

การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณชดเชยด้วยอุปกรณ์ปรับสภาพกำลังไฟฟ้า ของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟและตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ใช้หม้อแปลงแบบวี

A Comparative Study of Compensation Capacities of using Railway Power Conditioner and Steinmetz Compensator in Traction Substation with V/V Transformer

กฤษดา มงคลดี และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์*

Kritsada Mongkoldee and Thanatchai Kulworawanichpong*

Received: 6 March 2020, Revised: 28 June 2020, Accepted: 29 July 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบพิกัดการชดเชยในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟที่ใช้หม้อแปลงขับเคลื่อนแบบวีด้วยอุปกรณ์ปรับสภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ (Railway Power Conditioner: RPC) และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์เพื่อแก้ปัญหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังในระบบจ่ายไฟฟ้า และนำเสนอแบบจำลองและวิธีการคำนวณหาพิกัดที่เหมาะสมที่สุดของตัวชดเชยทั้งสองชนิด ทดสอบวิธีการคำนวณที่นำเสนอโดยใช้การจำลองผลการศึกษานี้ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่มีสถานะโหลดเลวร้ายที่สุด ผลการจำลองในคอมพิวเตอร์พบว่า การชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้พิกัดชดเชยเหมาะสมที่สุดน้อยกว่าการชดเชยด้วย RPC รวมถึงสามารถรักษาระดับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าได้ดีกว่า RPC ภายใต้เป้าหมายการชดเชยเดียวกันที่ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 2% และตัวประกอบกำลังขั้นต่ำเท่ากับ 0.95 โดยการชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้พิกัดเหมาะสมที่สุดน้อยกว่าการชดเชยด้วย RPC เฉลี่ยประมาณร้อยละ 30 ดังนั้น จึงสามารถติดตั้งตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ที่มีพิกัดน้อยกว่า และอนุมานจากขนาดตัวชดเชยได้ว่าจะใช้เงินลงทุนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาผลกระทบอื่นต่อราคาตัวชดเชยนอกเหนือจากขนาดพิกัด

คำสำคัญ: อุปกรณ์ปรับสภาพกำลังไฟฟ้า, หลักการสไตน์เมทซ์, พิกัดชดเชยเหมาะสมที่สุด, หม้อแปลงแบบวี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111, University Avenue Road, Suranaree, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): thanatchai@gmail.com

ABSTRACT

This paper presents the comparative study of using two different compensators in a railway traction substation with a V/V transformer to alleviate voltage unbalance and low power factor in a railway power supply system: railway power conditioner (RPC) and Steinmetz compensator. The paper also introduces mathematical models and a calculation method for searching optimal rating of both compensators. One computer simulation study case under the worst case of loading condition was used to validate the proposed models and method. The simulation results showed that the Steinmetz compensator had approximately 30 percent less optimal capacity than that of RPC and had better capability of substation voltage regulation under the same compensation target, voltage unbalance factor of less than 2%, and power factor of greater or equal to 0.95. Consequently, the installation of Steinmetz compensator could result in less compensator cost, with a capacity solely taken into consideration.

Key words: railway power conditioner, steinmetz theory, optimal compensation capacity, V/V transformer

บทนำ

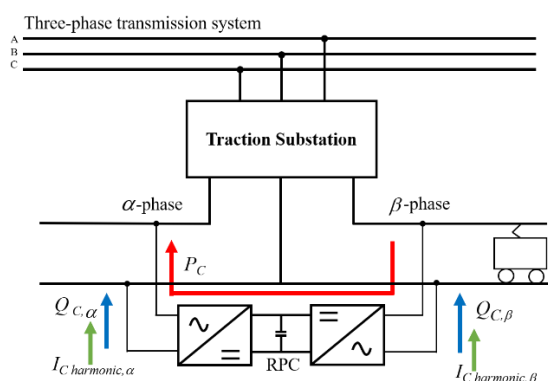
เนื่องด้วยปัญหามลพิษ มนุษย์จึงหันมาใช้วิธีการเดินทางที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด หนึ่งในนั้นคือ การเดินทางด้วยรถไฟไฟฟ้า (electrified railway) (Patra *et al.*, 2010) ประเทศพัฒนาแล้วหรือกำลังพัฒนาหลายประเทศมีแผนงานและโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้างานหลายสายในปัจจุบัน สิ่งที่ตามมาคือปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นและคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ลดลง ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่เคยเกิดขึ้นในต่างประเทศ ได้แก่ ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากโหลดหนึ่งเฟสของรถไฟไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำเกินเกณฑ์ และฮาร์โมนิกส์ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์แปลงผันทางไฟฟ้าต่างๆ ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า เช่น อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อน เป็นต้น (Ladoux *et al.*, 2014; Gazafrudi *et al.*, 2015; Yu-quan *et al.*, 2011; Capasso, 1998; Matta and Kumar, 2014) เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จึงมีการคิดค้นอุปกรณ์ชดเชยอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ในระบบจ่ายไฟฟ้าของ

รถไฟไฟฟ้า ได้แก่ ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบสถิต (Static VAR Compensator: SVC) ตัวชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต (Static Synchronous Compensator: STATCOM) อุปกรณ์ปรับสภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟไฟฟ้า (Railway Power Conditioner: RPC) เป็นต้น (Singh *et al.*, 1999) จากตัวอย่างที่กล่าวมา RPC เป็นอุปกรณ์ชดเชยที่ได้รับการพัฒนาและเสนอแนวคิดโดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2536 (Mochinaga *et al.*, 1993) และถูกพัฒนามาหลายรูปแบบและต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ซึ่งทำให้ RPC เป็นอุปกรณ์ชดเชยที่สามารถแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่กล่าวมาได้ทั้งหมดภายในอุปกรณ์ตัวเดียว นอกเหนือจากการชดเชยด้วยตัวชดเชยที่กล่าวมา หลักการชดเชยสไตน์เมทซ์ (Steinmetz) ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

