

การแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะด้วยวิธีชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วยเอสวีซี Problem Solving of Instantaneous Voltage Drop with Reactive Power Compensation using SVC

บุญยัง สิงห์เจริญ* และสันติ साแก้ว
Boonyung Singjaroen* and Santi Sakaew

สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ 32000
Electrical Technology Program Faculty of Agriculture and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus 32000

*Email: boonyung.si@hotmail.com

Received: 30 Oct 19

Revised: 31 Mar 20

Accepted: 04 Apr 20

บทคัดย่อ

การขาดเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ ซึ่งสาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด การแก้ปัญหาโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบสถิต (Static Var Compensator; SVC) โดยใช้วิธีการจำลองการทำงานเปรียบเทียบระหว่างระบบไฟฟ้าที่ไม่มีและมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยเอสวีซี ส่วนการทดสอบจริงทำการสร้างชุดสาธิตการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบสถิต เป็นกรณีศึกษาเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการชดเชยที่นำเสนอ ทดสอบโดยการต่อโหลดเข้าในระบบไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อโหลด ผลจากการทดสอบพบว่าระบบที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าจะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกทันที ณ จุดเชื่อมต่อเมื่อมีการต่อโหลดเข้าในระบบไฟฟ้า แต่เมื่อเพิ่มเอสวีซีเข้าไปในระบบไฟฟ้าเดียวกันนี้ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกดังกล่าวถูกยกระดับแรงดันให้คงที่ด้วยความรวดเร็ว สามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะและยังเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า จึงเป็นการยืนยันในทางปฏิบัติว่ารูปแบบที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ได้จริงเป็นข้อมูลชี้แนะในการออกแบบสร้างการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วยเอสวีซีจริง

คำสำคัญ: กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ เอสวีซี แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า เอสซีอาร์

Abstract

Lacking stability of voltage is mostly caused by changes in voltage levels temporarity. This is caused by sudden changes in load. This work presented the alternative problem solving voltage instantaneous in voltage dropped by reactive power compensation using Static Var Compensator; SVC. Using reactive power compensation by SVC was a case study to compare efficiency of the present work. Testing was done by adding load to electrical connection points. The result showed the system without reactive power compensation could caused instantaneous voltage drop at connection points when added load into electrical systems. Whereas added SVC into the same current systems could be solved changing of voltage levels temporary and increasing efficiency of voltage. This has confirmed that this work can be used and the information will guiding design of reactive power compensation using SVC.

Keyword: Reactive power, SVC, Voltage Instantaneous, Voltage stability, SCR

1. บทนำ

จากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี จำเป็นจะต้องจัดหาแหล่งพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้เกิดความหลากหลายในการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้าและมีการเชื่อมโยงของระบบโครงข่ายใหญ่ขึ้น มีขีดความสามารถสูงของระบบไฟฟ้าเพื่อรองรับสถานะของโหลดหรือกระบวนการผลิตที่มีความอ่อนไหวต่อคุณภาพไฟฟ้า เสถียรภาพของแรงดันเป็นส่วนหนึ่งของคุณภาพไฟฟ้าที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความน่าเชื่อถือในระบบไฟฟ้า บ่งบอกถึงความสามารถของระบบไฟฟ้าที่สามารถรักษาระดับแรงดันได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือสิ่งรบกวนขึ้นในระบบไฟฟ้า การขาดเสถียรภาพของแรงดันจึงเป็นสาเหตุหลักของปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า และอาจส่งผลกระทบต่อปัญหาเสถียรภาพโดยรวม หากระบบป้องกันรับรู้ถึงปัญหาและอาจต้องประกอบบางส่วนจากระบบออกไป [1],[2],[3] ปัญหาหนึ่งของการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามักจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบไฟฟ้า เช่น การต่อเข้า และปลดออกโหลดขนาดใหญ่ หรือผลกระทบจากการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเป็นปัญหาเสถียรภาพของแรงดันชั่วขณะซึ่งส่งผลถึงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์หรือองค์ประกอบระบบที่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน จึงกล่าวได้ว่าคุณภาพกำลังไฟฟ้าจึงเป็นเรื่องที่สำคัญต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่บ่งบอกถึงขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบ และสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ได้ในกรณีที่จ่ายโหลดแบบฉับพลัน [4]

การรักษาเสถียรภาพของแรงดันของระบบ ณ จุดต่อรวมให้คงที่จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นสำหรับระบบไฟฟ้าทั่วไป ส่วนใหญ่มักจะใช้การต่อเข้าและปลดออกอุปกรณ์พาสซีฟที่เป็นแบบตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในการรักษาความสมดุลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งอาจจะแก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันในสถานะคงที่ได้แต่ไม่สามารถแก้ปัญหาในสถานะฉับพลันหรือสถานะชั่วขณะที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในระบบแบบทันทีทันใดของโหลดได้ ปัจจุบันระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วอย่างมากจึงได้นำระบบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้าเป็นตัวชดเชยกำลังกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น หรือที่เรียกว่า FACTS (Flexible AC Transmission System) เป็นวิธีการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า [5] ซึ่งจะเป็นวิธีการที่จะเข้ามามีบทบาทในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยในอนาคต สามารถตอบสนองในสถานะฉับพลันหรือสถานะชั่วขณะได้ ซึ่งมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วยตัวฟื้นฟูแรงดันพลวัต (Dynamic Voltage Regulator; DVR) เป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบอนุกรมโดยใช้อุปกรณ์แปลงผันแรงดันไฟฟ้า (Inverter) เพื่อสร้างแรงดันชดเชยผ่านหม้อแปลงสำหรับฉีดเข้าระบบ นิยมนำมาติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อให้มีเสถียรภาพดีขึ้น และเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วยสแตตคอม (Static Compensator; STATCOM) เป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบขนานโดยสแตตคอมเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้สำหรับฉีดเข้าระบบ นิยมนำมาติดตั้งในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะในระบบไฟฟ้า และในบทความนี้เลือกใช้วิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบสถิตที่มีชื่อว่า เอสวีซี เป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ต่อขนานเข้าระบบไฟฟ้า โดยใช้ทรานซิสเตอร์ในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวรีแอคเตอร์ [6] เพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ และยังเป็น การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ข้อดีของวิธีการดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างง่ายและการควบคุมที่ซับซ้อนน้อย รวมถึงการลงทุนสร้างไม่สูง และเหมาะสำหรับการแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะในระบบไฟฟ้า 1 เฟส

