวได้ว่า วิธีการของการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ จะเป็นการบวกแรงดันศูนย์ขนาด  $\frac{1}{2}v_{bf}^*$  เข้าไปทุกเฟส และเมื่อลองคำนวณในลักษณะเดียวกันสำหรับเซกเตอร์แรงดันอื่น ๆ เราจะได้แรงดันศูนย์ที่บวกเข้ากับแรงดันเฟส  $v_{af}^*$ ,  $v_{bf}^*$  และ  $v_{cf}^*$  ดังแสดงในสมการที่ (2.23)

$$v_{fn} = -\frac{(\max + \min)}{2} \quad (2.23)$$

เมื่อนิยามให้

$$\max = \max(v_{af}^*, v_{bf}^*, v_{cf}^*)$$

$$\min = \min(v_{af}^*, v_{bf}^*, v_{cf}^*)$$

จากความเข้าใจข้างต้น เราสามารถทำการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ ที่ให้ผลเหมือนกันกับวิธีการของสเปซเวกเตอร์ได้โดยการบวกแรงดันศูนย์  $v_{fn}$  เข้าไปกับค่าแรงดันคำสั่ง ซึ่งทำให้การคำนวณในทางปฏิบัติง่ายและไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์

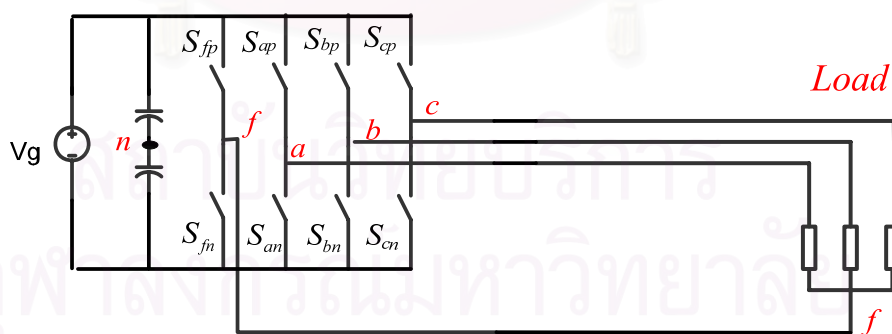


## บทที่ 3

### การกำเนิดสัญญาณมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์สำหรับ อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา

เนื่องจากวิธีการกำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับสวิตช์ทั้ง 4 ขา ในอดีตที่ผ่านมายังมีความซับซ้อน และยากต่อการทำความเข้าใจ เช่น วิธี การมอดูเลตสเปซเวกเตอร์แบบ 3 มิติ ซึ่งมีความยุ่งยากในการคำนวณค่อนข้างมาก และ วิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ที่มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วโดยไม่พิจารณาค่าแรงดันขั้วของกิ่งสวิตช์ที่ควบคุมสายนิวทรัล(ไม่นำแรงดันศูนย์มาคิด)ทำให้การกำเนิดสัญญาณ PWM มีเงื่อนไขที่ซับซ้อน อีกทั้งยังทำให้การเชื่อมโยงไปสู่การทำมอดูเลชันแบบ 3 ขา (3 arm modulation) ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 4 ขาเป็นไปได้ยากอีกด้วย ดังนั้นในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงวิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ที่มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วโดยที่ไม่พิจารณาค่าแรงดันขั้วของกิ่งสวิตช์ที่ควบคุมสายนิวทรัล (ไม่นำแรงดันศูนย์มาคิด) ก่อน เพื่อชี้ให้เห็นถึงปัญหาแล้วจึงจะกล่าวถึงวิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ที่มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขาพร้อมกัน หลังจากนั้นก็จะทำการเชื่อมโยงไปสู่การทำมอดูเลชันแบบ 3 ขา (3 arm modulation) เป็นลำดับต่อไป

3.1 วิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ที่มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วโดยที่ไม่พิจารณาค่าแรงดันขั้วของกิ่งสวิตช์ที่ควบคุมสายนิวทรัล (ไม่นำแรงดันศูนย์มาคิด)



รูปที่ 3.1 วงจรของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา

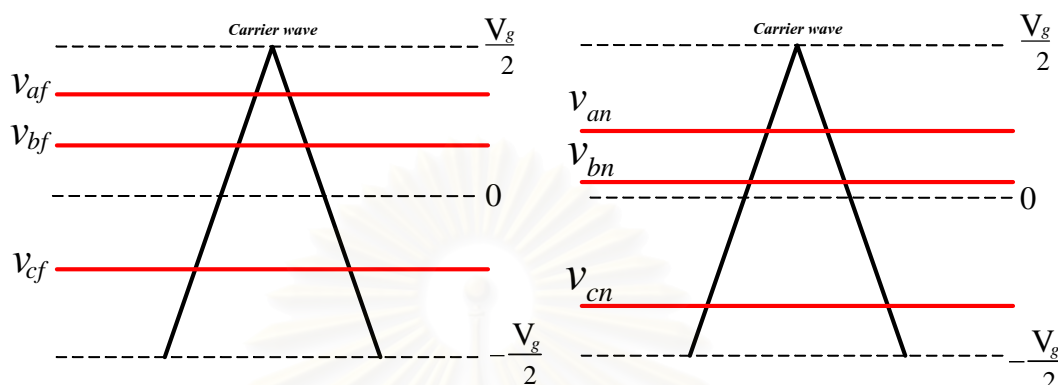
จากรูปที่ 3.1 เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันระหว่างจุดต่าง ๆ ในระบบได้ว่า

$$v_{an} = v_{af} + v_{fn} \quad (3.1)$$

$$v_{bn} = v_{bf} + v_{fn} \quad (3.2)$$

$$v_{cn} = v_{cf} + v_{fn} \quad (3.3)$$

ซึ่งในการทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้น แรงดันที่ต้องการคือแรงดันเฟสคร่อมโหลด  $v_{af}, v_{bf}$  และ  $v_{cf}$  ถ้าหากพิจารณาค่าแรงดันที่ต้องการจะเห็นว่าค่าแรงดันตกคร่อมโหลดยังคงเดิม แม้ว่าเราจะบวกด้วยค่าแรงดันศูนย์ ( $v_{fn} \neq 0$ ) เข้าไป ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ค่าแรงดันที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM เมื่อ  $v_{fn} \neq 0$

ในงานวิจัย [2] ได้พิจารณาค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมคือ  $v_{an}, v_{bn}$  และ  $v_{cn}$  โดยมีเงื่อนไขว่า

$$-\frac{V_g}{2} \leq v_{an}, v_{bn}, v_{cn} \leq +\frac{V_g}{2} \quad (3.4)$$

และ  $v_{fn}$  ก็ต้องอยู่ในเงื่อนไขนี้ด้วยเช่นกัน

$$-\frac{V_g}{2} \leq v_{fn} \leq +\frac{V_g}{2}$$

จากรูปที่ 3.2 ทำให้เข้าใจไปได้ว่าค่าแรงดันศูนย์ ( $v_{fn}$ ) ที่สามารถใช้ได้โดยไม่ทำให้ค่าแรงดันขั้ว  $v_{an}, v_{bn}, v_{cn}$  และ  $v_{fn}$  เกินขอบเขตการมอดูเลต คือ

$$-\frac{V_g}{2} - v'_{\min} \leq v_{fn} \leq +\frac{V_g}{2} - v'_{\max} \quad (3.5)$$

เมื่อนิยามให้

$$v'_{\max} = \max(v_{af}, v_{bf}, v_{cf})$$

$$v'_{\min} = \min(v_{af}, v_{bf}, v_{cf})$$

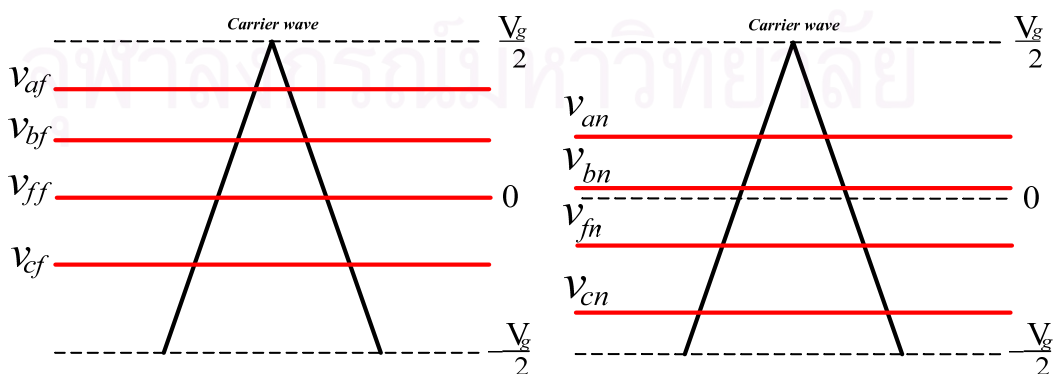
และเพื่อให้ได้ลำดับของการสวิตช์เป็นแบบสเปซเวกเตอร์ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.3 ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสวิตช์อย่างเป็นระเบียบเพื่อลดปัญหาเรื่องการสูญเสียในตัวสวิตช์ ในผลงานวิจัย [2] ได้เลือกใช้ค่าแรงดันศูนย์ดังสมการที่ (3.6)

$$v_{fn} = \begin{cases} -\frac{v'_{\max}}{2}, & v'_{\min} > 0 \\ -\frac{v'_{\min}}{2}, & v'_{\max} < 0 \\ -\frac{v'_{\max} + v'_{\min}}{2}, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3.6)$$

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสมการที่ (3.5) ไม่นำค่าแรงดันขั้วของกิ่งสวิตช์ที่ควบคุมสายนิวทรัล มาพิจารณาด้วยนั้นจะทำให้ขอบเขตของค่าแรงดัน  $v_{fn}$  ที่ใช้นั้นผิด เนื่องจากว่ายังมีในบางกรณีที่จะทำให้ค่าแรงดันขั้ว  $v_{an}, v_{bn}, v_{cn}$  และ  $v_{fn}$  เกินขอบเขตการมอดูเลต เช่น เมื่อค่าแรงดัน  $v_{af}, v_{bf}$  และ  $v_{cf}$  มีค่ามากกว่า 0 หรือน้อยกว่า 0 พร้อมกันทั้ง 3 เฟส ดังนั้นขอบเขตที่กำหนดโดยสมการที่ (3.5) จึงกว้างเกินไป ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีให้นำค่าแรงดันศูนย์กลางของสายนิวทรัลมาพิจารณาในการคำนวณหาค่าสูงสุดและต่ำสุด ( $v'_{\max}, v'_{\min}$ ) ด้วยนั่นเอง นอกจากนี้แล้วการนิยามค่า ( $v'_{\max}, v'_{\min}$ ) ตามงานวิจัย [2] ยังทำให้ต้องแยกพิจารณาเงื่อนไขในการหาค่า  $v_{fn}$  ในกรณีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์เป็น 3 กรณี ดังแสดงในสมการที่ (3.6) ทำให้ยุ่งยากในการใช้งานและ การเชื่อมโยงไปสู่การทำมอดูเลชันแบบ 3 ขา (3 arm modulation) เป็นไปได้ยาก

3.2 วิธีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์กลางที่มาจากพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขาพร้อมกัน

จากรูปที่ 3.1 เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันระหว่างจุดต่าง ๆ ในระบบได้ดังสมการที่ (3.1) , (3.2) และ (3.3) ซึ่งในการทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้น แรงดันที่ต้องการคือแรงดันเฟสคร่อมโหลด  $v_{af}, v_{bf}$  และ  $v_{cf}$  ถ้าหากพิจารณาค่าแรงดันที่ต้องการจะเห็นว่าค่าแรงดันตกคร่อมโหลดยังคงเดิม แม้ว่าเราจะบวกด้วยค่าแรงดันศูนย์กลาง ( $v_{fn} \neq 0$ ) เข้าไป ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ค่าแรงดันที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM เมื่อ  $v_{fn} \neq 0$  (พิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขา)

ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมคือ  $v_{an}, v_{bn}, v_{cn}$  และ  $v_{fn}$  โดยมีเงื่อนไขว่า

$$-\frac{V_g}{2} \leq v_{an}, v_{bn}, v_{cn}, v_{fn} \leq +\frac{V_g}{2} \quad (3.7)$$

จากรูปที่ 3.3 จะพบว่าค่าแรงดันศูนย์ ( $v_{fn}$ ) ที่สามารถใช้ได้โดยไม่ทำให้ค่าแรงดันขั้ว  $v_{an}, v_{bn}, v_{cn}$  และ  $v_{fn}$  เกินขอบเขตการมอดูเลต คือ

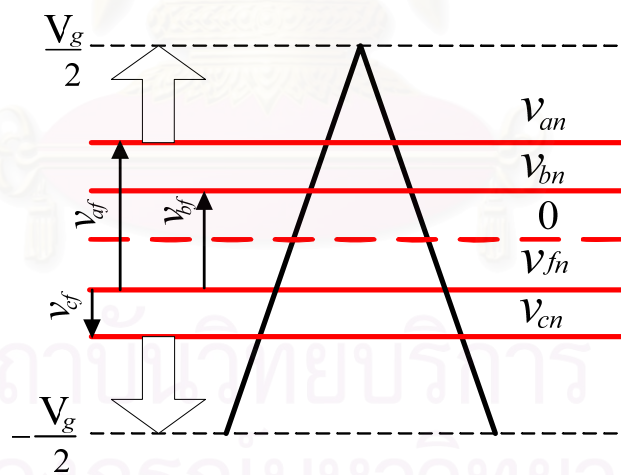
$$-\frac{V_g}{2} - v_{\min} \leq v_{fn} \leq +\frac{V_g}{2} - v_{\max} \quad (3.8)$$

เมื่อนิยามให้

$$v_{\max} = \max(v_{af}, v_{bf}, v_{cf}, 0)$$

$$v_{\min} = \min(v_{af}, v_{bf}, v_{cf}, 0)$$

ซึ่งขอบเขตบนและล่างของค่า  $v_{fn}$  ที่เป็นไปได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขอบเขตบนและล่างของค่าแรงดันที่ใช้ในการทำ PWM

### 3.3 Three-Dimensional Space Vector Modulation ( 3D-SVM )

วิธีการกำเนิดสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขานี้ เราจะใช้กระบวนการเดียวกันกับในกรณีของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 3 ขาที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 แต่จะแตกต่างกันตรงที่ในกรณีนี้สเปซเวกเตอร์จะมีมิติเพิ่มขึ้นเป็น 3 มิติ

หากกำหนดให้ค่าแรงดันคำสั่งมีค่าเป็น

$$v_{af}^* = R(\cos \phi \cos \theta + \sin \theta) \quad (3.9)$$

$$v_{bf}^* = \frac{R}{2}(-\cos \phi \cos \theta + \sqrt{3} \cos \theta \sin \phi + 2 \sin \theta) \quad (3.10)$$

$$v_{cf}^* = -\frac{R}{2}(\cos \phi \cos \theta + \sqrt{3} \cos \theta \sin \phi - 2 \sin \theta) \quad (3.11)$$

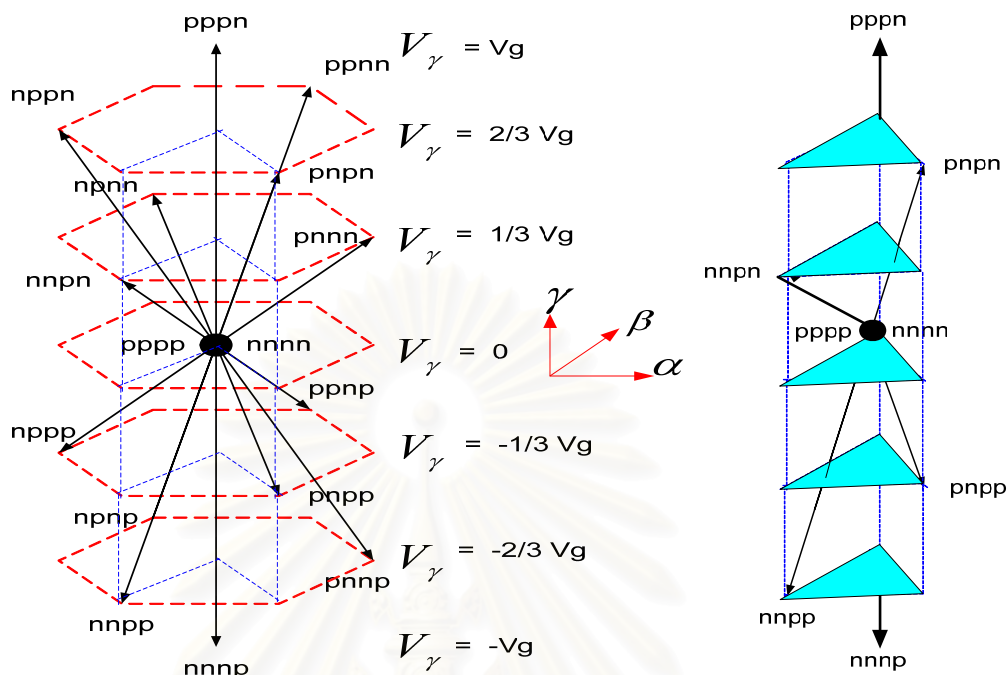
เราสามารถนิยามแรงดันคำสั่งในรูปแบบของสเปซเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ (3.12)

$$v^* = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{af}^* \\ v_{bf}^* \\ v_{cf}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos \theta \cos \phi \\ R \cos \theta \sin \phi \\ R \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

และ จากรูปลักษณะของสวิตซ์ทั้ง 8 ตัวของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันได้ด้วยกันทั้งหมด 16 รูปแบบ โดยเราสามารถแสดงเวกเตอร์แรงดันของแรงดัน  $v_{an}$ ,  $v_{bn}$  และ  $v_{cn}$  ตามตำแหน่งของการสวิตซ์ได้ดังรูปที่ 8 ทั้งนี้เราจะกำหนดให้

- ตัวอักษร p แสดงถึง สถานการณ์ปิดวงจรของสวิตซ์ตัวบนของเฟสหนึ่ง ๆ
- ตัวอักษร n แสดงถึง สถานการณ์ปิดวงจรของสวิตซ์ตัวล่างของเฟสหนึ่ง ๆ

โดยมีลำดับของเฟส คือ  $a, b, c, n$  ตามลำดับ สำหรับ pppp เป็นกรณีที่สวิตซ์ตัวบนทั้ง 4 ตัวปิดวงจรพร้อมกัน และ nnnn เป็นกรณีที่สวิตซ์ตัวล่างทั้ง 4 ตัวปิดวงจรพร้อมกัน ซึ่งเรานิยามเป็น zero switching vectors และ รูปแบบการสวิตซ์ที่เหลืออีก 14 แบบ คือ non-zero switching vectors ซึ่งเราจะได้แรงดันเฟสในแต่ละเวกเตอร์ของการสวิตซ์ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยในการสร้างแรงดันที่ต้องการ เราจะต้องใช้ non-zero switching vectors 3 ตัว และใช้ zero switching vectors อย่างน้อย 1 ตัว โดยส่วนใหญ่ non-zero switching vectors ที่จะนำมาใช้สร้างแรงดันที่ต้องการนั้น เราจะเลือกให้มีลักษณะการเปลี่ยนที่ละ bit ดังนั้น ในการเลือกใช้ non-zero switching vectors นั้นจะแบ่งได้ตามลักษณะ Prism ของรูป 6 เหลี่ยม และในแต่ละ Prism ยังมีรูปแบบการเลือกได้อีก 4 รูปแบบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเราจะมีรูปแบบในการเลือกเวกเตอร์ของการสวิตซ์ได้ทั้งหมด 24 รูปแบบ เพื่อใช้ในการสร้างแรงดันซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 สเปซเวกเตอร์ของแรงดันอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา

หลักในการสร้างเวกเตอร์แรงดันจากแรงดันคำสั่ง  $v^*$  จะอาศัยการเฉลี่ยแรงดันจากรูปแบบของเวกเตอร์แรงดันหลักทั้ง 14 รูปแบบ และคำนวณช่วงระยะเวลา ในการใช้เวกเตอร์นั้น ๆ ดังนี้

$$\text{จาก} \quad V_{ref} = d_1 \cdot V_1 + d_2 \cdot V_2 + d_3 \cdot V_3 \quad (3.13)$$

$$\text{โดยที่} \quad \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{V_g} \begin{bmatrix} X \\ X \\ X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

เมื่อ เมทริกซ์  $X$  จะเปลี่ยนไปตามค่าเวกเตอร์แรงดันหลักที่เลือกใช้ซึ่งเราสามารถสรุปค่าของเมทริกซ์  $X$  ที่ค่าเวกเตอร์แรงดันหลักต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าของเมทริกซ์ X ที่ค่าเวกเตอร์แรงดันหลักต่าง ๆ

Tetrahedron Prism	1	2	3	4
I	V1 = pnnn V2 = pnpn V3 = ppnp $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}$	V1 = pnnn V2 = ppnn V3 = ppnp $\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$	V1 = pnnn V2 = ppnn V3 = pppn $\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$	V1 = pnpn V2 = ppnp V3 = nnpn $\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
II	V1 = ppnn V2 = ppnp V3 = npnn $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix}$	V1 = ppnp V2 = npnn V3 = npnp $\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	V1 = ppnn V2 = npnn V3 = pppn $\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$	V1 = ppnp V2 = npnp V3 = nnpn $\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$
III	V1 = npnn V2 = npnp V3 = nppp $\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix}$	V1 = npnn V2 = nppn V3 = nppp $\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	V1 = npnn V2 = nppn V3 = pppn $\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	V1 = npnp V2 = nppp V3 = nnpn $\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & 0 \\ -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$
IV	V1 = nppn V2 = nppp V3 = nnpn $\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}$	V1 = nppp V2 = nnpn V3 = nppp $\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$	V1 = nppn V2 = nnpn V3 = pppn $\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	V1 = nppp V2 = nnpn V3 = nnpn $\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$



V	V1 = nnpn V2 = nnpp V3 = pnpp $\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -1 & 0 & -1 \\ \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix}$	V1 = nnpn V2 = pnpn V3 = pnpp $\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$	V1 = nnpn V2 = pnpn V3 = pppn $\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$	V1 = nnpp V2 = pnpp V3 = mnnp $\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$
	V1 = pnpn V2 = pnpp V3 = pnnn $\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix}$	V1 = pnpp V2 = pnnn V3 = pnnp $\begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$	V1 = pnpn V2 = pnnn V3 = pppn $\begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$	V1 = pnpp V2 = pnnp V3 = mnnp $\begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
VI	V1 = pnpn V2 = pnpp V3 = pnnn $\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix}$	V1 = pnpp V2 = pnnn V3 = pnnp $\begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix}$	V1 = pnpn V2 = pnnn V3 = pppn $\begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$	V1 = pnpp V2 = pnnp V3 = mnnp $\begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} & 0 \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$

ดังนั้นหากสมมติว่าเลือก ใช้ non-zero switching vectors 3 ตัวและใช้ zero switching vectors 2 ตัว ที่อยู่ใน Prism I Tetrahedron 1 เราสามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{array}{cccccccccc}
 \frac{t_f}{4} & \frac{t_1}{2} & \frac{t_2}{2} & \frac{t_3}{2} & \frac{t_f}{4} & \frac{t_f}{4} & \frac{t_3}{2} & \frac{t_2}{2} & \frac{t_1}{2} & \frac{t_f}{4} \\
 a & \boxed{n} & p & p & p & p & p & p & p & \boxed{n} \\
 b & \boxed{n} & n & n & p & p & p & p & \boxed{n} & n & n \\
 c & \boxed{n} & n & n & n & p & p & n & n & n & n \\
 f & \boxed{n} & n & p & p & p & p & p & p & \boxed{n} & n
 \end{array}$$

รูปที่ 3.6 รูปแบบการสวิตช์ของแรงดัน PWM ของ Prism I Tetrahedron 1 ใน 1 คาบการสวิตช์

จากรูปที่ 3.7 เราสามารถหาค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมได้ดังสมการที่ (3.15) ถึง สมการที่ (3.18)

$$v_{an} = (d_1 + d_2 + d_3) * \frac{V_g}{2} = \left( \frac{3}{2} v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} v_\beta \right) * \frac{1}{2} \quad (3.15)$$

$$v_{bn} = (-d_1 - d_2 + d_3) * \frac{V_g}{2} = \left( -\frac{3}{2} v_\alpha + \frac{3\sqrt{3}}{2} v_\beta \right) * \frac{1}{2} \quad (3.16)$$

$$v_{cn} = -(d_1 + d_2 + d_3) * \frac{V_g}{2} = -\left( \frac{3}{2} v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} v_\beta \right) * \frac{1}{2} \quad (3.17)$$

$$v_{fn} = (d_2 + d_3 - d_1) * \frac{V_g}{2} = \left( -\frac{v_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} v_\beta - 2v_\gamma \right) * \frac{1}{2} \quad (3.18)$$

ดังนั้นหากเราใช้ค่าแรงดันคำสั่งดังสมการที่ (3.12) และเมื่อพิจารณาค่าแรงดันศูนย์จากสมการที่ (3.18) เราสามารถคำนวณแรงดันศูนย์ได้เท่ากับ

$$v_{fn} = \frac{\left( -\frac{R \cos \theta \cos \phi}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} R \cos \theta \sin \phi - 2R \sin \theta \right)}{2}$$

$$v_{fn} = -\frac{v_{af} + v_{cf}}{2} \quad (3.19)$$

กล่าวได้ว่าวิธีการของการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ จะเป็นการบวกแรงดันศูนย์ ขนาด  $-\frac{v_{af} + v_{cf}}{2}$  เข้าไปทุกเฟส ( สำหรับกรณีที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ใน Prism I Tetrahedron 1) เมื่อลองคำนวณในลักษณะเดียวกัน สำหรับเซกเตอร์แรงดันอื่น ๆ เราจะได้ แรงดันศูนย์ที่บวกเข้าไปกับแรงดันเฟส  $v_{af}, v_{bf}$  และ  $v_{cf}$  ดังแสดงในสมการที่ (3.20)

$$v_{fn} = -\left( \frac{v_{\max} + v_{\min}}{2} \right) \quad (3.20)$$

เมื่อนิยามให้

$$v_{\max} = \max(v_{af}, v_{bf}, v_{cf}, 0)$$

$$v_{\min} = \min(v_{af}, v_{bf}, v_{cf}, 0)$$

จึงสรุปได้ว่าการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ ก็เปรียบเสมือนการบวกค่าแรงดันศูนย์ ขนาด  $-\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}$  เข้าไปทุกเฟส โดยที่ค่าแรงดันศูนย์ที่บวกเข้าไปสำหรับการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ นั้นก็เป็นเพียงแค่ค่าหนึ่งในขอบเขตตามสมการที่ (3.8) ที่ได้มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขานนั่นเอง

### 3.4 วิธีการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา

การทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา นั้น คือ การที่ในหนึ่งคาบของสัญญาณพาหะจะมีกึ่งสวิตช์เพียง 3 กึ่งเท่านั้นที่ทำการสวิตช์ ส่วนกึ่งสวิตช์ที่เหลืออยู่อีกกึ่งหนึ่งนั้นจะไม่ทำการสวิตช์ กล่าวคือ ถ้าสวิตช์ทำการเปิดวงจรอยู่ สวิตช์ก็จะทำการเปิดวงจรอยู่อย่างนั้นตลอด แต่ถ้าสวิตช์ปิดวงจรอยู่ สวิตช์ก็จะปิดวงจรอยู่อย่างนั้นไปตลอดเช่นกัน ซึ่งการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา โดยใช้วิธีสเปซเวกเตอร์นั้น สามารถทำได้โดยลดจำนวนของ zero switching vectors ที่ใช้ในหนึ่งคาบของสัญญาณพาหะลงจากปกติในหนึ่งคาบการสวิตช์ของสัญญาณพาหะ เราจะเลือกใช้ zero switching vectors ทั้ง 2 ตัว เมื่อต้องการทำ 3 Arms modulation เราก็จะเลือกใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียวเท่านั้น

