

## วงจรถูกคองเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ที่มีการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง A ZVS SEPIC Converter with Power Factor Correction

วาทัญญู มีศรีสุข<sup>1</sup> และอนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร [watanyu@mut.ac.th](mailto:watanyu@mut.ac.th)

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

PE001

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการสวิตช์ของสวิตช์ภายในวงจรเซปิกคอนเวอร์เตอร์โดยใช้อุปกรณ์แบบแอคทีฟซึ่งทำให้สวิตช์ทั้งหมดในวงจรทำงานภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) นอกจากนี้วงจรที่นำเสนอยังได้ถูกปรับปรุงตัวประกอบกำลังโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบกระแสเฉลี่ย (Average current control) ซึ่งสามารถช่วยลดความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกของกระแสขาเข้าของวงจรและทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง บทความนี้จะได้ทำการนำเสนอโหมดการทำงานและจำลองการทำงาน ของวงจรพบว่าผลที่ได้คือสวิตช์สามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขแรงดัน ศูนย์และตัวประกอบกำลังของวงจรมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง

**คำสำคัญ:** วงจรถูกคองเวอร์เตอร์ การสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ เทคนิคการควบคุมแบบกระแสเฉลี่ย

### Abstract

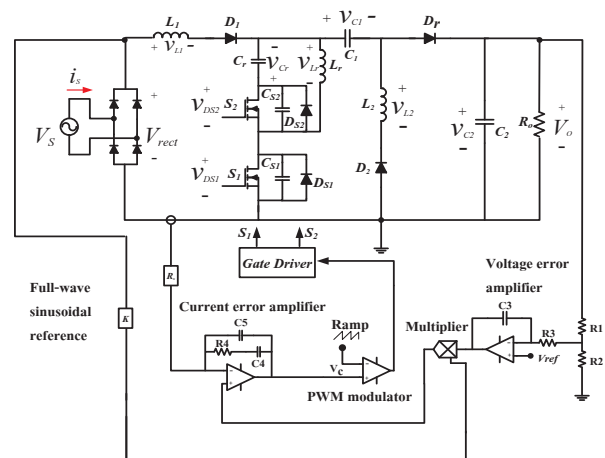
This paper presents a method for reducing the switching losses of switch within a SEPIC converter by using the active devices in order to achieve zero-voltage switching condition (ZVS). In addition, the power factor correction technique (PFC) is applied to this converter by using the average current control technique for improving the power factor (P.F.) at input side of converter. This technique can decrease the total harmonics distortion of the input current (THD<sub>i</sub>) and provide the unity power factor. This paper shows the operation modes and simulation results from the PSIM software. It is found that the switches can operate under ZVS condition and the power factor of converter is nearly to 1.

**Keywords:** SEPIC converter, ZVS, average current control

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำวงจรแปลงผันกำลังงานไฟฟ้ามาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่นการแปลงผันกำลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าให้เป็น ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าเหมาะสมต่อการชาร์จแบตเตอรี่ หรือการแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อใช้ งานกับอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

จึงมีความจำเป็นต้องการนำมาใช้ในงานดังกล่าว โดยเฉพาะวงจรแปลงผัน กำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC/DC converter) เช่นวงจรถูกคองเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์ วงจรชุกคองเวอร์เตอร์ เป็นต้น เนื่องจากวงจรทั้งสองดังกล่าวมีข้อดีคือสามารถลดและเพิ่มระดับ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามความต้องการ แต่ก็ยังคงมีปัญหาบางประการ ได้แก่ค่าของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้นั้นมีค่าเป็นลบ เพื่อที่จะเป็นการ แก้ไขปัญหาในเรื่องนี้จึงได้มีการนำเสนอวงจรแปลงผันกำลังงานไฟฟ้า กระแสตรงที่เรียกว่าวงจรถูกคองเวอร์เตอร์ (SEPIC) ซึ่งให้ค่า แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีค่าเป็นบวกและยังสามารถลดและเพิ่มระดับ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ แต่ในการใช้งานวงจรถูกคองเวอร์เตอร์ใน กรณีที่ใช้แหล่งจ่ายไฟจากระบบของการไฟฟ้านั้น ยังพบปัญหาที่สำคัญ คือเกิดความผิดเพี้ยนของกระแสอินพุตขึ้นทำให้ผลรวมความผิดเพี้ยน ทางฮาร์มอนิก (THD<sub>i</sub>) ของกระแสสูงซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ได้และยังทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor) ของวงจรมีค่า ก่อนข้างต่ำ อีกประการหนึ่งคือโดยทั่วไปแล้ววงจรถูกคองเวอร์เตอร์ จะมีการเกิดความสูญเสียอันเนื่องมาจากการสวิตช์ (Switching losses) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าไม่สูงมากนัก ดังนั้น เพื่อที่จะเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้นในบทความนี้จึงได้ทำการ นำเสนอเทคนิคการสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ของวงจรถูกคองเวอร์เตอร์ โดยใช้อุปกรณ์แบบแอคทีฟ [1-3] และทำการปรับปรุงแก้ไข ตัวประกอบกำลังของวงจรด้วยเทคนิคการควบคุมด้วยวิธีกระแสเฉลี่ย [4] ซึ่งสามารถที่จะลดความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตและ



รูปที่ 1 วงจรที่นำเสนอ

ปรับปรุงตัวประกอบกำลังของวงจรให้ดีขึ้น ซึ่งจะได้ทำการออกแบบและทำการจำลองการควบคุมวงจรเซปิกคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อพิสูจน์แนวคิดที่ได้นำเสนอ

## 2. วงจรที่นำเสนอ

### 2.1 วงจรกำลัง

วงจรกำลังของวงจรที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยด้านอินพุตรับไฟหนึ่งเฟสจากระบบของการไฟฟ้า ( $V_s$ ) นำมาเรียงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ จากนั้นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกส่งผ่านเข้าไปยังวงจรเซปิกคอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และ  $L_2$  เป็นตัวเก็บสะสมพลังงาน ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_2$  ซึ่งต่ออยู่กับโหลดเพื่อลดค่าแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมด้านขาออก ไดโอด  $D_1$  ถูกต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพื่อกำหนดทิศทางกระแสของกระแสและใช้มอสเฟต  $S_1$  เป็นสวิตช์หลักในวงจร นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์แบบแอคทีฟซึ่งใช้ในการช่วยให้เกิดการทำงานภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) คือสวิตช์ช่วย  $S_2$  และยังมีตัวเก็บประจุไรเซนซ์  $C_r$  และตัวเหนี่ยวนำไรเซนซ์  $L_r$  โดยใช้โหลดเป็นความต้านทาน  $R_o$

### 2.2 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมของวงจรที่ได้นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบายหลักการทำงานได้ดังนี้เริ่มจากการตรวจนับแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจร ( $V_o$ ) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ซึ่งค่าความผิดพลาดที่ได้จะถูกส่งผ่านวงจรรายความผิดพลาดของแรงดัน สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะถูกส่งไปยังตัว Multiplier เพื่อคูณเข้ากับสัญญาณแรงดันไฟตรงแบบเต็มบริดจ์ ( $V_{rect}$ ) ซึ่งตรวจนับมาจากด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ จากนั้นสัญญาณที่ได้จากการคูณกันจะถูกส่งไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากการตรวจนับจากกระแส ( $V_i$ ) และถูกส่งผ่านวงจรรายความผิดพลาดของกระแส สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังตัวเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณพิคบัลลิวเอมที่ใช้ในการขับสวิตช์หลัก  $S_1$  และสวิตช์ช่วย  $S_2$

## 3. โหมดการทำงาน

การทำงานของวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็น 8 โหมดการทำงานในหนึ่งไซเคิล โดยจะได้ทำการอธิบายการทำงานในแต่ละโหมดซึ่งสัมพันธ์กับรูปคลื่นดังรูปที่ 2 และรูปในแต่ละโหมดการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 3

โหมดที่ 1 [ $t_0-t_1$ , รูปที่ 4(ก)] ในช่วงโหมดการทำงานนี้สวิตช์หลัก  $S_1$  อยู่ในสถานะนำกระแสและสวิตช์ช่วย  $S_2$  อยู่ในสถานะหยุดนำกระแส กระแสของตัวเหนี่ยวนำ  $i_{L1}$  และ  $i_{Lr}$  มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ถ่ายเทพลังงานผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$ ,  $L_r$  และสวิตช์  $S_1$  ส่วนโหลดความต้านทาน  $R_o$  ได้รับพลังงานจากตัวเก็บประจุ  $C_2$

$$i_{L1}(t) = \frac{[V_{rect}(t) - V_{Cr} - V_{DS2}]}{L_1} \cdot (t - t_0) \quad (1)$$

