



การขับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีการแบบเวกเตอร์และวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบ
ไวงาน สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสด้วยการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

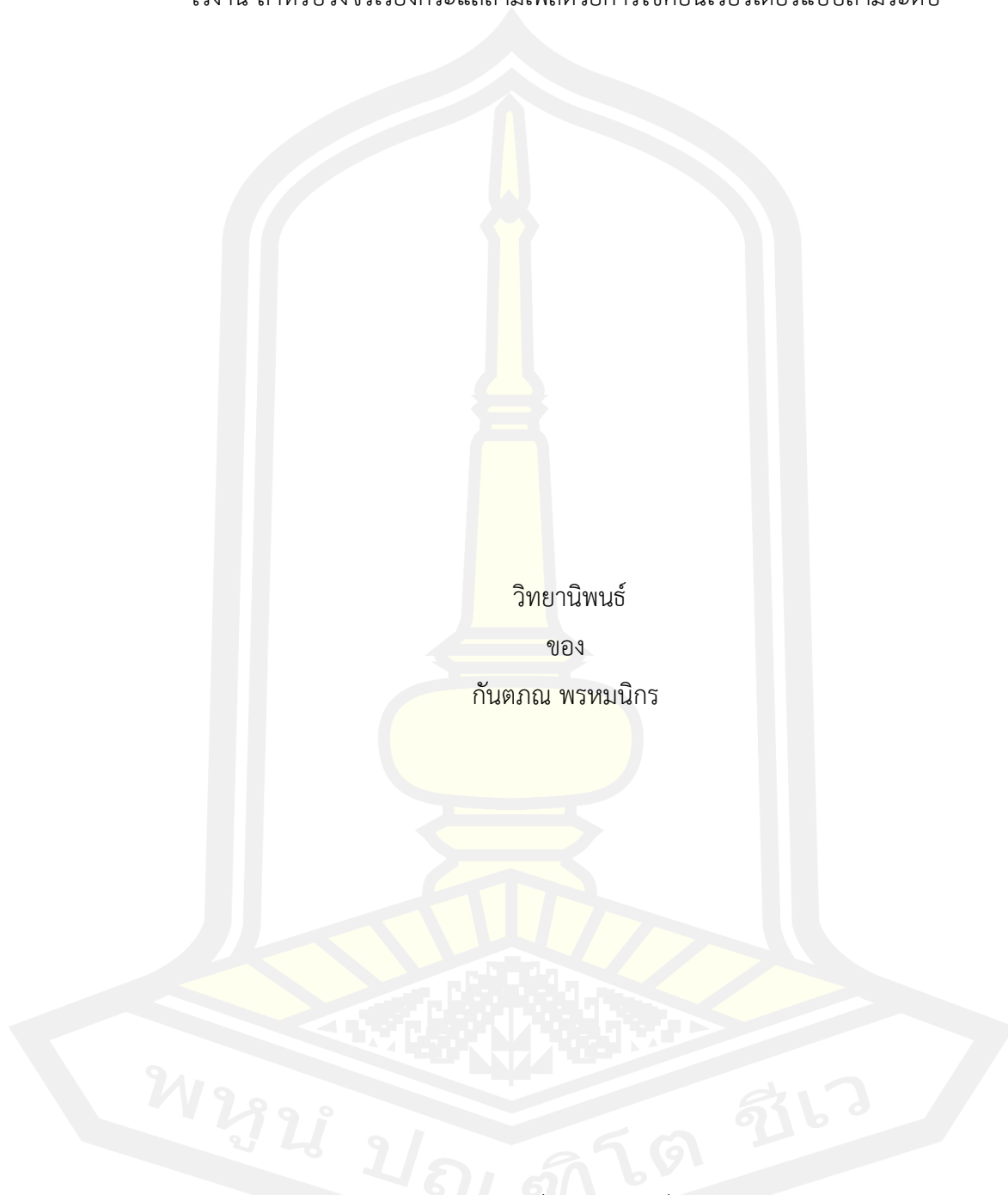
วิทยานิพนธ์
ของ
กัณฑ์พร พรหมนิกร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กุมภาพันธ์ 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การขั้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีการแบบเวกเตอร์และวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบ
ไวงาน สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสด้วยการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับ



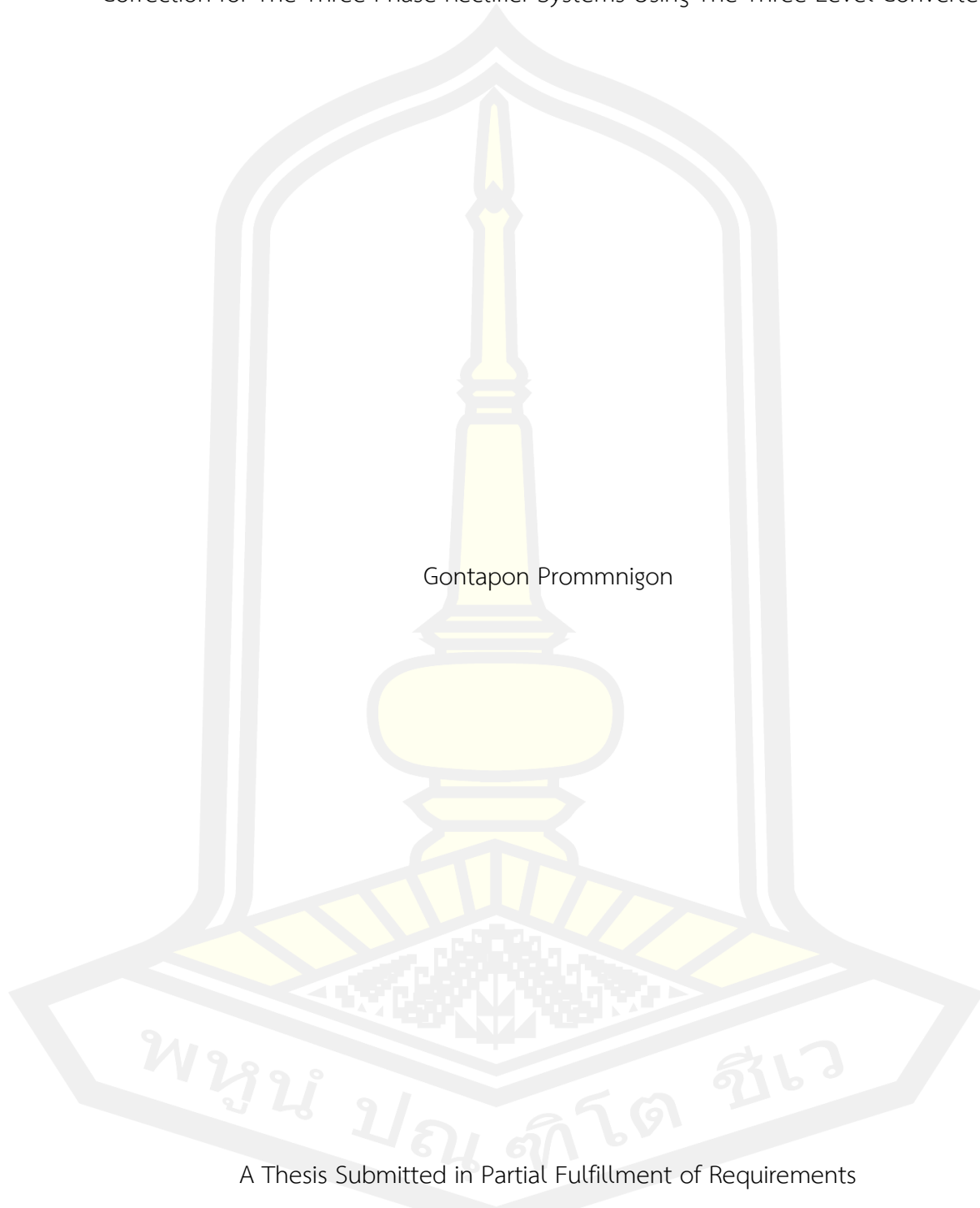
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

กุมภาพันธ์ 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Induction Motor Drive Based on Vector Control Technique and Active Power Factor
Correction for The Three-Phase Rectifier Systems Using The Three-Level Converters

Gontapon Prommnigon



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)

February 2023

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกันตภณ พรหมนิกร
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. สุพรรณนิกา วัฒนชะ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. บัญชา วัฒนชะ)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การขับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีการแบบเวกเตอร์และวงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบไวงาน สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสด้วยการใช้คอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับ		
ผู้วิจัย	กันตภณ พรหมนิกร		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2566

บทคัดย่อ

เครื่องปรับอากาศได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน หนึ่งในเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบปรับอากาศคืออินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมมอเตอร์ของคอมเพรสเซอร์เนื่องจากวงจรเรียงกระแสอยู่ภายในระบบ มีความเป็นไปได้ที่ค่าความเพี้ยนรวมของฮาร์มอนิก (THD) จะสูงกว่าขีดจำกัดของมาตรฐาน IEC/EN 61000-3-2 และทำให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ลดลง

วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่เหมาะสมเพื่อลดความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกและตัวประกอบกำลังที่ดีขึ้นคือระบบแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟ (APFC) เพื่อให้นำไปใช้ได้ต้องมีวิธีการควบคุมและวิธีการมอดูเลตในการทำงาน วิธีการควบคุมสามารถเป็นได้ทั้ง 1) การควบคุมกระแสหรือ 2) การควบคุมพลังงานโดยตรง และวิธีการมอดูเลตสามารถเป็นหนึ่งใน 1) PWM แบบเลื่อนเฟสตามพาหะ 2) PWM ระดับการเลื่อนตามพาหะ หรือ 3) จัดกึ่งกลาง เวกเตอร์อวกาศ PWM

จากการทดสอบวงจรประเภทแอคทีฟ PFC เวียนนาเรกติไฟเออร์กับโหลดมอเตอร์ขนาด 1.3 กิโลวัตต์ โดยใช้การควบคุมกระแสเป็นวิธีการควบคุม และวิธีมอดูเลตเวกเตอร์สเปซเวกเตอร์ PWM ที่จัดกึ่งกลาง พบว่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกทั้งหมดลดลงเหลือ 1.550% ตรงกับค่าฮาร์มอนิกมาตรฐาน IEC/EN 61000-3-2 และตัวประกอบกำลังเพิ่มขึ้นเป็น 0.9997 โดยมี 96% ของประสิทธิภาพของวงจร นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมแรงดันไฟ DC-link ได้ที่ 500V โดยมีการกระเพื่อม 0.6% ในค่าที่ยอมรับได้

คำสำคัญ : การขับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, วงจรเรียงกระแสสามเฟส, วงจรปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบไวงาน

TITLE	Induction Motor Drive Based on Vector Control Technique and Active Power Factor Correction for The Three-Phase Rectifier Systems Using The Three-Level Converters		
AUTHOR	Gontapon Prommnigon		
ADVISORS	Associate Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

ABSTRACT

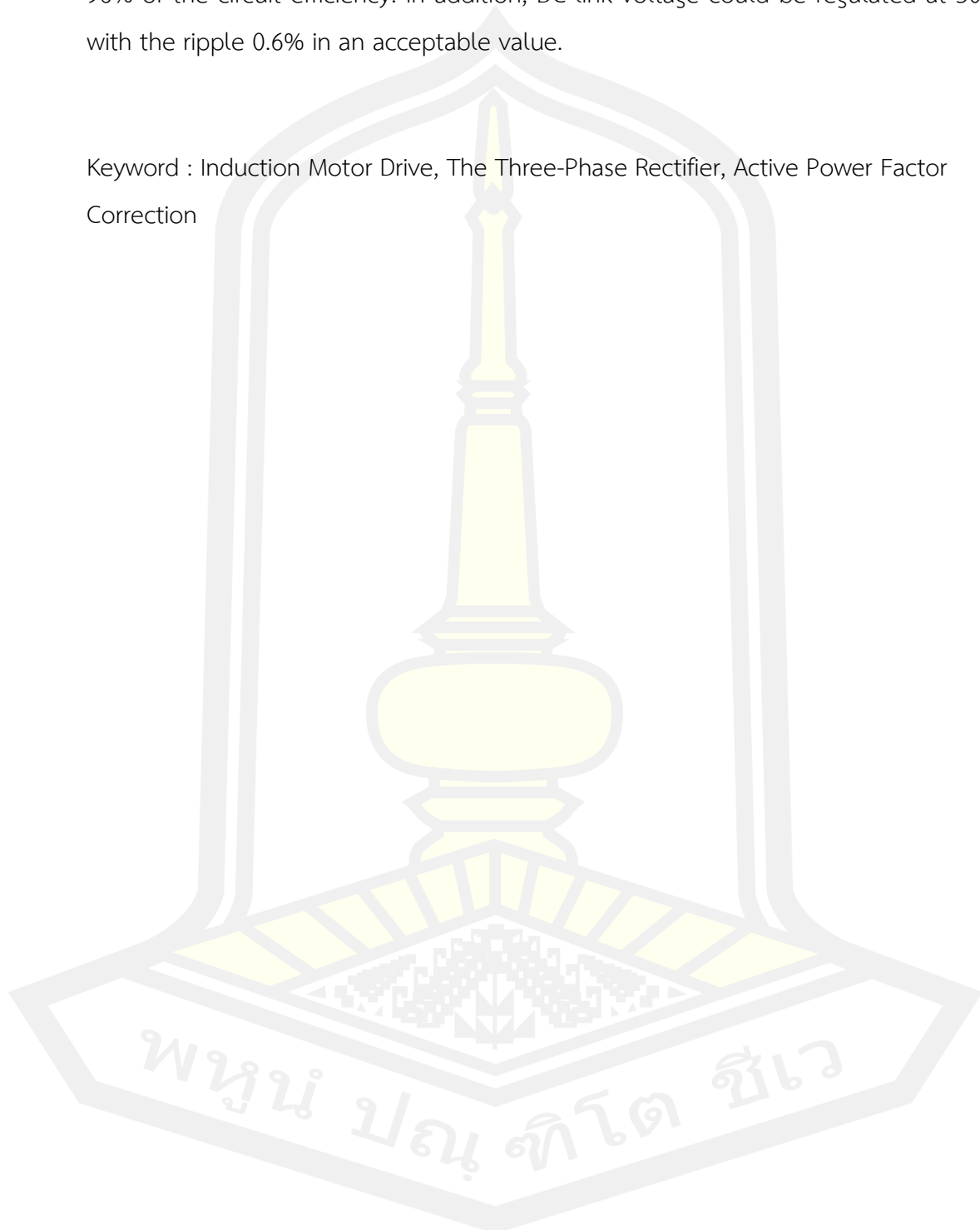
An air conditioner has been growing drastically in its popularity nowadays. One of widely-used technologies in air conditioning system is inverter that functions as a regulator of compressor motor. Since there is a rectifier circuit inside the system, it is possible that the value of total harmonics distortion (THD) is higher than the limit of IEC/EN 61000-3-2 standard and causing decrease of power factor value.

The proper three-phase rectifier circuit to lower harmonic distortion and better power factor is active power factor correction (APFC) system. However, to make it applicable, it is essential to have a control method and a modulation method in operation. The control methods can be either 1) current control or 2) direct power control, and the modulation method can be one of 1) carrier-based phase-shift PWM, 2) carrier-based level-shift PWM or 3) center-aligned space vector PWM.

According to a test of active PFC vienna rectifier type circuit with 1.3 kW load motor by applying current control as a control method and center-aligned space vector PWM as a modulation method, it was found that total harmonics distortion was reduced to 1.550% which falls exactly among harmonics standard

IEC/EN 61000-3-2 values. Moreover, The power factor was increased to 0.9997 with 96% of the circuit efficiency. In addition, DC-link voltage could be regulated at 500V with the ripple 0.6% in an acceptable value.

Keyword : Induction Motor Drive, The Three-Phase Rectifier, Active Power Factor Correction



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ร่วมวิจัย ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้ความรู้ทางวิชาการซึ่งเป็นแนวทางในการทำวิจัย อีกทั้งยังคอยให้คำปรึกษาในการเขียน บทความวิชาการในทุกงานประชุมวิชาการที่ได้ส่งบทความเข้าร่วม

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากรและเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ทุกท่านตลอดจนเจ้าหน้าที่งานบัณฑิตศึกษาของหลักสูตรและคณะ ที่คอยช่วยเหลือและให้แนะนำตลอด การศึกษาและการทำวิจัย รวมทั้งเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง นักศึกษาปริญญาโท-เอก ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ที่มีส่วนช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการศึกษาและการดำเนินงานวิจัยให้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณครอบครัวและมหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ดที่ให้โอกาสและให้ความอนุเคราะห์ ในการศึกษาและการดำเนินการวิจัย จนสามารถดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

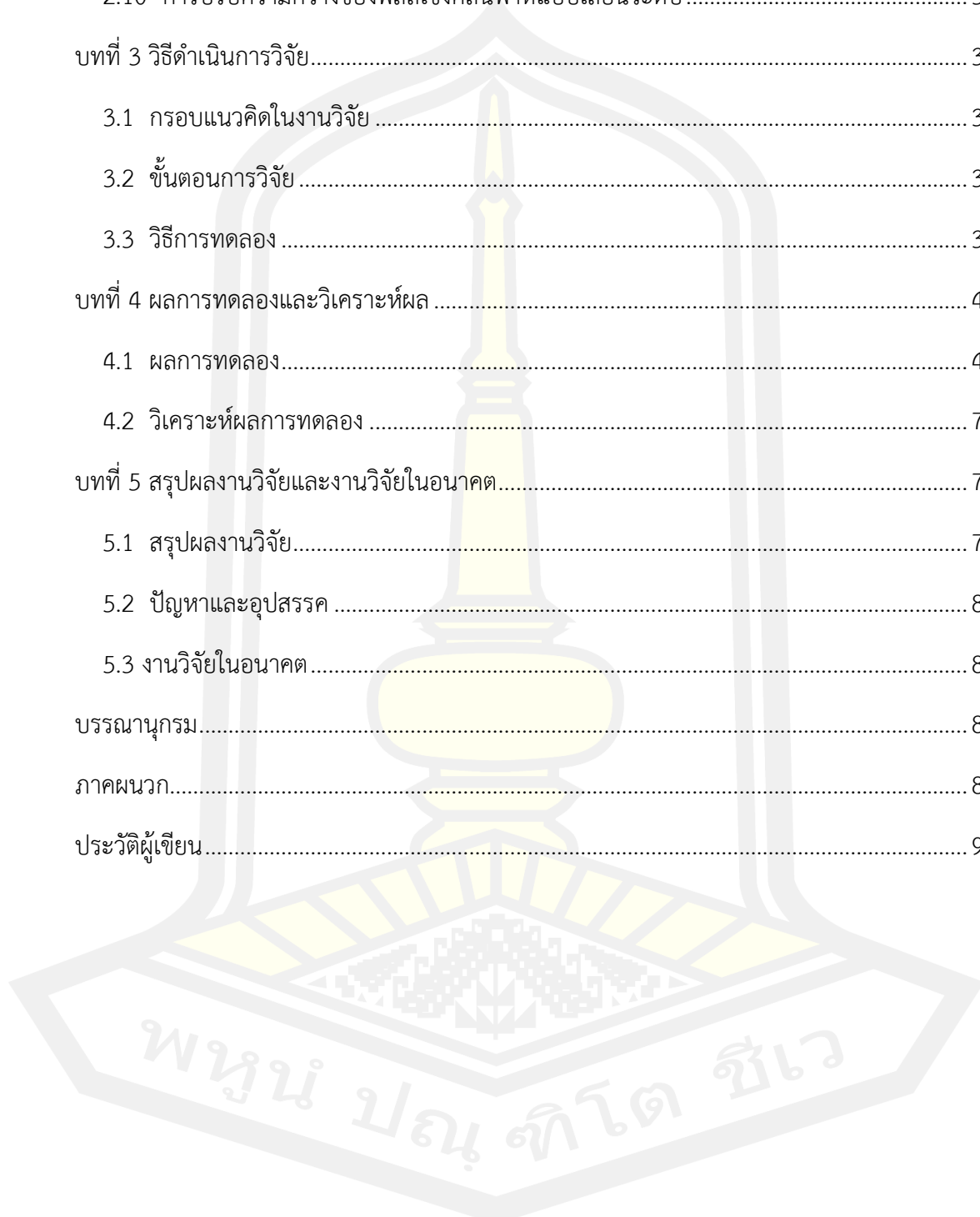
กัณฑ์ณ พรหมนิกร

พหุณ ปณุ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การจำแนกประเภทของวงจรเรียงกระแสสามเฟส.....	4
2.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดฉื่อยงาน.....	5
2.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดผสม.....	5
2.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดไวงาน.....	6
2.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา.....	7
2.6 การมอดูเลชั่นแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ.....	15
2.7 การมอดูเลชั่นแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับ.....	22
2.8 การปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์.....	26

2.9 การปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาร์แบบเลื่อนเฟส	31
2.10 การปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาร์แบบเลื่อนระดับ	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 กรอบแนวคิดในงานวิจัย	34
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	35
3.3 วิธีการทดลอง	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	43
4.1 ผลการทดลอง.....	43
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	75
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและงานวิจัยในอนาคต.....	78
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	78
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	80
5.3 งานวิจัยในอนาคต.....	80
บรรณานุกรม.....	81
ภาคผนวก.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	95



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการควบคุมกระแสและวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้า	14
ตารางที่ 2	สถานการณ์สวิตช์ของการมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับสำหรับวงจร	15
ตารางที่ 3	สถานะการสวิตช์ของแต่ละเวกเตอร์ในสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ	18
ตารางที่ 4	สรุปการคำนวณค่าเวลาเดเวลล์ของการหาเวกเตอร์อ้างอิง V_{ref} ในแต่ละเซกเตอร์	21
ตารางที่ 5	สรุปลำดับสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์ของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ	22
ตารางที่ 6	สรุปค่าเวลาเดเวลล์ของทุกเซกเตอร์และทุกพื้นที่ย่อยในสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับ	25
ตารางที่ 7	ตำแหน่งของการเปลี่ยนจุดศูนย์ของแต่ละเซกเตอร์และขนาด	27
ตารางที่ 8	สรุปการหาค่าเวลาเดเวลล์ของแต่ละเซกเตอร์ย่อยในการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์	30
ตารางที่ 9	เปรียบเทียบคุณสมบัติของการปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาร์ทแบบเลื่อนเฟสและ	33
ตารางที่ 10	พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงานกับโหลดตัวต้านทาน	44
ตารางที่ 11	พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบวงจรกับโหลดตัวต้านทาน	47
ตารางที่ 12	สรุปผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิด Active PFC กับโหลดตัวต้านทานที่ พิกัดกำลัง 1kW	66
ตารางที่ 13	พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบวงจรกับโหลดมอเตอร์	69
ตารางที่ 14	พารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM) ที่ใช้ในการทดสอบ	70
ตารางที่ 15	สรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และ แบบ Active PFC กับโหลดมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 1.3kW	73
ตารางที่ 16	เปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสรวมของมาตรฐาน IEC/EN 61000-3-2 กับการจำลองการทำงานและทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานพิกัด 1 kW จากการทดสอบดังภาพที่ 44	75

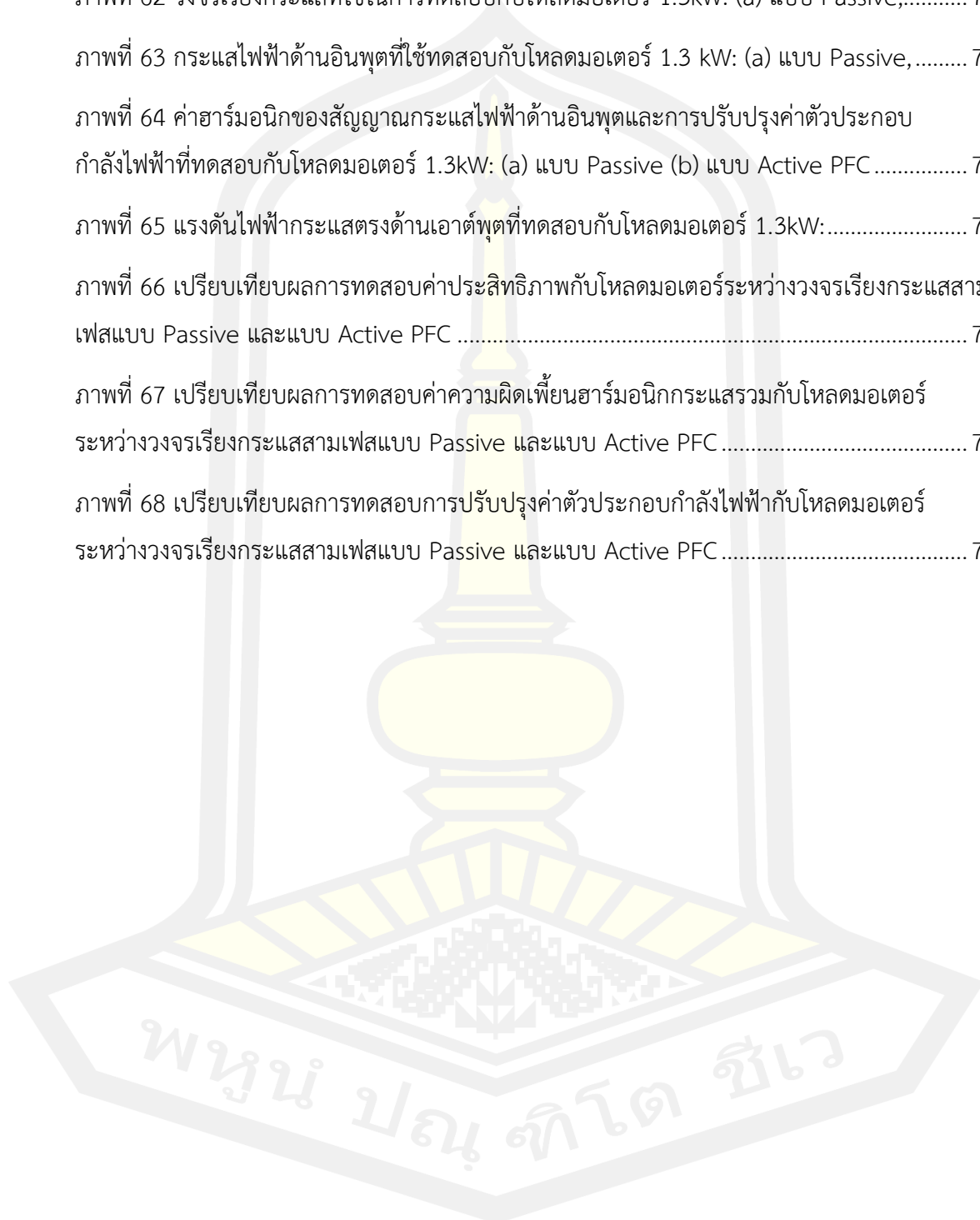
สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การแบ่งประเภทของวงจรเรียงกระแสสามเฟส	4
ภาพที่ 2 ตัวอย่างวงจรชนิดเฉื่อยงาน: (a) DC Side Inductor, (b) AC Side Inductors.....	5
ภาพที่ 3 ตัวอย่างวงจรชนิดผสม: (a) Half-Controlled Rectifier Bridge,.....	6
ภาพที่ 4 ตัวอย่างวงจรชนิดไวงาน: ประเภทแรงดันสองระดับชนิด Y-Switch Rectifier.....	7
ภาพที่ 5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา : (a) แบบอุปกรณ์สวิตซ์ 3 ตัว,	7
ภาพที่ 6 วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเวียนนา	8
ภาพที่ 7 สถานการณ์ทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเวียนนา: (a) เมื่อ S_a มีสถานะ ON และ $I_a > 0$, (b) เมื่อ S_a มีสถานะ OFF และ $I_a > 0$, (c) เมื่อ S_a มีสถานะ ON และ $I_a < 0$, (d) เมื่อ S_a มีสถานะ OFF และ $I_a < 0$	9
ภาพที่ 8 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ	11
ภาพที่ 9 แผนภาพแสดงวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเวียนนา.....	12
ภาพที่ 10 แผนภาพแสดงวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเวียนนา	13
ภาพที่ 11 การกำหนดเซกเตอร์ของสเปซเวกเตอร์.....	15
ภาพที่ 12 สถานะการสวิตซ์ทั้งหมด 8 สถานะ : (a) 000, (b) 100, (c) 110, (d) 010,	17
ภาพที่ 13 แผนภาพสำหรับการมอดูเลชั่นแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ	17
ภาพที่ 14 การหาตำแหน่ง V_{ref} ในเซกเตอร์ 1	19
ภาพที่ 15 ลำดับการสวิตซ์ในเซกเตอร์ 1	22
ภาพที่ 16 แผนภาพสเปซเวกเตอร์สำหรับสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับ	23
ภาพที่ 17 แผนภาพพื้นที่ย่อยทั้ง 4 ในเซกเตอร์ที่ 1.....	23
ภาพที่ 18 แผนภาพ V_{ref} ขณะอยู่ในพื้นที่ย่อย 3 ภายในเซกเตอร์ 1	24
ภาพที่ 19 แผนภาพการเปลี่ยนจุดศูนย์ของสเปซเวกเตอร์สามระดับไปเป็นสเปซเวกเตอร์สองระดับ	26

ภาพที่ 20 แผนภาพแสดงการแบ่งสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับออกเป็นสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับทั้งหมด 6 ส่วน.....	27
ภาพที่ 21 แผนภาพการหาเวกเตอร์อ้างอิง V_{ref} ในการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์	28
ภาพที่ 22 ลำดับการสวิตช์ในเซกเตอร์ 1	28
ภาพที่ 23 ลำดับการสวิตช์ของเซกเตอร์ 1 เซกเตอร์ย่อย 1	30
ภาพที่ 24 การมอดูเลชันของเซกเตอร์ย่อย 1 ในเซกเตอร์ 1	31
ภาพที่ 25 ตัวอย่างการปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาห์แบบเลื่อนเฟส	32
ภาพที่ 26 ตัวอย่างการปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาห์แบบเลื่อนระดับ	33
ภาพที่ 27 แผนภาพกรอบแนวคิดในงานวิจัย.....	34
ภาพที่ 28 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง.....	36
ภาพที่ 29 จำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดไวงานแบบเวียนนา.....	37
ภาพที่ 30 แผนภาพของ Power Circuit ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน	38
ภาพที่ 31 แผนภาพของการแปลงจากระบบสามเฟสให้เป็นระบบเฟรมหมุน.....	38
ภาพที่ 32 แผนภาพของ Current Control Loop และ Voltage Control Loop.....	39
ภาพที่ 33 แผนภาพของวิธีมอดูเลชันแบบ Center-Aligned Space Vector	39
ภาพที่ 34 แผนภาพการทดสอบวงจร Vienna Rectifier กับโหลดตัวต้านทาน	40
ภาพที่ 35 แผนภาพการทดสอบวงจร Vienna Rectifier กับโหลดมอเตอร์:.....	41
ภาพที่ 36 วงจรต้นแบบของวงจรเวียนนาที่พัฒนาโดย Texas Instruments.....	41
ภาพที่ 37 Control Card TMDSCNCD28379D	42
ภาพที่ 38 โปรแกรม Code Composer Studio	42
ภาพที่ 39 แผนภาพการทดลองทั้งหมด	43
ภาพที่ 40 แรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (V_a, V_b, V_c) และกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต (I_a, I_b, I_c).....	44
ภาพที่ 41 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (V_a) กับกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต (I_a).....	45
ภาพที่ 42 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ถูกปรับปรุงจากวงจรเรียงกระแสสามเฟส.....	45

