

บทที่ 4

ตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการใช้เทคนิคการถ่ายโอน โหลดเพื่อจำกัดข้อจำกัดของตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุทำให้ตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นไปได้ทุกตำแหน่งในระบบไฟฟ้าไม่จำกัดอยู่ที่บัสเท่านั้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดกำลังงานสูญเสียในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่หาได้จากการใช้ตัวประกอบความไวการสูญเสีย (*LSF*) และดัชนีกำลังงานสูญเสีย (*PLI*) ลำดับต่อมาเป็นการค้นหาขนาดที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถหาได้จากการใช้เงินเนติกอัลกอริทึม (*GA*) โดยวัตถุประสงค์หลักคือกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด ดังนี้

4.2 แบบจำลองตัวเก็บประจุ

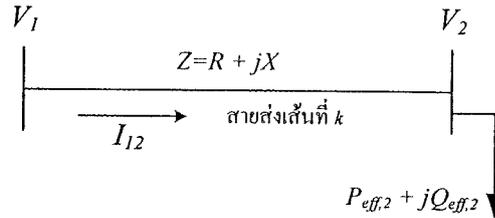
อุปกรณ์ที่ใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ามีหลายประเภท เช่น ตัวเก็บประจุ SVC รีแอกเตอร์ หรือ D-STATCOM ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าตัวเก็บประจุถือได้ว่าได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำมาใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีการลงทุนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นและง่ายต่อการบำรุงรักษา แต่ปัญหาที่สำคัญคือขนาดและตำแหน่งของตัวเก็บประจุที่จะนำไปติดตั้ง การติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมจะช่วยปรับปรุงระดับแรงดันในระบบให้สูงขึ้นทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบลดลง แบบจำลองตัวเก็บประจุที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์มี 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (reactive power model) และแบบจำลองซัสเซปแตนซ์ (susceptance model)

4.3 การค้นหาตำแหน่งบัสที่มีความไวต่อกำลังงานสูญเสีย

โดยทั่วไปการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเลือกติดตั้งเพียงบางบัสเท่านั้น เนื่องมาจากข้อจำกัดในด้านงบประมาณและความคุ้มค่าในการติดตั้ง งานวิจัยนี้จะนำเสนอดัชนีที่ใช้ระบุตำแหน่งบัสที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว คือ *LSF* และ *PLI* เพื่อช่วยให้ตำแหน่งที่เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุส่งผลดีที่สุดต่อระบบทั้งในเรื่องของระดับแรงดันและกำลังงานสูญเสีย ดังนี้

4.3.1 ตัวประกอบความไวการสูญเสีย LSF

ตัวประกอบความไวการสูญเสีย (Loss Sensitivity Factors: LSF) สามารถคำนวณได้จากกำลังงานสูญเสียในสายส่งระหว่างบัส 2 บัสดังรูปที่ 4.1 (Prakash, and Sydulu, 2007)



รูปที่ 4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 2 บัส

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- V_1, V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และบัส 2
- $P_{eff,2}$ คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส 2
- $Q_{eff,2}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส 2
- I_{12} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นที่ k
- Z คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งเส้นที่ k

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเส้นที่ k คำนวณได้จากสมการที่ (4-1)

$$S_{lineloss} = (I_{12})^2 Z \quad (4-1)$$

จากสมการที่ (4-3) กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งเส้นที่ k คำนวณได้จากสมการที่ (4-2)

$$I_{12} = \frac{P_{eff,2} - jQ_{eff,2}}{(V_2)^*} \quad (4-2)$$

แทนค่ากระแส I_{12} จากสมการที่ (4-2) ลงในสมการที่ (4-1) จะได้

$$S_{lineloss} = \frac{(P_{eff,2})^2 + (Q_{eff,2})^2}{(|V_2|)^2} Z \quad (4-3)$$

จากสมการที่ (4-3) กำลังงานสูญเสียในสายส่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ กำลังงานสูญเสียแอกทีฟ ($P_{lineloss}$) และกำลังงานสูญเสียรีแอกทีฟ ($Q_{lineloss}$) ดังนี้

$$P_{lineloss} = \frac{(P_{eff,2})^2 + (Q_{eff,2})^2}{(|V_2|)^2} R \quad (4-4)$$

$$Q_{lineloss} = \frac{(P_{eff,2})^2 + (Q_{eff,2})^2}{(|V_2|)^2} X \quad (4-5)$$

จากสมการที่ (4-4) และ (4-5) เขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังสมการที่ (4-6) และ (4-7)

$$P_{lineloss}[k] = \frac{(P_{eff}[m])^2 + (Q_{eff}[m])^2}{(|V[m]|)^2} R[k] \quad (4-6)$$

$$Q_{lineloss}[k] = \frac{(P_{eff}[m])^2 + (Q_{eff}[m])^2}{(|V[m]|)^2} X[k] \quad (4-7)$$

- โดยที่ $P_{eff}[m]$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส m
 $Q_{eff}[m]$ คือ โหลดกำลังไฟฟารีแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส m
 $V[m]$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส m
 $R[k]$ คือ ความต้านทานส่วนจริงของสายส่งเส้นที่ k
 $X[k]$ คือ ความต้านทานส่วนจินตภาพของสายส่งเส้นที่ k

ตัวประกอบความไวการสูญเสียเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานสูญเสียในสายส่งเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านบัสนั้น คำนวณได้จากสมการที่ (4-8) และ (4-9)

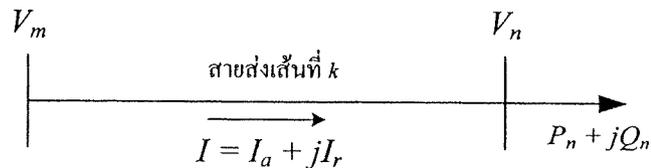
$$\frac{\partial P_{lineloss}[k]}{\partial Q_{eff}[m]} = \frac{2 \times R[k] \times Q_{eff}[m]}{(|V[m]|)^2} \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial Q_{line\ loss}[k]}{\partial Q_{eff}[m]} = \frac{2 \times X[k] \times Q_{eff}[m]}{(|V[m]|)^2} \quad (4-9)$$

บัสที่มีค่า LSF สูงสุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญเป็นลำดับแรก และบัสที่มีค่า LSF ต่ำที่สุด จะได้รับการจัดอันดับความสำคัญไว้ท้ายสุด

4.3.2 ดัชนีกำลังงานสูญเสีย PLI

ดัชนีกำลังงานสูญเสีย (Power Loss Index: PLI) ถูกพัฒนาโดย (Reddy, and Sydulu, 2007) โดยการหาขนาดของตัวเก็บประจุค่าหนึ่งมาติดตั้งแต่ละบัส ซึ่งแต่ละบัสขนาดของตัวเก็บประจุอาจมีค่าเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ขึ้นกับดัชนีที่บัสนั้น ๆ ผลจากการติดตั้งตัวเก็บประจุทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังลดลง บัสใดที่กำลังงานสูญเสียลดลงมากที่สุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญก่อน ดังนี้



รูปที่ 4.2 แผนภาพระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าเส้นเดียว

ดัชนีที่บัส n สามารถหาได้จาก

$$\text{Index}[n] = \frac{1}{(V[n])^2} + \frac{I_r[k]}{I_a[k]} + \frac{T_{Q\ load}[n]}{\text{Total } Q} \quad (4-10)$$

โดยที่ $\text{Index}[n]$ คือ ดัชนีของบัส n

$V[n]$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส n

$I_r[k]$ คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนจินตภาพในสายส่งเส้นที่ k

$I_a[k]$ คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนจริงในสายส่งเส้นที่ k

$T_{Q\ load}[n]$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้าริแอกทีฟทั้งหมดที่ไหลผ่านบัส n

$\text{Total } Q$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้าริแอกทีฟทั้งหมดในระบบไฟฟ้า

ขนาดของตัวเก็บประจุที่บัส n คำนวณได้จาก

$$\text{Capacitor}[n] = \text{Index}[n] \times Q_{load}[n] \quad (4-11)$$

โดยที่ $Q_{load}[n]$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้งหมดที่บัส n

สำหรับดัชนี PLI หาได้จากการนำค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้จากสมการที่ (4-11) ไปติดตั้งที่บัสแล้วคำนวณกำลังงานสูญเสียหลังจากการติดตั้งตัวเก็บประจุและคำนวณกำลังงานสูญเสียที่ลดลง ทำเช่นนี้จนครบทุกบัส จากนั้นทำให้กำลังงานสูญเสียที่ลดลงมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 บัสที่มีค่า PLI สูงสุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญเป็นลำดับแรก และบัสที่มีค่า PLI ต่ำที่สุดจะได้รับการจัดอันดับความสำคัญไว้ท้ายสุด

4.4 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

การค้นหาค่าตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสม ทำได้โดยการพิจารณาจากค่าดัชนีในหัวข้อที่ได้นำเสนอไปแล้วก่อนหน้านี้ ส่วนการหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ ทำได้โดยการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ดังนี้

4.4.1 การหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ

ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสม สามารถพิจารณาได้จากดัชนี LSF และ PLI ดังนี้ สำหรับดัชนี LSF บัสที่มีค่า LSF สูงที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกและบัสที่มีค่า LSF น้อยที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับสุดท้าย นอกจากนี้จะต้องพิจารณาขนาดของแรงดันที่บัสนั้นควบคุมกันไปด้วย โดยการหาค่านอร์มของ $V[i]$ สามารถหาได้จาก $V[i]/0.95$ ถ้าบัสใดมีค่ามากกว่า 1.01 p.u. บัสนั้นจะไม่ได้รับการเลือกให้เป็นตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุ ถึงแม้ว่าดัชนี LSF จะมีค่ามากที่สุดก็ตาม และบัสที่มีค่าดัชนี LSF รองลงมาจะได้รับการพิจารณา ดังนั้นบัสที่ถูกเลือกเป็นตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุจะต้องมีค่า LSF สูงและมีค่านอร์มของ $V[i]$ น้อยกว่า 1.01 สำหรับดัชนี PLI บัสที่มีค่า PLI สูงที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกและบัสที่มีค่า PLI น้อยที่สุดจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับสุดท้าย

