

ระบบอินเวอร์เตอร์ 6-Phase 60-Step สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6-Phase
แบบกระจาย Phase ไม่สมมาตร

6-PHASE, 60 STEP INVERTER SYSTEM FOR 6-PHASE INDUCTION
MOTORS WITH ASYMMETRICAL PHASE DISTRIBUTION

ประเสริฐ สอระกัน
FRASERT SORASON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2563-0

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบอินเวอร์เตอร์ 6-Phase 60-Step สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6-Phase
แบบกระจาย Phase ไม่สมมาตร

6-PHASE, 60 STEP INVERTER SYSTEM FOR 6-PHASE INDUCTION
MOTORS WITH ASYMMETRICAL PHASE DISTRIBUTION



ประเสริฐ สอรसन

PRASERT SORASON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2663-6

**6-PHASE, 60 STEP INVERTER SYSTEM FOR 6-PHASE INDUCTION
MOTORS WITH ASYMMETRICAL PHASE DISTRIBUTION**

PRASERT SORASON

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2663-6

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบอินเวอร์เตอร์ 6-Phase 60-Step สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6-Phase แบบกระจาย Phase ไม่สมมาตร
นักศึกษา	นายประเสริฐ สอระสัน
รหัสประจำตัว	44061054
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเทคนิคการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสด้วยวิธีการดัดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีอยู่เดิมเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรขับเคลื่อนด้วยระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป ซึ่งประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์หลักความถี่สวิตซ์ซึ่งตำรูปคลื่น 6 สเต็ป 2 ชุด และอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสร่วมกับรีแอกเตอร์คัปปลิ่งสำหรับกรองรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 และ 7 ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร โดยได้สร้างชุดต้นแบบเพื่อศึกษาการทำงานของระบบและเปรียบเทียบผลของพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส 12 สเต็ปกับระบบอินเวอร์เตอร์ที่ได้นำเสนอเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบการปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท ผลการทดสอบ สมรรถนะของระบบที่นำเสนอให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Thesis Title	6-Phase, 60 Step Inverter System for 6-Phase Induction Motors With Asymmetrical Phase Distribution
Student	Mr.Prasert Sorason
Student ID.	44061054
Degree	Masrter of Engineering
Programe	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinares

ABSTRACT

This thesis proposes a 6-phase induction motor drive technique with adaptation of 3ϕ existing induction motor for 6- phase unsymmetry distributed winding induction motor. The proposed motor is driven by a 6-phase,60 step inverter operating at low switching and additional 1 phase inverter in conjunction with a coupling reactor for filtering 5th and 7th harmonic voltages. A prototype is constructed in order to study operation of the proposed system. A comparison of power rating between conventional 6-phase,12 step inverter and the proposed inverter system has been performed in order to be guidelines for design for improvement of output voltages. Testing results of the proposed system show performance.

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีผู้เขียนขอขอบคุณ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นแหล่งสนับสนุนทางด้านตำราและเอกสารอ้างอิงรวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณ แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณน้องๆในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคน

สุดท้ายต้องขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณรุ่งเฉลา สอระสัน ที่เป็นคู่คิดและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณค่าและประโยชน์ที่ได้จากการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่เคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ประเสริฐ สอระสัน

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนจากขดลวดสเตเตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟส ไม่สมมาตร.....	21
2.5 การหาพิกัดแรงดันไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์.....	26
2.5.1 การหาค่าแฟคเตอร์ความกว้างขดลวด.....	27
2.5.2 การหาค่าแฟคเตอร์การกระจายของขดลวด.....	29
2.5.3 การคำนวณจำนวนรอบขดลวดเมื่อค่าแฟคเตอร์ขดลวดเปลี่ยนแปลง.....	34
2.6 การปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็น 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร.....	35
2.6.1 การออกแบบขดลวดแบบ Full pitch.....	35
2.6.2 การออกแบบขดลวดแบบ Short pitch.....	37
2.7 การปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็น 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร.....	39
2.7.1 การออกแบบขดลวดแบบ Full pitch.....	40
2.7.2 การออกแบบขดลวดแบบ Short pitch.....	42
2.8 สรุป.....	43
บทที่ 3 การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิตชิงต่ำ.....	44
3.1 บทนำ.....	44
3.2 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 6 สเต็ป.....	45
3.2.1 หลักการทำงาน.....	45
3.2.2 การหาค่าความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้า ดี.ซี. เชื่อม โยงกับพิกัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่มูลฐาน.....	49
3.3 การใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	50
3.3.1 หลักการทำงาน.....	50
3.4 การใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส แบบกระจายเฟสไม่สมมาตร.....	59
3.4.1 หลักการทำงาน.....	59
3.4.2 การปรับปรุงรูปคลื่นด้วยรีแอกเตอร์คัปปลิง.....	71
3.4.3 การหาค่าความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้า ดี.ซี. เชื่อม โยงกับพิกัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่มูลฐาน	79
3.5 สรุป.....	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ปสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ	
6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร.....	81
4.1 บทนำ.....	81
4.2 ทฤษฎีการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเป็นรูปคลื่นไซน์.....	81
4.3 หลักการทำงาน.....	83
4.3.1 หลักการทำงานอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส.....	85
4.3.2 การปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสด้วยสัญญาณรูปคลื่น 10 สเต็ป.....	90
4.3.3 การหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส.....	93
4.3.4 การหาแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสรูปคลื่น 60 สเต็ปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร	105
4.3.5 การหาค่าความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าดี.ซี. เชื่อม โยงของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสกับอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส.....	109
4.3.6 การหาค่าความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าดี.ซี. เชื่อม โยงกับพิกัดแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานรูปคลื่น 60 สเต็ป.....	112
4.3 สรุป.....	113
บทที่ 5 การวิเคราะห์ห้ออกแบบและทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส.....	114
5.1 บทนำ.....	114
5.2 การทดสอบการทำงานระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป.....	114
5.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส.....	115
5.2.2 อินเวอร์เตอร์ 6 เฟสและอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส.....	117
5.2.3 รีแอกเตอร์คัปปลิ่ง.....	119
5.3 การเปรียบเทียบค่าระดับแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส.....	121
5.3.1 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 12 สเต็ป.....	121
5.3.2 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ป.....	123

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 การเปรียบเทียบพิกัดกำลังระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสรูปคลื่น 12 สเต็ป กับรูปคลื่น 60 สเต็ป.....	124
5.4.1 พิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดรูปคลื่น 12 สเต็ป.....	124
5.4.2 พิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดรูปคลื่น 60 สเต็ป.....	125
5.4.3 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส.....	125
5.4.4 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนความสัมพันธ์กระแสอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส กับกระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	128
5.5 การทดสอบเปรียบเทียบพิกัดกำลังไฟฟ้าของรีแอกเตอร์คัปปลิงกับมอเตอร์ เหนี่ยวนำ 6 เฟส, 60สเต็ปกับ 12 สเต็ป.....	133
5.6 สรุปผลการทดลอง.....	141
5.6.1 การเปรียบเทียบผลการกรองฮาร์โมนิกส์และกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้น ที่ขดลวดรีแอกเตอร์คัปปลิง.....	141
5.6.2 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส.....	141
5.6.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วยระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปกับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป.....	142
บทที่ 6 สรุปข้อเสนอแนะ.....	143
6.1 สรุปหลักทฤษฎีและการออกแบบ.....	143
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	144
เอกสารอ้างอิง.....	145
ภาคผนวก.....	146
ภาคผนวก ก เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง.....	146
ภาคผนวก ข บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	149
ประวัติผู้เขียน.....	155

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สภาวะนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส แบบกระจายเฟสสมมาตร.....	51
3.2 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร.....	58
3.3 สภาวะนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส แบบกระจายเฟสไม่สมมาตร.....	60
3.4 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร	70
3.5 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร.....	79
4.1 สภาวะการนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส.....	86
4.2 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส (V_{albl}) รูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเมื่อฉีดแรงดันไฟฟ้า จากอินเวอร์เตอร์เพิ่ม เต็ม 1 เฟส.....	93
4.3 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{a1o1} / E ในช่วงคาบเวลา 0-360 องศาไฟฟ้า.....	99
4.4 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{b1o1} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า.....	100
4.5 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{c1o1} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า.....	101
4.6 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{a2o2} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า.....	102
4.7 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{b2o2} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า.....	103
4.8 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{c2o2} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า.....	104
4.9 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{u1o1} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า.....	105
4.10 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{u2o2} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า.....	106
4.11 กลุ่มฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร.....	109
5.1 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า (V_{a1u1} / E) ในช่วงคาบเวลา 0-180 องศาไฟฟ้า.....	122
5.2 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{a1u1} / E ในช่วงคาบเวลา 0-180 องศาไฟฟ้า.....	124
5.3 เปรียบเทียบพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 12 สเต็ปกับรูปคลื่น 60 สเต็ป.....	128
5.4 เปรียบเทียบอัตราส่วนกระแส I_{Rm} / I_m จากการคำนวณด้วยสมการกับผลการทดสอบ.....	131
5.5 ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป.....	135
5.6 ผลการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป.....	136

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.7 ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สตีป.....	137
5.8 ผลการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สตีป.....	138

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสมอเตอร์เหนี่ยวนำในอุดมคติ.....	8
2.2 วงจรสมมูลย์ต่อเฟสมอเตอร์เหนี่ยวนำในอุดมคติเมื่อย้ายพารามิเตอร์ ของโรเตอร์มาทางด้านสเตเตอร์.....	9
2.3 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดกับการเปลี่ยนแปลงความถี่.....	11
2.4 เวกเตอร์สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่สเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	15
2.5 เวกเตอร์สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่สเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส แบบกระจายเฟสสมมาตร.....	16
2.6 เวกเตอร์กระแสจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสแบบสมมาตร.....	17
2.7 เวกเตอร์สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่สเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส.....	22
2.8 เวกเตอร์กระแสจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	22
2.9 ขดลวดสเตเตอร์แบบ Full pitch.....	27
2.10 ขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch	28
2.11 เวกเตอร์พิคัดแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ตัวนำขดลวดทั้ง 2 ข้าง.....	28
2.12 การเกิดแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กแบบไม่กระจาย	30
2.13 การเกิดแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กแบบกระจาย	31
2.14 มุมระหว่างช่องสล็อตขดลวดแต่ละกลุ่ม(Phase belt).....	32
2.15 การกระจายกลุ่มขดลวด	33
2.16 การวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์แบบ Full pitch 6 เฟสแบบสมมาตร.....	36
2.17 การจัดวางตัวนำในช่องสล็อต ขดลวด Full-pitch 6 เฟสแบบสมมาตร.....	37
2.18 การวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch 6 เฟสแบบสมมาตร.....	38
2.19 การจัดวางตัวนำในช่องสล็อตขดลวด Short-pitch 6 เฟสแบบสมมาตร.....	39
2.20 การวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์แบบ Full pitch 6 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	40
2.21 การจัดวางตัวนำในช่องสล็อตขดลวด Full pitch 6 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	41
2.22 การวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch 6 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	42
2.23 การจัดวางตัวนำในช่องสล็อตขดลวด Short-pitch 6 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	43
3.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส.....	45
3.2 วงจรสมมูลย์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่อกับโหลด 3 เฟส.....	46
3.3 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส.....	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสสำหรับหาค่าแอมพลิจูดแรงดันไฟฟ้า ความถี่มูลฐาน.....	49
3.5 วงจรระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส แบบกระจายเฟสสมมาตร.....	50
3.6 แพทเทอร์นการสวิตช์กระแสอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	51
3.7 โหมมการทำงานเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสวิตช์กระแสตามตารางที่ 3.1.....	52
3.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบสมมาตร.....	55
3.9 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบสมมาตร.....	56
3.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุดร่วมของโหลดกับจุดร่วมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน ไฟฟ้า 3 เฟสแต่ละชุดจากวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบสมมาตร.....	57
3.11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส แบบกระจายเฟสสมมาตร.....	58
3.12 วงจรระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสขับเคลื่อน มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร.....	59
3.13 แพทเทอร์นการสวิตช์กระแสอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	60
3.14 โหมมการทำงานเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสวิตช์กระแสตามตารางที่ 3.3.....	61
3.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	67
3.16 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	68
3.17 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุดร่วมของโหลดกับจุดร่วมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน ไฟฟ้า 3 เฟสแต่ละชุดจากวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	69
3.18 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร.....	70
3.19 การใช้รีแอกเตอร์คัปปลิ่งในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	71
3.20 เวกเตอร์การคัปปลิ่งแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 กับชุดที่ 2.....	73
3.21 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (V_{u1o1}) เกิดขึ้นที่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส.....	74
3.22 เวกเตอร์การคัปปลิ่งแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 กับชุดที่ 1.....	75
3.23 การต่อขดลวด N_2 จำนวน 2 ขดอนุกรมกันจากการพันบนแกนเหล็กทั้ง 3 แกน เพื่อให้เกิด ความสมดุลการคัปปลิ่งแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2.....	76

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.24 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (V_{u2o2}) เกิดขึ้นที่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส.....	78
4.1 การปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเป็นรูปคลื่นไซน์.....	82
4.2 ระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมโดยการฉีดแรงดันไฟฟ้า รูปคลื่น $0.8 \cos 6\omega t$ ให้กับจุดต่ออนุกรมอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุด.....	83
4.3 ระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ป.....	84
4.4 แพทเทอร์นการสวิตช์กระแสอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	84
4.5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากึ่งสี่เหลี่ยมจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุด.....	85
4.6 โหมดการทำงานอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส ใน 1 ไซเคิล.....	86
4.7 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส ในช่วงคาบเวลา 1 ไซเคิล.....	90
4.8 การปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส V_{a1b1} เมื่อฉีดแรงดันไฟฟ้า รีเป็ล จากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส.....	90
4.9 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1.....	94
4.10 วงจรสมมูลย์แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากโหมดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส.....	97
4.11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุด และสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่น.....	98
4.12 รูปคลื่น 60 สเต็ปแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (V_{u1o1}) จากการคัปปลิงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ด้วยรีแอกเตอร์คัปปลิง.....	107
4.13 รูปคลื่น 60 สเต็ปแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (V_{u2o2}) จากการคัปปลิงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ด้วยรีแอกเตอร์คัปปลิง.....	108
4.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากผลการซัดฮาร์โมนิกส์โดยการฉีดแรงดันไฟฟารีเป็ล ให้กับจุดต่ออนุกรม (จุด M) ของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด.....	110
4.15 การแบ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 60 สเต็ปเป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม 15 ส่วน.....	112
5.1 ชุดต้นแบบระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ปขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส.....	114
5.2 การต่อวงจรหม้อแปลง 3 เฟสเป็นแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ 6 เฟสแบบไม่สมมาตร.....	115
5.3 แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสแบบ ไม่สมมาตร.....	116
5.4 แรงดันไฟฟ้าและกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และ 6 เฟส.....	116
5.5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสกับอินเวอร์เตอร์ เพิ่มเติม 1 เฟส.....	117
5.6 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์หลักเมื่อฉีดแรงดันไฟฟารีเป็ล 10 สเต็ป.....	118

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.7 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12สเต็มป์....	119
5.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60สเต็มป์....	120
5.9 แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิ่ง(V_{d1u1})ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็มป์...	122
5.10 แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิ่ง(V_{d1u1})ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็มป์...	123
5.11 เวกเตอร์กระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส.....	125
5.12 ความสัมพันธ์กระแส I_{Rm} / I_m เมื่อมุม φ_1 เปลี่ยนแปลงตามโหลด.....	127
5.13 รูปคลื่นกระแส I_m และกระแส I_{Rm} เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะโหลดเปลี่ยนแปลง.....	129
5.14 การเปลี่ยนแปลงค่า Peak กระแส I_{Rm} / I_m กับกระแส I_{Rm} และ I_m	132
5.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสต่อเฟสใช้คำนวณกำลังไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสขับเคลื่อนด้วยระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็มป์.....	133
5.16 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสต่อเฟสใช้คำนวณกำลังไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสขับเคลื่อนด้วยระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็มป์.....	134
5.17 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็มป์และประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส	136
5.18 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็มป์และประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส	138
5.19 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิ่งในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็มป์กับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็มป์.....	139
5.20 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็มป์กับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็มป์.....	140
5.21 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็มป์กับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็มป์.....	140

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ ความเร็วรอบสูงมากกว่า 3600 รอบต่อนาที สำหรับเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ หรือปั๊ม ในงานอุตสาหกรรมมากขึ้น [1] ทำให้มีขนาดกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น การลดขนาดกระแสในแต่ละเฟสสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนเฟสของสายส่งให้มากกว่า 3 เฟส โดยทั่วไปเพื่อใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีจำนวนเฟสเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับจำนวนเฟสของระบบสายส่งซึ่งมีข้อจำกัดไม่สามารถเพิ่มความถี่ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความเร็วรอบสูงขึ้น ดังนั้นการนำระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามาใช้สำหรับเพิ่มจำนวนเฟส และปรับความถี่ให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ ทำให้สามารถลดขนาดพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทดแทนวิธีการเพิ่มพิกัดกระแสอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยการต่อขนานขั้วปัญหาการแบ่งกระแสไหลผ่านตัวอุปกรณ์ไม่เท่ากัน จึงนำระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 6 สแต็ปซึ่งมีความถี่สวิตซ์ิ่งต่ำมาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสจากการเพิ่มเฟสมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบสมมาตรทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสเป็นรูปคลื่น 12 สแต็ป ซึ่งไม่สามารถปรับปรุงรูปคลื่นให้มีสแต็ปสูงขึ้นได้ แต่เมื่อเลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส แบบกระจายเฟสไม่สมมาตร มีลักษณะการปรับปรุงการพันขดลวดสเตเตอร์ใหม่ประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ชุด แต่ละชุดวางตำแหน่งขดลวดทำมุมกัน 30 องศาไฟฟ้าเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของพิกัดกระแส และความถี่สวิตซ์ิ่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ [2] เมื่อเปรียบเทียบผลจากกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ถูกขจัดทิ้งเนื่องจากการวางตำแหน่งขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรมีกลุ่มกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับ $3, 9, 15, \dots, 3V, \dots, \infty$ (V :จำนวนเต็มบวกเลขคี่) ส่วนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรนอกจากจะขจัดกลุ่มกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับ $3, 9, 15, \dots, 3V, \dots, \infty$ ยังสามารถขจัดกลุ่มกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับ $11, 13, 17, \dots, 6n \pm 1, \dots, \infty$ (n :จำนวนเต็มบวก $2, 3, 4, \dots, \infty$) ได้เพิ่มขึ้นอีกกลุ่ม ทำให้มีพิกัดกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำสูงขึ้นและลดการกระเพื่อมของแรงบิดได้ ดีกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร[3]-[4] แต่ยังคงมีกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 และ 7 เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร รวมทั้งกลุ่มกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ขจัดได้แต่ยังไม่สามารถทำให้หมดได้เนื่องจากลักษณะรูปคลื่นของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.เชื่อมโยง(D.C.Link) โดยการฉีดแรงดันไฟฟ้ารีปีทีรูรูปคลื่น 10 สแต็ปจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม

1 เฟส ด้วยเทคนิค เอ็น.พี.ซี.(Neutral point clamped) ร่วมกับคัปปลิงรีแอคเตอร์สำหรับกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ อันดับ 5 และ 7 ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสเป็น 60 สเต็ป ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรมีประสิทธิภาพและสมรรถนะการทำงานสูงขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังพัฒนาคุณภาพรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากระบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิตซ์ต่ำรูปคลื่น 6 สเต็ปให้มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 6 สเต็ปโดยการเพิ่มสเต็ปของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าให้มากขึ้นและเพิ่มจำนวนเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำให้ลดขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสได้โดยสร้างชุดต้นแบบซึ่งประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ชุดแต่ละชุดมีการสวิตซ์กระแสให้รูปคลื่น 6 สเต็ปต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้านำมาใช้ร่วมกับรีแอคเตอร์คัปปลิงสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรที่ได้จากการดัดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีอยู่เดิมเพื่อศึกษาหลักการออกแบบและการปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้วยการฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเป็ลเป็นระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ปสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย

จากการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิตซ์ต่ำด้วยวงจรขับเคลื่อนบริดจ์ 3 เฟสมีสัญญาณควบคุมการสวิตซ์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังให้นำกระแส 180 องศาไฟฟ้าซึ่งแต่ละเฟสมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศาไฟฟ้าทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม (Quasi square) และมีแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสเป็นรูปคลื่น 6 สเต็ป ดังนั้นการปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสให้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากลักษณะเดิมเพื่อเพิ่มสเต็ปรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าให้มากขึ้นโดยทำให้ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากที่สุดภายใต้เงื่อนไขการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังน้อยที่สุดจึงนำระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสที่ได้จากการนำอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ชุดต่ออนุกรมกันให้มีจุดร่วมระหว่างอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุดสำหรับฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเป็ลปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจากอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสเพียงชุดเดียวเพื่อลดจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้สามารถปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สร้างชุดทดสอบต้นแบบระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ปสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรที่ได้จากการปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาดพิกัด 300 วัตต์สำหรับศึกษาการทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์และทดสอบผลการทดลองดังนี้

1.4.1 พิสูจน์การลดกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการเพิ่มเฟสเป็น 6 เฟสจากการดัดแปลงเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

1.4.2 หาค่าความสัมพันธ์ของระดับแรงดันไฟฟ้าและพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ ดี.ซี. เชื่อมโยงภายในระบบที่ค่าเหมาะสมกับขนาดพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและพิกัดกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสรูปคลื่น 12 สเต็ปกับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสรูปคลื่น 60 สเต็ปแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรจากชุดทดสอบต้นแบบ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาและออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ปสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร โดยมีรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็นบทได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เนื้อหาบางส่วนที่แสดงที่มาของปัญหา และหลักวิธีการแก้ไข ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานการปรับปรุงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร พร้อมเปรียบเทียบและพิสูจน์ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรมีค่าเท่ากัน

บทที่ 3 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิตซ์ซึ่งต่ำใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรมีแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสรูปคลื่น 12 สเต็ปเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงรูปคลื่นเป็น 12 สเต็ปด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 6 สเต็ป 3 เฟส 2 ชุดมีมุมต่างเฟสในการสวิตซ์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 30 องศาไฟฟ้า ทั้งแบบ การต่อขนานอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ชุดและแบบการต่ออนุกรมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ชุด

บทที่ 4 ทฤษฎีการสร้างรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์รูปคลื่น 6 สเต็ป ให้เป็นรูปคลื่นไซน์เพื่อนำมาใช้กับระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ป สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรโดยกล่าวถึงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายในระบบ และการหาค่าขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.เชื่อม โยงสัมพันธ์กับขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

บทที่ 5 การวิเคราะห์และออกแบบวงจรจากการเลียนแบบจำลองด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลการปรับปรุงรูปคลื่นจากระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ป เพื่อพิสูจน์ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละสเต็ปจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบมีค่าเหมาะสมในการปรับปรุงรูปคลื่นเพื่อเปรียบเทียบผลกับการออกแบบวงจรและการทำงานของวงจร ชุดต้นแบบ และการคำนวณหาค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของส่วนประกอบระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสจาก ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและค่าความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์กับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 12 สเต็ปกับรูปคลื่น 60 สเต็ป

บทที่ 6 เป็นการสรุปหลักทฤษฎี, หลักการทำงานและวิธีการออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

สามารถปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิดซึ่งต่ำให้มีจำนวน สเต็ปของรูปคลื่นเพิ่มขึ้น โดยลดพิกัดกระแส, ความถี่และจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการใช้ multi step Inverter ที่ปรับปรุงรูปคลื่นได้จำนวนสเต็ปเท่ากัน

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานการปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็น 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

2.1 บทนำ

การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมากขึ้น เนื่องจากราคาถูก ทำให้ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาน้อยกว่าการเลือกใช้มอเตอร์ชนิดอื่น และสามารถใช้เทคโนโลยีการควบคุมความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์ แต่เนื่องจากอุตสาหกรรมบางชนิดจำเป็นต้องใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัดกำลังสูง และต้องการความเร็วรอบสูงกว่าการนำไปใช้กับความเร็วของระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องเพิ่มความเร็วของแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยเหตุนี้พิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์จึงต้องสูงตามพิกัดกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำการปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีจำนวนเฟสเพิ่มขึ้นเป็น 6 เฟส จะลดกระแสไหลแต่ละเฟสได้ โดยในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงหลักการปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำให้สูงขึ้นด้วยความถี่ การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนการออกแบบการวางตำแหน่งขดลวดมอเตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรจากโครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พร้อมกับพิสูจน์แสดงให้เห็นขนาดพิกัดกระแสไหลในขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มีค่ามากกว่าขนาดพิกัดกระแสไหลในขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสเป็น 2 เท่าเมื่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำเท่าเดิม

2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประกอบด้วยส่วนสำคัญที่แยกกันอย่างอิสระ และไม่มีการไหลไฟฟ้าต่อกันประกอบด้วย ส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator) และส่วนที่หมุนได้เรียกว่าโรเตอร์ (Rotor) มีหน้าที่การทำงานดังนี้

- สเตเตอร์ ประกอบด้วยขดลวดอาร์มเจอร์ (Armature) ที่บรรจุอยู่ในช่องสล๊อต ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในช่องอากาศ (Air gap) ซึ่งอยู่ระหว่างส่วนของสเตเตอร์กับโรเตอร์
- โรเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบกรงกระรอก (Squirrel cage) และแบบขดลวดพันในร่องสล๊อตของโรเตอร์ (Wound rotor)

1. แบบกรงกระรอก (Squirrel cage)

แกนโรเตอร์ทำด้วยแผ่นเหล็ก ลามิเนต (Laminated sheet steel) เชาะผิวด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบเรียกว่า สล๊อต (Slot) สำหรับฉีดอลูมิเนียมเข้าไปให้อัดแน่นในร่องสล๊อตและอลูมิเนียม

ต่อถึงกันระหว่างร่องสลีตที่ส่วนปลายทั้งสองของโรเตอร์เป็นวงแหวนมีครีบบนยื่นออกเพื่อใช้เป็น
ใบพัดระบายความร้อน

2. แบบขดลวดพันในร่องสลีตของโรเตอร์ (Wound rotor)

โรเตอร์แบบนี้แตกต่างจากแบบกรงกระรอกคือ การต่อวงจรไฟฟ้าของตัวนำในร่องสลีต
จะนำส่วนปลายของขดลวดแต่ละเฟสต่อเข้ากับสลีปริง (Slip ring) ซึ่งมีแปลงถ่านไว้สำหรับต่อวงจร
ขดลวดโรเตอร์ให้ครบวงจร โดยการพันขดลวดที่โรเตอร์จะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้ว
ของขดลวดสเตเตอร์

2.2.1 หลักการทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

การเหลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เกิดขึ้นได้จากขดลวดสเตเตอร์รับพลังงานไฟฟ้า
จากแหล่งจ่ายสร้างสนามแม่เหล็กหมุนเกิดขึ้นในแอร์แกป (Air gap) ซึ่งเป็นช่องอากาศระหว่าง
สเตเตอร์กับโรเตอร์ หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) ตามสมการ

$$N_S = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

N_S : ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)

f : ความถี่แรงดันไฟฟ้าจ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์

P : จำนวนขั้วแม่เหล็กขดลวดสเตเตอร์

โดยขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ความถี่ของกระแสเกิดขึ้นที่โรเตอร์จากการเหนี่ยวนำของสนาม
แม่เหล็กเท่ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า แต่ขณะที่กำหนดให้โรเตอร์มีความเร็วรอบ (Rotor speed) เท่ากับ
ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กหมุนจะไม่มีการเหนี่ยวนำกระแสเกิดขึ้นที่โรเตอร์ทำให้ไม่มี
แรงบิด (Torque) ดังนั้นเมื่อโรเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ N_r ใดๆ ที่มีความเร็วรอบแตกต่างจาก
ความเร็ว N_S จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสเกิดขึ้นที่โรเตอร์จึงมีแรงบิด และความแตกต่าง
สัมพัทธ์ของความเร็วทั้ง 2 นี้เรียกว่า สลิป (Slip)

$$\begin{aligned} S &= \frac{N_S - N_r}{N_S} \\ &= \frac{\omega_S - \omega_r}{\omega_S} \end{aligned} \quad (2.2)$$

ω_s : ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (Stator angular frequency)

ω_r : ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (Rotor angular frequency)

S : สลิป

จากการหมุนของโรเตอร์เมื่อพิจารณาสถานะโรเตอร์อยู่กับที่ ($N_r = 0$) ความถี่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์เท่ากับกับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยสถานะนี้มีค่าสลิปเท่ากับ 1 และเมื่อโรเตอร์เริ่มหมุนอัตราการหมุนสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์ตัดกับตัวนำของโรเตอร์จะลดลงทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่ลดลงเป็นสัดส่วนกับค่าสลิปซึ่งสถานะนี้ค่าสลิปจะลดลง ($S < 1$) เขียนสมการความสัมพันธ์จากผลของค่าสลิปเปลี่ยนแปลงได้ดังนี้

$$E_r = SE_2 \quad (2.3)$$

$$X_r = SX_2 \quad (2.4)$$

$$f_r = Sf \quad (2.5)$$

$$f_r = Sf$$

เมื่อ E_r : แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์สถานะ X_r ความเร็วรอบใดๆ

E_2 : แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์สถานะโร f_r เเตอร์อยู่กับที่

X_r : ค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟสที่โรเตอร์สถานะความเร็วรอบใดๆ

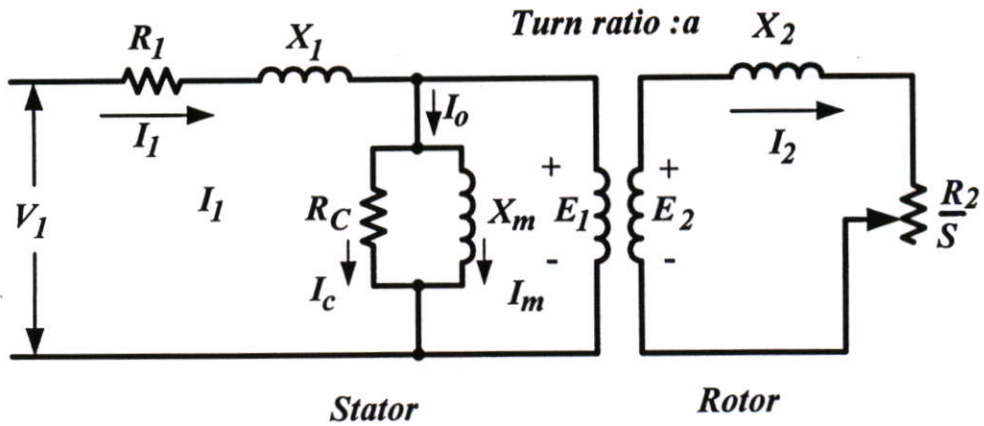
X_2 : ค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟสที่โรเตอร์สถานะโรเตอร์อยู่กับที่

f_r : ความถี่เกิดขึ้นที่โรเตอร์

f : ความถี่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

2.2.2 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากลักษณะ โครงสร้างและการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถเขียนวงจรสมมูลเปรียบเทียบกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงในอุดมคติได้เช่นเดียวกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงในอุดมคติดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 วงจรสมมูลต่อเฟสมอเตอร์เหนี่ยวนำในอุดมคติ

- เมื่อ
- X_m : ค่ารีแอกแตนซ์จากสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก
 - X_1 : ค่ารีแอกแตนซ์จากสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์
 - X_2 : ค่ารีแอกแตนซ์จากสนามแม่เหล็กที่ขดลวดหรือตัวนำของโรเตอร์
 - R_1 : ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
 - R_2 : ค่าความต้านทานของขดลวดหรือตัวนำของโรเตอร์
 - R_c : ค่าความต้านทานทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก
 - I_c : กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก
 - I_m : กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก
 - I_1 : กระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 - I_2 : กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นที่โรเตอร์

เมื่ออัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดสเตเตอร์ต่อจำนวนรอบขดลวดโรเตอร์ (Turn ratio :a) ทำให้ย้ายค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์มายังด้านสเตเตอร์ได้ดังภาพที่ 2.2 โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$E'_2 = aE_2 = E_1 \quad (2.6)$$

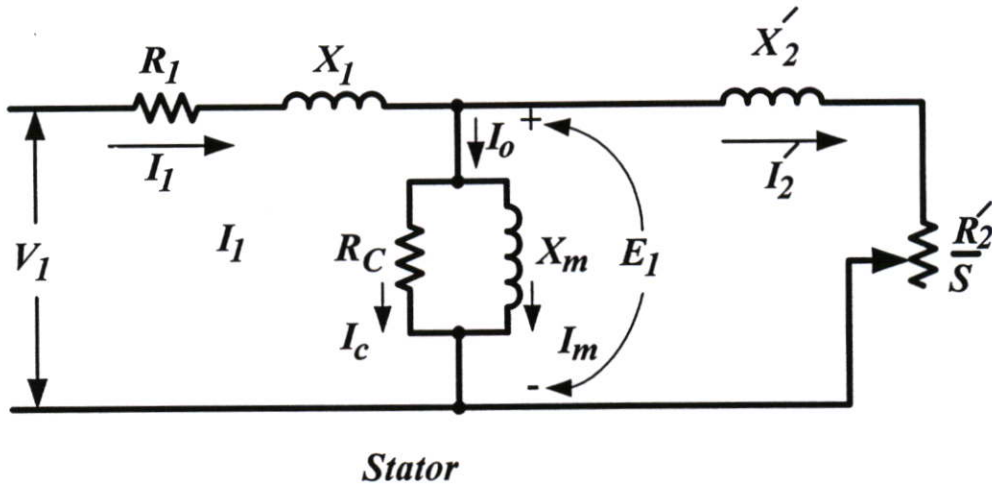
$$I'_2 = \frac{I_2}{a} \quad (2.7)$$

$$R'_2 = a^2 R_2 \quad (2.8)$$

$$X'_2 = a^2 X_2 \quad (2.9)$$

R'_2 : ค่าความต้านทานของโรเตอร์เมื่อย้ายค่ามาทางด้านสเตเตอร์

X'_2 : ค่ารีแอกเตอร์ของโรเตอร์เมื่อย้ายค่ามาทางด้านสเตเตอร์



ภาพที่ 2.2 วงจรสมมูลต่อเฟสมอเตอร์เหนี่ยวนำในอุดมคติเมื่อย้ายพารามิเตอร์ของโรเตอร์มาทางด้านสเตเตอร์

ในการคำนวณสามารถแยกค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากค่าความต้านทานขดลวดของโรเตอร์ออกจากกำลังงานกลที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้

$$P_{conv} = P_{ag} - P_{rcl}$$

$$= 3I_2'^2 \frac{R_2'}{S} - 3I_2'^2 R_2'$$

$$P_{conv} = 3I_2'^2 R_2' \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (2.10)$$

$$R_{conv} = R_2' \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ P_{rcl} : กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

P_{ag} : กำลังไฟฟ้าที่ช่องอากาศ

P_{conv} : กำลังงานกลที่เพลา

R_{conv} : ค่าความต้านทานของโหลดที่ทำให้เกิดกำลังงานกลที่เพลา

2.2.3 การหาค่าแรงบิดและกำลังงานกลที่เพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ $P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \theta$ (2.12)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ $P_{scl} = 3I_1^2 R_1$ (2.13)

กำลังไฟฟ้าส่งผ่านช่องอากาศ (Air gap) $P_{ag} = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{S}$ (2.14)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ $P_{rcl} = 3I_2'^2 R_2'$ (2.15)

กำลังงานกลเกิดขึ้นที่โรเตอร์ จากสมการ(2.10) $P_{conv} = 3I_2'^2 R_2' \left(\frac{1-S}{S} \right)$

กำลังงานกลเกิดขึ้นที่เพลา $P_{out} = P_{conv} - P_{f\&w}$ (2.16)

เมื่อ $P_{f\&w}$: กำลังงานกลสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและกำลังลมต้าน

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} \quad (2.17)$$

$$\omega_r = (1-S)\omega_s \quad (2.18)$$

$$T_{ind} = \frac{3I_2'^2 R_2' (1-S)}{S(1-S)\omega_s} = \frac{3I_2'^2 R_2'}{S\omega_s} \quad (2.19)$$

T_{ind} : แรงบิดเกิดขึ้นที่ โรเตอร์

$$I_2' = \frac{E_1^2}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_2')^2}} = \frac{SE_1}{\sqrt{R_2'^2 + S^2 X_2'^2}} \quad (2.20)$$

นำค่า I_2' จากสมการ (2.20) แทนค่าในสมการ (2.19)

$$T_{ind} = \frac{3R_2' S^2 E_1^2}{S(R_2'^2 + S^2 X_2'^2)} \omega_s \tag{2.21}$$

ในสภาวะแรงบิดสูงสุดค่า $\frac{R_2'}{S}$ มีค่าเท่ากับ X_2' เมื่อแทนค่า $R_2' = SX_2'$ ในสมการ (2.21)

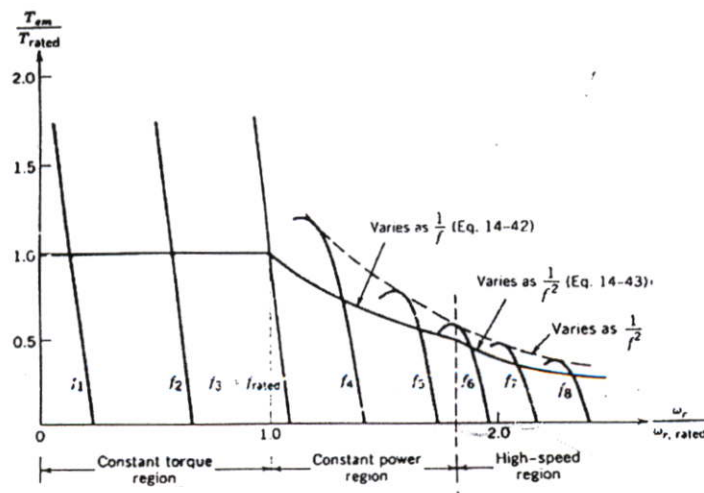
$$T_{ind} = \frac{3SX_2' S^2 E_1^2}{S(S^2 X_2'^2 + S^2 X_2'^2)} \omega_s = \frac{3E_1^2}{2X_2' \omega_s} \tag{2.22}$$

เมื่อ $\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60}$

$$T_{ind} = \left(\frac{3 \times 60}{4\pi N_s} \right) \left(\frac{E_1^2}{X_2'} \right) \tag{2.23}$$

จากสมการ (2.23) พบว่าค่าแรงบิดสูงสุดขึ้นกับค่ารีแอกแตนซ์ X_2' ของโรเตอร์

2.3 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดกับการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีความเร็วรอบต่ำหรือสูงกว่าพิกัดได้โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยจะใช้อินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า และความถี่ทางด้านเอาต์พุตเป็นไปตามหลักการของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากสมการพิกัดแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$E = 4.44 Nf\phi \quad (2.24)$$

$$\phi \propto \frac{E}{f}$$

$$T \propto \left(\frac{E}{f}\right)^2 \propto \phi^2$$

ดังนั้นการเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียวทำให้สนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำลดลง แรงบิดสูงสุดจะลดลงด้วย จึงจำเป็นต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ให้สูงขึ้นตามความถี่โดยรักษาอัตราส่วนความสัมพันธ์ของ $\frac{E}{f}$ ให้คงที่ เพื่อควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีแรงบิดสูงสุดคงที่จะทำได้ในย่านความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่ำกว่าพิกัด ส่วนการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสูงกว่าพิกัดจะไม่สามารถรักษาแรงบิดให้คงที่ได้เนื่องจากไม่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เกินพิกัดได้เพราะจะเกิดความเสียหายแก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงคงที่แรงดันไฟฟ้าไว้ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าเป็นผลทำให้แรงบิดสูงสุดลดลงเนื่องจากการลดลงของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังภาพที่ 2.3[2]

2.3.1 ช่วงการควบคุมความเร็วต่ำกว่าพิกัด

จากภาพที่ 2.3 การปรับอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ให้คงที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำรับโหลดได้ด้วยแรงบิดคงที่ที่ค่าพิกัดเรียกว่าย่านแรงบิดคงที่ (Constant torque region) ซึ่งในย่านนี้มีความถี่สลิปเท่ากับความถี่สลิปที่พิกัดตลอดย่านความเร็ว กระแสเกิดขึ้นที่โรเตอร์คงที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้นจากความต้านทานขดลวดโรเตอร์มีค่าคงที่ด้วย ดังนั้นการควบคุมความเร็วรอบในย่านนี้จึงต้องมีการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการขับเคลื่อนด้วยความถี่ต่ำ ส่วนในโหลดประเภท Centrifugal Pump ไม่มีปัญหาในการระบายความร้อนเพราะสภาวะขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบลดลงแรงบิดของโหลดจะต่ำลง

2.3.2 ช่วงการควบคุมความเร็วสูงกว่าพิกัด

การปรับความถี่ให้สูงขึ้นเกินพิกัดจากภาพที่ 2.3 ทำให้สนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศลดลงและแรงบิด (T_{ind}) ลดลงไม่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเกินพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ แต่เนื่องจากความเร็วรอบของโรเตอร์ (ω_r) เพิ่มขึ้น จาก $P_{conv} = T_{ind} \times \omega_r$ ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดและความเร็วรอบตรงข้ามกัน ทำให้กำลังงานกลเกิดขึ้นที่โรเตอร์คงที่จึงเรียกการควบคุมในย่านนี้ว่าย่านกำลังคงที่ (Constant power)

2.4 การเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสกับ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

การพิสูจน์การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีการวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสทำมุมกัน 120 องศาไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร โดยมีการจัดวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์เป็น 3 เฟส 2 ชุดแต่ละชุดวางทำมุมกัน 30 องศาไฟฟ้าซึ่งเป็นลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นในช่องอากาศเท่ากันพบว่าขนาดพิกัดกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสจะลดลงครึ่งหนึ่งของขนาดพิกัดกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จึงแสดงให้เห็นว่าการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมาปรับปรุงเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรเพื่อใช้กับอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสสามารถลดพิกัดกระแสอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของอินเวอร์เตอร์ได้

2.4.1 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนจากขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส

ในการพันขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขดลวดแต่ละเฟสวางตำแหน่งในช่องสลีตทำมุมกัน 120 องศาไฟฟ้างภาพที่ 2.4 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ 3 เฟส โดยแต่ละเฟสมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศาไฟฟ้าทำให้มีกระแสไหลเข้าขดลวดทั้ง 3 เฟสที่ปลาย a, b, c และมีกระแสไหลออกที่ปลาย a', b', c' ดังนั้นกระแสจ่ายให้กับขดลวดแต่ละเฟสได้ดังสมการ

$$i_{aa'}(t) = I_{M3\phi} \sin \omega t \quad A \quad (2.25)$$

$$i_{bb'}(t) = I_{M3\phi} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad A \quad (2.26)$$

$$i_{cc'}(t) = I_{M3\phi} \sin(\omega t - 240^\circ) \quad A \quad (2.27)$$

เมื่อ $H = NI$

กำหนดให้ N เป็นค่าคงที่ได้สมการการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกัน
กับกระแส

$$H_{aa'}(t) = H_{M3\phi} \sin \omega t \angle 0^\circ \quad A.T/m \quad (2.28)$$

$$H_{bb'}(t) = H_{M3\phi} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad A.T/m \quad (2.29)$$

$$H_{cc'}(t) = H_{M3\phi} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad A.T/m \quad (2.30)$$

เมื่อ $B = \mu.H$

กำหนดให้ค่า μ เป็นค่าคงที่ได้สมการการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
เช่นเดียวกันกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

μ : ความซึมซาบสนามแม่เหล็ก(Magnetic flux permeability)

$$B_{aa'}(t) = B_{M3\phi} \sin \omega t \angle 0^\circ \quad T \quad (2.31)$$

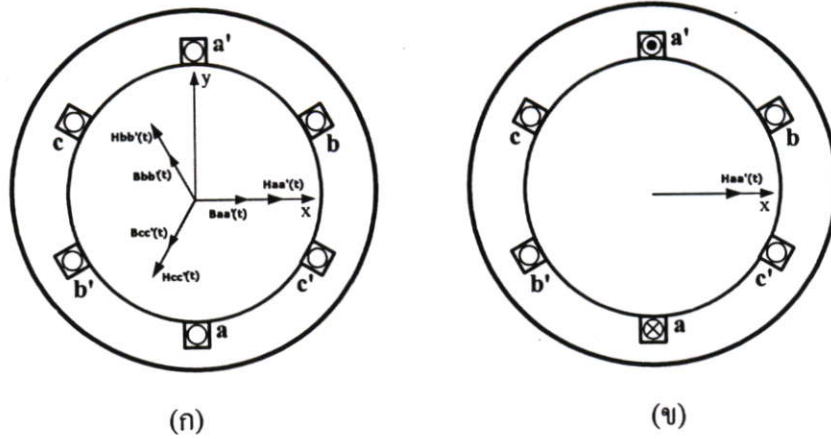
$$B_{bb'}(t) = B_{M3\phi} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad T \quad (2.32)$$

$$B_{cc'}(t) = B_{M3\phi} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad T \quad (2.33)$$

ผลรวมของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์ (B_{net})

$$B_{net3\phi}(t) = B_{aa'}(t) + B_{bb'}(t) + B_{cc'}(t) \quad T \quad (2.34)$$

$$B_{net3\phi}(t) = B_{M3\phi} \sin \omega t \angle 0^\circ + B_{M3\phi} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ + \dots + B_{M3\phi} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad T \quad (2.35)$$



ภาพที่ 2.4 เวกเตอร์สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่สเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

- (ก) เวกเตอร์ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจากกระแสไหลในขดลวดสเตเตอร์
- (ข) เวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสไหลเข้า ขดลวดเฟส a ที่ปลาย a และไหลออกที่ปลาย a'

จัดรูปสมการใหม่

$$\begin{aligned}
 B_{net3\phi}(t) &= B_{M3\phi} \sin \omega t \angle 0^\circ \\
 &+ B_{M3\phi} (\sin \omega t \cos 120^\circ - \sin 120^\circ \cos \omega t) \angle 120^\circ \\
 &+ B_{M3\phi} (\sin \omega t \cos 240^\circ - \sin 240^\circ \cos \omega t) \angle 240^\circ \\
 &= B_{M3\phi} \sin \omega t \hat{X} \\
 &- [0.5 B_{M3\phi} \sin(\omega t - 120^\circ)] \hat{X} + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} B_{M3\phi} \sin(\omega t - 120^\circ) \right] \hat{Y} \\
 &- [0.5 B_{M3\phi} \sin(\omega t - 240^\circ)] \hat{X} + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} B_{M3\phi} \sin(\omega t - 240^\circ) \right] \hat{Y} \\
 B_{net3\phi}(t) &= \left(B_{M3\phi} \sin \omega t + \frac{1}{4} B_{M3\phi} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} B_{M3\phi} \cos \omega t \right. \\
 &\left. + \frac{1}{4} B_{M3\phi} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} B_{M3\phi} \cos \omega t \right) \hat{X} \\
 &+ \left(-\frac{\sqrt{3}}{4} B_{M3\phi} \sin \omega t - \frac{3}{4} B_{M3\phi} \cos \omega t \right. \\
 &\left. + \frac{\sqrt{3}}{4} B_{M3\phi} \sin \omega t - \frac{3}{4} B_{M3\phi} \cos \omega t \right) \hat{Y}
 \end{aligned}$$

$$B_{net3\phi}(t) = (1.5B_{M3\phi} \sin \omega t) \hat{X} - (1.5B_{M3\phi} \cos \omega t) \hat{Y} \quad (2.36)$$

จากสมการ (2.36) กำหนดให้มุม ωt มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสแต็ปมีค่า 0° และ 90° ตามลำดับ ผลการคำนวณหาค่าผลรวมความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ดังสมการ

เมื่อ $\omega t = 0^\circ$

$$B_{net3\phi} = 1.5B_{M3\phi} \angle -90^\circ \quad (2.37)$$

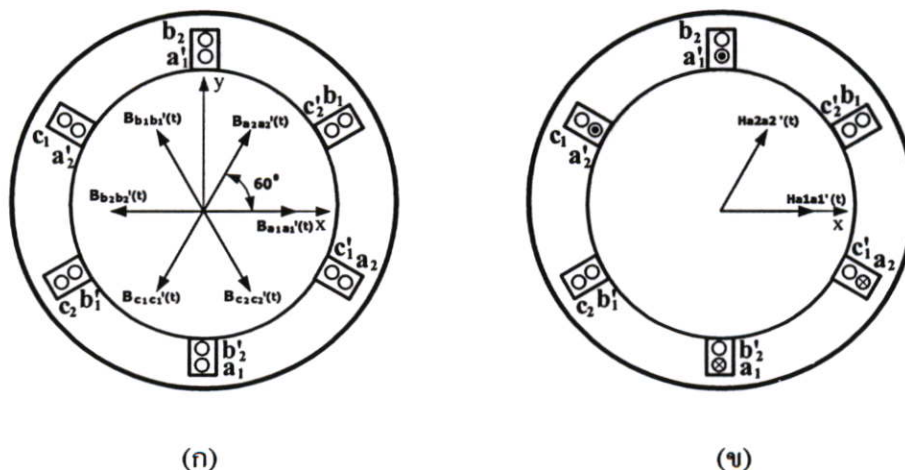
เมื่อ $\omega t = 90^\circ$

$$B_{net3\phi} = 1.5B_{M3\phi} \angle 0^\circ \quad (2.38)$$

ผลการคำนวณที่ได้จากสมการ(2.37) และ (2.38) ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่เท่ากับ $1.5B_{M3\phi}$ และมีทิศทางหมุนเมื่อมุม ωt เปลี่ยนแปลง

2.4.2 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนจากขดลวดสเตเตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร

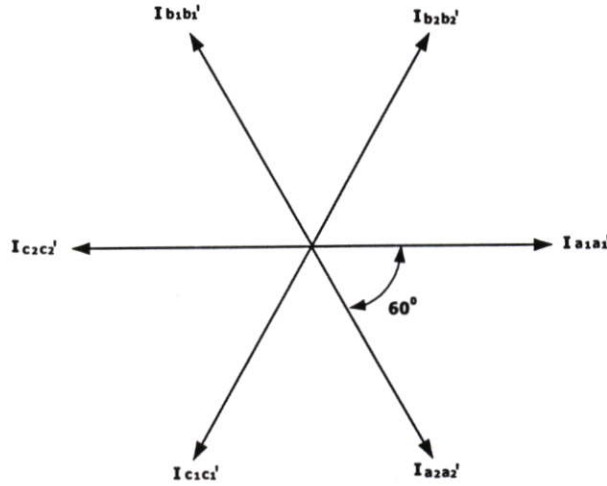
ในการพันขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร ประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ชุดแต่ละชุดวางในตำแหน่งทำมุมกัน 60 องศาไฟฟ้า และขดลวดแต่ละเฟสของแต่ละชุดวางตำแหน่งในช่องสล็อตทำมุมกัน 120 องศาไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสโดยทั่วไป ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 เวกเตอร์สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่สเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร

- (ก) เวกเตอร์ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสไหลในขดลวดสเตเตอร์
 (ข) เวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสไหลเข้า ขดลวดเฟส a_1 ที่ปลาย a_1 และไหลออกที่ปลาย a_1' , กระแสไหลเข้า ขดลวดเฟส a_2 ที่ปลาย a_2 และไหลออกที่ปลาย a_2'

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ 6 เฟสแบบสมมาตรประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ชุด แต่ละชุดมีมุมต่างเฟสกัน 60 องศาไฟฟ้างาภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 เวกเตอร์กระแสจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสแบบสมมาตร

เมื่อกระแสแต่ละเฟสจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ 6 เฟสมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของกระแสแต่ละเฟสจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส

$$\text{ดังนั้น} \quad I_{M6\phi} = \frac{I_{M3\phi}}{2}$$

$$i_{a1a1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \quad \text{A} \quad (2.39)$$

$$i_{a2a2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 60^\circ) \quad \text{A} \quad (2.40)$$

$$i_{b1b1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad \text{A} \quad (2.41)$$

$$i_{b2b2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 180^\circ) \quad \text{A} \quad (2.42)$$

$$i_{c1c1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 240^\circ) \quad \text{A} \quad (2.43)$$

$$i_{c2c2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 300^\circ) \quad \text{A} \quad (2.44)$$

ดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์ 6 เฟสได้ดังสมการ

$$H_{a1a1'}(t) = \frac{H_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \angle 0^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.45)$$

$$H_{a2a2'}(t) = \frac{H_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 60^\circ) \angle 60^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.46)$$

$$H_{b1b1'}(t) = \frac{H_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.47)$$

$$H_{b2b2'}(t) = \frac{H_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 180^\circ) \angle 180^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.48)$$

$$H_{c1c1'}(t) = \frac{H_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.49)$$

$$H_{c2c2'}(t) = \frac{H_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 300^\circ) \angle 300^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.50)$$

$$B_{a1a1'}(t) = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \angle 0^\circ \quad \text{T} \quad (2.51)$$

$$B_{a2a2'}(t) = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 60^\circ) \angle 60^\circ \quad \text{T} \quad (2.52)$$

$$B_{b1b1'}(t) = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad T \quad (2.53)$$

$$B_{b2b2'}(t) = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 180^\circ) \angle 180^\circ \quad T \quad (2.54)$$

$$B_{c1c1'}(t) = \frac{H_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad T \quad (2.55)$$

$$B_{c2c2'}(t) = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 300^\circ) \angle 300^\circ \quad T \quad (2.56)$$

ผลรวมของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์ (B_{net}) 6 เฟส

$$B_{net6\phi}(t) = B_{a1a1'}(t) + B_{a2a2'}(t) + B_{b1b1'}(t) \\ + B_{b2b2'}(t) + B_{c1c1'}(t) + B_{c2c2'}(t) \quad T \quad (2.57)$$

$$B_{net6\phi}(t) = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \angle 0^\circ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 60^\circ) \angle 60^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 180^\circ) \angle 180^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 300^\circ) \angle 300^\circ \quad T \quad (2.58)$$

จัดรูปสมการใหม่

$$B_{net6\phi} = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \angle 0^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\sin \omega t \cos 60^\circ - \sin 60^\circ \cos \omega t \right) \angle 60^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\sin \omega t \cos 120^\circ - \sin 120^\circ \cos \omega t \right) \angle 120^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\sin \omega t \cos 180^\circ - \sin 180^\circ \cos \omega t \right) \angle 180^\circ$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\sin \omega t \cos 240^\circ - \sin 240^\circ \cos \omega t \right) \angle 240^\circ \\
& + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\sin \omega t \cos 300^\circ - \sin 300^\circ \cos \omega t \right) \angle 300^\circ \quad \text{T} \quad (2.59)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{net6\phi} &= \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \hat{X} \\
& + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\frac{1}{2} \sin \omega t \right) \hat{X} + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(-\frac{3}{2} \cos \omega t \right) \hat{Y} \\
& + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \hat{X} \\
& + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\frac{1}{2} \sin \omega t \right) \hat{X} + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(-\frac{3}{2} \cos \omega t \right) \hat{Y} \quad \text{T} \quad (2.60)
\end{aligned}$$

$$B_{net6\phi} = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \hat{X} - \frac{3B_{M3\phi}}{2} \cos \omega t \hat{Y}$$

$$B_{net6\phi}(t) = \left(1.5B_{M3\phi} \sin \omega t \right) \hat{X} - \left(1.5B_{M3\phi} \cos \omega t \right) \hat{Y} \quad \text{T} \quad (2.61)$$

จากสมการ (2.61) กำหนดให้มุม ωt มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสตีปมีค่า 0° และ 90° ตามลำดับผลการคำนวณหาค่าผลรวมความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ดังสมการ

$$\text{เมื่อ } \omega t = 0^\circ$$

$$B_{net6\phi} = 1.5B_{M3\phi} \angle -90^\circ \quad (2.62)$$

$$\text{เมื่อ } \omega t = 90^\circ$$

$$B_{net6\phi} = 1.5B_{M3\phi} \angle 0^\circ \quad (2.63)$$

ผลการคำนวณที่ได้จากสมการ(2.62) และ (2.63) ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่เท่ากับ $1.5B_{M3\phi}$ และมีทิศทางหมุนเมื่อมุม ωt เปลี่ยนแปลง

2.4.3 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนจากขดลวดสเตเตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

ในการพันขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร ประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ชุดแต่ละชุดวางในตำแหน่งทำมุมกัน 30 องศาไฟฟ้า และขดลวดแต่ละเฟสของแต่ละชุดวางตำแหน่งในช่องสล็อตทำมุมกัน 120 องศาไฟฟ้าเช่นเดียวกับขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสโดยทั่วไป ดังภาพที่ 2.7 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ 6 เฟสแบบไม่สมมาตรประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ชุด แต่ละชุดมีมุมต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้างดภาพที่ 2.8 เมื่อกระแสแต่ละเฟสจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ 6 เฟสมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของกระแสแต่ละเฟสจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส

$$\text{ดังนั้น} \quad I_{M6\phi} = \frac{I_{M3\phi}}{2}$$

$$i_{a1a1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \quad \text{A} \quad (2.64)$$

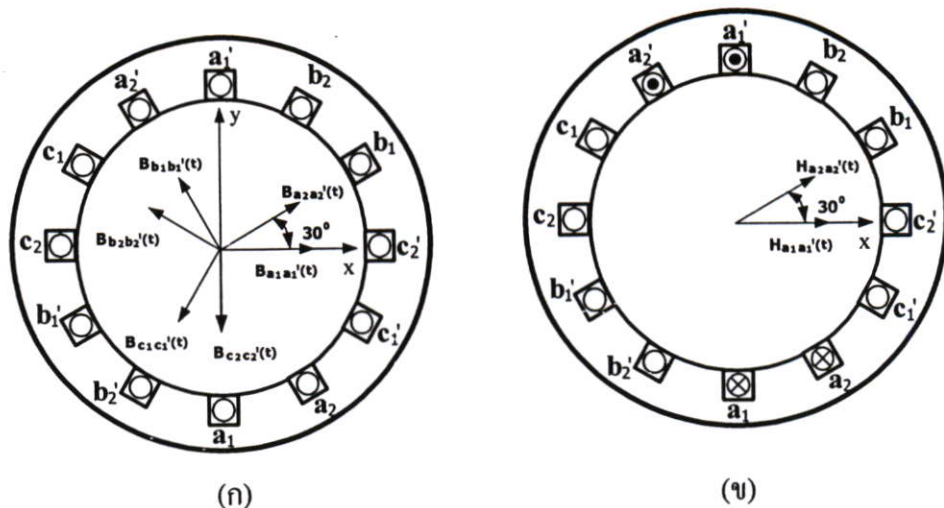
$$i_{a2a2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 30^\circ) \quad \text{A} \quad (2.65)$$

$$i_{b1b1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad \text{A} \quad (2.66)$$

$$i_{b2b2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 150^\circ) \quad \text{A} \quad (2.67)$$

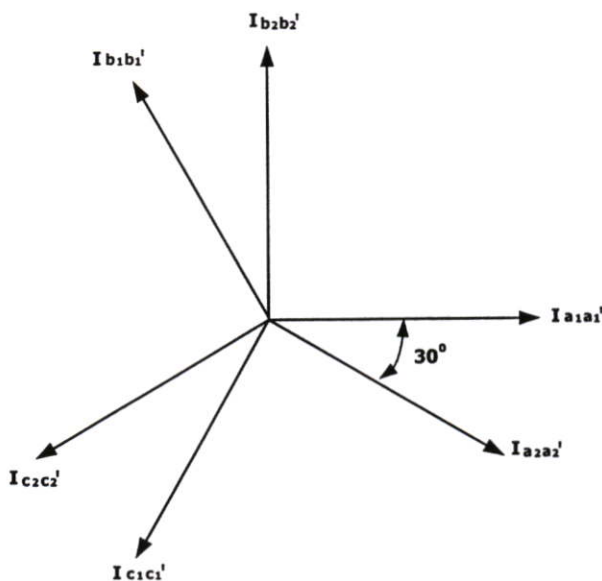
$$i_{c1c1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 240^\circ) \quad \text{A} \quad (2.68)$$

$$i_{c2c2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 270^\circ) \quad \text{A} \quad (2.69)$$



ภาพที่ 2.7 เวกเตอร์สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่สเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

- (ก) เวกเตอร์ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจากกระแสไหลในขดลวดสเตเตอร์
- (จ) เวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อกระแสไหลเข้า ขดลวดเฟส a_1 ที่ปลาย a_1 และไหลออกที่ปลาย a_1' , กระแสไหลเข้า ขดลวดเฟส a_2 ที่ปลาย a_2 และไหลออกที่ปลาย a_2'



ภาพที่ 2.8 เวกเตอร์กระแสจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสแบบไม่สมมาตร

ดังนั้นความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์ 6 เฟสได้ดังสมการ

$$H_{a_1a_1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \angle 0^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.70)$$

$$H_{a_2a_2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 30^\circ) \angle 30^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.71)$$

$$H_{b_1b_1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.72)$$

$$H_{b_2b_2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 150^\circ) \angle 150^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.73)$$

$$H_{c_1c_1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.74)$$

$$H_{c_2c_2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 270^\circ) \angle 270^\circ \quad \text{A.T/m} \quad (2.75)$$

$$B_{a_1a_1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \angle 0^\circ \quad \text{T} \quad (2.76)$$

$$B_{a_2a_2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 30^\circ) \angle 30^\circ \quad \text{T} \quad (2.77)$$

$$B_{b_1b_1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad \text{T} \quad (2.78)$$

$$B_{b_2b_2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 150^\circ) \angle 150^\circ \quad \text{T} \quad (2.79)$$

$$B_{c_1c_1'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad \text{T} \quad (2.80)$$

$$B_{c2c2'}(t) = \frac{I_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 270^\circ) \angle 270^\circ \quad \text{T} \quad (2.81)$$

ผลรวมของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์ (B_{net}) 6 เฟส

$$B_{net6\phi}(t) = B_{a1a1'}(t) + B_{a2a2'}(t) + B_{b1b1'}(t) \\ + B_{b2b2'}(t) + B_{c1c1'}(t) + B_{c2c2'}(t) \quad \text{T} \quad (2.82)$$

$$B_{net6\phi}(t) = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \angle 0^\circ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 30^\circ) \angle 30^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 150^\circ) \angle 150^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ + \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin(\omega t - 270^\circ) \angle 270^\circ \quad \text{T} \quad (2.83)$$

จัดรูปสมการใหม่

$$B_{net6\phi} = \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \angle 30^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} (\sin \omega t \cos 30^\circ - \sin 30^\circ \cos \omega t) \angle 30^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} (\sin \omega t \cos 120^\circ - \sin 120^\circ \cos \omega t) \angle 120^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} (\sin \omega t \cos 150^\circ - \sin 150^\circ \cos \omega t) \angle 150^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} (\sin \omega t \cos 240^\circ - \sin 240^\circ \cos \omega t) \angle 240^\circ \\ + \frac{B_{M3\phi}}{2} (\sin \omega t \cos 270^\circ - \sin 270^\circ \cos \omega t) \angle 270^\circ \quad \text{T} \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned}
B_{net6\phi} &= \frac{B_{M3\phi}}{2} \sin \omega t \hat{X} \\
&+ \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\frac{3}{4} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t \right) \hat{X} + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\frac{\sqrt{3}}{4} \sin \omega t - \frac{1}{4} \cos \omega t \right) \hat{Y} \\
&+ \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right) \hat{X} + \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t - \cos \omega t \right) \hat{Y} \\
&+ \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\frac{1}{4} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t \right) \hat{X} \\
&+ \frac{B_{M3\phi}}{2} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t - \frac{3}{4} \cos \omega t - \cos \omega t \right) \hat{Y} \quad \text{T} \quad (2.85)
\end{aligned}$$

$$B_{M6\phi} = (1.5B_{M3\phi} \sin \omega t) \hat{X} - (1.5B_{M3\phi} \cos \omega t) \hat{Y} \quad \text{T} \quad (2.86)$$

จากสมการ(2.86) กำหนดให้มุม ωt มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสแต็ปมีค่า 0° และ 90° ตามลำดับ ผลการคำนวณหาค่าผลรวมความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้ดังสมการ

เมื่อ $\omega t = 0^\circ$

$$B_{net3\phi} = 1.5B_{M3\phi} \angle -90^\circ \quad (2.87)$$

เมื่อ $\omega t = 90^\circ$

$$B_{net3\phi} = 1.5B_{M3\phi} \angle 0^\circ \quad (2.88)$$

ผลการคำนวณที่ได้จากสมการ(2.87) และ (2.88) ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่เท่ากับ $1.5B_{M3\phi}$ และมีทิศทางหมุนเมื่อมุม ωt เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจากสมการ (2.36) กับสมการ (2.86) มีค่าเท่ากัน ดังนั้นการปรับปรุงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรสามารถลดกระแสไหลในขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสได้ครึ่งหนึ่ง โดยค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์มีค่าเท่าเดิม

2.5 การหาพิกัดแรงดันไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์

ในการคำนวณหาค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าของขดลวดตัวนำจากหลักการของฟาราเดย์หาได้จากสมการ

$$e_c = -N_c \frac{d\phi_p}{dt} \quad \text{V} \quad (2.89)$$

เมื่อ $\phi_p = \phi_{pm} \sin \omega t$

$$e_c = -N_c \frac{d(\phi_{pm} \sin \omega t)}{dt} \quad \text{V} \quad (2.90)$$

จากสมการ (2.90) หาค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าที่วัดได้ (rms)

$$E_c = N_c \left[\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left(-\frac{d}{dt} \phi_{pm} \sin \omega t \right)^2 d\omega t \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{V} \quad (2.91)$$

$$E_c = N_c \left(\frac{\phi_{pm}^2 \omega^2}{2} \int_0^\pi \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} d\omega t \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{V} \quad (2.92)$$

$$= N_c \left(\frac{\phi_{pm}^2 \omega^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{V} \quad (2.93)$$

$$E_c = \frac{N_c \phi_{pm} \omega}{\sqrt{2}} \quad \text{V} \quad (2.94)$$

แทนค่า $\omega = 2\pi f$ ในสมการ (2.94) ได้

$$E_c = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_c \phi_{pm} f \quad \text{V}$$

$$E_c = 4.44 N_c \phi_{pm} f \quad \text{V} \quad (2.95)$$

จากสมการ (2.95) ใช้สำหรับคำนวณหาพิกัดแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ขดลวด 1 ขดมีระยะตัวนำของขดลวดเท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า (Full pitch) แต่เนื่องจากการออกแบบขดลวดสเตเตอร์บางกรณีสามารถออกแบบให้มีระยะห่างของตัวนำขดลวดแต่ละขดน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้าได้ (Fractional pitch) และจำนวนขดลวดต่อขั้วแม่เหล็กมีการกระจายมากกว่า 1 ขด (Distribution winding) ทำให้พิกัดแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสลดลงขึ้นกับค่าแฟกเตอร์ของขดลวด (Winding factor : K_w) ดังนั้นพิกัดแรงดันไฟฟ้าหาได้จากสมการ(2.96)

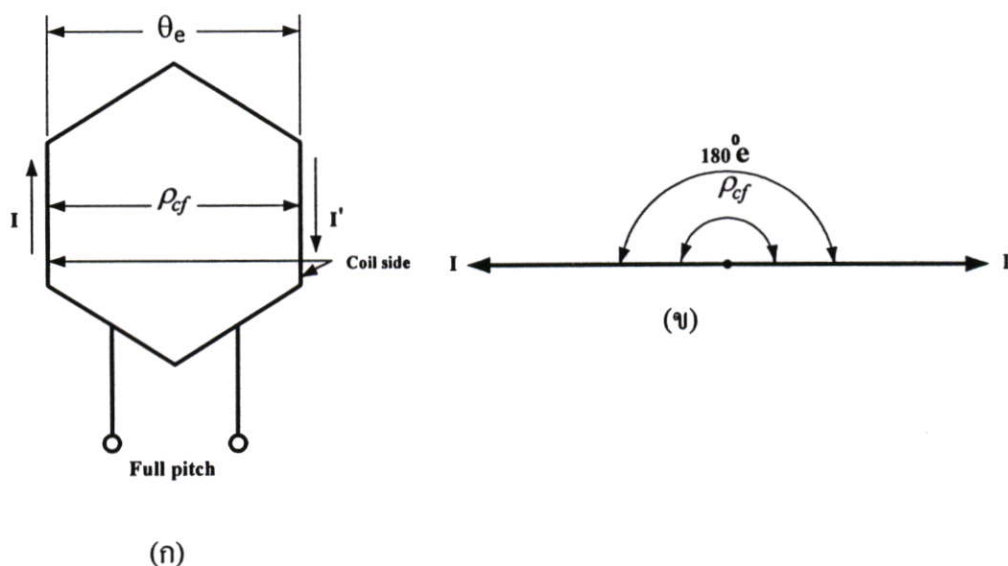
$$E_c = 4.44 N_c \phi_{pm} f K_w \quad \text{V} \quad (2.96)$$

เมื่อ $K_w = K_p \times K_d$

2.5.1 การหาค่าแฟกเตอร์ความกว้างขดลวด (Coil pitch)

ขดลวดสเตเตอร์แต่ละขดมีระยะห่างระหว่างตัวนำวางในช่องสลีตแบ่งลักษณะการออกแบบได้ตามความกว้างของขดลวดได้ 2 ลักษณะคือ

1. แบบ Full pitch
2. แบบ Short pitch หรือแบบ Chord pitch



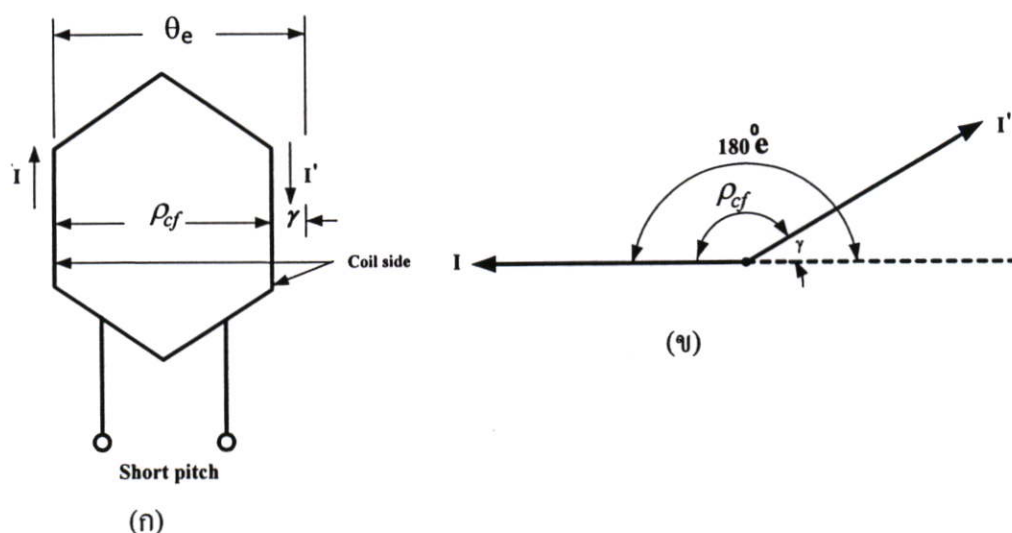
ภาพที่ 2.9 ขดลวดสเตเตอร์แบบ Full pitch

(ก) ระยะห่างของ Coil side เท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า

(ข) เวกเตอร์กระแสไหลในแต่ละ coil side

จากภาพที่ 2.9(ก) ขดลวดแบบ Full pitch มีระยะห่างระหว่างตัวนำ (Coil side) เท่ากับ 180 องศาไฟฟ้ากระแสไหลใน Coil side ทั้ง 2 ข้างคือ I และ I' ทำมุมกัน 180 องศาไฟฟ้างดภาพที่

2.9(ข) ผลรวมของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของขดลวดมากที่สุด ดังนั้นค่าแฟคเตอร์ความกว้างของขดลวดสำหรับหาค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าขดลวดเท่ากับ 1

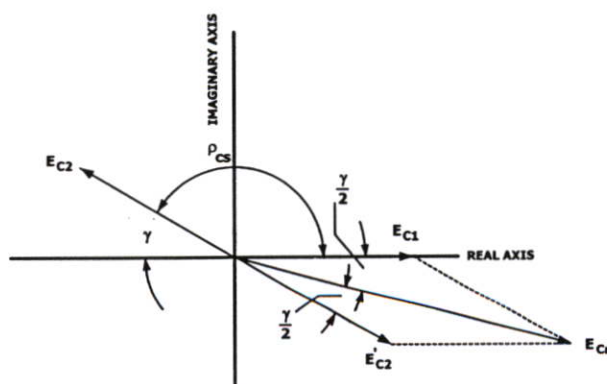


ภาพที่ 2.10 ขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch

(ก) ระยะห่างของ Coil side น้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้า

(ข) เวกเตอร์กระแสไหลในแต่ละ coil side

จากภาพที่ 2.10(ก) ขดลวดแบบ Short pitch มีระยะห่างระหว่างตัวนำ (Coil side) น้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้ากระแสไหลใน Coil side ทั้ง 2 ข้างคือ I และ I' ทำมุมกัน $180 - \gamma$ องศาไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.10(ข) ผลรวมของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของขดลวดลดลง ดังนั้นค่าแฟคเตอร์ความกว้างของขดลวดสำหรับหาค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าขดลวดลดลงหาได้จากภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 เวกเตอร์พิกัดแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ตัวนำของขดลวดทั้ง 2 ข้าง

จากภาพที่ 2.11 สามารถหาค่าแฟคเตอร์ความกว้างของขดลวดได้จากสมการ(2.72)

$$K_p = \frac{E_{cr}}{[E_{c1}] + [E_{c2}]} \quad (2.97)$$

เมื่อ $[E_{c1}] = [E_{c2}] = [E'_{c2}] = E$

$$E_{cr} = [E_{c1}] \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + [E'_{c2}] \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (2.98)$$

แทนค่าในสมการ(2.97)

$$K_p = \frac{2E \cos \frac{\gamma}{2}}{2E}$$

$$K_p = \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (2.99)$$

2.5.2 การหาค่าแฟคเตอร์การกระจายของขดลวด (Distribution factor)

ในการพันขดลวดเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ ลักษณะการออกแบบการพันขดลวดสเตเตอร์จะมีผลต่อการกระจายแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก(Magneto motive force: MMF) ถ้าออกแบบการพันจากลักษณะโครงสร้างที่มีจำนวนสล็อตน้อยทำให้มีจำนวนขดลวดต่อขั้วแม่เหล็กน้อยเช่นกัน ดังนั้นจำนวนรอบของขดลวดแต่ละขดจึงมีจำนวนรอบมากมีขนาดช่องสล็อตใหญ่มากเกินไปทำให้สูญเสียพื้นที่แกนเหล็กมาก ด้วยเหตุนี้การเพิ่มจำนวนช่องสล็อตให้มากขึ้นขนาดของช่องสล็อตเล็กลงมีพื้นที่ของแกนเหล็กมากขึ้น ทำให้มีพิคค่าสูงชันและลดฮาร์โมนิกส์ของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่ช่องอากาศ(Air-gap)ระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ จากภาพที่ 2.12(ก) ขดลวดจำนวน N รอบพันในช่องสล็อตจำนวน 2 สล็อต มีกระแสไหลผ่านขดลวด i แอมแปร์ ขดลวดสร้างแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก(MMF) มีขนาดขึ้นกับมุม θ มีลักษณะรูปคลื่นแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กเป็นสี่เหลี่ยม (Non sinusoidal) ดังภาพที่ 2.12(ข) มีความยาวของช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์เท่ากับ g โดยค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (μ_r) ของแกนเหล็กมีค่าสูงมากดังนั้นค่าความต้านทานสนามแม่เหล็ก (Reluctance) จึงมีค่าต่ำมากสามารถละทิ้งได้ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก(Magnetic flux density)ที่ช่องอากาศหาได้จากสมการ

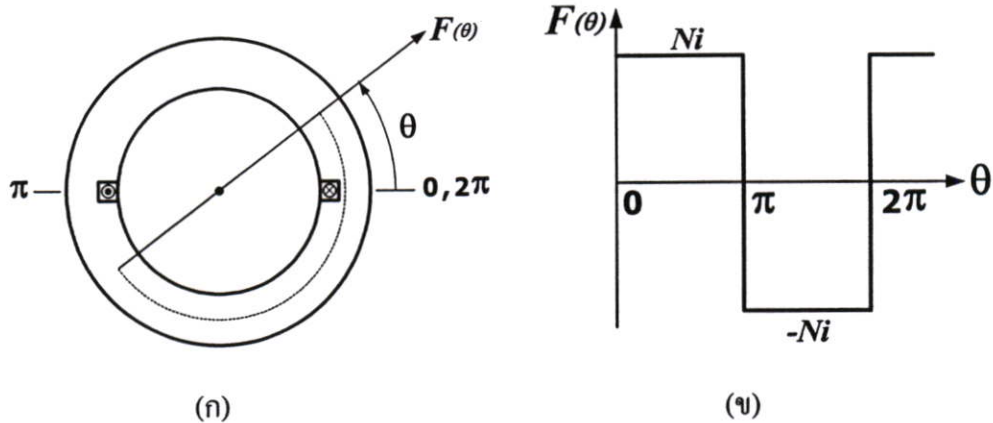
$$B(\theta) = \mu_0 \frac{Ni}{2g} \quad (2.100)$$

ได้รูปคลื่นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเมื่อกระจายรูปคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันคี่ (odd function) ในรูปอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series) ประกอบด้วยรูปคลื่นความถี่มูลฐาน และรูปคลื่นความถี่ฮาร์โมนิกส์ได้ดังสมการ

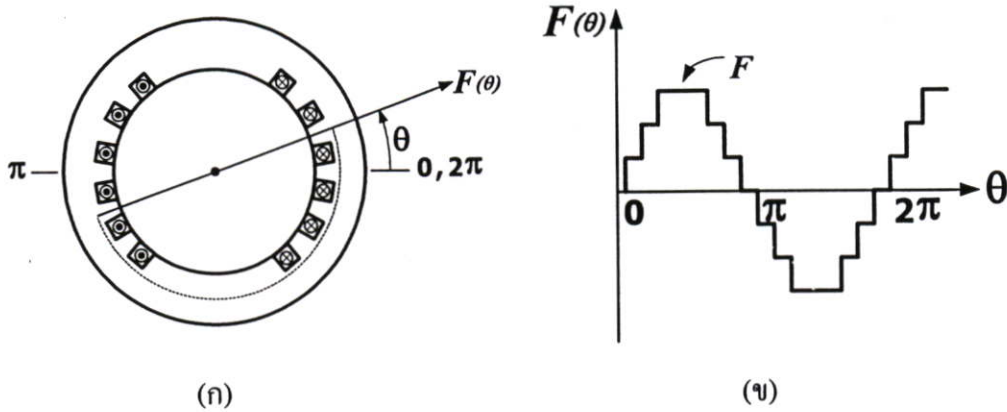
$$B(\theta) = B_{1(\max)} \sin \theta + B_{1(\max)} \sin 3\theta + B_{1(\max)} \sin 5\theta + \dots$$

$$B(\theta) = \sum_{h=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4}{\pi} B_{1(\max)} \sin(h\theta) \quad (2.101)$$

ดังนั้นการปรับปรุงการพันขดลวดสเตเตอร์เพื่อลดขนาดฮาร์โมนิกส์ของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในช่องอากาศสามารถทำได้โดยการออกแบบพันขดลวดสเตเตอร์ให้มีการกระจายขดลวดมากขึ้น ดังภาพที่ 2.13(ก) กระแสไหลในตัวนำขดลวดสเตเตอร์ 3 ขดต่อขั้วแม่เหล็ก 1 ขั้ว มีแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นดังภาพที่ 2.13(ข) มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้น ทำให้ลดค่าฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นความหนาแน่นสนามแม่เหล็กได้



ภาพที่ 2.12 การเกิดแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กแบบไม่กระจาย
 (ก) ขดลวดสเตเตอร์ในช่องสล็อตไม่มีการกระจาย
 (ข) แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์



ภาพที่ 2.13 การเกิดแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กแบบกระจาย

(ก) ขดลวดสเตเตอร์แบบกระจาย 3 ขดต่อ 1 ขั้วแม่เหล็ก

(ข) แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์

จากลักษณะการออกแบบการพันขดลวดสเตเตอร์โดยให้มีจำนวนขดลวดต่อขั้วแม่เหล็กของแต่ละเฟสมากกว่า 1 ขดเพื่อลดฮาร์โมนิกส์ของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในช่องอากาศ ดังนั้นขดลวดสเตเตอร์แต่ละขั้วจะต่ออนุกรมกันเป็นกลุ่มต่อขั้วแม่เหล็ก เรียกว่าจำนวนขดลวดต่อกลุ่ม (Coil/group/phase : N_g) หาได้จากสมการ

$$N_g = \frac{N_{st}}{Pq} \quad \text{coil/pole/phase} \quad (2.102)$$

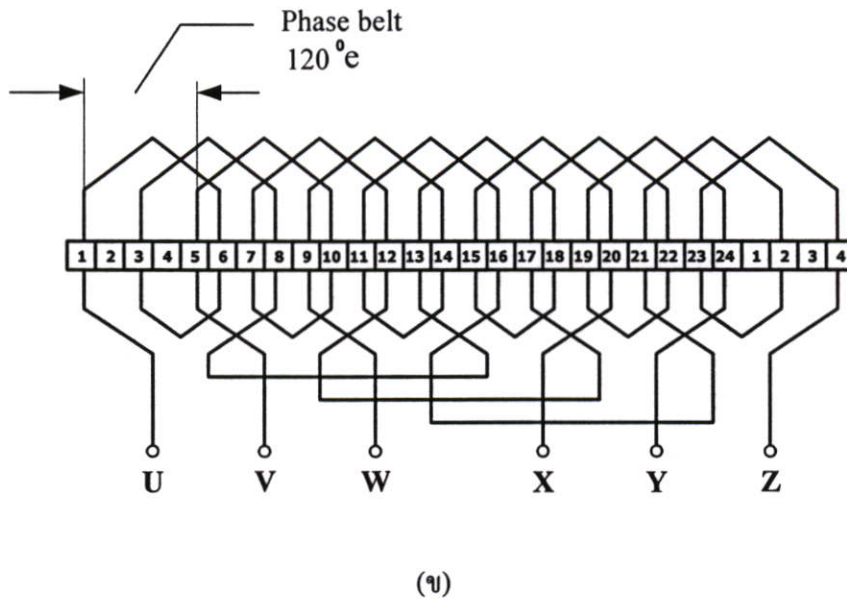
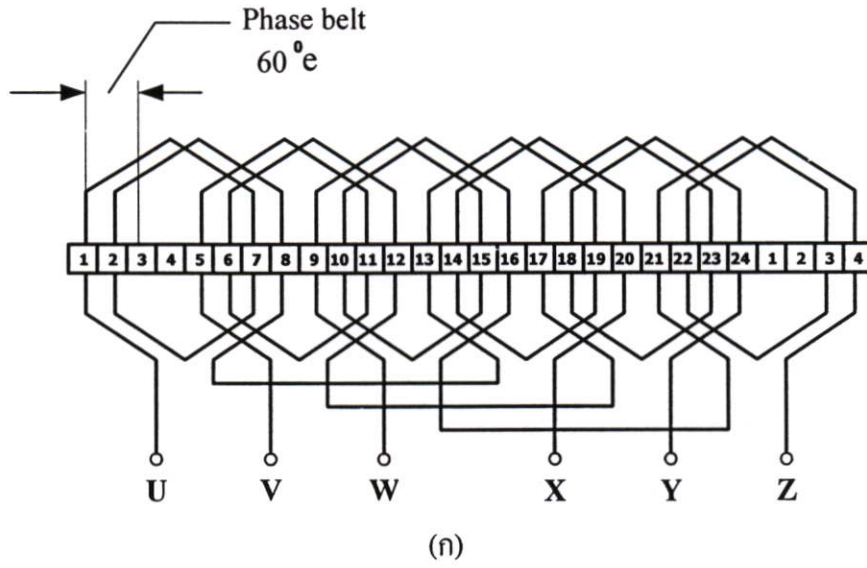
N_{st} : จำนวนขดลวดสเตเตอร์ทั้งหมด

ขดลวดแต่ละกลุ่มในแต่ละเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะพันในตำแหน่งช่องสลีตที่มีมุมระหว่างช่องสลีตแต่ละกลุ่มเท่ากับ 60 องศาไฟฟ้า (Phase belt = 60 องศาไฟฟ้า) ดังภาพที่ 2.14(ก) ดังนั้นหาค่าระยะมุมขดลวดแต่ละขดทำมุมกัน (α) ได้จากสมการ

$$\alpha = \frac{60}{N_g} \quad \text{electrical degrees/coil} \quad (2.103)$$

แต่บางกรณี การจัดวางขดลวดแต่ละกลุ่มของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจัดวางขดลวดในตำแหน่งช่องสลีตที่มีมุมระหว่างช่องสลีตแต่ละกลุ่มเท่ากับ 120 องศาไฟฟ้าได้ (Phase belt = 120 องศาไฟฟ้า) ดังภาพ 2.14(ข) ดังนั้นขดลวดแต่ละขดทำมุมกัน (α) ได้จากสมการ

$$\alpha = \frac{120}{N_g} \quad \text{electrical degrees/coil} \quad (2.104)$$

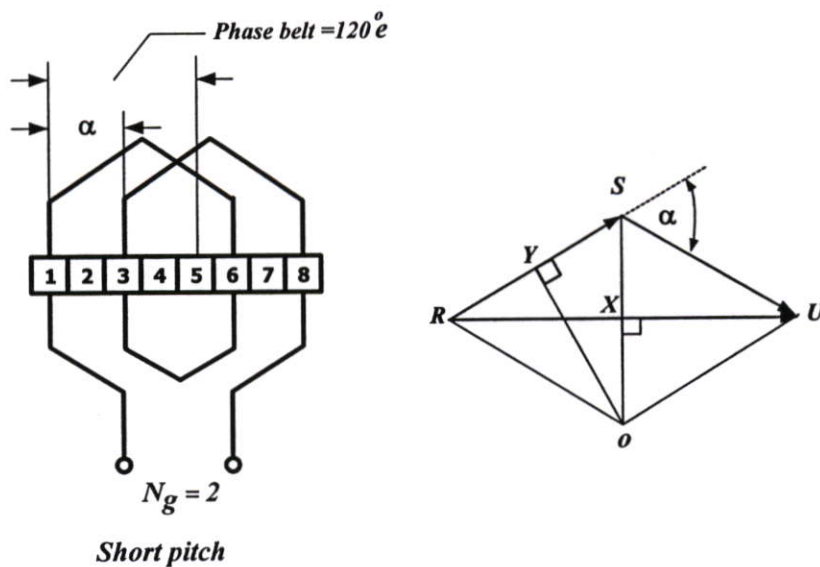
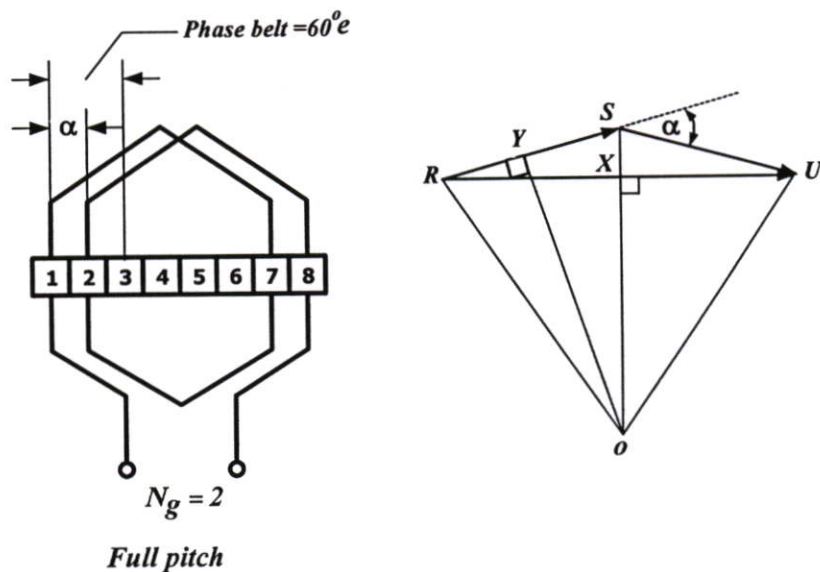


ภาพที่ 2.14 มุมระหว่างช่องสลีตขดลวดแต่ละกลุ่ม(Phase belt)

(ก) ขดลวดมุมระหว่างช่องสลีตแต่ละกลุ่มเท่ากับ 60 องศาไฟฟ้า

(ข) ขดลวดมุมระหว่างช่องสลีตแต่ละกลุ่มเท่ากับ 120 องศาไฟฟ้า

เนื่องจากการกระจายขดลวดในแต่ละกลุ่มขดลวดต่อขั้วแม่เหล็กจะต่ออนุกรมกัน และมี การวางตำแหน่งขดลวดแต่ละขดทำมุมกันเป็นมุม α ทำให้ผลรวมพิกัดแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แต่ละขดขึ้นกับผลรวมทางเวกเตอร์ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 การกระจายกลุ่มขดลวด

(ก) แบบ Full pitch และเวกเตอร์ผลรวมพิกัดแรงดันไฟฟ้า

(ข) แบบ Short pitch และเวกเตอร์ผลรวมพิกัดแรงดันไฟฟ้า

จากภาพที่ 2.15(ก) และ 2.15(ข) ค่าแฟคเตอร์การกระจายขดลวดหาได้จากสมการ(2.105) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของผลรวมทางเวกเตอร์พิคัดแรงดันไฟฟ้าแต่ละขดต่อผลรวมปริมาณทางคณิตศาสตร์พิคัดแรงดันไฟฟ้าแต่ละขด

$$\begin{aligned}
 K_d &= \frac{RU}{n(RS)} \\
 &= \frac{2RX}{n(2RY)} \\
 &= \frac{OR \sin(n\alpha/2)}{ORn \sin(\alpha/2)} \\
 K_d &= \frac{\sin(n\alpha/2)}{n \sin(\alpha/2)} \tag{2.105}
 \end{aligned}$$

2.5.3 การคำนวณหาจำนวนรอบขดลวดเมื่อค่าแฟคเตอร์ขดลวดเปลี่ยนแปลง

เมื่อมีการปรับปรุงการจัดวางตำแหน่งขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำจากแบบ Full pitch เป็นแบบ Short pitch ทำให้ค่าแฟคเตอร์ความกว้างของขดลวดลดลงเนื่องจากมีค่านุม γ และค่าแฟคเตอร์การกระจายขดลวดต่อขั้วแม่เหล็กลดลงเช่นกันเนื่องจากมีค่านุม α มีค่าเพิ่มมากขึ้นเพราะขดลวดแบบ Full pitch มีค่านุม Phase belt เท่ากับ 60 องศาไฟฟ้า ส่วนขดลวดแบบ Short pitch มีค่านุม Phase belt เท่ากับ 120 องศาไฟฟ้า เมื่อพิจารณาพิคัดแรงดันไฟฟ้าของขดลวดแบบ Full pitch จากสมการ(2.106) และขดลวดแบบ Short pitch จากสมการ(2.107)

$$E_{cf} = 4.44 N_{cf} \phi_{pm} K_w_{cf} \tag{2.106}$$

$$E_{cs} = 4.44 N_{cs} \phi_{pm} K_w_{cs} \tag{2.107}$$

โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็ก (ϕ_{pm}) และจำนวนรอบของขดลวด (N_c) เท่าเดิมอัตราส่วนพิคัดแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นกับอัตราส่วนของแฟคเตอร์ขดลวด (K_w) ดังสมการ(2.108)

$$\frac{E_{cf}}{E_{cs}} = \frac{K_w_{cf}}{K_w_{cs}} \tag{2.108}$$

แต่ถ้าหากกำหนดให้พิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่าเดิม ($E_{cf} = E_{cs}$) เมื่อเฟลคเตอร์ของขดลวดเปลี่ยนแปลงเมื่อต้องการให้สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ทำให้จำนวนรอบของขดลวดเปลี่ยนแปลงเช่นกัน สามารถหาอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดต่ออัตราส่วนเฟลคเตอร์ของขดลวดได้จากสมการ(2.109) เมื่อ($E_{cf} / E_{cs} = 1$)

$$\frac{E_{cf}}{E_{cs}} = \frac{4.44 N_{cf} \phi_{pm} Kw_{cf}}{4.44 N_{cs} \phi_{pm} Kw_{cs}}$$

$$1 = \frac{N_{cf} Kw_{cf}}{N_{cs} Kw_{cs}}$$

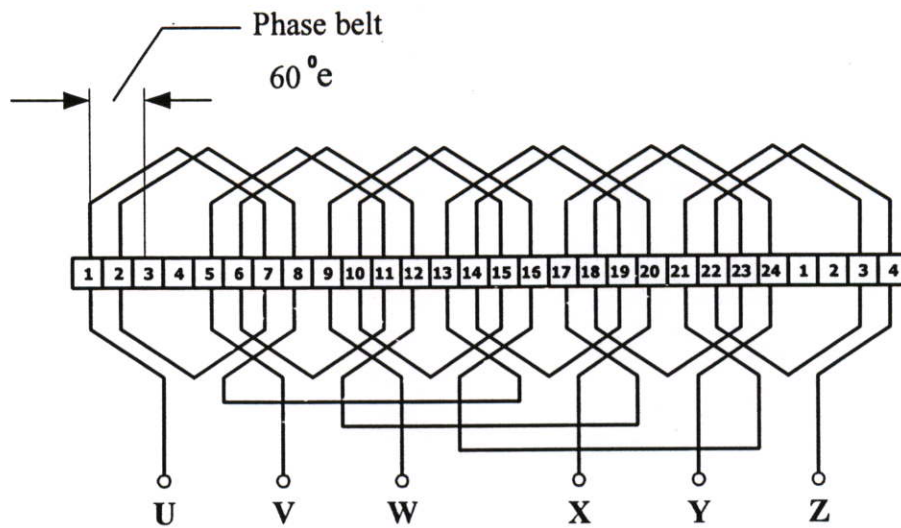
$$\frac{N_{cs}}{N_{cf}} = \frac{Kw_{cf}}{Kw_{cs}} \quad (2.109)$$

2.6 การปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็น 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร

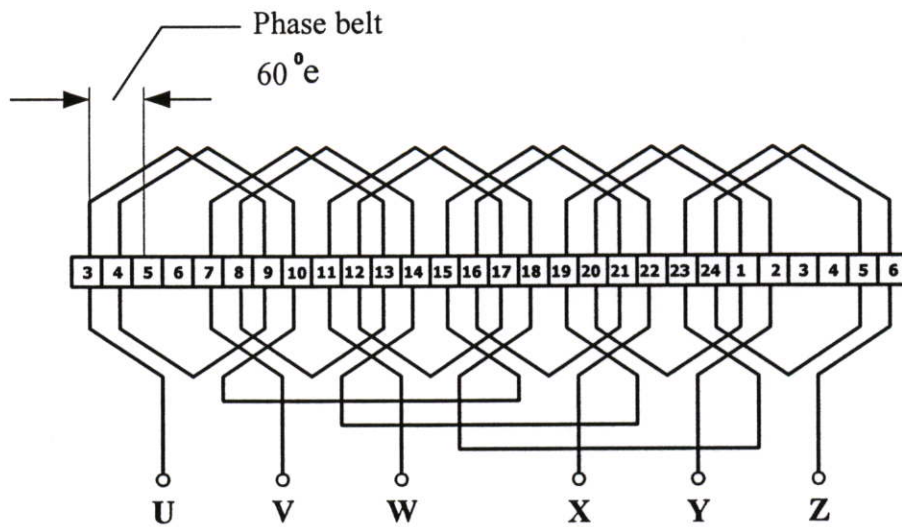
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาดพิกัดกำลังสูงที่ใช้งานเป็นต้นกำลังขับโหลดด้วยความเร็วรอบสูงโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีขั้วแม่เหล็ก(P)จำนวน 2 ขั้วถึง 4 ขั้ว เมื่อนำมาปรับปรุงเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร โดยออกแบบจัดวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์เป็น 3 เฟสจำนวน 2 ชุดแต่ละชุดทำมุมกัน 60 องศาไฟฟ้ามี่ข้อควรคำนึงถึงคือความสมดุลของการวางตำแหน่งและคุณสมบัติของขดลวด ของการออกแบบขดลวดสเตเตอร์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ แบบ Full pitch และแบบ Short pitch เพื่อเปรียบเทียบผลของความสมดุลของการวางตำแหน่งและคุณสมบัติของขดลวด

2.6.1 การออกแบบขดลวดแบบ Full pitch

ในการออกแบบขดลวดสเตเตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรโดยแบ่งเป็น 3 เฟส 2 ชุดแต่ละชุดวางตำแหน่งขดลวดทำมุมกัน 60 องศาไฟฟ้า จากภาพที่ 2.16(ก)ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส ชุดที่ 1 เริ่มวางขดลวดที่สล็อตช่องที่ 1 และจากภาพที่ 2.16(ข) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2 เริ่มวางขดลวดที่สล็อตช่องที่ 3 โดยออกแบบขดลวดให้มีความกว้างของขดลวดเป็นแบบ Full pitch มีค่ามุม Phase belt เท่ากับ 60 องศาไฟฟ้า



(ก)

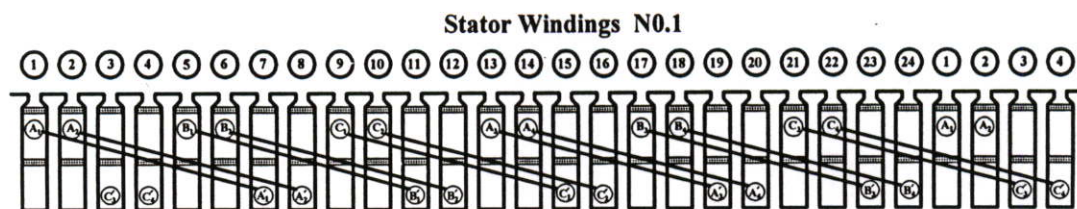


(ข)

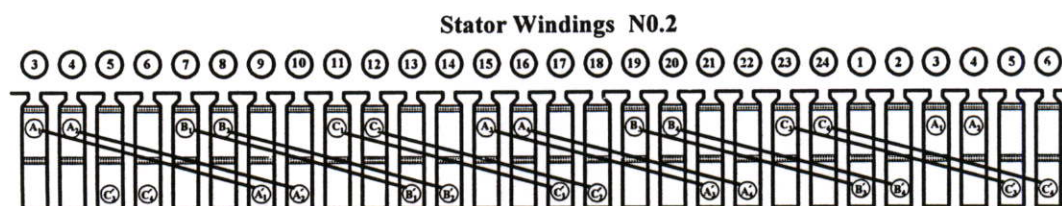
ภาพที่ 2.16 การวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์แบบ Full pitch 6 เฟสแบบสมมาตร

(ก) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1

(ข) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.17 การจัดวางตัวนำในช่องสลีต ขดลวด Full-pitch 6 เฟสแบบสมมาตร

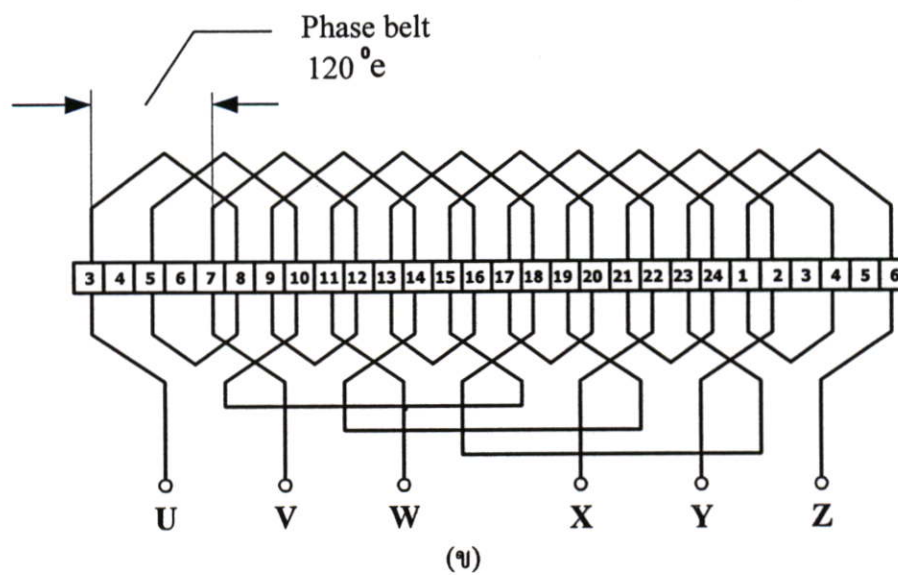
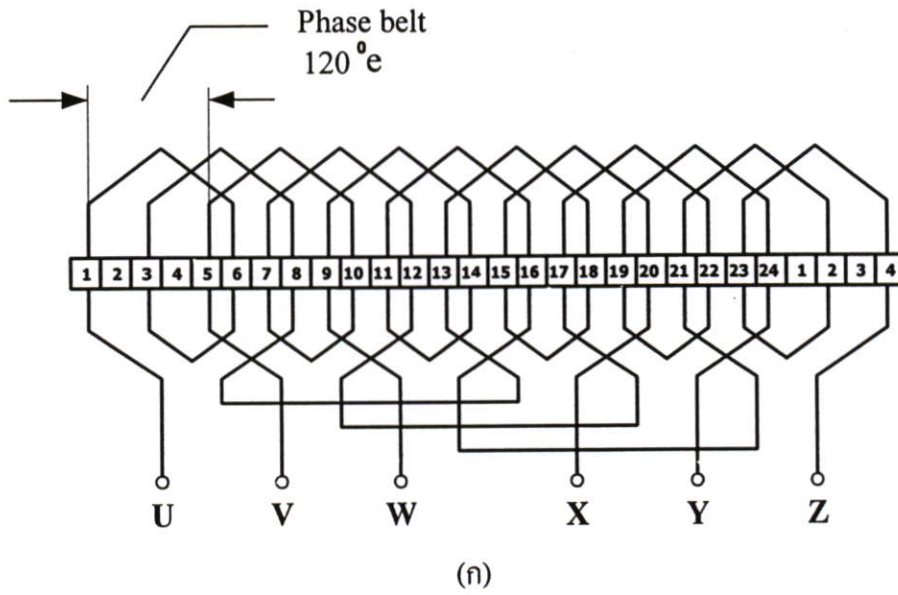
(ก) ขดลวดตัวนำของขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1

(ข) ขดลวดตัวนำของขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2

จากภาพที่ 2.17 การจัดวางขดลวดมีตำแหน่งตั้งนำในช่องสลีตและแนวต่อตัวนำแต่ละขดมีทิศทางเดียวกันทั้ง 2 ชุดจึงมีความสมดุลทั้งโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้า

2.6.2 การออกแบบขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch

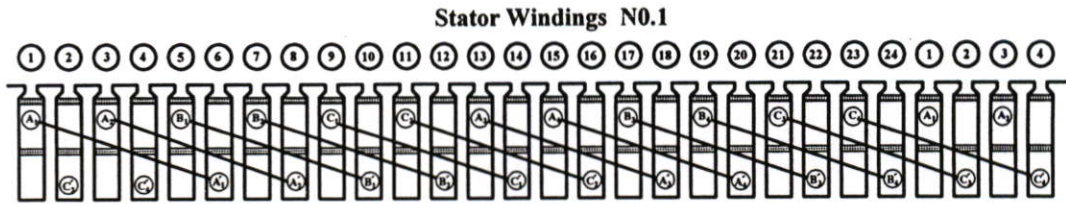
ขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch มีความกว้างของขดลวดน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้าและมีค่ามุม Phase belt เท่ากับ 120 องศาไฟฟ้างดภาพที่ 2.18



