



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันสำหรับพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า
กำลัง

Design and Implementation of Grid Connected Converters for Renewable Energy
Sources.

นามผู้วิจัย นายฐิติพัฒน์ เลี้ยงชีพวัฒน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันสำหรับพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง

Design and Implementation of Grid Connected Converters for Renewable Energy Sources

โดย

นายฐิติพัฒน์ เลี้ยงชีพวัฒน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฐิติพัฒน์ เลียงชีวะวัฒน์ 2557: การออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันสำหรับพลังงาน
ทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, Ph.D. 121 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบ และ สร้างระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่ง
พลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นการออกแบบระบบแปลงผันพลังงานเพื่อ
ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยประกอบด้วยวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ
เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และ วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอพารามิเตอร์ในการออกแบบภาคกำลัง วงจรประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และ
ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุม นอกจากนี้ยังได้จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม
คอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของกระบวนการออกแบบระบบที่ได้นำเสนอ และ ได้ทำการ
จัดสร้างระบบต้นแบบพร้อม ทำการทดสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพการทำงานโดยแบ่งออกเป็น
สองการทดสอบหลักคือ การทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่สภาวะคงตัว และการทดสอบโดยการ
หมุนเวียนพลังงาน โดยทดสอบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 15 กิโลวัตต์ (75%
ของพิกัดโหลดสูงสุด) ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ระบบต้นแบบสามารถจ่ายกระแส และ
แรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยมีประสิทธิภาพรวมของระบบเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ และสามารถ
เชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังได้

Thitiphat Liangchipwat 2014: Design and Implementation of Grid Connected Converters for Renewable Energy Sources. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Siriroj Sirisukprasert, Ph.D. 121 pages.

This thesis presents a practical design method and the an implementation of grid connected converters for renewable energy sources. The converter system is designed to be utilized with three phase alternators. The converter circuits are composed for a three phase rectifier and a three phase inverter. This research is discussed in the designed parameters in various parts of the system: the power stage, the digital signal processor circuit and software programming. Furthermore, the accuracy of the proposed design technique has been verified by the computer simulation. To ensure the performance of the prototype, the steady state testing and the circulated power testing has been conducted. The experiment has been performed up to 15 kilowatt (75% of the maximum load). The experimental results indicate that the prototype can generate nearly sinusoidal current and voltage wave form into system, has a total efficiency of 90 % and can be practically synchronized with the utility grid.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหา ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยตลอดจนทำการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงให้การสนับสนุนอุปกรณ์ และเครื่องมือวัดภายใต้ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังประยุกต์แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านสำหรับความรู้ และความช่วยเหลือต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

นอกจากนี้ยังต้องขอบคุณพี่ ๆ และเพื่อนทุกคนในห้องวิจัยโดยเฉพาะ นายสุประดิษฐ์ เดชพิทยานันท์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และทำงานร่วมกันจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา และ มารดา เป็นอย่างสูง ที่คอยให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจขณะที่กำลังศึกษาจนประสบผลสำเร็จในการเล่าเรียนในระดับปริญญาโท มา ณ โอกาสนี้ด้วย หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ฐิติพัฒน์ เลียงชีวะวัฒน์

มิถุนายน 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	53
อุปกรณ์	53
วิธีการ	54
ผลและวิจารณ์	89
ผล	89
วิจารณ์	114
สรุปและข้อเสนอแนะ	116
สรุป	116
ข้อเสนอแนะ	117
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	119
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	121

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สถานะการทำงานของสวิตช์ทั้ง 8 สถานะ	37
2 จัดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (แรงดัน 120 V ถึง 69 kV)	47
3 ค่าขีดจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิก	48
4 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ประเภท Converter หรือ A.C. Regulator แต่ละตัว	49
5 จัดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม	51
6 จัดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม	52
7 การเปรียบเทียบเทคนิค SVM และ เทคนิค SPWM	59
8 ข้อกำหนดการออกแบบ	61
9 คุณสมบัติสวิตช์ที่ใช้กับระบบแปลงผันพลังงาน	65
10 ความต้านทานความร้อน และ ปริมาณแผ่นระบายความร้อน	68
11 คุณสมบัติของบอร์ด dsPIC30F4011	75
12 ลักษณะของขั้วต่อ (Connector) ด้านปฐมภูมิ: (X1 14Pin DIN 41651)	77
13 ลักษณะขั้วต่อด้านทุติยภูมิ: (ส่งสัญญาณขับให้สวิตช์ตัวบน และ สวิตช์ตัวล่าง)	78
14 ค่า R_M ที่เหมาะสมที่แรงดันและอุณหภูมิต่างๆ	84
15 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	90
16 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ	96
17 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบแปลงผันพลังงาน	103
18 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบระบบหมุนเวียนพลังงาน	108
19 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟส	111

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ส่วนประกอบของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้าฯ	4
2 ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ	6
3 แผนภูมิแสดงกำลังไฟฟ้า และ ช่วงการทำงานของกังหันลม	7
4 กังหันลมที่มีแกนเพลายู่ในแนวตั้ง	8
5 กังหันลมที่มีแกนเพลายู่ในแนวนอน	9
6 กังหันลมแบบความเร็วคงที่	10
7 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่	11
8 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง	12
9 ลักษณะโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบไม่มีอ่างเก็บน้ำ	15
10 ลักษณะโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบมีอ่างเก็บน้ำ	16
11 ลักษณะโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบกลับ	17
12 (ก) ลักษณะวาล์วโรเตอร์มอเตอร์ (ข) ลักษณะโรเตอร์แบบวาล์ว	19
13 (ก) ลักษณะมอเตอร์โรเตอร์แบบกรงกระรอก (ข) ลักษณะโรเตอร์แบบกรงกระรอก	20
14 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัส (ก) ตัวโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรแบบสองขั้ว	21
15 (ก) สเตเตอร์ (ข) โรเตอร์แบบขั้วยื่น (ค) โรเตอร์แบบขั้วยื่นที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามเข็มนาฬิกา และ (ง) โรเตอร์แบบทรงกระบอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัส	22
16 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบแม่เหล็กถาวร	23
17 วงจรเรียงกระแสสามเฟส	24
18 แรงดันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด	25
19 วงจรพื้นฐานวงจรผกผันสามเฟส	28
20 เทคนิคการมอดูเลชันความกว้างพัลส์แบบไซน์	29
21 เวกเตอร์ไดอะแกรมแปลงแกน abc เป็น $\alpha\beta$	34
22 วงจรผกผันสามเฟส	35
23 สถานะการทำงานของสวิตช์ 8 สถานะ	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันในแต่ละสถานะการทำงานของสวิตช์	37
25	เวกเตอร์ไดอะแกรมของ $\vec{V}_{ref}$	39
26	รูปแบบการสวิตช์ของแต่ละเซกเตอร์	41
27	ฮาร์โมนิกที่ลำดับต่างๆ	46
28	แผนผังลำดับการทําวิจัย	54
29	ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้า	55
30	ความสัมพันธ์ของความเร็วลม และ แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	56
31	หลักการสร้างสัญญาณมอดูเลชั่นรูปคลื่นไซน์	57
32	โครงสร้างพื้นฐานของระบบแปลงผันพลังงาน	59
33	แผนผังการออกแบบระบบแปลงผันพลังงาน	60
34	ลักษณะวงจรเรียงกระแส	62
35	วงจรผกผันสามเฟส	63
36	โครงสร้างระบบระบายความร้อน	66
37	วงจรสมมูลความร้อน	67
38	ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	71
39	วงจรอัดประจุ	72
40	ตัวต้านทานสำหรับจำกัดกระแสอัดประจุ	74
41	บอร์ด dsPIC30F4011	75
42	แผนผังการทำงานของระบบแปลงผันพลังงาน	76
43	ความสามารถของวงจรขับเคลื่อน	78
44	ข้อมูลการควบคุมสถานะ ผิดพลาด และ รีเซต	79
45	วงจรบัฟเฟอร์	80
46	ตัวรับรู้แรงดัน	80
47	วงจรตัวรับรู้แรงดัน	81
48	วงจรขยายสัญญาณของวงจรตัวรับรู้แรงดัน	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
49 ตัวรับรู้กระแส	83
50 วงจรตัวรับรู้กระแส	83
51 วงจรขยายสัญญาณของวงจรตัวรับรู้กระแส	84
52 แผนผังการทำงานของโปรแกรม	85
53 การทำงานของโมดูลพีดีบีบลิวเอ็ม	86
54 วงจรภาคกำลัง	87
55 ส่วนวงจรภาคกำลัง และ ภาคควบคุม	87
56 ส่วนอุปกรณ์ป้องกันและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลัง	88
57 ต้นแบบระบบแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อนระบบการไฟฟ้า	88
58 วงจรแปลงผันพลังงานสำหรับพลังงานทดแทนจ่ายภาระที่ 20 กิโลวัตต์ จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	91
59 แรงดันกระแสตรง (V_{dc}) ด้านออกของวงจรเรียงกระแส	92
60 แรงดันกระแสเพื่่อม V_{dc}	92
61 แรงดัน V_{inv_ab} ด้านออกของวงจรผกผันก่อนผ่านตัวกรอง	93
62 แรงดันด้านออก V_{in_ab} เทียบกับ กระแสด้านออก I_a	93
63 (ก) แรงดัน V_a, V_b, V_c ด้านออกของวงจรผกผันสามเฟสที่ผ่านตัวกรองแล้ว	94
64 ค่ากำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระ	94
65 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ	95
66 กราฟแสดงค่ากระแสฮาร์มอนิก	95
67 โครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบ	96
68 ลักษณะการต่อโหลด	97
69 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{dc} มีแรงดันเท่ากับ 540 โวลต์	97
70 แรงดันกระแสเพื่่อมของแรงดันกระแสตรง V_{dc} มีค่าเท่ากับ 25 โวลต์	98
71 ผลการทดสอบสภาวะจ่ายภาระที่ 4.5 กิโลวัตต์ (ก) แรงดันอินพุต 383 โวลต์ แรงดัน V_{inv} เอาต์พุต 540 โวลต์ (ข) แรงดันเอาต์พุต 273 โวลต์ กระแส 6 แอมแปร์	99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
72 ผลการทดสอบสถานะจ่ายภาระที่ 9 กิโลวัตต์ (ก) แรงดันอินพุต 377 โวลต์ แรงดัน V_{inv} เอาต์พุต 540 โวลต์ (ข) แรงดัน V_{ab} เอาต์พุต 300 โวลต์ กระแส 11 แอมแปร์	100
73 ผลการทดสอบสถานะจ่ายภาระที่ 12 กิโลวัตต์ (ก) แรงดัน เอาต์พุต 540 โวลต์ (ข) แรงดันเอาต์พุต 380 โวลต์ กระแส 21 แอมแปร์	101
74 ผลการทดสอบสถานะจ่ายภาระที่ 15 กิโลวัตต์ (ก) แรงดันเอาต์พุตจากวงจรผกผัน ก่อนผ่านวงจรกรอง 540 โวลต์ (ข) แรงดันเอาต์พุต 377 โวลต์ กระแส 25 แอมแปร์	102
75 ประสิทธิภาพของระบบแปลงผันพลังงาน	103
76 การทดสอบระบบหมუნเวียนพลังงาน จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	105
77 (ก) แรงดัน V_{inv_ab} ด้านออกของวงจรผกผันก่อนผ่านตัวเหนี่ยวนำ	106
78 แรงดันด้านออก V_{In_ab} เทียบกับ กระแสด้านออก I_{ab}	107
79 กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ 400 วัตต์	107
80 วงจรใช้ทดสอบระบบโดยการหมუნเวียนพลังงาน	108
81 เปรียบเทียบแรงดันกระแสตรง V_{dc} เทียบกับแรงดันกริด V_g	109
82 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันกริด V_{g_AB} กับแรงดันอินเวอร์เตอร์ V_{IN_AB}	109
83 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันกริด V_{g_AB} กับกระแส I_a	110
84 วงจรที่ใช้ทดสอบการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟส	111
85 ระบบแปลงผันพลังงานเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟส	112
86 แรงดันกริด V_{ga} เทียบกับแรงดันด้านออกของวงจรผกผัน V_{inv}	113
87 แรงดันกริด V_{ga} เทียบกับกระแส I_a	113
88 กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง	114

การออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันสำหรับพลังงานทดแทน เพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง

Design and Implementation of Grid Connected Converters for Renewable Energy Sources

คำนำ

ในปัจจุบันนี้วัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตพลังงานเช่น น้ำมัน ถ่านหิน และ ก๊าซธรรมชาติมีปริมาณลดน้อยลง และมีแนวโน้มราคาที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงได้นำพลังงานทดแทนจากธรรมชาติ เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และ พลังงานจากไฮโดรเจน เป็นต้น เข้ามาใช้ประโยชน์มากขึ้น โดยพลังงานทดแทนเหล่านี้เป็นพลังงานที่สะอาด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งพลังงานทดแทนมีเสถียรภาพต่ำซึ่งจะต้องอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการปรับปรุงเสถียรภาพของพลังงานไฟฟ้าให้ดีขึ้น โดยทั่วไปอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่ดังกล่าวคือ คอนเวอร์เตอร์หรือวงจรแปลงผันพลังงานซึ่งประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาความแปรปรวนของขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้า แล้วส่งต่อไปยังตัวเก็บประจุที่บัสกระแสตรงเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าคงที่มากยิ่งขึ้น และ ในส่วนของวงจรผกผันหรืออินเวอร์เตอร์ จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า และ ยังทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายกระแส ในขณะที่ระบบสายส่งของการไฟฟ้าจะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันเราจึงสามารถขนานแหล่งจ่ายทั้งสองเข้าด้วยกันได้ โดยที่วงจรผกผันจะผลิตความถี่ และ เฟสที่เหมาะสมกับระบบสายส่งของการไฟฟ้าตลอดเวลาหรือเรียกว่า การซิงโครไนซ์เซชัน ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบขึ้นอยู่กับปริมาณของพลังงานทดแทนที่มี โดยจะมีแรงดันเท่ากับระบบของการไฟฟ้าตลอดเวลา

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ และ ออกแบบวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนโดยเฉพาะอย่างยิ่ง พลังงานลม และ พลังงานน้ำขนาดเล็กเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีเป้าหมายหลักในการเพิ่มคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ได้ให้สูงขึ้น



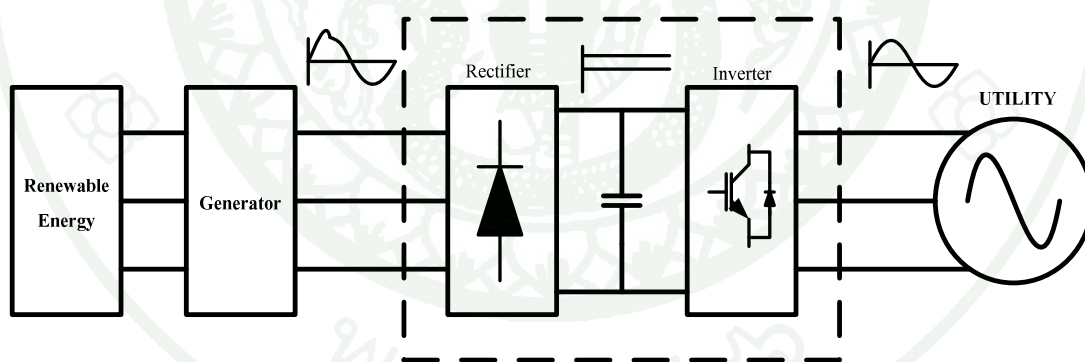
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้าง และ หลักการทำงานของวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดันรวมถึงการเชื่อมต่อวงจรแปลงผันเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง
2. เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบ และ สร้างวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส เพื่อให้ปรับปรุงคุณภาพของพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งพลังงานทดแทนให้เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง



การตรวจเอกสาร

ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานที่ได้รับจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อจ่ายให้กับระบบไฟฟ้ากำลังหรือนำไปใช้งานกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆได้ เมื่อแหล่งพลังงานทดแทนจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นพลังงานที่มีเสถียรภาพต่ำ ระบบก็จะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดย วงจรเรียงกระแส (Rectifier) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความแปรปรวนของขนาด และ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า หลังจากนั้น วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ หรือ วงจรผกผัน (Inverter) จะทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับมาจากวงจรเรียงกระแสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง (Ali Khajehoddin, Karimi-Ggartemani, Jain and Bakhshai, 2011.) ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง (Prodanovic and Timothy, 2003.) ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสที่ได้กำลังขับเคลื่อนจากพลังงานทดแทน วงจรเรียงกระแส และ วงจรผกผัน



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้า

พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทน (นิพนธ์ และ อจิตพล, 2547) คือ พลังงานที่นำมาใช้แทนน้ำมันหรือเชื้อเพลิง เป็นพลังงานที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก หรือเรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานจากไฮโดรเจน เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเสนอในรูปแบบของพลังงานทดแทนที่ให้พลังงานอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น พลังงานลม และ พลังน้ำ

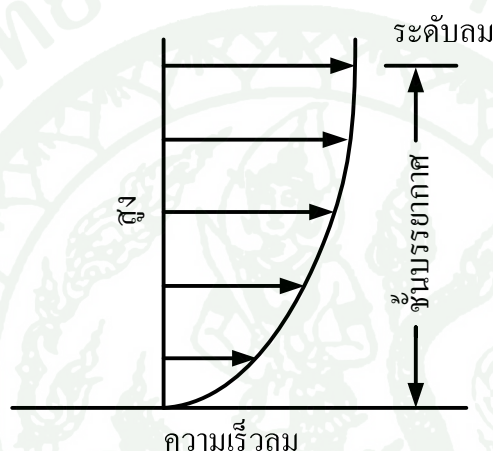
1. พลังงานลม

พลังงานลมจัดเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้ไม่มีวันหมด และ ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าก็ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ หลายประเทศทั่วโลกให้ความสนใจในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม แต่ในประเทศไทยมีความเร็วลมอยู่ในระดับกลาง และต่ำจากข้อมูลเก่าที่ว่าความเร็วลมในประเทศไทยเฉลี่ยเพียง 2-3 เมตรต่อวินาที ซึ่งนับว่าน้อยมาก และไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จากนั้นได้มีการตรวจวัดพลังงานลมทั่วประเทศ หรือที่เรียกว่าเป็นการทำแผนที่ความเร็วลมใหม่อีกครั้ง โดยวัดที่ความสูง 50 เมตร ตามเทคโนโลยีที่กังหันลมสมัยใหม่ทำได้ และ พบว่า พื้นที่ภาคใต้ แถบชายฝั่งตะวันออกของประเทศไทย ตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และ ที่อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ มีความเร็วลมเฉลี่ยสูงถึง 6.4 เมตรต่อวินาที ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถจะนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับประเทศในทวีปยุโรป

1.1 หลักการทำงานของกังหันลม

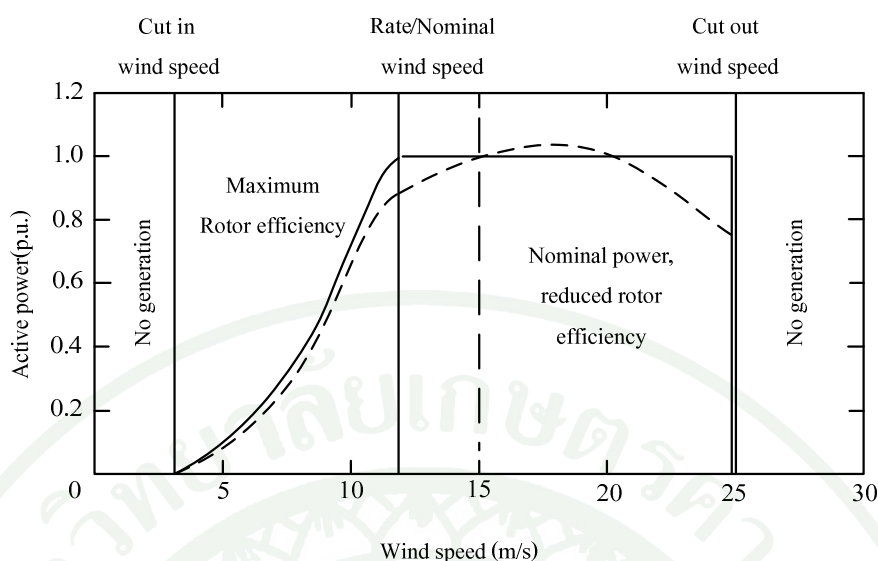
กังหันลม (Wind Turbine) คือ เครื่องจักรกลอย่างหนึ่งที่สามารถรับพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้ จากนั้นนำพลังงานกลมาใช้ประโยชน์โดยตรง เช่น การบดสีเมล็ดพืช การสูบน้ำ หรือในปัจจุบันใช้ผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า การพัฒนากังหันลมเพื่อใช้ประโยชน์มีมาตั้งแต่ชนชาวอียิปต์โบราณ และ มีความต่อเนื่องถึงปัจจุบัน โดยการออกแบบกังหันลมจะต้องอาศัยความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของลม และ หลักวิศวกรรมศาสตร์ในแขนงต่างๆ เพื่อให้ได้กำลังงาน พลังงาน และ ประสิทธิภาพสูงสุด

กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมที่อยู่ใกล้พื้นผิวโลกหรือเรียกว่าลมผิวพื้น หมายถึง ลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มีการผสมผสานของอากาศ และ แรงเสียดทานเกิดจากการปะทะสิ่งกีดขวางด้วยในระดับต่ำ แต่ที่ระดับความสูง 10 เมตรขึ้นไปแรงเสียดทานจะลดลง และ ความเร็วจะเพิ่มขึ้นแสดงในภาพที่ 2 ส่วนที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตรเกือบจะไม่มีแรงเสียดทาน ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความสูง และ ภูมิประเทศ เช่นเดียวกับทิศทางของลม ดังนั้นกังหันลมจะทำงานมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวนี้ ที่ความเร็วลมเท่าๆกันแต่มีทิศทางลมต่างกัน



ภาพที่ 2 ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ

พลังงานที่ได้รับจากกังหันลมจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลม แต่ความสัมพันธ์นี้ไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงที่ความเร็วลมต่ำอยู่ในช่วง 1-3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะยังไม่ทำงาน ที่ความเร็วลมอยู่ในช่วง 2.5 – 5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะเริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่าช่วงเริ่มความเร็วลม (Cut in Wind Speed) และ ที่ความเร็วลมประมาณ 12 – 15 เมตรต่อวินาที เป็นช่วงที่เรียกว่าช่วงความเร็วลม (Nominal หรือ Rate Wind Speed) ซึ่งเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังงานสูงสุดของตัวกังหันลม ในช่วงที่ความเร็วลมไต่ระดับไปสู่ช่วงความเร็วลม เป็นการทำงานของกังหันลมที่ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Rotor Efficiency) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตรากระตุ้นความเร็ว (Tip Speed Ratio) และ ในช่วงเลขความเร็วลม (Cut out Wind Speed) เป็นช่วงที่ความเร็วลมสูงกว่า 25 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของตัวกังหันลมได้



ภาพที่ 3 แผนภูมิแสดงกำลังไฟฟ้า และ ช่วงการทำงานของกังหันลม

การหาค่ากำลังของลมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V ผ่านพื้นที่หน้าตัด A หาได้จากสมการที่ (1)

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

เมื่อ	P_w	คือ กำลังของลม (W)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ มีค่าเท่ากับ (1.225 kg/m^3)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)
	v	คือ ความเร็วลม (m/s)

หลักการทั่วไปในการนำพลังงานลมมาใช้คือ เมื่อมีลมพัดมาปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมที่อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานกลโดยการหมุนของใบพัด แรงจากการหมุนของใบพัดนั้นจะถูกส่งผ่านแกนหมุนทำให้เฟืองเกียร์ที่ติดอยู่กับแกนหมุนเกิดการหมุนตามไปด้วย พลังงานกลที่ได้จากการหมุนของเฟืองเกียร์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ตามความต้องการเช่น ในกรณีต้องการใช้กังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าจะต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้า ซึ่งเมื่อเฟืองเกียร์ของกังหันลมเกิดการหมุนจะไปขับเคลื่อนให้แกนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนตามไปด้วย จากหลักการนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้

1.2 ประเภทของพลังงานลม

กังหันลมสามารถแบ่งออกตามลักษณะการจัดวางแกนของใบพัดได้ 2 รูปแบบ คือ กังหันลมที่มีแกนเพลาลอยในแนวแกนตั้ง และ กังหันลมที่มีแกนเพลาลอยบนแนวแกนนอน

1.2.1. กังหันลมที่มีแกนเพลาลอยในแนวตั้ง (Vertical-Axis type Wind Turbine, VAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของลม ซึ่งสามารถรับลมได้ทุกทิศทาง และ ติดตั้งอยู่ในระดับต่ำได้ กังหันลมแบบนี้ที่รู้จักกันดีคือกังหันลมแบบแดร์เรียส (Darrieus) ซึ่งออกแบบโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสในปี ค.ศ. 1920 ข้อดีของกังหันลมแนวแกนตั้งคือ สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง มีชุดปรับความเร็ว (Gear Box) และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถติดตั้งอยู่ที่ระดับพื้นล่างได้ นอกจากนี้ตัวเสาของกังหันลมยังไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือ ประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับกังหันลมที่มีแกนเพลาลอยแบบแกนนอน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการใช้งานอยู่น้อย กังหันลมที่มีแกนเพลาลอยในแนวตั้งแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กังหันลมที่มีแกนเพลาลอยในแนวตั้ง

ที่มา: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น)

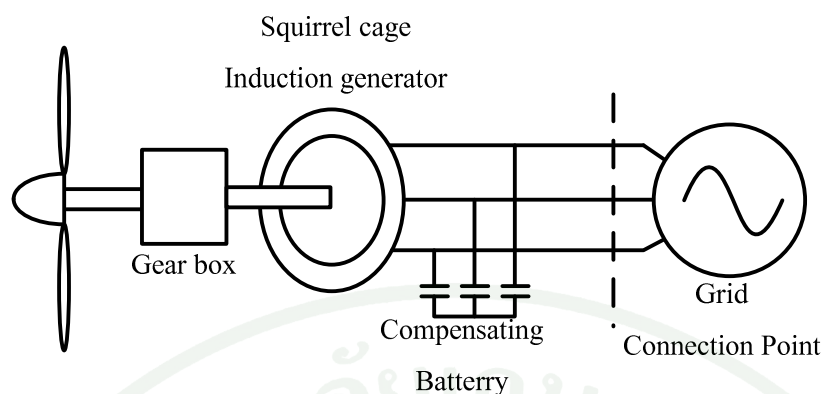
1.2.2. กังหันลมที่มีแกนเพลาลอยในแนวนอน (Horizontal-Axis type Wind Turbine, HAWT) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนวางตัวอยู่ในทิศขนานกับทิศทางของลม โดยมีใบเป็นตัวตั้งฉาก

รับแรงลม กังหันลมประเภทนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และ มีการนำมาใช้งานมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงแต่ต้องติดตั้งบนเสาที่มีความสูงมาก และมีชุดควบคุมให้กังหันลมหันหน้าเข้ารับแรงลมได้ทุกทิศทางในแนวนอนตลอดเวลาดังแสดงในภาพที่ 5 อย่างไรก็ตามในรายละเอียดของรูปแบบ องค์ประกอบ และ ลักษณะการทำงานของกังหันลมแบบนี้ที่นิยมใช้กันสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบได้แก่



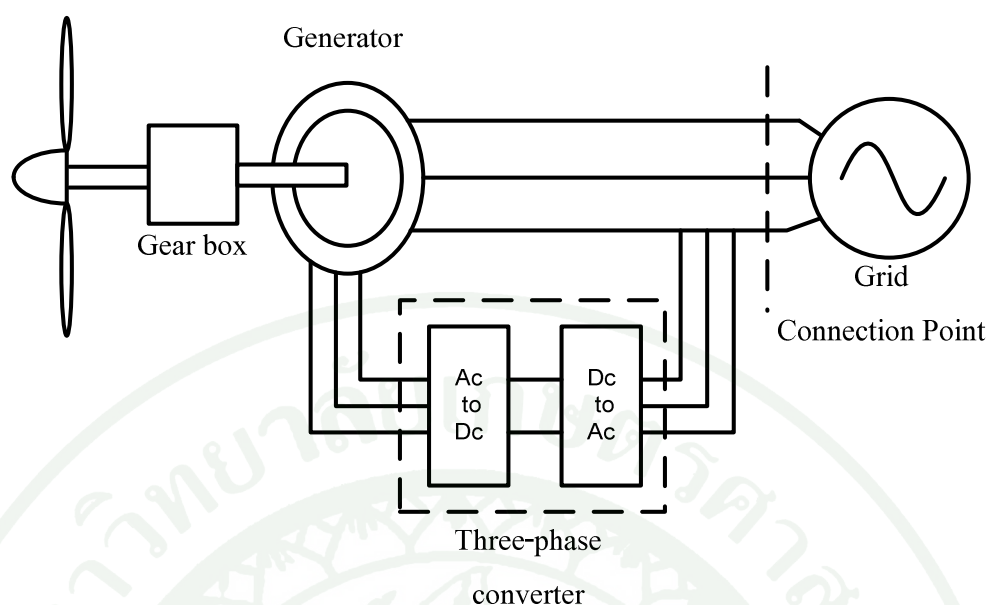
ภาพที่ 5 กังหันลมที่มีแกนเพลาลอยในแนวนอน

ก. กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (Fixed Speed Turbine) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด ก่อ่งเกียร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (Squirrel Cage Induction Generator) ชุดสเตรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า ในความเป็นจริงแล้วกังหันลมแบบนี้มีค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Slip) ไม่คงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าน้อยมาก เพียง 1 – 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเรียกกังหันลมแบบนี้ว่าเป็นแบบความเร็วคงที่ที่แสดงในภาพที่ 6 ข้อเสียของกังหันลมแบบความเร็วคงที่คือ การถ่ายโอนกำลังงานทำได้ไม่ดี เนื่องจากกังหันลมมีการแปลงผันพลังงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งหากความเร็วลมสูงกว่าหรือต่ำกว่าความเร็วพิกัด การแปลงผันพลังงานของระบบกังหันลมในแนวทางนี้จะไม่ได้ค่าสูงสุด



ภาพที่ 6 กังหันลมแบบความเร็วคงที่

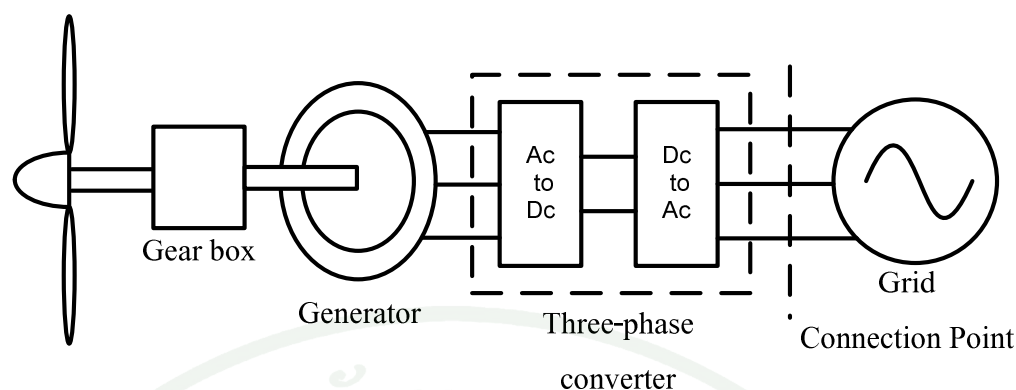
ข. กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable Speed Turbine) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด กล้องเกียร์ เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำแบบดับเบิลเฟด (Doubly Fed Induction Generator) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ชุดสแตเตอร์ต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า กังหันลมชนิดนี้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถปรับความเร็วรอบ และ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้องค์ประกอบของกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่แสดงในภาพที่ 7 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่นี้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันลมขนาดใหญ่มาได้อย่างดี



ภาพที่ 7 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่

ก. กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (Variable Speed With Direct Drive) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรง และมีคอนเวอร์เตอร์แปลงกระแสไฟฟ้า สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า องค์ประกอบของกังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรงแสดงในภาพที่ 8

ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ปรับขนาด และ ความถี่แรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมกับขนาด และ ความถี่ของแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ระบบไฟฟ้าสามารถควบคุมได้โดยคอนเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากคอนเวอร์เตอร์มีการเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ระบบไฟฟ้ากำลังทำให้คอนเวอร์เตอร์ต้องมีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นผลให้ระบบดังกล่าวเหมาะสมที่จะใช้กับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กไปจนถึงขนาดปานกลาง



ภาพที่ 8 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง

2. พลังงานน้ำ

พลังงานน้ำเกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์ และ พลังงานศักย์จากความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก การนำเอาพลังงานน้ำมาใช้ประโยชน์ทำได้โดยให้น้ำไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ พลังงานศักย์ของน้ำถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนนี้คือ กังหันน้ำ (Turbines) น้ำที่มีความเร็วสูงจะผ่านเข้าท่อแล้วให้พลังงานจลน์แก่กังหันน้ำ ซึ่งหมุนขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าในปัจจุบันพลังงานที่ได้จากแหล่งน้ำที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ พลังงานน้ำตก พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานคลื่น

การประยุกต์ใช้พลังงานจากน้ำที่อยู่ในแหล่งกักเก็บน้ำที่อยู่สูง เช่น น้ำตก ซึ่งน้ำจะสะสมพลังงานอยู่ในรูปของพลังงานศักย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$E_p = m \times g \times H \quad (2)$$

เมื่อ	E_p	คือ พลังงานศักย์ของน้ำ (J)
	m	คือ มวลของน้ำ (kg)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (มีค่าคงที่ 9.8 m/s^2 หรือประมาณ 10 m/s^2)
	H	คือ ความสูงในแนวดิ่งของแหล่งน้ำเหนือระดับอ้างอิง (m)

จากสมการที่ (2) ถ้าต้องการคำนวณหาค่าพลังงานศักย์ของน้ำที่มีอยู่ทั้งโลกเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า โดยประมาณจากแหล่งน้ำทั้งหมดบนโลกมีประมาณ 10^{17} กิโลกรัม และ ค่าเฉลี่ยความ

สูงของแหล่งน้ำทั้งหลายอยู่สูงเหนือระดับน้ำทะเล 800 เมตร จะได้ว่าค่าพลังงานจากน้ำประมาณ 8×10^{20} จูล หรือประมาณ 200,000 เทระวัตต์ชั่วโมงต่อปี ซึ่งมีค่าประมาณ 2 เท่าของพลังงานต่อปีที่บริโภคกันทั่วโลก