4.4.2 การหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ

ขนาดที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุหาได้จากการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับ

เงื่อนไขขอบเขตขนาดของตัวเก็บประจุ โดยกำหนดเงื่อนไขขนาดของตัวเก็บประจุแต่ละตำแหน่ง ติดตั้งไว้ที่ค่าต่ำสุดและสูงสุด คือ $Q_{c,i}^{min} = 200$ kVar และ $Q_{c,i}^{max} = 1200$ kVar ตามลำดับสามารถเขียนเป็นสมการปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (4-14)

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && P_{loss} = I^2 R \\ &\text{subject to} && Q_{c,i}^{min} \leq Q_{c,i} \leq Q_{c,i}^{max} \quad \text{kVar} \end{aligned} \quad (4-14)$$

โดยที่ P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียทั้งหมดในระบบ

4.4.3 จีแนติกอัลกอริทึมเบื้องต้น

จีแนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GA) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยมีพื้นฐานมาจากกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (natural selection) และกระบวนการคัดเลือกทางพันธุศาสตร์ (natural genetic selection) ซึ่งคิดค้นโดย John Holland เมื่อปี ค.ศ. 1975 ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก ๆ ดังนี้

1) การรีโพรดักชัน (reproduction)

เนื่องจากโครโมโซมแต่ละชุดมีโอกาสในการอยู่รอดได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นกระบวนการรีโพรดักชันจึงเป็นกระบวนการคัดเลือกโครโมโซมจากกลุ่มประชากรที่มีความเหมาะสมสูงเพื่อนำมาเป็นชุดคำตอบเริ่มต้นให้กับกลุ่มประชากรรุ่นต่อไปโดยอาศัยทฤษฎีการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตที่เรียกว่า ค่าความฟิต (fitness value) ซึ่งโดยทั่วไปประเมินได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือปริมาณอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2) การครอสโอเวอร์ (crossover)

เป็นขั้นตอนที่ทำภายหลังการรีโพรดักชัน โดยการแลกเปลี่ยนของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ (parent) ตามอัตราความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (probability of crossover) เพื่อสร้างชุดโครโมโซมรุ่นใหม่หรือโครโมโซมรุ่นลูก (offspring) อัตราการครอสโอเวอร์ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการหาคำตอบของจีแนติกอัลกอริทึม ซึ่งก็คืออัตราส่วนของจำนวนโครโมโซมลูกที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละรุ่นต่อขนาดของประชากร (population size) โดยปกติ จีแนติกอัลกอริทึมจะใช้การครอสโอเวอร์ในสัดส่วนที่สูง ประมาณ 60-70 % ของจำนวนประชากรทั้งหมด

3) การผ่าเหล่า (mutation)

เป็นขั้นตอนที่อาจช่วยให้โครโมโซมมีค่าความเหมาะสมดีขึ้นหลังจากการครอสโอเวอร์ โดยการปรับเปลี่ยนข้อมูลบางส่วนของโครโมโซมเป็นค่าใหม่ในตำแหน่งที่สุ่มได้ ตามอัตราส่วนความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (probability of mutation) ที่กำหนด อัตราการมิวเตชัน

หมายถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนยีนส์ทั้งหมดในประชากรที่จะเกิดการมิวเตชันขึ้น โดยปกติแล้ว จินเนติกอัลกอริทึมจะยอมให้การผ่าเหล่าเกิดขึ้นได้น้อยมากเพียง 1-2 % เท่านั้น

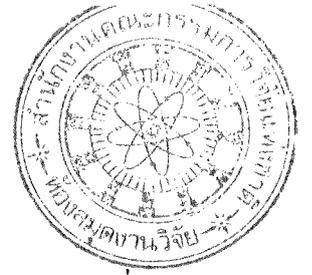
จินเนติกอัลกอริทึมได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาต่าง ๆ มากมาย สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการค้นหาคำตอบโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการค้นหาคำตอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและให้ค่า global optimum เมื่อเปรียบเทียบกับการค้นหาด้วยวิธีอื่น ๆ (Zhang, and Tolbert, 2005)

4.4.4 การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดตัวเก็บประจุโดยใช้จินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลด

ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปมี 2 ส่วนที่ต้องพิจารณา คือ ตำแหน่งการติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ โดยปัญหาทั้ง 2 ส่วนมักถูกแยกวิเคราะห์ทีละส่วนเพื่อลดตัวแปรที่ต้องค้นหาและประหยัดหน่วยความจำที่ต้องใช้ในระหว่างการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด การเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้หลาย ๆ ด้านในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าตัวเก็บประจุสามารถติดตั้งที่ตำแหน่งใด ๆ ก็ได้ เช่น ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสโหลด ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งมีแรงดันต่ำ ๆ ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งมีระยะทางห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้ามาก ๆ หรือแม้แต่ติดตั้งตัวเก็บประจุที่สายส่งระหว่างบัสใด ๆ ก็ได้ หรืออาจหาตำแหน่งติดตั้งโดยวิเคราะห์จากดัชนีต่าง ๆ เช่น *LSF* หรือ *PLI* เมื่อได้ตำแหน่งในการติดตั้งแล้ว ปัญหาเรื่องขนาดของตัวเก็บประจุที่จะติดตั้งจะเป็นส่วนที่ 2 ที่ต้องหาคำตอบ การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุนั้นอยู่กับตัวประกอบต่าง ๆ เช่น ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kvar) ระดับของแรงดัน ชนิดของโหลด ธรรมชาติของโหลด ระดับฮาร์มอนิก ภูมิอากาศ ความปลอดภัยของระบบ และราคาของตัวเก็บประจุ (ทศพล รัตน์นิยมชัย, 2549)