โหมดที่ 2 [ $t_1-t_2$ , รูปที่ 4(ข)] เมื่อถึงเวลา  $t_1$  สวิตช์หลัก  $S_1$  จะถูกสั่งให้หยุดนำกระแส กระแส  $i_{L1}$  ยังไหลในทิศทางเดิมผ่านทาง  $L_r$  และชาร์จตัวเก็บประจุของสวิตช์หลัก  $C_{S1}$  ทำให้แรงดันตกคร่อมสวิตช์หลัก  $V_{S1}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในโหมดนี้

$$V_{S1}(t) = \frac{i_{Lr,max}}{C_{S1}} \cdot (t - t_1) \quad (2)$$

โหมดที่ 3 [ $t_2-t_3$ , รูปที่ 4(ค)] ในช่วงโหมดการทำงานนี้ไดโอด  $D_r$  กระแสไปยังโหลดพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  ถูกส่งผ่านไปยังโหลด ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และ  $L_r$  ยังคงส่งถ่ายพลังงานให้กับตัวเก็บประจุ  $C_{S1}$  ทำให้แรงดันตกคร่อมสวิตช์หลัก  $V_{S1}$  ยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น

โหมดที่ 4 [ $t_3-t_4$ , รูปที่ 4(ง)] เมื่อถึงเวลา  $t_3$  พลังงานของตัวเก็บประจุแฝงภายในสวิตช์ช่วย  $C_{S2}$  จะถูกถ่ายเทผ่านทางตัวเหนี่ยวนำ  $L_r$  และตัวเก็บประจุ  $C_r$  ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และ  $L_2$  ยังคงนำกระแสในทิศทางเดียวกันกับโหมดก่อนหน้านี โหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อแรงดันตกคร่อมสวิตช์ช่วย  $V_{S2}$  มีค่าเป็นศูนย์

โหมดที่ 5 [ $t_4-t_5$ , รูปที่ 4(จ)] เมื่อพลังงานของตัวเก็บประจุ  $C_{S2}$  ถูกถ่ายเทออกจนหมดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์ช่วย  $V_{S2}$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ไดโอดแฝงภายในสวิตช์ช่วย  $D_{S2}$  จะเริ่มนำกระแสเรโซแนนซ์ระหว่าง  $L_r$  และ  $C_r$  สวิตช์ช่วย  $S_2$  จะสามารถนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ ZVS ได้ภายหลังจากนี้ ซึ่งแรงดันของตัวเก็บประจุไรเซนซ์ มีค่าเท่ากับ

$$V_{Cr}(t) = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \cdot i_{r,max} \sin \omega_r t \quad (3)$$

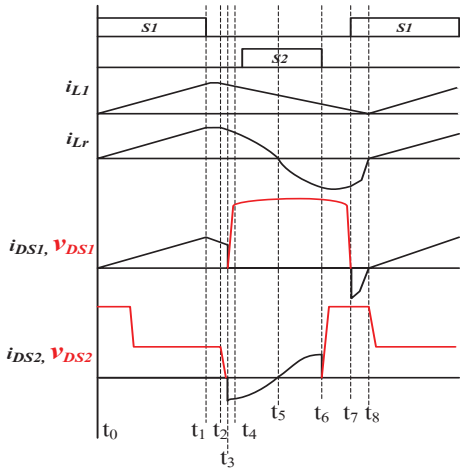
$$\text{เมื่อ} \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r \cdot C_r}}$$

โหมดที่ 6 [ $t_5-t_6$ , รูปที่ 4(ฉ)] ที่เวลา  $t_5$  กระแสเรโซแนนซ์ระหว่าง  $L_r$  และ  $C_r$  จะเริ่มเปลี่ยนทิศโดยไหลผ่านสวิตช์ช่วย  $S_2$  ซึ่งเป็นการนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ซึ่งทำให้ไม่เกิดความสูญเสียขึ้น ในขณะที่ตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  และ  $L_2$  ยังคงกระแสในทิศทางเดียวกันกับโหมดก่อนหน้านี