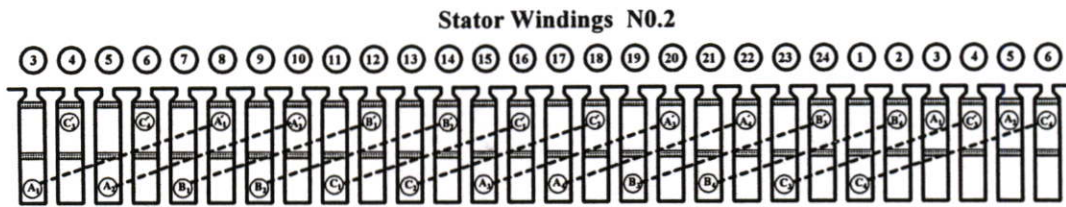
ภาพที่ 2.18 การวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch 6 เฟสแบบสมมาตร

(ก) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1

(ข) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.19 การจัดวางตัวนำในช่องสลีตของขดลวด Short-pitch 6 เฟสแบบสมมาตร

- (ก) ขดลวดตัวนำของขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1
- (ข) ขดลวดตัวนำของขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2

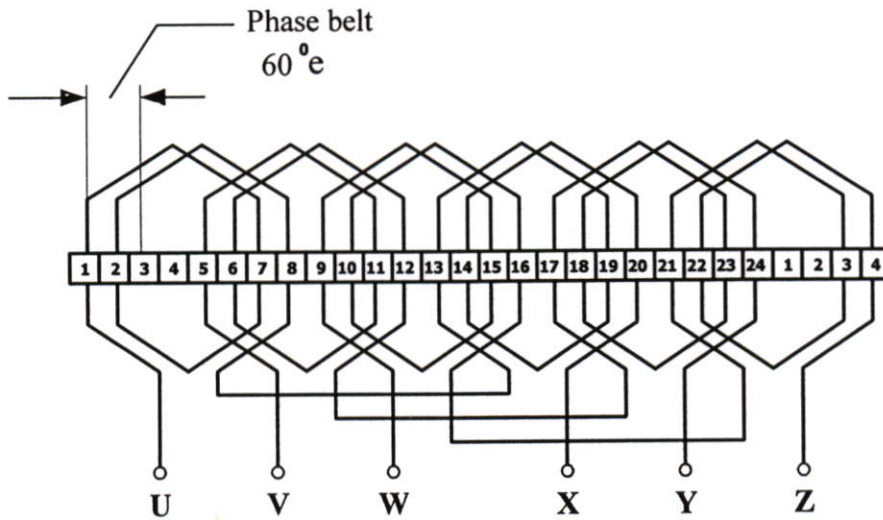
จากภาพที่ 2.19 การจัดวางขดลวดมีตำแหน่งตั้งนำในช่องสลีตและแนวต่อตัวนำแต่ละขดของขดลวด 3 เฟสแต่ละชุดมีทิศทางเดียวกันจึงมีความสมดุลทั้ง โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรสามารถออกแบบให้ความกว้างของขดลวดเป็นได้ทั้งแบบfull-pitch และแบบ Short-pitch

2.7 การปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็น 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

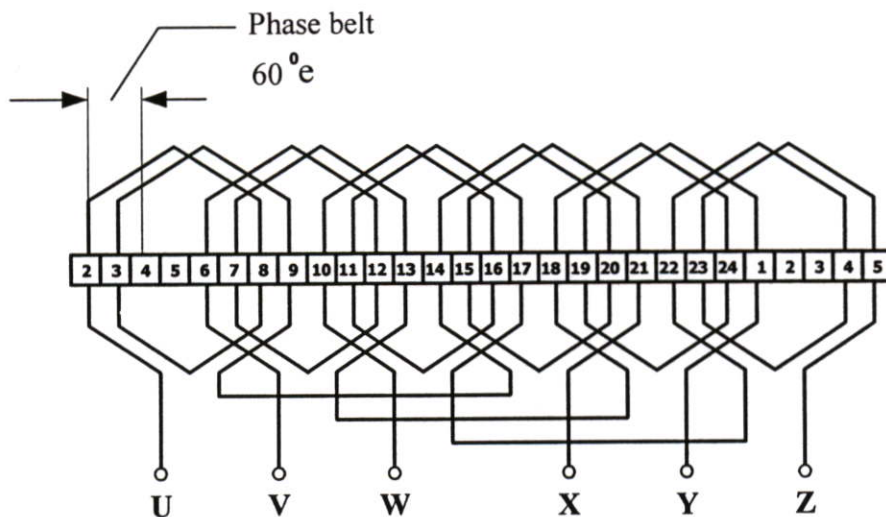
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาดพิกัดกำลังสูงที่ใช้งานเป็นต้นกำลังขับโหลดด้วยความเร็วรอบสูงโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีขั้วแม่เหล็ก(P)จำนวน 2 ขั้วถึง 4 ขั้ว เมื่อนำมาปรับปรุงเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร โดยออกแบบจัดวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์เป็น 3 เฟสจำนวน 2 ชุดแต่ละชุดทำมุมกัน 30 องศาไฟฟ้ามี่ข้อควรคำนึงถึงคือความสมดุลของการวางตำแหน่งและคุณสมบัติของขดลวด ของการออกแบบขดลวดสเตเตอร์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ แบบ Full pitch และแบบ Short pitch เพื่อเปรียบเทียบผลของความสมดุลของการวางตำแหน่งและคุณสมบัติของขดลวด

2.7.1 การออกแบบขดลวดแบบ Full pitch

จากลักษณะการออกแบบขดลวดให้มีความกว้างของขดลวดเป็นแบบ Full pitch มีค่ามุม Phase belt เท่ากับ 60° องศาไฟฟ้าดังภาพที่ 2.20



(ก)



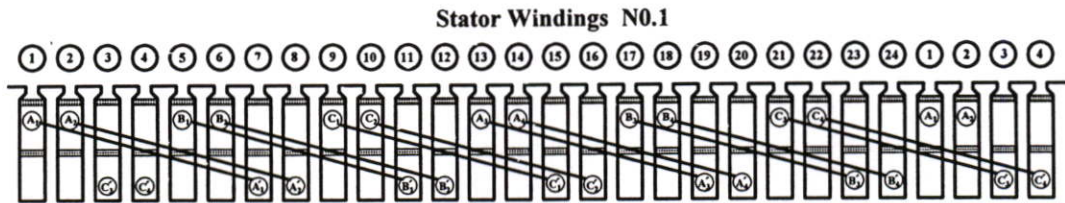
(ข)

ภาพที่ 2.20 การวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์แบบ Full pitch 6 เฟสแบบไม่สมมาตร

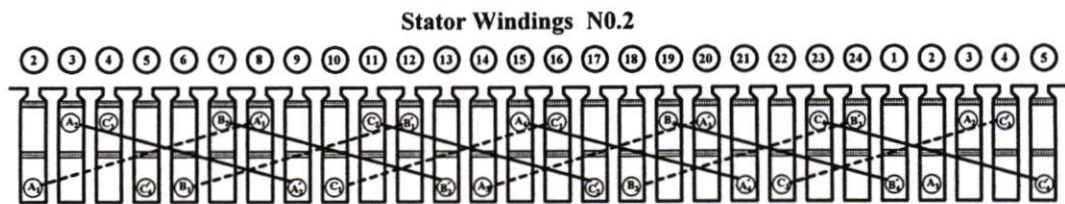
(ก) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1

(ข) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2

จากภาพที่ 2.20(ก) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส ชุดที่ 1 เริ่มวางขดลวดที่สลีตช่องที่ 1 และจากภาพที่ 2.20(ข) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส ชุดที่ 2 เริ่มวางขดลวดที่สลีตช่องที่ 2 ทำให้ขดลวดขดแรกของชุดที่ 2 ทับซ้อนกับขดลวดที่ 2 ของชุดที่ 1 เมื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 2.21



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.21 การจัดวางตัวนำในช่องสลีตขดลวด Full pitch 6 เฟสแบบ ไม่สมมาตร

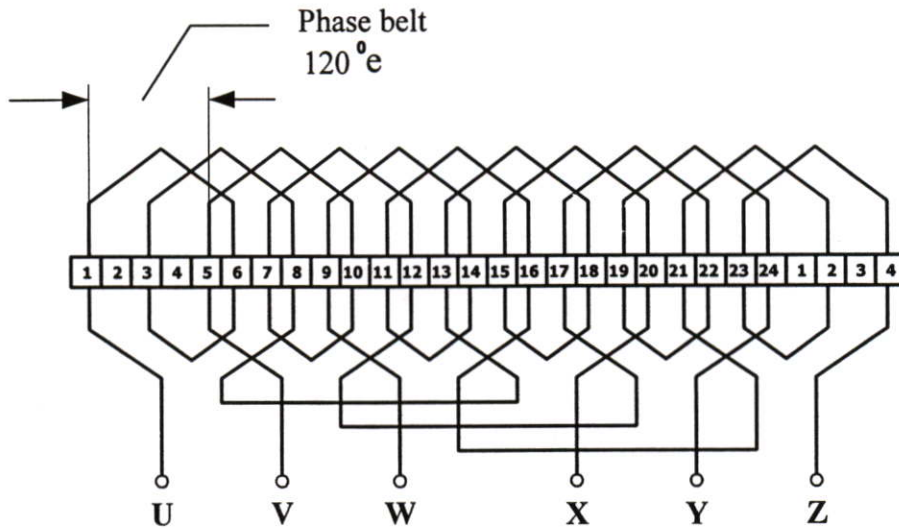
(ก) ขดลวดตัวนำของขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1

(ข) ขดลวดตัวนำของขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2

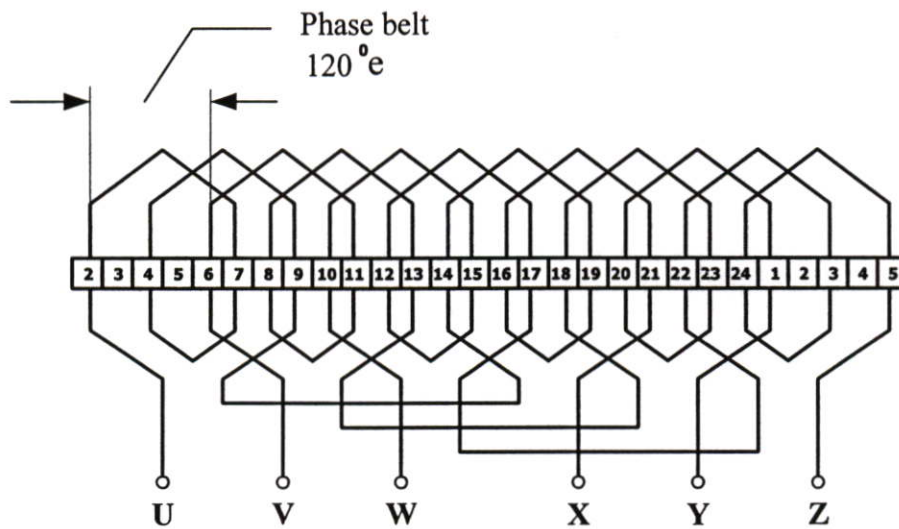
จากภาพที่ 2.21 (ก) ขดลวดสเตเตอร์ชุดที่ 1 มีการจัดวางตำแหน่งตัวนำในช่องสลีตได้สมดุล โดยขดลวดแต่ละขดได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กรั่วในช่องสลีต (Stator leakage flux) เท่ากันเพราะตำแหน่ง Coil side ขดลวดแต่ละขดจะอยู่ในช่องสลีตส่วนบนและส่วนล่างสลับกันและมีแนวการต่อตัวนำแต่ละขดเป็นทิศทางเดียวกัน ส่วนการวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์ชุดที่ 2 ดังภาพที่ 2.21(ข) ขดลวดสเตเตอร์จะทับซ้อนกันกับขดลวดสเตเตอร์ชุดที่ 1 ในตำแหน่งช่องสลีตที่ 2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22 และ 24 เมื่อสลับตำแหน่ง Coil side ขดลวดแต่ละขดให้อยู่ในช่องสลีตส่วนบนและส่วนล่างทำให้มีการจัดวางตัวนำในช่องสลีตแต่ละขดมีทิศทางแตกต่างจากขดลวดสเตเตอร์ชุดที่ 1 ความยาวของขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสที่ออกแบบในลักษณะนี้จะไม่มีความสมดุลของขดลวด

2.7.2 การออกแบบขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch

ขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch มีความกว้างของขดลวดน้อยกว่า 180 องศาไฟฟ้าและมีค่ามุม Phase belt เท่ากับ 120 องศาไฟฟ้าดังภาพที่ 2.22



(ก)



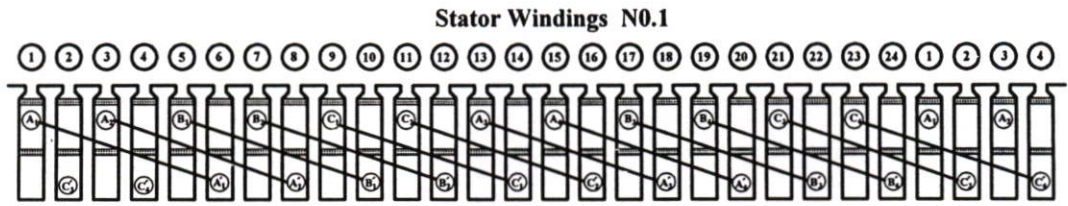
(ข)

ภาพที่ 2.22 การวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์แบบ Short pitch 6 เฟสแบบไม่สมมาตร

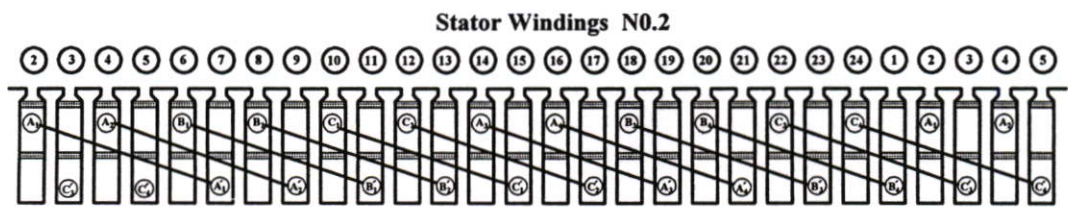
(ก) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1

(ข) ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2

จากภาพที่ 2.22 ขดลวดแต่ละขดวางทำมุมกัน เท่ากับ 30 องศาไฟฟ้าทำให้ขดลวดสเตเตอร์ของชุดที่ 1 กับชุดที่ 2 ไม่ทับซ้อนกันดังภาพที่ 2.23



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.23 การจัดวางตัวนำในช่องสล็อตขดลวด Short-pitch 6 เฟสแบบไม่สมมาตร

(ก) ขดลวดตัวนำของขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1

(ข) ขดลวดตัวนำของขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2

จากภาพที่ 2.23 การจัดวางขดลวดมีตำแหน่งตั้งนำในช่องสล็อตและแนวต่อตัวนำแต่ละขดมีทิศทางเดียวกันทั้ง 2 ชุดจึงมีความสมดุลทั้งโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้า

2.8 สรุป

ในเนื้อหาบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสเพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงการปรับปรุงมอเตอร์ 3 เฟสเป็น 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรและไม่สมมาตรเพื่อลดพิสัยกระแสแต่ละเฟสได้ รวมทั้งการออกแบบการจัดวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์ให้เกิดความสมดุลของโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 6 เฟสพร้อมพื้นฐานวิธีการควบคุมสามารถเลือกการควบคุมทั้งขานการควบคุมแรงบิดคงที่และขานกำลังคงที่

บทที่ 3

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิตซ์ต่ำ

3.1 บทนำ

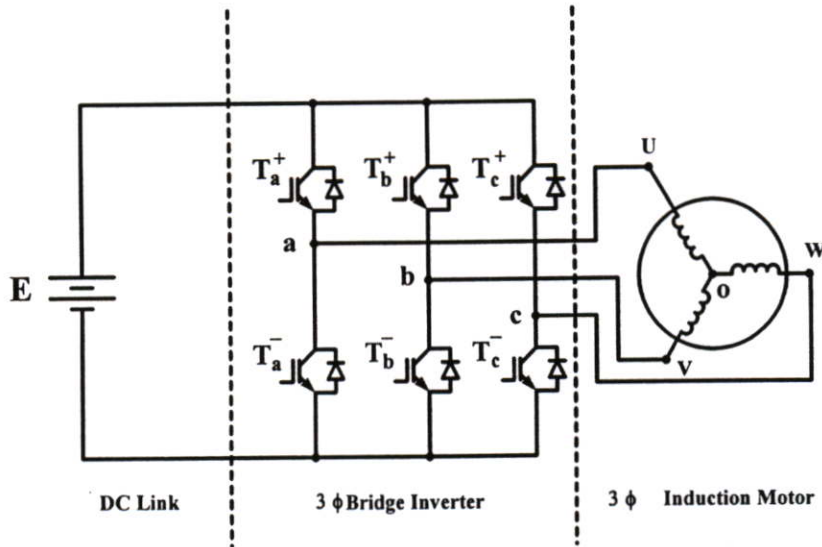
การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ให้มีความเร็วรอบสูง โดยการปรับความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ให้สูงขึ้น ดังนั้นการใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่สวิตซ์สูงด้วยเทคนิคผสมสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (PWM : Pulse Width Modulation) จึงมีข้อจำกัดเนื่องจากพิกัดความถี่และกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยเหตุนี้การนำอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าความถี่สวิตซ์ต่ำจึงมีความจำเป็นต้องนำมาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ให้มีความเร็วรอบสูง โดยการปรับเพิ่มความถี่สูงขึ้น แต่เนื่องจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าความถี่สวิตซ์ต่ำมีลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำมีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสเป็นรูปคลื่น 6 สเต็ป การใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสรูปคลื่น 6 สเต็ป 2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรสามารถลดพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้แต่ไม่สามารถปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสให้มีสเต็ปรูปคลื่นสูงขึ้นเพื่อลดค่ากำลังไฟฟ้ายูเอชไอจากฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำได้ ดังนั้นการใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ชุดต่ออนุกรมกันโดยมีการสวิตซ์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังให้รูปคลื่น 6 สเต็ปมีมุมต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร ซึ่งระบบนี้จะใช้ร่วมกันกับรีแอคเตอร์คัปปลิงต่ออนุกรมระหว่างอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรนอกจากลดพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ยังสามารถปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสเป็นรูปคลื่น 12 สเต็ป ลดฮาร์โมนิกส์แรงดันไฟฟ้าอันดับ 5 และ 7 ได้

ดังนั้นในบทนี้เป็นการกล่าวถึงหลักการทํางานและข้อดี ข้อเสีย ของอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรและไม่สมมาตรของทั้ง 2 ระบบเพื่อนำไปสู่การพัฒนาบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าความถี่สวิตซ์ต่ำให้มีลักษณะรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ยิ่งขึ้น

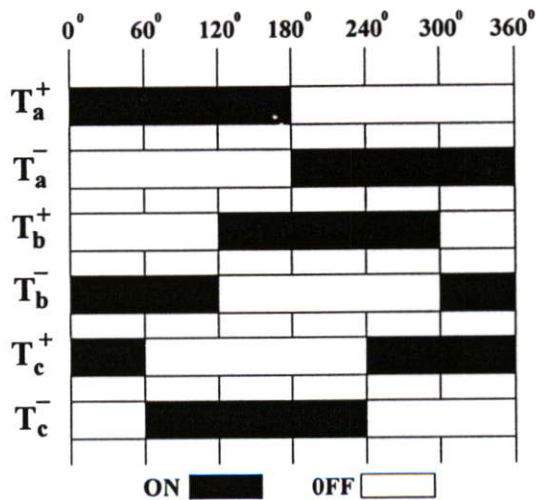
3.2 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 6 สเต็ป

3.2.1 หลักการทำงาน

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาดใหญ่ ด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ความถี่สวิตซ์ต่ำ โดยความถี่การสวิตซ์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเท่ากับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังภาพที่ 3.1

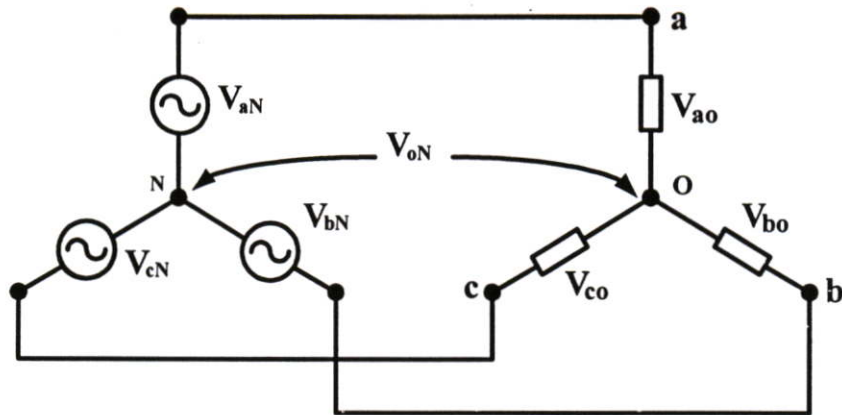


(ก) วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส



(ข) แพทเทิร์นการสวิตซ์กระแสอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ภาพที่ 3.1 ระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส



ภาพที่ 3.2 วงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่อกับ โหลด 3 เฟส

จากภาพที่ 3.1 การสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละเฟสมีช่วงคาบเวลา ωt เท่ากับ π แรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แต่ละเฟสจากวงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสต่อกับ โหลด 3 เฟส ดังภาพที่ 3.2 ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสดังสมการ (3.1)

$$V_{aN} = V_{bN} = V_{cN} = \frac{E}{2} \quad (3.1)$$

จากสมการ (3.1) การสวิตช์กระแสแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้างภาพที่ 3.3(ก) และแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสมีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้างภาพที่ 3.3(ข) หาได้จากสมการ

$$V_{ab} = V_{aN} - V_{bN} \quad (3.2)$$

$$V_{bc} = V_{bN} - V_{cN} \quad (3.3)$$

$$V_{ca} = V_{cN} - V_{aN} \quad (3.4)$$

ดังนั้นการหาค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่ โหลดจากวงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ต่อกับ โหลด 3 เฟส ภาพที่ 3.2

$$V_{aN} = V_{ao} + V_{oN} \quad (3.5)$$

$$V_{bN} = V_{bo} + V_{oN} \quad (3.6)$$

$$V_{cN} = V_{co} + V_{oN} \quad (3.7)$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของโหลดสมดุลโดยมีค่าเท่ากันผลรวมของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส จึงมีค่าเท่ากับ 0 ดังสมการ (3.8)

$$V_{ao} + V_{bo} + V_{co} = 0 \quad (3.8)$$

ผลรวมของสมการ (3.5), (3.6), (3.7) หาว่า V_{oN} ได้จากสมการ

$$V_{oN} = \frac{1}{3}(V_{aN} + V_{bN} + V_{cN}) \quad (3.9)$$

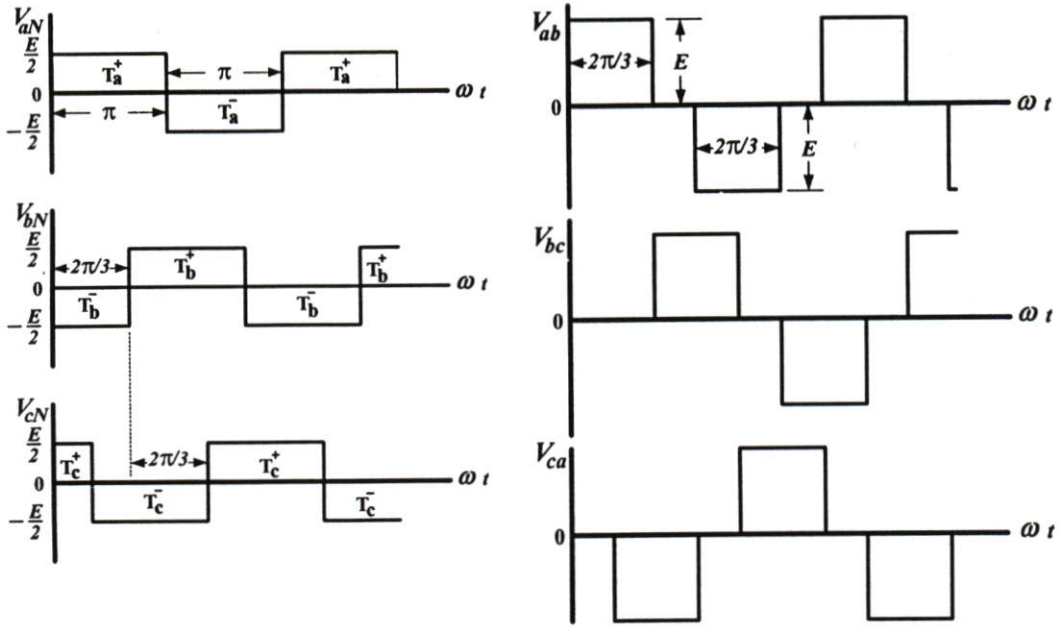
นำค่า V_{oN} จากสมการ (3.9) หาว่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสมีรูปคลื่น 6 สเต็ป V_{ao} ดังภาพที่ 3.3(ค) หาได้จากสมการ

$$V_{ao} = V_{aN} - V_{oN} \quad (3.10)$$

$$V_{bo} = V_{bN} - V_{oN} \quad (3.11)$$

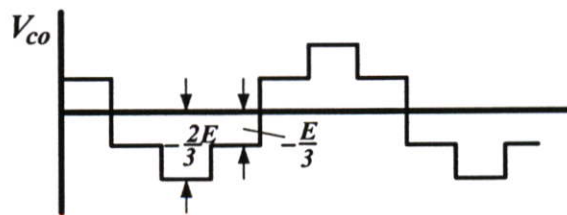
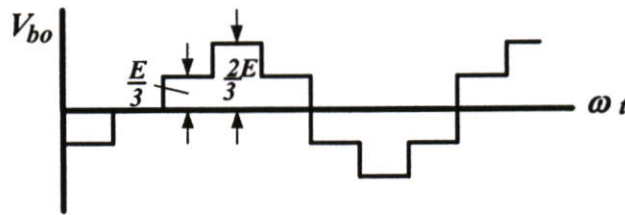
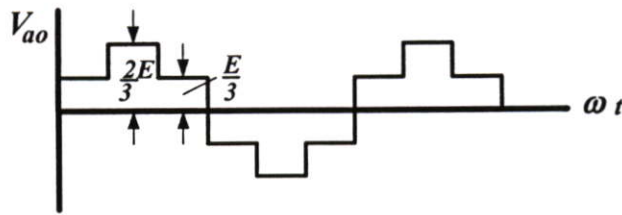
$$V_{co} = V_{cN} - V_{oN} \quad (3.12)$$

จากภาพที่ 3.3(ก) แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่าครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่าย ดี.ซี. ถึงเท่ากับ $\frac{E}{2}$ และแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสมีค่าเท่ากับ E นำหน้าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส 30 องศา ไฟฟ้าดังภาพที่ 3.3(ก) และ (ข) โดยแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่โหลดมีสูงสุดค่าเท่ากับ $\frac{2E}{3}$



(ก) แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์

(ข) แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสที่โหลด



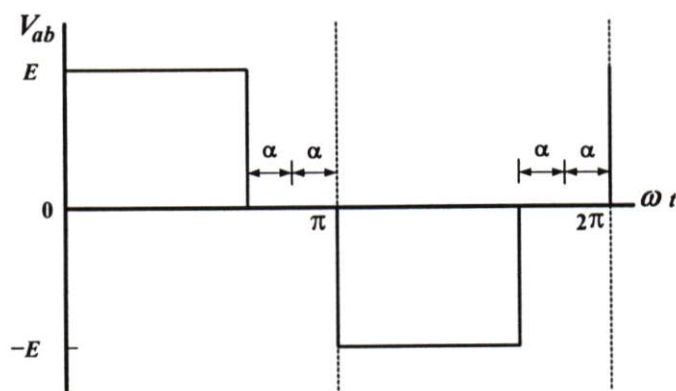
(ค) แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่โหลด

ภาพที่ 3.3 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

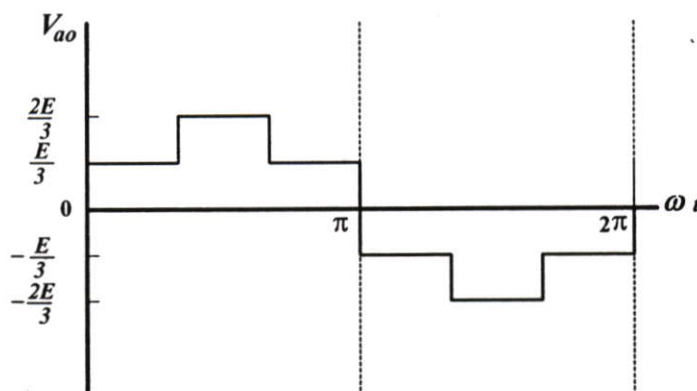
3.2.2 การหาค่าความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าดี.ซี.เชื่อมโยงกับพิกัดแรงดันไฟฟ้า

ความถี่มูลฐาน

จากลักษณะรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส (Line to Line) ดังภาพที่ 3.4(ก) และรูปคลื่น 6 สเต็ปแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (Line to Neutral) ดังภาพที่ 3.4 (ข)



(ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส



(ข) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส

ภาพที่ 3.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสสำหรับหาค่าแอมพลิจูดแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐาน

หาค่าแอมพลิจูดแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐาน (Fundamental) แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส และ แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส ได้จากสมการ

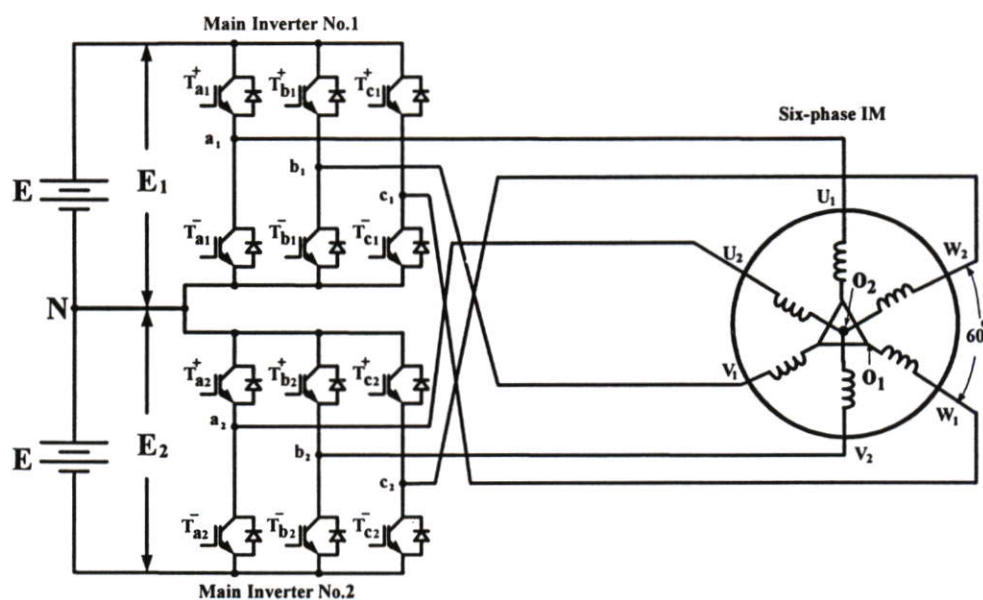
$$V_{ao} = \left(\frac{4E}{\pi} \right) \cos \alpha \quad (3.13)$$

$$V_{ao} = \left[\frac{2E}{3\pi} \left[2 + \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] \right] \quad (3.14)$$

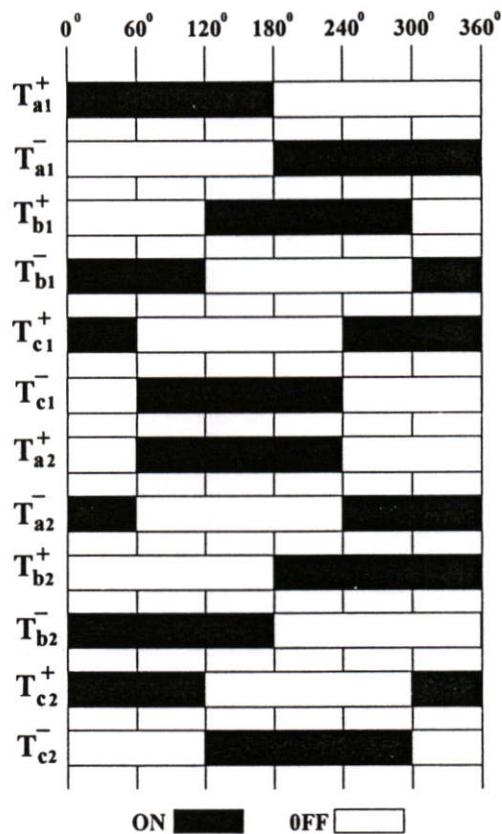
3.3 การใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร

3.3.1 หลักการทำงาน

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ชุดต่ออนุกรมกันดังภาพที่ 3.5 โดยมีการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างเฟสกัน 60 องศาไฟฟ้าแบ่งโหมคการทำงานในช่วงคาบเวลา 1 ไมโครวินาทีได้ 6 โหมค โดยแต่ละโหมคมีช่วงคาบเวลาเป็นมุม 60 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีการสวิตช์กระแสดังภาพที่ 3.6 และมีสภาวะนำกระแสในแต่ละโหมคดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.5 วงจรระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร



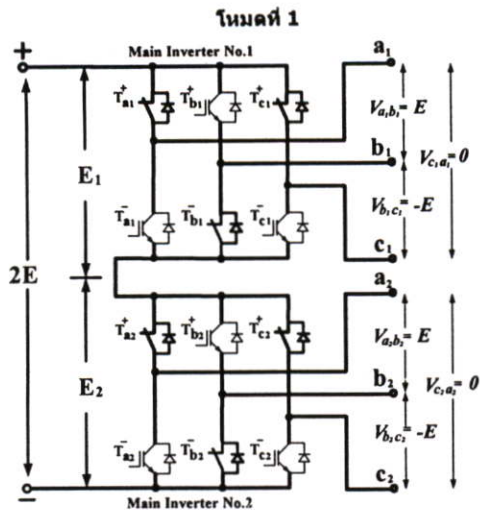
ภาพที่ 3.6 แพทเทิร์นการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ตารางที่ 3.1 สถานะนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟส

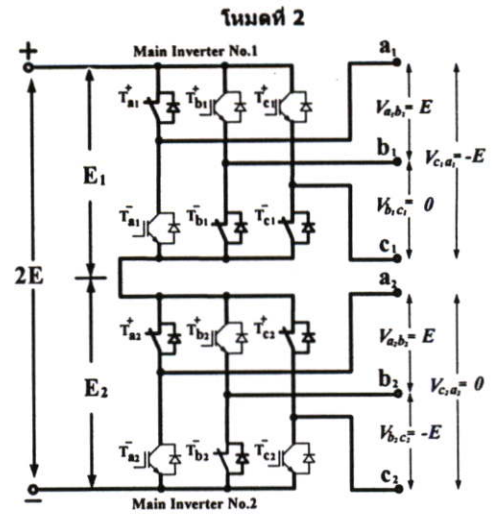
สมมาตร

โหมด	ช่วงคาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง นำกระแส
1	0 - 60	$T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^-, T_{b2}^-, T_{c2}^+$
2	60 - 120	$T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^-, T_{c2}^+$
3	120 - 180	$T_{a1}^+, T_{b1}^+, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^-, T_{c2}^-$
4	180 - 240	$T_{a1}^-, T_{b1}^+, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^-$
5	240 - 300	$T_{a1}^-, T_{b1}^+, T_{c1}^+, T_{a2}^-, T_{b2}^+, T_{c2}^-$
6	300 - 360	$T_{a1}^-, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^-, T_{b2}^+, T_{c2}^+$

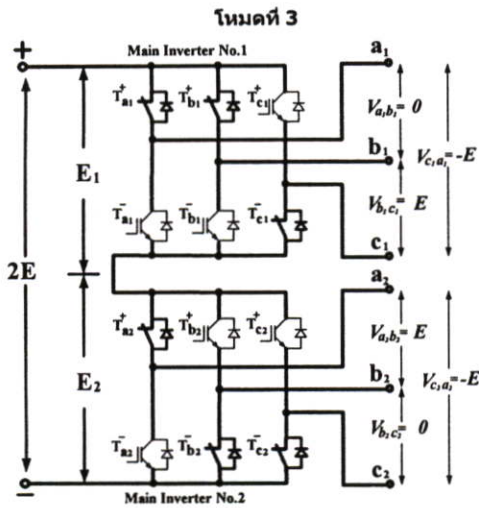
เมื่อ $E_1 = E_2 = E$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสจากการทำงานทั้ง 6 โหมดดังภาพที่ 3.7



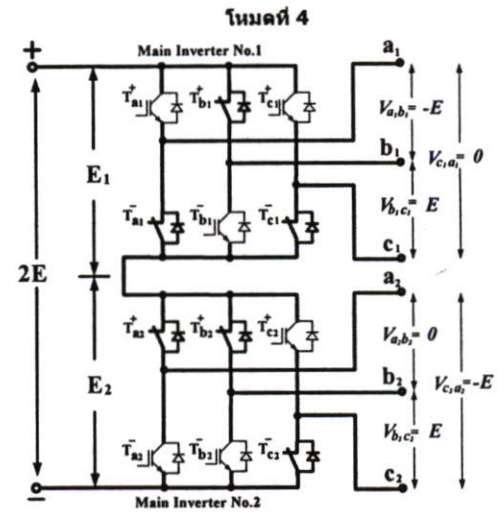
(ก)



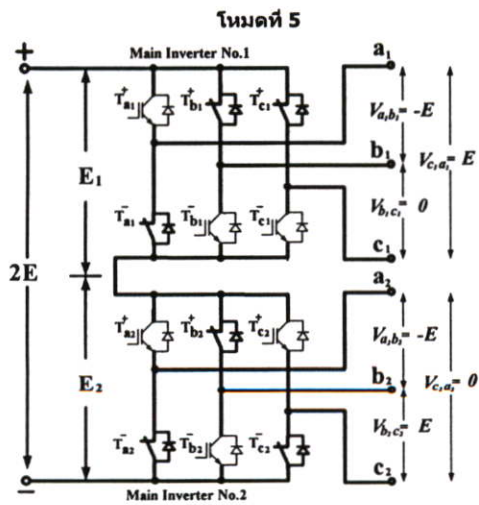
(ข)



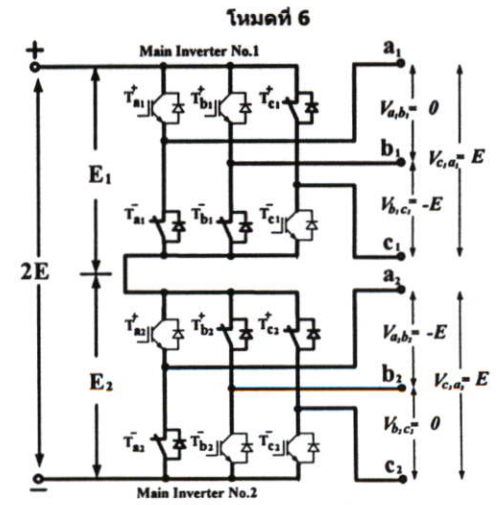
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 3.7 โหมดการทำงานเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสวิตช์กระแสตามตารางที่ 3.1

จากภาพที่ 3.7 สามารถพิจารณาแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส (Line to line) ของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดจากสภาวะนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในแต่ละโหมดการทำงานจากตารางที่ 3.1 ได้ดังต่อไปนี้

1. โหมดการทำงานที่ 1 จากภาพที่ 3.7(ก) ในช่วงคาบเวลา 0-60 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^-$ และ T_{c2}^+ มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = E, V_{b1c1} = -E, V_{c1a1} = 0$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = E, V_{b2c2} = -E, V_{c2a2} = 0$$

2. โหมดการทำงานที่ 2 จากภาพที่ 3.7(ข) ในช่วงคาบเวลา 60-120 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^-$ และ T_{c2}^+ มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = E, V_{b1c1} = 0, V_{c1a1} = -E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = E, V_{b2c2} = -E, V_{c2a2} = 0$$

3. โหมดการทำงานที่ 3 จากภาพที่ 3.7(ค) ในช่วงคาบเวลา 120-180 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^+, T_{b1}^+, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^-$ และ T_{c2}^- มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = 0, V_{b1c1} = E, V_{c1a1} = -E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = E, V_{b2c2} = 0, V_{c2a2} = -E$$

4. โหมคการทำงานที่ 4 จากภาพที่ 3.7(ง) ในช่วงคาบเวลา 180-240 องศาไฟฟ้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{a1}^- , T_{b1}^+ , T_{c1}^- , T_{a2}^+ , T_{b2}^+ และ T_{c2}^- มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสถานะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = -E, V_{b1c1} = E, V_{c1a1} = 0$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = 0, V_{b2c2} = E, V_{c2a2} = -E$$

5. โหมคการทำงานที่ 5 จากภาพที่ 3.7(จ) ในช่วงคาบเวลา 240-300 องศาไฟฟ้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{a1}^- , T_{b1}^+ , T_{c1}^+ , T_{a2}^- , T_{b2}^+ และ T_{c2}^- มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสถานะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = -E, V_{b1c1} = 0, V_{c1a1} = E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = -E, V_{b2c2} = E, V_{c2a2} = 0$$

6. โหมคการทำงานที่ 1 จากภาพที่ 3.7(ฉ) ในช่วงคาบเวลา 300-360 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{a1}^+ , T_{b1}^- , T_{c1}^+ , T_{a2}^- , T_{b2}^- และ T_{c2}^+ มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสถานะนำกระแส

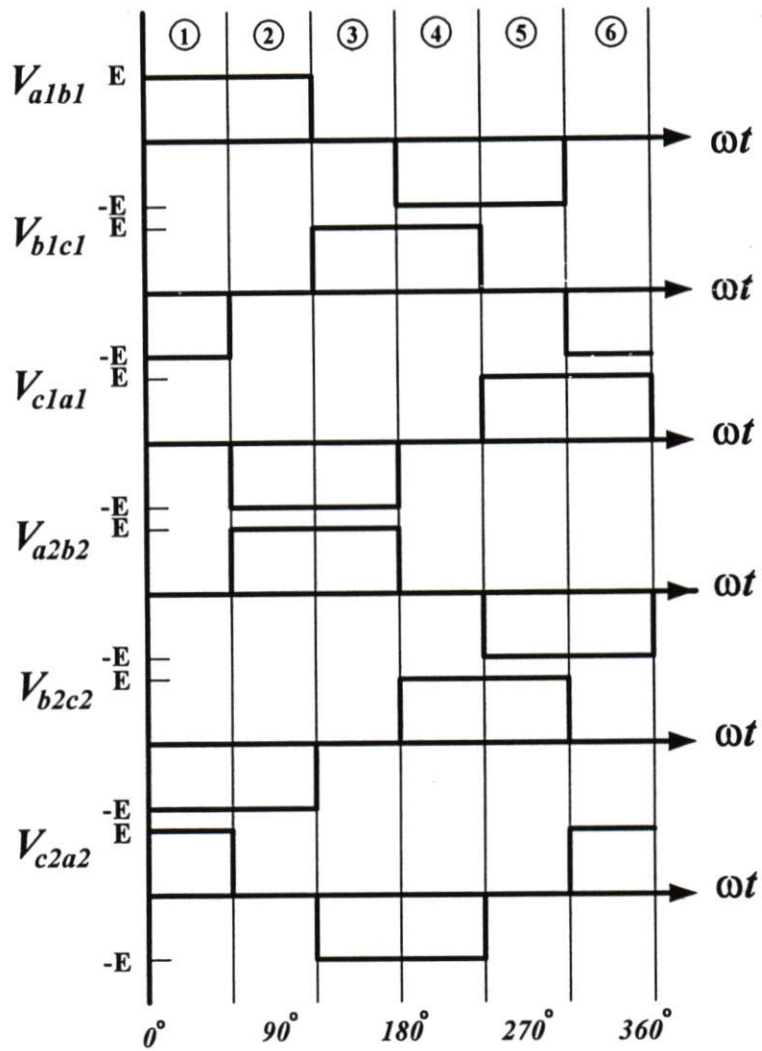
แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = E, V_{b1c1} = -E, V_{c1a1} = 0$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

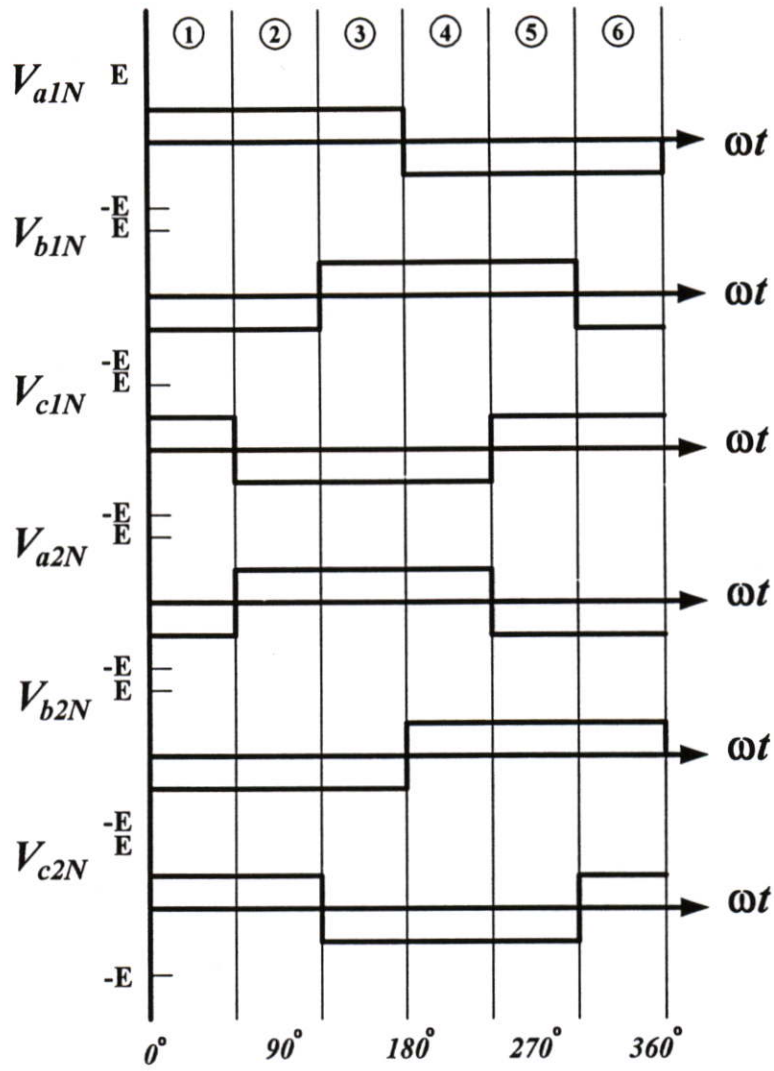
$$V_{a2b2} = 0, V_{b2c2} = -E, V_{c2a2} = E$$

ผลของการสวิตช์กระแสอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากโหมคการทำงานทั้ง 6 โหมคใน 1 ไซเคิลดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบสมมาตร

รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบสมมาตรจากวงจรสมมูลย์ 3 เฟสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสทั้ง 2 ชุดมีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ $\frac{E}{2}$ ดังภาพที่ 3.9



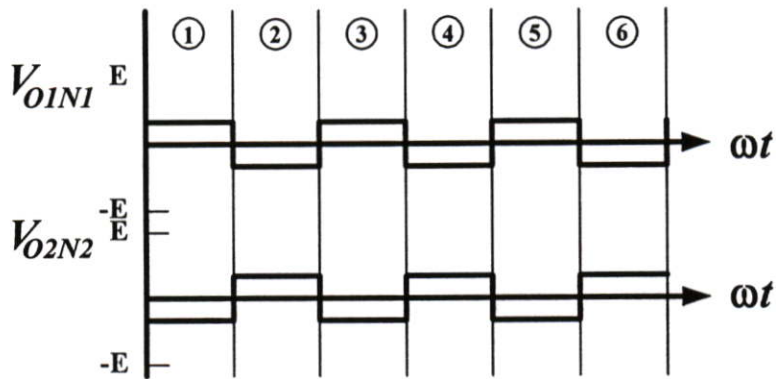
ภาพที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบสมมาตร

เมื่อโหลดของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแต่ละชุดสมมูลย์แรงดันไฟฟ้าจากจุดร่วมของโหลด (O_1 และ O_2) ซึ่งต่อแบบสตาร์ (Star connection) เทียบกับจุดร่วมของวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแต่ละชุด (N_1 และ N_2) หากค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{O_1N_1}$ และ $V_{O_2N_2}$ ได้จากสมการ

$$V_{O_1N_1} = \frac{1}{3}(V_{a1N_1} + V_{b1N_1} + V_{c1N_1}) \quad (3.15)$$

$$V_{O_2N_2} = \frac{1}{3}(V_{a2N_2} + V_{b2N_2} + V_{c2N_2}) \quad (3.16)$$

แทนค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแต่ละชุดจากภาพที่ 3.9 หาค่าแรงดันไฟฟ้า V_{O1N1} และ V_{O2N2} จากสมการ (3.15) และ (3.16) ในแต่ละโหมคทั้ง 6 โหมคมีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ $\frac{E}{6}$ และ $-\frac{E}{6}$ ตามลำดับ ได้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุดร่วมของโหมคกับจุดร่วมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสแต่ละชุดจากวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบสมมาตร

หาค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดได้จากสมการ (3.17), (3.18), (3.19), (3.20), (3.21) และ (3.22) ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรดังภาพที่ 3.11 มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละโหมคดังตารางที่ 3.2

$$V_{a1o1} = V_{a1N1} - V_{O1N1} \quad (3.17)$$

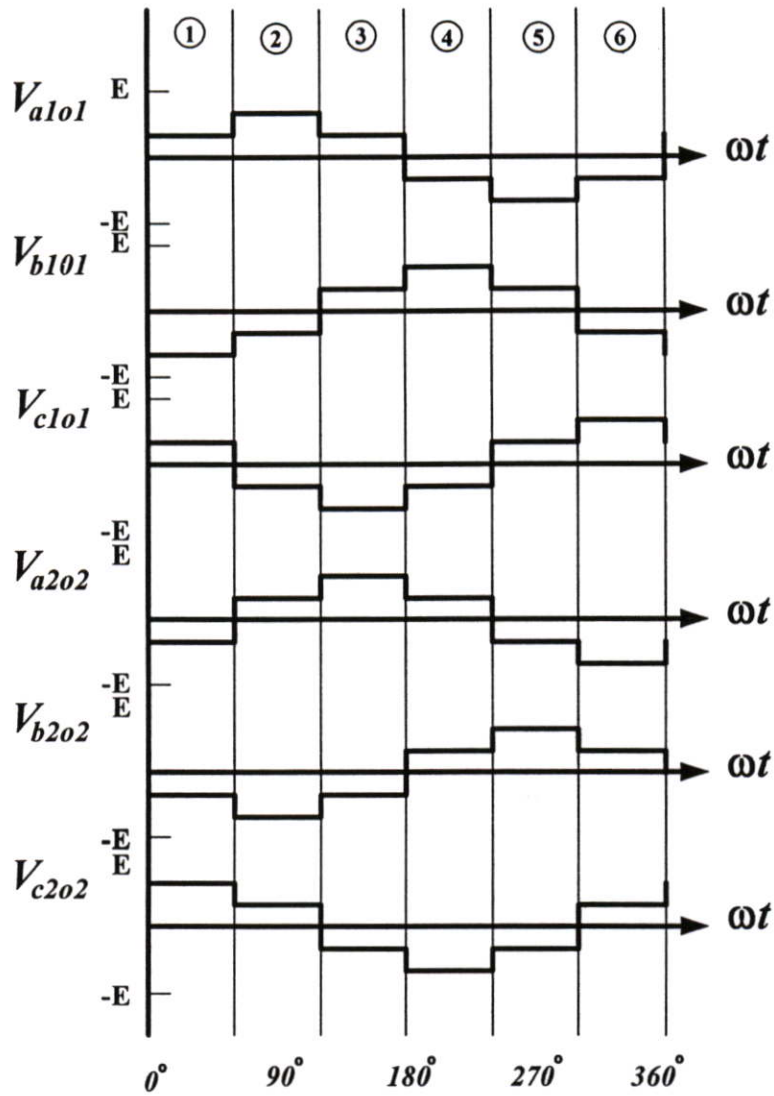
$$V_{b1o1} = V_{b1N1} - V_{O1N1} \quad (3.18)$$

$$V_{c1o1} = V_{c1N1} - V_{O1N1} \quad (3.19)$$

$$V_{a2o2} = V_{a2N2} - V_{O2N2} \quad (3.20)$$

$$V_{b2o2} = V_{b2N2} - V_{O2N2} \quad (3.21)$$

$$V_{c2o2} = V_{c2N2} - V_{O2N2} \quad (3.22)$$



ภาพที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร

ตารางที่ 3.2 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตร

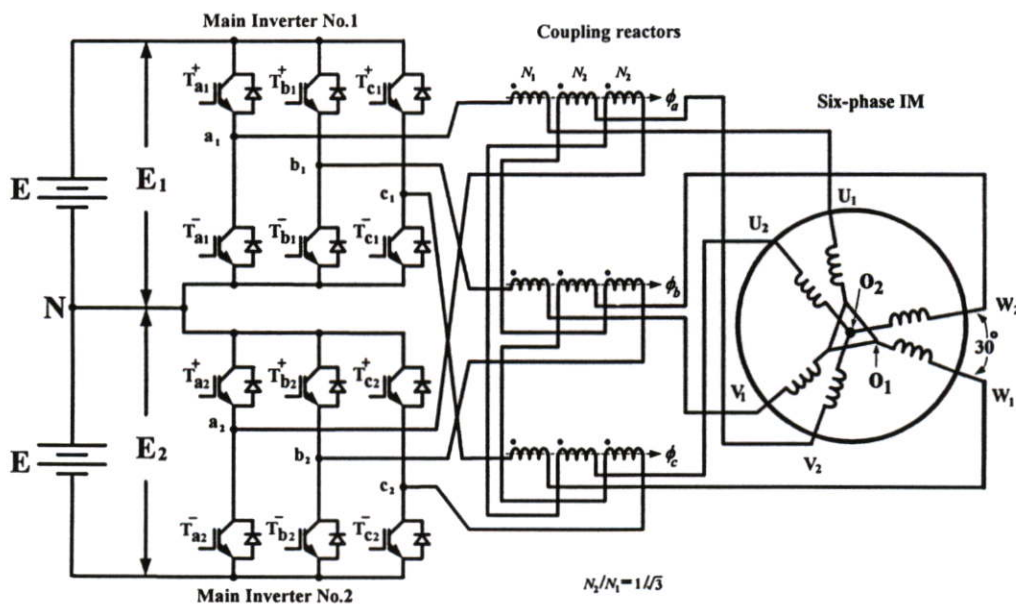
โหมด	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า	
		V_{a1o1}/E	V_{a2o2}/E
1	0 - 60	$1/3$	$-1/3$
2	60 - 120	$2/3$	$1/3$
3	120 - 180	$1/3$	$2/3$
4	180 - 240	$-1/3$	$1/3$
5	240 - 300	$-2/3$	$-1/3$
6	300 - 360	$-1/3$	$-2/3$

จากการปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็น 6 เฟสแบบกระจายเฟสสมมาตรสามารถลดกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้แต่ไม่สามารถปรับปรุงรูปคลื่นให้มีจำนวนสเต็ปในแต่ละไซเคิลสูงขึ้นได้เพราะรูปคลื่นแต่ละของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสยังเป็นรูปคลื่น 6 สเต็ป ดังนั้นการหาค่าความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้า ดี.ซี. เชื่อมโยงกับพิกัดแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานหาได้จากสมการ (3.14) เช่นเดียวกันกับระบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสรูปคลื่น 6 สเต็ป

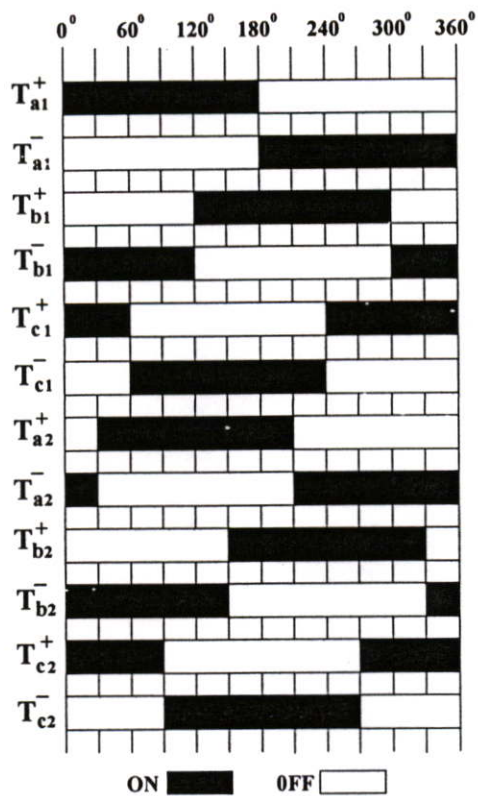
3.4 การใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

3.4.1 หลักการทำงาน

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ชุดต่ออนุกรมกันดังภาพที่ 3.12 โดยมีการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้าแบ่งโหมดการทำงานในช่วงคาบเวลา 1 ไซเคิลได้ 12 โหมด โดยแต่ละโหมดมีช่วงคาบเวลาเป็นมุม 30 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีการสวิตช์กระแสดังภาพที่ 3.13 และมีสภาวะนำกระแสในแต่ละโหมดดังตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.12 วงจรระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

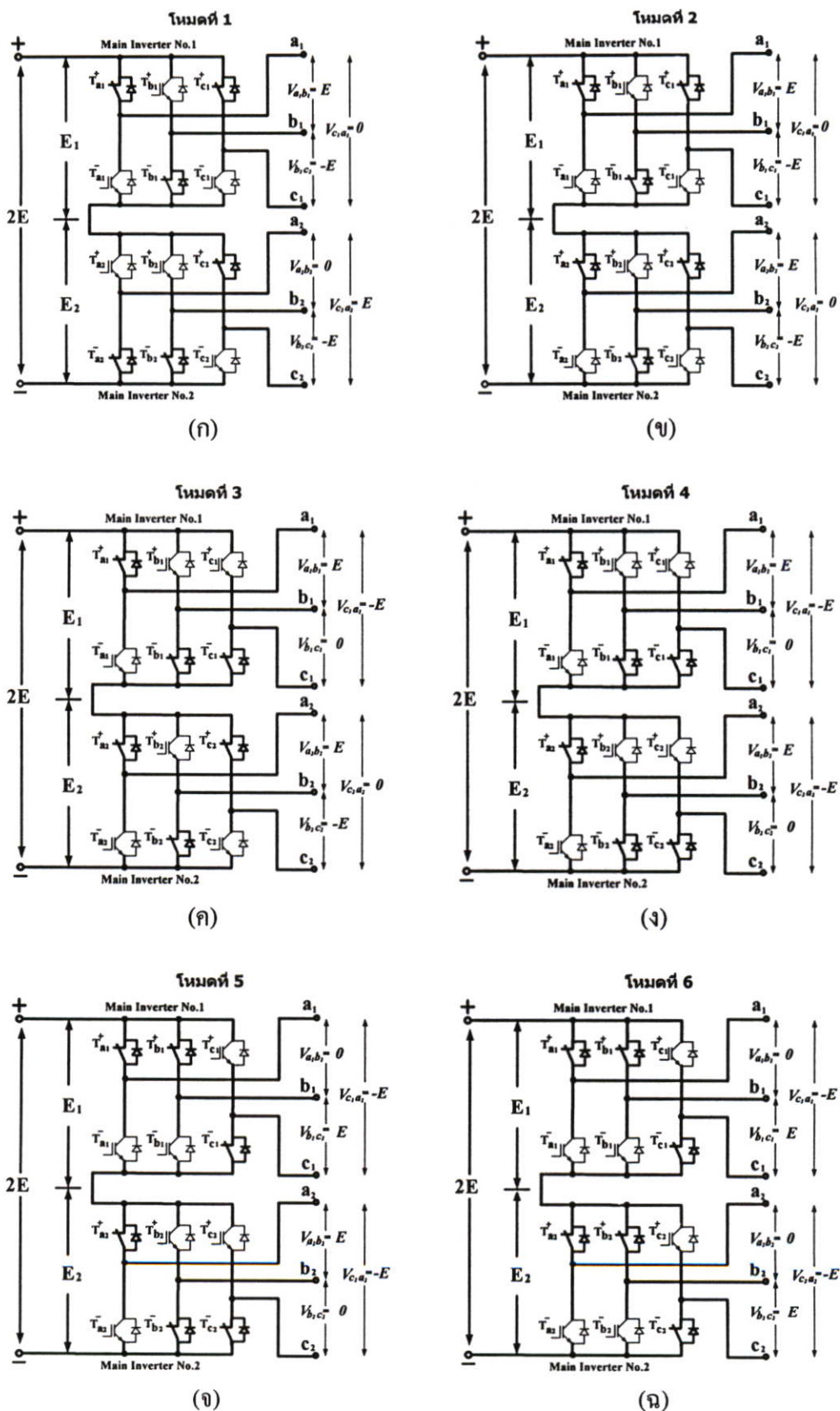


ภาพที่ 3.13 แพทเทิร์นการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

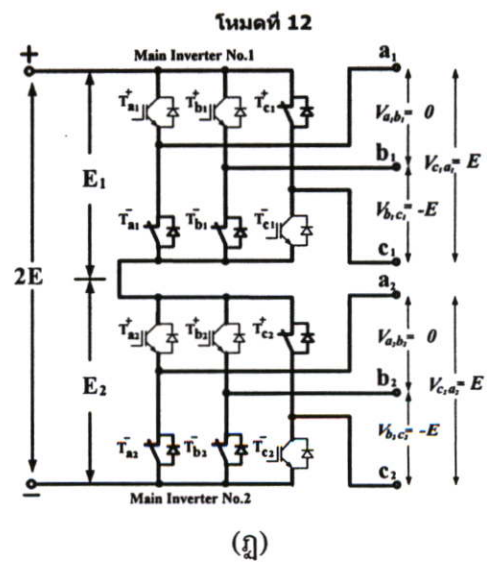
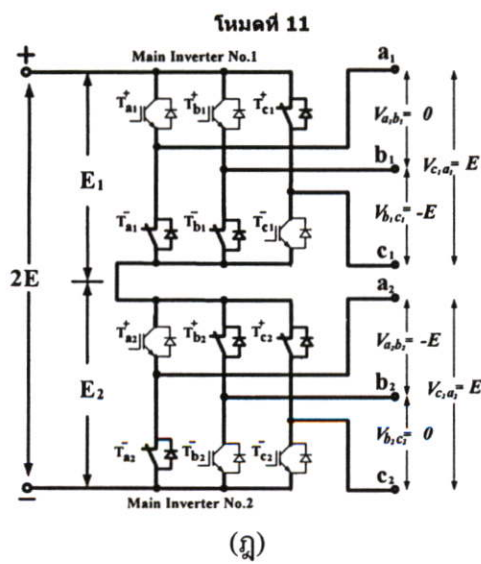
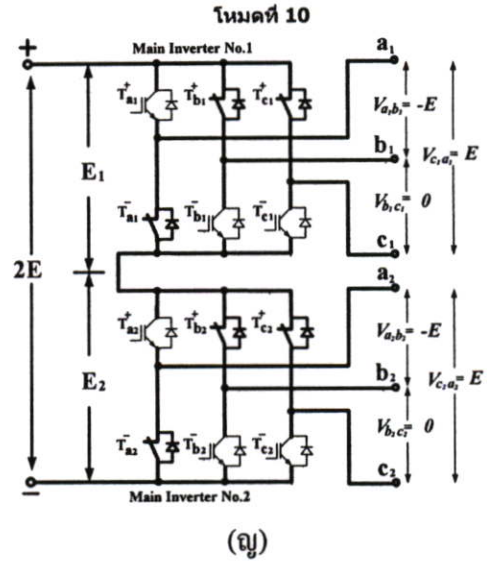
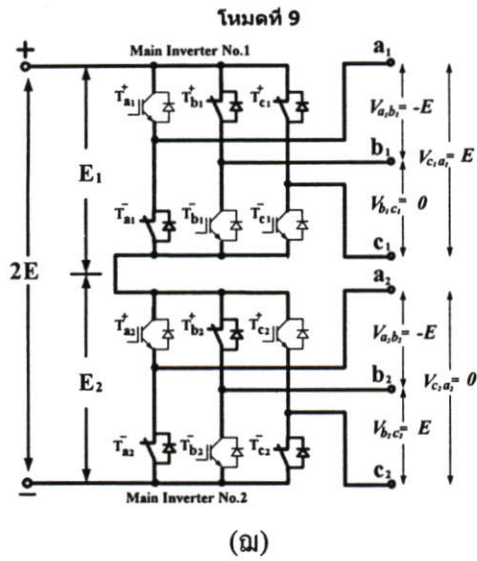
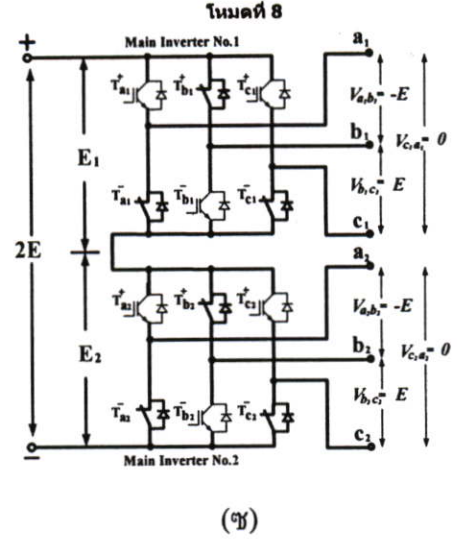
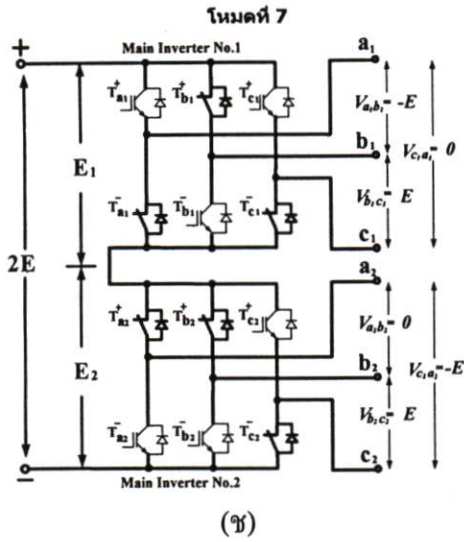
ตารางที่ 3.3 สถานะนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟส
ไม่สมมาตร

โหมด	ช่วงคาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง นำกระแส
1	0 - 30	$T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^-, T_{b2}^-, T_{c2}^+$
2	30 - 60	$T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^-, T_{c2}^+$
3	60 - 90	$T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^+$
4	90 - 120	$T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^-, T_{c2}^+$
5	120 - 150	$T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^+$
6	150 - 180	$T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^+$
7	180 - 210	$T_{a1}^-, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^+$
8	210 - 240	$T_{a1}^-, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^+$
9	240 - 270	$T_{a1}^-, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^+$
10	270 - 300	$T_{a1}^-, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^+$
11	300 - 330	$T_{a1}^-, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^+$
12	330 - 360	$T_{a1}^-, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^+, T_{c2}^+$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสจากการทำงานทั้ง 12 โหมดดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 โหมดการทำงานเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสวิตช์กระแสตามตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.14 (ต่อ)

จากภาพที่ 3.14 สามารถพิจารณาแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส (Line to line) ของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดจากสภาวะนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในแต่ละโหมดการทำงานจากตารางที่ 3.3 ได้ดังต่อไปนี้

1. โหมดการทำงานที่ 1 จากภาพที่ 3.14(ก) ในช่วงคาบเวลา 0-30 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^-, T_{b2}^-$ และ T_{c2}^+ มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = E, V_{b1c1} = -E, V_{c1a1} = 0$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = 0, V_{b2c2} = -E, V_{c2a2} = E$$

2. โหมดการทำงานที่ 2 จากภาพที่ 3.14(ข) ในช่วงคาบเวลา 30-60 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^+, T_{a2}^+, T_{b2}^-$ และ T_{c2}^+ มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = E, V_{b1c1} = -E, V_{c1a1} = 0$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = E, V_{b2c2} = -E, V_{c2a2} = 0$$

3. โหมดการทำงานที่ 3 จากภาพที่ 3.14(ค) ในช่วงคาบเวลา 60-90 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^-$ และ T_{c2}^+ มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = E, V_{b1c1} = 0, V_{c1a1} = -E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = E, V_{b2c2} = -E, V_{c2a2} = 0$$

4. โหมมคกรทำงานที่ 4 จากภาพที่ 3.14(ง) ในช่วงคาบเวลา 90-120 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^+, T_{b1}^-, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^-$ และ T_{c2}^- มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = E, V_{b1c1} = 0, V_{c1a1} = -E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = E, V_{b2c2} = 0, V_{c2a2} = -E$$

5. โหมมคกรทำงานที่ 5 จากภาพที่ 3.14(จ) ในช่วงคาบเวลา 120-150 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^+, T_{b1}^+, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^-$ และ T_{c2}^- มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = 0, V_{b1c1} = E, V_{c1a1} = -E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = E, V_{b2c2} = 0, V_{c2a2} = -E$$

6. โหมมคกรทำงานที่ 6 จากภาพที่ 3.14(ฉ) ในช่วงคาบเวลา 150-180 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^+, T_{b1}^+, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^+$ และ T_{c2}^- มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = 0, V_{b1c1} = E, V_{c1a1} = -E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = 0, V_{b2c2} = E, V_{c2a2} = -E$$

7. โหมมคกรทำงานที่ 7 จากภาพที่ 3.14(ช) ในช่วงคาบเวลา 180-210 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^-, T_{b1}^+, T_{c1}^-, T_{a2}^+, T_{b2}^+$ และ T_{c2}^- มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = -E, V_{b1c1} = E, V_{c1a1} = 0$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = 0, V_{b2c2} = E, V_{c2a2} = -E$$

8. โหมตการทำงานที่ 8 จากภาพที่ 3.14(ซ) ในช่วงคาบเวลา 210-240 องศาไฟฟ้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^{-}, T_{b1}^{+}, T_{c1}^{-}, T_{a2}^{-}, T_{b2}^{+}$ และ T_{c2}^{-} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสถานะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = -E, V_{b1c1} = E, V_{c1a1} = 0$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = -E, V_{b2c2} = E, V_{c2a2} = 0$$

9. โหมตการทำงานที่ 9 จากภาพที่ 3.14(ฉ) ในช่วงคาบเวลา 240-270 องศาไฟฟ้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^{-}, T_{b1}^{+}, T_{c1}^{+}, T_{a2}^{-}, T_{b2}^{+}$ และ T_{c2}^{-} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสถานะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = -E, V_{b1c1} = 0, V_{c1a1} = E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = -E, V_{b2c2} = E, V_{c2a2} = 0$$

10. โหมตการทำงานที่ 10 จากภาพที่ 3.14(ง) ในช่วงคาบเวลา 270-300 องศาไฟฟ้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^{-}, T_{b1}^{+}, T_{c1}^{+}, T_{a2}^{-}, T_{b2}^{+}$ และ T_{c2}^{-} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสถานะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = -E, V_{b1c1} = 0, V_{c1a1} = E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = -E, V_{b2c2} = 0, V_{c2a2} = E$$

11. โหมดการทำงานที่ 11 จากภาพที่ 3.14(ฎ) ในช่วงคาบเวลา 300-330 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^{-}, T_{b1}^{-}, T_{c1}^{+}, T_{a2}^{-}, T_{b2}^{+}$ และ T_{c2}^{-} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = -0, V_{b1c1} = -E, V_{c1a1} = E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

$$V_{a2b2} = -E, V_{b2c2} = 0, V_{c2a2} = E$$

12. โหมดการทำงานที่ 12 จากภาพที่ 3.9(ฎ) ในช่วงคาบเวลา 330-360 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $T_{a1}^{-}, T_{b1}^{-}, T_{c1}^{+}, T_{a2}^{-}, T_{b2}^{-}$ และ T_{c2}^{+} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

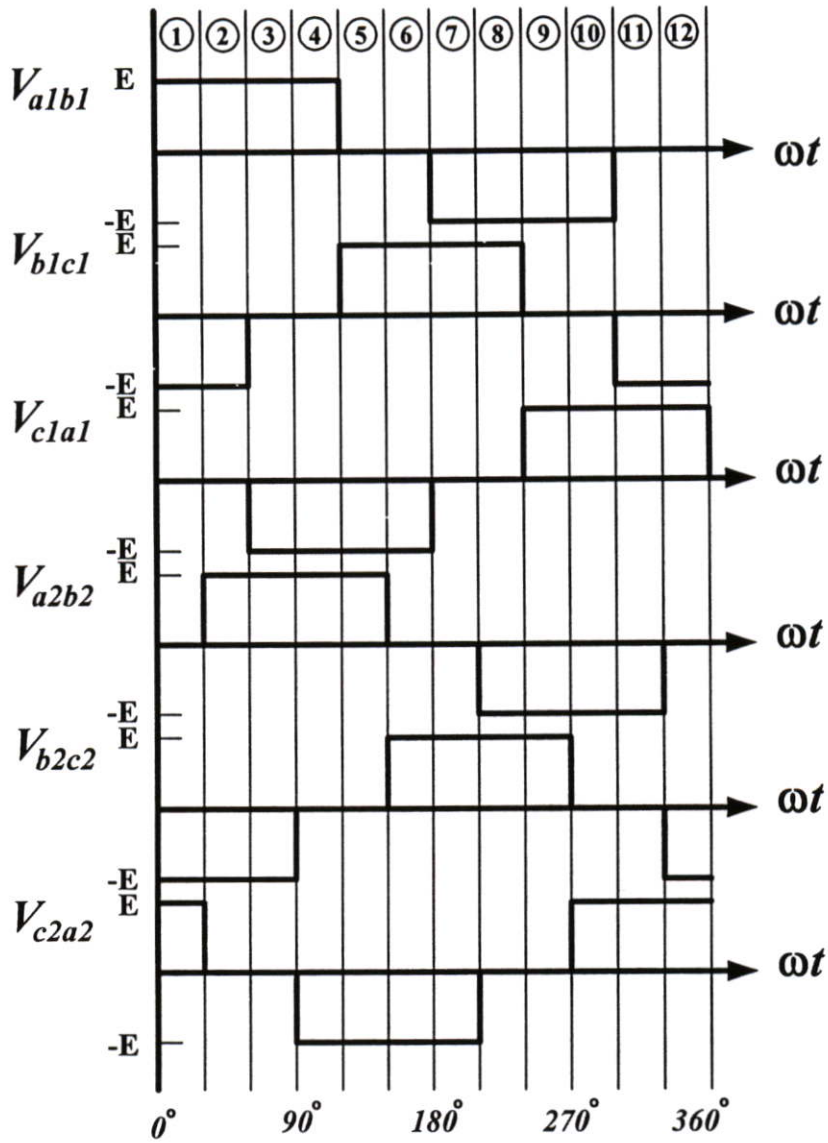
แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1

$$V_{a1b1} = 0, V_{b1c1} = -E, V_{c1a1} = E$$

แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 2

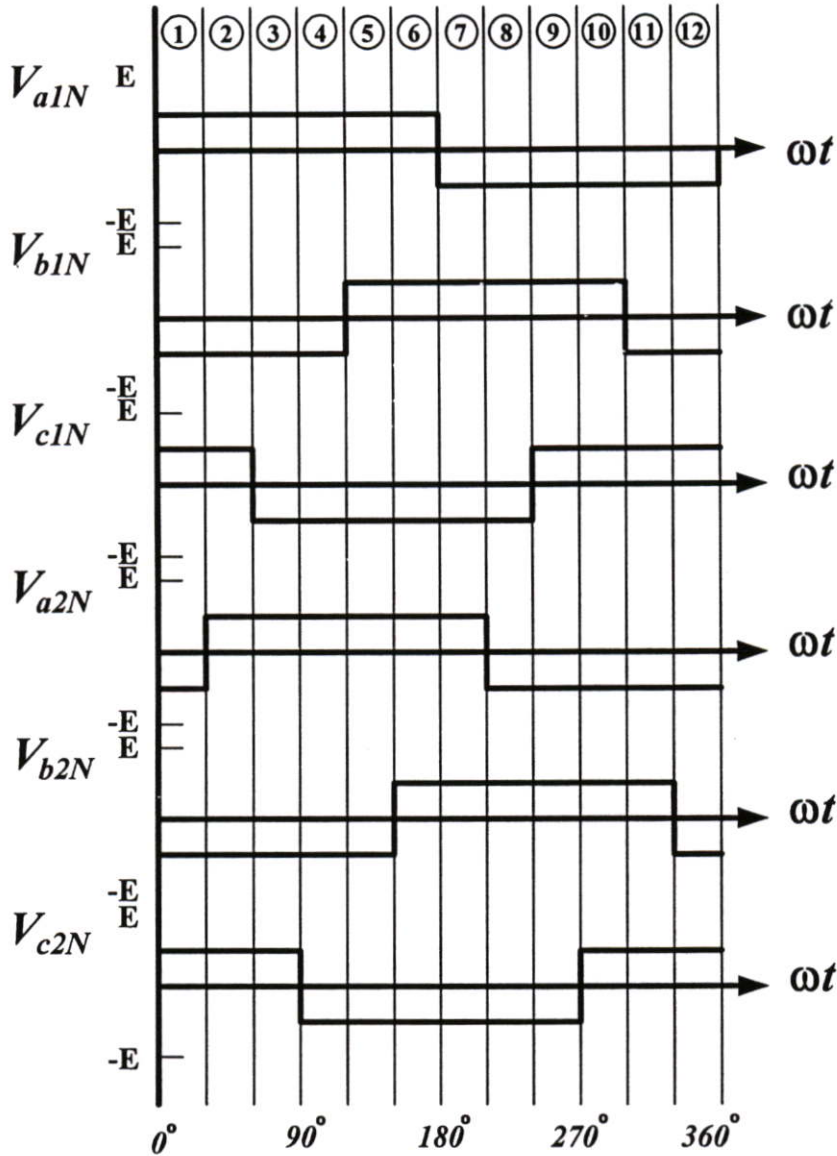
$$V_{a2b2} = 0, V_{b2c2} = -E, V_{c2a2} = E$$

ผลของการสวิตช์กระแสอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากโหมดการทำงานทั้ง 12 โหมดใน 1 ไซเคิลดังภาพที่



ภาพที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบไม่สมมาตร

รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบสมมาตรจากวงจรสมมูลย์ 3 เฟสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสทั้ง 2 ชุดมีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ $\frac{E}{2}$ ดังภาพที่ 3.16



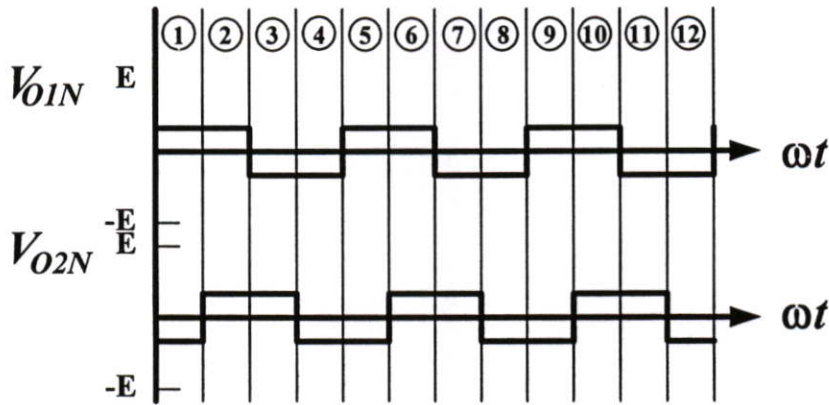
ภาพที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบไม่สมมาตร

เมื่อโหลดของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแต่ละชุดสมดุลย์แรงดันไฟฟ้าจากจุดร่วมของโหลด (O_1 และ O_2) ซึ่งต่อแบบสตาร์ (Star connection) เทียบกับจุดร่วมของวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแต่ละชุด (N_1 และ N_2) หาค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{O_1N_1}$ และ $V_{O_2N_2}$ ได้จากสมการ

$$V_{O_1N_1} = \frac{1}{3}(V_{a1N_1} + V_{b1N_1} + V_{c1N_1}) \quad (3.23)$$

$$V_{O_2N_2} = \frac{1}{3}(V_{a2N_2} + V_{b2N_2} + V_{c2N_2}) \quad (3.24)$$

แทนค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแต่ละชุดจากภาพที่ 3.16 หากค่าแรงดันไฟฟ้า V_{O1N1} และ V_{O2N2} จากสมการ (3.23) และ (3.24) ในแต่ละโหมคทั้ง 12 โหมคมีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ $\frac{E}{6}$ และ $-\frac{E}{6}$ ตามลำดับ ได้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุดร่วมของโหมคกับจุดร่วมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสแต่ละชุดจากวงจรสมมูลอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบไม่สมมาตร

หากค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดได้จากสมการ (3.25), (3.26), (3.27), (3.28), (3.29) และ (3.30) ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรดังภาพที่ 3.18 มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละโหมคดังตารางที่ 3.4

$$V_{a1o1} = V_{a1N1} - V_{O1N1} \quad (3.25)$$

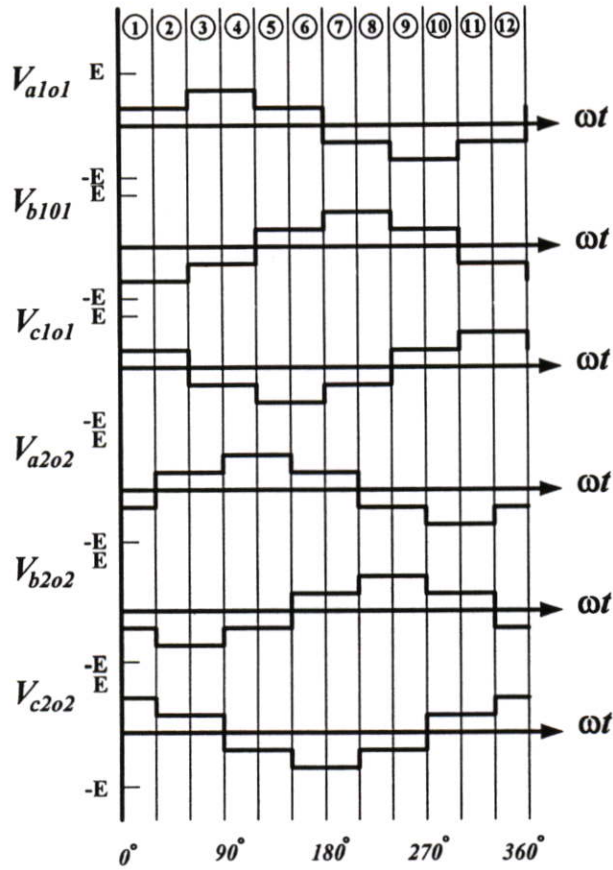
$$V_{b1o1} = V_{b1N1} - V_{O1N1} \quad (3.26)$$

$$V_{c1o1} = V_{c1N1} - V_{O1N1} \quad (3.27)$$

$$V_{a2o2} = V_{a2N2} - V_{O2N2} \quad (3.28)$$

$$V_{b2o2} = V_{b2N2} - V_{O2N2} \quad (3.29)$$

$$V_{c2o2} = V_{c2N2} - V_{O2N2} \quad (3.30)$$



ภาพที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

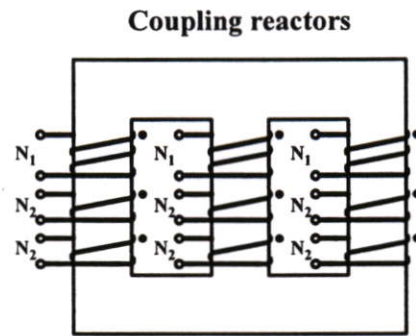
ตารางที่ 3.4 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

โหมด	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า	
		V_{a1o1}/E	V_{a2o2}/E
1	0 - 30	$1/3$	$-1/3$
2	30 - 60	$1/3$	$1/3$
3	60 - 90	$2/3$	$1/3$
4	90 - 120	$2/3$	$2/3$
5	120 - 150	$1/3$	$2/3$
6	150 - 180	$1/3$	$1/3$
7	180 - 210	$-1/3$	$1/3$
8	210 - 240	$-1/3$	$-1/3$
9	240 - 270	$-2/3$	$-1/3$
10	270 - 300	$-2/3$	$-2/3$
11	300 - 330	$-1/3$	$-2/3$
12	330 - 360	$-1/3$	$-1/3$

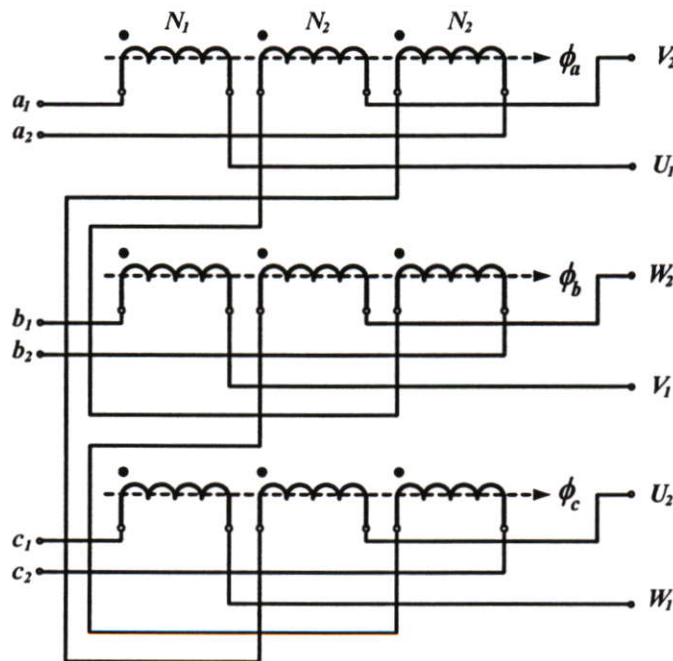
3.4.2 การปรับปรุงรูปคลื่นด้วยรีแอกเตอร์คัปปลิง

จากภาพที่ 3.19(ก) เป็นลักษณะโครงสร้างของรีแอกเตอร์คัปปลิงประกอบด้วยขดลวดพันบนแกนเหล็ก 3 แกนที่มีการเชื่อมโยงกันของสนามแม่เหล็ก แต่ละแกนประกอบด้วยขดลวด N_1 จำนวน 1 ขดและขดลวด N_2 จำนวน 2 ขด อัตราส่วนจำนวนรอบขดลวด N_1 กับ N_2 ดังสมการ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (3.31)$$



(ก) ลักษณะโครงสร้างและการพันขดลวด N_1 และ N_2 ของรีแอกเตอร์คัปปลิง



(ข) วงจรการต่อรีแอกเตอร์อนุกรมระหว่างอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

ภาพที่ 3.19 การใช้รีแอกเตอร์คัปปลิงในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสแบบไม่สมมาตร

จากภาพที่ 3.19(ข) เป็นลักษณะการต่อขดลวดรีแอกเตอร์คัปปลิงอนุกรมระหว่างอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ทั้ง 2 ชุดสามารถเชื่อมโยงกันได้ด้วยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการไหลของกระแสผ่านขดลวดของรีแอกเตอร์ ทั้ง 3 แกนได้แก่ ϕ_a, ϕ_b และ ϕ_c สามารถหาแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสได้จากสมการ

$$V_{a1o1} = V_{u1o1} + N_1 \frac{d\phi_a}{dt} \quad (3.32)$$

$$V_{b1o1} = V_{v1o1} + N_1 \frac{d\phi_a}{dt} \quad (3.33)$$

$$V_{c1o1} = V_{w1o1} + N_1 \frac{d\phi_a}{dt} \quad (3.34)$$

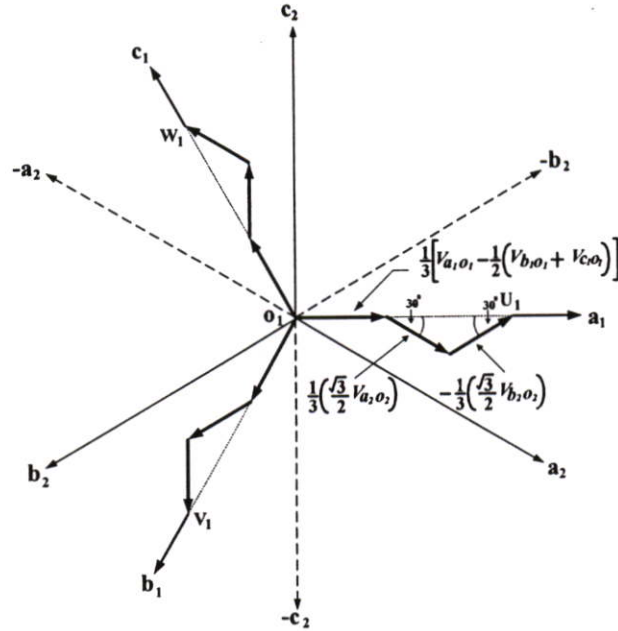
$$V_{a2o2} = V_{u2o2} - N_2 \frac{d\phi_a}{dt} + N_2 \frac{d\phi_c}{dt} \quad (3.35)$$

$$V_{b2o2} = V_{v2o2} - N_2 \frac{d\phi_b}{dt} + N_2 \frac{d\phi_a}{dt} \quad (3.36)$$

$$V_{c2o2} = V_{w2o2} - N_2 \frac{d\phi_c}{dt} + N_2 \frac{d\phi_b}{dt} \quad (3.37)$$

เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 เฟส a_1 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจากแกนเหล็ก ϕ_a คัปปลิงกับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 จากภาพที่ 3.20 ผลรวมแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิงได้แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากสมการ

$$\begin{aligned} V_{u1o1} &= \frac{1}{3} \left[V_{a1o1} - \cos 60^\circ (V_{b1o1} + V_{c1o1}) + \cos 30^\circ (V_{a2o2} - V_{b2o2}) \right] \\ &= \frac{1}{3} \left[V_{a1o1} - \frac{1}{2} (V_{b1o1} + V_{c1o1}) + \frac{\sqrt{3}}{2} (V_{a2o2} - V_{b2o2}) \right] \end{aligned} \quad (3.38)$$



ภาพที่ 3.20 เวกเตอร์การคัปปลิงแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 กับชุดที่ 2

ดังนั้นการต่อขดลวดเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าตามผลรวมทางเวกเตอร์จากสมการ(3.38) ขดลวด N_1 ของรีแอกเตอร์คัปปลิงที่ขั้ว \bullet ต่อเข้ากับเฟส a_1 , b_1 และ c_1 ส่วนปลายขดลวดต่อเข้ากับเฟสมอเตอร์เหนี่ยวนำ U_1 , V_1 และ W_1 ตามลำดับ

ผลรวมจากการคัปปลิงด้วยสนามแม่เหล็กของแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 เกิดขึ้นกับขดลวด N_1 ที่ต่อกับเฟส a_1

$$N_{1(a1)} \frac{d\phi_a}{dt} = \frac{1}{3} \left[V_{a1o1} - \frac{1}{2} (V_{b1o1} + V_{c1o1}) \right] \quad (3.39)$$

และผลรวมจากการคัปปลิงด้วยสนามแม่เหล็กของแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 เกิดขึ้นกับขดลวด N_2 ที่ต่อกับเฟส a_2 กำหนดให้มีกระแสไหลออกที่ขั้วจุด \bullet ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีขั้วเหมือนกันกับ V_{a1o1} ส่วนขดลวด N_2 ที่ต่อกับเฟส b_2 กำหนดให้มีการต่อให้กระแสไหลเข้าที่ขั้วจุด \bullet จึงทำให้แรงดันไฟฟ้ามีขั้วตรงกันข้ามกับ V_{a1o1} การย้ายโหนดแรงดันไฟฟ้าจากขดลวด N_2 ทั้ง 2 ชุดไปยังขดลวด N_1 จะขึ้นกับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด N_1 กับ N_2 และกำหนดให้ $(N_1 / N_2 = \sqrt{3})$ ดังสมการ

$$N_{1(a2)} \frac{d\phi_a}{dt} = \frac{1}{3} (V_{a2o2}) \frac{N_1}{2N_2}$$

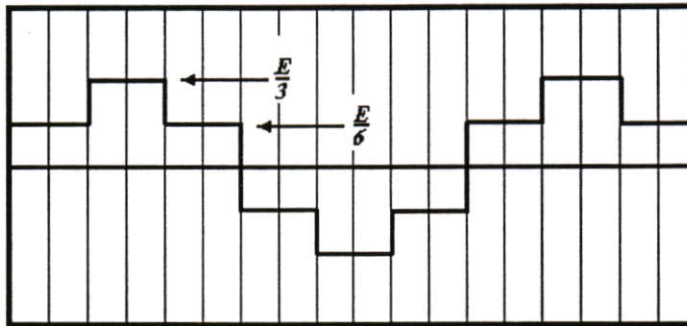
$$N_{1(a2)} \frac{d\phi_a}{dt} = \frac{1}{3} (V_{a2o2}) \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.40)$$

$$N_{1(b2)} \frac{d\phi_a}{dt} = -\frac{1}{3} (V_{b2o2}) \frac{N_1}{2N_2}$$

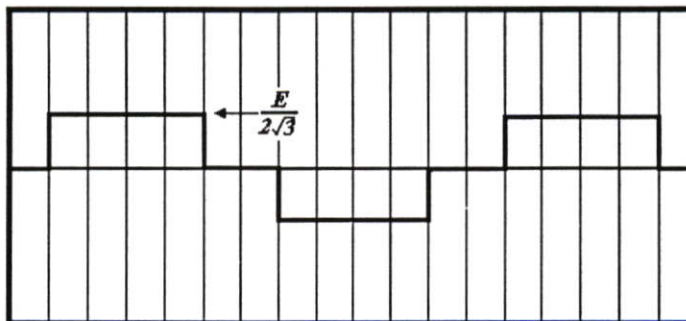
$$N_{1(b2)} \frac{d\phi_a}{dt} = -\frac{1}{3} (V_{b2o2}) \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.41)$$

$$V_{u1o1} = N_{1(a1)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{1(a2)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{1(b2)} \frac{d\phi_a}{dt} \quad (3.42)$$

จากสมการ (3.42) แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำชุดที่ 1 ได้จากการนำค่าสมการ (3.39) รวมกับสมการ (3.40) และ (3.41) ดังภาพที่ 3.21



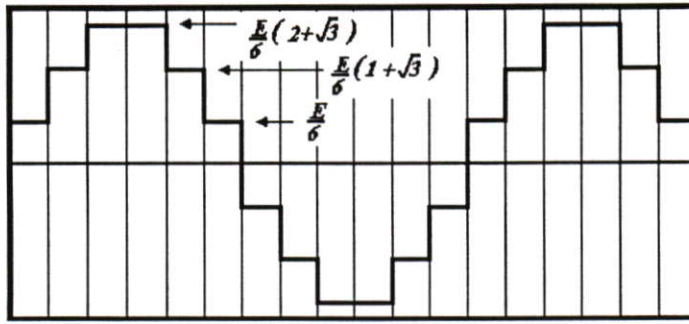
(ก) แรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1 เกิดขึ้นที่ขดลวด N_1 มีค่าเท่ากับ $N_{1(a1)} \frac{d\phi_a}{dt}$



(ข) แรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2 เกิดขึ้นที่ขดลวด N_2 ข้ายโอนไปยังขดลวด N_1

มีค่าเท่ากับ $N_{1(a2)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{1(b2)} \frac{d\phi_a}{dt}$

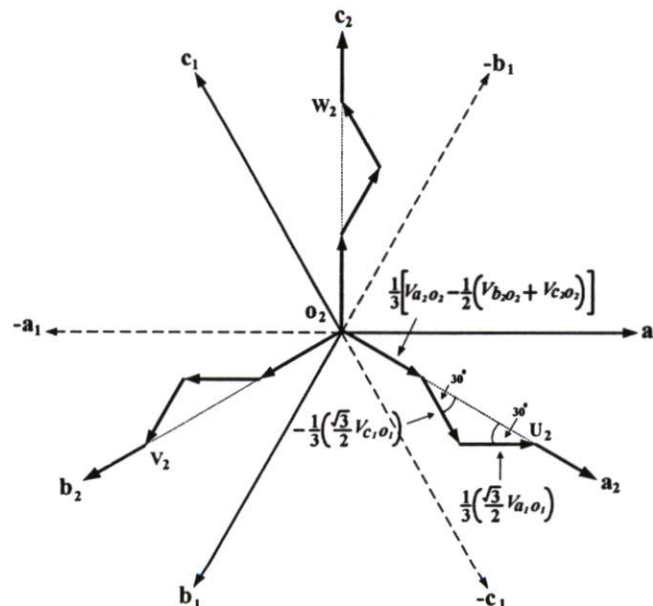
ภาพที่ 3.21 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (V_{u1o1}) เกิดขึ้นที่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส



(ค) แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำชุดที่ 1 $V_{u1o1} = N_{1(a1)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{1(a2)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{1(b2)} \frac{d\phi_a}{dt}$

ภาพที่ 3.21 (ต่อ)

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 เฟส a_2 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจากแกนเหล็ก ϕ_a คำนวณกับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 จากภาพที่ 3.22

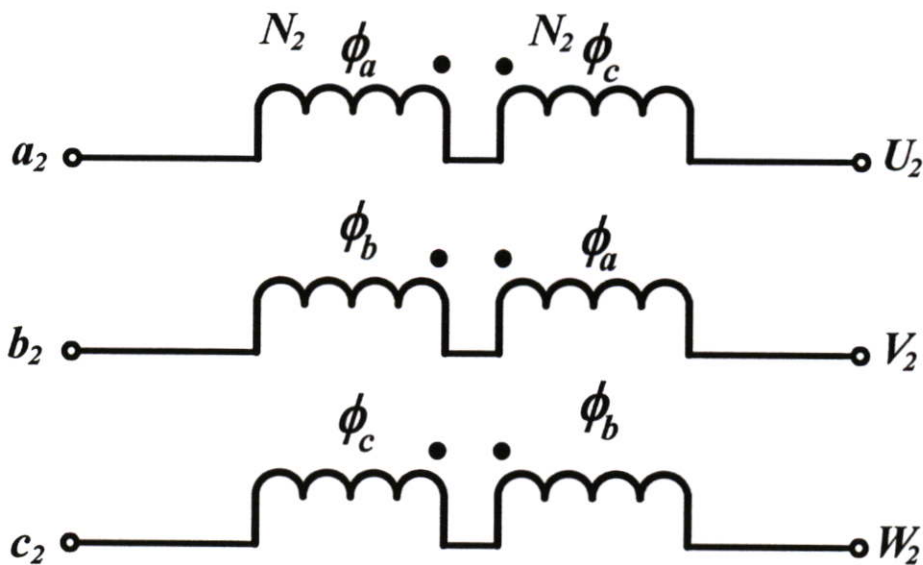


ภาพที่ 3.22 เวกเตอร์การคัปปลิงแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 กับชุดที่ 1

จากภาพที่ 3.22 ผลรวมแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิงได้แรงดันไฟฟ้าต่อเฟส จากสมการ

$$\begin{aligned}
 V_{u2o2} &= \frac{1}{3} \left[V_{a2o2} - \cos 60^\circ (V_{b2o2} + V_{c2o2}) + \cos 30^\circ (V_{a1o1} - V_{c1o1}) \right] \\
 &= \frac{1}{3} \left[V_{a2o2} - \frac{1}{2} (V_{b2o2} + V_{c2o2}) + \frac{\sqrt{3}}{2} (V_{a1o1} - V_{c1o1}) \right] \quad (3.43)
 \end{aligned}$$

จากการต่อขดลวด N_2 เข้ากับเฟส a_2 , b_2 และ c_2 กระแสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 จะไหลออกจากปลายจุด dot ของขดลวดไปยังปลายขดลวดแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ U_2 , V_2 และ W_2 ตามลำดับดังภาพที่ 3.23 ผลรวมจากการคัปปลิงด้วยสนามแม่เหล็กของแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 เกิดขึ้นกับขดลวด N_2 ที่ต่อกับเฟส a_2 ดังสมการ (3.44)



ภาพที่ 3.23 การต่อขดลวด N_2 จำนวน 2 ขดอนุกรมกันจากการพันบนแกนเหล็กทั้ง 3 แกนเพื่อให้เกิดความสมดุลการคัปปลิงแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2

$$N_{2(a2)} \frac{d\phi_a}{dt} = \frac{1}{3} \left[V_{a2o2} - \frac{1}{2} (V_{b2o2} + V_{c2o2}) \right] \quad (3.44)$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 เฟส a_2 ต่อเข้ากับขดลวด N_2 ที่ต่ออนุกรมกัน 2 ขด โดยพันบนแกนเหล็กสร้างสนามแม่เหล็ก ϕ_a และ ϕ_c ผลจากการคัปปลิงแรงดันไฟฟ้าด้วยสนามแม่เหล็ก เมื่อพิจารณาที่แกนเหล็กสร้างสนามแม่เหล็ก ϕ_a ขดลวด N_1 มีกระแสไหลเข้าที่ขั้ว $\dot{\phi}$ ส่วนขดลวด N_2 ที่ต่อกับเฟส a_2 มีทิศทางกระแสไหลตรงข้ามกัน ทำให้แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันกับ V_{a2o2} การย้ายอินแรงดันไฟฟ้าจากขดลวด N_1 ไปยังขดลวด N_2 หาได้จากสมการ

$$N_{2(a1)} \frac{d\phi_a}{dt} = \frac{1}{3} (V_{a1o1}) \frac{N_2}{2N_1}$$

$$N_{2(a1)} \frac{d\phi_a}{dt} = \frac{1}{3} (V_{a1o1}) \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.45)$$

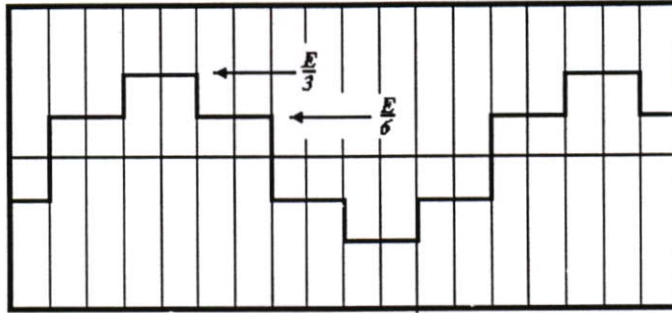
และเมื่อพิจารณาที่แกนเหล็กสร้างสนามแม่เหล็ก ϕ_c ขดลวด N_1 กระแสไหลเข้าที่ขั้ว $\dot{\phi}$ ส่วนขดลวด N_2 ที่ต่อกับเฟส a_2 มีทิศทางกระแสไหลตรงข้ามกัน ทำให้แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นมีขั้วตรงข้ามกันกับ V_{c2o2} การย้ายอินแรงดันไฟฟ้าจากขดลวด N_1 ไปยังขดลวด N_2 หาได้จากสมการ

$$N_{2(c1)} \frac{d\phi_c}{dt} = -\frac{1}{3} (V_{c1o1}) \frac{N_1}{2N_2}$$

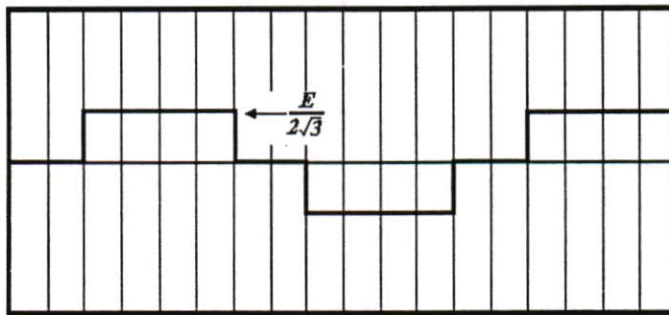
$$N_{2(c1)} \frac{d\phi_c}{dt} = -\frac{1}{3} (V_{c1o1}) \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.46)$$

$$V_{u2o2} = N_{2(a2)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{2(a1)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{2(c1)} \frac{d\phi_c}{dt} \quad (3.47)$$