4.5 ผลการทดสอบ

การทดสอบในบทนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการค้นหาคำแหน่งเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี *LSF* ส่วนที่ 2 เป็นการค้นหาคำแหน่งเพื่อติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี *PLI* โดยตำแหน่งที่ได้จากดัชนีทั้ง 2 ตัวไม่จำเป็นต้องเป็นตำแหน่งเดียวกัน และส่วนที่ 3 เป็นการค้นหาขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งที่เลือกจากดัชนีทั้ง 2 ตัวเปรียบเทียบกับการค้นหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดภายใต้เงื่อนไขกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด โดยทั้ง 3 ส่วน ทดสอบกับระบบทดสอบ 34 บัส และ 69 บัส เป็นต้น ระบบทดสอบทั้งหมดเป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสในสถานะสมดุล ผลเป็นดังนี้



ส่วนที่ 1 การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี LSF

1) ระบบทดสอบ 34 บัส

ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 34 บัสแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 15 อันดับแรก จากตารางที่ 4.1 บัสที่ 4 มีค่า LSF มากที่สุดจึงได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นบัสแรก แต่เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่ามากกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 4 จะไม่ได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 2 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับต่อมา เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสที่ 5 พบว่ามีค่ามากกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 5 จะไม่ได้รับการพิจารณาเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 6, 2, 3 และ 17 เป็นบัสที่มีค่า LSF สูงเป็นลำดับที่ 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของแต่ละบัสพบว่ามีค่ามากกว่า 1.01 ดังนั้น บัสดังกล่าวจะไม่ถูกเลือก บัสที่ 19 เป็นบัสที่มีค่า LSF อยู่ในลำดับที่ 7 เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 19 จึงเป็นบัสที่ได้รับการจัดลำดับความสำคัญเป็นลำดับที่ 1 ในการเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับระบบทดสอบ 34 บัส บัสที่ 7 และ 18 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 8 และ 9 ตามลำดับ แต่ค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสทั้ง 2 มีค่ามากกว่า 1.01 จึงไม่ได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้ง บัสที่ 22 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 10 และเป็นบัสที่มีค่านอร์มของ $V[i]$ ต่ำกว่า 1.01 บัสที่ 22 จึงถูกเลือกให้เป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยมีลำดับความสำคัญรองลงมาจากบัสที่ 19 บัสที่ 20 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 11 และเป็นบัสที่มีค่านอร์มของ $V[i]$ ต่ำกว่า 1.01 บัสที่ 20 จึงถูกเลือกให้เป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยมีลำดับความสำคัญรองลงมาจากบัสที่ 22 เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 15 อันดับแรก พบว่า บัสที่ได้รับเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 19, 22, 20, 21, 23 และ 24 ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุเพียง 3 บัสเท่านั้น สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 19, 22 และ 20 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ดัชนี LSF ของระบบทดสอบ 34 บัส

| Bus No. | $\frac{\partial P_{line loss}}{\partial Q_{eff}}$ | $V[i]/0.95$ | Basecase voltage (p.u.) |
|---------|---|-------------|-------------------------|
| 4 | 0.007296 | 1.03374 | 0.98205 |
| 5 | 0.006344 | 1.02743 | 0.97606 |
| 6 | 0.006044 | 1.02149 | 0.97041 |
| 2 | 0.005623 | 1.04646 | 0.99414 |
| 3 | 0.004949 | 1.04107 | 0.98902 |
| 17 | 0.004799 | 1.01679 | 0.96595 |
| 19 | 0.004585 | 1.00858 | 0.95815 |
| 7 | 0.004414 | 1.01746 | 0.96659 |

ตารางที่ 4.1 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 34 บัส (ต่อ)

| Bus No. | $\partial P_{line loss} / \partial Q_{eff}$ | $V[i]/0.95$ | Basecase voltage (p.u.) |
|---------|---|-------------|-------------------------|
| 18 | 0.004015 | 1.01289 | 0.96224 |
| 22 | 0.003837 | 0.99866 | 0.94872 |
| 20 | 0.003709 | 1.00511 | 0.95486 |
| 21 | 0.003240 | 1.00210 | 0.95199 |
| 23 | 0.003169 | 0.99583 | 0.94604 |
| 24 | 0.002992 | 0.99317 | 0.94351 |
| 9 | 0.002847 | 1.01265 | 0.96202 |

