

## การเปรียบเทียบวิธีการควบคุมวงจรเอสวีซีสำหรับใช้ชดเชยแรงดันไฟฟ้า และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

### The Comparison of SVC Control Methods for Voltage Compensation and Power Factor Improvement in Single-Phase Power Systems

ภูษิต ภูคาเพชร ทศพร ณรงค์ฤทธิ์\* และ กองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Poosit Phukaphet Tosaporn Narongrit\* and Kongpol Areerak

Power Electronic, Energy, Machines and Control Research Group

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

\*Corresponding author: Email: [tosaporn@sut.ac.th](mailto:tosaporn@sut.ac.th)

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรสร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (Flexible AC Transmission Systems: FACTS) ชนิดวงจรเอสวีซี (Static VAR Compensator: SVC) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยการนำเสนอจะเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยของวงจรเอสวีซีที่ใช้วิธีการควบคุมการทำงาน 3 วิธี คือ วิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดัน (Voltage Control: VC) วิธีการควบคุมผ่านค่ากำลังรีแอกทีฟ (VAR Compensation Control: VCC) และวิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดันร่วมกับกำลังรีแอกทีฟ (Voltage and VAR Compensation Control: WVCC) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซีจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซีซึ่งจะได้นำเสนอในบทความนี้เช่นกัน การตรวจสอบสมรรถนะการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรเอสวีซีจะใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware in the loop simulation) ที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000<sup>TM</sup> Experimenter Kit ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า วงจรเอสวีซีที่ใช้การควบคุมด้วยวิธีการควบคุมผ่านค่ากำลังรีแอกทีฟและวิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดันร่วมกับกำลังรีแอกทีฟสามารถให้ประสิทธิผลการชดเชยที่ดีใกล้เคียงกัน และดีกว่าวิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดัน โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) และค่าตัวประกอบกำลังของระบบภายหลังการชดเชยเป็นไปตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อนับระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559

**คำสำคัญ:** การชดเชยแรงดันไฟฟ้า การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง วงจรเอสวีซี วิธีการควบคุมวงจรเอสวีซี วงจรสร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

#### ABSTRACT

This paper presents the voltage compensation and power factor improvement using Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Static VAR Compensation (SVC) for single-phase power systems. The performance comparison of SVC with three control methods such as Voltage Control (VC) method, VAR

Compensation Control (VCC) method, and Voltage and VAR Compensation Control (VCC) method are proposed. The design of SVC parameters depend on the mathematical model which is also presented in this paper. For performance testing, the hardware in the loop simulation technique using MATLAB/Simulink program and TMS320C2000<sup>TM</sup>Experimenter Kit DSP board are applied to Simulate voltage compensation and power factor improvement via the SVC. The simulation results show that the SVC controlled by VCC and VCC methods can provide similarly a good performance and better than VC method. However, the voltages at point of common coupling (PCC) and power factor values after compensation by three control methods. are satisfied under Provincial Electricity Authority's Regulation on the Power Network System Interconnection Code B.E.2559 (2016).

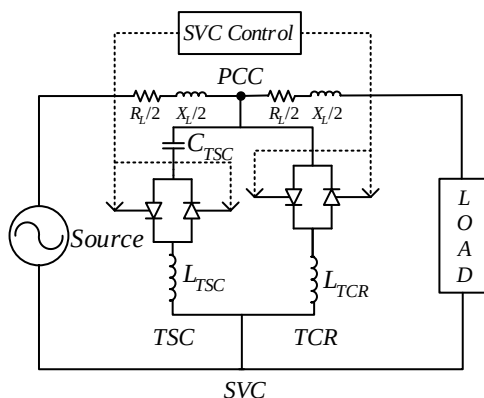
**Keyword:** Voltage Compensation, Power Factor Improvement, SVC, SVC Control, FACTS.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่มีการต่อใช้งานโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าหลากหลายประเภท ซึ่งโหลดแต่ละประเภทมีความต้องการทั้งปริมาณกำลังแอกทีฟ (active power: P) และปริมาณกำลังรีแอกทีฟ (reactive power: Q) ที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม ถ้าระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อใช้งานโหลดประเภทกำลังรีแอกทีฟในปริมาณสูงมาก ๆ จะก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพทางไฟฟ้าได้ เช่น ปัญหาแรงดันตก (voltage drop/under voltage) ปัญหาแรงดันเกิน (over voltage) และปัญหาด้านค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor: PF) ที่ต่ำลง เป็นต้น ซึ่งในสภาวะปกติระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องมีค่าแรงดันไฟฟ้าตามพิกัดมาตรฐานของแต่ละประเทศ (ประเทศไทยใช้ระดับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่ 220 V<sub>rms</sub>) และควรมีค่าตัวประกอบกำลังไม่น้อยกว่า 0.85 [1] สำหรับในกรณีปัญหาด้านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผิดปกติทั้งแรงดันตกและแรงดันเกินดังกล่าวนอกจากจะส่งผลเสียต่อคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังโดยตรงแล้ว ในบางครั้งสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักรกลในการผลิตอาจจะต้องหยุดชะงักเนื่องจากกระแสไฟฟ้าถูกตัดโดยการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งไว้ และนำไปสู่ความเสียหายทางธุรกิจตามมา ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่าง

ยิ่งที่จะต้องมีการป้องกันและแก้ไขปัญหาดังกล่าวเพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพมากยิ่งขึ้นและลดความเสี่ยงความเสียหายทางด้านธุรกิจ การแก้ไขปัญหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผิดปกติและการปรับปรุงค่า PF สามารถทำได้หลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบไฟฟ้า เช่น พิกัดแรงดันไฟฟ้าของระบบ ปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าสูงสุด พื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย ประสิทธิภาพการชดเชยที่ยอมรับได้ และการลงทุน เป็นต้น วิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผิดปกติและการปรับปรุง PF ของระบบไฟฟ้ากำลัง คือ การติดตั้งวงจรสร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (Flexible AC Transmission Systems: FACTS) [2] เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพื่อชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้ารวมถึงปรับปรุง PF ได้พร้อมกัน วงจร FACTS สามารถแยกออกได้หลายชนิดวงจร ได้แก่ วงจรเอสวีซี (SVC) วงจรยูนิไฟฟลี (Unified Power Flow Controller: UPFC) วงจรเอสเอสเอสซี (Static Synchronous Series Compensator: SSSC) และวงจรสแตทคอม (STATCOM) [3-5] อย่างไรก็ตามในบทความนี้ จะนำเสนอการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF ด้วยวงจรเอสวีซี ทั้งนี้เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟสำหรับการชดเชยด้วยอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive Elements) ซึ่งจะง่ายต่อการออกแบบและการติดตั้งใช้งาน อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพในการชดเชย

ที่ดีอีกด้วย [6] โดยปกติการติดตั้งวงจรเอสวีซีในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสจะทำการติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง (ณ จุด PCC) ทำให้โหม่งพีแวนซ์สายส่งแบ่งออกเป็นสองส่วน [2] ดังแสดงได้ดังรูปที่ 1 จากรูปดังกล่าว วงจรเอสวีซีประกอบด้วย 2 วงจรย่อย คือ วงจรทีเอสซี (Thyristor Switched Capacitor: TSC) และวงจรทีซีอาร์ (Thyristor Controlled Reactor: TCR) โดยวงจรทีเอสซีจะทำหน้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟแบบคาปาซิทีฟ หรือกำลังรีแอกทีฟที่เป็นค่าลบ ( $-Q$ ) ส่วนวงจรทีซีอาร์จะทำหน้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟแบบอินดักทีฟ หรือกำลังรีแอกทีฟที่เป็นค่าบวก ( $+Q$ ) ให้กับระบบไฟฟ้า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรเอสวีซีในบทความนี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร ซึ่งสามารถดูรายละเอียดการวิเคราะห์หาแบบจำลองและการนำไปใช้ออกแบบวงจรเอสวีซีได้จากหัวข้อที่ 2 และ 3 ตามลำดับ นอกจากนี้ในส่วนของการควบคุมการทำงานของวงจรเอสวีซี (SVC control) ในปัจจุบันพบว่า มีอยู่ 3 วิธีที่นิยมใช้ คือ วิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดัน (Voltage Control: VC) [7] วิธีการควบคุมผ่านค่ากำลังรีแอกทีฟ (VAR Compensation Control: VCC) [8] และวิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดันร่วมกับกำลังรีแอกทีฟ (Voltage and VAR Compensation Control: WVCC) [9] ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมทั้ง 3 วิธีดังกล่าว โดยใช้ประสิทธิภาพการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

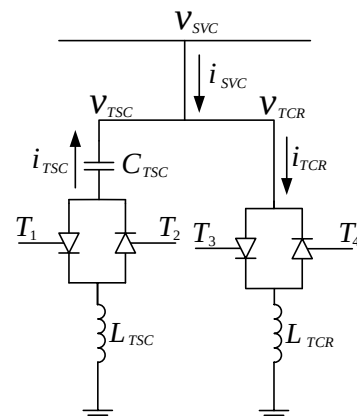


รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งวงจรเอสวีซีเป็นตัวชดเชยสมรรถนะ

การนำเสนอเนื้อหาสาระของบทความนี้จะประกอบด้วยในหัวข้อที่ 2 จะอธิบายการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซี หัวข้อที่ 3 จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซี หัวข้อที่ 4 จะอธิบายวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรเอสวีซี 3 วิธี ได้แก่ วิธี VC วิธี VCC และวิธี WVCC ในหัวข้อที่ 5 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ และเปรียบเทียบสมรรถนะวิธีการควบคุมวงจรเอสวีซี 3 วิธี และในหัวข้อที่ 6 คือ สรุปผลของบทความ

## 2. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซี

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซีมีจุดประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีในการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุง PF ให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จากรูปที่ 2 โครงสร้างของวงจรเอสวีซีประกอบด้วยวงจรย่อย 2 วงจร คือ วงจรทีเอสซี (ทำหน้าที่จ่ายปริมาณ  $-Q$ ) และวงจรทีซีอาร์ (ทำหน้าที่จ่ายปริมาณ  $+Q$ ) โดยโครงสร้างของวงจรทีเอสซีประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ( $C_{TSC}$ ) ต่ออนุกรมกับชุดอุปกรณ์สวิตช์แบบไทรสเตอร์ ( $T_1, T_2$ ) และเหนี่ยวนำ ( $L_{TSC}$ ) ส่วนโครงสร้างของวงจรทีซีอาร์ประกอบด้วยอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_{TCR}$ ) ต่ออนุกรมกับชุดอุปกรณ์สวิตช์แบบไทรสเตอร์ ( $T_3, T_4$ ) ดังปรากฏในรูป



รูปที่ 2 โครงสร้างของวงจรเอสวีซี

จากโครงสร้างของวงจรเอสซีซีดังกล่าวข้างต้น การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสซีซีในรูปของสมการค่ากำลังรีแอกทีฟ จะสามารถทำได้โดยการแยกวิเคราะห์หาแบบจำลองที่ละวงจรย่อย คือ การวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรทีเอสซี และการวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรทีซีอาร์ จากนั้นเมื่อได้แบบจำลองทั้งสองวงจรแล้วจะถูกนำมารวมกัน เพื่อแสดงเป็นแบบจำลองของวงจรเอสซีซี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทีเอสซี

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทีเอสซีจะเริ่มต้นจากการพิจารณาค่ากระแสที่ไหลผ่านวงจรทีเอสซี ( $i_{TSC}$ ) ดังสมการที่ (1) โดย  $\alpha_{TSC}$  คือ ค่ามุมจุดขนวนไทรสเตอร์  $T_1$  และ  $T_2$  ของวงจรทีเอสซี และ  $V_{CO}$  คือ ค่าแรงดันเงื่อนไขในการทำงานของวงจรทีเอสซี

$$i_{TSC}(t) = \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} V_{TSC} \cos(\omega t + \alpha_{TSC}) - \omega C_{TSC} V_{TSC} \cos(\omega_n t) \cos(\alpha_{TSC}) - n \omega C_{TSC} \left( V_{CO} - V_{TSC} \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \right) \sin(\alpha_{TSC}) \sin(\omega_n t) \quad (1)$$

$$\text{โดยที่ } n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 L_{TSC} C_{TSC}}} \text{ และ } \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_{TSC} C_{TSC}}}$$

จากสมการที่ (1) เนื่องจากวงจรทีเอสซีจะทำงานเพียง 2 สถานะ คือ สถานะเปิดวงจร (TSC: off) ซึ่งจะทำให้  $i_{TSC}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และสถานะปิดวงจร (TSC: on) ที่จะทำให้  $i_{TSC}$  มีค่าสูงสุด ซึ่งจะสามารถลดรูปสมการที่ (1) ได้โดยกำหนดตาม 2 เงื่อนไข [2] ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 กำหนดให้

$$\cos(\alpha_{TSC}) = 0 \text{ หรือ } \sin(\alpha_{TSC}) = 1$$

เงื่อนไขที่ 2 กำหนดให้

$$V_{CO} = \pm V_{TSC} \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \sin(\omega t)$$

จากการดำเนินการตาม 2 เงื่อนไขในข้างต้น จะได้สมการ  $i_{TSC}$  ในสถานะปิดวงจรใหม่ ดังสมการที่ (2)

$$i_{TSC}(t) = V_{TSC} \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \sin(\omega t) \quad (2)$$

พิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวงจรทีเอสซีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$v_{TSC} = V_{TSC} \sin(\theta) \quad (3)$$

โดยที่  $\theta$  คือ มุมเฟสแรงดันของวงจรทีเอสซี

จากค่า  $i_{TSC}$  ดังสมการที่ (2) และค่า  $v_{TSC}$  ตามสมการที่ (3) จะสามารถคำนวณหาค่ากำลังรีแอกทีฟของวงจรทีเอสซี ( $Q_{TSC}$ ) ที่สามารถจ่ายชดเชยให้กับระบบได้ แสดงดังสมการที่ (4)

$$Q_{TSC} = \frac{V_{TSC}^2}{2} \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \quad (4)$$

### 2.2. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทีซีอาร์

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทีซีอาร์จะพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรทีซีอาร์ ( $i_{TCR}$ ) และแรงดันที่ตกคร่อมวงจรทีซีอาร์ ( $v_{TCR}$ ) ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$i_{TCR} = \left( \frac{V_{TCR}}{\omega L_{TCR}} \right) (\sin(\omega t) - \sin(\alpha_{TCR})) \quad (5)$$

$$v_{TCR} = V_{TCR} \sin(\theta) \quad (6)$$

โดยที่  $\alpha_{TCR}$  คือ ค่ามุมจุดขนวนไทรสเตอร์ของวงจรทีซีอาร์ ( $T_3$  และ  $T_4$ ) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง  $\pi/2$

rad ส่วน  $\theta$  คือ มุมเฟสแรงดันของวงจรที่ช็ืออาร์ (เท่ากับมุมเฟสของ  $v_{TSC}$ )

จากสมการที่ (5) และ (6) เมื่อพิจารณา คำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟของวงจรที่ช็ืออาร์ ( $Q_{TCR}$ ) ที่สามารถจ่ายชดเชยได้ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$Q_{TCR} = \left( \frac{V_{TCR}^2}{2\omega L_{TCR}} \right) (1 - \sin(\alpha_{TCR})) \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) ถ้ากำหนดให้  $\alpha = 0$  rad จะได้ ค่ากำลังรีแอกทีฟสูงสุด แต่ถ้ากำหนดให้มุม  $\alpha = \pi/2$  rad จะทำให้ได้ค่ากำลังรีแอกทีฟต่ำสุดเท่ากับศูนย์

### 2.3. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซี

จากผลการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรที่ช็ืออาร์และวงจรทีเอสซีในสองหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อนำมาเขียนรวมจะสามารถแสดงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซีได้ดังนี้

พิจารณาค่ากระแสรวมที่ไหลผ่านวงจรเอสวีซี ( $i_{SVC}$ ) ซึ่งหาได้จากผลต่างระหว่างค่า  $i_{TCR}$  และค่า  $i_{TSC}$  แสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$i_{SVC} = i_{TCR} - i_{TSC} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) จะสามารถคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟของวงจรเอสวีซี ( $Q_{SVC}$ ) ที่สามารถจ่ายชดเชยได้ดังสมการที่ (9) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวงจรเอสวีซี ( $v_{SVC}$ ) จะมีขนาดและมุมเฟสเท่ากับ  $v_{TSC}$  และ  $v_{TCR}$  ซึ่งกำหนดใหม่ คือ  $v_{SVC} = V_{SVC} \sin(\theta)$

$$Q_{SVC} = \left( \frac{V_{SVC}^2}{2\omega L_{TCR}} \right) (1 - \sin(\alpha_{TCR})) - \frac{V_{SVC}^2}{2} \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \quad (9)$$

นอกจากนี้ เนื่องจากวงจรเอสวีซีถูกออกแบบให้จ่ายเฉพาะค่ากำลังรีแอกทีฟเท่านั้น ดังนั้น

