

การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์

**A DESIGN OF POWER CONVERTER FOR 1 kW
WIND TURBINE GENERATOR**

วสันต์ เพชรพิมูล

WASAN PHETPHIMOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์



วสันต์ เพชรพิมูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

**A DESIGN OF POWER CONVERTER FOR 1 kW
WIND TURBINE GENERATOR**

WASAN PHETPHIMOON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

วสันต์ เพชรพิมูล





ใบรับรองวิทยานิพนธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับกักเก็บลมผลิตไฟฟ้า
ขนาด 1 กิโลวัตต์
A DESIGN OF POWER CONVERTER FOR 1 kW
WIND TURBINE GENERATOR

ชื่อนักศึกษา นายวสันต์ เพชรพิมูล
รหัสประจำตัว 115170420114-4
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์
วัน เดือน ปี ที่สอบ 9 ตุลาคม 2553
สถานที่สอบ ห้องชมพูนุพัทธ์ทิพย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร.ยุทธนา จำสุวรรณ์)

..... กรรมการ

(ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์)

..... กรรมการ

(ดร.สุรินทร์ แห่งงาม)

..... กรรมการ

(ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาด 1 กิโลวัตต์
ชื่อนักศึกษา	นายวสันต์ เพชรพิมูล
รหัสประจำตัว	115170420114-4
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า ที่มีแรงดันและความถี่ด้านนอกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร เปลี่ยนแปลงตามความเร็วลม ซึ่งมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้า และความถี่ด้านนอกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์จะประกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทบระดับ โดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวชดเชยระบบแบบพีไอ และสร้างสัญญาณควบคุมชนิดเฉลี่ยความกว้างพัลส์ ที่ควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 600 โวลต์ และแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต ด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยผลการทดลองพบว่าระบบสามารถยกระดับแรงดันได้ตามที่ออกแบบไว้ได้ และสามารถรักษาระดับแรงดันในช่วงพิกัดคือ 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต ที่แรงดันจากกังหันลมช่วง 58-70 โวลต์

งานวิจัยนี้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้า และความถี่ที่ออกจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหันลม และทำการยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อได้แรงดัน และความถี่ด้านนอกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามที่ต้องการที่ 380 โวลต์ 50 เฮิร์ต

คำสำคัญ : กังหันลมผลิตไฟฟ้า วงจรเรียงกระแส วงจรทบระดับ วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์
วงจรอินเวอร์เตอร์

Thesis Title : A DESIGN OF POWER CONVERTER FOR 1 KW
WIND TURBINE GENERATOR

Student Name : Mr.Wasan Phetphimoon

Student ID : 115170420114-4

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Electrical Engineering

Academic Year : 2010

Thesis Advisor: Dr. Krischonme Bhumkittipich

ABSTRACT

This thesis presents a design of power converter circuit for wind turbine application. According to the changing of wind speed, the output voltage and frequency of generator are varied and controlled by using power connector.

These converter circuits are composed three phase rectifier, boost converter circuit with the closed loop PI control and a PWM Inverter. These systems implemented are in the digital signal system by using digital signal processor (DSP). The simulation results and experimental show that the benefit of power converter that can control the output voltage up to 600 V with the input voltage about 58-70 V

Research can control voltage and frequency of wind turbine generator a regulate the constant high voltage using by converter circuit.

Keywords : Wind turbine Generation, Rectifier circuit, Boost Converter circuit, Push - Pull converter circuit, Inverter circuit

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยการดูแลคอยให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือด้านต่างๆ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักติพิชญ์ ที่คอยเป็นห่วงเอาใจใส่ ให้คำแนะนำ และให้ความรู้ทั้งทางด้านทฤษฎี ทางด้านปฏิบัติ ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์สันติภาพ โคตทะเล ซึ่งท่านได้สละเวลาคอยดูแลเป็นห่วง และเอาใจใส่ข้าพเจ้าตลอดมาตั้งแต่อดีตถึงเริ่มทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ ทั้งทางด้านทฤษฎี ทางด้านปฏิบัติ และคอยให้กำลังใจข้าพเจ้าขณะทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจในการศึกษา ค้นคว้าข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่คอยเป็นห่วงดูแลเอาใจใส่ข้าพเจ้า และพี่สาวร่วมบิดา มารดาของข้าพเจ้า นางสาวระวีวรรณ เพชรพิมูล ที่คอยให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ พร้อมทั้งน้องชายร่วมบิดา มารดาของข้าพเจ้า นายสุรศักดิ์ เพชรพิมูล ซึ่งได้สนับสนุนรถยนต์ในช่วงที่ข้าพเจ้าทำงานวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และนางอนุธิดา เพชรพิมูล ภรรยาซึ่งเป็นพี่รัก ที่คอยห่วงใย เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมา

ขอบคุณเพื่อนปริญญาโท โดยเฉพาะนายทรงกลด ศรีปรารักษ์ และนายสุรเดช อินทร์พุ่ม ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความรู้เพื่อนำไปใช้ในงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมทั้งพี่ๆ และทีมงานวิจัย ห้องปฏิบัติการระบบกำลังไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วสันต์ เพชรพิมูล

9 ตุลาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา	3
1.7 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หลักการของพลังงานลม	5
2.2 กังหันลมผลิตไฟฟ้า	8
2.3 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์	16
2.4 วงจรทบทระดับแรงดัน	18
2.5 วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์	23
2.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	27
2.7 ตัวควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม	31
2.8 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	35
บทที่ 3 การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์	36
3.1 แนวคิดในการออกแบบ และการสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์	37
3.2 การออกแบบวงจรเรียงกระแส	37
3.3 การออกแบบวงจรทบทระดับแรงดัน	38
3.4 การออกแบบวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	46
3.6 วงจรขับนำ และตรวจจับสัญญาณแรงดัน	47
บทที่ 4 ผลการจำลอง และการทดสอบ	49
4.1 การจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK	49
4.2 ผลการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการควบคุมบัลไฟฟ้ากระแสตรง ที่สภาวะต่างๆ	50
4.3 ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรง ที่ได้ออกแบบสร้าง	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	
ก ผลการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่างๆ	64
ข โปรแกรมควบคุมตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	66
ค เครื่องต้นแบบในงานวิจัย	74
ง ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่	78
ประวัติผู้เขียน	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มุมการนำกระแสของไดโอด	17
2.2 อัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิกกับ แรงดันไฟฟ้า ของแรงดันสายของอินเวอร์เตอร์	30
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และตัวเก็บประจุที่มาต่อใช้งาน	37
4.1 ค่าพารามิเตอร์การจำลองการทำงาน ใน MATLAB/SIMULINK	49
ก-1 ผลการทดสอบที่สภาวะแรงดันต่างๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่มีการควบคุมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่	65



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ส่วนประกอบของงานวิทยานิพนธ์	2
2.1 ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ	5
2.2 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม	7
2.3 กระบวนการเกิดทอร์กอากาศพลศาสตร์	9
2.4 ส่วนประกอบของกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า	11
2.5 กราฟการทำงานของกังหันลม	11
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง สัมประสิทธิ์แรงบิด กับ แลมด้า	13
2.7 เส้นทางการควบคุมกังหันลม ณ ความเร็วลมต่างๆ	13
2.8 วงจรเรียงกระแสสามเฟส	16
2.9 การนำกระแสของไดโอด	17
2.10 วงจรแปลงผันแบบทระดับแรงดัน	18
2.11 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส	18
2.12 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส	19
2.13 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ	22
2.14 วงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์	24
2.15 กระแสไหลผ่าน	24
2.16 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM	29
2.17 รูปคลื่นของแรงดัน และกระแสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แสดงช่วงกำลังงาน ไม่ไหลสู่โหลด	31
2.18 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย	33
2.19 สัญญาณผิดพลาดเป็นยูนิตสเต็ปกับสัญญาณทางออกของตัวควบคุมพีไอ	33
2.20 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย	33
2.21 โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST	36
2.22 สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลหลักของ ADMCF326BST	36
3.1 โครงสร้างพื้นฐาน และส่วนประกอบของวงจรแปลงผันกำลังงาน	37
3.2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส	37
3.3 วงจรทระดับแรงดัน	38
3.4 บล็อกฟังก์ชัน โอนย้าย และตัวควบคุมชนิดพีไอ	39
3.5 กราฟ Step Response จากการสุ่มค่าเริ่มต้น	40
3.6 กราฟ Step Response ที่ได้จากกฎของ Ziegler-Nichols	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 โครงสร้างพื้นฐาน และส่วนประกอบของวงจรพุก – พูลคอนเวอร์เตอร์	42
3.8 ขาต่างๆภายในตัวไอซี	43
3.9 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส	47
3.10 วงจรภายในของอุปกรณ์ PM50RS120	47
3.11 วงจรขับเคลื่อนสำหรับวงจรทระดับ และวงจรพุกพูล คอนเวอร์เตอร์	48
3.12 วงจรการตรวจจับสัญญาณแรงดัน	48
4.1 วงจรการจำลองอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการควบคุมบัสแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง ใน MATLAB/SIMULINK	49
4.2 การจำลองแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดัน 48 V คงที่	50
4.3 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรเรียงกระแส	50
4.4 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรทระดับแรงดัน	50
4.5 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter	52
4.6 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ได้ผ่านวงจร LC Filter	52
4.7 การจำลองแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สภาวะแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลง อย่างฉับพลัน	53
4.8 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรเรียงกระแส	53
4.9 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรทระดับแรงดัน	53
4.10 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter	54
4.11 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ได้ผ่านวงจร LC Filter	55
4.12 สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ Mosfet ของวงจรทระดับแรงดัน	56
4.13 สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ Mosfet ของวงจรพุก-พูล คอนเวอร์เตอร์	56
4.14 สัญญาณ ที่ใช้ขับสวิตช์ IGBT ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส	57
4.15 แรงดันของวงจรเรียงกระแส และวงจรทระดับแรงดันเมื่อสภาวะแรงดันคงที่	58
4.16 แรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อสภาวะแรงดันคงที่	58
4.17 แรงดันของวงจรเรียงกระแส และวงจรทระดับแรงดันเมื่อสภาวะแรงดัน เกิดการเปลี่ยนแปลง	59
4.18 แรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อสภาวะแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลง	59
4.19 แรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสามเฟสเมื่อสภาวะแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลง	60
ค.1 ระบบโดยรวมเครื่องต้นแบบในงานวิจัย	75
ค.2 วงจรภาคจ่ายไฟ และวงจรทระดับ	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.3 วงจรพวง-พวงคอนเวอร์เตอร์	76
ค.4 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่ไปขับสวิตช์วงจรพวง-พวงคอนเวอร์เตอร์	76
ค.5 วงจรขับสวิตช์ Mosfet	77
ค.6 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส	77



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C	คาปาซิเตอร์
D	ค่าความถี่ไอเคิล
D_1	ไดโอดตัวที่ 1
f	ความถี่
$S_w f$	ความถี่สวิตชิง
I_{av}	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย
I	กระแส
I_D	กระแสที่ไหลผ่านไดโอด
I_{dc}	กระแสไฟฟ้ากระแสตรง
I_L	กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
I_o	กระแสเอาต์พุต
I_p	กระแสสูงสุด
V_{ref}	แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง
L	ตัวเหนี่ยวนำ
L_{min}	ตัวเหนี่ยวนำค่าต่ำสุด
N_p	จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ
N_s	จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ
P_o	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต
r	รีปเปลแฟคเตอร์
R	ตัวต้านทาน
S_1	สัญญาณขับสวิตช์ตัวที่ 1
$S_w 1$	เพาเวอร์สวิตช์ตัวที่ 1
T	คาบเวลา
V_t	แรงดันชั่วขณะ
$V_{control}$	แรงดันควบคุม
V_{dc}	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
V_{ac}	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

<i>A</i>	Ampere
<i>C</i>	Capacitor
<i>D</i>	Duty Cycle
<i>DC</i>	Direct Current
<i>DSP</i>	Digital Signal Processor
<i>Hz</i>	Hertz
μH	Micro-Henry
μF	Micro-Farad
<i>kHz</i>	Kilo-Hertz
<i>mA</i>	Milli-Ampere
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation
<i>V</i>	Volt
<i>W</i>	Watt
<i>PI</i>	Proportional plus integral
<i>PWM</i>	Pulsewidth modulated
<i>RMS</i>	Root-mean-square
<i>TF</i>	Transfer function
<i>VSC</i>	Voltage source converter

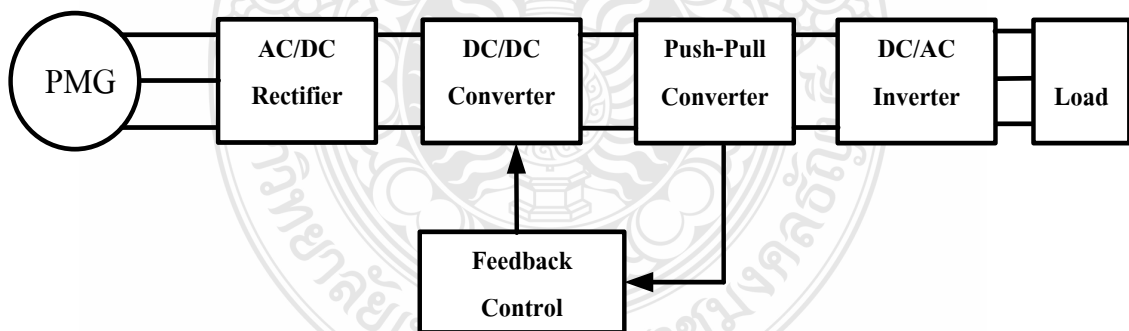
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น และเชื้อเพลิงที่ใช้นำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าจะมาจากพลังงานธรรมชาติ เช่น แก๊ส ถ่านหิน น้ำมัน แต่พลังงานธรรมชาติที่กล่าวมานั้นวันจะลดน้อยลงจนหมดไปในอนาคต ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงมีความสำคัญในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานที่สนใจคือพลังงานลม ซึ่งพลังงานที่ได้จากกังหันลมนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าทุกครั้งที่ความเร็วที่มาปะทะกับใบของกังหันลม

เนื่องจากความเร็วลมในธรรมชาตินั้นมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เปลี่ยนแปลงตามสภาวะความเร็วลม มีผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามความเร็วลมที่มากระทำต่อใบพัดของกังหันลม และแรงดันที่ออกจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ได้นั้นมีแรงดันไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำถ้าจะนำไปใช้งานได้นั้นควรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน และความถี่ที่ใช้ในประเทศ ซึ่งมีวิธีที่ทำให้แรงดันสูงขึ้นได้หลายวิธี เช่นผ่านหม้อแปลงให้มีแรงดันที่ต้องการ และอีกวิธีคือใช้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานคือวงจรแปลงผันกำลังงาน หรือวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถแปลงแรงดันไฟฟ้า และยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้ได้ตามที่ต้องการ และแปลงแรงดันไฟฟ้าให้กลายเป็นแรงดันใช้งาน และความถี่ที่ใช้งานอีกด้วยดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบของงานวิทยานิพนธ์

จากปัญหาดังกล่าววิทยานิพนธ์นี้จึงมีการนำเสนอการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร โดยทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากกังหันลมผลิตไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และทำการยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ และมีการควบคุมแรงดันบัลให้คงที่ในช่วงที่ต้องการด้วยวงจรทระดับแรงดัน โดยตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกของวงจรทระดับแรงดัน และส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อควบคุมความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM เพื่อไปขับมอเตอร์ของวงจรทระดับแรงดัน และทำการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นอีกด้วยด้วยวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์เพื่อส่งต่อไปกับวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดัน และความถี่ที่ต้องการคือ 380 โวลต์ 50 เฮิร์ต

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้กับกังหันลมผลิตไฟฟ้า
- 1.2.3 สร้างชุดคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันทางออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.4.1 ออกแบบ และสร้างวงจรทระดับ และวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์ที่มีแรงดันด้านออกไม่ต่ำกว่า 537 โวลต์
- 1.4.2 ออกแบบ และสร้างอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่แรงดันด้านออก 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎี และค้นคว้าหาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยกังหันลม
- 1.5.3 ศึกษาหลักการทำงานเกี่ยวกับวงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทระดับแรงดัน
วงจรพุก-พูล คอนเวอร์เตอร์ วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส
- 1.5.4 วิเคราะห์ และออกแบบวงจร
- 1.5.5 จำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.5.6 ออกแบบ และสร้างเครื่องต้นแบบ พร้อมทดสอบการทำงาน
- 1.5.7 ตรวจสอบผล และปรับปรุงแก้ไขระบบต้นแบบ
- 1.5.8 วิเคราะห์ผล เก็บข้อมูล และประเมินผล
- 1.5.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ข้อยกเว้นของการศึกษา

การศึกษางานวิจัยนี้ต้องการแก้ปัญหาของระบบผลิตไฟฟ้าโดยใช้กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบสามเฟส เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงมีผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงค่าตามความเร็วของลมที่มากระทำต่อใบพัดของกังหันลม ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการยกแรงดันไฟฟ้าควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และทำการแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่แรงดัน 380 โวลต์ และความถี่ 50 เฮิร์ต

1.7 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบการจำลอง และสร้างเครื่องต้นแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งรายละเอียดในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนของการศึกษา ข้อยกเว้นของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของกังหันลม วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทระดับ วงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์ วงจรอินเวอร์เตอร์ ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวงจรเรียงกระแสสามเฟส การออกแบบวงจรทระดับ การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วย Ziegler – Nichols การออกแบบวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์ และการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK รวมถึงการทดสอบเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ



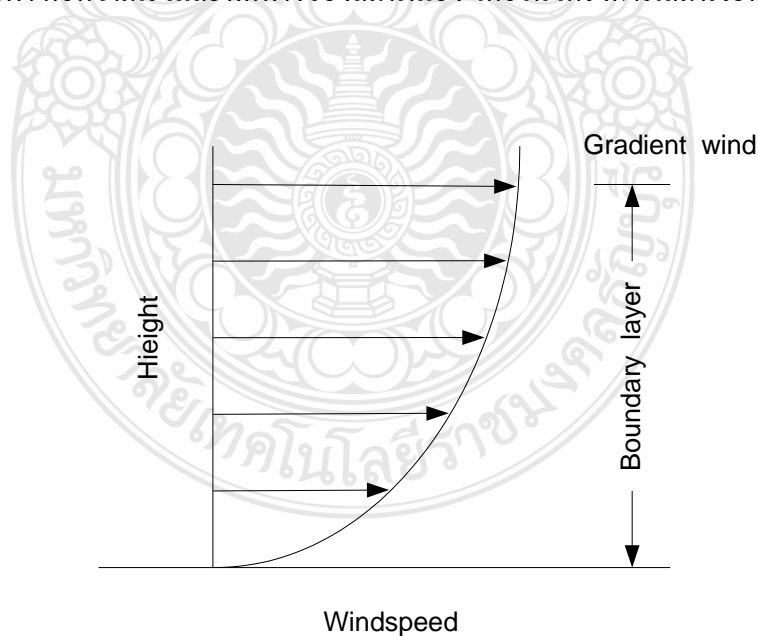
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ พลังงานลม วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจร
ทบระดับแรงดัน วงจรพุ่ม-พุดคอนเวอร์เตอร์ ระบบควบคุม และตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลโดยมี
ทฤษฎี และหลักการที่จะนำเสนอต่อไปนี้

2.1 หลักการของพลังงานลม

ลมที่นำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตกำลังไฟฟ้า ได้จากส่วนที่อยู่ใกล้ผิวโลก หรือที่เรียกว่า
ลมพื้นผิว ซึ่งหมายถึงลมที่อยู่บริเวณภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มี
การผสมผสานของอากาศและอนุภาคอื่นๆ และมีแรงเสียดทานในระดับสูง เมื่อความสูงมากกว่า 10
เมตรขึ้นไป แรงเสียดทานจะลดลงไป ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จนกระทั่งระดับ
ความสูงใกล้ 1 กิโลเมตร เกือบจะไม่มีแรงเสียดทานเลย ความเร็วลมจะขึ้นอยู่กับระดับความสูงและ
สภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกับทิศทางของลม จนการศึกษาและการค้นคว้าเพิ่มเติมจะพบว่ากังหันลม
ทำงานได้ดีหรือไม่นั้น จะขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองนี้ ที่ทิศทางลมเดียวกัน แต่ความเร็วลมต่างกัน จะ
ทำให้กังหันลมทำงานได้ไม่มีประสิทธิภาพ ความเร็วของกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้
กำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ปัจจัยเบื้องต้นที่เป็นตัวกำหนดในการใช้พลังงาน
ลมในการผลิตไฟฟ้า คือความเร็วและทิศทางของลมนั่นเอง โดยในโครงการเล่มนี้จะกล่าวถึงความเร็ว
ของลม



รูปที่ 2.1 ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ [1]

โดยที่ความเร็วลมต่ำในช่วง 1-3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะยังไม่มีการทำงานจึงยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ที่ความเร็วระหว่าง 2.5-5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะเริ่มทำงาน เรียกช่วงนี้ว่าช่วง เริ่มความเร็วลม (Cut in wind speed) และความเร็วลมช่วงประมาณ 12-15 เมตรต่อวินาที เป็นช่วงที่เรียกว่า ช่วงความเร็วลม (Nominal or Rate wind speed) ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง ในช่วงความเร็วไต่ระดับไปสู่ช่วงความเร็วลม เป็นการทำงานของกังหันลมด้วยประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการกระตุ่นความเร็ว (Tip speed ratio) และในช่วงความเร็วลมสูงกว่า 25 เมตรต่อวินาที (Cut out- wind speed) กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมสูงเกินไป ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้พลังงานลม (E_{wind}) ซึ่งเป็นพลังงานจลน์ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศ

$$E_{wind} = (1/2)mv^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$E_{wind} = \text{พลังงานจลน์}$$

$$M = \text{มวลอากาศ}$$

$$V = \text{ความเร็วลม(m/s)}$$

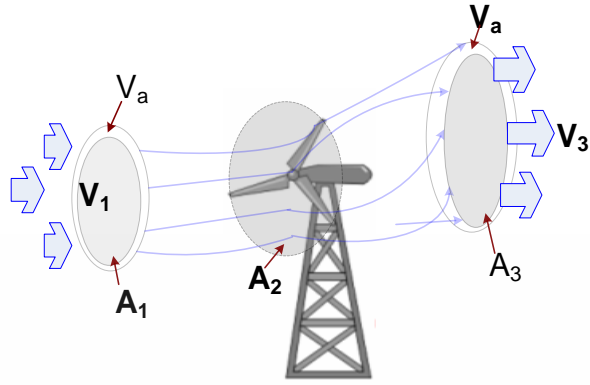
ถ้าลมเคลื่อนที่ผ่านพิกัด A เราสามารถเขียนอัตราการไหลของอากาศเชิงมวลต่อเวลา

$$M = \rho AV \quad (2.2)$$

แทนสมการ 2.2 ลงใน 2.1 จะได้พลังงานจลน์หน่วยเวลาคือ สมการของกำลังลม (P_{wind})
 นั่นเอง ($A=A_{turb}$)

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A_{turb} V^3 \quad (2.3)$$

$P =$ ความหนาแน่นของอากาศ($\sim 1.26 \text{ kg/m}^3$ ที่ อุณหภูมิ 20°C)



รูปที่ 2.2 ปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านกังหันลม[2]

จากรูปที่ 2.2 สามารถเขียนสมการพลังงานลมที่กังหันลมสามารถสกัดได้ดังนี้

$$W_w = V_a \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_3^2) \quad (2.4)$$

เมื่อ

W_w = พลังงานลมที่กังหันลมสกัดได้

V_a = ปริมาตรการไหลของอากาศ

V_1 = ความเร็วลมของพื้นที่หน้าตัด A_1

V_3 = ความเร็วลมของพื้นที่หน้าตัด A_3

จะได้สมการที่ (2.5) ของพลังงานลมที่กังหันสามารถสกัดได้ต่อหน่วยเวลา

$$P_w = \frac{dW_w}{dt} = \frac{dV_a}{dt} \frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_3^2) \quad (2.5)$$

ปริมาตรการไหลของอากาศในพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม ($A_2 = A_{turb}$)

$$\frac{dV_a}{dt} = A_{turb} V_2 \quad (2.6)$$

ฉะนั้นจะได้

$$P_w = A_{turb} \frac{\rho}{2} (V_1^2 - V_3^2) V_2 \quad (2.7)$$

ปริมาณกำลังงานที่กังหันลมสามารถสกัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่หน้าตัดของกังหันลม ความเร็วลมและลักษณะของใบพัดของกังหันลม ตามทฤษฎีของเบทซ์ (Betz) กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่กังหันลมสกัดได้คือ

$$P_w^{\max} = \frac{16}{27} A_{\text{turb}} \frac{\rho}{2} V_1^3 \quad (2.8)$$

โดยมีความสัมพันธ์ความเร็วลม

$$V_2 = \frac{2}{3} V_1 \quad \text{และ} \quad V_3 = \frac{1}{3} V_1 \quad (2.9)$$

C_p เป็นค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงส่วนของกำลังงานที่กังหันลมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยได้จากรูปที่ 2.7 คุณลักษณะ C_p , C_T โดยเป็นคุณสมบัติเฉพาะของใบพัดนั้นๆ

$$P_w = P_{\text{wind}} \times C_p \quad (2.10)$$

หรือ

$$P_w = \frac{\rho}{2} A_{\text{turb}} V_1^3 \times C_p \quad (2.11)$$

จากสมการ 2.3 ซึ่งจะได้กำลังผ่านกังหันลม แต่กำลังที่สกัดได้จริงนั้นจะแปรผันตาม C_p ด้วย เพราะฉะนั้นจึงสมมุติให้กังหันลมมีพื้นที่หน้าตัดที่รับลมเป็นวงกลม ($A_{\text{turb}} = \pi R^2$) สมการกำลังอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Power, P_a)

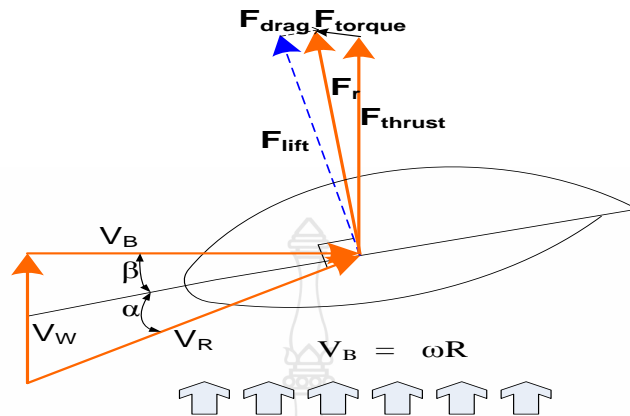
$$P_w = \frac{\rho}{2} \pi R^2 V_1^3 \times C_p \quad (2.12)$$

2.2 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

2.2.1 ประเภทของกังหันลม

กังหันลม โดยทั่วไปจะมีรูปแบบพื้นฐานหลักๆ คล้ายๆกัน แต่อาจแตกต่างกันบ้างในส่วนของรายละเอียด ดังนั้นการแบ่งประเภทของกังหันลมมักจะยึดเอาลักษณะการวางตัวของแกนเพลลาของกังหันลมเป็นหลัก ซึ่งประเภทหลักๆของกังหันลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอนและกังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวตั้ง

2.2.2 ประเภทของการจำกัดพลังงาน กังหันลม 3 ใบพัด



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดทอร์กอากาศพลศาสตร์ [2]

V_W = ความเร็วลมที่กระทำต่อใบพัดด้านหน้า (ทวนเข็มนาฬิกา)

V_B = ความเร็วลมตรงข้ามกับการหมุน

V_R = เวกเตอร์ความเร็วลมลัพธ์ (Resulting Wind Speed)

$$V_R = V_W + V_B \quad (2.13)$$

โดยขนาดของแรงยก (Lifting Force, F_{lift}) และแรงฉุด (Drag Force, F_{drag}) จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของใบพัด และขนาดของ V_R

F_{lift} = แรงยก (Lifting Force) กระทำกับใบพัดในทิศทางตั้งฉากกับ V_R

F_{drag} = แรงฉุด (Drag Force) กระทำกับใบพัดในทิศทางเดียวกับ V_R

$$F_r = F_{lift} + F_{drag} \quad (2.14)$$

แรงสร้างทอร์ก (Tangential or Torque Force, F_{torque}) กระทำต่อใบพัดทิศทางเดียวกับการหมุน

$$F_{torque} = F_r + F_{thrust} \quad (2.15)$$

F_{thrust} = แรงผลัก (Thrust Force) กระทำต่อใบพัดในทิศทางเดียวกับความเร็วลม มีผลโดยตรงกับเสาของกังหันลม (Tower)

ขนาดของทอร์คที่กระทำต่อใบพัด สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยการควบคุมเวกเตอร์ V_R จะสามารถควบคุมได้โดยมุม β, α

β คือมุมที่ V_B กระทำต่อแนวแกนใบพัด เรียกว่ามุมพิช (Pitch Angle) สามารถปรับมุมได้โดยการเบี่ยงองศาของใบพัด

α คือมุมที่ V_R กระทำต่อแนวแกนใบพัด เรียกว่ามุมปะทะ (Attack angle) เราสามารถทำได้ 2 วิธี โดยวิธีแรกปรับมุม เช่นเดียวกับ β โดยการปรับองศาของใบพัด วิธีที่สองปรับเวกเตอร์ V_R โดยประกอบด้วย V_w และ V_B แต่เนื่องจาก V_w ไม่สามารถปรับใบพัดในทิศทางตั้งฉากได้จึงไม่สามารถควบคุมขนาดและทิศทางได้ส่วน V_B จะสามารถควบคุมความเร็วของลมที่ใบพัดเมื่อเกิดการหมุน โดยการปรับความเร็วระบบของกังหันลม ซึ่งส่งผลต่อเวกเตอร์ V_R โดยตรงจำกัดพลังงานโดยบังคับให้เกิดปรากฏการณ์สตอล