2) ระบบทดสอบ 69 บัส

ค่านิ LSF ของระบบทดสอบ 69 บัสแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 12 อันดับแรก จากตารางที่ 4.2 บัสที่ 57 มีค่า LSF มากที่สุดจึงได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นบัสแรก เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 57 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ บัสที่ 58 ซึ่งเป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 2 จะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับต่อมา เมื่อพิจารณาค่านอร์มของ $V[i]$ ของบัสที่ 58 พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1.01 ดังนั้น บัสที่ 58 จะถูกเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยมีลำดับความสำคัญรองลงมาจากบัสที่ 57 บัสที่ 7 เป็นบัสที่มีค่า LSF เป็นลำดับที่ 3 แต่เป็นบัสที่มีค่านอร์มของ $V[i]$ มากกว่า 1.01 บัสที่ 7 จึงไม่ถูกเลือกให้เป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า LSF สูงที่สุด 12 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับการเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 57, 58, 61, 60 และ 59 สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุเพียง 4 บัสเท่านั้น ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 57, 58, 61 และ 60 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 69 บัส

| Bus No. | $\partial P_{line loss} / \partial Q_{eff}$ | $V[i]/0.95$ | Basecase voltage (p.u.) |
|---------|---|-------------|-------------------------|
| 57 | 0.026648 | 0.98957 | 0.94010 |
| 58 | 0.013449 | 0.97793 | 0.92904 |
| 7 | 0.009357 | 1.03241 | 0.98079 |
| 6 | 0.008829 | 1.04219 | 0.99008 |
| 61 | 0.008483 | 0.96035 | 0.91234 |
| 60 | 0.006351 | 0.96814 | 0.91973 |

ตารางที่ 4.2 คำนวณ LSF ของระบบทดสอบ 69 บัส (ต่อ)

| Bus No. | $\frac{\partial P_{line\ loss}}{\partial Q_{eff}}$ | $V[i]/0.95$ | Basecase voltage (p.u.) |
|---------|--|-------------|-------------------------|
| 10 | 0.005718 | 1.02362 | 0.97244 |
| 59 | 0.005269 | 0.97343 | 0.92476 |
| 55 | 0.004568 | 1.01783 | 0.96694 |
| 56 | 0.004497 | 1.01323 | 0.96257 |
| 12 | 0.003600 | 1.01913 | 0.96818 |
| 54 | 0.003284 | 1.02254 | 0.97141 |

ส่วนที่ 2 การค้นหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ดัชนี PLI

1) ระบบทดสอบ 34 บัส

ดัชนี PLI ของระบบทดสอบ 34 บัส แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า PLI สูงที่สุด 10 อันดับแรก จากตารางที่ 4.3 เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 270.43 kVar ที่บัส 24 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 15.91 kW ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ดังนั้น บัสที่ 24 จึงมีค่า PLI มากที่สุด คือ 1.00 จึงทำให้ได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นลำดับแรก ดังนั้น บัสที่ 4 จะได้รับการพิจารณาเป็นบัสแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 263.75 kVar ที่บัส 25 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 15.83 kW โดยกำลังงานสูญเสียที่ลดลงอยู่ในลำดับที่ 2 ทำให้บัสที่ 25 มีค่า PLI เป็นลำดับที่ 2 และจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับที่ 2 ในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 276.71 kVar ที่บัส 23 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 15.57 kW ซึ่งมีค่าลดลงน้อยกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 24 และ 25 ทั้งที่ขนาดของตัวเก็บประจุในการชดเชยมีค่ามากกว่า แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งไม่เหมาะสมย่อมไม่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงได้มากเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า PLI สูงที่สุด 10 อันดับแรกพบว่า บัสที่ได้รับการเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 24, 25, 23, 26, 22, 21, 20, 19, 18 และ 17 สำหรับระบบทดสอบ 34 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งหมด 3 บัส ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 24, 25 และ 23 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 คำนวณ *PLI* ของระบบทดสอบ 34 บัส

| Bus No. | Power loss after compensation (kW) | Loss reduction (kW) | Power loss index (<i>PLI</i>) | Capacitor size (kVar) |
|---------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 24 | 205.8123 | 15.9112 | 1.0000 | 270.4336 |
| 25 | 205.8899 | 15.8336 | 0.9951 | 263.7523 |
| 23 | 206.1556 | 15.5679 | 0.9784 | 276.7081 |
| 26 | 206.1886 | 15.5349 | 0.9764 | 256.8457 |
| 22 | 206.6185 | 15.1050 | 0.9493 | 282.9525 |
| 21 | 207.3252 | 14.3983 | 0.9049 | 289.0285 |
| 20 | 207.9305 | 13.7930 | 0.8669 | 295.2493 |
| 19 | 208.7241 | 12.9994 | 0.8170 | 301.3428 |
| 18 | 209.8336 | 11.8899 | 0.7473 | 307.1985 |
| 17 | 210.8302 | 10.8933 | 0.6846 | 313.1926 |

