



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2558

รายงานฉบับสมบูรณ์

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้ง
ตามแนวแกนเพลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน
และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

(รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A11802005)

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



สนับสนุนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป (เงินงบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ 2558

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

มีนาคม 2559

สนับสนุนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป (เงินงบประมาณแผ่นดิน)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2558



รายงานฉบับสมบูรณ์

รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A11802005

ชื่อโครงการ

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้ง
ตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน
และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

Three Phase Four Wire Grid Connected Wind Turbine Axial Flux
Generator System with Active Power Filter and Var
Compensation Functionality for Nonlinear Loads

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ผู้ร่วมโครงการ

อาจารย์ ศักดา พรหมเหมือน

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน



อาจารย์ พูนศรี วรรณการ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



อาจารย์ อัครกิตต์ ไชยธนกุลวัฒน์

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ



มีนาคม 2559

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับสมบูรณ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นภายใต้รหัสข้อเสนอ 2558A11802005 ในชื่อโครงการ “ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อน โดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์โมนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น” ซึ่งเป็นโครงการวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป(เงินงบประมาณแผ่นดิน)ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

คณะที่วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้จัดสรรเงินอุดหนุนการวิจัยมายังสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการจัดทำโครงการนี้ขึ้นมา

สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ ที่ให้การสนับสนุน และอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ทั้งด้านสถานที่ เครื่องมือต่างๆ เพื่อใช้ในการดำเนินโครงการดังกล่าว และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ได้เอื้อเฟื้อบุคลากรมาร่วมทำวิจัยในโครงการนี้ และขอขอบคุณนายวัชรินทร์ พรหมคุณ ที่ช่วยเหลือทางด้านซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์จนโครงการดังกล่าวสำเร็จจุลวง

คณะที่วิจัย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสร้าง และพัฒนาระบบเชื่อมต่อกรีด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมระบบทั้งหมด โดยอาศัยเทคนิคการชดเชยกระแสกริดด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีพี-คิวที่อยู่ในเทอมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่กริดกับโหลด เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดจ่ายแรงดันโดยมีการทำงานหลายหน้าที่ กล่าวคือ การส่งถ่ายพลังงานทดแทนที่ได้จากพลังงานลมเข้ากับระบบกริด 3 เฟส 4 สายกำจัดฮาร์มอนิก และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับกริดและโหลดไม่เชิงเส้น โดยได้มีการจำลองออกแบบระบบทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จากนั้นได้ทำการออกแบบวงจรฮาร์ดแวร์ที่ใช้ แล้วสร้างเป็นเครื่องต้นแบบในการนำไปใช้ทดสอบการทำงานของระบบที่นำเสนอ ขับเคลื่อนโดยกังหันลม 3 ใบพัดที่สถานที่ติดตั้งจริง มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี จังหวัดสมุทรปราการ โดยจากการทดสอบระบบที่นำเสนอสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟไปยังระบบกริด 3 เฟส 4 สาย และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับกริดและโหลดไม่เชิงเส้นที่ต่อร่วมกับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย โดยมีการกำจัดฮาร์มอนิกซึ่งทำให้มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบระบบต้นแบบนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ : กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ กำลังไฟฟารีแอกทีฟ อินเวอร์เตอร์สามเฟส ฮาร์มอนิก

ABSTRAC

This research project presents the design, implementation and development of a three-phase four wire grid connected wind turbine axial flux generator system with active power filter and var compensation functionality for nonlinear loads using a microcontroller for controlling the whole system. A reference current control technique is based on P - Q theory in terms of real power and reactive power at load and to generate PWM signals for controlling a three-phase voltage source inverter with multi-functionality, namely power transfer from wind energy to the three-phase four wire grid, harmonic current elimination and var compensation for nonlinear loads. The proposed system is simulated by using the program MATLAB/SIMULINK. Then, the hardware circuit is designed. A prototype is constructed in order to test the functionality of the proposed system driven by the three blades wind turbine at Dhonburi Rajabhat university samut prakam province. From the testing, the proposed system can transfer active power and reactive power to three-phase four wire grid system and nonlinear loads connected to the three-phase four wire grid. Total harmonic distortion is low. Testing results show satisfactory performances of the prototype.

Keywords: Active power, Reactive power, Three phase inverter, Harmonic

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 รายละเอียดวิธีการและแผนการดำเนินโครงการ	4
บทที่ 2 การออกแบบกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์	9
2.1 บทนำ	9
2.2 สมการกำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลม	9
2.3 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดต่อเฟส	13
2.4 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส แบบ AFPM	14
2.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์	14
2.6 บทสรุป	18
บทที่ 3 โหลดไม่เชิงเส้น	19
3.1 บทนำ	19
3.2 ฮาร์มอนิกและความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม	19
3.3 โหลดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด	22
3.4 โหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่น ต่อในระบบ 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว	23
3.5 โหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว	26
3.6 โหลดไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	27
3.7 โหลดอินเวอร์เตอร์สามเฟสขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	30
3.8 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส	32
3.9 บทสรุป	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตาม แนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชย กำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น	33
4.1 บทนำ	33
4.2 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์	34
4.3 หลักการชดเชยกระแสกริดและการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมกระแส อ้างอิง	35
4.4 การคำนวณหาสัญญาณกระแสอ้างอิง	37
4.5 บทสรุป	40
บทที่ 5 การจำลองและผลการจำลอง	41
5.1 บทนำ	41
5.2 การจำลองการทำงานของกังหันลม	41
5.3 การจำลองการทำงานของวงจรชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงป้อนไป ยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	44
5.4 การจำลองสมรรถนะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ตามระบบที่นำเสนอ	47
5.5 บทสรุป	56
บทที่ 6 การออกแบบวงจร และการสร้างฮาร์ดแวร์	59
6.1 บทนำ	59
6.2 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน	59
6.3 การออกแบบวงจรขับเคลื่อน วงจรประวิงเวลา และการต่อขาสัญญาณของ ไมโครคอนโทรลเลอร์	62
6.4 ลายทองแดง ภาพสามมิติ และภาพถ่ายของวงจรที่ได้ออกแบบ	64
6.5 บทสรุป	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 ผลการทดสอบ	75
7.1 บทนำ	75
7.2 การทดสอบโหลดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด	76
7.3 การทดสอบโหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นต่อในระบบ 3 เฟส 4 สาย แบบไดโอด 12 ตัว	77
7.4 การทดสอบโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว	78
7.5 การทดสอบโหลดทริสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	79
7.6 การทดสอบโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	80
7.7 การทดสอบกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ที่ติดตั้งในสถานที่จริง	81
7.8 การทดสอบวงจรบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูง	86
7.9 การทดสอบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้น แรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรอง ฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น	87
7.10 บทสรุป	103
บทที่ 8 สรุปและข้อเสนอแนะ	106
8.1 บทนำ	106
8.2 สรุปผลการวิจัย	106
8.3 ข้อเสนอแนะ	108
เอกสารอ้างอิง	109
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกความเร็วลม	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแสดงความก้าวหน้าของผลงานวิจัย ณ ช่วงรายงานเมื่อเทียบกับแผนงานวิจัยทั้งโครงการ ดำเนินการระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 31 มีนาคม 2559	5
1.2 เป้าหมายผลงานในแต่ละช่วงเวลา	7
2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส แบบ AFPM	14
3.1 สรุปผลการทดสอบหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม(THD _i) ที่โหลดไม่เชิงเส้น 5 รายการ	21
3.2 สรุปผลการจำลองหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม(THD _i) ที่โหลดไม่เชิงเส้น 5 รายการ	32
5.1 พารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการจำลองระบบ	49
7.1 การทดสอบหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม(THD _i)ของโหลดไม่เชิงเส้นชนิดต่างๆ จำนวน 5 รายการ	103
7.2 การทดสอบระบบเชื่อมต่อกริดที่นำเสนอ	104

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิดต่างๆ	1
1.2 ซ้าย: เครื่องจักรกลชนิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามแนวรัศมี ขวา: เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา	2
1.3 ส่วนประกอบของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าให้การไฟฟ้าพร้อมโหลดชนิดไม่เชิงเส้น	2
1.4 ภาพรวมของระบบที่นำเสนอ	4
2.1 ลักษณะใบพัดกังหันลมและใบพัดทางเสือที่ออกแบบที่ทาสีขาวนำมาตากแดดให้แห้ง	12
2.2 ลักษณะทางเสือกังหันลมที่ออกแบบ	12
2.3 แกนเหล็กใช้ติดตั้งใบพัดทางเสือและใช้ติดตั้งกับเครื่องกำเนิดไฟสลับ 3 เฟส แบบ AFPM	13
2.4 การวางแท่งแม่เหล็กจำนวน 16 แท่งลงบนแผ่นจานเหล็กหมุนทั้ง 2 แผ่น	14
2.5 การวางขดลวดสเตเตอร์จำนวน 12 ขดลงบนแผ่นไม้ที่เคลือบด้วยสารผสมเรซิน	15
2.6 การต่อขดลวดจำนวน 12 ขด ให้ได้ไฟสลับออกมาเท่ากับ 3 เฟสต่อเข้ากับ วงจรเรียงกระแสไฟสลับ 3 เฟสแปลงเป็นไฟตรง	15
2.7 ท่อเหล็กจำนวน 2 ท่อนที่นำมาต่อกันใช้ทำเสากังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์	16
2.8 กังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ ที่ติดตั้งจริง ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ	16
2.9 ทิวทัศน์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ	17
3.1 รูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบของกระแสที่ ความถี่หลักมูล และกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3	20
3.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด	22
3.3 รูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบ ไดโอด	22
3.4 สเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด	23
3.5 การนำคอมพิวเตอร์ 1 เฟส มาต่อใช้งานในระบบไฟฟ้าสามเฟส 4 สาย	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.6	วงจรรีจิงกระแส 1 เฟสแบบไดโอดที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว	24
3.7	รูปคลื่นแรงดันเฟส กระแสในสาย ที่ไหลไปยังโหลดวงจรรีจิงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟส ที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย แบบไดโอด 12 ตัว	25
3.8	สเปกตรัมกระแสในสายที่ไหลไปยังโหลดวงจรรีจิงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟส ที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย แบบไดโอด 12 ตัว	25
3.9	กระแสที่ไหลไปยังสายนิวตรอนของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย	25
3.10	วงจรรีจิงกระแสสามเฟสแบบไดโอด 6 ตัว	26
3.11	แรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรรีจิงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว	26
3.12	สเปกตรัมกระแสในสายของวงจรรีจิงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว	27
3.13	วงจรรีจิงกระแส 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	27
3.14	สัญญาณชีพของตัวรีจิงกระแสของวงจรรีจิงกระแส 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	28
3.15	รูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรรีจิงกระแส 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	29
3.16	สเปกตรัมกระแสในสายของวงจรรีจิงกระแส 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	29
3.17	โหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	30
3.18	รูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	31
3.19	รูปสเปกตรัมกระแสในสายของโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	31

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.1	การทำงานคอนเวอร์เตอร์หลายหน้าที่	34
4.2	การหาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟอ้างอิง	38
5.1	ความสัมพันธ์ของอัตราความเร็วปลายใบพัด(λ) กับสัมประสิทธิ์กำลัง(C_p) ที่มุม บิดใบพัด β เท่ากับ 0 องศา	41
5.2	ความสัมพันธ์ของอัตราความเร็วปลายใบพัด(λ) กับสัมประสิทธิ์แรงบิด(C_t) ที่มุม บิดใบพัด β เท่ากับ 0 องศา	42
5.3	ความสัมพันธ์ของค่ามุมบิดใบพัด(β) ต่างๆ กับสัมประสิทธิ์กำลัง(C_p)	42
5.4	ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเพลลากังหัน (n) กับกำลังทางกลเอาต์พุตของ กังหันลม (P_m) ที่ความเร็วลมต่างๆ	43
5.5	ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเพลลากังหัน (n) กับแรงบิด (T_m) ที่ความเร็ว ลมต่างๆ	44
5.6	วงจรชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	44
5.7	วงจรจำลองชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	45
5.8	สัญญาณขั้วเกท G1 , G2 , G3 และ G4 ในวงจรจำลองชุดบูสต์แรงดันไฟตรง	45
5.9	ผลการจำลองจับสัญญาณแรงดันคอนเวอร์เตอร์	46
5.10	ผลการจำลองจับสัญญาณแรงดันด้านอินพุต	46
5.11	ผลการจำลองจับสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุต	46
5.12	องค์ประกอบของการควบคุมคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกริดไฟฟ้าระบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ทำงานหลายหน้าที่	47
5.13	ผลตอบสนองชั่วขณะของแรงดันและกระแสจุดต่างๆ	52
5.14	แถบสเปกตรัมของกระแสตามจุดต่างๆ (ก) กรณีที่ 1 , (ข) กรณีที่ 2	54
5.15	แถบสเปกตรัมของกระแสตามจุดต่างๆ (ก) กรณีที่ 3 , (ข) กรณีที่ 4	55
5.16	ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟตามจุดต่างๆ	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1	วงจรถรวจจับกระแสโดยใช้ Current Transducer แบบ Hall Effect 59
6.2	วงจรถรวจจับแรงดันไฟสลับโดยใช้ Isolation Amplifier เป็นตัวแยกกราวนด์ของสัญญาณควบคุมและวงจรถรวจกำลัง 60
6.3	วงจรถรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงโดยใช้ Isolation Amplifier เป็นตัวแยกกราวนด์ของสัญญาณควบคุมและวงจรถรวจกำลัง 61
6.4	วงจรถรวจที่สามารส่งใช้งานและหยุดใช้งานสัญญาณขับเกตได้ 62
6.5	วงจรถรวจเวลา (Deadtime) 63
6.6	การเชื่อมต่อสัญญาณเข้าและออกของไมโครคอนโทรลเลอร์ 63
6.7	ลายทองแดงด้านล่างของวงจรถรวจระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น 64
6.8	ภาพสามมิติของวงจรถรวจระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น 65
6.9	ลายทองแดงด้านล่างของวงจรถรวจ IPM Module เบอร์ PM25RSB120 66
6.10	ลายทองแดงด้านบนของวงจรถรวจ IPM Module เบอร์ PM25RSB120 67
6.11	ลายทองแดงด้านบนและด้านล่างของวงจรถรวจ IPM Module เบอร์ PM25RSB120 68
6.12	ภาพสามมิติของวงจรถรวจ IPM Module เบอร์ PM25RSB120 69
6.13	การ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมระบบเบอร์ TMS320F28335 70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
6.14	บอร์ดด้านหน้าของวงจรควบคุม	70
6.15	ลายทองแดงของบอร์ดวงจรควบคุม	71
6.16	ตัวเหนี่ยวนำต่อเฟสเชื่อมต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย ขนาด 12mH พิกัดกระแส 10A	71
6.17	ตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงเชื่อมโยง	72
6.18	Intelligent Power Module (IPM) เบอร์ PM25RSB120	72
6.19	บอร์ดวงจรขับเคลื่อนของ IPM เบอร์ PM25RSB120	73
6.20	ฮาร์ดแวร์ของวงจร DC-DC converter	73
7.1	ชุดต้นแบบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรง แม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิก ไวงาน	75
7.2	ผลการทดสอบจับรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสเต็ม คลื่น 1 เฟสแบบไดโอด	76
7.3	ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบ ไดโอด	76
7.4	ผลการทดสอบจับรูปคลื่นแรงดันเฟส กระแสในสาย ที่ไหลไปยังโหลดวงจรเรียง กระแสเต็มคลื่น 1 เฟส ที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 สาม 4 สาย แบบไดโอด 12 ตัว สเกลแรงดัน : 200V/div, สเกลกระแส : 5A/div	77
7.5	ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายที่ไหลไปยังโหลดวงจรเรียงกระแสเต็ม คลื่น 1 เฟสที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย แบบไดโอด 12 ตัว	77
7.6	ผลการทดสอบจับแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็ม คลื่นแบบไดโอด 6 ตัว สเกลแรงดัน : 200V/div, สเกลกระแส : 5A/div	78
7.7	ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่น แบบไดโอด 6 ตัว	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.8 ผลการทดสอบจับรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สเกลแรงดัน : 200V/div, สเกลกระแส : 10A/div	79
7.9 ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	79
7.10 ผลการทดสอบจับรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของโหลดระบบ ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สเกลแรงดัน : 200V/div, สเกลกระแส : 5A/div	80
7.11 ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายของโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	80
7.12 กังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ที่ติดตั้งในสถานที่จริง	81
7.13 เครื่องมือวัดความเร็วลมที่ติดตั้งบนดาตฟ้าของตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ	81
7.14 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไฟสลับ 3 เฟสของกังหันลม ที่ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 20 ms/div	82
7.15 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไฟสลับ 3 เฟสของกังหันลม ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 20 ms/div	82
7.16 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไฟสลับ 3 เฟสของกังหันลม ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 10 ms/div	83
7.17 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไฟสลับ 3 เฟสของกังหันลม ที่ความเร็วลม 3.5 เมตรต่อวินาที สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 5 ms/div	83
7.18 การทดสอบจับสัญญาณแรงดันไฟตรงที่ผ่านวงจรเรกติไฟร์ 3 เฟส	84
7.19 ข้อมูลความเร็วลมตามเวลาจริง เก็บผลเมื่อวันที่ 27 มกราคม 2559 ช่วงเวลา 14:40:27 ถึง 15:53:50 น.	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
7.20	ข้อมูลความเร็วลมตามเวลาจริง เก็บผลเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559 ช่วงเวลา 14:23:16 ถึง 15:20:10 น.	85
7.21	ข้อมูลความเร็วลมตามเวลาจริง เก็บผลเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559 ช่วงเวลา 15.30 น. ถึง 15.50 น.	85
7.22	ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสามเฟสที่ได้จาก กังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ ตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมในช่วงเวลา 15.30 น. ถึง 15.50 น. สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 2 Sec/div	86
7.23	วงจรบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูง	86
7.24	สัญญาณต่างๆ ทางด้านเอาต์พุตของวงจรบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูง สเกลแรงดัน 500 V/div ; สเกลกระแส 5 A/div	87
7.25	วงจรกำลังของระบบที่นำเสนอ	87
7.26	การทดสอบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรง แม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิก ไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น	88
7.27	ค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่กริด สัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดกรณีที่ 1	89
7.28	ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแสกริดกรณีที่ 1	89
7.29	ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแสคอนเวอร์ เตอร์กรณีที่ 1	90
7.30	ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดกรณีที่ 1	90
7.31	แถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 1	90
7.32	สัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์ และกระแสโหลดกรณีที่ 1 โดยสเกลแรงดัน 500 V/div ; สเกลกระแส 5 A/div	91
7.33	สัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 1 โดยสเกลกระแสเท่ากับ 5 A/div	91
7.34	ค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่กริด สัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดกรณีที่ 2	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
7.35	ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสกริดกรณี 2	92
7.36	ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์กรณี 2	93
7.37	ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดกรณี 2	93
7.38	ค่ากระแสและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณี 2	93
7.39	สัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์และกระแสโหลดกรณี 2	94
7.40	สัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณี 2	94
7.41	ค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่กริด สัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดกรณี 3	95
7.42	ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสกริดกรณี 3	95
7.43	ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์กรณี 3	96
7.44	ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดกรณี 3	96
7.45	แถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณี 3	96
7.46	สัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์และกระแสโหลดกรณี 3	97
7.47	สัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณี 3	97
7.48	ค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่กริด สัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดกรณี 4	98
7.49	ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสกริดกรณี 4	98
7.50	ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์กรณี 4	99
7.51	ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดกรณี 4	99
7.52	แถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณี 4	99

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
7.53	สัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์ และกระแสโหลดกรณีที่ 4	100
7.54	สัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 4	100
7.55	สัญญาณ v_{ga} , i_{ga} , i_{conva} และ i_{La} เมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย สเกลแรงดันกริด 500 V/div; สเกลกระแสกริด และกระแสคอนเวอร์เตอร์ 10 A/div ; สเกลกระแสโหลด 5 A/div	101
7.56	ผลตอบสนองเชิงไดนามิกของระบบที่นำเสนอเมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่าย และรับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ(P_g)เข้ากริด 3 เฟส 4 สาย สเกลแรงดัน 500 V/div ; สเกลกระแส 5 A/div ; สเกลกำลัง 1,000 W/div	101
7.57	สัญญาณ v_{ga} , i_{ga} , i_{conva} และ i_{La} เมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่าย และรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย สเกลแรงดันกริด 500 V/div ; สเกลกระแสกริด และกระแสคอนเวอร์เตอร์ 10 A/div; สเกลกระแสโหลด 5 A/div	102
7.58	ผลตอบสนองเชิงไดนามิกของระบบที่นำเสนอเมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟ และรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย สเกลกำลังไฟฟารีแอกทีฟ(Q_g) 2,000 Var/div	102

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

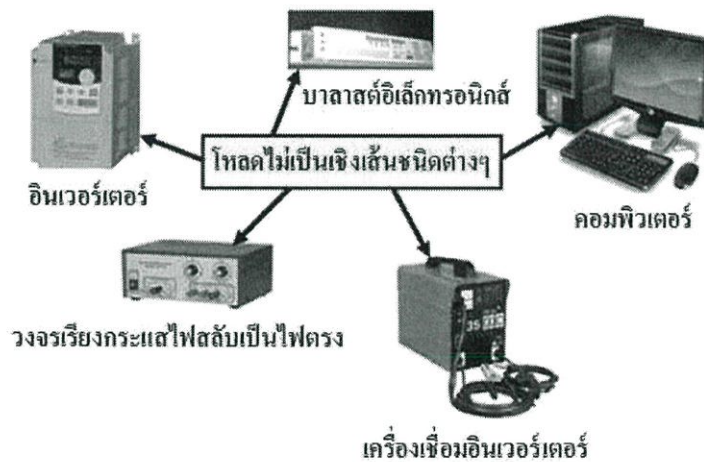
P_{turb}	กำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลม
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ
β	มุมบิดของใบพัดเป็นองศาทางกล
R_{turb}	รัศมีของใบพัดในหน่วยเมตร
V_w	ความเร็วลมในหน่วยเมตรต่อวินาที
C_p	สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม
C_T	สัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม
λ	อัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด
ω_r	ความเร็วของการหมุนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดกังหันลมในหน่วยเรเดียนต่อวินาที
E_{ph}	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดต่อเฟส
k_w	สัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดที่ความถี่มูลฐาน
N_{ph}	จำนวนรอบการพันของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส
$\phi_{\delta 1}$	เส้นแรงแม่เหล็กที่ความถี่มูลฐานต่อขั้ว
P	จำนวนขั้วแม่เหล็ก
N_r	ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามแนวแกนเพลลา
T	แรงบิดทางกล
A	พื้นที่หน้าตัดเป็นตารางเมตร
B	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
h	ฮาร์มอนิก
THD_i	ความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม
PF	ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
P	ค่ากำลังไฟฟ้าจริง
Q	ค่ากำลังไฟฟ้าแฝง
R	ตัวต้านทาน
L	ตัวเหนี่ยวนำ
C	ตัวเก็บประจุ
D	ไดโอด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

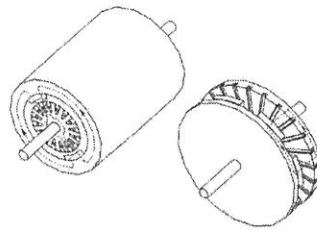
ในปัจจุบันนี้โหลดชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในงานอุตสาหกรรม และตามที่อยู่อาศัยเป็นผลให้รูปคลื่นกระแสที่กริดของการไฟฟ้ามีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ มีฮาร์มอนิกปะปนเข้าไปที่เกิดมาจากโหลดชนิดไม่เชิงเส้น หากมีภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 1.1 เชื่อมต่ออยู่กับระบบกริดจะก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกรบกวนต่อระบบไฟฟ้าได้ ทำให้กระแสที่กริดไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าต่ำ ส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานง่าย โหลดเพิ่มขึ้นและอาจเสียหายได้



รูปที่ 1.1 โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิดต่างๆ

ในปัจจุบันนี้มีการใช้พลังงานกันอย่างมากมายซึ่งนับวันแหล่งพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซ กำลังจะหมดไปและหากสามารถนำพลังงานลมซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีวันใช้หมดมาผลิตไฟฟ้าก็จะเป็นการอนุรักษ์พลังงานอีกทางหนึ่ง ซึ่งจะต้องอาศัยเครื่องกำเนิดทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมกับกักหันลมที่ทำหน้าที่หมุนขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิด โดยทั่วไปโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ามี 2 แบบ ดังแสดงดังรูปที่ 1.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้า

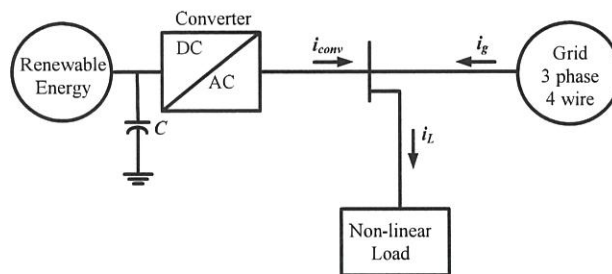
แบบเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามแนวรัศมี (Radial flux machine) จะมีรูปร่างของโครงเครื่องสั้นกว่าแต่มีความยาวมากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา (Axial flux machine) ดังนั้นเมื่อนำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาจะมีน้ำหนักเบาและมีจำนวนขั้วแม่เหล็กมากกว่าเพราะมีรัศมีใหญ่เหมาะกับตัวต้นกำลังทางกลที่มีความเร็วต่ำจึงไม่จำเป็นต้องใช้กล่องเกียร์สำหรับเพิ่มความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กน้อย ทำให้เหมาะในการนำไปประยุกต์สร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก



รูปที่ 1.2 ซ้าย: เครื่องจักรกลชนิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามแนวรัศมี

ขวา: เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา

การเลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับงานจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามแนวแกนเพลลาเป็นเครื่องกำเนิดผลิตพลังงานไฟฟ้าทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจมากขึ้นสำหรับพลังงานหมุนเวียนต่างๆ แต่สำหรับพลังงานลมดูเหมือนว่าจะเหมาะสมกว่าเพราะมีอยู่ทั่วไป และในโครงการที่นำเสนอนี้ได้เลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้า [1-3] โดยอาศัยพลังงานลมเป็นตัวต้นกำลังในการขับเคลื่อน เพื่อผลิตไฟฟ้าส่งไปยังคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบกริด 3 เฟส 4 สายดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ส่วนประกอบของระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้าพร้อมโหลดชนิดไม่เชิงเส้น

ในการชดเชยกระแสกริดของการไฟฟ้าให้มีลักษณะเป็นชายน้ เมื่อมีโหลดชนิดไม่เชิงเส้น ต่ออยู่ ซึ่งมีวิธีการการชดเชยหลายวิธี เช่นในบทความที่นำเสนอในเอกสารอ้างอิง [4-8] ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สาย เข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็ก ฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขนาด 1 กิโลวัตต์ ขับเคลื่อนโดยกังหันลม โดยใช้หลักการคำนวณหากระแส อ้างอิงควบคุมอินเวอร์เตอร์นั้น โดยประยุกต์ใช้ร่วมกันระหว่างทฤษฎีกำลังไฟฟ้าชั่วขณะพี-คิวใช้ สำหรับคำนวณหากระแสอ้างอิงที่กริด กับทฤษฎีกำลังไฟฟ้าชั่วขณะแบบดั้งเดิมซึ่งใช้สำหรับการ คำนวณหากระแสอ้างอิงจากโหลดชนิดไม่เชิงเส้นและหลังจากนั้นก็นำสัญญาณอ้างอิงทั้งสองไป เปรียบเทียบกับกระแสเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์เพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่ง อินเวอร์เตอร์นี้จะทำหน้าที่ดังต่อไปนี้

1. ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงไปยังกริด 3 เฟส 4 สาย
2. ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนไปยังกริด 3 เฟส 4 สาย
3. ทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น
4. ทำหน้าที่กรองฮาร์มอนิกสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น
5. ทำหน้าที่ปรับปรุงกระแสที่กริดให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นชายน้

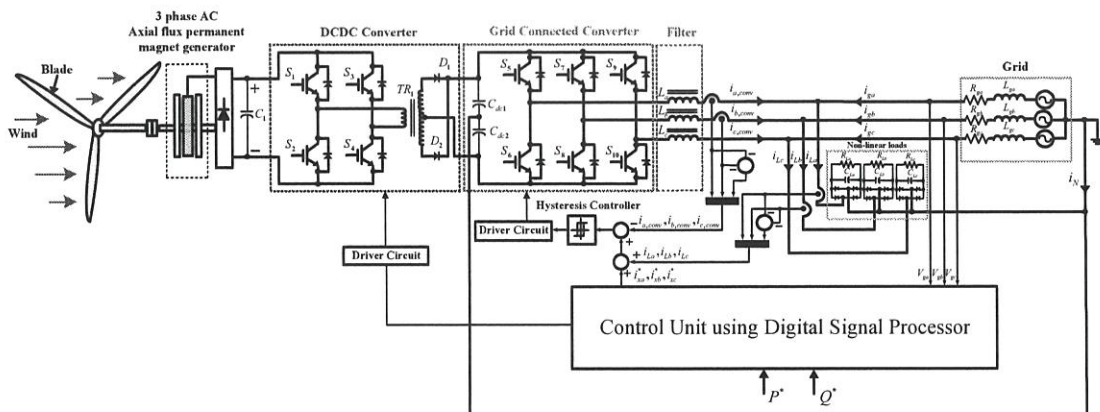
โดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานในท้องตลาดในเชิงพาณิชย์ไม่มีฟังก์ชันการทำงานครอบคลุมทุก หน้าที่ดังที่นำเสนอในโครงการวิจัยที่ขอทุนสนับสนุนนี้ อีกทั้งการไฟฟ้าจะได้ประโยชน์จากการที่ไม่ ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนไปยังโหลดประเภทไม่เชิงเส้น แต่ระบบที่นำเสนอในโครงการนี้จะทำ หน้าที่เปลี่ยนจากพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าชดเชยไปยังโหลดไม่เชิงเส้นแทน ทำให้ผู้ใช้ไฟและการไฟฟ้าได้ประโยชน์ร่วมกัน จากหลักการที่นำเสนอนี้ ก็จะทำให้เกิดการอนุรักษ์ พลังงานไฟฟ้าได้ และลดการสิ้นเปลืองจากการนำเข้าพลังงานเชื้อเพลิงซอสซิลเพื่อนำมาผลิต กระแสไฟฟ้าได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา เมื่อขั้วเคลื่อนโดยกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ
- 1.2.2 เพื่อศึกษา ออกแบบ และจำลองระบบเชื่อมต่อกิต 3 เฟส 4 สายเข้ากับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่มีภาระโหลดประเภทไม่เชิงเส้นเชื่อมต่ออยู่ที่กิต
- 1.2.3 เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังเสมือนที่จ่ายให้กับระบบการไฟฟ้าได้อย่างอิสระ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรถอเล็กทรอนิกส์กำลัง

1.3 รายละเอียดวิธีการและแผนการดำเนินโครงการ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอภาพรวมของระบบแสดงดังรูปที่ 1.4 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขั้วเคลื่อนโดยกังหันลมแบบ 3 ใบพัด ผ่านชุดเรกติไฟร์ไปยังชุดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการส่งผ่านกำลังด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ในการเชื่อมต่อกับระบบกิต 3 เฟส 4 สาย ที่มีโหลด 3 เฟส แบบไม่เป็นเชิงเส้นต่อร่วมอยู่กับระบบกิต 3 เฟส 4 สายด้วย



รูปที่ 1.4 ภาพรวมของระบบที่นำเสนอ

1.3.1 ขอบเขตการดำเนินงาน

1.3.1.1 ได้ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่มีภาระโหลด 3 เฟสประเภทไม่เชิงเส้นที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงป้อนชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส มาจากเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขนาดพิกัด 1 กิโลวัตต์ ขับเคลื่อนโดยกังหันลม 3 ใบพัด จำนวน 1 ระบบ

1.3.1.2 มีค่าตัวประกอบกำลังของกระแสกริดในแต่ละเฟสเข้าใกล้หนึ่ง เมื่อมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเพียงอย่างเดียว

1.3.1.3 ค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแส (THDi) กริด ในแต่ละเฟสไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

1.3.2 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงความก้าวหน้าของผลงานวิจัย ณ ช่วงรายงานเมื่อเทียบกับแผนงานวิจัยทั้งโครงการ ดำเนินการระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 31 มีนาคม 2559 โดยมีแผนการดำเนินงานดังนี้

กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลารวมขยายเวลาดำเนินโครงการ (เดือน)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1) การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาเข้ากับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย ที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม																	
2) วิเคราะห์ตัวแปร สมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อระบบกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลม																	
3) ออกแบบอัลกอริทึม สำหรับควบคุมระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาเข้ากับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย ที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม																	

ตารางที่ 1.1(ต่อ) ตารางแสดงความก้าวหน้าของผลงานวิจัย ณ ช่วงรายงานเมื่อเทียบกับแผนงานวิจัยทั้งโครงการ ดำเนินการระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 31 มีนาคม 2559 โดยมีแผนการดำเนินงานดังนี้

กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลารวมขยายเวลาดำเนินโครงการ (เดือน)															
	เดือน															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4) จำลองการทำงานของระบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการควบคุมด้วยโปรแกรมจำลองการทำงาน เช่น โปรแกรม Matlab/simulink				←→												
5) ออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมตามที่ได้วิเคราะห์และจำลองการทำงานไว้				←→												
6) ประกอบวงจรส่วนต่างๆ ของระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขับเคลื่อนโดยตัวจำลองการทำงานของกัณฑ์ลภในห้องปฏิบัติการ					←→											
7) ทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ตัวจำลองการทำงานของกัณฑ์ลภแทนการทำงานของกัณฑ์ลภ 3 ใบพัดจริง ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรีสมุทรปราการ							←→									
8) ทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบกับกัณฑ์ลภ 3 ใบพัดจริงที่สถานที่ติดตั้งจริง													←→			
9) สรุปผลการวิจัย และจัดพิมพ์รายงาน						←→										
10) นำเสนอผลการวิจัยในรูปแบบต่างๆ													←→			

←→ แผนงานวิจัยทั้งโครงการที่วางไว้

←----> ผลงานวิจัยที่ดำเนินจนถึงปัจจุบัน

ตารางที่ 1.2 เป้าหมายผลงานในแต่ละช่วงเวลา

ปีที่	เดือนที่	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ	ผลจากการปฏิบัติงานจริง
1.5	1 - 6	1. ได้ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาเข้ากับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย ที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม	ได้ผลการศึกษาว่าการเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์เข้ากับระบบกริด 3 เฟส โดยอาศัยหลักการชดเชยกระแสกริดด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิงที่อยู่ในเทอมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่กริดกับโหลดให้กับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมด้วยกระแสแบบแถบฮีสเทอรีซิสที่คงที่ จะทำให้ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นได้
		2. ได้ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์ตัวแปร สมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อระบบกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลม	ได้ผลการศึกษาว่ากำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลมขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ มุมบิดของใบพัด รัศมีของใบพัด ความเร็วลมที่ปะทะใบกังหัน และสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม ส่วนขนาดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ของการผันขดลวดที่ความถี่มูลฐาน จำนวนรอบการพันของขดลวด สเตเตอร์ต่อเฟส เส้นแรงแม่เหล็กที่ความถี่มูลฐานต่อขั้ว และความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามแนวแกนเพลลา
		3. ออกแบบอัลกอริทึม สำหรับควบคุมระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาเข้ากับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย ที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม	ได้ทำการออกแบบอัลกอริทึม สำหรับควบคุมระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาเข้ากับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย ที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันลมดังรายละเอียดในบทที่ 4
		4. จำลองการทำงานของระบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการควบคุมด้วยโปรแกรมจำลองการทำงาน ด้วยโปรแกรม Matlab/simulink	ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการควบคุมด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/simulink ดังรายละเอียดในบทที่ 5

ตารางที่ 1.2(ต่อ) เป้าหมายผลงานในแต่ละช่วงเวลา

ปีที่	เดือนที่	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ	ผลจากการปฏิบัติงานจริง
1.5	1 - 6	5. ออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมตามที่ ได้วิเคราะห์และจำลองการทำงานไว้	ได้ผลการการออกแบบเครื่องกำเนิดแบบ เส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ดัง รายละเอียดในบทที่ 2 ได้ผลการออกแบบ กังหันลมขนาด 1 kW และศึกษาทฤษฎี โหลดไม่เชิงเส้น ดังรายละเอียดในบทที่ 3 และนำเสนอพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ สำหรับจำลองการเชื่อมต้อระบบกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสชนิด แม่เหล็กถาวร
	7 - 16	6. ประกอบวงจรส่วนต่างๆ ของระบบ เชื่อมต้อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่อง กำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนว แกนเพลลาขับเคลื่อนโดยตัวจำลองการทำงาน ของกังหันลมในห้องปฏิบัติการ	ได้ประกอบวงจรส่วนต่างๆ ของระบบ เชื่อมต้อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่อง กำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนว แกนเพลลาขับเคลื่อนโดยตัวจำลองการ ทำงานของกังหันลมในห้องปฏิบัติการ PMC 405 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
		7. ทดสอบการทำงานเครื่องต้นแบบใน ห้องปฏิบัติการโดยใช้ตัวจำลองการทำงานของ กังหันลมแทนการทำงานของกังหันลม 3 ใบพัดจริงที่มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ	ได้ทดสอบการทำงานเครื่องต้นแบบใน ห้องปฏิบัติการ PMC 405 ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง โดยใช้ตัวจำลองการ ทำงานของกังหันลมแทนการทำงานของ กังหันลม 3 ใบพัดจริงที่ติดตั้งจริง
		8. ทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบกับ กังหันลม 3 ใบพัดจริงที่สถานที่ติดตั้งจริง	ได้ทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบกับ กังหันลม 3 ใบพัดจริงที่สถานที่ติดตั้งจริง มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ
		9. สรุปผลการวิจัย และจัดพิมพ์รายงานฉบับ สมบูรณ์	ได้สรุปผลการวิจัยลงในเล่มรายงานฉบับ สมบูรณ์
	10. นำเสนอผลการวิจัยในรูปแบบต่างๆ	* รอดำเนินการ	

บทที่ 2

การออกแบบกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบสร้างกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ โดยนำเสนอเกี่ยวกับสมการกำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลม และสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดต่อเฟส โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2 สมการกำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลม

กำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลม (P_{turb}) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ มุมบิดของใบพัด รัศมีของใบพัด และความเร็วลมที่ปะทะใบกังหัน[9] ดังสมการที่ (2.1)

$$P_{turb} = \frac{1}{2} \rho \pi R_{turb}^2 V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.1)$$

เมื่อ

P_{turb} คือ กำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลม

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

β คือ มุมบิดของใบพัดเป็นองศาทางกล

R_{turb} คือ รัศมีของใบพัดในหน่วยเมตร

V_w คือ ความเร็วลมในหน่วยเมตรต่อวินาที

$C_p(\lambda, \beta)$ คือ สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม

หาค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดได้จากสมการที่ (2.2) ได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{\omega_r R_{turb}}{V_w} \quad (2.2)$$

เมื่อ

ω_r คือ ความเร็วของการหมุนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดกังหันลมในหน่วยเรเดียนต่อวินาที

λ คือ อัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด

โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด สำหรับกังหันลมที่ใช้ในกรณีศึกษานี้ ค่า C_p เขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันของอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด[10] ได้ดังสมการที่ (2.3) นี้

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2.3)$$

โดยค่า λ_i หาได้จากสมการที่ (2.4)

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.4)$$

เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์กำลัง $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ และ $c_6 = 0.0068$

สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมตามกฎของเบท(Betz' Law)[17] หาได้จากสมการที่ (2.5)

$$c_p = \frac{P_{Rotor}}{P_{wind}} \quad (2.5)$$

เมื่อ

c_p คือ สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม

P_{Rotor} คือ กำลังโรเตอร์

P_{wind} คือ กำลังลม

และจากสูตรการแปลงกำลังทางกลเป็นกำลังทางไฟฟ้าดังสมการที่ (2.6)

$$P = T\omega \quad (2.6)$$

เมื่อ

P คือ กำลังทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นวัตต์

T คือ แรงบิดทางกลมีหน่วยเป็นนิวตันเมตร

ω คือ ความเร็วเชิงมุมมีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

เมื่อแทน $\omega_r = \frac{\lambda V_w}{R_{turb}}$ และกำหนดให้มุมพิช (β) มีค่าคงที่ ดังนั้นหาแรงบิดเอาต์พุตที่เพลลา

โรเตอร์ของกังหันลม (T_{turb}) ได้จากการแทนค่ากำลังที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลม (P_{turb}) ในสมการที่ (2.1) หารด้วยความเร็วเชิงมุมที่เพลลาของโรเตอร์กังหันลมหมุน (ω_r) จะได้

$$T_{turb} = \frac{1}{2\lambda} \cdot \rho \pi R_{turb}^3 V_w^2 C_p(\lambda) \quad (2.7)$$

โดยความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงบิดและสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.8)

$$c_T(\lambda) = \frac{c_P(\lambda)}{\lambda} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$c_T(\lambda)$ คือ สัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม

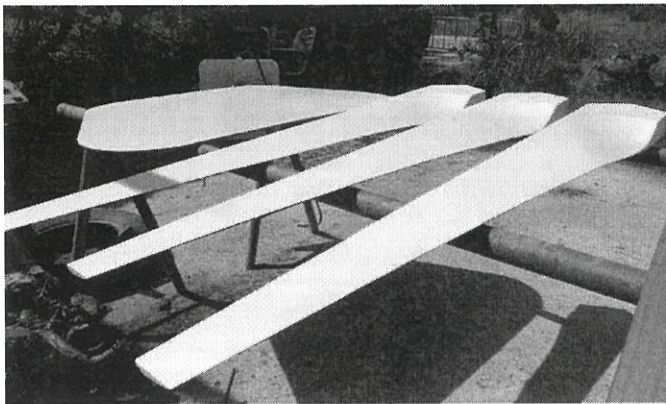
$c_P(\lambda)$ คือ สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม

λ คือ อัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด

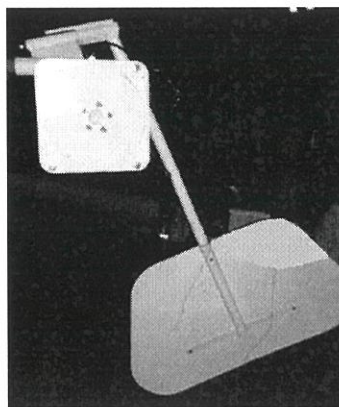
จากคุณลักษณะของกำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลมสมการที่ 2.1 เมื่อนำกังหันลมไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา (AFPM) ได้แรงดันไฟสลับ 3 เฟส ผ่านวงจรเรียงกระแสไฟสลับเป็นไฟตรง แล้วนำไปผ่านชุดบูสต์แรงดันไฟตรง ได้แรงดันสูงไฟตรงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย จะเห็นได้ว่าหากให้ระบบที่นำเสนอนี้ทำงานจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงคืนสู่กริดที่จุดสูงสุดในย่านความเร็วลมต่างๆที่มาปะทะ

ใบกังหัน จะต้องควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดคืนสู่กริด 3 เฟส ให้สอดคล้องกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด (λ) และค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม (C_p) โดยการพิจารณาค่าของกระแสที่ออกจากคอนเวอร์เตอร์และแรงดันกริดจากการตรวจจับ และใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในชุดบูสต์แรงดันไฟตรงก่อนเข้าหม้อแปลงสวิตซ์ซึ่งเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

ใบกังหันลมที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 โดยมีใบกังหันลมจำนวน 3 ใบ ใบกังหันแต่ละใบมีรัศมี 1.20 เมตร และหางเสือกังหันลมที่ออกแบบ มีลักษณะดังรูปที่ 2.2

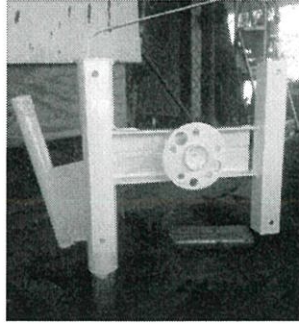


รูปที่ 2.1 ลักษณะใบพัดกังหันลมและใบพัดหางเสือที่ออกแบบที่ทาสีขาวนำมาตากแดดให้แห้ง



รูปที่ 2.2 ลักษณะหางเสือกังหันลมที่ออกแบบ

แกนเหล็กยึดใบพัดหางเสือและใช้สำหรับยึดติดกับเครื่องกำเนิดไฟสลับ 3 เฟส แบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แกนเหล็กใช้ติดตั้งใบพัดทางเสือและใช้ติดตั้งกับเครื่องกำเนิดไฟสลับ 3 เฟส แบบ AFPM

2.3 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดต่อเฟส

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดต่อเฟสหาได้จากสมการที่ (2.9) ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กที่ความถี่มูลฐานต่อขั้วหาได้จากสมการที่ (2.10)

$$E_{ph} = 4.44k_w N_{ph} \phi_{\delta 1} (N_r P / 120) \quad (2.9)$$

เมื่อ

- E_{ph} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดต่อเฟส
- k_w คือ สัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดที่ความถี่มูลฐาน
- N_{ph} คือ จำนวนรอบการพันของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส
- $\phi_{\delta 1}$ คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่ความถี่มูลฐานต่อขั้ว
- P คือ จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็กทั้งหมดที่วางบนจานเหล็กหมุนคู่
- N_r คือ ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามแนวแกนเพลลา

$$\phi_{\delta 1} = A.B \quad (2.10)$$

เมื่อ

- A คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วแม่เหล็ก
- B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

2.4 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส แบบ AFPM

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาชนิด 3 เฟส แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส แบบ AFPM

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรชนิดเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา	
พารามิเตอร์	ค่า
ความหนาแน่นกระแสในตัวนำ	4 A/mm ²
บริดจ์ไดโอดเรกติไฟร์	35A -700V per phase
กระแสเอาต์พุตสูงสุดต่อเฟส	10 A
เบอร์ลวดตัวนำทองแดง	S.W.G. 21
จำนวนของขดลวดสเตเตอร์	12 ชุด
จำนวนรอบตัวนำต่อเฟส	300 รอบ
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	16 ขั้ว
พื้นที่หน้าตัดของขั้วแม่เหล็ก	0.001 m ²
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่ฟุ้งตัดผ่านคอล์ย	1.27 T

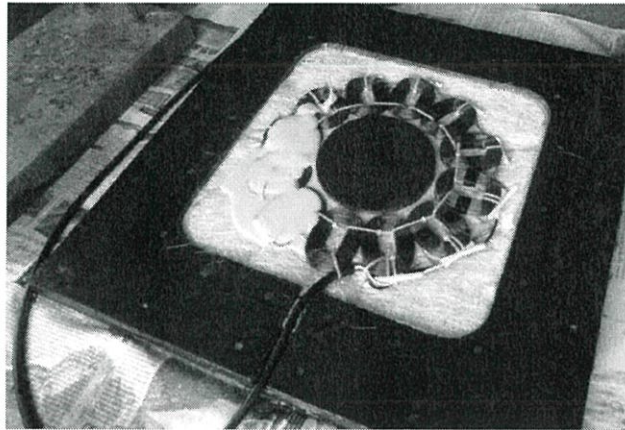
2.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์

ลักษณะการวางแท่งแม่เหล็กจำนวน 16 แท่งลงบนแผ่นจานเหล็กหมุนทั้ง 2 แผ่นแสดงดังรูปที่ 2.4



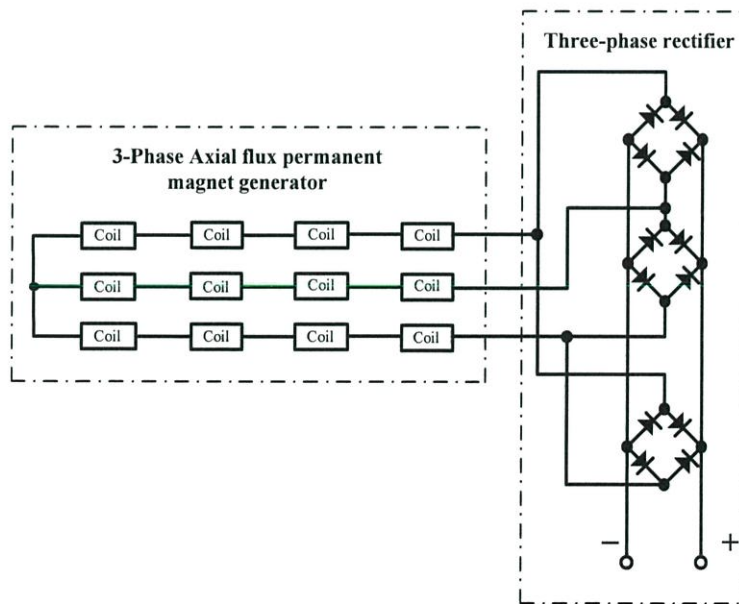
รูปที่ 2.4 การวางแท่งแม่เหล็กจำนวน 16 แท่งลงบนแผ่นจานเหล็กหมุนทั้ง 2 แผ่น

การวางขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟสลับ 3 เฟส แบบ AFPM ที่ออกแบบลงบนแผ่นไม้เคลือบด้วยเรซิน มีลักษณะดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การวางขดลวดสเตเตอร์จำนวน 12 ชุดลงบนแผ่นไม้ที่เคลือบด้วยสารผสมเรซิน

เมื่อนำขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 12 ชุดมาต่อให้ได้จำนวนขดลวดต่อเฟสเท่ากับ 3 เฟสมีลักษณะดังรูปที่ 2.6



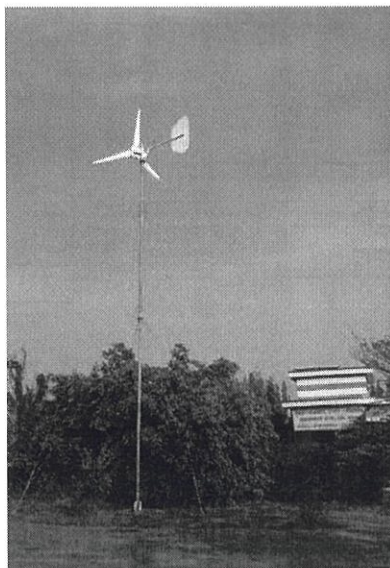
รูปที่ 2.6 การต่อขดลวดจำนวน 12 ชุด ให้ได้ไฟสลับออกมาเท่ากับ 3 เฟสต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสไฟสลับ 3 เฟสแปลงเป็นไฟตรง

เสาของกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ ที่ออกแบบมีความสูง 10 เมตร โดยนำท่อเหล็กจำนวน 2
ท่อนมาต่อกัน มีลักษณะดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ท่อเหล็กจำนวน 2 ท่อนที่นำมาต่อกันใช้ทำเสากังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์

กังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ ที่ติดตั้งจริง ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
สมุทรปราการ 59/1 ม.14 ซ.เทศบาลบางปู 119 ถ.สุขุมวิท ต.บางปลา อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ
แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ ที่ติดตั้งจริง ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

โดยทิวทัศน์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ แสดงดังรูปที่ 2.9



(ก) ทิวทัศน์ด้านหน้ามหาวิทยาลัย



(ข) ทิวทัศน์ภายในมหาวิทยาลัยฯ

รูปที่ 2.9 ทิวทัศน์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

2.6 บทสรุป

การออกแบบกังหันลมให้มีกำลังกลเอาต์พุตที่ออกมาจากเพลลากังหันลมมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ มุมบิดของใบพัด รัศมีของใบพัด ความเร็วลม และสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม และการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามแนวแกนเพลลาให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดต่อเฟสมากน้อยเท่าใดก็ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ของการพันขดลวดที่ความถี่มูลฐาน จำนวนรอบการพันของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส เส้นแรงแม่เหล็กที่ความถี่มูลฐานต่อขั้ว จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็กทั้งหมดที่วางบนจานเหล็กหมุนคู่ และความเร็รรอบของเพลลาของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิด

บทที่ 3

โหลดไม่เชิงเส้น

3.1 บทนำ

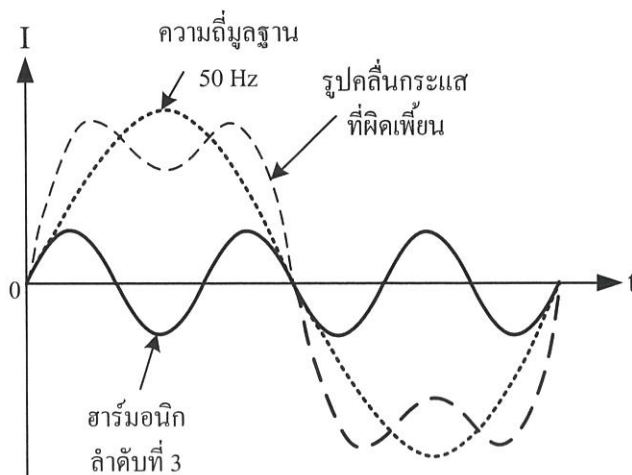
ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีฮาร์โมนิกและความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม สำหรับโหลดทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต่อรวมอยู่ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส โดยเมื่อโหลดประเภทนี้ทำงานเชื่อมต่อกับระบบกริด จะก่อให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกรบกวนต่อระบบไฟฟ้าได้ เช่น วงจรเรียงกระแสไฟสลับเป็นไฟตรง(AC-DC Power Supply) บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์(Electronics Ballast) ที่ไม่มีการแก้ตัวประกอบกำลัง ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิดใช้ไทรสเตอร์ แหล่งจ่ายไฟสวิตชิงของคอมพิวเตอร์ และเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น

3.2 ฮาร์โมนิกและความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม

โหลดแบบไม่เชิงเส้น จะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกโดยตรงและสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มด้วยกันคือ เกิดจากการอิมิตัวของอุปกรณ์ เช่น การเกิดฮาร์โมนิกจากการอิมิตัวของอุปกรณ์ โดยมากจะเกิดจากการอิมิตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แบบแกนเหล็ก สาเหตุโดยส่วนใหญ่มักเกิดจากการที่ต้องการลดต้นทุนในการผลิต จึงนิยมที่จะออกแบบให้จุดทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้เลยจุดอิมิตัวของแกนเหล็กมาเล็กน้อย เป็นผลทำให้กระแสสร้างสนามแม่เหล็กมีค่าสูง และมีฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ปนอยู่ด้วยมาก และเกิดจากการสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ไทรสเตอร์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรเรียงกระแสไฟสลับเป็นไฟตรง และเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น

ระบบจ่ายไฟฟ้างกำลังในประเทศไทยได้มีข้อกำหนดให้มีความถี่หลักมูลเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ แต่ผลจากการดึงกำลังไฟฟ้าของโหลดบางชนิด ได้ทำให้เกิดกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล ซึ่งความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลเหล่านี้จะก่อให้เกิดภาวะมลพิษทางไฟฟ้าขึ้นโดยที่จะเรียกว่า “ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง” และด้วยผลของฮาร์โมนิกเหล่านี้ ที่ทำให้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังจะไม่ได้เป็นรูปไซน์โดยสมบูรณ์แต่จะได้อุปกรณ์ที่ผิดเพี้ยนไปจากชายนั่นแทน

ฮาร์มอนิก หมายถึงส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ของสัญญาณหรือ ปริมาณเป็นคาบใดๆซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล ยกตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูลจะเรียกว่า ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 เป็นต้น ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่า รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์จะมีฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วยเสมอ การที่จะบอกว่ารูปคลื่นนั้นๆผิดเพี้ยนมากหรือน้อยไปจากรูปคลื่นไซน์ จะต้องพิจารณาจากค่า “ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม” (Total Harmonic Distortion: THD)



รูปที่ 3.1 รูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากไซน์ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบของกระแสที่ความถี่หลักมูล และกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3

ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิก กับค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบกระแสความถี่หลักมูลเทียบเป็นร้อยละ โดยความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกรวมและความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม หาได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$THD_v (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{1,rms}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$THD_i (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h,rms}^2}}{I_{1,rms}} \times 100 \quad (3.2)$$

ซึ่งผลการทดสอบความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกรวม (THD_i) ที่โหลดไม่เชิงเส้นต่างๆ จำนวน 5 รายการ แสดงดังตารางที่ 3.1

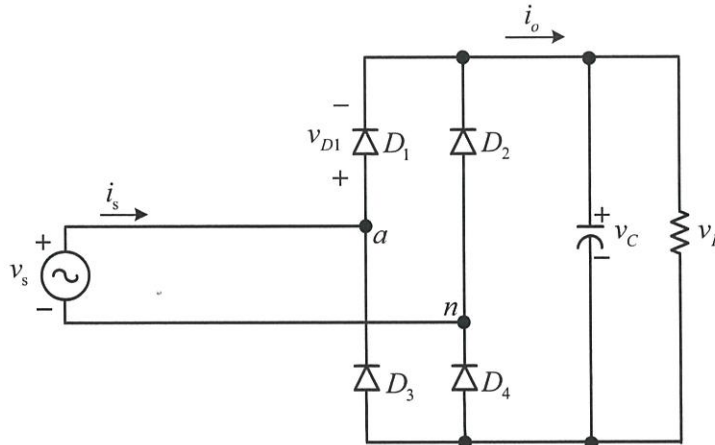
ตารางที่ 3.1 สรุปผลการทดสอบหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกรวม (THD_i) ที่โหลดไม่เชิงเส้น 5 รายการ

ลำดับที่	รายการโหลด	% THD _i
1	คอมพิวเตอรืโน้ตบุค	30.4
2	ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ทรিসเตอร์	52.7
3	บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์	23.5
4	วงจรเรียงกระแสไฟสลับเป็นไฟตรงต่อโหลด RC	76.1
5	เครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์	79.4

จากการศึกษาผลกระทบของกระแสฮาร์โมนิกต่อระบบไฟฟ้า 1 เฟส โดยหลักๆ ทำให้รูปคลื่นกระแสของกริดมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ ทำให้ไปรบกวนระบบไฟฟ้าข้างเคียงที่โหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมใช้งานอยู่ และจากตารางสรุปผลการทดสอบหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกรวม (THD_i) ที่โหลดต่างๆ 5 รายการข้างต้น สรุปได้ว่าเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกรวมมากที่สุด คือ 79.4 % ส่วนบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกรวมน้อยที่สุด คือ 23.5 % ในจำนวนโหลด 5 รายการที่นำมาทดสอบ ทั้งนี้ในการทดสอบดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน อุณหภูมิสถานะแวดล้อมที่นำโหลดไม่เชิงเส้นต่างๆ มาทดสอบด้วย

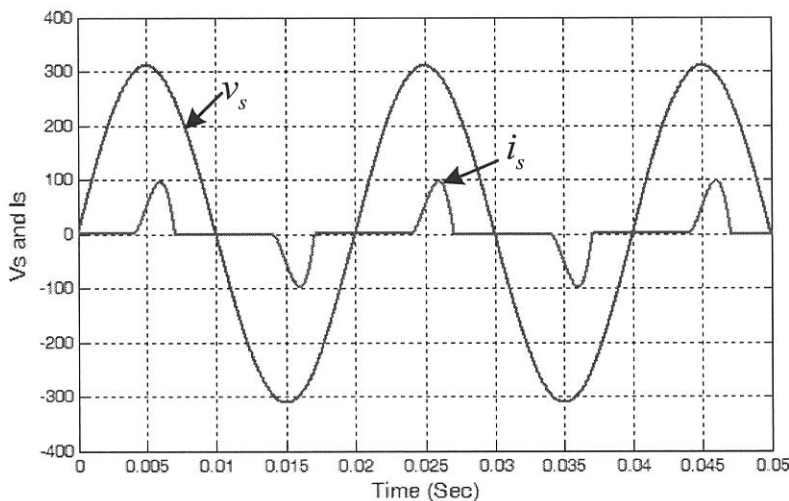
3.3 โหลดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอดเป็นโหลดไม่เชิงเส้นประเภทหนึ่งที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกרבกวานในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ซึ่งวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแสดงในรูปที่ 3.2

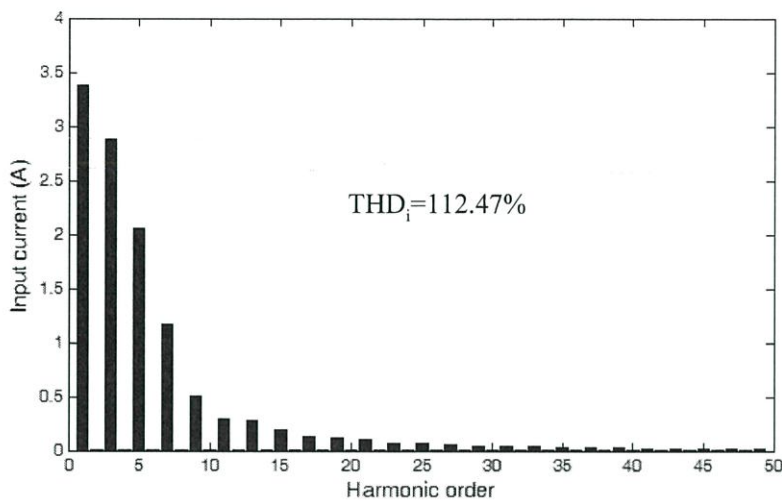


รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด

เมื่อโหลดของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอดเป็นตัวต้านทานขนาด 170 โอห์ม และตัวคาปาซิเตอร์ขนาด 3400 ไมโครฟารัด นำมาต่อขนานกัน จะมีรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอด กระแสที่ไหลในสายของระบบไฟฟ้า 1 เฟสจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นขายนมีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอดแสดงในรูปที่ 3.4 แสดงถึงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณขายน 112.47 %



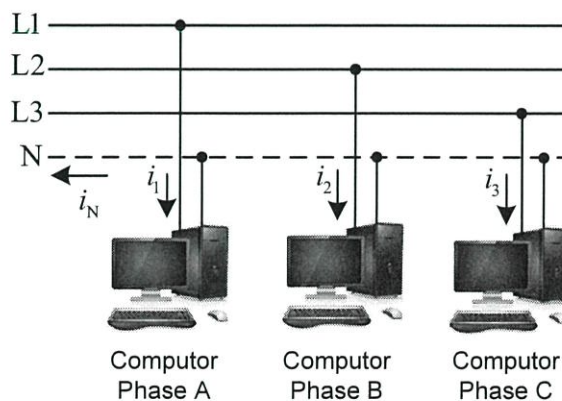
รูปที่ 3.3 รูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด



รูปที่ 3.4 สเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด

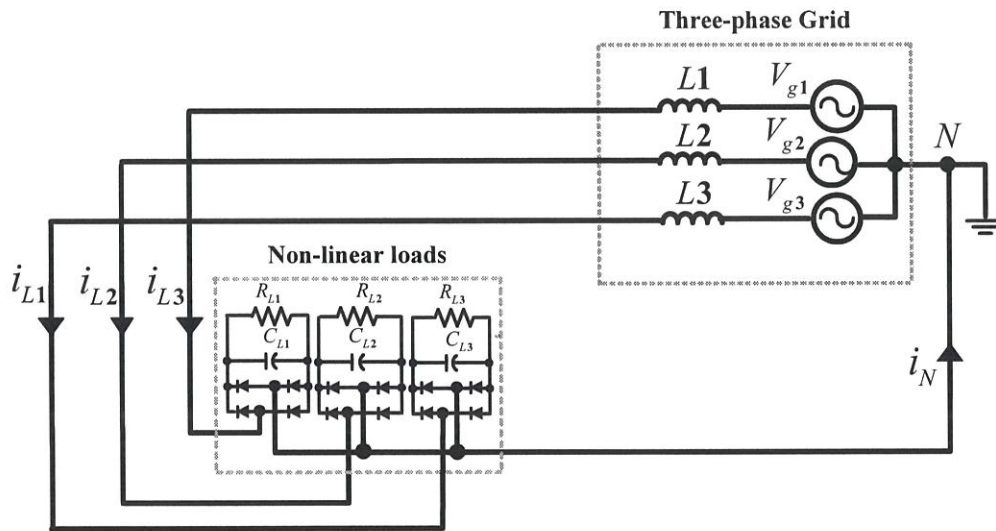
3.4 โหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่น ต่อในระบบ 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว

โหลดไม่เชิงเส้นจำพวกคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะหรือพกพา ส่วนมากใช้หลักการของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด ในการนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์ภายในต่างๆ หากนำมาต่อใช้งานในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในอาคารที่อยู่อาศัย หรือสำนักงานก็ก่อให้เกิดผลกระทบกับระบบไฟฟ้าที่คอมพิวเตอร์เชื่อมต่ออยู่ได้ โดยยกตัวอย่างการนำคอมพิวเตอร์ 1 เฟส มาต่อใช้งานในระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยต่อกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ดังรูปที่ 3.5



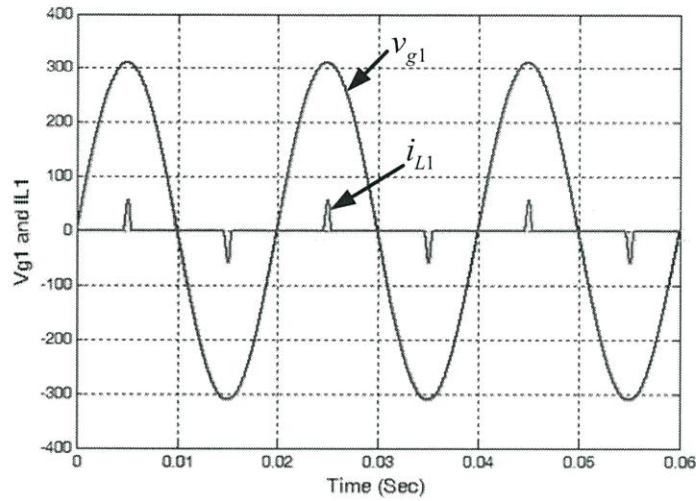
รูปที่ 3.5 การนำคอมพิวเตอร์ 1 เฟส มาต่อใช้งานในระบบไฟฟ้าสามเฟส 4 สาย

โหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอด จำนวน 3 ชุดที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย แสดงรูปที่ 3.6

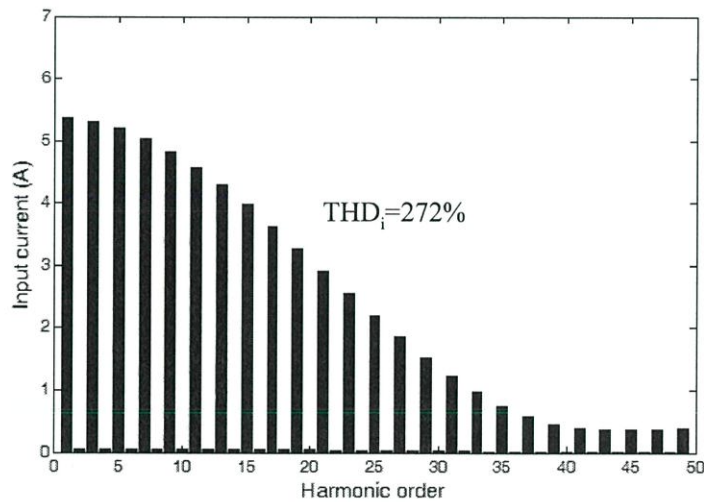


รูปที่ 3.6 วงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอดที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว

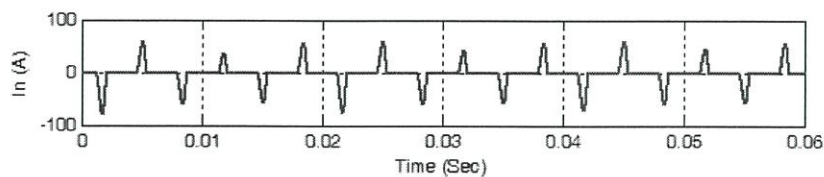
จากรูปที่ 3.6 เมื่อกำหนดให้โหลดของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอดเป็นตัวต้านทานขนาด 115 โอห์ม และตัวคาปาซิเตอร์ขนาด 6800 ไมโครฟารัดนำมาต่อขนานกัน จะมีรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอดต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว กระแสที่ไหลในสายจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์มีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายที่ไหลไปยังโหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอดที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.8 แสดงถึงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ 272 % ส่วนกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลไปยังสายนิวตรอนของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายแบบโหลดไม่เชิงเส้นสมดุล แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันเฟส กระแสในสาย ที่ไหลไปยังโหลดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟส ที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย แบบไดโอด 12 ตัว



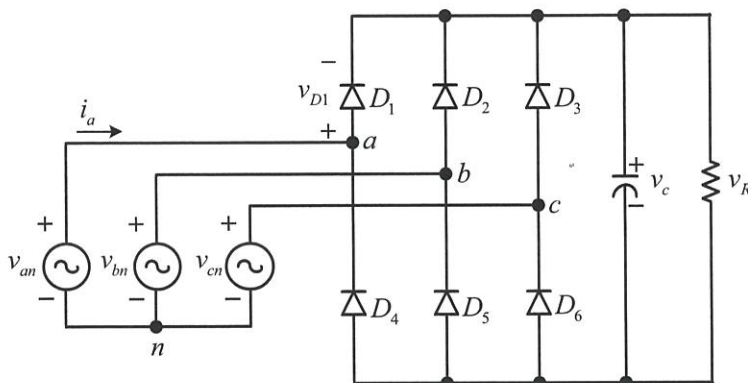
รูปที่ 3.8 สเปกตรัมกระแสในสายที่ไหลไปยังโหลดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟส ที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย แบบไดโอด 12 ตัว



รูปที่ 3.9 กระแสที่ไหลไปยังสายนิวตรอนของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย

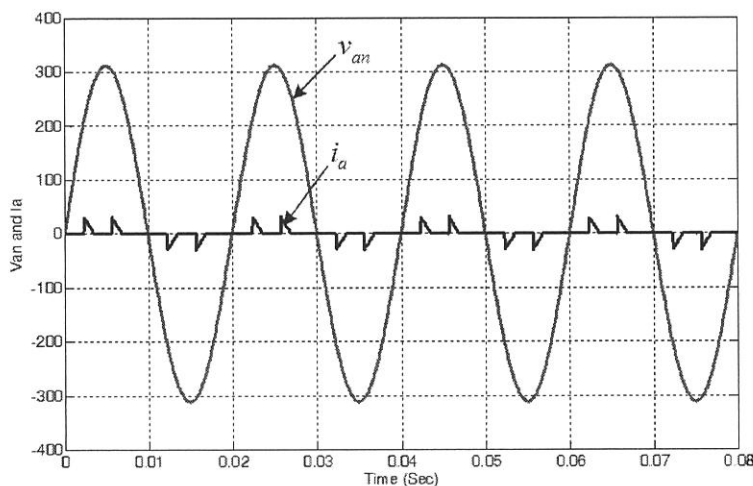
3.5 โหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว

วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว เป็นโหลดไม่เชิงเส้นประเภทหนึ่งที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกרבววนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นแสดงในรูปที่ 3.10 เป็นระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล และมีการจัดเรียงลำดับเฟสเป็น a-b-c โดยสมมุติให้แหล่งจ่ายและไดโอดเป็นอุดมคติเพื่อให้ง่ายแก่การวิเคราะห์

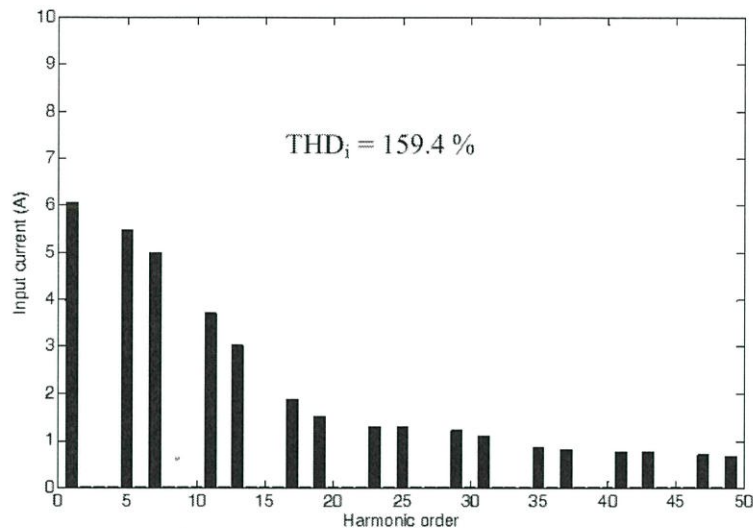


รูปที่ 3.10 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด 6 ตัว

เมื่อโหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว เป็นตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม และตัวคาปาซิเตอร์ขนาด 470 ไมโครฟารัดนำมาต่อขนานกัน จะมีรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณิโหดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด กระแสที่ไหลในสายของระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นขายนีมีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว ในรูปที่ 3.12 แสดงถึงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณขายนี 159.4 %



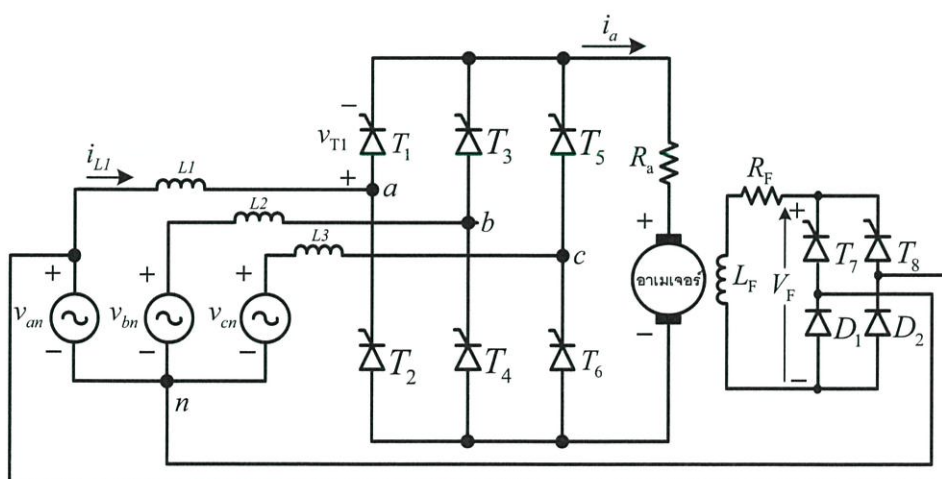
รูปที่ 3.11 แรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว



รูปที่ 3.12 สเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว

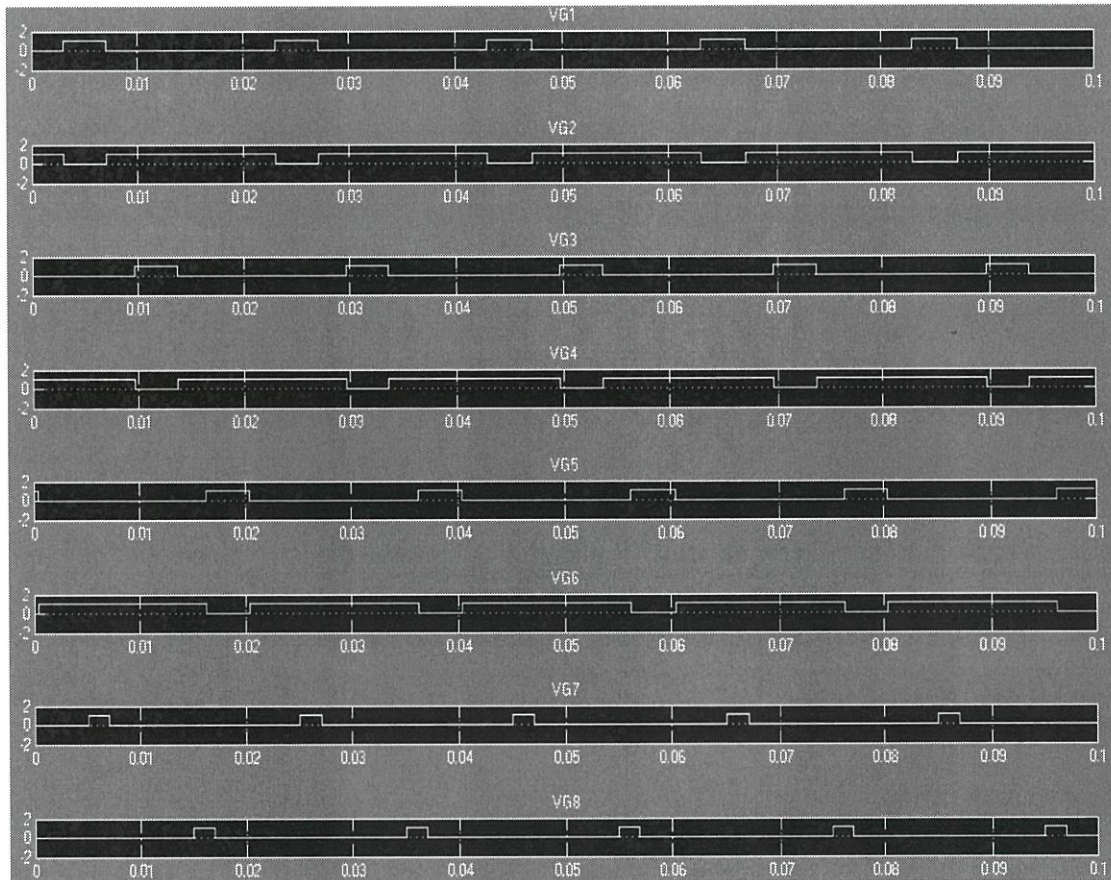
3.6 โหลดไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นโหลดไม่เชิงเส้นประเภทหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกรบกวนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งวงจรไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงในรูปที่ 3.13 เป็นระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล และมีการจัดเรียงลำดับเฟสเป็น a-b-c