ดังนั้นหากสมมุติว่าเลือก non-zero switching vectors 3 ตัว ให้อยู่ใน Prism I และ Tetrahedron 1 และ ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (nnnn) แล้วทำการคำนวณค่าต่าง ๆ เราจะได้แรงดันศูนย์ที่บวกเข้าไปกับแรงดันเฟส  $v_{af}, v_{bf}$  และ  $v_{cf}$  ดังนี้

$$\begin{array}{cccccccc}
 \frac{t_f}{2} & \frac{t_1}{2} & \frac{t_2}{2} & \frac{t_3}{2} & \frac{t_3}{2} & \frac{t_2}{2} & \frac{t_1}{2} & \frac{t_f}{2} \\
 a & \boxed{n} & p & p & p & p & p & \boxed{n} \\
 b & \boxed{n} & n & n & \boxed{p} & p & \boxed{n} & n & n \\
 c & \boxed{n} & n & n & n & n & n & n & n \\
 f & \boxed{n} & n & \boxed{p} & p & p & p & \boxed{n} & n
 \end{array}$$

รูปที่ 3.7 รูปแบบการสวิตช์ของแรงดัน PWM เมื่อใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว(nnnn)

จากรูปที่ 3.7 เราสามารถหาค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมได้ดังสมการที่ (3.21) ถึงสมการที่ (3.24)

$$v_{an} = (d_1 + d_2 + d_3 - d_f) * \frac{V_g}{2} = \left( \frac{3}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - \frac{V_g}{2} \right) \quad (3.21)$$

$$v_{bn} = (-d_1 - d_2 + d_3 - d_f) * \frac{V_g}{2} = \left( \sqrt{3}v_\beta - \frac{V_g}{2} \right) \quad (3.22)$$

$$v_{cn} = -(d_1 + d_2 + d_3 + d_f) * \frac{V_g}{2} = -\frac{V_g}{2} \quad (3.23)$$

$$v_{fn} = (d_2 + d_3 - d_1 - d_f) * \frac{V_g}{2} = \left( \frac{v_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta - v_\gamma - \frac{V_g}{2} \right) \quad (3.24)$$

เมื่อ  $d_f = 1 - d_1 - d_2 - d_3$

ดังนั้นหากเราใช้ค่าแรงดันคำสั่งดังสมการที่ (3.12) และเมื่อพิจารณาค่าแรงดันลำดับศูนย์จากสมการที่ (3.24) เราสามารถคำนวณแรงดันศูนย์ได้เท่ากับ

$$v_{fn} = \frac{R \cos \theta \cos \phi}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} R \cos \theta \sin \phi - R \sin \theta - \frac{V_g}{2}$$

$$v_{fn} = -v_{cf} - \frac{V_g}{2} \quad (3.25)$$

กล่าวได้ว่าวิธีการของการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา โดยใช้วิธีสเปซเวกเตอร์นั้นจะเป็นการบวกแรงดันศูนย์ขนาด  $-\frac{1}{2}(2v_{cf} + V_g)$  เข้าไปทุกเฟส (สำหรับกรณีที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ใน Prism I Tetrahedron 1) เมื่อลองคำนวณในลักษณะเดียวกัน สำหรับเซกเตอร์แรงดันอื่น ๆ เราจะได้ แรงดันศูนย์ที่บวกเข้าไปกับแรงดันเฟส  $v_{af}, v_{bf}$  และ  $v_{cf}$  ดังแสดงในสมการที่ (3.26)

$$v_{fn} = -v_{\min} - \frac{V_g}{2} \quad (3.26)$$

ถ้าหากสมมติว่าเราเลือก non-zero switching vectors 3 ตัวให้อยู่ใน Prism I และ Tetrahedron 1 และ ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (pppp) แล้วทำการคำนวณค่าต่าง ๆ เราจะได้แรงดันลำดับศูนย์ที่บวกเข้าไปกับแรงดันเฟส  $v_{af}, v_{bf}$  และ  $v_{cf}$  ดังนี้

	$\frac{t_1}{2}$	$\frac{t_2}{2}$	$\frac{t_3}{2}$	$\frac{t_f}{2}$	$\frac{t_f}{2}$	$\frac{t_3}{2}$	$\frac{t_2}{2}$	$\frac{t_1}{2}$
<i>a</i>	$p$	$p$	$p$	$p$	$p$	$p$	$p$	$p$
<i>b</i>	$n$	$n$	$p$	$p$	$p$	$p$	$n$	$n$
<i>c</i>	$n$	$n$	$n$	$p$	$p$	$n$	$n$	$n$
<i>f</i>	$n$	$p$	$p$	$p$	$p$	$p$	$p$	$n$

รูปที่ 3.8 รูปแบบการสวิตช์ของแรงดัน PWM เมื่อใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว(pppp)

จากรูปที่ 3.8 เราสามารถหาค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมได้ดังสมการที่ (3.27) ถึงสมการที่ (3.30)

$$v_{an} = (d_1 + d_2 + d_3 + d_f) * \frac{V_g}{2} = \frac{V_g}{2} \quad (3.27)$$

$$v_{bn} = (-d_1 - d_2 + d_3 + d_f) * \frac{V_g}{2} = \left( -\frac{3}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \frac{V_g}{2} \right) \quad (3.28)$$

$$v_{cn} = -(d_1 + d_2 + d_3 - d_f) * \frac{V_g}{2} = \left( -\frac{3}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta + \frac{V_g}{2} \right) \quad (3.29)$$

$$v_{fn} = (d_2 + d_3 - d_1 + d_f) * \frac{V_g}{2} = \left( -v_\alpha - v_\gamma + \frac{V_g}{2} \right) \quad (3.30)$$

เมื่อ  $d_f = 1 - d_1 - d_2 - d_3$

ดังนั้นหากเราใช้ค่าแรงดันคำสั่งดังสมการที่ (3.12) และเมื่อพิจารณาค่าแรงดันศูนย์จากสมการที่ (3.30) เราสามารถคำนวณแรงดันศูนย์ได้เท่ากับ

$$v_{fn} = -R \cos \theta \sin \phi - R \sin \theta + \frac{V_g}{2}$$

$$v_{fn} = -v_{af} + \frac{V_g}{2} \quad (3.31)$$

กล่าวได้ว่าวิธีการของการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา โดยใช้วิธีสเปซเวกเตอร์นั้นจะเป็นการบวกแรงดันศูนย์ ขนาด  $-\frac{1}{2}(2v_{af} - V_g)$  เข้าไปทุกเฟส ( สำหรับกรณีที่เวกเตอร์คำสั่งอยู่ใน Prism I Tetrahedron 1) เมื่อลองคำนวณในลักษณะเดียวกัน สำหรับเซกเตอร์แรงดันอื่น ๆ เราจะได้ แรงดันศูนย์ที่บวกเข้าไปกับแรงดันเฟส  $v_{af}, v_{bf}$  และ  $v_{cf}$  ดังแสดงในสมการที่ (3.32)

$$v_{fn} = -v_{\max} + \frac{V_g}{2} \quad (3.32)$$

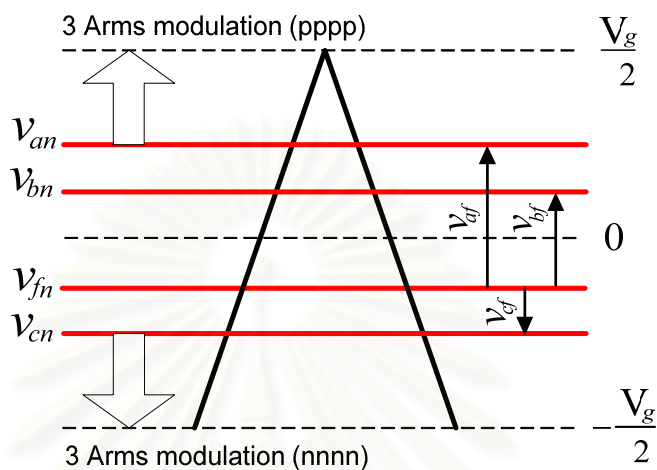
จึงสรุปได้ว่าวิธีการของการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ ก็เปรียบเสมือนการบวกค่าแรงดันศูนย์ ขนาด  $-\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  เข้าไปทุกเฟสเมื่อเลือกใช้ zero switching vectors ( pppp ) เพียงตัวเดียว โดยที่ค่าแรงดันศูนย์ที่บวกเข้าไปสำหรับวิธีการของการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ นั้นก็เป็นเพียงแค่ค่าหนึ่งในขอบเขตตามสมการที่ (3.8) ที่ได้มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขานั้นเอง ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.9

ดังนั้นเราจึงสามารถสรุป และ เชื่อมโยงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ ไปสู่การทำ Three-Dimensional SpaceVector Modulation และ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ ได้ดังนี้

- เลือกใช้ค่า  $v_{fn} = 0$       เปรียบได้กับการนำนิวทรัลต่อเข้ากับกึ่งกลางแรงดันบัสไฟตรง
- เลือกใช้ค่า  $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$  เปรียบได้กับการทำ Three-Dimensional Space Vector Modulation โดยใช้ zero switching vectors 2 ตัว (ปรับค่าแรงดันไปไว้ตรงกลางขอบเขต)
- เลือกใช้ค่า  $v_{fn} = -v_{\min} - \frac{V_g}{2}$  เปรียบได้กับการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว ( nnnn ) (ปรับค่าแรงดันไปติดขอบเขตล่าง)



เลือกใช้ค่า  $v_{fn} = -v_{\max} + \frac{V_g}{2}$  เปรียบได้ดั่งการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 4 ขาใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว ( pppp ) (ปรับค่าแรงดันไปติดขอบเขตบน)



รูปที่ 3.9 ความเชื่อมโยงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยการบวกแรงดันศูนย์ไปสู่การทำ 3D-SVM และ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 4 ขา

## บทที่ 4

### ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้แรงดันบัสดไฟตรง 540 V ,ความถี่การสวิตช์ 10 kHz ,ต่อกับโหลด 3 เฟสด้านออก  $50\Omega$   $30\text{ mH}$  ได้ผลจำลองการทำงานเป็นดังนี้

4.1.1 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสสมดุล มีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 250 \sin(100\pi t - 120^\circ)$$

$$v_{cf} = 250 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.1 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันคำสั่งที่สร้างขึ้นจะเห็นว่าค่าแรงดันคำสั่งทั้ง 3 เฟสเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสสมดุลซึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ

รูปที่ 4.2 เป็นรูปแสดงค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสจะเห็นได้ว่ากระแสโหลดนั้นเป็นรูป sine สมดุลทั้ง 3 เฟสและขนาดของค่าสูงสุดมีค่าประมาณ 5A ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่ง ส่วนในสายนิวทรัลนั้นมีกระแสอันดับ 3 ขนาดเล็กไหลอยู่

รูปที่ 4.3 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อนำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_m = 0$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่งซึ่งก็เปรียบได้กับการนำจุดนิวทรัลของโหลดไปต่อเข้ากับกึ่งกลางบัสดไฟตรงนั่นเอง

รูปที่ 4.4 และ 4.5 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสดไฟตรงเมื่อค่าแรงดันศูนย์ที่บวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งมีค่าเท่ากับ  $v_m = 0$  เมื่อสังเกตจากค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสดไฟตรง จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น สวิตช์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา โดยที่สวิตช์กิ่งนิวทรัลจะมีช่วงระยะเวลาในการ ON และ OFF เท่ากันเพื่อให้ค่าเฉลี่ยแรงดันมีค่าเท่ากับ 0

รูปที่ 4.6 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}\right)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะเป็นแบบสมมูลกัน คือค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดจะมีขนาดที่เท่ากัน

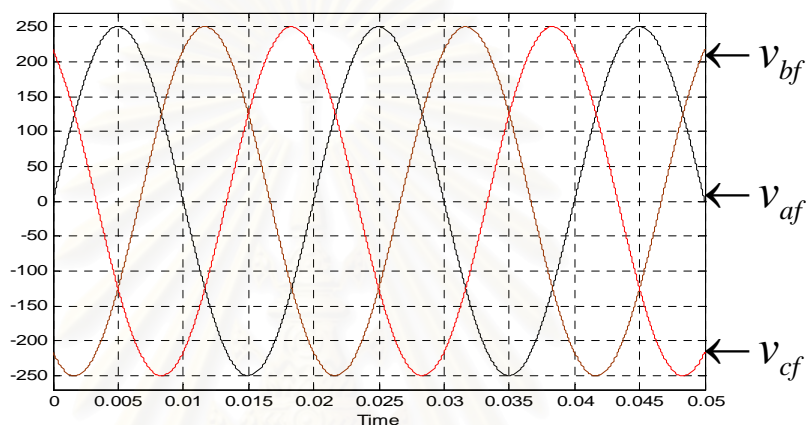
รูปที่ 4.7 และ 4.8 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อค่าแรงดันศูนย์ที่บวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งมีค่าเท่ากับ  $v_{fn} = -\left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}\right)$  เมื่อสังเกตจากค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น สวิตช์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา

รูปที่ 4.9 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับลบครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

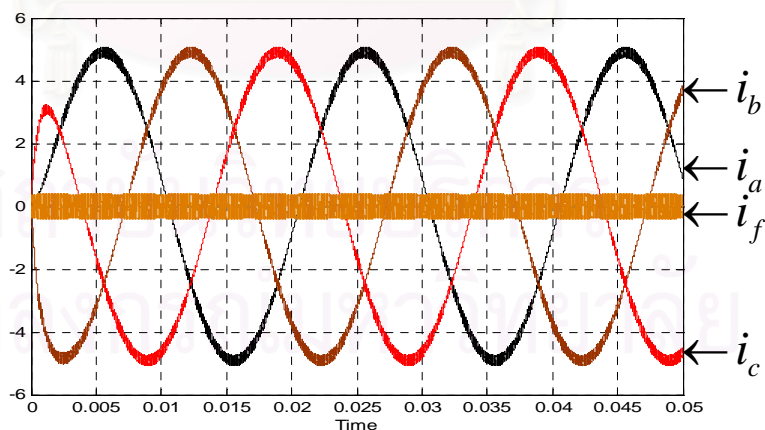
รูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อค่าแรงดันศูนย์ที่บวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งมีค่าเท่ากับ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  เมื่อสังเกตจากค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ OFF ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ก็คือการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (nnnn))

รูปที่ 4.12 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

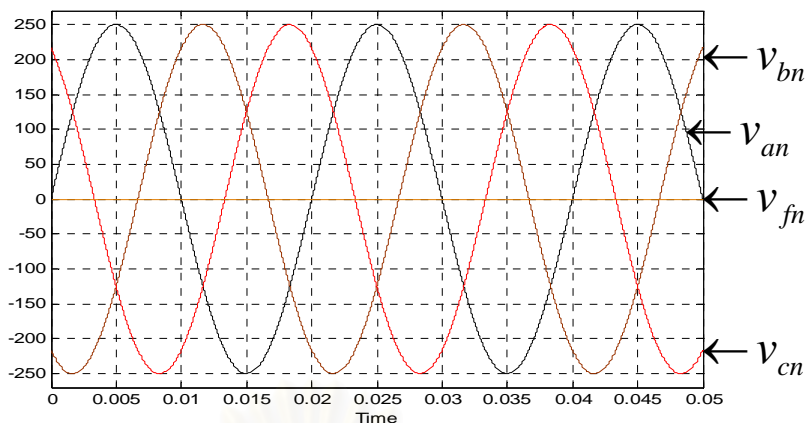
รูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันโพลคเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อค่าแรงดันศูนย์ที่บวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งมีค่าเท่ากับ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  เมื่อสังเกตจากค่าแรงดันโพลคเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ ON ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ก็ถือเป็นการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว ( pppp ))



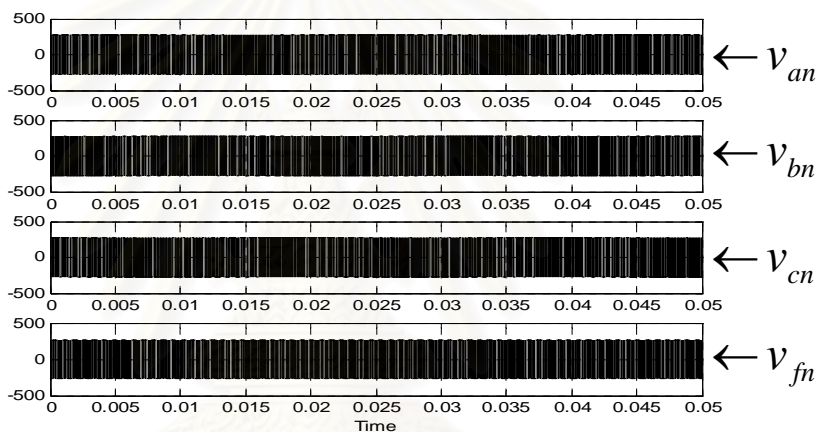
รูปที่ 4.1 ค่าแรงดันคำสั่ง 3 เฟสสมดุล



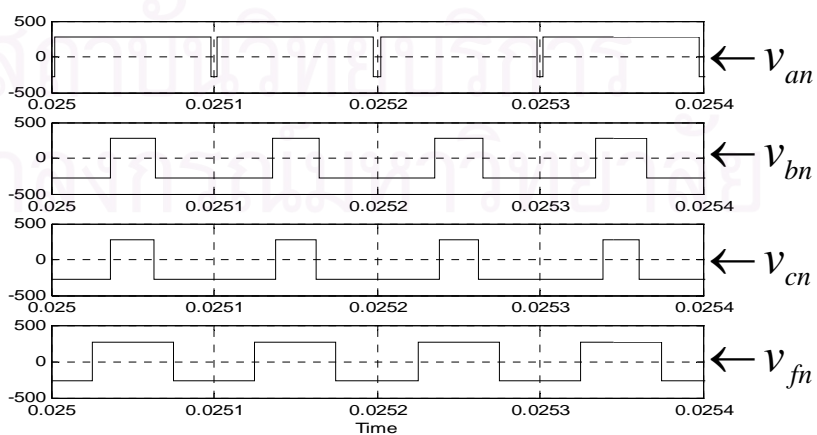
รูปที่ 4.2 ค่ากระแสโพลคทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



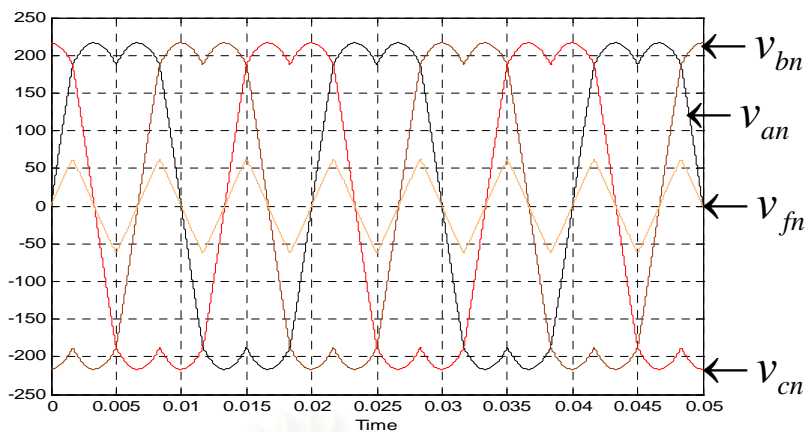
รูปที่ 4.3 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.4 ค่าแรงดันโหนดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง ( $v_{fn} = 0$ )  
เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล

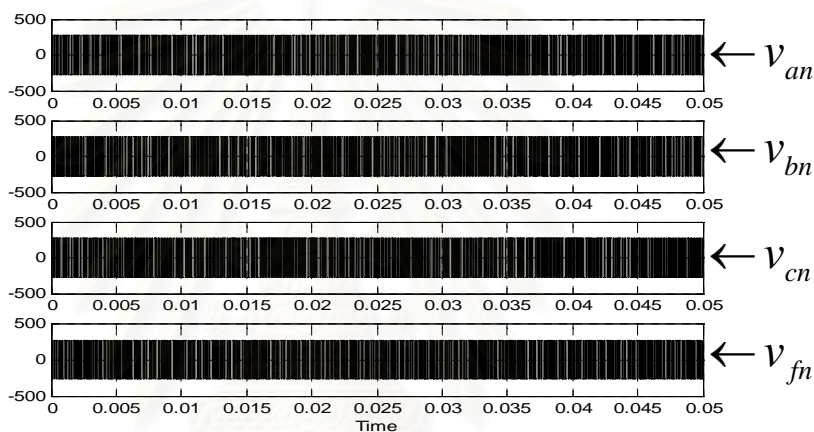


รูปที่ 4.5 ค่าแรงดันโหนดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อ ZOOM ( $v_{fn} = 0$ )  
เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



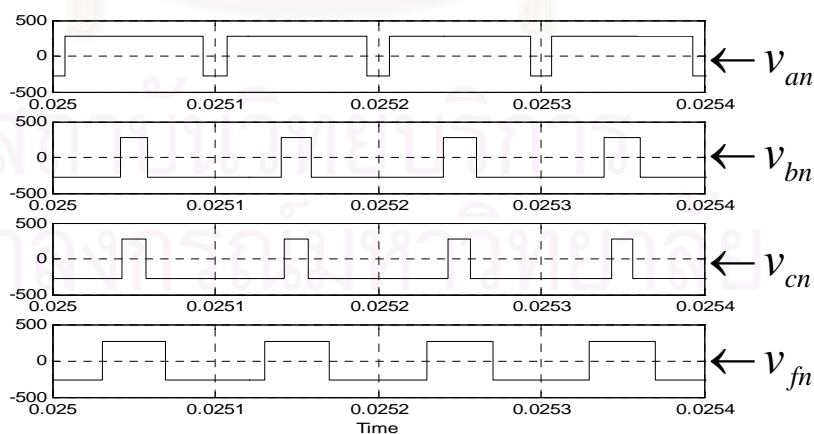
รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.7 ค่าแรงดัน โหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

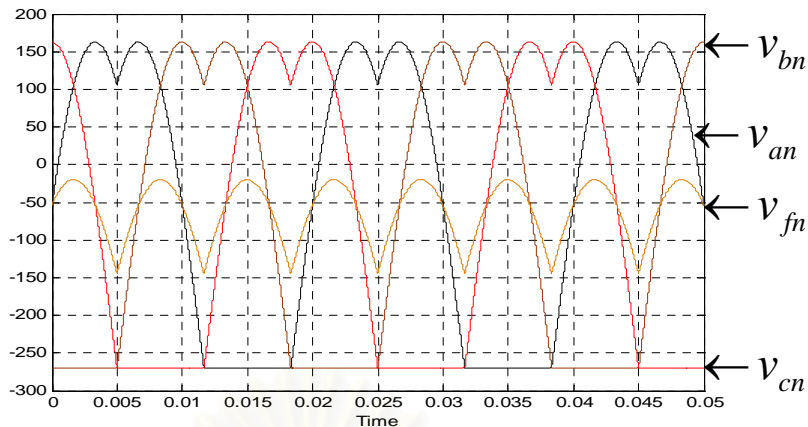
เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.8 ค่าแรงดัน โหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อ ZOOM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

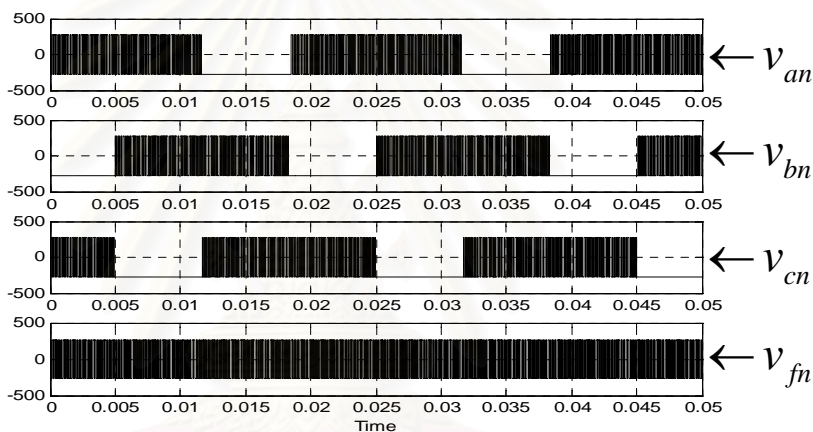
เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล





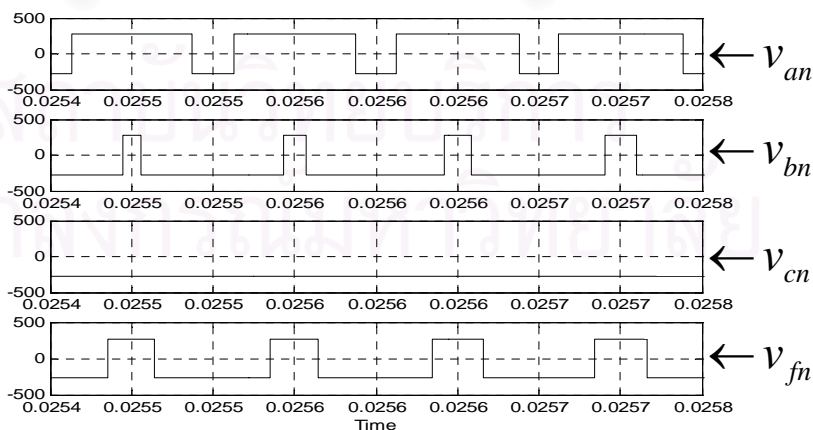
รูปที่ 4.9 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



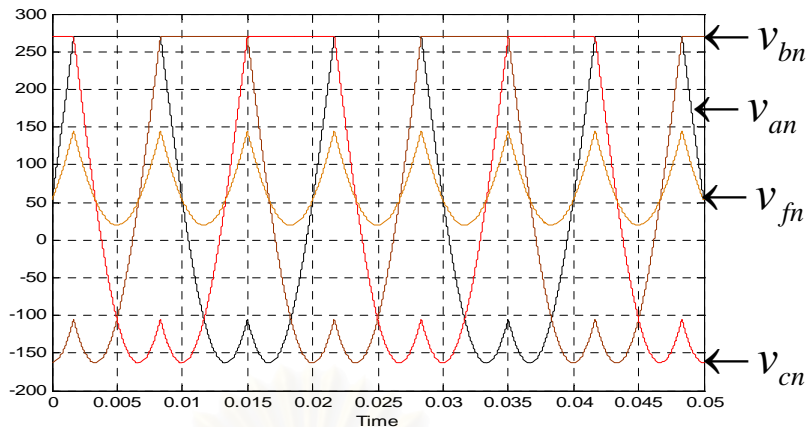
รูปที่ 4.10 ค่าแรงดันโหนดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



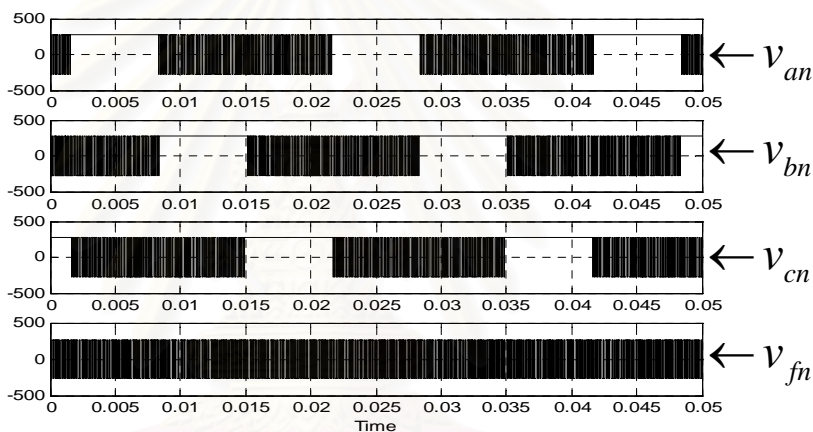
รูปที่ 4.11 ค่าแรงดันโหนดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อ ZOOM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



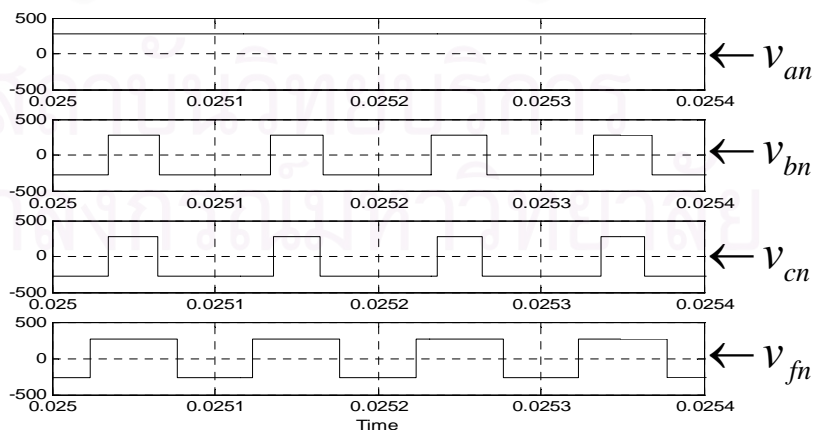
รูปที่ 4.12 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.13 ค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.14 ค่าแรงดันโหลดเมื่อวัดเทียบกับกึ่งกลางบัสไฟตรงเมื่อ ZOOM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล

4.1.2 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 200 \sin(100\pi t - 120^\circ)$$

$$v_{cf} = 150 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.15 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันคำสั่งที่สร้างขึ้นจะเห็นว่าค่าแรงดันคำสั่งทั้ง 3 เฟสเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟสแต่ยังคงมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา ซึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ

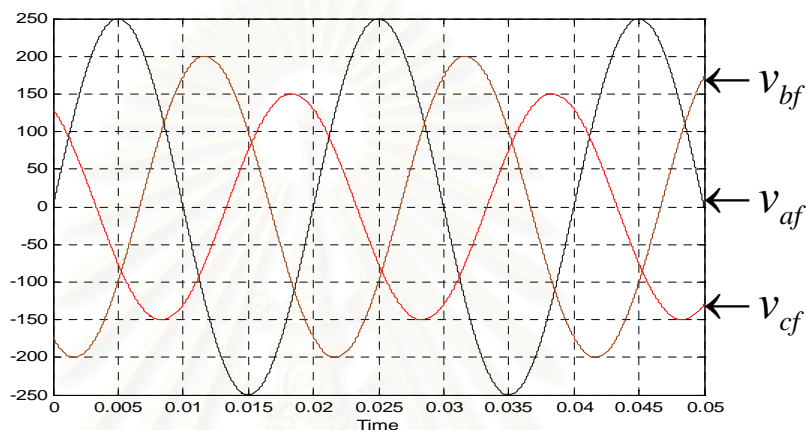
รูปที่ 4.16 เป็นรูปแสดงค่ากระแสไหลทั้ง 4 เฟสจะเห็นได้ว่ากระแสไหลนั้นเป็นรูป sine และขนาดของค่าสูงสุดมีค่าประมาณ 5A , 4A และ 3A ลดหลั่นกันลงมาตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่ง ส่วนสายนิวทรัลนั้นก็จะมีกระแสที่เกิดจากความไม่สมดุลของแรงดันคำสั่งไหลอยู่

รูปที่ 4.17 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = 0$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่งซึ่งก็เปรียบได้กับการนำจุดนิวทรัลของไหลลไปต่อเข้ากับกึ่งกลางบัสไฟตรงนั่นเอง

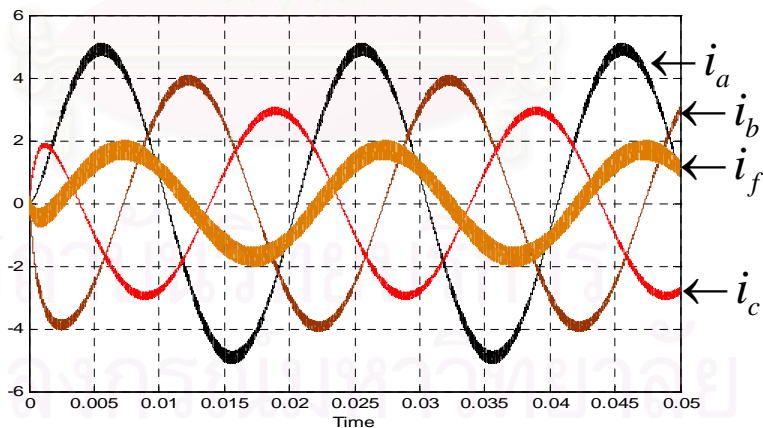
รูปที่ 4.18 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}\right)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะเป็นแบบสมดุลกัน คือค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดจะมีขนาดที่เท่ากัน

รูปที่ 4.19 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับลบครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

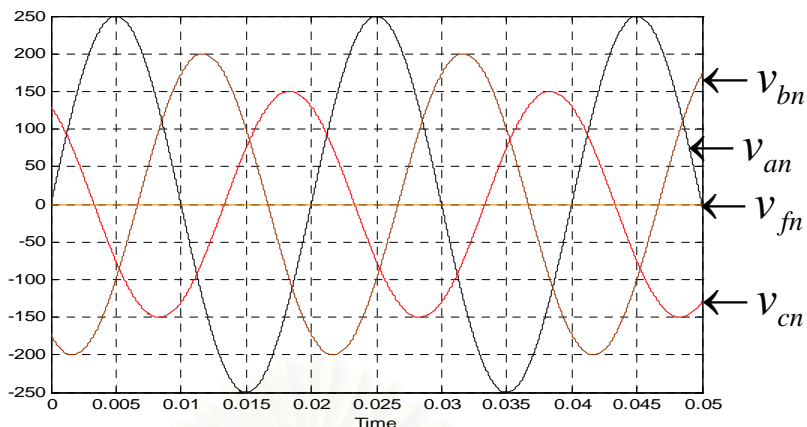
รูปที่ 4.20 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ



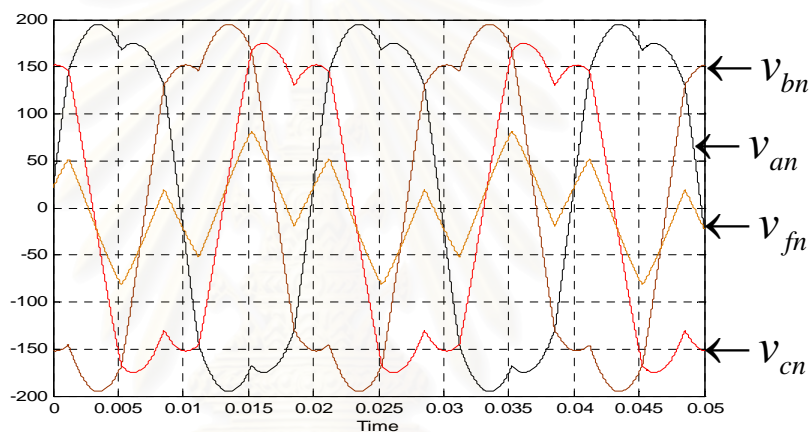
รูปที่ 4.15 ค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



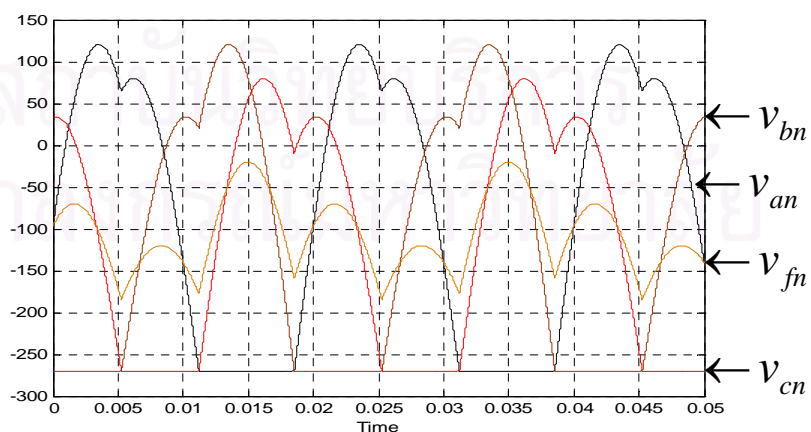
รูปที่ 4.16 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



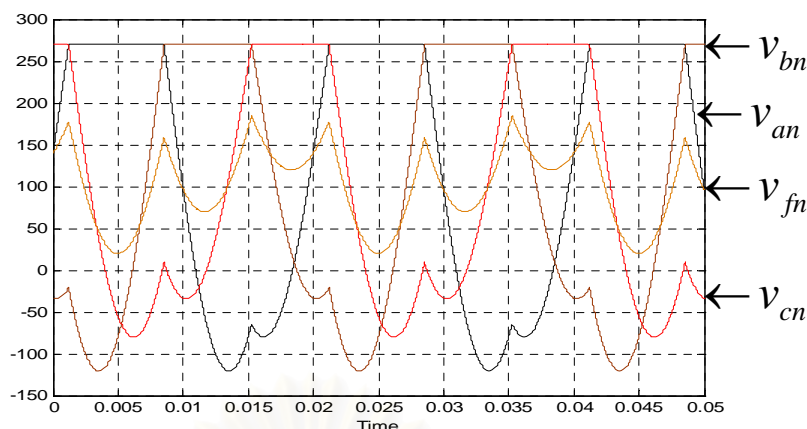
รูปที่ 4.17 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 4.18 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ )  
เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 4.19 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )  
เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 4.20 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)

4.1.3 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดเท่ากันทั้ง 3 เฟสแต่มีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 250 \sin(100\pi t - 90^\circ)$$

$$v_{cf} = 250 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.21 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันคำสั่งที่สร้างขึ้นจะเห็นว่าค่าแรงดันคำสั่งทั้ง 3 เฟสเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดเท่ากันทั้ง 3 เฟส แต่มีมุมต่างเฟสกันของเฟส A และเฟส B ไม่เท่ากับ 120 องศา ซึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ

รูปที่ 4.22 เป็นรูปแสดงค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสจะเห็นได้ว่ากระแสโหลดนั้นเป็นรูป sine และขนาดของค่าสูงสุดมีค่าประมาณ 5A โดยที่กระแสเฟส A กับเฟส B จะมีมุมต่างเฟสกัน 90 องศา, กระแสเฟส B กับเฟส C จะมีมุมต่างเฟสกัน 150 องศา และ กระแสเฟส C กับเฟส A จะมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่ง ส่วนในสายนิวทรัลนั้นก็จะมีกระแสที่เกิดจากความไม่สมดุลของแรงดันคำสั่งไหลอยู่

รูปที่ 4.23 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อนำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = 0$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้าง

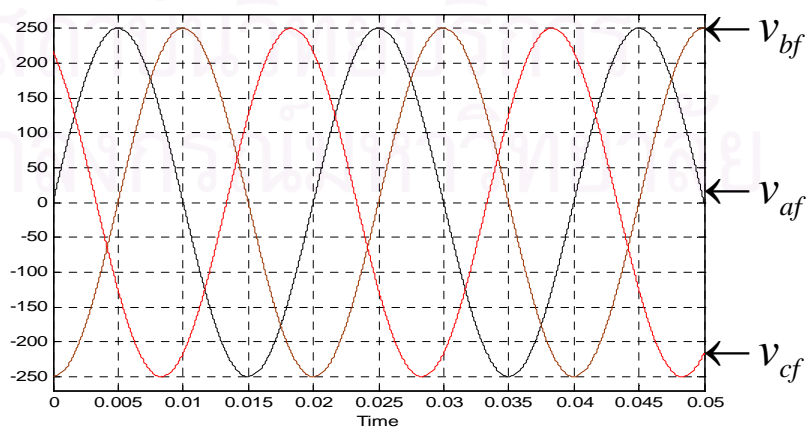


สัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่งซึ่งก็เปรียบได้กับการนำจุดนิวทรัลของโพลไปต่อเข้ากับกึ่งกลางบัสไฟตรงนั่นเอง

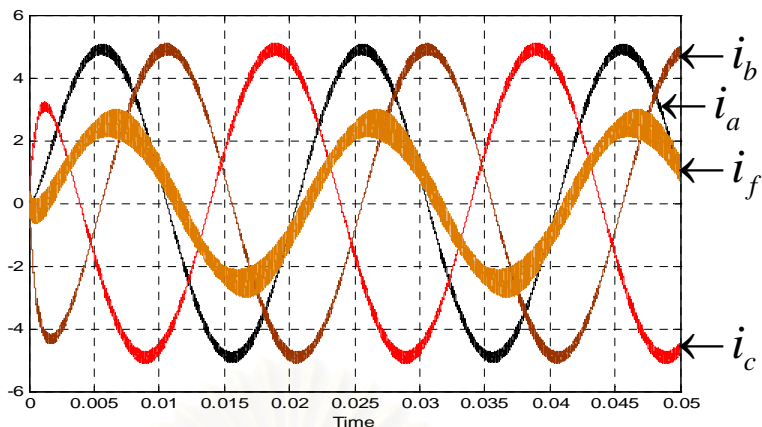
รูปที่ 4.24 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}\right)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะเป็นแบบสมมูลกัน คือค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดจะมีขนาดที่เท่ากัน

รูปที่ 4.25 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับลบครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

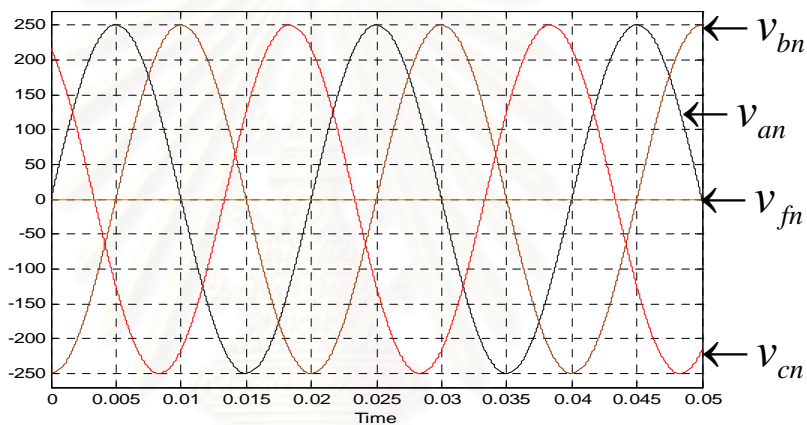
รูปที่ 4.26 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ



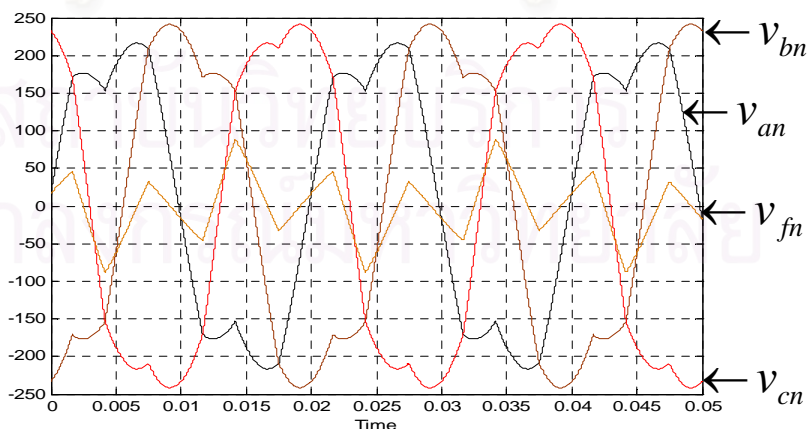
รูปที่ 4.21 ค่าแรงดันคำสั่ง 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



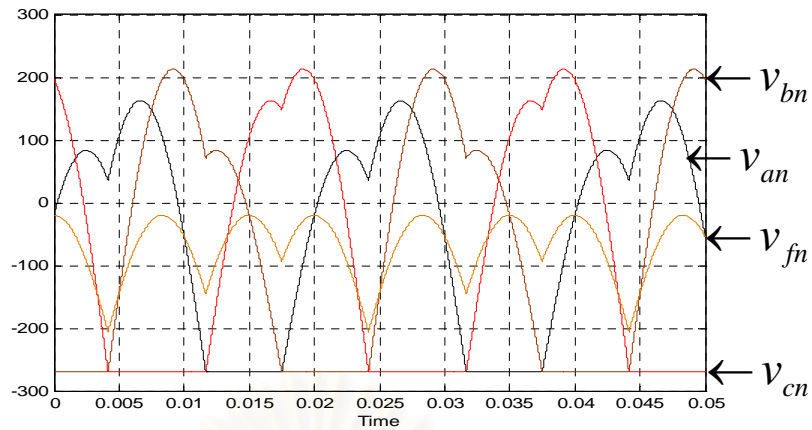
รูปที่ 4.22 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.23 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )

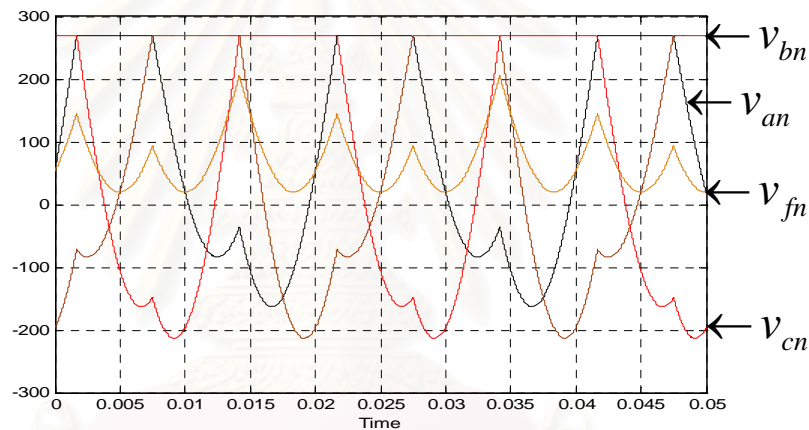


รูปที่ 4.24 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ ) เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.25 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.26 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )

4.1.4 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส และมีมุมต่างเฟสกัน ไม่เท่ากับ  $120$  องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 200 \sin(100\pi t - 90^\circ)$$

$$v_{cf} = 150 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.27 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันคำสั่งที่สร้างขึ้นจะเห็นว่าค่าแรงดันคำสั่งทั้ง 3 เฟสเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟสและมีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา ซึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ

รูปที่ 4.28 เป็นรูปแสดงค่ากระแสไหลลัดทั้ง 4 เฟสจะเห็นได้ว่ากระแสไหลลัดนั้นเป็นรูป sine และขนาดของค่าสูงสุดมีค่าประมาณ 5A , 4A และ 3A ลดหลั่นกันลงมาตามลำดับ โดยที่กระแสเฟส A กับเฟส B จะมีมุมต่างเฟสกัน 90 องศา , กระแสเฟส B กับเฟส C จะมีมุมต่างเฟสกัน 150 องศา และ กระแสเฟส C กับเฟส A จะมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่ง ส่วนในสายนิวทรัลนั้นก็จะมีการเกิดกระแสที่เกิดจากความไม่สมดุลของแรงดันคำสั่งไหลอยู่

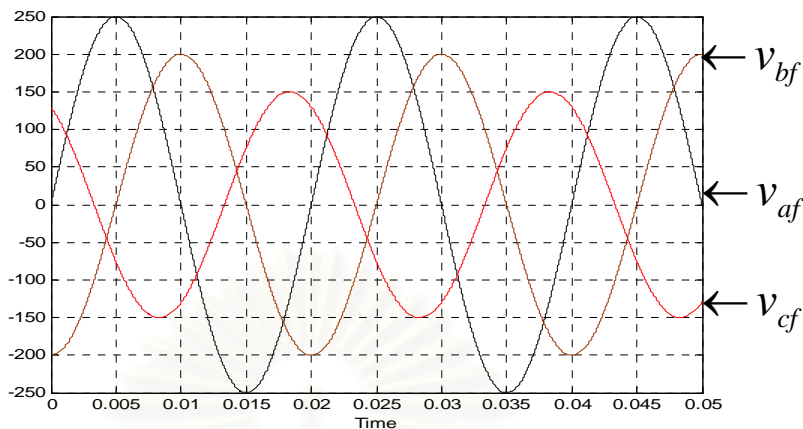
รูปที่ 4.29 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = 0$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่งซึ่งก็เปรียบได้กับการนำจุดนิวทรัลของไหลลัดไปต่อเข้ากับกึ่งกลางบัสไฟตรงนั่นเอง

รูปที่ 4.30 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}\right)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะเป็นแบบสมดุลกัน คือค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดจะมีขนาดที่เท่ากัน

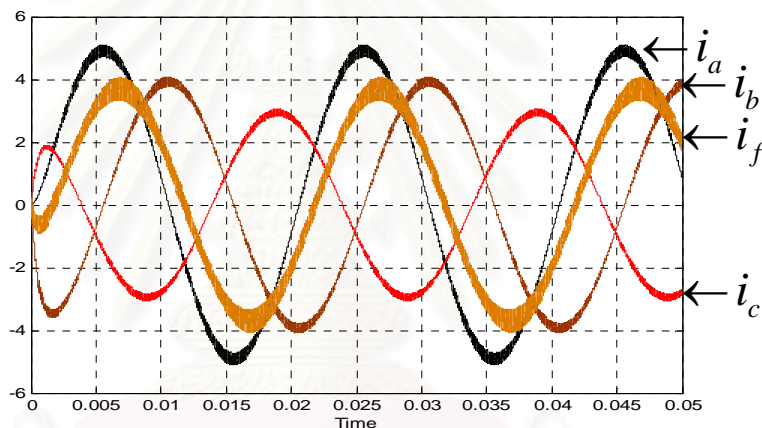
รูปที่ 4.31 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับลบครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

รูปที่ 4.32 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการ

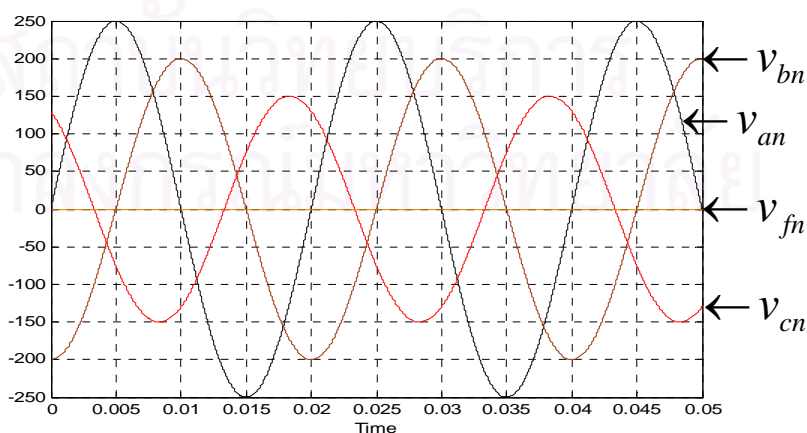
พิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ



รูปที่ 4.27 ค่าแรงดันคำสั่ง 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม)

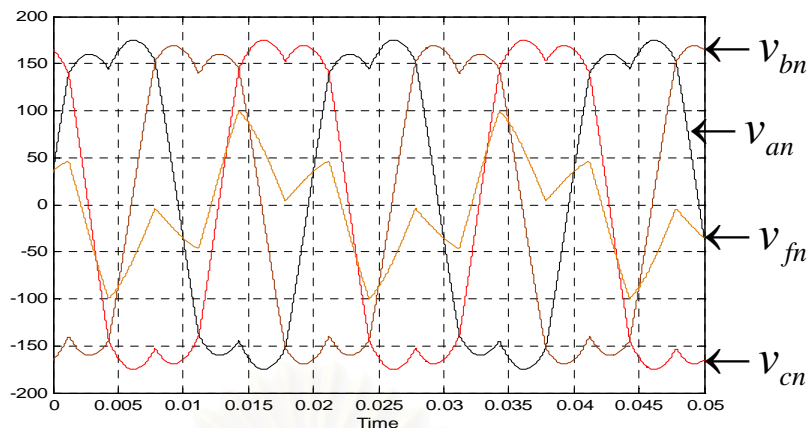


รูปที่ 4.28 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล (มีความต่างทั้งขนาดและมุม)



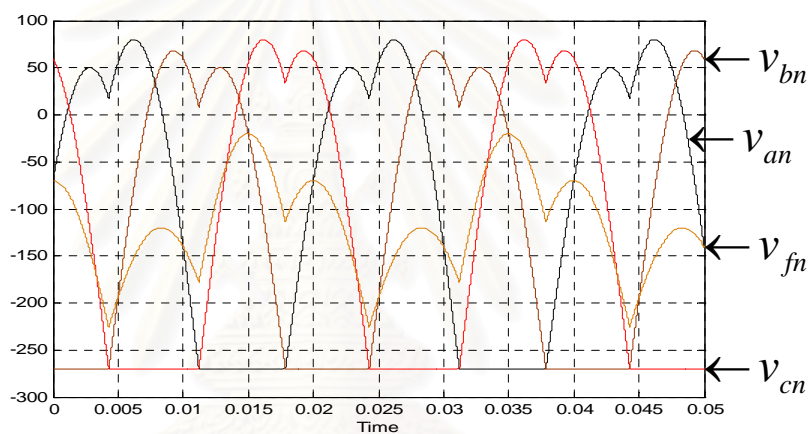
รูปที่ 4.29 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม)





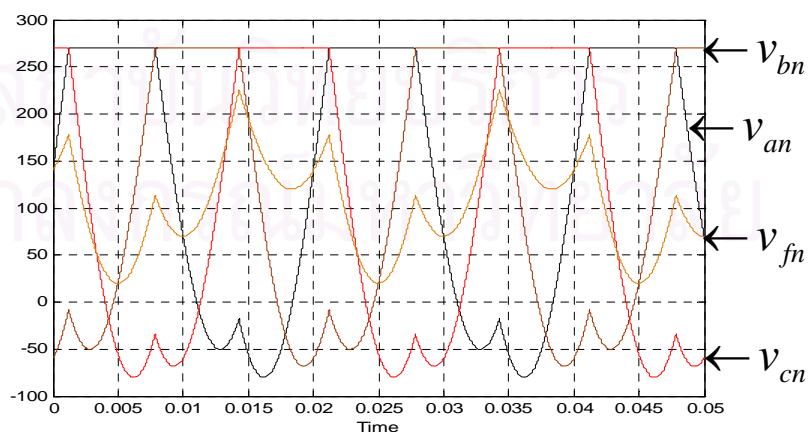
รูปที่ 4.30 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม)



รูปที่ 4.31 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม)



รูปที่ 4.32 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

เมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มีความต่างทั้งขนาดและมุม)



## 4.2 ผลการทดลองการทำงาน

การทดลองการทำงานจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ แรงดันบัลไฟตรง 540 V , ความถี่การสวิตช์ 10 kHz ,ต่อกับ โหลด 3 เฟสต้านออก  $50\ \Omega$   $30\ mH$  ได้ผลการทำงานเป็นดังนี้

### 4.2.1 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสสมดุล ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 250 \sin(100\pi t - 120^\circ)$$

$$v_{cf} = 250 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.33 , 4.34 , 4.35 และ 4.36 เป็นรูปแสดงค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$  ,  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$  ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากระแสโหลดนั้นเป็นรูป sine สมดุลทั้ง 3 เฟสและขนาดของค่าสูงสุดมีค่าประมาณ 5A ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่ง ส่วนในสายนิวทรัลนั้นมีกระแสอันดับ 3 ขนาดเล็กไหลอยู่

รูปที่ 4.37 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อนำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = 0$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่งซึ่งก็เปรียบได้กับการนำจุดนิวทรัลของโหลดไปต่อเข้ากับกึ่งกลางบัลไฟตรงนั่นเอง

รูปที่ 4.38 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = 0$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น สวิตช์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา โดยที่สวิตช์กิ่งนิวทรัลจะมีช่วงระยะเวลาในการ ON และ OFF เท่ากัน เพื่อให้ค่าเฉลี่ยแรงดันมีค่าเท่ากับ 0

รูปที่ 4.39 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อนำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการ

พิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะเป็นแบบสมมูลกัน คือค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดจะมีขนาดที่เท่ากัน

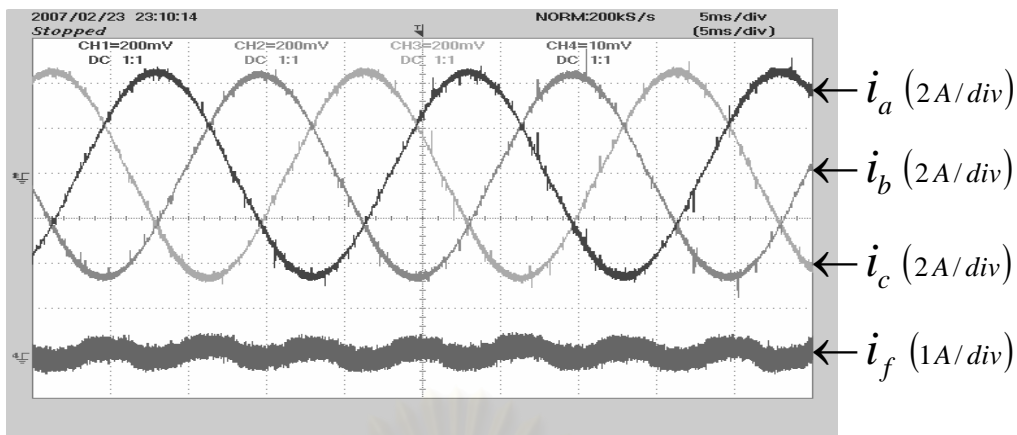
รูปที่ 4.40 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะจะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น สวิตช์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา

รูปที่ 4.41 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับลบครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

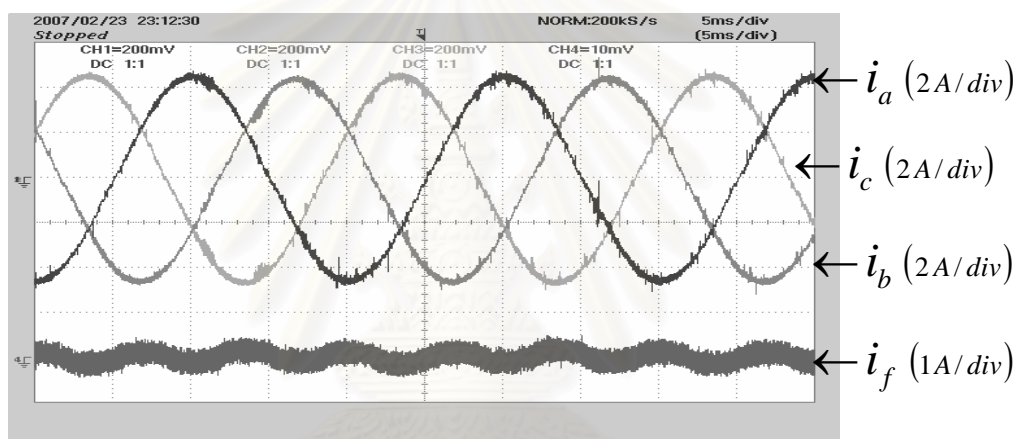
รูปที่ 4.42 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ OFF ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ นั่นก็คือการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (nnnn))

รูปที่ 4.43 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

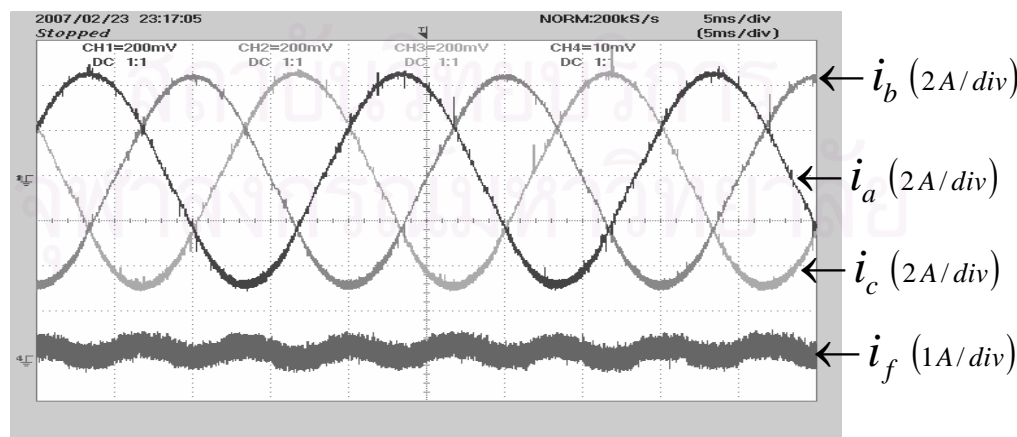
รูปที่ 4.44 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ ON ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ นั่นก็คือการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (pppp))



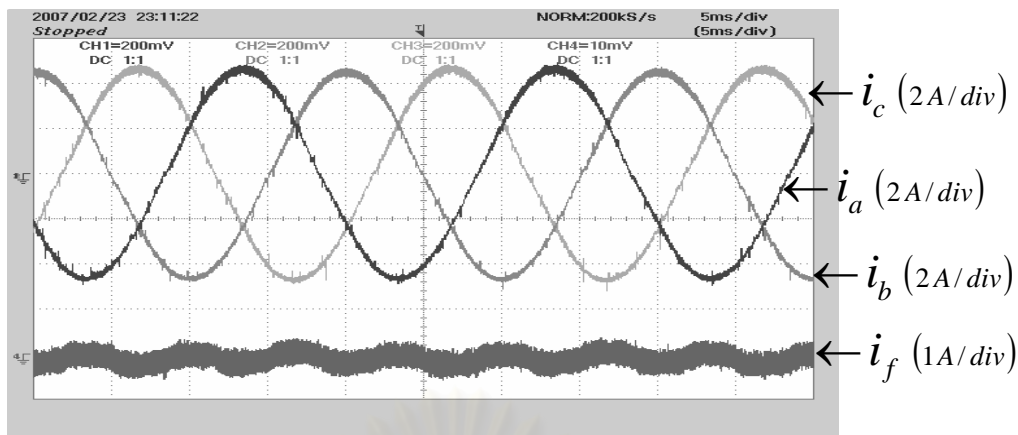
รูปที่ 4.33 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.34 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{v_{max} + v_{min}}{2}$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล

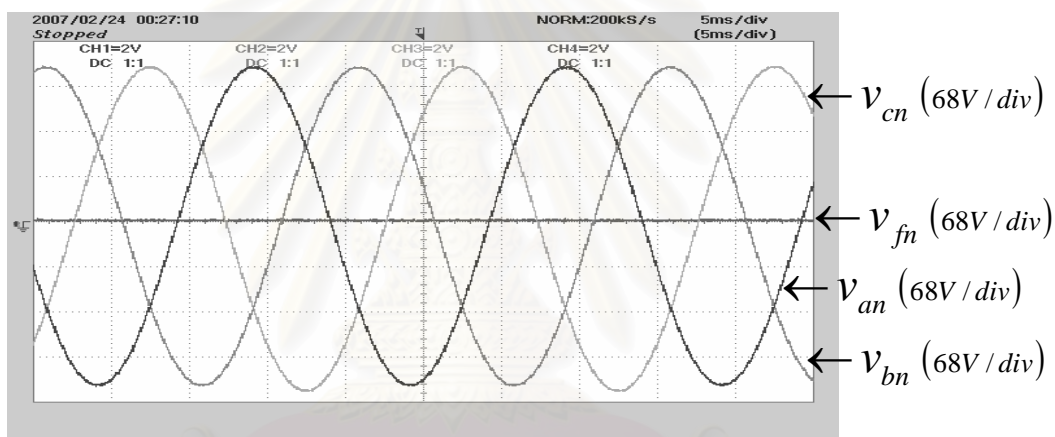


รูปที่ 4.35 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



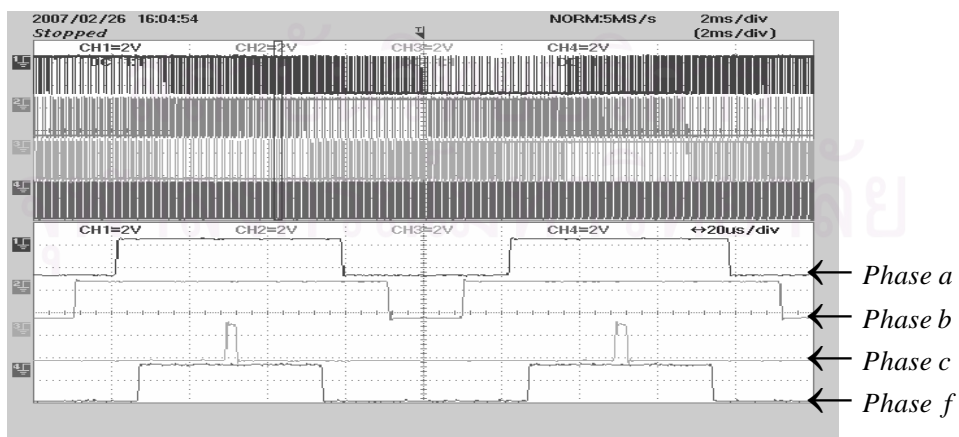
รูปที่ 4.36 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



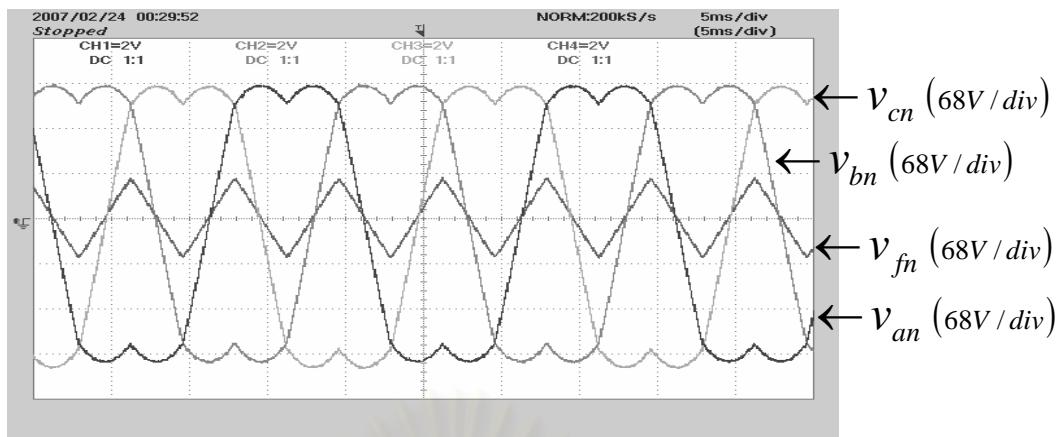
รูปที่ 4.37 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



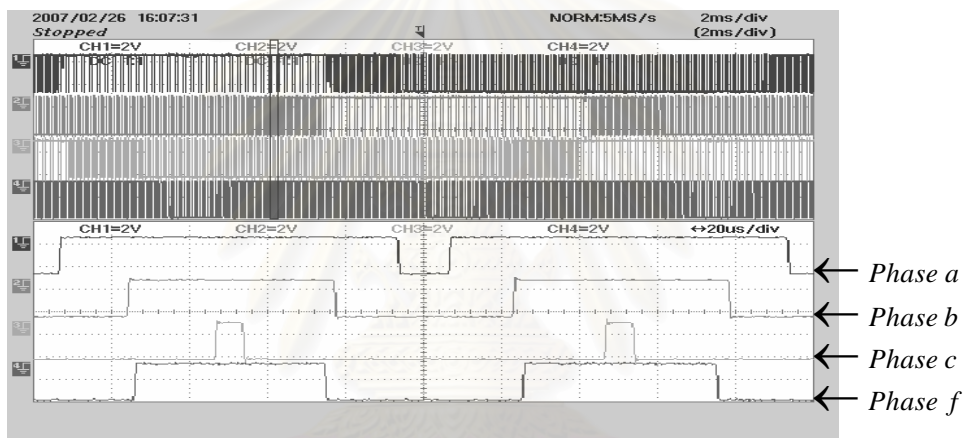
รูปที่ 4.38 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = 0$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



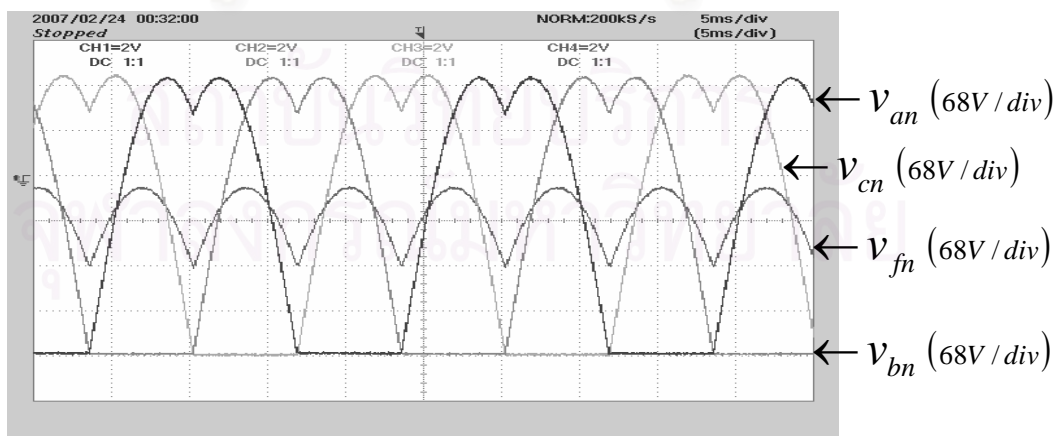
รูปที่ 4.39 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.40 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

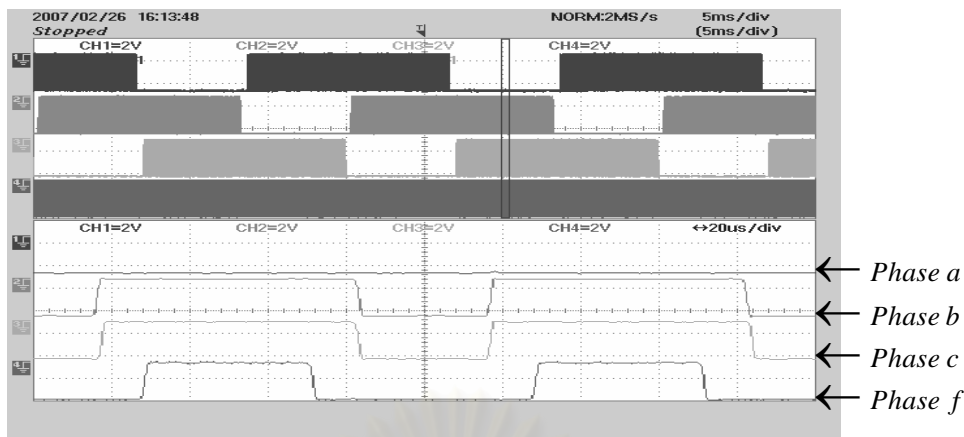
ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.41 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$ )

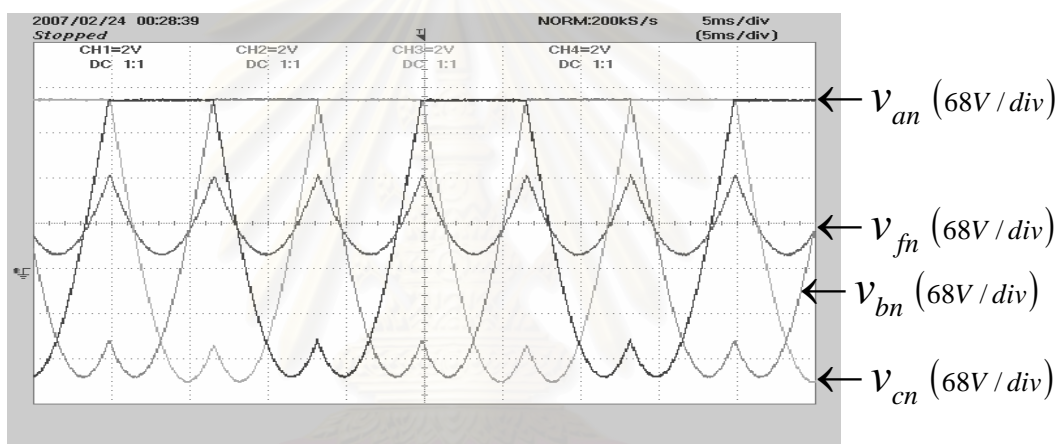
ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล





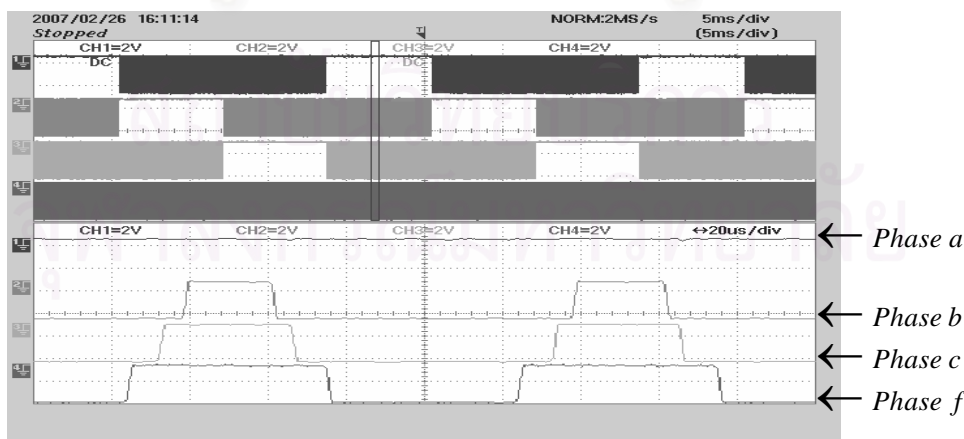
รูปที่ 4.42 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.43 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



รูปที่ 4.44 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุล



4.1.2 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 200 \sin(100\pi t - 120^\circ)$$

$$v_{cf} = 150 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.45 , 4.46 , 4.47 และ 4.48 เป็นรูปแสดงค่ากระแสไหลตลอดทั้ง 4 เฟสเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$  ,  $v_{fn} = -(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2})$  ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2V_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2V_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากระแสไหลค่านั้นเป็นรูป sine และขนาดของค่าสูงสุดมีค่าประมาณ 4.8A , 3.8A และ 2.8A ลดหลั่นกันลงมาตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่ง ส่วนในสายนิวทรัลนั้น ก็จะมีกระแสที่เกิดจากความไม่สมดุลของแรงดันคำสั่งไหลอยู่

รูปที่ 4.49 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = 0$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่งซึ่งก็เปรียบได้กับการนำจุดนิวทรัลของไหลคไปต่อเข้ากับกึ่งกลางบัสไฟตรงนั่นเอง

รูปที่ 4.50 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิทช์ตัวบนของสวิทช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = 0$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิทช์นั้น สวิทช์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา โดยที่สวิทช์กึ่งนิวทรัลจะมีช่วงระยะเวลาในการ ON และ OFF เท่ากัน เพื่อให้ค่าเฉลี่ยแรงดันมีค่าเท่ากับ 0

รูปที่ 4.51 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2})$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะเป็นแบบสมดุลกัน คือค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดจะมีขนาดที่เท่ากัน

รูปที่ 4.52 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิทช์ตัวบนของสวิทช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม

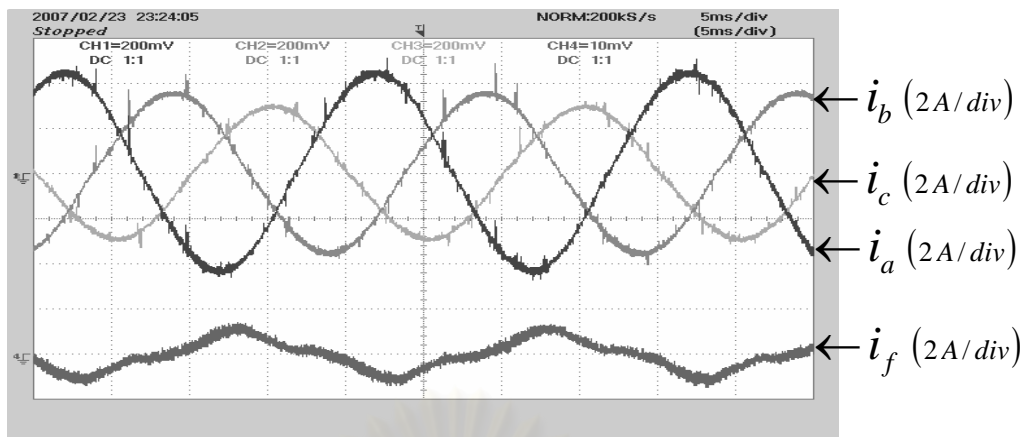
( $v_{fn} = -\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะจะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น สวิตช์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา

รูปที่ 4.53 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับลบครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

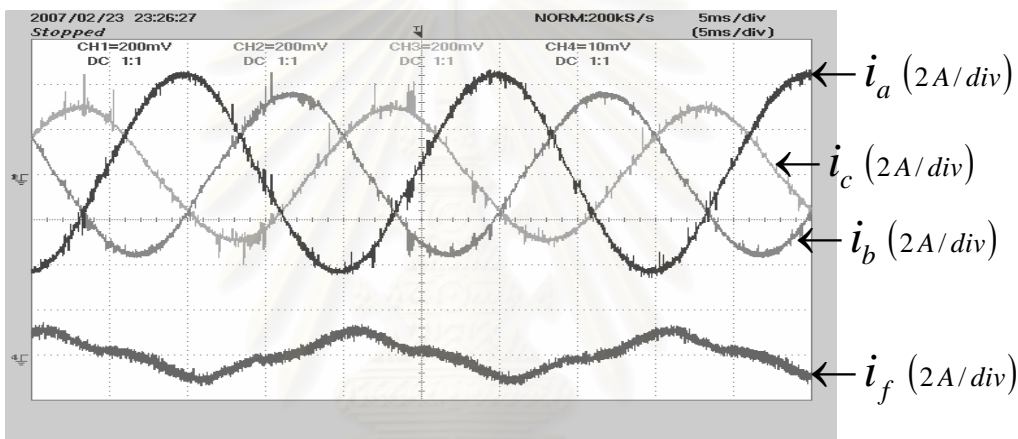
รูปที่ 4.54 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ OFF ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ก็คือการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (nnnn))

รูปที่ 4.55 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

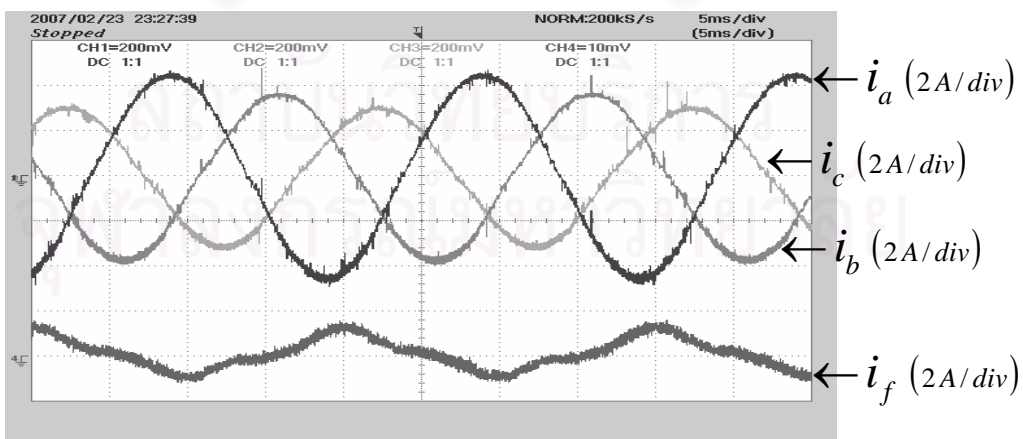
รูปที่ 4.56 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ ON ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ก็คือการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (pppp))



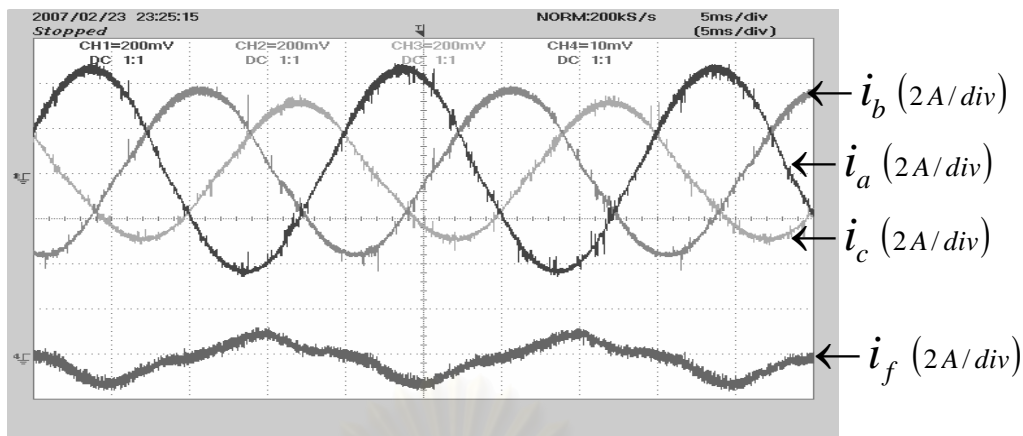
รูปที่ 4.45 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 4.46 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{(v_{max} + v_{min})}{2}$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)

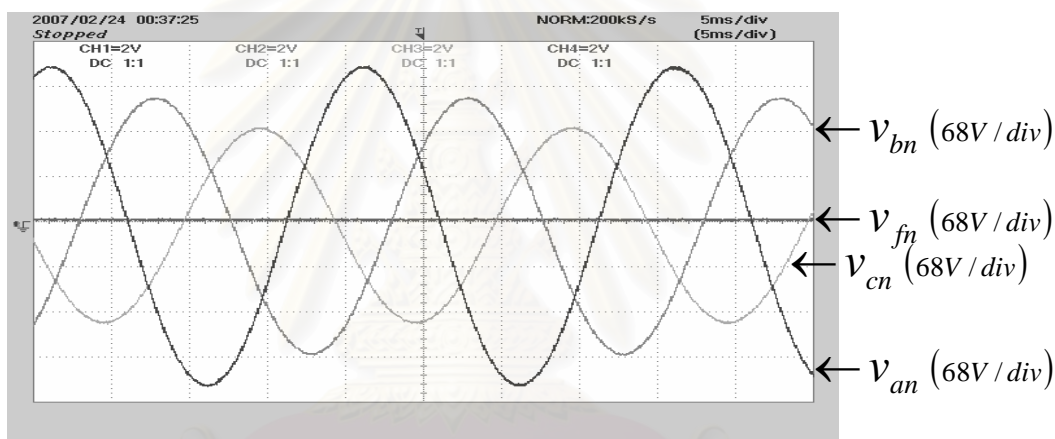


รูปที่ 4.47 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$   
 ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



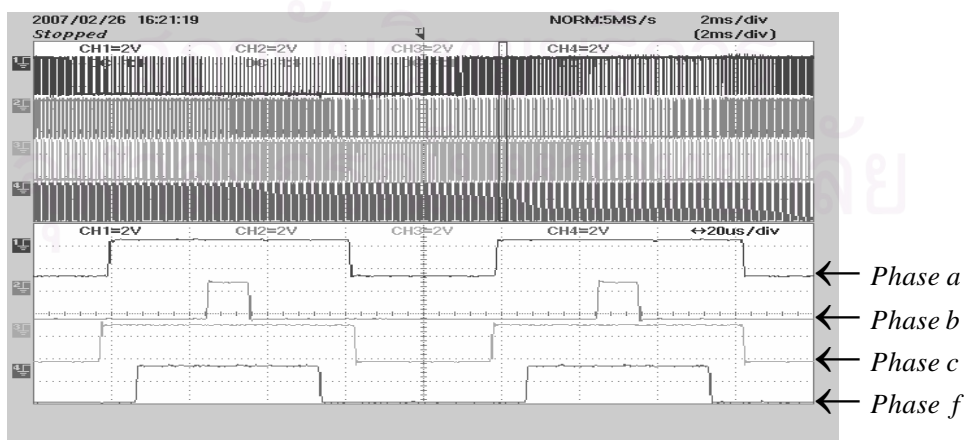
รูปที่ 4.48 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



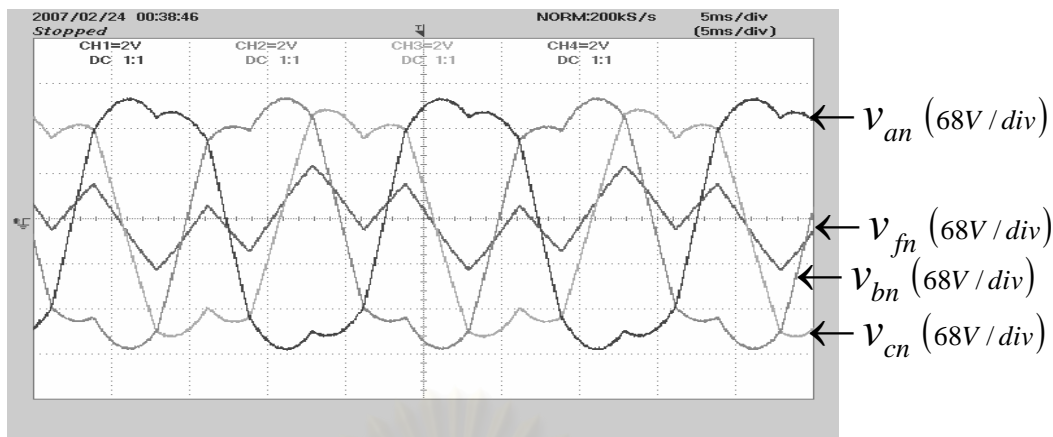
รูปที่ 4.49 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



