

การวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค
 Analysis of Optimal Allocation of FACTS Devices in Radial Distribution Systems by Using
 Particle Swarm Optimization Method

จักรินทร์ วิเศษยา¹ และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค การติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อต้องการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์จะใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 10 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 12.66 kV กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 221.4346 kW และ 150.1784 kVar การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะใช้การคำนวณกระแสแบบย้อนกลับและการคำนวณแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้าและใช้เทคนิคการหาตำแหน่งที่เหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาค ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่ ผลการจำลองการทำงานพบว่าแรกเริ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 1 มีค่าเท่า 0.98 p.u. ส่วนบัสอื่นๆ ที่อยู่ไกลออกไปแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะลดลงโดยเฉพาะที่บัส 33 ซึ่งเป็นบัสปลายสายจะเป็นบัสอ่อนแอที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.881373 p.u. หลังจากใช้เทคนิคการหาค่าความเหมาะสมแล้ว ทำให้ได้ขนาดและตำแหน่งติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสม คือ บัสที่ 12 เมื่อติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA และติดตั้ง STATCOM ขนาด 2.4939 MVA เข้าไปที่บัส 12 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบลดลงแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสดีขึ้น ระบบมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ดีขึ้นเพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งหากเปรียบเทียบกันระหว่าง FACTS ทั้ง 2 ชนิด การติดตั้ง SVC มีความเหมาะสมมากกว่าการติดตั้ง STATCOM เนื่องจากใช้ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เล็กกว่า แต่สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียได้ 27.54% และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสีย 43.17% ซึ่งมากกว่า STATCOM ที่สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียได้ 27.12% และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสีย 41.60% บทความนี้ช่วยให้เข้าใจหลักการวิเคราะห์และเทคนิคการออกแบบระบบขดเซยกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้แก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้ง SVC และ STATCOM เข้าไปในระบบ และเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และพัฒนเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า กำลังเพื่อรองรับการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านพลังงานของประเทศในอนาคต

คำสำคัญ : ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล, FACTS, การหาตำแหน่งที่เหมาะสม, วิธีกลุ่มอนุภาค

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

This paper proposes the analysis of optimal allocation analysis of FACTS devices using particle swarm optimization method (PSO). FACTS device is the compensation device that can inject the real and active power into the power system in order to improve the voltage stability and power system reliability. The analysis uses the IEEE 33 buses radial distribution system (RDS) for testing system. The total real and reactive power is 3.72 MW and 2.3 MVar, respectively and uses Base MVA is 10 MVA and Base kV is 12.66 kV. The original real and reactive power loss is 221.4346 kW and 150.1784 kVar, respectively. The load flow analysis on distribution use backward-forward sweep methodology and optimization technique by using PSO method. The simulation results show that the original voltage at bus 1 is 0.98 p.u.. The weak bus is occurred at bus 33 0.881317 p.u.. After used the optimization technique, the size of SVC and STATCOM with 2.4431 MVA and 2.4939 MVA, respectively, The power loss is the installed at bus 12 decreased and the voltage bus is increased. The comparison between SVC and STATCOM installation, SVC have aspect appropriate more installed STATCOM. Aspect weak decreased real and reactive power loss 27.54% and 43.17%. STATCOM decreased real and reactive power loss to 27.12% and 41.60%. This paper results show solve the voltage stability of power system after installed SVC and STATCOM. The guideline to support the development of energy technology in the future.

Keywords : Radial Distribution Systems, FACTS, Optimal Allocation, PSO Method

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความต้านทานกับความต้านทานเหนี่ยวนำค่อนข้างสูง ทั้งยังเป็นระบบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำและมีกระแสไหลในสายมากกว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้า [1] ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟถือเป็นระบบที่มีความสำคัญ เพราะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรงเมื่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าสูงจะส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับผู้ใช้ไฟลดลงทำให้ต้องเพิ่มการลงทุนเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนหาวิธีปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย การปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียนั้นมีหลายวิธี เช่น การจัดเรียงโครงสร้างการจ่ายไฟของระบบไฟฟ้าใหม่ ซึ่งเป็นวิธีการปรับเปลี่ยนรูปแบบ

การจ่ายไฟโดยการหาตำแหน่งเปิดและปิดสวิตช์จ่ายโอน [2] การติดตั้งหม้อแปลงปรับระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในพื้นที่ที่มีการเดินสายป้อนของระบบจำหน่ายค่อนข้างไกล เป็นการแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกที่ปลายสาย การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าในจุดที่มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูง [3] การติดตั้งคาปาซิเตอร์เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบ [4] และการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (Flexible AC Transmission System, FACTS) เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบ และแก้ปัญหาตัวประกอบกำลัง [5] ปัจจุบันการวางแผนติดตั้ง FACTS ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายอย่าง โดยวิธีที่วิเคราะห์ปัญหานี้ได้มีการนำเสนอหลายวิธี เช่น วิธีกลุ่มอนุภาคได้รับความนิยมนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังมากขึ้น เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบ

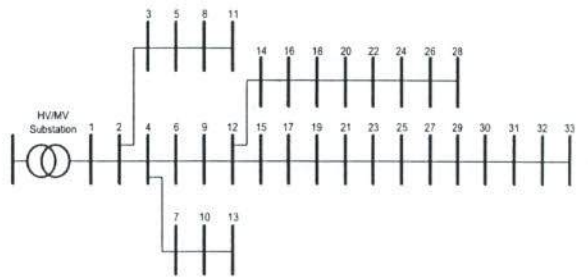
ไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากมีอัลกอริทึมในการค้นหาคำตอบที่ง่ายต่อการศึกษาทำความเข้าใจและสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นในบทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย ซึ่งเลือกอุปกรณ์ FACTS 2 ชนิด คือ (Static VAR Compensator, SVC) และ (Static Synchronous Compensator, STATCOM) เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าระบบและแก้ปัญหาตัวประกอบกำลัง เป็นการแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก ทำให้ระบบมีเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น

องค์ประกอบของการนำเสนอบทความนี้ประกอบด้วย ลำดับแรกจะกล่าวถึงระบบจำหน่ายแบบเรเดียล การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด วิธีการอนุภาค อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบซิดหูนุ่น FACTS สุดท้ายจะกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ สำหรับงานวิจัยลำดับต่อไป

2. ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล (Radial Distribution Systems)

ระบบจำหน่ายแบบเรเดียลเป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด ที่มีการจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านสายจำหน่ายเพียงด้านเดียว โดยที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลไปในทิศทางเดียวกันจากสถานีไฟฟ้าไปยังโหลดการใช้งาน การวางแผนใช้ระบบจำหน่ายนี้หากมีโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในอนาคตก็สามารถที่จะเพิ่มระบบจำหน่ายแบบเรเดียลให้กลายเป็นระบบจำหน่ายแบบลูปได้ หรือระบบจำหน่ายแบบร่างแหต่อไปได้ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลนิยมใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ทั่วไปหรือในชนบท เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าประเภทที่ลงทุนต่ำมีการป้องกันระบบง่ายและลักษณะของการวางสายแบบนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar ตามลำดับ โดยใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 10 MVA และแรงดันไฟฟ้าฐาน

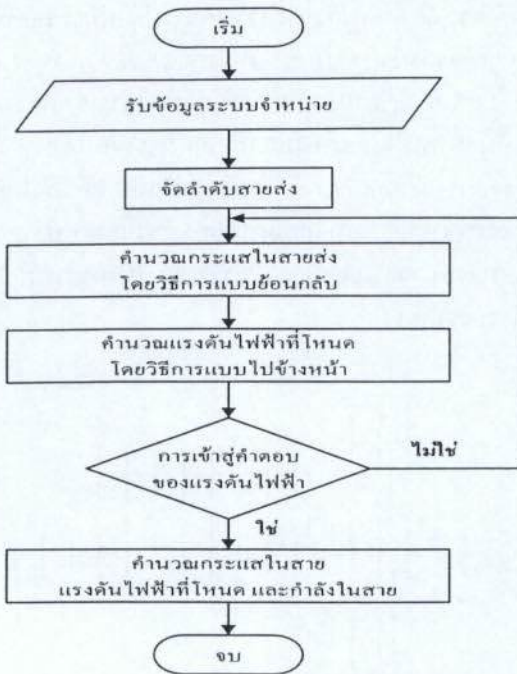
เท่ากับ 12.66 kV กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 221.4346 kW และ 150.1784 kVar ตามลำดับ บัสที่ 1 เป็นโหนดจ่ายที่เชื่อมต่อกับระบบส่งโดยผ่านสถานีย่อย การเชื่อมต่อโหนดสาขาจะเริ่มเชื่อมต่อจากบัสที่ 1 ไปยังบัสที่ 2 แล้วต่อไปยังโหนดสาขาอื่นๆ ต่อไป แผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE แสดงดังรูปที่ 1 [6]



รูปที่ 1 แผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE

3. การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Calculation of Power Flow)

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เพราะในระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นระบบเรเดียล แต่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจะเป็นระบบโครงข่ายอีกประการหนึ่งพารามิเตอร์สายในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจะประกอบด้วย ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุ แต่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะพิจารณาเพียงแค่ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของสายเท่านั้น การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการใช้เมทริกซ์จาคอบีเยน เช่น นิวตันราฟสัน โหลด หรือ เกาส์ไซเดลนั้น ไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่บางครั้งเกิดปัญหาเกี่ยวกับผู้เข้าสู่ค่าตอบ ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอเทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังด้วยวิธีการคำนวณกระแสแบบย้อนกลับและแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า [7] (Current Backward Sweep and Voltage Forward Sweep) โดยมีลำดับขั้นตอนวิเคราะห์ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลำดับขั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ด้วยวิธีแบบย้อนกลับและไปข้างหน้า

3.1 การคำนวณกระแสแบบย้อนกลับ (Current Backward Sweep):KCL

โดยจะเริ่มจากกระแสที่โหนดจะมีค่า ดังสมการที่ (1) [8]

$$I_i^{(k)} = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - Y_i V_i^{(k-1)} \quad (1)$$

เมื่อ S_i เป็นกำลังที่โหนด $i (S_i = P_i \pm jQ_i)$, Y_i เป็นผลรวมของแอดมิตแตนซ์ส่วนลงดินทั้งหมดที่โหนด i ; $V_i^{(k-1)}$ เป็นแรงดันไฟฟ้าที่โหนด i ณ รอบ คำนวณที่ $k-1$

การคำนวณกระแสจะเริ่มให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าเป็น 1.0 p.u. และมุมแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่ทุกๆ โหนด ส่วนของการคำนวณกระแสในสายจะเริ่มจาก การคำนวณที่เรียกว่า การแพร่กระจายถอยหลัง โดยที่รอบคำนวณที่ k จะคำนวณกระแส J ในสายที่สุดท้ายหรือเข้าสู่จุดโหนดหรือ รูตบัส โดยกระแสที่สาย L หาได้จากสมการที่ (2)

$$J_L^k = -J_{L2}^k + \sum (\text{กระแสในสายที่พุ่งจากโหนด } L_2) \quad (2)$$

3.2 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า (Voltage Forward Sweep):KVL

เริ่มต้นจากบัสอ้างอิงจุดโหนด หรือ รูตบัส โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้ากำหนดให้มีค่าคงที่และเฟสเป็นศูนย์ ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอื่นๆ ถัดจากบัสอ้างอิงในรอบคำนวณที่ k จะถูกคำนวณค่าแรงดันที่บัสเรื่อยไปสู่อบัสสุดท้าย ดังสมการที่ (3)

$$V_{L2}^{(k)} = V_{L1}^{(k)} - Z_L J_L^{(k)} \quad (3)$$

เมื่อ Z_L เป็นค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งช่วง L ระหว่างโหนด L_2 และ L_1 , L_2 เป็นโหนดปลายทาง, L_1 เป็นโหนดต้นทาง, J เป็นกระแสในสาย และ k เป็นรอบการคำนวณ

3.3 การเข้าสู่ค่าตอบของแรงดันไฟฟ้า

การคำนวณค่ากระแสแบบย้อนกลับและการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้าจะกระทำในลักษณะเวียนซ้ำ ในแต่ละรอบการคำนวณจะตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส ดังสมการที่ (4)

$$\Delta V_j^{(k)} = V_j^{(k)} - V_j^{(k-1)} \quad (4)$$

เมื่อ $\Delta V_j^{(k)}$ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าที่พอยอมรับได้ที่บัส j หลังจากการคำนวณในรอบที่ k , $V_j^{(k)}$ เป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัส j ในรอบการคำนวณที่ k และ $V_j^{(k-1)}$ เป็นแรงดันที่บัส j ในรอบการคำนวณที่ $k-1$