ภาพที่ 43 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต (V_{bus}) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุฝั่งเอาต์พุต (V_{cp} และ V_{cn})	45
ภาพที่ 44 การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต	46
ภาพที่ 45 แรงดันขั้วของเฟส A (V_{AM})	46
ภาพที่ 46 ความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต	46
ภาพที่ 47 แผนภาพการทดสอบวงจร Vienna Rectifier กับโหลดตัวต้านทานที่พิกัดกำลัง 1 kw ...	48
ภาพที่ 48 กระแสไฟฟ้าด้านอินพุต 3 เฟส: (a) ขณะที่ Active PFC ยังไม่ทำงาน,	48
ภาพที่ 49 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (V_a) กับกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต (I_a) จากการทดสอบกับโหลดตัวต้านทาน 1kW.....	62
ภาพที่ 50 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าขณะที่ Active PFC ทำงานที่โหลดตัวต้านทาน 1kW	62
ภาพที่ 51 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตทั้ง 2 ตัว ที่โหลดตัวต้านทาน 1kW	63
ภาพที่ 52 ทดสอบการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตที่โหลดตัวต้านทาน 1kW 63	
ภาพที่ 53 ทดสอบแรงดันขั้วของเฟส A (V_{AM})	64
ภาพที่ 54 ทดสอบวัดความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตที่โหลดตัวต้านทาน 1kW.....	64
ภาพที่ 55 ทดสอบ step-up โหลดจาก 300W เป็น 1kW.....	65
ภาพที่ 56 ทดสอบ step-down โหลดจาก 1kW เป็น 300W	65
ภาพที่ 57 เปรียบเทียบผลการทดสอบของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสรวมกับโหลดตัวต้านทานพิกัดกำลัง 1kW.....	67
ภาพที่ 58 เปรียบเทียบผลการทดสอบการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับโหลดตัวต้านทานพิกัดกำลัง 1kW.....	67
ภาพที่ 59 แผนภาพการทดสอบกับโหลดมอเตอร์.....	68
ภาพที่ 60 แผนภาพการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงานกับโหลดมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 1.3 kW	68

ภาพที่ 61 Motor Test ที่ใช้ในการทดสอบ.....	69
ภาพที่ 62 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการทดสอบกับโหลดมอเตอร์ 1.3kW: (a) แบบ Passive,.....	70
ภาพที่ 63 กระแสไฟฟ้าด้านอินพุตที่ใช้ทดสอบกับโหลดมอเตอร์ 1.3 kW: (a) แบบ Passive,.....	71
ภาพที่ 64 ค่าฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตและการปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ทดสอบกับโหลดมอเตอร์ 1.3kW: (a) แบบ Passive (b) แบบ Active PFC.....	71
ภาพที่ 65 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตที่ทดสอบกับโหลดมอเตอร์ 1.3kW:.....	72
ภาพที่ 66 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพกับโหลดมอเตอร์ระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC	73
ภาพที่ 67 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสรวมกับโหลดมอเตอร์ระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC.....	74
ภาพที่ 68 เปรียบเทียบผลการทดสอบการปรับปรุ่ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับโหลดมอเตอร์ระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC.....	74



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ที่โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ไม่มีแปรงถ่านทำให้การสูญเสียเนื่องจากความถี่มีค่าน้อย มีตัวประกอบกำลังสูง การบำรุงรักษาต่ำ การเริ่มเดินทำได้ไม่ยาก ความเร็วรอบค่อนข้างคงที่ สร้างง่าย ทนทาน ราคาถูก และมีประสิทธิภาพสูง ข้อเสีย คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ทำได้ยาก ดังนั้นการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญ เราจึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุมมอเตอร์ เรียกว่า Motor Drive เพื่อที่จะได้ควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพให้เหมาะสมกับงานที่ใช้มากที่สุด การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามเฟส จะควบคุมโดยใช้ อุปกรณ์ เซมิคอนดักเตอร์ ในการควบคุมมอเตอร์ ซึ่งจากสมการหาความเร็วของมอเตอร์หาได้จาก $n_s = 120 f/p$ ซึ่งมีหน่วยเป็น RPM หรือ รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าเราสามารถปรับค่าความเร็วรอบได้ โดยการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งก็สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-60 Hz หรือมากกว่า จนกระทั่งได้ความเร็วที่ต้องการแต่ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของมอเตอร์ด้วย

โดยองค์ประกอบของอินเวอร์เตอร์ได้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1) วงจรคอนเวอร์เตอร์ และ 2) วงจรอินเวอร์เตอร์ โดยที่วงจรคอนเวอร์เตอร์หรือวงจรที่ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้วงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ไดโอด (Bridge Diode Rectifier) ซึ่งจะทำให้กระแสอินพุตมีความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ไดโอด ส่งผลให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion: THD) มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดโดยเทียบกับมาตรฐาน IEC/EN61000-3-2 ก่อให้เกิดปัญหาสัญญาณรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) โดยสัญญาณรบกวนดังกล่าวจะแพร่ไปยังระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ เชื่อมต่ออยู่ และยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ทางด้านอินพุตมีค่าต่ำอีกด้วย แนวทางในการลดทอนสัญญาณรบกวนทางด้านฮาร์มอนิกให้อยู่ในมาตรฐานและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งของวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีหลายแนวทางเช่น 1) การใช้วงจรกรองแบบเฉื่อยงาน (Passive Filter) ซึ่งจะใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในการลดทอนสัญญาณรบกวน 2) การใช้วงจรกรองแบบไวงาน (Active Filter) ซึ่งจะใช้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งในการทำงาน 3) การใช้วงจรแบบผสม (Hybrid Filter) คือใช้ทั้งแบบเฉื่อยงานและแบบไวงานร่วมกันเป็นต้น แต่ด้วยเงื่อนไขการแข่งขันทางการตลาดของระบบอินเวอร์เตอร์มักจะต้องการวงจรไฟฟ้าที่มีขนาด

เล็ก กะทัดรัด ประสิทธิภาพสูง น้ำหนักเบา ซึ่งทำได้โดยลดการใช้อุปกรณ์แบบเฉื่อยงานและใช้เทคนิคทางการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลังมาช่วยทำหน้าที่แทน จึงเป็นสาเหตุให้แนวโน้มการพัฒนาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงานได้รับความนิยม ซึ่งการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์นั้นจะวิธีควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรง (Direct Power Control) และวิธีการควบคุมกระแส (Current Control) อีกทั้งยังต้องอาศัยการมอดูเลชันเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์สวิตช์โดยเลือกใช้ด้วยกันทั้งหมด 4 วิธีคือ 1) วิธีการมอดูเลชันของสัญญาณพาหะแบบเลื่อนเฟส (Carrier-Based Phase-Shift Pulse Width Modulation) 2) วิธีการมอดูเลชันของสัญญาณพาหะแบบเลื่อนระดับ (Carrier-Based Level-Shift Pulse Width Modulation) 3) วิธีมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Pulse Width Modulation) 4) วิธีมอดูเลชันแบบการปรับศูนย์กลางของสเปซเวกเตอร์ (Center-Aligned Space Vector Pulse Width Modulation)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงาน โดยจะใช้วิธีการจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบวิธีการควบคุมการทำงานและวิธีการมอดูเลชันทั้งหมด เพื่อดูว่าวิธีการใดที่เหมาะสมในการลดทอนสัญญาณรบกวนทางด้านฮาร์มอนิกและสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และจะนำวิธีการดังกล่าวไปใช้ในการทดสอบกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงาน โดยจะทดสอบกับโหลดตัวต้านทานเพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองการทำงานกับผลการทดสอบจริง อีกทั้งจะทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเฉื่อยงานและวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงานโดยใช้โหลดที่เป็นมอเตอร์เช่นเดียวกับที่อยู่ภายในคอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ และจะทำการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสกับมาตรฐาน IEC/EN61000-3-2 เพื่อยืนยันว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงาน วิธีการควบคุมและวิธีการมอดูเลชันที่เลือกใช้นั้นสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางด้านฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในมาตรฐานได้

1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อพัฒนาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงานโดยเลือกใช้วิธีการควบคุมการทำงานและวิธีการมอดูเลชันที่เหมาะสมสำหรับการลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิกและสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในมาตรฐาน IEC/EN61000-3-2

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรกระแสสามเฟสแบบไวงาน โดยใช้วิธีการควบคุมกระแสและใช้วิธีการมอดูเลชันแบบการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชัน จะทำให้ช่วยลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิก, ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและสามารถเพิ่มและควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้คงที่ได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาชนิดของวงจรเรียงกระแสสามเฟส
- 1.4.2 ศึกษาวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงาน
- 1.4.3 ศึกษาวิธีการมอดูเลชันสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงาน
- 1.4.4 ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองการทำงานกับโหลดตัวต้านทานที่พิกัดกำลัง 1kW
- 1.4.5 ทดสอบการทำงานกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงานเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองการทำงานกับโหลดตัวต้านทานที่พิกัดกำลัง 1kW
- 1.4.6 ทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงานกับแบบไวงานโดยใช้โหลดมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 1.3kW
- 1.4.7 เปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสกับมาตรฐาน IEC/EN61000-3-2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถพัฒนางจรต้นแบบที่ใช้ลดทอนฮาร์มอนิกให้อยู่ในมาตรฐาน IEC/EN61000-3-2
- 1.5.2 สามารถพัฒนางจรต้นแบบที่สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้ใกล้เคียงหนึ่ง
- 1.5.3 สามารถพัฒนางจรต้นแบบที่สามารถเพิ่มและควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้คงที่

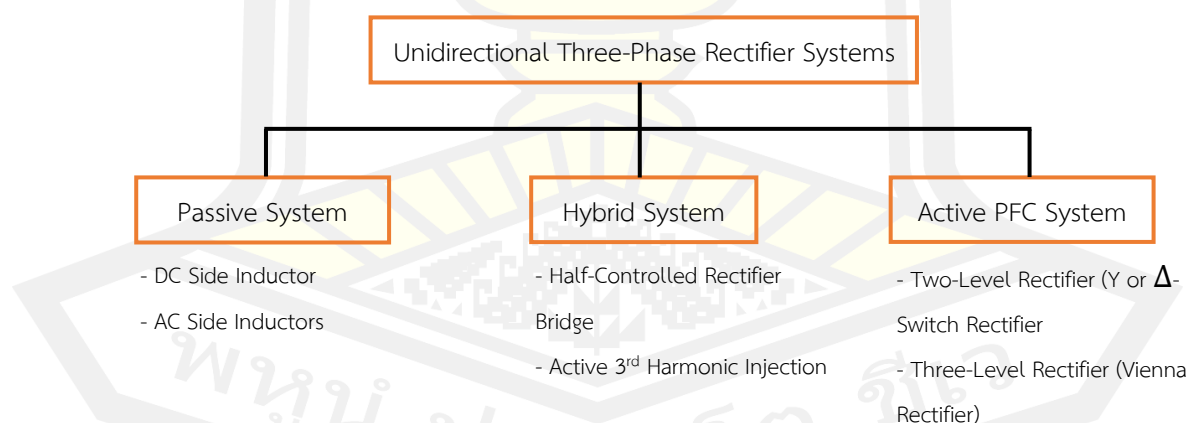
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC-DC Converter) หรือที่เรียกว่าวงจรเรียงกระแส เป็นวงจรที่นิยมใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายแอปพลิเคชันเช่น อินเวอร์เตอร์ไดรฟ์เวอร์, เครื่องจ่ายไฟสำรอง, โซลาร์เซลล์ เป็นต้น ซึ่งการแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงนั้น มักจะทำให้กระแสอินพุตมีความผิดเพี้ยนและจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

2.1 การจำแนกประเภทของวงจรเรียงกระแสสามเฟส

จากงานวิจัยของ Johann W. Kolar และ Thomas Friedli, Power Electronic System Laboratory (PES) [1-2] ได้ทำการจำแนกประเภทของวงจรเรียงกระแสสามเฟสออกเป็น 3 ชนิดดังภาพที่ 1 โดยแบ่งออกเป็น 1) วงจรเรียงกระแสชนิดเฉื่อยงาน (Passive System) จะใช้อุปกรณ์จำพวกตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในการลดทอนความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก 2) วงจรเรียงกระแสชนิดผสม (Hybrid System) จะใช้อุปกรณ์จำพวกตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจรร่วมกับอุปกรณ์สวิตช์ และ 3) วงจรเรียงกระแสชนิดไวงาน (Active PFC System) จะใช้อุปกรณ์สวิตช์โดยอาศัยวิธีการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์

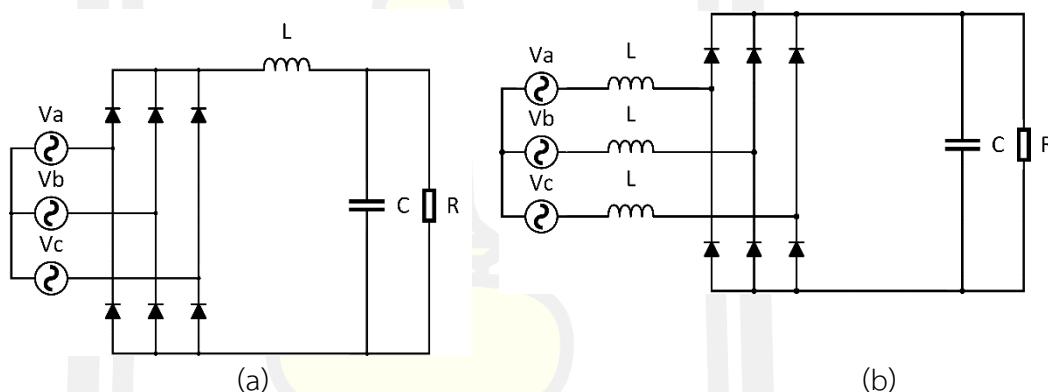


ภาพที่ 1 การแบ่งประเภทของวงจรเรียงกระแสสามเฟส

2.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเฉื่อยงาน

การทำงานของวงจรเรียงกระแสชนิดเฉื่อยงานดังภาพที่ 2 นั้นจะใช้อุปกรณ์ที่เป็นแบบเฉื่อยงานจำพวกตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในการลดทอนความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก ซึ่งจะมีคุณลักษณะดังนี้

- 2.2.1 ไม่มีอุปกรณ์สวิตช์
- 2.2.2 ทำงานในช่วงความถี่ต่ำ
- 2.2.3 ใช้ไดโอดในการเรียงกระแส
- 2.2.4 ใช้ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตเป็นตัวช่วยลดการกระเพื่อมของแรงดัน
- 2.2.5 ไม่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต
- 2.2.6 ไม่มีการควบคุมความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุต



ภาพที่ 2 ตัวอย่างวงจรชนิดเฉื่อยงาน: (a) DC Side Inductor, (b) AC Side Inductors

โดยทั่วไปแล้ววงจรชนิดเฉื่อยงานนั้นจะมีกระแสด้านอินพุตที่ผิดเพี้ยนและค่าตัวประจุกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตต่ำ ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใส่ตัวกรองชนิดตัวเหนี่ยวนำเข้าไปที่ฝั่ง AC หรือ DC ของวงจรเรียงกระแสแต่วิธีการนี้ก็ทำให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่มากขึ้นและประสิทธิภาพต่ำ

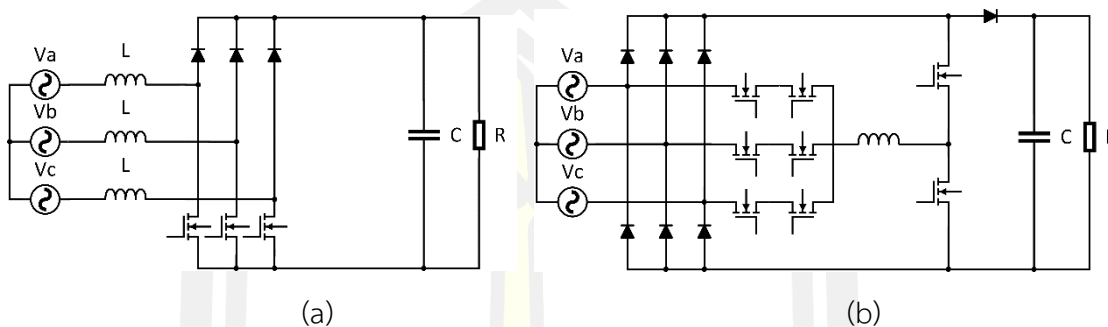
2.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดผสม

การทำงานแบบวงจรเรียงกระแสชนิดผสมดังภาพที่ 3 ได้รับการพัฒนามาจากชนิดเฉื่อยงานโดยการเพิ่มอุปกรณ์สวิตช์เข้าไป ซึ่งจะช่วยให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตและควบคุมให้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุตให้มีความผิดเพี้ยนน้อยลง ซึ่งมีคุณลักษณะดังนี้

- 2.3.1 ใช้อุปกรณ์ประเภทเฉื่อยงานที่มีความถี่ต่ำ
- 2.3.2 ใช้ไดโอดและอุปกรณ์สวิตซ์ในการเรียงกระแส

2.3.3 มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต

2.3.4 มีการควบคุมความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุต



ภาพที่ 3 ตัวอย่างวงจรชนิดผสม: (a) Half-Controlled Rectifier Bridge,
(b) Active 3rd Harmonic Injection

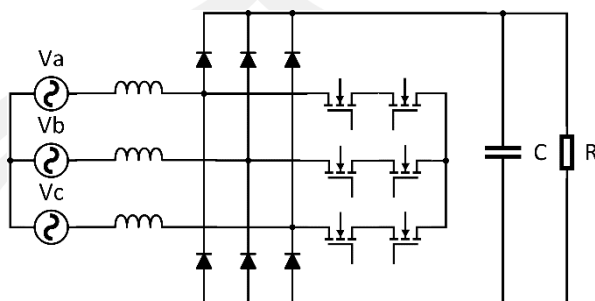
2.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดไวงาน

วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดไวงาน นั้นจะอาศัยการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรเป็นหลัก เพื่อที่จะควบคุมความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุต อีกทั้งยังสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตได้อีกด้วย ซึ่งมีคุณลักษณะดังนี้

- 2.4.1 ใช้อุปกรณ์สวิตซ์ในการควบคุมการทำงาน
- 2.4.2 สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดี
- 2.4.3 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุตมีขนาดเล็ก
- 2.4.4 มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต
- 2.4.5 มีการควบคุมความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุต
- 2.4.6 วงจรมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

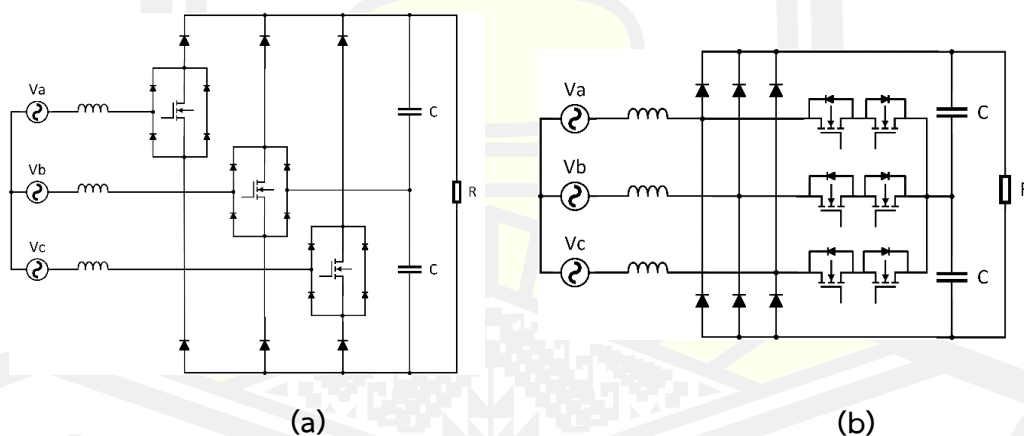
วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดไวงาน ที่นิยมใช้จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท 1) แรงดันสองระดับ (Two-Level Voltage) ดังภาพที่ 4 และ 2) แรงดันสามระดับ (Three-Level Voltage) ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกันแรงดันสามระดับจะให้การกระเพื่อมของกระแสที่ต่ำกว่าแรงดันสองระดับและแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์น้อยกว่าเนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสที่ต่ำกว่าก็ส่งผลให้ตัวเหนี่ยวนำ (Boost Inductor) ที่อยู่ด้านฝั่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีขนาดที่เล็กลงและแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์ที่น้อยกว่าทำให้การสูญเสียกำลังมีค่าลดลง ทำให้ขนาดของตัวกรองสัญญาณมีขนาดเล็กลงและสามารถทำงานที่ความถี่สูงๆได้ เนื่องจากการที่สามารถทำงานในช่วงความถี่สูงได้ และให้ประสิทธิภาพที่ดีนั้นทำให้วงจรแรงดันสามระดับเหมาะกับการใช้งานในหลายๆแอปพลิเคชัน

อย่างไรก็ตามวงจรแรงดันสามระดับก็ยังมีข้อเสียอยู่ก็คือมีการควบคุมการทำงานที่ซับซ้อนและต้องควบคุมให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้ง 2 ตัวมีแรงดันที่เท่ากัน



ภาพที่ 4 ตัวอย่างวงจรชนิดไวงาน: ประเภทแรงดันสองระดับชนิด Y-Switch Rectifier

วงจรแรงดันสามระดับที่ได้รับความนิยมคือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ 3 ตัวและไดโอดดังภาพที่ 5 (a) วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนาได้รับความนิยมมาเชื่อก่อนข้างมากเนื่องจากให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตที่สูง แต่เนื่องจากเวลาทำงานในแต่ละเฟสนั้นไดโอดจะมีทำงาน 2 ตัวซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานภายในอุปกรณ์ จึงได้มีการปรับปรุงโดยการลดจำนวนไดโอดลงและแทนที่ด้วยอุปกรณ์สวิตช์ 2 ทิศทาง ดังภาพที่ 5 (b)

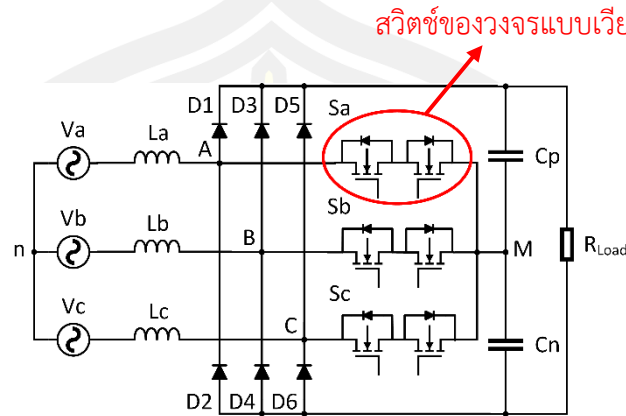


ภาพที่ 5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา : (a) แบบอุปกรณ์สวิตช์ 3 ตัว,
(b) แบบอุปกรณ์สวิตช์ 6 ตัว

2.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา

วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเวียนนา [3] ดังภาพที่ 6 นั้นโครงสร้างจะประกอบไปด้วยไดโอดเรียงกระแสทั้งหมด 6 ตัว (D1-D6) ต่อกันในลักษณะของไดโอดบริดจ์ (Bridge Diode Rectifier) และมีอุปกรณ์สวิตช์ที่ต่อในลักษณะสวิตช์สองทิศทาง (Bi-Directional Switch) ทั้งหมด 3

ชุด (Sa, Sb, Sc) ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านอินพุตให้ลดน้อยลงอีกทั้งยังควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้คงที่อีกด้วย



ภาพที่ 6 วงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเวียนนา

จากวงจรดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 1-3 [4-8] โดยที่ L คือ ตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุต, i_a, i_b, i_c คือ กระแสในระบบไฟฟ้า 3 เฟส, VAM, VBM, VCM คือ แรงดันขั้วของแต่ละเฟสและ VMn คือ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแรงดันที่จุด neutral ของ dc-link กับแรงดันที่จุด neutral ของแหล่งจ่ายสามเฟสและ V_{an}, V_{bn}, V_{cn} คือ แหล่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสดังสมการที่ 4-6

$$V_{an} = L \frac{di_a}{dt} + V_{AM} + V_{Mn} \quad (1)$$

$$V_{bn} = L \frac{di_b}{dt} + V_{BM} + V_{Mn} \quad (2)$$

$$V_{cn} = L \frac{di_c}{dt} + V_{CM} + V_{Mn} \quad (3)$$

$$V_{an} = V_m \cos(\omega t) \quad (4)$$

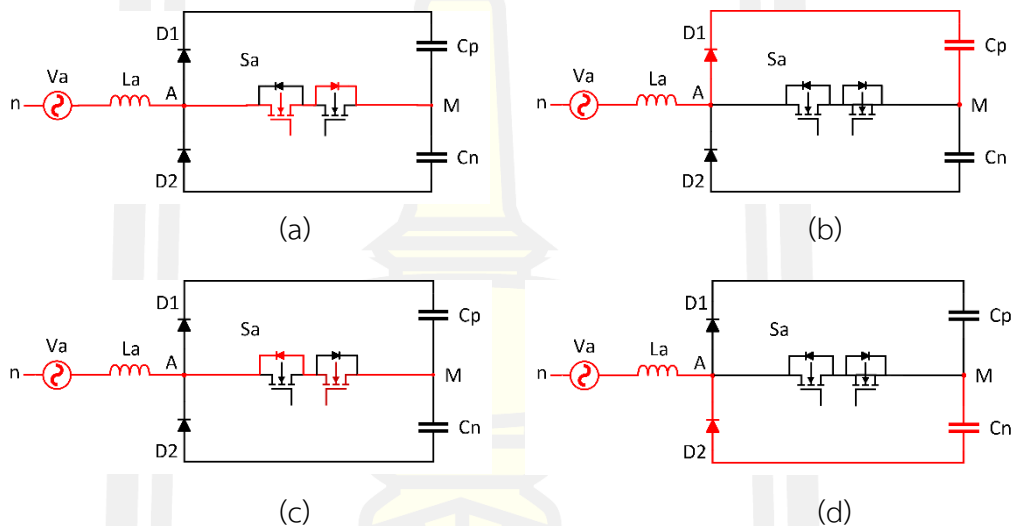
$$V_{bn} = V_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (5)$$

$$V_{cn} = V_m \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (6)$$

โดยที่การทำงานของสวิตช์แต่ละชุดนั้นจะมีด้วยกันทั้งหมด 4 สถานะคือ สถานะที่ 1) เมื่อสวิตช์ Sa มีสถานะเป็น OFF และกระแส i_a มีค่าเป็นบวกจะทำให้แรงดันที่จุด VAM มีค่าเป็น $V_{dc}/2$,

สถานะที่ 2) เมื่อสวิตช์ S_a มีสถานะเป็น ON และกระแส I_a มีค่าเป็นบวกจะทำให้แรงดันที่จุด VAM มีค่าเป็น 0, สถานะที่ 3) เมื่อสวิตช์ S_a มีสถานะเป็น OFF และกระแส I_a มีค่าเป็นลบจะทำให้แรงดันที่จุด VAM มีค่าเป็น $-V_{dc}/2$ และสถานะที่ 4) เมื่อสวิตช์ S_a มีสถานะเป็น ON และกระแส I_a มีค่าเป็นลบจะทำให้แรงดันที่จุด VAM มีค่าเป็น 0 ดังภาพที่ 7 ซึ่งสามารถสรุปสถานการณ์สวิตช์ในผังสมการที่ 7 และตารางที่ 2 ซึ่งในเฟส V_b และ V_c ก็จะมีการทำงานในลักษณะเดียวกัน

$$V_{an} = \begin{cases} 0, & \text{ถ้า } S_a \text{ สถานะเป็น ON} \\ \frac{V_{dc}}{2}, & \text{ถ้า } S_a \text{ สถานะเป็น OFF และ } I_a > 0 \\ -\frac{V_{dc}}{2}, & \text{ถ้า } S_a \text{ สถานะเป็น OFF และ } I_a < 0 \end{cases} \quad (7)$$



ภาพที่ 7 สถานการณ์ทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเวียนนา: (a) เมื่อ S_a มีสถานะ ON และ $I_a > 0$, (b) เมื่อ S_a มีสถานะ OFF และ $I_a > 0$, (c) เมื่อ S_a มีสถานะ ON และ $I_a < 0$, (d) เมื่อ S_a มีสถานะ OFF และ $I_a < 0$

ถ้าหากแรงดันอินพุตสามเฟสมีความสมดุลกันดังนั้นแรงดันระหว่างจุด output neutral กับจุด neutral ของแหล่งจ่ายคือ V_{Mn} ซึ่งคือ common mode voltage จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 8

$$V_{Mn} = -\frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (8)$$

เนื่องจากการควบคุมการทำงานของวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่มีความยุ่งยากในการควบคุม จึงทำการแปลงจากระบบไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่ในรูปของ Rotating Frame (d-q Frame) ดังนั้นจัดรูปสมการที่ 1-3 ให้อยู่ในรูปของ matrix ดังแสดงในสมการที่ 9

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} \quad (9)$$

แปลงสมการที่ 9 ให้อยู่ในรูปของ Rotating Frame โดยใช้สมการการแปลง Clark Transformation และ Park Transformation ดังแสดงในสมการที่ 10 และสมการในรูปของ Rotating Frame ดังแสดงในสมการที่ 11 และ 12 ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 13 และ 14

$$T_{abc-dq} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

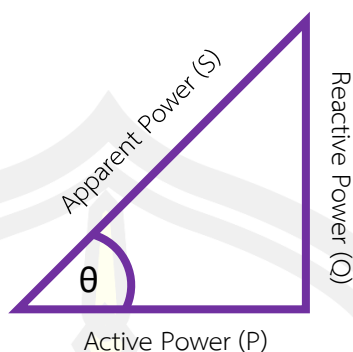
$$T_{abc-dq} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} T_{abc-dq} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + T_{abc-dq} \begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{d_rectifier} \\ V_{q_rectifier} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$V_{d_rectifier} = V_d - L \frac{dI_d}{dt} + \omega L I_q \quad (13)$$

$$V_{q_rectifier} = V_q - L \frac{dI_q}{dt} - \omega L I_d \quad (14)$$

จากสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าที่แสดงในภาพที่ 8 จะเห็นว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้นจะเกิดจากค่า active power หาดด้วย apparent power หรือแสดงดังสมการที่ 15 ซึ่งถ้าหากต้องการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเป็น 1 นั้นจะต้องควบคุมไม่ให้เกิด reactive power และการเลื่อนเฟสกันระหว่างแรงดันกับกระแสเกิดขึ้นในระบบ



ภาพที่ 8 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ

$$\text{Power Factor} = \frac{\text{Active Power (P)}}{\text{Apparent Power (S)}} = \cos(\theta) \quad (15)$$