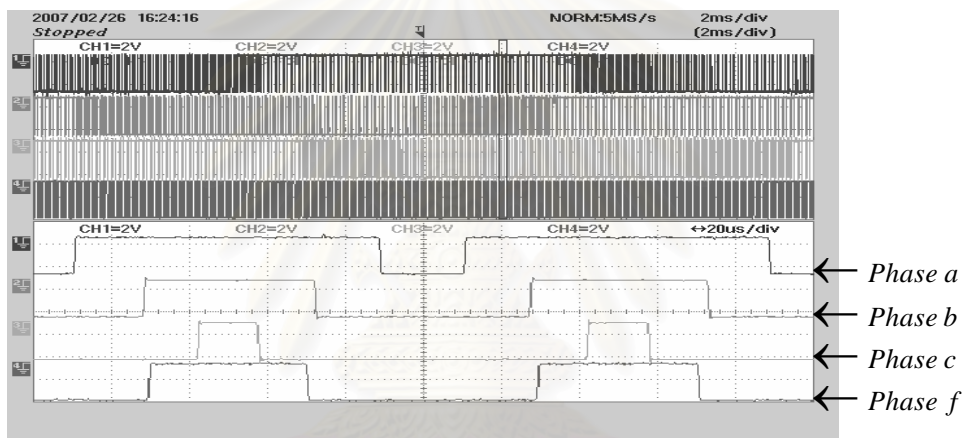
รูปที่ 4.50 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = 0$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



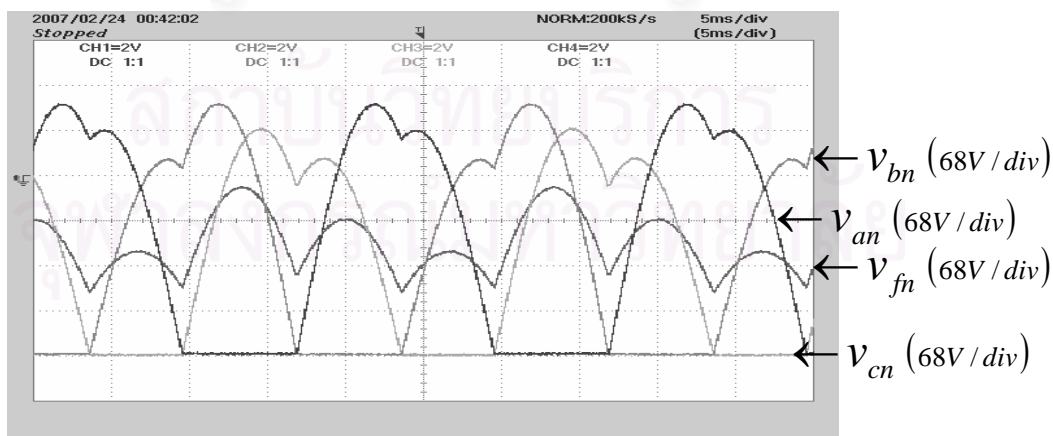
รูปที่ 4.51 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 4.52 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 4.53 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$ )

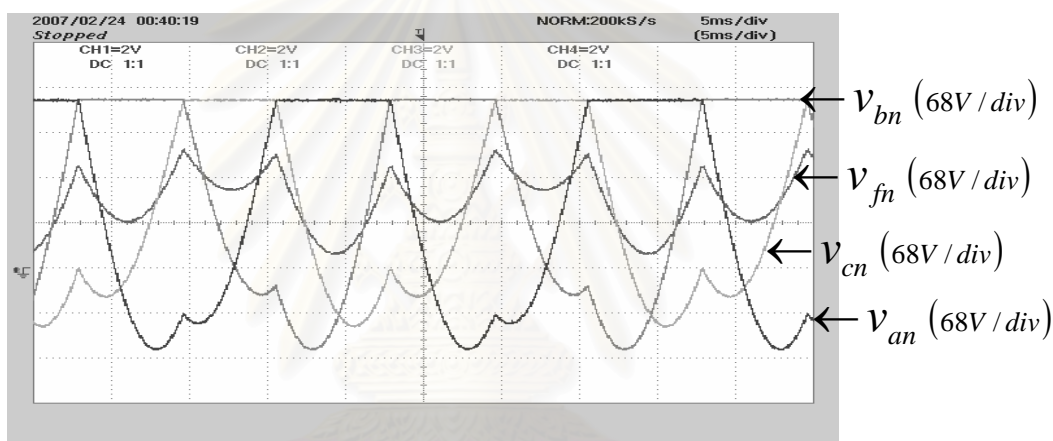
ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)





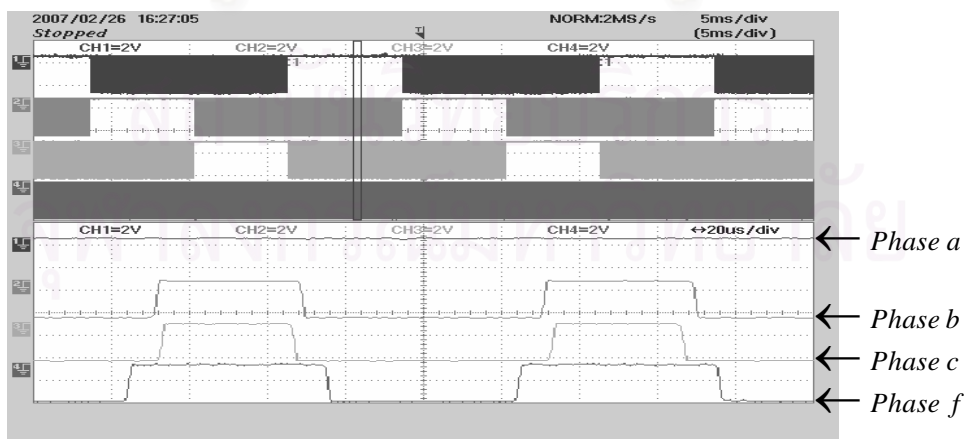
รูปที่ 4.54 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 4.55 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 4.56 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน)



4.1.3 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดเท่ากันทั้ง 3 เฟสแต่มีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 250 \sin(100\pi t - 90^\circ)$$

$$v_{cf} = 250 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.57, 4.58, 4.59 และ 4.60 เป็นรูปแสดงค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$ ,  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากระแสโหลดนั้นเป็นรูป sine โดยขนาดของค่าสูงสุดของเฟส C จะมีขนาดสูงสุด ทั้งที่ขนาดของค่าแรงดันคำสั่งมีขนาดเท่ากันทั้ง 3 เฟส ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลเนื่องมาจากผลของการประวิงเวลา ซึ่งผลของการประวิงเวลา ของสวิตซ์กึ่งนิวทรัลนั้นจะส่งผลกระทบต่อค่ากระแสเฟสอื่น ๆ มากที่สุด

รูปที่ 4.61 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = 0$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่งซึ่งก็เปรียบได้กับการนำจุดนิวทรัลของโหลดไปต่อเข้ากับกึ่งกลางบัสไฟตรงนั่นเอง

รูปที่ 4.62 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตซ์ตัวบนของสวิตซ์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = 0$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตซ์นั้น สวิตซ์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา โดยที่สวิตซ์กึ่งนิวทรัลจะมีช่วงระยะเวลาในการ ON และ OFF เท่ากัน เพื่อให้ค่าเฉลี่ยแรงดันมีค่าเท่ากับ 0

รูปที่ 4.63 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะเป็นแบบสมดุลกัน คือค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดจะมีขนาดที่เท่ากัน

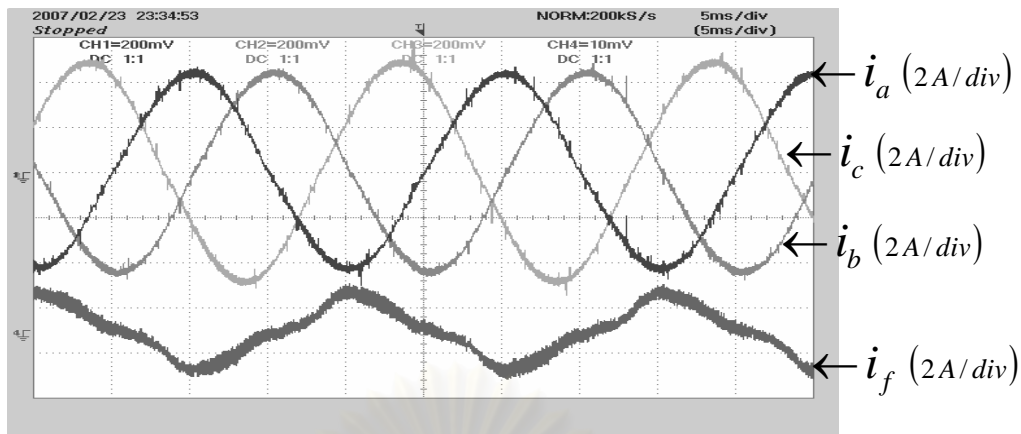
รูปที่ 4.64 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -(\frac{V_{max} + V_{min}}{2})$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะจะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น สวิตช์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา

รูปที่ 4.65 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณ ไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับลบครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

รูปที่ 4.66 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ OFF ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ นั่นก็คือการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (mnn))

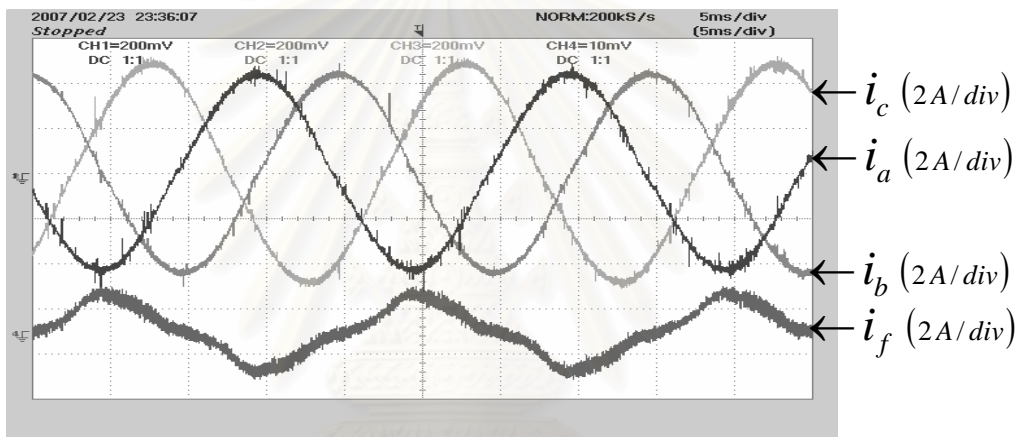
รูปที่ 4.67 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณ ไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

รูปที่ 4.68 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ ON ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ นั่นก็คือการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (pppp))



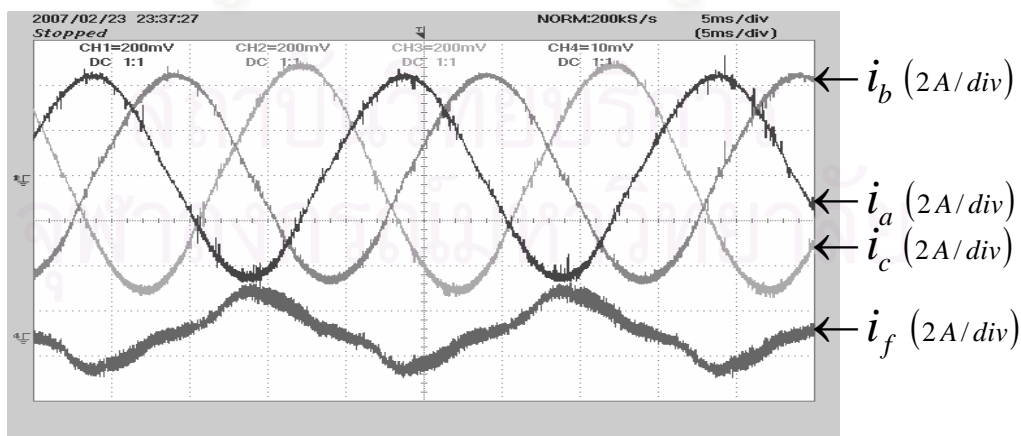
รูปที่ 4.57 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



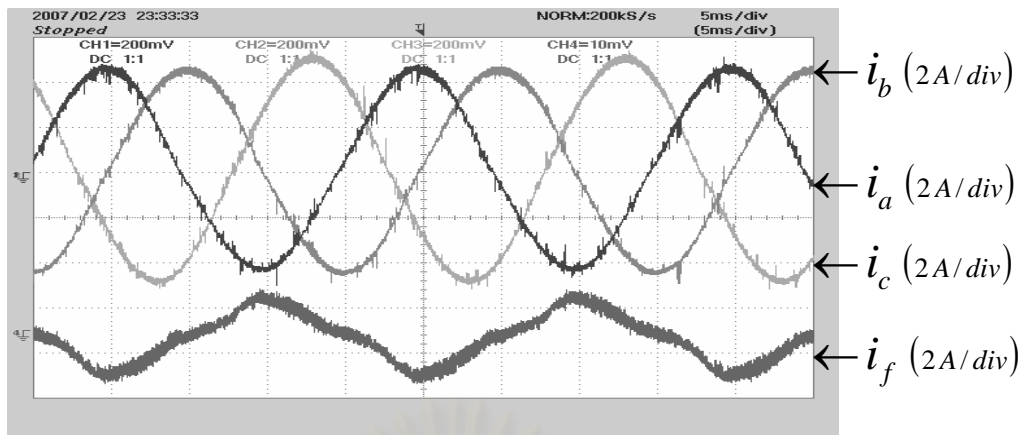
รูปที่ 4.58 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}$

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



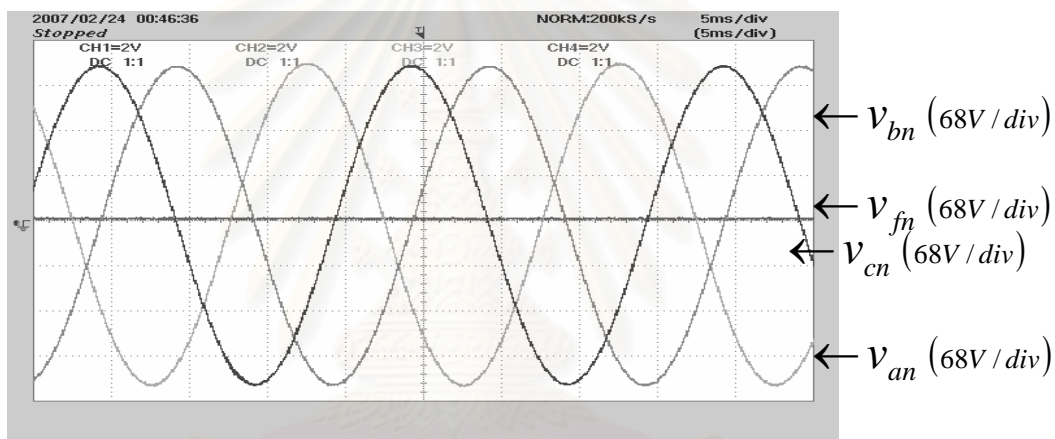
รูปที่ 4.59 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



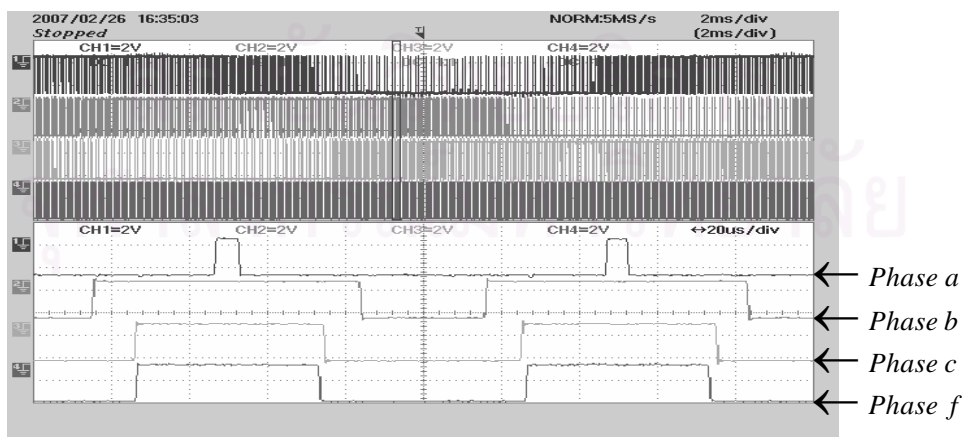
รูปที่ 4.60 ค่ากระแสไหลอดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{max} - V_g)$

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



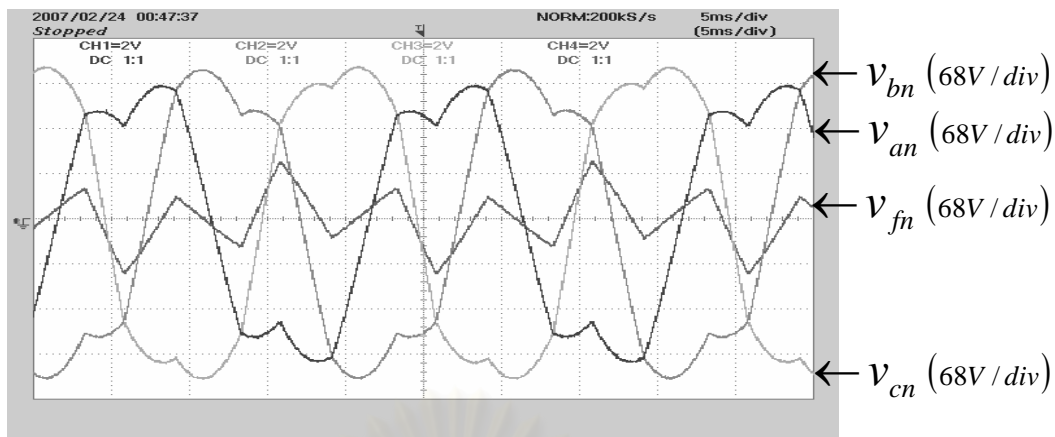
รูปที่ 4.61 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



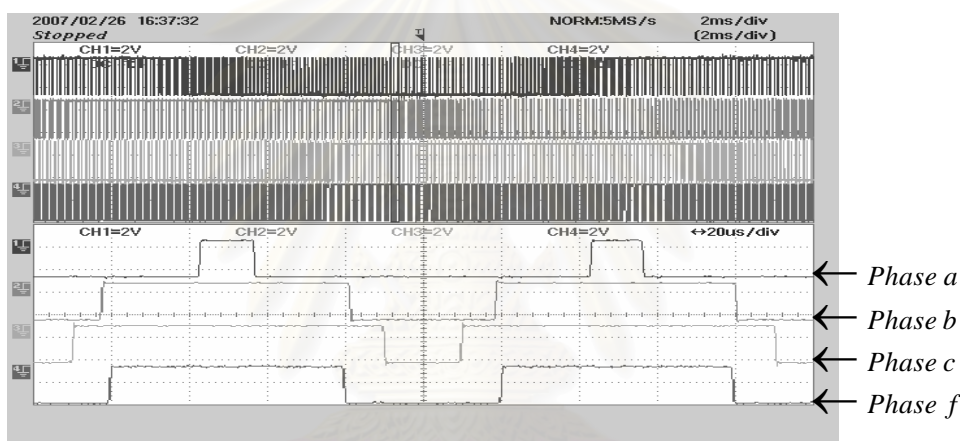
รูปที่ 4.62 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = 0$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



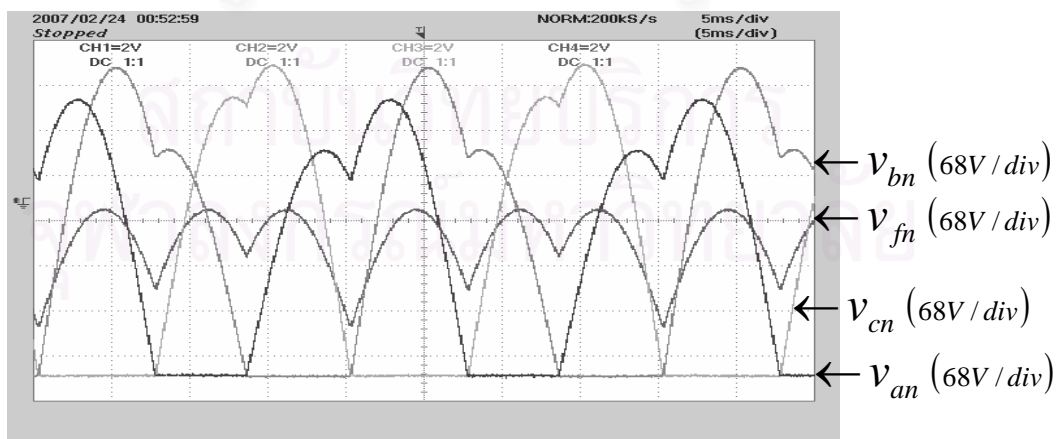
รูปที่ 4.63 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง 120°)



รูปที่ 4.64 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

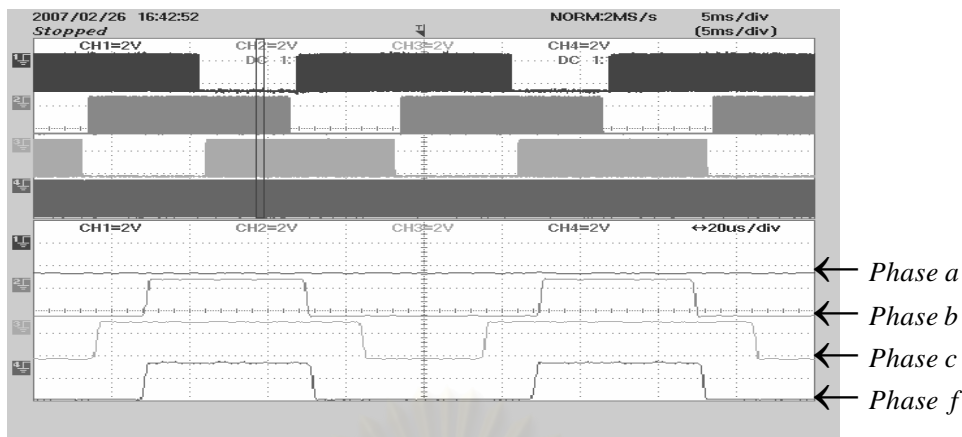
ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง 120°)



รูปที่ 4.65 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$ )

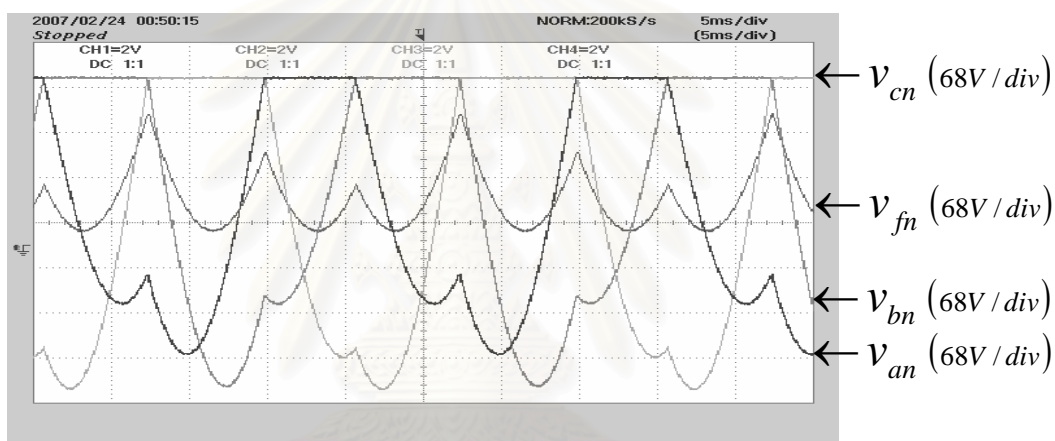
ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง 120°)





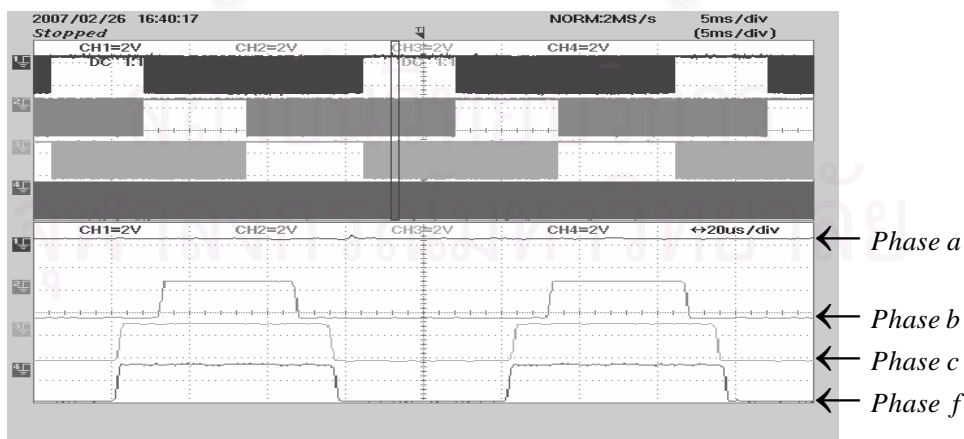
รูปที่ 4.66 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.67 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.68 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



4.1.4 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟสและมีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 200 \sin(100\pi t - 90^\circ)$$

$$v_{cf} = 150 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.69 , 4.70 , 4.71 และ 4.72 เป็นรูปแสดงค่ากระแสไหลตทั้ง 4 เฟสเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$  ,  $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$  ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากระแสไหลตนั้นเป็นรูป sine และขนาดของค่าสูงสุดมีค่าลดหลั่นกันลงมาตามลำดับ ซึ่งทั้งที่ยังมีผลของการประวิงเวลาอยู่แต่ผลที่ปรากฏกลับไม่เด่นชัดเหมือนกับกรณีที่มีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง 120°) อาจเป็นผลเนื่องมาจากขนาดของค่ากระแสที่น้อยลงทำให้เห็นส่วนต่างได้ไม่ชัดเจน

รูปที่ 4.73 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อนำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = 0$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่งซึ่งก็เปรียบได้กับการนำจุดนิวทรัลของไหลตไปต่อเข้ากับกึ่งกลางบัสไฟตรงนั่นเอง

รูปที่ 4.74 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตซ์ตัวบนของสวิตซ์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = 0$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตซ์นั้น สวิตซ์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา โดยที่สวิตซ์กิ่งนิวทรัลจะมีช่วงระยะเวลาในการ ON และ OFF เท่ากันเพื่อให้ค่าเฉลี่ยแรงดันมีค่าเท่ากับ 0

รูปที่ 4.75 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อนำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\left(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการ

พิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะเป็นแบบสมมูลกัน คือค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดจะมีขนาดที่เท่ากัน

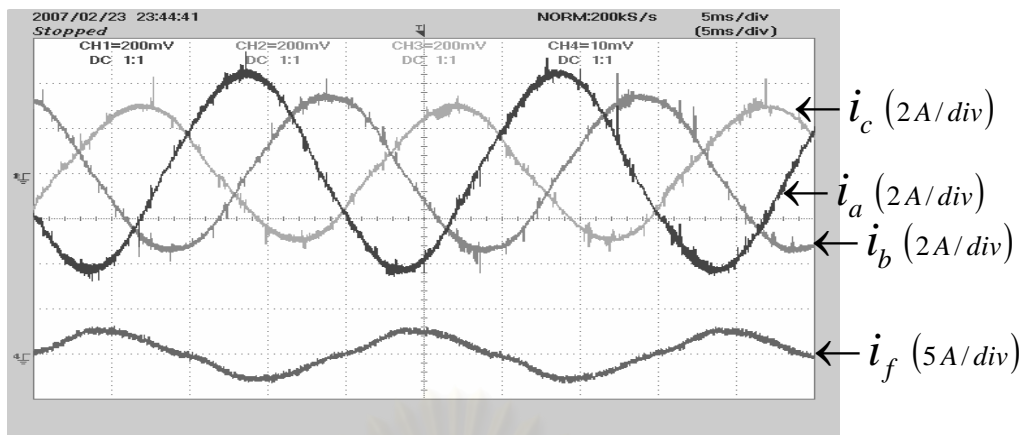
รูปที่ 4.76 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะจะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น สวิตช์ทั้ง 4 กิ่งมีการ ON-OFF ตลอดเวลา

รูปที่ 4.77 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับลบครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

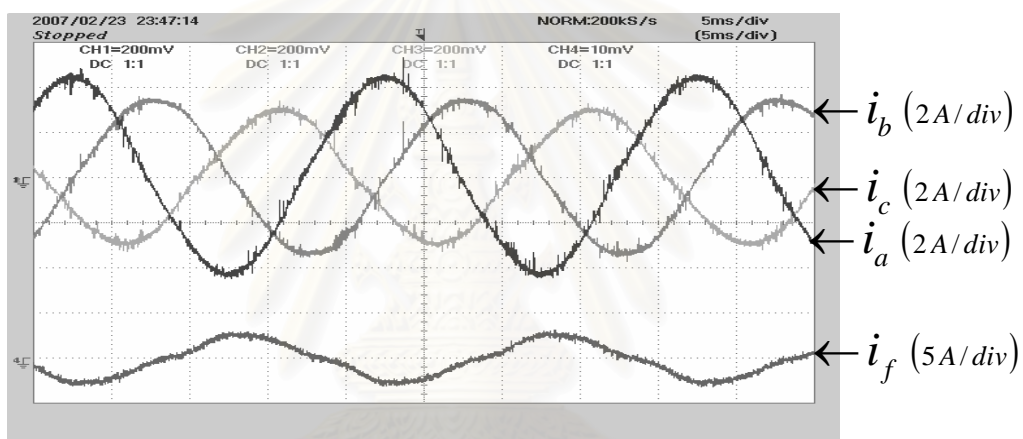
รูปที่ 4.78 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ OFF ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ก็ถือเป็นการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (nnnn))

รูปที่ 4.79 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูป ในทุก ๆ ช่วงเวลาจะมีค่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเสมอ

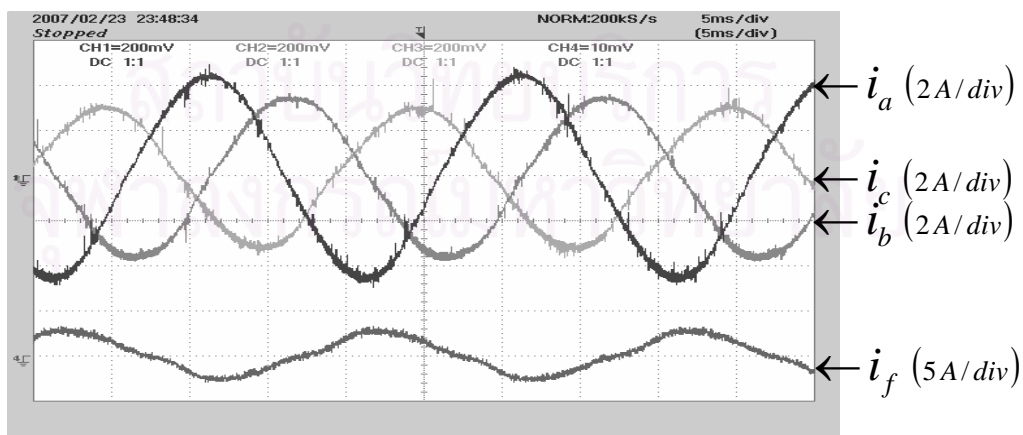
รูปที่ 4.80 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่งที่ได้มาจากการนำค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ ) ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบการสวิตช์นั้น จะมีสวิตช์เพียง 3 กิ่งที่ทำการ ON-OFF และจะมีสวิตช์ 1 กิ่งที่สวิตช์ตัวบนจะทำการ ON ตลอดเวลา ซึ่งการ ON-OFF สวิตช์ในลักษณะแบบนี้ก็ถือเป็นการทำ 3 Arms modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา นั่นเอง (ใช้ zero switching vectors เพียงตัวเดียว (pppp))



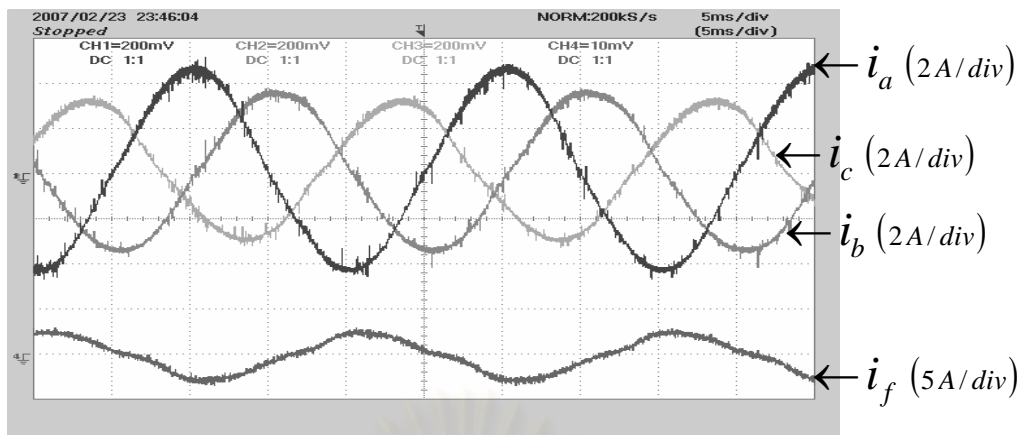
รูปที่ 4.69 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีค่าแรงดัน  
คำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



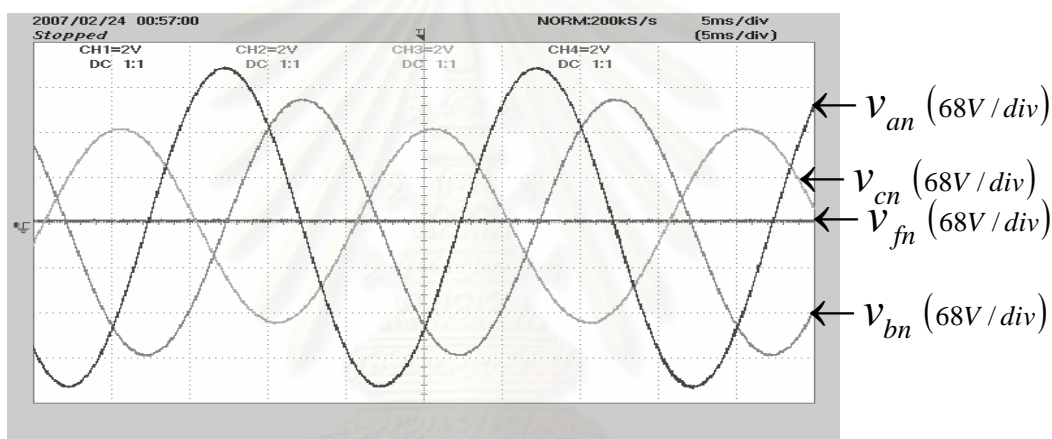
รูปที่ 4.70 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}$  ในกรณีค่าแรงดัน  
คำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



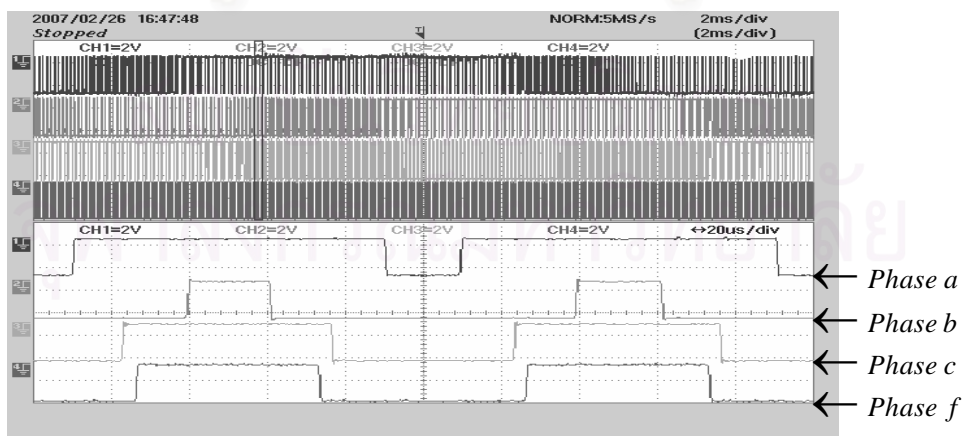
รูปที่ 4.71 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีค่าแรงดัน  
คำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



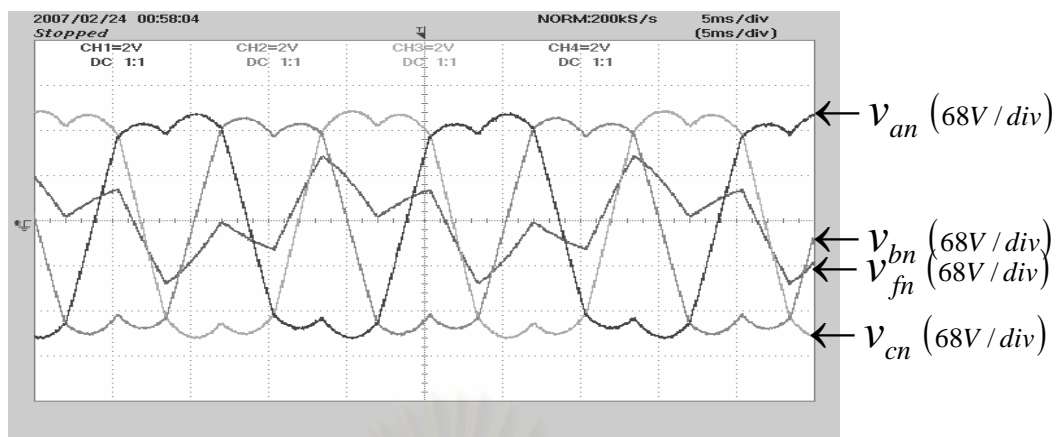
รูปที่ 4.72 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.73 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )

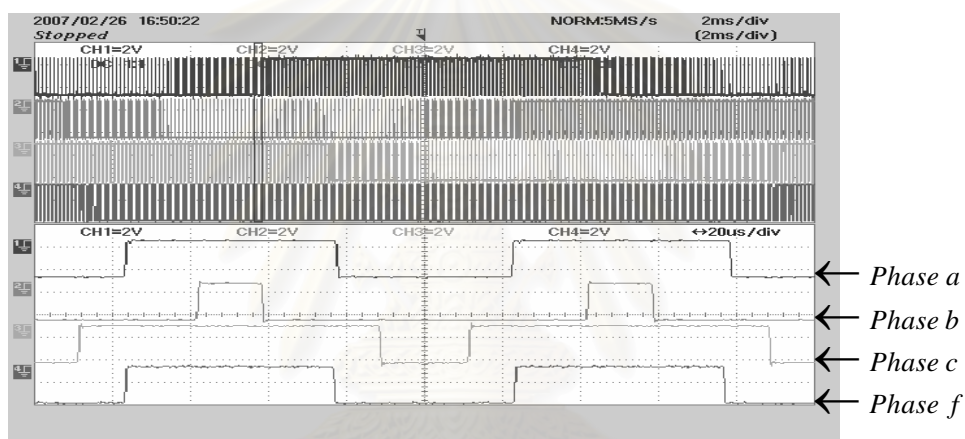


รูปที่ 4.74 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



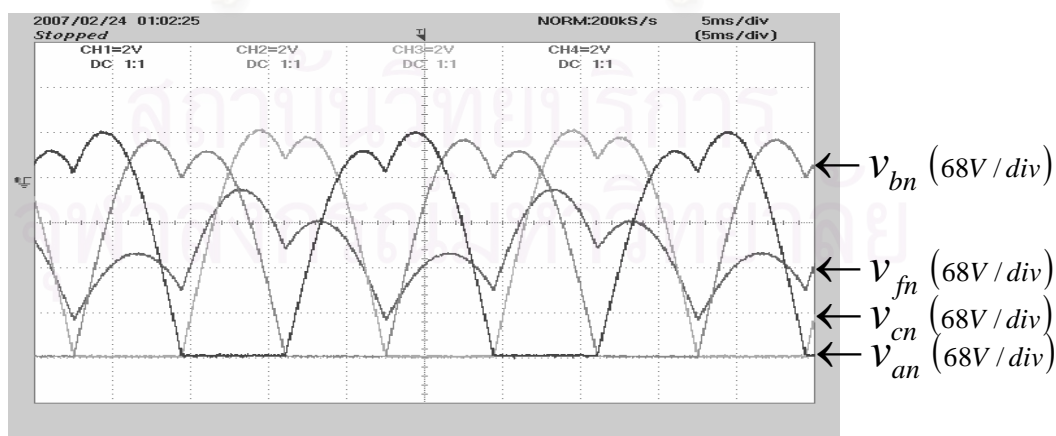
รูปที่ 4.75 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.76 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -(\frac{v_{max} + v_{min}}{2})$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.77 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{min} + V_g)$ )

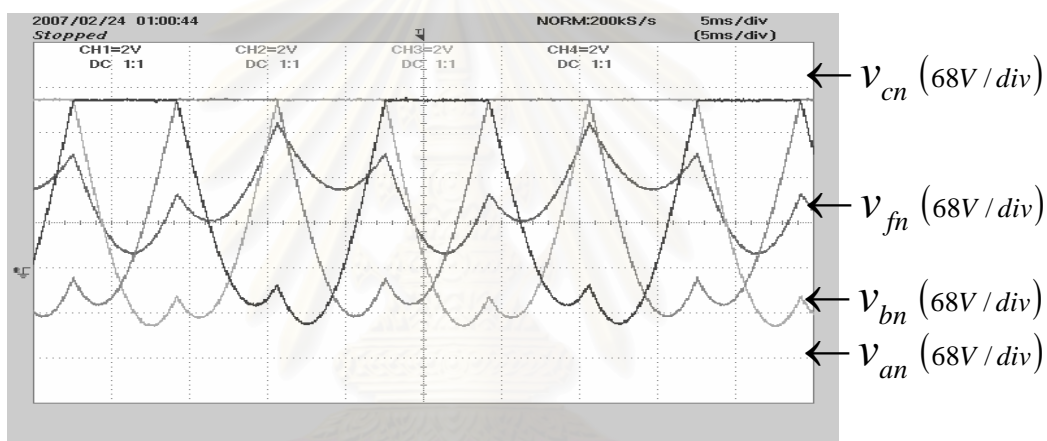
ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )





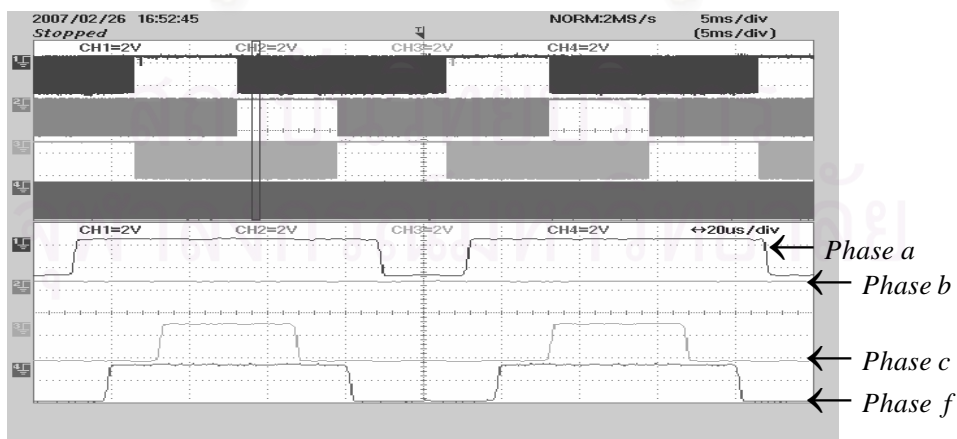
รูปที่ 4.78 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.79 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



รูปที่ 4.80 ค่าแรงดันควบคุมสวิตช์ตัวบนของสวิตช์ทั้ง 4 กิ่ง ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ )

ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งไม่สมดุล (ขนาดไม่เท่ากันและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )



#### 4.3 ผลการจำลองการทำงานเมื่อเพิ่มส่วนการประวิงเวลาของสวิตช์

การจำลองการทำงานจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ แรงดันบัลไฟตรง 540 V ความถี่การสวิตช์ 10 kHz , การประวิงเวลาของสวิตช์  $2.98\mu S$  , ต่อกับโหลด 3 เฟสด้านออก  $50\Omega$   $30\text{ mH}$  ได้ผลจำลองการทำงานเป็นดังนี้

เมื่อค่าแรงดันคำสั่งมีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 250 \sin(100\pi t - 90^\circ)$$

$$v_{cf} = 250 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.81 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันคำสั่งที่สร้างขึ้นจะเห็นว่าค่าแรงดันคำสั่งทั้ง 3 เฟสเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดเท่ากันทั้ง 3 เฟสแต่มีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา ซึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ

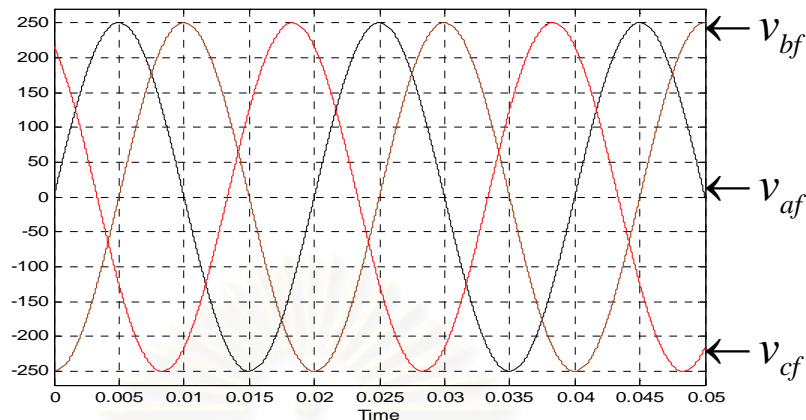
รูปที่ 4.82 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = 0$  จากนั้นจึงนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่จะนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่งซึ่งก็เปรียบได้กับการนำจุดนิวทรัลของโหลดไปต่อเข้ากับกึ่งกลางบัลไฟตรงนั่นเอง

รูปที่ 4.83 เป็นรูปแสดงค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$  จะเห็นได้ว่ากระแสโหลดนั้นเป็นรูป sine โดยขนาดของค่าสูงสุดของเฟส C จะมีขนาดสูงสุด ทั้งที่ขนาดของค่าแรงดันคำสั่งมีขนาดเท่ากันทั้ง 3 เฟส ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลเนื่องมาจากผลของการประวิงเวลา ซึ่งตรงกับผลการทดลองที่ได้มาก่อนหน้านี้

รูปที่ 4.84 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อเรานำค่าแรงดันคำสั่งไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาค่าแรงดันศูนย์ซึ่งในที่นี้  $v_{fn} = 0$  จากนั้นก็ทำการชดเชยแรงดันที่สูญเสียไปจากการประวิงเวลาของสวิตช์ในกึ่ง N โดยการบวกแรงดันขนาดประมาณ 16 V ที่มีทิศทางตามทิศของกระแสของเฟสนิวทรัลเข้าไปด้วย จะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันคำสั่ง จะมีแต่เฟส N เท่านั้นที่ต่างจากแรงดันคำสั่ง เพราะได้บวกค่าแรงดันชดเชยการประวิงเวลาของสวิตช์เข้าไป

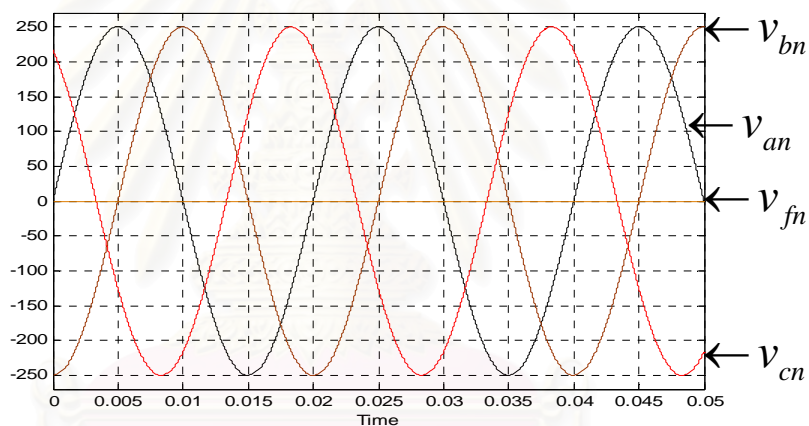
รูปที่ 4.85 เป็นรูปแสดงค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$  และได้ทำการชดเชยแรงดันที่สูญเสียไปจากการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว จะเห็นได้ว่ากระแสโหลดนั้นเป็น

รูป sine โดยที่ขนาดของค่ากระแสสูงสุดจะมีขนาดใกล้เคียงกันทั้ง 3 เฟส ซึ่งเป็นไปตามค่าแรงดันคำสั่งที่ต้องการ



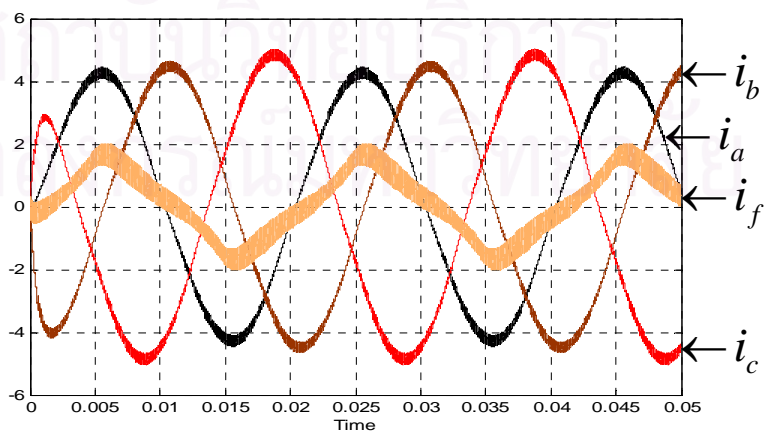
รูปที่ 4.81 ค่าแรงดันคำสั่ง 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ )

เมื่อเพิ่มส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์

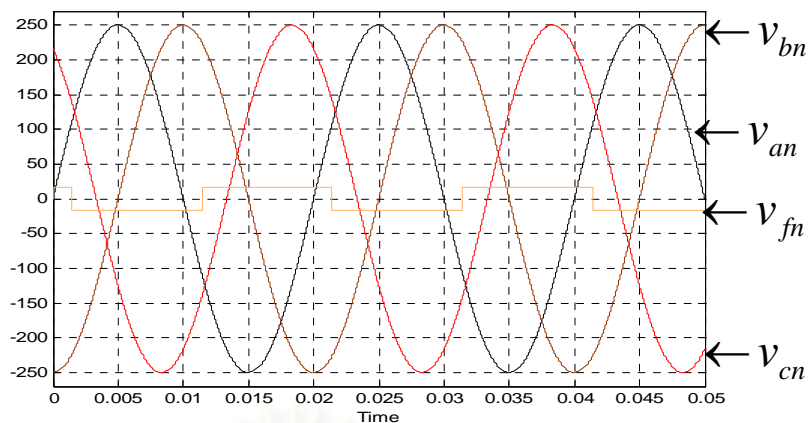


รูปที่ 4.82 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )

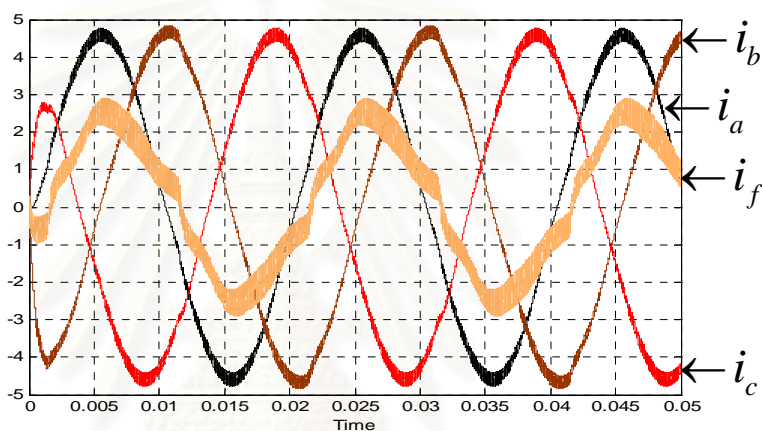
เมื่อเพิ่มส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์



รูปที่ 4.83 ค่ากระแสไหลทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล (มุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$ ) เมื่อเพิ่มส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์



รูปที่ 4.84 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ )  
เมื่อทำการชดเชยแรงดันส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์



รูปที่ 4.85 ค่ากระแสไหลคทั้ง 4 เฟสเมื่อแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล(มุมต่างเฟสกัน  
ไม่ถึง  $120^\circ$ ) เมื่อทำการชดเชยแรงดันส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์

#### 4.4 ผลการทดลองการทำงานเมื่อชดเชยแรงดันในส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์

การทดลองการทำงานจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ แรงดันบัสไฟตรง 540 V ความถี่การสวิตช์ 10 kHz ,ชดเชยแรงดันในส่วนของการประวิงเวลาด้วยแรงดันขนาดประมาณ 16 V ,ต่อกับโหลด 3 เฟสด้านออก  $50\Omega$   $30\text{ mH}$  ได้ผลการทำงานเป็นดังนี้

4.4.1 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสสมดุล ซึ่งมีค่าเท่ากับ

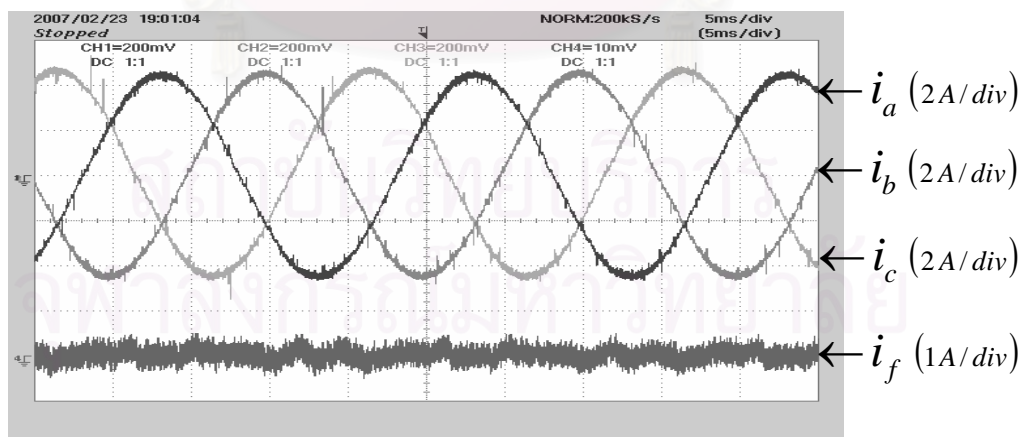
$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 250 \sin(100\pi t - 120^\circ)$$

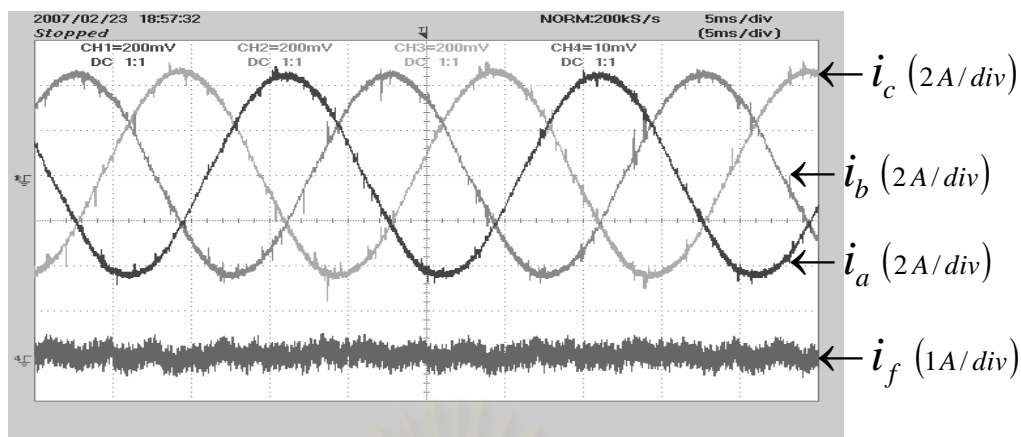
$$v_{cf} = 250 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.86, 4.87, 4.88 และ 4.89 เป็นรูปแสดงค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$ ,  $v_{fn} = -(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2})$ ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากระแสโหลดนั้นเป็นรูป sine สมดุลทั้ง 3 เฟสและขนาดของค่าสูงสุดมีค่าประมาณ 5A ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่ง