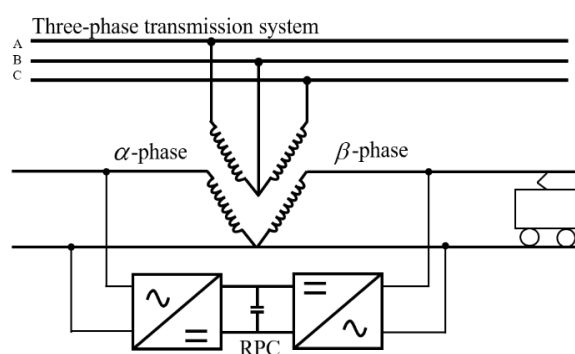
โครงสร้างของ RPC ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว ที่เชื่อมต่อกันด้วยตัวเก็บประจุกระแสตรง คอนเวอร์เตอร์ตัวหนึ่งเชื่อมต่อกับเฟสจ่ายไฟฟ้า

หนึ่งของหม้อแปลงขับเคลื่อน ส่วนคอนเวอร์เตอร์อีกตัวหนึ่งเชื่อมต่อกับอีกเฟสหนึ่งที่เหลือของหม้อแปลงขับเคลื่อนฝั่งทุติยภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 1 RPC ทำหน้าที่ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าระหว่างสองเฟสที่จ่ายไฟฟ้าให้รถไฟเพื่อให้ทั้งสองเฟสรับโหลดในปริมาณที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ในขณะเดียวกัน คอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวยังสามารถชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟและฮาร์โมนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จุดประสงค์หลักของการใช้ RPC คือการแก้ปัญหาแรงดันไม่สมดุลในฝั่งสามเฟสที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ดังนั้นหน้าที่หลักของ RPC คือการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างเฟสที่จ่ายไฟให้รถไฟ หน้าที่รองลงมาคือการชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟและฮาร์โมนิกส์ตามลำดับ โดยจะใช้ฟังก์ชันที่หลีกเลี่ยงการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงมาชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟและฮาร์โมนิกส์ นอกจากการทำงานดังกล่าวมาแล้ว ในประเทศญี่ปุ่น RPC ยังสามารถทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟเพียงอย่างเดียว หรือรักษาแรงดันจ่ายไฟฟ้าให้คงที่ได้ เช่นเดียวกับ SVC เรียกการทำงานแบบนี้ว่าโหมด SVC (Ohmi and Yoshii, 2010) จะเห็นได้ว่า RPC มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการแก้ปัญหาคุณภาพ

กำลังไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟ โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่นที่มีการเปลี่ยนจากการใช้ SVC มาใช้ RPC แทนในจำนวนมากขึ้นในระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้ายันคันเซนสายโทไกโด (Moriyama *et al.*, 2019) เนื่องจากต้นทุนในการผลิตและติดตั้ง RPC ค่อนข้างสูงมาก จึงมีการคิดค้นวิธีการต่างๆ เพื่อลดขนาดของ RPC หรือตัวชดเชยอื่นๆ วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การนำหลักการวางจอร์สไคน์เมทซ์มาใช้ชดเชยในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ (Abrahamsson *et al.*, 2017) ยกตัวอย่างงานวิจัยที่ได้ศึกษาการชดเชยร่วมกันของ RPC ในสถานีไฟฟ้าหลายสถานีที่อยู่ติดกันโดยใช้หลักการสไคน์เมทซ์ วิธีการดังกล่าวสามารถลดขนาดของตัวชดเชยได้ถึง 83.33% เมื่อเทียบกับการชดเชยที่ใช้ RPC แบบทั่วไป (Jafarikaleybar *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตาม วิธีการชดเชยนี้ทำได้ยากในสถานการณ์จริง เนื่องจากต้องอาศัยสถานีไฟฟ้าหลายสถานีชดเชยร่วมกันรวมถึงต้องมีระบบควบคุมและสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้า จึงไม่เหมาะสมกับระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟระยะสั้นหรือระบบจ่ายไฟฟ้าที่ใช้สถานีไฟฟ้าไม่มาก



ภาพที่ 1 การเชื่อมต่อและการชดเชย RPC ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน



ภาพที่ 2 การเชื่อมต่อ RPC กับหม้อแปลงแบบวี

บทความนี้จึงนำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างการชดเชยโดยใช้ RPC และการชดเชยโดยใช้หลักการสไลด์เมทซ์ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนหนึ่งสถานีที่ใช้หม้อแปลงขับเคลื่อนแบบวี (V/V transformer) เพื่อศึกษาความแตกต่างของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ชดเชย และหาปริมาณกำลังไฟฟ้าชดเชยที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ภายใต้เงื่อนไขคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่กำหนด กล่าวคือตัวชดเชยไม่จำเป็นต้องแก้ปัญหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังได้อย่างสมบูรณ์ แต่ชดเชยเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและใช้ปริมาณชดเชยน้อยที่สุด (partial compensation) ข้อแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างการชดเชยสองวิธี คือ การชดเชยด้วย RPC ใช้คอนเวอร์เตอร์สองตัว ส่วนการชดเชยด้วยหลักการ สไลด์เมทซ์ต้องใช้คอนเวอร์เตอร์สามตัว สมมติฐานของการศึกษาคือว่า ขนาดพิกัดโดยรวมของตัวชดเชยด้วยหลักการสไลด์เมทซ์จะมีค่าน้อยกว่าพิกัดโดยรวมของ RPC

การชดเชยในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า

การชดเชยในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ามีหลายรูปแบบ ทั้งการชดเชยในฝั่งปฐมภูมิของสถานีไฟฟ้าและการชดเชยในฝั่งทุติยภูมิ บทความนี้มุ่งประเด็นไปที่การชดเชยในฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบวี 2 แบบ ได้แก่ การชดเชยโดยใช้ RPC และการชดเชยโดยอาศัยหลักการสไลด์เมทซ์ดังต่อไปนี้

1. การชดเชยด้วย RPC

$$P_C = \frac{P_{L\alpha} - P_{L\beta}}{2}$$

$$Q_{Ca} = Q_{La} - (P_{La} - P_C) \tan(\pi/6)$$

$$Q_{Cb} = Q_{Lb} + (P_{Lb} + P_C) \tan(\pi/6)$$

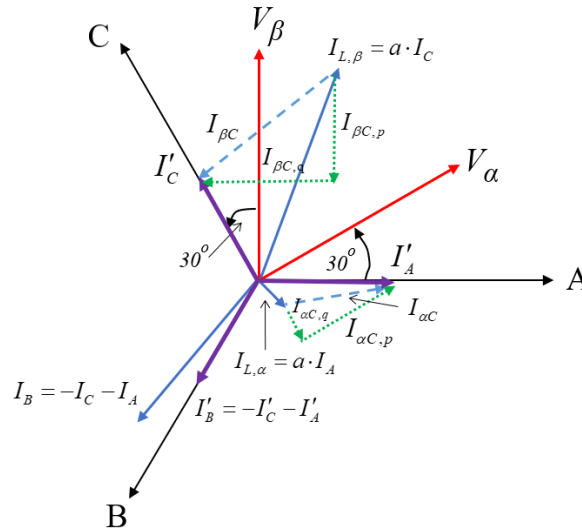
เมื่อ P_C คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ถ่ายโอนระหว่างเฟส α และ β

ลักษณะการติดตั้ง RPC ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ใช้หม้อแปลงแบบวี แสดงดังภาพที่ 2 สถานีไฟฟ้าหนึ่งสถานีทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าทั้งสองทิศทางโดยใช้ไฟฟ้าต่างเฟสกัน จึงกำหนดให้เฟสหนึ่งเรียกว่าเฟส α และอีกเฟสหนึ่งเรียกว่าเฟส β หลักการพื้นฐานของการชดเชยด้วย RPC ประกอบด้วย (1) การปรับสมดุลโหลดกำลังไฟฟ้าจริงโดยการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างเฟส α และ β (2) การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟซึ่งสามารถใช้คอนเวอร์เตอร์แต่ละเฟสแยกกันชดเชยได้อย่างอิสระ (3) การชดเชยฮาร์โมนิกส์ซึ่งสามารถแยกชดเชยในแต่ละเฟสได้เช่นกัน เนื่องจากหม้อแปลงแบบวีไม่ใช่หม้อแปลงชนิดสมดุล (balancing transformer) โดยธรรมชาติ เพียงแค่การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างเฟสจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าและการชดเชยโหลดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจึงไม่เพียงพอต่อการสร้างความสมดุลแรงดันไฟฟ้าสามเฟส หรือกล่าวได้ว่ามุมเฟสของเฟสจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าไม่ตรงกับมุมเฟสของแรงดันต่อเฟสในฝั่งสามเฟสอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น จึงต้องมีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพิ่มเติม ดูแผนภาพเฟสประกอบในภาพที่ 3 และปริมาณการชดเชยทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟทั้งสองเฟสแสดงดังสมการที่ (1) (2) และ (3) ตามลำดับ (Joseph and Thomas, 2014) ปริมาณการชดเชยในสมการดังกล่าวเป็นปริมาณชดเชยเต็มพิกัด (full compensation capacity) ซึ่งใช้เพื่อชดเชยให้ตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งและความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์

$Q_{C\alpha}, Q_{C\beta}$ คือ กำลังไฟฟัรืแอกทีฟชดเชยสำหรับเฟส α และ β

$P_{L\alpha}, P_{L\beta}$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้าจริงเฟส α และ β

$Q_{L\alpha}, Q_{L\beta}$ คือ โหลดกำลังไฟฟัรืแอกทีฟเฟส α และ β



ภาพที่ 3 แผนภาพเฟสของการชดเชยด้วย RPC

2. การชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์

หลักการชดเชยด้วยวงจรสไตน์เมทซ์ในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงแบบวีอาสัยการชดเชยครบทั้งสามเฟสในฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบวี ซึ่งแตกต่างกับการชดเชยด้วย RPC ที่ชดเชยเฉพาะสองเฟสที่จ่ายไฟฟ้าให้รถไฟ และอาศัยการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างสองเฟสนั้น การชดเชยแบบสไตน์เมทซ์อาศัยเฉพาะกำลังไฟฟัรืแอกทีฟในการชดเชยทั้งสามเฟส ภาพที่ 4 และ 5 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการชดเชยกรณี

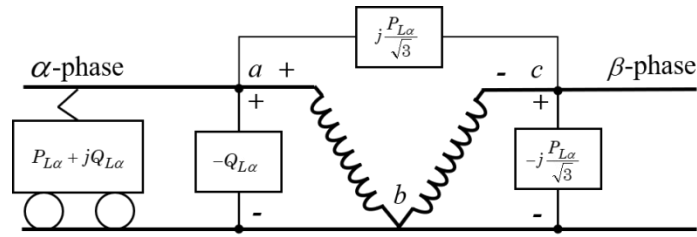
โหลดรถไฟอยู่เฉพาะในเฟส α และ β ตามลำดับจากแผนภาพนี้ สามารถคำนวณหาปริมาณการชดเชยของแต่ละเฟสได้ดังสมการที่ (4) - (6) (Abrahamsson *et al.*, 2017) เครื่องหมายลบในสมการหมายถึงกำลังไฟฟัรืแอกทีฟเชิงเก็บประจุ (capacitive reactive power) ในการศึกษาไม่ได้กำหนดชนิดของตัวชดเชยที่ติดตั้งในแต่ละเฟส ตัวชดเชยอาจจะเป็นได้ทั้งอุปกรณ์แบบแอกทีฟและพาสซีฟ แต่จะให้ความสนใจเพียงปริมาณการชดเชยที่จำเป็นต้องใช้เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าเท่านั้น

$$Q_{S,C\alpha} = -Q_{L\alpha} + \frac{P_{L\beta}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