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากน้ำนั้นเป็นลักษณะพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องเช่น พลังงานน้ำตกหรือพลังงานที่เกิดจากการปล่อยน้ำของเขื่อนจึงมักใช้อธิบายเป็นค่าพลังงานต่อหน่วยเวลาที่เรียกว่า กำลัง (Power) ซึ่งกำลังของน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ (Flow Rate) เป็นกิโลกรัมต่อวินาที หรือโดยทั่วไปมักใช้เป็น ปริมาตรการไหล (Volume Flow) เป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

จากสมการ (2) ถ้าเปลี่ยนพลังงานให้อยู่ในรูปของกำลังหรือค่าพลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา จะได้ว่ากำลังของน้ำขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีมวล 1000 กิโลกรัม จะมีค่าเท่ากับ

$$P = (1000Q) \times 10H \quad (3)$$

เมื่อ P คือ กำลังวัตต์ (W)
 Q คือ ปริมาตรการไหล ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/s)

หรือแปลงหน่วยให้เป็นกิโลวัตต์เขียนได้เป็น

$$P = 10QH \quad (4)$$

นอกจากนี้ในการใช้พลังงานน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเฉพาะการใช้กังหันน้ำประเภท หัวทิดจะต้องมีการบังคับน้ำให้พุ่งเป็นลำเพื่อฉีดเข้าไปที่กังหัน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงนอกจากระดับความสูงของน้ำแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความเร็วของน้ำ และ อัตราการไหลของน้ำ ซึ่งจะมี ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

พิจารณาจากกฎทรงพลังงาน (Energy Conservation) จะได้ว่าน้ำเมื่อตกลงมาพลังงานศักย์ของน้ำจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$E_p = E_k \quad (5)$$

$$mgH = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6)$$

$$v^2 = 2gH \quad (7)$$

$$\text{ดังนั้นความเร็วของน้ำหาค่าได้จาก } v = \sqrt{2gH} \quad (8)$$

พิจารณาการไหลของลำน้ำที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัด A ด้วยความเร็ว v จะได้ปริมาตรของการไหลของน้ำ

$$Q = Av \quad (9)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (9) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการไหลพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ และ ระดับความสูงของน้ำคือ

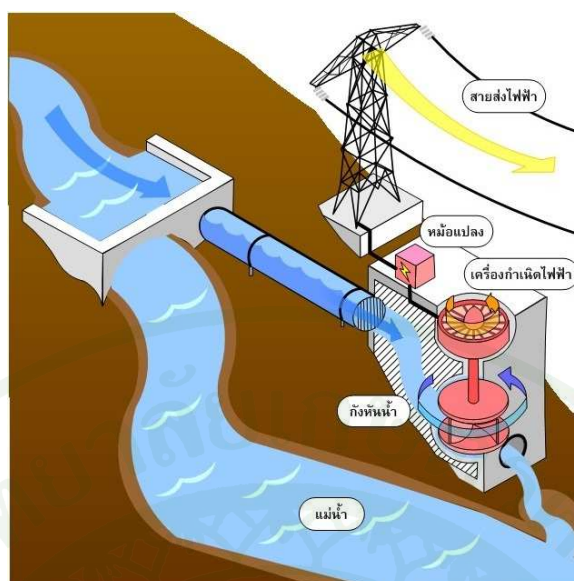
$$Q = A \times \sqrt{2gH} \quad (10)$$

นั่นคือการไหลของน้ำจะแปรผันโดยตรงกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ และ ความสูงของแหล่งน้ำ

2.1 ประเภทของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ

การแบ่งประเภทของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ มักจะยึดเอาปริมาณน้ำที่มีอยู่หรือที่ต้องใช้กับโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท (วัฒนา ถาวร. 2543 : 35-41) คือ

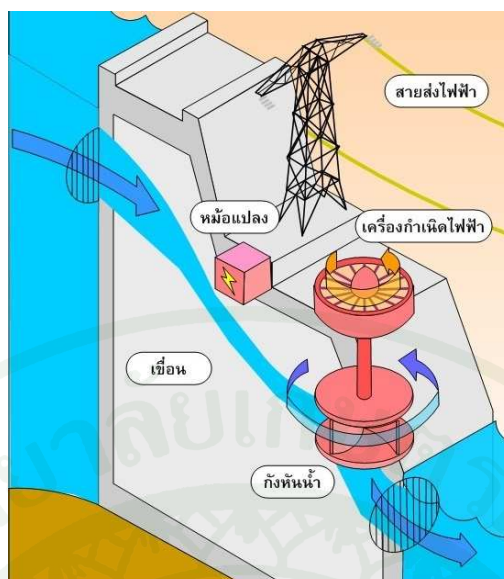
2.1.1. โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบไม่มีอ่างเก็บน้ำ (Run of River) เป็นโรงไฟฟ้าที่สร้างขึ้นเพื่อผลิตไฟฟ้าโดยการบังคับทิศทางกั้นการไหลของน้ำ จากแหล่งน้ำเล็กๆ เช่นตามลำห้วย ลำธาร หรือ ฝายต่างๆ ให้มารวมตัวกัน และ ไหลผ่านท่อหรือรางน้ำที่จัดทำไว้ และใช้แรงดันของน้ำซึ่งตกจากตำแหน่งที่สูงมาหมุนกังหันซึ่งต่อกับแกนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ลักษณะของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบไม่มีอ่างเก็บน้ำ แสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ลักษณะโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบไม่มีอ่างเก็บน้ำ

ที่มา: ยิ่งปลิว ศุภกิตติวงศ์. 2553.

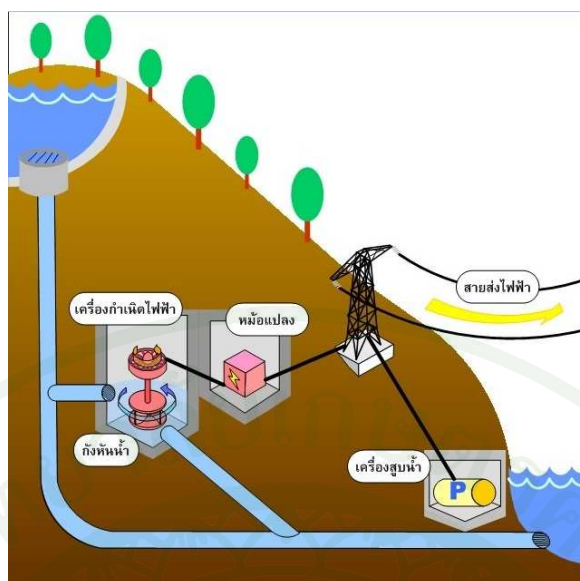
2.1.2. โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบมีอ่างเก็บน้ำ (Storage Regulation Development) เป็นโรงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้า โดยใช้พลังงานน้ำที่มีอยู่ซึ่งอาจเป็นแหล่งธรรมชาติหรือเกิดจากการสร้างขึ้นมาเองในลักษณะของเขื่อน ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งน้ำที่มีอยู่ในอ่างหรือเขื่อนจะมีปริมาณมากพอที่จะถูกปล่อยออกมาเพื่อผลิตไฟฟ้าได้ตลอดเวลา ในประเทศไทยโรงไฟฟ้าแบบนี้ถูกใช้เป็นหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพราะเป็นระบบที่มีความมั่นคงในการผลิตและจ่ายไฟสูง



ภาพที่ 10 ลักษณะโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบมีอ่างเก็บน้ำ

ที่มา: ยี่งปวิ สุภกิตติวงศ์, 2553.

2.1.3. โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบน้ำกลับ (Pumped Storage Plant) โรงไฟฟ้าแบบนี้ถูกสร้างบนพื้นฐานความคิดในการจัดการกระแสไฟฟ้าส่วนเกิน เพราะโดยปกติการใช้ไฟฟ้าในช่วงกลางคืนที่ค่อนข้างต่ำแล้วจะมีการใช้ไฟฟ้าลดลงแต่กำลังการผลิตไฟฟ้ายังคงเท่าเดิม ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า โรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบน้ำกลับเป็นโรงไฟฟ้าที่มีอ่างเก็บน้ำสองส่วนคือ อ่างเก็บน้ำส่วนบน (Upper Reservoir) และ อ่างเก็บน้ำส่วนล่าง (Lower Reservoir) น้ำจะถูกปล่อยจากอ่างเก็บน้ำส่วนบนลงมาเพื่อหมุนกังหัน และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อต้องการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 11 และ ในช่วงที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำหรือน้อยลง จะใช้ไฟฟ้าที่เหลือจ่ายให้กับปั๊มน้ำขนาดใหญ่ที่ติดตั้งอยู่ในอ่างเก็บน้ำส่วนล่าง เพื่อสูบน้ำจากอ่างเก็บน้ำส่วนล่างนี้กลับขึ้นไปเก็บไว้ที่อ่างเก็บน้ำส่วนบนเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าต่อไป



ภาพที่ 11 ลักษณะโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบกลับ

ที่มา: ชัยปวิธ สุขกิตติวงศ์, 2553.

3. ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานกล ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กตามหลักการของ ไมเคิลฟาราเดย์ คือ การเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำผ่านสนามแม่เหล็ก หรือการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กผ่านขดลวดตัวนำ จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดตัวนำนั้น (วิระเชษฐ์, 2552) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้งานมีอยู่สองชนิดคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Generator)

3.1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ การหมุนของมอเตอร์ดังกล่าวเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำในโรเตอร์ในงานที่ต้องการมอเตอร์ในการขับเคลื่อน ปัจจุบันจะนิยมใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะว่ามีมอเตอร์ชนิดนี้มีความทนทาน ราคาถูก และ การบำรุงรักษาน้อย เริ่มหมุนได้ง่ายโดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนที่ (Stator) และ โรเตอร์ (Rotor)

3.1.1. ส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกัน และ ทำเป็นช่อง สลักไว้บรรจุขดลวด ความเร็วของมอเตอร์จะแปรผันตรงตามจำนวนขั้วแม่เหล็ก เมื่อจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับให้กับขดลวดส่วนที่อยู่กับที่จะเกิดสนามแม่เหล็กค่าคงตัวค่าหนึ่ง ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว ซิงโครนัส N_s ดังสมการที่ (11) สนามแม่เหล็กหมุนเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในตัวหมุน โดย เป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำ

$$N_s = \frac{120 f}{P} \quad (11)$$

โดยที่ N_s คือ ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน เป็นรอบ ต่อ นาที
 f คือ ความถี่ของกระแสไฟฟ้า เป็นเฮิรตซ์
 P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

3.1.2 โรเตอร์ ประกอบด้วยเหล็กกล้าประกบเป็นแผ่นบาง ๆ เป็นรูปทรงกระบอก แบ่ง ออกเป็น 2 ประเภท คือ โรเตอร์แบบขดลวดพัน (Wound Rotor) และ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor)

ก. โรเตอร์แบบวาวด์ หรือเฟสวาวด์ (Wound Rotor or Phase Wound Rotor) เรียก มอเตอร์ชนิดนี้ว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์มอเตอร์ หรือสลีปรिंगมอเตอร์ แสดงดังภาพที่ 12 (ก) พบมากในมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส การพันขดลวดเป็นแบบสองชั้นเหมือนกับขดลวดที่ใช้ใน เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ภายในตัวหมุนจะถูกต่อแบบสตาร์ มีปลายสายออกมาสามเส้น ต่อ เข้ากับสลีปรिंगที่ติดกับเพลลาของตัวหมุน สามารถนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์มาต่อกับสลีปรिंगที่ ต่อมาจากขดลวดในตัวหมุนแบบวาวด์เพื่อเพิ่มแรงหมุน โรเตอร์แบบวาวด์แสดงดังภาพที่ 12 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 12 (ก) ลักษณะवादโรเตอร์มอเตอร์ (ข) ลักษณะโรเตอร์แบบवाद

ที่มา: นิรนาม, ม.ป.ป.

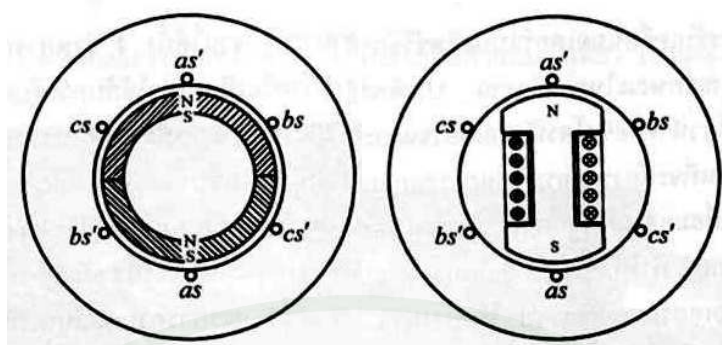
ข. โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor Motor) แสดงดังภาพที่ 13 (ก) มีประมาณ 90 เปอร์เซนต์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากทำได้ง่าย และ ทนทาน โดยประกอบด้วย แผ่นเหล็กบางๆอัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก และ ถูกทำให้เป็นช่องสล็อตขนานกันเพื่อบรรจุ ตัวนำของตัวหมุนลงในช่องสล็อตนั้น ตัวนำที่ฝังจะเป็นแท่งทองแดง อะลูมิเนียม หรือ อลลลอย โดยใน หนึ่งสล็อตจะบรรจุตัวนำเพียงหนึ่งตัวที่ปลายสุดของแท่งตัวนำทั้งสองด้านจะถูกเชื่อมด้วยไฟอย่าง ถาวรจึงไม่สามารถนำความต้านทานจากภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจรตัวหมุนได้ สล็อตของ ตัวหมุนจะวางให้มีลักษณะไม่ขนานกับเพลลา โดยเฉียงเล็กน้อยเพื่อช่วยให้มอเตอร์หมุนได้เร็ว โร เตอร์แบบกรงกระรอกแสดงดังภาพที่ 13 (ข)



ภาพที่ 13 (ก) ลักษณะมอเตอร์โรเตอร์แบบกรงกระรอก (ข) ลักษณะโรเตอร์แบบกรงกระรอก

ที่มา: นิรนาม, ม.ป.ป.

3.2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส การกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องกลไฟฟ้าซิงโครนัสใช้หลักการนำตัวนำหมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กหรือให้เส้นแรงแม่เหล็กหมุนตัดตัวนำก็ได้เช่นกัน โครงสร้างพื้นฐานที่จะกล่าวถึงในที่นี้ เป็นแบบสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งมีขดลวดอาร์เมเจอร์อยู่ที่สเตเตอร์ และ ขดลวดสนามแม่เหล็กอยู่ที่โรเตอร์ สำหรับการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีพิกัดต่ำถึงปานกลาง จะนิยมใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Generator) ดังภาพที่ 14 (ก) เป็นหลัก และ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีพิกัดไฟฟ้าสูงๆ จะนิยมใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบตัวหมุนพันด้วยขดลวด (Synchronous Generator with Wound Rotor) แสดงดังภาพที่ 14 (ข)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 14 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (ก) ตัวโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรแบบสองขั้ว
(ข) โรเตอร์แบบขั้วยื่นแบบสองขั้ว

ที่มา: วีระเชษฐ ชันเงิน. 2552 : 770

3.2.1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบตัวหมุนพันขดลวด (Would-Field Generator)

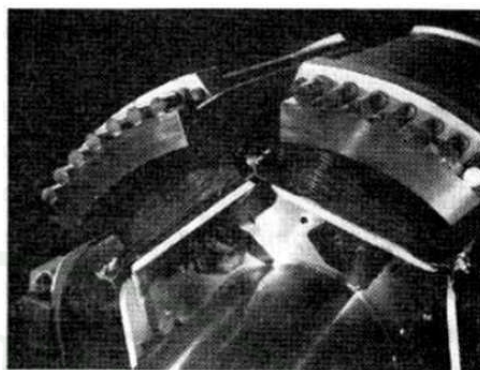
สนามแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์เกิดจากขดลวดกระตุ้น (Excitation Winding) ที่ต่ออยู่ที่ตัวโรเตอร์ โดยขดลวดจะรับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยผ่านทางแปลงถ่าน และ วงแหวน (Slip-Ring) ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากสเตเตอร์จะมีค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 11

แรงบิดจะเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ และ โรเตอร์ ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสไม่สามารถเริ่มเดินเครื่องด้วยตนเองได้ แต่ต้องอาศัยหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะเริ่มเดินเครื่อง

ในส่วนของสเตเตอร์ได้แสดงดังภาพที่ 15 (ก) และ ตัวโรเตอร์ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ใช้ในเขื่อนต่างๆ ตัวโรเตอร์เป็นแบบขั้วยื่นซึ่งช่องว่างอากาศจะไม่มีควมสม่ำเสมอ (Non-Uniform Air-Gap) แสดงดังภาพที่ 15 (ข) และ (ค) ในขณะที่ซิงโครนัสมีพิสัยกำลังไฟฟ้า และ ความเร็วรอบสูง โครงสร้างของโรเตอร์โดยมากจะเป็นทรงกระบอก (Cylindrical Rotor or Round Rotor) ซึ่งช่องว่างอากาศมีความสม่ำเสมอ แสดงดังภาพที่ 15 (ง)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 15 (ก) สเตเตอร์ (ข) โรเตอร์แบบขั้วยื่น (ค) โรเตอร์แบบขั้วยื่นที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ และ (ง) โรเตอร์แบบทรงกระบอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ที่มา: วีระเชษฐ ชันเงิน. 2552 : 762

3.2.2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Generator) สนามแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์อาจจะเปลี่ยนจากขดลวดพันรอบโรเตอร์เป็นการใช้แม่เหล็กถาวรแทนได้ แสดงดังภาพที่ 16 โดยที่แม่เหล็กถาวรจะทำมาจาก เฟอร์ไรต์แบบวัสดุแข็ง เช่น เซรามิกเฟอร์ไรต์ เหล็กอัลลอยด์ นิกเกิล หรือ โคบอลต์ เป็นต้น แต่เนื่องจากเฟอร์ไรต์แบบ

วัสดุแข็งจะมีค่า Remanence และ กำลังบังคับต่ำ ทำให้แม่เหล็กถาวรมีขนาดใหญ่ และ น้ำหนักมาก ในอนาคตอาจจะมีการใช้ Samarium-Cobalt-Rare-Earth Material แทนเฟอร์ไรต์แบบเดิม เพราะ สารดังกล่าวมีค่า Remanence และ กำลังบังคับสูง ทำให้ขนาด และ น้ำหนักลดลง แต่ราคาค่อนข้างสูงของสารดังกล่าวยังมีราคาสูงอยู่ทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้มากนักสำหรับปัญหาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร คือ ไม่สามารถปรับค่ากระแสสนามได้ ซึ่งทำให้ไม่สามารถปรับปรุง ค่าตัวประกอบกำลัง แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องต่ำ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับภายใน (Internal e.m.f) มีค่าแปรตามความเร็ว ซึ่งสำหรับกรณีที่ต้องการค่าความเร็วหรือค่าความถี่ที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรให้มีค่าคงที่ผลของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับภายในก็จะสามารถยกเว้นไม่นำมาพิจารณาได้ แต่สำหรับการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง จะต้องมีการใช้ขั้วแรงดันสูง เพราะผลของของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับภายในดังกล่าว

สำหรับข้อดีของเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร คือ ไม่ต้องใช้ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และ ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่ตัวโรเตอร์ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

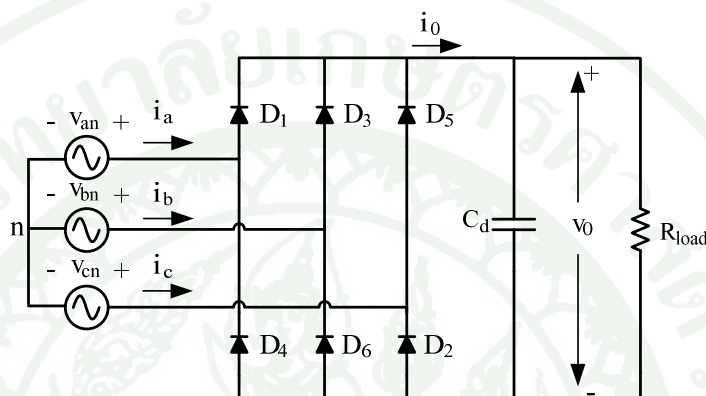


ภาพที่ 16 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร

ที่มา: นรินาม, ม.ป.ป.

4. วงจรเรียงกระแส

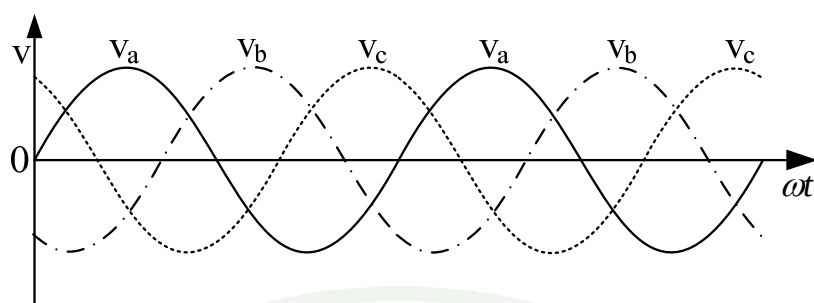
วงจรเรียงกระแสแบบไดโอดสามเฟสแสดงในภาพที่ 17 เป็นวงจรพื้นฐานที่ใช้แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับมาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (วีระเชษฐ์ ชันจิน. 2552)



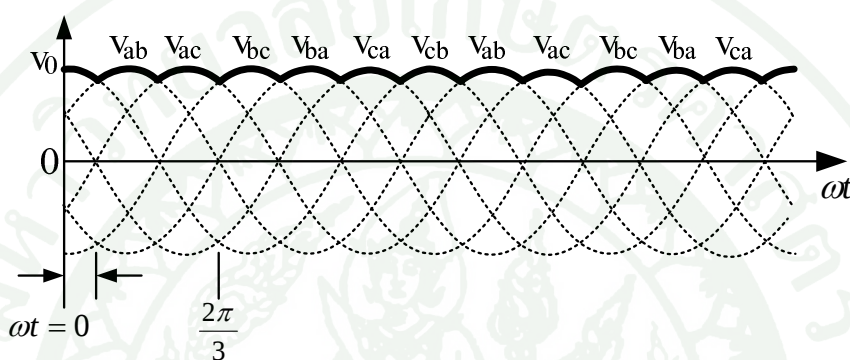
ภาพที่ 17 วงจรเรียงกระแสสามเฟส

หลักการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟส เมื่อพิจารณาจากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) จะพบว่ามิไดโอดของวงจรเรียงกระแสชุกบนเพียงตัวเดียวที่นำกระแสในเวลานึงๆ คือไดโอด D_1 , D_3 หรือ D_5 โดยไดโอดที่นำกระแสไฟฟ้าจะมีด้านแอโนดต่ออยู่กับแรงดันไฟฟ้าเฟสซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในเวลานึงๆ และ ไดโอดชุกล่างเพียงตัวเดียวที่นำกระแสในเวลานึงๆ คือไดโอด D_2 , D_4 หรือ D_6 ไดโอดที่นำกระแสไฟฟ้าจะมีด้านแคโทดที่ต่ออยู่แรงดันไฟฟ้าซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดในเวลานึงๆ กล่าวคือไดโอดที่อยู่ในกิ่งเดียวกันไม่สามารถนำกระแสไฟฟ้าพร้อมกันได้ และ แรงดันที่ตกคร่อมโหลดคือแรงดันระหว่างเฟส (Line-to-Line) ของแหล่งจ่าย ไดโอดคู่ที่นำไฟฟ้าจะเป็นไดโอดต่อระหว่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสที่มีค่าสูงสุดในช่วงเวลานั้น เช่น แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสมีแรงดันด้านออกคือ V_{ac} ไดโอด D_1 และ D_2 นำกระแสเป็นต้น

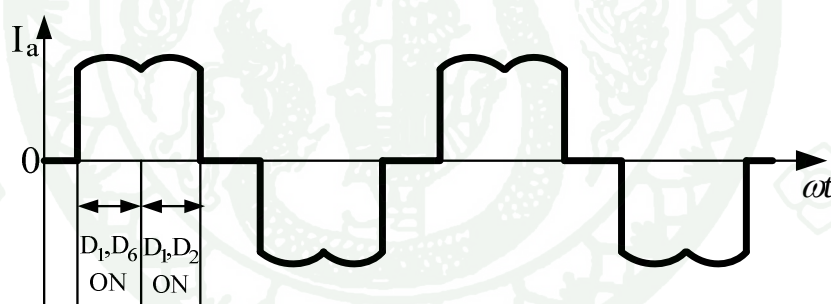
แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสมีความเป็นไปได้อยู่ 6 รูปแบบ ช่วงแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเป็นช่วง 60 องศา ดังนั้นวงจรเรียงกระแสนี้มักถูกเรียกว่า วงจรเรียงกระแสแบบหกรูปคลื่น ซึ่งนับจากการเปลี่ยนค่าสูงสุดในหนึ่งคาบ



(ก) แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า



(ข) แรงดันไฟฟ้าด้านออก

(ค) กระแสไฟฟ้าเฟส i_a

ภาพที่ 18 แรงดันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด

ภาพที่ 18 (ก) แรงดันไฟฟ้าเฟส ภาพที่ 18 (ข) แสดงถึงการเกิดแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส และ ภาพที่ 18 (ค) แสดงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดในวงจรที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน จะเห็นว่าไดโอดจะนำกระแสเป็นคู่ๆ และ ไดโอดจะนำกระแสไฟฟ้าเป็นลำดับคือ 1,2,3,4,5,6,1,...

กระแสไฟฟ้าที่ไดโอดจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าโหลด เพื่อที่จะหากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสของแหล่งจ่ายจะพิจารณาจากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ที่โหนด a, b และ c จากสมการที่ (12)

$$i_a = i_{D1} - i_{D4}$$

$$i_b = i_{D3} - i_{D6} \quad (12)$$

$$i_c = i_{D5} - i_{D2}$$

ไดโอดแต่ละตัวนำกระแสเพียงหนึ่งในสามของคาบเวลา ดังนั้นจะได้

$$I_{D,av} = \frac{1}{3} I_{0,av}$$

$$I_{D,rms} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{0,rms} \quad (13)$$

$$I_{s,rms} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{0,rms}$$

เมื่อ	$I_{D,av}$	คือ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของไดโอด
	$I_{D,rms}$	คือ รากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไดโอด
	$I_{s,rms}$	คือ รากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสแหล่งจ่าย
	$I_{0,av}$	คือ กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด
	$I_{0,rms}$	คือ รากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสโหลด

ค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสย้อนกลับสูงสุดที่ตกคร่อมไดโอดจะเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าขอดระหว่างเฟสรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด D_1 เมื่อไดโอด D_1 นำกระแสค่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าประมาณศูนย์ ในขณะที่หยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ v_{ab} เมื่อไดโอด D_3 นำกระแสและ จะมีค่าเท่ากับ v_{ac} เมื่อไดโอด D_5 นำกระแส

สัญญาณคาบของแรงดันไฟฟ้าด้านออกนิยามได้ดังสมการที่ (14)

$$v_0(\omega t) = V_{m,L-L} \sin(\omega t) \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3} \quad (14)$$

ทำให้คาบเวลาในการหาสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์มีค่าเท่ากับ $\frac{\pi}{3}$ และ เนื่องจากเป็นรูปคลื่นแบบสมมาตรทำให้สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันไซน์มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้อนุกรมฟูเรียร์ของแรงดันไฟฟ้าด้านออกเท่ากับสมการที่ (15)

$$v_0(t) = V_0 + \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\alpha} V_n \cos(n\omega_0 t + \pi) \quad (15)$$

ในการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าด้านออกเฉลี่ยจะกระทำในช่วง 60 องศา โดยจะเริ่มจากส่วนยอดของแรงดันสาย (V_{L-L}) จะเริ่มคำนวณจาก $\frac{\pi}{3}$ ถึง $\frac{2\pi}{3}$ ซึ่งในหนึ่งคาบจะมีลูกคลื่นอยู่ 6 ลูก คลื่นคล้ายกันทุกลูกเวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตจึงมีคาบ ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกหรือค่าองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงหาได้จากสมการที่ (16)

$$V_0 = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (16)$$

โดยที่ $V_{m,L-L}$ หมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าขั้วระหว่างสายซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}V_{L-L,rms}$

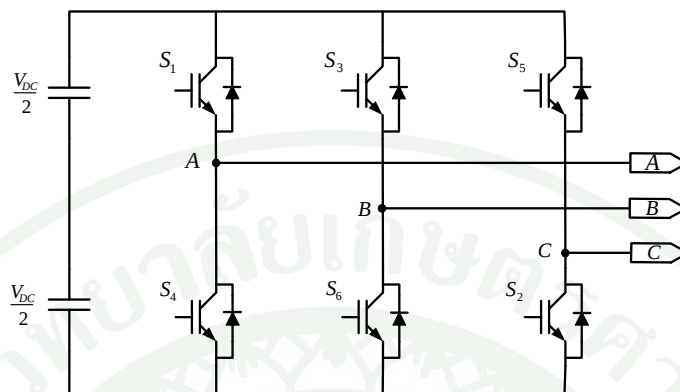
ค่ากำลังปรากฏ (Apparent Power) จากแหล่งจ่ายหาได้จากสมการที่ (17)

$$S = \sqrt{3}V_{L-L,rms} I_{S,rms} \quad (17)$$

5. วงจรผกผัน

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ นิยมแปลงผันผ่านวงจรผกผันสามเฟสซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพราะถ้าหากจะใช้วงจรผกผันเฟสเดียวแบบฟลูบรีดจ์จำนวน 3 ชุดได้ แต่ต้องใช้สวิตช์จำนวนถึง 12 ตัว นอกจากนั้นยังต้องอาศัยวงจรควบคุมที่ทำให้แต่ละเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูล จึงไม่เหมาะที่จะเลือกใช้วงจรผกผันเฟสเดียวแบบฟลูบรีดจ์สามตัว จึงมีการพัฒนางจรผกผันแบบสามเฟสขึ้นมาที่สามารถ

ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ทั้งขนาด และ ความถี่ดังแสดงในภาพที่ 19 จะเห็นว่ามิสวิตช์ และ ไดโอดจำนวนอย่างละ 6 ตัว และ ประกอบด้วยสามกิ่งหรือสามเฟส

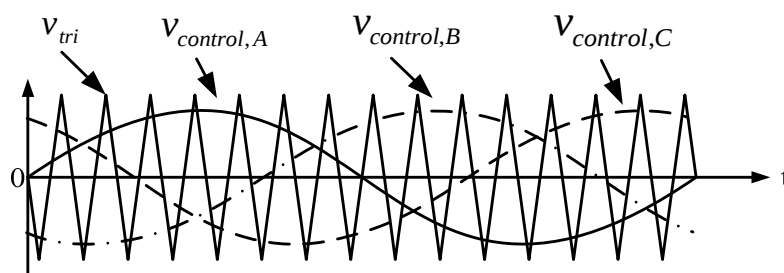


ภาพที่ 19 วงจรพื้นฐานวงจรผกผันสามเฟส

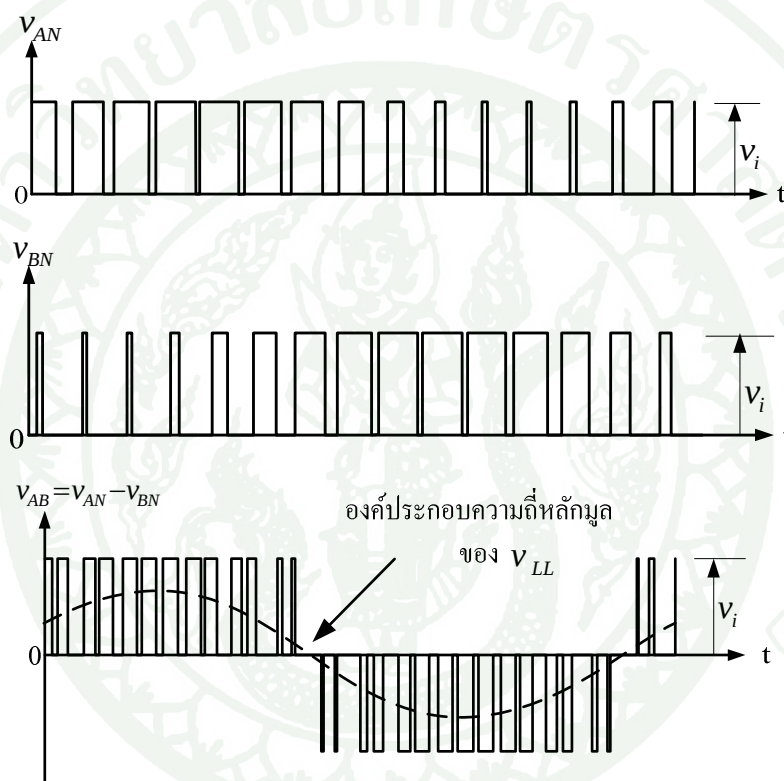
หลักการทำงานของวงจรผกผันสามเฟสนั้น จะมีการสร้างสัญญาณในการควบคุมการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละตัว สัญญาณที่สร้างขึ้นนั้นจะเป็นแบบพัลส์วidthมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation: PWM) เพื่อลดสัญญาณฮาร์โมนิก (Harmonic) ในระบบ เทคนิค และ วิธีการสร้างสัญญาณแบบพัลส์วidthมอดูเลชันนั้นมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มากในปัจจุบันในงานที่เกี่ยวข้องกับการขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามีอยู่ 2 วิธี (Zhou and Wang, 2002) คือ เทคนิคการมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Pulse-Width Modulation: SPWM) และ เทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (Space Vector Modulation: SVM)

5.1. การสร้างสัญญาณพัลส์วidthมอดูเลชันด้วยเทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ (SPWM)

การสร้างสัญญาณพัลส์วidthมอดูเลชันด้วยเทคนิค SPWM ถือได้ว่าเป็นวิธีการพื้นฐานในการสร้างสัญญาณแบบพัลส์วidthมอดูเลชันในวงจรผกผันสามเฟส เนื่องจากมีหลักการในการสร้างที่ง่าย และไม่ซับซ้อน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 20 เทคนิคการมอดูเลชันความกว้างพัลส์แบบไซน์

หลักการทำงานของเทคนิคการมอดูเลชันความกว้างพัลส์แบบไซน์จะใช้ลักษณะของการเปรียบเทียบสัญญาณ 2 สัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 20 คือใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมเรียกว่า สัญญาณพาห้ (Carrier signal) เปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมรูปไซน์เรียกว่า สัญญาณควบคุม (Control Signal) สำหรับวงจรพหุคูณสามเฟสนั้นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ใช้มีทั้งหมด 3 สัญญาณ และ แต่ละสัญญาณมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา เพื่อสร้างสัญญาณสามเฟสแบบพีดับเบิลวีม จากภาพที่ 20