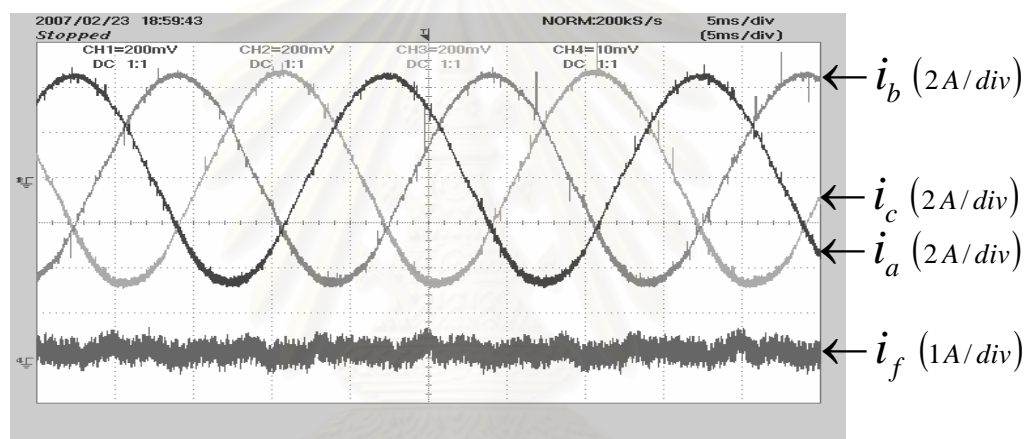
รูปที่ 4.90, 4.91, 4.92 และ 4.93 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยม เมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$ ,  $v_{fn} = -(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2})$ ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ เมื่อนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่บวกด้วยแรงดันที่ชดเชยส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์ (เฉพาะในส่วนของสวิตช์กึ่ง N) แล้วนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต จะเห็นได้ว่าจะมีเพียงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมของสวิตช์กึ่ง N เท่านั้นที่จะแตกต่างกันไปเมื่อเทียบกับก่อนที่เราจะทำการชดเชยแรงดันของการประวิงเวลาของการสวิตช์



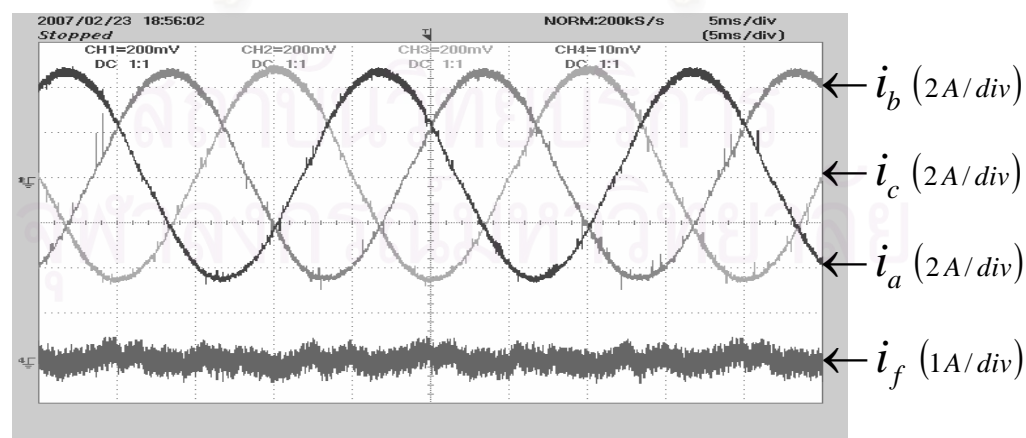
รูปที่ 4.86 ค่ากระแสโหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.87 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}$  ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

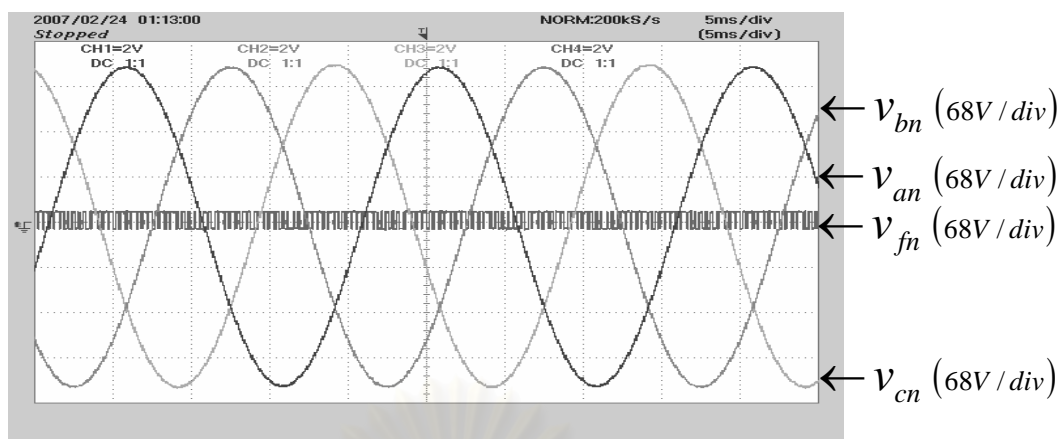


รูปที่ 4.88 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

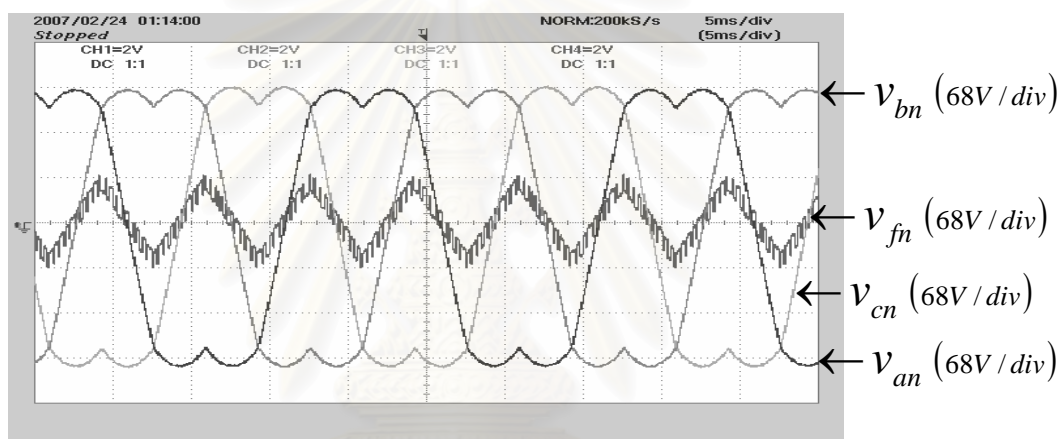


รูปที่ 4.89 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

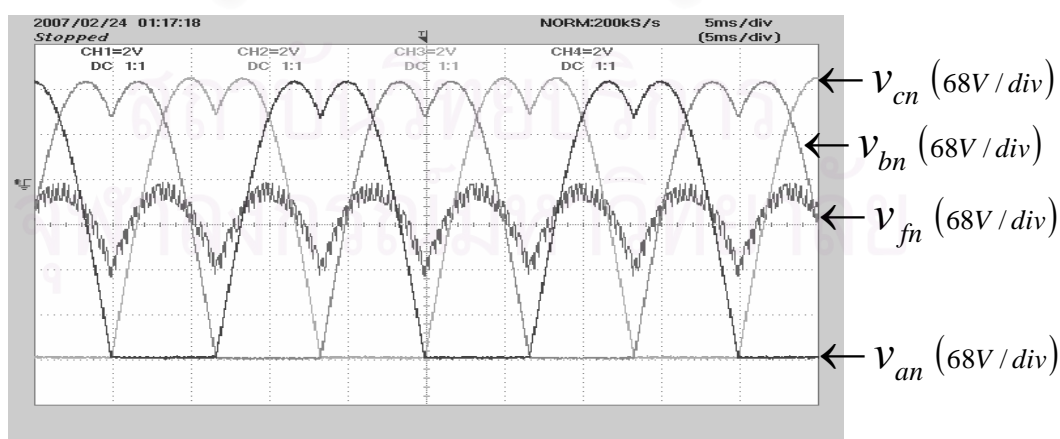




รูปที่ 4.90 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่าแรงดันคำสั่งเป็น แรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

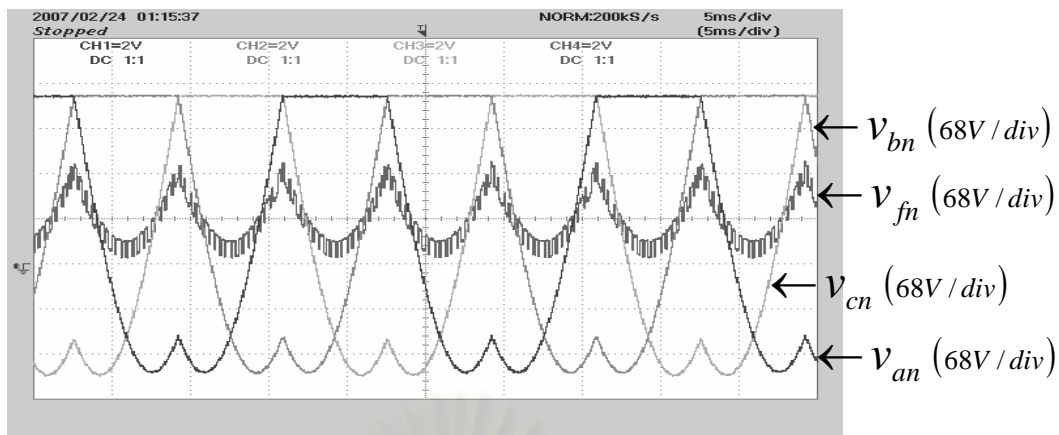


รูปที่ 4.91 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ ) ในกรณีแรงดัน คำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันจากผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.92 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ ) ในกรณีแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันจากผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว





รูปที่ 4.93 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ ) ในกรณีแรงดันคำสั่งเป็นแรงดัน 3 เฟสสมดุลและชดเชยแรงดันจากผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

4.4.2 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาด ค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ

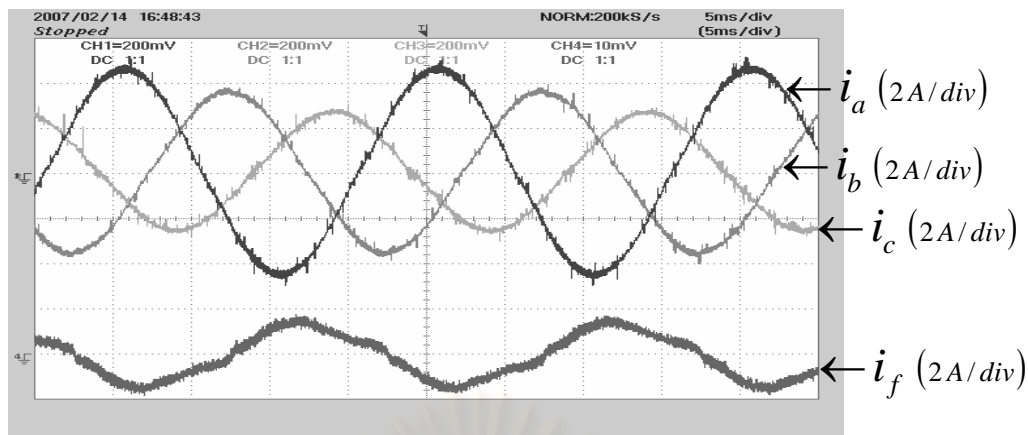
$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 200 \sin(100\pi t - 120^\circ)$$

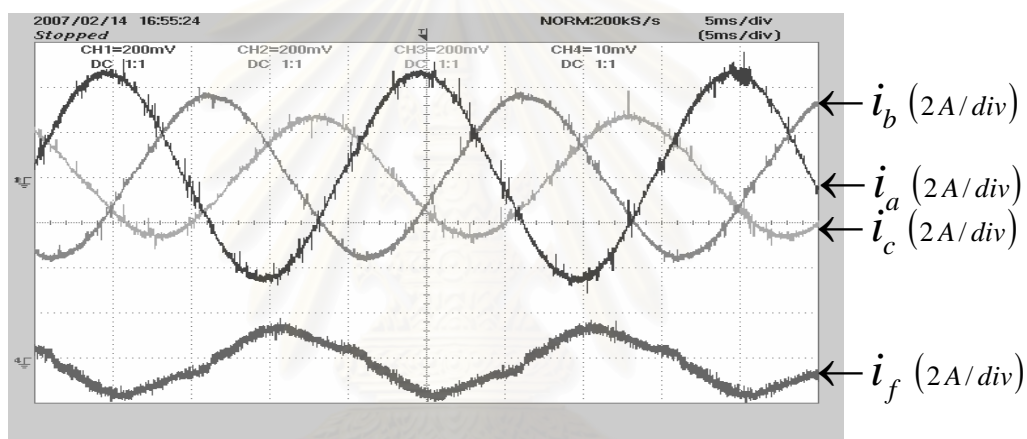
$$v_{cf} = 150 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.94 , 4.95 , 4.96 และ 4.97 เป็นรูปค่ากระแสไหลตลอดทั้ง 4 เฟสเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$  ,  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$  ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากระแสไหลเหล่านั้นเป็นรูป sine และขนาดของค่าสูงสุดมีค่าประมาณ 4.8A , 3.8A และ 2.8A ลดหลั่นกันลงมาตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่ง ส่วนในสายนิวทรัลนั้นก็จะมีการเสถียรที่เกิดจากความไม่สมดุลของแรงดันคำสั่งไหลอยู่

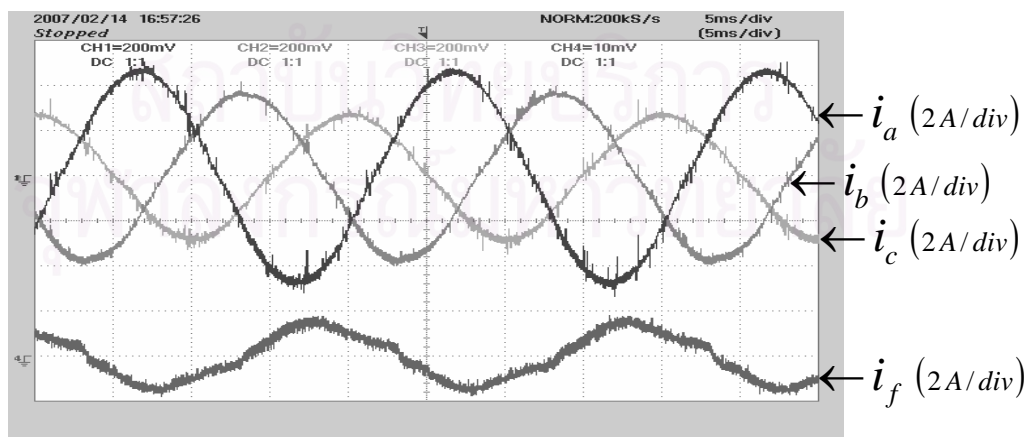
รูปที่ 4.98 , 4.99 , 4.100 และ 4.101 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้พิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$  ,  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$  ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ เมื่อนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่บวกด้วยแรงดันที่ชดเชยส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์ (เฉพาะในส่วนของสวิตช์กึ่ง N ) แล้วนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต จะเห็นได้ว่าจะมีเพียงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมของสวิตช์กึ่ง N เท่านั้นที่จะแตกต่างกันเมื่อเทียบกับก่อนที่เราจะทำการชดเชยแรงดันของการประวิงเวลาของการสวิตช์



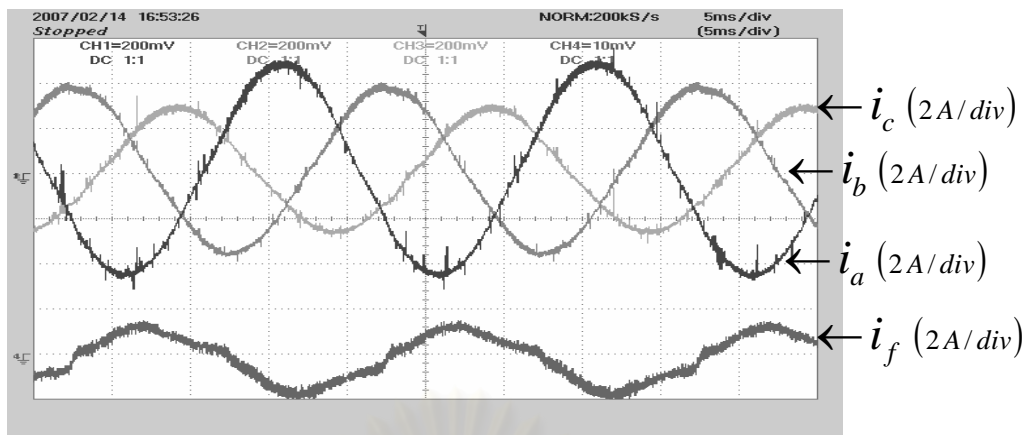
รูปที่ 4.94 ค่ากระแสไหลทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประจุเวลาของสวิตช์แล้ว



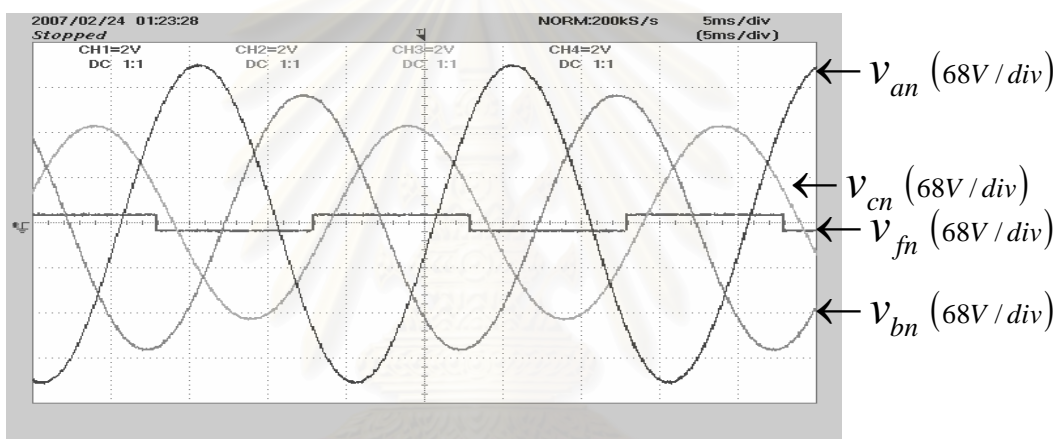
รูปที่ 4.95 ค่ากระแสไหลทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}$  ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากันและชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประจุเวลาของสวิตช์แล้ว



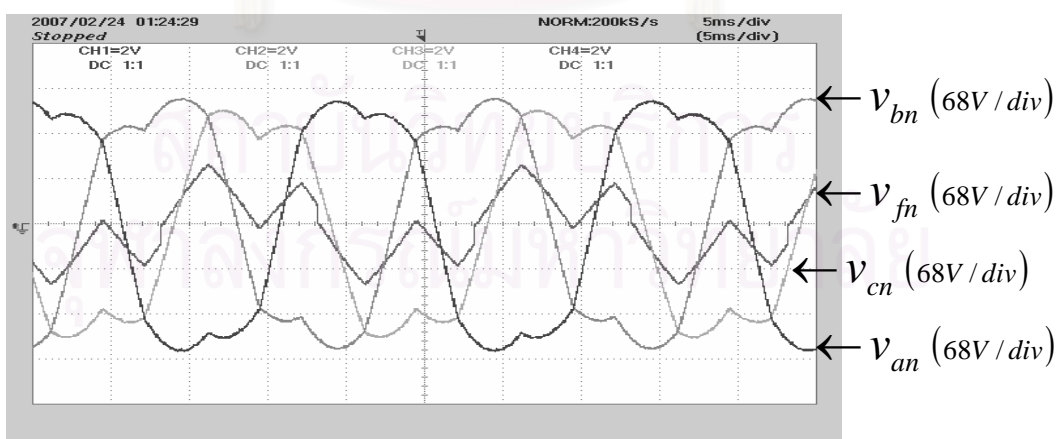
รูปที่ 4.96 ค่ากระแสไหลทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประจุเวลาของสวิตช์แล้ว



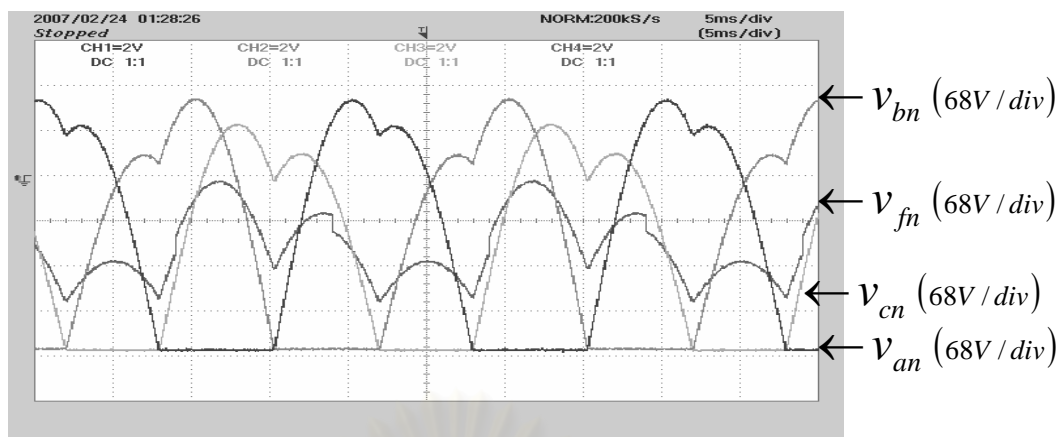
รูปที่ 4.97 ค่ากระแสไหลตลอดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



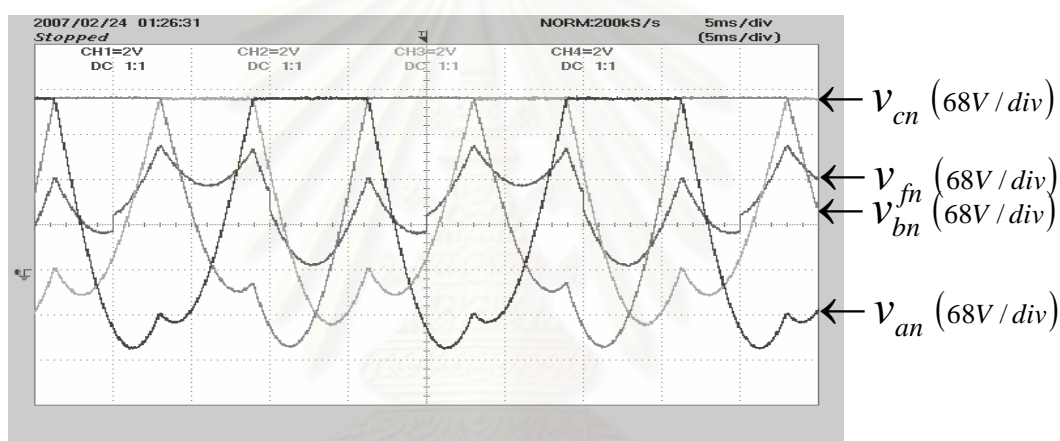
รูปที่ 4.98 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.99 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ ) ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.100 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ ) ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.101 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ ) ในกรณีค่าแรงดันสูงสุดไม่เท่ากัน และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

4.4.3 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันสูงสุดเท่ากันทั้ง 3 เฟสแต่มีมุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

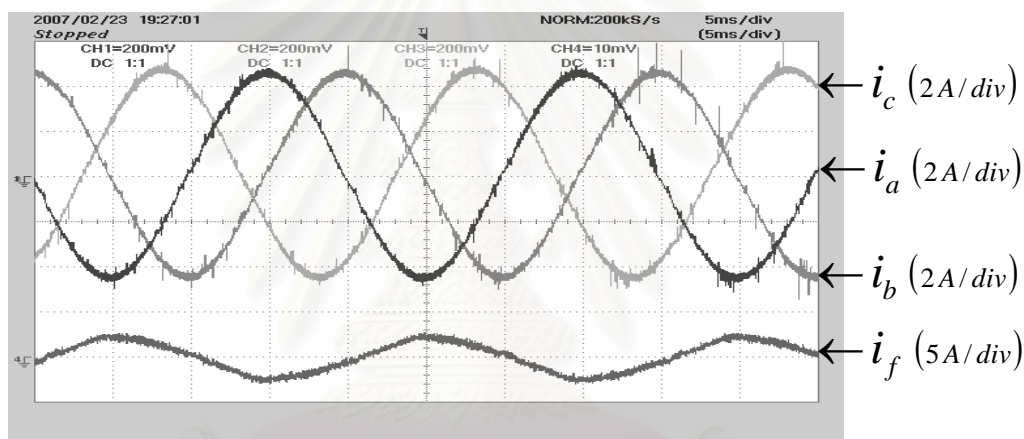
$$v_{bf} = 250 \sin(100\pi t - 90^\circ)$$

$$v_{cf} = 250 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

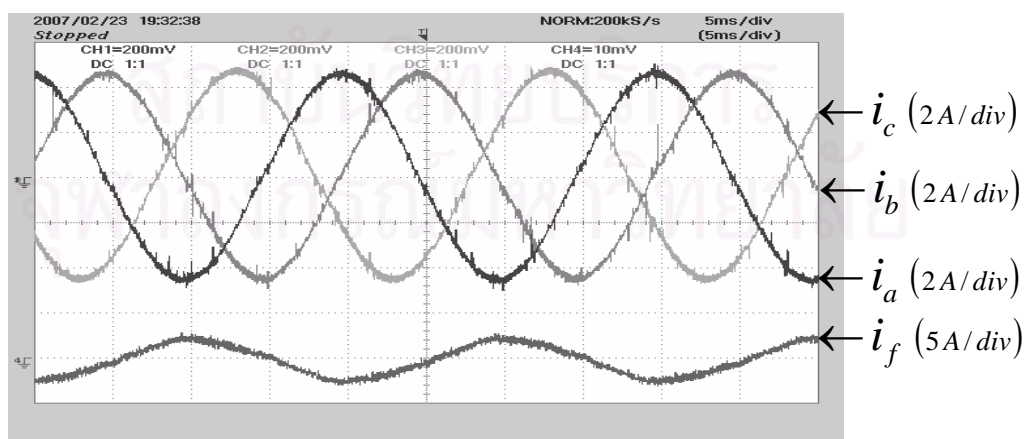
รูปที่ 4.102 , 4.103 , 4.104 และ 4.105 เป็นรูปค่ากระแสไหลลัดทั้ง 4 เฟสเมื่อมีแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$ ,  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$ ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่ากระแสไหลค่านั้นเป็นรูป sine โดยค่าสูงสุดและมุมเฟสของกระแสแต่ละเฟสจะสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่งที่ต้องการ

รูปที่ 4.106, 4.107, 4.108 และ 4.109 เป็นรูปแสดงค่าแรงดันที่ใช้พิจารณาสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$ ,  $v_{fn} = -\left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}\right)$ ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ เมื่อนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่บวกด้วยแรงดันที่ชดเชยส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์ (เฉพาะในส่วนของสวิตช์กึ่ง N) แล้วนำค่าแรงดันนี้ไปทำการมอดูเลต จะเห็นได้ว่าจะมีเพียงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมของสวิตช์กึ่ง N เท่านั้นที่จะแตกต่างกันเมื่อเทียบกับก่อนที่เราจะทำการชดเชยแรงดันของการประวิงเวลาของการสวิตช์