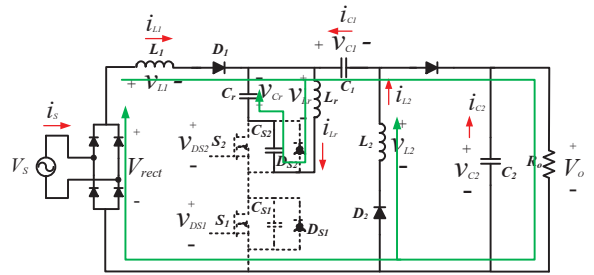
โหมดที่ 7 [ $t_6-t_7$ , รูปที่ 4(ช)] สวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  ถูกสั่งให้หยุดนำกระแสที่เวลา  $t_6$  ตัวเก็บประจุแฝงภายในสวิตช์ช่วย  $C_{S2}$  จะถ่ายเทพลังงานออกผ่านทางตัวเหนี่ยวนำ  $L_r$  ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  ทำให้แรงดันตกคร่อมสวิตช์ช่วย  $V_{S2}$  มีค่าลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเป็นศูนย์เมื่อสิ้นสุดโหมดนี้ที่เวลา  $t_7$

โหมดที่ 8 [ $t_7-t_8$ , รูปที่ 4(ซ)] พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำ  $L_r$  จะถูกถ่ายเทผ่านทางตัวเก็บประจุ  $C_1$ ,  $C_2$  ไดโอด  $D_r$  และไดโอดแฝงภายในสวิตช์ช่วย  $D_{S2}$  ทำให้กระแส  $i_{Lr}$  มีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเป็นศูนย์เมื่อ

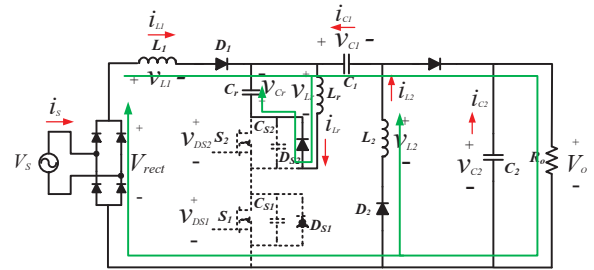
สิ้นสุดโหมดนี้ที่เวลา  $t_8$  ซึ่งที่เวลาเดียวกันนี้สวิตช์ช่วย  $S_2$  จะเริ่มนำกระแสอีกครั้งภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) เป็นอันสิ้นสุดโหมดการทำงานของวงจรในหนึ่งไซเคิล



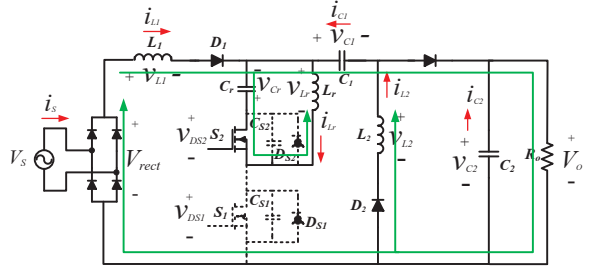
รูปที่ 3 โดอะแกรมเวลาการทำงานของวงจร



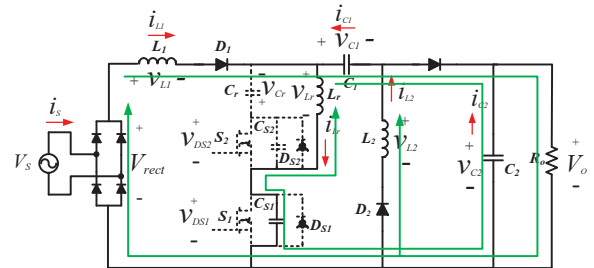
(ง) โหมด 4



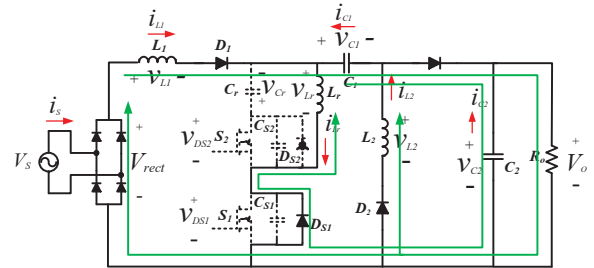
(จ) โหมด 5



(ฉ) โหมด 6

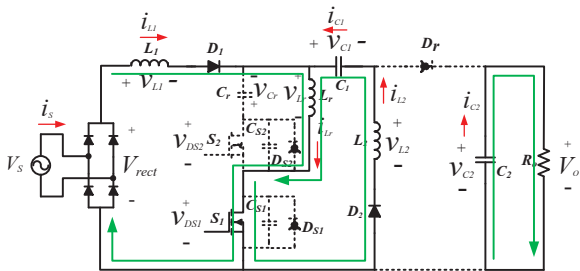


(ช) โหมด 7

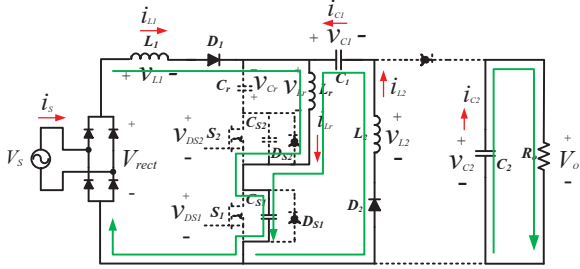


(ซ) โหมด 8

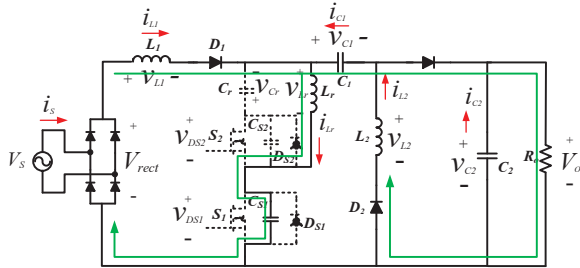
รูปที่ 3 โหมดการทำงานของวงจร



(ก) โหมด 1



(ข) โหมด 2



(ค) โหมด 3

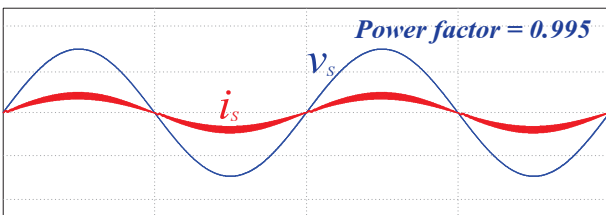
#### 4. ผลการจำลองแบบ

วงจรที่ได้ทำการนำเสนอได้ออกแบบและทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรดังที่แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

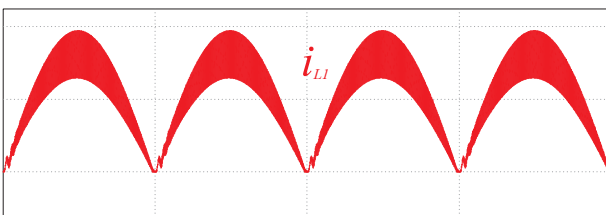
จากการจำลองการทำงานพบว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4 ถึง รูปที่ 7 ในรูปที่ 4 นั้นแสดงรูปคลื่นแรงดันอินพุต ( $V_s$ ) และกระแสอินพุต ( $i_s$ ) จะพบว่ารูปคลื่นกระแสที่มีความใกล้เคียงกับรูปคลื่นแรงดันไซน์และมีมุมเฟสตรงกันซึ่งจากการวัดค่าพบว่าตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 0.995 และค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกของกระแส (THDi) มีค่าเท่ากับ 9.76% ในรูปที่ 5 แสดงรูปคลื่นกระแสของตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ( $i_{L1}$ ) ซึ่งจะพบว่าวงจรทำงานอยู่ในโหมดกระแสต่อเนื่องและรูปร่างของกระแสมีลักษณะใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการเรียงกระแส ( $V_{rect}$ ) ในรูปที่ 6 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์หลัก  $S_1$  ซึ่งจะพบว่าเกิดลักษณะการทำงานภายใต้เงื่อนไขโซ่แรงดันศูนย์ (ZVS) จึงทำให้ไม่เกิดความสูญเสียอันเนื่องมาจากการสวิตช์ในช่วงของการเริ่มนำกระแสเช่นเดียวกันดังในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงการเกิดการทำงานแบบ ZVS ของสวิตช์ช่วย  $S_2$  นอกจากนั้นเมื่อทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและทำการวัดค่าตัวประกอบกำลังและค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสด้านอินพุตพบว่าได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 8