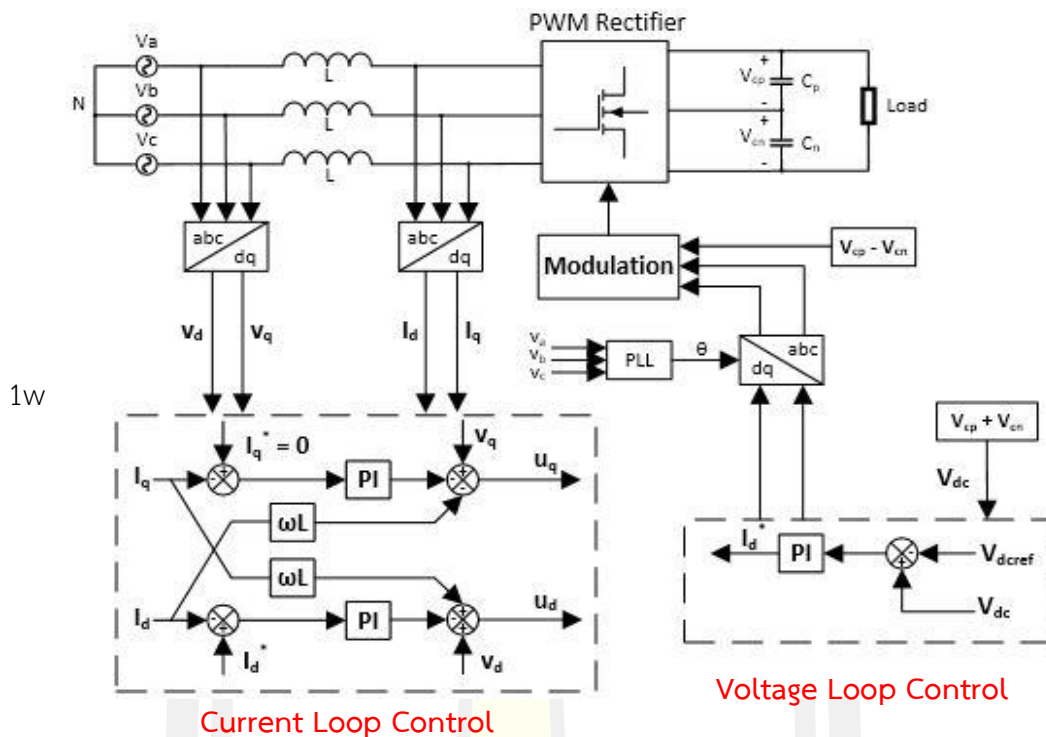
จากสมการของ active power และ reactive power ดังแสดงในสมการที่ 16 และ 17 ถ้าในระบบไฟฟ้าสามเฟสปกติที่รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไซน์ไม่มีการผิดเพี้ยนจะทำให้ค่า $V_q=0$ ดังนั้นจึงต้องควบคุมค่ากระแส I_q ให้มีค่าเป็นศูนย์เพื่อที่จะทำการปรับปรุงให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็น 1

$$P = V_d I_d + V_q I_q \quad (16)$$

$$Q = V_q I_d - V_d I_q \quad (17)$$

2.5.1 วิธีการควบคุมกระแส

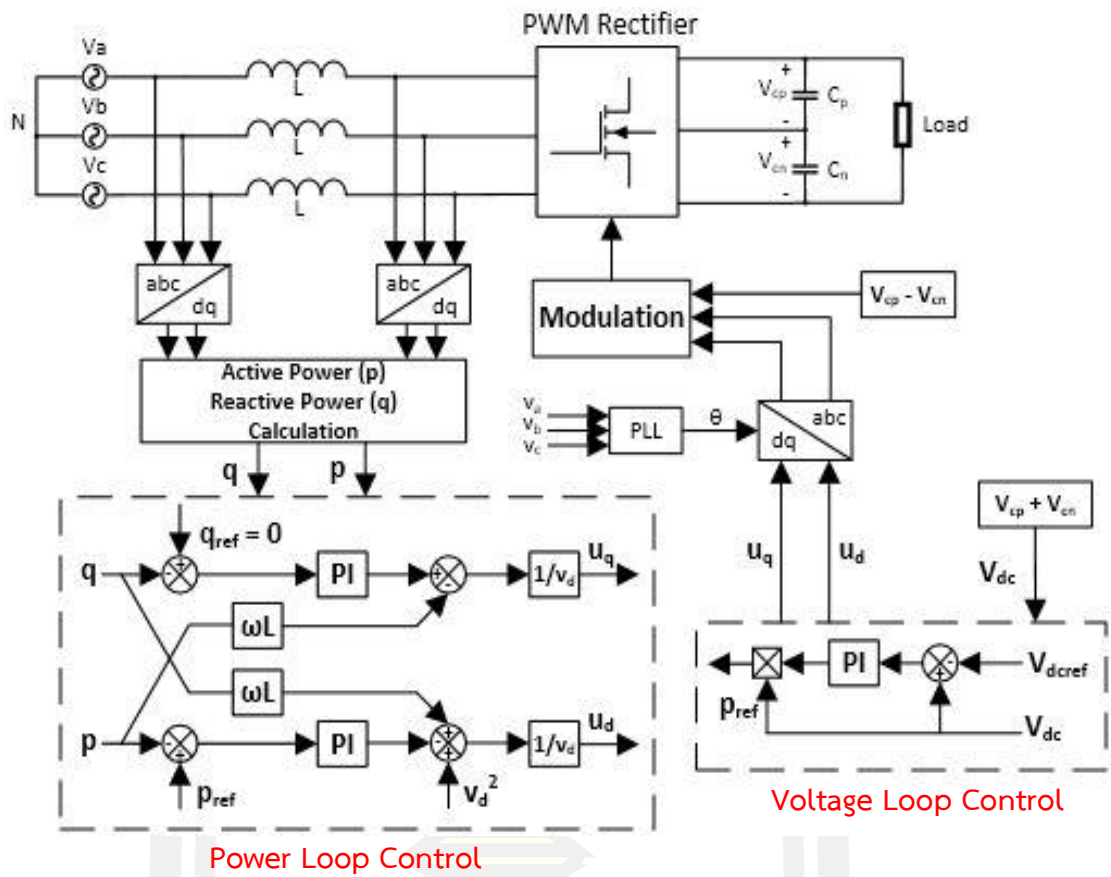
ในการควบคุมแบบ Current Control [9-11] ดังแสดงในภาพที่ 9 จะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าในระบบสามเฟส V_a, V_b, V_c และกระแสในระบบสามเฟส I_a, I_b, I_c เป็น V_d, V_q และ I_d, I_q ที่อยู่ในรูปของ Rotating Frame (d-q Frame) โดยใช้สมการการแปลง Clark และ Park ดังสมการที่ 10 ซึ่งกระแส I_d จะอ้างอิงเป็นกระแสใน active power และกระแส I_q จะอ้างอิงเป็นกระแสใน reactive power โดยทำการควบคุมกระแส I_q ให้มีค่าเป็นศูนย์ ($I_q^*=0$) โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI และมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งจะอ้างอิงเป็นกระแส I_d^* และควบคุมกระแส I_d โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในส่วนนี้เรียกว่าลู่วิธีควบคุมกระแส อีกทั้งมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุทั้งสองตัว V_{cp} และ V_{cn} โดยการใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในส่วนนี้เรียกว่าลู่วิธีควบคุมแรงดัน



ภาพที่ 9 แผนภาพแสดงวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเวียนนา
ด้วยวิธีควบคุมกระแส

2.5.2 วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางตรง

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางตรง [31] ดังแสดงในภาพที่ 10 จะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าในระบบสามเฟส V_a, V_b, V_c และกระแสในระบบสามเฟส I_a, I_b, I_c ให้อยู่ในรูปของ Rotating Frame (d-q Frame) โดยใช้สมการการแปลง Clark และ Park ดังสมการที่ 10 และคำนวณค่า active power และ reactive power จากสมการที่ 16 และ 17 ซึ่งจะควบคุมค่า reactive power ให้มีค่าเป็นศูนย์เพื่อที่จะทำให้ค่าประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นหนึ่ง โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในส่วนนี้เรียกว่าลู่วิธีควบคุมกำลังไฟฟ้า อีกทั้งมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุทั้งสองตัว V_{cp} และ V_{cn} โดยการใช้ตัวควบคุมแบบ PI ในส่วนนี้เรียกว่าลู่วิธีควบคุมแรงดัน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างวิธีการควบคุมกระแสและวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางตรง ดังตารางที่



ภาพที่ 10 แผนภาพแสดงวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดเวียนนา ด้วยวิธีควบคุมกำลังไฟฟ้าทางตรง



ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการควบคุมกระแสและวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้า

ทางตรง [31]

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีการควบคุมกระแส (Current Control)	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ความถี่การสวิตช์ที่คงที่ (ทำให้ง่ายต่อการออกแบบ วงจรกรองด้านอินพุต) - สามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการมอดูเลชันได้หลายวิธี - ใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลที่ราคาถูกลง 	<ul style="list-style-type: none"> - มีขั้นตอนการทำงานที่ซับซ้อน - ต้องการการคัปปลิงระหว่างส่วนแอคทีฟและส่วนรีแอคทีฟ
วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางตรง (Direct Power Control)	<ul style="list-style-type: none"> - มีความยืดหยุ่นสูง - มีขั้นตอนการทำงานที่ง่าย - มีการคัปปลิงกันของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและกำลังไฟฟารีแอคทีฟ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลที่มีความเร็วสูง - ความถี่ของการสวิตช์ไม่คงที่ - จำเป็นต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำและความถี่การสวิตช์ที่สูง

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงาน (Active Power Factor Correction) ซึ่งจะมีทั้งวงจรชนิดแรงดันสองระดับ (Two Level Voltage Converter) [1] ดังภาพที่ 4 หรือวงจรแรงดันสามระดับ (Three Level Voltage Converter) [12] ดังภาพที่ 5(b) นั้นจะมีอุปกรณ์สวิตช์อยู่ในวงจรซึ่งจะมีหน้าที่ในการควบคุมความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุต, ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้คงที่ ซึ่งการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์นั้นจะต้องอาศัยการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่จะนำไปควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ โดยวิธีการวิจัยมีดังต่อไปนี้

2.6 การมอดูเลชั่นแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ

สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา นั้นสวิตช์ในแต่ละเฟสจะมีด้วยกัน 2 สถานะ คือ 1. เมื่อสวิตช์ในเฟสนั้นมีสถานะ ON จะทำให้เกิดแรงดันที่จุด VXM ($x = A, B, C$) มีค่าเป็น 0 2. เมื่อสวิตช์ในเฟสนั้นมีสถานะ OFF จะทำให้เกิดแรงดันที่จุด VXM มีค่าเป็น $+V_{dc}/2$ เมื่อ IXM มีค่าเป็นบวกและ VXM มีค่าเป็น $-V_{dc}/2$ เมื่อ IXM มีค่าเป็นลบ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สถานการณ์สวิตช์ของการมอดูเลชั่นแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา

สถานะ สวิตช์	Phase A (VAM)		Phase B (VBM)		Phase C (VCM)	
	$I_a > 0$	$I_a < 0$	$I_b > 0$	$I_b < 0$	$I_c > 0$	$I_c < 0$
ON	0	0	0	0	0	0
OFF	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$+\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$

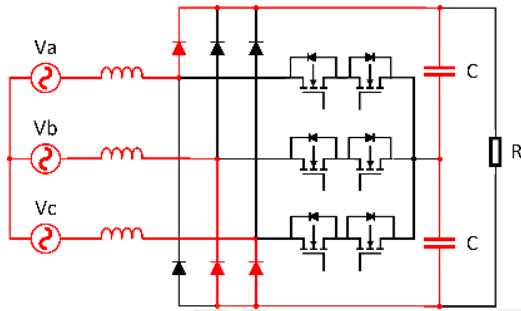
2.6.1 การกำหนดเซกเตอร์และสถานะของเวกเตอร์

แบ่งการทำงานของสเปซเวกเตอร์ออกเป็นทั้งหมด 6 เซกเตอร์ ตามสถานะของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสดังภาพที่ 11

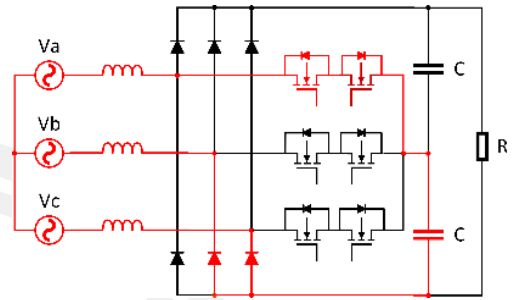


ภาพที่ 11 การกำหนดเซกเตอร์ของสเปซเวกเตอร์

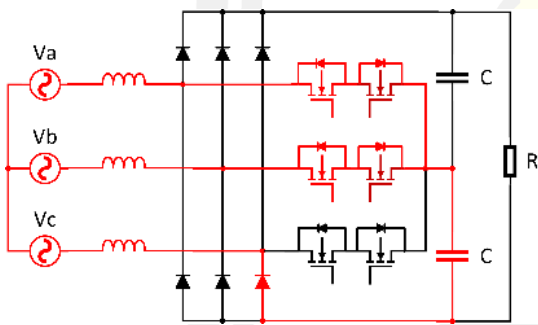
ซึ่งจะมีสถานการณ์สวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ทั้งสามเฟสทั้งหมด 8 สถานะ 000, 100, 110, 010, 011, 001, 101, 111 ดังภาพที่ 12 (a)-(h) ซึ่งจะประกอบไปด้วย active vector ทั้งหมด 6 vector คือ $\vec{V}_1 - \vec{V}_6$ และ zero vector ทั้งหมด 2 vector คือ \vec{V}_0, \vec{V}_7 ดังภาพที่ 13 และสามารถสรุปสถานะการสวิตช์ทั้งหมดได้ดังตารางที่ 2



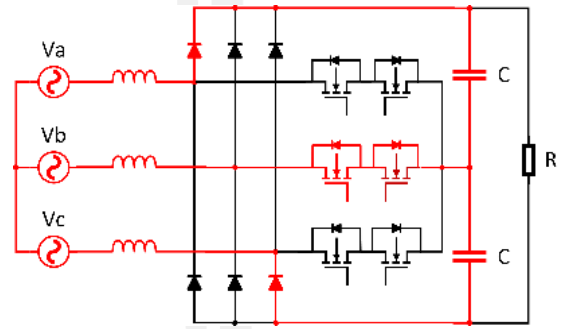
(a)



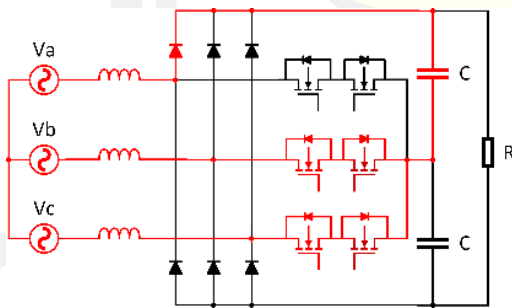
(b)



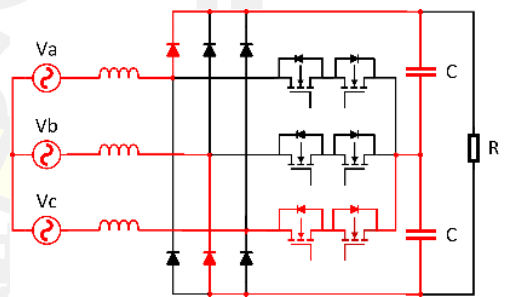
(c)



(d)

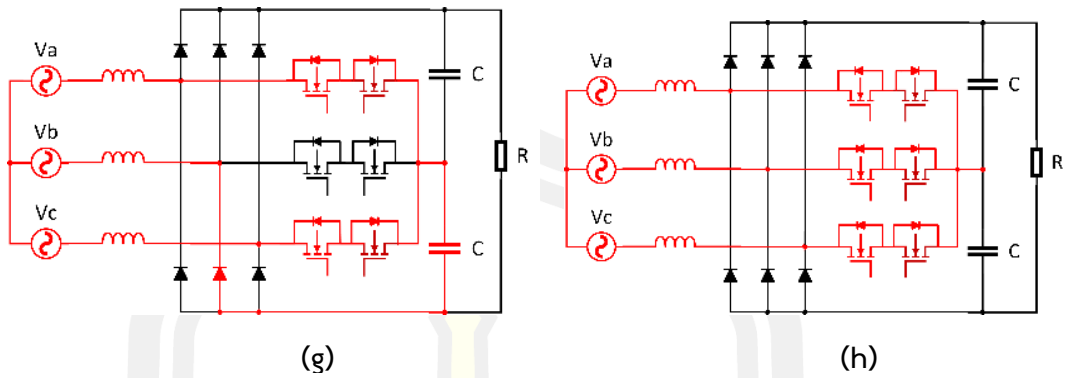


(e)

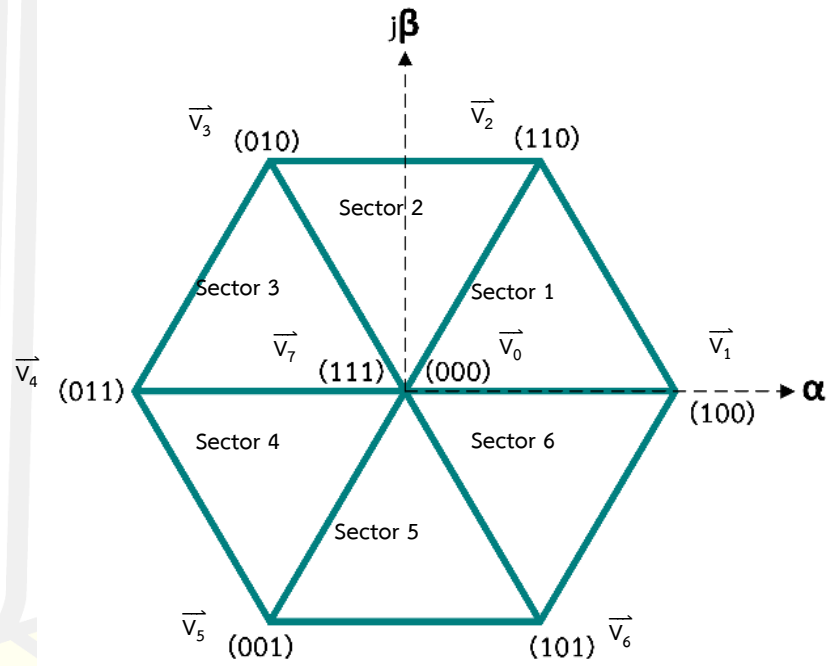


(f)

พหุบัณฑิต



ภาพที่ 12 สถานะการสวิตช์ทั้งหมด 8 สถานะ : (a) 000, (b) 100, (c) 110, (d) 010, (e) 011, (f) 001, (g) 101, (h) 111



ภาพที่ 13 แผนภาพสำหรับการมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ

พหุบัณฑิต ชีวะ

ตารางที่ 3 สถานะการสวิตช์ของแต่ละเวกเตอร์ในสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ

สถานะการสวิตช์			สถานะของแต่ละเวกเตอร์		
S_a	S_b	S_c	เวกเตอร์	ขนาด	มุม
0	0	0	\vec{V}_0	0	0
1	1	1	\vec{V}_7	$\frac{2}{3}V_{dc}$	0
1	0	0	\vec{V}_1	$\frac{2}{3}V_{dc}$	0
1	1	0	\vec{V}_2	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{\pi}{3}$
0	1	0	\vec{V}_3	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{2\pi}{3}$
0	1	1	\vec{V}_4	$\frac{2}{3}V_{dc}$	π
0	0	1	\vec{V}_5	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{4\pi}{3}$
1	0	1	\vec{V}_6	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{5\pi}{3}$

จากสมการความสัมพันธ์ของระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลงดังสมการที่ 18 - 20

$$V_a = V_m \sin(\omega t) \quad (18)$$

$$V_b = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (19)$$

$$V_c = V_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (20)$$

สามารถหาความสัมพันธ์ของเวกเตอร์อ้างอิงในสเปซเวกเตอร์ดังสมการที่ 21 และสามารถหาขนาดและมุมของเวกเตอร์อ้างอิงได้ดังสมการที่ 22 และ 23

$$V_{ref} = V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) ; \therefore a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (21)$$

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (22)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_\alpha}{V_\beta} \right) \quad (23)$$

จากสมการที่ 21 สามารถจัดรูปสมการได้ดังสมการที่ 24 – 26

$$V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3} \left(V_a + e^{j\frac{2\pi}{3}} V_b + e^{-j\frac{2\pi}{3}} V_c \right) \quad (24)$$

$$V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3} \left(V_a + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) V_b + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) V_c \right) + j\frac{2}{3} \left(\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) V_b - \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) V_c \right) \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (26)$$

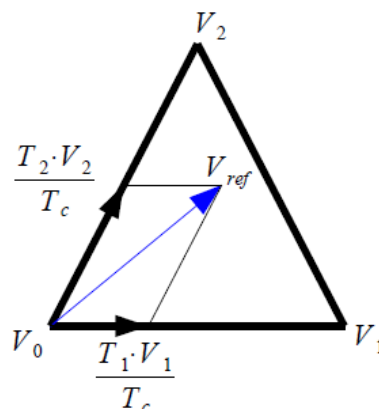
ดังนั้นสามารถสรุปค่า V_α และ V_β ได้ดังสมการที่ 27 และ 28

$$V_\alpha = \frac{2}{3} \left(V_a - \frac{1}{2} V_b - \frac{1}{2} V_c \right) \quad (27)$$

$$V_\beta = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_b - \frac{\sqrt{3}}{2} V_c \right) \quad (28)$$

2.6.2 การคำนวณค่าเวลาตเวลล์ของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ

สามารถหาตำแหน่งของเวกเตอร์อ้างอิง V_{ref} ได้จาก 2 Active Vector และ 1 Zero Vector ซึ่งในตัวอย่างนี้จะสมมติให้ V_{ref} อยู่ในเซกเตอร์ 1 (มุม $0 - \pi/3$) โดยสามารถหา V_{ref} ได้จากเวกเตอร์ V_0, V_1 และ V_2 ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การหาตำแหน่ง V_{ref} ในเซกเตอร์ 1

สามารถพิจารณาการหาเวลาดเวลล์ของเวกเตอร์ V_{ref} , V_0 , V_1 และ V_2 ได้ดังสมการที่ 29 และ 30 โดยที่ $T_c = 1/\text{Switching Frequency}$

$$V_{ref} \cdot T_c = V_1 \cdot \frac{T_1}{T_c} + V_2 \cdot \frac{T_2}{T_c} + V_0 \cdot \frac{T_0}{T_c} \quad (29)$$

$$T_c = T_1 + T_2 + T_0 \quad (30)$$

และพิจารณาการหาตำแหน่งของเวกเตอร์ V_{ref} , V_0 , V_1 และ V_2 ได้ดังสมการที่ 31-34

$$V_{ref} = V_{ref} e^{j\theta} \quad (31)$$

$$V_0 = 0 \quad (32)$$

$$V_1 = \frac{2}{3} V_{dc} \quad (33)$$

$$V_2 = \frac{2}{3} V_{dc} e^{j\frac{\pi}{3}} \quad (34)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการที่ 35

$$T_c \cdot V_{ref} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} = T_1 \cdot \frac{2}{3} V_{DC} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} V_{DC} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (35)$$

แยกส่วนที่เป็น Real Part กับ Imaginary Part ออกจากกันเพื่อความง่ายในการคำนวณค่าเวลาดเวลล์ ดังสมการที่ 36 และ 37

$$\text{Real Part : } T_c \cdot V_{ref} \cdot \cos(\theta) = T_1 \cdot \frac{2}{3} V_{DC} + T_2 \cdot \frac{1}{3} V_{DC} \quad (36)$$

$$\text{Imaginary Part : } T_c \cdot V_{ref} \cdot \sin(\theta) = T_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} V_{DC} \quad (37)$$

ดังนั้นเราสามารถหาเวลาดเวลล์ของ T_1 และ T_2 ได้ดังสมการที่ 38 และ 39

$$T_1 = T_c \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot V_{ref}}{V_{DC}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) = T_c \cdot a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \quad (38)$$

$$T_2 = T_c \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot V_{ref}}{V_{DC}} \cdot \sin(\theta) = T_c \cdot a \cdot \sin(\theta) \quad (39)$$

ดังนั้นค่าเวลาดเวลล์ของแต่ละเซกเตอร์สามารถหาได้ดังสมการที่ 40-42 โดยที่ n คือ เซกเตอร์ (n = 1, 2, 3, 4, 5, 6) และสามารถสรุปค่าเวลาดเวลล์ของแต่ละเซกเตอร์ได้ดังตารางที่ 3

$$T_0 = T_c - T_1 - T_2 \quad (40)$$

$$T_1 = T_c \cdot a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta + \frac{n-1}{3} \cdot \pi\right) \quad (41)$$

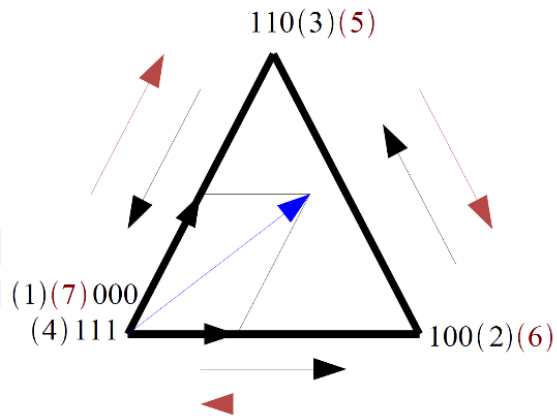
$$T_2 = T_c \cdot a \cdot \sin\left(\theta - \frac{n-1}{3} \cdot \pi\right) \quad (42)$$

ตารางที่ 4 สรุปการคำนวณค่าเวลาดเวลล์ของการหาเวกเตอร์อ้างอิง V_{ref} ในแต่ละเซกเตอร์

Sector	Dwell Times		
	T_1	T_2	T_0
1	$T_c \cdot a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$	$T_c \cdot a \cdot \sin(\theta)$	$T_c - T_1 - T_2$
2	$T_c \cdot a \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right)$	$T_c \cdot a \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)$	$T_c - T_1 - T_2$
3	$T_c \cdot a \cdot \sin(\pi - \theta)$	$T_c \cdot a \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$	$T_c - T_1 - T_2$
4	$T_c \cdot a \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \theta\right)$	$T_c \cdot a \cdot \sin(\theta - \pi)$	$T_c - T_1 - T_2$
5	$T_c \cdot a \cdot \sin\left(\frac{5\pi}{3} - \theta\right)$	$T_c \cdot a \cdot \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$	$T_c - T_1 - T_2$
6	$T_c \cdot a \cdot \sin(2\pi - \theta)$	$T_c \cdot a \cdot \sin\left(\theta - \frac{5\pi}{3}\right)$	$T_c - T_1 - T_2$

2.6.3 การกำหนดลำดับการสวิตช์ของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ

ในแต่ละเซกเตอร์จะประกอบไปด้วย 7 ลำดับการสวิตช์ดังภาพที่ 15 โดยที่จุดเริ่มและจบคือ Zero Vector อย่างเช่นในเซกเตอร์ 1 จะมีลำดับการสวิตช์คือ 000-100-110-111-110-100-000 ดังนั้นจะได้เวลาสวิตช์ของเซกเตอร์ 1 แสดงดังสมการที่ 43 และสามารถสรุปลำดับการสวิตช์ของแต่ละเซกเตอร์ได้ดังตารางที่ 4



ภาพที่ 15 ลำดับการสวิตช์ในเซกเตอร์ 1

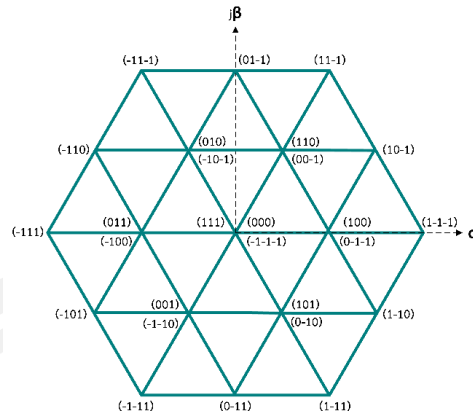
$$T_c = \frac{T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} + \frac{T_0}{2} + \frac{T_2}{2} + \frac{T_1}{2} + \frac{T_0}{4} \quad (43)$$

ตารางที่ 5 สรุปลำดับสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์ของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ

Sector	Switching Sequence						
1	\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_2	\vec{V}_0	\vec{V}_2	\vec{V}_1	\vec{V}_0
	000	100	110	111	110	100	000
2	\vec{V}_0	\vec{V}_3	\vec{V}_2	\vec{V}_0	\vec{V}_2	\vec{V}_3	\vec{V}_0
	000	010	110	111	110	010	000
3	\vec{V}_0	\vec{V}_3	\vec{V}_4	\vec{V}_0	\vec{V}_4	\vec{V}_3	\vec{V}_0
	000	010	011	111	011	010	000
4	\vec{V}_0	\vec{V}_5	\vec{V}_4	\vec{V}_0	\vec{V}_4	\vec{V}_5	\vec{V}_0
	000	001	011	111	011	001	000
5	\vec{V}_0	\vec{V}_5	\vec{V}_6	\vec{V}_0	\vec{V}_6	\vec{V}_5	\vec{V}_0
	000	001	101	111	101	001	000
6	\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_6	\vec{V}_0	\vec{V}_6	\vec{V}_1	\vec{V}_0
	000	100	101	111	101	100	000

2.7 การมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับ

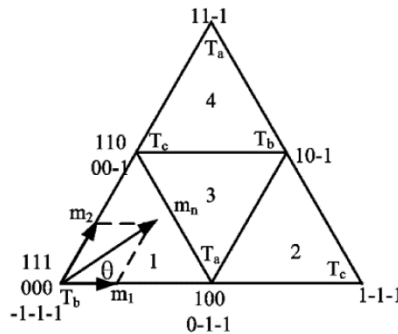
สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา ซึ่งเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสประเภทแรงดันสามระดับดังภาพที่ 16 ดังนั้นวิธีการมอดูเลชัน ที่ใช้ก็จะมี ความซับซ้อนมากกว่าชนิดที่เป็นแรงดันสองระดับ



ภาพที่ 16 แผนภาพสเปซเวกเตอร์สำหรับสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับ

2.7.1 การกำหนดเซกเตอร์และพื้นที่ย่อย

การมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับนั้นจะใช้วิธีการแบ่งการทำงานออกเป็น 6 เซกเตอร์ เช่นเดียวกับแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ แต่เนื่องจากจำนวนลำดับการสวิตช์ที่มีมากกว่าจึงทำให้ในแต่ละเซกเตอร์นั้นจะแบ่งเป็น 4 พื้นที่ย่อย [13-14] ดังภาพที่ 17 ซึ่งการที่จะบอกได้ว่าเวกเตอร์อ้างอิง V_{ref} นั้นอยู่ที่พื้นที่ย่อยไหนนั้นจะใช้ขนาดของ m_1 และ m_2 ในการแบ่งแต่ละพื้นที่ย่อย ดังสมการที่ 44 และ 45



ภาพที่ 17 แผนภาพพื้นที่ย่อยทั้ง 4 ในเซกเตอร์ที่ 1

$$m_1 = m_n \left(\cos(\theta) - \sin\left(\frac{\theta}{\sqrt{2}}\right) \right) \tag{44}$$

$$m_2 = 2m_n \sin\left(\frac{\theta}{\sqrt{2}}\right) \tag{45}$$

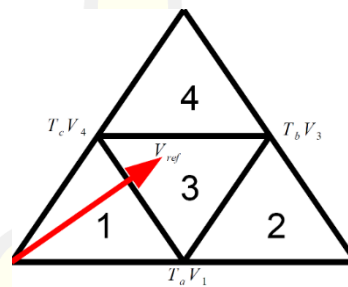
$$\therefore m_n = \sqrt{3}m_a, m_a = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{V_{dc}}$$

โดยมีเงื่อนไขการแบ่งพื้นที่ย่อยทั้ง 4 ดังนี้

1. ถ้า m_1, m_2 และ $(m_1+m_2) \leq 1$ จะได้ว่า V_{ref} อยู่พื้นที่ย่อย 1
2. ถ้า $m_1 > 1$ จะได้ว่า V_{ref} อยู่พื้นที่ย่อย 2
3. ถ้า $m_1 \leq 1, m_2 \leq 1 (m_1+m_2) > 1$ จะได้ว่า V_{ref} อยู่พื้นที่ย่อย 3
4. ถ้า $m_2 > 1$ จะได้ว่า V_{ref} อยู่พื้นที่ย่อย 4

2.7.2 การคำนวณค่าเวลาดเวลล์ของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับ

การคำนวณค่าเวลาดเวลล์นั้นสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับวิธีของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ เพียงแต่ต้องคำนึงถึงพื้นที่ย่อยที่เวกเตอร์อ้างอิง V_{ref} นั้นตกอยู่ ตัวอย่างดังภาพที่ 18 V_{ref} ตกอยู่พื้นที่ย่อย 3 ดังนั้น โดยที่การหา V_{ref} นั้นสามารถหาได้จากเวกเตอร์ V_1, V_3 และ V_4 โดยแสดงความสัมพันธ์การหา V_{ref} ในพื้นที่ย่อย 3 ได้ดังสมการที่ 46



ภาพที่ 18 แผนภาพ V_{ref} ขณะอยู่ในพื้นที่ย่อย 3 ภายในเซกเตอร์ 1 ของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับ

$$\vec{V}_{ref} T_c = \vec{V}_1 T_a + \vec{V}_3 T_b + \vec{V}_4 T_c \quad (46)$$

$$\therefore \vec{V}_1 = \frac{1}{3} V_{dc}, \quad \vec{V}_3 = \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc} e^{j\frac{\pi}{6}}, \quad \vec{V}_4 = \frac{1}{3} V_{dc} e^{j\frac{\pi}{3}}$$

แทนค่าของเวกเตอร์ V_1, V_3, V_4 ลงในสมการที่ 46 จะได้ดังสมการที่ 47

$$\frac{V_{ref}}{V_{dc}} (\cos(\theta) + j \sin(\theta)) T_c = \frac{1}{3} T_1 + \frac{\sqrt{3}}{3} \left(\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + j \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right) T_2 + \frac{1}{3} \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \right) T_3 \quad (47)$$

แยกส่วนที่เป็น Real Part กับ Imaginary Part ออกจากกันเพื่อความง่ายในการคำนวณ ค่าเวลาดเวลาเวกเตอร์ ดังสมการที่ 48 และ 49 และตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 50 จะได้ค่าเวลาดเวลาเวกเตอร์ ของแต่ละพื้นที่ย่อยในแต่ละเซกเตอร์ ตามตารางที่ 5

$$\frac{V_{ref}}{V_{dc}} \cos(\theta) T_c = \frac{1}{3} T_1 + \frac{\sqrt{3}}{3} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) T_2 + \frac{1}{3} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) T_3 \quad (48)$$

$$\frac{V_{ref}}{V_{dc}} \sin(\theta) T_c = \frac{\sqrt{3}}{3} \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) T_2 + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) T_3 \quad (49)$$

$$T_c = T_1 + T_2 + T_3 \quad (50)$$

ตารางที่ 6 สรุปค่าเวลาดเวลาเวกเตอร์ของทุกเซกเตอร์และทุกพื้นที่ย่อยในสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับ

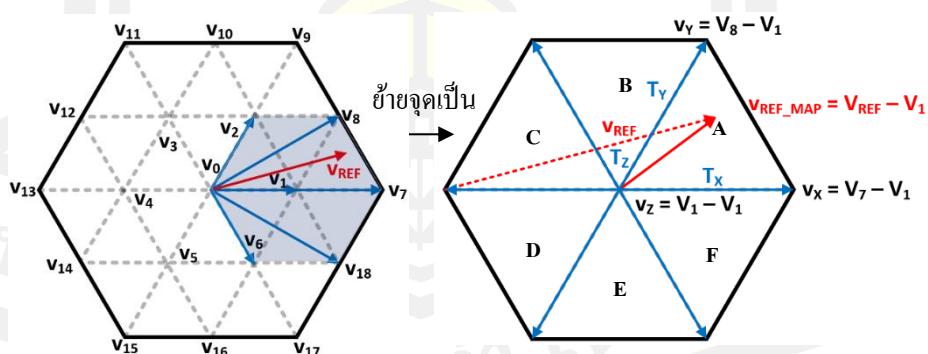
Sector	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4
1	$T_1 = aT_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[1 - 2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_3 = aT_c \sin(\theta)$	$T_1 = T_c \left[1 + a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_2 = aT_c \sin(\theta)$ $T_3 = -\frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) - 1\right]$	$T_1 = \frac{T_c}{2} \left[1 - 2a \sin(\theta)\right]$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + 2\right]$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[1 + 2a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right]$	$T_1 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin(\theta) - 1\right]$ $T_2 = aT_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$ $T_3 = T_c \left[1 - a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]$
2	$T_1 = aT_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[1 - 2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_3 = aT_c \sin(\theta)$	$T_1 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) - 1\right]$ $T_2 = aT_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$ $T_3 = aT_c [1 - \sin(\theta)]$	$T_1 = \frac{T_c}{2} \left[1 - 2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin(\theta) - 1\right]$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + 1\right]$	$T_1 = T_c [1 - a \sin(\theta)]$ $T_2 = aT_c \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)$ $T_3 = -\frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) - 1\right]$
3	$T_1 = aT_c \sin(\theta)$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[1 - 2a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_3 = aT_c \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)$	$T_1 = T_c \left[1 - a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_2 = aT_c \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin(\theta) - 1\right]$	$T_1 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + 1\right]$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[1 + 2a \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)\right]$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[1 - 2a \sin(\theta)\right]$	$T_1 = \frac{T_c}{2} [1 - a \sin(\theta)]$ $T_2 = aT_c \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) - 1\right]$
4	$T_1 = aT_c \sin(\theta)$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[1 + 2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_3 = aT_c \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)$	$T_1 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) - 1\right]$ $T_2 = aT_c \sin(\theta)$ $T_3 = aT_c \left[1 + a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]$	$T_1 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - 1\right]$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[1 + 2a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[1 + 2a \sin(\theta)\right]$	$T_1 = \frac{T_c}{2} \left[1 + 2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_2 = aT_c \sin(\theta)$ $T_3 = T_c \left[1 + a \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)\right]$
5	$T_1 = aT_c \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)$ $T_2 = \frac{T_c}{2} [1 + 2a \sin(\theta)]$ $T_3 = aT_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$	$T_1 = T_c [1 + a \sin(\theta)]$ $T_2 = aT_c \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + 1\right]$	$T_1 = -\frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) + 1\right]$ $T_2 = \frac{T_c}{2} [2a \sin(\theta) + 1]$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + 1\right]$	$T_1 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - 1\right]$ $T_2 = aT_c \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)$ $T_3 = T_c [1 + a \sin(\theta)]$
6	$T_1 = aT_c \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[1 + 2a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_3 = aT_c \sin(\theta)$	$T_1 = T_c [1 + 2a \sin(\theta)]$ $T_2 = aT_c \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) + 1\right]$	$T_1 = \frac{T_c}{2} [2a \sin(\theta) + 1]$ $T_2 = \frac{T_c}{2} \left[1 - 2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_3 = \frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - 1\right]$	$T_1 = T_c \left[1 + a \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right]$ $T_2 = aT_c \sin(\theta)$ $T_3 = -\frac{T_c}{2} \left[2a \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) - 1\right]$

2.8 การปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์

จากวิธีการมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา ที่เป็นวงจรประเภทแรงดันสามระดับนั้นจะเห็นว่าวงจรประเภทแรงดันสามระดับนั้นจะมีจำนวนลำดับการสวิตช์ทั้งหมด 27 ลำดับ ซึ่งแตกต่างจากวงจรประเภทแรงดันสองระดับที่มีเพียง 8 ลำดับเท่านั้น จากจำนวนลำดับการสวิตช์ที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลให้การคำนวณหาค่าเวลาเดเวลล์ของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่าแบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับ ดังนั้นวิธีการมอดูเลชันแบบการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์นั้นจะช่วยให้การคำนวณหาค่าเวลาเดเวลล์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนานั้นทำได้ง่ายขึ้น โดยจะใช้วิธีการเปลี่ยนจุดศูนย์หรือ zero vector ให้ไปอยู่ในตำแหน่งของเวกเตอร์อื่นที่ต้องการและใช้การคำนวณหาค่าเวลาเดเวลล์แบบสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับPWM แทน

2.8.1 การเปลี่ยนจุดศูนย์ของสเปซเวกเตอร์

วิธีการนี้จะเป็นการเปลี่ยนจุดเริ่มต้น (V_0) ของสเปซเวกเตอร์สามระดับ [15-16] ดังภาพที่ 19 (a) ซึ่งประกอบไปด้วย 19 เวกเตอร์แรงดัน แบ่งเป็นเวกเตอร์ศูนย์หรือ zero vector (V_0) มีขนาดเท่ากับศูนย์, เวกเตอร์ขนาดเล็กหรือ small vectors ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ $V_{dc}/3$, เวกเตอร์ขนาดกลางหรือ medium vectors ($V_8, V_{10}, V_{12}, V_{14}, V_{16}, V_{18}$) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ $\sqrt{3}V_{dc}/3$ และเวกเตอร์ขนาดใหญ่หรือ large vectors ($V_7, V_9, V_{11}, V_{13}, V_{15}, V_{17}$) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ $2V_{dc}/3$ ไปยังเวกเตอร์ขนาดเล็ก $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ ซึ่งจะทำให้สเปซเวกเตอร์รอบ ๆ จุดศูนย์นั้น มีรูปร่างคล้ายกับสเปซเวกเตอร์สองระดับ ดังภาพที่ 19 (b) จะสามารถหาเวกเตอร์อ้างอิง V_{ref} ได้จากสมการที่ 51 และ 52



ภาพที่ 19 แผนภาพการเปลี่ยนจุดศูนย์ของสเปซเวกเตอร์สามระดับไปเป็นสเปซเวกเตอร์สองระดับ

$$(V_x - V_n)T_x + (V_y - V_n)T_y + (V_z - V_n)T_z = (V_{ref} - V_n)T_s \quad (51)$$

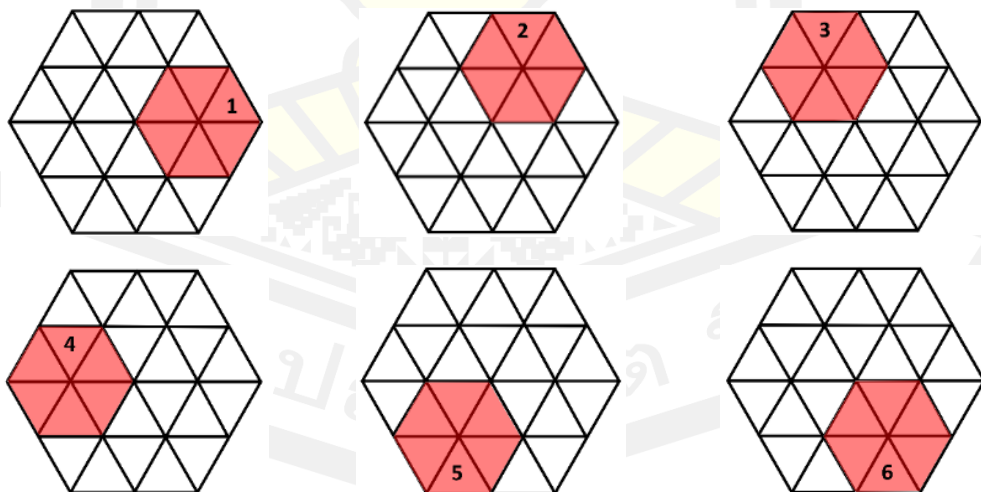
$$(52)$$

$$T_x + T_y + T_z = T_s$$

โดยที่ n (1, 2, 3, 4, 5, 6) คือ ขนาดของเวกเตอร์ในตำแหน่งที่เลื่อนจุดศูนย์ไป โดยแสดงดังตารางที่ 6 เมื่อเลื่อนจุดศูนย์ไปยังตำแหน่งเวกเตอร์ขนาดเล็กต่าง ๆ แล้วจะทำให้สเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับนั้นแบ่งออกเป็นสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับทั้งหมด 6 ส่วนดังภาพที่ 20

ตารางที่ 7 ตำแหน่งของการเปลี่ยนจุดศูนย์ของแต่ละเซกเตอร์และขนาด

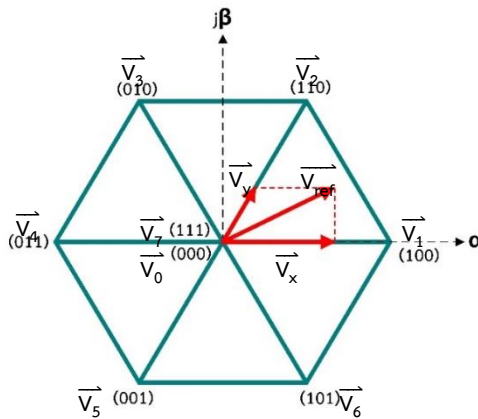
Sector	ตำแหน่งของการเปลี่ยนจุดศูนย์	ขนาดของ V_n
1	V_1	$\frac{V_{dc}}{3}$
2	V_2	$\frac{V_{dc}}{6}$
3	V_3	$-\frac{V_{dc}}{6}$
4	V_4	$-\frac{V_{dc}}{3}$
5	V_5	$-\frac{V_{dc}}{6}$
6	V_6	$\frac{V_{dc}}{6}$



ภาพที่ 20 แผนภาพแสดงการแบ่งสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสามระดับออกเป็นสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับทั้งหมด 6 ส่วน

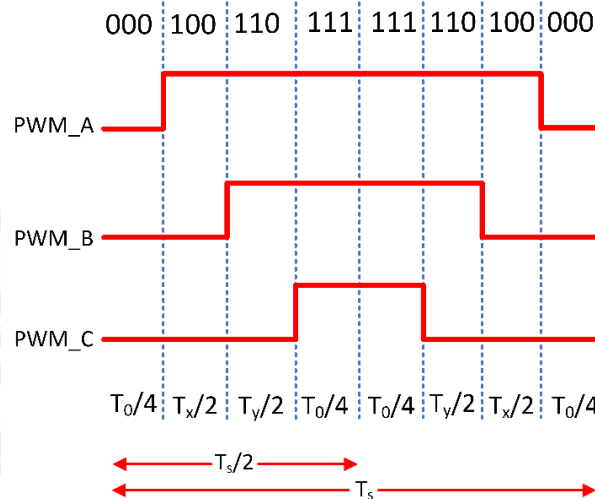
2.8.2 การคำนวณเวลาตเวลล์ของการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์

การคำนวณค่าเวลาตเวลล์ [17] ของการมอดูเลชั่นแบบการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์ นั้นจะอ้างอิงโดยใช้วิธีของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับดังภาพที่ 21 โดยที่ให้เวกเตอร์อ้างอิง V_{ref} นั้นอยู่ที่เซกเตอร์ 1 ซึ่งสามารถหา V_{ref} ได้จากเวกเตอร์ใกล้เคียงคือ $\vec{V}_0, \vec{V}_7, \vec{V}_x, \vec{V}_y$



ภาพที่ 21 แผนภาพการหาเวกเตอร์อ้างอิง V_{ref} ในการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์

โดยที่จะมีลำดับการสวิตช์เป็น $\vec{V}_0 - \vec{V}_1 - \vec{V}_2 - \vec{V}_7 - \vec{V}_7 - \vec{V}_2 - \vec{V}_1 - \vec{V}_0$ หรือ 000-100-110-111-111-110-100-000 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ลำดับการสวิตช์ในเซกเตอร์ 1

จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 53

$$\int_0^{\frac{T_s}{2}} \vec{V}_{ref} dt = \int_0^{\frac{T_0}{4}} \vec{V}_0 dt + \int_{\frac{T_0}{4}}^{\frac{T_0+T_x}{4}+\frac{T_x}{2}} \vec{V}_x dt + \int_{\frac{T_0+T_x}{4}+\frac{T_x}{2}}^{\frac{T_0+T_x+T_y}{4}+\frac{T_y}{2}} \vec{V}_y dt + \int_{\frac{T_0+T_x+T_y}{4}+\frac{T_y}{2}}^{\frac{T_s}{2}} \vec{V}_7 dt \quad (53)$$

เนื่องจาก \vec{V}_0 และ \vec{V}_7 เป็น zero vector ซึ่งมีขนาดเป็นศูนย์และจากสมการที่ 29 และ 30 ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 54

$$\vec{V}_{ref} \cdot \frac{T_s}{2} = \vec{V}_x \cdot \frac{T_x}{2} + \vec{V}_y \cdot \frac{T_y}{2} \quad (54)$$

จากสมการที่ 21 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการ Matrix ได้ดังสมการที่ 55

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \frac{T_s}{2} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{(k-1)\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{k\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\frac{(k-1)\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{k\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{T_x}{2} \\ \frac{T_y}{2} \end{bmatrix} \quad (55)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 56

$$\begin{bmatrix} \frac{T_x}{2} \\ \frac{T_y}{2} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{k\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{k\pi}{3}\right) \\ -\sin\left(\frac{(k-1)\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{(k-1)\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (56)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าเวลาดำเนินการ T_x , T_y , T_z ได้จากสมการที่ 57-59

$$\frac{T_x}{2} = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} \left[V_\alpha \cdot \sin\left(\frac{k\pi}{3}\right) - V_\beta \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{3}\right) \right] \quad (57)$$

$$\frac{T_y}{2} = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} \left[-V_\alpha \cdot \sin\left(\frac{(k-1)\pi}{3}\right) + V_\beta \cdot \cos\left(\frac{(k-1)\pi}{3}\right) \right] \quad (58)$$

$$T_z = T_s - T_x - T_y \quad (59)$$

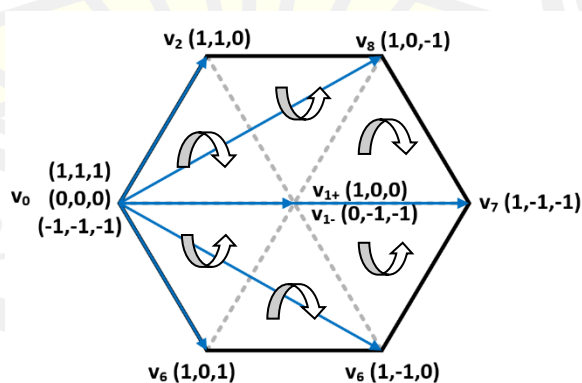
เมื่อ k (1, 2, 3, 4, 5, 6) คือเซกเตอร์ย่อยของสเปซเวกเตอร์ชนิดแรงดันสองระดับที่เกิดจากการเปลี่ยนจุดศูนย์ เมื่อแทนค่า k ลงในสมการที่ 57-59 จะสามารถสรุปการหาค่าเวลาดเวลล์ของแต่ละเซกเตอร์ย่อย [18-19] ได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สรุปการหาค่าเวลาดเวลล์ของแต่ละเซกเตอร์ย่อยในการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์

Sub Sector (k)	T_x	T_y	T_z
1	$(3V_\alpha - \sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$(2\sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$T_s - T_x - T_y$
2	$(3V_\alpha + \sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$(-3V_\alpha + \sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$T_s - T_x - T_y$
3	$(2\sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$(-3V_\alpha - \sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$T_s - T_x - T_y$
4	$(-3V_\alpha + \sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$(-2\sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$T_s - T_x - T_y$
5	$(-3V_\alpha - \sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$(3V_\alpha - \sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$T_s - T_x - T_y$
6	$(2\sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$(3V_\alpha + \sqrt{3}V_\beta) \frac{T_s}{V_{dc}}$	$T_s - T_x - T_y$

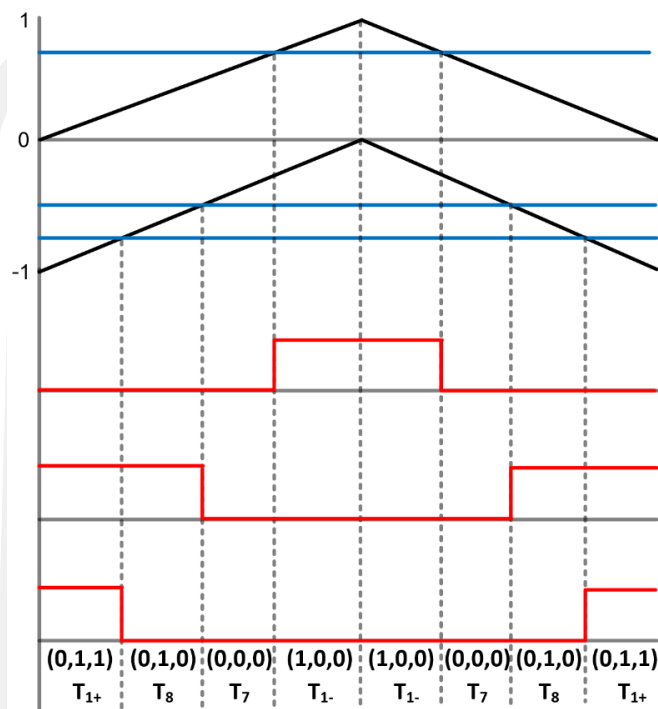
2.8.3 การกำหนดลำดับการสวิตซ์ของการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์

การกำหนดลำดับการสวิตซ์ในสเปซเวกเตอร์ [20-22] แบบการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์นั้นจะใช้วิธีการสมมาตรของเวกเตอร์ ลำดับการสวิตซ์ของเซกเตอร์ย่อย 1 ในเซกเตอร์ 1 คือ $V_{1+} - V_8 - V_7 - V_{1-} - V_{1-} - V_7 - V_8 - V_{1+}$ ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ลำดับการสวิตซ์ของเซกเตอร์ 1 เซกเตอร์ย่อย 1

กำหนดเงื่อนไขการมอดูเลชันจากทิศทางของกระแสด้านอินพุตอย่างเช่นในเซกเตอร์ 1 กระแสในเฟส A จะมีค่าเป็นบวกดังนั้นจะมอดูเลชันกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีค่าเป็นบวก และ กระแสในเฟส B และเฟส C จะมีค่าเป็นลบดังนั้นจะมอดูเลชันกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีค่าเป็นลบดัง ภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การมอดูเลชันของเซกเตอร์ย่อย 1 ในเซกเตอร์ 1

2.9 การปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาห์แบบเลื่อนเฟส

การปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาห์แบบเลื่อนเฟส (Carrier-Based Phase-Shift PWM) [27] เป็นวิธีการมอดูเลชันวิธีหนึ่ง โดยที่จะใช้สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Carrier Signal) ซึ่งจะมีค่าและขนาดที่เท่ากันแต่จะต่างกันที่สัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้เปรียบเทียบนั้นจะมีการเลื่อนเฟสกันอยู่ดังภาพที่ 25

ในการใช้งานการปรับความกว้างของพัลส์โดยใช้สัญญาณสามเหลี่ยมแบบเลื่อนเฟส นั้น จะต้องดูว่าจะนำไปใช้งานกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ประเภทแรงดันกี่ระดับ เพราะจะส่งผลต่อสัญญาณสามเหลี่ยมและมุมเฟสที่จะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังสมการที่ 60 และ 61

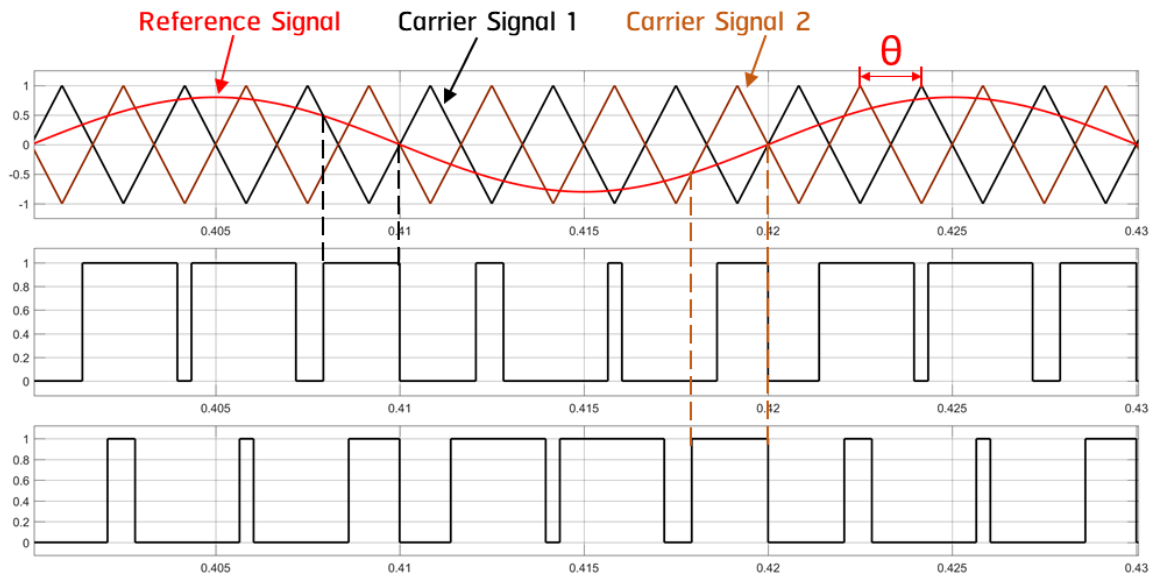
$$\text{Carrier Signal} = m-1 \quad (60)$$

$$\theta = \frac{360^\circ}{m-1} \quad (61)$$

เมื่อ Carrier Signal คือ จำนวนของสัญญาณสามเหลี่ยม

m = ระดับของแรงดัน

θ = มุมที่เหลื่อมกันของสัญญาณสามเหลี่ยม

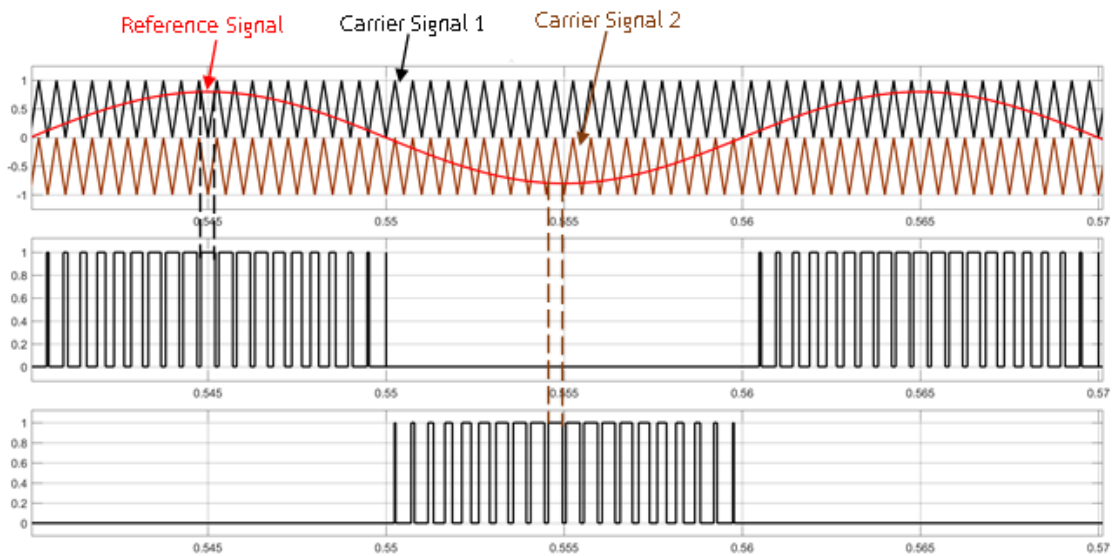


ภาพที่ 25 ตัวอย่างการปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาทแบบเลื่อนเฟส

2.10 การปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาทแบบเลื่อนระดับ

การปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาทแบบเลื่อนระดับ (Carrier-Based Level-Shift PWM) [27] เป็นวิธีการมอดูเลชันวิธีหนึ่งที่คล้ายกับการปรับความกว้างของพัลส์โดยใช้สัญญาณสามเหลี่ยมแบบเลื่อนเฟส โดยที่จะใช้สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Carrier Signal) ซึ่งจะมีความถี่, ความกว้างและมุมเฟสเท่ากัน ซึ่งจำนวนของสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของวงจรที่ใช้งานดังสมการที่ 60 และจะมีสัญญาณสามเหลี่ยมที่เลื่อนไปตามแกนแนวตั้งดังภาพที่ 26 สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติได้ดังตารางที่ 9

พหุ ประถมศึกษา



ภาพที่ 26 ตัวอย่างการปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาห์แบบเลื่อนระดับ

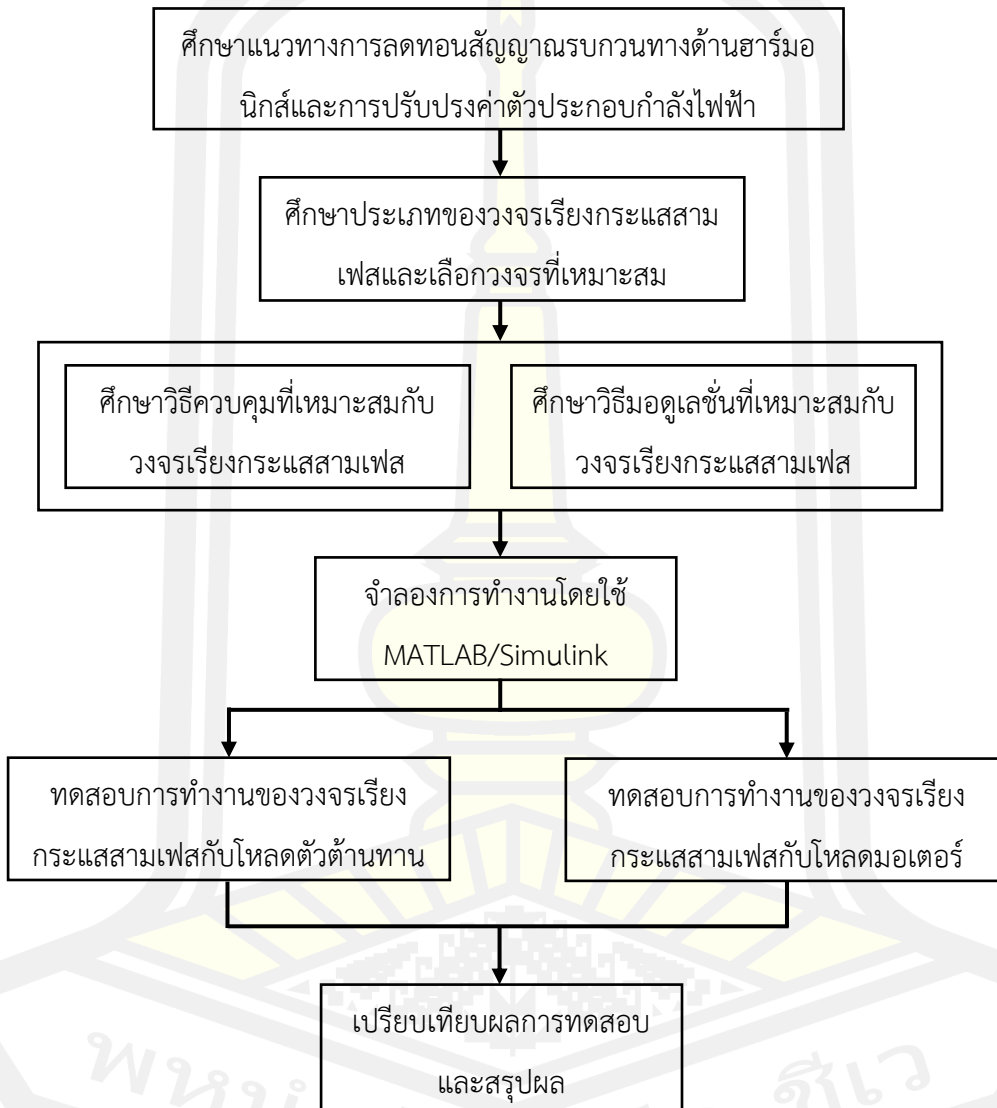
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบคุณสมบัติของการปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาห์แบบเลื่อนเฟสและแบบเลื่อนระดับ [27]

การเปรียบเทียบ	Carrier-Based Phase-Shift PWM	Carrier-Based Level-Shift PWM
ความถี่ในการสวิตช์	เหมือนกันทุกสวิตช์	แตกต่างกัน
ช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์	เหมือนกันทุกสวิตช์	แตกต่างกัน
การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการสวิตช์	ไม่จำเป็น	จำเป็น
THD ของแรงดัน	ดี	ดีกว่า