2) ระบบทดสอบ 69 บัส

คำนวณ *PLI* ของระบบทดสอบ 69 บัส แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงเฉพาะบัสที่มีค่า *PLI* สูงที่สุด 12 อันดับแรก จากตารางที่ 4.4 เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 2042.24 kVar ที่บัส 61 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 53.41 kW ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่น ดังนั้น บัสที่ 61 จึงมีค่า *PLI* มากที่สุด คือ 1.00 จึงทำให้ได้รับการจัดลำดับความสำคัญไว้เป็นลำดับแรก ดังนั้น บัสที่ 61 จะได้รับการพิจารณาเป็นบัสแรกในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 318.74 kVar ที่บัส 64 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 31.54 kW โดยกำลังงานสูญเสียที่ลดลงอยู่ในลำดับที่ 2 ทำให้บัสที่ 64 มีค่า *PLI* เป็นลำดับที่ 2 และจะได้รับการพิจารณาเป็นลำดับที่ 2 ในการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุ เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 195.26 kVar ที่บัส 12 กำลังงานสูญเสียของระบบลดลง 6.37 kW ซึ่งมีค่าลดลงน้อยกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 59 และ 65 ทั้งที่ขนาดของตัวเก็บประจุในการชดเชยมีค่ามากกว่า แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งไม่เหมาะสมย่อมไม่ทำให้กำลังงานสูญเสียของระบบลดลงได้มากเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาบัสที่มีค่า *PLI* สูงที่สุด 12 อันดับแรกพบว่าบัสที่ได้รับการเลือกให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเรียงตามลำดับความสำคัญ คือ บัสที่ 61, 64, 59, 65, 12, 21, 11, 62, 8, 18, 17 และ 16 สำหรับระบบทดสอบ 69 บัส ในงานวิจัยนี้ เลือกติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งหมด 4 บัส ดังนั้น จะได้ตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 61, 64, 59 และ 65 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 คัดนี้ *PLI* ของระบบทดสอบ 69 บัส

| Bus No. | Power loss after compensation (kW) | Loss reduction (kW) | Power loss index (<i>PLI</i>) | Capacitor size (kVar) |
|---------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 61 | 171.5950 | 53.4078 | 1.0000 | 2042.2446 |
| 64 | 193.4638 | 31.5390 | 0.5905 | 318.7356 |
| 59 | 210.3398 | 14.6630 | 0.2745 | 165.2483 |
| 65 | 216.0455 | 8.9573 | 0.1677 | 80.1115 |
| 12 | 218.6369 | 6.3659 | 0.1192 | 195.2615 |
| 21 | 218.7110 | 6.2918 | 0.1178 | 148.7103 |
| 11 | 219.0495 | 5.9533 | 0.1115 | 200.6163 |
| 62 | 219.9802 | 5.0226 | 0.0940 | 45.3233 |
| 8 | 222.0128 | 2.9900 | 0.0560 | 130.7584 |
| 18 | 222.1120 | 2.8908 | 0.0541 | 63.4966 |
| 17 | 222.1212 | 2.8816 | 0.0540 | 63.2939 |
| 16 | 222.5489 | 2.4539 | 0.0459 | 54.5322 |

ส่วนที่ 3 การค้นหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

การค้นหาขนาดของตัวเก็บประจุสามารถทำได้โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้เงินเนติกอัลกอริทึมใน โปรแกรม MATLAB โดยใช้ฟังก์ชันค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด

1) ระบบทดสอบ 34 บัส

ระบบทดสอบ 34 บัส เป็นระบบทดสอบ 11 kV 100 kVA การค้นหาขนาดที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุผลที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อใช้ดัชนี *LSF* เลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่าบัสที่ 19, 22 และ 20 จะได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ ขนาดของตัวเก็บประจุมีขนาด 957.88, 861.38 และ 228.69 kVar ตามลำดับ และขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 2047.95 kVar เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 24, 25 และ 23 ซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่าขนาดของตัวเก็บประจุมีค่า 200, 335.98 และ 982.13 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 1518.11 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด (LTT) พบว่า ตัวเก็บประจุจะต้องติดตั้งที่บัส 19,

9 และระหว่างบัสที่ 25 กับ 26 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 25 เป็นระยะ 0.13 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 25 และ 26 และขนาดของตัวเก็บประจุคือ 949, 806 และ 666 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมดคือ 2421 kVar สำหรับแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชย แสดงในตารางที่ 4.6 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 8 ลำดับแรกเท่านั้น จากตารางที่ 4.6 พบว่า แรงดันก่อนการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุมีขนาดต่ำสุดที่บัส 27 คือ 0.94169 p.u. เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *LSF* พบว่า บัสที่ 27 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.94953 p.u. และขนาดแรงดันโดยรวมมีค่าสูงขึ้น เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่า บัสที่ 27 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.94945 p.u. แรงดันบัสหลังการชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอน โหลดพบว่า บัสที่ 27 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.95027 p.u. เมื่อพิจารณาในภาพรวม ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอน โหลดทำให้ขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นมากที่สุด จากตารางที่ 4.7 จำนวนตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน คือ 3 ตำแหน่ง แต่วิธี *PLI* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมน้อยกว่าวิธี *LSF* และ *LTT* ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่เลือกจากดัชนี *PLI* อาจไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดตัวเก็บประจุที่นำมาชดเชย ถ้าขนาดตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่มากเกินไป กำลังงานสูญเสียในระบบอาจไม่ลดลงขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยทั้งหมด กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส ทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 4.7 กำลังงานสูญเสียก่อนการชดเชย คือ 221.7235 kW ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธี *LTT* มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ 160.4264 kW วิธี *LSF* มีค่ากำลังงานสูญเสีย 168.8133 kW และวิธี *PLI* มีค่ากำลังงานสูญเสียมากที่สุด คือ 173.8826 kW