การเข้าสู่ค่าตอบของแรงดันไฟฟ้าอาจหาได้จากผลต่างของค่าอื่น ๆ ดังสมการที่ (5)

$$\left\{ \begin{array}{l} |\text{Re}(\Delta V_j^{(k)})| \leq \epsilon \\ |\text{Im}(\Delta V_j^{(k)})| \leq \epsilon \\ |(\Delta V_j^{(k)})| \leq \epsilon \end{array} \right. \quad (5)$$

เมื่อ ε เป็นค่าความคลาดเคลื่อนหรือ mismatch ที่ยอมรับได้

4. ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด (Problem of Optimal Power Flow)

4.1 สมการรูปแบบปัญหา

เป็นการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในสถานะคงที่ [9] โดยพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ร่วมกับขอบเขตเงื่อนไขบังคับที่เป็นตัวแปรควบคุม โดยมีรูปแบบทั่วไปดังสมการที่ (6) สมการที่ (7) และสมการที่ (8)

$$\text{Max / Minimize } f(x) \quad (6)$$

$$\text{Subject to } g(x) = 0, \text{ เงื่อนไขสมการ } (7)$$

$$h(x) = 0, \text{ เงื่อนไขอสมการ } (8)$$

การแปลงเงื่อนไขสมการและอสมการให้เป็นพจน์ปรับโทษ และนำไปรวมกับสมการวัตถุประสงค์เดิม จะได้ฟังก์ชันปรับโทษและเทอมปรับโทษ ดังสมการที่ (9) และสมการที่ (10)

$$P(x) = f(x) + X(x) \quad (9)$$

$$X(x) = \rho \left\{ g^2(x) + [\max(0, h(x))]^2 \right\} \quad (10)$$

โดยที่ $P(x)$ คือ ฟังก์ชันปรับโทษ, $X(x)$ คือ เทอมปรับโทษ และ ρ คือ ตัวประกอบการปรับโทษ

4.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหลายปัญหาที่นิยมนำมาพิจารณา เช่น การจ่ายโหลดอย่างประหยัด การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ในบทความนี้ใช้การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งแสดงดังสมการที่ (11)

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N_L} g_{i,j} \{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (11)$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียในสายส่งทั้งหมด, N_L คือ จำนวนสายส่งทั้งหมด, V_i คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ i , V_j คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่ j , δ_i คือ มุมแรงดันไฟฟ้าบัสที่ i , δ_j คือ มุมแรงดันไฟฟ้าบัสที่ j และ $g_{i,j}$ คือ ความนำไฟฟ้าจากบัส i ไปยังบัส j

4.3 ระบบเงื่อนไขบังคับ (Constraints)

ตัวแปรปรับตั้งในบทความนี้คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากโรงจักรไฟฟ้า ขนาดแรงดันไฟฟ้าถูกควบคุมโดยสถานีไฟฟ้า แทปหม้อแปลงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยจะทำการปรับตั้งตัวแปรเหล่านี้เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุด และยังคงอยู่ในช่วงขีดจำกัดของตัวแปรแต่ละตัว โดยมีตัวแปรที่ต้องการควบคุมคือ พิกัดการไหลกำลังไฟฟ้าของสายส่ง พิกัดช่วงขนาดแรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะปกติ ระบบเงื่อนไขบังคับทั้งเงื่อนไขสมการและอสมการแสดงดังต่อไปนี้

1) เงื่อนไขบังคับสมการเป็นสมการการไหลกำลังไฟฟ้า (Equality Constraints) ดังสมการที่ (12) และสมการที่ (13)

$$P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (12)$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (13)$$

โดยที่ $P_{G,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงผลิตที่บัส i , $P_{D,i}$ คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i , $Q_{G,i}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟผลิตที่บัส i , $Q_{D,i}$ คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i , N_B คือ จำนวนบัส, $\theta_{i,j}$ คือ มุมแอดมิตแดนซ์บัส i ไปยังบัส j , $Y_{i,j}$ คือ ขนาดแอดมิตแดนซ์บัส i ไปยังบัส j

2) เงื่อนไขบังคับอสมการเป็นขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการปรับตั้ง (Un Equality Constraints) ดังสมการที่ (14) - (17)

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (14)$$

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad (15)$$

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \quad (16)$$

$$Q_{comp,i}^{\min} \leq Q_{comp,i} \leq Q_{comp,i}^{\max} \quad (17)$$

โดยที่ V_i^{\min}, V_i^{\max} คือ ขอบเขตแรงดันต่ำสุดและสูงสุด, T_i^{\min}, T_i^{\max} คือ ขอบเขตแทปหม้อแปลงต่ำสุดและสูงสุด, $P_{G,i}^{\min}, P_{G,i}^{\max}$ คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดและสูงสุด และ $Q_{comp,i}^{\min}, Q_{comp,i}^{\max}$ คือ ขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่ำสุดและสูงสุด

ดังนั้นฟังก์ชันปรับโทษสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (18)

$$P(x) = P_{loss} + X_P + X_Q + X_C + X_T + X_V + X_G \quad (18)$$

$$X_P = \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ P_{G,i} - P_{D,i} - \sum_{j=1}^{N_g} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) \right\}^2 \quad (19)$$

$$X_Q = \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ Q_{G,i} - Q_{D,i} + \sum_{j=1}^{N_g} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) \right\}^2 \quad (20)$$

$$X_C = \rho \sum_{i=1}^{N_c} \left\{ \max(0, Q_{comp,i} - Q_{comp,i}^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_c} \left\{ \max(0, Q_{comp,i}^{\min} - Q_{comp,i}) \right\}^2 \quad (21)$$

$$X_T = \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i - T_i^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \max(0, T_i^{\min} - T_i) \right\}^2 \quad (22)$$

$$X_V = \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ \max(0, V_i - V_i^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_g} \left\{ \max(0, V_i^{\min} - V_i) \right\}^2 \quad (23)$$

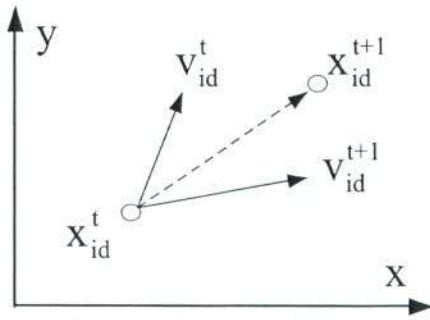
$$X_G = \rho \sum_{i=1}^{N_G} \left\{ \max(0, P_{G,i} - P_{G,i}^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_G} \left\{ \max(0, P_{G,i}^{\min} - P_{G,i}) \right\}^2 \quad (24)$$