พหุ ประถมศึกษา

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กรอบแนวคิดในงานวิจัย



ภาพที่ 27 แผนภาพกรอบแนวคิดในงานวิจัย

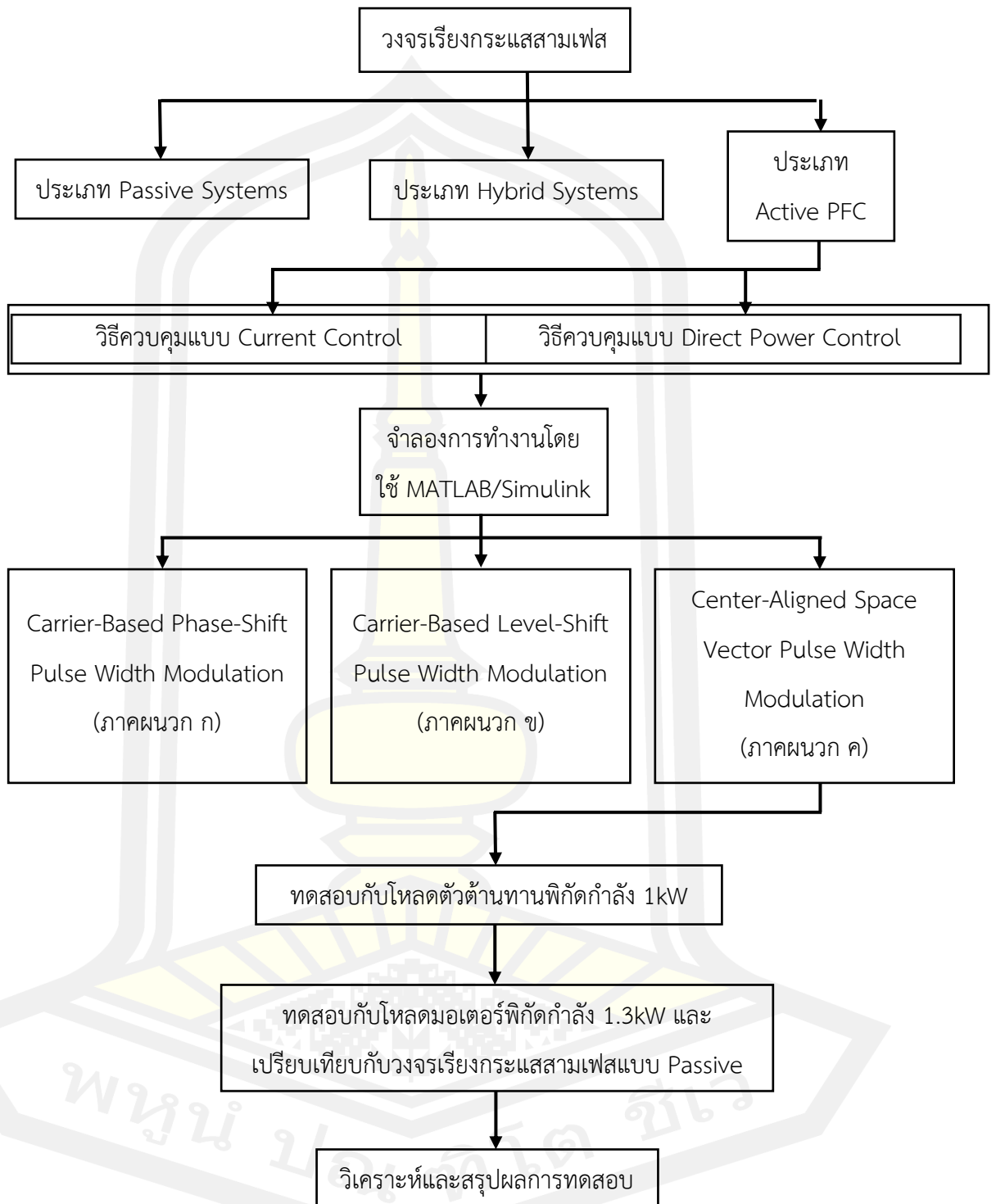
3.2 ขั้นตอนการวิจัย

จากกรอบแนวคิดในงานวิจัยดังกล่าวที่ 27 ในขั้นตอนแรกจะเริ่มศึกษาแนวทางที่จะใช้ในการลดทอนสัญญาณรบกวนทางด้านฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าซึ่งจะมีด้วยกับ 3 ประเภทหลักๆคือ 1) วิธีแบบเฉื่อยงาน 2) วิธีแบบผสมและ 3) วิธีแบบไวงาน โดยที่พบว่าวิธีการแบบไวงานนั้นสามารถช่วยในการลดทอนสัญญาณรบกวนทางด้านฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอีกทั้งยังสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้สูงขึ้นได้ด้วย

แต่เนื่องจากวิธีการแบบไวงานนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สวิตซ์ในการทำงานด้วย ดังนั้นวิธีการที่จะควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์จึงเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมการทำงานของ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงาน โดยในการวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการควบคุมการทำงานอยู่ 2 วิธีคือ 1) การควบคุมกระแส 2) การควบคุมกำลังไฟฟ้าทางตรงและศึกษาวิธีการมอดูเลชันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสด้วยกัน 3 วิธีคือ 1) การปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาห์แบบเลื่อนเฟส (carrier-based phase-shift PWM) 2) การปรับความกว้างของพัลส์เชิงคลื่นพาห์แบบเลื่อนระดับ (carrier-based phase-shift PWM) 3) การปรับความกว้างของพัลส์โดยใช้สเปซเวกเตอร์ (space vector PWM)

โดยทำการจำลองการทำงานขึ้นในโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจากผลจากการจำลองการทำงานพบว่ายังไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางด้านฮาร์มอนิกได้ตามที่ต้องการ โดยที่มีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่ 7.77% ดังนั้นจึงได้ศึกษาวิธีมอดูเลชันแบบการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์ (center-aligned space vector PWM) ในการสร้างสัญญาณพัลส์ เพื่อที่จะนำไปควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์และใช้วิธีควบคุมกระแส โดยจะทำการสร้างแบบจำลองการทำงานขึ้นบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจากผลการจำลองการทำงานพบว่าสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนทางด้านฮาร์มอนิกได้ตามที่ต้องการ โดยที่มีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่ 2.28%

จึงเลือกวิธีควบคุมกระแสและวิธีมอดูเลชันแบบการปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์ในการทดลอง โดยจะทำการวัดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสด้านอินพุต (%THD_i), ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor), การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต และเปรียบเทียบผลจากการจำลองการทำงานกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง เพื่อที่จะหาข้อสรุปที่ว่าวิธีการควบคุมและการมอดูเลชันดังกล่าวนี้สามารถใช้งานร่วมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดไวงาน เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนทางด้านฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ ซึ่งสรุปการทดลองได้ดังภาพที่ 28

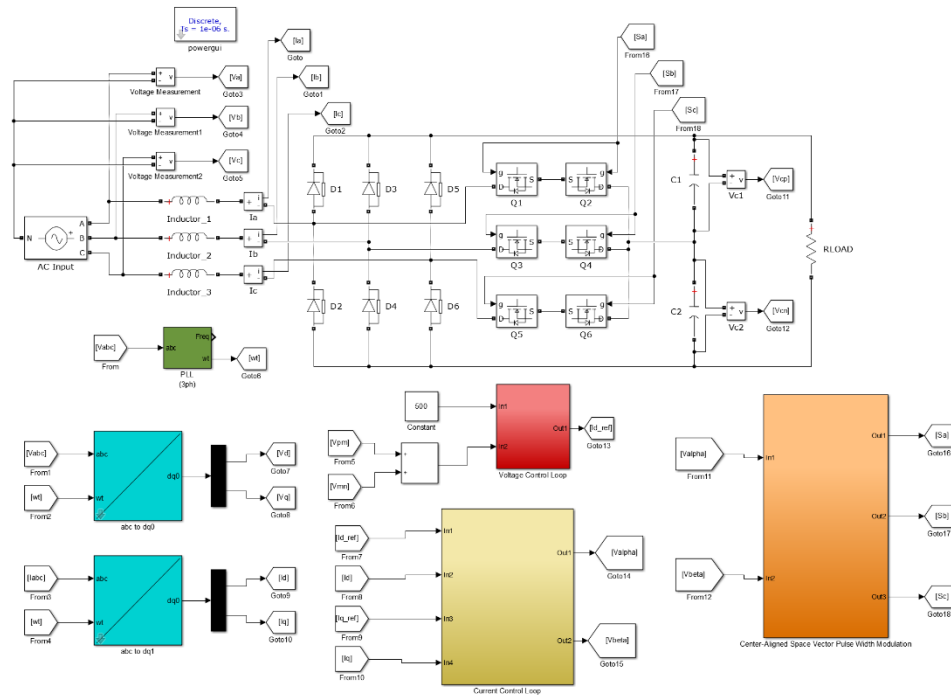


ภาพที่ 28 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง

3.3 วิธีการทดลอง

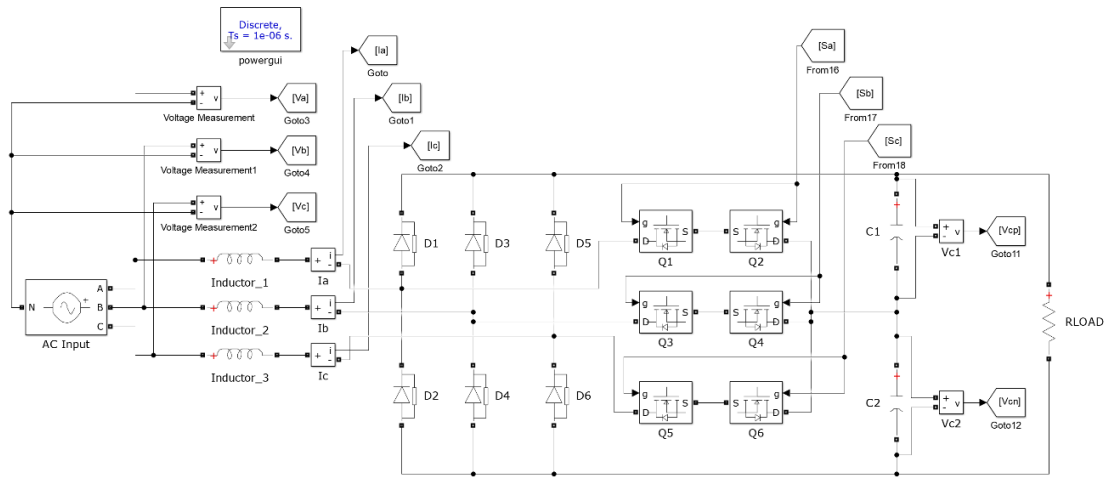
3.3.1 การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

การจำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดไวงานแบบเวียนนา โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังภาพที่ 29



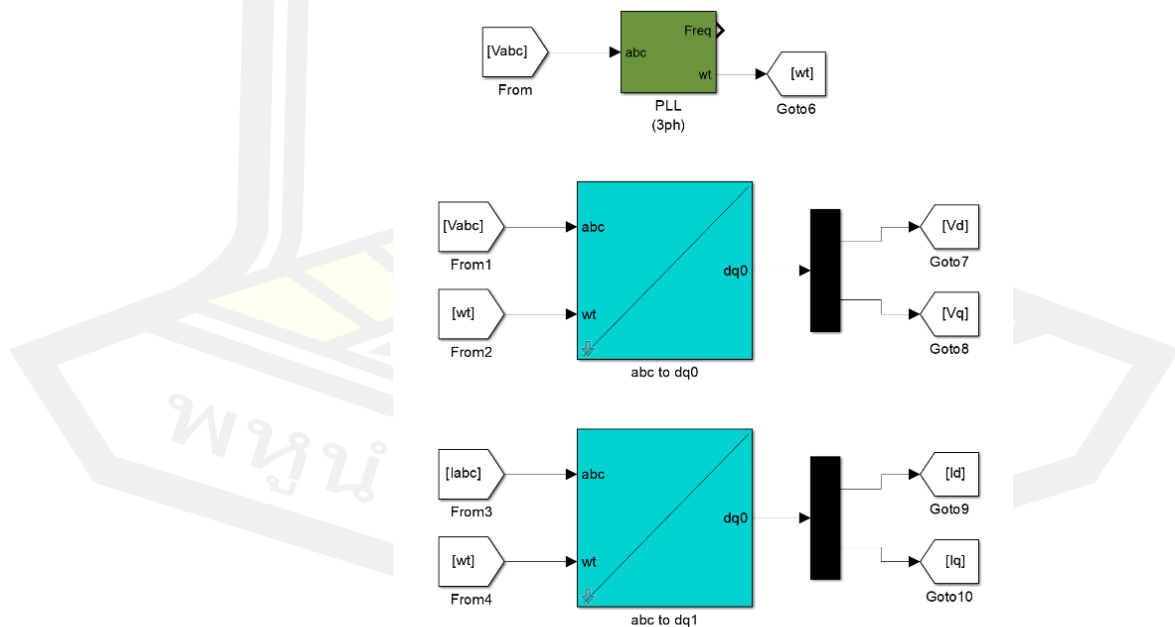
ภาพที่ 29 จำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดไวงานแบบเวียนนา

ประกอบไปด้วยส่วนที่ 1 คือส่วน Power Circuit ดังภาพที่ 30 ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุต 3 ตัว ไดโอดที่ต่อกันในลักษณะของ Bridge Diode 6 ตัวและอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดไวงานแบบเวียนนา 6 ตัว และตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต 2 ตัวและโหลด



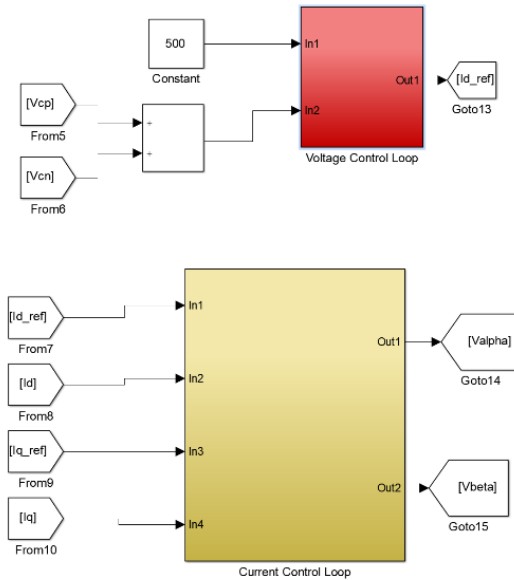
ภาพที่ 30 แผนภาพของ Power Circuit ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ส่วนที่ 2 คือการแปลงแรงดันและกระแสอินพุตจากระบบสามเฟสให้เป็นระบบเฟรมหมุน (Rotating Frame) โดยอาศัยหลักการของ clark transformation และ park transformation และมีส่วนของ phase-lock loop ที่ใช้สำหรับคำนวณมุมของแรงดันอินพุต เพื่อที่จะนำไปใช้ในการควบคุมในส่วนอื่นต่อไปดังภาพที่ 31



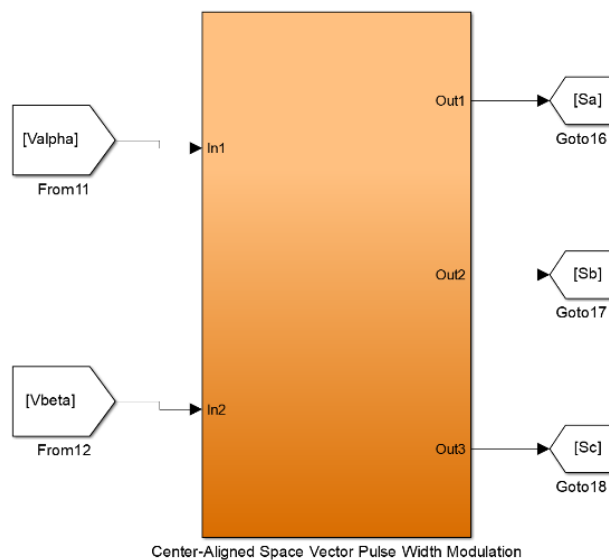
ภาพที่ 31 แผนภาพของการแปลงจากระบบสามเฟสให้เป็นระบบเฟรมหมุน

ส่วนที่ 3 ประกอบด้วยกัน 2 ส่วนคือ 1. การควบคุมค่ากระแส reactive ให้มีค่าเป็นศูนย์ ($i_q=0$) หรือ Current Control Loop และ 2. การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้คงที่หรือ Voltage Control Loop โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 แผนภาพของ Current Control Loop และ Voltage Control Loop

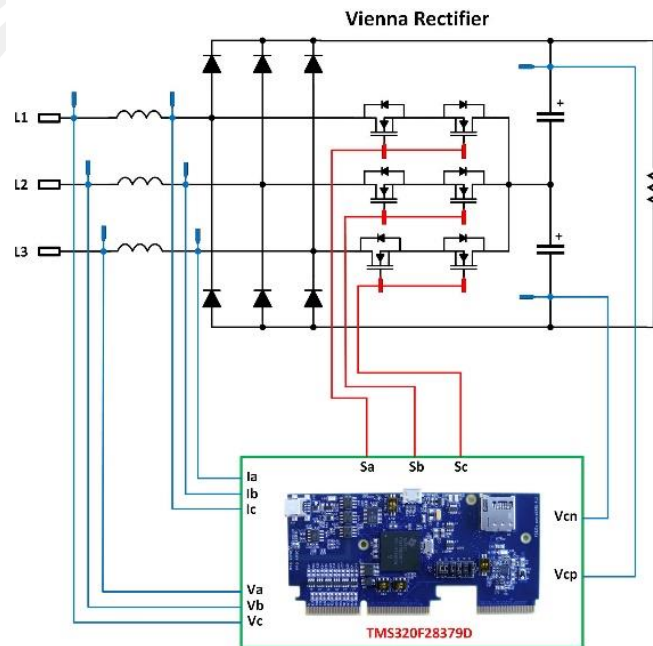
ส่วนที่ 4 เป็นวิธีการมอดูเลชั่นที่เลือกใช้แบบ Center-Aligned Space Vector Pulse Width Modulation เพื่อใช้สร้างสัญญาณ PWM ในการขับอุปกรณ์สวิตซ์ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 แผนภาพของวิธีมอดูเลชั่นแบบ Center-Aligned Space Vector Pulse Width Modulation

3.3.2 การทดสอบกับโหลดตัวต้านทาน

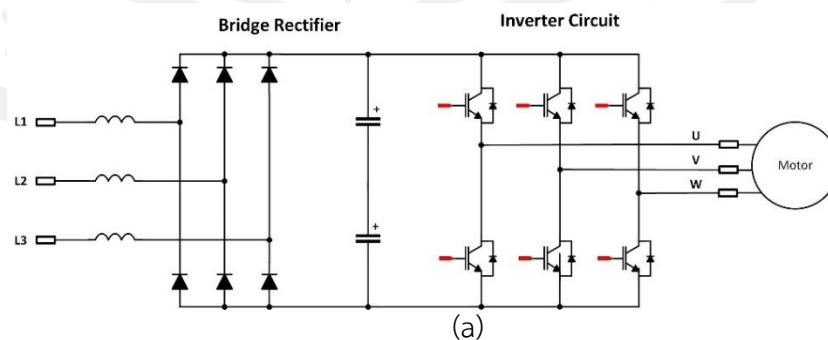
ซึ่งจากการทดลองด้วยการจำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB/Simulink แล้ว จะทำการทดสอบวงจร Vienna Rectifier กับโหลดตัวต้านทาน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและจากการทดสอบกับวงจรต้นแบบ ดังภาพที่ 34

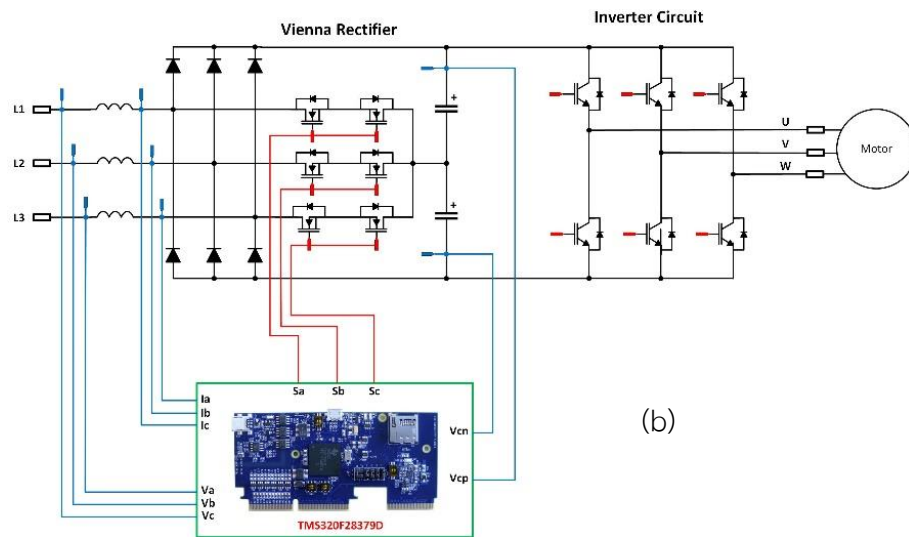


ภาพที่ 34 แผนภาพการทดสอบวงจร Vienna Rectifier กับโหลดตัวต้านทาน

3.3.3 การทดสอบกับโหลดมอเตอร์

ทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิด Passive Systems (Bridge Rectifier) ดังภาพที่ 35(a) กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิด Active PFC Systems (Vienna Rectifier) ดังภาพที่ 35(b) และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้





ภาพที่ 35 แผนภาพการทดสอบวงจร Vienna Rectifier กับโหลดมอเตอร์:

(a) วงจรเรียงกระแสชนิด Passive Systems, (b) วงจรเรียงกระแสชนิด Active PFC Systems

3.3.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนาที่ใช้ในการทดสอบ

ซึ่งจากที่ทำการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink แล้วนั้นจะทำการใช้ Block ที่อยู่ภายในโปรแกรม MATLAB/Simulink แปลงเป็น C Code เพื่อที่จะนำไปใช้ทดสอบกับ Hardware โดย Hardware ที่ใช้คือ TIDM-1000 Vienna Rectifier-Based Three Phase Power Factor Correction Reference Design Using C2000 MCU [23] ซึ่งเป็นบอร์ดทดลองต้นแบบที่ใช้สำหรับศึกษาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Active PFC System ชนิด Vienna Rectifier ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Texas Instruments ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 วงจรต้นแบบของวงจรเวียนนาที่พัฒนาโดย Texas Instruments

โดยที่ Controller ที่จะใช้ในการควบคุมและประมวลผลนั้นคือ TMDSCNCD28379D ซึ่งเป็นตัวประมวลผลประเภท Digital Signal Processor (DSP) ซึ่งสามารถประมวลผลได้รวดเร็ว ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 Control Card TMDSCNCD28379D

หลังจากที่ทำการแปลง Block ที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ให้เป็น C Code แล้ว วิธีการที่จะนำ C Code ไปโปรแกรมลงใน Control Card นั้นสามารถทำได้โดยอาศัยโปรแกรม Code Composer Studio ดังภาพที่ 38 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถเชื่อมต่อการทำงานระหว่างโปรแกรม MATLAB/Simulink กับ Control Card ได้



ภาพที่ 38 โปรแกรม Code Composer Studio

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดลอง

ในการทดลองจะเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทดสอบวงจรกับโหลดตัวต้านทาน และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC โดยทดสอบกับโหลดมอเตอร์ เพื่อที่จะดูผลในการลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิก, การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต ดังภาพที่ 39



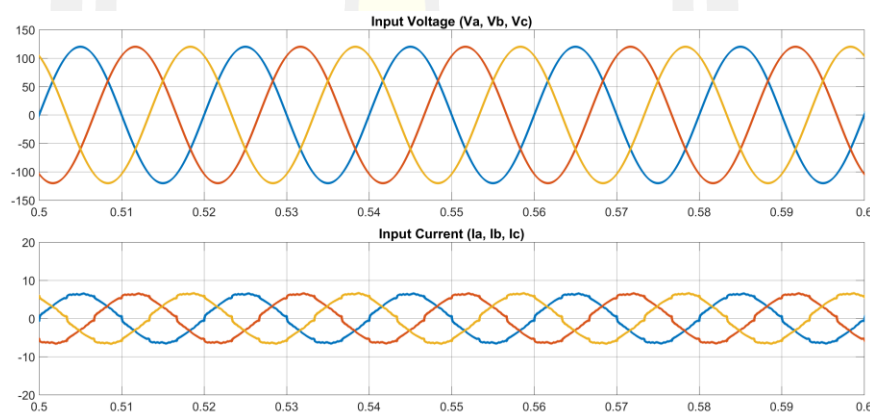
ภาพที่ 39 แผนภาพการทดลองทั้งหมด

4.1.1 ผลการทดลองจากการจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink และวิเคราะห์ผล

การจำลองการทำงานมีพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 10 จากผลการจำลองดังภาพที่ 40 จะเห็นว่าวงจรสามารถลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิกของกระแสด้านอินพุตได้ โดยที่จะแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตของเฟส V_a , V_b , V_c และแสดงถึงกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตของเฟส I_a , I_b , I_c จะเห็นว่ากระแสทั้งสามเฟสนั้นถูกปรับปรุงให้มีความผิดเพี้ยนของกระแสลดลงทำให้สัญญาณของกระแสนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับแรงดันซึ่งคือรูปคลื่นไซน์

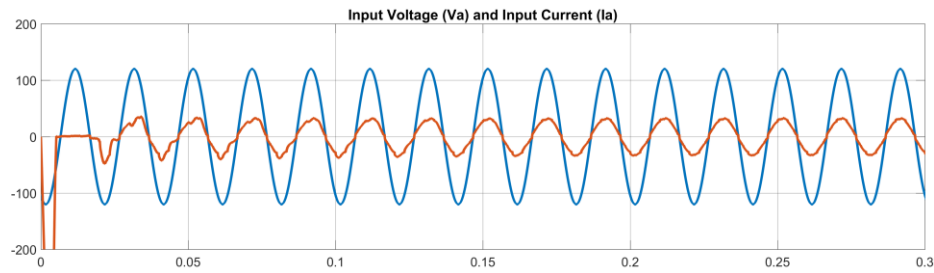
ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงานกับโหลดตัวต้านทาน

Parameters	Value
Input Voltage	200 V _{ac}
Output Voltage	500 V _{dc}
Output Power	1 kW
Switching Frequency	20 kHz
Inductor	3 mH
Capacitor	180 uF
Sample Time	0.000001 s

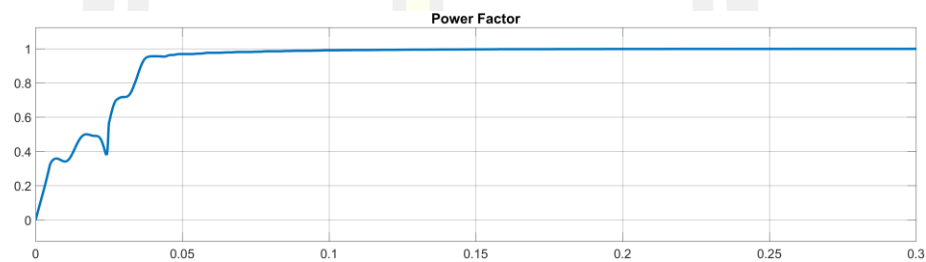


ภาพที่ 40 แรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (V_a , V_b , V_c) และกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต (I_a , I_b , I_c)

จากภาพที่ 41 จะแสดงให้เห็นว่าระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต V_a กับสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต I_a นั้นจะไม่เกิดการเลื่อนเฟสกันเกิดขึ้น เพราะฉะนั้นจากที่สัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตมีความผิดเพี้ยนลดลงใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และไม่เกิดการเลื่อนเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสนั้น จะส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามักเป็น 0.9986 ดังแสดงในภาพที่ 42

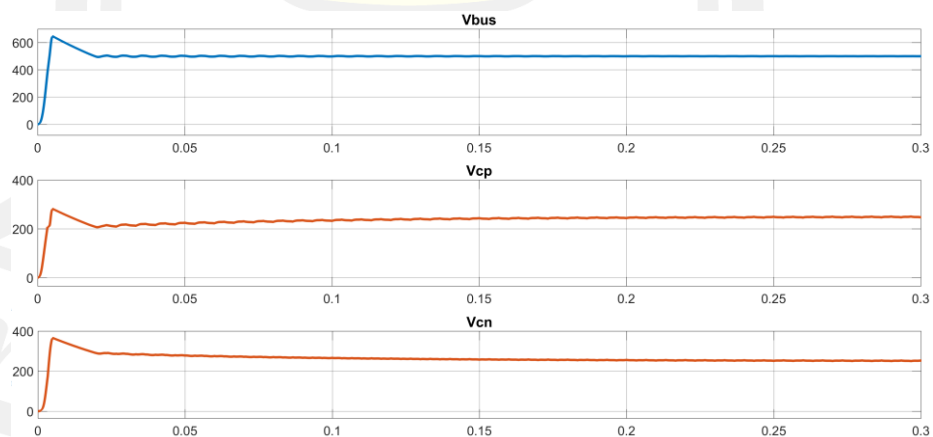


ภาพที่ 41 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (V_a) กับกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต (I_a)



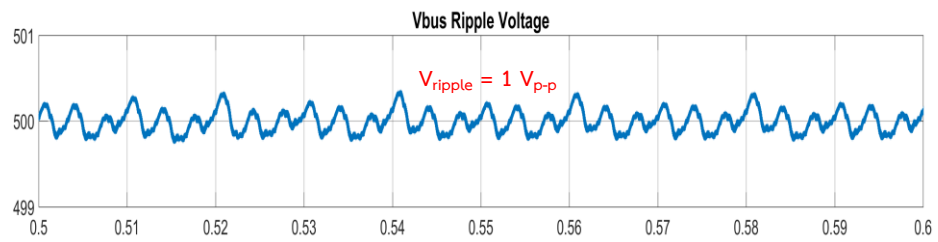
ภาพที่ 42 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ถูกปรับปรุงจากวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิด Vienna Rectifier

จากภาพที่ 43 จะเห็นว่าระบบสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้มีค่าเป็น $500 V_{dc}$ ได้และสามารถควบคุมให้คงที่ได้อีกด้วยและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุฝั่งเอาต์พุตทั้ง 2 ตัวมีค่าเท่ากันคือ $250 V_{dc}$



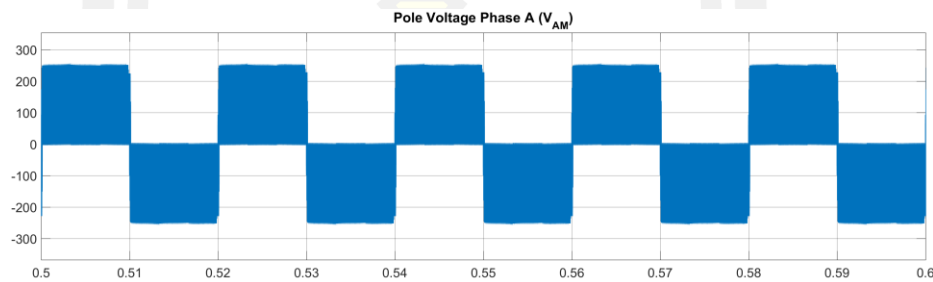
ภาพที่ 43 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต (V_{bus}) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุฝั่งเอาต์พุต (V_{cp} และ V_{cn})

เมื่อวัดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตนั้นพบว่าการกระเพื่อมที่ $1 V_{p-p}$ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 0.2% ดังภาพที่ 44



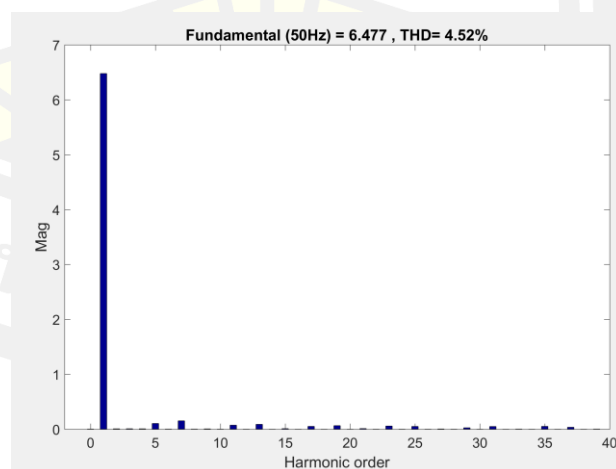
ภาพที่ 44 การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต

ภาพที่ 45 แสดงให้เห็นแรงดันชั่วของเฟส A (V_{AM}) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแรงดันสามระดับ คือ +250V, 0V, -250



ภาพที่ 45 แรงดันชั่วของเฟส A (V_{AM})

เมื่อทำการวัดค่าฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตพบว่ามีค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 4.52% ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต

วิเคราะห์ผลจากการจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink

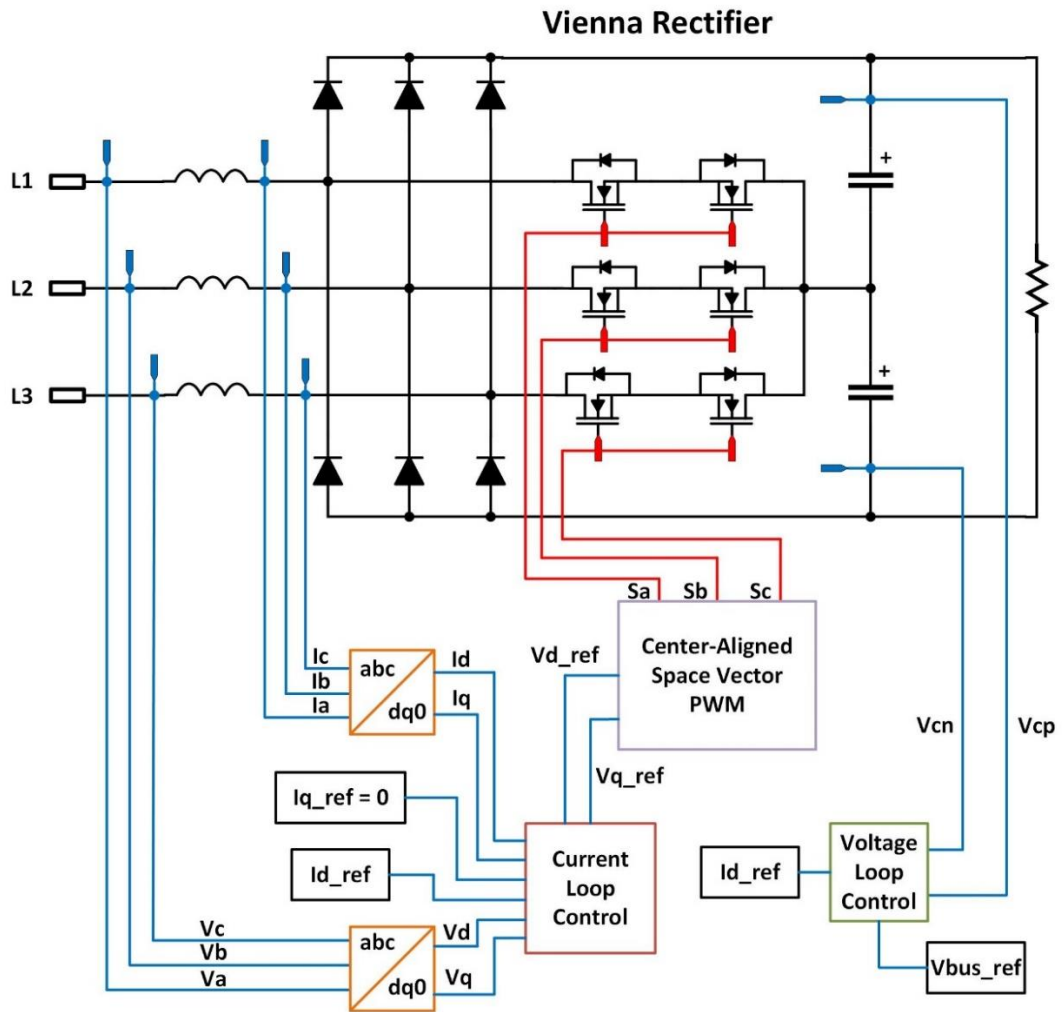
จากการทดสอบโดยใช้วิธีจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อที่จะดูว่าระบบสามารถลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิกด้านอินพุต, การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตได้ พบว่าระบบสามารถลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตให้มีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปไซน์ซึ่งมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 4.52% และเมื่อเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างแรงดันอินพุตและกระแสอินพุตในเฟสเดียวกันแล้วพบว่าทั้ง 2 สัญญาณไม่มีการเลื่อนเฟสกัน ซึ่งนั่นส่งผลต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยสามารถวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ 0.9986 อีกทั้งยังสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตในมีค่าคงที่ที่ $500V_{dc}$ และควบคุมให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้ง 2 ตัวมีค่าเท่ากันที่ $250V_{dc}$ โดยที่วัดค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตได้เป็น $1V_{p-p}$ หรือคิดเป็น 0.2% และเมื่อวัดแรงดันขั้วของเฟส A ก็พบว่าวงจรทำงานเป็นวงจรชนิดแรงดันสามระดับตามคุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิด Vienna Rectifier โดยที่มีค่าเป็น +250V, 0V, -250V

4.1.2 ผลการทดลองวงจรกับโหลดตัวต้านทานและวิเคราะห์ผล

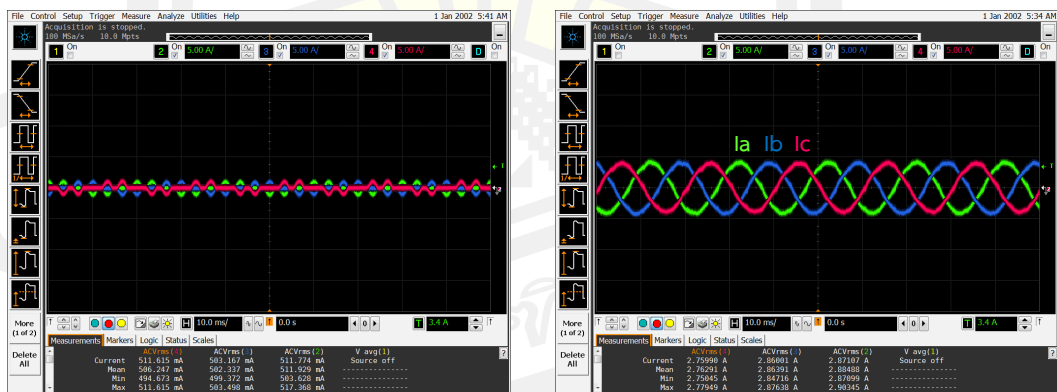
การทดลองกับโหลดตัวต้านทานมีพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 11 และดังภาพที่ 47 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลทดสอบที่ได้จากการทดสอบกับ Hardware จะเห็นว่าในขณะที่ยังไม่ได้สั่งการทำงานของ Active PFC นั้นกระแสไฟฟ้านด้านอินพุตจะมีความผิดเพี้ยนสูงดังภาพที่ 48 (a) ที่เกิดจากวงจรเรียงกระแสสามเฟสและเมื่อสั่งการทำงานของ Active PFC แล้วสามารถปรับปรุงความผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสให้มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปไซน์ดังภาพที่ 48 (b)

ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบวงจรกับโหลดตัวต้านทาน

Parameters	Value
Input Voltage	200 V_{ac}
Output Voltage	500 V_{dc}
Output Power	1 kW
Switching Frequency	20 kHz
Inductor	3 mH
Capacitor	180 μF
Sample Time	0.000001 s



ภาพที่ 47 แผนภาพการทดสอบวงจร Vienna Rectifier กับโหลดตัวต้านทานที่พิกัดกำลัง 1 kw

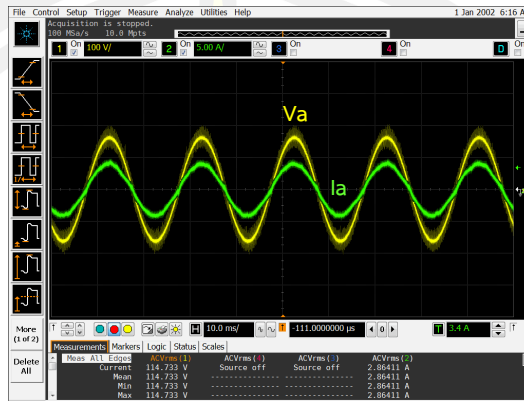


(a)

(b)

ภาพที่ 48 กระแสไฟฟ้าด้านอินพุต 3 เฟส: (a) ขณะที่ Active PFC ยังไม่ทำงาน, (b) เมื่อ Active PFC ทำงานที่โหลดตัวต้านทาน 1kw

เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตในเฟส A จะเห็นว่าไม่เกิดการเลื่อนเฟสกันระหว่างแรงดันกับกระแสดังภาพที่ 49 และสามารถวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ 0.9986 ดังภาพที่ 50

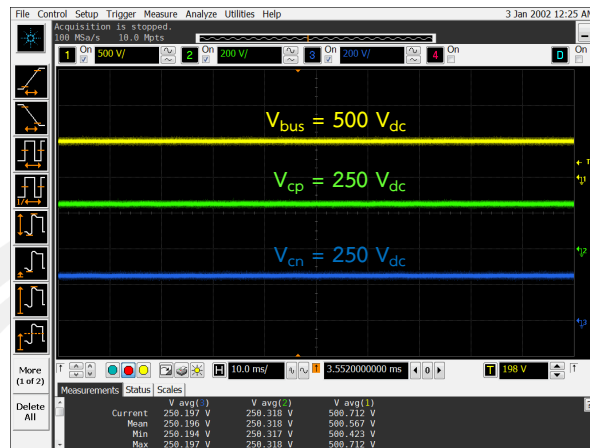


ภาพที่ 49 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (V_a) กับกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต (I_a) จากการทดสอบกับโหลดตัวต้านทาน 1kW



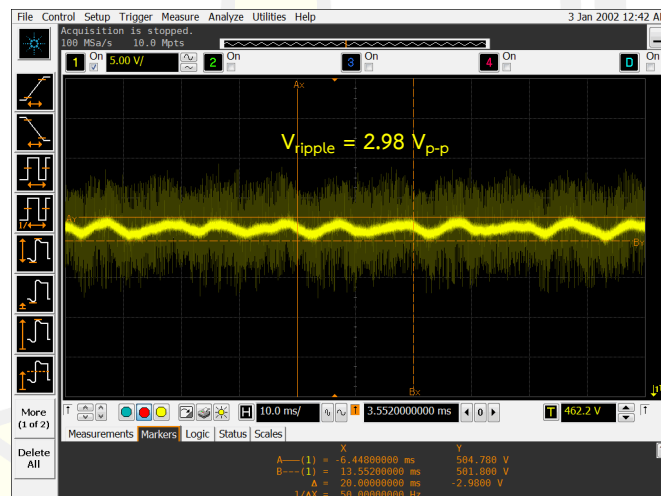
ภาพที่ 50 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าขณะ Active PFC ทำงานที่โหลดตัวต้านทาน 1kW

จากการทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตและแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตทั้ง 2 ตัวดังภาพที่ 51 พบว่าวงจรสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตและควบคุมให้มีค่า $500V_{dc}$ และควบคุมให้แรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุมีค่า $250V_{dc}$ เท่ากัน



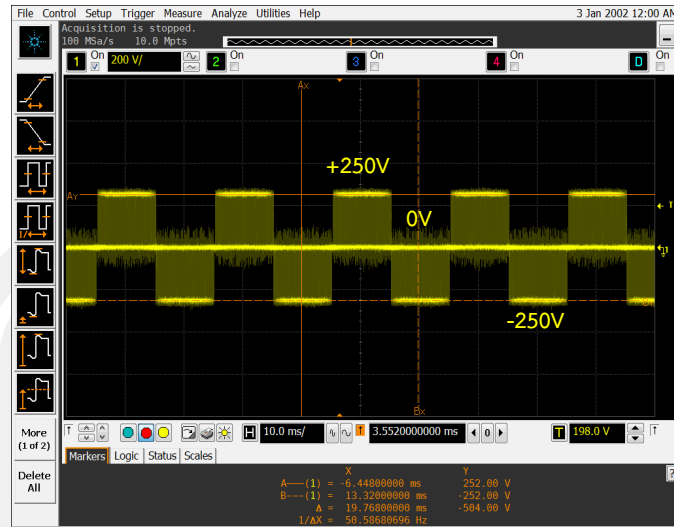
ภาพที่ 51 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตทั้ง 2 ตัว ที่โหลดตัวต้านทาน 1kW

เมื่อวัดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตนั้นพบว่าการกระเพื่อมอยู่ที่ $2.98V_{p-p}$ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 0.6% ดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 ทดสอบการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตที่โหลดตัวต้านทาน 1kW

ภาพที่ 53 แสดงให้เห็นแรงดันชั่วของเฟส A (V_{AM}) ที่ได้จากการทดสอบซึ่งจะมีลักษณะเป็นแรงดันสามระดับคือ +250V, 0V, -250V



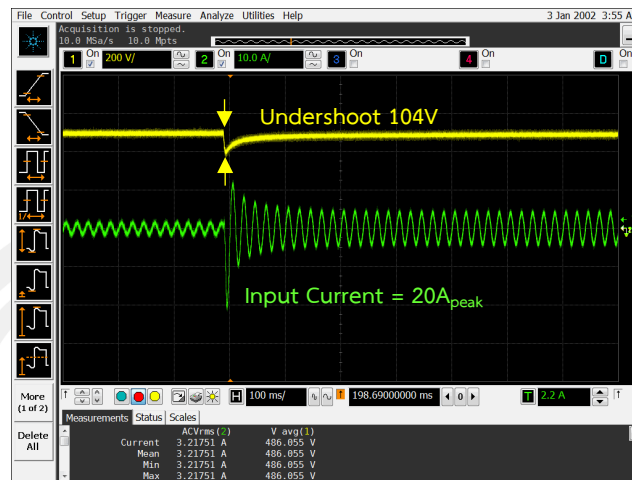
ภาพที่ 53 ทดสอบแรงดันชั่วของเฟส A (V_{AM})

เมื่อทำการวัดค่าฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตพบว่ามีความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 2.64% ดังภาพที่ 54



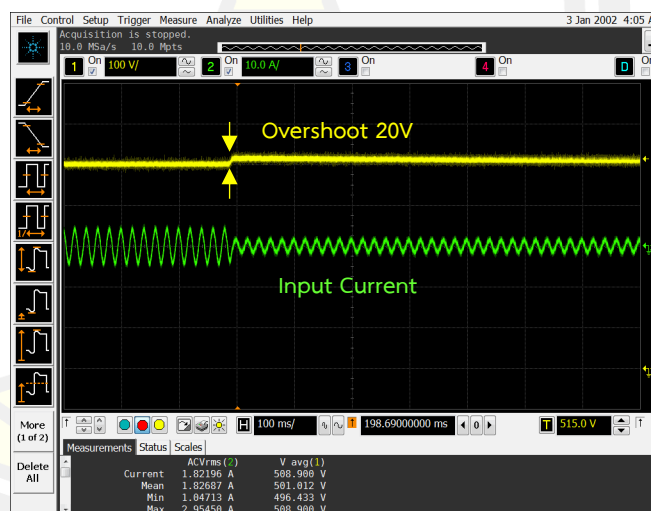
ภาพที่ 54 ทดสอบวัดความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวมของกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตที่โหลดตัวต้านทาน 1kW

ทดสอบการควบคุมของ current control loop และ voltage control loop โดยการ step-up โหลดโดยเพิ่มโหลดจาก 300W เป็น 1000W ดังภาพที่ 55 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะเกิดการ undershoot ที่ 104V และกระแสอินพุตขณะ step-up โหลดมีค่าสูงสุดที่ $20A_{peak}$



ภาพที่ 55 ทดสอบ step-up โหลดจาก 300W เป็น 1kW

ทดสอบการควบคุมของ current control loop และ voltage control loop โดยการ step-down โหลดโดยลดโหลดจาก 1000W เป็น 300W ดังภาพที่ 56 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะเกิดการ overshoot ที่ 20V=



ภาพที่ 56 ทดสอบ step-down โหลดจาก 1kW เป็น 300W

วิเคราะห์ผลการทดลองวงจรกับโหลดตัวต้านทาน

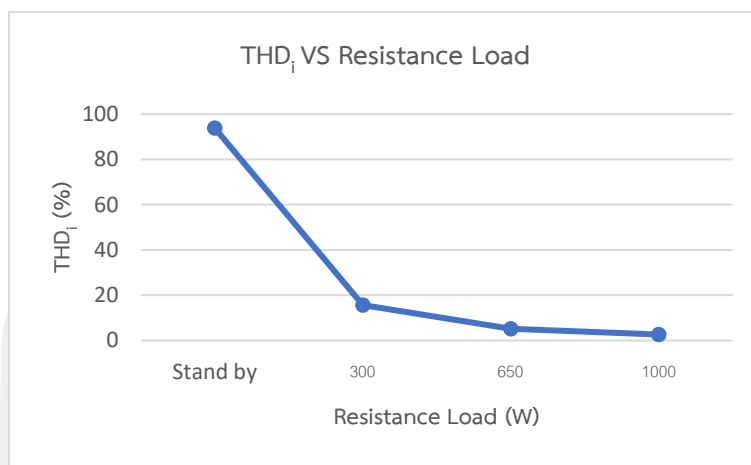
จากผลการทดสอบตามตารางที่ 12 พบว่าก่อนที่จะสั่งการทำงานของวงจร Active PFC สัญญาณของกระแสอินพุตนั้นเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่สูงซึ่งเกิดจากวงจรเรียงกระแส แต่เมื่อสั่งการทำงานของวงจร Active PFC แล้วระบบสามารถลดทอนฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตให้มีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปไซน์ซึ่งมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 2.64% และเมื่อเปรียบเทียบสัญญาณ

ระหว่างแรงดันอินพุตและกระแสอินพุตในเฟสเดียวกันแล้วพบว่าทั้ง 2 สัญญาณไม่มีการเลื่อนเฟสกัน ซึ่งส่งผลต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยสามารถวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ 0.9986 อีกทั้งยังสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ที่ $500V_{dc}$ และควบคุมให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้ง 2 ตัวมีค่าเท่ากันที่ $250V_{dc}$ โดยที่วัดค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตได้เป็น $2.98V_{p-p}$ หรือคิดเป็น 0.6% และเมื่อวัดแรงดันชั่วขณะของเฟส A ก็พบว่าวงจรทำงานเป็นวงจรชนิดแรงดันสามระดับตามคุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิด Vienna Rectifier โดยที่มีค่าเป็น +250V, 0V, -250V อีกทั้งยังได้ทดสอบการควบคุมของ current control loop และ voltage control loop โดยทำการ step-up และ step-down โหลดพบว่า ในขณะที่ step-up โหลดโดยเพิ่มโหลดจาก 300W เป็น 1000W แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตเกิดแรงดัน undershoot ที่ 104V และมีค่ากระแสสูงสุดที่ $20A_{peak}$ และในขณะที่ step-down โหลดโดยลดโหลดจาก 1000W เป็น 300W แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตเกิดแรงดัน overshoot ที่ 20V ซึ่งการควบคุมของ current control loop และ voltage control loop ก็สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้านอินพุตให้คงที่ได้

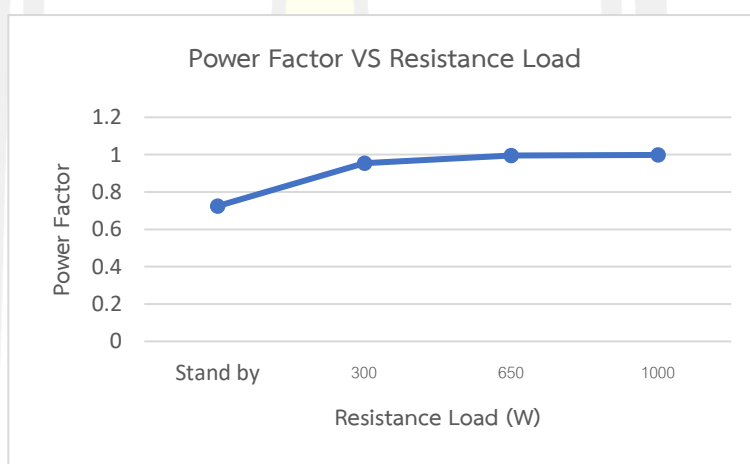
ตารางที่ 12 สรุปผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิด Active PFC กับโหลดตัวต้านทานที่พิกัดกำลัง 1kW

V_{cp} (V)	V_{cn} (V)	V_{bus} (V)	%THD	Power Factor	Load (W)
136.14	133.17	269.31	93.85	0.7249	Stand by
251.92	249.06	500.98	15.61	0.9547	300
251.89	249.12	501.01	5.13	0.9956	650
251.68	249.27	500.95	2.64	0.9986	1000

หมายเหตุ: Stand by คือช่วงเวลาที่ยังไม่ทำงาน



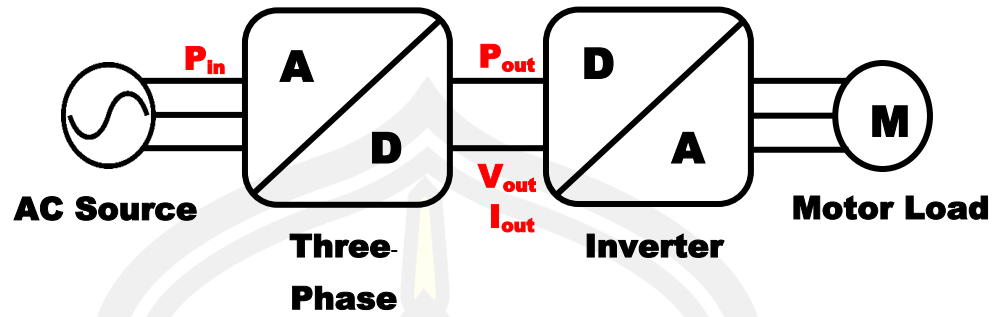
ภาพที่ 57 เปรียบเทียบผลการทดสอบของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสรวมกับโหลดตัวต้านทานพิกัดกำลัง 1kW



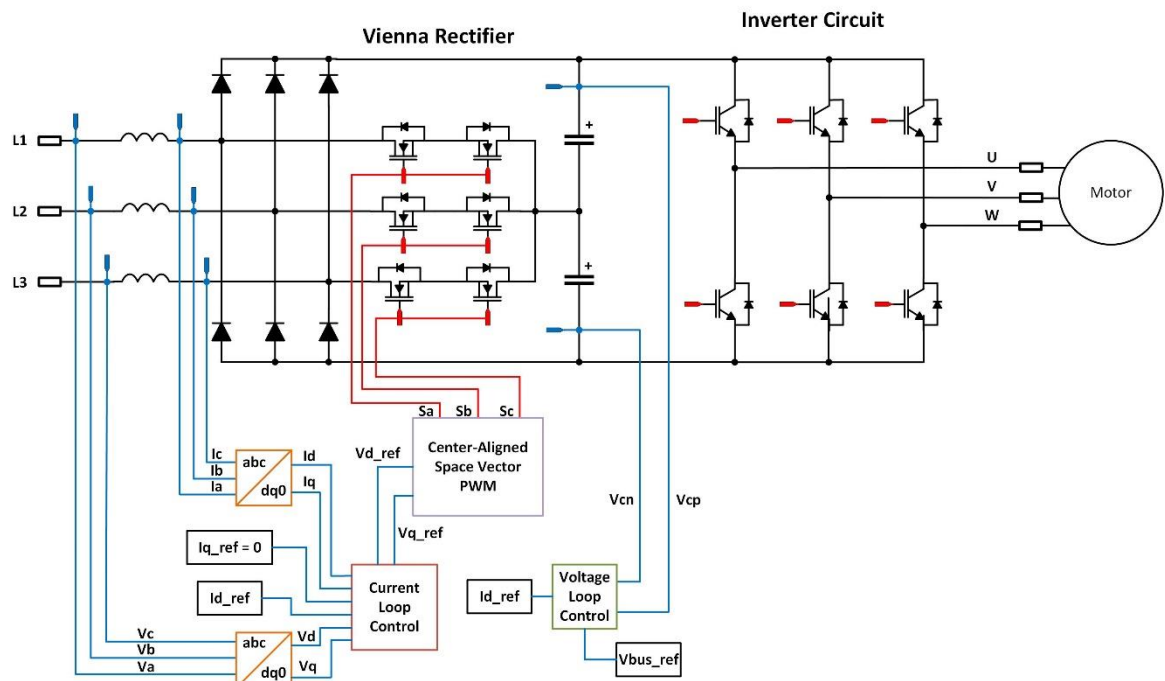
ภาพที่ 58 เปรียบเทียบผลการทดสอบการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับโหลดตัวต้านทานพิกัดกำลัง 1kW

4.1.3 ผลการทดลองวงจรกับโหลดมอเตอร์และวิเคราะห์ผล

ทำการทดสอบเปรียบเทียบการทำงานระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC ดังภาพที่ 59 โดยจะทำการทดสอบกับโหลดที่เป็นมอเตอร์ซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบดังภาพที่ 60 และ 61 โดยจะทำการวัดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแส การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตและประสิทธิภาพการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟส โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆตามตารางที่ 13 และ



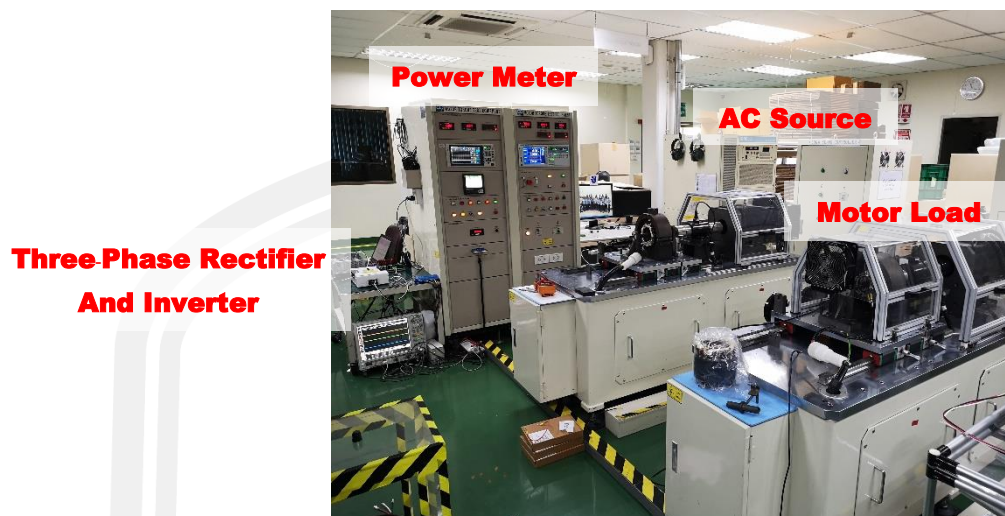
ภาพที่ 59 แผนภาพการทดสอบกับโหลดมอเตอร์



ภาพที่ 60 แผนภาพการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไวงานกับโหลดมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง

1.3 kW

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพที่ 61 Motor Test ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 13 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบวงจรกับโหลดมอเตอร์

Parameters	Passive	Active PFC
Input Voltage	200 V _{ac}	200 V _{ac}
Output Voltage	282 V _{dc}	500 V _{dc}
Output Power	1.3 kW	1.3 kW
Switching Frequency	-	20 kHz
Inductor	25 mH	3 mH
Capacitor	1100 uF	180 uF
Sample Time	-	0.000001 s

ตารางที่ 14 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM) ที่ใช้ในการทดสอบ

Parameters	Value
Motor Type	PMSM
Number of pole pairs	3
Terminal Resistance	0.58 Ohm
Terminal inductance	Lq : 3.5 mH
	Ld : 2.6 mH
Voltage constant parameter	Terminal : 24.4 mV/rpm
	Phase : 14.1 mV/rpm
Torque constant parameter	0.36 N•m/A

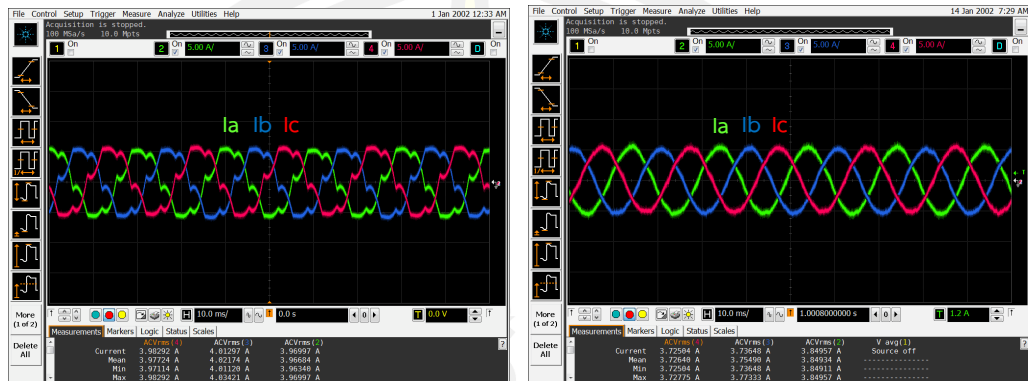
ซึ่งวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive นั้นจะใช้ reactor ดังภาพที่ 62 (a) ในการลดทอนความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสและวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Active PFC นั้นจะใช้บอร์ดทดลองวงจร Vienna rectifier ของ Texas Instruments ดังภาพที่ 62 (b) ในการลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิกของกระแสด้านอินพุตและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 62 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการทดสอบกับโหลดมอเตอร์ 1.3kW: (a) แบบ Passive, (b) แบบ Active PFC

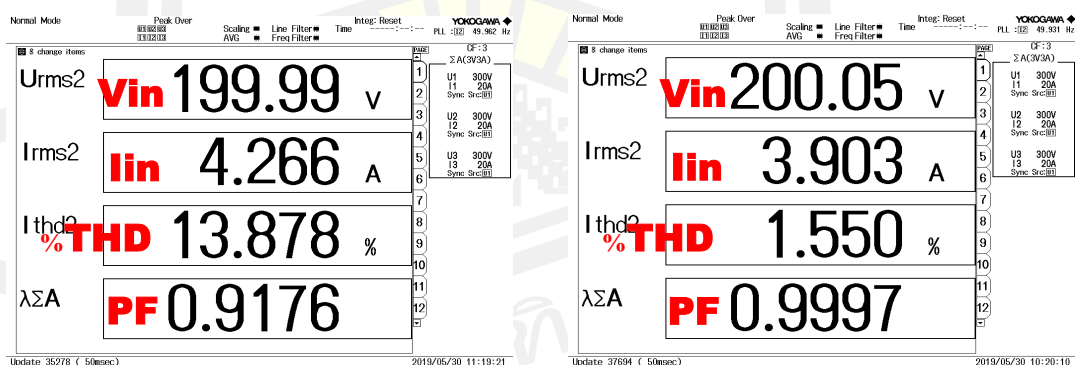
จากผลการทดสอบเปรียบเทียบการลดทอนสัญญาณฮาร์มอนิกของกระแสด้านอินพุตที่พิกัดกำลัง 1.3kW พบว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive รูปคลื่นของกระแสยังมีความ

ผิดเพี้ยนเกิดขึ้นทำให้ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังภาพที่ 63 (a) ส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Active PFC นั้นความผิดเพี้ยนของกระแสมีน้อยกว่าจึงทำให้รูปคลื่นของกระแสเป็นรูปคลื่นไซน์ดังภาพที่ 63 (b)



ภาพที่ 63 กระแสไฟฟ้าด้านอินพุตที่ใช้ทดสอบกับโหลดมอเตอร์ 1.3 kW: (a) แบบ Passive, (b) แบบ Active PFC

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านอินพุต และการปรับปรุณค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าพบว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive มีค่าฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตอยู่ที่ 13.878% และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็น 0.9176 ในส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Active PFC นั้นมีค่าฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตอยู่ที่ 1.550% และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็น 0.9997 ดังภาพที่ 64

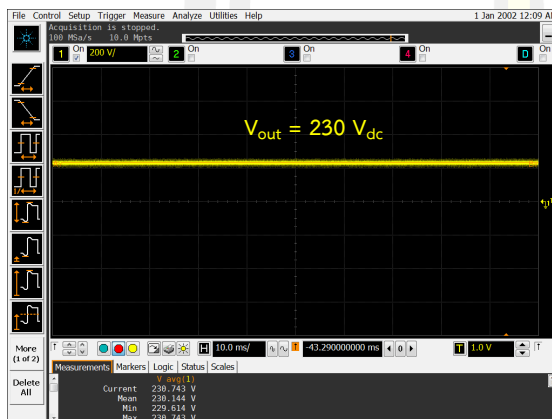


(a)

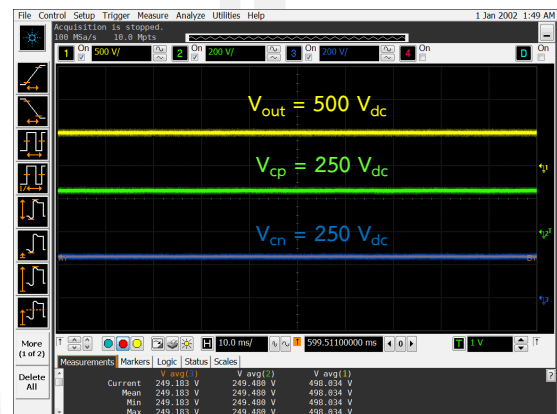
(b)

ภาพที่ 64 ค่าฮาร์มอนิกของสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตและการปรับปรุณค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ทดสอบกับโหลดมอเตอร์ 1.3kW: (a) แบบ Passive (b) แบบ Active PFC

จากการทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตนั้นวงจรแบบ Passive มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลดลงจาก 282V เหลือเพียง 230V ดังภาพที่ 65(a) เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าบางส่วนตกคร่อมที่ reactor ทั้ง 3 ตัว แต่ในส่วนของวงจรแบบ Active PFC นั้นสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและควบคุมให้คงที่ได้ที่ 500V โดยที่มีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตทั้ง 2 ตัวอยู่ที่ 250V เท่ากันดังภาพที่ 65(b)



(a)



(b)

ภาพที่ 65 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตที่ทดสอบกับโหลดมอเตอร์ 1.3kW:

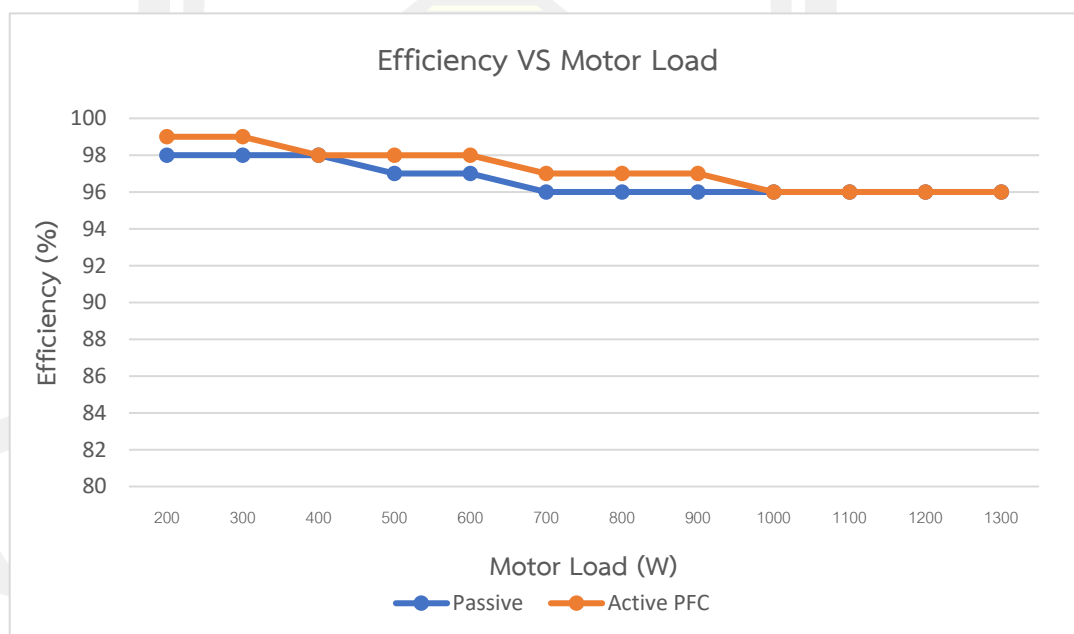
(a) แบบ Passive (b) แบบ Active PFC

วิเคราะห์ผลการทดลองกับโหลดมอเตอร์

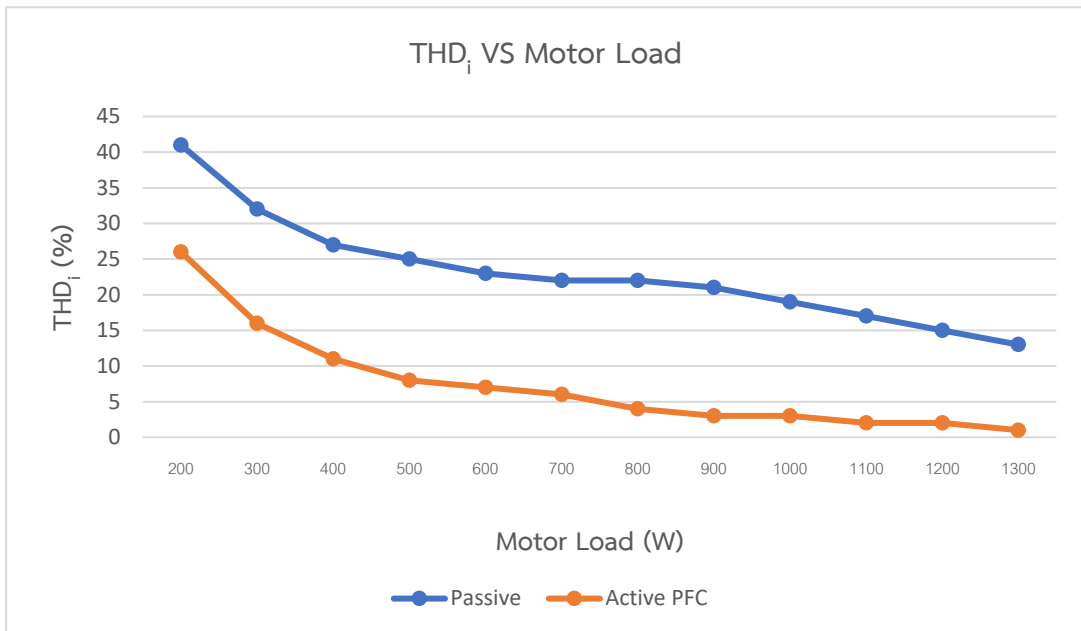
เมื่อทำการทดสอบกับโหลดมอเตอร์เพื่อเปรียบเทียบการทำงานระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC ที่พิกัดกำลัง 1.3kW จากผลการทดสอบตามตารางที่ 15 พบว่าการลดทอนค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสนั้นวงจรแบบ Passive ทำได้เพียง 13.878% ในขณะที่วงจรแบบ Active PFC นั้นสามารถลดทอนค่าความผิดเพี้ยนให้เหลือเพียง 1.550% ในส่วนของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้นวงจรแบบ Passive มีค่าเพียง 0.9176 ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสที่สูงจึงทำให้ค่าตัวประกอบกำลังต่ำลง ในขณะที่วงจรแบบ Active PFC ซึ่งมีค่าความผิดเพี้ยนที่ต่ำกว่าทำให้การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็น 0.9997 ด้านการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรแบบ Passive จะไม่มีการควบคุมส่วนวงจรแบบ Active PFC สามารถควบคุมให้คงที่ที่ 500V_{dc} และในส่วนของค่าประสิทธิภาพวงจรแบบ Passive นั้นมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 96% ในขณะที่วงจรแบบ Active PFC มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 96% ซึ่งใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 15 สรุปผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC กับโหลดมอเตอร์ที่พิกัดกำลัง 1.3kW

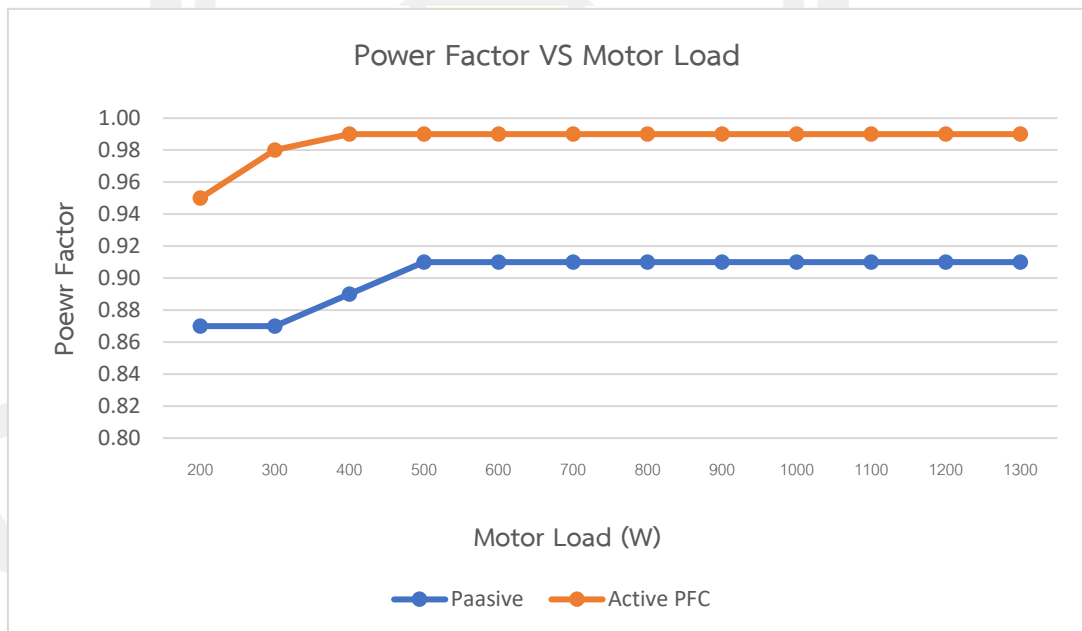
Pin (W)		Vout (V)		Iout (A)		Pout (W)	Efficiency (%)		THD _i (%)		Power Factor	
Passive	PFC	Passive	PFC	Passive	PFC		Passive	PFC	Passive	PFC	Passive	PFC
205	201	260	500	0.78	0.40	200	98	99	41	26	0.87	0.95
308	302	258	500	1.18	0.60	300	98	99	32	16	0.87	0.98
409	405	255	500	1.58	0.80	400	98	98	27	11	0.89	0.99
512	510	252	500	1.98	1.00	500	97	98	25	8	0.91	0.99
620	611	249	500	2.42	1.20	600	97	98	23	7	0.91	0.99
725	716	245	500	2.87	1.40	700	96	97	22	6	0.91	0.99
828	819	239	500	3.35	1.60	800	96	97	22	4	0.91	0.99
937	925	235	500	3.84	1.80	900	96	97	21	3	0.91	0.99
1039	1035	234	500	4.27	2.00	1000	96	96	19	3	0.91	0.99
1142	1140	233	500	4.72	2.20	1100	96	96	17	2	0.91	0.99
1245	1243	232	500	5.16	2.40	1200	96	96	15	2	0.91	0.99
1355	1352	230	500	5.66	2.60	1300	96	96	13	1	0.91	0.99



ภาพที่ 66 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพกับโหลดมอเตอร์ระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC



ภาพที่ 67 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสรวมกับโหลดมอเตอร์ ระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC



ภาพที่ 68 เปรียบเทียบผลการทดสอบการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับโหลดมอเตอร์ ระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าวงจรสามารถควบคุมค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแส การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตได้ตามต้องการ และเมื่อทำการทดลองกับวงจรต้นแบบโดยใช้โหลดตัวต้านทาน พบว่าผลการทดลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน อีกทั้งเมื่อทำการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC เมื่อทดลองกับโหลดมอเตอร์ พบว่าวงจรเรียงกระแสชนิด Active PFC นั้นสามารถลดทอนค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแส, ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต ได้ดีกว่าวงจรเรียงกระแสชนิด Passive อย่างเห็นได้ชัด

สามารถสรุปได้ว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Active PFC ที่ใช้วิธีการควบคุมแบบ Current Control และวิธีมอดูเลชันแบบ Center-Aligned Space Vector Pulse Modulation นั้นสามารถช่วยลดทอนค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแส, ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้และควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตได้ ซึ่งอยู่ในมาตรฐาน IEC/EN 61000-3-2 ตามตารางที่ 16

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสรวมของมาตรฐาน IEC/EN 61000-3-2 กับการจำลองการทำงานและทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานพิกัด 1 kW จากการทดสอบดังภาพที่ 44

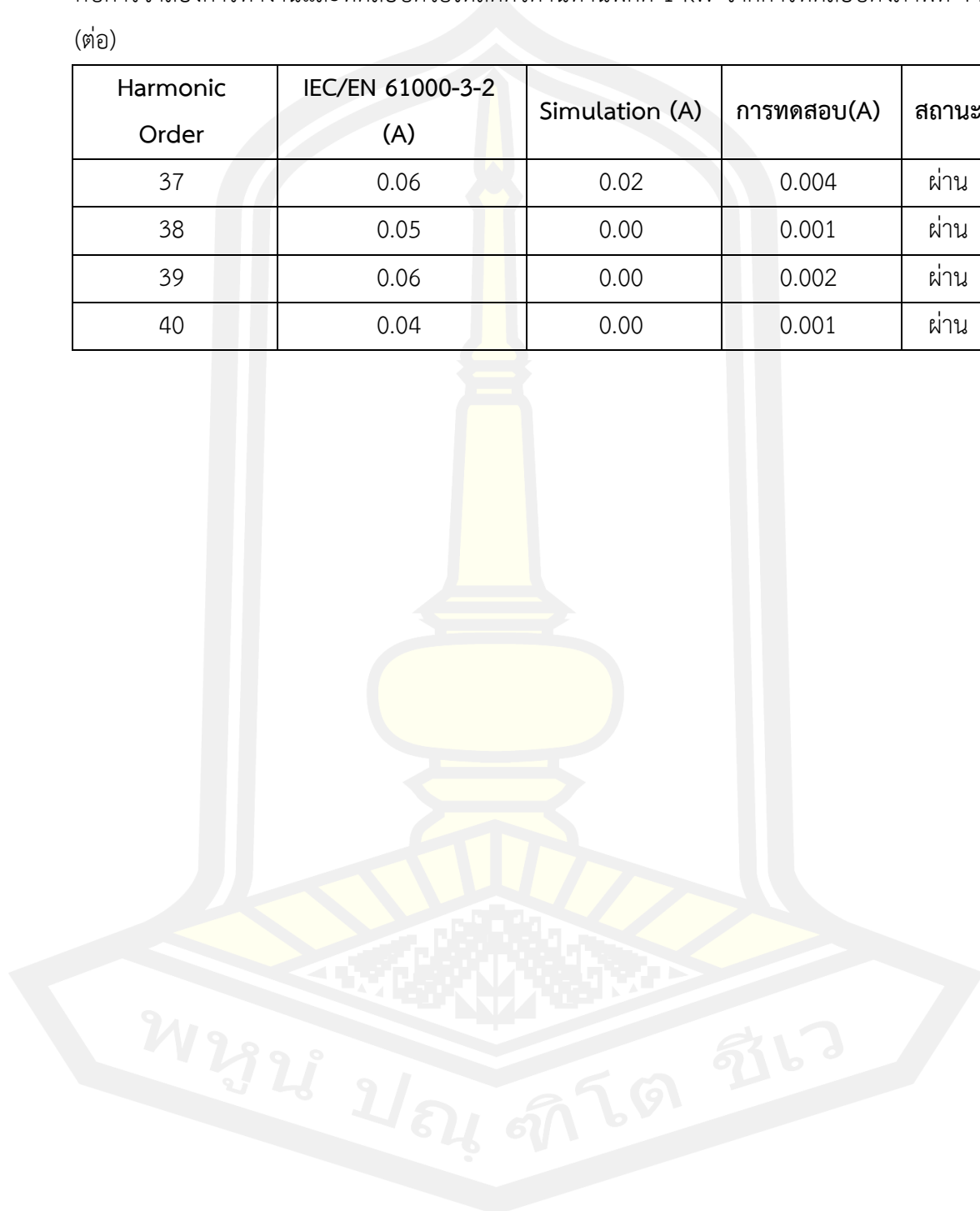
Harmonic Order	IEC/EN 61000-3-2 (A)	Simulation (A)	การทดสอบ(A)	สถานะ
1	-	2.94	2.85	-
2	1.08	0.02	0.015	ผ่าน
3	2.30	0.01	0.011	ผ่าน
4	0.43	0.01	0.014	ผ่าน
5	1.14	0.04	0.044	ผ่าน
6	0.30	0.01	0.005	ผ่าน
7	0.77	0.07	0.040	ผ่าน
8	0.23	0.01	0.005	ผ่าน
9	0.40	0.00	0.008	ผ่าน
10	0.18	0.00	0.003	ผ่าน
11	0.33	0.03	0.018	ผ่าน
12	0.15	0.00	0.004	ผ่าน
13	0.21	0.04	0.022	ผ่าน

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกกระแสรวมของมาตรฐาน IEC/EN 61000-3-2 กับการจำลองการทำงานและทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานพิกัด 1 kW จากการทดสอบดังภาพที่ 44 (ต่อ)

Harmonic Order	IEC/EN 61000-3-2 (A)	Simulation (A)	การทดสอบ(A)	สถานะ
13	0.21	0.04	0.022	ผ่าน
14	0.13	0.00	0.005	ผ่าน
15	0.15	0.01	0.005	ผ่าน
16	0.12	0.00	0.003	ผ่าน
17	0.13	0.02	0.014	ผ่าน
18	0.10	0.00	0.002	ผ่าน
19	0.12	0.03	0.011	ผ่าน
20	0.09	0.00	0.003	ผ่าน
21	0.11	0.01	0.002	ผ่าน
22	0.08	0.00	0.002	ผ่าน
23	0.10	0.02	0.008	ผ่าน
24	0.08	0.00	0.002	ผ่าน
25	0.10	0.02	0.007	ผ่าน
26	0.07	0.00	0.002	ผ่าน
27	0.08	0.00	0.003	ผ่าน
28	0.07	0.00	0.001	ผ่าน
29	0.08	0.01	0.005	ผ่าน
30	0.06	0.00	0.001	ผ่าน
31	0.07	0.02	0.005	ผ่าน
32	0.06	0.00	0.002	ผ่าน
33	0.07	0.00	0.001	ผ่าน
34	0.05	0.00	0.002	ผ่าน
35	0.06	0.02	0.004	ผ่าน
36	0.05	0.00	0.002	ผ่าน
37	0.06	0.02	0.004	ผ่าน

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกกระแสรวมของมาตรฐาน IEC/EN 61000-3-2
กับการจำลองการทำงานและทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานพิกัด 1 kW จากการทดสอบดังภาพที่ 44
(ต่อ)

Harmonic Order	IEC/EN 61000-3-2 (A)	Simulation (A)	การทดสอบ(A)	สถานะ
37	0.06	0.02	0.004	ผ่าน
38	0.05	0.00	0.001	ผ่าน
39	0.06	0.00	0.002	ผ่าน
40	0.04	0.00	0.001	ผ่าน



บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและงานวิจัยในอนาคต

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาปัญหาค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกกรวมของกระแสด้านอินพุต และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบอินเวอร์เตอร์ของเครื่องปรับอากาศ สาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกนั้นเกิดจากส่วนของวงจรเรียงกระแสในส่วนคอนเวอร์เตอร์ของระบบอินเวอร์เตอร์ในเครื่องปรับอากาศและจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบนั้นต่ำลง ถ้าไม่มีการควบคุมค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ โดยมีมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมค่าฮาร์มอนิกของอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าคือมาตรฐาน IEC/EN 61000-3-2

5.1.1 การศึกษาประเภทของวงจรเรียงกระแสสามเฟส

ซึ่งจากการศึกษาพบความพบว่าวิธีการลดค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้นมีด้วยกัน 3 วิธีคือ 1) วิธีแบบ Passive ซึ่งจะใช้อุปกรณ์แบบ Passive ที่ไม่ต้องอาศัยตัวควบคุมในการทำงานเข้ามาช่วย 2) วิธีแบบ Hybrid ซึ่งจะใช้อุปกรณ์แบบ Passive ทำงานร่วมกับอุปกรณ์สวิตซ์ 3) วิธีแบบ Active PFC ซึ่งจะใช้อุปกรณ์สวิตซ์ที่ต้องอาศัยตัวควบคุมในการสั่งการทำงาน โดยที่วิธีแบบ Passive และ Hybrid นั้นมีข้อดีคือมีการทำงานที่งานไม่ซับซ้อนแต่มีข้อเสียคือจะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานในระบบอินเวอร์เตอร์ของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งวิธีแบบ Active PFC นั้นมีข้อดีคือไม่ต้องใช้อุปกรณ์ Passive ที่มีขนาดใหญ่จึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้งานแต่วิธีการนี้จะต้องอาศัยการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยวงจรแบบ Active PFC ที่น่าสนใจและเลือกนำมาใช้คือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา (Vienna Rectifier) นอกจากจะเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Active PFC แล้วยังมีข้อดีคือเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสชนิดแรงดันสามระดับซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตรงคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์และตัวเก็บประจุนั้นมีค่าลดลง อีกทั้งยังเป็นวงจรที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้มากกว่าแหล่งจ่ายได้

5.1.2 การศึกษาวิธีการควบคุมวงจรรีเรียงกระแสสามเฟส

นอกจากนี้วิธีการควบคุมการทำงานก็เป็นสิ่งสำคัญจึงได้ศึกษาวิธีควบคุม 2 วิธีคือ 1) วิธีควบคุมแบบ Direct Power Control จะเป็นการควบคุมค่า reactive power ของระบบซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแส 2) วิธีควบคุมแบบ Current Control จะเป็นการควบคุมค่ากระแส reactive (I_q) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการทำให้เกิดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแส

5.1.3 การศึกษาวิธีการมอดูเลชันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา

เนื่องจากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนานั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้ในการทำงานจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์เหล่านั้น โดยศึกษาวิธีการมอดูเลชันที่ใช้สำหรับควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ทั้งหมด 3 วิธีคือ 1) วิธี Carrier-Based Phase-Shift Pulse Width Modulation เป็นการใช้อนุสัญญาสามเหลี่ยมในการมอดูเลชัน 2) สัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา 2) วิธี Carrier-Based Level-Shift Pulse Width Modulation เป็นการใช้อนุสัญญาสามเหลี่ยมในการมอดูเลชัน 2 สัญญาณที่มีการเลื่อนระดับกัน 3) วิธี Space Vector Pulse Width Modulation เป็นการหาเวกเตอร์ของแรงดันอ้างอิงเพื่อนำมาคำนวณหาช่วงเวลาในการสวิตช์และกำหนดลำดับการสวิตช์

5.1.4 จำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบวิธีการควบคุมและมอดูเลชัน

โดยวิธีควบคุมและวิธีมอดูเลชันที่กล่าวมานั้นได้ทำการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยวิธีควบคุมแบบ Direct Power Control กับวิธีมอดูเลชันแบบ Carrier-Based Phase-Shift PWM ให้ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสต่ำสุดที่ 7.77% (อ้างอิงบทความในภาคผนวก ก และภาคผนวก ข) ซึ่งค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสตัวยังมีค่าที่สูงจึงได้ทำการศึกษาวิธีการมอดูเลชันเพิ่มเติมคือวิธีแบบ Center-Aligned Space Vector Pulse Width Modulation เป็นวิธีที่ช่วยให้การคำนวณค่าเวลาการสวิตช์และการกำหนดลำดับการสวิตช์ของ Space Vector PWM มีความง่ายยิ่งขึ้นโดยทำงานร่วมกับวิธีควบคุมแบบ Current Control ซึ่งสามารถลดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสให้เหลือเพียง 2.28% (อ้างอิงบทความในภาคผนวก ค)

5.1.5 ทดสอบการทำงานของวงจรกับโหลดตัวต้านทาน

ดังนั้นจึงนำวิธีการดังกล่าวนำมาทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงานและการทดสอบจริง โดยทำการทดสอบกับโหลดตัวต้านทานพิกัด 1kW พบว่าวงจรสามารถลดทอนค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสให้มีค่าเป็น 2.64% และสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตและควบคุมให้คงที่ 500V_{dc} และสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้เป็น 0.9986

5.1.6 การเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC กับ โหลดมอเตอร์

ได้ทำการทดสอบกับโหลดมอเตอร์ที่พิกัด 1.3kW เพื่อทำการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ Passive และแบบ Active PFC พบว่าการลดทอนค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสที่วงจรแบบ Active PFC มีค่าเพียง 1.550% และสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ถึง 0.9997 อีกทั้งยังสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตให้

คงที่ได้ที่ $500V_{dc}$ และมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 96% ซึ่งสามารถลดทอนค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าวงจรแบบ Passive อย่างชัดเจน จากผลการทดสอบทั้งหมดนั้นสามารถยืนยันได้ว่าวงจรเรียงกระแสสามแบบเวียนนาที่ใช้วิธีการควบคุมแบบ Current Control และวิธีการมอดูเลชั่นแบบ Center-Aligned Space Vector Pulse Width Modulation สามารถช่วยลดทอนค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้ผ่านมาตรฐาน IEC/EN 61000-3-2 ได้

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

จากการจำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB/Simulink พบปัญหาในการปรับค่าตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งถ้าหากปรับค่าตัวควบคุม PI ไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อการควบคุมการทำงานทำให้ไม่สามารถลดทอนค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ และจากการทดลองกับวงจรต้นแบบนั้นพบปัญหาคือวงจรไม่สามารถควบคุมได้และให้ผลไม่เหมือนกับการจำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB/Simulation อันเนื่องจากการปรับค่า gain ของเซ็นเซอร์จึงส่งผลให้ค่าที่ controller รับไปค่านวนนั้นไม่ถูกต้องทำให้การควบคุมการทำงานผิดพลาดซึ่งแก้ปัญหาโดยการหาค่า gain ที่ถูกต้อง

5.3 งานวิจัยในอนาคต

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาวงจรเรียงกระแสสามเฟสซึ่งเลือกใช้วงจรเรียงกระแสแบบเวียนนา ในการทดลอง แต่วงจรเรียงกระแสสามเฟสนั้นยังมีอีกหลายประเภทที่น่าสนใจเช่นวงจรประเภท Y-Switch หรือ Delta-Switch อีกทั้งด้านวิธีการควบคุมก็มีวิธีที่น่าสนใจเช่น การควบคุมแบบ sliding mode control หรือการควบคุมแบบ predictive control เป็นต้น

บรรณานุกรม

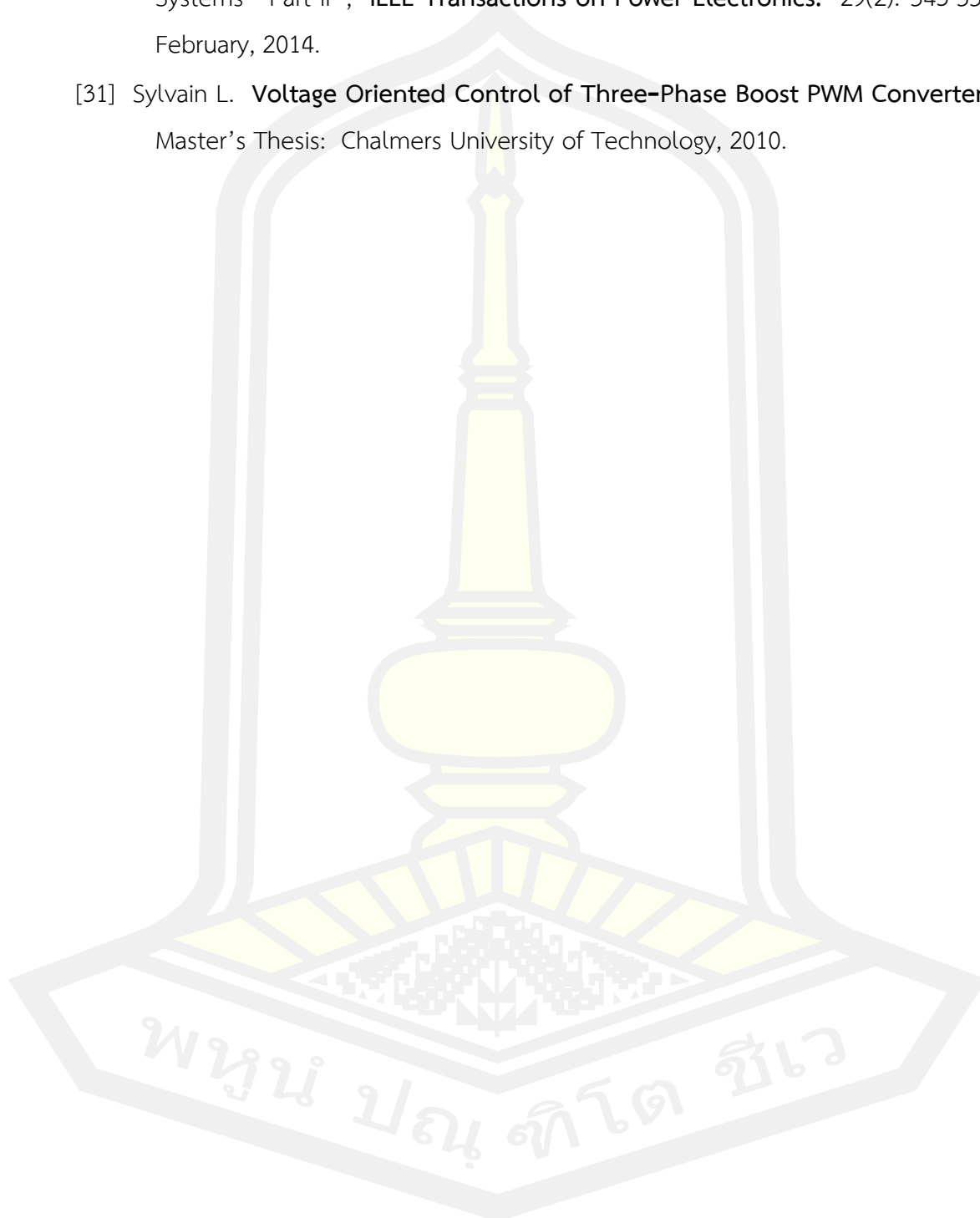


- [1] Bengi T. **Space Vector Pulse Width Modulation for Three-Level Converters**.
Master's Thesis: Uppsala Universitet, 2012.
- [2] J. W. Kolar and Thomas Friedli. "The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems—Part I", **IEEE Transactions on Power Electronics**. 28(1):176-198; January, 2013.
- [3] J. W. Kolar. **The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems**. Swiss Federal Institute of Technology (ETH): Zurich, 2012.
- [4] Jiajun L. and Wenlong D. "A Control Scheme of the VIENNA Rectifier With Unbalanced Grid Voltage", in **Chinese Automation Congress (CAC)**, p.6263-6267. Jinan: IEEE, 2017.
- [5] Rixin L. and Fei W. "Average Modeling and Control Design for VIENNA-Type Rectifiers Considering the DC-Link Voltage Balance", **IEEE Transactions on Power Electronics**. 24(11): 2509-2521; November, 2009.
- [6] Sean C. **Theory Simulation, and Implementation of Grid Connected Back to Back Converters Utilizing Voltage Oriented Control**. Master's Thesis: The University of Wisconsin-Milwaukee, 2017.
- [7] Ligao H. and Xinbing C. "A Neutral Point Potential Balance Control Strategy Based on Vector Controlled VIENNA Rectifier", in **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. p.2060-2065. Atlanta: IEEE, 2010.
- [8] Jiajun L. and Wenlong D. "Neutral-Point Voltage Balance Control and Oscillation Suppression for VIENNA Rectifier", in **IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)**. p.1275-1279. Kaohsiung: IEEE, 2017.
- [9] Xing L. and Yao S. "A Hybrid Control Scheme for Three-Phase Vienna Rectifiers", **IEEE Transactions on Power Electronics**. 33(1): 629-640; January, 2018.
- [10] June-Seok L. and Kyo-Beum L. "A Novel Carrier-Based PWM Method for Vienna Rectifier With a Variable Power Factor", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 63(1): 3-12; January, 2016.
- [11] Hui M. and Yunxiang X. "Improved direct power control for Vienna-type rectifiers based on sliding mode control", **IET Power Electronics**. 9(3):427-434; July, 2015.