(ก) ค่าแอมปริจูดระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และ สัญญาณสามเหลี่ยมนั้นจะมีค่าเท่ากัน แต่ ความถี่ระหว่างสองสัญญาณนั้นจะมีค่าไม่เท่ากันคือ ค่าความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์นั้นจะมีค่า อยู่ในช่วงที่ใช้งานกับโหลดที่นำมาใช้งาน มีค่าความถี่อยู่ที่ 50 เฮิร์ตซ์ ในส่วนค่าความถี่ของ สัญญาณรูปคลื่นสามสัญญาณนั้นจะเป็นตัวกำหนดสัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น

ในการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มนั้นเป้าหมายคือ ต้องการที่จะปรับเปลี่ยนปริมาณของ แรงดัน และ ความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับโหลดไฟฟ้า ในการปรับปริมาณของแรงดัน และ ความถี่ของแหล่งจ่ายนั้นสามารถกระทำได้โดยการหาอัตราส่วนของ m_a และ m_f โดยที่ m_a คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดแรงดันของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และ สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ดัง สมการที่ (18)

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (18)$$

โดยที่ $V_{control}$ คือ ค่าสูงสุดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และ V_{tri} คือค่าสูงสุดของสัญญาณ สามเหลี่ยม

m_f คือ อัตราส่วนระหว่างความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม และ สัญญาณรูปคลื่น ไซน์ ดังสมการที่ (19)

$$m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{control}} \quad (19)$$

โดยที่ $f_{carrier}$ คือ ค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม
 $f_{control}$ คือ ค่าความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์

ในการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันหรือความถี่นั้นจะกระทำเฉพาะสัญญาณรูปคลื่นไซน์เท่านั้น ในส่วนของสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นจะไม่มีการปรับเปลี่ยน ในการกำหนดค่าขนาดของสัญญาณใน สมการที่ (18) นั้นจะต้องกำหนดให้ m_a นั้นมีค่าอยู่ในช่วง $m_a \leq 1$ เนื่องจากเป็นช่วงที่วงจรพกผัน ทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น ในย่านเชิงเส้นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลในหนึ่งเฟสจะมีค่า ดังสมการ (20)

$$V_{AN} = m_a \times \frac{V_d}{2} \quad (20)$$

โดยที่ V_d คือ แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง
 ในส่วนของแรงดัน V_{LL} หรือ V_{AB} นั้นจะมีค่าตามสมการ

$$V_{LL} = V_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (V_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times m_a \times \frac{V_d}{2} = 0.612 \times m_a \times V_d \quad (21)$$

ความหมายของการทำงานในย่านเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น หากจ่ายแรงดันเชื่อมโยง 311 โวลต์ เมื่อปรับ $m_a = 0.5$ จะได้แรงดันจะได้แรงดันเท่ากับ $0.612 \times 0.5 \times 311 = 95.17$ โวลต์ การกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม $f_{carrier}$ นั้นจะคำนึงถึงการเกิดฮาร์โมนิกของแรงดันด้านออก ซึ่งการกำหนดค่าความถี่นั้นจะสามารถกำหนดการเกิดของฮาร์โมนิกได้ โดยจะกำหนดให้เกิดห่างจากค่าความถี่หลักมูล เพื่อต่อการสร้างวงจรกรองฮาร์โมนิก การเกิดของฮาร์โมนิกจะเป็นฮาร์โมนิกเลขคี่เกิดขึ้นที่ไซด์แบนของ m_f และ จำนวนเท่าของ m_f และ ผลจากค่าของแรงดัน V_{AN} , V_{BN} และ V_{CN} นั้นมีเฟสต่างกัน 120 องศา ส่งผลให้เฟสจะเท่ากันทุกๆ $3m_f$ ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะไม่มีฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 หารลงตัวเช่น 3, 9, 15, 21 เป็นต้น นอกจากนี้สำหรับในกรณีแรงดันเฟสที่มีโหลดสมดุล ค่าแรงดันระหว่างสายจะไม่มีฮาร์โมนิกเลขคู่ เช่น ฮาร์โมนิก 2, 4, 6, 8 เป็นต้น สามารถสรุปประเด็นสำคัญของวงจรพ่นสามเฟสที่มีการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิค SPWM ได้ดังนี้

ที่ค่า $m_f \leq 21$ หากต้องการกำจัดฮาร์โมนิกเลขคู่จะต้องใช้การสวิตซ์ซึ่งแบบพีดับบลิวเอ็มที่ซิงโครไนส์ หมายถึง m_f จะต้องเป็นจำนวนเต็ม และ ความถี่หลักมูลจะเริ่ม และ จบคาบพร้อมกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม และ m_f ต้องเป็นจำนวนเลขคี่

ที่ค่า $m_f \geq 21$ ฮาร์โมนิกย่อยที่เกิดขึ้นจากการสวิตซ์ซึ่งแบบพีดับบลิวเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์ (m_f ไม่เป็นจำนวนเต็ม) จะมีค่าน้อย แต่ต้องตระหนักว่าควรหลีกเลี่ยงการสวิตซ์ซึ่งแบบพีดับบลิวเอ็มแบบไม่ซิงโครไนส์ เพราะจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกย่อยใกล้เคียงกับความถี่หลักมูล

ที่ค่า $m_a > 1$ หากไม่พิจารณาค่าของ m_f จะมีผลเช่นเดียวกับกรณีที่ 1

ทั้งหมดที่กล่าวในข้างต้นคือ หลักการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคการมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีข้อดีคือ ง่ายต่อการสร้างสัญญาณควบคุม และ สามารถใช้

ความถี่สวิตช์ซึ่งเกิดได้ห่างจากความถี่หลักมูลมาก ซึ่งจะทำให้สะดวกในการออกแบบวงจรกรองความถี่ และ มีขนาดเล็ก แต่ข้อเสียคือ จะใช้แรงดันบัลลิสต์ตรงได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน และ ในการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นอาจเกิดกรณีที่ไมซิงโครไนส์ อันเนื่องมาจากกระบวนการทำงานของฮาร์ดแวร์ จึงอาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องของฮาร์โมนิกย่อยที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับความถี่หลักมูล จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการคิดค้นเทคนิคการสวิตช์ในรูปแบบใหม่โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

5.2. การสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVM)

การสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็ม ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVM) นั้น จัดเป็นเทคนิคการมอดูเลชันขั้นสูงสำหรับวงจรพหุสามเฟส และ เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า เนื่องจากการสร้างสัญญาณด้วยเทคนิคดังกล่าวเป็นการใช้หลักการจากการหมุนของสนามแม่เหล็กภายในเครื่องกลไฟฟ้าแบบหมุน ข้อดีในการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มด้วย เทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชันคือ เทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรควบคุมแบบดิจิทัล และ ให้แรงดันเอาต์พุตสูงกว่าวิธีมอดูเลชันพื้นฐาน SPWM 15% อีกทั้งยังสามารถสร้างสัญญาณ พีคดับลิวเอ็มที่มีรูปแบบการจัดเรียงการสวิตช์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสวิตช์โดยไม่จำเป็นได้ซึ่งทำให้ลดการสูญเสียในกระบวนการสวิตช์ ทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น และ เกิดฮาร์-มอนิกต่ำกว่า ในการควบคุมแรงดัน 3 เฟส จะควบคุมเฉพาะเวกเตอร์อ้างอิงตัวเดียวเท่านั้น ซึ่งต่างจาก SPWM ที่ใช้แรงดันควบคุมแยกกันทั้ง 3 เฟส

หลักการในการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็ม ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน มาจากการศึกษาเกี่ยวกับหลักการสนามแม่เหล็กหมุนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า แรงดันไซน์ที่สร้างขึ้นจะเกิดจากเวกเตอร์ที่มีขนาดคงที่ และ มีความเร็วคงที่ ซึ่งจะอ้างอิงกับเวกเตอร์อ้างอิง ($\vec{V}$) เทคนิคนี้สามารถจะเปลี่ยนแปลงจากปริมาณ 3 เฟส ไปเป็นปริมาณ 2 เฟส (แปลงจากพิกัด abc เป็น $\alpha\beta$) โดยเริ่มจากสมการแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมมูลสามารถเขียนดังสมการที่ (22)

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

$$V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (22)$$

$$V_c = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

โดยที่ V_m เป็นค่ายอดแรงดันไฟฟ้า

จากสมการที่ (22) แรงดันไฟฟ้าด้านออกนั้นเป็นแรงดันที่มีความต่างเฟสกัน 120 องศาทางไฟฟ้า จะทำการวิเคราะห์เหมือนกับเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากง่ายต่อการคำนวณ และการควบคุม ดังนั้นจะต้องทำการแปลงแรงดันสามเฟสให้เป็นแรงดันสองเฟส โดยใช้ Clarke Transform การแปลงจากสามแกน abc ให้เป็นสองแกน $\alpha\beta$ ใช้สมการดังนี้

$$\vec{V} = V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (23)$$

โดยที่ $a = 1e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

และ $a^2 = 1e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

นำค่าของ a และ a^2 แทนในสมการที่ (23) จะได้ตามสมการที่ (24)

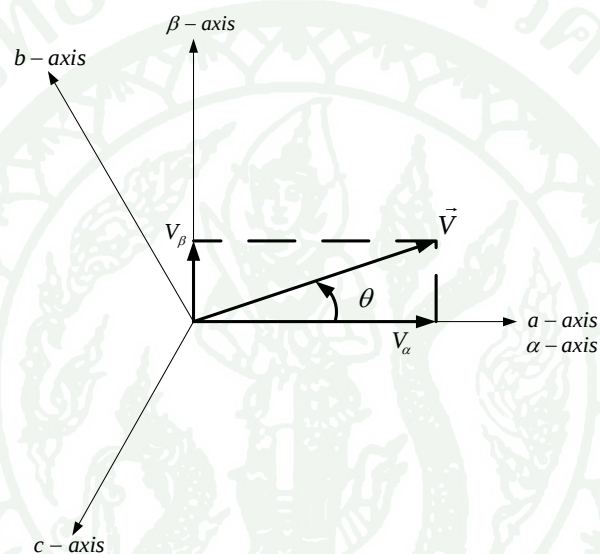
$$\vec{V} = V_\alpha + jV_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}}(V_a + (\frac{1}{2} \times V_b) + (j\frac{\sqrt{3}}{2} \times V_b) - (\frac{1}{2} \times V_c) - (j\frac{\sqrt{3}}{2} \times V_c)) \quad (24)$$

ทำการแยกส่วนของจำนวนจริง และ จำนวนจินตภาพจะได้ค่าของ V_α และ V_β ตามสมการที่ (25)

$$V_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(V_a - \left(\frac{1}{2} \times V_b \right) - \left(\frac{1}{2} \times V_c \right) \right) \quad (25)$$

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

จากการคำนวณเพื่อการแปลงจากแกน abc เป็นสองแกน $\alpha\beta$ สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์ไดอะแกรมดังภาพที่ 21



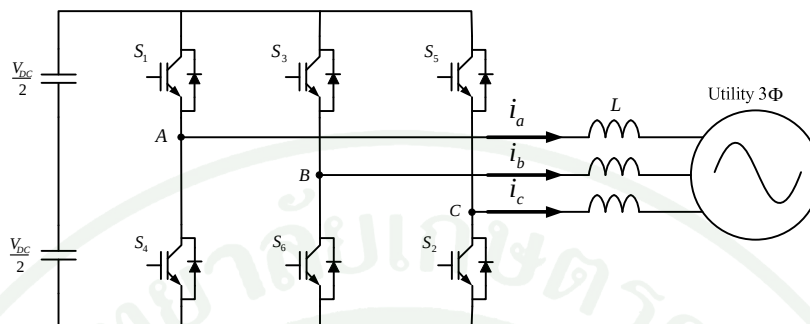
ภาพที่ 21 เวกเตอร์ไดอะแกรมแปลงแกน abc เป็น $\alpha\beta$

จากภาพที่ 21 จะเห็นว่าเมื่อทำการแปลงจากแกน abc เป็นแกน $\alpha\beta$ แล้วผลรวมทางเวกเตอร์ของแกน α และ β ในแต่ละช่วงเวลานั้นจะเกิดเวกเตอร์ $\vec{V}$ ขึ้นมา ซึ่งเวกเตอร์ดังกล่าว นั้นจะหมุนเป็นวงกลมทุกๆการเปลี่ยนแปลงของ θ การเกิดของเวกเตอร์ดังกล่าวนี้เป็นที่มาของหลักการในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น โดย $\vec{V}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (26) และมุม θ คำนวณได้จากสมการที่ (27)

$$\vec{V} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (26)$$

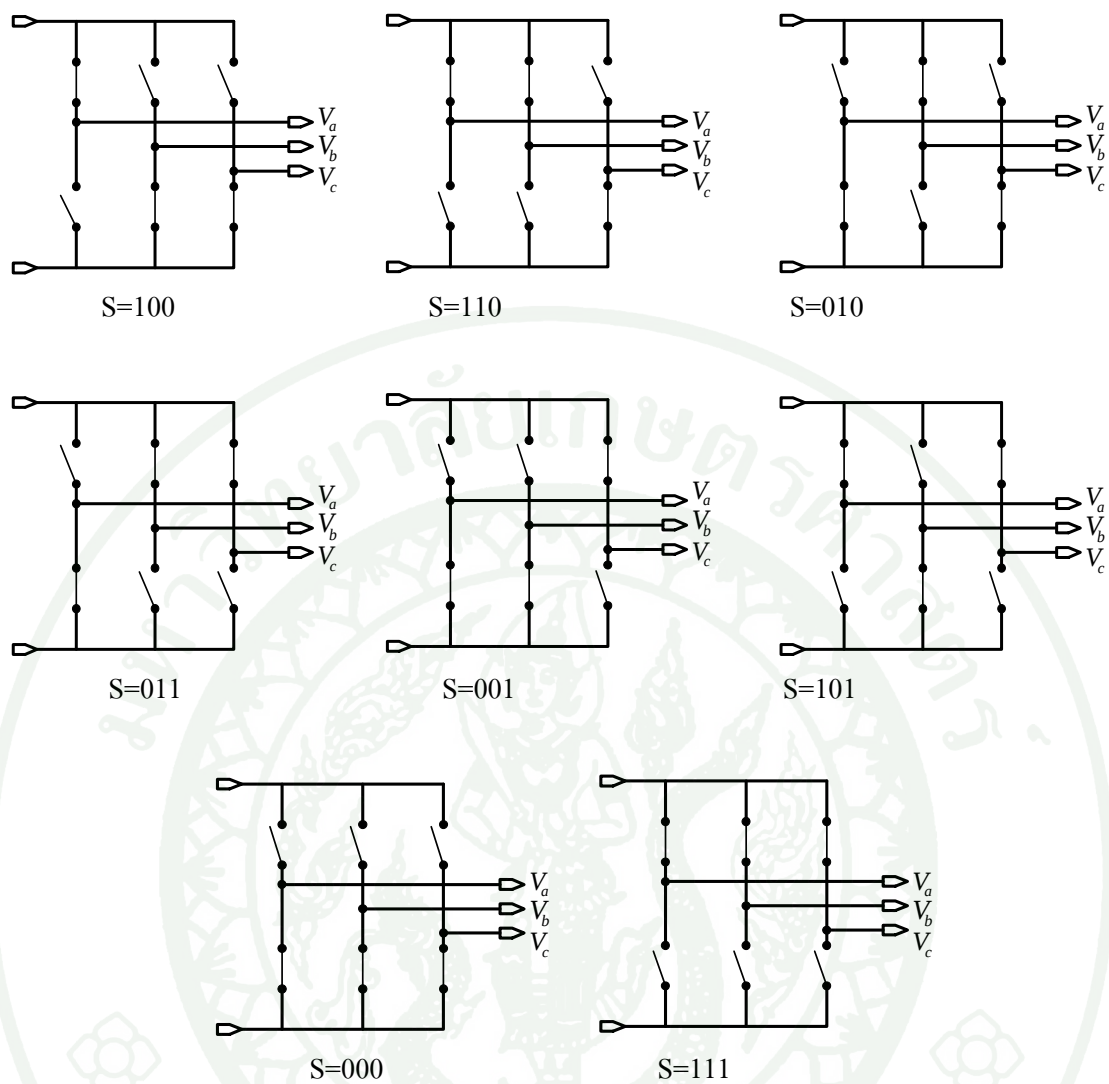
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_\beta}{V_\alpha} \right) \quad (27)$$

การควบคุมวงจรพ่นสามเฟสดังแสดงในภาพที่ 22 หลักการควบคุมสวิตช์ของวงจรพ่นนั้นสามารถแบ่งการสวิตช์ออกเป็น 8 สถานะดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 22 วงจรพ่นสามเฟส

จากภาพที่ 23 สามารถนำมาเขียนตารางแสดงสถานะการทำงานของสวิตช์ได้ดังตารางที่ 1 การทำงานของสวิตช์นั้นจะคิดเพียง 6 สถานะเท่านั้นเนื่องจากสถานะที่ $S = 000$ และ $S = 111$ นั้นจะไม่มีแรงดันทางด้านเอาต์พุต

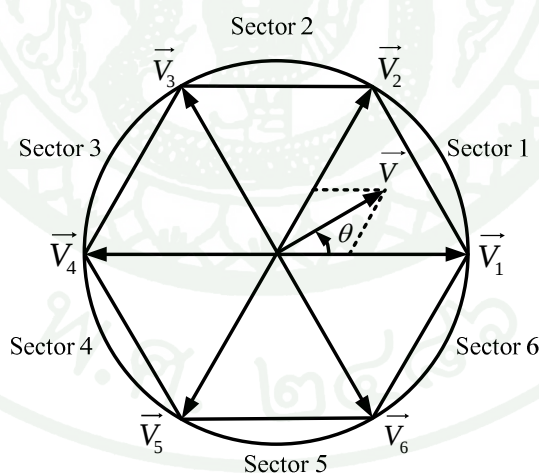


ภาพที่ 23 สถานะการทำงานของสวิตช์ 8 สถานะ

ตารางที่ 1 สถานะการทำงานของสวิตช์ทั้ง 8 สถานะ

S_a	S_b	S_c	Switching State	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	Voltage Vector
0	0	0	nnn	0	0	0	$\vec{V}_0$
1	0	0	pnn	V_{dc}	0	$-V_{dc}$	$\vec{V}_1$
1	1	0	ppn	0	V_{dc}	$-V_{dc}$	$\vec{V}_2$
0	1	0	npn	$-V_{dc}$	V_{dc}	0	$\vec{V}_3$
0	1	1	npp	$-V_{dc}$	0	V_{dc}	$\vec{V}_4$
0	0	1	nnp	0	$-V_{dc}$	V_{dc}	$\vec{V}_5$
1	0	1	pnP	V_{dc}	$-V_{dc}$	0	$\vec{V}_6$
1	1	1	ppp	0	0	0	$\vec{V}_7$

จากตารางที่ 1 สามารถนำมาเขียนเป็นเวกเตอร์ไคอะแกรมของแรงดันทั้ง 8 สถานะได้ดังภาพที่ 24 เพื่อเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ $\vec{V}$ ในแต่ละเซกเตอร์ทำงานของสวิตช์



ภาพที่ 24 เวกเตอร์ไคอะแกรมของแรงดันในแต่ละสถานการณ์ทำงานของสวิตช์

ขั้นตอนในการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น สามารถสร้างโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1. เลือกเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ โดยคำนวณค่าของ $\vec{V}$ และ มุม θ เพื่อที่จะทราบถึงสถานะของการสวิตช์ จะใช้การคำนวณโดยสมการแปลงแกน เพื่อที่จะหาค่า V_α, V_β และ มุม θ จากผลของ V_α, V_β ที่คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta/abc} \times \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad \text{โดยที่} \quad T_{\alpha\beta/abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\vec{V}_{ref} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}_{ref} = \vec{V} \times e^{j\theta} \quad (29)$$

$$\vec{V} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (30)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_\beta}{V_\alpha} \right) \quad (31)$$

ขั้นตอนที่ 2. อัตราส่วนคิวดีไอเซลของเวกเตอร์การสวิตช์ที่เซกเตอร์ 1
พิจารณาจากภาพที่ 25 การทำงานของสวิตช์ในเซกเตอร์ 1 เขียนผลรวมของการสวิตช์ได้ดังสมการ (32)

กำหนดให้ $\vec{V}_{ref}$ เป็นค่าคงที่ในเวลา T_s

$$\vec{V}_{ref} \cdot T_s = (\vec{V}_1 \times T_1) + (\vec{V}_2 \times T_2) \quad (32)$$

$$\vec{V} \times \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix} \times T_s = \|\vec{V}_1\| \times T_1 + \|\vec{V}_2\| \times \begin{bmatrix} \cos 60^\circ \\ \sin 60^\circ \end{bmatrix} \times T_2 \quad (33)$$

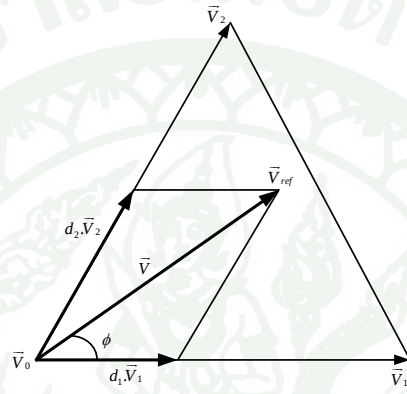
$$\text{ที่ } \phi = \theta - 30^\circ$$

จากสมการที่ (32) และ (33) หาอัตราส่วนคิวดีไอเซลได้ดังนี้

$$\frac{T_1}{T_s} = d_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{\vec{V}}{\|\vec{V}_1\|} \times \sin(60^\circ - \phi) \quad (34)$$

$$\frac{T_2}{T_s} = d_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{\vec{V}}{\|\vec{V}_2\|} \times \sin \phi \quad (35)$$

$$d_0 = 1 - d_1 - d_2 \quad (36)$$



ภาพที่ 25 เวกเตอร์ไดอะแกรมของ $\vec{V}_{ref}$

จากทุกๆ เวกเตอร์การสวิตช์ $\|\vec{V}_N\| = \sqrt{2} \times V_{dc}$ และ $\vec{V} = \sqrt{\frac{3}{2}} \times V_m$ (37)

นำสมการที่ (37) แทนลงในสมการที่ (34) และสมการที่ (35)

$$d_N = \frac{V_m}{V_{dc}} \times \sin(60^\circ - \phi) \quad (38)$$

$$d_{N+1} = \frac{V_m}{V_{dc}} \times \sin \phi \quad (39)$$

$$d_0 = 1 - d_N - d_{N+1} \quad (40)$$

โดยที่ $\phi = \theta - (N-1) \cdot 60^\circ - 30^\circ$

N คือ หมายเลขเซกเตอร์ (1-6)

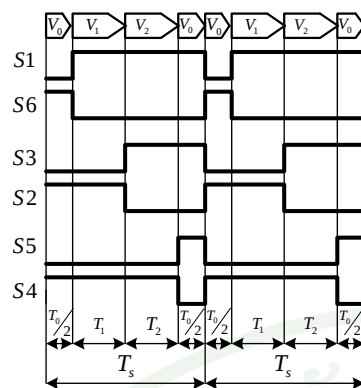
กำหนดการมอดูเลต $M = \frac{V_m}{V_{dc}}$ นำไปแทนลงในสมการที่ (41) และสมการที่ (42) จะได้เป็น

$$d_N = M \times \sin(60^\circ - \phi) \quad (41)$$

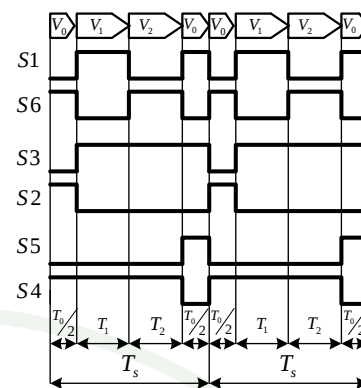
$$d_{N+1} = M \times \sin \phi \quad (42)$$

$$d_0 = 1 - d_N - d_{N+1} \quad (43)$$

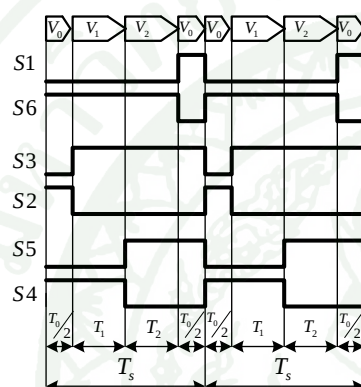
ขั้นตอนที่ 3. หาช่วงเวลาการสวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัว (S0 ถึง S6) รูปสถานะของการสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์แสดงดังภาพที่ 26



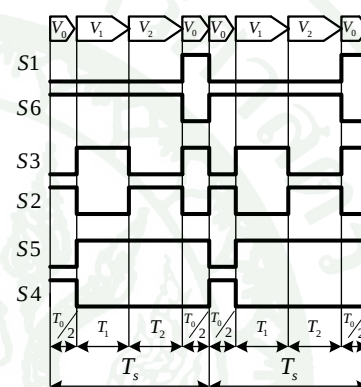
(ก) เชกเตอร์ 1



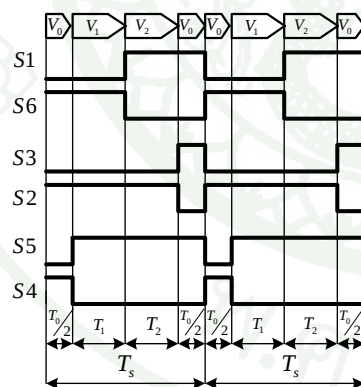
(ข) เชกเตอร์ 2



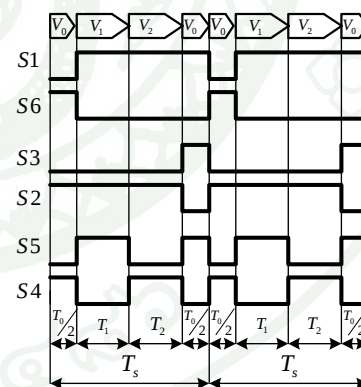
(ค) เชกเตอร์ 3



(ง) เชกเตอร์ 4



(จ) เชกเตอร์ 5



(ฉ) เชกเตอร์ 6

ภาพที่ 26 รูปแบบการสวิตช์ของแต่ละเชกเตอร์

6. ผลกระทบของการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดพลังงานแบบกระจายเข้ากับระบบไฟฟ้า

การที่จะเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distribution Generator : DG) เข้ากับระบบการไฟฟ้านั้นจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าในด้านต่างๆดังนี้

6.1. ผลกระทบที่มีต่อแรงดัน

6.1.1. DG เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจริงที่มีตัวประกอบกำลังคงที่

6.1.2. การมีกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบที่ตำแหน่งใดๆจะทำให้แรงดันที่ตำแหน่งนั้นสูงขึ้นได้

6.1.3. ถ้า DG เป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าไปในระบบ แต่จะดึงกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟออกจากระบบ

6.1.4. ถ้า DG เป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะสามารถปรับตัวประกอบกำลังให้จ่ายหรือดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ จึงสามารถใช้เป็น Voltage Regulator ได้

6.1.5. ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล (ที่ไม่มี DG) จะมีระดับแรงดันลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากสถานีไฟฟ้าต้นทางควบคุมระดับแรงดันโดยใช้คาปาซิเตอร์ หรือ Step-Type Voltage Regulator (SVR) หรือการเปลี่ยนค่า Tap ของหม้อแปลง

6.1.6. ระบบจำหน่ายที่มีขนาดใหญ่ โหลดของระบบจะมีค่ามาก สายส่งมีระยะไกล การติดตั้ง DG ให้กับโหลดจะช่วยยกระดับแรงดันปลายทางที่โหลดให้สูงขึ้น

6.2. ผลกระทบที่มีต่อความสูญเสียทางไฟฟ้า

6.2.1. DG ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง ทำให้ลดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายมาจากสถานีไฟฟ้าย่อย และ ลดขนาดกระแสที่ไหลในสายส่ง ทำให้กำลังสูญเสียในสายส่งลดลง

6.2.2. ถ้า DG มีขนาดใกล้เคียงกับโหลด และ เชื่อมต่อกับระบบในตำแหน่งที่ใกล้กับ โหลด จะทำให้ความสูญเสียรวมในระบบลดลง

6.2.3. ถ้า DG อยู่ไกลจากสถานีไฟฟ้าย่อย แต่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยหรือ ย้อนกลับเข้าไปในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จะทำให้ความสูญเสียในระบบจำหน่ายสูงขึ้น แต่ความสูญเสียในระบบส่งจ่ายลดลง

6.3. ผลกระทบที่มีต่อการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกัน

6.3.1. ความผิดปกติ (Fault) กระแสมีค่าสูงกว่าปกติ เมื่อมี DG ต่อเข้ามาในระบบ จำหน่าย จะทำให้ความผิดปกติกระแส มีค่าสูงขึ้น อาจทำให้ความเสียหายให้อุปกรณ์ป้องกันทั้งของการไฟฟ้า และ ผู้ใช้ไฟรายอื่น

6.3.2. การตั้งค่าของ รีเลย์ มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

6.3.3. มีการตัด DG ออกจากระบบบ่อยเกินไป ปกติเมื่อมีการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ DG ต้องปลดตัวเองออกจากระบบ แต่บ่อยครั้งที่ DG ตรวจจับความผิดปกติ ในสายส่งข้างเคียงแล้วปลดตัวเองออกโดยไม่จำเป็น

6.3.4. เกิดปัญหาจากการทำงานของ รีโกลสเซอร์ การเชื่อมต่อนี้ที่มี DG กำลังจ่ายไฟอยู่ อาจทำให้เกิดปัญหา Out-of-Phase ของ DG กับระบบไฟฟ้าหลัก อาจทำให้เกิดผลกระทบดังนี้

- ก. เกิดแรงดันเกินได้ถึง 3 เท่า
- ข. กระแสกระชากชั่วขณะ สูงมากไหลเข้าหม้อแปลงหรือมอเตอร์
- ค. แรงบิดเกิดการเปลี่ยนแปลงฉับพลันที่มอเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้า

6.4. ผลกระทบที่มีต่อเสถียรภาพของระบบเนื่องจากการถูกจ่ายไฟฟ้าแบบแยกตัวอิสระ (Islanding)

6.4.1. แรงดัน และ ความถี่ของระบบที่เชื่อมต่อกับ DG จะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมได้ ส่งผลเสียต่อผู้ใช้ไฟฟ้า

6.4.2. DG ไม่สามารถปรับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายอยู่ได้ ทำให้ไม่สามารถรองรับโหลดที่เหลืออยู่ โดยไม่มีสถานีไฟฟ้าช่วยจ่ายโหลด

6.4.3. การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในส่วนที่เหลือของวงจร อาจไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ

6.4.4. อาจเกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานด้านการบำรุงรักษา เนื่องจากระบบยังมีการจ่ายไฟจาก DG หลังจากตัดวงจรออกจากสถานีไฟฟ้าแล้ว

6.4.5. อาจเกิดปัญหาเมื่อมีการ รีโคลสเซอร์ ส่วนของ Islanding เข้ากับระบบหลัก

ปัญหาระบบไฟฟ้าที่เกิดจากฮาร์มอนิกแบ่งเป็น ผลกระทบที่ไม่รุนแรงแต่ทำให้เกิดความสูญเสียในระยะยาวเช่น เพิ่มกำลังสูญเสียในระบบ ลดประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ ลดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ หรือทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาด และ ผลกระทบที่รุนแรงอาจจะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายหรือเกิดระเบิดได้ จึงได้มีมาตรฐานฮาร์มอนิกเพื่อกำหนดขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแส และ แรงดันที่เกิดจากฮาร์มอนิกไม่ให้มีความเพี้ยนเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดก่อนที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบการไฟฟ้าโดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

7. มาตรฐานฮาร์มอนิก

การเชื่อมต่อระบบแปลงผันพลังงานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดัน และ กระแสในระบบจำหน่ายไฟฟ้าผิดเพี้ยนมากเกินไปกว่ามาตรฐานที่กำหนดใน IEEE Std. 519-1992: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems เป็นมาตรฐานที่แนะนำเรื่องการจัดการ และ ควบคุมฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และ PRC - PQG - 01/1998 เป็นข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจ และ อุตสาหกรรม

7.1. ฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิกคือ ส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มทวีคูณของความถี่หลักมูล เมื่อกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าของความถี่หลักมูล มีกระแสหรือแรงดันฮาร์โมนิกผสมเข้าไปทำให้กระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่หลักมูลเกิดการบิดเบี้ยวขึ้น แสดงดังภาพที่ 27 ในทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ ทฤษฎีฟูเรียร์ในการวิเคราะห์แยกรูปคลื่นที่มีคาบไม่ว่าเป็นคลื่นใดๆ ออกได้ตั้งแต่ 2 คลื่นไซน์ขึ้นไป ดังสมการที่ (44)

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (44)$$

โดยที่ a_0 คือ ขนาดของสัญญาณที่มีความถี่ฮาร์โมนิกลำดับศูนย์
 a_n และ b_n คือ แอมพลิจูดหรือขนาดของสัญญาณที่มีความถี่ฮาร์โมนิกลำดับที่ n
 ซึ่งจะเป็นสัมประสิทธิ์ของเทอมโคไซน์ และ ไซน์ตามลำดับ

ω คือ ความถี่หลักมูล

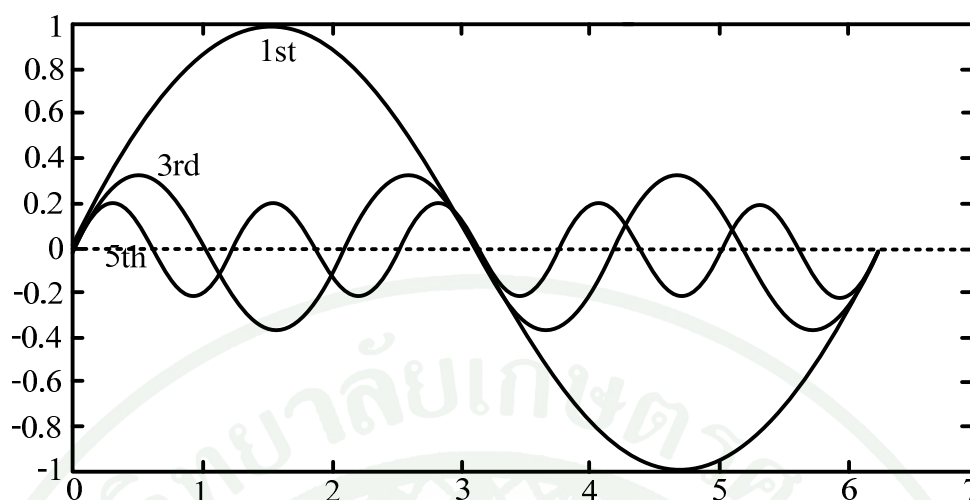
และ $n = \{1, 2, 3, \dots\}$

โดยแอมพลิจูดของสัญญาณหรือสัมประสิทธิ์ของความถี่ฮาร์โมนิกที่ลำดับต่างๆ ก็สามารถได้จากสมการที่ (45) ถึง (47)

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) \quad (45)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (46)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (47)$$



ภาพที่ 27 ฮาร์โมนิกที่ลำดับต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีฮาร์โมนิกอีกประเภทหนึ่งเรียกว่า อินเตอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonic) มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม เช่น ฮาร์โมนิกที่มีความถี่ 75 เฮิรตซ์ มีค่าเป็น 1.5 เท่า ของความถี่หลักมูล

7.2. จิตจำกัดกระแส และ แรงดันฮาร์โมนิก

จิตจำกัดความเพี้ยนของกระแส และ แรงดันฮาร์โมนิกตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 มีดังนี้

7.2.1 จิตจำกัดกระแสเพี้ยน (Current Distortion Limits) เป็นการใช้จิตจำกัดกระแสฮาร์โมนิกที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าได้ โดยดัชนีที่ใช้กำหนดความเพี้ยนของกระแสคือ (Total Harmonic Distortion of Current :THD_c) หมายถึง ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของความต้องการกระแสโหลดสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 2 สามารถหาค่า THD_c ได้จากสมการที่ (48)

$$THD_c = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (48)$$

โดยที่ I_1 คือ ขนาดกระแสที่ความถี่หลักมูล
 I_n คือ ขนาดของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ n
 $n = \{2,3,\dots\}$

ตารางที่ 2 จัดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (แรงดัน 120 V ถึง 69 kV)

I_{sc} / I_{Load}	กระแสฮาร์โมนิกสูงสุดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ I_{Load} ในแต่ละลำดับที่					TDD
	<11	11-15	17-21	23-33	>34	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

โดยที่ I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรที่ PCC
 I_{Load} คือ ความต้องการกระแสโหลดสูงสุด(ส่วนประกอบที่ความถี่หลักมูล)ที่

PCC

หมายเหตุ ค่าของกระแสฮาร์โมนิกลำดับคู่ใช้ร้อยละ 25 ของลำดับคี่

7.2.2. จัดจำกัดแรงดันเพี้ยน (Voltage Distortion Limits) เป็นการตรวจกระแสฮาร์โมนิกที่ผู้ใช้แต่ละรายส่งกลับเข้าระบบไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสไฟฟ้าเหล่านี้ไม่เป็นต้นเหตุที่ทำให้แรงดันมีความเพี้ยนสูงเกินจัดจำกัดตามที่ระบุในตารางที่ 3 ดัชนีที่ใช้กำหนดจัดจำกัดแรงดันเพี้ยนคือ ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion of Voltage: THD_v) มีค่าเป็นแรงดันที่ระบุความถี่หลักมูล

สามารถหาค่า THD_v ได้จากสมการที่ (49)

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (49)$$

โดยที่ V_1 คือ ขนาดแรงดันที่ความถี่หลักมูล
 V_n คือ ขนาดของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ n
 $n = \{2,3,\dots\}$

ตารางที่ 3 ค่าขีดจำกัดของแรงดันฮาร์โมนิก

ระดับแรงดัน(V_n)	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์โมนิก แต่ละลำดับ (%)	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์โมนิกรวม (THD _v)
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV < V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	1.0	1.5

โดยที่ V_n คือ ระดับแรงดันไฟฟ้า Nominal (V_{rms})

7.2.3. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม
 PRC - PQG - 01/1998

ขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์โมนิก แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3
 ขั้นตอนดังนี้

ก. ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาจากขนาดของอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่สามารถนำเข้าสู่ระบบได้โดยไม่พิจารณาในส่วนของฮาร์โมนิก

1. อุปกรณ์ 3 เฟส ชนิด Converter หรือ A.C. Regulator ไม่เกิน 1 ตัว ที่จะ
 นำเข้าสู่ระบบแรงดัน 0.400,11 และ 12 กิโลโวลต์ หากมีขนาดไม่เกิน สามารถนำเข้าสู่ระบบโดยไม่
 ต้องพิจารณาในส่วนของฮาร์โมนิก แต่ถ้ามีอุปกรณ์หลายตัวให้พิจารณาในขั้นตอนที่ 2

ตารางที่ 4 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ประเภท Converter หรือ A.C. Regulator แต่ละตัว

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	Converter ชนิด 3 เฟส			A.C. Regulator ชนิด 3 เฟส	
	3-Pulse (kVA)	6-Pulse (kVA)	12-Pulse (kVA)	6-Thyristor (kVA)	3-Thyristor / 3-Diode (kVA)
0.400	8	12	-	14	10
11 และ 12	85	130	250	150	100

2. อุปกรณ์ 1 เฟส

2.1. เครื่องใช้ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะสามารถติดตั้งเข้าระบบได้ ต้องมีค่าตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ซึ่งเป็นมาตรฐานกำหนดขีดจำกัดฮาร์มอนิกที่ปล่อยออกจากอุปกรณ์ขนาดไม่เกิน 16 แอมแปร์

2.2. อุปกรณ์ประเภท Converter หรือ A.C. Regulator แรงดันไม่เกิน 230 โวลต์ เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ไม่สร้างกระแสฮาร์มอนิกอันดับคู่ มีขนาดไม่เกิน 5 kVA โดยติดตั้งไม่เกิน 1 ตัวต่อเฟส

2.3. ถ้ามีอุปกรณ์มากกว่า 1 ตัว ต่อเฟสให้พิจารณาตามขั้นตอนที่ 2

ข. ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาระดับกระแสฮาร์โมนิก

อุปกรณ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดในขั้นตอนที่ 1 สามารถนำเข้าสู่ระบบได้เมื่อ

1. อุปกรณ์ 3 เฟส

1.1. ค่ากระแสฮาร์โมนิกที่จุดต่อรวมไม่เกินค่าขีดจำกัดในตารางที่ 5

1.2. หากค่า MVA_{sc} ต่ำสุด ณ จุดต่อรวมมีค่าแตกต่างจากค่า $MVA_{sc, Base}$ ที่ระบุในตารางที่ 5 ยอมให้ปรับค่ากระแสฮาร์โมนิกที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบดังสมการที่ (50)

$$I_h = I_{h_p} \times \frac{MVA_{sc, 1}}{MVA_{sc, (Base)}} \quad (50)$$

โดยที่ I_h คือ กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ h ที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบ เมื่อค่า MVA_{sc} เป็น $MVA_{sc, 1}$

I_{h_p} คือ กระแสฮาร์โมนิกลำดับ h ที่กำหนดในตารางที่ 5

$MVA_{sc, 1}$ คือ ค่า MVA_{sc} ต่ำสุด ณ จุดต่อรวมมีค่าไม่เท่ากับค่า $MVA_{sc, (Base)}$

$MVA_{sc, (Base)}$ คือ ค่า $MVA_{sc, (Base)}$ สำหรับค่ากระแสฮาร์โมนิกตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดที่จัดต่อรวม

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จัดต่อรวม(kV)	MVA _{sc} Base	อันดับฮาร์โมนิกและขีดจำกัดของกระแส(A _{rms})																	
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.400	10	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11 และ 12	100	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
22 , 24 และ 33	500	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
69	500	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 และ สูงกว่า	1000	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

ค. ขั้นตอนที่ 3

อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นที่ไม่ผ่านการพิจารณาในขั้นตอนที่ 2 ผู้ใช้ไฟสามารถเชื่อมต่อโหลดดังกล่าวเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังได้ถ้ามีการศึกษาวิเคราะห์คำนวณจากคุณลักษณะระบบ และพฤติกรรมฮาร์มอนิกของโหลดอย่างละเอียดโดยผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่ได้ต้องไม่เกินขีดจำกัดตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้อไฟรายใดๆที่จุดต่อร่วม

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ของแรงดัน (%THD _v)	ความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดัน แต่ละอันดับ (THD _v %)	
		อันดับที่	อันดับคู่
0.400	5	4	2
11,12,22 และ 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115	1.5	1	0.5

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนสำหรับ
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้สำหรับออกแบบสร้างต้นแบบระบบแปลงผันพลังงาน และ ใช้ทดสอบการ
ทำงานของระบบต้นแบบมีดังนี้

1. เครื่องมือ

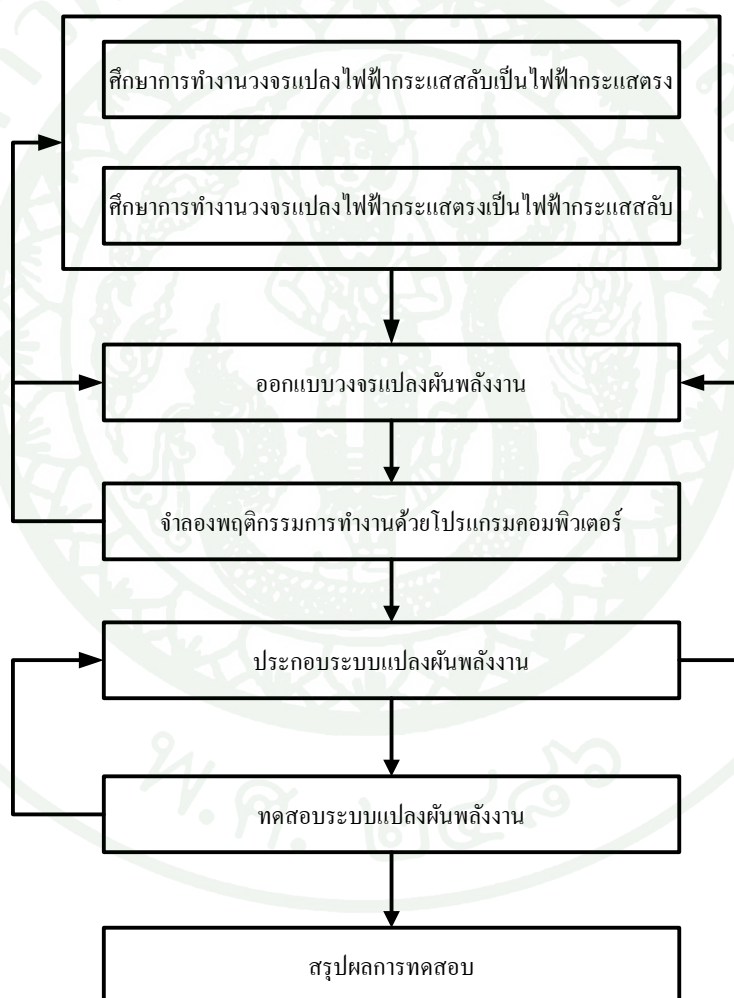
- 1.1 คอมพิวเตอร์
- 1.2 มัลติมิเตอร์
- 1.3 ออสซิลโลสโคป
- 1.4 โปรแกรม Microsoft Office
- 1.5 โปรแกรมออกแบบลายวงจร Protel 99se
- 1.6 หม้อแปลงปรับค่า
- 1.7 หม้อแปลงอัตราส่วน 1:1

2. อุปกรณ์ต้นแบบระบบแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน

- 2.1 วงจรเรียงกระแส
- 2.2 วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ
- 2.3 วงจรขับเคลื่อน
- 2.4 วงจรบัฟเฟอร์
- 2.5 วงจรตัวรับรู้แรงดันไฟฟ้า
- 2.6 วงจรตัวรับรู้กระแส
- 2.7 วงจรขยาย และ ขยายสัญญาณ
- 2.8 วงจรป้องกัน
- 2.9 วงจรควบคุม

วิธีการ

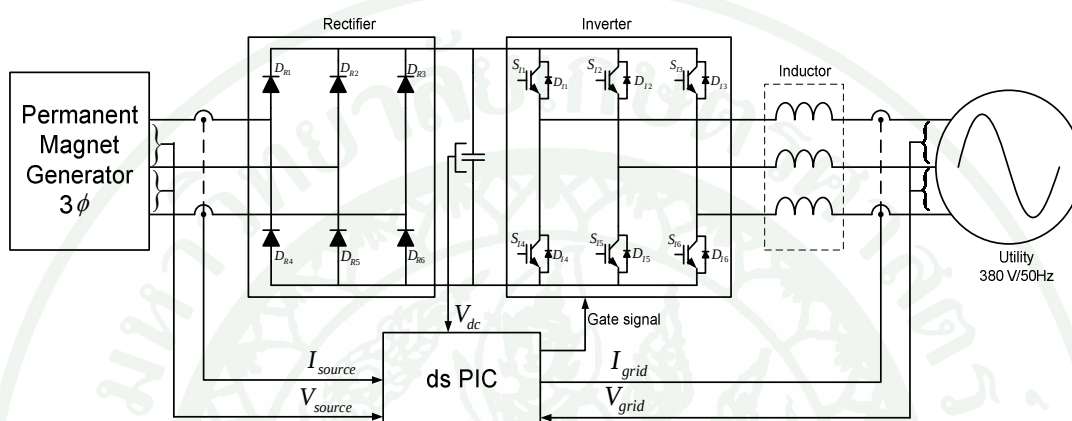
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนสำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยศึกษาการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้า และ ทดสอบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมจำลองพฤติกรรมการทำงาน แล้วนำมาจัดสร้างเป็นต้นแบบระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนสำหรับเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีขั้นตอนการวิจัยมีรายละเอียดดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แผนผังลำดับการทำวิจัย

1. ระบบแปลงผันพลังงานที่ศึกษา

ในการสร้างต้นแบบระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังมีโครงสร้างดังภาพที่ 29

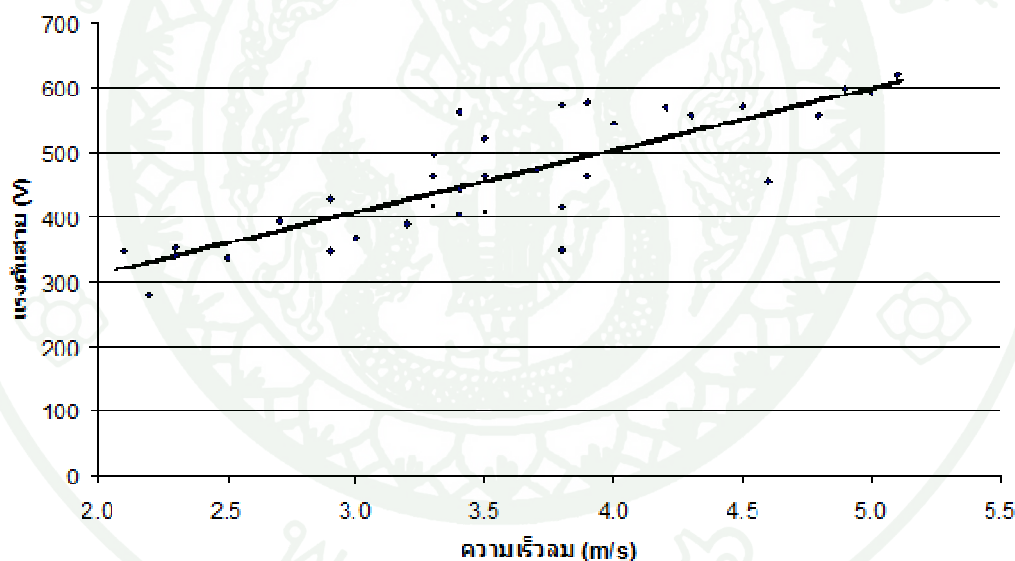


ภาพที่ 29 ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้า

จากภาพที่ 29 แสดงระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างภาคกำลัง และ ภาคควบคุม โดยระบบต้นแบบประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส และ วงจรผกผัน ซึ่งวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นวงจรไดโอด 3 เฟส จะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อปรับปรุงขนาด และ ความถี่ของแรงดันให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นแรงดันจะถูกกรองให้เรียบยิ่งขึ้น โดยตัวเก็บประจุที่บัสกระแสตรง และ วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเป็นวงจรฟูลบริดจ์ 3 เฟสจะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้อุปกรณ์ ไอจีบีที เป็นอุปกรณ์ในการสวิตช์ ซึ่งจะได้สัญญาณควบคุมสวิตช์จากตัวประมวลผลดิจิทัลผ่านวงจรขับเคลื่อนควบคุมการสวิตช์ของตัว ไอจีบีที ให้สัญญาณด้านออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมออกมา และ ต่อด้วยหม้อแปลงเพื่อทำให้เป็นสัญญาณรูปไซน์ก่อนเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังโดยการออกแบบจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

1.1. การศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

ในเบื้องต้นจากการศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบแปลงผันพลังงานเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 20 กิโลวัตต์ แรงดันด้านออกที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ จะแปรผันตรงกับความเร็วม และ การไหลของน้ำ กล่าวคือ เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แรงดันที่ผลิตได้ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยความสัมพันธ์ของความเร็วม และ แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ของความเร็วม และ แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

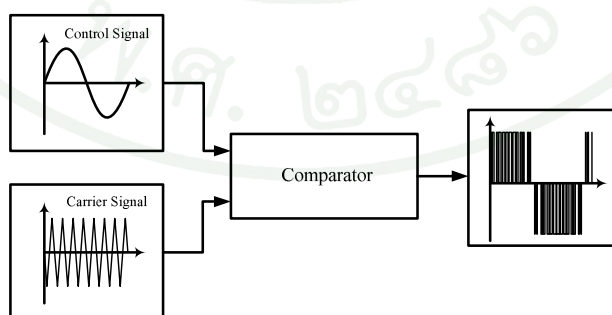
1.2. ศึกษาวงจรผกผัน

ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดที่ 1200 โวลต์ ที่เป็นผลจากการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้อยู่ในรูปแบบของ

ไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งวงจรผกผันสามเฟสจะรับสัญญาณในการควบคุมการทำงานของสวิตช์แต่ละตัว โดยสัญญาณควบคุมนั้นจะเป็นแบบพีคดับลิวเอ็ม เพื่อลดสัญญาณฮาร์มอนิก (Harmonic) ในระบบ ซึ่งเทคนิคในการควบคุมสวิตช์มีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันสำหรับขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามีอยู่ 2 วิธีที่ได้ศึกษา และ เปรียบเทียบ คือ เทคนิคมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ และ เทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน

1.2.1. เทคนิคการมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์

จากการศึกษาเทคนิคการมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์ถือได้ว่าเป็นเทคนิคพื้นฐานในการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มสำหรับวงจรผกผันสามเฟส เนื่องจากมีหลักการที่ง่ายไม่ซับซ้อน ซึ่งหลักการในการสร้างสัญญาณมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์กระทำโดยการนำสัญญาณ 2 สัญญาณมาเปรียบเทียบกัน ประกอบด้วยสัญญาณสามเหลี่ยม และ สัญญาณรูปคลื่นไซน์ ซึ่งในวงจรผกผันสามเฟสสัญญาณรูปคลื่นไซน์จะมี 3 สัญญาณ แต่ละสัญญาณจะมีเฟสต่างกัน 120 องศา ค่าแอมพลิจูดระหว่างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และ สัญญาณสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากัน แต่ความถี่ระหว่างสัญญาณมีค่าไม่เท่ากัน คือความถี่ของรูปคลื่นไซน์นั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงใช้งานในการจ่ายภาระหรือกำหนดตามความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ใช้งาน ในประเทศไทยใช้ที่ 50 เฮิร์ตซ์ ในส่วนความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมนั้นจะเป็นตัวกำหนดสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น โดยหลักการสร้างสัญญาณมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์แสดงดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 หลักการสร้างสัญญาณมอดูเลชันรูปคลื่นไซน์

1.2.2. เทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน

เทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชันเป็นเทคนิคการสวิตช์ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะระบบควบคุมที่ต้องการความแม่นยำสูง เมื่อพิจารณาแรงดันในระบบสามเฟสสมดุลที่แปลงผันตามเวลาจะเขียนเป็นสมการที่ 22 ที่ได้กล่าวมาแล้ว

แรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นแรงดันที่มีความต่างเฟสกัน 120 องศา ในการควบคุมต้องเปลี่ยนแรงดันสามเฟสในระนาบ abc ให้อยู่ในระนาบสองมิติ ($\alpha\beta$) ซึ่งการแปลงค่าจากสามแกนเป็นสองแกนจะสามารถหารแรงดันอ้างอิงได้ และ เมื่อพิจารณาแรงดันอ้างอิงจากวงจรผกผันสามเฟส ในการสร้างแรงดันอ้างอิงซึ่งพิจารณาจากช่วงเวลา และ ขนาดของแรงดันกระแสตรงตามการเลื่อนค่าของมุมเฟสในหนึ่งคาบสัญญาณ ซึ่งผลรวมของแกน α และ β ในแต่ละช่วงเวลาก็เกิดเวกเตอร์อ้างอิง $\vec{V}$ ขึ้นมา ซึ่งเวกเตอร์ดังกล่าวจะหมุนเป็นวงกลมทุกๆการเปลี่ยนแปลงของมุม θ และรูปแบบการสวิตช์มีอยู่ด้วยกัน 8 สถานะ โดยแบ่งออกเป็น 6 เซกเตอร์ใน 1 คาบสัญญาณ ซึ่งสอดคล้องกับการ เปิด-ปิด ของอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรผกผันสามเฟสที่สัมพันธ์กับ แรงดันเฟสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ $\sqrt{\frac{2}{3}} \times V_{dc}$

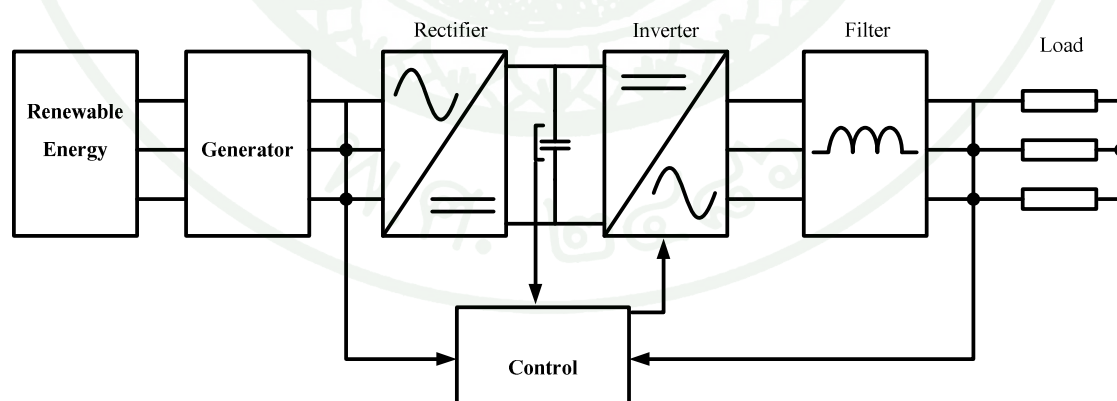
จากหลักการทำงานข้างต้นได้ทำการเปรียบเทียบเทคนิค SVM และ เทคนิค SPWM ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบเทคนิค SVM และ เทคนิค SPWM

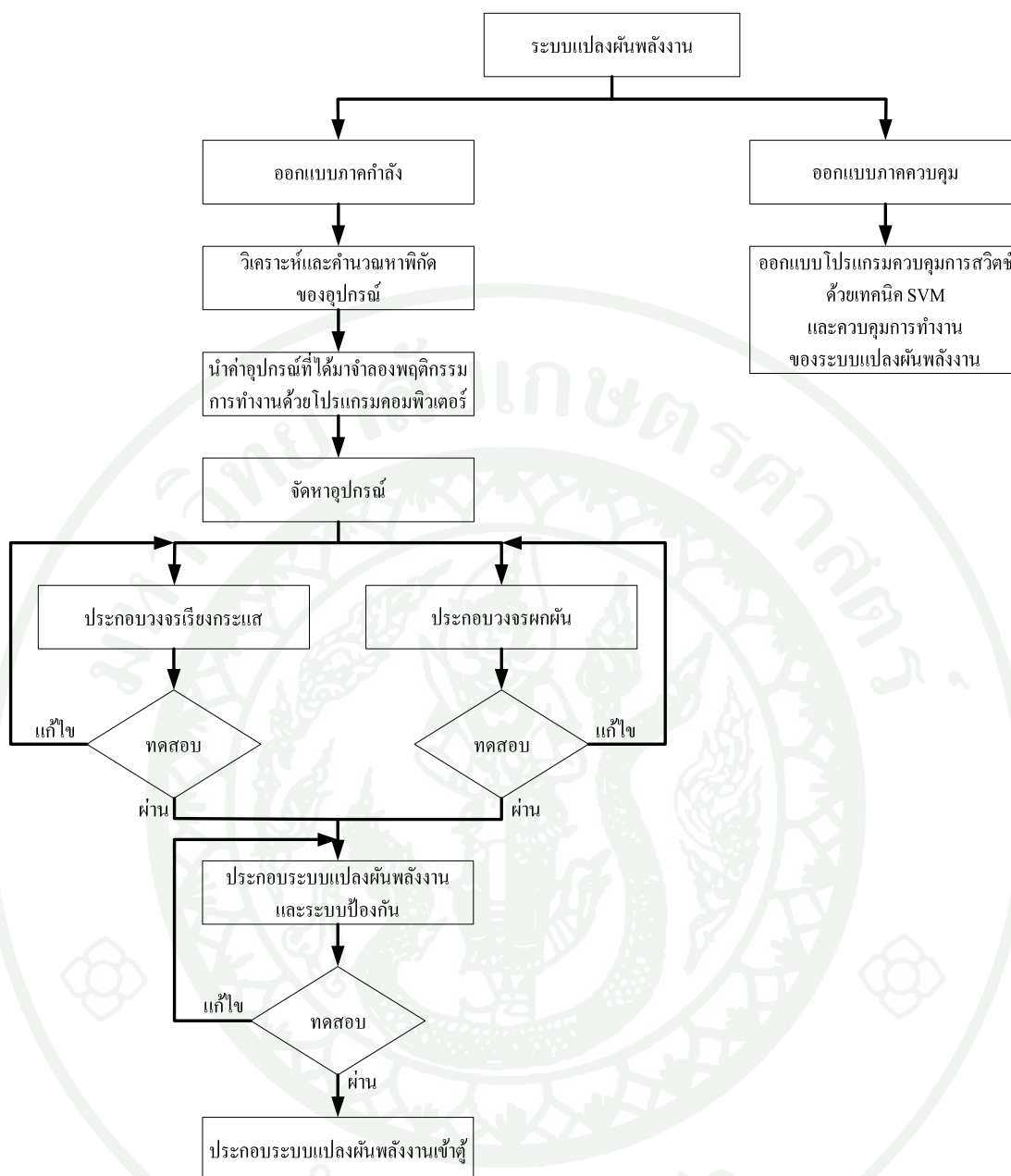
เทคนิค SVM	เทคนิค SPWM
มีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อน	กระบวนการสร้างไม่ซับซ้อน
ให้แรงดันด้านออกมากกว่าเทคนิค SPWM 15%	แรงดันด้านออกจะมีค่าน้อย
ประยุกต์ใช้งานง่าย และสัญญาณมอดูเลชั่นมีความแน่นอนกว่า SPWM	การสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมนั้นอาจเกิดกรณีที่ไม่ซิงโครไนส์
ให้ฮาร์มอนิก ต่ำกว่าเทคนิค SPWM	ฮาร์มอนิกย่อยเกิดขึ้นใกล้ความถี่หลักมูล
สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการสวิตช์โดยไม่จำเป็นได้	

2. การออกแบบระบบแปลงผันพลังงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และ ออกแบบระบบแปลงผันพลังงานเพื่อประยุกต์ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับโดยต้องการแปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนให้มีแรงดันด้านออกที่มีคุณภาพเหมาะสมในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง



ภาพที่ 32 โครงสร้างพื้นฐานของระบบแปลงผันพลังงาน



ภาพที่ 33 แผนผังการออกแบบระบบแปลงผันพลังงาน

การออกแบบระบบแปลงผันพลังงานจะแบ่งออกเป็น 2 ภาค คือ ภาคกำลัง และ ภาคควบคุม แสดงดังภาพที่ 32 ซึ่งภาคกำลังจะประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟส และ วงจรผกผันแบบฟูลบริดจ์สามเฟส ส่วนภาคควบคุมจะประกอบด้วย ตัวประมวลผลดิจิทัล ตัวรับรู้กระแส และ ตัวรับรู้แรงดัน ซึ่งจะส่งค่าให้ตัวประมวลผลดิจิทัล โดยมีเงื่อนไขของการออกแบบคือ ระบบแปลงผันพลังงานที่สร้างขึ้นมีแรงดันกระแสสลับด้านออกเท่ากับ 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ เพื่อจ่ายให้กับ

ภาระทางไฟฟ้า และสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังได้ ซึ่งขั้นตอนการออกแบบแสดงดังภาพที่ 33 โดยค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ข้อกำหนดการออกแบบ

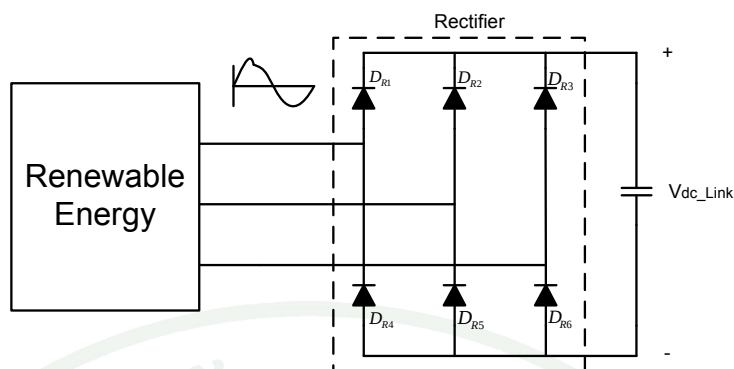
กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด	20 กิโลวัตต์
แรงดันสายอินพุตสูงสุด	380-850 โวลต์
แรงดันสายเอาต์พุตสูงสุด/ความถี่	380 โวลต์/50 เฮิร์ตซ์
แรงดันกระแสตรงสูงสุด	1200 โวลต์
กระแสอาร์เอ็มเอสสูงสุด	31 แอมแปร์
ความถี่สวิตชิง	3 กิโลเฮิร์ตซ์

3. การออกแบบภาคกำลัง

ภาคกำลังจะประกอบด้วยสองวงจรหลักคือ วงจรเรียงกระแส และ วงจรผกผัน ในการออกแบบภาคกำลังของระบบแปลงผันพลังงาน โดยจะกล่าวถึงการออกแบบของทั้งสองวงจรตามลำดับ

3.1. วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสใช้ไดโอด 6 ตัวซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลังแสดงดังภาพที่ 34 วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับจากแหล่งพลังงานทดแทนให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นตัวเก็บประจุขนาดเล็กที่บัสกระแสตรงจะกรองให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเรียบขึ้น



ภาพที่ 34 ลักษณะวงจรเรียงกระแส

แหล่งพลังงานทดแทนให้แรงดันกระแสสลับสูงสุดเท่ากับ 850 โวลต์ พิกัดกำลังงาน 20 กิโลวัตต์ และ กระแส 31 แอมแปร์ โดยจะหาค่าแรงดัน (V_{dc}) และ กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านวงจรเรียงกระแส (I_m) ได้ดังสมการที่ (51)

$$V_{dc} = \sqrt{2} \times V_{Line} = \sqrt{2} \times 850 = 1200 \text{ โวลต์}$$

จากสมการหาค่ากระแสเฉลี่ย

$$I_d = \frac{4}{2\pi} \int_0^{\pi/6} I_m \cos \omega t d(\omega t) = I_m \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} = 0.3183 I_m \quad (51)$$

ค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัวซึ่งไดโอดแต่ละตัวจะนำกระแสเป็นมุม 120° ไดโอดแต่ละตัวจะนำกระแสเท่ากับ $\frac{31}{3} = 10.3$ แอมแปร์ ดังนั้นกระแส I_m ที่ไหลผ่านไดโอดมีค่าเท่ากับ

$$I_m = \frac{I_d}{0.3183} = \frac{10.3}{0.3183} = 32.36 \text{ แอมแปร์}$$

ตัวเก็บประจุที่บัสกระแสตรงจะทำหน้าที่กรองแรงดันที่ได้จากวงจรเรียงกระแสให้มีความเป็นกระแสตรงยิ่งขึ้น โดยการหาค่าตัวเก็บประจุกำหนดให้มีแรงดันกระแสพุ่มของไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะหาค่าตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (52)

$$V_{Ripple} = \left(\frac{V_{dc}}{2fRC} \right) \quad (52)$$

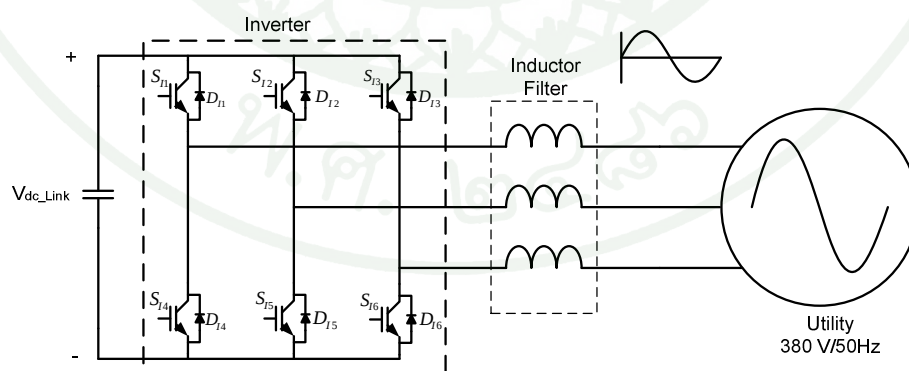
โดยที่ f คือ ความถี่ระหว่างแรงดันกระแสเพื่อมเท่ากับ 300 เฮิร์ตซ์
 R คือ ความต้านทานเอาต์พุตเท่ากับ 72 โอห์ม
 C คือ ค่าความจุ
 V_{Ripple} คือ แรงดันกระแสเพื่อม

เมื่อแรงดันกระแสเพื่อมที่ 4 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถหาค่าตัวเก็บประจุได้โดยแทนค่าลงในสมการที่ (52)

$$C = \frac{1200}{2 \times 300 \times 72 \times 48} = 579 \text{ ไมโครฟารัด}$$

3.2. วงจรพคผัน

วงจรพคผันแสดงดังภาพที่ 35 ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับมาจากวงจรเรียงกระแสที่มีขนาดแรงดันสูงสุด 1200 โวลต์ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีขนาด 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ โดยใช้หลักการการควบคุมสวิตช์ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน ซึ่งการออกแบบเพื่อเลือกอุปกรณ์จะกล่าวในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 35 วงจรพคผันสามเฟส