เมื่อ N_G คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ, N_C คือ จำนวนตัวอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบ, N_T คือ จำนวนของหม้อแปลงที่ติดตั้งในระบบ และ N_B คือ จำนวนบัส

5. วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization Method)

วิธีกลุ่มอนุภาคนี้มีต้นกำเนิดมาจากความคิดของนักวิทยาศาสตร์กลุ่มหนึ่ง ที่สนใจและสังเกตเกี่ยวกับพฤติกรรมการอยู่รวมกันเป็นฝูง หรือ การอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์ต่างสายพันธุ์มากมายหลายชนิด สัตว์บางสายพันธุ์มีพฤติกรรมการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มที่น่าสนใจคือการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง ความน่าสนใจของพฤติกรรมของสัตว์เหล่านี้ คือ การปรับตัวในการอยู่รวมกันในกลุ่มโดยไม่ต้องมีผู้นำมาคอยควบคุม สังคมการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของสัตว์เหล่านี้อาศัยการปรับตัวด้วยตัวเองตามสภาพแวดล้อม โดยอาศัยการเรียนรู้คุณลักษณะที่เหมาะสมของการอยู่รวมกันภายในกลุ่ม เริ่มต้นจากปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคต่ออนุภาคในกลุ่มย่อยรวมไปเป็นกลุ่มใหญ่

จากพฤติกรรมที่น่าสนใจนี้ ในปี 1995 อีลกอริทึมในการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคจึงถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart [10] การหาค่าตอบจะอาศัยทฤษฎีการเคลื่อนที่ในการหาอาหารและอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของฝูงนก ฝูงปลา และฝูงแมลง อีลกอริทึมของวิธีกลุ่มอนุภาคเป็นอีลกอริทึมที่ปรับตัวเองบนพื้นฐานของการเรียนรู้สถานการณ์และใช้ข้อมูลร่วมกัน อนุภาคที่อยู่ภายในกลุ่มจะปรับเปลี่ยนตำแหน่งโดยการอาศัยการเรียนรู้จากอนุภาคข้างเคียงที่อยู่ในตำแหน่งที่ให้ค่าที่ดีกว่าจนกระทั่งแต่ละอนุภาคอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม จะไม่มีการเคลื่อนที่ การปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค

อัลกอริทึมที่สำคัญในการปรับตำแหน่งแสดงได้ตามสมการที่ (25) และสมการที่ (26) โดยสมการที่ (25) แสดงถึงความเร็วในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค และสมการที่ (26) แสดงถึงตำแหน่งใหม่ของอนุภาคหลังปรับเปลี่ยนตำแหน่งแล้ว

$$v_{id}^{t+1} = w \cdot v_{id}^t + rand_1() \cdot c_1 \cdot (pbest_{id} - x_{id}^t) + rand_2() \cdot c_2 \cdot (gbest_d - x_{id}^t) \quad (25)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (26)$$

โดยที่ x_{id}^t คือ ตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t , x_{id}^{t+1} คือ ตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ $t+1$, v_{id}^t คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ t , v_{id}^{t+1} คือ ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค i ของตัวแปร d ในรอบการคำนวณที่ $t+1$, $rand_1()$, $rand_2()$ คือ ตัวเลขสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1, $pbest_{id}$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค i ของตัวแปร d , $gbest_d$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดในทุกๆ อนุภาคของตัวแปร d , c_1 , c_2 คือ ค่าคงที่ความเร่งมีผลต่อความเร็วในการลู่เข้าสู่ค่าตอบโดย c_1 มีผลต่อการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่ดีที่สุดของตำแหน่งในปัจจุบันและ c_2 มีผลต่อการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่ดีที่สุดของตำแหน่งในปัจจุบัน การกำหนดค่าคงที่ทั้งสองนี้มีความสำคัญโดยปกติจะกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 4 การกำหนดค่าตัวแปรในวิธีกลุ่มอนุภาคมีความสำคัญในการลู่เข้าสู่ของคำตอบดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ให้มีความเหมาะสมกับปัญหาลังนี้ และ w คือ

ค่าถ่วงน้ำหนักจะทำให้คำตอบมีความหลากหลายไม่ตกอยู่กับคำตอบเฉพาะที่ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมจะทำให้การค้นหาคำตอบมีความสมดุลระหว่างการหาค่าตอบเฉพาะที่และการค้นหาคำตอบจากขอบเขตทั้งหมดซึ่งจะทำให้รอบในการค้นหาคำตอบน้อยลงโดยทั่วไปขอบเขตของค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะถูกกำหนดอยู่ระหว่าง 0.4 กับ 0.9 โดยสมการในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักนี้ แสดงได้ตามสมการที่ (27)

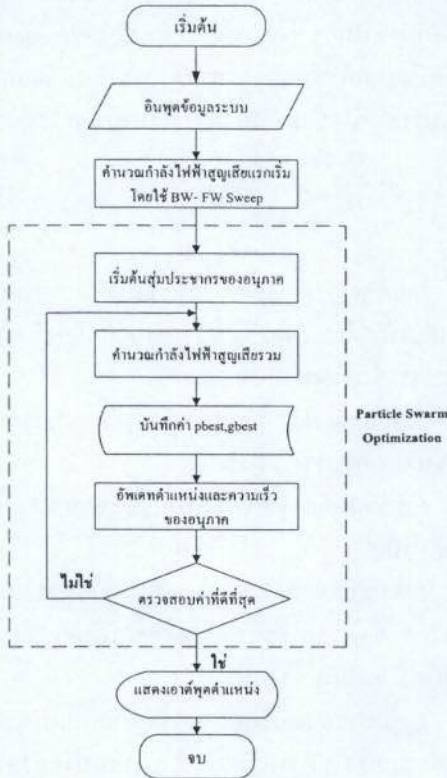
$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{k} \cdot t \quad (27)$$

โดยที่ w_{min} , w_{max} คือ ขอบเขตล่างและขอบเขตบนของค่าถ่วงน้ำหนัก, t คือ รอบการคำนวณปัจจุบัน และ k คือ รอบการคำนวณทั้งหมด

ขั้นตอนของวิธีกลุ่มอนุภาคดังรูปที่ 4 มีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. รับข้อมูลสาขา ข้อมูลบัส และขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่บัส
2. กำหนดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้การไหลของโหนดโดย กำหนดกระแสแบบย้อนกลับและคำนวณแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า
3. สุ่มประชากรเริ่มต้นของอนุภาคกับสุ่มตำแหน่งและสุ่มความเร็วในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอนุภาคโดยตั้งค่ารอบตัวนับซ้ำ $k = 0$
4. แต่ละอนุภาคหากแรงดันบัสอยู่ในขอบเขตที่กำหนด การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดจะอยู่ในสมการที่ (11)
5. แต่ละอนุภาคเปรียบเทียบค่าเป้าหมายกับอนุภาคที่ดีที่สุด ถ้าค่าเป้าหมายต่ำกว่า $pbest$ ให้กำหนดค่าปัจจุบันนี้เป็น $pbest$ และบันทึกตำแหน่งของอนุภาคที่สอดคล้องกัน
6. เก็บค่าที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาคไว้ในตัวแปร $pbest$ และเก็บค่าที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดไว้ในตัวแปร $gbest$
7. ปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคโดยใช้สมการที่ (25) และ (26) ตามลำดับ
8. ถ้าจำนวนรอบถึงขีดจำกัดสูงสุดให้ไปที่ขั้นตอนที่ 9 ถ้าไม่เช่นนั้นให้ตั้งค่ารอบ $k = k + 1$ และกลับไปยังขั้นตอนที่ 4

9. แสดงผลฟังก์ชันเป้าหมายที่ดีที่สุดสำหรับตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะติดตั้ง FACTS และเพื่อให้สอดคล้องกับระบบมีกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียรวมต่ำที่สุด



รูปที่ 4 ขั้นตอนของวิธีการกลุ่มอนุภาค

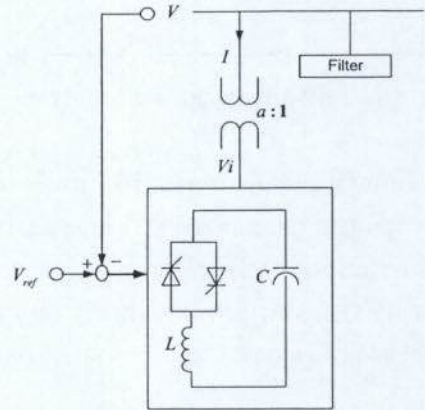
6. อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยึดหยุ่น (FACTS)

6.1 Static VAR Compensator (SVC)

SVC ติดตั้งขนานกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ารักษาแรงดันให้อยู่ในระดับคงที่หรือใกล้เคียง [11] ภายใต้ภาวะการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ของโหลด แก้ไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันเนื่องจากเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ ปรับปรุงเสถียรภาพแรงดัน ณ จุดสำคัญ เช่น จุดกึ่งกลางของสายส่งระยะไกลช่วยลดข้อผิดพลาดในการปรับปรุงแคมป์ของระบบ ช่วยปรับปรุงค่าประกอบกำลัง แก้ไขปัญหาเฟสไม่สมดุล ประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ชนิด คือ

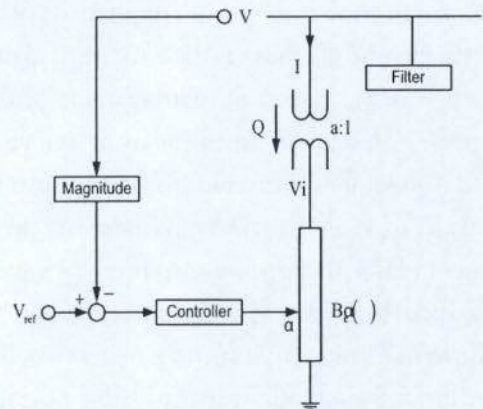
1) ไทริสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ (TCR Thyristor Controlled Reactor) และตัวเหนี่ยวนำ จะใช้ไทริสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์

2) ไทริสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์ (TSC Thyristor Switched Capacitor) และตัวเก็บประจุคงที่ (FC Fixed Capacitor) หรือเรียกย่อว่า TSC / FC ตัวเก็บประจุคงที่จะใช้การสวิตช์ทางกลลักษณะโครงสร้างพื้นฐานและแบบจำลองของ SVC แสดงดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ



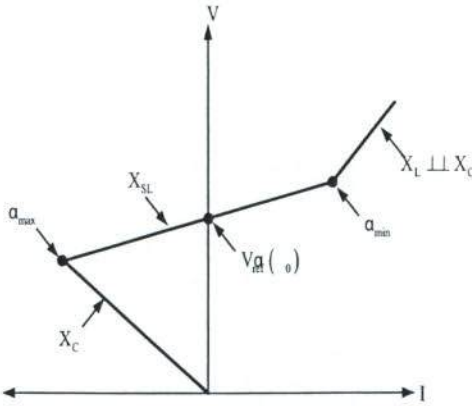
รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ SVC

SVC สามารถควบคุมตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานได้ดังรูปที่ 5 โดย SVC จะสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่มีสายนในระบบไฟฟ้ากำลังได้ และจากรูปที่ 6 SVC จะใช้การควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์รับ หรือ จ่าย ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ มุมจุดชนวนจะอยู่ในช่วงระหว่าง $90^\circ - 180^\circ$



รูปที่ 6 แบบจำลองของ SVC

คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ SVC แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสของ SVC

การทำงานของ SVC ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่บัส ส่วนขอบเขตของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ SVC จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่จุด α_{min} คือ ตำแหน่งที่ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเหนี่ยวนำทำงานรับกำลังไฟฟ้านำ และที่จุด α_{max} คือ ตำแหน่งที่สวิตช์ไทรสเตอร์ควบคุมตัวเก็บประจุทำงานจ่ายกำลังไฟฟ้านำตามขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุ ส่วนประกอบในการควบคุมของ SVC สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังสมการที่ (28) และสมการที่ (29)

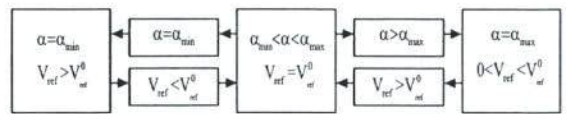
$$\begin{bmatrix} x_c \\ \alpha \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, V, V_{ref}) \quad (28)$$

$$0 = \underbrace{\begin{bmatrix} B_c \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi(2 - X_L / X_C)}{\pi X_L} \\ I - V_i B_c \\ Q - V_i^2 B_c \end{bmatrix}}_{g(\alpha, V, V_i, I, Q, B_c)} \quad (29)$$

จากสมการที่ (28) และสมการที่ (29) แบบจำลองของ SVC ในสถานะคงตัว สามารถเขียนแทนได้ ดังสมการที่ 30

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} - X_{SL} I \\ g(\alpha, V, V_i, I, Q, B_c) \end{bmatrix} \quad (30)$$

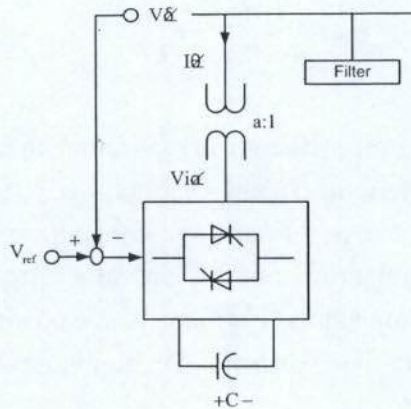
ขอบเขตการควบคุมของ SVC คือ การควบคุมค่าของมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ ซึ่งอยู่ในช่วง $\alpha_{min} < \alpha < \alpha_{max}$ เมื่อ α_{min} และ α_{max} คือ มุมจุดชนวนน้อยที่สุดและมุมจุดชนวนมากที่สุดตามลำดับถ้าไม่รู้จักหาขอบเขตมุมจุดชนวนให้กำหนดมุมจุดชนวนให้คงที่และเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง V_{ref} วิธีการของการจัดการควบคุมขอบเขต แสดงดังรูปที่ 8



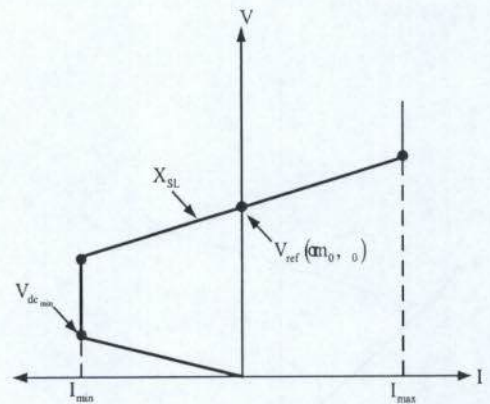
รูปที่ 8 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสถานะคงตัวของ SVC

6.2 Static Synchronous Compensator (STATCOM)

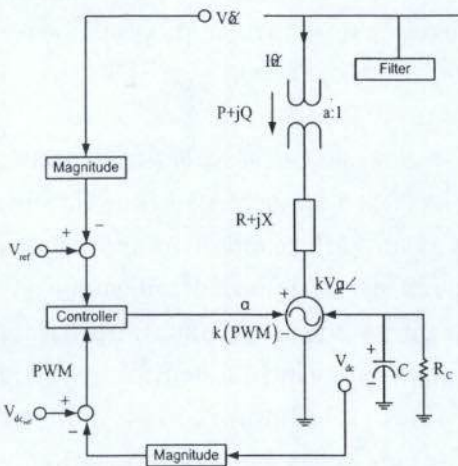
STATCOM มีลักษณะคล้ายกันกับซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ แต่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและมีหม้อแปลงเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับบัส สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส โดยการควบคุมการจ่าย หรือ รับ กำลังไฟฟ้านำจากระบบไฟฟ้ากำลัง [12] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ต่อในลักษณะขนานเข้ากับระบบ โดยใช้หลักการของโซลิตสเททคอนเวอร์เตอร์ ทำการแลกเปลี่ยนกำลังงานเสมือนกับระบบจำหน่าย STATCOM จะใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสในการส่งผ่านกำลังงานเสมือน แบบนำ หรือ แบบตาม ให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยผ่านทางหม้อแปลงคัปปลิง ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ STATCOM ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแปลงผัน โดยวงจรแปลงผันจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ควบคุมระดับความถี่ให้เท่ากับระบบที่เชื่อมต่อ และชดเชยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้านำตามความต้องการของระบบ ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานและแบบจำลองของ STATCOM แสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ STATCOM



รูปที่ 11 คุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ STATCOM



รูปที่ 10 แบบจำลองของ STATCOM

การควบคุมของ STATCOM มี 2 วิธี คือ การควบคุมมุมเฟสเป็นการควบคุมการเลื่อนมุมเฟส (α) ที่ควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าของ STATCOM และอีกวิธีหนึ่งคือการควบคุมโดยการสร้างสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) เพื่อควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าของ STATCOM และมุมเฟส ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะแรงดันและกระแสไฟฟ้าของ STATCOM แสดงดังรูปที่ 11

แบบจำลองของ STATCOM มีข้อจำกัดระหว่างการควบคุมและการทำงาน โดยทั่วไปแล้วจะนิยมให้แบบจำลองของ STATCOM มีลักษณะเดียวกับเครื่องจักรซิงโครนัส ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์แบบจำลองของ STATCOM สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเปอร์ยูนิตได้ ดังสมการที่ (31) สมการที่ (32) และสมการที่ (33) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} x_c \\ \alpha \\ m \end{bmatrix} = f(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dc,ref}) \quad (31)$$

$$V_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{1}{RC} V_{dc} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{dc}} \quad (32)$$

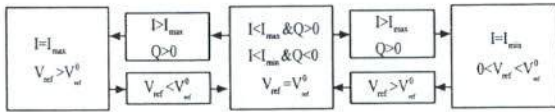
$$0 = \begin{bmatrix} P - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q - VI \sin(\delta - \theta) \\ P - V^2 G + kV_{dc} VG \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VB \sin(\delta - \alpha) \\ Q + V^2 B + kV_{dc} VBC \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VGS \sin(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (33)$$

$g(\alpha, k, V, V_{dc}, \delta, I, \theta, P, Q)$

เมื่อ m คือ ค่ามอดูเลชันของอุปกรณ์แปลงผัน, x_c และ $f(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dc,ref})$ สำหรับปรับการควบคุมระบบและสมการตามลำดับ แบบจำลองของ STATCOM จากสมการที่ (31)–(33) สามารถเขียนในสภาวะคงตัวได้ ดังสมการที่ (34)

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} \pm X_{SL} I \\ V_{dc} - V_{dc,ref} \\ P - V_{dc}^2 / R_c - RI^2 \\ g(\alpha, k, V, V_{dt}, \delta, I, \theta, P, Q) \end{bmatrix} \quad (34)$$