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจร

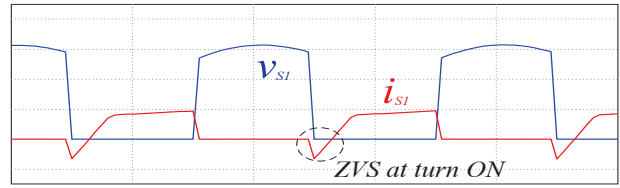
แรงดันไฟฟ้าอินพุต ( $V_s$ )	220 V <sub>rms</sub> , 50 Hz
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ )	100-400 V <sub>dc</sub>
ความถี่สวิตช์ ( $f_s$ )	70 kHz
ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_1$ )	1.5 mH
ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_2$ )	1 mH
ตัวเหนี่ยวนำรีโซแนนซ์ ( $L_r$ )	0.2 mH
ตัวเก็บประจุ ( $C_1$ )	0.6 $\mu$ F
ตัวเก็บประจุ ( $C_2$ )	450 $\mu$ F
ตัวเก็บประจुरีโซแนนซ์ ( $C_r$ )	0.33 $\mu$ F
โหลดความต้านทาน ( $R$ )	500 $\Omega$



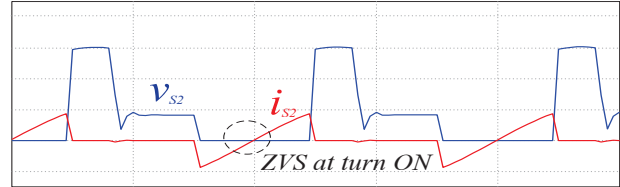
รูปที่ 4 แรงดัน ( $v_s$ ) และกระแส ( $i_s$ ), (200V/div, 2A/div, 10ms/div)



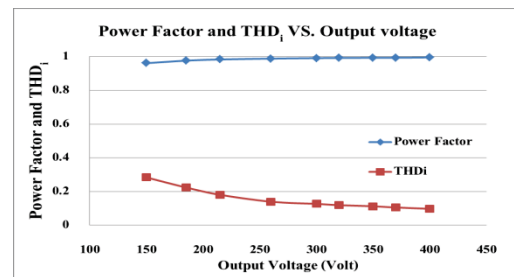
รูปที่ 5 กระแสของตัวเหนี่ยวนำ  $L_1$  ( $i_{L1}$ ), (0.5A/div, 10ms/div)



รูปที่ 6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์หลัก  $S_1$ , (200V/div, 1A/div, 10 $\mu$ s/div)



รูปที่ 7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ช่วย  $S_2$ , (200V/div, 1A/div, 10 $\mu$ s/div)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง P.F., THDi และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

#### 5. สรุป

จากการที่ได้ทำการจำลองและทำการวิเคราะห์ผลการจำลองของวงจรเซปิคคอนเวอร์เตอร์แบบ ZVS ที่ได้นำเสนอพบว่าสวิตช์หลัก  $S_1$  และสวิตช์ช่วย  $S_2$  เกิดการทำงานภายใต้สถานะแรงดันศูนย์ (ZVS) ในช่วงของการเริ่มนำกระแสทำให้ไม่เกิดความสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์ในช่วงของการเริ่มนำกระแส อีกทั้งการนำเทคนิคการปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยวิธีการเรียงเหลี่ยมาประยุกต์ใช้สามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังของวงจรให้มีค่าใกล้เคียง 1 และสามารถลดปริมาณฮาร์มอนิกของกระแสที่ไม่จำเป็นออกไปจากระบบ ทำให้เกิดผลดีต่อระบบของการไฟฟ้าและมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานมากกว่าวงจรเซปิคคอนเวอร์เตอร์โดยทั่วไป

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Shen, C. L., Wu, Y. E., Chen, M. H., "A modified SEPIC converter with soft-switching feature for power factor correction," in Proc. IEEE ICIT, 2008, pp. 1 - 6.
- [2] H. Y. Kanaan, K. Al-Haddad, and F. Fnaiech, "Switching Function Based Modeling and Control of a SEPIC Power Factor Correction Circuit in Continuous and Discontinuous Current Modes," in Proc. IEEE ICIT, vol. 1, 2004, pp. 431-437.
- [3] B.R. Lin, J.J. Chen and J.F. Wan "Active Clamp Sepic Converter with Power Factor Correction," in Proc. IEEE IECON, 2007, pp. 1989-1994.
- [4] L. Rossetto, G. Spiazzi and P.Tenti, "Control techniques for power factor correction converters," in Proc. Power Electron., Motion Control Conf. 1994, pp.1310-1318.