2. วิธีการวิจัย

2.1 พื้นฐานการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ

กำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ ชนิดแรกเรียกว่า กำลังไฟฟ้าจริง (Active power; P) มีหน่วยวัดเป็น วัตต์ (W) เป็นกำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่นได้ เช่น ความร้อน แสงสว่าง หรือกำลังทางกล และชนิดที่สอง คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power; Q) มีหน่วยวัดเป็น วาร์ (VAR) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปอื่นได้ แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ต้องทำงานด้วยหลักการขดลวดสนามแม่เหล็กจำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาก่อน ในระบบไฟฟ้านั้นอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะมีเพียงเครื่องจักรกลซิงโครนัส (Synchronous Machines) และตัวเก็บประจุกำลัง (Power Capacitor) เครื่องจักรกลซิงโครนัสมักจะถูกจำกัดทั้งปริมาณในการลงทุนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงรวมทั้งความซับซ้อนในการติดตั้ง ดังนั้นการติดตั้งตัวเก็บประจุกำลังไม่ว่าจะเป็นตัวเก็บประจุกำลังที่ใช้กับระบบแรงดันต่ำ (แรงดันไม่เกิน 1,000 โวลต์) หรือระบบแรงดันสูงเพิ่มเติมเข้าไปในระบบไฟฟ้าจึงเป็นวิธีการที่สำคัญที่สุดในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

ตัวเก็บประจุกำลังจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสม และเป็นวิธีการชดเชยที่มีการปฏิบัติมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีราคาถูกกว่าเครื่องจักรกลซิงโครนัส การติดตั้งใช้งานได้ง่าย [7] ในทางปฏิบัติอาจจะกล่าวได้ว่ามีการบำรุงรักษาต่ำมากเพราะไม่มีส่วนที่มีการเคลื่อนที่ และประการสำคัญคือ มีกำลังสูญเสียในตัวเองต่ำมากมีให้เลือกใช้งานหลายขนาดเหมาะสมกับการติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้า

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วยตัวเก็บประจุกำลังจึงเป็นอีกหนึ่งวิธีการในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้

อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าที่มีการปฏิบัติและพัฒนาไปพร้อมกับวิวัฒนาการของเทคโนโลยีที่เอื้ออำนวยมีชื่อเรียกว่า “Capacitor Bank” เช่น มีการใช้ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อเป็นการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของระบบไฟฟ้า การต่ออุปกรณ์ชดเชยนี้เข้ากับระบบไฟฟ้าเริ่มมีวิวัฒนาการตั้งแต่การใช้สวิตช์ หรือแมกเนติกคอนแทกเตอร์ (Magnetic contactor) เพื่อการต่อเข้าและปลดออกที่เหมาะสมกับการชดเชย แต่ปัญหาของการปฏิบัติในลักษณะดังกล่าวคือจะเป็นการควบคุมแบบปิด – เปิด (ON – OFF Control) ที่มักจะอาศัยความพอดีจากการคาดเดาของผู้ปฏิบัติการซึ่งจะได้ผลลัพธ์ไม่แน่นอนที่เหมาะสมกับค่าที่ต้องการ เนื่องจากการปรับค่าการชดเชยแบบนี้จะเป็นการปรับค่าชดเชยแบบขั้น (Step change) และที่สำคัญคือความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่อาศัยการสังเกตจากผู้ปฏิบัติการในการออกคำสั่ง ทำให้ความไวในการตอบสนองอาจจะไม่ทันต่อการเปลี่ยนแปลงในระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมักจะอยู่ในช่วงไดนามิกส์ (Dynamic events)

2.2 โครงสร้างอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบสถิต

อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบสถิต หรือที่นิยมเรียกกันว่าเอสวีซี เพื่อใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพื่อเพิ่มเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้า และยังช่วยในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อให้คงที่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น หรือลดลงในย่านพลวัตได้ โดยทั่วไปเอสวีซีจะต่ออุปกรณ์ชดเชยขนานกับระบบหรือจุดเชื่อมต่อ โหลดซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ใช้ไทรสเตอร์ในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวรีแอคเตอร์ (Thyristor Controlled Reactor; TCR) และแบบที่ใช้ไทรสเตอร์เป็นสวิตช์ควบคุมตัวสับเข้า หรือปลดออกตัวเก็บประจุ (Thyristor Switched Capacitor; TSC) ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบไทรสเตอร์ควบคุมกระแสไหลผ่านตัวรีแอคเตอร์ ซึ่งมีลักษณะดัง Figure 1 แสดงลักษณะโครงสร้างเอสวีซีจะประกอบด้วยไทรสเตอร์ 2 ตัวต่อขนานกันแบบกลับหัวกัน (Anti – parallel) ทำหน้าที่เสมือนเป็นสวิตช์ 2 ทาง โดยที่ไทรสเตอร์ T1 จะถูกควบคุมการทำงานช่วงลูกคลื่นไซเคิลบวกและไทรสเตอร์ T2 จะถูกควบคุมการทำงานช่วงลูกคลื่นไซเคิลลบสำหรับควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) โดยตัวเก็บประจุ (C) จะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟออกมาชดเชยให้กับระบบเพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ต้องการ และขดลวดเหนี่ยวนำทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่หักล้างตัวเก็บประจุ ซึ่งจะทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเป็นไปอย่างต่อเนื่องและแม่นยำ