สตอลเป็นปรากฏการณ์ทางอากาศพลศาสตร์อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นกับวัตถุ ที่วางอยู่ในแนวการไหลของอากาศ เช่น ปีกเครื่องบิน หรือใบพัดกังหัน ซึ่งจะทำให้อากาศที่ไหลผ่านวัตถุทั้งทางด้านบนและด้านล่าง เกิดการแยกตัวออกจากกัน ส่งผลให้แรงยกลดลง ถ้าปีกของเครื่องบินเกิดการสตอลเครื่องบินก็จะตก แต่สำหรับกังหันลมเมื่อเกิดการสตอลจะทำให้จำกัดพลังงานได้คือ จะไม่สามารถผลิตพลังงานไปมากกว่านี้ได้ ซึ่งปรากฏการณ์สตอลนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมุมกระทบ α มีค่าเพิ่มขึ้นถึงค่าๆหนึ่ง การบังคับให้เกิดการสตอลจึงทำได้โดยการปรับมุม α นั้นเอง โดยสามารถควบคุมได้ 2 วิธี โดยการปรับมุมปะทะ โดยเวกเตอร์ V_R

ก) การควบคุมมุมใบพัดโดยวิธีทางกล

ข) การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ ทำให้ V_B มีขนาด ซึ่งส่งผลโดยตรงกับเวกเตอร์ V_R

2.2.3 ส่วนประกอบของกังหันลม

กังหันลมโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ คือ ใบพัด ระบบถ่ายทอดกำลังจากใบพัด ชุดควบคุมการบังคับทิศทางของใบพัดและเสาหรือหอคอย อย่างไรก็ตามในส่วนรายละเอียดของส่วนประกอบของกังหันลมจะขึ้นอยู่กับ วัตถุประสงค์การใช้งานของกังหันลมนั้น เช่น ถ้าเป็นกังหันลมที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการผลิตไฟฟ้าก็จะมีส่วนประกอบ รายละเอียด และเทคโนโลยีที่ซับซ้อนกว่ากังหันลมที่ใช้สำหรับการสูบน้ำ อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความเข้าใจในความแตกต่างของส่วนประกอบของกังหันลมแต่ละชนิด

ส่วนประกอบของกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า จากการได้รับประโยชน์อย่างชัดเจนในการใช้กังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า ทำให้เทคโนโลยีของกังหันลมประเภทนี้ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเรื่อยๆจึงทำให้ส่วนประกอบต่างๆของกังหันลมประเภทนี้มีค่อนข้างมากและมีความซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งส่วนประกอบแต่ละส่วนมีหน้าที่สรุปได้ดังต่อไปนี้

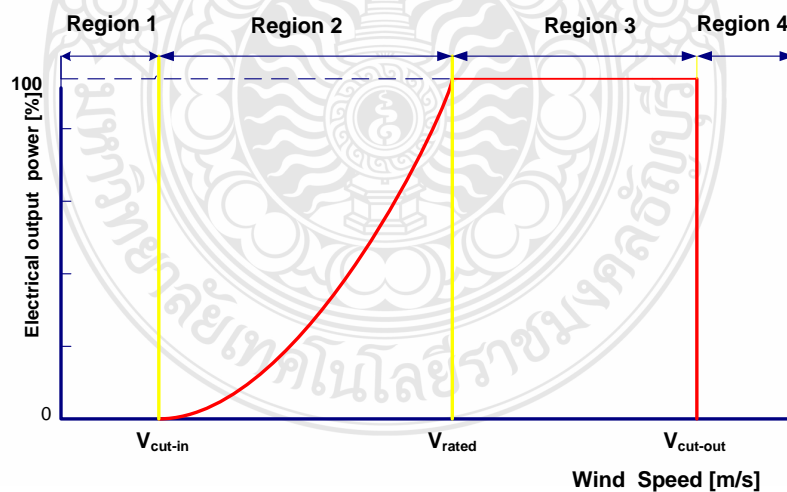
ก. ใบพัด (blade) เป็นตัวรับพลังงานลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อนเพลาแกนหมุน (rotor) ของใบพัด



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า[3]

ข. เพลา (Shaft) เพลาของกังหันลมต่อกับจุดศูนย์กลางของโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุน เพลาจะหมุนตามไปด้วย ฉะนั้นโรเตอร์หมุนเป็นงานทางกล เพลาหมุนที่ก่อให้เกิดพลังงาน ซึ่งจะต่อไปที่เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Electrical generator) ในส่วนท้าย

ค. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ทำหน้าที่ที่เปลี่ยนพลังงานกลที่ถูกส่งมาจากเพลาแกนหมุนของใบพัดเป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 การทำงานของกังหันลม [4]

2.2.4 ช่วงการทำงานของกังหันลมและควบคุมการทำงานในช่วงความเร็วลม

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าในช่วงที่ 1 ความเร็วลมมีค่าน้อยกว่า V_{cut-in} ดังนั้นกังหันจะไม่ทำงาน เช่นเดียวกันกับช่วงที่ 4 ความเร็วลมมีค่าสูงเกินไป ซึ่งอาจทำให้กังหันเกิดความเสียหายได้กังหันจะถูกสั่งให้หยุดทำงานทันที กังหันจะทำงานเมื่อ $V_{cut-out}$ ลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 โดยที่ พลังงานที่สกัดได้ ที่ 100 % คือค่าที่คำนวณไว้แล้วว่าเมื่อลมมีความเร็วเท่ากับค่าดังกล่าว กำลังที่สกัดได้จะมีค่าเท่ากับพิกัดกำลังพอดี [4-5]

เมื่อลมมีความเร็วอยู่ในช่วงที่ 2 จะเรียกช่วงนี้ว่าความเร็วลมต่ำกว่าพิกัด ซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะแปรผันกับความเร็วลมกำลังสาม จะเรียกช่วงนี้ว่าความเร็วลมสูงกว่าพิกัด ซึ่งกำลังที่ผลิตได้จะต้องถูกจำกัดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดกำลัง โดยใช้วิธีจำกัดพลังงานทางอากาศพลศาสตร์ แบบใดแบบหนึ่ง ระหว่างแบบควบคุมให้เกิดปรากฏการณ์การสตอล กับวิธีการปรับมุมพิช สำหรับบทความนี้จะสนใจเฉพาะกังหันแบบปรับความเร็วได้ ซึ่งใช้วิธีพลังงานสตอล

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของกังหัน กับพลังงานที่สกัดได้จากลม ดังรูปที่ 2.5 สามารถใช้กราฟนี้เพื่อเลือกความเร็วรอบที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการควบคุมกังหันที่ความเร็วลมต่างๆ

โดยกังหันที่มีขนาดและลักษณะของใบพัดต่างกัน ก็จะมีกราฟคุณลักษณะต่างกันด้วย ดังนั้นจึงแสดงสมการกำลังที่กังหันสกัดได้จากลมดังสมการที่ 2.16

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^3 C_p (v, \omega, \beta) \quad (2.16)$$

ในที่นี้พิจารณาเฉพาะกังหันลมที่ไม่มี การปรับมุมพิช ดังนั้นที่มุมพิชคงที่ค่าหนึ่ง C_p จะขึ้นอยู่กับค่าของ v และ ω เท่านั้น ถ้ากำหนดให้ λ คือ อัตราส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งนิยามตามสมการที่ 2.17

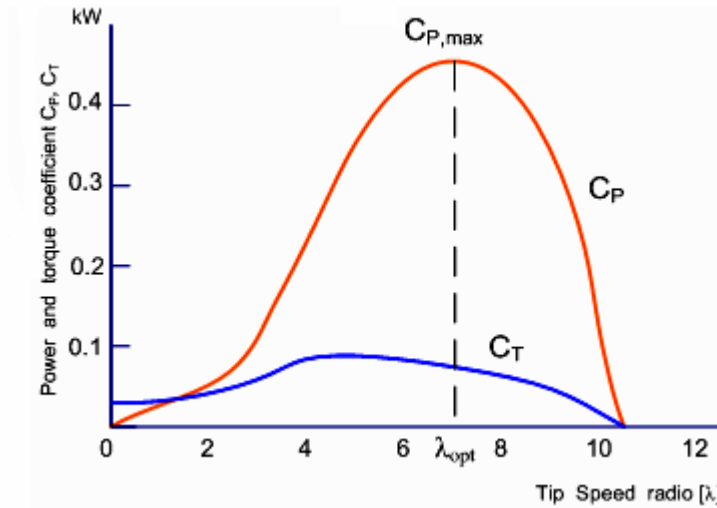
$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2.17)$$

จะได้

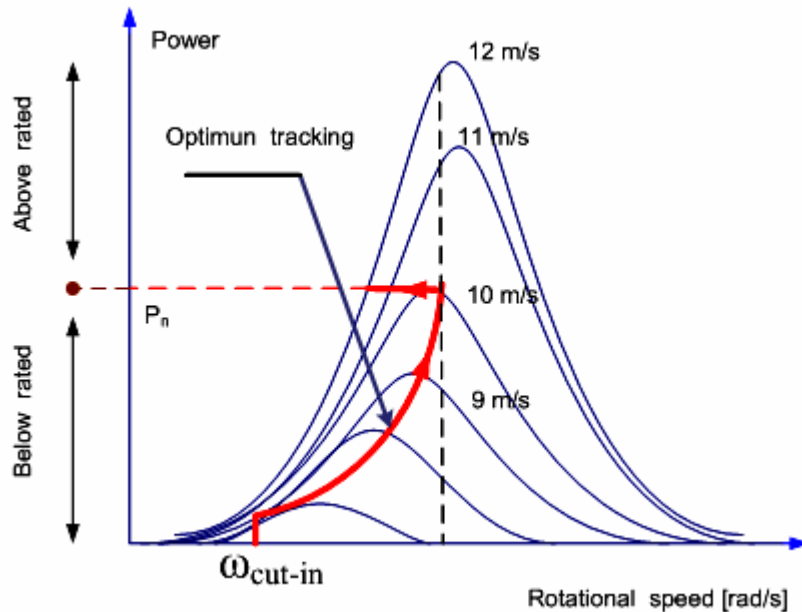
$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^3 v^3 C_p (\lambda) \quad (2.18)$$

โดยของกังหันลมจริงที่ใช้ในการทดลองนี้ขนาด 400 W มีลักษณะเป็นกราฟ ดังรูปที่ 2.7 จากสมการที่ 2.18 และกราฟของ C_p จึงสามารถหากราฟคุณลักษณะของกังหันที่ใช้ในการทดลองได้ดัง รูปที่ 2.6 ถ้าทราบความเร็วลมที่กระทำต่อกังหัน ก็จะ สามารถเลือกทำงานที่ความเร็วรอบ อันจะทำให้เกิดการสกัดกำลังตามที่ต้องการได้ แต่ในทางปฏิบัติพบว่า การวัดค่าความเร็วลมมีปัญหา

หลายประการและอาจได้ค่าที่ไม่แม่นยำ งานวิจัยนี้จะใช้วิธีที่ไม่ต้องวัดความเร็วลม ดังจะอธิบายต่อไป



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง สัมประสิทธิ์แรงบิด กับ แลมด้า[4]



รูปที่ 2.7 เส้นทางการควบคุมกังหันลม ณ ความเร็วลมต่างๆ [4]

2.2.5 การควบคุมกังหันลมในช่วงความเร็วต่ำกว่าพิกัด

เนื่องจากกำลังสูงสุดที่สามารถสกัดได้จากความเร็วลมในช่วงนี้ วัตถุประสงค์ของการควบคุมในช่วงนี้คือสกัดพลังงานจากลมให้ได้สูงสุด จากรูปที่ 2.7 คือที่ $v = 10 \text{ m/s}$ มีค่าไม่เกินพิกัด (ในการทดลองนี้คือ 400 W) ดังนั้นการควบคุมกังหันในช่วงนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อทำให้กังหันสกัดกำลังจากลมให้ได้มากที่สุดตลอดเวลา ไม่ว่าจะความเร็วลมจะเปลี่ยนแปลงเช่นไร หลักการคือต้อง

ควบคุมให้กังหันมีความเร็วอันทำให้ เกิดสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด ที่ λ_{opt} อยู่เสมอ ฉะนั้นสมการควบคุมจะมีสมการเป็น

$$P_a = P_{a\max} = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v^3 C_p^{\max} \quad (2.19)$$

$$\lambda = \lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} R}{v} \quad (2.20)$$

ดังนั้น

$$V^3 = \frac{\omega_{opt}^3 R^3}{\lambda_{opt}^3} \quad (2.21)$$

แทนค่า จะได้

$$P_a = \frac{\rho}{2} \pi R^2 \frac{\omega_{opt}^3 R^3}{\lambda_{opt}^3} C_p^{\max} = K_{opt} \omega_{opt}^3 \quad (2.22)$$

โดยที่

$$K_{opt} = \frac{\rho}{2} \pi R^5 C_p^{\max} \frac{1}{\lambda_{opt}^3} \quad (2.23)$$

$$P_a = \omega T_a \quad (2.24)$$

สมการที่ใช้สร้างคำสั่งจึงเป็น

$$T_{a'opt} = K_{opt} \omega_{opt}^2 \quad (2.25)$$

$$\omega_{ref} = \sqrt{\frac{T_a}{K_{opt}}} \quad (2.26)$$

2.2.6 การควบคุมกังหันลมในช่วงความเร็วลมสูงกว่าพิกัด

เนื่องจากกำลังที่สกัดได้ ดังนั้นจะต้องใช้วิธีทางอากาศพลศาสตร์เพื่อจำกัดกำลังที่สกัดได้ ให้คงที่อยู่ที่ค่าซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดผลิตกำลังออกมาที่พิกัดพอดี พิจารณาจากรูปที่ 2.7 การควบคุมสามารถทำได้โดย ควบคุมให้กังหันลดความเร็วลงไปยังจุดที่ทำให้เกิดปรากฏการสตอล ซึ่งเมื่อเกิดขึ้น กำลังส่วนหนึ่งที่กังหันได้รับจะถูกกำจัดออกไปทำให้ผลลัพธ์ของกำลังที่สกัดได้ มีค่าลดลงตามไปด้วย จากสมการที่ 2.24 จะได้

$$\omega = \frac{P_a}{T_a} \quad (2.27)$$

ดังนั้นถ้าต้องการให้กำลังที่สกัดได้จากลมมีค่า ต้องสร้างคำสั่งความเร็วรอบเป็น

$$\omega_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{max}}}{T_a} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ 2.27 และ 2.28 จะเห็นว่า การควบคุมในกรณีไม่ทราบความเร็วลมสามารถทำได้ถ้าทราบค่าทอร์กอากาศพลศาสตร์ที่กักันได้รับ แต่เนื่องจากทอร์กดังกล่าวไม่สามารถใช้ทอร์กดิฟเฟอเรนเชียลได้ ต้องใช้ตัวประเมิน T_a แทน

2.2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG)

สมการทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่อ้างอิงแกนนิ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.29) และ (2.30)

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_m \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (2.29)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_m \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (2.30)$$

เมื่อ v คือ แรงดันไฟฟ้าด้านออก, i คือ กระแสไฟฟ้าด้านออก, ψ คือ เส้นแรงแม่เหล็กคัลล์อง, R คือ ความต้านทาน, ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ตัวห้อย d และ q คือ องค์ประกอบอ้างอิงสำหรับแกนนิ่งตามลำดับ [6] และ s คือ สเตเตอร์ ค่าทั้งหมดจะแสดงในหน่วยต่อยูนิท (per unit) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าต่อยูนิทสามารถหาได้ใน เส้นแรงแม่เหล็กคัลล์อง สามารถหาได้จาก

$$\psi_{qs} = (L_{qm} + L_{os}) i_{qs} \quad (2.31)$$

$$\psi_{qs} = (L_{qm} + L_{os}) i_{qs} + \psi_f \quad (2.32)$$

เมื่อ ψ_f คือ เส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเพื่อที่จะวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่ายสถานะชั่วคราวจะละเลย [7] ดังนั้นสมการที่ (2.29) และ (2.30) สามารถนำไปแทนลงในสมการที่ (2.31) และ (2.32) ได้ ดังนี้

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_m (L_{dm} + L_{os}) i_{ds} + \omega_m \psi_f \quad (2.33)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_m (L_{dm} + L_{os}) i_{ds} \quad (2.34)$$

เมื่อ L_{qm} , L_{dm} คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมในแกน q และ d ตามลำดับ และ L_{os} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลในสเตเตอร์ แรงบิดในช่องอากาศ T_{ag} สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{ag} = \psi_{ds} i_{qs} \quad \psi_f i_{ds} = \psi_f i_{qs} + (L_{dm} - L_{qm}) i_{qs} i_{ds} \quad (2.35)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร สามารถแสดงได้ดังนี้

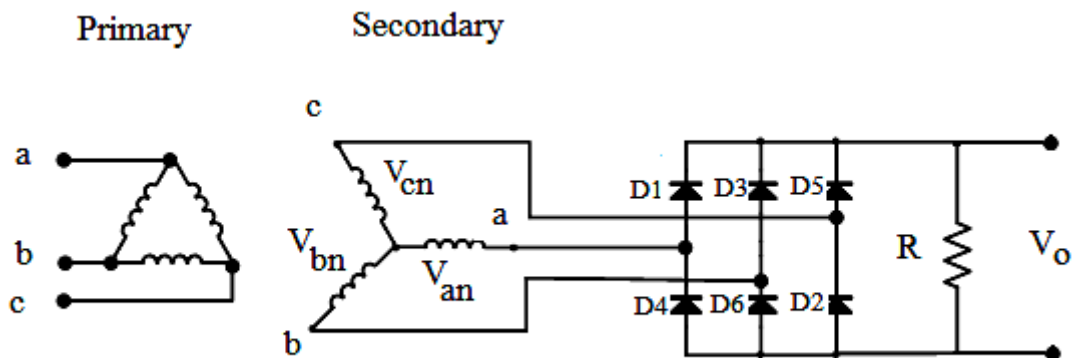
$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (2.36)$$

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (2.37)$$

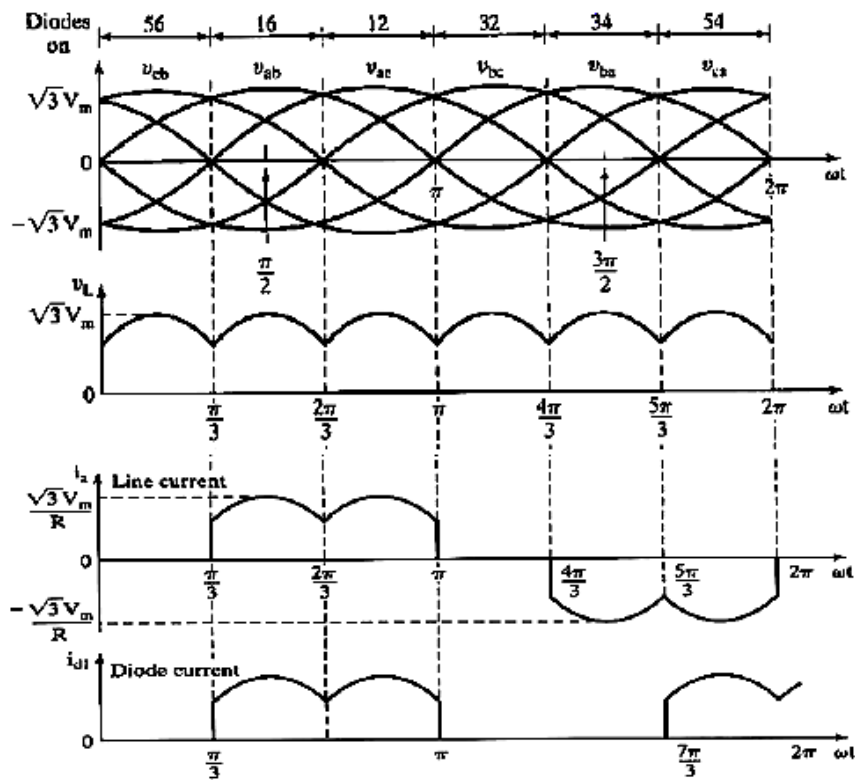
2.3 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์จะใช้กับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงๆ และจะให้รูปคลื่นที่ที่เรียกว่าเป็นฟูลเวฟ โดยจะขดคลื่น 6 ขดลวดคลื่นต่อหนึ่งคาบเวลาซึ่งจะทำให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีริบเบิลน้อยมากสามารถหาค่าคาปาซิเตอร์ที่มีค่าไม่สูงนักทำหน้าที่ฟิลเตอร์ก็จะได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีริบเบิล [8]

$$v_{an} = V_m \sin(\omega t) \quad v_{bn} = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad v_{cn} = V_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$



รูปที่ 2.8 วงจรเรียงกระแสสามเฟส [8]



รูปที่ 2.9 การนำกระแสของไดโอด

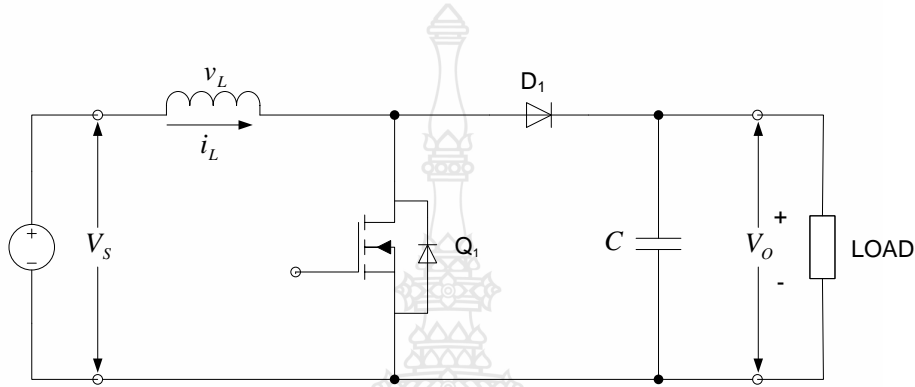
แต่ละตัวจะมีเวลาในการนำกระแส 120° และการนำกระแสของไดโอดแต่ละครั้งจะนำกระแสกันเป็นคู่แต่ละคู่จะนำกระแส 60° ซึ่งหากใช้สัญญาณลูกคลื่น v_{ab} เป็นสัญญาณอ้างอิงก็จะเห็นว่า ไดโอด D1 และ D2 นำกระแสพร้อมกันที่มุม $0 - \frac{\pi}{3}$ ไดโอด D3 และ D2 นำกระแสพร้อมกันที่มุม $\frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}$ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 มุมการนำกระแสของไดโอด

คู่ของไดโอดที่นำกระแส	มุมนำกระแสของไดโอด
D1 - D2	$0 - \frac{\pi}{3}$
D3 - D2	$\frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}$
D3 - D4	$\frac{2\pi}{3} - \pi$
D5 - D4	$\pi - \frac{4\pi}{3}$
D5 - D6	$\frac{4\pi}{3} - \frac{5\pi}{3}$
D1 - D6	$\frac{5\pi}{3} - 2\pi$

2.4 วงจรทบทระดับแรงดัน [9]

ตัวแปลงผันแบบทบทระดับเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง (DC-DC Converter) ชนิดหนึ่งที่จะทำให้แรงดัน ทางด้านเอาต์พุตมีค่ามากกว่าแรงดันทางด้านอินพุตดังวงจรในรูปที่ 2.10 การทำงานจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบกระแสต่อเนื่องและแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องที่ใช้ในวิทยานิพนธ์



รูปที่ 2.10 วงจรแปลงผันแบบทบทระดับแรงดัน

หลักการการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัวดังนี้

2.4.1 ขณะสวิตช์นำกระแส

จากรูป 2.11 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดังรูป 2.11 จากกฎของเคอร์ชอฟจะได้สมการแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

$$-V_s + v_L = 0 \quad (2.38)$$

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.39)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.40)$$

เมื่อ

V_s คือแรงดันแหล่งจ่าย

v_L คือแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

L คือตัวเหนี่ยวนำ

i_L คือกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{Dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.41)$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s D T}{L} \quad (2.42)$$

$\Delta i_{L,on}$ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะนำกระแส

2.4.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ใดโอดจะถูกไปอัดไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมติแรงดันไฟฟ้าที่ด้านออกมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$-V_s + v_L + V_o = 0 \quad (2.43)$$

$$v_L = V_s - V_o \quad (2.44)$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.45)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.46)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1-D)T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่และอาจจะถือว่าการลดลงของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.47)$$

ที่สภาวะคงตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับ ศูนย์ จากสมการที่ (2.48) และสมการที่ (2.49) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.48)$$

$$\left(\frac{V_s}{L} \right) DT + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.49)$$

$$V_s D + (V_s - V_o)(1-D) = 0$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$$

$$V_s - V_o(1-D) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.50)$$

2.4.3 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรทระดับแรงดัน

สมมติการสูญเสียภายในวงจรทระดับแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ กำลังไฟฟ้าที่ออกจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ โดยให้โหลดเป็นตัวต้านทาน จะได้ว่า

$$P_s = P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (2.51)$$

$$P_s = V_s I_s = V_s I_L \quad (2.52)$$

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R} \quad (2.53)$$

จาก
$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad \text{และ} \quad V_s I_L = \frac{\left(\frac{V_s}{1-D}\right)^2}{R}$$

ดังนั้นจะได้ว่า
$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \quad (2.54)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด หาได้จากค่าเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส ดังในสมการ (2.55) และจะหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด คือ

$$I_{L,max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,max} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) \quad (2.55)$$

$$I_{L,min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) \quad (2.56)$$

สมมติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรทระดับแรงดันทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ได้จากการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการ (2.57)

$$I_{L,\min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right) = 0 \quad (2.57)$$

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right)$$

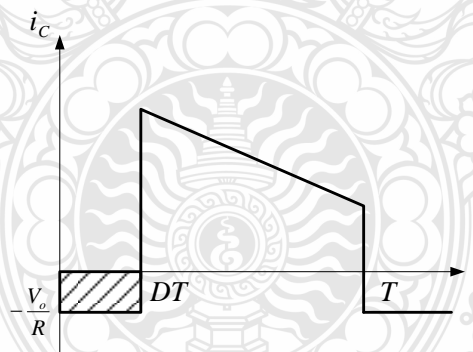
$$I_{L,\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.58)$$

การปรับค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด จากสมการ (2.58) สามารถทำได้โดยการปรับค่า D หรือค่าความต้านทานโหลด R หรือค่าความถี่สวิตช์

2.4.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะสามารถรักษาให้รักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากๆ ได้เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมและค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

การคำนวณหาระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอดสามารถหาได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$|\Delta Q| = C \Delta V_o = I_o \Delta t_{on} \quad (2.59)$$

จาก $I_o = \frac{V_o}{R}$ และ $\Delta t_{on} = DT$

ดังนั้นจะได้
$$\Delta V_o = \frac{I_o \Delta t_{on}}{C} = \frac{V_o DT}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC} \quad (2.60)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (2.61)$$

เมื่อต้องการจะลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้ศูนย์ หรือการเพิ่มค่าโหลด หรือเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุ หรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตช์ให้สูงขึ้น

2.5 วงจรพุก-พุกคอนเวอร์เตอร์ [10]

วงจรพุก-พุกคอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะคล้ายกับกรณีวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ที่ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กจะไม่ใช้ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้าจะกำหนดให้เป็นแบบอุดมคติเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ สวิตช์ S_{W1} จะนำกระแสในขณะที่ S_{W2} จะไม่นำ

2.5.1 กรณีสวิตช์ S_{W1} นำกระแสและสวิตช์ S_{W2} ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ S_{W1} นำกระแสจะเป็นผลทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ (P_1) เท่ากับ

$$V_{p1} = V_s \quad (2.62)$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ (P_1) จะถ่ายเทไปยังขดลวดอีก 3 ขด ที่เหลือ ดังนี้

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.63)$$

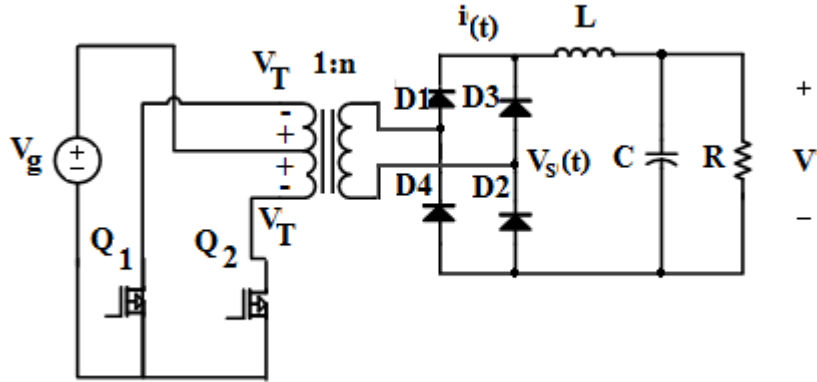
$$V_{s2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.64)$$

$$V_{Sw2} = 2V_s \quad (2.65)$$

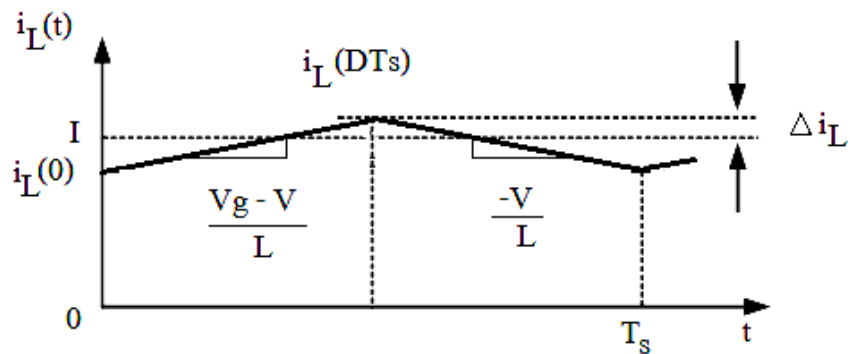
ไดโอด D_1 ได้รับไบอัสตรงขณะที่ไดโอด D_2 ได้รับไบอัสกลับ

$$V_x = V_{s2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.66)$$

$$V_{Lx} = V_x - V_0 = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0 \quad (2.67)$$