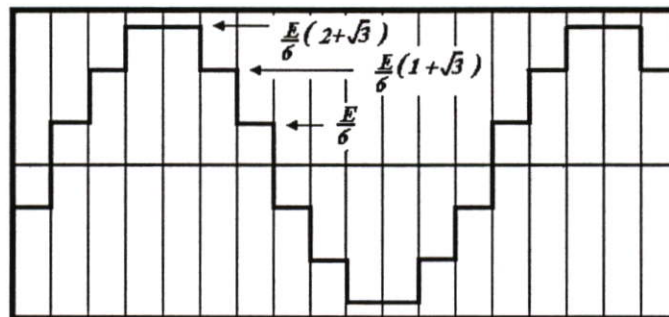
จากสมการ (3.47) แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำชุดที่ 2 ได้จากการนำค่าสมการ (3.44) รวมกับสมการ (3.45) และ (3.46) ดังภาพที่ 3.24



(ก) แรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสชุดที่ 2 เกิดขึ้นที่ขดลวด N_2 มีค่าเท่ากับ $N_{2(a2)} \frac{d\phi_a}{dt}$



(ข) แรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสชุดที่ 1 เกิดขึ้นที่ขดลวด N_1 ย้ายโอนไปยังขดลวด N_2 มีค่าเท่ากับ $N_{2(a1)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{2(c1)} \frac{d\phi_c}{dt}$



(ค) แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำชุดที่ $2V_{u2o2} = N_{2(a2)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{2(a1)} \frac{d\phi_a}{dt} + N_{2(c1)} \frac{d\phi_c}{dt}$

ภาพที่ 3.24 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (V_{u2o2}) เกิดขึ้นที่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

หาค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร (V_{u1o1} และ V_{u2o2}) โดยนำค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละโหมดจากตารางที่ 3.4 แทนค่าในสมการ (3.38) และ (3.43) คำนวณค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแต่ละโหมดได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส แบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

โหมด	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า	
		V_{u1o1}/E	V_{u2o2}/E
1	0 - 30	$1/6$	$-1/6$
2	30 - 60	$(1+\sqrt{3})/6$	$1/6$
3	60 - 90	$(2+\sqrt{3})/6$	$(1+\sqrt{3})/6$
4	90 - 120	$(2+\sqrt{3})/6$	$(2+\sqrt{3})/6$
5	120 - 150	$(1+\sqrt{3})/6$	$(2+\sqrt{3})/6$
6	150 - 180	$1/6$	$(1+\sqrt{3})/6$
7	180 - 210	$-1/6$	$1/6$
8	210 - 240	$-(1+\sqrt{3})/6$	$-1/6$
9	240 - 270	$-(2+\sqrt{3})/6$	$-(1+\sqrt{3})/6$
10	270 - 300	$-(2+\sqrt{3})/6$	$-(2+\sqrt{3})/6$
11	300 - 330	$-(1+\sqrt{3})/6$	$-(2+\sqrt{3})/6$
12	330 - 360	$-1/6$	$-(1+\sqrt{3})/6$

3.4.3 การหาค่าความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าดี.ซี.เชื่อมโยงกับพิกัดแรงดันไฟฟ้า

ความถี่มูลฐาน

จากลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสมีลักษณะรูปคลื่นเป็น 12 สเต็ปและมีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละสเต็ปดังตารางที่ 3.5 หาค่าแอมพลิจูดแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานได้จากสมการ

$$V_1 = \frac{2E}{3\pi} \left[1 + \sqrt{3} \cos \frac{\pi}{6} + \cos \frac{\pi}{3} \right] \quad (3.48)$$

$$= \frac{2E}{\pi} = 0.636E$$

3.5 สรุป

การปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็น 6 เฟสสำหรับการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าความถี่สวิตซ์ซึ่งต่ำเพื่อลดพิกัดกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ให้ลดลง ในบทนี้ได้กล่าวถึงการปรับปรุงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสเป็น 2 ลักษณะคือแบบกระจายเฟสสมมาตรและไม่สมมาตร ซึ่งมีข้อแตกต่างกันจากหลักทฤษฎีที่นำเสนอมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรจะสามารถปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสให้เป็นรูปคลื่น 12 สเต็ปโดยใช้รีแอคเตอร์คัปปลิงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 6 สเต็ปของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 2 ชุดที่มีมุมต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้า และจากลักษณะการต่ออนุกรมกันของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 2 ชุดทำให้สามารถพัฒนารูปคลื่นให้มีสเต็ปสูงขึ้นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ได้

บทที่ 4

ระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส ,60สเต็ม สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอในส่วนของหลักการและวิธีการสร้างสัญญาณรูปคลื่น 60 สเต็มจากระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส ในขั้นต้นจะกล่าวถึงทฤษฎีการปรับปรุงรูปคลื่นสัญญาณกึ่งสี่เหลี่ยมเป็นรูปคลื่นไซน์ ส่วนที่สอง จะเป็นเทคนิคและการสร้างสัญญาณรูปคลื่น 60 สเต็มจากระบบอินเวอร์เตอร์พร้อมอธิบายหลักการทำงานวงจรส่วนประกอบของระบบอินเวอร์เตอร์โดยจะพิจารณาถึงแพทเทอร์นการสวิตช์กระแสของสัญญาณรูปคลื่นที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ส่วนประกอบภายในระบบจากโหมดการทำงานในสภาวะการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่วนตอนท้ายเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของรูปคลื่นที่เกิดขึ้นในระบบเพื่อหาความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า คี.ซี. เชื่อมโยงกับค่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐาน

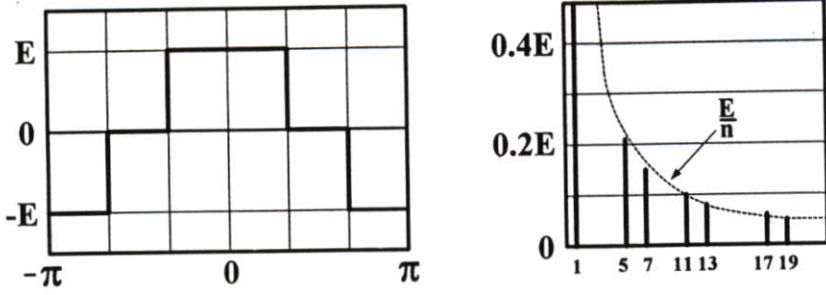
4.2 ทฤษฎีการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเป็นรูปคลื่นไซน์

รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสความถี่สวิตช์ซึ่งดามีลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 4.1(ก) เมื่อนำสัญญาณรูปคลื่นโคไซน์ความถี่สูงกว่ารูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม 6 เท่ามาคูณเท่ากับรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมได้รูปคลื่นดังภาพที่ 4.1(ข) และนำรูปคลื่นจากภาพที่ 4.1(ข) รวมกับรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมทำให้รูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเปลี่ยนแปลงได้รูปคลื่นดังภาพที่ 4.1(ค) เมื่อมีการซัดฮาร์โมนิกอันดับ $6m \pm 1$ (m =จำนวนเต็มเลขคี่) จะได้รูปคลื่นเป็นรูปคลื่นไซน์ดังภาพที่ 4.1(ง) เขียนสมการได้ดังนี้

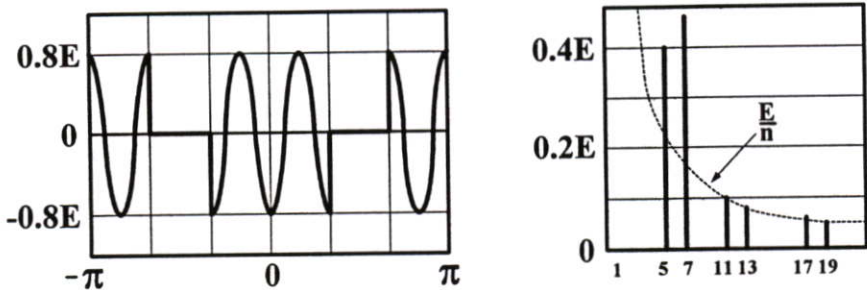
$$\text{รูปคลื่น(ก)} \times (-0.8) \cos 6\omega t \quad \Rightarrow \quad \text{รูปคลื่น(ข)}$$

$$\text{รูปคลื่น(ก)} + \text{รูปคลื่น(ข)} \quad \Rightarrow \quad \text{รูปคลื่น(ค)}$$

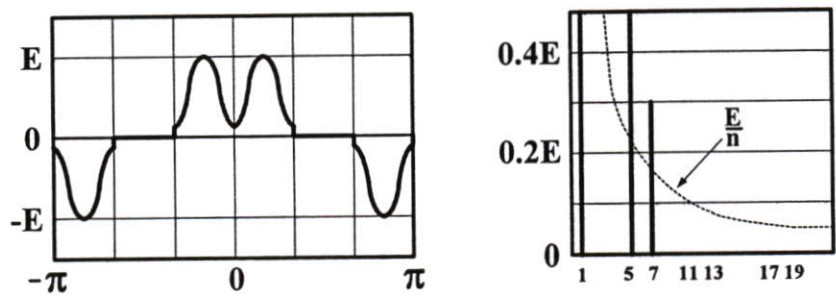
$$\text{รูปคลื่น(ค)} - \text{ฮาร์โมนิกอันดับ } 6m \pm 1 \quad \Rightarrow \quad \text{รูปคลื่น(ง)}$$



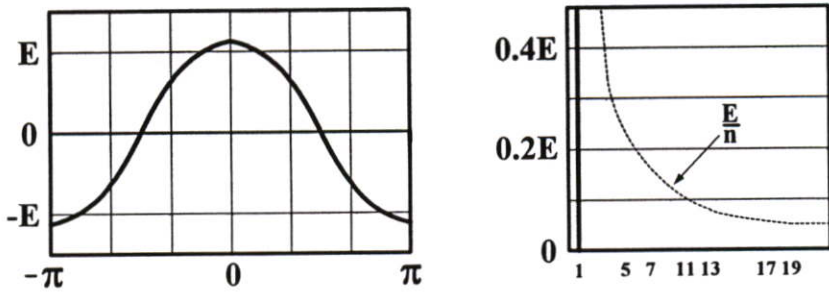
(ก) รูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม รูปคลื่น(ก)



(ข) รูปคลื่น(ข) ได้จาก รูปคลื่น(ก) $\times (-0.8) \cos 6\omega t$



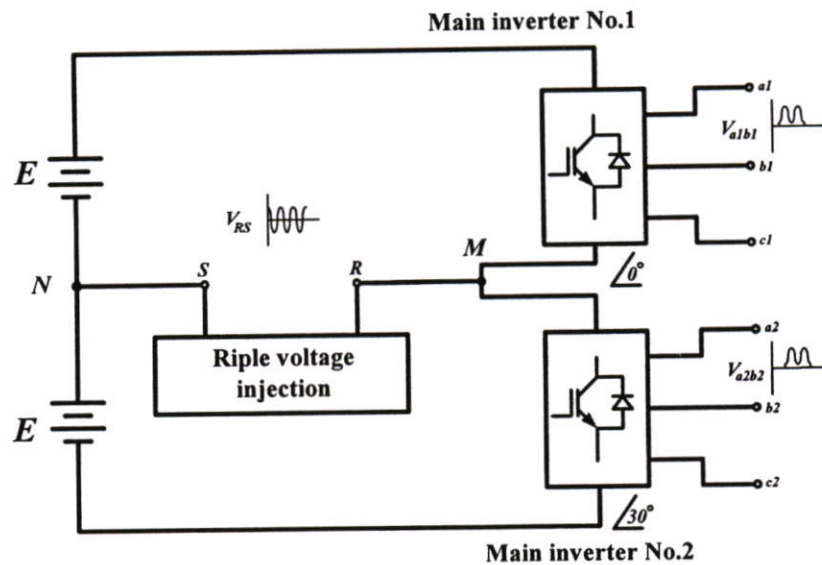
(ค) รูปคลื่น(ค) ได้จาก รูปคลื่น(ก) + รูปคลื่น(ข)



(ง) รูปคลื่น(ง) ได้จาก รูปคลื่น(ค) - ฮาร์โมนิกอันดับ $6m \pm 1$

ภาพที่ 4.1 การปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเป็นรูปคลื่นไซน์

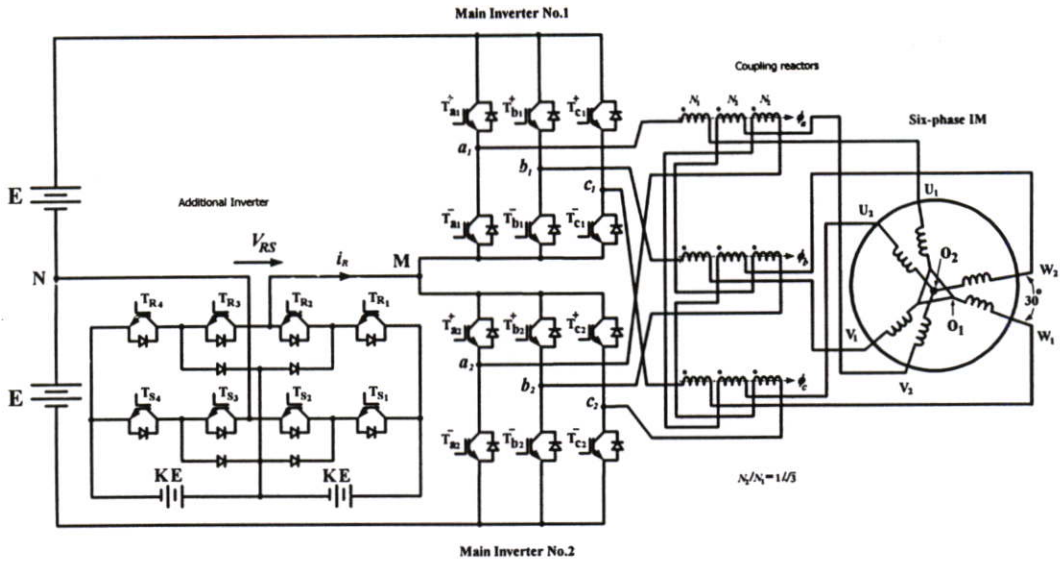
จากภาพที่ 4.1 สัญญาณรูปคลื่นที่ได้จากการนำสัญญาณรูปคลื่น $0.8 \cos 6\omega t$ มอดูเลตกับรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมโดยการคูณกับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสในทิศทางกรไหลของกระแสตรงข้าม จึงได้เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าดังภาพที่ 4.1(ข) สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์จะหักล้างกับสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมทำให้รูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเปลี่ยนแปลงเป็นรูปคลื่นที่มีสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำที่ อันดับ 5 และ 7 สำหรับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดต่ออนุกรมดังภาพที่ 4.2 เป็นระบบปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสด้วยสัญญาณรูปคลื่น $0.8 \cos 6\omega t$



ภาพที่ 4.2 ระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมโดยการฉีดแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น $0.8 \cos 6\omega t$ ให้กับจุดต่ออนุกรมอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุด

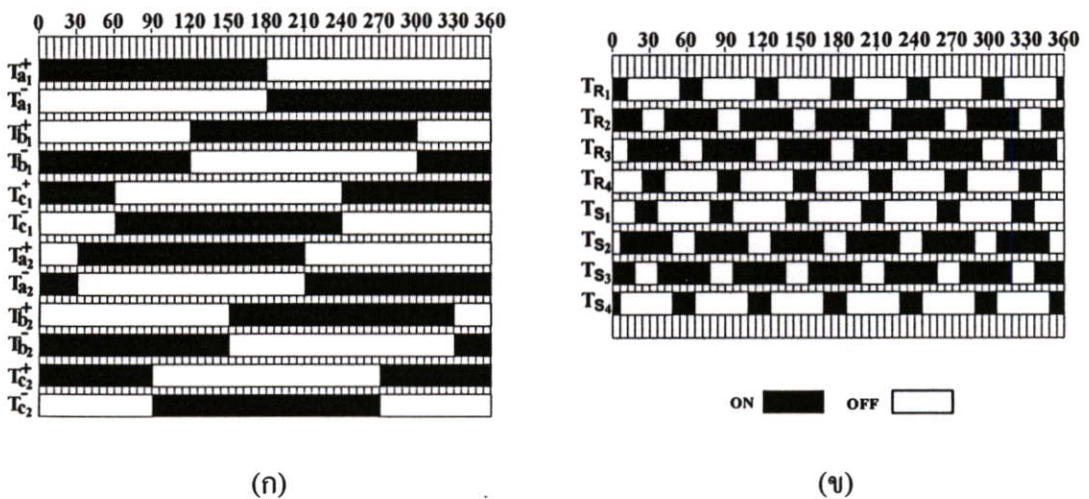
4.3 หลักการทำงาน

ในการสร้างสัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสำหรับฉีดให้กับจุดต่ออนุกรมระหว่างอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดด้วยการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงรูปคลื่นด้วยเหตุนี้การเลือกใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 10 สเต็ปด้วยเทคนิค Neutral point clamped ดังภาพที่ 4.3 จะช่วยให้ลดจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากลักษณะรูปคลื่น 60 สเต็ปมีคุณภาพดีพอที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสูงขึ้นและคุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ



ภาพที่ 4.3 ระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ป

จากภาพที่ 4.3 เป็นระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ปที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดต่อกันสามารถปรับปรุงรูปคลื่นให้มีสเต็ปของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้โดยการฉีดแรงดันไฟฟ้าที่ปรับเปิดความถี่ 6 เท่าของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสมีแพทเทิร์นการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังภาพที่ 4.4

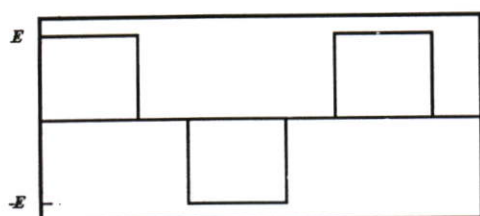
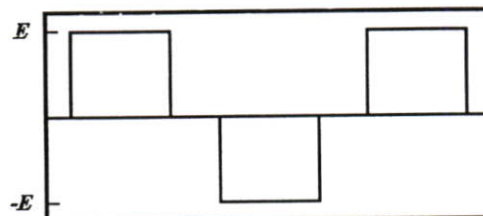
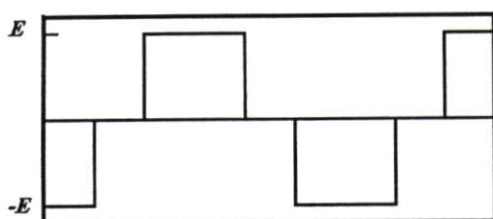
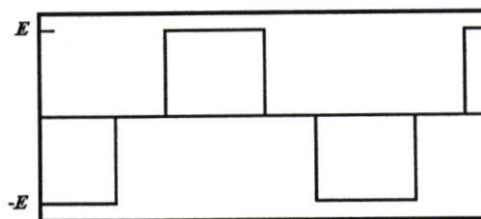
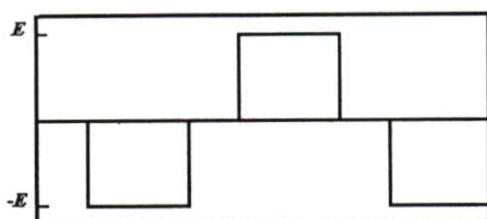
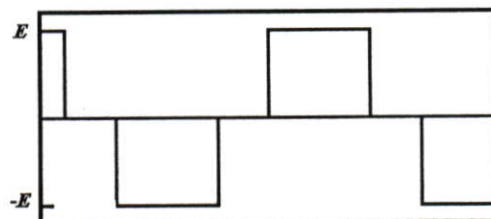


ภาพที่ 4.4 แพทเทิร์นการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

(ก) สัญญาณควบคุมการสวิตช์กระแสอินเวอร์เตอร์หลัก

(ข) สัญญาณควบคุมการสวิตช์กระแสอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

จากภาพที่ 4.4 สัญญาณการควบคุมการสวิตช์กระแสของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุด ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเป็นสัญญาณรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ชุดที่ 1 ดังภาพที่ 4.5(ก) และจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 โดยยังไม่ฉีดแรงดันไฟฟ้ารีปเปลต์ จากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

(ก) V_{a1b1} (ข) V_{a2b2} (ค) V_{b1c1} (ง) V_{b2c2} (จ) V_{c1a1} (ฉ) V_{c2a2}

ภาพที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากึ่งสี่เหลี่ยมจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุด

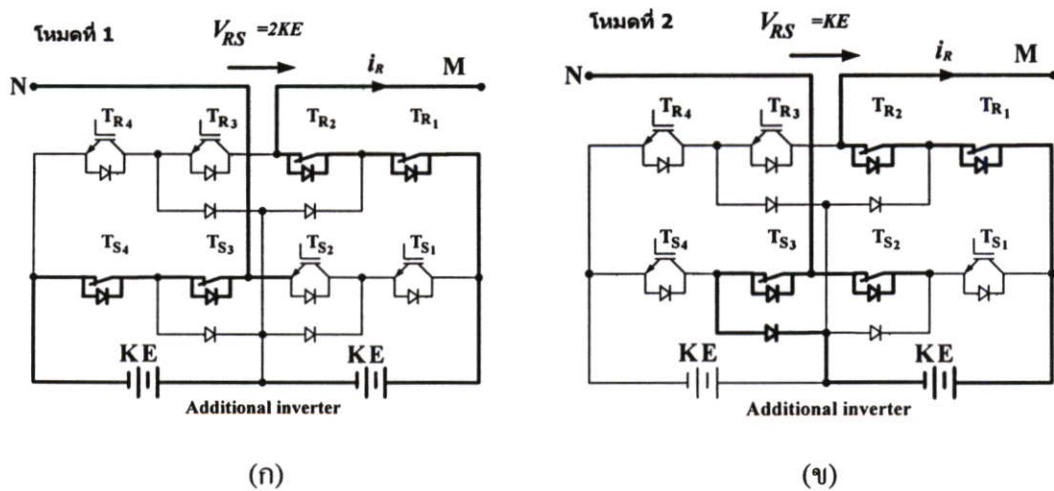
4.3.1 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

การใช้อินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสฉีดแรงดันไฟฟ้ารีปเปลต์ที่จุดต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดอนุกรมกัน (จุด M) ด้วยความถี่ 6 เท่าของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส เพื่อปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม โดยใช้วงจรการสร้างรูปคลื่น 10 สเต็ปด้วยเทคนิค Neutral point clamp แบ่งโหมคการทำงานจากแพทเทอร์นการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังตารางที่ 4.1

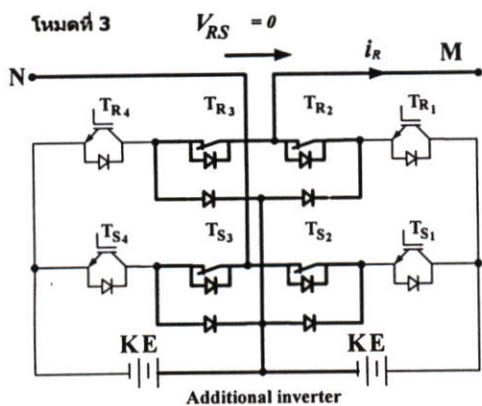
ตารางที่ 4.1 สภาวะการนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

โหมด	ช่วงคาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง นำกระแส
1	0 - 6	T_{R1} T_{R2} T_{S3} T_{S4}
2	6 - 12	T_{R1} T_{R2} T_{S2} T_{S3}
3	12 - 18	T_{R2} T_{R3} T_{S2} T_{S3}
4	18 - 24	T_{R2} T_{R3} T_{S1} T_{S2}
5	24 - 30	T_{R3} T_{R4} T_{S1} T_{S2}
6	30 - 36	T_{R3} T_{R4} T_{S1} T_{S2}
7	36 - 42	T_{R3} T_{R4} T_{S2} T_{S3}
8	42 - 48	T_{R2} T_{R3} T_{S2} T_{S3}
9	48 - 54	T_{R2} T_{R3} T_{S3} T_{S4}
10	54 - 60	T_{R1} T_{R2} T_{S3} T_{S4}

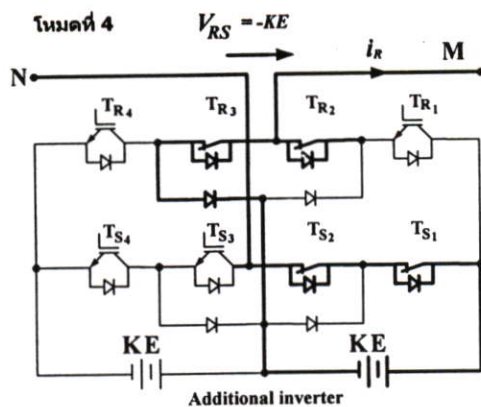
เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า ดี.ซี. ของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสมี 2 แหล่งจ่ายโดยแต่ละแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับ KE ได้แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส (V_{RS}) ในแต่ละโหมดการทำงานดังภาพที่ 4.6



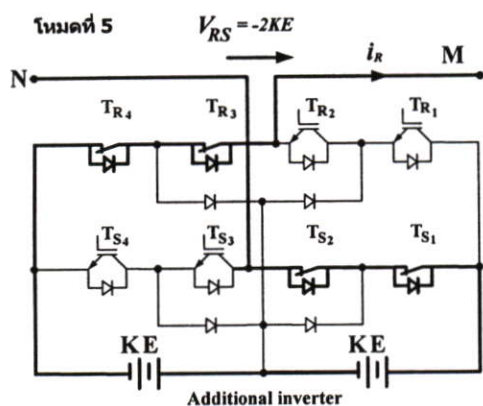
ภาพที่ 4.6 โหมดการทำงานอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส ใน 1 ไซเคิล



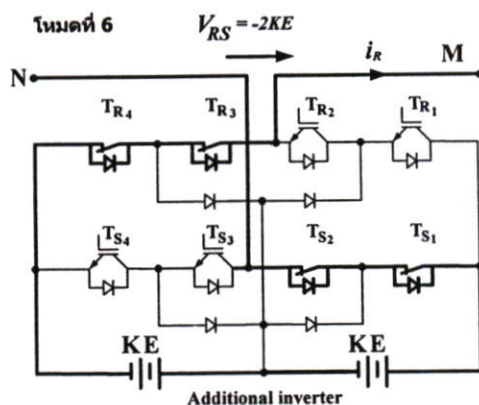
(ก)



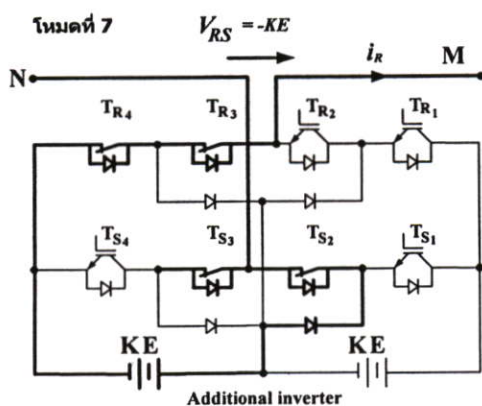
(ข)



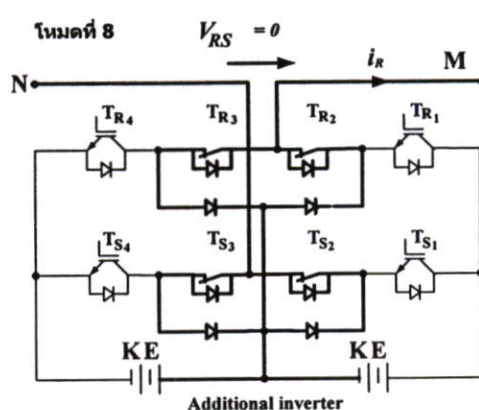
(ค)



(ง)

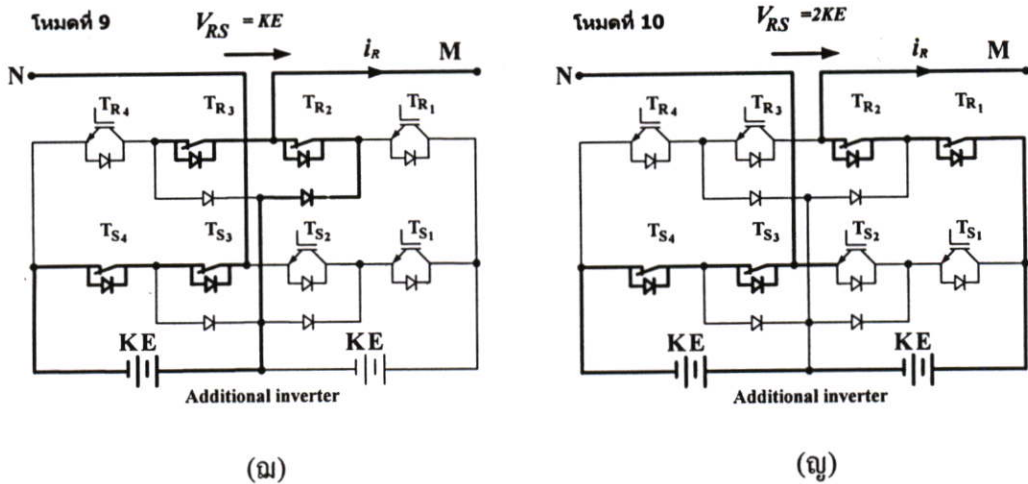


(ฉ)



(ช)

ภาพที่ 4.6 (ต่อ)



ภาพที่ 4.6 (ต่อ)

จากภาพที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส (V_{RS}) จากสภาวะการนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในแต่ละโหมดการทำงานจากตารางที่ 4.1 ได้ดังต่อไปนี้

1. โหมดการทำงานที่ 1 จากภาพที่ 4.6(ก) ในช่วงคาบเวลา 0-6 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R1} , T_{R2} , T_{S3} และ T_{S4} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = 2KE$$

2. โหมดการทำงานที่ 2 จากภาพที่ 4.6(ข) ในช่วงคาบเวลา 6-12 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R1} , T_{R2} , T_{S2} และ T_{S3} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = KE$$

3. โหมดการทำงานที่ 3 จากภาพที่ 4.6(ค) ในช่วงคาบเวลา 12-18 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R2} , T_{R3} , T_{S2} และ T_{S3} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = 0$$

4. โหมดการทำงานที่ 4 จากภาพที่ 4.6(ง) ในช่วงคาบเวลา 18-24 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R2} , T_{R3} , T_{S1} และ T_{S2} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = -KE$$

5. โหมมดการทำงานที่ 5 จากภาพที่ 4.6(จ) ในช่วงคาบเวลา 24-30 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R3} , T_{R4} , T_{S1} และ T_{S2} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = -2KE$$

6. โหมมดการทำงานที่ 6 จากภาพที่ 4.6(ฉ) ในช่วงคาบเวลา 30-36 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R3} , T_{R4} , T_{S1} และ T_{S2} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = -2KE$$

7. โหมมดการทำงานที่ 7 จากภาพที่ 4.6(ช) ในช่วงคาบเวลา 36-42 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R3} , T_{R4} , T_{S2} และ T_{S3} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = -KE$$

8. โหมมดการทำงานที่ 8 จากภาพที่ 4.6(ซ) ในช่วงคาบเวลา 42-48 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R2} , T_{R3} , T_{S2} และ T_{S3} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = 0$$

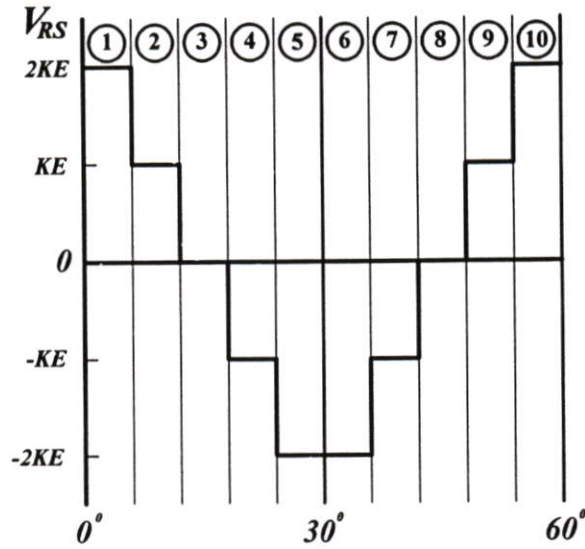
9. โหมมดการทำงานที่ 9 จากภาพที่ 4.6(ฅ) ในช่วงคาบเวลา 48-54 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R2} , T_{R3} , T_{S3} และ T_{S4} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = KE$$

10. โหมมดการทำงานที่ 10 จากภาพที่ 4.6(ฉ) ในช่วงคาบเวลา 54-60 องศาไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง T_{R1} , T_{R2} , T_{S3} และ T_{S4} มีการสวิตช์กระแสอยู่ในสภาวะนำกระแส

$$V_{RS} = 2KE$$

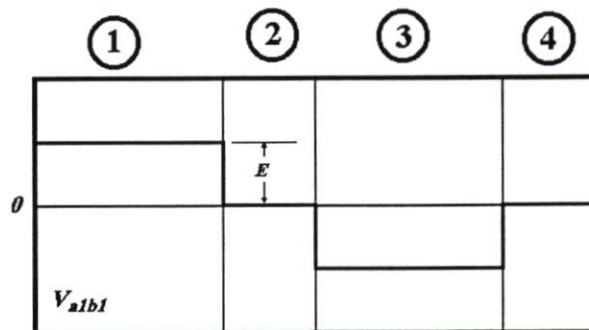
ผลของการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส ทั้ง 10 โหมมดการทำงานในช่วงคาบเวลา 1 ไซเคิล ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (V_{RS}) ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส ในช่วงคาบเวลา 1 ไซเคิล

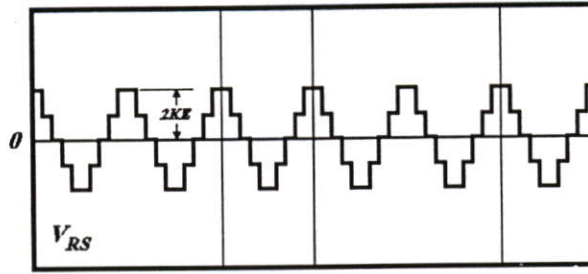
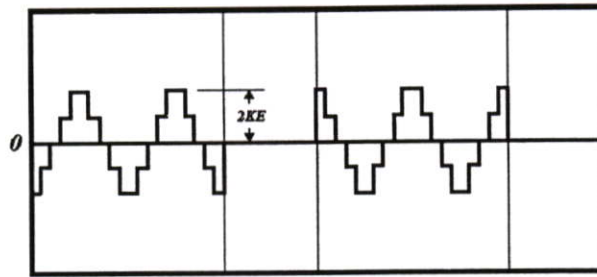
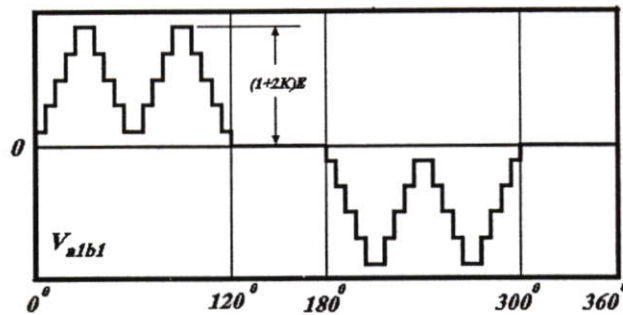
4.3.2 การปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสด้วยสัญญาณรูปคลื่น 10 สเต็ป

เมื่อนำอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสต่ออนุกรมเข้ากับจุด M และ N ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป ดังภาพที่ 4.3 ซึ่งเป็นการมอดูเลตรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดกับแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 10 สเต็ปในรูปผลคูณ ดังภาพที่ 4.8 ทำให้รูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเปลี่ยนแปลงไป โดยแบ่งโหมคการทำงาน การปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a_1 กับเฟส b_1 ของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 ได้ 4 โหมคการทำงานในช่วงเวลา 1 ไซเคิล



(ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า V_{a1b1}

ภาพที่ 4.8 การปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส V_{a1b1} เมื่อนำแรงดันไฟฟ้ารีเปิ้ล จากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

(ข) รูปคลื่น V_{RS} (ค) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า $[-(V_{a1b1} \times V_{RS})/E]$ (ง) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า V_{a1b1} ได้จาก ภาพที่ 4.8(ก) + ภาพที่ 4.8(ค)

ภาพที่ 4.8 (ต่อ)

ผลการฉีดแรงดันไฟฟ้าริเปิดเกิดการมอดูเลทของรูปคลื่น V_{a1b1} จากภาพที่ 4.8(ก) กับ V_{RS} จากภาพที่ 4.8(ข) ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าตามสมการ $[-(V_{a1b1} \times V_{RS})/E]$ ดังภาพที่ 4.8(ค) เขียนสมการการปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากภาพที่ 4.8(ง) ได้ดังนี้

$$V_{a1b1} = \text{รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ภาพที่ 4.8(ก) + ภาพที่ 4.8(ค)}$$

แบ่งโหมดการทำงานเพื่อคำนวณหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละสแต็ปของ V_{alb1} เปลี่ยนแปลงตามสแต็ปของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ปรับเปิดในช่วงสแต็ปละ 6 องศาไฟฟ้าสรุปเป็นตาราง ได้ดังตารางที่ 4.2

1. โหมดการทำงานที่ 1 ช่วงคาบเวลา $0 \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3}$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a_1 กับเฟส $b_1(V_{alb1})$ มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ E ผลการมอดูเลทในรูปผลคูณได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากสมการ

$$V_{alb1} = E + \left[-\left(E \times V_{RS} \right) / E \right]$$

$$V_{alb1} = E - V_{RS}$$

2. โหมดการทำงานที่ 2 ช่วงคาบเวลา $\frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a_1 กับเฟส $b_1(V_{alb1})$ มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 ผลการมอดูเลทในรูปผลคูณได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเท่ากับ 0

$$V_{alb1} = 0$$

3. โหมดการทำงานที่ 3 ช่วงคาบเวลา $\pi \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{3}$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a_1 กับเฟส $b_1(V_{alb1})$ มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $-E$ ผลการมอดูเลทในรูปผลคูณได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากสมการ

$$V_{alb1} = -E + \left[-\left(-E \times V_{RS} \right) / E \right]$$

4. โหมดการทำงานที่ 4 ช่วงคาบเวลา $\frac{5\pi}{3} \leq \omega t \leq 2\pi$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a_1 กับเฟส $b_1(V_{alb1})$ มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 ผลการมอดูเลทในรูปผลคูณได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเท่ากับ 0

$$V_{alb1} = 0$$

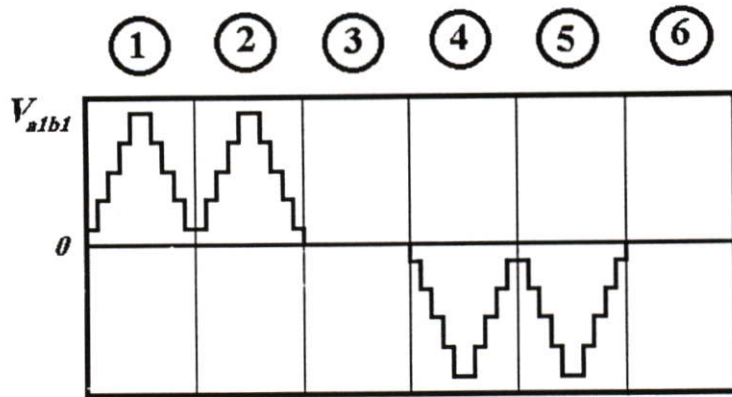
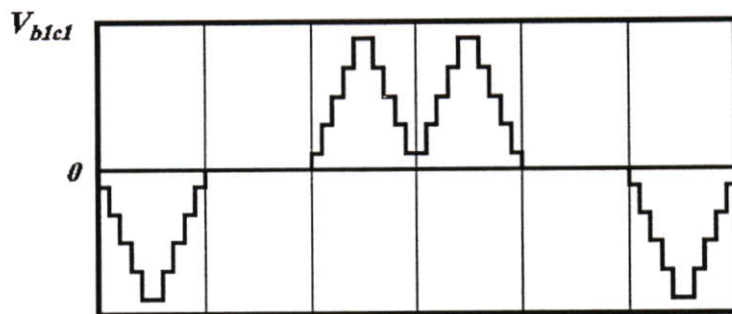
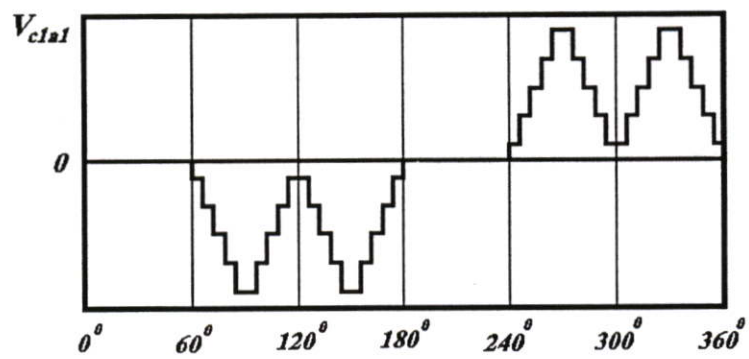
ตารางที่ 4.2 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส(V_{a1b1}) รูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเมื่อฉีดแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เพิ่ม เดิม 1 เฟส

โหมด	สแต็ป	ช่วงคาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ระดับแรงดันไฟฟ้า
1	1	0 - 6	(1-2K)E
	2	6 - 12	(1-K)E
	3	12 - 18	E
	4	18 - 24	(1+K)E
	5	24 - 30	(1+2K)E
	6	30 - 36	(1+2K)E
	7	36 - 42	(1+K)E
	8	42 - 48	E
	9	48 - 54	(1-K)E
	10	54 - 60	(1-2K)E
	11	60 - 66	(1-2K)E
	12	66 - 72	(1-K)E
	13	72 - 78	E
	14	78 - 84	(1+K)E
	15	84 - 90	(1+2K)E
	16	90 - 96	(1+2K)E
	17	96 - 102	(1+K)E
	18	102 - 108	E
	19	108 - 114	(1-K)E
	20	114 - 120	(1-2K)E
2	21-30	120 - 180	0

โหมด	สแต็ป	ช่วงคาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ระดับแรงดันไฟฟ้า
3	31	180 - 186	-(1-2K)E
	32	186 - 192	-(1-K)E
	33	192 - 198	-E
	34	198 - 204	(1+K)E
	35	204 - 210	(1+2K)E
	36	210 - 216	(1+2K)E
	37	216 - 222	(1+K)E
	38	222 - 228	E
	39	228 - 234	(1-K)E
	40	234 - 240	-(1-2K)E
	41	240 - 246	-(1-2K)E
	42	246 - 252	-(1-K)E
	43	252 - 258	-E
	44	258 - 264	-(1+K)E
	45	264 - 270	-(1+2K)E
	46	270 - 276	-(1+2K)E
	47	276 - 282	-(1+K)E
	48	282 - 288	-E
	49	288 - 294	-(1-K)E
	50	294 - 300	-(1-2K)E
4	51-60	300 - 360	0

4.3.3 การหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส

เมื่อนำผลการปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสที่มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละสแต็ปจากตารางที่ 4.2 นำมาคำนวณหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละสแต็ปของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส โดยแบ่งโหมดการทำงานของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 ดังภาพที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส V_{a1b1} ทำมุมกับ V_{b1c1} 120 องศาไฟฟ้า และ V_{b1c1} ทำมุมกับ V_{c1a1} 120 องศาไฟฟ้า การหาค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 ได้โดยการแบ่งโหมดของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเป็น 6 โหมดเพื่อเขียนวงจรสมมูลหาค่ากระแสแต่ละเฟส(i)และค่าความต้านทานรวมของวงจรสมมูล (R_{eq}) สำหรับโหลด 3 เฟสแบบสมดุลต่อแบบสตาร์ คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสทั้ง 3 เฟสในแต่ละโหมดการทำงานดังภาพที่ 4.10

(ก) V_{a1b1} (ข) V_{b1c1} (ค) V_{c1a1}

ภาพที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1

1. โหมดการทำงานที่ 1 จากภาพที่ 4.10(ก) ในช่วงคาบเวลา 0 – 60 องศาไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a_1 กับเฟส c_1 มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าจาก a_1 กับเฟส c_1 มีค่าเท่ากันเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเท่ากับ V_{alb1} และ R_{eq} เท่ากับ $\frac{3R}{2}$ กระแสในแต่ละเฟสเท่ากับ $\frac{2}{3R}(V_{alb1})$ ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสดังนี้

$$V_{a1o1} = V_{c1o1} = i \frac{R}{2} = \frac{1}{3}(V_{alb1}) \quad (4.1)$$

$$V_{b1o1} = iR = \frac{2}{3}(V_{alb1}) \quad (4.2)$$

2. โหมดการทำงานที่ 2 จากรูปที่ 4.10(ข) ในช่วงคาบเวลา 60 – 120 องศาไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส b_1 กับเฟส c_1 มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าจาก b_1 กับเฟส c_1 มีค่าเท่ากันเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเท่ากับ (V_{alb1}) และ R_{eq} เท่ากับ $\frac{3R}{2}$ กระแสในแต่ละเฟสเท่ากับ $\frac{2}{3R}(V_{alb1})$ ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสดังนี้

$$V_{b1o1} = V_{c1o1} = -i \frac{R}{2} = -\frac{1}{3}(V_{alb1}) \quad (4.3)$$

$$V_{a1o1} = iR = \frac{2}{3}(V_{alb1}) \quad (4.4)$$

3. โหมดการทำงานที่ 3 จากรูปที่ 4.10(ค) ในช่วงคาบเวลา 120 – 180 องศาไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a_1 กับเฟส b_1 มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าจาก a_1 กับเฟส b_1 มีค่าเท่ากันเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเท่ากับ (V_{b1c1}) และ R_{eq} เท่ากับ $\frac{3R}{2}$ กระแสในแต่ละเฟสเท่ากับ $\frac{2}{3R}(V_{b1c1})$ ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสดังนี้

$$V_{a1o1} = V_{b1o1} = i \frac{R}{2} = \frac{1}{3}(V_{b1c1}) \quad (4.5)$$

$$V_{c1o1} = -iR = -\frac{2}{3}(V_{b1c1}) \quad (4.6)$$

4. โหมดการทำงานที่ 4 จากรูปที่ 4.10(ง) ในช่วงคาบเวลา 180 – 240 องศาไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส c_1 กับเฟส a_1 มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าจาก c_1 กับเฟส a_1 มีค่าเท่ากันเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเท่ากับ (V_{b1c1}) และ R_{eq} เท่ากับ $\frac{3R}{2}$ กระแสในแต่ละเฟสเท่ากับ $\frac{2}{3R}(V_{b1c1})$ ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสดังนี้

$$V_{a1o1} = V_{c1o1} = -i\frac{R}{2} = -\frac{1}{3}(V_{b1c1}) \quad (4.7)$$

$$V_{b1o1} = iR = \frac{2}{3}(V_{b1c1}) \quad (4.8)$$

5. โหมดการทำงานที่ 5 จากรูปที่ 4.10(จ) ในช่วงคาบเวลา 240 – 300 องศาไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส b_1 กับเฟส c_1 มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าจาก b_1 กับเฟส c_1 มีค่าเท่ากันเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเท่ากับ (V_{c1a1}) และ R_{eq} เท่ากับ $\frac{3R}{2}$ กระแสในแต่ละเฟสเท่ากับ $\frac{2}{3R}(V_{c1a1})$ ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสดังนี้

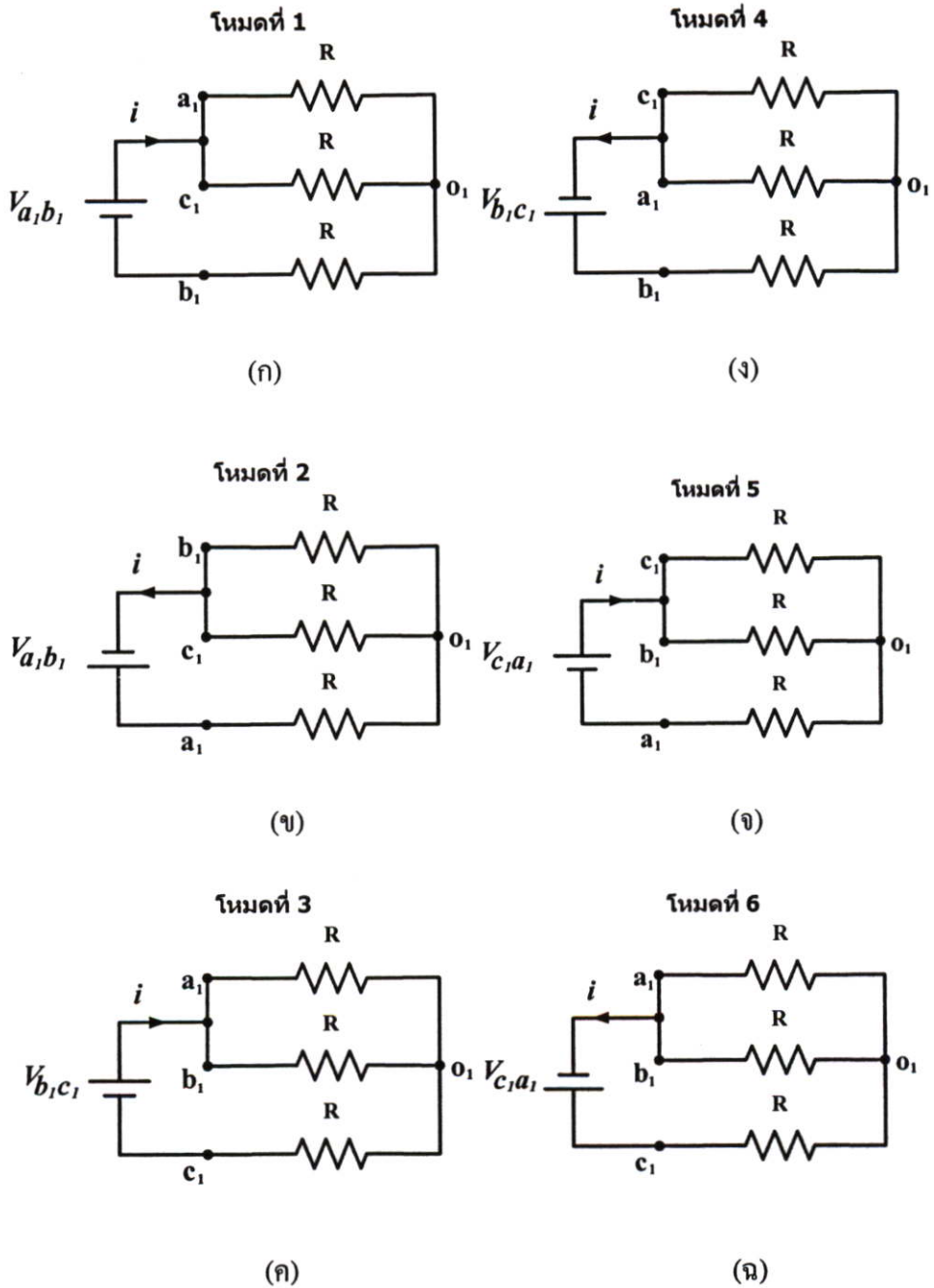
$$V_{b1o1} = V_{c1o1} = i\frac{R}{2} = \frac{1}{3}(V_{c1a1}) \quad (4.9)$$

$$V_{a1o1} = -iR = -\frac{2}{3}(V_{c1a1}) \quad (4.10)$$

6. โหมดการทำงานที่ 6 จากรูปที่ 4.10(ฉ) ในช่วงคาบเวลา 300 – 360 องศาไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a_1 กับเฟส b_1 มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าจาก a_1 กับเฟส b_1 มีค่าเท่ากันเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเท่ากับ (V_{c1a1}) และ R_{eq} เท่ากับ $\frac{3R}{2}$ กระแสในแต่ละเฟสเท่ากับ $\frac{2}{3R}(V_{c1a1})$ ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสดังนี้