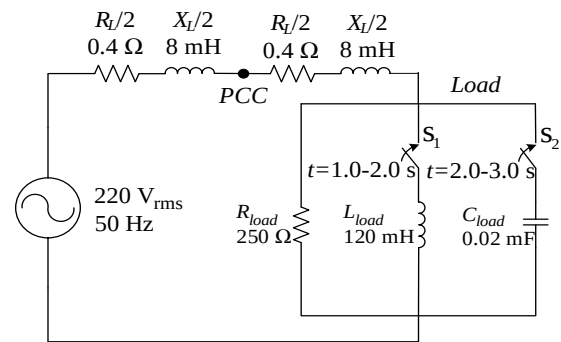
ค่ากำลังแอกทีฟ ( $P_{SVC}$ ) ที่ได้จากวงจรจะมีค่าเท่ากับศูนย์แสดงดังสมการที่ (10)

$$P_{SVC} = \left( \left( \frac{V_{SVC}^2}{2\omega L_{TCR}} \right) (1 - \sin(\alpha_{TCR})) - \frac{V_{SVC}^2}{2} \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \right) \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad (10)$$

จากการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซีในข้างต้น แบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซี ซึ่งสามารถดูได้ในหัวข้อต่อไป

## 3. การออกแบบค่าพารามิเตอร์วงจรเอสวีซี

### 3.1. ระบบที่พิจารณา



รูปที่ 3 ระบบที่พิจารณาชดเชยแรงดันไฟฟ้า

และปรับปรุงค่า PF

ระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่พิจารณาชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปดังกล่าว ระบบไฟฟ้ามีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 220 Vrms ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz และมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง คือ ความต้านทาน ( $R_L$ ) เท่ากับ 0.8  $\Omega$  อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ( $X_L$ ) เท่ากับ 16 mH ระบบไฟฟ้าง่ายต่อเข้ากับโหลดตัวความต้านทาน ( $R_{load}$ ) เท่ากับ 250  $\Omega$  ขนานกับตัวเหนี่ยวนำ ( $L_{load}$ ) เท่ากับ 120 mH และตัวเก็บประจุ ( $C_{load}$ ) เท่ากับ 0.02 mF จากระบบที่พิจารณาดังกล่าว สามารถให้ค่ากำลังแอกทีฟสูงที่ 220 W ค่ากำลังรีแอกทีฟต่ำสุดที่ -360 Var และค่ากำลังรีแอกทีฟสูงสุด คือ 780 Var เมื่อทำการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในหน่วยอาร์เอ็มเอส (rms) ของระบบก่อนมีการชดเชย (แรงดันที่

จุด  $V_{pcc}$ ) ค่ากำลังรีแอกทีฟที่โหลด ( $Q_L$ ) และค่ากำลังแอกทีฟที่โหลด ( $P_L$ ) ได้ดังรูปที่ 4 5 และ 6 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวในช่วงเวลาเริ่มต้นตั้งแต่ 0 ถึง 1 วินาที คือช่วงเวลาที่มีการต่อโหลดเฉพาะ  $R_{load}$  ซึ่งสังเกตได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบอยู่ในสภาวะปกติที่ค่าประมาณ  $220\text{ V}_{rms}$  โดยมีปริมาณ  $Q_L$  เท่ากับ 0 Var และปริมาณ  $P_L$  เท่ากับ 197 W จากผลดังกล่าวสามารถคำนวณค่าตัวประกอบกำลัง (PF) โดยใช้สมการที่ (11) ได้ค่าเท่ากับ 1

ต่อมาในช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 2 วินาที เป็นช่วงเวลาของการต่อโหลด  $R_{load}$  ขนานกับ  $L_{load}$  สังเกตได้ว่า โหลดดังกล่าวทำให้เกิดแรงดันตกที่ประมาณ  $170\text{ V}_{rms}$  ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันในสถานะอยู่ตัว (percent of steady state voltage error:  $\%E_V$ ) เท่ากับ 22.7% โดยโหลดมีการใช้ปริมาณ  $Q_L$  เท่ากับ 780 Var และปริมาณ  $P_L$  เท่ากับ 120 W ซึ่งในช่วงเวลานี้มีค่า PF เท่ากับ 0.13 Lagging

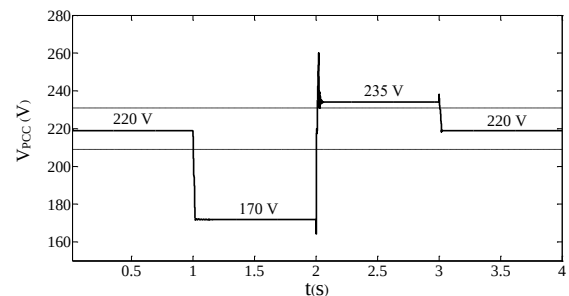
สำหรับในช่วงเวลาตั้งแต่ 2 ถึง 3 วินาที คือ ช่วงเวลาการต่อโหลด  $R_{load}$  ขนานกับ  $C_{load}$  (ปลด  $L_{load}$ ) สังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าเกิดแรงดันเกินที่ประมาณ  $235\text{ V}_{rms}$  (ค่า  $\%E_V$  เท่ากับ 6.82%) โดยมีปริมาณ  $Q_L$  เท่ากับ -360 Var และปริมาณ  $P_L$  เท่ากับ 220 W สามารถคำนวณค่า PF ในช่วงเวลานี้ได้เท่ากับ 0.37 Leading

และในช่วงเวลาตั้งแต่ 3 ถึง 4 วินาที ได้ทำการปลดโหลด  $C_{load}$  ออก เหลือเพียง  $R_{load}$  เท่านั้น จึงส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติที่ค่าประมาณ  $220\text{ V}_{rms}$  โดยมีปริมาณ  $Q_L$  เท่ากับ 0 Var ปริมาณ  $P_L$  เท่ากับ 197 W และค่า PF กลับมามีค่าเท่ากับ 1

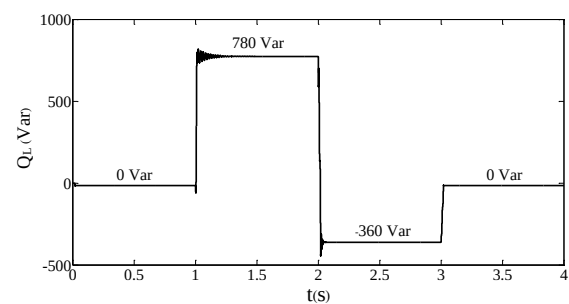
จากผลการสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้น พบว่า โหลดของระบบที่พิจารณาสามารถส่งผลให้เกิดความผิดปกติของระดับแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งกรณีแรงดันตกและแรงดันเกิน ซึ่งค่าแรงดันตกและแรงดันเกินดังกล่าวมีค่าเกิน 5% ของแรงดันปกติ และในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติของแรงดันดังกล่าว พบว่า ค่า PF ของระบบมีค่าต่ำกว่า 0.85

ซึ่งไม่เป็นไปตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคฯ ด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 [1]

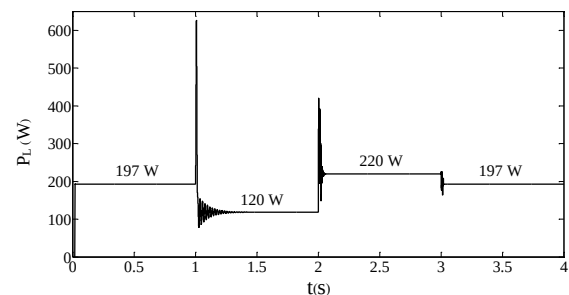
$$PF = \frac{P}{P + Q} \quad (11)$$



รูปที่ 4 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ของระบบก่อนการชดเชย



รูปที่ 5 ค่ากำลังรีแอกทีฟที่โหลดของระบบ



รูปที่ 6 ค่ากำลังแอกทีฟที่โหลดของระบบ

### 3.2. การออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซี

จากระบบที่พิจารณาที่มีความผิดปกติของระดับแรงดันไฟฟ้าและมีค่า PF ดังกล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการชดเชยปรับแก้ไขเพื่อให้ระบบมีคุณภาพทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยการออกแบบวงจรเอสวีซีเพื่อใช้ชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF สำหรับระบบที่พิจารณาดังกล่าวจะอธิบายดังต่อไปนี้

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสซีวีซี ได้แก่ ค่าตัวเก็บประจุ  $C_{TSC}$  และค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L_{TSC}$  ของวงจรทีเอสซี และค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L_{TCR}$  ของวงจรทีซีอาร์ จะต้องทำการออกแบบให้มีค่าเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา ทั้งนี้เพื่อให้วงจรเอสซีวีซีสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการออกแบบวงจรดังกล่าวในบทความนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสซีวีซีที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ( $220 V_{rms}$ ) โดยใช้ข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากำลังรีแอกทีฟที่โหลดที่ได้จากการวัดในระบบก่อนมีการชดเชยดังนี้

การคำนวณปริมาณกำลังรีแอกทีฟค่าบวกที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ

ปริมาณกำลังรีแอกทีฟค่าบวกของโหลดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ( $+Q_{L,Vnormal}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12) โดยอาศัยข้อมูลของระบบที่พิจารณาในช่วงที่เกิดแรงดันตก คือ ค่าแรงดันตก ( $v_{under}$ ) เท่ากับ  $170 V_{rms}$  และมีปริมาณ  $+Q_L$  เท่ากับ  $780 \text{ Var}$  ซึ่งจากค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า  $+Q_{L,Vnormal}$  ได้เท่ากับ  $1306 \text{ Var}$

$$+Q_{L,Vnormal} = \frac{V_{normal}^2}{V_{under}} (+Q_L) \quad (12)$$

การคำนวณปริมาณกำลังรีแอกทีฟค่าลบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ

ปริมาณกำลังรีแอกทีฟค่าลบของโหลดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ( $-Q_{L,Vnormal}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (13) โดยอาศัยข้อมูลของระบบในช่วงที่เกิดแรงดันเกิน คือ ค่าแรงดันเกิน ( $v_{over}$ ) เท่ากับ  $235 V_{rms}$  และปริมาณ  $-Q_L$  เท่ากับ  $-360 \text{ Var}$  ซึ่งจากค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า  $-Q_{L,Vnormal}$  ได้เท่ากับ  $-316 \text{ Var}$

$$-Q_{L,Vnormal} = \frac{V_{normal}^2}{V_{over}} (-Q_L) \quad (13)$$

ขั้นที่ 2 ตรวจสอบค่า  $Q_L$  ของระบบที่พิจารณาโดยถ้าเป็นปริมาณ  $+Q_L$  ให้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่วงจรทีเอสซี แต่ถ้าเป็นปริมาณ  $-Q_L$  ให้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่วงจรทีซีอาร์ อย่างไรก็ตาม ถ้าโหลดมีทั้งปริมาณ  $+Q_L$  และ  $-Q_L$  ให้เริ่มทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีเอสซีก่อน จากนั้นจึงออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีซีอาร์ สำหรับในบทความนี้ โหลดของระบบที่พิจารณามีทั้งปริมาณ  $+Q_L$  และ  $-Q_L$  ดังนั้น จึงต้องดำเนินการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีเอสซีก่อน ดังนี้

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีเอสซี

วงจรทีเอสซีจะต้องออกแบบให้สามารถจ่าย  $Q_{TSC}$  ค่าลบ ที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณ  $+Q_{L,Vnormal}$  ของระบบที่พิจารณา ซึ่งในกรณีนี้ปริมาณ  $+Q_{L,Vnormal}$  มีค่าเท่ากับ  $1306 \text{ Var}$  ดังนั้น การออกแบบจึงกำหนดให้  $Q_{TSC}$  มีค่าเท่ากับ  $-1500 \text{ Var}$  จากค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณหาตัวเก็บประจุ  $C_{TSC}$  ของวงจรทีเอสซีได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการที่ (4) ซึ่งผลการคำนวณจะได้ค่า  $C_{TSC}$  เท่ากับ  $0.1 \text{ mF}$  โดยการออกแบบกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำ  $L_{TSC}$  เท่ากับ  $1 \mu\text{H}$  (ค่า  $L_{TSC}$  ควรออกแบบให้มีค่าน้อย ๆ เนื่องจากทำหน้าที่ในการลดการกระเพื่อมของกระแสเท่านั้น [2]) การคำนวณค่าตัวเก็บประจุ  $C_{TSC}$  ดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังนี้

$$1500 = \frac{(220\sqrt{2})^2}{2} \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{100\pi \times 0.1 \times 10^{-6} \times C_{TSC}}} \right)^2 - 1 \right] 100\pi C_{TSC}$$

$$C_{TSC} = 0.1 \text{ mF}$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีซีอาร์

วงจรทีซีอาร์จะต้องออกแบบเพื่อให้สามารถจ่าย  $Q_{TCR}$  ค่าบวก ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของ

$-Q_{L,Vnormal}$  ของระบบที่พิจารณาซึ่งในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ -316 Var ดังนั้น การออกแบบจึงกำหนดให้  $Q_{TCR}$  มีค่าเท่ากับ 600 Var ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L_{TCR}$  ของวงจรที่ชื้ออาร์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการที่ (7) ได้ค่าเท่ากับ 0.25 H แสดงได้ดังนี้ (ที่ค่า  $Q_{TCR}$  สูงสุดเท่ากับ 600 Var จะเกิดขึ้นเมื่อมุมจุดชนวน ( $\alpha_{TCR}$ ) เท่ากับ 0 rad)

$$600 = \left( \frac{(220\sqrt{2})^2}{2 \times 100\pi L_{TCR}} \right) (1 - \sin(0))$$

$$L_{TCR} = 0.25 \text{ H}$$

สรุปผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซีข้างต้น คือ  $C_{TSC} = 0.1 \text{ mF}$   $L_{TSC} = 1 \text{ }\mu\text{H}$  และ  $L_{TCR} = 0.25 \text{ H}$  โดยวงจรดังกล่าว จะสามารถจ่ายค่ากำลังรีแอกทีฟ  $Q_{SVC}$  ได้ต่ำสุดเท่ากับ -1500 Var (จาก  $Q_{TSC}$ ) และสูงสุดเท่ากับ 600 Var (จาก  $Q_{TCR}$ ) การจำลองสถานการณ์การชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการ

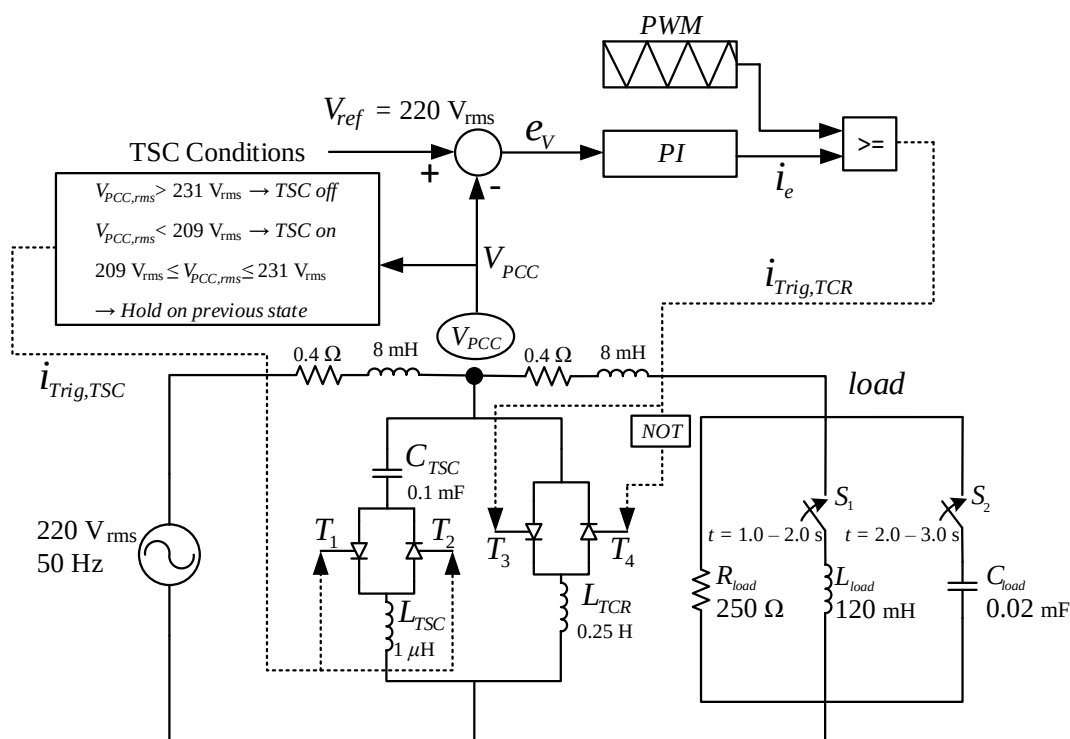
ปรับปรุงค่า PF ด้วยวงจรเอสวีซีที่ได้ออกแบบนี้สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 5

#### 4. การควบคุมวงจรเอสวีซี

การควบคุมการทำงานของวงจรเอสวีซีเพื่อให้สามารถชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF มีอยู่หลายวิธี ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอเปรียบเทียบวิธีการควบคุมที่นิยมใช้ในปัจจุบัน 3 วิธี คือ วิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดัน (วิธี VC) วิธีการควบคุมผ่านค่ากำลังรีแอกทีฟ (วิธี VCC) และวิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดันร่วมกับกำลังรีแอกทีฟ (วิธี VVCC) ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1. การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VC

การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VC [7] มีจุดเด่นคือ การควบคุมผ่านค่าแรงดันที่ต้องการชดเชยโดยตรง และมีการใช้อินพุตจากการตรวจวัดเพียงค่าเดียว คือ ค่า  $V_{PCC}$  จึงทำให้มีจำนวนอุปกรณ์ในการติดตั้งน้อยและไม่มีส่วนของการคำนวณที่ซับซ้อน



รูปที่ 7 การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VC



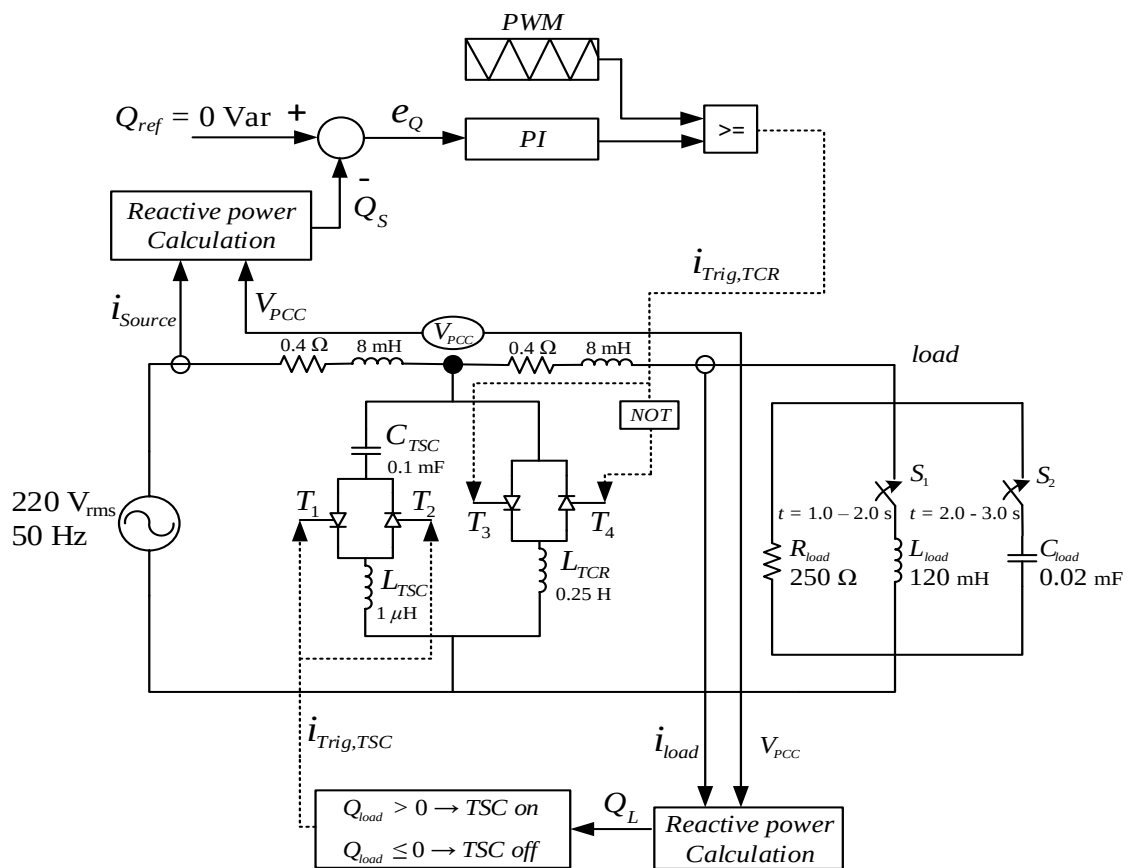
การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VC จะให้ค่าเอาต์พุต คือ สัญญาณกระแสจุดชนวนไทรสเตอร์  $T_1$  และ  $T_2$  ของวงจรที่เอสซี ( $i_{Trig,TSC}$ ) และสัญญาณกระแสจุดชนวนไทรสเตอร์  $T_3$  และ  $T_4$  ของวงจรที่ซีอาร์ ( $i_{Trig,TCR}$ ) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปดังกล่าว หลักการควบคุมของวิธี VC จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

**ส่วนที่ 1** การควบคุมการทำงานของวงจรที่เอสซี จะเริ่มต้นจากการรับค่า  $V_{PCC}$  เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานของวงจรที่เอสซี (TSC Conditions) จากนั้นจะส่งค่าเอาต์พุตเป็นค่าสัญญาณกระแส  $i_{Trig,TSC}$  สำหรับจุดชนวนอุปกรณ์ไทรสเตอร์  $T_1$  และ  $T_2$  โดยเงื่อนไขการควบคุมดังกล่าว คือ เมื่อ  $V_{PCC}$  มีค่าแรงดันไฟฟ้ามากกว่า  $231 V_{rms}$  (+5% ของแรงดัน  $220 V_{rms}$ ) จะกำหนดให้วงจรที่เอสซีเปิดวงจร (TSC: off) แต่ถ้า  $V_{PCC}$  มีค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า  $209 V_{rms}$  (-5% ของแรงดัน  $220 V_{rms}$ ) กำหนดให้วงจรที่เอสซีปิดวงจร (TSC: on) และถ้า  $V_{PCC}$

มีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $209 V_{rms}$  ถึง  $231 V_{rms}$  จะคงค่าสัญญาณเอาต์พุตตามการทำงานก่อนหน้านี้

หมายเหตุ: การเปิดวงจรที่เอสซีทำได้โดยส่งสัญญาณ  $i_{Trig,TSC} = 0$  ส่วนการปิดวงจรที่เอสซีทำได้โดยการส่งสัญญาณ  $i_{Trig,TSC} = 1$  เพื่อจุดชนวนไทรสเตอร์

**ส่วนที่ 2** การควบคุมการทำงานของวงจรที่ซีอาร์ โดยจะใช้อินพุตค่าความคลาดเคลื่อน ( $e_v$ ) ระหว่างค่า  $V_{PCC}$  กับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ที่มีค่าเท่ากับ  $220 V_{rms}$  ผ่านเข้าตัวควบคุมพีไอ (PI controller) จากนั้นจะนำเอาต์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้างพัลส์ (pulse) ด้วยเทคนิค PWM (Pulse Width Modulation: PWM) โดยสัญญาณพัลส์ดังกล่าว คือสัญญาณ  $i_{Trig,TCR}$  เพื่อจุดชนวนอุปกรณ์ไทรสเตอร์  $T_3$  และ  $T_4$  ของวงจรที่ซีอาร์สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของตัวควบคุมแบบพีไอสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14) และ (15) ตามลำดับ [10]



รูปที่ 8 การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VCC

$$K_p = \frac{1}{L_{TCR}} \quad (14)$$

$$K_I = \frac{2\zeta\omega_n - 1}{L_{TCR}} \quad (15)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับบทความนี้ กำหนดให้ค่าอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio:  $\zeta$ ) เท่ากับ  $\sqrt{2}/2$  และค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) เท่ากับ  $100\pi$  ซึ่งจากการกำหนดค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า  $K_p$  ได้เท่ากับ 4 และ  $K_I$  เท่ากับ 1773

#### 4.2. การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VCC

การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VCC [8] มีจุดเด่น คือ ระบบควบคุมมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรีแอกทีฟ ทำให้วงจรเอสวีซีใช้เวลาอันน้อยในการจ่ายค่ากำลังรีแอกทีฟเข้าระบบไฟฟ้ากำลัง และส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็วยิ่งขึ้น โครงสร้างการควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VCC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งมีการรับค่าอินพุต 2 ค่า คือ ค่ากำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่าย ( $Q_s$ ) และกำลังรีแอกทีฟที่โหลด ( $Q_L$ ) ส่วนค่าเอาต์พุตของการควบคุม คือ สัญญาณ  $i_{Trig,TSC}$  ของวงจรทีเอสซี และสัญญาณ  $i_{Trig,TCR}$  ของวงจรทีซีอาร์ สำหรับหลักการควบคุมด้วยวิธี VCC จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน ดังนี้

**ส่วนที่ 1** การควบคุมการทำงานของวงจรทีเอสซี โดยจะเริ่มต้นจากการรับค่าอินพุต  $Q_L$  เพื่อกำหนดเงื่อนไขการจุดชนวนของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ โดยถ้าค่า  $Q_L$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ( $Q_L \leq 0$ ) จะกำหนดให้วงจรทีเอสซีเปิดวงจร (TSC: off) แต่ถ้าค่า  $Q_L$  มีค่ามากกว่าศูนย์ ( $Q_L > 0$ ) จะกำหนดให้วงจรทีเอสซีปิดวงจร (TSC: on) โดยการส่งสัญญาณ  $i_{Trig,TSC} = 1$  ไปควบคุมไทรสเตอร์  $T_1$  และ  $T_2$

**ส่วนที่ 2** การควบคุมการทำงานของวงจรทีซีอาร์จะใช้อินพุตค่าความคลาดเคลื่อน ( $e_Q$ ) ระหว่างค่า  $Q_s$  กับค่ากำลังรีแอกทีฟอ้างอิง ( $Q_{ref}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 Var ผ่านเข้าตัวควบคุมพีไอ จากนั้นจะนำเอาต์พุตที่ได้ผ่านเทคนิค PWM เพื่อสร้างพัลส์สัญญาณ  $i_{Trig,TCR}$  สำหรับจุดชนวนอุปกรณ์ไทรสเตอร์  $T_3$  และ  $T_4$  ของวงจรทีซีอาร์ โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_I$  ได้จากสมการที่ (16) และ (17) ตามลำดับ [10]

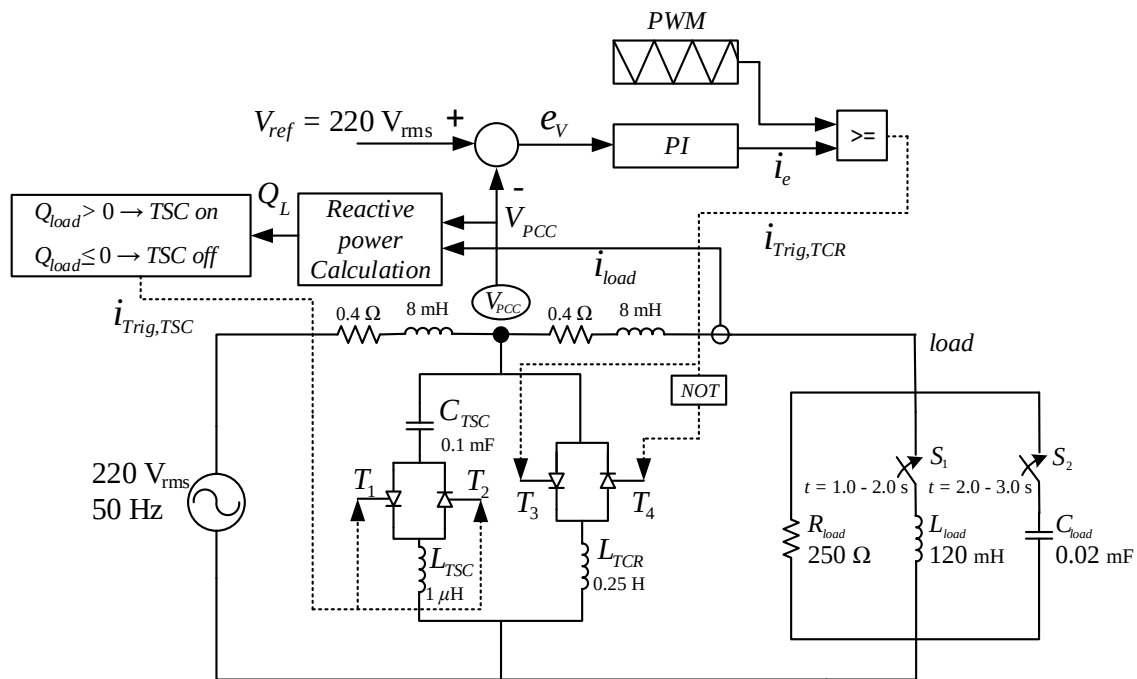
$$K_p = \frac{1}{L_{TCR}} - 1 \quad (16)$$

$$K_I = \frac{2\zeta\omega}{L_{TCR}} \quad (17)$$

โดยการออกแบบกำหนดให้ค่า  $\zeta$  เท่ากับ  $\sqrt{2}/2$  และค่า  $\omega_n$  เท่ากับ  $100\pi$  ซึ่งจากการกำหนดค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า  $K_p$  ได้เท่ากับ 3 และค่า  $K_I$  เท่ากับ 1777

#### 4.3. การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VVCC

การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VVCC คือ การรวมข้อดีและจุดเด่นของวิธี VC กับวิธี VVC เข้าไว้ด้วยกัน [9] ซึ่งจะทำให้ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรีแอกทีฟ จึงสามารถชดเชยให้แรงดันไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็วเหมือนกับวิธี VCC แต่จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้และการคำนวณจะน้อยกว่าวิธี VVC โครงสร้างการควบคุมวงจรเอสวีซีด้วย VVCC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 จากรูปดังกล่าว ระบบการควบคุมจะรับค่าอินพุต 2 ค่า คือ ค่า  $Q_L$  และค่า  $V_{PCC}$  โดยค่าเอาต์พุต คือ สัญญาณ  $i_{Trig,TSC}$  และ  $i_{Trig,TCR}$  ของวงจรทีเอสซี และวงจรทีซีอาร์ตามลำดับ โดยส่วนของการควบคุมวงจรทีเอสซีจะมีหลักการเหมือนกับวิธี VCC ในขณะที่ส่วนของการควบคุมการทำงานของวงจรทีซีอาร์จะเหมือนกับวิธี VC ตามที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.1 ตามลำดับ



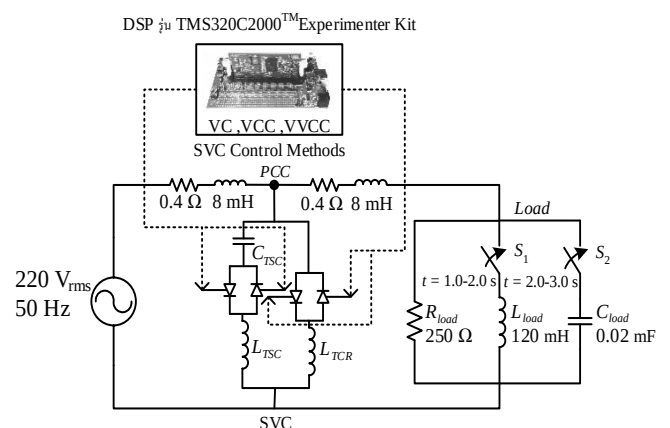
รูปที่ 9 การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี WCC

จากการอธิบายหลักการควบคุมวงจรเอสวีซีทั้ง 3 วิธี  
ในข้างต้น การจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบ  
สมรรถนะการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่า PF  
ด้วยวงจรเอสวีซีร่วมกับ 3 วิธีควบคุมดังกล่าว สามารถดูได้  
จากหัวข้อต่อไปนี้

## 5. ผลการจำลองสถานการณ์

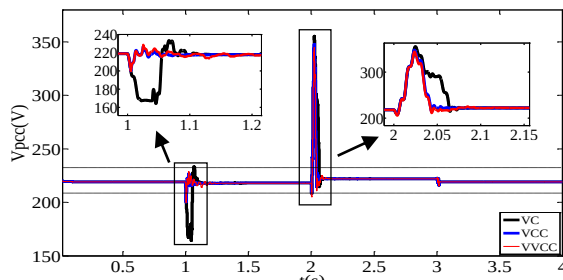
จากระบบที่พิจารณาขดเค้นแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF ด้วยวงจรเอสซีซีร่วมกับวิธีการควบคุมด้วยวิธี VC วิธี VCC และวิธี WVCC ดังรูปที่ 7 8 และ 9 ตามลำดับ ในหัวข้อนี้จะทำการจำลองสถานการณ์ระบบดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยของวงจรเอสซีซีที่ใช้วิธีการควบคุมแตกต่างกัน โดยการเปรียบเทียบจะใช้ประสิทธิภาพการชดเชยในสถานะอยู่ตัว คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันในสถานะอยู่ตัว หรือค่า  $\%E_v$  ค่าช่วงเวลาเข้าสู่สถานะแรงดันปกติ (steady state time of voltage:  $T_{ss}$ ) และประสิทธิภาพการชดเชยในสถานะชั่วคราว คือ ค่าแรงดันพุ่งเกินชั่วขณะ (instantaneous over voltage:  $i_{ov}$ ) ค่าแรงดันตกต่ำสุดชั่วขณะ (instantaneous under voltage:  $i_{uv}$ )

ส่วนการเปรียบเทียบผลการปรับปรุงค่า PF จะใช้ค่า PF ที่  
แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะ การ  
จำลองสถานการณ์ในบทความนี้ จะใช้เทคนิคการจำลอง  
แบบฮาร์ดแวร์ในลูป [11] ที่ใช้โปรแกรมMATLAB/Simulink  
ร่วมกับบอร์ด DSP TMS320C2000™ Experimenter Kit  
ซึ่งในส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาจะถูกสร้างขึ้นบน  
โปรแกรม Simulink ในขณะที่ส่วนของการควบคุมวงจร  
สวิตช์ด้วยวิธี VC วิธี VCC และวิธี WVCC จะถูกสร้างขึ้นที่  
ฮาร์ดแวร์บอร์ด DSP ดังแสดงในรูปที่ 10

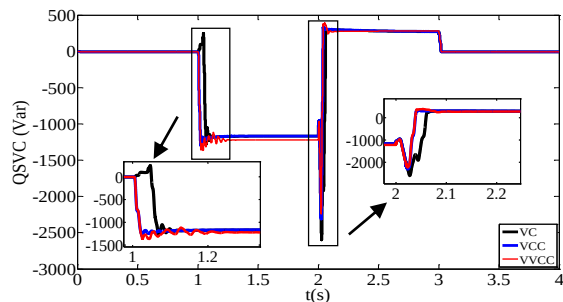


รูปที่ 10 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

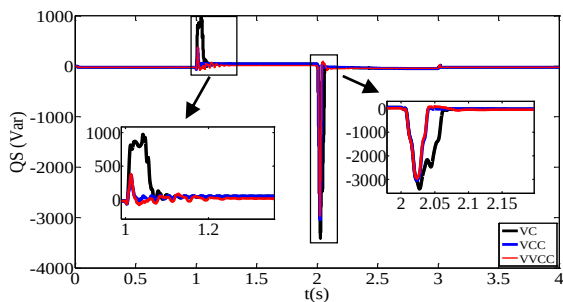
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562



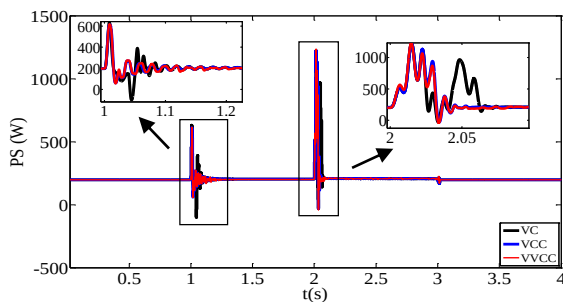
รูปที่ 11 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ภายหลังการชดเชย



รูปที่ 12 ค่ากำลังรีแอกทีฟที่จ่ายโดยวงจรเอสวีซี



รูปที่ 13 ค่ากำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่ายของระบบ



รูปที่ 14 ค่ากำลังแอกทีฟที่แหล่งจ่ายของระบบ

ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสของระบบ ( $V_{pcc}$ ) ค่ากำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่าย ( $Q_s$ ) และค่ากำลังแอกทีฟที่แหล่งจ่าย ( $P_s$ ) ภายหลังการชดเชย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11 ถึง 14 ตามลำดับ โดยกรณีที่วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VC ได้แสดงเป็นเส้นกราฟสีดำ กรณีใช้วิธี VCC แสดงเป็นเส้นกราฟสีแดง และกรณีที่ใช้วิธี VVCC แสดงเป็นเส้นกราฟสีน้ำเงิน ดังปรากฏในรูป

จากผลการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 11 ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 1 วินาที คือ ช่วงเวลาที่ระบบมีการต่อโหลดเฉพาะ  $R_{load}$  และค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนมีการติดตั้งวงจรเอสวีซีมีค่าปกติเท่ากับ  $220 V_{rms}$  (ดูได้จากรูปที่ 4) จะเห็นได้ว่า ถึงแม้จะมีการติดตั้งวงจรเอสวีซีเพิ่มเข้าไปในระบบ แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลานี้ยังคงมีค่าปกติเท่ากับ  $220 V_{rms}$  เช่นเดิม โดยวงจรเอสวีซีไม่ได้รับการจ่ายกำลังรีแอกทีฟ ( $Q_{svc}$ ) ซึ่งจากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า  $Q_{svc}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ต่อมาในช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 2 วินาที คือ ช่วงเวลาที่ระบบมีการต่อโหลด  $R_{load}$  ขนานกับ  $L_{load}$  ซึ่งก่อนมีการชดเชย พบว่า ระบบไฟฟ้าเกิดแรงดันตกที่ค่าเท่ากับ  $170 V_{rms}$  (ดังรูปที่ 4) อย่างไรก็ตาม เมื่อวงจรเอสวีซีทำการจ่ายปริมาณ  $Q_{svc} = -1250 \text{ Var}$  ดังรูปที่ 12 เข้าไปในระบบ จะสังเกตได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าภายหลังการชดเชยสามารถกลับมามีค่าปกติได้เช่นเดิม ที่ค่าประมาณเท่ากับ  $220 V_{rms}$  โดยในกรณีที่วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VC ให้ผลการชดเชยที่ค่า  $\%E_v$  เท่ากับ 0.1% ค่า  $T_{sv}$  เท่ากับ 0.08 s ค่า  $i_{ov}$  เท่ากับ  $236 V_{rms}$  ค่า  $i_{uv}$  เท่ากับ  $165 V_{rms}$  และค่า  $\%THD_v$  เท่ากับ 0.145% กรณีที่ใช้วิธี VCC ให้ผลค่า  $\%E_v$  เท่ากับ 0.3% ค่า  $T_{sv}$  เท่ากับ 0.03 s ค่า  $i_{ov}$  เท่ากับ  $232 V_{rms}$  ค่า  $i_{uv}$  เท่ากับ  $200 V_{rms}$  และค่า  $\%THD_v$  เท่ากับ 0.15% และในกรณีที่การควบคุมที่ใช้วิธี VVCC ให้ผลที่ค่า  $\%E_v$  เท่ากับ 0.1% ค่า  $T_{sv}$  เท่ากับ 0.03 s ค่า  $i_{ov}$  เท่ากับ  $229 V_{rms}$  ค่า  $i_{uv}$  เท่ากับ  $205 V_{rms}$  และค่า  $\%THD_v$  เท่ากับ 0.140% ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 1 ลำดับต่อมาในช่วงเวลาตั้งแต่ 2 ถึง 3 วินาทีที่ระบบมีการต่อโหลด  $R_{load}$  ขนานกับ  $C_{load}$  ซึ่งก่อนการชดเชย พบว่า ระบบเกิดแรงดันเกินที่  $235 V_{rms}$  (ดังรูปที่ 4) แต่เมื่อมีการชดเชยโดยการจ่ายปริมาณ  $Q_{svc} = 250 \text{ Var}$  ดังรูปที่ 12 สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันของระบบหลังการชดเชยสามารถกลับมามีค่าอยู่ในระดับปกติได้ ( $220 V_{rms}$ ) โดยกรณีที่วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VC ให้ผลการชดเชยค่า  $\%E_v$  เท่ากับ 1.5% ค่า  $T_{sv}$  เท่ากับ 0.065 s ค่า  $i_{ov}$  เท่ากับ  $365 V_{rms}$  ค่า  $i_{uv}$  เท่ากับ  $209 V_{rms}$  และค่า  $\%THD_v$  เท่ากับ 0.12% ส่วนกรณีที่ใช้วิธี VCC ให้ค่า  $\%E_v$  เท่ากับ 1.3% ค่า  $T_{sv}$  เท่ากับ 0.04 s ค่า  $i_{ov}$  เท่ากับ  $352 V_{rms}$  ค่า  $i_{uv}$  เท่ากับ  $205 V_{rms}$  และค่า  $\%THD_v$  เท่ากับ 0.12%

ส่วนในกรณีที่วิธี WCC ให้ค่า  $\%E_v$  เท่ากับ 1.5% ค่า  $T_{sv}$  เท่ากับ 0.04 s ค่า  $i_{ov}$  เท่ากับ 355  $V_{rms}$  ค่า  $i_{lv}$  เท่ากับ 209  $V_{rms}$  และค่า %THDv เท่ากับ 0.13% ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2 สำหรับในช่วงเวลาสุดท้ายตั้งแต่ 3 ถึง 4 วินาทีกรณีที่ระบบมีการปลดโหลดเหลือเพียง  $R_{load}$  จะสังเกตได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้ายังคงมีค่าปกติเท่ากับ 220  $V_{rms}$  คงที่ตลอดทั้งช่วงเวลา โดยในช่วงเวลานี้วงจรเอสวีซีไม่มีการจ่าย  $Q_{sv}$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลค่ากำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่าย ( $Q_s$ ) และค่ากำลังแอกทีฟที่แหล่งจ่าย ( $P_s$ ) หลังการชดเชย ดังรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า ค่า  $Q_s$  หลังการชดเชยมีค่าประมาณศูนย์ในสถานะอยู่ตัวเกือบตลอดทุกช่วงเวลา โดยในช่วงเวลาที่ 2 ถึง 3 วินาที พบว่า ยังคงมีปริมาณกำลังรีแอกทีฟหลงเหลือเล็กน้อยเท่ากับ -70 Var -90 Var และ -65 Var สำหรับกรณีที่วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VC วิธี WC และวิธี WCC ตามลำดับ ส่วนค่า  $P_s$  หลังการชดเชย พบว่า มีค่าประมาณ 200 W ในสถานะอยู่ตัวตลอดทุกช่วงเวลา ซึ่งจากค่ากำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟภายหลังการชดเชยดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่า PF ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 2 วินาที และช่วงเวลาที่ 3 ถึง 4 วินาทีได้ค่า PF ได้เท่ากับ 1 เท่ากันทั้งสามกรณีวิธีควบคุม ในขณะที่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 2 ถึง 3 วินาที พบว่า กรณีวิธี VC และวิธี WCC ให้ค่า PF เท่ากันเท่ากับ 0.98 ส่วนกรณีวิธี VCC ให้ค่า PF เท่ากับ 0.99

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่า PF ของวงจรเอสวีซีที่ใช้วิธีการควบคุมด้วยวิธี VC วิธี VCC และวิธี WVCC ในช่วงเวลาที่มีการชดเชยแรงดันตกและแรงดันเกินได้ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากตารางดังกล่าว ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้า พบว่า วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี WVCC ให้ประสิทธิภาพในการชดเชยดีที่สุดทั้งในช่วงแรงดันตกที่ค่า  $\%E_v$  เท่ากับ 0.1% ค่า  $T_{sv}$  เท่ากับ 0.03 s ค่า  $i_{ov}$  เท่ากับ 229  $V_{rms}$  และค่า  $i_{lv}$  เท่ากับ 205  $V_{rms}$  ส่วนในช่วงแรงดันเกินพบว่า วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VCC ให้ประสิทธิภาพการชดเชยดีที่สุด ที่ค่า  $\%E_v$  เท่ากับ 1.3% ค่า  $T_{sv}$

เท่ากับ 0.04 s ค่า  $i_{ov}$  เท่ากับ 352  $V_{rms}$  และค่า  $i_{lv}$  เท่ากับ 205  $V_{rms}$  นอกจากนี้ สำหรับผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงค่า PF ของระบบในช่วงที่แรงดันตกและแรงดันเกิน พบว่า ทั้งสามวิธีการควบคุมสามารถปรับปรุงค่า PF ได้ดีใกล้เคียงกัน โดยค่า PF หลังการชดเชยมีค่าประมาณเท่ากับ 1 นอกจากนี้จากผลการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุง PF ในตารางที่ 1 และ 2 ยังพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่า PF ของระบบที่พิจารณา ภายหลังการชดเชยด้วยวงจรเอสวีซีที่ใช้การควบคุมทั้งสามวิธี เป็นไปตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559

ตารางที่ 1 ผลการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่า PF ในช่วงที่เกิดแรงดันตก

| วิธีการควบคุมวงจร SVC | ค่าประสิทธิภาพ |          |               |               |      |        |
|-----------------------|----------------|----------|---------------|---------------|------|--------|
|                       | $\%E_v$        | $T_{sv}$ | $i_{ov}$      | $i_{lv}$      | PF   | % THDv |
| ก่อนการชดเชย          |                |          |               |               |      |        |
| -                     | 22.7%          | -        | -             | -             | 0.13 | 0      |
| หลังการชดเชย          |                |          |               |               |      |        |
| วิธี VC               | 0.1%           | 0.08 s   | 236 $V_{rms}$ | 165 $V_{rms}$ | 1    | 0.145  |
| วิธี VCC              | 0.3%           | 0.03 s   | 232 $V_{rms}$ | 200 $V_{rms}$ | 1    | 0.150  |
| วิธี WVCC             | 0.1%           | 0.03 s   | 229 $V_{rms}$ | 205 $V_{rms}$ | 1    | 0.140  |

ตารางที่ 2 ผลการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่า PF ในช่วงที่เกิดแรงดันเกิน

| วิธีการควบคุมวงจร SVC | ค่าประสิทธิภาพ |          |               |               |      |        |
|-----------------------|----------------|----------|---------------|---------------|------|--------|
|                       | $\%E_v$        | $T_{sv}$ | $i_{ov}$      | $i_{lv}$      | PF   | % THDv |
| ก่อนการชดเชย          |                |          |               |               |      |        |
| -                     | 6.82 %         | -        | -             | -             | 0.37 | 0      |
| หลังการชดเชย          |                |          |               |               |      |        |
| วิธี VC               | 1.5%           | 0.065 s  | 365 $V_{rms}$ | 209 $V_{rms}$ | 0.98 | 0.12   |
| วิธี VCC              | 1.3%           | 0.04 s   | 352 $V_{rms}$ | 205 $V_{rms}$ | 0.99 | 0.12   |
| วิธี WVCC             | 1.5%           | 0.04 s   | 355 $V_{rms}$ | 209 $V_{rms}$ | 0.98 | 0.13   |

## 6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรสร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับชนิดวงจรเอสวีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยการนำเสนอได้เปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยของวงจรเอสวีซีที่ใช้การควบคุม 3 วิธี คือ VC VCC และ WVCC ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์

พบว่า วิธี WCC และวิธี VCC สามารถให้ประสิทธิผลในการชดเชยแรงดันไฟฟ้าดีใกล้เคียงกันและดีกว่าวิธี VC นอกจากนี้ ทั้งสามวิธีการควบคุมสามารถให้ประสิทธิผลการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่ดีเหมือนกันที่ค่าประมาณเท่ากับ 1 โดยผลการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยวงจรเอสวีซีที่ใช้การควบคุมทั้งสามวิธีดังกล่าวเป็นไปตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 ทั้งนี้ การเลือกใช้งานวิธีการควบคุมต่าง ๆ ดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับประสิทธิผลที่ยอมรับได้รวมถึงความซับซ้อนของแต่่วิธีการควบคุม กล่าวคือ หากเลือกใช้วิธีการควบคุมแบบ VC จะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันเพียงตำแหน่งเดียว จึงง่ายต่อการออกแบบและการใช้งาน อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจะให้ประสิทธิผลการชดเชยที่ต่ำกว่า วิธีการควบคุมแบบ VCC และ WCC ที่ต้องใช้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันและกระแสหลายจุด จึงมีความซับซ้อนทั้งการออกแบบและการใช้งานมากกว่าวิธีการ VC

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลังพลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุมที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยรวมถึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2561, พฤษภาคม 7). ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 [Online]. แหล่งที่มา: [//www.pea.co.th/เกี่ยวกับเรา/การดำเนินการตามนโยบายรัฐบาล/โครงการเชื่อมโยงโครงการต่างๆ-กับระบบงาน-กฟภ-VSPP/PID/1070/evl/0/CategoryID/42/CategoryName/ระเบียบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง](http://www.pea.co.th/เกี่ยวกับเรา/การดำเนินการตามนโยบายรัฐบาล/โครงการเชื่อมโยงโครงการต่างๆ-กับระบบงาน-กฟภ-VSPP/PID/1070/evl/0/CategoryID/42/CategoryName/ระเบียบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง)
- [2] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible*

*AC Transmission Systems*, 1st Indian Edition, IEEE Press, New York and Standard Publishers Distributors, Delhi, 2000.

- [3] Y. Zhou et al., “An Improved Topology of Unified Power Flow Controller Based on MMC with Fault Current Limiting,” *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, Glasgow, 2016, pp. 1-6.
- [4] Shagufta Khan and Suman Bhowmick, “A Novel Power Flow Model of a Static Synchronous Series Compensator (SSSC),” *6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*, Delhi, 2014, pp. 1-6.
- [5] Youjie Ma et al., “The Discussion on Static Synchronous Compensator Technology,” *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Harbin, 2016, pp. 106-111.
- [6] Esther Barrios-Martinez and Cesar Angeles-Camacho, “Technical comparison of FACTS controllers in parallel connection,” *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 15, pp. 36-44, Feb. 2017.
- [7] Nedzmija Demirovic, “Impact of statcom and SVC to voltage control in systems with wind farms using induction generators (IG),” *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, Belgrade, 2016, pp.1-6.
- [8] R. You and M.H. Nehrir, “A Systematic Approach to Controller Design for SVC to Enhance Damping of Power System Oscillations,” *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, New York, 2004,

- pp. 1134-1139.
- [9] Mehrdad Ahmadi et al., “Comparison of SVC and STATCOM in Static Voltage Stability Margin Enhancement,” *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 38, pp. 324-328, Feb. 2010.
- [10] N. A. M. Kamari et al., “ Optimal Design of SVC-PI Controller for Damping Improvement Using New Computational Intelligence Approach,” *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 42, pp. 184-189, Aug. 2012.
- [11] Hardware in the Loop from the MATLAB/Simulink Environment, Altera Corporation, 2013, pp. 1-9.