รูปที่ 2.14 วงจรพุ่ม-พุ่มคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.15 กระแสไหลผ่าน

ถ้าสมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านออก V_0 และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าคงที่ ช่วงเวลาที่ สวิตช์นำกระแสจะเป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x มีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของ กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x ในช่วงเวลาที่สวิตช์ S_{w1} นำกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\Delta i_{Lx}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lx}}{DT} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0}{L_x} \quad (2.68)$$

$$(\Delta i_{L_x})_{\text{closed}} = DT \left[\frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0}{L_x} \right] \quad (2.69)$$

2.5.2 กรณีสวิตช์ S_{w1} ไม่นำกระแสและสวิตช์ S_{w2} นำกระแส

จะเป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ V_{p2} เท่ากับ

$$V_{p2} = -V_s \quad (2.70)$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ จะถ่ายเทไปยังขดลวดอีก 3 ชุดที่เหลือ ดังนี้

$$V_{p1} = -V_s \quad (2.71)$$

$$V_{s1} = -V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.72)$$

$$V_{s2} = -V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.73)$$

$$V_{Sw1} = 2V_s \quad (2.74)$$

เมื่อไดโอด D_2 ได้รับไบอัสไปหน้าขณะที่ไดโอด D_1 ได้รับไบอัสกลับ

$$V_x = -V_{s2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.75)$$

$$V_{Lx} = V_x - V_0 = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0 \quad (2.76)$$

โดยที่แรงดันไฟฟ้า V_{Lx} จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีค่าเป็นบวก โดยค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อสวิตช์ S_{w2} นำกระแส และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x สามารถหาได้โดยสมการที่ (2.76)

2.5.4 กรณีสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} ไม่นำกระแส

ในกรณีที่ทั้งสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิ P_1 และ P_2 จะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x จะยังคงไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้ ไดโอด D_1 และ D_2 ยังคงได้รับไบอัสตรง แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิแต่ละขดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าเท่ากับ

$$V_x = 0 \quad (2.77)$$

$$V_{Lx} = V_x - V_0 = -V_0 \quad (2.78)$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าเท่ากับ $-V_0$ เป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x จะมีค่าลดลงด้วยการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ

$$\frac{\Delta i_{Lx}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lx}}{\left(\frac{T}{2} - DT\right)} = -\frac{V_0}{L_x} \quad (2.79)$$

แก้สมการหาค่า Δi_{Lx} จะได้

$$\left(\Delta i_{Lx}\right)_{open} = -\left(\frac{V_0}{L_x}\right)\left(\frac{1}{2} - D\right)T \quad (2.80)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสุทธิของกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่สภาวะอยู่ตัวในหนึ่งคาบเวลาจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \left(\Delta i_{Lx}\right)_{closed} + \left(\Delta i_{Lx}\right)_{open} &= 0 \\ \left(\frac{V_s(N_s/N_p) - V_0}{L_x}\right)(DT) + \left(\frac{V_0}{L_x}\right)\left(\frac{1}{2} - D\right)T &= 0 \end{aligned} \quad (2.81)$$

แก้สมการหาค่า V_0 จะได้

$$V_0 = 2V_s \left(\frac{N_s}{N_p}\right)D \quad (2.82)$$

โดยที่ D ในที่นี้จะหมายถึง คิวดีไซ์ของสวิตช์แต่ละตัว

พิจารณาสมการที่ (2.82) จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวจะคล้ายกับกรณีวงจรบ็๊ก ดังนั้นค่า
ระลอกคลื่นของแรงดันก็จะสามารถหาได้คล้ายกับกรณีวงจรบ็๊กเช่นกัน จะได้

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-2D}{32L_x C_f^2} \quad (2.83)$$

การวิเคราะห์ที่ได้กระทำมาก่อนหน้านี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของตัวเหนี่ยวนำ L_m ของหม้อ
แปลงไฟฟ้าโดยถ้าทำการเพิ่มผลของตัวเหนี่ยวนำ L_m ในวงจรสมมูล จะได้ว่า ค่ากระแส i_{Lm} จะ
เพิ่มขึ้นเมื่อสวิตช์ S_{w1} นำกระแส จากนั้นจะไหลวนอยู่ในหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อสวิตช์ S_{w1} และ
 S_{w2} ไม่นำกระแส และกระแสไฟฟ้า i_{Lm} จะมีค่าลดลงเมื่อสวิตช์ S_{w2} นำกระแส เนื่องจากช่วงเวลา
ในการนำกระแสของทั้งสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} จะเท่ากัน เป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงสุทธิของ
กระแส i_{Lm} มีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือในทางอุดมคติ แกนแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า
จะถูกรีเซ็ทภายในแต่ละคาบเวลาของการสวิตช์

2.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

2.6.1 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณ

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งโครงสร้าง และ
รูปคลื่นสัญญาณของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแสดงอยู่ในรูปที่ 2.16

เทคนิค PWM สามารถใช้ได้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคไซน์ตัด
สามเหลี่ยม หรือเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกต่ำ หรือการควบคุมรูปคลื่นของกระแส

และแสดงหลักการของเทคนิคไซน์ตัดสามเหลี่ยม เรามีรูปสามเหลี่ยม V_T ซึ่งมีความถี่
เท่ากับความถี่การสวิตช์ และมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ 3 สัญญาณ ได้แก่ V_{rA}, V_{rB} และ V_{rC} ซึ่งมีมุม
เฟสต่างกัน 120° โดยมีจุดตัดระหว่าง V_T กับ V_{rA} (V_{rB} และ V_{rC}) เป็นตัวกำหนดการตัดต่อวงจรของ
สวิตช์ Q_1, Q_4 (Q_3, Q_6 และ Q_5, Q_2 ตามลำดับ) รูปคลื่นของแรงดัน V_{AG}, V_{BG} (G คือสายลบบของแหล่ง
แรงดันไฟตรง) และ V_{AB} แสดงอยู่ในรูปที่ 2.16(ค) สังเกตได้ว่าองค์ประกอบหลักมูลของ V_{AG} หรือ
 V_{AG1} มีแอมพลิจูดเท่ากับค่าที่แสดงในสมการที่(2.74) (V_{AG} ต่างกับ V_{AO} เพียงค่าแรงดันไฟตรง $V_s / 2$)

$$V_{AG1} = m_a V_s \quad ; m_a \leq 0.5 \quad (2.84)$$

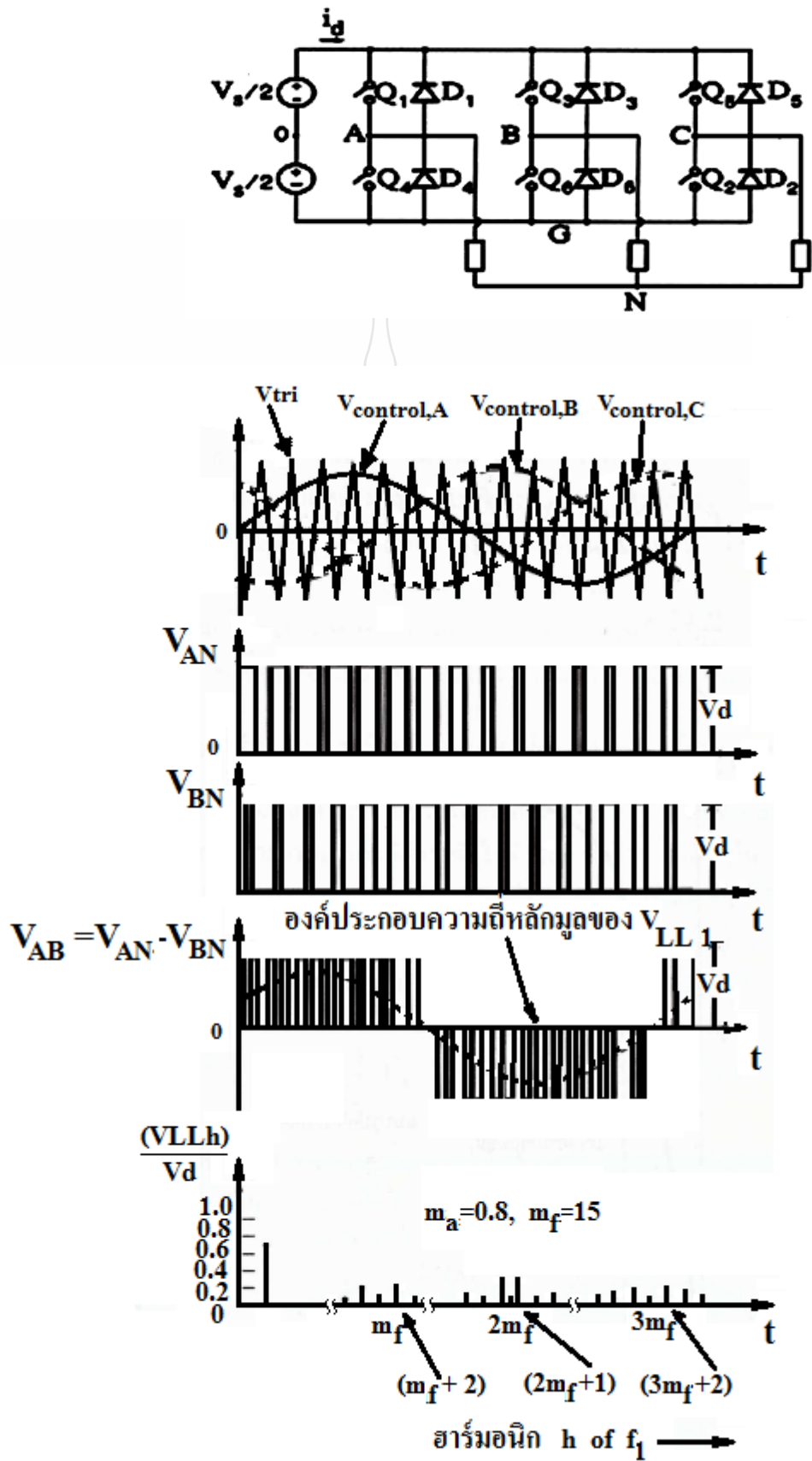
แรงดันสาย V_{AB} มีองค์ประกอบหลักมูลเท่ากับ V_{AB1} แอมพลิจูดของ V_{AB1} เท่ากับ $\sqrt{3}$ ของแอมพลิจูดของ V_{AG1} เนื่องจาก V_{AG} และ V_{BG} มีเฟสต่างกัน 120° และ V_{AB1} มีเฟสล้าหลัง V_{AG1} อยู่ 30° ดังนั้น

$$V_{AB1} = \sqrt{3}m_a V_s \quad ; m_a \leq 0.5 \quad (2.85)$$

ในการออกแบบระบบ โดยทั่วไปนิยมเลือกอัตราการผลิตความถี่ m_f เป็นเลขคี่และเป็นพหุคูณของ 3 และให้ความลาดชันของ V_T และ V_r ณ จุดที่แรงดันทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกัน ในกรณีนี้ถ้า $m_a \leq 0.5$ สเปกตรัมของ V_{AB} นอกจากนี้สังเกตได้ว่าฮาร์มอนิกต่ำสุดเกิดขึ้นที่ความถี่ $(m_f \pm 2k)f_a$ ตารางที่ 2.1 แสดงฮาร์มอนิกของแรงดันสายของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเราอาจจะออกแบบให้วงจรทำงานถึงในย่านการผลิตเกิน เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าสูงขึ้น ส่วนข้อเสียที่เนื่องมาจากฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้นมักจะพอยอมรับได้

ถ้าโหลดมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำโดยมีค่าคงตัวเวลาที่เป็นไปตามเงื่อนไข กระแสโหลดจะเป็นรูปใกล้เคียงไซน์โดย ทิศทางของกระแสโหลดเป็นตัวกำหนดการนำกระแสของไดโอด เช่น กรณีที่เฟสของโหลดเท่ากับ 30° (ตามล้าหลัง) โดยสังเกตได้ว่าในช่วงเวลาที่ $i_c > 0$ และ $V_{CG} = 0$ (Q_2 หรือ D_2 นำกระแส) แต่ทิศทางของ i_c แสดงว่า D_2 นำกระแส แสดงในรูปที่ 2.16





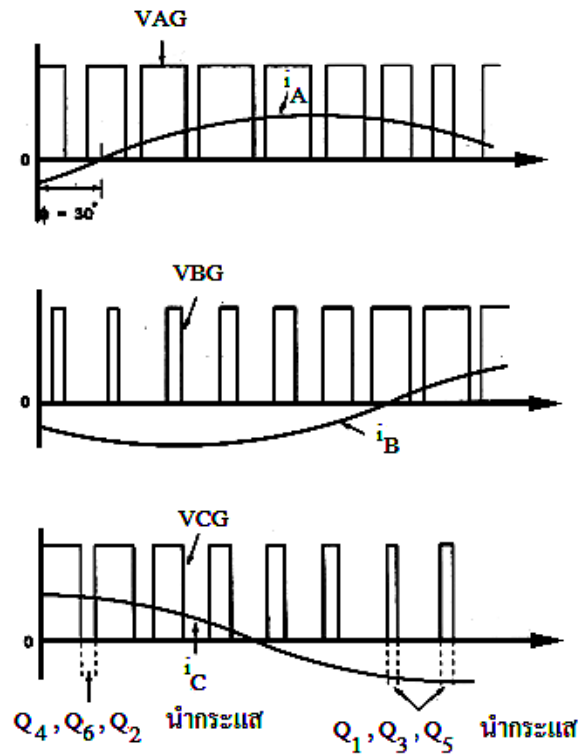
รูปที่ 2.16 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM

เมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 2.16 จะพบว่า ในบางช่วงเวลาดังแสดงในรูปล่าง สวิตช์จะต่อถึงทั้งสามของโหลดเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่าย V_s (เช่น เมื่อ Q_4, Q_6, Q_2 นำกระแส) และ บางช่วงเวลาสวิตช์จะต่อถึงทั้งสามของโหลดเข้ากับขั้วบวกของแหล่ง V_s (เช่น เมื่อ Q_1, Q_3, Q_6 นำกระแส) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว กระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์ มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่ากำลังงานไม่ไหลจากแหล่งจ่ายสู่โหลด ซึ่งระยะเวลาของการควบคุมช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการควบคุมกำลังงานที่จ่ายให้แก่โหลด หรือควบคุมค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันเอาต์พุตนั่นเอง

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิกกับ แรงดันไฟฟ้าของแรงดันสายของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

h	m_a	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1		0.122	0.245	0.367	0.490	0.612
$m_f \pm 2$		0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$m_f \pm 4$					0.005	0.011
$2m_f \pm 1$		0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2m_f \pm 5$					0.008	0.020
$3m_f \pm 2$		0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3m_f \pm 4$			0.007	0.029	0.064	0.096
$4m_f \pm 1$		0.100	0.096	0.005	0.064	0.042
$4m_f \pm 5$				0.021	0.051	0.073
$4m_f \pm 7$					0.010	0.030





รูปที่ 2.17 รูปคลื่นของแรงดัน และกระแสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แสดงช่วงกำลังงาน
ไม่ไหลสู่โหลด

2.7 ตัวควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม

ตัวควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณทางออก (Output) ของระบบกับสัญญาณทางเข้า (Input) หรือค่าที่ต้องการควบคุมหรือค่าอ้างอิง (Reference) ที่มีค่าคงที่ของระบบ ผลของการเปรียบเทียบที่ได้คือค่าเบี่ยงเบนหรือค่าผิดพลาด (Error) หลังจากนั้นตัวควบคุมอัตโนมัติจะนำค่าเบี่ยงเบนไปสร้างเป็นสัญญาณขึ้นมาใหม่เพื่อควบคุมให้ระบบลดการเบี่ยงเบนหรือ ลดค่าผิดพลาดลงให้เป็นศูนย์หรือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ลักษณะการทำงานของตัวควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณขึ้นมาควบคุมระบบดังกล่าวนี้ เรียกว่า “การทำงานควบคุม” ซึ่งสามารถแบ่งตัวควบคุมอัตโนมัติออกเป็นแบบต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) ตัวควบคุมแบบ ปิด-เปิด หรือ แบบสองตำแหน่ง
- 2) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน
- 3) ตัวควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย
- 4) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย
- 5) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบอนุพันธ์
- 6) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย ร่วมกับแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จะใช้ในระบบควบคุมความดันของของไหล เช่น น้ำมัน หรือ อากาศ การเลือกใช้ตัวควบคุมอัตโนมัติต้องดูความเหมาะสมของโรงงานและสภาวะการทำงาน อาจรวมไปถึงความปลอดภัย ความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ขนาดและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ซึ่งในที่นี้ขอกกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Controller) เพียงอย่างเดียว

2.7.1 การกระทำการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

การกระทำการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วยหรือการควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) นี้ค่าของสัญญาณทางออกของตัวควบคุมกำหนดได้ดังสมการที่ (2.86)

$$M(t) = K_p E(t) + \left(\frac{K_p}{T_i} \right) \int_0^t E(t) dt \quad (2.86)$$

เมื่อ $M(t)$ คือ สัญญาณทางออกของตัวควบคุม

$E(t)$ คือ สัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้น

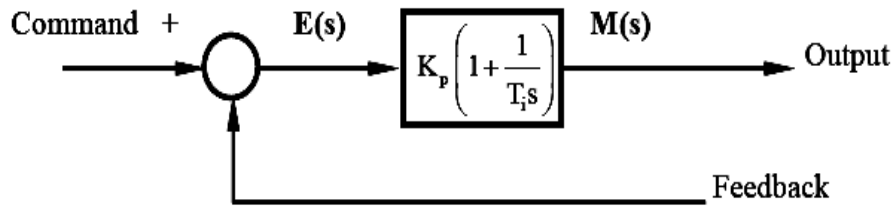
หรือเขียนในรูปของฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function) ได้คือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.87)$$

เมื่อ K_p คือ ความไวของสัดส่วนหรืออัตราขยาย

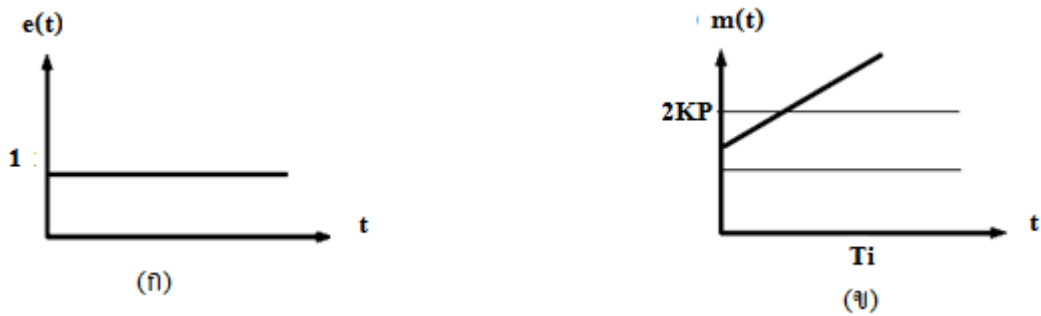
T_i คือ เวลาบูรณาการรวมหน่วย

ค่าของ K_p และ T_i สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งการปรับค่าจะมีผลต่อการกระทำการควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย แต่ถ้าปรับค่าความไวของสัดส่วน K_p จะส่งผลให้ทั้งการกระทำการควบคุมแบบสัดส่วนและการกระทำแบบบูรณาการรวมหน่วย ส่วนกลับของ T_i เรียกว่า “อัตราส่วนจัดใหม่” เป็นจำนวนครั้งต่อวินาที การควบคุมแบบสัดส่วนเริ่มต้นใหม่ จากสมการที่(2.87) เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ได้ดังรูปที่ 2.18

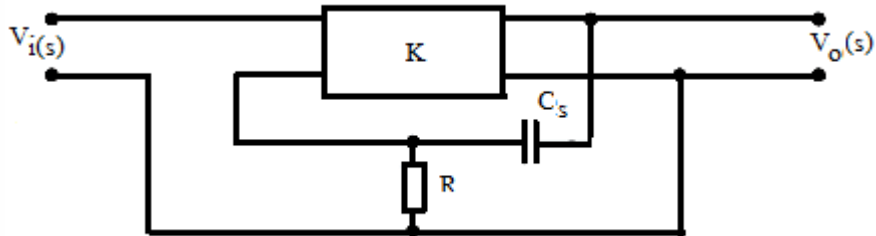


รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

สมมติให้สัญญาณผิดพลาด $E(t)$ เป็นฟังก์ชันยูนิตสเต็ป (unit step) ดังรูปที่ 2.19 (ก) สัญญาณทางขาออกของตัวควบคุม $M(s)$ จะได้อิงรูปที่ 2.19 (ข)



รูปที่ 2.19 สัญญาณผิดพลาดเป็นยูนิตสเต็ปกับสัญญาณทางออกของตัวควบคุมพีไอวงจรรีเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย



รูปที่ 2.20 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

จากรูปที่ 2.20 เขียนฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function) ได้ดังสมการ (2.88)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{K}{1 + K \left(\frac{R}{R + \left(1 + \frac{1}{sC_s} \right)} \right)} \quad (2.88)$$

กำหนดให้

$$K \left(\frac{R}{R + \left(1 + \frac{1}{sC_s} \right)} \right) \geq 1 \quad (2.89)$$

ดังนั้น

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{K}{\frac{KR}{R + \frac{1}{sC_s}}} = \frac{K \left(R + \frac{1}{sC_s} \right)}{KR} \quad (2.90)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R + \frac{1}{sC_s}}{R} \quad (2.91)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = 1 + \frac{1}{RC_s S} \quad (2.92)$$

กำหนดให้ $\tau = RC_s$ โดย τ คือ ค่าเวลาคงตัวของการบูรณาการรวมหน่วย

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = 1 + \frac{1}{\tau s} \quad (2.93)$$

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Control) มีผลต่อระบบคือ

- 1) ทำให้ระบบมีการตอบสนองเร็วเหมือนการควบคุมแบบสัดส่วน
- 2) ทำให้ระบบมีความแม่นยำเหมือนการควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย

ดังนั้นการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย จะมีผลทำให้ระบบมีความผิดพลาด น้อยที่สุด ที่สภาวะคงตัว และมีผลต่อการตอบสนองที่รวดเร็ว

2.8 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

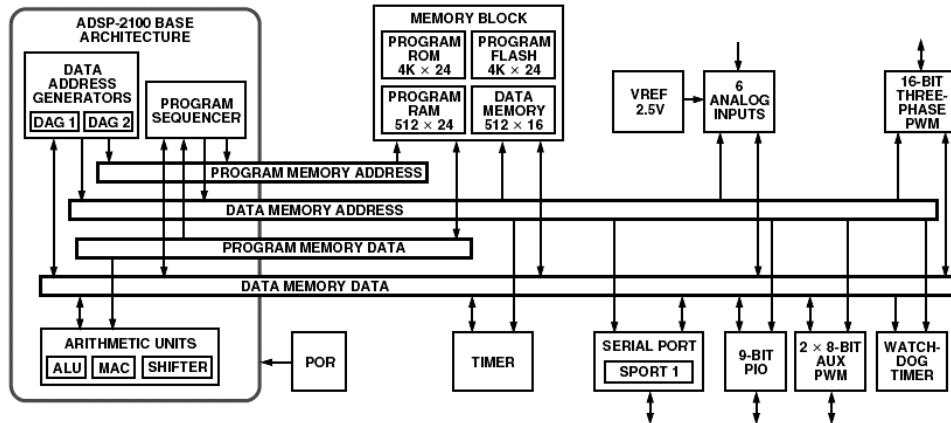
การพัฒนาด้านการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ที่มีความเร็วสูง ทำให้มีการคิดค้นประดิษฐ์ตัวประมวลผลที่ใช้สำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล หรือที่เรียกว่า ดีเอสพี (DSP) โดยตัวประมวลผลดังกล่าวจะเน้นที่ความเร็วของคำสั่งทางคณิตศาสตร์ ในปัจจุบันที่บริษัทผู้ผลิตชิปดีเอสพีอยู่หลายบริษัทและชิปของแต่ละบริษัทยังแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างออกไป ในโครงการนี้ได้เลือกใช้ชิปของบริษัท Analog Device เบอร์ ADMCF326 โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังที่จะกล่าวต่อไป [11]

2.8.1 คุณสมบัติของ ADMCF326BST

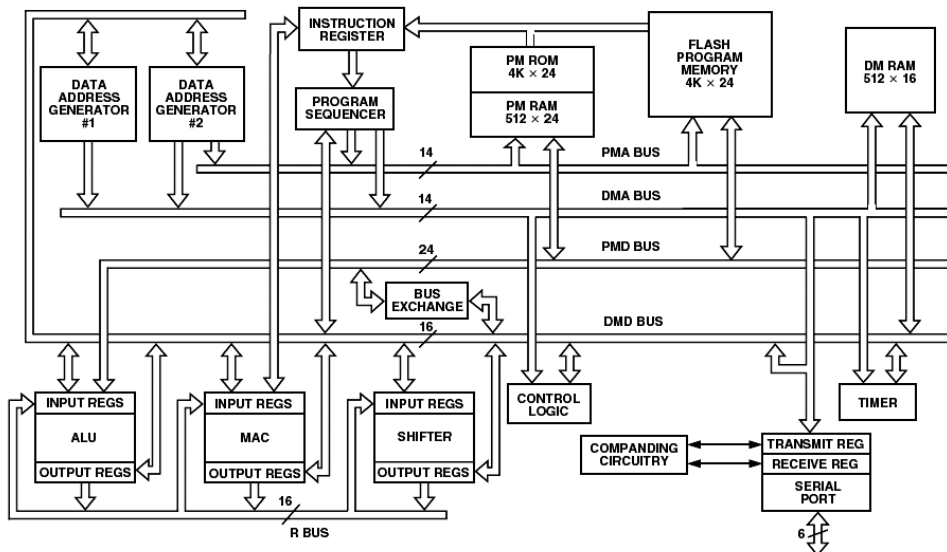
ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST ของบริษัท Analog Device มีโครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นแบบจุดทศนิยมคงที่ขนาด 16 บิต (16 bit fixed-point digital signal processing) โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต ใช้แรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์
 - 2) ความเร็วในการประมวลผล 20 MIPS (ล้านคำสั่งในหนึ่งวินาที) ต่อ 1 แมกซีนไซเคิล
 - 3) ฮาร์ดแวร์การคูณแบบขนานขนาด 16 บิต มีผลลัพธ์เป็น 32 บิต
 - 4) มี Accumulator ขนาด 32 บิต และ Arithmetic logic unit ขนาด 32 บิต
 - 5) มีพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตขนาด 24 บิต
 - 6) หน่วยความจำโปรแกรมแบบแรม ขนาด 512 x 24 บิต แบบรอม ขนาด 4k x 24 บิต
 - 7) หน่วยความจำข้อมูลแบบแรม ขนาด 512 x 16 บิต
 - 8) หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ขนาด 4k x 24 บิต
 - 9) ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 12 บิต จำนวน 7 ช่อง รับค่าอนาล็อกได้ 4 ช่องในเวลาเดียวกัน
 - 10) ตัวสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (Pulse width modulation, PWM) ขนาด 16 บิต
 - 11) มีตัวโปรแกรมการประวิงเวลา (Dead time) และตัวยกเลิกพัลส์ที่แคบ (Narrow Pluse Deletion)
 - 12) มีขาทร립ของพีดับบลิวเอ็มจากภายนอก (External PWM Trip)
 - 13) มีย่านอุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส
 - 14) มีโปรแกรมฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์
 - 15) ติดต่อกับดีบั๊กเจอร์ (Debugger) ผ่านทางพอร์ตอนุกรมด้วยบอด (Baud) แบบอัตโนมัต
- ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST จะประกอบไปด้วยระบบประมวลผลอิสระ 3 ชุดคือ ส่วนประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic and Logic Unit : ALU) ฮาร์ดแวร์การคูณ และฮาร์ดแวร์การบวก (Multiplier/Accumulator : MAC) และฮาร์ดแวร์การชิฟท์ (Shift) โดยกระบวนการ

ประมวลผลจะเป็นแบบ 16 บิต โดยมีหน่วยความจำทั้งแบบรอม แบบแรมและแบบแฟลคติดต่อกับ ดีบั๊กเจอร์ (Debugger) ผ่านพอร์ตอนุกรม



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST



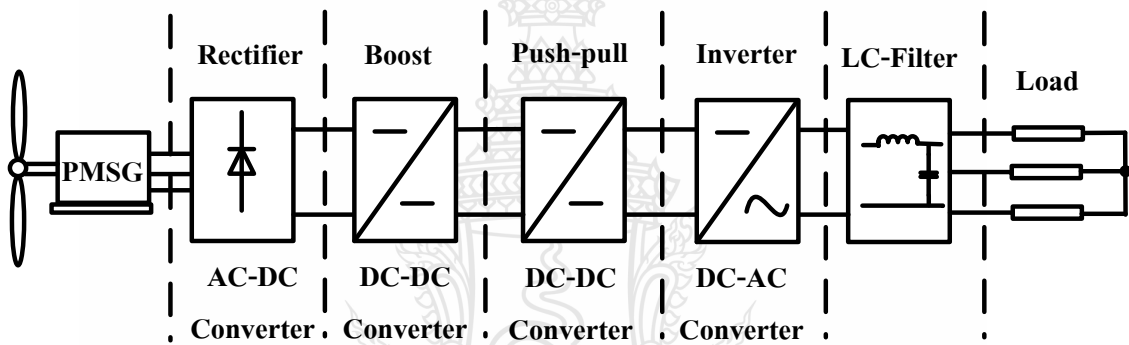
รูปที่ 2.22 สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลหลักของ ADMCF326BST