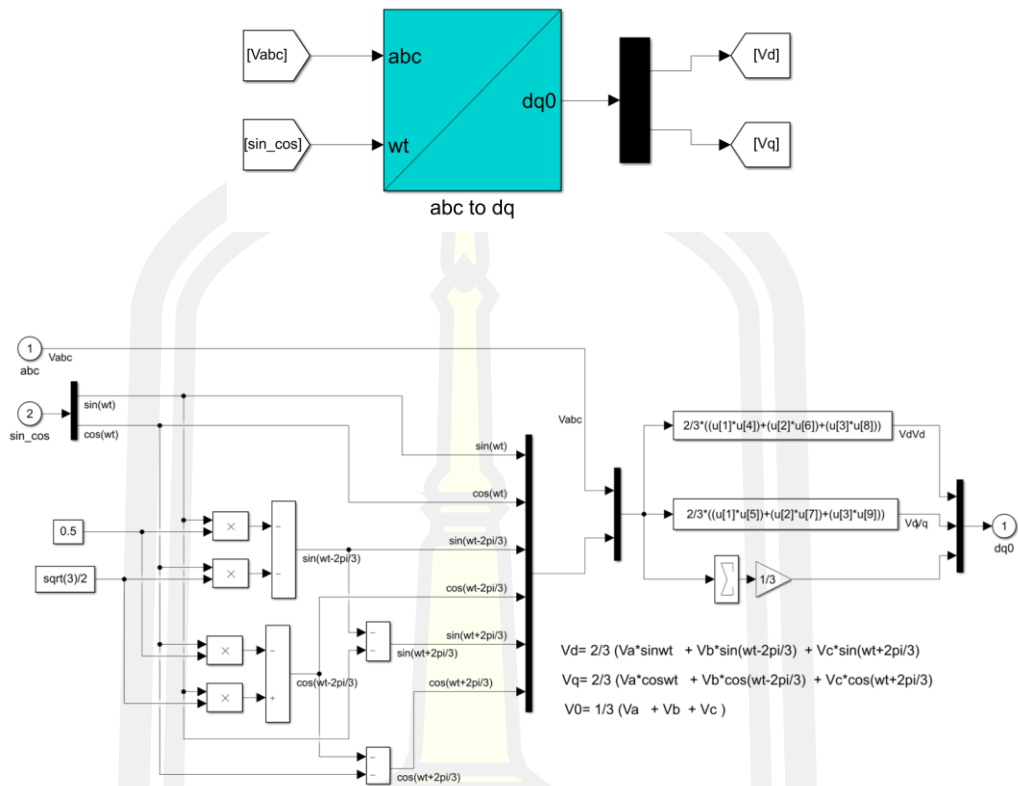
- [12] Milosz M. and Arnstein J. **A Three-Level Space Vector Modulation Strategy for Two-Level Parallel Inverters.** Master's Thesis: Institute of Energy Technology, 2009.
- [13] Abhinav D. and T Bhargav R. "A Simplified Space -Vector Pwm For Three Level Inverters Applied To Passive And Motor Load" , **International Journal of Science Engineering and Advance Technology.** 2(8): 268-275; August,2014.
- [14] Hui M. and Yunxiang X. "Voltage Balance Control of Vienna-Type Rectifier Using SVPWM Based On 60° Coordinate System" , in **International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).** p.3187-3191. Hangzhou:IEEE, 2014.
- [15] Vieri X. **Center-Aligned SVPWM Realization for 3-Phase 3-Level Inverter.** Texas: Texas Instruments, 2012.
- [16] Jae Hyeong S. and Chang Ho C. "A New Simplified Space-Vector PWM Method for Three-Level Inverters" , **IEEE Transactions on Power Electronics.**16(4): 545-550; July, 2001.
- [17] Analog Devices Inc. **Implementing Space Vector Modulation with the ADMC401.** Massachusetts: Analog Devices Inc, 2000.
- [18] Hui M. and Yunxiang X. "Neutral-Point Balancing Control of Vienna-type rectifier based on Correlation between Carrier-based PWM and SVM" , in **18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).** p.547-552. Pattaya City: IEEE, 2015.
- [19] Hui M. and Yunxiang X. "Modeling and Direct Power Control Method of Vienna Rectifiers Using the Sliding Mode Control Approach" , **Journal of Power Electronics.** 15(1): 190-201; January, 2015.
- [20] J. W. Kolar and Uwe D. "Comparison of Not Synchronized Sawtooth Carrier and Synchronized Triangular Carrier Phase Current Control for the VIENNA Rectifier I" , in **ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics.** p.13-19. Slovenia: IEEE, 1999.

- [21] Wenlong D. and Chenghui Z. “ A Zero-Sequence Component Injection Modulation Method With Compensation for Current Harmonic Mitigation of a Vienna Rectifier”, **IEEE Transactions on Power Electronics.** 34(1): 801-814; January, 2019.
- [22] Houjian X. and Wenxi Y. “ Improved SVPWM Schemes for Vienna Rectifiers without Current Distortion” , in **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).** p.3410-3414. Ohio: IEEE, 2017.
- [23] Texas Instruments. **Vienna Rectifier-Based Three-Phase Power Factor Correction (PFC) Reference Design Using C2000™ MCU.** Texas: TexasInstruments, 2018.
- [24] Jinping W. and Yan G. “A Carrier-Based Implementation of Virtual Space Vector Modulation for Neutral-Point-Clamped Three-Level Inverter” , **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS.** 64(12) : 9580-9586; December, 2017.
- [25] Uros B. **Analysis and Comparison of Different Active Rectifier Topologies For Avionic Specifications.** Master’ s Thesis: Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [26] Wenxi Y. “ Comparisons of Space-Vector Modulation and Carrier-Based Modulation of Multilevel Inverter”, **IEEE Transactions on Power Electronics.** 23(1): 45-51; January, 2008.
- [27] Bin W. **HIGH-POWER CONVERTERS AND AC DRIVES.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [28] Er-Jie Q. and Zhan L. “Modelling and Control of Single Phase VIENNA Rectifier”, in **International Conference on Industrial Informatics.** p.286-289. Wuhan: IEEE, 2016.
- [29] Rolando B. and Rixin Lai. “Space Vector Modulator for Vienna-Type Rectifiers Based on the Equivalence Between Two- and Three-Level Converters: A Carrier-Based Implementation” , **IEEE Transaction on Power Electronics.** 23(4): 1888-1898; July, 2008.

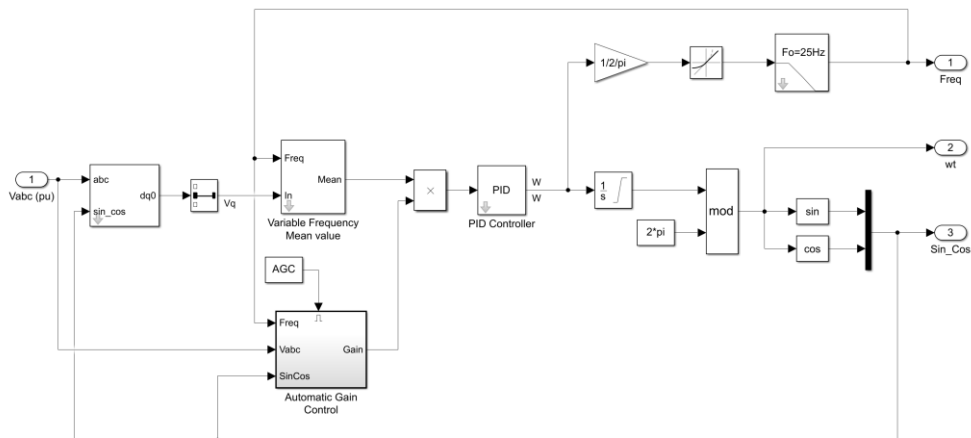
- [30] Thomas F. and J. W. Kolar. “ The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems—Part II”, *IEEE Transactions on Power Electronics*. 29(2): 543-559; February, 2014.
- [31] Sylvain L. **Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost PWM Converters**. Master’s Thesis: Chalmers University of Technology, 2010.



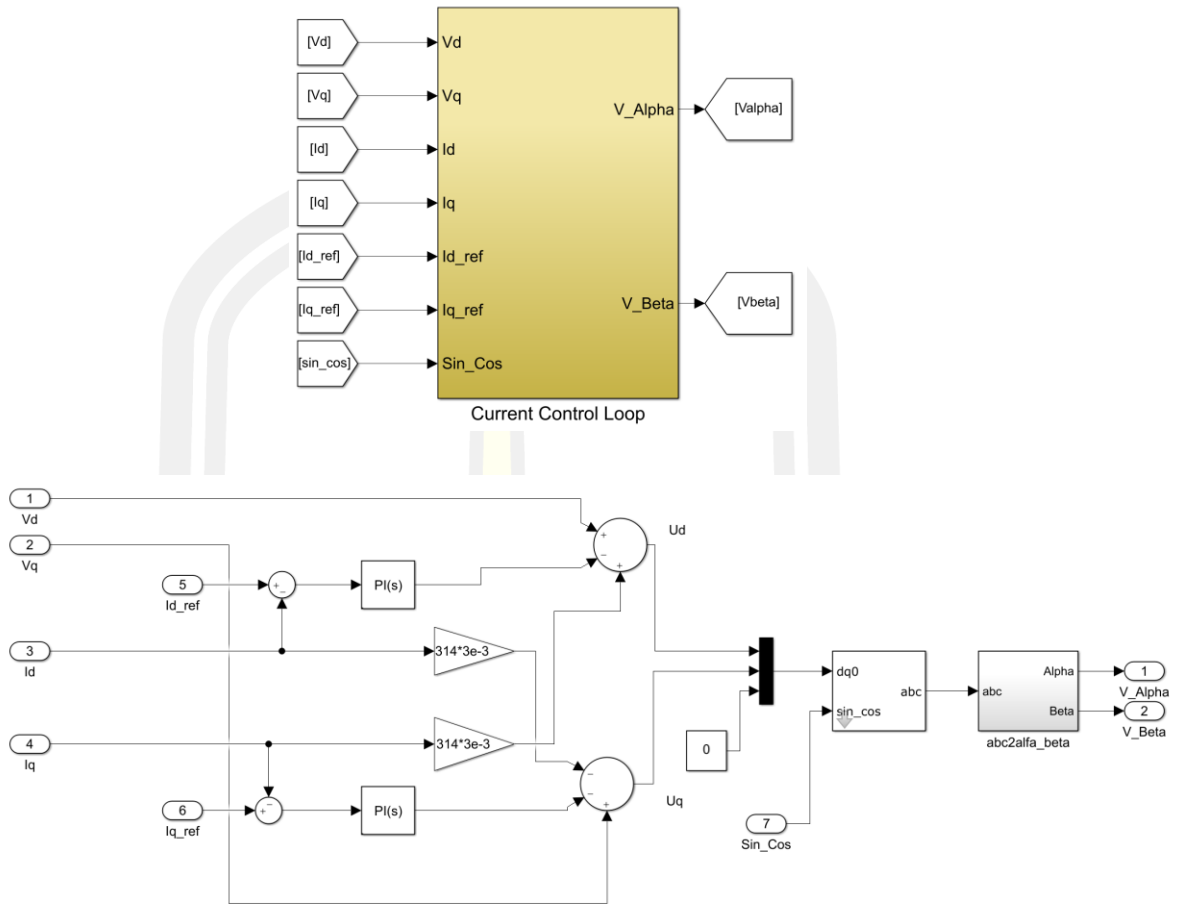




ภาพที่ 1 การแปลงจากระบบ 3 เฟสเป็น Rotating Frame โดยใช้การแปลง Clark และ Park

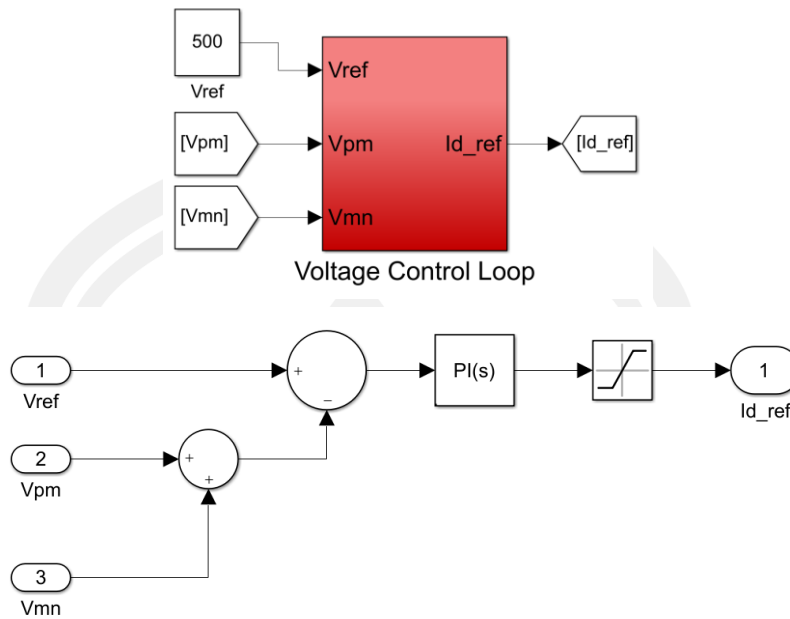


ภาพที่ 2 การหามุมจาก Phase Lock Loop

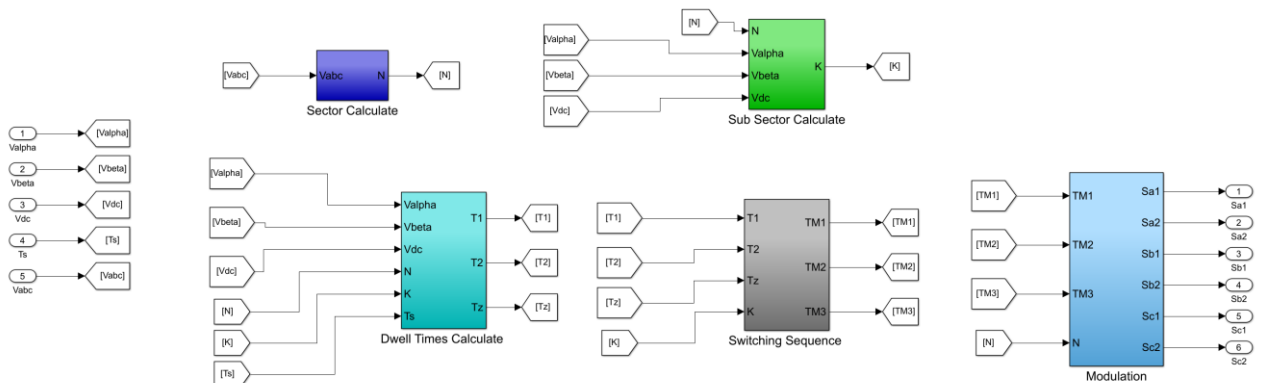
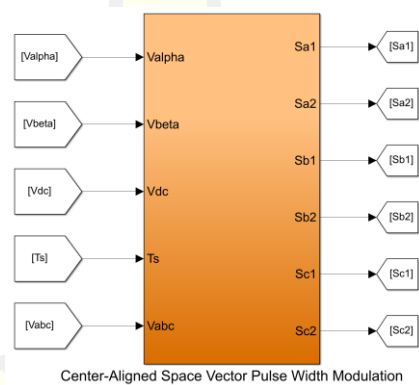


ภาพที่ 3 Current Control Loop

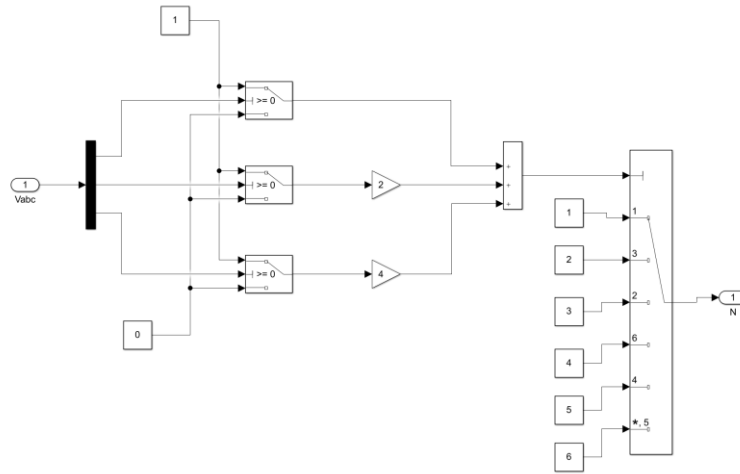
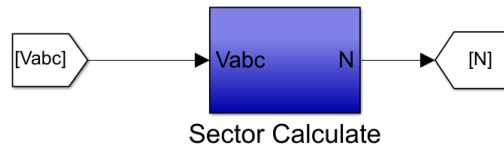
พหุบัณฑิต ชีวะ



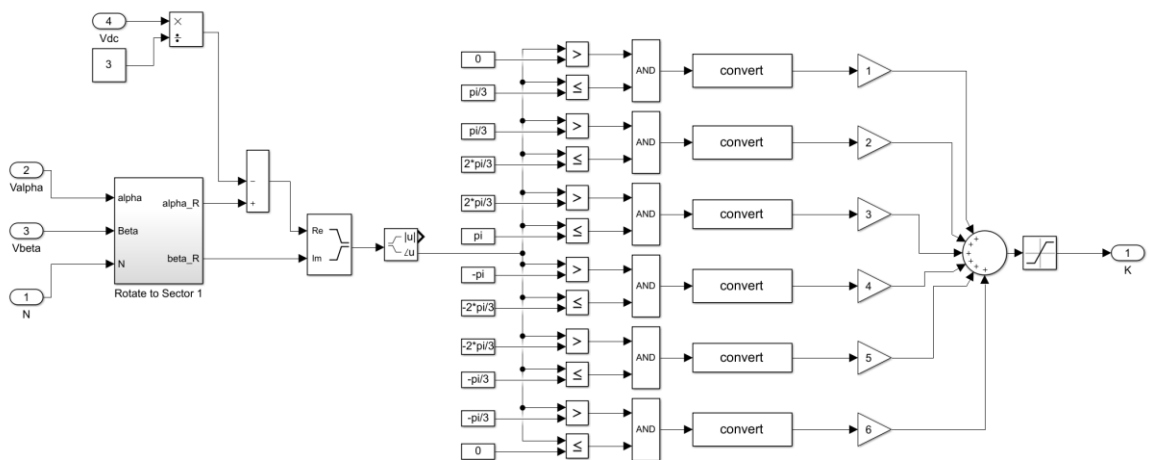
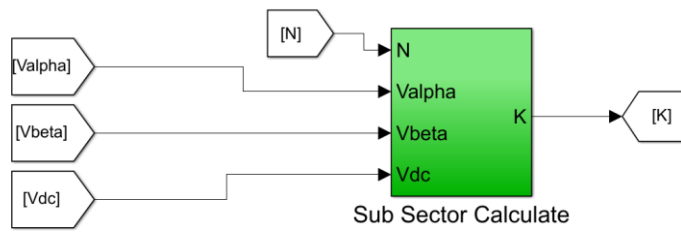
ภาพที่ 4 Voltage Control Loop



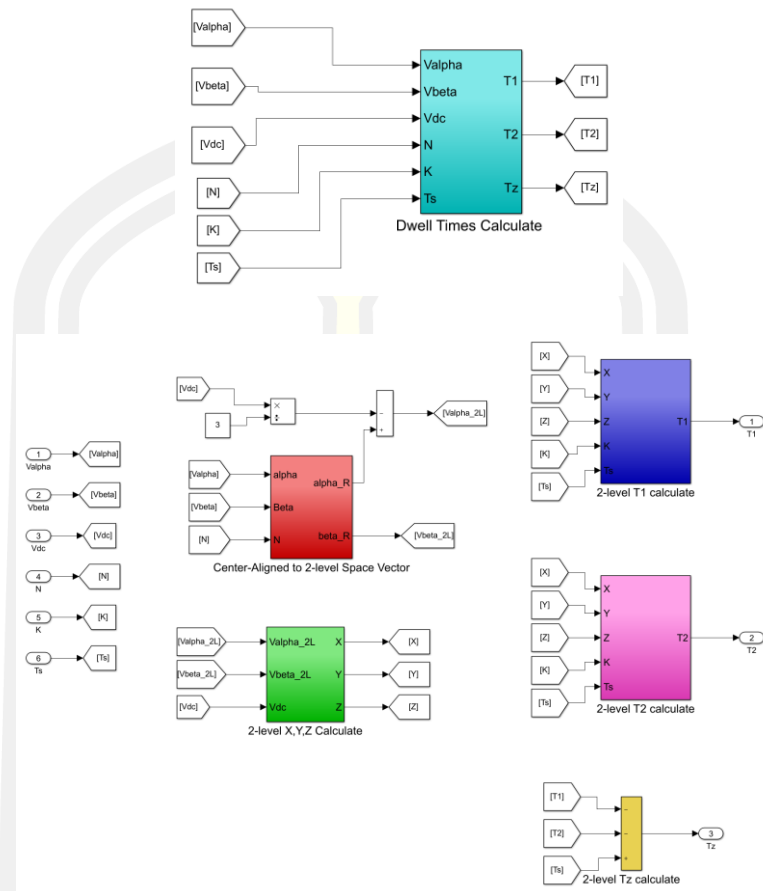
ภาพที่ 5 Center-Aligned Space Vector Pulse Width Modulation



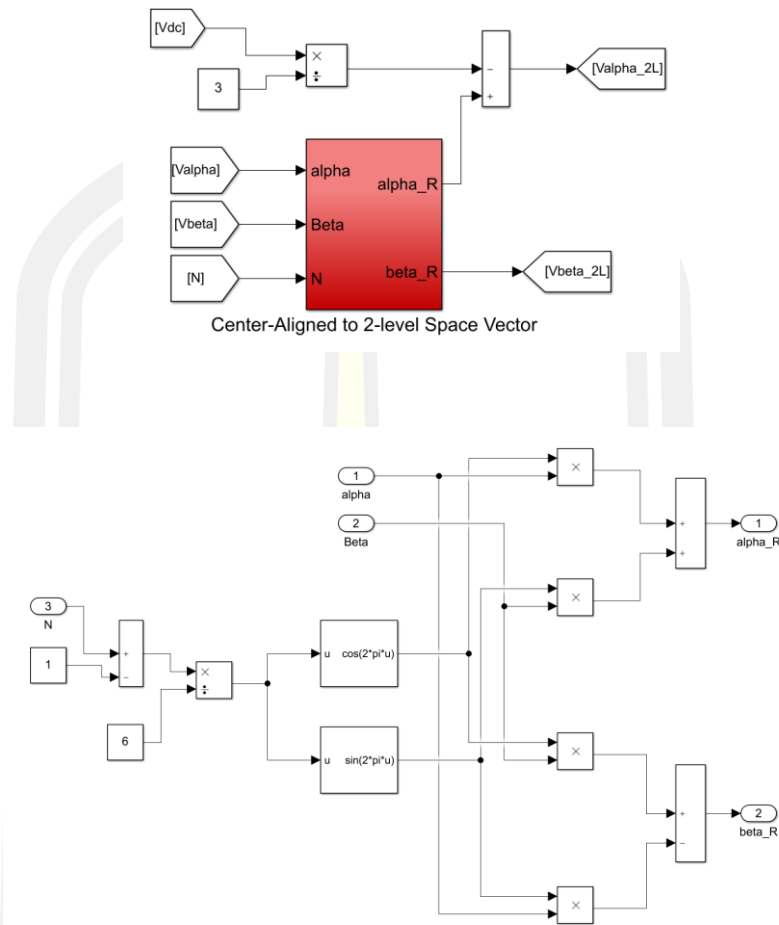
ภาพที่ 6 Sector Calculate



ภาพที่ 7 Sub Sector Calculate

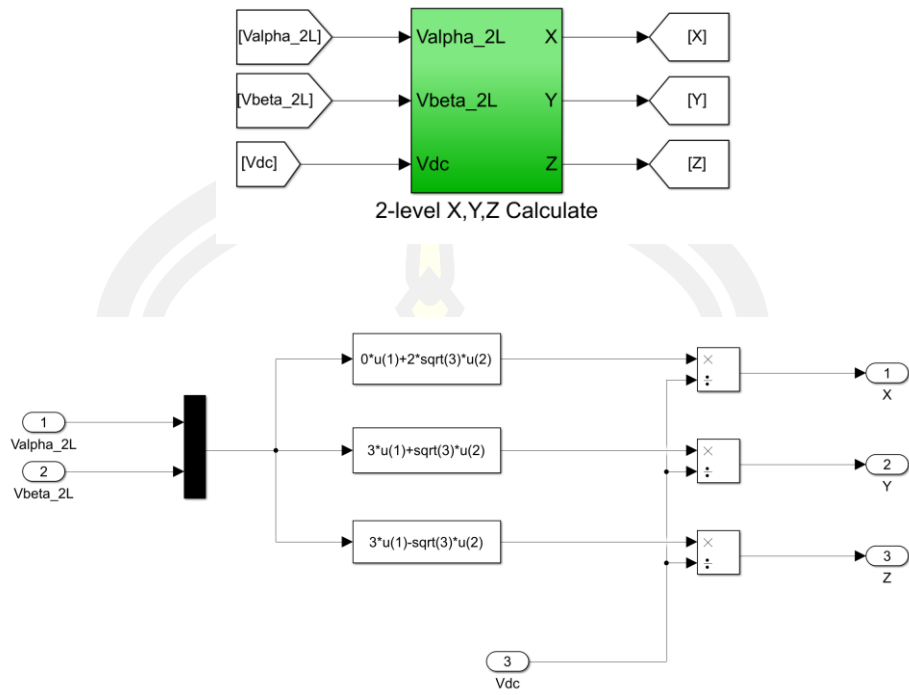


ภาพที่ 8 Dwell Times Calculate

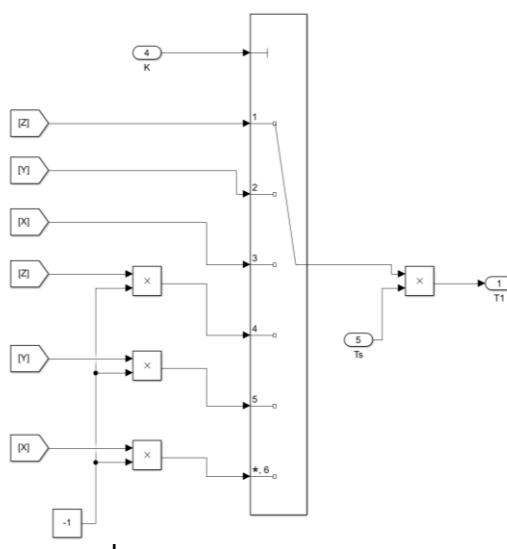
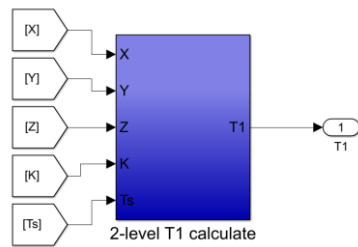


ภาพที่ 9 Center-Aligned to 2-level Space Vector

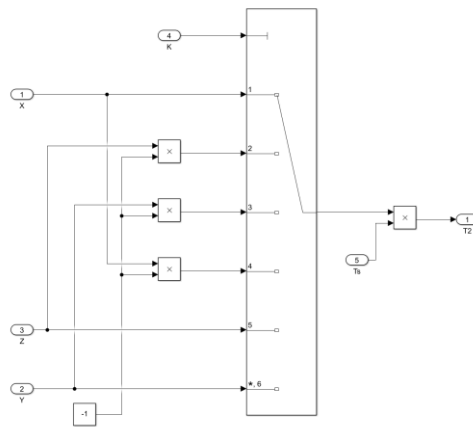
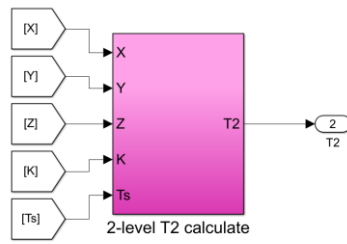




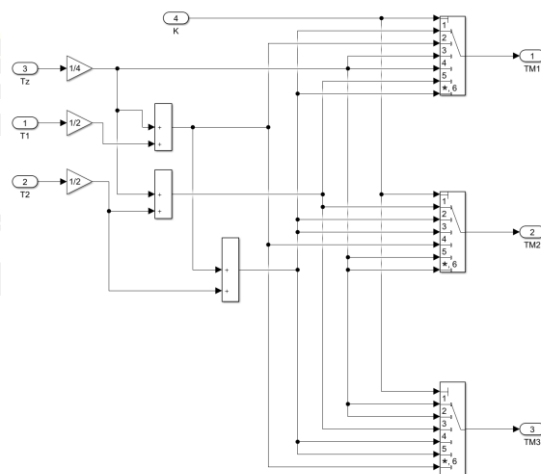
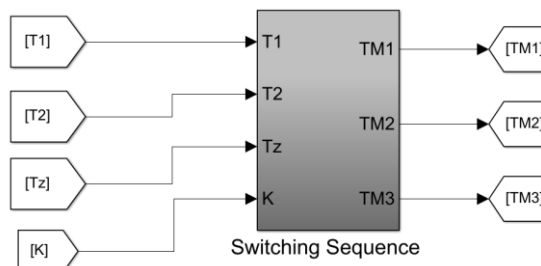
ภาพที่ 10 2-level X,Y,Z Calculate



ภาพที่ 11 2-level T1 Calculate



ภาพที่ 12 2-level T2 Calculate



ภาพที่ 13 Switching Sequence

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายกันตภณ พรหมนิกร
วันเกิด	6 กรกฎาคม 2516
สถานที่เกิด	จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	282 ถนน รณชัยชาญยุทธ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด 45000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2542 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.) อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันราชภัฏอุบลราชธานี พ.ศ. 2550 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.) วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2566 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทัต ชีเว