3.3. การออกแบบวงจรผกผัน

ในการออกแบบวงจรสวิตช์ซึ่งจะพิจารณาถึงค่ากระแส และ แรงดันทั้งในส่วนของ อินพุต และ เอาท์พุตที่ต้องการเพื่อนำไปเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้เป็นสวิตช์กำลัง โดยมีข้อกำหนด ในการออกแบบเป็นไปตามตารางที่ 8

การคำนวณหากระแสสำหรับวงจรสวิตช์ซึ่งได้ดังสมการที่ (53)

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_g} \quad (53)$$

โดยที่ P คือ กำลังงานไฟฟ้า
 I คือ กระแส
 V_g คือ แรงดันสายของระบบไฟฟ้ากำลัง

ดังนั้นสวิตช์แต่ละตัวต้องสามารถทนกระแสได้เท่ากับ.

$$I = \frac{20kW}{\sqrt{3} \times 380} = 30.4A$$

วงจรผกผัน 3 เฟสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรผกผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ประกอบด้วยสวิตช์ 6 ตัว แบ่งเป็นสามกิ่ง โดยแต่ละกิ่งจะประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว ซึ่งการทำงานของสวิตช์ในแต่ละกิ่งจะทำการปิด และ เปิดวงจรไม่พร้อมกันเพื่อป้องกันการลัดวงจร เพราะฉะนั้น การเลือกตัวอุปกรณ์สวิตช์กำลังพิจารณาที่แรงดันกระแสตรงสูงสุดที่ 1200 โวลต์ ที่ตกคร่อมสวิตช์ ในขณะที่เปิดวงจร สวิตช์แต่ละตัวต้องสามารถทนแรงดันได้อย่างน้อยเท่ากับ $V_{dc_Link} = 1200$ โวลต์

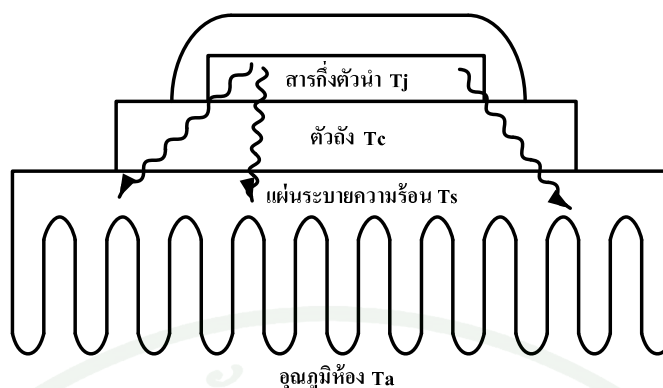
ในการออกแบบวงจรภาคกำลังจากตารางที่ 8 อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งจะต้องทนแรงดันตกคร่อม ขณะเปิดวงจรที่ 1200 โวลต์ และ กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆโดยปกติพิกัดของสวิตช์ได้จาก

การคำนวณค่ากระแสที่ไหลผ่านสวิตช์เท่ากับ 30.44 แอมแปร์ โดยเป็นการกำหนดพิกัดที่ 25 องศา แต่การเลือกพิกัดในการใช้งานจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิขณะทำงาน และ การออกแบบต้องประเมิน อุณหภูมิที่ตัวถังด้วย ในขณะที่งานจะมีแผ่นระบายความร้อนให้ตัวถังของสวิตช์มีอุณหภูมิไม่ถึง 80 องศา และ อุณหภูมิห้องไม่เกิน 45 องศา เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบการระบายความร้อนของสาร กึ่งตัวนำที่นำมาผลิตสวิตช์พิกัดของกระแสเฟสที่อุณหภูมิ 80 องศา จะลดลงเหลือ 0.7 เท่าของพิกัด เมื่ออุณหภูมิที่ตัวถังเท่ากับ 25 องศา ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่มีพิกัดกระแสที่ตัวถังมีอุณหภูมิ ที่ 25 องศา เท่ากับ $31/0.7 = 44$ แอมแปร์ เมื่อพิจารณาถึงการเกิดแรงดัน และ กระแสเกิน ประมาณ 1.5 เท่า จะต้องใช้สวิตช์ที่มีพิกัดกระแสที่อุณหภูมิ 25 องศาเท่ากับ 66 แอมแปร์ จึงเลือกใช้ โมดูลไอจีบีที (IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor) SKM 200GB176D มีพิกัดกำลัง 1700 โวลต์ พิกัดกระแส 260 แอมแปร์ เป็นสวิตช์กำลัง คุณสมบัติของสวิตช์มีรายละเอียดดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 คุณสมบัติสวิตช์ที่ใช้กับระบบแปลงผันพลังงาน

V_{CES}	1700 โวลต์
$V_{CE(on)}$	0.9 โวลต์
$I_C (T_J=150^{\circ}C, T_c=25^{\circ}C)$	260 แอมแปร์
$I_C (T_J=150^{\circ}C, T_c=80^{\circ}C)$	180 แอมแปร์
P_d	735 วัตต์
$E_{ts(hot)}$	151 mj
T_j	-40 ถึง $150^{\circ}C$
$R_{th(j-c)}$	0.12 K/W
$R_{th(c-s)}$	0.038 K/W

การระบายความร้อนจากโมดูลไอจีบีที ต้องระบายความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมที่อยู่ข้างๆ เพื่อรักษาให้อุณหภูมิที่รอยต่อ (Junction Temperature : T_j) ไม่เกินค่ากำหนดที่อุปกรณ์สามารถ ทำงานได้ โดยโครงสร้างระบบระบายความร้อนแสดงดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 โครงสร้างระบบระบายความร้อน

ในการออกแบบอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งนั้นต้องมีการคำนวณหาอัตรากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Dissipation : P_d) เพื่อมาเปรียบเทียบกับกำลังงานไฟฟ้าสูญเสียของอุปกรณ์สวิตช์ที่กำหนดมาให้กับคู่มือการใช้งาน ในกรณีที่ค่ากำลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ อุปกรณ์สวิตช์อาจจะเกิดความเสียหายได้ถ้านำไปใช้งาน และ กรณีที่ค่ากำลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าสรุปได้ว่าสามารถนำอุปกรณ์สวิตช์ไปใช้งานได้ ซึ่งการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (54)

$$P_d = P_{cond} + P_{sw} \quad (54)$$

$$P_{cond} = V_{CE(on)} \times I_c \times D \quad (55)$$

$$P_{sw} = E_{ts(hot)} \times f_{sw} \quad (56)$$

- โดยที่ P_d คือ กำลังงานไฟฟ้าสูญเสีย
 P_{cond} คือ กำลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากตัวนำ
 P_{sw} คือ กำลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากสวิตช์
 $V_{CE(on)}$ คือ แรงดัน V_{CE} อิมิต์
 I_c คือ กระแสคอลเลคเตอร์

D คือ ดิวตี้ไซเคิล

$E_{ts(hot)}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากสวิตช์รวม

f_{sw} คือ ความถี่สวิตช์

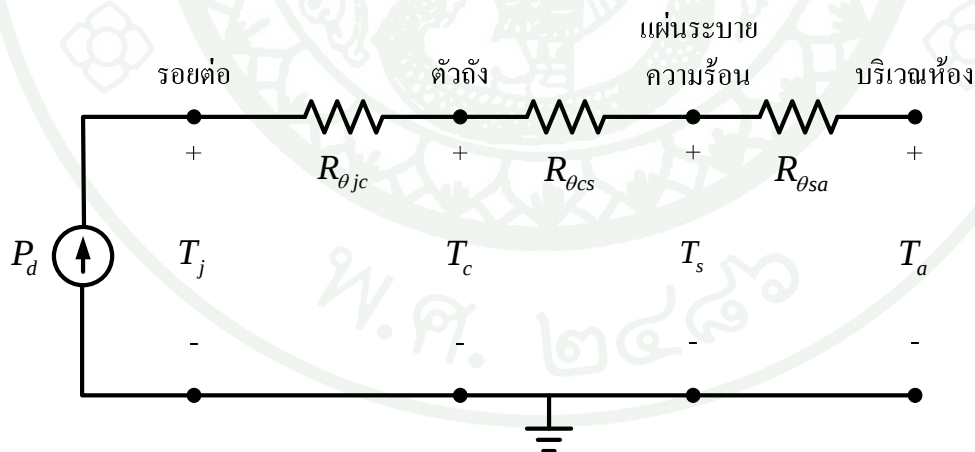
ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้ความถี่สวิตช์ที่ 3 กิโลเฮิร์ตซ์ และ ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุดเท่ากับ 0.8 ดังนั้นนำค่าแทนลงในสมการที่ (55) และ (56) จะสามารถหาค่ากำลังงานสูญเสียได้ดังนี้

$$P_{cond} = 0.8 \times 180 \times 0.8 = 129 \text{ วัตต์}$$

$$P_{sw} = 151 \times 3 = 453 \text{ วัตต์}$$

เพราะฉะนั้น $P_d = 129 + 453 = 582 \text{ วัตต์}$

จากการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสีย และ ทำการออกแบบขนาดของแผ่นระบายความร้อนให้แก่ อุปกรณ์สวิตช์เพื่อไม่ให้อุณหภูมิที่รอยต่อของ P-N สูงเกิน 150 องศา ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เกี่ยวข้อง แสดงดังตารางที่ 9 และ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลความร้อนได้ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 วงจรสมมูลความร้อน

จากภาพที่ 37 จะกำหนดให้อุณหภูมิห้องขณะสวิตช์ทำงาน (T_a) เท่ากับ 40 องศา และ อุณหภูมิที่รอยต่อเท่ากับ 150 องศา สามารถหาค่าความต้านทานความร้อนได้จากสมการที่ (57)

$$T_j = P_D(R_{\theta_{jc}} + R_{\theta_{cs}} + R_{\theta_{sa}}) + T_a \quad (57)$$

โดยที่	T_j	คือ อุณหภูมิที่รอยต่อ
	$R_{\theta_{jc}}$	คือ ความต้านทานความร้อนรอยต่อกับตัวถัง
	$R_{\theta_{cs}}$	คือ ความต้านทานความร้อนรอยต่อตัวถังกับแผ่นระบายความร้อน
	$R_{\theta_{sa}}$	คือ ความต้านทานของแผ่นระบายความร้อนกับอากาศบริเวณห้อง
	T_a	คือ อุณหภูมิบริเวณห้อง

จากสมการที่ (57) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนระหว่างแผ่นระบายความร้อนกับอากาศอุณหภูมิห้องเพื่อที่จะเลือกขนาดของแผ่นระบายความร้อน โดยนำค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 9 แทนลงในสมการที่ (58) ได้ดังนี้

$$R_{\theta_{sa}} = \frac{T_j - T_a}{P_d (R_{\theta_{jc}} + R_{\theta_{cs}})} \quad (58)$$

$$R_{\theta_{sa}} = \frac{150 - 40}{735 \times (0.12 + 0.038)} = 0.95^\circ \text{C} / \text{W}$$

จากการคำนวณจะได้ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างแผ่นระบายความร้อนกับอากาศอุณหภูมิห้องได้เท่ากับ $0.95^\circ \text{C} / \text{W}$ สามารถเลือกขนาดของแผ่นระบายความร้อนได้จากตารางที่ 10 โดยเลือกค่า $R_{\theta_{sa}}$ ที่มีอุณหภูมิน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ คือ $R_{\theta_{sa}}$ เท่ากับ $0.8^\circ \text{C} / \text{W}$ มีขนาดของแผ่นระบายความร้อนเท่ากับ 695 ตารางเซนติเมตร เพราะฉะนั้นในโครงการวิจัยนี้ต้องใช้แผ่นระบายความร้อนขนาด $60 \times 15 \times 20$ เซนติเมตร

ตารางที่ 10 ความต้านทานความร้อน และ ปริมาณแผ่นระบายความร้อน

$R_{\theta_{sa}}$ ($^\circ \text{C} / \text{W}$)	3.2	2.3	2.2	0	2.1	1.7	1.3	1.3	1.25	1.2	0.8	0.65
Vol (cm^3)	76	99	181	0	198	298	435	675	608	634	695	1311

3.4. ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้เชื่อมต่อระบบแปลงผันพลังงานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ระหว่างแรงดันฟีดแบ็คของวงจรพิกัดกับแรงดันไซน์ของระบบไฟฟ้ากำลัง (Sozer, Torrey and Reva. 2000.) ค่าความเหนี่ยวนำสูงสุดจะเป็นฟังก์ชันของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถถ่ายโอนระหว่างวงจรแปลงผันพลังงานกับระบบไฟฟ้ากำลัง และ ตัวเหนี่ยวนำยังเป็นตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากวงจรสวิตชิ่งซึ่งเป็นปัจจัยในการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดของตัวเหนี่ยวนำ และ กำลังไฟฟ้านำออกเป็นฟังก์ชันของแรงดันบัลสกระแสดตรง ดังนั้นสามารถหาแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (59)

$$V_L = V_{Ia} - V_{ga} \quad (59)$$

และ คำนวณหากระแสระเหิมของตัวเหนี่ยวนำสูงสุด (Ahmed, Finney and Williams, 2007) จากค่าของ V_{Ia} และ V_{ga} เป็นดังสมการที่ (60) และ (61) ค่าดีไซด์ไซเคิลที่ทำให้แรงดันเฟสด้านออกมีค่าสูงสุดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์

$$V_{Ia} = \frac{2}{3}V_{DC}, V_{ga} = \frac{1}{2}V_{DC} \quad (60)$$

$$V_L = \frac{2}{3}V_{DC} - \frac{1}{2}V_{DC} = \frac{1}{6}V_{DC} \quad (61)$$

ค่ากระแสระเหิมสูงสุดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (61) กระแสระเหิมจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่บัลสกระแสดตรง ค่าความเหนี่ยวนำ และ ความถี่สวิตชิ่ง โดยให้แรงดันที่บัลสกระแสดตรง และ ความถี่สวิตชิ่งเป็นค่าคงที่ ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (66)

$$V_L = L \frac{\Delta \hat{I}_L}{DT_s}, \Delta \hat{I}_L = DT_s \frac{V_L}{L} \quad (62)$$

$$\Delta \hat{I}_L = D \frac{V_L}{Lf_s} = \frac{1}{6} \frac{DV_{DC}}{Lf_s} \quad (63)$$

$$D = 1 - \frac{1}{5} = \frac{4}{5} \quad (64)$$

$$\Delta \hat{I}_L = 0.133 \frac{V_{DC}}{L f_s}, \Delta \hat{I}_L = \frac{8}{100} I_{Inv} \quad (65)$$

$$\therefore L = 0.133 \frac{V_{DC}}{\Delta \hat{I}_L f_s} \quad (66)$$

โดย	V_L	คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ
	f_s	คือ ความถี่สวิตชิ่ง
	V_{DC}	คือ แรงดันกระแสตรง
	D	คือ ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุด
	$\Delta \hat{I}_L$	คือ ส่วนต่างของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ
	L	คือ ตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อ I_{Inv} คือ กระแสด้านออกจากวงจรผกผันเท่ากับ 31 แอมแปร์ นำค่าแทนลงในสมการที่ (64)

$$\Delta \hat{I}_L = \frac{9}{100} 31 = 2.79 A$$

นำค่า $\Delta \hat{I}_L$ ที่คำนวณได้แทนลงในสมการที่ (65) เพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

$$L = 0.133 \frac{1200}{2.79 \times (3 \times 10^3)} = 20 \text{ มิลลิเฮนรีต่อเฟส}$$

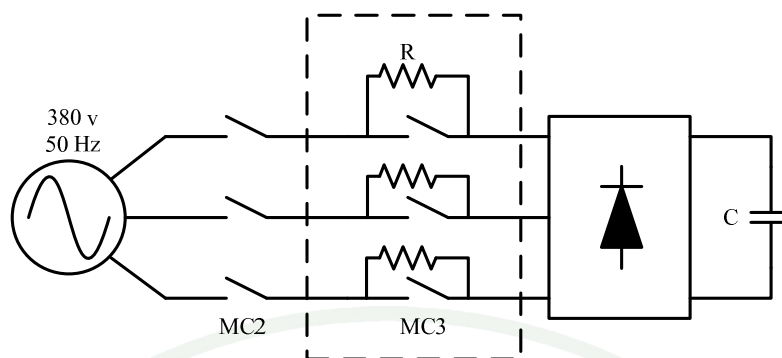
จากการคำนวณ และ การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำที่นำมาใช้กับระบบต้นแบบแสดงดังภาพที่ 38 มีค่าความเหนี่ยวนำ 20 มิลลิเฮนรี ต่อเฟส



ภาพที่ 38 ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

3.5. วงจรจำกัดกระแสอัดประจุ (Charging Circuit)

หลังจากเชื่อมต่อแรงดันจากแหล่งพลังงานทดแทนเข้ากับระบบต้นแบบในช่วงเริ่มต้น จำเป็นต้องจำกัดกระแสอัดประจุของตัวเก็บประจุที่บัสกระแสตรงเพื่อไม่ให้เกิดกระแสเกินในอุปกรณ์สวิตชิง วงจรอัดประจุดังแสดงดังภาพที่ 39 มีหน้าที่ในการป้องกันกระแสเกินในตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับบัสกระแสตรง ประกอบด้วยตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ และ ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านคอนแทกเตอร์แม่เหล็กตัวที่ 2 เมื่อควบคุมให้คอนแทกเตอร์แม่เหล็กตัวที่ 2 เปิดการทำงานตัวเก็บประจุจะเริ่มชาร์จทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นในอัตราเร็วที่กำหนดโดยผลคูณของตัวเก็บประจุ และ ตัวต้านทานจนกระทั่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟคอนแทกเตอร์แม่เหล็กตัวที่ 3 จะทำงานเป็นการตัดตัวต้านทานออกจากระบบเป็นการสิ้นสุดกระบวนการอัดประจุ



ภาพที่ 39 วงจรอัดประจุ

อัตราความเร็วในการอัดประจุขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลาซึ่งเป็นผลคูณของตัวต้านทาน และ ตัวเก็บประจุดังสมการที่ (67)

$$\tau = RC \quad (67)$$

ประจุในตัวเก็บประจุ และ ความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าแปรผันตรงกับเวลา ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังสมการที่ (68)

$$V_c = V(1 - e^{-t/\tau}) \quad (68)$$

โดยที่ e คือ ฐานของลอการิทึมธรรมชาติ และ มีค่าเท่ากับ 2.718
 V คือ ความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย

จากสมการที่ 63 สามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทาน โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้

$$t = 1, V_c = 1191.6 \text{ โวลต์ (99.3\%), } V = 1200 \text{ โวลต์}$$

$$\text{จาก } V_c = V(1 - e^{-t/\tau})$$

$$1191.6 = 1200(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\frac{1191.6}{1200} = (1 - e^{-t/\tau})$$

$$e^{-t/\tau} = \frac{8.4}{1200}$$

$$-\frac{t}{\tau} = \ln\left(\frac{8.4}{1200}\right)$$

$$t = -\tau \ln\left(\frac{8.4}{1200}\right) = -RC \ln\left(\frac{8.4}{1200}\right)$$

$$R = -\frac{1}{640 \times 10^{-6} \ln(8.4/1200)} = 315 \text{ โอห์ม}$$

ตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จประจุจนเต็มทีค่าคงที่เวลาเท่ากับ 5τ (τ คือ ค่าคงที่เวลา) ดังนั้นเวลาที่ตัวเก็บประจุถูกชาร์จจนเต็มเท่ากับ

ที่ 1τ เวลาในการชาร์จเท่ากับ $\tau = RC = 200 \times (640 \times 10^{-6}) = 1.24$ วินาที

ดังนั้นเวลาที่สามารถชาร์จประจุจนเต็มเท่ากับ $t = 5 \times \tau = 5 \times 1.2 = 6.4$ วินาที

จากการวิเคราะห์ แรงดันอินพุตสูงสุด ค่าเก็บประจุ และ ค่าความต้านทานความร้อนของตัวต้านทาน (Thermal Resistance) จะต้องใช้ตัวต้านทานขนาด 315 โอห์ม แต่ค่าที่สามารถหาได้ตามท้องตลาดคือ 200 โอห์ม 200 วัตต์ ดังนั้นจึงได้นำค่าตัวต้านทานดังกล่าวมาจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ปรากฏว่าอัตราความเร็วในการอัดประจุซึ่งเป็นผลคูณจากตัวต้านทานขนาด 200 โอห์ม ใช้เวลาในการอัดประจุเร็วกว่าตัวต้านทานขนาด 315 โอห์ม และ ไม่เกิดแรงดันเกินชั่วขณะ แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบตัวต้านทานที่มีค่าต่ำกว่า 200 โอห์ม ซึ่งถ้าความต้านทานต่ำจะทำให้แรงดันเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็ว ขึ้นแต่ต้องพิจารณาการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะด้วย เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ค่าความต้านทาน 200 โอห์ม ตัวต้านทานชนิดซิงค์แสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ตัวต้านทานสำหรับจำกัดกระแสอัดประจุ

3.6. อุปกรณ์ป้องกัน

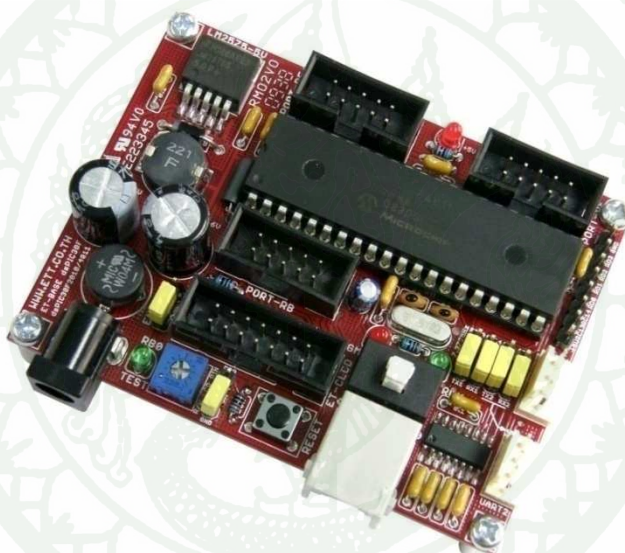
อุปกรณ์ป้องกันมีหน้าที่หลักในการป้องกันไม่ให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สายไฟ และ ส่วนต่างๆของวงจรภาคกำลัง และ ภาคควบคุมเกิดการเสียหายจากกรณีที่มีกระแสเกินขนาด (Over Current) หรือ เกิดการลัดวงจร (Short Circuit) ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้ามากเกินไปนั้นจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้น วงจรป้องกันจะทำการตัดกระแสหรือเปิดวงจร (Open Circuit) ดังกล่าว ก่อนจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างถาวรกับตัววงจร โดนอาศัยการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ และ คอนแทกเตอร์แม่เหล็กในการช่วยตัดวงจรออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง

การเลือกฟักัดของอุปกรณ์ป้องกันพิจารณาจากค่ากำลังงานสูงสุด คือ 20 กิโลวัตต์ จะสามารถคำนวณหาค่ากระแสสูงสุดได้เป็น $20000 / (1.732 \times 380) = 30.4$ แอมแปร์ จะต้องใช้อุปกรณ์ ที่มีฟักัดการป้องกันการรับภาระทางกระแสไฟฟ้าได้ไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน คือ $30.4 \times 1.25 = 38$ แอมป์ เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้ เซอร์กิตเบรกเกอร์จากบริษัท ABB รุ่น TMAXTIN 160 ฟักัด 50 AT / 160 AF และ คอนแทกเตอร์แม่เหล็ก รุ่น 50-30 ฟักัดกระแส 50 แอมแปร์ เป็นอุปกรณ์ป้องกัน

4. การออกแบบภาคควบคุม

4.1. ตัวควบคุม (Controller)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ dsPIC30F4011 ของบริษัท Microchip ดังแสดงในภาพที่ 41 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ 40 ขา เป็น MCU ซึ่งจะใช้ในการประมวลผลข้อมูลขนาด 16 บิต ที่รวมความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เข้ากับตัวควบคุมการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing: DSP) หรือที่เรียกว่า (Digital Signal Controller: DSC) โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 11 และ โมดูล MCpwm จำนวน 6 ช่อง



ภาพที่ 41 บอร์ด dsPIC30F4011

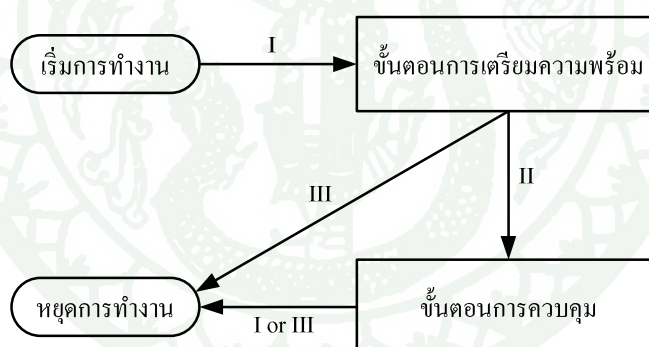
ตารางที่ 11 คุณสมบัติของบอร์ด dsPIC30F4011

Pins	Program Mem.Bytes	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16 Bit	Input Cap	Output Std.PWM	Motor Control PWM	A/D 10 Bit
40	48k	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch

โดยบอร์ด dsPIC30F4011 นำมาใช้สร้างสัญญาณควบคุมให้กับระบบแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทน โดยจะควบคุมส่วนต่างๆดังนี้

- ระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ
- วงจรเซนเซอร์
- วงจรป้องกัน
- สวิตช์ ปิด – เปิดหน้าตู้
- การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

ในส่วนของภาคควบคุมจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนของฮาร์ดแวร์ จะประกอบด้วย วงจร-ตัวรับรู้แรงดัน ตัวรับรู้กระแส ตัวประมวลผล และ ส่วนประสานงานผู้ใช้ (User Interface) ส่วนที่สองคือ โปรแกรมควบคุมการทำงาน ขั้นตอนการทำงานจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมความพร้อม และ ขั้นตอนการควบคุม แสดงดังภาพที่ 42



หมายเหตุ I คือ ผู้ใช้, II คือ อัตโนมติ, III คือ เกิดข้อผิดพลาด

ภาพที่ 42 แผนผังการทำงานของระบบแปลงผันพลังงาน

สำหรับขั้นตอนการเตรียมความพร้อมประกอบด้วย การจำกัดกระแสในขั้นตอนการอัดประจุและ การตรวจสอบแรงดันของตัวเก็บประจุที่บัสกระแสตรงรวมถึงการตรวจสอบเฟสต่างระหว่างแรงดันของวงจรผกผันกับกับแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อขั้นตอนการเตรียมความพร้อมเสร็จสิ้นโดยไม่เกิดความผิดพลาด วงจรควบคุมจะทำการเชื่อมต่อระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง และ ดำเนินการควบคุมการถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง รวมถึงควบคุมการแลกเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วย โดยการทำงานของระบบจะ

เปลี่ยนจากขั้นตอนการทำงานหนึ่งไปสู่อีกการทำงานหนึ่งด้วยเงื่อนไขจากผู้ใช้งานจากการผิดพลาด (Fault) ที่เกิดขึ้นในขณะดำเนินการ และ เงื่อนไขภายในตัวโปรแกรม ในทุกขั้นตอนหากเกิดความผิดพลาดที่อาจส่งผลให้เกิดความเสียหาย ตัวประมวลผลจะสั่งหยุดการทำงานของระบบ

4.2. วงจรขับนำ

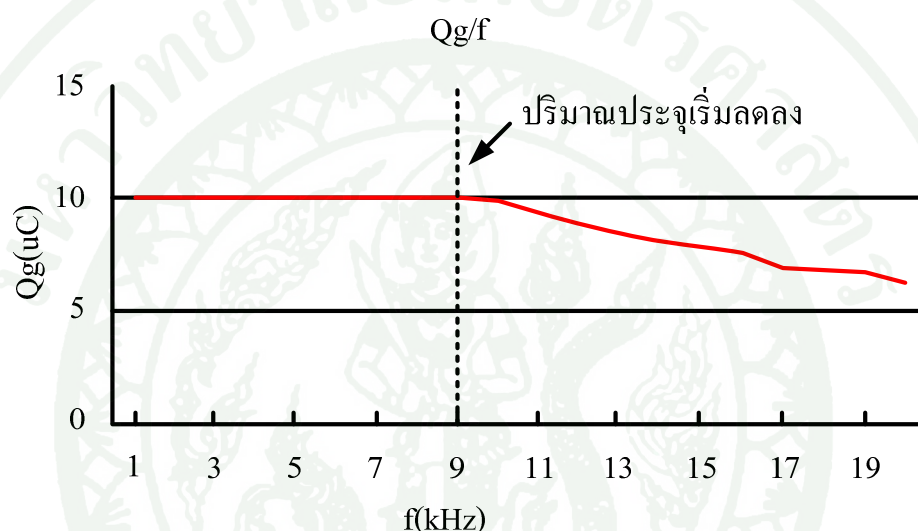
วงจรขับนำเป็นวงจรควบคุมการนำกระแส (ปิดวงจร) และ การหยุดนำกระแส (เปิดวงจร) ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในภาคกำลัง สำหรับวงจรขับเกตที่เลือกมาใช้คือ GNDC 1700 Dual IGBT Gate Driver ซึ่งถูกออกแบบมาให้ใช้กับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังประเภทไอจีบีที และสามารถควบคุมการเปิด-ปิดของสวิตช์โดยวงจรขับเกตจะปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์บิตวึม (Pulse Width Modulation: PWM) ที่รับมาจากวงจรควบคุม และ มาแยกสัญญาณออกเป็น 2 สัญญาณ คือ ใช้เป็นสัญญาณควบคุมสวิตช์บน (Top Switch) และ สัญญาณควบคุมสวิตช์ล่าง (Bottom- Switch) โดยที่จะมีวงจรป้องกันไม่ให้สวิตช์บนและ สวิตช์ล่างปิดวงจรพร้อมกันซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรของบัลลิสต์กระแสตรง (DC Link) และ เป็นผลให้เกิดความเสียหายขึ้นกับวงจรได้ วงจรขับสวิตช์นี้ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงภายนอกอย่างน้อย 12 V แต่ไม่เกิน 18 V วงจรขับเกตจึงจะสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 12 ลักษณะของขั้วต่อ (Connector) ด้านปฐมภูมิ: (X1 14Pin DIN 41651)

PIN No.	ชื่อ	การทำงาน
2	BOT	รับสัญญาณขับสวิตช์ตัวล่าง
3	ERROR	ส่งสัญญาณออกมาเมื่อเกิดความผิดพลาด
4	TOP	รับสัญญาณขับสวิตช์ตัวบน
8,9	Vs	ไฟเลี้ยง 15 โวลต์
10,11	GND	กราวด์ 0 โวลต์

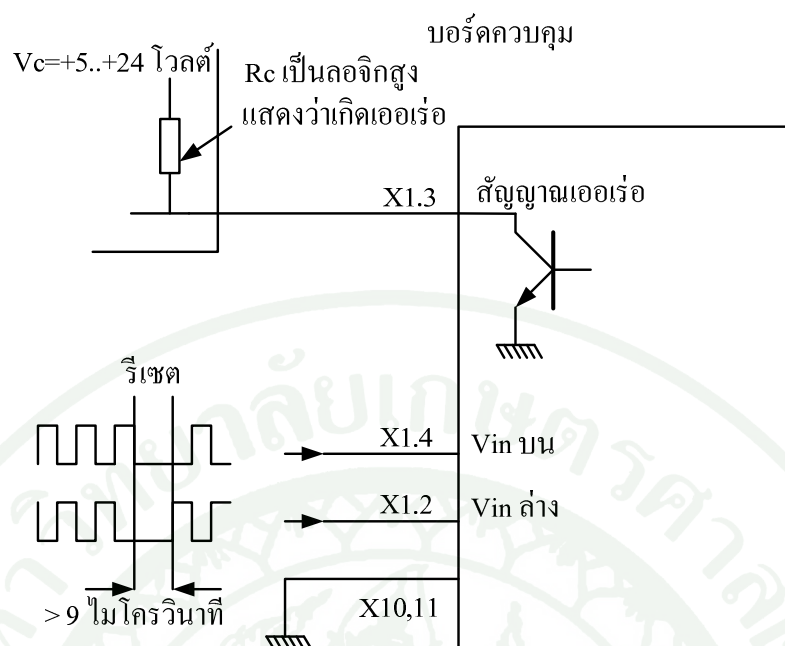
ตารางที่ 13 ลักษณะข้อต่อด้านทฤษฎี: (ส่งสัญญาณขับให้สวิตช์ตัวบน และ สวิตช์ตัวล่าง)

PIN No.	ชื่อ	การทำงาน
1	E	อิมิตเตอร์เอาต์พุต
2	G	เกตเอาต์พุต
5	C	คอลเลกเตอร์เอาต์พุต



ภาพที่ 43 ความสามารถของวงจรขับเกต

ตารางที่ 12 และ ตารางที่ 13 แสดงตำแหน่งของแต่ละขาบนวงจรขับเกต ภาพที่ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุที่ขาเกตของไอจีบีทีกับความถี่สวิตช์สูงสุดซึ่งจะพบว่า หากปริมาณประจุที่ขาเกตของไอจีบีทีที่ต้องการมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ความถี่สวิตช์ลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือ อัตราการปิดเปิดสวิตช์จะลดลงเมื่อสวิตช์ต้องการประจุมากขึ้น สำหรับภาคกำลังที่ออกแบบจะใช้ความถี่สวิตช์ที่ 3 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)

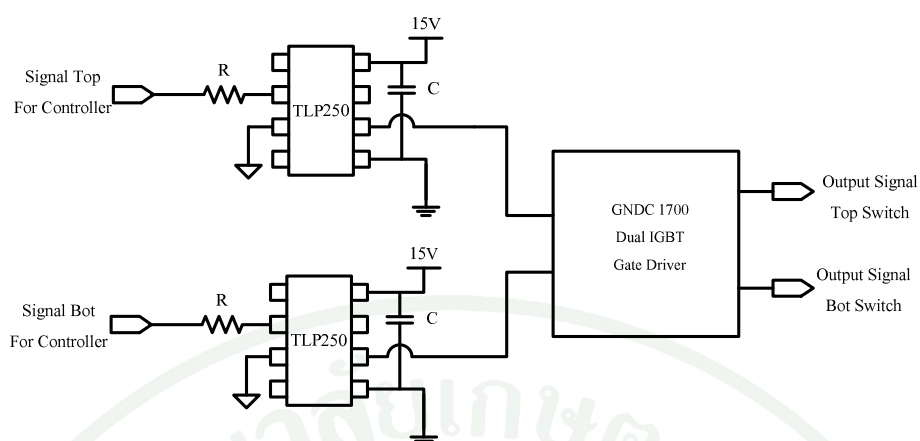


ภาพที่ 44 ข้อมูลการควบคุมสถานะ ผิดพลาด และ รีเซต

จากภาพที่ 44 สัญญาณอินพุตเข้ากันได้กับ CMOS โลจิกด้านบน (โลจิกสูง หมายถึง ไอจีบีทีที่นำกระแส) สัญญาณที่ขา X1.4 เป็นสำหรับรับสัญญาณควบคุมไอจีบีทีที่สวิทช์บน และ X1.2 เป็นสำหรับรับสัญญาณควบคุมไอจีบีทีที่สวิทช์ล่าง ในส่วนของการป้องกันการลัดวงจรทำได้โดยการวัดแรงดันที่ขาคอลเลคเตอร์ และ อิมิตเตอร์ ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรไอจีบีทีจะปิดทันที หน่วยความจำข้อผิดพลาดป้องกันไม่ให้ไอจีบีทีเริ่มการทำงานอีก ที่ X1.3 เป็นตัวแสดงว่าเกิดการลัดวงจร ถ้าเอาต์พุตที่คอลเลคเตอร์เป็นศูนย์แสดงว่าไม่เกิดความผิดพลาด สัญญาณความผิดพลาดจะถูกปิดการทำงานโดยการจ่ายศูนย์ให้กับสัญญาณอินพุตทั้งคู่ (รีเซต) หรือ โดยการตัดแหล่งจ่ายแรงดันออก สัญญาณรีเซตต้องมีความกว้างมากกว่า 9 ไมโครวินาที

ในส่วนของการขับเคลื่อนยังมีอุปกรณ์ TLP-250 ซึ่งเป็นไอซีทางแสง (Opto-Isolator) นำมาสร้างเป็นวงจรบัฟเฟอร์ในการขับเคลื่อน สำหรับแยกกราวด์ระหว่างภาคควบคุม และ ภาคกำลังเพื่อให้ภาคควบคุมเกิดความเสียหายในกรณีที่เกิดการความผิดปกติที่เกิดขึ้นในภาคกำลัง

วงจรบัฟเฟอร์จะมีหลักการทำงานคือ วงจรบัฟเฟอร์จะรับสัญญาณที่ดับลิวิตเอ็มจากตัวประมวลผลดิจิทัล เพื่อขยายสัญญาณให้สัญญาณมีขนาดที่เหมาะสมเพื่อที่จะส่งสัญญาณให้วงจรขับ นำเพื่อใช้ในการขับสวิทช์กำลัง วงจรบัฟเฟอร์ที่ออกแบบแสดงดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 วงจรบัฟเฟอร์

5. วงจรตัวรับรู้

วงจรตัวรับรู้ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยวงจรตัวรับรู้แรงดัน และ วงจรตัวรับรู้กระแส เพื่อที่จะส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลทำการประมวลผล

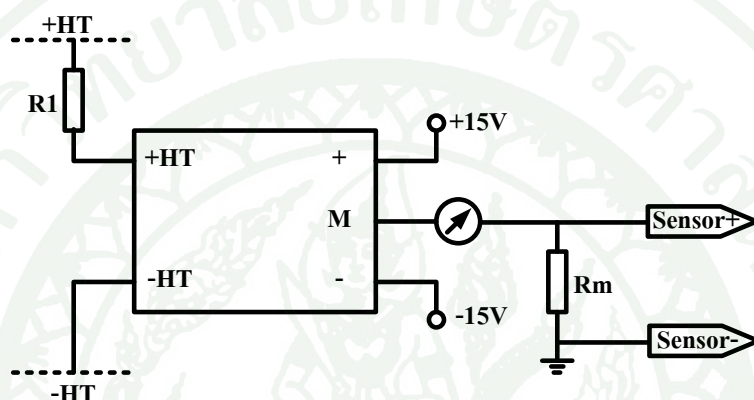
5.1 ตัวรับรู้แรงดัน (Voltage Sensor)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวรับรู้แรงดัน LEM LV25-P แรงดันที่สามารถวัดได้อยู่ในช่วง 10 ถึง 500 V_{RMS} มีพิกัดกระแส 10 mA_{RMS} ลักษณะตัวรับรู้แรงดันแสดงดัง ภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ตัวรับรู้แรงดัน

หลักการทำงานของ LV25-P จะวัดสัญญาณแรงดันโดยใช้หลักการของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Hall Effect) วิธีการวัดแรงดันจะทำโดยการแปลงเป็นค่ากระแสที่มีสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันที่จุดวัดผ่านตัวต้านทานภายนอก (R_1) ที่ต่อกับวงจรด้านปฐมภูมิของตัวรับรู้แรงดันที่ขา +HT ซึ่งเป็นขาที่รับแรงดันอินพุตด้านบวก โดยกระแสที่ไหลผ่านวงจรด้านปฐมภูมิควรมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ จะทำให้ค่าที่วัดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยอัตราส่วนของกระแสด้านปฐมภูมิต่อกระแสด้านปฐมภูมิเท่ากับ 2.5 เท่า วงจรตัวรับรู้แรงดันแสดงดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 วงจรตัวรับรู้แรงดัน

ในที่นี้จะนำ LV25-P มาวัดแรงกริด 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ เพราะฉะนั้นจึงได้ทำการออกแบบให้วงจรรับรู้แรงดันสามารถอ่านแรงดันได้ที่ 380 โวลต์ โดยต่อตัวต้านทานภายนอก R_1 ดังภาพที่ 47 ซึ่งกระแสที่จ่ายให้กับตัวรับรู้แรงดันด้านปฐมภูมิ (I_{pm}) มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ ดังนั้นจะสามารถหาค่า R_1 ได้ดังสมการที่ (69)

$$R_1 = \frac{V_g}{10mA} \quad (69)$$

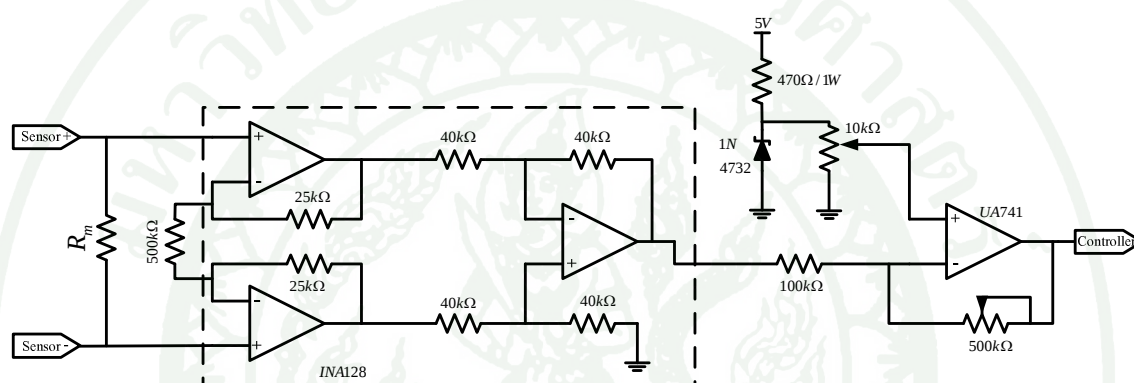
โดยที่ V_g คือ แรงดันกริด

จะได้ความต้านทาน R_1 เป็น 38 กิโลโอห์ม และ สามารถทนกำลังสูญเสียได้ 3.8 วัตต์ จากอัตราส่วนตัวรับรู้แรงดันด้านปฐมภูมิเป็น 2.5 เท่าของด้านปฐมภูมิ กระแสที่ไหลผ่านตัวรับรู้แรงดันจะเท่ากับ 25 มิลลิแอมแปร์ และ ใช้แรงดันที่ ± 15 โวลต์ จากเอกสารประกอบการใช้งานได้กำหนดไว้แล้ว

ต้านทานจะมีค่าประมาณ 100-350 โอห์ม และ แรงดันที่ต้องการเท่ากับ 4.5 โวลต์ จะสามารถหาค่าตัวต้านทาน R_M ได้จากสมการที่ (70)

$$R_M = \frac{V_{mea}}{I_{sec}} = \frac{4.5}{25mA} = 180\Omega \quad (70)$$

ค่าความต้านทานสำหรับอ่านค่าแรงดัน R_M เท่ากับ 180 โอห์ม ซึ่งจะให้ค่าแรงดัน ± 2.25 โวลต์ โดยสัญญาณที่ได้นี้จะนำไปใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงรูปคลื่นไซน์เพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป

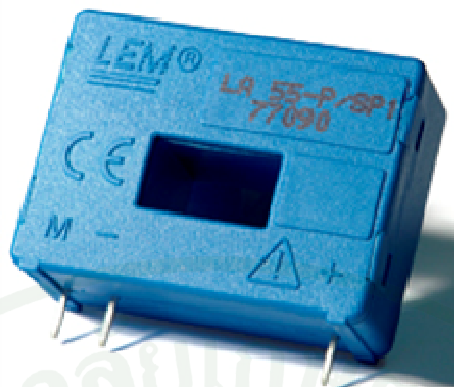


ภาพที่ 48 วงจรขยายสัญญาณของวงจรตัวรับรู้แรงดัน

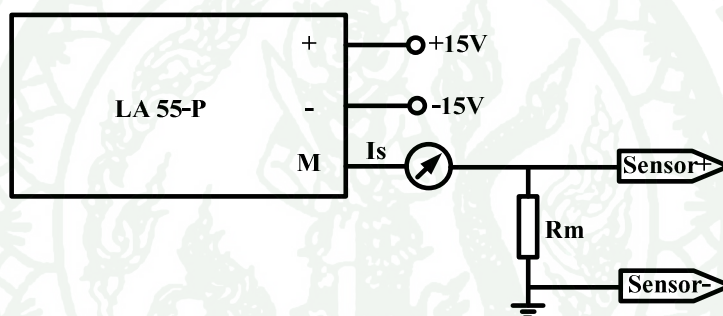
ภาพที่ 48 แสดงวงจรขยายสัญญาณของวงจรตัวรับรู้แรงดัน วงจรตัวรับรู้แรงดันจะรับสัญญาณเข้ามาที่ 10 มิลลิแอมป์จะตรวจจับอยู่ในรูปของกระแสก่อนที่จะถูกแปลงเป็นแรงดันโดย R_M แรงดันที่ออกจากตัวรับรู้เป็น 4.5 โวลต์ แล้วผ่านวงจรขยายสัญญาณ (INA128) เพื่อให้แรงดันที่ได้อยู่ที่ 0 – 5 โวลต์ จากนั้นจะผ่านวงจรยกระดับแรงดันเพื่อให้แรงดันที่ได้อยู่ในฝั่งบวกทั้งหมดเพื่อที่จะจ่ายสัญญาณให้กับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลได้

5.2. ตัวรับรู้กระแส (Current Sensor)

ตัวรับรู้กระแสได้เลือกใช้ LEM LA55-P มีฟลักซ์กระแสด้านทุติยภูมิ 50 มิลลิแอมป์ จะวัดกระแสโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Hall Effect) การวัดกระแสด้านปฐมภูมิจะวัดได้ตั้งแต่ 0 ถึง 50 แอมป์ ตัวรับรู้กระแสแสดงดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 ตัวรับรู้กระแส



ภาพที่ 50 วงจรตัวรับรู้กระแส

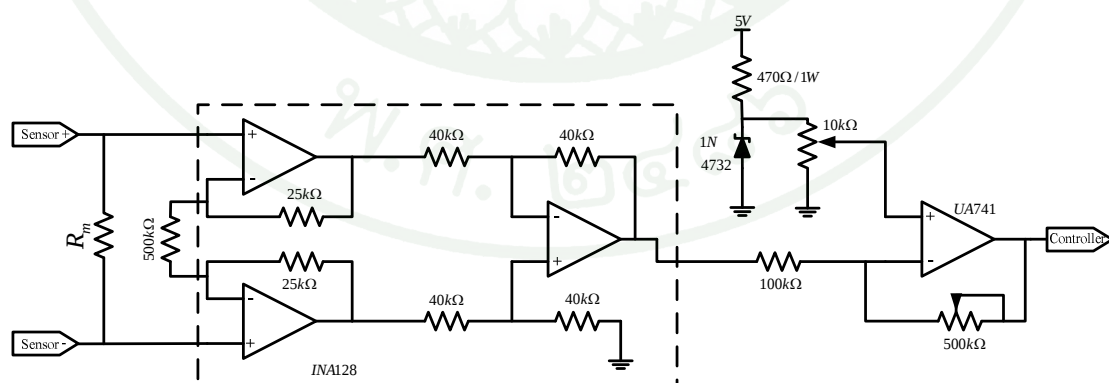
ภาพที่ 50 แสดงการต่อวงจรตัวรับรู้กระแส การพิจารณาหาค่า R_M จะมีอนุสมเป็น ส่วนประกอบในการเลือกค่า R_M ด้วย โดยจะทำการเลือกที่กระแสเท่ากับ 50 แอมแปร์ ค่า R_M ที่เหมาะสมจะแสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่า R_M ที่เหมาะสมที่แรงดันและอุณหภูมิต่างๆ

แรงดัน อุณหภูมิ	70 °C	85 °C
±12	10–100Ω	60–95Ω
±15	50–160Ω	135–155Ω

ในการคำนวณหาค่า R_M จะพิจารณาจากแรงดันที่วัดได้ต้องมีค่าเท่ากับ 4.5 โวลต์ และ กระแสต้าน
 ทฤษฎี 50 มิลลิแอมแปร์ เพราะฉะนั้น R_M ที่ใช้ในวงจรมีค่าเท่ากับ $R_M = \frac{4.5}{50mA} = 90$ โอห์ม

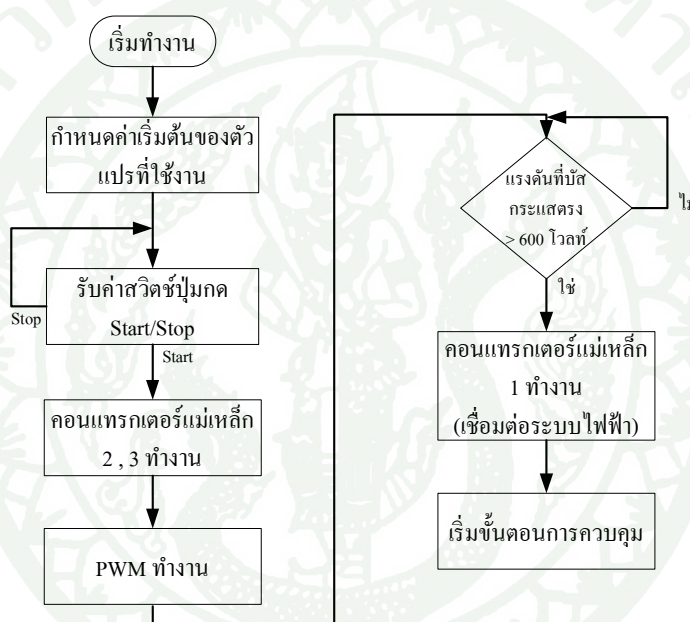
วงจรตัวรับรู้กระแสเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปของกระแสแต่สัญญาณที่จะนำไปใช้จะเป็น
 สัญญาณที่อยู่ในรูปของแรงดัน ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนสัญญาณอินพุตที่ได้รับจากตัวรับรู้กระแสให้อยู่
 ในรูปของสัญญาณแรงดัน จากภาพที่ 51 วงจรแบ่งแรงดัน R_M ที่คำนวณได้คือ 90 โอห์ม ต่อคร่อม
 อยู่กับวงจรขยายสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณเอาต์พุตที่อยู่ในรูปของกระแสให้อยู่ในรูปของแรงดัน
 โดยแรงดันที่ออกจากตัวรับรู้เป็น 4.5 โวลต์ แล้ววงจรขยายสัญญาณจะขยายสัญญาณให้แรงดันที่ได้
 อยู่ที่ 0 – 5 โวลต์ จากนั้นจะผ่านวงจรระดับแรงดันเพื่อให้แรงดันที่ได้อยู่ในฝั่งบวกทั้งหมด
 เพื่อที่จะจ่ายสัญญาณให้กับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลให้ทำการประมวลผล



ภาพที่ 51 วงจรขยายสัญญาณของวงจรตัวรับรู้กระแส

6. การออกแบบโปรแกรมควบคุม

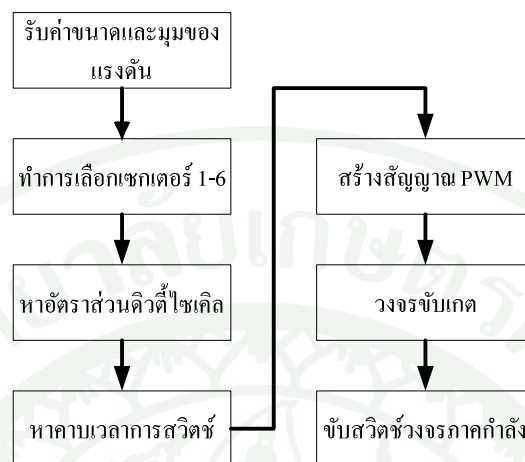
ภาคควบคุมถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญในการที่ทำให้ระบบโดยรวมทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ ภาคควบคุมจะประกอบด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลซึ่งอ่านสัญญาณมาจากตัวรับรู้กระแส และ แรงดัน ซึ่งใช้ควบคุมการทำงานของระบบแปลงผันพลังงาน และ อุปกรณ์เชื่อมต่อกับระบบแปลงผันพลังงานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังทั้งหมด โดยหน้าที่หลักของโปรแกรมคือ สร้างสัญญาณ พัลส์บวลิเอ็ม รวมถึงการควบคุมอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อไม่ให้อุปกรณ์เกิดการเสียหาย โดยจะมีแผนผังการทำงานของโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

การทำงานของแผนผังโปรแกรมที่แสดงดังภาพที่ 52 จะเริ่มการทำงานเมื่อกดปุ่มสตาร์ท คอนแทกเตอร์แม่เหล็กตัวที่ 2 จะทำงาน แรงดันจากแหล่งพลังงานทดแทนจะถูกส่งผ่านตัวต้านทานที่ต่อขนานกับคอนแทกเตอร์แม่เหล็กตัวที่ 3 ผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุเป็นเวลา 3 วินาที คอนแทกเตอร์แม่เหล็กตัวที่ 3 จึงทำงานเป็นการลัดวงจรตัวต้านทาน จากนั้นตัวประมวลผลจะเริ่มสร้างสัญญาณพัลส์บวลิเอ็ม โดยการสร้างสัญญาณพัลส์บวลิเอ็มนั้นจะแสดงดังภาพที่ 53 เมื่อโมดูลพัลส์บวลิเอ็มเริ่มทำงานจะรับค่าขนาด และ มุมของแรงดัน เพื่อคำนวณหาเซกเตอร์ และ กำหนดค่าดีไซด์ไคเคิลเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์บวลิเอ็ม หลังจากนั้นจะส่งสัญญาณไปยังวงจรขับเคลื่อนเพื่อขับสวิตช์ไอจีบีที โดยแรงดันที่บัสกระแสตรงต้องมีแรงดัน

มากกว่า 600 โวลต์ คอนแทกเตอร์แม่เหล็กตัวที่ 1 ถึงทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง และเข้าสู่ขั้นตอนการควบคุม



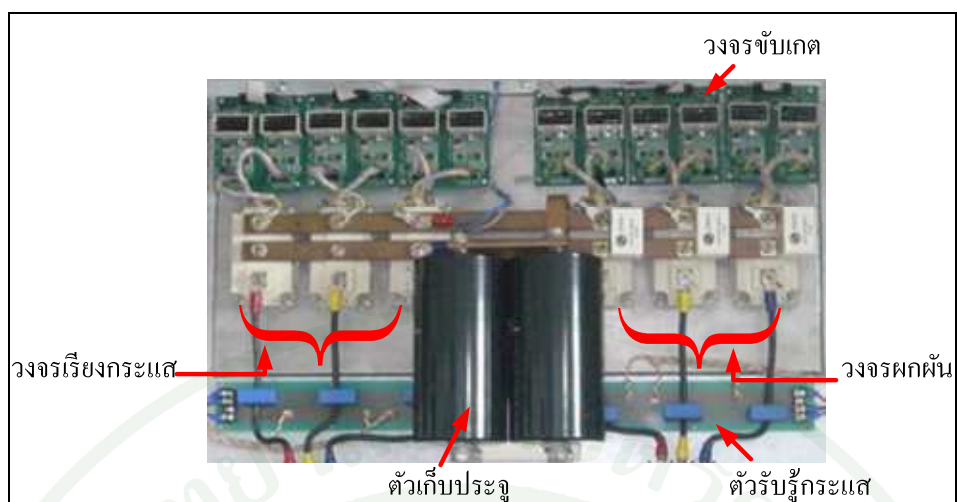
ภาพที่ 53 การทำงานของโมดูลพีดับบลิวเอ็ม

ในส่วนขั้นตอนการควบคุมจะทำการควบคุมการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบต้นแบบเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะเป็นการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward) และใช้เทคนิคการตรวจจับแรงดันตัดข้ามศูนย์ (Zero Crossing) แรงดัน V_{AB} ของการไฟฟ้าเพื่อทำการซิงโครไนส์เข้าไปในระบบ

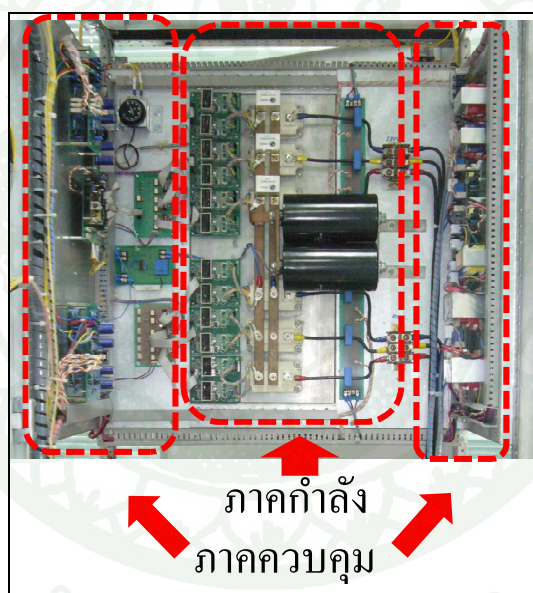
7. ประกอบระบบแปลงผันพลังงาน

ในการประกอบต้นแบบระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้า ในส่วนวงจรภาคกำลังประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส และ วงจรผกผัน ภายในวงจรประกอบด้วย ไอจีบีทีเบอร์ SKM 200GB176D ขนาดกระแส 75 แอมแปร์ แรงดัน 1700 โวลต์ จำนวน 6 ตัว วางเรียงกันอยู่บนแผ่นระบายความร้อน (Heat Sink) ต่อตัวเก็บประจุต่อจากวงจรเรียงกระแส วงจรขับนำ และ ตัวรับรู้กระแสจะจับกระแสทั้งด้านเข้า และ ด้านออกของวงจร แสดงดังภาพที่ 54

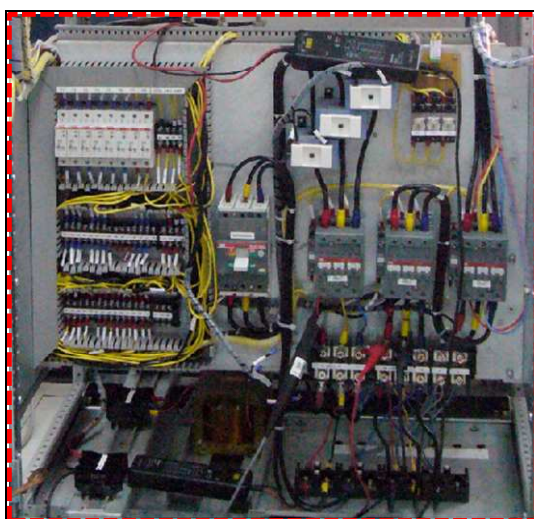
ภาพที่ 55 แสดงการติดตั้ง วงจรภาคกำลัง และ ภาคควบคุมเข้าไปในตู้ผลิตไฟฟ้า ภาพที่ 56 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งจะประกอบด้วย เซอร์คิตเบรกเกอร์ และ คอนแทกเตอร์แม่เหล็ก รวมถึงจุดเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลัง และ ภาพที่ 57 แสดงระบบแปลงผันพลังงานต้นแบบขนาด 20 กิโลวัตต์



ภาพที่ 54 วงจรภาคกำลัง

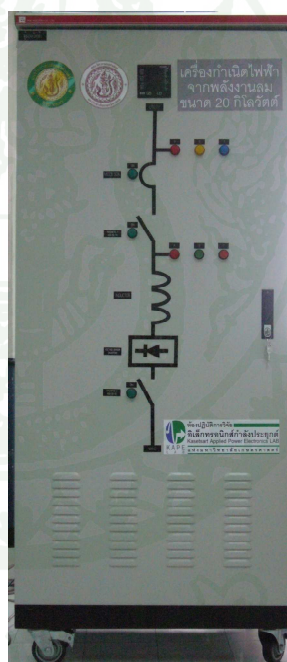
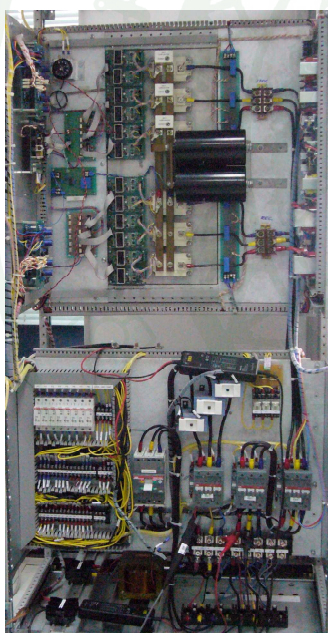


ภาพที่ 55 ส่วนวงจรภาคกำลัง และ ภาคควบคุม



อุปกรณ์ป้องกัน
ส่วนเชื่อมต่อกับแหล่ง
พลังงานทดแทน
และระบบการไฟฟ้า

ภาพที่ 56 ส่วนอุปกรณ์ป้องกันและเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลัง



ภาพที่ 57 ต้นแบบระบบแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อระบบการไฟฟ้า

ผลและวิจารณ์

ผล

1. วิธีการ และ เงื่อนไขการทดสอบ

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการจำลองการทำงานของระบบที่ได้ ออกแบบในหัวข้อที่ผ่านมา จะนำค่าของอุปกรณ์ต่างๆมาประกอบวงจรจำลองการทำงานในเบื้องต้น ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ ทดสอบต้นแบบของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น จะแบ่งการทดสอบเป็นสองกรณี คือ การทดสอบจ่ายโหลดที่สถานะคงตัว (Steady State Test) และ การทดสอบระบบโดยการหมุนเวียนพลังงาน (Circulated Power Test)

2. การจำลองการทำงาน และ การทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่สถานะคงตัว (Steady State Test)

การทดสอบระบบแปลงผันพลังงานโดยจ่ายภาระทางไฟฟ้า จะทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับทดสอบระบบแปลงผันพลังงานที่ออกแบบ เพื่อยืนยันความถูกต้องของระบบแปลงผันพลังงานที่ถูกสร้างขึ้น

2.1. การจำลองพฤติกรรมการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จาก ภาพที่ 58 เป็นการจำลองการทำงานในส่วนต่างๆของระบบแบบจ่ายภาระในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการจำลองจะทำการจ่ายแรงดันอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับคงที่ และ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแส และ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสด้วยวงจรผกผัน และ ผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 15 โดยมีหลักการทำงานดังนี้

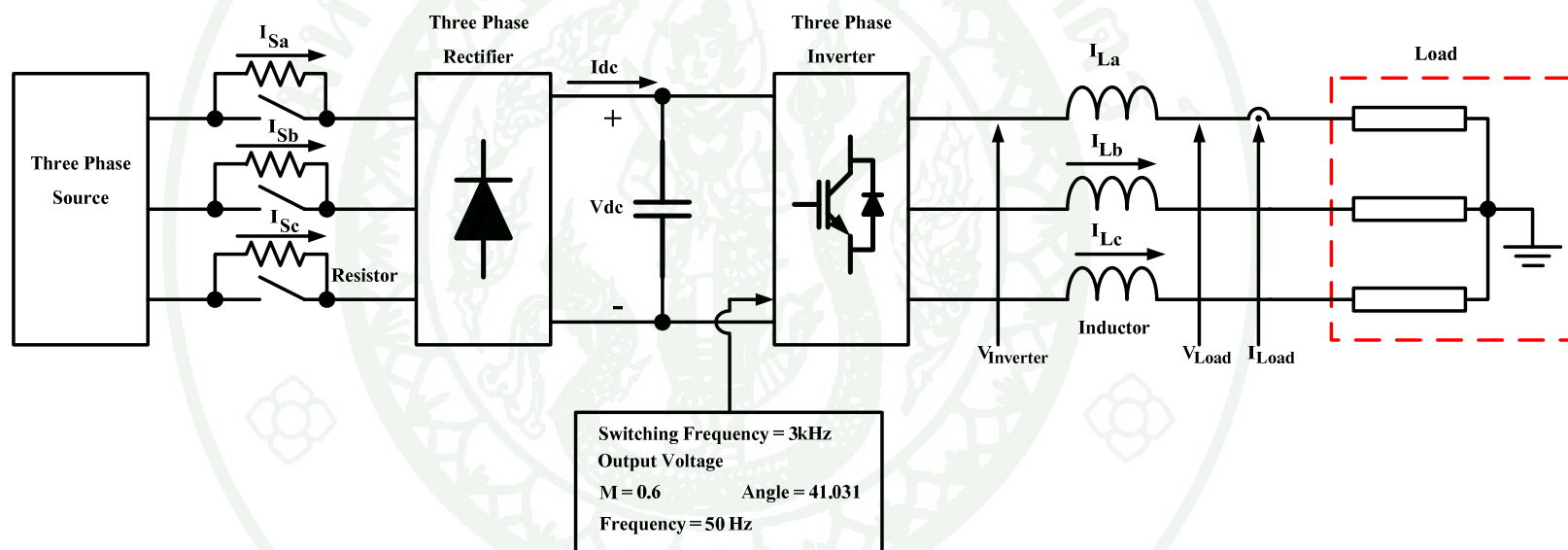
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งพลังงานทดแทนจะถูกจำลองด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส (Three-Phase Programmable Voltage Source) แรงดันสายอินพุต 848 โวลต์ จะถูกป้อนไปยังวงจรเรียงกระแสสามเฟส และ ตัวเก็บประจุ ซึ่งจะได้อาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1200 โวลต์ และ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะเป็นอินพุตให้กับวงจรผกผันสามเฟสที่ด้าน

สวิตช์ (IGBT1-6) เอาต์พุตจะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำต่อไปยังระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกจำลองจากแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส

ในส่วนของการควบคุมการทำงานของวงจรผกผันนั้น จะใช้ชุดกำเนิดสัญญาณมอดูเลชั่นความกว้างพัลส์ความถี่สวิตช์ 3 กิโลเฮิร์ตซ์ ความถี่เอาต์พุต 50 เฮิร์ตซ์ และ ในการจำลองการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานจะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของแรงดัน และ ค่ามุมเพื่อให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 380 โวลต์ และ จ่ายกำลังงานไฟฟ้าจริงสูงสุดขนาด 20 กิโลวัตต์

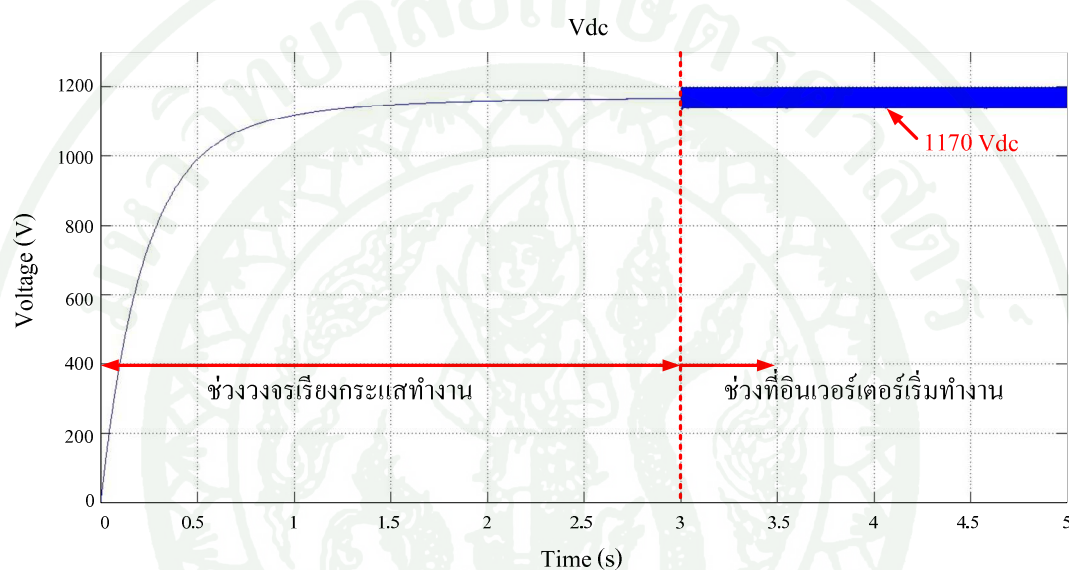
ตารางที่ 15 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
แรงดันอินพุตกระแสสลับ	380-848 โวลต์
แรงดันที่บัสกระแสตรง	1200 โวลต์
แรงดันสายต้านออก	380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์
กระแสต้านออก	30 แอมแปร์
ตัวเหนี่ยวนำ	20 มิลลิเฮนรี
ตัวเก็บประจุ	640 ไมโครฟารัด
ความถี่สวิตชิง	3 กิโลเฮิร์ตซ์

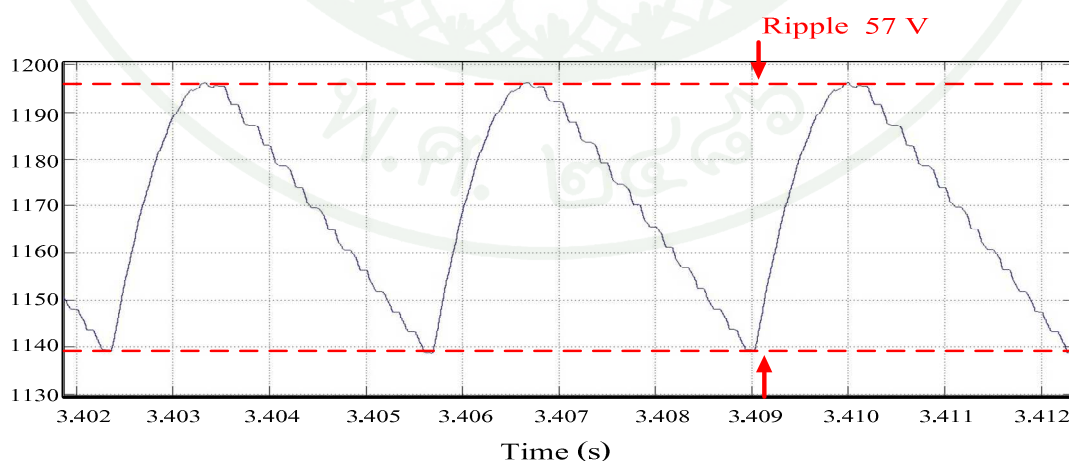


ภาพที่ 58 วงจรแปลงผันพลังงานสำหรับพลังงานทดแทนจ่ายภาระที่ 20 กิโลวัตต์ จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการจำลองพฤติกรรมระบบแปลงผันพลังงานในภาพที่ 59 แสดงแรงดันกระแสตรง (V_{dc}) ด้านออกของวงจรเรียงกระแส โดยจ่ายแรงดันอินพุตกระแสสลับสามเฟสเท่ากับ 840 โวลต์ ซึ่งในช่วงเวลา 0 ถึง 3 วินาทีจะทำการอัดประจุแรงดันจะค่อยเพิ่มขึ้นจนแรงดันมีค่าคงที่ในวินาทีที่ 3 วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานจึงมีการดึงกระแสเพื่อจ่ายให้ภาระทำให้แรงดันกระแสตรง (V_{dc}) มีค่าเท่ากับ 1170 โวลต์ และ ภาพที่ 60 แสดงแรงดันกระแสเฟืองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) มีค่าเท่ากับ 57 โวลต์ (เท่ากับ 4.8 เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน V_{dc})

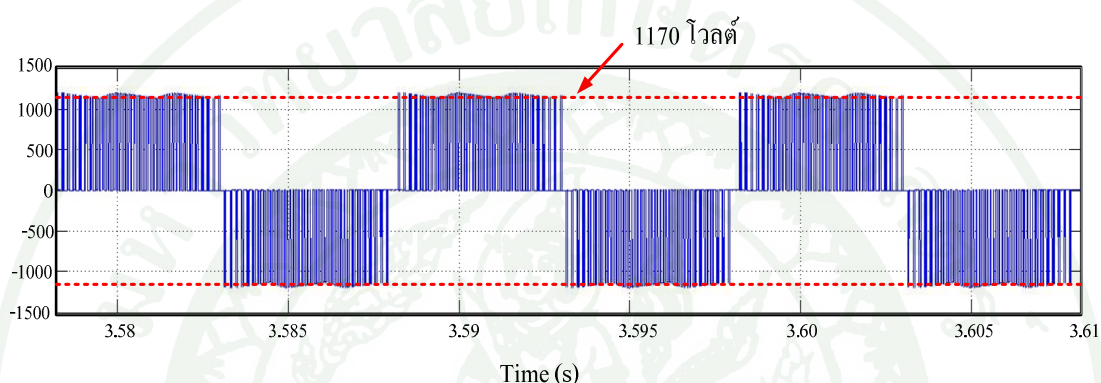


ภาพที่ 59 แรงดันกระแสตรง (V_{dc}) ด้านออกของวงจรเรียงกระแส

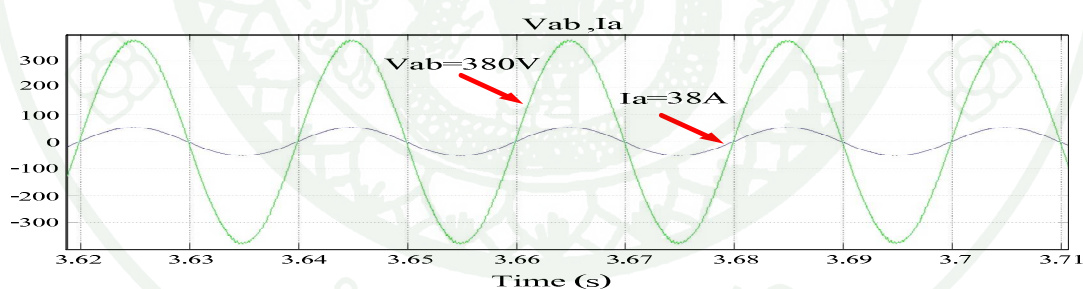


ภาพที่ 60 แรงดันกระแสเฟือง V_{dc}

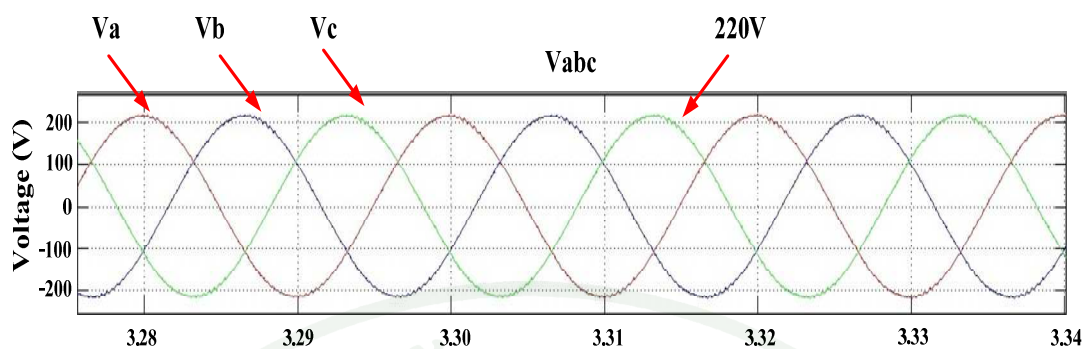
ภาพที่ 61 เป็นแรงดัน V_{inv_ab} ด้านออกของวงจรผกผันที่ยังไม่ได้ผ่านวงจรกรองมีค่าเท่ากับ 1700 โวลต์ ภาพที่ 62 แสดงรูปสัญญาณกระแสด้านออก และ สัญญาณแรงดันหลังตัวเหนี่ยวนำ ภาพที่ 63 เป็นแรงดัน และ กระแสด้านออกหลังตัวเหนี่ยวนำ ภาพที่ 64 เป็นค่ากำลังงานไฟฟ้าของระบบแปลงผันพลังงานเท่ากับ 20 กิโลวัตต์ ภาพที่ 65 เป็นค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมของระบบมีค่าเท่ากับ 1.36 เปอร์เซ็นต์ และ ภาพที่ 66 แสดงค่ากระแสฮาร์มอนิกของระบบในการทดสอบจ่ายภาระทางไฟฟ้า



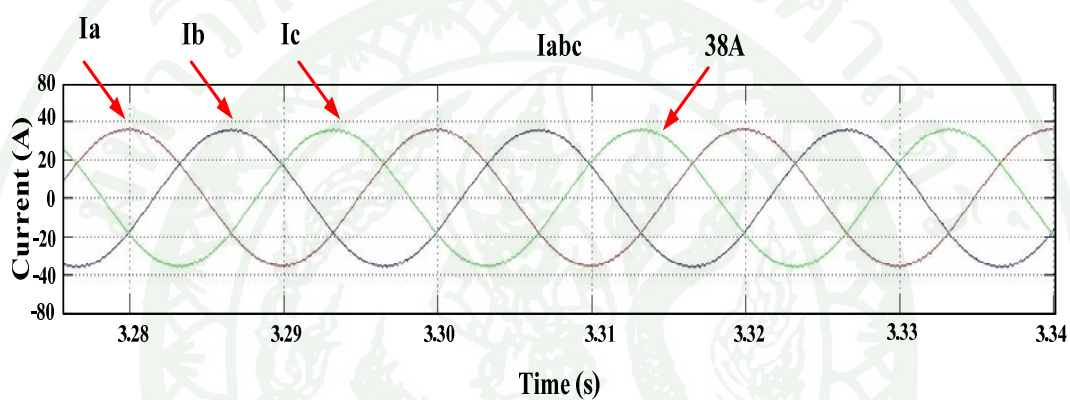
ภาพที่ 61 แรงดัน V_{inv_ab} ด้านออกของวงจรผกผันก่อนผ่านตัวกรอง



ภาพที่ 62 แรงดันด้านออก V_{in_ab} เทียบกับ กระแสด้านออก I_a



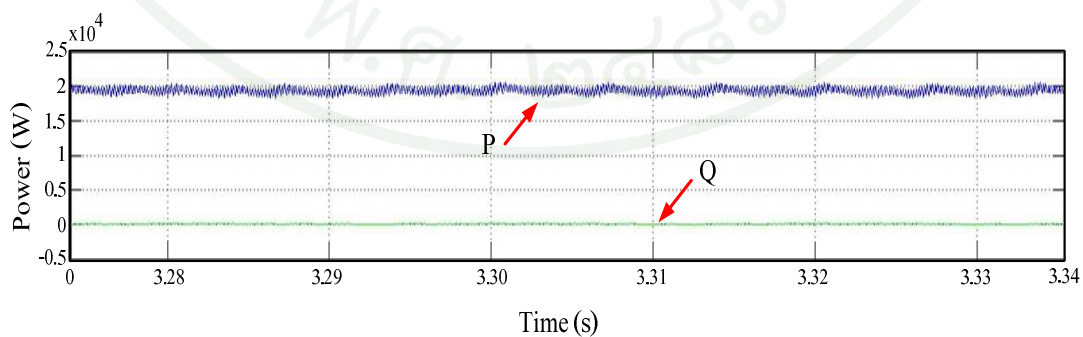
(ก)



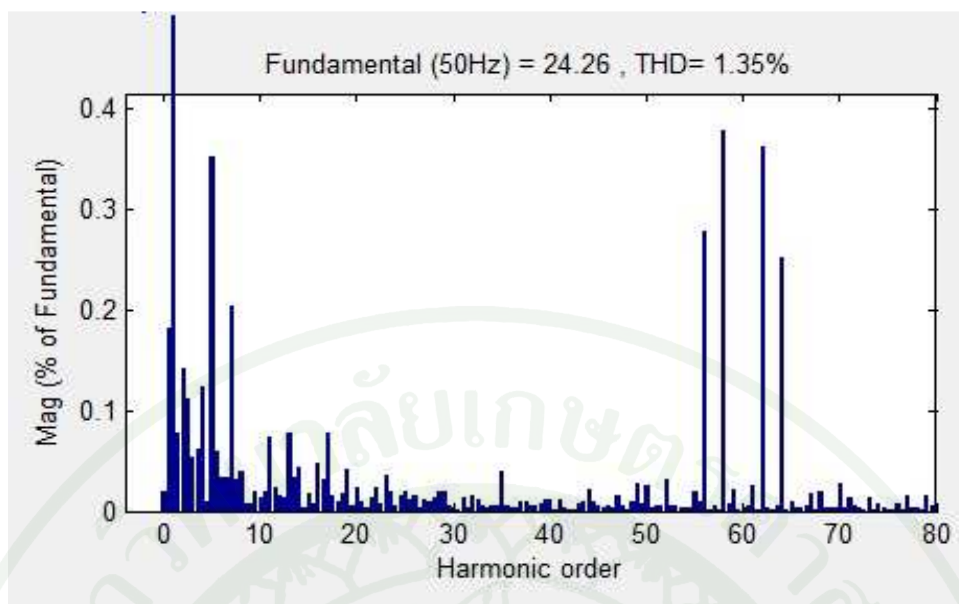
(ข)

ภาพที่ 63 (ก) แรงดัน V_a , V_b , V_c ด้านออกของวงจรหมักฝนสามเฟสที่ผ่านตัวกรองแล้ว

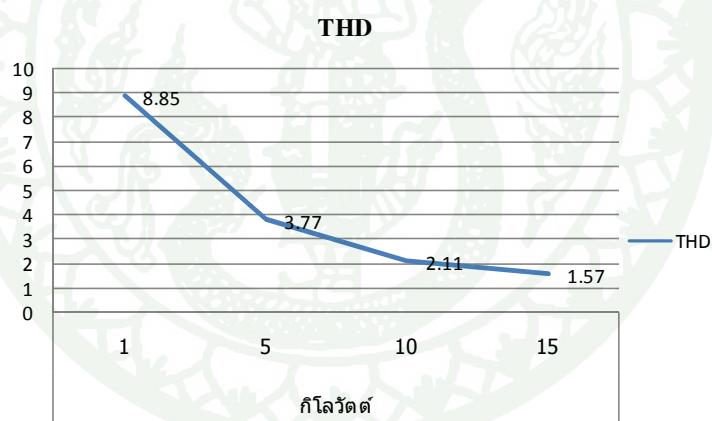
(ข) กระแส I_a , I_b , I_c ด้านออก



ภาพที่ 64 ค่ากำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระ



ภาพที่ 65 ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบ

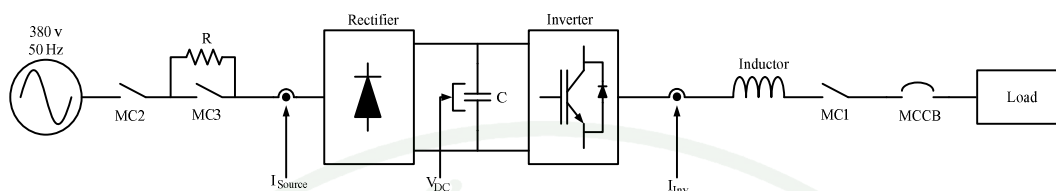


ภาพที่ 66 กราฟแสดงค่ากระแสฮาร์โมนิก

2.2. การทดสอบระบบแปลงผันพลังงานที่ออกแบบ

โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังภาพที่ 67 จะประกอบด้วยหม้อแปลงปรับค่าได้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันต้นสายไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 380 โวลต์ ต่อผ่านตัวต้านทาน 200 โอห์ม 200 วัตต์ เพื่อจำกัดกระแสการอัดประจุที่ตัวเก็บประจุก่อนเข้าระบบแปลงผันพลังงาน และ

แรงดันด้านออกจะผ่านตัวเหนี่ยวนำก่อนต่อไปยังภาระทางไฟฟ้า ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 16

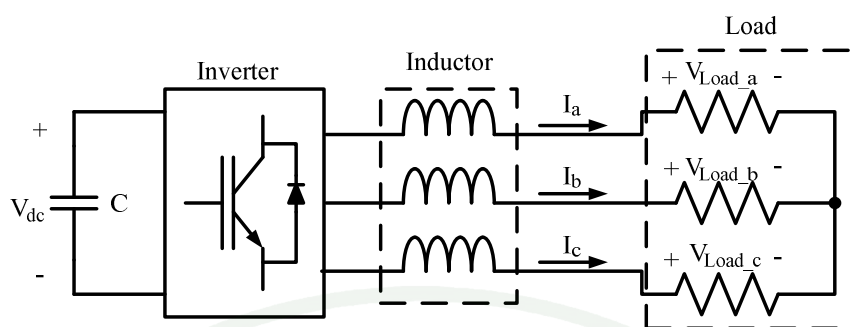


ภาพที่ 67 โครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

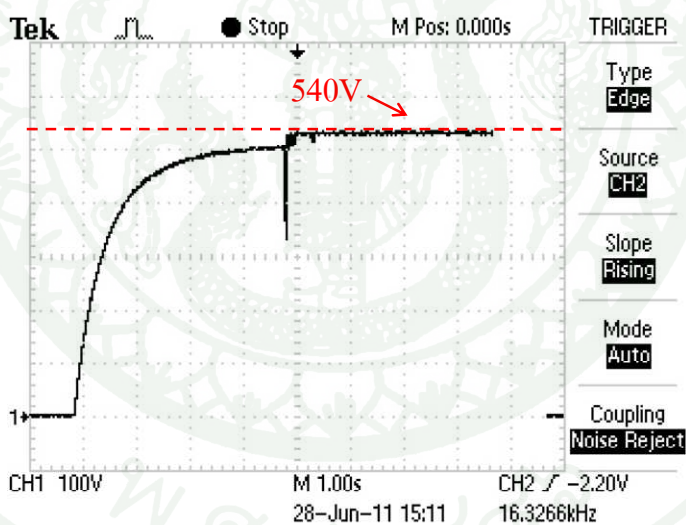
ระบบไฟฟ้า	3 เฟส 3 สาย
แรงดันอินพุต	380 โวลต์
ความถี่	50 เฮิร์ตซ์
โหลดโหลดไฟสูงสุด	15 กิโลวัตต์
ความถี่สวิตช์	3 กิโลเฮิร์ตซ์
ตัวเก็บประจุ	640 ไมโครฟารัด
ตัวเหนี่ยวนำ	20 มิลลิเฮนรี

การทดสอบการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานแบบสภาวะคงตัว จะทำการทดสอบโดยใช้โหลดเป็นโหลดไฟฮาโรเจน ที่ใช้กำลังงาน 500 วัตต์จำนวน 12 หลอด และ 1500 วัตต์จำนวน 6 หลอด ซึ่งจำทำการทดสอบภาระสูงสุดที่ 15 กิโลวัตต์ (เป็น 75 เปอร์เซ็นต์ของฟลักโหลด) โดยทดสอบการจ่ายภาระตั้งแต่ 4.5 , 9 , 12 และ 15 กิโลวัตต์ และต่อภาระในลักษณะ สตาร์ หรือ วาย (Star or Wye) ทางด้านเอาต์พุตของวงจรพิกัดแสดงดังภาพที่ 68 โดยกำหนดให้ ค่าความถี่เกิดเท่ากับ 0.85 มุมเท่ากับ 41 องศา

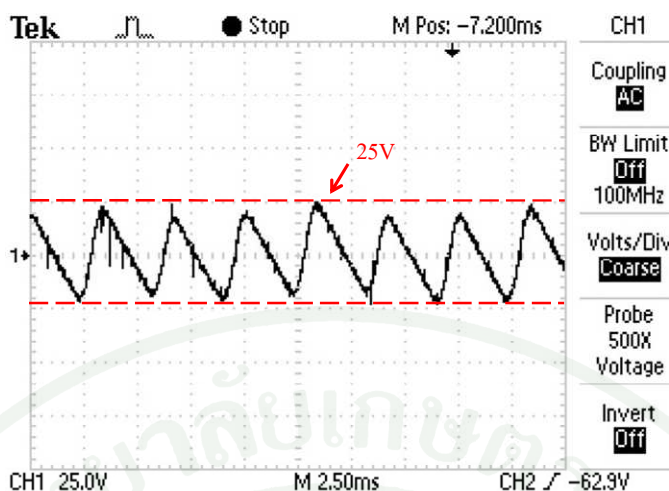


ภาพที่ 68 ลักษณะการต่อโหลด

จากภาพที่ 69 เป็นสัญญาณแรงดันด้านออกจากวงจรเรียงกระแสสามเฟส จะเห็นว่าแรงดันชาร์ตตัวเก็บประจุค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนแรงดันที่ตัวเก็บประจุเต็มที 540 โวลต์ ภาพที่ 70 แสดงให้เห็นแรงดันกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีขนาด 25 โวลต์ (มีค่าเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดัน V_{dc})



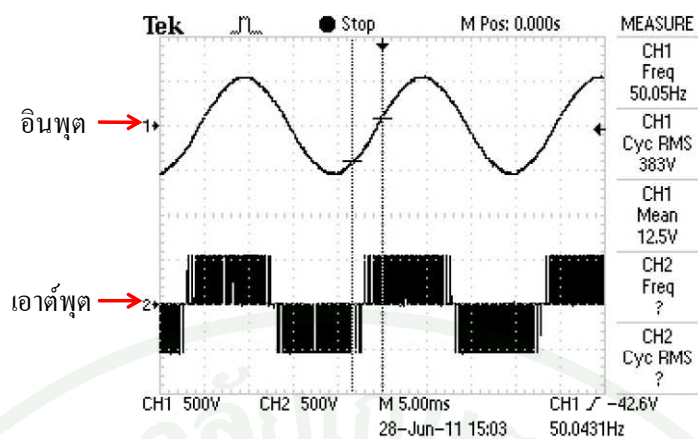
ภาพที่ 69 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{dc} มีแรงดันเท่ากับ 540 โวลต์



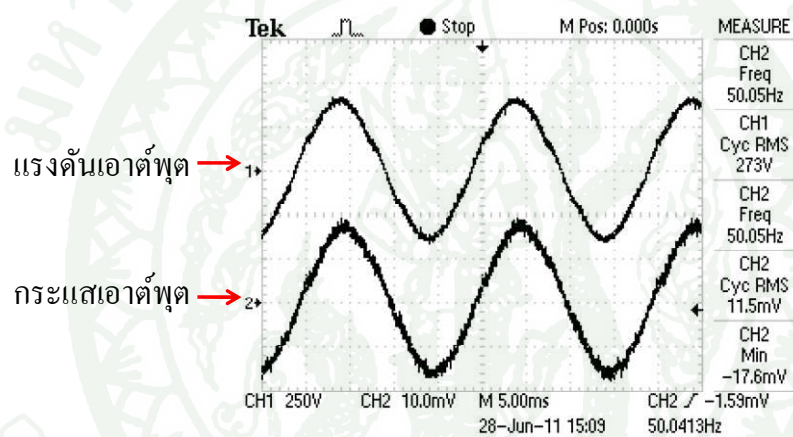
ภาพที่ 70 แรงดันกระแสเฟืองของแรงดันกระแสตรง V_{dc} มีค่าเท่ากับ 25 โวลต์

จากผลการทดสอบการจ่ายภาระที่กำลังงาน 4.5 , 9 , 12 และ 15 กิโลวัตต์ และ วัดค่าแรงดันด้านออกเทียบกับกระแสด้านออก

ในภาพที่ 71 ถึง 79 แสดงสัญญาณแรงดัน และ กระแสด้านออกของระบบแปลงผันพลังงานที่จ่ายให้กับโหลด จะเห็นว่าระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจ่ายกระแสเพิ่มตามพิกัดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้า แต่แรงดันในช่วงที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าแรงดันด้านออกมีค่าไม่ถึง 380 โวลต์ เนื่องจากผลของตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่ระหว่างวงจรพิกัดมีค่ามากจึงทำให้แรงดันที่ครอบคลุมตัวเหนี่ยวนำมากตามไปด้วย และ ทำให้กระแสด้านออกจะมีมุมล้าหลังแรงดันด้านออก

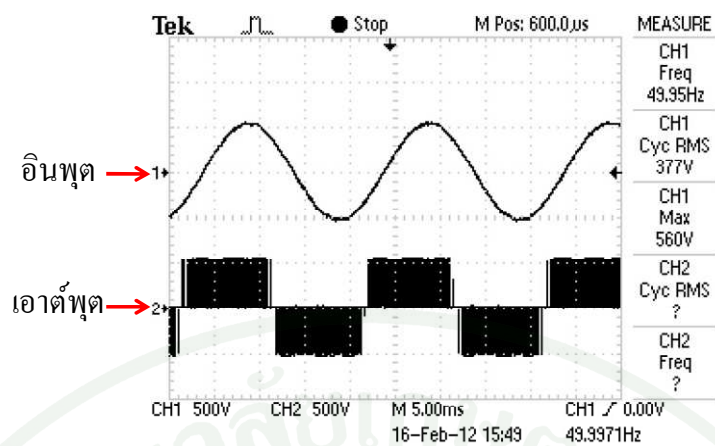


(ก)

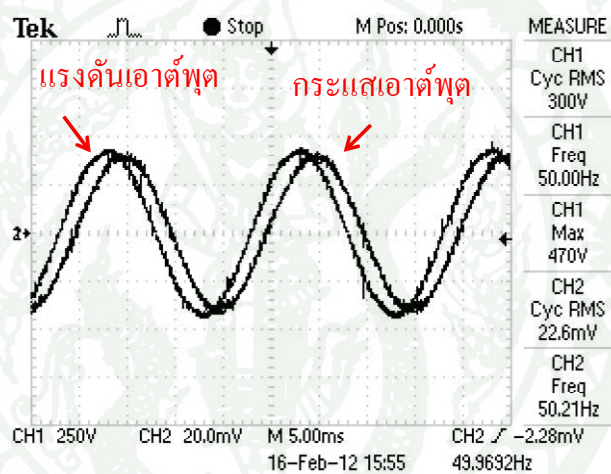


(ข)

ภาพที่ 71 ผลการทดสอบสภาวะจ่ายภาระที่ 4.5 กิโลวัตต์ (ก) แรงดันอินพุต 383 โวลต์ แรงดัน V_{inv} เอาต์พุต 540 โวลต์ (ข) แรงดันเอาต์พุต 273 โวลต์ กระแส 6 แอมแปร์

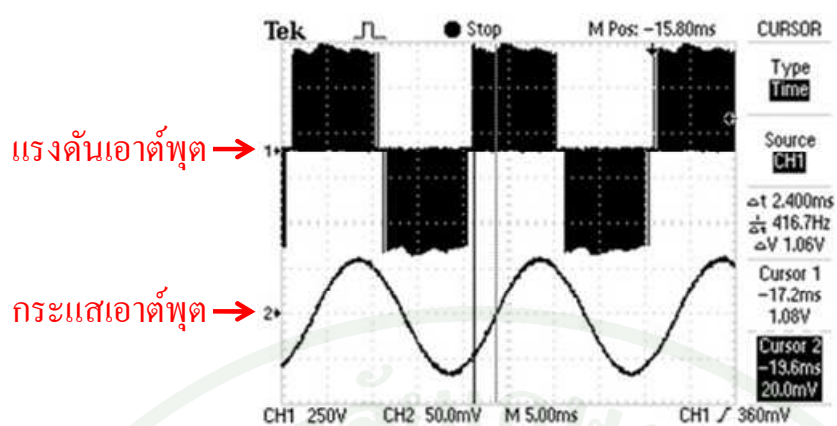


(ก)

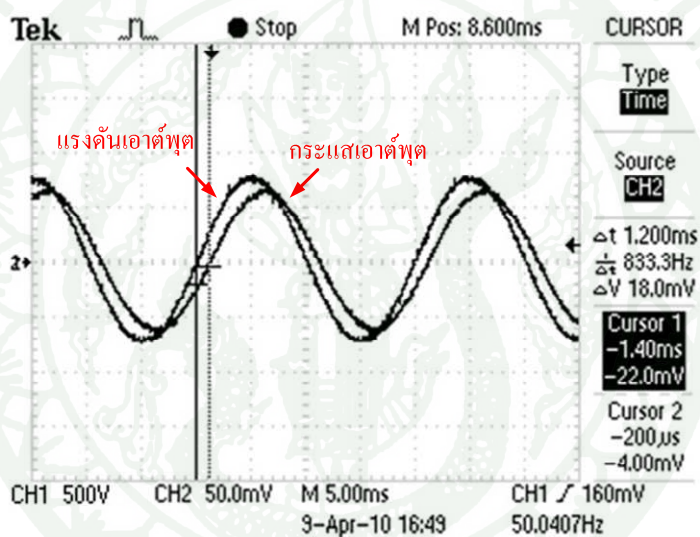


(ข)

ภาพที่ 72 ผลการทดสอบสภาวะจ่ายภาระที่ 9 กิโลวัตต์ (ก) แรงดันอินพุต 377 โวลต์ แรงดัน V_{inv} เอาต์พุต 540 โวลต์ (ข) แรงดัน V_{ab} เอาต์พุต 300 โวลต์ กระแส 11 แอมแปร์

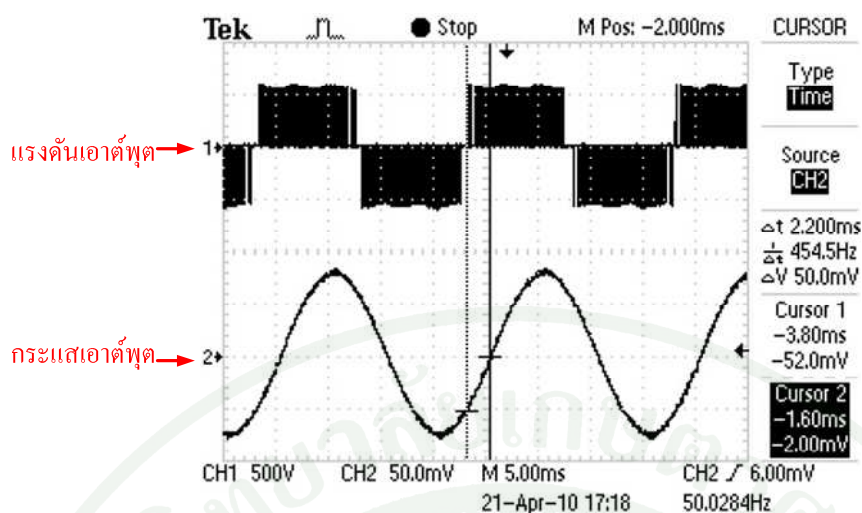


(ก)

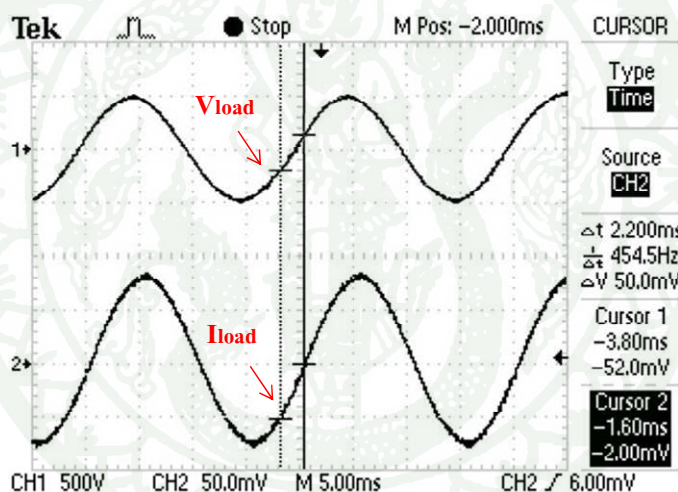


(ข)

ภาพที่ 73 ผลการทดสอบสภาวะจ่ายภาระที่ 12 กิโลวัตต์ (ก) แรงดัน เอาต์พุต 540 โวลต์ (ข) แรงดัน เอาต์พุต 380 โวลต์ กระแส 21 แอมแปร์



(ก)



(ข)

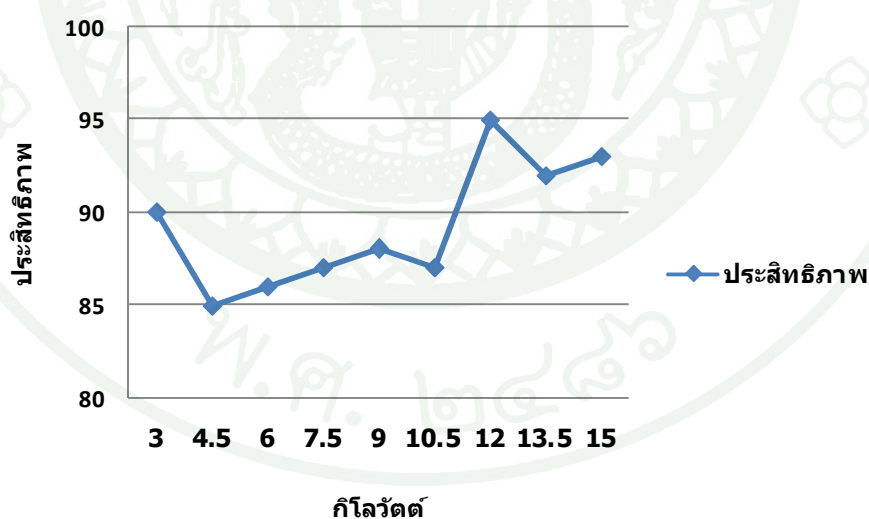
ภาพที่ 74 ผลการทดสอบสถานะจ่ายภาระที่ 15 กิโลวัตต์ (ก) แรงดันเอาต์พุตจากวงจรพ่นก่อนผ่านวงจรกรอง 540 โวลต์ (ข) แรงดันเอาต์พุต 377 โวลต์ กระแส 25 แอมแปร์

ผลการทดสอบระบบแปลงผันพลังงาน จากการจ่ายแรงดันอินพุต 380 โวลต์ ระบบแปลงผันพลังงานสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง และ แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายให้กับภาระที่แรงดัน 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ได้ จากผลการทดสอบได้นำแรงดันอินพุตกับแรงดันด้านออก และ กระแสด้านออก มาคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบแปลงผันพลังงาน จากการคำนวณกำลังงานเอาต์พุตต่ออินพุตประสิทธิภาพ

ของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 85 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 17 และ ภาพที่ 75 แสดงกราฟประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

ตารางที่ 17 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบแปลงผันพลังงาน

กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ	กำลังงานไฟฟ้าที่วัดได้	เปอร์เซ็นต์การทำงานของระบบ
3 กิโลวัตต์	2.7 กิโลวัตต์	90 เปอร์เซ็นต์
4.5 กิโลวัตต์	3.8 กิโลวัตต์	85 เปอร์เซ็นต์
6 กิโลวัตต์	5.2 กิโลวัตต์	86 เปอร์เซ็นต์
7.5 กิโลวัตต์	6.5 กิโลวัตต์	87 เปอร์เซ็นต์
9 กิโลวัตต์	7.9 กิโลวัตต์	88 เปอร์เซ็นต์
10.5 กิโลวัตต์	9.2 กิโลวัตต์	87 เปอร์เซ็นต์
12 กิโลวัตต์	11.4 กิโลวัตต์	95 เปอร์เซ็นต์
13.5 กิโลวัตต์	12.3 กิโลวัตต์	91 เปอร์เซ็นต์
15 กิโลวัตต์	13.8 กิโลวัตต์	92 เปอร์เซ็นต์

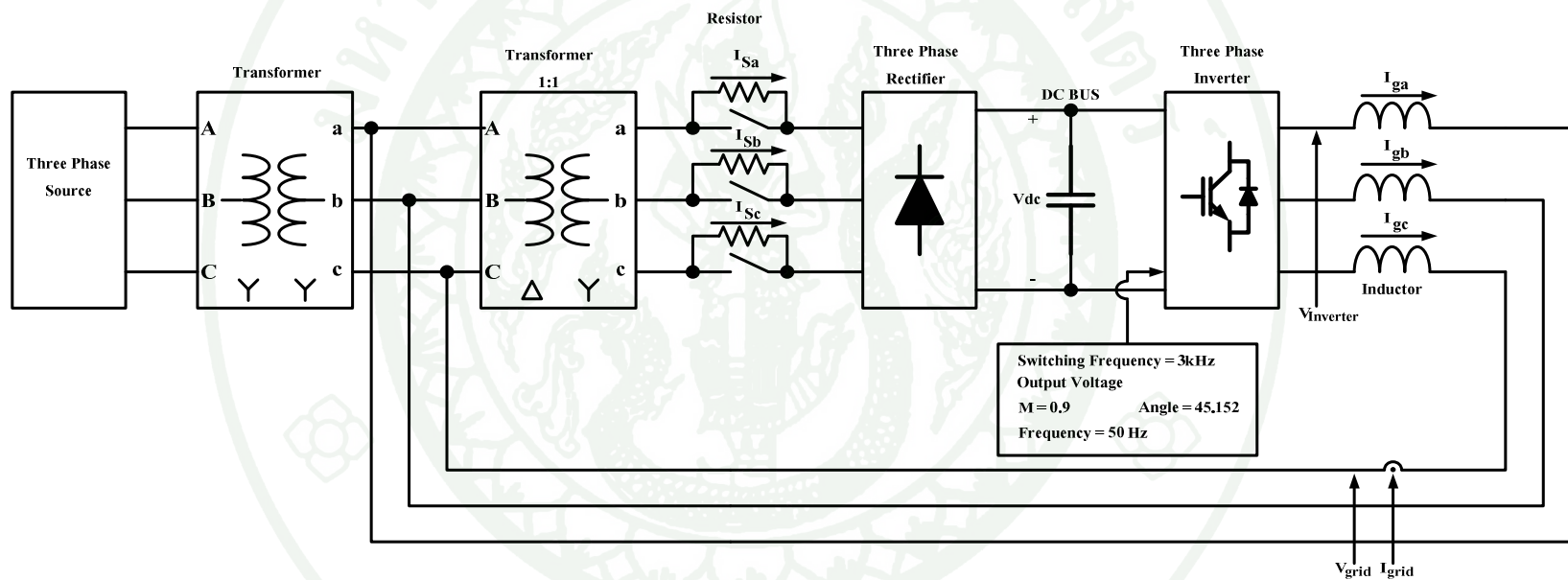


ภาพที่ 75 ประสิทธิภาพของระบบแปลงผันพลังงาน

3. การทดสอบระบบโดยการหมุนเวียนพลังงาน (Circulated Power Test)

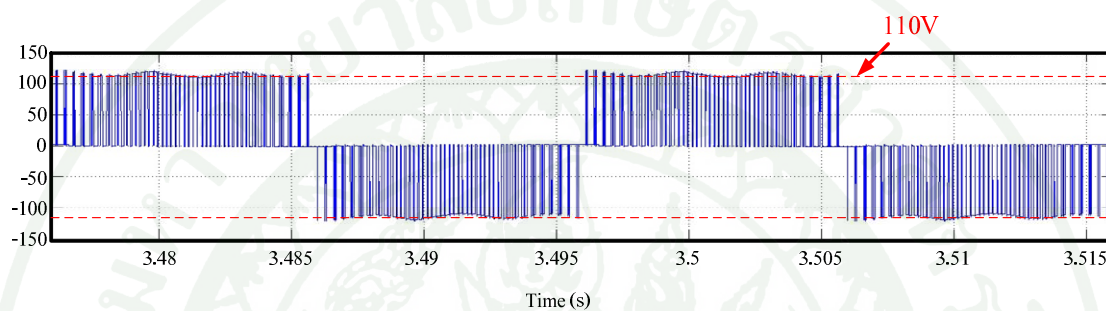
3.1. การจำลองพฤติกรรมการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานโดยการหมุนเวียนพลังงาน

การจำลองพฤติกรรมระบบแปลงผันพลังงานโดยอาศัยการหมุนเวียนพลังงานมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง จากภาพที่ 76 เป็นวงจรต้นแบบที่ใช้ในการจำลอง โดยจะใช้หม้อแปลงปรับค่าเป็นแหล่งจ่ายให้กับระบบ และ ทางด้านเข้าของวงจรเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้ากำลัง ต่อหม้อแปลงอัตราส่วน 1 ต่อ 1 เพื่อทำการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันด้านออกของระบบต้นแบบกับแรงดันการไฟฟ้า กำหนดให้แรงดันอินพุตเท่ากับ 50 โวลต์ ค่าดีวีดีไซน์เกิล 0.8 โดยแรงดันเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 50 โวลต์ 50 เฮิรตซ์

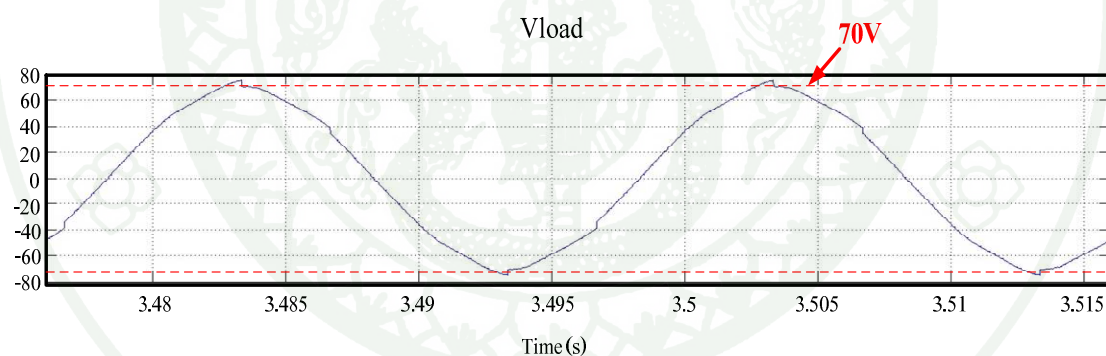


ภาพที่ 76 การทดสอบระบบหมุนเวียนพลังงาน จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลจากการจำลองพฤติกรรมการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานโดยการหมุนเวียนพลังงาน จากภาพที่ 77 (ก) แสดงแรงดันฟีดแบ็คลิ่วเอ็มด้านออกของวงจรพิกผันมีขนาดเท่ากับ 110 โวลต์ ภาพที่ 77 (ข) แสดงแรงดันสาย V_{ab} ด้านออกจากวงจรพิกผันเทียบกับแรงดันด้านออกหลังตัวเหนี่ยวนำ และ ภาพที่ 78 แสดงสัญญาณของกระแสด้านออกเทียบกับแรงดันไฟฟ้าด้านออก แสดงว่าระบบสามารถจ่ายกระแสเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองเท่ากับ 400 วัตต์ แสดงดังภาพที่ 79



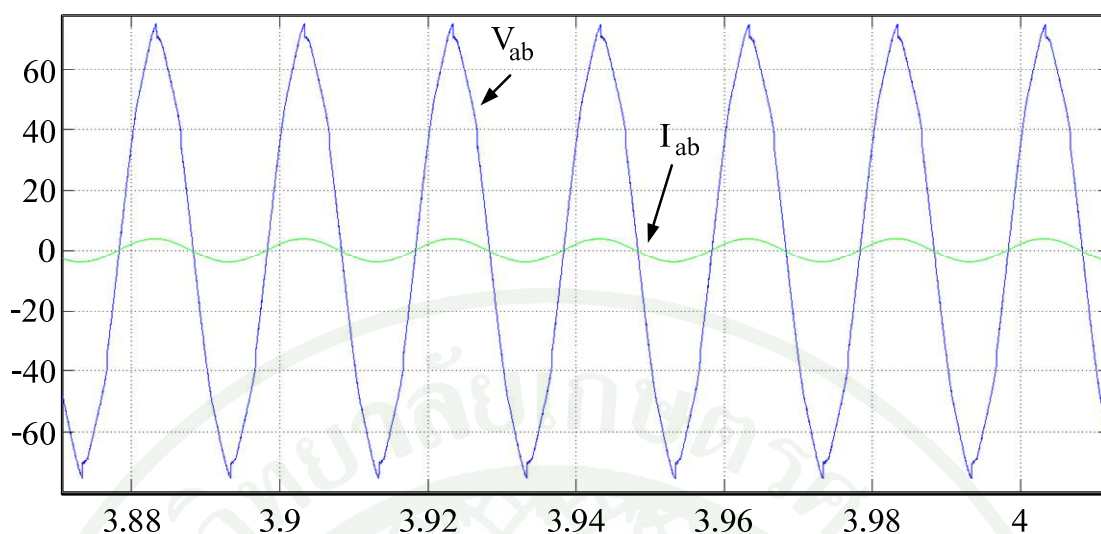
(ก)



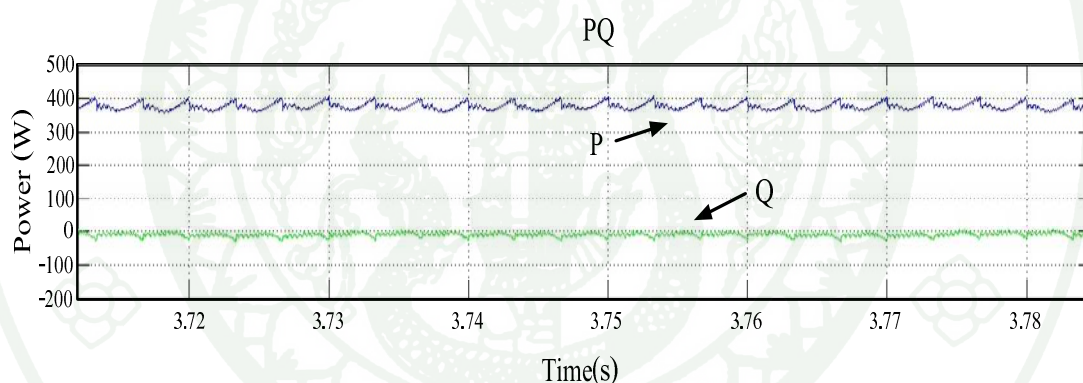
(ข)

ภาพที่ 77 (ก) แรงดัน V_{inv_ab} ด้านออกของวงจรพิกผันก่อนผ่านตัวเหนี่ยวนำ

(ข) แรงดัน V_{ab} ด้านออกจากวงจรพิกผันหลังจากผ่านตัวเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 78 แรงดันด้านออก V_{In_ab} เทียบกับ กระแสด้านออก I_{ab}



ภาพที่ 79 กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ 400 วัตต์

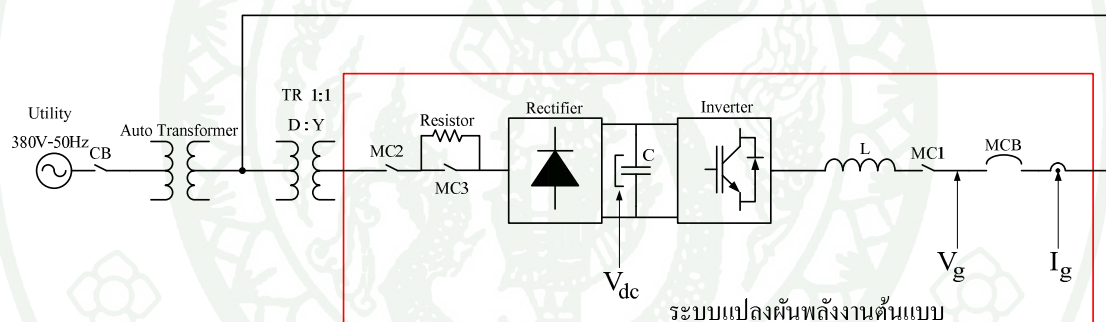
3.2. การทดสอบระบบโดยการหมุนเวียนพลังงาน

ในการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเชื่อมต่อบรรยากาศกับระบบไฟฟ้ากำลังโดยอาศัยหลักการหมุนเวียนพลังงานแสดงดังภาพที่ 80 วงจรที่ใช้ในการทดสอบจะประกอบด้วย หม้อแปลงปรับค่าได้ (Variac) แทนแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับใช้สร้างแรงดันสายขนาด 70 โวลต์ เนื่องจากนำเอาหม้อแปลงปรับค่าได้มาใช้แทนแหล่งพลังงานกระแสสลับทำให้ด้านเข้าของระบบแปลงผันพลังงานที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าจึงใช้หม้อแปลงสามเฟสที่มีอัตราส่วนรอบเท่ากับ 1 ต่อ 1 และพิกัดกำลังเท่ากับ 20 กิโลวัตต์ ทำหน้าที่แยกกราวด์ของ

ระบบต้นแบบ และระบบของไฟฟ้ากำลังออกจากกันเพื่อป้องกันความเสียหายจากการลัดวงจร ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 18 ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 81 - 83

ตารางที่ 18 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบระบบหมุนเวียนพลังงาน

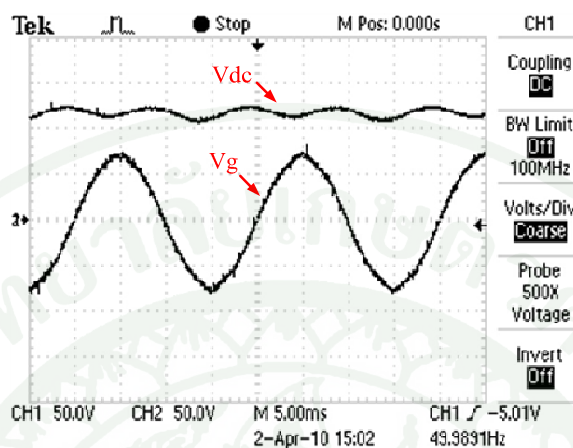
ระบบไฟฟ้า	3 เฟส 3 สาย
แรงดันอินพุต	50 โวลต์
ค่าตัวชี้เซเคิล	0.85
ความถี่	50 เฮิร์ตซ์
ความถี่สวิตช์	3 กิโลเฮิร์ตซ์
ตัวเก็บประจุ	640 ไมโครฟารัด
ตัวเหนี่ยวนำ	20 มิลลิเฮนรี



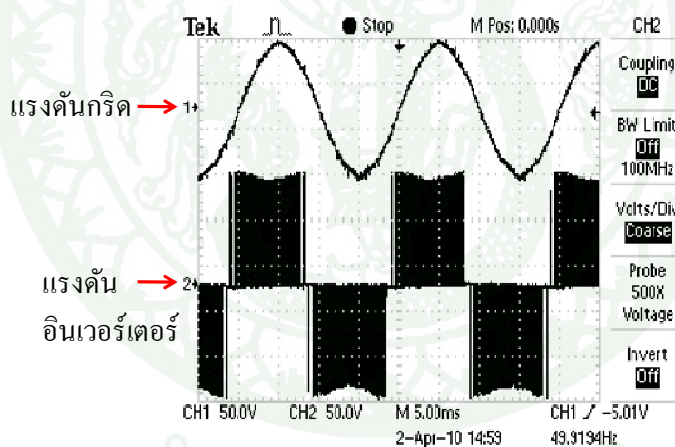
ภาพที่ 80 วงจรใช้ทดสอบระบบโดยการหมุนเวียนพลังงาน

จากผลการทดสอบพบว่าในภาพที่ 81 เปรียบเทียบแรงดันจากแหล่งจ่าย และ แรงดัน V_{dc} จะสังเกตเห็นถึงความผิดเพี้ยนของแรงดัน V_{dc} เนื่องจากเป็นแรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ดังนั้นจึงต้องมีความถี่ 6 เท่าของความถี่มูลฐานหรือ 300 เฮิร์ตซ์ แต่จากรูปวัดได้เพียง 4 เท่าของความถี่มูลฐานหรือ 200 เฮิร์ตซ์ ในขณะที่อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันพิคดับลิวเอ็ม เมื่อทดสอบระบบหมุนเวียนพลังงาน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงลดลงบางช่วง ซึ่งส่งผลให้แรงดันพิคดับลิวเอ็มที่อินเวอร์เตอร์สร้างขึ้นนั้นมีแรงดันเพี้ยนตามแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังภาพที่ 82 เนื่องจากขนาดของตัวเก็บประจุยังมีขนาดไม่มากพอ และ ภาพที่ 83 แสดงปริมาณของกระแสที่วัดได้มีขนาดไม่

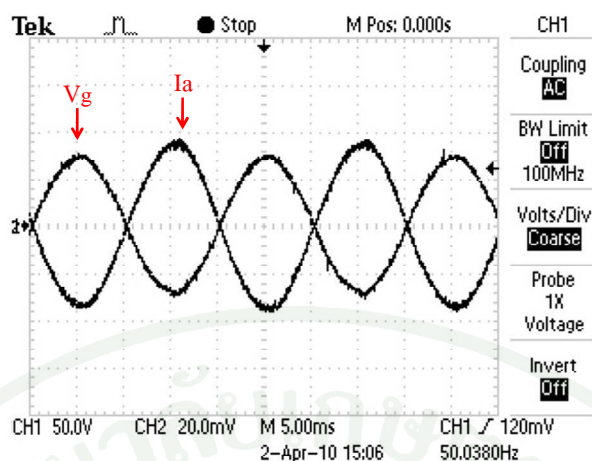
สมมาตรกัน ซึ่งอาจเกิดจากความเหนี่ยวนำร่วมในหม้อแปลงแบบแยกกราวด์ และ ค่าพารามิเตอร์ภายในหม้อแปลง



ภาพที่ 81 เปรียบเทียบแรงดันกระแสตรง V_{dc} เทียบกับแรงดันกริด V_g



ภาพที่ 82 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันกริด V_{g_AB} กับแรงดันอินเวอร์เตอร์ V_{IN_AB}



ภาพที่ 83 ผลการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันกริด V_{g-AB} กับกระแส I_a

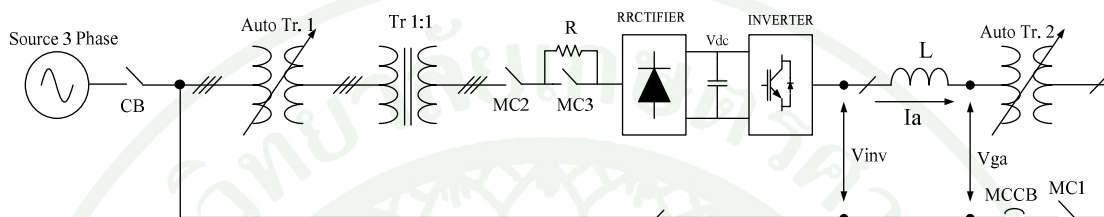
3.3. สรุป

จากผลการจำลองพฤติกรรมการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจำลองภาระทางไฟฟ้าจะเห็นว่า เมื่อมีแรงดันจากแหล่งพลังงาน กระแสสลับจะถูกจำกัดกระแสโดยตัวต้านทานผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นเวลา 3 วินาที แรงดันกระแสตรงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1170 โวลต์คงที่ และสามารถจ่ายกระแสที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ และ ผลการจำลองพฤติกรรมการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานงานแบบหมุนเวียนพลังงานจะเห็นว่ากระแสด้านออกเข้าจังหวะกับแรงดันแสดงว่าระบบสามารถถ่ายโอนพลังงานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังได้ ซึ่งจากการทดสอบระบบแปลงผันพลังงานที่สร้างขึ้นโดยจำลองภาระทางไฟฟ้า เมื่อจ่ายแรงดันให้กับระบบผ่านวงจรเรียงกระแส แรงดันกระแสตรงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนแรงดันคงตัวที่ 540 โวลต์ และสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยแรงดันสายด้านออกเท่ากับ 380 โวลต์ ซึ่งมีผลสอดคล้องกับการจำลองการทำงาน

4. การทดสอบระบบแปลงผันพลังงานเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟส

ในการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเชื่อมต่อระบบต้นแบบเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งวงจรต้นแบบที่ใช้ทดสอบแสดงดังภาพที่ 84 โดยแรงดันด้านเข้าจะใช้แรงดันจากแหล่งจ่ายสามเฟสผ่านหม้อแปลงปรับค่า (Variac) และ หม้อแปลง 1 ต่อ 1 ซึ่งหม้อแปลงต่ออยู่ในลักษณะ วาย เดลต้า เพื่อยกระดับแรงดันด้านออกให้เป็น $\sqrt{3}$ เท่าของแรงดันอินพุต และ แยก

กราวด์ ระหว่างระบบต้นแบบกับแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส ในส่วนของแรงดันระบบไฟฟ้ากำลังที่ระบบต้นแบบได้เชื่อมต่อได้นำเอาหม้อแปลงปรับค่าสร้างแรงดัน 220 โวลต์ เพื่อให้ได้แรงดันตามที่กำหนด ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 19 และ ระบบต้นแบบแสดงดังภาพที่ 84



ภาพที่ 84 วงจรที่ใช้ทดสอบการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟส

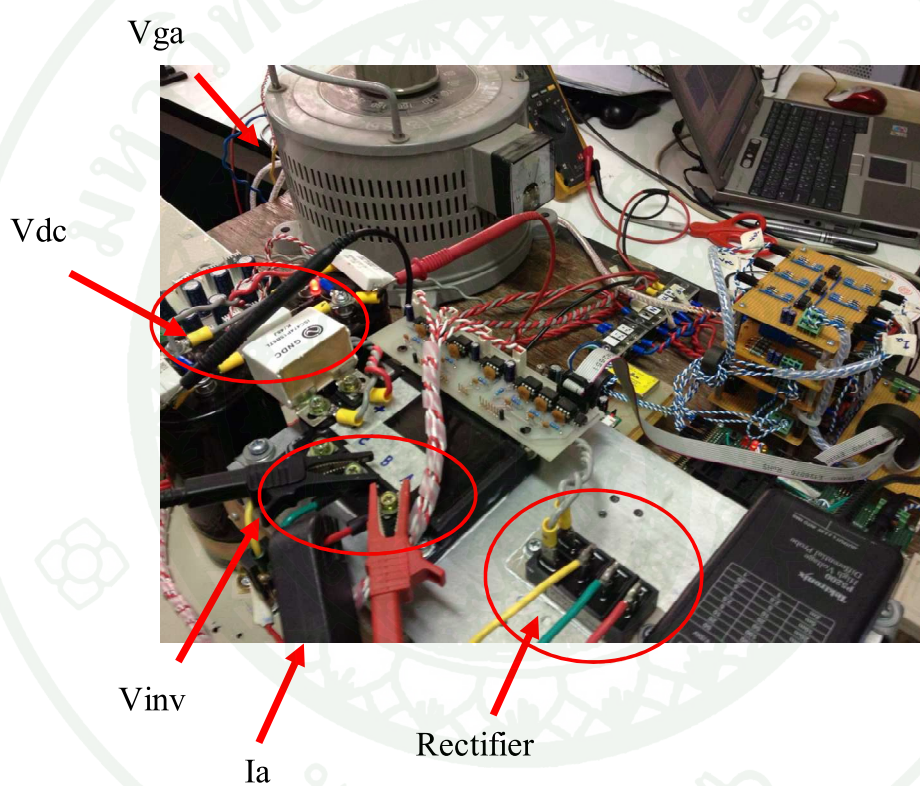
ตารางที่ 19 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟส

ระบบไฟฟ้า	3 เฟส 3 สาย
กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด	10 กิโลวัตต์
แรงดันอินพุต 3 เฟส	120 โวลต์
แรงดันด้านออก 1 เฟส	220 โวลต์
แรงดันบัลกระแสตรง	490 โวลต์
กระแสด้านออก	9 แอมแปร์
ความถี่สวิตช์	6 กิโลเฮิร์ตซ์
ตัวเก็บประจุ	6.6 มิลลิฟารัด
ตัวเหนี่ยวนำ	10 มิลลิเฮนรี

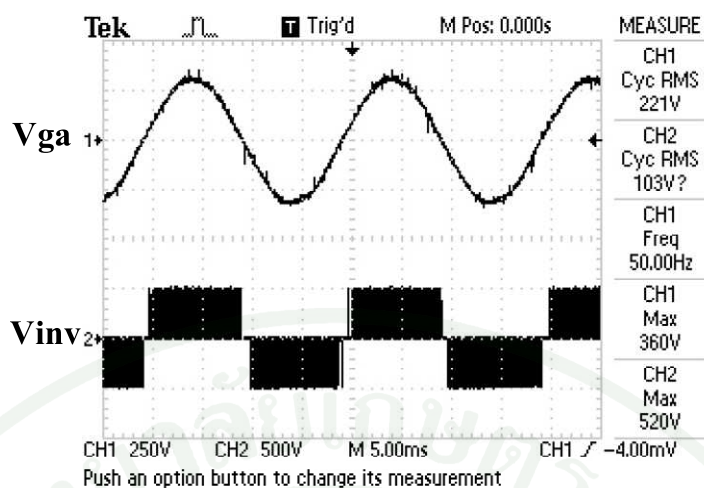
จากผลการทดสอบการเชื่อมต่อระบบต้นแบบเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟส ในภาพที่ 86 แสดงแรงดันฝั่งกริด V_{ga} เท่ากับ 221 โวลต์ เทียบกับแรงดันอินเวอร์เตอร์ V_{inv} เท่ากับ 520 โวลต์

ในภาพที่ 87 แสดงรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_{ga} เทียบกับกระแสต้านออก I_a จะสังเกตว่า กระแสมีทิศทางกลับเฟสกับแรงดันไฟฟ้า 180 องศา เป็นผลมาจากระบบแปลงผันพลังงานได้มีการ ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง

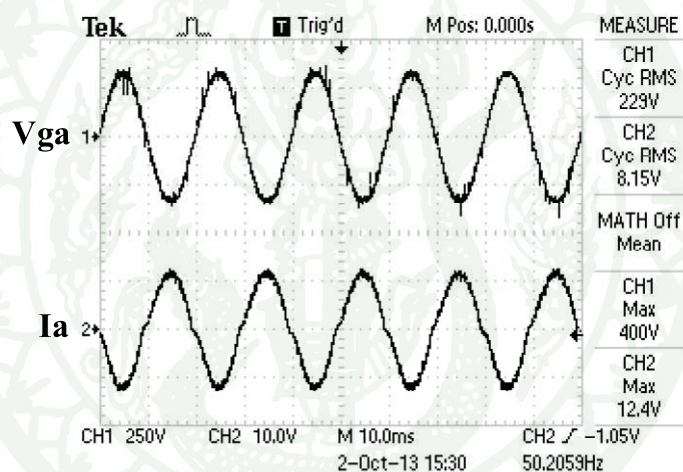
ในภาพที่ 88 แสดงค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ระบบแปลงผันพลังงานจ่ายให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง เท่ากับ 2 กิโลวัตต์



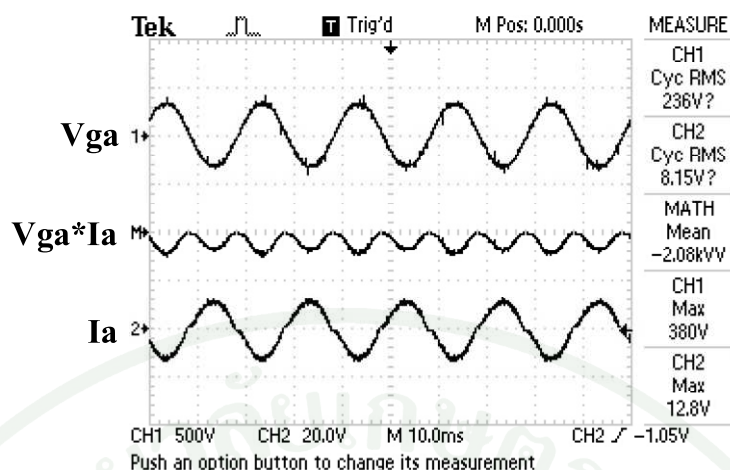
ภาพที่ 85 ระบบแปลงผันพลังงานเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟส



ภาพที่ 86 แรงดันกริด V_{ga} เทียบกับแรงดันด้านออกของวงจรผกผัน V_{inv}



ภาพที่ 87 แรงดันกริด V_{ga} เทียบกับกระแส I_a



ภาพที่ 88 กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง

วิจารณ์

ระบบแปลงผันพลังงานที่สร้างขึ้นมีจุดประสงค์เพื่อนำเอาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานทดแทนในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง โครงการวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษา และ ออกแบบระบบแปลงผันพลังงาน โดยใช้วงจรภาคกำลังทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ควบคุมระบบ เพื่อทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของแหล่งพลังงานทดแทนให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง

จากการทดสอบการทำงานของระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าต้นแบบที่ได้ออกแบบ และ สร้างขึ้นโดยการจ่ายภาระทางไฟฟ้า ได้ผลสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงาน โดยระบบแปลงผันพลังงานสามารถให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านออก 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งสัญญาณกระแส และ สัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปไซน์ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 89 เปอร์เซ็นต์ และ การทดสอบระบบแปลงผันพลังงานเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส แสดงให้เห็นว่า ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสามารถถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังได้

ระบบแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนที่สร้างขึ้นในส่วนวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นวงจรพื้นฐานซึ่งแรงดันกระแสตรงที่ได้จะแปลงผันตามแรงดันด้านเข้าจากแหล่งพลังงานทดแทนซึ่งระบบจะสามารถถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้ก็ต่อเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{dc} ต้องมีแรงดันมากกว่าหรือเท่ากับ 540 โวลต์ ระบบแปลงผันพลังงานถึงจะสามารถถ่ายโอนพลังงานเข้าไปในระบบได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบต้นแบบควรมีวงจรยกระดับแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรงให้มีค่ามากกว่า 540 โวลต์ ในกรณีที่แหล่งพลังงานทดแทนมีกำลังงานต่ำเพื่อให้ระบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างต่อเนื่อง และ เมื่อประกอบวงจรแปลงผันพลังงานเข้าไปในตู้ผลิตกระแสไฟฟ้าอาจจะมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงอันเนื่องมาจากวงจรสวิตช์ซึ่งควรมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง นอกจากนั้นระบบแปลงผันพลังงานจำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดปรากฏการณ์การจ่ายไฟฟ้าแบบแยกตัวอิสระ เพื่อให้ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 20 กิโลวัตต์ โดยเริ่มจากการศึกษาโครงสร้าง และ หลักการทำงานเพื่อเป็นแนวในการออกแบบ และ ควบคุมการทำงานของระบบแปลงผันพลังงาน ซึ่งสรุปรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1. ได้ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อสร้างระบบแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนขนาด 20 กิโลวัตต์
2. ได้ศึกษาเทคนิคการควบคุมวงจรผกผันเพื่อให้สร้างแรงดันรูปไซน์สามเฟสขนาด 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ โดยงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน
3. ได้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนต้นแบบคือ พลังงานลม และ พลังงานน้ำ
4. นำเสนอเทคนิคการเชื่อมต่อกับระบบที่ออกแบบกับระบบไฟฟ้ากำลัง
5. ได้สร้างแบบจำลองพฤติกรรมการทำงาน เพื่อยืนยันว่าระบบที่ออกแบบสามารถทำงานได้ตามหลักการและสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ
6. ได้สร้างต้นระบบแบบแปลงผันพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 20 กิโลวัตต์ ที่ให้เอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดัน 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์

7. จากผลการทดสอบระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถนำไปจ่ายให้กับภาระอิเล็กทรอนิกส์ที่แรงดัน 220 โวลต์ได้ และจากการทดสอบแบบหมุนเวียนพลังงานแสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบสามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังได้

ข้อดีของระบบ

1. กระแสด้านออกมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์
2. ช่วยสนับสนุนการใช้พลังงานจากธรรมชาติทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม
3. สามารถนำระบบต้นแบบไปพัฒนาด้านอื่นต่อไปได้

ข้อเสนอแนะ

ระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าต้นแบบนี้ยังมีประเด็นที่สำคัญบางประการที่ควรศึกษาและวิจัยเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาระบบให้ดียิ่งขึ้นดังนี้

ในส่วนอินพุตของระบบแปลงผันพลังงานในส่วนวงจรเรียงกระแสซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกเก็บสะสมไว้ที่ตัวเก็บประจุที่บัสกระแสตรง ซึ่งจะต้องรักษาแรงดันให้คงที่เสมอ เพื่อรองรับการทำงานของวงจรพิกซ์ที่จ่ายกำลังงานเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้วงจรพิกซ์ยังสามารถจ่ายกำลังงานเข้าสู่ระบบไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีที่ แรงดันตก หรือ แหล่งพลังงานทดแทนผลิตแรงดันได้น้อย ควรพัฒนาจากวงจรเรียงกระแสให้เป็นวงจรเรียงกระแสแบบแปลงขึ้น (Active Front End)

ควรมีการพัฒนาระบบต้นแบบให้มีส่วนของการป้องกันการเกิดปรากฏการณ์การจ่ายไฟฟ้าแบบแยกตัวอิสระ (Islanding Protection) โดยชุดป้องกันจะต้องตัดระบบแปลงผันพลังงานออกจากระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหาย และ เชื่อมต่อระบบระบบไฟฟ้าใหม่เมื่อระบบไฟฟ้าสามารถกลับมาจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อีกครั้ง

ควรต้องมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ป้องกันสัญญาณความถี่สูง
เข้ามารบกวนระบบ เนื่องจากวงจรประเภทสวิตช์ซึ่งเป็นตัวสร้างสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และ
ความถี่วิทยุ สามารถรบกวนการทำงานของตัวประมวลผล และ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆได้



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์. 2547. เทคโนโลยีพลังงานลม. วารสาร มหาวิทยาลัย
นครสวรรค์. 12: 57-73.

นิรนาม, ม.ป.ป. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส. ความรู้เกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้า. แหล่งที่มา:
<http://202.129.59.73/tn/motor10-52/motor8.htm>

ยิ่งปลิว สุภกิตติวงศ์. 2553. รูปแบบของไฟฟ้าพลังน้ำ. ไฟฟ้าพลังน้ำ. แหล่งที่มา:
<http://www.yp.co.th2010-10-03-06-35-3488--hydroelectricity.html>, 20 สิงหาคม 2556

วัฒนา ถาวร. 2545. โรงต้นกำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 6. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., กรุงเทพฯ.

วีระเชษฐ์ ชันจิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. 2552. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 9. ห้างหุ้น-
ส่วนจำกัด วี.เจ. พรินตติ้ง, กรุงเทพฯ.

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น). 2552. กังกัณณแบบเพลาตั้ง. เทคโนโลยีกังหันลม
สมัยใหม่. แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=4&bookID=1321&read=true&count=true, 20 สิงหาคม 2556.

AHMED, K.H., FINNEY, S.J. and WILLIAMS, B.W. 2007. Passive Filter Design for Three-
Phase Inverter Interfacing in Distributed Generation. **Electrical Power Quality and
Utilisation, Journal Vol. XIII**, No. 2.

Ali Khajehoddin, S., M. Karimi-Ggartemani, Jain, P.K. and Bakhshai, A. 2011. A Control Design
Approach for Three-Phase Grid-Connected Renewable Energy Resources. **IEEE
Transactions On Sustainable Energy**, VOL. 2, NO. 4: 423-432.

Zhou, K. and Wang, D. 2002. Relationship Between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carrier-Based PWM: A Comprehensive Analysis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 49: 186-196.

Prodanovic, M. and Timothy, C. 2003. Control and Filter Design of Three-Phase Inverters for Highh Power Quality Grid Connection. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 18 : 373-380.

Sozer, Y., Torrey, D.A. and Reva, S. 2000. New Inverter Output Filter Topology for PWM Mortor Drive. **IEEE Transactions On Power Electronics**. 15 : 1007-1017.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายฐิติพัฒน์ เลี้ยงชีพวัฒน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 พฤษภาคม 2526
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-