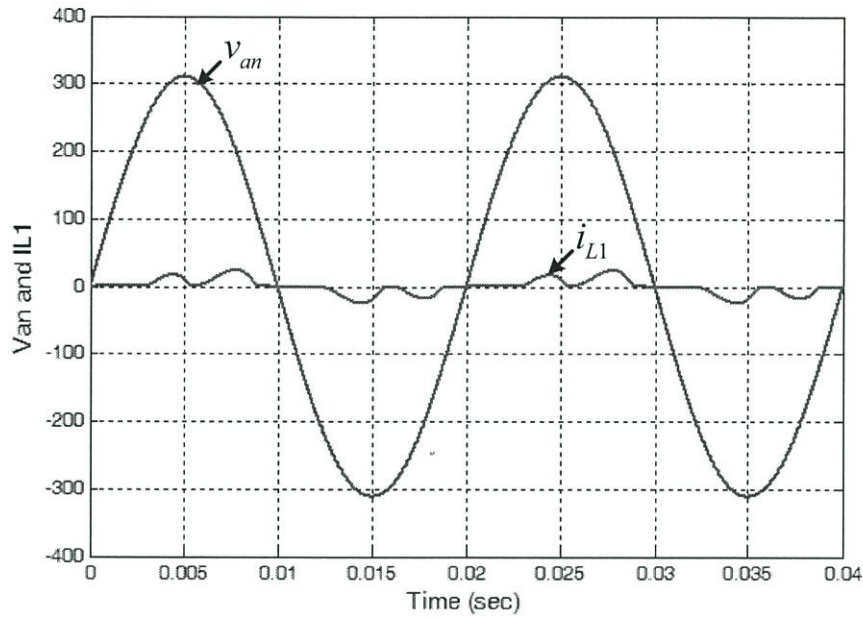
รูปที่ 3.13 วงจรไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อโหลดของวงจรไทรสเตอร์ 3 เฟส เป็นการนำไปใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง โดยมีสัญญาณขับเกทของตัวไทรสเตอร์ T1 ถึง T8 ดังรูปที่ 3.14

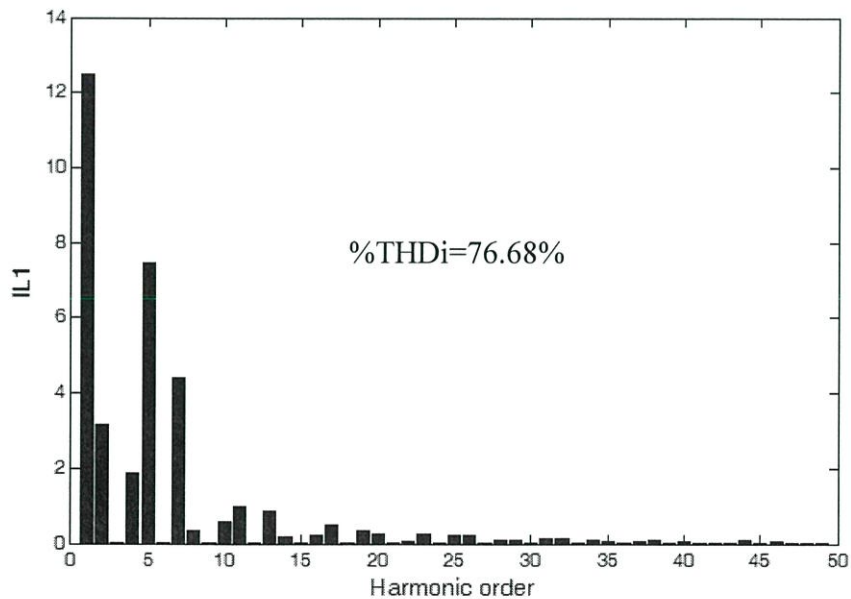


รูปที่ 3.14 สัญญาณขับเกทของตัวไทรสเตอร์ของวงจรไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

โดยมีรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีโหลดเป็นวงจรไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจุดโหลด 1 นิวตันเมตร กระแสที่ไหลในสายของระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์มีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปที่ 3.16 แสดงถึงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ 76.68 %



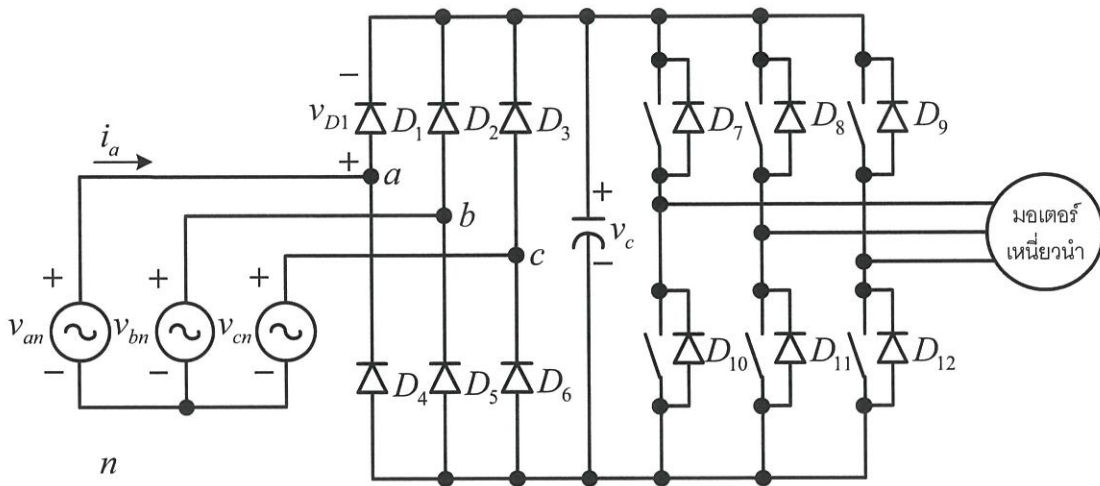
รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรไตรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.16 สเปกตรัมกระแสในสายของวงจรไตรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

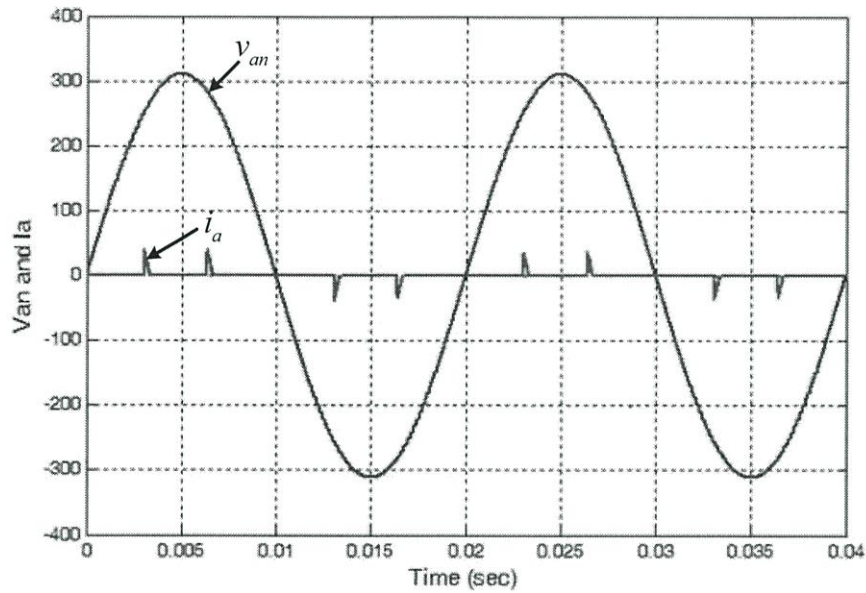
3.7 โหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์สามเฟสขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นโหลดไม่เชิงเส้นประเภทหนึ่งที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกרבกวนในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แสดงในรูปที่ 3.17 เป็นระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล และมีการจัดเรียงลำดับเฟสเป็น a-b-c

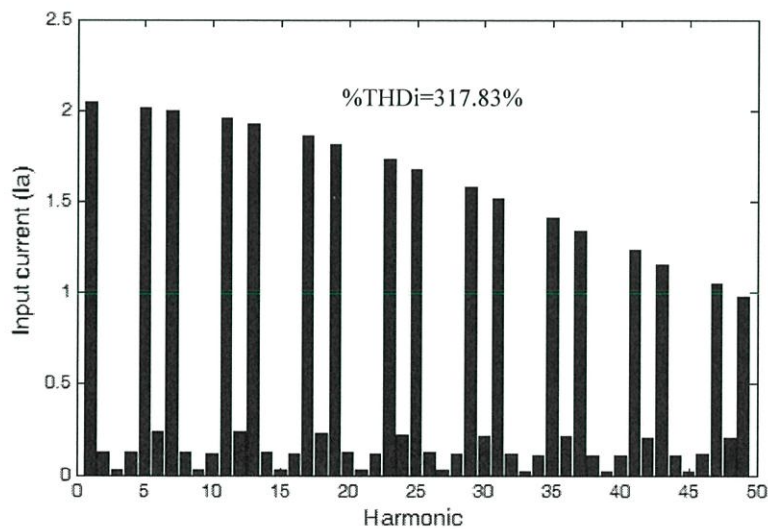


รูปที่ 3.17 โหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อโหลดเป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาดพิกัด 3 แรงม้า จำลองจับสัญญาณรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 3.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการรบกวนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโหลดที่แรงบิดปลายเพลลาขนาด 5 นิวตันเมตร กระแสที่ไหลในสายของระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์มีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอดในรูปที่ 3.19 แสดงถึงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ 317.83 %



รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 3.19 รูปสเปกตรัมกระแสในสายของโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

3.8 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส

ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส โดยหลักๆ ทำให้เกิดความร้อนเกินที่หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะพบบ่อยในกรณีที่มีหม้อแปลงจ่ายโหลดแบบไม่เชิงเส้นเป็นจำนวนมาก โดยที่ในกรณีดังกล่าว การคิดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปจะนิยมคิดที่ค่าน้อยกว่า 0.8 ของค่าพิกัดของกำลังไฟฟ้าปรากฏ (kVA) และยังทำให้เกิดกระแสเกินที่สายนิวทรัล (neutral) อีกด้วย

3.9 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก นิยามของฮาร์มอนิก สมการความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกรวม สมการความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม และการจำลองหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวมของโหลดไม่เชิงเส้นไม่เชิงเส้นชนิดต่างๆ ที่ต่อในระบบกริด 1 เฟส และ 3 เฟส โดยสรุปแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปผลการจำลองหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_i)

ที่โหลดไม่เชิงเส้น 5 รายการ

ลำดับที่	รายการโหลด	% THD _i
1	โหลดดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด	112.47 %
2	โหลดดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่น ต่อในระบบ 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว	272 %
3	โหลดดวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว	159.4 %
4	โหลดไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	76.68 %
5	โหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	317.83 %

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อในระบบ 3 เฟส 4 สาย มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวมมากที่สุด คือ 317.83 % ส่วนโหลดโหลดไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวมน้อยที่สุด คือ 76.68 % ในจำนวนโหลด 5 รายการที่นำมาจำลอง ทั้งนี้ในการจำลองดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำมาใช้จำลองกับโหลดไม่เชิงเส้นต่างๆ ด้วย

บทที่ 4

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่อง กำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อน โดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์โมนิก ไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับ โหลดไม่เชิงเส้น

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการชดเชยกระแสกริดและการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิง การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานหลายหน้าที่ในระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์โมนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น จากการทำงานที่ง่าย และมีประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ให้ทำหน้าที่เป็นตัวส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่รับมาจากแหล่งพลังงานทดแทนไปยังกริดและเป็นตัวกรองฮาร์โมนิก เพื่อให้เกิดการลงทุนที่คุ้มค่าสำหรับตัวคอนเวอร์เตอร์ โดยสามารถนำคอนเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียวให้ทำงานเป็นทั้งตัวส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนมายังกริด พร้อมทั้งในเวลาเดียวกันนี้ ถ้าหากไม่มีพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนก็สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกรองฮาร์โมนิกได้ ซึ่งเรียกว่า “คอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกริดทำงานหลายหน้าที่” ซึ่งมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีโหลดของตนเองที่ไม่เป็นเชิงเส้นและโรงงานดังกล่าวมีการติดตั้งชุดผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน เช่น ลม และเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น เมื่อเวลาใด พลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนไม่มี ก็ให้คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกรองฮาร์โมนิก แต่ถ้าหากเวลาใดพลังงานทดแทนสามารถผลิตได้มากกว่าโหลดของตนเอง ให้คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกรองฮาร์โมนิก และส่วนของพลังงานที่เกินโหลดตนเองสามารถส่งถ่ายให้กับระบบ กริดไฟฟ้า 3 เฟส (ขายพลังงานไฟฟ้าให้กับกริดไฟฟ้า) ได้

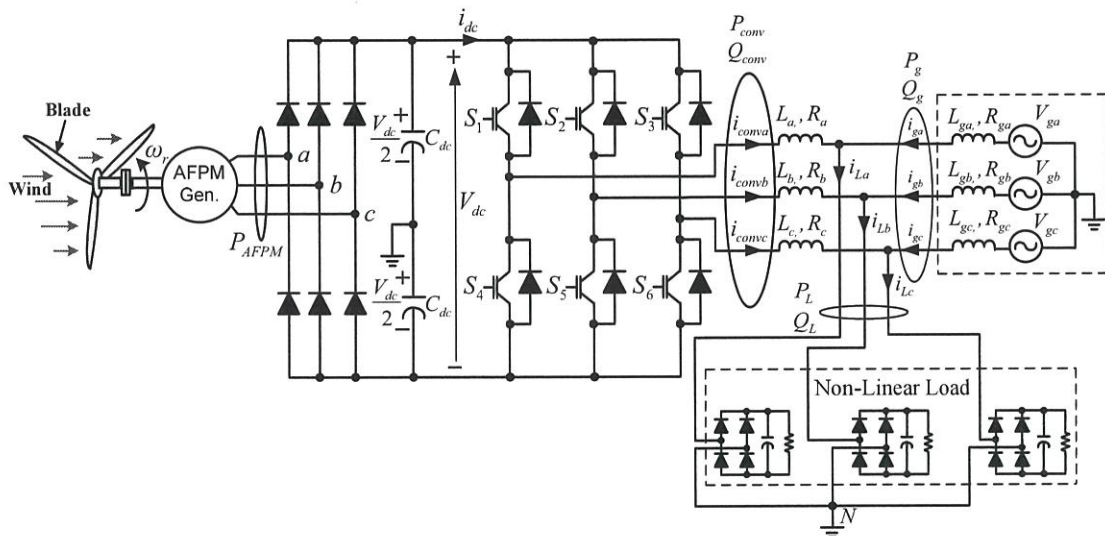
4.2 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์

จากการควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นทั้งตัวกรองกำลังไฟฟ้าแอกทีฟแบบขนานและสามารถเป็นตัวส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังกริดซึ่งส่วนประกอบต่างๆแสดงในรูปที่ 4.1 ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสชนิดเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตัดผ่านตามแนวแกนเพลลา(AFPM Gen.)ต่อเพลลาเชื่อมกับกังหันลมหมุนด้วยความเร็วโรเตอร์ในหน่วยเรเดียนต์ต่อวินาที (ω_r) เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสไดโอดบริดจ์ 3 เฟส คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส 3 กิ่ง แบบตัวเก็บประจุที่ไฟตรงแบบแยก ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมรวม โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และกริดระบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งการทำงานกำหนดดังนี้

สำหรับกรณีเป็นตัวกรองกำลังไฟฟ้าแอกทีฟแบบขนาน : เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสชนิดเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตัดผ่านตามแนวแกนเพลลาไม่มีการผลิตกำลังไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่จ่ายกระแสฮาร์โมนิกและกระแสรีแอกทีฟให้กับโหลด ส่วนองค์ประกอบหลักมูลของกระแสโหลดจะได้รับมาจากระบบกริด

สำหรับการทำงานเป็นทั้งตัวกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังกริด : เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสชนิดเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตัดผ่านตามแนวแกนเพลลามีการผลิตกำลังไฟฟ้าแอกทีฟมากกว่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟของโหลด ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ จ่ายกระแสฮาร์โมนิกกระแสรีแอกทีฟ และกระแสแอกทีฟให้กับโหลด ส่วนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ได้จากเครื่องกำเนิดที่เกินของโหลดจะถูกจ่ายไปยังกริด

ดังนั้นในการที่จะให้คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้หลายหน้าที่ได้นั้น จะขึ้นอยู่กับสัญญาณกระแสอ้างอิงซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.1 การทำงานคอนเวอร์เตอร์หลายหน้าที่

4.3 หลักการชดเชยกระแสกริดและการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิง

ในโครงการวิจัยนี้นำเสนอหลักการชดเชยกระแสกริดด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิงที่อยู่ในเทอมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่กริดกับโหลด ดังสมการที่ (4.1) ให้กับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันที่ควบคุมด้วยกระแสแบบแถบฮีสเทอรีซิสที่คั้งที่ [11]

$$P^* = P_g + P_L \quad (4.1)$$

$$Q^* = (Q_g + Q_L)$$

จากสมการที่ (4.1) สามารถขยายสมการให้อยู่ในเทอมของกระแสได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\begin{aligned} P^* &= v_{ga}i_{ga} + v_{gb}i_{gb} + v_{gc}i_{gc} + v_{ga}i_{La} + v_{gb}i_{Lb} + v_{gc}i_{Lc} \\ &= v_{ga}(i_{ga} + i_{La}) + v_{gb}(i_{gb} + i_{Lb}) + v_{gc}(i_{gc} + i_{Lc}) \\ Q^* &= j(v_{ga}i_{ga} + v_{gb}i_{gb} + v_{gc}i_{gc} + v_{ga}i_{La} + v_{gb}i_{Lb} + v_{gc}i_{Lc}) \\ &= j[v_{ga}(i_{ga} + i_{La}) + v_{gb}(i_{gb} + i_{Lb}) + v_{gc}(i_{gc} + i_{Lc})] \end{aligned} \quad (4.2)$$

เริ่มด้วยการหาลำดับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ P_g^* และกำลังไฟฟารีแอกทีฟอ้างอิงกริด Q_g^* ด้วยทฤษฎีพี-คิว (P-Q theory)[12] โดยทำการแปลงแรงดัน 3 เฟสที่กริดให้อยู่ในสมการกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง v_α และ v_β ดังสมการ (4.3) โดยกำหนดให้องค์ประกอบลำดับศูนย์เป็นศูนย์

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) ทำการแปลงแรงดัน v_α และ v_β ให้อยู่ในรูปของกระแสโดยใช้สมการที่ (4.4) ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.5) นำมาทำการแปลงกลับให้อยู่ในรูปแบบ 3 เฟส จะได้ตั้งสมการที่ (4.6)

$$\begin{bmatrix} i_{xa}^* \\ i_{xb}^* \\ i_{xc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.6) ที่ได้ จะเป็นสัญญาณกระแสอ้างอิงสำหรับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ P_g^* และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟอ้างอิง Q_g^* ที่กริดและเมื่อนำสมการที่ (4.6) มาทำการบวกกันโดยตรงกับกระแสโหลดซึ่งเป็นสัญญาณกระแสอ้างอิงสำหรับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ P_L^* และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟอ้างอิง Q_L^* ที่โหลด ดังสมการที่ (4.7)

$$\begin{aligned} i_{a,conv}^* &= i_{xa}^* + i_{La} \\ i_{b,conv}^* &= i_{xb}^* + i_{Lb} \\ i_{c,conv}^* &= i_{xc}^* + i_{Lc} \end{aligned} \quad (4.7)$$

เมื่อ i_{La}, i_{Lb} และ i_{Lc} คือกระแสโหลดชนิดไม่เชิงเส้นของเฟส a, b และ c ตามลำดับ

จากสมการที่ (4.3) ถึง (4.7) สามารถนำมาเขียนเป็นบล็อกการทำงานของหลักการชดเชยกระแสที่กริดด้วยการควบคุมกระแสดังรูปที่ 1.4 ในบทที่ 1 ที่กล่าวมาแล้ว

4.4 การคำนวณหาสัญญาณกระแสอ้างอิง

สำหรับการหาสัญญาณกระแสอ้างอิงนั้นจะใช้ทฤษฎีพี-ควซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้
แรงดันกริดทั้ง 3 เฟสคือ $V_{g\alpha}, V_{g\beta}$ และ V_{g0} แปลงให้อยู่ในระบบ $\alpha\beta 0$ คือ $V_{g\alpha}, V_{g\beta}$ และ V_{g0}
ดังแสดงในสมการที่ (4.8)

$$\begin{bmatrix} V_{g\alpha} \\ V_{g\beta} \\ V_{g0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{gan1} \\ V_{gbn1} \\ V_{cg1} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

เพื่อให้ได้รับสัญญาณกระแสอ้างอิงที่มีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้า สามารถกระทำได้โดยใช้
สมการที่ (4.9) ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า

$$\begin{bmatrix} P_g \\ Q_{g\alpha} \\ Q_{g\beta} \\ Q_g \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_{g\alpha} & V_{g\beta} & V_{g0} \\ 0 & -V_{g0} & V_{g\beta} \\ V_{g0} & 0 & -V_{g\alpha} \\ -V_{g\beta} & V_{g\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{g\alpha}^* \\ i_{g\beta}^* \\ i_{g0}^* \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.9) สามารถคำนวณหาสัญญาณกระแสอ้างอิงที่แทนด้วยค่ากำลังไฟฟ้าจริงอ้างอิง
และกำลังไฟฟ้าจิตภาพอ้างอิงได้ ดังแสดงในสมการที่ (4.10)

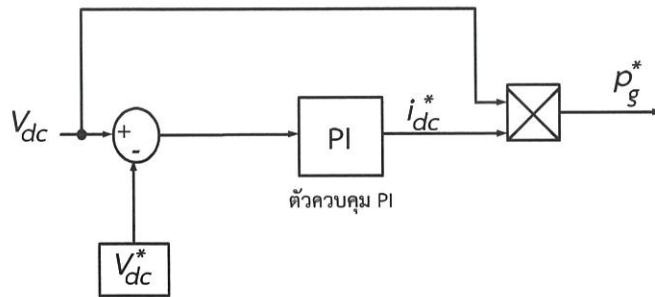
$$\begin{bmatrix} i_{g\alpha}^* \\ i_{g\beta}^* \\ i_{g0}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3 V_{tot}} \begin{bmatrix} V_{g\alpha} & 0 & V_{g0} & -V_{g\beta} \\ V_{g\beta} & -V_{g0} & 0 & V_{g\alpha} \\ V_{g0} & V_{g\beta} & -V_{g\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_g^* \\ Q_{g\alpha}^* \\ Q_{g\beta}^* \\ Q_g^* \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.10) กำหนดให้ $Q_{g\alpha}^* = Q_{g\beta}^* = 0$ ซึ่งสามารถเขียนใหม่ดังแสดงใน
สมการที่ (4.11)

$$\begin{bmatrix} i_{g\alpha}^* \\ i_{g\beta}^* \\ i_{g0}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_{tot}} \begin{bmatrix} V_{g\alpha} & 0 & V_{g0} & -V_{g\beta} \\ V_{g\beta} & -V_{g0} & 0 & V_{g\alpha} \\ V_{g0} & V_{g\beta} & -V_{g\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_g^* \\ 0 \\ 0 \\ Q_g^* \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

เมื่อ $V_{tot} = \sqrt{V_{g\alpha}^2 + V_{g\beta}^2 + V_{g0}^2}$

สำหรับการหาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟอ้างอิง หาได้จาก การส่งสัญญาณแรงดันไฟตรงค่าจริงเปรียบเทียบกับแรงดันไฟตรงอ้างอิง โดยผ่านตัวควบคุมพีไอที่มีการป้อนกลับบวก ซึ่งจะได้กระแสไฟตรงอ้างอิงที่มีค่าเป็นลบ หลังจากนั้น นำกระแสไฟตรงอ้างอิงไปคูณกับแรงดันไฟตรงค่าจริง ก็จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟอ้างอิงที่มีค่าเป็นลบ ซึ่งจากหลักการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2[22]



รูปที่ 4.2 การหาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟอ้างอิง

จากสมการที่ (4.11) เมื่อได้รับค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟอ้างอิงจากรูปที่ 4.2 จะได้สัญญาณที่เป็นรูปคลื่นซายน์ที่มีลักษณะกลับเฟสกับแรงดันกริดโดยที่มีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบหลักมูลของกระแสโหลด ดังนั้นเมื่อนำกระแสโหลดมาแปลงจากระบบ abc ไปเป็นระบบ $\alpha\beta 0$ ดังแสดงในสมการที่ (4.12) มาบวกกับสมการที่ (4.11) ก็จะได้สัญญาณฮาร์มอนิกของกระแสโหลด ดังแสดงในสมการที่ (4.13)

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha}^* \\ i_{L\beta}^* \\ i_{L0}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} i_{conv\alpha}^* &= i_{g\alpha}^* + i_{L\alpha}^* \\ i_{conv\beta}^* &= i_{g\beta}^* + i_{L\beta}^* \\ i_{conv0}^* &= i_{g0}^* + i_{L0}^* \end{aligned} \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.13) นำมาแปลงให้อยู่ในระบบ abc ดังแสดงในสมการที่ (4.14) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกระแสจริงผ่านตัวควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขต

$$\begin{bmatrix} i_{conva}^* \\ i_{convb}^* \\ i_{convc}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{conv\alpha}^* \\ i_{conv\beta}^* \\ i_{conv0}^* \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

ดังนั้นสมการที่ (4.14) เป็นสัญญาณกระแสอ้างอิงที่เป็นสัญญาณฮาร์โมนิกของกระแสโหลดที่สามารถควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถทำงานเป็นตัวกรองกำลังไฟฟ้าแอคทีฟได้

4.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการชดเชยกระแสกริต และการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิง โดยการคำนวณหาสัญญาณกระแสอ้างอิงโดยใช้ทฤษฎีพี-ควิ ซึ่งมีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้ คือ นำแรงดันกริตทั้ง 3 เฟสมาแปลงให้อยู่ในระบบ $\alpha\beta_0$ และนำไปจัดรูปให้อยู่ในเทอมของกระแสอ้างอิงที่แทนด้วยค่ากำลังไฟฟ้าจริงอ้างอิง และกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกังกริตไฟฟ้า 3 เฟส ให้ทำหน้าที่เป็นตัวส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่รับมาจากแหล่งพลังงานทดแทนไปยังกริต และเป็นตัวกรองฮาร์มอนิก เพื่อให้เกิดการลงทุนที่คุ้มค่าสำหรับตัวคอนเวอร์เตอร์ โดยสามารถนำคอนเวอร์เตอร์เพียงชุดเดียวให้ทำงานเป็นทั้งตัวส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าที่รับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจากแหล่งพลังงานทดแทนไปยังกริตและเป็นตัวกรองฮาร์มอนิกในเวลาเดียวกันนี้ และถ้าหากไม่มีพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนก็ยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกรองฮาร์มอนิกได้

บทที่ 5

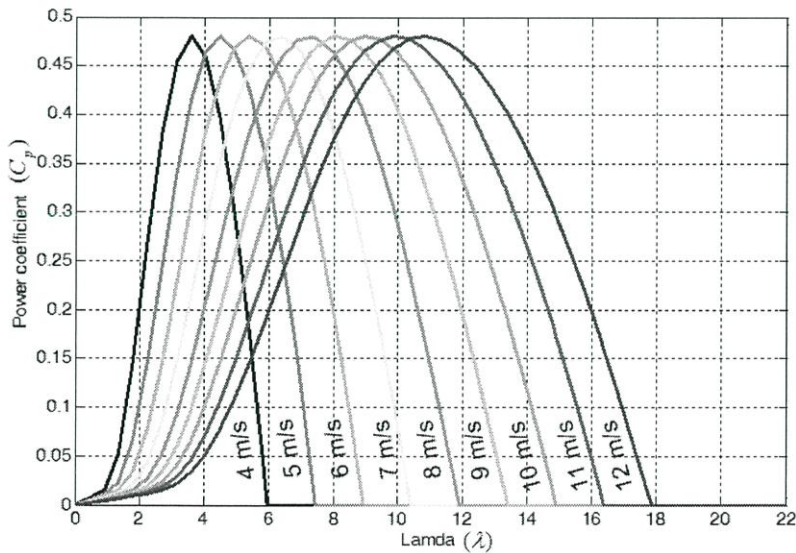
การจำลองและผลการจำลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองระบบที่นำเสนอด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับการจำลองระบบนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกคือ การจำลองการทำงานของกังหันลม ส่วนที่สองคือ การจำลองการทำงานของวงจรชุดบูสต์แรงดันไฟตรงได้แรงดันสูงไฟตรงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส และส่วนที่ 3 คือ การจำลองสมรรถนะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ตามระบบที่นำเสนอ โดยมีรายละเอียดดังนี้

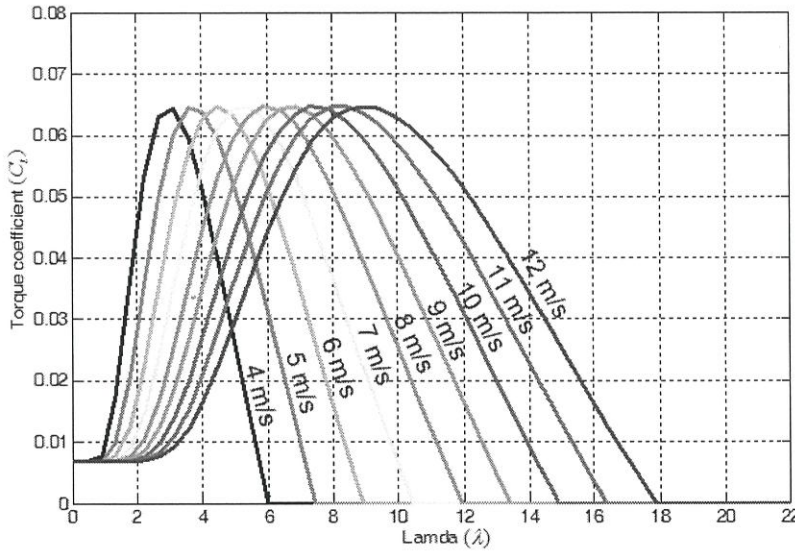
5.2 การจำลองการทำงานของกังหันลม

ในการจำลองศึกษาคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ ที่มีรัศมีใบพัดเท่ากับ 1.2 เมตร เมื่อดูความสัมพันธ์ของอัตราความเร็วปลายใบพัด(λ) กับสัมประสิทธิ์กำลัง(C_p) ที่มุม β เท่ากับ 0 องศา แสดงดังรูปที่ 5.1



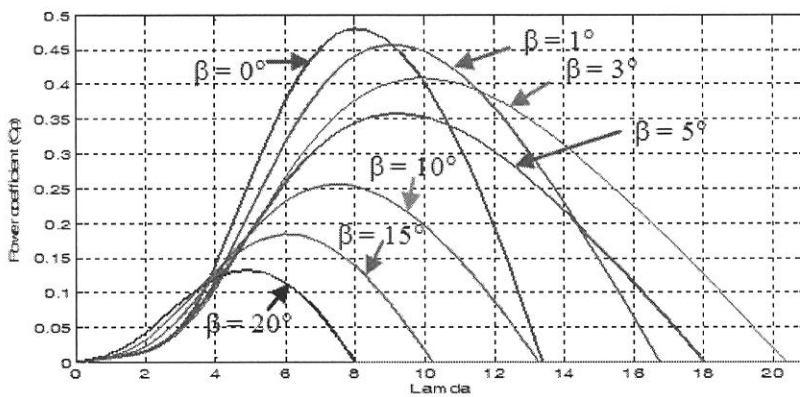
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของอัตราความเร็วปลายใบพัด(λ) กับสัมประสิทธิ์กำลัง(C_p)
ที่มุมบิดใบพัด β เท่ากับ 0 องศา

เมื่อดูความสัมพันธ์ของอัตราความเร็วปลายใบพัด(λ) กับสัมประสิทธิ์แรงบิด(C_T) ที่มุมบิดใบพัด β เท่ากับ 0 องศา ที่ความเร็วลมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.2



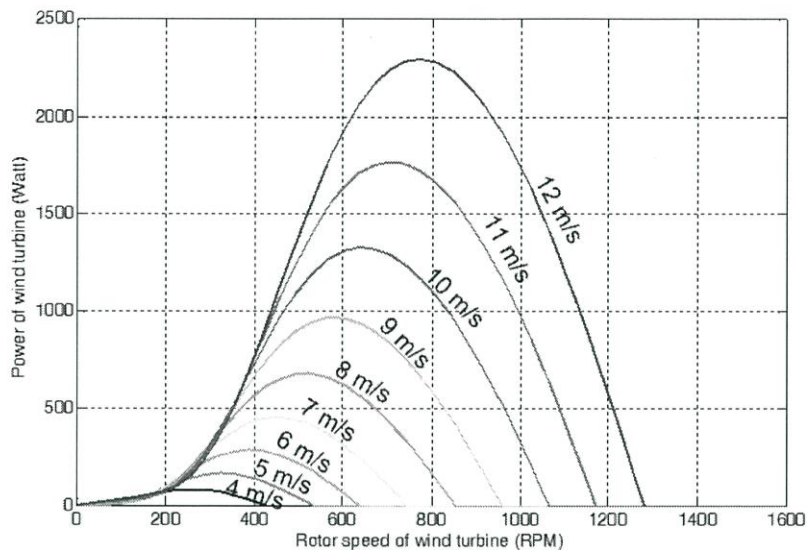
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของอัตราความเร็วปลายใบพัด(λ) กับสัมประสิทธิ์แรงบิด(C_T) ที่มุมบิดใบพัด β เท่ากับ 0 องศา

ผลการจำลองความสัมพันธ์ของค่ามุมบิดใบพัด(β) ต่างๆ กับสัมประสิทธิ์กำลัง(C_p) แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของค่ามุมบิดใบพัด(β) ต่างๆ กับสัมประสิทธิ์กำลัง(C_p)

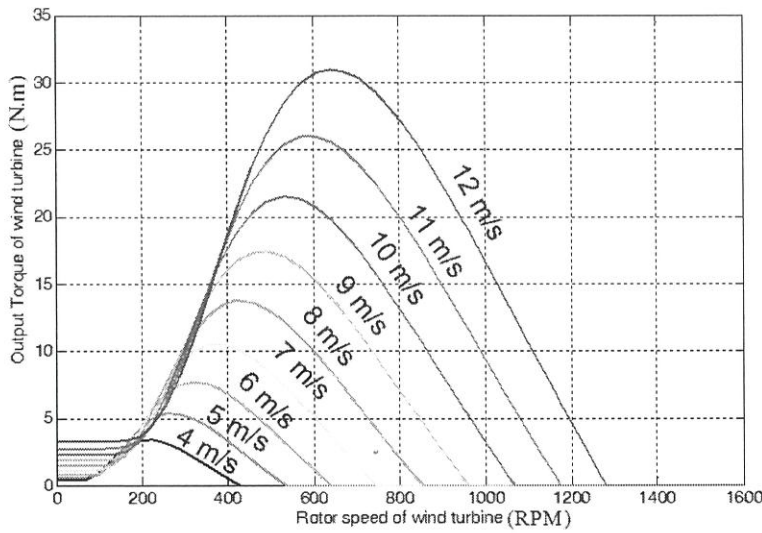
ส่วนผลการจำลองความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเพลลากังหัน (n) กับกำลังทางกล (P_m) ที่ความเร็วลมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเพลลากังหัน (n) กับกำลังทางกลเอาต์พุตของกังหันลม (P_m) ที่ความเร็วลมต่างๆ

รูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วลมมากกว่า 9 เมตรต่อวินาที กำลังทางกลเอาต์พุตสูงสุดที่เกิดขึ้นที่กังหันลมมีค่าประมาณเท่ากับ 1 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบของเพลลากังหันมีค่าประมาณ 600 รอบต่อนาที และที่ความเร็วลมต่ำกว่า 9 เมตรต่อวินาที กำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่ใบพัดกังหันลมจะมีค่าต่ำกว่า 1 กิโลวัตต์

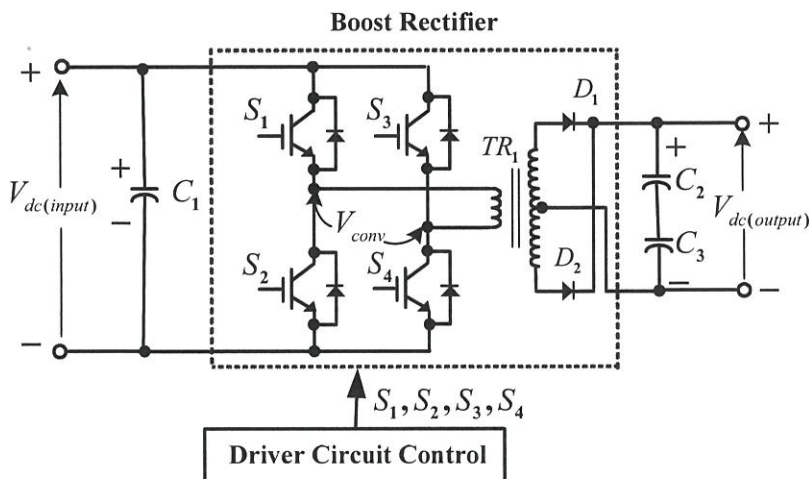
ส่วนผลการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (n) กับแรงบิด (T_m) ที่ความเร็วลมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.5



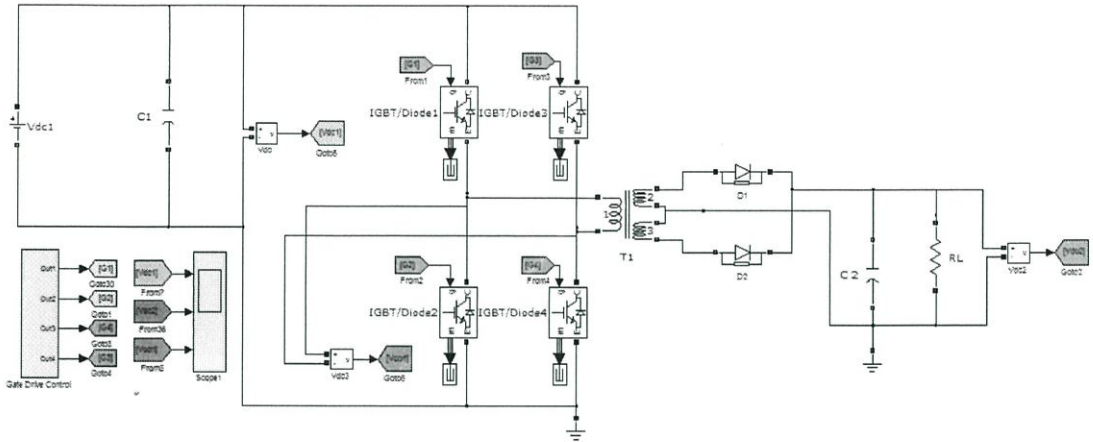
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของเพลลา (n) กับแรงบิด (T_m) ที่ความเร็วลมต่างๆ

5.3 การจำลองการทำงานของวงจรชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

การจำลองการทำงานของวงจรชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 5.6 ส่วนวงจรจำลองชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 5.7

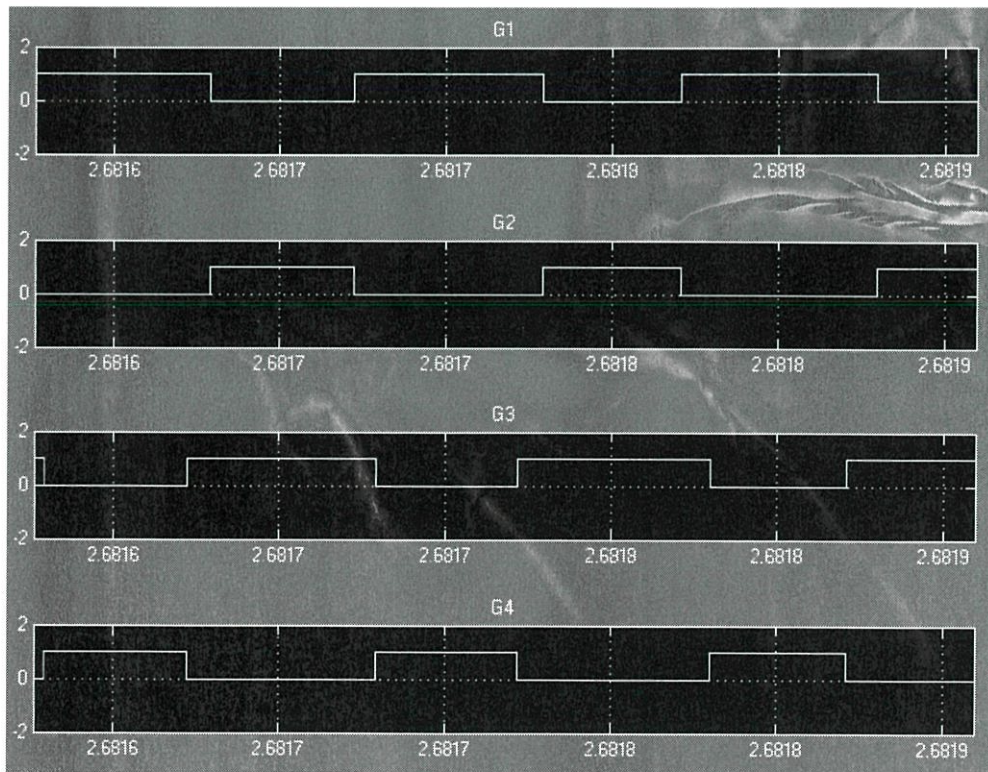


รูปที่ 5.6 วงจรชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส



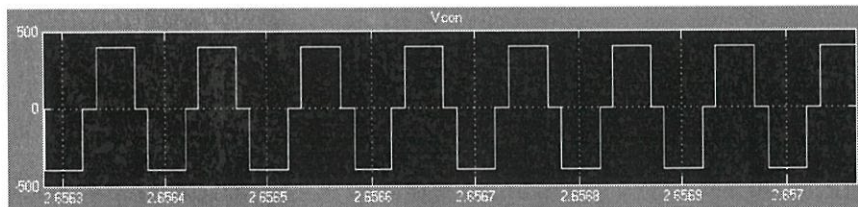
รูปที่ 5.7 วงจรจำลองชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ลักษณะของสัญญาณขับเกท G1 , G2 , G3 และ G4 ในวงจรจำลองชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 5.8

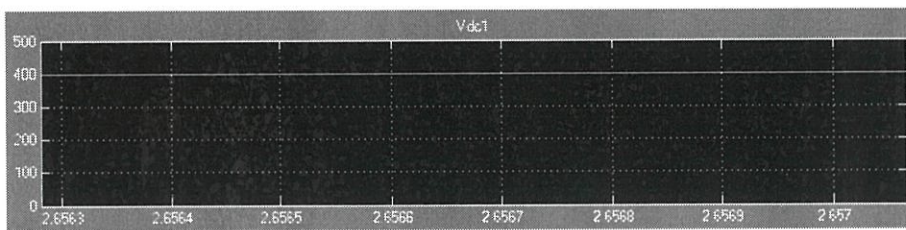


รูปที่ 5.8 สัญญาณขับเกท G1 , G2 , G3 และ G4 ในวงจรจำลองชุดบูสต์แรงดันไฟตรง

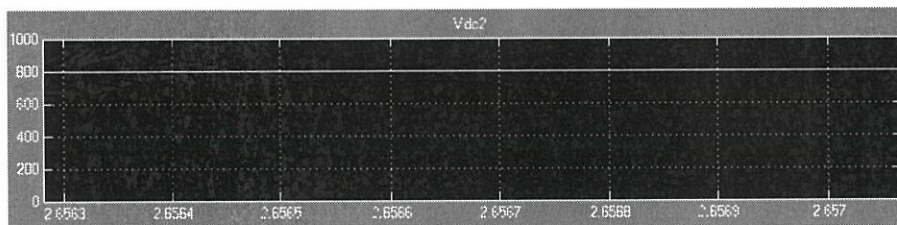
ผลการจำลองจับสัญญาณแรงดันคอนเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.9 ส่วนผลการจำลองจับสัญญาณแรงดันด้านอินพุต แสดงดังรูปที่ 5.10 และผลการจำลองจับสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.9 ผลการจำลองจับสัญญาณแรงดันคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.10 ผลการจำลองจับสัญญาณแรงดันด้านอินพุต

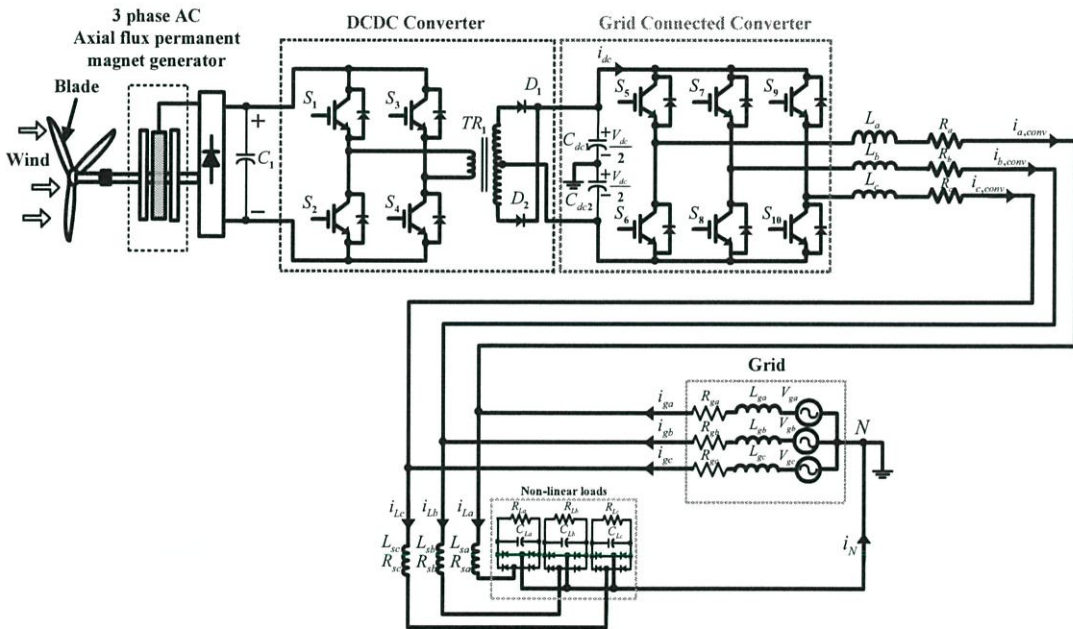


รูปที่ 5.11 ผลการจำลองจับสัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุต

จากผลการจำลองจะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณแรงดันไฟตรงด้านเอาต์พุตมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 400 โวลต์ เป็น 800 โวลต์ เราสามารถทำการปรับสัญญาณแรงดันไฟตรงด้านเอาต์พุตให้มีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยการปรับสัญญาณควบคุมชุดบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูง ซึ่งจะนำสัญญาณแรงดันไฟตรงที่ได้ไปป้อนยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสต่อไป

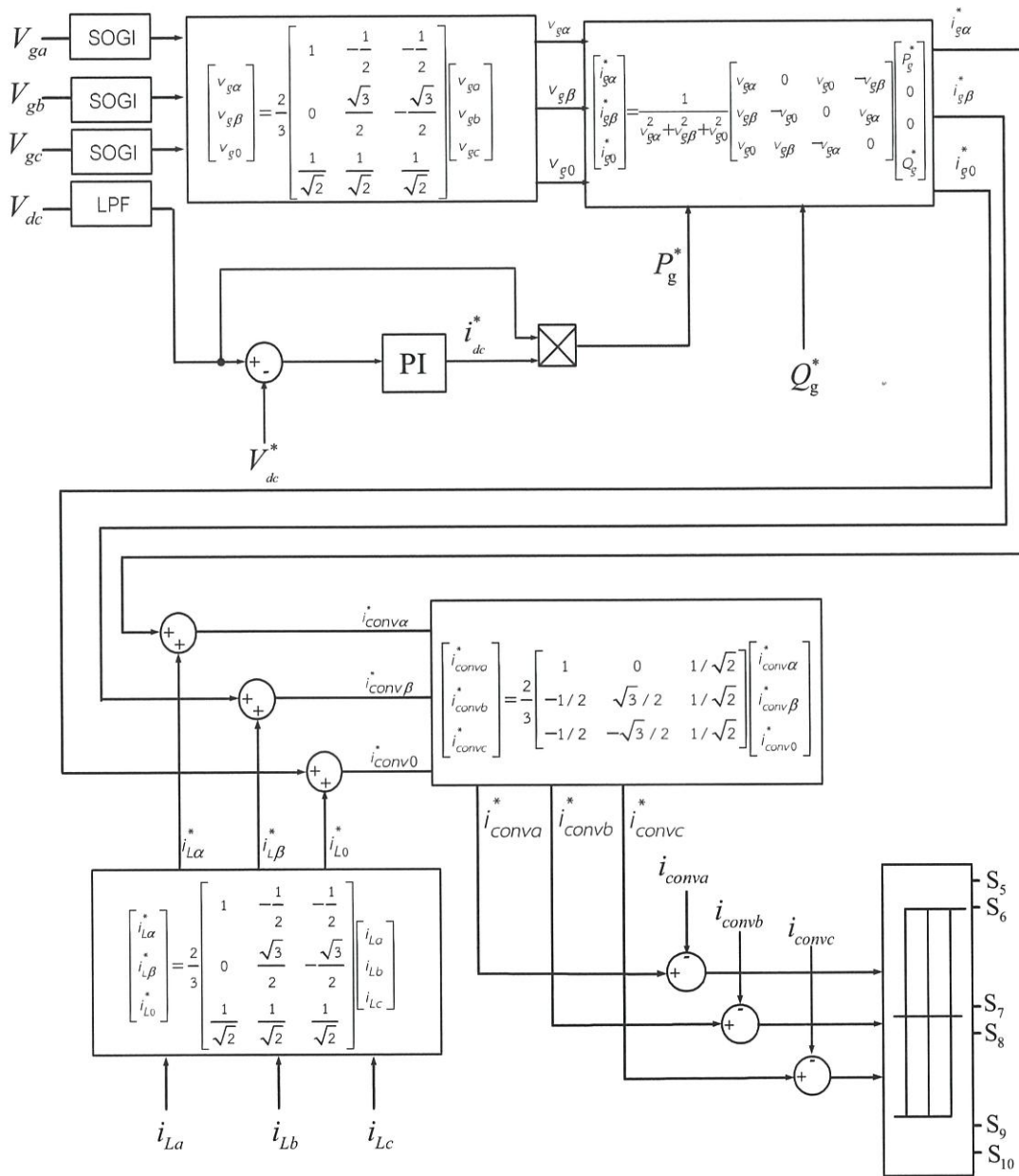
5.4 การจำลองสมรรถนะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ตามระบบที่นำเสนอ

การจำลองเพื่อศึกษาการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่หลายหน้าที่ กระทำโดยการใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ส่วนวงจรกำลังและวงจรควบคุมของระบบจำลองที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 5.12(ก) และ 5.12(ข) ตามลำดับ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา โดยเพลลานั้นเชื่อมต่อกับกังหันลมที่หมุนโดยอาศัยพลังงานลม สำหรับส่วนประกอบอื่นคือ คอนเวอร์เตอร์ 3 กิ่งชนิดแบ่งตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับระบบกริด ตัวเหนี่ยวนำภายในของระบบกริด 3 เฟส 4 สาย โหลดไม่เชิงเส้นชนิด 1 เฟส แบบไดโอดบริดจ์ที่มีตัวเก็บประจุกรองแรงดันและโหลดเป็นค่าความต้านทานที่ต่อกับกริดไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมดุล และส่วนควบคุมที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 5.1



(ก) วงจรกำลังของระบบจำลองที่นำเสนอ

รูปที่ 5.12 องค์ประกอบของการควบคุมคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดไฟฟ้าระบบ 3 เฟส 4 สาย
ที่ทำงานหลายหน้าที่



(ข) ส่วนควบคุม

รูปที่ 5.12(ต่อ) องค์ประกอบของการควบคุมคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกริดไฟฟ้าระบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ทำงานหลายหน้าที่

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการจำลองระบบ

พิกัดระบบกริด:	380 V, 50 Hz , 3 เฟส 4 สาย
ค่าความเหนี่ยวนำภายในของระบบกริด: $L_{ga} = L_{gb} = L_{gc}$	0.4 mH
ค่าความต้านทานภายในของระบบกริด: $R_{ga} = R_{gb} = R_{gc}$	0.1 Ω
แรงดันไฟตรงอ้างอิง: V_{dc}^*	800 V
ค่าความเหนี่ยวนำเชื่อมระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับระบบกริด/เฟส: $L_a = L_b = L_c$	8 mH
ค่าความต้านทานภายในของความเหนี่ยวนำเชื่อมระหว่าง คอนเวอร์เตอร์กับระบบกริด/เฟส $R_a = R_b = R_c$	0.1 Ω
ค่าความต้านทานของโหลดไม่เชิงเส้น: $R_{La} = R_{Lb} = R_{Lc}$	150 Ω
ค่าตัวเก็บประจุของโหลดไม่เชิงเส้น: $C_{La} = C_{Lb} = C_{Lc}$	680 μ F
ค่าความเหนี่ยวนำสำหรับกรองสัญญาณรบกวนแรงดันกริดและ กระแสโหลด : $L_{sa} = L_{sb} = L_{sc}$	6 mH
ค่าความต้านทานภายในของค่าความเหนี่ยวนำกรองแรงดันและ กระแสโหลดให้เรียบขึ้น $R_{sa} = R_{sb} = R_{sc}$	0.1 Ω
ค่าตัวเก็บประจูด้านไฟตรงของคอนเวอร์เตอร์: $C_{dc1} = C_{dc2}$	5000 μ F
ความถี่ในการสวิตช์: f_{sw}	10 kHz
ค่าแบนด์คั้งที่ของตัวควบคุมกระแสฮีสเตอร์ซิสแบบแบนด์คั้งที่	0.92
ค่าคั้งที่สมการตัวกรองอินทิเกรตทั่วไปแบบอันดับสอง(SOGI): K	1
ค่าคั้งที่ของตัวควบคุม PI : K_p, K_i	0.3, 5

รูปคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.13 แลสเปกตรัมฮาร์มอนิกของ
กระแสตามจุดต่างๆ สำหรับกรณี 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 5.14 และแลสเปกตรัมฮาร์มอนิกของ
กระแสตามจุดต่างๆ สำหรับกรณี 3 และ 4 แสดงดังรูปที่ 5.15 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

กรณีที่ 1: กระแสกริดมีลักษณะใกล้เคียงกับกระแสโหลด ดังแสดงในรูปที่ 5.13(ก) และ
5.13 (ค) ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์ปรากฏเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการสูญเสียที่คอนเวอร์เตอร์ และ
ส่วนที่ คอนเวอร์เตอร์ที่ต้องการกระแสเพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันไฟตรงได้ ดังแสดงในรูปที่
5.13 (ก) สำหรับช่วงเวลานี้จะสังเกตได้ว่า เมื่อกระแสกริดมีลักษณะใกล้เคียงกระแสโหลดซึ่ง
คุณลักษณะของโหลดชนิดนี้ จะสร้างกระแสในวตอร์ลในอันดับที่ 3 , 9 ,15 และจากกรณีที่ 1 เมื่อนำ
คลื่นกระแสต่างๆ มากระจายสเปกตรัมฮาร์มอนิก ดังแสดงในรูปที่ 5.14(ก) สังเกตได้ว่า องค์ประกอบ
หลักมูลของกระแสกริดจะมากกว่ากระแสโหลด โดยค่าองค์ประกอบหลักมูลของกระแสกริดดังแสดง
ในรูปที่ 5.14 (ก-1), 5.14 (ก-2) และ 5.14 (ก-3) ส่วนฮาร์มอนิกของกระแสกริดจะเหมือนกับกระแส
โหลดดังแสดงในรูปที่ 5.14 (ก-1) และ 5.14 (ก-3) และด้วยคุณลักษณะของโหลดชนิดนี้ จะสร้าง
กระแสในวตอร์ลที่กริดที่อันดับฮาร์มอนิกที่ 3 9 และ15 เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 5.14 (ก-4) และ
พร้อมกันนี้เมื่อทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสกริดปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ
59.36 %

กรณีที่ 2: กระแสกริดใกล้เคียงขายนและมีมุมที่อินเฟสกับแรงดันกริด ดังแสดงในรูปที่
5.13 (ก) ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีลักษณะคลื่นที่เป็นฮาร์มอนิกของกระแสโหลดดังแสดงใน
รูปที่ 5.13 (ข) และ 5.13 (ค) เมื่อกระแสกริดมีลักษณะเป็นขายน เป็นผลทำให้กระแสที่นิวตอร์ลถูก
กำจัดไปดังแสดงในรูปที่ 5.13 (ง) ซึ่งช่วงเวลานี้ คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกรองกำลังไฟฟ้า
แอกทีฟ และจากรูปคลื่นกระแสต่างๆ เมื่อนำมาทำการกระจายแลสเปกตรัมฮาร์มอนิก กระแสกริด
จะมีเพียงองค์ประกอบหลักมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.14(ข-1) ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์จะ
ประกอบด้วย ส่วนองค์ประกอบหลักมูลค่าน้อยๆ เนื่องจากการรวมกันระหว่างกระแสที่คอนเวอร์เตอร์
ต้องการเพื่อรักษาแรงดันไฟตรงกับและค่ากำลังไฟฟ้แอกทีฟของโหลดดังแสดงในรูปที่ 5.14 (ข-2)
สำหรับฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์จะเหมือนกับกระแสโหลด ดังแสดงในรูปที่ 5.14 (ข-2)
และ 5.14 (ข-3) สำหรับกระแสในวตอร์ลนั้นแลสเปกตรัมฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ มีปรากฏเพียง
เล็กน้อยดังรูปที่ 5.14 (ข-4) และพร้อมกันนี้เมื่อทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม
ของกระแสกริดปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 7.04 %

กรณีที่ 3: กระแสกริดใกล้เคียงชายน์และมีมุมที่ต่างเฟสกับแรงดันกริดอยู่ประมาณ 180 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.13(ก) ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีลักษณะคลื่นที่เกิดจากองค์ประกอบหลักมูลของกระแสกริดบวกกับกระแสโหลดดังแสดงในรูปที่ 5.13 (ข) และ 5.13 (ค) เมื่อกระแสกริดมีลักษณะเป็นชายน์ ย่อมส่งผลให้กระแสที่นิวตรอลถูกกำจัดไปดังรูปที่ 5.13 (ง) ซึ่งช่วงเวลานี้ คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกรองฮาร์มอนิกและส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟไปยังกริด และจากรูปคลื่นกระแสต่างๆ เมื่อนำมาทำการกระจายแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิก กระแสกริดจะมีเพียงองค์ประกอบหลักมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.15 (ก-1) ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์จะประกอบด้วย ส่วนองค์ประกอบหลักมูลที่มีค่ามากและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกจะประกอบด้วยฮาร์มอนิกดังแสดงในรูปที่ 5.15 (ก-2) ที่เหมือนกับฮาร์มอนิกของกระแสโหลด ดังแสดงในรูปที่ 5.15 (ก-3) ส่วนองค์ประกอบหลักมูลของกระแสคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีค่าเท่ากับองค์ประกอบหลักมูลของกระแสโหลดบวกด้วยค่าองค์ประกอบหลักมูลของกระแสกริด สำหรับกระแส นิวตรอลยังคงปรากฏที่น้อยมากดังรูปที่ 5.15 (ก-4) และพร้อมกันนี้เมื่อทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสกริดปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 5.42 %

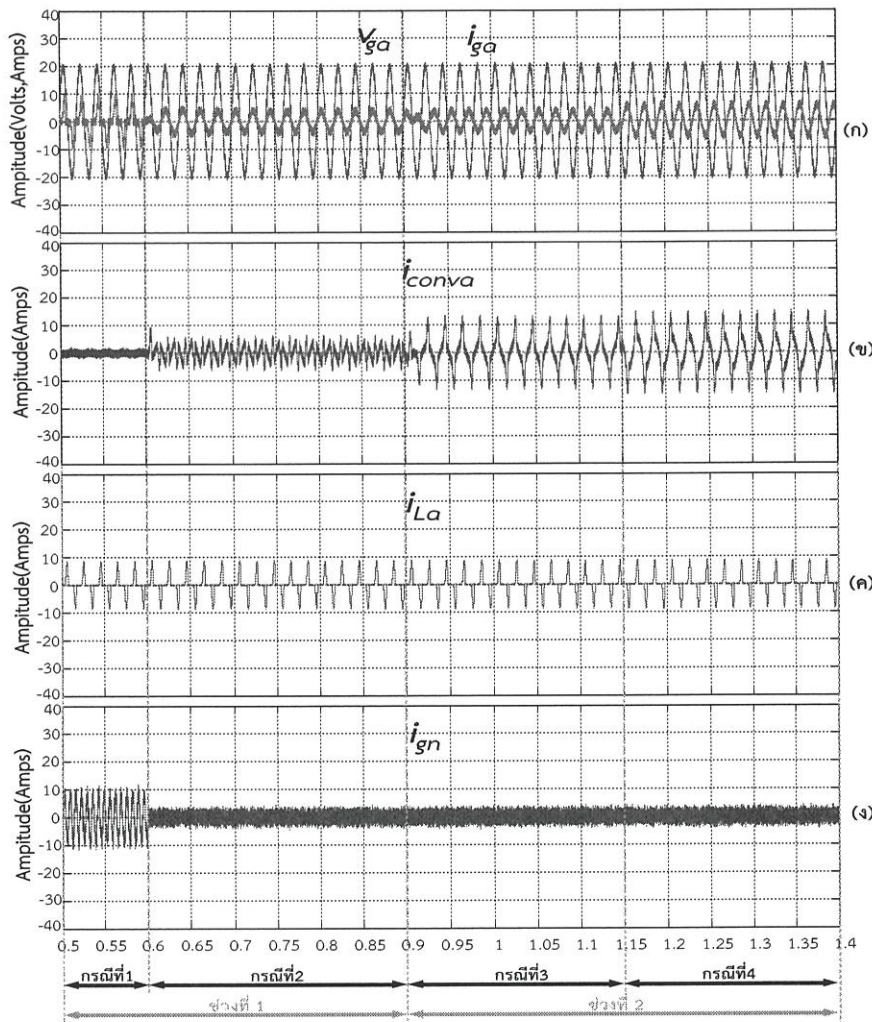
กรณีที่ 4: กระแสกริดใกล้เคียงชายน์ที่มีขนาดเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 3 และมีมุมนำหน้ากับแรงดันกริดอยู่ประมาณ 130 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.13 (ก) ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีลักษณะคลื่นที่เกิดจากองค์ประกอบหลักมูลของกระแสกริดที่ล่าหลังแรงดันกริดบวกกับกระแสโหลดดังแสดงในรูปที่ 5.13 (ข) และ 5.13 (ค) เมื่อกระแสกริดมีลักษณะเป็นชายน์ ย่อมส่งผลให้กระแสที่นิวตรอลถูกกำจัดไปดังแสดงในรูปที่ 5.13 (ง) ซึ่งช่วงเวลานี้ คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกรองฮาร์มอนิกและส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟไปยังกริด และจากรูปคลื่นกระแสต่างๆ เมื่อนำมาทำการกระจายแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิก กระแสกริดจะมีเพียงองค์ประกอบหลักมูลที่มีค่าสูง ดังแสดงในรูปที่ 5.15 (ข-1) สำหรับกระแส นิวตรอลยังคงปรากฏที่น้อยมากดังรูปที่ 5.15 (ข-4) และพร้อมกันนี้เมื่อทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสกริดปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 5.04 %

จากรูปที่ 5.16 (ก) และ 5.16 (ข) แสดงการวัดค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟตามจุดต่างๆ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยการแบ่งออกเป็นแต่ละกรณีดังนี้

กรณีที่ 1 : ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่วัดได้ที่คอนเวอร์เตอร์ กริด และโหลดมีค่า -88.42 วัตต์ 1,746 วัตต์ และ 1,657.6 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า กริดจะจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟให้กับโหลดและคอนเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ก-1) , 5.16 (ก-2) และ 5.16(ก-3) ส่วนค่ากำลังไฟฟ้า

รีแอกทีฟที่วัดได้ที่คอนเวอร์เตอร์ กริด และโหลดมีค่า 0 วาร์ , 484.8 วาร์ และ 484.8 วาร์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า กริดเท่านั้นที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับโหลด ดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ข-1) , 5.16 (ข-2) และ 5.16 (ข-3)

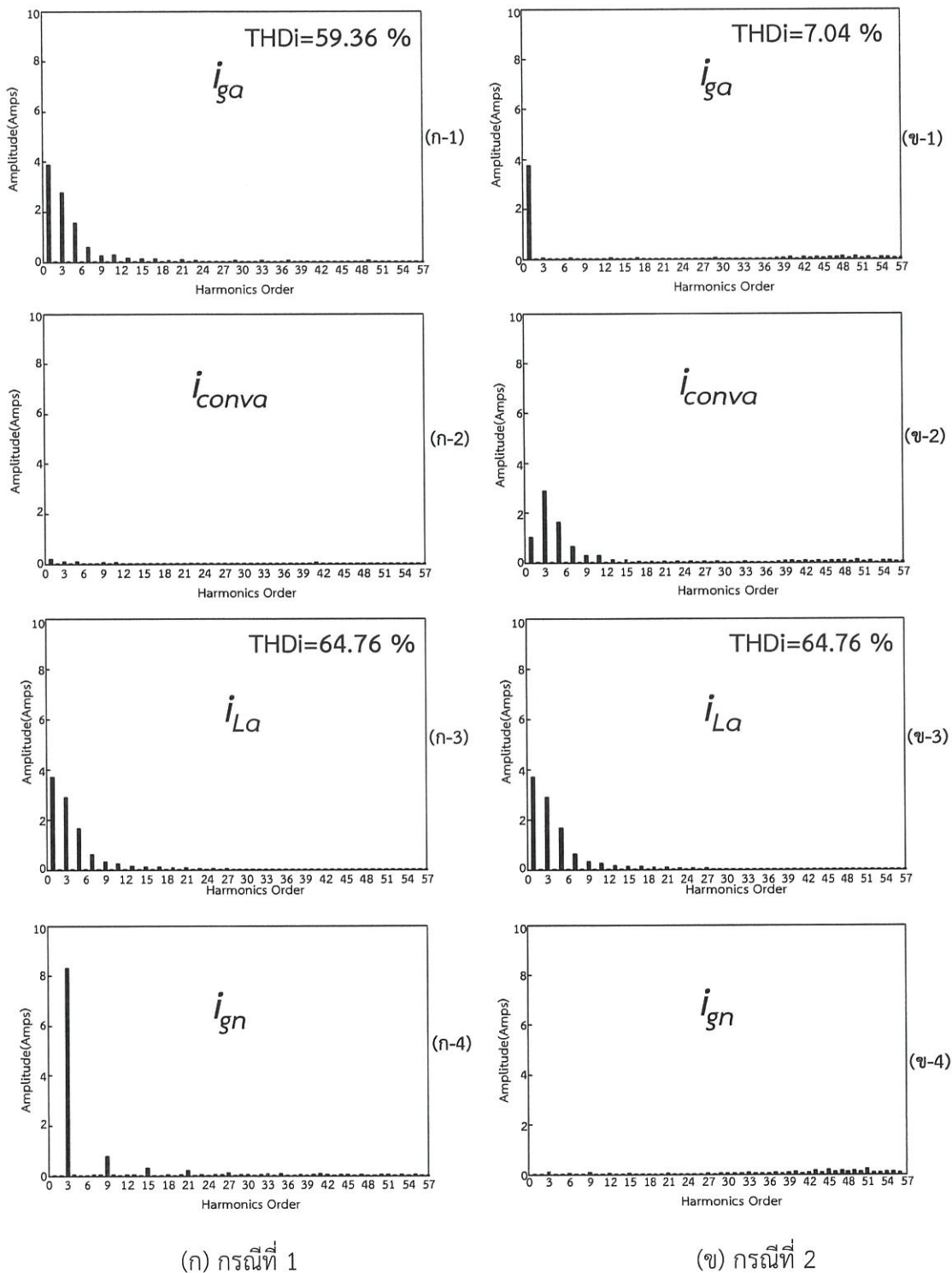
กรณีที่ 2 : ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่วัดได้ที่คอนเวอร์เตอร์ กริด และโหลดมีค่า -88.42 วัตต์ 1,746 วัตต์ และ 1,657.6 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า กริดจะจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟให้กับโหลดและคอนเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ก-1) , 5.16 (ก-2) และ 5.16(ก-3) ส่วนค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่วัดได้ที่คอนเวอร์เตอร์ กริด และโหลดมีค่า 484.8 วาร์ 0 วาร์ และ 484.8 วาร์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า คอนเวอร์เตอร์เท่านั้นที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับโหลด ดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ข-1) , 5.16 (ข-2) และ 5.16 (ข-3)



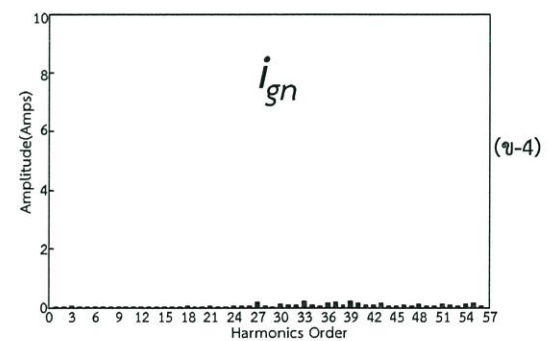
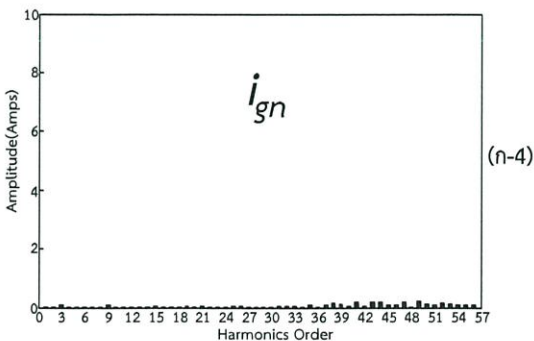
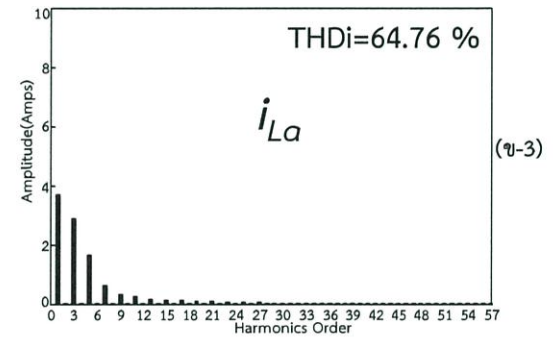
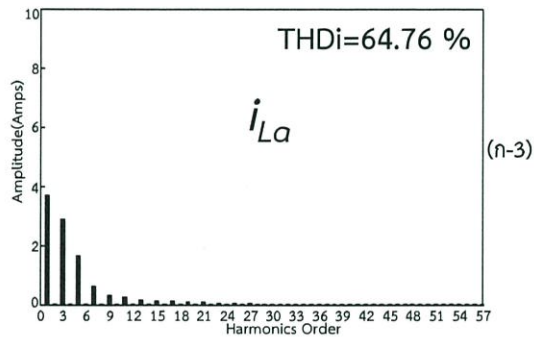
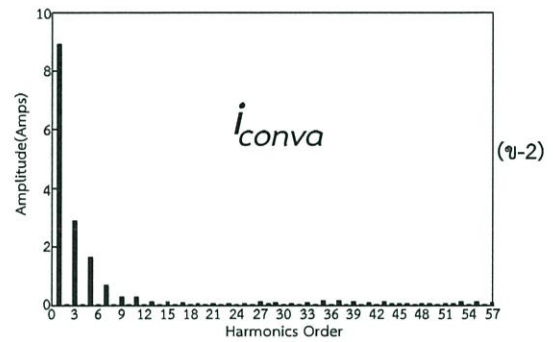
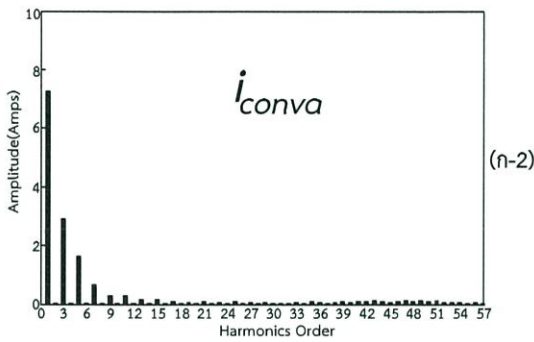
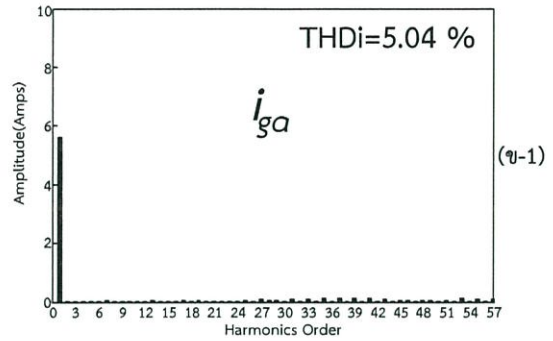
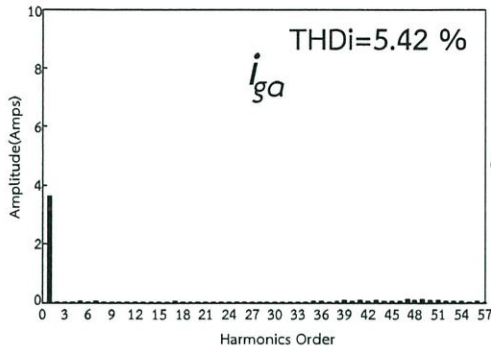
รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองชั่วขณะของแรงดันและกระแสจุดต่างๆ

กรณีที่ 3 : ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่วัดได้ที่คอนเวอร์เตอร์ กฤต และโหลดมีค่า 3,348.6 วัตต์ -1,691 วัตต์ และ 1,657.6 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า คอนเวอร์เตอร์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟให้กับโหลดและกฤต ดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ก-1) , 5.16 (ก-2) และ 5.16 (ก-3) ส่วนค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่วัดได้ที่คอนเวอร์เตอร์ กฤต และโหลดมีค่า 484.8 วาร์ , 0 วาร์ และ 484.8 วาร์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า คอนเวอร์เตอร์เท่านั้นที่จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับโหลด ดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ข-1) , 5.16 (ข-2) และ 5.16 (ข-3)

กรณีที่ 4 : ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่วัดได้ที่คอนเวอร์เตอร์ กฤตและโหลดมีค่า 3,348.6 วัตต์ -1,691 วัตต์ และ 1,657.6 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า คอนเวอร์เตอร์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟให้กับโหลดและกฤต ดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ก-1) , 5.16 (ก-2) และ 5.16 (ก-3) ส่วนค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่วัดได้ที่คอนเวอร์เตอร์ กฤตและโหลดมีค่า 2,498.8 วาร์ , -2,014 วาร์ และ 484.8 วาร์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า คอนเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับโหลดและกฤต ดังแสดงในรูปที่ 5.16 (ข-1) , 5.16 (ข-2) และ 5.16 (ข-3)



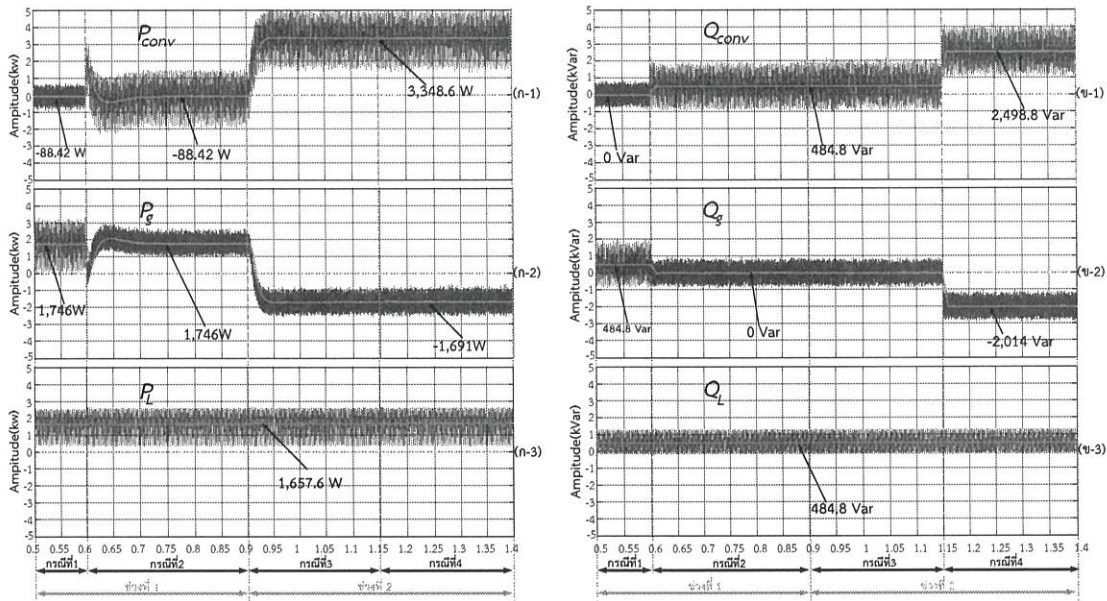
รูปที่ 5.14 แถบสเปกตรัมของกระแสตามจุดต่างๆ



(ก) กรณีที่ 3

(ข) กรณีที่ 4

รูปที่ 5.15 แลสเปกตรัมของกระแสตามจุดต่างๆ



(ก) ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

(ข) ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

รูปที่ 5.16 ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟตามจุดต่างๆ

5.5 บทสรุป

ในบทนี้จะสรุปเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การจำลองการทำงานของกังหันลมที่ขนาดรัศมีใบพัด 1.2 เมตร ที่ค่าความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะผลิตกำลังกลเอาต์พุตได้ประมาณ 1,000 วัตต์ ที่ความเร็วรอบเพลลาของกังหันลมประมาณ 600 รอบต่อนาที ส่วนที่ 2 การจำลองการทำงานของวงจรชุดบูสต์แรงดันไฟตรงได้แรงดันสูงไฟตรงป้อนไปยังชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ได้ผลการจำลองแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่จ่ายไปยังอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสในการเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริด 3 เฟส เป็นสัญญาณแรงดันไฟตรงขนาดประมาณ 800 โวลต์ เมื่อสัญญาณทางด้านอินพุตที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กไหลตามแนวแกนเพลลาในการจำลองกำหนดให้มีค่า 400 โวลต์ และส่วนที่ 3 คือ การจำลองสมรรถนะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ตามระบบที่นำเสนอ โดยผลการจำลองการตอบสนองชั่วขณะของแรงดัน และกระแสจุดต่างๆ ใน 4 กรณี สรุปได้ดังนี้

กรณีที่ 1 กระแสกริดมีลักษณะใกล้เคียงกับกระแสโหลด ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์ปรากฏเพียงเล็กน้อย และองค์ประกอบหลักมูลของกระแสกริดจะมากกว่ากระแสโหลด ส่วนฮาร์มอนิกของกระแสกริดจะเหมือนกับกระแสโหลด ด้วยคุณลักษณะของโหลดชนิดนี้ จะสร้างกระแสรีแอกทีฟที่กริดที่อันดับฮาร์มอนิกที่ 3 9 และ 15 เป็นต้น และพร้อมกันนี้เมื่อทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสกริดปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 59.36 % เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและ

รีแอกทีฟตามจุดต่างๆ จะเห็นได้ว่าไม่มีการชดเชยกำลังรีแอกทีฟจากตัวคอนเวอร์เตอร์สำหรับโหลดไม่เชิงเส้น โดยกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้น และคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 1,657.6 วัตต์ และ 88.42 วัตต์ตามลำดับ และกริดยังจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 484.8 วาร์

กรณีที่ 2: กระแสกริดใกล้เคียงขายนและมีมุมที่อินเฟสกับแรงดันกริด ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีลักษณะคลื่นที่เป็นฮาร์มอนิกของกระแสโหลด เมื่อกระแสกริดมีลักษณะเป็นขายนเป็นผลทำให้กระแสที่นิวตรอลถูกกำจัดไป ซึ่งช่วงเวลานี้คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกรองฮาร์มอนิก แถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแสกริดจะมีเพียงองค์ประกอบหลักมูล สำหรับฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์จะเหมือนกับกระแสโหลด ส่วนกระแสนิวตรอลนั้นแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ มีปรากฏเพียงเล็กน้อย และพร้อมกันนี้เมื่อทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสกริดปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 7.04 % เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟตามจุดต่างๆ จะเห็นได้ว่าตัวคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ชดเชยกำลังรีแอกทีฟสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 484.8 วาร์ โดยกริดไม่ได้จ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้น แต่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจากกริดไปยังโหลดไม่เชิงเส้นและคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 1,657.6 วัตต์ และ 88.42 วัตต์ตามลำดับ

กรณีที่ 3: กระแสกริดใกล้เคียงขายนและมีมุมที่ต่างเฟสกับแรงดัน กริดอยู่ประมาณ 180 องศา ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีลักษณะคลื่นที่เกิดจากองค์ประกอบหลักมูลของกระแสกริดบวกกับกระแสโหลด โดยกระแสที่นิวตรอลถูกกำจัดไป ซึ่งช่วงเวลานี้คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกรองฮาร์มอนิกและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟไปยังกริด โดยแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกกระแสกริดจะมีเพียงองค์ประกอบหลักมูล ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยส่วนองค์ประกอบหลักมูลที่มีค่ามากและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกจะเหมือนกับฮาร์มอนิกของกระแสโหลด ส่วนองค์ประกอบหลักมูลของกระแสคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีค่าเท่ากับองค์ประกอบหลักมูลของกระแสโหลดบวกด้วยค่าองค์ประกอบหลักมูลของกระแสกริด สำหรับกระแสนิวตรอลยังคงปรากฏที่น้อยมาก และพร้อมกันนี้เมื่อทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสกริดปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 5.42 % เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟตามจุดต่างๆ จะเห็นได้ว่าตัวคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ชดเชยกำลังรีแอกทีฟสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 484.8 วาร์ โดยกริดไม่ได้จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้น แต่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจากคอนเวอร์เตอร์คืนไปยังกริดและจ่ายให้กับโหลดไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 1,691 วัตต์ และ 1,657.6 วัตต์ตามลำดับ

กรณีนี้ที่ 4: กระแสกริดใกล้เคียงขายนที่มีขนาดเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 3 มีมูมนำหน้ากับแรงดันกริดอยู่ประมาณ 130 องศา ส่วนกระแสคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีลักษณะคลื่นที่เกิดจากองค์ประกอบหลักมูลของกระแสกริดที่ล่าหลังแรงดันกริดบวกกับกระแสโหลด เมื่อกระแสกริดมีลักษณะเป็นขายน ย่อมส่งผลให้กระแสที่นิวตรอลถูกกำจัดไป ซึ่งช่วงเวลานี้คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกรองฮาร์มอนิกและส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟไปยังกริด และเมื่อนำมาทำการกระจายแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิก กระแสกริดจะมีเพียงองค์ประกอบหลักมูลที่มีค่าสูง สำหรับกระแสนิวตรอลยังคงปรากฏที่น้อยมากและพร้อมกันนี้เมื่อทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสกริดปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 5.04 % เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟตามจุดต่างๆ จะเห็นได้ว่าตัวคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ชดเชยกำลังรีแอกทีฟสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นและจ่ายคืนกริดมีค่าเท่ากับ 484.8 วาร์ และ 2,014 วาร์ ตามลำดับ ขณะเดียวกันตัวคอนเวอร์เตอร์ยังทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟคืนสู่กริดและจ่ายไปยังโหลดไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 1,691 วัตต์ และ 1,657.6 วัตต์ตามลำดับ

บทที่ 6

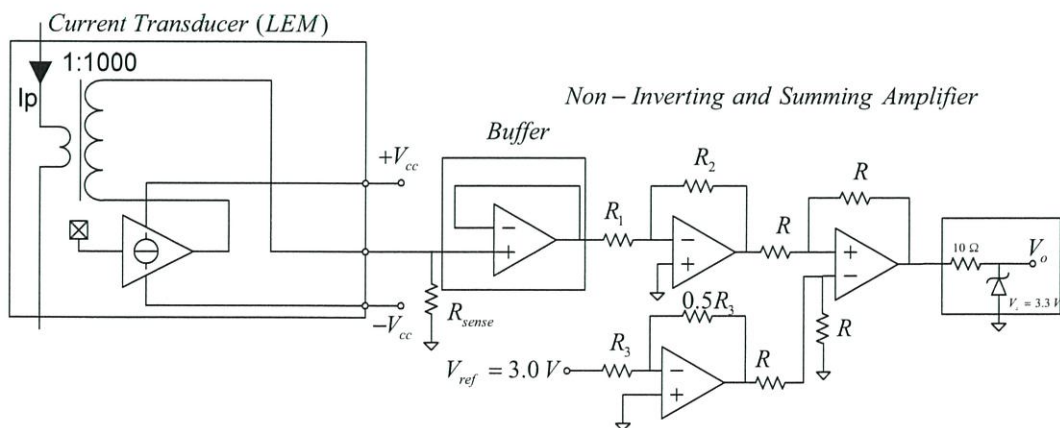
การออกแบบวงจร และการสร้างฮาร์ดแวร์

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจร และสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบเชื่อมต่อกรีด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขับเคลื่อนโดยกึ่งหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น โดยอาศัยเทคนิคการชดเชยกระแสกริดด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีพี-คิวที่อยู่ในเทอมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่กริดกับโหลด เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดจ่ายแรงดัน โดยส่วนของโปรแกรมควบคุมจะเขียนลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนของฮาร์ดแวร์ต่างๆ มีรายละเอียดของการออกแบบสร้างดังนี้

6.2 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน

การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน โดยแบ่งออกเป็นวงจรตรวจจับกระแส วงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับ และวงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ถึง 6.3

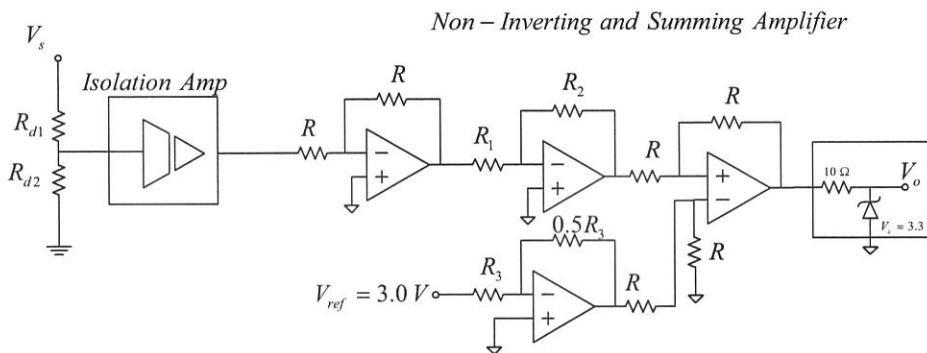


รูปที่ 6.1 วงจรตรวจจับกระแสโดยใช้ Current Transducer แบบ Hall Effect

$$V_o = \frac{-I_p R_{sense} R_2}{1000R_1} + 1.5 \quad (6.1)$$

$$sensitivity = \frac{V_o}{I_p} = \frac{R_{sense} R_2}{1000R_1} \text{ Volts / Amp} \quad (6.2)$$

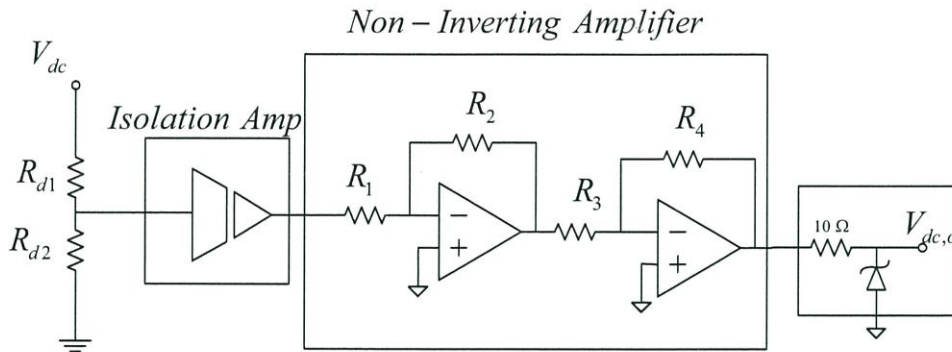
การออกแบบวงจรตรวจจ่ายกระแสสามารถแสดงวงจรได้ดังรูปที่ 6.1 และสามารถอธิบายแรงดันขาออกและค่าความไวของวงจรตรวจจ่ายกระแสได้ดังสมการที่ (6.1) และ (6.2) ตามลำดับ โดยส่วนประกอบหลักๆ จะแบ่งออกเป็นตัวเซนเซอร์และวงจรปรับขนาดและยกระดับสัญญาณเพื่อให้สามารถใช้งานในย่านการวัด และยกระดับสัญญาณเหมาะสมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ให้สามารถวัดค่าได้ทั้งซีกบวกและซีกลบของสัญญาณกระแส



รูปที่ 6.2 วงจรตรวจจ่ายแรงดันไฟสลับโดยใช้ Isolation Amplifier เป็นตัวแยกการรบกวนของสัญญาณควบคุมและวงจรกำลัง

$$V_o = \frac{V_s R_{d1}}{(R_{d1} + R_{d2})} \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + 1.5 \quad (6.3)$$

$$Gain = \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_{d1}}{(R_{d1} + R_{d2})} \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (6.4)$$

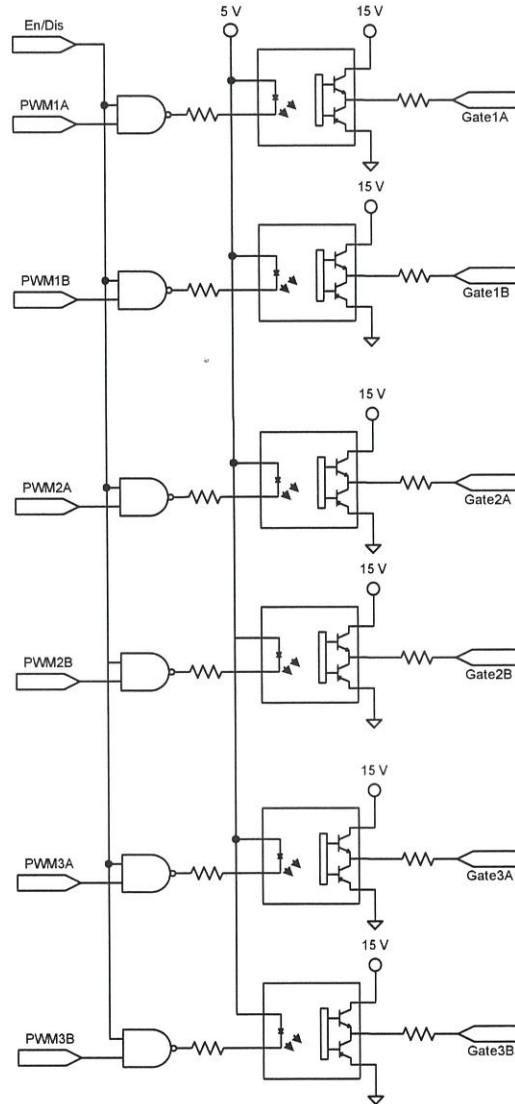


รูปที่ 6.3 วงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงโดยใช้ Isolation Amplifier เป็นตัวแยกกราวด์ของสัญญาณควบคุมและวงจรกำลัง

$$V_{dc,o} = \frac{R_2 R_4 R_{d2}}{R_1 R_3 (R_{d1} + R_{d2})} V_{dc} \quad (6.5)$$

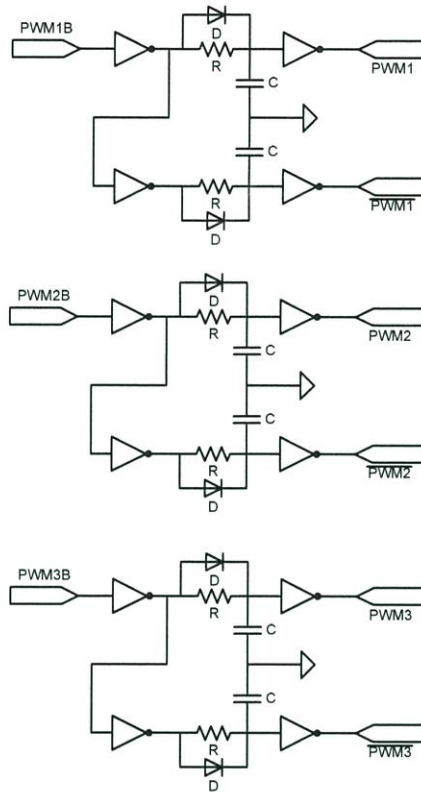
วงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับ และวงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง สามารถแสดงวงจรได้ดังรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ โดยจะใช้ Isolation Amplifier เป็นตัวแยกกราวด์ของสัญญาณแรงดัน ปรับขนาดและยกระดับสัญญาณโดยใช้วงจร Non-Inverting and Summing Amplifier แต่สำหรับวงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงจะไม่ได้ยกระดับสัญญาณ สามารถอธิบายแรงดันขาออกและอัตราขยายของวงจรได้ดังสมการที่ (6.3) ถึง (6.5)

6.3 การออกแบบวงจรขับเคลื่อน วงจรประวิงเวลา และการต่อขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์



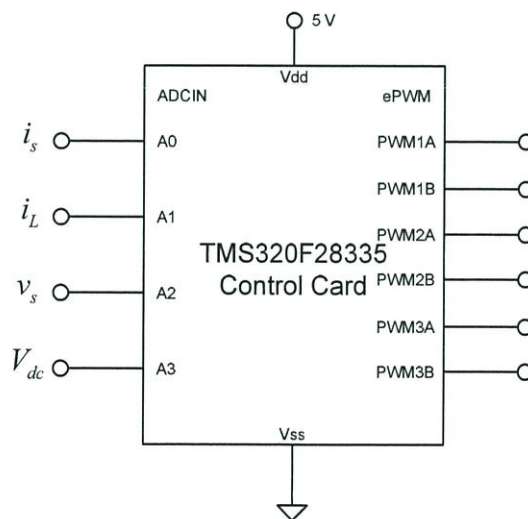
รูปที่ 6.4 วงจรขับเคลื่อนที่สามารถสั่งใช้งานและหยุดใช้งานสัญญาณขับเคลื่อนได้

ในรูปที่ 6.4 ได้แสดงวงจรขับเคลื่อนซึ่งสัญญาณขาเข้าเป็นแบบ Active High และสัญญาณขาออกเป็นแบบ Active Low โดยที่วงจรมีสามารถสั่งใช้งานและหยุดใช้งานสัญญาณขับเคลื่อนได้ Opto-isolator เบอร์ TLP250 และใช้ Intelligent Power Module (IPM) เบอร์ PM25RSB120 ซึ่งเป็นโมดูล IGBT พิกัด 1200 V 25A ซึ่งแรงดันขับเคลื่อนเป็นแบบ Active Low ซึ่งสามารถ On IGBT ที่แรงดัน 0V และ Off ที่แรงดัน 15V



รูปที่ 6.5 วงจรประวิงเวลา (Deadtime)

วงจรถ่วงเวลาที่ใช้งานเลือกใช้ RC Circuit ซึ่งสามารถคำนวณเวลาได้จาก $V_{Low} = 5 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$ ซึ่ง V_{Low} คือแรงดันลอจิก 0 ของไอซี Not Logic gate และได้แสดงวงจรถ่วงเวลาในรูปที่ 6.5

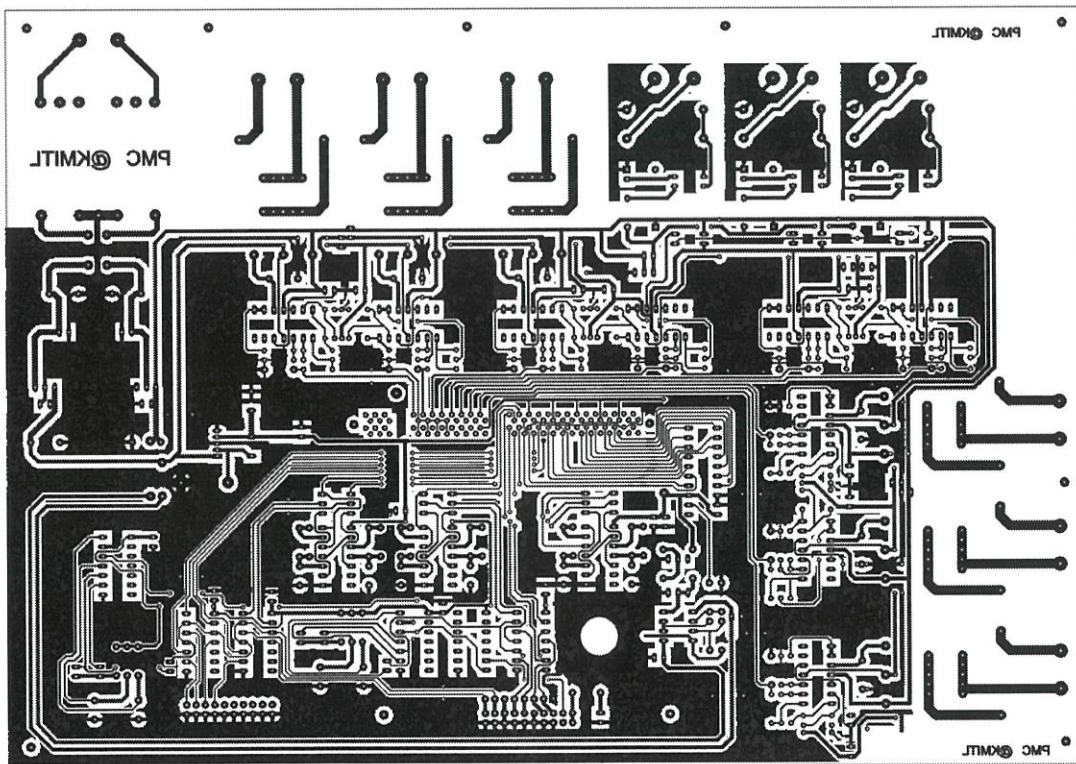


รูปที่ 6.6 การเชื่อมต่อสัญญาณเข้าและออกของไมโครคอนโทรลเลอร์

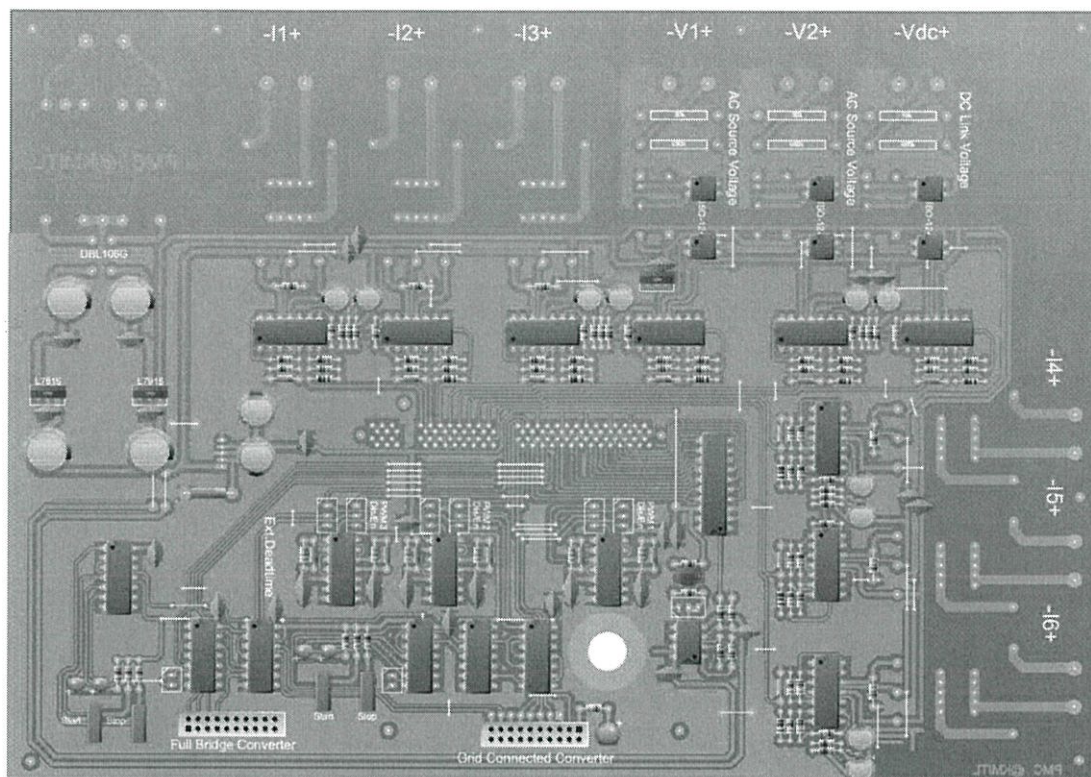
รูปที่ 6.6 แสดงการเชื่อมต่อขาสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณอนาล็อกที่ได้รับการปรับขนาดและยกระดับสัญญาณแล้ว โดยมีกระแสแหล่งจ่ายไฟสลับ (i_s), กระแสโหลด (i_L), แรงดันแหล่งจ่ายไฟสลับ (v_s) และ แรงดันไฟตรงเชื่อมโยง (V_{dc}) ในขณะที่สัญญาณขาออกจะเป็นสัญญาณการมอดูเลทความกว้างพัลส์ (PWM)

6.4 สายทองแดง ภาพสามมิติ และภาพถ่ายของวงจรที่ได้ออกแบบ

หลังจากได้ออกแบบวงจรตรวจจับกระแสแหล่งจ่าย วงจรตรวจจับแรงดันแหล่งจ่ายไฟสลับ วงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง การเชื่อมต่อสัญญาณขาเข้าและออกของไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรประวิงเวลา (Deadtime) และวงจรขับเคลื่อนสำหรับ Intelligent Power Module (IPM) เบอร์ PM25RSB120 ของบริษัท Mitsubishi แล้วได้จัดทำแผ่นวงจรพิมพ์ และประกอบเชื่อมต่องจรในแต่ละส่วนขึ้น และได้มีรายละเอียดและรูปภาพดังนี้

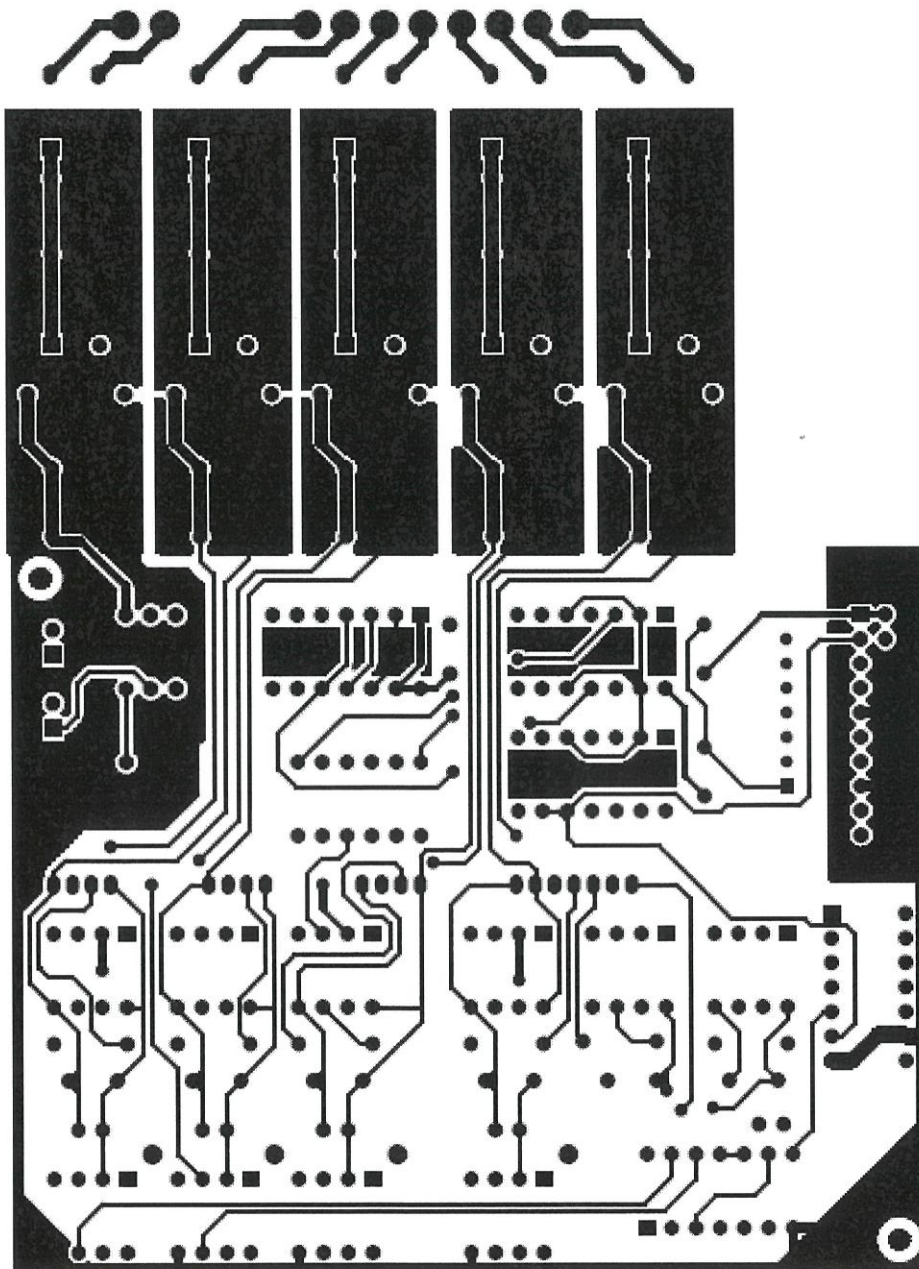


รูปที่ 6.7 สายทองแดงด้านล่างของวงจรควบคุมระบบเชื่อมต่องรีด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลาขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น



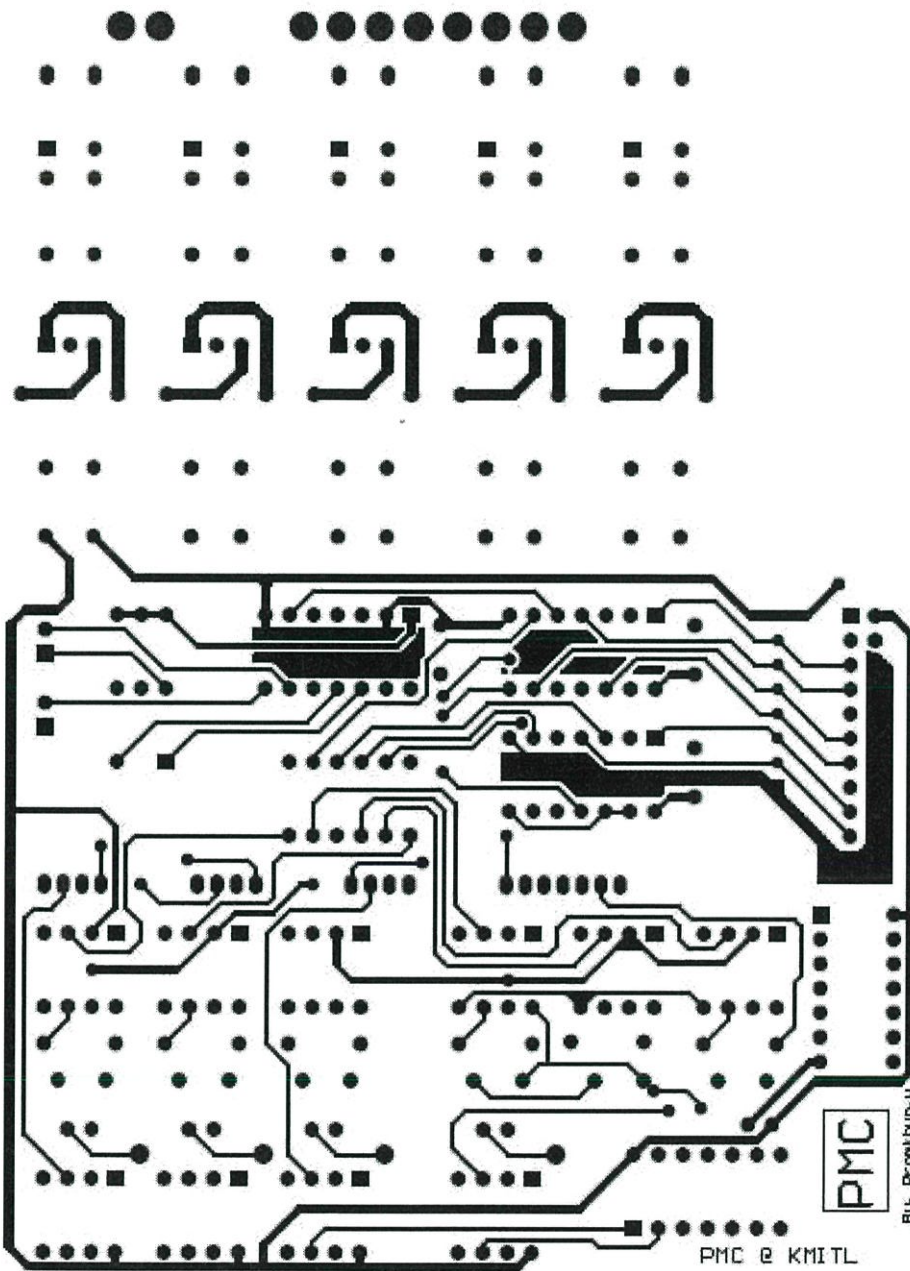
รูปที่ 6.8 ภาพสามมิติของวงจรควบคุมระบบเชื่อมต่อกรีด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

วงจรควบคุมระบบเชื่อมต่อกรีด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น ได้แสดงลายทองแดงของวงจรในรูปที่ 6.7 และได้แสดงภาพสามมิติของวงจรในรูปที่ 6.8 ซึ่งวงจรนี้ได้รวมทั้งวงจรตรวจจับกระแส วงจรตรวจจับแรงดันแหล่งจ่ายไฟสลับ วงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง วงจรประจิงเวลา ไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรจ่ายไฟเลี้ยงที่ได้กล่าวถึงในการออกแบบวงจรส่วนต่างๆข้างต้น ในส่วนสัญญาณขาออกของวงจรนี้คือสัญญาณ PWM ที่จะนำไปใช้ขับเคลื่อนของ IGBT ที่อยู่ใน Intelligent Power Module (IPM)

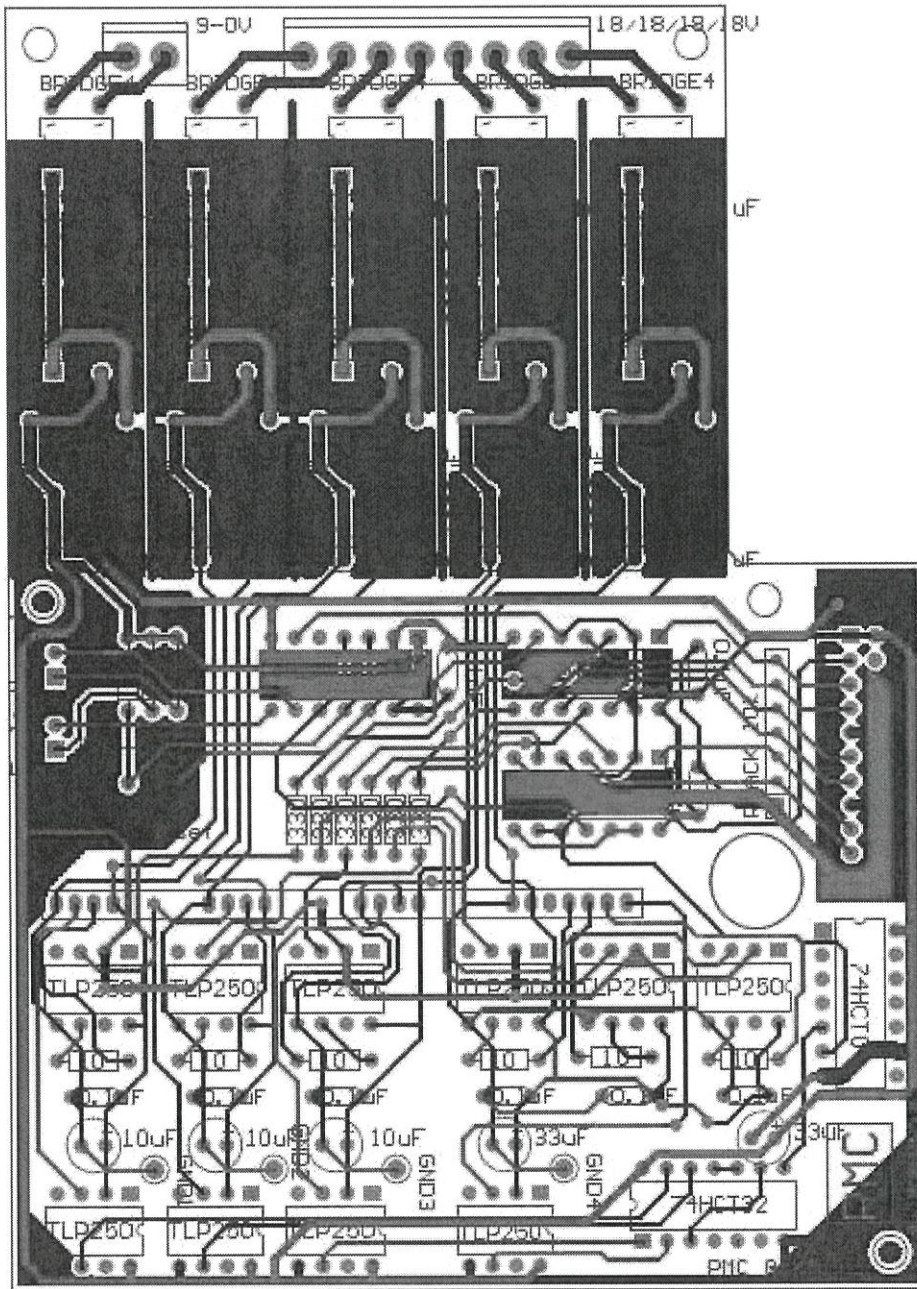


รูปที่ 6.9 ลายทองแดงด้านล่างของวงจรขั้วเกต IPM Module เบอร์ PM25RSB120

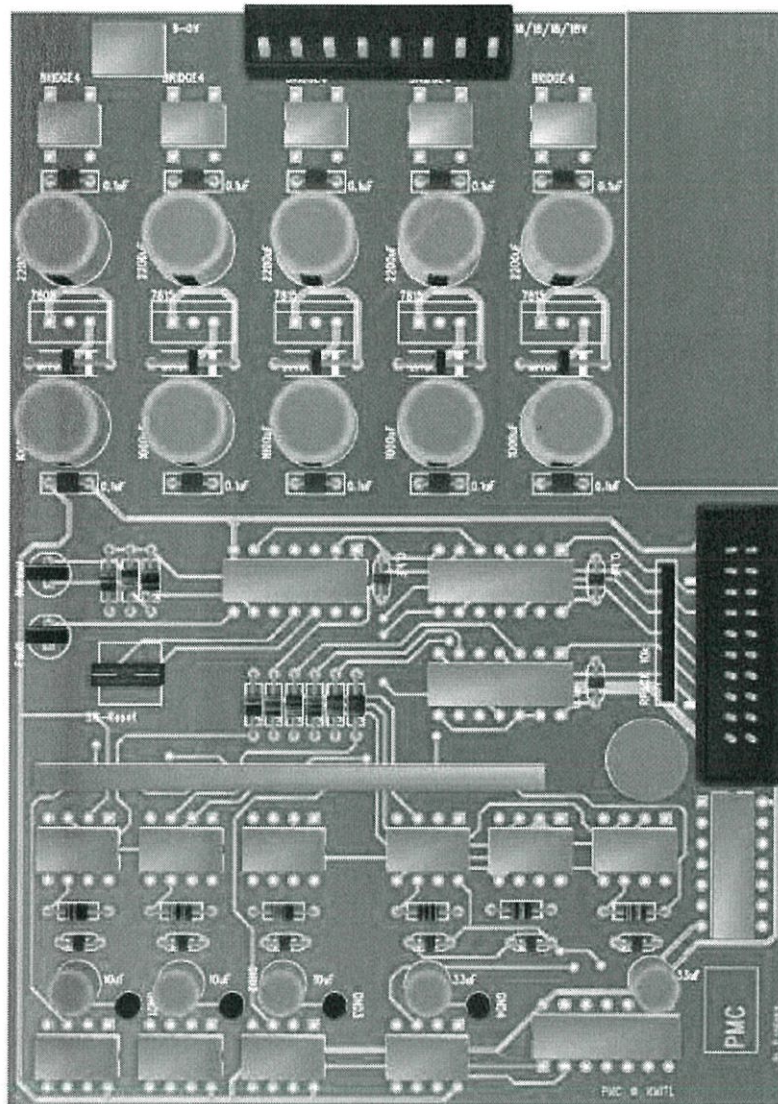
รูปที่ 6.9 ได้แสดงลายทองแดงด้านล่างของวงจรขั้วเกต IPM Module เบอร์ PM25RSB120 ในรูปที่ 6.10 แสดงลายทองแดงด้านบนของวงจรขั้วเกต ส่วนรูปที่ 6.11 ได้แสดงลายทองแดงทั้งด้านบนและด้านล่างของวงจร และในรูปที่ 6.12 ได้แสดงภาพสามมิติของวงจรขั้วเกต IPM Module เบอร์ PM25RSB120 ที่ได้ออกแบบวงจรตั้งได้กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 6.10 ลายทองแดงด้านบนของวงจรขับเคลื่อน IPM Module เบอร์ PM25RSB120

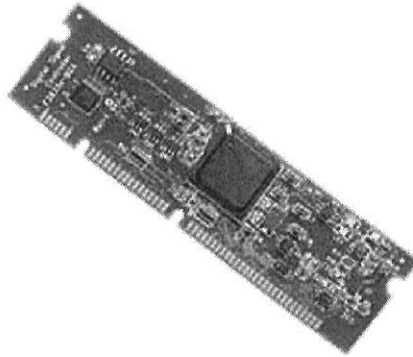


รูปที่ 6.11 ลายทองแดงด้านบนและด้านล่างของวงจรขั้วเกต IPM Module เบอร์ PM25RSB120

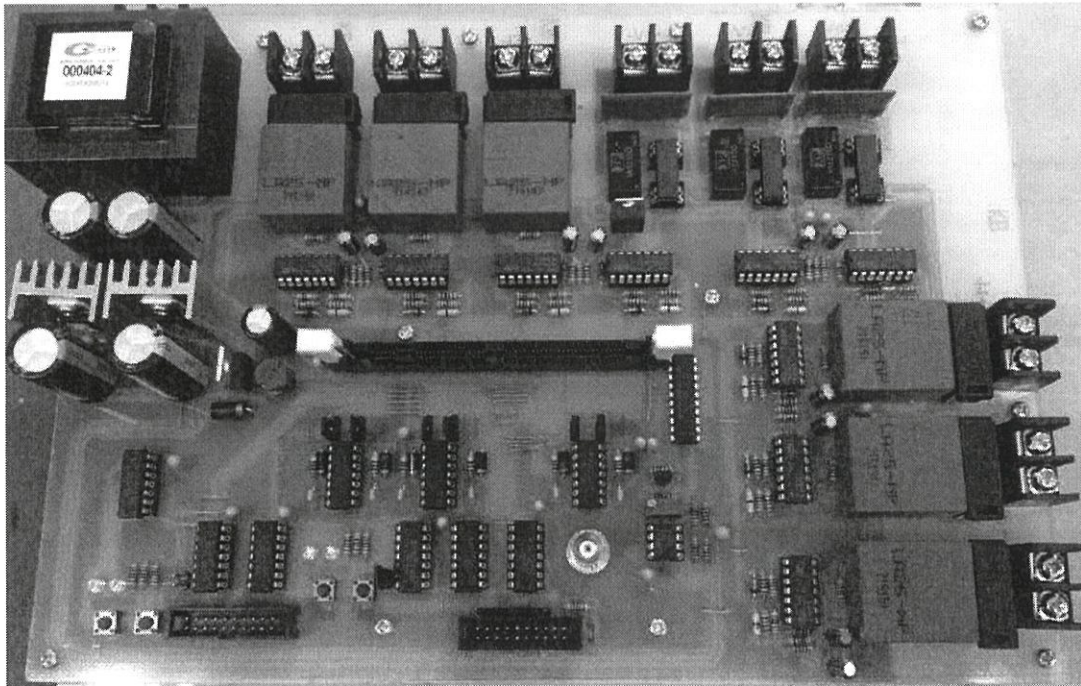


รูปที่ 6.12 ภาพสามมิติของวงจรขับเคลื่อน IPM Module เบอร์ PM25RSB120

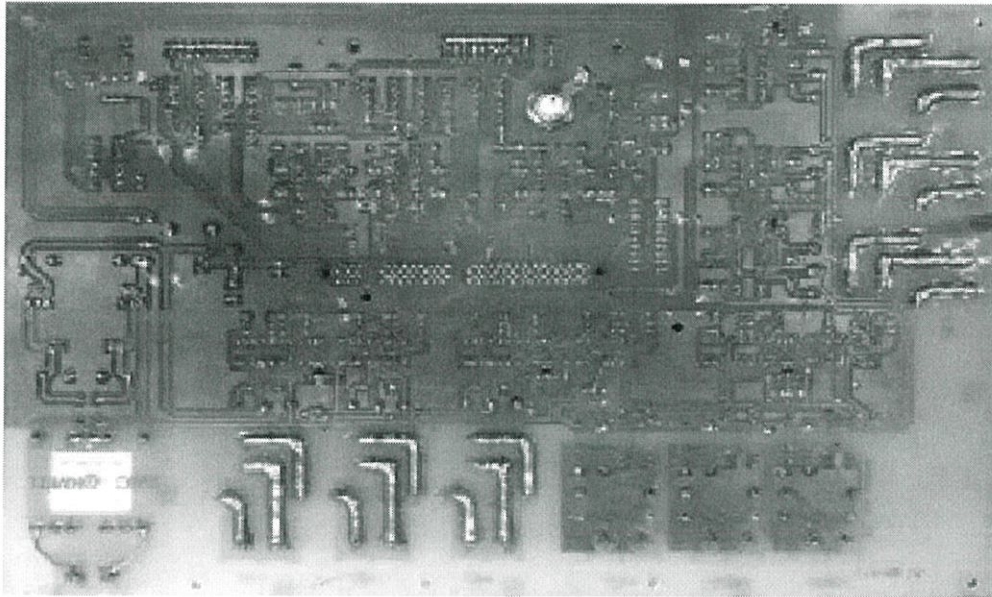
ภาพของการ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 ของบริษัท Texas Instrument เบอร์ TMS320F28335 ที่ใช้ควบคุมระบบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 6.13



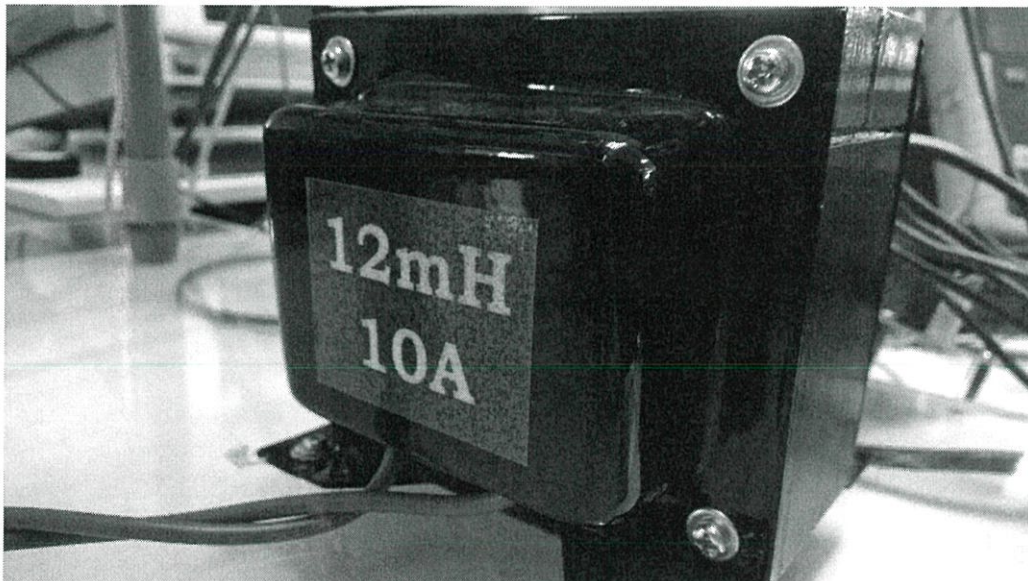
รูปที่ 6.13 การ์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมระบบเบอร์ TMS320F28335



รูปที่ 6.14 บอร์ดด้านหน้าของวงจรควบคุม



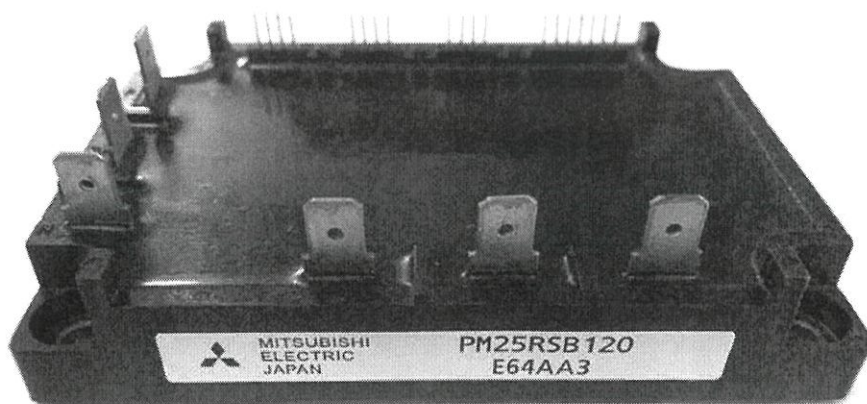
รูปที่ 6.15 สายทองแดงของบอร์ดวงจรควบคุม



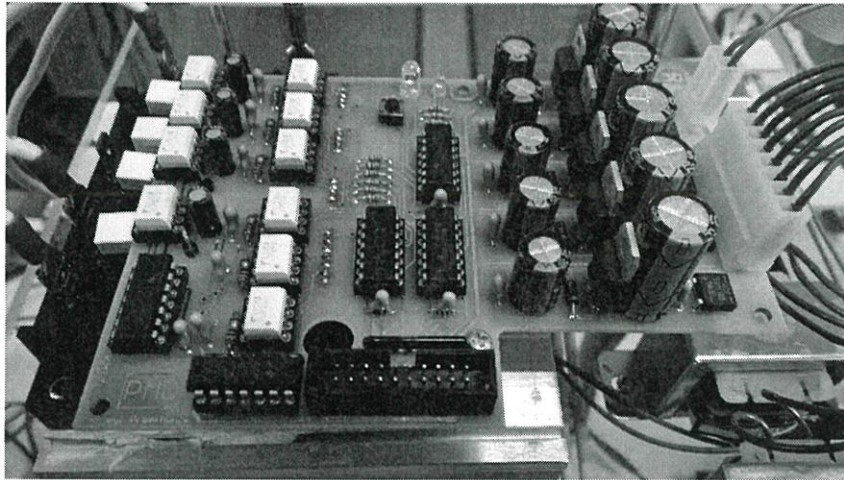
รูปที่ 6.16 ตัวเหนี่ยวนำต่อเฟสเชื่อมต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย ขนาด 12mH พิกัดกระแส 10A



รูปที่ 6.17 ตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงเชื่อมโยง

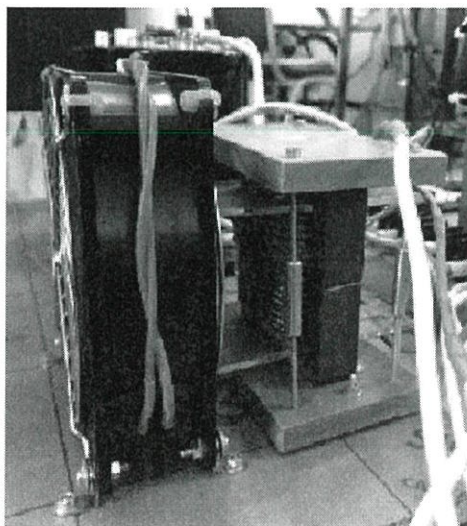


รูปที่ 6.18 Intelligent Power Module (IPM) เบอร์ PM25RSB120



รูปที่ 6.19 บอร์ดวงจรขับเคลื่อนของ IPM เบอร์ PM25RSB120

รูปที่ 6.14 ถึง 6.19 แสดงบอร์ดด้านหน้าของวงจรควบคุม, ลายทองแดงของบอร์ดวงจรควบคุม, ตัวเหนี่ยวนำต่อเฟสเชื่อมต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย ขนาด 12mH พิกัดกระแส 10A, ตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงเชื่อมโยง, Intelligent Power Module (IPM) เบอร์ PM25RSB120 และบอร์ดวงจรขับเคลื่อนของ IPM เบอร์ PM25RSB120 ส่วนรูปที่ 6.20 แสดงฮาร์ดแวร์ของวงจร DC-DC converter ที่ทำหน้าที่เพิ่มระดับไฟตรงเอาต์พุตให้มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าระดับไฟตรงอินพุต เพื่อป้อนให้กับอินพุตของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสต่อไป



รูปที่ 6.20 ฮาร์ดแวร์ของวงจร DC-DC converter

6.5 บทสรุป

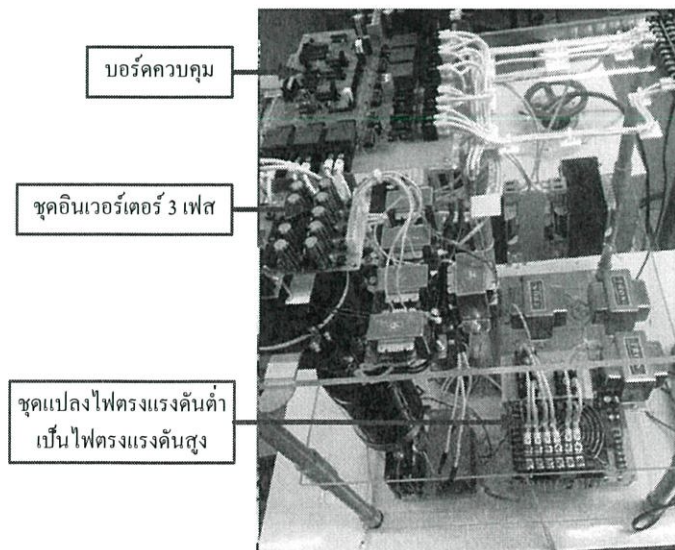
ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรและสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบเชื่อมต่อกรีด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น โดยอาศัยเทคนิคการชดเชยกระแสกริดด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีพี-คิวที่อยู่ในเทอมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่กริดกับโหลด เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดจ่ายแรงดัน ซึ่งฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นมาประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ วงจรตรวจจับกระแสโดยใช้ Current Transducer แบบ Hall Effect วงจรตรวจจับแรงดันไฟสลับโดยใช้ Isolation Amplifier เป็นตัวแยกกราวด์ของสัญญาณควบคุมและวงจรถูกำลัง วงจรตรวจจับแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงโดยใช้ Isolation Amplifier เป็นตัวแยกกราวด์ของสัญญาณควบคุมและวงจรถูกำลัง วงจรขับเคลื่อนที่สามารถสั่งใช้งานและหยุดใช้งานสัญญาณขับเคลื่อนได้โดยใช้ Opto-isolator เบอร์ TLP250 ซึ่งแรงดันขับเคลื่อนเป็นแบบ Active Low ซึ่งสามารถ On IGBT ที่แรงดัน 0V และ Off ที่แรงดัน 15V วงจรประวิงเวลาที่ใช้งานเลือกใช้ RC Circuit ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมระบบเลือกใช้เบอร์ TMS320F28335 ตัวเหนี่ยวนำต่อเฟสเชื่อมต่อกันระหว่างคอนเวอร์เตอร์กับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย เลือกใช้ขนาด 12mH ฟักัดกระแส 10A ตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงเชื่อมโยงเลือกใช้ขนาด 10,000 μ F จำนวน 2 ตัวนำมาต่ออนุกรมกัน และ Intelligent Power Module (IPM) เลือกใช้เบอร์ PM25RSB120 โดยมีรายละเอียดและรูปภาพประกอบทั้งหมดของฮาร์ดแวร์ข้างต้นได้แสดงอยู่ในเนื้อหาบทนี้แล้ว

บทที่ 7

ผลการทดสอบ

7.1 บทนำ

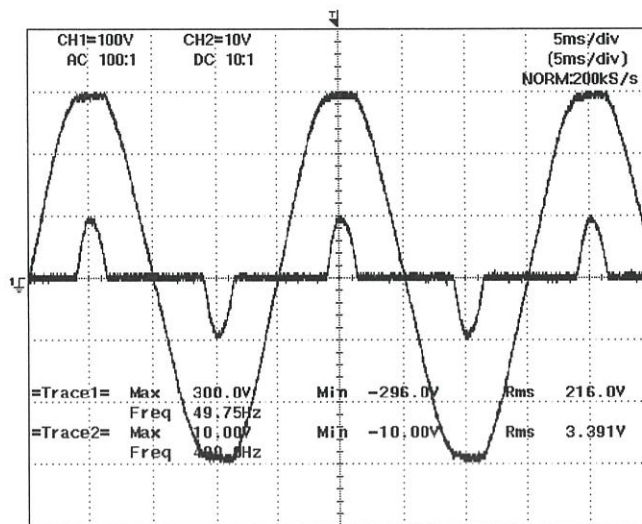
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบโหลดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด, โหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นต่อในระบบ 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว, โหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว, โหลดไทรสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง, การทดสอบโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส, การทดสอบกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ที่ตั้งอยู่ในสถานที่จริง มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี จังหวัดสมุทรปราการ และการทดสอบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับกริดและโหลดไม่เชิงเส้น โดยใช้เทคนิคการชดเชยกระแสกริดด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีพี-คิวที่อยู่ในเทอมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่กริดกับโหลด เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดจ่ายแรงดันโดยมีการทำงานหลายหน้าที่ในขณะที่มีโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมด้วย โดยต้นแบบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน แสดงดังรูปที่ 7.1



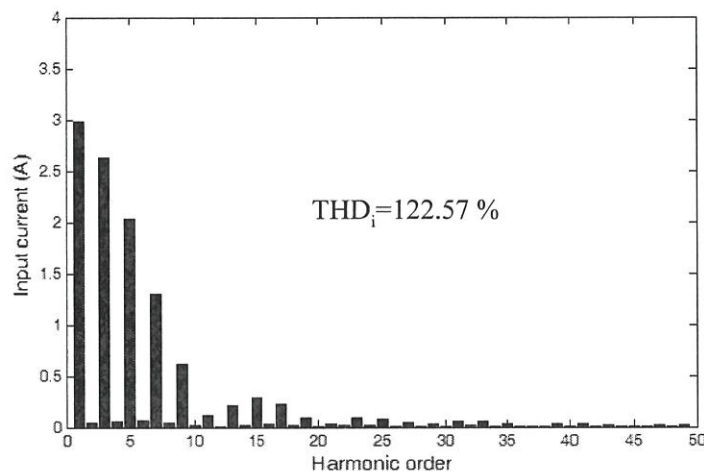
รูปที่ 7.1 ชุดต้นแบบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน

7.2 การทดสอบโหลดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด

เมื่อโหลดของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอดเป็นตัวต้านทานขนาด 173 โอห์ม และตัวคาปาซิเตอร์ขนาด 6800 ไมโครฟารัด 2 ตัวนำมาต่ออนุกรมกันและนำมาต่อขนานกับตัวต้านทาน จะมีรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 7.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอด กระแสที่ไหลในสายของระบบไฟฟ้า 1 เฟสจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์มีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอดในรูปที่ 7.3 แสดงถึงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ 122.57 %



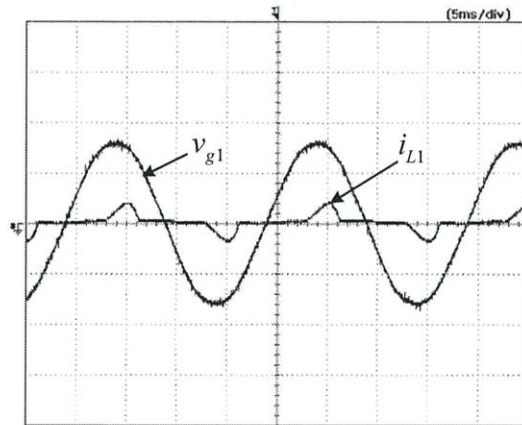
รูปที่ 7.2 ผลการทดสอบจับรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด



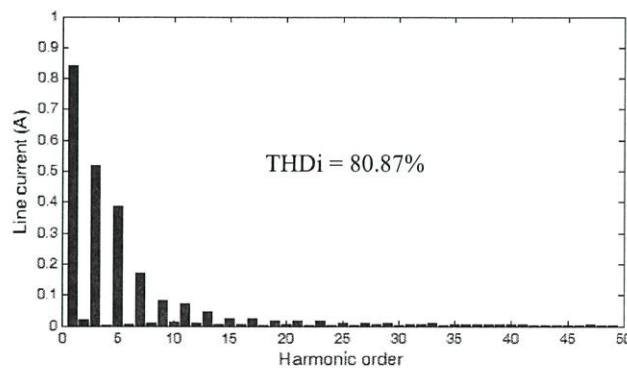
รูปที่ 7.3 ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด

7.3 การทดสอบโหลดดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นต่อในระบบ 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว

โหลดดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอด จำนวน 3 ชุดที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย เมื่อกำหนดให้โหลดของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอดเป็นโหลดไฟ 100 วัตต์ จำนวน 3 หลอดนำมาต่ออนุกรมกัน และนำมาต่อขนานกับตัวคาปาซิเตอร์ขนาด 120 ไมโครฟารัด จะมีรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 7.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอดต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว กระแสที่ไหลในสายจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์มีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายที่ไหลไปยังโหลดดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสแบบไดโอดที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว ดังในรูปที่ 7.5 แสดงถึงค่ากระแสในสายที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ 80.87 %



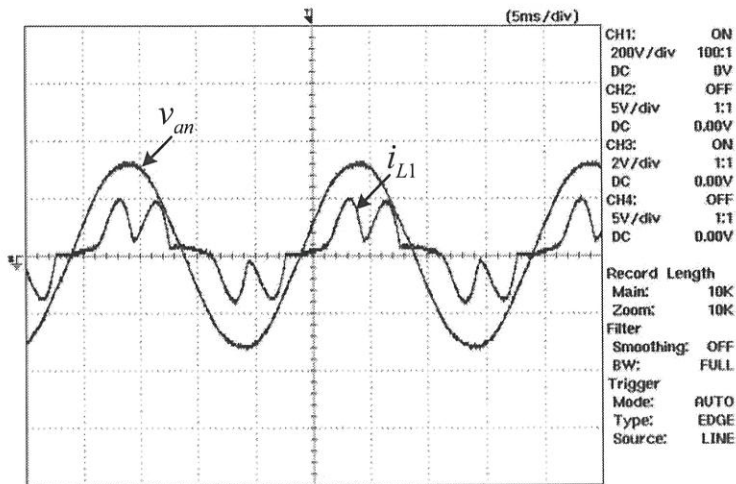
รูปที่ 7.4 ผลการทดสอบจับรูปคลื่นแรงดันเฟส กระแสในสาย ที่ไหลไปยังโหลดดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟส ที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย แบบไดโอด 12 ตัว
สเกลแรงดัน : 200V/div, สเกลกระแส : 5A/div



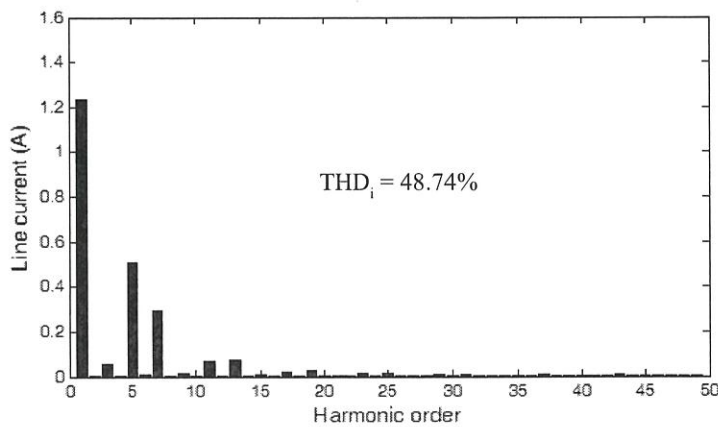
รูปที่ 7.5 ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายที่ไหลไปยังโหลดดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟส ที่ต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย แบบไดโอด 12 ตัว

7.4 การทดสอบโหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว

เมื่อโหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอดเป็นโหลดไฟ 100 วัตต์ จำนวน 3 โหลดนำมาต่ออนุกรมกัน และนำมาต่อขนานกับตัวคาปาซิเตอร์ขนาด 120 ไมโครฟาร์ด จะมีรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 7.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด กระแสที่ไหลในสายของระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ มีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอดในรูปที่ 7.7 แสดงถึงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ 48.74 %



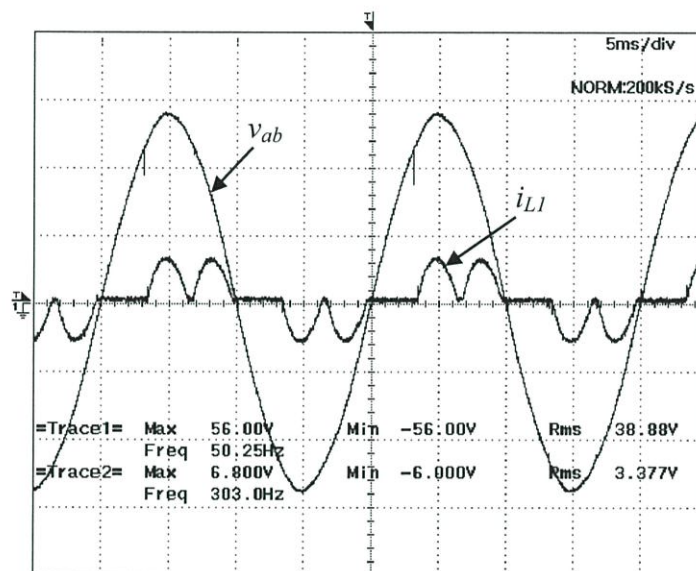
รูปที่ 7.6 ผลการทดสอบจับแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว สเกลแรงดัน : 200V/div, สเกลกระแส : 5A/div



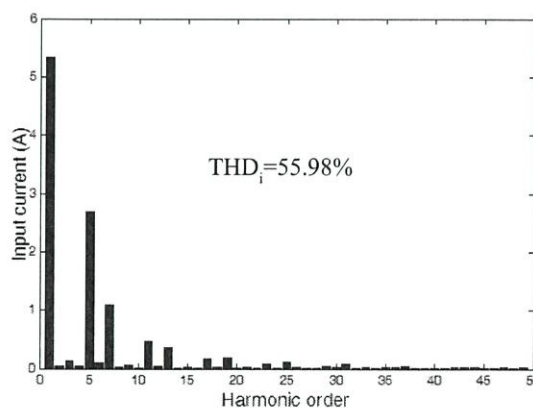
รูปที่ 7.7 ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว

7.5 การทดสอบโหลดทริสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อโหลดของวงจรทริสเตอร์ 3 เฟส เป็นการนำไปใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงบิดเอาต์พุต 9 นิวตันเมตร โดยมีรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 7.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรณีโหลดเป็นวงจรทริสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสที่ไหลในสายของระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์มีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรทริสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปที่ 7.9 แสดงถึงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ 55.98 %



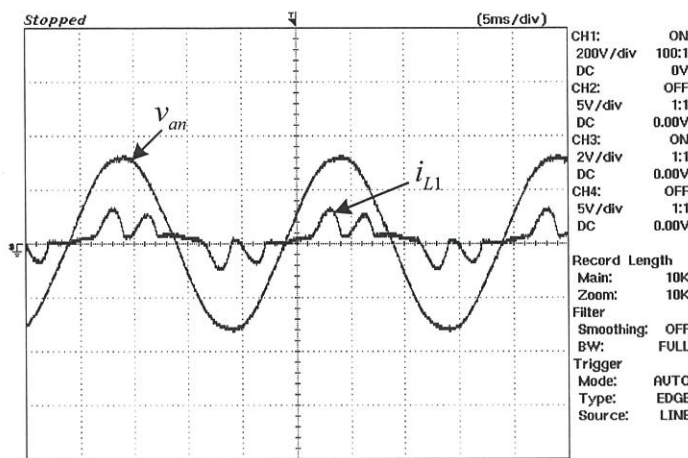
รูปที่ 7.8 ผลการทดสอบจับรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของวงจรทริสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สเกลแรงดัน : 200V/div, สเกลกระแส : 10A/div



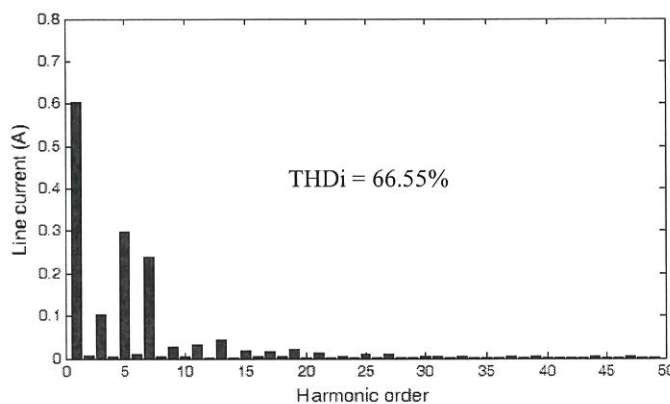
รูปที่ 7.9 ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรทริสเตอร์ 3 เฟส ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

7.6 การทดสอบโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

การทดสอบโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาดพิกัด 2 แรงม้า จำลองจับสัญญาณรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายแสดงดังรูปที่ 7.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเหนี่ยวนำ 3 เฟสโหลดที่แรงบิดปลายเพลลาขนาด 9 นิวตันเมตร กระแสที่ไหลในสายของระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์มีความผิดเพี้ยนไป ซึ่งสเปกตรัมกระแสในสายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอดในรูปที่ 7.11 แสดงถึงค่ากระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ 66.55 %



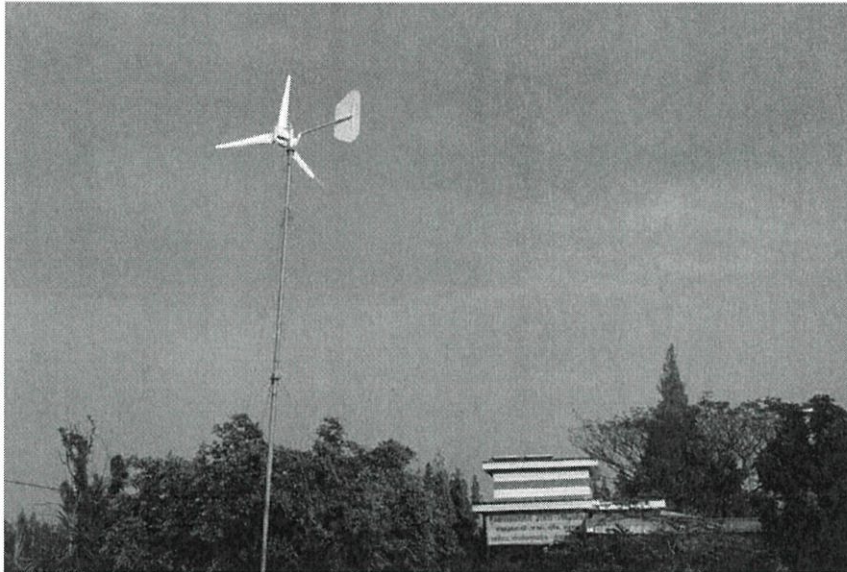
รูปที่ 7.10 ผลการทดสอบจับรูปคลื่นแรงดันเฟสและกระแสในสายของโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สเกลแรงดัน : 200V/div, สเกลกระแส : 5A/div



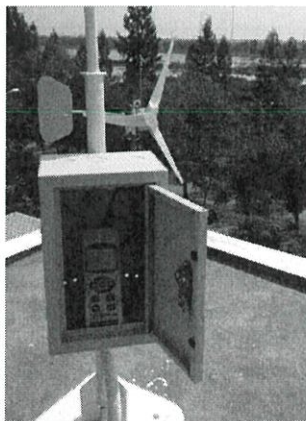
รูปที่ 7.11 ผลการทดสอบสเปกตรัมกระแสในสายของโหลดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

7.7 การทดสอบกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ที่ติดตั้งในสถานที่จริง

กังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ที่ติดตั้งในสถานที่จริง และเครื่องมือวัดความเร็วลมที่ติดตั้งบน
ดาดฟ้าของตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ 59/1 ม.14
ช. เทศบาลบางปู 119 ถ. สุขุมวิท ต. บางปลา อ. บางพลี แสดงดังรูปที่ 7.12 และเครื่องมือวัด
ความเร็วลม แสดงดังรูปที่ 7.13

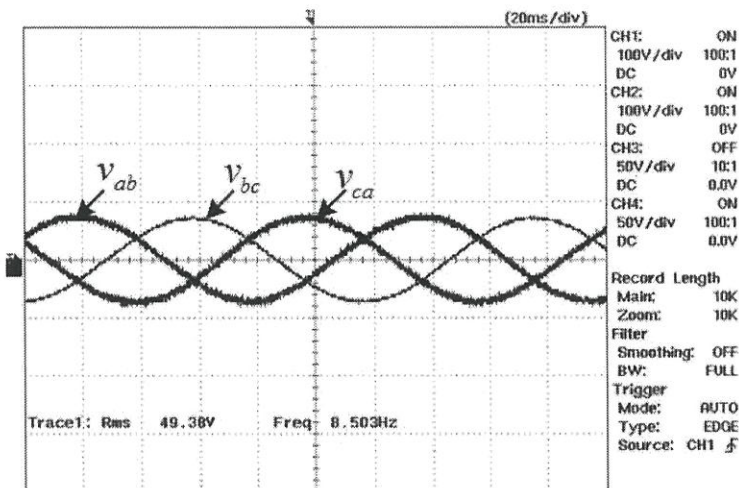


รูปที่ 7.12 กังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ที่ติดตั้งในสถานที่จริง



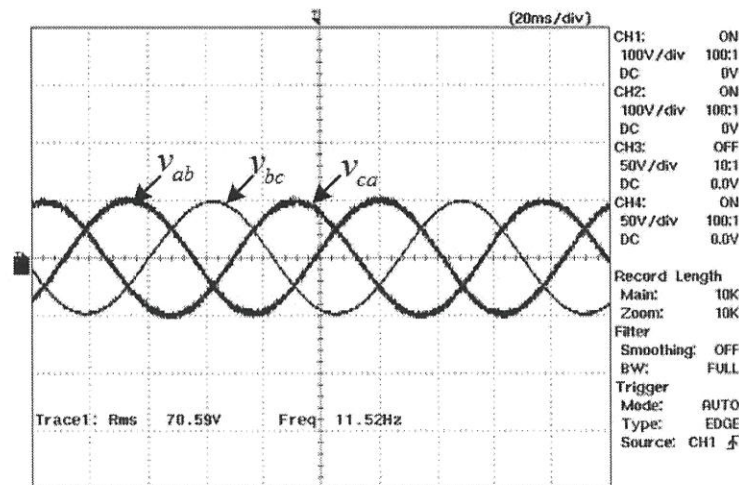
รูปที่ 7.13 เครื่องมือวัดความเร็วลมที่ติดตั้งบนดาดฟ้าของตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

การทดสอบจับสัญญาณแรงดันไฟสลับ 3 เฟสที่ออกมาจากเอาต์พุตของกังหันลม ที่ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 7.14 วัดค่าแรงดันไฟสลับระหว่างสายได้เท่ากับ 49.38 V ความถี่ไฟฟ้า 8.503 Hz



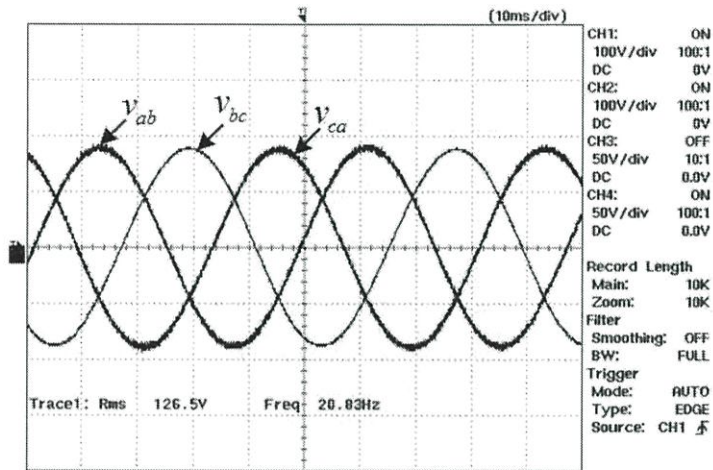
รูปที่ 7.14 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไฟสลับ 3 เฟสของกังหันลม ที่ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 20 ms/div

การทดสอบจับสัญญาณแรงดันไฟสลับ 3 เฟสที่ออกมาจากเอาต์พุตของกังหันลม ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 7.15 วัดค่าแรงดันไฟสลับระหว่างสายได้เท่ากับ 70.59 V ความถี่ไฟฟ้า 11.52 Hz



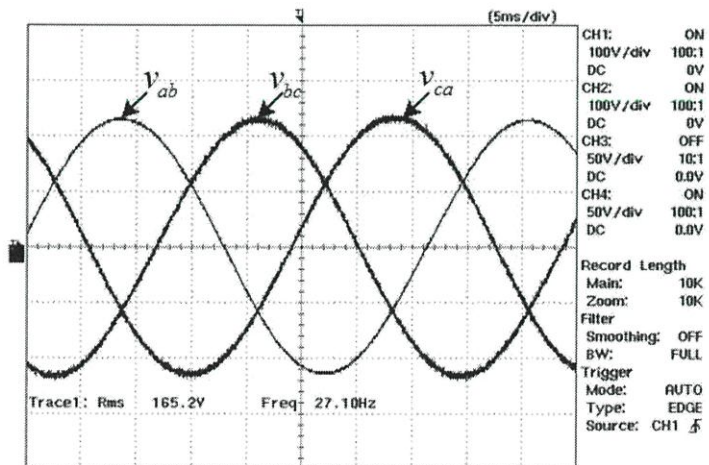
รูปที่ 7.15 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไฟสลับ 3 เฟสของกังหันลม ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 20 ms/div

การทดสอบจับสัญญาณแรงดันไฟสลับ 3 เฟสที่ออกมาจากเอาต์พุตของกังหันลม ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 7.16 วัดค่าแรงดันไฟสลับระหว่างสายได้เท่ากับ 126.5 V ความถี่ไฟฟ้า 20.83 Hz



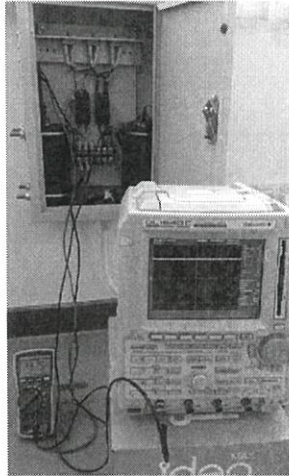
รูปที่ 7.16 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไฟสลับ 3 เฟสของกังหันลม ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 10 ms/div

การทดสอบจับสัญญาณแรงดันไฟสลับ 3 เฟสที่ออกมาจากเอาต์พุตของกังหันลม ที่ความเร็วลม 3.5 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 7.17 วัดค่าแรงดันไฟสลับระหว่างสายได้เท่ากับ 165.2 V ความถี่ไฟฟ้า 27.10 Hz



รูปที่ 7.17 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตไฟสลับ 3 เฟสของกังหันลม ที่ความเร็วลม 3.5 เมตรต่อวินาที สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 5 ms/div

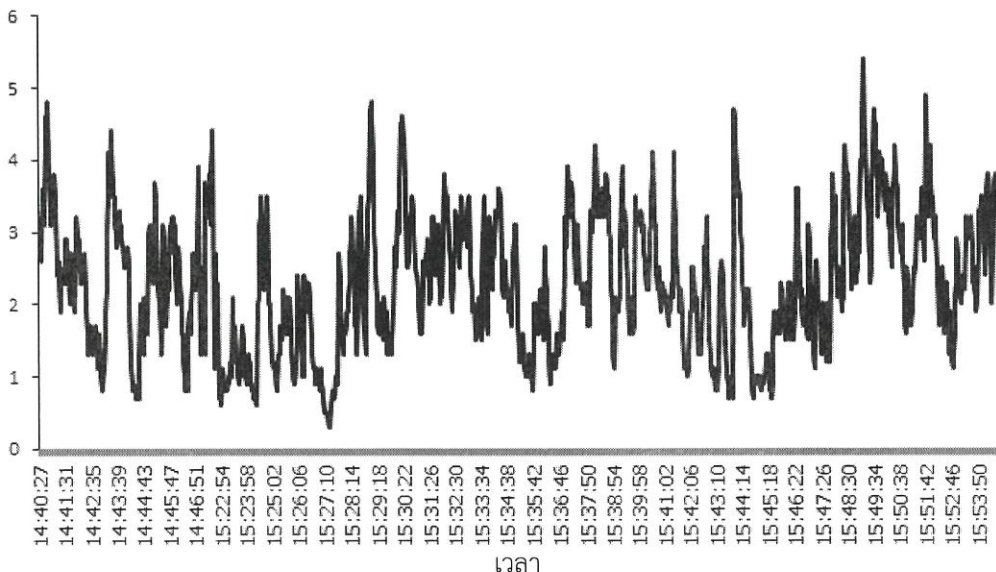
การทดสอบจับสัญญาณแรงดันไฟตรงที่ผ่านวงจรถูกไฟร์ 3 เฟส ที่ความเร็วลม 2.5 เมตร ต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 7.18 วัดค่าแรงดันไฟตรงได้เท่ากับ 237.9 V



รูปที่ 7.18 การทดสอบจับสัญญาณแรงดันไฟตรงที่ผ่านวงจรถูกไฟร์ 3 เฟส

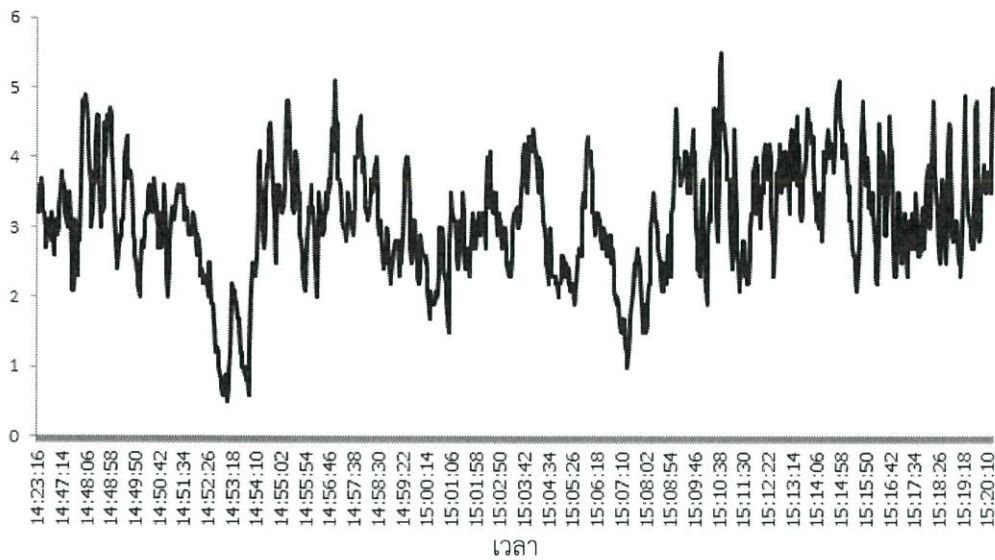
ข้อมูลความเร็วลมตามเวลาจริง เก็บผลเมื่อวันที่ 27 มกราคม 2559 ช่วงเวลา 14:40:27 ถึง 15:53:50 น. แสดงดังรูปที่ 7.19 และข้อมูลความเร็วลมตามเวลาจริง เก็บผลเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559 ช่วงเวลา 14:23:16 ถึง 15:20:10 น. แสดงดังรูปที่ 7.20

ความเร็วลม (m/s)



รูปที่ 7.19 ข้อมูลความเร็วลมตามเวลาจริง เก็บผลเมื่อวันที่ 27 มกราคม 2559
ช่วงเวลา 14:40:27 ถึง 15:53:50 น.