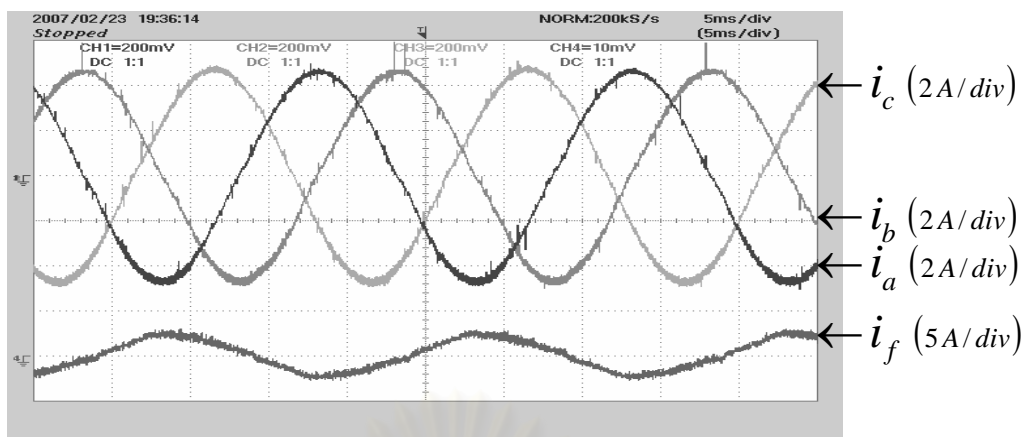


รูปที่ 4.102 ค่ากระแสไหลคทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

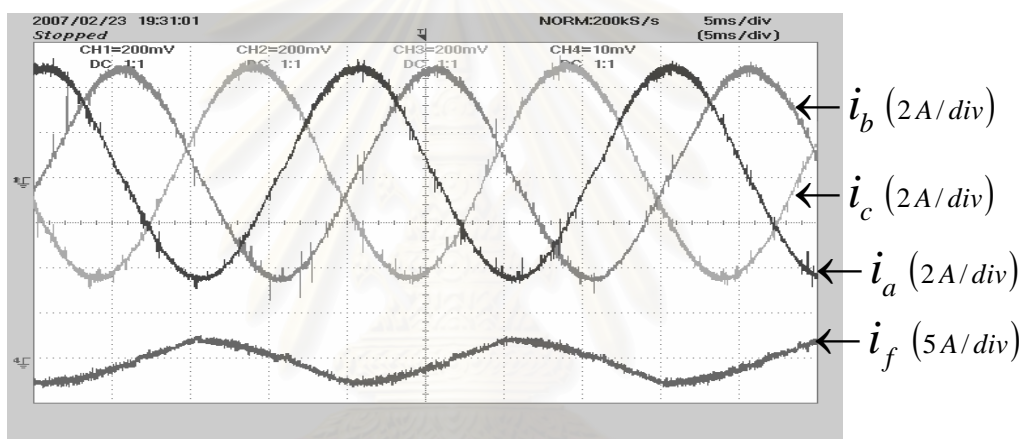


รูปที่ 4.103 ค่ากระแสไหลคทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\left(\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}\right)$  ในกรณี ค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

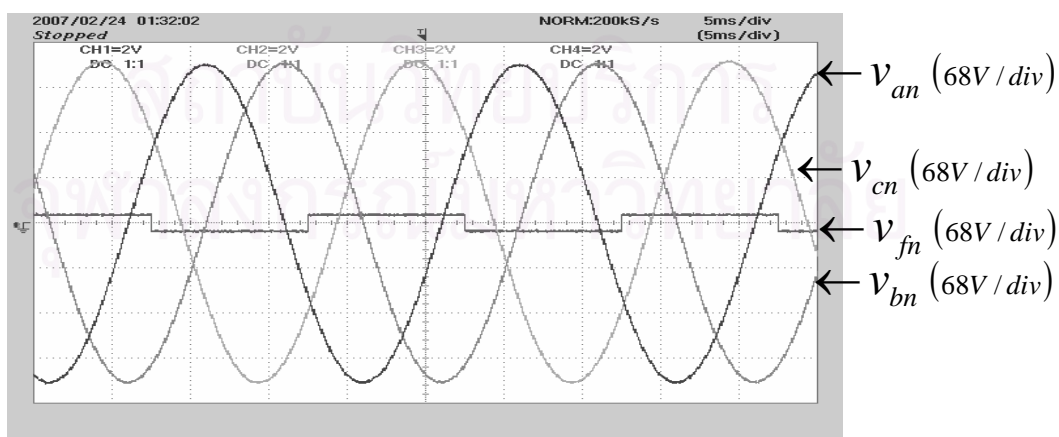




รูปที่ 4.104 ค่ากระแสโพลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

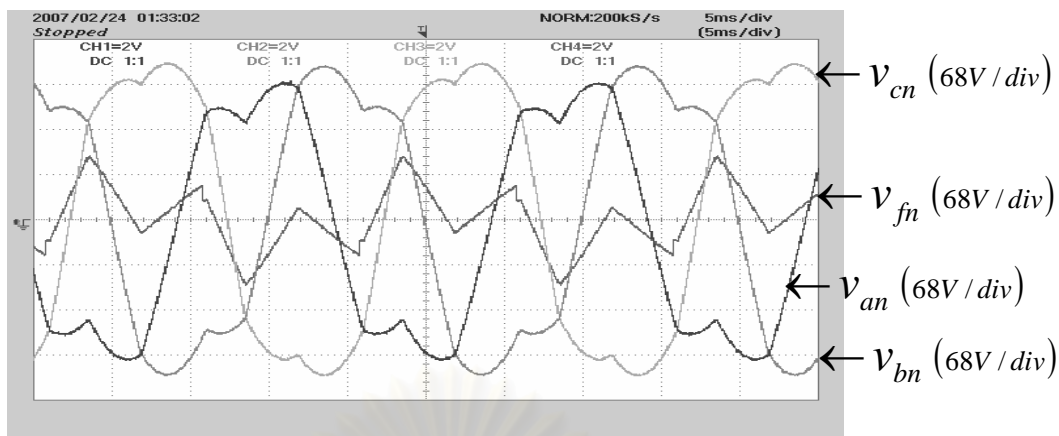


รูปที่ 4.105 ค่ากระแสโพลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

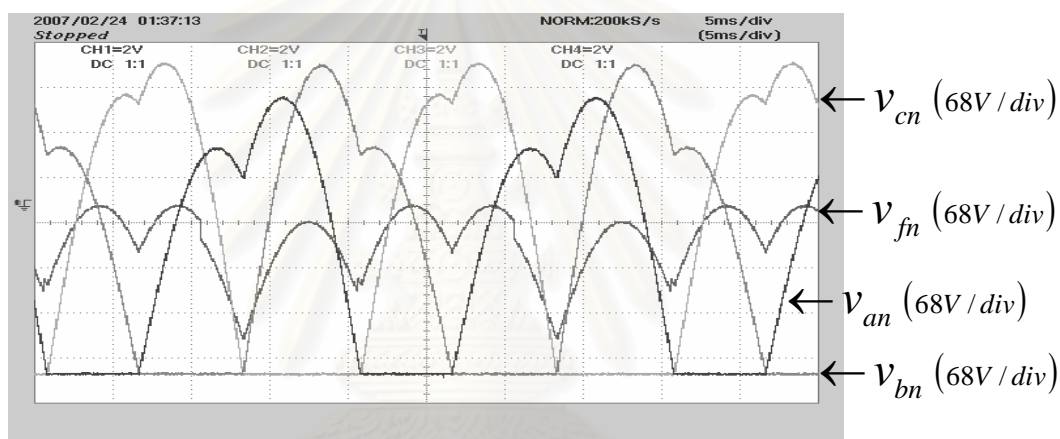


รูปที่ 4.106 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

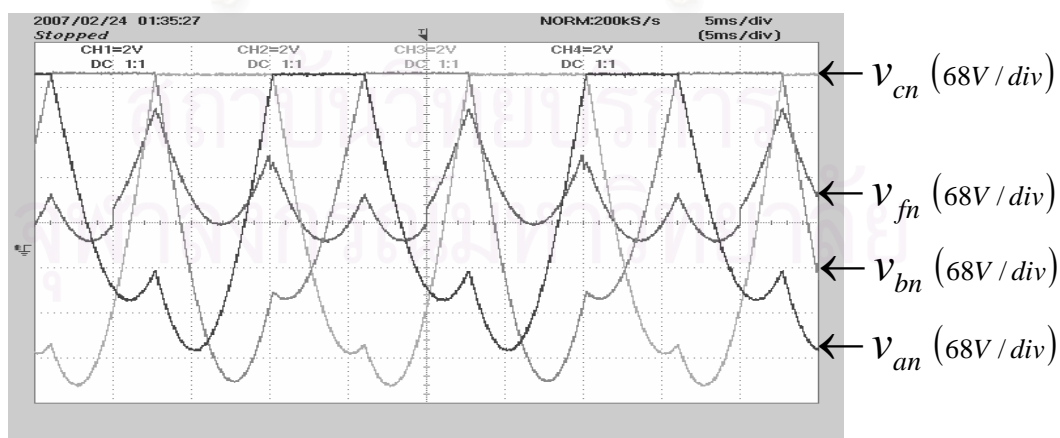




รูปที่ 4.107 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}$ ) ในกรณีมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.108 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ ) ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.109 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ ) ในกรณีค่ามุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยแรงดันที่หายไปจากผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

4.4.4 เมื่อค่าแรงดันคำสั่งเป็นค่าแรงดัน 3 เฟสไม่สมดุลที่มีขนาดค่าแรงดันไม่เท่ากันทั้ง 3 เฟสและมี มุมต่างเฟสกันไม่เท่ากับ 120 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับ

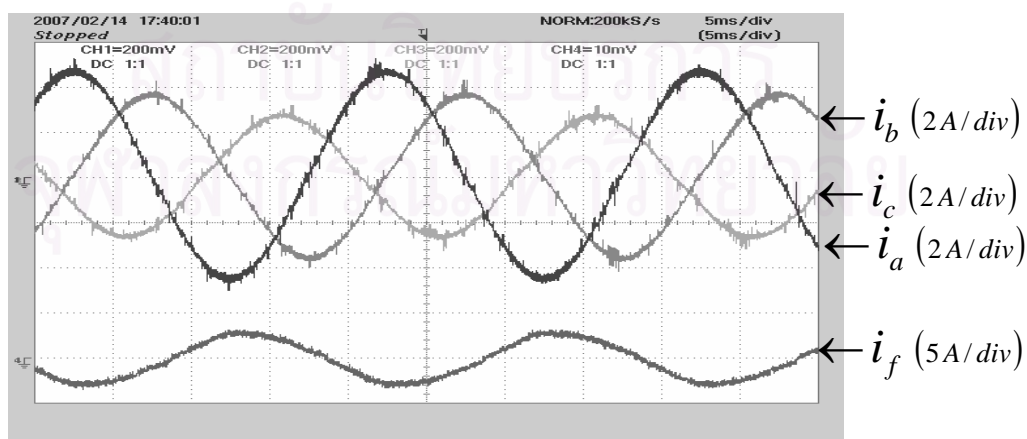
$$v_{af} = 250 \sin(100\pi t)$$

$$v_{bf} = 200 \sin(100\pi t - 90^\circ)$$

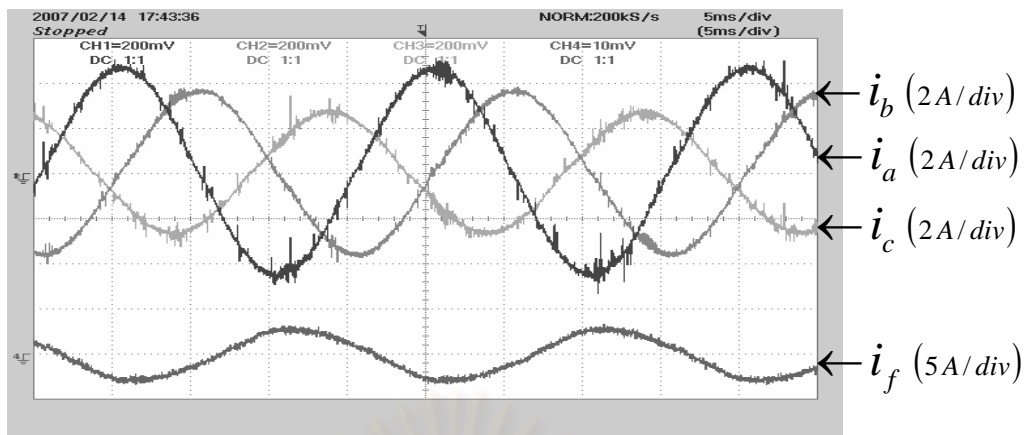
$$v_{cf} = 150 \sin(100\pi t - 240^\circ)$$

รูปที่ 4.110 , 4.111 , 4.112 และ 4.113 เป็นรูปค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$  ,  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$  ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากระแสไหลดนั้นเป็นรูป sine และขนาดของค่าสูงสุดมีค่าลดหลั่นกันลงมาตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่งที่ต้องการ

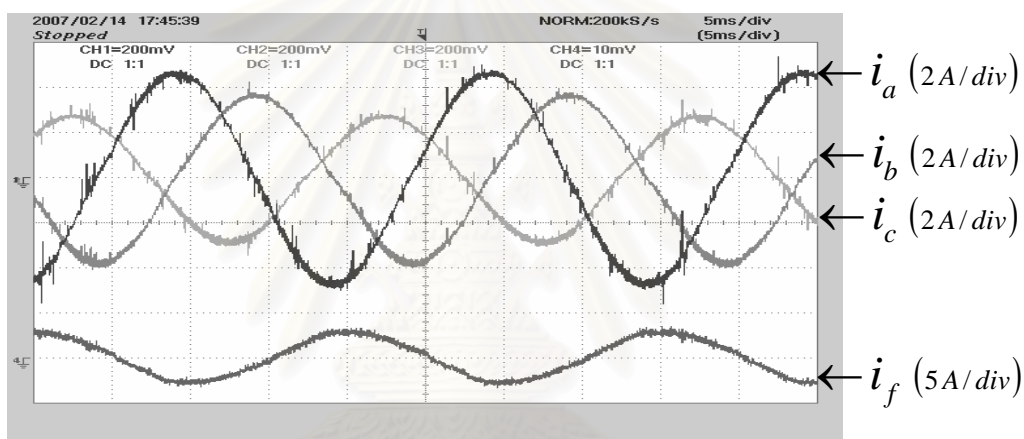
รูปที่ 4.114 , 4.115 , 4.116 และ 4.117 เป็นรูปแสดงแรงดันที่ใช้พิจารณาสำหรับการสร้าง สัญญาณ PWM ด้วยสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยมเมื่อมีค่าแรงดันศูนย์  $v_{fn} = 0$  ,  $v_{fn} = -(\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2})$  ,  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  และ  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ตามลำดับ เมื่อนำค่าแรงดันศูนย์ที่ได้จากการคำนวณไปบวกเข้ากับค่าแรงดันคำสั่งก่อนที่บวกด้วยแรงดันที่ ชดเชยส่วนของการประวิงเวลาของสวิตช์ (เฉพาะในส่วนของสวิตช์ถึง N ) แล้วนำค่าแรงดันนี้ไป ทำการมอดูเลต จะเห็นได้ว่าจะมีเพียงค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ด้วย คลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมของสวิตช์ถึง N เท่านั้นที่จะแตกต่างไปเมื่อเทียบกับก่อนที่เราจะทำการ ชดเชยแรงดันของการประวิงเวลาของการสวิตช์



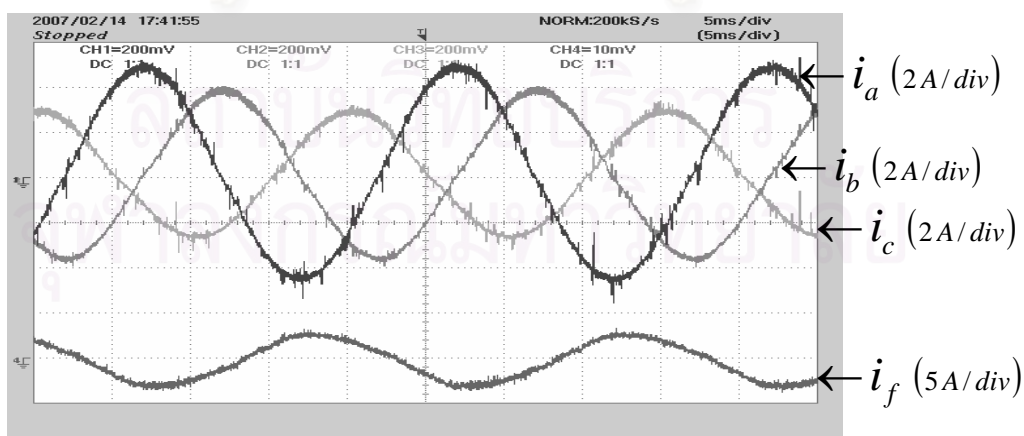
รูปที่ 4.110 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = 0$  ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่าง เฟสกัน ไม่ถึง 120° และชดเชยผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



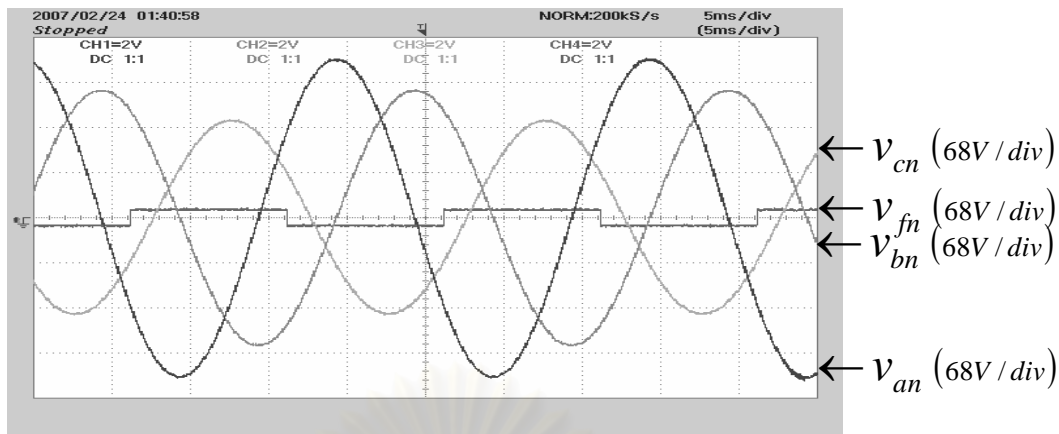
รูปที่ 4.111 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}$  ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชัดเจนผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



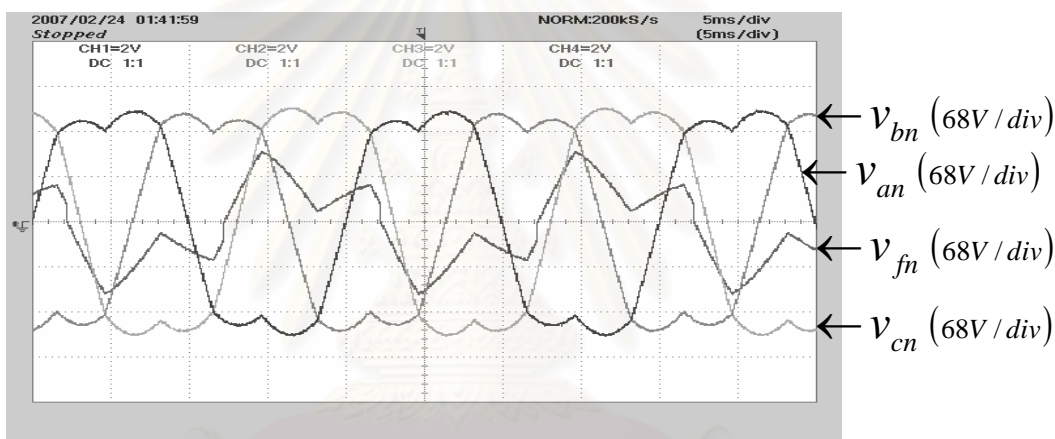
รูปที่ 4.112 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$  ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชัดเจนผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



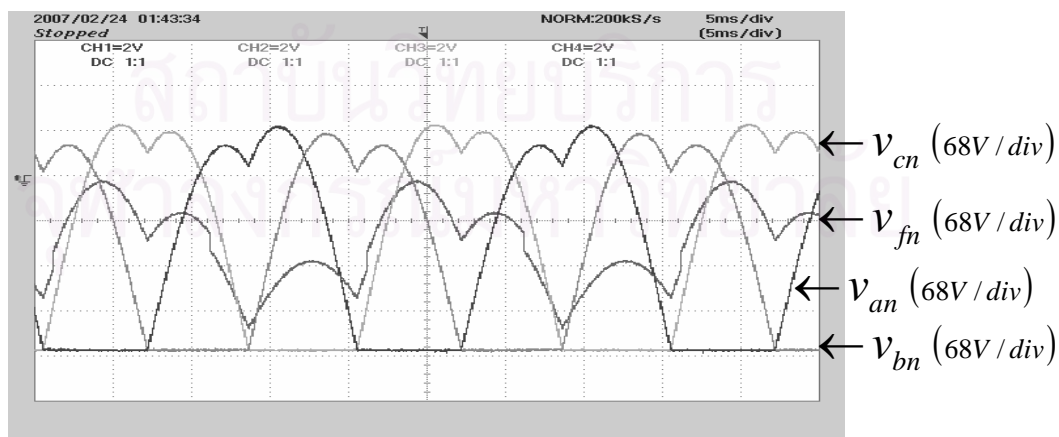
รูปที่ 4.113 ค่ากระแสไหลดทั้ง 4 เฟสเมื่อเลือกใช้  $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$  ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชัดเจนผลของการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



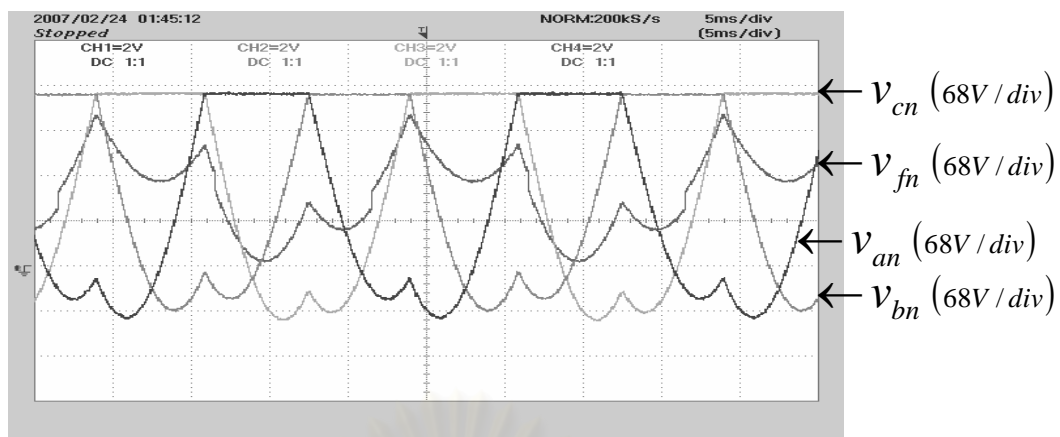
รูปที่ 4.114 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = 0$ ) ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.115 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}$ ) ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.116 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาสู่การสร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\min} + V_g)$ ) ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว



รูปที่ 4.117 ค่าแรงดันที่ใช้ในการพิจารณาผู้สร้างสัญญาณ PWM ( $v_{fn} = -\frac{1}{2}(2v_{\max} - V_g)$ ) ในกรณีไม่เท่ากันทั้งขนาดและมุมต่างเฟสกันไม่ถึง  $120^\circ$  และชดเชยผลการประวิงเวลาของสวิตช์แล้ว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา สำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย โดยนำเสนอแนวคิดใหม่ ในการกำเนิดสัญญาณ PWM ที่อาศัยวิธีการบวกสัญญาณอ้างอิงของแรงดัน ด้วยค่าแรงดันศูนย์ที่ได้มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขา พร้อมกัน ( นำแรงดันศูนย์มาคิดด้วย ) ซึ่งทำให้การให้กำเนิดสัญญาณ PWM สามารถทำได้ง่าย และปราศจากเงื่อนไขที่ซับซ้อนเกินความจำเป็น อีกทั้งยังสามารถอาศัยแนวคิดเดียวกันนี้เพื่อเชื่อมโยงไปสู่การทำ 3 arm modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขาได้ ซึ่งทำให้การทำ 3 arm modulation ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขา สามารถทำได้โดยง่าย ซึ่งจากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่าสามารถนำไปใช้งานได้ดี แต่ในทางปฏิบัติจริงกลับพบปัญหาที่เกิดขึ้นจากการขาดหายไปของแรงดันอันเป็นผลเนื่องมาจากการประวิงเวลาของการสวิตซ์ทำให้ค่าแรงดันที่สร้างได้ไม่เป็นไปตามค่าแรงดันที่ต้องการ จึงต้องทำการชดเชยค่าแรงดันที่ขาดหายไปจากการประวิงเวลาของการสวิตซ์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว

จากผลการทดลองหลังจากทำการชดเชยค่าแรงดันที่ขาดหายไปจากการประวิงเวลาของการสวิตซ์จะเห็นว่า การกำเนิดสัญญาณ PWM ที่อาศัยวิธีการบวกสัญญาณอ้างอิงของแรงดัน ด้วยค่าแรงดันศูนย์ที่ได้มาจากการพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขา พร้อมกัน ( นำแรงดันศูนย์มาคิดด้วย ) สามารถสร้างแรงดันป้อนให้กับโหลดได้ตามที่ต้องการ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการชดเชยค่าแรงดันที่ขาดหายไปจากการประวิงเวลาของการสวิตซ์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการชดเชยเข้าไปเพียงเฟสเดียว (เฟส N) ก็สามารถแก้ไขปัญหได้ในระดับหนึ่งแล้วเนื่องจากว่าแรงดันที่ขาดหายไป ในเฟสนี้ส่งผลกระทบต่อเฟสอื่น ๆ อย่างชัดเจน แต่ในความเป็นจริงแล้วแรงดันที่ขาดหายไปจากการประวิงเวลาของการสวิตซ์เกิดขึ้นในทุก ๆ เฟส ดังนั้นหากต้องการแก้ปัญหาดังกล่าวให้หมดไปจริงๆ ก็จะต้องทำการชดเชยแรงดันที่ขาดหายไปในทุก ๆ เฟส เช่นกัน



## รายการอ้างอิง

- [1] R.Zhang, V.H.Prasad, D.Boroyevich, F.C.Lee. “Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converters”. IEEE Transactions on Power Electronics 17 , 3 (May 2002 ): 314– 326.
- [2] Jang-Hwan Kim, Seung-Ki Sul. “A carrier-based PWM method for three-phase four-leg voltage source converters”. IEEE Transactions on Power Electronics 19, 1(Jan.2004 ): 66–75.
- [3] V.H.Prasad, D.Boroyevich, R.Zhang. “Analysis and comparison of space vector modulation schemes for a four-leg voltage source inverter”. Proceedings of APEC’97 2 (Feb. 1997): 864 – 871.
- [4] D.Shen, P.W.Lehn. “Fixed-frequency space-vector-modulation control for three-phase four-leg active power filters ”. Proceedings of IEE 149, 4 (July 2002) : 268-274.
- [5] M.A.Perales, M.M.Prats, R.Portillo, J.L.Mora, J.I.Leon, L.G.Franquelo. “Three - dimensional space vector modulation in abc coordinates for four - leg voltage source converters” IEEE Transactions on Power Electronics 1, 4 (Dec. 2003): 104–109.
- [6] O.Ojo, P.Kshirsagar. “A carrier - based discontinuous PWM modulation for four - leg inverters and applications”. Conference Record of IAS Annual Meeting 1 (Oct. 2003): 32 – 39.
- [7] P.Verdelho, G.D.Marques. “A current control system based in  $\alpha\beta 0$  variables for a four-leg PWM voltage converter”. Proceedings of IECON’98 3 (Sept. 1998): 1847 - 1852 .

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย นครศ ชูดวง เกิดเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(ไฟฟ้ากำลัง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2545 และได้เข้ารับการศึกษาคือต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

นครศ ชูดวง สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ “ วิธีการใหม่ในการกำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ 4 ขาโดยพิจารณาแรงดันขั้วทั้ง 4 ขา พร้อมกัน ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 , พฤศจิกายน 2549



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย