

การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจร
ซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

Improvement Performance Maximum Power Point Tracking Using
Synchronous Zeta Converter for Photovoltaic

ณัฐวรรษ จำปาศรี* กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล**
พงศพัชร บัวเพ็ชร*** พชรินทร์ อินทมาศ**** และ นพวรรณ แทนเล็ก*****
Nuttawat Jumpasri*, Kaweepoj Woranetsuttikul**,
Pongpat Buapet***, Phacharin Inthamas **** and Noppawan Thaenlek*****

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดซิงโครนัสซีต้าที่เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของรูปคลื่นทั้งด้านออกและด้านเข้า โดยคอนเวอร์เตอร์ชนิดซิงโครนัสซีต้านี้ได้ออกแบบและพัฒนามาจากคอนเวอร์เตอร์ชนิดซีต้า ด้วยการเลือกใช้ออสเฟตที่มีการสูญเสียต่ำกว่าการสูญเสียของไดโอด ที่ทำงานในโหมดบ็ีกและบูสต์ โหมดแบบกระแสต่อเนื่องในช่วงค่าวัฏจักรตั้งแต่ 0-0.65 ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่กำลังไฟฟ้า 0-160 วัตต์ ที่ค่าประสิทธิภาพสูงสุดไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ โดยกระแสรีปเปลและแรงดันรีปเปลทั้งด้านเข้าและด้านออกถูกออกแบบให้มีค่าน้อยกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวงจรที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้และถูกทดสอบในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ: ซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์, การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, ประสิทธิภาพ

* วิศวกรฝ่ายผลิต บริษัทซีเกทประเทศไทย จำกัด

** อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช Corresponding author e-mail: kaweepott@hotmail.co.th

*** อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

**** อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

***** อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

Abstract

This paper presents the proposed synchronous zeta converter focusing on performance improvement and ripple waveform of voltage and current. The proposed synchronous zeta converter is developed based on the conventional zeta converter by replacement of low loss MOSFET on the diode. The synchronous zeta converter is operated on current continuous mode at buck-boost operation with 0-0.65 duty cycle, 20 kHz switching frequency and 0-160 watts. The maximum power efficiency is achieved 95% at current and voltage ripple for both input and output less than 1 %. The synchronous converter can be applied and tested in maximum power point tracking with photovoltaic system.

Keywords: Synchronous Zeta converter, Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic, Efficiency

1. บทนำ

จากปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันและมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นผลกระทบจากโรงไฟฟ้าถ่านหินนิวเคลียร์และโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงมีมลพิษที่สูงขึ้นดังนั้นจึงได้มีการหันมาใช้พลังงานหมุนเวียนเพิ่มมากขึ้นและใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล และไฮโดรเจน เป็นต้น (Blaabjerg, *et al.*, 2005) ในประเทศไทยมีความเหมาะสมในการที่จะสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพราะเป็นประเทศที่มีแสงอาทิตย์ค่อนข้างมากส่วนพลังงานอื่นเช่น พลังงานจากน้ำ หรือลมก็ลดน้อยลงตามมา ซึ่งในปัจจุบันมีผู้สนใจในพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก (Bose, 2009), (Stalter, *et al.*, 2010) นักวิชาการและผู้ที่สนใจทางด้านพลังงานทดแทนได้นำเอาเทคโนโลยีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างแพร่หลายเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าเป็นชนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจำเป็นที่จะต้องมียินเวอร์เตอร์เข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อที่จะแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในมาใช้งานกับบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม (Niculescu, Niculescu & Purcaru, 2008; Matthew & Kessler, 2010)

ปัญหาที่พบโดยส่วนมากของเซลล์แสงอาทิตย์คือการเกิดสภาวะเมฆหมอกมาบังในบางส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ไม่สามารถให้พลังงานได้เต็มที่อีกทั้งเซลล์แสงอาทิตย์จะมีจุดที่ให้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดจุดนั้นๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิได้แผงของเซลล์แสงอาทิตย์ (Gu, 2007; Viero, *et al.*, 2010) ด้วยเหตุนี้เซลล์แสงอาทิตย์จึงจำเป็นที่จะต้องมีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ตลอดเวลาหรือที่เรียกกันว่า MPPT (Maximum Power Point Tracking) ดังนั้น Power Electronics จึงมีความสำคัญในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดวงจรที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดยกตัวอย่างเช่นวงจร DC-DC converter อาทิ Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, Sepic และ Zeta เป็นต้น (Falin, 2008)

ในการวิจัยนี้ได้เลือกวงจร DC-DC converter ขึ้นมาหนึ่งวงจรคือ วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมันสามารถที่จะลดระดับแรงดัน และเพิ่มระดับแรงดันได้ในวงจรเดียวผู้วิจัยได้เลือกวงจรมันเพราะมีคุณสมบัติที่โดดเด่นของวงจรคือ สามารถเพิ่มหรือลดระดับแรงดันได้แล้วยังมีค่าแรงดันกระแสเพื่อมและกระแสกระแสเพื่อมที่ต่ำมาก อีกทั้งยังสามารถรองรับพลังงานได้สูง วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ถูกพัฒนาขึ้นจากวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์และซีปิกคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งข้อเสียของวงจรชุกคอนเวอร์เตอร์คือกลับหัวไฟฟ้าด้านขาออกส่วนข้อเสียของซีปิกคอนเวอร์เตอร์คือกระแสกระแสเพื่อมและแรงดันกระแสเพื่อมทางด้านขาออกมีค่าที่สูงวงจรซีต้าภายใน Circuit จะเห็นว่ามี LC ที่ด้านขาออกที่ทำหน้าที่เสมือน Low pass filter ดีๆ นั่นเองอีกทั้งยังมีประสิทธิภาพที่สูงข้อเสียของวงจร Zeta หรือวงจร Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, Sepic คือการเกิด Over Voltage เกิดขึ้นและการสูญเสียที่ Diode จึงได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาเหล่านี้และเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรให้สูงขึ้นนั่นเองคือการเปลี่ยนจากวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์นั่นคือการเปลี่ยนไดโอดเป็นมอสเฟตเข้ามาแทนที่และทำหน้าที่ on/off สลับการทำงานกับ Mosfet ตัวแรก ผลที่ได้วงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นไม่ทำให้เกิด Over Voltage เกิดขึ้นทั้งในขณะที่มีโหลดและไม่มีโหลดทั้งในโหมดกระแสต่อเนื่อง(Continuous current mode : CCM) และไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous current mode : DCM) คุณภาพไฟฟ้าที่ด้านขาออกมีคุณภาพที่ดี Ripple Voltage และ Ripple Current ต่ำ

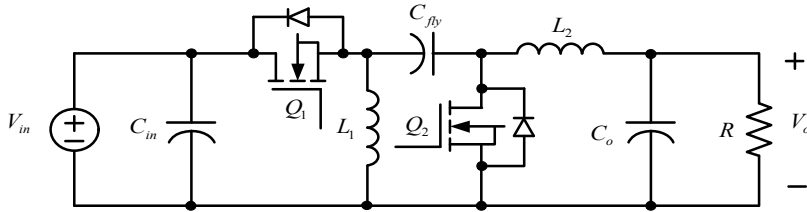
การติดตามหากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะใช้ทฤษฎีรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation : P&O) เพราะสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วและสะดวกต่อการนำมาใช้งานถึงจะมีข้อเสียในเรื่องที่เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวนั้นจะมีการแกว่งรอบๆ จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำหน้าที่เกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนไป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ตลอดเวลาทุกๆช่วงความเข้มของแสงที่เวลานั้นๆ คอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุมคือ dsPic30F4011 ส่วนเทคนิคที่ใช้ในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) คือวิธีการรบกวนและสังเกต (Perturbation and Observation : P&O) ความถี่ของซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์คือ 20 kHz

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

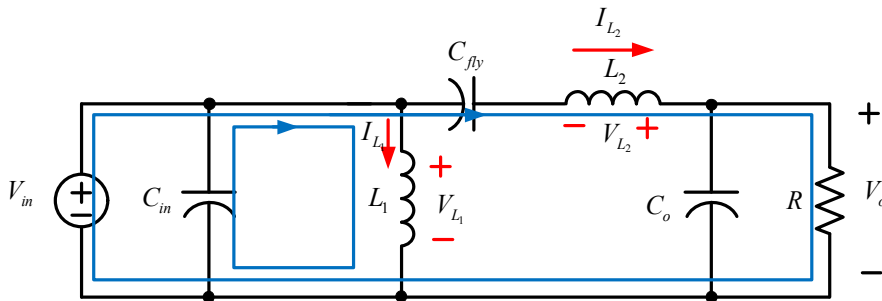
ส่วนประกอบของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ จะมีอุปกรณ์ คือ 1) ตัวเก็บประจุด้านอินพุท (C_m) 2) ตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างกลาง (C_{fy}) 3) ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุท (C_o) 4) ตัวเหนี่ยวนำ 1 (L_1) และ 5) ตัวเหนี่ยวนำ 2 (L_2) สำหรับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการสวิตซ์ซิงคือ มอสเฟต (MOSFET) เพื่อการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ไดโอด ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

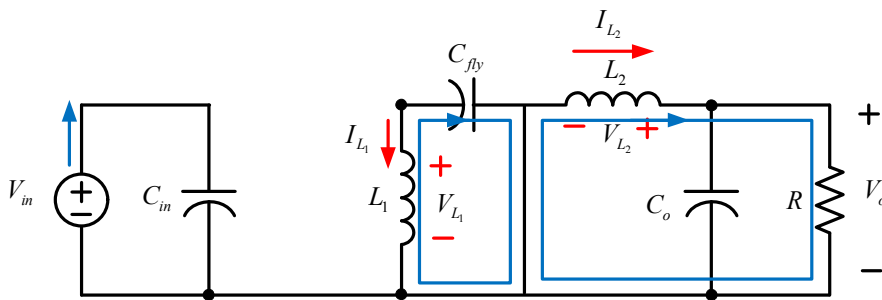
การทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) ของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์จะถูกอธิบายด้านล่างนี้ จากการวิจัยนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30f4011 ทำหน้าที่ให้การสร้างสัญญาณ Pulse-Width Modulation (PWM) เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน

สำหรับการทำงานของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก สวิตช์ Q_1 จะนำกระแส และ Q_2 ไม่นำกระแส โดยกระแสไฟฟ้าจะถูกเข้าไปเก็บไว้ที่ตัวเหนี่ยวนำ L_1 และแรงดันไฟฟ้าถูกชาร์จ (Charge) ประจุเข้าไปยังตัวเก็บประจุ C_{fly} ดังภาพที่ 2 (Falin, 2008)



ภาพที่ 2 สวิตช์ Q_1 ทำงานและ Q_2 หยุดทำงาน

ช่วงที่สองสวิตช์ Q_1 ไม่นำกระแส และ Q_2 จะนำกระแส โดยกระแสไฟฟ้าที่ถูกคายจากตัวเหนี่ยวนำ L_1 ผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_2 ไหลลงสู่โหลด และตัวเก็บประจุ C_{fly} จะทำหน้าที่ในการดิสชาร์จ (Discharge) ประจุไฟฟ้าผ่าน Q_2 ไหลลงสู่โหลดดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 สวิตช์ Q_1 หยุดทำงานและ Q_2 ทำงาน

การเพิ่มและลดระดับแรงดันไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิล หากค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิล วงจรจะทำงานในโหมดบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter) หรือลดระดับแรงดันไฟฟ้า แต่กระแสที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น หากมีค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิล จะทำงานในโหมดบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost converter) หรือเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

สมมุติวงจรมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 100% สมการของวงจรซิงโครนัสชัตตาคอนเวอร์เตอร์ ในโหมดกระแสต่อเนื่อง สามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรได้ จากสมการที่ (1)-(7) ดังนี้

$$V_o = V_{in} \times \frac{D}{1-D} \dots\dots\dots(1)$$

ค่า L_1 และ L_2 สามารถหาได้ดังสมการที่ (2)

$$L_{1, \min} = \frac{(1-D)^2}{2Df} \times R \dots\dots\dots(2)$$

$$I_{DC} = \frac{I_o \times V_o}{V_{in, \min} \times E_{ff}} \dots\dots\dots(3)$$

$$I_{sat} \geq 1.15 \times I_{DC} \dots\dots\dots(4)$$

$$C_{fly} = \frac{I_o \times V_o}{(V_{in} + V_o) \times f \times V_{ripple}} \dots\dots\dots(5)$$

$$C_{in} = I_o \times \frac{1}{2 \times f \times I_{ripple} \times V_s} \dots\dots\dots(6)$$

$$C_o = \frac{1-D}{8 \times L \times V_{ripple} \times f_s^2} \dots\dots\dots(7)$$

เมื่อ

- C_{in} คือ ค่าความเก็บประจุด้านอินพุท
- C_o คือ ค่าความเก็บประจุด้านเอาต์พุท
- C_{fly} คือ ค่าความเก็บประจุระหว่างกลาง
- D คือ ค่าดีวตี้ไซเคิล
- E_{ff} คือค่าประสิทธิภาพ
- f_s คือ ความถี่ในการสวิตช์
- I_{ripple} คือ กระแสกระเพื่อม (ripple current)

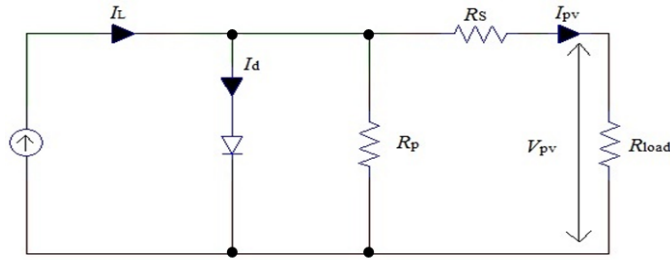
I_o	คือ กระแสไฟฟ้าด้านเอาต์พุต
I_{DC}	คือกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต
I_{sat}	คือกระแสไฟฟ้าสูงสุดด้านอินพุต
L	คือ ค่าความเหนี่ยวนำ
$L_{1, \min}$	คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยสุดในโหมด CCM
R	คือ ค่าความต้านทานที่โหลด
V_{in}	คือ แรงดันอินพุต
$V_{in, \min}$	คือ แรงดันอินพุตน้อยสุด
V_o	คือ แรงดันเอาต์พุต
V_{ripple}	คือ แรงดันกระเพื่อม (Ripple voltage)

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic)

เซลล์แสงอาทิตย์ หรือเซลล์ Photovoltaic ซึ่งล้วนมีที่มาจากคำว่า Photovoltaic โดยแยกออกเป็นคำว่า Photo ซึ่งหมายถึง แสง และ Volt หมายถึง แรงดันไฟฟ้า เมื่อรวมคำแล้ว หมายถึง กระบวนการผลิตจากการตกกระทบของแสงบนวัตถุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แนวความคิดนี้ได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ ปี ค.ศ.1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมา จนกระทั่งใน ปี ค.ศ.1954 จึงมีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ และได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียมในอวกาศ เมื่อ ปี ค.ศ.1959 (Konghuayrob, 2013) ดังนั้น สรุปได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (Silicon) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium arsenide) อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium phosphide) แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium telluride) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองข้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถนำไปต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรงหรือนำมาผ่านคอนเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อนำไปใช้งานได้ต่อไป

2.2.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำเหมือนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โครงสร้างของวัสดุสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะรอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction) เหมือนไดโอด ดังนั้นคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้านานกับไดโอดได้ดังภาพที่ 4 ซึ่งปริมาณกระแส I_{SC} นี้กำเนิดมา จากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกที่มีความเข้มข้นของแสงค่าหนึ่งซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแหล่งจ่าย กระแสคงที่ ส่วนไดโอดจะแสดงถึงคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นค่ากระแสจ่ายออกจึงสามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างของกระแส I_{SC} ที่กำเนิดจากแสงอาทิตย์กับกระแสของไดโอดแสดงในสมการที่ 8 และ 9



ภาพที่ 4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์โดยต่อเข้ากับโหลด

จากภาพที่ 4 เป็นรูปวงจรสมมูลซึ่งแสดงรายละเอียดภายในเซลล์แสงอาทิตย์ โดย R_S คือความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ R_P คือ ความต้านทานขนานโดยที่ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงออกมาในรูปของสมการได้ดังนี้

$$I_{pv} = I_L - I_d \left[\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_T}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots (8)$$

$$V_{pv} = V_T I_n \left[\frac{I_L - I_{pv}}{I_d} + 1 \right] \dots \dots \dots (9)$$

เมื่อทำการปรับค่าความต้านทานที่ต่อตรงเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานต่างๆ จะได้กราฟของกำลังไฟฟ้าซึ่งพล็อตระหว่างแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้ายิ่งจะได้ลักษณะเดียวกัน และจะพบว่าจุดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่จุด V_{mpp} กับจุด I_{mpp} ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีความมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันของกราฟ คือ ถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยม ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า ฟิลแฟคเตอร์ (FF: Fill Factor) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนต่อไปนี้

2.2.2 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยวิธีการรบกวนและสังเกต

การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) หมายถึงขั้นตอนวิธีที่ถูกรวมเข้าไว้ในอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุด (Maximum power) ทั้งนี้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่นความเข้มของแสงอาทิตย์อุณหภูมิสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell temperature) ระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้รับการออกแบบให้ใช้หน่วยประมวลผลสำหรับการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดเวลาเพื่อให้ได้ค่ากำลังผลิตสูงสุดในแต่ละเวลาตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ได้รับในรูปของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะทำได้

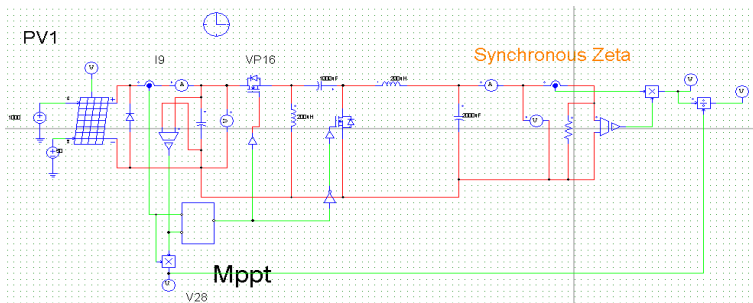
กำลังไฟฟ้ามากขึ้นหากตรวจสอบพบว่าตำแหน่งจุดทำงานไม่ใช่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยการย้ายจุดทำงานนั้นไปยังตำแหน่งที่คาดว่าจะเป็จุดสูงสุดต่อไป

3. การจำลองและผลการจำลอง

สำหรับการจำลองวงจรเพื่อหาผลของเปอร์เซ็นต์ I_{ripple} และ V_{ripple} ด้านอินพุท, เอาท์พุท และเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพ โดยกำหนดความถี่ในการสวิตซ์ที่ 20kHz

3.1 การจำลองวงจร

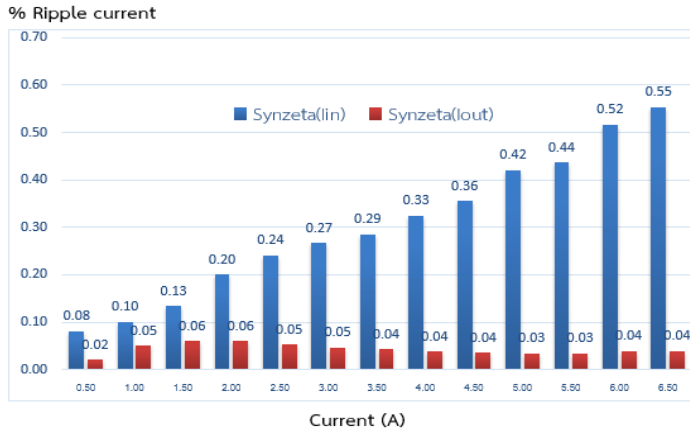
ในการจำลองการทำงานของวงจรจะใช้โปรแกรม Power sim ดังภาพที่ 5 โดยการปรับค่าดิวิตซ์ไซเคิลตั้งแต่ 0% และปรับเพิ่มขึ้นทีละ 5% ไปจนถึง 65% ดิวิตซ์ไซเคิลเก็บผลข้อมูลทั้ง I_{ripple} และ V_{ripple} ที่เกิดขึ้นนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์และวงจรที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็นซิงโครนัสคอนเวอร์เตอร์



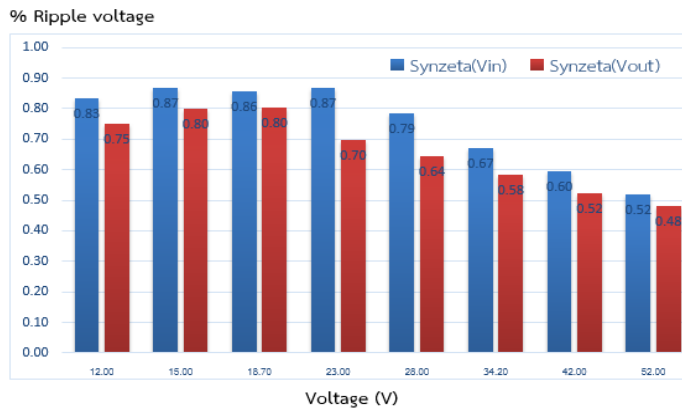
ภาพที่ 5 การจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม Power sim

3.2 ผลการจำลองวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

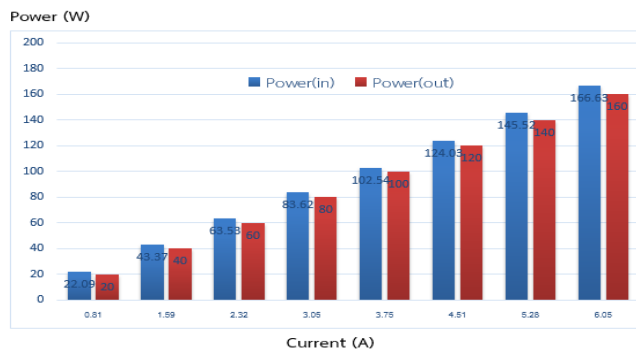
สำหรับผลการจำลองการทำงานของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์จะแสดงในรูปแบบของกราฟแท่ง โดยผลที่ได้มีดังนี้ เมื่อทำการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ดิวิตซ์ไซเคิลตั้งแต่ 30% จนถึง 70% ดิวิตซ์ไซเคิล จากผลการทดลอง ดังภาพที่ 6 และ 7 จะเห็นได้ว่าค่า I_{ripple} และ V_{ripple} ของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ทางด้านเอาท์พุทจะมีค่าน้อยกว่าทางด้านอินพุท ตลอดทุกๆ ช่วงที่มีการทดลอง เนื่องจากทางด้านเอาท์พุทมีลักษณะเป็น LC Low pass filter ทำให้ค่าริปเปิ้ลทางด้านเอาท์พุทมีค่าน้อย ส่วนค่าประสิทธิภาพสูงสุด ดังภาพที่ 8จะมีค่าอยู่ที่ 97.52%



ภาพที่ 6 เปอร์เซนต์ I_{ripple} ทางด้านอินพุทและเอาต์พุท



ภาพที่ 7 เปอร์เซนต์ V_{ripple} ทางด้านอินพุทและเอาต์พุท



ภาพที่ 8 เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพ

4. การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับการทดลองจะใช้ค่าพารามิเตอร์จริงให้เหมือนกับการจำลอง และทำการบันทึกค่าสัญญาณ I_{ripple} และ V_{ripple} ของวงจรทั้งสอง และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ซึ่งการทดลองจะประกอบไปด้วย

- 1) ปรับค่า % ดิวตี้ไซเคิล ตั้งแต่ 30% จนถึง 70% เพื่อทดลองการทำงานในโหมดบักคอนเวอร์เตอร์และบูสต์คอนเวอร์เตอร์
- 2) กำหนดค่าความถี่ที่ใช้ในการสวิตซ์ซึ่งที่ 20kHz
- 3) ทำการทดลองโดยการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่โหลด ตั้งแต่ 0W และปรับเพิ่มขึ้นทีละ 20W จนถึง 160W

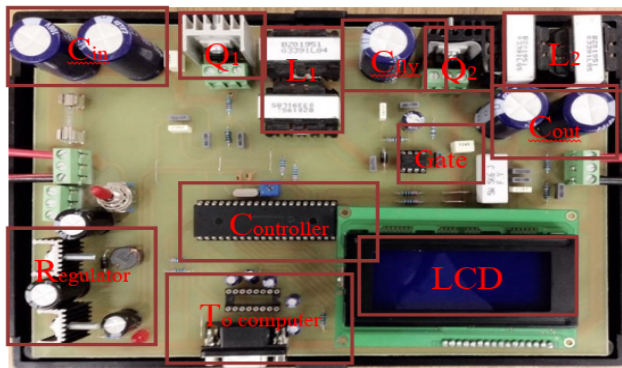
4.1 การทดลอง

กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์และวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ดังตารางที่ 2 โดยมี V_{in} ที่ 28V

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

C_{in}	1000 μ F	C_o	1000 μ F
L_1	100 μ H	L_2	100 μ H
C_{fly}	1000 μ F	f_s	20kHz
MOSFET	IRF2807	$R_{ds(on)}$	13m Ω

สำหรับวงจรที่ออกแบบเพื่อใช้ในการทดลองจะใช้ โปรแกรม Altium 10 นำมาสร้างเป็นวงจรจริง ดังภาพที่ 9 เพื่อใช้ในการทดลองหาค่าต่างๆ

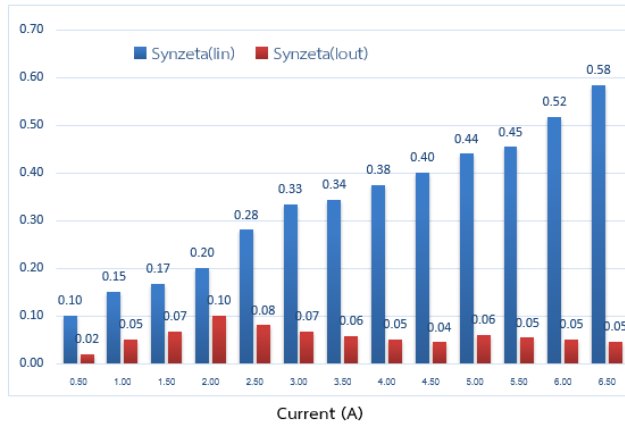


ภาพที่ 9 วงจรที่สร้างจริง

4.2 ผลการทดลองซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

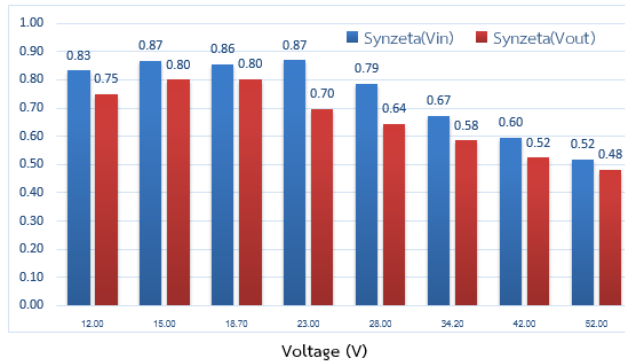
จากผลการทดลอง พบว่า I_{ripple} และ V_{ripple} ทางด้านอินพุทและทางด้านเอาต์พุท ดังภาพที่ 10 และ 11 ตามลำดับ ผลที่ได้จะไม่แตกต่างกัน วงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 95 % ดังภาพที่ 12

% Ripple current



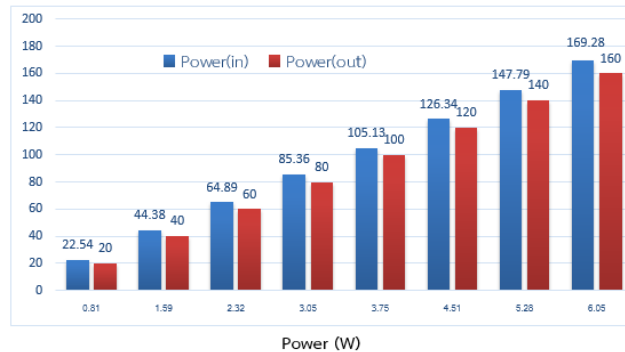
ภาพที่ 10 เปอร์เซนต์ Ripple current

% Ripple voltage



ภาพที่ 11 เปอร์เซนต์ Ripple voltage

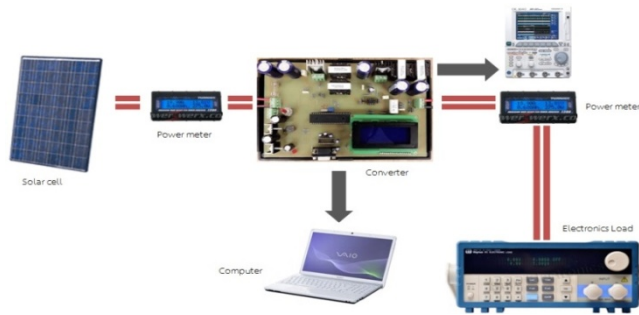
% Efficiency



ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพของวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์