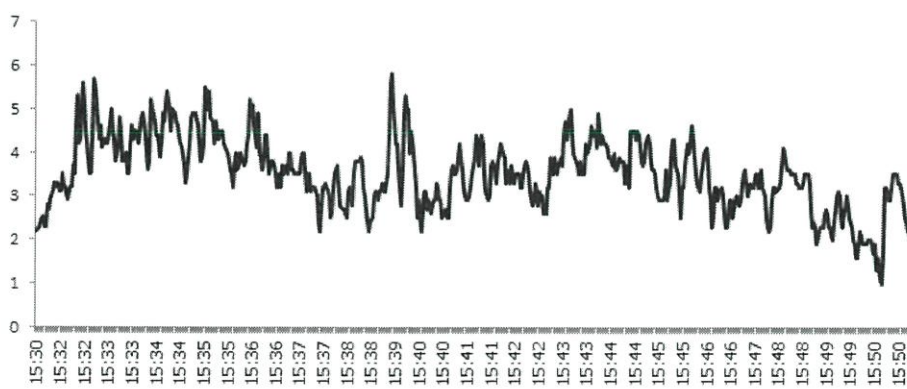
ความเร็วลม (m/s)



รูปที่ 7.20 ข้อมูลความเร็วลมตามเวลาจริง เก็บผลเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559
ช่วงเวลา 14:23:16 ถึง 15:20:10 น.

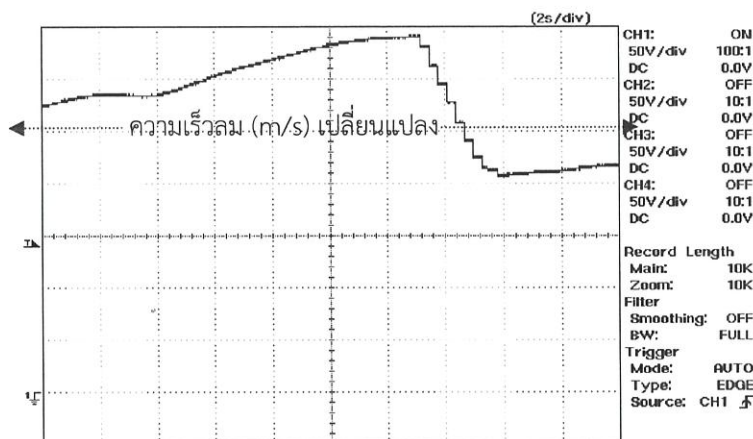
ข้อมูลความเร็วลมตามเวลาจริง เก็บผลเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559 ช่วงเวลา 15.30 น. ถึง 15.50 น. แสดงดังรูปที่ 7.21

ความเร็วลม (m/s)



รูปที่ 7.21 ข้อมูลความเร็วลมตามเวลาจริง เก็บผลเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559
ช่วงเวลา 15.30 น. ถึง 15.50 น.

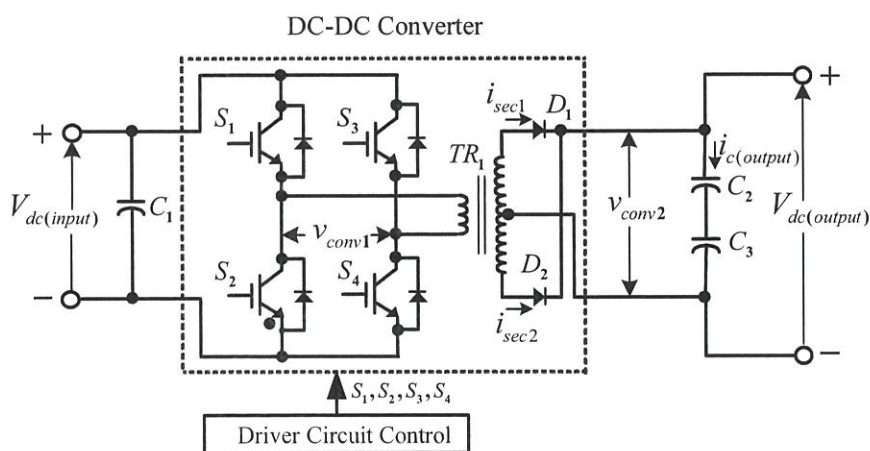
ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟตรงเอาต์พุตของวงจรเรกติไฟร์ 3 เฟสที่ป้อนแรงดันอินพุตจาก กังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ ตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมในช่วงเวลา 15.30 น. ถึง 15.50 น. เก็บผลเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559 แสดงดังรูปที่ 7.22



รูปที่ 7.22 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสามเฟสที่ได้จากกังหันลม ขนาด 1 กิโลวัตต์ ตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมในช่วงเวลา 15.30น. ถึง 15.50น. สเกลแรงดัน 100 V/div ; สเกลเวลา 2 Sec/div

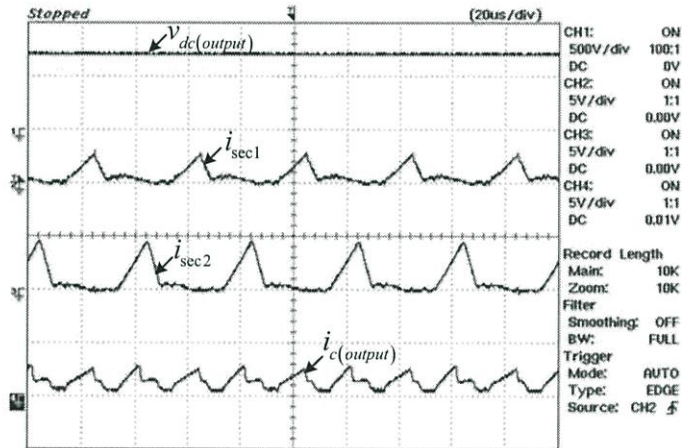
7.8 การทดสอบวงจรบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูง

การทดสอบวงจรบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูง ทดสอบโดยจำลองความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาที เมื่อปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (D) ไว้ที่ 0.5 จะทำให้ได้แรงดันไฟตรงด้านเอาต์พุตมีค่าเป็นสองเท่าของแรงดันไฟตรงด้านอินพุต โดยมีการจับสัญญาณแรงดัน ณ จุดต่างๆ ของวงจรบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงดังรูปที่ 7.23 ได้ดังนี้



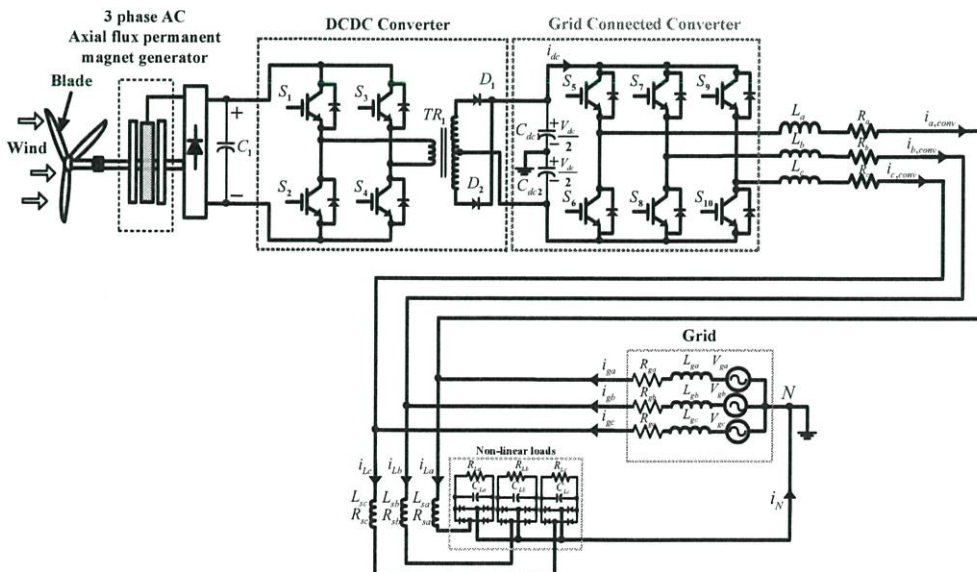
รูปที่ 7.23 วงจรบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูง

สัญญาณต่างๆ ทางด้านเอาต์พุตของวงจรบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูงแสดงดังรูปที่ 7.24 โดยสัญญาณที่ 1 แสดงแรงดันไฟตรงขาออกของ DC-DC Converter ที่ 700 โวลต์, สัญญาณที่ 2 แสดงกระแสด้าน Secondary ขดลวดที่ 1, สัญญาณที่ 3 แสดงกระแสด้าน Secondary ขดลวดที่ 2 และสัญญาณที่ 4 แสดงกระแสอัดประจุตัวเก็บประจุขาออกของ DC-DC Converter โดยค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจากการวัดมีค่า 1000 วัตต์



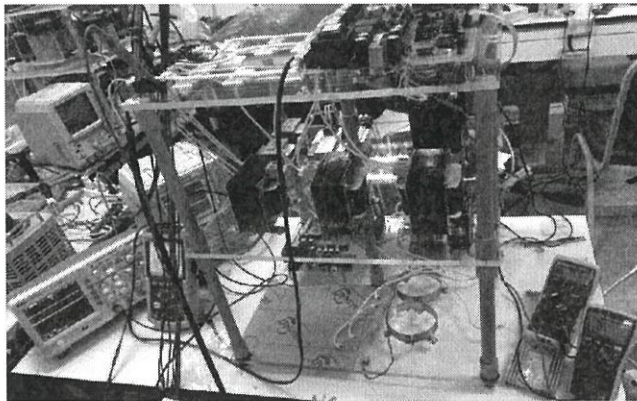
รูปที่ 7.24 สัญญาณต่างๆ ทางด้านเอาต์พุตของวงจรบูสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูง สเกลแรงดัน 500 V/div ; สเกลกระแส 5 A/div

7.9 การทดสอบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขั้วเคลื่อนโดยกัณฑ์หลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น



รูปที่ 7.25 วงจรกำลังของระบบที่นำเสนอ

การทดสอบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น ซึ่งวงจรกำลังของระบบที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 7.25 และการทดสอบระบบต้นแบบที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 7.26



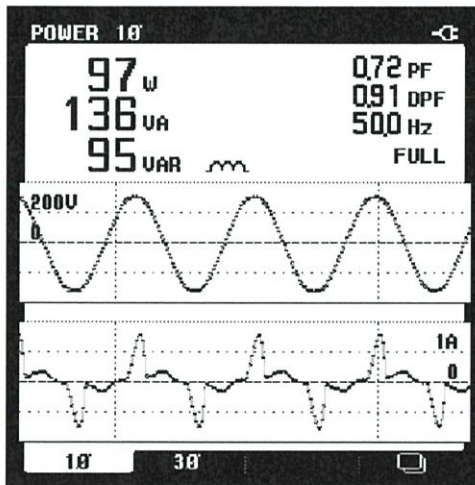
รูปที่ 7.26 การทดสอบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

โดยในการทดสอบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นนี้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7.25 และ 7.26 แสดงการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่กริด กระแสกริด กระแสคอนเวอร์เตอร์ กระแสโหลด และกระแสที่ไหลในสายนิวตรอน ที่มีโหลดไม่เชิงเส้นแบบโหลดวางจเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นต่อในระบบ 3 เฟส 4 สาย โดยจะแยกการทดสอบออกเป็น 4 กรณี คือ

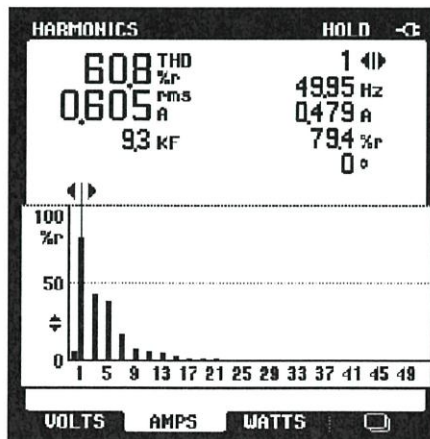
- 1) กรณีที่ 1 การทดสอบระบบขณะที่ไม่มีการชดเชยจากตัวคอนเวอร์เตอร์ กริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนไปยังโหลดไม่เชิงเส้น
- 2) กรณีที่ 2 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดปรับปรุงกระแสกริดให้เป็นชายนี เมื่อกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับโหลดไม่เชิงเส้น
- 3) กรณีที่ 3 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟคืนสู่กริด และเป็นตัวกรองฮาร์มอนิกสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น
- 4) กรณีที่ 4 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคืนกริด และกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้น

กรณีศึกษาที่ 1 การทดสอบระบบขณะที่ไม่มีการชดเชยจากตัวคอนเวอร์เตอร์ กริดจ่ายกำลังไฟฟ้า แอคทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนไปยังโหลดไม่เชิงเส้น

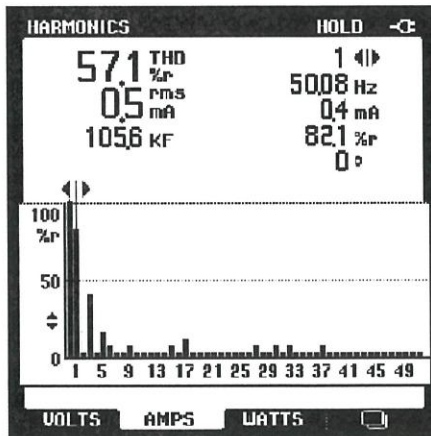
ทดสอบโดยให้ตัวคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดไม่มีการชดเชยจากตัวคอนเวอร์เตอร์ วัดค่า กำลังไฟฟ้าต่างๆ ต่อเฟสที่กริดและจับสัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดแสดงดังรูปที่ 7.27 ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแสกริดแสดงดังรูปที่ 7.28 ค่ากระแส คอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแส คอนเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 7.29 ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแสโหลดแสดงดังรูปที่ 7.30 และแถบสเปกตรัม ฮาร์มอนิกส์ของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนแสดงดังรูปที่ 7.31



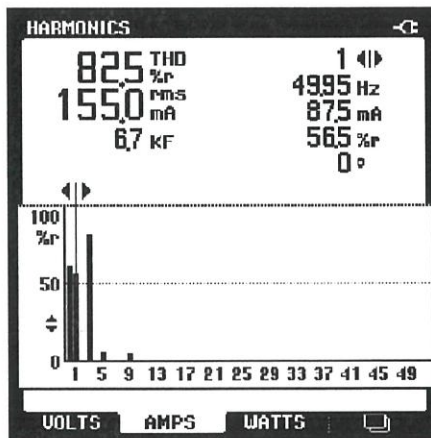
รูปที่ 7.27 ค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่กริด สัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดกรณีศึกษาที่ 1



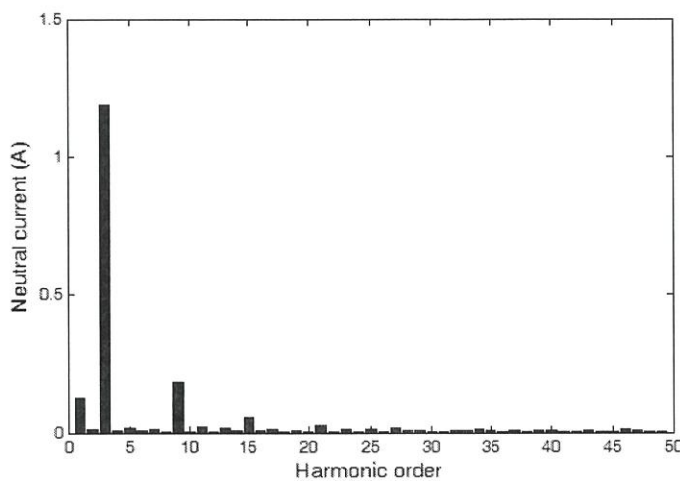
รูปที่ 7.28 ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสกริดกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ 7.29 ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์กรณีที่ 1

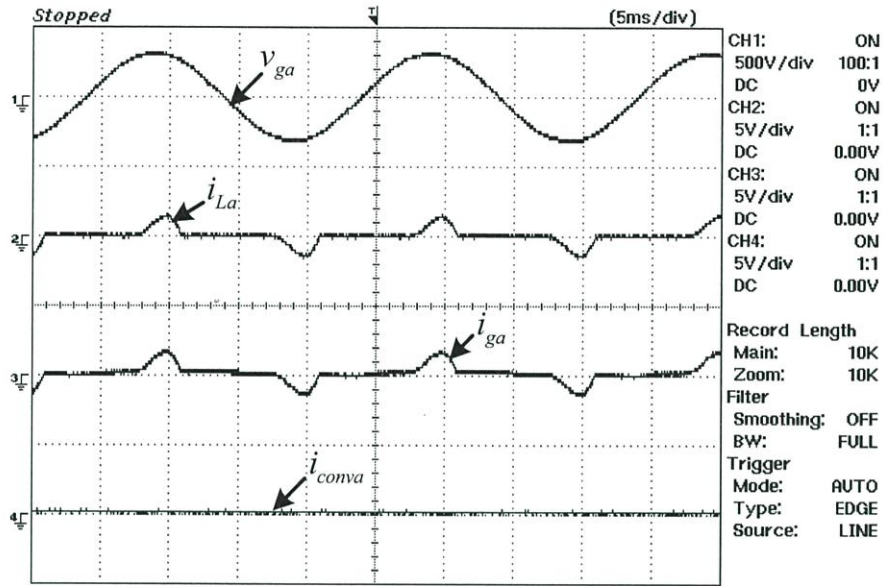


รูปที่ 7.30 ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดกรณีที่ 1

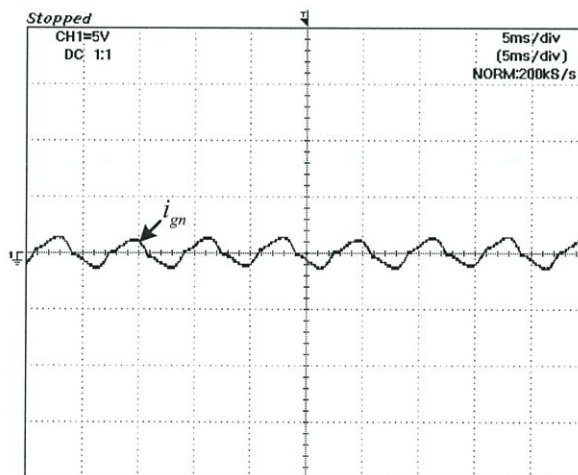


รูปที่ 7.31 แถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 1

จับสัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส (v_{ga}) กระแสกริดที่ไหลในสาย (i_{ga}) กระแสคอนเวอร์เตอร์ (i_{conva}) และกระแสโหลดแสดงดังรูปที่ 7.32 จับสัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอน (i_{La}) แสดงดังรูปที่ 7.33



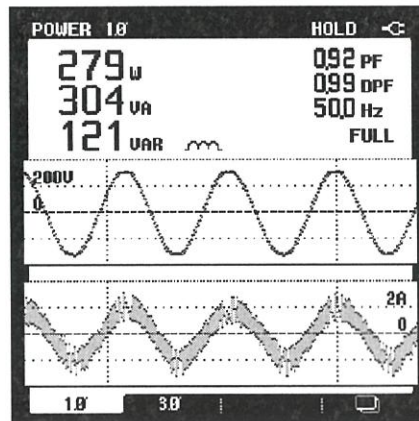
รูปที่ 7.32 สัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์ และกระแสโหลดกรณีที่ 1 โดยสเกลแรงดัน 500 V/div ; สเกลกระแส 5 A/div



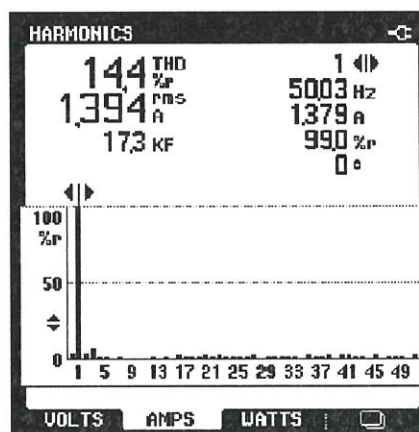
รูปที่ 7.33 สัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 1 โดยสเกลกระแสเท่ากับ 5 A/div

กรณีศึกษาที่ 2 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดปรับปรุงกระแสกริดให้เป็น
ชายน์ เมื่อกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับโหลดไม่เชิงเส้น

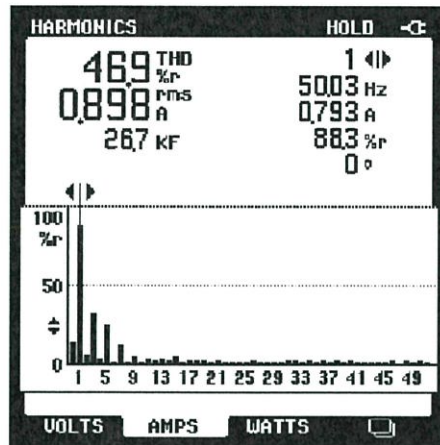
ทดสอบโดยให้ตัวคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดปรับปรุงกระแสกริดให้เป็นชายน์ เมื่อกริด
จ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับโหลดไม่เชิงเส้น วัดค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ต่อเฟสที่
กริดและจับสัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดแสดงดังรูปที่ 7.34 ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัม
ฮาร์มอนิกส์ของกระแสกริดแสดงดังรูปที่ 7.35 ค่ากระแส คอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัม
ฮาร์มอนิกส์ของกระแสคอนเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 7.36 ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอ
นิคส์ของกระแสโหลดแสดงดังรูปที่ 7.37 และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแสที่ไหลในสาย
นิวตรอนแสดงดังรูปที่ 7.38



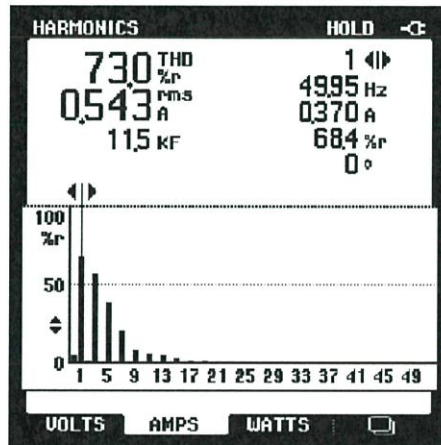
รูปที่ 7.34 ค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่กริด สัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดกรณีศึกษาที่ 2



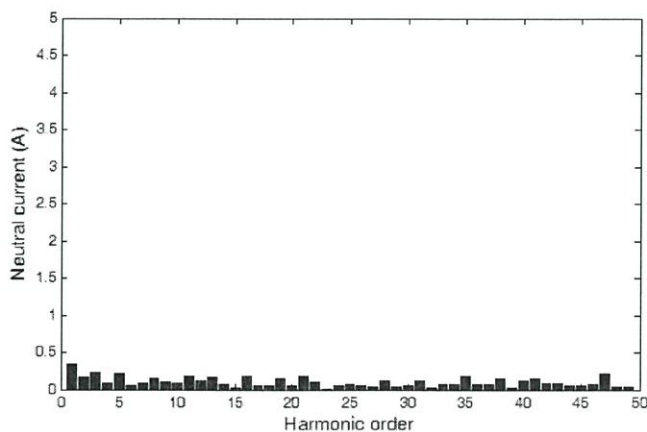
รูปที่ 7.35 ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสกริดกรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ 7.36 ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์กรณีที่ 2

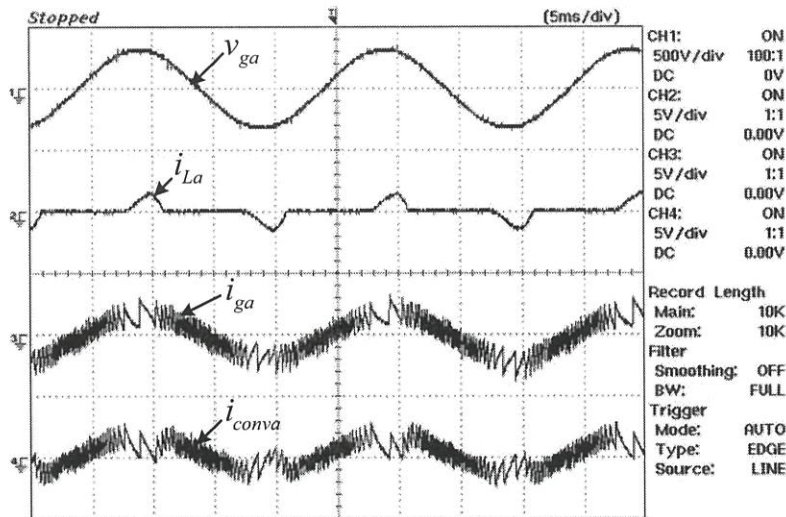


รูปที่ 7.37 ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดกรณีที่ 2

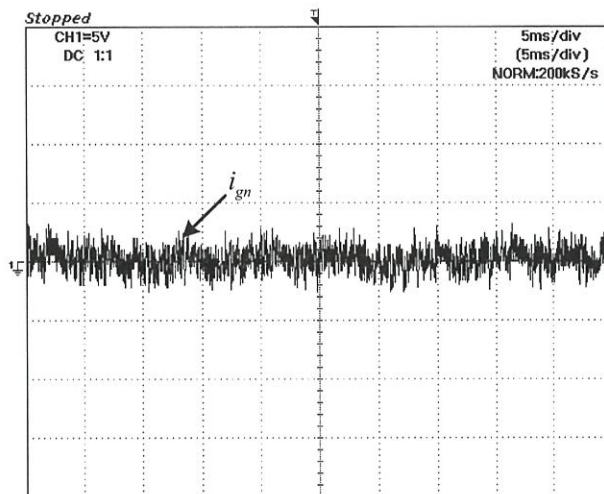


รูปที่ 7.38 ค่ากระแสและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 2

จับสัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์ และกระแสโหลดแสดงดังรูปที่ 7.39 จับสัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนแสดงดังรูปที่ 7.40



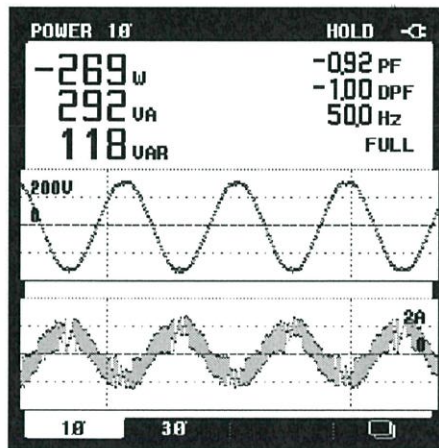
รูปที่ 7.39 สัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์ และกระแสโหลดกรณีที่ 2



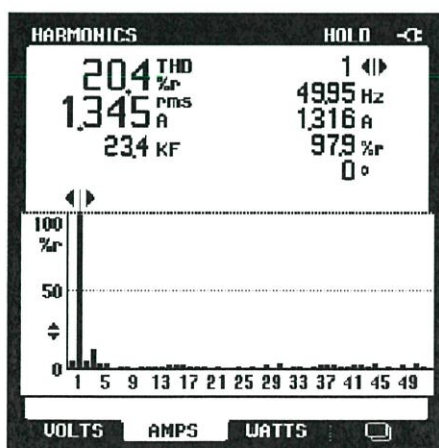
รูปที่ 7.40 สัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 2

กรณีที่ 3 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ฟิ้น สู่กริด และเป็นตัวกรองฮาร์มอนิกสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

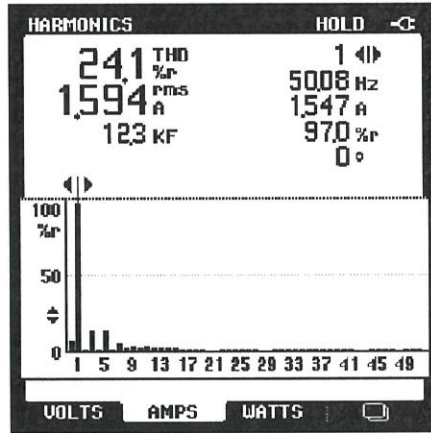
ทดสอบโดยให้ตัวคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ฟิ้นสู่กริด และเป็นตัว
กรองฮาร์มอนิกสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น วัดค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ต่อเฟสที่ กริดและจับสัญญาณแรงดันกร
ริดและกระแสกริดแสดงดังรูปที่ 7.41 ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแสกริด
แสดงดังรูปที่ 7.42 ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแสคอนเวอร์เตอร์
แสดงดังรูปที่ 7.43 ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแสโหลดแสดงดังรูปที่
7.44 และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนแสดงดังรูปที่ 7.45



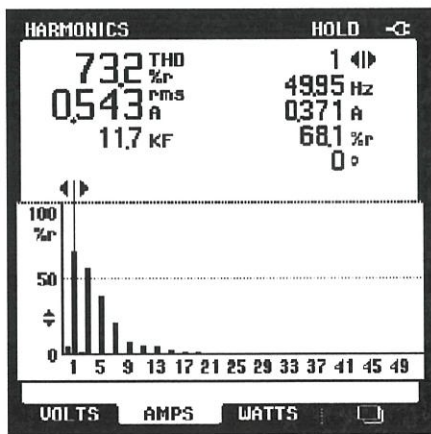
รูปที่ 7.41 ค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่กริด สัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดกรณีที่ 3



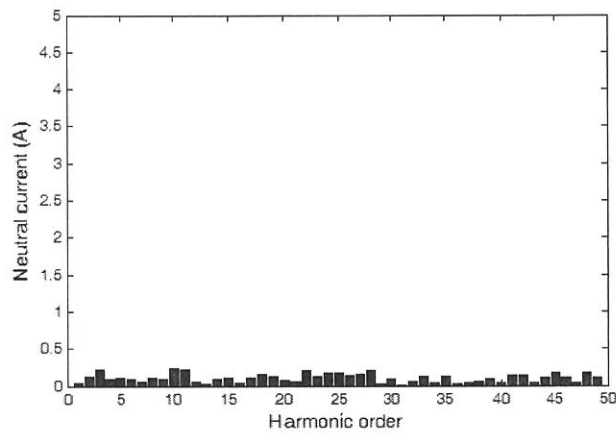
รูปที่ 7.42 ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสกริดกรณีที่ 3



รูปที่ 7.43 ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแอมสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์กรณีที่ 3

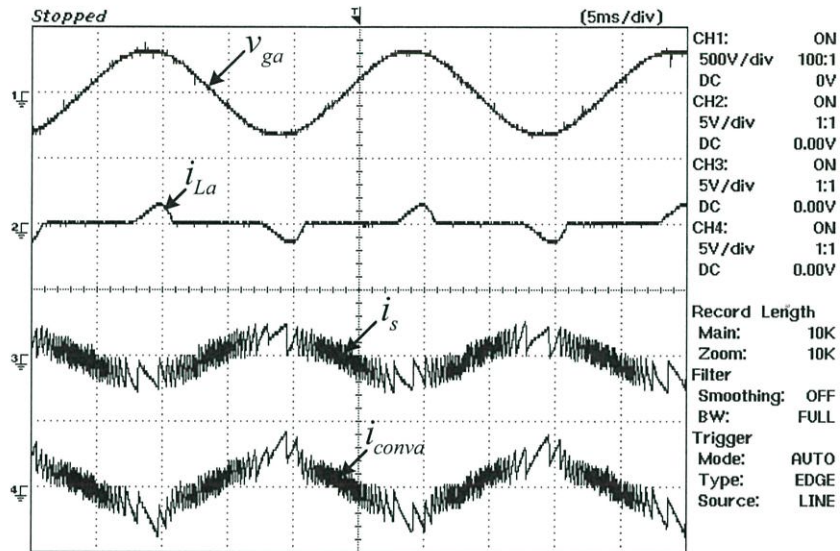


รูปที่ 7.44 ค่ากระแสโหลดและแอมสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดกรณีที่ 3

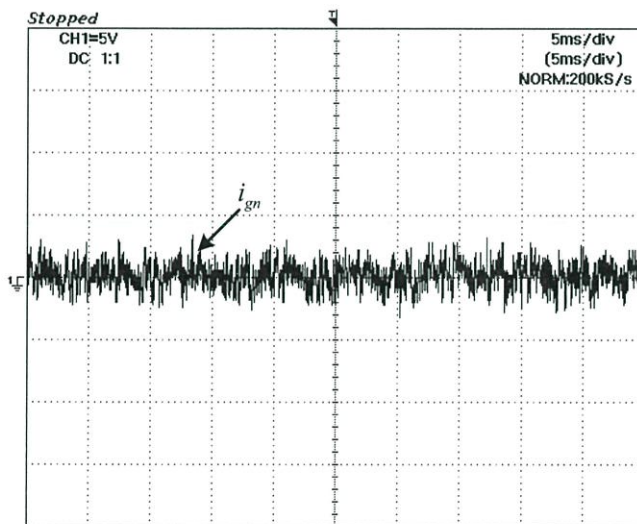


รูปที่ 7.45 แอมสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 3

จับสัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์ และกระแส
โหลดแสดงดังรูปที่ 7.46 จับสัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนแสดงดังรูปที่ 7.47



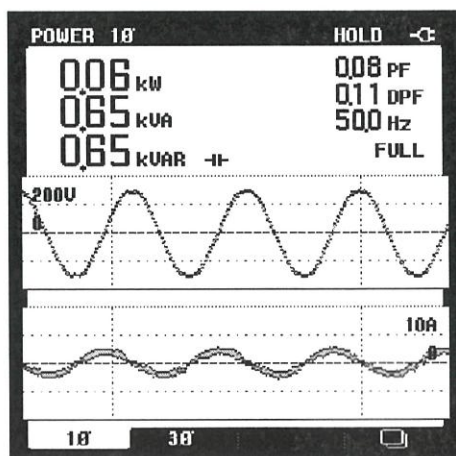
รูปที่ 7.46 สัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์
และกระแสโหลดกรณีที่ 3



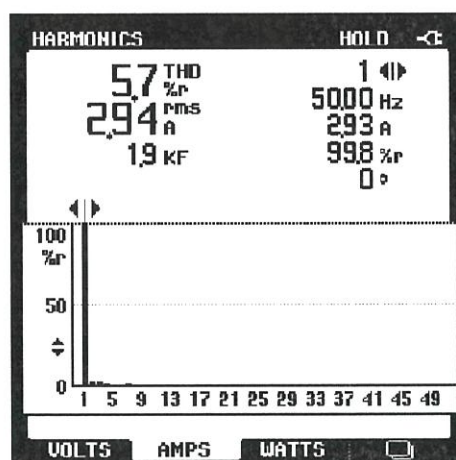
รูปที่ 7.47 สัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 3

กรณีศึกษาที่ 4 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ คีนกริด และและกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้น

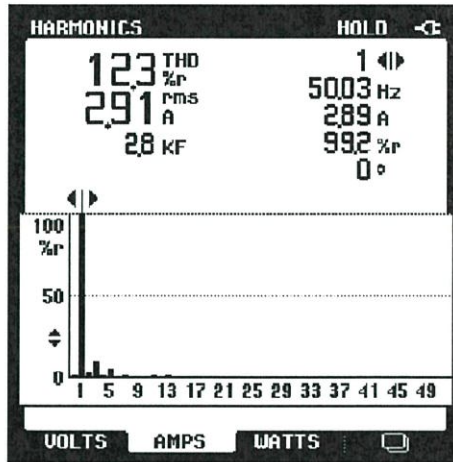
ทดสอบโดยให้ตัวคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคีนกริด และกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้น วัดค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ต่อเฟสที่กริดและจับสัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดแสดงดังรูปที่ 7.48 ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสกริดแสดงดังรูปที่ 7.49 ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์แสดงดังรูปที่ 7.50 ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดแสดงดังรูปที่ 7.51 และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนแสดงดังรูปที่ 7.52