บทที่ 3

การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนต่างๆ ของงานวิจัย โดยมีการออกแบบวงจรรวมทั้งหมด 4 ส่วน คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทบทระดับ วงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์ และวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสต่อเข้าระบบ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเชื่อมโยงครั้งที่ ใช้วงจรทบทระดับในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

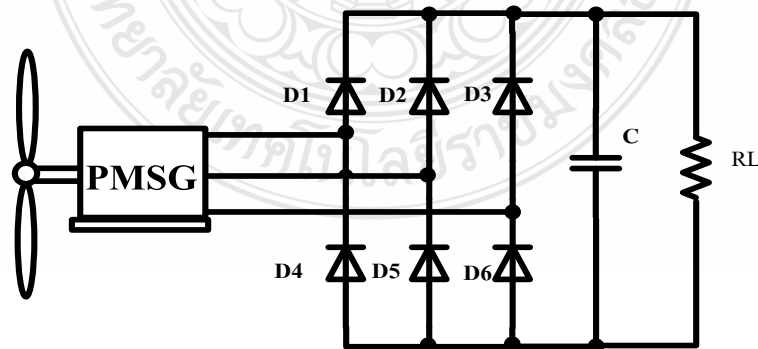
3.1 แนวคิดในการออกแบบ และการสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐาน และส่วนประกอบของวงจรคอนเวอร์เตอร์

3.2 การออกแบบวงจรเรียงกระแส

จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 48 V และพิกัดกำลังไฟฟ้า 1 kW



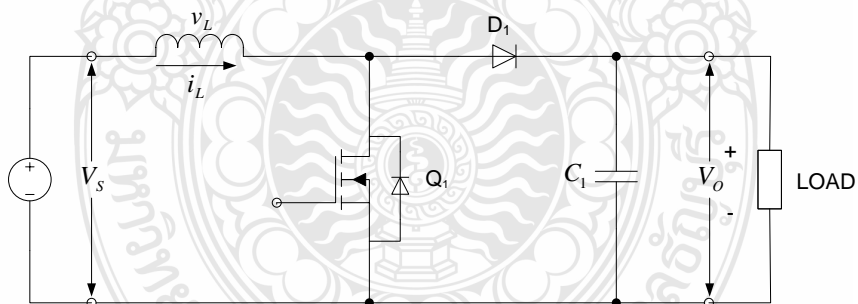
รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และตัวเก็บประจุที่นำมาต่อใช้งาน

กระแสสูงสุดของวงจรที่นำมาต่อใช้งาน	ค่าของตัวเก็บประจุที่นำมาต่อเพื่อสำรองไฟ
125 mA	470 μ F
250 mA	1,000 μ F
500 mA	2,200 μ F
1A	4,700 μ F
2A	6,800 μ F
4A	10,000 μ F
8A	22,000 μ F

3.3 การออกแบบวงจรทระดับแรงดัน

ในการออกแบบวงจรทระดับแรงดันในงานวิจัยนี้จะกำหนดแรงดันด้านเข้าของวงจรทระดับมีค่าเท่ากับ 48 V และแรงดันด้านออกของวงจรทระดับมีค่า 100 V ที่ความถี่สวิตช์ 10 kHz โดยในงานวิจัยนี้ใช้ MOSFET เบอร์ IRFP 250 ซึ่งมีอัตราทนแรงดันเท่ากับ 200 V กระแส 33A จากค่าต่างๆ ที่กำหนดนี้สามารถนำมาหาค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุของวงจรทระดับแรงดันได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 วงจรทระดับแรงดัน

1) หาค่า Dudy Cycle จากสมการ (2.39)

จาก

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D}$$

$$\frac{100}{48} = \frac{1}{1-D}$$

$$1 - D = \frac{48}{100} = 0.48$$

$$D = 0.52$$

หาขนาดตัวเหนี่ยวนำ (L) สามารถคำนวณจากสมการ (2.47)

$$L_{\min 1} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f}$$

$$L_{\min 1} = \frac{0.52(1-0.52)^2 \times 10}{2(10 \times 10^3)}$$

$$= 60 \mu\text{H}$$

2) หาขนาดตัวเก็บประจุที่ระลอกคลื่นแรงดันของตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์จากสมการที่ (2.50)

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf}$$

จะได้

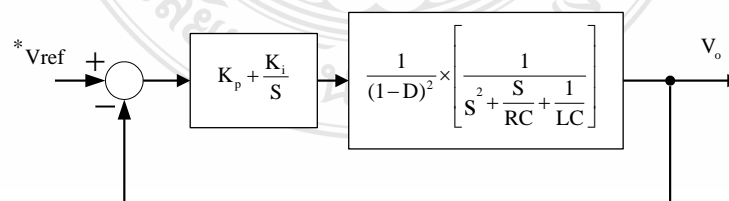
$$C_1 = \frac{D}{Rf \frac{\Delta V_o}{V_o}}$$

$$C_1 = \frac{0.52}{10 \times (10 \times 10^3) \times 0.1}$$

$$= 52 \mu\text{F}$$

3.3.1 การจำลองตัวควบคุมชนิด PI ด้วย Ziegler-Nichols

เป็นการออกแบบตัวควบคุมชนิด PI ด้วย Ziegler-Nichols เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ที่ทำให้ระบบมีความ ผิดพลาด น้อยที่สุด ที่สภาวะคงตัว และมีผลต่อการตอบสนองที่รวดเร็ว จึงสามารถ ออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรได้รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 บล็อกฟังก์ชัน โอนย้าย และตัวควบคุมชนิดพีไอ[12]

ลำดับขั้นตอนการหาค่า Kp Ki ด้วย Ziegler-Nichols

1) ทำการหาค่า Kp Ki ขึ้นมาเพื่อทำการหา Step Response ในโปรแกรม Matlab

```
kp = 10;
```

```
ki = 15;
```

```
L = 60e-6;
```

```
C = 52e-6;
```

```
R = 10;
```

```
Num = [kp ki];
```

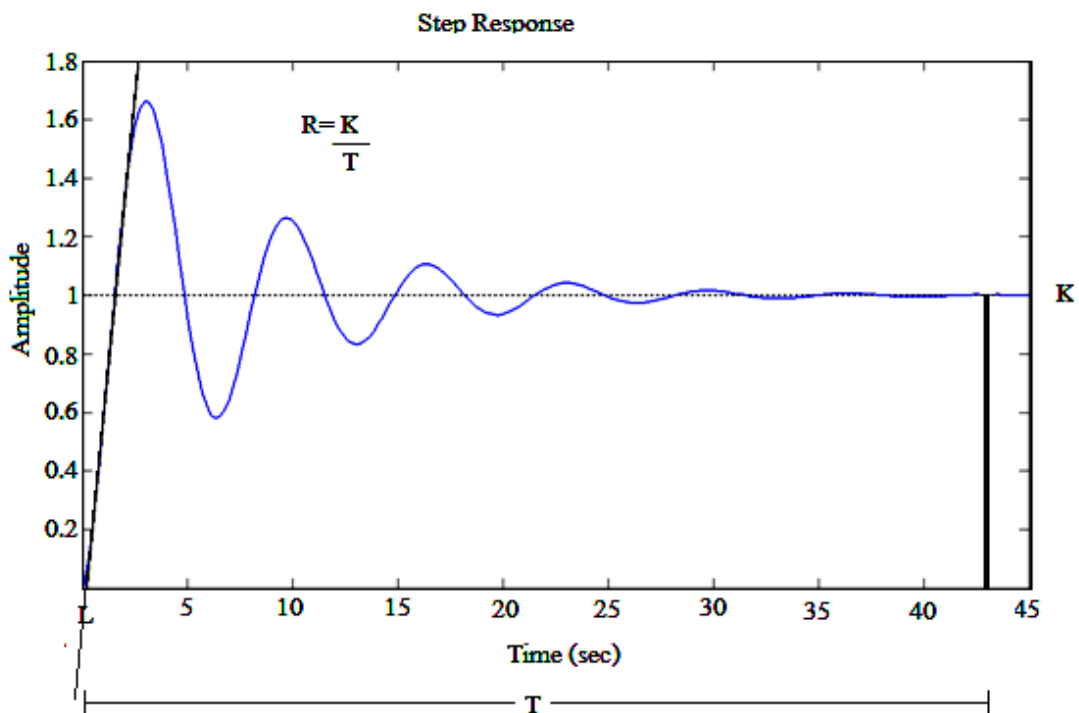
```
Den = [1 1/(R*C) 1/(L*C) 0];
```

```
Sys = tf(num,den);
```

```
sys1 = feedback(sys,1);
```

```
step(sys1)
```

จะได้กราฟ Step Response ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟ Step Response จากการหาค่าเริ่มต้น

2) นำค่าที่ได้จากรูปที่ 3.5 นำมาหาค่า L และค่า R เพื่อนำไปหาค่า Kp Ki

$L = 0.2$

$R = 1/43.5 = 0.02298$

ต้องการควบคุมแบบ PI controller

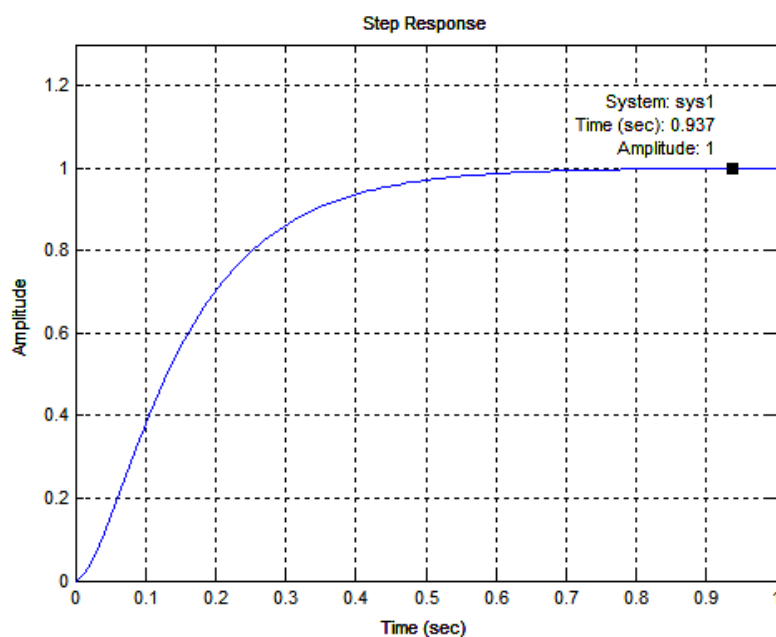
$$K_p = 0.9/R.L = 0.9/0.2 \times 0.02298 = 195.822$$

$$K_i = L/0.3 = 0.2/0.3 = 0.666666$$

3) นำค่าที่ได้มาคำนวณการควบคุมแบบ PI controller ตามกฎของ Ziegler -Nichols และนำค่าที่ได้จากการมาคำนวณหา Step Response อีกครั้ง ได้ดังภาพที่ 3.6

$$K_p = 0.9T/L = 0.9 \times 0.54/0.12 = 4.05$$

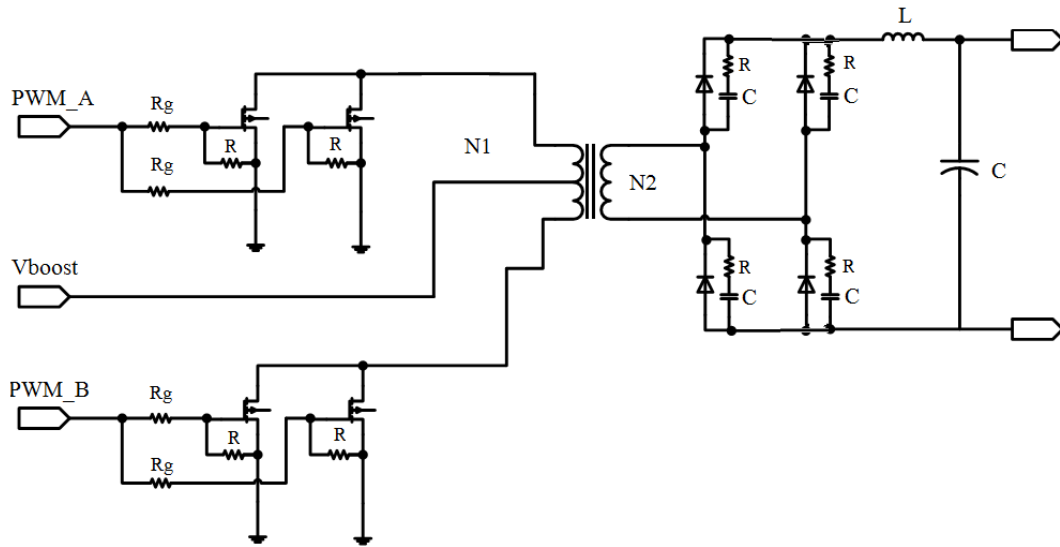
$$K_i = L/0.3 = 0.12/0.3 = 0.4$$



รูปที่ 3.6 กราฟ Step Response ที่ได้จากกฎของ Ziegler-Nichols

3.4 การออกแบบวงจรพวง-พูลคอนเวอร์เตอร์

ในการออกแบบวงจรพวงพูล คอนเวอร์เตอร์นี้จะใช้ IC TL494 เป็นตัวสร้างสัญญาณ PWM เพื่อไปควบคุมการขับของสวิตช์ MOSFET ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เบอร์ IRFP 460 มีคุณสมบัติในการทนแรงดันได้ 500V ทนกระแสได้ 20A



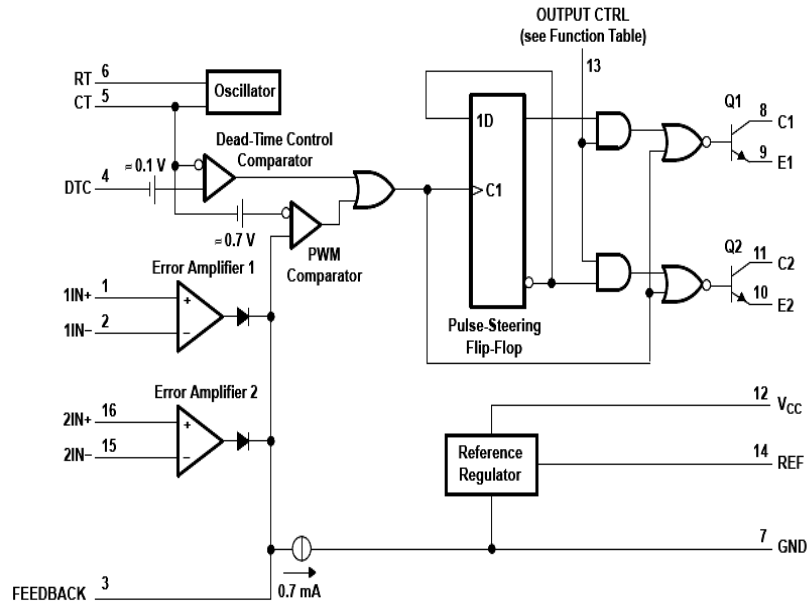
รูปที่ 3.7 โครงสร้างพื้นฐาน และส่วนประกอบของวงจรพช – พูลคอนเวอร์เตอร์

3.4.1 ข้อพิจารณาในการออกแบบวงจรควบคุม

การออกแบบวงจรควบคุมเป็นการออกแบบสัญญาณ เพื่อไปควบคุมการขับสวิตช์ MOSFET ออกแบบให้วงจรทำงานที่ภาคขับกำลังแบบ Push-Pull converter จึงต้องออกแบบให้สัญญาณเอาต์พุตคู่ และมีการแยกราวด์ของชุดวงจรควบคุมออกจากภาคกำลัง ด้วยวิธีการเชื่อมโยงสัญญาณทางแสงเพื่อให้ความปลอดภัยในการใช้งาน โดยใช้ HCPL 3120 และปรับความกว้างพัลส์ และความถี่ให้ได้ตามที่ต้องการด้วยความต้านทานปรับค่าได้

3.4.2 การออกแบบวงจรควบคุม

วงจรควบคุมเลือกใช้ไอซี TL494 เนื่องจากไอซีเบอร์นี้สามารถใช้ในการควบคุม วงจรพช-พูล คอนเวอร์เตอร์และสามารถควบคุม PWM ของวงจรควบคุม โดยภายในตัวไอซีจะมี แรงดันอ้างอิง วงจรเปรียบเทียบ 2 วงจร วงจรผลิตความถี่ PWM, flip flop และมีสัญญาณเอาต์พุตสอง สัญญาณเพื่อไปขับสวิตช์ MOSFET



รูปที่ 3.8 ขาต่างๆภายในตัวไอซี

คำนวณหาความถี่ที่ใช้

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T C_T} \quad (3.1)$$

แต่จาก Data sheet ของ TL494 การใช้เอาต์พุตของไอซีเพื่อขับวงจร ให้ทำงานแบบ push-pull

ความถี่

$$\frac{f_{out}}{f_{osc}} = 0.5$$

$$f_{out} = \frac{f_{osc}}{2} \quad (3.2)$$

ดังนั้นสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความถี่เอาต์พุตจึงเท่ากับ

$$f_{out} = \frac{1.1}{2R_T C_T} \quad (3.3)$$

ในการออกแบบเลือกความถี่ในการทำงานเท่ากับ 10 kHz และเลือกค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 1nF การหาค่าความต้านทาน R_T จึงเท่ากับ

$$R_T = \frac{1.1}{2C_T f_{out}} \quad (3.4)$$

$$R_T = \frac{1.1}{2 \times 1 \times 10^{-9} \times 10 \times 10^3} \quad (3.5)$$

$$R_T = 55 \text{ k}\Omega$$

3.4.3 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับวงจรพวง-พูลคอนเวอร์เตอร์

แรงดันด้านเข้า (V_{in}) 100 V

กระแสด้านออก (I_o) 2 A

ความถี่สวิตซิ่ง (f_s) 10 kHz

แรงดันด้านออก (V_o) 537 V $\pm 10\%$

ก. หาค่าลึงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

$$P_{o2} = (V_o + V_{ri} + V_D) \cdot I_o = (537 + (537 \cdot 10\%) + 1.5) \cdot 2 = 1184 \text{ W}$$

ข. การเลือกขนาดของแกนแม่เหล็ก

$$A_p = A_c A_w = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{o2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\eta}\right)}{4JK_w B_w f_s} \quad (3.6)$$

เลือกค่าที่ออกแบบหม้อแปลงปลอดภัย

$$\eta = 0.8$$

$$J = 3 \text{ A/mm}^2$$

$$K_w = 0.4$$

$$B_m = 0.2 \text{ T}$$

แทนค่าในสูตร

$$A_p = \frac{\sqrt{2} \times 882 \times \left(1 + \frac{1}{0.8}\right)}{4 \times 3 \times 0.4 \times 0.2 \times 35 \times 10^3} \quad (3.7)$$

$$A_p = 0.0835269 \text{ m}^2$$

$$A_p = 83526.9 \text{ mm}^4$$

ทำการเลือกแถมแม่เหล็กจากตาราง โดยต้องเลือก A_p ในตารางให้มามีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นทำการเลือกแถมแม่เหล็กเบอร์ E65/32/13

$$A_p = 142840 \text{ mm}^4, A_w = 537 \text{ mm}^2, A_c = 266 \text{ mm}^2$$

ค. หาจำนวนรอบของหม้อแปลง

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

$$N_1 = \frac{V_{in,max}}{4 A_c B_m f_s} \quad (3.8)$$

$$N_1 = \frac{100 + (100 \times 10\%)}{4 \times 266 \times 10^{-6} \times 0.2 \times 10 \times 10^3}$$

$$N_1 = 51 \text{ รอบ}$$

เลือก $N_1 = 51$ รอบ

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_o'}{V_{in,min} (2D_{max})} \quad (3.9)$$

เลือกใช้ $D_{max} = 0.45$

$$\eta = \frac{537}{(100 - (100 \times 10\%)) \times 2 \times 0.45}$$

$$\eta = 5.1$$

$$N_2 = \eta N_1$$

$$N_2 = 5.1 \times 51 = 273 \text{ รอบ}$$

เลือก $N_2 = 273$ รอบ

ง. การเลือกขนาดลวดตัวนำ

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$I_2 = I_0 \sqrt{D_{\max}} \quad (3.10)$$

$$I_2 = 2 \times \sqrt{0.45} = 1.35 \text{ A}$$

$$I_1 = nI_2$$

$$I_1 = 5.1 \times 1.34 = 6.83 \text{ A}$$

คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวด จาก

$$a_1 = \frac{I_1}{J} \quad (3.11)$$

$$a_1 = \frac{6.83 \text{ A}}{3 \text{ A/mm}^2} = 2.27 \text{ mm}^2$$

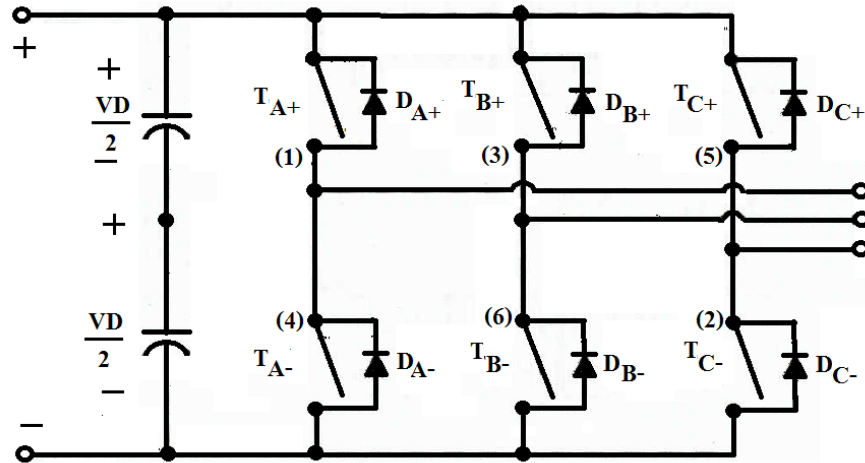
$$a_2 = \frac{I_2}{J}$$

$$a_2 = \frac{1.35 \text{ A}}{3 \text{ A/mm}^2} = 0.45 \text{ mm}^2$$

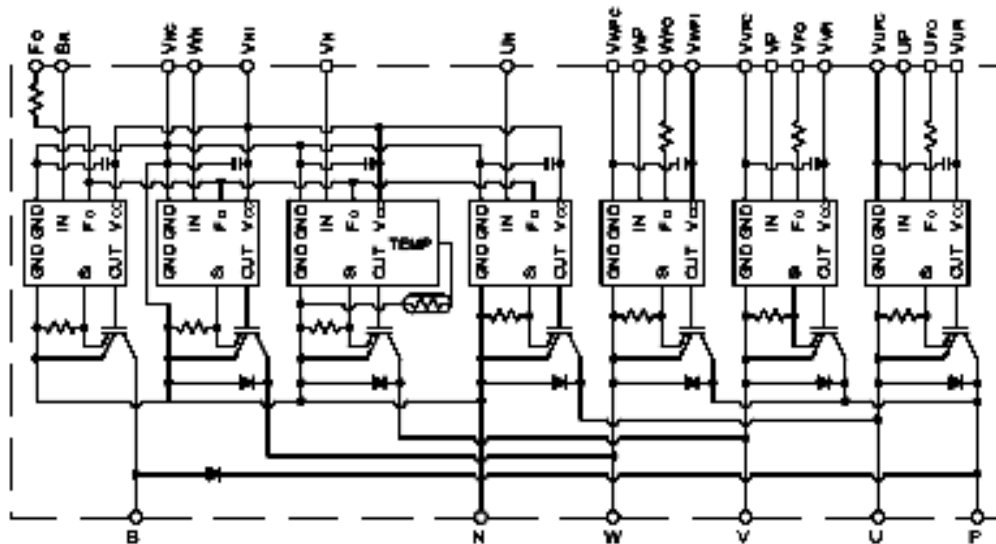
จากตาราง[12]ทำการเลือกขนาดขดลวดที่มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะได้ขดลวด a_1 เบอร์ SWG15 (2.54 mm^2) และขดลวด a_2 เบอร์ SWG20 (0.65 mm^2)

3.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ในงานวิจัยนี้ใช้ IGBT เบอร์ PM50RS120 ซึ่งมีอัตรากรทนแรงดันได้ 1200 V และอัตรากรทนกระแสได้ 50A ซึ่งจะรับสัญญาณขับจาก DSP ทั้ง 6 สัญญาณ และมีการแยกแวลด์ของชุดวงจรควบคุมออกจากภาคกำลัง ด้วยวิธีการเชื่อมโยงสัญญาณทางแสงเพื่อให้มีความปลอดภัยในการทำงาน โดยใช้ IC HCPL 4506



รูปที่ 3.9 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

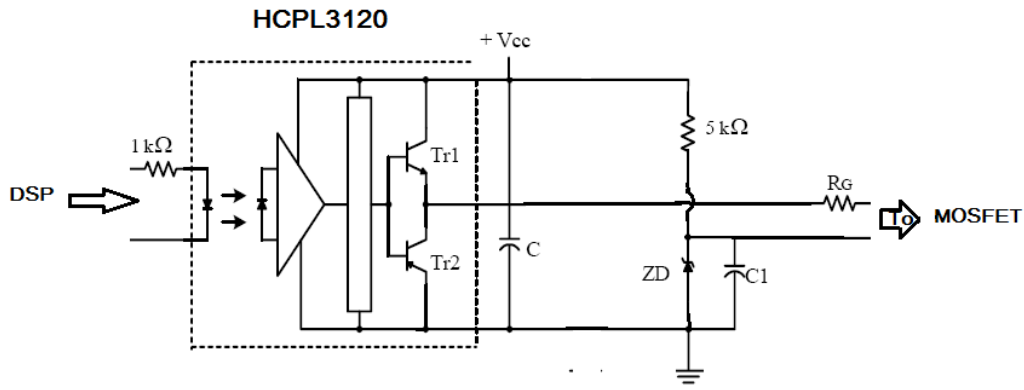


รูปที่ 3.10 วงจรภายในของอุปกรณ์ PM50RS120

3.6 วงจรขับนำ และตรวจจับสัญญาณแรงดัน

3.6.1 วงจรขับนำสัญญาณของวงจรทระดับแรงดัน และวงจรพuxe-พุลคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมการทำงานของสวิตช์จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทำการแยกระหว่างขาเกตกับสัญญาณควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในการแยกกันของสัญญาณนี้ ก็เพื่อต้องการแยกกราวด์ด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรอันเกิดจากการใช้กราวด์เดียว อุปกรณ์ที่ใช้แยกกราวด์จะเลือกใช้ไอซีแยกระบบด้วยแสง (Opto Coupler) เบอร์ HCPL 3120 ตัวสำหรับวงจรทระดับแรงดันซึ่งสามารถใช้ไฟฟ้าเลี้ยงวงจรขนาด 15 V โดยแสดงวงจรดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.11 วงจรขับเกตสำหรับวงจรทบระดับ และวงจรพืชมูล คอนเวอร์เตอร์

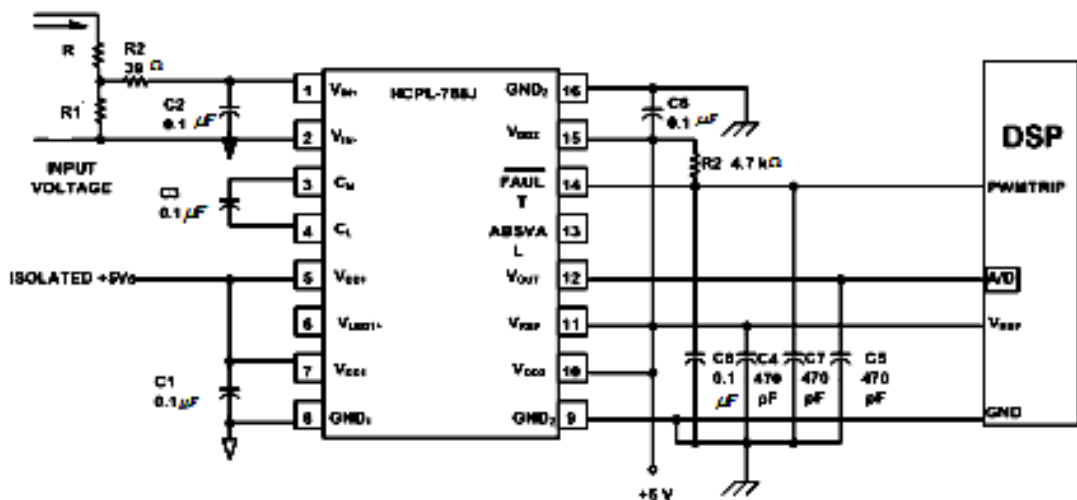
3.4.3 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

โดยการตรวจจับสัญญาณของแรงดันของงานวิจัยนี้ตรวจจับแรงดันด้านออกของวงจรทบระดับที่แรงดัน 110 V จะใช้วงจรแบ่งแรงดัน และกำหนดค่า R เพื่อใช้เป็นแรงดันอินพุตให้กับไอซีเบอร์ HCPL-788J มีค่าอยู่ช่วง 0 -200 mV โดยกำหนดค่า R ที่ใช้วงจรแบ่งแรงดันตกคร่อมให้เป็นแรงดันอินพุตให้กับตัวจับสัญญาณเป็นค่า R₁ ดังสมการที่ 3.12

$$V_{\text{sense}} = \frac{R_1}{R+R_1} + V_{\text{boost}} \quad (3.12)$$

$$200\text{mV} = \frac{R_1}{R+R_1} + 110$$

เลือก R = 100 kΩ จะ R₁ = $\frac{200 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^3}{100} = 181.81 \Omega$ ดังนั้นเลือกใช้ R₁ = 180 Ω