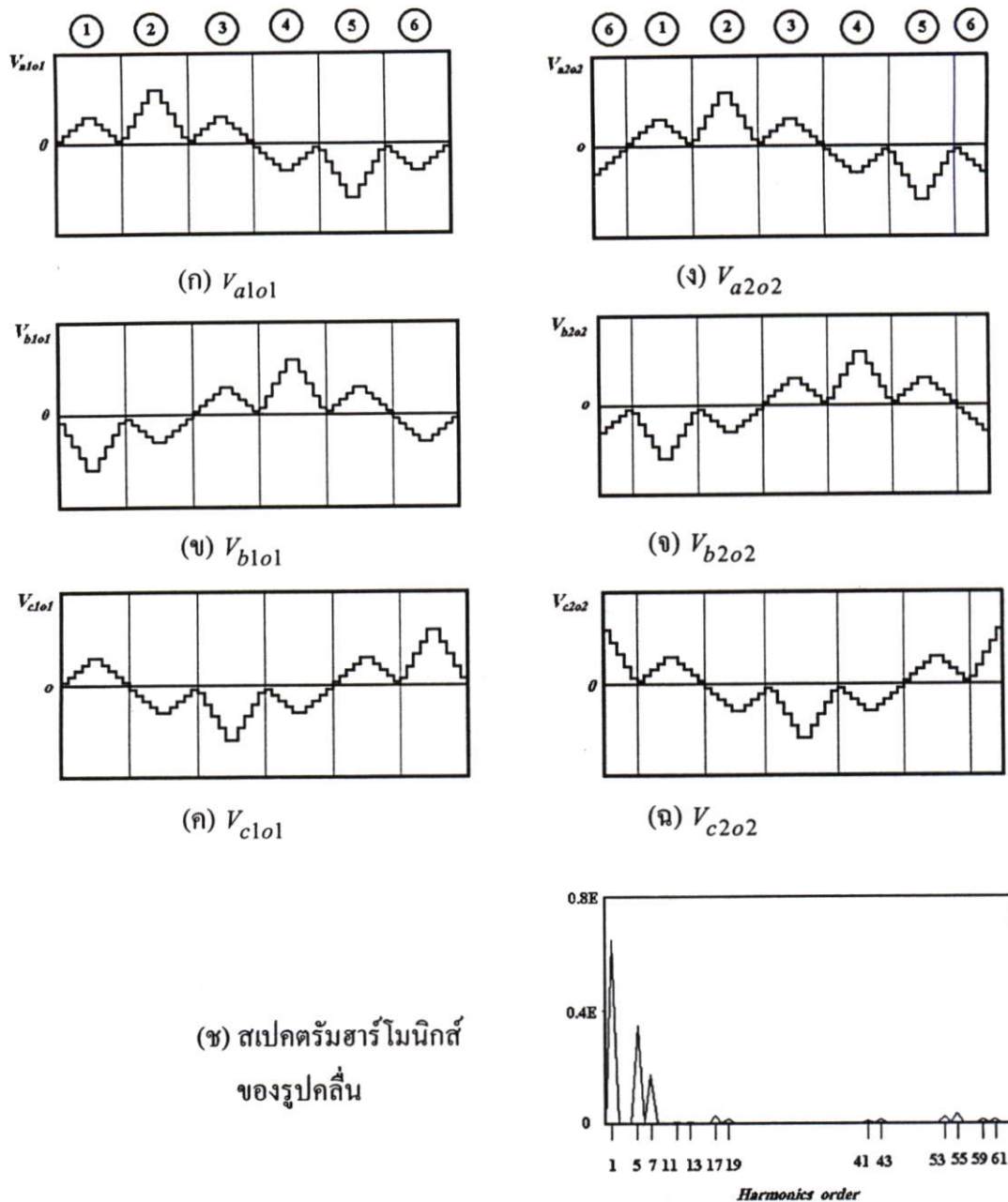
$$V_{a1o1} = V_{b1o1} = -i\frac{R}{2} = -\frac{1}{3}(V_{c1a1}) \quad (4.11)$$

$$V_{c1o1} = iR = \frac{2}{3}(V_{c1a1}) \quad (4.12)$$



ภาพที่ 4.10 วงจรสมมูลย์แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากโหมดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส

เมื่อคำนวณแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากสมการ (4.1) ถึง (4.12) แต่ละโหมดของการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสดังภาพที่ 4.11(ก), 4.11(ข) และ 4.11(ค) จะประกอบด้วยฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำ อันดับ 5 และ 7 ซึ่งมีค่าสูงดังภาพที่ 4.11(ข) และในทำนองเดียวกัน แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2 มีมุมต่างเฟสกับชุดที่ 1 เป็นมุม 30 องศาไฟฟ้า ดังภาพที่ 4.11(ง), 4.11(จ) และ 4.11(ฉ)



ภาพที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุด และสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่น

สรุปผลการคำนวณค่าระดับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดจากภาพที่ 4.11 ได้ดังตารางที่ 4.3, ตารางที่ 4.4, ตารางที่ 4.5, ตารางที่ 4.6, ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{a101} / E ในช่วงคาบเวลา 0 - 360 องศาไฟฟ้า

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า	สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
1	0 - 6	$(1-2K)/3$	31	182 - 188	$-(1-2K)/3$
2	6 - 12	$(1-K)/3$	32	188 - 194	$-(1-K)/3$
3	12 - 18	$1/3$	33	194 - 200	$-1/3$
4	18 - 24	$(1+K)/3$	34	200 - 206	$-(1+K)/3$
5	24 - 30	$(1+2K)/3$	35	206 - 212	$-(1+2K)/3$
6	30 - 36	$(1+2K)/3$	36	212 - 218	$-(1+2K)/3$
7	36 - 42	$(1+K)/3$	37	218 - 224	$-(1+K)/3$
8	42 - 48	$1/3$	38	224 - 230	$-1/3$
9	48 - 54	$(1-K)/3$	39	230 - 236	$-(1-K)/3$
10	54 - 60	$(1-2K)/3$	40	236 - 240	$-(1-2K)/3$
11	60 - 66	$2(1-2K)/3$	41	240 - 246	$-2(1-2K)/3$
12	66 - 72	$2(1-K)/3$	42	246 - 252	$-2(1-K)/3$
13	72 - 78	$2/3$	43	252 - 258	$-2/3$
14	78 - 84	$2(1+K)/3$	44	258 - 264	$-2(1+K)/3$
15	84 - 90	$2(1+2K)/3$	45	264 - 270	$-2(1+2K)/3$
16	90 - 96	$2(1+2K)/3$	46	270 - 276	$-2(1+2K)/3$
17	96 - 102	$2(1+K)/3$	47	276 - 282	$-2(1+K)/3$
18	102 - 108	$2/3$	48	282 - 288	$-2/3$
19	108 - 114	$2(1-K)/3$	49	288 - 294	$-2(1-K)/3$
20	114 - 120	$2(1-2K)/3$	50	294 - 300	$-2(1-2K)/3$
21	120 - 126	$(1-2K)/3$	51	300 - 306	$-(1-2K)/3$
22	126 - 132	$(1-K)/3$	52	306 - 312	$-(1-K)/3$
23	132 - 138	$1/3$	53	312 - 318	$-1/3$
24	138 - 144	$(1+K)/3$	54	318 - 324	$-(1+K)/3$
25	144 - 150	$(1+2K)/3$	55	324 - 330	$-(1+2K)/3$
26	150 - 156	$(1+2K)/3$	56	330 - 336	$-(1+2K)/3$
27	156 - 162	$(1+K)/3$	57	336 - 342	$-(1+K)/3$
28	162 - 168	$1/3$	58	342 - 348	$-1/3$
29	168 - 174	$(1-K)/3$	59	348 - 354	$-(1-K)/3$
30	174 - 180	$(1-2K)/3$	60	354 - 360	$-(1-2K)/3$

ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{b101} จะเลื่อนเฟสจาก V_{a101} เป็นมุม 120 องศาไฟฟ้ามีค่า
ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{blo1} / E ในช่วงกบเวลา 0 - 360 องศาไฟฟ้า

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
41	0 - 6	$-2(1-2K)/3$
42	6 - 12	$-2(1-K)/3$
43	12 - 18	$-2/3$
44	18 - 24	$-2(1+K)/3$
45	24 - 30	$-2(1+2K)/3$
46	30 - 36	$-2(1+2K)/3$
47	36 - 42	$-2(1+K)/3$
48	42 - 48	$-2/3$
49	48 - 54	$-2(1-K)/3$
50	54 - 60	$-2(1-2K)/3$
51	60 - 66	$-(1-2K)/3$
52	66 - 72	$-(1-K)/3$
53	72 - 78	$-1/3$
54	78 - 84	$-(1+K)/3$
55	84 - 90	$-(1+2K)/3$
56	90 - 96	$-(1+2K)/3$
57	96 - 102	$-(1+K)/3$
58	102 - 108	$-1/3$
59	108 - 114	$-(1-K)/3$
60	114 - 120	$-(1-2K)/3$
1	120 - 126	$(1-2K)/3$
2	126 - 132	$(1-K)/3$
3	132 - 138	$1/3$
4	138 - 144	$(1+K)/3$
5	144 - 150	$(1+2K)/3$
6	150 - 156	$(1+2K)/3$
7	156 - 162	$(1+K)/3$
8	162 - 168	$1/3$
9	168 - 174	$(1-K)/3$
10	174 - 180	$(1-2K)/3$

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
11	182 - 188	$2(1-2K)/3$
12	188 - 194	$2(1-K)/3$
13	194 - 200	$2/3$
14	200 - 206	$2(1+K)/3$
15	206 - 212	$2(1+2K)/3$
16	212 - 218	$2(1+2K)/3$
17	218 - 224	$2(1+K)/3$
18	224 - 230	$2/3$
19	230 - 236	$2(1-K)/3$
20	236 - 240	$2(1-2K)/3$
21	240 - 246	$(1-2K)/3$
22	246 - 252	$(1-K)/3$
23	252 - 258	$1/3$
24	258 - 264	$(1+K)/3$
25	264 - 270	$(1+2K)/3$
26	270 - 276	$(1+2K)/3$
27	276 - 282	$(1+K)/3$
28	282 - 288	$1/3$
29	288 - 294	$(1-K)/3$
30	294 - 300	$(1-2K)/3$
31	300 - 306	$-(1-2K)/3$
32	306 - 312	$-(1-K)/3$
33	312 - 318	$-1/3$
34	318 - 324	$-(1+K)/3$
35	324 - 330	$-(1+2K)/3$
36	330 - 336	$-(1+2K)/3$
37	336 - 342	$-(1+K)/3$
38	342 - 348	$-1/3$
39	348 - 354	$-(1-K)/3$
40	354 - 360	$-(1-2K)/3$

ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{c101} จะเลื่อนเฟสจาก V_{b101} เป็นมุม 120 องศาไฟฟ้ามี่ค่าดังตารางที่

4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{c101} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
21	0 - 6	$(1-2K)/3$
22	6 - 12	$(1-K)/3$
23	12 - 18	$1/3$
24	18 - 24	$(1+K)/3$
25	24 - 30	$(1+2K)/3$
26	30 - 36	$(1+2K)/3$
27	36 - 42	$(1+K)/3$
28	42 - 48	$1/3$
29	48 - 54	$(1-K)/3$
30	54 - 60	$(1-2K)/3$
31	60 - 66	$-(1-2K)/3$
32	66 - 72	$-(1-K)/3$
33	72 - 78	$-1/3$
34	78 - 84	$-(1+K)/3$
35	84 - 90	$-(1+2K)/3$
36	90 - 96	$-(1+2K)/3$
37	96 - 102	$-(1+K)/3$
38	102 - 108	$-1/3$
39	108 - 114	$-(1-K)/3$
40	114 - 120	$-(1-2K)/3$
41	120 - 126	$-2(1-2K)/3$
42	126 - 132	$-2(1-K)/3$
43	132 - 138	$-2/3$
44	138 - 144	$-2(1+K)/3$
45	144 - 150	$-2(1+2K)/3$
46	150 - 156	$-2(1+2K)/3$
47	156 - 162	$-2(1+K)/3$
48	162 - 168	$-2/3$
49	168 - 174	$-2(1-K)/3$
50	174 - 180	$-2(1-2K)/3$

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
51	182 - 188	$-(1-2K)/3$
52	188 - 194	$-(1-K)/3$
53	194 - 200	$-1/3$
54	200 - 206	$-(1+K)/3$
55	206 - 212	$-(1+2K)/3$
56	212 - 218	$-(1+2K)/3$
57	218 - 224	$-(1+K)/3$
58	224 - 230	$-1/3$
59	230 - 236	$-(1-K)/3$
60	236 - 240	$-(1-2K)/3$
1	240 - 246	$(1-2K)/3$
2	246 - 252	$(1-K)/3$
3	252 - 258	$1/3$
4	258 - 264	$(1+K)/3$
5	264 - 270	$(1+2K)/3$
6	270 - 276	$(1+2K)/3$
7	276 - 282	$(1+K)/3$
8	282 - 288	$1/3$
9	288 - 294	$(1-K)/3$
10	294 - 300	$(1-2K)/3$
11	300 - 306	$2(1-2K)/3$
12	306 - 312	$2(1-K)/3$
13	312 - 318	$2/3$
14	318 - 324	$2(1+K)/3$
15	324 - 330	$2(1+2K)/3$
16	330 - 336	$2(1+2K)/3$
17	336 - 342	$2(1+K)/3$
18	342 - 348	$2/3$
19	348 - 354	$2(1-K)/3$
20	354 - 360	$2(1-2K)/3$

ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{a2o2} จะเลื่อนเฟสจาก V_{a1o1} เป็นมุม 30 องศาไฟฟ้ามีก่า
ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{a2o2} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
56	0 - 6	$-(1+2K)/3$
57	6 - 12	$-(1+K)/3$
58	12 - 18	$-1/3$
59	18 - 24	$-(1-K)/3$
60	24 - 30	$-(1-2K)/3$
1	30 - 36	$(1-2K)/3$
2	36 - 42	$(1-K)/3$
3	42 - 48	$1/3$
4	48 - 54	$(1+K)/3$
5	54 - 60	$(1+2K)/3$
6	60 - 66	$(1+2K)/3$
7	66 - 72	$(1+K)/3$
8	72 - 78	$1/3$
9	78 - 84	$(1-K)/3$
10	84 - 90	$(1-2K)/3$
11	90 - 96	$2(1-2K)/3$
12	96 - 102	$2(1-K)/3$
13	102 - 108	$2/3$
14	108 - 114	$2(1+K)/3$
15	114 - 120	$2(1+2K)/3$
16	120 - 126	$2(1+2K)/3$
17	126 - 132	$2(1+K)/3$
18	132 - 138	$2/3$
19	138 - 144	$2(1-K)/3$
20	144 - 150	$2(1-2K)/3$
21	150 - 156	$(1-2K)/3$
22	156 - 162	$(1-K)/3$
23	162 - 168	$1/3$
24	168 - 174	$(1+K)/3$
25	174 - 180	$(1+2K)/3$

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
26	182 - 188	$(1+2K)/3$
27	188 - 194	$(1+K)/3$
28	194 - 200	$1/3$
29	200 - 206	$(1-K)/3$
30	206 - 212	$(1-2K)/3$
31	212 - 218	$-(1-2K)/3$
32	218 - 224	$-(1-K)/3$
33	224 - 230	$-1/3$
34	230 - 236	$-(1+K)/3$
35	236 - 240	$-(1+2K)/3$
36	240 - 246	$-(1+2K)/3$
37	246 - 252	$-(1+K)/3$
38	252 - 258	$-1/3$
39	258 - 264	$-(1-K)/3$
40	264 - 270	$-(1-2K)/3$
41	270 - 276	$-2(1-2K)/3$
42	276 - 282	$-2(1-K)/3$
43	282 - 288	$-2/3$
44	288 - 294	$-2(1+K)/3$
45	294 - 300	$-2(1+2K)/3$
46	300 - 306	$-2(1+2K)/3$
47	306 - 312	$-2(1+K)/3$
48	312 - 318	$-2/3$
49	318 - 324	$-2(1-K)/3$
50	324 - 330	$-2(1-2K)/3$
51	330 - 336	$-(1-2K)/3$
52	336 - 342	$-(1-K)/3$
53	342 - 348	$-1/3$
54	348 - 354	$-(1+K)/3$
55	354 - 360	$-(1+2K)/3$

ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{b2o2} จะเลื่อนเฟสจาก V_{b1o1} เป็นมุม 30 องศาไฟฟ้ามิก้า
ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{b2o2}/E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
36	0 - 6	$-(1+2K)/3$
37	6 - 12	$-(1+K)/3$
38	12 - 18	$-1/3$
39	18 - 24	$-(1-K)/3$
40	24 - 30	$-(1-2K)/3$
41	30 - 36	$-2(1-2K)/3$
42	36 - 42	$-2(1-K)/3$
43	42 - 48	$-2/3$
44	48 - 54	$-2(1+K)/3$
45	54 - 60	$-2(1+2K)/3$
46	60 - 66	$-2(1+2K)/3$
47	66 - 72	$-2(1+K)/3$
48	72 - 78	$-2/3$
49	78 - 84	$-2(1-K)/3$
50	84 - 90	$-2(1-2K)/3$
51	90 - 96	$-(1-2K)/3$
52	96 - 102	$-(1-K)/3$
53	102 - 108	$-1/3$
54	108 - 114	$-(1+K)/3$
55	114 - 120	$-(1+2K)/3$
56	120 - 126	$-(1+2K)/3$
57	126 - 132	$-(1+K)/3$
58	132 - 138	$-1/3$
59	138 - 144	$-(1-K)/3$
60	144 - 150	$-(1-2K)/3$
1	150 - 156	$(1-2K)/3$
2	156 - 162	$(1-K)/3$
3	162 - 168	$1/3$
4	168 - 174	$(1+K)/3$
5	174 - 180	$(1+2K)/3$

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
6	182 - 188	$(1+2K)/3$
7	188 - 194	$(1+K)/3$
8	194 - 200	$1/3$
9	200 - 206	$(1-K)/3$
10	206 - 212	$(1-2K)/3$
11	212 - 218	$2(1-2K)/3$
12	218 - 224	$2(1-K)/3$
13	224 - 230	$2/3$
14	230 - 236	$2(1+K)/3$
15	236 - 240	$2(1+2K)/3$
16	240 - 246	$2(1+2K)/3$
17	246 - 252	$2(1+K)/3$
18	252 - 258	$2/3$
19	258 - 264	$2(1-K)/3$
20	264 - 270	$2(1-2K)/3$
21	270 - 276	$(1-2K)/3$
22	276 - 282	$(1-K)/3$
23	282 - 288	$1/3$
24	288 - 294	$(1+K)/3$
25	294 - 300	$(1+2K)/3$
26	300 - 306	$(1+2K)/3$
27	306 - 312	$(1+K)/3$
28	312 - 318	$1/3$
29	318 - 324	$(1-K)/3$
30	324 - 330	$(1-2K)/3$
31	330 - 336	$-(1-2K)/3$
32	336 - 342	$-(1-K)/3$
33	342 - 348	$-1/3$
34	348 - 354	$-(1+K)/3$
35	354 - 360	$-(1+2K)/3$

ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{c2o2} จะเลื่อนเฟสจาก V_{c1o1} เป็นมุม 30 องศาไฟฟ้ามี่ค่าดังตาราง
ที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{c2o2} / E ในช่วงคาบเวลา 0 – 360 องศาไฟฟ้า

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า	สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
16	0 - 6	$2(1+2K)/3$	46	182 - 188	$-2(1+2K)/3$
17	6 - 12	$2(1+K)/3$	47	188 - 194	$-2(1+K)/3$
18	12 - 18	$2/3$	48	194 - 200	$-2/3$
19	18 - 24	$2(1-K)/3$	49	200 - 206	$-2(1-K)/3$
20	24 - 30	$2(1-2K)/3$	50	206 - 212	$-2(1-2K)/3$
21	30 - 36	$(1-2K)/3$	51	212 - 218	$-(1-2K)/3$
22	36 - 42	$(1-K)/3$	52	218 - 224	$-(1-K)/3$
23	42 - 48	$1/3$	53	224 - 230	$-1/3$
24	48 - 54	$(1+K)/3$	54	230 - 236	$-(1+K)/3$
25	54 - 60	$(1+2K)/3$	55	236 - 240	$-(1+2K)/3$
26	60 - 66	$(1+2K)/3$	56	240 - 246	$-(1+2K)/3$
27	66 - 72	$(1+K)/3$	57	246 - 252	$-(1+K)/3$
28	72 - 78	$1/3$	58	252 - 258	$-1/3$
29	78 - 84	$(1-K)/3$	59	258 - 264	$-(1-K)/3$
30	84 - 90	$(1-2K)/3$	60	264 - 270	$-(1-2K)/3$
31	90 - 96	$-(1-2K)/3$	1	270 - 276	$(1-2K)/3$
32	96 - 102	$-(1-K)/3$	2	276 - 282	$(1-K)/3$
33	102 - 108	$-1/3$	3	282 - 288	$1/3$
34	108 - 114	$-(1+K)/3$	4	288 - 294	$(1+K)/3$
35	114 - 120	$-(1+2K)/3$	5	294 - 300	$(1+2K)/3$
36	120 - 126	$-(1+2K)/3$	6	300 - 306	$(1+2K)/3$
37	126 - 132	$-(1+K)/3$	7	306 - 312	$(1+K)/3$
38	132 - 138	$-1/3$	8	312 - 318	$1/3$
39	138 - 144	$-(1-K)/3$	9	318 - 324	$(1-K)/3$
40	144 - 150	$-(1-2K)/3$	10	324 - 330	$(1-2K)/3$
41	150 - 156	$-2(1-2K)/3$	11	330 - 336	$2(1-2K)/3$
42	156 - 162	$-2(1-K)/3$	12	336 - 342	$2(1-K)/3$
43	162 - 168	$-2/3$	13	342 - 348	$2/3$
44	168 - 174	$-2(1+K)/3$	14	348 - 354	$2(1+K)/3$
45	174 - 180	$-2(1+2K)/3$	15	354 - 360	$2(1+2K)/3$

4.3.4 การหาแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสรูปคลื่น 60 สเต็ปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

แบบกระจายเฟส ไม่สมมาตร

จากลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดเมื่อคัปปลิงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้วยรีแอกเตอร์คัปปลิงทำให้ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร หาได้จากการนำค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละสเต็ปจากตารางที่ 4.3, ตารางที่ 4.4 ตารางที่ 4.5 ตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 แทนค่าในสมการ(3.38)และสมการ(3.43) สำหรับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส V_{u1o1} และ V_{u2o2} ตามลำดับ ได้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละสเต็ปของรูปคลื่นดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{u1o1} / E ในช่วงคาบเวลา 0 - 360 องศาไฟฟ้า

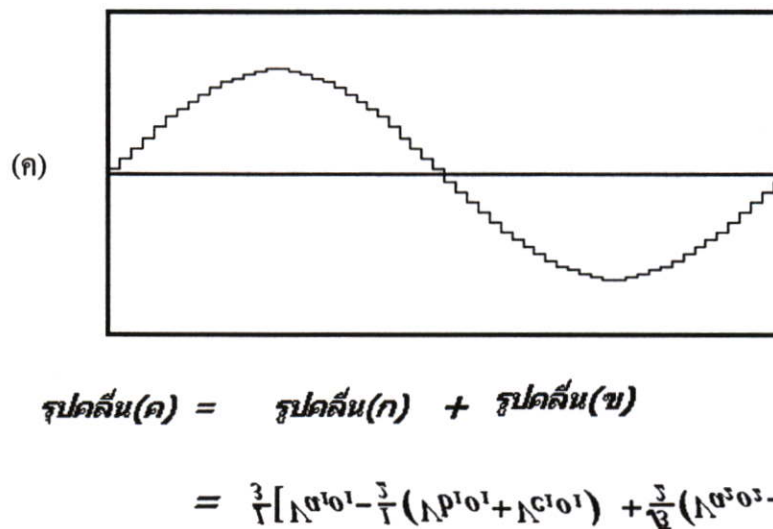
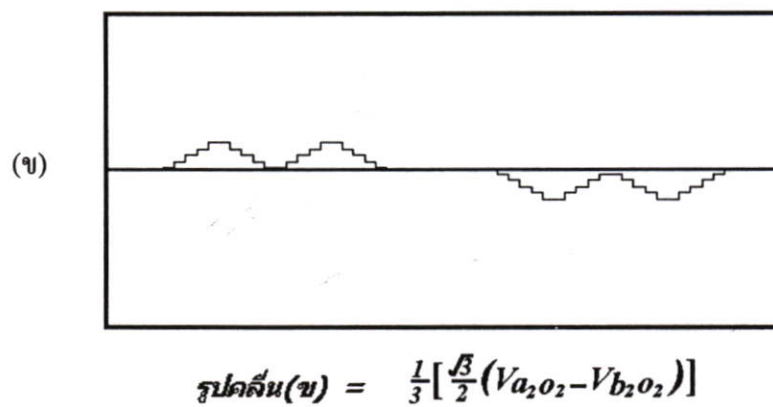
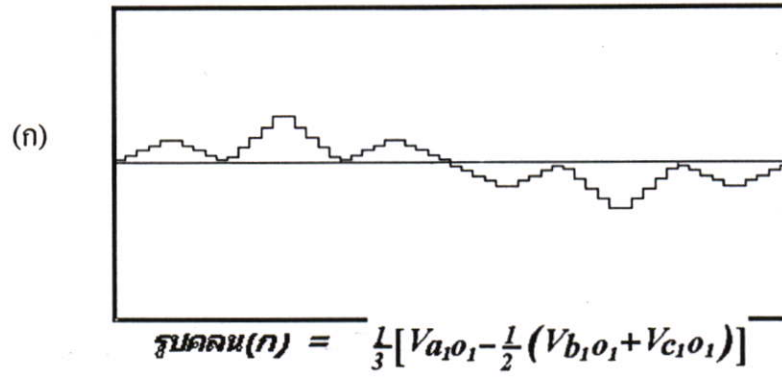
สเต็ป	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
1	0 - 6	$(1-2K)/6$
2	6 - 12	$(1-K)/6$
3	12 - 18	$1/6$
4	18 - 24	$(1+K)/6$
5	24 - 30	$(1+2K)/6$
6	30 - 36	$[1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$
7	36 - 42	$[1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$
8	42 - 48	$(1+\sqrt{3})/6$
9	48 - 54	$[1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$
10	54 - 60	$[1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$
11	60 - 66	$[2+\sqrt{3}-2(2-\sqrt{3})k]/6$
12	66 - 72	$[2+\sqrt{3}-(2\sqrt{3})k]/6$
13	72 - 78	$(2+\sqrt{3})/6$
14	78 - 84	$[2+\sqrt{3}+(2\sqrt{3})k]/6$
15	84 - 90	$[2+\sqrt{3}+2(2\sqrt{3})k]/6$
16	90 - 96	$[2+\sqrt{3}+2(2\sqrt{3})k]/6$
17	96 - 102	$[2+\sqrt{3}+(2\sqrt{3})k]/6$
18	102 - 108	$(2+\sqrt{3})/6$
19	108 - 114	$[2+\sqrt{3}-(2\sqrt{3})k]/6$
20	114 - 120	$[2+\sqrt{3}-2(2\sqrt{3})k]/6$
21	120 - 126	$[1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$
22	126 - 132	$[1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$
23	132 - 138	$(1+\sqrt{3})/6$
24	138 - 144	$[1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$
25	144 - 150	$[1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$
26	150 - 156	$(1+2K)/6$
27	156 - 162	$(1+K)/6$
28	162 - 168	$1/6$
29	168 - 174	$(1-K)/6$
30	174 - 180	$(1-2K)/6$

สเต็ป	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
31	180 - 186	$-(1-2K)/6$
32	186 - 192	$-(1-K)/6$
33	192 - 198	$-1/6$
34	198 - 204	$-(1+K)/6$
35	204 - 210	$-(1+2K)/6$
36	210 - 216	$[-1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$
37	216 - 222	$[-1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$
38	222 - 228	$-(1+\sqrt{3})/6$
39	228 - 234	$[-1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$
40	234 - 240	$[-1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$
41	240 - 246	$[-2+\sqrt{3}-2(2-\sqrt{3})k]/6$
42	246 - 252	$[-2+\sqrt{3}-(2\sqrt{3})k]/6$
43	252 - 258	$-(2+\sqrt{3})/6$
44	258 - 264	$[-2+\sqrt{3}+(2\sqrt{3})k]/6$
45	264 - 270	$[-2+\sqrt{3}+2(2\sqrt{3})k]/6$
46	270 - 276	$[-2+\sqrt{3}+2(2\sqrt{3})k]/6$
47	276 - 282	$[-2+\sqrt{3}+(2\sqrt{3})k]/6$
48	282 - 288	$-(2+\sqrt{3})/6$
49	288 - 294	$[-2+\sqrt{3}-(2\sqrt{3})k]/6$
50	294 - 300	$[-2+\sqrt{3}-2(2\sqrt{3})k]/6$
51	300 - 306	$[-1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$
52	306 - 312	$[-1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$
53	312 - 318	$-(1+\sqrt{3})/6$
54	318 - 324	$[-1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$
55	324 - 330	$[-1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$
56	330 - 336	$-(1+2K)/6$
57	336 - 342	$-(1+K)/6$
58	342 - 348	$-1/6$
59	348 - 354	$-(1-K)/6$
60	354 - 360	$-(1-2K)/6$

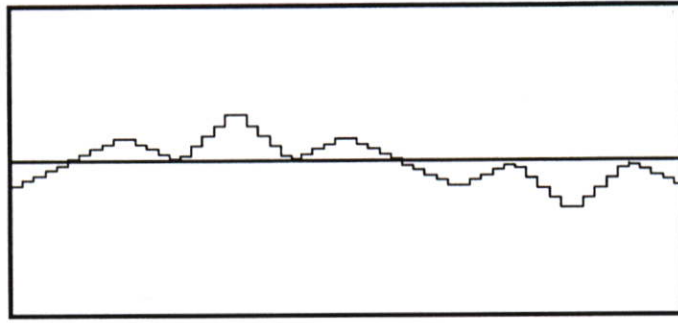
ตารางที่ 4.10 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า V_{u2o2} / E ในช่วงคาบเวลา 0–360 องศาไฟฟ้า

สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า	สลับ	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
56	0 - 6	$-(1+2K)/6$	26	180 - 186	$(1+2K)/6$
57	6 - 12	$-(1+K)/6$	27	186 - 192	$(1+K)/6$
58	12 - 18	$-1/6$	28	192 - 198	$1/6$
59	18 - 24	$-(1-K)/6$	29	198 - 204	$(1-K)/6$
60	24 - 30	$-(1-2K)/6$	30	204 - 210	$(1-2K)/6$
1	30 - 36	$(1-2K)/6$	31	210 - 216	$-(1-2K)/6$
2	36 - 42	$(1-K)/6$	32	216 - 222	$-(1-K)/6$
3	42 - 48	$1/6$	33	222 - 228	$-1/6$
4	48 - 54	$(1+K)/6$	34	228 - 234	$-(1+K)/6$
5	54 - 60	$(1+2K)/6$	35	234 - 240	$-(1+2K)/6$
6	60 - 66	$[1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$	36	240 - 246	$-[1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$
7	66 - 72	$[1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$	37	246 - 252	$-[1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$
8	72 - 78	$(1+\sqrt{3})/6$	38	252 - 258	$-(1+\sqrt{3})/6$
9	78 - 84	$[1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$	39	258 - 264	$-[1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$
10	84 - 90	$[1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$	40	264 - 270	$-[1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$
11	90 - 96	$[2+\sqrt{3}-2(2-\sqrt{3})k]/6$	41	270 - 276	$-[2+\sqrt{3}-2(2-\sqrt{3})k]/6$
12	96 - 102	$[2+\sqrt{3}-(2-\sqrt{3})k]/6$	42	276 - 282	$-[2+\sqrt{3}-(2-\sqrt{3})k]/6$
13	102 - 108	$(2+\sqrt{3})/6$	43	282 - 288	$-(2+\sqrt{3})/6$
14	108 - 114	$[2+\sqrt{3}+(2-\sqrt{3})k]/6$	44	288 - 294	$-[2+\sqrt{3}+(2-\sqrt{3})k]/6$
15	114 - 120	$[2+\sqrt{3}+2(2-\sqrt{3})k]/6$	45	294 - 300	$-[2+\sqrt{3}+2(2-\sqrt{3})k]/6$
16	120 - 126	$[2+\sqrt{3}+2(2-\sqrt{3})k]/6$	46	300 - 306	$-[2+\sqrt{3}+2(2-\sqrt{3})k]/6$
17	126 - 132	$[2+\sqrt{3}+(2-\sqrt{3})k]/6$	47	306 - 312	$-[2+\sqrt{3}+(2-\sqrt{3})k]/6$
18	132 - 138	$(2+\sqrt{3})/6$	48	312 - 318	$-(2+\sqrt{3})/6$
19	138 - 144	$[2+\sqrt{3}-(2-\sqrt{3})k]/6$	49	318 - 324	$-[2+\sqrt{3}-(2-\sqrt{3})k]/6$
20	144 - 150	$[2+\sqrt{3}-2(2-\sqrt{3})k]/6$	50	324 - 330	$-[2+\sqrt{3}-2(2-\sqrt{3})k]/6$
21	150 - 156	$[1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$	51	330 - 336	$-[1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$
22	156 - 162	$[1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$	52	336 - 342	$-[1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$
23	162 - 168	$(1+\sqrt{3})/6$	53	342 - 348	$-(1+\sqrt{3})/6$
24	168 - 174	$[1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$	54	348 - 354	$-[1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$
25	174 - 180	$[1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$	55	354 - 360	$-[1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$

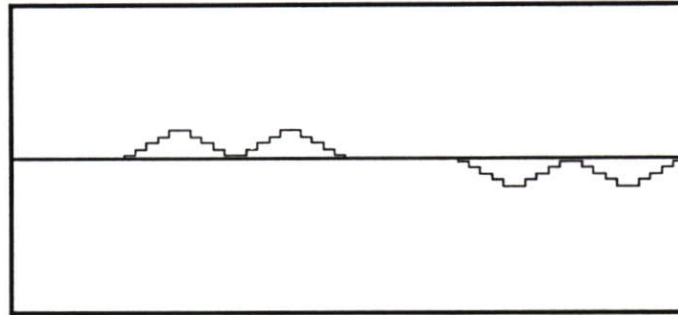
จากตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสของ V_{u1o1} และ V_{u2o2} มีมุมต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้า โดยแสดงแผนภูมิการรวมรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสทั้ง 2 ชุดด้วยรีแอกเตอร์คัปปลิงจากสมการ(3.38) และสมการ(3.43) ได้ดังภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13



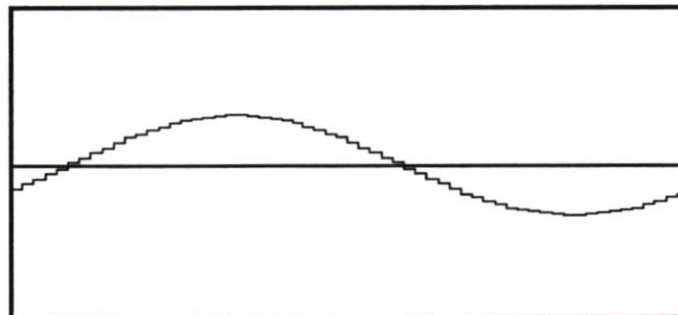
ภาพที่ 4.12 รูปคลื่น 60 สเต็ปแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (V_{u1o1}) จากการค้ำปลีงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้วยรีแอกเตอร์ค้ำปลีง



$$\text{รูปคลื่น}(ก) = \frac{1}{3} [V_{a_2} o_2 - \frac{1}{2} (V_{b_2} o_2 + V_{c_2} o_2)]$$



$$\text{รูปคลื่น}(ข) = \frac{1}{3} [\frac{\sqrt{3}}{2} (V_{a_1} o_1 - V_{c_1} o_1)]$$



$$\begin{aligned} \text{รูปคลื่น}(ค) &= \text{รูปคลื่น}(ก) + \text{รูปคลื่น}(ข) \\ &= \frac{1}{3} [V_{a_2} o_2 - \frac{1}{2} (V_{b_2} o_2 + V_{c_2} o_2)] \end{aligned}$$

ภาพที่ 4.13 รูปคลื่น 60 สเต็ปแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส (V_{u2o2}) จากการคัปปลิงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้วยรีแอกเตอร์คัปปลิง

4.3.5 การหาค่าความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสกับอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

การจัดวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร โดยออกแบบให้ขดลวดสเตเตอร์เป็น 3 เฟส 2 ชุดทำมุมกัน 30 องศาไฟฟ้าผลของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งกลุ่มฮาร์โมนิกส์ (h_k) ที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

$$h_k = q_{even} v \pm (q_{even} - k) \tag{4.13}$$

- เมื่อ q_{even} : จำนวนเฟสที่เป็นเลขคู่
 v : 1, 3, 5, 7,
 k : 1, 3, 5,($q_{even} - 1$)

ดังนั้นเมื่อแทนค่า k และจำนวนเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสในสมการ (4.13) ได้กลุ่มฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นได้ 3 กลุ่มดังสมการ (4.14), (4.15) และ(4.16) สรุปเป็นกลุ่มฮาร์โมนิกส์ได้ดังตารางที่ 4.11

$$h_1 = 6v \pm (6 - 1) \tag{4.14}$$

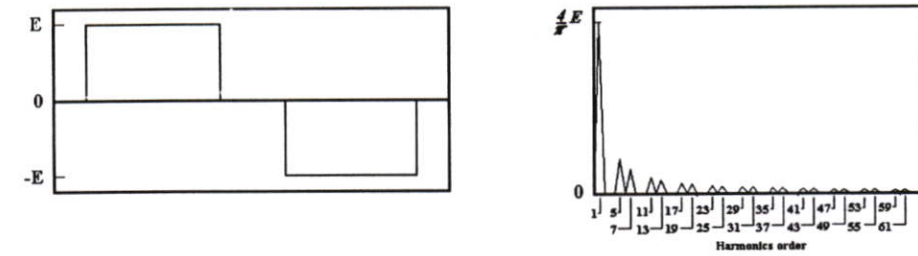
$$h_3 = 6v \pm (6 - 3) \tag{4.15}$$

$$h_5 = 6v \pm (6 - 5) \tag{4.16}$$

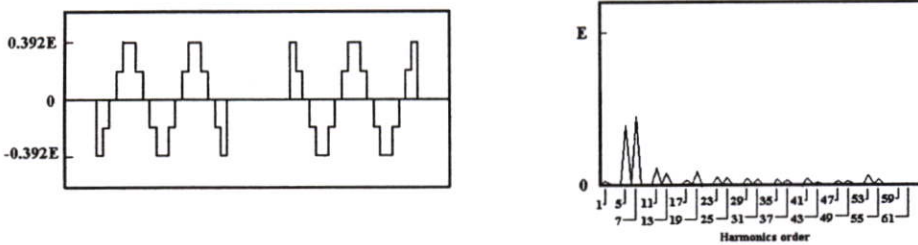
ตารางที่ 4.11 กลุ่มฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

q_{even}	มุมระหว่างเฟส ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ชุด β	กลุ่มฮาร์โมนิกส์ k	ฮาร์โมนิกส์แต่ละกลุ่ม h_k
6	30°	1	1, 11, 13, 23, 25, 35..... $6v \pm 5$
		3	3, 9, 15, 21, 27, 33..... $6v \pm 3$
		5	5, 7, 17, 19, 29, 31..... $6v \pm 1$

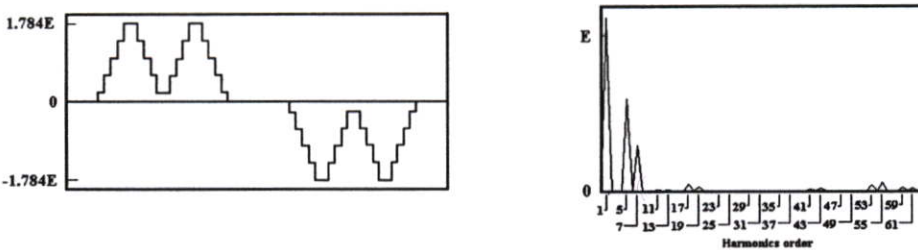
จากตารางที่ 4.11 กลุ่มฮาร์โมนิกส์กลุ่มที่ 3(k=3) ถูกขจัดโดยไม่ต่อจุดร่วมของขดลวด สเตเตอร์ 3 เฟสแต่ละชุดเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ส่วนกลุ่มฮาร์โมนิกส์ กลุ่มที่ 1 (k=1) และ กลุ่มที่ 5 (k=5)สามารถขจัดได้โดยฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเป็ลความถี่ 6 เท่าของความถี่แรงดันไฟฟ้า จากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสให้มีค่าเหมาะสมดังภาพที่ 4.14



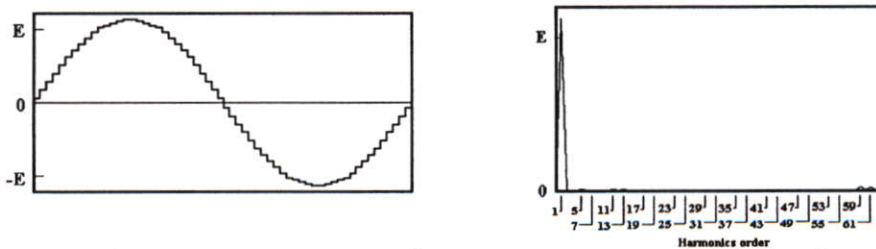
(ก) รูปคลื่น(ก) V_{a1b1} เมื่อไม่ฉีดแรงดันไฟฟ้า V_{RS}



(ข) รูปคลื่น(ข)ผลการมอดเลท V_{a1b1} กับ V_{RS}



(ค) รูปคลื่น(ค)แรงดันไฟฟ้า V_{a1b1} ได้จาก รูปคลื่น(ก)+รูปคลื่น(ข)



(ง) รูปคลื่น(ง)แรงดันไฟฟ้า V_{u1o1} เมื่อกรองฮาร์โมนิกส์กลุ่มที่ 3 จากรูปคลื่น(ค)

ภาพที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากผลการขจัดฮาร์โมนิกส์โดยการฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเป็ล ให้กับจุดต่ออนุกรม (จุด M) ของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด

จากภาพที่ 4.14(ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส (V_{a1b1}) ขณะไม่ฉีดแรงดันไฟฟ้า ริปเปิ้ลประกอบด้วยกลุ่มสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 5 เมื่อฉีดแรงดันไฟฟ้า ริปเปิ้ล ดังภาพที่ 4.14(ข) ซึ่งประกอบด้วยสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 5 โดยไม่มีสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับ 59 และ 61 จากลักษณะการฉีดแรงดันไฟฟ้า ริปเปิ้ลจะทำให้สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ จากภาพที่ 4.14(ข) หักล้างกันกับสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์จากภาพที่ 4.14(ก) ได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสดังภาพที่ 4.14(ค) โดยการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี. ของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสให้เหมาะสมทำให้ค่าสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์กลุ่มที่ 1 อันดับ 11 และ 13 มีค่าต่ำที่สุด จะทำให้ค่า สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์กลุ่มที่ 5 อันดับ 23, 25, 29, 31, 35, 37, 47 และ 49 มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อใช้รีแอกเตอร์คัปปลิ่งต่ออนุกรมระหว่างอินเวอร์เตอร์หลักกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้กรองแรงดันไฟฟ้าฮาร์โมนิกส์อันดับ 5, 7, 17, 19, 41, 43, 53 และ 55 ให้หมดไปได้โดยยังคงเหลือค่าสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์อันดับ 59 และ 61 เพราะลักษณะรูปคลื่นเป็น 60 สเต็ป ดังภาพที่ 4.14(ง)

ดังนั้นการหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี. ของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสที่มีค่าเหมาะสมจึงแทนค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัมอันดับ 23 เท่ากับ 0 ในสมการอนุกรมฟูเรียร์ได้

$$V_{23} = \frac{4E}{23 \times 6\pi} \left[1 - 2K + K(\cos 23\alpha + \cos 23 \times 2\alpha + \cos 23 \times 3\alpha + \cos 23 \times 4\alpha) + \dots \right. \\ \left. (\sqrt{3} - 2\sqrt{3}K)\cos 23 \times 5\alpha + \dots \right. \\ \left. (\sqrt{3} - 1)K(\cos 23 \times 6 + \cos 23 \times 7\alpha + \cos 23 \times 8\alpha + \cos 23 \times 9\alpha) + \dots \right. \\ \left. (1 - 2K)\cos 23 \times 10\alpha + \dots \right. \\ \left. (2 - \sqrt{3})K(\cos 23 \times 11\alpha + \cos 23 \times 12\alpha + \cos 23 \times 13\alpha + \cos 23 \times 14\alpha) \right] \quad (4.17)$$

$$\text{เมื่อ } V_{23} = 0$$

$$0 = \frac{4E}{23 \times 6\pi} \left[1 - 2K - 1.02897871K + 0.866025403(\sqrt{3} - 2\sqrt{3}K) - \dots \right]$$

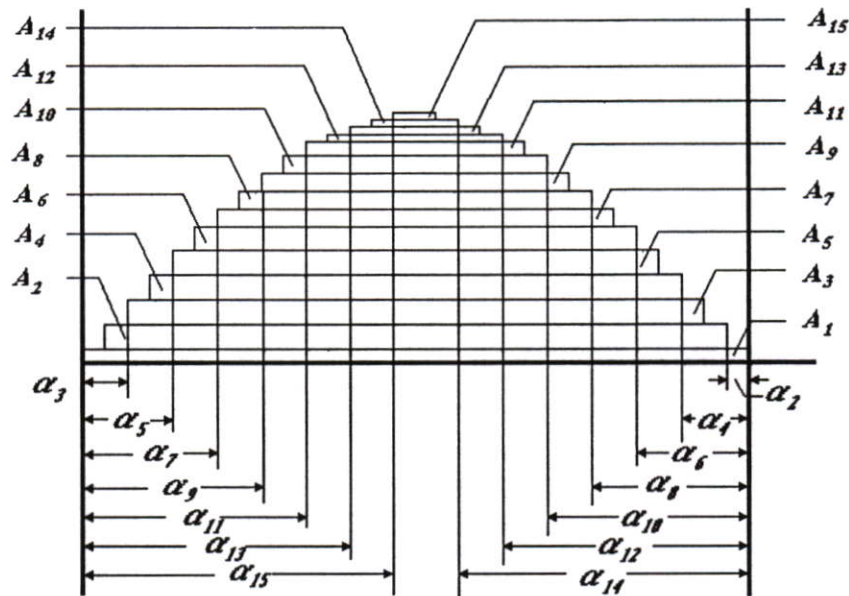
$$0.75326469K(\sqrt{3}-1)+0.5(1-2K)-0.27571401K(2-\sqrt{3})]$$

$$0 = \frac{4E}{23 \times 6\pi} (2.999999999 - 7.654284079K)$$

$$K = \frac{-2.999999999}{-7.654284079} = 0.392 \quad (4.18)$$

4.3.6 การหาค่าความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.เชื่อมโยงกับพิกัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่มูลฐานรูปคลื่น 60 สเต็ป

การหาค่าแอมพลิจูดแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานของแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 60 สเต็ปทำได้
โดยวิธีการแบ่งแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 60 สเต็ปเป็นสัญญาณรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเป็น 15 ส่วนดังภาพ
ที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 การแบ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 60 สเต็ปเป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม 15 ส่วน

เมื่อนำค่าแอมพลิจูดแต่ละส่วนหาค่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานจากสมการ
(3.13) นำมารวมกันทั้ง 15 ส่วนจะได้ค่าแอมพลิจูดแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานของแรงดันไฟฟ้า
รูปคลื่น 60 สเต็ปจากสมการอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการ

$$V_1 = \frac{4}{\pi} [A_{s1} + (A_{s2} - A_{s1})\cos\alpha + (A_{s3} - A_{s2})\cos 2\alpha + \dots + (A_{s15} - A_{s14})\cos 14\alpha] \quad (4.19)$$

แทนค่าแอมพลิจูดของระดับแรงดันไฟฟ้าจากสตีปที่ 1 ถึง สตีปที่ 15 คือค่า

$$A_{s1}, A_{s2}, A_{s3}, \dots, A_{s15}$$

$$V_1 = \frac{4E}{6\pi} [1 - 2K + K(\cos\alpha + \cos 2\alpha + \cos 3\alpha + \cos 4\alpha) + (\sqrt{3} - 2\sqrt{3}K)\cos 5\alpha + \dots$$

$$(\sqrt{3} - 1)K(\cos 6\alpha + \cos 7\alpha + \cos 8\alpha + \cos 9\alpha) + (1 - 2K)\cos 10\alpha + \dots$$

$$(2 - \sqrt{3})K(\cos 11\alpha + \cos 12\alpha + \cos 13\alpha + \cos 14\alpha)] \quad (4.20)$$

จากสมการ (4.14) เมื่อมุม α เท่ากับ 15 องศาไฟฟ้าและค่า $K = 0.392$ ค่าแอมพลิจูดของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานคำนวณได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{4}{\pi} \frac{E}{6} [3.0663] \\ &= 0.6507E \end{aligned} \quad (4.21)$$

4.4 สรุป

การปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดต่ออนุกรมกันเพื่อใช้เป็นจุดร่วมในการปรับปรุงรูปคลื่นสัญญาณเก็งสี่เหลี่ยมของอินเวอร์เตอร์หลักทั้ง 2 ชุดด้วยอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส ชุดเดียว เมื่อนำไปใช้ร่วมกับ รีแอกเตอร์คัปปลิ่งทำให้ขจัดฮาร์โมนิกสักลุ่มที่ 1 เริ่มจากอันดับที่ 11 และ 13 และกรองฮาร์โมนิกสักลุ่มที่ 5 เริ่มจากอันดับ 5 และ 7 ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 60 สตีปโดยในบทนี้ได้อธิบายถึงหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสพร้อมกับวิธีการหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละสตีปของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส และต่อเฟสที่เกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้เป็นหลักทฤษฎีในการวิเคราะห์และออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สตีปสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร

บทที่ 5

การวิเคราะห์ห่ออกแบบและทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส

5.1 บทนำ

ในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป ประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด, อินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส และรีแอกเตอร์คัปปลิ่ง ในบทนี้ได้นำเสนอการหาค่าขนาดพิกัดของแรงดันไฟฟ้า, กระแส และกำลังไฟฟ้า เกิดขึ้นในส่วนประกอบของระบบ โดยกล่าวถึงวิธีการทดสอบการลดพิกัดกระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการเพิ่มเฟสเป็น 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร, การหาค่าพิกัดกำลังของคัปปลิ่งรีแอกเตอร์ให้เหมาะสมกับพิกัดกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส และวิเคราะห์ผลการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสที่สภาวะโหลดแตกต่างกัน เพื่อศึกษาและนำไปใช้เป็นหลักการออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป เปรียบเทียบกับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป

5.2 การทดสอบการทำงานระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป

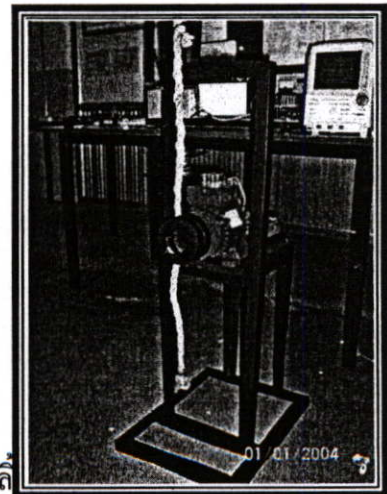
ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส 60 สเต็ปจะแบ่งส่วนประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด , อินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส , รีแอกเตอร์คัปปลิ่ง และมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส ดังภาพที่ 5.1



(ก) อินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด
และอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส



(ข) รีแอกเตอร์คัปปลิ่ง

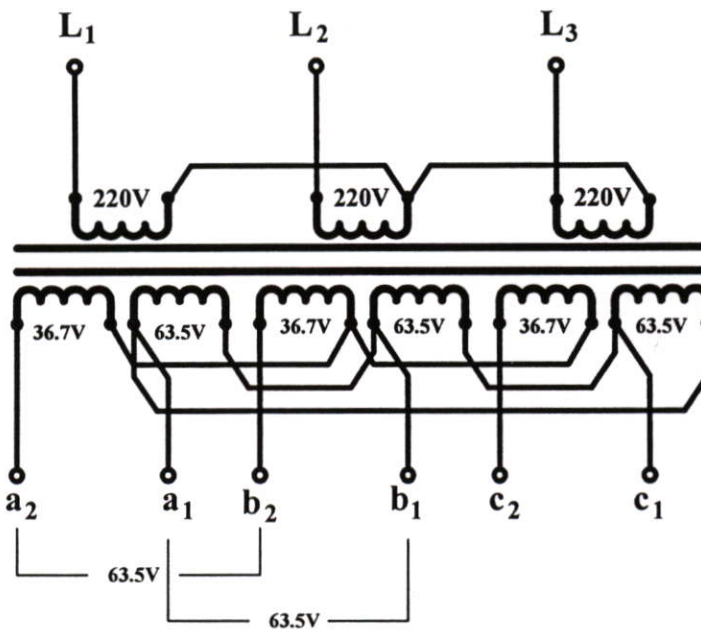


(ค) มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

ภาพที่ 5.1 ชุดต้นแบบระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ปขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

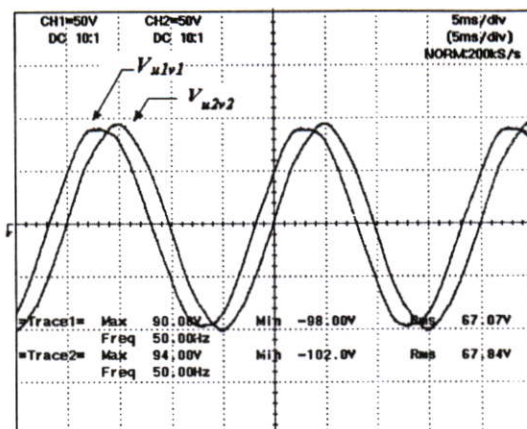
5.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรได้จากการออกแบบขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ชุดแต่ละชุดวางตำแหน่งขดลวดทำมุมกัน 30 องศาไฟฟ้า เพื่อลดขนาดกระแสของขดลวดแต่ละเฟสให้ลดลง ซึ่งพิสูจน์โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสรูปคลื่นไซน์จากแหล่งจ่าย 3 เฟส 2 ชุดแต่ละชุดทำมุมต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้าได้จากหม้อแปลง 3 เฟส ดังภาพที่ 5.2 สามารถต่อเข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสได้โดยไม่ต้องต่อเข้ากับรีแอกเตอร์คัปปลิงเพราะเป็นแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์

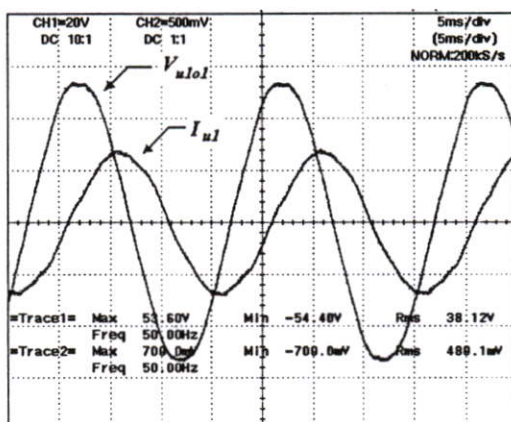


ภาพที่ 5.2 การต่อวงจรหม้อแปลง 3 เฟสเป็นแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ 6 เฟสแบบไม่สมมาตร

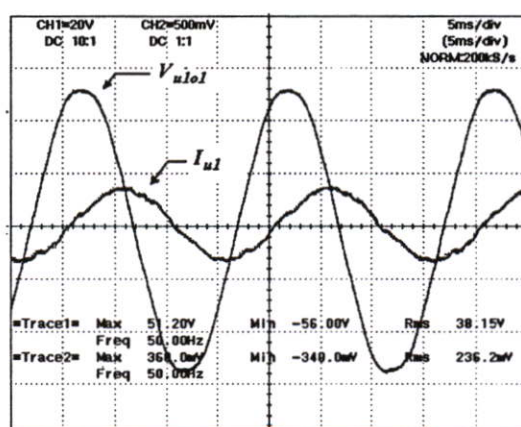
ผลการต่อขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงชุดที่ 1 ต่อแบบเคลด้าและชุดที่ 2 ต่อแบบสตาร์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าจากขดลวดทุติยภูมิทั้ง 2 ชุดต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร โดยมีแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสชุดที่ 1 (V_{a1b1}) กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสชุดที่ 2 (V_{a2b2}) ทำมุมต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้า ดังภาพที่ 5.3 เมื่อนำไปจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสที่ขนาดพิคกิ้งกำลังไฟฟ้าเท่ากันกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสมีค่าลดลงดังภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.3 แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสแบบไม่สมมาตร



(ก) มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

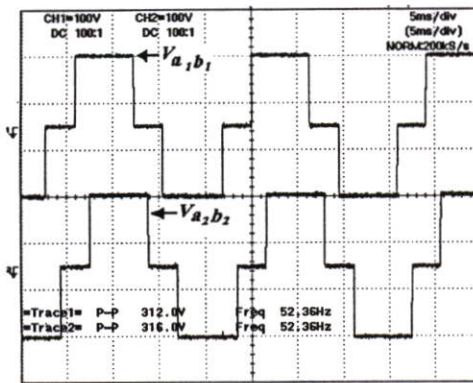


(ข) มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

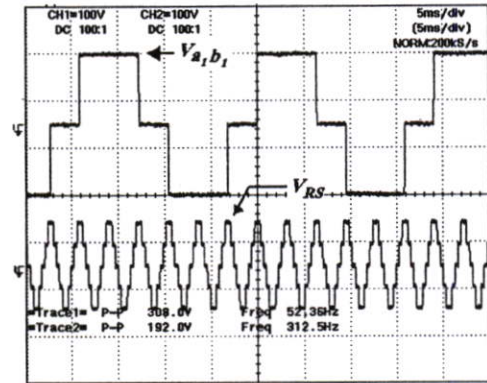
ภาพที่ 5.4 แรงดันไฟฟ้าและกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และ 6 เฟส

5.2.2 อินเวอร์เตอร์ 6 เฟสและอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

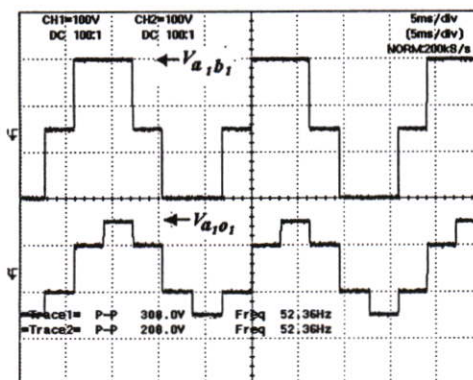
ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดมีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเท่ากับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ดี.ซี. เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสแต่ละชุดโดยมีมุมต่างเฟสกันของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลักชุดที่ 1 กับชุดที่ 2 เป็นมุม 30 องศาไฟฟ้าดังภาพ 5.5(ก) จากแพทเทิร์นการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในสภาวะยังไม่ฉีดแรงดันไฟฟ้ารีปเปิ้ลให้กับจุดต่ออนุกรมระหว่างอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดรูปคลื่นสัญญาณจากแพทเทิร์นการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส (V_{RS}) เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ารีปเปิ้ล 10 สเต็ปดังภาพ 5.5(ข) และเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสและแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 กับชุดที่ 2 ดังภาพที่ 5.5(ค) และ (ง)



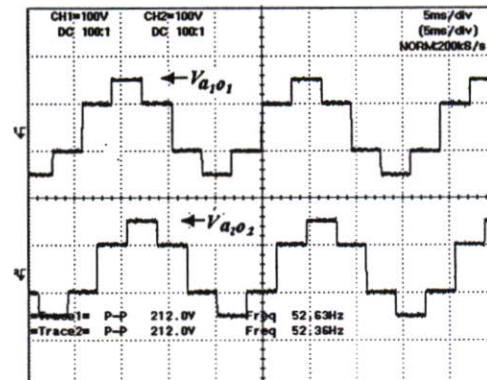
(ก) V_{a1b1} กับ V_{a2b2}



(ข) V_{a1b1} กับ V_{RS}



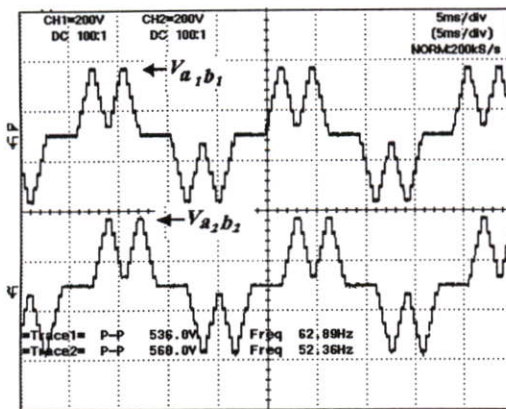
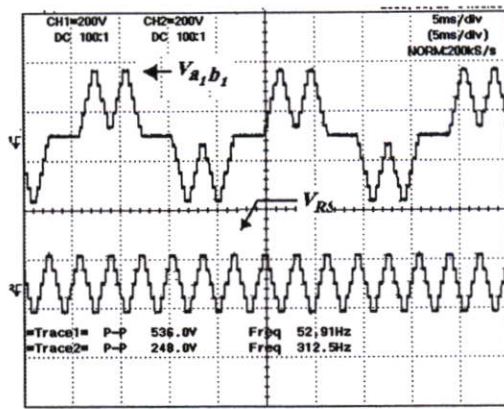
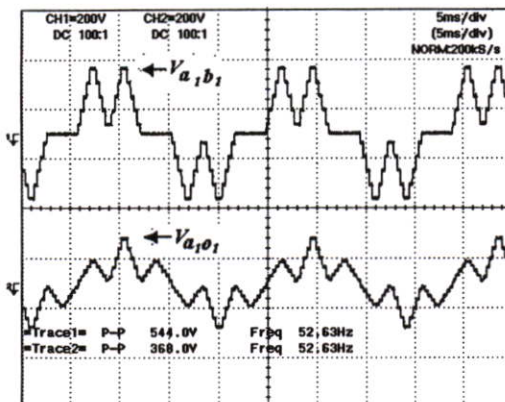
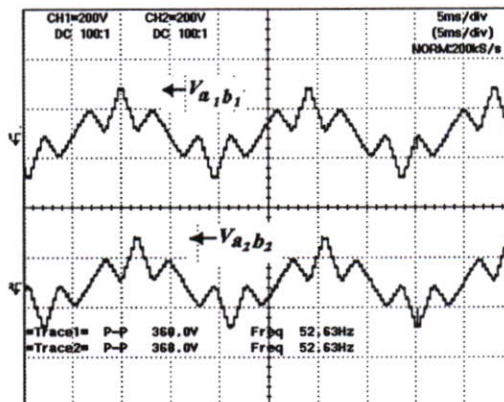
(ค) V_{a1b1} กับ V_{a1o1}



(ง) V_{a1o1} กับ V_{a2o2}

ภาพที่ 5.5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสกับอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

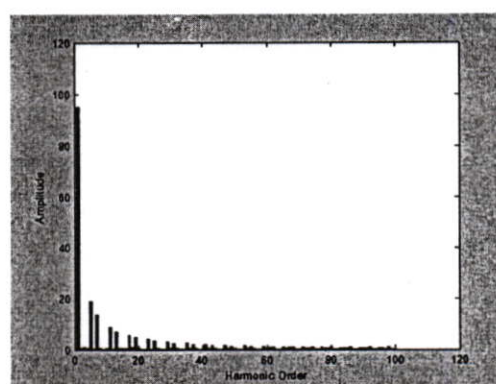
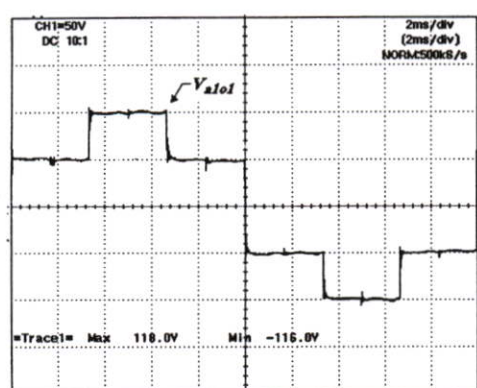
เมื่อฉีดแรงดันไฟฟ้ารีปเปิ้ลให้กับจุดต่ออนุกรมระหว่างอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ทั้ง 2 ชุด โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสมีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแต่ละตัวเท่ากับ 0.392 เท่าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ดี.ซี. เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสแต่ละชุดทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดมีลักษณะรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 5.6(ก)เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a_1 กับเฟส b_1 (V_{a1b1}) และรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของเฟส a_1 จากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 (V_{a1o1}) จากลักษณะรูปคลื่น 6 สแต็ปเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 5.6(ข)

(ก) V_{a1b1} กับ V_{a2b2} (ข) V_{a1b1} กับ V_{RS} (ค) V_{a1b1} กับ V_{a1o1} (ง) V_{a1b1} กับ V_{a2o2}

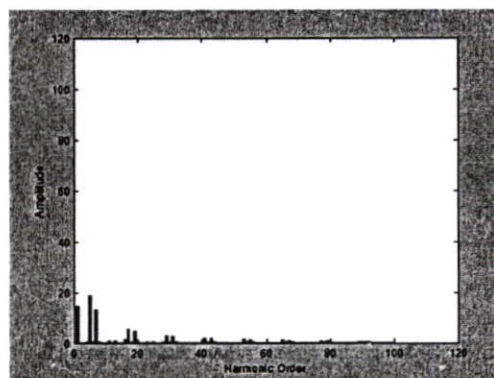
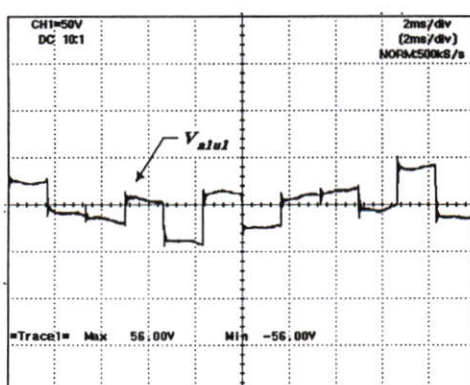
ภาพที่ 5.6 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์หลักเมื่อฉีดแรงดันไฟฟ้ารีปเปิ้ล 10 สแต็ป

5.2.3 รีแอกเตอร์คัปปลิง

การนำรีแอกเตอร์คัปปลิงต่ออนุกรมระหว่างอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสกับมอเตอร์เหนี่ยวนำทำให้สามารถกรองฮาร์โมนิกอันดับ 5 และ 7 ออกได้โดยขดลวด N_1 และ N_2 ทำหน้าที่คัปปลิงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากึ่งสี่เหลี่ยมของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดทำให้เพิ่มสเต็ปของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทดสอบการทำงานของรีแอกเตอร์คัปปลิงเป็น 2 สภาวะคือการทำหน้าที่ในสภาวะไม่ฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเปิดทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสเป็น 12 สเต็ป และมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ขดลวดรีแอกเตอร์คัปปลิงแต่ละเฟสดังภาพที่ 5.7 กับสภาวะฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเปิด 10 สเต็ป ทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสเป็น 60 สเต็ปและมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ขดลวดรีแอกเตอร์คัปปลิงแต่ละเฟสดังภาพที่ 5.8

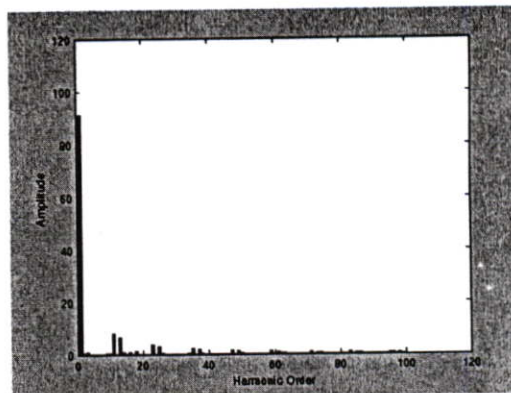
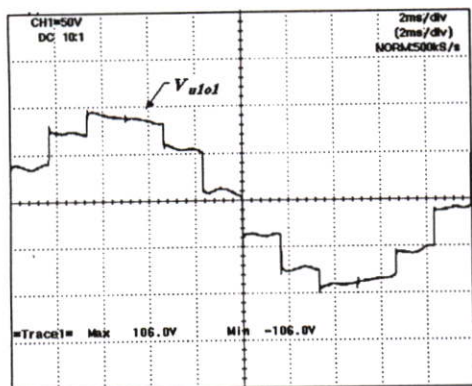


(ก) V_{alo1}



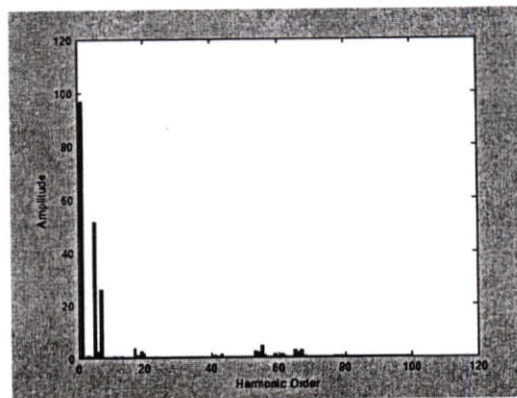
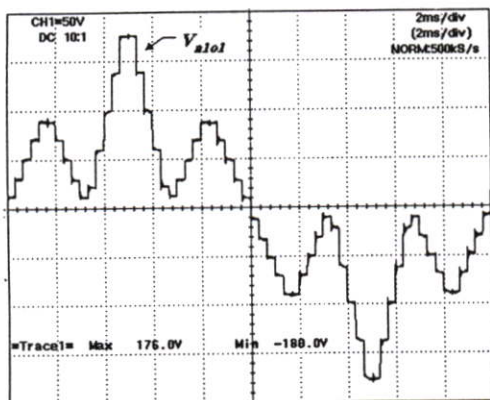
(ข) V_{alu1}

ภาพที่ 5.7 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและสเปกตรัมฮาร์โมนิกของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป

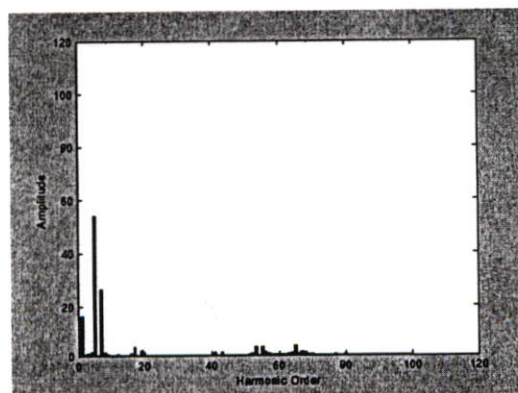
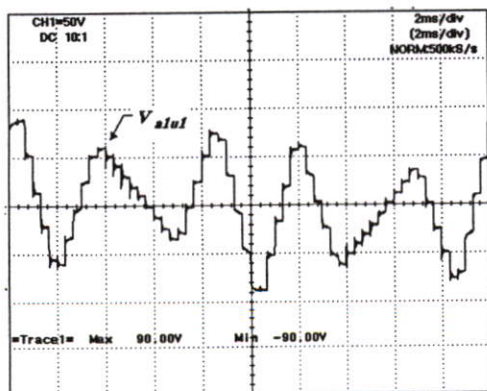


(ค) V_{ul01}

ภาพที่ 5.7 (ต่อ)

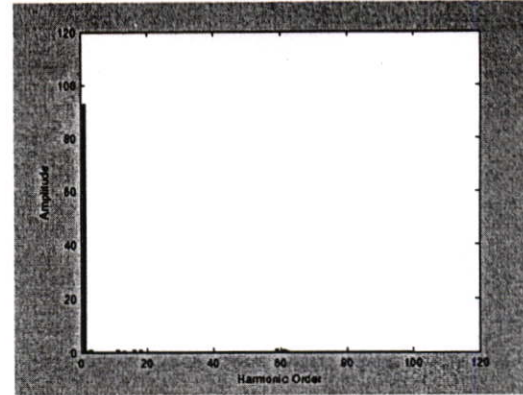
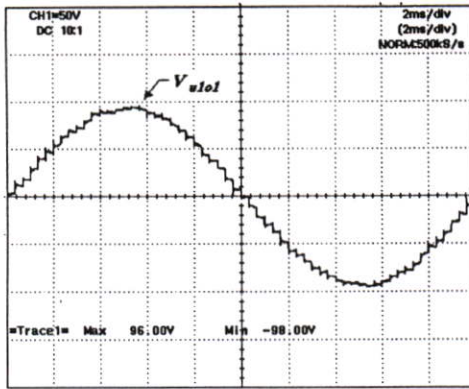


(ก) V_{al01}



(ข) V_{al11}

ภาพที่ 5.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและสเปกตรัมฮาร์โมนิกซ์ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สตีป

(ค) V_{u1ol}

ภาพที่ 5.8 (ต่อ)

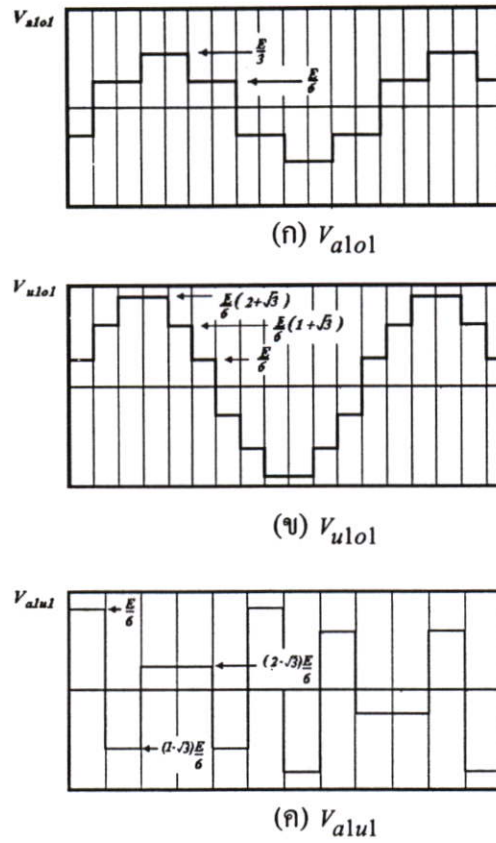
5.3 การเปรียบเทียบค่าระดับแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส

ขดลวดของรีแอกเตอร์คัปปลิงจะต่ออนุกรมระหว่างอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดมีขนาดเท่ากับกระแสจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในการคำนวณหาค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของรีแอกเตอร์คัปปลิงได้จากการนำค่ากระแสคูณกับรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดของรีแอกเตอร์คัปปลิงแต่ละเฟสรวมกัน ซึ่งการหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ขดลวดรีแอกเตอร์คัปปลิงสำหรับเฟส α_1 หาได้สมการ (5.1)

$$V_{a1u1} = V_{a1o1} - V_{u1o1} \quad (5.1)$$

5.3.1 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 12 สเต็ป

การทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 จุดต่ออนุกรมกันเมื่อไม่มีการฉีดแรงดันไฟฟ้าริบเปิดให้กับจุดต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่ละเฟสจะเป็นรูปคลื่น 12 สเต็ป ดังภาพที่ 5.9



ภาพที่ 5.9 แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิ่ง (V_{alol}) ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป

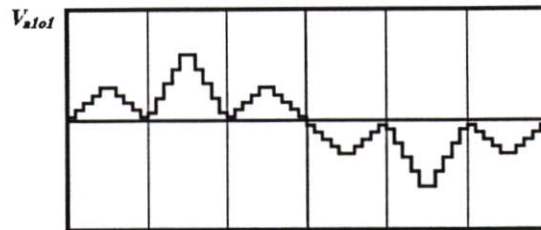
จากลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิ่ง (V_{alol}) ดังภาพที่ 5.2 คำนวณจากสมการที่ (5.1) ได้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละสเต็ปของรูปคลื่นดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า (V_{alu1} / E) ในช่วงคาบเวลา 0-360 องศาไฟฟ้า

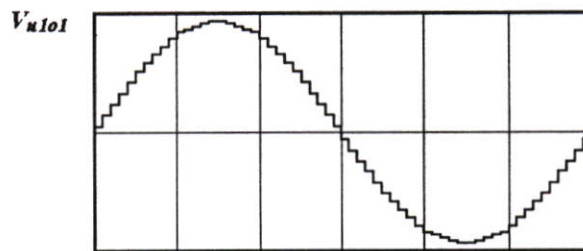
สเต็ป	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
1	0 - 30	$1/6$
2	30 - 60	$(1-\sqrt{3})/6$
3	60 - 90	$(2-\sqrt{3})/6$
4	90 - 120	$(2-\sqrt{3})/6$
5	120 - 150	$(1-\sqrt{3})/6$
6	150 - 180	$1/6$

5.3.2 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ป

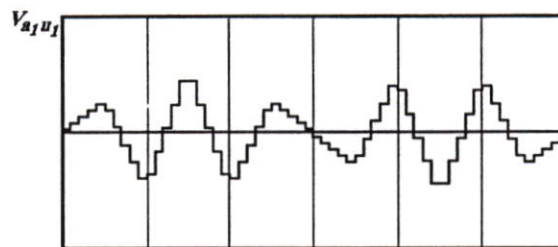
การทำงานของระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 จุดต่ออนุกรมกันเมื่อไม่มีการฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเปลรูปคลื่น 10 สเต็ปด้วยความถี่ 6 เท่าของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสให้กับจุดต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส ทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของ V_{a1o1} , V_{u1o1} และ V_{a1u1} เปลี่ยนแปลงดังภาพที่ 5.10



(ก) V_{a1o1}



(ข) V_{u1o1}



(ค) V_{a1u1}

ภาพที่ 5.10 แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิ่ง (V_{a1u1}) ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส,] 60 สเต็ป

จากลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิ่ง (V_{a1u1}) ดังภาพที่ 5.10 คำนวณจากสมการที่ (5.1) ได้ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละสเต็ปของรูปคลื่นดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า (V_{allow} / E) ในช่วงคาบเวลา 0-180 องศาไฟฟ้า

สเต็ป	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า	สเต็ป	คาบเวลา (องศาไฟฟ้า)	ค่าระดับแรงดันไฟฟ้า
1	0 - 6	$(1-2K)/6$	16	90 - 96	$[2+\sqrt{3}+2(2-\sqrt{3})k]/6$
2	6 - 12	$(1-K)/6$	17	96 - 102	$[2+\sqrt{3}+(2-\sqrt{3})k]/6$
3	12 - 18	$1/6$	18	102 - 108	$(2+\sqrt{3})/6$
4	18 - 24	$(1+K)/6$	19	108 - 114	$[2+\sqrt{3}-(2-\sqrt{3})k]/6$
5	24 - 30	$(1+2K)/6$	20	114 - 120	$[2+\sqrt{3}-2(2-\sqrt{3})k]/6$
6	30 - 36	$[1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$	21	120 - 126	$[1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$
7	36 - 42	$[1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$	22	126 - 132	$[1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$
8	42 - 48	$(1+\sqrt{3})/6$	23	132 - 138	$(1+\sqrt{3})/6$
9	48 - 54	$[1+\sqrt{3}+(\sqrt{3}-1)k]/6$	24	138 - 144	$[1+\sqrt{3}-(\sqrt{3}-1)k]/6$
10	54 - 60	$[1+\sqrt{3}+2(\sqrt{3}-1)k]/6$	25	144 - 150	$[1+\sqrt{3}-2(\sqrt{3}-1)k]/6$
11	60 - 66	$[2+\sqrt{3}-2(2-\sqrt{3})k]/6$	26	150 - 156	$(1+2K)/6$
12	66 - 72	$[2+\sqrt{3}-(2-\sqrt{3})k]/6$	27	156 - 162	$(1+K)/6$
13	72 - 78	$(2+\sqrt{3})/6$	28	162 - 168	$1/6$
14	78 - 84	$[2+\sqrt{3}+(2-\sqrt{3})k]/6$	29	168 - 174	$(1-K)/6$
15	84 - 90	$[2+\sqrt{3}+2(2-\sqrt{3})k]/6$	30	174 - 180	$(1-2K)/6$

5.4 การเปรียบเทียบพิกัดกำลังระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 12 สเต็ปกับรูปคลื่น 60 สเต็ป

ในการนำระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 60 สเต็ปเพื่อลดขนาดพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะนำมาใช้แทนวิธีการลดขนาดพิกัดกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 12 สเต็ป ซึ่งจะต้องใช้อินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสสำหรับฉีดแรงดันไฟฟ้าริปเปลเพื่อปรับปรุงรูปคลื่น ดังนั้นจึงต้องเปรียบเทียบขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 60 สเต็ปกับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 12 สเต็ปเพื่อเลือกขนาดพิกัดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.ได้เหมาะสมกับขนาดพิกัดของระบบอินเวอร์เตอร์ โดยกำหนดให้ ขนาดพิกัดของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 12 สเต็ปมีขนาดพิกัดเป็นฐานในการเปรียบเทียบกำหนดให้เท่ากับ 100%

5.4.1 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดรูปคลื่น 12 สเต็ป

ในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 12 สเต็ปประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด แต่ละชุดมีการสวิตช์กระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสรูปคลื่นที่สี่เหลี่ยมในช่วงคาบเวลา 1 ไซเคิลค่าระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสสูงสุดเท่ากับ $2E$

เมื่อ KVA_{INV} : พิกัดกำลังไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดต่อเฟส

$$KVA_{INV} = 2EI_m \quad (5.2)$$

อินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดรวมเป็น 6 เฟสหาค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าทั้ง 6 เฟสได้

$$KVA_{Main,INV} = 6 \times 2EI_m = 12EI_m \quad (5.3)$$

กำหนดให้เป็นค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100%

5.4.2 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดรูปคลื่น 60 สเต็ป

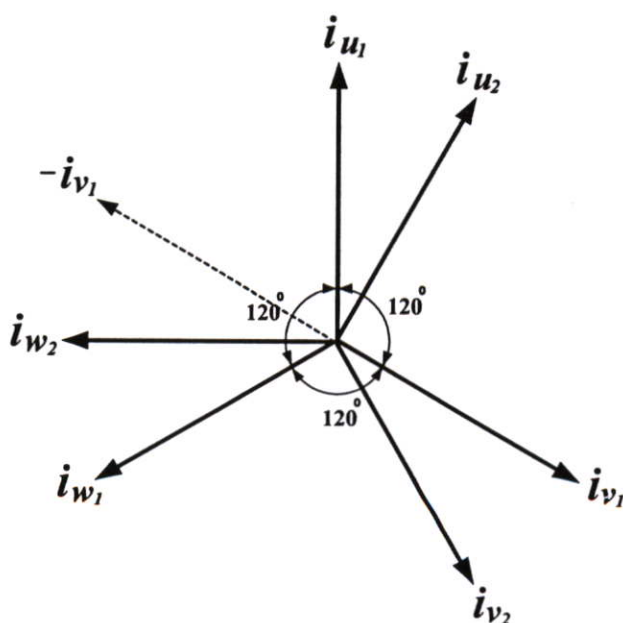
ในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสรูปคลื่น 60 สเต็ปได้จากการปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสโดยการฉีดแรงดันไฟฟ้าริบเปิดให้กับจุดต่ออนุกรม(จุด M)อินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดทำให้มีขนาดระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น $2(1+2K)E$ ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสรูปคลื่น 60 สเต็ปเพิ่มขึ้นเป็น

$$KVA_{Main,INV} = 6 \times 2(1+2K)EI_m = 12(1+2E)EI_m \quad (5.4)$$

มีค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 178.4% เมื่อค่า $K = 0.392$

5.4.3 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

$$KVA_{Add,INV} = 8KEI_{Rm} \quad (5.5)$$



ภาพที่ 5.11 เวกเตอร์กระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

การหาค่าอัตราส่วนของกระแสจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสในรูปของความสัมพันธ์อัตราส่วน I_{Rm}/I_m เมื่อพิจารณาขนาดและทิศทางกระแสแต่ละเฟสดังภาพที่ 5.11 จากลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสเป็นรูปคลื่น 60 สเต็ปแปรผันตามรูปคลื่นไซน์ กำหนดให้กระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำแปรผันตามสมการรูปคลื่นไซน์ได้กระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับเฟส U_1 หาได้จากสมการ

$$i_{u1} = I_m \sin(\omega t - \varphi_1) \quad (5.6)$$

เมื่อ I_m : ค่าแอมพลิจูดกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

φ_1 : มุมกระแสล่าหลัง(Lagging)แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเฟส

i_{d1} : กระแสอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1

i_{d2} : กระแสอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 2

i_{Rm} : กระแสอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

กระแสจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส (i_{Rm}) หาได้จากสมการ

$$i_{Rm} = i_{d2} - i_{d1} \quad (5.7)$$

จากภาพที่ 5.11 กำหนดให้สภาวะการสวิตช์กระแสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ $2(i_{d2})$ เป็นกระแสจากเฟส c_2 จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟส $w_2(i_{w2})$ มีเฟสเซอร์นำหน้า (Leading) i_{u1} เป็นมุม 90 องศาไฟฟ้า ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกระแส i_{w2} ขึ้นกับสมการ

$$i_{w2} = I_m \cos(\omega t - \varphi_1) \quad (5.8)$$

สำหรับกระแสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 (i_{d1}) จ่ายกระแสไหลผ่านขดลวด N_1 ของรีแอกเตอร์คัปปลิงที่พันบนแกนเหล็กเดียวกันกับขดลวด N_2 ซึ่งมีกระแส i_{w2} ไหลผ่านคือกระแสจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสชุดที่ 1 เฟส $b_1(i_{v1})$ แต่เนื่องจากการต่อขดลวด N_1 ในตำแหน่งทิศทางเวกเตอร์ตรงข้ามกับกระแส i_{v1} เป็นกระแส $-i_{v1}$ มีมุมล่าหลัง i_{w2} เป็นมุม 30 องศาไฟฟ้า กระแส $-i_{v1}$ ขึ้นกับสมการ

$$-i_{v1} = I_m \cos(\omega t - \varphi_1 - \frac{\pi}{6}) \quad (5.9)$$

นำค่ากระแส i_{w2} และ $-i_{v1}$ จากสมการ(5.8) และ (5.9) แทนค่าในสมการ (5.7) ได้

$$i_{Rm} = I_m \cos(\omega t - \varphi_1) - I_m \cos(\omega t - \varphi_1 - \frac{\pi}{6}) \quad (5.10)$$

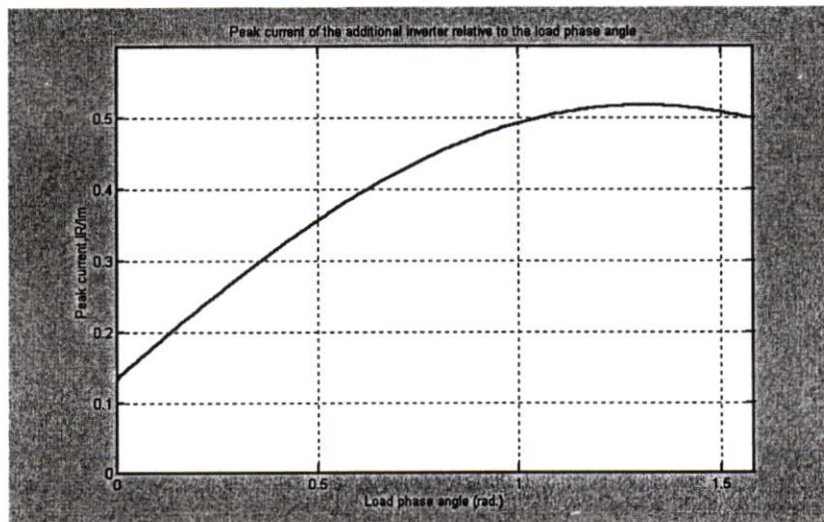
จัดรูปสมการใหม่

$$* \quad i_{Rm} = -2I_m \sin \frac{\pi}{12} \sin(\omega t - \varphi_1 - \frac{\pi}{12}) \quad (5.11)$$

ดังนั้นอัตราส่วนความสัมพันธ์ของกระแสอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสกับกระแสแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำหาได้จากสมการ

$$\frac{i_{Rm}}{I_m} = -2 \sin \frac{\pi}{12} \sin(\omega t - \varphi_1 - \frac{\pi}{12}) \quad (5.12)$$

เมื่อนำค่าอัตราส่วนความสัมพันธ์ของกระแส $\frac{i_{Rm}}{I_m}$ จากสมการ(5.12) ที่สภาวะโหลดแตกต่างกันทำให้มีค่ามุม φ_1 มีค่าเปลี่ยนแปลงโดยแทนค่ามุม φ_1 จากค่า $0 - \frac{\pi}{2}$ พล็อตกราฟได้ดังภาพที่ 5.6



ภาพที่ 5.12 ความสัมพันธ์กระแส I_{Rm} / I_m เมื่อมุม φ_1 เปลี่ยนแปลงตามโหลด

เนื่องจากการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะคงตัว (Steady stated) ค่ามุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ (ϕ_1) จากสภาวะไม่มีโหลดถึงค่าโหลดเต็มพิกัดมีค่ามุม ϕ_1 น้อยที่สุดเท่ากับ $\frac{\pi}{6}$ โดยประมาณแทนค่าในสมการ (5.12)

$$\frac{i_{Rm}}{I_m} = 0.366$$

$$I_{Rm} = 0.366I_m \quad (5.13)$$

แทนค่า I_{Rm} จากสมการ(5.13) ในสมการ(5.5) คำนวณหาค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสได้

$$KVA_{Add,INV} = 8KE \times 0.366I_m = 2.928KEI_m \quad (5.14)$$

มีค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 9.6% เมื่อค่า $K = 0.392$

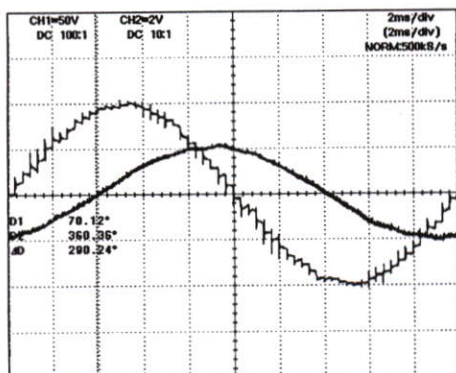
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส รูปคลื่น 12 สเต็ปกับรูปคลื่น 60 สเต็ป

Inverter	Rating	12-step	60-step
Main	Voltage	E	$(1+2k)E$
	Current	I_m	I_m
	KVA	$12EI_m$ (=100%)	$12(1+2K)EI_m$ (=178%), $K=0.392$
Additional	Voltage	0	kE
	Current	0	$I_{Rm} = 0.366I_m$ $\phi_1 = \pi/6$
	KVA	0	$8kE I_{Rm} = 2.928I_m$ (=9.6%), $K=0.392$

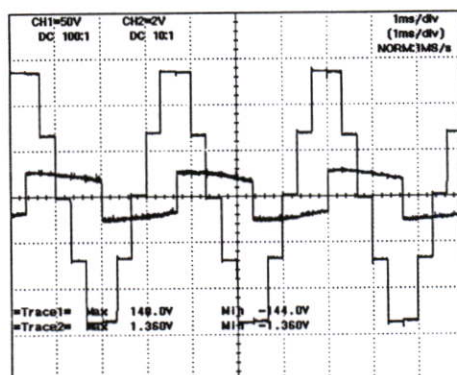
5.4.4 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนความสัมพันธ์กระแสอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสกับกระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การหาค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสจากอัตราส่วนความสัมพันธ์กระแสสูงสุดจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส (I_{Rm}) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (I_m) โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นทำให้มุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันไฟฟ้ามีค่ามุมลดลงดังภาพที่ 5.13 เมื่อบันทึกค่ากระแส I_{Rm} และ I_m คำนวณหาค่า อัตราส่วน

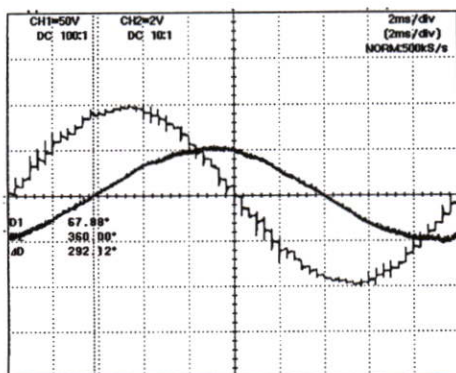
ความสัมพันธ์ของกระแส I_{Rm} / I_m จากผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการ (5.12) คังตารางที่ 5.4



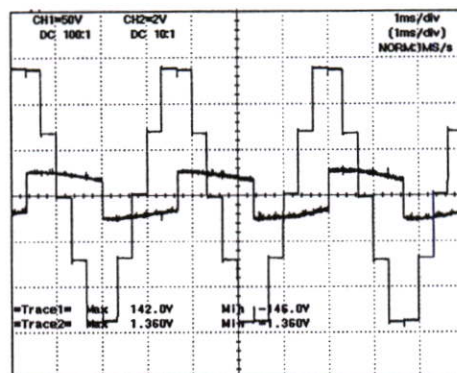
(ก) V_{u1o1} กับ I_{u1} เมื่อ $\phi = 70.12^\circ$



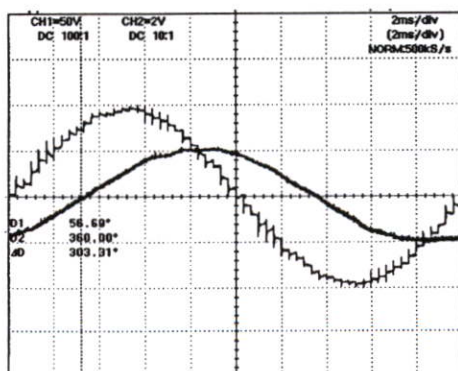
(ข) V_{RS} กับ I_{Rm} เมื่อ $\phi = 70.12^\circ$



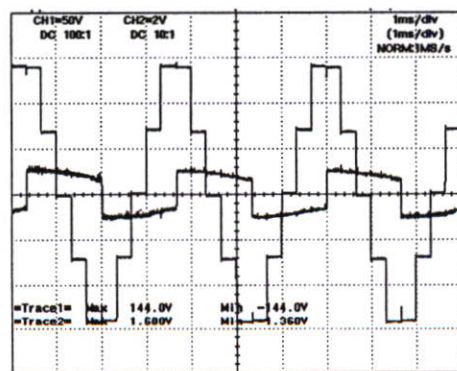
(ค) V_{u1o1} กับ I_{u1} เมื่อ $\phi = 67.88^\circ$



(ง) V_{RS} กับ I_{Rm} เมื่อ $\phi = 67.88^\circ$

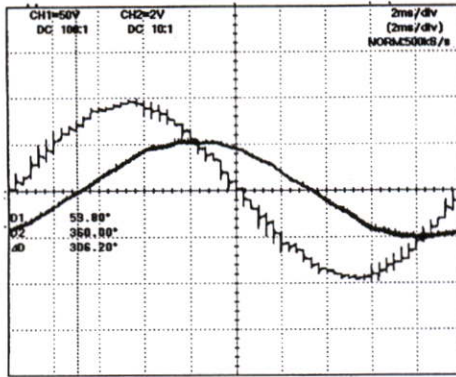


(จ) V_{u1o1} กับ I_{u1} เมื่อ $\phi = 56.69^\circ$

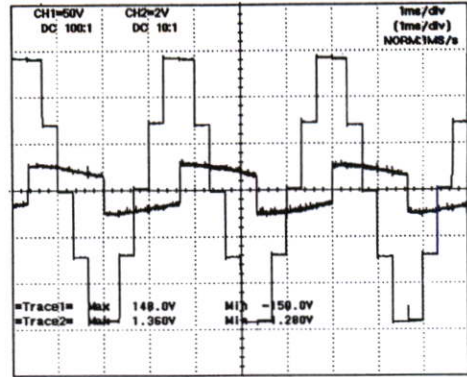


(ฉ) V_{RS} กับ I_{Rm} เมื่อ $\phi = 56.69^\circ$

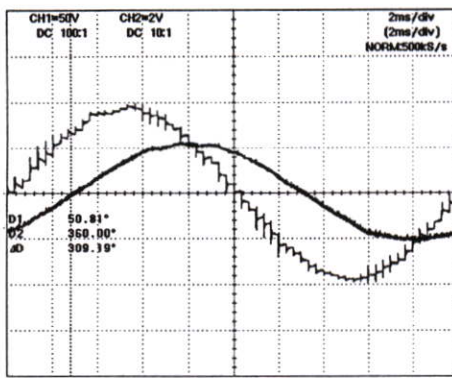
ภาพที่ 5.13 รูปคลื่นกระแส I_m และกระแส I_{Rm} เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะโหลดเปลี่ยนแปลง



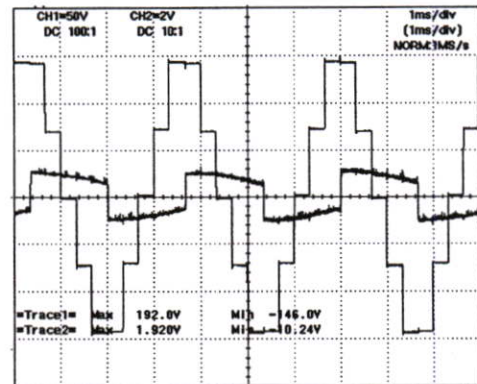
(ข) V_{u1o1} กับ I_{u1} เมื่อ $\phi = 53.80^\circ$



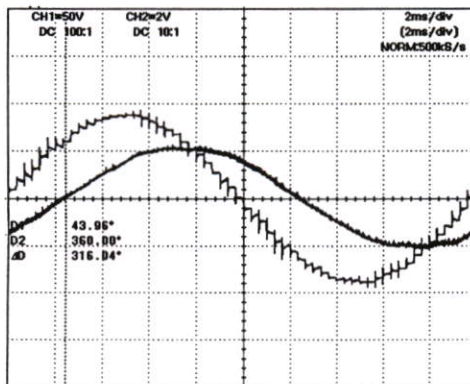
(ข) V_{RS} กับ I_{Rm} เมื่อ $\phi = 53.80^\circ$



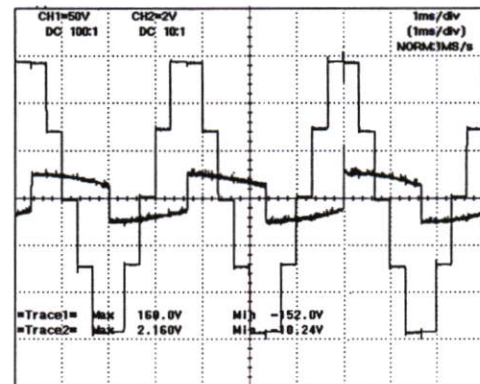
(ค) V_{u1o1} กับ I_{u1} เมื่อ $\phi = 50.81^\circ$



(ค) V_{RS} กับ I_{Rm} เมื่อ $\phi = 50.81^\circ$

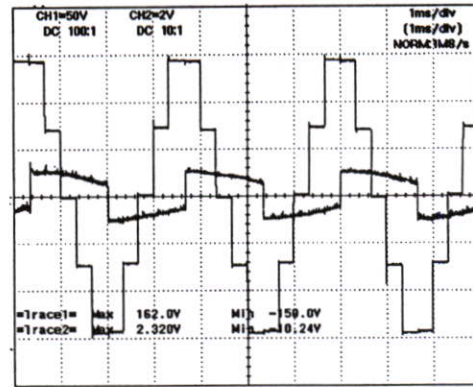
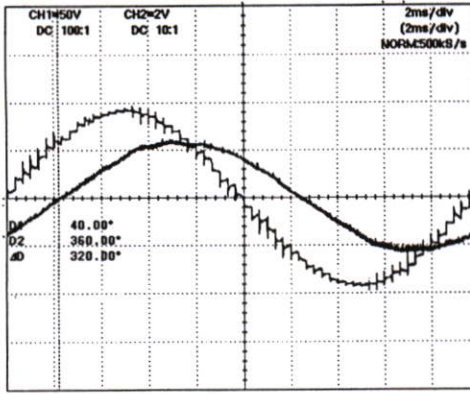


(ง) V_{u1o1} กับ I_{u1} เมื่อ $\phi = 43.96^\circ$



(ง) V_{RS} กับ I_{Rm} เมื่อ $\phi = 43.96^\circ$

ภาพที่ 5.13 (ต่อ)



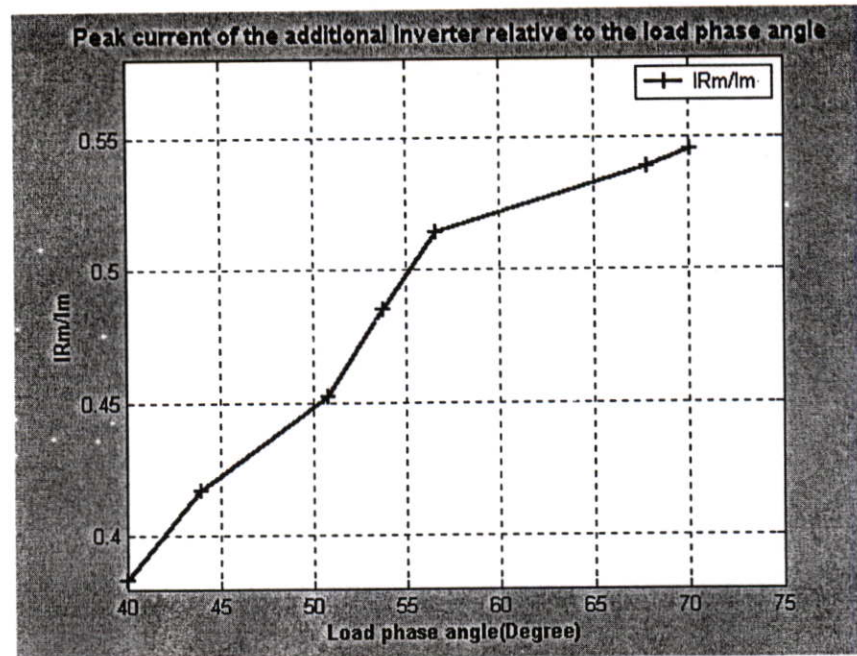
(ง) V_{u1o1} กับ I_{u1} เมื่อ $\phi = 40.00^\circ$

(จ) V_{u1o1} กับ I_{u1} เมื่อ $\phi = 40.00^\circ$

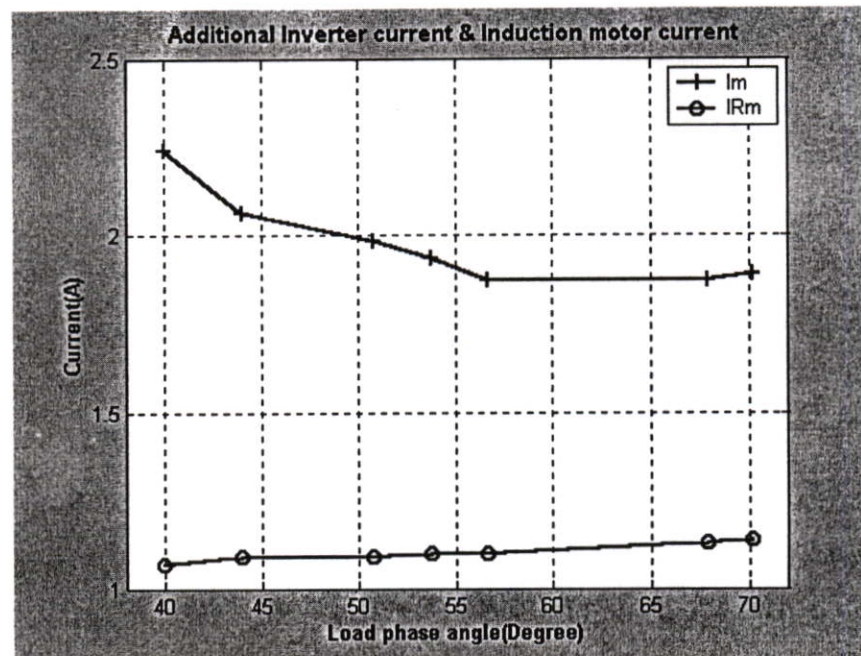
ภาพที่ 5.13 (ต่อ)

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบอัตราส่วนกระแส I_{Rm} / I_m จากการคำนวณด้วยสมการกับผลการทดสอบ