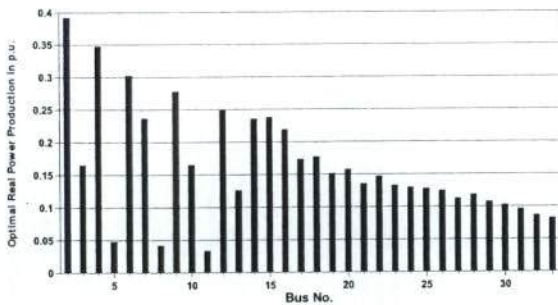
การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบที่มี STATCOM ในสภาวะคงตัว การจำกัดขอบเขตของกระแสของแบบจำลองในสภาวะคงตัวที่คืบนั้น อัตราส่วนของการมอดูเลชัน k หรือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าสามารถทำงานร่วมกันได้ในแบบจำลองที่นำเสนอคือรูปที่ 12



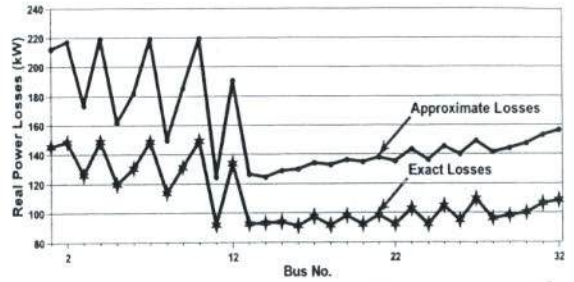
รูปที่ 12 การจำกัดขอบเขตการควบคุมในแบบจำลองสภาวะคงตัวของ STATCOM

7. ผลการจำลอง

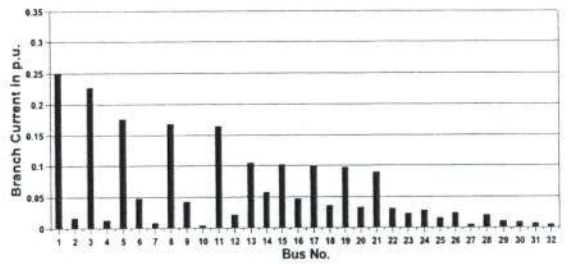
ผลการจำลองค่าต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE แสดงดังรูปที่ 13-16 ตามลำดับ



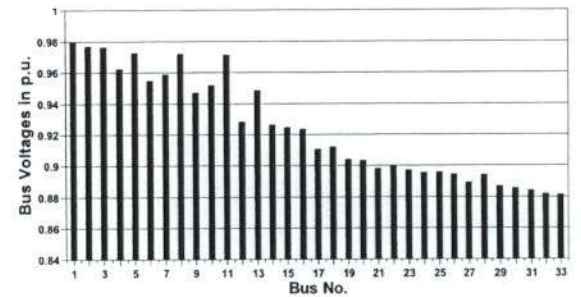
รูปที่ 13 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส



รูปที่ 14 ค่าโดยประมาณกับค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียที่ต้องการของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส



รูปที่ 15 ขนาดกระแสที่สาขาต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส



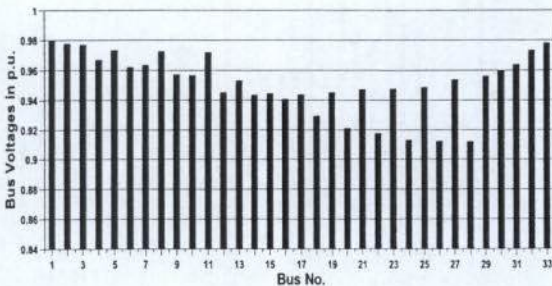
รูปที่ 16 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส

จากรูปที่ 16 ผลจากการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบกระแสนอนกลับและแรงดันไฟฟ้าแบบไปข้างหน้าของระบบจำหน่ายแล้วพบว่า ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.98 p.u. ส่วนบัสอื่นๆ ที่อยู่ไกลออกไปแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะลดลงเรื่อยๆ โดยเฉพาะที่ปลายสาย คือ บัสที่ 33 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดจะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.881373 p.u.

ตารางที่ 1 การหาค่าแห่งติดตั้ง SVC โดยใช้ PSO

System	Method	Bus No.	SVC Size MVA	Ploss kW	Qloss kVar	Loss Reduction %	
						Real	Reactive
33 Bus	Load Flow Analysis			221.4346	150.1784		
	PSO	12	2.4431	160.3745	85.2280	27.57	43.24
		15	2.3315	161.3063	87.1492	27.15	41.96
		14	2.3114	162.9829	85.9819	26.39	42.74
		17	1.7170	169.1077	86.0403	23.63	42.70
		25	1.2844	178.1469	87.6076	19.54	41.66
6	2.9080	207.4799	111.1396	6.30	25.99		

จากตารางที่ 1 หลังจากจำลองการติดตั้ง SVC เข้าไปโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ได้บัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง SVC เข้าไปในระบบคือ บัสที่ 12 เพราะกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่นๆ มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียเท่ากับ 160.3745 kW และ 85.2280 kVar ซึ่งขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ หลังติดตั้ง SVC แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ของระบบ จำหน่ายหลังติดตั้ง SVC

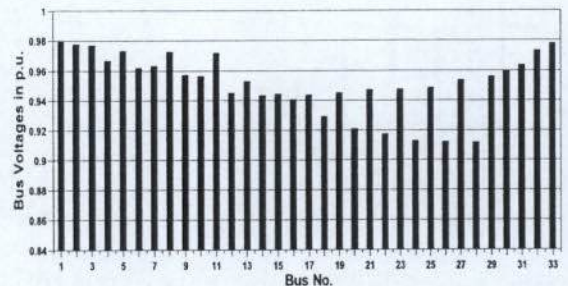
หลังติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA เข้าไปเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบให้ดีขึ้น โดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ทำให้แรงดันไฟฟ้าในทุกๆ บัสดีขึ้นกว่าเดิม ส่วนบัสที่เป็นบัสที่อ่อนแอที่สุดก็เปลี่ยนไปจากเดิมบัสที่ 33 ไปเป็นบัสที่ 28 ที่มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.911769 p.u. ซึ่งเป็นผลมาจาก

การติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA เข้าไปในระบบ จำหน่าย ทำให้บัสที่อ่อนแอที่สุดเปลี่ยนตำแหน่งไป

ตารางที่ 2 การหาค่าแห่งติดตั้ง STATCOM โดยใช้ PSO

System	Method	Bus No.	STATCOM Size MVA	Ploss kW	Qloss kVar	Loss Reduction %	
						Real	Reactive
33 Bus	Load Flow Analysis			221.4346	150.1784		
	PSO	12	2.4939	160.4509	85.3447	27.54	43.17
		15	2.3801	161.3696	87.6981	27.12	41.60
		14	2.3545	163.0485	86.0639	26.36	42.69
		17	1.7321	169.1200	86.1770	23.62	42.61
		25	1.2786	178.1378	87.5945	19.55	41.67
6	3.0298	207.6376	111.1676	6.23	25.97		

จากตารางที่ 2 หลังจากจำลองการติดตั้ง STATCOM เข้าไปโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ได้บัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบคือ บัสที่ 12 เพราะกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่นๆ มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียเท่ากับ 160.4509 kW และ 85.3447 kVar ตามลำดับ ซึ่งขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ หลังติดตั้ง STATCOM แสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่าง ๆ ของระบบ จำหน่ายหลังติดตั้ง STATCOM

หลังติดตั้ง STATCOM ขนาด 2.4939 MVA เข้าไปเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบให้ดีขึ้น โดย

ใช้วิธีกลุ่มอนุภาคหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ทำให้แรงดันไฟฟ้าในทุกๆ บัสดีขึ้นกว่าเดิม ส่วนบัสที่เป็น บัสที่อ่อนแอที่สุดก็เปลี่ยนไปจากเดิมบัสที่ 33 ไปเป็นบัส ที่ 28 ที่มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.911717 p.u. ซึ่งเป็นผลมาจาก การติดตั้ง STATCOM ขนาด 2.4939 MVA เข้าไปใน ระบบจำหน่าย ทำให้บัสที่อ่อนแอที่สุดเปลี่ยนตำแหน่งไป

8. สรุป

จากการจำลองระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของมาตรฐาน IEEE ผลการจำลองก่อนการติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย แรงดันไฟฟ้าที่บัสจากการคำนวณ การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบกระจายย้อนกลับและแรงดัน ไฟฟ้าแบบไปข้างหน้าพบว่าที่บัส 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.98 p.u. ส่วนบัสอื่นๆ ที่อยู่ไกลออกไปแรงดันไฟฟ้าที่บัส จะลดลงเรื่อยๆ โดยเฉพาะที่ปลายสาย คือ บัสที่ 33 จะเป็น บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ แต่หลังจากใช้เทคนิคการหาค่าความเหมาะสมโดยวิธีกลุ่มอนุภาคแล้ว ทำให้ทราบ ขนาดและตำแหน่งติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมที่จะติดตั้ง FACTS เข้าไป คือ บัสที่ 12 และหลังติดตั้ง SVC ขนาด 2.4431 MVA และติดตั้ง STATCOM ขนาด 2.4939 MVA เข้าไปในระบบที่บัส 12 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ลดลง ซึ่งการติดตั้ง SVC สามารถลดกำลังไฟฟ้าจริงและ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรีแอกทีฟสูญเสียได้ถึง 27.57% และ 43.24% ส่วนการติดตั้ง STATCOM สามารถลดกำลัง ไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียได้ 27.54% และ 43.17% ส่งผลให้ตำแหน่งบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน จากการที่ติดตั้ง FACTS เข้าไปในระบบจำหน่าย โดยเปลี่ยนจากบัสที่ 33 ไปเป็น บัสที่ 28 ผลการจำลองระบบดังกล่าวทำให้ขนาดแรงดัน ไฟฟ้าที่บัสต่างๆ หลังติดตั้ง FACTS มีค่าที่ดีขึ้นใกล้เคียง 0.98 p.u. ระบบมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ดีเพียงพอต่อ ความต้องการ ซึ่งหากเปรียบเทียบ FACTS ทั้ง 2 ชนิด การติดตั้ง SVC มีความเหมาะสมมากกว่าการติดตั้ง STATCOM เข้าไปในระบบจำหน่าย เนื่องจากใช้ขนาด กำลังไฟฟ้าปรากฏที่เล็กกว่า แต่ได้เปอร์เซ็นต์ในการลด กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียที่มากกว่า

นำผลที่ได้จากการจำลองระบบมาวิเคราะห์ปรับปรุงเพื่อ พัฒนาและแก้ปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ ต่อไป

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและ พลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยการ สนับสนุนข้อมูลและสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Fukuyama, Y. Nakanishi, and H. D. Chiang, 1996. "Fast Distribution Power Flow Using Multi-Processors", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 18, No. 5, pp. 331-337.
- [2] กนกวรรณ กลิ่นเอี่ยม, 2549. "การหาค่าแห่งการติดตั้งสวิตช์ตัดคอนที่ที่เหมาะสม ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลโดยวิธีเชิงพันธุกรรม", *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*.
- [3] Wichit Krueasuk, and Weerakron Ongsakul, 2006. "Optimal Placement of Distributed Generation Using Particle Swarm Optimization", *Proc. AUPEC 2006*, pp. 1-6.
- [4] ธวัช สิริสังกัส, 2550. "การหาค่าแห่งและขนาดติดตั้งคาปาซิเตอร์เบงค์ที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาค", *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*.
- [5] จักรินทร์ วิเศษยา, และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดิพิชญ์, 2554. "การวิเคราะห์หาค่าแห่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย", *การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET2010), คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, หน้า 214-217.*

- [6] P. Mahat, W. Ongsakul, and N. Mithulanathan, 2006. "Optimal placement of wind turbine DG in primary distribution systems for real loss reduction", Energy for Sustainable Development Prospects and Issues for Asia (Electronic), pp. 1-6.
- [7] E. Bompard, E. Carpaneto, G. Chicco and R. Napoli, 2000. "Convergence of the Backward/Forward Sweep Method for the Load-Flow Analysis of Radial Distribution Systems", International Journal of Electrical power & energy system, Volume 22, pp. 521-530.
- [8] ชวิษ เกิดชื่น, และ กฤตวิทย์ บัวใหญ่, 2552. "เทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังในระบบจำหน่าย", การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET2008), คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2552, หน้า 1-13.
- [9] อุเทน ลีตน, และ ธนัชชัชกุลรวรานิชพงษ์, 2553. "การแก้ปัญหากำลังงานสูญเสียในสายส่งต่ำที่สุดโดยใช้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดที่อาศัยปัญญาเชิงกลุ่ม", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33, หน้า 81-84.
- [10] J. Kennedy, and R. Eberhart, 1995. "Particle Swarm Optimization", Proceeding of the IEEE International Conference on Neural Network. Perth : Piscataway.
- [11] Claudio A. Canizares, 2000. "Power Flow and Transient Stability Models of FACTS Controllers for Voltage and Angle Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1-8.
- [12] Claudio A. Canizares, Massimo Pozzib, Sandro Corsib, and Edvina Uzunovic, 2003. "Review STATCOM modeling for voltage and angle stability studies", International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 25, Issue 6, pp. 431-441.