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 34 บัส

| <i>LSF</i> | | <i>PLI</i> | | <i>LTT</i> | | |
|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|----------|-----------------------|
| Bus no. | Capacitor size (kVar) | Bus no. | Capacitor size (kVar) | Bus no. | α | Capacitor size (kVar) |
| 19 | 957.88 | 24 | 200.00 | 19 | 0.00 | 949.00 |
| 22 | 861.38 | 25 | 335.98 | 9 | 0.00 | 806.00 |
| 20 | 228.69 | 23 | 982.13 | 25 – 26 | 0.13 | 666.00 |
| Total | 2047.95 | Total | 1518.11 | Total | | 2421.00 |

ตารางที่ 4.6 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 34 บัส

| Before compensation | | After compensation (LSF) | | After compensation (PLI) | | After compensation (LTT) | |
|---------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| Bus no. | $ V $ (p.u.) | Bus no. | $ V $ (p.u.) | Bus no. | $ V $ (p.u.) | Bus no. | $ V $ (p.u.) |
| 27 | 0.94169 | 27 | 0.94953 | 27 | 0.94945 | 27 | 0.95027 |
| 26 | 0.94183 | 26 | 0.94967 | 26 | 0.94959 | 26 | 0.95041 |
| 25 | 0.94230 | 25 | 0.95013 | 25 | 0.95005 | 25 | 0.95086 |
| 24 | 0.94351 | 24 | 0.95134 | 24 | 0.95115 | 24 | 0.95185 |
| 23 | 0.94604 | 23 | 0.95384 | 23 | 0.95340 | 23 | 0.95404 |
| 22 | 0.94872 | 22 | 0.95651 | 22 | 0.95548 | 22 | 0.95645 |
| 21 | 0.95199 | 21 | 0.95941 | 21 | 0.95813 | 21 | 0.95942 |
| 20 | 0.95486 | 20 | 0.96193 | 20 | 0.96042 | 20 | 0.96201 |

ตารางที่ 4.7 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 34 บัส

| Characteristics/Methods | LSF | PLI | LTT |
|--|----------|----------|----------|
| No. of selected locations | 3 | 3 | 3 |
| Total compensation (kVar) | 2047.95 | 1518.11 | 2421.00 |
| Losses before compensation (kW) | 221.7235 | 221.7235 | 221.7235 |
| Losses after compensation (kW) | 168.8133 | 173.8826 | 160.4264 |
| Reduction of losses after compensation | 23.86% | 21.58% | 27.65% |

2) ระบบทดสอบ 69 บัส

ระบบทดสอบ 69 บัส เป็นระบบทดสอบ 12.66 kV 100 kVA สำหรับการค้นหาขนาดที่เหมาะสม สามารถหาได้จากการใช้เทคนิคหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไข คือ กำลังงานสูญเสีย น้อยที่สุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัสซึ่งหาได้จากส่วนที่ 1 และ 2 จากการหาค่าเหมาะที่สุดของ ตัวเก็บประจุผลที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.8 เมื่อใช้ดัชนี LSF เลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่า บัสที่ 57, 58, 61 และ 60 จะได้รับเลือกเป็นตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ ขนาดของตัวเก็บประจุมี ขนาด 200, 200, 878.72 และ 200 kVar ตามลำดับ และขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมด คือ 1478.72kVar เมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 61, 64, 59 และ 65 ซึ่งเลือกจากดัชนี PLI พบว่า ขนาดของตัวเก็บประจุมีค่า 722.50, 200, 253.85 และ 200 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจรรวมทั้งหมด คือ 1376.35 kVar เมื่อใช้การค้นหาโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด (LTT) พบว่า ตัว

เก็บประจุจะต้องติดตั้งที่บัส 61, 21, 8 และระหว่างบัสที่ 11 กับ 12 โดยตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากบัสที่ 11 เป็นระยะ 0.82 เท่าของความยาวสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ 11 และ 12 และขนาดของตัวเก็บประจุ คือ 1199.75, 216, 318.25 และ 269.75 kVar ตามลำดับ โดยขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด คือ 2003.75 kVar สำหรับแรงดันที่บัสก่อนและหลังการชดเชย แสดงในตารางที่ 4.9 โดยแสดงเพียงบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุด 7 ลำดับแรกเท่านั้น จากตารางที่ 4.9 พบว่า แรงดันก่อนการชดเชยด้วยตัวเก็บประจุมีขนาดต่ำสุดที่บัส 65 คือ 0.90919 p.u. เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *LSF* พบว่า บัสที่ 65 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.93098 p.u. ขนาดแรงดันโดยรวมมีค่าสูงขึ้น เมื่อชดเชยที่ตำแหน่งซึ่งเลือกจากดัชนี *PLI* พบว่า บัสที่ 65 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.93279 p.u. และขนาดแรงดันต่ำสุดอยู่ที่บัสที่ 64 มีค่า 0.93264 p.u. แรงดันบัสหลังการชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดพบว่า บัสที่ 65 มีขนาดแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 0.93141 p.u. เมื่อพิจารณาในภาพรวม ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยโดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้ขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นมากที่สุด จากตารางที่ 4.10 จำนวนตำแหน่งในการติดตั้งตัวเก็บประจุของทั้ง 3 วิธี มีค่าเท่ากัน คือ 4 ตำแหน่ง แต่วิธี *LSF* และ *PLI* ใช้ขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมน้อยกว่าวิธี *LTT* ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่เลือกจากดัชนีทั้ง 2 อาจไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องของขนาดตัวเก็บประจุที่นำมาชดเชย ถ้าขนาดตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่เกินไป กำลังงานสูญเสียในระบบอาจไม่ลดลง ทำให้ขนาดที่ค้นหาได้จำกัดอยู่ที่ค่าต่ำที่สุด คือ 200 kVar ถึง 3 ตำแหน่ง ขนาดของตัวเก็บประจุที่ชดเชยทั้งหมด กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส ทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 4.10 กำลังงานสูญเสียก่อนการชดเชย คือ 221.7235 kW ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธี *LTT* มีค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด คือ 160.4264 kW วิธี *LSF* มีค่ากำลังงานสูญเสีย 168.8133 kW และวิธี *PLI* มีค่ากำลังงานสูญเสียมากที่สุด คือ 173.8826 kW

ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุในระบบทดสอบ 69 บัส

| <i>LSF</i> | | <i>PLI</i> | | <i>LTT</i> | | |
|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|----------|-----------------------|
| Bus no. | Capacitor size (kVar) | Bus no. | Capacitor size (kVar) | Bus no. | α | Capacitor size (kVar) |
| 57 | 200.00 | 61 | 722.50 | 61 | 0.00 | 1199.75 |
| 58 | 200.00 | 64 | 200.00 | 21 | 0.00 | 216.00 |
| 61 | 878.72 | 59 | 253.85 | 8 | 0.00 | 318.25 |
| 60 | 200.00 | 65 | 200.00 | 11 – 12 | 0.82 | 269.75 |
| Total | 1478.72 | Total | 1376.35 | Total | | 2003.75 |

ตารางที่ 4.9 แรงดันบัสก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุของระบบทดสอบ 69 บัส

| Before compensation | | After compensation (LSF) | | After compensation (PLI) | | After compensation (LTT) | |
|---------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| Bus no. | $ V $ (p.u.) | Bus no. | $ V $ (p.u.) | Bus no. | $ V $ (p.u.) | Bus no. | $ V $ (p.u.) |
| 65 | 0.90919 | 65 | 0.93098 | 64 | 0.93264 | 65 | 0.93141 |
| 64 | 0.90976 | 64 | 0.93154 | 65 | 0.93279 | 64 | 0.93197 |
| 63 | 0.91166 | 63 | 0.93340 | 63 | 0.93353 | 63 | 0.93382 |
| 62 | 0.91205 | 62 | 0.93378 | 62 | 0.93371 | 62 | 0.93420 |
| 61 | 0.91234 | 61 | 0.93406 | 61 | 0.93386 | 61 | 0.93448 |
| 60 | 0.91973 | 60 | 0.93977 | 60 | 0.93916 | 60 | 0.93964 |
| 59 | 0.92476 | 59 | 0.94383 | 59 | 0.94319 | 59 | 0.94361 |

ตารางที่ 4.10 กำลังงานสูญเสียก่อนและหลังการชดเชยของระบบทดสอบ 69 บัส

| Characteristics/Methods | LSF | PLI | LTT |
|--|----------|----------|----------|
| No. of selected locations | 4 | 4 | 4 |
| Total compensation (kVar) | 1478.72 | 1376.35 | 2003.75 |
| Losses before compensation (kW) | 225.0028 | 225.0028 | 225.0028 |
| Losses after compensation (kW) | 151.6957 | 151.8203 | 144.8742 |
| Reduction of losses after compensation | 32.58% | 32.53% | 35.61% |

4.6 สรุป

การเลือกตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมจะช่วยให้แรงดันในระบบมีค่าสูงขึ้นพร้อมทั้งทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบมีค่าลดลง สำหรับการเลือกตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาจากค่า *LSF* ทำได้โดยการเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งบัสที่มีค่า *LSF* สูง และมีแรงดันต่ำหรืออาจเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งบัสที่มีค่า *PLI* สูง ๆ ก็ได้ นอกจากนี้การหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุสามารถทำได้พร้อม ๆ กันโดยการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดร่วมกับการใช้เทคนิคการถ่ายโอนโหลด ผลการทดสอบพบว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าในระบบไฟฟ้าทำให้แรงดันโดยรวมมีค่ามากขึ้นและกำลังงานสูญเสียมีค่าลดลง ตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุที่หาโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมร่วมกับเทคนิคการถ่ายโอนโหลดทำให้กำลังงานสูญเสียในระบบลดลงมากที่สุด