ϕ_1 (Degree)	ผลการคำนวณจากสมการ	ผลการคำนวณจาก การทดสอบ		
	$I_{Rm} / I_m = -2 \sin \frac{\pi}{12} \sin(\omega t - \phi_1 - \frac{\pi}{12})$	I_{Rm} (A)	I_m (A)	I_{Rm} / I_m
70.12	0.516	1.14	1.89	0.603
67.88	0.514	1.13	1.87	0.604
56.69	0.491	1.1	1.87	0.588
53.80	0.483	1.1	1.93	0.569
50.81	0.472	1.09	1.98	0.55
43.96	0.444	1.09	2.06	0.529
40.00	0.424	1.07	2.24	0.477



(ก) การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกระแส I_{Rm} / I_m

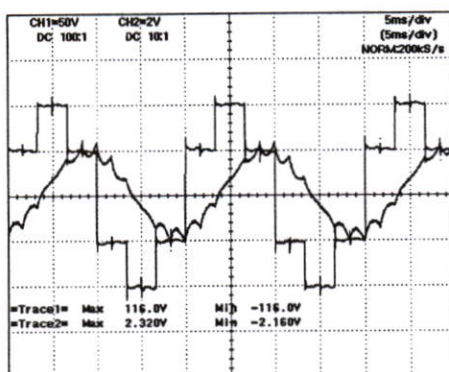


(ข) การเปลี่ยนแปลงกระแส I_{Rm} และ I_m

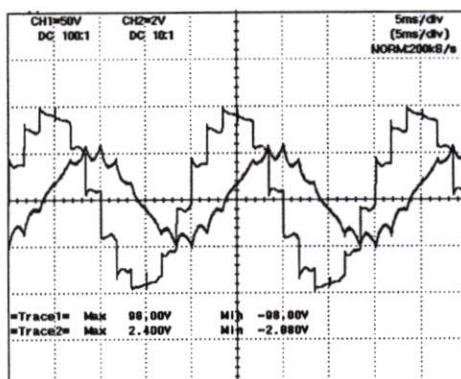
ภาพที่ 5.14 การเปลี่ยนแปลงค่า Peak กระแส I_{Rm} / I_m กับกระแส I_{Rm} และ I_m

5.5 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส , 60 สเต็ป กับ 12 สเต็ป

ในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตร ประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด, รีแอกเตอร์คัปปลิง และอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส การหาค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ส่วนประกอบของระบบได้จากการบันทึกผลของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่เกิดขึ้นในระบบเพื่อ หาค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในส่วนประกอบของระบบ และกำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อเปรียบเทียบกับกำลังงานเอาต์พุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส, 12 สเต็ปและ 60 สเต็ป ดังภาพที่ 5.15 และ ภาพที่ 5.16 ตามลำดับ

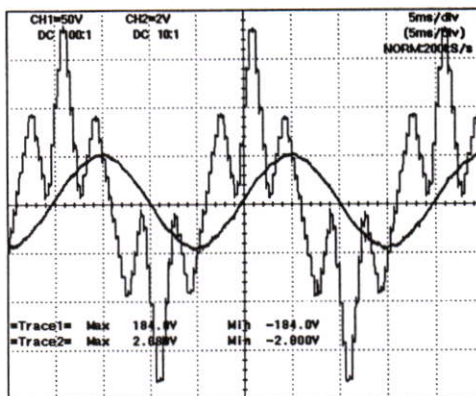


(ก) V_{a1o1} กับ I_{a1} คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก

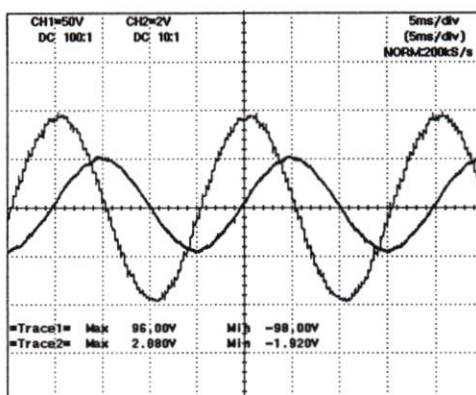


(ข) V_{u1o1} กับ I_{u1} คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าอินพุทมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

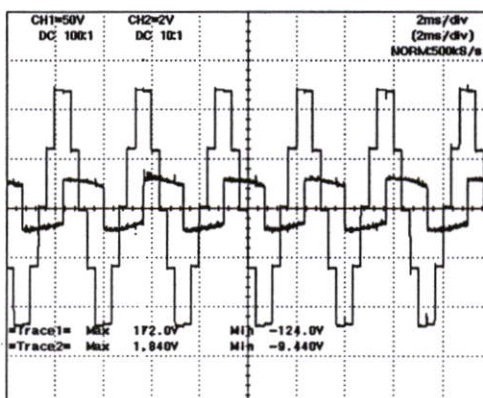
ภาพที่ 5.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสต่อเฟสใช้ค่านวมกำลังไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส ขับเคลื่อนด้วยระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป



(ก) V_{a1o1} กับ I_{a1} คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก



(ข) V_{u1o1} กับ I_{u1} คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส



(ค) V_{RS} กับ I_{Rm} คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส

ภาพที่ 5.16 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสต่อเฟสใช้คำนวณกำลังไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส
ขับเคลื่อนด้วยระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป

ได้ผลการคำนวณจากการทดสอบการรับภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้วยระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปและระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป ดังตารางที่ 5.5, ตารางที่ 5.6 และ ตารางที่ 5.7, ตารางที่ 5.8 ตามลำดับ และคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิงจากสมการ (5.15) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส (η) จากสมการ (5.16)

การหาค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิง

$$P_{6\phi,CR} = P_{Main,INV} - P_{6\phi,IM} \quad (5.15)$$

เมื่อ

$P_{6\phi,CR}$: กำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิง

$P_{Main,INV}$: กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด

$P_{6\phi,IM}$: กำลังไฟฟ้าอินพุตมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

การหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{6\phi,IM}} \times 100 \quad (5.16)$$

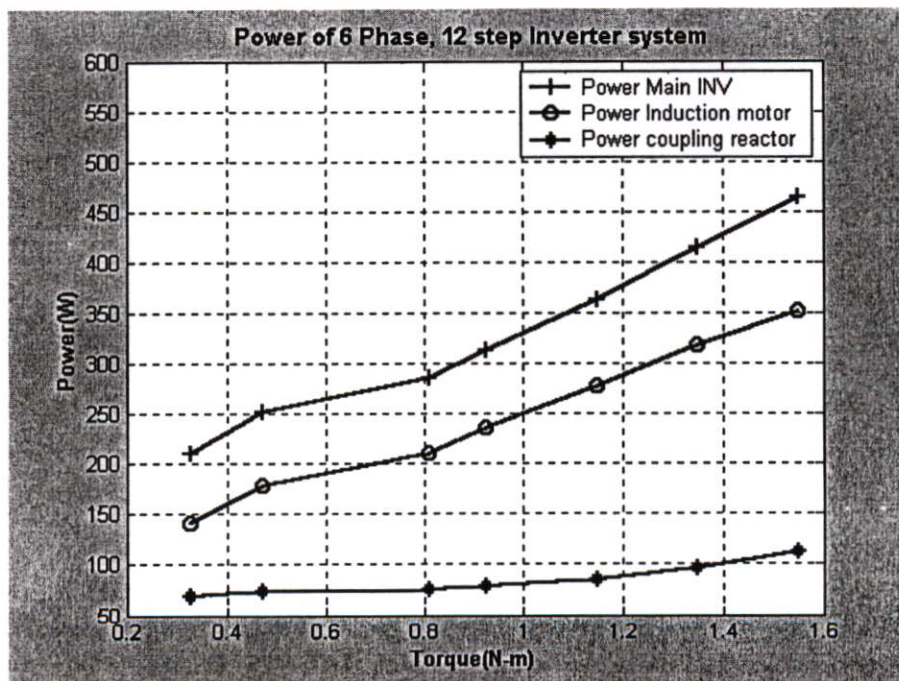
ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป

ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลังไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์หลัก	กำลังไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ	กำลังไฟฟ้ารืแอกเตอร์คัปปลิง
(rpm)	(N-m)	$P_{Main,INV}$ (W)	$P_{6\phi,IM}$ (W)	P_{CR} (W)
1491	0.329	209.64	141.3	68.1
1483	0.473	251.12	178.36	72.6
1478	0.812	285.71	210.06	75.65
1469	0.926	313.41	235.32	78.09
1463	1.15	363.13	278.05	85.08
1445	1.34	413.84	317.33	96.51
1427	1.55	464.46	351.83	112.53

ตารางที่ 5.6 ผลการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป

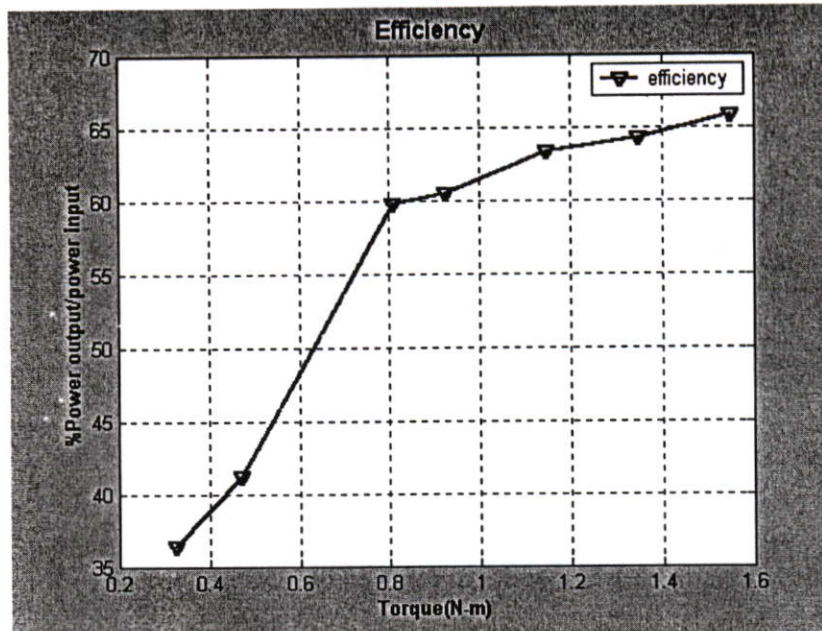
ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลังไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ	กำลังงานกลเอาต์พุต	ประสิทธิภาพ
(rpm)	(N-m)	$P_{6\phi,IM}$ (W)	P_{out} (W)	η (%)
1491	0.329	141.3	51.36	36.35
1483	0.473	178.36	73.46	41.19
1478	0.812	210.06	125.68	59.83
1469	0.926	235.32	142.45	60.53
1463	1.15	278.05	176.19	63.37
1445	1.35	317.33	204.28	64.37
1427	1.55	351.83	231.62	65.83

นำผลจากตารางที่ 5.5 และตารางที่ 5.6 พล็อตกราฟแสดงกำลังไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปและประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส ดังภาพที่ 5.17



(ก) กำลังไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป $P_{Main,INV}$, $P_{6\phi,IM}$ และ $P_{6\phi,CR}$

ภาพที่ 5.17 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปและประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส



(จ) ประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

ภาพที่ 5.17 (ต่อ)

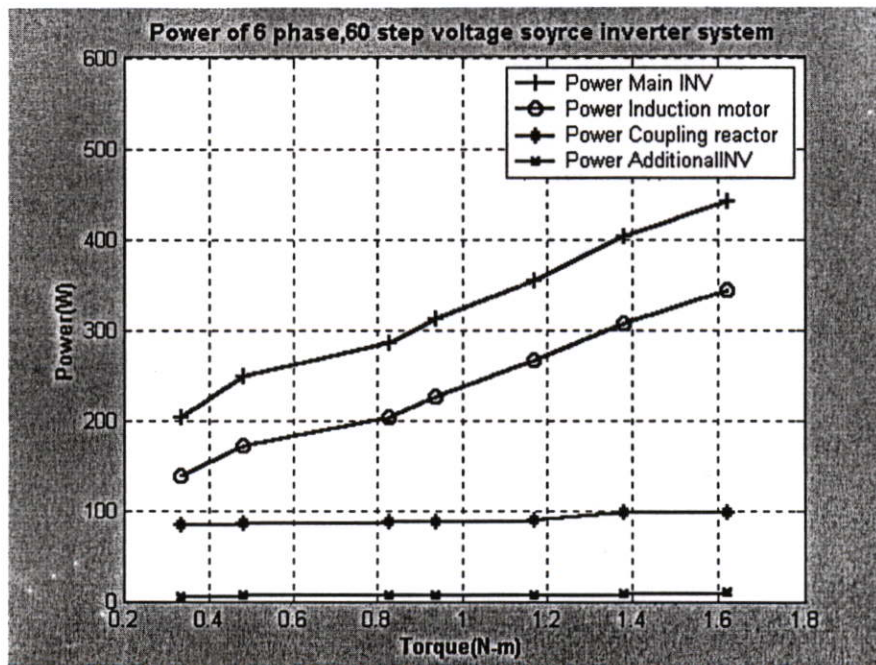
ตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป

ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลังไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์หลัก	กำลังไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ	กำลังไฟฟารีแอคเตอร์คัปปลิง	กำลังไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม
(rpm)	(N-m)	$P_{Main,INV}$ (W)	$P_{6\phi,IM}$ (W)	P_{CR} (W)	$P_{Add,INV}$ (W)
1492	0.334	202.62	137.11	82.51	4.61
1485	0.482	247.99	171.36	84.63	5.41
1480	0.827	284.48	203.46	86.02	5.59
1472	0.938	312.03	225.47	86.56	6.11
1466	1.17	354.19	265.77	88.42	6.78
1450	1.38	402.37	305.74	96.63	7.73
1432	1.62	442.02	343.83	98.19	9.05

ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป

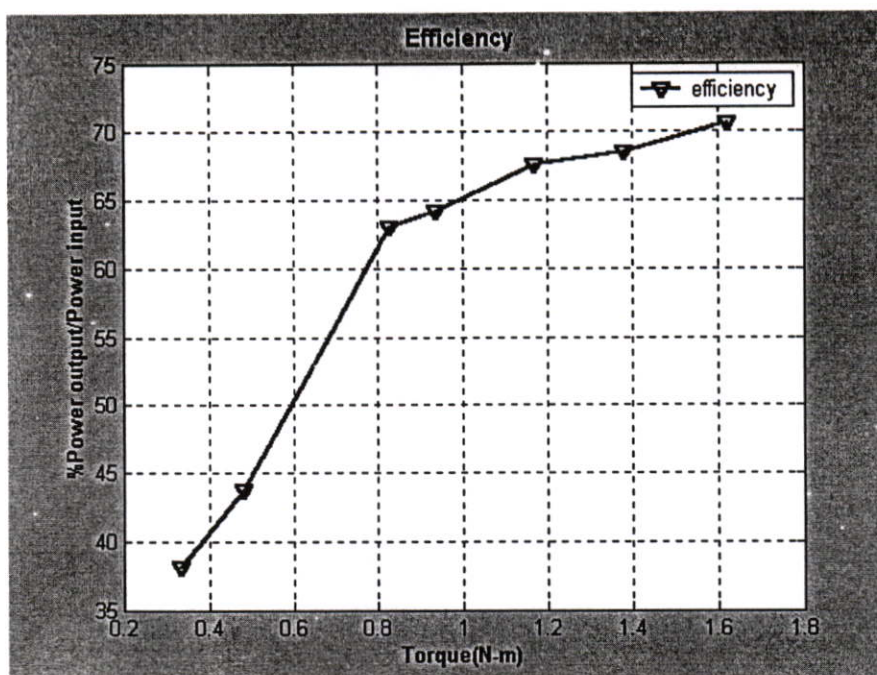
ความเร็วรอบ	แรงบิด	กำลังไฟฟ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ	กำลังงานกลเอาต์พุต	ประสิทธิภาพ
(rpm)	(N-m)	$P_{6\phi,IM}$ (W)	P_{out} (W)	η (%)
1492	0.334	137.11	52.18	38.06
1485	0.482	171.36	74.96	43.74
1480	0.827	203.46	128.17	62.99
1472	0.938	225.47	144.59	64.13
1466	1.17	265.77	179.62	67.58
1450	1.38	305.74	209.54	68.54
1432	1.62	343.83	242.93	70.65

นำผลจากตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8 พล็อตกราฟแสดงกำลังไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ปและประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส ดังภาพที่ 5.18



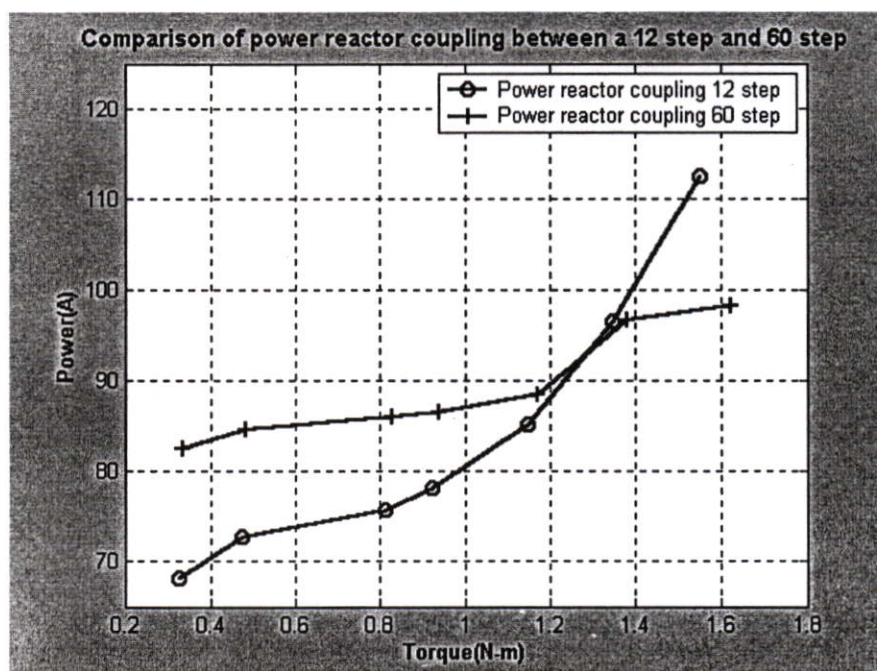
(ก) กำลังไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป $P_{Main,INV}$, $P_{6\phi,IM}$, $P_{6\phi,CR}$ และ $P_{Add,INV}$

ภาพที่ 5.18 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ปและประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

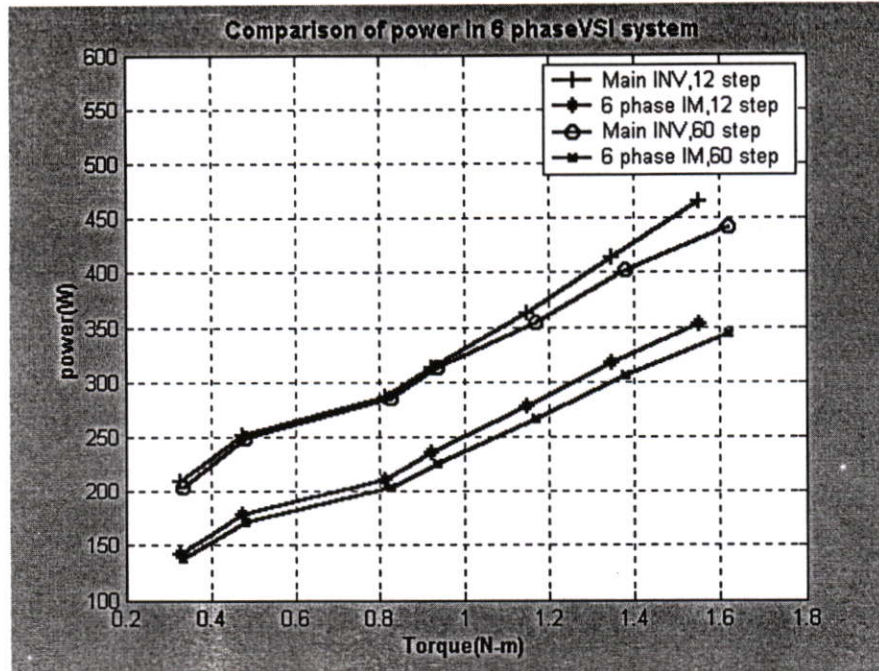


(ข) ประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส

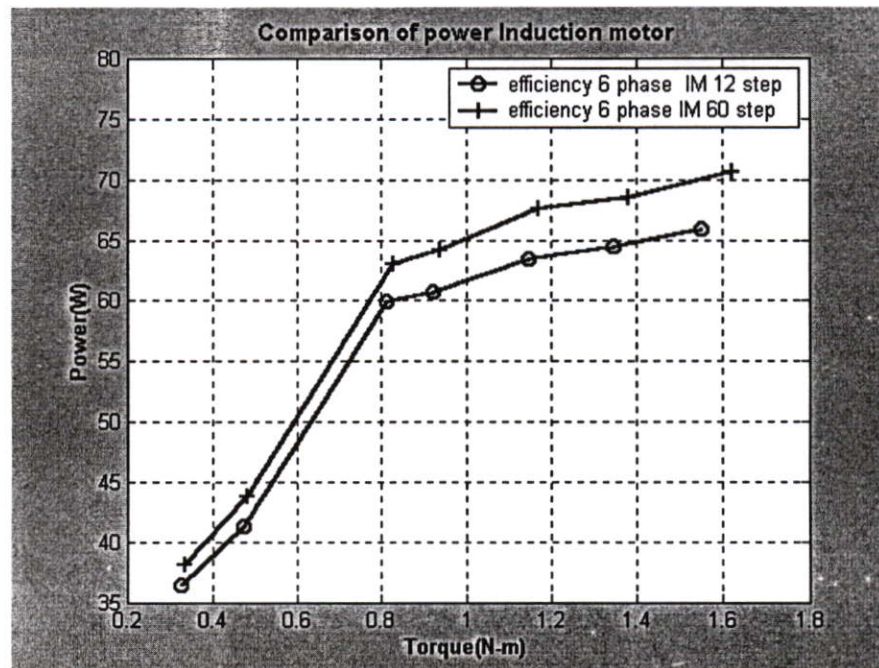
ภาพที่ 5.18 (ต่อ)



ภาพที่ 5.19 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอกเตอร์คัปปลิ่งในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปกับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป



ภาพที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปกับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป



ภาพที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปกับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป

5.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสความถี่สวิตซ์ซึ่งต่ำสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส โดยพัฒนาจากการนำอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม 2 ชุดต่ออนุกรมกันแต่ละชุดมีการสวิตซ์กระแสมีมุมต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้าทำให้สามารถปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากรูปคลื่น 6 สเต็ปเป็น 12 สเต็ปได้โดยใช้รีแอคเตอร์คัปปลิงทำหน้าที่กรองฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 และ 7 และเมื่อต้องการให้มีสเต็ปของรูปคลื่นสูงขึ้น โดยการปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจากการฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเปิ้ลความถี่ 6 เท่าของความถี่อินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส โดยชุดต้นแบบใช้อินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสรูปคลื่น 10 สเต็ปสำหรับปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมได้เป็นระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป แบ่งการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสเป็น 2 ลักษณะโดยเพื่อวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการทดสอบจากการไม่ปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมด้วยการฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเปิ้ลจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสจะเป็นระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป และเมื่อมีการปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมด้วยการฉีดแรงดันไฟฟ้ารีเปิ้ลจากอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสจะเป็นระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป ได้ผลการทดลองดังนี้

5.6.1 การเปรียบเทียบผลจากการกรองฮาร์โมนิกส์และกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ขดลวดรีแอคเตอร์คัปปลิง

จากภาพที่ 5.7(ข) เปรียบเทียบกับภาพที่ 5.8(ข) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดรีแอคเตอร์คัปปลิง (V_{alul}) เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ถูกกรองออกจากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจากอินเวอร์เตอร์หลัก (V_{alol}) ในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปมีค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์น้อยกว่าสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป ทำให้ผลของกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ขดลวดรีแอคเตอร์คัปปลิงน้อยกว่าในสภาวะภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่ำเนื่องจากมุมต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปกับแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์มีค่ามากกว่า ระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป เมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำรับภาระทางกลมากขึ้นกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำมีมุมต่างเฟสลดลงและค่าความแตกต่างของมุมต่างเฟสมีค่าลดลงจึงทำให้ผลของกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รีแอคเตอร์คัปปลิงของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ปมีค่ามากกว่าของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ป ดังภาพที่ 5.19

5.6.2 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส

จากภาพที่ 5.20 การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสในสภาวะภาระทางกลต่ำค่ากำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์หลักของการขับเคลื่อนด้วยระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปกับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ปได้ผลมีค่าใกล้เคียงกันและเริ่มมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อ มอเตอร์เหนี่ยวนำรับภาระทางกลสูงขึ้นเข้าสู่พิกัด

5.6.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส ด้วย ระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปกับระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป

จากผลของฮาร์โมนิกส์อันดับสูงกว่าอันดับ 5 และ 7 ของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 12 สเต็ปทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้นภายในตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำมากกว่าระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สเต็ป ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ลดลงดังภาพที่ 5.21

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะรูปคลื่นจำนวนสลับสูงขึ้นไปเรื่อยๆ ข้อจำกัดในการออกแบบสำหรับพิคคความถี่และกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่ำ

6.1 สรุปหลักทฤษฎีและการออกแบบ

จากหลักทฤษฎีและการออกแบบได้แบ่งส่วนประกอบของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 สลับเป็น 3 ส่วนเพื่อทำหน้าที่ในการปรับปรุงรูปคลื่นสัญญาณกึ่งสะพานจากอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟสทั้ง 2 ชุดให้เป็นรูปคลื่น 60 สลับ ดังนี้

1. การนำอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดต่ออนุกรมกันเพื่อใช้จุดร่วมระหว่างอินเวอร์เตอร์ 2 ชุดอนุกรมกันสำหรับฉีดแรงดันไฟฟ้าปรับเปลี่ปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสะพานทั้ง 2 ชุดด้วยอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟสชุดเดียวโดยออกแบบเป็นอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสรูปคลื่น 10 สลับด้วยเทคนิค NPC (Neutral point clamp) ทำให้ลดจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

2. การใช้รีแอคเตอร์คัปปลิ่งกรองสัญญาณฮาร์โมนิกส์แรงดันไฟฟ้าอันดับ 5 และ 7 ด้วยวิธีนี้สามารถทำได้จากการสวิตช์กระแสของอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุดมีมุมต่างเฟสกัน 30 องศาไฟฟ้าและปรับปรุงการวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเป็น 6 เฟส โดยแบ่งเป็น 3 เฟส 2 ชุดแต่ละชุดวางในตำแหน่งทำมุมกัน 30 องศาไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับการสวิตช์กระแสของอินเวอร์เตอร์

3. การออกแบบการวางตำแหน่งขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแบบกระจายเฟสไม่สมมาตรเพื่อให้มีความสมดุลทั้งลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะออกแบบขดลวดสเตเตอร์เป็นแบบ Short pitch โดยมี Phase belt เท่ากับ 120 องศาไฟฟ้า

4. การหาค่าระดับแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.เชื่อม โขงในระบบให้มีขนาดและพิคคที่เหมาะสมกับพิคคแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

5. การวิเคราะห์พิคคกำลังไฟฟ้าของระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส

6.2 ข้อเสนอแนะ


งานวิจัยนี้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัดกำลังสูงที่ต้องควบคุมความเร็วรอบคงที่ที่ค่าพิกัดความเร็วรอบสูงเป็นผลทำให้พิกัดกระแส และความถี่มีค่าสูงเกินพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เมื่อเลือกใช้ระบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิตซ์สูงด้วยเทคนิค พี.ดับบลิว.เอ็ม. แนวทางแก้ไขเมื่อเลือกใช้ระบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิตซ์ต่ำจึงต้องลดขนาดฮาร์โมนิกส์แรงดันไฟฟ้าจากรูปคลื่นของอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิตซ์ต่ำรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมให้เป็นรูปคลื่น 60 สเต็ป ทำให้ได้พิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์สูงขึ้นจากการฉีดแรงดันไฟฟารีปเปิ้ลด้วยอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม 1 เฟส และจากผลการทดลองการเลือกใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้รับภาระทางกลสูงตามพิกัดกำลังไฟฟ้าจะทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และพัฒนาระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี. เชื่อมโยงให้ได้แรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำคงที่ตามพิกัดแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำต้องการเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงของโหลดทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่รีแอคเตอร์คัปปลิงเปลี่ยนแปลง


เอกสารอ้างอิง

- [1] J.C.Rama and A. Ggiescke, "High-speed electric Drives:Technology and opportunity"
IEEE Ind. Applicat.Mag.,vol.3,pp.48-55,sept./oct.1997.
- [2] Bimal K.Bose,"Modern Power Electronics and AC Drives",Prentice Hall,2002
- [3] M. Abbas, R. Chisten and T. Jahns,"Six-phase Voltage Source Inverter driven
induction motor",in conf. Rec. Annu. IEEE Ind. Appl.soc.,pp.503-511,1983.
- [4] Eugene A. Kling Shirn, "Harmonic filters for Six-phase and Other Multiphase Motors
on Voltage Source Inverters ",IEEE Trans. Ind. Appl,Vol. IA-21NO.4,May/JunPP.588-
594,1985.
- [5] Pual L. Cochra, "Polyphase Induction Motors", Marcell Dekker, 1989.
- [6] P.C. Sen, "Principles of Electric Machines an Power Electronics", John Wiley and
Sons, 1989.
- [7] Daniel W. Hart, "Introduction to Power Electronics", Print Hall, 1997.
- [8] Stephen J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", Mc Graw Hill.
- [9] D.A. Paice, "Power Electronic Converter Harmonics" New York:IEEE Press, pp.36,
1995.
- [10] Mohand N., Undeland T.M., Robins W.P. "Power Electronics Converters, Applications,
and Design.", John Wiley and Sons, 1995.


ภาคผนวก ก

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)</p> <p>รุ่น DL1520/L (4 Channel)</p> <p>รายละเอียด 150 MHz bandwidth 200 MS/s sampling rate on one channel or 100 MS/s on two channels (DL1520/L) 8 bit vertical resolution DC to 30 MHz, 850V (DC + AC peak) 2% DC accuracy, Internal low pass filter</p>
---	--

	<p>ผลิตภัณฑ์ Current Probe (CHAUVIN ARNOUX)</p> <p>รุ่น E3N</p> <p>รายละเอียด Current Probe 10 – 100 Ampere / 1 Volt Input 100 A Peak Max Frequency: DC to 100 kHz. (@ 3 db) Output 10 mV/A, 100 mV/A CAT III</p>
--	--

	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Tachometers(YOKOGAWA)</p> <p>รุ่น 3631</p> <p>รายละเอียด Measurement range : 60.0 to 1999.9 rpm and 60 to 19,999 rpm Detection distance 30 to 300 mm.</p>
---	---

	<p>ผลิตภัณฑ์ Band Differential Probe</p> <p>รุ่น 700924</p> <p>รายละเอียด 100 MHz</p> <p>A probe lets you make wide-band differential input measurements</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Clamp (YOKOGAWA)</p> <p>รุ่น 2343 02</p> <p>รายละเอียด Amp 40A / 400A / 1000 A</p> <p>Volt 40V / 400V / 600 V</p> <p>Ohm 400 / 4k Ohm</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ Power Harmonics Analyzer (FLUKE)</p> <p>รุ่น FLUKE 41B</p> <p>รายละเอียด 5 to 600 Vrms, 1.00 to 1000 Arms</p> <p>up to 600 kw., 6 Hz to 99.9 Hz</p> <p>Indicates fundamental to 13 th harmonics.</p> <p>Measures crest factor, PF, DPF, K-factor</p> <p>%THD, %THD-R</p>

ภาคผนวก ข
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27
 27th Electrical Engineering Conference

Volume 1

สาขาทศความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น



ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น



**ระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ปสำหรับ
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส แบบกระจายเฟสไม่สมมาตร**
A Six-phase, 60 step VSI system for Six-phase Induction Motors with
Non-symmetric phase axes distribution

ประเสริฐ ธาระตัน และ วิจิตร กิณทร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 4 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง แขวงบางปลาฬ เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 6-6232-64111 ต่อ 3471,3472 โทรสาร 6-6232-64167 E-mail: prasert274@hotmail.com,

PERO

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ความถี่สวิชต์ต่ำแบบ 6 สเต็ป 2 ชุดให้เป็นอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ปขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ระบบนี้ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด, คาปัลลิ่งรีแอกเตอร์, อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเพิ่มเติม และมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส แบบกระจายเฟสไม่สมมาตร ได้จากการออกแบบพันขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสใหม่ให้เป็น 6 เฟส ประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ชุด แต่ละขดลวดตำแหน่งขดลวดในช่องสเตเตอร์ของสเตเตอร์มีระยะห่างกัน 30 องศาไฟฟ้า โดยได้ทดสอบเพื่อศึกษาผลการทดลองจากชุดต้นแบบสำหรับใช้เป็นแนวทางและการพัฒนาและออกแบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าความถี่สวิชต์ต่ำ

คำสำคัญ : การกรองฮาร์โมนิก 6 เฟส, มอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส, อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส

Abstract

This paper proposes a method of output voltage waveform improvement generated from dual - 6 step low switching inverters modified into a 6 phase, 60 step voltage source inverter for an induction motor drive. This system consists of dual - 3 phase main inverters, coupling reactor, an additional 1 - phase inverter, and an 6 - phase induction motor modified from existing 3 - phase induction motor having 2 stator rewinding sets in 30 electrical degree displacement for each slot. The testing has been made in order to study experimental results for guidelines in design and development of a low switching voltage source inverter.

Keywords : Harmonic filters for six-phase, Six-phase induction motor, Voltage source inverter

1. คำนำ

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาดใหญ่ให้ความเร็วรอบสูงด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า การใช้เทคนิคผสม

สัญญาณความกว้างของพัลส์ หรือ ที.ดับเบิลยู.เอ็ม.(pulse width modulation) มีข้อจำกัด พิกัดกระแสและความถี่สวิชต์สูงเกินที่คิดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังนั้นการใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าความถี่สวิชต์ต่ำรูปคลื่น 6 สเต็ป จากสัญญาณรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมของระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส สามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีพัลส์กว้างไฟฟ้าสูงได้ แต่ยังมีผลเสียเกิดขึ้นเนื่องจากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า 6 สเต็ปมีขนาดสเปคตรัมฮาร์โมนิกอันดับค่าสูง ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้นเนื่องจากฮาร์โมนิกอันดับค่าสูง [1] ด้วยเหตุนี้การปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าความถี่สวิชต์ต่ำรูปคลื่น 6 สเต็ป ให้มีลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ โดยใช้ระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 สเต็ป เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากฮาร์โมนิกอันดับค่าสูงที่อินเวอร์เตอร์ลดค่าลงได้

2. ทฤษฎี

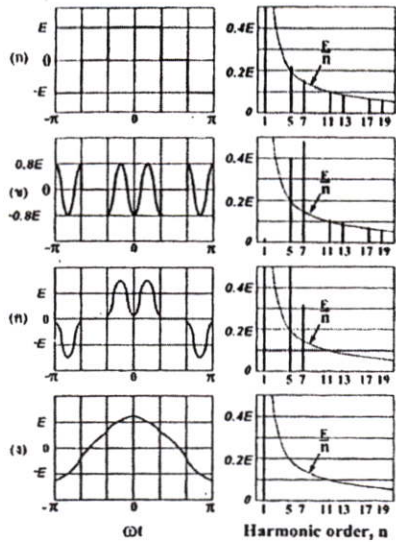
การปรับปรุงสัญญาณรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมให้มีลักษณะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ [2] จากรูปที่ 1 เมื่อนำสัญญาณรูปคลื่นโคไซน์ความถี่ 6 เท่าของรูปคลื่น(ก) ผสมสัญญาณกับรูปคลื่น(ก)โดยการคูณสัญญาณเข้าระบบในทิศทางความต่างศักย์เป็นตรงข้ามได้รูปคลื่นสัญญาณเป็นรูปคลื่น(ข) ดังสมการ (1) เมื่อรวมสัญญาณจากรูปคลื่น(ก)กับ รูปคลื่น(ข) ได้สัญญาณกึ่งสี่เหลี่ยมเปลี่ยนแปลงเป็นรูปคลื่น(ค) ดังสมการ (2) ซึ่งสัญญาณประกอบด้วยฮาร์โมนิกอันดับค่า 5 และ 7 ดังนั้นการกรองสัญญาณฮาร์โมนิกอันดับค่า 5 และ 7 ออกจากรูปคลื่น(ค) ได้ดังสมการ (3) ทำให้ได้สัญญาณไซน์ดังรูปคลื่น(ง)

$$รูปคลื่น(ก) \times (-0.8) \cos 6\omega t = รูปคลื่น(ข) \quad (1)$$

$$รูปคลื่น(ก) + รูปคลื่น(ข) = รูปคลื่น(ค) \quad (2)$$

$$รูปคลื่น(ก) - (6m \pm 1) \text{อันดับฮาร์โมนิก} = รูปคลื่น(ง) \quad (3)$$

เมื่อ m : เลขที่จำนวนเต็ม

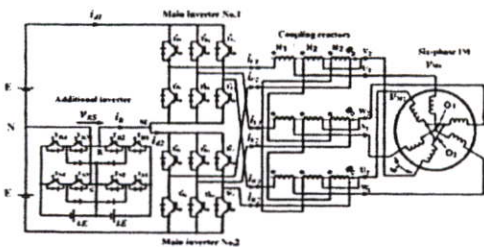


รูปที่ 1 การปรับปรุงรูปคลื่นกำลังที่เปลี่ยนเป็นรูปคลื่นไซน์

3. หลักการทำงาน

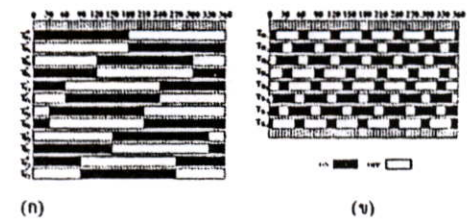
3.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 ตีเป็

จากหลักทฤษฎีการปรับปรุงรูปคลื่นสัญญาณที่เปลี่ยนเป็นรูปคลื่นไซน์นำมาประยุกต์ใช้ในระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 ตีเป็ดังรูปที่ 2

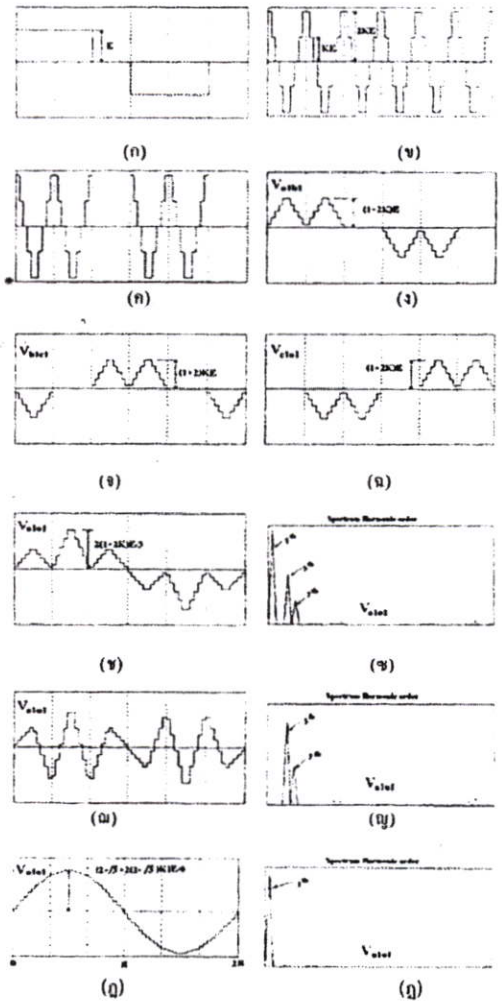


รูปที่ 2 ระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 ตีเป็

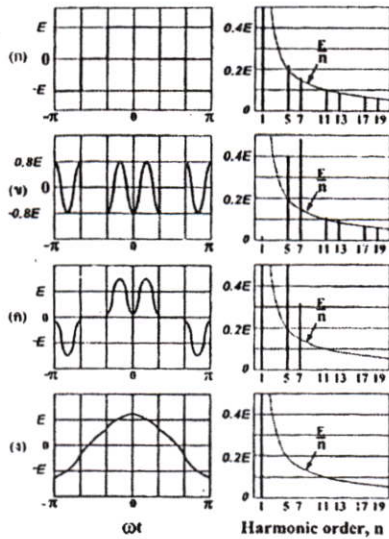
จากรูปที่ 2 ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด (Inverter No.1 และ Inverter No.2), อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว (Additional Single-phase Inverter) สำหรับชดเชยโวลเทจแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 10 ตีเป็ความถี่ 6. เท่าของแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์หลักด้วยเทคนิค เช่น, ที.ซี.(Neutral point clamped)ต่อระหว่างจุด M ลบจุด N มีสัญญาณควบคุมการสวิตซ์กระแสดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 (ก) สัญญาณควบคุมการสวิตซ์กระแสอินเวอร์เตอร์หลัก (ข) สัญญาณควบคุมการสวิตซ์กระแสอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว



รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 ตีเป็ได้จากการคำนวณสมการแรงดันไฟฟ้า

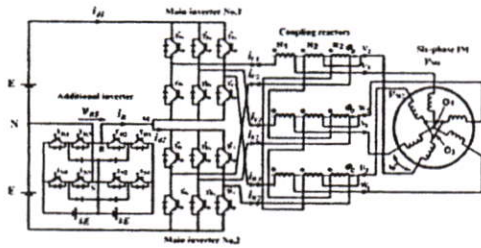


รูปที่ 1 การปรับปรุงรูปคลื่นกึ่งสีก่เปลี่ยนเป็นรูปคลื่นไซน์

3. หลักการทำงาน

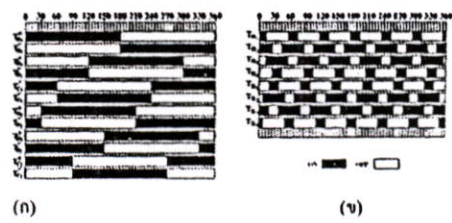
3.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 ฮีตซ์

จากหลักทฤษฎีการปรับปรุงรูปคลื่นสัญญาณกึ่งสีก่เปลี่ยนเป็นรูปคลื่น ไซน์นำมาประยุกต์ใช้ในระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 ฮีตซ์ดังรูปที่ 2

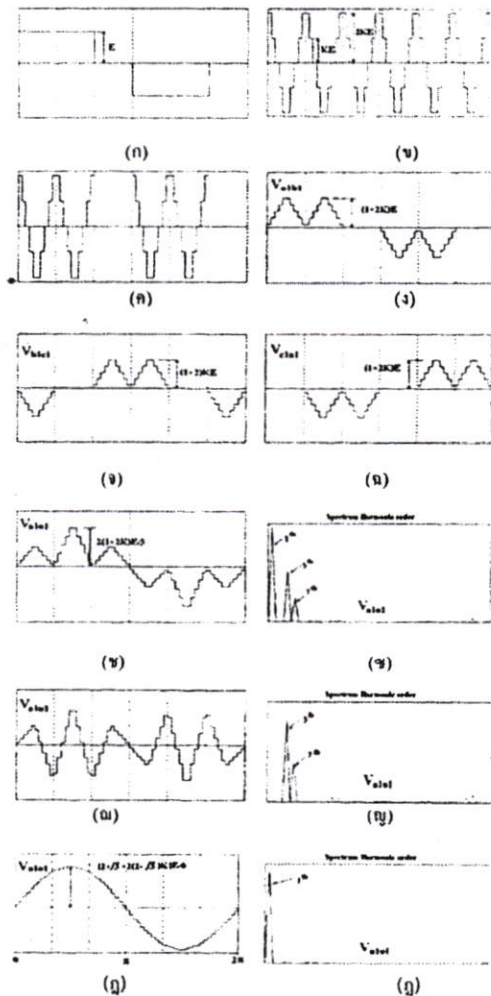


รูปที่ 2 ระบบอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 6 เฟส, 60 ฮีตซ์

จากรูปที่ 2 ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์หลัก 3 เฟส 2 ชุด (Inverter No.1 และ Inverter No.2), อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว (Additional Single-phase Inverter) สำหรับจัดสรรโมเมนต์แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 10 ฮีตซ์ความถี่ 6 เท่าของแรงดันไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์หลักด้วยเทคนิค เอ็น.พี.ซี.(Neutral point clamped)ต่อระหว่างจุด M ลับจุด N มีสัญญาณควบคุมการสวิตซ์กระแสดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 (ก) สัญญาณควบคุมการสวิตซ์กระแสอินเวอร์เตอร์หลัก (ข) สัญญาณควบคุมการสวิตซ์กระแสอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว



รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในระบบอินเวอร์เตอร์ 6 เฟส, 60 ฮีตซ์ได้จากการคำนวณสมการแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 4 รูปคลื่น(ก) เป็นรูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมจากอินเวอร์เตอร์หลัก เมื่อฉีดแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่น 10 สเต็ปดังรูปคลื่น(ข) ผลของการผสมสัญญาณรูปคลื่น(ก)กับรูปคลื่น(ข)ได้รูปคลื่น(ค) เมื่อนำรูปคลื่น(ก)รวมกับรูปคลื่น(ค)ได้รูปคลื่นกึ่งสี่เหลี่ยมเปลี่ยนแปลงเป็นรูปคลื่น(ง), รูปคลื่น(จ) และ รูปคลื่น(ฉ) เป็นลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส(Line to Line) V_{a1b1} , V_{b1c1} และ V_{c1a1} ตามลำดับ ดังนั้นการหาค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส(Phase voltage)เป็นโหมคการทำงานเพื่อหาสมการของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่เกิดขึ้นใน 1 คาบเวลาได้ 6 โหมค

โหมค 1 $0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3}$

$$V_{a1o1} = \frac{1}{3}(V_{a1b1} - V_{b1c1}) \tag{4}$$

โหมค 2 $\frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3}$

$$V_{a1o1} = \frac{2}{3}(V_{a1o1} - V_{c1a1}) \tag{5}$$

โหมค 3 $\frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi$

$$V_{a1o1} = \frac{1}{3}(V_{b1c1} - V_{c1a1}) \tag{6}$$

โหมค 4 $\pi \leq \omega t \leq \frac{4\pi}{3}$

$$V_{a1o1} = -\frac{1}{3}(V_{b1c1} - V_{a1b1}) \tag{7}$$

โหมค 5 $\frac{4\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{3}$

$$V_{a1o1} = -\frac{2}{3}(V_{c1a1} - V_{a1b1}) \tag{8}$$

โหมค 6 $\frac{5\pi}{3} \leq \omega t \leq 2\pi$

$$V_{a1o1} = -\frac{1}{3}(V_{c1a1} - V_{b1c1}) \tag{9}$$

จากสมการ(4) - (9) ได้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส ดังรูปคลื่น(ข) มีค่าสเปคตรัมฮาร์โมนิกของแรงดันไฟฟ้าค้ำรูป(ข) ประกอบด้วยฮาร์โมนิกอันดับ 5 และ 7

3.2 คัพปลิ่งรีแอกเตอร์

ประกอบด้วยขดลวดพันบนแกนเหล็ก 3 แกนแต่ละแกนมีขดลวด N_1 จำนวน 1 ขด และขดลวด N_2 จำนวน 2 ขด ต่อเข้ากับระบบอยู่ระหว่างอินเวอร์เตอร์ 6 เฟสกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟส ทำให้มีกระแสไหลในขดลวดผ่านคัพปลิ่งรีแอกเตอร์สร้างสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่แกนเหล็กทั้ง 3 แกนเป็น ϕ_a, ϕ_b และ ϕ_c เขียนสมการแรงดันไฟฟ้าในรูปของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขดลวดตัวนำได้ดังนี้

$$V_{a1o1} = V_{u1o1} + N_1 \frac{d\phi_a}{dt} \tag{10}$$

$$V_{b1o1} = V_{v1o1} + N_1 \frac{d\phi_b}{dt} \tag{11}$$

$$V_{c1o1} = V_{w1o1} + N_1 \frac{d\phi_c}{dt} \tag{12}$$

$$V_{a2o2} = V_{a2o2} - N_2 \frac{d\phi_a}{dt} + N_2 \frac{d\phi_b}{dt} \tag{13}$$

$$V_{b2o2} = V_{b2o2} - N_2 \frac{d\phi_b}{dt} + N_2 \frac{d\phi_c}{dt} \tag{14}$$

$$V_{c2o2} = V_{c2o2} - N_2 \frac{d\phi_c}{dt} + N_2 \frac{d\phi_a}{dt} \tag{15}$$

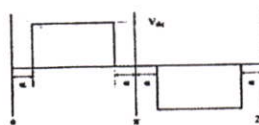
จากสมการ (10) - (15) เขียนสมการแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสใหม่ในรูปแรงดันไฟฟ้า V_{u1o1} และ V_{u2o2} ได้ดังนี้

$$V_{u1o1} = \frac{1}{3} \left[V_{u1o1} - \frac{1}{2} (V_{b1o1} + V_{c1o1}) + \frac{\sqrt{3}}{2} (V_{a2o2} - V_{b2o2}) \right] \tag{16}$$

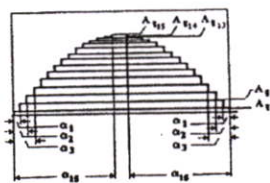
$$V_{u2o2} = \frac{1}{3} \left[V_{a2o2} - \frac{1}{2} (V_{b2o2} + V_{c2o2}) + \frac{\sqrt{3}}{2} (V_{a1o1} - V_{c1o1}) \right] \tag{17}$$

ดังนั้นผลการคัพปลิ่งรีแอกเตอร์เพื่อกรองฮาร์โมนิกที่แรงดันไฟฟ้าอันดับ 5 และ 7 ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าคคคร์มคัพปลิ่งรีแอกเตอร์จากรูปที่ 4 ดังรูปคลื่น(ข) ประกอบด้วยสเปคตรัมฮาร์โมนิกที่แรงดันไฟฟ้าค้ำรูป(ข) ทำให้แรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6 เฟสแต่ละเฟสมีลักษณะดังรูปคลื่น(ข) ประกอบด้วยสเปคตรัมฮาร์โมนิกที่แรงดันไฟฟ้าค้ำรูป(ข)

3.3 หลักการหาค่าแรงดันไฟฟ้า ดี.ซี.จ่ายให้ระบบ



รูปที่ 5 สัญญาณกึ่งสี่เหลี่ยม



รูปที่ 6 สัญญาณรูปคลื่น 60 สเต็ป

จากรูปที่ 5 หาค่าแอมทิจูดของแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐาน (Fundamental) ของสัญญาณกึ่งสี่เหลี่ยมได้จากสมการ

$$V_a = \int_{-\alpha}^{\pi-\alpha} V_d \sin(n\omega t) d(\omega t) \tag{18}$$

$$V_1 = \frac{4V_d}{\pi} \cos \alpha \tag{19}$$

ดังนั้นการหาค่าแอมทิจูดของแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐาน (Fundamental) ของสัญญาณรูปคลื่น 60 สเต็ปจากรูปที่ 6 ได้จากสมการ

$$V_1 = \frac{4}{\pi} \left[A_{s1} + (A_{s2} - A_{s1}) \cos \alpha + (A_{s3} - A_{s2}) \cos 2\alpha + \dots + (A_{s15} - A_{s14}) \cos 14\alpha \right] \tag{20}$$

ประวัติผู้เขียน

นายประเสริฐ สอระสัน เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม 2503 ที่อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีอุตสาหกรรมบัณฑิต(ไฟฟ้ากำลัง) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ อุตสาหกรรมบัณฑิต วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตเทเวศร์ ปีการศึกษา 2528

ปี พ.ศ. 2524 เริ่มรับราชการตำแหน่งครู 2 ระดับ 2 จนถึงปัจจุบันตำแหน่งอาจารย์ 2 ระดับ 7 ประจำแผนกวิชาช่างไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม