

การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม

APPLICATION OF SOLID-STATE TRANSFORMER FOR SOLAR FARM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-D-018-062

การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม

APPLICATION OF SOLID-STATE TRANSFORMER FOR SOLAR FARM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562
KMITL-2019-EN-D-018-062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม

APPLICATION OF SOLID-STATE TRANSFORMER FOR SOLAR FARM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562
KMITL-2019-EN-D-018-062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF SOLID-STATE TRANSFORMER FOR SOLAR FARM



PANYA KHEMMOOK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-D-018-062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019


FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม
Thesis Title Application of Solid-State Transformer for Solar Farm
นักศึกษา นายปัญญา เข้มมุข
รหัสประจำตัว 57601023
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2019-EN-D-018-062

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ไพบุลย์	นาคมหาขลาสินธุ์	
รศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
รศ.ดร.สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
รศ.ดร.สุรินทร์	คำฝอย	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 เวลา 9.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 4 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม
นักศึกษา	นายปัญญา เข็มมูข
รหัสประจำตัว	57601023
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม โดยการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และมีโครงสร้างคล้ายกับการรวมหม้อแปลงไฟฟ้าและวงจรอินเวอร์เตอร์เข้าไว้ด้วยกันในอุปกรณ์เพียงตัวเดียวมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม เพื่อแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงในช่วงเวลากลางคืนหรือในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม และเพื่อเพิ่มรายได้จากการขายไฟให้กับเจ้าของโซลาร์ฟาร์ม เนื่องจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถตัดการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าจึงไม่ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากแกนเหล็กเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน การจำลองการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และโปรแกรม PSIM ซึ่งประกอบด้วย 1) การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่สร้างจากวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ ผ่านหม้อแปลงความถี่สูงแกนเฟอร์ไรต์ด้วยเทคนิค SHE (Selective harmonic elimination method) ที่ความถี่ 10 kHz และ 2) การทำงานของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถยืนยันประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังนำเสนอฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมที่หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังควรมี ได้แก่ 1) ฟังก์ชันการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ขณะทำงานด้วยเทคนิค Box Plot เพื่อลดเวลาในการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ในโซลาร์ฟาร์ม สามารถแก้ไขปัญหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ทำให้การสูญเสียรายได้ของเจ้าของโซลาร์ฟาร์มมีค่าลดลง และ 2) ฟังก์ชันการเพิ่มเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าจริงของระบบไฟฟ้าด้วยเทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกันของวงจรคอนเวอร์เตอร์ภายในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อรองรับการทำงานของระบบไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์

Thesis	Application of Solid-State Transformer for Solar Farm
Student	Mr.Panya Khemmook
Student ID.	57601023
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Surin Khomfoi
Thesis Co-Advisor	Assist.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam

ABSTRACT

This thesis presents a solid-state transformer (SST) application for solar farms. SST is a device using power electronics components as a one-piece device which combine between inverters and a conventional low frequency transformer. The main factor of this converter application in solar farms is to reduce the loss of energy during the off-load hours at night, resulting in more revenue for investors in the solar farm project. A SST can automatically disconnect from the utility grid; therefore, the SST does not cause the loss of power from the core loss like the conventional transformer. The overall simulation of the solid-state transformer structure is performed by utilizing MATLAB/Simulink together with PSIM. Generally, the application of electronic transformers on a solar farm consists of seven-level H-bridge multilevel converters with selective harmonic elimination (SHE) technique and switching via the high frequency transformer at approximately 10 kHz. The circuit operation of the three-level multilevel inverter structure connected to the electrical system is consistent with the actual experimental results in the laboratory; thus, these results show that the system is able to operate correctly. In addition, there are also additional functions of an SST such as functions for detecting abnormal working conditions of a solar panel by using the Box-Plot technique. A Box-Plot method can be used to determine the defected solar panel so that the problem of loss of income of solar farm owners can also be monitored. Moreover, the proposed SST can offer the function of stability compensation in a transient condition of utility grid by adding the developed control technique in the converter of an SST to support the required operation from the utility system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม ประสบผลสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม โดยเฉพาะ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย ที่คอยแนะนำให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ ตลอดการทำงานวิจัย นอกจากนี้ ต้องขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ. ระดับปริญญาเอก) ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้ความร่วมมือกับ บริษัท พีระบราเธอร์ จำกัด และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่สัญญา PHD5810092 ที่สนับสนุนด้านเงินทุนสำหรับการวิจัยในครั้งนี้

นอกจากความช่วยเหลือของพี่ ๆ และ น้อง ๆ ทุกคน ในห้องปฏิบัติการอาคารระบบไฟฟ้า อัจฉริยะ และการสนับสนุนจากทุก ๆ ฝ่าย รวมทั้งความวิริยะอุตสาหะของตัวผู้จัดทำเอง ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุด นั่นคือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพภักดีของผู้จัดทำ ซึ่งได้เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนผู้จัดทำเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้านเสมอมา ผู้จัดทำระลึกในพระคุณและกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ปัญญา เข้มมุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน.....	6
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	6
1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในงานวิจัย.....	7
บทที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 หลักการทำงานของโซลาร์ฟาร์มและปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์ม.....	8
2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม.....	10
2.4 บทสรุป.....	20
บทที่ 3 หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 ความเป็นมาของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	21
3.3 โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	22
3.3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	23
3.3.2 หม้อแปลงความถี่สูง.....	24
3.4 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบต่าง ๆ.....	28
3.4.1 การประยุกต์ใช้งานในระบบสมาร์ตกริด.....	28
3.4.2 การประยุกต์ใช้งานกับระบบรางไฟฟ้า.....	30
3.4.3 การประยุกต์ใช้งานกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า.....	30
3.4.4 การประยุกต์ใช้งานกับระบบจำหน่ายเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า..	31
3.5 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม.....	33
3.6 บทสรุป.....	38
บทที่ 4 การออกแบบและการจำลองหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	39
4.1 บทนำ.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การออกแบบและการจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง.....	39
4.2.1 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง.....	40
4.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ฟีดปรัภูมิของหม้อแปลง.....	42
4.2.3 เทคนิคการควบคุมการทำงานวงจรเอชบริดจ์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ.....	43
4.2.4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นสัญญาณ แรงดันไฟฟ้า.....	46
4.3 การออกแบบและการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ฟีดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า...	50
4.3.1 การออกแบบและการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์.....	51
4.3.2 การควบคุมการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์.....	56
4.3.3 ผลการจำลองการทำงานวงจรมอดูลาร์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์.....	59
4.4 บทสรุป.....	76
บทที่ 5 ผลการทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	77
5.1 บทนำ.....	77
5.2 การทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง.....	78
5.2.1 การประเมินประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง..	80
5.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงระหว่างเทคนิคการ ส่งกำลังไฟฟ้าแบบ SHE กับเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Square wave.....	84
5.3 ผลการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ฟีดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า.....	89
5.3.1 ผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W.....	92
5.3.2 ผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W.....	96
5.3.3 ผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W.....	100
5.3.4 การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลิตเลเวล อินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ.....	104
5.4 การประเมินประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	105
5.5 บทสรุป.....	106
บทที่ 6 ฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	107
6.1 บทนำ.....	107
6.2 การตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์.....	107
6.2.1 เทคนิค Box Plot.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.2 การประยุกต์ใช้เทคนิค Box Plot กับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังใน โซลาร์ฟาร์ม.....	108
6.2.3 การจำลองการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเทคนิค Box Plot.....	109
6.3 การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์.....	117
6.3.1 เทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกัน (Coordinated control).....	117
6.3.2 การควบคุมการทำงานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	118
6.3.3 การออกแบบเงื่อนไขการควบคุมการทำงานร่วมกันเพื่อให้เกิดความ เหมาะสมที่สุด.....	121
6.3.4 การจำลองการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์.....	122
6.4 บทสรุป.....	127
บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....	128
7.1 สรุปผลงานวิจัย.....	128
7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	131
เอกสารอ้างอิง.....	132
ภาคผนวก งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	137
ประวัติผู้เขียน.....	175

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พลังงานที่สูญเสียของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในขณะที่ทำงานของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 MW.....	10
2.2 ประสิทธิภาพและราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ.....	11
2.3 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ.....	11
2.4 มูลค่าการคืนทุนของหม้อแปลงไฟฟ้าจากการใช้ชนิดลดและแกนเหล็กที่มีคุณภาพสูงขึ้น เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมาตรฐานชนิดที่ 1 (ประสิทธิภาพ 98.5 %).....	18
2.5 มูลค่าการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ในช่วงที่โซลาร์ฟาร์มไม่มีการทำงาน.....	19
3.1 คุณสมบัติของแกนชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำหม้อแปลงความถี่สูง.....	25
3.2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 3 kHz.....	26
3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์ฟาร์มที่มีโครงสร้างแบบ String inverter และแบบ Central inverter.....	36
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์.....	60
5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของชุดทดสอบวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์.....	90
5.2 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W.....	105
5.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W.....	105
5.4 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W.....	105
6.1 เงื่อนไขการจำลองการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์.....	109
6.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม PI.....	124

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ผลกระทบของ PV ต่อระบบของการไฟฟ้า.....	2
1.2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเวลากลางวันและกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงที่ไม่มีการทำงาน ของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 MW.....	3
1.3 โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ทั้ง ทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยหม้อแปลงความถี่สูง (HFT).....	3
1.4 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีโครงสร้างคล้ายกับการรวมวงจร คอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกันในระบบต่าง ๆ.....	4
2.1 หลักการทำงาน และโครงสร้างของโซลาร์ฟาร์ม.....	9
2.2 การทำงานของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 MW.....	9
2.3 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 1.....	13
2.4 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 2.....	13
2.5 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 3.....	14
2.6 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 4.....	14
2.7 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 5.....	15
2.8 มูลค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียลดลงของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้า แบบมาตรฐานชนิดที่ 1 (ประสิทธิภาพ 98.5 %) ตลอดระยะเวลา 25 ปี ตามสัญญาการ ซื้อขายไฟ.....	16
2.9 มูลค่าการคืนทุนหรือผลกำไรสุทธิของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เทียบกับหม้อแปลง ไฟฟ้าแบบมาตรฐานชนิดที่ 1 (ประสิทธิภาพ 98.5 %) ตลอดระยะเวลา 25 ปี ตาม สัญญาการรับซื้อขายไฟ.....	17
2.10 มูลค่าการคืนทุนจากการใช้ชุดลดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และการใช้แกนเหล็กที่มี ประสิทธิภาพสูงขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ มาตรฐานชนิดที่ 1.....	18
2.11 มูลค่าการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ในช่วงที่โซลาร์ฟาร์มไม่มีการทำงาน.....	19
3.1 วงจรหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย W. McMurray ในปี 1970..	21
3.2 ตัวอย่างโครงสร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	22
3.3 โครงสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	24
3.4 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ ขนาด และต้นทุนในการผลิตหม้อแปลงความถี่สูง.....	25
3.5 ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนความถี่สูงที่ความถี่ต่าง ๆ ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 100 kHz.	26
3.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับหม้อแปลง ความถี่ต่ำที่ทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ที่ประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้า.....	28
3.7 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบไฟฟ้าแบบสมาร์ทกริด.....	29
3.8 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบรางไฟฟ้า.....	30
3.9 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ ไฟฟ้า.....	31
3.10 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในรูปแบบอุปกรณ์ FACTs device.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังแทนที่ระบบการทำงานเดิมในโซลาร์ฟาร์ม.....	33
3.12 โซลาร์ฟาร์มไทรย้อยที่จังหวัดนครปฐม (String inverter).....	35
3.13 โซลาร์ฟาร์มไทรทองที่จังหวัดนครปฐม (Central inverter).....	35
3.14 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มในรูปแบบ Central inverter.....	37
4.1 โครงสร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังของงานวิจัยที่นำมาประยุกต์ใช้กับโซลาร์ฟาร์ม....	39
4.2 โครงสร้างหม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
4.3 วงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ.....	43
4.4 การนำเทคนิค Alternate arrangement of pulses มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิค SHE..	44
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า m_a กับค่า %THDv.....	47
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า m_a กับชุดมุมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน.....	47
4.7 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองโดยใช้เทคนิค SHE.....	48
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า m_a กับแรงดัน RMS ของรูปคลื่นสัญญาณ.....	48
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า m_a กับฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมที่อันดับต่าง ๆ.....	49
4.10 การเปรียบเทียบค่า %THDv ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณกับชุดมุมที่เหมาะสม.....	49
4.11 วงจรมอดูเลตมัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 3 ระดับ แบบ DSCC.....	51
4.12 การควบคุมการทำงานคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า.....	57
4.13 วงจรมอดูเลตมัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบ 3 ระดับ.....	59
4.14 วงจรควบคุมการทำงานของวงจรมอดูเลตมัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ในโปรแกรม PSIM.....	61
4.15 เทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM แบบ Phase disposition PWM (PDPWM).....	61
4.16 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการมอดูเลชั่น 0.2.....	62
4.17 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการมอดูเลชั่น 0.4.....	63
4.18 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการมอดูเลชั่น 0.6.....	64
4.19 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการมอดูเลชั่น 0.8.....	65
4.20 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการมอดูเลชั่น 1.0.....	66
4.21 วงจรอินพุตการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W ของวงจร MMI.....	67
4.22 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI.....	68
4.23 ภาพขยายการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI.	69
4.24 วงจรอินพุตการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W ของวงจร MMI.....	70
4.25 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI.....	71
4.26 ภาพขยายการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI.	72
4.27 วงจรอินพุตการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W ของวงจร MMI.....	73
4.28 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI.....	74
4.29 ภาพขยายการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI.....	75
5.1 หลักการทำงานของชุดทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 ชุดทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง...	79
5.3 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ในสภาวะไม่จ่ายโหลด.....	79
5.4 ค่า %THDv รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์.....	80
5.5 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	81
5.6 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	81
5.7 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	82
5.8 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	82
5.9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	83
5.10 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	83
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับ ประสิทธิภาพหม้อแปลงความถี่สูง.....	84
5.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบ Quasi square wave ในสภาวะไม่จ่ายโหลด.....	85
5.13 ค่า %THDv รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแบบ Quasi square wave.....	85
5.14 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	86
5.15 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	86
5.16 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	87
5.17 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลง อิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	87
5.18 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงระหว่างเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้า แบบ SHE กับเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Square wave.....	88
5.19 การควบคุมการทำงานวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ.....	89
5.20 วงจรคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	91
5.21 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุม Smart Line Modules.....	91
5.22 แรงดันและกระแสของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W.....	92
5.23 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส A ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W.....	93
5.24 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส B ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W.....	93
5.25 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส C ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 แร้งดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตีซีลิ่งค์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W.....	94
5.27 แร้งดันไฟฟ้า PWM ระหว่างเฟสของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ ขณะจ่าย กำลังไฟฟ้า 350 W.....	95
5.28 แร้งดันและกระแสของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W.....	96
5.29 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส A ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W.....	97
5.30 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส B ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W.....	97
5.31 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส C ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W.....	98
5.32 แร้งดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตีซีลิ่งค์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W.....	98
5.33 แร้งดันไฟฟ้า PWM ระหว่างเฟสของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ ขณะจ่าย กำลังไฟฟ้า 500 W.....	99
5.34 แร้งดันและกระแสของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W.....	100
5.35 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส A ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W.....	101
5.36 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส B ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W.....	101
5.37 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส C ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W.....	102
5.38 แร้งดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตีซีลิ่งค์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W.....	102
5.39 แร้งดันไฟฟ้า PWM ระหว่างเฟสของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ ขณะจ่าย กำลังไฟฟ้า 1,000 W.....	103
5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวล อินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	104
5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าพิกัดต่าง ๆ เข้าสู่ระบบไฟฟ้า.....	106
6.1 การประยุกต์ใช้เทคนิค Box Plot กับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังไนโวลาร์ฟาร์ม.....	108
6.2 แบบจำลองการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเทคนิค Box Plot.....	110
6.3 ค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการจำลอง.....	110
6.4 วงจรแผงโซลาร์เซลล์ในสถานะปกติ.....	111
6.5 ผลการจำลองสถานะปกติ.....	111
6.6 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สถานะเปิดวงจร.....	112
6.7 ผลการจำลองสถานะเปิดวงจร.....	112
6.8 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สถานะการเกิดฟอลท์แบบ Line-line ($R_f = 0 \Omega$).....	113
6.9 ผลการจำลองสถานะการเกิดฟอลท์แบบ Line-line ($R_f = 0 \Omega$).....	113
6.10 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สถานะการเกิดฟอลท์แบบ Line-line ($R_f = 20 \Omega$).....	114
6.11 ผลการจำลองสถานะการเกิดฟอลท์แบบ Line-line ($R_f = 20 \Omega$).....	114
6.12 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สถานะการเกิดเงาบัง.....	115
6.13 ผลการจำลองสถานะการเกิดเงาบัง.....	115
6.14 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สถานะแผงโซลาร์เซลล์เสื่อมสภาพ.....	116
6.15 ผลการจำลองสถานะแผงโซลาร์เซลล์เสื่อมสภาพ.....	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16 การประยุกต์ใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า.	118
6.17 การควบคุมการทำงานของ SPV inverter.....	119
6.18 การควบคุมการทำงานของ SST.....	119
6.19 ตัวควบคุม PI.....	121
6.20 แบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม.....	122
6.21 สัญญาณอินพุทของ Remote PI controller และค่าความเข้มแสงที่ใช้ในการจำลอง.....	125
6.22 ผลการจำลองที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ.....	126



บทที่ 1

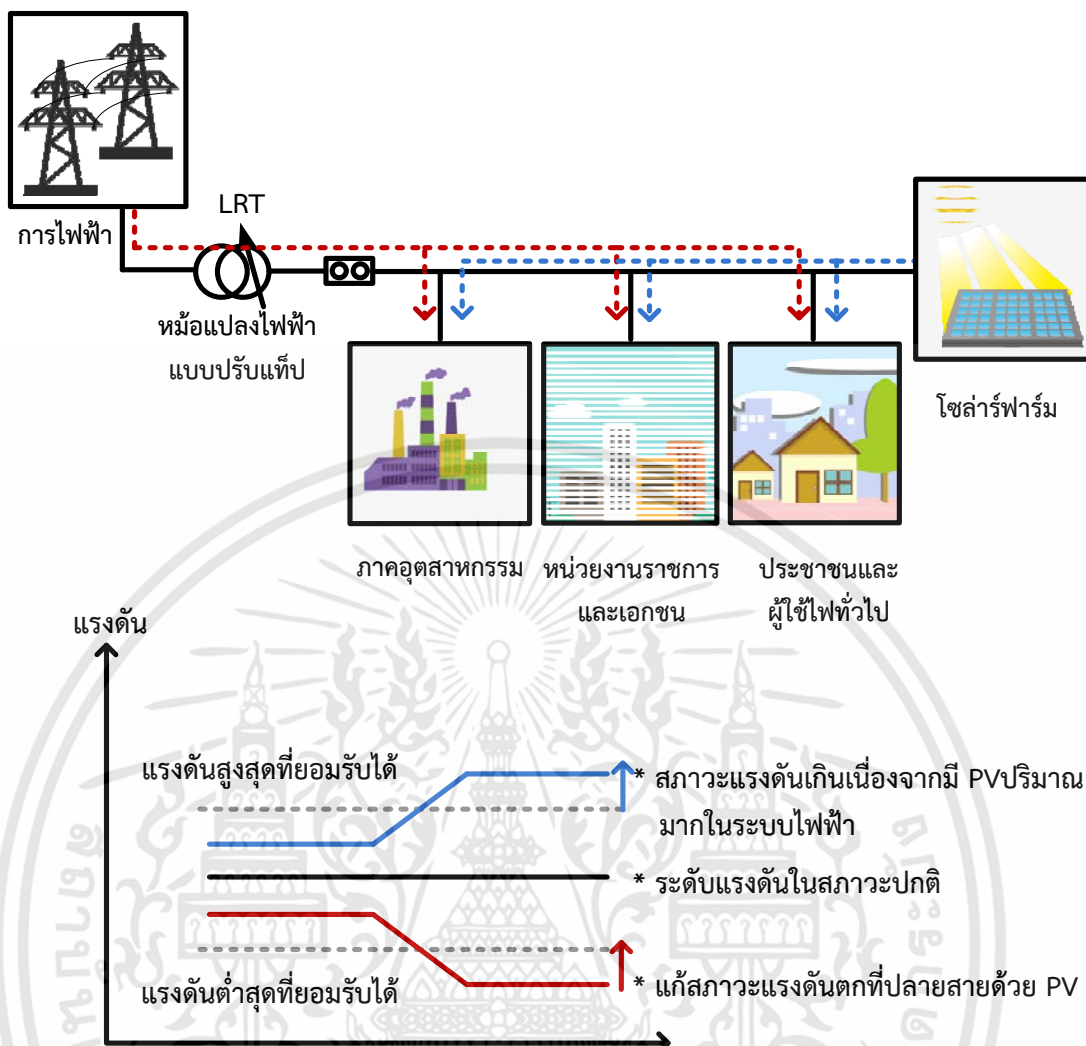
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหา

พลังงานทดแทนเป็นพลังงานสะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีอยู่ตามธรรมชาติ และช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นเหตุให้เกิดภาวะโลกร้อน จากแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า (PDP) ปี 2553 - 2573 และแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) ปี 2555 - 2564 ของกระทรวงพลังงานได้กำหนดให้มีสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็น 25 % ของการใช้พลังงานทั้งหมดในปี 2564 ทำให้เกิดการตื่นตัวในเรื่องของพลังงานทดแทนและมีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนมากยิ่งขึ้น พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทยได้ถูกนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก แต่พลังงานที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากที่สุด คือ พลังงานแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยแผงโซลาร์เซลล์ (PV) ในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือโซลาร์ฟาร์ม (Solar farm) เนื่องจากวิธีการดังกล่าวไม่ยุ่งยาก สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ง่าย มีความเหมาะสมกับประเทศไทยเพราะพื้นที่ส่วนใหญ่ในประเทศไทยมีแสงแดดค่อนข้างมาก ราคาต้นทุนของอุปกรณ์มีมูลค่าถูกลง สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าและแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกที่ปลายสายได้ อีกทั้งยังสามารถชะลอการสร้างโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนในการก่อสร้างสูง และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย นอกจากนี้ข้อดีต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว PV ยังมีข้อด้อยที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า คือ เมื่อ PV จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบดังแสดงในรูปที่ 1.1 พบว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ ณ จุดที่ PV ทำงานจะเพิ่มสูงขึ้น ถ้า PV จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ามาในระบบมากก็อาจทำให้เกิดสถานะแรงดันเกิน (Over voltage) จนแรงดันไฟฟ้าเกินค่าที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ถ้าในช่วงที่ไม่มีแสงแดดหรือมีแสงแดดน้อย PV ก็จะมีผลิตกระแสไฟฟ้าได้น้อย ทำให้การไฟฟ้าต้องสำรองปริมาณกระแสไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่ง เพื่อใช้ในกรณีที่ PV ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เป็นเหตุให้เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

ปัจจุบันประเทศไทยได้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์เข้ามาใช้ในระบบไฟฟ้าแล้วประมาณ 2,000 MW อยู่ในระหว่างดำเนินการก่อสร้างประมาณ 1,000 MW และในระยะอีกไม่กี่ปีข้างหน้า ยังมีแผนเพิ่มการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์ขึ้นอีกประมาณ 1,500-2,000 MW ซึ่งจะทำให้ประเทศไทยมีการใช้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงโซลาร์เซลล์รวมทั้งประเทศประมาณ 4,500-5,000 MW (ปี พ.ศ. 2579) ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์ในรูปแบบโซลาร์ฟาร์มมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในปริมาณที่มาก และเป็นวิธีการหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนของประเทศ ดังนั้น การศึกษาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งนอกจากจะช่วยลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของระบบแล้ว ยังช่วยเพิ่มรายได้จากการขายไฟให้แก่เจ้าของโซลาร์ฟาร์มได้อีกทางหนึ่งด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

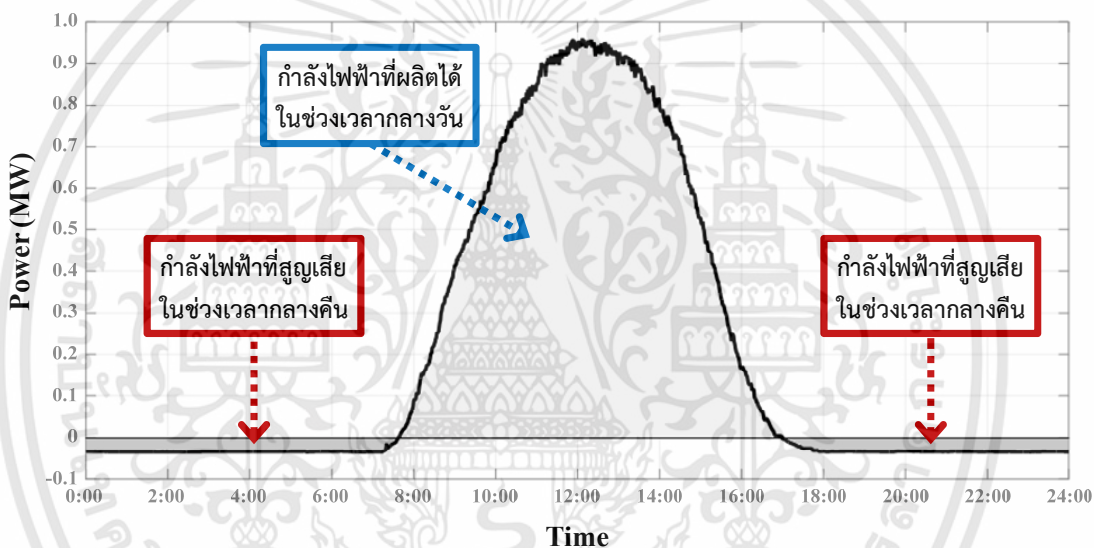


รูปที่ 1.1 ผลกระทบของ PV ต่อระบบของการไฟฟ้า

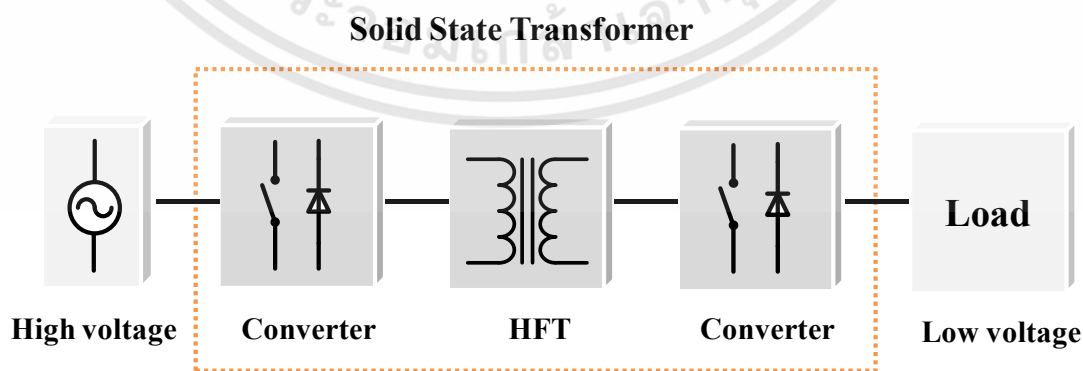
จากการศึกษาระบบการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม พบว่า โซลาร์ฟาร์มมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าด้วยกันทั้งหมด 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในขณะที่ทำงาน ซึ่งเป็นการสูญเสียที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แต่ในส่วนที่สองเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีการทำงานหรือในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งได้แก่ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากไฟเลี้ยงระบบการทำงานของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้า (No-load loss) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 สำหรับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่โซลาร์อินเวอร์เตอร์สามารถแก้ไขได้ด้วยการปิดสวิตช์อินเวอร์เตอร์เพื่อตัดไฟเลี้ยงระบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ แต่ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลงในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มเป็นการสูญเสียที่มีมูลค่ามากและไม่สามารถแก้ไขได้ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าของโซลาร์ฟาร์มจะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้งานในโซลาร์ฟาร์มจึงควรเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า Core loss ต่ำ [1] อย่างไรก็ตามหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า Core loss ต่ำก็ยังมี การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในโซลาร์ฟาร์มและสามารถแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ในช่วงเวลากลางคืนได้ คือ หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Solid state transformer, SST) เนื่องจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำงานที่ความถี่สูง สามารถปิดสวิตช์กำลังได้ กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าจึงไม่สามารถไหลมายังที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้จึงไม่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลง และจากโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีลักษณะเหมือนกับการรวมโซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพียงตัวเดียวแทนที่ระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยโซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำได้ ซึ่งโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.3

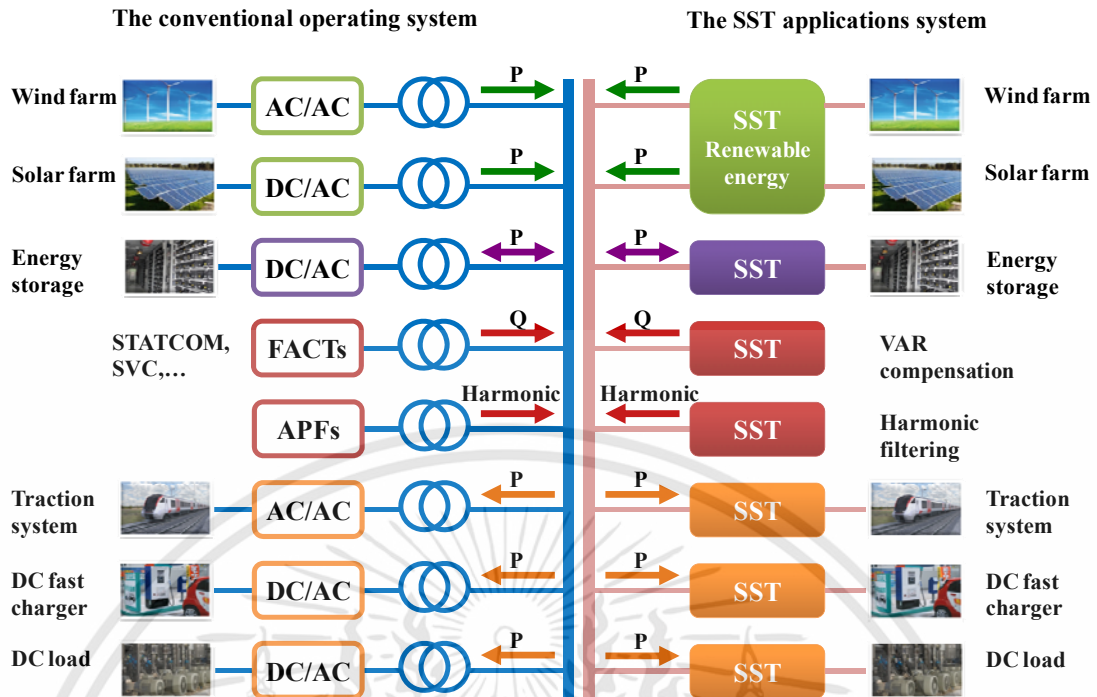


รูปที่ 1.2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเวลากลางวันและกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 MW



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยหม้อแปลงความถี่สูง (HFT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีโครงสร้างคล้ายกับการรวมวงจรคอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกันในระบบต่าง ๆ

จากข้อได้เปรียบในเรื่องของขนาดที่เล็ก น้ำหนักเบา (ทำงานที่ความถี่สูง) ฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย และมีโครงสร้างคล้ายกับการรวมวงจรคอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกันในอุปกรณ์เพียงตัวเดียว หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานแทนที่ระบบการทำงานแบบเดิมที่ประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำ เช่น ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Renewable energy) ระบบเก็บสะสมพลังงาน (Energy storage) ระบบการชดเชยแรงดันไฟฟ้า (FACTS device) ระบบกรองสัญญาณรบกวน (Harmonic filtering) ระบบรถไฟฟ้า (Traction system) ระบบการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็ว (DC fast charger) และโหลดไฟฟ้ากระแสตรง (DC load) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.4 [2]

ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้ การนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มในประเทศไทยจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนส่วนใหญ่ของประเทศเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์ฟาร์ม ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานในโซลาร์ฟาร์มและการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม โดยศึกษาตัวอย่างโครงสร้างและการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม วิเคราะห์การสูญเสียกำลังไฟฟ้าของโซลาร์ฟาร์ม ประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานแทนที่ระบบการทำงานเดิม การออกแบบวงจรหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน ผลการจำลองและผลการทดสอบการทำงานจริงของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น และฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พร้อมทั้งสรุปผลการทดสอบและหาแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานในโซลาร์ฟาร์ม
2. เพื่อศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงาน และการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม
3. เพื่อประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์การแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ในช่วงเวลากลางคืนหรือในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม ด้วยการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังแทนที่ระบบการทำงานเดิม
4. เพื่อศึกษาและออกแบบสร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม
5. เพื่อพัฒนาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้มีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม และรองรับการทำงานของระบบไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย

1. ศึกษาคุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานในโซลาร์ฟาร์ม ขนาด 1 MW
2. ประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์การคืนทุนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ในปัจจุบัน ขนาด 1,250 kVA พิกัดแรงดันไฟฟ้า 400 V / 22 kV แบบ 2 winding ที่ใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม ขนาด 1 MW
3. ประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์การแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้า ในช่วงเวลากลางคืนหรือในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 MW ด้วยการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังแทนที่ระบบการทำงานเดิม
4. ออกแบบสร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้
5. ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงขนาด 350 W, 500 W และ 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า
6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงความถี่สูงระหว่างการส่งกำลังไฟฟ้า ด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟารูปคลื่นไซน์ที่สร้างจากเทคนิค SHE และปรับจูนค่าจนได้ชุดมุมที่เหมาะสมกับการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟารูปคลื่นสี่เหลี่ยมแบบ Quasi square wave ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงขนาด 350 W และ 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า
7. ศึกษาฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมที่ควรมีของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม โดยใช้เทคนิค Box Plot ในการตรวจจับความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ขณะทำงาน และใช้เทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกันของคอนเวอร์เตอร์ในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังช่วยเพิ่มเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าจริงของระบบไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ การทำงานของโซลาร์ฟาร์ม หลักการทำงาน และโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบต่าง ๆ และตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม
2. ศึกษาคุณสมบัติวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ และคุณสมบัติของแกนความถี่สูง ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
3. ออกแบบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และสร้างแบบจำลองการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และโปรแกรม PSIM เพื่อศึกษาการทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
4. ทดสอบและปรับปรุงชุดทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สร้างขึ้น พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. สรุปผลงานวิจัย นำเสนอผลงานในรูปแบบบทความวิชาการและวารสาร และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานในโซลาร์ฟาร์มควรเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า Core loss ต่ำ เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลากลางคืนที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม
2. สามารถนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มเพื่อแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน
3. การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟารูปคลื่นไซน์หรือรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าฮาร์มอนิกส์ต่ำสามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้
4. สามารถตัวจับความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ในขณะที่ทำงาน เพื่อลดการสูญเสียรายได้จากการขายไฟของเจ้าของโซลาร์ฟาร์ม
5. การควบคุมการทำงานร่วมกันของวงจรคอนเวอร์เตอร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สามารถเพิ่มเสถียรภาพของกำลังไฟฟ้าจริงและรองรับการทำงานของระบบไฟฟ้า
6. เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับโซลาร์ฟาร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มได้แบ่งเนื้อหาส่วนต่าง ๆ ออกเป็น 7 บท ซึ่งภาพรวมเนื้อหาในแต่ละบทสามารถแสดงได้ดังนี้

บทที่ 1 นำเสนอเกี่ยวกับความเป็นมาและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอเกี่ยวกับหลักการการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์ม และหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม

บทที่ 3 นำเสนอเกี่ยวกับความเป็นมาและโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบต่าง ๆ และการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม

บทที่ 4 นำเสนอเกี่ยวกับผลการออกแบบและผลการจำลองการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งประกอบด้วย ผลการจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง และผลการทำงานของวงจรมอดูเลชันพัลส์ความถี่อินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

บทที่ 5 นำเสนอเกี่ยวกับผลการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สร้างขึ้น การประเมินประสิทธิภาพการทำงานในส่วนต่าง ๆ และการประเมินประสิทธิภาพการทำงานรวมทั้งระบบ

บทที่ 6 นำเสนอเกี่ยวกับฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้แก่ การตรวจสอบความผิดปกติขณะทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ และการเพิ่มเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าจริงของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์

บทที่ 7 นำเสนอเกี่ยวกับบทสรุปของงานวิจัย ประกอบด้วย การสรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย

บทที่ 2

หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม

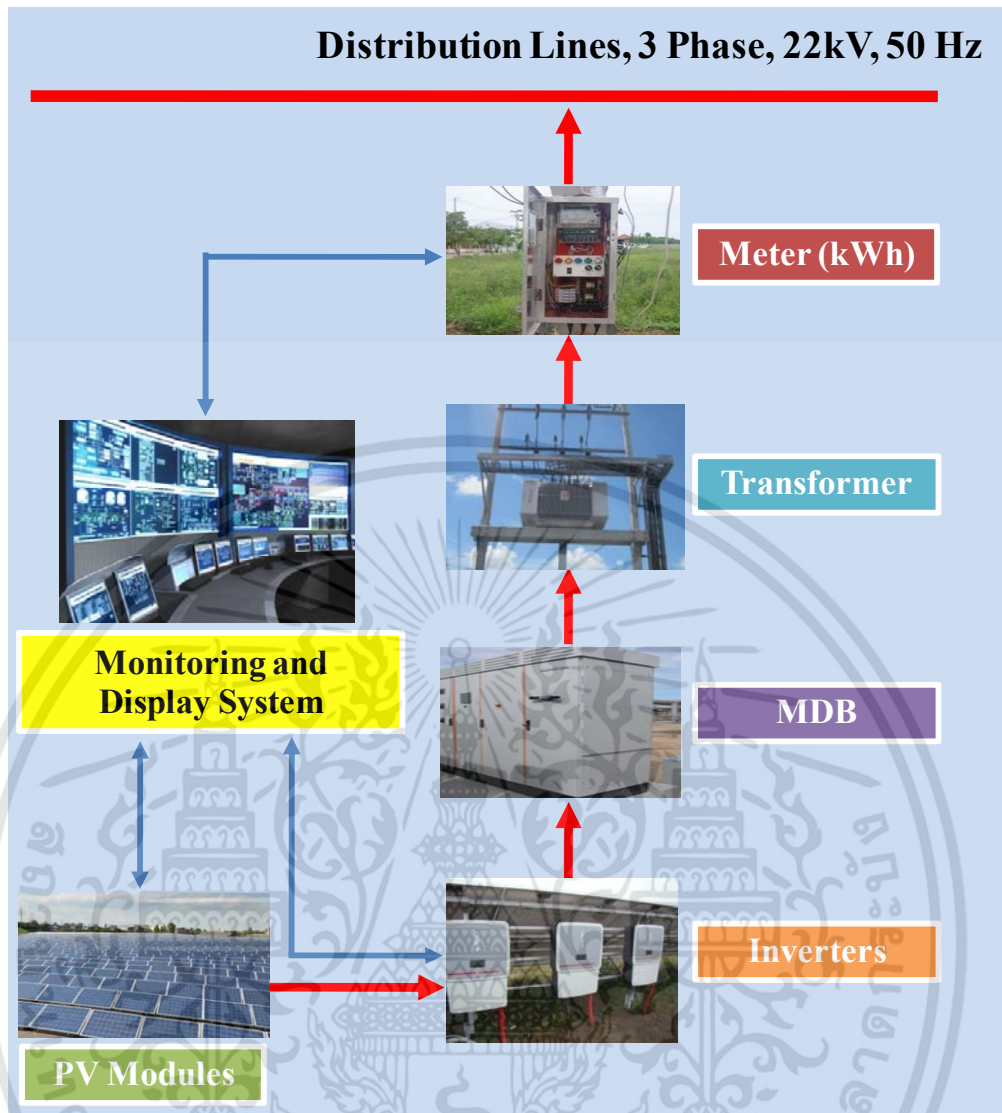
2.1 บทนำ

พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่นำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นมีความหลากหลายชนิด แต่พลังงานทดแทนที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า คือ พลังงานแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์ในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือโซลาร์ฟาร์ม ดังนั้นการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การลดกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม โดยเฉพาะการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์ม และบทสรุปเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม โดยประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ และหาจุดคุ้มทุนของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิด (มูลค่าการคืนทุนจากการขายไฟ) เพื่อพิจารณาว่าหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดใดมีความเหมาะสมที่สุดในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม

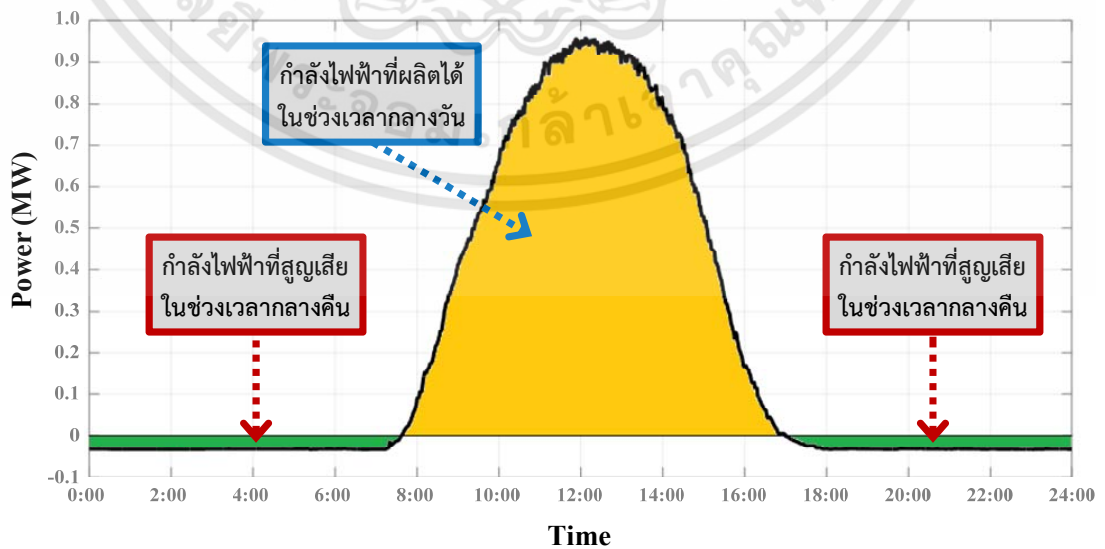
2.2 หลักการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม และปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์ม

โครงสร้างและอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโซลาร์ฟาร์มสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยแผงโซลาร์เซลล์ (PV modules) โซลาร์อินเวอร์เตอร์ (Solar inverters) หม้อแปลงไฟฟ้า (Power transformer) และระบบวัดผลและแสดงผล (Monitoring and display system) การทำงานของโซลาร์ฟาร์มเริ่มจากไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์จะผ่านโซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จากนั้นจะส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 380 V_{LL} ให้กลายเป็น 22 kV_{LL} และเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโซลาร์ฟาร์มจะถูกเก็บข้อมูล บันทึกผล และแสดงผล เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาศึกษาและพัฒนาให้โซลาร์ฟาร์มสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด พร้อมทั้งตรวจสอบการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม หากมีอุปกรณ์ตัวใดชำรุดเสียหาย หรือเสื่อมสภาพ จะได้ดำเนินการแก้ไขซ่อมแซมได้อย่างทันท่วงที

จากการศึกษาข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ใน 1 วัน ของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 เมกกะวัตต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยพื้นที่สีส้ม คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์ฟาร์มในช่วงเวลากลางวัน ส่วนพื้นที่สีเขียวเป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มหรือในช่วงเวลากลางคืน สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในอุปกรณ์ต่าง ๆ ของโซลาร์ฟาร์มขณะที่มีการทำงานสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่โซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้า [1]



รูปที่ 2.1 หลักการทำงาน และโครงสร้างของโซลาร์ฟาร์ม



รูปที่ 2.2 การทำงานของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 MW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 พลังงานที่สูญเสียของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในขณะทำงานของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 MW

ขั้นตอนการแปลงผันพลังงาน	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)	พลังงานที่สูญเสีย (kWh/kWp)	พลังงานเอาต์พุต (kWh/kWp)
พลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก PV module	-	-	1,000
การสูญเสียในส่วนที่เป็น DC	3	30	970
การสูญเสียที่อินเวอร์เตอร์	4	38.8	931.2
การสูญเสียในส่วนที่เป็น AC	1	9.3	921.9
การสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า	3	27.7	894.2
รวม	-	105.8	894.2

เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม พบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียนั้นเกิดจากค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้าและไฟเลี้ยงที่โซลาร์อินเวอร์เตอร์ โดยมีค่าเฉลี่ยสูงถึง 32 กิโลวัตต์ หรือประมาณ 480 หน่วยต่อวัน จากอัตราราคาค่าไฟฟ้าในปัจจุบันที่ขายให้การไฟฟ้าในรูปแบบ Feed-in tariff ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.66 บาทต่อหน่วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเหล่านี้จะทำให้เจ้าของโซลาร์ฟาร์มสูญเสียรายได้จากการขายไฟประมาณ 2,716.8 บาทต่อวัน หรือประมาณ 991,632 บาทต่อปี และเมื่อคิดตลอดระยะเวลา 25 ปี ตามสัญญาของการไฟฟ้า เจ้าของโซลาร์ฟาร์มจะสูญเสียรายได้ถึง 24,790,800 บาท ต่อโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 เมกกะวัตต์

จากปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของโซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากไฟเลี้ยงที่โซลาร์อินเวอร์เตอร์สามารถแก้ไขได้ด้วยการปิดสวิตช์ที่โซลาร์อินเวอร์เตอร์ แต่ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงในสถานะไร้อโหลดทางไฟฟ้า (No-load loss) หรือการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มนี้เป็นปัญหาที่สำคัญและไม่สามารถแก้ไขได้ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ามีการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเพื่อลดกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม ในลำดับถัดไปจะเป็นการศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เพื่อหาว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบใดมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม

เป็นที่ทราบกันดีว่า กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจาก Copper loss และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจาก Core loss สำหรับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจาก Copper loss จะเกิดขึ้นเฉพาะตอนที่มีการไหลของไฟฟ้าในหม้อแปลง (Conduction loss) หรือหม้อแปลงมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้า (Load) ส่วนการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจาก Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดขึ้นตลอดเวลา ไม่ว่าจะมีการไหลของไฟฟ้าหรือไม่มีการไหลของไฟฟ้าก็ตาม เพราะหม้อแปลงไฟฟ้ามีการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กที่แกนเหล็กอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น การหาว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบใดในปัจจุบันมีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม จะพิจารณาจากราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า และมูลค่าการคืนทุนหรือผลกำไรสุทธิที่ได้จากการขายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสำรวจหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดทั่วไป พิกัดกำลังขนาด 1,250 kVA พิกัดแรงดัน 400/22 kV แบบ 2 Winding ที่ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 เมกกะวัตต์ พบว่ามีด้วยกันทั้งหมด 5 ประเภท ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 5 ประเภทนี้ มีการผลิตด้วยวัสดุที่มีคุณภาพแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพ รวมถึงต้นทุนในการผลิตของหม้อแปลงมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพและราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

ชนิดของหม้อแปลง	คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ	
	ประสิทธิภาพ (%)	ราคา (บาท)
ชนิดที่ 1 (Standard)	98.5 %	700,000
ชนิดที่ 2	99 %	900,000
ชนิดที่ 3	99.2 %	1,150,000
ชนิดที่ 4 (Low core loss)	99.2 %	1,250,000
ชนิดที่ 5 (Super low core loss)	99.2 %	1,350,000

ที่มา : รายงานการทดสอบหม้อแปลงขนาด 1,250 kVA พิกัดแรงดัน 400/22 kV แบบ 2 Winding บริษัท เอกรัฐวิศวกรรม จำกัด มหาชน

ตารางที่ 2.3 กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

ชนิดของหม้อแปลง	กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ		
	กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสถานะไม่จ่ายโหลด	กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเพิ่มขึ้นในสถานะจ่ายโหลดที่พิกัด	กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียรวมทั้งหมด
ชนิดที่ 1	1,800 W	18,300 W	20,100 W
ชนิดที่ 2	1,800 W	10,700 W	12,500 W
ชนิดที่ 3	1,250 W	9,300 W	10,550 W
ชนิดที่ 4	1,000 W	9,600 W	10,600 W
ชนิดที่ 5	950 W	9,500 W	10,450 W

ที่มา : รายงานการทดสอบหม้อแปลงขนาด 1,250 kVA พิกัดแรงดัน 400/22 kV แบบ 2 Winding บริษัท เอกรัฐวิศวกรรม จำกัด มหาชน

จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมีค่า Core loss ต่ำ จะทำให้อำนาจไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มมีค่าต่ำลง ส่งผลให้เจ้าของโซลาร์ฟาร์มมีรายได้จากการขายไฟเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมีค่า Core loss ต่ำนั้น จะสร้างจากแกนเหล็กและขดลวดที่มีคุณภาพสูง จึงทำให้ราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามคุณภาพของวัสดุที่ใช้ในการทำหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย ซึ่งความแตกต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 5 ชนิด เป็นดังนี้

1) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพ 98.5 % เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมาตรฐานที่ใช้กันอยู่ทั่วไป สร้างจากแกนเหล็กและขดลวดแบบธรรมดา จึงทำให้ Core loss มีค่าสูง และมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

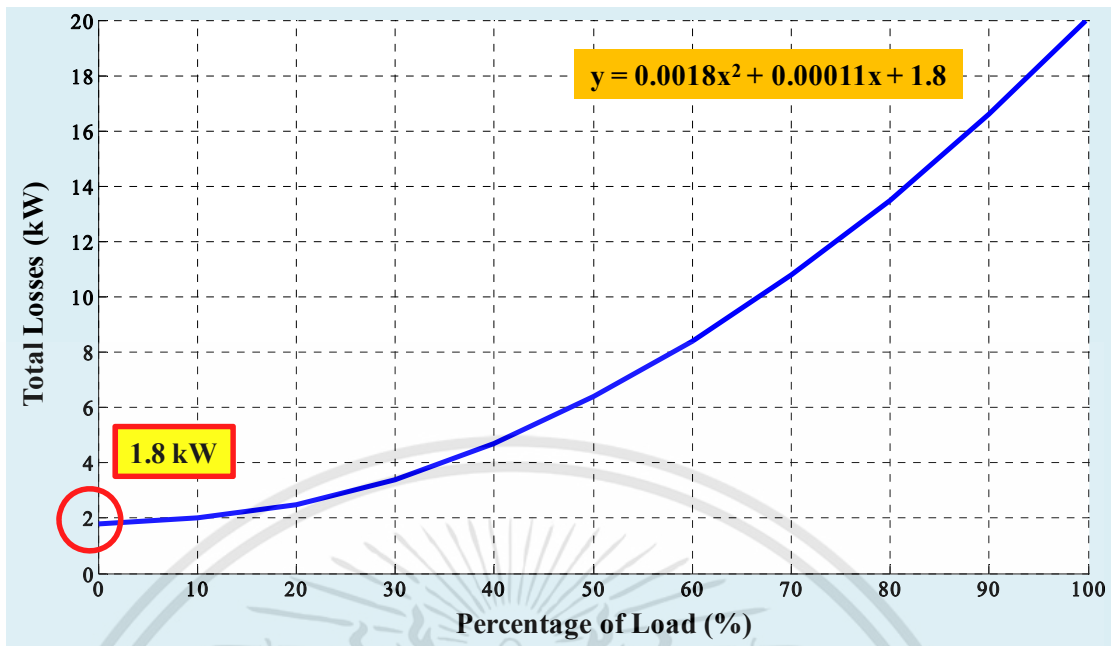
2) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพ 99 % สร้างจากแกนเหล็กชนิดเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 1 แต่มีการใช้ขดลวดที่มีคุณภาพสูงขึ้น จึงทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

3) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 3 หม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพ 99.2 % สร้างจากแกนเหล็กและขดลวดที่มีคุณภาพสูง จึงทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้มีค่า Core loss ต่ำ และมีประสิทธิภาพสูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 2

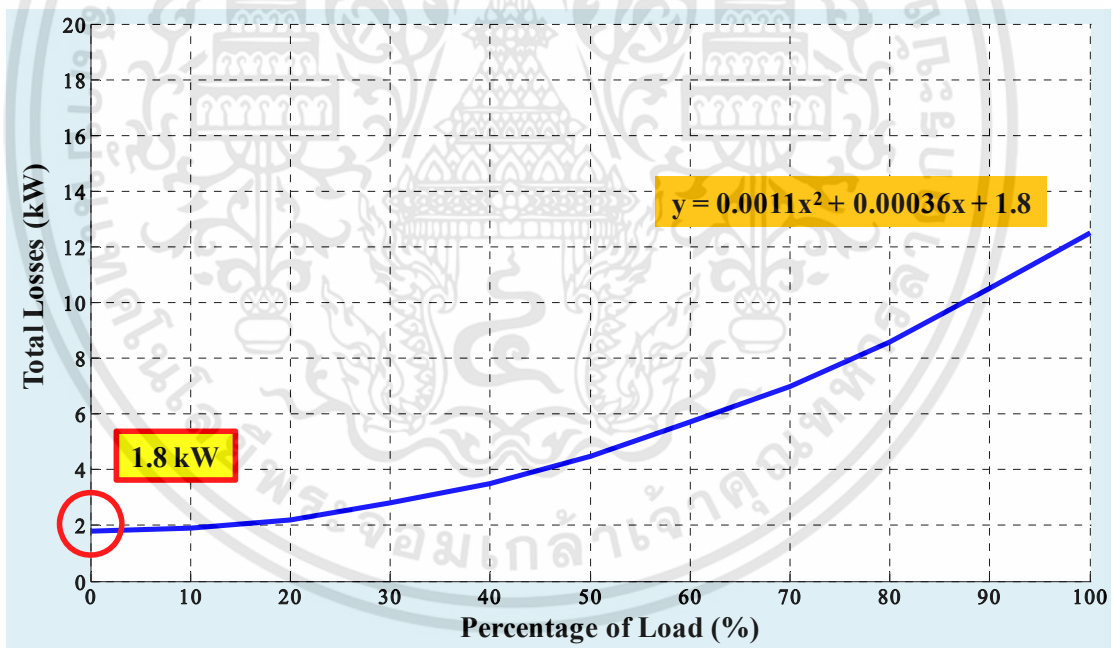
4) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 4 หม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพ 99.2 % (Low core loss) มีการใช้ขดลวดที่มีประสิทธิภาพสูงเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 3 แต่ใช้แกนเหล็กที่มีคุณภาพสูงกว่า จึงทำให้ค่า Core loss ต่ำกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 3

5) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 5 หม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพ 99.2 % (Super low core loss) มีการใช้ขดลวดที่มีประสิทธิภาพสูงเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 3 และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 4 แต่ใช้แกนเหล็กที่มีคุณภาพสูงที่สุดจึงทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้มีค่า Core loss ต่ำที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงที่สุด เมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 5 ประเภท

ถึงแม้ว่าการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า Core loss ต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง จะทำให้อำนาจไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงในโซลาร์ฟาร์มมีค่าต่ำลง แต่การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นนี้ย่อมส่งผลต่อเงินลงทุนที่เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้น จึงมีการนำข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบ (The losses are referred to the actual test report) มาพล็อตกราฟ และหาสมการกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธี Curve fitting โดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งสามารถแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขณะที่ไม่มีการจ่ายโหลด (Core loss) และสมการกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียตามเปอร์เซ็นต์โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถึงรูปที่ 2.7 เพื่อวิเคราะห์ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบใดมีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มมากที่สุด มีการสูญเสียต่ำสุด และให้ผลตอบแทนหรือมีมูลค่าการคืนทุนสูงสุด

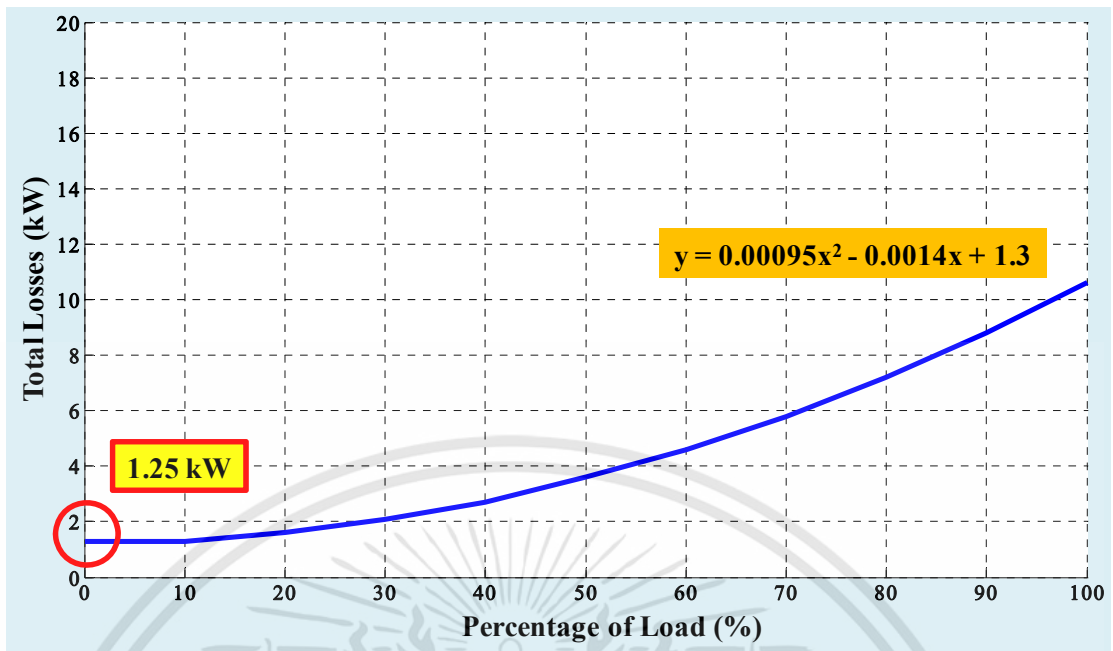


รูปที่ 2.3 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 1

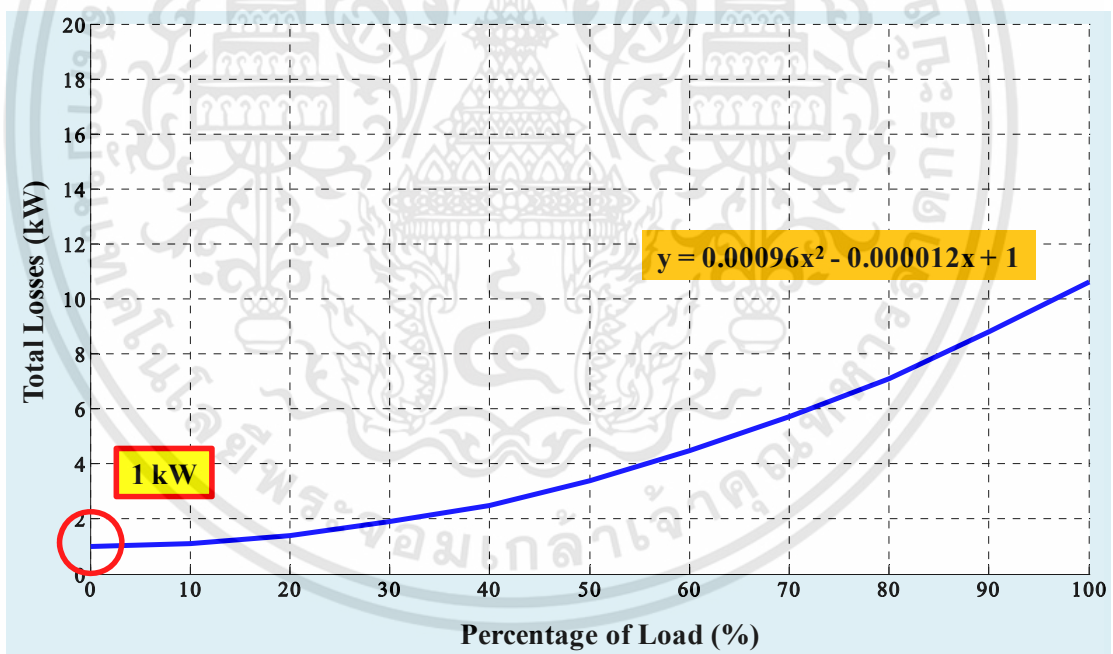


รูปที่ 2.4 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

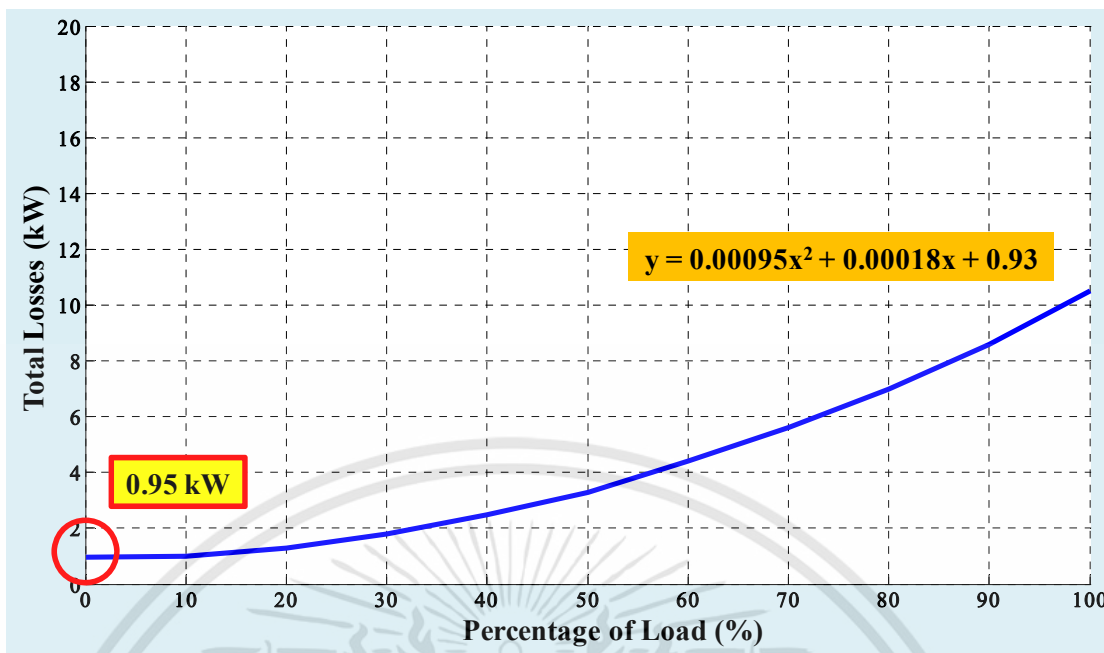


รูปที่ 2.5 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 3



รูปที่ 2.6 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 5

เมื่อวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1250 kVA ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 เมกกะวัตต์ และทำการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยกำหนดให้ค่าไฟฟ้าที่ขายให้กับกริดอยู่ในรูปแบบ Feed-in tariff มีค่า 5.66 บาทต่อหน่วย ตลอดระยะเวลา 25 ปี ตามสัญญาการรับซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ลดลง 5 % ทุก ๆ 5 ปี ตามการใช้งานจริง และคิดค่าอัตราเงินเฟ้อร้อยละ 2.2 (Net present value, NPV) โดยกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงที่จ่ายโหลดจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์ฟาร์มซึ่งมีการเฉลี่ยทุก ๆ 30 นาที และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อหา กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าตามสมการในรูปที่ 2.3 ถึงรูปที่ 2.7 ส่วนการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มสามารถพิจารณาได้จากค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ตำแหน่งเปอร์เซ็นต์โหลดเท่ากับศูนย์ ซึ่งมูลค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ถึงสมการที่ 2.5 โดยมูลค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียลดลงของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมาตรฐานหรือหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 และผลกำไรสุทธิหลังหักมูลค่าการลงทุนที่เพิ่มขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9

$$\text{Energy}_{\text{off-period}} = (P_{\text{Core Loss}} \times t_{\text{off-period}}) / 1,000 \tag{2.1}$$

$$\text{Energy}_{\text{operation}} = [\sum P(\% \text{Load} \times T_{\text{average}})] / 1000 \tag{2.2}$$

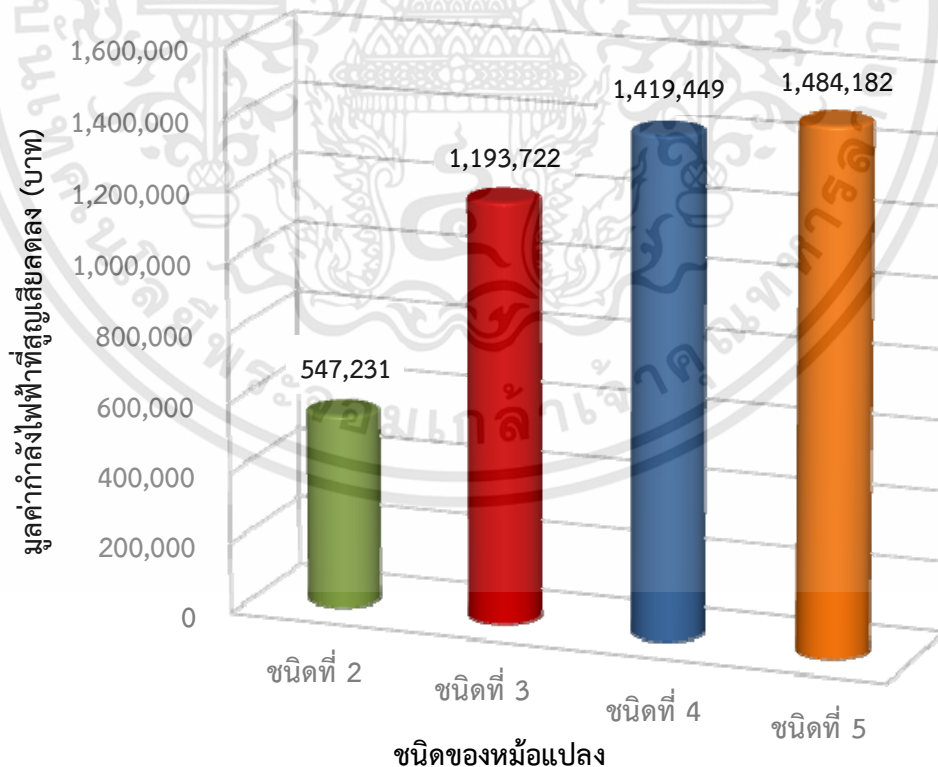
$$\text{Energy Loss all Day} = \text{Energy}_{\text{off-period}} + \text{Energy}_{\text{operation}} \tag{2.3}$$

$$\text{Cost} = (\text{Energy Loss all Day}) \times (5.66) \times (365) \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

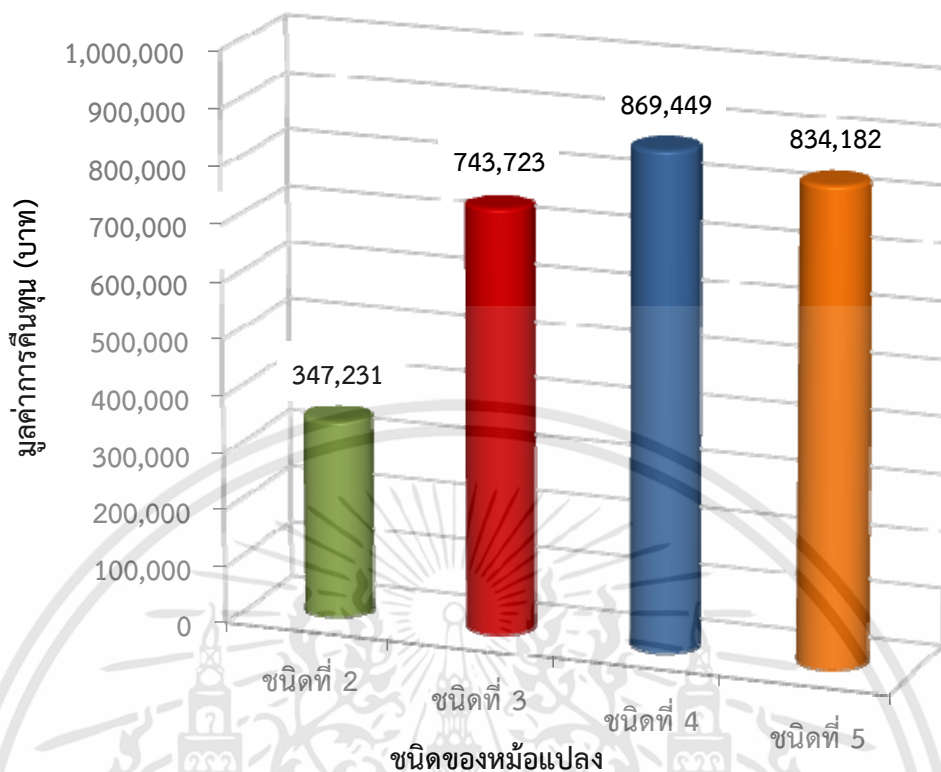
$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{Cost_t}{(1+i)^t} \quad (2.5)$$

- เมื่อ $Energy_{off-period}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงที่โซลาร์ฟาร์มไม่มีการทำงาน
- $P_{Core Loss}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสถานะไม่จ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า
- $t_{off-period}$ คือ ระยะเวลาในช่วงที่โซลาร์ฟาร์มไม่มีการทำงาน
- $Energy_{operation}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในขณะที่โซลาร์ฟาร์มทำงาน
- $P(\% load)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียโดยคิดตามเปอร์เซ็นต์โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า
- $T_{average}$ คือ คาบเวลาเฉลี่ย
- $Energy Loss all Day$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียของโซลาร์ฟาร์มใน 1 วัน
- $Cost$ คือ มูลค่าการสูญเสียของโซลาร์ฟาร์มใน 1 วัน
- NPV คือ มูลค่าการคืนทุนปัจจุบัน
- n คือ อายุของโซลาร์ฟาร์ม หรือ ระยะเวลาที่การไฟฟ้ารับซื้อไฟ



รูปที่ 2.8 มูลค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียลดลงของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมาตรฐานชนิดที่ 1 (ประสิทธิภาพ 98.5 %) ตลอดระยะเวลา 25 ปี ตามสัญญาการซื้อขายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 มูลค่าการลงทุนหรือผลกำไรสุทธิของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมาตรฐานชนิดที่ 1 (ประสิทธิภาพ 98.5 %) ตลอดระยะเวลา 25 ปี ตามสัญญาการรับซื้อขายไฟ

จากรูปที่ 2.8 การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง มีค่า Core loss ต่ำ หรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างจากขดลวดและแกนเหล็กที่มีคุณภาพสูง จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าของโซลาร์ฟาร์มมีค่าต่ำลง การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 5 ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณภาพสูงสุด ส่งผลให้มูลค่าการลงทุนมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมาตรฐานชนิดที่ 1 คือ 1,484,182 บาท แต่เมื่อพิจารณาถึงมูลค่าการลงทุนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 1 พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 4 จะให้ผลตอบแทนคุ้มค่าที่สุด มีมูลค่าการลงทุนเท่ากับ 869,449 บาท ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับโซลาร์ฟาร์ม คือ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 4 ที่มีประสิทธิภาพ 99.2 % แบบ Low core loss เนื่องจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่ำ และให้ผลกำไรตอบแทนคุ้มค่ากับการลงทุนมากที่สุด

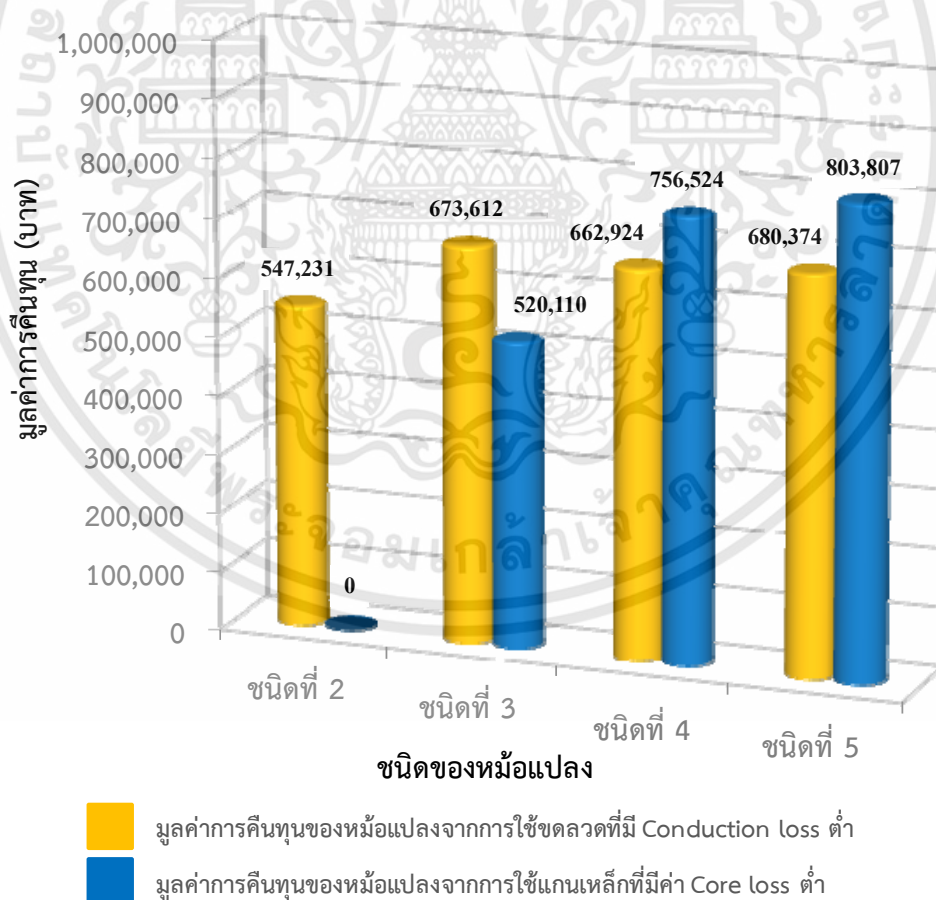
เมื่อนำมูลค่าการลงทุนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ที่เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมาตรฐานชนิดที่ 1 มาวิเคราะห์และแยกเป็นมูลค่าการลงทุนจากค่า Conduction loss ที่ลดลง และค่า Core loss ที่ลดลงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.10 สังเกตเห็นได้ชัดเจนว่า มูลค่าการลงทุนของหม้อแปลงไฟฟ้าจากการใช้ขดลวดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 1 แต่เมื่อพิจารณามูลค่าการลงทุนจากการใช้แกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จะได้ผลตอบแทนที่มีมูลค่าสูงขึ้นจากเดิมอย่างมาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มจึงควรเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่า Core loss ต่ำ เนื่องจากโซลาร์ฟาร์มมีการทำงานเพียงประมาณ 10 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งเวลาที่เหลืออีก 14 ชั่วโมง ในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มจะเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการสูญเสียที่มีมูลค่าสูง

ตารางที่ 2.4 มูลค่าการคืนทุนของหม้อแปลงไฟฟ้าจากการใช้ขดลวดและแกนเหล็กที่มีคุณภาพสูงขึ้น เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมาตรฐานชนิดที่ 1 (ประสิทธิภาพ 98.5 %)

ชนิดของหม้อแปลง	มูลค่าการคืนทุนของหม้อแปลงชนิดต่าง ๆ เทียบกับหม้อแปลงชนิดที่ 1	
	มูลค่าการคืนทุนจากการใช้ขดลวดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (บาท)	มูลค่าการคืนทุนจากการใช้แกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (บาท)
ชนิดที่ 2	547,231	0
ชนิดที่ 3	673,612	520,110
ชนิดที่ 4	662,924	756,524
ชนิดที่ 5	680,374	803,807

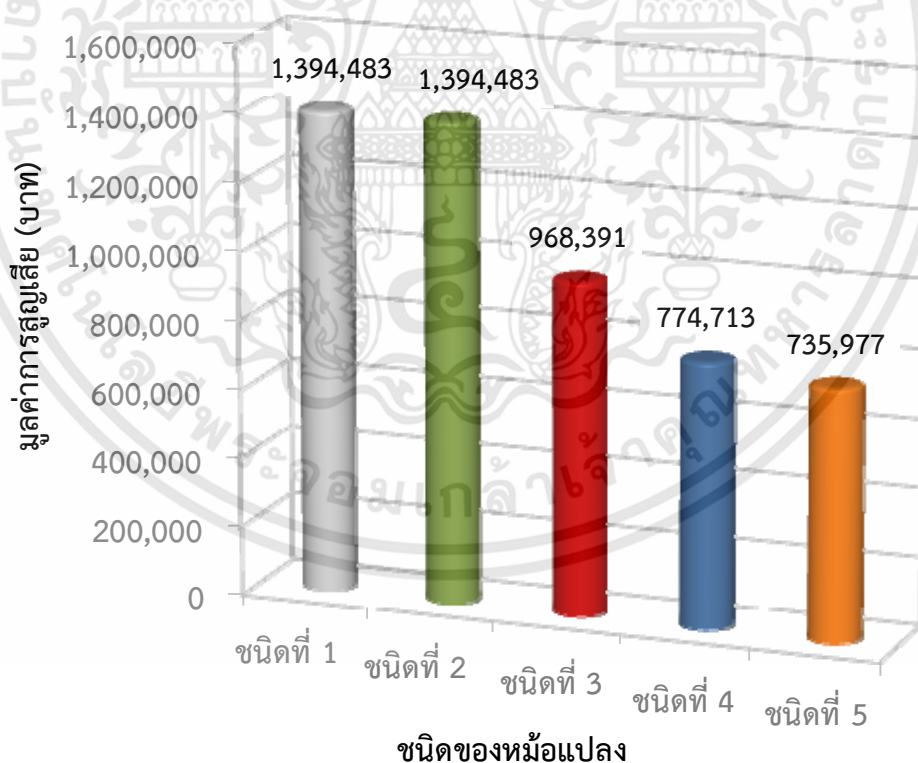


รูปที่ 2.10 มูลค่าการคืนทุนจากการใช้ขดลวดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และการใช้แกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมาตรฐานชนิดที่ 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามถึงแม้จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า Core loss ต่ำมาก เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 5 แต่ก็ยังเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจาก Core loss ในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 เมกกะวัตต์ ตลอดสัญญาการซื้อขายไฟของการไฟฟ้าเป็นมูลค่าถึง 735,997 บาท ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.11 ซึ่งนำเสนอมูลค่าการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม

ตารางที่ 2.5 มูลค่าการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ในช่วงที่โซลาร์ฟาร์มไม่มีการทำงาน

ชนิดของหม้อแปลง	ค่า Core loss ของหม้อแปลง (kW)	มูลค่าการสูญเสียต่อปี (บาท)	มูลค่าการสูญเสียตลอดระยะเวลา 25 ปี (บาท)
ชนิดที่ 1	1.80	55,779.30	1,394,483
ชนิดที่ 2	1.80	55,779.30	1,394,483
ชนิดที่ 3	1.25	38,735.63	968,391
ชนิดที่ 4	1.00	30,988.50	774,713
ชนิดที่ 5	0.95	29,439.08	735,977



รูปที่ 2.11 มูลค่าการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ในช่วงที่โซลาร์ฟาร์มไม่มีการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์ม และหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีความเหมาะสมในการใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม พบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์มควรเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า Core loss ต่ำ เนื่องจากโซลาร์ฟาร์มมีการทำงานเพียงประมาณ 10 ชั่วโมงต่อวัน ส่วนเวลาที่เหลืออีกประมาณ 14 ชั่วโมง ที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มจะเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น หากมีการนำหม้อแปลงไฟฟ้าแบบใหม่ที่ไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงที่โซลาร์ฟาร์มไม่มีการทำงานหรือสามารถปิดสวิทซ์การทำงานได้เช่นเดียวกับโซลาร์อินเวอร์เตอร์มาใช้งาน จะสามารถแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ในช่วงที่ไม่มีความจำเป็นหรือไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มได้ นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มรายได้จากการขายไฟฟ้าให้กับเจ้าของโซลาร์ฟาร์มได้อีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแบบใหม่นี้จะมีการนำเสนอในลำดับถัดไป



บทที่ 3

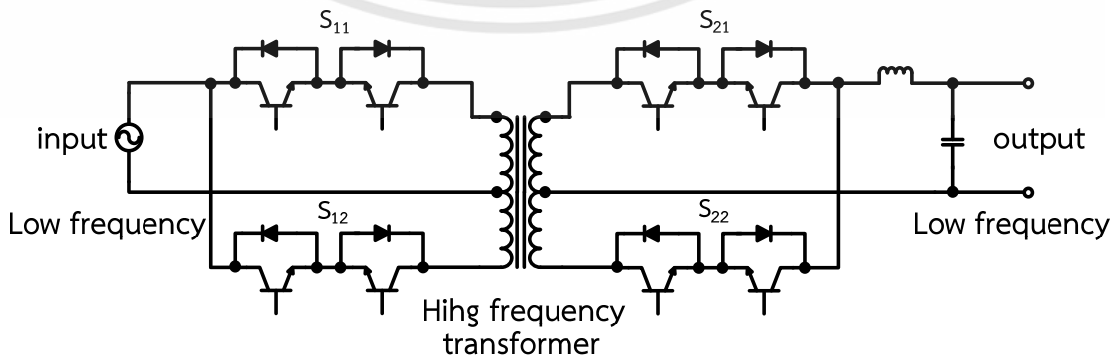
หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

3.1 บทนำ

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronics transformer) หรือ “Solid state transformer” (SST) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและทำงานที่ความถี่สูงซึ่งโครงสร้างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 ของบทที่ 1 โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ 2 ฟัง ทั้งทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ซึ่งทั้ง 2 ฟังนี้มีการเชื่อมต่อกันด้วยหม้อแปลงความถี่สูง (High frequency transformer, HFT) จากการทำงานที่ความถี่สูงจึงส่งผลให้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักที่เบากว่าเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบธรรมดา นอกจากนี้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังยังมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ปรับระดับแรงดันไฟฟ้า ขดเคเบิลกำลังไฟฟ้าเสมือน แก้วค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ กรองสัญญาณรบกวน มีระบบการป้องกันที่อัจฉริยะ สามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ต่างกันได้อย่างปลอดภัย การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ทำให้สามารถบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขะลอกการสร้างโรงไฟฟ้า และเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาระบบไฟฟ้าให้เป็นระบบไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ [3]

3.2 ความเป็นมาของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หรือ SST ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย W. McMurray ในปี 1970 ซึ่งนำเสนอเกี่ยวกับวงจรหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการทำงานแบบ 4 จัดภาค โดยฝั่งปฐมภูมิจะเชื่อมต่อกับกริดและเชื่อมต่อกับฝั่งทุติยภูมิด้วยหม้อแปลงแทปแรงดันแบบขดลวดความถี่สูง 1 เฟส โครงสร้างของด้านทุติยภูมิเหมือนกับด้านปฐมภูมิแต่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเข้าไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สำหรับการทำงานของสวิตช์ S_{11} และสวิตช์ S_{12} จะทำงานพร้อมกันโดยมีวัฏจักรงาน 50 % ซึ่งเหมือนกับสวิตช์ S_{21} และสวิตช์ S_{22} ของด้านทุติยภูมิ โดยมีการเลื่อนมุมเฟสในแต่ละคู่สวิตช์ และแรงดันเอาต์พุตสามารถปรับค่าได้ตามกระแสอินพุต [4], [5] ซึ่งพบว่า วงจรสามารถทำงานได้ดีเหมือนวงจร Dual-Active-Bridge ของ DC-DC converter ที่ถูกนำเสนอในปี 1990 [6]

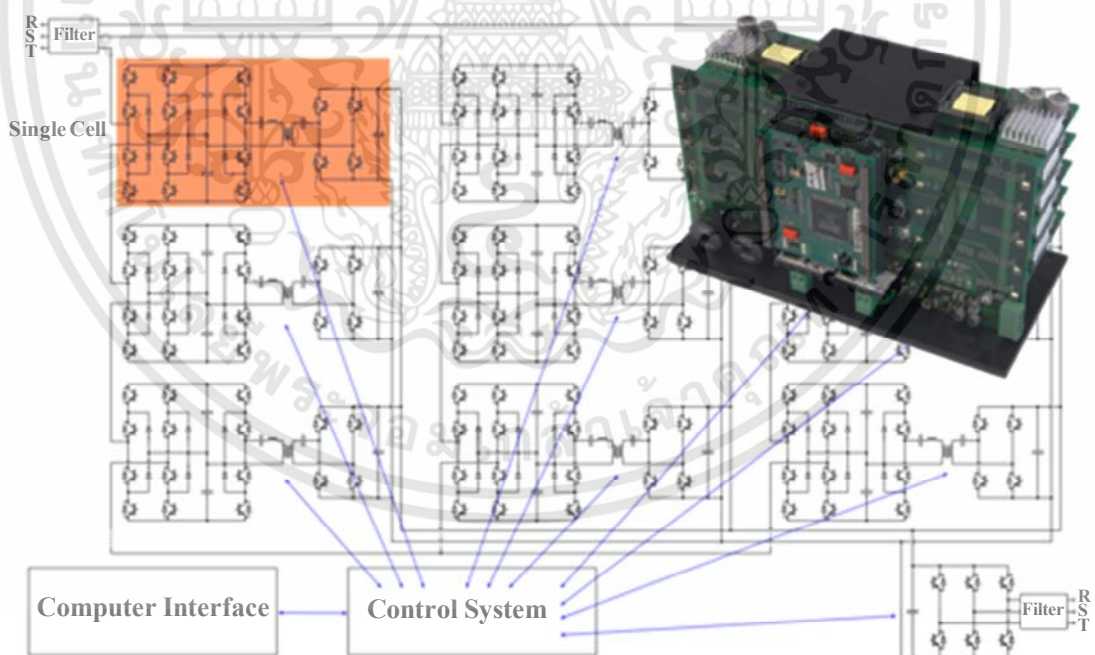


รูปที่ 3.1 วงจรหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย W. McMurray ในปี 1970

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

การส่งกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ไกลและลดปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) ที่ปลายสายได้เป็นอย่างดี และอุปกรณ์หนึ่งที่มีความจำเป็นอย่างมากสำหรับระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับก็คือหม้อแปลงไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันทำมาจากแกนเหล็กและขดลวด ซึ่งข้อดีของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ คือ มีความแข็งแรงทนทาน แต่ข้อเสีย คือ มีน้ำหนักมาก ขนาดใหญ่ และไม่มีฟังก์ชันการใช้งานอื่น ๆ นอกจากยกระดับแรงดันไฟฟ้า (Step up voltage) หรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า (Step down voltage) เท่านั้น จากความต้องการพัฒนาระบบไฟฟ้าให้เป็นระบบไฟฟ้าแบบอัจฉริยะที่สามารถควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้า ควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้า และปรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างอัตโนมัติ ตลอดจนการนำพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกมาใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สิ่งต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นต้องมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหม้อแปลงความถี่ต่ำที่ใช้ในปัจจุบันไม่สามารถทำได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายกว่ามาประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้า ซึ่งโครงสร้างหลักของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูง ระบบควบคุม (Control system) และระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ (Computer interface) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะถูกนำเสนอในลำดับถัดไป



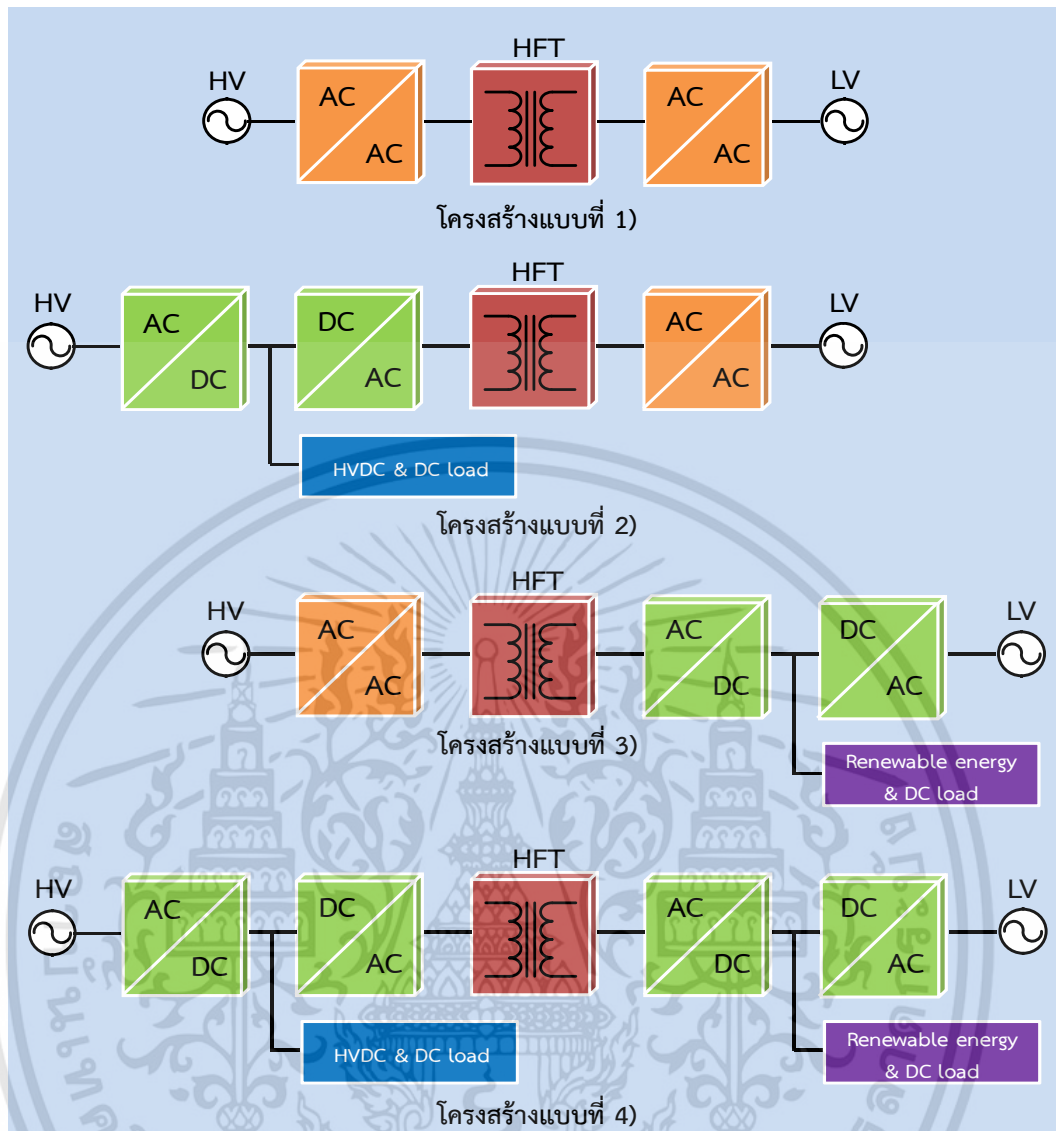
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างโครงสร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์

ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุด ทั้งทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุดนี้จะเชื่อมต่อกันด้วยหม้อแปลงความถี่สูงที่ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า และแยกวงจรไฟฟ้าทั้ง 2 ฝั่ง ออกจากกัน สำหรับการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรคอนเวอร์เตอร์ฝั่งปฐมภูมิจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง จากนั้นจะส่งกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อให้คอนเวอร์เตอร์อีกชุดหนึ่งแปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำและนำกลับไปใช้งาน โดยโครงสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ฝั่ง แบบต่าง ๆ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 พบว่า คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งานจะเป็นแบบเอซีทูเอซีคอนเวอร์เตอร์ (AC-AC converter) โดยทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วงจรแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (Matrix converter) และวงจรอีกรูปหนึ่งที่มีการใช้งาน คือ วงจรแบ็คทูแบ็คคอนเวอร์เตอร์ (Back-back converter) ที่มีลักษณะคล้ายกับการนำดีซีลิงค์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ชุด มาเชื่อมต่อกันและมีตัวเก็บประจุอยู่ตรงกลาง ซึ่งวงจรที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นแบบฟรอนท์เอ็นด์คอนเวอร์เตอร์ (Front-end converter) โดยข้อดีของวงจรแบ็คทูแบ็คคอนเวอร์เตอร์นี้จะมีในส่วนที่เป็นดีซีลิงค์ ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงอื่น ๆ โหลดไฟฟ้ากระแสตรง และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตจากพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกได้ [7], [8]

นอกจากนี้อาจจำเป็นต้องนำเทคนิคหลายระดับขั้น (Multilevel) มาประยุกต์ใช้งานทางด้านแรงสูงด้วยเพื่อให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งข้อดีคือ สามารถลดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังในแต่ละตัวและเพิ่มพิกัดกำลังของวงจรคอนเวอร์เตอร์ แต่ข้อเสียคือ สวิตช์กำลังที่ใช้มีจำนวนมาก ทำให้การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการทำงานของสวิตช์มีค่ามาก และมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้นด้วย [9] โดยตัวอย่างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีการใช้งาน ได้แก่ วงจรไดโอดแคมป์ (Diode camped inverter) วงจรไฟลิ่งคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor inverter) วงจรแคสเคดมีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (Cascaded multi-cell inverter) วงจรเจนเนอเรเตอร์โรลไลซ์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (Generalized P2-cell multilevel inverter) วงจรรีเวิร์สโวลต์เตจมีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (Reversing voltage multilevel inverter) และวงจรมอดดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (Modular multilevel inverter) เป็นต้น [10]

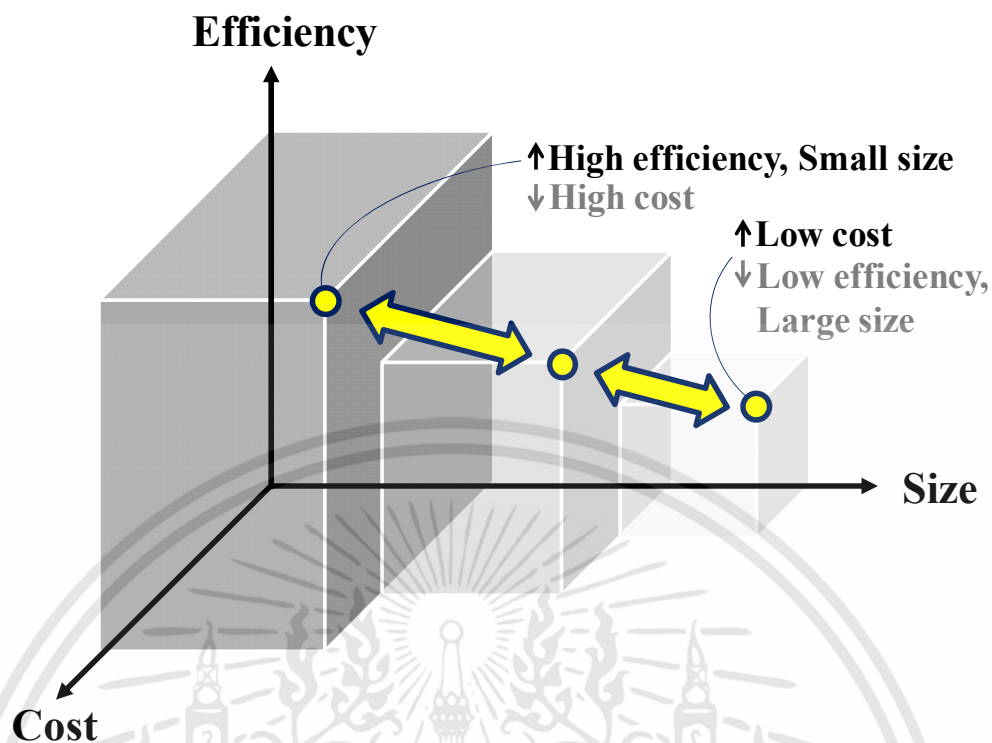


รูปที่ 3.3 โครงสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่าง ๆ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

3.3.2 หม้อแปลงความถี่สูง

โครงสร้างหม้อแปลงความถี่สูงหรือหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ขดลวดตัวนำ และแกนที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก สำหรับการออกแบบสร้างหม้อแปลงความถี่สูงหรือหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบได้แก่ ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ขนาดของหม้อแปลง และต้นทุนในการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จะพบว่า ถ้าใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูงในการสร้างหม้อแปลง หม้อแปลงที่ได้นั้นก็จะมีประสิทธิภาพสูง มีขนาดเล็ก แต่ราคาของหม้อแปลงก็จะเพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางกลับกันถ้าใช้วัสดุที่มีคุณภาพต่ำในการสร้างหม้อแปลง หม้อแปลงที่ได้ก็จะราคาถูก แต่ประสิทธิภาพของหม้อแปลงจะต่ำ และหม้อแปลงจะมีขนาดใหญ่ [11], [12] ซึ่งการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงนั้น ปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแกนความถี่สูงที่นำมาใช้ในการออกแบบ โดยแกนความถี่สูงที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ แกนซิลิกอนสตีล (Silicon steel) แกนอะมอร์ฟัส (Amorphous) แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และแกนนาโนคริสตัลไลน์ (Nanocrystalline) คุณสมบัติของแกนชนิดต่าง ๆ นี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 [3], [13], [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ ขนาด และต้นทุนในการผลิตหม้อแปลงความถี่สูง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแกนชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำหม้อแปลงความถี่สูง

วัสดุ	ตัวอย่างชนิดแกน	ค่าความอิ่มตัวของ สนามแม่เหล็ก (T) 25°C	ค่าความซึมซาบ แม่เหล็ก (μ)	ราคา
ซิลิกอนสตีล	Arnold Arnon5	1.48	ปานกลาง	ต่ำ
อะมอร์ฟัส	Metglas 2605SA1	1.56	ปานกลาง	ปานกลาง
เฟอร์ไรต์ 1	Ferroxcube 3C96	0.44	ต่ำ	ปานกลาง
เฟอร์ไรต์ 2	Epcos N97	0.41	ต่ำ	ปานกลาง
นาโนคริสตัลไลน์ 1	Hitachi Finemet FT-3M	1.23	สูง	สูง
นาโนคริสตัลไลน์ 2	VAC Vitroperm500F	1.20	สูง	สูง
นาโนคริสตัลไลน์ 3	Magmet Namglass 4	1.23	สูง	สูง

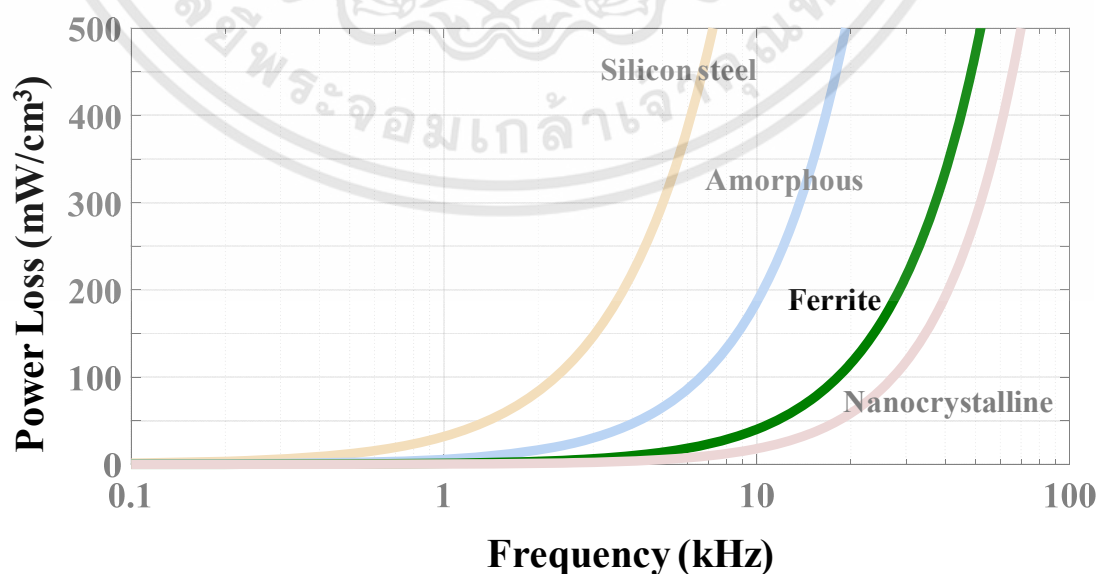
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของแกนชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำหม้อแปลงความถี่สูง คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเพื่อใช้สร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงความถี่สูง ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กจะเป็นไปตามสมการของ Steinmetz ดังแสดงในสมการที่ (3.1) โดย P_c เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก (mw/cm^3), f เป็นความถี่มูลฐานที่ใช้ในการส่งกำลัง (Hz), K เป็นค่าคงที่การสูญเสียของแกนความถี่สูงแต่ละชนิด (mw/cm^3), B เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (T) ซึ่งในการออกแบบส่วนใหญ่จะกำหนดให้ B มีค่าเท่ากับ 0.3 T, α และ β เป็นค่าคงที่ที่หาได้จากกราฟของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ โดยตัวอย่างค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 3 kHz และค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนที่ความถี่ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 100 kHz สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.5 ตามลำดับ

$$P_c = Kf^\alpha B^\beta \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 3 kHz

วัสดุ	K (mw/cm^3)	α	β	ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (ที่ 0.3 T)
ซิลิกอนสตีล	278.40	1.39	1.80	147.00
อะมอร์ฟัส	46.70	1.51	1.74	30.20
เฟอร์ไรต์ 1	42.80	1.53	2.98	6.30
เฟอร์ไรต์ 2	44.00	1.36	2.72	7.40
นาโนคริสตัลไลน์ 1	8.03	1.62	1.98	4.39
นาโนคริสตัลไลน์ 2	2.48	1.80	2.08	1.47
นาโนคริสตัลไลน์ 3	3.75	1.71	1.97	2.30



รูปที่ 3.5 ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนความถี่สูงที่ความถี่ต่าง ๆ ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 100 kHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ โดยอาศัยข้อมูลจากตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.2 และข้อมูลอื่น ๆ ที่ได้ทำการศึกษา พบว่า แกนซิลิกอนสติลจะมีค่าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Saturation density) ประมาณ 1.48 T มีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ปานกลาง ราคาถูก การออกแบบและใช้งานง่าย มีความแข็งแรงทนทาน มีสัญญาณรบกวนน้อย แต่ข้อเสีย คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียมีค่าสูง จึงทำให้หม้อแปลงความถี่สูงที่ทำจากแกนชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับหม้อแปลงความถี่สูงที่ทำจากแกนความถี่สูงชนิดอื่น ๆ

แกนอะมอร์ฟัสเป็นแกนความถี่สูงที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กปานกลาง ค่าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.56 T การออกแบบและใช้งานง่าย ราคาปานกลาง กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียปานกลาง จึงทำให้หม้อแปลงความถี่สูงที่ผลิตจากแกนชนิดนี้มีคุณสมบัติในระดับปานกลาง ขนาดไม่ใหญ่มาก และมีประสิทธิภาพเหมาะสมกับต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก

แกนเฟอร์ไรต์เป็นแกนความถี่สูงที่มีค่าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กประมาณ 0.4 T ราคาปานกลาง การสูญเสียมีค่าต่ำ แต่มีการออกแบบและการใช้งานที่ค่อนข้างซับซ้อน แกนมีความเปราะและแตกหักง่าย และมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กต่ำ จึงทำให้หม้อแปลงความถี่สูงที่ผลิตจากแกนชนิดนี้มีขนาดใหญ่มาก แต่หากมองข้ามในเรื่องของขนาดก็ลักษณะการใช้งานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงทนทานมากนัก แกนชนิดนี้ก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจเนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับราคาต้นทุน

แกนนาโนคริสตัลไลน์เป็นแกนความถี่สูงที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง มีค่าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.2 T มีการสูญเสียต่ำมากและต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแกนความถี่สูงชนิดอื่น ๆ ซึ่งหากนำแกนความถี่สูงชนิดนี้มาผลิตเป็นหม้อแปลงจะได้หม้อแปลงความถี่สูงที่มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูงมาก แต่ราคาที่ใช้ในการลงทุนก็จะสูงมากเช่นกัน

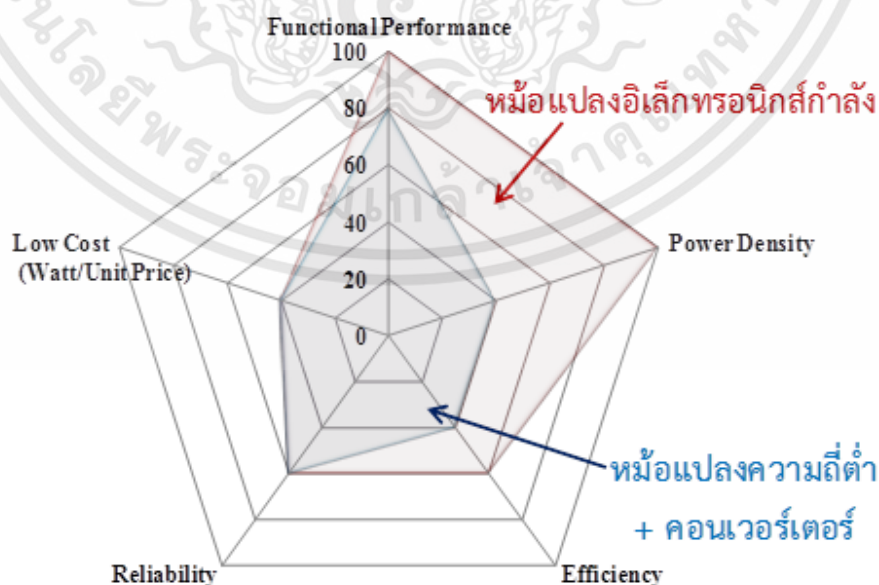
ดังนั้นการเลือกใช้แกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ขนาดของหม้อแปลง และต้นทุนในการผลิต ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

3.4 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบต่าง ๆ

ปัจจุบัน โครงสร้างวงจรหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้กับงานในด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น ระบบสมาร์ตกริด (Smart grid) พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Renewable energy) ระบบเก็บสะสมพลังงาน (Energy storage) สถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็ว (EV charging station) ระบบรถไฟฟ้ (Traction system) และอุปกรณ์เพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (FACTS devices) เป็นต้น ซึ่งข้อได้เปรียบของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเมื่อเทียบกับระบบการทำงานเดิม คือ สามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ, มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบากว่าระบบทำงานเดิม และมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงภาพรวมการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังไปประยุกต์ใช้งานกับระบบต่าง ๆ ซึ่งรายละเอียดสามารถแสดงได้ดังนี้

3.4.1 การประยุกต์ใช้งานในระบบสมาร์ตกริด

ระบบสมาร์ตกริด เป็นระบบที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ระบบสะสมพลังงานไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้า และศูนย์กลางการควบคุมที่ใช้ในการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้เกิดเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูงสุด จากปัญหาและผลกระทบจากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า จึงทำให้มีแนวคิดในการนำวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมการทำงานได้มาใช้ในระบบไฟฟ้าร่วมกับหม้อแปลงความถี่ต่ำ เพื่อให้สามารถบริหารจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการนี้สามารถช่วยให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งมีขนาดใหญ่ และฟังก์ชันการทำงานยังไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้น จึงได้มีการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบไฟฟ้าแทนที่หม้อแปลงความถี่ต่ำและคอนเวอร์เตอร์ที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไป [15], [16]-[18] ซึ่งสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ได้แก่ ฟังก์ชันการใช้งาน ขนาดและน้ำหนัก ประสิทธิภาพ ความน่าเชื่อถือ และราคา ดังแสดงในรูปที่ 3.6



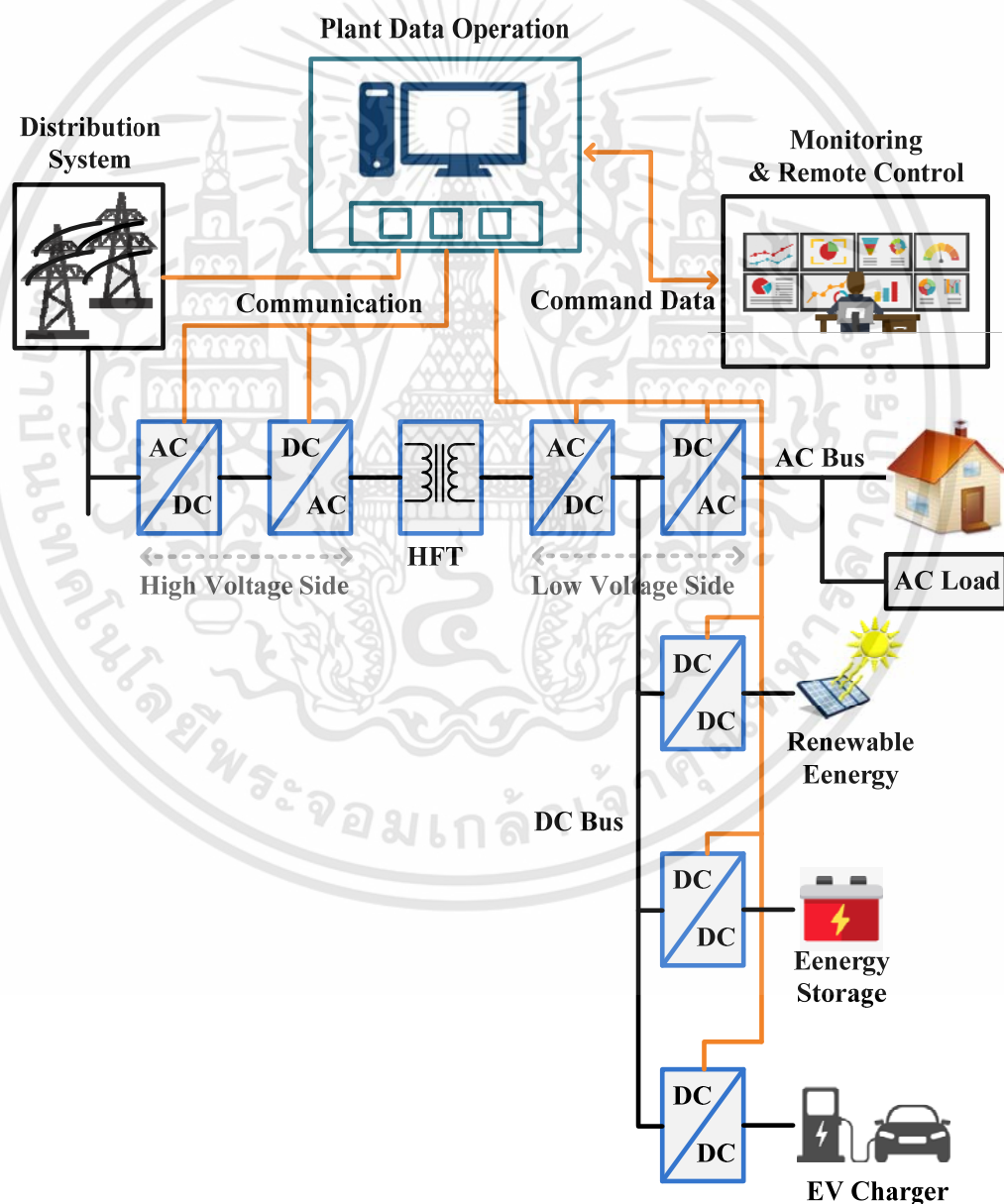
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับ

หม้อแปลงความถี่ต่ำที่ทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ที่ประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูยาดเ้าหน้าไปไซประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 เป็นการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังร่วมกับระบบไฟฟ้าแบบสมาร์ตกริด ซึ่งโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังประกอบด้วย หม้อแปลงความถี่สูง คอนเวอร์เตอร์ด้านปฐมภูมิ และคอนเวอร์เตอร์ด้านทุติยภูมิ จากรูปจะพบว่าหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย นอกจากการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าแล้ว หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังยังสามารถเชื่อมต่อกับระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ระบบสะสมพลังงานไฟฟ้า และสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็ว เป็นต้น มีการรับส่งข้อมูลแบบ 2 ทิศทาง ทั้งข้อมูลจากระบบไฟฟ้าและข้อมูลของผู้ใช้ไฟ ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ หรือสามารถควบคุมการทำงานโดยการสั่งการจากระยะไกลเพื่อให้สามารถบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบให้มีความคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุด [3], [15], [18]-[21]

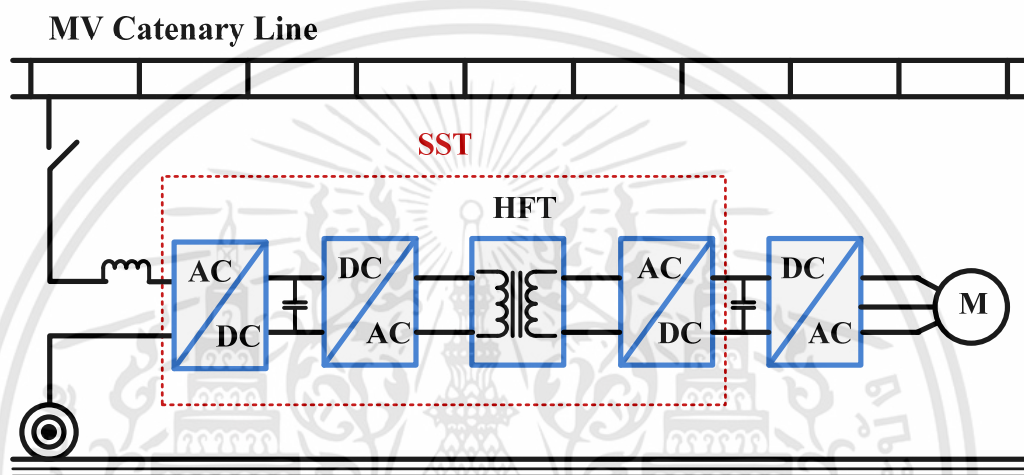


รูปที่ 3.7 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบไฟฟ้าแบบสมาร์ตกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การประยุกต์ใช้งานกับระบบแรงดันไฟฟ้า

จากข้อได้เปรียบในเรื่องของขนาดที่เล็กและน้ำหนักที่เบาจึงทำให้มีการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานในระบบแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 สำหรับระบบการทำงานเดิมของแรงดันไฟฟ้าจะประกอบด้วย หม้อแปลงความถี่ต่ำที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักค่อนข้างมาก และวงจรจรรยาแบ็คคัพแบ็คคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการปรับความเร็วรอบของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพส่วนใหญ่ของระบบการทำงานเดิมจะอยู่ที่ประมาณ 90% แต่เมื่อนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาเนื่องจากการทำงานที่ความถี่สูงมาประยุกต์ใช้งานทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น โดยส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 95% [3], [18]

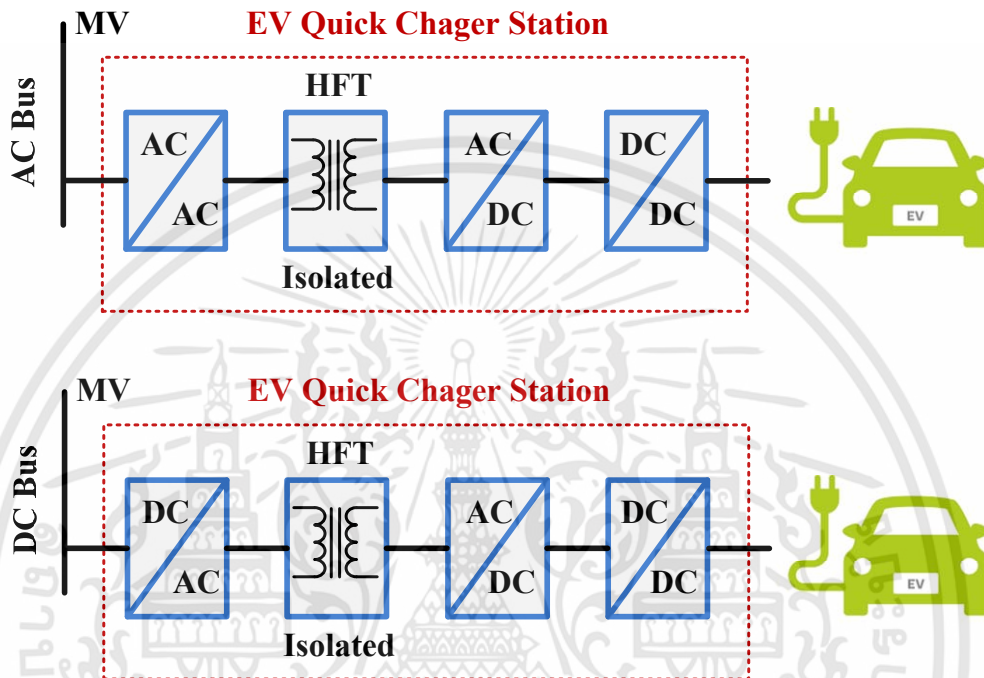


รูปที่ 3.8 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบแรงดันไฟฟ้า

3.4.3 การประยุกต์ใช้งานกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 โดยพบว่าระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่จะมีด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับ และระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระแสสลับจะประกอบด้วย วงจรเอชทูเอชคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ หม้อแปลงความถี่สูงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้า วงจรเอชทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เรียงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมกระแสและแรงดันขณะทำการอัดประจุแบตเตอรี่ ส่วนโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงจะประกอบด้วย วงจรดีซีทูเอชคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่สูง หม้อแปลงความถี่สูงที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้า วงจรเอชทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เรียงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมกระแสและแรงดันขณะทำการอัดประจุแบตเตอรี่ [22]-[24]

การนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วส่งผลให้ขนาดของอุปกรณ์มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย และการติดตั้งใช้งาน ง่ายต่อการบำรุงรักษา และระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะประสิทธิภาพจะอยู่ที่ประมาณ 95% สูงกว่าระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยหม้อแปลงความถี่ต่ำกับอิเล็กทรอนิกส์คอนเวอร์เตอร์ และดีซีฟิวตีซีคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 88% - 92% [3]



รูปที่ 3.9 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

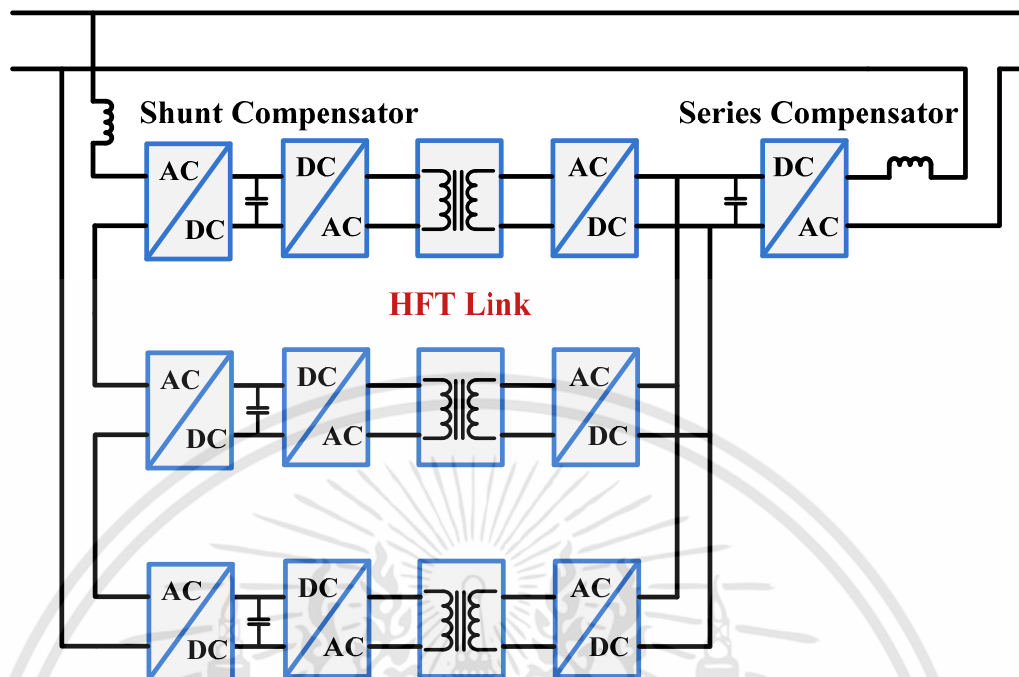
3.4.4 การประยุกต์ใช้งานกับระบบจำหน่ายเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

จากฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงทำให้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็น FACTS device ให้กับระบบไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากวงจรในรูปที่ 3.10 เป็นการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาแก้ปัญหาการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power compensation) และการแก้ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณไฟฟ้าด้วยวิธี Active filter ซึ่งเสมือนกับตัวชดเชยแบบรวมขนาน-อนุกรม (Combined series-shunt compensator) ที่รวมตัวชดเชยแบบขนาน (Shunt compensator) และตัวชดเชยแบบอนุกรม (Series compensator) ไว้ในอุปกรณ์ตัวเดียวกัน

นอกจากการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนและการแก้ฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณไฟฟ้าแล้ว การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายังสามารถควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า ลดการสูญเสียในสายส่งของระบบไฟฟ้า ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ป้องกันสถานะโหลดเกินที่จะเกิดขึ้นกับสายส่ง (Over load) รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของสายส่ง และช่วยเพิ่มขีดจำกัดของสายส่งให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นในกรณีที่ไม่สามารถสร้างสายส่งใหม่ได้ [3], [19]-[21], [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Distribution System



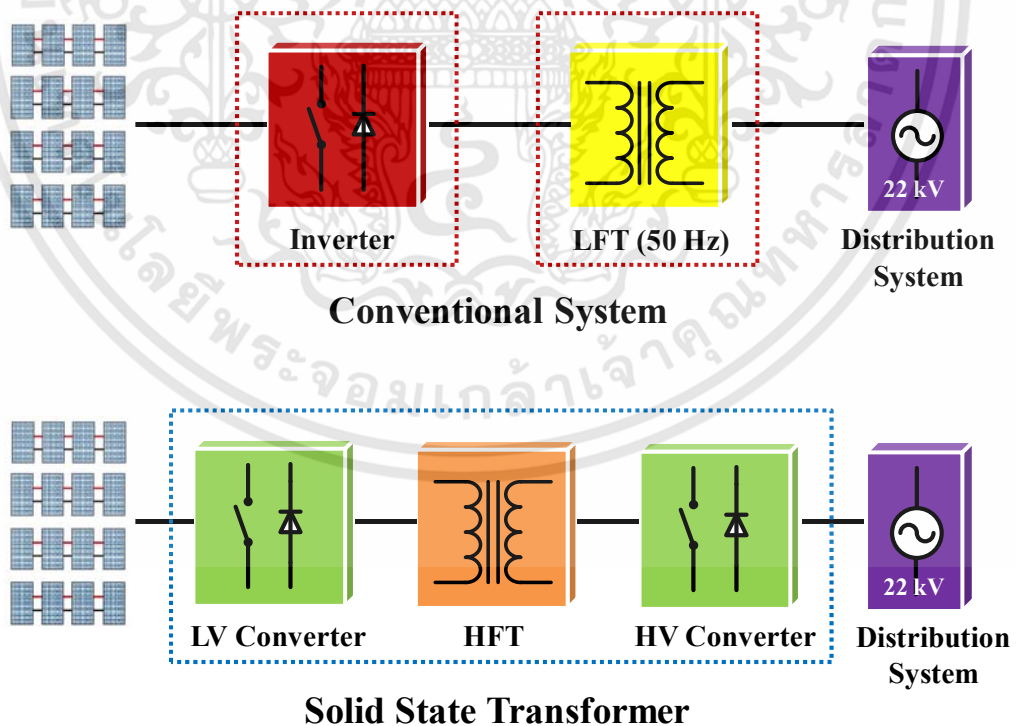
รูปที่ 3.10 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในรูปแบบอุปกรณ์ FACTS device

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม

จากการศึกษาที่ผ่านมาดังแสดงในบทที่ 2 การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขณะที่มีการทำงาน ซึ่งเป็นการสูญเสียที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แต่ในส่วนที่สองเป็นการสูญเสียในขณะที่ไม่มีการทำงานหรือในช่วงเวลากลางคืน ได้แก่ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้า (No-load loss) และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่โซลาร์อินเวอร์เตอร์ สำหรับปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากค่า Core loss ของหม้อแปลงในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มเป็นการสูญเสียที่มีมูลค่ามากและไม่สามารถแก้ไขได้ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าของโซลาร์ฟาร์มเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น หม้อแปลงที่มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในโซลาร์ฟาร์มจึงควรเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า Core loss ต่ำ

อย่างไรก็ตามค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่อง Core loss ก็ยังคงเกิดขึ้นตลอดเวลาในช่วงที่ไม่มีการทำงานหรือในช่วงเวลากลางคืน ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มและสามารถแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจาก Core loss ในช่วงเวลากลางคืนได้ คือ หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถปิดสวิตช์กำลังที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (Power electronic switch) จึงทำให้กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าไม่สามารถไหลมาที่หม้อแปลงไฟฟ้าของโซลาร์ฟาร์มได้ และจากโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีลักษณะเหมือนกับการรวมโซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพียงตัวเดียวแทนที่ระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วย โซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำได้ดังแสดงในรูปที่ 3.11 [1]



รูปที่ 3.11 การใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังแทนที่ระบบการทำงานเดิมในโซลาร์ฟาร์ม

โครงสร้างของโซลาร์ฟาร์มสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ แบบที่หนึ่ง เป็นโครงสร้างแบบ String inverter คือ ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็กหรือขนาดกลางหลาย ๆ ตัว ซึ่งอินเวอร์เตอร์เหล่านี้จะติดตั้งอยู่ใกล้กับ PV string โดยจะส่งกำลังไฟฟ้าในรูปแบบไฟฟ้ากระแสสลับมารวมกันที่ MDB (Main distribution board) ก่อนเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนแบบที่สอง เป็นโครงสร้างแบบ Central inverter โดยจะมีการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสตรงไปรวมกันที่อินเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่ และแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อนเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำงานของโซลาร์ฟาร์มที่มีการใช้งานจริงในประเทศไทยทั้ง 2 รูปแบบ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาจะถูกนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อให้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง ซึ่งได้รับความร่วมมือจากบริษัทโซลาร์ต้า จำกัด (Solarta Co., Ltd.) โดยโซลาร์ฟาร์มแบบ String inverter มีขนาด 3.573 MWp(DC), 3 MWp(AC) และใช้โซลาร์อินเวอร์เตอร์ขนาด 15 kW จำนวน 203 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ส่วนโซลาร์ฟาร์มแบบ Central inverter มีขนาด 6.168 MWp(DC), 5 MWp(AC) ใช้โซลาร์อินเวอร์เตอร์ขนาด 850 kW จำนวน 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งโซลาร์ฟาร์มทั้ง 2 สถานีนี้ได้สร้างเสร็จและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจำหน่ายตั้งแต่ปี 2012 และสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของทั้ง 2 ระบบ ได้ดังตารางที่ 3.3

จากข้อมูลในตารางที่ 3.3 พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์ฟาร์มที่พิกัดกำลังของทั้ง 2 ระบบมีค่าใกล้เคียงกัน (Rated power) ซึ่งโซลาร์ฟาร์มแบบ Central inverter จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ String inverter เพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ของทั้ง 2 ระบบ พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของ Central inverter จะมีค่าต่ำกว่า String inverter โดยค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของ Central inverter มีค่าเท่ากับ 2.44 % ส่วนค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของ String inverter มีค่าเท่ากับ 2.49 % ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มจึงควรเป็นแบบ Central inverter ที่มีการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากหลาย ๆ PV string มารวมกันที่จุดเดียว ก่อนทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยโซลาร์อินเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 3.14 นอกจากนี้อุปกรณ์ไฟฟ้าทางด้านแรงดันสูงมีราคาที่ค่อนข้างแพง จึงทำให้การใช้งานอุปกรณ์ที่มีพิกัดกำลังขนาดใหญ่มีความคุ้มค่ากับการลงทุนมากกว่า เมื่อเทียบกับการใช้งานอุปกรณ์ที่มีพิกัดกำลังขนาดเล็กหลาย ๆ ตัว

หลักการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ประยุกต์ใช้กับโซลาร์ฟาร์มในรูปแบบ Central inverter ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เริ่มจากการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงด้วยโซลาร์อินเวอร์เตอร์ จากนั้นจะส่งกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูง (HFT) เพื่อแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า ต่อจากนั้นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแส (Rectifier) และมีดีซีลิงค์ (DC-link) ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน ในลำดับสุดท้าย จะเป็นการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งหนึ่งด้วยอินเวอร์เตอร์ เพื่อเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่ความถี่ 50 Hz โดยข้อมูลต่าง ๆ จะถูกส่งมาที่ศูนย์ควบคุมการทำงานของระบบ (Plant data operation) เพื่อเก็บและบันทึกข้อมูล และแสดงผลด้วยระบบ Monitoring ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานของระบบด้วยการสั่งการจากระยะไกล (Remote control) นอกเหนือจากข้อดีในเรื่องของขนาดที่เล็กลงและน้ำหนักของอุปกรณ์ที่เบาขึ้น เนื่องจากการทำงานที่ความถี่สูง หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังยังมีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายสามารถเป็น

FACT's device เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยในการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการพัฒนาาระบบไฟฟ้าให้เป็นระบบไฟฟ้าแบบสมาร์ตกริด



รูปที่ 3.12 โซลาร์ฟาร์มไทรย้อยที่จังหวัดนครปฐม (String inverter) [25]

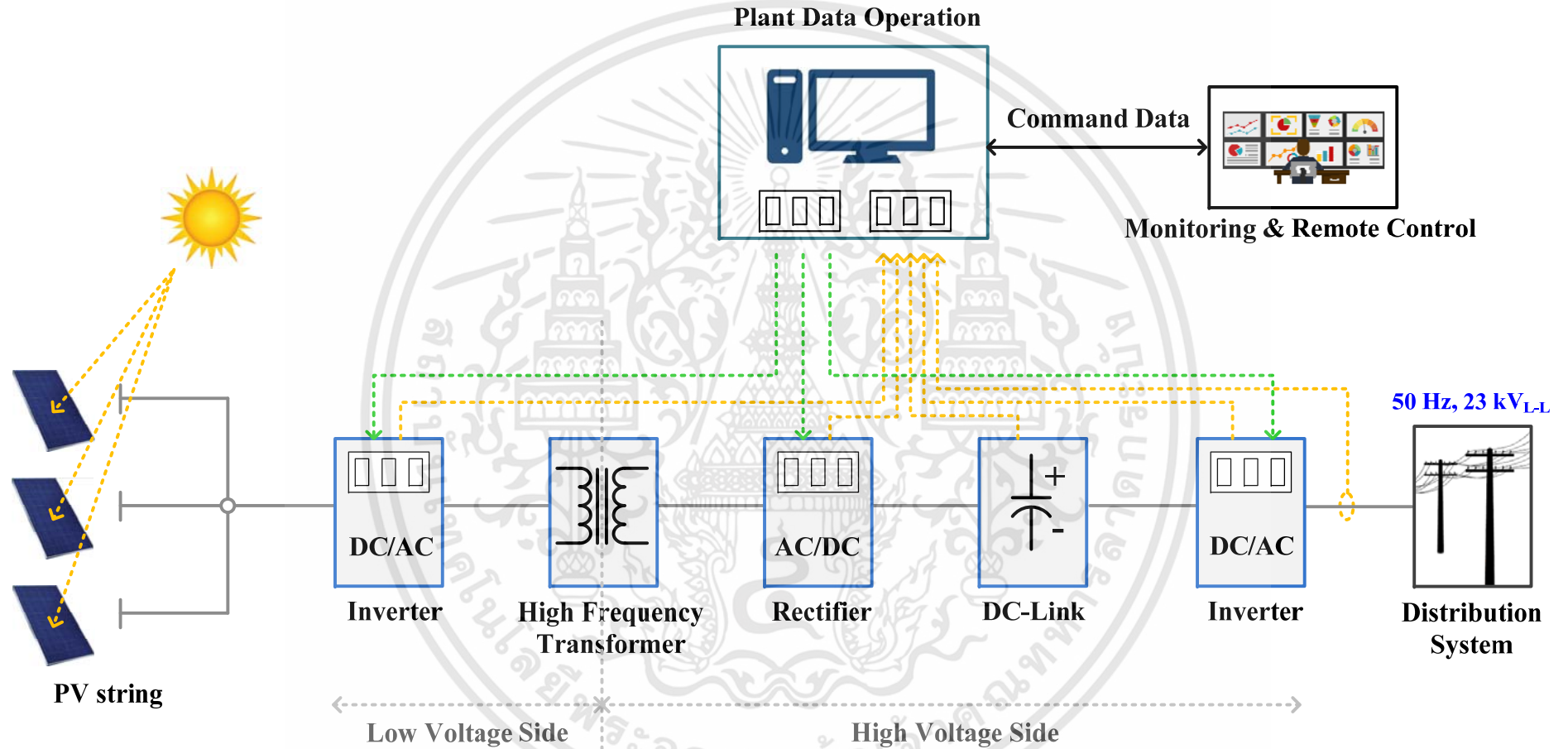


รูปที่ 3.13 โซลาร์ฟาร์มไทรทองที่จังหวัดนครปฐม (Central inverter) [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์ฟาร์มที่มีโครงสร้างแบบ String inverter และแบบ Central inverter

Operation (Rated power)								
Item	String inverter				Central inverter			
	Input (kW)	Output (kW)	Power loss (kW)	% loss	Input (kW)	Output (kW)	Power loss (kW)	% loss
PV peak power	3573.00				6168.00			
Capture loss + DC cabling loss		3046.00	527.00	14.75 %	5209.53	958.47	15.54 %	
Inverter (Eff. 97.5%)	3046.00	2970.00	76.00	2.49 %	5209.53	5082.33	127.20	2.44 %
AC cabling loss	2970.00	2925.68	44.32	1.49 %	5082.33	5062.00	20.00	0.40 %
Transformer (Eff. 99.2%)	2925.68	2902.28	23.4	0.80 %	5062.00	5021.50	40.50	0.80 %
Total loss			670.72				1146.17	
	Eff. over all system = 81.23 %				Eff. over all system = 81.41 %			
Not-operation								
Item	String inverter			Central inverter				
	Power loss (kW)	Energy loss all day (14 hr)		Power loss (kW)	Energy loss all day (14 hr)			
Transformer	3.75	52.5 kWh		6.25	87.5 kWh			



รูปที่ 3.14 การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มในรูปแบบ Central inverter

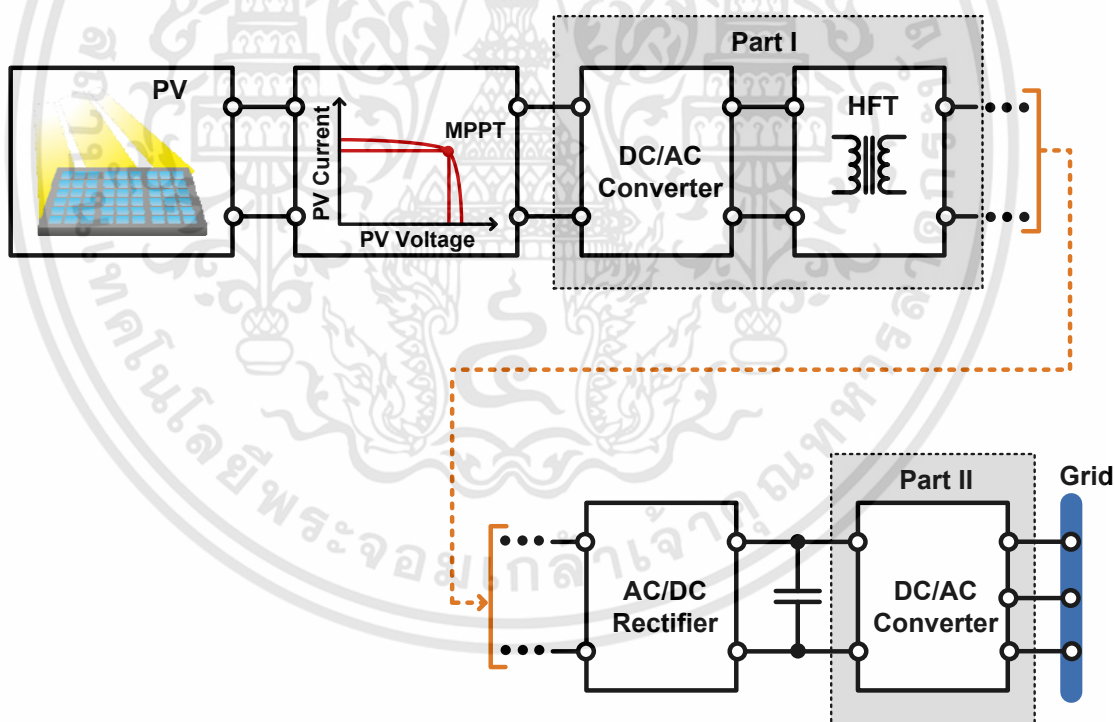
3.6 บทสรุป

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1970 โดย W. McMurray และได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ซึ่งปัจจุบัน หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบต่าง ๆ มากมาย เช่น ระบบสมาร์ตกริด พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ระบบเก็บสะสมพลังงาน สถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็ว ระบบบรรจรงไฟฟ้า และอุปกรณ์เพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เป็นต้น การนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มในประเทศไทยก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนส่วนใหญ่ของประเทศไทยเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์ฟาร์ม จากการศึกษาตัวอย่างการทำงานจริงของโซลาร์ฟาร์ม พบว่า การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มควรมีโครงสร้างในลักษณะ Central inverter คือ มีการส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากหลาย ๆ PV string มารวมกันที่จุดเดียว ก่อนทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยโซลาร์อินเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่ ในลำดับต่อไปจะเป็นการออกแบบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังต้นแบบเพื่อทดสอบการทำงานในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง และการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง

การออกแบบและการจำลองหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการออกแบบและการจำลองการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยอาศัยข้อมูลในบทที่ 3 ที่ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หลักการทำงานของคุณสมบัติของแกนความถี่สูง และการประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม มาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ การออกแบบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนที่หนึ่ง คือ การออกแบบและการจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง ในส่วนนี้ประกอบด้วย การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง การเลือกวงจรอินเวอร์เตอร์ฝั่งปฏุมภูมิของหม้อแปลง การเลือกเทคนิคที่ใช้ในการส่งกำลัง และผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับส่วนที่สองจะเป็นการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การเลือกวงจรคอนเวอร์เตอร์ หลักการควบคุมการทำงาน และผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังของงานวิจัยที่นำมาประยุกต์ใช้กับโซลาร์ฟาร์ม

4.2 การออกแบบและการจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง

ในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบและการจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ฝั่งปฏุมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง การออกแบบเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้า และการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนสามารถอธิบายได้ดังนี้

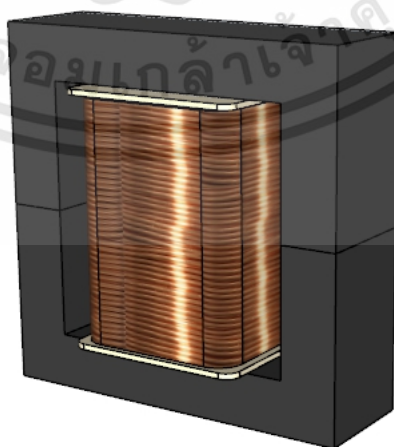
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

โครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูง (HFT) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ขดลวดตัวนำและแกนความถี่สูงที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง ได้แก่ ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ขนาดของหม้อแปลง และต้นทุนในการผลิต ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ของบทที่ 3 นอกจากนี้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ยังได้กล่าวถึงคุณสมบัติการทำงานของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แกนซิลิกอนสตีล แกนอะมอร์ฟัส แกนนาโนคริสตัลไลน์ และแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้ถูกนำมาประกอบการพิจารณาในการเลือกแกนความถี่สูงของหม้อแปลงด้วย

เมื่อพิจารณาความถี่ที่ใช้ในการส่งกำลังและคุณสมบัติการทำงานของแกนความถี่สูงที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ พบว่า แกนเฟอร์ไรต์มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาทำหม้อแปลงความถี่สูง เนื่องจากแกนชนิดนี้มีราคาถูกและมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้หม้อแปลงความถี่สูงที่ทำจากแกนเฟอร์ไรต์มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูง ถึงแม้ว่าแกนเฟอร์ไรต์จะมีข้อด้อยในเรื่องของความเปราะ แตกหักง่าย และมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กต่ำ แต่ก็ไม่เป็นปัญหาต่อการประยุกต์ใช้งาน เพราะแกนเฟอร์ไรต์สามารถรับแรงกดได้เป็นอย่างดี แต่อาจต้องเพิ่มความระมัดระวังในการเคลื่อนย้ายและการติดตั้งเพื่อป้องกันการแตกหัก สำหรับค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่มีค่าต่ำของแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งทำให้หม้อแปลงความถี่สูงที่ทำจากแกนเฟอร์ไรต์มีขนาดใหญ่ นั้นสามารถละลายได้ เนื่องจากพื้นที่ของโซลาร์ฟาร์มมีขนาดใหญ่ จึงทำให้ไม่เป็นปัญหาต่อการประยุกต์ใช้งานจริง

หม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ถูกออกแบบด้วยวิธีผลคูณพื้นที่ (Area product Ap approach) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถออกแบบได้โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานของแกนจากผู้ผลิต และมีความแม่นยำต่ำกว่าวิธี Core geometry เพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้สองรูปแบบ คือ การส่งกำลังแบบรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) และการส่งกำลังแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งสมการแรงดันไฟฟ้าของรูปคลื่นไซน์และสมการแรงดันไฟฟ้าของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.1) และสมการที่ (4.2) ตามลำดับ โดยที่ N คือ จำนวนรอบของขดลวด f คือ ความถี่ Fundamental ของรูปคลื่น B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดแกน



รูปที่ 4.2 โครงสร้างหม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{rms} = 4.44 N f B_{max} A_c \quad (4.1)$$

$$V_{rms} = 4 N f B_{max} A_c \quad (4.2)$$

เมื่อพิจารณาทั้ง 2 สมการ โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีค่าเท่ากัน การส่งกำลังด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์จะมีค่าพื้นที่หน้าตัดแกนเล็กกว่าการส่งกำลังด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม ส่งผลให้หม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้ในการส่งกำลังด้วยแรงดันรูปคลื่นไซน์มีขนาดเล็กกว่าหม้อแปลงความถี่สูงที่ส่งกำลังด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมยังมีค่าฮาร์มอนิกที่สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าของรูปคลื่นไซน์ ส่งผลให้การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงมากกว่าการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ เพื่อลดขนาดและการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูง โดยสมการที่ใช้ในการออกแบบสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$A_p = \frac{V_1 I_1 + V_2 I_2}{4 k B_{max} f J} \quad (4.3)$$

$$N_1 = \frac{V_1}{4 B_{max} A_c f} \quad (4.4)$$

$$N_2 = \frac{V_2}{4 B_{max} A_c f} \quad (4.5)$$

$$A_{wire} = \frac{I}{J} \quad (4.6)$$

$$A_{window} = N_1 A_{wire,1} + N_2 A_{wire,2} \quad (4.7)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}} \quad (4.8)$$

สมการที่ (4.3) เป็นการคำนวณหาค่าขนาดแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงความถี่สูงที่ต้องการออกแบบ โดยที่ k คือ ค่าแฟคเตอร์การพันขดลวดมีค่าประมาณ 0.3 - 0.9, B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์มีค่าประมาณ 0.3 T และ J คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสในขดลวดตัวนำมีค่าประมาณ 3 - 5 A/mm² เมื่อได้ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แล้วสามารถคำนวณหาจำนวนรอบขดลวดของฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ตั้งสมการที่ (4.4) และสมการที่ (4.5) และสามารถคำนวณหาขนาดของขดลวดและตรวจสอบพื้นที่หน้าต่างที่ใช้ในการพันขดลวดได้จากสมการที่ (4.6) และสมการที่ (4.7) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการส่งกำลังที่ความถี่สูง คือ ค่าความลึกผิว (Skin depth) โดยรัศมีของเส้นลวดทองแดงที่ใช้งานจะต้องน้อยกว่าค่าความลึกผิวซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (4.8) หากรัศมีของเส้นลวดทองแดงที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.6) มีค่ามากกว่าค่าความลึกผิวจะต้องใช้เส้นลวดทองแดงที่รัศมีน้อยกว่าค่าความลึกผิวที่เดียวกัน โดยให้ผลรวมพื้นที่ของเส้นลวดทองแดงที่ดีที่สุดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของเส้นลวดทองแดงที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.6)

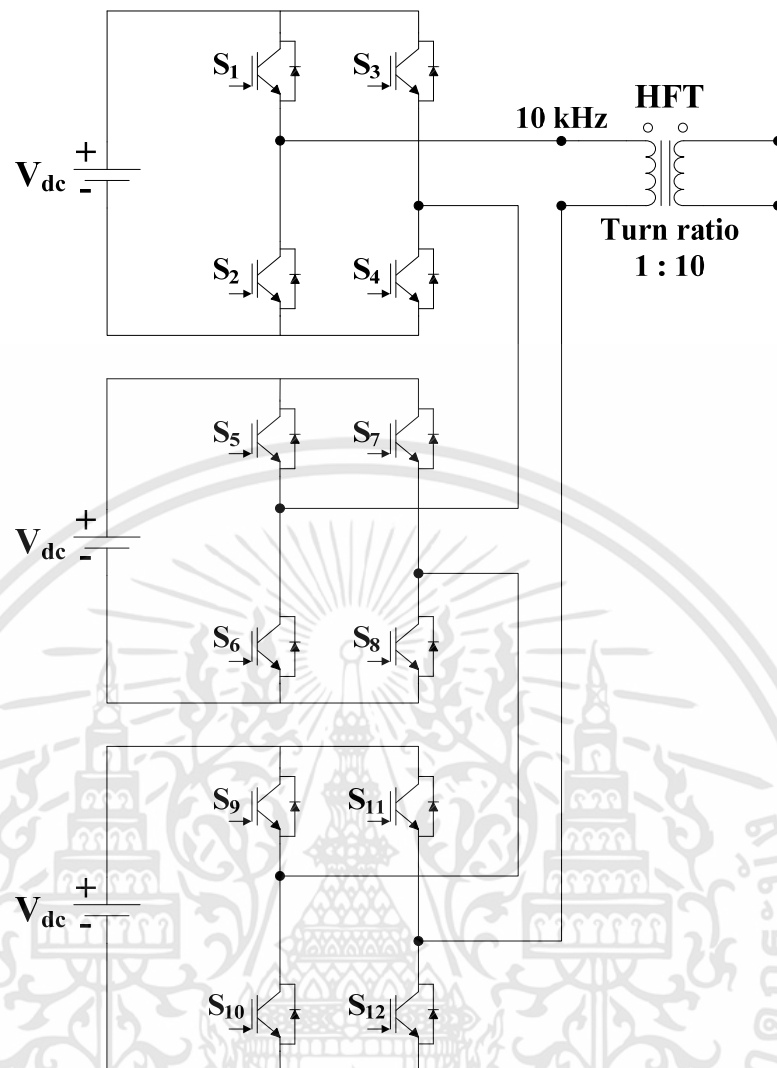
4.2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ฝั่งปฏุมภูมิของหม้อแปลง

จากที่กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์สามารถลดฮาร์มอนิกส์และลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงได้ ดังนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์ฝั่งปฏุมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงจึงควรเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ

วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีด้วยกัน 3 รูปแบบใหญ่ ๆ ได้แก่ วงจรไดโอดแคลมป์ (Diode clamped) วงจรฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor) และวงจรแคสเคดเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (Cascaded H-bridge Multi-level inverter, CHB inverter) วงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มมากที่สุดและถูกนำมาใช้กับงานวิจัยนี้ด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากมีประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานที่สูง ทำหน้าที่กักกำลังไฟฟ้าสูงและแรงดันไฟฟ้าสูงได้เป็นอย่างดี มีอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าต่ำ (dv/dt ต่ำ) มีการรบกวนของสนามแม่เหล็กน้อย ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าต่ำ (Total harmonic distortion, THD) ควบคุมการทำงานง่าย และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC source) เป็นแบบแยกอิสระซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ PV string จึงทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มได้เป็นอย่างดี [27]-[29] สำหรับจำนวนระดับของแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.9) โดยที่ m_p เป็นจำนวนระดับของแรงดันไฟฟ้าของรูปคลื่นแรงดันเฟส และ s เป็นจำนวนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในวงจร

$$m_p = 2s + 1 \quad (4.9)$$

จำนวนระดับแรงดันไฟฟ้าที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มที่ระดับแรงดันปานกลาง (Medium voltage) และระดับแรงดันสูง (High voltage) ได้แก่ 5 ระดับ, 7 ระดับ, 9 ระดับ และ 11 ระดับ [30]-[34] ถึงแม้ว่า จำนวนระดับของแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะสามารถลดค่า THD ของรูปคลื่นได้เป็นอย่างดี และส่งผลให้อุปกรณ์และฟิวเตอร์มีขนาดเล็กลง แต่การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจาก Switching loss และ Conduction loss ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลง รวมถึงค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากจำนวนสวิตช์กำลังที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น วงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ จึงมีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากค่า THD ต่ำ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าไม่มาก และมีความคุ้มค่ากับการลงทุน [29], [34]-[36]



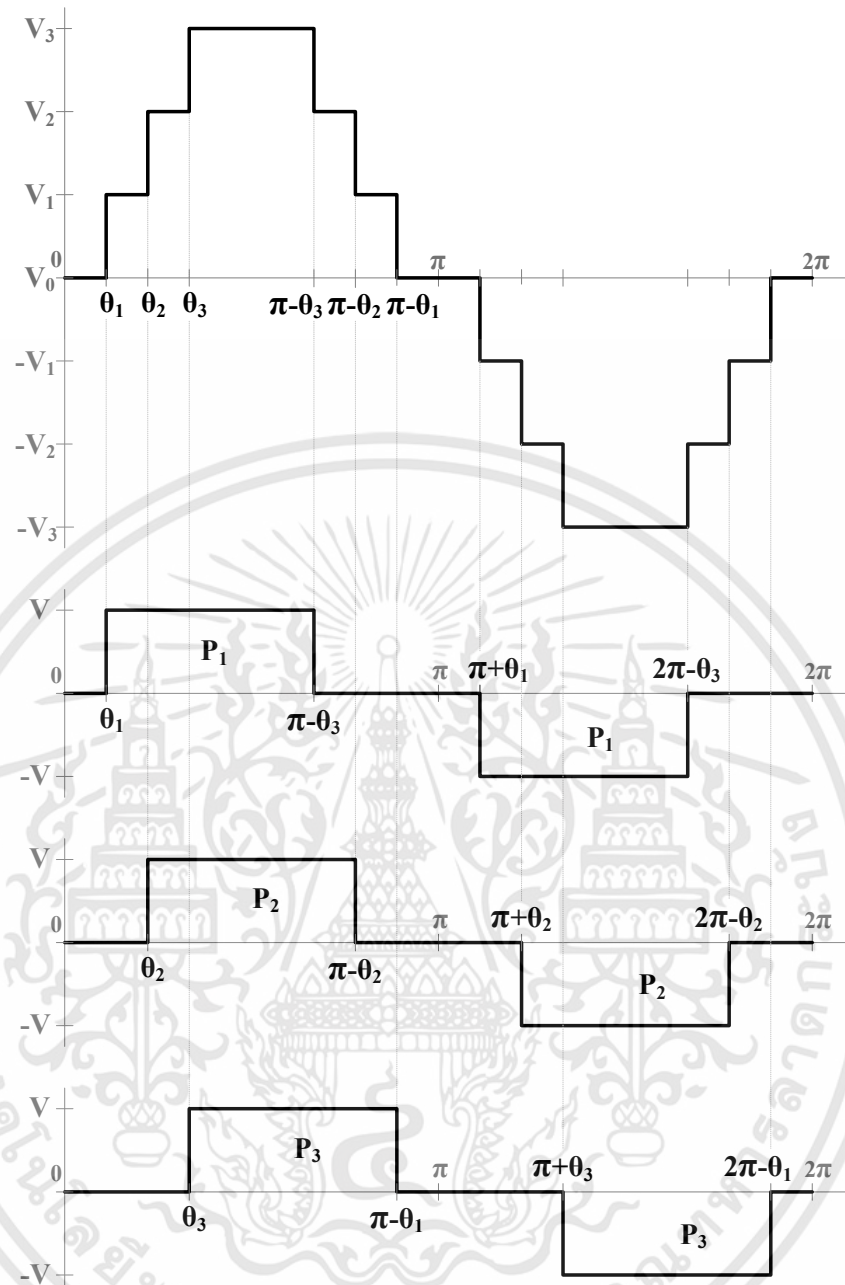
รูปที่ 4.3 วงจรเอชบริดจ์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ

4.2.3 เทคนิคการควบคุมการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ

เทคนิค Selective harmonic elimination method (SHE) ถูกนำมาใช้ควบคุมการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงที่สร้างจากแกนเฟอร์ไรต์ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยข้อดีของเทคนิคนี้ คือ การควบคุมมีความง่ายและไม่ซับซ้อน ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณต่ำ ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการสวิตช์ของสวิตช์กำลัง สามารถกำจัดฮาร์มอนิกอันดับต่ำ ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือสามารถกำจัดฮาร์มอนิกของรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตได้โดยตรง จึงทำให้การควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยเทคนิค SHE สามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและการเกิดความร้อนที่หม้อแปลงความถี่สูงได้เป็นอย่างดี [29], [32], [37]-[39]

เพื่อไม่ให้สวิตช์กำลังของ cell 1 ทำงานมากจนเกินไป จึงนำวิธีการ Alternate arrangement of pulses มาประยุกต์ใช้กับเทคนิค SHE เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ โดยลดวัฏจักรงานของ cell 1 และเพิ่มวัฏจักรงานของ cell 3 วิธีการนี้ทำให้วัฏจักรงานของ cell 1 และ cell 3 มีค่าเท่ากัน ($P_1 = P_3$) และทำให้วัฏจักรงานของทั้ง 3 cell มีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การนำเทคนิค Alternate arrangement of pulses มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิค SHE

เมื่อวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ด้วยสมการฟูริเยร์ (Fourier equation) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.10) โดยที่ L เป็นจำนวนระดับของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีความถี่มูลฐาน (Fundamental output) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.11) สำหรับรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าในลักษณะที่เป็น 7 ระดับ จะพบว่าฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3^{rd} จะมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงควรกำจัดฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5^{th} และฮาร์มอนิกส์ 7^{th} ซึ่งมีอิทธิพลมากกว่าดังแสดงใน [9], [27], [36], [40]-[43] ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5^{th} และฮาร์มอนิกส์ 7^{th} สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.12) และสมการที่ (4.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการฟูเรียร์รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ระดับแรงดันเป็นเลขคี่

$$V_{out,n} = \frac{4V_{dc}}{n\pi} [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3) + \dots + \cos(n\theta_{(L-1)/2})] \quad (4.10)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ความถี่มูลฐาน

$$V_{out,1} = \frac{4V_{dc}}{(1)\pi} [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3)] \quad (4.11)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮาร์โมนิกอันดับที่ 5th

$$V_{out,5} = \frac{4V_{dc}}{(5)\pi} [\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3)] \quad (4.12)$$

สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮาร์โมนิกอันดับที่ 7th

$$V_{out,7} = \frac{4V_{dc}}{(7)\pi} [\cos(7\theta_1) + \cos(7\theta_2) + \cos(7\theta_3)] \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.11) เมื่อแทนค่า $n = 1$ และกำหนดให้ $m_a = (\pi V_{out,1}) / (4V_{dc})$ ค่าที่ได้จะเป็นไปตามสมการที่ (4.14) ในการกำจัดฮาร์โมนิกอันดับที่ 5th และฮาร์โมนิก 7th จะกำหนดให้ค่า $V_{out,5}$ และค่า $V_{out,7}$ มีค่าเท่ากับ 0 และเมื่อแทนค่า $V_{out,5} = 0$ และค่า $V_{out,7} = 0$ ลงในสมการที่ (4.12) และสมการที่ (4.13) ผลที่ได้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.15) และสมการที่ (4.16) ตามลำดับ

$$\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) = m_a \quad (4.14)$$

$$\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) = 0 \quad (4.15)$$

$$\cos(7\theta_1) + \cos(7\theta_2) + \cos(7\theta_3) = 0 \quad (4.16)$$

สมการที่ (4.15) และสมการที่ (4.16) สามารถกระจายค่า cosine โดยใช้สมการที่ (4.17) และสมการที่ (4.18) เพื่อจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการพหุนาม (Polynomial equations) และใช้วิธีการของนิวตัน-ราฟสัน (Newton Raphson's method) ในการแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear polynomial equations) เพื่อหาค่า θ_1 , θ_2 และ θ_3 โดยที่ $0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \pi/4$

$$\cos(5\theta) = 16\cos^5(\theta) - 20\cos^3(\theta) + 5\cos(\theta) \quad (4.17)$$

$$\cos(7\theta) = 64\cos^7(\theta) - 112\cos^5(\theta) + 56\cos^3(\theta) + 7\cos(\theta) \quad (4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

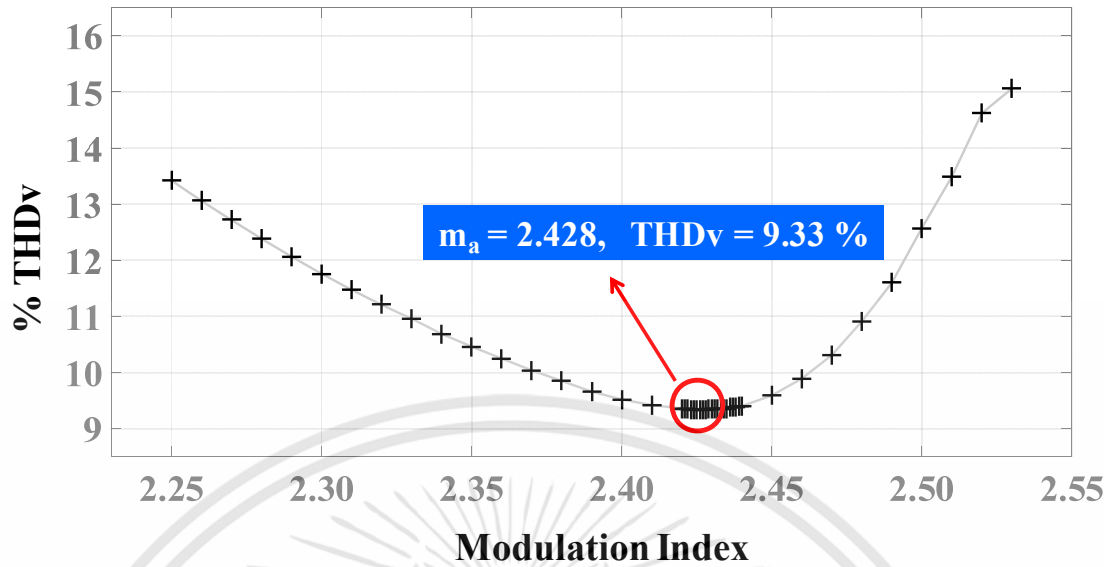
4.2.4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ ด้วยเทคนิค SHE แบบแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีขนาดเท่ากัน (Equal DC input voltages) สำหรับเทคนิค SHE แบบแหล่งจ่ายไฟตรงปรับค่าได้ (Unequal DC input voltages) จะสามารถลดค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณได้ดีกว่าแบบแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีขนาดเท่ากัน แต่ถ้าทำการปรับจูนจนได้ค่ามุมที่เหมาะสม (Optimal angle) ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณวิธีแบบแหล่งจ่ายไฟตรงขนาดเท่ากันจะมีขนาดใกล้เคียงกับวิธีแบบแหล่งจ่ายไฟตรงปรับค่าได้ เพียงพอต่อการใช้งาน และมีการควบคุมการทำงานที่ง่ายกว่า

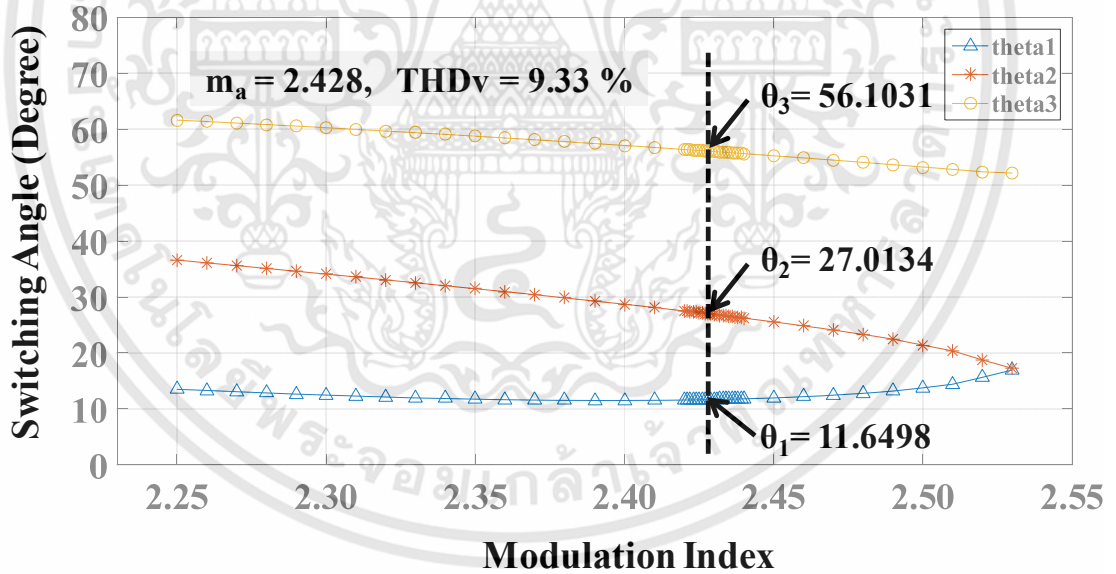
การจำลองการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ และการหาค่ามุม θ_1 , θ_2 และ θ_3 ในสมการที่ (4.14) ถึงสมการที่ (4.16) ถูกคำนวณและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยความถี่ที่ใช้ในการส่งกำลังเท่ากับ 10 kHz ขนาดแรงดันไฟตรงของแต่ละแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 V การวิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.19) ซึ่งผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.9

$$\%THDv = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (4.19)$$

จากผลการจำลองอย่างละเอียด พบว่า ที่ค่า $m_a = 2.428$ จะให้ค่า $\%THDv$ มีค่าต่ำสุด คือ 9.33% ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยค่ามุม $\theta_1 = 11.6498^\circ$, $\theta_2 = 27.0134^\circ$ และ $\theta_3 = 56.1031^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและค่าแรงดัน RMS สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณและพล็อตค่าฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมอันดับต่ำ ๆ ซึ่งมีอิทธิพลสูงต่อการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่า ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3rd มีค่าเท่ากับ 0.06% ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5th มีค่าเท่ากับ 0.02% ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7th มีค่าเท่ากับ 0.01% และฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 9th มีค่าเท่ากับ 6.97% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าที่ตำแหน่ง $m_a = 2.428$ ซึ่งมีค่า $\%THDv = 9.33\%$ จะมีค่าฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3rd ต่ำที่สุด แต่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 9th นั้นมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้น เพื่อให้ค่ามุมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานมีความเหมาะสมที่สุดและมีค่า $\%THDv$ ต่ำสุด ค่ามุมเบื้องต้นที่หาได้จากเทคนิค SHE จะถูกนำมาปรับจูนอีกครั้งหนึ่ง โดยพบว่า ค่ามุมที่เหมาะสมที่สุด (Optimal angle) คือ $\theta_1 = 8.7^\circ$, $\theta_2 = 26.4^\circ$ และ $\theta_3 = 54.1^\circ$ โดยมีค่า $\%THDv$ ต่ำสุด คือ 8.66% และสามารถเปรียบเทียบค่าฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมที่อันดับต่าง ๆ ระหว่างเทคนิค SHE กับการปรับจูนจนได้ค่าที่มุมที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.10

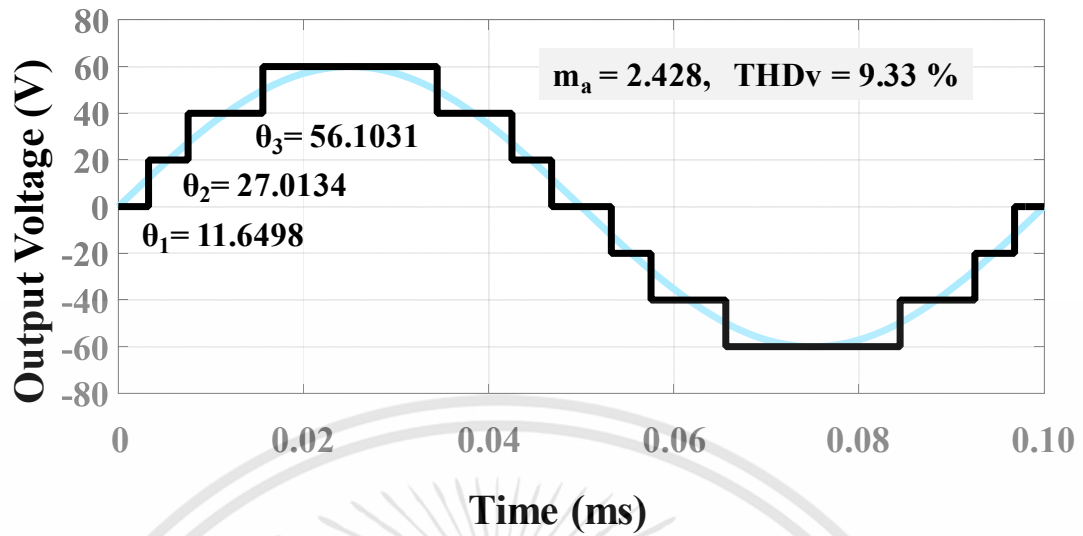


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า m_a กับค่า %THDv

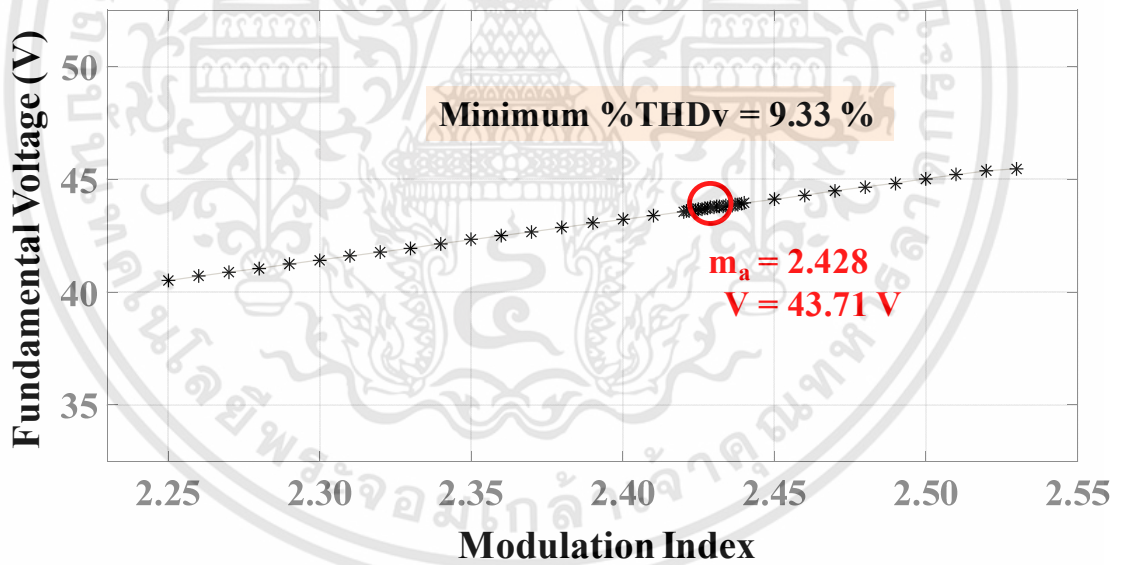


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า m_a กับชุดมุมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

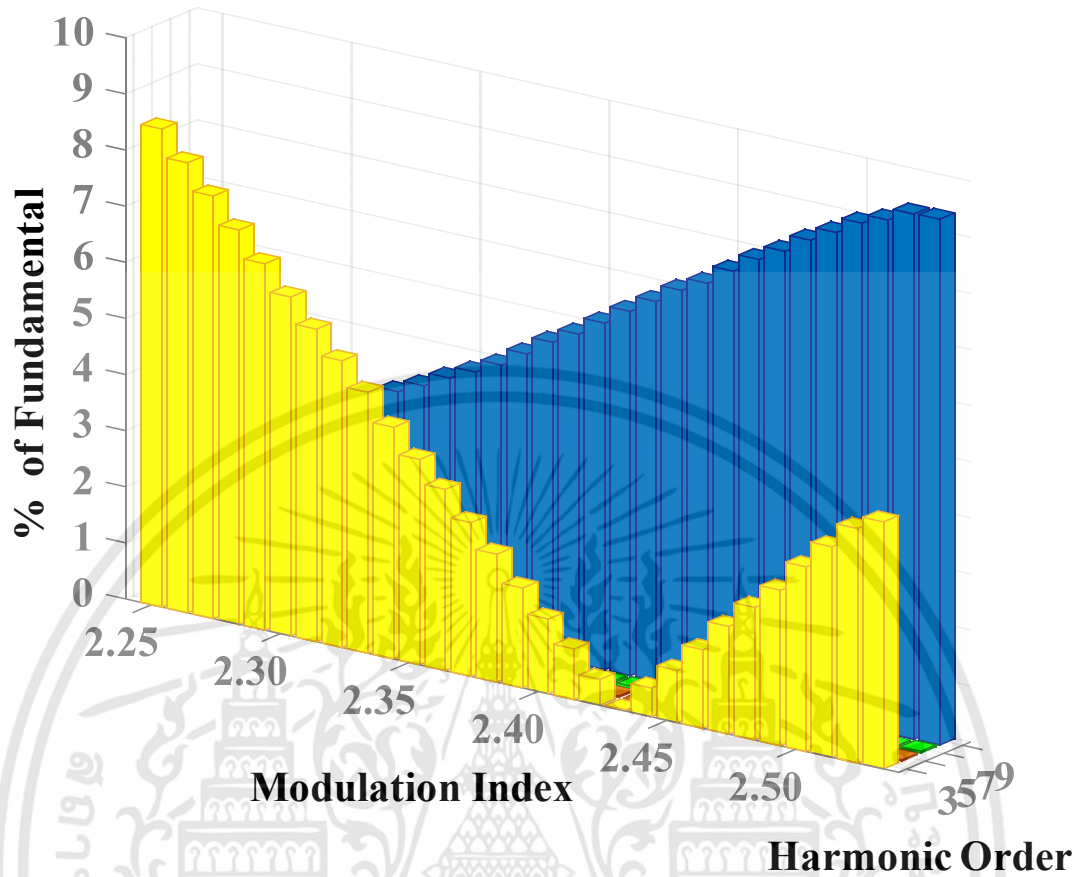


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองโดยใช้เทคนิค SHE

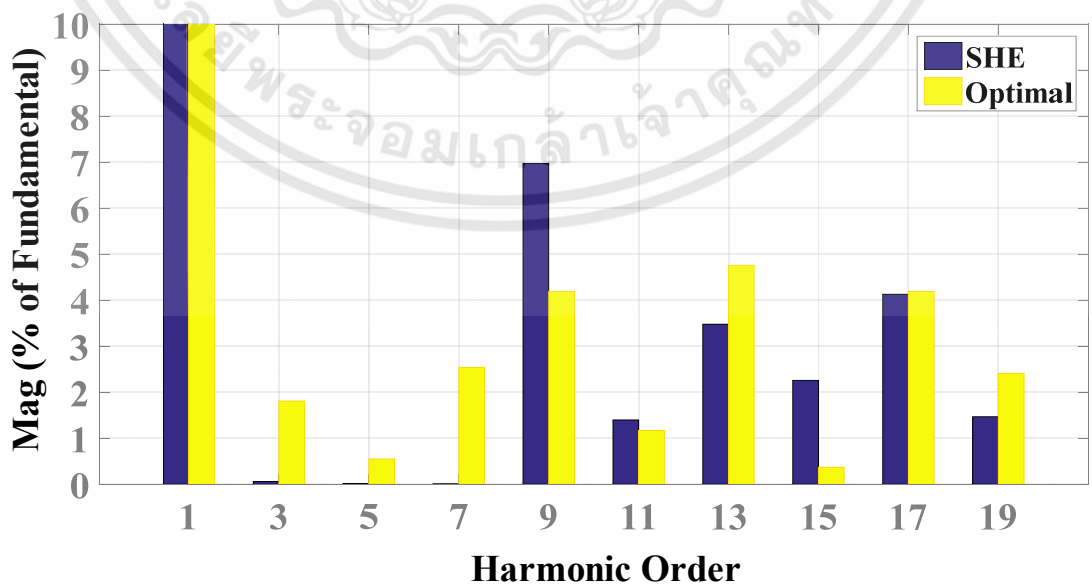


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า m_a กับแรงดัน RMS ของรูปคลื่นสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า m_a กับฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมที่อันดับต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่า %THDv ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณกับชุดมุมที่เหมาะสม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าฮาร์มอนิกอันดับที่ 9th ฮาร์มอนิกอันดับที่ 11th และฮาร์มอนิกอันดับที่ 15th ของชุดมุมที่เหมาะสม (Optimal angle) จะมีค่าต่ำกว่าชุดมุมที่คำนวณได้จากเทคนิค SHE จึงส่งผลให้ค่า $\%THD_v$ รวมของชุดมุมที่เหมาะสมมีค่าน้อยกว่าค่า $\%THD_v$ รวมของชุดมุมที่คำนวณได้จากเทคนิค SHE ถึงแม้จะมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำ ๆ ซึ่งได้แก่ ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3rd ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th และฮาร์มอนิกอันดับที่ 7th เกิดขึ้นก็ตาม สำหรับชุดมุมที่เหมาะสมนี้จะถูกนำไปใช้ควบคุมการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยจะมีการนำเสนอในบทต่อไป

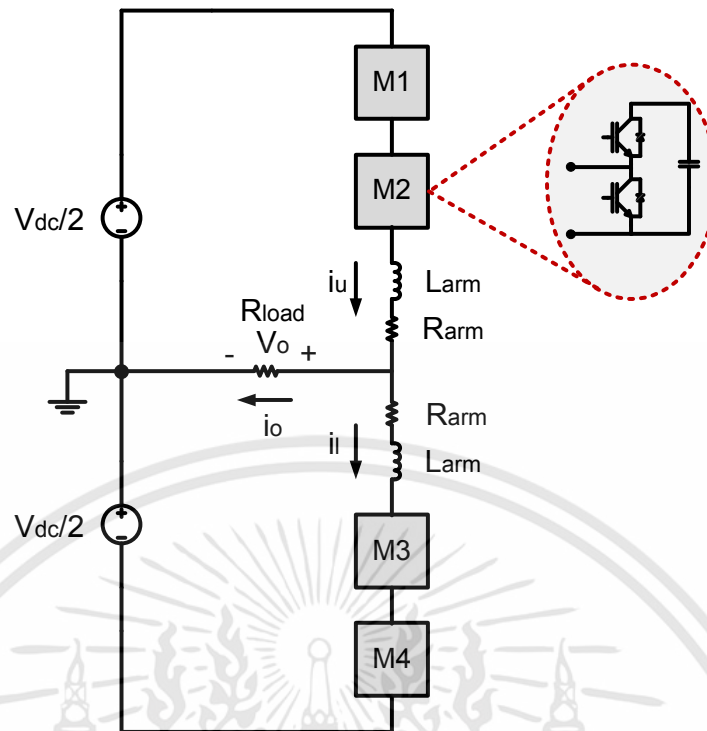
4.3 การออกแบบและการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

วงจรคอนเวอร์เตอร์หลายระดับที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้มีด้วยกันมากมายหลายชนิด แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (Modular multilevel inverter, MMI) มาใช้งานเป็นส่วนหนึ่งของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม โดยข้อได้เปรียบของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่น ๆ [44]-[47] ได้แก่

- ใช้แหล่งจ่ายกระแสตรงเพียงแหล่งจ่ายเดียวในการทำงาน
- โครงสร้างของแต่ละโมดูลมีความอิสระต่อกันทำให้ง่ายต่อการออกแบบและการซ่อมแซม
- การควบคุมไม่ซับซ้อน สามารถประยุกต์ใช้การควบคุมวงจรที่มีจำนวนโมดูลน้อยกับวงจรที่มีจำนวนโมดูลมากได้
- การทำงานของแต่ละโมดูลสามารถควบคุมการทำงานได้ทั้งฝั่งไฟฟ้ากระแสตรงและฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับ
- การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากการสวิตช์มีค่าต่ำ เนื่องจากจำนวนสวิตช์กำลังน้อย
- สามารถใช้สวิตช์กำลังที่ทนแรงดันไฟฟ้าไม่สูงได้
- วงจรรองความถี่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เนื่องจากภายในวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์มีตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เป็น passive filter
- สามารถลิมิตกระแสไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับในกรณีที่ฟูลท์ที่ตีซีลิ่งค์
- สามารถลดอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของกระแสไฟฟ้า (di/dt)
- สามารถลดสัญญาณรบกวนความถี่สูงได้

โดยทั่วไปวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภท ซึ่งได้แก่ Single star bridge cells (SSBC), Single delta bridge cells (SDBC), Double star chopper cells (DSCC) และ Double star bridge cells (DSBC) [48] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นและนำเสนอวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ Double star chopper cells (DSCC) [49] ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจากในแต่ละโมดูลเป็นแบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half bridge) จึงทำให้จำนวนสวิตช์ที่ใช้น้อยกว่าแบบฟูลบริดจ์ (Full bridge) ส่งผลให้ DSCC มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับ SSBC, SDBC และ DSBC นอกจากนี้ DSCC ยังสามารถต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้โดยตรงซึ่งไม่เหมือนกับอินเวอร์เตอร์ชนิดอื่น ๆ ที่ต้องต่อตัวเหนี่ยวนำ (Protection choke) ก่อนเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 วงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส 3 ระดับ แบบ DSCC

4.3.1 การออกแบบและการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์

การออกแบบและการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์สามารถแสดงรายละเอียดต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

4.3.1.1 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์

วงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์การทำงานทั่วไปเป็นวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส ในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ซึ่งได้กล่าวถึงไปก่อนหน้านี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 [44] จำนวนระดับของแรงดันเฟสนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 4.20 และระดับแรงดันระหว่างเฟสสามารถหาได้จากสมการที่ 4.21 โดยที่ N คือ จำนวนโมดูลใน 1 แขน ของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์

$$V_p = N + 1 \quad (4.20)$$

$$V_{L-L} = 2N + 1 \quad (4.21)$$

เพื่อให้เกิดความง่ายต่อการวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 4.11 จึงใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแทนตัวเก็บประจุ และไม่คิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน เมื่อวิเคราะห์วงจรตามกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's voltage law) สามารถแสดงสมการของลูบบนและลูปล่างได้ดังสมการที่ (4.22) และสมการที่ (4.23) โดยที่ V_o คือ แรงดันที่ตกคร่อมโหลด V_{m1} , V_{m2} , V_{m3} และ V_{m4} คือ แรงดันไฟฟ้าของแต่ละโมดูล ระดับแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทมี 3 ระดับ ได้แก่ $V_{dc/2}$, V_o และ $-V_{dc/2}$ และมีค่าแรงดันที่ตีซิงค์เท่ากับ V_{dc}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \frac{V_{dc}}{2} - V_{m1} - V_{m2} \quad (4.22)$$

$$V_o = -\frac{V_{dc}}{2} + V_{m3} + V_{m4} \quad (4.23)$$

แต่เมื่อนำค่าความเหนี่ยวนำ (L_{arm}) และค่าความต้านทาน (R_{arm}) มาวิเคราะห์อัตรา การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าตามกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.24) และสมการที่ (4.25) โดยที่ i_u คือ ค่ากระแสในลูบบน และ i_l คือ ค่ากระแสในลูปล่าง เมื่อแทน ค่าสมการที่ (4.24) ลงในสมการที่ (4.25) และจัดรูปใหม่ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.26)

$$0 = \frac{V_{dc}}{2} - V_{m1} - V_{m2} - L_{arm} \frac{di_u}{dt} - R_{arm} i_u - V_o \quad (4.24)$$

$$0 = \frac{V_{dc}}{2} - V_{m3} - V_{m4} - L_{arm} \frac{di_l}{dt} - R_{arm} i_l + V_o \quad (4.25)$$

$$2V_o = V_{m3} + V_{m4} - V_{m1} - V_{m2} + L_{arm} \frac{di_l}{dt} + R_{arm} i_l - L_{arm} \frac{di_u}{dt} - R_{arm} i_u \quad (4.26)$$

จากรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณากฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's current law) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.27)

$$i_o = i_u - i_l \quad (4.27)$$

แทนค่าสมการที่ (4.27) ลงในสมการที่ (4.26) และจัดรูปใหม่ซึ่งสามารถแสดงได้ดัง สมการที่ (4.28) และสามารถเขียนสมการทั่วไปในกรณีที่มียานวนโมดูลในหนึ่งแขนมากกว่า 2 โมดูล ขึ้นไปได้ดังสมการที่ (4.29) เมื่อแทนค่า $V_o = R_o i_o$ และจัดสมการในรูปของกระแสเอาต์พุตสามารถ แสดงได้ดังสมการที่ (4.30) จากสมการที่ (4.29) พบว่าระดับแรงดันเอาต์พุตต่อเฟสของวงจรมอดูลาร์ มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์สามารถสร้างระดับแรงดันได้ถึง $2N+1$ ระดับ แต่ต้องมีการควบคุมระดับ แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุของแต่ละโมดูลให้มีค่าเท่ากัน ไม่เช่นนั้นแรงดันเฟสจะมีค่าลดลงเหลือ $N+1$ ระดับ

$$V_o = \frac{1}{2}(V_{m3} + V_{m4} - V_{m1} - V_{m2}) - \frac{1}{2}(L_{arm} \frac{di_o}{dt} + R_{arm} i_o) \quad (4.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^N V_{ml} - \sum_{m=1}^N V_{mu} \right) - \frac{1}{2} \left(L_{arm} \frac{di_o}{dt} + R_{arm} i_o \right) \quad (4.29)$$

$$\frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^N V_{ml} - \sum_{m=1}^N V_{mu} \right) = R_o i_o + \frac{1}{2} \left(L_{arm} \frac{di_o}{dt} + R_{arm} i_o \right) \quad (4.30)$$

4.3.1.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่แขนของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์
ตัวเหนี่ยวนำเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ ค่าความเหนี่ยวนำจะมีผลต่อระลอกของกระแสเอาต์พุตซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและพิกัดการทำงานของสวิตช์กำลัง นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อขนาดของตัวเก็บประจุและการควบคุมแรงดันที่ตัวเก็บประจุของแต่ละโมดูลให้มีความสมดุลกัน สมการที่ (4.31) เป็นสมการแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับระลอกของกระแสไฟฟ้าและแปรผกผันกับเวลา และเมื่อพิจารณาอุปบนของวงจรในรูปที่ 4.11 ตามกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์สามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (4.32)

$$V_{L_{arm}} = L_{arm} \frac{di}{dt} \quad (4.31)$$

$$V_{L_{arm}} = \frac{V_{dc}}{2} - V_o \quad (4.32)$$

จากสมการที่ (4.31) สามารถเขียนระลอกของกระแสได้ดังสมการที่ (4.33) และแทนค่าสมการที่ (4.32) ลงในสมการที่ (4.33) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.34)

$$di = \frac{V_{L_{arm}} dt}{L_{arm}} \quad (4.33)$$

$$di = \frac{\left(\frac{V_{dc}}{2} - V_o \right) dt}{L_{arm}} \quad (4.34)$$

หากพิจารณาระลอกของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ตัวเหนี่ยวนำ ค่าพีคระลอกของกระแสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.35) โดยที่ i_{dc} เป็นกระแสที่ตีซีลิ่งค์ และ $\frac{\delta i_{peak}}{2}$ เป็นค่าพีคของ

กระแสที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งค่า i_{dc} และค่า $\frac{i_{o,peak}}{2}$ สามารถหาได้จากสมการที่ (4.36) และ

สมการที่ (4.37) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{u,peak} = i_{dc} + \frac{i_{o,peak}}{2} + \frac{\delta i_{peak}}{2} \quad (4.35)$$

การหาค่า i_{dc} จากหลักการการเท่ากันของกำลังไฟฟ้าที่ตีซีลิ่งคืกับกำลังไฟฟ้าที่โหลด

$$P_{dc} = P_{load}$$

$$V_{dc} i_{dc} = \frac{V_{o,rms}^2}{R_{load}}$$

$$i_{dc} = \frac{V_{o,rms}^2 V_{dc}}{R_{load}} \quad (4.36)$$

การหาค่า $\frac{i_{o,peak}}{2}$ จากค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่คร่อมโหลด

$$V_{o,rms} = i_{o,rms} R_{load}$$

$$i_{o,peak} = \frac{V_{o,peak}}{R_{load}}$$

ดังนั้นค่ากระแสพีคที่โหลดของตัวเหนี่ยวนำในแต่ละแขน คือ

$$\frac{i_{o,peak}}{2} = \frac{V_{o,peak}}{R_{load}} \quad (4.37)$$

สำหรับค่าพีคของกระแสที่เกิดขึ้นในตัวเหนี่ยวนำนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่ตีซีลิ่งคืและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ดังนั้นจึงสามารถละทิ้งค่า $\frac{\delta i_{peak}}{2}$ ได้ และสามารถประมาณค่ากระแสพีคที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของแขนบนได้ดังสมการที่ (4.38)

$$i_{u,peak} = i_{dc} + \frac{i_{o,peak}}{2} \quad (4.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.3 การออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าในแต่ละโมดูลของวงจร

การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุส่งผลต่ออายุการใช้งานของตัวเก็บประจุและระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งค่าตัวเก็บประจุที่มีความเหมาะสมจะช่วยให้คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรมอดูลาร์ มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ในที่นี่จะอ้างอิงวงจรจากรูปที่ 4.11 กำหนดให้กระแสไฟฟ้าในลูปบนที่มีความถี่มูลฐานเป็นรูปคลื่นไซน์ และกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการคายประจุของตัวเก็บประจุมีค่าเป็นลบ สามารถเขียนสมการที่ไหลของกระแสไฟฟ้าในลูปบนได้ดังสมการที่ (4.39) และสามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุได้ดังสมการที่ (4.40) โดยที่ C_{mod} คือ ค่าตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล i_c คือ กระแสไฟฟ้าในลูปบน dt คือ เวลาที่ใช้ในการคายประจุของตัวเก็บประจุ และ dV_c คือ ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการออกแบบ

$$i_u = i_{dc} + \frac{i_o}{2} \quad (4.39)$$

$$C_{mod} = \frac{i_c dt}{dV_c} \quad (4.40)$$

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตกับกระแสไฟฟ้าที่ตีซีลิงค์โดยใช้หลักการเท่ากันของกำลังไฟฟ้าที่ตีซีลิงค์กับกำลังไฟฟ้าที่โหลดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.41) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตกับกระแสไฟฟ้าที่ตีซีลิงค์นี้จะเป็นค่าคงที่และไม่ขึ้นกับจำนวนโมดูลในวงจร

$$P_{load} = P_{dc}$$

$$V_{o,rms} i_{o,rms} = V_{dc} i_{dc}$$

$$\frac{V_{o,peak} i_{o,peak}}{2} = V_{dc} i_{dc}$$

$$i_{o,peak} = 4i_{dc} \quad (4.41)$$

กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการคายพลังงานของตัวเก็บประจุในลูปบนจะมีค่าเป็นลบซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (4.42) และสามารถหาค่าประจุไฟฟ้าได้จากสมการที่ (4.43) โดยเวลา t_1 เป็นเวลาที่ตัวเก็บประจุเริ่มคายประจุไฟฟ้า และ t_2 เป็นเวลาที่ตัวเก็บประจุคายประจุไฟฟ้าจนหมด

$$i_{dc} - \frac{i_{o,peak}}{2} \sin(\omega t) = 0 \quad (4.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_c = \int_{t_1}^{t_2} i_c dt = \int_{t_1}^{t_2} (i_{dc} - \frac{i_{o,peak}}{2} \sin(\omega t)) dt \quad (4.43)$$

สำหรับในกรณีที่เป็นระบบไฟฟ้าสามเฟส ค่า Q_c สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.44) ซึ่งสามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (4.43) และเมื่อแทนค่า Q_c ลงในสมการที่ (4.40) ค่าตัวเก็บประจุที่ได้จะเป็นไปตามสมการ (4.45)

$$Q_c = \frac{i_{dc}(t_2 - t_1)}{3} + \frac{i_{o,peak}}{2\omega_1} (\cos(\omega_1 t_2) - \cos(\omega_1 t_1)) \quad (4.44)$$

$$C_{mod} = \frac{\frac{i_{dc}(t_2 - t_1)}{3} + \frac{i_{o,peak}}{2\omega_1} (\cos(\omega_1 t_2) - \cos(\omega_1 t_1))}{dV_c} \quad (4.45)$$

เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2 เท่า ที่เกิดจากค่า L_{arm} และ C_{mod} ในทางปฏิบัติ นั้น จะใช้สมการที่ (4.46) ในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุ แต่วิธีการนี้จำเป็นต้องทราบค่า L_{arm} ก่อนจึงจะสามารถทำการออกแบบได้

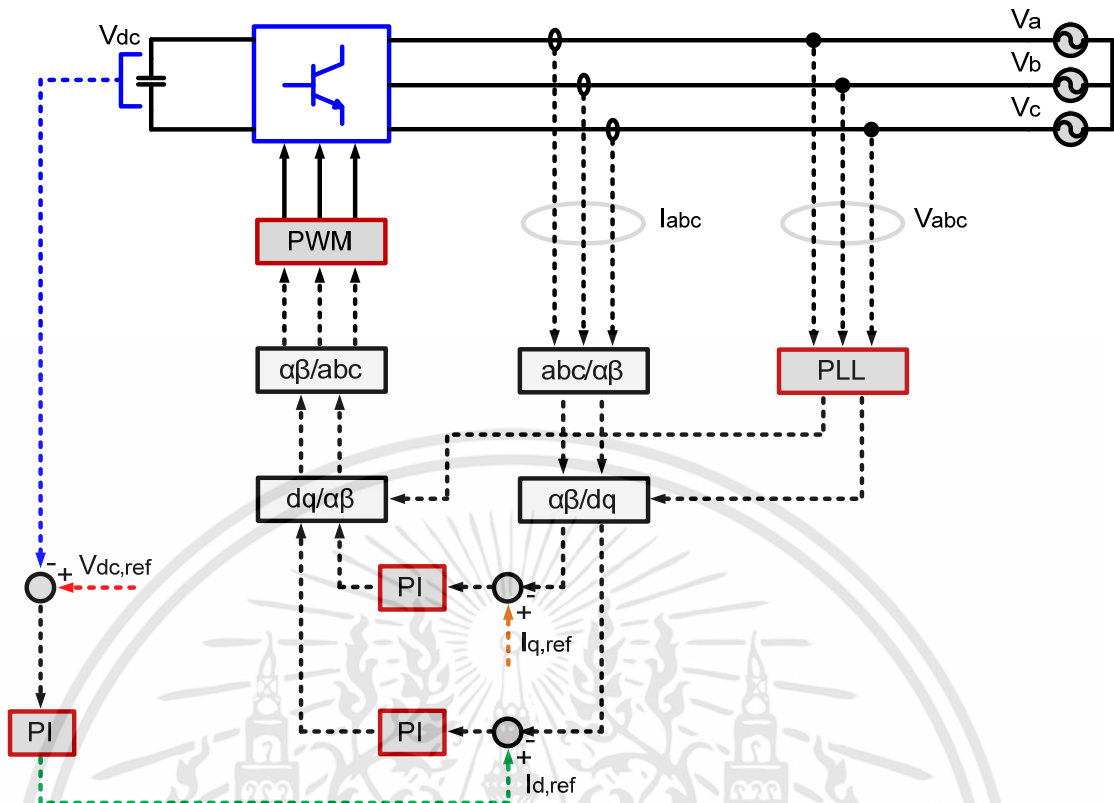
$$C_{mod} = \frac{5N}{12\omega_1^2 L_{arm}} \quad (4.46)$$

4.3.2 การควบคุมการทำงานของวงจรมอดูเลตเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์

การควบคุมการทำงานแบบโหมดเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier mode) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจรมอดูเลตเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง (Active power) เข้าสู่ระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.12 ในการควบคุมการทำงานนั้นจะทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตีสีลิ่งค์ให้มีค่าคงที่โดยใช้วิธีการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตซ์กำลัง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันทั่วไป โดยแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ส่วน ที่มีความอิสระต่อกัน คือ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง (Active power) และการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) แต่สำหรับกรณีนี้จะกำหนดให้อองค์ประกอบในแกนเสมือนมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากต้องการจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้า [44]

การทำงานของวงจรมอดูเลตเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์เริ่มจากการตรวจจับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ได้แก่ เฟส a เฟส b และเฟส c กระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ที่ตรวจจับด้วยตัววัดกระแสไฟฟ้าจะถูกแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงสองเฟสหมุนตามการแปลงของคลาร์ก (Clarke transformation) ดังสมการที่ (4.47) จากนั้นกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในรูปกรอบอ้างอิงสองเฟสหมุนจะถูกแปลงจากกรอบอ้างอิงสองเฟสหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงสองเฟสหยุดนิ่งตามการแปลงของปาร์ค (Park transformation) ดังสมการที่ (4.48) โดยใช้ค่ามุมเฟสที่ได้จากการทำเฟสล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ฟัซเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

ของแรงดันไฟฟ้า (Phase lock loop, PLL) ค่า error ของแรงดันที่ตีซีลิ่งค์ กระแสไฟฟ้าจริง (I_d) และ กระแสไฟฟ้าเสมือน (I_q) จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม PI (PI controller) เมื่อได้ค่ากระแสไฟฟ้าจริง และกระแสไฟฟ้าเสมือนที่เหมาะสมแล้ว ค่ากระแสไฟฟ้านี้จะถูกแปลงจากกรอบอ้างอิงสองเฟสหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสองเฟสหมุนด้วยสมการอินเวอร์สการแปลงของปาร์คดังสมการที่ (4.49) และถูกแปลงจากกรอบอ้างอิงสองเฟสหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟสดังสมการที่ (4.50) เพื่อใช้สร้างสัญญาณ PWM (Pulse width modulation) ควบคุมวัฏจักรงานของสวิตช์กำลังในแต่ละเฟส สำหรับในกรณีที่ ต้องการจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงสามารถควบคุมการทำงานได้ ด้วยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าเสมือนให้มีค่าเป็นศูนย์ ($I_q = 0$)

การแปลงของคลาร์ก

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

โดยที่ $u_a(t) = U_m \cos(\omega t)$

$$u_b(t) = U_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_c(t) = U_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

การแปลงของปาร์ค

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

อินเวอร์สการแปลงของปาร์ค

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

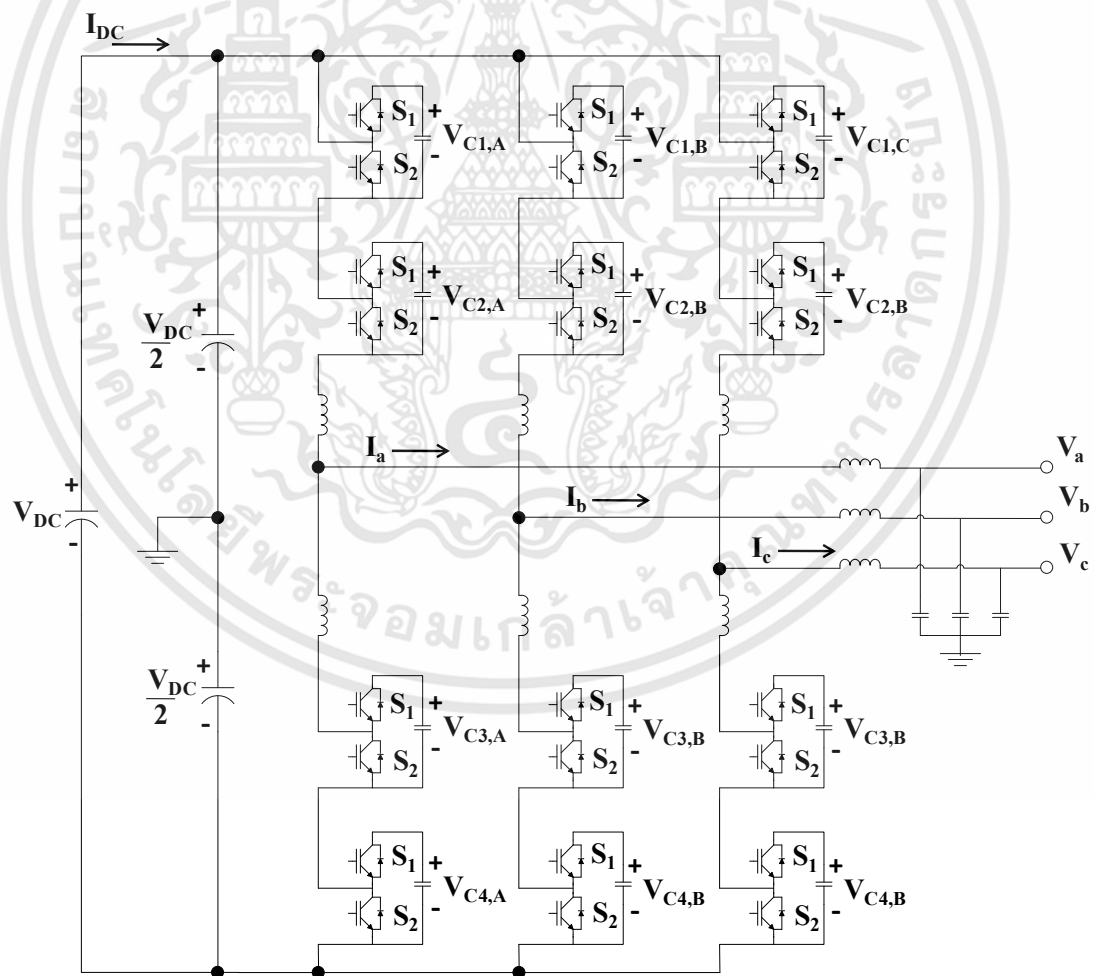
อินเวอร์สการแปลงของคลาร์ก

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการจำลองการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์

การจำลองการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM (Power simulation) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของวงจรไฟฟ้าโดยเฉพาะ ภายในวงจรที่จำลองประกอบด้วย 1) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานเพื่อตัดแปลงให้มีลักษณะคล้ายกับแหล่งจ่ายกระแสสำหรับประยุกต์ใช้แทนที่แผงโซลาร์เซลล์ วงจร MPPT และวงจรส่งกำลังไฟฟ้าความถี่สูงที่ประกอบด้วยวงจรเอชบริดจ์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ หม้อแปลงความถี่สูง และวงจรบริดจ์ไดโอด 2) ตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นดีซีลิงค์ให้กับวงจร 3) วงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า และ 4) วงจรควบคุมการทำงานของมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ ในการจำลองการทำงานนั้นจะทำการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ดีไซน์ไว้คงที่ที่ 600 V ($V_{ref} = 600$ V) เมื่อแรงดันที่ดีไซน์มากกว่า 600 V ตัวควบคุมจะปรับค่าอัตราการมอดูเลชันของสัญญาณให้สูงขึ้น ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันที่ดีไซน์มีค่าต่ำลงจนมีค่าเท่ากับ 600 V ซึ่งในที่นี้ระบบจะเริ่มทำงานเมื่อค่าแรงดันอินพุตที่ดีไซน์มีค่าสูงกว่า 600 V



รูปที่ 4.13 วงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบ 3 ระดับ

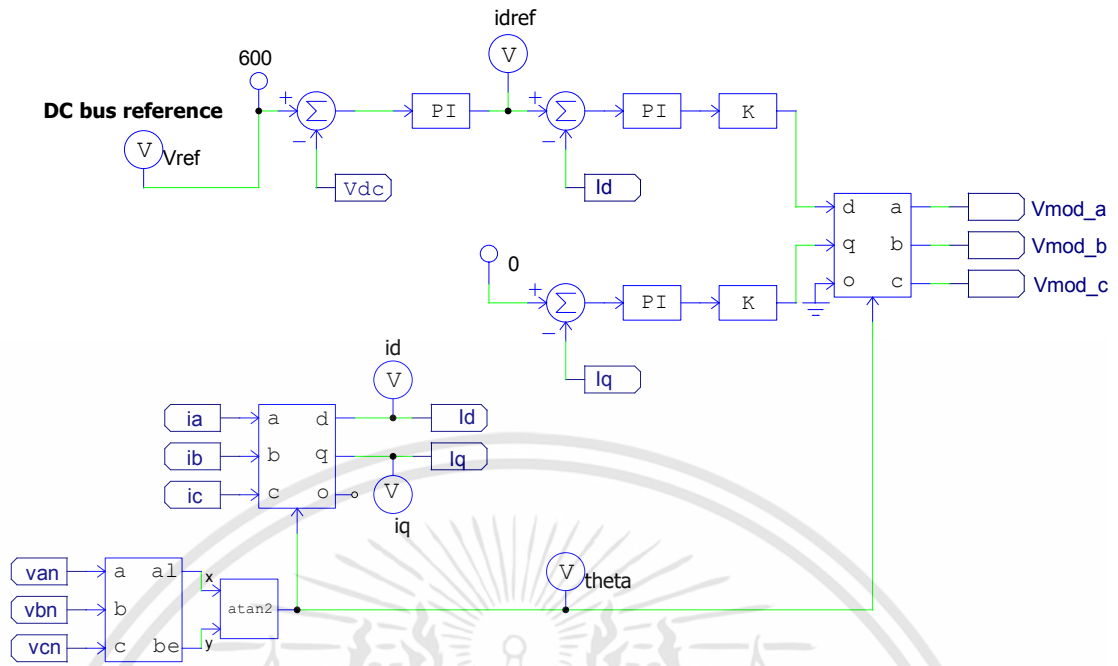
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรมอดูลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ในโปรแกรม PSIM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 ค่า error ของแรงดันไฟฟ้าที่ตีซีลิ่งจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม PI ซึ่งเอาท์พุทที่ได้จะเป็นค่ากระแสไฟฟ้าจริงอ้างอิง ($I_{d,ref}$) จากนั้นค่ากระแสไฟฟ้าจริงจะถูกนำไปเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากระบบ (I_d) โดยค่า error ของกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม PI อีกครั้ง ซึ่งค่าเอาท์พุทที่ได้จะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าจริง (U_d) ค่าแรงดันไฟฟ้าจริงที่ได้นี้จะถูกแปลงจากรอบอ้างอิงสองเฟสหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสองเฟสหมุน และถูกแปลงจากรอบอ้างอิงสองเฟสหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟสโดยอาศัยค่ามุมเฟสที่ได้จากการทำเฟสล็อกของแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำการสร้างสัญญาณ PWM ควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังในแต่ละเฟส สำหรับเทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM จะใช้เทคนิค Phase disposition PWM (PDPWM) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีเฟสตรงกัน 2 สัญญาณ (ด้านบวก 1 สัญญาณ และด้านลบ 1 สัญญาณ) เปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์อ้างอิง

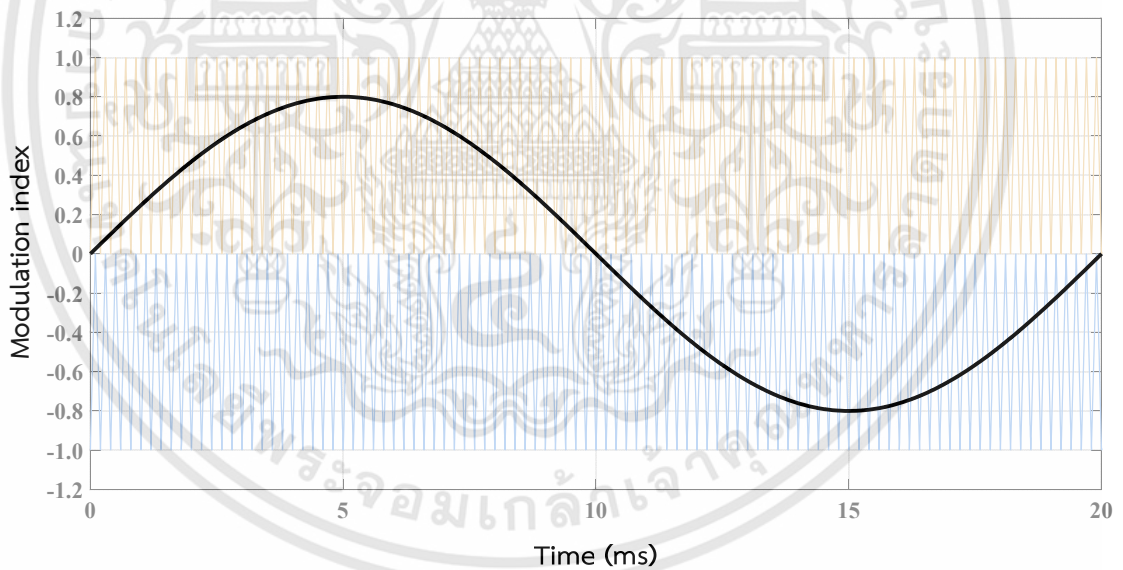
ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ในเบื้องต้นได้แสดงการจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการมอดูเลชันต่าง ๆ ได้แก่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ด้วยการวัดแรงดัน PWM ของแต่ละเฟสและระหว่างเฟสซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ
แรงดันไฟฟ้าที่ตีซีลิ่ง	600 V
ค่าตัวเก็บประจุที่ตีซีลิ่ง	10,000 μ F
จำนวนโมดูลในแต่ละแขน	2
ค่าตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล	470 μ F
ค่าตัวเหนี่ยวนำระหว่างแขนบนกับจุดเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า	1 mH
ความถี่ระบบไฟฟ้า	50 Hz
ความถี่สวิตซ์	5 kHz
ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรองความถี่	20 mH

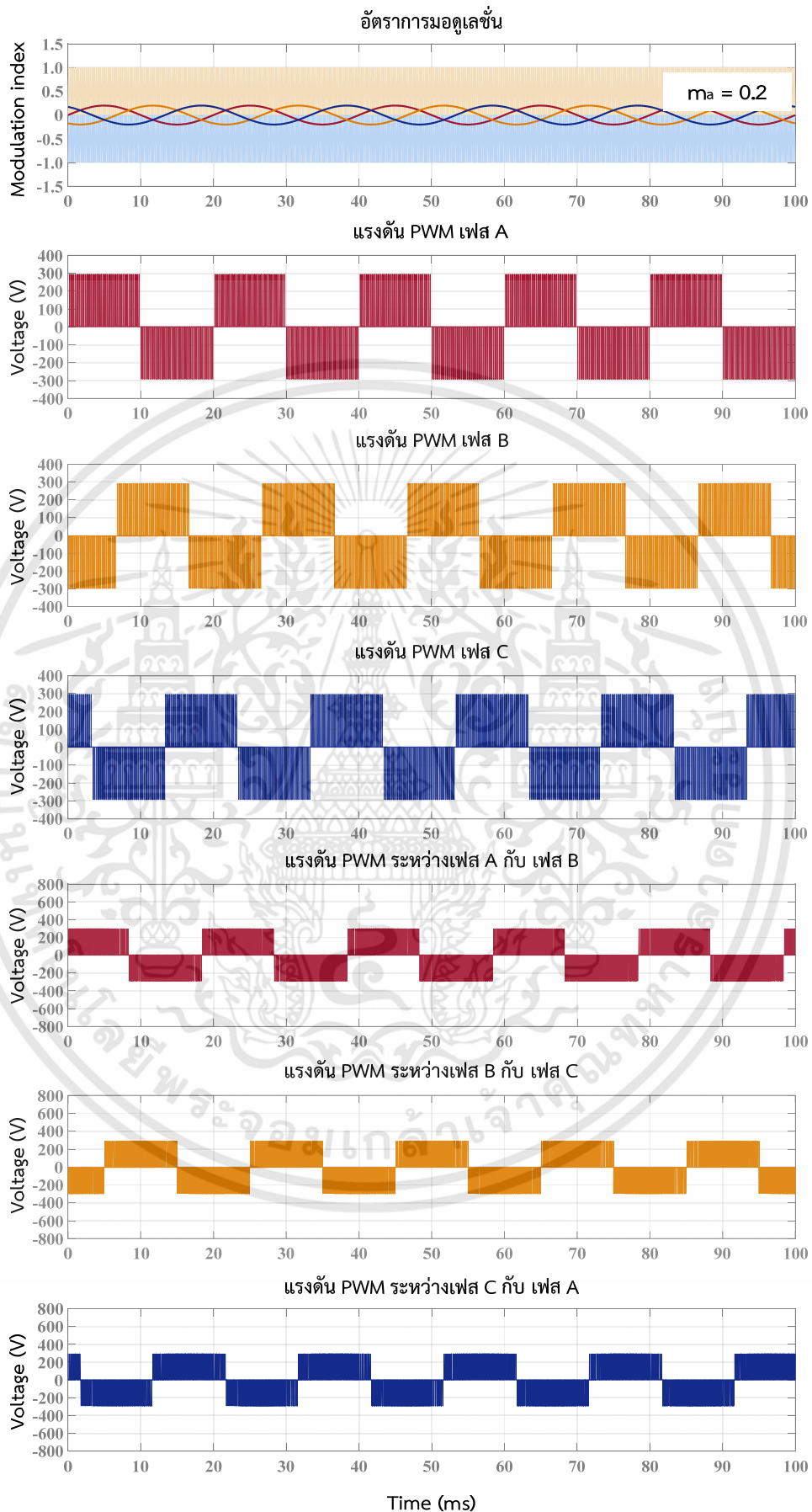


รูปที่ 4.14 วงจรควบคุมการทำงานของวงจรมอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าในโปรแกรม PSIM



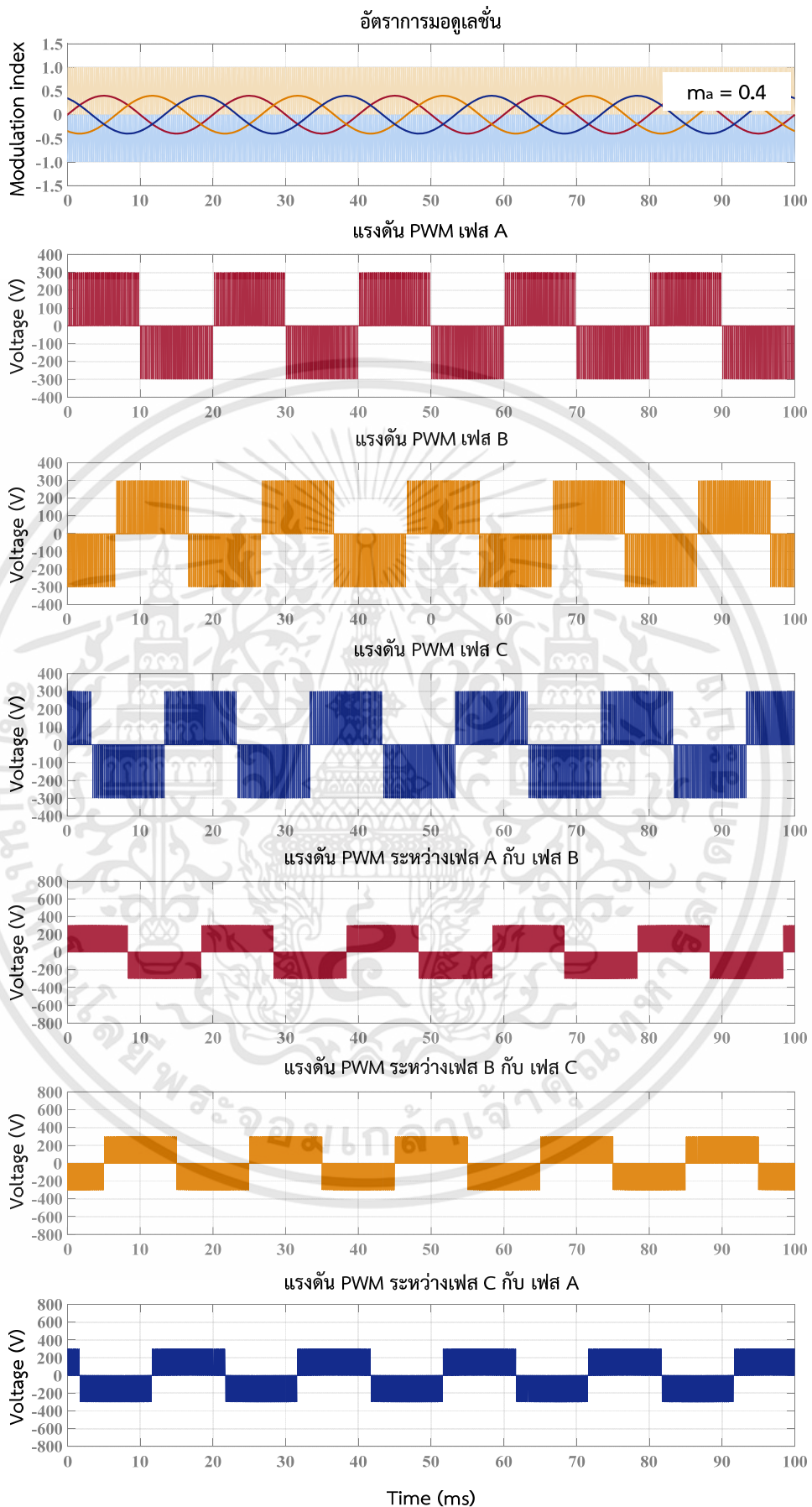
รูปที่ 4.15 เทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM แบบ Phase disposition PWM (PDPWM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



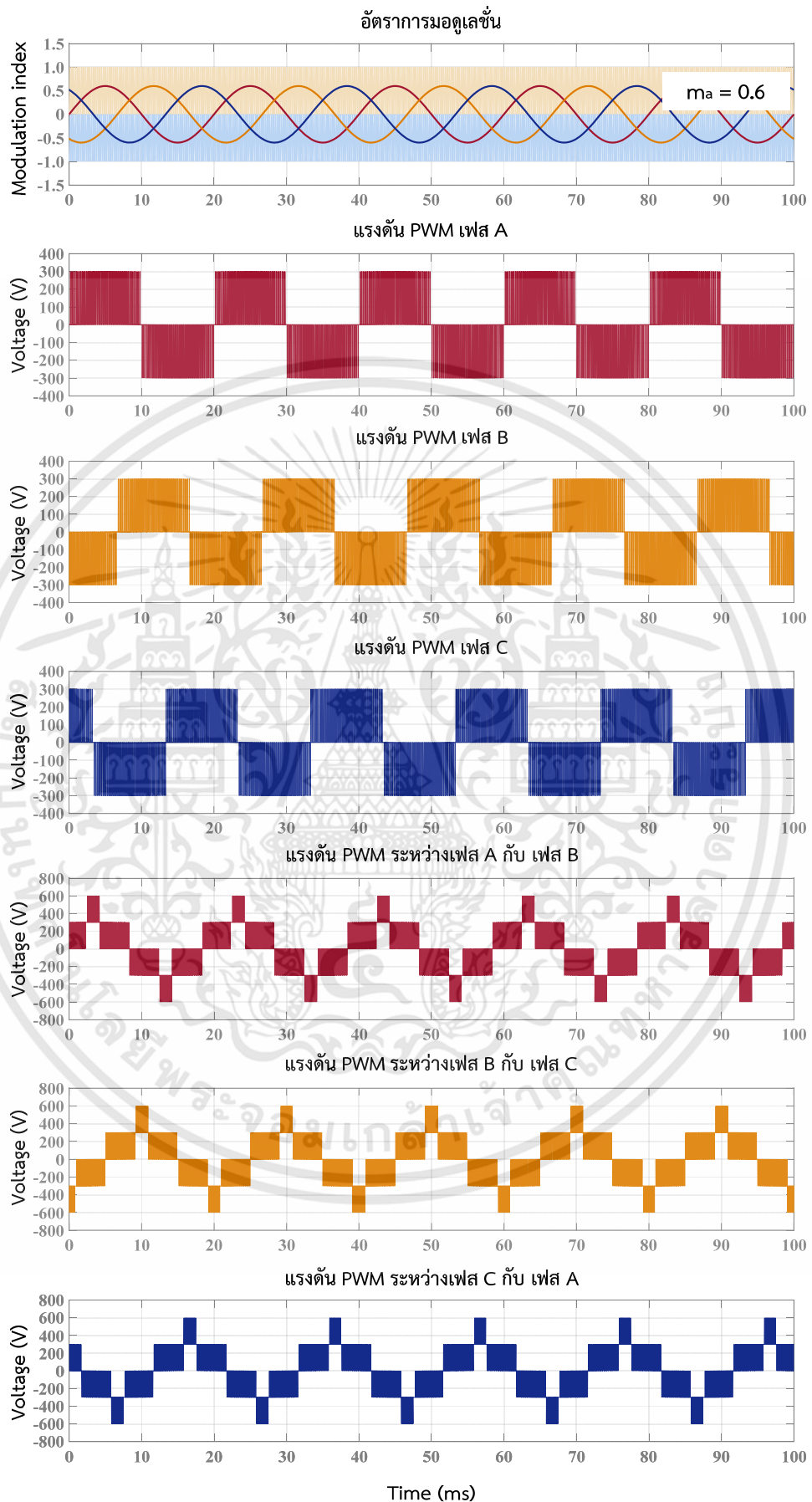
รูปที่ 4.16 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการมอดูเลชั่น 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



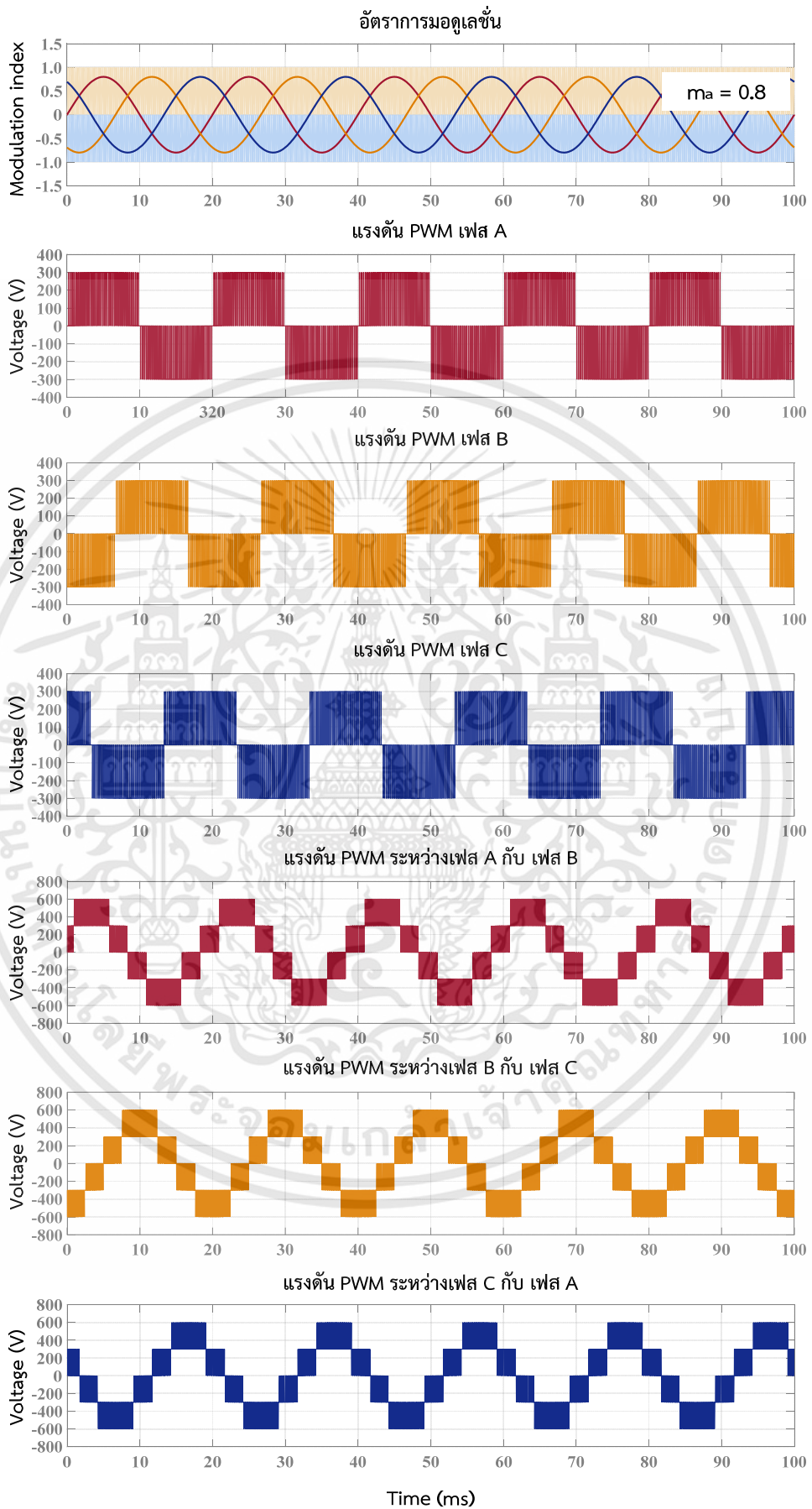
รูปที่ 4.17 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการผลิต 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



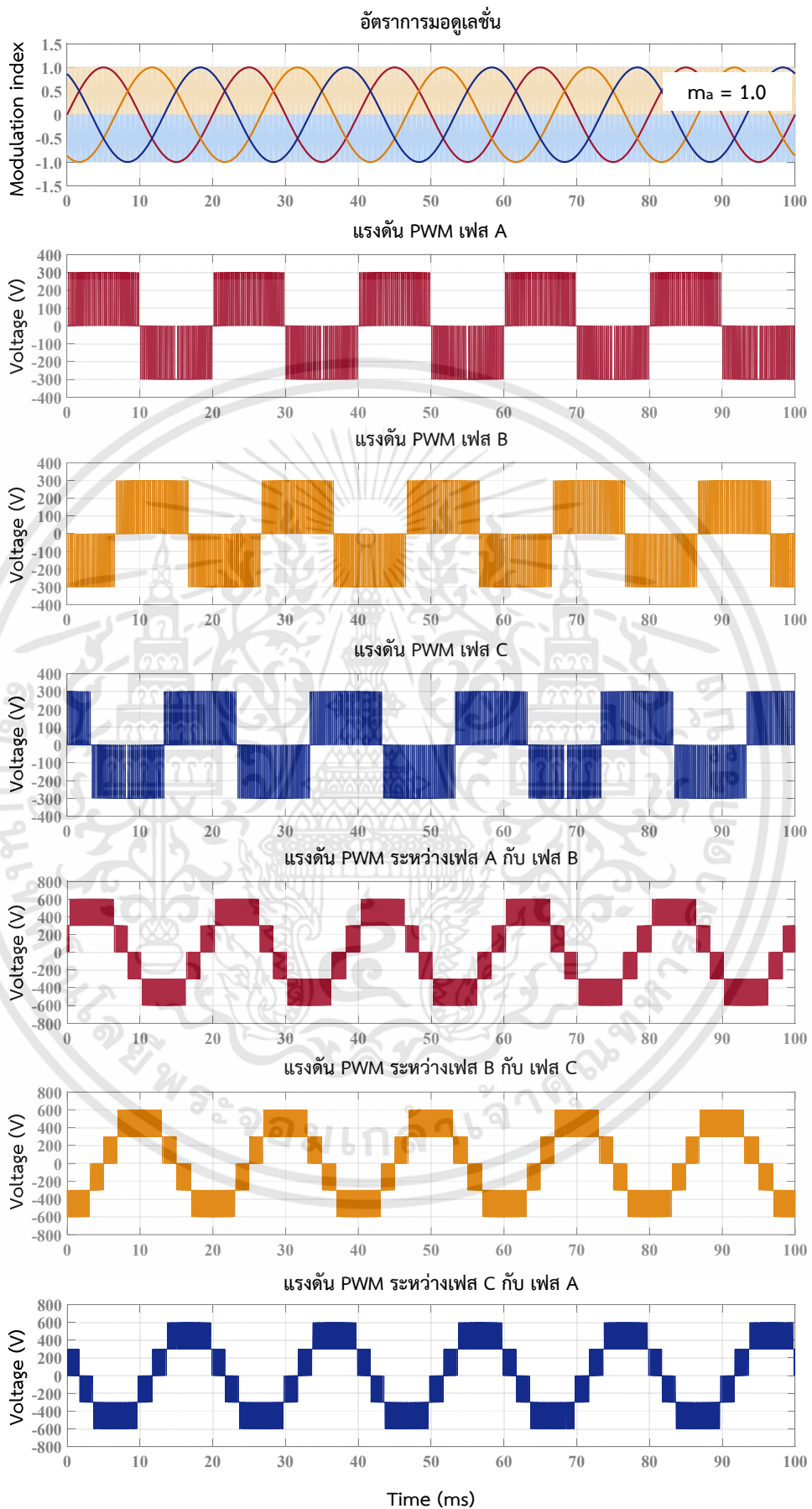
รูปที่ 4.18 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการผลิต 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการผลิต 0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

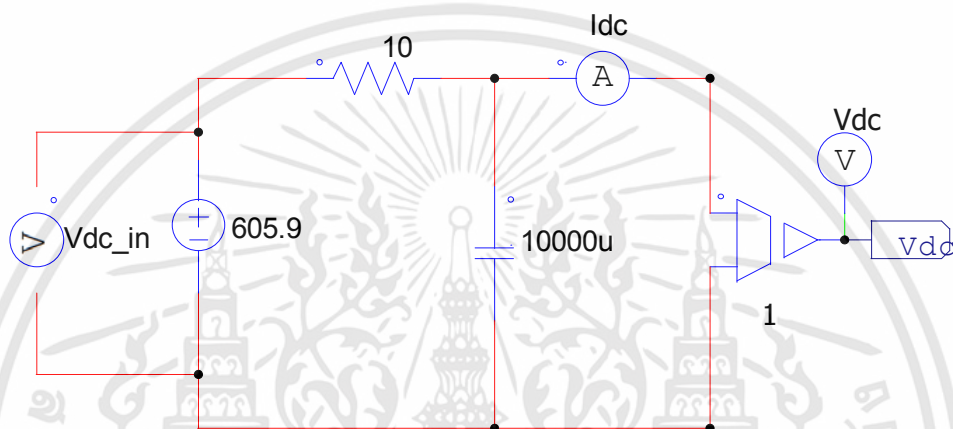


รูปที่ 4.20 การจำลองการทำงานในสภาวะไร้โหลดที่อัตราการผลิต 1.0

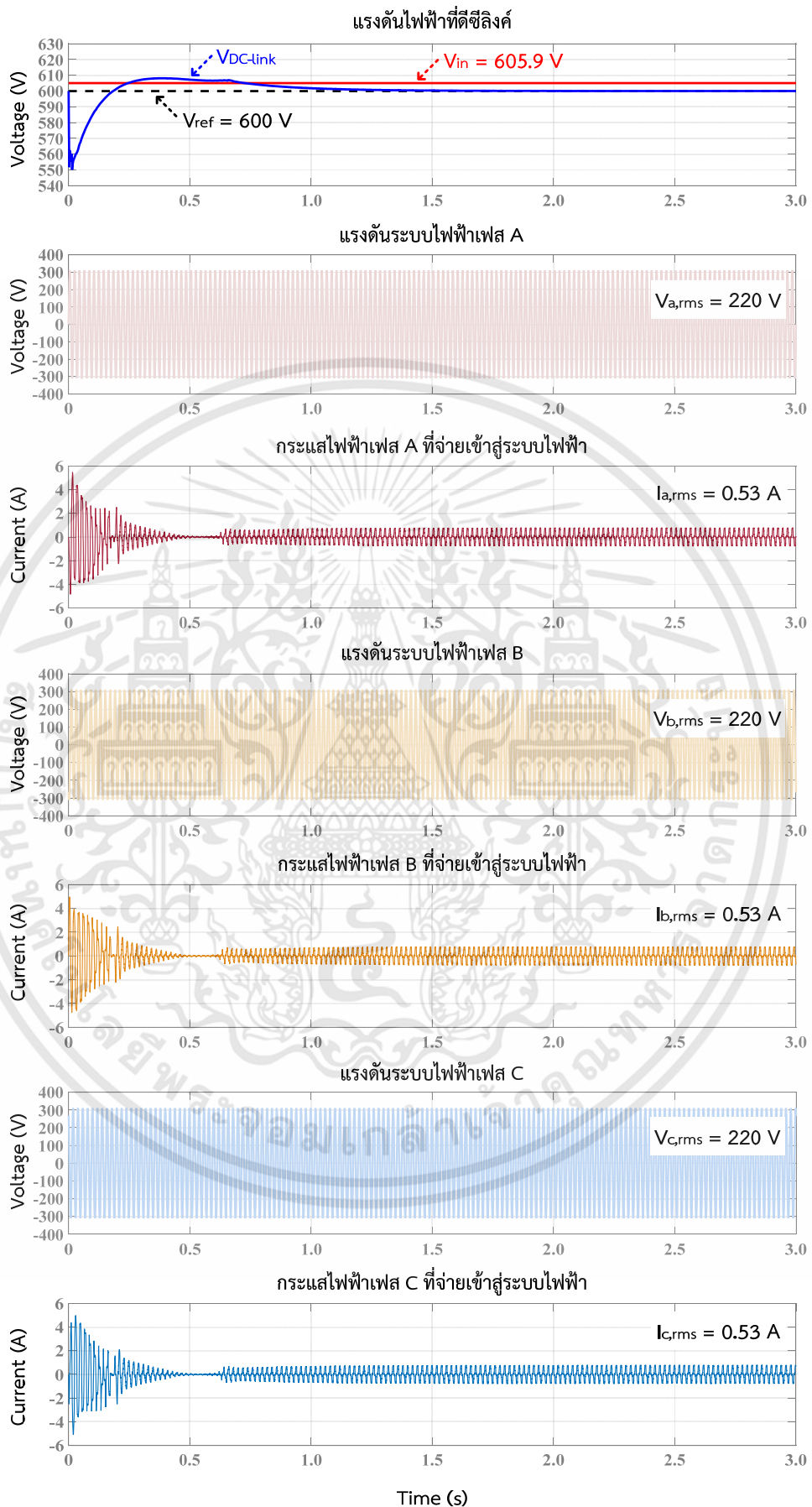
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3.1 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า

การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSIM จะทำการปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานขนาด 10 โอห์ม ให้มีค่าเท่ากับ 605.9 V ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ ดีซีลิงค์จะถูกควบคุมและรักษาระดับแรงดันให้คงที่ที่ 600 V ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง และเมื่อทำการขยายรูปที่ 4.22 ในช่วงเวลาที่ 2.90 ถึงนาที่ที่ 3.00 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะอินเฟสกัน เนื่องจากวงจรมอดูลาร์มีลติเพลวลินเวอร์เตอร์จ่ายแต่ กำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเท่านั้น

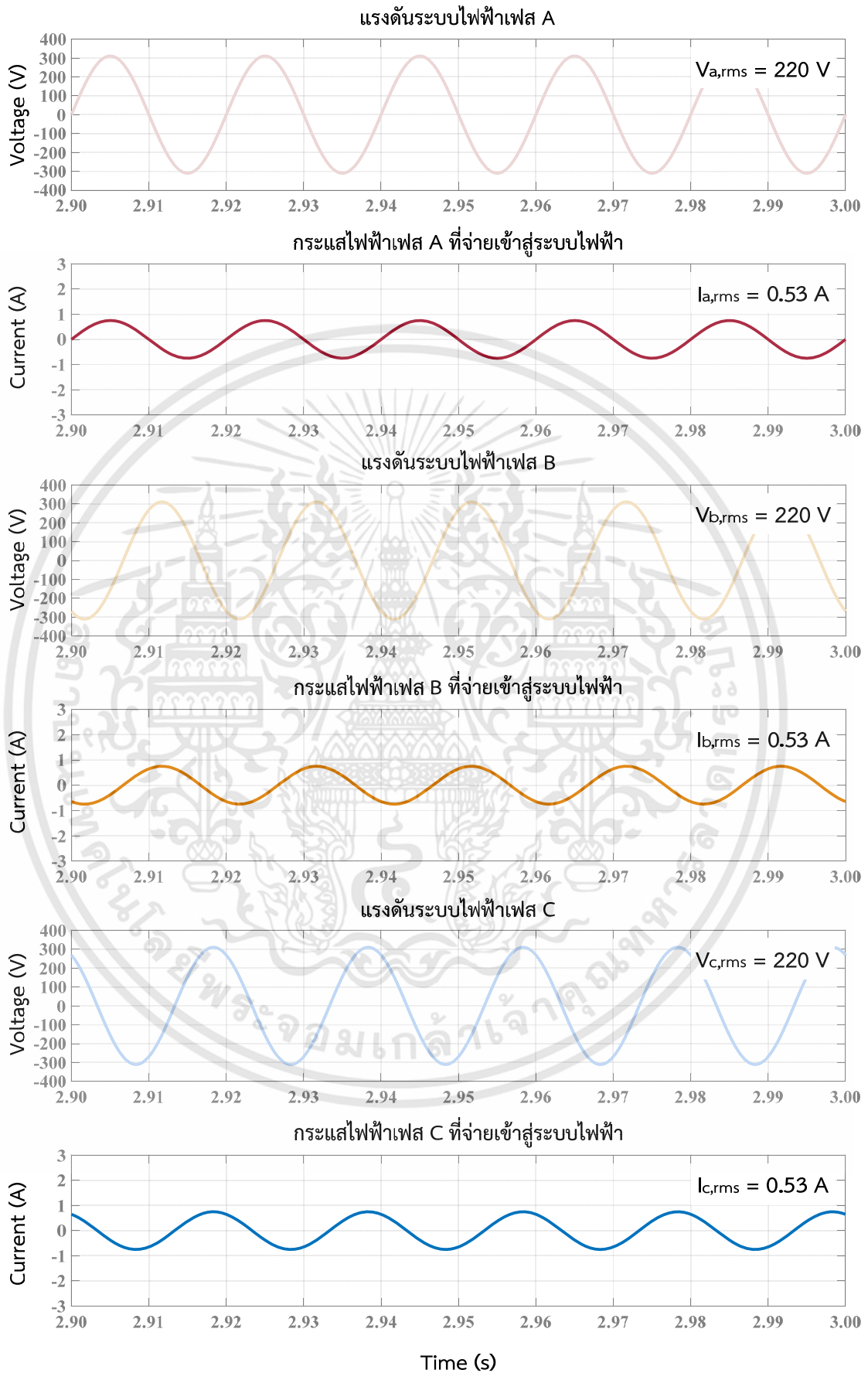


รูปที่ 4.21 วงจรอินพุตการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W ของวงจร MMI



รูปที่ 4.22 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI

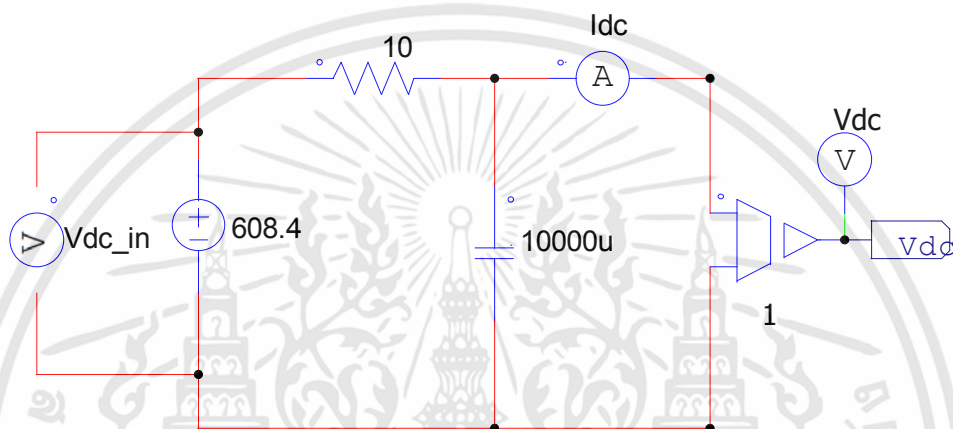
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



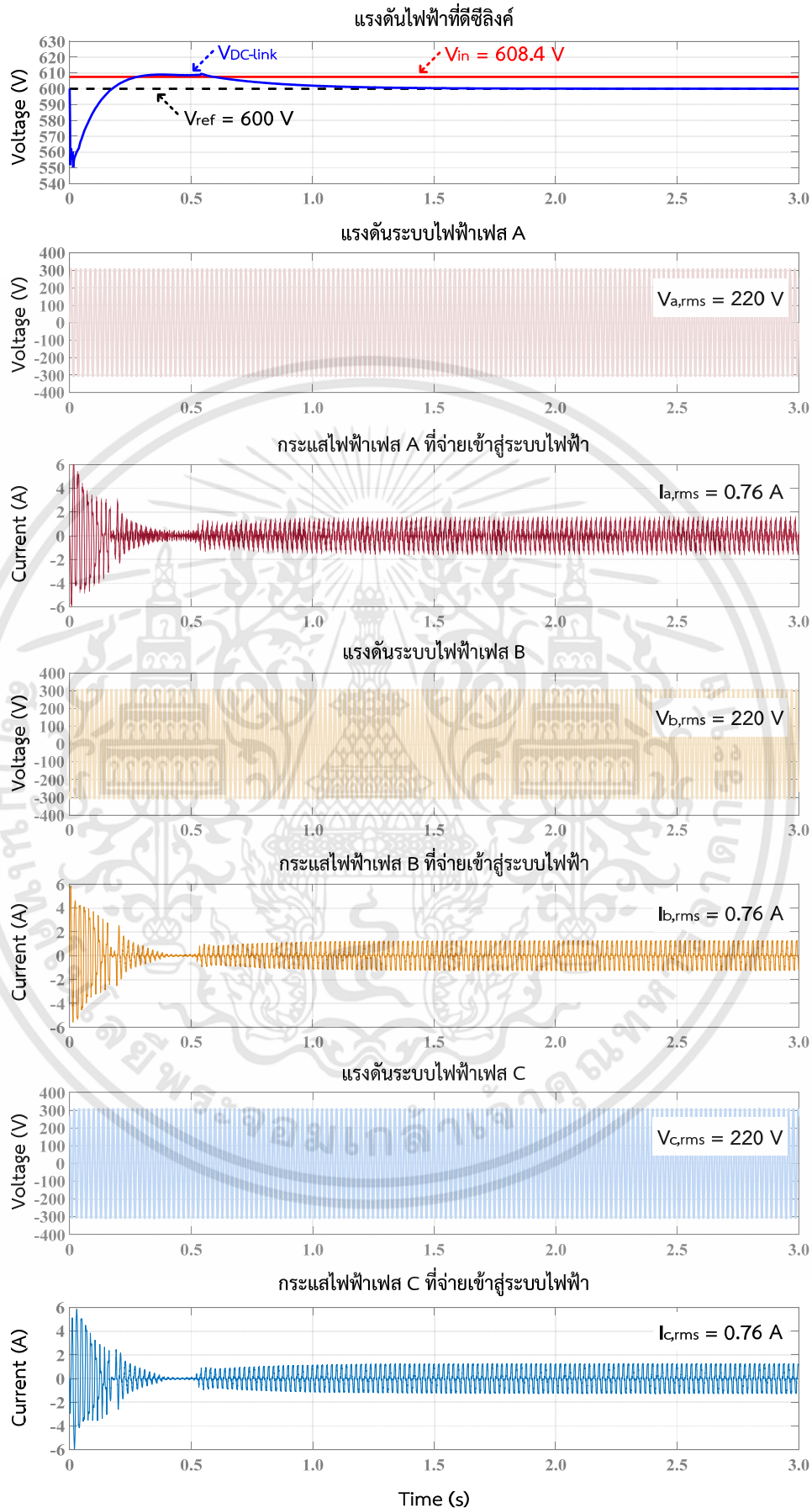
รูปที่ 4.23 ภาพขยายการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3.2 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า

การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSIM จะทำการปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานขนาด 10 โอห์ม ให้มีค่าเท่ากับ 608.4 V ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ ดีซีลิงค์จะถูกควบคุมและรักษาระดับแรงดันให้คงที่ที่ 600 V ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง และเมื่อทำการขยายรูปที่ 4.25 ในช่วงเวลาที่ 2.90 ถึงเวลาที่ 3.00 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะอินเฟสกัน เนื่องจากวงจรมอดูเลตาร์มีลติเพลกอินเวอร์เตอร์จ่ายแต่ กำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเท่านั้น

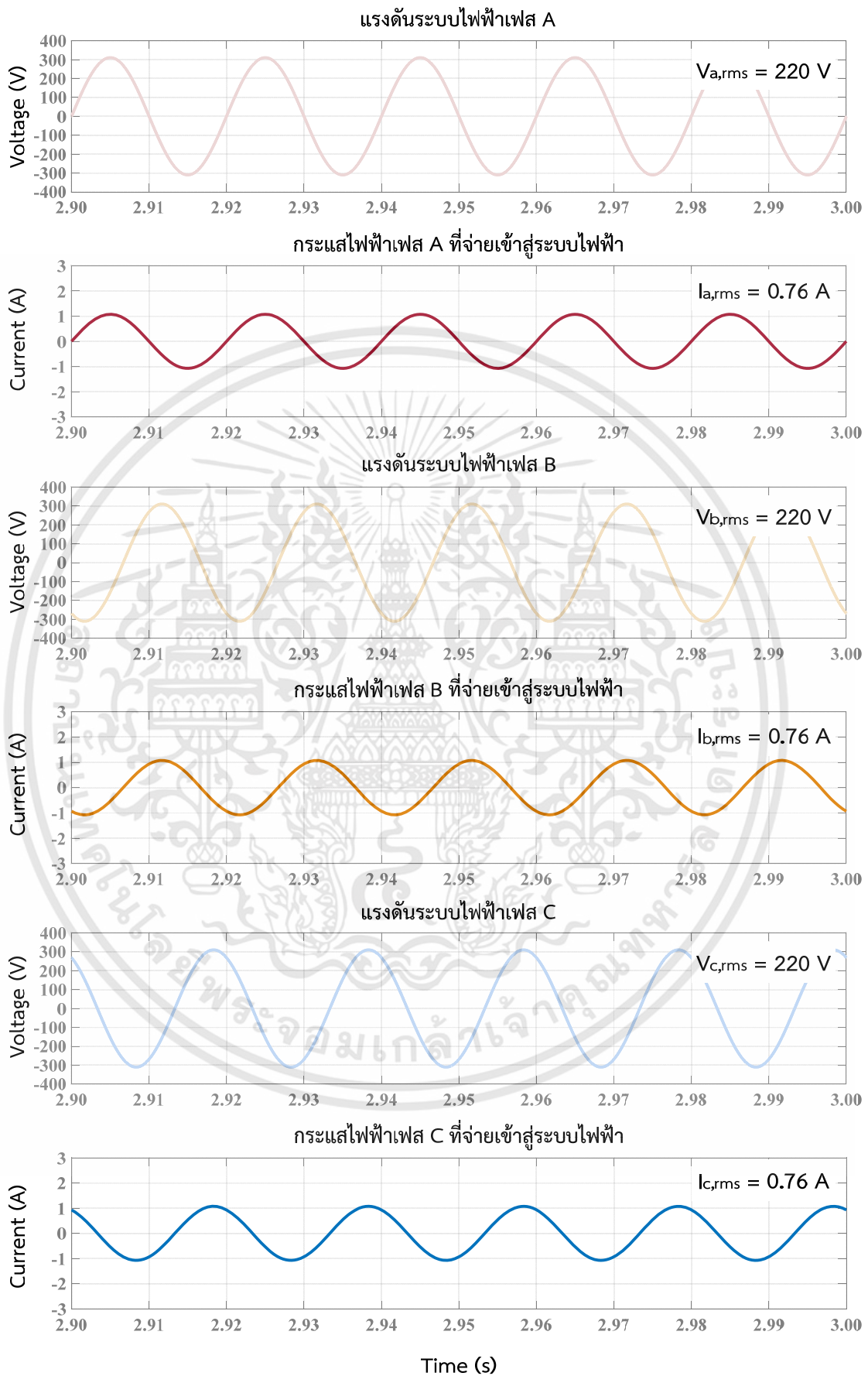


รูปที่ 4.24 วงจรอินพุตการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W ของวงจร MMI



รูปที่ 4.25 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI

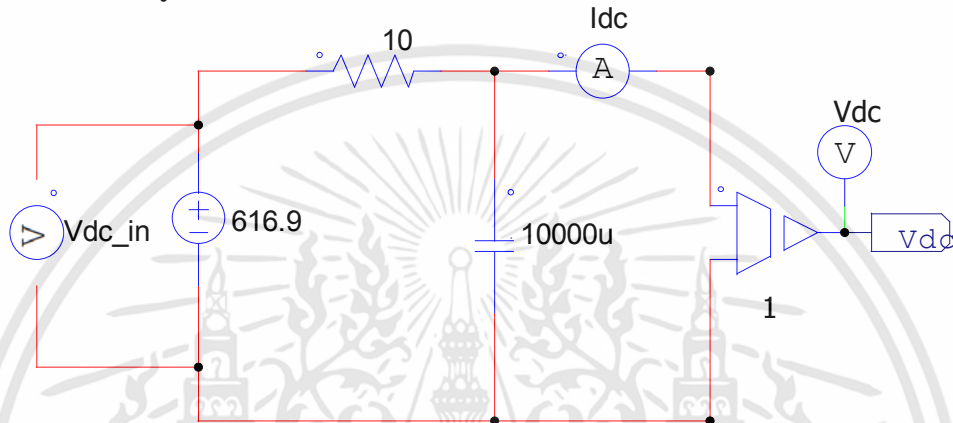
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



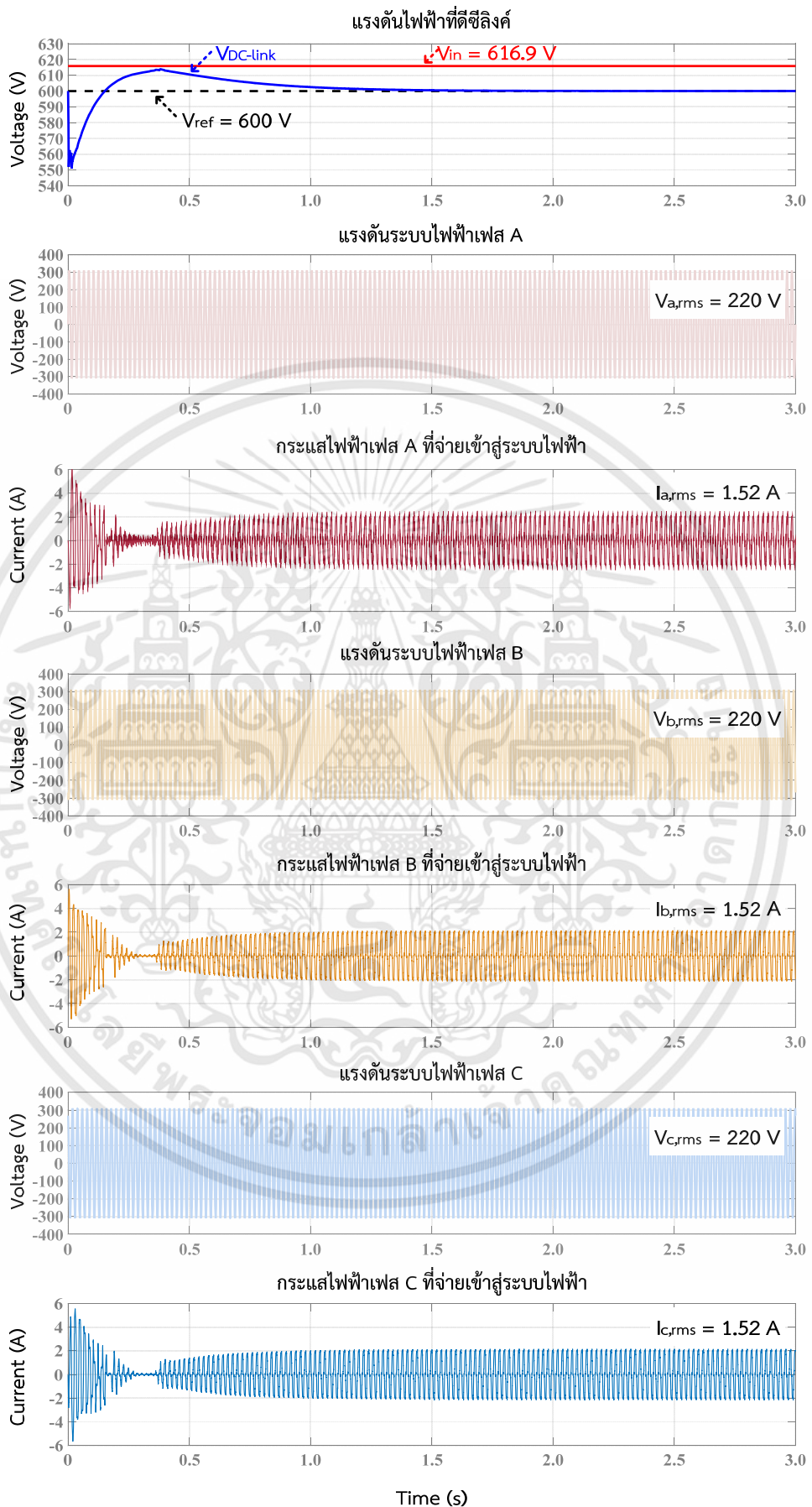
รูปที่ 4.26 ภาพขยายการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3.3 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า

การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PSIM จะทำการปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานขนาด 10 โอห์ม ให้มีค่าเท่ากับ 616.9 V ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ ดีซีลิงค์จะถูกควบคุมและรักษาระดับแรงดันให้คงที่ที่ 600 V ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์อ้างอิง และเมื่อทำการขยายรูปที่ 4.28 ในช่วงเวลาที่ 2.90 ถึงเวลาที่ 3.00 ดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะอินเฟสกัน เนื่องจากวงจรมอดูเลาร์มีลติเพลกอนอินเวอร์เตอร์จ่ายแต่กำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเท่านั้น

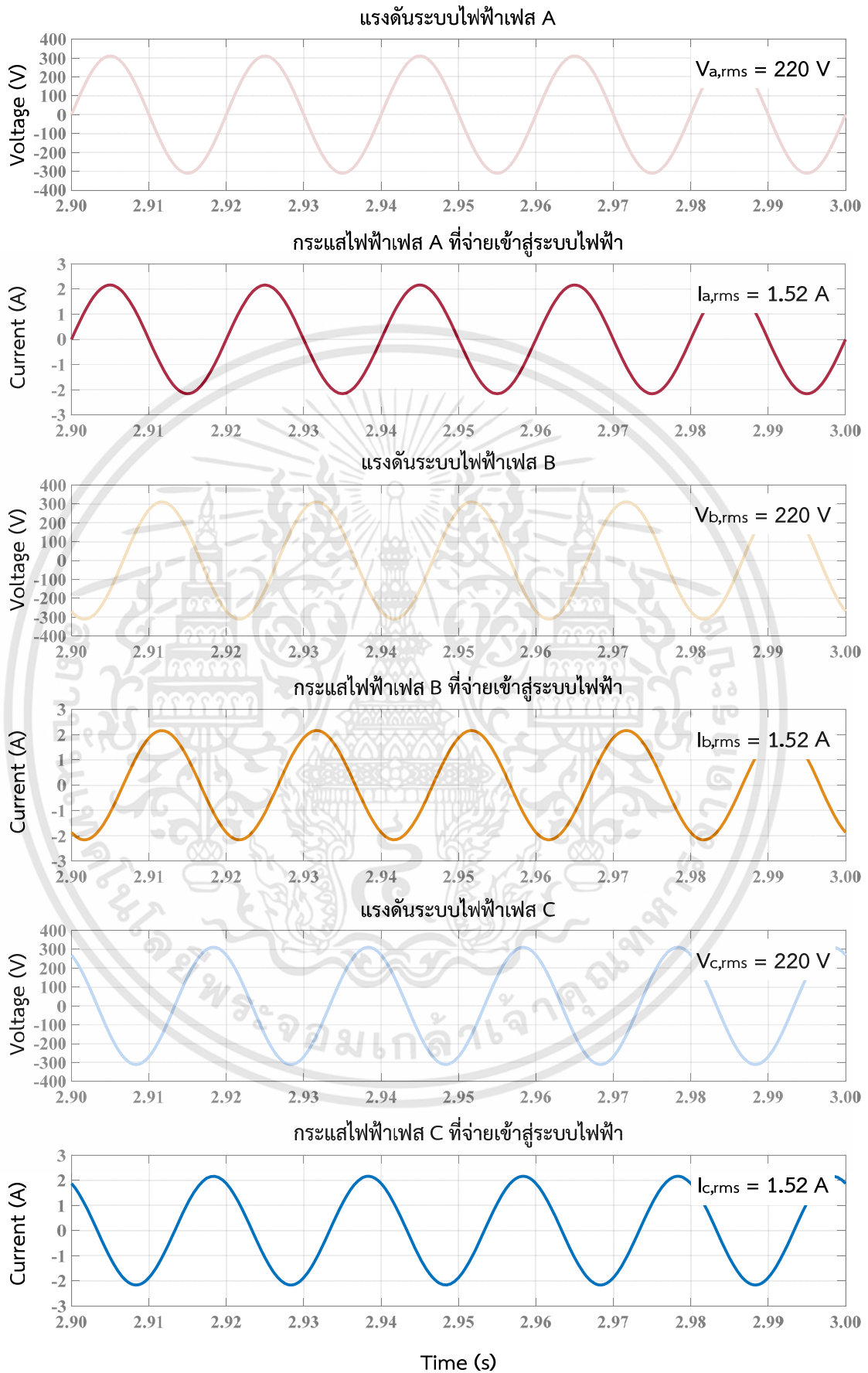


รูปที่ 4.27 วงจรอินพุตการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W ของวงจร MMI



รูปที่ 4.28 การจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ภาพขยายการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าของวงจร MMI เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้แบ่งการออกแบบและการจำลองการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ออกเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง และการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในส่วนของการออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงได้นำเทคนิค SHE มาไปใช้ควบคุมการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ โดยทำการคำนวณหาค่าชดุมุมที่มีค่า $\%THD_V$ ต่ำ และทำการปรับจูนค่าชดุมุมที่คำนวณได้อีกครั้งหนึ่งจนได้ชดุมุมที่เหมาะสมซึ่งมีค่า $\%THD_V$ ต่ำที่สุด เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงเนื่องจากค่าฮาร์มอนิกส์ของแรงดันไฟฟ้า สำหรับในส่วนของการทำงาน ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า วงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยทำการควบคุมแรงดันที่ดิสลิงค์ให้คงที่ที่ 600 V ผลการจำลองพบว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในลำดับต่อไปจะนำเทคนิคการออกแบบที่ผ่านการจำลองในเบื้องต้นมาสร้างชุดทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบและรายละเอียดต่าง ๆ จะถูกนำเสนอในบทถัดไป

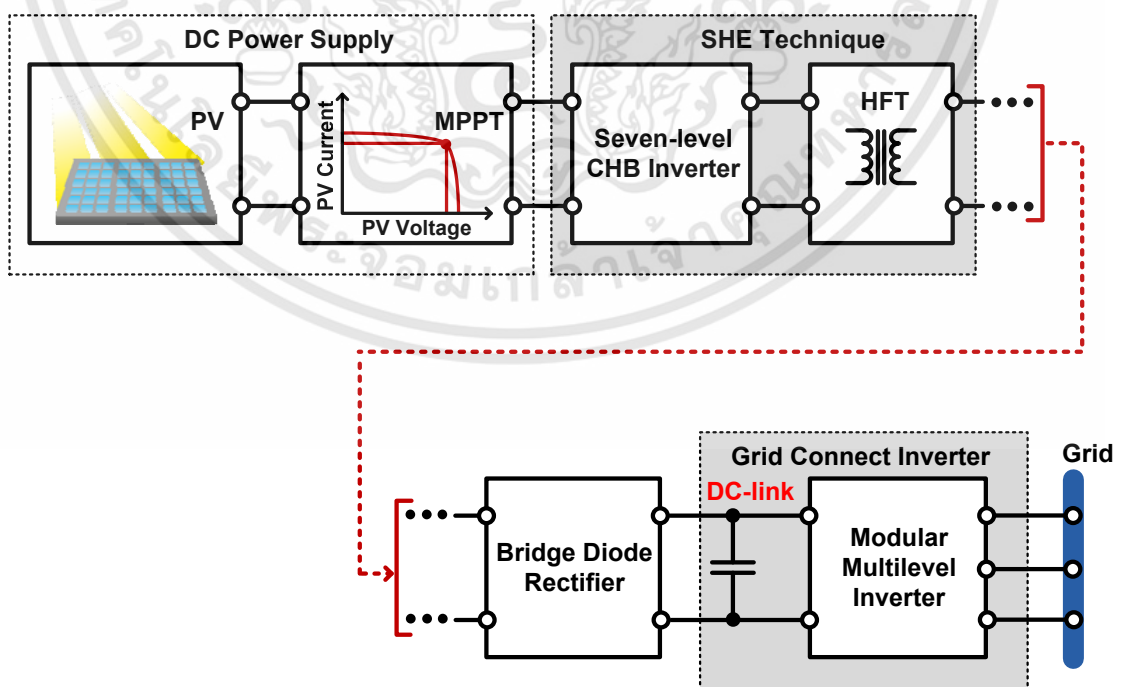


ผลการทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

5.1 บทนำ

การออกแบบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในบทที่ 4 ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่ง คือ การออกแบบการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง และส่วนที่สอง คือ การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการการทำงานและผลการทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สร้างขึ้นจากการออกแบบในบทที่ 4 ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

หลักการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 5.1 หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะรับไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์และมีการทำ MPPT เรียบร้อยแล้ว โดยแผงโซลาร์เซลล์มีจำนวนทั้งหมด 3 String ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแต่ละ String มีขนาด 20 V จากนั้นวงจรเอชบริดจ์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ด้วยเทคนิค SHE (Selective harmonic elimination method) ที่ความถี่ 10 kHz และมีค่ายอดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 60 V ($V_{peak} = 60$ V) หลังจากนั้นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงนี้จะถูกส่งกำลังและแยกวงจรไฟฟ้า (Isolated) ระหว่างระบบไฟฟ้ากับแผงโซลาร์เซลล์ด้วยหม้อแปลงความถี่สูงที่สร้างจากแกนเฟอร์ไรต์ซึ่งมีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1:10 จึงทำให้ค่ายอดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 600 V ไฟฟ้ากระแสสลับที่ผ่านหม้อแปลงความถี่สูงจะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ไดโอดและต่อเข้ากับตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็น



รูปที่ 5.1 หลักการทำงานของชุดทดสอบหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีซีลิงค์ให้กับอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid connect inverter) สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าจะใช้วงจรมอดูเลตเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ซึ่งข้อดีต่าง ๆ ได้ถูกกล่าวไว้ในบทที่ 4 วงจรมอดูเลตเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์จะแปลงไฟฟ้าตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 50 Hz เพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

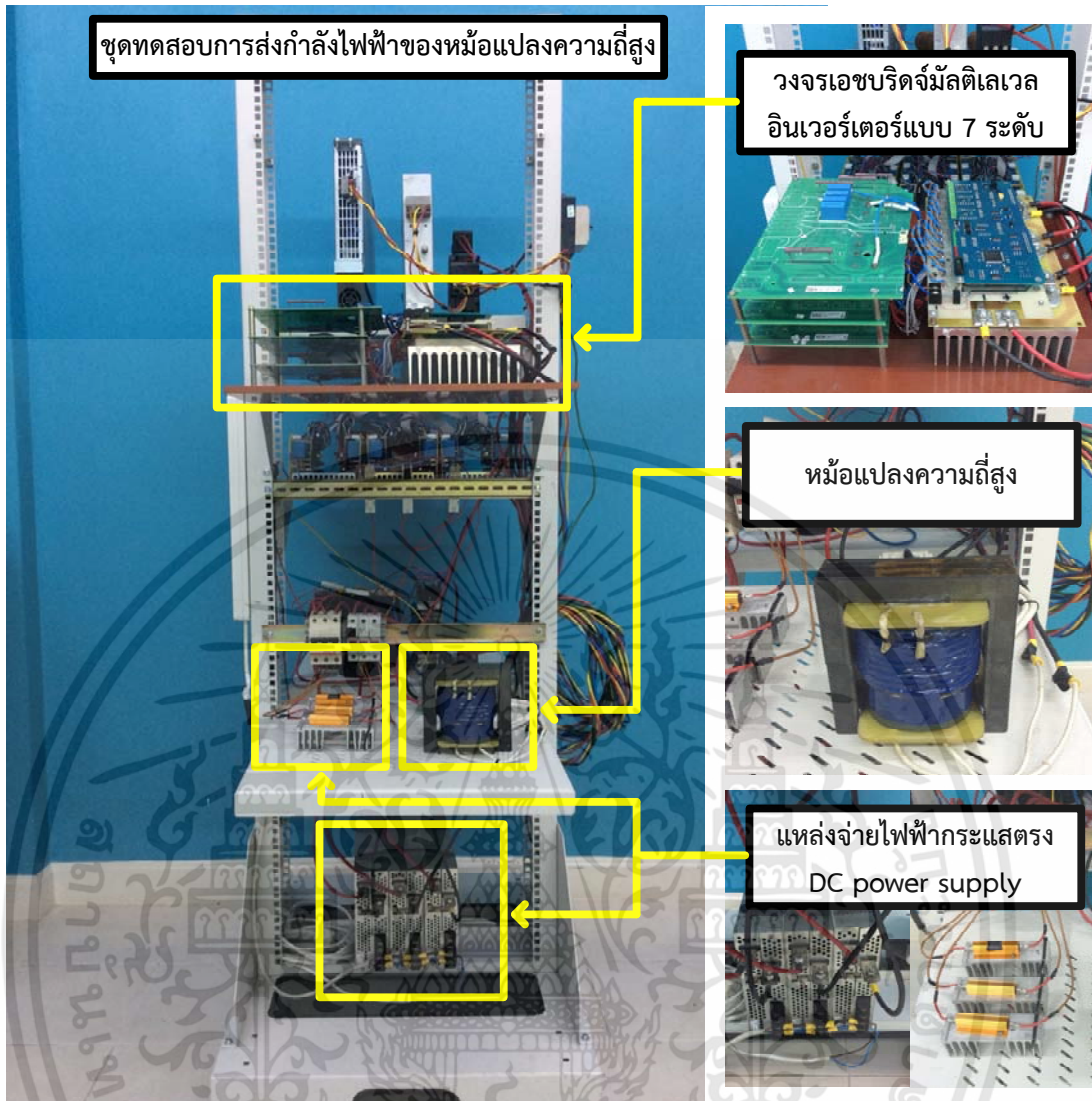
การควบคุมการทำงานของวงจรมอดูเลตเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์จะใช้ชุดเชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติของบริษัท Siemens ซึ่งชุดเชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติจะตรวจจับ ความถี่ ขนาด และมุมเฟสของแรงดันในระบบไฟฟ้าเพื่อนำมาเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างสัญญาณ PWM สำหรับใช้ควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังของวงจรมอดูเลตเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะทำการควบคุมแรงดันที่ ดีซีลิงค์ให้คงที่ซึ่งตัดแปลงมาจากโหมดการทำงานแบบเรียงกระแส (Rectifier mode) และกำหนดค่าองค์ประกอบกำลังไฟฟ้าเสมือนให้มีค่าเป็นศูนย์ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ ดีซีลิงค์ให้คงที่นี้ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทและแรงดันไฟฟ้าอินพุทของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าคงที่และเป็นอิสระจากแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ การทดสอบการทำงานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงนำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามาต่ออนุกรมกับตัวต้านทานเพื่อประยุกต์ใช้แทนที่แผงโซลาร์เซลล์และวงจร MPPT

5.2 การทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง

ชุดทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งประกอบด้วย วงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ หม้อแปลงความถี่สูงที่สร้างจากแกนเฟอร์ไรต์ และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่อตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม เข้าไปในวงจร เพื่อปรับพฤติกรรมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เป็นแบบแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า สำหรับการควบคุมการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ จะใช้บอร์ด FPGA สำเร็จรูป (Field programmable gate array) เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานโมดูลสวิตช์กำลัง IGBT ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ จะใช้เทคนิค SHE (Selective harmonic elimination method) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยทำการกำจัดฮาร์โมนิกอันดับที่ 5th และฮาร์โมนิก 7th และนำค่าที่ได้มาปรับจูนอีกครั้งหนึ่งจนได้ค่าชุดมุมที่เหมาะสมซึ่งมีค่าฮาร์โมนิกของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด โดยชุดมุมดังกล่าว คือ $\theta_1 = 8.7^\circ$, $\theta_2 = 26.4^\circ$ และ $\theta_3 = 54.1^\circ$ และมีค่า %THDv ต่ำสุด คือ 8.66%

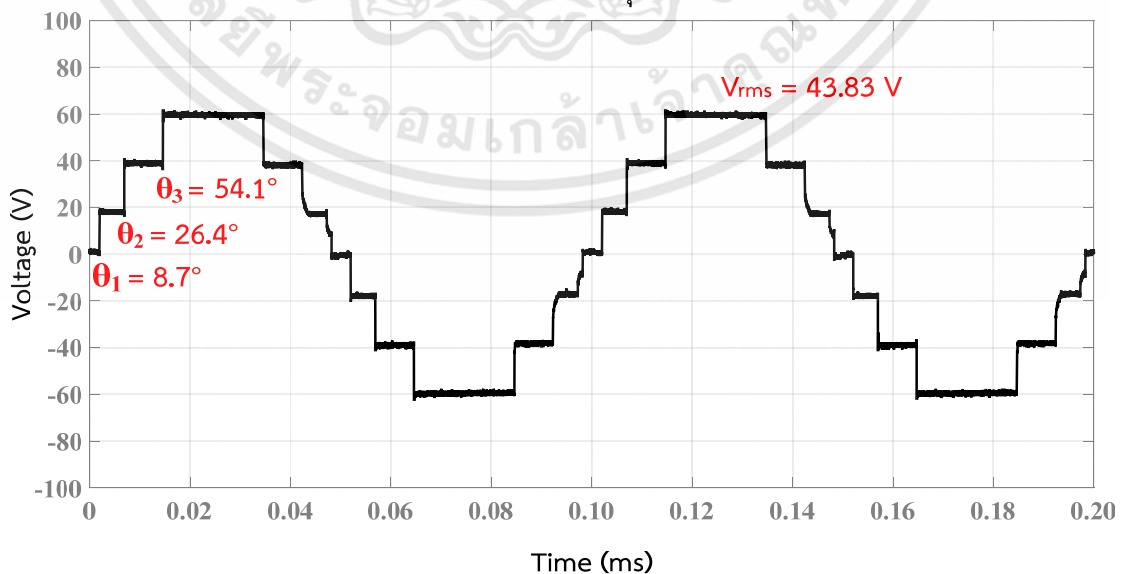
รูปที่ 5.3 เป็นรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ ในสถานะไม่จ่ายโหลด ซึ่งใช้ชุดมุมที่เหมาะสมที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ $\theta_1 = 8.7^\circ$, $\theta_2 = 26.4^\circ$ และ $\theta_3 = 54.1^\circ$ พบว่า รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท RMS มีค่า 43.83 V ซึ่งใกล้เคียงกับผลการจำลองในบทที่ 4 คือ 43.71 V และเมื่อทำการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5.4 พบว่า ค่า %THDv ของรูปคลื่นมีค่าเท่ากับ 8.96% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลอง คือ 8.66% ในลำดับต่อไปจะเป็นผลการทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงด้วยเทคนิค SHE ในสถานะจ่ายโหลดขนาดต่าง ๆ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



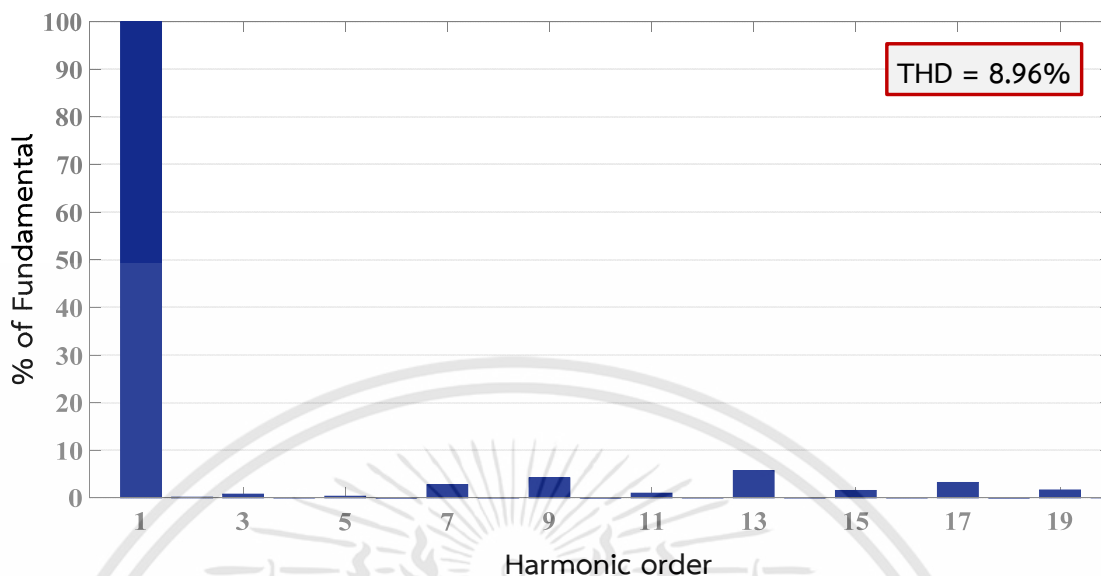
รูปที่ 5.2 ชุดทดสอบการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ CHB



รูปที่ 5.3 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ในสภาวะไม่จ่ายโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



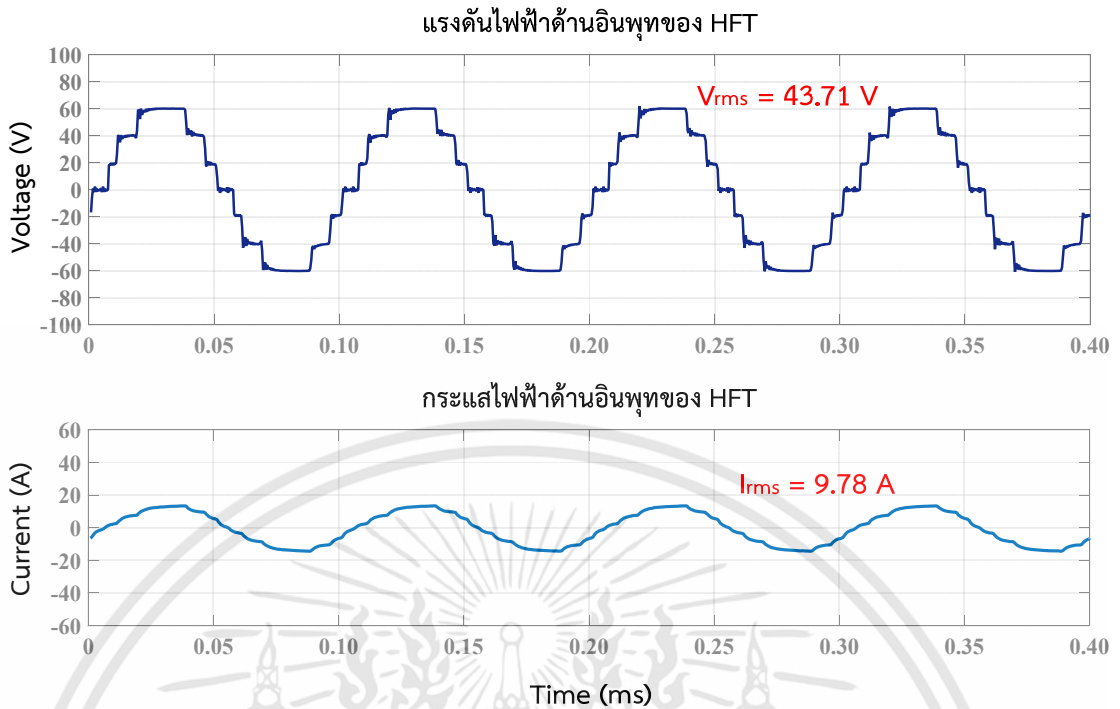
รูปที่ 5.4 ค่า %THD รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์

5.2.1 การประเมินประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง

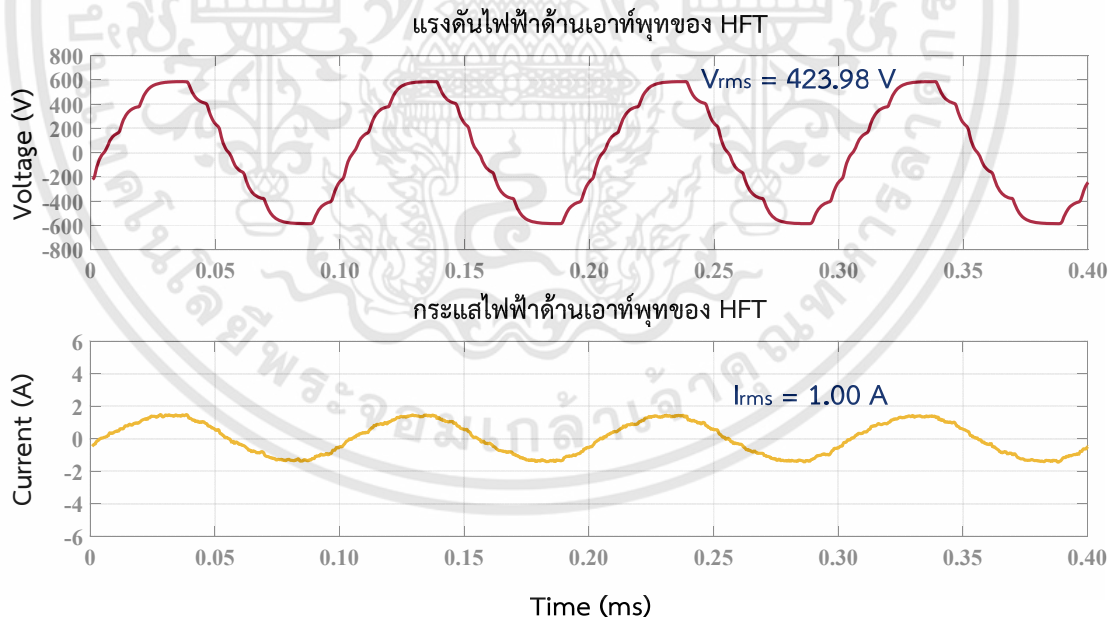
การทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนสู่ระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นได้ทำการทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W, 500 W และ 1,000 W ซึ่งผลที่ได้เป็นดังนี้

- เมื่อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 428.51 W และ 422.62 W ตามลำดับ และประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูง คือ 98.64%
- เมื่อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 631.36 W และ 614.88 W ตามลำดับ และประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูง คือ 97.39%
- เมื่อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 1,411.29 W และ 1,326.05 W ตามลำดับ และประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูง คือ 93.96%

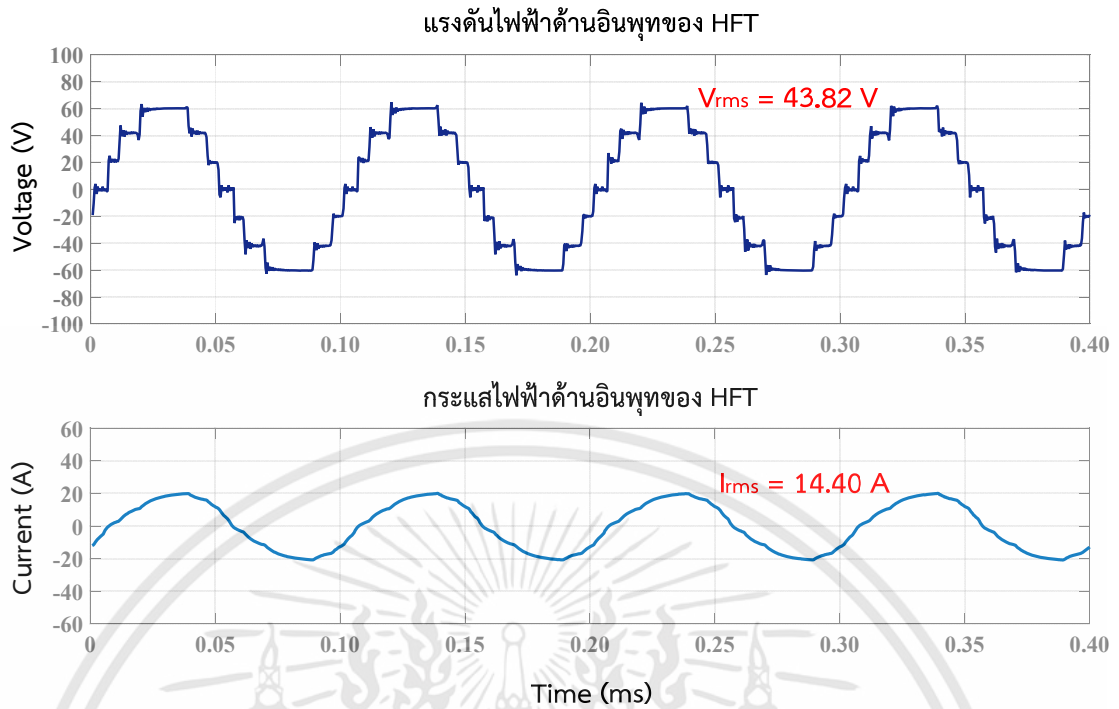
จากผลการทดสอบที่ได้สามารถแสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินพุต กระแสไฟฟ้าอินพุต แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง จากการจ่ายกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่พิกัดกำลังต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.10 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับประสิทธิภาพหม้อแปลงความถี่สูงได้ดังรูปที่ 5.11



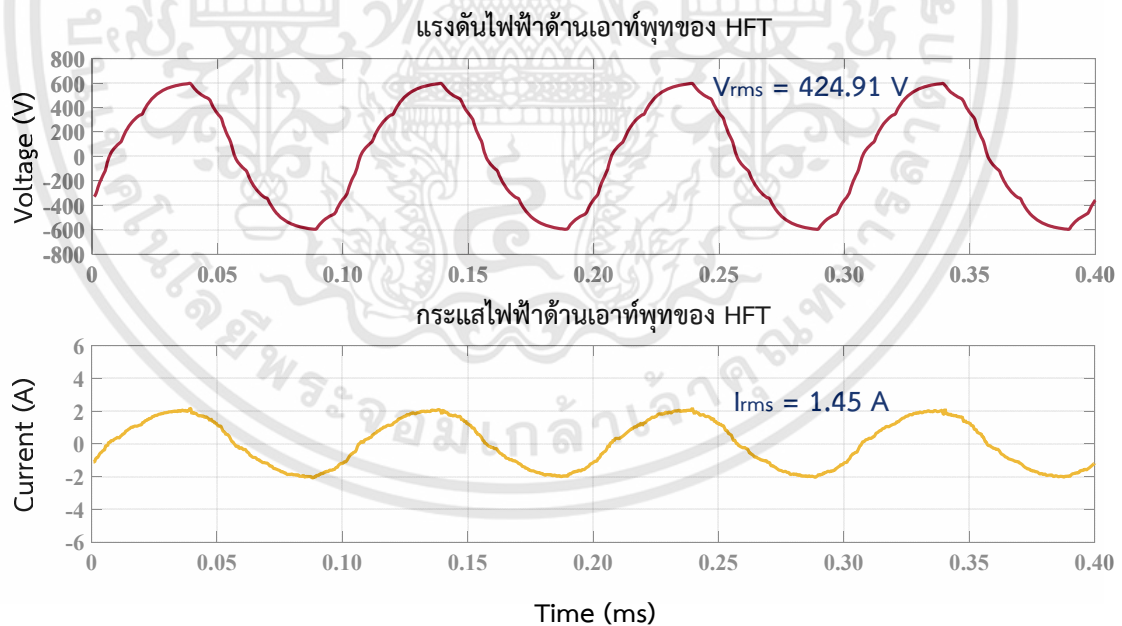
รูปที่ 5.5 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุทของหม้อแปลงความถี่สูง
ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า



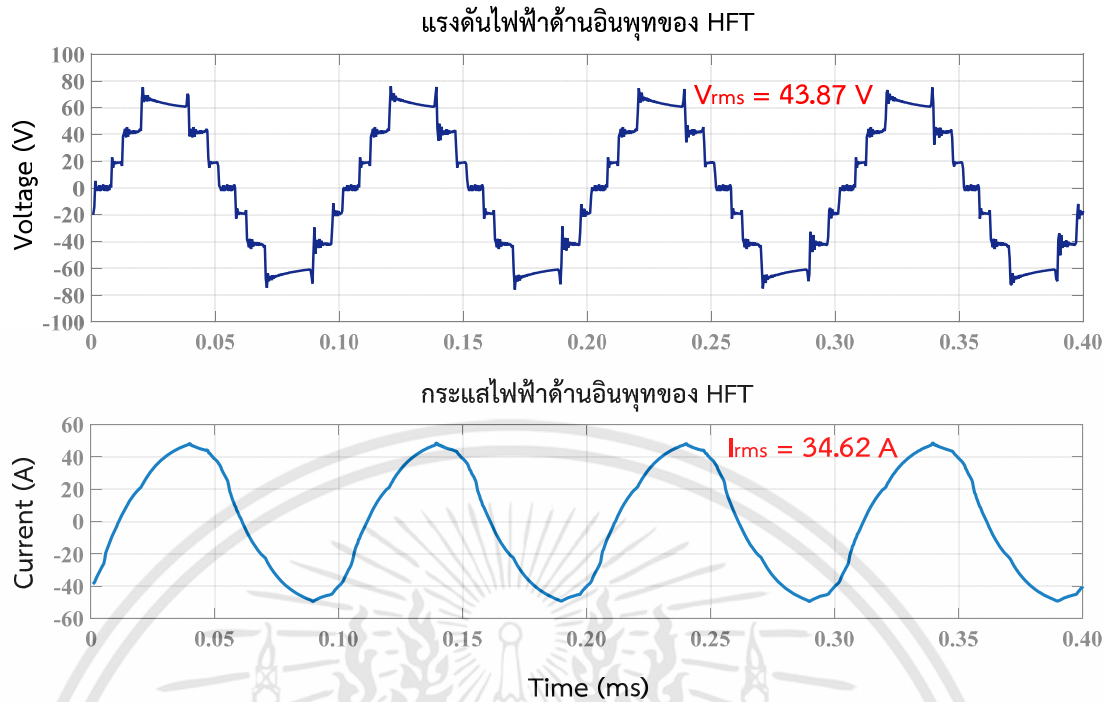
รูปที่ 5.6 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุทของหม้อแปลงความถี่สูง
ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า



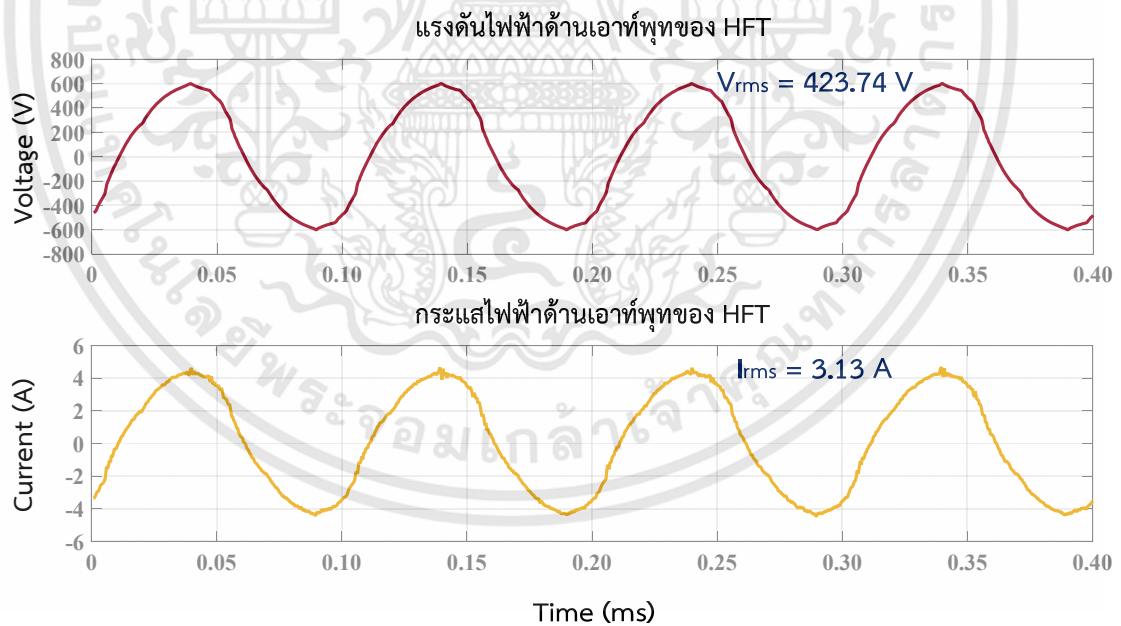
รูปที่ 5.7 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า



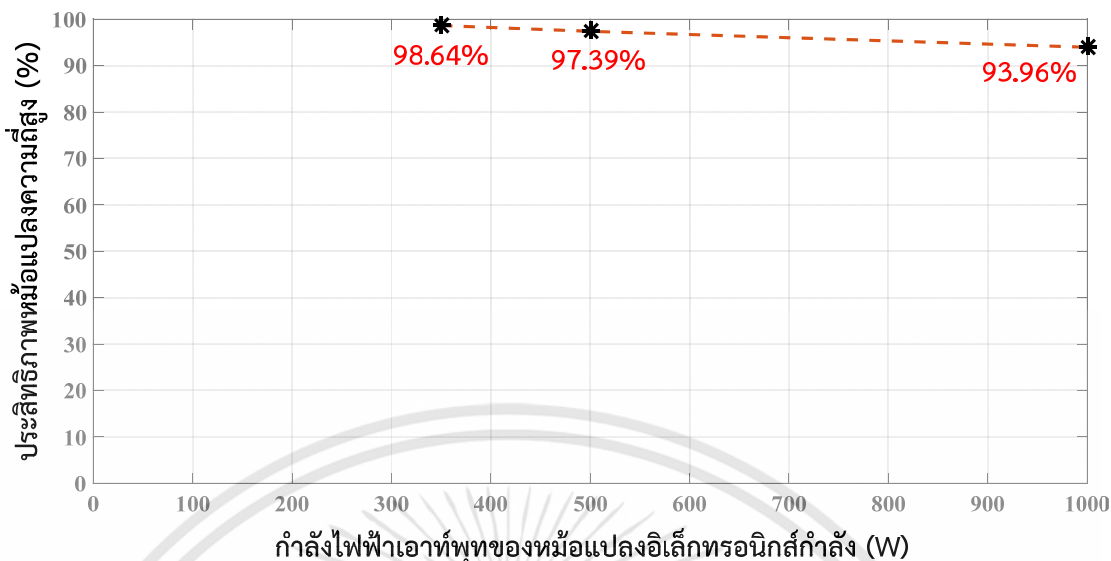
รูปที่ 5.8 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุทของหม้อแปลงความถี่สูง
ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.10 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุทของหม้อแปลงความถี่สูง
ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 1,000 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า

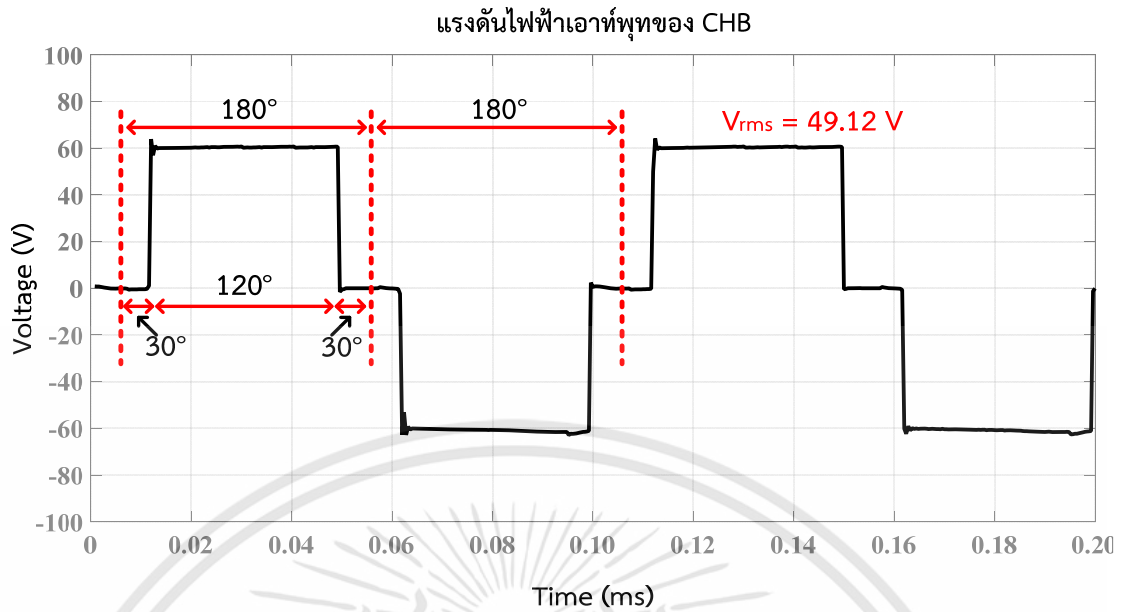


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับประสิทธิภาพหม้อแปลงความถี่สูง

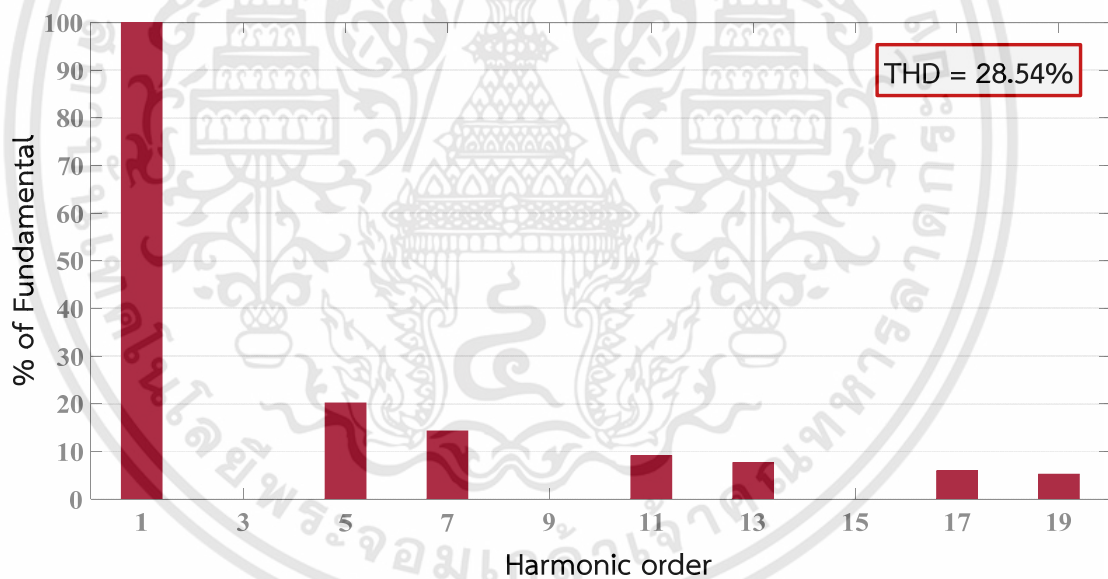
5.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงระหว่างเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ SHE กับเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Square wave

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าฮาร์มอนิกมีผลกระทบต่อการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้านื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) เพิ่มมากขึ้น ส่วนกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดและเกิดการสูญเสียเนื่องจากสเตรย์ฟลักซ์ (Stray flux loss) เพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการรับและจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าต่ำลง นอกจากนี้ผลของฮาร์มอนิกยังทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่หม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงมีค่าต่ำลง เกิดความร้อนสะสมและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของฉนวนที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิค SHE ในการสร้างสัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าฮาร์มอนิกต่ำในการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อลดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงระหว่างเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ SHE กับเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Square wave ด้วยรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบ Quasi square wave ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต RMS เท่ากับ 49.12 V เมื่อทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5.13 พบว่า ค่า %THDv ของรูปคลื่นมีค่าเท่ากับ 28.54% ซึ่งผลการทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าคืบสู่ระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่พิกัดกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W และ 500 W ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 434.95 W กับ 422.68 W และ 643.38 W กับ 614.88 W ตามลำดับ และสามารถคำนวณประสิทธิภาพหม้อแปลงความถี่สูงได้เท่ากับ 97.18% และ 95.57% ตามลำดับ โดยสามารถแสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินพุต กระแสไฟฟ้าอินพุต แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงความถี่สูงได้ดังรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.17 และสามารถเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.18

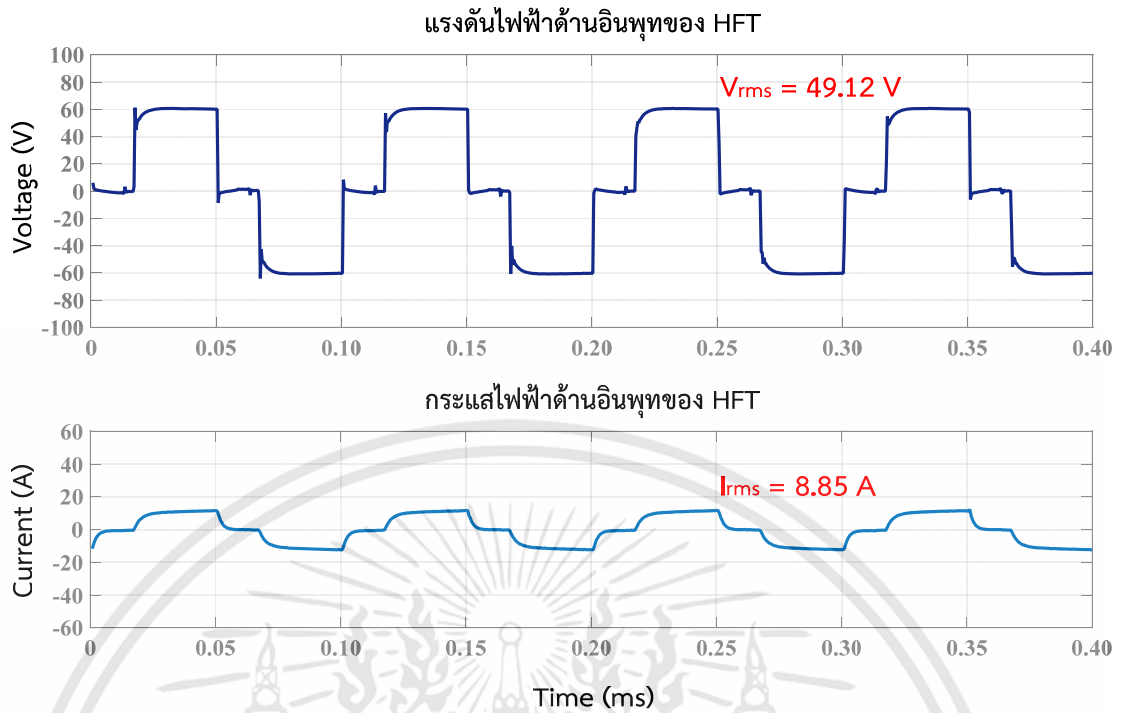


รูปที่ 5.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบ Quasi square wave ในสถานะไม่จ่ายโหลด

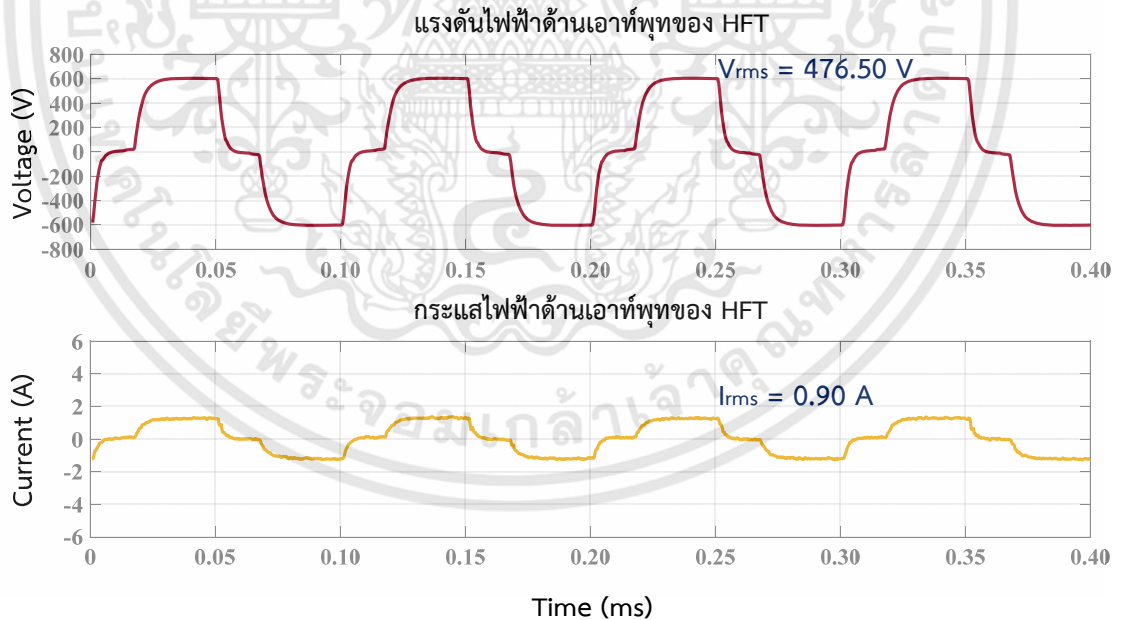


รูปที่ 5.13 ค่า %THD รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแบบ Quasi square wave

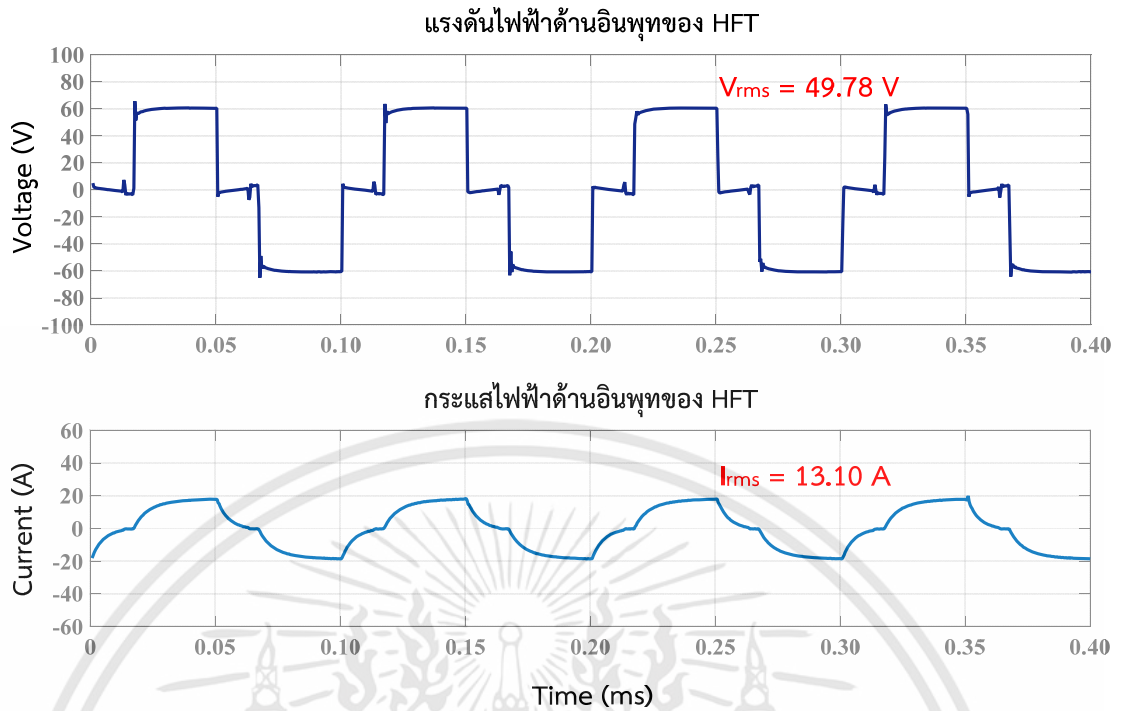
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



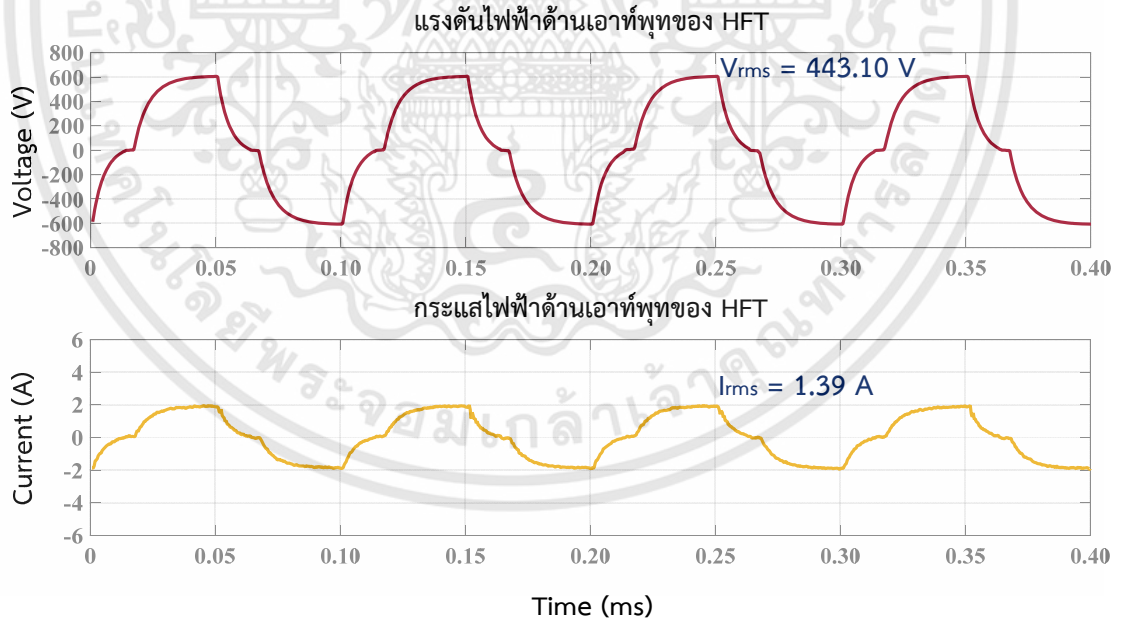
รูปที่ 5.14 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุทของหม้อแปลงความถี่สูง
ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า



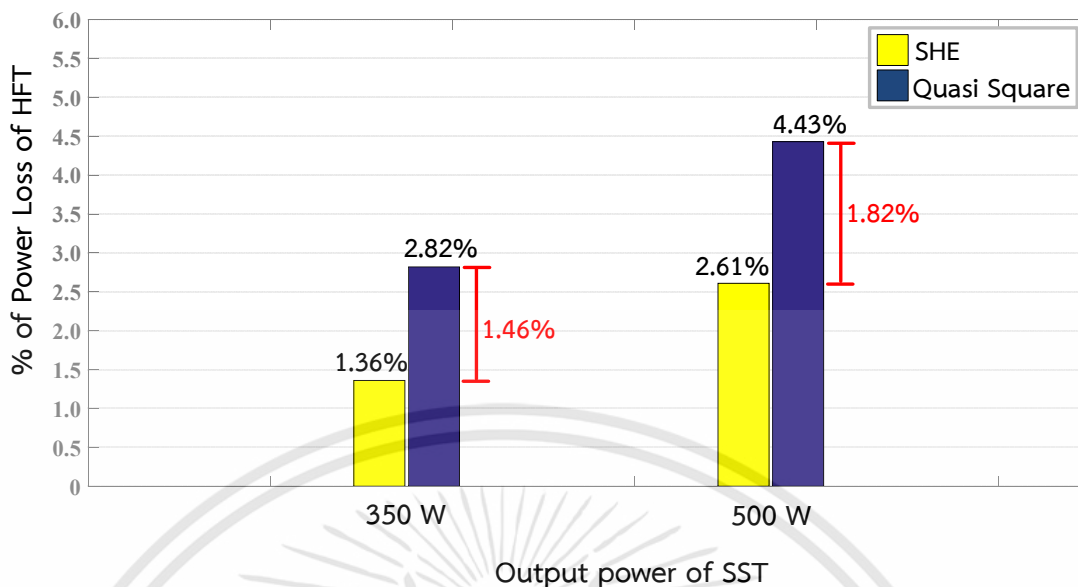
รูปที่ 5.15 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุทของหม้อแปลงความถี่สูง
ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.16 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุทของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.17 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุทของหม้อแปลงความถี่สูง ขณะหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า



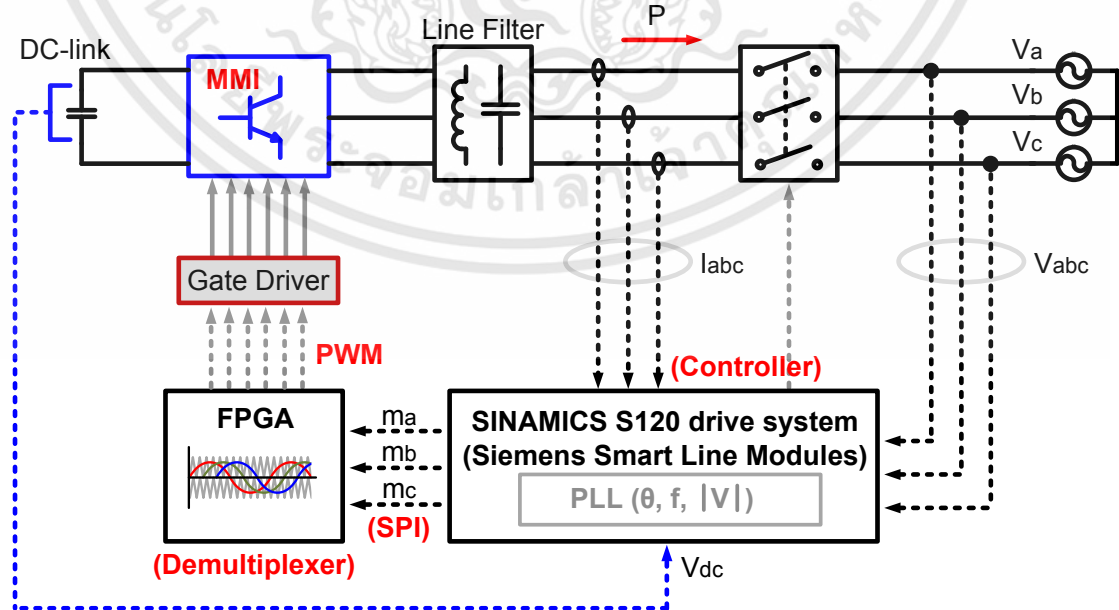
รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อแปลงความถี่สูงระหว่างเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ SHE กับเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Square wave

จากรูปที่ 5.18 พบว่า ขณะที่หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้า การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยรูปคลื่นไซน์ที่สร้างด้วยเทคนิค SHE สามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงได้ 1.46% เมื่อเทียบกับเทคนิคการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ Square wave ด้วยรูปคลื่นสัญญาณ Quasi square wave และสามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงในขณะที่หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 W เข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ถึง 1.82% ดังนั้น การลดค่าฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งกำลังจะสามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงได้

5.3 ผลการทำงานของวงจรมอเตอร์ฝิ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

วงจรมอเตอร์ฝิ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งข้อดีต่าง ๆ ของวงจรมอเตอร์ฝิ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ได้มีการกล่าวถึงมาก่อนหน้านี้ สำหรับหลักการทำงานของวงจรมอเตอร์ฝิ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบ 3 ระดับ สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 5.19 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงที่ส่งผ่านด้วยหม้อแปลงความถี่สูงจะถูกวงจรเรียงกระแสไดโอดแบบฟูลบริดจ์แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและเก็บสะสมพลังงานไว้ที่ ดีซีลิงค์ พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่สะสมอยู่ในดีซีลิงค์จะถูกวงจรมอเตอร์ฝิ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแบบ 3 ระดับ แปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 Hz เพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ในการควบคุมการทำงานของวงจรมอเตอร์ฝิ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแบบ 3 ระดับ จะใช้ชุดควบคุม Smart Line Modules ของบริษัท Siemens รุ่น SINAMICS S120 drive system เป็นตัวประมวลผลเพื่อหาค่าอัตราการมอดูเลชันของสัญญาณ อัตราการมอดูเลชันของสัญญาณที่ได้นี้จะถูกส่งข้อมูลในรูปแบบของ SPI ให้กับ FPGA ตระกูล Spartan-3 เบอร์ XC3S200 ที่มีความจุ 200,000 เกต และสามารถออกแบบวงจรดิจิทัลให้มีไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฝังตัวอยู่ด้วยได้ ค่าอัตราการมอดูเลชันที่ส่งให้กับ FPGA จะถูกนำไปใช้สร้างสัญญาณ PWM และส่งต่อให้กับตัวขับเคลื่อนเพื่อควบคุมการทำงานของสวิทช์กำลังของวงจรมอเตอร์ฝิ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.20

การควบคุมการทำงานของวงจรมอเตอร์ฝิ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแบบ 3 ระดับ จะควบคุมให้จ่ายเฉพาะค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active power) และควบคุมแรงดันดีซีลิงค์ให้คงที่ที่ 600 V ($V_{dc,ref} = 600$ V) ดังแสดงในรูปที่ 5.21 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ ค่าแรงดันสามเฟสของระบบไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กับระบบไฟฟ้าจะถูกตรวจจับมาที่ชุดควบคุม Smart Line Modules ค่า error ของแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม PI ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จะเป็นค่ากระแสไฟฟ้าจริงอ้างอิง ($I_{d,ref}$) จากนั้น



รูปที่ 5.19 การควบคุมการทำงานของวงจรมอเตอร์ฝิ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแบบ 3 ระดับ

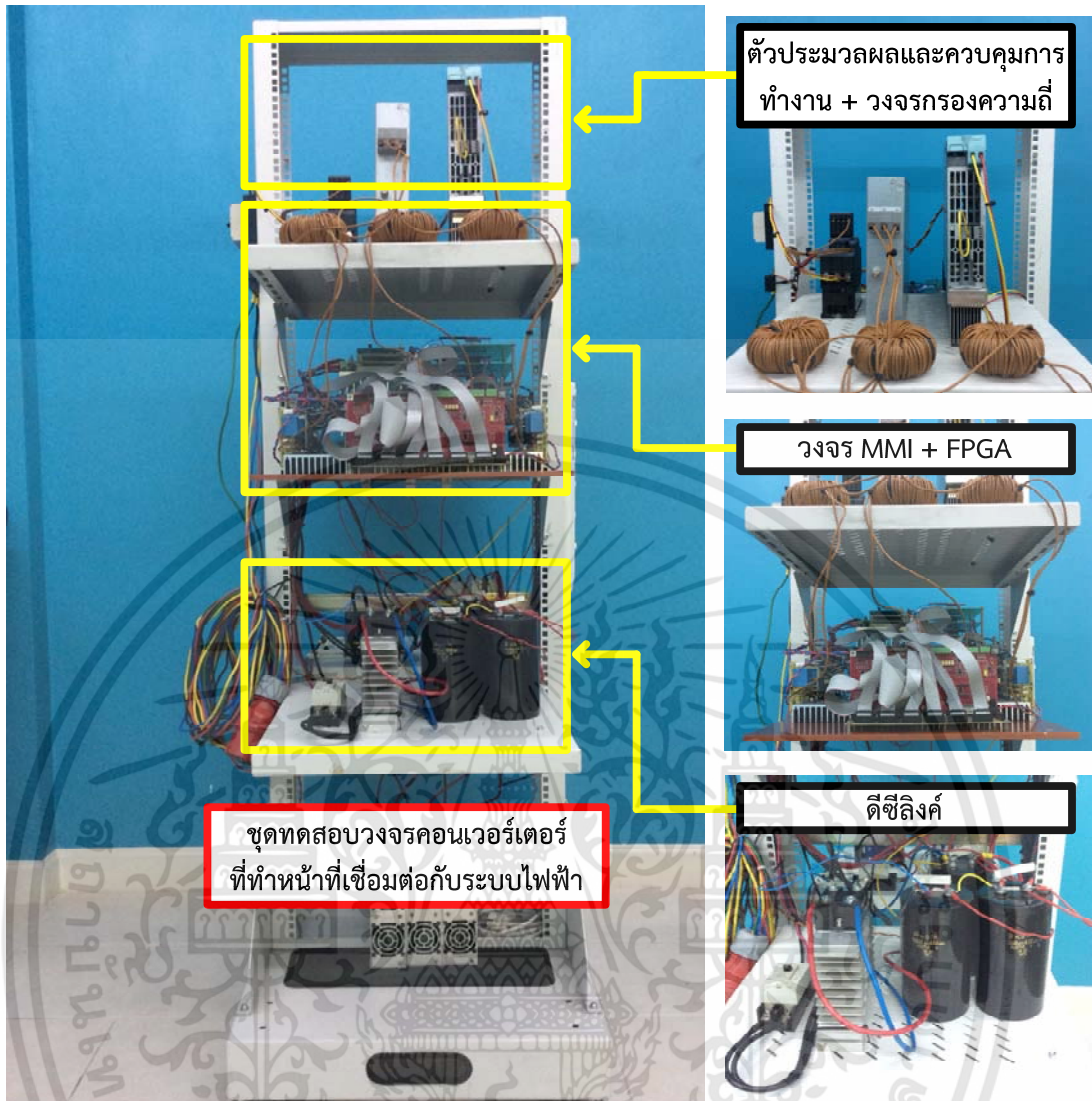
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสไฟฟ้าจริงจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากระบบ (I_d) โดยค่า error ของกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม PI อีกครั้ง ซึ่งค่าเอาต์พุตที่ได้จะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าจริง (U_d) ค่าแรงดันไฟฟ้าจริงที่ได้นี้จะถูกแปลงจากรอบอ้างอิงสองเฟสหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสองเฟสหมุน และถูกแปลงจากรอบอ้างอิงสองเฟสหมุนไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟสโดยอาศัยค่ามุมเฟสที่ได้จากการทำเฟสล็อกของแรงดันไฟฟ้า เมื่อแรงดันที่ตีซีลิ่งมากกว่า 600 V ตัวควบคุมจะปรับค่าอัตราการผลิตของสัญญาณให้สูงขึ้น ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันที่ตีซีลิ่งมีค่าต่ำลงจนมีค่าเท่ากับ 600 V ซึ่งในขั้นตอนนี้ระบบจะเริ่มทำงานเมื่อค่าแรงดันอินพุตที่ตีซีลิ่งมีค่าสูงกว่า 600 V

ในการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทำการทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบไฟฟ้าที่ 350 W, 500 W และ 1,000 W รายละเอียดต่าง ๆ จะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 5.3.1 ถึงหัวข้อที่ 5.3.3

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของชุดทดสอบวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ
แรงดันไฟฟ้าที่ตีซีลิ่ง	600 V
ค่าตัวเก็บประจุที่ตีซีลิ่ง	10,000 μ F
จำนวนโมดูลในแต่ละแขน	2
ค่าตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล	470 μ F
ค่าตัวเหนี่ยวนำระหว่างแขนบนและล่าง	4.5 mH
ค่าตัวเหนี่ยวนำระหว่างแขนบนกับจุดเชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้า	1 mH
ความถี่ระบบไฟฟ้า	50 Hz
ความถี่สวิตชิง	5 kHz
การสูญเสียที่วงจรองความถี่	16 W



รูปที่ 5.20 วงจรคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

Param...	Parameter text	Offline value A_INF_02	Unit	Modifiable to	Access level	Minimum	Maximum
244	p3421 Infeed inductance	0.882	mH	Ready to run	3	0.001	2000
245	p3422 Infeed DC link capacitance	1.22	mF	Operation	3	0.2	2000
246	p3424 Infeed line supply inductance	0.042	mH	Ready to run	3	0.001	1000
247	p3440 Smart Mode configuration	1H		Ready to run	3		
248	p3441[0] Smart Mode Vdc ctrl Kp/Tn, Proportional gain	100.00	%	Operation	3	0	1000
249	p3442[0] Smart Mode smoothing times, DC link voltage actual value (r3445)	0.25	ms	Operation	3	0	20
250	r3445[0] Smart Mode voltages display, DC link voltage smoothed	238.90	V		3		
251	r3446[0] Smart Mode currents, DC link current setpoint	0.00	A		3		
252	p3458[0] Infeed PLL smoothing time, Encoderless operation line supply frequency smoothing time	23.1	ms	Operation	3	1	1000
253	p3462 Infeed line fault maximum time	0.00	s	Ready to run	3	0	10000
254	r3467[0] CO: Infeed current alpha/beta, Alpha	0.00	A		3		
255	r3468[0] CO: Infeed voltage alpha/beta, Alpha	-81.50	V		3		
256	r3470 CO: Infeed active current filter	0.00	Arms		3		
257	r3471 CO: Infeed reactive current filter	0.00	Arms		3		
258	p3480 Infeed modulation depth limit	97.0	%	Operation	3	50	110
259	r3485 Infeed standby controller output	0.00	V		3		
260	p3490 Infeed delay time OFF1 command	0.0	ms	Ready to run	2	0	1E+06
261	p3492 Infeed, line supply undervoltage delay time	0	s	Ready to run	3	0	300
262	p3508 Infeed step-up factor maximum	2.00		Ready to run	2	1.6	3
263	p3510 Infeed DC link voltage setpoint	600.00	V	Operation	2	100	1600
264	p3511 Ct: Infeed DC link voltage supplementary setpoint	0		Ready to run	3		
265	p3513 Bt: Voltage-controlled operation inhibit	0		Operation	3		
266	p3514 Infeed supplementary active current steady-state	0.00	Arms	Operation	3	-2000	2000
267	p3515 Ct: Infeed supplementary active current	0		Ready to run	3		
268	p3516 Infeed current distribution factor	100.00	%	Operation	3	0	100
269	r3517 CO: Infeed active current controller unlimited setpoint	-1.4	Arms		3		
270	r3519[0] Ct: Infeed ore-control power (scaled)	0		Ready to run	2		

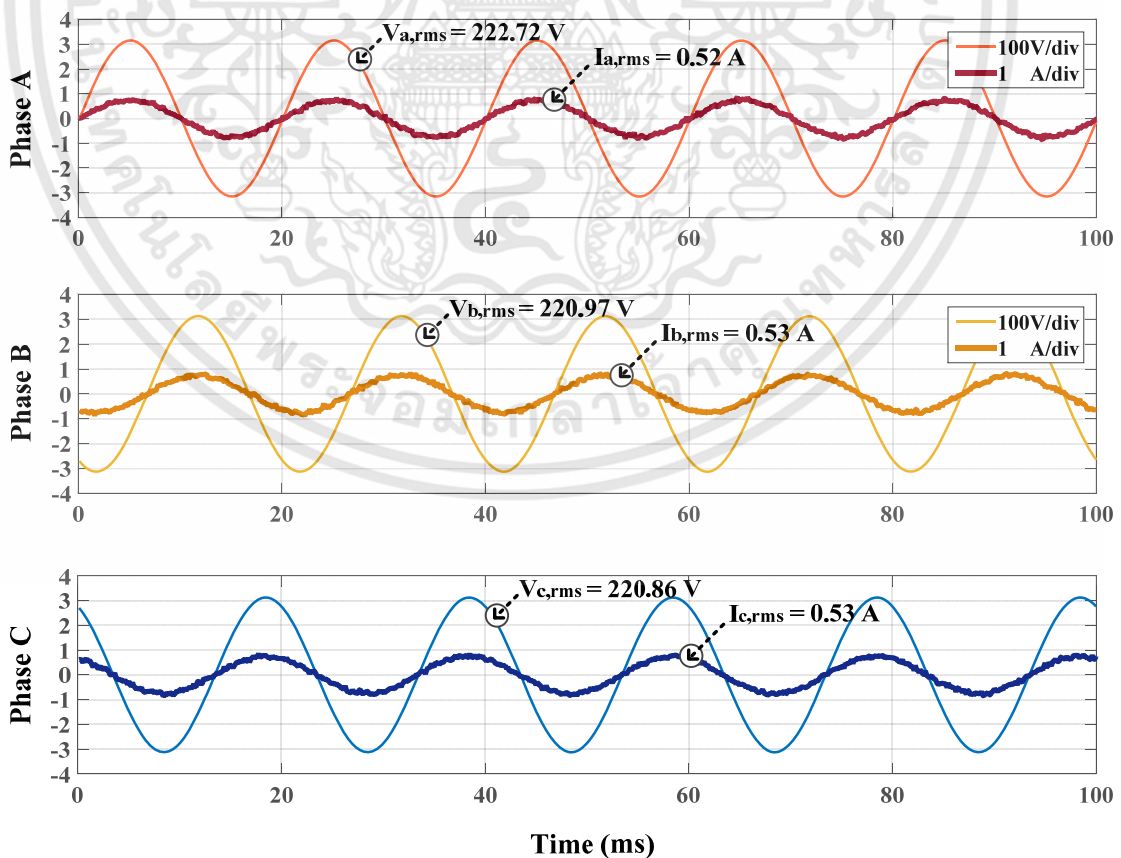
รูปที่ 5.21 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุม Smart Line Modules

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1 ผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W

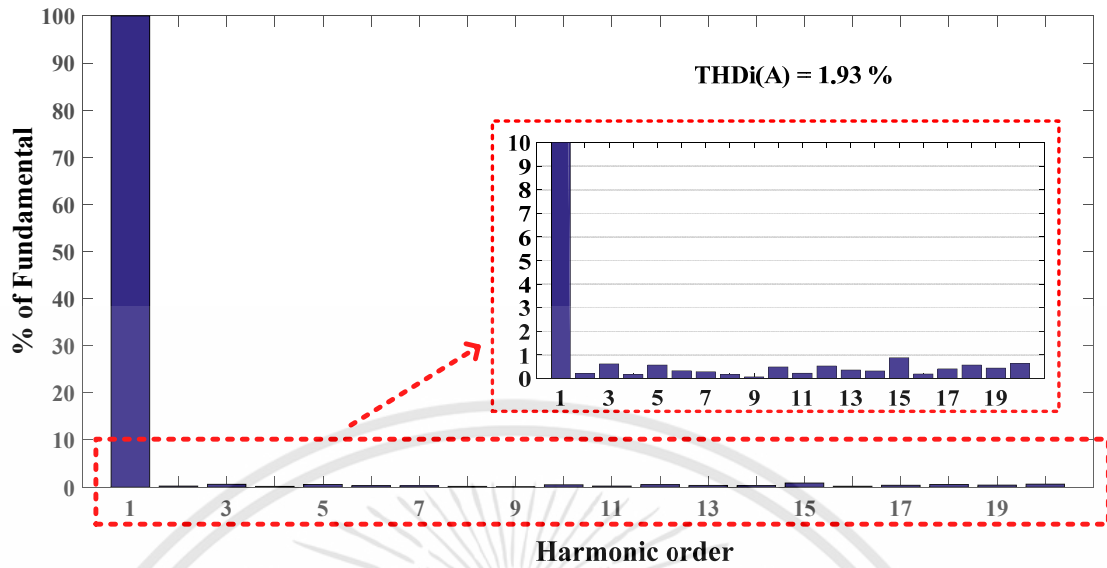
ผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ในสภาวะคงตัว (Steady state) ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 พบว่า กระแสและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะอินเฟสกันเนื่องจากจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยค่าแรงดันไฟฟ้าของเฟส A เฟส B และเฟส C มีค่าเป็น 222.72 V, 220.97 V และ 220.86 V ตามลำดับ และค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A เฟส B และเฟส C มีค่าเป็น 0.52 A, 0.53 A และ 0.53 A ตามลำดับ เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบของแต่ละเฟสมาวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (%THDi) พบว่า ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฟส A, เฟส B และเฟส C มีค่าเท่ากับ 1.93%, 2.01% และ 2.07% ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของการไฟฟ้าที่กำหนดให้ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ามีค่าไม่เกิน 5% โดยค่าฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.23 ถึงรูปที่ 5.25 ตามลำดับ

สำหรับรูปที่ 5.26 เป็นภาพแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตีซิลิ่งค์ พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตีซิลิ่งค์มีค่าเท่ากับ 600 V ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตีซิลิ่งค์เท่ากับ 0.70 A เมื่อทำการขยายภาพแรงดันไฟฟ้าที่ตีซิลิ่งค์ พบว่า ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ามียค่าประมาณ 4 V ส่วนรูปที่ 5.27 เป็นภาพแรงดันไฟฟ้า PWM ของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W ให้กับระบบไฟฟ้า ซึ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า PWM เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสที่วัดหน้าตัวเหนี่ยวนำของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ก่อนเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

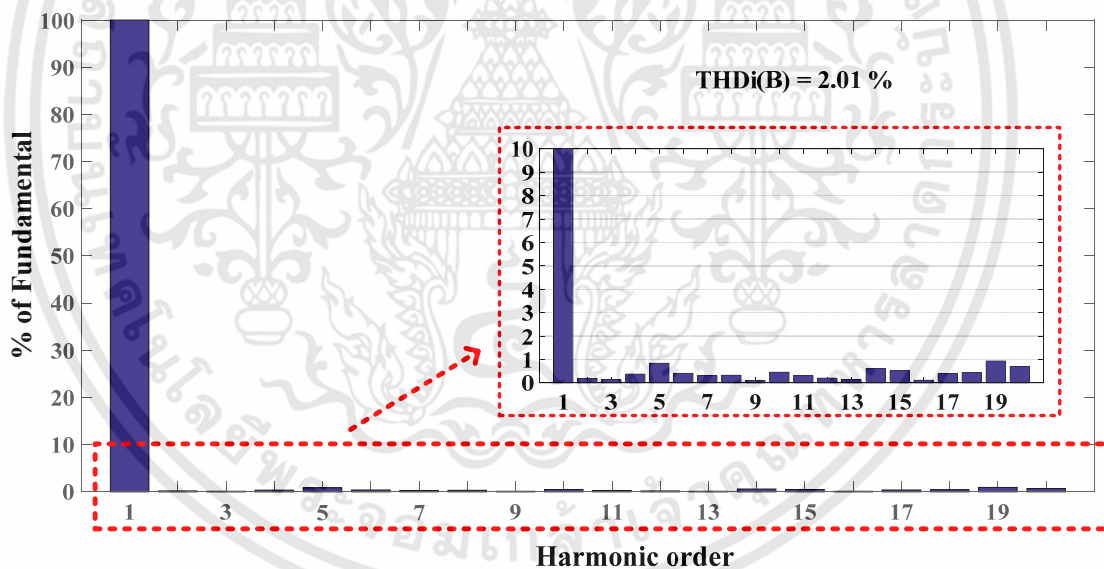


รูปที่ 5.22 แรงดันและกระแสของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

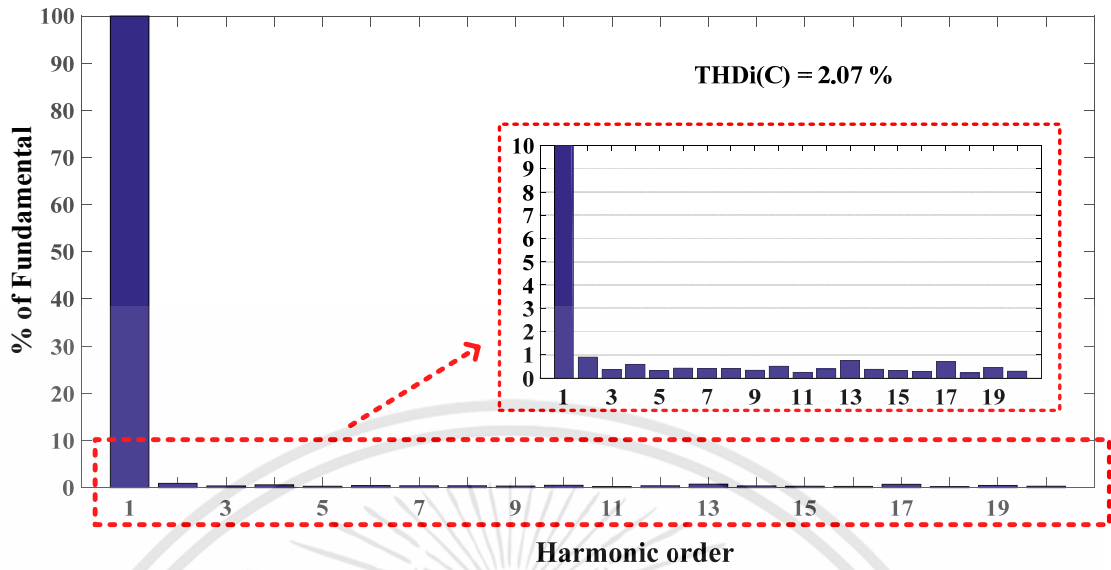


รูปที่ 5.23 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส A ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W

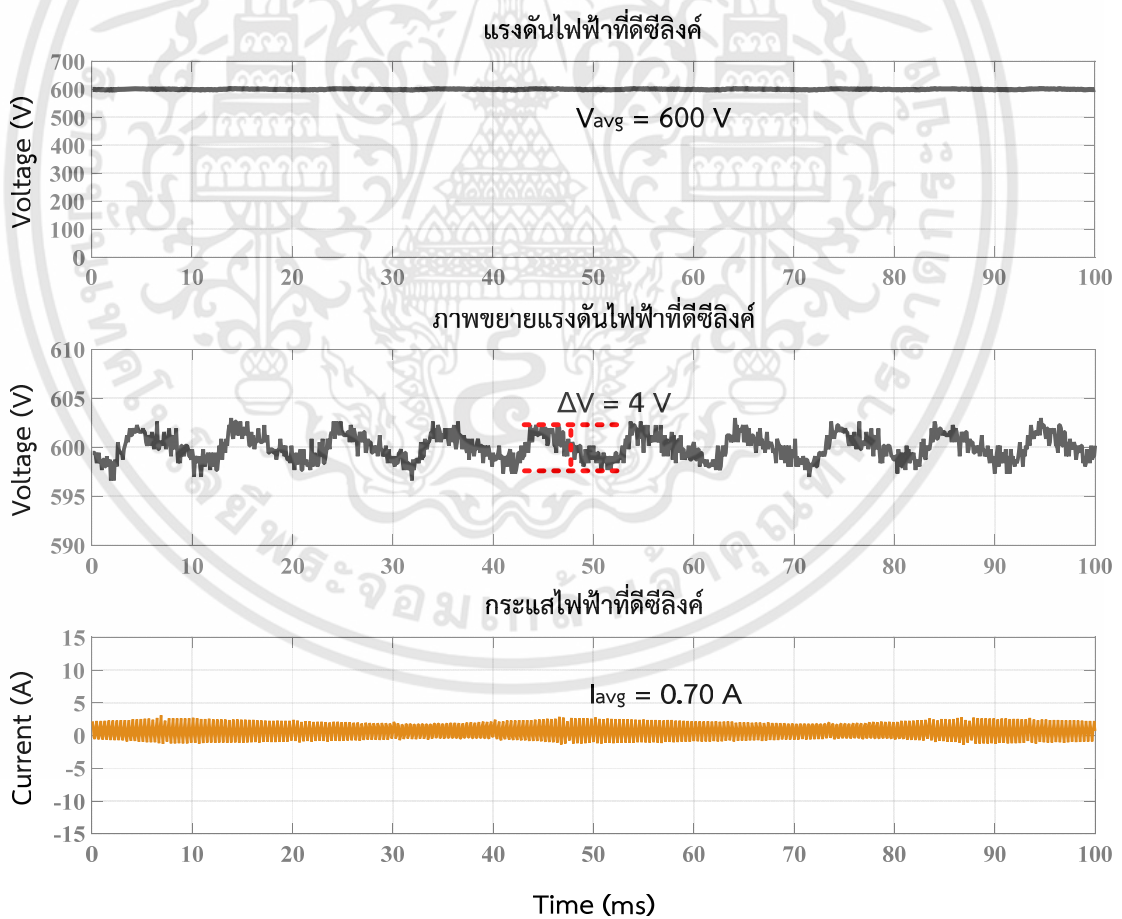


รูปที่ 5.24 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส B ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

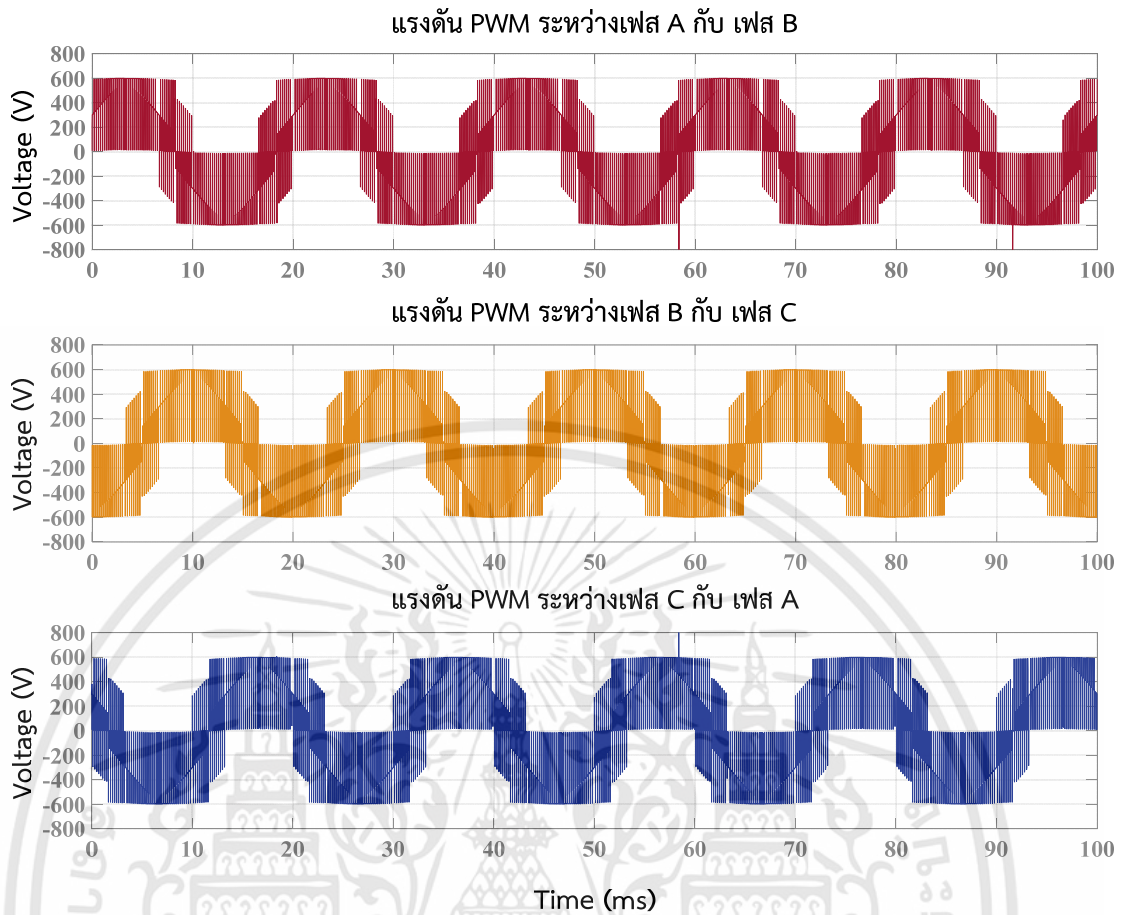


รูปที่ 5.25 ฮาร์โมนิกส์เปกต์มของกระแสเฟส C ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W



รูปที่ 5.26 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ดิสซิลิ่งค์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



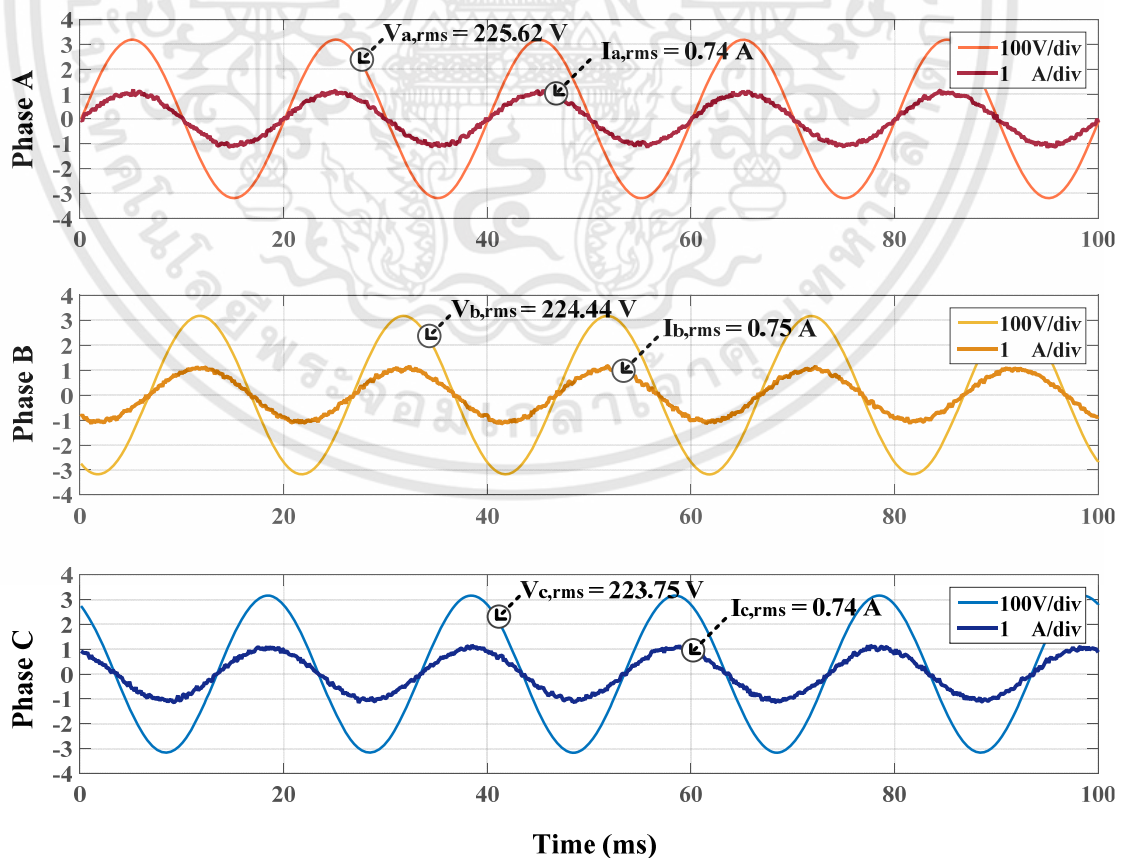
รูปที่ 5.27 แรงดันไฟฟ้า PWM ระหว่างเฟสของวงจรมอเตอร์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์
ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 ผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W

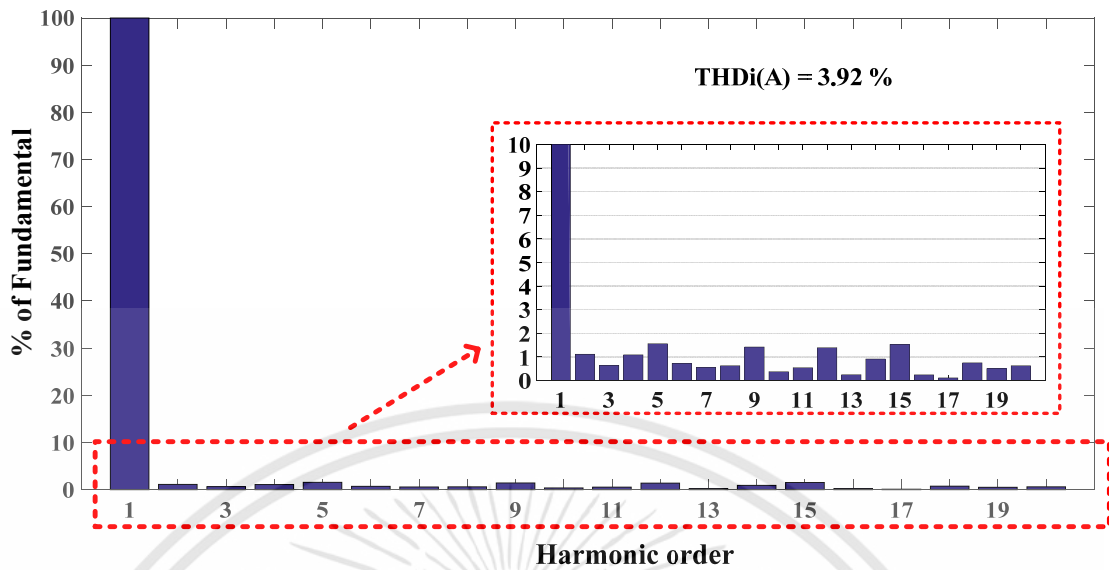
ผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ในสภาวะคงตัว (Steady state) ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.28 พบว่า กระแสและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะอินเฟสกันเนื่องจากจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยค่าแรงดันไฟฟ้าของเฟส A เฟส B และเฟส C มีค่าเป็น 225.62 V, 224.44 V และ 223.75 V ตามลำดับ และค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A เฟส B และเฟส C มีค่าเป็น 0.74 A, 0.75 A และ 0.74 A ตามลำดับ เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบของแต่ละเฟสมาวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (%THDi) พบว่า ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฟส A, เฟส B และเฟส C มีค่าเท่ากับ 3.92%, 3.39% และ 3.60% ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของการไฟฟ้าที่กำหนดให้ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ามีค่าไม่เกิน 5% โดยค่าฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.29 ถึงรูปที่ 5.31 ตามลำดับ

สำหรับรูปที่ 5.32 เป็นภาพแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตีซิงค์ พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตีซิงค์มีค่าเท่ากับ 600 V ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตีซิงค์เท่ากับ 1.02 A เมื่อทำการขยายภาพแรงดันไฟฟ้าที่ตีซิงค์ พบว่า ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 4 V ส่วนรูปที่ 5.33 เป็นภาพแรงดันไฟฟ้า PWM ของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W ให้กับระบบไฟฟ้า ซึ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า PWM เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสที่วัดหน้าตัวเหนี่ยวนำของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ก่อนเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

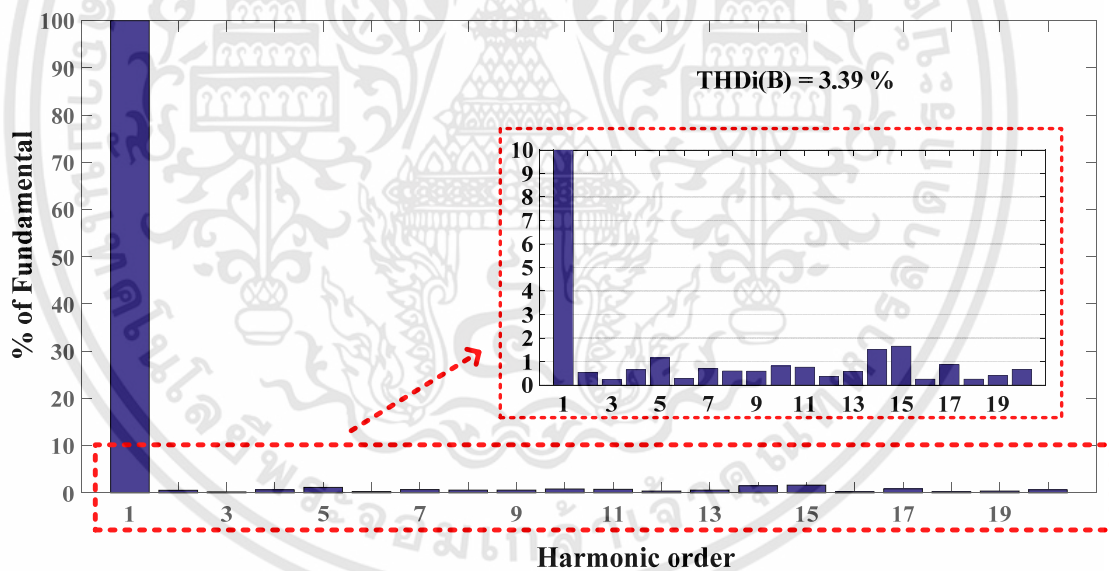


รูปที่ 5.28 แรงดันและกระแสของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

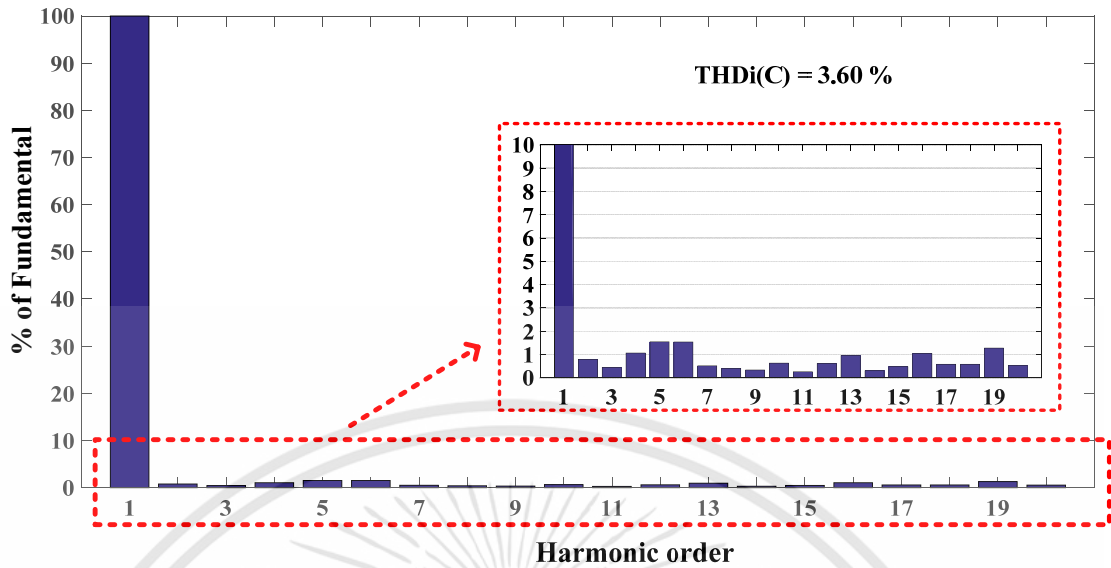


รูปที่ 5.29 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส A ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W

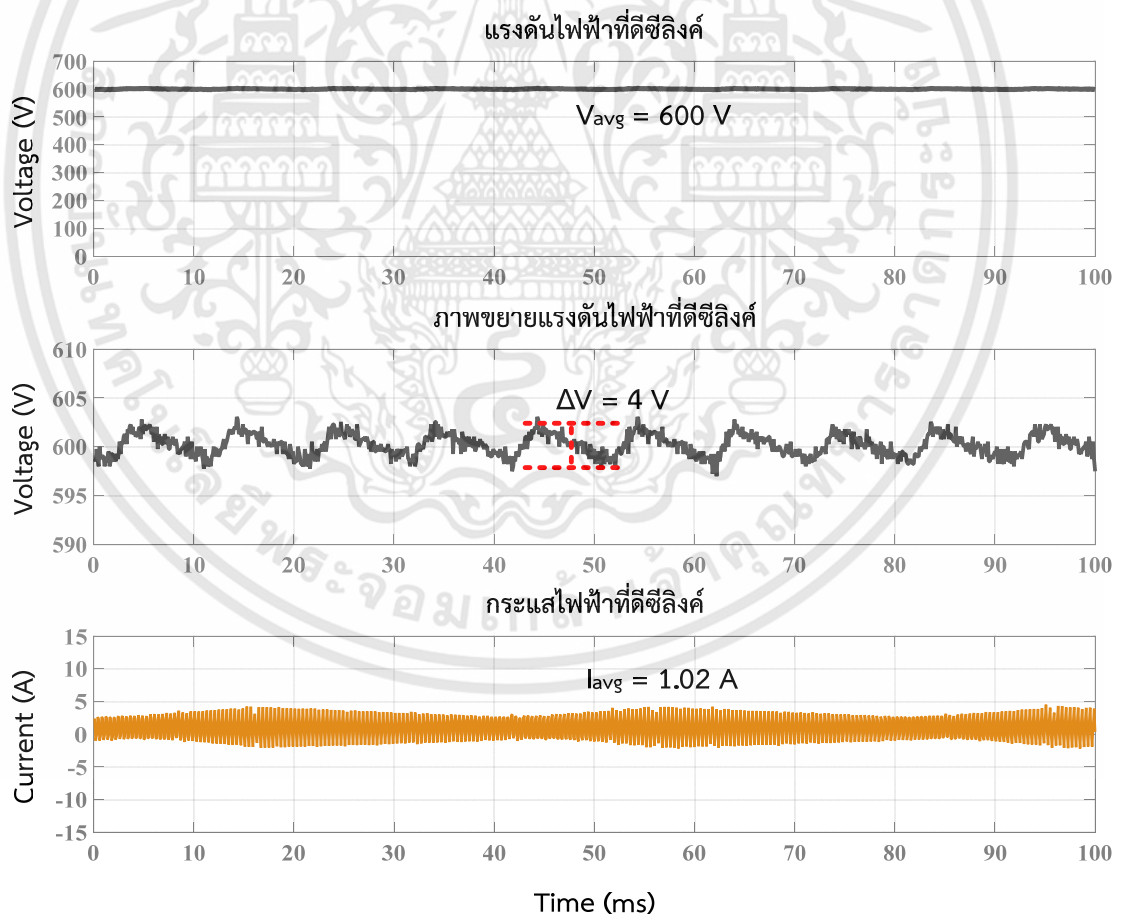


รูปที่ 5.30 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส B ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

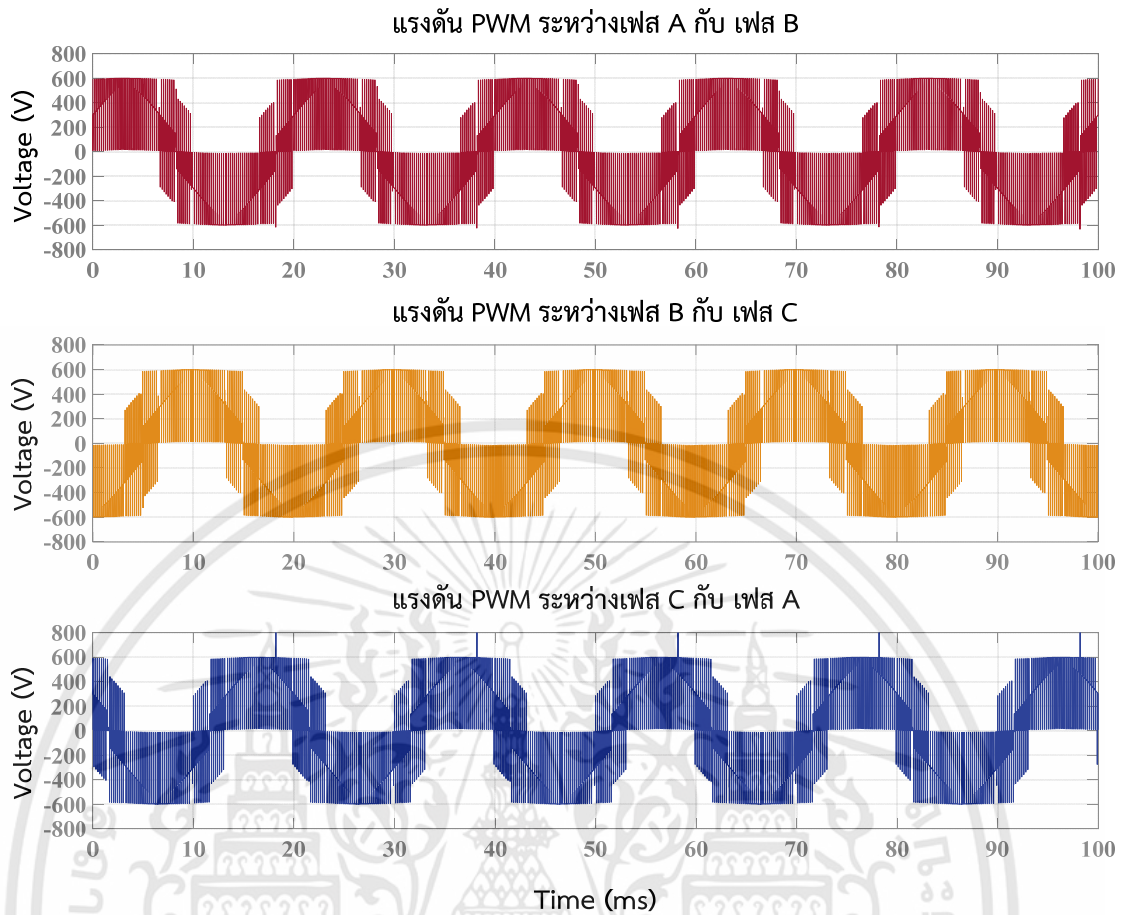


รูปที่ 5.31 ฮาร์โมนิกส์เปกต์มของกระแสเฟส C ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W



รูปที่ 5.32 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ติซีลิ่งขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



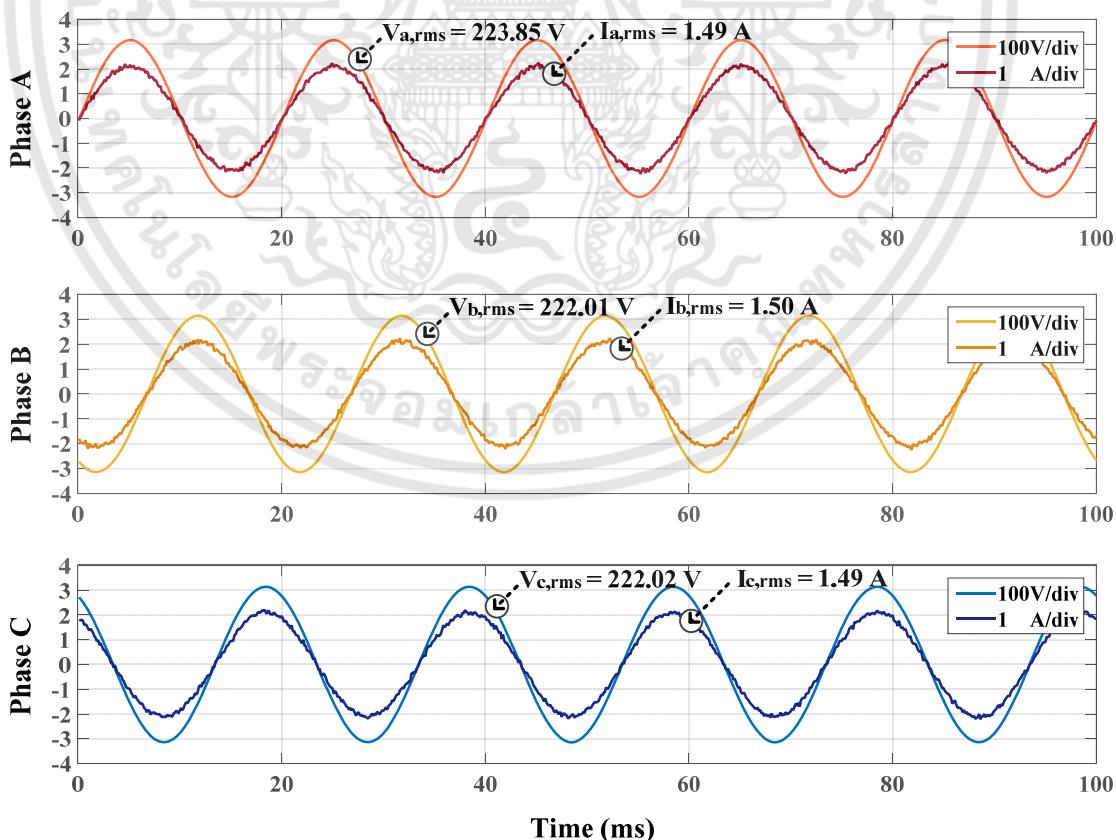
รูปที่ 5.33 แรงดันไฟฟ้า PWM ระหว่างเฟสของวงจรมอดูลาร์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์
ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W

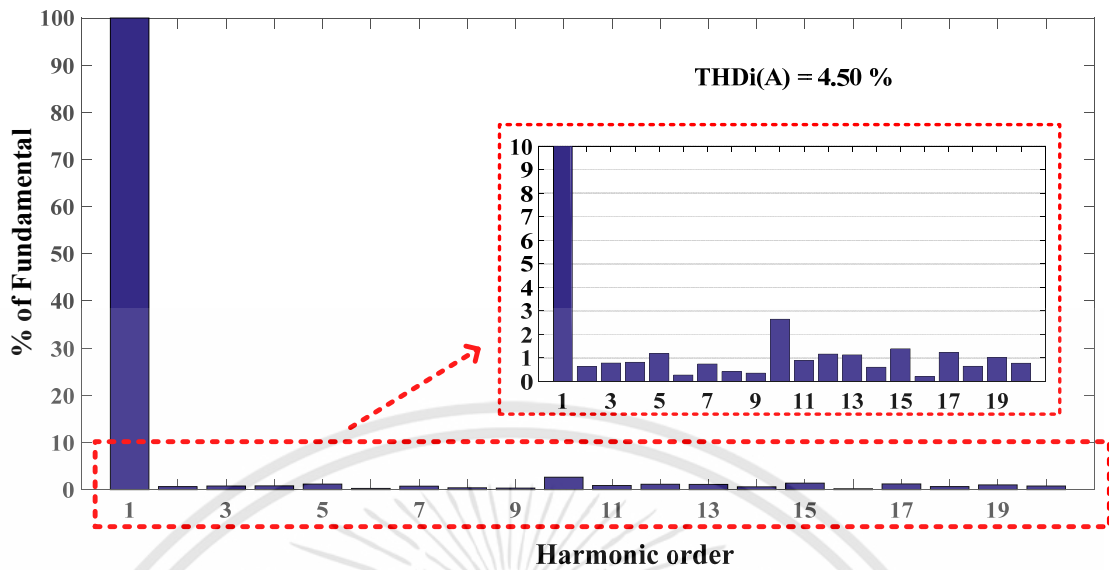
ผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ในสภาวะคงตัว (Steady state) ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.34 พบว่า กระแสและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะอินเฟสกันเนื่องจากจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยค่าแรงดันไฟฟ้าของเฟส A เฟส B และเฟส C มีค่าเป็น 223.85 V, 222.01 V และ 222.02 V ตามลำดับ และค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส A เฟส B และเฟส C มีค่าเป็น 1.49 A, 1.50 A และ 1.50 A ตามลำดับ เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบของแต่ละเฟสมาวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (%THDi) พบว่า ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฟส A, เฟส B และเฟส C มีค่าเท่ากับ 4.50%, 5.66% และ 5.17% ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับมาตรฐานของการไฟฟ้าที่กำหนดให้ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ามีค่าไม่เกิน 5% โดยค่าฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของรูปคลื่นสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.35 ถึงรูปที่ 5.37 ตามลำดับ

สำหรับรูปที่ 5.38 เป็นภาพแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตีซิลิกซ์ พบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตีซิลิกซ์มีค่าเท่ากับ 600 V ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตีซิลิกซ์เท่ากับ 2.21 A เมื่อทำการขยายภาพแรงดันไฟฟ้าที่ตีซิลิกซ์ พบว่า ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 3 V ส่วนรูปที่ 5.39 เป็นภาพแรงดันไฟฟ้า PWM ของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W ให้กับระบบไฟฟ้า ซึ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า PWM เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสที่วัดหน้าตัวเหนี่ยวนำของวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ก่อนเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

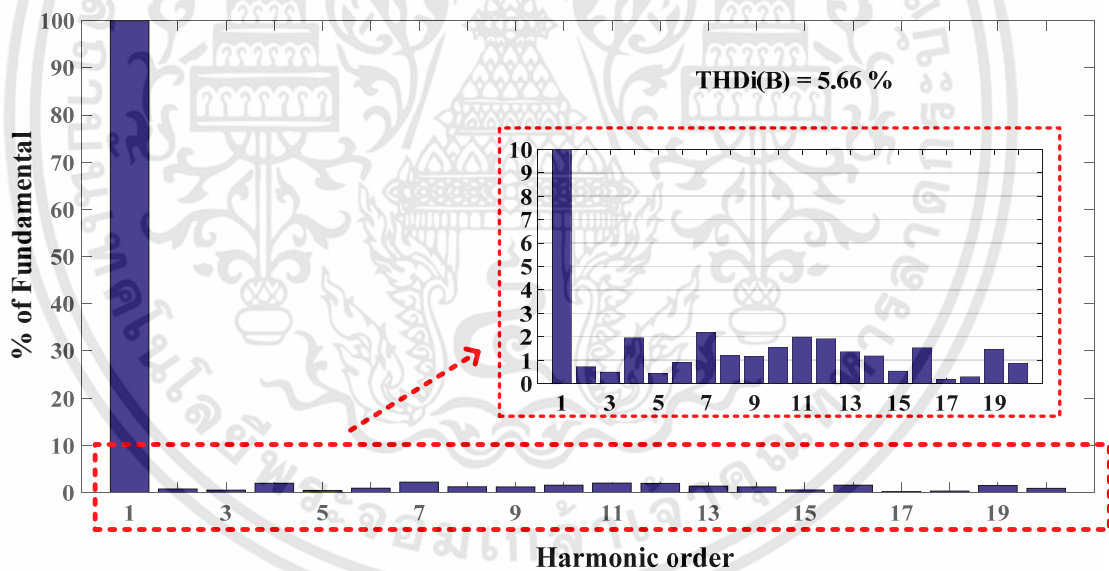


รูปที่ 5.34 แรงดันและกระแสของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

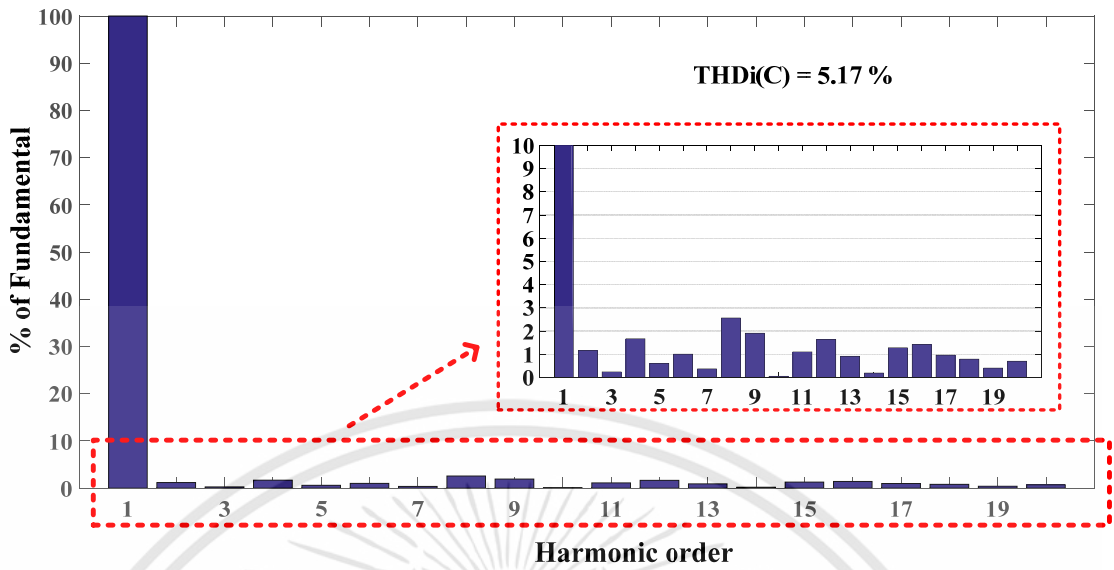


รูปที่ 5.35 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส A ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W

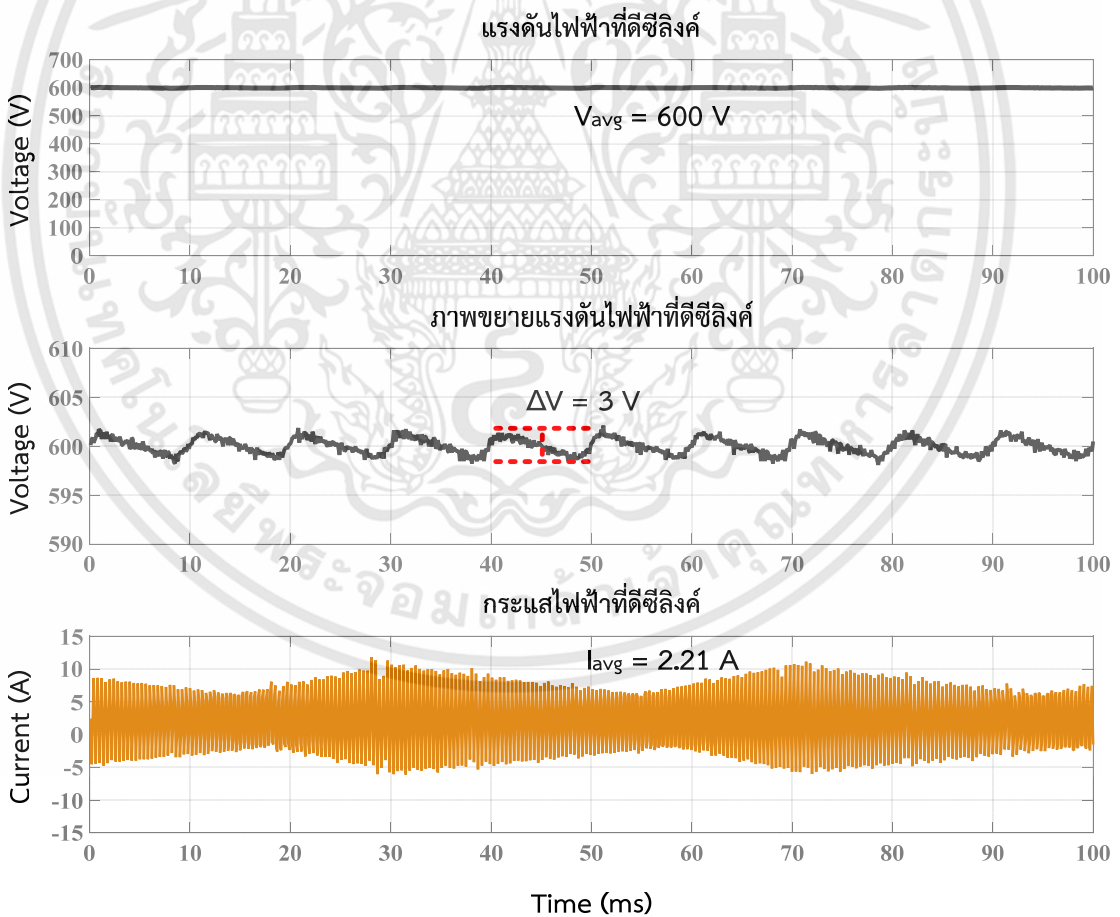


รูปที่ 5.36 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสเฟส B ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

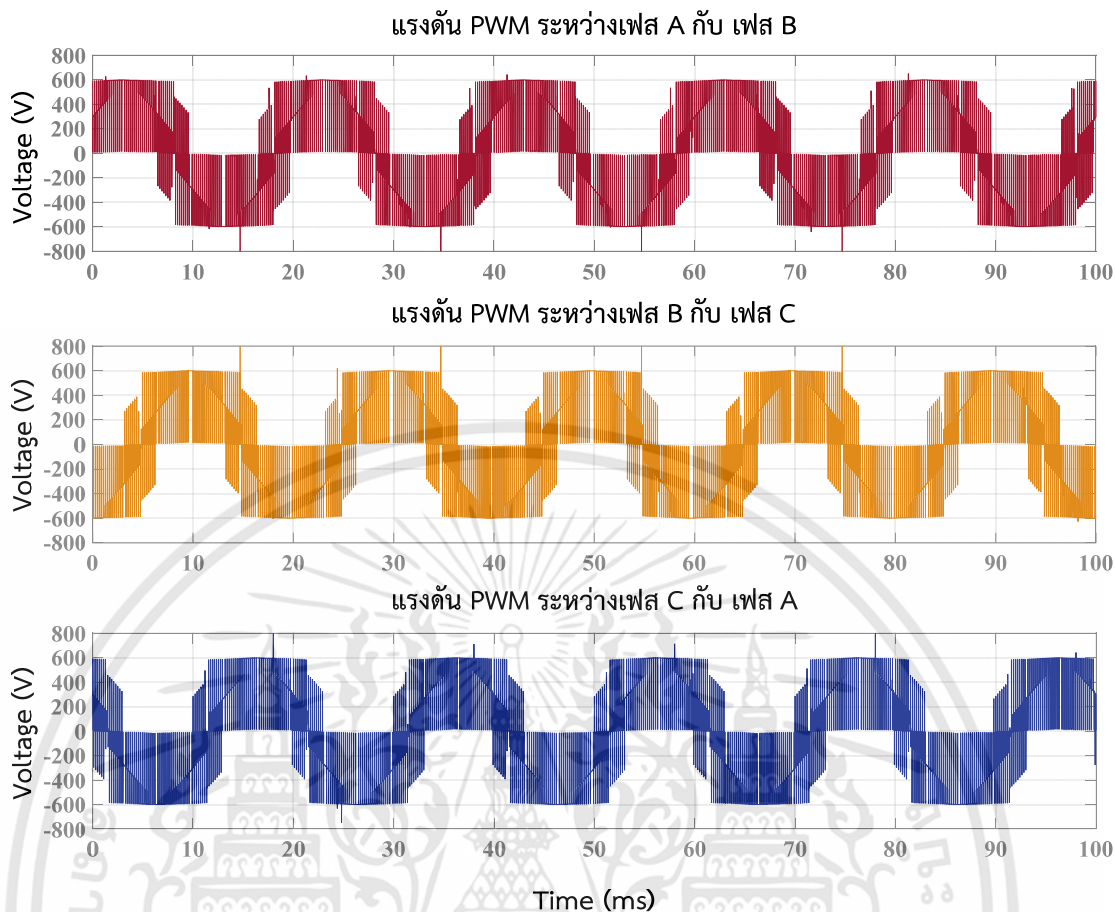


รูปที่ 5.37 ฮาร์โมนิกส์เปกต์มของกระแสเฟส C ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W



รูปที่ 5.38 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ติซีลิ่งค์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

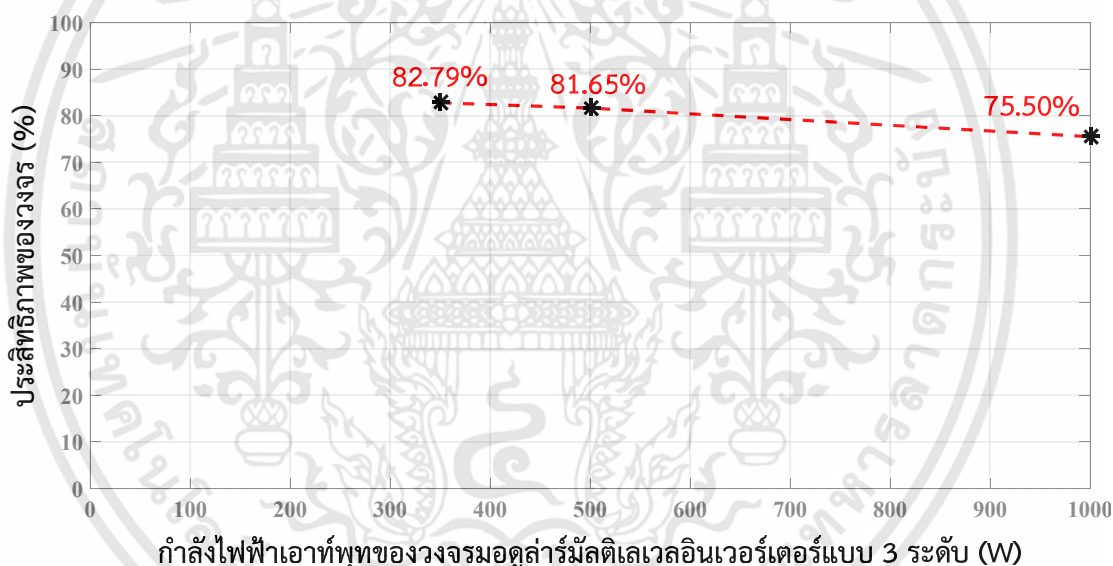


รูปที่ 5.39 แรงดันไฟฟ้า PWM ระหว่างเฟสของวงจรมอเตอร์มีลิตเลเวลอินเวอร์เตอร์
ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ

วงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ดังนั้น กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่จ่ายให้กับระบบไฟฟ้าจึงมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ จากการทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 350 W, 500 W และ 1,000 W สามารถแสดงประสิทธิภาพของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ที่ขนาดกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 5.40 ที่กำลังไฟฟ้า 350 W กำลังไฟฟ้าอินพุตของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 422.19 W ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 349.53 W สามารถคำนวณประสิทธิภาพได้ 82.79% ที่กำลังไฟฟ้า 500 W กำลังไฟฟ้าอินพุตของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 614.17 W ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 501.48 W สามารถคำนวณประสิทธิภาพได้ 81.65% และที่กำลังไฟฟ้า 1,000 W กำลังไฟฟ้าอินพุตของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 1,324.50 W ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 999.96 W และสามารถคำนวณประสิทธิภาพได้ 75.50%



รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เข้าสู่ระบบไฟฟ้า

5.4 การประเมินประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ส่วนประกอบของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยวงจรเอชบริดจ์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ หม้อแปลงความถี่สูง และวงจรมอดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ โดยประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าขนาด 350 W, 500 W และ 1,000 W เท่ากับ 74.38%, 70.72% และ 60.40% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ตารางที่ 5.3 และตารางที่ 5.4 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตกับประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าพิกัดต่าง ๆ เข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.41

ตารางที่ 5.2 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 350 W

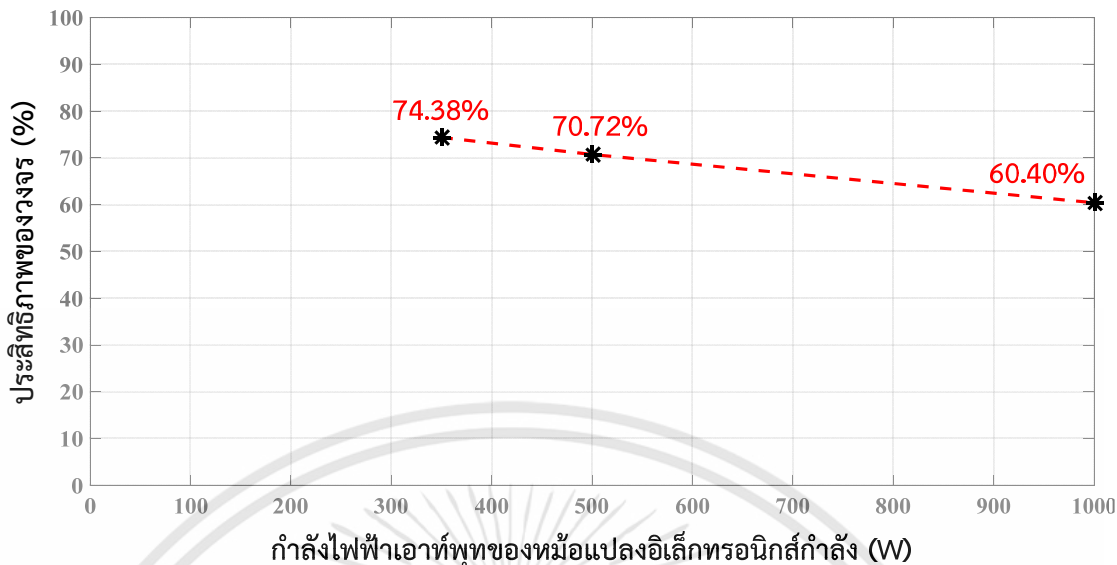
วงจรของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง			ประสิทธิภาพ (%)
	อินพุต (W)	เอาต์พุต (W)	การสูญเสีย (W)	
1. วงจร CHB	469.91	428.51	41.40	91.19%
2. หม้อแปลง HFT	428.51	422.62	5.89	98.64%
3. วงจร MMI	422.19	349.53	72.66	82.79%
ทั้งวงจร	469.91	349.53	120.38	74.38%

ตารางที่ 5.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 500 W

วงจรของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง			ประสิทธิภาพ (%)
	อินพุต (W)	เอาต์พุต (W)	การสูญเสีย (W)	
1. วงจร CHB	709.15	631.36	77.79	89.03%
2. หม้อแปลง HFT	631.36	614.88	16.48	97.39%
3. วงจร MMI	614.17	501.48	112.69	81.65%
ทั้งวงจร	709.15	501.48	207.67	70.72%

ตารางที่ 5.4 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,000 W

วงจรของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง			ประสิทธิภาพ (%)
	อินพุต (W)	เอาต์พุต (W)	การสูญเสีย (W)	
1. วงจร CHB	1655.47	1411.29	244.18	85.25%
2. หม้อแปลง HFT	1,411.29	1,326.05	85.24	93.96%
3. วงจร MMI	1,324.50	999.96	324.54	75.50%
ทั้งวงจร	1,655.47	999.96	655.51	60.40%



รูปที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าพิกัดต่าง ๆ เข้าสู่ระบบไฟฟ้า

5.5 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการดำเนินงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วยการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ การทำงานของหม้อแปลงความถี่สูง และการทำงานของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ โดยนำเสนอรูปคลื่นสัญญาณการทำงานและประเมินประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 350 W, 500 W และ 1,000 W ตามลำดับ ในลำดับต่อไปจะเป็นการนำเสนอตัวอย่างฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม ได้แก่ การตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ และการเพิ่มเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าจริงของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะถูกนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 6

ฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

6.1 บทนำ

จากข้อได้เปรียบในเรื่องฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มจึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม ได้แก่ การตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ [50] และการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์ [51] สำหรับการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์จะใช้เทคนิค Box Plot ในการตรวจจับความผิดปกติการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อลดเวลาในการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ในโซลาร์ฟาร์ม สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ทำให้การสูญเสียรายได้ของเจ้าของโซลาร์ฟาร์มมีค่าลดลง ส่วนการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์จะใช้เทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกันของคอนเวอร์เตอร์ภายในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อเกิดพอลท์หรือเกิดการรบกวนขึ้นกับระบบไฟฟ้า รายละเอียดต่าง ๆ ของฟังก์ชันการทำงานทั้ง 2 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

6.2 การตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์

ปัญหาความผิดปกติจากการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์เป็นปัญหาใหญ่ที่ทำให้เจ้าของโซลาร์ฟาร์มสูญเสียรายได้จากการขายไฟเป็นจำนวนมาก ดังนั้น เพื่อให้โซลาร์ฟาร์มสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ผลตอบแทนคุ้มค่ากับการลงทุนมากที่สุด โซลาร์ฟาร์มจึงควรมีระบบตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ ระบบการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี และช่วยให้การซ่อมแซมสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นการเพิ่มฟังก์ชันการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ให้กับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้เทคนิค Box Plot ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการพัฒนาระบบ และมีความแม่นยำสูงเมื่อปริมาณข้อมูลมีจำนวนมาก

6.2.1 เทคนิค Box Plot

Box Plot เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธีการทางสถิติในการกำหนดค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของข้อมูลโดยใช้ค่า Inclusive quartile ซึ่งตำแหน่งของค่า Quartile สามารถหาได้จากสมการที่ (6.1)

$$Q_k = \frac{k}{4}(n-1)+1 \quad (6.1)$$

โดยที่ k คือ ลำดับที่ของควอไทล์ ($k = 1, 2, 3$)

n คือ จำนวนของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (6.1) สามารถหาค่าตำแหน่งของ Q_1 และ Q_3 ได้จากสมการที่ (6.2) และ (6.3) และสามารถหาค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของ Box Plot ได้ดังสมการที่ (6.4) และ (6.5) ตามลำดับ

$$Q_1 = \frac{1}{4}(n-1) + 1 = 0.25(n-1) + 1 \tag{6.2}$$

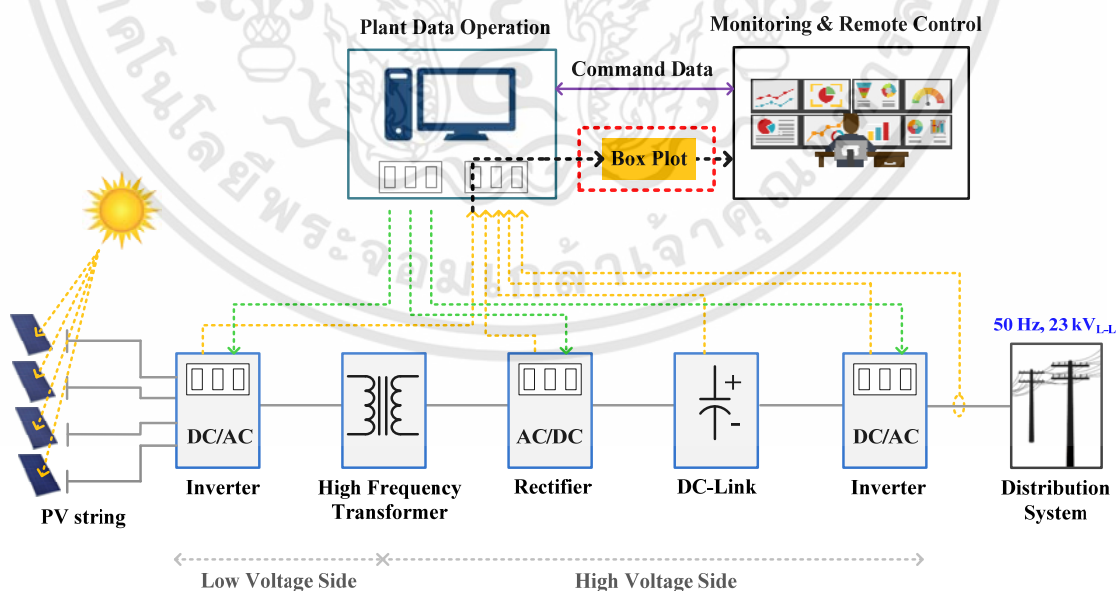
$$Q_3 = \frac{3}{4}(n-1) + 1 = 0.75(n-1) + 1 \tag{6.3}$$

$$\text{Upper bound} = Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \tag{6.4}$$

$$\text{Lower bound} = Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1) \tag{6.5}$$

6.2.2 การประยุกต์ใช้เทคนิค Box Plot กับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโซลาร์ฟาร์ม

การประยุกต์ใช้เทคนิค Box Plot กับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโซลาร์ฟาร์มสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 ในการตรวจสอบหาความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์นี้จะเป็นการตรวจสอบในระดับ String โดยนำกระแสของแต่ละ String ที่ถูกส่งมายัง Plant data operation มาเข้าโมเดล Box Plot เพื่อคำนวณและวิเคราะห์สถานะการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละ String ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถแสดงผลผ่านระบบ Monitoring หรือแสดงผลออนไลน์ผ่านเว็บไซต์ หรืออาจพัฒนาต่อยอดโดยการทำ Application ใช้งานบนโทรศัพท์มือถือ เพื่อแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับแผงโซลาร์เซลล์ ทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการแก้ไขปัญหาและช่วยลดการสูญเสียรายได้ของเจ้าของโซลาร์ฟาร์มให้มีค่าน้อยลง



รูปที่ 6.1 การประยุกต์ใช้เทคนิค Box Plot กับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโซลาร์ฟาร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

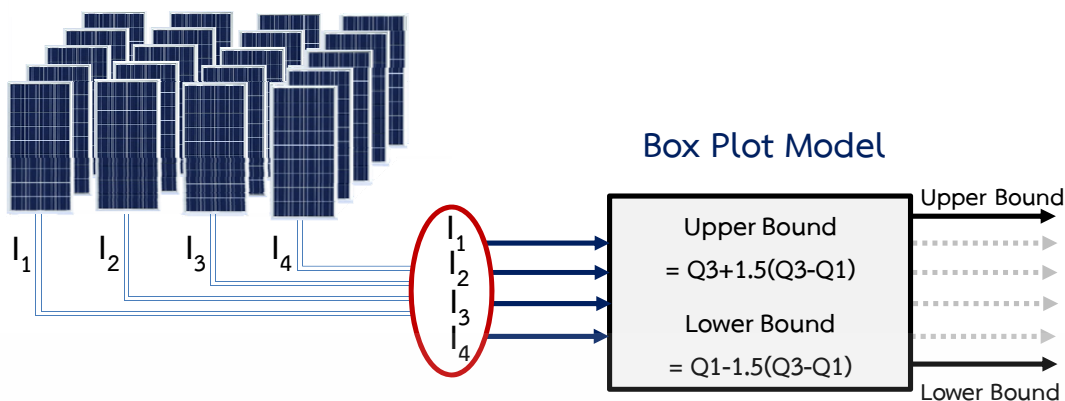
การตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเทคนิค Box Plot วิธีนี้สามารถตรวจสอบค่าที่มีความผิดปกติ (Outlier) หรือค่าที่อยู่นอกเหนือขอบเขตบนและขอบเขตล่างได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ความแตกต่างระหว่างข้อมูล โดยข้อมูลในสภาวะปกติที่นำมาใช้วิเคราะห์ต้องมีความแตกต่างกันไม่เกิน 25% นั้นหมายความว่า ค่ากระแสจาก PV string ทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ในสภาวะการทำงานปกติจะต้องมีความแตกต่างกันไม่เกิน 25%

6.2.3 การจำลองการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเทคนิค Box Plot

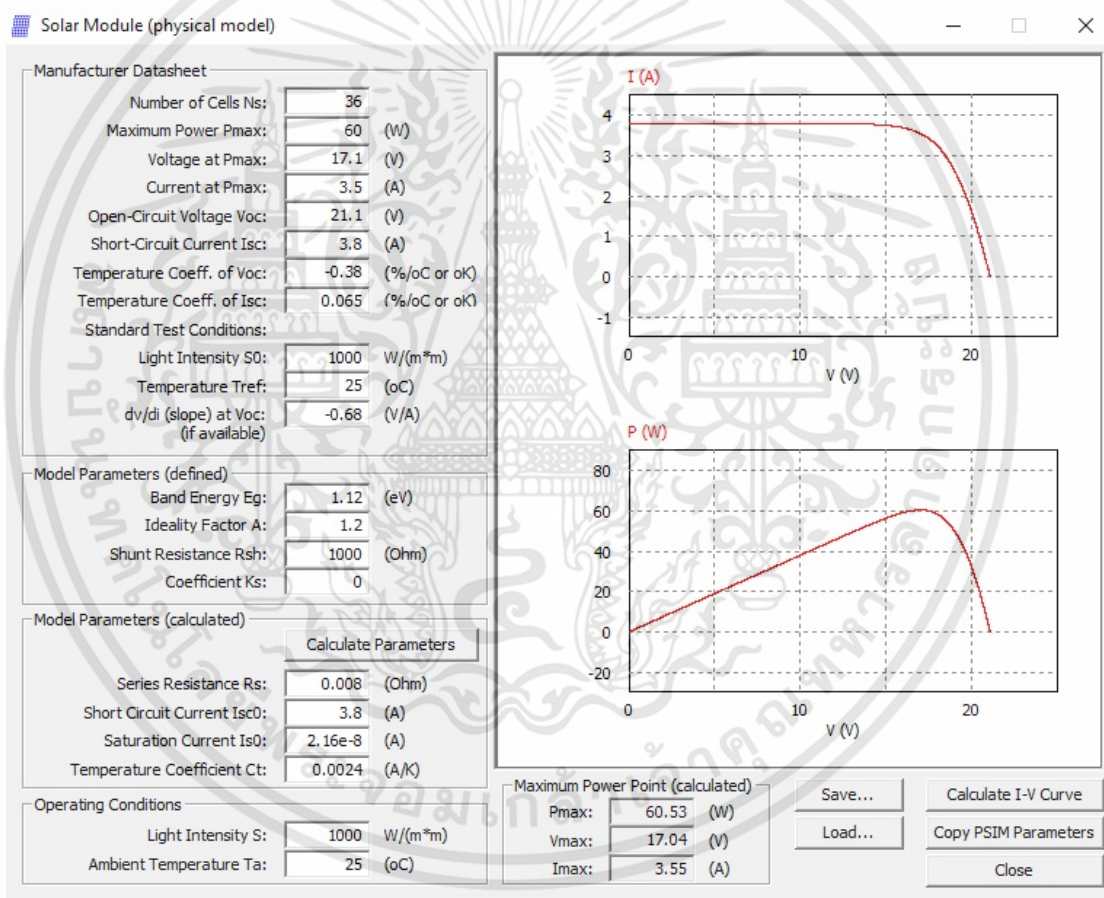
สำหรับการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้แบ่งสภาวะการทำงานออกเป็น 6 สภาวะ ได้แก่ สภาวะปกติ (Normal condition) สภาวะเปิดวงจร (Open circuit condition) สภาวะการเกิดฟอลต์แบบ Line-line (Line-line condition, Fault resistance = 0 Ω) สภาวะการเกิดฟอลต์แบบ Line-line ที่สามารถทำงานได้ (Line-line condition, Fault resistance = 20 Ω), สภาวะการเกิดเงาบัง (Partial shading condition) และสภาวะแผงโซลาร์เซลล์เสื่อมสภาพ (Degradation condition) ในขั้นแรกจะเป็นการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Power simulation (PSIM) เพื่อเก็บข้อมูล โดยสร้างกลุ่มวงจรย่อยของแผงโซลาร์เซลล์จำนวน 4 สตริง ในแต่ละสตริงมีการต่อแผงโซลาร์เซลล์อนุกรมกันจำนวน 5 แผง ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 สำหรับการจำลองการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละสตริงได้ทำการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ในทุก ๆ กรณีที่ทำการทดสอบ ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองของในแต่ละกรณีสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Box Plot โดยใช้ Code program ที่สร้างใน M-file ของโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งผลการจำลองที่ได้สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขการจำลองการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์

กรณีศึกษา	เงื่อนไข
Normal condition	การทำงานปกติ (Resistance = 0.008 Ω)
Open circuit condition	เปิดวงจรที่ String 1
Line-line condition	เกิดการลัดวงจรที่ String 1 (Fault resistance = 0 Ω)
Line-line condition	เกิดการลัดวงจรที่ String 1 (Fault resistance = 20 Ω)
Partial shading condition	กำหนดค่าความเข้มแสงที่ String 2 เท่ากับ 500 W/m ²
Degradation condition	เพิ่มค่าความต้านทานของ String 1 เท่ากับ 0.1 Ω



รูปที่ 6.2 แบบจำลองการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเทคนิค Box Plot

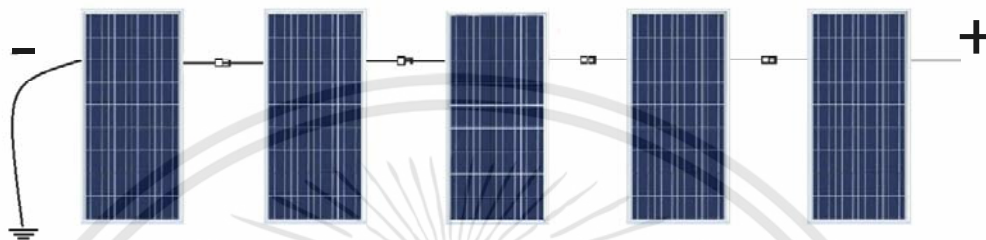


รูปที่ 6.3 ค่าพารามิเตอร์ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการจำลอง

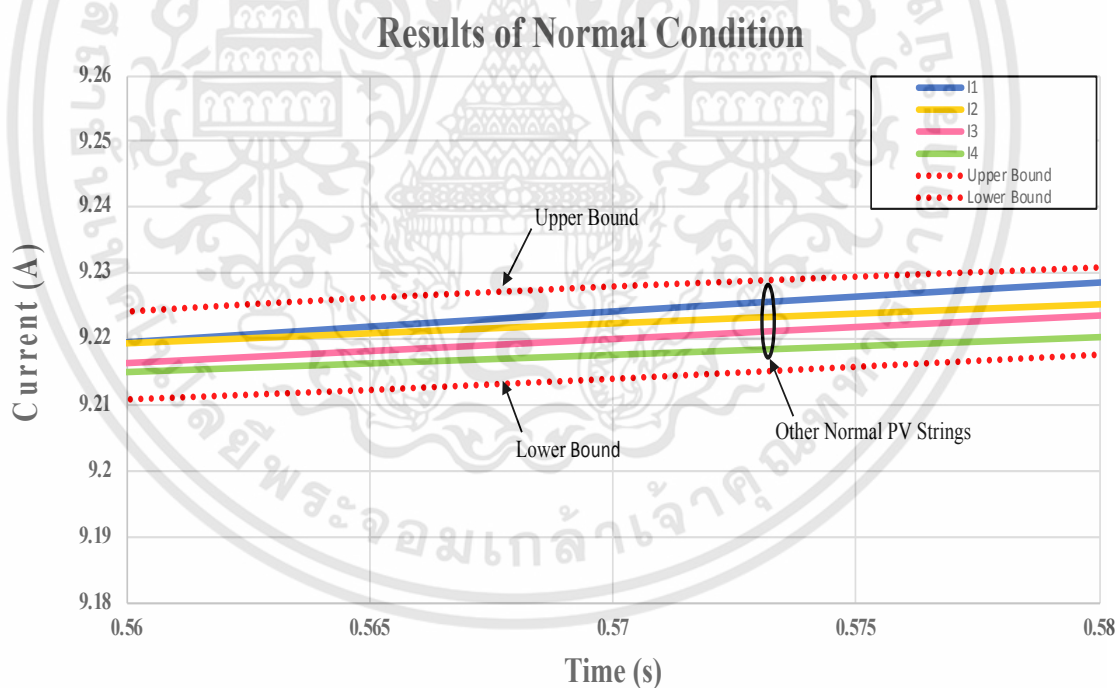
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.1 สภาวะปกติ

ในสภาวะนี้ แผงโซลาร์เซลล์ทุกสตริงจะทำงานปกติดังแสดงในรูปที่ 6.4 เมื่อนำค่ากระแสทุกสตริงมาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค Box Plot พบว่า ค่ากระแสทุกสตริงอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค Box Plot ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ไม่มีความผิดปกติใด ๆ เกิดขึ้นกับแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.4 วงจรแผงโซลาร์เซลล์ในสภาวะปกติ

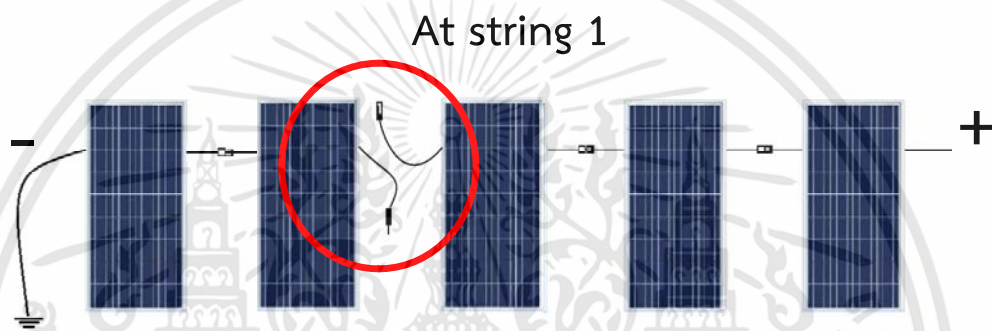


รูปที่ 6.5 ผลการจำลองสภาวะปกติ

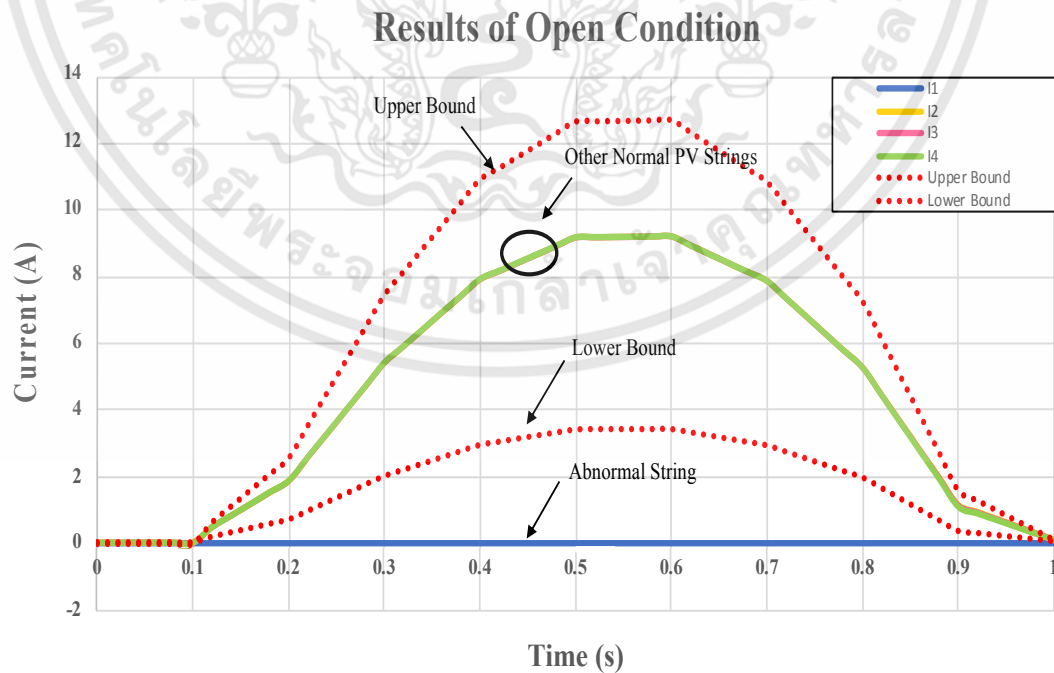
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.2 สภาวะเปิดวงจร

การเปิดวงจรอาจเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ เช่น สายไฟขาด คอนเนคเตอร์หลุด หรือ ฟิวส์ขาด เป็นต้น ในการจำลองได้กำหนดให้เกิดสภาวะเปิดวงจรที่สตริง 1 ดังแสดงในรูปที่ 6.6 เมื่อนำค่ากระแสทุกสตริงมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Box Plot พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าของสตริงที่ 2 สตริงที่ 3 และสตริงที่ 4 จะอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค Box Plot แต่ค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 1 จะอยู่นอกขอบเขตและมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากเกิดสภาวะเปิดวงจรที่สตริงนี้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เทคนิค Box Plot สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถตรวจจับความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ที่เกิดขึ้นที่สตริง 1 ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.6 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สภาวะเปิดวงจร



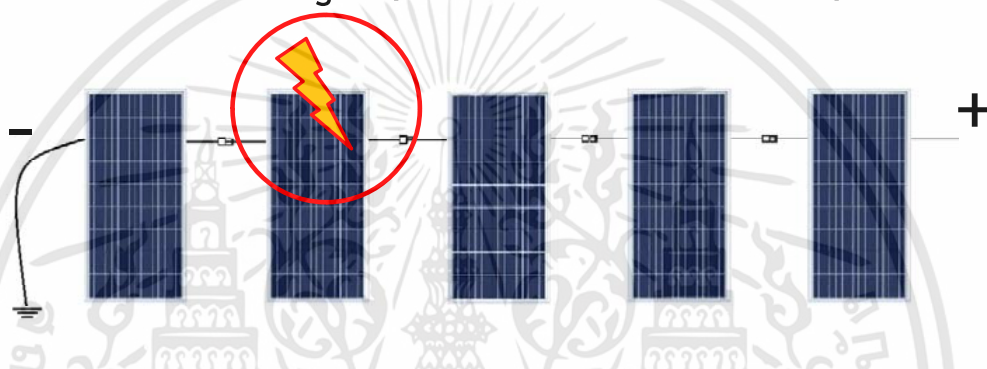
รูปที่ 6.7 ผลการจำลองสภาวะเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.3 สภาวะการเกิดฟอลต์แบบ Line-line (Fault resistance = 0 Ω)

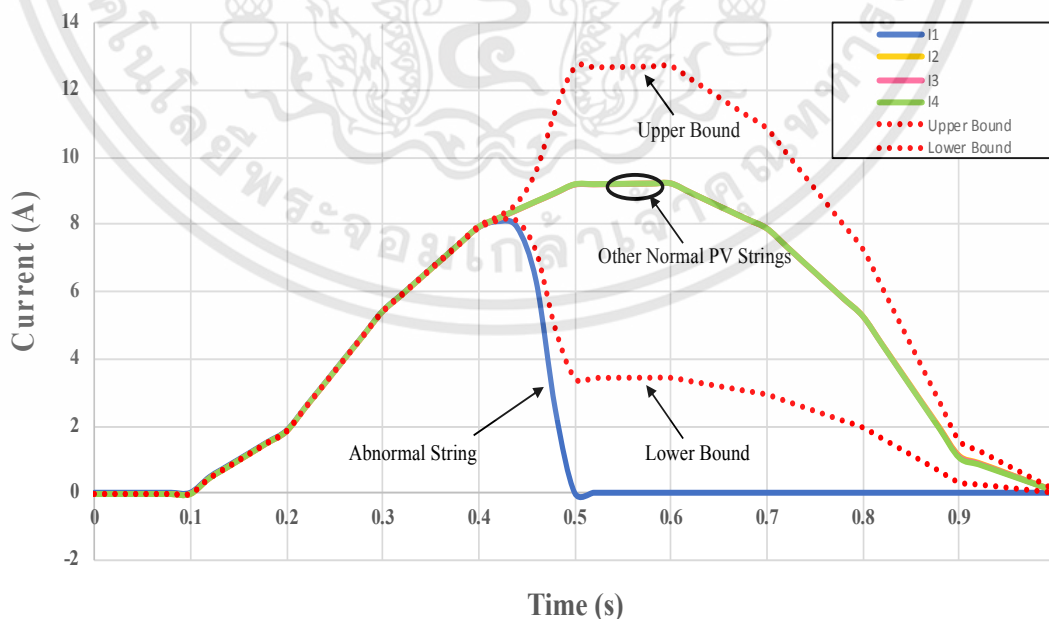
การเกิดฟอลต์แบบ Line-line เป็นการเกิดฟอลต์ที่มีความรุนแรง ซึ่งส่วนใหญ่เมื่อเกิดฟอลต์ในลักษณะนี้ เบรกเกอร์จะทริปหรือฟิวส์ขาดเพื่อตัดวงจรในส่วนที่เกิดฟอลต์ออกเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ ในการจำลองการทำงานสภาวะนี้ได้กำหนดให้เกิดฟอลต์ที่สตริง 1 ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ผลการจำลองที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 กระแสไฟฟ้าสตริง 1 ที่มีค่าเป็นศูนย์จะอยู่นอกช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เทคนิค Box Plot สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแผงโซลาร์เซลล์ในสตริง 1 เนื่องจากการเกิดฟอลต์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

At string 1 (Fault Resistance = 0 Ω)



รูปที่ 6.8 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สภาวะการเกิดฟอลต์แบบ Line-line (Rf = 0 Ω)

Results of Line-Line with Rf=0 ohms Condition



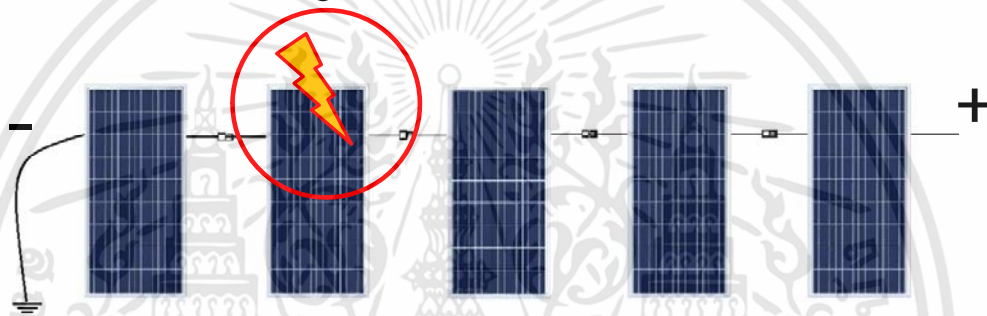
รูปที่ 6.9 ผลการจำลองสภาวะการเกิดฟอลต์แบบ Line-line (Rf = 0 Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.4 สภาวะการเกิดฟอลต์แบบ Line-line (Fault resistance = 20 Ω)

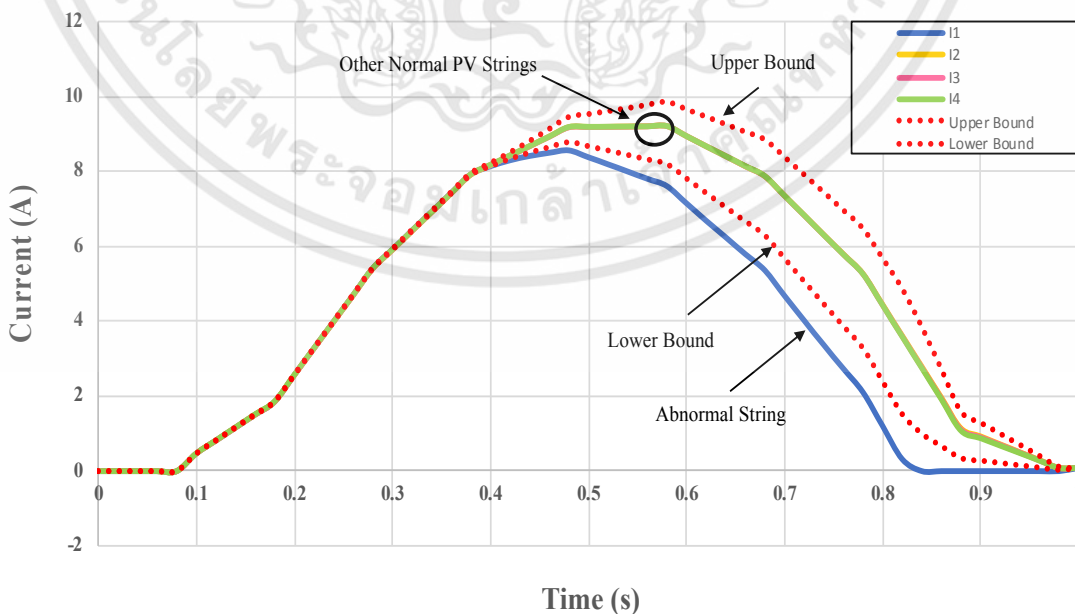
การจำลองในสภาวะนี้เป็นการเกิดฟอลต์แบบ Line-line ที่ระบบยังสามารถทำงานได้ โดยมีค่า Fault resistance = 20 Ω ซึ่งในการจำลองได้กำหนดให้เกิดฟอลต์ที่สตริง 1 ดังแสดงในรูปที่ 6.10 จากผลการจำลองดังรูปที่ 6.11 พบว่า เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่สตริง 1 ค่ากระแสไฟฟ้าของสตริงที่ 1 จะลดลงและอยู่นอกช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่างของ Box Plot ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าของสตริงที่ 2 สตริงที่ 3 และสตริงที่ 4 ยังคงอยู่ในขอบเขตบนและขอบเขตล่าง การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค Box Plot แสดงให้เห็นว่า เทคนิค Box Plot สามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่สตริง 1 ได้ ถึงแม้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าของสตริง 1 จะมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสไฟฟ้าของสตริงอื่น ๆ ก็ตาม

At string 1 (Fault Resistance = 20 Ω)



รูปที่ 6.10 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สภาวะการเกิดฟอลต์แบบ Line-line ($R_f = 20 \Omega$)

Results of Line-Line with $R_f=20$ ohms Condition

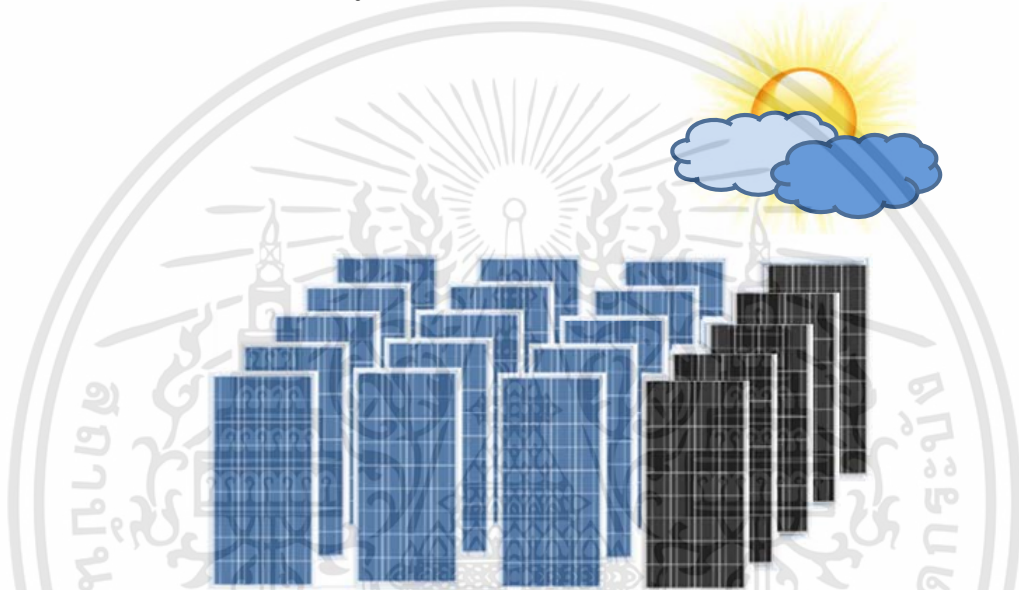


รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสภาวะการเกิดฟอลต์แบบ Line-line ($R_f = 20 \Omega$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

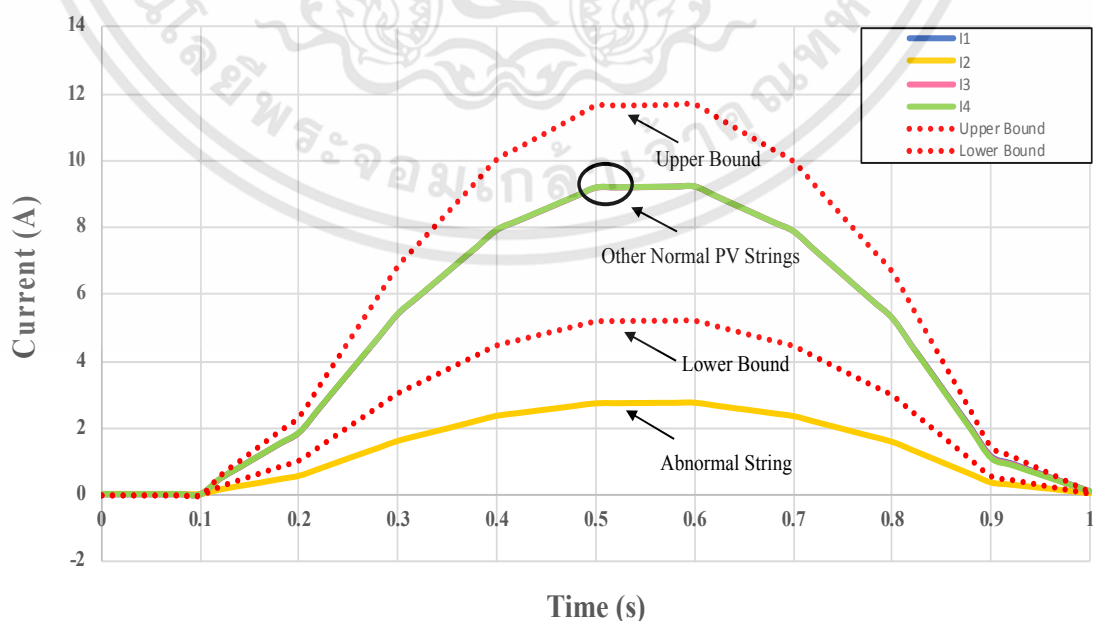
6.2.3.5 สภาวะการเกิดเงาบัง

การจำลองในสภาวะนี้เป็นการจำลองความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์เนื่องจากปรากฏการณ์เงาบัง โดยกำหนดให้เกิดสภาวะเงาบังขึ้นกับแผงโซลาร์เซลล์ในสตริงที่ 2 ส่วนการทำงานของสตริงที่ 1 สตริงที่ 3 และสตริงที่ 4 เป็นไปตามปกติ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 6.12 ในการจำลองนั้นได้กำหนดให้ความเข้มแสงของสตริงที่เกิดสภาวะเงาบังมีค่าเท่ากับ 500 W/m^2 ส่วนค่าความเข้มแสงในสตริงอื่น ๆ ที่ทำงานปกติมีค่าเท่ากับ $1,100 \text{ W/m}^2$ เมื่อวิเคราะห์ผลการจำลองที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.13 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสตริงที่ 1 สตริงที่ 3 และสตริงที่ 4 นั้นมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ส่วนกระแสไฟฟ้าสตริงที่ 2 ที่ถูกลดความเข้มแสงลงจะมีความผิดปกติ และอยู่นอกขอบเขตที่สร้างด้วยเทคนิค Box Plot



รูปที่ 6.12 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สภาวะการเกิดเงาบัง

Results of Partial Shading Condition

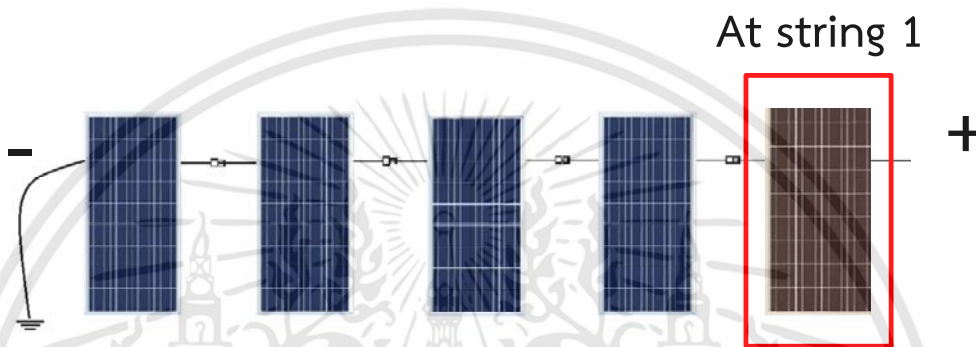


รูปที่ 6.13 ผลการจำลองสภาวะการเกิดเงาบัง

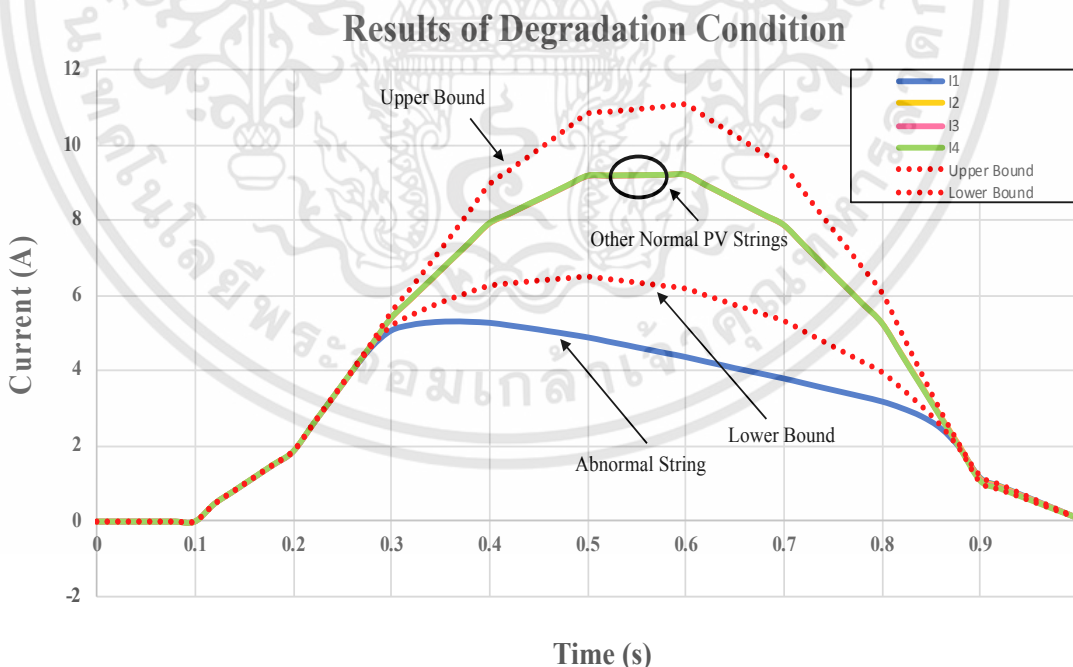
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3.6 สภาวะแผงโซลาร์เซลล์เสื่อมสภาพ

เมื่อโซลาร์เซลล์เสื่อมสภาพ ค่าความต้านทานของแผงโซลาร์เซลล์จะมีค่าสูงขึ้น การเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์อาจเกิดขึ้นเพียงหนึ่งแผงดังแสดงในรูปที่ 6.14 หรืออาจเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งแผงก็ได้ ในการจำลองการทำงานในสภาวะนี้ได้ทำการเพิ่มค่าความต้านทานอนุกรมของสตริงที่ 1 ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 Ω และเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Box Plot สามารถแสดงให้เห็นว่าเกิดความผิดปกติขึ้นกับแผงโซลาร์เซลล์สตริงที่ 1 โดยค่ากระแสไฟฟ้าของสตริงที่ 1 จะอยู่นอกขอบเขตและมีค่าต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าสตริงอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.14 วงจรแผงโซลาร์เซลล์สภาวะแผงโซลาร์เซลล์เสื่อมสภาพ



รูปที่ 6.15 ผลการจำลองสภาวะแผงโซลาร์เซลล์เสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์

ในปัจจุบัน พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกได้ถูกนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างเป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีต้นทุนเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า (เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานแสงอาทิตย์) ถึงแม้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกจะมีข้อดีหลายอย่างมากมาย แต่พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกก็ยังมีข้อด้อยในเรื่องของความไม่สม่ำเสมอของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และเป็นปัญหาที่สำคัญต่อเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

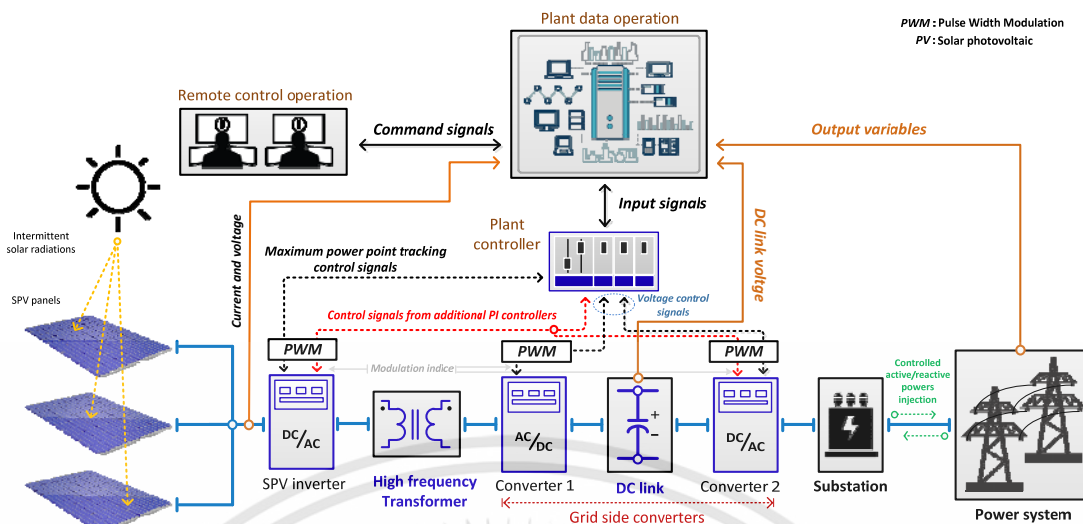
จากฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากแหล่งพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งในที่จะนำเสนอตัวอย่างฟังก์ชันการใช้งานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์สำหรับประยุกต์ใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์มเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์โดยการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในช่วงที่เกิดฟลอร์ทกับระบบไฟฟ้า สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้จะใช้เทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกัน (Coordinated control) ของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ตัว ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งได้แก่ คอนเวอร์เตอร์ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง คอนเวอร์เตอร์ฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง และคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

6.3.1 เทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกัน (Coordinated control)

การประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกันของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์มสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.16 ในที่นี้จะเป็นการควบคุมการทำงานที่ Substation ที่ได้ติดตั้งโซลาร์ฟาร์มไว้เป็นจำนวนมาก หรือรวมโซลาร์ฟาร์มขนาดย่อย ๆ ที่มีการติดตั้งอย่างกระจายเข้าไว้ด้วยกันเพื่อทำการควบคุมที่จุดเดียว (Solar photovoltaic, SPV) โดยไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จาก SPV จะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงด้วย SPV inverter และส่งผ่านหม้อแปลงความถี่สูง (High frequency transformer) ไปยังคอนเวอร์เตอร์ 1 (Converter 1) เพื่อทำการเรียงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและเก็บสะสมพลังงานไว้ที่ดีซีลิงค์ (DC link) พลังงานที่สะสมในดีซีลิงค์นี้จะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 (Converter 2) เพื่อเชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์ฟาร์มซึ่งแปรผันตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (Solar radiation) และข้อมูลต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าจะถูกวัดและส่งค่ามายังศูนย์ควบคุมการทำงาน (Plant data operation, PDO) เช่น ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าสัญญาณการควบคุมการทำงานของแต่ละ Substation เป็นต้น ค่าต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกประมวลผลและใช้สร้างสัญญาณควบคุมการทำงานให้กับตัวควบคุม PI (PI controller) ของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ตัว ได้แก่ ตัวควบคุม PI ของ SPV inverter ตัวควบคุม PI ของ Converter 1 และตัวควบคุม PI ของ Converter 2 ซึ่งข้อดีของเทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกัน คือ ช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เกิดความยืดหยุ่นในการควบคุมการทำงานของตัวควบคุม PI ของคอนเวอร์เตอร์แต่ละตัว และสามารถแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะมีการนำเสนอในลำดับถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.16 การประยุกต์ใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

6.3.2 การควบคุมการทำงานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

การควบคุมการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในที่นี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมการทำงานของ SPV inverter ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงดังแสดงในรูปที่ 6.17 และการควบคุมการทำงานของ Converter 1 และ Converter 2 ที่อยู่ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง หรือ SST ดังแสดงในรูปที่ 6.18 สำหรับการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้ จะใช้ตัวควบคุม PI แบบเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 6.19 เป็นตัวควบคุมการทำงาน

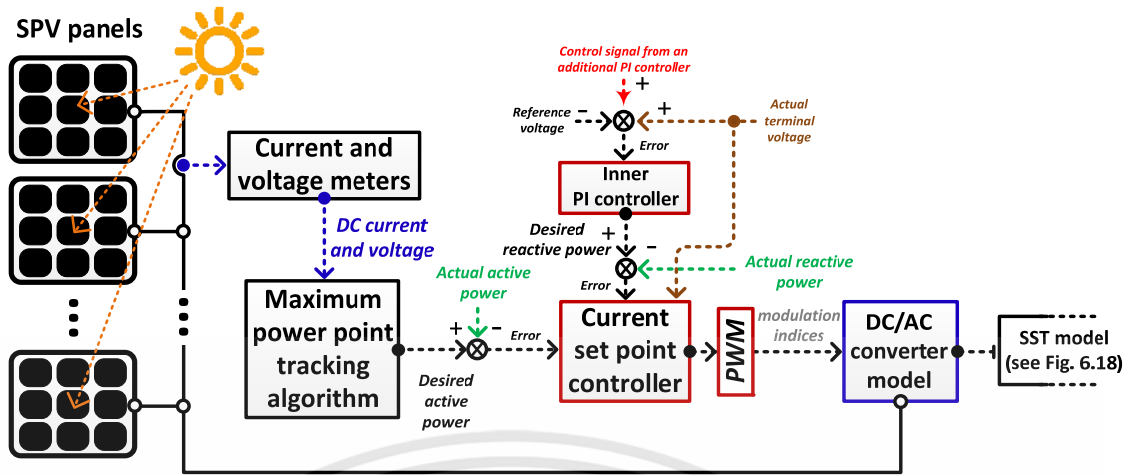
6.3.2.1 การควบคุมการทำงานของ SPV inverter

การควบคุมการทำงานของ SPV inverter ประกอบด้วยตัวควบคุมการทำงาน 2 ตัวตัวหนึ่งเป็นการทำ Maximum power point tracking เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก SPV มีค่าสูงสุด โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ SPV เป็นสัญญาณอินพุท ส่วนอีกตัวหนึ่งเป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้า

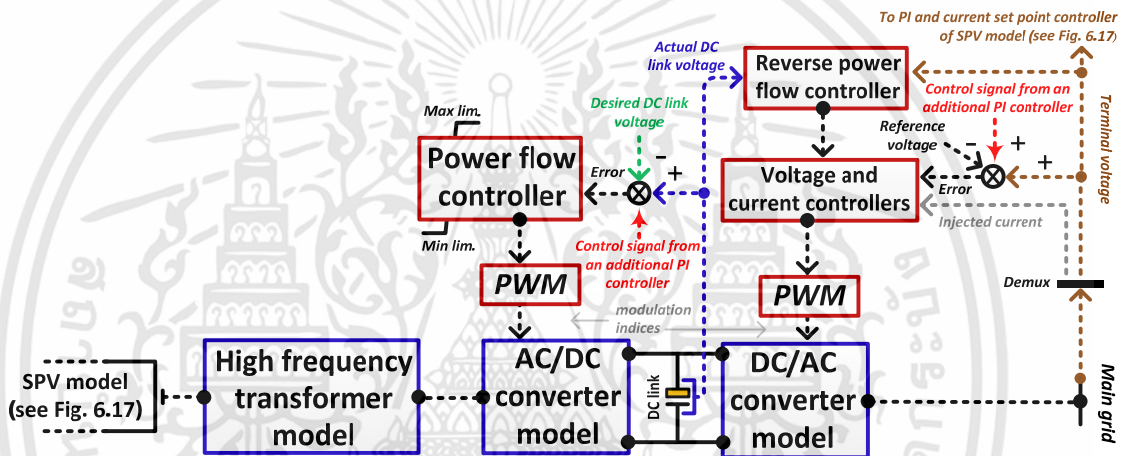
ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point tracking controller) จะสร้างสัญญาณควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงตามที่ระบบต้องการ (Desired active power) หลังจากนั้นสัญญาณควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณกำลังไฟฟ้าที่วัดจริงจาก SPV (Actual active power) ค่า error ที่ได้จากการเปรียบเทียบจะถูกส่งไปที่ตัวควบคุมกระแส (Current set point controller) เพื่อปรับค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของ SPV

ในส่วนของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน จะใช้สัญญาณ error ที่ได้จากการเปรียบเทียบของสัญญาณตัวควบคุม PI สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากระบบไฟฟ้า และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง เป็นสัญญาณอินพุท ซึ่งสัญญาณจากตัวควบคุม PI ที่ถูกนำมาใช้งานใน loop การควบคุมนี้จะทำหน้าที่ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงของระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดการรบกวนขนาดใหญ่ สำหรับเอาท์พุทที่ออกจากตัวควบคุมนี้จะถูกเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนจริงที่วัดได้จากระบบไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง ก่อนจะส่งสัญญาณ error ไปที่ตัวควบคุมกระแส (Current set point controller) เช่นเดียวกับ ค่า error ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 การควบคุมการทำงานของ SPV inverter



รูปที่ 6.18 การควบคุมการทำงานของ SST

กำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบต้องการ (Desired active power) กับสัญญาณกำลังไฟฟ้าที่วัดจริงจาก SPV (Actual active power) และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากระบบไฟฟ้า เพื่อใช้สร้างสัญญาณ PWM ในการควบคุมการทำงานของ DC/AC converter หรือ SPV inverter

6.3.2.2 การควบคุมการทำงานของ SST

การควบคุมการทำงานของ SST ที่ประกอบด้วย Converter 1 และ Converter 2 จะใช้ตัวควบคุมหลักทั้งหมด 3 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.18

ตัวควบคุมตัวที่หนึ่งเป็นตัวควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow controller) ตัวควบคุมนี้จะเป็นตัวสร้างสัญญาณ PWM ให้กับวงจร AD/DC converter หรือ Converter 1 โดยมีสัญญาณอินพุท คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากดีซีลิงค์ สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม PI และสัญญาณแรงดันดีซีลิงค์อ้างอิง

ตัวควบคุมตัวที่สองเป็นตัวควบคุมการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้า (Reverse power flow controller) สัญญาณอินพุทของตัวควบคุมนี้จะใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากดีซีลิงค์และสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม PI เมื่อทำการประมวลผลเรียบร้อยแล้ว สัญญาณเอาต์พุท

ที่ได้จะถูกใช้เป็นสัญญาณอินพุทของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (Voltage and current controllers) ที่ใช้สร้างสัญญาณ PWM ให้กับ Converter 2

ตัวควบคุมตัวที่สาม คือ ตัวควบคุมแรงดันและกระแส (Voltage and current controllers) สัญญาณอินพุทของตัวควบคุมนี้จะได้จากสัญญาณเอาต์พุทของตัวควบคุมตัวที่สองหรือตัวควบคุมการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้แล้ว สัญญาณอินพุทที่ถูกนำมาใช้ประมวลผลอีกสัญญาณหนึ่ง คือ สัญญาณ error ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม PI สัญญาณแรงดันอ้างอิงของระบบไฟฟ้า และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากระบบไฟฟ้า เมื่อตัวควบคุมทำการประมวลผลเรียบร้อยแล้วจะทำการสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของ DC/AC converter หรือ Converter 2

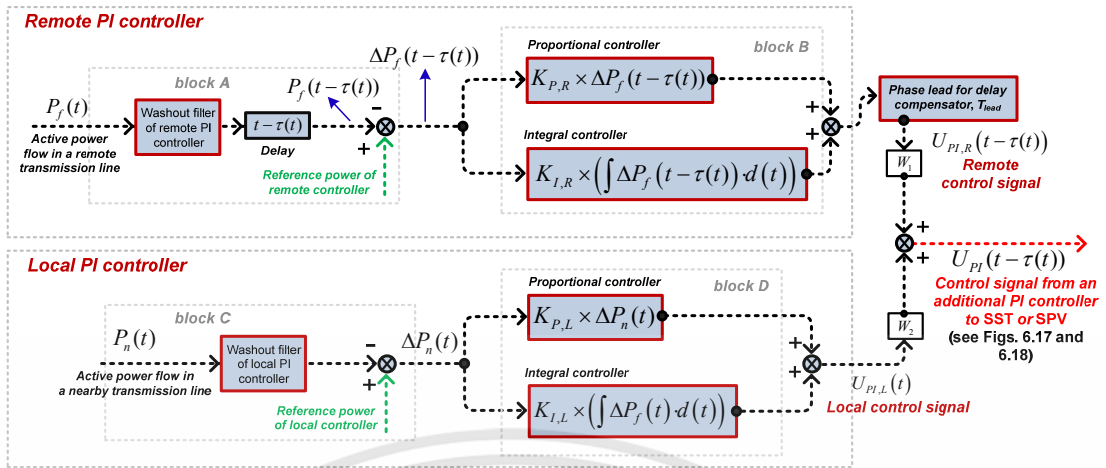
6.3.2.3 ตัวควบคุม PI

ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ตัวควบคุม PI ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.19 ภายในตัวควบคุม PI นี้ จะประกอบด้วยตัวควบคุม PI ย่อย 2 ตัว ได้แก่ Remote PI controller และ Local PI controller ซึ่งหลักการการทำงานของตัวควบคุม PI สามารถอธิบายได้ดังนี้

สัญญาณอินพุทของ Remote PI controller จะประกอบด้วยสัญญาณการควบคุมกำลังไฟฟ้าในสายส่งอ้างอิงและสัญญาณจริงที่ส่งมาจากศูนย์กลางการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับสัญญาณการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานจริงที่ถูกส่งมาจากศูนย์กลางการควบคุมนั้น จะเกิดการตีเลย์ของสัญญาณซึ่งสามารถแสดงได้ดัง Block A หลังจากนั้นสัญญาณเอาต์พุทที่ได้จาก Block A จะถูกปรับจูนด้วยค่า K_p และ K_i ดังแสดงใน Block B และสัญญาณเอาต์พุทที่ได้จาก Block B จะถูกชดเชยด้วยพารามิเตอร์การตีเลย์ของสัญญาณ (T_{lead}) เพื่อให้ Remote PI controller สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับ Local PI controller จะมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับ Remote PI controller แต่ไม่มีการตีเลย์ของสัญญาณเนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้นั้นอยู่ในระยะใกล้ ๆ โดยสัญญาณอินพุทของ Local PI controller คือ ค่ากำลังไฟฟ้าอ้างอิงและค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากบัสที่มีการติดตั้งหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการทำงานร่วมกับโซลาร์ฟาร์มซึ่งสามารถแสดงได้ดัง Block C สัญญาณเอาต์พุทที่ได้จาก Block C จะถูกปรับจูนด้วยค่า K_p และ K_i ดังแสดงใน Block D ซึ่งสัญญาณเอาต์พุทที่ได้จาก Block D จะเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างสัญญาณของตัวควบคุม PI ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของคนเวอร์เตอร์ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เมื่อได้สัญญาณเอาต์พุทจาก Remote PI controller และ Local PI controller แล้ว สัญญาณเอาต์พุททั้ง 2 นี้จะถูกคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักตามความสำคัญ (W) หรือหากต้องการใช้งานตัวควบคุม PI เพียงชนิดเดียว สามารถกำหนดค่าน้ำหนักของตัวควบคุม PI ที่ไม่ต้องการใช้งานให้มีค่าเป็น 0 และกำหนดค่าน้ำหนักของตัวควบคุม PI ที่ต้องการใช้งานให้มีค่าเป็น 1 โดยในที่นี้ได้กำหนดให้ค่าน้ำหนักของ Remote PI controller มีค่าเท่ากับ 1 ($W_1 = 1$) และกำหนดให้ค่าน้ำหนักของ Local PI controller มีค่าเท่ากับ 0.25 ($W_2 = 0.25$) โดยให้ความสำคัญกับตัวควบคุม Remote PI controller มากกว่า เนื่องสัญญาณการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ถูกส่งมาจากศูนย์กลางการควบคุมของระบบไฟฟ้าจะมีสัญญาณการควบคุมการทำงานที่ซับซ้อน ๆ ด้วย ดังนั้น ตัวควบคุม Remote PI controller จึงสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าทั้งระบบได้ดีกว่าตัวควบคุม Local PI controller



รูปที่ 6.19 ตัวควบคุม PI

6.3.3 การออกแบบเงื่อนไขการควบคุมการทำงานร่วมกันเพื่อให้เกิดความเหมาะสมที่สุด

ในการใช้ตัวควบคุม PI เพื่อควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้านั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ ประสิทธิภาพการทำงาน ราคาของตัวควบคุม PI และความสามารถในการทำงานของตัวควบคุม PI เป็นต้น นั้นหมายความว่า ถ้าตัวควบคุม PI มีประสิทธิภาพดี จะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์ได้เป็นอย่างดี แต่ราคาของตัวควบคุม PI ก็จะมีค่อนข้างสูง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าใช้ตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพต่ำ อาจทำให้การลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์ได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร แต่ราคาของตัวควบคุม PI ก็จะถูกลง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบตัวควบคุม PI อย่างเหมาะสม เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์ให้มีค่าต่ำสุด และลดภาระการทำงานของตัวควบคุม PI ให้มีค่าต่ำสุด ซึ่งเป้าหมายในการออกแบบตัวควบคุมคือ ตัวควบคุมไม่จำเป็นต้องทำงานมาก แต่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าให้มีค่าต่ำสุด

เพื่อให้ตัวควบคุม PI สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมที่สุด จึงจำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวควบคุม PI ซึ่งได้แก่ $K_{P,R}$, $K_{P,L}$, T_{lead} , $K_{I,R}$ และ $K_{I,L}$ ซึ่งสมการพื้นที่ใต้กราฟของกำลังไฟฟ้าที่เกิดการแกว่ง ($ITAE_{P_f}$) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6.6) และสมการกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของตัวควบคุม ($ITAE_{U_{PI}}$) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 6.7

$$ITAE_{P_f} = \int_{t=t_d}^{t_f} ((t_f - t_d) \times |\Delta P_f(t - \tau(t))|) \cdot dt \tag{6.6}$$

ในสมการที่ (6.6) การตีเลยของสัญญาณมีผลต่อสัญญาณการแกว่งของกำลังไฟฟ้า P_f โดยกำหนดให้ t_d เป็นเวลาที่มีการเกิดฟลท์หรือเกิดการรบกวนของระบบไฟฟ้า และ t_f เป็นเวลาสิ้นสุดการเกิดฟลท์หรือเกิดการรบกวนของระบบไฟฟ้า

$$ITAE_{U_{PI}} = \sum_{i=1}^{nPI} \left(\int_{t=t_d}^{t_f} ((t_f - t_d) \times |U_{PI,i}(t - \tau(t))|) \cdot dt \right) \tag{6.7}$$

สำหรับสมการที่ (6.7) เป็น สมการลดภาระงานของตัวควบคุม โดย U_{PI} คือ สัญญาณเอาต์พุตตัวควบคุม i^{th} คือ ลำดับที่ของตัวควบคุม และ nPI คือ จำนวนตัวควบคุมทั้งหมด

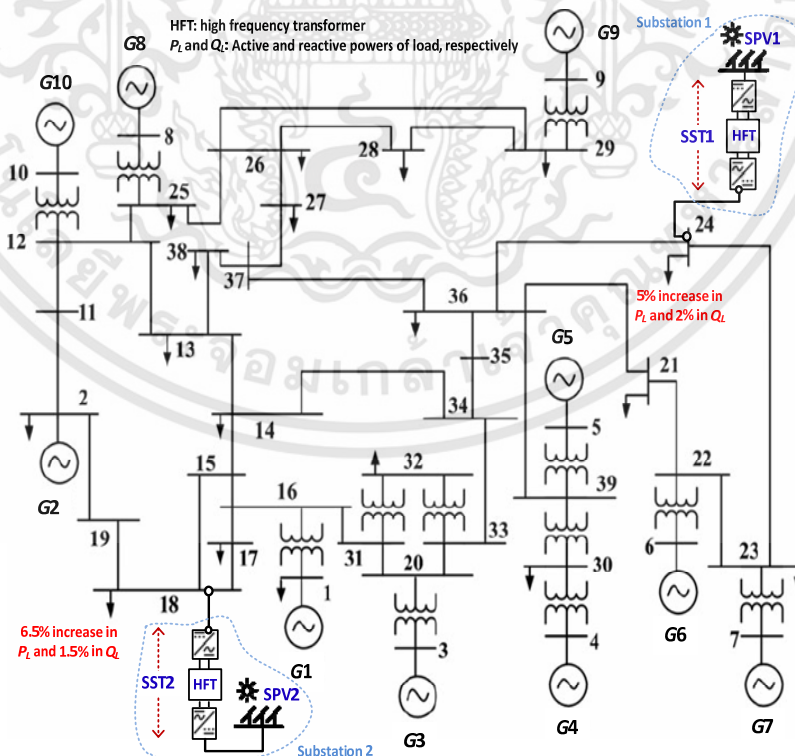
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (6.6) และสมการที่ (6.7) สามารถเขียนสมการจุดประสงค์การแกว่งของกำลังไฟฟ้าและมีการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าที่ตัวควบคุมได้ดังสมการที่ (6.8) โดยที่ η_1 คือ ค่าน้ำหนักของ Remote PI controller และ η_2 คือ ค่าน้ำหนักของ Local PI controller ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้ค่า $\eta_1=3$ และ $\eta_2=1$ โดยให้ความสำคัญกับ Remote PI controller มากกว่า เนื่องจาก Remote PI controller เป็นการควบคุมการแกว่งกำลังไฟฟ้าของระบบในสถานะทรานเซียนต์

$$F(t, \tau) = \eta_1 / IAE_{P_f} + \eta_2 / IAE_{U_{PI}} \quad (6.8)$$

6.3.4 การจำลองการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์

การจำลองการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำงานร่วมกับโซลาร์ฟาร์มสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.20 ในที่นี้ได้ใช้ระบบ IEEE 39 Bus ในการทดสอบการทำงานของระบบ สำหรับระบบ IEEE 39 Bus เป็นระบบมาตรฐานและเป็นที่ยอมรับในการจำลองเกี่ยวกับการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 10 เครื่อง และบัสจำนวน 39 บัส โดยในการจำลองได้ทำการติดตั้งหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำงานร่วมกับโซลาร์ฟาร์มจำนวน 2 ชุด ที่บัส 24 และบัสที่ 18 โดยโซลาร์ฟาร์มทั้ง 2 ชุดนี้เกิดจากการรวมกันของโซลาร์ฟาร์มขนาดย่อยและขนาดใหญ่เข้าไว้ด้วยกันซึ่งมีขนาด 200 MW และ 250 MW ตามลำดับ โหลดของระบบไฟฟ้ามีพิกัดกำลังไฟฟ้าจริง 6.097 GW มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน 1.401 GVar และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องมีการทำงานอย่างอัตโนมัติ มีตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าและตัวควบคุมกำลังไฟฟ้า ยกเว้น G2 ที่บัส 2 ซึ่งเกิดจากการรวมกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวนหลาย ๆ เครื่อง ดังนั้นหากเกิดฟอลท์ขึ้นในระบบไฟฟ้าจะทำให้กำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัสที่ 2 กับบัสที่ 19 เกิดการแกว่งอย่างรุนแรง หรือได้รับผลกระทบมากที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ๆ



รูปที่ 6.20 แบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบที่สร้างขึ้นนี้ถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ $K_{P,R}$, $K_{P,L}$, T_{lead} , $K_{I,R}$ และ $K_{I,L}$ ของตัวควบคุม PI ทั้ง 6 ตัว (ตัวควบคุม PI 1 ตัวจะควบคุมการทำงานคอนเวอร์เตอร์ 1 ตัว และในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 ชุด จะมีคอนเวอร์เตอร์ 3 ตัว ดังนั้น เมื่อติดตั้งหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2 ชุด จึงทำให้มีตัวควบคุม PI ทั้งหมด 6 ตัว) โดยใช้สมการที่ (6.8) เป็นสมการจุดประสงค์ เพื่อให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์และภาระการทำงานของตัวควบคุมมีค่าต่ำสุด

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวควบคุม PI ทั้ง 6 ตัว จะถูกหาด้วยวิธีการ PSO (Particle swam optimization) โดยกำหนดประชากรสุ่มเริ่มต้นจำนวน 100 ประชากร ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อยู่ในช่วง $0.1 \leq (K_{P,R}, K_{I,R}, K_{P,L}, K_{I,L}) \leq 25$ และ $0.425 \leq (T_{lead}) \leq 0.525$ อัตราการเรียนรู้เป็น 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ ทำการจำลองซ้ำจำนวน 500 ครั้ง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้สมการจุดประสงค์มีค่าต่ำสุดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.2

ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ สัญญาณควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุม Remote PI controller จะถูกส่งมาจากศูนย์กลางการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วยสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณควบคุมจริง เพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงานจริงที่มีการดีเลย์ของสัญญาณ สัญญาณที่ใช้ในการจำลองนั้นจึงเป็นสัญญาณที่มีการดีเลย์ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.21 (a) โดยดีเลย์ 450 ms ในช่วงวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 32 และดีเลย์ 475 ms ในช่วงวินาทีที่ 33 ถึงวินาทีที่ 60 นอกจากนี้ยังกำหนดให้โหลดโปรไฟล์ของโซลาร์ฟาร์มที่ใช้ในการจำลองการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 2 ชุด มีค่าแตกต่างกัน โดยกำหนดให้ความเข้มแสงของโซลาร์ฟาร์มที่ 1 มีค่ามากกว่าความเข้มแสงของโซลาร์ฟาร์มที่ 2 อยู่ 150 W/m^2 และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอยู่ในช่วง $\pm 50 \text{ W/m}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 6.21 (b) และเพิ่มเงื่อนไขการจำลองอีก 1 สถานการณ์คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 5% และกำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้น 7% ดังแสดงในรูปที่ 6.20

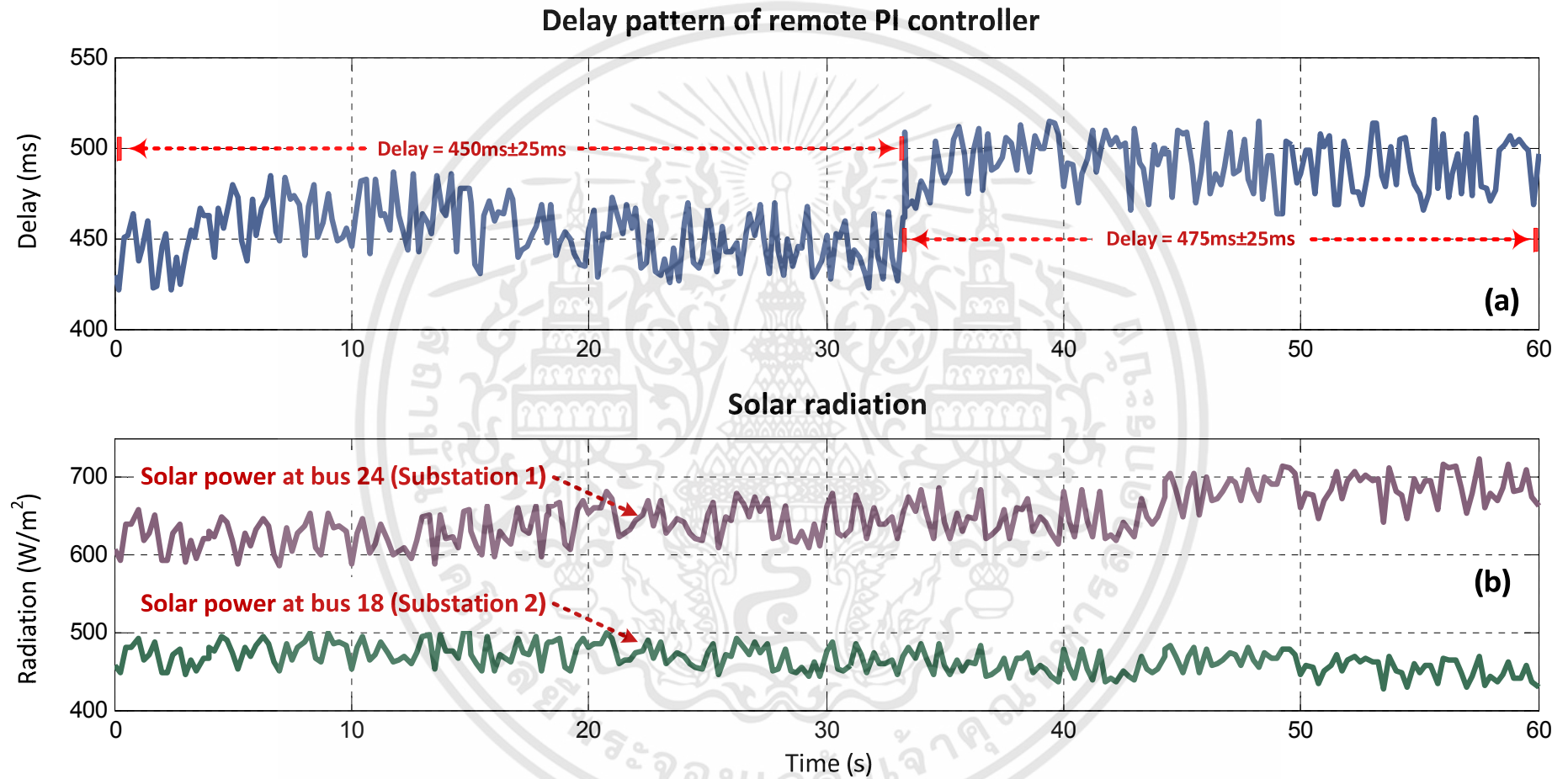
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากวิธี PSO มาควบคุมการทำงานคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 6 ตัว ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 2 ชุด สามารถแสดงผลการจำลองการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 19 ซึ่งเป็นบัสที่มีการแกว่งรุนแรงที่สุดได้ดังรูปที่ 6.22 ผลการจำลองพบว่า ที่วินาทีที่ 1 เมื่อเกิดการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ระหว่างบัสที่ 21 กับบัสที่ 36 ตัวควบคุมจะสามารถจัดการกับการแกว่งของกำลังไฟฟ้าให้เข้าสู่เสถียรภาพได้ภายใน 8 วินาที เทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกันของ SST กับ SPV จะให้ผลตอบสนองที่ดีมาก เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ถ้ามีการควบคุมการทำงานเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง การแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะมีค่าสูง และค่อย ๆ ลดลงจนเข้าสู่เสถียรภาพ

ที่วินาทีที่ 20 เป็นการจำลองสถานการณ์การเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟส ที่บัส 14 และระบบไฟฟ้าสามารถเคลียร์ฟอลต์ให้สามารถกลับมาทำงานได้ในวินาทีที่ 20.12 ผลการจำลองพบว่า การควบคุมการทำงานทั้ง SST และ SPV จะสามารถควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี และลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าลงจนระบบสามารถเข้าสู่เสถียรภาพได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 10 วินาที ผิดกับระบบที่ไม่มีการควบคุมการทำงานหรือมีการควบคุมการทำงานเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น กำลังไฟฟ้าของระบบที่ไม่มีการควบคุมการทำงานจะแกว่งและไม่สามารถเข้าสู่เสถียรภาพได้ แต่ระบบที่มีการควบคุมเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง เมื่อเคลียร์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นแล้วระบบจะสามารถเข้าสู่เสถียรภาพได้ แต่กำลังไฟฟ้าที่แกว่งจะมีค่าสูง คือ 450 MW และ 190 MW

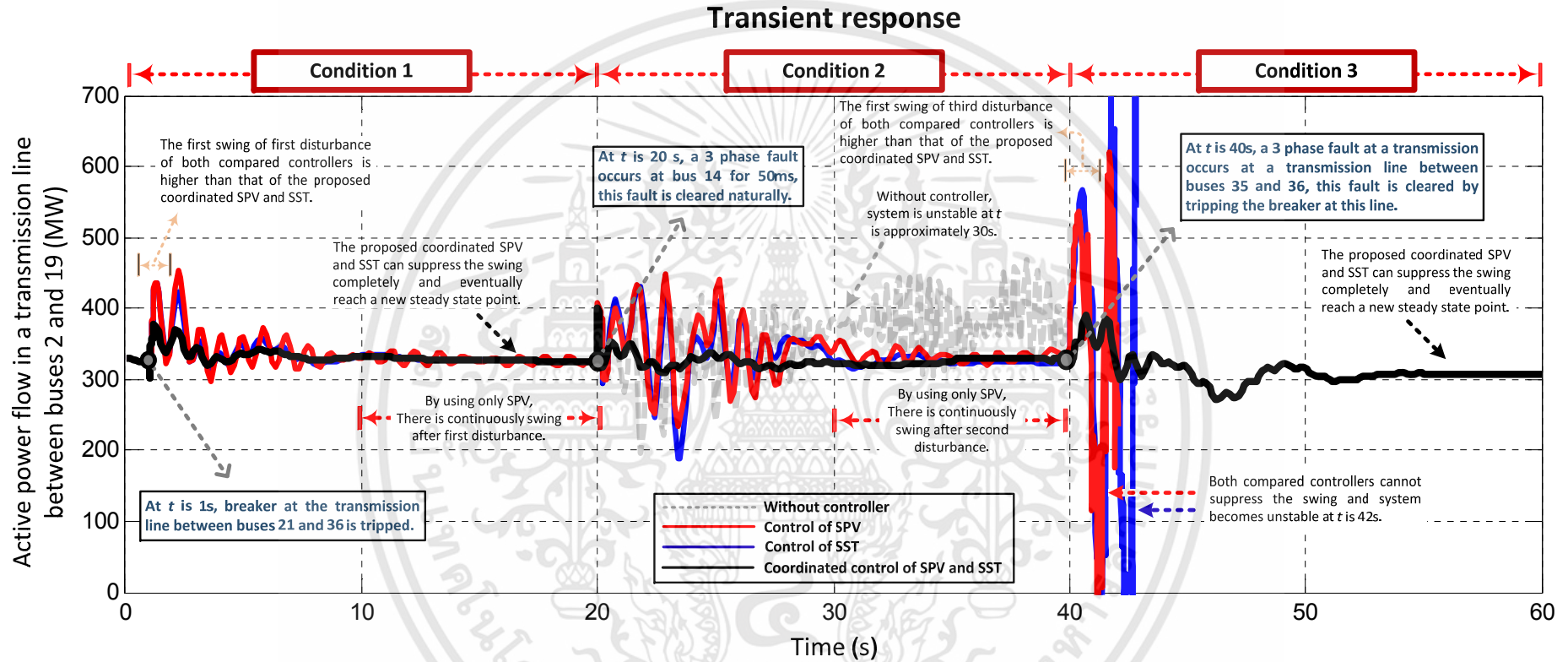
ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม PI

Parameters of additional PI controllers		Control of SPV	Control of SST	Proposed coordinated control of SPV and SST	
Substation 1	SPV inverter	$K_{P,R}$	20.36809	3.17470	15.80898
		$K_{I,R}$	22.64480	22.8344	2.43851
		T_{lead}	0.42558	0.49002	0.46770
		$K_{P,L}$	6.96245	23.9376	3.94032
		$K_{I,L}$	13.67204	24.1222	24.26482
	SST converter 1	$K_{P,R}$	23.92917	17.3707	18.78168
		$K_{I,R}$	12.13439	7.92748	6.37737
		T_{lead}	0.42458	0.45408	0.51751
		$K_{P,L}$	20.00701	23.7555	12.64893
		$K_{I,L}$	3.54715	0.86115	17.47692
	SST converter 2	$K_{P,R}$	10.54403	10.9686	22.27258
		$K_{I,R}$	22.89339	9.53896	23.98229
		T_{lead}	0.51913	0.47059	0.49206
		$K_{P,L}$	19.80518	19.1379	13.68039
		$K_{I,L}$	23.98731	19.8800	3.46561
Substation 2	SPV inverter	$K_{P,R}$	16.39352	4.67181	3.73235
		$K_{I,R}$	0.89279	12.2441	6.437706
		T_{lead}	0.47000	0.48390	0.44755
		$K_{P,L}$	21.22823	11.1396	21.01793
		$K_{I,L}$	23.34983	16.1578	6.35705
	SST converter 1	$K_{P,R}$	16.96838	17.7341	20.35712
		$K_{I,R}$	18.94350	18.8671	6.08812
		T_{lead}	0.46727	0.45450	0.50368
		$K_{P,L}$	18.57831	6.90062	23.23159
		$K_{I,L}$	9.80567	16.9925	8.74959
	SST converter 2	$K_{P,R}$	16.38695	16.3774	4.91488
		$K_{I,R}$	4.27966	4.06529	6.27709
		T_{lead}	0.43710	0.45744	0.49595
		$K_{P,L}$	17.65115	2.9749	15.40112
		$K_{I,L}$	0.79582	12.4591	11.83222

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.21 สัญญาณอินพุตของ Remote PI controller และค่าความเข้มแสงที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 6.22 ผลการจำลองที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ

สำหรับวินาทีที่ 40 เป็นการจำลองสถานการณ์การเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟส ในสายส่งระหว่าง บัสที่ 35 และบัสที่ 36 โดยที่ระบบไฟฟ้าไม่สามารถเคลียร์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นได้ และต้องเคลียร์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วยการปลดเบรกเกอร์เท่านั้น จากผลการจำลองการทำงานพบว่า การควบคุมการทำงานเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง คือ ควบคุมการทำงานเฉพาะ SST หรือควบคุมการทำงานเฉพาะ SPV ไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 19 ได้ นอกจากนั้นระบบไฟฟ้ายังเสถียรภาพและไม่สามารถควบคุมการทำงานได้ แต่ในทางตรงกันข้าม การใช้เทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกันของ SST และ SPV จะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี และทำให้กำลังไฟฟ้าของระบบเข้าสู่เสถียรภาพได้ภายในเวลา 15 วินาที

6.4 บทสรุป

ผลการจำลองการทำงานฟังก์ชันเพิ่มเติมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 2 ฟังก์ชัน ได้แก่ การตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ และการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์ พบว่าทั้ง 2 ระบบ สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานเหล่านี้ในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะช่วยให้โซลาร์ฟาร์มทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยสามารถลดการสูญเสียรายได้จากการขายไฟของเจ้าของโซลาร์ฟาร์มเนื่องจากสถานะการทำงานที่ผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ และสามารถเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าด้วยการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อมีการเกิดฟอลต์หรือเกิดการรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้า นอกจาก 2 ฟังก์ชัน ที่ได้ทำการศึกษาใน หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังยังสามารถเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานอื่น ๆ ได้อีกมากมาย ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งาน แต่อีกหนึ่งฟังก์ชันการใช้งานที่ควรศึกษาและควรมีอยู่ในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คือ การแก้ไขปัญหากำลังไฟฟ้าไหลย้อน ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดจากการมีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่ไม่มีการจัดการมากเกินไปในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะปัญหากำลังไฟฟ้าไหลย้อนจากโซลาร์ฟาร์ม ซึ่งกำลังเป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าในปัจจุบัน

สรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

7.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาระบบการทำงานของโซลาร์ฟาร์มจะพบว่า โซลาร์ฟาร์มมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในขณะที่มีการทำงาน ซึ่งเป็นการสูญเสียที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ และส่วนที่สองเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีการทำงานหรือในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งได้แก่ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากไฟเลี้ยงของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่โซลาร์อินเวอร์เตอร์สามารถแก้ไขได้ด้วยการปิดสวิตซ์อินเวอร์เตอร์เพื่อตัดไฟเลี้ยงระบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ แต่ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลงในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มเป็นการสูญเสียที่มีมูลค่ามากและไม่สามารถแก้ไขได้ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าของโซลาร์ฟาร์มจะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มจึงควรเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า Core loss ต่ำ หรือสามารถปิดสวิตซ์การทำงานได้เช่นเดียวกับโซลาร์อินเวอร์เตอร์

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Solid state transformer, SST) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในโซลาร์ฟาร์มและสามารถแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากค่า Core loss ในช่วงเวลากลางคืนได้ เนื่องจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำงานที่ความถี่สูง สามารถปิดสวิตซ์กำลังได้ ทำให้กระแสไฟจากการไฟฟ้าไม่สามารถไหลมายังที่หม้อแปลงไฟฟ้าได้ จึงไม่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากค่า Core loss ของหม้อแปลง และจากโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีลักษณะเหมือนกับการรวมโซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพียงตัวเดียวแทนที่ระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยโซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำได้

จากโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับการรวมวงจรคอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกันในอุปกรณ์เพียงตัวเดียว ขนาดที่เล็ก น้ำหนักเบา และฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย จึงทำให้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาประยุกต์ใช้งานแทนที่ระบบการทำงานแบบเดิมที่ประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำอย่างมากมาย เช่น ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Renewable energy) ระบบเก็บสะสมพลังงาน (Energy storage) ระบบการชดเชยแรงดันไฟฟ้า (FACTS device) ระบบกรองสัญญาณรบกวน (Harmonic filtering) ระบบรถไฟฟ้า (Traction system) ระบบการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็ว (DC fast charger) และโหลดไฟฟ้ากระแสตรง (DC load) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อดีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ การนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่งและเป็นที่มาของงานวิจัย ซึ่งภาพรวมของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้ บทที่ 1 เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับความเป็นมาและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย บทที่ 2 เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับหลักการการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์ม และหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม บทที่ 3 เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับความเป็นมาและโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบต่าง ๆ และการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม บทที่ 4 เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับผลการออกแบบและผลการจำลองหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งประกอบด้วย ผลการจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูง และผลการทำงานของวงจรมอดูลาร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า บทที่ 5 เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับผลการทดสอบการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สร้างขึ้น การประเมินประสิทธิภาพการทำงานในส่วนต่าง ๆ และการประเมินประสิทธิภาพการทำงานรวมทั้งระบบ และบทที่ 6 เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้แก่ การตรวจสอบความผิดปกติขณะทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ และการเพิ่มเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าจริงของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์สำหรับประเด็นต่าง ๆ ที่สำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

- ผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ขนาด 1,250 kVA พิกัดแรงดัน 400/22 kV แบบ 2 Winding ที่ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 MW (กำหนดให้ค่าไฟฟ้าที่ขายให้การไฟฟ้าอยู่ในรูปแบบ Feed-in tariff มีค่า 5.66 บาทต่อหน่วย ตลอดระยะเวลา 25 ปี ตามสัญญาการรับซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ลดลง 1 % ทุก ๆ 1 ปี ตามการใช้งานจริง และคิดค่าอัตราเงินเฟ้อร้อยละ 2.2) พบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 4 ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมีค่า Core loss ต่ำ มีมูลค่าการคืนทุนสูงสุด คือ 869,449 บาท ถึงอย่างไรก็ตามหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ก็ยังมี การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มหรือในช่วงเวลากลางคืน ดังนั้น หากประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถตัดการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ มูลค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจะลดลง 1,394,483 บาท เมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 1 และมูลค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจะลดลง 735,977 บาท เมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดที่ 5 ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า Core loss ต่ำสุด

- เทคนิค SHE เป็นเทคนิคการควบคุมที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีค่าความผิดพลาดของรูปคลื่นสัญญาณต่ำ ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink พบว่า ชุดมุม $\theta_1 = 11.6498^\circ$, $\theta_2 = 27.0134^\circ$ และ $\theta_3 = 56.1031^\circ$ มีค่า %THDV มีค่าต่ำสุด คือ 9.33% และเมื่อทำการปรับจูนชุดมุมจนได้ค่าที่เหมาะสม คือ $\theta_1 = 8.7^\circ$, $\theta_2 = 26.4^\circ$ และ $\theta_3 = 54.1^\circ$ พบว่า ค่า %THDV จะลดลงเหลือ 8.66% เมื่อนำชุดมุมที่เหมาะสมนี้ไปควบคุมการทำงานของวงจรเอชบริดจ์มัลติเลเวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ ให้สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์เพื่อส่งกำลังผ่านหม้อแปลง ความถี่สูง และเปรียบเทียบกับเทคนิคการส่งกำลังด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแบบ Quasi square wave ที่มีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 28.54% พบว่า การส่งกำลังด้วยชุดมอดูเลชันที่เหมาะสมมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงความถี่สูงน้อยกว่าการส่งกำลังด้วยรูปคลื่นแบบ Quasi square wave ถึง 1.46% และ 1.82% ที่โหลดของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนาด 300 W และ 500 W ตามลำดับ

- หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งยืนยันได้ด้วยผลการจำลองและผลการทดลองจริง จากการจ่ายกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนาด 350 W, 500 W และ 1,000 W พบว่า ประสิทธิภาพทั้งระบบของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีค่าเท่ากับ 74.38%, 70.72% และ 60.40% ตามลำดับ โดยสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายโหลดเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า ($\%THD_i$) ที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ซึ่งพบว่า ค่า $\%THD_i$ มีค่าต่ำ เป็นไปตามมาตรฐานของการไฟฟ้าที่กำหนดให้ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนไม่เกิน 5 %

- ข้อได้เปรียบที่เด่นชัดที่สุดของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเมื่อเทียบกับหม้อแปลงความถี่ต่ำทั่วไป คือ การมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอฟังก์ชันการใช้งานเพิ่มเติมของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้แก่ ฟังก์ชันการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเทคนิค Box Plot และฟังก์ชันการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์ สำหรับฟังก์ชันการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเทคนิค Box Plot เป็นฟังก์ชันเสริมเพื่อเพิ่มรายได้ให้กับเจ้าของโซลาร์ฟาร์มและช่วยให้โซลาร์ฟาร์มสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการจำลองพบว่า เทคนิค Box Plot สามารถจำแนกการทำงานในสถานะต่าง ๆ ของแผงโซลาร์เซลล์ได้เป็นอย่างดี สำหรับในส่วนของฟังก์ชันการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์ จะใช้เทคนิคการควบคุมการทำงานร่วมกันของคอนเวอร์เตอร์ภายในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งผลที่ได้พบว่า การควบคุมการทำงานร่วมกันทั้งหมดของคอนเวอร์เตอร์ภายในหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบขณะเกิดฟลลท์แบบต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี และสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงในระบบให้เข้าสู่เสถียรภาพ ซึ่งการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์เพียงบางตัวไม่สามารถทำได้

7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

งานวิจัยนี้ยังเป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์ม ยังมีข้อบกพร่องที่ต้องแก้ไขและพัฒนาเพื่อให้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ซึ่งข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังยังมีประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำ ดังนั้นจึงควรควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังให้ทำงานแบบซอฟต์สวิตชิง (Soft switching) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรให้มีค่าสูงขึ้น

2) ควรเพิ่มการออกแบบการควบคุมกระแสไหลวนของวงจรมอดูเลตเตอร์อินเวอร์เตอร์ให้มีความเหมาะสมเพื่อลดการกระเพื่อมของตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล

3) เพิ่มฟังก์ชันการปรับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้กับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อรองรับการทำงานของระบบไฟฟ้า โดยสามารถปรับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้เป็น Lagging ในกรณีที่เกิดสถานะแรงดันไฟฟ้าเกิน และสามารถปรับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้เป็น Leading ในสถานะแรงดันไฟฟ้าตก เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

4) ควรออกแบบการทำงานวงจรคอนเวอร์เตอร์ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้เป็นแบบ Active filter เพื่อลดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าและลดขนาดของวงจรความถี่

5) เพิ่มฟังก์ชันการแก้ไขปัญหากำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับให้กับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อแก้ปัญหากำลังไฟฟ้าไหลย้อนในระบบไฟฟ้า เนื่องจากการมีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่ไม่มีการจัดการมากเกินไป โดยเฉพาะปัญหากำลังไฟฟ้าไหลย้อนจากโซลาร์ฟาร์ม ซึ่งกำลังเป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าในปัจจุบัน

6) ควรเปรียบเทียบความแข็งแรง ทนทาน และความเชื่อถือได้ (Reliability) ในการใช้งานจริง ระหว่างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วย โซลาร์อินเวอร์เตอร์ และหม้อแปลงความถี่ต่ำ

7) พัฒนาต่อยอดงานวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับโซลาร์ฟาร์ม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Khemmook P., Suwan-ngam W. and Khomfoi S. "Suitable power transformers for solar farm applications," **2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**, Hua Hin, Thailand, June 2015.
- [2] ปัญญา เข็มमुख และ สุรินทร์ คำฝอย. "การศึกษาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม," **วารสารวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี**, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, มกราคม-กุมภาพันธ์ 2562, หน้า 172-188.
- [3] She X., Huang A.Q. and Burgos R. "Review of Solid-State Transformer Technologies and Their Application in Power Distribution Systems," **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, vol. 1, no. 3, September 2013, pp. 186-198.
- [4] Kolar J.W. and Ortiz, G. "Solid-state-transformers: Key components of future traction and smart grid systems," **International Power Electronics Conference (IPEC)**, Hiroshima, Japan, 2014.
- [5] McMurray W. "The thyristor electro nic transformer: A power converter using a high-frequency link," **IEEE Trans. Ind. Gen.**, vol. IGA-7, no. 4, July 1971, pp. 451-457.
- [6] Doncker R.D., Divan D. and Kheraluwala M. "A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications," **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 27, no. 1, January-February 1991, pp. 63-73.
- [7] Steimer P. "Enabled by high power electronics-energy efficiency, renewables and smart grids," **International Power Electronics Conference (IPEC)**, Sapporo, 2010.
- [8] Falcones S., Ayyanar R. and Mao, X. "A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage," **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 28, no. 5, May 2013, pp. 2192-2203.
- [9] Khomfoi S. and Tolbert L.M. **Chapter 17 Multilevel Power Converters, pp. 451-482**, In Rashid, M., **Power Electronics Handbook**, 2nd ED., Academic Press, Massachusetts, Inc. 2006.
- [10] Nordvall A. **Multilevel Inverter Topology Survey**, M.Sc. Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Hassan O.A., Klumpner C. and Asher G. "Design considerations for core material selection and operating modes for a high frequency transformer used in an isolated DC/DC converter," **The 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications**, Birmingham, UK, 30 August - 1 September 2011, pp. 1-11.
- [12] Huber J.E. and Kolar J.W. "Volume/ weight/cost comparison of a 1 MVA 10 kV/400V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer," **2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, Pittsburgh, PA, USA, 14-18 Sept. 2014, pp. 4545-4552.
- [13] Du Y., Baek S., Bhattacharya S. and Huang A.Q. "High-voltage high-frequency transformer design for a 7.2 kV to 120V/240V 20 kVA solid state," **IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, Glendale, Arizona, USA, 7-10 Nov. 2010.
- [14] Huang P., Mao C., Wang D., Wang L., Duan Y., Qiu J., Xu G. and Cai H. "Optimal design and implementation of high-voltage high-power silicon steel core medium-frequency transformer," **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 64, no. 6, June 2017, pp. 4391-4401.
- [15] Costa L.F., Carne G.D., Buticchi G. and Liserre M. "The Smart Transformer: A solid-state transformer tailored to provide ancillary services to the distribution grid," **IEEE Power Electronics Magazine**, vol. 4, no. 2, June 2017, pp. 56-67.
- [16] Hossain M.S., Madloul N.A., Rahim N.A., Selvaraj J., Pandey A.K. and FaheemKhan A. "Role of smart grid in renewable energy: An overview," **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 60, July 2016, pp. 1168-1184.
- [17] Ye Q., Mo R. and Li H. "Multiple Resonances Mitigation of Paralleled Inverters in a Solid-State Transformer (SST) Enabled AC Microgrid," **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 9, no. 5, September 2018, pp. 4744-4754.
- [18] Huber J.E. and Kolar J. W. "Applicability of Solid-State Transformers in Today's and Future Distribution Grids," **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 10, no. 1, January 2019, pp. 317-326.
- [19] Huber J.E. and Kolar J.W. "Solid-State Transformers: On the Origins and Evolution of Key Concepts," **IEEE Industrial Electronics Magazine**, vol. 10, no. 3, September 2016, pp. 19-28.
- [20] Huang A.Q. "Medium-Voltage Solid-State Transformer: Technology for a Smarter and Resilient Grid," **IEEE Industrial Electronics Magazine**, vol. 10, no. 3, September 2016, pp. 29-42.

- [21] Liserre M., Buticchi G., Andresen M., Carne G.D., Costa L.F. and Zou Z.X. "The Smart Transformer: Impact on the Electric Grid and Technology Challenges," **IEEE Industrial Electronics Magazine**, vol. 10, no. 2, June 2016, pp. 46-58.
- [22] Liu Y., Tang Y., Shi J., Shi X., Deng J. and Gong K. "Application of Small-Sized SMES in an EV Charging Station With DC Bus and PV System," **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol. 25, no. 3, June 2015.
- [23] Ahmed H.M.A., Eltantawy A.B. and Salama M.M.A. "A Planning Approach for the Network Configuration of AC-DC Hybrid Distribution Systems," **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 9, no. 3, May 2018, pp. 2203-2213.
- [24] Chen Q., Liu N., Hu C., Wang L. and Zhang J. "Autonomous Energy Management Strategy for Solid-State Transformer to Integrate PV-Assisted EV Charging Station Participating in Ancillary Service," **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, vol. 13, no. 1, February 2017, pp. 258-269.
- [25] Thailand Category. "Solar Energy, Sai Thong Solar Power Plant," [Online]. Available : <http://www.industryabout.com/country-territories-3/2068-thailand/solar-energy/31510-sai-yoi-solar-power-plant>. 2018
- [26] Thailand Category. "Solar Energy, Sai Yoi Solar Power Plant," [Online]. Available : <http://www.industryabout.com/country-territories-3/2068-thailand/solar-energy/31506-sai-thong-solar-power-plant>. 2018.
- [27] Pairindra W. and Khomfoi S. "An Optimization Design of the Diode Clamped Multi-Level Converter for Coaxial Inductive Power Transfer on the Low Voltage DC Micro-grid," **Journal of Electrical Engineering and Technology (JEET)**, vol. 13, no. 1, 2018, pp. 333-344.
- [28] Han J., Yang T., Peng D., Wang T. and Yao G. "Model predictive control for asymmetrical cascaded H-Bridge multilevel grid-connected inverter with flying capacitor," **IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, Dallas, TX, USA, October 2014.
- [29] Diong B., Sepahvand H. and Corzine K.A. "Harmonic Distortion Optimization of Cascaded H-Bridge Inverters Considering Device Voltage Drops and Noninteger DC Voltage Ratios," **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 60, no. 8, August 2013, pp. 3106-3114.
- [30] Xiao B., Hang L., Mei J., Riley C., Tolbert L.M. and Ozpineci B. "Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid-Connected Applications," **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 51, no. 2, March-April 2015, pp. 1722-1731.
- [31] Farivar G., Hredzak B. and Agelidis V.G. "A DC-Side Sensorless Cascaded H-Bridge Multilevel Converter-Based Photovoltaic System," **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 63, no. 7, July 2016. pp. 4233-4241.

- [32] Iman-Eini H., Bacha S. and Frey D. “Improved control algorithm for grid-connected cascaded H-bridge photovoltaic inverters under asymmetric operating conditions,” **IET Power Electronics**, vol. 11, no. 3, 2018, pp. 407-415.
- [33] Tafti H.D., Maswood A.I., Konstantinou G., Townsen C.D., Acuna P. and Pou J. “Flexible Control of Photovoltaic Grid-Connected Cascaded H-Bridge Converters During Unbalanced Voltage Sags,” **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 65, no. 8, August 2018, pp. 6229-6238.
- [34] Uthirasamy R., Chinnaiyan V.K., Ragupathy U.S. and Karpagam J. “Investigation on three-phase seven-level cascaded DC-link converter using carrier level shifted modulation schemes for solar PV system applications,” **IET Renewable Power Generation**, vol. 12, no. 4, 2018, pp. 439-449.
- [35] Khamooshi R. and Namadmalan A. “Converter utilisation ratio assessment for total harmonic distortion optimisation in cascaded H-bridge multi-level inverters,” **IET Power Electronics**, vol. 9, no. 10, 2016, pp. 2103-2110.
- [36] Manohar V.J., Rani I.S. and Ramana K.V. “SHE controlled CHB 7-level inverter with equal & unequal DC sources using C-genetic algorithm,” **2016 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)**, Coimbatore, India, 21-22 October 2016.
- [37] Yang K., Zhang Q., Zhang J., Yuan R., Guan Q., Yu W. and Wang J. “Unified Selective Harmonic Elimination for Multilevel Converters,” **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 32, no. 2, February 2017, pp. 1579-1590.
- [38] Sharifzadeh M., Vahedi H., Cecati C., Buccella C. and Al-Haddad K. “A generalized formulation of SHM-PAM for cascaded H-bridge inverters with non-equal DC sources,” **2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, Toronto, Canada. 22-25 March 2017.
- [39] Kumar A.N., Tangirala A., Joji S., Diwagar S.V. and Sujith M. “Comparative analysis of switching strategies for harmonic minimization in MLI,” **2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)**, May 19-20, 2017, Bangalore, India.
- [40] Holmes D.G. and Lipo T.A. **Pulse width modulation for power converter**, pp. 440-449, A John Wiley & Son, Inc. 2003.
- [41] Negash M.F. and Manthathi U.B. “Development of 7-level cascaded H-bridge inverter topology for PV applications,” **2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)**, Chennai, India, 3-5 March 2016.

- [42] Panda K.P. and Rout S. “Swarm optimization based harmonic elimination in improved H-bridge multilevel inverter,” **2017 International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)**, Coimbatore, India, 19-20 January 2017.
- [43] Haghdar K. and Shayanfar H.A., “Selective Harmonic Elimination With Optimal DC Sources in Multilevel Inverters Using Generalized Pattern Search,” **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, vol. 14, no. 7, July 2018, pp. 3124-3131.
- [44] Asimakopoulos P. **Design and Control of Modular Multilevel Converter in an Active Front End Application**, M.Sc. Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, 2013.
- [45] Li Y. **Arm Inductance and Sub-module Capacitance Selection in Modular Multilevel Converter**, Master's Thesis, University of Tennessee, 2013.
- [46] Najmi V. **Modeling, Control and Design Considerations for Modular Multilevel Converters**, M.Sc. Thesis in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University
- [47] Mei J., Xiao B., Shen K., Tolbert L.M. and Zheng J.Y. “Modular Multilevel Inverter with New Modulation Method and Its Application to Photovoltaic Grid-Connected Generator,” **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 28, no. 11, November 2013, pp. 5063-5073.
- [48] Akagi H. “Classification, Terminology, and Application of the Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC),” **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 26, no. 11, November 2011, pp. 3119-3130.
- [49] Khemmook P. and Khomfoi S. “Solid State Transformer using a Modular Multilevel Inverter for PV Farm Applications,” **18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, Pattaya Thailand, 25-28 October 2015.
- [50] Khemmook P. and Khomfoi S. “Deteriorated Solar Panel Detection Technique of SST for a Solar Farm Application,” **International Electrical Engineering Congress (iEECON2019)**, Hua Hin, Thailand, 6-8 March 2019.
- [51] Khemmook P. and Khomfoi S. “Transient Stability Improvement using Coordinated Control of Solar PVs and Solid State Transformers,” **International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)**, vol. 13, no. 6, November-December 2011, pp. 486-494.

ภาคผนวก
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Khemmook P., Suwan-ngam W. and Khomfoi S. “Suitable power transformers for solar farm applications,” **12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2015)**, Hua Hin, Thailand, June 2015.
- [2] Khemmook P. and Khomfoi S. “Solid State Transformer using a Modular Multilevel Inverter for PV Farm Applications,” **18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015)**, Pattaya Thailand, 25-28 October 2015.
- [3] Khemmook P., Khomfoi S. and Manee-in C., “The Design of the PI controller with SmartCtrl for the Solid State Transformer in the Solar Farm Application,” **14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2017)**, Phuket, Thailand, 27-30 June 2017.
- [4] Khemmook P. and Khomfoi S. “The Implementation of SHE Control Technique for the SST with CHB Seven-level Waveform on the Solar Farm Applications,” **International Electrical Engineering Congress (iEECON 2019)**, Hua Hin, Thailand, 6-8 March 2019.
- [5] Khemmook P. and Khomfoi S. “Deteriorated Solar Panel Detection Technique of SST for a Solar Farm Application,” **International Electrical Engineering Congress (iEECON 2019)**, Hua Hin, Thailand, 6-8 March 2019.
- [6] Khemmook P. and Khomfoi S. “Transient Stability Improvement using Coordinated Control of Solar PVs and Solid State Transformers,” **International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)**, vol. 13, no. 6, November-December 2018, pp. 486-494.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Suitable Power Transformers for Solar Farm Applications

Panya Khemmook

Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520
Kp.panya@gmail.com

Warachart Suwan-ngam¹, Surin Khomfoi²

^{1,2}Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520
w.saeok@gmail.com¹
kkhsurin@kmitl.ac.th²

Abstract—This paper presents a suitable power transformer for solar farm applications. Losses and economic value of the proposed transformer are compared to those of the standard transformer, for the application to a 1 MW solar farm, to help the solar farm owners select the best solution for their business. In this paper, a power electronics transformer called a Solid State Transformer (SST) is also proposed for the application to the solar farm because of its light weight, small size and varieties of functions. There are no core losses during no operation period which is about 15-16 hours a day.

Keywords—solar farm; transformer; power electronic transformer; solid state transformer

I. INTRODUCTION

Nowadays, solar energy is one of the most attractive renewable energy sources for electricity generation as it is environmental friendly as well as worth investment comparing to other renewable energy sources. However, one of the drawbacks of solar energy is the electricity generation period which is available only the day. Therefore, the energy storage devices such as battery system should be applied to store the electrical energy generated [1-2]. The losses in the solar farm system can be classified into two types, losses in the conductors and loss in the equipment. The losses in the conductor are the copper loss in the cables connecting between equipment in the solar farm. They appear during electricity generation to the grid due to current flowing in the conductor. The losses in the equipment are mainly from the inverter and the transformer which are the major loss in the solar farm. During the generation period, such losses are unavoidable. However, during the off-period which is account for 15-16 hours a day, there are no electricity generated, but the inverter and the transformer are still energized causing losses in both inverter and transformer. However, the inverter can be turned off but the transformer can still be energized, so the losses in the transformer are still existed. Therefore, there are copper loss in the primary winding (high voltage side) of the transformer and the core loss [3]. Considering the conventional transformer, in the market, there are several brands of the transformers having different prices depending of the quality of the conductor and the core [4].

As previously discussed, the solid state transformer (SST) is proposed for the application in this area as its advantages which will be discussed in the following sections of this paper.

This paper mainly focuses on the factor which can be used for selection of the suitable transformer for solar farm application to meet the economical value. The application and the topology of SST are also presented as an alternative choice for the investors. The content of this paper is arranged as follows: losses in the solar farm, the conventional transformers, most optimal transformer for the solar farm, solid state transformer technology and finally conclusion.

II. LOSSES IN THE SOLAR FARM

This section describes the losses in the solar farm which are the most important factor for this business. In the case of a MW scale solar farm, there are many components and structures as shown in Fig. 1.

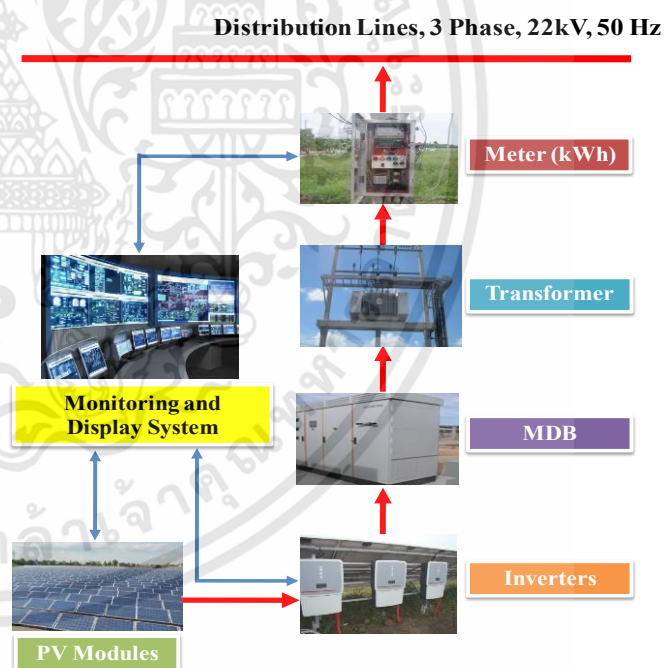


Fig. 1. Structures of solar farm.

As can be seen in the figure, one solar farm may consist of the PV modules, solar inverter, power transformer, power meter, main distribution board (MDB) and monitoring and display system. The electricity generation process begins on the conversion from the light energy to the electrical energy in

the form of DC electricity by the PV modules. The electricity generated from the PV is then converted to the AC electricity by the solar inverter which is connected to the grid via the power transformer. The voltage level of the inverter is stepped up from the low voltage level to the distribution voltage level. During this generation process, the power flow from PV module to the grid and the losses in the system can be calculated and shown in Table I [5-6].

TABLE I. LOSS IN A 1 MW SOLAR FARM SYSTEM

Energy Conversion Step	Energy Loss (%)	Energy Loss (kWh/kWp)	Energy Output (kWh/kWp)
Conversion to DC in the modules	-	-	1,000
Other DC losses	3	30	970
Inverters (DC to AC Conversion)	4	38.8	931.2
AC cabling losses	1	9.3	921.9
Transformer	3	27.7	894.2
Total	-	105.8	894.2

The data shown in the table is the losses during the electricity generation period which is normally during the day. However, during the off-period (night time), which is approximately 15 – 16 hours, some losses still existed although there is no electricity generation. Such losses are mainly from the inverter and the transformer as both devices are always connected to the grid. The solution for this problem is to turn-off the inverter which can only stop the loss from the inverter but not those from the transformer which are primary winding copper loss and core loss, due to continuous excitation at the high voltage side. Therefore, the comparison of the losses in the transformer in the market is required to meet the best solution for the investor to find the suitable transformer for their business. The comparison is performed on the conventional transformer and the details are discussed in the next section.

III. THE CONVENTIONAL TRANSFORMERS

From the survey of the 1250 kVA, 400/22 kV, 2 winding conventional transformers which are used for the 1 MW solar farm, there are 5 types of transformers manufactured from different material qualities. The material used affects the values of the losses, performance and the manufacturing cost. The details are shown in Table II [7].

TABLE II. QUALIFICATION OF CONVENTIONAL TRANSFORMERS

Type of Transformers	Qualification of Conventional Transformers			
	No-load loss (W)	Full load loss (W)	Full load loss (%)	Price (THB)
98.5 %	1,800	20,100	1.6	700,000
99 %	1,800	12,500	1.0	900,000
99.2 %	1,250	10,550	0.844	1,150,000
99.2 % Type A	1,000	10,600	0.848	1,250,000
99.2 % Type B	950	10,450	0.836	1,350,000

As shown in Table II, the higher the loss generated the transformer generated, the higher price the investor has to pay. However, the price of the transformer cannot be used to justify that the cheapest is the most suitable transformer for the solar farm. For the long term operation, the transformer losses have the major effect on the profit of the investor, so the analysis on the loss at different load and the optimization are required. Fig. 2 to Fig. 6 show prediction of total losses in different transformer from 0 % load to 100 % load by using curve fitting from Matlab/Simulink program. At no load (0% load), only core losses are significant and the primary copper losses can be neglected.

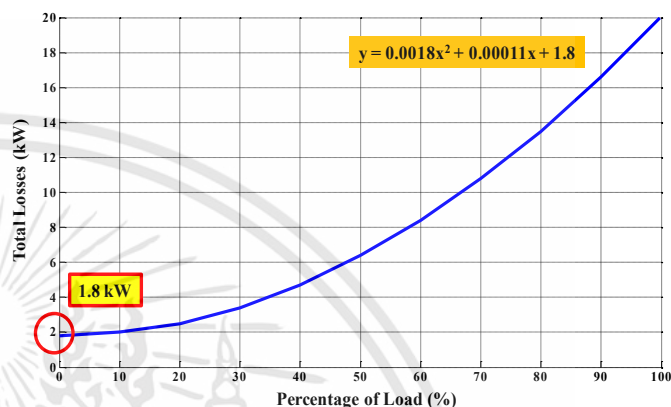


Fig. 2. Losses of 98.5 % transformer varied from 0 to 100 percent load.

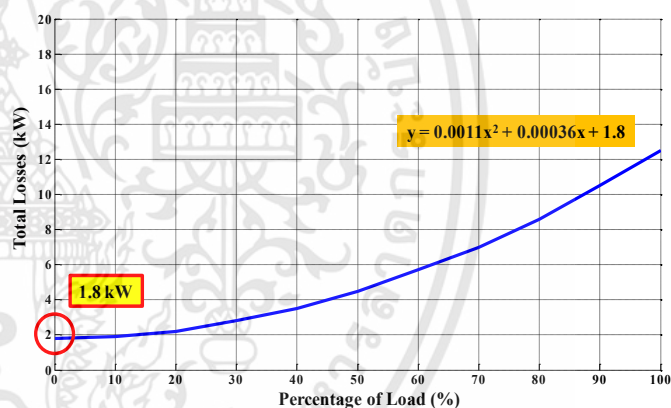


Fig. 3. Losses of 99 % transformer varied from 0 to 100 percent load.

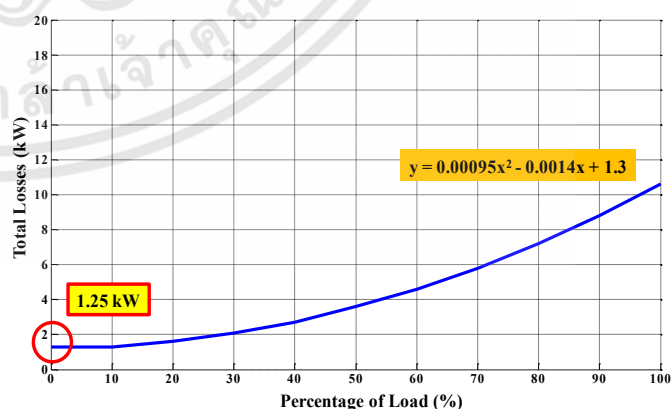


Fig. 4. Losses of 99.2 % transformer varied from 0 to 100 percent load.

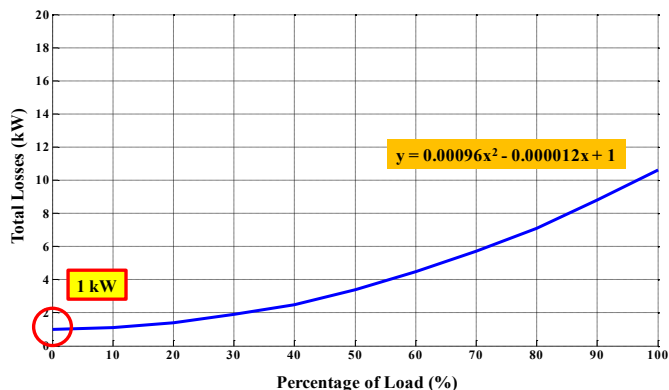


Fig. 5. Losses of 99.2 % Type A transformer varied from 0 to 100 percent load.

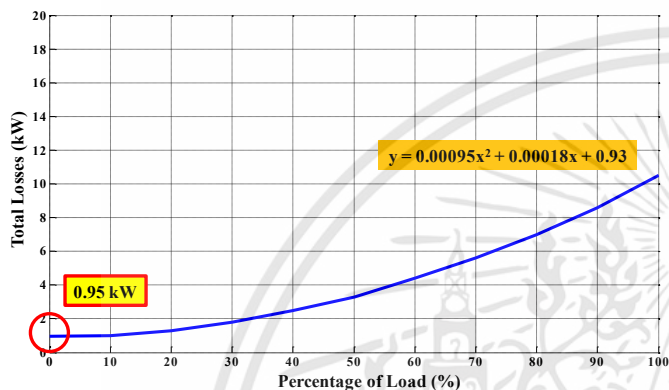


Fig. 6. Losses of 99.2 % Type B transformer varied from 0 to 100 percent load.

From the test results, the losses of transformer and the profit when the solar farm operate can be calculated and compared with standard type transformer to find which one is the most suitable transformer for use in the solar farm for the highest benefit. The best transformer that makes the most benefit is shown in next section.

IV. THE MOST OPTIMAL TRANSFORMER FOR SOLAR FARM

The output powers of different stages of the electricity generation are analyzed in this section. The example solar farm output is connected to the PEA distribution system. Considering the power output of the solar inverter as shown in Fig. 7 and Fig. 8 respectively, the green area is the output power generated during operation period while the red is the inverter power loss during the off-period. Fig. 8 focuses on the losses during the off-period and can be found that average energy loss is 32 kW or approximately 480 units per day. Calculated cost in THB, the owner has to pay 2,716.8 THB per day or 991,632 THB per year. However, the inverter loss can be by turn-off the inverter. Once the inverter converts the power from DC to AC, the power is transferred to the grid via the transformer. During the operating period there are two types of losses in the transformer, copper losses in the primary and secondary windings and the core loss. The copper and core losses are depended on quality of the wire and the material of the core respectively. The better the quality the material has the higher the production cost increases; consequently, higher cost of a power transformer.

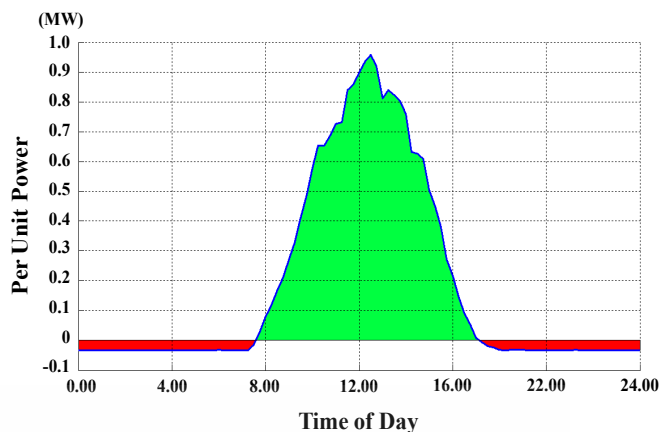


Fig. 7. Inverter output power and inverter loss of the 1 MW solar farm.

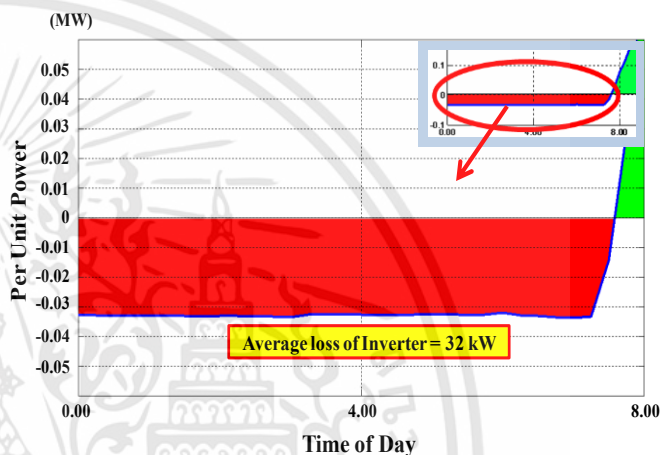


Fig. 8. Power generation and power losses in a day of the 1 MW solar farm.

Let analyze the loss of a power transformer used in a solar farm, the 1 MW solar farm is used as the scenario assumption with 1,250 MVA power transformer. The feed-in tariff in Thailand is 5.66 THB/kWh. Assuming that PV modules will degrade 1 % a year and the PV farm life time is 25 years. Net present value (NPV) 2.2 % is used to perform financial calculation. The average power generation of solar inverter in every 30 minutes is shown in Fig. 9. Form Fig. 9, the losses of a transformer can be calculated from equation (1) to equation (5) into financial benefits as shown in Fig. 10 and Fig. 11. The benefits comparison among a power transformer types are also performed.

$$\text{Energy}_{\text{off-period}} = (P_{\text{Core Loss}} \times t_{\text{off-period}}) / 1000 \quad (1)$$

$$\text{Energy}_{\text{operation}} = [\sum (P(\% \text{ load}) \times T_{\text{average}})] / 1000 \quad (2)$$

$$\text{Energy Loss all Day} = \text{Energy}_{\text{off-period}} + \text{Energy}_{\text{operation}} \quad (3)$$

$$\text{Estimate Cost} = (\text{Energy Loss all Day}) \times (5.66) \times (365) \quad (4)$$

$$\text{NPV} = \sum_{t=1}^n \frac{\text{CE}_t}{(1+i)^t} \quad (5)$$

Which

- Estimate Cost is Cost of energy per year.
- NPV is Net present value.
- ECt is Cost of energy in each year.
- i is inflation rate.
- t is a preportion to time range 1 to 25 years.

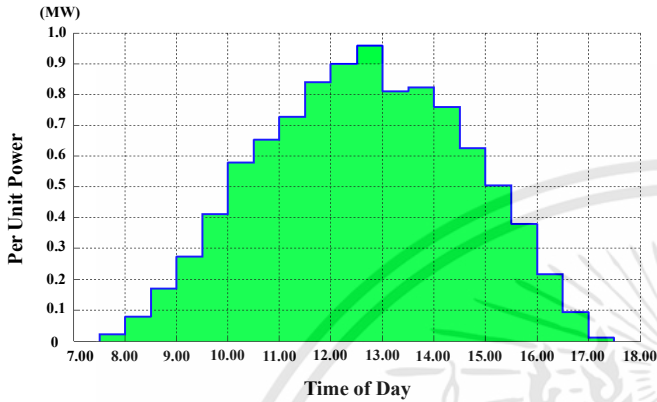


Fig. 9. Average electricity production from 1MW solar farm in every 30 minutes.

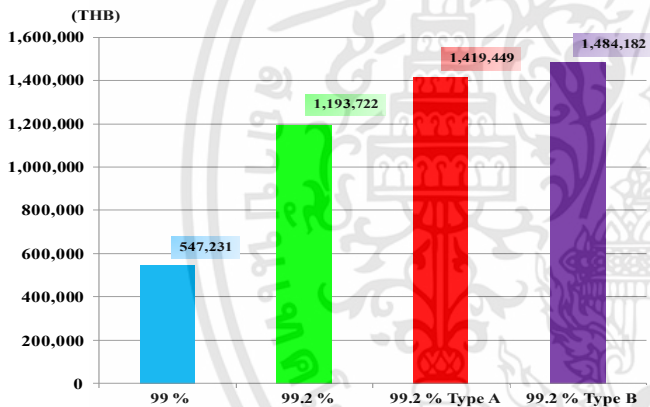


Fig. 10. Financial benefits comparison of each type power transformer referring a standard type transformer (98.5 %).

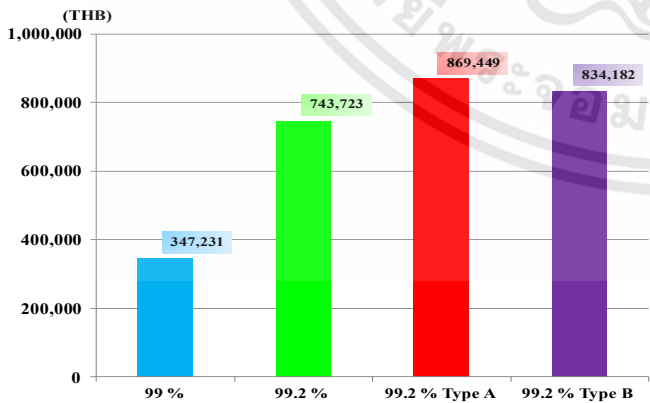


Fig. 11. Net financial benefits comparison of each type power transformer referring a standard type transformer (98.5 %).

As shown in Fig. 10, the high efficiency transformers are more profitable compared with standard type transformers. However the transformer is equally effective. The transformers which have low core losses will have minimum all day losses and will earn more financial benefits. It should be noted that a solar farm normally operates at full load about five hours a day; where as, a solar farm operates in under rated power about three hours a day. In addition, about 12 hours a day, a solar farm operates in idel power mode. Normally, the efficiency of a power transformer provided by a vender is factory validated at full load condition. Therefore, low core losses transformers offers more financial benefit than a standard transformer ($\eta = 98.5\%$) as illustrated in fig. 11. As can be seen, the net financial benefits of 99.2 % (Type A) power transformer when the investment is deducted have highest return rate of investment compared to others. Clearly, the 99.2 % (Type B) power transformer has the best financial benefit as shown in Fig. 10, but the 99.2 % (type B) tranformer does not have the best in the net financial benefits because of the investment cost as shown in Fig. 10.

The various types of transformer can be calculated the cost of energy loss in off-period as shown in figure 12. Thereupon, it would be better if a power transformer used in a solar farm application will not have no load loss. Recently, with the new power electronics devices, the solid state transformer concept can make it possible and will be discussed in the next section.

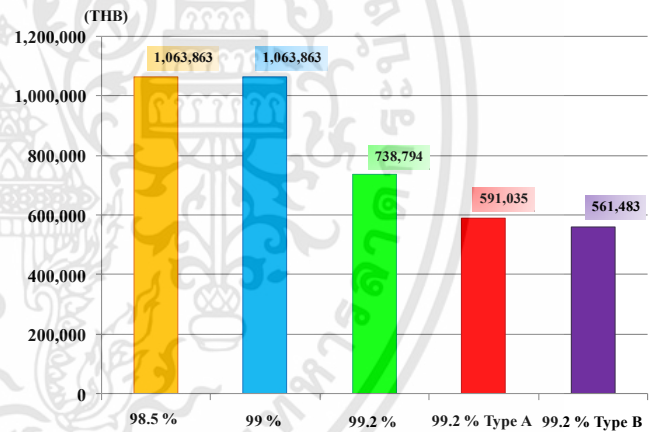


Fig. 12. The cost of energy loss in off-period in different kind of transformers.

V. SOLID STATE TRANSFORMER TECHNOLOGY

The Solid State Transformer (SST) consists of power electronics converters and the high frequency transformer (HFT). The advantage of this transformer is that it has variety of functions to increase the flexibility of grid system. The reason is that the output power of the transformer is controllable by controlling the power electronics converters. Several converter topologies are integrated to the SST as shown in Fig. 13. The main idea is to connect the AC-AC converters to both primary and secondary sides of the transformer. There are two methods to construct the AC-AC converter. The first method is by using the matrix converter while the second is by using back-to-back converters [8].

Considering Fig. 13d, both sides of the SST are connected to the Back to Back Converters. Therefore, in application to the solar farm system, the DC-AC Converter at low voltage side can be replaced by the PV module [9-10] as shown in Fig. 14.

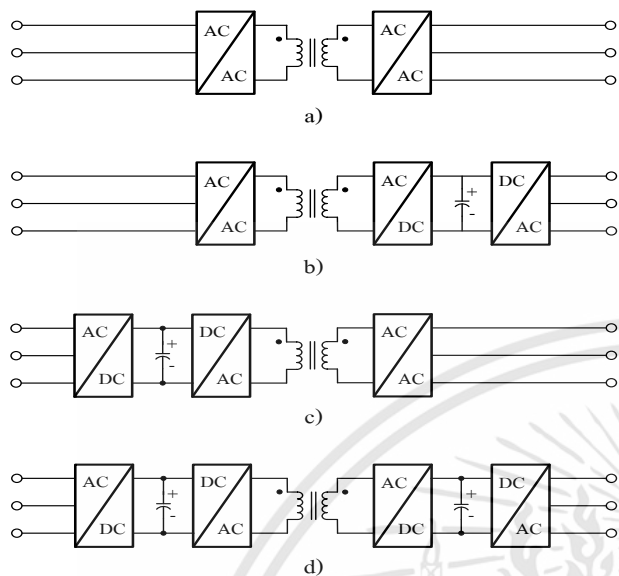


Fig. 13. Structure of SST include converter and HFT.

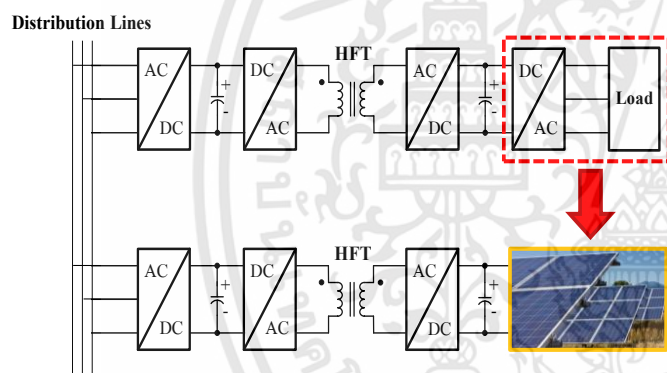


Fig. 14. Adaption of SST with solar farm.

From the structure of the solar farm, shown in Fig. 15 the solar inverters are connected to the PEA distribution system via the low frequency transformer, if the modified SST is installed in the solar farm system, the modified SST can replace the bulky low frequency transformer and the solar inverter.

The advantages of using the SST in the solar farm are the reduction in size of the element by its high operating frequency and the combination of transformer and inverter in to one element. Additionally, the SST does not have core loss during the off-period of solar farm as the transformer is excited only when the inverter is operating, so during such period, the inverter is turned off and the core loss is also disappeared.

The SST can also increase the profit for the owners as for example, during over voltage condition, the conventional system will be disconnected from the system. However, if the SST is used, the SST can control the power output and the power can still be generated to the system.

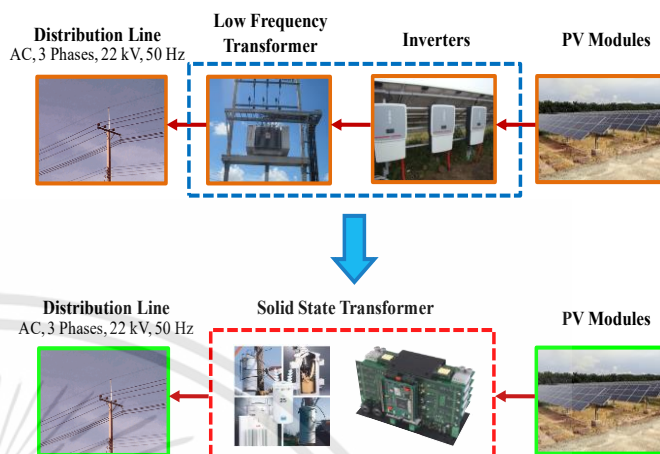


Fig. 15. Adaption of the SST with solar farm that work as transformer and inverter combined.

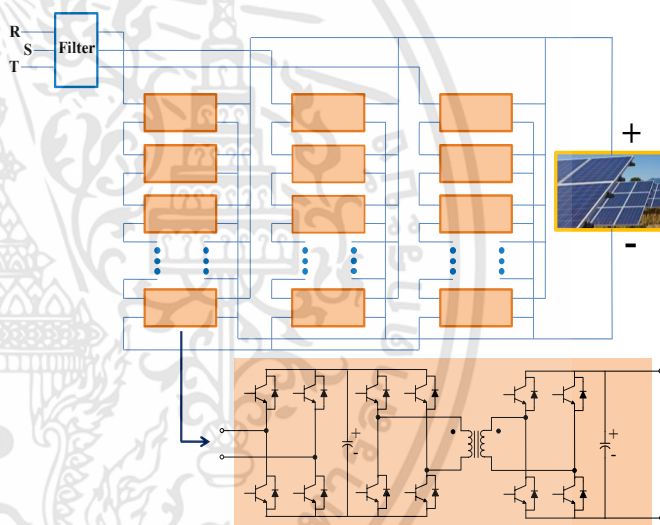


Fig. 16. Adaption of SST with solar farm with PEA distribution system.

For the application to the PEA distribution system, the voltage level is 22 kV which is too high for using only one module of the SST. The multilevel technique is proposed as shown in Fig. 16. There are several cells of SST at the primary side (high voltage side) connected in series to reduce the voltage drop in each cell and in secondary side (low voltage side) each cell combine in parallel to reduce current flow from PV Modules. The disadvantage of multilevel technique is the increase in the number of switches causing higher switching loss and cost. Therefore, design of the SST should consider about optimal switching losses and the number of switches that lead to the higher cost [11].

Other disadvantages of the SST in the distribution system are the manufacturing cost, reliability and efficiency because the technology of the SST is still not mature and the lack of study and development. Comparison of the SST and the LFT is depicted in Fig. 17[8]. However, the SST technology is interesting if application to the solar farm. The combination of the transformer and the converters into one element leads to the smaller size of the components and have varieties of function.

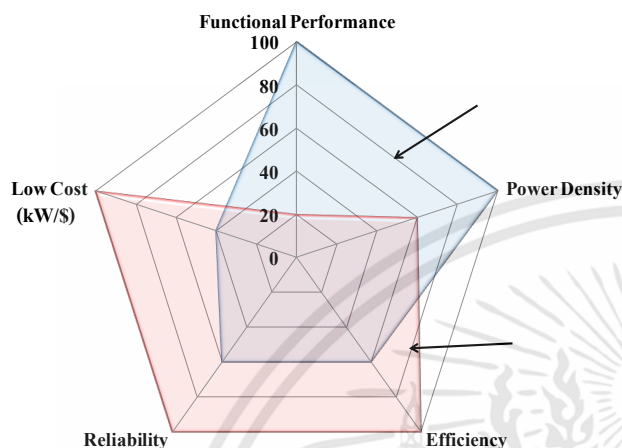


Fig. 17. Comparison of SST with LFT in distribution systems.

The compare a cost, a SST will compared with a cost of a power transformer and a PV inverter in solar farm application. Let consider 1 MW solar farm, the cost of a SST would be about 8 THB/VA which is approxivally 8 MTHB. The cost of a standard power transformer is about 1 MTHB. In addition, the cost of a PV inverter is roughly 5 MTHB. So, the SST would be hiher cost about 2 MTHB. However, the function of SST can offer a lot more benefit such as: low no load losses, ancillary service and grid-supporting operation. This benefits will have a key contibution both solar farm owner and utility grid.

VI. CONCLUSION

Suitable power transformer can be reduced power losses and increased profit from selling electricity to distribution system. The high efficiency and low core loss transformer, there are lower losses and make more benefit comparing to

standard transformer. The most suitable type transformer is 99.2 % (Type A) which cost 1.25 MTHB because it makes more net profit comparing to the other transformers. The profit of 99.2 % (Type A) transformer is about 869,449 THB as shown in Fig. 11. Since a high efficiency transformer has a low no load losses, this will provide a high financial benefits in solar farm business. Although using the low core loss transformer, it still has core loss in off-period. SST can help prevent these losses by turn-off a gate drive in off-period of solar farm. SST is smaller size, varieties of function and available to control output power. So, SST is an interesting device the solar farm instead of a power transformer and a PV inverter that apply in nowadays.

REFERENCES

- [1] A. Marinopoulos and P. Bakas, "Techno-economic evaluation of alternative configurations for very large scale PV power systems including energy storage," Monte-Carlo, IEEE, March 2014, pp.1-7.
- [2] C. Boccaletti and M. Macilietti, "Electrical Storage Systems in Cogeneration Plants Based on the Solar Energy Source," Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference, IEEE, June 2011, pp.407-412.
- [3] "IEEE Guide for Transformer Loss Measurement," IEEE Std C57.123-2002, August 2010, pp.1-49.
- [4] P.S. Georgilakis, J.C. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez, I. Fofana and G.K. Stefopoulos, "Environmental Cost of Transformer Losses for Industrial and Commercial Users of Transformers," Boston, MA, IEEE, August 2011, pp. 1-4.
- [5] Detail Project Report 1 MWp SPV Power Plant, <http://www.scribd.com/doc/236254021/1MW-Utility-Scale-Solar-PV-Power-Plant-Final-libre#scribd>
- [6] PV Planner Report for a PV Power Plant in USA, <http://solargis.info/doc/pvplanner-sample-reports>
- [7] <http://www.ekarat-transformer.com/news/frontend/detail/id/24>
- [8] J.W. Kolar and G. Ortiz, "Solid-State-Transformers: Key Components of Future Traction and Smart Grid Systems," IEEE International Power Electronics Conference (IPEC), May 2014.
- [9] G. Brando, A. Dannier, A. Del Pizzo and R. Rizzo, "A High Performance Control Technique of Power Electronic Transformers in Medium Voltage Grid-Connected PV Plant," Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference, September 2010, pp. 1-6.
- [10] N.C. Foureaux, L. Adolpho, S.M. Silva, J.A.S. Brito and B.J.C. Filho, "Application of Solid State Transformers in Utility Scale Solar Power Plant," Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE, 2014, pp. 3695-3700.
- [11] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, "Chapter 17 Multilevel Power Converters", Power Electronics Handbook, 2nd Edition Elsevier, 2007, ISBN 978-0-12-088479-7, Chapter 17, pp. 451-482.

2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015)

**Pattaya, Thailand
25-28 October 2015**

Pages 1-721



IEEE Catalog Number: CFP15801-POD
ISBN: 978-1-4799-8806-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solid State Transformer using a Modular Multilevel Inverter for PV Farm Applications

P. Khemmoon¹ and S. Khomfoi²

^{1,2} Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand
E-mail: kp.panya@gmail.com¹, kkhsurin@kmitl.ac.th²

Abstract — The aim of this paper is to present the solid state transformer integrated with PV farm applications in the distribution system of PEA grid. A Modular Multilevel Inverter (MMI) circuit, which can be connected to a 22 kV_{L-L} transmission system is also presented in this paper. The MMI has the capability of current limit if the short circuit fault occurs. The topology of the proposed MMI is the three-level three-phase inverter with the reduced voltage for laboratory use. The proposed idea focusing only on the MMI is validated by simulation and substantiate by the experiment.

I. INTRODUCTION

Nowadays, renewable energy is known as a source of electrical energy generation in worldwide, especially for solar energy. The solar energy system is not complicated and it is worthiness. The limitation of solar cell is solar panel producing energy only when there was a sunlight radiation, so an energy storage system is required to store the energy for use at the night time. The energy storage system used worldwide is battery [1]. Generally, the electricity generated from the solar cells requires the PV inverter for maximizing the power captured and transfer the power to the grid via the distribution transformer as shown in Fig. 1a. Normally, the electrical losses come from the inverter and the distribution transformer during the day time which is approximately 8 hours. However, during the night time, there are only the losses from the transformer which is mainly the core losses, as the inverter is not operating during this period. Therefore, the low core loss should be selected for this application, but the core losses still occur [2].

The proposed solution is to apply a solid state transformer (SST) to this system. The SST is the integration of the PV inverter and the distribution transformer in one circuit as shown in Fig. 1b [2-3]. One of the main advantages of the SST is the small size because it is operating at high frequency, so the core of the transformer integrated in the SST circuit is made from the ferrite [4]. It results in reduction in the install area in the solar farm.

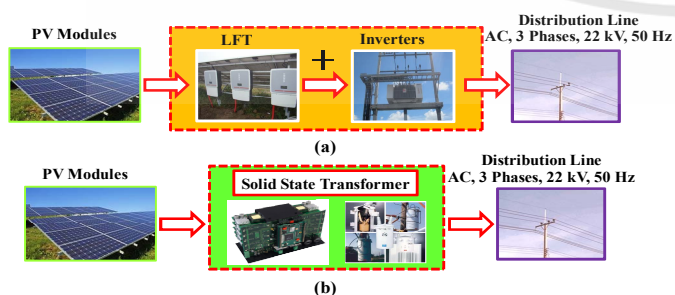


Fig. 1. Adaption of the SST with PV farm that work as transformer and inverter combined.

This paper presents the MMI circuit which is the high voltage side of the SST. It is connected between the DC link and the grid. The paper is arranged into 4 sections, the application of the SST, the theory of the MMI, the simulation and experimental results and finally conclusion.

II. APPLICATION OF THE SST IN THE SOLAR FARM

An application of the SST in solar farms is introduced as shown in Fig. 2. In one farm, there are many strings of the solar panels having the voltage between 400-800 V [5]. The SST can be separated into low voltage side, which is connected to each string of the solar panels, and the high voltage side, which is connected to the grid [6-7]. As shown in Fig. 2, each string is connected to the high frequency full-bridge DC-DC converter. The power is transferred to the fast recovery full bridge diode rectifier via the high frequency transformer (HFT) [8]. To increase the DC-link voltage level, the outputs of each rectifier are cascaded as shown in Fig. 2.

Considering the high voltage side, the MMI is connected between the DC-link and the grid, so its fundamental frequency is defined by the grid which is generally 50 Hz for the PEA distribution system [9]. The output voltage level of the MMI for this case is 22 kV. The MMI circuit consists of the buffer inductor which can limit the AC current under short circuit condition. On the other hand, the buffer inductor is used as the passive filter under normal operating condition [10].

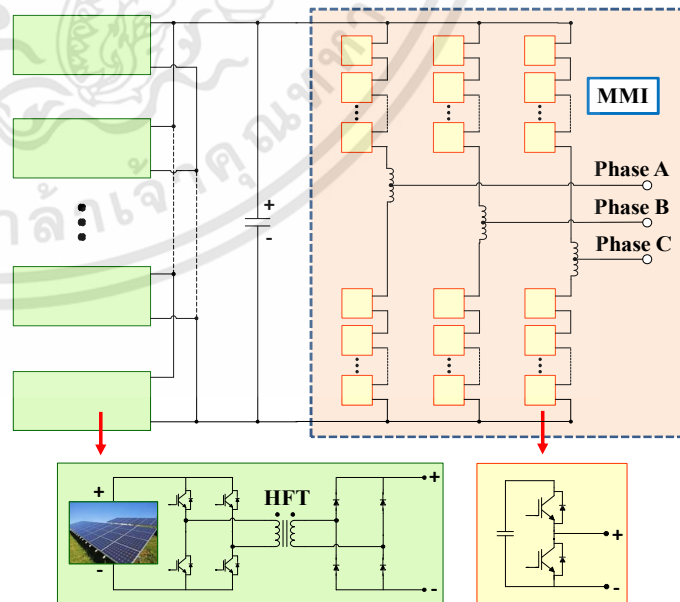


Fig. 2. An application of the solid state transformer in solar farms.

III. MODULAR MULTILEVEL INVERTER

Generally, the modular multilevel inverter (MMI) can be categorized into 4 topologies as follows,

- 1) Single Star Bridge Cells (SSBC),
- 2) Single Delta Bridge Cells (SDBC),
- 3) Double Star Chopper Cells (DSCC),
- 4) Double Star Bridge Cells (DSBC).

In this research the DSCC MMI is selected as the grid connected inverter at the high voltage side as shown in Fig. 2. The DSCC consists of several single cells connected in series in each phase leg. Each cell is in the form of half bridge as shown in the magnified view in Fig. 2. Due to reduction in the power switches in each cell, the total losses of the DSCC is lower than those of other topologies. Moreover, the DSCC can be connected directly to the grid without the bulky inductor connected in series [10-11] because there is an inductor with center tap installed between the upper and lower parts of each phase leg as shown in Fig. 3. The equation for the induction of each part of the phase leg can be derived as follows [12],

$$4L_{ab} = L_{ac} = L_{bc}. \quad (1)$$

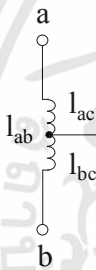


Fig. 3. The buffer inductor circuit.

The three-level three-phase MMI is selected for this research. The circuit diagram of the MMI is shown in Fig. 4 and its parameters are presented in Table I. In this research, the dc-link voltage level is reduced to 300 V for application in the laboratory.

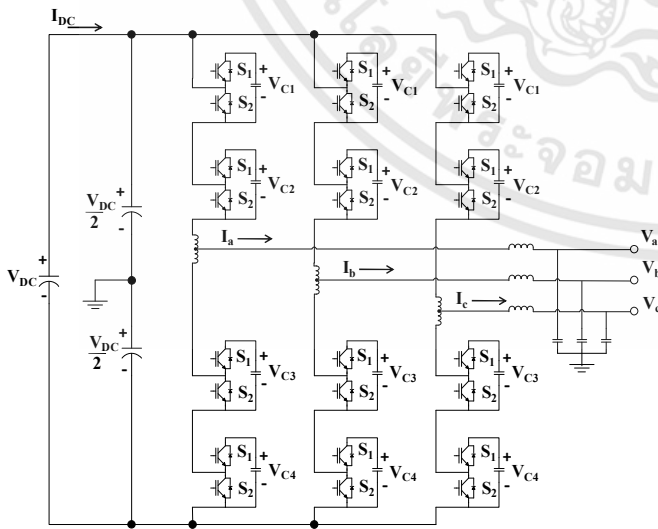


Fig. 4. The three-level three-phase MMI circuit design.

TABLE I
SIMULATION AND EXPERIMENT PARAMETERS

DC-link Voltage (V_{DC})	300 V
DC-link capacitor	2200 μ F
No. of cell in each arm	2
Capacitor in each cell	470 μ F
Coupled inductor (L_{ab})	4 mH
Carrier frequency (f_c)	5 kHz
Power frequency	50 Hz
C Filter	60 μ F
L Filter	0.5 mH

The pulse width modulation (PWM) technique for driving the MMI under the open loop operation is the Phase Disposition Pulse Width Modulation (PDPWM). Hence, two carrier signals are required for this topology. The upper portion and the lower carrier signals of the zero reference line are compared with the fundamental 50 Hz sinusoid waveform as shown in Fig. 5 [13]. The advantage of this technique is that the output voltage and output current will generate low harmonic distortion [14].

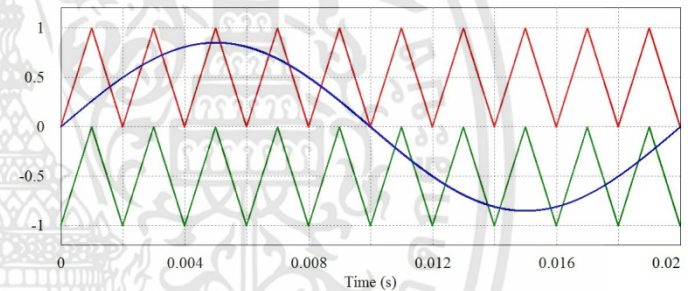


Fig. 5. The basic control technique by using PDPWM.

IV. SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS

In this paper, Power Simulation Program (PSIM) is used to simulate the MMI scenario. The PWM switching topology for the three-level three-phase inverter MMI circuit for simulation with PSIM is shown in Fig. 6.

The sinusoid waveform multiplied with the adjustable gain is created to simulate the adjustable amplitude modulating signals. The modulating signals are sent to the PWM block set for driving the gate of the power switches. The operating conditions for each cell and phase are shown in Table II.

TABLE II
MMI SWITCHING STATE.

V_{load}	C1	C2	C3	C4
$\frac{V_{dc}}{2}$	0	0	1	1
0	1	0	0	1
$-\frac{V_{dc}}{2}$	1	1	0	0

According to the logical status, the logic “1” means “turn on state for switching device 1 (S_1)”. Whereas, the logic “0” means “turn on state for switching device 2 (S_2)” [15].

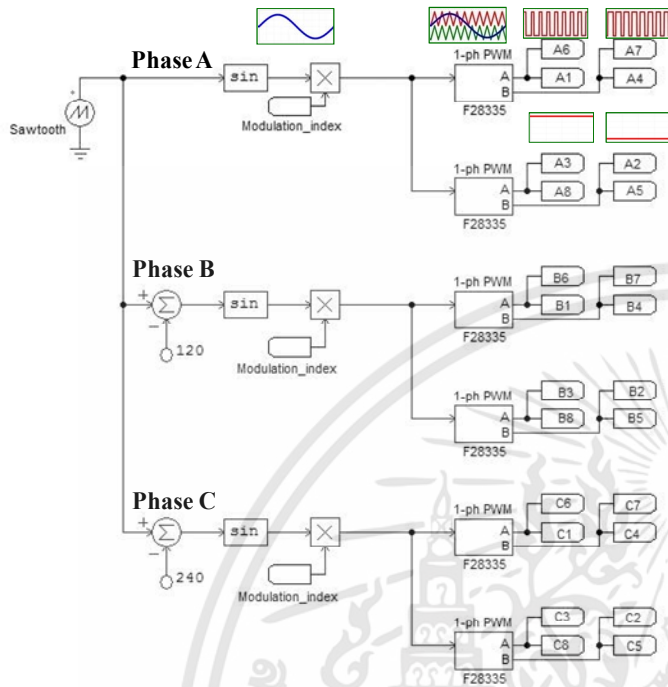


Fig. 6. The PWM switching topology by the PSIM program.

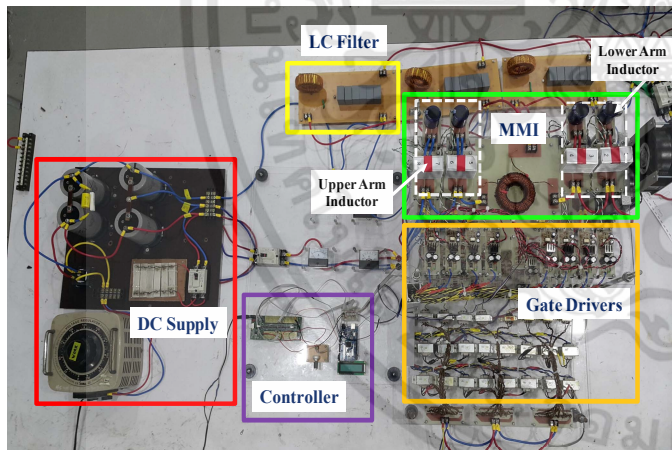


Fig. 7. The experimental hardware.

The simulation systems is then implemented on the test rig as shown in Fig. 7. The experimental system consists of the dc power supply for converter dc link, power circuit, gate driver, LC filter and the controller module. The Texas Instrument TMS320F28335 is used as a main CPU with the C-code generated by the PSIM to compile with the Code Composer Studio (CCS).

The simulation results under stand alone condition are shown in Fig. 8. Fig. 8(a) shows the line to line voltage of 3-phase with the modulation index equal to 0.85 and Fig. 8(b) shows the output voltage after the LC filter. The experimental results under the same operating condition are shown in Fig. 9. The converter voltage waveforms are shown in Fig. 9a and the output voltage waveforms of the LC filter are shown in Fig. 9b.

The experiment under load condition was also performed and the results are shown in Fig. 10. The results shown in Fig. 10a are the DC-link voltage and current waveforms which is the input of the MMI. The input power can be calculated using (2) and it is equal to 177.3 W. The results shown in Fig. 10b are the load voltage and current waveforms having power 151.9 W. It can be calculated using (3) and the efficiency can be calculated using (4). The efficiency of the experimental system is equal to 85.7 %.

$$P_{in} = V_{DC} \times I_{DC} \quad (2)$$

$$P_{out} = \sqrt{3} V_{line} I_{line} \cos\theta \quad (3)$$

$$\text{Efficiency} = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100 \% \quad (4)$$

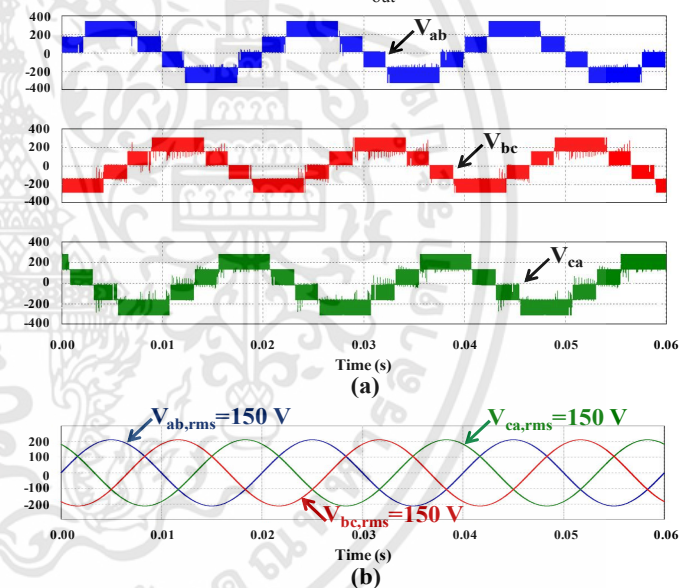


Fig. 8. The MMI simulation results.

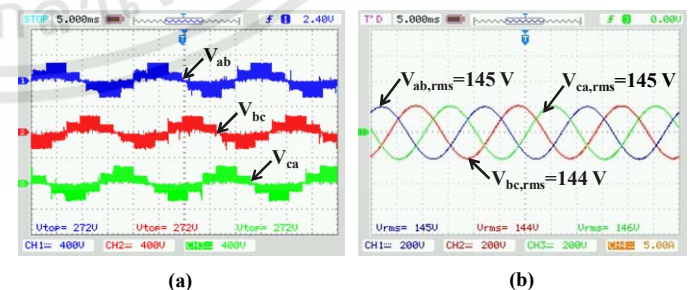


Fig. 9. The results from experimental hardware under no load test.

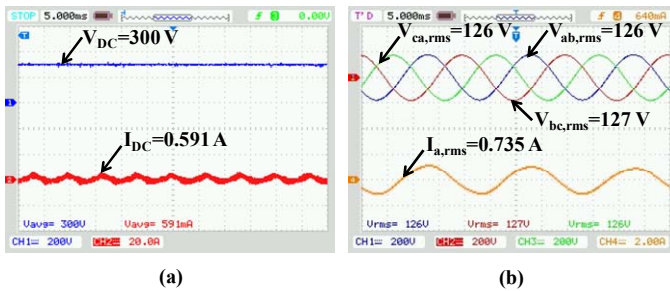


Fig. 10. Results under load test condition. (a) The dc input voltage and current. (b) The three phase output voltage and output current phase A.

The system harmonic distortion is analyzed by using the voltage and current waveforms as shown in Fig. 11. The %THD_v is equal to 1.53 % and the %THD_i is equal to 3.71 %. Both values are less than 5 % which is the power quality standard of the PEA.

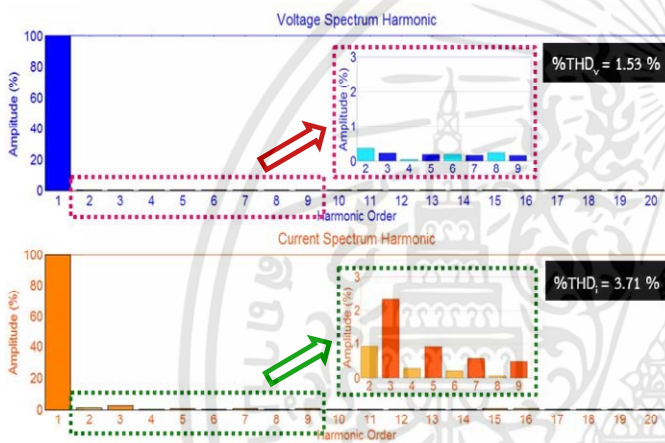


Fig. 11. The harmonic distortion of voltage and current waveform.

V. CONCLUSION

This paper proposes the application of the MMI for the high voltage side of the used in the PV farm. In this paper, the DSCC MMI is selected. The reduced operating voltage MMI is considered for implementation in the laboratory. In this research, PSIM program is applied to simulate the proposed converter. The simulation result validate the operation of the converter with open loop control under stand alone mode. The experimental results also substantiate the effectiveness of the converter. In the near future, the closed loop operation of MMI will be developed by many kind of algorithms and the converter level will be increased from three-level to five-level to handle the PEA distribution system at 22 kV.

VI. REFERENCES

- [1] S. Khomfoi, "Power electronics roles in Thailand smart grid," International Electrical Engineering Congress (iEECON), IEEE, 2014, March 19-21, 2014, pp. 1-5.
- [2] P. Khemmoook, W. Suwan-ngam and S. Khomfoi, "Suitable Power Transformers for Solar Farm Applications," ECTI-CON 2015, Hua Hin Thailand, June 24 – 27, 2015.
- [3] N.C. Foureaux, L. Adolpho, S.M. Silva, J.A.S. Brito and B.J.C. Filho, "Application of Solid State Transformers in Utility Scale Solar Power Plant," Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE, 2014, pp. 3695-3700.

- [4] J.W. Kolar and G. Ortiz, "Solid-State-Transformers: Key Components of Future Traction and Smart Grid Systems," IEEE International Power Electronics Conference (IPEC), May 2014.
- [5] W. Liu, K. Wang, H.S. Chung and S.T. Chuang "Modeling and Design of Series Voltage Compensator for Reduction of DC-Link Capacitance in Grid-Tie Solar Inverter," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 5, May 2015, pp. 2534-2548.
- [6] F. Filho, Y. Cao and L.M. Tolbert, "11-level Cascaded H-bridge Grid-tied Inverter Interface with Solar Panels," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, February 21-25, 2010, pp. 968-972.
- [7] S. Khomfoi, L. M. Tolbert, "Chapter 17 Multilevel Power Converters," Power Electronics Handbook, 2nd Edition Elsevier, 2007, ISBN 978-0-12-088479-7, Chapter 17, pp. 451-482.
- [8] X. She, A.Q. Huang and R. Burgos, "Review of Solid-State Transformer Technologies and Their Application in Power Distribution Systems," IEEE Industry Applications Society, Vol. 1, No. 3, September 2013, pp. 186-198.
- [9] B.N. Alajmi, K.H. Ahmed, G.P. Adam, S.J. Finney and B.W. Williams, "Modular Multilevel Inverter with Maximum Power Point Tracking for Grid Connected Photovoltaic Application," IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) 2011, June 27-30, 2011, pp. 2057-2062.
- [10] M.S. Rajan and R. Seyezhai, "Comparative Study of Multicarrier PWM Techniques for a Modular Multilevel Inverter," International Journal of Engineering (IJET), Vol. 5, No. 6, January 2014, pp. 4850-4865.
- [11] H. Akagi, "Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC)," International Power Electronics Conference (IPEC), June 21-24, 2010, pp. 508-515.
- [12] M. Hagiwara and H. Akagi, "Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No.7, 2009, pp.1737-1746.
- [13] J. Mei, B. Xiao, K. Shen and L.M. Tolbert, "Modular Multilevel Inverter with New Modulation Method and Its Application to Photovoltaic Grid-Connected Generator," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 11, November 2013, pp. 5063-5073.
- [14] S. Sedghi, A. Dastfan and A. Ahmadyfard, "A New Multilevel Carrier Based Pulse Width Modulation Method For modular Multilevel Inverter," International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, The Shilla Jeju, Korea, May 30-June 3, 2011, pp.1432-1439.
- [15] A. Nordvall, "Multilevel Inverter Topology Survey," Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Göteborg, Sweden, 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Design of the PI controller with SmartCtrl for the Solid State Transformer in the Solar Farm Application

Panya Khemmook

Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520
Kp.panya@gmail.com

Surin Khomfoi¹, Chaitouch Manee-in²

^{1,2}Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520
kkhsurin@kmitl.ac.th¹, kmchaita@kmitl.ac.th²

Abstract— This paper presents design and control a suitable power electronics transformer (Solid State Transformer, SST) that is suitable for applying to be application in solar farm in Thailand by using Power Simulation Version 9.1 (PSIM 9.1). SmartCtrl is a toolbox of the PSIM 9.1 program that is used to design PI controllers and find the optimal gain automatically. The advantages of designing a controller with SmartCtrl are used to interface or work with other applications, simplified to use and not complicated, simulation results are easy to understand and analyze, and the controller from the design is stable. The PI controller from the design from the SmartCtrl to for using with Solid State Transformer in solar farm applications work satisfied and very well as confirmed by the simulation results.

Keywords—solar farm; power electronic transformer; solid state transformer; solar inverter; high frequency transformer

I. INTRODUCTION

Nowadays, renewable energy and alternative energy are used in power generation, including: hydro energy, wind energy, solar energy, biomass, biogas and geothermal energy. Solar energy is the most attractive source of electricity, because the energy source is easy to find, free of cost and the process of producing electricity with solar energy is simple and uncomplicated. Considering the cost of generating electricity with solar panels, it is quite expensive. To exceed the profit of investment and high returns, a large solar power generation system or a solar farm is chosen. From the survey and analysis of a suitable power transformer for using in solar farms, it should have a low core loss [1]. It can reduce the power loss from the core loss during the night time or during periods of the system that does not generate the electricity. Therefore, the owner of the solar farm have more profit compared to the system using the high core loss power transformer. From the problem of power loss of the power transformer during the night time, Power electronics transformer or Solid State Transformer (SST) is very interesting for application in the solar farm system. The structure of the SST is as same as the transformer combining with the inverter, in the other words, the SST can integrate low frequency power transformers and the inverters with one device which the SST structure as shown in Fig. 1. From the SST structure with the inverter inside, the current cannot flow into the transformer if turn off power switch by turning off gate drive. Because of this, there is not core loss of the transformer at night time which is a high cost loss. In addition, the SST is small size, light weight, uses less

installation space compared to systems that use the low frequency power transformer with the solar inverter, and has varieties of function to support smart grid systems in the future.

Therefore, this paper focuses on the suitable SST circuit for solar farm applications in Thailand and uses SmartCtrl toolbox in the PSIM 9.1 to design the PI controller, which stability and the performance of the system can be validated by the simulation results that will be presented in the next section.

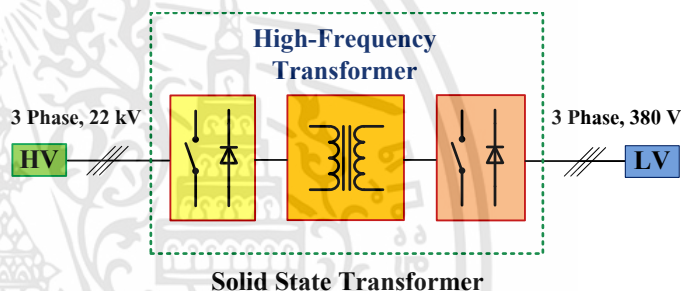


Fig. 1. Structure of the SST applied to the distribution system in Thailand.

II. EXAMPLE STRUCTURE OF SOLAR FARM AND SUITABLE SST FOR SOLAR FARM APPLICATION IN THAILAND

From the survey structure of a 1 MW solar farm and the general structure of solar farm in Thailand, that consists of PV modules those are connected in parallel and serial before connecting to the solar inverter then connect to the Main Distribution Board (MDB). Afterward, the power is transferred to the distribution system by the power transformer as shown in Fig. 2. In addition, most of solar farms do not use only one large inverter. Because if there is any damage to the solar inverter, the system will not be able to operate. So most of solar farms will use many of medium-sized solar inverters to increase stability and reliability of the system.

Therefore, the structure of the SST that is suitable for using with a large solar farm can be shown in Fig. 3. In the low voltage side which connected to the string of the PV module, it is a 3-phase inverter circuit which converts DC to AC and connects to the high frequency transformer. In the high voltage side uses a Modular Multilevel Inverter (MMI), DC electricity is converted to AC electricity at 50 Hz before connecting to the distribution system. The advantage of the MMI circuit is a half bridge circuit, so that the power switch is reduced in each cell. Moreover, there is an inductor to limit the current in a short

circuit condition and a passive filter to the system at normal operating condition operate as [2-3].

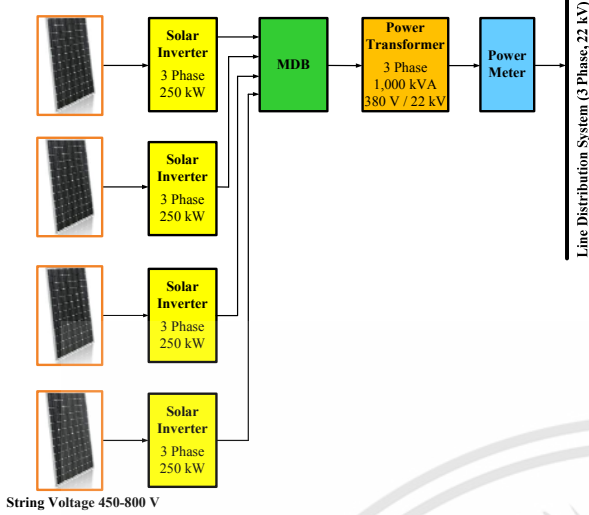


Fig. 2. The general structure of the 1 MW solar farm.

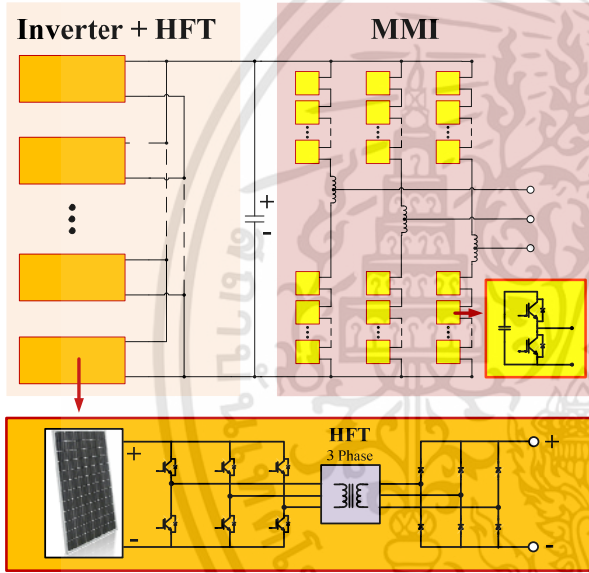


Fig. 3. The suitable SST circuit for solar farms application.

III. CONTROL SYSTEM DESIGN AT THE LOW VOLTAGE SIDE OF SST

This paper focuses on the 3-phase solar inverter between PV string and high frequency transformer (HFT) which is the one part of SST as shown in Fig. 3. In this section, the PSIM SmartCtrl toolbox is used to design the PI controller as shown in Fig. 4 and the part of HFT to the distribution system are replaced by 3-phase grid for simulation[3].

There are many different methods to control the system in Fig. 4. The axis decoupling control is used in this case which is the feedforward control can be shown in Fig. 5. However, the axis decoupling method is very complex and requires a large amount of computations. Therefore, a simplified control and application to microcontrollers (Micro PICs, PICs, DSPs or Small FPGAs), direct PI control (without feedforward parts for axis decoupling) is used as shown in Fig. 6. The transfer

function in Fig. 6 is the relationship between \hat{I}_d , \hat{I}_q and I_d^* , I_q^* which can be rewritten from equations (1) - (6) [4]. In order to design the PI compensator using two identical PI controller, the plant can be either the mutual transfer function or the self transfer function. This has the advantage of higher bandwidth and better than stability than use the self transfer function only.

$$\hat{I}_d = (\hat{d}_d V_G + \hat{I}_q L \omega) \frac{1}{Ls + r} \quad (1)$$

$$\hat{I}_q = (\hat{d}_q V_G - \hat{I}_d L \omega) \frac{1}{Ls + r} \quad (2)$$

Whereas,

$$\hat{I}_d = \frac{\hat{d}_d V_G}{(Ls + r)} + \frac{\hat{d}_q V_G L \omega}{(Ls + r)^2} \frac{\hat{I}_d (L \omega)^2}{(Ls + r)^2} \quad (3)$$

$$\hat{I}_d + \frac{\hat{I}_d (L \omega)^2}{(Ls + r)^2} = \frac{\hat{d}_d V_G}{(Ls + r)} + \frac{\hat{d}_q V_G L \omega}{(Ls + r)^2} \quad (4)$$

$$\left(\frac{(Ls + r)^2 + (L \omega)^2}{(Ls + r)^2} \right) \hat{I}_d = \frac{\hat{d}_d V_G}{(Ls + r)} + \frac{\hat{d}_q V_G L \omega}{(Ls + r)^2} \quad (5)$$

$$\hat{I}_d = \frac{\hat{d}_d V_G (Ls + r)}{(Ls + r)^2 + (L \omega)^2} + \frac{\hat{d}_q V_G L \omega}{(Ls + r)^2 + (L \omega)^2} \quad (6)$$

Given, \hat{I}_d and \hat{I}_q are the d-q current control loop, I_d^* and I_q^* are the d-q current reference, \hat{d}_d is comparable signal between I_d^* , and \hat{I}_d , \hat{d}_q is comparable signal between I_q^* and \hat{I}_q , V_G is output voltage of the inverter, ω is frequency of the system and R, L is Low pass filter

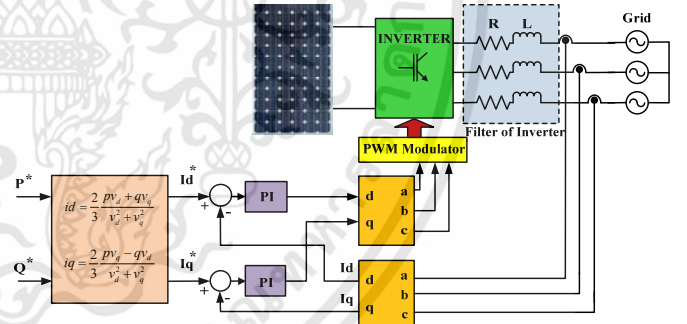


Fig. 4. Feedback current control of 3-phase solar inverter.

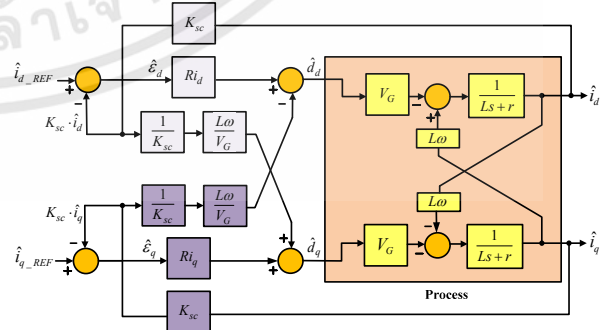


Fig. 5. The axis decoupling control of feedforward control

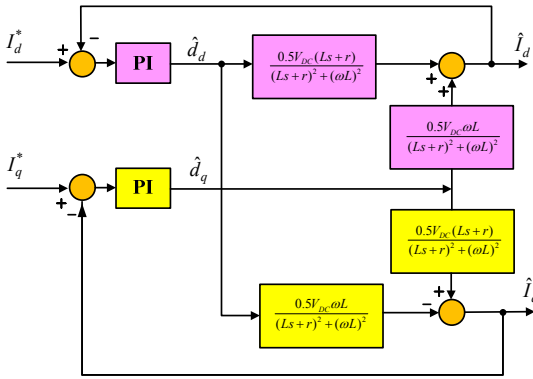


Fig. 6. Direct PI control by using two identical PI controller

IV. PI CONTROLLER DESIGN BY SMARTCTRL

PI control is easy method to control, mostly used for varieties applications and can maintain the stability of the system as well. The parameters use to design the PI controller of the 3-phase inverter system between the PV string and the HFT of the SST can be expressed as (7)-(10).

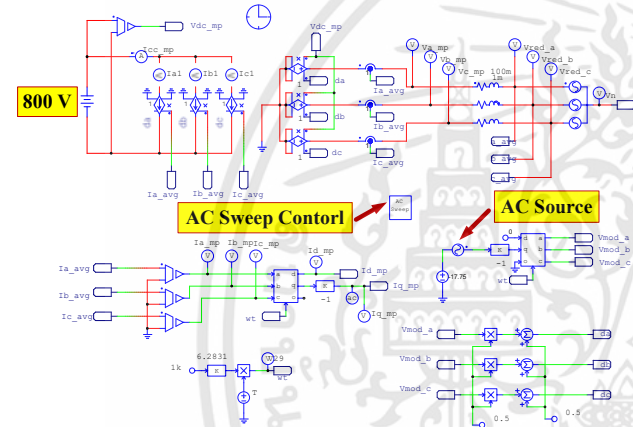


Fig. 7. Model of 3-phase inverter in dq axis by means of the PSIM AC Analysis.

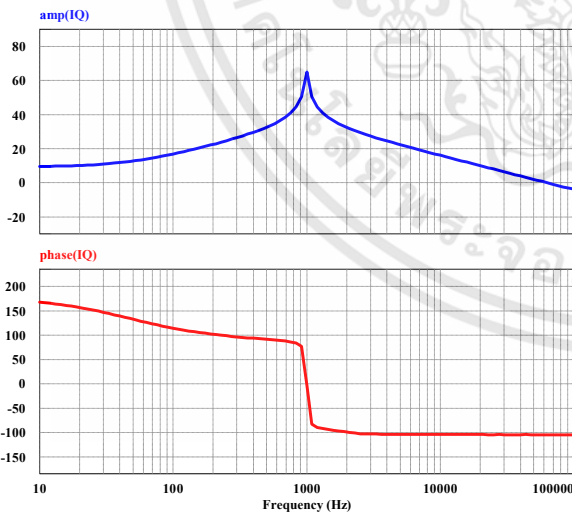


Fig. 8. The frequency response of the model

$$\%OS = \frac{C_{max} - C_{ss}}{C_{ss}} \times 100 \tag{7}$$

$$\zeta = \frac{-\ln(\%OS / 100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\%OS / 100)}} \tag{8}$$

$$\omega_{BW} = \frac{4}{T_s \zeta} \sqrt{(1 - 2\zeta^2) + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}} \tag{9}$$

$$PM = \tan^{-1} \frac{2\zeta}{\sqrt{-2\zeta^2 + \sqrt{1 + 4\zeta^4}}} \tag{10}$$

Whereas, %OS is percent overshoot
 ζ is damping ratio
 ω_{BW} is bandwidth which can be approximately cross frequency
 PM is phase margin

The PSIM SmartCtrl toolbox used to design the PI controller of this 3-phase inverter and the plant can be shown in Fig. 7. This 3-phase inverter is a feedback current control and sets the basic parameters: input voltage is equal to 800 V, output voltage (line to line) is equal to 380 V and power frequency is equal to 1 kHz which the frequency response of the model as shown in Fig. 8. From the frequency response of the plant in Fig. 8, the PI controller gain can be designed by filling the cross frequency and phase margin as shown in Fig. 9. In designing the system, overshoot percentage (%OS) is equal to 10 %, setting time (T_s) is equal to 4 ms. From equation (8) and (9) can be calculated damping ratio (ζ) equal to 0.6 and cross frequency equal to 1.913 kHz. For PI controller design, the coordinate of the cross frequency and phase margin (Red Point) must be in the white area, where the system is stable. When filling the cross frequency and phase margin values, SmartCtrl will be calculated the K_p and K_i gain as shown in Fig. 10. For design, the phase margin generally sets in the range of 30 to 60 degrees to prevent system instability.

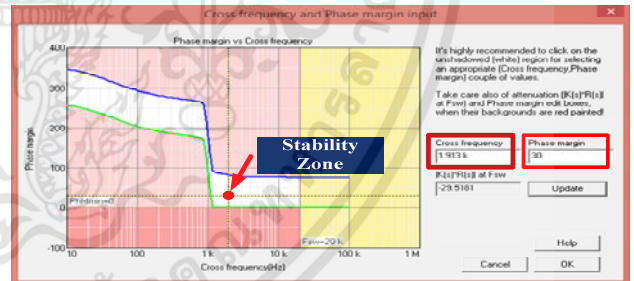


Fig. 9. Design PI Controller gain by entering cross frequency and phase margin in SmartCtrl toolbox of PSIM.

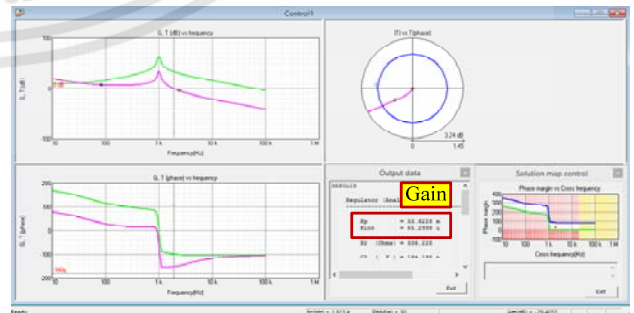


Fig. 10. Design K_p and K_i gain by SmartCtrl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V. PI CONTROLLER PERFORMANCE

Fig. 11 is the feedback current control inverter circuit of the SmartCtrl toolbox used to test the Gain value from design. Simulation parameters are shown in Table I. In this simulation, K_P is equal to 48.57×10^{-3} , K_I is equal to 164.16×10^{-6} and phase margin of PI controller is equal to 55 degree. Which the performance of the system can be confirmed by the simulation results in Fig. 12. The output power of the inverter will be change to the reference output power regulated by the PI Controller.

TABLE I. PARAMETERS FOR SIMULATION MODEL

DC-link Voltage	800 V
Output Voltage (Line to Line)	380 V
Output Power of Inverter	250 kW
Carrier Frequency	20 kHz
Power Frequency	1 kHz
R Filter	0.1 Ω
L Filter	1 mH
K_P	48.57×10^{-3}
K_I	164.16×10^{-6}

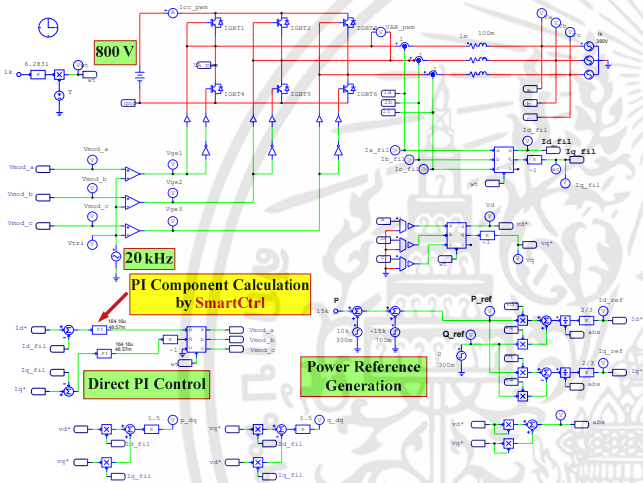


Fig. 11. The simulation model of SmartCtrl used to test the PI controller gain.

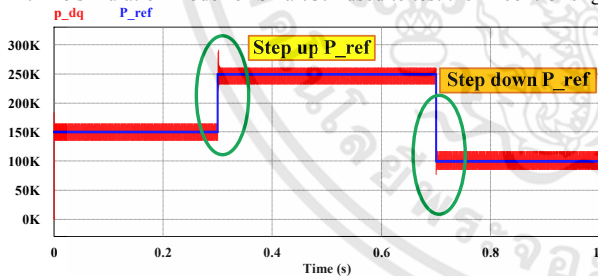


Fig. 12. The simulation results of the system using the K_P and K_I gain from design with SmartCtrl.

VI. CONCLUSION

This paper proposed the PI controller design of the 3-phase inverter between the PV string and the HFT of SST with the SmartCtrl toolbox of the PSIM. The program automatically calculated the K_P and K_I gain values. Just fill the cross frequency and the phase margin in the stability zone. The simulation results show that the gain gained from the design can control the system to maintain stability and control of the system as well.

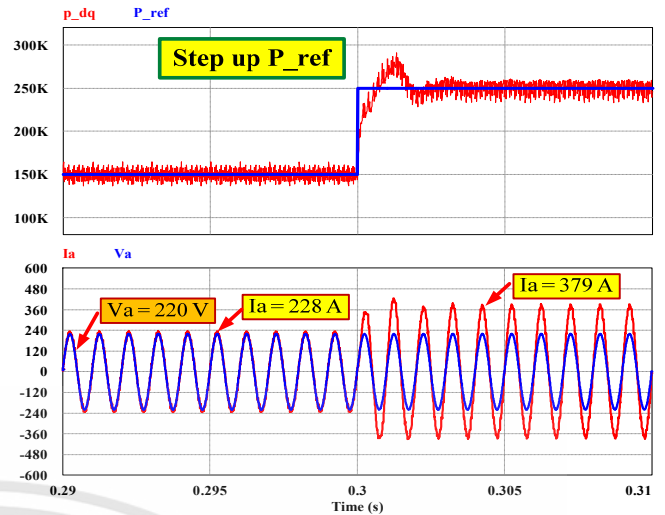


Fig. 13. An enlarged image of Fig.12 in the range of increase output power referenced from 150 kW to 250 kW.

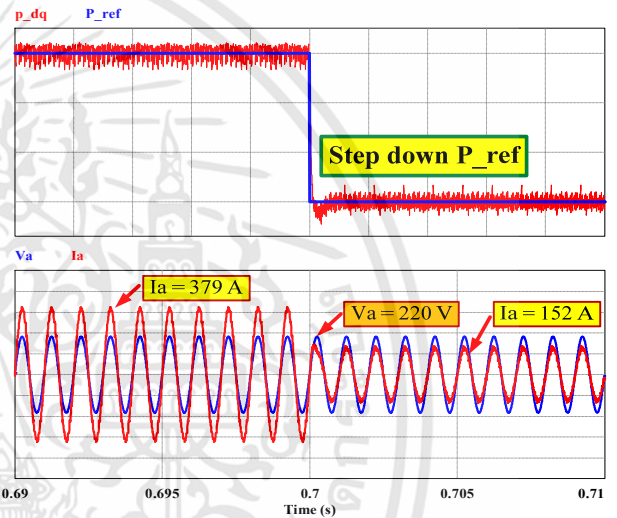


Fig. 14. An enlarged image of Fig.12 in the range of decrease output power referenced from 250 kW to 100 kW.

ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by the Thailand Research Fund under the research grant No. PHD58I0092 and Bira Brothers Co. Ltd. Moreover, Department of Electrical Engineering of KMITL, Bangkok, Thailand.

REFERENCES

- [1] P. Khemmoook, W. Suwan-ngam and S. Khomfoi, "Suitable Power Transformers for Solar Farm Applications," ECTI-CON 2015, Hua Hin Thailand, June 24 - 27, 2015.
- [2] P. Khemmoook, S. Khomfoi, "Solid State Transformer using a Modular Multilevel Inverter for PV Farm Applications," 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2015, pp. 2108 - 2111.
- [3] M. Hagiwara and H. Akagi, "Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No.7, 2009, pp.1737-1746.
- [4] SmartCtrl Tutorial, "3-Phase Grid-Connected PV Inverter Control Loop Design".
- [5] K. Prompinit, S. Khomfoi, "Design of active power controller of a BESS in AC microgrids," ECTI-CON 2015, Hua Hin Thailand, June 24 - 27, 2015.

EEAFT

M

*i*EECON2019

The 7th International Electrical Engineering Congress
6 - 8 March 2019, **Cha-am, Thailand**

Conference Program and Abstract Book

Power & Energy
Communications
Electronics & Control
Digital Signal Processing
Computer & IT

Organized by

M **EEAFT**

Technical Sponsored by

IEEE
THAILAND SECTION

Supported by

NBTC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Implementation of SHE Control Technique for the SST with CHB Seven-level Waveform on the Solar Farm Applications

Panya Khemmook
Dept. of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520
kp.panya@gmail.com

Surin Khomfoi
Dept. of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand, 10520
kkhsurin@kmitl.ac.th

Teeraphon Phophongviwat
Dept. of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand, 10520
teeraphon.ph@kmitl.ac.th

Worapong Pairindra
Dept. of Engineering Education,
Faculty of Industrial Education
and Technology, King Mongkut's
Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok, Thailand,
10520, worapong.pa@kmitl.ac.th

Abstract—This proposed paper presents the use of selective harmonic elimination (SHE) technology to control the cascaded H-Bridge Multi-level Inverter (CHBMI) for power transferring over the high frequency transformer (HFT), which is a part of the SST for applying to a solar farm. Apparently, the converter is using the seven-level CHBMI and the SHE technique to get rid of the 5th harmonic and 7th harmonic to find a set of angles θ_1 , θ_2 and θ_3 with the lowest 3rd harmonic. The calculated angles are used in each modules. Obviously, the simulation has shown that, at $m_a = 2.43$, $\theta_1 = 11.6782^\circ$, $\theta_2 = 26.8870^\circ$ and $\theta_3 = 56.0271^\circ$. The total harmonic distortion (%THDv) will be lowest at 9.35%. According to the experimentation, the SHE technique with low %THDv can reduce the power loss at HFT compared to the square wave transmission technique which the %THDv is high.

Keywords—solid state transformer, solar farm, cascaded H-bridge multi-level inverter, selective harmonic elimination method

I. INTRODUCTION

Solid state transformer or smart transformer or electronic transformer is built from the power electronic components with high switching frequency. The SST structure consists of 2-side converter, the primary side and the secondary side are connected via the high frequency transformer (HFT). According to the high switching frequency, the size becomes smaller and weight is less than conventional low frequency transformer which is normally used [1]. The SST has been applied in many fields such as solar farm, wind farm, energy storage, traction system, EV charger, harmonic filtering and FACTS device. This article discusses how SST can be applied to a solar farm. The advantages of SST compared to conventional solar inverter and low frequency transformer are SST, which can solve the problem of losses [2]. Power due to the core loss of the transformer during the night. It can combine the operation of a solar inverter with a low frequency transformer into a single device.

For the application of SST to a solar farm in Thailand can be shown in Fig. 1. The principle the SST operation starts with the inverter, the primary side of the HFT converts the direct current from the PV string to AC at high switching frequencies. Afterward, the power transmitted through the HFT and the HFT secondary converter is converted into a high-frequency with alternating current to a low-frequency alternating current at 50 Hz to connect it to the grid. The system will automatically work and send data to the plant data operation to process and display or can be run directly from the system administrator.

In this paper, we will present the primary inverter system of HFT as a part of the SST, as highlighted in Fig. 1. The 7-cascaded H-Bridge Multi-level Inverter (CHB seven-level inverter) is operated as the primary input side of the HFT. The advantages of the CHB seven-level inverter are independent DC source, similar to the PV string, which makes it ideal for solar farm applications, high power conversion efficiency [3], Power loss of switching devices is not too high and with lower harmonics compared to square wave or five-level converter transmission, the loss of power at HFT decreases.

There are many techniques used to control the operation of the CHB seven-level inverter, but there is one method that is popular in the use. The Selective Harmonic Elimination (SHE) technique is introduced due to the simplicity, uncomplicated and low harmonic voltage waveform [4]. Therefore, in this article, the CHB seven-level inverter control with SHE method is proposed to reduce the harmonics of the voltage waveform and reduce the power loss of the HFT generated from the ferrite core. According to the simulated results, the harmonic of the CHB seven-level inverter controlled by the SHE method is low. The reduction of the HFT power loss due to harmonic distortion can be confirmed due to the harmonics compared to square wave transmission. The experimental results in this section can be illustrated as follows.

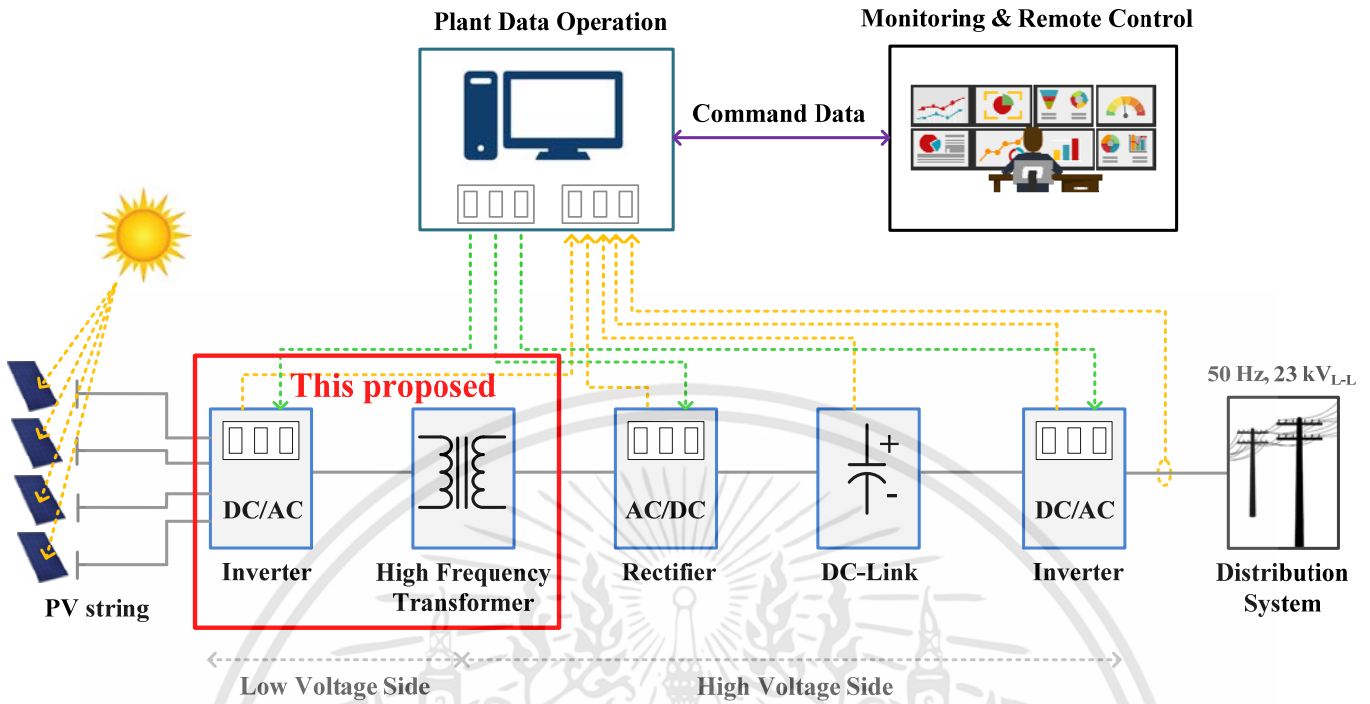


Fig. 1 The application of SST to a solar farm in Thailand.

II. SELECTIVE HARMONICS ELIMINATION

The selective harmonic elimination method (SHE) is a simple, easy-to-use control technique that lowers THD and reduces the switching losses of power switching devices. SHE also has the advantage of being able to directly control the output voltage harmonics and eliminate the lower harmonic order. Therefore, the SHE technique has been applied in this research to reduce the power loss and heat loss. HFT [4].

Fig. 2 is the CHB seven-level inverter output voltage waveform. When analyzing the waveform using the Fourier equation, it can be expressed as (1) where L is the level of the waveform and the fundamental output voltage can be expressed as (2)

For a seven-level waveform, it is found that the 3rd harmonic is lower, so it is better to remove the harmonics at 5th harmonic and 7th harmonic, as shown in [5], [6]. The output voltage of 5th harmonic and 7th harmonic can be expressed as (3) and (4).

Odd value

$$V_{out,n} = \frac{4V_{dc}}{n\pi} [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3) + \dots + \cos(n\theta_{(L-1)/2})] \quad (1)$$

Fundamental output equation

$$V_{out,1} = \frac{4V_{dc}}{\pi} [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3)] \quad (2)$$

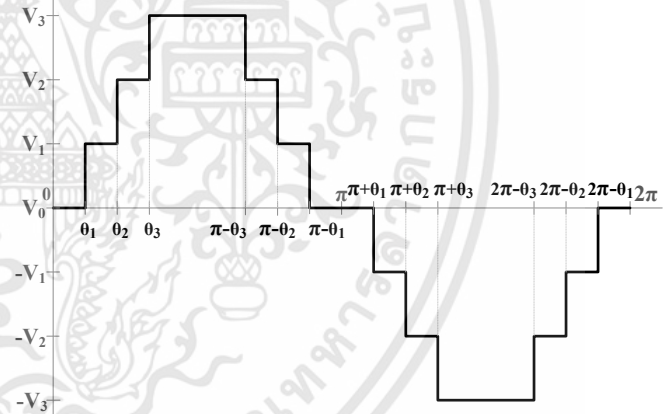


Fig. 2 The CHB seven-level inverter output voltage waveform.

5th harmonic output equation

$$V_{out,5} = \frac{4V_{dc}}{5\pi} [\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3)] \quad (3)$$

7th harmonic output equation

$$V_{out,7} = \frac{4V_{dc}}{7\pi} [\cos(7\theta_1) + \cos(7\theta_2) + \cos(7\theta_3)] \quad (4)$$

From the equation (2), when the value of $n = 1$ is set to (5), $m_a = (\pi V_{out,1}) / (4V_{dc})$. In order to eliminate harmonic 5 and harmonic 7 by using $V_{out,5} = 0$ and $V_{out,7} = 0$, which can be expressed as (6) and (7).

$$\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) = m_a \quad (5)$$

$$\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) = 0 \quad (6)$$

$$\cos(7\theta_1) + \cos(7\theta_2) + \cos(7\theta_3) = 0 \quad (7)$$

Equation (6) and Equation (7), cosine can be extracted by using (8) and (9) to form polynomial equations and use Newton Raphson's method to solve equations for nonlinear polynomial equations [7], [8]. From the equation, values of θ_1 , θ_2 , and θ_3 , where $0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \pi/4$ for angles θ_1 , θ_2 , and θ_3 can be generated as well, which gives the lowest value of %THDv which will be discussed in next section.

$$\cos(5\theta) = 16\cos^5(\theta) - 20\cos^3(\theta) + 5\cos(\theta) \quad (8)$$

$$\cos(7\theta) = 64\cos^7(\theta) - 112\cos^5(\theta) + 56\cos^3(\theta) + 7\cos(\theta) \quad (9)$$

III. SIMULATION RESULTS

MATLAB/Simulink simulation results can be expressed as Fig. 3 to Fig. 6 using a fundamental frequency of 10 kHz and the voltage in each DC source is equal to 20 volts. The $m_a = 2.43$, %THDv is lowest at 9.35% as shown in Fig. 3 and the angles are $\theta_1 = 11.6782^\circ$, $\theta_2 = 26.8870^\circ$ and $\theta_3 = 56.0271^\circ$ as shown in Fig. 4. This set of angles will generate the lowest 3rd harmonic at 0.02% (5th harmonic = 0%, 7th harmonic = 0.02%, 9th harmonic = 7.07%) as shown in Fig. 5 and the output voltage $V_{rms} = 43.75$ V as illustrated in Figure 6, respectively.

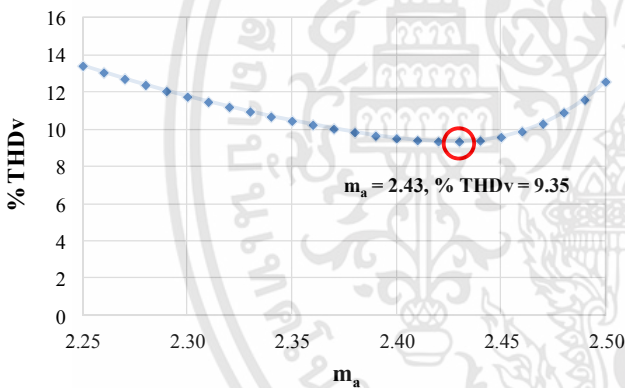


Fig. 3 The SHE %THDv vs modulation index.

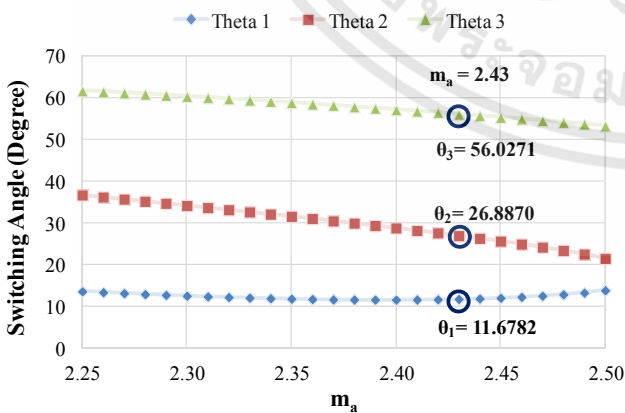


Fig. 4 The switching angles vs modulation index.

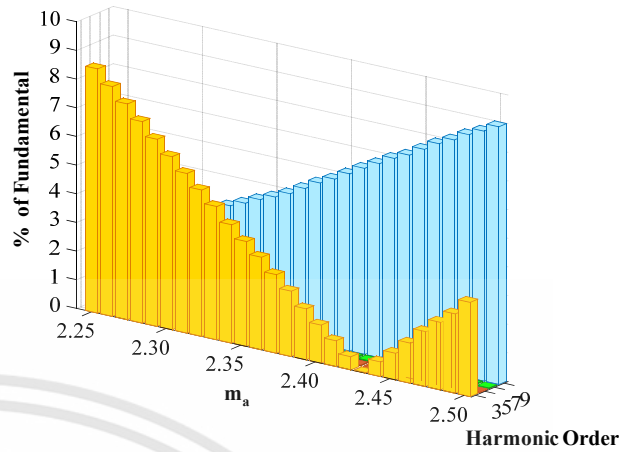


Fig. 5 Harmonic elimination vs modulation index.

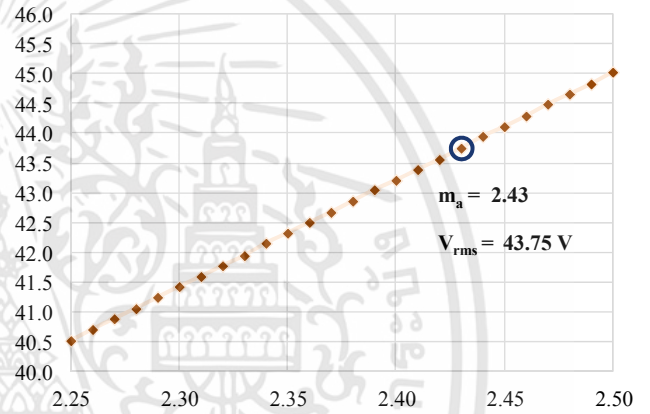


Fig. 6 The CHB seven-level inverter output voltage vs modulation index.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

This section will be discussing the performance of the seven-level inverters CHB and HFT as a component of the SST, using the SHE technique for controlling the operation as previously shown. Experimental hardware used for testing can be seen in Fig. 7. The FPGA generates a control signal for the system to supply power to the resistive load. Test results can be displayed in Table I, and Fig. 8, Fig. 10.

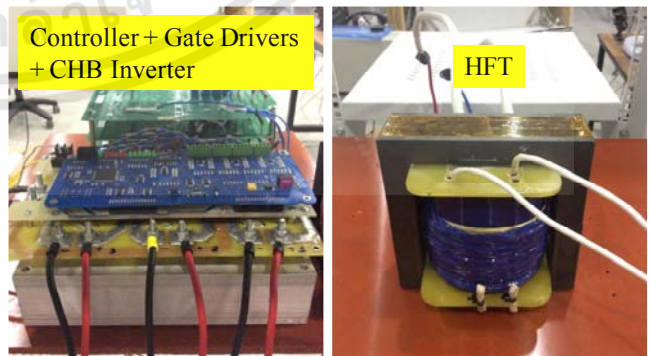


Fig. 7 Experimental hardware used for testing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

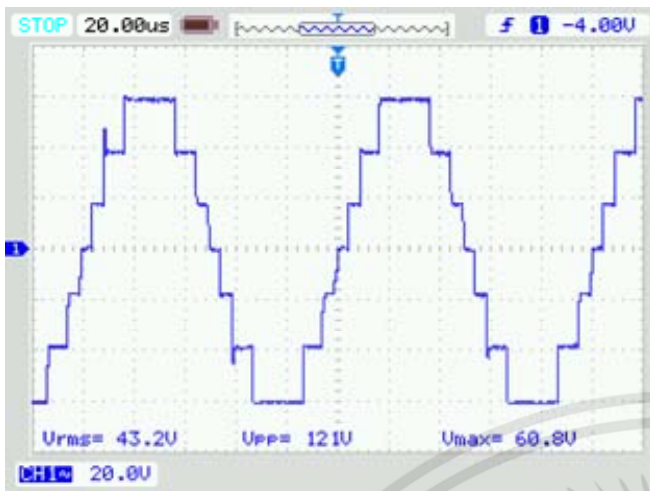


Fig. 8 The CHB seven-level inverter output voltage waveform at no-load.

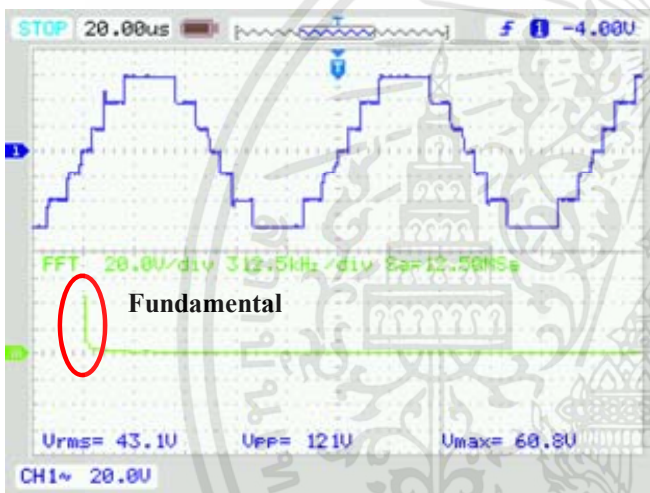


Fig. 9 CHB seven-level inverter harmonic analysis at no-load.

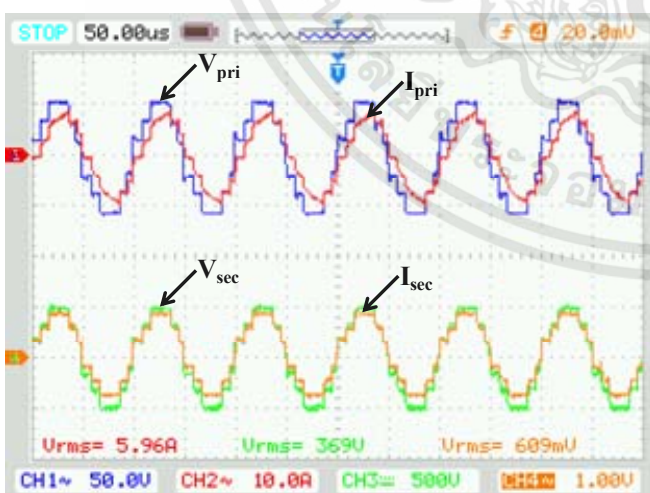


Fig. 10 Current and voltage waveform of HFT while supplying resistive load.

TABLE I. % LOSS IN EACH CASE

	P_{pri} (W)	P_{sec} (W)	Loss (W)	% Loss
SHE method	230	225	5	2.17
Square wave	354	338	16	4.52

The data in Table I. shows that the SHE method has a %Loss at HFT of 2.17%, which is less than square wave power transmission, which results in a loss of power of 4.52%. Hence, the low harmonic waveform with SHE technique can reduce the power loss at HFT.

V. CONCLUSION

This proposed paper presents the use of SHE techniques to control the CHB seven-level inverter for high frequency power transmission through HFT as part of the SST for application to solar farms. The results show that the SHE method with a low %THDv will have low % Loss at the HFT of 2.17%. The square wave transmission technique has a % Loss at the HFT of 4.52%, therefore, the SHE technique can reduce the power loss at HFT as well. The power loss can be reduced by up to 100% compared to the technique of square wave transmission with a relatively high %THDv.

ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by the Thailand Research Fund under the research grant No. PHD5810092 and Bira Brothers Co. Ltd. Moreover, Department of Electrical Engineering of KMUTL, Bangkok, Thailand.

REFERENCES

- [1] P. Khemmook, S. Khomfoi and C. Manee-in, "The design of the PI controller with SmartCtrl for the Solid State Transformer in the solar farm application," IEEE, 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 501 - 504, June 2017.
- [2] P. Khemmook, W. Suwan-ngam and S. Khomfoi, "Suitable Power Transformers for Solar Farm Applications," IEEE, 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Hua Hin Thailand, June 2015.
- [3] R. Khamooshi and A. Namadmalan, "Converter utilisation ratio assessment for total harmonic distortion optimisation in cascaded H-bridge multi-level inverters," IET Power Electronics, volume: 9, pp. 2103 - 2110, August 2016.
- [4] V. Joshi Manohar, I. Sobha Rani and K. Venkata Ramana, "SHE controlled CHB 7-level inverter with equal & unequal DC sources using C-genetic algorithm," IEEE, 2016 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore India, October 2016.
- [5] D. Graham Holmes, Thomas A. Lipo, Pulse width modulation for power converter: A John Wiley & Son, p. 440-449, 2003.
- [6] M.F. Negash and U.B. Manthathi, "Development of 7-level cascaded H-bridge inverter topology for PV applications," IEEE, 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai, India, March 2016.
- [7] S. Khomfoi and L. M. Tolbert, Multi-level Power Converters, Power Electronics Handbook, 2nd Edition, Elsevier, Chapter 17, pp. 451-482. 2007.
- [8] W. Pairindra and S. Khomfoi, "An Optimization Design of the Diode Clamped Multi-Level Converter for Coaxial Inductive Power Transfer on the Low Voltage DC Micro-grid," Journal of Electrical Engineering & Technology (JEET), vol 1, no. 13, pp. 333-344, 2018.

EEAAT

iEECON2019

The 7th International Electrical Engineering Congress
6 - 8 March 2019, **Cha-am, Thailand**

Conference Program and Abstract Book

Power & Energy
Communications
Electronics & Control
Digital Signal Processing
Computer & IT

Organized by

EEAAT

Technical Sponsored by

IEEE
THAILAND SECTION

Supported by

NBTC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deteriorated Solar Panel Detection Technique of SST for a Solar Farm Application

Panya Khemmook
Dept. of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520
kp.panya@gmail.com

Surin Khomfoi
Dept. of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand, 10520
kkhsurin@kmitl.ac.th

Teeraphon Phophongviwat
Dept. of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand, 10520
teeraphon.ph@kmitl.ac.th

Worapong Pairindra
Dept. of Engineering Education,
Faculty of Industrial Education
and Technology, King Mongkut's
Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok, Thailand,
10520, worapong.pa@kmitl.ac.th

Abstract— This proposed paper introduces the fault detection method for solar cell with Box Plot technique on the Solid State Transformer (SST) for the solar farm application. The Box Plot technique with inclusive quartile value is functioned for finding the upper and lower limit for data analysis. Normally, the fault detections of solar panels are found by using the PV string current from the SST to calculate the upper and lower limit of the Box Plot. If one of the string currents is in the specific outer boundary, therefore, the solar panels are in non-operational condition mode. Generally, the fault detection testing for the solar panels can be categorized in 5 cases: normal condition, open circuit condition, line-line condition, partial shading condition and degradation condition. Finally, based on the simulation result and the actual results, the Box Plot is able to monitor the performance of the PV string according to various conditions as efficiently as possible and accurate.

Keywords—solid state transformer, solar farm, box plot method

I. INTRODUCTION

Power electronic transformers or solid-state transformers become the main power supply devices in the near future. In general, solid-state transformers have a structure of 2 converters and use a high frequency transformer (HFT) to transmit power through the ferromagnetic core with high switching frequency. Therefore, the size and weight of solid-state transformers will be greatly reduced compared to traditional transformers [1]. There are many applications that use solid-state transformers such as solar farms, wind farms, energy storage systems, harmonic filtering, EV chargers and FACTS devices. This article deals with SST in application of solar farms by using the advantages of SST over the traditional transformers. In addition, SST can solve the problem of night loss in conventional transformers and can also integrate the functions of the solar inverter and low frequency transformers into a single device as well [2].

To make solar farms work effectively and get the most return on investment. Monitoring of solar panels is important [3]- [5]. Therefore, function will be added to monitor the abnormalities of the solar cell to SST by using the Box Plot technique to detect the abnormalities of each PV string and display the results in real time as shown in Fig. 1. The

advantages of Box Plot technique are that it is not complicated. Easy to develop a system and high accuracy when the volume of data is large. [6]. The problem of solar panel degradation is a problem that causes the owner of the solar farm to lose a lot of sales revenue.

The monitoring system of solar panel can solve this problem very well. And the repair can be done quickly and easily. Therefore, this paper presents the detection of solar cell abnormalities using the Box Plot technique using the PV string of SST. From simulation and experimental results show that, the system can work effectively. The PV string operating condition can be accurately and precisely monitored.

II. BOX PLOT MODEL

Box Plot is a mathematical process that uses the statistical principle to determine the upper boundary and the lower boundary of the data by using the inclusive quartile. The quartile position can be derived from (1).

$$Q_k = \frac{k}{4}(n-1)+1 \quad (1)$$

When k is the order of the quartile ($k = 1, 2, 3$).
 n is amount of data.

Equation (1) determines the position of Q_1 and Q_3 from (2) and (3) and find the upper and lower limits of Box Plot as (4) and (5) as follows [6];

$$Q_1 = \frac{1}{4}(n-1) + 1 = 0.25(n-1) + 1 \quad (2)$$

$$Q_3 = \frac{3}{4}(n-1) + 1 = 0.75(n-1) + 1 \quad (3)$$

$$\text{Upper bound} = Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (4)$$

$$\text{Lower bound} = Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (5)$$

This method can detect outlier beyond the upper and lower limits accurately. However, the limitation of this method is that the number of stings analyzed must be no more than 25% of the total sting.

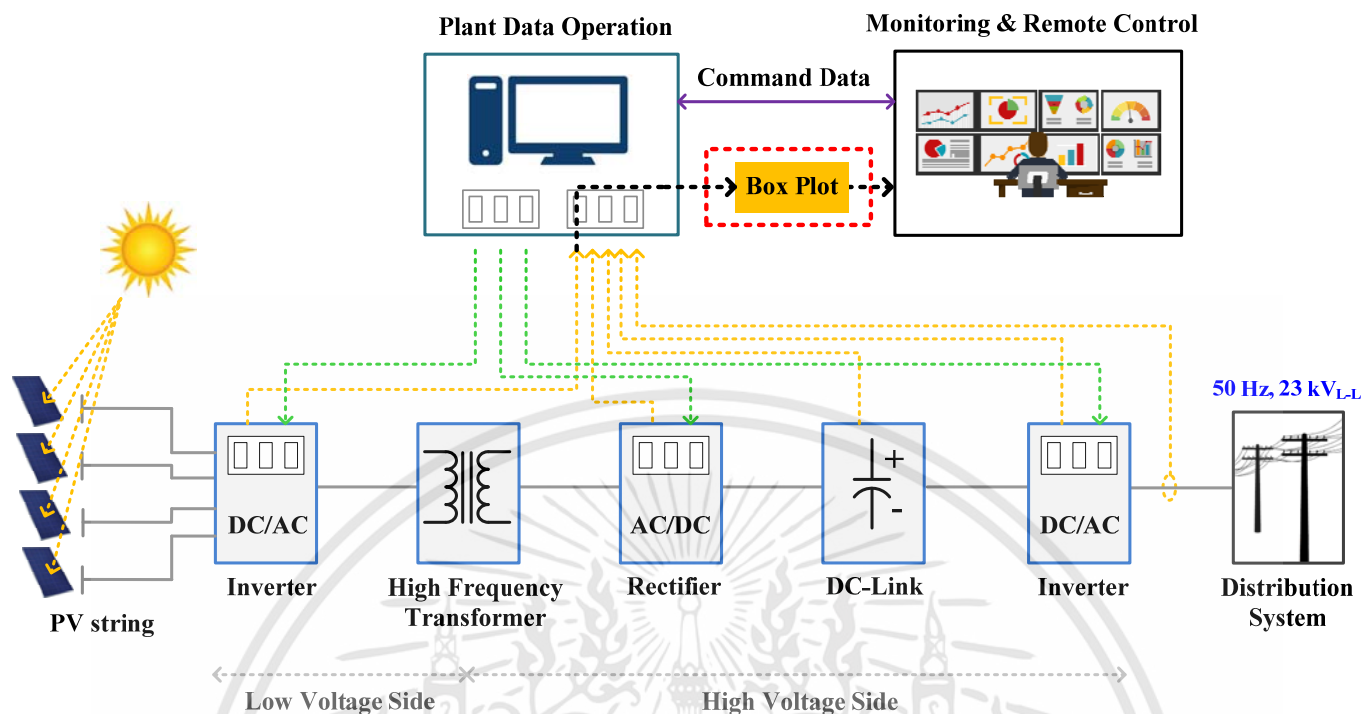


Fig. 1 Application of Box Plot Technique with SST to monitor the current fault in each string of PV.

III. SIMULATION RESULTS

The computer simulation test status can be divided into 5 conditions such as normal condition, open circuit condition, line-line condition (fault resistance = 0 Ω and 20 Ω), partial shading condition and degradation condition [6]. Initially, the Power Simulation (PSIM) is used for simulating the collected data. After that, the data is analyzed by Box Plot. The code generated in M-File of MATLAB & Simulink.

In simulation process with PSIM program, 4 sub strings of solar cell are created in each string. There are 5 serial solar panels connected. The parameters of the panel can be simulated as shown in Fig. 2.

For simulations of solar cells, each string varies from 0 to 1100 W/m² in every case tested. The simulation conditions in each case can be shown in Table I, and simulation results can be displayed as Fig. 3 to Fig. 8.

TABLE I. SIMULATION CONDITIONS IN EACH CASE

Case	Condition
Normal condition	-
Open circuit condition	Open circuit at String 1
Line-line condition	Short circuit at string 1 (Fault Resistance = 0 Ω and 20 Ω)
Partial shading condition	Light intensity at string 1 = 500 W/m ²
Degradation condition	Resistance at string 1 = 0.1 Ω

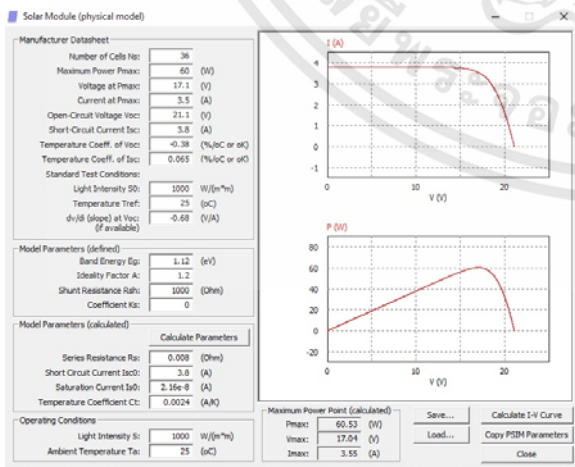


Fig. 2 Parameter settings.

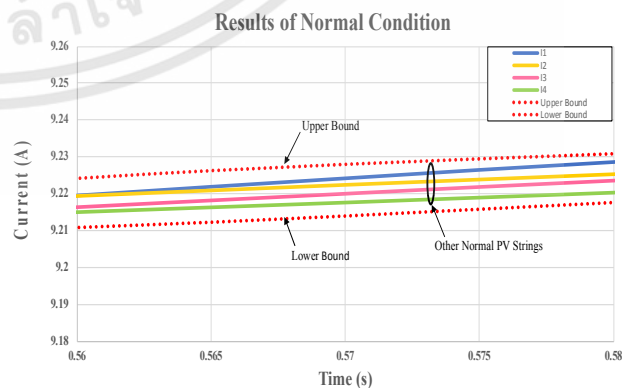


Fig. 3 Simulation results of normal circuit condition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

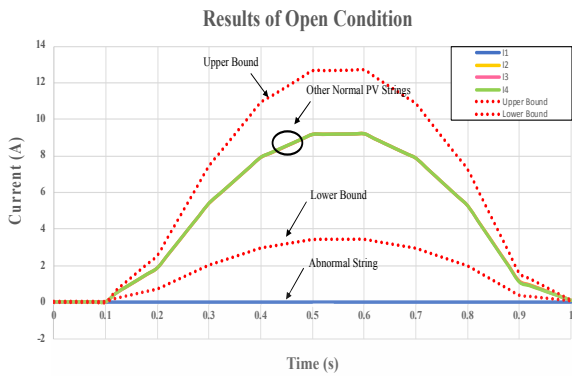


Fig. 4 Simulation results of open circuit condition.

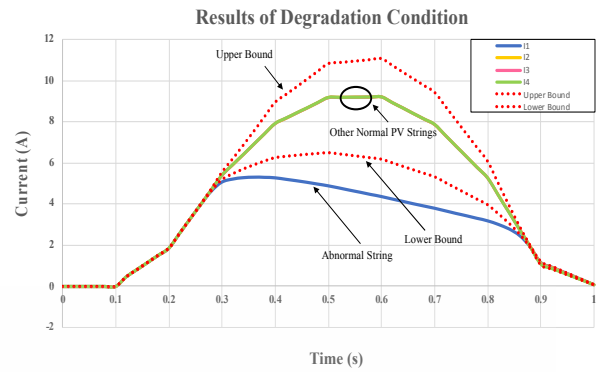


Fig. 8 Simulation results of degradation condition.

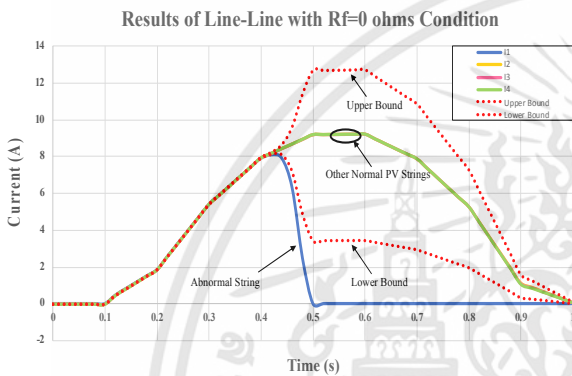


Fig. 5 Simulation results of L-L (0 ohms) condition.

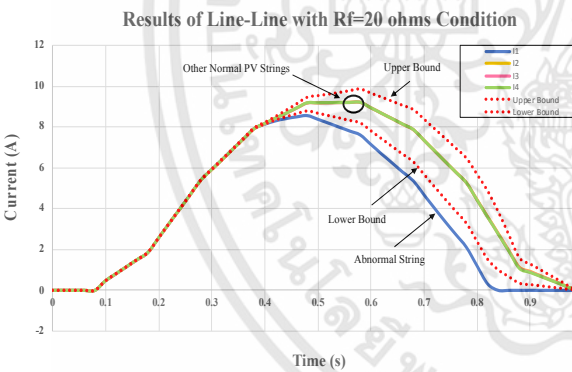


Fig. 6 Simulation results of L-L (20 ohms) condition.

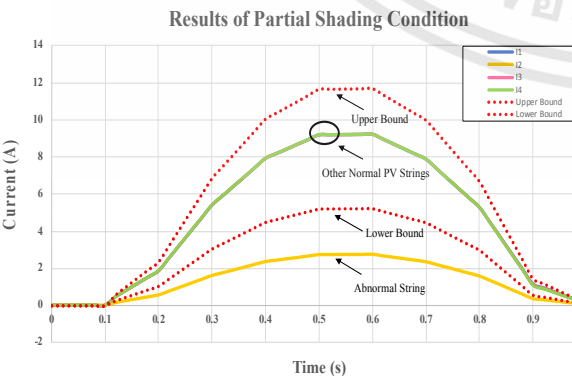


Fig. 7 Simulation results of partial shading condition.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

This topic will be testing the operation of the Box Plot, the current value in each PV string of SST is computed with MATLAB program and recorded in the text file in real time. After that, the resulting text file is then converted to PHP and JAVA scripts for displaying through the Web site which created with Visual Studio Code, and then stored in the server. The tested results can be illustrated from Fig. 9 to Fig. 13.

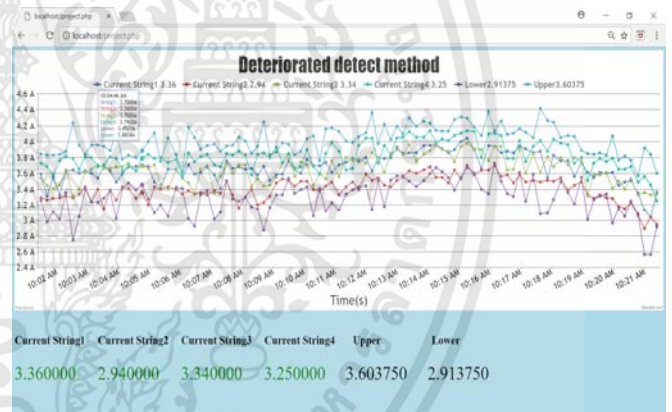


Fig. 9 Monitoring screen of normal condition.

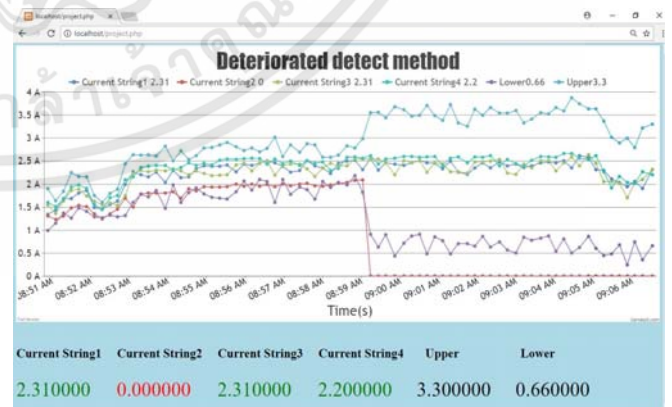


Fig. 10 Monitoring screen of open circuit condition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V. CONCLUSION

This paper presented the use of Box Plot with SST to detect abnormalities in solar panel operation in solar farms. The simulation results and test results showed that the Box Plot is able to monitor the condition of the PV string operation according to various conditions efficiently and accurately including normal condition, open circuit condition, line-line condition, partial shading condition and degradation condition. In addition, knowing the real-time operating system information made it easier to check for any malfunction and reduced time for checking. It can be repaired in a timely manner and reduced the loss of revenue that will occur with the owner of the solar farm.

ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by the Thailand Research Fund under the research grant No. PHD58I0092 and Bira Brothers Co. Ltd. Moreover, Department of Electrical Engineering of KMITL, Bangkok, Thailand.

REFERENCES

- [1] P. Khemmoook, S. Khomfoi and C. Manee-in, "The design of the PI controller with SmartCtrl for the Solid State Transformer in the solar farm application," IEEE, 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand, June 2017.
- [2] P. Khemmoook, W. Suwan-ngam and S. Khomfoi, "Suitable Power Transformers for Solar Farm Applications," IEEE, 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Hua Hin Thailand, June 2015.
- [3] E.L. Meyer and E.E. van Dyk, "Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters," IEEE Transactions on Reliability, vol. 53, pp. 83-92, March 2004.
- [4] M. Kumar and A. Kumar, "Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews (Elsevier), vol. 78, pp.554-587, October 2017.
- [5] A. Buraoui, M. Hamouda, A. Chaker, S. Latchar, A. Necaibia, N. Boutasseta and M. Mostefaoui, "Experimental evaluation of the performance and degradation of single crystalline silicon photovoltaic modules in the saharan environmental," Energy (Elsevier), pp. 22-30, August 2017.
- [6] Y. Zhao, B. Lehman, R. Ball, J. Mosesian, J.F. D. Palma, "Outlier detection rules for fault detection in solar photovoltaic arrays," 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 2013.

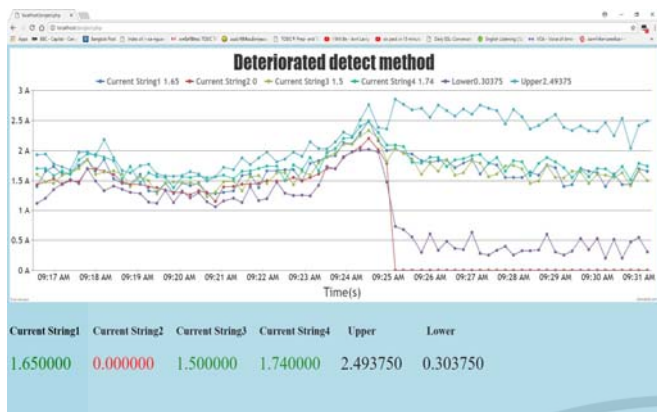


Fig. 11 Monitoring screen of line-line condition.

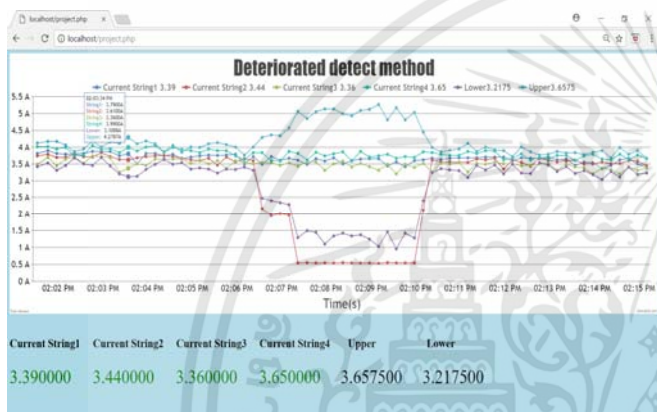


Fig. 12 Monitoring screen of partial shading condition.

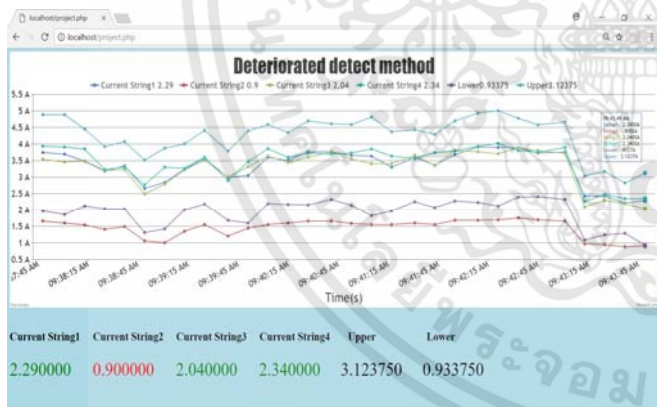


Fig. 13 Monitoring screen of degradation condition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International Review of Electrical Engineering (IREE)

Contents:

Open Loop Control of Voltage Across a Three-Phase Resistive Load Fed by Two Level Inverters Controlled by DSP-TMS320F2812	440
<i>by Soukaina El Daoudi, Loubna Lazrak, Chirine Benzagah, Mustapha Ait Lafkih</i>	
Multidisciplinary Design of Electrical Motors for Fuel Pumps of Perspective Aircrafts by Using Genetic Algorithms	452
<i>by Ismagilov F. R., Vavilov V. Ye., Zarembo I. V., Miniyarov A. H., Ayyuzina V. V.</i>	
A Comprehensive Review of Field-Oriented Control in Sensorless Control Techniques for Electric Vehicle	461
<i>by M. Syazmie Sepeeb, S. Aizam Zulkifli, S. Yi Sim, E. Pathan</i>	
A Novel Identification of High Neutral to Earth Voltage (NTEV) Faults on Power Distribution Systems	476
<i>by Mohd Abdul Talib Mat Yusoh, Ahmad Farid Abidin, Zubatla Mat Yasin, Turgay Yalcin</i>	
Transient Stability Improvement Using Coordinated Control of Solar PVs and Solid State Transformers	486
<i>by Panya Khemmoek, Surin Khomfoi</i>	
A Review of the Effect of AC/DC Interference on Corrosion and Cathodic Protection Potentials of Pipelines	495
<i>by Kazgem B. Adedeji, Akinlolu A. Ponnle, Bolanle T. Abe, Adisa A. Jimoh, Adnan M. Abu-Mahfouz, Yskandar Hamam</i>	
Proposed Magnetic Integration Techniques for Two-Stage High Power Factor Dimmable Electronic Ballasts	509
<i>by Vuttipon Tarateeraseth</i>	



Praise Worthy Prize

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transient Stability Improvement Using Coordinated Control of Solar PVs and Solid State Transformers

Panya Khemmook, Surin Khomfoi

Abstract – An optimization coordinated controller applied for solar farm together with a solid state transformer in order to improve transient stability is presented in this paper. Transient stability issues in a modern electrical power grid represent one of the challenge topics for an electrical engineer because uncertain renewable energy resources (RES) are increased because of a demand for green energy requirement. This increased RES can adversely disturb a terminal voltage; consequently, a damage to electrical equipment can happen. In order to solve a transient response issue, it is possible to use a solid state transformer (SST) or intelligent transformer, used to interface between RES and a power grid. SST consists of a set of converters which can be modulated via the converters to maintain the desired voltage levels; thus, this solution can reduce transient response and power fluctuation concurrently. For this reason, this paper presents a controller design for a solar photovoltaic (SPV), connected to a power grid via SST in order to enhance the quality of power injections from RES to improve transient stability of the electrical system. The optimization of a controller model is proposed by modifying a PI controller from a commercial one. The proposed controller is validated with the standard IEEE 39 buses. The validation scenario of both an uncertainty due to time delay accounting for a range of 425ms-525ms and various solar radiation patterns are also taken into account for the evaluation of a proposed controller performance. Simulation results demonstrate that power fluctuation due to uncertain RES can be mitigated by using the proposed controller. Moreover, in case of large disturbances such as a circuit breaker tripping to open a power line due to a fault, the proposed coordinated control of SPV and SST can satisfactorily perform to suppress severe voltage swings within an electrical device rated voltage limit to protect catastrophe damage. The results suggest that the proposed controllers can be alternative solutions in order to solve a transient stability issue due to uncertain increased RES in a modern power grid. Copyright © 2018 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

Keywords: Solid State Transformer, Solar Photovoltaic, Converter Control, Transient Simulation

Nomenclature

P_f and P_n	Power flows in remote and nearby transmission lines	nPI	A total number of additional PI controllers
τ	Time delay	$F(t, \tau)$	Objective function depending on time domain and time delay
Δ	A small deviation	η_1 and η_2	Factor of first and second terms
$K_{P,R}$ and $K_{P,L}$	Proportional gains of remote and local PI controller		
$K_{I,R}$ and $K_{I,L}$	Integral gains of remote and local PI controller		
T_{lead}	Leading time for delay compensator		
$U_{PI,R}$ and $U_{PI,L}$	Remote and local control signals		
U_{PI}	Control signal from an additional PI controller used as input signal of SST or SPV		
W_1 and W_2	Constant weights of $U_{PI,R}$ and $U_{PI,L}$		
ITAE	Integral time absolute error		
ITAE _{Pf}	ITAE of P_f affecting by time delay		
t_d and t_f	Disturbance and final times		
$U_{PI,i}$	U_{PI} corresponding to i^{th} additional PI controller		

I. Introduction

In modern power grids, solar photovoltaic (SPV) is widely used in order to supply extra load demands in regions that cannot be easily supplied with electricity from main grids [1], [2]. There are several advantages of SPV compared to other renewable energy and alternative sources [1]-[22]. The major advantages of SPV are the low installation cost and the easy power harvesting. However, incorporation of SPVs, supplying their maximum power, into a grid without proper management may cause significant degradation of the voltage at the transmission-line buses [3]-[5]. Moreover, intermittent power injections from SPVs coupled with large

disturbances in the power grid, such as faulty or open line circuit, may cause a large transient response [6], [7]. On top of that, unlike directly connecting an SPV to the electrical power system of a house, transformers are needed to connect groups of SPVs to the main grid which incur additional investment cost. The transformers that are utilized in order to transfer power between SPVs and main grids should operate with a low core loss [8] in order to reduce power loss effectively during the periods that the SPVs are unable to generate electricity to supply the main grid so that the owners of the SPVs will gain more profit. Among low-core-loss transformers, solid state transformer (SST) is very popular. One of its main advantages is its small size due to its ferrite core that is tightly integrated into the SST circuit and it operates at high frequency [9]. Additionally, it is very energy efficient, meaning that it can deliver much more power through similar-sized wires at a faster rate than the ones that transformers of other types can deliver. An example of utilization of SPVs in a power system is a hybrid power system in Myanmar that consists of diesel generators, SPVs, and an energy storage system [10].

This hybrid system not only reduces the installation cost significantly but also provides high reliability. An analysis of the stability of a power system connected to an increasing number of SPVs has also been investigated.

Specifically, this study has analyzed how large-scale PV power plants impacted a transmission grid for different penetration levels [11]. The analysis results demonstrate that the stability of system frequency and oscillatory stability have been enhanced by using SPVs that have been equipped with a synchronous power controller. [12] reports the simulation results of voltage stabilization of a DC microgrid under the control of an SPV inverter that show that, fluctuation of the voltage level at the DC buses could be kept under good control by properly applying a modulation scheme to the control signal of the SPV inverter. [13] reports an investigation of coordinated load control by an SPV and a frequency controller that has demonstrated the flexibility of such coordinated control in regulating the frequency of island microgrids. [6] has demonstrated that an SPV inverter could manipulate reactive power in order to manage the power in a transmission line and act as a Static Var Compensator or STATCOM to regulate the voltage in the transmission line. By properly controlling the SPV inverter, the power transmission limit could be extended, which would otherwise require additional and expensive series/shunt capacitors or other flexible ac transmission system controllers. For applications of SST in a power system, several papers report the utilization of SST in order to concurrently control power injection from generators and to improve system stability [15], [17]. In [14], SST has been employed in order to link a DC-microgrid consisting of SPVs and an energy storage system to a main grid and to connect an AC-microgrid consisting of SPVs, a wind farm, and an energy storage system to a main grid. The results have demonstrated that SST could be utilized to regulate the terminal voltage of

the interested bus and could thus provide a high power-conversion efficiency between the interconnected subsystems. In [15], smart modular cascaded SSTs, which have been interfaced to a distributed SPV power generation system, has been controlled to improve the quality of maximum power point tracking of the SPVs.

In [16], a comprehensive state-space dynamic model of SST has been identified and the physical and controlling properties of SST have been analyzed. The results demonstrate that SST may well be a vital technology that can truly enable integration of renewable energy such as wind and solar into main power grids [16], [17]. Despite many studies on SPV and SST, a coordinated control of a group of SPVs and SSTs in a large system in order to enhance the transient stability of the system has not been well researched. Actually, the power electronics converter in SPV and SST can control active and reactive powers of a system with a quick response time and so it can be used to improve the system's transient stability. In this paper, a new approach to coordinated control of several substations is proposed.

A simulation of the operational parameters of a power system consisting of several substations has been carried out, where each substation has been consisted of a group of SPVs connected to a main grid via an SST. In order to reduce the transient responses of the intermittent power outputs from the group of SPVs in each substation, an SST has been used to connect them to the main grid. The inverter of a group of SPVs and the power electronics converters of the SST could suppress power swings when the system was subjected to disturbances. The measures of system's outputs such as the active power flow in major transmission lines have been used as input signals for the PI controllers. The output signals from the PI controllers could be used to adjust the modulation indices of the power electronic converters of the SST as well as the inverter of the SPVs. The impact of input signal time delay on the outputs of PI controllers has also been considered.

The simulation results show that the swings caused by disturbances could be successfully suppressed by using a coordinated control by SPV and SST. The IEEE 39 bus system has been the system that has been used in the simulation since it is a standard benchmark system that could guarantee the high performance of the proposed approach. Contributions from this paper are described as follows:

- i. The results of this simulation demonstrate that the proposed coordinated control approach by SST and SPV can effectively suppress transient response caused by disturbances.
- ii. This proposed approach is a promising option for reducing transient response in power grids with penetration from renewable energy sources.
- iii. The design of this proposed approach has successfully taken into account the uncertainty of input signal into PI controller due to time delay, i.e., time delay compensators have been used as a countermeasure for such uncertainty.

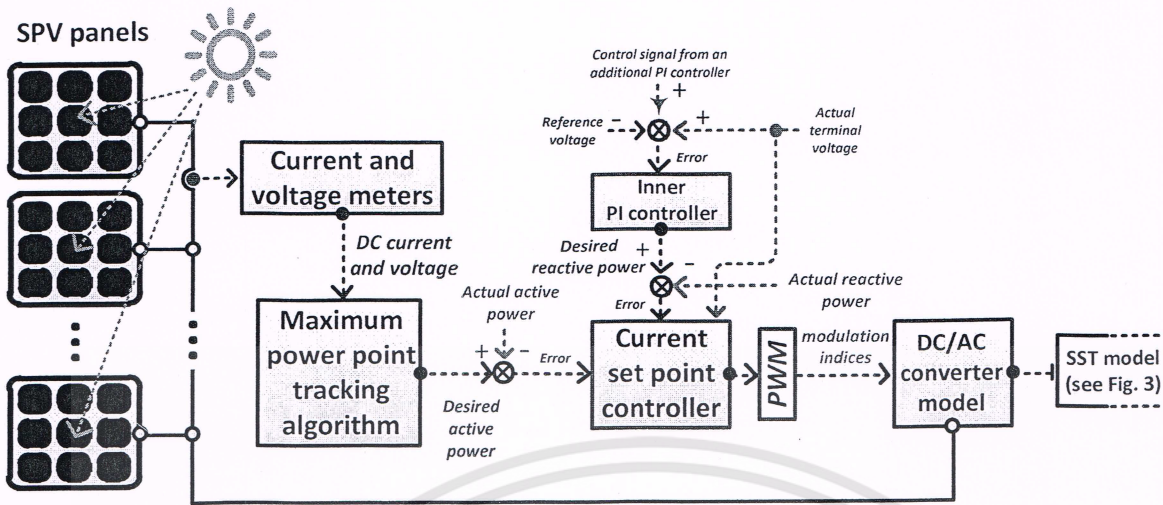


Fig. 2. SPV model and control strategy

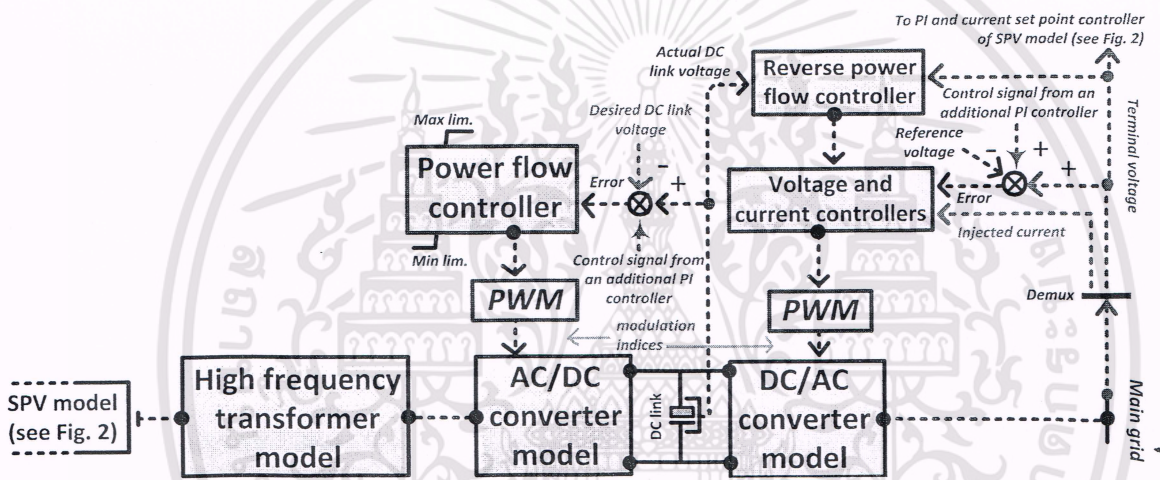


Fig. 3. SST model and control strategy

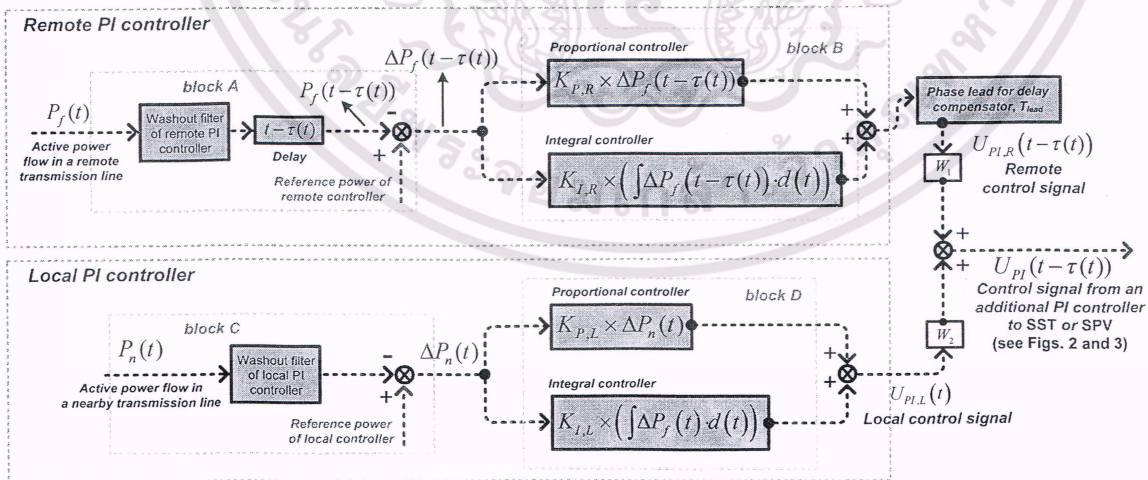


Fig. 4. Structure of an additional PI controller

II. Overview of Coordinated Control Strategy

In this section, an overview of the coordinated control strategy of SPV and SST is described as shown in Fig. 1.

First, SPV panels receive intermittent solar radiation from the sun and convert energy from solar radiation into DC current. Second, DC current is sent to the inverter to convert DC to AC current. The inverter is also utilized to control maximum power point tracking of power obtained from SPV to regulate direction of power flow which is injected to the main power grid. In this work, SPV inverter is directly connected to a high frequency transformer. Then, the SPV power transferred from high frequency transformer is sent to grid side converters. The power converters at a grid-side converter can also be used to control power quality from SPV before supplying to the main power grid. DC link between a grid-side converter is applied to regulate the voltage of the connected bus to be reached the desired level. An active power signal in transmission line will be disturbed if a fault occurs in a main power grid; for instance, open circuit of a circuit breaker action after a fault. This disturbance signal can be used to monitor information by sending a feedback the disturbance signal to a controller; therefore, a controller can suppress a transient effect in a main power grid. It is assumed that data obtained from the transmission line is measured and the acquired data is probed at a different point from SST and SPV substation.

Practically, SPV and SST are installed in different places with plant data operation (PDO) and there may be long distance between SST, SPV and PDO. It should be noted that the feedback signal should be managed before sending to a PDO due to long distance considerations. In this case, input and output signals of the controller are affected by time delay accounting for approximately

425ms to 525ms. In this scenario, the effect of time delay may degrade the performance of the controller.

Therefore, uncertainty due to the variation of time delay is utilized in the design process so that the designed controller will be able to resist the impact of time delay. After the design process, simulation studies in section V are evaluated in each possibility of SST and SPV controllers such as control only SST and SPV, control both SST and SVP. Both control scenarios are clearly explained in section V.

III. SPV, SST and PI Controller Models

In this section, models and control strategies of SPV, SST and PI controller are described as demonstrated in Figs. 2, 3 and 4 respectively.

III.1. Solar Photovoltaic (SPV) Model

The SPV model and the control strategy consist of two main controllers. The first one is to maximize power output from PV using maximum power point tracking algorithm; whereas, another one is voltage controller which is used to control reactive power and voltage at a terminal bus. Inputs of maximum power point tracking controller are current and voltage signals of SPV system.

The maximum power point tracking controller generates the output signal as a desired or reference active power. After that, the desired active power (Watt) is subtracted by the actual active power output of SPV.

The error signal is then sent to a current controller as a current set point to properly adjust the active power output of SPV.

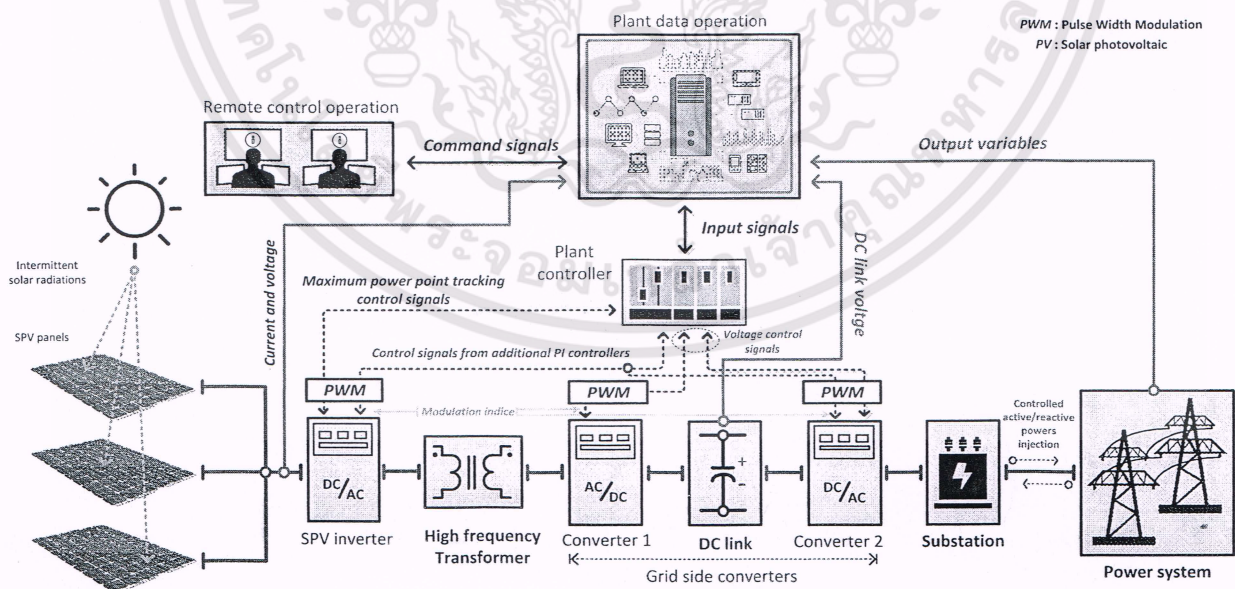


Fig. 1. Control strategy of SST and Solar SPV

At the same time, the actual terminal voltage is used as an input signal of the voltage controller or a reactive power (Var) controller. Moreover, without degradation of active power, the control signal from an additional PI controller using active power flow in a transmission line as an input signal is added to this loop to suppress the transient swings when the system is subjected to large disturbances. In this control loop, actual terminal voltage and an additional signal from the PI controller are subtracted by the reference voltage, the error is then sent to the inner PI controller.

Then, the output signal of the inner PI controller as desired reactive power is subtracted by the actual reactive power of SPV and it is sent to the current controller as a current set point; so, the reactive power of SPV inverter can be controlled. An inverter of SPV is connected to the main power grid via SST. The structure of an additional proposed PI controller is described in the next section.

III.2. Static Solid State Transformer (SST) Model

SST control strategy model consists of three main controllers: reverse power flow controller, a power flow controller and a voltage and a current controller as shown in Fig. 3. An actual DC link and terminal voltages are used as input signals for the reverse controller; whereas, the difference between the actual and the desired DC link voltages is used as an input signal for the power flow controller. The power flow controller then sends a control signal to adjust modulation indices, i.e. magnitude and phase modulations, in AC to DC converter so that power output direction from SPV, which is transferred to main grids, can be controlled. In addition, the error among the reference voltage signal, actual terminal voltage and control signal from an additional PI controller is utilized as an input of the voltage and current controllers. Then, the output signal from voltage and current controllers is used to adjust modulation indices of DC to AC converter, which is connected to main power grid as depicted in Fig. 3.

III.3. Developed PI controller Model

Developed PI controller model for SPV and SST is depicted in Fig. 4. P_f and P_n are power flow signals probed from PDO and power flow signals from local buses, respectively.

Also, the parameter t is the time, τ is the time delay and Δ is a small deviation. $K_{P,R}$ and $K_{P,L}$ are proportional gains of remote and local PI controller, respectively. $K_{I,R}$ and $K_{I,L}$ are integral gains of remote and local PI controller, respectively. T_{lead} is leading time for delay compensator. $U_{PI,R}$ and $U_{PI,L}$ are remote and local control signals, respectively.

U_{PI} is a control signal from an additional PI controller used as input signal of SST or SPV. W_1 and W_2 are constant weights of $U_{PI,R}$ and $U_{PI,L}$, respectively. In this work, an additional PI controller consists of two main

controllers: remote and local PI ones which are simultaneously used to suppress the transient swing of the system when it is subjected to large disturbance. The input signal P_f is used in remote PI controller which contains sufficient swing information. It should be noted that only the input signal P_f of the remote PI controller is affected by time delay as shown in Fig. 3 (block A). $K_{P,R}$ and $K_{I,R}$ (block B) are utilized to weight proportional and integral controllers in order to properly adjust control signal $U_{PI,R}$. Moreover, leading compensator block is used to compensate phase lag of P_f time delay.

However, in some cases, the input signal P_f can be lost of communication in a large system. As a result, the local PI controller using local input signal is necessary. The input signal of local PI controller is P_n as shown in Fig. 4 which is able to be directly measured from local measurements. For this reason, the impact of time delay can be avoided.

The error between the reference signal and P_n is used as input of the local PI controller (block C). $K_{P,L}$ and $K_{I,L}$ (block D) are utilized to weight proportional and integral controllers for adjusting control signal $U_{PI,L}$. Accordingly, the sum of $U_{PI,R}$ and $U_{PI,L}$ using W_1 and W_2 is used as the control signal of an additional PI controller U_{PI} . Because the remote PI controller will provide more sensitive control effect than the local PI controller due to higher transient swing information of input signal, $W_1=1$ and $W_2=0.25$ are set as the weight of the proposed controller.

It should be noted that these weights are chosen from optimization technique as studied in [18]. $W_2=1$ can also be set when failure of P_f occurs because there is no control effect from remote PI controller ($U_{PI,R}=0$). The structure of additional PI controllers of SPV and SST is also the same. Totally, in each SPV and SST substation, three additional local PI controllers and three additional remote PI controllers are used.

IV. Design of the Proposed Coordinated Controller

The design additional controller as explained in III.3 is used for the proposed objective function in (3) for transient stability enhancement. Integral time absolute error method (ITAE) is applied in order to calculate optimal parameters of additional PI controllers. parameters $K_{P,R}$, $K_{P,L}$, T_{lead} , $K_{I,R}$ and $K_{I,L}$ can be acquired by using ITAE searching technique. All remote power flows, containing ample information about the system swing, can be used as representative signals in ITAE.

Accordingly, an input signal P_f of remote PI controllers for tuning optimal parameters is used. The ITAE applying P_f can be written by minimizing function in (1):

$$ITAE_{P_f} = \int_{t=t_d}^{t_f} \left((t_f - t_d) \times |\Delta P_f(t - \tau(t))| \right) dt \quad (1)$$

$ITAE_{P_f}$ is $ITAE$ of the power disturbance (P_f) affecting by the time delay. t_d is a time in which the power disturbance occurs; whereas, t_f is the final time at which power disturbance disappear. It can be clearly seen that if $ITAE_{P_f}$ is minimized, the error of input signals of remote PI controllers can be suppressed. Additionally, the less control effort is another important factor in the design process of PI controller for transient stability improvement. Less control effort means that such controllers can reduce energy in order to suppress swing but still provide high performance. Thus, $ITAE$ is also applied to reduce the controller effort by minimizing the output U_{PI} of the function in (2):

$$ITAE_{U_{PI}} = \sum_{i=1}^{nPI} \left(\int_{t=t_d}^{t_f} ((t_f - t_d) \times |U_{PI,i}(t - \tau(t))|) dt \right) \quad (2)$$

$U_{PI,i}$ is U_{PI} corresponding to i^{th} additional PI controller and nPI is a total number of additional PI controllers.

In order to optimize transient power swings of the system, the error of input signals and control effort of the PI controller, the objective function can be formulated by (3):

$$F(t, \tau) = \eta_1 ITAE_{P_f} + \eta_2 ITAE_{U_{PI}} \quad (3)$$

where $F(t, \tau)$ is the objective function depending on the time domain and time delay, $\eta_1=3$ and $\eta_2=1$, η_1 and η_2 are the factor of first and second terms, respectively. In this work, particle swarm optimization (PSO) algorithm is applied to tune the control parameters [23]-[26].

V. Simulation Study and Outcomes

The simulation results have been carried out by MATLAB & Simulink together with Power System Toolbox, Control System Toolbox and Symbolic Toolbox. A modified New England system which is used in the simulation study by applying the proposed coordinated SPV and SST for improving transient stability is depicted in Fig. 5. In this system, there are ten synchronous generators (G1-G10), 39 buses, and 18 constant impedance loads accounting for approximately 6.097 GW and 1.401 GVar. Each synchronous generator is equipped with an IEEE type-1 automatic voltage regulator and a simple turbine governor excluding G2. It is considered as an aggregation model of a large number of generators. In each substation, it consists of a group of SPV and SST. Moreover, it is assumed that substations 1 and 2 are located at buses 24 and 18 to supply inflated load demand, respectively. Total capacities of SPV1 and SPV2 are 200 MW and 250MW. It should be mentioned that SPV1 and SPV2 are modeled by using an integrated model of SPV. It is also assumed that solar radiation in each substation is different characteristic of power generation. For input signal of remote PI controllers, active power flow in a remote transmission line between

bus 2 and bus 19, which contain ample swing information in this system, is used as input signal of remote PI controllers of both substations while active power flow in nearby transmission lines between bus 23, 24, 15 and 18 are used as input signals of local PI controllers of substation 1 and substation 2. The proposed coordinated control of SPV and SST is compared with an individual controller known as "Control of SPV" which is only control SPV and "Control of SST" which is only control SST. Both of them are optimized by using the same objective function as the proposed coordinated control of SPV and SST.

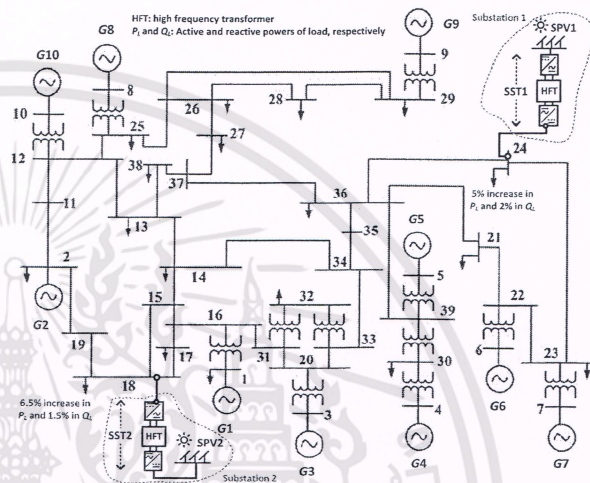
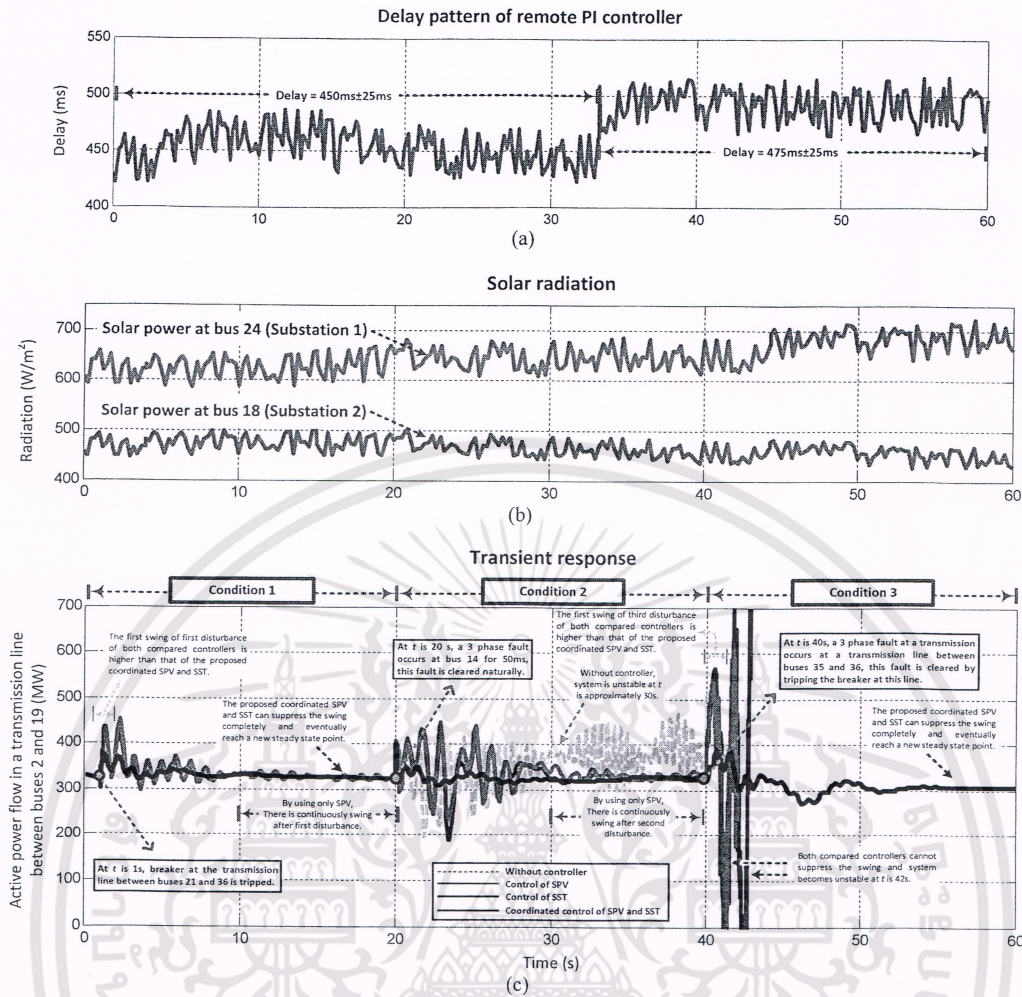


Fig. 5. Validation 39 bus standard system with two substations of SPV and SST

During optimization using PSO, population and iteration are set at 100 and 500, respectively. Also, learning factors c_1 and c_2 are set at 0.5 and 0.7, respectively. Ranges of parameters are set at $0.1 \leq (K_{P,R}, K_{I,R}, K_{P,L}, K_{I,L}) \leq 25$ and $0.425 \leq (T_{lead}) \leq 0.525$. As a result, the optimal parameters of the proposed and compared PI controllers are given in Table I. It should be noted that all the parameters of additional PI controllers are simultaneously tuned and the compatible control effects can be achieved. In order to observe system response after occurring of large disturbances, delay in the input and output signals of additional PI controllers, the intermittent solar radiations and transient simulation under several disturbances are given in Figs. 6(a), 6(b) and 6(c). In Fig. 6(a), the delay of input-output signal additional PI controllers is assumed to be inconstant according to time domain with two mean values which are 450ms between 0s to 32s and 475ms between 33s to 60s. In Fig. 6(b), it is assumed that solar radiation at substation 2 is less than the one of substation 1 by 150 W/m^2 and the fluctuation is about $\pm 50 W/m^2$. In Fig. 6(c), all power outputs of synchronous generators are increased by 5% and all power consumption of loads are increased by 7% of the validation 39 bus standard system as illustrated in Fig. 5. The proposed controller is validated by using the Fig. 5 configuration in three conditions.



Figs. 6. Transient response during disturbances

As it can be seen, for condition 1, the transmission line between buses 21 and 36 is out of service at $t=1s$ by opening the circuit breaker at this power line. The transient power swing of both compared controllers is very severe during the first 8s; more specially, the first and the second consecutive peaks. After that, the transient response of the control of SPV continuously fluctuates with small oscillation. On the other hand, the proposed coordinated control of SPV and SST is able to significantly reduce such peaks effectively. Additionally, the proposed coordinated control of SPV and SST also provides superior response in this case.

For condition 2, at $t=20s$, it is assumed that a three-phase fault occurs at bus 14 and is naturally cleared at $t=20.12s$. It can be obviously observed that the proposed coordinated control of SPV and SST is able to effectively eliminate the first swing and subsequently suppress the transient response during this duration. As a result, the system quickly becomes stable in approximately 10s after the control process takes action.

On the other hand, without a controller, the validated system is completely unstable. Additionally, both of the compared controllers cannot eliminate the fault, as a

result, the system continuously contains transient swing. During the period of $t=20s$ to $t=30s$, minimum and maximum swing amplitudes of the transient power swing in this transmission line are approximately 195MW and 450MW, respectively. These transient power swing can cause a damage of electrical equipment connected to these buses.

At $t=40s$, for condition 3, it is assumed that a three-phase fault transpires at a transmission between bus 35 and bus 36, the fault is permanent and is cleared by tripping the breaker at this related line at $t=40.15s$. Clearly, the transient response of both compared controllers is unstable. The transient power swings are very severe and thus blackout consequently occurs in the system.

In contrast to the compared controller, the proposed coordinated control of SPV and SST can gradually suppress the swing: the validated system then becomes stable in approximately 15s after the control process taking action. This transient simulation results apparently validate the high performance of the proposed coordinated control of SPV and SST over several conditions of power disturbances.

TABLE I
OPTIMAL PARAMETERS OF THE PROPOSED
COORDINATED SPV AND SST

Parameters of additional PI controllers		Control of SPV	Control of SST	Proposed coordinated control of SPV and SST	
Substation 1	SPV inverter	$K_{P,R}$	20.36809	3.17470	15.80898
		$K_{I,R}$	22.64480	22.8344	2.43851
		T_{lead}	0.42558	0.49002	0.46770
		$K_{P,L}$	6.96245	23.9376	3.94032
		$K_{I,L}$	13.67204	24.1222	24.26482
	SST converter 1	$K_{P,R}$	23.92917	17.3707	18.78168
		$K_{I,R}$	12.13439	7.92748	6.37737
		T_{lead}	0.42458	0.45408	0.51751
		$K_{P,L}$	20.00701	23.7555	12.64893
		$K_{I,L}$	3.54715	0.86115	17.47692
	SST converter 2	$K_{P,R}$	10.54403	10.9686	22.27258
		$K_{I,R}$	22.89339	9.53896	23.98229
		T_{lead}	0.51913	0.47059	0.49206
		$K_{P,L}$	19.80518	19.1379	13.68039
		$K_{I,L}$	23.98731	19.8800	3.46561
Substation 2	SPV inverter	$K_{P,R}$	16.39352	4.67181	3.73235
		$K_{I,R}$	0.89279	12.2441	6.437706
		T_{lead}	0.47000	0.48390	0.44755
		$K_{P,L}$	21.22823	11.1396	21.01793
		$K_{I,L}$	23.34983	16.1578	6.35705
	SST converter 1	$K_{P,R}$	16.96838	17.7341	20.35712
		$K_{I,R}$	18.94350	18.8671	6.08812
		T_{lead}	0.46727	0.45450	0.50368
		$K_{P,L}$	18.57831	6.90062	23.23159
		$K_{I,L}$	9.80567	16.9925	8.74959
	SST converter 2	$K_{P,R}$	16.38695	16.3774	4.91488
		$K_{I,R}$	4.27966	4.06529	6.27709
		T_{lead}	0.43710	0.45744	0.49595
		$K_{P,L}$	17.65115	2.9749	15.40112
		$K_{I,L}$	0.79582	12.4591	11.83222

VI. Conclusion

This paper has been proposed a new coordinated control of several substations consisting of groups of SPV and SSTs in order to mitigate transient response when the system is subjected to have power disturbances. The finding results can be described as follows:

- i. In this work, the objective function of the coordinated control of groups of SPVs and SST focuses on the reduction of the swings of power transient response. The error of input signals and control effort of PI controller have also been discussed. Moreover, severe patterns of solar radiation and time delay have also been taken into account in the design process. As a result, the proposed coordinated controller can work well against such uncertainties.
- ii. The coordinated control of a group of SPV and SST is represented to improve transient stability. It has been discovered that the coordinated control of such devices can provide better control performance comparing to either individual control of SPV or SST.
- iii. Although PI controller in this work is fixed structure controller, it can be effectively used to damp out the swing. Moreover, it is practical in a real system. On the other hand, the adaptive controller will be considered in the system with high penetration of

uncertain renewable energy sources.

- iv. Moreover, application of coordinated control of SPV and SST can be applied to solve the reverse power flow problems.
- v. In the future work, coordinated control of a group of SPV and a wind farm connected to main power grid via SST will be analyzed for transient stability enhancement.

Acknowledgements

This work is supported by the Thailand Research Fund under the research grant No. PHD58I0092 and Bira Brothers Co. Ltd. Moreover, Department of Electrical Engineering of KMITL, Bangkok, Thailand.

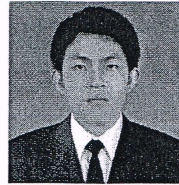
References

- [1] D. Lew, N. Miller, Reaching new solar heights: integrating high penetrations of PV into the power system, *IET Renewable Power Generation*, vol. 11 no. 1, Nov. 2017, pp. 20-26.
- [2] A. Safayet, P. Fajri, I. Husain, Reactive power management for overvoltage prevention at high PV penetration in a low-voltage distribution system, *IEEE Trans. Indust. Appl.*, vol. 53 no. 6, Nov.-Dec. 2017, pp. 5786-5794.
- [3] K. Meng, D. Wang, Z. Y. Dong, X. Gao, Y. Zheng, K. P. Wong, Distributed control of thermostatically controlled loads in distribution network with high penetration of solar PV, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 3 no. 1, March 2017, pp. 53-62.
- [4] J. Widén, M. Shepero, J. Munkhammar, Probabilistic load flow for power grids with high PV penetrations using copula-based modeling of spatially correlated solar irradiance, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7 no. 6, Nov. 2017, pp. 1740-1745.
- [5] J. D. Watson, N. R. Watson, D. Santos-Martin, A. R. Wood, S. Lemon, A. J. V. Miller, Impact of solar photovoltaics on the low-voltage distribution network in New Zealand, *IET Generation, Transmission & Distribution*, i, July 2016, pp. 1-9.
- [6] R. K. Varma, S. A. Rahman, T. Vanderheide, New control of PV solar farm as STATCOM (PV-STATCOM) for increasing grid power transmission limits during night and day, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30 no. 2, April 2015, pp. 755-763.
- [7] P. K. Ray, S. R. Paital, A. Mohanty, T. K. Panigrahi, Improvement of stability in solar energy based power system using hybrid PSO-GS based optimal SVC damping controller, *Energy Procedia*, vol. 109, 2017, pp. 130-137.
- [8] P. Khemmoek, S. Khomfoi, C. Manee-in, The design of the PI controller with SmartCtrl for the solid state transformer in the solar farm application, *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2017, Phuket, Thailand.
- [9] J.W. Kolar, G. Ortiz, Solid-state-transformers: key components of future traction and smart grid systems, *IEEE International Power Electronics Conference (IPEC)*, May 2014, Japan.
- [10] P. P. Win, Y. G. Jin, Y. T. Yoon, Evaluation of solar-diesel-battery hybrid system for off-grid rural electrification in Myanmar, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 1, 2017, pp. 13-20.
- [11] D. Remon, A. M. Cantarellas, J. M. Mauricio, P. Rodriguez, Power system stability analysis under increasing penetration of photovoltaic power plants with synchronous power controllers, *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11 no. 6, May 2017, pp. 733-741.
- [12] T. Kim, J. Kim, J. Cho, J. S. Jung, Study on the voltage stabilization technology using photovoltaic generation simulator in three-level bipolar type DC microgrid, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 13 no. 3, 2018, pp. 1123-1130.
- [13] Y. Liu, H. Xin, Z. Wang, D. Gan, Control of virtual power plant in microgrids: a coordinated approach based on photovoltaic systems and controllable loads, *IET Gener., Trans. Dist.*, vol. 9

- no. 10, June 2015, pp. 921-928.
- [14] H. J. Choi, J. H. Jung, Practical Design of Dual Active Bridge Converter as Isolated Bi-directional Power Interface for Solid State Transformer Applications, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 11 no. 5, 2016, pp. 1265-1273.
- [15] H. Zhao, T. Zhu, D. Cheng, B. Li, J. Ding, Y. Li, Research on the smart modular cascaded solid state transformer interfaced to distributed photovoltaic power generation system, *The Journal of Engineering*, vol. 2017 no. 13, 2017, pp. 1872-1879.
- [16] M. T. A. Khan, A. A. Milani, A. Chakraborty, I. Husain, Dynamic modeling and feasibility analysis of a solid-state transformer-based power distribution Ssystem, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54 no. 1, Jan.-Feb. 2018, pp. 551-562.
- [17] A. Q. Huang, Medium-voltage solid-state transformer: technology for a smarter and resilient grid, *IEEE Indust. Elect. Mag.*, vol. 10 no. 3, Sept. 2016, pp. 29-42.
- [18] Ajdid, R., Ouassaid, M., Maaroufi, M., Modeling and Simulation of a Novel Photovoltaic Solar System, (2017) *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 5 (6), pp. 171-179. doi:https://doi.org/10.15866/irecon.v5i6.13802
- [19] Ouadi, H., Et-taoussi, M., Bouhlal, A., Nonlinear Control of Multilevel Inverter for Grid Connected Photovoltaic System with Power Quality Improvement, (2017) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 12 (1), pp. 43-59. doi:https://doi.org/10.15866/iree.v12i1.10685
- [20] Chaitanakulwat, A., Kinnares, V., Implementation of a Low-Cost Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Active Power Filtering Mechanism, (2017) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 12 (2), pp. 175-182. doi:https://doi.org/10.15866/iree.v12i2.11383
- [21] Laagoubi, T., Benchagra, M., Bouzi, M., Photovoltaic System for Three Phase Load with Nonlinear Controllers, (2017) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 10 (1), pp. 70-76. doi:https://doi.org/10.15866/iremos.v10i1.11420
- [22] Sabiri, Z., Machkour, N., El Majdoub, K., Kheddioui, E., Ouoba, D., Ailane, A., An Adaptative Control Management Strategy Applied to a Hybrid Renewable Energy System, (2017) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 10 (4), pp. 258-267. doi:https://doi.org/10.15866/iremos.v10i4.12044
- [23] K. E. Parsopoulos, *Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications*, IGI global, 2010.
- [24] Dileep, M., Surekha, K., Vishnu, N., Ascent Phase Trajectory Optimization of Launch Vehicle Using Theta-Particle Swarm Optimization with Different Thrust Scenarios, (2016) *International Review of Aerospace Engineering (IREASE)*, 9 (6), pp. 200-207. doi:https://doi.org/10.15866/irease.v9i6.10521
- [25] Jhaji, H., Garg, R., Saluja, N., Efficient Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks Using Hybridized Particle Swarm Intelligence and Ant Colony Algorithm, (2017) *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, 7 (7), pp. 586-593. doi:https://doi.org/10.15866/irecap.v7i7.12434
- [26] Chaudhary, R., Singh, A., Agrawal, S., Stabilizing Controller Design for Nonlinear Power System Using Particle Swarm Optimization, (2017) *International Review of Automatic Control (IREACO)*, 10 (5), pp. 433-442. doi:https://doi.org/10.15866/ireaco.v10i5.12155

Authors' information

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.



doing research in Alternative Energy and Power Electronics.

Panya Khemmoek received the B.Eng. and M.Eng. degrees in electrical engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, in 2012 and 2014, respectively. He is presently working toward his D.Eng. degree in Electrical Engineering at the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. He is interested in



From 1996 to 1997, he was with the Engineering Division of the Telephone Organization of Thailand (TOT). Since December 1997, he has been a Lecturer with the Department of Electrical Engineering, KMITL, where he is currently an Assistant Professor. His research interests include multilevel power converters, AC drives, renewable energy applications, fault diagnosis, and especially, artificial intelligent-based techniques applied to power electronics and drive applications. Dr. Khomfoi is a member of the Eta Kappa Nu honor society. He was a recipient of academic scholarship awards, including a full academic scholarship for his B.E. studies from the TOT, and a full academic scholarship for his M.E. and Ph.D. studies from the Energy Policy and Planning Office (EPPPO), Thailand.

Surin Khomfoi (Member, IEEE) received his B.E. and M.E. in Electrical Engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand in 1996 and 2000, respectively, and his Ph.D. in Electrical and Computer Engineering at the University of Tennessee, Knoxville, in 2007.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปัญญา เข้มมุข
วัน เดือน ปีเกิด	1 พฤษภาคม 2533
ที่อยู่	32/1 ม.5 ต.เกาะขนุน อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา 24120
ประวัติการศึกษา	2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การติดตั้งและการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าสวิตซ์รีลักแตนซ์ 2) ระบบโซลาร์ฟาร์ม 3) หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] ปัญญา เข้มมุข และ ภพ จันท์เจริญสุข. “การทนทานต่อฟอลท์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสวิตซ์รีลักแตนซ์ไฮบริด 6 เฟส,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 36 (EECON-36), 11-13 ธันวาคม 2556, หน้า 329-332.
- [2] ปัญญา เข้มมุข และ ภพ จันท์เจริญสุข. “การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสวิตซ์รีลักแตนซ์ไฮบริด 6 เฟส สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม,” การประชุมวิชาการครั้งที่ 52 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KU ANNUAL CONFERENCE 52), 4-7 กุมภาพันธ์ 2557, หน้า 202-209.
- [3] ปัญญา เข้มมุข และ สุรินทร์ คำฝอย. “หม้อแปลงไฟฟ้าอัจฉริยะกับระบบจำหน่ายแบบสมาร์ตกริดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 37 (EECON-37), 19-21 พฤศจิกายน 2557, หน้า 549-552.
- [4] สันติชัย อู่อรุณ, ปัญญา เข้มมุข และ สุรินทร์ คำฝอย. “การใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโซลาร์ฟาร์มด้วยวงจรมอดูเลตเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38 (EECON-38), 18-20 พฤศจิกายน 2558, หน้า 513-516.
- [5] Khemmook P., Suwan-ngam W. and Khomfoi S. “Suitable power transformers for solar farm applications,” 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Hua Hin, Thailand, June 2015.
- [6] Khemmook P. and Khomfoi S. “Solid State Transformer using a Modular Multilevel Inverter for PV Farm Applications,” 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Pattaya Thailand, 25-28 October 2015.

- [7] Khemmook P., Khomfoi S. and Manee-in C. “The Design of the PI controller with SmartCtrl for the Solid State Transformer in the Solar Farm Application,” **14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**, Phuket, Thailand, 27-30 June 2017.
- [8] Uaroon S., Khemmook P. and Khomfoi S. “The Design of the PI controller with SmartCtrl for the Solid State Transformer in the Solar Farm Application,” **14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**, Phuket, Thailand, 27-30 June 2017.
- [9] Khemmook P. and Khomfoi S. “The Implementation of SHE Control Technique for the SST with CHB Seven-level Waveform on the Solar Farm Applications,” **International Electrical Engineering Congress (iEECON2019)**, Hua Hin, Thailand, 6-8 March 2019.
- [10] Khemmook P. and Khomfoi S. “Deteriorated Solar Panel Detection Technique of SST for a Solar Farm Application,” **International Electrical Engineering Congress (iEECON2019)**, Hua Hin, Thailand, 6-8 March 2019.
- [11] ปัญญา เข็มมุก และ สุรินทร์ คำฝอย. “การศึกษาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม,” **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, มกราคม-กุมภาพันธ์ 2562, หน้า 172-188.
- [12] Khemmook P. and Khomfoi S. “Transient Stability Improvement using Coordinated Control of Solar PVs and Solid State Transformers,” **International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)**, vol. 13, no. 6, November-December 2011, pp. 486-494.