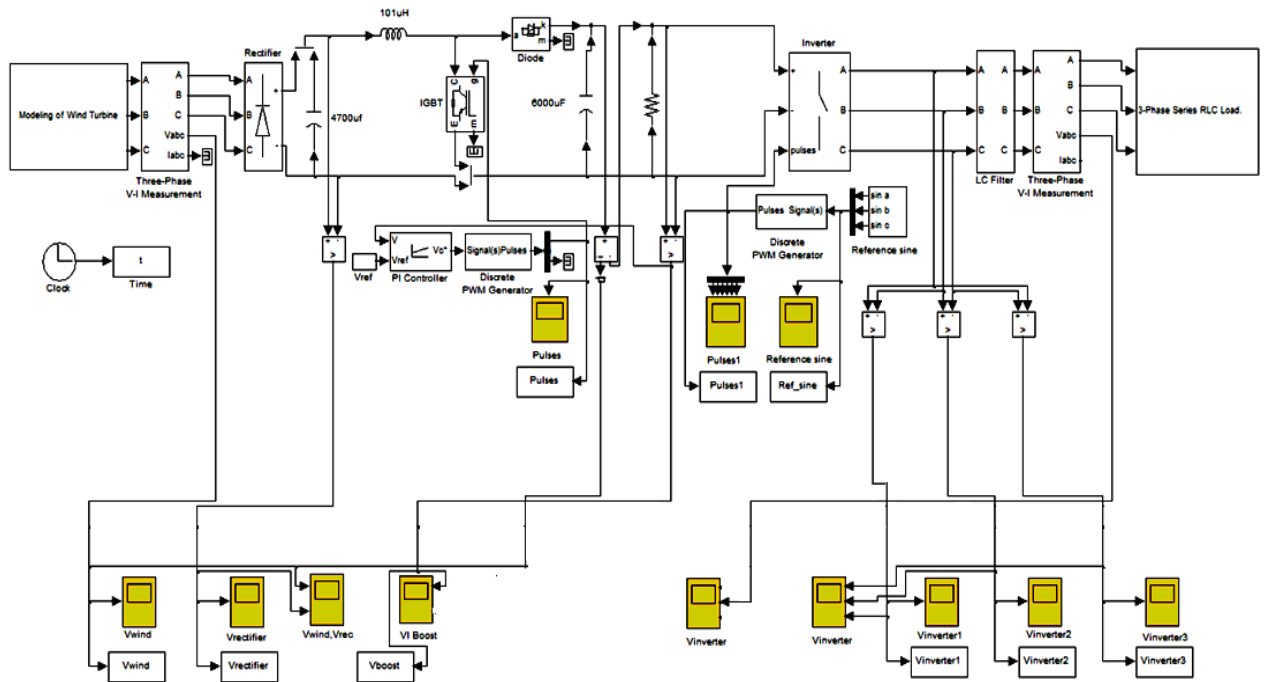
รูปที่ 3.12 วงจรการตรวจจับสัญญาณแรงดัน

บทที่ 4

ผลการจำลอง และการทดสอบ

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการจำลองการทำงานของวงจรต่างๆ บน MATLAB/SIMULINK ได้แก่วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทบทระดับแรงดัน และวงจรอินเวอร์เตอร์ และได้ทดสอบการทำงานของวงจรที่ได้ทำการจำลองต่างๆบนเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น และทำการทดสอบการจำลองที่สถานะแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

4.1 การจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK [13]



รูปที่ 4.1 วงจรการจำลองวงจรคอนเวอร์เตอร์ ใน MATLAB/SIMULINK

จากรูปที่ 4.1 เป็นการจำลองการทำงานในส่วนต่างๆของวงจรคอนเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่จำลองเป็นแรงดันไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้า และแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟส และทำการยกแรงดันด้วยวงจรทบทระดับ และมีการควบคุมแรงดันด้านออกจากวงจรทบทระดับด้วย ตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ และแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ และผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำด้วย LC ฟิลเตอร์โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ดังตารางที่ 4.1

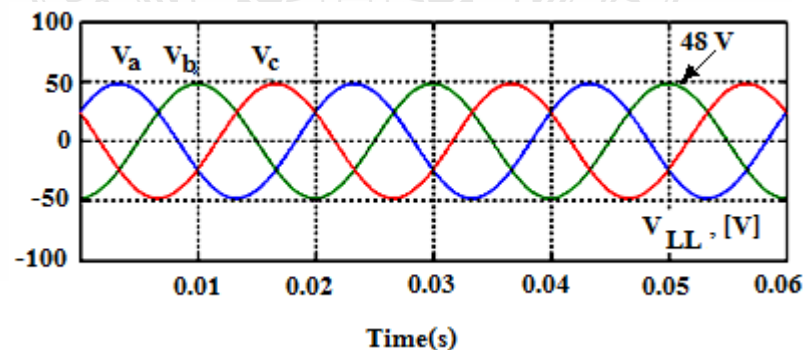
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์การจำลองการทำงาน ใน MATLAB/SIMULINK

รายการ / สัญลักษณ์	ค่าที่ใช้
แรงดันออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	48 V
แรงดันด้านเข้าของวงจรทระ คีบ	64.82 V
แรงดันด้านออกของวงจรทระ คีบ	100 V
กระแสด้านออกของ วงจรทระ คีบ	15 A
ค่าความเหนี่ยวนำ (L)	60 μ H
ค่าเก็บประจุ(C)	52 μ F
ความถี่ในการสวิตช์	10 kHz

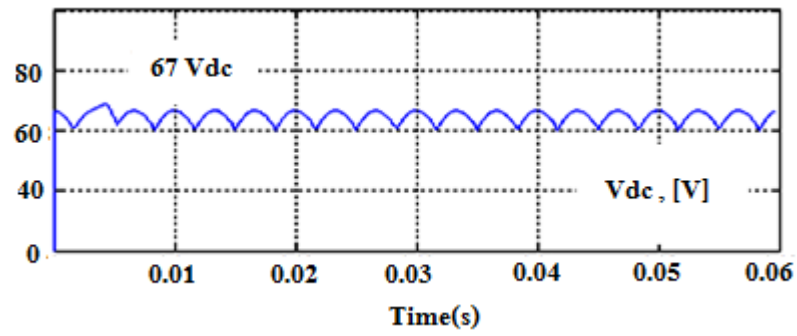
4.2 ผลการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการควบคุมบัลไฟฟ้ากระแสตรงที่สภาวะต่างๆ

การทดลองการจำลองของระบบจะทำการทดลองที่สภาวะแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่แรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ 48 V คงที่ และดูสภาวะแรงดันของวงจรต่างๆในระบบ และทำการจำลองในกรณีที่สภาวะแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างฉับพลันเพื่อดูสภาวะแรงดันต่างๆของวงจรว่าทำงานตามที่ออกแบบไว้หรือไม่

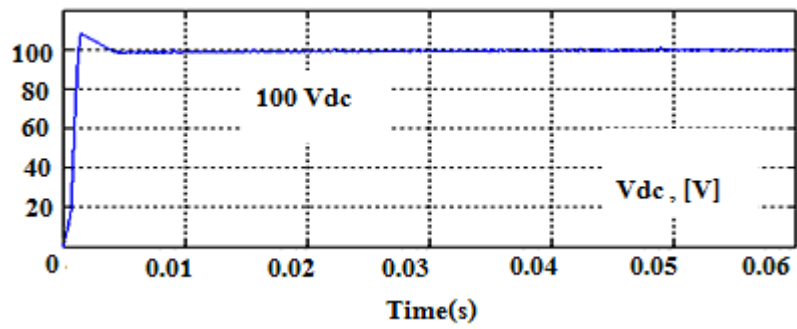
4.2.1 การจำลองที่สภาวะแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่แรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่ที่ 48 V



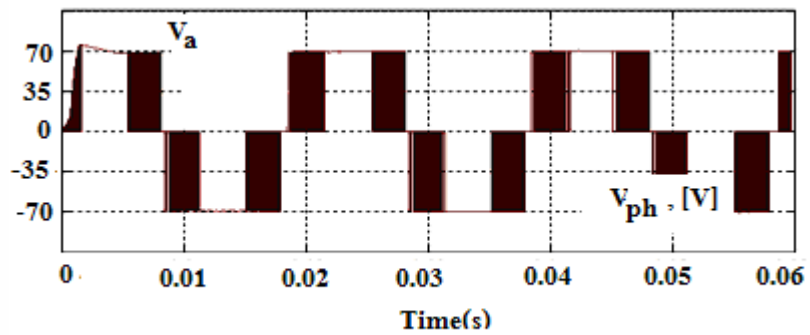
รูปที่ 4.2 การจำลองแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดัน 48 V



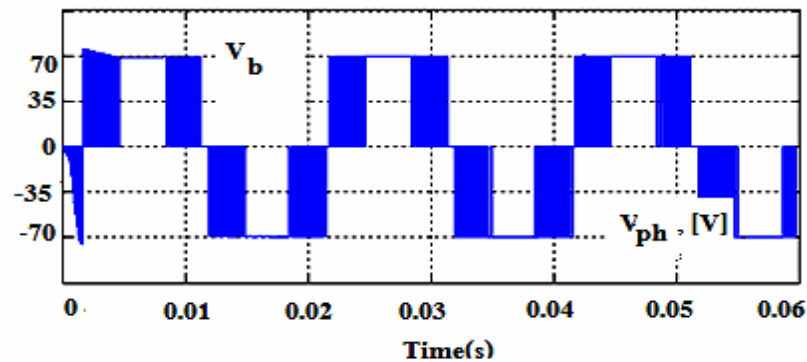
รูปที่ 4.3 การจำลองแรงดันด้านออกจากวงจรเรียงกระแส



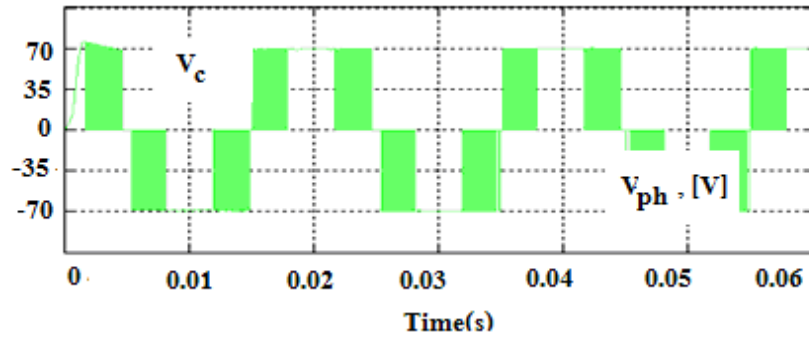
รูปที่ 4.4 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรวงจรทระดับแรงดัน



(ก) การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟส 1 ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter

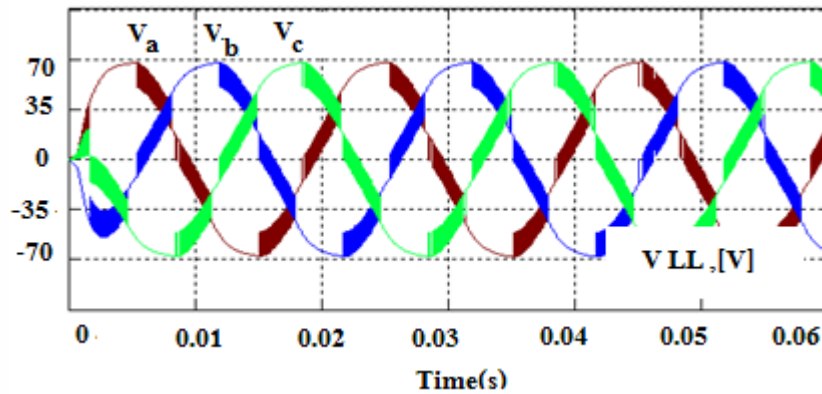


(ข) การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟส 2 ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter



(ค) การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟส 3 ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter

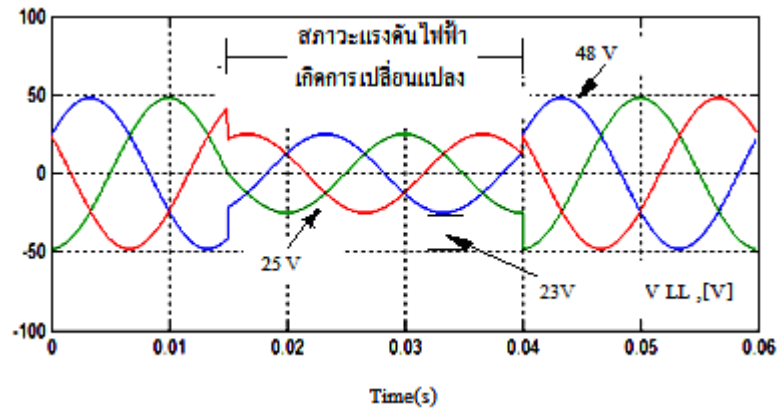
รูปที่ 4.5 (ก),(ข) และ(ค) การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter



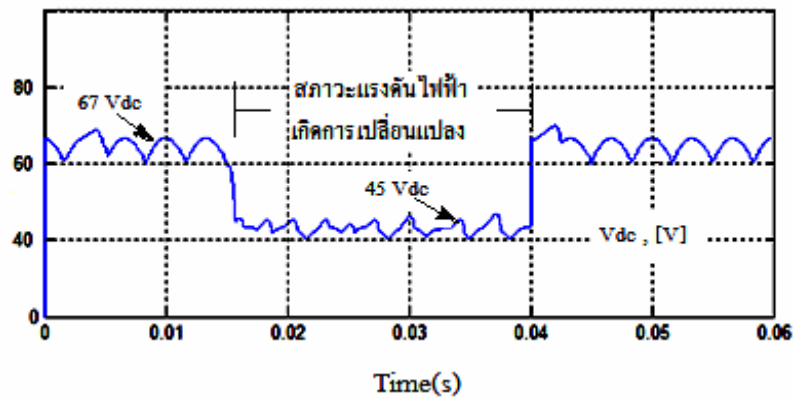
รูปที่ 4.6 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ได้ผ่านวงจร LC Filter

จากรูปที่ 4.2 จะเป็นแรงดันด้านออกที่จำลองเป็นแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งทำการจำลองที่สภาวะความเร็วลมคงที่ คือให้มีแรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 48 V คงที่ ส่วนรูปที่ 4.3 เป็นแรงดันด้านออกจากวงจรเรียงกระแสสามเฟส และรูปที่ 4.4 เป็นแรงดันด้านออก จากวงจรทบระดับแรงดันซึ่งทำการยกกระดบแรงดันขึ้นมาที่ 100 V และรูปที่ 4.5 (ก) เป็นแรงดันด้าน ออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เฟส 1 ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter รูปที่ 4.5 (ข) เป็นแรงดันด้านออก ของวงจรอินเวอร์เตอร์เฟส 2 ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter รูปที่ 4.5 (ค) เป็นแรงดันด้านออกของ วงจรอินเวอร์เตอร์เฟส 3 ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter และรูปที่ 4.6 เป็นแรงดันด้านออกของวงจร อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ผ่านวงจร LC Filter แล้ว

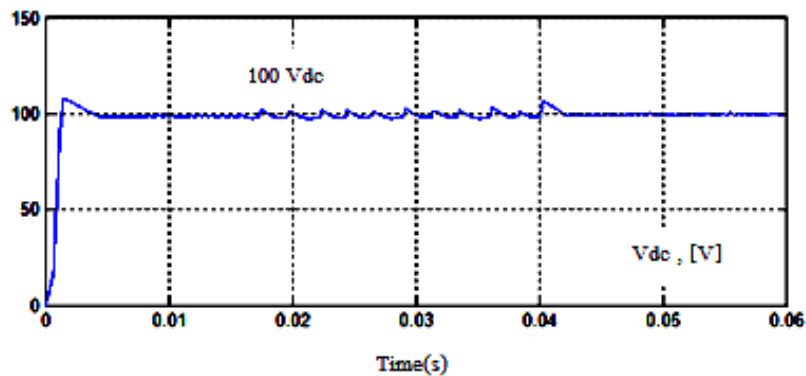
4.2.2 การจำลองที่สภาวะแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่แรงดันด้าน
 ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก 48 V เป็น 25 V



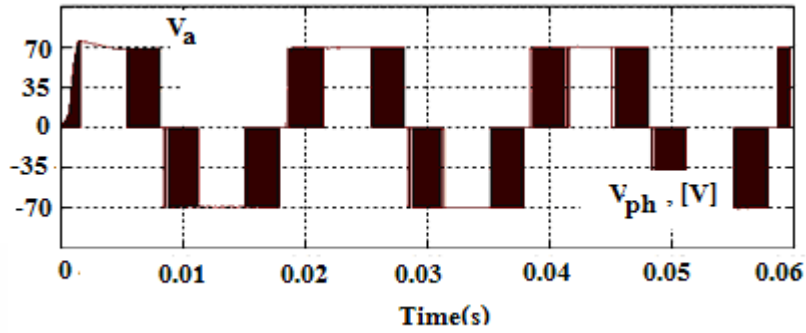
รูปที่ 4.7 การจำลองแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สภาวะแรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน



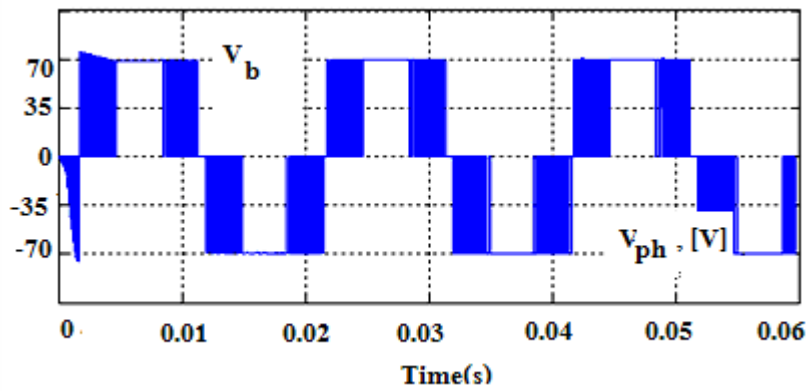
รูปที่ 4.8 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรเรียงกระแส



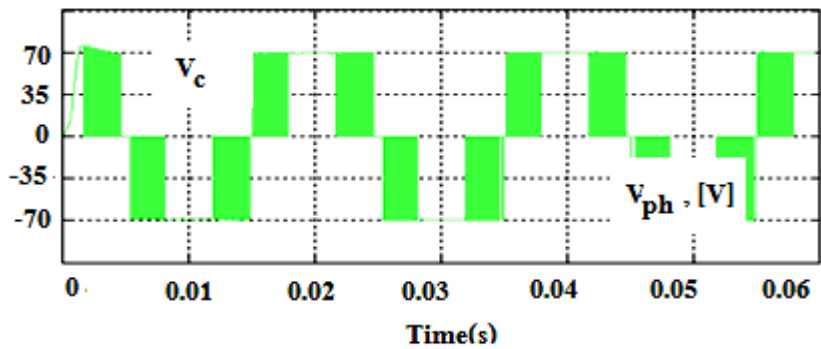
รูปที่ 4.9 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรจรรยาระดับแรงดัน



(ก) การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสที่ 1 ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter

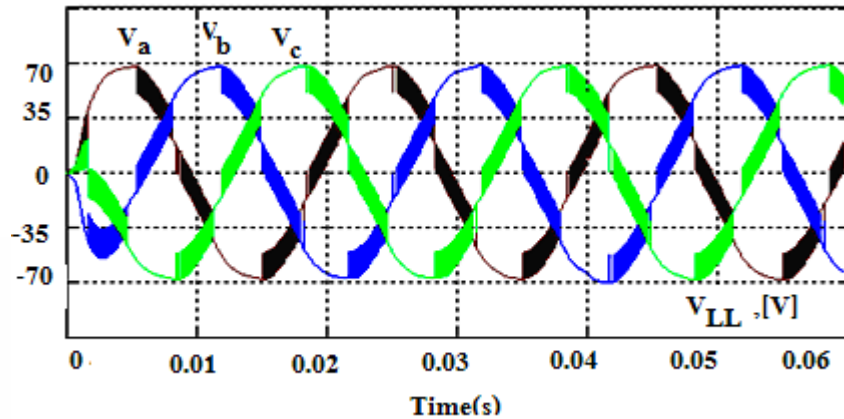


(ข) การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสที่ 2 ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter



(ค) การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์เฟสที่ 3 ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter

รูปที่ 4.10 (ก),(ข) และ(ค) การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส
ที่ยังไม่ได้ผ่านวงจร LC Filter



รูปที่ 4.11 การจำลองแรงดันที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ได้ผ่านวงจร LC Filter

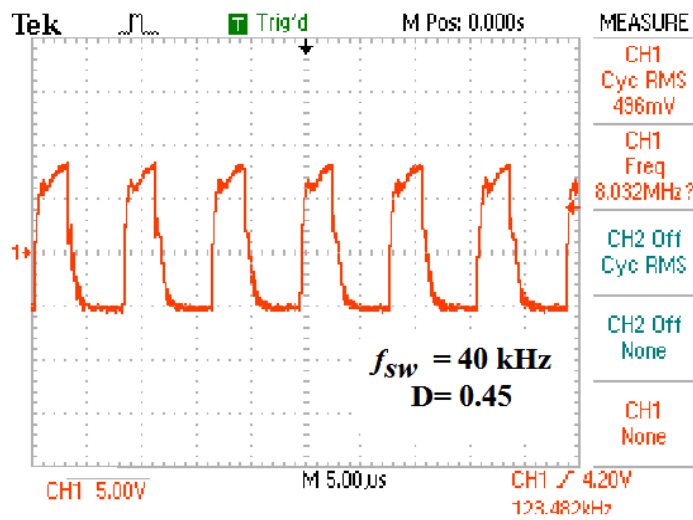
จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเมื่อแรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันดังรูปที่ 4.7 จะพบว่าแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงตามสถานะแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนแรงดันด้านออกของวงจรทระดับแรงดันจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการควบคุมแรงดันให้คงที่โดยตัวควบคุมแบบ PI ที่มีการตรวจจับแรงดันด้านออกของวงจรทระดับแล้วส่งสัญญาณกลับมาให้ตัว PI Control สร้างสัญญาณความกว้างพัลส์เข้าไปขับสวิตช์ของวงจรทระดับแรงดัน เพื่อให้ได้แรงดันที่ออกจากวงจรทระดับที่ 100 V ดังรูปที่ 4.9 และทำการแปลงแรงดันเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.11

4.3 ผลการทดสอบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้

ออกแบบสร้าง

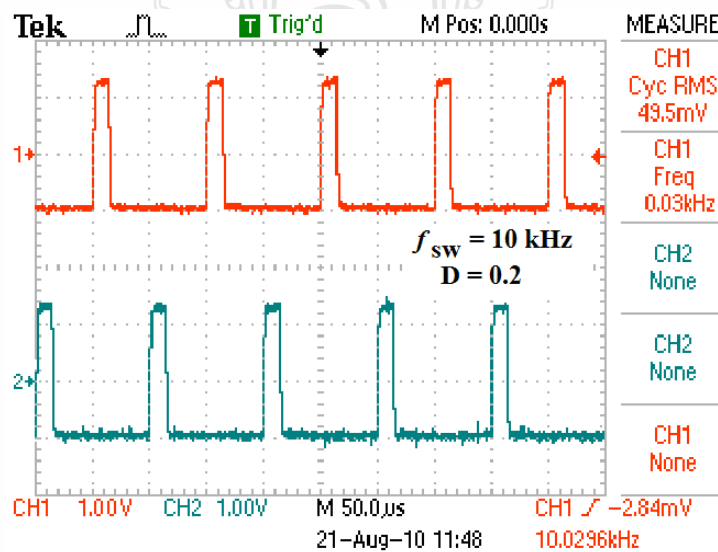
ผลการทดสอบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงสถานะแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่แรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่ และดูสถานะแรงดันของวงจรต่างๆในระบบ และทำการทดสอบในกรณีที่สถานะแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อดูสภาวะแรงดันต่างๆของวงจรว่าได้ทำงานตามที่ออกแบบไว้หรือไม่

4.3.1 การทดสอบที่สภาวะแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่แรงดันด้าน
ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คงที่ และที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง



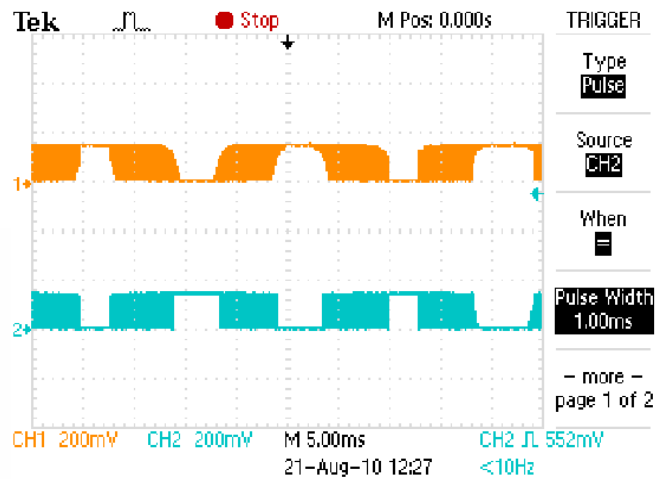
รูปที่ 4.12 สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ Mosfet ของวงจรทระดับแรงดัน

จากรูปที่ 4.12 เป็นสัญญาณจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่จะไปขับสวิตช์ Mosfet ของ
วงจรทระดับ

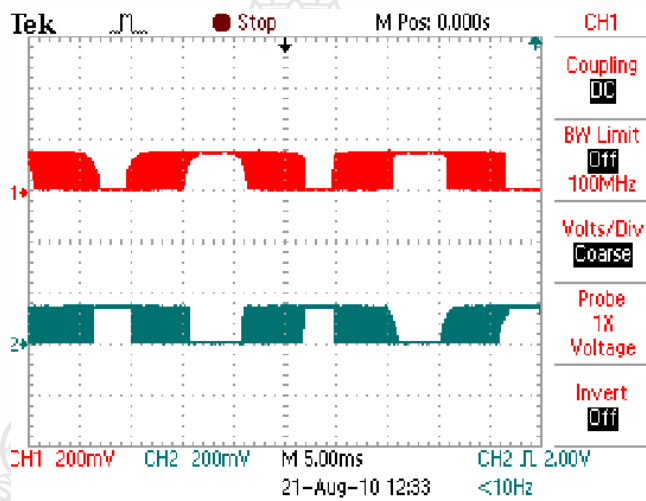


รูปที่ 4.13 สัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ Mosfet ของวงจรพช-พุล คอนเวอร์เตอร์

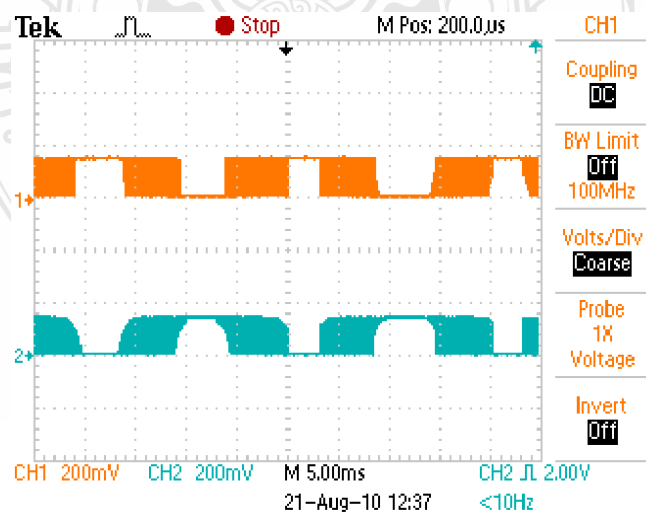
จากรูปที่ 4.13 เป็นสัญญาณจาก IC TL494 ซึ่งเป็นตัวสร้างสัญญาณ PWM เพื่อไปขับสวิตช์
ของวงจรพช-พุลคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสัญญาณที่ออกจากวงจร IC TL494 นั้นจะมีสัญญาณออกมา 2
สัญญาณแต่ละสัญญาณจะต้องทำงานต่างช่วงเวลากันซึ่งได้ทำการสร้างค่า Deat time เพื่อไม่ให้สอง
สัญญาณนั้นทำงานไม่พร้อมกันเพื่อไปขับสวิตช์ Mosfet



(ก) สัญญาณ U_p U_n



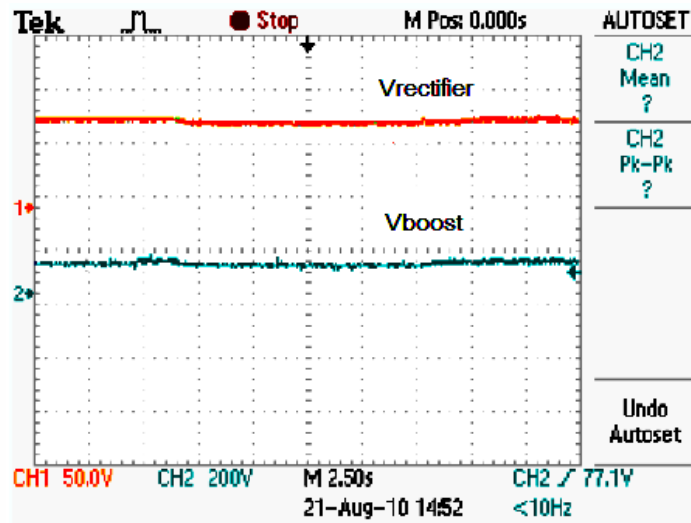
(ข) สัญญาณ V_p V_n



(ค) สัญญาณ W_p W_n

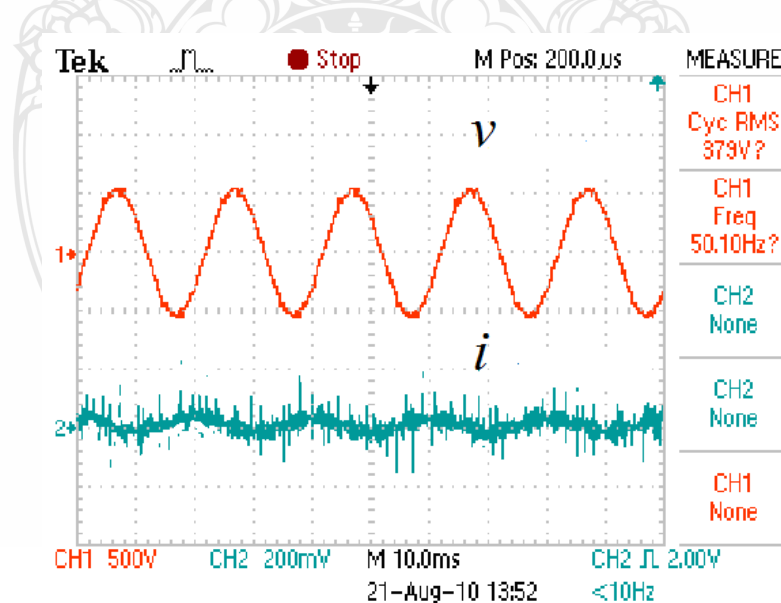
รูปที่ 4.14 (ก),(ข) และ(ค) สัญญาณ ที่ใช้ขับสวิตซ์ IGBT ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