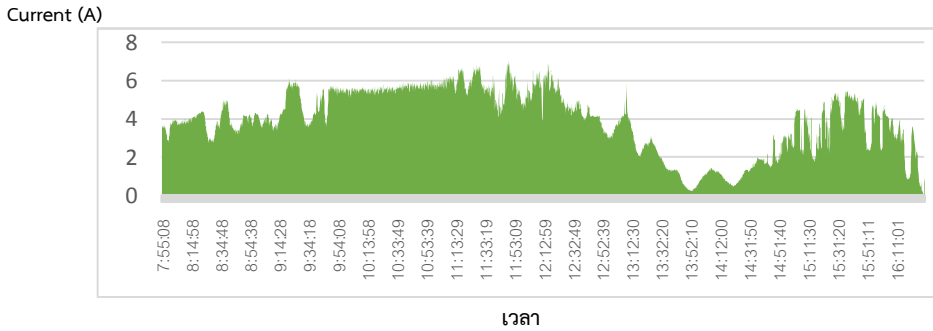
4.3 การนำไปใช้งานในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ทำการทดลอง ซึ่งผู้ทดลองได้ทำการเก็บผลข้อมูลการทดลองและนำผลการทดลองมาสรุปผล ดังจะแสดงรายละเอียดต่อไป อุณหภูมิได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส ความเข้มของแสงอาทิตย์สามารถกำหนดให้มีค่าคงที่ได้จะเปลี่ยนไปตามสภาพอากาศและเมฆที่ทำให้เกิดเงาบังทุกอย่างเป็นไปตามสภาพแวดล้อมจริง เซลล์แสงอาทิตย์ทำมุม 13 องศาหันไปทางทิศใต้ Diagram การทำงานในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงดังภาพที่ 13

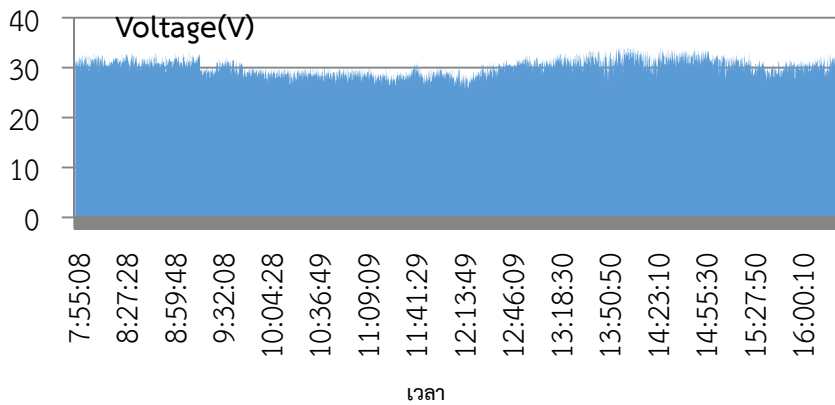


ภาพที่ 13 ไดอะแกรมการทำงานในการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

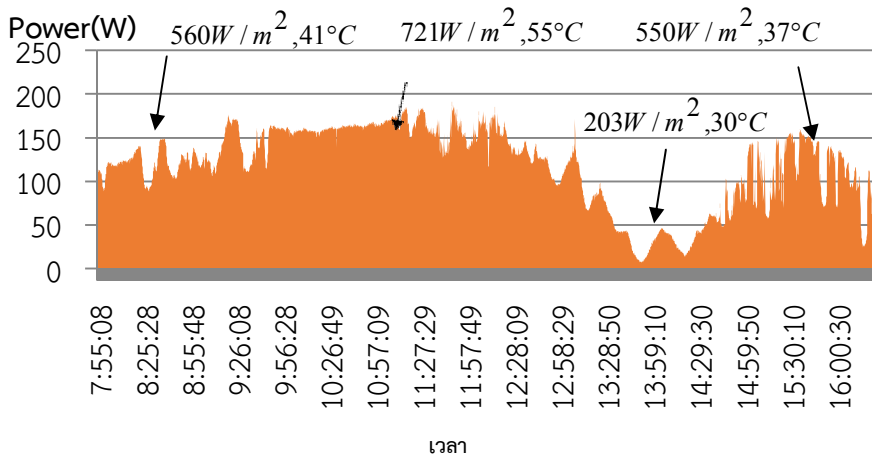
จากการทดลอง พบว่ากราฟกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกราฟกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง จึงทำให้กระแสไฟฟ้ามีผลกับความเข้มของแสงอาทิตย์มาก ส่วนกราฟแรงดันพบว่า แรงดันจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากจุดที่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะขึ้นอยู่กับกระแสเป็นส่วนใหญ่ หากเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้แรงดันมีค่าที่สูงขึ้น ในทำนองเดียวกันหากอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจะทำให้แรงดันมีค่าที่ต่ำลงนั่นเอง การทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้ ทำให้เห็นพฤติกรรมของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาการทำงานทั้งในตอนเช้าที่มีเมฆน้อยอุณหภูมิต่ำ ตอนเที่ยงความเข้มแดดสูงขึ้นอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ตอนบ่ายเกิดฝนตกทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำ และความเข้มของแสงอาทิตย์ต่ำลง และมีเมฆมาก ซึ่งหากมีการเปรียบเทียบกับอุดมคติ กรณีที่ไม่มีเมฆบังหรือสภาพอากาศมีการเปลี่ยน จะไม่สามารถเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ควรได้ในแต่ละวันได้ การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของวงจรเชิงโคโรนัสซีดีคอนเวอร์เตอร์ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 90-95% Efficiency ผลการทดลองการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงดังภาพที่ 14, 15 และ 16 ภาพที่ 14 เป็นการแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลานั้นๆ ภาพที่ 15 เป็นการแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลานั้นๆ และสุดท้ายภาพที่ 16 เป็นการแสดงค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลานั้นๆ



ภาพที่ 14 กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดณเวลานั้นๆ



ภาพที่ 15 แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดณเวลานั้นๆ



ภาพที่ 16 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลานั้นๆ

5. การอภิปรายผล หรือการวิจารณ์และสรุป

จากผลการจำลองและผลการทดลองกระแสและแรงดันทั้งทางด้านขาเข้าและขาออกพบว่าเปอร์เซ็นต์ Ripple voltage และ เปอร์เซ็นต์ Ripplecurrent ทางด้านเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าทางด้านอินพุตเนื่องจากทางด้านเอาต์พุตมีลักษณะเป็น LC Low pass filter จึงทำให้ทางด้านเอาต์พุตมีค่า เปอร์เซ็นต์ Ripple voltage และ เปอร์เซ็นต์ Ripplecurrent ที่น้อย โดยค่า เปอร์เซ็นต์ Ripple voltage อยู่ที่ไม่เกิน 0.8% ส่วนค่า เปอร์เซ็นต์ Ripplecurrent อยู่ที่ไม่เกิน 0.4% ผลการจำลองและผลการทดลองมีลักษณะเหมือนกันเพียงแต่ค่าประสิทธิภาพจากการจำลองจะมีค่ามากกว่าอยู่ที่ 2-3 % เนื่องจากวงจรจำลองไม่มีการสูญเสียที่วงจรไฟเลี้ยงเพื่อนำไฟฟ้าไปเลี้ยงตัววงจรหลัก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าวงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 95.12% การติดตามกำลังไฟสูงสุด เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นเมื่อทำการติดตั้งเซนเซอร์กระแสและเซนเซอร์แรงดัน นำค่าที่ได้มาคูณกันจะได้กำลังไฟฟ้าออกมา ณ สภาวะโหลดนั้นๆ ดังสมการ ($P_{mpp} = V_{mpp} \times I_{mpp}$) เมื่อทำการการเพิ่มค่าตัวต่อไอเซิลกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ให้ทำการเพิ่มค่าตัวต่อไอเซิลต่อไปจนกว่ากำลังไฟฟ้าจะต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าก่อนหน้านั้นแล้วให้ทำการลดค่าตัวต่อไอเซิลจนกว่ากำลังไฟฟ้าจะต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าก่อนหน้านั้นจึงให้ทำการเพิ่มค่าตัวต่อไอเซิลขึ้นใหม่จนกว่ากำลังไฟฟ้าจะต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าก่อนหน้านั้นเพื่อเป็นการติดตามจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ตลอดเวลา เมื่อนำมาใช้ติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้วงจรซิงโครนัสซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงอยู่ในช่วง 90-95% Efficiency และยังสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตลอดช่วงระยะเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่ให้การสนับสนุนในการเขียนบทความวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- Blaabjerg, F.; Consoli, A.; Ferreira, J.A.J. & Vanwyk, D. (2005). The future of electronic power processing and conversion. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 41(1), 3-8.
- Bose, B.K. (2009). The past, present, and future of power electronics – Guest introduction. **IEEE on Industrial Electronics Magazine**, 3, 7-11.
- Falin, J. (2008). Designing DC/DC converters based on SEPIC topology. **Analog Applications Journal**, 1-6.
- Gu, W. (2007). Designing A SEPIC Converter. **National Semi-conductor**, 1-6.
- Matthew, C. & Kessler. (2010). Synchronous Inverse SEPIC Using the ADP1870/ADP1872 Provides High Efficiency for Noninverting Buck/Boost Applications. **AN-1075**, 1-7.

- Niculescu, E.; Niculescu, M.C. & Purcaru, D.M. (2008). Modelling the PWM Zeta Converter in Discontinuous Conduction Mode. **Electrotechnical Conference**, 651-657.
- Poom Konghuayrob. (2013). **A Study on Multiple Step Size Incremental Conductance Technique and Fuzzy Logic Control for MPPT in Flyback PV Inverter**. Thesis (Master degree) Electrical engineering Faculty of Engineering KMITL.
- Stalter, O.; Kranzer, D.; Rogalla, S. & Burger, B. (2010). Advanced Solar Power Electronics. **Proc. of International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs - ISPSD**, 3-10.
- Viero, R.C.; Lopez, H.F.M.; Zollmann, C.A. & dos Reis, F.S. (2010). Dynamic Modeling of a Sinusoidal Inverter Based on ZETA Converter Working in DCM for PV Arrays. **Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, 439-444.