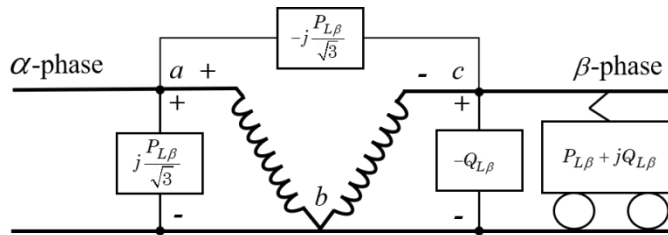
$$Q_{S,C\beta} = -Q_{L\beta} - \frac{P_{L\alpha}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

$$Q_{S,Cac} = \frac{P_{L\alpha} - P_{L\beta}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

เมื่อ $Q_{S,C\alpha}, Q_{S,C\beta}, Q_{S,Cac}$ คือ กำลังไฟฟัรืแอกทีฟชดเชยในเฟส α เฟส β และเฟส ac ตามลำดับ



ภาพที่ 4 การชดเชยแบบสไตน์เมทซ์ของโหลดเฟส α



ภาพที่ 5 การชดเชยแบบสไตน์เมทซ์ของโหลดเฟส β

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แบบจำลองและวิธีการคำนวณ

องค์ประกอบของระบบจ่ายไฟฟ้าในการศึกษานี้ประกอบด้วยหม้อแปลงขับเคลื่อนซึ่งในที่นี้คือหม้อแปลงแบบวี อุปกรณ์ชดเชย และโหลดรถไฟฟ้า แผนภาพแบบจำลองของระบบแสดงดังภาพที่ 6 หม้อแปลงแบบวีใช้แบบจำลองอย่างง่ายของหม้อแปลงหนึ่งเฟสที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีแดนซ์รั่วไหล (leakage impedance: Z_r) ทั้งเฟส α และ β การชดเชยของตัวชดเชยทั้ง RPC และตัวชดเชยที่ใช้หลักการสไตน์เมทซ์แทนด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้าหรือแบบจำลองกำลังไฟฟ้าคงที่ ในส่วนโหลดรถไฟฟ้าใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าคงที่เช่นเดียวกัน โดยโหลดรถไฟฟ้าและตัวชดเชยเชื่อมต่อโดยตรงกับหม้อแปลงแบบวี แบบจำลองในส่วนจุดเชื่อมต่อรับไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้าสามเฟสใช้อิมพีแดนซ์แทนพิกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบไฟฟ้าสามเฟส (grid's short-circuit impedance:

Z_{sc}) จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าพื้นฐาน จะได้สมการที่ใช้คำนวณแบบจำลองที่กล่าวมาดังสมการต่อไปนี สมการที่ (7) แสดงการคำนวณแรงดันเฟส ณ จุดเชื่อมต่อ (Point of Common Coupling: PCC) สมการที่ (8) แสดงการคำนวณกระแสโหลดและกระแสชดเชยเฟส ac ของตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ สมการที่ (9) แสดงการคำนวณแรงดันระหว่างเฟสฝั่งปฐมภูมิที่ได้จากวงจรสมมูลหม้อแปลง สมการที่ (10) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิ และสมการที่ (11) แสดงความสัมพันธ์ของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อระหว่างหม้อแปลง โหลด และตัวชดเชย วิธีการคำนวณนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งการชดเชยด้วย RPC และการชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ สำหรับการชดเชยด้วย RPC สามารถกำหนดให้กำลังไฟฟ้าชดเชยของเฟส ac ในฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบวีเป็นศูนย์

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{sc} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{sc} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$I_{L\alpha} = \left(\frac{S_{L\alpha}}{V_{L\alpha}} \right)^*, I_{L\beta} = \left(\frac{S_{L\beta}}{V_{L\beta}} \right)^*, I_{ac} = \left(\frac{S_{ac}}{V_{ac}} \right)^* \quad (8)$$

$$v_{AB} = a(V_{L\alpha} + I_{s\alpha}Z_T), v_{CB} = a(V_{L\beta} + I_{s\beta}Z_T) \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$I_{s\alpha} = I_{L\alpha} + I_{ac}, I_{s\beta} = I_{L\beta} - I_{ac} \quad (11)$$

เนื่องจากระบบสมการของแบบจำลองที่นำเสนอไม่เป็นแบบเชิงเส้น จึงใช้การคำนวณแบบวนรอบ (iterative calculation) ซึ่งแสดงขั้นตอนกระบวนการคำนวณในภาพที่ 7 ประเด็นหลักของการคำนวณแบบวนรอบ คือ การปรับปรุงค่าแรงดันสั่งป้อนภูมิโดยการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างเฟสสั่งป้อนภูมิของหม้อแปลง 2 ค่าที่คำนวณจากแบบจำลองของหม้อแปลงสั่งป้อนภูมิ (สมการที่ (9)) และคำนวณจากระบบจ่ายไฟฟ้าสามเฟส (สมการที่ (7)) เมื่อแรงดันทั้งสองค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันตามเกณฑ์ที่กำหนด แสดงว่าการคำนวณจากชุดสมการที่กล่าวมาทั้งหมดให้ผลลัพธ์ที่ตรงกัน จึงได้ผลเฉลยของการคำนวณ ผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้จากการคำนวณประกอบด้วยตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า (Voltage Unbalance Factor: VUF) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างขนาดของแรงดันลำดับลบต่อขนาดแรงดันลำดับบวกในเฟสสามเฟส ($|V_-|/|V_+|$) ตัวประกอบกำลังของแต่ละเฟส โหลดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทั้งสั่งป้อนภูมิและทุติยภูมิ รวมถึงแรงดันและกระแสโหลดรถไฟฟ้

2. การจำลองผลของกรณีศึกษา

การจำลองผลในบทความนี้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ชดเชยด้วย RPC และระบบที่ชดเชยด้วยหลักการสโตนเมทซ์ แต่ละระบบจะได้รับการทดสอบภายใต้สภาพโหลดที่ก่อให้เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดและต้องการปริมาณการชดเชยมากที่สุดเช่นกัน โดยกำหนดให้ โหลด

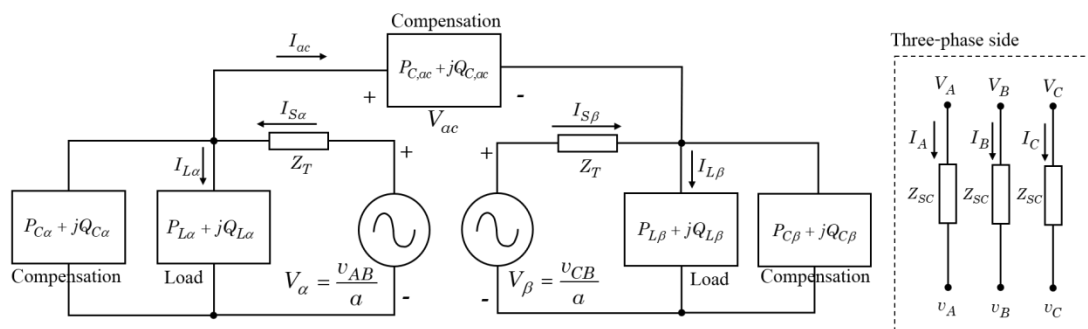
กำลังไฟฟ้าจริงของเฟส β เท่ากับ 15 MW โดยอ้างอิงจากการกระจายโหลดในสถานีไฟฟ้าของงานวิจัยในอดีต (Hu *et al.*, 2017) ในขณะที่เฟส α ไม่มีโหลด และตัวประกอบกำลังของโหลดเฟส β แบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ 0.80 0.85 และ 0.90 ซึ่งกำหนดจากระบบจ่ายไฟฟ้าที่มีตัวประกอบกำลังของโหลดรถไฟฟ้ต่ำ โดยเฉพาะการใช้ตัวจรจักรแบบ AC-DC (Hu *et al.*, 2017) พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าและหม้อแปลงแบบวีแสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีกำหนดมาตรฐานคุณภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ในปัจจุบัน จึงกำหนดเป้าหมายของการชดเชยในการศึกษานี้ให้ VUF มีค่าไม่เกิน 2% และตัวประกอบกำลังที่ PCC มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.90 ตามมาตรฐานประจำชาติสาธารณรัฐประชาชนจีน GB/T15543-2008 ในส่วนเป้าหมายการชดเชยตัวประกอบกำลัง (targeted power factor: PF*) เลือกตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.95 เพื่อให้ได้คุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ดีขึ้นและเพื่อกรณีฉุกเฉินที่ค่าตัวประกอบกำลังอาจลดลงต่ำกว่า 0.90 นอกจากนี้ ถ้าเลือกเป้าหมายตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.95 จะส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณการชดเชยมากขึ้นเกินความจำเป็น (Hu *et al.*, 2017)

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดถูกนำมาใช้หาปริมาณชดเชยน้อยที่สุดที่เป็นไปได้เพื่อให้ได้เป้าหมายคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่กำหนด ในบทความนี้เลือกใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm

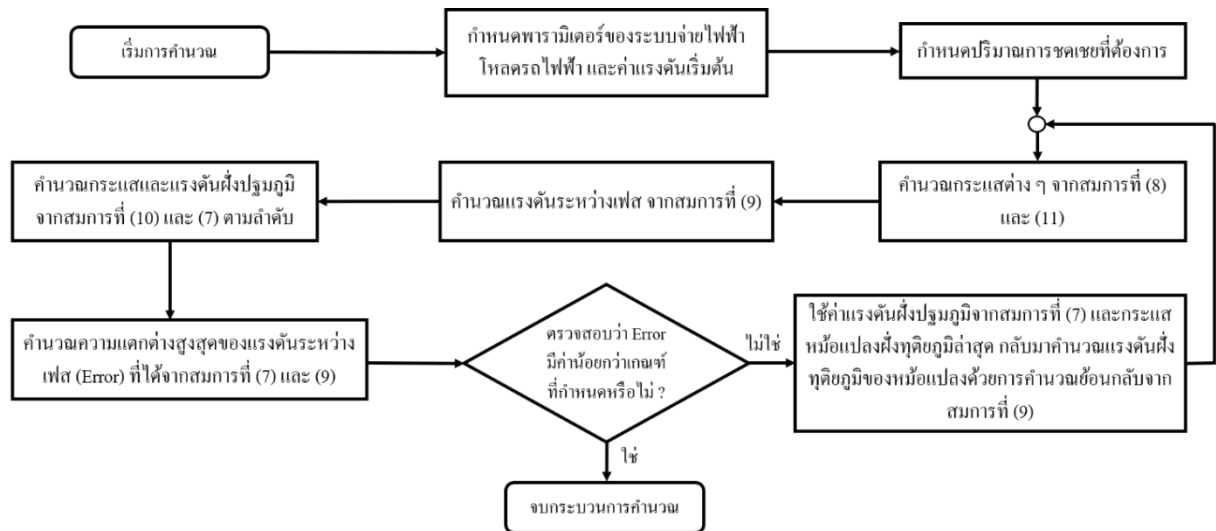
Optimisation: PSO) ซึ่งใช้ฟังก์ชันการคำนวณในโปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) ด้วยเหตุที่วิธีดังกล่าวสามารถหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่ต่อเนื่องได้ดี ฟังก์ชันที่ใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด คือ กระบวนการคำนวณในภาพที่ 7 ที่มีอินพุตเป็นปริมาณชดเชยซึ่งคิดเป็นร้อยละเทียบกับปริมาณชดเชยแบบสมบูรณ์ และมีเอาต์พุตหรือค่าของฟังก์ชัน (function value) เป็นปริมาณการชดเชยที่คำนวณได้รวมกับค่าโทษ (penalty factor) ในกรณีเป้าหมายไม่เป็นไปตามที่กำหนด ดังแสดงในสมการที่ (12) เมื่อ $S_{com,0}$ คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าชดเชยก่อนปรับเพิ่มค่าโทษ PF_A , PF_B และ PF_C คือ ตัวประกอบกำลังแต่ละเฟส γ_1 คือ ตัวประกอบที่ใช้ปรับค่าโทษของตัวประกอบกำลัง และ γ_2 คือ ตัวประกอบที่ใช้ปรับค่าโทษของ VUF ($\gamma_1 = \gamma_2 = 10^6$ ในการศึกษา)

ค่าโทษมีทั้งหมด 4 พจน์ คือ ค่าโทษของตัวประกอบกำลังสามค่าและค่าโทษของ VUF ค่าโทษแต่ละพจน์จะปรากฏก็ต่อเมื่อการชดเชยไม่เป็นไปตามเป้าหมายเท่านั้น ($PF < PF^*$ และ $VUF > 2\%$) เพื่อปรับให้ค่าของฟังก์ชันสูงขึ้นและทำให้การคำนวณนั้นไม่เป็นคำตอบของการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในส่วนการคำนวณพิกัดโดยรวมของตัวชดเชย พิกัดของ RPC จะถูกกำหนดด้วยขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ชดเชยมากที่สุด กล่าวคือพิกัดของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวของ RPC ต้องมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น ขนาดรวมของ RPC จะเท่ากับ $2 \times \max(S_{converter1}, S_{converter2})$ สำหรับตัวชดเชยด้วยหลักการสโตนเมทซ์ พิกัดโดยรวมเท่ากับผลรวมพิกัดของแต่ละคอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันได้

$$Function\ value = S_{com,0} + \gamma_1 \left[(PF_A - PF^*)^2 + (PF_B - PF^*)^2 + (PF_C - PF^*)^2 \right] + \gamma_2 (VUF - VUF^*)^2 \quad (12)$$



ภาพที่ 6 แบบจำลองการคำนวณการชดเชยของสถานีไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงแบบวี



ภาพที่ 7 แผนภาพลำดับการทำงานของการคำนวณแบบวนรอบ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ระบบไฟฟ้า (Hu *et al.*, 2017)

ระดับแรงดันระบบไฟฟ้าสามเฟส	110 kV
พิกัดกำลังหม้อแปลงแบบวี	20 MVA (10 MVA ต่อเฟส)
พิกัดลัดวงจรของระบบจ่ายไฟฟ้า	486 MVA
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (Z_T)	10% (ต่อเฟส)
อัตราส่วนหม้อแปลง (a)	110 kV: 27.5 kV

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการจำลองที่ได้ประกอบด้วยปริมาณการชดเชยของ RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ที่คิดเป็นร้อยละเทียบกับปริมาณชดเชยแบบสมบูรณ์ (full compensation) ดังแสดงในตารางที่ 2 พิกัดรวมของ RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ ดังแสดงในตารางที่ 3 ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังก่อนและหลังชดเชย ดังแสดงในตารางที่ 4 - 6 คุณภาพกำลังไฟฟ้าก่อนการชดเชยต่ำกว่ามาตรฐาน GB/T15543-2008 (Hu *et al.*, 2017) อย่างชัดเจน ค่า VUF เกิน 2% ตัวประกอบกำลังเฟส C มีค่าต่ำถึง 0.127 ในกรณีที่ 1 ส่วนของเฟส A มีค่าใกล้เคียง

เนื่องจากไม่มีโหลดในเฟสนี้ นอกจากนี้แรงดันตกในเฟสที่มีโหลด (V_β) มีค่ามากถึง 25.4% ในกรณีที่ 1

ผลการจำลองพบว่า หลังจากการชดเชย VUF มีค่าน้อยกว่า 2% ทุกกรณี อย่างไรก็ตามความไม่สมดุลไม่ลดลงทั้งหมดเนื่องจากการใช้การชดเชยบางส่วน (partial compensation) ตัวประกอบกำลังเฟส C ได้รับการชดเชยจนมีค่าตามเป้าหมาย 0.95 ในทุกกรณีของทั้ง RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ แรงดันที่สถานีไฟฟ้าก็ได้รับการปรับปรุงจากการชดเชยเช่นเดียวกัน แรงดันเฟส β มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่านอมิแนล (nominal voltage: 27.5 kV) เฉลี่ยประมาณ 2% ในแต่ละกรณี ส่วนแรงดันเฟส α สำหรับการชดเชยด้วย RPC มีค่าต่ำลงจากค่านอมิแนลประมาณ 3% เนื่องจาก RPC ต้องจ่ายโณกำลังไฟฟ้าจริงจากเฟส α ไปยังเฟส β ซึ่งเทียบเท่า

กับการจ่ายโหลดในปริมาณหนึ่ง จึงส่งผลให้เกิดแรงดันตกในเฟสนี้ ถึงกระนั้นก็ตามเฟส α ไม่มีการจ่ายโหลด จึงถือว่าไม่ใช่ปัญหาในกรณีนี้ ดังนั้น การชดเชยแบบสไตน์เมทซ์สามารถรักษาแรงดันที่หม้อแปลงได้ดีกว่าการชดเชยด้วย RPC ปริมาณร้อยละการชดเชยในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดสามารถหาปริมาณการชดเชยที่จำเป็นและน้อยที่สุดตามเงื่อนไขคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่กำหนดได้ ตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้ปริมาณชดเชยของเฟส α เฟส β และเฟส γ เท่ากับร้อยละ 41.76 100 และ 68.06 เทียบกับปริมาณชดเชยแบบสมบูรณ์เท่ากันทั้งสามกรณี ตามลำดับ และให้ผลลัพธ์ VUF หลังการชดเชยเท่ากับ 1.311% และตัวประกอบกำลังหลังการชดเชยเท่ากับ $-0.95 (PF_A)$ - $0.966 (PF_B)$ $0.95 (PF_C)$ เท่ากันทั้งสามกรณีเช่นกัน ในส่วนของ RPC ปริมาณชดเชยในเฟส β คิดเป็นประมาณร้อยละ 80 - 85 ของปริมาณชดเชยแบบสมบูรณ์ ซึ่งเป็นปริมาณชดเชยที่ทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายพอดี ค่าร้อยละของปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงที่ถ่ายโอนระหว่างเฟส (P_C) ลดลงเมื่อตัวประกอบกำลังโหลดมีค่ามากขึ้น ในทำนองเดียวกัน ค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ทำให้พิกัดรวมของ RPC น้อยที่สุดเพื่อให้ได้คุณภาพกำลังไฟฟ้าตามเป้าหมาย ค่า VUF จากการชดเชยด้วย RPC อยู่ในช่วง 0.66% - 1.15% และตัวประกอบกำลังหลังการชดเชยเท่ากับ $0.99 (PF_A) \pm 0.99 (PF_B)$ $0.95 (PF_C)$ พิกัดรวมของตัวชดเชยทั้งสองจากการชดเชยด้วยปริมาณชดเชยที่เหมาะสมที่สุดมีค่าน้อยกว่าค่าจากการชดเชยแบบสมบูรณ์อย่างชัดเจน ยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นว่าพิกัดเหมาะสมที่สุดของตัวชดเชยด้วยหลักการส

ไตน์เมทซ์มีค่าน้อยกว่าพิกัดเหมาะสมที่สุดของ RPC 32% 30.15% และ 27.68% ตามลำดับกรณี เมื่อเทียบกับขนาดของ RPC ที่ชดเชยร่วมกันในสถานีไฟฟ้าหลายสถานีที่สามารถลดขนาดตัวชดเชยได้มากถึง 83.33% (Jafarikaleybar *et al.*, 2015) ยิ่งถือว่าลดลงได้น้อยกว่า เพราะว่าการชดเชยที่นำเสนอในบทความนี้เป็นการชดเชยในสถานีไฟฟ้าเพียงหนึ่งสถานีซึ่งจะไม่สามารถอาศัยประโยชน์จากตัวชดเชยจากสถานีอื่นได้ ดังนั้น การชดเชยแบบสไตน์เมทซ์ที่นำเสนอจึงเหมาะกับระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่ต้องการการชดเชยแยกเป็นรายสถานี หรือระบบจ่ายไฟฟ้าที่รับไฟฟ้าสามเฟสมาจากคนละแหล่งกัน

จากการจำลองผลได้ผลสรุปชัดเจนว่า การติดตั้งตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้พิกัดที่เหมาะสมที่สุดน้อยกว่าการติดตั้ง RPC และรักษาระดับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าได้ดีกว่า จึงอนุมานจากพิกัดได้ว่าใช้เงินลงทุนน้อยกว่า โดยจากงานวิจัยในอดีตพบว่า ราคาคอนเวอร์เตอร์ของ RPC เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 60 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อกิโลวัตต์แอมแปร์ (Ghassemi *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตามตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้คอนเวอร์เตอร์มากกว่า RPC หนึ่งคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งหมายความว่าอาจใช้พื้นที่ติดตั้งมากกว่าและมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนมากกว่า บทความนี้ไม่ได้ศึกษาผลกระทบดังกล่าวต่อราคาของตัวชดเชย อีกหนึ่งสาเหตุที่พิกัดของ RPC มากกว่า คือ การเลือกพิกัด RPC ถูกกำหนดด้วยคอนเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดมากกว่า ในขณะที่พิกัดของแต่ละคอนเวอร์เตอร์ของตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ ไม่จำเป็นต้องมีขนาดเท่ากันได้

ตารางที่ 2 ปริมาณร้อยละการชดเชยเทียบกับปริมาณการชดเชยแบบสมบูรณ์

ตัวประกอบกำลังโหลด	ปริมาณชดเชยของ RPC			ปริมาณชดเชยด้วยหลักการสไต้นเมทซ์		
	P_C (%)	$Q_{C\alpha}$ (%)	$Q_{C\beta}$ (%)	$Q_{S,C\alpha}$ (%)	$Q_{S,C\beta}$ (%)	$Q_{S,Cac}$ (%)
0.80 (กรณีที่ 1)	77.79	100*	85.28	41.76	100	68.06
0.85 (กรณีที่ 2)	70.17	100*	83.07	41.76	100	68.06
0.90 (กรณีที่ 3)	61.75	100*	80.24	41.76	100	68.06

หมายเหตุ *ปริมาณชดเชยเป็นศูนย์เนื่องจากไม่มีโหลดในเฟส α

ตารางที่ 3 พิกัดของ RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไต้นเมทซ์

กรณี	พิกัดของ RPC (MVA)		พิกัดของตัวชดเชยด้วยหลักการสไต้นเมทซ์ (MVA)	
	Full compensation	Optimal compensation	Full compensation	Optimal compensation
1	34.583	30.532	28.570	20.761
2	31.108	26.928	26.617	18.808
3	27.618	23.196	24.585	16.776

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์อื่นๆ ก่อนการชดเชย

กรณี	VUF (%)	PF_A	PF_B	PF_C	V_α (kV)	V_β (kV)
1	5.392	0.985	0.948	0.127	27.700	20.516
2	4.690	0.997	0.975	0.241	27.804	22.012
3	4.154	-0.999	0.994	0.361	27.895	23.299

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์อื่นๆ หลังการชดเชยด้วย RPC

กรณี	VUF (%)	PF_A	PF_B	PF_C	V_α (kV)	V_β (kV)
1	0.668	0.998	-0.999	0.950	26.580	27.971
2	0.892	0.998	0.994	0.950	26.741	28.071
3	1.155	0.998	-0.977	0.950	26.946	28.183

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์อื่นๆ หลังการชดเชยด้วยหลักการสไต้นเมทซ์

กรณี	VUF (%)	PF_A	PF_B	PF_C	V_α (kV)	V_β (kV)
1	1.311	-0.950	-0.966	0.950	27.641	28.123
2	1.311	-0.950	-0.966	0.950	27.641	28.123
3	1.311	-0.950	-0.966	0.950	27.641	28.123

สรุป

บทความนี้ศึกษาการเปรียบเทียบการชดเชยด้วย RPC และด้วยตัวชดเชยที่ใช้หลักการสไตน์เมทซ์ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟที่ใช้หม้อแปลงแบบวี และนำเสนอแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า วิธีการคำนวณพิกัดที่เหมาะสมที่สุดของตัวชดเชยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า วิธีการคำนวณที่นำเสนอสามารถนำมาใช้หาพิกัดรวมที่เหมาะสมที่สุดหรือน้อยที่สุดของ RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ได้ ผลลัพธ์ คือ การชดเชยทั้งสองแบบสามารถแก้ไขปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้ตามเป้าหมาย กล่าวคือ ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าหลังการชดเชยมีค่าอยู่ในช่วง 0.6% - 1.3% และตัวประกอบกำลังแต่ละเฟสมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.95 ตามกำหนด พิกัดรวมที่เหมาะสมที่สุดของตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์น้อยกว่าพิกัดรวมของ RPC โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30 ดังนั้น การชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้พิกัดชดเชยน้อยกว่าการชดเชยด้วย RPC รวมถึงสามารถรักษาระดับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าได้ดีกว่า RPC ภายใต้อำนาจการชดเชยเดียวกัน จึงประเมินในเบื้องต้นจากขนาดพิกัดได้ว่าการใช้งานตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์จะใช้เงินลงทุนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของจำนวนคอนเวอร์เตอร์ในตัวชดเชยพื้นที่การติดตั้ง การซ่อมบำรุง และระบบควบคุมต่อราคาตัวชดเชย บทความนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือศึกษาเพิ่มเติม โดยพิจารณาโหลดรถไฟตลอดช่วงการให้บริการเพื่อนำมาหาพิกัดติดตั้งที่เหมาะสมของตัวชดเชยที่ครอบคลุมโหลดตามสภาพจริง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) รุ่นที่ 18 (รอบที่ 1)

ประจำปีงบประมาณ 2559 สัญญาเลขที่ PHD/0028/2558

เอกสารอ้างอิง

- Abrahamsson, L., Belea, R., Klerfors, B., Schutte, T. and Warner, B. 2017. Modern methods for balancing of single phase loads when feeding a.c. electrified railways. **eb - Elektrische Bahnen** 115(6-7): 378-384.
- Capasso, A. 1998. The power quality concern in railway electrification studies, pp. 647-652. **In 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power.** IEEE, Athens.
- Gazafrudi, S.M.M., Langerudy, A.T., Fuchs, E.F. and Al-Haddad, K. 2015. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective. **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 62(5): 3081-3090.
- Ghassemi, A., Fazel, S.S., Maghsoud, I. and Farshad, S. 2014. Comprehensive study on the power rating of a railway power conditioner using thyristor switched capacitor. **IET Electrical Systems in Transportation** 4(4): 97-106.
- Hu, S., Xie, B., Li, Y., Gao, X., Zhang, Z., Luo, L., Krause, O. and Cao, Y. 2017. A Power Factor-Oriented Railway Power Flow Controller for Power Quality Improvement in Electrical Railway Power System. **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 64(2): 1167-1177.

- Jafarikaleybar, H., Kazemzadeh, R. and Farshad, S. 2015. Power Rating Reduction of Railway Power Quality Compensator Using Steinmetz Theory, pp. 442-447. *In 6th International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC2015)*. IEEE, Tehran.
- Joseph, V.P. and Thomas, J. 2014. Power quality improvement of AC railway traction using railway static power conditioner a comparative study, *In International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON)*. IEEE, Thrissur.
- Ladoux, P., Fabre, J. and Caron, H. 2014. Power Quality Improvement in ac Railway Substations: The concept of chopper-controlled impedance. *IEEE Electrification Magazine* 2(3): 6-15.
- Matta, V. and Kumar, G. 2014. Unbalance and voltage fluctuation study on AC traction system, pp. 315-320. *In International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*. IEEE, Chennai.
- Mochinaga, Y., Hisamizu, Y., Takeda, M., Miyashita, T. and Hasuike, K. 1993. Static power conditioner using GTP converters for AC electric railway, pp. 641-646. *In Power Conversion Conference*. IEEE, Yokohama.
- Moriyama, H., Shimizu, T., Kai, M. and Kunomura, K. 2019. Integrating the system of the electric power compensators for the Tokaido Shinkansen, pp. 1-6. *In World Congress on Railway Research (WCRR2019)*. IEEE, Tokyo.
- Ohmi, M. and Yoshii, Y. 2010. Validation of Railway Static Power Conditioner in Tohoku Shinkansen on actual operation, pp. 2160-2164. *In International Power Electronics Conference (ECCE ASIA)*. IEEE, Sapporo.
- Patra, A.P., Kumar, U. and Larsson Kraik, P.O. 2010. Availability target of the railway infrastructure: an analysis. *In Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, San Jose.
- Singh, B., Al-Haddad, K. and Chandra, A. 1999. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 46(5): 960-971.
- Yu-quan, L., Guo-pe, W., Huang-sheng, H. and Li, W. 2011. Research for the effects of high-speed electrified railway traction load on power quality, pp. 569-573. *In 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. IEEE, Weihai.