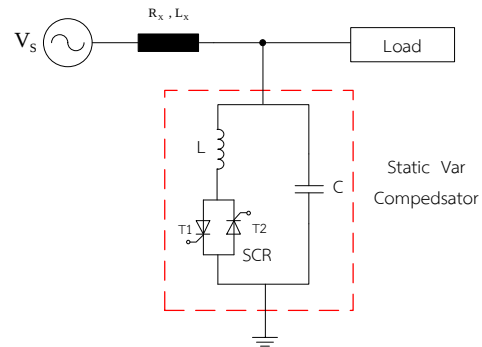


Figure 1 Thyristor controlled reactor of SVC

โดยที่

- V_s คือ แรงดันไฟฟ้าที่ต้นทาง
- R_x, L_x คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง
- SCR คือ Silicon Controlled Rectifier
- L คือ ขดลวดเหนี่ยวนำ
- C คือ ตัวเก็บประจุ

การทำงานของเอสวีซีเมื่อระบบอยู่ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดที่จุดเชื่อมต่อลดลงอย่างรวดเร็ว การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ใกล้เคียงกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการนั้น จะอาศัยหลักการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟผ่านตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ด้วยการปรับมุมจุดชววนเอสซีอาร์ (Silicon Control Rectifier; SCR) เพื่อปรับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำให้ตรงกับความต้องการชดเชยกำลังไฟฟ้า[8] ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟรวมของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมต่อโหลดและเป็นการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดให้คงที่การควบคุม การทำงานโดยการกำเนิดสัญญาณมุมจุดชววนเพื่อปรับการไหลกระแสด้วยเอสซีอาร์ ซึ่งจะต้องกำเนิดให้สอดคล้องกับสัญญาณอ้างอิงดัง Figure 2

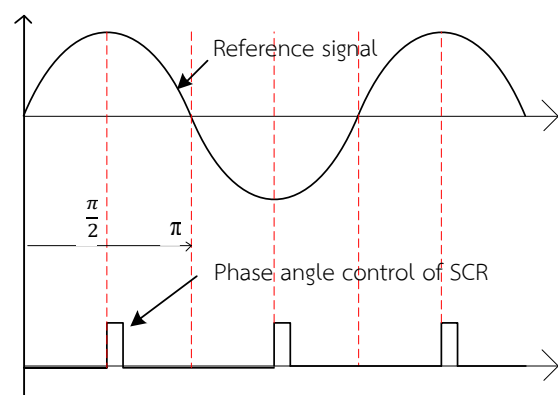


Figure 2 Reference signal and phase angle control of SCR

ในสภาวะที่ระบบยังไม่มีกระแสจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ค่า X_L และ X_C ของเอสวีซีจะถูกปรับให้มีค่าใกล้เคียงกันทำให้กระแสไฟฟ้า I_L และ I_C เกิดการหักล้างกันตามคุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ทั้งสองนี้ สัญญาณมุมจุดชนวนเอสซีอาร์ในสภาวะนี้จะอยู่ที่มุม 90 องศา หรือที่ค่า $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน ทำให้ไทรสเตอร์นำกระแสตัวเหนี่ยวนำได้เต็มที่ และในสภาวะที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ สัญญาณมุมจุดชนวนเอสซีอาร์จะเปลี่ยนระหว่างมุม 90 องศา ถึง 180 องศา ซึ่งจะทำให้ไทรสเตอร์นำกระแสตัวเหนี่ยวนำไม่ต่อเนื่อง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำถูกปรับเปลี่ยนค่าตามของมุมจุดชนวนเอสซีอาร์ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และของตัวเก็บประจุจะเป็นผลลัพธ์ของกระแสเอสวีซีที่เหมาะสมสำหรับจ่ายเข้าในระบบไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ และสอดคล้องกับความต้องการชดเชยกำลังไฟฟ้า ซึ่งการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเป็นตัวบ่งชี้การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ต้องการ จากคุณสมบัติของเอสวีซีที่มีการทำงานแบบเฉพาะพลวัตที่แสดงถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงของบัสแรงดันที่มีการต่อเอสวีซีอยู่ [9] ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเอสวีซีดัง Figure 3

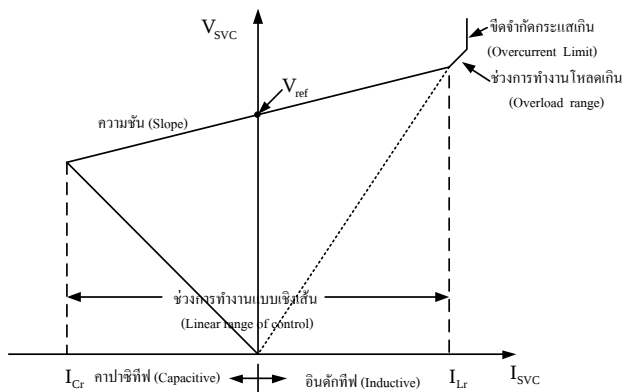


Figure 3 The characteristics of SVC with dynamic specific operation

การทำงานของเอสวีซีซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่บัส หรือจุดเชื่อมต่อกับกระแสไฟฟ้าเอสวีซี ประกอบด้วยแรงดันอ้างอิง เป็นแรงดันไฟฟ้าในระบบหรือแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อของเอสวีซีช่วงสภาวะลอยตัวที่เอสวีซีไม่มีการดึงเข้า และจ่ายออกกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟใด ๆ โดยที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.95 เพอร์ยูนิต และค่า 1.05 เพอร์ยูนิต สามารถแบ่งการทำงานออกเป็นโหมดได้ดังนี้ การทำงานในโหมดแบบเชิงเส้น (Linear Range of Control) เป็นช่วงที่มีควบคุมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของเอสวีซีให้มีการทำงานแบบเชิงเส้น โดยการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าเอสวีซีหรือกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากช่วงการทำงานแบบคาปาซิทีฟ หรือแบบนำหน้าถึงช่วงการทำงานแบบอินดักทีฟ หรือเป็นแบบล้าหลัง การทำงานในโหมดโหลดเกิน (Overload

range) เป็นช่วงที่เอสวีซีทำงานนอกนอกช่วงการทำงานแบบเชิงเส้นจะเกิดในเฉพาะช่วงการทำงานแบบอินดักทีฟ หรือด้านล้าหลัง ซึ่งช่วงนี้เอสวีซีจะมีประพฤติกรรมเหมือนกับตัวเหนี่ยวนำค่าคงที่ และการทำงานในโหมดขีดจำกัดกระแสเกิน (Overcurrent Limit) เป็นการป้องกันไทรสเตอร์ไม่ให้เสียหายเนื่องจากผลของความร้อน ซึ่งกระแสแบบล้าหลังสูงสุดในช่วงโหลดเกินจะถูกจำกัดให้มีค่าคงที่สามารถทำได้โดยการเพิ่มระบบควบคุมเสริมให้กับตัวเอสวีซี ส่วนค่าความชัน (Slope) หรือกระแสทรอป (Current droop) คือความชันของเส้นกราฟช่วงการทำงานแบบเชิงเส้น เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงต่อขนาดผลต่างของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ข้อจำกัดการทำงานของเอสวีซีสามารถแสดงได้บนพื้นที่ในกราฟจะเห็นได้ว่าถ้าแรงดันอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจากค่าที่อ้างอิงไว้จะทำให้ความสามารถในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของเอสวีซีลดลงซึ่งเป็นข้อด้อยของอุปกรณ์ชดเชยชนิดนี้

2.3 การออกแบบและกำหนดค่าอุปกรณ์

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วยเอสวีซีดัง Figure 4 เป็นระบบไฟฟ้าอ้างอิงประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_s) แบบจำลองสายส่งที่มีตัวต้านทาน (R_x) ตัวเหนี่ยวนำ (L_x) ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วยเอสวีซี โหลดตัวต้านทาน (R -Load) และตัวเหนี่ยวนำ (L -Load) สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเลือกค่าตัวเก็บประจุเอสวีซีโดยในที่นี้กำหนดพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูงสุดขนาด 630 วาร์ ที่แรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์ สามารถคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุได้จาก

$$C = \frac{Q}{2\pi f V^2} \quad (1)$$

เมื่อ

Q คือ พิกัดของกำลังไฟฟ้าเอสวีซี มีหน่วยเป็นวาร์ (Var)

V คือ แรงดันไฟฟ้าในระบบ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

f คือ ค่าความถี่ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

$$C = \frac{630}{2\pi \times 50 \times 100^2} = 200 \mu F$$

การเลือกตัวเหนี่ยวนำ (L) โดยมีข้อกำหนดที่ว่าค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะต้องมีค่าเท่ากันเพื่อให้กระแสเกิดการหักล้างกันขณะที่ยังไม่มีกระแสจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณจาก

$$X_C = X_L = 2\pi f L \quad (2)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 200 \times 10^{-6}} = 15 \Omega$$

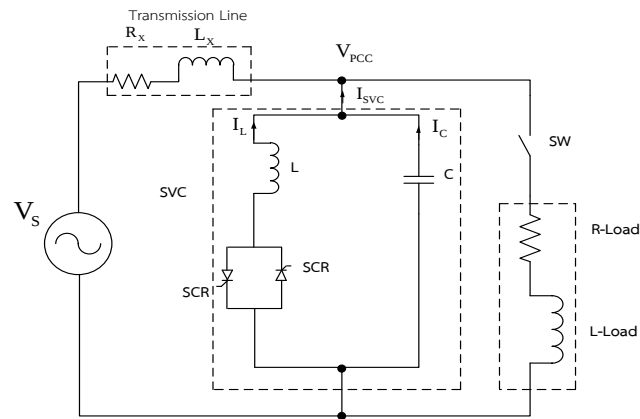


Figure 4 Reference power system of reactive power compensation using SVC

3. การจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานของการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยเอสวีซีซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นในการออกแบบระบบควบคุม เพื่อให้สามารถพยากรณ์หรือทดสอบระบบตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ก่อนการลงมือสร้างจริง การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนี้ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Matlab / Simulink [10] จำลองการทำงาน และเปรียบเทียบระหว่างระบบไฟฟ้าที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า และมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยเอสวีซี โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบเป็นไปตาม Table 1 การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของระบบไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยเอสวีซีเพื่อจะสั่งมุมจุดชนวนเอสซีอาร์ทำงานแบบอัตโนมัติที่ทำให้กระแสไฟฟ้า I_L ถูกปรับเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่โหลด ส่วนกระแสไฟฟ้า I_C จะไม่มีการปรับแต่งการไหลของกระแสไฟฟ้าแต่จะเปลี่ยนแปลงตาม

ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} โดยกระแสไฟฟ้า I_{SVC} จะเกิดจากผลรวมระหว่างกระแสไฟฟ้า I_L และกระแสไฟฟ้า I_C หากกระแสไฟฟ้า I_L ถูกเปลี่ยนแปลงไปที่เกิดจากมุมจุดชนวนเอสซีอาร์ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้า I_{SVC} ถูกเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนที่สัมพันธ์กัน เป็นผลให้เกิดการไหลกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขึ้นตามหลักการของวงจรไฟฟ้า ดังนั้นระบบควบคุมจึงเป็นตัวกำหนดการไหลของกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ การออกแบบระบบควบคุมให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่แม้มีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างรวดเร็วจะมีการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} และนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง V_{PCC}^* ผลต่างที่ได้จะนำมาปรับแต่งระบบควบคุมเพื่อกำหนดค่ามุมจุดชนวนเอสซีอาร์ดัง

Figure 5

Table 1 The parameters used in simulation

No.	Equipment	Initials	Size	Number
1	Power supply	Vs	100 V	1
2	SCR	SCR	x	2
3	Inductor	L	50 mH	1
4	Capacitor	C	200 uF	1
5	Resistance of transmission	Rx	1 Ω	1
6	Inductance of transmission	Lx	3 mH	1
7	Load Resistance	R_Load	5 Ω	1
8	Load Inductance	L_Load	5 mH	1

X = Specified use for the device

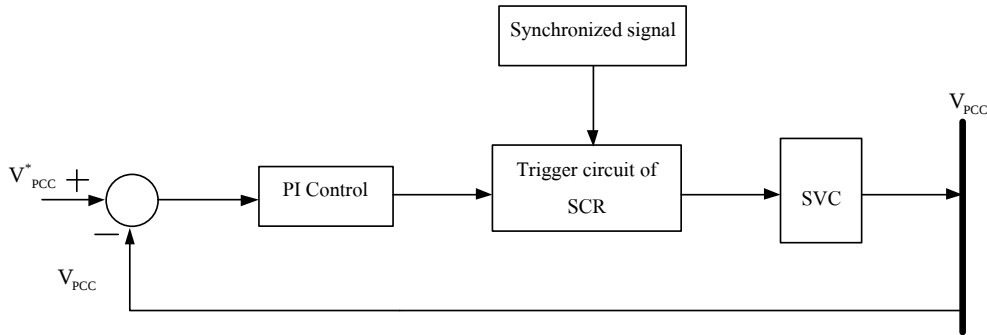


Figure 5 Block Diagram in control systems

การเลือกระบบควบคุมมีให้เลือกใช้หลายวิธีขึ้นอยู่กับการใช้งานของแต่ละระบบ และในบทความนี้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID controller เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยใช้การปรับตั้งค่าตามวิธีการพื้นฐานของ Ziegler - Nichols ตามแนวคิดที่อธิบายไว้ใน [11],[12] เพื่อปรับค่าอัตราขยายของ PID เป็นวิธีการที่ใช้ปรับปรุงหรือพัฒนาตัวควบคุมเพื่อให้ระบบควบคุมนั้นมีการตอบสนองช่วงชั่วคราว (Transient Response) และการตอบสนองในสถานะอยู่ตัว (Steady State) ให้มีลักษณะตามที่ต้องการ ซึ่ง Ziegler - Nichols ได้พัฒนาการปรับค่าระบบควบคุมที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการต่าง ๆ ในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้เกณฑ์การตอบสนองของระบบเป็นแบบผลตอบสนองต่อสัญญาณยูนิตสเตป (Unit Step Response) ซึ่งในระบบที่ได้ออกแบบนี้เลือกตัวควบคุมแบบ PI controller โดยมีค่า K_P เท่ากับ 0.15 และค่า K_I เท่ากับ 35

3.1 การจำลองกรณีไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า

การจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้าอ้างอิงในสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ด้วยการต่อโหลดเข้าในระบบด้วยการสับสวิตช์ SW ในขณะที่ระบบไม่มีเอสวีซีต่อในระบบผลการจำลองดัง Figure 6 กราฟเส้นบนสุดแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้า V_{rms} ที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} จะตกลงทันทีประมาณ 0.2 pu ขณะต่อโหลดที่เวลา $t = 0.5s$ แรงดันไฟฟ้านี้จะตกลงที่ค่านี้จนกระทั่งโหลดถูกปลดออกที่เวลา $t = 0.75s$ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าจึงกลับมาเป็นปกติที่ค่า 1.0 pu เช่นเดียวกันกราฟเส้นกลางแสดงแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขณะต่อโหลดที่เวลาดังกล่าว และกราฟเส้นล่างสุดแสดงกระแสไฟฟ้าของโหลดที่ไหล ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกลักษณะนี้เกิดจากกระแสไฟฟ้าโหลดที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายสูงขึ้นทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสายส่งสูงขึ้น แล้วส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้า V_{PCC} ลดลง จะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้าอ้างอิงที่ไม่เอสวีซีในการชดเชยกำลังไฟฟ้าจะไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้ขณะที่มีการต่อโหลดเข้าในระบบ

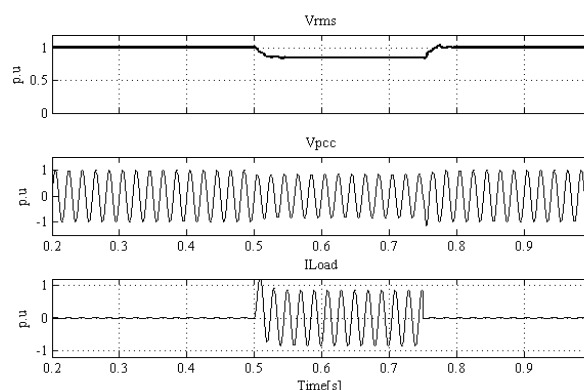


Figure 6 Voltage V_{rms} , V_{Load} and current I_{Load} without reactive power compensation

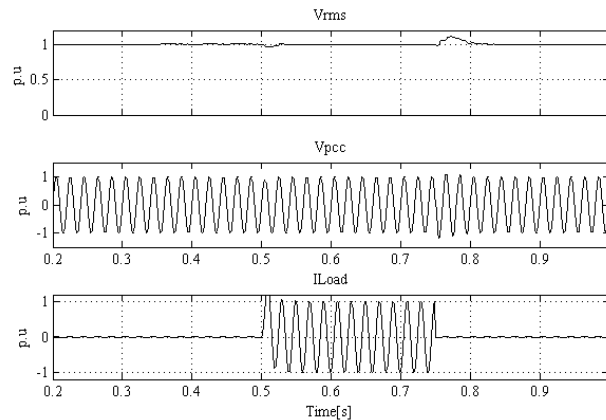


Figure 7 Voltage V_{rms} , V_{Load} and current I_{Load} with reactive power compensation

3.2 การจำลองกรณีมีการชดเชยกำลังไฟฟ้า

เมื่อระบบไฟฟ้าอ้างอิงมีเอสวีซีต่อในระบบและทำการจำลองเช่นเดียวกรณีไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าผลการจำลองดัง Figure 7 เมื่อพิจารณากราฟเส้นบนสุดแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้า V_{rms} ที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} มีการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้กลับมาเป็นปกติที่ค่า 1.0 pu ขณะที่มีการต่อโหลดที่เวลาดังกล่าวเช่นเดียวกับกราฟเส้นกลางแสดงแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} และกราฟเส้นล่างสุดแสดงกระแสไฟฟ้าของโหลดที่โหลด ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้าอ้างอิงที่มีเอสวีซีนั้นสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้ขณะที่มีการต่อโหลด และเมื่อพิจารณาการจ่ายกระแสเอสวีซีดัง Figure 8 จะเห็นได้ว่าในสภาวะปกติขณะที่ยังไม่มีการต่อโหลดเข้าในระบบที่จุดเชื่อมต่อจะไม่มีกระแสเอสวีซี I_{SVC} ฉีดเข้าระบบ (กราฟเส้นบน) แต่เมื่อต่อโหลดเข้าในระบบที่เวลา $t = 0.5$ s ทำให้ระบบควบคุมรับรู้ถึงค่าแรงดันตกและสั่งฉีดกระแสไฟฟ้าเอสวีซีเข้าในระบบเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจุดเชื่อมต่อให้คงที่ จนกระทั่งโหลดถูกปลดออกที่เวลา $t = 0.75$ s ระบบจึงกลับมาทำงานเป็นปกติ ส่วนกราฟเส้นกลางแสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุ I_C และ

กราฟด้านล่างแสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_L เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอได้นำผลการจำลองขนาดของแรงดันไฟฟ้า V_{rms} ที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} กรณีมีและไม่มีเอสวีซีในระบบไฟฟ้าอ้างอิงนำมาพิจารณาในเชิงเปรียบเทียบดัง Figure 9 แสดงขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} กรณีไม่มีเอสวีซีชดเชยกำลังไฟฟ้าทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าตกลงแปรตามโหลด และค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งซึ่งมีค่าลดลงประมาณ 20% ในทางตรงกันข้ามเมื่อระบบมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการที่นำเสนอ ขนาดแรงดันดังกล่าวนี้จะมีเสถียรภาพสูงขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} ถูกรักษาให้คงที่ 1.0 pu อยู่ตลอดเวลา จะมีเพียงในช่วงเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลดเท่านั้นที่ทำให้แรงดันไฟฟ้านี้ตกลงอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากที่ระบบควบคุมรับรู้ และตอบสนองด้วยการปรับการทำงานมุมจุดชนวนเอสซีอาร์ ทำให้เกิดการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าในระบบก็ทำให้แรงดันไฟฟ้ากลับมาอยู่ในระดับอ้างอิงภายในเวลาอันรวดเร็ว

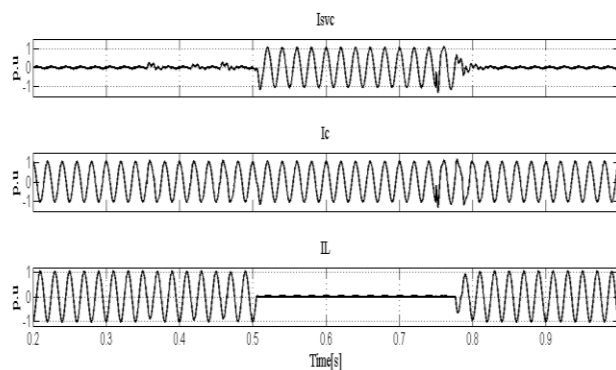


Figure 8 Current I_{svc} , I_C and I_L with reactive power compensation

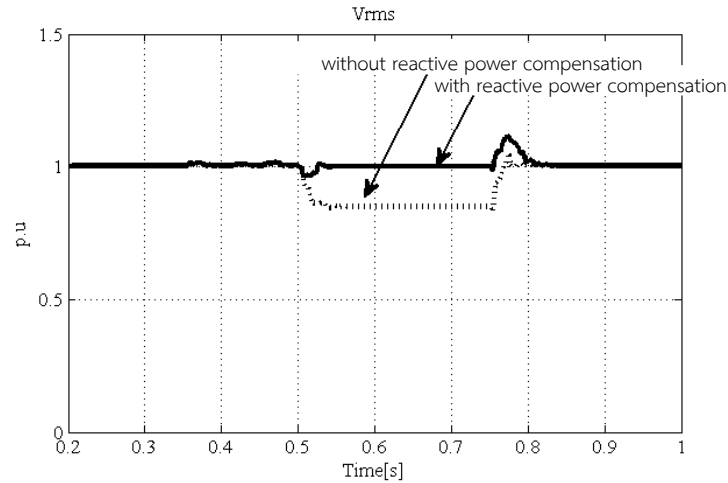


Figure 9 Voltage in case of with and without reactive power compensation

4. การทดสอบ

ระบบไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยเอสวีซีดัง Figure 10 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ $V_s = 100$ Vp สายส่งที่มีความต้านทาน 5Ω และตัวเหนี่ยวนำ 8 mH ความต้านทานโหลด 30Ω ตัวเหนี่ยวนำโหลดขนาด 100 mH ชุดเอสวีซีประกอบด้วยเอสซีอาร์ ตัวเก็บประจุขนาด $200 \mu\text{F}$ ตัวเหนี่ยวนำขนาด 50 mH โดยเซนเซอร์ V-sen 1 ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า V_s เลือกใช้เซนเซอร์แรงดัน Hall Sensor LV-25-P ผ่านวงจรปรับแต่งก่อนส่งสัญญาณเข้ามาสร้างสัญญาณเฟสล็อกภายในไมโครคอนโทรลเลอร์[13] ส่วนเซนเซอร์ V-sen 2 ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} และจะถูกแปลงให้เป็นค่าแรงดันประสิทธิผล (rms) ด้วยไอซี A0737 ก่อนส่งสัญญาณให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นหัวใจหลักในการประมวลผล[14] การกำเนิดสัญญาณมุมจุดชนวนเอสซีอาร์เกิดจากการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณเฟสล็อกกับสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} ในสภาวะที่ระบบ

ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าระบบควบคุมจะสั่งไมโครคอนโทรลเลอร์กำเนิดสัญญาณมุมจุดชนวนเอสซีอาร์ที่มุม 90 องศา ช่วงลูกคลื่นไซเคิลบวก และมุม 270 องศา ช่วงลูกคลื่นไซเคิลลบในสภาวะที่ระบบยังไม่มีกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเนื่องจากค่าตัวเหนี่ยวนำ X_L และตัวเก็บประจุ X_C ของเอสวีซีจะถูกปรับให้มีค่าใกล้เคียงกันทำให้กระแสไฟฟ้าตัวเหนี่ยวนำ I_L และกระแสไฟฟ้าตัวเก็บประจุ I_C เกิดการหักล้างกันตามคุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ทั้งสอง แต่เมื่อมีการต่อโหลดเข้าในระบบที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} เกิดแรงดันตก ณ จุดนี้ ทำให้ระบบควบคุมรับรู้และทำการปรับมุมจุดชนวนเอสซีอาร์เพื่อปรับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำให้ตรงกับความต้องการชดเชยกำลังไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} มีค่าคงที่ใกล้เคียงกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ ส่วนใน Figure 11 แสดงระบบไฟฟ้าอ้างอิงที่สร้างจริงเพื่อใช้สำหรับการทดสอบ

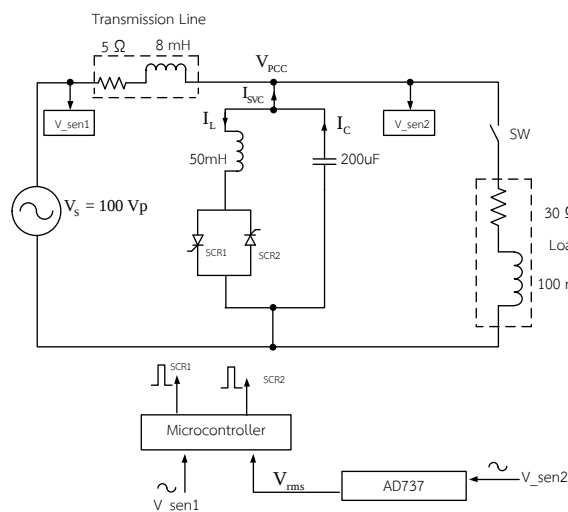


Figure 10 Reference system used in testing

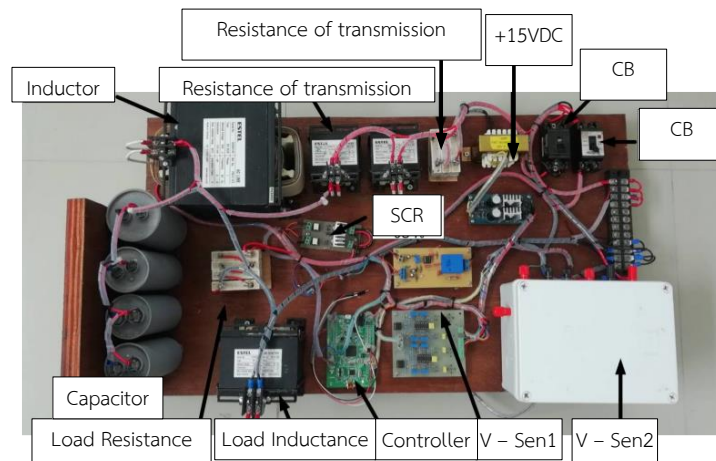


Figure 11 The actual reference system

4.1 การทดสอบระบบที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้าอ้างอิงที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า ผลจากการทดสอบดัง Figure 12 เมื่อทำการต่อโหลดเข้าในระบบ ด้วยการสับสวิตช์ SW ที่จุดเชื่อมต่อ V_{PCC} จะเกิดแรงดันไฟฟ้าตก ณ จุดนี้เห็นที่ดังกราฟเส้นบนที่เวลา A และแรงดันไฟฟ้าจะตก

อยู่ค่านี้นจนกระทั่งปลดโหลดออกที่เวลา B แรงดันจึงกลับมาเป็นปกติ ส่วนกราฟเส้นล่างแสดงกระแสโหลดที่ไหลในขณะที่มีการต่อโหลด จะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้าที่ไม่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า จะไม่สามารถรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อโหลดได้ขณะทำการต่อโหลดเข้าในระบบ

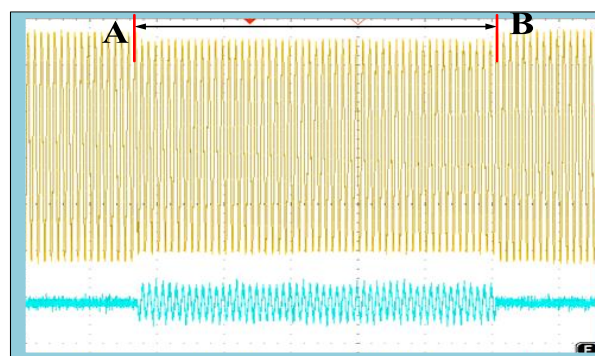


Figure 12 Voltage point of common coupling V_{PCC} and the load current without reactive power compensation

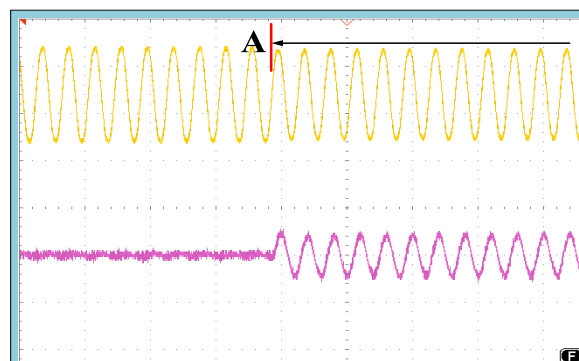


Figure 13 Voltage point of common coupling V_{PCC} and the load current with reactive power compensation

4.2 การทดสอบระบบที่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้า

การทดสอบกรณีที่ระบบมีการปรับปรุงด้วยรูปแบบที่นำเสนอผลการทดสอบดัง Figure 13 กราฟเส้นบนแสดงแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ V_{pcc} จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าถูกรักษาให้คงที่ไว้ได้ภายในเวลา 20 ms ถึงแม้ว่าจะมีการต่อโหลดเข้าระบบที่เวลา A ก็ตาม ส่วนกราฟเส้นล่างแสดงกระแสไฟฟ้าโหลดที่โหลดขณะที่มีการต่อโหลด จะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้าที่มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอสามารถรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อโหลดได้

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากระบบไฟฟ้าอ้างอิงที่ไม่มี และการชดเชยกำลังไฟฟ้าซึ่งผลการจำลองและทดสอบชุดสาธิตชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้วยเอสวีซี พบว่าในระบบที่ไม่มี การชดเชยกำลังไฟฟ้าจะเกิดแรงดันไฟฟ้าตก ณ จุดเชื่อมต่อโหลดเมื่อมีการจ่ายโหลดเนื่องจากกระแสโหลดทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของสายส่ง แต่เมื่อระบบมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าด้วยเอสวีซีเข้าไปในระบบเดียวกันนี้ ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกดังกล่าวจะถูกยกกระด้นขึ้นมาด้วยความรวดเร็วให้อยู่ในเกณฑ์ที่เรากำหนดไว้ ซึ่งมีความเร็วเพียงพอต่อแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน (IEEE Standard 1159 - 1995) ซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 10 ms – 1s

การตอบสนองของเอสวีซีต่อปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับ การควบคุมที่ออกแบบไว้บนพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ และจากผลการจำลอง และทดสอบแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงด้วยรูปแบบที่นำเสนอ มีข้อดีใน ความไวพอสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสำหรับแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะอย่างฉับพลันได้ และหากเปรียบเทียบระบบที่ใช้วิธีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เป็นแบบขั้น จะไม่สามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะอย่างฉับพลันได้

6. References

- [1] Kundur, P. 1994. **Power System Stability and Control**. McGraw-Hill Inc.
- [2] Dugan, R. C. and et al. 2002. **Electrical Power Systems Quality**. McGraw Hill.
- [3] IEEE std 1159-1995. 2001. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- [4] Krischonme, B. 2015. **Control Techniques of Voltage Stability**. Bangkok: Triple Education. (in Thai)
- [5] Song, Y. H. and Johns, A. T. 1999. **Flexible AC Transmission Systems (FACTS)**. IEE Power and Energy Series30. London, UK.
- [6] Singh, R. P. Bharadwaj, S. K and Singh, R. K. 2014. Flexible AC Transmission System Controllers: A State of Art. **International Journal of Electronic and Electrical Engineering**. 7(8): 843-850
- [7] Chaichan, H. 2008. **Electrical machines 2**. Bangkok: Thai-Nichi Institute of Technology. (in Thai)
- [8] Natthawut, T. 2014. **Power System Stability Enhancement Using Plus Damping Circuit**. M.Sc. Thesis, Rajamangala University. (in thai)
- [9] Mohan Mathur, R. and Rajiv Varma, K. 2002. **THYRISTOR-BASED FACTS CONTROLLERS FOR ELCTRICAL TRANSMISSION SYSTEMS**. IEEE Press New York.
- [10] The Math Works. 2004. **SimPowerSystems**. http://read.pudn.com/downloads152/ebook/667368/simulink_power_system.pdf Accessed 15 March 2016. (in Thai)
- [11] Basilio, J. C. and Matos, S. R. 2002. Design of PI and PID Controllers with Transient Performance Specification, **IEEE Transactions on Education**. 45(4): 364-370.
- [12] Astrom, K. and Hagglund, T. 1995. **PID Controllers**. United States of America.
- [13] Chanrit, T. (2014). Fundamental of Phase-locked Loop for Grid-Connected Inverter. **SWU Engineering Journal**. 9(2): 86-94
- [14] Aimagin. 2 5 6 1 .Basic Waijung and STM32F4. <http://aimagin.com/blog/บทความเกี่ยวกับwaijungและmicrocontrollers/?lang=th>. Accessed 15 March 2016. (in Thai)