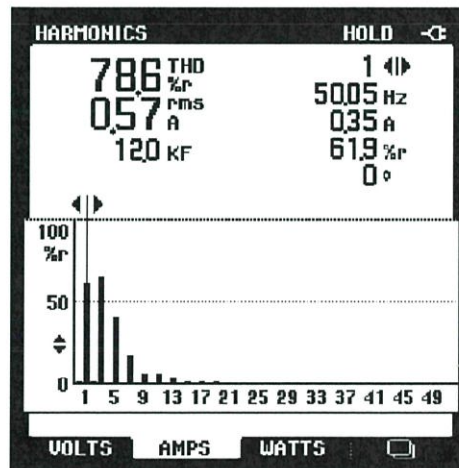
รูปที่ 7.48 ค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่กริด สัญญาณแรงดันกริดและกระแสกริดกรณีศึกษาที่ 4



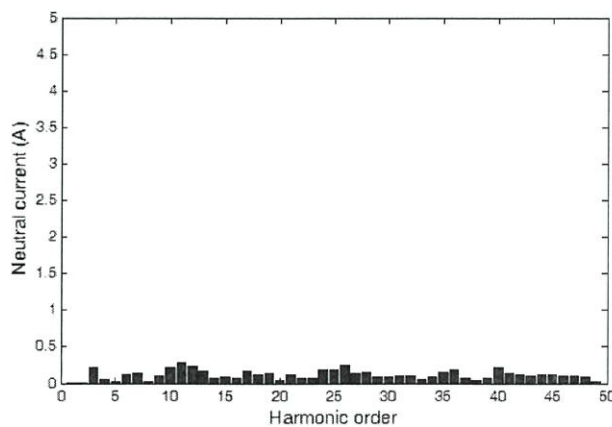
รูปที่ 7.49 ค่ากระแสกริดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสกริดกรณีศึกษาที่ 4



รูปที่ 7.50 ค่ากระแสคอนเวอร์เตอร์และแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสคอนเวอร์เตอร์กรณี 4

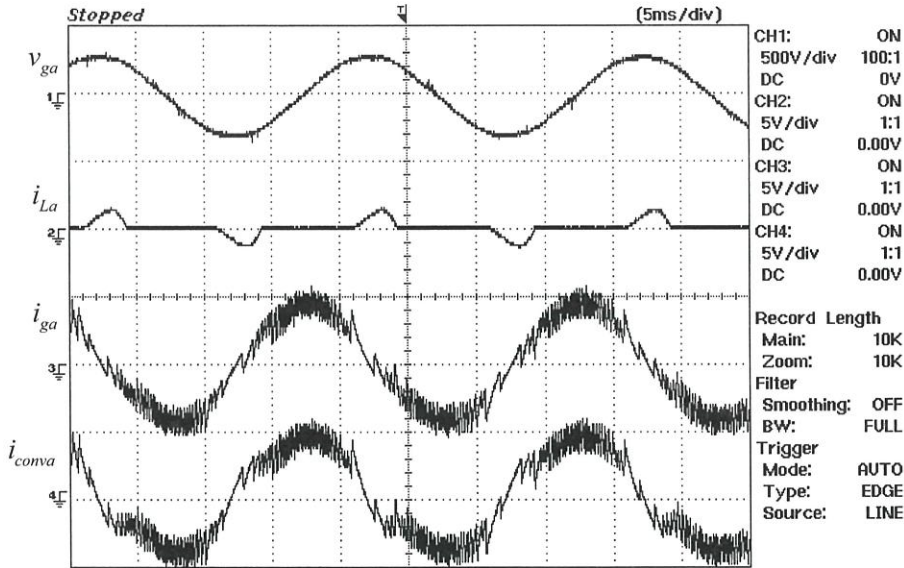


รูปที่ 7.51 ค่ากระแสโหลดและแถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสโหลดกรณี 4

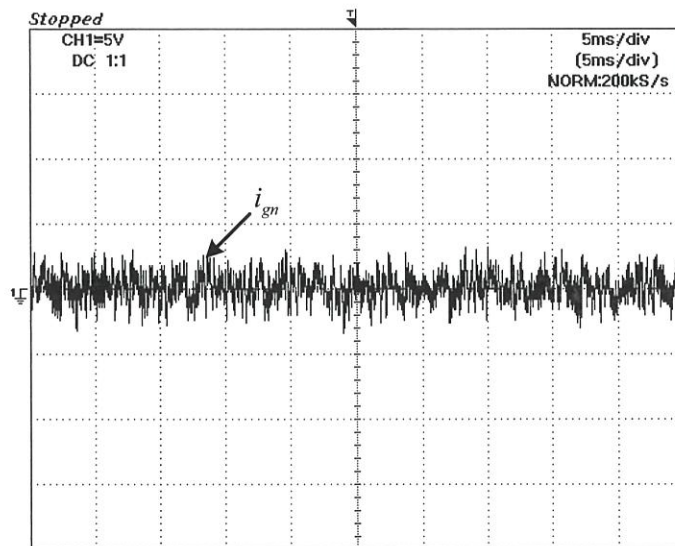


รูปที่ 7.52 แถบสเปกตรัมฮาร์มอนิกของกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณี 4

จับสัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์ และกระแสโหลดแสดงดังรูปที่ 7.53 จับสัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนแสดงดังรูปที่ 7.54

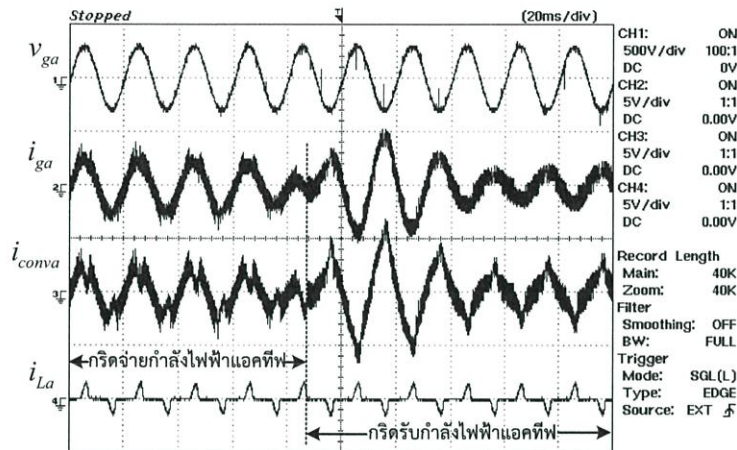


รูปที่ 7.53 สัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส กระแสกริดที่ไหลในสาย กระแสคอนเวอร์เตอร์ และกระแสโหลดกรณีที่ 4



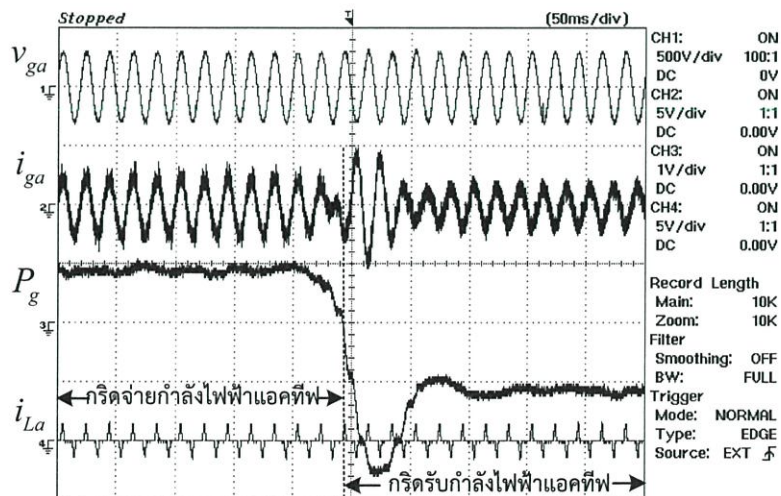
รูปที่ 7.54 สัญญาณกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนกรณีที่ 4

การทดสอบจับสัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส (V_{ga}) กระแสกริดที่ไหลในสาย (i_{ga}) กระแสคอนเวอร์เตอร์ต่อเฟส (i_{conva}) และกระแสโหลดต่อเฟส (i_{La}) เมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจากกริด 3 เฟส 4 สาย และรับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.55



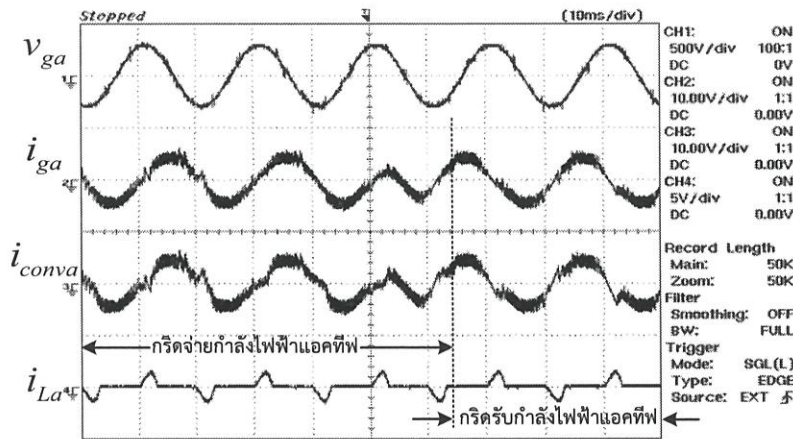
รูปที่ 7.55 สัญญาณ V_{ga} , i_{ga} , i_{conva} และ i_{La} เมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย สเกลแรงดันกริด 500 V/div; สเกลกระแสกริดและกระแสคอนเวอร์เตอร์ 10 A/div ; สเกลกระแสโหลด 5 A/div

ผลตอบสนองเชิงไดนามิกของระบบที่นำเสนอเมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.56



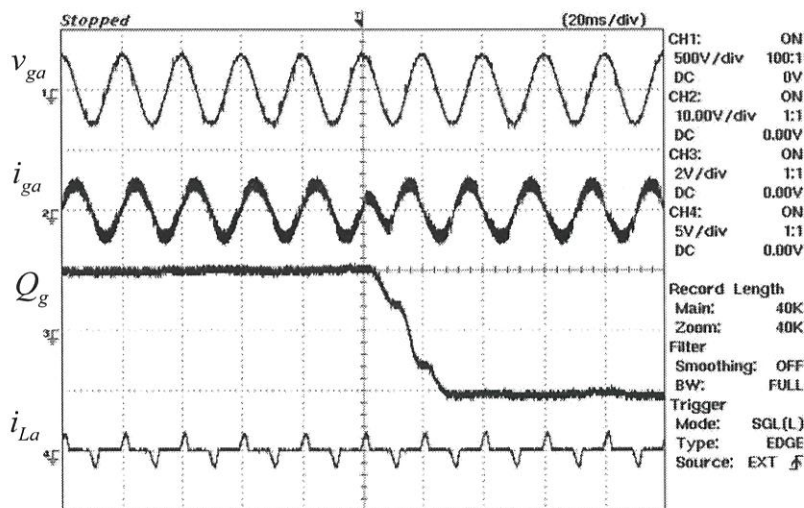
รูปที่ 7.56 ผลตอบสนองเชิงไดนามิกของระบบที่นำเสนอเมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายและรับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (P_g)เข้ากริด 3 เฟส 4 สาย สเกลแรงดัน 500 V/div; สเกลกระแส 5A/div ; สเกลกำลัง 1,000 W/div

การทดสอบจับสัญญาณแรงดันกริดต่อเฟส (V_{ga}) กระแสกริดที่ไหลในสาย (i_{ga}) กระแสคอนเวอร์เตอร์ต่อเฟส (i_{conva}) และกระแสโหลดต่อเฟส (i_{La}) เมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.57



รูปที่ 7.57 สัญญาณ V_{ga} , i_{ga} , i_{conva} และ i_{La} เมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายและรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย สเกลแรงดันกริด 500 V/div ; สเกลกระแสกริด และกระแสคอนเวอร์เตอร์ 10 A/div ; สเกลกระแสโหลด 5 A/div

ผลตอบสนองเชิงไดนามิกของระบบที่นำเสนอเมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายและรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.58



รูปที่ 7.58 ผลตอบสนองเชิงไดนามิกของระบบที่นำเสนอเมื่อควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเข้ากริด 3 เฟส 4 สาย สเกลกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q_g) 2,000 Var/div

7.10 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดสอบหาความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_i) ของโหลดไม่เชิงเส้นชนิดต่างๆ จำนวน 5 รายการ เมื่อนำมาต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย จะทำให้กระแสในสายมีรูปคลื่นไม่เป็นไซน์ทำให้เกิดค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสในสายแตกต่างกันไปตามชนิดของโหลด ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 การทดสอบหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_i) ของโหลดไม่เชิงเส้นชนิดต่างๆ จำนวน 5 รายการ

ลำดับที่	รายการโหลด	% THD _i
1	โหลดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด	122.57 %
2	โหลดวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่น ต่อในระบบ 3 เฟส 4 สายแบบไดโอด 12 ตัว	80.87 %
3	โหลดวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด 6 ตัว	48.74 %
4	โหลดไทรสเตอร์ 3 เฟส ขั้วเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	55.98 %
5	โหลดระบบขั้วเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	66.55 %

จากสรุปผลการทดสอบหาความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_i) ของโหลดไม่เชิงเส้นชนิดต่างๆ จำนวน 5 รายการ ดังในตารางที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าโหลดวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟสแบบไดโอด เมื่อนำมาต่อในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย จะมีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม (THD_i) มากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 122.57%

จากผลการทดสอบก้งหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์ที่ติดตั้งในสถานที่จริง โดยขนาดแรงดันเอาต์พุตระหว่างสายที่ได้จากก้งหันลมขึ้นอยู่กับความเร็วลม ถ้าความเร็วลมสูงจะผลิตขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้มากกว่าความเร็วลมต่ำ ส่วนการทดสอบจับสัญญาณแรงดันไฟตรงที่ผ่านวงจรเรกติไฟร์ 3 เฟส ที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที จะได้ค่าแรงดันไฟตรงประมาณมีค่าเท่ากับ 238 โวลต์ โดยข้อมูลเก็บผลความเร็วลม ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ เมื่อวันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2559 ช่วงเวลา 14:40:27 ถึง 15:53:50 น. และข้อมูลเก็บผลความเร็วลม เมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559 ช่วงเวลา 14:23:16 ถึง 15:20:10 น. มีค่าความเร็วลมสูงสุดไม่เกิน 6 เมตรต่อวินาที จะเห็นได้ว่าเมื่อนำก้งหันลมที่ออกแบบนี้ไปใช้ติดตั้งใช้งานจริงที่ความเร็วลมต่ำ ก้งหันตัวนี้สามารถผลิตแรงดันไฟตรงได้สูงเกิน 200 โวลต์ ซึ่งเมื่อนำไปผ่านวงจรบัสต์แรงดันไฟตรงเป็นไฟตรงแรงดันสูง จะทำให้แรงดันเพิ่มขึ้นจากประมาณ 200 โวลต์เป็น 700 โวลต์ ซึ่งเมื่อนำไปผ่านชุดวงจรอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกริด 3 เฟส โดยมีสัญญาณควบคุมการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ด้วย

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำให้ระบบที่นำเสนอสามารถทำหน้าที่ได้หลายอย่าง โดยในบทนี้ได้แยกการทดสอบระบบที่นำเสนอออกเป็น 4 กรณี คือ

1) กรณีที่ 1 การทดสอบระบบขณะที่ไม่มีการชดเชยจากตัวคอนเวอร์เตอร์ กริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนไปยังโหลดไม่เชิงเส้น

2) กรณีที่ 2 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดปรับปรุงกระแสกริดให้เป็นชายน์ เมื่อกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับโหลดไม่เชิงเส้น

3) กรณีที่ 3 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟคืนสู่กริด และเป็นตัวกรองฮาร์มอนิกสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

4) กรณีที่ 4 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคืนกริด และกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้น

โดยสรุปผลการทดสอบแต่ละกรณี แสดงในตารางที่ 7.2 ดังนี้

ตารางที่ 7.2 การทดสอบระบบเชื่อมต่อกริดที่นำเสนอ

ชนิดการทดสอบ	กริด 3 เฟส 4 สาย				คอนเวอร์เตอร์		โหลดไม่เชิงเส้น	
	P_g (W)	Q_g (Var)	I_g (A)	$\%THDi_g$ (%)	I_{conv} (A)	$\%THDi_c$ (%)	I_L (A)	$\%THDi_L$ (%)
กรณีที่ 1	97	95	0.600	60.8	0.5mA	57.1	0.155	82.5
กรณีที่ 2	279	121	1.394	14.4	0.898	46.9	0.543	73.0
กรณีที่ 3	-269	118	1.345	20.4	1.594	24.1	0.543	73.2
กรณีที่ 4	60	-650	2.940	5.7	2.910	12.3	0.570	78.6

จากผลการทดสอบระบบเชื่อมต่อกริดที่นำเสนอในตารางที่ 7.2 และจากการทดสอบจับสัญญาณแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ สรุปผลการทดสอบในแต่ละกรณีได้ดังนี้

กรณีที่ 1 : จะเห็นได้ว่าไม่มีการชดเชยจากตัวคอนเวอร์เตอร์ กริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟหรือกำลังเสมือนไปยังโหลดไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 97 W และ 95 VAR ตามลำดับ โดยสัญญาณกระแสที่กริดไม่เป็นรูปคลื่นชายน์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม ($\%THDi_g$) ที่กริดเท่ากับ 60.8% ส่วนกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนมีค่าไม่เกิน $2 A_{peak}$

กรณีที่ 2 : จะเห็นได้ว่าคอนเวอร์เตอร์มีการทำงาน จ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนจากกริดไปยังโหลดไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 279 W และ 121 Var ตามลำดับ โดยสัญญาณ

กระแสที่กริดอินเฟสกับแรงดันกริดเป็นรูปคลื่นไซน์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม ($THDi_g$) ที่กริดเท่ากับ 14.4% ส่วนกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนมีค่าไม่เกิน $2 A_{peak}$

กรณีที่ 3 : จะเห็นได้ว่าคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟคืนสู่กริดมีค่าเท่ากับ 269 W และกริดจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 118 Var และเป็นตัวกรองฮาร์มอนิกสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น โดยสัญญาณกระแสที่กริดต่างเฟสกับแรงดันกริด 180 องศาไฟฟ้า ซึ่งกระแสกริดเป็นรูปคลื่นไซน์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม ($THDi_g$) ที่กริดเท่ากับ 20.4% ส่วนกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนมีค่าไม่เกิน $3 A_{peak}$

กรณีที่ 4 : จะเห็นได้ว่าคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟคืนสู่กริดมีค่าเท่ากับ 650 Var และกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 60 W โดยสัญญาณกระแสที่กริดมีมุมหน้าแรงดันกริด 90 องศาไฟฟ้า ซึ่งกระแสกริดเป็นรูปคลื่นไซน์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม ($THDi_g$) ที่กริดเท่ากับ 5.7% ส่วนกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนมีค่าไม่เกิน $3 A_{peak}$

จากการทดสอบทางด้านไดนามิกในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานเชื่อมต่อบนที่นำเสนอนี้เข้ากับกริด 3 เฟส 4 สาย ในสภาวะจากกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟประมาณ 1,000 W ไปยังสภาวะกริดรับกำลังไฟฟ้าแอคทีฟที่ค่าประมาณ -1,000 W ระบบสามารถทำงานตอบสนองได้ดีในทำนองคล้ายกันเมื่อทดสอบทางด้านไดนามิกในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานเชื่อมต่อบนที่นำเสนอนี้เข้ากับกริด 3 เฟส 4 สาย ในสภาวะจากกริดจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟประมาณ 2,000 Var ไปยังสภาวะกริดรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ค่าประมาณ -2,000 Var ระบบสามารถทำงานตอบสนองได้ดีเช่นกัน

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น โดยวิเคราะห์ตัวแปร สมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ออกแบบอัลกอริทึม สำหรับควบคุมระบบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลาเข้ากับระบบกริด 3 เฟส 4 สาย ที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม จำลองการทำงานของระบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการควบคุมด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab/simulink ออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมตามที่ได้วิเคราะห์และจำลองการทำงานไว้ โดยได้ทำการทดสอบการทำงานเครื่องต้นแบบในห้องปฏิบัติการโดยใช้ตัวจำลองการทำงานของกังหันลมแทนการทำงานของกังหันลม 3 ใบพัดจริง จากนั้นทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบกับกังหันลม 3 ใบพัดจริงที่สถานที่ติดตั้งจริงโดยได้ทำการสรุปผลการวิจัย และมีข้อเสนอแนะดังนี้

8.2 สรุปผลการวิจัย

จากผลการจำลองของระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมด้วย โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยอาศัยเทคนิคการชดเชยกระแสกริดด้วยการควบคุมกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีพี-คิวที่อยู่ในเทอมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่กริดกับโหลด เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดจ่ายแรงดันโดยมีการทำงานหลายหน้าที่ กล่าวคือ การเชื่อมต่อพลังงานทดแทนที่ได้จากพลังงานลมเข้ากับกริด 3 เฟส 4 สาย กำจัดฮาร์มอนิก และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น โดยจะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมการกำจัดฮาร์มอนิกของกระแสกริดให้รูปคลื่นกระแสลักษณะใกล้เคียงขายน้มีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นขายน้ลดลง ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม(THD) ที่กริดแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส มีค่าที่ต่ำ ซึ่งจากผลการทดสอบระบบ

เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟตรงเข้ากับกริด 3 เฟส 4 สาย ปรากฏว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการจำลองที่ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองและการทดสอบใกล้เคียงกัน

ในบทนี้ได้แยกการทดสอบระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นต่อร่วมด้วย ออกเป็น 4 กรณี คือ

1) กรณีที่ 1 การทดสอบระบบขณะที่ไม่มีการชดเชยจากตัวคอนเวอร์เตอร์ กริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนไปยังโหลดไม่เชิงเส้น โดยสัญญาณกระแสที่กริดไม่เป็นรูปคลื่นชานน์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม($THDi_g$) ที่กริดเท่ากับ 60.8% ส่วนกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนมีค่าไม่เกิน 2 A_{peak}

2) กรณีที่ 2 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดปรับปรุงกระแสกริดให้เป็นชานน์ เมื่อกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับโหลดไม่เชิงเส้น กระแสที่กริดอินเฟสกับแรงดันกริดเป็นรูปคลื่นชานน์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม($THDi_g$) ที่กริดเท่ากับ 14.4% ส่วนกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนมีค่าไม่เกิน 2 A_{peak}

3) กรณีที่ 3 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟคืนสู่กริด และเป็นตัวกรองฮาร์มอนิกสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น กระแสกริดเป็นรูปคลื่นชานน์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม($THDi_g$) ที่กริดเท่ากับ 20.4% ส่วนกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนมีค่าไม่เกิน 3 A_{peak}

4) กรณีที่ 4 การทดสอบระบบขณะที่คอนเวอร์เตอร์มีการทำงานในโหมดจ่ายกำลังไฟฟ้าวรีแอคทีฟคืนกริด และกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟไปยังโหลดไม่เชิงเส้น กระแสกริดเป็นรูปคลื่นชานน์มีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม($THDi_g$) ที่กริดเท่ากับ 5.7% ส่วนกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนมีค่าไม่เกิน 3 A_{peak}

เมื่อทดสอบระบบที่นำเสนอทางด้านไดนามิกในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานเชื่อมต่อเข้ากับกริด 3 เฟส 4 สาย ในสภาวะจากกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟไปยังสภาวะกริดรับกำลังไฟฟ้าแอคทีฟ คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานตอบสนองได้ดี ในทำนองคล้ายกันเมื่อทดสอบทางด้านไดนามิกในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานเชื่อมต่อระบบที่นำเสนอนี้เข้ากับกริด 3 เฟส 4 สาย ในสภาวะจาก กริดจ่ายกำลังไฟฟ้าวรีแอคทีฟไปยังสภาวะกริดรับกำลังไฟฟ้าวรีแอคทีฟ คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานตอบสนองได้ดีเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบที่นำเสนอมีการทำงานหลายหน้าที่ คือ มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน จ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟ และจ่ายกำลังไฟฟ้าวรีแอคทีฟคืนสู่กริดได้

8.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเราสามารถสร้างระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นได้ โดยควรออกแบบให้ระบบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และลดการลดทอนด้านฮาร์มอนิกรวมได้ดีขึ้น ดังนั้นควรมีการออกแบบระบบให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกของโหลดไม่เชิงเส้นให้ได้ดีในลำดับต่อไป ซึ่งมีข้อเสนอแนะในการปรับปรุงเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

8.3.1 ลดกระแสที่ไหลในสายนิวตรอนให้น้อยลงกว่าเดิม เมื่อระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สาย ทำงานในสภาวะโหลดไม่สมดุล

8.3.2 ลดความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกกระแส ($THDi_c$) ให้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยการใช้การควบคุมด้วยแรงดันอ้างอิง(Reference Voltage) แทนการควบคุมด้วยกระแสอ้างอิง(Reference Current) เช่น Space vector PWM เป็นต้น เพื่อที่จะทำให้ลดความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกกระแสลง

8.3.3 พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำ (L) ที่เหมาะสม เช่น ใช้เทคนิค Optimization โดยใช้ Genetic algorithm (GA) เป็นต้น เพื่อลดความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกกระแสลง

8.3.4 ศึกษาหาวิธีการที่จะใช้กับโหลดไม่สมดุลของแต่ละเฟส โดยใช้หลักการพิจารณา Positive และ Negative Sequence เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chen. Y, Pillay. P, "Axial-flux PM wind generator with a soft magnetic composite core", IEEE Industry Applications, Vol.1, 2005, pp. 231-237.
- [2] J. R. Bumby and R. Martin, "Axial Flux, Permanent Magnet, Generators for Engine Integration," The 12th International Stirling Engine Conference, Durham, Sept 2005.
- [3] Garrison F. Price, Todd D. Batzel, Mihai Comanescu and Bruce A. Muller, "Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator", The 2008 IAJC-IJME International Conference.
- [4] G Gitanjali Mehta and S.P. Singh, R.D. Patidar, "NonLinear load compensation in Fuel Cell grid interfaced system using active power filter" , IEEE PEDS 2011, Singapore, 5-8 December 2011, PP. 197-202, 2011.
- [5] HIROFUMI AKAGI, AKIRA NABAE and SATOSHI ATOH." Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage Source PWM Converters" ,IEEE Transactions on Industry Application, Vol. IA-22, No. 3, PP. 460-465, 1986.
- [6] Luis Moran, Pedro Godoy, Rogel Wallace and Juan Dixon," A NEW CURRENT CONTROL STRATEGY FOR ACTIVE POWER FILTERS USING THREE PWM VOLTAGE SOURCE INVERTERS", Power Electronics Specialists Conference, PP. 3 - 9, 1993.
- [7] S.H. Hosseini, S. Danyali, A. Yazdanpanah Goharrizi and M. Sarhangzadeh."Three-Phase Four Wire Grid-Connected PV Power Supply with Accurate MPPT for Unbalanced Nonlinear Load Compensation" IEEE ISIE 2009, Korea, 5-8 July 2009, PP. 1099-1104, 2009.
- [8] Zhilei Yao and Lan Xiao."Control of Single-Phase Grid-Connected Inverters With Nonlinear Loads ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. PP, No. 99, PP. 1-6, 2012 .

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis, "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, NO.3, April 2006. pp. 486-494.
- [10] P. Jansuya and Y. Kumsuwan, "Design of MATLAB/Simulink Modeling of Fixed-Pitch Angle Wind Turbine Simulator", 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Ubon ratchathani, Thailand, December 5-8, 2012.
- [11] Sakda Prommeuan, Vijit Kinnares and Chakrapong Charumit, "Control of a 3-Phase 4 Wire Grid Connected Converter with Active Power Filter and Var Compensation Functionality for Nonlinear Loads", IEEE IPEC2012, Vietnam, 12-13 December 2012, PP. 412-417, 2012.
- [12] H.Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning" IEEE Press, John Wiley & Sons, 2007.
- [13] P. Wannakarn, T. Tanmaneeprasert, N. Rugthaicharoencheep and S. Nedphograw, "Design and Construction of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbine Generated DC Voltage at Rated Power 1500 W", The Fourth International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Weihai, Shandong, China, 2011.
- [14] P. Wannakarn and V. Kinnares, "Microcontroller based Grid Connected Inverter for Axial Flux Permanent Magnet Generator" IEEE PEDS 2011, International Conference, Singapore, 2011.
- [15] P. Wannakarn and V. Kinnares, "Single-Phase Grid Connected Axial Flux Permanent Magnet Generator System with Reactive Power Compensation Functionality", IEEE IPEC 2012, International Conference, Vietnam, 2012.

รายงานฉบับสมบูรณ์ รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A11802005

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลา ขับเคลื่อน
โดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] S.Tunyasirut, V. Kinnares “SPEED AND POWER CONTROL A SLIP ENERGY RECOVERY DRIVE USING VOLTAGE-SOURCE PWM CONVERTER WITH CURRENT CONTROLLED TECHNIQUE”, Eco-Energy and Materials Science and Engineering 2012 5-8 December, 2012.
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/Betz'_law

รายงานฉบับสมบูรณ์ รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A11802005

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลา ขับเคลื่อน
โดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลความเร็วลมจริงที่ปะทะใบกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์

รายงานฉบับสมบูรณ์ รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A11802005

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อน
โดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

ตารางบันทึกผลความเร็วลมจริงที่ปะทะใบกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์
เก็บผลเมื่อวันที่ 27 มกราคม 2559 ช่วงเวลา 14:40:27 น. ถึง 15:54:50 น.

วัน/เดือน/ปี	เวลา	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
27/1/2016	14:40:27	3.2
27/1/2016	14:41:27	2.5
27/1/2016	14:42:27	1.6
27/1/2016	14:43:27	4.1
27/1/2016	14:44:27	0.7
27/1/2016	14:45:27	1.3
27/1/2016	14:46:27	1
27/1/2016	14:47:01	3.2
27/1/2016	14:57:27	1.3
27/1/2016	14:58:27	3.2
27/1/2016	15:16:14	1.1
27/1/2016	15:16:16	1.9
27/1/2016	15:16:18	2.7
27/1/2016	15:16:49	1.7
27/1/2016	15:16:51	1.9
27/1/2016	15:16:53	2.3
27/1/2016	15:22:48	0.7
27/1/2016	15:23:48	1.7
27/1/2016	15:24:48	2.9
27/1/2016	15:25:48	1.3
27/1/2016	15:26:48	1.1
27/1/2016	15:27:48	1.9
27/1/2016	15:28:48	1.3
27/1/2016	15:29:48	1.6
27/1/2016	15:30:48	3
27/1/2016	15:31:48	3.1
27/1/2016	15:32:48	3.5
27/1/2016	15:33:48	2.2
27/1/2016	15:34:48	2
27/1/2016	15:35:48	2
27/1/2016	15:36:48	1.5
27/1/2016	15:37:48	2.3
27/1/2016	15:38:48	2.9
27/1/2016	15:39:48	2.1

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เงินอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

รายงานฉบับสมบูรณ์ รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A11802005

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อน
โดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

วัน/เดือน/ปี	เวลา	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
27/1/2016	15:40:48	2.5
27/1/2016	15:41:48	1.6
27/1/2016	15:42:48	3.2
27/1/2016	15:43:48	0.9
27/1/2016	15:44:48	1
27/1/2016	15:45:48	2.3
27/1/2016	15:46:48	1.6
27/1/2016	15:47:48	2.3
27/1/2016	15:48:48	2.6
27/1/2016	15:49:48	3.7
27/1/2016	15:50:48	2.6
27/1/2016	15:51:48	3.7
27/1/2016	15:52:48	1.2
27/1/2016	15:53:48	2
27/1/2016	15:54:48	3.6
27/1/2016	15:54:50	3.5

รายงานฉบับสมบูรณ์ รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A11802005

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อน
โดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

ตารางบันทึกผลความเร็วลมจริงที่ปะทะใบกังหันลมขนาด 1 กิโลวัตต์
เก็บผลเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559 ช่วงเวลา 14:23:16 น. ถึง 16:31:31 น.

วัน/เดือน/ปี	เวลา	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
3/2/2016	14:23:16	3.2
3/2/2016	14:46:52	3.2
3/2/2016	14:47:54	3.6
3/2/2016	14:48:54	4.4
3/2/2016	14:49:54	2.3
3/2/2016	14:50:54	3.3
3/2/2016	14:51:54	3.2
3/2/2016	14:52:54	0.8
3/2/2016	14:53:54	0.6
3/2/2016	14:54:54	3.6
3/2/2016	14:55:54	2.1
3/2/2016	14:56:54	4.9
3/2/2016	14:57:54	4
3/2/2016	14:58:56	2.2
3/2/2016	14:59:54	2.3
3/2/2016	15:00:54	2.2
3/2/2016	15:01:54	2.7
3/2/2016	15:02:54	2.8
3/2/2016	15:03:54	4.2
3/2/2016	15:04:54	2
3/2/2016	15:05:54	4.2
3/2/2016	15:06:54	2.1
3/2/2016	15:07:54	1.6
3/2/2016	15:08:54	2.3
3/2/2016	15:09:54	2.4
3/2/2016	15:10:54	3.7
3/2/2016	15:11:54	4
3/2/2016	15:12:54	4.1
3/2/2016	15:13:54	4.2
3/2/2016	15:14:54	4.7
3/2/2016	15:15:54	3.6
3/2/2016	15:16:54	2.3
3/2/2016	15:17:56	3.3
3/2/2016	15:18:54	2.9

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เงินอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

รายงานฉบับสมบูรณ์ รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A11802005

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อน
โดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

วัน/เดือน/ปี	เวลา	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
3/2/2016	15:19:54	3
3/2/2016	15:20:22	4.7
3/2/2016	15:29:47	1.3
3/2/2016	15:30:47	1.9
3/2/2016	15:31:47	2.8
3/2/2016	15:32:47	4.3
3/2/2016	15:33:47	4.4
3/2/2016	15:34:47	4.1
3/2/2016	15:35:47	4
3/2/2016	15:36:47	3.8
3/2/2016	15:37:47	3
3/2/2016	15:38:47	3.8
3/2/2016	15:39:45	5.3
3/2/2016	15:40:45	3.2
3/2/2016	15:41:45	3.6
3/2/2016	15:42:45	3.1
3/2/2016	15:43:45	3.5
3/2/2016	15:44:45	3.2
3/2/2016	15:45:45	4.3
3/2/2016	15:46:45	3.1
3/2/2016	15:47:45	3
3/2/2016	15:48:45	3.3
3/2/2016	15:49:45	1.9
3/2/2016	15:50:45	3.3
3/2/2016	15:51:45	1.7
3/2/2016	15:52:45	3.5
3/2/2016	15:53:45	2.9
3/2/2016	15:54:45	4.5
3/2/2016	15:55:45	2.3
3/2/2016	15:56:45	2.6
3/2/2016	15:57:45	3.7
3/2/2016	15:58:45	3.2
3/2/2016	15:59:45	2.8
3/2/2016	16:00:45	1.6
3/2/2016	16:01:45	3.6
3/2/2016	16:02:45	3.2
3/2/2016	16:03:45	3.8

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เงินอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

รายงานฉบับสมบูรณ์ รหัสข้อเสนอโครงการ 2558A11802005

ระบบเชื่อมต่อกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา ขับเคลื่อน
โดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

วัน/เดือน/ปี	เวลา	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
3/2/2016	16:04:45	1.3
3/2/2016	16:05:45	3.5
3/2/2016	16:06:45	3.1
3/2/2016	16:07:45	2.3
3/2/2016	16:08:45	2
3/2/2016	16:09:45	2.1
3/2/2016	16:10:45	2.5
3/2/2016	16:11:45	2
3/2/2016	16:12:45	3
3/2/2016	16:13:45	3.7
3/2/2016	16:14:45	3.9
3/2/2016	16:15:45	2.6
3/2/2016	16:16:45	1.6
3/2/2016	16:17:45	3
3/2/2016	16:18:45	2.3
3/2/2016	16:19:45	3.2
3/2/2016	16:20:45	2.5
3/2/2016	16:21:45	1.3
3/2/2016	16:22:45	2.8
3/2/2016	16:23:45	2.1
3/2/2016	16:24:45	1
3/2/2016	16:25:45	1.9
3/2/2016	16:26:45	1.5
3/2/2016	16:27:45	3.6
3/2/2016	16:28:45	1.9
3/2/2016	16:29:45	2.4
3/2/2016	16:30:45	1.1
3/2/2016	16:31:31	0.6

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เงินอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

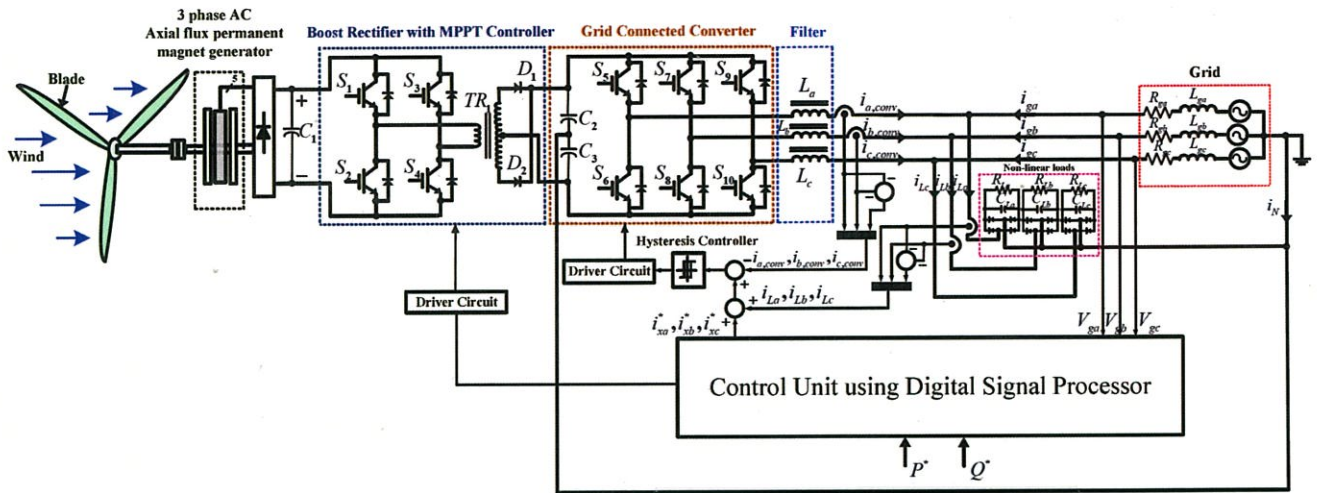
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

ระบบเชื่อมต่อกับกริด 3 เฟส 4 สายเข้ากับเครื่องกำเนิดแบบเส้นแรงแม่เหล็กฟุ้งตามแนวแกนเพลลา
 ขับเคลื่อนโดยกังหันลมที่มีหน้าที่กรองฮาร์มอนิกไวงาน และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น

Three Phase Four Wire Grid Connected Wind Turbine Axial Flux Generator System
 with Active Power Filter and Var Compensation Functionality for Nonlinear Loads



หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ร่วมโครงการ

อาจารย์ ศักดา พรหมเหมือน

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

อาจารย์ พูนศรี วรรณการ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

อาจารย์ อัครกิตติ์ ไชยธนกุลวัฒน์

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ

สนับสนุนโดยทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป (เงินงบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