จากรูปที่ 4.14 (ก) เป็นสัญญาณจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อไปขับสวิตช์ IGBT แบบโมดูลที่ขา U_p U_n รูปที่ 4.14 (ข) เป็นสัญญาณจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อไปขับสวิตช์ IGBT แบบโมดูลที่ขา V_p V_n รูปที่ 4.14 (ค) เป็นสัญญาณจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อไปขับสวิตช์ IGBT แบบโมดูลที่ขา W_p W_n

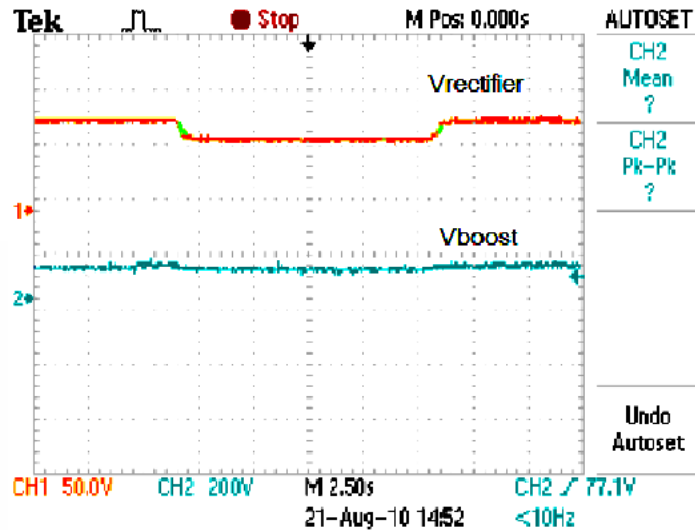


รูปที่ 4.15 แรงดันของวงจรเรียงกระแส และวงจรทบระดับเมื่อสถานะแรงดันคงที่

จากรูปที่ 4.15 เป็นแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส และแรงดันด้านออกของวงจรทบระดับแรงดันที่สถานะแรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำคงที่

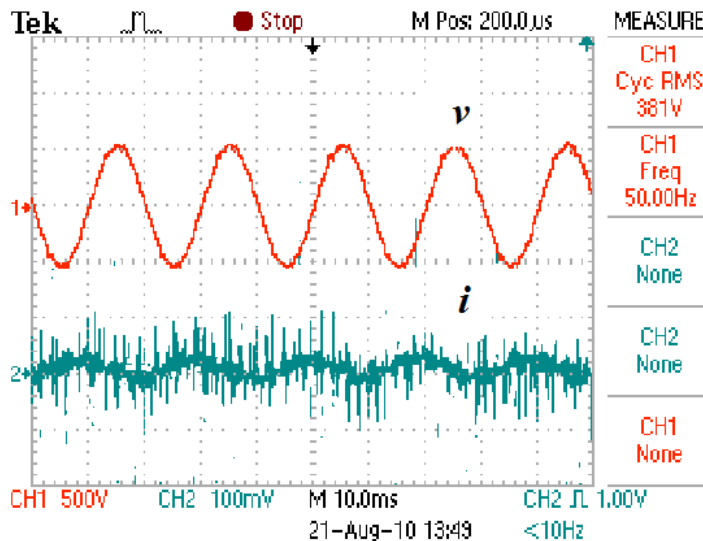


รูปที่ 4.16 แรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรคงที่

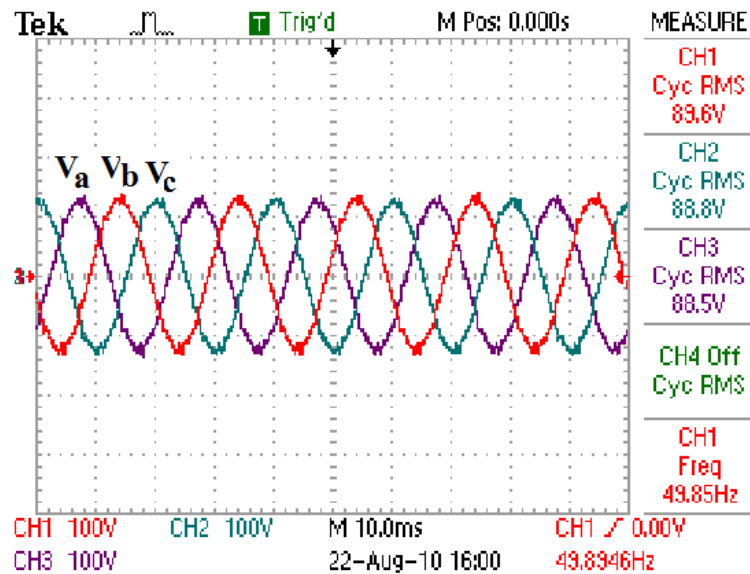


รูปที่ 4.17 แรงดันของวงจรเรียงกระแส และวงจรทบระดับแรงดันเมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าด้านออก จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรเกิดการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.17 เป็นแรงดันด้านออกจากวงจรเรียงกระแสสามเฟส จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรซึ่งทำการทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนแรงดันด้านออกของวงจรทบระดับแรงดันนั้นยังคงรักษา ระดับแรงดันไว้ช่วงที่ต้องการไว้ได้เพราะในส่วนของวงจรทบระดับนั้นมีการตรวจจับสัญญาณแรงดันด้านออกแล้วส่งผ่านให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลทำการสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์ เพื่อไปควบคุมสวิตช์ Mosfet ของวงจรทบระดับ



รูปที่ 4.18 แรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.19 แรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสามเฟสเมื่อสถานะแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำเกิดการเปลี่ยนแปลง

การทดสอบเมื่อสถานะความเร็วลมเปลี่ยนแปลงนั้นจะทำให้ค่าแรงดัน กระแส และความถี่ที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรนั้น เกิดการเปลี่ยนแปลงตามสถานะความเร็วลม และแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีแรงดันต่ำ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการคือ 380 V และมีความถี่ถึงที่ 50 Hz

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อสถานะแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่แต่มีแรงดันด้านเข้าต่ำแต่ระบบได้ทำการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นด้วยวงจรทระดับแรงดัน และวงจรพูลคอนเวอร์เตอร์ และแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบที่ความถี่ 50 Hz ดังรูปที่ 4.16 และเมื่อทดสอบระบบที่สถานะแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงจะเห็นได้ว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่จะเห็นว่าแรงดันด้านออกของวงจรทระดับแรงดันนั้นยังคงรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่ออกแบบไว้ได้ ดังรูปที่ 4.17 และทำการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นอีกก่อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสเพื่อให้แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์มีแรงดันที่ต้องการคือ 380 V ที่ความถี่ 50 Hz คงที่ ดังรูปที่ 4.19

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลอง และสร้างอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการควบคุมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการรับแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่ถาวร และทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟส โดยทำการยกแรงดันด้วยวงจรทบระดับแรงดัน โดยมีการตรวจจับแรงดันด้านออกของวงจรทบระดับเพื่อส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลทำการประมวลผล และสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์เพื่อไปควบคุมสวิทช์ของวงจรทบระดับแรงดันให้คงที่ และใช้วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ ทำการยกแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้ได้แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสให้ได้แรงดันที่ออกแบบไว้คือ 380 V ที่ความถี่ 50 Hz

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลของการทดสอบที่สภาวะแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรคงที่

จากการทดสอบสภาวะแรงดันด้านออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ต่างที่ได้ทำการออกแบบ และสร้าง คือวงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทบระดับ วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ และวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยรับแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เข้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสเพื่อแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และทำการยกแรงดันด้วยวงจรทบระดับ โดยมีการตรวจจับแรงดันด้านออกด้วยเซนเซอร์เพื่อส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์เพื่อไปควบคุมสวิทช์การทำงานของวงจรทบระดับให้มีแรงดันตามที่ออกแบบไว้คือ 110 Vdc และทำการยกแรงดันให้สูงขึ้นด้วยวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ โดยใช้ ไอซี TL494 สร้างสัญญาณความกว้างพัลส์เป็นตัวควบคุมการทำงานของสวิทช์ Mosfet ให้มีแรงดันด้านออกของวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ 600 Vdc และทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่มีแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ 380 Vac ที่ความถี่ 50 Hz ตามที่ออกแบบไว้ได้

5.1.2 ผลการทดสอบที่สถานะแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรเกิดการเปลี่ยนแปลง

จากการทดสอบที่สถานะแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สถานะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อทดสอบการทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรทระดับแรงดัน โดยทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพบว่าแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนแรงดันด้านออกของวงจรทระดับแรงดันที่มีการควบคุมนั้นยังคงรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไว้อยู่ช่วง 110 Vdc ตรงตามทีออกแบบไว้ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

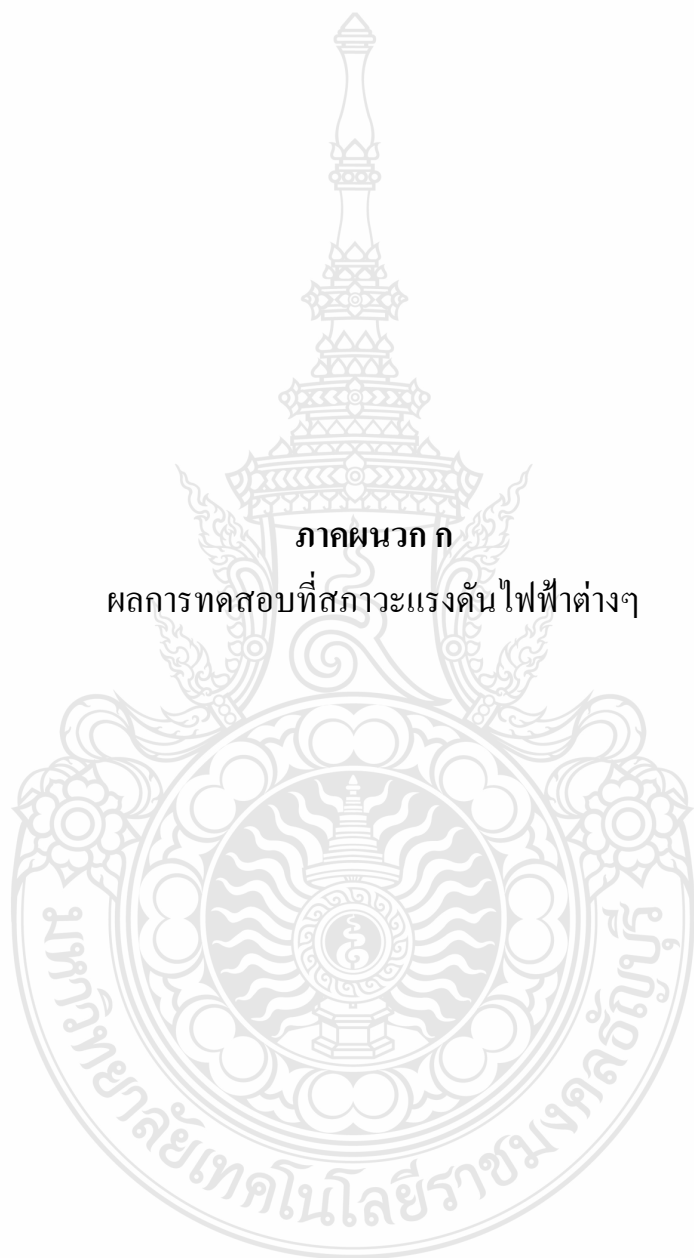
5.2.1 ในการทดสอบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงนั้นแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าควรออกแบบให้มีค่าแรงดันที่สูงขึ้นเพื่อให้วงจรทระดับ และวงจรฟิว-ฟูลคอนเวอร์เตอร์ไม่ทำงานหนักเกินไปเนื่องจากการยกระดับแรงที่สูงขึ้นมากเกินไปอาจทำให้สวิตช์ของวงจรทระดับ และฟิว-ฟูลเกิดความเสียหายได้

5.2.2 ควรมีการตรวจจับกระแสเพื่อส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลหยุดการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากกระแสเกิน

5.2.3 ควรมีทั้งวงจรทระดับ และวงจรทอนระดับแรงดันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thomas, A., Lennart, S. (2002,Januart). “An Overview of Wind Energy-Status 2002”
Renewble and Sustainable Energy. 10(6) : 145-157
- [2] H. Vihriälä. Control of a Variable Speed Wind Turbine. Licentiate Thesis, Tampere
University of Technology. 1998.
- [3] www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?passTo=a7f27a0a459bc50b03a4493ed5f20bdb&pageid=3&bookID=1321&read=true&count=true
- [4] T. Thriringer, J. Linders. “Control by Variable Rotor Speed of a Fixed-Pitch Wind Turbine
Operating in a Wide Speed Range.” IEEE Trans. Energy Con.Vol. 8, No.3, (1993) : 520–526.
- [5] R. Hoffmann, P. Mutschler. “The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of
Wind Turbines.” IEEE. Trans. Ind. App. Vol. 2, (2000) : 886–893.
- [6] Mohan, N.; Undeland, T. and Robbins, W. Power Electronics Converters, Application and
Design. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [7] Johnson, G. L. Wind Energy Systems. England Cliffs: Prentic-Hall, 2001.
- [8] http://eng.rmutsv.ac.th/coen/sunya_web/pe/pe.htm
- [9] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”พิมพ์ครั้งที่ 2 ,วี.เจ.
พรินติ้ง , 2547.
- [10] สุวัฒน์ คั่น, “ เทคนิคการและออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย”พิมพ์ครั้งที่ 1 , บริษัท เอนเทล
ไทยจำกัด, กรุงเทพฯ, 2537.
- [11] Analog Devices, “Single Chip DSP Motor Controller ADMCF326,” Analog Devices Inc.
2000.
- [12] http://services.eng.uts.edu.au/~venkat/pe_html/ch07s3/ch07s3p1.htm
- [13] MATLAB User Manual, refer to this website: www.mathwork.com.



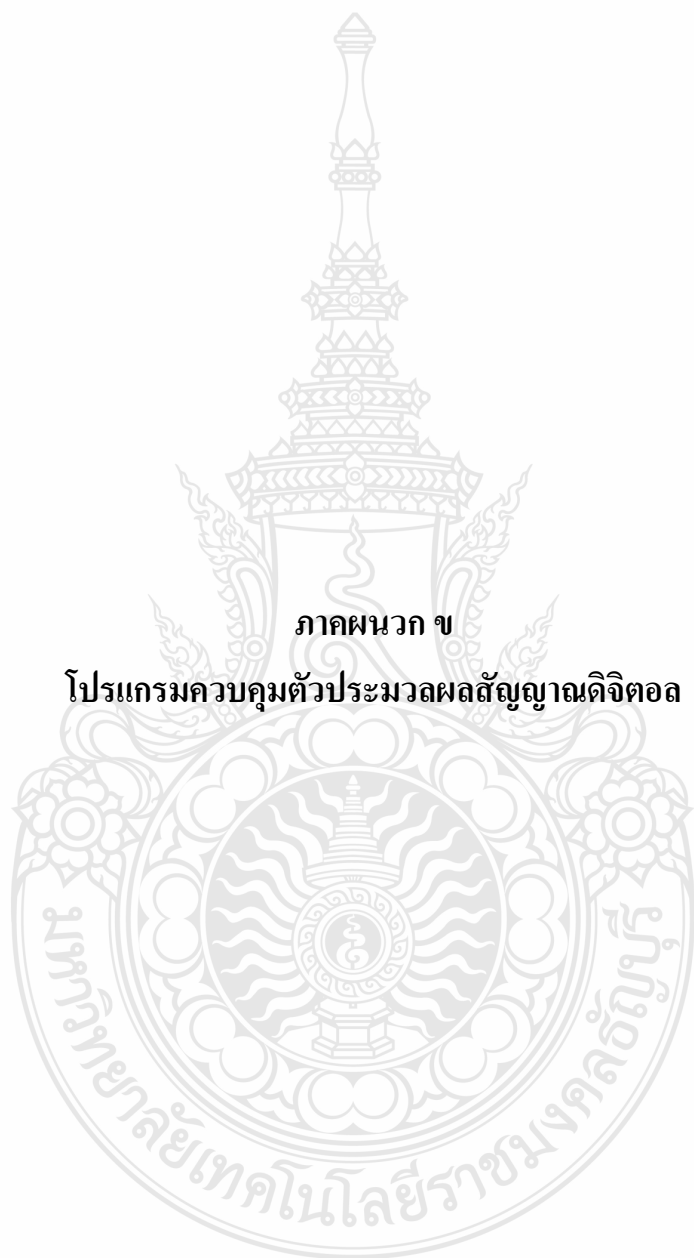
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

Vwind(V)	Vrectifier(V)	Vboost(V)	Iboost(A)	Vpush-pull(V)	Ipush-pull(A)	Vinverter	Iinverter
10.1	10.4	14.5	1.21	59.5	0.16	35.8	0.17
21.7	25.8	37.5	2.13	183.4	0.29	111.9	0.27
28.2	35.3	51.9	2.62	261.5	0.35	160.5	0.35
31.9	40.4	59.1	2.84	299.2	0.38	183.8	0.39
42.9	54.8	80.7	3.53	424.3	0.48	260.5	0.51
50.2	64.9	98.5	3.92	506.4	0.53	312.2	0.57
53.4	69.2	102.3	4.17	548.4	0.56	336.1	0.61
57.2	74.5	109.5	4.42	585.2	0.58	360.5	0.62
58.5	76.3	111.2	4.56	600.1	0.59	380.6	0.63
60.8	79.8	115.1	4.62	609.2	0.61	382.2	0.66
65.5	85.6	115.7	4.63	615.4	0.62	384.3	0.67
70.2	91.4	116.2	4.64	620.1	0.63	386.4	0.68





ภาคผนวก ข

โปรแกรมควบคุมตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

โปรแกรมควบคุมตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

MODULE/RAM/SEG=USER_PM1/ABS=0x30 Main_Program;

```
{*****
*****
* Include General System Parameters and Libraries *
*****
*****}
#include <main.h>;
#include <aux_dac.h>;
#include <pwmf32x.h>;
#include <trigono.h>;
#include <Mathfun.h>;
#include <pi.h>;
{*****
*****
* Constants Defined in the Module *
*****
*****}
.CONST Delta =0x148; {Angle increment 64 pr.rev}
.CONST TwoPiOverThree =0xffff/3; {Hex equivalent of 2pi/3 }
{*****
*****
* Local Variable Defind in this Module *
*****
*****}
#define PI_SF16 0
.VAR/RAM/PM/CIRC/SEG=USER_PM1 PI_Coef16[3];
.INIT PI_Coef16: 0xE00200,0x200100,0x7FFF00;
.VAR/RAM/DM/CIRC/SEG=USER_DM PI_Delay16[2];
```

```

.INIT PI_Delay16: 0x0000,0x0000;

.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM AD_IN;           {volt/herzt command (0-1)}
.INIT AD_IN : 0x6000;                     {Corresponds to 1.0  }

.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM SETUPTIME;
.INIT SETUPTIME :0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM PIODATA1_REF;
.INIT PIODATA1_REF :0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM delt;
.INIT delt :0x0000;

.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Theta;          {Current angle  }
.INIT Theta : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM soft;          {Soft start  }
.INIT Soft : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM VrefA;        {Voltage demand  }
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM VrefB;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM VrefC;
.INIT VrefA : 0x0000;
.INIT VrefB : 0x0000;
.INIT VrefC : 0x0000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM v;
.INIT v : 0x0;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM vref;
.INIT vref :0x000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM vmod;
.INIT vmod : 0x000;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Soft_start;
.INIT Soft_start : 0x0;
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Store;

```

```

.INIT Store : 0x0;

.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM v_boost;

.INIT v_boost : 0x000;

.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM SinCos[2];           {Sine Cosine Buffer   }
.VAR/DM/RAM/SEG=USER_DM Vabc[3];           {3 Phase Buffer     }

{*****}
*****}
{ Start of program code                       }
{*****}
*****}

Startup:

    write_auxdac_init;
    ax1=80{255};
    dm(auxTM0)=ax1;
    dm(auxTM1)=ax1;

    PWM_INIT(PWMSYNC_ISR,PWMTRIP_ISR);

    {ICNTL=0x03;}
    IFC = 0x80;           { Clear any pending IRQ2 inter.}
    ay0 = 0x0200;        { unmask irq2 interrupts.     }
    ar = IMASK;
    ar = ar or ay0;
    IMASK = ar;          { IRQ2 ints fully enabled here}

init_pi16(pi_delay16,0x0000);

Main:                               { Wait for interrupt to occur }

    jump Main;

    rts;

```

```
{*****  
*****}
```

```
{ PWM Interrupt Service Routine
```

```
}
```

```
{*****  
*****}
```

```
PWMSYNC_ISR:
```

```
{**** BOOST ****}
```

```
    set_DAG_registers_for_trigonometric;
```

```
ay0=dm(soft_start);ax0=0x7F00;
```

```
    ar=ax0-ay0;if LT af=pass ax0;
```

```
    ar=ax0-ay0;if GT af=pass ay0;
```

```
    ar=pass af;
```

```
dm(store)=ar;my1=dm(store);
```

```
ax0=0x2497;{0x2140}ay0=0x1D00;ar=ax0-ay0;
```

```
dm(vref)=ar;
```

```
ar=dm(adcaux);ay0=0x1D00;ar=ar-ay0;if LE ar=pass 0;
```

```
dm(v)=ar;
```

```
ax0=dm(vref);ay0=dm(v);
```

```
ena AR_SAT;ar=ax0-ay0;if LE ar=pass 0;dis AR_SAT;
```

```
Pi16(PI_Delay16, PI_Coeff16, PI_SF16);
```

```
ar=sr1;
```

```
my0=27000;mr=ar*my0(ss);
```

```
sr=lshift mr1 by 8(hi);
```

```

dm(vmod)=ar;

mr=ar*my1(ss);
ay0=mr1;ax0=30{120};
ar=ax0-ay0;if LT af=pass ax0;
ar=ax0-ay0;if GT af=pass ay0;
ar=pass af;

dm(v_boost)=ar;
write_auxpwm(auxch0,v_boost);
write_auxpwm(auxch1,v_boost);

ar=dm(soft_start);ay1=0x7F00;ar=ar-ay1;if GE jump pas;
ar=dm(soft_start);ar=ar+1;
dm(soft_start)=ar;jump pas1;
pas:
ax0=0x7F01;
dm(soft_start)=ax0;
pas1:
nop;

{****inverter****}
my0=0x7FFF{dm(AD_IN)};

mr=0; {Clear mr }
mr1=dm(Theta); {Preload Theta }
mx0={dm(delt)}Delta;
mr=mr+mx0*my0(ss); {Compute new angle & store }
dm(Theta)=mr1;

Sin(mr1); {Result in the ar register }

```

```
mr=ar*my0 (ss);           {Multiply by AD_IN for VrefA }  
{mr=mr1*my1(ss);}  
dm(VrefA)=mr1;
```

```
ax1=dm(Theta);           {compute angle for phase B }  
{mx0=TwoPiOverThree;my0=0x4000;mr=mx0*my0(SS);}  
ay1=TwoPiOverThree;  
ar=ax1-ay1;  
Sin(ar);                 {Result in the ar register }  
mr=ar*my0 (ss);         {Multiply by AD_IN for VrefB }  
{mr=mr1*my1(ss);}  
dm(VrefB)=mr1;
```

```
ax1=dm(Theta);           {Compute angle for phase C }  
ay1=TwoPiOverThree;  
ar=ax1+ay1;  
Sin(ar);                 {Result in the ar register }  
mr=ar*my0 (ss);         {Multiply by AD_IN for VrefC }  
{mr=mr1*my1(ss);}  
dm(VrefC)=mr1;
```

```
ax0=dm(VrefA);  
ax1=dm(VrefB);  
ay0=dm(VrefC);
```

```
PWM_update_demanded_Voltage(ax0,ax1,ay0);
```

```
nop;
```


rti;

```
{*****  
*****}
```

{ PWM Trip Interrupt Service Routine

}

```
{*****  
*****}
```

PWMTRIP_ISR:

nop;

rti;

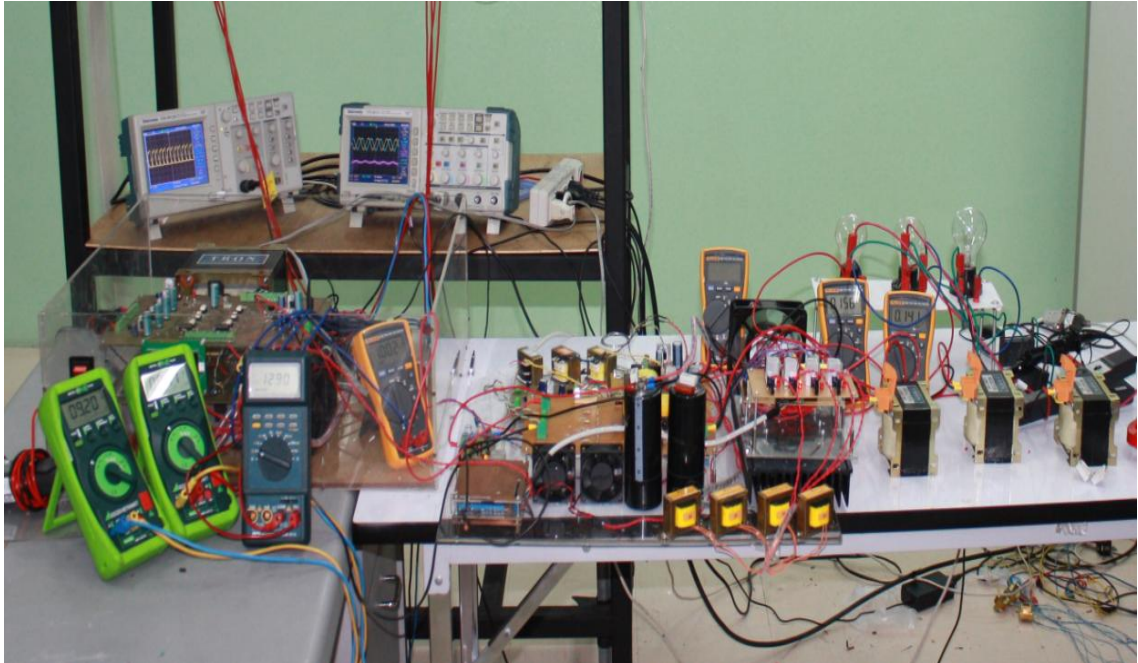
.ENDMOD;



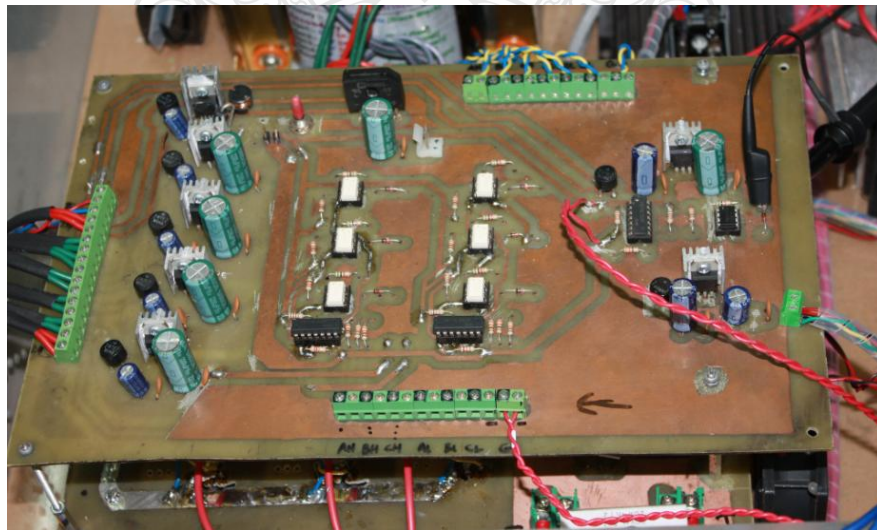
ภาคผนวก ค
เครื่องต้นแบบในงานวิจัย



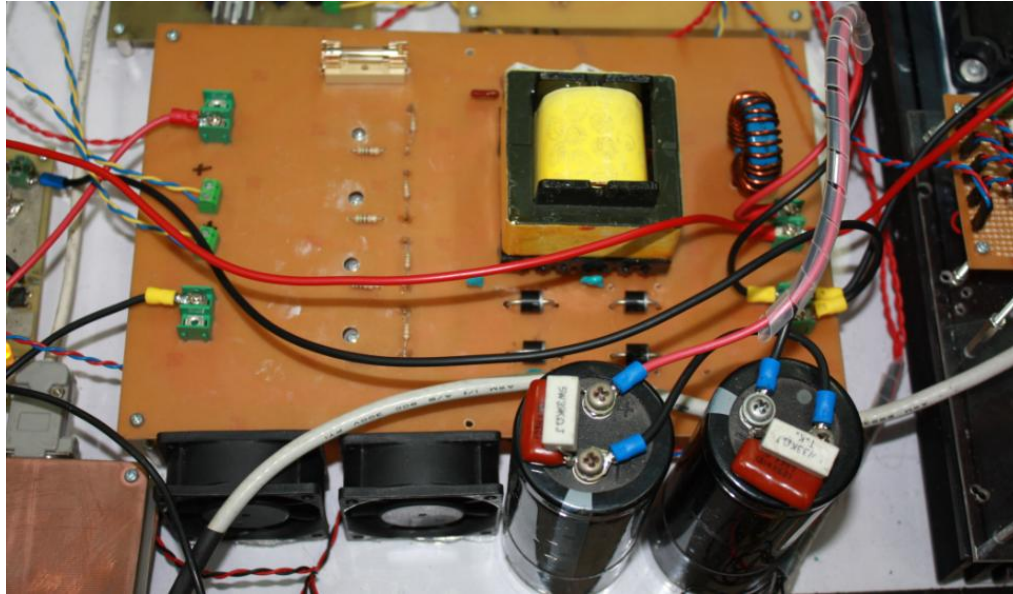
เครื่องต้นแบบในงานวิจัย



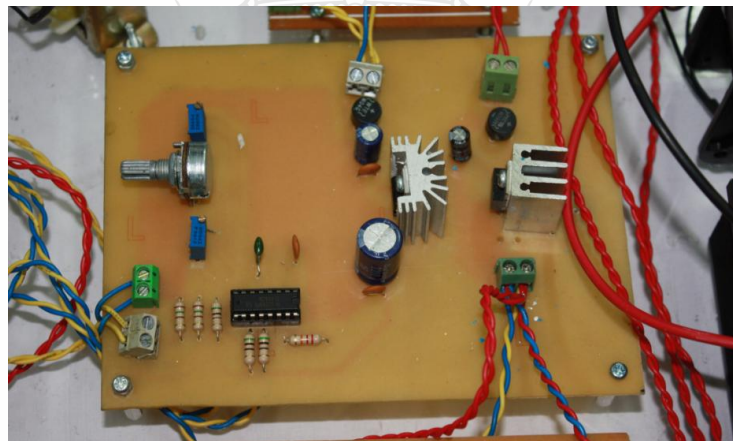
รูปที่ ค.1 ระบบโดยรวมเครื่องต้นแบบในงานวิจัย



