

# การศึกษาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการประยุกต์ใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม The Study of Power Electronic Transformers and their Application for Solar Farms

ปัญญา เข้มมุข\* และสุรินทร์ คำฝอย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Panya Khemmook\* and Surin Khomfoi

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology

Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม โดยนำเสนอโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ หม้อแปลงความถี่สูง การออกแบบและการเลือกใช้แกนความถี่สูงให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของประสิทธิภาพ ขนาด และราคาต้นทุน การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังแทนที่หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำกับคอนเวอร์เตอร์ในระบบต่าง ๆ และการประยุกต์ใช้งานในโซลาร์ฟาร์ม นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้งานในโซลาร์ฟาร์ม การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อด้อย และวิเคราะห์มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำ ซึ่งพบว่าถ้านำมูลค่าการคืนทุนที่ไม่มีการสูญเสียกำลังไฟเนื่องจากค่า core loss ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาหักออกจากมูลค่าการลงทุนที่เพิ่มขึ้น หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีมูลค่าการลงทุนที่สูงกว่าระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่จะได้ระบบการทำงานใหม่ที่มีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น และสามารถรองรับระบบไฟฟ้าแบบอัจฉริยะที่จะเกิดในอนาคตได้เป็นอย่างดี

**คำสำคัญ :** หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง; วงจรคอนเวอร์เตอร์; หม้อแปลงความถี่สูง; โซลาร์ฟาร์ม

## Abstract

This proposed paper presents the study of power electronic transformers and their application for solar farms. The structure of the power electronic transformer consists of both

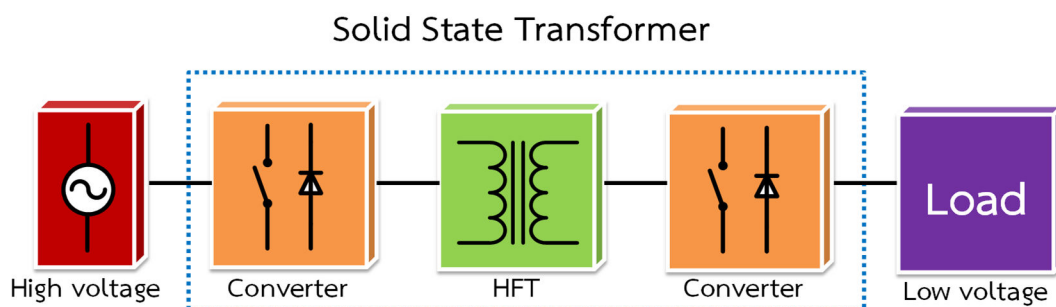
primary and secondary converters and the high frequency transformer. The ferromagnetic core is chosen for the design, whether in terms of performance, size and cost. The application of the power electronic transformer replacing the low frequency transformer with the converters is applied in the solar farm. It also discusses the transformers that are suitable for using in solar farms, including a comparison of advantages-disadvantages and analyzing the economic value of the power electronic transformer with the conventional system consisting of an inverter with a low frequency transformer. It is found that if the return value was not lost due to the core loss of the transformer, it is deducted from the investment value. The power electronic transformers are going to be worth a higher investment than the original system consisting of inverters with low frequency transformers. But to get a new operating system that has more functionality and more intelligent systems that will be in the future as well.

**Keywords:** solid state transformer; converter circuit; high frequency transformer; solar farm

## 1. บทนำ

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (solid state transformer, SST) เป็นหม้อแปลงที่สร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและทำงานที่ความถี่สูง ซึ่งโครงสร้างสามารถแสดงดังรูปที่ 1 [1] โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ฟัง ทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ซึ่งทั้ง 2 ฟัง มีการเชื่อมต่อกันด้วยหม้อแปลงความถี่สูง (high frequency transformer, HFT) จากการทำงานที่ความถี่สูงจึงส่งผลให้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีขนาดเล็กกว่าและมีน้ำหนักที่เบากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบธรรมดา [2,3] นอกจากนี้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังยังมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ปรับระดับแรงดันไฟฟ้า ชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน แก้อัปเดตเวอร์แพคเตอร์ กรองสัญญาณรบกวน มีระบบการป้องกันที่อัจฉริยะ สามารถเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่มีความถี่ต่างกันได้อย่างปลอดภัย การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ทำให้สามารถบริหารจัดการการส่งกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดการสร้างโรงไฟฟ้า และเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาระบบไฟฟ้าให้เป็นระบบไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ [2-4]



รูปที่ 1 โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

การศึกษาค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในโซลาร์ฟาร์ม พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในส่วนของการแปลงผันพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ การสูญเสียในสายที่เป็นส่วนของไฟฟ้ากระแสตรง การสูญเสียเนื่องจากการแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์ การสูญเสียในสายที่เป็นส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับ และการสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย [5] สำหรับกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขณะที่มีการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้น เป็นการสูญเสียที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แต่กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์หรือในช่วงเวลากลางคืนที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มเป็นการสูญเสียที่ไม่จำเป็น ได้แก่ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากไฟเลี้ยงที่อินเวอร์เตอร์ และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก (core loss หรือ no-load loss) ดังนั้นการลดกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงเวลากลางคืนจึงเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการสูญเสียในส่วนนี้ทำให้เจ้าของโซลาร์ฟาร์มสูญเสียรายได้จากการขายไฟอย่างมหาศาล สำหรับการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากไฟเลี้ยงที่อินเวอร์เตอร์สามารถแก้ไขได้โดยการปิดสวิตช์ไฟที่อินเวอร์เตอร์เพื่อหยุดการทำงาน แต่การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถแก้ไขได้เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ามีการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา [6] ดังนั้นการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้กับโซลาร์ฟาร์มจึงเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กในช่วงเวลากลางคืนหรือในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม

ได้ ด้วยการปิดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ด้านแรงดันสูงเพื่อตัดการเชื่อมต่อนะบบของโซลาร์ฟาร์มกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า นอกจากนี้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังยังมีความเล็กและน้ำหนักเบาเนื่องจากการทำงานที่ความถี่สูง โดยสามารถอธิบายได้จากกฎของเลนซ์ (Lenz's law) ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) เมื่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ หากเพิ่มความถี่ที่ใช้ส่งกำลังไฟฟ้ามูลค่าสูงขึ้นจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของแกน ( $A_c$ ) ที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง ซึ่งทำให้ลดพื้นที่ในการติดตั้งใช้งานและสะดวกในการเคลื่อนย้ายหรือบำรุงรักษา

$$\phi = \phi_m \sin(\omega t) = B_m A_c \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = N (2\pi f) (B_m A_c) \cos(\omega t) \quad (2)$$

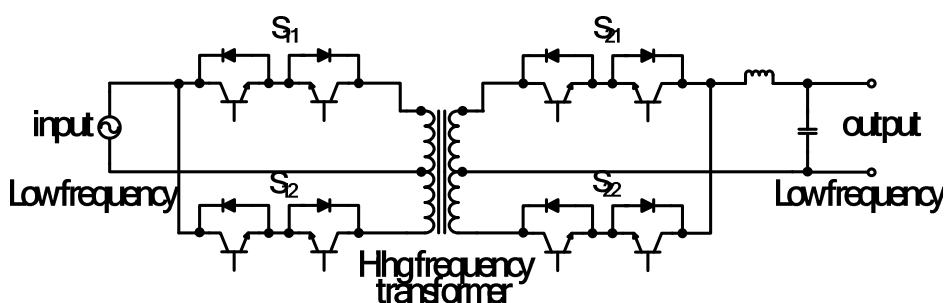
โดยที่  $\phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก;  $B_m$  คือ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก;  $A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน;  $e$  คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ;  $N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด;  $f$  คือ ความถี่ที่ใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้า

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยกล่าวถึงโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์กับแกนความถี่สูง การนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อด้อย และการวิเคราะห์มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำ โดยพบว่าหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีความน่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มเป็นอย่างมาก เพราะสามารถลดกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงเวลากลางคืนของระบบการทำงานเดิม และเพิ่มมูลค่าการขายไฟให้แก่เจ้าของโซลาร์ฟาร์มได้เป็นอย่างดี

## 2. ความเป็นมาและโครงสร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังนำเสนอครั้งแรกโดย McMurray ในปี ค.ศ. 1970 [7] ซึ่งได้เสนอวงจรหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำงานแบบ 4 จัตุภาค โดยคอนเวอร์เตอร์ฝั่งปฐมภูมิจะเชื่อมต่อกับกริดและเชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์ฝั่งทุติยภูมิด้วยหม้อแปลงแทปแรงดันขดลวดความถี่สูง 1 เฟส โครงสร้างคอนเวอร์เตอร์ของด้านทุติยภูมิจะเหมือนกับด้านปฐมภูมิ แต่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเข้าไปด้วยดังรูปที่ 2 สำหรับการทำงาน สวิตช์  $S_{11}$  และสวิตช์  $S_{12}$  จะทำงานพร้อมกันโดยมีวัฏจักรงาน 50 % ซึ่งเหมือนกับสวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  ของด้านทุติยภูมิ โดยมีการเลื่อนมุมเฟสในแต่ละคู่สวิตช์ และแรงดันเอาท์พุทสามารถปรับค่าได้ตามค่าของกระแสอินพุท [8] ซึ่งพบว่าวงจรที่นำเสนอนี้สามารถทำงานได้ดีเหมือนกับวงจร dual-active-bridge ของ DC-DC converter ที่นำเสนอในปี ค.ศ.1990 [9] หลังจากที่มี

แนวคิดเกี่ยวกับหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังเกิดขึ้น หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและมีการนำเสนอหลักการการทำงานในรูปแบบ 3 เฟส AC-AC converter ที่มีการแยกระบบไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ และนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ระบบรถราง ระบบส่งกำลังไฟฟ้าบนเรือ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังอยู่ในช่วงการพัฒนาในเรื่องของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ทำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้มีประสิทธิภาพและพิกัดกำลังที่สูงขึ้น แต่ลดราคาต้นทุนในการผลิตให้มีค่าต่ำลง และในอนาคตอันใกล้หากเทคโนโลยีมีการพัฒนาจนถึงขีดสุด หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะถูกนำมาเข้ามาแทนที่ระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยหม้อแปลงความถี่ต่ำและอินเวอร์เตอร์ทั้งหมด ได้แก่ ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบสมาร์ทกริด ระบบรถไฟฟ้า และระบบเครื่องจักรรถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็ว เป็นต้น



รูปที่ 2 วงจรหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย McMurray ในปี ค.ศ. 1970

### 2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์

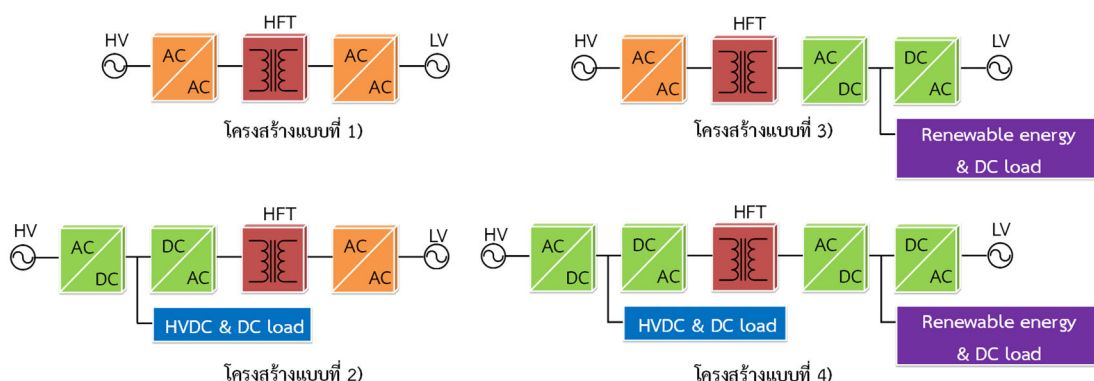
การส่งกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากสามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปได้ไกลและลดปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก (voltage drop) ที่ปลายสายได้เป็น

อย่างดี และอุปกรณ์หนึ่งที่มีความจำเป็นอย่างมากสำหรับระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับคือ หม้อแปลงไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันทำจากแกนเหล็กและขดลวด ซึ่งข้อดีของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ คือ มีความแข็งแรงทนทาน แต่มี

ข้อเสีย คือ มีน้ำหนักมาก มีขนาดใหญ่ และไม่มีฟังก์ชันการใช้งานอื่น ๆ นอกจากยกระดับแรงดันไฟฟ้า (step up voltage) หรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า (step down voltage) เท่านั้น จากความต้องการพัฒนาระบบไฟฟ้าให้เป็นระบบไฟฟ้าแบบอัจฉริยะที่สามารถควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้า ควบคุมความถี่ของระบบ และปรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างอัตโนมัติ ตลอดจนการนำพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกมาใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สิ่งต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นต้องมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหม้อแปลงความถี่ต่ำที่ใช้ในปัจจุบันไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายกว่ามาประยุกต์ใช้งานในระบบไฟฟ้าแบบอัจฉริยะ

ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ โครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์จำนวน 2 ชุด คือ คอนเวอร์เตอร์ฝั่งป้อนภูมิ และคอนเวอร์เตอร์ฝั่งหุติภูมิ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุด นี้เชื่อมต่อกันด้วยหม้อแปลงความถี่สูงที่ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแยกวงจรไฟฟ้าทั้ง 2 ฝั่ง ออกจากกัน สำหรับการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์

ทรอนิกส์กำลังวงจรคอนเวอร์เตอร์ฝั่งป้อนภูมิจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง จากนั้นจะส่งกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อให้คอนเวอร์เตอร์อีกชุดหนึ่งแปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำและนำกลับไปใช้งาน โดยโครงสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ฝั่ง แบบต่าง ๆ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 พบว่าคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งานจะเป็นแบบเอซีทูเอซีคอนเวอร์เตอร์ (AC-AC converter) โดยทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วงจรแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (matrix converter) และอีกวงจรหนึ่งที่มีการใช้งาน คือ วงจรแบ็คทูแบ็คคอนเวอร์เตอร์ (back-back converter) ที่มีลักษณะคล้ายกับการนำลิงค์ไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ 2 ชุด มาเชื่อมต่อกันและมีตัวเก็บประจุอยู่ตรงกลาง ซึ่งวงจรที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นแบบฟรอนต์เอนด์คอนเวอร์เตอร์ (front-end converter) โดยข้อดีของวงจรแบ็คทูแบ็คคอนเวอร์เตอร์นี้จะมีส่วนที่เป็นลิงค์ไฟตรงซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสตรงอื่น ๆ โหลดไฟฟ้ากระแสตรงและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตจากพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกได้ [10,11]



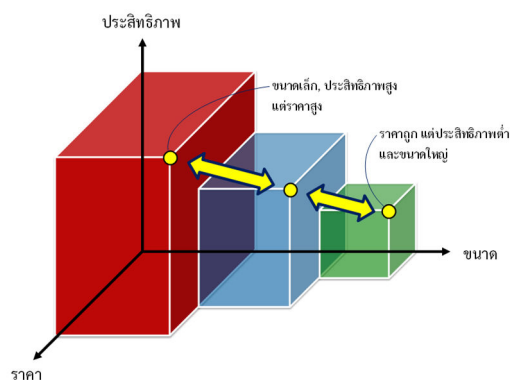
รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ฝั่ง แบบต่าง ๆ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

นอกจากนี้อาจจำเป็นต้องนำเทคนิคหลายระดับชั้น (multilevel) มาประยุกต์ใช้งานด้านแรงสูงด้วย เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งข้อดี คือ สามารถลดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์กำลังในแต่ละตัวและเพิ่มพิสัยกำลังของวงจรคอนเวอร์เตอร์ แต่ข้อเสีย คือ สวิตช์กำลังที่ใช้มีจำนวนมาก ทำให้การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการทำงานของสวิตช์กำลังมีค่ามาก และมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้นด้วย [12] โดยตัวอย่างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีการใช้งาน ได้แก่ วงจรไดโอดแคมป์ (diode camped inverter) วงจรไฟลิ่งคาปาซิเตอร์ (flying capacitor inverter) วงจรแคสเคดมีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (cascaded multi-cell inverter) วงจรเจนเนอเรตอร์ไลซ์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (generalized P2-cell multilevel inverter) วงจรรีเวิร์สโวลต์เจมมีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (reversing voltage multilevel inverter) และวงจรมอดดูลาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์ (modular multilevel inverter) เป็นต้น [13]

## 2.2 หม้อแปลงความถี่สูง

โครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูงหรือหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ขดลวดตัวนำ และแกนที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก สำหรับการออกแบบสร้างหม้อแปลงความถี่สูงหรือหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพของหม้อแปลงขนาดของหม้อแปลง และต้นทุนในการผลิต ดังรูปที่ 4 พบว่าถ้าใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูงในการสร้างหม้อแปลงหม้อแปลงที่ได้นั้นจะมีประสิทธิภาพสูง มีขนาดที่เล็กลง แต่ราคาของหม้อแปลงก็จะเพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางกลับกัน ถ้าใช้วัสดุที่มีคุณภาพต่ำในการสร้างหม้อแปลงหม้อแปลงที่ได้ก็จะมีราคาถูก แต่ประสิทธิภาพของหม้อแปลงจะต่ำและหม้อแปลงมีขนาดใหญ่ [14,15] ซึ่งการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงนั้น ปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าว

มานี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแกนความถี่สูงที่นำมาใช้ในการออกแบบ โดยแกนความถี่สูงที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ แกนซิลิกอนสตีล (silicon steel) แกนอะมอร์ฟัส (amorphous) แกนเฟอร์ไรต์ (ferrite) และแกนนาโนคริสตัลไลน์ (nanocrystalline) สมบัติของแกนชนิดต่าง ๆ นี้ แสดงดังตารางที่ 1 [16-18]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ ขนาด และต้นทุนในการผลิตหม้อแปลงความถี่สูง

สมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของแกนชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำหม้อแปลงความถี่สูง คือ ค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กจะเป็นไปตามสมการของ Steinmetz ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$P_c = K f^\alpha B^\beta \quad (3)$$

โดย  $P_c$  เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก ( $\text{mw/cm}^3$ );  $f$  เป็นความถี่มูลฐานที่ใช้ในการส่งกำลัง (Hz);  $K$  เป็นค่าคงที่การสูญเสียของแกนความถี่สูงแต่ละชนิด ( $\text{mw/cm}^3$ );  $B$  เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (T) ซึ่งในการออกแบบส่วนใหญ่จะกำหนดให้  $B$  มีค่าเท่ากับ 0.3 T;  $\alpha$  และ  $\beta$  เป็นค่าคงที่ที่หาได้จากกราฟของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ โดยตัวอย่างค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกน

ความถี่สูงชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 3 kHz และค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนที่ความถี่ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 100 kHz แสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 5 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ ด้วยข้อมูลจากตารางที่ 1 ตารางที่ 2 และข้อมูลอื่น ๆ พบว่าแกนซิลิกอนสเตลมีค่าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (saturation density) ประมาณ 1.48 T มีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) ปานกลาง ราคาถูก การออกแบบและใช้งานง่าย มีความแข็งแรงทนทาน มีสัญญาณรบกวนน้อย แต่มีข้อเสีย คือ กำลัง

ไฟฟ้าที่สูญเสียมีค่าสูง จึงทำให้หม้อแปลงความถี่สูงที่ทำจากแกนชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงความถี่สูงที่ทำจากแกนความถี่สูงชนิดอื่น ๆ

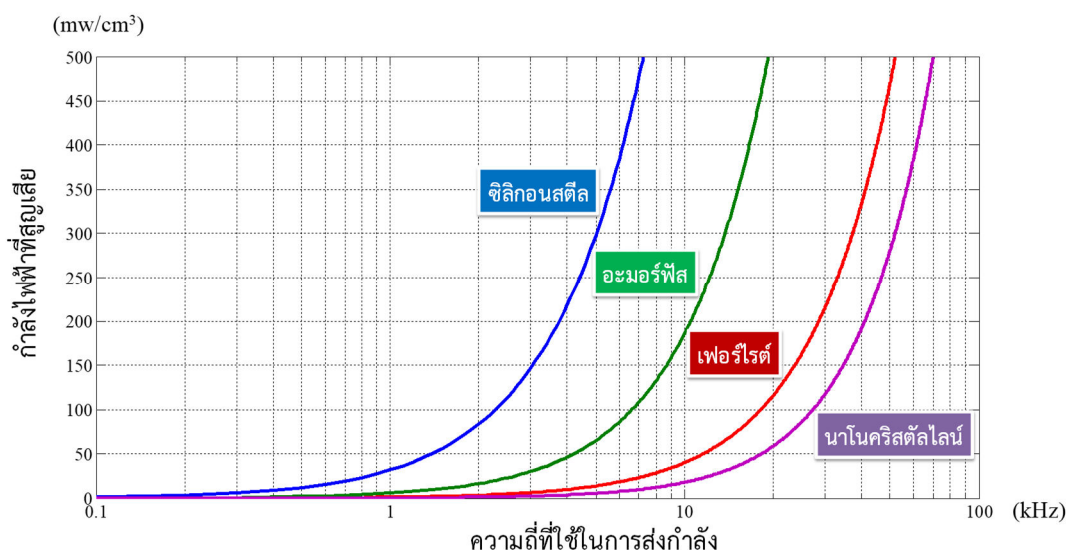
แกนอะมอร์ฟัสเป็นแกนความถี่สูงที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กปานกลาง ค่าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.56 T การออกแบบและใช้งานง่าย ราคาปานกลาง กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียปานกลาง จึงทำให้หม้อแปลงความถี่สูงที่ผลิตจากแกนชนิดนี้มีสมบัติในระดับปานกลาง ขนาดไม่ใหญ่มาก และมีประสิทธิภาพเหมาะสมกับต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก

ตารางที่ 1 สมบัติของแกนชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำหม้อแปลงความถี่สูง

| วัสดุ             | ตัวอย่างชนิดของแกน    | ค่าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (T) ที่ 25 °C | ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ( $\mu$ ) | ราคา    |
|-------------------|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|---------|
| ซิลิกอนสเตล       | 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     |

ตารางที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ ที่ความถี่ 3 kHz

| วัสดุ             | K (mw/cm <sup>3</sup> ) | $\alpha$ | $\beta$ | ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่ 0.3 T (mw/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------------|-------------------------|----------|---------|--------------------------------------------------------|
| ซิลิกอนสเตล       | 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 5 ค่ากัลงไฟฟ้าที่สูญเสียของแกนความถี่สูงที่ความถี่ต่าง ๆ ตั้งแต่ 100 Hz จนถึง 100 kHz

แกนเฟอร์ไรต์เป็นแกนความถี่สูงที่มีค่าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กประมาณ 0.4 T ราคาปานกลาง การสูญเสียมีค่าต่ำ แต่มีการออกแบบและใช้งานที่ค่อนข้างซับซ้อน แกนมีความเปราะและแตกหักง่าย และมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กต่ำ จึงทำให้หม้อแปลงความถี่สูงที่ผลิตจากแกนชนิดนี้มีขนาดใหญ่มาก แต่หากมองข้ามในเรื่องของขนาดกับลักษณะการใช้งานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงทนทานมากนัก แกนชนิดนี้ก็เป็นที่น่าสนใจสำหรับการนำมาใช้งาน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับราคาต้นทุน

แกนนาโนคริสตัลไลน์เป็นแกนความถี่สูงที่มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง ค่าความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.2 T มีการสูญเสียต่ำ และต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแกนความถี่สูงชนิดอื่น ๆ ถ้าใช้แกนชนิดนี้ผลิตหม้อแปลงความถี่สูง หม้อแปลงที่ได้จะมีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูงมาก แต่ราคาต้นทุนก็จะสูงมากเช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้แกนความถี่สูงชนิดต่าง ๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน ประสิทธิภาพของหม้อแปลง ขนาดของหม้อแปลง และต้นทุนใน

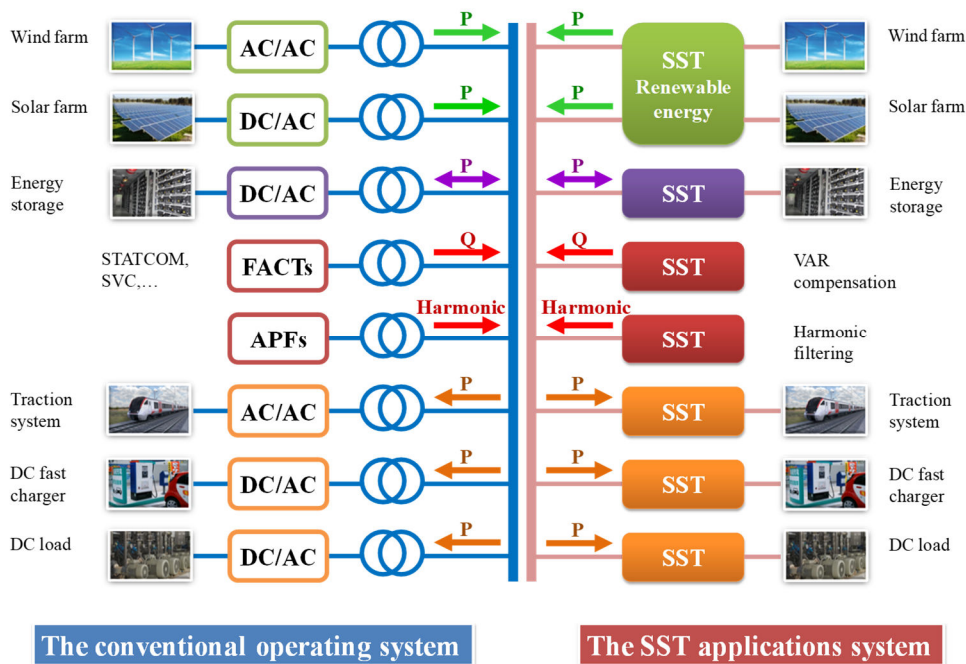
การผลิต ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

### 3. การประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มเพื่อแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงในช่วงเวลากลางคืนของระบบการทำงานเดิม

ข้อได้เปรียบในเรื่องของขนาดที่เล็ก น้ำหนักเบา มีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย และมีโครงสร้างคล้ายกับการรวมวงจรคอนเวอร์เตอร์ และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกันในอุปกรณ์เพียงตัวเดียว ทำให้มีการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานแทนที่ระบบการทำงานแบบเดิมที่ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำ ซึ่งตัวอย่างระบบการทำงานที่มีการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานลม (wind farm) การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (solar farm) ระบบเก็บสะสมพลังงาน (energy storage) ระบบการชดเชย

แรงดันไฟฟ้า (FACTS device) ระบบกรองสัญญาณรบกวน (harmonic filtering) ระบบรถไฟฟ้า (traction system) ระบบการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบ

รวดเร็ว (DC fast charger) และโหลดไฟฟ้ากระแสตรง (DC load) เป็นต้น ดังรูปที่ 6 [19]



รูปที่ 6 การนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีโครงสร้างคล้ายกับการรวมวงจรคอนเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกันในอุปกรณ์เพียงตัวเดียวมาใช้งานแทนที่ระบบการทำงานแบบเดิม

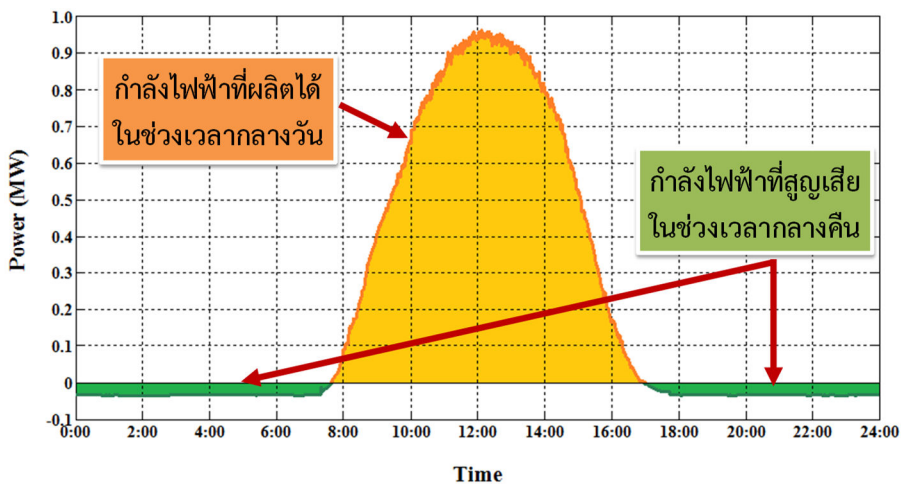
สำหรับการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับโซลาร์ฟาร์มนั้นยังอยู่ในขั้นการวิจัย การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการจำลองกับระบบขนาดเล็ก ซึ่งยังไม่มีการใช้งานจริงในระบบใหญ่ ๆ โดยในปี ค.ศ. 2014 ได้มีแนวคิดเกี่ยวกับการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มจริงดังแสดงในบทความของ Foureaux และคณะ [20] แต่เนื่องจากการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม นั้นจะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง จึงจำเป็นต้องเทคนิคอินเวอร์เตอร์หลายระดับมาช่วยพัฒนา เพื่อให้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถรองรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้ [21] ในบทความนี้ได้ศึกษาการ

ประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับ โซลาร์ฟาร์ม โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดิมในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งรายละเอียดจะมีการนำเสนอในลำดับถัดไป

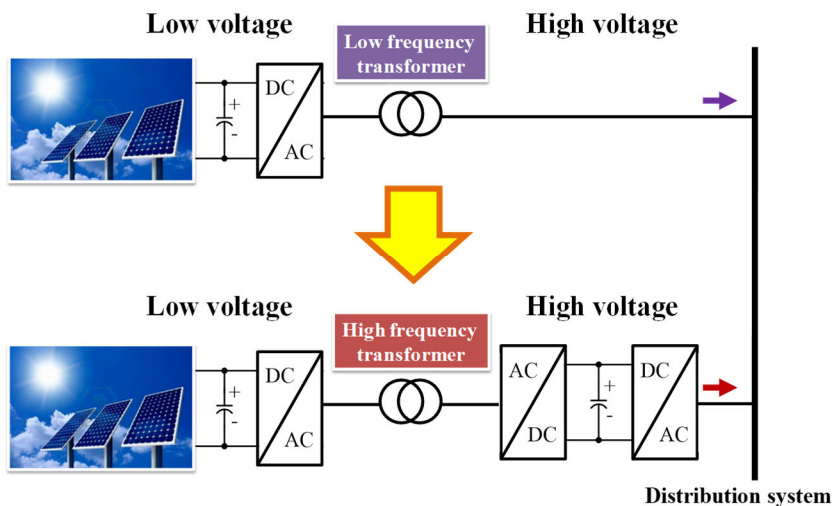
รูปที่ 7 เป็นการศึกษาการทำงานและเก็บข้อมูลการทำงานจริงของโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 เมกกะวัตต์ จะพบว่าในช่วงเวลากลางคืนหรือช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม (พื้นที่สีเขียว) เกิดจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ 2 ชนิด ได้แก่ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากไฟเลี้ยงที่อินเวอร์เตอร์ และการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กเพื่อใช้ในการสร้าง

สนามแม่เหล็ก (core loss หรือ no-load loss) ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องจากไฟเลี้ยงที่อินเวอร์เตอร์สามารถแก้ไขได้โดยการปิดสวิตช์ไฟที่อินเวอร์เตอร์ เพื่อตัดวงจรการทำงานออกจากแหล่งจ่ายไฟ แต่การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแกนเหล็กเพื่อใช้สร้างสนามแม่เหล็กไม่สามารถแก้ไขได้ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ามีการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของ

การไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในส่วนนี้ จึงจำเป็นต้องมีการนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีโครงสร้างคล้ายกับการรวมโซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกันในอุปกรณ์เพียงตัวเดียวมาประยุกต์ใช้งานแทนที่ระบบการทำงานแบบเดิมที่ประกอบด้วยโซลาร์อินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเวลากลางวันและกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม



รูปที่ 8 โครงสร้างหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นำมาประยุกต์ใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มแทนที่ระบบการทำงานแบบเดิม

ตารางที่ 3 สมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

| ชนิดของหม้อแปลง | สมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ |                                        |                                     |                                |            |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------|
|                 | ประสิทธิภาพ (%)                  | กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสถานะไม่จ่ายโหลด | กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสถานะจ่ายโหลด | กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียรวมทั้งหมด | ราคา (บาท) |
| ชนิดที่ 1       | 98.5                             | 1,800 W                                | 18,300 W                            | 20,100 W                       | 700,000    |
| ชนิดที่ 2       | 99.0                             | 1,800 W                                | 10,700 W                            | 12,500 W                       | 900,000    |
| ชนิดที่ 3       | 99.2                             | 1,250 W                                | 9,300 W                             | 10,550 W                       | 1,150,000  |
| ชนิดที่ 4       | 99.2                             | 1,000 W                                | 9,600 W                             | 10,600 W                       | 1,250,000  |
| ชนิดที่ 5       | 99.2                             | 950 W                                  | 9,500 W                             | 10,450 W                       | 1,350,000  |

รูปที่ 8 จะพบว่าโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีคอนเวอร์เตอร์อีก 1 ชุด ด้านแรงดันสูงที่เชื่อมต่อระหว่างหม้อแปลงความถี่สูงกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ดังนั้นหากปิดสวิตช์หรือปิดชุดขับเคลื่อนเพื่อตัดการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ด้านแรงดันสูงจะทำให้กระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไม่สามารถไหลมายังหม้อแปลงความถี่สูงได้ เพียงเท่านั้นก็สามารถแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากการสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงในช่วงเวลากลางคืนที่ไม่มีการทำงานหรือในช่วงที่ไม่มีภาระทางไฟฟ้าได้ ซึ่งต่างจากระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำที่ไม่สามารถตัดวงจรไฟฟ้าระหว่างหม้อแปลงความถี่ต่ำกับระบบจำหน่ายได้ จึงทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลาถึงแม้จะไม่มีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าก็ตาม

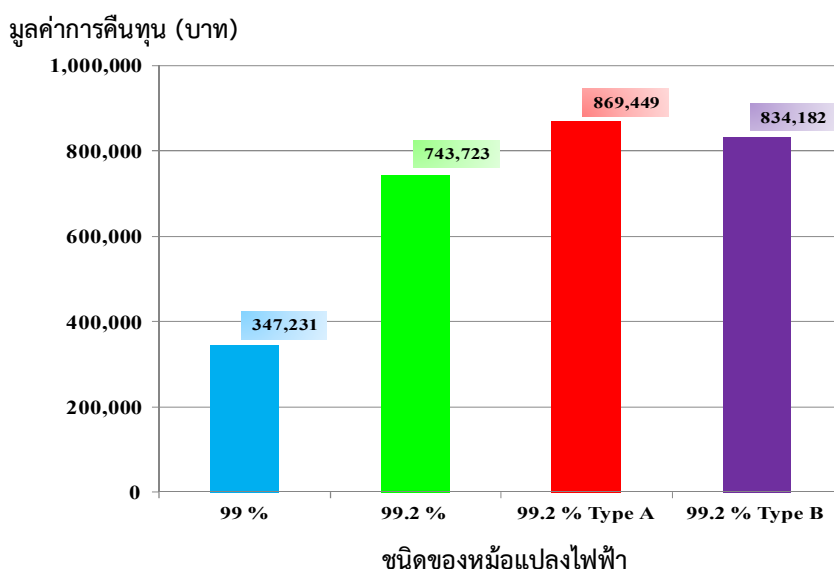
#### 4. การเปรียบเทียบ ข้อดี-ข้อด้อย และการวิเคราะห์มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำ

การศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม [21] หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ร่วมกับโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 เมกกะวัตต์ ส่วนใหญ่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ 2 winding พิกัดกำลังขนาด 1,250 kVA และพิกัดแรงดัน 400/22 kV มีด้วยกันทั้งหมด 5 ประเภท ประกอบด้วยหม้อแปลงประสิทธิภาพ 98.5 % หม้อแปลงประสิทธิภาพ 99 % หม้อแปลงประสิทธิภาพ 99.2 % หม้อแปลงประสิทธิภาพ 99.2 % แบบกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่แกนเหล็กต่ำ (type A) และหม้อแปลงประสิทธิภาพ 99.2 % แบบกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่แกนเหล็กต่ำพิเศษ (type B) ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 5 ประเภท นี้มีการผลิตด้วยวัสดุที่มีคุณภาพแตกต่างกัน ส่งผลให้การสูญเสียกำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพ รวมถึงต้นทุนในการผลิตที่มีค่าต่างกันด้วยดังตารางที่ 3

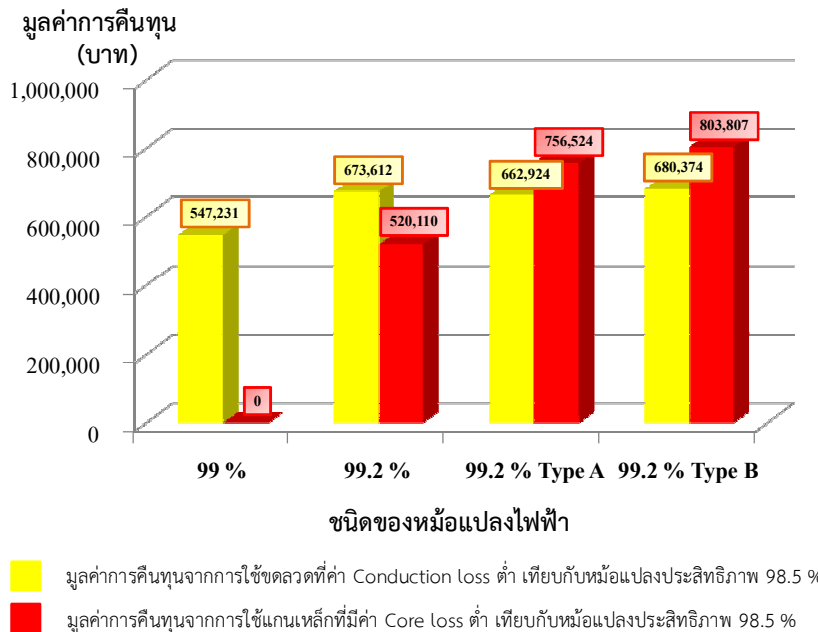
สมบัติเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงจะมีการสูญเสียต่ำ แต่ราคาจะสูงตามไปด้วยทำให้ต้องมีการลงทุนที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นหากใช้หม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาสูงแต่มีการคืนทุนในระยะยาวที่คุ้มค่าก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจในการลงทุนเพิ่มของเจ้าของโซลาร์ฟาร์ม พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความ

เหมาะสมในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์มมากที่สุด คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบประสิทธิภาพ 99.2 % type A ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมีค่า core loss ต่ำ โดยมีการคืนทุนหลังหักค่าใช้จ่ายที่ต้องลงทุนเพิ่มมากกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ เมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพ 98.5 % ซึ่งเป็นหม้อแปลงแบบมาตรฐานที่มีการใช้งานอยู่ทั่วไปดังรูปที่ 9 (คิดอัตราค่าไฟฟ้ารูปแบบ feed-in tariff เท่ากับ 5.66 บาทต่อหน่วย และอายุสัญญาการซื้อขายไฟ 25 ปี) เมื่อวิเคราะห์มูลค่าการคืนทุนทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เทียบกับหม้อแปลงประสิทธิภาพ 98.5 % (ยังไม่หักมูลค่าการลงทุนที่ต้องลงทุนเพิ่มขึ้น) จะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นมูลค่าการคืนทุนจากการใช้ขดลวดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (low load loss) และส่วนที่สองเป็นมูลค่าการคืนทุนจากการใช้แกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (low core loss) ดังรูปที่ 10 จะพบว่ามูลค่าการคืนทุนจากการใช้ขดลวดคุณภาพดีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า

จะมีค่าไม่แตกต่างกันมาก แต่ต่างกับมูลค่าการคืนทุนจากการใช้แกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งจะมีมูลค่าการคืนทุนที่สูงมากเมื่อแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่า core loss ต่ำลง โดยสังเกตเห็นได้ชัดจากค่า core loss ที่ต่ำลงของหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพ 99 % กับหม้อแปลงไฟฟ้าประสิทธิภาพ 99.2 % สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโซลาร์ฟาร์มจะมีการทำงานเพียงประมาณ 10 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งเวลาที่เหลืออีก 14 ชั่วโมง จะเป็นช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม และเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กขณะไม่มีภาระไฟฟ้าหรือค่า core loss อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับโซลาร์ฟาร์มจึงอาจไม่จำเป็นต้องมีมีประสิทธิภาพสูง แต่ควรเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า core loss ของแกนเหล็กต่ำ ๆ หรือควรเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า core loss ในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม



รูปที่ 9 มูลค่าการคืนทุนของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ หลังหักค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับหม้อแปลงประสิทธิภาพ 98.5 %



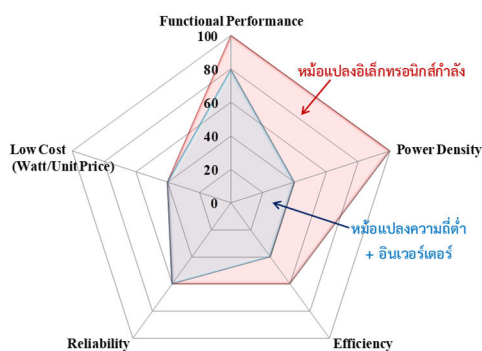
รูปที่ 10 มูลค่าการลงทุนจากการใช้ขดลวดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (low load loss) และมูลค่าการลงทุนจากการใช้แกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (low core loss) เปรียบเทียบกับหม้อแปลงประสิทธิภาพ 98.5 %

ถึงจะมีหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมที่สุดในการใช้งานกับโซลาร์ฟาร์ม แต่หากยังเป็นระบบการทำงานแบบเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันที่ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำ ระบบก็ยังคงมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า core loss ของหม้อแปลงที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กในขณะที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มอยู่ ดังนั้นหากนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีโครงสร้างเหมือนกับการรวมโซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำเข้าไว้ด้วยกันในอุปกรณ์เพียงตัวเดียวและสามารถตัดการเชื่อมต่อทางด้านแรงดันสูงระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับระบบจำหน่ายมาใช้งาน โซลาร์ฟาร์มก็จะไม่เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า core loss ในช่วงที่ไม่มีการทำงาน

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์เข้ามาใช้ในระบบไฟฟ้าแล้วประมาณ

2,000 เมกกะวัตต์ อยู่ในระหว่างดำเนินการก่อสร้างอีกประมาณ 1,000 เมกกะวัตต์ และนอกจากนี้คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพช.) ยังมีแผนในระยะยาวให้เพิ่มการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์ให้มีความเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งล่าสุดได้ส่งเสริมให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้นอีก 1,054 เมกกะวัตต์ ทั้งในรูปแบบติดตั้งบนพื้นดิน (โซลาร์ฟาร์มในหน่วยงานราชการและสหกรณ์การเกษตร) และแบบติดตั้งบนหลังคา (solar PV rooftop) ดังนั้นหากนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้งานแทนที่ระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยโซลาร์อินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงความถี่ต่ำกับโซลาร์ฟาร์มขนาดประมาณ 2,000 เมกกะวัตต์ ที่กำลังจะดำเนินการก่อสร้าง จะทำให้ผู้ประกอบการเจ้าของโซลาร์ฟาร์มมีรายได้เพิ่มขึ้นรวมทั้งประเทศประมาณ 1,471,954,000 บาท ซึ่งรายได้ที่เพิ่มขึ้นในส่วนนี้เกิดจากการลดกำลังไฟฟ้าที่

สิ้นเปลืองโดยใช้เหตุที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กให้กับหม้อแปลงในขณะที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม นั้นหมายความว่าหากนำหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้งานแทนที่ระบบการทำงานแบบเดิมจะสามารถประหยัดทรัพยากรเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 1,471,954,000 บาท ด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นการช่วยลดสถานะโลกร้อนจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้า



**รูปที่ 11** การเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบการทำงานแบบเดิมที่ใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำกับโซลาร์อินเวอร์เตอร์

นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าและชะลอการสร้างโรงไฟฟ้าของประเทศ อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังก็ยังมีข้อด้อยในเรื่องของราคาที่มีมูลค่าสูงกว่าระบบการทำงานเดิมที่ใช้โซลาร์อินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำ โดยหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีต้นทุนประมาณ 4 ล้านบาทต่อโซลาร์ฟาร์มขนาด 1 เมกะวัตต์ ส่วนระบบการทำงานเดิมที่ใช้โซลาร์อินเวอร์เตอร์ (ประมาณ 2 ล้านบาท) กับหม้อแปลงความถี่ต่ำ (ประมาณ 1 ล้านบาท) จะมีต้นทุนอยู่ที่ประมาณ 3 ล้านบาทต่อเมกะวัตต์ ดังนั้นการใช้หม้อ

แปลงอิเล็กทรอนิกส์จึงแพงกว่าระบบการทำงานเดิมอยู่ประมาณ 1 ล้านบาท แต่เมื่อหักมูลค่าการสูญเสียจากค่า core loss ของหม้อแปลงความถี่ต่ำในช่วงที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์มอีกประมาณ 800,000 บาท ซึ่งพบว่าแท้จริงแล้วหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีมูลค่าการลงทุนที่สูงกว่าระบบการทำงานเดิมเพียง 200,000 บาท เท่านั้น แต่จะได้ฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย อุปกรณ์มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา และระบบมีประสิทธิภาพการทำงานที่เพิ่มสูงขึ้น (เนื่องจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าลดลง) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบภาพรวมการทำงานของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบการทำงานแบบเดิมที่ใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำกับโซลาร์อินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 11

## 5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการศึกษาหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งานร่วมกับโซลาร์ฟาร์ม ซึ่งนำเสนอโครงสร้างของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ทั้งด้านป้อนภูมิและด้านทุดิยภูมิ และหม้อแปลงความถี่สูง ข้อคำนึงต่าง ๆ ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง การเลือกใช้แกนความถี่สูง ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบต่าง ๆ ในระบบจำหน่าย และการประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโซลาร์ฟาร์มเพื่อแก้ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่ต่ำในช่วงเวลากลางคืนของระบบการทำงานเดิม นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้งานในโซลาร์ฟาร์มซึ่งได้แก่หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่า core loss ต่ำ หรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่มีค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า core loss ในช่วงเวลากลางคืนที่ไม่มีการทำงานของโซลาร์ฟาร์ม และการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อด้อย และวิเคราะห์มูลค่าทาง

เศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังกับระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำ พบว่าถ้านำมูลค่าการลงทุนที่ไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากค่า core loss ของหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาหักออกจากมูลค่าการลงทุนที่เพิ่มขึ้น หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีมูลค่าการลงทุนที่สูงกว่าระบบการทำงานเดิมที่ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์กับหม้อแปลงความถี่ต่ำเพียงประมาณ 200,000 บาท แต่จะได้ระบบการทำงานใหม่ที่มีฟังก์ชันการใช้งานหลากหลายและสามารถรองรับระบบไฟฟ้าแบบอัจฉริยะที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้เป็นอย่างดี

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ. ระดับปริญญาเอก) ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เลขที่สัญญา PHD58I0092 ภายใต้ความร่วมมือของ บริษัท พีระบราเธอร์ จำกัด และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## 7. รายการอ้างอิง

- [1] She, X., Burgos, R., Wang, G., Wang, F. and Huang, A.Q., 2012, Review of solid state transformer in the distribution system: From components to field application, pp. 4077-4084, Proceedings of IEEE: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh.
- [2] She, X., Wang, F., Burgos, R. and Huang, A.Q., 2012, Solid state transformer interfaced wind energy system with integrated active

power transfer, reactive power compensation and voltage conversion functions, pp. 3140-3147, Proceedings of IEEE: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh.

- [3] Alepuz, S., Gonzalez, F., Arnedo, J.M. and Martinez, J.A., 2013, Solid state transformer with low-voltage ride-through and current unbalance management capabilities, pp. 1278-1283, Proceedings of IEEE: Industrial Electronics Society (IECON), Vienna.
- [4] Khomfoi, S., 2014, Power electronics roles in Thailand smart grid, pp. 1-5, Proceedings of IEEE: International Electrical Engineering Congress (iEECON), Krabi.
- [5] Detail Project Report 1 MWp SPV Power Plant, Available Source: [http://www.scribd.com/doc/236254021/1MW-Utility-Scale-Solar-PV-Power-Plant-Final-libre% 203scribd](http://www.scribd.com/doc/236254021/1MW-Utility-Scale-Solar-PV-Power-Plant-Final-libre%203scribd), December 8, 2011.
- [6] Khemmook, P. and Khomfoi, S., 2015, Solid state transformer using a modular multilevel inverter for PV farm applications, pp. 2108-2111, Proceedings of IEEE: International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Pattaya.
- [7] Kolar, J.W. and Ortiz, G., 2014, Solid-state-transformers: Key components of future traction and smart grid systems, pp. 18-21, Proceedings of IEEE: Proceedings of International Power Electronics Conference (IPEC) and Proceedings of ECCE Asia,

- Hiroshima.
- [8] McMurray, W., 1971, The thyristor electronic transformer: A power converter using a high-frequency link, IEEE Trans. Ind. Gen. Appl. 1971: 451-457.
- [9] Doncker, R.D., Divan, D. and Kheraluwala, M., 1991, A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications, IEEE Trans. Ind. Appl. 1991: 63-73.
- [10] Steimer, P., 2010, Enabled by high power electronics-energy efficiency, renewables and smart grids, pp. 11-15, Proceedings of International Power Electronics Conference (IPEC), Sapporo.
- [11] Falcones, S., Ayyanar, R. and Mao, X., 2013, A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage, IEEE Trans. Power Elect. 28(5): 2192-2203.
- [12] Khomfoi, S. and Tolbert, L.M., 2006, Chapter 17 Multilevel Power Converters, pp. 451-48, In Rashid, M., Power Electronics Handbook, 2nd Ed., Academic Press, Massachusetts.
- [13] Nordvall, A., 2011, Multilevel Inverter Topology Survey, M.Sc. Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 78 p.
- [14] Hassan, O.A., Klumpner, C. and Asher, G., 2011, Design considerations for core material selection and operating modes for a high frequency transformer used in an isolated DC/DC converter, pp. 1-11, Proceedings of IEEE: Power Electronics and Applications (EPE), Birmingham.
- [15] Huber, J.E. and Kolar, J.W., 2014, Volume/weight/cost comparison of a 1 MVA 10 kV/400V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer, pp. 4545-4552, Proceedings of IEEE: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore.
- [16] Du, Y., Baek, S., Bhattacharya, S. and Huang, A.Q., 2010, High-voltage high-frequency transformer design for a 7.2 kV to 120V/240V 20 kVA solid state, pp. 493-498 transformer, Proceedings of IEEE: Industrial Electronics Society, Arizona.
- [17] She, X., Huang, A.Q. and Burgos, R., 2013, Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems, IEEE J. Emerg. Select. Topics Power Elect. 2013: 186-198.
- [18] Huang, P., Mao, C., Wang, D., Wang, L., Duan, Y., Qiu, J., Xu, G. and Cai, H., 2017, Optimal design and implementation of high-voltage high-power silicon steel core medium-frequency transformer, IEEE Trans. Ind. Elect. 2017: 4391-4401.
- [19] She, X. and Huang, A., 2013, Solid state transformer in the future smart electrical system, pp. 1-5, Proceedings of IEEE: Power and Energy Society General Meeting (PES), Vancouver.
- [20] Foureux, N.C., Adolpho, L., Silva, S.M.,

- Brito, J.A.S. and Filho, B.J.C., 2014, Application of solid state transformers in utility scale solar power plant, pp. 3695-3700, Proceedings of IEEE: Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Colorado.
- [21] Khemmook, P., Suwan-ngam, W. and Khomfoi, S., 2015, Suitable power transformers for solar farm applications, pp. 1-6, Proceedings of IEEE: International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phetchaburi.