

การออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
แบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
กังหันน้ำขนาดเล็ก

DESIGN OF 12-PULSE AC TO DC CONVERTER
FOR SMALL HYDRO GENERATOR CONNECTED GRID SYSTEM

ชาคริต วินิจธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
แบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
กังหันน้ำขนาดเล็ก

ชาคริต วินิจธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก
ชื่อ – นามสกุล	นายชาคริต วินิจธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก ซึ่งวงจรนี้ สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังได้และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกจะมีค่าเป็น 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างวงจรแบบ 6 พัลส์

การออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์นั้น จำเป็นต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกให้คงที่ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ PI โดยแยกการควบคุมเป็น 2 ชุด เพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์แบบ PWM ไปขับอุปกรณ์ โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทดสอบเครื่องต้นแบบในห้องปฏิบัติการ ควบคุมการทำงานผ่านบอร์ด dSPACE รุ่น DS1104

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้ภาระโหลดขนาด 5 กิโลวัตต์ และ 10 กิโลวัตต์ วงจรสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกได้คงที่ 650 โวลต์ 7.5 แอมป์ และ 15 แอมป์ ตามลำดับ และผลการทดสอบจากเครื่องต้นแบบนั้นจะชี้แจงใจเกี่ยวกับการจำลองภายใต้ข้อจำกัดของพิกัดอุปกรณ์ จึงสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกคงที่ได้เพียง 400 โวลต์ 4.8 แอมป์ และ 9 แอมป์ ตามลำดับ ดังนั้นวงจรที่นำเสนอนี้ สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกให้คงที่ได้ มีความน่าเชื่อถือในการทำงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด แม้เมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้น และค่าส่วนประกอบของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองกับการทดสอบพบว่ามีค่าต่างกันอยู่ร้อยละ 40 เนื่องจากถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ : คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ กังหันน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

Thesis Title	Design of 12-Pulse AC to DC Converter for Small Hydro Generator Connected Grid System
Name - Surname	Mr. Chakrit Winittham
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Mr. Nathabhat Phankong, Ph.D.
Academic Year	2013

ABSTRACT

This thesis proposes the design of the 12-Pulse AC to DC converter for small hydro generator connected to the grid system. This converter can reduce current harmonic component value in electrical power system and increase the DC output voltage was two times, compared with typical structure of the 6-Pulse AC to DC converter.

To design 12-Pulse converter control circuit of constant DC output voltage is necessary by using control technique 2 sets PI controller. The driver signal is generated using PWM technique for driving IGBT devices. The simulation method used a MATLAB/Simulink environment. The experiment of this thesis was setup via dSPACE DS1104 board in the laboratory level.

The simulation is modeled in MATLAB/Simulink using the 5 kW and 10 kW as resistive load. This converter can control the DC output voltage at 650V 7.5A and 15A, respectively. The experiment is set with the same condition as simulation model, under the limitation of devices rating. The experiment result showed that the converter can control the DC output voltage at 400V 4.8A and 9A, respectively. Therefore, the proposed converter can control the output voltage that can reliable operate under laboratory condition, although when the load was increased. The current harmonic component value compared between the simulation and experiment result, is difference about 40%, because the limitation of the laboratory rated device.

Keywords: 12-Pulse Converter, Hydro Turbine, Permanent Magnet Synchronous Generator

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจากท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักติพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เกิดชื่น ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงานที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบใจเพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโททุกคนที่ให้กำลังใจในการดำเนินกิจกรรมการวิจัยจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่มอบทุนสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชาคริต วินิจธรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(14)
บทที่	
1 บทนำ.....	16
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	16
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	18
1.3 สมมุติฐานของวิทยานิพนธ์.....	18
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	19
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	19
1.6 ข้อยกเว้นของวิทยานิพนธ์.....	20
1.7 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	20
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.2 ความเป็นมาของปัญหาที่เกิดขึ้นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.....	24
2.3 ฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	25
2.4 โครงสร้างส่วนต่างๆของระบบ.....	31
2.5 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	38
2.6 การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม.....	44
2.7 อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	48
2.8 แผนภาพของการทำงานวิจัย (Flow Chart).....	52
2.9 กรอบของการทำงานวิจัย (Frame Work).....	53
2.10 สรุปผลเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	54
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	54
3.2 การออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แบบ 12 พัลส์	55
3.3 การออกแบบส่วนวงจรกำลัง	57
3.4 การออกแบบส่วนวงจรควบคุม.....	60
3.5 การออกแบบส่วนการแปลงผันพลังงาน	67
3.6 การจำลองการทำงานในโปรแกรม Matlab/Simulink	77
3.7 สรุปการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แบบ 12 พัลส์ และผลการจำลอง.....	88
4 การทดสอบการทำงานและผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	89
4.1 โครงสร้างของระบบ.....	89
4.2 ผลการทดสอบการทำงาน	99
4.3 สรุปการทดสอบการทำงาน	106
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	107
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	107
5.2 ข้อเสนอแนะ	109
รายการอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	113
ประวัติผู้เขียน.....	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การปรับค่าโดยวิธี Ziegler – Nicole.....	66
3.2 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง.....	80



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างระบบขับเคลื่อนน้ำด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSG โดยคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์	18
1.2 โครงสร้างของระบบทั้งหมดที่ทำการออกแบบและทดสอบ	19
2.1 รูปคลื่นสัญญาณความผิดเพี้ยนจากการเกิดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า	25
2.2 รูปคลื่นการรวมกันของสัญญาณไซน์	27
2.3 สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์	27
2.4 สเปกตรัมอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์	28
2.5 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ	30
2.6 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ	32
2.7 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนีสแม่เหล็กถาวร	34
2.8 วงจรสมมูล $dq0$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนีสแม่เหล็กถาวร	34
2.9 การต่อวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด	37
2.10 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด	39
2.11 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเฟส a-b-c	40
2.12 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบ ไดโอด	40
2.13 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบคุมเฟสโดยใช้สัญญาณ PWM	42
2.14 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์โดยควบคุมแบบ PI	44
2.15 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 12 พัลส์โดยควบคุมแบบ PI	44
2.16 การสร้างสัญญาณสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม	47
2.17 พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (Sinusoidal Pulse width Modulation : SPWM)	48
2.18 วงจรสมมูลของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	49
2.19 ค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ช่วงเวลาต่าง ๆ	50
2.20 อุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} ที่ปลอดภัยของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	52
2.21 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน	52
2.22 แผนรูปของการทำวิจัย	53
2.23 กรอบของการทำงานวิจัย	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 โครงสร้างของระบบทั้งหมดที่ทำการออกแบบ	55
3.2 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์....	56
3.3 วงจรส่วนภาคควบคุมของวงจรแบบ 12 พัลส์	57
3.4 การต่อวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่ใช้ในงานจริง	58
3.5 ลักษณะการต่อวงจรของตัวเก็บประจุ	59
3.6 การต่อวงจรของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในวงจร	60
3.7 การต่อวงจรการระโหดความต้านทาน(R)	61
3.8 ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แบบ 6 พัลส์	62
3.9 ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แบบ 12 พัลส์	63
3.10 ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน	63
3.11 ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส a, b, c เป็น d-q	64
3.12 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	64
3.13 ส่วนการปรับค่ากระแส	65
3.14 ผลการตอบสนองแบบ Ziegler – Nicole	66
3.15 ไดอะแกรมการแปลงแบบคาร์ค	67
3.16 ไดอะแกรมการแปลงแบบปาร์ค	67
3.17 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ ไอจีบีทีรุ่น SKW30N60	68
3.18 วงจรภาคขับสวิตซ์ไอจีบีที	69
3.19 วงจรกลับสัญญาณและหน่วงเวลา	70
3.20 ไอซีเบอร์ CD40106BE (NOT Gate)	71
3.21 วงจรสับเบอร์	72
3.22 การแบ่งกระแส I_o เป็น I_s และ I_c	72
3.23 ช่วงเวลาที่สวิตซ์ต่อวงจร	73
3.24 การวัดสัญญาณของ LV25-P	76
3.25 การวัดสัญญาณของ LAS50-TP	77

สารบัญรูป (ต่อ)

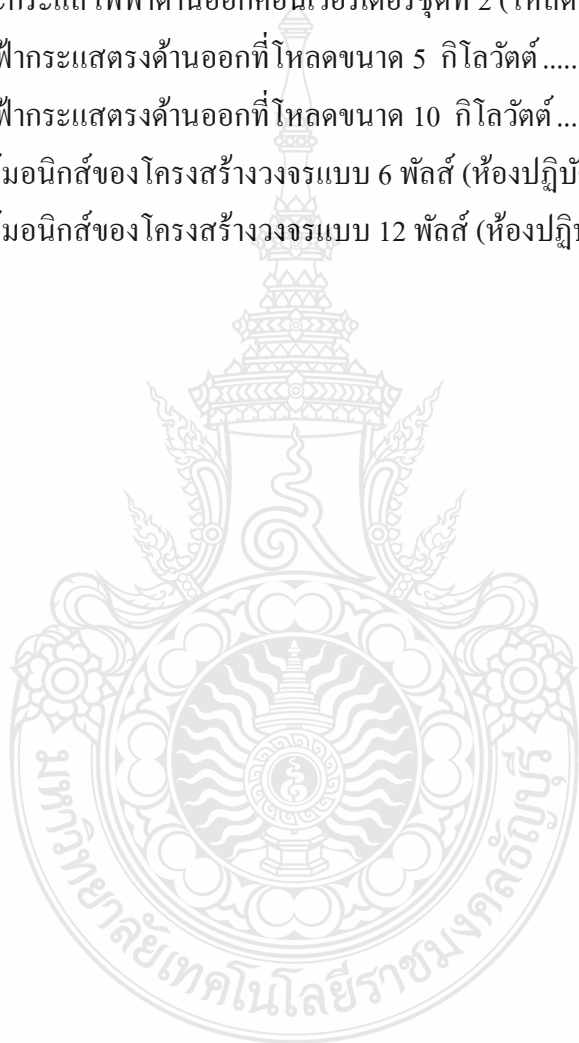
รูปที่	หน้า
3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านออกกับกระแสด้านเข้า	77
3.27 แบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ในโปรแกรม Matlab/Simulink ส่วนวงจรกำลัง.....	78
3.28 แบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ในโปรแกรม Matlab/Simulink ส่วนวงจรควบคุม	79
3.29 แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	80
3.30 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่มีโหลดขนาด 5 กิโลวัตต์	81
3.31 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่มีโหลดขนาด 10 กิโลวัตต์	81
3.32 แรงดันด้านออกของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดสตาร์และเดลต้าเฟส A	82
3.33 แรงดันไฟฟ้าเฟส A B และ C ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิตเพื่อใช้ในวงจรควบคุม.....	82
3.34 กระแสไฟฟ้าเฟส A B และ C ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิตเพื่อใช้ในวงจรควบคุมที่โหลด 5 kW	83
3.35 กระแสไฟฟ้าเฟส A B และ C ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิตเพื่อใช้ในวงจรควบคุมที่โหลด 10 kW	83
3.36 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของแกนหมุน V_{dq0}	84
3.37 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของแกนหมุน I_{dq0}	84
3.38 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่าง Id Ref. กับ Id actual เมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงวินาทีที่ 10 (คอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1)	84
3.39 กระแสคำสั่งแกน Id ของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 โดย $I_q = 0$	85
3.40 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่าง Id Ref. กับ Id actual เมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงวินาทีที่ 10 (คอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2)	85
3.41 กระแสคำสั่งแกน Id ของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 โดย $I_q = 0$	85
3.42 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่ความถี่ 2.5 กิโลเฮิร์ต	86
3.43 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเทียบระหว่างคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 และ 2.....	87
3.44 กระแสไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงวินาทีที่ 10.....	87
3.45 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงวินาทีที่ 10.....	87
3.46 กระแสฮาร์มอนิกส์ของ โครงสร้างวงจรแบบ 6 พัลส์ (การจำลอง).....	88
3.47 กระแสฮาร์มอนิกส์ของ โครงสร้างวงจรแบบ 12 พัลส์ (การจำลอง)	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ในการทดสอบ	90
4.2 วงจรภาคกำลังทั้งหมด	91
4.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส สตาร์/สตาร์-เดลต้า	92
4.4 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์...	92
4.5 วงจรสับเบอร์	93
4.6 ตัวเก็บประจุ	93
4.7 ภาระโหลด(ฮีตเตอร์)	94
4.8 การต่อใช้งาน dSPACE รุ่น DS1104.....	94
4.9 โมเดลของวงจรควบคุมในโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	95
4.10 หน้าต่างการควบคุมการทำงานของ dSPACE ผ่านโปรแกรม dSPACE Control Desk	96
4.11 ตัววัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า LEM LV25-P	96
4.12 ตัววัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า LEM LAS50-TP.....	97
4.13 วงจรขับสวิตช์ไอจีบีทีโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250	97
4.14 วงจรกลับสัญญาณ โดยใช้ไอซีไอซีเบอร์ 40106 (Schmitt Trigger NOT GATE).....	98
4.15 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (+15, ±15 และ +5 โวลต์) สำหรับอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ	98
4.16 โครงสร้างของระบบโดยรวมของวงจรทั้งหมด	99
4.17 แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส A.....	100
4.18 แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส B	100
4.19 แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส C	100
4.20 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส A ที่โหลด 5 กิโลวัตต์	101
4.21 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส A ที่โหลด 10 กิโลวัตต์	101
4.22 แรงดันไฟฟ้าด้านออกระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว.....	101
4.23 สัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีของวงจร (10ms/div)	102
4.24 สัญญาณที่ออกจากวงจรขับสวิตช์ไอจีบีทีของวงจร (2ms/div).....	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.25	แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 (โหลดขนาด 5 กิโลวัตต์)...	103
4.26	แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 (โหลดขนาด 10 กิโลวัตต์)..	103
4.27	แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 (โหลดขนาด 5 กิโลวัตต์)...	104
4.28	แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 (โหลดขนาด 10 กิโลวัตต์).	104
4.29	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกที่โหลดขนาด 5 กิโลวัตต์.....	105
4.30	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกที่โหลดขนาด 10 กิโลวัตต์.....	105
4.31	กระแสฮาร์มอนิกส์ของโครงสร้างวงจรแบบ 6 พัลส์ (ห้องปฏิบัติการ)	106
4.32	กระแสฮาร์มอนิกส์ของโครงสร้างวงจรแบบ 12 พัลส์ (ห้องปฏิบัติการ)	106



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

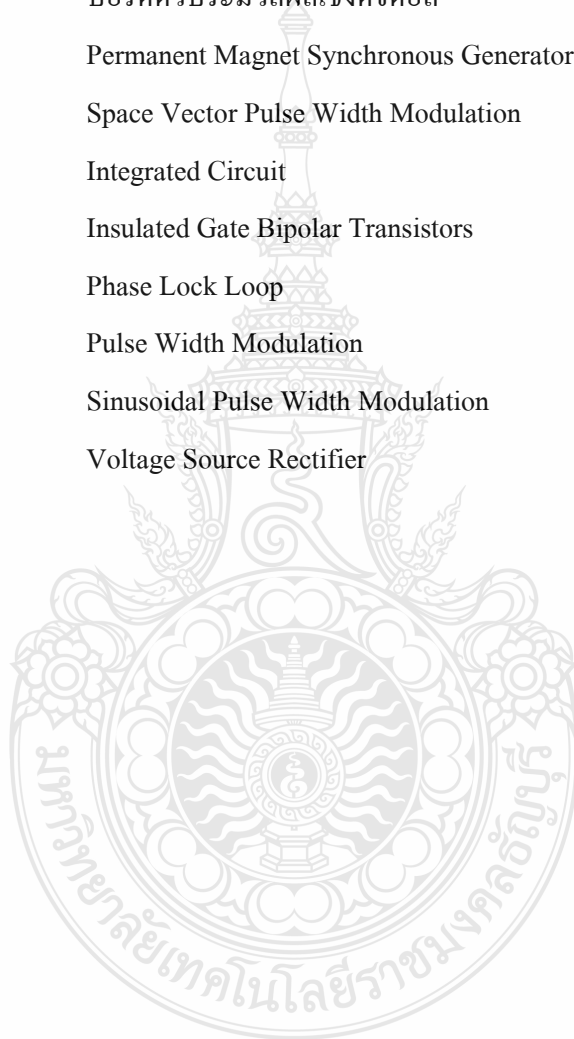
สัญลักษณ์	ความหมาย
∞	ค่าอนันต์
ω	ค่าความถี่หลักมูลฐานในหน่วย rad/s
dv/dt	อัตราการเพิ่มของแรงดัน
T	คาบเวลา
$\cos\phi$	ค่าตัวประกอบกำลัง
D	ค่าความผิดเพี้ยน
D_n	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์แต่ละตัว
THD	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม
\sum	ค่าผลรวม
n	ค่าจำนวนใดๆ
C_{bus}	ขนาดของตัวเก็บประจุ
C_f	ตัวเก็บประจุวงจรกรอง
C_S	ตัวเก็บประจุสแน็บเบอร์
I_L	กระแสที่สาย
I_{Load}	กระแสที่โหลด
I_{on}	กระแสในขณะนำกระแส
i_a, i_b, i_c	กระแสบนระนาบ abc
i_d, i_q	กระแสบนแกนหมุนหรือบนระนาบ d-q
i_α, i_β	กระแสบนแกนนิ่งหรือบนระนาบ $\alpha-\beta$
k_p, k_i	สัดส่วนของค่าสัมประสิทธิ์
P_{AV}	กำลังสูญเสียของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในขณะทำงานที่ ความถี่สวิตซ์
R_S	ตัวต้านทานสแน็บเบอร์
R_{thja}	ความต้านทานความร้อนระหว่างจุดต่อของสารกึ่งตัวนำ
T_{jmax}	อุณหภูมิการทำงานสูงสุด

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$t_{conduct}$	ช่วงเวลานำกระแส (On)
t_{off}	ช่วงเวลาหยุดนำกระแส (Off)
$t_{s,on}$	ช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn On)
$t_{s,off}$	ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn Off)
V_{ac}	แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า
V_{dc}	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก
V_C	แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สับเบอร์
P_Q	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไอจีบีที
P_R	กำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานในวงจรสับเบอร์
V_S	แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์
V_s	แรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้า
v_a, v_b, v_c	แรงดันบนระนาบ abc
v_d, v_q	แรงดันบนแกนหมุนหรือบนระนาบ d-q
v_α, v_β	แรงดันบนแกนนิ่งหรือบนระนาบ $\alpha-\beta$
Y	การต่อคลวดแบบสตาร์
Δ	การต่อคลวดแบบเดลต้า
θ	มุมเฟส

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
DC-Link	ตัวเก็บประจุเชื่อม โยงไฟฟ้ากระแสตรง
Duty Cycle	วัฏจักรงาน
dSPACE	บอร์ดตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation
IC	Integrated Circuit
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors
PLL	Phase Lock Loop
PWM	Pulse Width Modulation
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
VSR	Voltage Source Rectifier



บทที่ 1

บทนำ

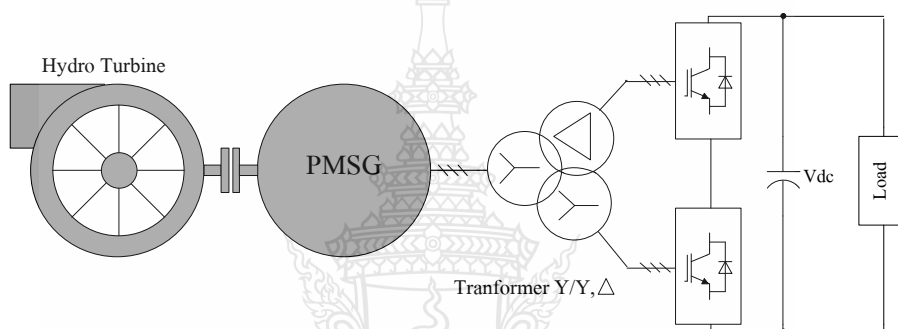
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตไฟฟ้าที่มาจากพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ โดยพลังงานดังกล่าวเมื่อนำมาผ่านกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีข้อจำกัดในด้านการสร้างปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเป็นพลังงานที่สิ้นเปลืองและมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่สภาวะขาดแคลนในอนาคต ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ หรือจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ไฮโดรเจน และแรงคลื่นจากทะเล ซึ่งพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่สะอาดที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จักหมดสิ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน โดยปัจจุบันพลังงานทางเลือกจึงมีบทบาทที่สำคัญในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการนำพลังงานจลน์จากแหล่งพลังงานจากธรรมชาติดังกล่าวมาแปลงเปลี่ยนให้เป็นพลังงานทางกลสำหรับเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนให้กับชุดขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนทดแทนการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่ได้มาจากแหล่งพลังงานสิ้นเปลือง

โครงสร้างโดยทั่วไปของชุดขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนส่วนใหญ่จะใช้พลังงานน้ำและพลังงานลมเป็นต้นกำลังในการหมุนชุดขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีขนาดพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 0.4 kW ถึง 5 MW โดยโครงสร้างของกังหันสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ 1) แบบมีระบบเกียร์ 2) แบบไม่มีระบบเกียร์ ต่อเข้ากับชุดขับเคลื่อนเพื่อเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งแบบซิงโครนัสและแบบอินเวอร์เตอร์ เพื่อเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่กริดระบบ (Grid-connected system) โดยผ่านคอนเวอร์เตอร์กำลัง (Power converter) หรือเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบโดยตรง

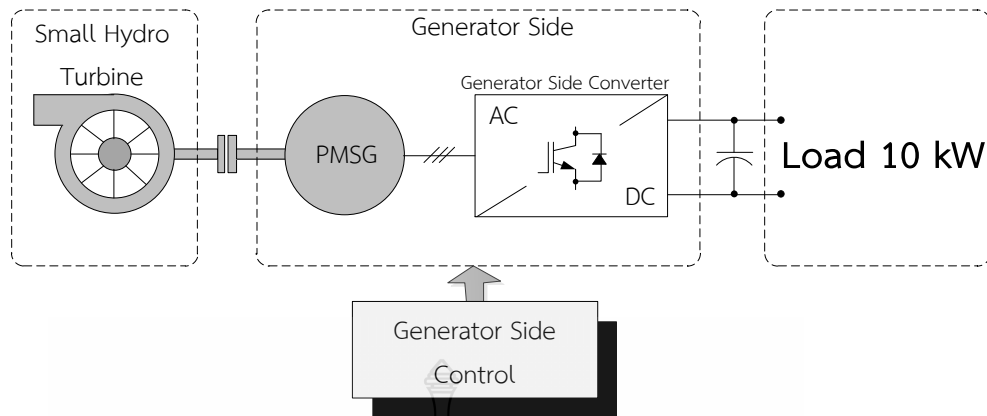
แนวความคิดสำหรับวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้ จะให้กับแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้มาจากแหล่งพลังงานน้ำโดยจะนำใช้กังหันน้ำ (Hydro Turbine) เปลี่ยนพลังงานจลน์การหมุนขับเคลื่อนต้นกำลังของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบกระตุ้นด้วยแม่เหล็ก (PMSG) แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิม บนพื้นฐานของการควบคุมการทำงานในโหมดความเร็วรอบคงที่ และพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG จ่ายออกมาจะถูกเชื่อมต่อเข้าโหลดของระบบ โดยเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ที่มีหม้อแปลงแบบ 3 ขด เพื่อสร้างรูปคลื่น 12 พัลส์ โดยมีขดปฐมภูมิ 1 ขด และทุติยภูมิ 2 ขด จะ

มีการต่อแบบ สตาร์-สตาร์ และ เดลต้า-สตาร์ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกของหม้อแปลง 2 ขด ต่างเฟสกัน 30 องศา ซึ่งสามารถลดกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ เนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิกส์นี้ ทำให้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังจะไม่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์โดยสมบูรณ์แต่จะได้รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม(distorted waveform) ซึ่งเกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม เช่น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหาย ฯลฯ จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก เพื่อลดปัญหาดังกล่าว โดยมีโครงสร้างพื้นฐานของระบบขับที่นำเสนอตามรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างระบบขับกังหันน้ำด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSG โดยคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์

จากรูปที่ 1.1 เป็นโครงสร้างของระบบที่นำเสนอจะประกอบไปด้วยชุดกังหันน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG เป็นเครื่องจักรกลที่มีแม่เหล็กถาวรฝังอยู่ในตัว โดยจะทำหน้าที่เป็นวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (Field excitation) สำหรับกระตุ้นสนามแม่เหล็กเหมือนกับเครื่องกำเนิดเชิงโรตอร์ทั่วไป อีกทั้งลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบหลายขั้วแม่เหล็ก (Multipole) จึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้กับตัวขับกังหันน้ำที่หมุนในย่านความเร็วรอบต่ำได้ โดยไม่ต้องต่อชุดเกียร์เพิ่ม ทำให้ไม่ต้องเสียค่าบำรุงรักษาในส่วนของชุดเกียร์ การทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์จะเป็นคอนเวอร์เตอร์กำลังต่อด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นคงที่ตามไปด้วย ซึ่งจะทำงานในลักษณะวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ซึ่งจะควบคุมแรงดันเชื่อมโยงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาสำหรับที่จะป้อนให้กับโหลดโดยตรงหรือผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อป้อนให้กับกริดของระบบการไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของระบบทั้งหมดที่ทำการออกแบบและทดสอบ

โครงสร้างของระบบทั้งหมดของวิทยานิพนธ์นี้ จะศึกษาทางเทคนิคในโครงสร้างนี้โดยทำการศึกษา วิเคราะห์และออกแบบจากการทำงานทั้งหมดของระบบจากแบบการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจะออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของระบบทั้งภาควจรกำลังและภาควจรควบคุม โดยเป็นการจำลองใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์เป็น 12 พัลส์ในขนาดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ขนาด 10 kW ใช้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อทำการศึกษา วิเคราะห์ ทดสอบ และแก้ไขการทำงานต่างๆ ทั้งหมดของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อออกแบบ และสร้างวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และทดสอบจริงในห้องวิจัยปฏิบัติการ โดยจะสร้างจากเครื่องต้นแบบขนาดเล็ก 10 kW เพื่อศึกษาระบบควบคุม เปรียบเทียบทั้งในเชิงทฤษฎีและในเชิงปฏิบัติการจริง

1.3 สมมุติฐานของวิทยานิพนธ์

การแปลงรูปพลังงานงานจลน์ให้เป็นพลังงานทางกล สำหรับใช้เป็นตัวขับเคลื่อนกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระโหลดหรือเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบ โดยใช้พลังงานจากแหล่งน้ำในการขับเคลื่อนกังหันน้ำขนาดเล็ก (Small Hydro Turbine) เพื่อเป็นต้นกำลังในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG และใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า

กระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ในการเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG เข้าไปช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดหรือเข้ากับกริดระบบสำหรับเพิ่ม ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขจัดปัญหาด้านคุณภาพของระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถทำงานในโหมดการปรับความเร็วรอบของกังหันน้ำ โดยไม่ต้องใช้ชุดเกียร์เพื่อช่วยในการลด ความเร็วรอบสำหรับหมุนขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะให้อัตราดีในด้านการบำรุงรักษาและที่สำคัญอย่าง ยิ่งพลังงานที่ได้จากแหล่งน้ำภายในประเทศ ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่มากมายหลายแหล่ง จึงมี ความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านระบบควบคุมเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า PMSG ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่โหลดหรือเข้ากับกริด ระบบ ลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และพัฒนาเครื่องต้นแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้ จริงต่อไป

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 ออกแบบ สร้าง และทดสอบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงแบบ 12 พัลส์สำหรับเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSG ขนาด 10 kW

1.4.2 สร้างระบบควบคุมต้องรักษาแรงดันเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ในขณะที่เชื่อมต่อเข้า กับบัสไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ให้มี ค่าเปอร์เซ็นต์รักษาแรงดัน ไม่เกิน $\pm 10\%$ ของค่าแรงดันอ้างอิง

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหาของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์ ข้อจำกัดและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย พื้นฐานการควบคุมวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์และระบบควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ สร้าง และระบบควบคุมวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ และผลการจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบการทำงานของระบบ

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ที่ทำครั้งนี้เป็นศึกษาเป็นการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และทดสอบจริงในห้องวิจัยปฏิบัติการ โดยจะสร้างจากเครื่องต้นแบบขนาดเล็ก 10 kW แต่ไม่สามารถไปทดสอบในแหล่งน้ำจริงได้เนื่องจากมีงบประมาณน้อย

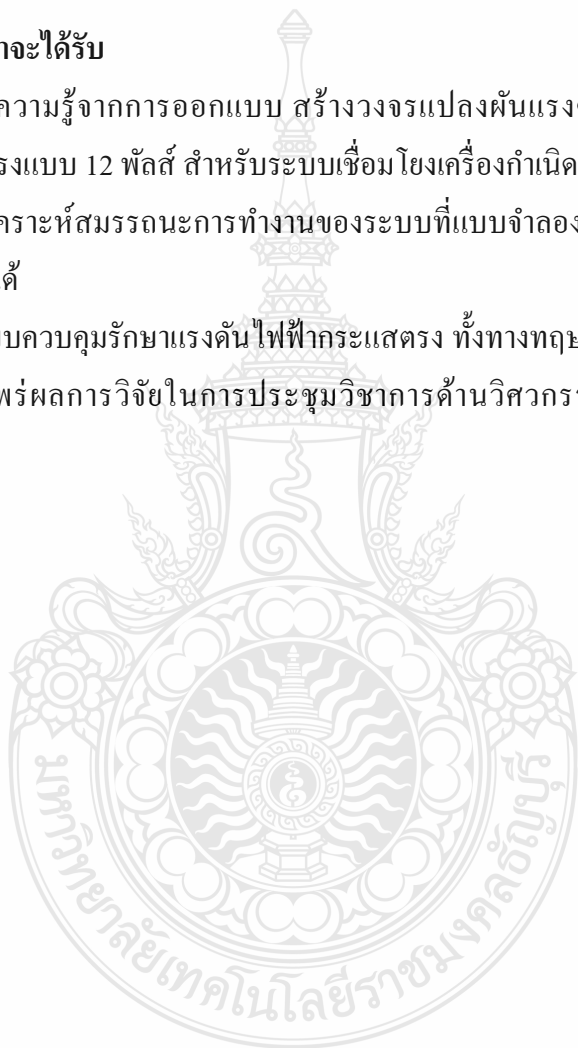
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้รับความรู้จากการออกแบบ สร้างวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก

1.7.2 สามารถวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบที่แบบจำลองคณิตศาสตร์จากโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้

1.7.3 ได้รู้ถึงระบบควบคุมรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติการจริง

1.7.4 การเผยแพร่ผลการวิจัยในการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและวารสารด้านพลังงาน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก โดยการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSG และสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้กับโหลดได้คงที่ โดยใช้สัญญาณ PWM จากการศึกษาค้นคว้าได้ดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาจากบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ โดยเอกสารที่ได้ศึกษามาสรุปได้พอสังเขปดังนี้

วิฒนะ สืบกนิร [1] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับระบบการส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับกังหันลม โดยได้อธิบายการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อน 2 ทาง (Double fed induction generator ; DFIG) โดยใช้เบ็คทูแบ็ค (back to back) PWM คอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Converters) ในวงจรโลเตอร์ โดยใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) โดยจะคอนเวอร์เตอร์ด้านระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Line Side Converter) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การควบคุมแบบ Decoupling และการใช้ PWM คอนเวอร์เตอร์ส่งผลทำให้สามารถควบคุมกำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟ ได้อย่างอิสระจากแหล่งจ่าย การควบคุมสามารถควบคุมรักษาระดับแรงดันบัสกระแสตรง (dc bus) ให้คงที่ได้โดยไม่สนใจว่ากำลังไฟฟ้าจะไหลจากกริดไปที่บัสกระแสตรง หรือไหลในทิศทางกลับกัน (เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยที่กระแสแหล่งจ่ายเป็นชานซ์และมีการเพี้ยนของภาพคลื่นสัญญาณต่ำ) และได้ทำการทดลองกับคอนเวอร์เตอร์ขนาด 7.5 kW โดยเชื่อมต่อกับกริด และทำการทดสอบในสภาวะชั่วคราวและสภาวะสงบนิ่งเพื่อยืนยันผลการควบคุม โดยระบบสามารถรักษาระดับแรงดัน DC bus ไว้ได้ และเมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงผันกำลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้ากลับเข้าไปยังด้านแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ระบบก็ควบคุมการไหลได้ จะเห็นได้ว่าการควบคุมสามารถการควบคุมพลังงานได้ 2 ทิศทาง ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นคอนเวอร์เตอร์ด้านระบบส่งกำลังไฟฟ้าในงานควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อน 2 ทาง

วิฒนา แก้วมณี [2] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบหม้อแปลงออโตสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ เพื่อลดฮาร์มอนิกส์ที่วงจรเรียงกระแสปล่อยเข้าสู่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ค่าที่ได้จากการออกแบบในงานวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นหม้อแปลงจริง และทดสอบพบว่าค่าฮาร์มอนิกส์ในแบบ

วงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ มีค่าน้อยกว่าวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ ซึ่งจะมีค่าอยู่ประมาณ 30% และจากการนำหม้อแปลงที่ออกแบบไปทดสอบนั้นสามารถใช้งานได้

นายวัฒนา แก้วมณี และวิบูลย์ ชื่นแขก [3] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับมัลติพัลส์คอนเวอร์เตอร์ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการลดฮาร์มอนิกส์ วิธีการที่ง่ายที่สุดในการศึกษามัลติพัลส์คอนเวอร์เตอร์คือการใช้โปรแกรมจำลองการทำงานของวงจร อย่างไรก็ตามการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมทั่วไปมักใช้เวลาการคำนวณนาน และอาจเกิดปัญหาการไม่เสถียรภาพของการคำนวณซึ่งส่งผลให้การจำลองการทำงานของวงจรล้มเหลวได้ งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการศึกษาการทำงานในสภาวะคงตัวและฮาร์มอนิกส์ของวงจรมัลติพัลส์คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบแม่นยำ และคุณลักษณะความสมมาตรของรูปคลื่นในการพัฒนาแบบจำลองของวงจร 12 พัลส์คอนเวอร์เตอร์ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถให้รูปคลื่นในลักษณะผลลัพธ์ของฟังก์ชัน ในช่วง 1/12 ของภาพคลื่นทั้งหมดได้ จากนั้น ผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการสร้างรูปคลื่นทั้งคาบโดยวิธีการหมุนบนระนาบเชิงซ้อน

เนื่องจากวิธีวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอเป็นการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ จึงสามารถกล่าวได้ว่าผลการวิเคราะห์นั้นถูกต้อง และวิธีวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอยังแสดงให้เห็นถึงความเร็วในการคำนวณหาผลลัพธ์ที่สูงกว่าการใช้โปรแกรม Simulink อย่างมากอีกด้วย

จักรพงษ์ จารุมิตรี ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล และวิจิตร กิมเรศ [4] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างชุดจำลองระบบการเชื่อมโยงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสองแหล่งที่อยู่ห่างไกลกัน โดยสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ในการแปลงกำลังไฟฟ้าจากระบบเอซี เป็นระบบดีซีจะใช้ชุด 12 พัลส์ ฟูลคอนเวอร์เตอร์ โดยมีอุปกรณ์ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตชิงและระบบการส่งเป็นแบบโมโนโพลา ในการทดสอบสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้ากลับไปได้ โดยอาศัยคอมพิวเตอร์ควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า โดยเมื่อต้องการส่งกำลังไฟฟ้าจะทำการควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ด้านส่งทำงานในโหมดเร็กติฟายเออร์ เพื่อที่จะแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปตามสายส่ง จากนั้นควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์ด้านรับกำลังไฟฟ้าทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้การซิงโครไนซ์กับระบบทางด้านรับกำลังไฟฟ้าเพื่อช่วยในการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์และนำกำลังงานที่ได้นี้ช่วยในการจ่ายโหลดต่อไป ซึ่งในการทดสอบจะแบ่งเงื่อนไขการทดสอบคือแรงดันและความถี่ทางด้านรับและ

ด้านส่งกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน แรงดันและความถี่ทางด้านรับและด้านส่งกำลังไฟฟ้าเท่ากัน และมากไปกว่านั้นจะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน เพื่อให้การออกแบบระบบควบคุมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

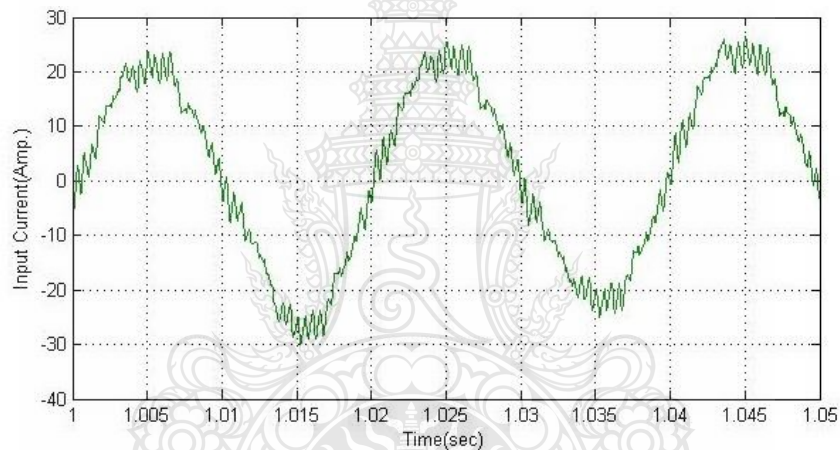
Karl M. Hink [5] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการหาค่าโมเดลของหม้อแปลง 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ แบบวงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอด โดยการเปรียบเทียบพิจารณาผลลัพธ์ของค่าชั่วคราวและค่าคงที่ที่ได้จากการจำลองของโมเดล 6 พัลส์และ 12 พัลส์ มันจะแสดงค่าเฉลี่ยของโมเดลให้มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังกับวงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอด วงจรควบคุมคอนเวอร์เตอร์แบบมัลติพายและระบบขับไฟฟ้า

W. Xu, H. Kaizheng, Y. Shijie และ X. Bin [6] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคภาพคลื่นไซน์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation) ที่นิยมใช้ในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แต่การควบคุมจะซับซ้อนและระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะมีจำนวนน้อย ดังนั้นบทความนี้จะแสดงการมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Pulse Width Modulation) โดยนำเสนอการจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลที่ได้ คือการควบคุมแบบใหม่สามารถปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบเดิม อีกทั้งสามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ DC-Link ได้อีกด้วย

Z. Jinghua, M. Yongqing, L. Zhengxi และ L. Kun [7] ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ NPC VSR (Voltage Source Rectifier) ซึ่งใช้การควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบใหม่ที่มีพื้นฐานจากทฤษฎีของ Lyapunov ที่ใช้กับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวงจรจะมีเสถียรภาพและมีการตอบสนองที่ดีแม้จะมีสัญญาณรบกวนขนาดใหญ่ โดยออกแบบการมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคภาพคลื่นไซน์แบบใหม่ ซึ่งบทความนี้จะแสดงปัญหาที่เกิดขึ้นที่บริเวณ DC-Link ที่เกิดฮาร์มอนิกที่สามโดยจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการจำลองจะพบว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้วิธีนี้จะมีเสถียรภาพและการตอบสนองที่ดี และได้มีฮาร์มอนิกที่น้อยลง

2.2 ความเป็นมาของปัญหาที่เกิดขึ้นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาที่สำคัญ อาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชิ้นเล็ก ๆ หรืออุปกรณ์ชิ้นอื่นที่ประกอบอยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าทำให้อุปกรณ์เหล่านี้เสียหาย หรือไม่สามารถใช้งานได้ ซึ่งหนึ่งในนั้นที่สร้างปัญหาให้กับระบบคือปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เพราะผลของการเกิดฮาร์มอนิกส์นี้ ทำให้ภาพคลื่นของแรงดันไฟฟ้า และภาพคลื่นของกระแสไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังจะไม่ได้เป็นภาพคลื่นไซน์โดยสมบูรณ์แต่จะได้อาภคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม(distorted waveform) ซึ่งเกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม เช่น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหาย ฯลฯ จากปัญหาดังกล่าวทำให้ได้ภาพคลื่นสัญญาณผิดเพี้ยน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นสัญญาณความผิดเพี้ยนจากการเกิดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า[8]

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ เพื่อลดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า ไม่ให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมอยู่ในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆที่เกี่ยวข้อง

2.3 ฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ฮาร์มอนิกส์(Harmonic) คือ ส่วนประกอบของสัญญาณไซน์(Sine wave) ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่า (เป็นจำนวนเต็ม) ของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่มูลฐานของระบบ ดังนั้น เมื่อความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz ความถี่ฮาร์มอนิกส์ ได้แก่ 100, 150, 200, ...Hz [9]

พิจารณาสัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้น สามารถแยกวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) ซึ่งแสดงผลของสัญญาณอยู่ในภาพสัญญาณ ไซน์ที่มีความถี่ต่าง ๆ กันหลายภาพมารวมกัน

$$\chi(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.1)$$

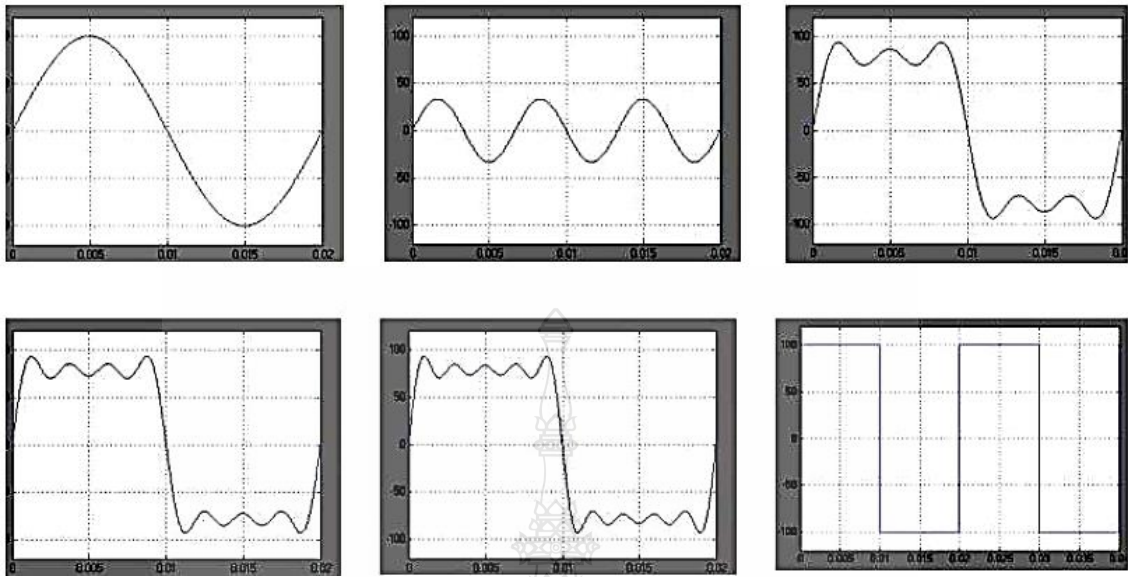
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \chi(t) dt \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \chi(t) \cos(n\omega t) dt \quad , n=1,2,3\dots a \quad (2.3)$$

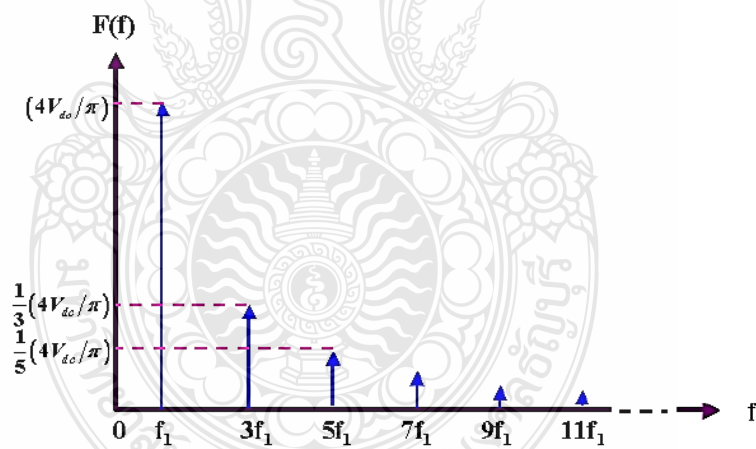
$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \chi(t) \sin(n\omega t) dt \quad , n=1,2,3\dots a \quad (2.4)$$

ตัวอย่าง ฟังก์ชันภาพคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave)

$$\left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{9} \sin 9\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \dots \right) \quad (2.5)$$

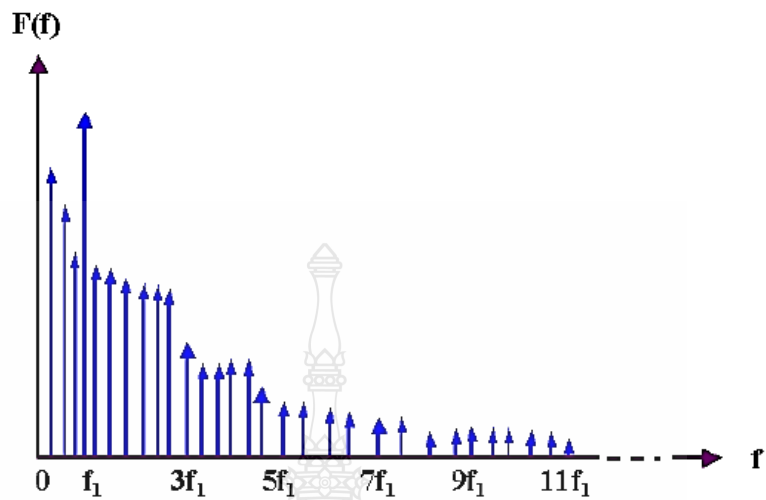


รูปที่ 2.2 รูปคลื่นการรวมกันของสัญญาณไซน์



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์

อินเทอร์ฮาร์โมนิกส์ (Inter Harmonic) คือ ส่วนประกอบของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่า (จำนวนจริง) ของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่มูลฐานของระบบ ดังรูปที่ 2.4 แสดงสเปกตรัมอินเทอร์ฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมอินเทอร์ฮาร์โมนิกส์

2.3.1 นิยามของฮาร์โมนิกส์

- 1) ค่าชั่วขณะ Instantaneous Value

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) + \dots \quad (2.6)$$

- 2) ค่าประสิทธิภาพ (Effective Value or RMS Value)

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} \quad (2.7)$$

$$f_{rms} = f_{rms1} \quad (2.8)$$

$$f_{rms} = \sqrt{f_{rms1}^2 + f_{rms2}^2 + f_{rms3}^2 + \dots} \quad (2.9)$$

3) กำลังไฟฟ้าและตัวประกอบกำลัง (Electrical Power and Power Factor)

$$\text{Displacement pf.} = \frac{\text{Active power}}{\text{Apparent power(Fund)}} \quad (2.10)$$

$$= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v i dt}{V_{rms} I_{rms}} \quad (2.11)$$

$$= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v (i_1 + i_2 + i_3 + \dots) dt}{V_{rms} I_{rms}} \quad (2.12)$$

$$= \frac{V_{rms} I_{rms} \cos \phi_1}{V_{rms} I_{rms}} \quad (2.13)$$

$$= \cos \phi_1 \quad (2.14)$$

$$\text{Total pf.} = \frac{\text{Active power}}{\text{Apparnt power(total)}} \quad (2.15)$$

$$= \frac{V_{rms} I_{rms} \cos \phi_1}{V_{rms} I_{rms}} \quad (2.16)$$

$$= \frac{I_{rms1} \cos \phi_1}{I_{rms}} \quad (2.17)$$

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots} \quad (2.18)$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (2.19)$$

$$\frac{I_{rms1}}{I_{rms}} = \mathcal{D} = \text{distortion factor} \quad (2.20)$$

ในกรณีที่สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าไม่มีฮาร์มอนิกส์

$$P = S \cos \theta \quad (2.21)$$

$$Q = S \sin \theta \quad (2.22)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.23)$$

ในกรณีที่สัญญาณแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกส์

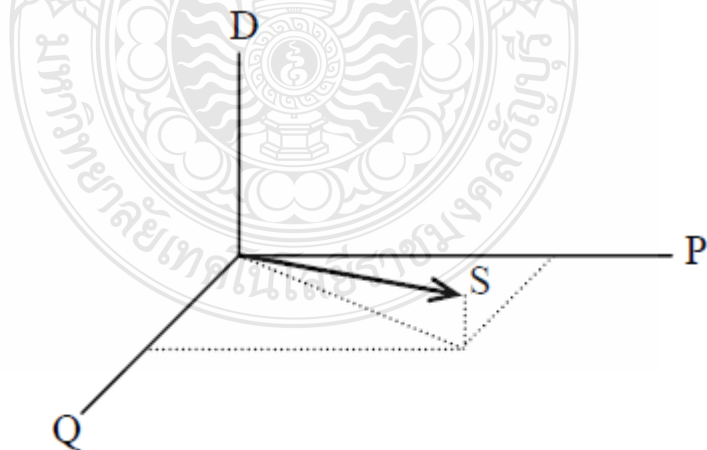
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.24)$$

$$P = \sum_k V_k I_k \cos \theta_k \quad (2.25)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} - Q^2 \quad (2.26)$$

เมื่อ D = Distortion

โดย เอม D แสดงผลคูณแรงดันและกระแสที่มีความถี่ต่างกัน



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ

4) ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์แต่ละตัว (Individual Harmonic Distortion ; D_n)

$$D_n = \frac{f_n}{f_1} \times 100\% \quad ; n = 2, 3, 4, 5, \dots \quad (2.27)$$

5) ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion; THD)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum f_n^2}}{f_1} \times 100\% \quad ; n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots \quad (2.28)$$

2.3.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

การวิเคราะห์ทางด้านฟูเรียร์จะนำมาใช้อธิบายถึงการควบคุมมุมของเฟสที่ถูกควบคุมและการควบคุมรูปแบบของการกระตุ้นไทรสเตอร์ให้มีระยะห่างเท่าๆกัน

มุมเฟสคงที่ก็คือภาพแบบหนึ่งของการควบคุมแบบปกติทั่วไปที่จะได้พบใน “ Naturally Commutated Static Converters ” และเร็กกูเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage Regulator)

เร็กกูเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับจะกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่มีอันดับต่างๆ กัน ในกรณีที่เป็นโพลดิโวลต์จะมีความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่เป็นอันดับคี่และไฟฟ้ากระแสตรง ถึงแม้ว่าเร็กกูเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบใช้การควบคุมไทรสเตอร์ ในปัจจุบันนี้การใช้จะถูกจำกัดอยู่ในขนาดกำลังไฟฟ้าต่ำๆ (ตัวอย่างเช่น เครื่องหรีไฟเครื่องคุมอินดักชั่นมอเตอร์ขนาดเล็ก เป็นต้น)

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์โดยกำเนิดหลักๆ แล้วจะอยู่ในภาพของเร็กติไฟเออร์ควบคุมเฟส (Phase Angle Controlled Rectifier) และอินเวอร์เตอร์ เพื่อเป็นการทำให้สะดวกในการพิจารณาถึงพฤติกรรมของฮาร์โมนิกส์ที่แตกต่างกันจึงได้มีการแบ่งอุปกรณ์เหล่านี้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

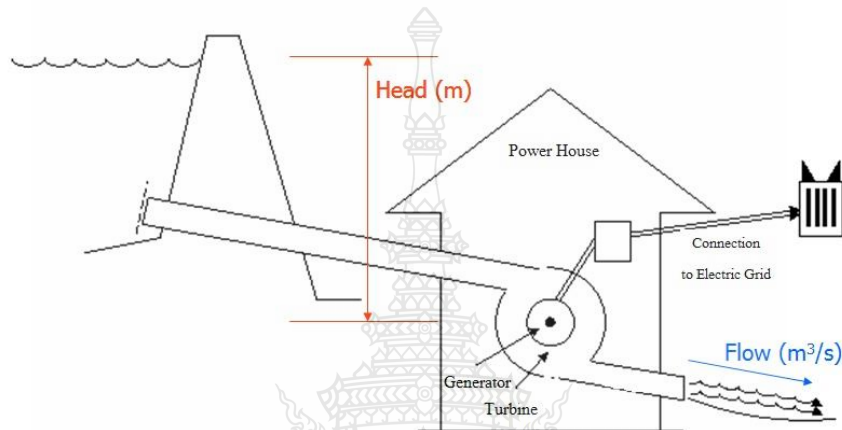
1) คอนเวอร์เตอร์ที่มีกำลังขนาดใหญ่ โดยส่วนใหญ่แล้วคอนเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่นี้มักจะใช้ในอุตสาหกรรมการหลอมเหล็กและการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงแบบกระแสตรง

2) คอนเวอร์เตอร์ขนาดปานกลาง ประเภทนี้นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ เช่น การใช้ในการควบคุมมอเตอร์กำลัง ทั้งนี้จะรวมไปถึงประยุกต์ใช้เกี่ยวกับรถไฟด้วย

3) คอนเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก ใช้กับไฟฟ้าเฟสเดียวเป็นส่วนใหญ่ เช่น ใช้กับระบบ โทรทัศน์ และเครื่องชาร์ตไฟสำหรับแบตเตอรี่

2.4 โครงสร้างส่วนต่างๆ ของระบบ

2.4.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ



รูปที่ 2.6 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ[10]

สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่จะได้รับจากพลังงานน้ำจะอาศัยพลังงานจลน์เป็นพลังงานกลเพื่อหมุนขั้วกังหันน้ำที่ต่อเชื่อมกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$P = gdQH \quad (2.29)$$

โดยกำหนดให้ P คือ กำลังที่ได้จากน้ำ(วัตต์)

Q คือ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านกังหัน (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

g คือ ค่าความเร่งของน้ำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.807 เมตร-วินาที²)

d คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

H คือ ความสูงของน้ำตกหรือศักย์น้ำ (เมตร)

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เป็นดังสมการที่ 2.30

$$W = Ptnf \quad (2.30)$$

โดยกำหนดให้ W คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง)

P คือ กำลังน้ำตก (กิโลวัตต์)

t คือ ระยะเวลาการผลิต (ชั่วโมง)

n คือ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ – เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.5 – 0.9

f คือ สัมประสิทธิ์สำหรับความผันผวนของการไหลของน้ำในลำธาร[1]

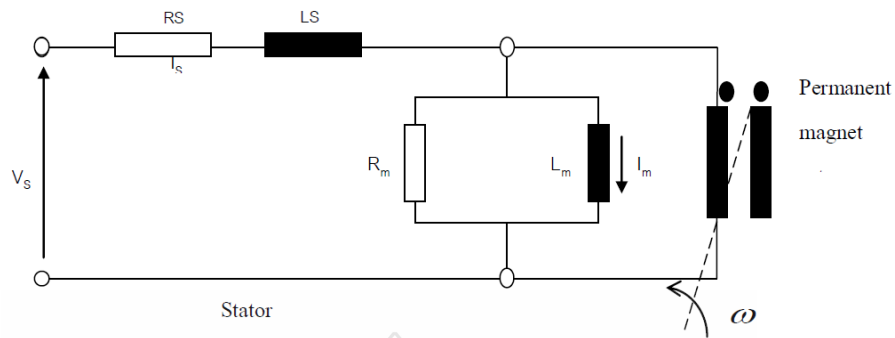
2.4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร(PMSG)

1) โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ซึ่งเท่ากับหรือเป็นจังหวะเดียวกับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนหรือขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่สเตเตอร์กับขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ภายในเครื่องกำเนิดประกบติดกันแล้วหมุนไปพร้อมกัน โครงสร้างเครื่องกำเนิดซิงโครนัส 3 เฟส โครงสร้างสำคัญประกอบไปด้วยสเตเตอร์ (Stator) ทำหน้าที่ยึดขดลวดอาร์เมเจอร์ที่บรรจุอยู่ในสล็อต ประกอบด้วยแผ่นลามิเนตบางๆอัดเป็นภาพทรง ส่วนโรเตอร์ (Rotor) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ โรเตอร์แบบขั้วไม่เสมอ (Salient pole) มีลักษณะเหมาะกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วต่ำ โรเตอร์มีขั้วแม่เหล็กตั้งแต่ 4 ขั้วขึ้นไป และโรเตอร์แบบขั้วเสมอผิว (Non salient pole) มีลักษณะเหมาะกับการใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วสูงเพราะสามารถทนแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้ มีขั้วแม่เหล็กน้อย คือ 2 ขั้วหรือ 4 ขั้วเท่านั้น

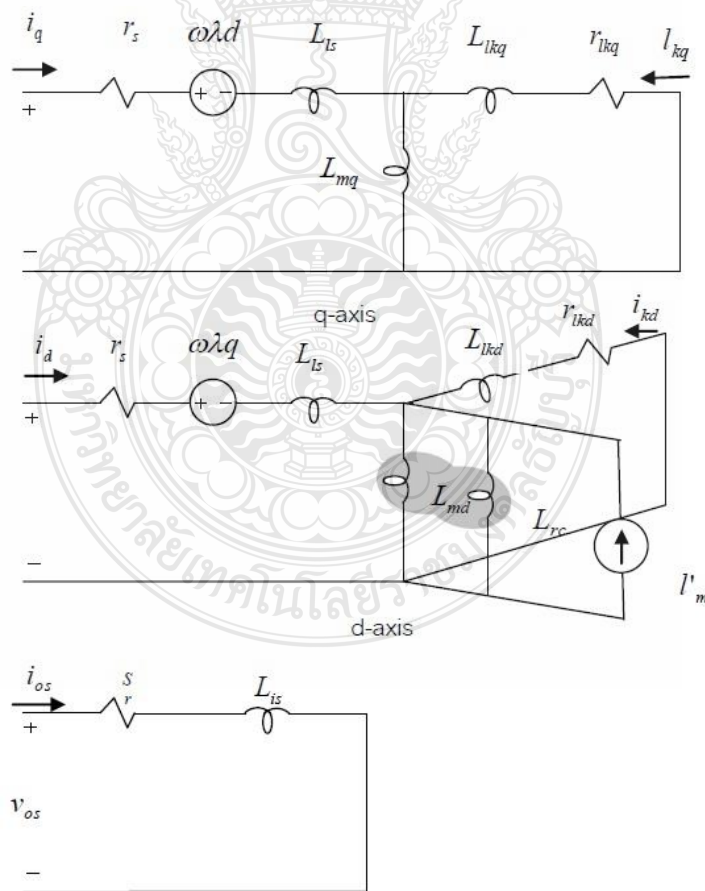
2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร

ในการกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นสามารถถูกแทนที่ด้วยแม่เหล็กถาวรได้ สิ่งที่เห็นได้ชัดเจนอย่างหนึ่งในการแทนที่การถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยแม่เหล็กถาวรมันได้ช่วยลดค่าสูญเสียในลวดทองแดงไป (Copper losses) มันทำให้มีโครงสร้างที่เรียบง่ายขึ้นมีน้ำหนักน้อยลงในขณะที่ประสิทธิภาพเท่าเดิมอีกทั้งมีขนาดที่เล็กลงจากการที่ความสูญเสียลดลง ทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นนั่นเอง ทางเลือกในการใช้แม่เหล็กถาวรมันมีผลกระทบโดยตรงกับปัจจัยต่างๆ เช่น ประสิทธิภาพน้ำหนัก ขนาดและมูลค่า โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถถูกสร้างหรือคำนวณได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

สำหรับภาพแบบของวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะเขียนวงจรอ้างอิงกับแกนที่แปลงค่าเป็น $dq0$ และจะไม่ใช้วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบปกติทั่วไป แต่เราจะใช้วงจรสมมูลในระบบ $dq0$ แทนซึ่งสามารถที่จะเขียนได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูล $dq0$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร[1]

สมการต่างๆ ในแกน dq0 ที่ได้จากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรนั้นถูกสรุปไว้ดังนี้

สมการแรงดัน แกน dq0 (dq0 Voltage equations) :

$$U_q = r_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \lambda_d \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.31)$$

$$U_d = r_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} + \lambda_q \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.32)$$

$$U_0 = r_s i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt} \quad (2.33)$$

$$0 = r'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\lambda'_{kd}}{dt} \quad (2.34)$$

$$0 = r'_{kq} i'_{kq} + \frac{d\lambda'_{kq}}{dt} \quad (2.35)$$

สมการการเชื่อมเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux linkages) :

$$\lambda_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{mq} \quad (2.36)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + L_{md} i'_{kd} + l_{md} i'_m \quad (2.37)$$

$$\lambda_0 = L_{ls} i_0 \quad (2.38)$$

$$\lambda'_{kq} = L_{mq} i_0 + L_{kqkq} i'_{kq} \quad (2.39)$$

$$\lambda'_{kd} = L_{md} i_d + L_{kdkd} i'_{kd} + L'_{md} i'_m \quad (2.40)$$

สมการแรงบิดของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque) :

$$T_{\theta_m} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad \text{N.m.} \quad (2.41)$$

ในแรงบิดของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque) ด้านล่างสุดนั้น สามารถแยกแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้เป็น 3 องค์ประกอบ คือ องค์ประกอบเส้นแรงแม่เหล็ก และมีค่าเป็นลบเมื่อ $L_d < L_q$ องค์ประกอบซึ่งเป็นแรงบิดที่ไม่สามารถเข้ากันได้และองค์ประกอบของการกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร

สมการเชื่อมเส้นแรงแม่เหล็กเข้าด้วยกันในแกน q และแกน d ถูกแสดงได้ดังนี้

$$\lambda_{mq} = L_{mq} (i_q + i'_{kq}) \quad (2.42)$$

$$\lambda_{md} = L_{md} (i_d + i'_m + i'_{kd}) \quad (2.43)$$

เหมือนกับในสมการการเชื่อมเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นสมการกระแสในขดลวดสามารถอธิบายได้ คือ

$$i_q = \frac{1}{L_{is}} (\lambda_q - \lambda_{mq}) \quad i_d = \frac{1}{L_{is}} (\lambda_d - \lambda_{md}) \quad (2.44)$$

$$i'_{kq} = \frac{1}{L'_{lkq}} (\lambda'_{kq} - \lambda_{mq}) \quad i'_{kd} = \frac{1}{L'_{lkd}} (\lambda'_{kd} - \lambda_{md}) \quad (2.45)$$

จากความสัมพันธ์ทั้งหมด สำหรับกระแสในขดลวดของแกน d ถูกแทนค่าในสมการด้านบนสุดและจะได้ภาพอย่างง่ายเป็น

$$\lambda_{md} = L_{md} \left(\frac{\lambda_d}{L_{is}} + \frac{\lambda'_{kd}}{L'_{lkd}} + i'_m \right) \quad (2.46)$$

เมื่อ :

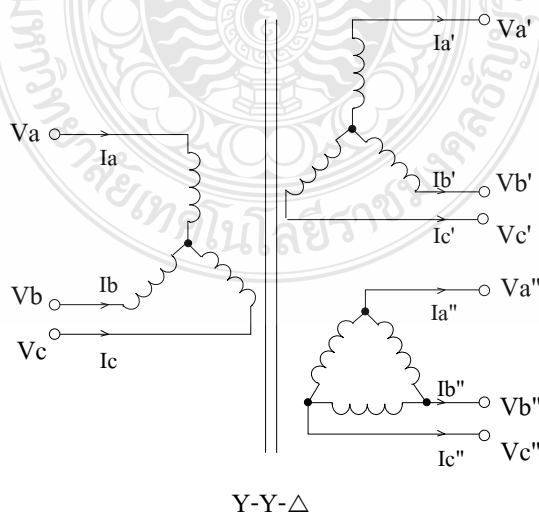
$$\frac{1}{L_{MD}} + \frac{1}{L_{is}} + \frac{1}{L'_{lkd}} + \frac{1}{L_{md}} \quad (2.47)$$

การอธิบายแบบเดียวกันสำหรับ λ_{mq} และ L_{mq} สามารถเขียนเป็นแกน q ได้สำหรับสภาวะคงตัว (Steady state) ในขณะที่ $\omega = \omega_e$ ในกรณี E_f อยู่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีสนามแม่เหล็กที่ผิดเพี้ยน $\omega_e \lambda'_m$ หรือ $x_{md} i'_m$ สามารถถูกแทนค่าด้วย E_m แรงดันจากการกระตุ้นของแม่เหล็กด้านสเตเตอร์ และถ้าความต้านทานในสเตเตอร์ไม่มีผล ให้แทนค่า E_f ด้วย E_m ในสมการ

$$T_{em} = -3 \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \left\{ \frac{V_a E_m}{X_d} \sin \delta + \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin \delta \right\} \quad (2.48)$$

2.4.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด

หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับป้อนให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ในแต่ละชุด โดยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด ต่อวงจรทางด้านปฐมภูมิเป็นแบบสตาร์และทุติยภูมิเป็นแบบสตาร์ - เดลต้า โดยจะมีมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของชุดทุติยภูมิต่างกันอยู่ 30° [10]



รูปที่ 2.9 การต่อวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด

จะได้สมการทางด้านอินพุต มีดังนี้

$$V_{sa} = nvV_m \sin(\omega_s t + \frac{\pi}{2}) \quad (2.49)$$

$$V_{sb} = nvV_m \sin(\omega_s t - \frac{\pi}{6}) \quad (2.50)$$

$$V_{sc} = nvV_m \sin(\omega_s t - \frac{5\pi}{6}) \quad (2.51)$$

ให้ $nv=1:1, nv=1:\sqrt{3}$

สมการทางด้านเอาต์พุตทั้ง 2 ขด มีดังนี้

$$V_{a'} = V_m \sin(\omega_s t + \frac{\pi}{2}) \quad (2.52)$$

$$V_{b'} = V_m \sin(\omega_s t - \frac{\pi}{6}) \quad (2.53)$$

$$V_{c'} = V_m \sin(\omega_s t - \frac{5\pi}{6}) \quad (2.54)$$

จากสมการที่ 2.49 - 2.51 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 2.53 - 2.54 จะเห็นว่าค่ามุมเฟสของแต่ละเฟส จะมีต่างกัน 30°

$$V_{a''} = V_m \sin(\omega_s t + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{6}) = V_m \sin(\omega_s t + \frac{\pi}{3}) \quad (2.55)$$

$$V_{b''} = V_m \sin(\omega_s t - \frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{6}) = V_m \sin(\omega_s t - \frac{\pi}{3}) \quad (2.56)$$

$$V_{c''} = V_m \sin(\omega_s t - \frac{5\pi}{6} - \frac{\pi}{6}) = V_m \sin(\omega_s t - \pi) \quad (2.57)$$

หน้าที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะใช้ในวงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ไม่ใช่เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวแต่เป็นการสร้างแรงดันไฟฟ้าชนิดสามเฟสขึ้นสองชุด โดยมีมุมต่างเฟสกัน 30° จึงทำให้เกิดเป็นรูปคลื่น 12 พัลส์

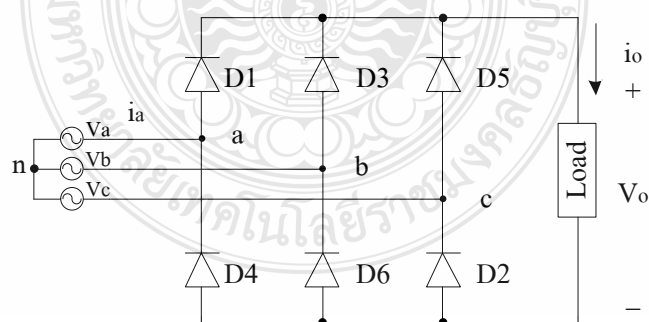
2.5 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2.5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟส

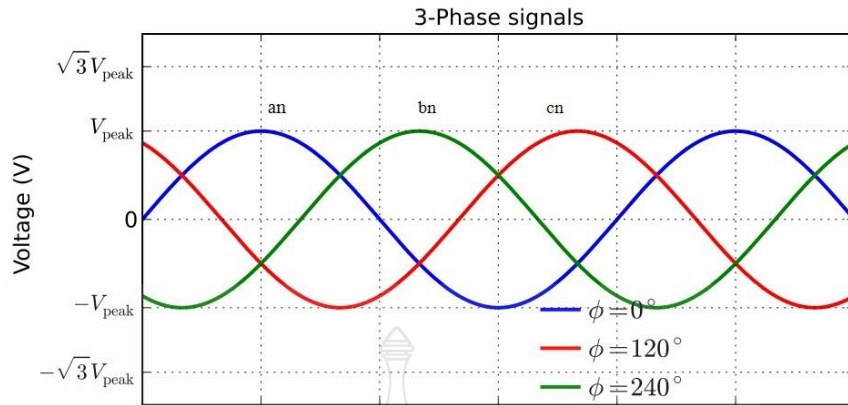
วงจรเรียงกระแสสามเฟส นิยมใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรมเพื่อจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดขนาดใหญ่ จึงจะนำเสนอมวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอดและแบบควบคุมเฟสได้ โดยปกตินั้นจะใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งแต่ไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ได้ ผู้จัดทำจึงจะนำเสนอมวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบคุมเฟสโดยใช้สัญญาณ PWM ที่สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ตลอดเวลา

1) วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด

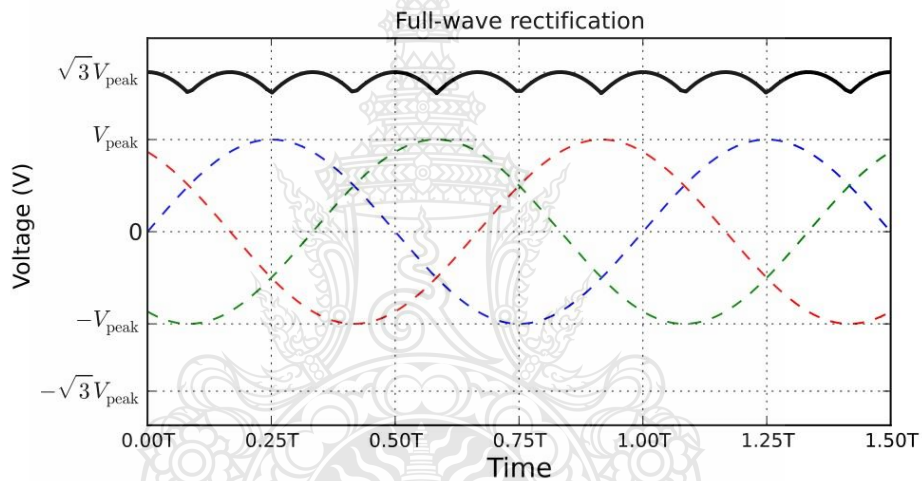
วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอดเป็นแบบง่ายที่สุดจึงนิยมใช้กันในปัจจุบัน วงจรเรียงกระแสสามเฟสแสดงในรูปที่ 2.10 จะให้ระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและมีการจัดเรียงเฟสเป็น a-b-c โดยสมมติให้แหล่งจ่ายและไดโอดเป็นอุดมคติ[11]



รูปที่ 2.10 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด



รูปที่ 2.11 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเฟส a-b-c



รูปที่ 2.12 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบไดโอด

กระแสไฟฟ้าไดโอดจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าโหลด เพื่อที่จะหากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสของแหล่งจ่ายจะพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าของเคอร์รันทที่โหนด a, b และ c

$$i_a = i_{D1} - i_{D4} \quad (2.58)$$

$$i_b = i_{D3} - i_{D6} \quad (2.59)$$

$$i_c = i_{D5} - i_{D2} \quad (2.60)$$

ไดโอดแต่ละตัวจะนำกระแสไฟฟ้าเพียงหนึ่งในสามคาบเวลา ดังนั้นจะได้

$$I_{D,av} = \frac{1}{3} I_{o,av} \quad (2.61)$$

$$I_{D,rms} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{o,rms} \quad (2.62)$$

$$I_{s,rms} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{o,rms} \quad (2.63)$$

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

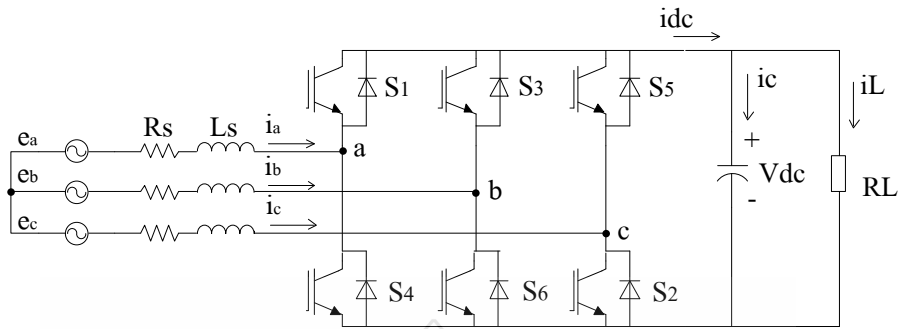
ค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสย้อนกลับสูงสุดที่ตกคร่อมไดโอดจะเท่ากับที่ค่าแรงดันไฟฟ้าขอดระหว่างเฟสรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด D_1 และเมื่อไดโอด D_1 นำกระแส ค่าแรงดันตกคร่อมจะมีค่าประมาณศูนย์ ในขณะที่ขณะหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ V_{ab} เมื่อไดโอด D_3 นำกระแส และจะมีค่าเท่ากับ V_{ac} เมื่อไดโอด D_5 นำกระแส ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกหรือหรือค่าองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{3V_{m,L-L}}{\pi} = 0.955V_{m,L-L} \quad (2.64)$$

โดยให้ $V_{m,L-L}$ หมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าขอดระหว่างสายซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}V_{L-L,rms}$

2) วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบคุมเฟสโดยใช้สัญญาณ PWM

วงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM จะใช้ไอจีบีที 6 ตัว สามารถสร้างรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบ 6 พัลส์ และควบคุมไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามต้องการ โดยการป้อนสัญญาณ PWM เข้าไปยังขาเกตของไอจีบีทีแต่ละตัว[6]



รูปที่ 2.13 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบคุ่มเฟสโดยใช้สัญญาณ PWM

จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบคุ่มเฟสโดยใช้สัญญาณ PWM สามารถนำมาเขียนสมการ
ได้ดังสมการที่ 2.65 - 2.69

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - (V_{dc} s_a + V_{NO}) \quad (2.65)$$

$$L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - (V_{dc} s_b + V_{NO}) \quad (2.66)$$

$$L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - (V_{dc} s_c + V_{NO}) \quad (2.67)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_a s_a + i_b s_b + i_c s_c - \frac{V_{dc}}{R_L} \quad (2.68)$$

$$V_{NO} = -\frac{V_{dc}}{3} \sum_{i=a,b,c} S_i \quad (2.69)$$

เมื่อ S_i ($i = a, b, c$) แต่ $S_i = 1$ ($i = a, b, c$) มีสัญญาณมาทริกขาเกต จะเป็นสถานะ เปิด และถ้า $S_i = 0$ ($i = a, b, c$) ไม่มีสัญญาณมาทริกขาเกต จะเป็นสถานะ ปิด [12]

เงื่อนไข :

$$S_i \begin{cases} 1 & \text{แขนด้านบน จะ เปิด} \\ & \text{แขนด้านล่าง จะ ปิด} \\ 0 & \text{แขนด้านบน จะ ปิด} \\ & \text{แขนด้านล่าง จะ ปิด} \end{cases}$$

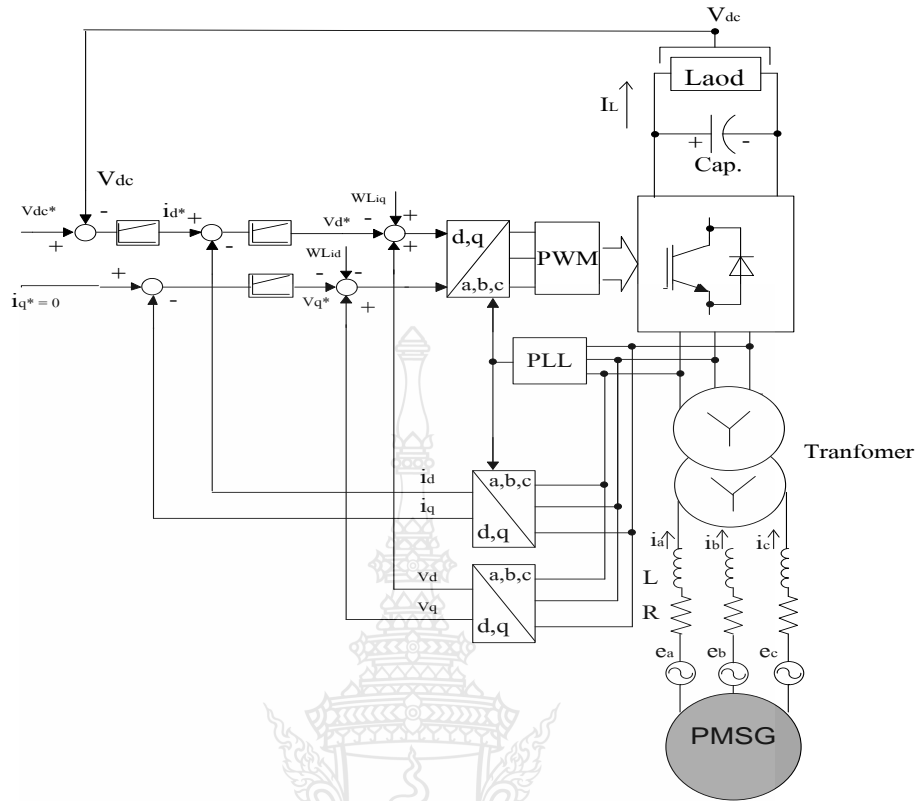
เพื่อง่ายต่อการออกแบบสัญญาณควบคุมจึงต้องมีการแปลงระบบ 3 เฟสไปสู่ระบบ 2 เฟส โดยแปลงจากระบบ abc ไปสู่ dq0 เพื่อสร้างสัญญาณทริกขาเกตของ IGBT โดยนำสมการที่ 2.65 - 2.67 มาเขียนเป็น ระบบ dq0 ดังนี้

$$U_{sd} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q + V_d \quad (2.70)$$

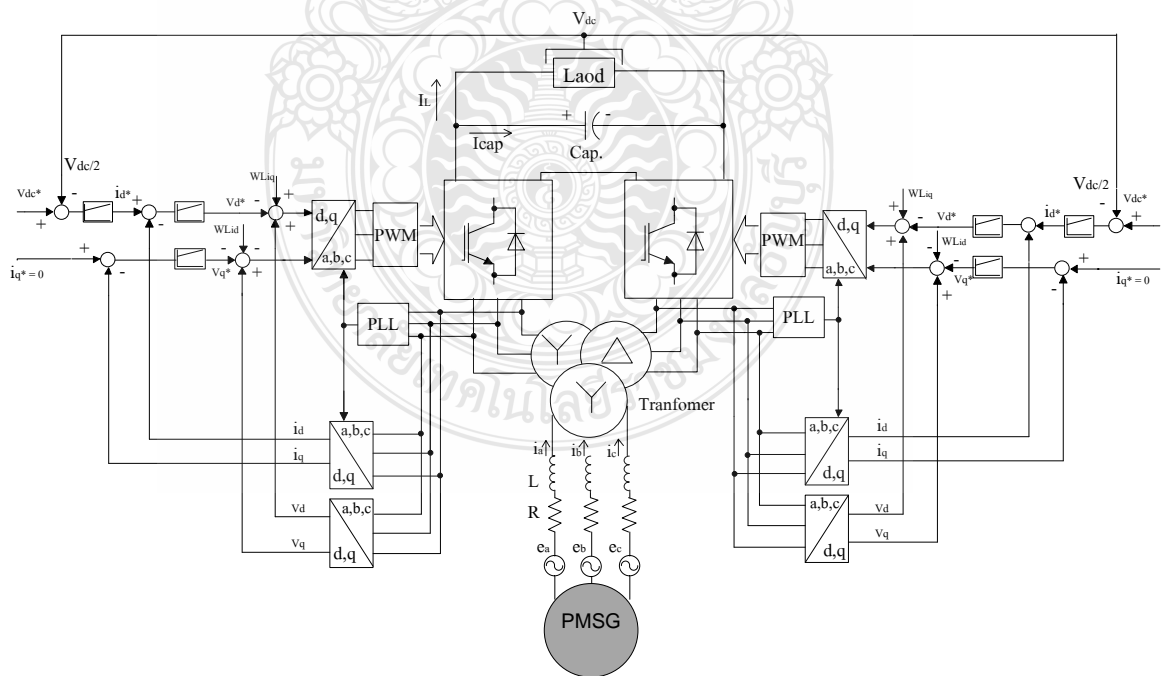
$$U_{sq} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + V_q \quad (2.71)$$

2.5.2 การควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM 12 พัลส์

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์นั้น ใช้วิธีการควบคุม เป็น 2 ชุดๆละ 6 พัลส์ โดยการควบคุมแรงดันดีซีบััสให้คงที่ ใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอ ควบคุมด้วยกระแส id ซึ่งจะมีแหล่งจ่ายไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กมาต่อกับชุดหม้อแปลงแยกออกไปยังชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ 2 ชุด มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้รูปคลื่น เป็นแบบ 12 พัลส์ ทางเอาท์พุทจะต่อกับคาปาซิเตอร์ และต่อไปยังโหลด ดังรูปที่ 2.14 [10]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์โดยควบคุมแบบ PI



รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 12 พัลส์โดยควบคุมแบบ PI

2.6 การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นภาพไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยใช้สัญญาณควบคุมไซน์ (Sinusoidal Control Signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับภาพคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Waveform) ดังในรูปที่ 2.16 (ก) ความถี่ของการสวิตชิง (f_s) จะเท่ากับความถี่ของภาพคลื่นสามเหลี่ยม[11]

คำย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม มีดังต่อไปนี้

$V_{control}$	สัญญาณควบคุมภาพไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก
V_{tri}	สัญญาณภาพสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตชิง
f_1	ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์
f_s	ความถี่ของการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์
m_a	อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
m_f	อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

ค่า m_a และ m_f จะนิยามจากสมการที่ 2.72 และ 2.73 ตามลำดับ

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2.72)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.73)$$

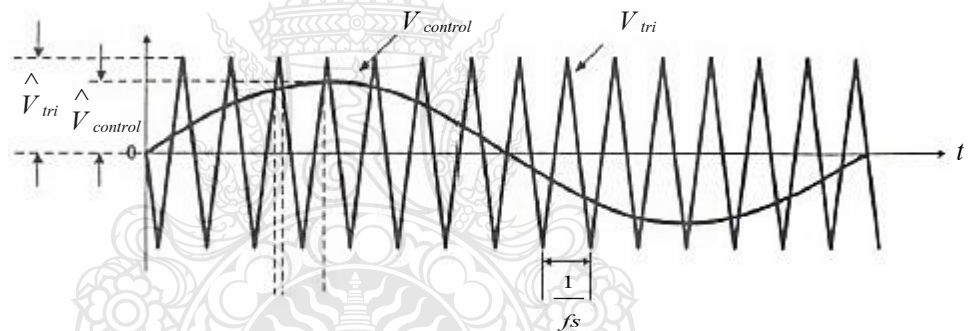
เมื่อ	$\hat{V}_{control}$	คือค่ายอดของสัญญาณควบคุมไซน์
	\hat{V}_{tri}	คือค่ายอดสัญญาณภาพสามเหลี่ยม

ถ้าค่า $0 \leq m_a \leq 1$ จะเป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น ซึ่งหมายถึงองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านออก (Fundamental-Frequency Component of the Output Voltage) โดยจะแปรผันเชิงเส้นกับค่า m_a

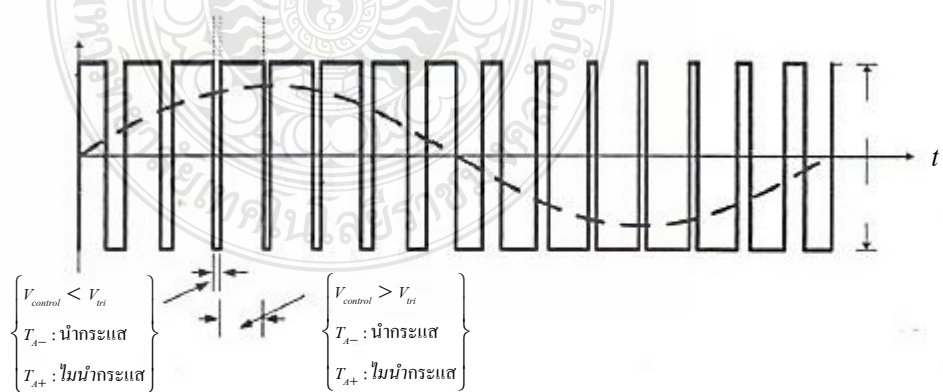
ในกรณี $m_a > 1$ จะเป็นช่วงการควบคุมแบบโอเวอร์มอดูเลต ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่สูงกว่าช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น สำหรับเงื่อนไขของการสัญญาณสวิตซ์แบบพีคเบิคลูเอ็ม คือ

$$V_{control} > V_{tri}, T_{A+} \text{ จะนำกระแส } V_{A0} = \frac{1}{2}V_d \quad (2.74)$$

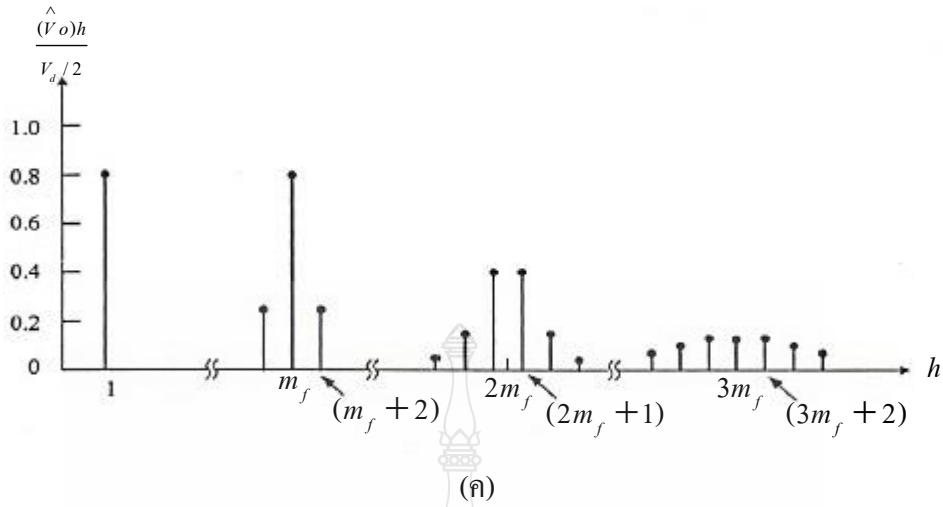
$$V_{control} < V_{tri}, T_{A-} \text{ จะนำกระแส } V_{A0} = -\frac{1}{2}V_d \quad (2.75)$$



(ก)



(ข)



รูปที่ 2.16 การสร้างสัญญาณสวิตซ์แบบพีคดับเบิ้ลยูเอ็ม

การทำงานของสวิตซ์ T_{A+} และ T_{A-} จะขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ $V_{control}$ กับ V_{tri} โดยมีเงื่อนไขดังสมการที่ 2.74 และ 2.75 และจะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแส รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างเมื่อกำหนดเงื่อนไขที่ $m_a = 0.8$ และ $m_f = 15$ ฮาร์มอนิกสเปกตรัม (harmonic spectrum) ของ V_{A0} โดยเขียนกราฟเทียบกับค่าแกนตั้ง $(\hat{V}_{Ao})_h / (V_d/2)$ แสดงในรูปที่ 2.16 (ค) จะมีส่วนสำคัญสามส่วนคือ

- 1) ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล $(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a (V_d/2)$

โดยมีความสัมพันธ์จาก

$$V_{A0} = \frac{V_{control}}{\hat{V}_{tri}} \cdot \frac{V_d}{2}, \quad V_{control} < \hat{V}_{tri} \quad (2.76)$$

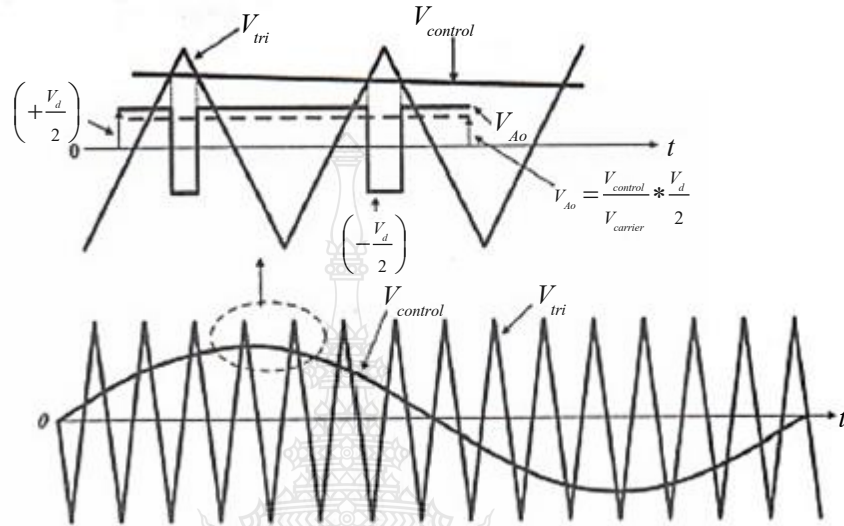
$$V_{control} = \hat{V}_{control} \sin \omega_1 t, \quad V_{control} \leq \hat{V}_{tri} \quad (2.77)$$

$$(V_{Ao})_1 = \left(\frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \cdot \frac{V_d}{2} \right) \sin(\omega_1 t), \quad m_a \leq 1.0 \quad (2.78)$$

$$(V_{Ao})_1 = m_a \cdot (V_d/2) \sin \omega_1, \quad m_a \leq 1.0 \quad (2.79)$$

$$(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a \cdot (V_d/2), \quad m_a \leq 1.0 \quad (2.80)$$

สมการที่ 2.80 พิจารณาประกอบจากรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลจะแปรผันเป็นเชิงเส้นค่า m_a ซึ่ง m_a จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1



รูปที่ 2.17 พัลส์เบร็ดธูเอมแบบไซน์ (Sinusoidal Pulse width Modulation : SPWM)

2) ค่าไซน์แบนด์ฮาร์โมนิกส์ (sideband harmonic) จะเกิดขึ้นรอบๆ $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$

ดังแสดงในสมการที่ 2.81 หรือ 2.82

$$f_h = (jm_f \pm k) f_1 \quad (2.81)$$

$$h = j(m_f) \pm k \quad (2.82)$$

เมื่อ $h=1$ คือความถี่หลักมูล (fundamental frequency)

ถ้าค่า j เป็นเลขคี่ ค่าฮาร์โมนิกส์จะเท่ากับค่า k ที่เป็นคู่

ถ้าค่า j เป็นเลขคู่ ค่าฮาร์โมนิกส์จะเท่ากับค่า k ที่เป็นคี่

เช่น ตัวอย่างไซน์แบนด์ฮาร์โมนิกส์ในรูปที่ 2.16 (ค) ซึ่งมีข้อสังเกตว่าค่า $\left(\hat{V}_{Ao}\right)_h / (V_d / 2)$

จะเป็นฟังก์ชันกับ m_a

3) ค่า m_f ฮาร์โมนิกส์ควรจะเป็นเลขคี่ เพราะถ้ากำหนดให้ค่า m_f เป็นเลขคู่ก็จะทำให้เกิดการสมมาตรเลขคี่ ซึ่งแสดงได้จากสมการ $f(-t) = -f(t)$ ผลที่ได้คือจะมีเพียงฮาร์โมนิกส์เลขคี่เท่านั้นที่ยังปรากฏอยู่ใน V_{Ao} ส่วนฮาร์โมนิกส์เลขคู่จะหักล้างกัน โดยที่ช่วง $m_f > 21$ จะถือว่า m_f มีค่ามาก โดยที่ขนาดของฮาร์โมนิกส์ย่อย (sub-harmonics) จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า m_f

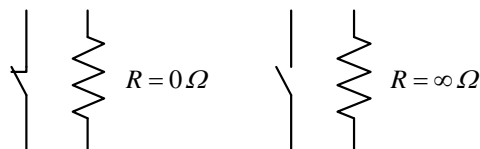
2.7 อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำงานใน 2 สถานะคือ สถานะนำกระแส และสถานะหยุดนำกระแส ทั้งนี้ในเชิงทฤษฎี อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกสมมติให้เป็นสวิตซ์อุดมคติ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์วงจร อย่างไรก็ตามความเข้าใจคุณลักษณะแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละชนิดมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังควรมีคุณลักษณะทางอุดมคติดังนี้

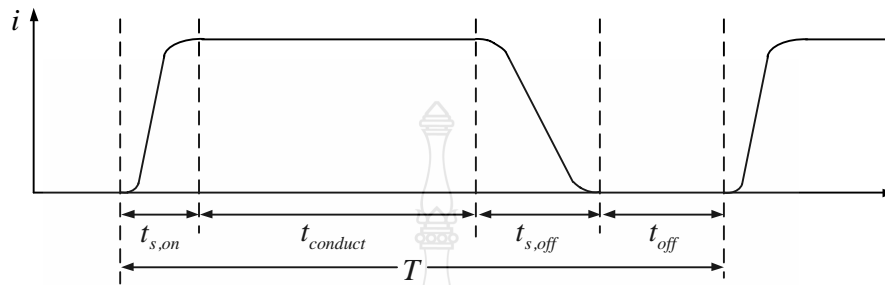
- สามารถทนแรงดันพังทลายได้สูง ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันใช้งาน
- มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำ
- มีความเร็วสูงในการเปลี่ยนสถานะการทำงาน
- ทนต่ออุณหภูมิสูงขณะใช้งาน
- ควบคุมได้ง่าย

โดยทั่วไปอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทำงานเป็นสวิตซ์ในวงจร ซึ่งขณะนำกระแส ค่าความต้านทานของอุปกรณ์จะต่ำมาก (ใกล้เคียงศูนย์) และขณะหยุดนำกระแส ค่าความต้านทานของอุปกรณ์จะสูงมาก (ใกล้เคียงค่าอนันต์) ดังวงจรสมมูลในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ขณะอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเปลี่ยนสถานะทำงาน จะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าประสิทธิภาพของวงจรโดยรวม ทั้งนี้ช่วงเวลาในการทำงานของสวิตซ์ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการทำงานทั้ง 2 สถานะ แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ช่วงเวลาต่าง ๆ

เมื่อ $t_{s,on}$ คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn On)

$t_{conduct}$ คือ ช่วงเวลานำกระแส (On)

$t_{s,off}$ คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn Off)

t_{off} คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแส (Off)

การสูญเสียที่สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ สูญเสียขณะนำกระแส ($W_{con,loss}$) และขณะสวิตซ์ ($W_{s,loss}$) โดยการสูญเสียขณะสวิตซ์แบ่งได้อีกเป็น 2 ส่วนคือ ช่วงเริ่มนำกระแส (Turn-On Loss: $W_{s,on,loss}$) และช่วงเริ่มหยุดนำกระแส (Turn-Off Loss: $W_{s,off,loss}$) ค่าพลังงานสูญเสียต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.83 – 2.85

$$W_{con,loss} = V_d I_d t_{conduct} \quad (2.83)$$

$$W_{s,on,loss} = \frac{1}{2} V_d I_d t_{s,on} \quad (2.84)$$

$$W_{s,off,loss} = \frac{1}{2} V_d I_d t_{s,off} \quad (2.85)$$

วัตถุประสงค์ของการออกแบบอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังคือค่าที่น้อยที่สุดของการสูญเสียขณะนำกระแสและการสูญเสียขณะสวิตช์ซึ่งรวมกัน (อยู่ในภาพของความร้อน) เพราะอุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} จะต้องถูกจำกัดเพื่อป้องกันอุณหภูมิเบรคดาวน ดังนั้นกำลังสูญเสียสูงสุดหาได้จากสมการที่ 2.86

$$P_{AVmax} \leq \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{thja}} \quad (2.86)$$

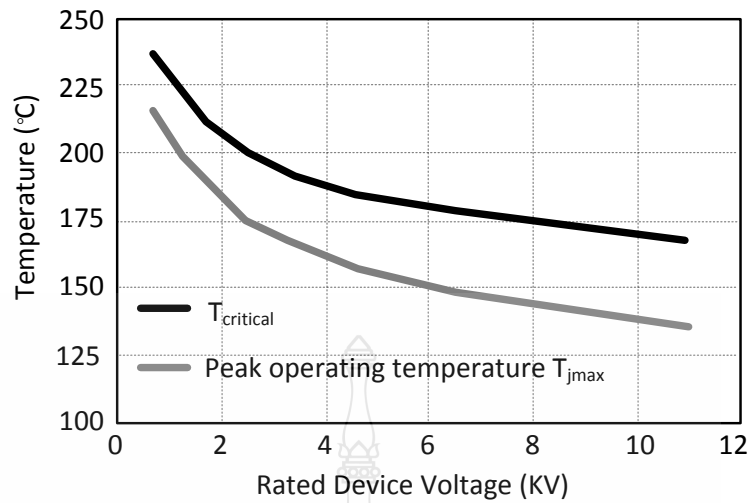
เมื่อ T_{jmax} คือ อุณหภูมิสูงสุดที่จุดต่อ
 T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม
 R_{thja} คือ ความต้านทานความร้อนระหว่างจุดต่อของสารกึ่งตัวนำและสภาพแวดล้อม

อุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} จะลดลงด้วยอุปกรณ์ป้องกันแรงดัน [13] ซึ่งอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} ที่ปลอดภัยของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในขณะทำงานที่ความถี่ f สามารถหาได้จากสมการที่ 2.87

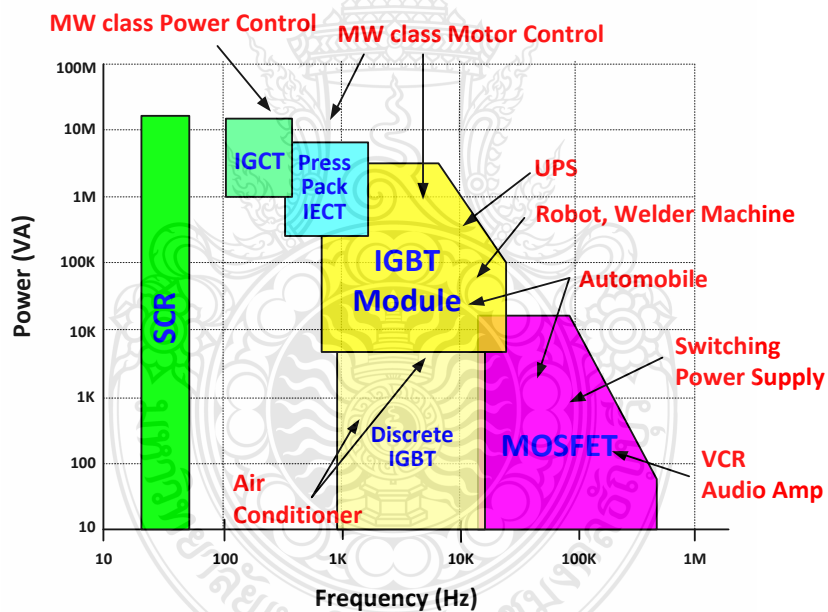
$$P_{AV} = \psi I_{on} V_{on} + f (W_{on} + W_{off}) \quad (2.87)$$

เมื่อ I_{on} คือ กระแสในขณะนำกระแส
 V_{on} คือ แรงดันขณะนำกระแส
 W_{on} คือ การสูญเสียขณะนำกระแส
 W_{off} คือ การสูญเสียขณะหยุดนำกระแส
 ψ คือ Duty Cycle

จากสมการที่ 2.86 และ 2.87 เป็นข้อจำกัดสำหรับการนำอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไปประยุกต์ใช้งานตามที่แสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21



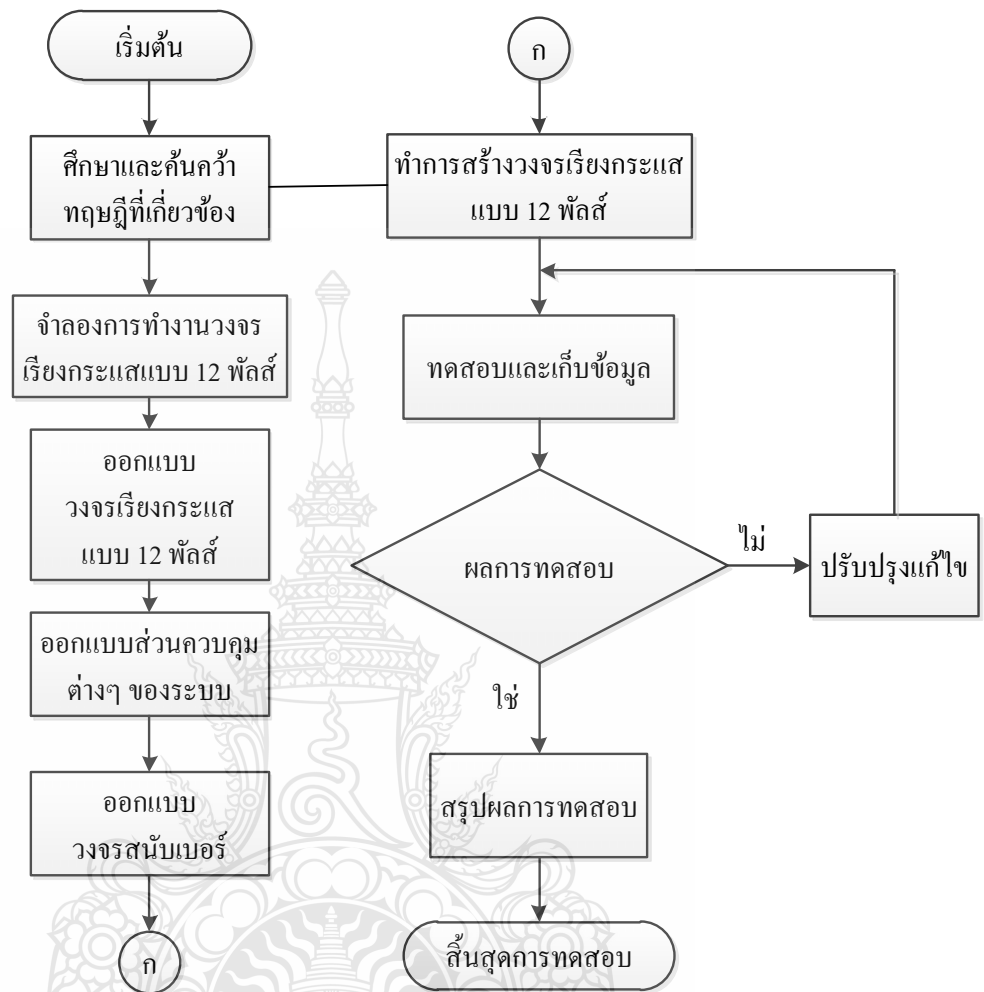
รูปที่ 2.20 อุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} ที่ปลอดภัยของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ [13]



รูปที่ 2.21 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน [13]

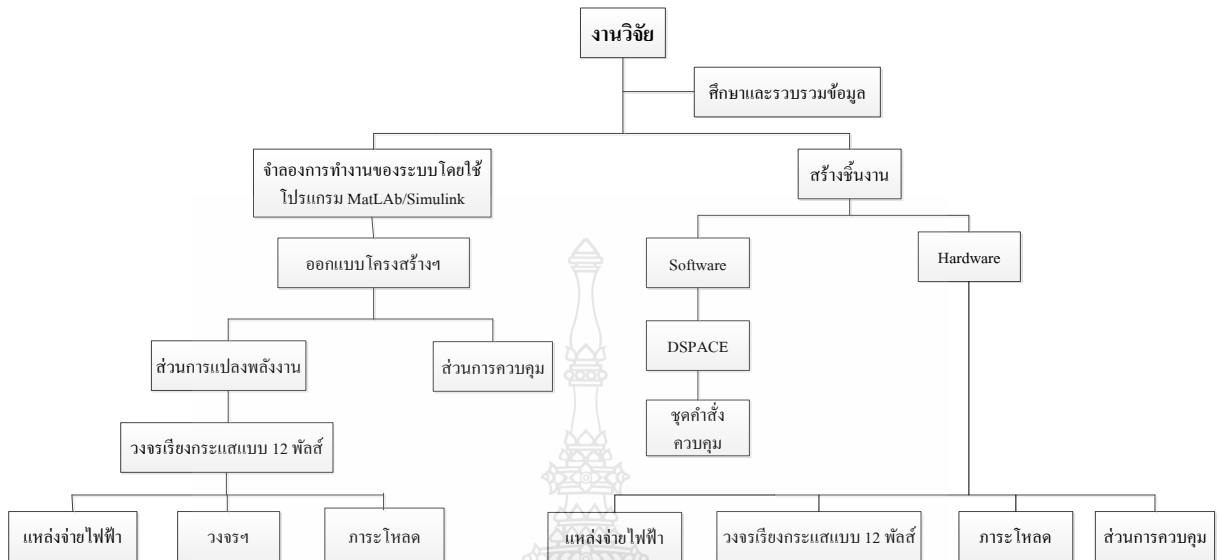
การพัฒนาอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในปัจจุบันสามารถพัฒนาไปที่พิกัดที่สูงขึ้นมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.21 สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้คือ 10 กิโลวัตต์ ความถี่สวิตซ์ 2.5 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่พิจารณาเลือกใช้คือ ไอจีบีที

2.8 แผนภาพของการทำงานวิจัย (Flow Chart)



รูปที่ 2.22 แผนภาพของการทำงานวิจัย

2.9 กรอบของการทำงานวิจัย (Frame Work)



รูปที่ 2.23 กรอบของการทำงานวิจัย

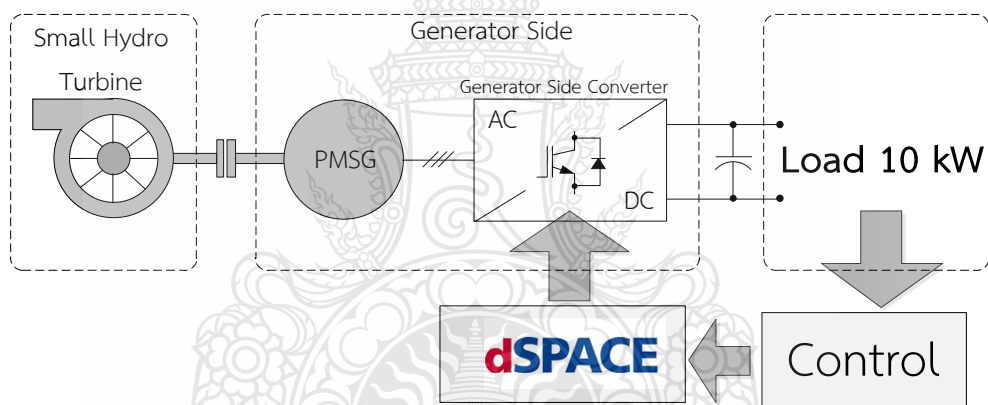
2.10 สรุปผลเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ พบว่าในส่วนของการศึกษาทฤษฎีจะต้องทำความเข้าใจแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆ คือวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ และส่วนของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ข้อดีของออกแบบวงจรนี้ คือ สามารถลดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าได้ สามารถลดขนาดของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งลงได้เนื่องจากใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุด ข้อเสียคือ ระบบควบคุมค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนกว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบไดโอดธรรมดา และในการทำชิ้นงานจริงจะมีปัญหาในการควบคุมมากกว่าการจำลอง เพราะฉะนั้นผู้ทำวิทยานิพนธ์จึงจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษาและทดลองค่อนข้างนาน โดยจะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบเพราะไม่เช่นนั้นแล้วอาจเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบได้ หากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำงานในช่วงเวลาที่ไม่เหมาะสม

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในการสร้างแบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก โดยใช้เทคนิคการควบคุมสัญญาณ PWM เพื่อให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกสม่ำเสมอและคงที่ โดยทำการวัดค่ากระแส แรงดัน สัญญาณควบคุมต่างๆ ทั้งในผลการจำลองทางโปรแกรม Matlab/Simulink และผลการทำงานจริงในห้องปฏิบัติการ โดยเชื่อมต่อส่วนควบคุมผ่านโปรแกรม dSPACE ไปยังภาควงจรกำลัง ในการจำลองและออกแบบวงจรต่างๆ จะนำเสนอในบทนี้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบทั้งหมดที่ทำการออกแบบ

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานทั้งในส่วนของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : ศึกษาทฤษฎี บทความวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยที่นำเสนอ

ขั้นตอนที่ 2 : รวบรวมข้อมูลที่ต้องใช้และอ้างอิง

ขั้นตอนที่ 3: ออกแบบ สร้างแบบจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองการทำงานของระบบและวิเคราะห์ความถูกต้อง

ขั้นตอนที่ 4 : ศึกษาการทำงานภาคควบคุม ด้วยตัวประกอบประมวลผลทางดิจิทัล DS 1104 ออกแบบและทดสอบส่วนภาควงจรควบคุมต่างๆ ของระบบเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ด DS 1104 รวมถึง ออกแบบ สร้าง ทั้งภาควงจรถ้าล้าง ภาควงจรควบคุม และภาควงจรป้องกันต่างๆ ของคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ สำหรับใช้กับเครื่องต้นแบบในห้องปฏิบัติการวิจัย

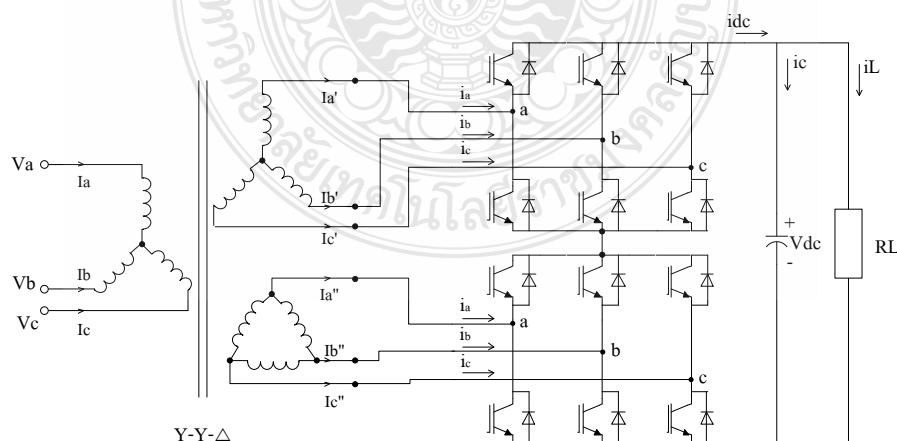
ขั้นตอนที่ 5 : ทดสอบระบบขับทั้งหมดที่นำเสนอเกี่ยวกับเครื่องต้นแบบ ในห้องปฏิบัติการ และวิเคราะห์ ปรับแก้ไข พร้อมประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 6 : ทดสอบระบบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดคอนเวอร์เตอร์กำลัง 12 พัลส์ โดยขยาย ขนาดพิกัดที่ 10 kW

ขั้นตอนที่ 7 : สรุปภาพเล่มฉบับสมบูรณ์และนำเสนอผลงานวิจัย

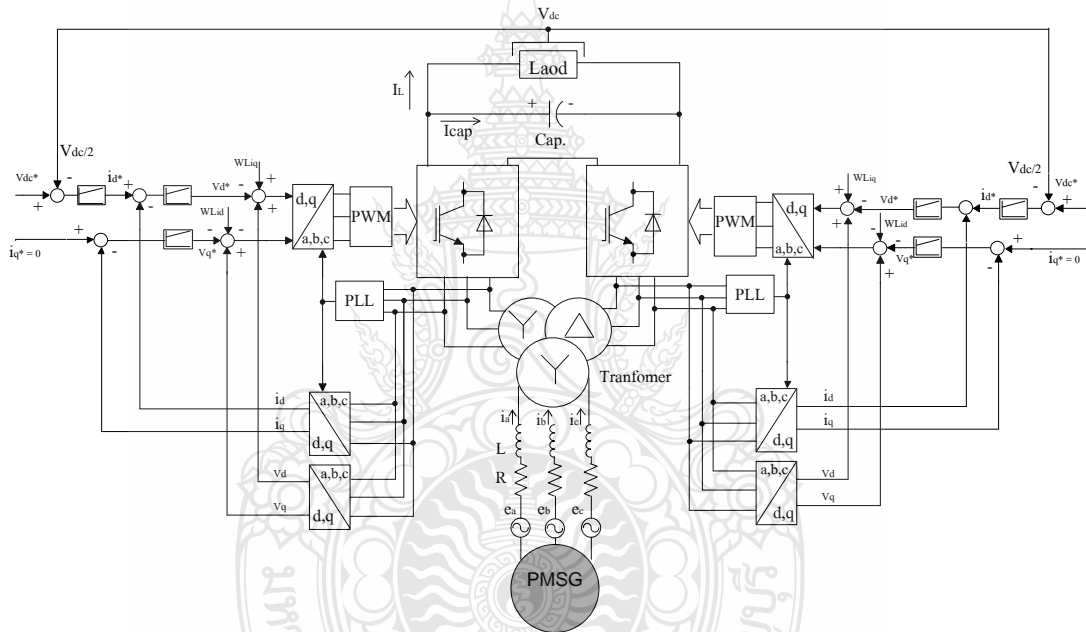
3.2 การออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์

การจำลองการทำงานของแหล่งจ่ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากักน้ำขนาดเล็กให้ได้แรงดันไฟฟ้านั้น สามารถควบคุมแรงดันน้ำได้ง่ายและคงที่ทำให้แรงดัน ไฟฟ้าที่ผลิตออกมานั้นคงที่ตาม เพราะฉะนั้นจึงนำเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ามาใช้แทน โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ 380 V ผ่านไปยัง หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด เพื่อแยกจ่ายให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุด เพื่อให้ได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบ 12 พัลส์ และสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ได้ จ่ายให้กับ โหลด R โดยแนวคิดในการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ เพื่อลดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า และสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อ อุปกรณ์สวิตชิงขนาดใหญ่ ส่วนรูปร่างของส่วนกำลังและควบคุมจะแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์

ส่วนภาคควบคุมกำลังในการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ดังสาเหตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้นที่แรงดัน 380 V_{L-L} ผ่านไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว คือ ตัวแรกมีการต่อขดลวดเป็น สตาร์ - สตาร์ ตัวที่สองต่อขดลวดเป็นแบบ สตาร์ - เกลด้าเพื่อให้แรงดันด้านออกมีมุมเฟสต่างกันอยู่ 30° จากนั้นจ่ายให้กับวงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ โดยควบคุมสัญญาณแบบ PWM ทั้งสองชุด แล้วนำชุดวงจรทั้งสองชุดมาต่ออนุกรมกัน เพื่อให้ได้รูปคลื่น 12 พัลส์ และแรงดันที่ได้สูงเป็นสองเท่าจากแรงดันปกติ จะถูกจ่ายให้กับโหลด R ที่มีพิกัด 5 kW จำนวน 2 ชุด เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานทั้งหมดของระบบ โดยมีการตรวจจับวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าในจุดต่าง ๆ



รูปที่ 3.3 วงจรส่วนภาคควบคุมของวงจรแบบ 12 พัลส์

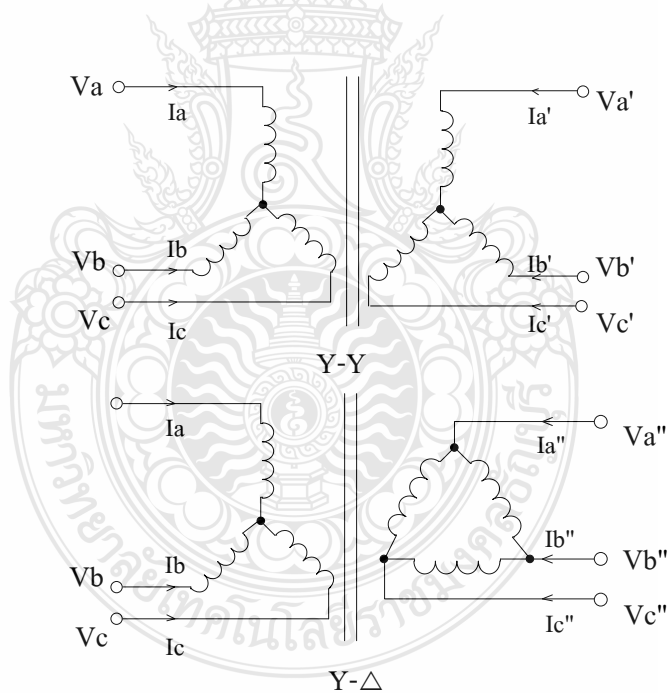
ส่วนภาคควบคุมจะทำงานเป็น 2 ชุด ซึ่งชุดควบคุมด้านขวาจะทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของชุดวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ 6 พัลส์ ที่มีแรงดันไฟฟ้าออกมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการต่อขดลวดแบบ สตาร์ - สตาร์ และชุดควบคุมด้านซ้ายจะทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของชุดวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ 6 พัลส์ ที่มีแรงดันไฟฟ้าออกมาจ่ายหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการต่อขดลวดแบบ สตาร์ - เกลด้า ซึ่งการรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ แบบ 12 พัลส์นั้น จะต้องจับแรงดันที่จ่ายให้กับโหลด มาผ่านชุดควบคุมแต่ละชุดดังรูปที่ 3.3

3.3 การออกแบบส่วนวงจรกำลัง

วงจรกำลังนั้นจะส่วนประกอบหลักๆ คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งตัวเก็บประจุ (C) โหลดภาระไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดของส่วนต่างๆ ดังนี้

3.3.1 ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด

หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด ใช้ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับป้อนให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ในแต่ละชุด โดยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด ต้องวางจทางด้านปฐมภูมิเป็นแบบสตาร์และทุติยภูมิเป็นแบบสตาร์ - เดลต้า โดยจะมีมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของชุดทุติยภูมิต่างกันอยู่ 30° แต่ที่นำมาออกแบบใช้งานจริงนั้น เป็นแบบแยกหม้อแปลงไฟฟ้าเป็น 2 ตัวๆ หนึ่งเป็นการต่อวงจรแบบสตาร์ - สตาร์ และอีกตัวหนึ่งเป็นวงจรแบบสตาร์ - เดลต้า ขนาดตัวละ 10 กิโลโวลต์แอมป์ อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกคือ 400 โวลต์ : 300 โวลต์ ทั้งนี้เพราะว่าหม้อแปลงในท้องตลาดไม่นิยมผลิตมาใช้งาน ซึ่งผลแรงดันด้านออกที่ได้จะเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด โดยมีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 3.4



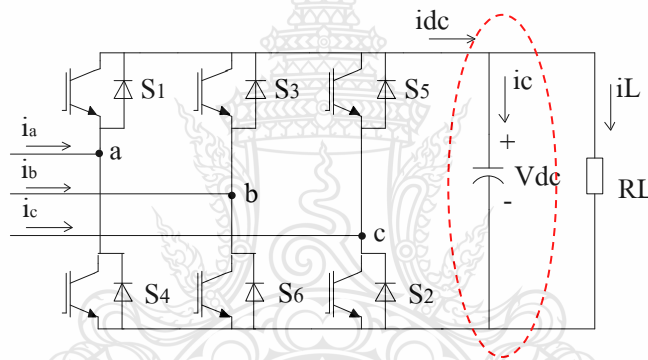
รูปที่ 3.4 การต่อวงจรหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่ใช้งานจริง

3.3.2 ออกแบบตัวเก็บประจุสำหรับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ จะได้ สัญญาณรูปคลื่นที่เป็นแบบ 12 พัลส์ แต่จำเป็นต้องออกแบบตัวเก็บประจุ(C) เพื่อทำหน้าที่กรอง แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เรียบขึ้นและทำหน้าที่เก็บประจุไฟ โดยลักษณะการต่อวงจรของตัวเก็บ ประจุดังรูปที่ 3.5

จากสมการแรงดันเฉลี่ยขาออกของวงจรเรียงกระแสคือ

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m,L-L} \cos \alpha \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.5 ลักษณะการต่อวงจรของตัวเก็บประจุ

ดังนั้นเราต้องการแรงดัน $V_{dc} = 650 \text{ V}$ นำสมการที่ 3.1 มาคำนวณจะได้

$$\frac{650}{3\sqrt{3} / \pi} = 393 V_{m,L-L}$$

$$V_{\text{ripple,p-p}} = V_{\text{peak}} \times 0.05 \quad (3.2)$$

$$= 650 \times 0.05$$

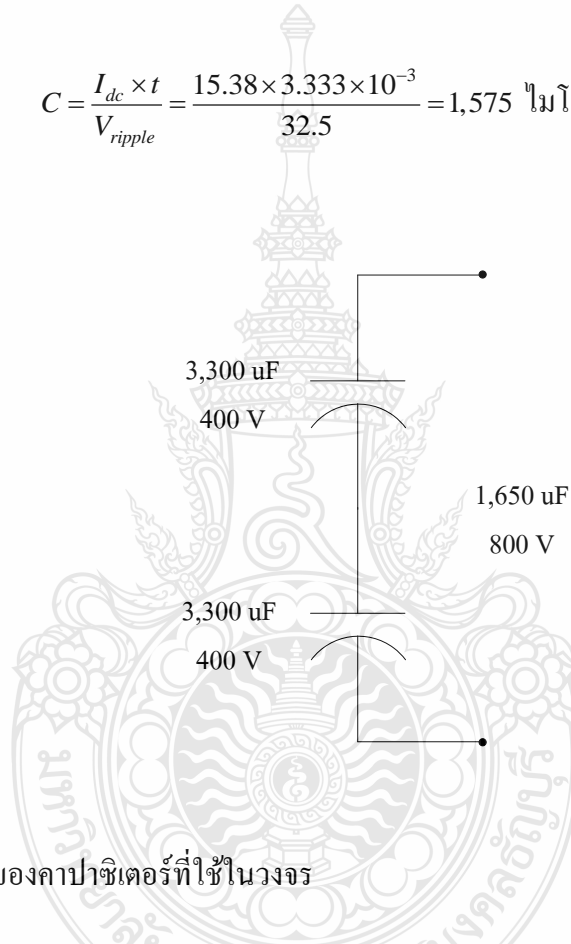
$$= 32.5 \text{ โวลต์}$$

ประจุไฟฟ้าที่คายจากตัวเก็บประจุในช่วงเวลา

$$t = \frac{t_{rate}}{6} = \frac{1}{50 \times 6} = 3.333 \text{ มิลลิวินาที} \quad (3.3)$$

$$I_L = \frac{P}{V_{dc}} = \frac{10000}{650} = 15.38 \text{ แอมป์} \quad (3.4)$$

$$C = \frac{I_{dc} \times t}{V_{ripple}} = \frac{15.38 \times 3.333 \times 10^{-3}}{32.5} = 1,575 \text{ ไมโครฟารัด} \quad (3.5)$$

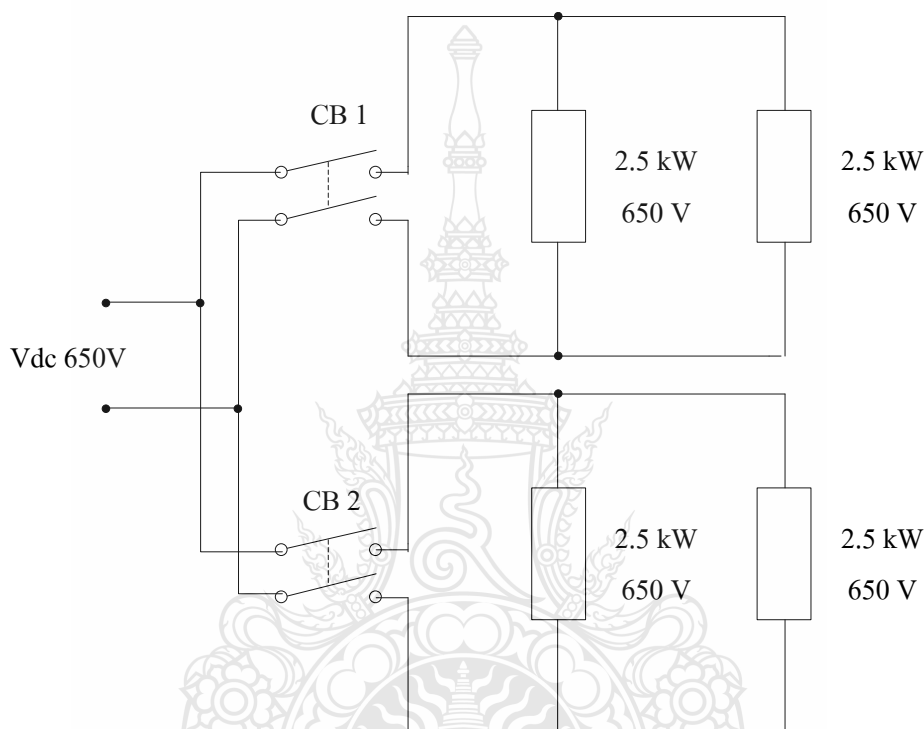


รูปที่ 3.6 การต่อวงจรของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในวงจร

เพราะฉะนั้นจึงเลือกคาปาซิเตอร์ขนาด 3,300 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดัน 400 โวลต์ 2 ตัว ต่ออนุกรมกันซึ่งจะได้ค่าความจุรวมเท่ากับ 1,650 ไมโครฟารัด และได้พิกัดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 800 โวลต์ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้

3.3.3 ภาวะโหลดไฟฟ้า

เนื่องจากการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์นั้น เป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 650 โวลต์ จึงเลือกใช้โหลดที่เป็นประเภทความต้านทาน(R) กำลังไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ฮีตเตอร์เป็น โหลด โดยมีการต่อวงจรดังรูปที่ 3.7



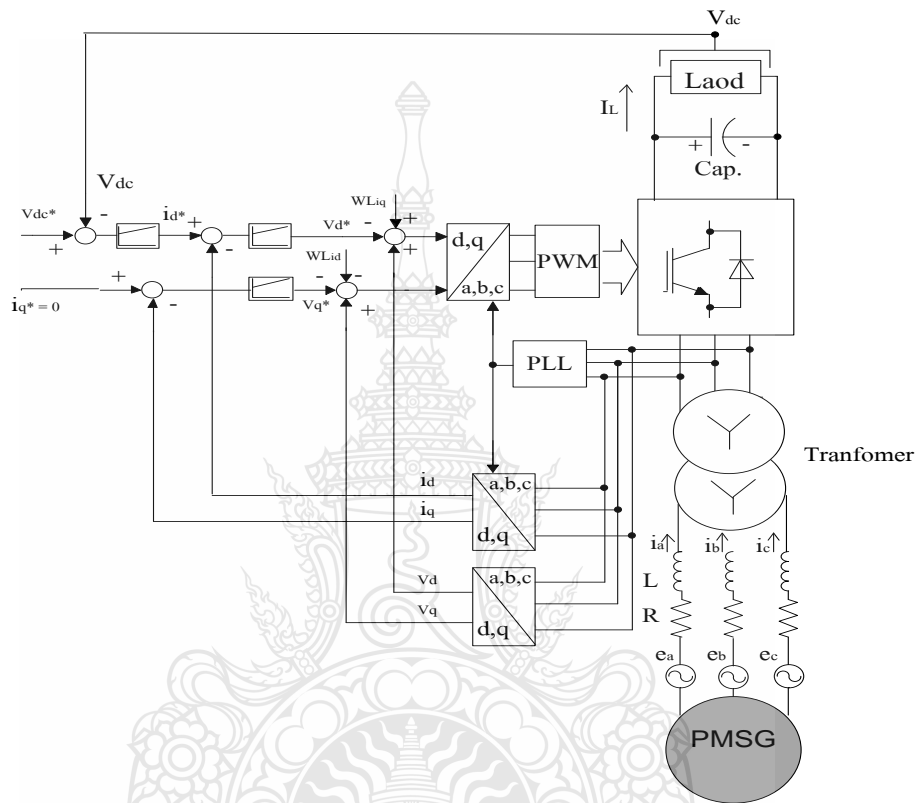
รูปที่ 3.7 การต่อวงจรภาวะ โหลดความต้านทาน(R)

3.4 การออกแบบส่วนวงจรควบคุม

3.4.1 ลักษณะทั่วไปของการควบคุมวงจร

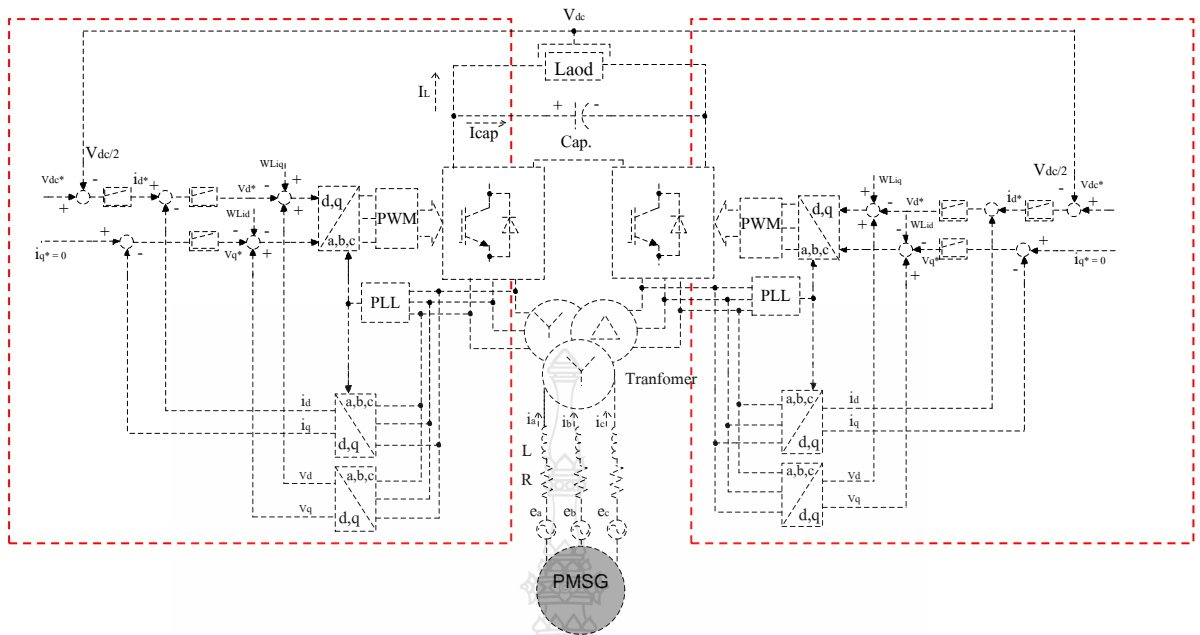
การทำงานของระบบควบคุมแรงดันในระบบสามเฟส u_{sa} , u_{sb} จะถูกวัดเข้ามาเพื่อทำการคำนวณหาค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เฟสล็อกกรุป เมื่อได้มุมของแรงดันไฟฟ้าจะถูกนำไปใช้ในการแปลงแกนของกระแสในระบบสามเฟส i_{sa} , i_{sb} จากแกนอ้างอิงอยู่กับที่ (a -, b -, c -axis) ไปเป็นกระแสในแกนหมุนด้วยความถี่เร็วซิงโครนัส (d -, q -axis) จะได้กระแส i_{sd}^* , i_{sq}^* กระแสในส่วนนี้ก็จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอ โดยจะถูกควบคุมให้เท่ากับกระแสอ้างอิงของ i_{sd}^* ซึ่งได้จากตัวควบคุมแรงดันที่เป็นแบบ พีไอ และกระแสอ้างอิงของ i_{sq}^* ซึ่งจะถูกตั้งค่าไว้กับศูนย์ กระแสที่

ถูกควบคุมแล้วจะได้เป็นแรงดันในแกน $d-q$ axis คือ u_{sd}^* และ u_{sq}^* แรงดันในส่วนนี้จะถูกนำไปรวมกับแรงดันในส่วนของการทำ Voltage Decoupling จะได้แรงดัน u_{dn}^* และ u_{qn}^* จากนั้นแปลงแรงดันจาก $d-q$ axis ไปอยู่ใน $a-, b-, c$ axis จะได้แรงดัน $u_{an, bn, cn}^*$ จากนั้นจะนำแรงดันในส่วนนี้ไปสร้างสัญญาณ PWM เป็นการสวิตช์เพื่อควบคุมคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.8 ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 6 พัลส์

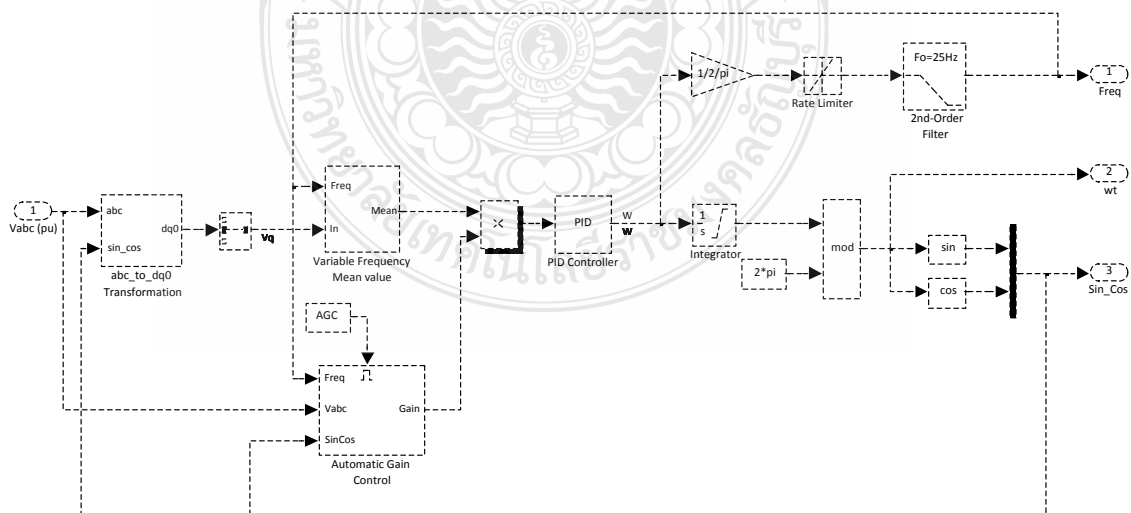
จากรูปที่ 3.8 เมื่อสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 6 พัลส์ได้ จากนั้นก็ประยุกต์ให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ โดยแบบ 12 พัลส์มีข้อแตกต่างก็นำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหารสองเพื่อแบ่งการควบคุมเป็น 2 ข้าง ดังรูปที่ 3.9 โดยทั้ง 2 แบบนี้ใช้เทคนิคการควบคุมแบบ PI



รูปที่ 3.9 ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์

3.4.2 ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน

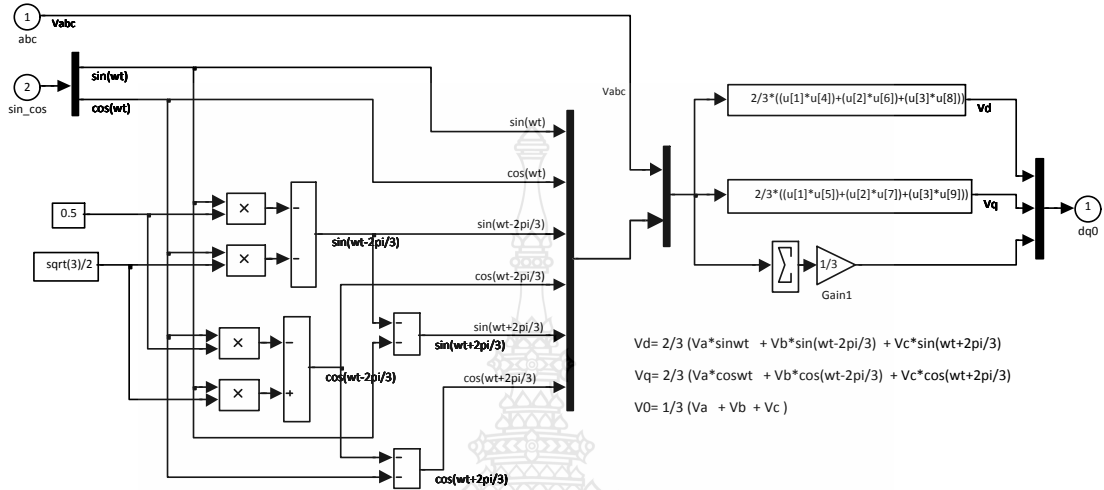
ส่วนนี้จะทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย e_a , e_b และ e_c เพื่อที่จะนำค่ามุม θ_r มาใช้ในการแปลงแกน (Park และ Inverse Park Transformation) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 หรือที่เรียกกันว่าวงจรเฟสล็อกคูลูป (Phase-Lock-Loop: PLL)



รูปที่ 3.10 ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน

3.4.3 ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส a, b, c เป็น $d-q$

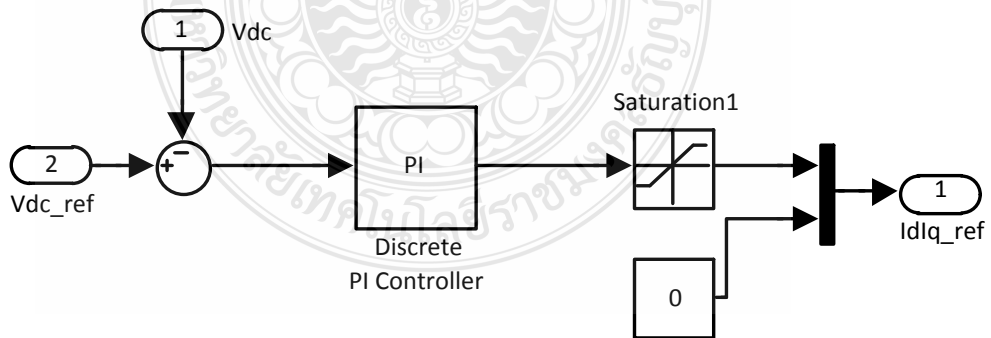
ส่วนนี้เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแปลงแกนจากแกน 3 เฟส a, b, c เป็นแกนนิ่ง $d-q$ โดยจะใช้มุมที่ได้จากส่วนการตรวจจับมุมเฟสมาช่วยในการแปลงแกนดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส a, b, c เป็น d-q

3.4.4 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

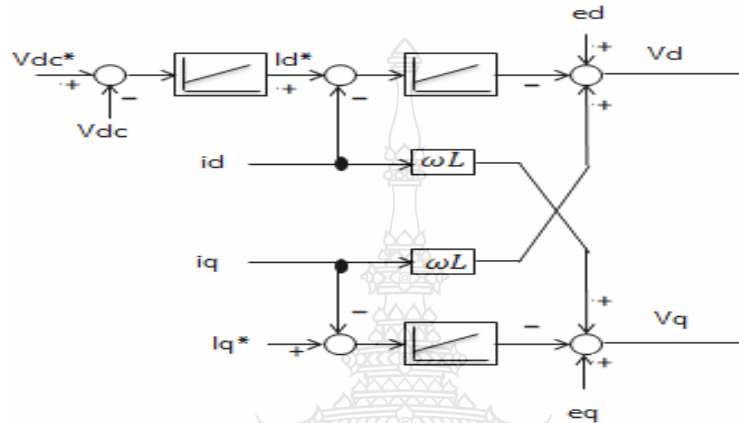
ส่วนนี้จะทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันตามค่าที่เราต้องการ ซึ่งจะถูกรควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI โดยจะได้เป็นกระแสอ้างอิงของวงจรควบคุม ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

3.4.5 ส่วนการปรับค่ากระแส

การทำงานในส่วนนี้จะนำกระแสที่วัดได้จากการใช้งานจริงมาเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านตัวควบคุมแบบ PI จากนั้นก็จะได้แรงดันในแกน $d-q$ (v_d, v_q) ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ส่วนการปรับค่ากระแส

เมื่อได้แรงดัน v_d, v_q จากส่วนนี้แล้วก็จะนำไปแปลงให้อยู่ในแกน $\alpha-\beta$ จะได้แรงดัน v_α, v_β ออกมา จากนั้นก็จะนำแรงดัน v_α, v_β นำสัญญาณที่ได้สร้างสัญญาณ SPWM ไปขับนำสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

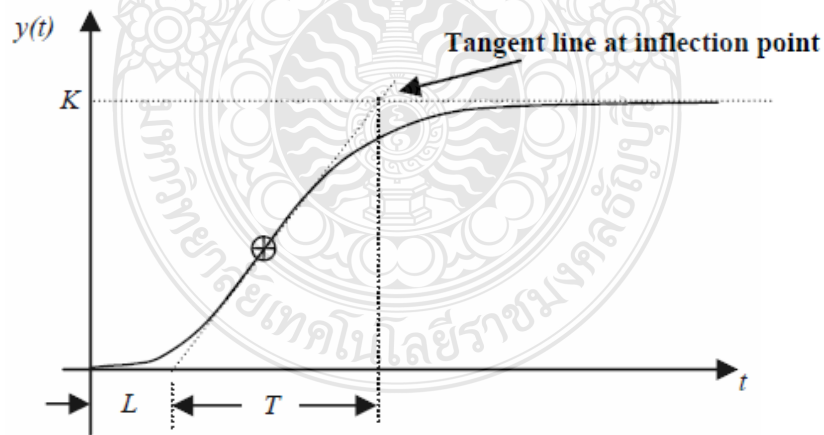
3.3.6 การออกแบบค่า PI โดยเทคนิคการหาพารามิเตอร์ควบคุมแบบ Ziegler – Nicole

เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PI โดยใช้แบบ Ziegler – Nicole ภายใต้อะบบการของระบบแบบลูปปิด (Closed loop) วิธีนี้สามารถหาค่า k_p และ k_i โดยการปรับหาค่า L และ T จากกราฟการตอบสนองของวงจรที่สร้างขึ้นหรือต้องการควบคุม (รูปที่ 3.14) เพื่อนำมาแทนค่าในตารางที่ 3.1 [14]

- เมื่อ K_p = Proportional Gain
 K_i = Integral Gain
 K_d = Derivative Gain
 T_i = Reset time
 T_d = Rate time or derivative time

ตารางที่ 3.1 การปรับค่าโดยวิธี Ziegler – Nicole

PID TYPE	K_p	$T_i = K_p / K_i$	$T_d = K_d / K_p$
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

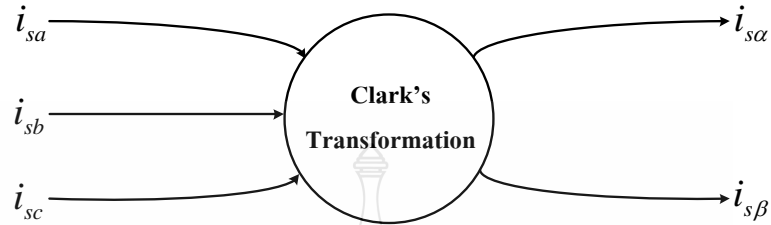


รูปที่ 3.14 ผลการตอบสนองแบบ Ziegler – Nicole

3.4.7 การแปลงแบบคาร์ค (Clark's Transformation)

คือการแปลงจากระบบสามแกน (a, b, c) เป็นสองแกน ($\alpha - \beta$) มีลักษณะแสดงดังในรูปที่

3.15 [15]

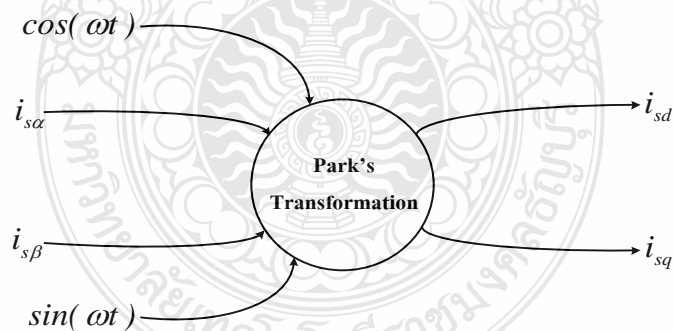


รูปที่ 3.15 ไคอะแกรมการแปลงแบบคาร์ค

$$i_\alpha = i_a \quad (3.6)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(2i_b + i_c) \quad (3.7)$$

3.4.8 การแปลงแบบปาร์ค (Park's Transformation)



รูปที่ 3.16 ไคอะแกรมการแปลงแบบปาร์ค

$$i_d = i_\alpha \cos(\omega t) + i_\beta \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

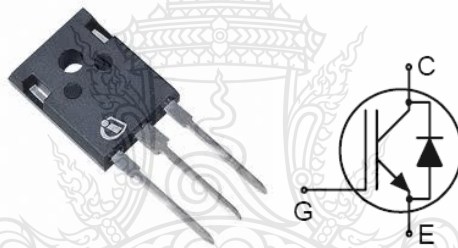
$$i_q = -i_\alpha \sin(\omega t) + i_\beta \cos(\omega t) \quad (3.9)$$

3.5 การออกแบบส่วนการแปลงผันพลังงาน

3.5.1 การออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าสลับเป็นแรงดันไฟฟ้าตรงแบบ 12 พัลส์

ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแล้วผ่านการกรองจากวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวงจรจะประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 12 ตัว ซึ่งในที่นี้จะใช้ไอจีบีทีที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือการมอดูเลตแบบปรับความกว้างของพัลส์เนื่องจากไอจีบีทีมีข้อดีในด้านความเร็วในการสวิตช์ที่สูงเกือบเท่ามอสเฟตและมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถขับไอจีบีทีที่มีความถี่สูงและเกิดความร้อนน้อยในการทำงานเนื่องมาจากกำลังการสูญเสียที่ตกคร่อมบนตัวไอจีบีทีมีค่าต่ำ

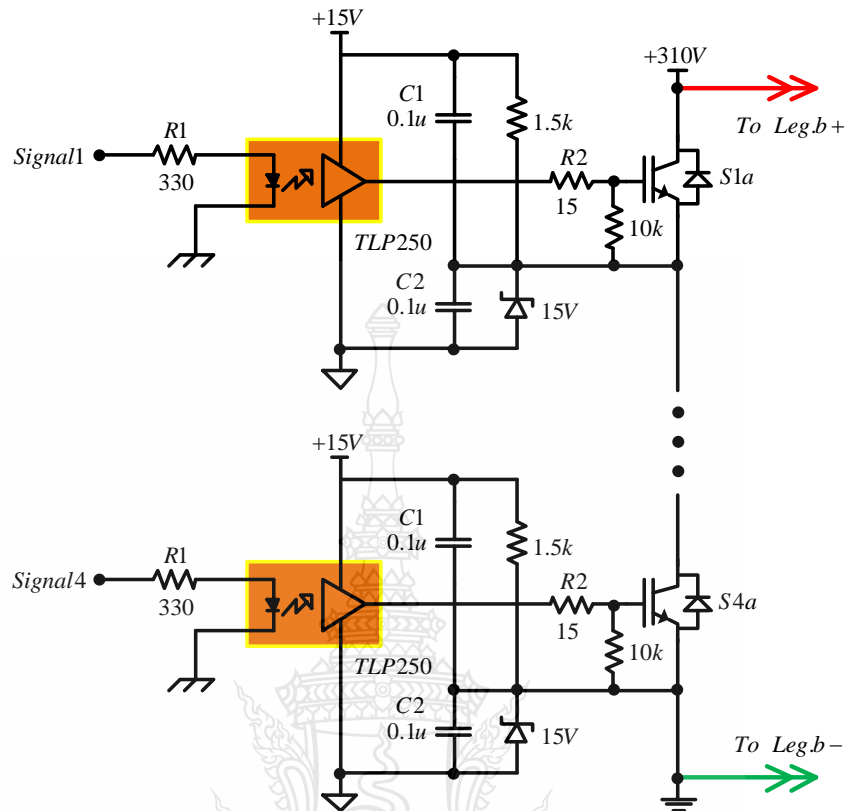
ในส่วนของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นใช้ไอจีบีทีของ Infineon รุ่น SKW30N60 ขนาด 600 โวลต์, 30 แอมแปร์ เป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่ง แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไอจีบีทีรุ่น SKW30N60

3.5.2 การออกแบบวงจรภาคขับเคลื่อนสวิตช์ไอจีบีที

การออกแบบวงจรขับเคลื่อนสวิตช์ไอจีบีทีจะใช้ Opto Isolator เบอร์ TLP250 เพื่อแยกแรงดันไฟฟ้าต่ำกับแรงดันไฟสูงออกจากกัน โดย R_2 ในรูปที่ 3.18 จะใช้ค่าอยู่ระหว่าง 10 โอห์ม ถึง 100 โอห์ม เพื่อป้องกันการเกิดการแกว่งของสัญญาณที่ขาเกตของไอจีบีที ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า R_2 เท่ากับ 39 โอห์ม เนื่องจากสัญญาณที่ด้านออกของ Opto Isolator เป็นสัญญาณพัลส์ PWM ที่ประกอบด้วยฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณไซน์หลายความถี่ซึ่งอาจทำให้เกิดการออสซิลเลทได้จึงจำเป็นต้องใส่ตัวต้านทาน R_2 เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการแกว่งของสัญญาณ



รูปที่ 3.18 วงจรภาคขับสวิตช์ไอจีบีที

การออกแบบ R_1 กำหนดให้กระแส (I_F) ที่ไหลผ่าน TLP250 มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ และแรงดัน V_F เท่ากับ 1.6 โวลต์ โดยที่ V_{CC} มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ จะได้ว่า

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} \quad (3.10)$$

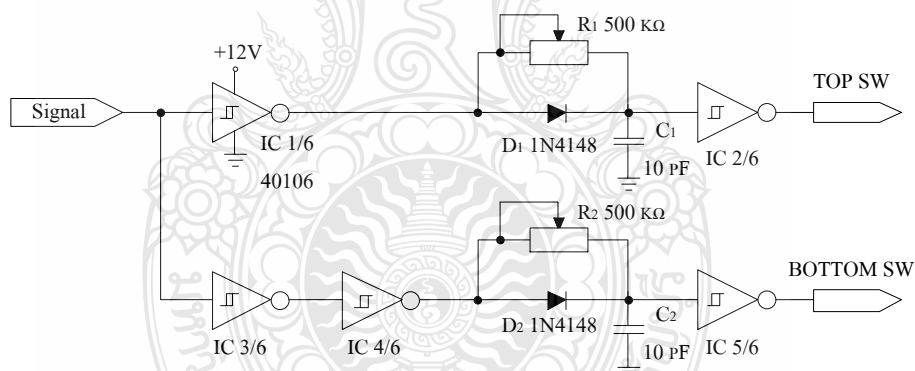
$$= \frac{5V - 1.6V}{10mA}$$

$$= 340 \text{ โอห์ม}$$

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า 330 โอห์ม โดยจะได้กระแสมีค่าประมาณ 10.3 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งวงจรยังสามารถทำงานได้

3.5.3 การออกแบบวงจรกลับสัญญาณและหน่วงเวลา

เนื่องจากพอร์ตสัญญาณที่ออกจาก dSPACE มีจำนวนจำกัด ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณที่ได้จาก dSPACE ไปทำการกลับสัญญาณ เพราะในวงจรนั้นสัญญาณควบคุมของสวิตช์ไอจีบีทีที่อยู่ในกิ่งเดียวกันจะมีสัญญาณที่มีเฟสตรงข้ามอยู่ 2 สัญญาณ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ไอซี CMOS เบอร์ 40106 ซึ่งเป็น Schmitt Trigger NOT GATE และส่งต่อไปยังวงจรปรับเวลาไร้ผลสนองเป็นวงจรหน่วงเวลาโดยใช้ R C D ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์สวิตช์กำลังซึ่งอยู่ในสาขาเดียวกันทำงานพร้อมกัน ทำให้เกิดการลัดวงจรได้ สัญญาณที่ผ่านจาก NOT GATE 1/6 เป็นระดับลอจิก 1 ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง ผ่านไปยัง NOT GATE 2/6 ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นลอจิก 0 ขณะเดียวกันตัวเก็บประจุก็จะทำการเก็บประจุ ตัวเก็บประจุก็จะค่อยๆ คายประจุผ่านทาง R แรงดันที่อินพุตของแรงดันของ NOT GATE 2/6 ก็ค่อยๆ ลดลง จนถึงอินพุตระดับต่ำของ Schmitt Trigger NOT GATE ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4 V เอาต์พุต ของไอซี 1/6 จะเปลี่ยนสถานะเป็นลอจิก 1 สัญญาณที่ได้จะมีการหน่วงเวลาออกไป ดังรูปที่ 3.19 โดยในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดช่วงเวลาไร้ผลสนองเท่ากับ 100 ns - 10 μ s โดยค่าเวลาไร้ผลสนองสามารถหาได้จากสมการคายประจุของตัวเก็บประจุดังสมการที่ 3.11



รูปที่ 3.19 วงจรกลับสัญญาณและหน่วงเวลา

$$U_c = U_{in} \left(1 - e^{-\left(\frac{T}{RC}\right)} \right) \quad (3.11)$$

เมื่อ U_c คือ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเท่ากับค่าแรงดันอินพุตระดับต่ำของ Schmitt Trigger

NOT GATE มีค่าเท่ากับ 4V

U_{in} คือ แรงดันอินพุต 12 V

T คือ ค่าเวลาไร้ผลสนองที่ต้องการ

จากสมการที่ (3.11) หากกำหนดค่า C สามารถหาค่า R ได้ดังนี้

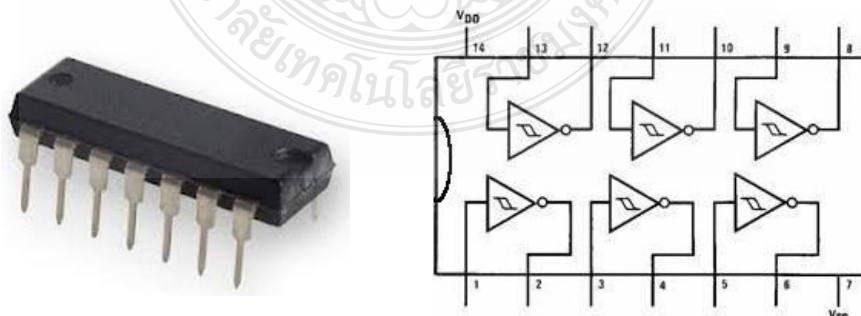
$$R = \frac{-T}{C \ln\left(\frac{U_{in} - U_c}{U_{in}}\right)} \quad (3.12)$$

แทนค่าลงไปในสมการที่ (4-4) โดยกำหนดให้ T เท่ากับ 200 ns และ C เท่ากับ 10 pF จะได้ว่า

$$R = \frac{-(200 \times 10^{-9})}{(10 \times 10^{-12}) \ln\left(\frac{12-4}{12}\right)} = 49.326 \text{ k}\Omega$$

ในงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า C เท่ากับ 10 pF และความต้านทานปรับค่าได้ (VR) เท่ากับ 500 k Ω

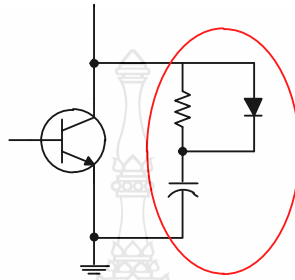
รูปที่ 3.19 วงจรกลับสัญญาณและหน่วงเวลาที่สร้างขึ้นของสัญญาณขั้วนำเกตด้านบน (Top Switch) และสัญญาณขั้วนำเกตด้านล่าง (Bottom Switch) เพื่อใช้ในการกลับสัญญาณควบคุมก่อนที่จะนำไปเข้าวงจรจับสวิตช์ไอจีบีทีต่อไป



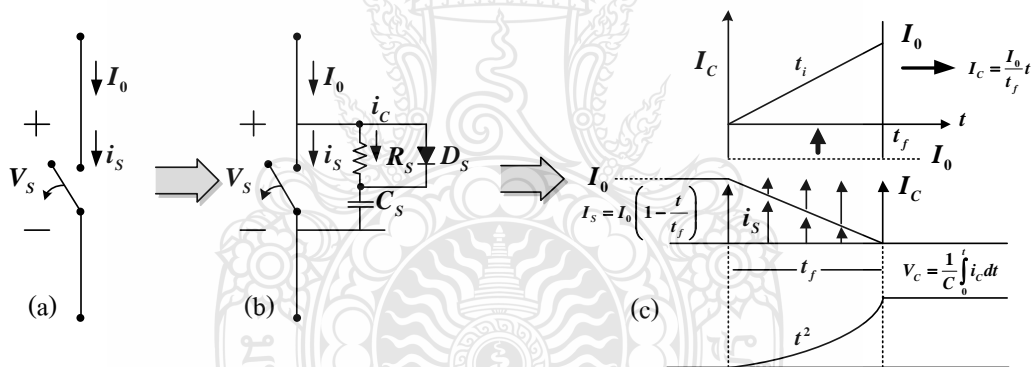
รูปที่ 3.20 ไอซีเบอร์ CD40106BE (NOT Gate)

3.5.4 การออกแบบวงจรสแน็บเบอร์

วงจรสแน็บเบอร์ (Snubber Circuit) เป็นวงจรที่ช่วยลดการเกิดแรงดันเกิน (Over Voltage) คร่อมสวิตช์ขณะเริ่มนำและเริ่มหยุดนำกระแสในวงจรโหลด R-L ดังรูปที่ 3.21 แสดงการต่อวงจรสแน็บเบอร์[11]



รูปที่ 3.21 วงจรสแน็บเบอร์



รูปที่ 3.22 การแบ่งกระแส I_o เป็น I_s และ I_c

- 1) การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุของสแน็บเบอร์[16]

จากรูปที่ 3.22(a) จะเห็นได้ว่ากระแสมีทิศทางไหลทางเดียวตลอด เมื่อสวิตช์ทำงานในลักษณะตัดหรือต่อวงจรจะทำให้กระแสเกิดการหยุดไหลในทันทีทันใดจึงทำให้เกิดแรงดันสไปค์จากการที่กระแสเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด อันเป็นผลมาจากค่า L ในแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงต้องสร้างเส้นทางไหลใหม่ให้กับกระแส ดังในรูปที่ 3.22(b) เมื่อสวิตช์จากออกแล้วกระแส (I_o) ก็ยังไหลไปในทิศทางเดิมแล้วค่อยๆ ลดลง ดังในรูปที่ 3.22(c) จะเห็นได้ว่ามีทางให้กระแสไหลได้สองทางโดยการใส่วงจร $R_s C_s$ สแน็บเบอร์เพิ่มเข้าไปในวงจร จากนั้นจึงต้องหาค่าของ $R_s C_s$ สแน็บเบอร์ที่

ใส่เข้าไป โดยเริ่มจากการคำนวณหาที่มาของสมการหาค่า C_s ของสแน็บเบอร์ จากลักษณะการแบ่งกระแส I_o เป็น I_s และ I_c จากรูปที่ 3.22(c) เมื่อแรงดันที่ตกคร่อม C_s มีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย กระแสที่ไหลผ่าน C_s จะหยุดไหลดังนั้น V_c เท่ากับ $V_s(V_d)$ ดังสมการที่ 3.13

$$V_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} i_c dt \quad (3.13)$$

$$V_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} I_o \frac{t}{t_f} dt \quad (3.14)$$

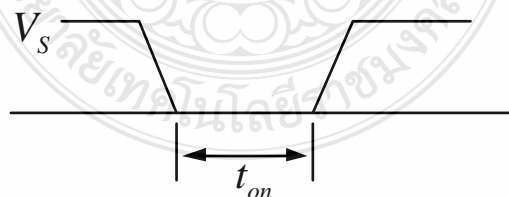
ดังนั้นจะได้สมการ C_s ดังนี้

$$C_s = \frac{I_o t_f}{2V_s} \quad (3.15)$$

เมื่อ t_f คือ เวลาเริ่มหยุดนำกระแสของสวิตช์ แทนค่ากระแสแรงดันเข้าและเวลาในการหยุดนำกระแสของสวิตซ์ลงในสมการที่ 3.15 จะได้

$$C_s = \frac{15 \times 440 \times 10^{-9}}{2 \times 300} = 11 \text{ นาโนฟารัด}$$

2) การคำนวณหาความต้านทานของสแน็บเบอร์



รูปที่ 3.23 ช่วงเวลาที่สวิตซ์ต่อวงจร

ในรูปที่ 3.23 ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส (t_{on}) จะต้องมากพอที่จะให้ตัวเก็บประจุ สนับเบอร์คายประจุได้หมดก่อนที่สวิตช์จะหยุดนำกระแสในครั้งต่อไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเวลาที่ใช้ในการคายประจุจะมีค่าประมาณ 5τ ดังสมการที่ 3.16

$$t_{on} > 5R_S C_S \quad (3.16)$$

จากสมการที่ 3.16 จะได้ว่า

$$R_S < \frac{t_{on}}{5C_S} \quad (3.17)$$

t_{on} คือ ช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ที่วัฏจักรงานร้อยละ 50

แทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ 3.17 จะได้

$$R_S < \frac{2.5 \times 10^{-5}}{5 \times 7.33 \times 10^{-9}} < 682.13 \text{ โอห์ม}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า R_S ได้จากสมการ 3.18

$$R_S = \frac{5V_S}{I_o} \quad (3.18)$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ 3.16 จะได้

$$R_S = \frac{5 \times 300}{15} = 100 \text{ โอห์ม}$$

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไอจีบีทีขณะเริ่มหยุดนำกระแสหาได้จากสมการที่ 3.19

$$P_Q = \frac{1}{2} I_o V_S (t_s + t_f) f_s \quad (3.19)$$

$$P_Q = \frac{1}{2} \times 15 \times 300 \times ((100 + 440) \times 10^{-9}) \times 20 \times 10^3 = 24.3 \text{ วัตต์}$$

เมื่อใส่วงจรสับเบอร์แล้ว ที่ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไอจีบีที่จะหาได้จากสมการที่ 3.20 ซึ่งเท่ากับ

$$P_Q = \frac{I_0^2 t_f^2 f_s}{24C} \quad (3.20)$$

$$P_Q = \frac{15^2 \times (440 \times 10^{-9})^2 \times 20 \times 10^3}{24 \times 11 \times 10^{-9}} = 3.3 \text{ วัตต์}$$

ทั้งนี้ตัวเก็บประจุจะคายประจุผ่านทางตัวต้านทานในวงจรสับเบอร์ขณะไอจีบีที่เริ่มนำกระแส ซึ่งพลังงานสะสมที่ตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการที่ 3.21

$$W = \frac{1}{2} CV_s^2 \quad (3.21)$$

$$W = \frac{1}{2} \times 11 \times 10^{-9} \times 300^2 = 4.95 \times 10^{-4} \text{ วัตต์}$$

พลังงานนี้ส่วนใหญ่จะถูกถ่ายเทไปยังตัวต้านทานของวงจรสับเบอร์ขณะไอจีบีที่นำกระแส ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานในวงจรสับเบอร์นี้หาได้จากสมการที่ 3.22

$$P_R = \frac{CV_s^2}{2T_s} = \frac{1}{2} CV_s^2 f_s \quad (3.22)$$

$$P_R = \frac{1}{2} \times 11 \times 10^{-9} \times 300^2 \times 20 \times 10^3 = 9.9 \text{ วัตต์}$$

จะเห็นว่าค่าตัวเก็บประจุสามารถใช้ลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ได้แต่ก็เป็น การสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานได้เช่นกัน

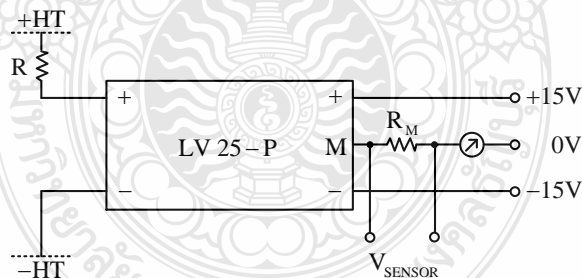
3.5.5 การออกแบบส่วนการตรวจวัดสัญญาณ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ LEM LV25-P เป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณแรงดันโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Hall Effect) การวัดแรงดันจะวัดจากกระแสที่มีสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันผ่านความต้านทานภายนอก (R) ที่ต่ออนุกรมกับวงจรทางด้านปฐมภูมิของ LV25-P ดังรูปที่ 3.24 โดยกระแสที่ไหลผ่านวงจรปฐมภูมิควรมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ เพื่อความแม่นยำในการวัดของ LV25-P อัตราส่วนของกระแสทางด้านทุติยภูมิต่อกระแสทางด้านปฐมภูมิต้องมีค่าเท่ากับ 2.5

ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำ LV25-P มาวัดแรงดัน 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ามีการกระเพื่อม ดังนั้นจึงออกแบบให้ LV25-P สามารถอ่านแรงดันได้ 250 โวลต์ ซึ่งความต้านทาน R สามารถหาได้จากสมการ 3.23

$$R = \frac{V_{grid}}{10mA} \quad (3.23)$$

จะได้ค่าความต้านทาน R เป็น 25 กิโลโอห์ม และสามารถทนกำลังสูญเสียได้ 2.5 วัตต์ จากอัตราส่วนของกระแสทางด้านทุติยภูมิต่อกระแสทางด้านปฐมภูมิจะใช้ตัวต้านทานสำหรับอ่านค่าแรงดัน (R_M) เท่ากับ 200 โอห์ม ซึ่งจะให้ค่าแรงดันด้านออกเท่ากับ ± 5 โวลต์ โดยสัญญาณแรงดันที่ได้นี้จะนำไปใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงรูปคลื่นไซน์เพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป



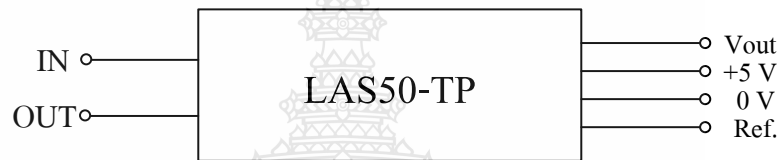
รูปที่ 3.24 การวัดสัญญาณของ LV25-P

เช่นเดียวกับการวัดแรงดันที่บัสไฟตรงนั้นสามารถใช้ตัววัดสัญญาณ LV25-P ได้เหมือนกัน ดังนั้นสามารถหาความต้านทาน R ที่แรงดันบัสไฟตรง 300 โวลต์ ได้ดังนี้

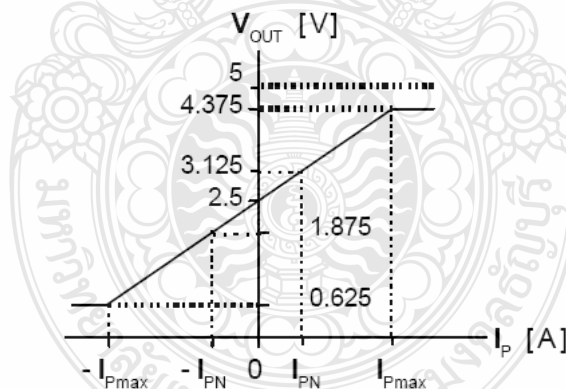
$$R_3 = \frac{V_{dc}}{10mA} = \frac{300}{10mA} = 30 \text{ กิโลโอม์}$$

ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทาน R เป็น 30 กิโลโอม์ และสามารถทนกำลังสูญเสียได้ 2.5 วัตต์ จากอัตราส่วนของกระแสทางด้านทุติยภูมิต่อกระแสทางด้านปฐมภูมิจะใช้ตัวต้านทานสำหรับอ่านค่าแรงดัน (R_M) เท่ากับ 200 โอม์ ซึ่งจะให้ค่าแรงดันด้านออกเท่ากับ ± 5 โวลต์เช่นกัน โดยสัญญาณแรงดันที่ได้นี้จะนำไปใช้เป็นสัญญาณรูปคลื่นเพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป

นอกจากนี้ในส่วนของการวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้านั้นจะใช้ Current transducer รุ่น LEM LAS50-TP ดังรูปที่ 3.25 ซึ่งจะมีพิสัยการวัดที่ 0 ถึง 50 แอมป์ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.26

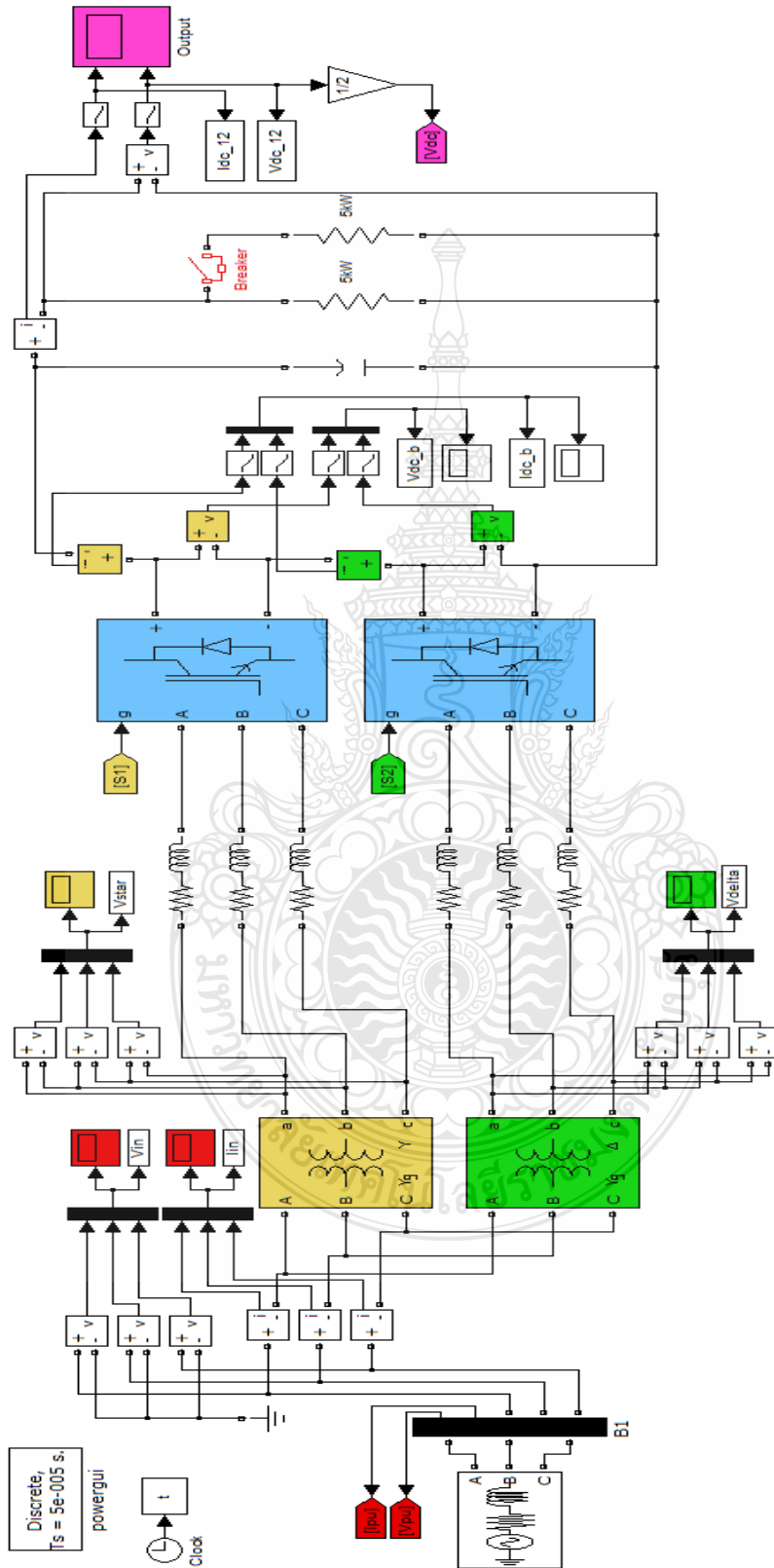


รูปที่ 3.25 การวัดสัญญาณของ LAS50-TP

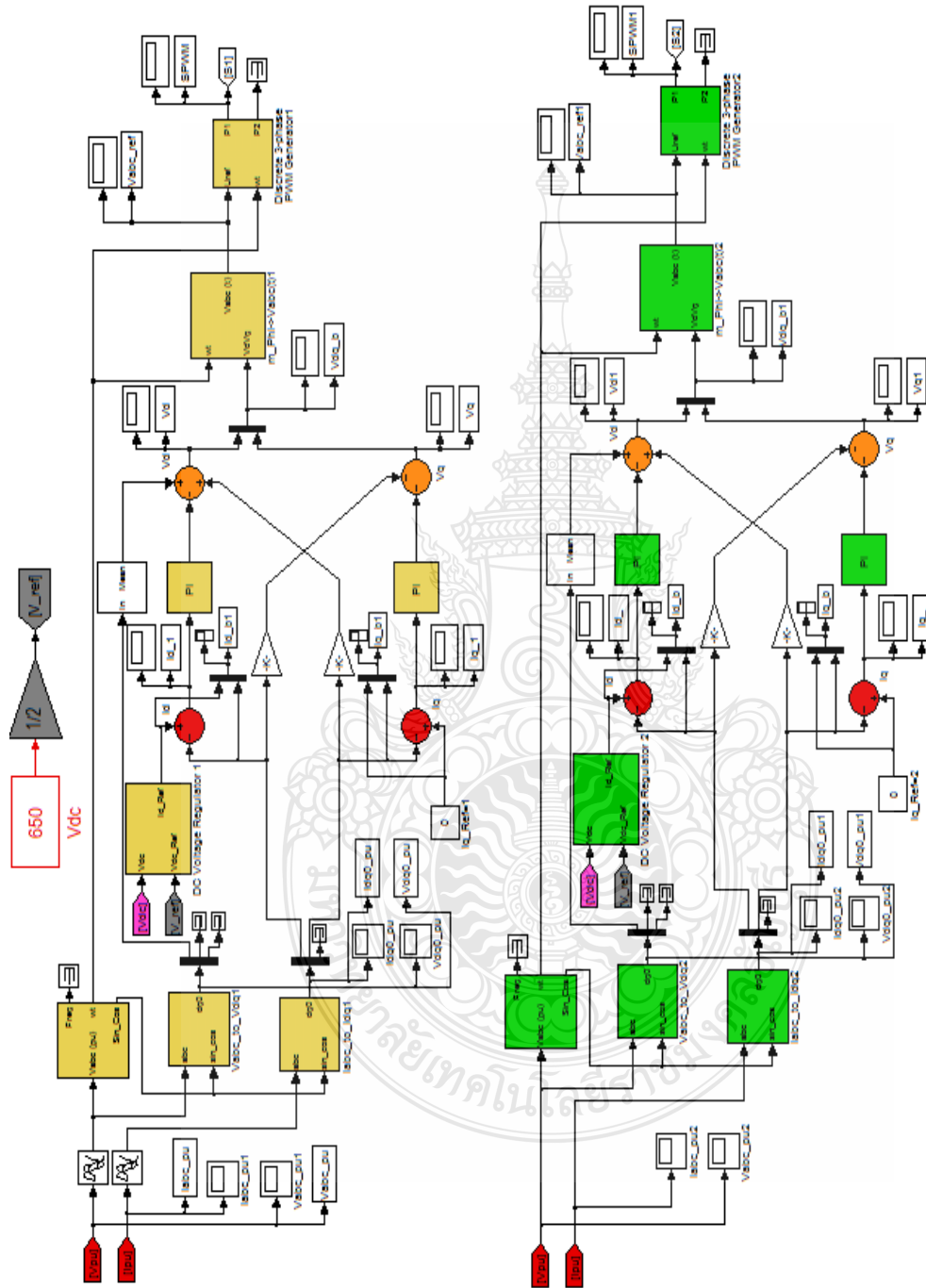


รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านออกกับกระแสด้านเข้า

3.6 การจำลองการทำงานในโปรแกรม Matlab/Simulink



รูปที่ 3.27 แบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ในโปรแกรม Matlab/Simulink ส่วนวงจรกำลัง

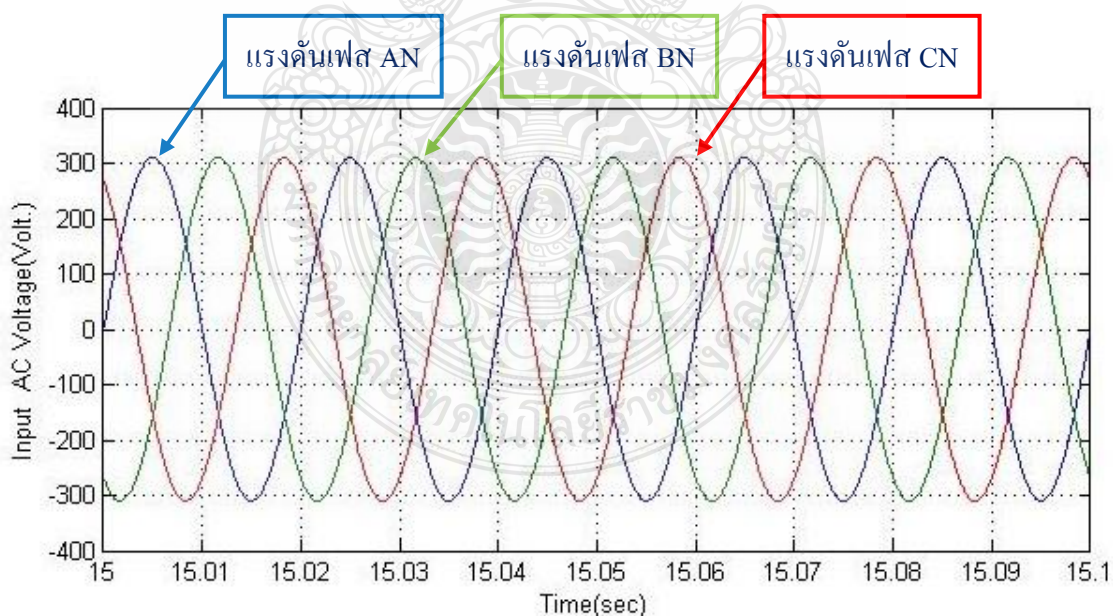


รูปที่ 3.28 แบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ในโปรแกรม Matlab/Simulink ส่วนวงจรควบคุม

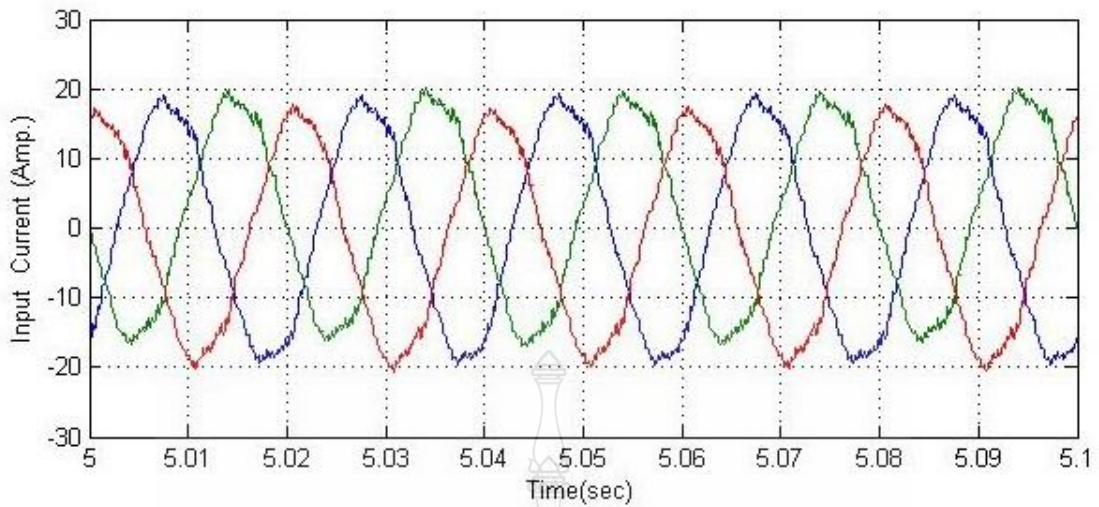
การจำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink แสดงแบบจำลองเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 3.27 และ 3.28 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงานดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลอง

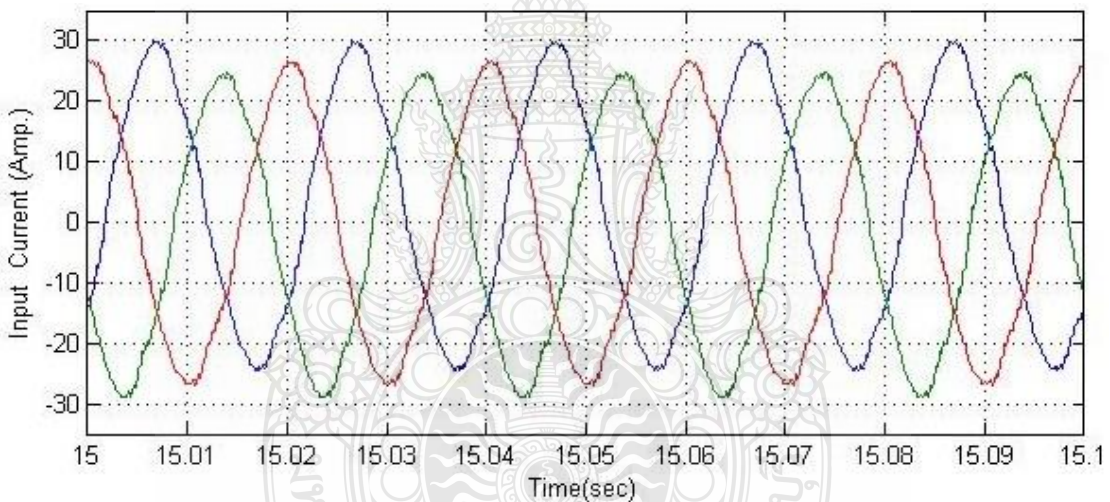
พารามิเตอร์	หน่วย
แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า(V_{ac})	380 โวลต์
ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า	10 กิโลโวลต์แอมป์
ตัวเก็บประจุ	1,650 ไมโครฟารัด
แรงดันไฟฟ้าด้านออก(V_{dc})	650 โวลต์
ความถี่ในการสวิตซ์	2.5 กิโลเฮิรตซ์
ค่า K_p, K_i ส่วนของควบคุมแรงดัน	$K_p = 0.015$, $K_i = 1.6$
ค่า K_p, K_i ส่วนของควบคุมกระแส	$K_p = 0.3$, $K_i = 20$



รูปที่ 3.29 แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

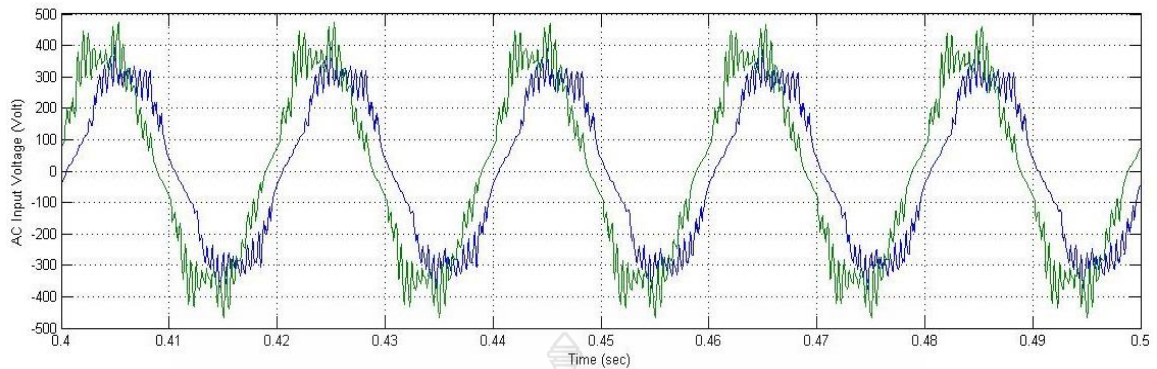


รูปที่ 3.30 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่มีโหลดขนาด 5 กิโลวัตต์



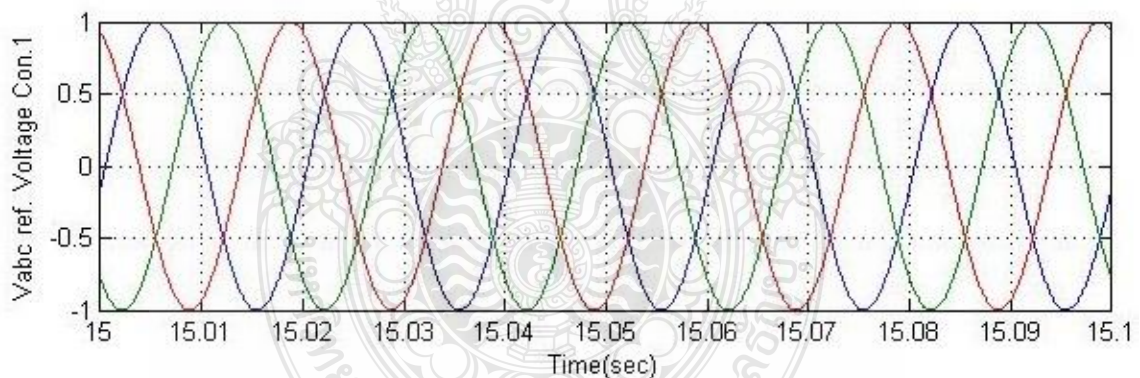
รูปที่ 3.31 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่มีโหลดขนาด 10 กิโลวัตต์

รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยมีแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเมื่อวัดเทียบกับกราวด์ประมาณ 310 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 3.29 และกระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่มีโหลดขนาด 5 กิโลวัตต์ จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดรูปที่ 3.30 และกระแสด้านเข้าที่มีโหลดขนาด 10 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 3.31 โดยกระแสมีค่าประมาณ 30 แอมป์ นอกจากนี้ลักษณะรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านเข้าจะมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก เนื่องจากในวงจรมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆที่มีค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุทางไฟฟ้าจึงมีการนำกระแสไฟฟ้าไปใช้งานทำให้กระแสไฟฟ้าด้านเข้ามีลักษณะรูปคลื่นที่ไม่ราบเรียบ



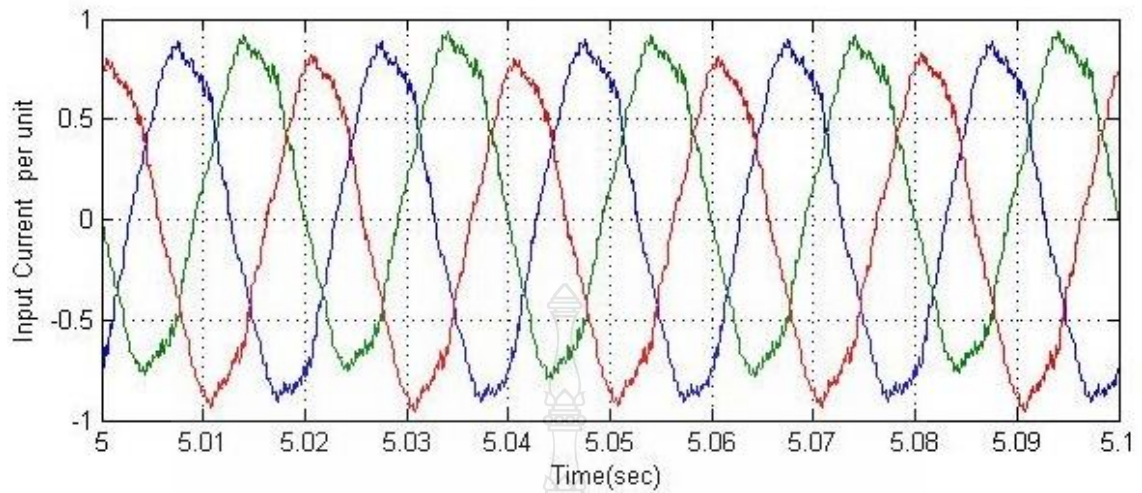
รูปที่ 3.32 แรงดันด้านออกของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดสตาร์และเดลต้าของเฟส A

รูปคลื่นจากรูปที่ 3.32 เป็นแรงดันด้านออกของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดสตาร์และเดลต้าของเฟส A เมื่อเทียบกับนิวตรอน แรงดันที่ได้ประมาณ 310 โวลต์ โดยจะมูมเฟสต่างกันอยู่ 30 องศา เพื่อป้อนให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ แต่ละชุด และจะสังเกตเห็นว่ารูปคลื่นไม่เรียบ เนื่องจากในวงจรมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆที่มีค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุทางไฟฟ้าจึงมีการนำกระแสไฟฟ้าไปใช้งานทำให้กระแสไฟฟ้าด้านเข้ามีลักษณะรูปคลื่นที่ไม่ราบเรียบ

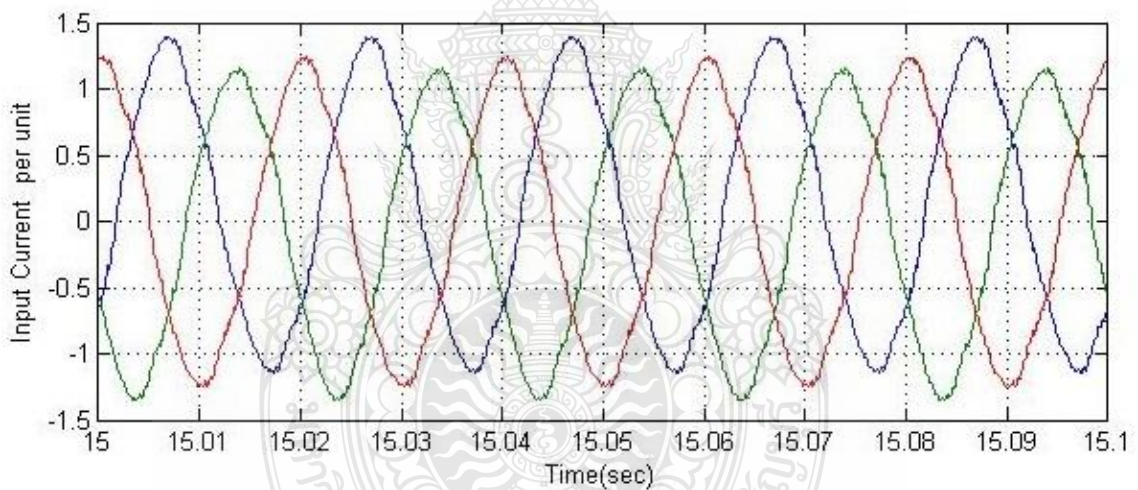


รูปที่ 3.33 แรงดันไฟฟ้าเฟส A B และ C ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิตเพื่อใช้ในวงจรควบคุม

รูปคลื่นรูปที่ 3.33 เป็นแรงดันไฟฟ้าเฟส A B และ C ที่แปลงจากค่าแรงดันไฟฟ้าปกติคือประมาณ 310 โวลต์ เมื่อเทียบเฟสกับนิวตรอนให้มาอยู่ในรูปของหน่วยเปอร์ยูนิตเพื่อง่ายต่อการควบคุม เช่นเดียวกับกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.34 และ 3.35 ที่เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฟส A B และ C ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิตเพื่อใช้ในวงจรควบคุมที่โหลด 5 kW และ 10 kW โดยใช้ทั้งคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 และ 2

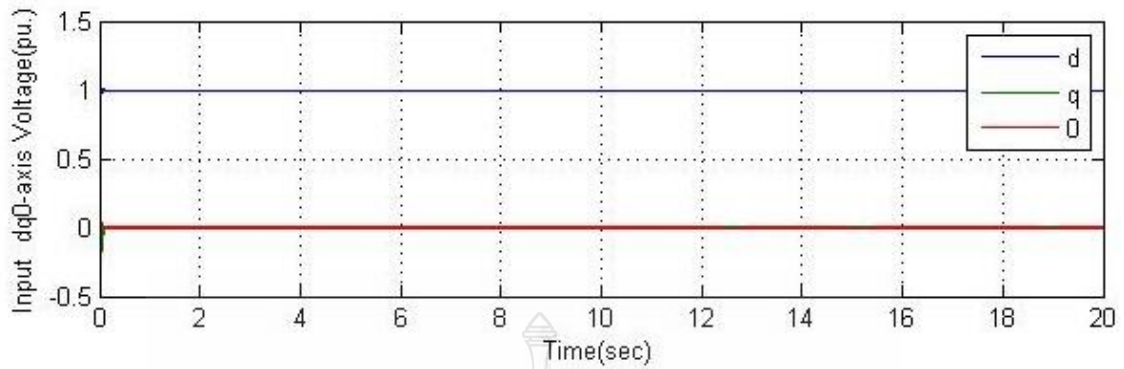


รูปที่ 3.34 กระแสไฟฟ้าเฟส A B และ C ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิตเพื่อใช้ในวงจรควบคุมที่โหลด 5 kW

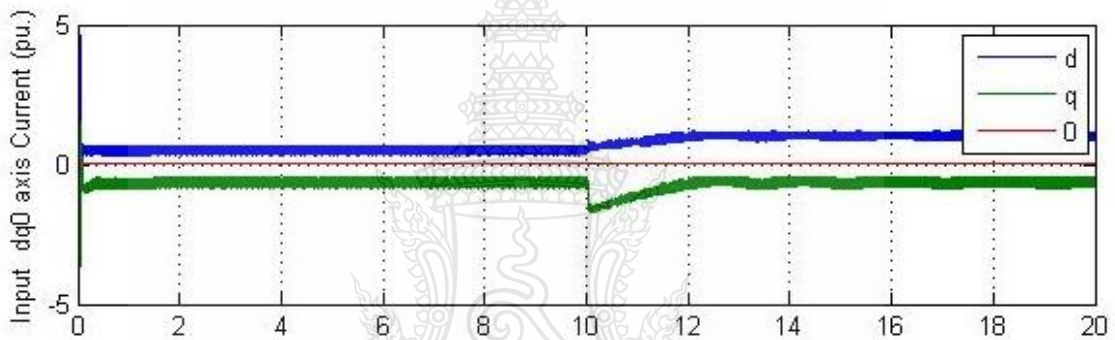


รูปที่ 3.35 กระแสไฟฟ้าเฟส A B และ C ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิตเพื่อใช้ในวงจรควบคุมที่โหลด 10 kW

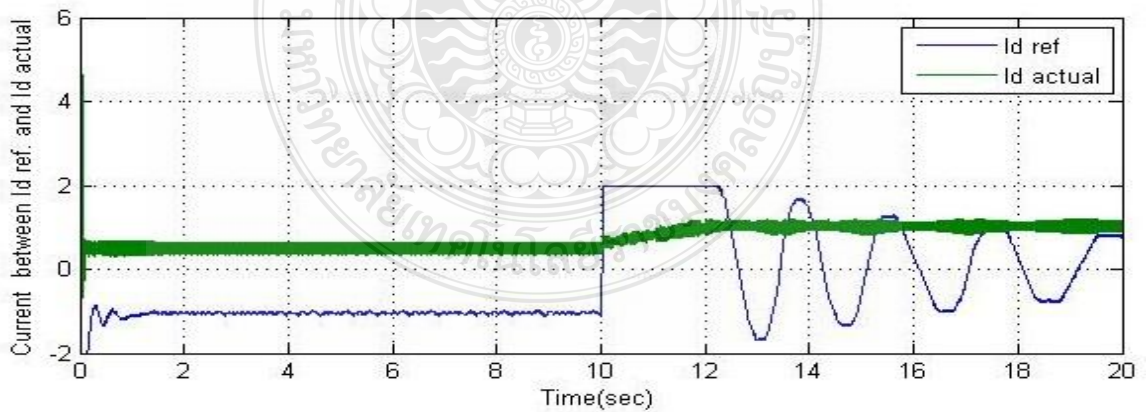
จากนั้นนำสัญญาณรูปคลื่นรูปที่ 3.33 , 3.34 และ 3.35 เป็นแรงดันและกระแสไฟฟ้าเฟส A B และ C ที่เป็นค่าเปอร์ยูนิต นำไปแปลงแกนจากแกนนี้ A B และ C ไปสู่แกนหมุน dq0 เพื่อใช้ในการควบคุมเป็น V_{dq} และ I_{dq} แสดงดังรูปที่ 3.36 และ 3.37 โดยใช้ทั้งคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 และ 2



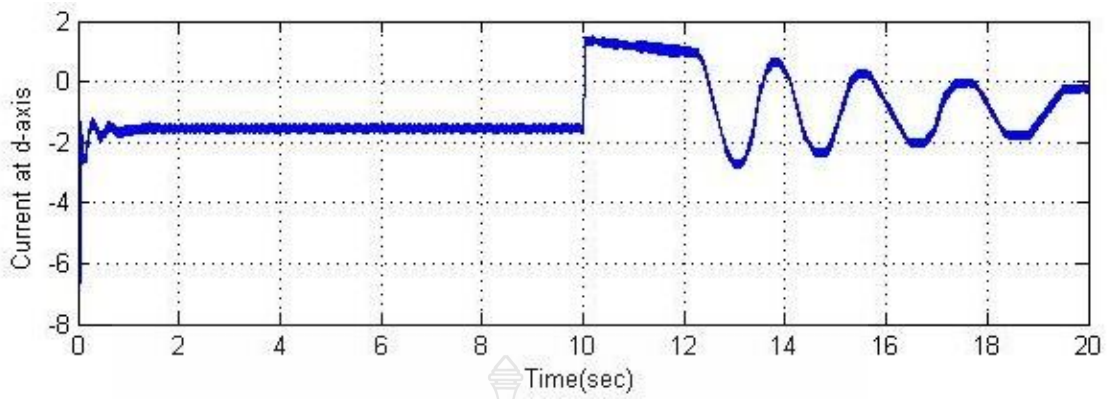
รูปที่ 3.36 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของแกนหมุน V_{dq0}



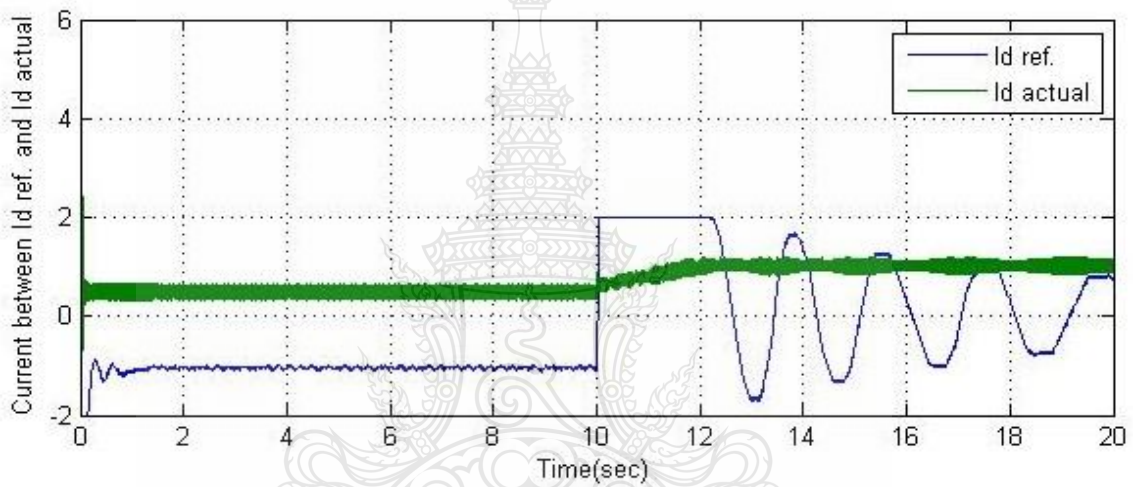
รูปที่ 3.37 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของแกนหมุน I_{dq0}



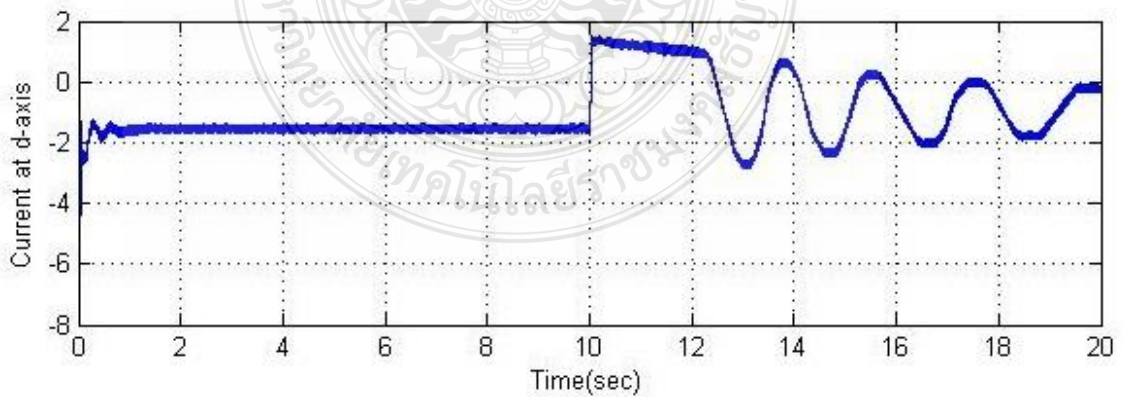
รูปที่ 3.38 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่าง Id Ref. กับ Id actual เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงวินาทีที่ 10 (คอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1)



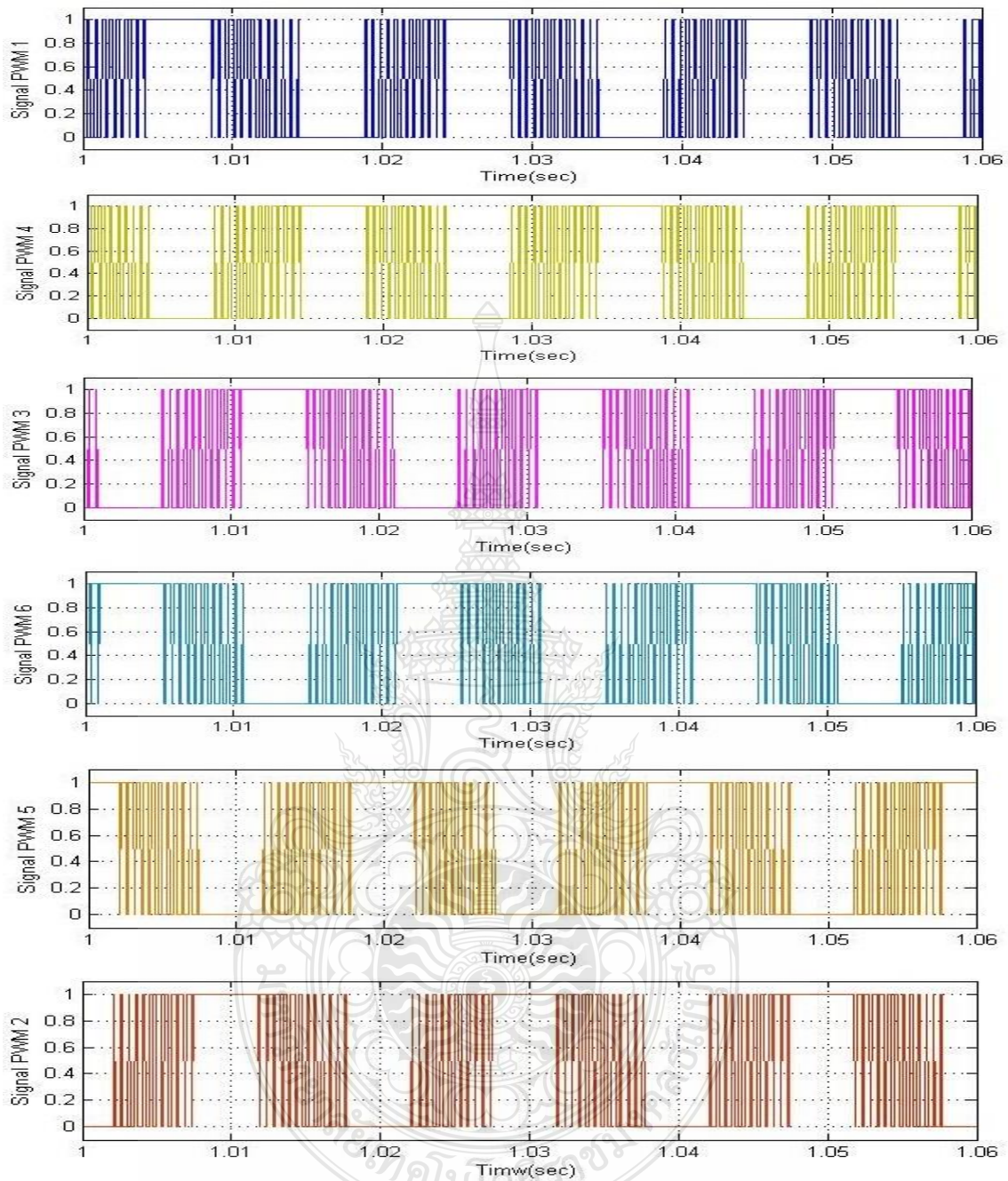
รูปที่ 3.39 กระแสคำสั่งแกน I_d ของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 โดย $I_q = 0$



รูปที่ 3.40 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่าง Id Ref. กับ Id actual เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงวินาทีที่ 10 (คอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2)



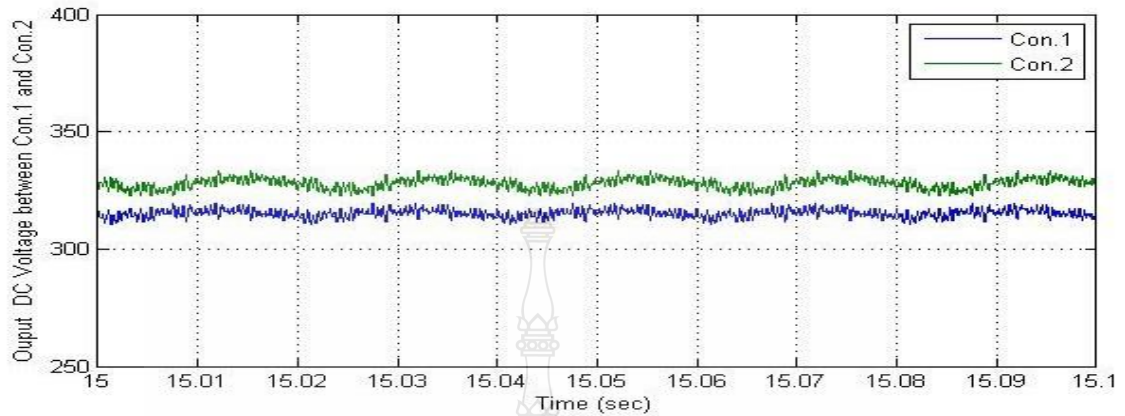
รูปที่ 3.41 กระแสคำสั่งแกน I_d ของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 โดย $I_q = 0$



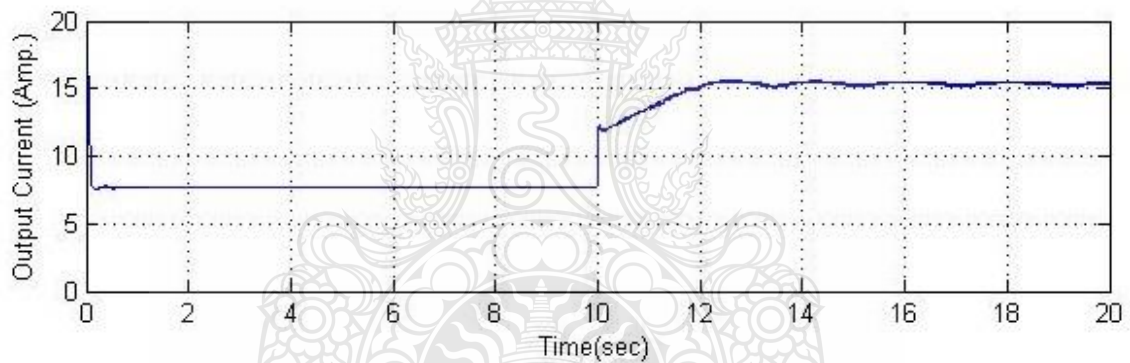
รูปที่ 3.42 สัญญาณ PWM ที่ใช้ขับอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่ความถี่ 2.5 กิโลเฮิรตซ์(คอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1)

สำหรับการจำลองการทำงานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ จะใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมได้สัญญาณดังรูปที่ 3.42 (คอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1) โดยสัญญาณของชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 จะมีรูปแบบเหมือนกันแต่จะมีมุมต่างเฟสกันอยู่ 30 องศา เพื่อควบคุมให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกชุดละ 325 โวลต์ ดังรูปที่ 3.43 มาต่ออนุกรม

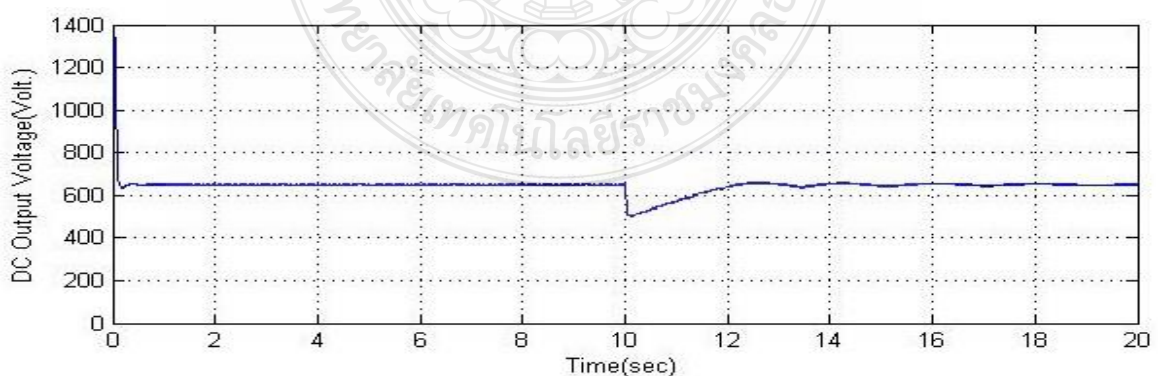
กันให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกคงที่ 650 โวลต์ สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 10 กิโลวัตต์



รูปที่ 3.43 สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเทียบระหว่างคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 และ 2

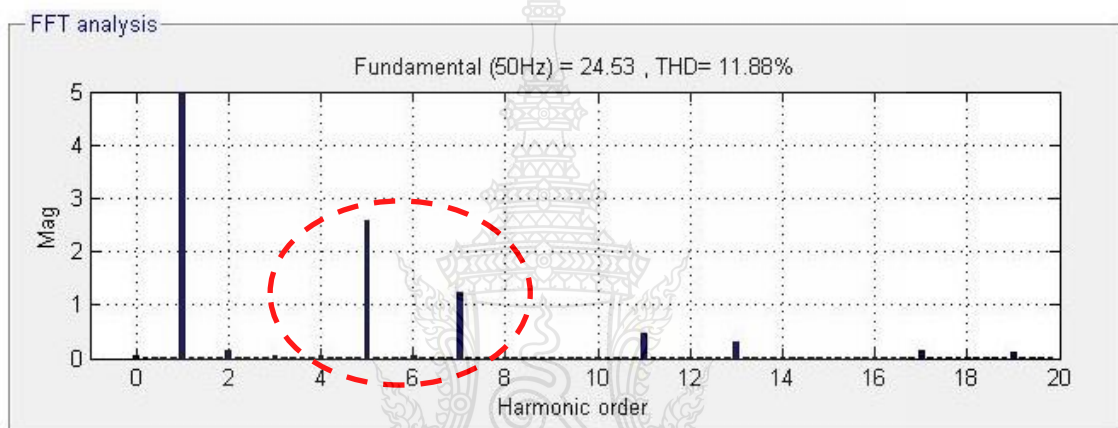


รูปที่ 3.44 กระแสไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงวินาทีที่ 10

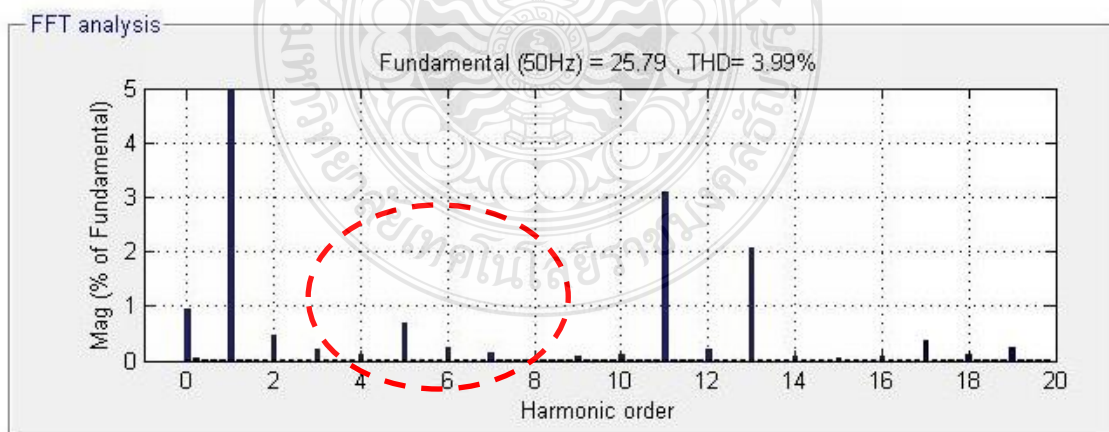


รูปที่ 3.45 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงวินาทีที่ 10

จากรูปที่ 3.44 และ 3.45 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ เมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงวินาทีที่ 10 จากโหลดร้อยละ 50 (5 กิโลวัตต์) เป็นร้อยละ 100 (10 กิโลวัตต์) ระบบสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้คงที่ และเมื่อเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ใน โครงสร้างวงจรแบบ 6 พัลส์กับ 12 พัลส์ พบว่าโครงสร้างวงจรแบบ 12 พัลส์ มีค่ากระแสฮาร์มอนิกส์รวม (THD) ร้อยละ 3.99 ซึ่งน้อยกว่า แบบ 6 พัลส์ ที่มีค่ากระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) ร้อยละ 11.88 ดังรูปที่ 3.46 และ 3.47



รูปที่ 3.46 กระแสฮาร์มอนิกส์ของ โครงสร้างวงจรแบบ 6 พัลส์ (การจำลอง)



รูปที่ 3.47 กระแสฮาร์มอนิกส์ของ โครงสร้างวงจรแบบ 12 พัลส์ (การจำลอง)

3.7 สรุปการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ และผลการจำลอง

จากการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กและผลการจำลองนั้น สรุปได้ว่า ส่วนประกอบหลักๆ ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนวงจรกำลังและส่วนการควบคุม ซึ่งส่วนวงจรกำลังจะประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน วงจรสับเบออร์ วงจรกรอง วงจรกลับสัญญาณ และหน่วยเวลาและวงจรขับสวิตช์ไอจีบีที เป็นต้น ส่วนวงจรควบคุมจะมี 2 ชุดเพื่อควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์แต่ละชุด โดยจะมีการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า กระแสไฟฟ้าด้านเข้า และแรงดันไฟฟ้าด้านออกเพื่อควบคุมแบบลูปปิด

ส่วนการจำลองนั้นใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ซึ่งใช้การควบคุมแบบ PI เพื่อสร้างสัญญาณ PWM สำหรับขับสวิตช์ไอจีบีที ผลการจำลองที่ได้ วงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้คงที่ แม้เมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงระบบควบคุมก็สามารถทำงานได้ตามปกติ และสามารถลดกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย ดังนั้นผลการจำลองนี้ จึงจะนำไปออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์จริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการทดสอบการทำงานจะกล่าวในบทต่อไป

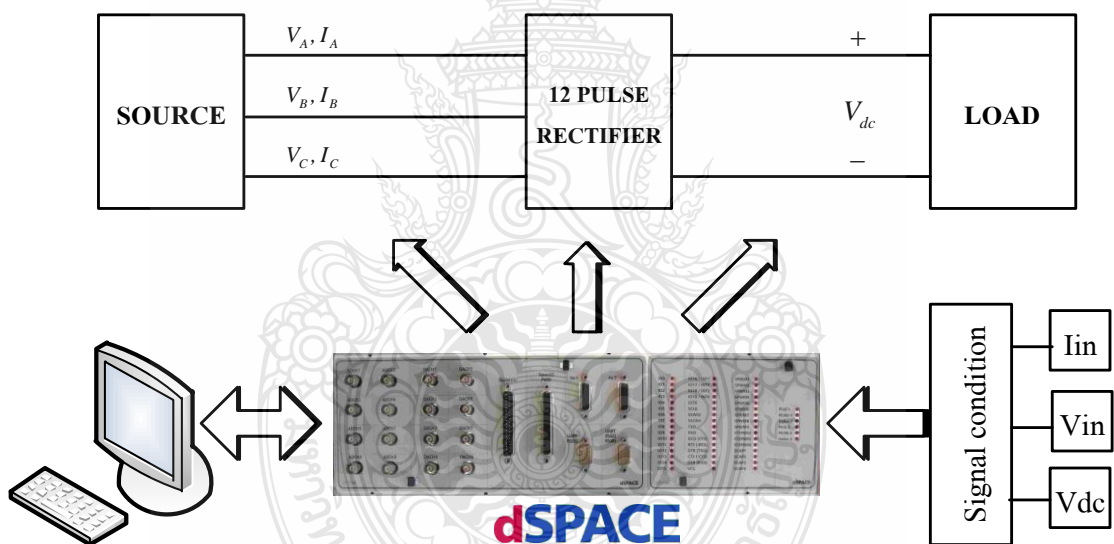
บทที่ 4

การทดสอบการทำงานและผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างการทำงานของเครื่องต้นแบบขนาดเล็ก และพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ รวมทั้งผลการทดสอบการทำงานของระบบ

4.1 โครงสร้างของระบบ

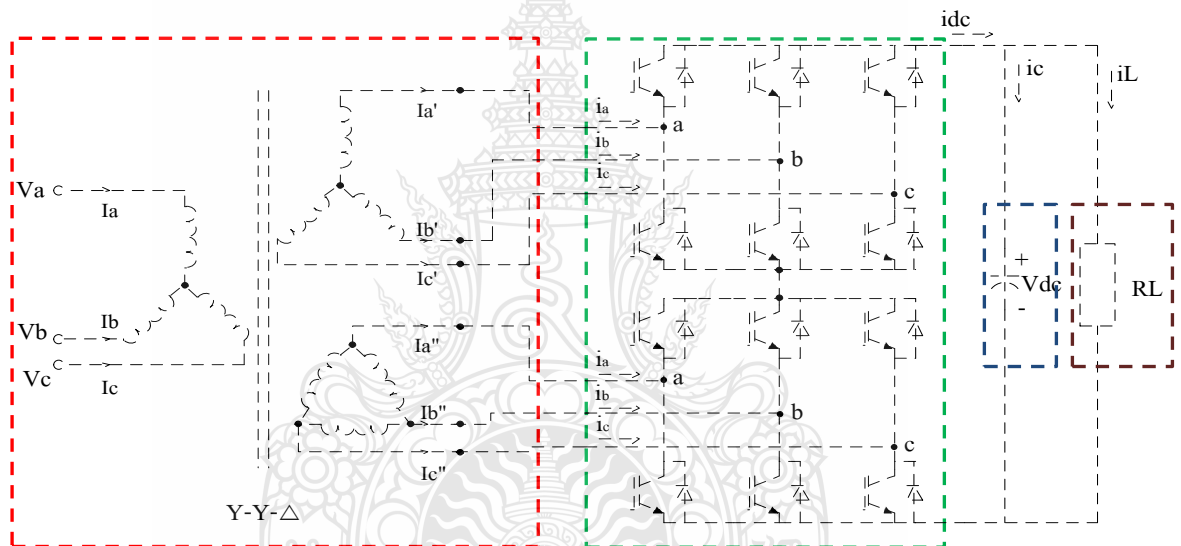
โครงสร้างโดยรวมของฮาร์ดแวร์ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ แสดงดังรูปที่ 4.1



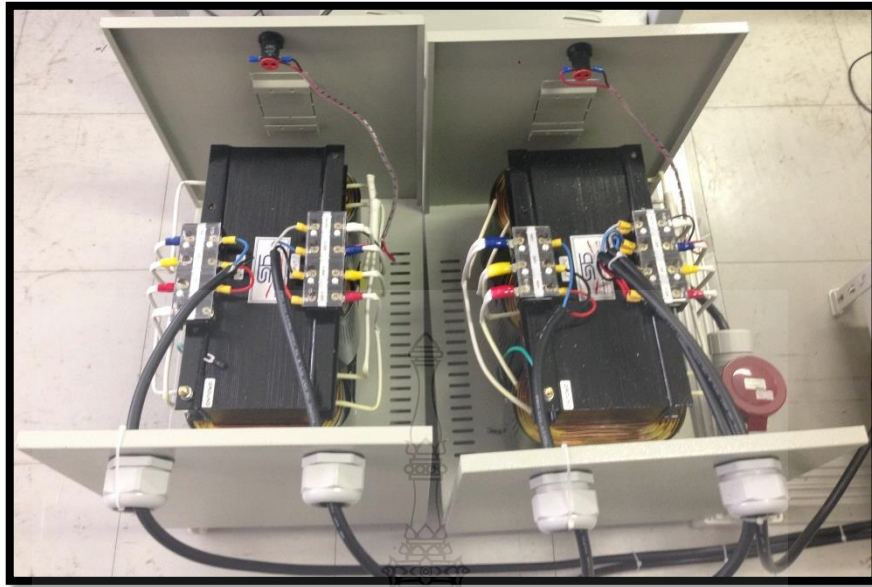
รูปที่ 4.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ในการทดสอบ

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของวงจรภาคกำลังและส่วนของวงจรภาคควบคุม ส่วนของวงจรภาคกำลังจะประกอบด้วยวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ดังรูปที่ 4.2

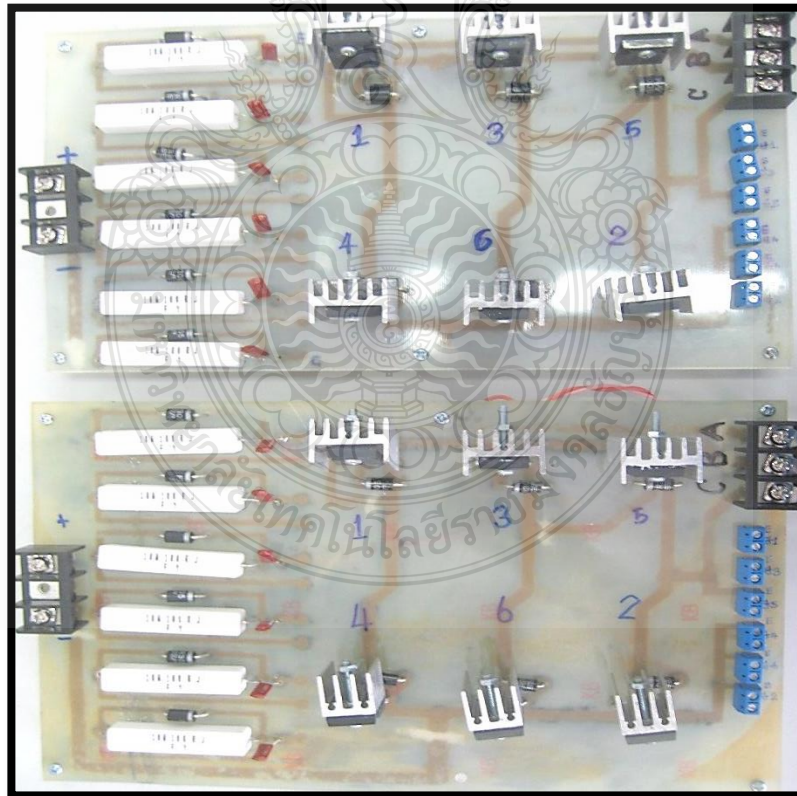
โดยวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ จะประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุดต่อกัน โดยแต่ละจะมีไอจีบีทีจำนวน 6 ตัว ไดโอดจำนวน 6 ตัว และที่บริเวณ DC-Link จะมีตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัวขนาด 3,300 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดัน 400 โวลต์ 2 ตัว ต่อกันซึ่งจะได้ค่าความจุรวมเท่ากับ 1,650 ไมโครฟารัด ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้ในบทที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.6



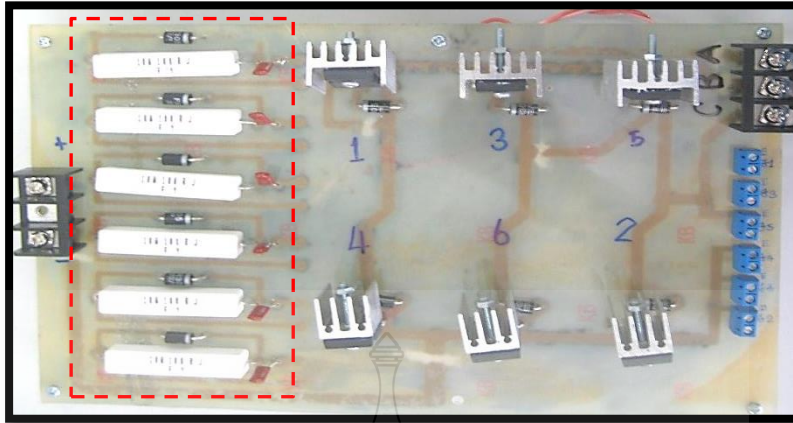
รูปที่ 4.2 วงจรภาคกำลังทั้งหมด



รูปที่ 4.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส สตาร์/สตาร์-เดลต้า



รูปที่ 4.4 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์



รูปที่ 4.5 วงจรสับเบอร์

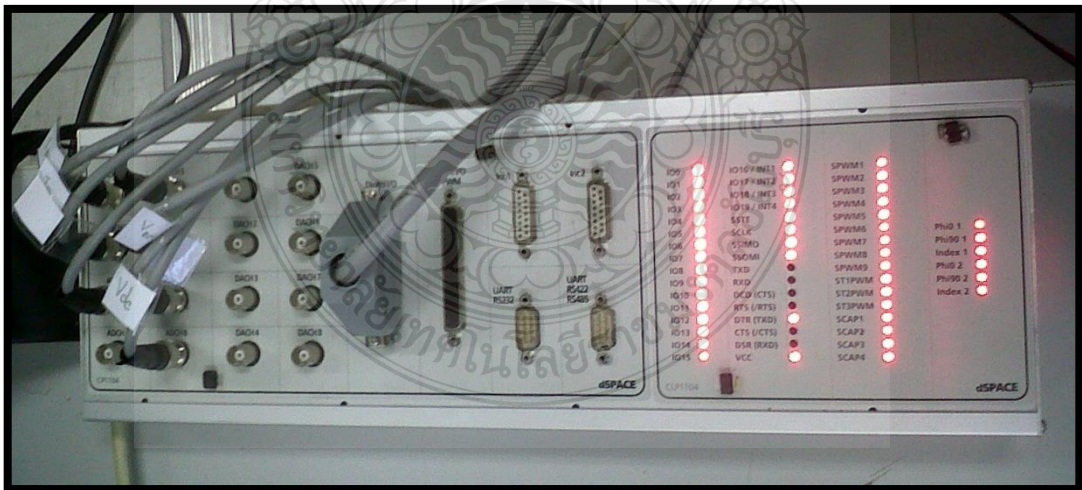


รูปที่ 4.6 ตัวเก็บประจุ

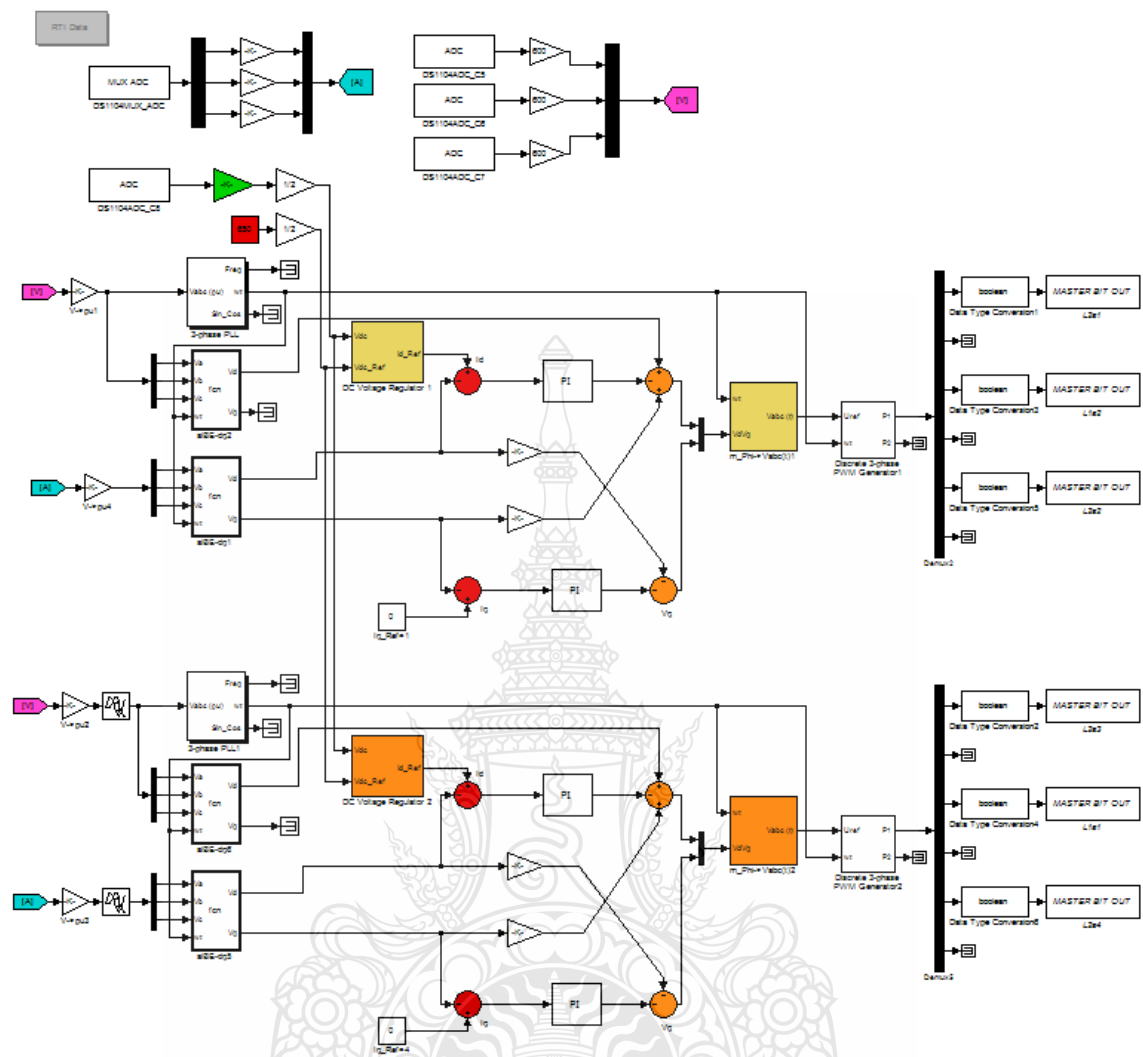


รูปที่ 4.7 ภาวะ โหลด(ฮีตเตอร์)

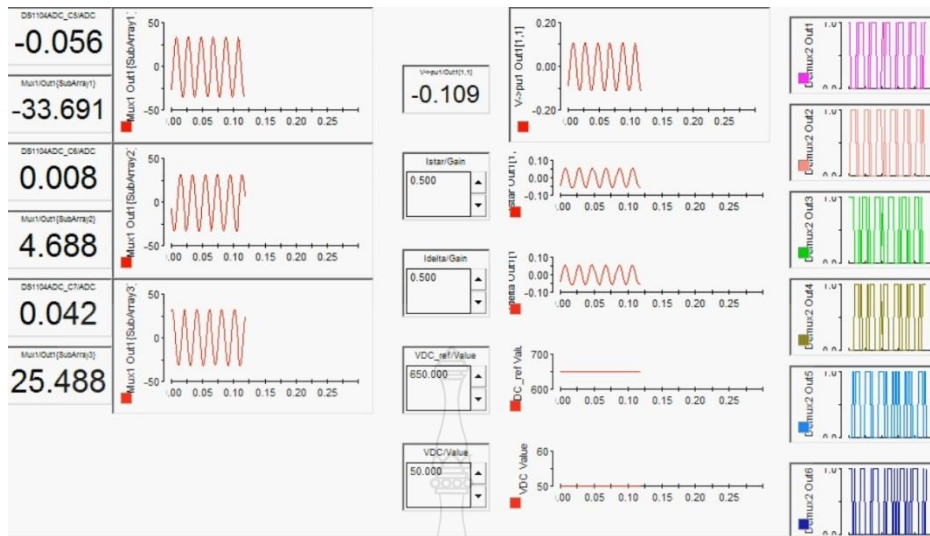
ภาคควบคุมของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ จะใช้บอร์ดตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล dSPACE รุ่น DS1104 ดังรูปที่ 4.8 เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบซึ่งจะทำงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรม dSPACE Control Desk ดังรูปที่ 4.10 และทำการสร้างสัญญาณขับนำสวิตซ์เพื่อนำไปยังวงจรขับสวิตซ์ไอจีบีทีต่อไป



รูปที่ 4.8 การต่อใช้งาน dSPACE รุ่น DS1104

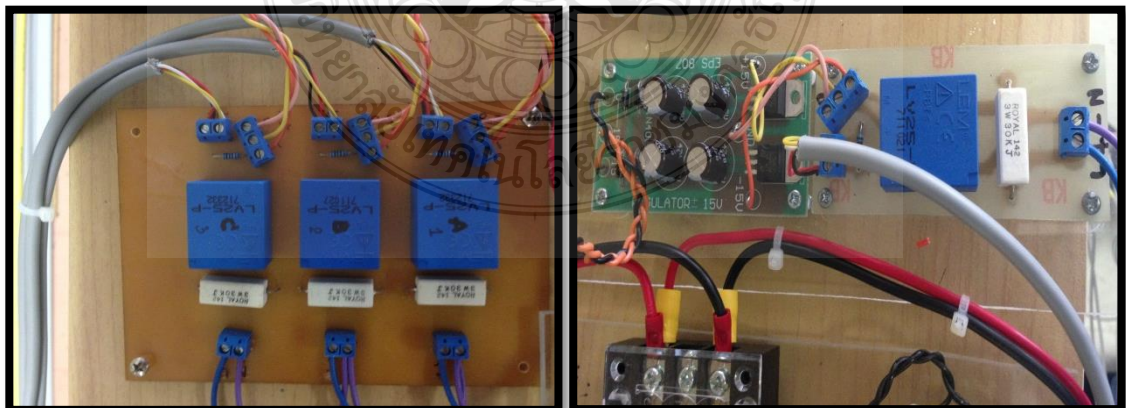


รูปที่ 4.9 โมเดลของวงจรควบคุมใน โปรแกรม MATLAB/Simulink

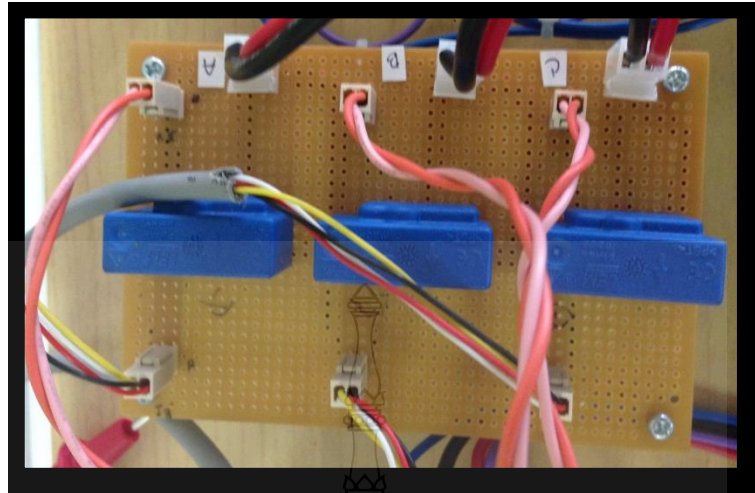


รูปที่ 4.10 หน้าต่างการควบคุมการทำงานของ dSPACE ผ่านโปรแกรม dSPACE Control Desk

การตรวจวัดสัญญาณต่างๆที่จำเป็นต้องการในการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ จะประกอบด้วย การตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า กระแสไฟฟ้าด้านเข้าและสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ DC-Link โดยสัญญาณทั้งหมดจะส่งให้กับตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลภายในตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล dSPACE การตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะใช้ตัววัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า LEM LV25-P เป็นตัววัดแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 4.11 ในการวัดกระแสไฟฟ้าด้านเข้าก็เช่นเดียวกันซึ่งใช้ตัววัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า LEM LAS50-TP ดังแสดงในรูปที่ 4.12

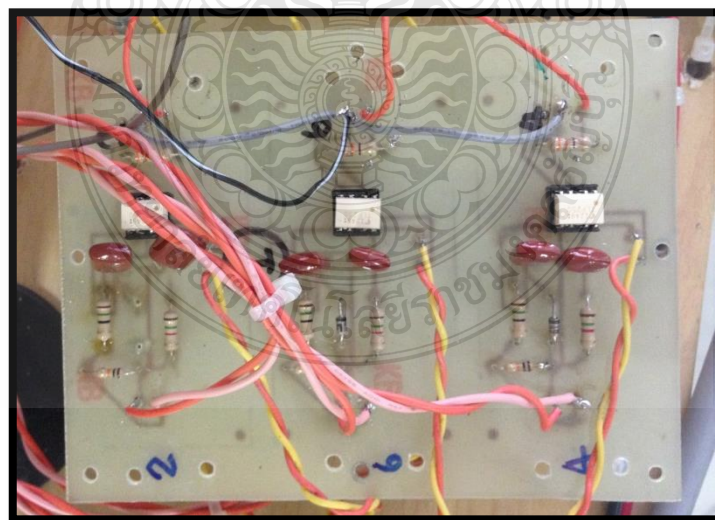


รูปที่ 4.11 ตัววัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า LEM LV25-P

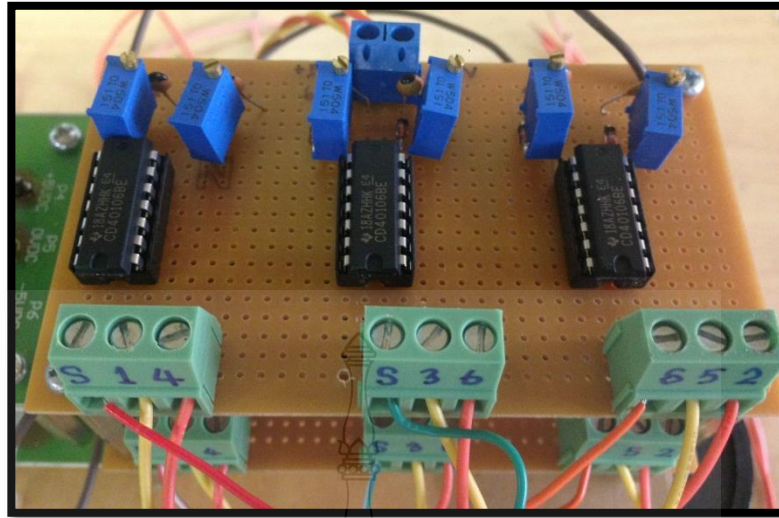


รูปที่ 4.12 ตัววัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า LEM LAS50-TP

เมื่อประมวลผลสัญญาณต่างๆเสร็จแล้ว สัญญาณที่ได้จาก dSPACE จะถูกส่งไปยังวงจรจับสวิตช์ไอจีบีที แสดงดังรูปที่ 4.13 และเพื่อป้องกันสัญญาณข้ามเกตระหว่างตัวบนและตัวล่างในกึ่งเดียวกันลัดวงจรจึงจำเป็นต้องสร้างวงจรกลับสัญญาณและหน่วงเวลาโดยใช้ไอซีเบอร์ 40106 ซึ่งเป็น Schmitt Trigger NOT GATE ดังรูปที่ 4.14

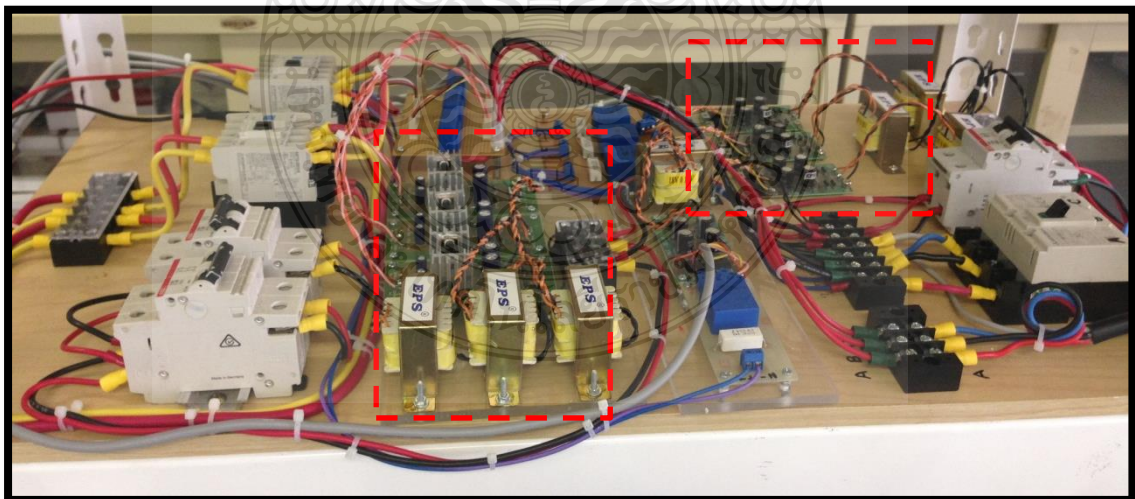


รูปที่ 4.13 วงจรจับสวิตช์ไอจีบีทีโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250

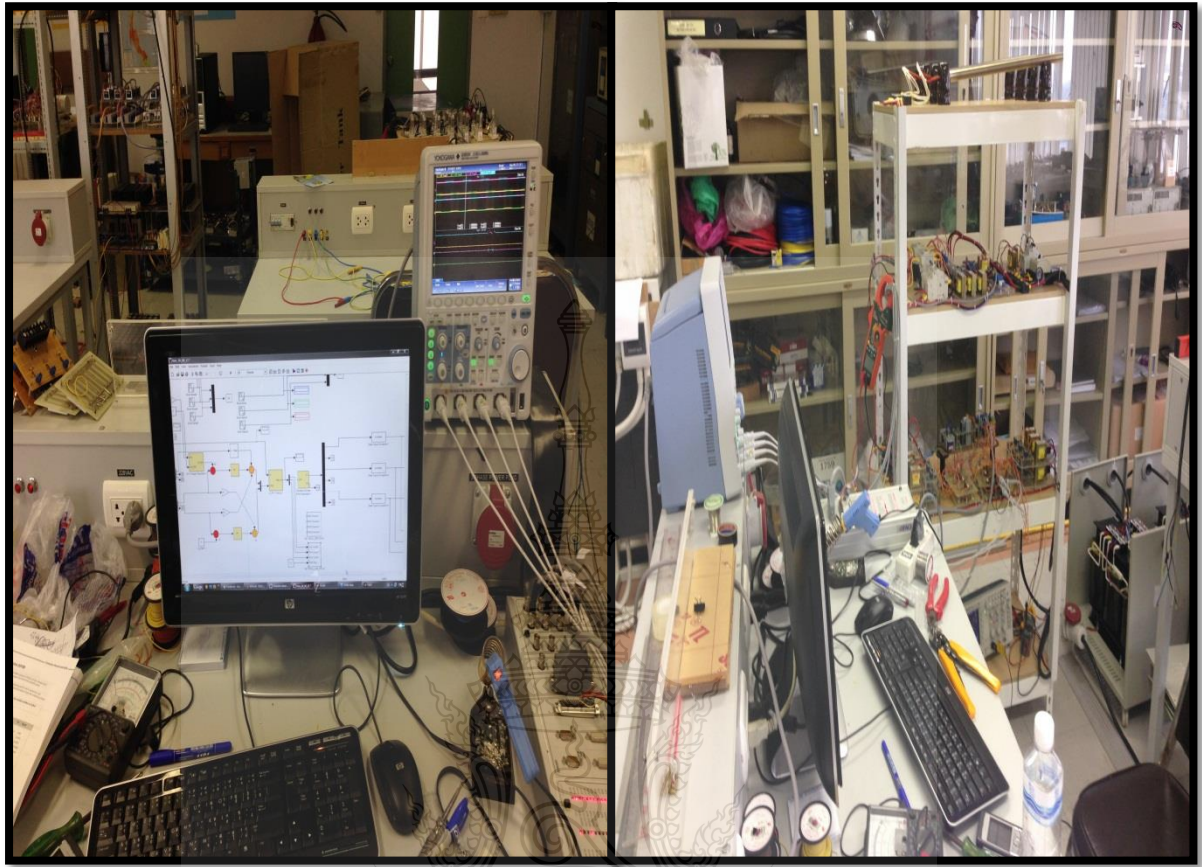


รูปที่ 4.14 วงจรกลับสัญญาณ โดยใช้ไอซีไอซีเบอร์ 40106 (Schmitt Trigger NOT GATE)

นอกจากนี้ยังมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (+15, ±15 และ +5 โวลต์) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เช่น วงจรจับสวิตช์ไอจีบีที ตัววัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ตัววัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า และวงจรกลับสัญญาณและหน่วงเวลา เป็นต้น ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก แสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (+15, ±15 และ +5 โวลต์) สำหรับอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ

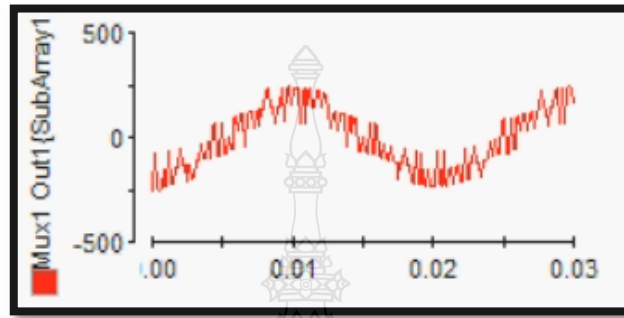


รูปที่ 4.16 โครงสร้างของระบบโดยรวมของวงจรทั้งหมด

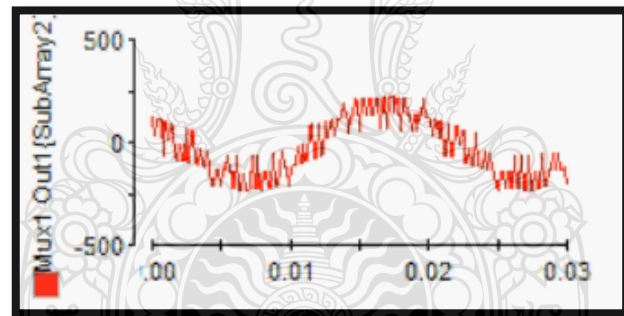


4.2 ผลการทดสอบการทำงาน

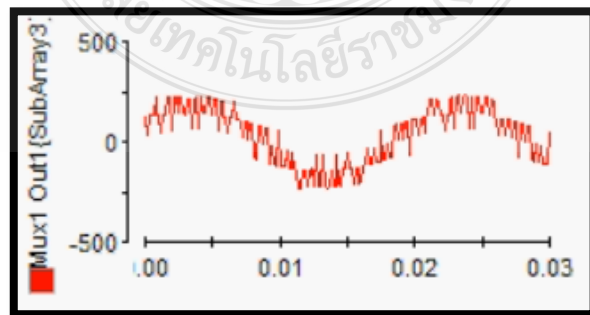
ในการทดสอบวงจรต้นแบบสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์นั้น จะทำการทดสอบโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ด้านเข้ามีค่าประมาณ 380 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.17 - 4.19



รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส A

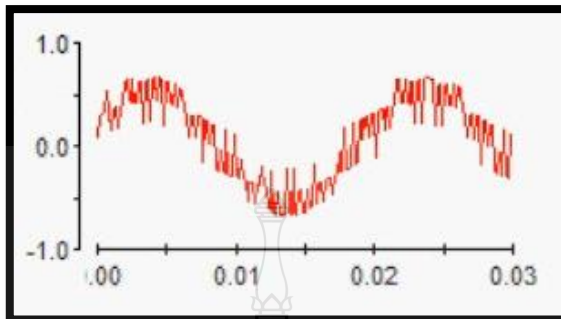


รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส B

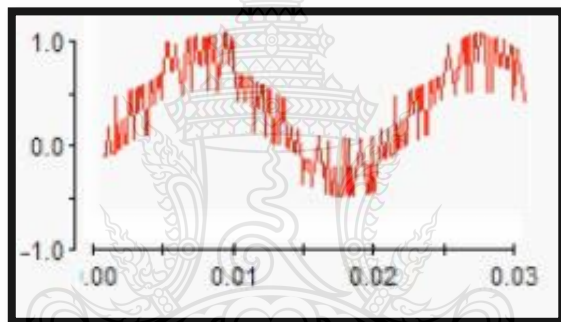


รูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส C

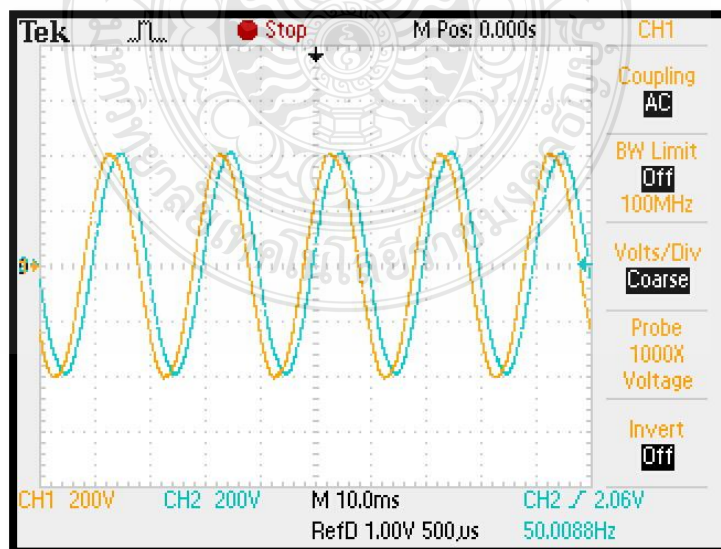
รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส A ที่โหลด 5 กิโลวัตต์ มีค่าประมาณ 17 แอมป์และ โหลด 10 กิโลวัตต์ มีค่าประมาณ 30 แอมป์ แสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส A ที่โหลด 5 กิโลวัตต์

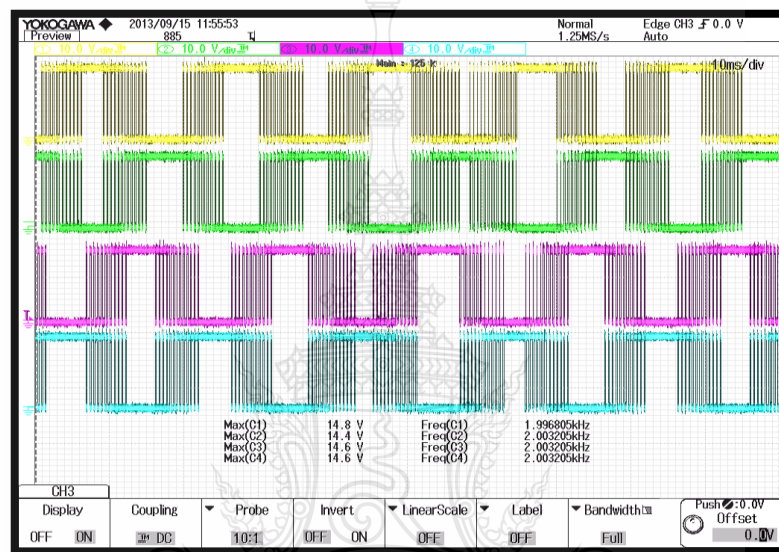


รูปที่ 4.21 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่เฟส A ที่โหลด 10 กิโลวัตต์

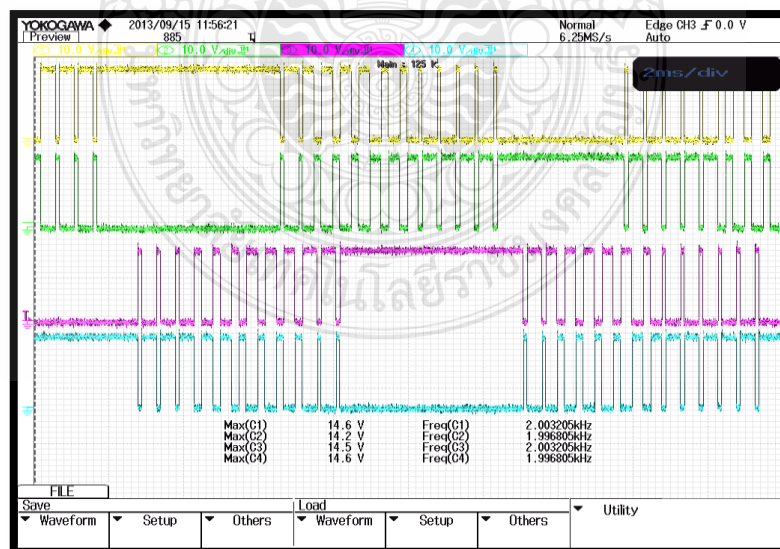


รูปที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าด้านออกระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว

จากนั้นจะนำค่าสัญญาณต่างๆของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ คือ สัญญาณด้านเข้าทั้งแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่บริเวณ DC-Link แล้วจะทำการส่งสัญญาณไปยังระบบควบคุมในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยผ่านบอร์ดควบคุม dSPACE รุ่น DS1104 เมื่อระบบประมวลผล และคำนวณเสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะส่งสัญญาณให้ระบบควบคุม เพื่อส่งสัญญาณ ไปขับสวิตช์ไอจีบีทีของวงจร โดยผ่านบอร์ดควบคุม dSPACE เช่นเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.23

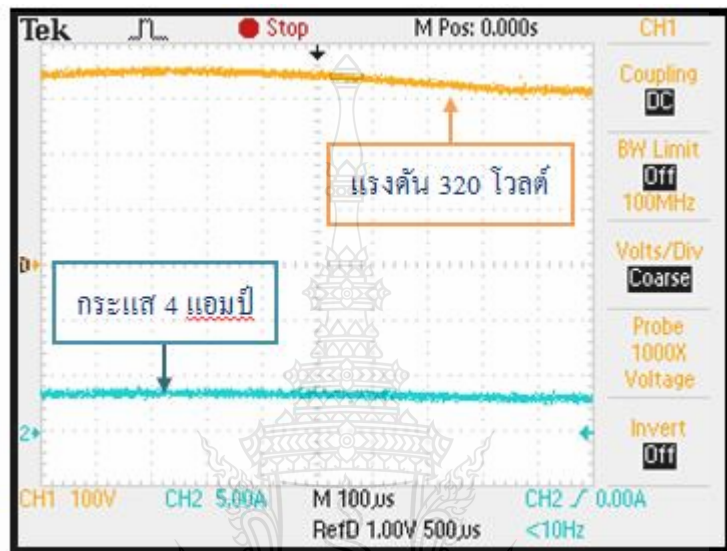


รูปที่ 4.23 สัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีของวงจร (10ms/div)

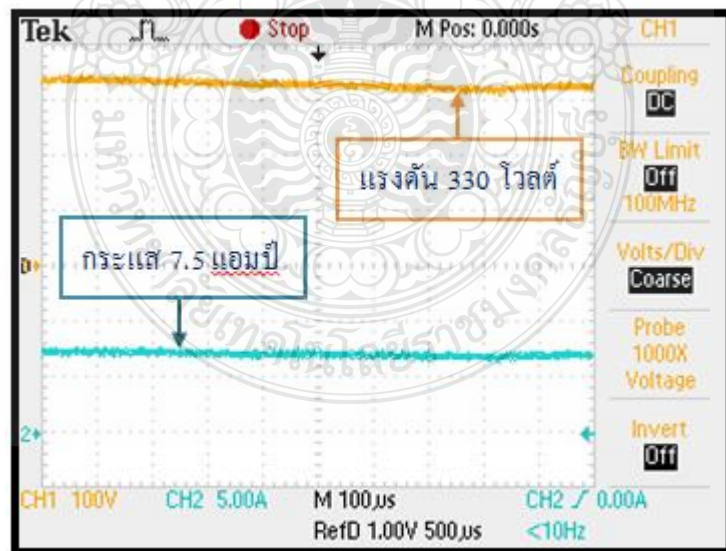


รูปที่ 4.24 สัญญาณที่ออกจากวงจรขับสวิตช์ไอจีบีทีของวงจร (2ms/div)

สัญญาณที่ออกจาก dSPACE จะมีแรงดันที่สัญญาณเพียง 5 โวลต์ ซึ่งไม่สามารถนำไปขับสวิตช์ไอจีบีทีได้โดยตรง เพราะไอจีบีทีที่ต้องการแรงดันสัญญาณไม่ต่ำกว่า 15 โวลต์ ดังนั้นจำเป็นต้องผ่านวงจรขับสวิตช์ไอจีบีทีที่ก่อน ซึ่งสัญญาณที่ออกจากวงจรขับสวิตช์ไอจีบีทีที่แสดงได้ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24

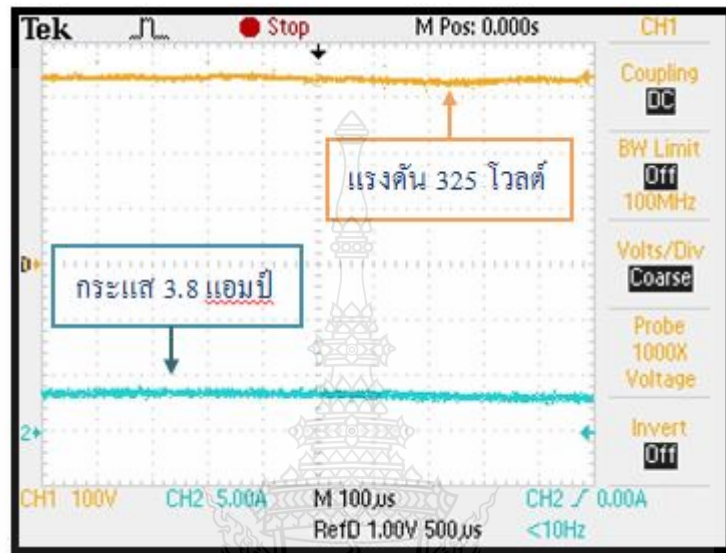


รูปที่ 4.25 แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 (โหลดขนาด 5 กิโลวัตต์)

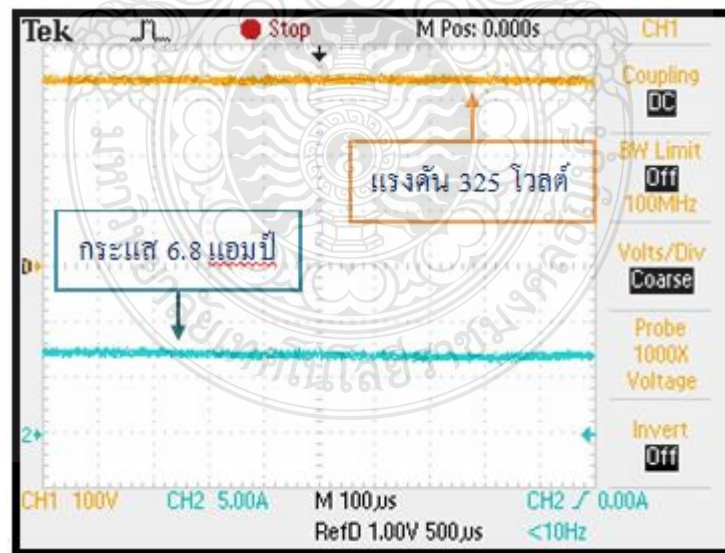


รูปที่ 4.26 แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 (โหลดขนาด 10 กิโลวัตต์)

จากรูปคลื่น จะเห็นว่าในชุดคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้สม่ำเสมอได้โดยอยู่ที่ ประมาณ 325 โวลต์ โดยกระแสไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าขึ้นอยู่กับโหลดที่ป้อนให้ โดยในการทดสอบนี้ป้อนโหลดขนาด 5 และ 10 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 4.25 - 4.28

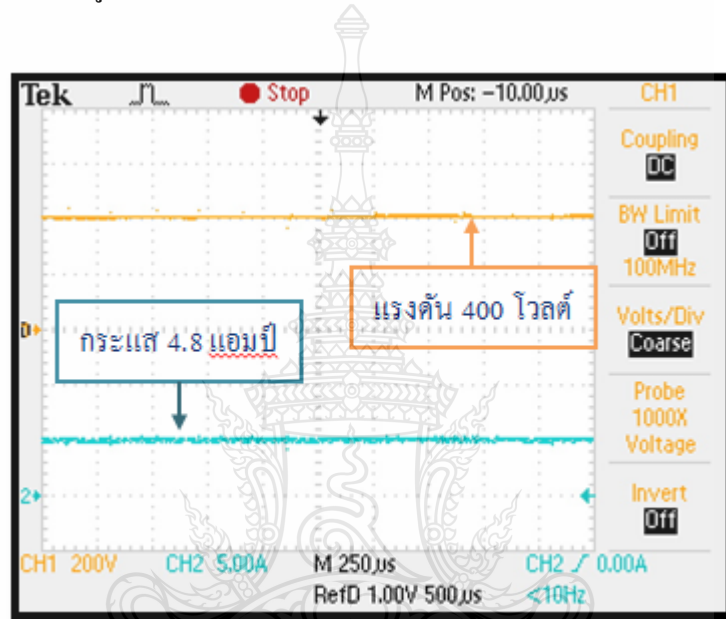


รูปที่ 4.27 แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 (โหลดขนาด 5 กิโลวัตต์)

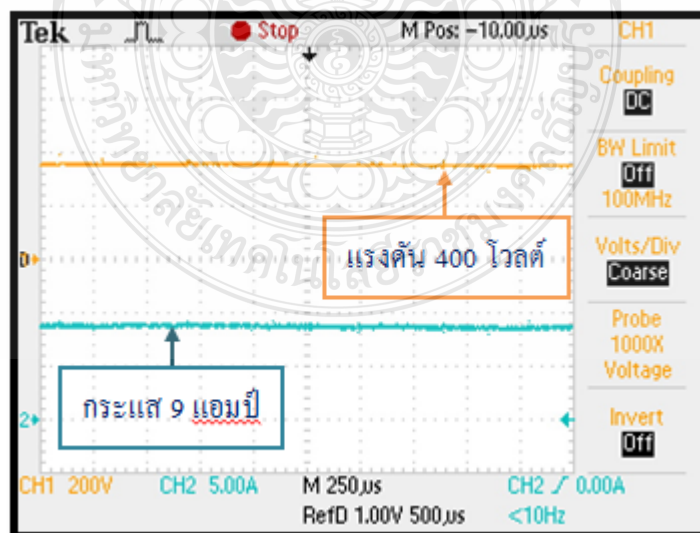


รูปที่ 4.28 แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 2 (โหลดขนาด 10 กิโลวัตต์)

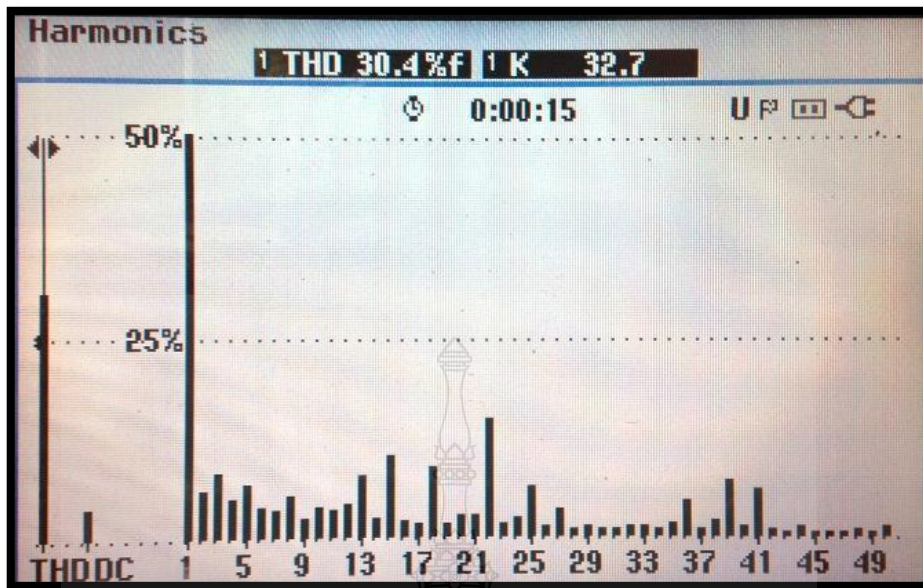
รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ได้จากวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 6 พัลส์ มีค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกขุดละประมาณ 325 โวลต์ จากนั้นนำมาต่ออนุกรมกันให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกให้คงที่ 650 โวลต์ แต่ในทางปฏิบัติงานจริงนั้นจะทดสอบที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกที่ 400 โวลต์ เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการไม่สามารถทนกระแสได้สูงพอ โดยผลการทดสอบจะได้ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออก ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 โดยมีโหลดขนาด 5 กิโลวัตต์ และ 10 กิโลวัตต์



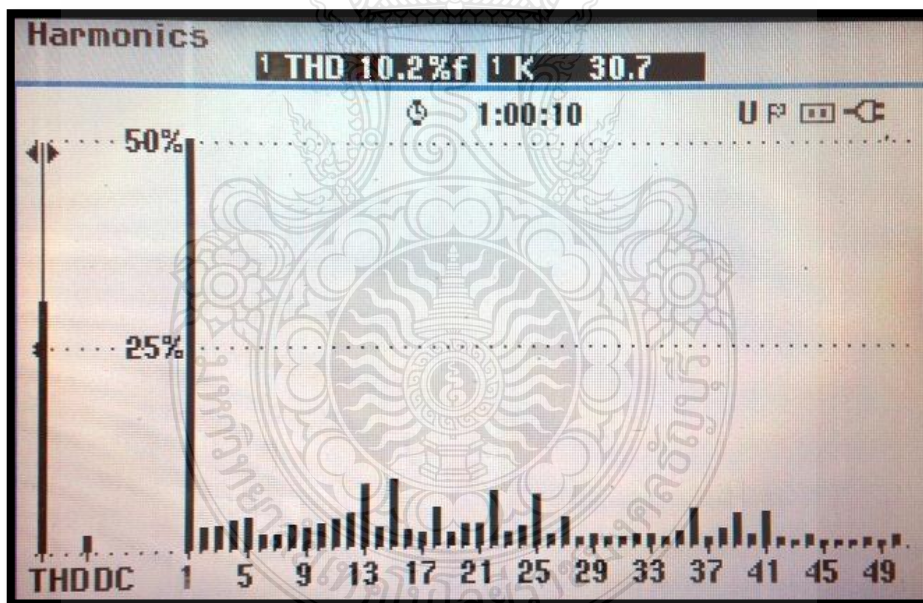
รูปที่ 4.29 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกที่โหลดขนาด 5 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.30 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกที่โหลดขนาด 10 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.31 กระแสฮาร์โมนิกของโครงสร้างวงจรแบบ 6 พัลส์ (ห้องปฏิบัติการ)



รูปที่ 4.32 กระแสฮาร์โมนิกของโครงสร้างวงจรแบบ 12 พัลส์ (ห้องปฏิบัติการ)

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 แสดงถึงกระแสฮาร์โมนิกในวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโครงสร้างวงจรแบบ 6 พัลส์และ 12 พัลส์ พบว่าโครงสร้างวงจรแบบ 12 พัลส์ มีค่ากระแสฮาร์โมนิกทั้งหมด (THD) ร้อยละ 10.2 ซึ่งน้อยกว่าแบบ 6 พัลส์ ที่มีค่ากระแสฮาร์โมนิกทั้งหมด(THD) ร้อยละ 30.4

4.3 สรุปการทดสอบการทำงาน

จากการทดสอบการทำงานจะพบว่าวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์นั้น สามารถแปลงผันพลังงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำเนื่องจากใช้บอร์ด dSPACE รุ่น DS1104 ซึ่งมีความถี่ในการประมวลผลที่รวดเร็ว แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่บริเวณ DC-Link จะมีลักษณะราบเรียบ มีสัญญาณรบกวนน้อย อีกทั้งระบบควบคุมก็สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ได้ ดังนั้นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์นี้มีประสิทธิภาพในการทำงานและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ และออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าไม่ให้ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น และเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับโหลดและระบบเชื่อมโยงกริด ซึ่งทำการจำลองระบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และออกแบบระบบ โดยอาศัยข้อมูลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการจำลองระบบเพื่อมาสร้างเป็นตัวต้นแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์

การจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink จะทำการตรวจสอบการทำงานของวงจรควบคุมในระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง โหลด จาก 5 กิโลวัตต์ เป็น 10 กิโลวัตต์ ส่วนการทดสอบการทำงานของตัวต้นแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ นั้นจะเป็นการทดสอบ 2 ครั้ง คือที่โหลด 5 กิโลวัตต์ และ 10 กิโลวัตต์ และทำการวิเคราะห์การทำงานในส่วนต่างๆของตัวต้นแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink

การจำลองวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ โดยที่มีการนำแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ DC-Link และกระแสไฟฟ้าด้านเข้ามาทำการวิเคราะห์ คำนวณ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ PI แล้วจึงสร้างสัญญาณ PWM ขับเกตสวิตช์ไอจีบีที ผลที่ได้ คือ วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ มีประสิทธิภาพในการทำงานดี โดยที่รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่า 380 โวลต์ กระแสไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าประมาณ 30 แอมป์ ขนาดตัวเก็บประจุ 1,650 ไมโครฟารัด และโหลดขนาด 5 กิโลวัตต์ และ 10 กิโลวัตต์ จะได้สัญญาณรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกที่ DC-Link มีค่าประมาณ 650 โวลต์ ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่โหลด 5 กิโลวัตต์ มีค่าประมาณ 8 แอมป์ และที่โหลด 10 กิโลวัตต์ มีค่าประมาณ 15.5 แอมป์ นอกจากนี้เมื่อมีการเพิ่มและลดภาระโหลด

ระบบควบคุมก็ยังสามารถทำงานได้ตามปกติ ดังนั้นการจำลองวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์นี้ได้ผลค่อนข้างดี สามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกให้คงที่ได้ และเมื่อพิจารณาจากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก จะมีลักษณะเรียบมีสัญญาณรบกวนน้อย

5.1.2 การทดสอบการทำงานของตัวต้นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์

การทดสอบตัวต้นแบบวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์นั้น โดยใช้บอร์ด dSPACE รุ่น DS1104 เป็นตัวควบคุมการทำงาน โดยจะทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า สัญญาณกระแสไฟฟ้าด้านเข้า และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ DC-Link เพื่อใช้เป็นสัญญาณด้านเข้าให้กับส่วนควบคุมการทำงาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าด้านออก เพื่อที่จะรักษาแรงดันให้คงที่ ส่วนควบคุมจะทำการตรวจจับและสร้างสัญญาณ PWM ขึ้นมาเพื่อที่จะนำไปควบคุมขั้วเกตสวิตช์ไอจีบีที จากการทดสอบจะพบว่าตัวต้นแบบของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์ โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าประมาณ 380 โวลต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ DC-Link มีค่าประมาณ 400 โวลต์ ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่โหลด 5 กิโลวัตต์ มีค่าประมาณ 4.8 แอมป์ และที่โหลด 10 กิโลวัตต์ มีค่าประมาณ 9 แอมป์ โดยตัวต้นแบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกได้คงที่เหมือนกับผลจำลอง

5.1.3 ข้อดีของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์

- 1) สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบได้
- 2) รูปคลื่นสัญญาณด้านออกของวงจรแบบ 12 พัลส์เรียบกว่าแบบ 6 พัลส์
- 3) ความถี่ในการสวิตช์คงที่เพราะเป็นการมอดูเลตสัญญาณ PWM
- 4) สามารถนำไปใช้ในพิกัดแรงดันที่สูงขึ้นได้ เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังน้อยลง
- 5) ทำให้ระบบกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- 6) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกสูงเป็นสองเท่าเมื่อกับโครงสร้างวงจรแบบ 6 พัลส์

5.1.4 ข้อสังเกตของวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์

- 1) วงจรต้องใช้อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนสองเท่าเมื่อเทียบวงจรแบบ 6 พัลส์
- 2) ระบบควบคุมค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนกว่าวงจรแบบปกติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ส่วนของการจำลองการทำงาน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink นั้นควรจะใช้เวอร์ชันเดิยวตลอด เพราะบางโมเดลจะไม่สามารถรันได้

5.2.2 ส่วนของฮาร์ดแวร์ควรวางแผนและพิจารณาให้รอบคอบก่อนที่จะทำการทดสอบไม่เช่นนั้นแล้วอาจเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบได้

5.2.3 การทำงานของบอร์ด dSPACE ที่ไม่สามารถรับค่า Sample Time ที่มีความละเอียดในการคำนวณที่สูงได้ ทำให้การควบคุมความถี่ในการสวิตซ์ซึ่งนั้นจะได้ต่ำ หรืออาจไปใช้พอร์ตอื่นๆ เพื่อให้ได้ค่าความถี่ที่สูงขึ้น

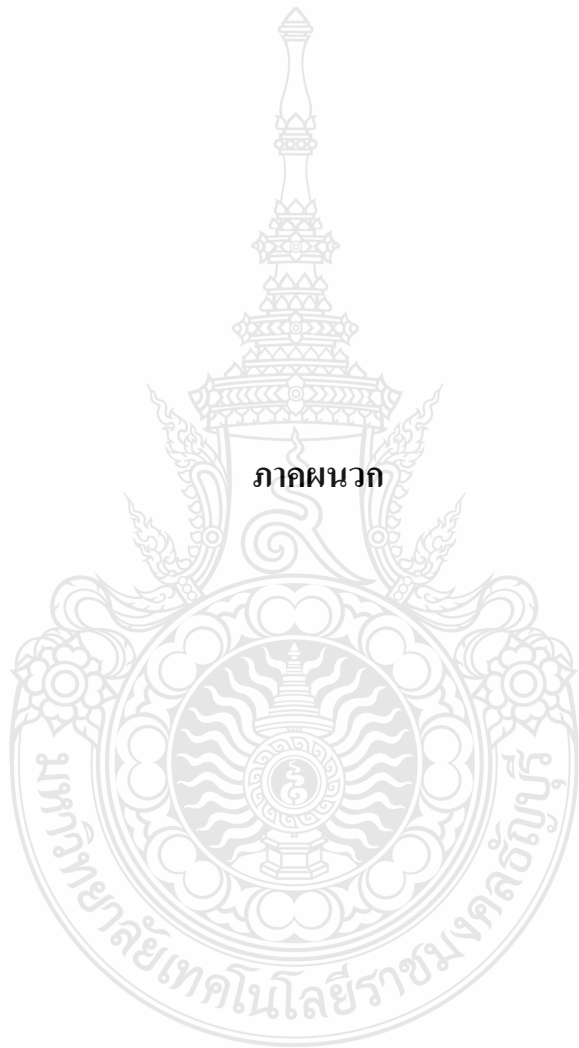
5.2.4 ส่วนของการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติไม่สามารถทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกได้ตามที่ออกแบบไว้ที่ 600 โวลต์ ทดสอบจริงได้เพียง 400 โวลต์ เนื่องจากมีข้อจำกัดของพิกัดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

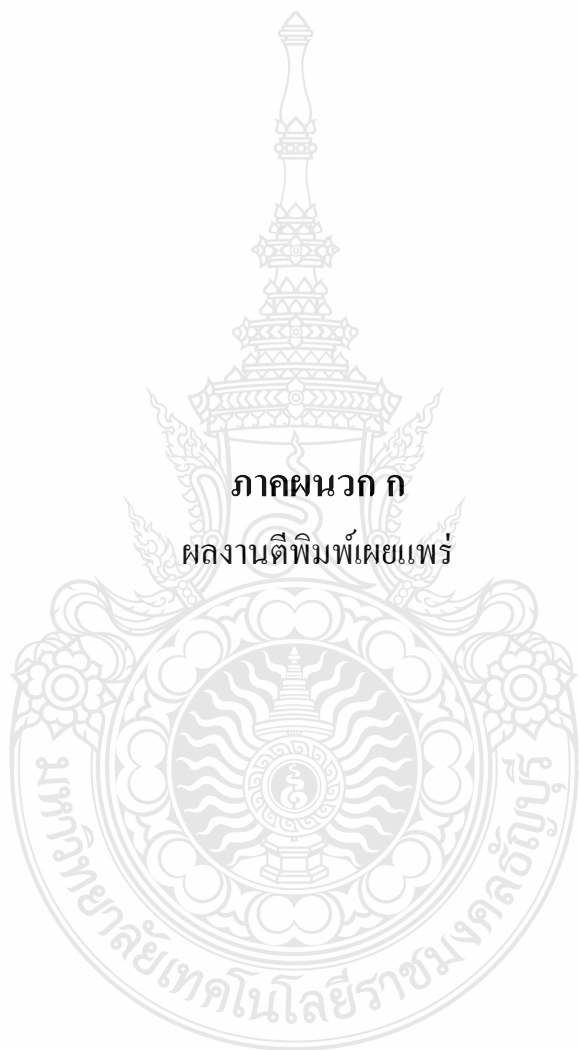
รายการอ้างอิง

- [1] วัฒนะ สืบกนิรและบัลลังก์ เนียมมณี.(2551).คอนเวอร์เตอร์ด้านระบบส่งกำลังไฟฟ้าสำหรับ
กังหันลม. วิศวกรรมสารเอเชียอาคเนย์,56.
- [2] วัฒนา แก้วมณีและคณะ.(2551).การออกแบบหม้อแปลงชนิดอโตสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ
12 พัลส์.การประชุมวิชาการระดับชาติด้านครุศาสตร์อุตสาหกรรม,,273-278.
- [3] วัฒนา แก้วมณี.(2547).การวิเคราะห์สภาวะคงตัวของวงจรมัติพัลส์คอนเวอร์เตอร์สำหรับ
พลังงานสะอาด.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร
เหนือ.
- [4] จักรพงษ์ จารุมิสร์.(2542).คอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ประยุกต์ใช้ในระบบส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า
กระแสตรง.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.
- [5] Karl M. Hink.“Harmonic mitigation of 12-pulse drives with unbalanced input line voltage”
MTE Corporation.
- [6] W. Xu, H Kaizheng, Y. Shijie and X. Bin.(2008). Simulation of three-phase voltage source
PWM rectifier based on the Space Vector Modulation. **Control and Decision
Conference, 2008.** pp.1881-1884.
- [7] Z. Jinghua, M. Yongqing, L. Zhengxi and L. Kun.(2008). Research on Control Method of
Three-Level NPC Voltage Source Rectifier. **Vehicle Power and Propulsion
Conference,2008.** pp.1-6.
- [8] ชาคริต วินิจธรรม , กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ และณัฐภัทร พันธุ์คง.(2556).การเปรียบเทียบ
วงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์.การ
ประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 5,2556.
- [9] ผศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์.คุณภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง.ปทุมธานี:คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [10] ชาคริต วินิจธรรม , กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ และณัฐภัทร พันธุ์คง.(2556).การจำลองการ
ทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12
พัลส์.การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่
5,2556.125-128.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [11] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน, ดร. วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์.(2555).อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (POWER ELECTRONICS) พิมพ์ครั้งที่ 12.กรุงเทพมหานคร:วิ.เจ.พรินติ้ง.
- [12] Shutuan Zhang, Kai Zhang, Zhongshan Jiang and Fang Lu.(2010). Modeling and Simulation of Three-phase Rectifier Based on SVPWM.” **IEEE Trans. Ind. Electron**,pp.318-321.
- [13] Vitezslav Benda. “Power semiconductors - state of the art and future trends”. **Global Journal of Technology & Optimization V.2**, 2011, pp.29-36.
- [14] Brian R Copeland.(2008).The design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning.March 2008.
- [15] นาวิณ ยุกตานนท์.(2555).การออกแบบวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้า กระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบหลังชนหลังสามระดับ. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [16] ณัฐวุฒิ พลชะดินและวิริยะ พิเชฐจำเริญ.(2551).การวิเคราะห์วงจรเอชชอปเปอร์โดยมีวงจร สนับเบอร์ทำงานในระหว่างการเปลี่ยน โหมด.ประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 46. หน้า 233-240.





ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

1. ชาคริต วินิจธรรม , กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ และณัฐภัทร พันธุ์คง.(2556).การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 12 พัลส์.การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 5,2556.125-128.
2. ชาคริต วินิจธรรม , กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ และณัฐภัทร พันธุ์คง.(2556).การเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์.การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 5,2556.



2013
EENET
ELECTRICAL ENGINEERING NETWORK



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

บทความวิจัย

- ไฟฟ้ากำลัง
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- ไฟฟ้าสื่อสารและโทรคมนาคม
- ระบบควบคุมและการวัดคุม
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

บทความวิชาการ

27-29 มีนาคม 2556 โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

EENET2013



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
ศาสตราจารย์ ดร. วัลลภ	สุระก่าพลธร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์	วัฒนกุล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. พิชัย	อารีย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. พุศศักดิ์	ชีวิสุทธิย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร	กิมเรศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์	จิตรุ่งเรือง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. สมพร	สิริสำราญนุกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์	หวังสดีชัยวงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์	ชื่นแขก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. บัลดงัก	เนียมมณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนดชัย	กุลวราวิชพงษ์ มหาวิทยาลัยสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร. เวทีน	ปิยรัตน์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ	หุนเจริญ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย	เดชสอนันต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์	สุวรรณกวิน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์	คำฝอย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา	จำสุวรรณ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาวิไลย์	นาคทรัพย์ มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์	บาลมงคล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร. นาดยา	คล้ายเรือง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
อาจารย์ ดร. ยงยุทธ	นารายณ์ มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ ดร. นิมิตร	บุญภิรมย์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
อาจารย์ ดร. สมมาตร	แสงเงิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ		หน่วยงาน
ดร.อภิรดา	นามแสง	สถาบันการบินพลเรือน
ดร.สุวิทย์	อัคริยะเมต	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.ชวงค์	วันศักดิ์ภูบาล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ดร.อรรด	พยอมหอม	การไฟฟ้านครหลวง
ดร.ปายาม	กุลวานิช	กรมวิทยาศาสตร์บริการ





รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
อาจารย์ ดร. วุฒิววัฒน์	กองรัตนประเสริฐ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร. สายชล	ชุดเจือจิ้น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ชัยณรงค์	วิเศษศักดิ์วิชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิโรจน์	เพชรพันธุ์ศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกมล	พลสิงห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพนธ์	ทางทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ประหยัด	กองสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ภัทรพงศ์	อัญชันภาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์สมพล	โคศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์สมยศ	สันติมาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ทัศนพันธุ์	สุวรรณเท็ด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์	ภูมิศักดิ์พิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย	ทรัพย์สิงห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักริ	ศรีนนท์ฉัตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ฉัตรชัย	ศุภพิทักษ์สกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. กิตติวัฒน์	นิมเกิดผล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. บุญยัง	ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. สุรินทร์	แห่งมงาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย	หิรัญวโรดม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. อำนวย	เรืองวาริ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ณฐภัทร	พันธ์คง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย	แดงเอม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ	โสเมเกษตรินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์พินิจ	จิตจริง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์สมชาย	เบียนสูงเนิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ สำหรับการพิจารณาบทความ
 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
อาจารย์พร้อมศักดิ์ อภริติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์นิติพงศ์ ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ธีระพล เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราชญ์ คาบบัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ไพฑูรย์ รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์วิโรจน์ พิราจนนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ณัฐ โชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ทอง ลานธรรทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ชุตุงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์เวทรินทร์ ธิญสิประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์สมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์อรุณ ชลิ่งสุทธิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์มนัส บุญเกียรติทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์โกศล นิธิโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรินทร์ จุลวานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลทิพย์ วัฒนีกั๊ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัจจา ดักษ์ณัฒนวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ธนะกิจ วัฒนีกั๊ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์นิลมิต นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ชลกาญจน์ วงศ์ก่อเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ณพพร จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ สำหรับการพิจารณาบทความ
 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ประสพ โสภ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.มนตรี สมดุลยกนก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์อดิศักดิ์ แข็งสารกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนต์พงษ์ ศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ไกรฤกษ์ เขยชั้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.พิชิต กิตติสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์กาญจน์ญา พานิชเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ดิศพล ฉ่ำเฉียวกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์โสภา แซ่เอ็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์สิทธิ์ชัย บุญปโยทน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์สมพันธ์ อำพวัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ์ พงศ์พุกษธาดู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไครรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธ์พงศ์ อภิชาติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิชัย สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์รุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธินันท์ คั่นโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤตวิทย์ บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ เผื่อนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์กิตติวุฒิ จินนะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.มงคล กุฬิมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.ประจวบ อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5
THE 5TH ELECTRICAL ENGINEERING NETWORK OF RAJAMANGALA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (EENET2013)



- PE01** การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบจำหน่ายภายใต้สภาวะแรงดันตกช่วงสั้นสำหรับกังหันลม (บทความดีเด่น)
- PE02** การออกแบบและควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งระบบจำหน่ายในสภาวะแรงดันไม่สมดุลสำหรับกังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกรงกระรอก
- PE03** การชดเชยแรงดันตกชั่วขณะโดยใช้ เอช-เอช พีดับเบิลยูเอ็ม คอนเวอร์เตอร์สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย
- PE04** การลดฮาร์โมนิกส์ด้วยวิธี Pulse Width Modulation สำหรับมอเตอร์ชนิด Flux Concentration Interior PM
- PE05** การชดเชยผลของเดดไทม์ สำหรับมอเตอร์กระแสสลับชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้ตัวสังเกตการสัญญาณรบกวนแบบปรับปรุง
- PE06** กรณีศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่มีสายเคเบิลยาว: การเกิดปัญหาแรงดันเสิร์จที่ขั้วมอเตอร์ (บทความชมเชย)
- PE07** วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้สวิตช์ที่นำกระแสได้สองทิศทางสำหรับการควบคุมแรงดัน
- PE08** การแก้ไขตัวประกอบกำลังด้านเข้าของวงจรแปลงผันแบบลด-เพิ่ม ด้วยการควบคุมกระแส
- PE09** ต้นแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบมัลติเปิดอินพุท/เอาต์พุตแบบรวมวงจรอาร์ชแบดเดอรี



บทความสาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5
THE 5TH ELECTRICAL ENGINEERING NETWORK OF RAJAMANGALA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (EENET2013)



- PE10** การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟกระแสสลับเป็นแรงดันไฟกระแสตรงแบบ 12 พัลส์
- PE11** การปรับแสงสว่างของโคมหลอดแอลอีดีโดยควบคุมอัตโนมัติ
- PE12** การวิเคราะห์การทำงานของวงจรฟีดสวิตชิงบูสท์ดีซีทูดี้คอนเวอร์เตอร์ (บทความชมเชย)
- PE13** เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการปรับปรุงแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าด้านแหล่งจ่ายไฟสลับ
- PE14** การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกไรเซนเซอร์วัดความเร็วโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
- PE15** การจำลองผลสนามแม่เหล็กที่มีผลต่ออุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์



บทความสาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)



บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

การจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟกระแสสลับเป็นแรงดันไฟกระแสตรงแบบ 12 พัลส์

Simulation of 12-pulse AC-to-DC Power Converter

ชาคริต วิจิตรธรรม กฤษณ์ชานม์ ภูมิศักดิ์พิชญ์ และณัฐภัทร พันธุ์คง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail : chakritt.wi@gmail.com, krischonme.b@en.rmutt.ac.th, nathabhat.p@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟกระแสตรงแบบ 12 พัลส์ โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด เพื่อให้สามารถลดฮาร์มอนิกในระบบและลดพิกัดของอุปกรณ์สวิตซ์ิ่งให้เล็กลง ซึ่งต้องเข้าทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหม้อขนาดเล็ก โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) ขนาด 10 kW และมีการรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ 650 โวลต์ ด้วยวิธีการควบคุมแบบ ฟีดแบ็ค การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ผลการจำลองที่ได้พบว่าจะมีค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 5% โดยสามารถรักษาแรงดันให้คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง และในอนาคตจะทดลองจริงในห้องปฏิบัติการโดยจะสร้างเครื่องต้นแบบขนาด 10 kW เพื่อวิเคราะห์ระบบควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกับในเชิงทฤษฎีและปฏิบัติการจริง โดยใช้การควบคุมประมวลผลแบบดิจิทัล (dsSPACE)

คำสำคัญ : คอนเวอร์เตอร์กำลัง 12 พัลส์ ทั้งหม้อนำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครไนซ์ชนิดแม่เหล็กถาวร

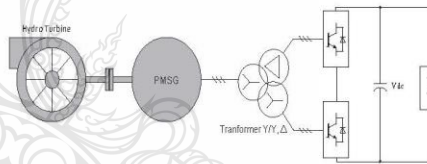
Abstract

This paper presents the simulation of 12-Pulse AC-t-DC power converter using three winding transformer. This paper aims to reduce the voltage harmonics in the generator side and to decrease the sizing of power switching device. Permanent Magnet Synchronous Generator is directly connected to three winding transformer. The dq-reference frame and conventional PI controller are used to control the DC output voltage at 650VDC that is implemented using MATLAB/simulink. The simulation results show that the ripple voltage is reduced less than 5 percent compared with the conventional power converter.

Keywords : 12 pulse power converter, hydro turbine, PMSG

1. บทนำ

ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้านั้นมีที่มาจากพลังงานหลากหลายชนิด ทั้งเชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ หรือจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ไฮโดรเจน และแรงคลื่นจากทะเล โดยวิธีการเหล่านี้ล้วนเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เดียวกัน ก็เพื่อเป็นการผลิตแรงดันไฟฟ้าออกมามุ่งมั่น สำหรับเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ แต่การใช้เทคนิคในการเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้โหลดหรือเข้าสู่กริดระบบ (Grid-connected system) มีหลากหลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะมีวิธีการที่แตกต่างกันทั้งทางด้าน การควบคุม แต่วิธีที่นิยมใช้กันหลักๆนั้น จะนิยมใช้วิธีการเชื่อมต่อโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์กำลัง (Power converter) [1]



รูปที่ 1 ระบบทั้งหม้อนำที่ใช้คอนเวอร์เตอร์กำลัง 12 พัลส์

สำหรับแนวคิดของบทความที่นำเสนอจะ ใช้กับแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้จากพลังงานน้ำโดยขับกังหันน้ำ (Hydro Turbine) และเปลี่ยนพลังงานจลน์ให้เป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนกำลังของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชนิดซิงโครไนซ์แม่เหล็กถาวร (PMSG) [1] แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิม บนพื้นฐานของการควบคุมการทำงานในโหมดปรับความเร็วรอบได้ พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG จ่ายออกมาจะส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขด มีขดลวดปฐมภูมิ 1 ขดและทุติยภูมิ 2 ขด โดยมีการต่อแบบ สตาร์-สตาร์ และสตาร์-เดลต้าเพื่อให้แรงดันด้านออกของหม้อแปลง 2 ขด ต่างเฟสกัน 30 ° ผ่านอุปกรณ์สวิตซ์ิ่ง ด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ โดยใช้สัญญาณ PWM จ่ายให้ขาเกตของ IGBT ซึ่งการเชื่อมโยงด้วยคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์นั้นจะเกิดฮาร์โมนิกที่น้อยกว่า 6 พัลส์ [3] และใช้วิธีการควบคุมแบบ ฟีดแบ็ค

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ สำหรับใช้จ่ายให้กับ โหลดหรือระบบเชื่อมต่อกิจ

องค์ประกอบกรณำเสนอในบทความนี้ประกอบด้วย ใน ส่วนที่ 2 จะอธิบายถึงระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงาน ซึ่งประกอบด้วย ระบบกังหันน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงแบบ 3 ขดลวด ส่วน ที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟกระแสสลับเป็น แรงดันไฟกระแสตรงแบบ 12 พัลส์ ส่วนที่ 4 จะแสดงผลการจำลองการ ทำงาน และส่วนที่ 5 คือสรุปและอภิปรายข้อเสนอนี้

2. ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ

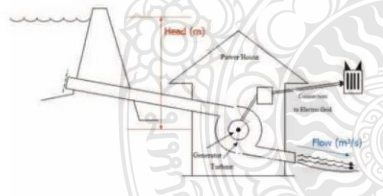
2.1 กังหันน้ำ

พลังงานไฟฟ้าที่จะได้รับจากพลังงานน้ำเป็นไปตามสมการที่ (1) โดยกำหนดให้ P คือกำลังที่ได้จากน้ำ(วัตต์) Q คืออัตราการไหลของ น้ำที่ผ่านกังหัน (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) g คือ ค่าความเร่งของน้ำ เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก(9.807 เมตร-วินาที²) d คือความหนาแน่น ของน้ำ(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) H คือความสูงของน้ำตกหรือศักย์น้ำ (เมตร)ปริมาณไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เป็นดังสมการที่ 2

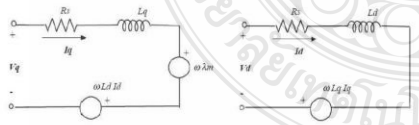
$$P = \rho g d Q H \tag{1}$$

$$W = P t \tag{2}$$

โดย W คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้(กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง) P คือ กำลังน้ำตก (กิโลวัตต์) t คือ ระยะเวลาการผลิต (ชั่วโมง) g คือ ประสิทธิภาพของ กังหันน้ำ - เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.5 - 0.9f คือ สัมประสิทธิ์ สำหรับความผันผวนของการไหลของน้ำในลำธาร[1]



รูปที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของ PMSG ที่เกี่ยวกับแกนอ้างอิงของโรเตอร์

2.2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร จะไม่มีชุดจ่ายกระแส ไฟตรงเข้าไปกระตุ้นสนามแม่เหล็ก แต่ใช้สนามแม่เหล็กจากชุดแม่เหล็ก ถาวรแทน จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องมีแปรงถ่านและวงแหวน (Slip ring) ง่าย แก่การบำรุงรักษา และสมการทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ แม่เหล็กถาวรที่อ้างอิงแกนนิ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$V_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \tag{3}$$

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

เมื่อ v คือ แรงดันไฟฟ้าที่ด้านออก, i คือ กระแสไฟฟ้าที่ด้านออก, ψ คือ เส้นแรงแม่เหล็กค้ำ, R คือความต้านทาน, ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมของ โรเตอร์ ค่า d และ q คือองค์ประกอบอ้างอิงสำหรับแกนนิ่งตามลำดับ และ s คือกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ ค่าทั้งหมดจะแสดงในหน่วยต่อหน่วย (per unit) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าต่อหน่วย เส้นแรงแม่เหล็กค้ำสามารถหาได้จาก

$$\psi_{qs} = (L_{qm} + L_{\sigma s}) i_{qs} \tag{5}$$

$$\psi_{ds} = (L_{dm} + L_{\sigma s}) i_{ds} + \psi_f \tag{6}$$

เมื่อ ψ_f คือเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรเพื่อที่จะวิเคราะห์เครื่อง ก่อเกิดไฟฟ้าอย่างง่าย ดังนั้นสมการที่ (5) และ (6) สามารถนำไปแทนลงในสมการที่ (3) และ (4) ได้ดังนี้

$$V_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_m (L_{dm} + L_{\sigma s}) i_{ds} + \omega_m \psi_f \tag{7}$$

$$V_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_m (L_{qm} + L_{\sigma s}) i_{qs} \tag{8}$$

เมื่อ L_{qm}, L_{dm} คือค่าความเหนี่ยวนำร่วมในแกน q และ d ตามลำดับ และ $L_{\sigma s}$ คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลในสเตเตอร์ แรงบิดใน ช่องอากาศ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [2]

$$T_{ac} = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} = \psi_f i_{qs} + (L_{dm} - L_{qm}) i_{ds} i_{qs} \tag{9}$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ แม่เหล็กถาวร สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_i = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \tag{10}$$

$$Q_i = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \tag{11}$$

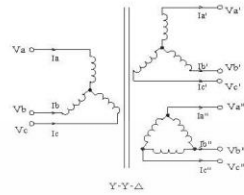
2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด

หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด ทำหน้าที่ปรับ แรงดันไฟฟ้าสำหรับป้อนให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์แบบหกพัลส์ในแต่ละ ชุด โดยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด ต้องจรรยาตาด้านปฐมภูมิเป็น แบบสตาร์และทุติยภูมิเป็นแบบสตาร์-เดลต้า

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



รูปที่ 4 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด

หน้าที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ไม่ใช่เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวแต่เป็นการสร้างแรงดันไฟฟ้าชนิดสามเฟสขึ้นสองชุด จะมีมุมต่างเฟสกัน 30° จึงทำให้เกิดเป็นรูปคลื่น 12 พัลส์

3. การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์

3.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟส

วงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM จะใช้ไอซีที่มี 6 ตัว สามารถสร้างรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบ 6 พัลส์ และควบคุมไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามต้องการ โดยการป้อนสัญญาณ PWM เข้าไปยังขาเกตของไอซีที่มีแต่ละตัว

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - (V_{dc} s_a + V_{NO}) \quad (12)$$

$$L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - (V_{dc} s_b + V_{NO}) \quad (13)$$

$$L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - (V_{dc} s_c + V_{NO}) \quad (14)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_a s_a + i_b s_b + i_c s_c - \frac{V_{dc}}{R_L} \quad (15)$$

$$V_{NO} = -\frac{V_{dc}}{3} \sum_{i=a,b,c} S_i \quad (16)$$

เมื่อ Si (i = a,b,c) แต่ Si = 1 (i = a,b,c) มีสัญญาณมอดูเลตขาเกต จะเป็นสถานะ เปิด และถ้า Si = 0 (i = a,b,c) ไม่มีสัญญาณมอดูเลตขาเกต จะเป็นสถานะ ปิด

เงื่อนไข :

$$S_i \begin{cases} 1 & \text{แขนด้านบน จะ เปิด} \\ & \text{แขนด้านล่าง จะ ปิด} \\ 0 & \text{แขนด้านบน จะ ปิด} \\ & \text{แขนด้านล่าง จะ เปิด} \end{cases}$$

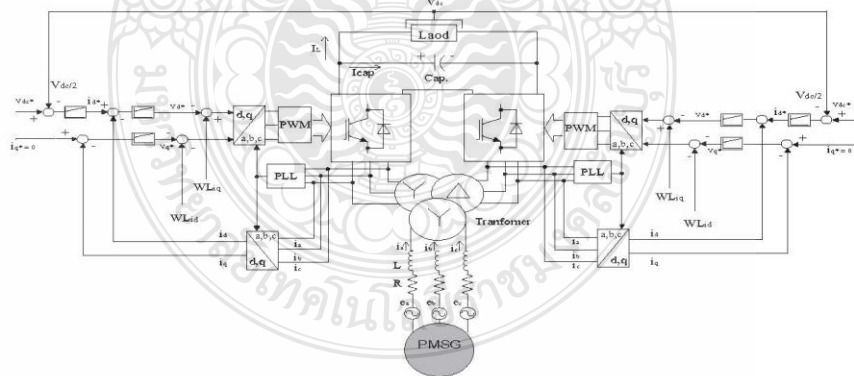
เพื่อง่ายต่อการออกแบบสัญญาณควบคุมจึงต้องการแปลงระบบ 3 เฟสไปสู่ระบบ 2 เฟส โดยแปลงจากระบบ abc ไปสู่ dq เพื่อสร้างสัญญาณมอดูเลตขาเกตของ IGBT โดยนำสมการที่ (12)-(15) มาเขียนเป็น ระบบ dq ดังนี้

$$U_{dq} = L \frac{di_{dq}}{dt} + Ri_{dq} - \omega Li_q + V_d \quad (17)$$

$$U_{dq} = L \frac{di_{dq}}{dt} + Ri_{dq} + \omega Li_d + V_q \quad (18)$$

3.2 การควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์นั้น ใช้วิธีการควบคุมเป็น 2 ชุดๆละ 6 พัลส์ โดยการควบคุมแรงดันดิซิบัสให้คงที่ ใช้ตัวควบคุมแบบ ฟีดแบ็ค ควบคุมด้วยกระแส id ซึ่งจะไหลลงจ่ายไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหันนั้นขนาดเล็กกับชุดหม้อแปลง แยกออกไปยังชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ 2 ชุด มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้รูปคลื่นเป็นแบบ 12 พัลส์ ทางเอาท์พุทจะต่อกับคาปาซิเตอร์ และต่อไปยังโหลด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบ ฟีดแบ็ค

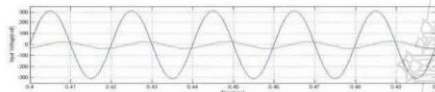
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

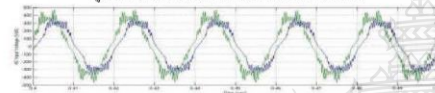
Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

4. ผลการทดลอง

การจำลองการควบคุมการเชื่อมต่อกับ PMSG ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อต่อเข้ากับชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบดังต่อไปนี้ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด 380/300/300 V ขนาด 10 kVA ค่าความต้านทานด้านเข้าเท่ากับ 0.15 Ω ค่าความเหนี่ยวนำด้านเข้าเท่ากับ 3 mH โดยมีความถี่การสวิตซ์สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ PWM มีค่าเท่ากับ 2 kHz และต้องการควบคุมแรงดัน โฟตรงด้านออกเท่ากับ 650 V ปล่อยให้กับโหลดขนาด 10 kW หรือระบบเชื่อมต่อกิริติ สามารถแสดงผลการจำลองการทำงาน ได้ดังรูปที่ 6 – 13

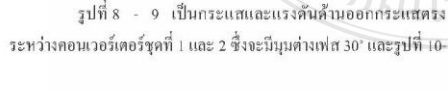
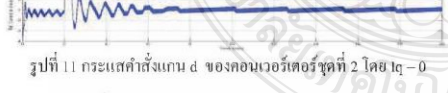
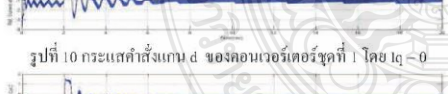
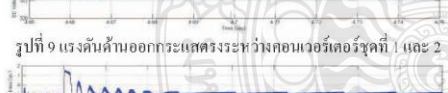
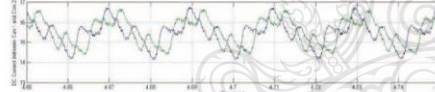


รูปที่ 6 แรงดันและกระแสด้านเข้าของเฟส A

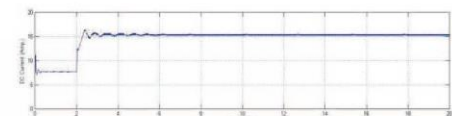


รูปที่ 7 แรงดันด้านออกของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟส A

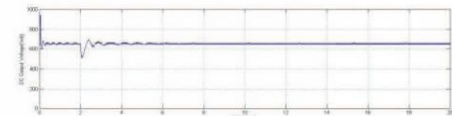
รูปที่ 6 แรงดันและกระแสด้านเข้าของเฟส A และรูปที่ 7 แรงดันและกระแสด้านออกของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 ขดลวด ของเฟส A ซึ่งจะต่างเฟสกัน 30°



รูปที่ 8 กระแสตัวสั่งแกน d เมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s ของคอนเวอร์เตอร์ชุดที่ 1 และ 2 โดย $i_q = 0$



รูปที่ 11 กระแสตัวสั่งแกน d เมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s.



รูปที่ 12 กระแสตัวสั่งแกน d เมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s.

รูปที่ 13 แรงดันด้านออกกระแสตรงเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s.

รูปที่ 12-13 เป็นกระแสและแรงดันด้านออกกระแสตรงเมื่อมี

โหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s. โดยมีการรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้

คงที่ 650 V.

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าสลับเป็นแรงดันไฟตรงแบบ 12 พัลส์ สำหรับระบบเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก โดยการควบคุมแบบ ฟีดแบ็กควบคุมเป็น 2 ชุดๆ ละ 6 พัลส์ ต่อดวงรอบกรวมกัน เพื่อให้ได้รูปคลื่นเป็น 12 พัลส์ สามารถควบคุมแรงดันไฟดีซีบัสให้คงที่ 650 V ได้ แม้ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดก็ตาม และในทางปฏิบัติยังสามารถลดขนาดอุปกรณ์ตัวขับที่ใช้ในวงจรให้มีขนาดเล็กลง เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายของค่าอุปกรณ์ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สนธยา มั่นหมาย, กฤษณ์ชนันท์ ภูมิภคดิพิชญ์. "แบบจำลองการเชื่อมโยง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเข้ากับกริดโดยใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. 64-67, 2555
- [2] ประมุข อุฬหเสจกะ และ ศุภะ. "การจำลองระบบควบคุมแรงดันคู่แบบ ควบคุมเดี่ยว สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 1 kW ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. 97-100, 2554
- [3] Karl M. Hink. "Harmonic mitigation of 12-pulse drives with unbalanced input line voltage" MFE Corporation.



RMUTCON
Rajamangala University of Technology
Bangkok Thailand 2013

บทคัดย่อ

การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

“การพัฒนาคณิตศาสตร์และนวัตกรรมเพื่อความยั่งยืน”

15-16 กรกฎาคม 2556

บางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์

เซ็นทาราแกรนด์ แอท เซ็นทรัลเวิลด์ กรุงเทพมหานคร

15.30 - 15.50 น.	5E-O27	การปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้มีคุณภาพและปลอดภัย : กรณีศึกษาของสนามกีฬา	คิดชาย อุณหศิริกุล / มร.ร.ำไพพรรณี
Session 2 สาขาวิศวกรรมศาสตร์		Meeting Room : Lotus suite 3	
Chairman	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ		มทร.พระนคร
Co-Chair	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี ศรีสงคราม		มทร.พระนคร
08.30 - 08.50 น.	5E-O39	การหมุนแบบสัมผัสที่ส่งผลต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	กานต์ เพ็ชรไทย / ม.มหาสารคาม
08.50 - 09.10 น.	5E-O40	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ในระบบสายส่งสำหรับการตั้งค่าของรีเลย์ระยะทาง	กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติ พิชญ์ / มทร.ธัญบุรี
09.10 - 09.30 น.	5E-O41	ตัวจำลองกังหันลมบนพื้นฐานการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่	รงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์ / มทร.ล้านนา
09.30 - 09.50 น.	5E-O42	การปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมแบบฟuzzyด้วยวิธีฝูงมิ่ง	บัญชา ได้ศรีโคตร / ม.นครพนม
09.50 - 10.10 น.	5E-O43	รีเลย์รู้ทิศทางตรวจจับเฉพาะกระแสโดยใช้กระแสลำดับบวก	วิวัฒน์ ทิพจร / มทร.ล้านนา
10.10 - 10.40 น.	พักรับประทานอาหารว่าง		
10.40 - 11.00 น.	5E-O44	การประยุกต์อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวหลายวิถีในงานออกแบบ ตัวควบคุมฟuzzyของวงจรองกำลังแยกที่แบบสวิตซ์ส์ถาวร	ทัศน์ะ ถมทอง / มทร.ล้านนา
11.00 - 11.20 น.	5E-O45	การออกแบบวงจรชดเชยอนุภูมิสำหรับวงจรขยายความนำขนำมอส และการประยุกต์ใช้งาน	สายัณห์ ฉายวาส / ม.มหาสารคาม
11.20 - 11.40 น.	5E-O46	การออกแบบและการพัฒนาเครื่องมวัดไฟฟ้ากระแสตรงในระบบปฏิบัติการแอนดรอย์	คมกฤษณ์ ศรีสุวรรณ / มทร.อีสาน
11.40 - 12.00 น.	5E-O47	การออกแบบวงจรอ้างอิงแรงดันแบบมอส	อดิราช สุขสวัสดิ์ / ม.มหาสารคาม
12.00 - 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน		
13.00 - 13.20 น.	5E-O48	การดัดแปลงคอมพิวเตอร์ 1 เฟส 220 โวลต์ เป็น 3 เฟส 220 โวลต์ สำหรับใช้งานใน	เกษม ศรีภาค / มทร.ล้านนา



			เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาดเล็กที่ควบคุมด้วยอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ	
13.20 - 13.40 น.	5E-O49	การหาสถานที่ตั้งและขนาดที่เหมาะสมของโซลาร์ฟาร์มในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของฟูล์ฟูล์งโดยพิจารณาการแผ่รังสีดวงอาทิตย์	ธนกร ศิริมงคลกานต์ / ม.มหาสารคาม	
13.40 - 14.00 น.	5E-O50	การเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์	กฤษณ์ชัมม์ ภูมิภักดีพิชญ์ / มทร.ธัญบุรี	
14.00 - 14.20 น.	5E-O51	การศึกษาความสัมพันธ์ของคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อและระดับความปวดหลัง	กุลธวัช สายรัตน์ / ม.มหาสารคาม	
14.20 - 14.40 น.	5E-O52	การออกแบบและสร้างกังหันน้ำขนาดเล็กผลิตไฟฟ้า ติดตั้งและทดสอบ ณ บริเวณลุ่มแม่น้ำแควใหญ่ จังหวัดกาญจนบุรี	พลั้งวัชร พงษ์ธีระสุขมัย / มทร.พระนคร	
14.40 - 15.10 น.		พักรับประทานอาหารว่าง		
15.10 - 15.30 น.	5E-O53	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายระยะไกลโดยเมกเนติกส์คู่เปิดรีโซแนนซ์	เอกชัย ชัยดี / มทร.ล้านนา	
15.30 - 15.50 น.	5E-O54	การกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กถาวรที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของถั่วงอก	นัทปภา จันทริโสเม / ม.มหาสารคาม	
Session 3 สาขาวิศวกรรมศาสตร์		Meeting Room : Lotus suite 4		
Chairman	: ดร.วรินทร์ สุตคณี	มทร.พระนคร		
Co-Chair	: ดร.ไพรัตน์ ปุญญาเจริญนนท์	มทร.พระนคร		
08.30 - 08.50 น.	5E-O68	ผลของปริมาณทองแดงต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทาในสภาพหล่อ	อัครศักดิ์ วิชชานันทกุล / ม.เทคโนโลยีสุรนารี	
08.50 - 09.10 น.	5E-O69	โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของทองเหลืองโดยกระบวนการเชื่อมแพร่	เดช เหมือนขาว / มทร.ศรีวิชัย	
09.10 - 09.30 น.	5E-O70	การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน ในการทำแพ็คคาร์บูไรซิง และชนิดของถ่านไม้	เอกรัฐ ใจบุญ / มทร.ล้านนา	
09.30 - 09.50 น.	5E-O71	การศึกษาทดลองการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับในท่อกลมด้วยการติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายอะลูมิเนียม	จิตพล ป้องกัน / มทร.อีสาน	
09.50 - 10.10 น.	5E-O72	การวิเคราะห์สมรรถนะของวัสดุผงสำหรับ	สุทธาวาส สุกุลเจริญ	



RMUTCON

5E-O50: การเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผัน
แบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์

Comparison of PWM Power Rectifier between 6 Pules and 12 Pules Converter Topology

ชาคริต วินิจธรรม¹ ฤกษ์ณัฐชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์² และ ณัฐภัทร พันธุ์คง³

¹ นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ อาจารย์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ โดยมีแหล่งจ่ายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กขนาด 20 kW เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการจ่ายกระแสอาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบ ซึ่งชุดคอนเวอร์เตอร์ของทั้งสองแบบจะต่อเข้ากับด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก แบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) และการควบคุมแรงดันด้านของวงจรเรียงกระแสที่ 700 V จะใช้การควบคุมแบบ Decoupling Control กับ Conventional PI Control โดยใช้เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบ Nicole-Ziegler การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ผลการจำลองที่ได้พบว่าจะมีค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 5 % โดยสามารถรักษาแรงดันให้คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง โดยแบบ 12 พัลส์มีอาร์มอนิกส์ที่ถูกป้อนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG น้อยกว่าแบบ 6 พัลส์ ซึ่งแนวทางการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมวงจรเรียงกระแสกำลัง PWM ในอนาคตได้

คำสำคัญ : วงจรเรียงกระแสกำลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร การควบคุมพีไอ

Keywords : Power Rectifier, Permanent Magnet Synchronous Generator and PI Control

ผู้สนับสนุนประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ krischonme.b@en.rmutt.ac.th โทร. 0 2549 3571

การเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์
Comparison of PWM Power Rectifier between 6 Pules and 12 Pules Converter Topology

ชาคริต วินิจธรรม¹ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์² และ ณัฐภัทร พันธุ์คง³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³อาจารย์ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทร 025493571

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ โดยมีแหล่งจ่ายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กขนาด 20 kW เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบ ซึ่งชุดคอนเวอร์เตอร์ของทั้งสองแบบจะต่อเข้ากับด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก แบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) และการควบคุมแรงดันด้านของวงจรเรียงกระแสที่ 700 V จะใช้การควบคุมแบบ Decoupling Control กับ Conventional PI Control โดยใช้เทคนิคการหาพารามิเตอร์การควบคุมแบบ Nicole-Ziegler การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ผลการจำลองที่ได้พบว่าจะมีค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิน 5 % โดยสามารถรักษาแรงดันให้คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง โดยแบบ 12 พัลส์มีฮาร์มอนิกส์ที่ถูกป้อนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG น้อยกว่าแบบ 6 พัลส์ ซึ่งแนวทางการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมวงจรเรียงกระแสกำลัง PWM ในอนาคตได้

Abstract

This paper presents a study of comparison of PWM power rectifier between 6 Pules and 12 Pules converter topology by small hydro turbine Generator (20kW) is power supply and Compare harmonics Current feed in the systems. Both converter connected Permanent Magnet Synchronous Ganager(PMSG) and Voltage Regulator Control at 700 V. The control system by Decoupling Control and Conventional PI Control for control parameter PI value by Nicole-Ziegler method. Analysis for Performance of the system presented a mathematical model with Matlab/Simulink program. The result of simulation have value less than 5 percent of ripple voltage and Voltage Control continuously. Converter 12 pulse have harmonics Current value feed in the systems less than converter 6 pulse. This Case study can apply using PWM power rectifier control in future work.

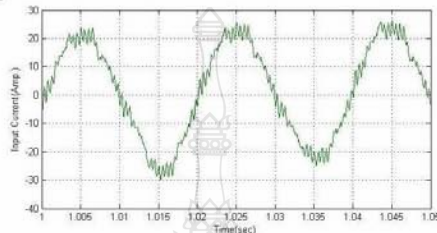
คำสำคัญ : วงจรเรียงกระแสกำลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร การควบคุมพีไอ

Keywords : Power Rectifier, Permanent Magnet Synchronous Generator and PI Control

ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ krischonme.b@en.rmutt.ac.th โทร. 0 2549 3571

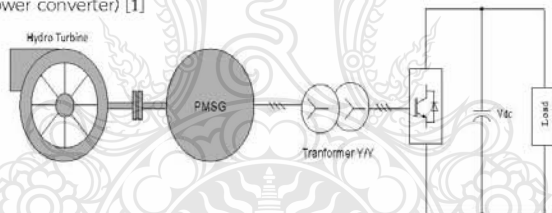
1. บทนำ

ปัญหาคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นปัญหาสำคัญ ซึ่งหนึ่งในนั้นที่สร้างปัญหาให้กับระบบคือปัญหาฮาร์มอนิกสในระบบไฟฟ้ากำลังและด้วยผลของฮาร์มอนิกสนี้ ทำให้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังจะไม่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์โดยสมบูรณ์แต่จะได้รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม(distorted waveform) ซึ่งเกิดจากโหลดที่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม เช่น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหาย ฯลฯ จากปัญหาดังกล่าวทำให้ได้รูปคลื่นสัญญาณความถี่ต่างๆ ดังรูปที่ 1

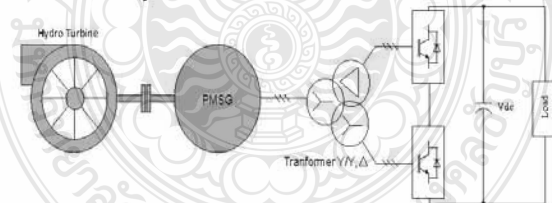


รูปที่ 1 รูปคลื่นสัญญาณความถี่ความผิดเพี้ยนจากฮาร์มอนิกส

จากปัญหาดังกล่าวจึงได้นำเสนอบทความนี้ขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ โดยมีแหล่งจ่ายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กขนาด 20 kW เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกสเข้าสู่ระบบ ระหว่าง ซึ่งชุดคอนเวอร์เตอร์ของทั้งสองแบบจะต่อเข้ากับด้านสแตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็ก แบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) และการควบคุมแรงดันด้านของวงจรเรียงกระแสที่ 700 V สำหรับเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Decoupling Control กับ Conventional PI Control เพื่อเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้โหลดหรือเข้าสู่กริดระบบ (Grid-connected system) โดยใช้วิธีการเชื่อมต่อโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์กำลัง (Power converter) [1]



รูปที่ 2 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์



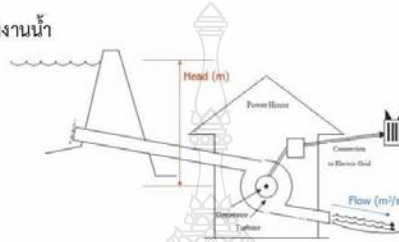
รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 12 พัลส์

สำหรับแนวคิดของบทความที่นำเสนอนี้ จะใช้กับแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้จากพลังงานน้ำโดยขับกังหันน้ำ(Hydro Turbine)และเปลี่ยนพลังงานจลน์ให้เป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนกำลังของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชนิดเชิงโรตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) [1] แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบดั้งเดิม บนพื้นฐานของการควบคุมการทำงานในโหมดปรับความเร็วรอบได้ พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG จ่ายออกมาจะส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแบบ 2 ขดลวดในโครงสร้างวงจรแปรผันแบบ 6 พัลส์และชนิด

แบบ 3 ขดลวดในโครงสร้างวงจรแปรผันแบบ 12 พัลส์ โดยวงจรแปรผันแบบ 6 พัลส์จะมีการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ สตาร์-สตาตาร์ ส่วนวงจรแปรผันแบบ 12 พัลส์ จะมีขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นขดลวดปฐมภูมิ 1 ขดและขดลวดทุติยภูมิ 2 ขด ต่อแบบ สตาร์-สตาตาร์ และสตาตาร์-เดลต้า เพื่อให้แรงดันด้านออกของหม้อแปลง 2 ขด ต่างเฟสกัน 30° ผ่านอุปกรณ์สวิตติง ด้วยชุดคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์ ทั้งสองโครงสร้างจะใช้สัญญาณ PWM จ่ายให้ขาเกตของ IGBT ใช้วิธีการควบคุมแบบ ฟ็อลโล เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ สำหรับใช้จ่ายให้กับโหลดหรือระบบเชื่อมต่อกริด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ



รูปที่ 4 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ

สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่จะได้รับจากพลังงานน้ำเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$P = \rho g Q H \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ P คือกำลังที่ได้จากน้ำ (วัตต์) Q คืออัตราการไหลของน้ำที่ผ่านกังหัน (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) g คือ ค่าความเร่งของน้ำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.807 เมตร-วินาที⁻²) d คือความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) H คือความสูงของน้ำตกหรือศักย์น้ำ (เมตร) ปริมาณไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เป็นดังสมการที่ 2

$$W = P t n_f \quad (2)$$

โดย W คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง) P คือ กำลังน้ำตก (กิโลวัตต์) t คือ ระยะเวลาการผลิต (ชั่วโมง) n คือ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ - เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ระหว่าง $0.5 - 0.9$ คือ สัมประสิทธิ์สำหรับความผันผวนของการไหลของน้ำในลำธาร [1]

2.2 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร จะไม่มีชุดจ่ายกระแสไฟตรงเข้าไปกระตุ้นสนามแม่เหล็ก แต่ใช้สนามแม่เหล็กจากชุดแม่เหล็กถาวรแทน จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องมีแปรงถ่านและวงแหวน (Slip ring) ง่ายแก่การบำรุงรักษา และสามารถทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่อ้างอิงกันนี้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3) และ (4) [2]



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของ PMSG ที่เทียบกับแกนอ้างอิงของโรเตอร์

จากวงจรสมมูลจะได้สมการที่แปลงจากแกน abc เป็น dq ได้ดังนี้

$$V_{dq} = -R i_{dq} + \omega_m (L_{dm} + L_{\sigma d}) i_{dq} + \omega_m \psi_f \quad (3)$$

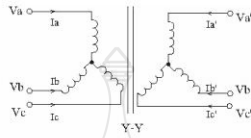
$$V_{dq} = -R i_{dq} - \omega_m (L_{qm} + L_{\sigma q}) i_{dq} \quad (4)$$

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \quad (5)$$

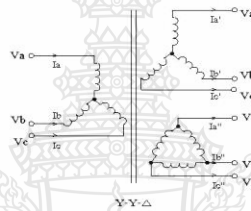
$$Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \quad (6)$$

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 2 ขดลวดและ 3 ขดลวด



รูปที่ 6 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 2 ขดลวด

หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 2 ขดลวด จะใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ และแบบ 3 ขดลวด ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ โดยจะต่อวงจรทางด้านปฐมภูมิเป็นแบบสตาร์และทุติยภูมิเป็นแบบสตาร์-เดลต้า [4] ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าสำหรับป้อนให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 7 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ 3 ขดลวด

หน้าที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ไม่ใช่เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวแต่เป็นการสร้างแรงดันไฟฟ้าชนิดสามเฟสขึ้นสองชุด จะมีมุมต่างเฟสกัน 30° จึงทำให้เกิดเป็นรูปคลื่น 12 พัลส์

3. การวางจรรยาบรรณแรงดันไฟกระแสสลับเป็นแรงดันไฟกระแสตรงแบบ 6 พัลส์และ 12 พัลส์

3.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบควบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM

วงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบควบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM จะใช้ไอจีบีที 6 ตัว สามารถสร้างรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแบบ 6 พัลส์ และควบคุมไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามต้องการโดยการป้อนสัญญาณ PWM เข้าไปยังขาเกตของไอจีบีทีแต่ละตัว [5]

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - (V_{dc} s_a + V_{NO}) \quad (7)$$

$$L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - (V_{dc} s_b + V_{NO}) \quad (8)$$

$$L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - (V_{dc} s_c + V_{NO}) \quad (9)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_a s_a + i_b s_b + i_c s_c - \frac{V_{dc}}{R_L} \quad (10)$$

$$V_{NO} = -\frac{V_{dc}}{3} \sum_{i=a,b,c} S_i \quad (11)$$

เมื่อ S_i ($i = a, b, c$) แต่ $S_i = 1$ ($i = a, b, c$) มีสัญญาณมาทริกขาเกต จะเป็นสถานะ เปิด และถ้า $S_i = 0$ ($i = a, b, c$) ไม่มีสัญญาณมาทริกขาเกต จะเป็นสถานะ ปิด

เงื่อนไข :

$$S_i \begin{cases} 1 & \text{แขนด้านบน จะ เปิด} \\ & \text{แขนด้านล่าง จะ ปิด} \\ 0 & \text{แขนด้านบน จะ ปิด} \\ & \text{แขนด้านล่าง จะ เปิด} \end{cases}$$

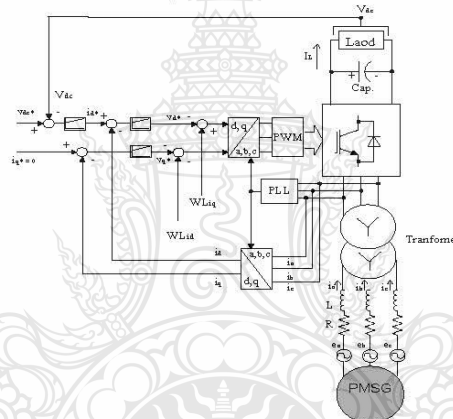
เพื่อถ่ายต่อการออกแบบสัญญาณควบคุมจึงต้องการแปลงระบบ 3 เฟสไปสู่ระบบ 2 เฟส โดยแปลงจาก abc ไปสู่ dq เพื่อสร้างสัญญาณทริกขาเกตของ IGBT โดยนำสมการที่ (12)-(15) มาเขียนเป็น ระบบ dq ดังนี้

$$U_{sd} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega L i_q + V_d \quad (12)$$

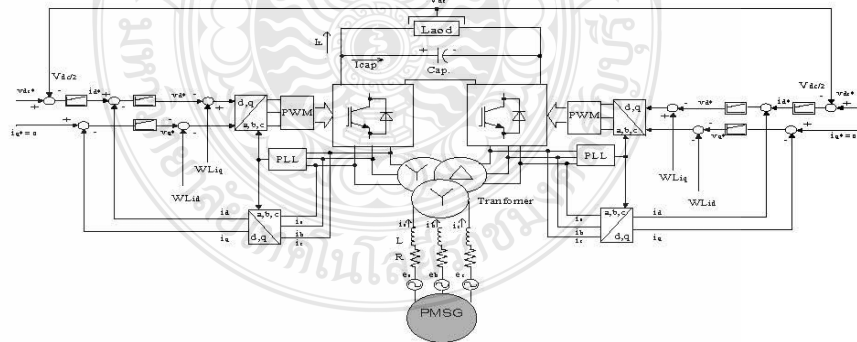
$$U_{sq} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega L i_d + V_q \quad (13)$$

3.2 การควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM 6 พัลส์

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ ใช้วิธีการควบคุม โดยการควบคุมแรงดันดีซีบัสให้คงที่ที่ 700 V ใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอ ควบคุมด้วยกระแส i_d ซึ่งจะมีแหล่งจ่ายไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กน้อยมาต่อกับชุดหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด ผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์ต่อกับคาปาซิเตอร์ และต่อไปยังโหลด ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์โดยควบคุมแบบ PI



รูปที่ 9 โครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 12 พัลส์โดยควบคุมแบบ PI

3.2 การควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแส แบบคุมเฟสโดยสัญญาณ PWM 12 พัลส์

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ 12 พัลส์นั้น ใช้วิธีการควบคุม เป็น 2 ชุดๆละ 6 พัลส์ โดยการควบคุมแรงดันดิซิบัสให้คงที่ ใช้ตัวควบคุมแบบ พีโอ ควบคุมด้วยกระแส id ซึ่งจะมีแหล่งจ่ายไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กมาต่อกับชุดหม้อแปลง แยกออกไปยังชุดคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ 2 ชุด มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้รูปคลื่น เป็นแบบ 12 พัลส์ ทางเอาท์พุทจะต่อกับคาปาซิเตอร์ และต่อไปยังโหลด ดังรูปที่ 9 [5]

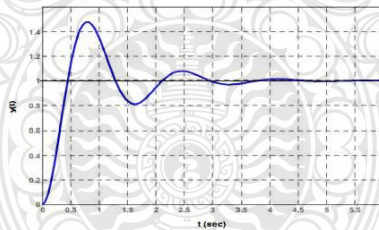
3.3 เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ควบคุมแบบ Nicole – Ziegler

เทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PI โดยใช้แบบ Nicole – Ziegler ภายใต้กระบวนการของระบบแบบลูปปิด (closed loop) วิธีนี้จะมีค่า โอเวอร์ชูต ประมาณร้อยละ 25 และสามารถปรับจูนค่า PI โดยมีเงื่อนไขดังนี้ [6]

- 1) ลดค่า Integrator และ derivative gains ให้ถึง 0
 - 2) เพิ่มค่า K_p จาก 0 จนปรับค่า $K_p=K_{cr}$ ซึ่งจะไม่มีการแกว่งเกิดขึ้น แต่ถ้ามีให้ประยุกต์ใช้วิธีอื่นๆ
- เมื่อ $K_p = \text{Proportional Gain}$
 $K_i = \text{Integral Gain}$
 $K_d = \text{Derivative Gain}$
 $T_i = \text{Reset time} = K_p/K_i$
 $T_d = \text{Rate time or derivative time}$

ตารางที่ 1 การปรับค่าโดยวิธี Nicole – Ziegler

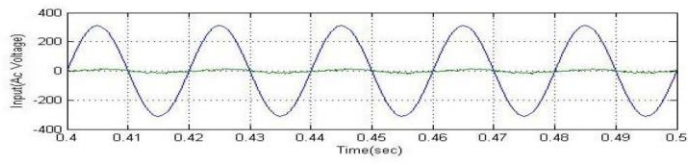
PID TYPE	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{p_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$\frac{p_{cr}}{2}$	$\frac{p_{cr}}{8}$



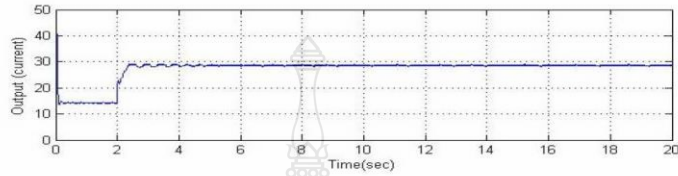
รูปที่ 10 ผลการตอบสนองแบบ Nicole – Ziegler

4. ผลการทดลอง

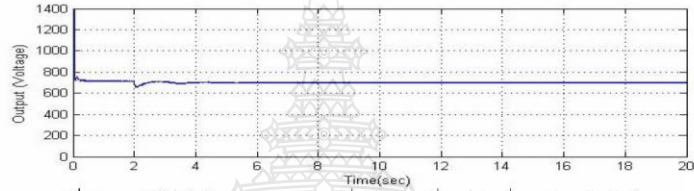
การจำลองการควบคุมการเชื่อมต่อกับ PMSG ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อต่อเข้ากับชุดคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์และ 12 พัลส์ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบดังต่อไปนี้ หม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 20 kVA ค่าความต้านทานด้านเข้าเท่ากับ 0.15Ω ค่าความเหนี่ยวนำด้านเข้าเท่ากับ 3 mH โดยมีความถี่การสวิตซ์สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ PWM มีค่าเท่ากับ 2 kHz และต้องการควบคุมแรงดันไฟตรงด้านออกเท่ากับ 7000 V จ่ายให้กับโหลดขนาด 20 kW หรือระบบเชื่อมต้อกริด สามารถแสดงผลการจำลองการทำงานได้ดังรูปที่ 11 – 20



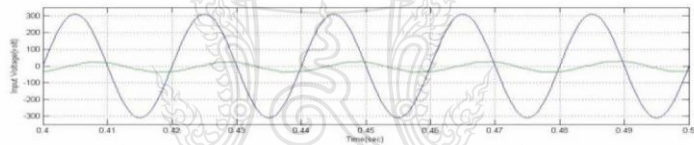
รูปที่ 11 แรงดันและกระแสต้านเข้าของเฟส A (6 พัลส์)



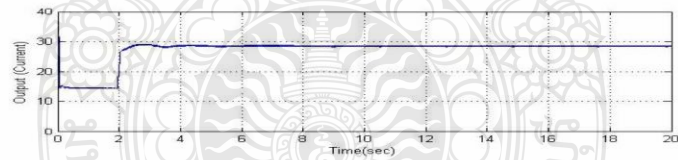
รูปที่ 12 กระแสต้านออกกระแสตรงเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s. (6 พัลส์)



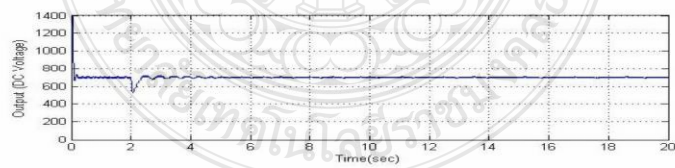
รูปที่ 13 แรงดันไฟฟ้าต้านออกกระแสตรงเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s. (6 พัลส์)



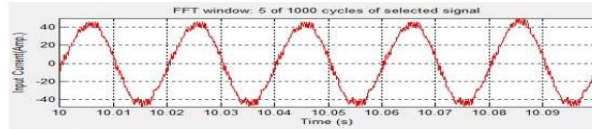
รูปที่ 14 แรงดันและกระแสต้านเข้าของเฟส A (12 พัลส์)



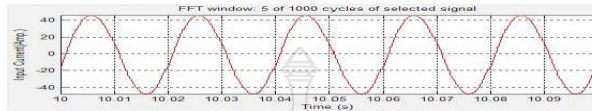
รูปที่ 15 กระแสต้านออกกระแสตรงเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s. (12 พัลส์)



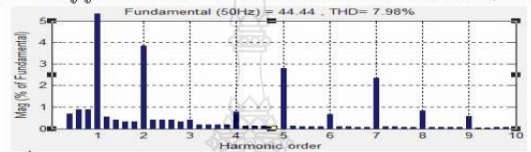
รูปที่ 16 แรงดันไฟฟ้าต้านออกกระแสตรงเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2 s. (12 พัลส์)



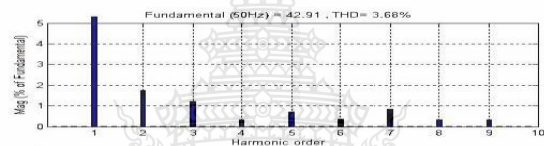
รูปที่ 17 สัญญาณความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าต้านเข้าจากฮาร์มอนิกส์(6 พัลส์)



รูปที่ 18 สัญญาณความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าต้านเข้าจากฮาร์มอนิกส์(12พัลส์)



รูปที่ 19 กระแสฮาร์มอนิกส์ของโครงสร้างวงจรเรียงกระแส PWM แบบ 6 พัลส์



รูปที่ 20 กระแสฮาร์มอนิกส์ของโครงสร้างวงจรเรียงกระแส PWM แบบ 12 พัลส์

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวงจรเรียงกระแส PWM ระหว่างโครงสร้างวงจรแปลงผันแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ โดยการควบคุมแบบ PI ใช้เทคนิคการหาพารามิเตอร์ควบคุมแบบ Nicotie – Ziegler สามารถควบคุมแรงดันฟีดซีบัสให้คงที่ๆ 700 V แม้ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่วินาทีที่ 2 ก็ตาม และโครงสร้างวงจรแบบ 12 พัลส์ มีค่ากระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) ร้อยละ 3.68 ยังมีค่ากระแสฮาร์มอนิกส์น้อยกว่า แบบ 6 พัลส์ มีค่ากระแสฮาร์มอนิกส์รวม(THD) ร้อยละ 7.98 เพราะฉะนั้นโครงสร้างวงจรที่เป็นแบบ 12 พัลส์ เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงเพื่อลดความเสียหายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อันเกิดจากปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าได้ในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สนธยา มันหมาย,กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์,“แบบจำลองการเชื่อมโยง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเข้ากับกริดโดยใช้การควบคุมแบบเวคเตอร์”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรม ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.64-67,2555
- [2] ชาคริต วินิจธรรม, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ และ ณัฐภัทร พันธัง.“การจำลองการทำงานของวงจร แปลงผันแรงดันไฟกระแสตรงแบบ 12 พัลส์”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรม ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.125-128,2556
- [3] Karl M. Hink.“Harmonic mitigation of 12-pulse drives with unbalanced input line voltage” MTE Corporation.
- [4] Liqiu Han, Jiabin Wang and David Howe.“State-space average modelling of 6- and 12-pulse diode rectifiers” Electrical Engineering, University of Sheffield.
- [5] Shutuan Zhang, Kai Zhang, Zhongshan Jiang and Fang Lu. “Modeling and Simulation of Three-phase Rectifier Based on SVPWM.” IEE Trans. Ind. Electron,pp.318-321 ,2010.
- [6] Brian R Copeland. “The design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning”, March 2008.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชาคริต วินิจธรรม
วัน เดือน ปีเกิด	12 ก.ค. 30
ที่อยู่	1 หมู่ 1 ซ.9 ถ.เทศบาล 2 ต.พลี อ.แหลมสิงห์ จ.จันทบุรี 22190
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ปี พ.ศ. 2553
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2550 - 2551	ช่างเทคนิค บริษัท รีเทลลิงค์(ไทยแลนด์) จำกัด
พ.ศ. 2553 - ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี