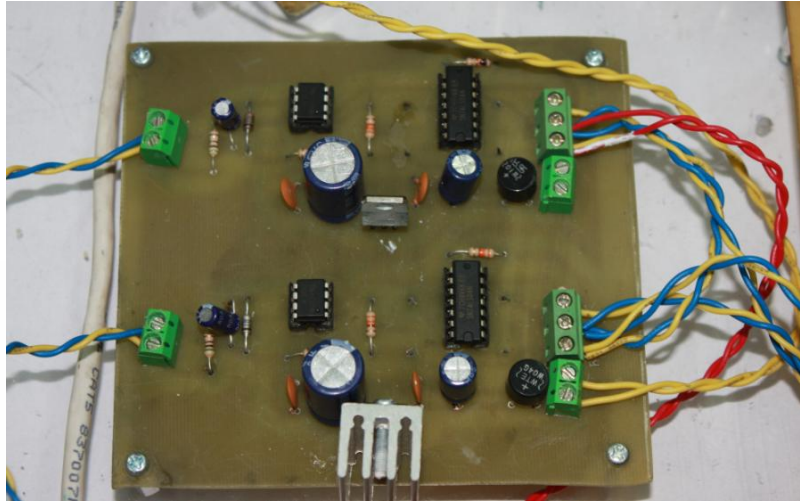
รูปที่ ค.2 วงจรภาคจ่ายไฟ และวงจรทบระดับ



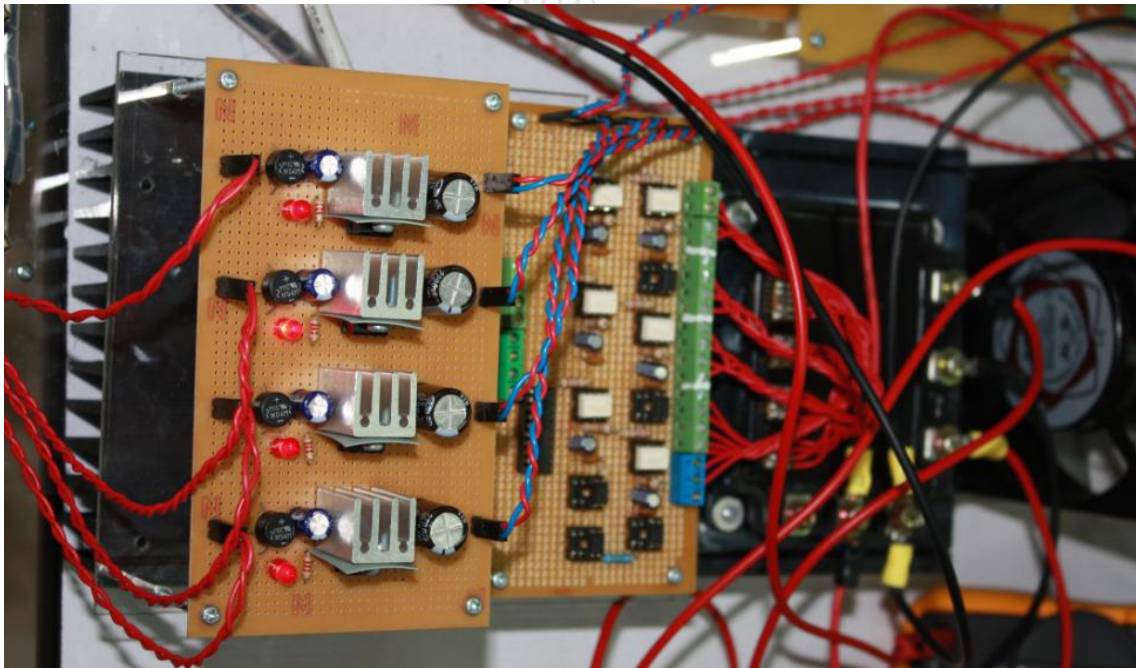
รูปที่ ก.3 วงจรพวง-พวงคอนเวอร์เตอร์



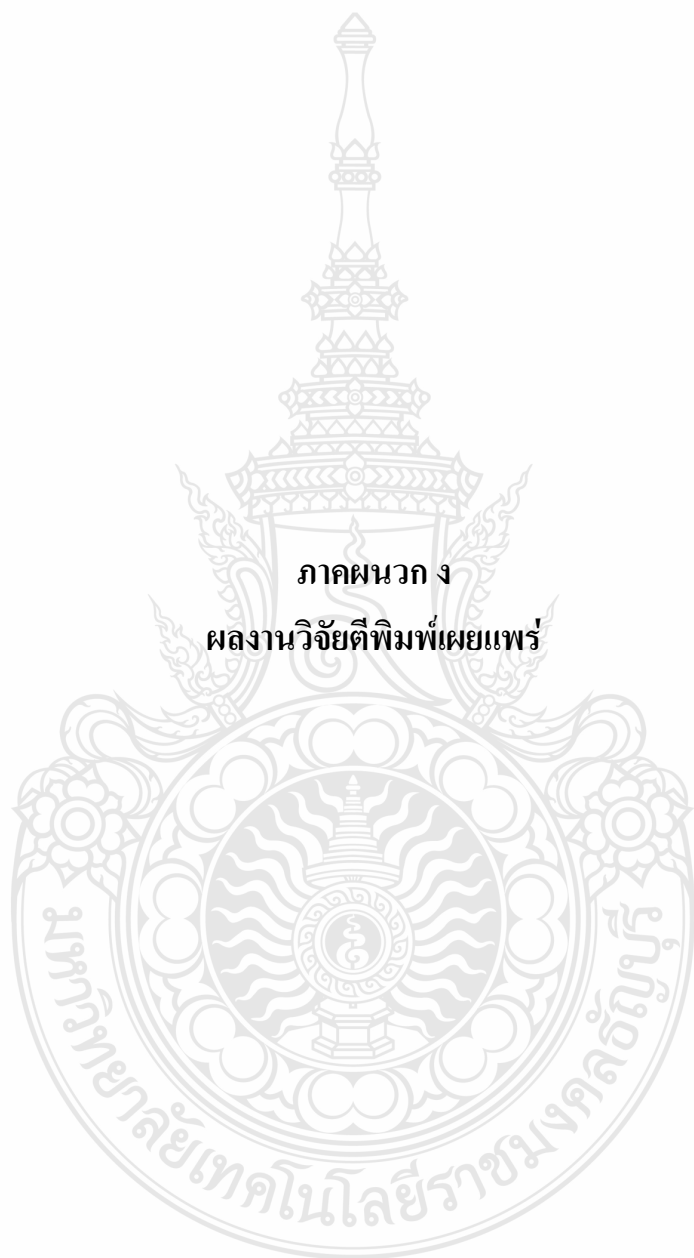
รูปที่ ก.4 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่ไปขับสวิทช์วงจรถ่วง-พวงคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ ค.5 วงจรขับสวิตช์ Mosfet



รูปที่ ค.6 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส



ภาคผนวก ง
ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

Proceedings

รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2



การประชุมสัมมนา “รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2”



สวทช.
NSTDA



วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร
จังหวัดพิษณุโลก

คณะกรรมการพิจารณาบทความ

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒนพงศ์ รัชนีวีเชียร
2. ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
3. ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา
4. ดร.วีระชัย โรชนรินทร์
5. ดร.อนุสรณ์ แสงประจักษ์
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี
8. คุณอำนวย ทองสถิตย์
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรจิตร์ พระเมือง
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทรินทร์ ดวนใหญ่
11. ดร. รวิภา ยงประยูร
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ สารสิทธิ์
13. ดร.เกษิณี หมั่นไธสง
14. รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ มัจฉาชีพ
15. รองศาสตราจารย์ ดร.มัทนี สงวนเสริมศรี
16. ดร.สุขฤดี สุขใจ
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ เกตุจ้อย
18. ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ
19. ดร.ประพิฑารีย์ ธนารักษ์
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรายุทธ วิทยุฉิม

ฝ่ายพิธีการและต้อนรับ

1. นาง พัชรินทร์ เขาวรัตน์
2. นางสาว อิชญา นาคโต
3. นางสาว นฤมล ดวงนامل
4. นางสาว ชนกวนัน ไยศิลา
5. นางสาว ทาริกา บุญพันธ์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทความสาขาเทคโนโลยีพลังงานชุมชน	
การเตรียมวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์จากแร่ลูโคซีนด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม <i>สรพงษ์ ภาสุปรีย์, มณฑิรชัย กลั่นบุบผา, กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ธนกร วิรุฬห์มามงคล, สมหมาย ผิวสะอาด, สิงห์โต สกุลเขมฤทัย, จูไรรัตน์ ดวงเดือน, นวตล เหล่าศิริพนธ์</i>	1
การเปลี่ยนความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเป็นพลังงานด้วยเครื่องยนต์สเตอร์ริง <i>ศุภวิทย์ ลวดะสกล, พิสิษฐ์ มณีโชติ</i>	11
การผลิตไบโอดีเซลจากถั่วเหลือง <i>ดุสิต บัวเกตุ</i>	19
การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมความเร็วต่ำสำหรับชุมชน กรณีศึกษาจังหวัดพิษณุโลก <i>อำพล สีดาดี, ทรายุทธ วัชรุฒิ</i>	27
การศึกษากังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้าขนาด 400 วัตต์ <i>วิรัช โยชนรินทร์, จักร์ ศรีนนท์ฉัตร, วารุณี อริยวิริยะนันท์, วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล</i>	37
การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตถ่านจากหญ้าฉนวนน้อย <i>อรทัย กลับบ้านเกาะ, พิสิษฐ์ มณีโชติ</i>	49
การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำความร้อนจากเตาเผาขยะขนาดเล็กสำหรับผลิตไฟฟ้า <i>ศุภวิทย์ ลวดะสกล, พิสิษฐ์ มณีโชติ</i>	57
การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวกลางพลาสติกและตัวกลางไม้ไผ่ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพระดับครัวเรือน <i>สภาพร วันเทวิน, ธนิตน์ เรืองรุ่งชัยกุล</i>	63
การศึกษาและวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง PEMFC 1.2 kW <i>ปนัดดา แสงแก้ว, บุญยั้ง ปลั่งกลาง</i>	71
แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร <i>वलันต์ เพชรพิมูล, ไพศาล บุญเยี่ยม, ประมุข อุณหเลขกะ, วารุณี ศรีสงคราม</i>	79

แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร
Modeling of Wind Turbine Driving Permanent Magnet Synchronous Generator

วสันต์ เพชรพิมูล¹ ไพศาล บุญเจียม¹ ประมุข อุณหเลขกะ² วารุณี ศรีสงคราม²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
โทรศัพท์ 0-2549-3571 E-mail: paisan.bc@en.rmutt.ac.th

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 1 kW โดยมีการออกแบบวงจรรวมทั้ง 3 ส่วน คือวงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทบทระดับ และวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสต่อเข้าระบบ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเชื่อมโยงคองที่ ใช้วงจรทบทระดับในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสให้มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออก ที่มีเสถียรภาพที่ดี ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB - SIMULINK เพื่อนำไปสู่การพัฒนาาระบบฮาร์ดแวร์ต่อไป

คำสำคัญ: กังหันลมผลิตไฟฟ้า; แม่เหล็กถาวร; วงจรเรียงกระแส; วงจรทบทระดับ และวงจรอินเวอร์เตอร์

Abstract

This paper presents modeling of wind turbine driving 1 kW Permanent magnet synchronous generator. The system design consists of 3 parts, namely rectifier circuit, boost converter and inverter. To control the DC voltage, boost converter is carried out the constant at the rating DC voltage. Inverter is AC-to-DC converter for generating the line voltage. Synchronous rectifier frame and PI control are used to control the wind turbine system by using MATLAB with Simulink. The results show that the control circuit and control the DC voltage with boost converter and AC voltage with inverter circuit. This development is the first of research. Next step will build up the hardware for observing the performance of the system.

Keywords: Wind turbine, Permanent Magnet, Rectifier circuit, Boost converter, Inverter circuit

1. บทนำ

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมปัจจุบันนี้ จำเป็นต้องพิจารณาความเร็วลมของแต่ละพื้นที่ เป็นสำคัญ เพื่อให้วิศวกรสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้อย่างถูกต้อง สำหรับการเพิ่มกำลังด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ลดเสียงรบกวนและองค์ประกอบอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากกังหันลม แต่การออกแบบที่ซับซ้อนจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมมีราคาแพงซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ต้องการ บทความนี้จึงทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีวงจรเรียงกระแส ประโยชน์ของการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรและวงจรเรียงกระแสเพราะมีประสิทธิภาพ

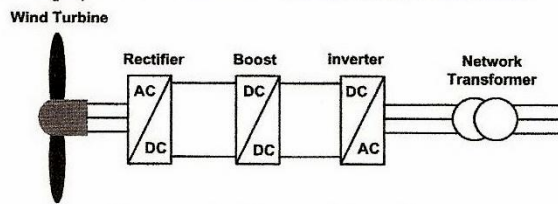
สูงและราคาถูก โครงการวิจัยนี้จะมุ่งไปที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 1 kW, 48 V, 400 rpm ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้สำหรับพื้นที่ๆ มีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 5-7 m/s

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งระบบที่พิจารณาในโครงการวิจัยนี้โครงสร้างหลักๆ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรเรียงกระแส วงจรทระดับแรงดัน และวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 ประโยชน์ของการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่ต่อกับวงจรเรียงกระแสดังที่กล่าวมาแล้วนั้น เพราะการสูญเสียต่ำและราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น การใช้วงจรเรียงกระแสทำให้กระแสอาร์เมเจอร์มีค่าตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำอาจจะต้องการกระแสสูงเพื่อไปสร้างกระแสสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

องค์ประกอบของบทความนี้ประกอบด้วย ส่วนแรกเราจะกล่าวถึงระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรต่อมาส่วนประกอบต่างๆ พร้อมทั้งอธิบายแบบจำลองเชิงสมการแกนหมุน (Rotating reference frame) และแกนนิ่ง (Stationary reference frame) ส่วนที่สามจะกล่าวถึงการออกแบบ ผลการทำสอบ และสุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะ

2. กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรถูกต่อโดยตรงกับกังหันผลิตไฟฟ้า โดยเงื่อนไขทางกลอย่างง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมหรือระบบที่มีเกียร์บ็อกซ์ที่ทำให้น้ำหนักเพิ่ม กำเนิดเสียงดังรบกวนเมื่อระบบกำลังทำงาน จำเป็นต้องบำรุงรักษาและเพิ่มค่ากำลังสูญเสีย การบำรุงรักษา ระบบเกียร์บ็อกซ์มีความยุ่งยากเพราะ nacelle ถูกติดตั้งตำแหน่งสูงสุดของเสา และมีปัญหาเรื่องวัสดุที่นำมาสร้างและอายุการใช้งานของลูกปืน เงื่อนไขดังกล่าวสามารถละเลยได้เมื่อนำมาใช้กับระบบที่ไม่มีเกียร์บ็อกซ์ เสียงที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากการเคลื่อนของเพลลาบ้างซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้ และประสิทธิภาพพร้อมกับความน่าเชื่อถือสามารถแสดงได้โดยการลดน้ำหนักและเพิ่มการบำรุงรักษาระบบ อย่างไรก็ตามระบบกำเนิดไฟฟ้าจากกังหันลมจะควบคุมกำลังสูงสุดได้ยากเมื่อความเร็วของลมเปลี่ยนแปลงตลอด



รูปที่ 1: ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่นำเสนอ

เมื่อพิจารณากำลังและแรงบิดเชิงกลที่สร้างจากกังหันลมดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) [1]

$$P_m = \frac{1}{2} C_p r \rho R^2 u^3 \quad (1)$$

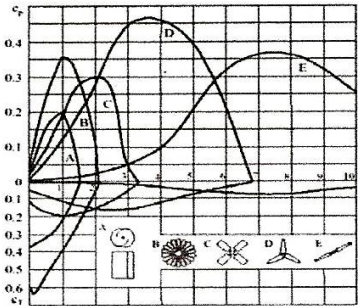
$$T_m = \frac{1}{2} C_T r \rho R^3 u^2 \quad (2)$$

เมื่อ P_m , T_m คือ กำลังและแรงบิดเชิงกลที่ถูกสร้างจากกังหันลมตามลำดับ, ρ คือ ความหนาแน่นของลม (Kg/m^3), R คือ รัศมีของใบพัด (m), u คือ ความเร็วของลม และ C_p , C_T คือ สัมประสิทธิ์ของกำลังและแรงบิดของกังหันลมตามลำดับ เมื่อความเร็วของลมเปลี่ยน ความเร็วเชิงมุมของเพลลา ω_m ถูกปรับเพื่อให้ได้ค่า C_p ที่เหมาะสมที่สุด นั่นหมายถึง ω_m และ ความเร็วลมจะหลอมรวมเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรเดียว และ

สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_p และ ω_m ได้ สำหรับตัวแปรเดียวนี้ถูกเรียกว่าอัตราส่วนของความเร็วจุดปลายสุด $R\omega_m$ ต่อความเร็วลม u อัตราส่วนความจุปลายสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\lambda = \frac{R\omega_m}{u} \tag{3}$$

เมื่อ ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของเพลากังหันลม (red/sec) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_T และ λ สำหรับแต่ละชนิดของกังหันลมแสดงได้ในรูปที่ 2 [2] จากสมการที่ (3) ค่า C_p และ C_T เป็นฟังก์ชันของ λ โดยมีความสัมพันธ์ คือ $C_T = C_p / \lambda$ จากรูปที่ 2 เราจะเลือกชนิดของกังหันที่ให้กำลังออกมาสูงสุด ดังนั้นในการจำลองการทำงานที่ความเร็วต่างกัน ความเร็วเชิงมุมควรจะถูกควบคุมให้ทำงานที่ค่า λ ใกล้เคียง 3.8 (จากกราฟ กังหันลมชนิด D ถูกเลือก) โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จะจ่ายไปที่โหลด การควบคุมอัตราส่วนคาบเวลาของวงจรถบระดับ และดัชนีการมอดูเลชั่น ของอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้ซึ่งอธิบายในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2: ความสัมพันธ์ของระหว่าง C_p , C_T และ λ ของกังหันลมต่างๆ

2. ส่วนประกอบของระบบ (System Components)

การจำลองการทำงานของระบบจะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink [3] และจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีองค์ประกอบหลักๆ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรถบระดับ และวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG)

สมการทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่อ้างอิงกันนี้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \tag{4}$$

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \tag{5}$$

เมื่อ v คือ แรงดันไฟฟ้าต้านออก, i คือกระแสไฟฟ้าต้านออก, ψ คือ เส้นแรงแม่เหล็กค้ำ, R คือความต้านทาน, ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ตัวย่อย d และ q คือองค์ประกอบอ้างอิงสำหรับแกนนิ่งตามลำดับ [4] และ s คือสเตเตอร์ ค่าทั้งหมดจะแสดงในหน่วยต่อยูนิต (per unit) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าต่อยูนิตสามารถหาได้ใน [5] เส้นแรงแม่เหล็กค้ำ สามารถหาได้จาก

$$\psi_{qs} = (L_{qm} + L_{qs}) i_{qs} \tag{6}$$

$$\psi_{ds} = (L_{dm} + L_{ds}) i_{ds} + \psi_f \tag{7}$$

เมื่อ ψ_f คือ เส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเพื่อที่จะวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย สภาวะชั่วคราวจะละเอียด [1] ดังนั้นสมการที่ (6) และ (7) สามารถนำไปแทนลงในสมการที่ (4) และ (5) ได้ ดังนี้

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m (L_{dm} + L_{\sigma s}) i_{ds} + \omega_m \psi_f \quad (8)$$

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m (L_{qm} + L_{\sigma s}) i_{qs} \quad (9)$$

เมื่อ L_{qm} , L_{dm} คือค่าความเหนี่ยวนะรวมในแกน q และ d ตามลำดับ และ $L_{\sigma s}$ คือ ความเหนี่ยวนา รั่วไหลในสเตเตอร์ แรงบิดในช่องอากาศ T_{ag} สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{ag} = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} = \psi_f i_{qs} + (L_{dm} - L_{qm}) i_{qs} i_{ds} \quad (10)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร สามารถแสดงได้ ดังนี้

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (11)$$

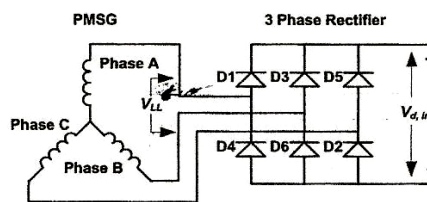
$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (12)$$

2.2 วงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส (Three-phase diode rectifier)

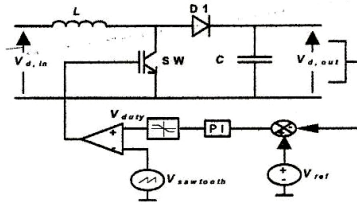
วงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอดเป็นวงจรรอง่าย ราคาถูก และใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ข้อเสียของไดโอดมันไม่สามารถให้กำลังไฟฟ้าไหลได้สองทางได้ แรงดันต้านออกของ วงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (13) โดยละเอียดเงื่อนไขการ overlap กัน

$$V_{d.in} = \frac{3\sqrt{2}V_{LL}}{\pi} \quad (13)$$

เมื่อ $V_{d.in}$ คือ แรงดันต้านออกของวงจรเรียงกระแส หรือแรงดันต้านเข้าวงจรทระดับ V_{LL} คือ แรงดันสายต้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3: วงจรเรียงกระแสสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4: วงจรทบทระดับ

2.3 วงจรทบทระดับ (Boost Converter)

รูปที่ 4 แสดงวงจรทบทระดับแรงดันและการควบคุม ซึ่งวงจรมีแรงดันด้านออกปกติจะมากกว่าแรงดันด้านเข้าเสมอ วงจรทบทระดับจะควบคุมแรงดันด้านออกโดยใช้การควบคุมคาบเวลาการสวิตช์เมื่อแรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าและแรงดันด้านออก และกระแสของวงจรทบทระดับสามารถแสดงได้สมการสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{V_{d,out}}{V_{d,in}} = \frac{1}{1-D} \quad (14)$$

เมื่อ $V_{d,out}$ คือ แรงดันด้านออกของวงจรทบทระดับ D คือ อัตราส่วนคาบเวลา $I_{d,in}, I_{d,out}$ คือ กระแสด้านเข้าและด้านออกของวงจรทบทระดับตามลำดับ อัตราส่วนคาบเวลาที่ต้องการสำหรับเงื่อนไขการทำงานกระแสต่อเนื่อง (Continuous Mode) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (15)

$$D = 1 - \left(\frac{V_{d,in}}{V_{d,out}} \right) \quad (15)$$

แรงดันด้านออกของวงจรทบทระดับในเทอมของแรงดันด้านเข้าและอัตราส่วนคาบเวลาแสดงได้ในสมการที่ (16)

$$V_{d,out} = \frac{V_{d,in}}{(1-D)} \quad (16)$$

รูปคลื่นในสภาวะคงตัวของแรงดันและกระแสในตัวเหนี่ยวนำในโหมดการทำงานกระแสต่อเนื่อง [$i_L(t) > 0$] ค่าระลอกของแรงดันด้านออก $\Delta V_{d,out}$ ในโหมดกระแสต่อเนื่องสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta V_{d,out} = \frac{I_{d,out} D}{C f_{sb}} \quad (17)$$

เมื่อ C คือ ตัวเก็บประจุของวงจรทบทระดับ f_{sb} คือ ความถี่การสวิตช์ของวงจรทบทระดับ

2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการสวิตช์แบบปรับความกว้างของพัลส์ถูกค้นพบครั้งแรกตั้งแต่ปี 1964 [7] การควบคุมแบบนี้จะประมวลผลภายใต้เงื่อนไขความถี่การขับนำสวิตช์ (f_s) และอัตราส่วนความถี่ของสัญญาณคำสั่ง และอัตราส่วนแรงดันด้านเข้าและด้านออก บางครั้งเรียกว่าดัชนีการมอดูเลชัน (m_a) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (18)

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{\hat{V}_{LLC}}{V_{d,out}} \quad (18)$$

เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุม \hat{V}_{tri} คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม อัตราส่วนมอดูเลชันความถี่ m_f แสดงได้ดังนี้

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (19)$$

เมื่อ f_s คือ ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ f_1 คือ ความถี่หลักมูล การควบคุมแรงดันด้านออก จะพยายามลดส่วนของแรงดันผิดเพี้ยนจากแรงดันคำสั่ง ค่าความผิดเพี้ยนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า m_a อยู่ในย่าน over-modulation ($m_a > 1$) ในย่านเชิงเส้น ($m_a < 1$) ส่วนประกอบความถี่หลักมูลของแรงดันด้านออกจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นตาม m_a ดังแสดงในสมการที่ (18) แรงดันด้านออกที่ความถี่หลักมูลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{LLC} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} (m_a V_{d,out}) \quad (20)$$

แทนค่าสมการที่ (16) ลงในสมการที่ (20) จะได้

$$V_{LLC} = m_a \left[\frac{\sqrt{3} V_{d,in}}{2\sqrt{2}(1-D)} \right] \quad (21)$$

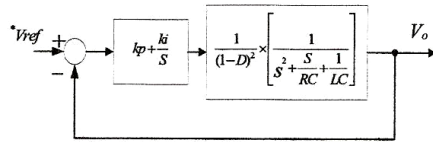
3. การออกแบบ

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด กำลังไฟฟ้า 1 kW แรงดัน 48 V ที่ความเร็ว 400 rpm โดยงานวิจัยนี้กำหนดแรงดันด้านเข้า 48 V แรงดันด้านออก 100 V ที่ค่าระลอกแรงดัน 10 % ที่ความถี่สวิตช์ 10 kHz เราสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างของวงจรระดับได้จากสมการที่ (22) และ (23) ตามลำดับ

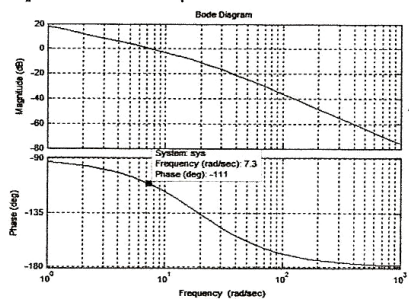
$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (22)$$

$$C = \frac{D}{Rf_s \frac{\Delta v}{v}} \quad (23)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (22) และ(23) จะได้ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบคือ $L = 60 \mu F$ $C = 5,200 \mu F$ $R = 10 \Omega$ $D = 0.52$ โดยระบบจะควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดังรูปที่ 5 ในการหาค่า k_p k_i โดยการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอ ด้วย Ziegler-Nichols โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากกราฟผลตอบสนองจะได้ $k_p = 156$ $k_i = 0.5$ และจะได้แผนภาพโบลด์ดังรูปที่ 6



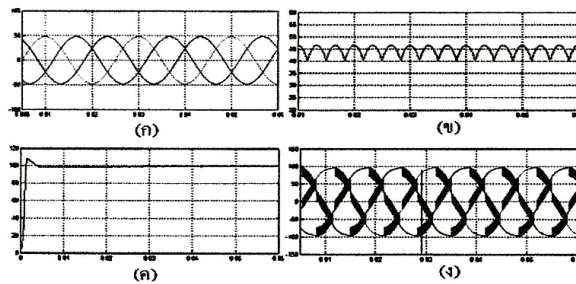
รูปที่ 5: ระบบควบคุมแรงดันของวงจรทระดับ



รูปที่ 6: แผนภาพโบลด์ของระบบควบคุมวงรอบเปิดที่ได้ทำกาออกแบบ

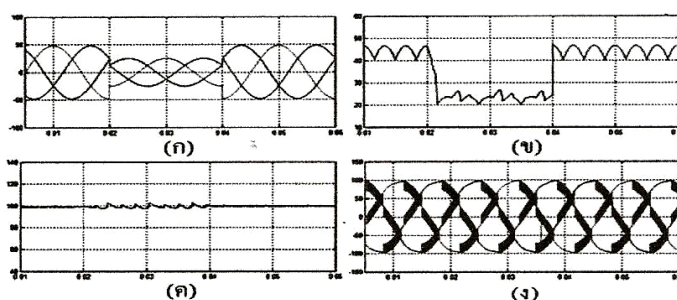
4. ผลการจำลอง

กรณีที่ 1 การจำลองที่แรงดันอินพุตที่จำลองจากกังหันลมที่มีแรงดันคงที่ ที่ 48V จากผลการทดลองรูปที่ 7 (ก) แรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่สภาวะแรงดันด้านเข้าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 7 (ข) แรงดันของวงจรเรียงกระแสเมื่อแรงดันด้านเข้าคงที่ รูปที่ 7 (ค) แรงดันด้านออกของวงจรทระดับเมื่อสภาวะแรงดันอินพุตคงที่ รูปที่ 7 (ง) แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 7: สัญญาณต่างๆ ของกรณีที่ 1 (ก) แรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่สภาวะแรงดันด้านเข้าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (ข) แรงดันของวงจรเรียงกระแสเมื่อแรงดันด้านเข้าคงที่ (ค) แรงดันด้านออกของวงจรทระดับเมื่อสภาวะแรงดันอินพุตคงที่ (ง) แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

กรณีที่ 2 ผลการทดลองที่แรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน รูปที่ 8 (ก) เป็นแรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยที่แรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน รูปที่ 8 (ข) แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส โดยที่แรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน รูปที่ 8 (ค) แรงดันด้านออกของวงจรทระดับ โดยที่แรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน จะเห็นว่าช่วงที่แรงดันเกิดการเปลี่ยนแปลงจะเกิดการกระเพื่อมของแรงดันแต่ระบบยังสามารถควบคุมให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ รูปที่ 8 (ง) แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยที่แรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ซึ่งจะเห็นว่าแม้ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้าของระบบอย่างฉับพลันจะเห็นว่าแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ยังมีแรงดันด้านออกตามที่ออกแบบไว้ได้



รูปที่ 8: สัญญาณต่างๆ ของกรณีที่ 2 (ก) เป็นแรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสสามเฟส (ข) แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส (ค) แรงดันด้านออกของวงจรทระดับ (ง) แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

5. สรุป

แบบจำลองและผลการจำลองการทำงานของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่วิเคราะห์ในโครงการวิจัยนี้เป็นระบบที่มีราคาถูก และประสิทธิภาพการทำงานสูง น้ำหนักเบา ระบบที่นำเสนอจะได้อำนาจด้านออกสูงสุดเมื่อเลือกค่า C_p ที่เหมาะสม การควบคุมจะใช้วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ และให้วงจรอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแรงดันให้เป็นแรงดันไฟฟ้าใช้งาน การทำงานทั้งหมดมีเสถียรภาพสูงที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลง และขาดมือนิกิต่ำ

6. บรรณานุกรม

- [1] Johnson, G. L., 2001, *Wind Energy Systems*. England Cliffs: Prentic-Hall.
- [2] Mohan, N.; Undeland, T. and Robbins, W., 2003, *Power Electronics Converters, Application and Design*. New York: John Wiley & Sons.
- [3] Schonung, A. and Stemmler, H., 1964, "Static Frequency Changer with Sub-harmonics Control in Conjunction with Reversible Variable Speed ac Drives." *BBC Review*, Aug./Sep.
- [4] Nacfaire, H., 1988, *Grid Connected Wind Turbines*. London and New York: Elsevier Applied Science.
- [5] Eltamaly, Ali M., 2003, "A New Relation between Firing Angle of Three-phase SCR Converter and Best Reinjection Current Angle." *The 9th International Middle East Power Systems Conference, MEPCON'2003*, Shebin El-Kom, Egypt, Dec., 793- 798.
- [6] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราริ์เศรษฐ์, 2547, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" พิมพ์ครั้งที่ 2, วี.เจ. พรินติ้ง.

EENET 2010

- Chiangmai Thailand



การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2



EENET
2010
CHIANGMAI

5 - 6 กุมภาพันธ์ 2553 ณ อาคารหอสมุด
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
 วิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2



ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
เกษม	ศรีภาค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย
เกษม	เนื้อแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
กิตติพงษ์	กิมะพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กฤษณ์ชนม์	ภูมิกิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กฤษดา	ยิ่งขยัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ
กิตติวงศ์	สุธรรมโน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ก่อเกียรติ	อัครทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
โกศล	โอฬาร ไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ
ขอบคุณ	ไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เจษฎา	พรหมเกษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เดิมศักดิ์	แสนเพียง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ไพศาล	บุญเยี่ยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พินิจ	จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
จงเจริญ	คุ้มบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
จตุรงค์	จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครศูนย์พระนครเหนือ
จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
จัตตุฤทธิ์	ทองปรอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ
จักรชัย	สุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ชัยณรงค์	วิเศษศักดิ์วิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชาญชัย	ดชาธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ
ชาญฤทธิ์	ธาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชลากร	สุวรรณสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ
ขวัญชัย	เอื้อวิริยานุกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ
มานะ	ทะนะอัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
ชูศักดิ์	กมลขันดิษฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ฉรงค์	นันทกุศล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ

วิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2



ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
ณรงค์ฤทธิ์	พิมพ์คำวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
ณัฐวุฒิ	โสมะเกษตริรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ณัฐวุฒิ	พานิชเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
คูสิต	อุทิศสุนทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ทง	ลานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครศูนย์พระนครเหนือ
ทัศนະ	ถมทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
ธงชัย	คล้ายคลึง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ธนพงศ์	คุ้มญาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
ธนวัฒน์	ฉลาดสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครศูนย์พระนครเหนือ
ธนวัฒน์	พันธ์คู่ย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย
ธวัช	เกศิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ธีระศักดิ์	สมศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ธวัชชัย	สิมมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ธีระพล	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นคร	ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ
นครินทร์	ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นราวิทย์	กิจเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นรินทร์	หลักทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นิติพงษ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นิธิโรจน์	พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นิพนธ์	สุนทรหุด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
นิพนธ์	เรืองวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นิพนธ์	วงศ์ทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ
บุญช่วย	เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
บัลลังก์	เนียมมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
 วิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2



ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
บุญตั้ง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปรีชา	มหาไม้	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
ประเสริฐ	พี่น้องหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ประเสริฐ	หาชานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประทีป	แสงคิ้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
ประมุข	อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี
ประวิช	เปรียบเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ปราโมทย์	อนันต์วราพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
พงษ์ศักดิ์	อำภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พิเชษฐ	กันทะวัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงใหม่
พิสิทธิ์	ถวัลญกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พันธ์	พิริยะวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
พิชัย	อยู่เปล่า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
พินิจ	จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พิสิทธิ์	สุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
พูนศรี	วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครศูนย์พระนครเหนือ
ภาณุมาศ	แสนพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
มนตรี	เงาเดช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
มังกร	ศิริจันทร์ชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
มาณฑ	ธนะคำดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
มัชย	แจ่มใส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ยุทธนา	จำสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
ยุทธนา	กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี
ยงอุทธ	นารายณ์	มหาวิทยาลัยสยาม



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
วิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2



ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
รัก	สกุลพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เวคิน	ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
วัฒนา	แก้วมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วันชัย	ทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิเชียร	หทัยรัตน์ศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิโรจน์	เพชรพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิชัย	ศุภศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิจิต	สุทธิพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
วินัย	จันทร์เพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วินัย	เมธาวิตถ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิรัตน์	นักรรองดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
วิฑูรย์	พรหมมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย
วิวัฒน์	เจริญสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วีระ	ชันษาภิรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
วิรัช	กองสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
วิวัฒน์	ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย
วีระชัย	จรบูรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
วารุณี	ศรีสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี
ศรีศักดิ์	น้อยไรรุณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครศูนย์พระนครเหนือ
ศักดิ์ระวี	ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศิริชัย	แดงอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศิริชัย	ลาภาสระน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ศุภวดี	เนตร โพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครศูนย์พระนครเหนือ
สถาพร	ศิริดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
สมเกียรติ	ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครศูนย์พระนครเหนือ
สมบัติ	สันกว้าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
 วิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2



ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
สมชัย	หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมชาย	เบียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมนึก	เครือสอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
สยาม	ประจูดะศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สรรรพด	คุ้มทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สันติภาพ	โคตรทะเล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
สาคร	ปิ่นดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
สามารถ	ยะเชียงคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
สรพงษ์	ภวสุปรีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สาชชล	ชูดเจือจิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สุวรรณณี	พิทักษ์วินัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
สุชุม	จุฬางศุรศิริระรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุชาติ	จันทร์จรมานิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
สุทธินันท์	ตัน โปธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สุรศักดิ์	อยู่สวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
สุรสิทธิ์	แสนทอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
สุรินทร์	แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สุจิตรา	จินะวงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงใหม่
สุริยา	แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุวัลยา	ศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เอกกฤษณ์	สมุนพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
อโนชา	รุ่งโรจน์วัฒนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
องอาจ	แสคใหม่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อนันต์	โสภณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เอกพล	อนุสุเรนทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เอกวิทย์	หายักวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
 วิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2



ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
อนนท์	นำอินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
อัศวิน	แก้วสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
อาภาพล	มหาวีระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อำนาจ	เรืองวาริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อุเทน	คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
อุดม	เครือเทพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
อุรา	คันมีแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร



กลุ่มที่ EN 4: พลังงาน 04

วันเสาร์ที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553, เวลา 13.00-14.00 น. ห้อง: Study room 1 อาคารหอสมุด

ประธานควบคุมการบรรยาย ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รองประธานควบคุมการบรรยาย อ. วันไชย ก้าเสน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

EN4-1 13.00น. เรื่อง การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก

ผู้แต่ง อรรถกัมภ์ หนูนทร์พิศ¹ นิพนธ์ เกตุชัย² และ สหิศา ลาดปลาชะ³

หน้า 297¹ 'วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยธนบุรี'

EN4-2 13.20น. เรื่อง แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบแม่เหล็กถาวร

ผู้แต่ง วสันต์ เพชรพิมุข¹ กฤษณ์ชนม์ อุภักดีพิชญ์¹ วิรัช โรตยวินทร์² ประมุข ตูยทะเลชะ² และ

หน้า 300 วาภูมิ ศรีสงคราม³

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

EN4-3 13.40น. เรื่อง เครื่องกำเนิดกังหันลมหัวลมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมและแสดงผลด้วยเรดิโออินเตอร์เฟซ DS1104

ผู้แต่ง ชาญฤทธิ์ อาราสันติสุข¹ บุญช่วย เจริญผล² และ นพรัตน์ บ่วงคุ้ม¹

หน้า 304¹ 'สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ'

EN4-4 14.00น. เรื่อง ระบบควบคุมแหล่งจ่ายพลังงานแบบผสมผสานในรถจักรยานยนต์

ผู้แต่ง ชุนแผน ปฏิมาประกร¹ ประวิช เปรียบเหมือน¹ สักดิ์ระวี ระวีกุล² และ เกษม เนื้อแก้ว³

หน้า 310¹ 'สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน'

แบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

Modeling of Wind Turbine Driving Permanent Magnet Synchronous Generator

วสันต์ เพชรพิบูล¹, ถนอมชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์¹, วิรัชช์ โรยนรินทร์¹, ประมุข อุณหเลขกะ² และวารุณี ศรีสงคราม³¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-3571

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 0-2549-3571

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 1 kW โดยมีการออกแบบวงจรรวมทั้ง 3 ส่วน คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรทบทระดับ และวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสต่อเข้าระบบ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเชื่อมโยงคั้งที่ใช้วงจรทบทระดับในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คั้งที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสให้มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออก ที่มีเสถียรภาพที่ดี ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB - SIMULINK เพื่อนำไปสู่การพัฒนาฮาร์ดแวร์ต่อไป

คำสำคัญ: กังหันลมผลิตไฟฟ้า, แม่เหล็กถาวร, วงจรเรียงกระแส, วงจรทบทระดับ และวงจรอินเวอร์เตอร์

Abstract

This paper presents modeling of wind turbine driving 1 kW Permanent magnet generator. The system design consists of 3 parts, namely rectifier circuit, boost converter and inverter. To control the DC voltage, boost converter is carried out the constant at the rating DC voltage. Inverter is AC-to-DC converter for generating the line voltage. Synchronous rectifier frame and PI control are used to control the wind turbine system by using MATLAB with Simulink. The results show that the control circuit and control the DC voltage with boost converter and AC voltage with inverter circuit. This development is the first of research. Next step will build up the hardware for observing the performance of the system.

Keywords: Wind turbine, Permanent Magnet, Rectifier circuit, Boost converter, Inverter circuit

1. บทนำ

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมปัจจุบันนี้จำเป็นต้องพิจารณาความเร็วลมของแต่ละพื้นที่เป็นสำคัญ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้อย่างถูกต้อง สำหรับการเพิ่มขีดความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ลดเสียงรบกวนและองค์ประกอบอื่น ๆ

ที่เกิดขึ้นจากกังหันลม แต่การออกแบบที่ซับซ้อนจะเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมมีราคาแพงซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ บทความนี้เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีวงจรเรียงกระแสประโยชน์ของการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรและวงจรเรียงกระแสเพราะมีประสิทธิภาพสูงและราคาถูก โครงการวิจัยนี้จะมุ่งไปที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 1 kW, 48 V, 400 rpm ที่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับพื้นที่ที่มีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 5-7 m/s

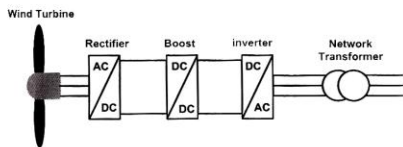
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งระบบที่พิจารณาในโครงการวิจัยนี้โครงสร้างหลักประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรเรียงกระแส วงจรทบทระดับ และวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 ประโยชน์ของการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่ต่อกับวงจรเรียงกระแสที่กล่าวมานั้น เพราะการสูญเสียต่ำและราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้คั้งกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น การใช้วงจรเรียงกระแสทำให้กระแสแกนแม่เหล็กมีค่าตัวประกอบกำลังเข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหนึ่งนี้อาจจะต้องการกระแสสูงเพื่อไปสร้างกระแสสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

องค์ประกอบของบทความนี้ประกอบด้วย ส่วนแรกจะกล่าวถึงระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้คั้งกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรต่อมาส่วนประกอบต่างๆ พร้อมทั้งอธิบายแบบจำลองเชิงสมการแกนหมุน (Rotating reference frame) และคั้ง (Stationary reference frame) ส่วนที่สามจะกล่าวถึงการออกแบบ การทดสอบ และสุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะ

2. ส่วนประกอบของระบบ (System Components)

การจำลองการทำงานของระบบจะใช้โปรแกรม MATLAB Simulink [3] และจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีองค์ประกอบหลักๆ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรปรับระดับ และวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 1 ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่นำเสนอ

เมื่อพิจารณากำลังและแรงบิดเชิงกลที่สร้างจากกังหันลมแสดงในสมการที่ (1) และ (2) [1]

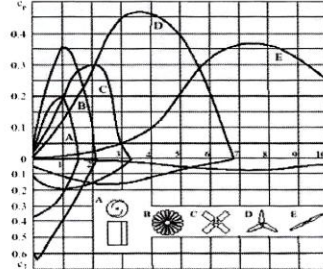
$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho r p R^3 u^3 \quad (1)$$

$$T_m = \frac{1}{2} C_T \rho r p R^3 u^2 \quad (2)$$

เมื่อ P_m , T_m คือ กำลังและแรงบิดเชิงกลที่ถูกสร้างจากกังหันลมตามลำดับ, ρ คือ ความหนาแน่นของลม (Kg/m^3), R คือ รัศมีของใบพัด (m), u คือ ความเร็วของลม และ C_p , C_T คือ สัมประสิทธิ์ของกำลังและแรงบิดของกังหันลมตามลำดับ เมื่อความเร็วของลมเปลี่ยนความเร็วเชิงมุมของเพลา ω_m ถูกปรับเพื่อให้ได้ค่า C_p ที่เหมาะสมที่สุดนั้นหมายถึง ω_m และ ความเร็วลมจะหลอมรวมเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรเดียว และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_p และ ω_m ได้ สำหรับตัวแปรเดียวนี้ถูกเรียกว่าอัตราส่วนของความเร็วจุดปลายสุด $R\omega_m$ ต่อความเร็วลม u อัตราส่วนความเร็วจุดปลายสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\lambda = \frac{R\omega_m}{u} \quad (3)$$

เมื่อ ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของเพลา (rad/sec) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_p , C_T และ λ สำหรับแต่ละชนิดของกังหันลมแสดงได้ในรูปที่ 2 [2] จากสมการที่ (3) ค่า C_p และ C_T เป็นฟังก์ชันของ λ โดยมีความสัมพันธ์คือ $C_T = C_p / \lambda$ จากรูปที่ 2 เราจะเลือกชนิดของกังหันที่ให้กำลังออกมาสูงสุด ดังนั้นในการจำลองการทำงานที่ความเร็วต่างกัน ความเร็วเชิงมุมควรจะถูกควบคุมให้ทำงานที่ค่า λ ใกล้เคียง 3.8 (จากกราฟ กังหันลมชนิด D ถูกเลือก) โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จะจ่ายไปที่โหลด การควบคุมอัตราส่วนเวลาของวงจรถบระดับ และดัชนีการมอดูเลชันของอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้ซึ่งอธิบายในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของระหว่าง C_p , C_T และ λ ของกังหันลมต่างๆ

2.2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG)

สมการทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่อ้างอิงกันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (4)$$

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (5)$$

เมื่อ v คือ แรงดันไฟฟ้าด้านนอก, i คือกระแสไฟฟ้าด้านนอก, ψ คือ เส้นแรงแม่เหล็กค้ำ, R คือความต้านทาน, ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ตัวอักษร d และ q ก็คือทั้งประกอบอ้างอิงสำหรับแกนนิ่งตามลำดับ [4] และ s คือสแตเตอร์ ค่าทั้งหมดจะแสดงในหน่วยต่อยูนิท (per unit) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าต่อยูนิทสามารถหาได้ใน [5] เส้นแรงแม่เหล็กค้ำ สามารถหาได้จาก

$$\psi_{qs} = (L_{qm} + L_{\sigma s}) i_{qs} \quad (6)$$

$$\psi_{ds} = (L_{dm} + L_{\sigma s}) i_{ds} + \psi_f \quad (7)$$

เมื่อ ψ_f คือ เส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเพื่อที่จะวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างง่าย สภาวะชั่วคราวจะละเลย [1] ดังนั้นสมการที่ (6) และ (7) สามารถนำไปแทนลงในสมการที่ (4) และ (5) ได้ดังนี้

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m (L_{dm} + L_{\sigma s}) i_{ds} + \omega_m \psi_f \quad (8)$$

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m (L_{qm} + L_{\sigma s}) i_{qs} \quad (9)$$

เมื่อ L_{qm} , L_{dm} คือค่าความเหนี่ยวนำรวมในแกน q และ d ตามลำดับ และ $L_{\sigma s}$ คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลในสแตเตอร์ แรงบิดในช่องอากาศ T_{og} สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{og} = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} = \psi_f i_{qs} + (L_{dm} - L_{qm}) i_{qs} i_{ds} \quad (10)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (11)$$

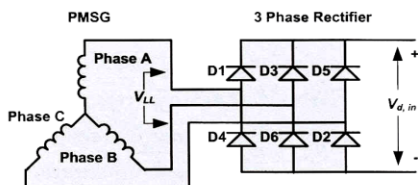
$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (12)$$

2.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟส (Three-phase diode rectifier)

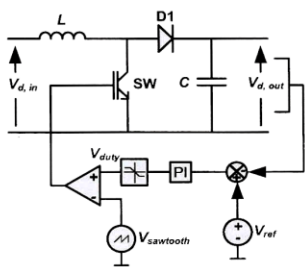
วงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอดเป็นวงจรรอง่าย ราคาถูก และใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ข้อเสียของไดโอดไม่สามารถให้กำลังไฟฟ้าไหลได้สองทางได้ แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (13) โดยละเลยเงื่อนไขการ overlap กัน

$$V_{d.in} = \frac{3\sqrt{2}V_{LL}}{\pi} \tag{13}$$

เมื่อ $V_{d.in}$ คือ แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส หรือ แรงดันด้านเข้าวงจรทระดับ V_{LL} คือ แรงดันสายด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3 วงจรเรียงกระแสสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า



รูปที่ 4 วงจรทระดับ

2.4 วงจรทระดับ (Boost Converter)

รูปที่ 4 แสดงวงจรทระดับแรงดันและการควบคุม ซึ่งวงจรนี้แรงดันด้านออกปกติจะมากกว่าแรงดันด้านเข้าเสมอ วงจรทระดับจะควบคุมแรงดันด้านออกโดยใช้การควบคุมเวลาการสวิตช์เมื่อแรงดันด้านเข้าเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าและแรงดันด้านออก และกระแสของวงจรทระดับสามารถแสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{V_{d.out}}{V_{d.in}} = \frac{1}{1-D} \tag{14}$$

เมื่อ $V_{d.out}$ คือ แรงดันด้านออกของวงจรทระดับ D คือ อัตราส่วนคาบเวลา $I_{d.in}, I_{d.out}$ คือ กระแสด้านเข้าและด้านออกของวงจรทระดับตามลำดับ อัตราส่วนคาบเวลาที่ต้องการสำหรับเงื่อนไขการทำงานกระแสต่อเนื่อง (Continuous Mode) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (15)

$$D = 1 - \left(\frac{V_{d.in}}{V_{d.out}} \right) \tag{15}$$

แรงดันด้านออกของวงจรทระดับในเทอมของแรงดันด้านเข้าและอัตราส่วนคาบเวลาแสดงได้ในสมการที่ (16)

$$V_{d.out} = \frac{V_{d.in}}{(1-D)} \tag{16}$$

รูปคลื่นในสภาวะคงตัวของแรงดันและกระแสในตัวเหนี่ยวนำในโหลดการทำงานกระแสต่อเนื่อง $[I_L(t) > 0]$ ค่าระลอกของแรงดันด้านออก $\Delta V_{d.out}$ ในโหลดกระแสต่อเนื่องสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta V_{d.out} = \frac{I_{d.out} D}{C f_{sb}} \tag{17}$$

2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการสวิตช์แบบปรับความกว้างของพัลส์ถูกค้นพบครั้งแรกตั้งแต่ปี 1964 [7] การควบคุมแบบนี้จะประมวลผลภายใต้เงื่อนไขความถี่การขับนำสวิตช์ (f_s) และอัตราส่วนความถี่ของสัญญาณคำสั่ง และอัตราส่วนแรงดันด้านเข้าและด้านออก บางครั้งเรียกว่าดัชนีการมอดูเลชัน (m_a) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (18)

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} = \frac{\hat{V}_{LLC}}{V_{d.out}} \tag{18}$$

เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุม \hat{V}_{tri} คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม อัตราส่วนมอดูเลชันความถี่ m_f แสดงได้ดังนี้

$$m_f = \frac{f_s}{f_i} \tag{19}$$

เมื่อ f_s คือ ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ f_i คือ ความถี่หลักมูล การควบคุมแรงดันด้านออกจะพยายามลดส่วนของแรงดันคิดเทียบจากแรงดันคำสั่ง ค่าความคิดเทียบจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า m_a อยู่ในย่าน over-modulation ($m_a > 1$) ในย่านเชิงเส้น ($m_a < 1$) ส่วนประกอบความถี่หลักมูลของแรงดันด้านออกจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นตาม m_a ดังแสดงในสมการที่ (18) แรงดันด้านออกที่ความถี่หลักมูลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{LLC} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} (m_a V_{d.out}) \tag{20}$$

แทนค่าสมการที่ (16) ลงในสมการที่ (20) จะได้

$$V_{LLC} = m_a \left[\frac{\sqrt{3} V_{d.in}}{2\sqrt{2} (1-D)} \right] \tag{21}$$

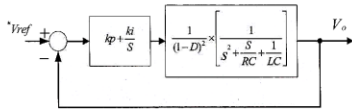
3. การออกแบบ

การออกแบบคอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาดกำลังไฟฟ้า 1 kW แรงดัน 48 V ที่ความเร็ว 400 rpm โดยงานวิจัยนี้ กำหนดแรงดันด้านเข้า 48 V แรงดันด้านออก 100 V ที่ภาระโหลดแรงดัน 10% ที่ความถี่สวิตซ์ 10 KHz เราสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างของวงจรระดับได้จากสมการที่ (22) และ (23) ตามลำดับ

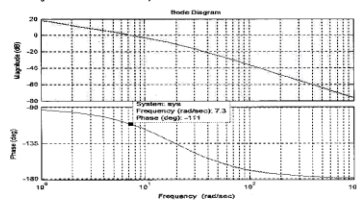
$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (22)$$

$$C = \frac{D}{Rf_s} \frac{\Delta v}{v} \quad (23)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (22) และ(23) จะได้ค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบคือ $L = 60 \mu F$ $C = 5,200 \mu F$ $R = 10 \Omega$ $D = 0.52$ โดยระบบจะควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบฟีดแบ็ครูปที่ 5 ในการหาค่า k_p k_i โดยการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอ ด้วย Ziegler-Nichols โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากกราฟผลตอบสนองจะได้ $k_p = 1.56$ $k_i = 0.5$ และจะได้แผนภาพโพลดังรูปที่ 6

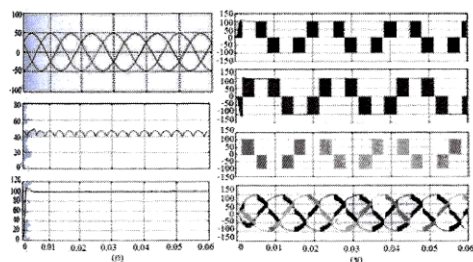


รูปที่ 5 การควบคุมแรงดันของวงจรระดับ

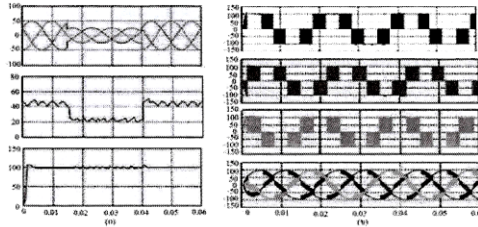


รูปที่ 6 แผนภาพโพลของระบบควบคุมวงรอบเปิดที่ได้ทำกาออกแบบ

4. ผลการจำลอง



รูปที่ 7 สัญญาณต่างๆ ของกรณีที่ 1 (ก) แรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส และแรงดันด้านออกของวงจรระดับ ตามลำดับ (ข) แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส



รูปที่ 8 สัญญาณต่างๆ ของกรณีที่ 2 (ก) แรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส แรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแส และแรงดันด้านออกของวงจรระดับ ตามลำดับ (ข) แรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

5. สรุป

แบบจำลองและผลการจำลองการทำงานของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่วิเคราะห์ในโครงการวิจัยนี้ เป็นระบบที่มีราคาถูก และประสิทธิภาพการทำงานสูง น้ำหนักเบา ระบบที่นำเสนอจะได้อัตราการส่งออกสูงสุดเมื่อเลือกค่า C_p ที่เหมาะสม การควบคุมจะใช้วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ และให้วงจรอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแรงดันให้เป็นแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าหากแรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน แต่ยังมีภาระระดับแรงดันตามที่ต้องการได้ การทำงานทั้งหมดมีเสถียรภาพสูงที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลง และฮาร์มอนิกต่ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์สันติภาพ โคตรทะเล ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล และให้คำปรึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Johnson, G. L. *Wind Energy Systems*. England Cliffs: Prentice-Hall, 2001.
- [2] Mohan, N.; Undeland, T. and Robbins, W. *Power Electronics Converters, Application and Design*. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [3] Schonung, A. and Stemmler, H. "Static Frequency Changer with Sub-harmonics Control in Conjunction with Reversible Variable Speed ac Drives." *BBC Review*, Aug./Sep. 1964.
- [4] Naefaire, H. *Grid Connected Wind Turbines*. London and New York: Elsevier Applied Science, 1988.
- [5] Eltamaly, Ali M. "A New Relation between Firing Angle of Three-phase SCR Converter and Best Reinjection Current Angle." *The 9th International Middle East Power Systems Conference, MEPCON'2003*, Shebin El-Kom, Egypt, Dec. 2003, 793- 798.
- [6] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ชาราชิเรศรชฎู, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" พิมพ์ครั้งที่ 2, วิ.เจ. พรินติ้ง, 2547

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล วสันต์ เพชรพิมูล
วัน เดือน ปี 15 เมษายน พ.ศ 2525
ที่อยู่ 1144 ม.11 ต.หนองไผ่ อ.หนองไผ่ จ.เพชรบูรณ์ 67140
ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก เมื่อ พ.ศ.2550

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2550 วิศวกร บริษัทแสงชัยมิเตอร์
พ.ศ. 2550 – ปัจจุบัน ตำแหน่งอาจารย์ ทำหน้าที่สอนประจำโปรแกรมวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

ผลงานวิจัย

วสันต์ เพชรพิมูล , ไพศาล บุญเจียม , ประมุข อุณหเลขกะ , วารุณี ศรีสงคราม , แบบจำลอง
กักเก็บผลผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร , รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่ง
ประเทศไทย ครั้งที่ 2 วันที่ 22-23 ธันวาคม 2552 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

วสันต์ เพชรพิมูล , ไพศาล บุญเจียม , วิรัชย์ โรยรินรินทร์ , ประมุข อุณหเลขกะ ,
วารุณี ศรีสงคราม , แบบจำลองกักเก็บผลผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร , การประชุม
เครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 2 วันที่ 5-6 กุมภาพันธ์ 2553
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา