

### บทที่ 3

#### การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนาน

ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น พลังงานส่วนใหญ่จะถูกส่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยผ่านระบบส่ง (Transmission System) และระบบจำหน่าย (Distribution System) การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าทำให้เกิดกำลังสูญเสีย (Power Loss) และแรงดันตกในสายขึ้น กำลังสูญเสียจะเพิ่มมากขึ้นในขณะที่โหลดมีค่าสูงสุด (Peak Load) เป็นที่ทราบกันดีว่าวิธีการหนึ่งซึ่งสามารถลดกำลังสูญเสียและลดแรงดันตกในสายได้ คือการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้หมายถึงสายป้อนของระบบจำหน่ายแบบปฐมภูมิ (Primary Distribution Feeder)

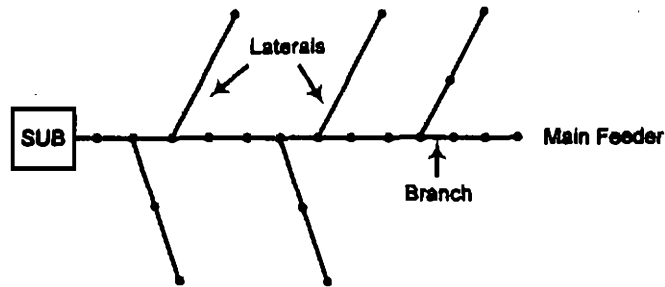
ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถูกพิจารณาในเรื่องของการหาตำแหน่ง ประเภท จำนวน และขนาดของตัวเก็บประจุต่อขนานที่จะทำการติดตั้งบนสายป้อนของระบบจำหน่ายในแต่ละระดับของโหลด (Load Level) ทั้งนี้โดยคำนึงถึงการลดค่าพลังงานงานสูญเสียและเงินลงทุนรวมของระบบให้มีค่าต่ำสุด พร้อมทั้งรักษาระดับแรงดันตลอดความยาวของสายป้อนให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

#### 3.1 แบบจำลองของระบบจำหน่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์

แบบจำลองของระบบที่ใช้วิเคราะห์หาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนาน ประกอบด้วยรายละเอียด ดังนี้

##### 3.1.1 รูปแบบของระบบจำหน่าย

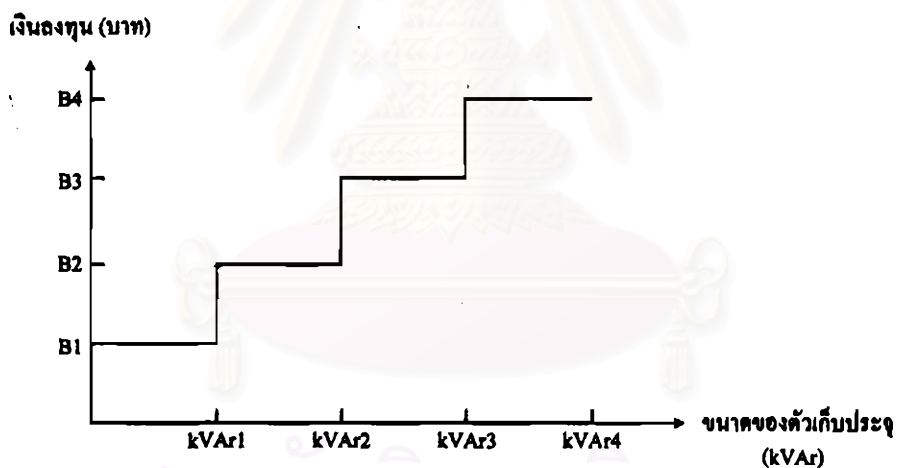
แบบจำลองของระบบจำหน่ายที่ใช้วิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นสายป้อนแบบเรเดียล ประกอบด้วยสายป้อนหลัก (Main Feeder) และสายป้อนย่อยที่แยกออกจากสายป้อนหลัก (Laterals) ซึ่งในแต่ละส่วนจะประกอบด้วยช่วงสายจำนวนมาก (Branch) ดังแสดงในรูปที่ 3-1 โดยสมมติให้ระบบจำหน่ายอยู่ในภาวะสมดุล (Balance) ดังนั้นค่าที่ใช้ในการคำนวณจะแสดงเป็นค่าต่อเฟสทั้งสิ้น



รูปที่ 3-1 แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

### 3.1.2 ขนาดของตัวเก็บประจุ (Capacitor Sizing)

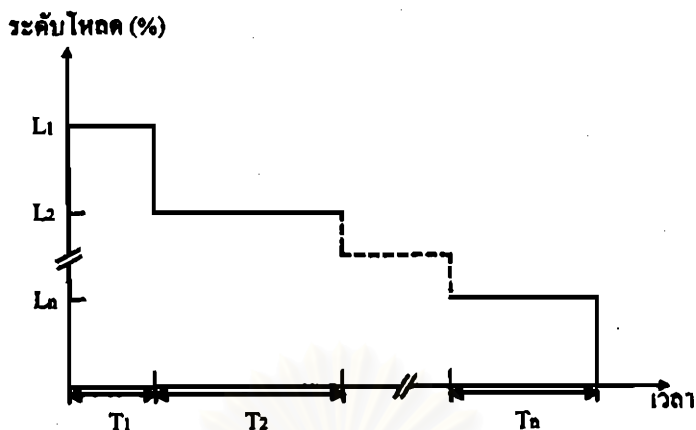
ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการควบคุมนั้น เป็นตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3-2 จะเห็นได้ว่าราคาลงทุนของตัวเก็บประจุมีความไม่ต่อเนื่อง (Non-differentiable) โดยจะมีค่าสูงขึ้นตามขนาดของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3-2 ฟังก์ชันราคาลงทุนของตัวเก็บประจุ

### 3.1.3 โหลดของระบบ (System Load)

ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เราสามารถทราบถึงการกระจายของโหลดในแต่ละปีได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-3 ซึ่งในระยะเวลาหนึ่งปีจะสมมติให้โหลดถูกแบ่งออกเป็นระดับๆ (Load Level) โดยที่คาบเวลาของโหลดจะถูกแบ่งออกเป็นช่วงๆ (Time Interval) และในระหว่างช่วงเวลายังจะสมมติให้โหลดมีค่าคงที่ตลอด รวมถึงทราบราคาพลังงานสูญเสียด้วย (Energy Loss Cost,  $K_e$ )

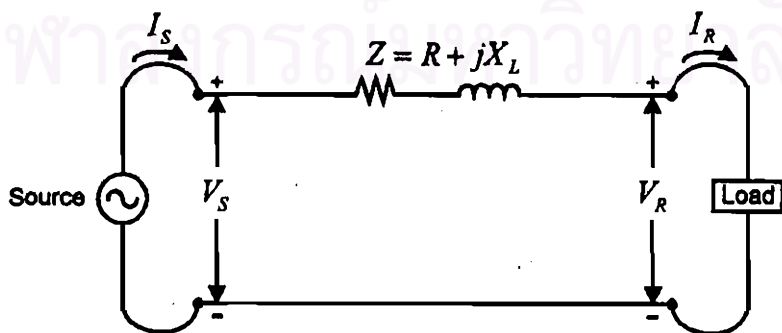


รูปที่ 3-3 กราฟการกระจายของโหลด (Load duration curve)

ระดับของโหลดแต่ละระดับจะถูกแบ่งออกเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับสถานะโหลดปกติ (Normal Load) โดยถือว่าค่ากำลังงานจริงและกำลังงานรีแอกทีฟของโหลดทั้งระบบ จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดแต่ละระดับในปริมาณเท่าๆ กัน และสมมติให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาที่เกิดโหลดในระดับนั้นๆ

### 3.1.4 สายป้อน (Distribution Feeder)

เนื่องจากสายป้อนของระบบจำหน่ายมักมีความยาวไม่เกิน 80-100 กิโลเมตร ดังนั้นแบบจำลองของสายป้อนจึงจัดอยู่ในประเภทของสายส่งระยะสั้น (Short Transmission Line) คุณสมบัติของสายส่งระยะสั้นคือ ไม่มีการนำเอาค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่มีอยู่ในสายส่งมาคิดเนื่องจากมีค่าน้อยมาก มีแต่การนำเอาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) มาคิดเท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3-4 [9]



รูปที่ 3-4 วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้นหรือสายป้อนของระบบจำหน่าย

โดยที่

$R$	=	ความต้านทานของสายส่งต่อเฟส
$X_L$	=	อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่งต่อเฟส
$Z$	=	อิมพีแดนซ์ของสายส่งต่อเฟส
$V_S$	=	แรงดันไฟฟ้าด้านต้นสาย (Sending End)
$I_S$	=	กระแสไฟฟ้าด้านต้นสาย
$V_R$	=	แรงดันไฟฟ้าด้านปลายสาย (Receiving End)
$I_R$	=	กระแสไฟฟ้าด้านปลายสาย

### 3.2 ลักษณะของปัญหา (Problem Description)

จากที่กล่าวมาในข้างต้น เนื่องจากขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการควบคุมนั้นเป็นตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง โดยราคาของตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของตัวเก็บประจุ ดังนั้นปัญหาในการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขานานจะถูกรัดให้เป็นปัญหาการทำออปติไมเซชัน (Optimization) แบบการรวม (Combinatorial) ที่มีค่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) เป็นแบบไม่ต่อเนื่องเช่นเดียวกัน

#### 3.2.1 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function)

การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุต่อขานาน สามารถแสดงฟังก์ชันเป้าหมายได้ โดยการทำให้เงินลงทุนของตัวเก็บประจุ (คิดเป็นรายปี) และราคาพลังงานสูญเสียในแต่ละปีของระบบมีค่าต่ำสุด ทั้งนี้ต้องอยู่ในเงื่อนไขของการรักษาระดับแรงดันตลอดสายป้อนให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดหลังจากการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขานาน ซึ่งสามารถแสดงสมการของฟังก์ชันเป้าหมาย ได้ดังสมการที่ (3.1) [10]

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^l C_i + \sum_{j=1}^l k_{sj} T_j P_{loss,j} \quad (3.1)$$

พิจารณาเงื่อนไข

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad (\text{Voltage constrains}) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $1 \leq k \leq N$

โดยที่

- $j$  = ระดับของโหลดซึ่งมีอยู่ทั้งหมด  $L$  ระดับ  
 $C_i$  = เงินลงทุนของตัวเก็บประจุที่ทำการติดตั้ง  $i$  บัต์ (บาท/ปี)  
 $P_{lossj}$  = กำลังสูญเสีย  $w$  ระดับโหลด  $j$  (กิโลวัตต์)  
 $T_j$  = ช่วงเวลาที่เกิดของระดับโหลด  $j$  (ชั่วโมง)  
 $k_{e,j}$  = ค่าพลังงานสูญเสีย  $w$  ระดับโหลด  $j$  (บาท/กิโลวัตต์ช.ม.)  
 $V_k$  = ระดับแรงดัน  $w$  บัต์  $k$   
 $V_k^{\min}, V_k^{\max}$  = ระดับแรงดันต่ำสุดและสูงสุด  $w$  บัต์  $k$   
 $I$  = จำนวนของตำแหน่งที่น่าจะได้รับการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนาน  
 $N$  = จำนวนบัต์ทั้งหมดของระบบ

### 3.2.2 การคิดราคาเงินลงทุนของตัวเก็บประจุ

เนื่องจากแบบจำลองของโหลดที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้กำหนดคาบเวลาของระดับโหลดทั้งหมดเป็นระยะเวลาหนึ่งปี หรือ 8,760 ชั่วโมง เท่านั้น ดังนั้นราคาเงินลงทุนของตัวเก็บประจุในสมการที่ (3.1) จึงต้องเป็นราคาเงินลงทุนที่คิดภายในหนึ่งปีด้วย โดยปกติราคาของตัวเก็บประจุจะบอกมาพร้อมกับอายุการใช้งานเช่น 15 ปี รวมถึงอัตราค่าบำรุงรักษาและอัตราดอกเบี้ย ในการวิเคราะห์จึงต้องแปลงหน่วยราคาโดยคิดอายุการใช้งานภายในหนึ่งปี (Annual Cost) ทั้งนี้รวมถึงราคาที่แตกต่างกันของตัวเก็บประจุแบบต่อถาวรและแบบสับเข้า-ปลดออก ด้วย

### 3.3 วิธีการแก้ปัญหา (Solution Methodology)

ในทางปฏิบัติการแก้ปัญหของการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนาน อันดับแรกวิศวกรจะเป็นคนตัดสินใจเลือกตำแหน่งที่จะสามารถทำการติดตั้งได้โดยอาศัยประสบการณ์ช่วยในการตัดสินใจ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องหาวิธีการเพื่อใช้ตรวจสอบหรือหาดำแหน่งที่ควรได้รับการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานเสียก่อน วิธีการหนึ่งซึ่งสามารถทำได้คือ การวิเคราะห์แบบ *เช่นซิวิตี* (Sensitivity Analysis) โดยจะเป็นกระบวนการในขั้นแรกเพื่อใช้วิเคราะห์หาดำแหน่งที่น่าจะได้รับการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานในระบบจำหน่าย ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนในการแก้ปัญหาได้เป็นอย่างมาก

### 3.3.1 การวิเคราะห์แบบเซินซิวิตี (Sensitivity Analysis)

หลักการของการวิเคราะห์แบบเซินซิวิตี เป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานสูญเสียจริง (Real Power Loss) เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานรีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัส (Reactive Power Injection) ซึ่งเรียกว่า เซินซิวิตีแฟกเตอร์ (Sensitivity Factor) ( $\partial P_{LOSS} / \partial Q_{inj}$ ) โดยบัสที่มีค่าเซินซิวิตีแฟกเตอร์สูงสุดจะถูกเลือกให้เป็นบัสที่ควรได้รับการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานก่อน สมการที่ใช้วิเคราะห์หาเซินซิวิตีแฟกเตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.3) [11]

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_i} = 2 \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} Q_j - \beta_{ij} P_j) \quad (3.3)$$

โดยที่

- $P_L$  = กำลังงานสูญเสียจริงของทั้งระบบ (กิโลวัตต์)
- $Q_i$  = กำลังงานรีแอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัส  $i$
- $P_j$  = กำลังงานจริงที่บัส  $j$
- $Q_j$  = กำลังงานรีแอกทีฟที่บัส  $j$
- $\alpha_{ij}, \beta_{ij}$  = สัมประสิทธิ์กำลังงานสูญเสีย
- $N$  = จำนวนบัสทั้งหมดของระบบ

สัมประสิทธิ์กำลังงานสูญเสียในสมการที่ (3.3) สามารถหาค่าและแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.4) และ (3.5)

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (3.4)$$

$$\beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (3.5)$$

โดยที่

- $V_i, \theta_i$  = ขนาดและมุมของแรงดัน ณ บัส  $i$
- $V_j, \theta_j$  = ขนาดและมุมของแรงดัน ณ บัส  $j$
- $r_{ij}$  = สมาชิกของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์  $[Z_{bus}]$  ตามมิติ  $ij$
- $[Z_{bus}]_{ij} = [Y_{bus}]_{ij}^{-1} = r_{ij} + jx_{ij}$

ในการวิเคราะห์หาเซ็นซิวิตีแฟกเตอร์ดังกล่าว จะกระทำในแต่ละ巴士ทุกๆ ครั้งหลังจากที่ติดตั้งตัวเก็บประจุ เนื่องจากอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันที่巴士ต่างๆ และกำลังสูญเสียของทั้งระบบ จากการวิเคราะห์จะได้กลุ่มของ巴士ที่มีค่าเซ็นซิวิตีแฟกเตอร์แตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาเรียงลำดับตามค่าของเซ็นซิวิตีแฟกเตอร์ในแต่ละ巴士ได้จากมากไปหาน้อย เพื่อทำการเก็บบันทึกไว้ใน *ไพออริตีลิสต์* (Priority List) และใช้พิจารณาในการสร้างทางเลือกของการวิเคราะห์ปัญหาในขั้นตอนต่อไป โดยกลุ่มของ巴士ที่มีค่าเซ็นซิวิตีแฟกเตอร์สูงสุดในช่วงต้นๆ (Top-rank) ของไพออริตีลิสต์ จะถูกนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรก

### 3.3.2 การสร้างทางเลือก (Generation of Alternatives)

หลังจากทราบถึงตำแหน่งของ巴士ที่น่าจะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขานานแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างทางเลือก โดยการกำหนดให้มีการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขานานที่มีขนาดต่ำสุดตามมาตรฐาน ณ巴士ที่อยู่บนสุดในไพออริตีลิสต์แบบชั่วคราว หลังจากนั้นต้องทำการตรวจสอบเงื่อนไขของแรงดันทั้งระบบ (Feasibility Test) ว่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดหรือไม่ หากอยู่ในขอบเขตขั้นต่อไปจะเป็นการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดตามสมการที่ (3.1) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายที่หาได้ในครั้งที่ผ่านมา โดยมีหลักพิจารณาว่า ถ้า

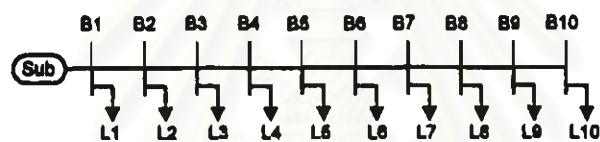
ค่าใช้จ่ายรวมค่าใหม่ < ค่าใช้จ่ายรวมค่าเก่า  
(ให้เก็บบันทึกค่าใช้จ่ายรวมค่าใหม่ไว้)

ค่าใช้จ่ายรวมค่าใหม่ > ค่าใช้จ่ายรวมค่าเก่า  
(ให้เก็บบันทึกค่าใช้จ่ายรวมค่าเก่าไว้)

การคำนวณค่าใช้จ่ายรวมจะกระทำเฉพาะทางเลือกที่เป็นไปตามเงื่อนไขของแรงดันเท่านั้น ในกรณีที่แรงดันของระบบไม่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขานานจะถูกย้ายไปยัง巴士ต่อไปตามไพออริตีลิสต์เพื่อสร้างทางเลือกใหม่ และในกรณีที่ทำการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขานานแบบชั่วคราวจนครบจำนวน巴士ทั้งหมดตามไพออริตีลิสต์แล้ว แต่ระดับแรงดันของระบบยังไม่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ให้ทำการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุทีละขั้นตามฟังก์ชันเงินลงทุนของตัวเก็บประจุ ในการคำนวณรอบแรกให้ตรวจสอบดูว่าทางเลือกใดมีค่าใช้จ่ายรวมค่าที่ต่ำสุด และให้ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขานานที่巴士นั้นๆ ในการคำนวณรอบที่สองต้องเริ่มต้นด้วยการหาเซ็นซิวิตีแฟกเตอร์ใหม่โดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุในรอบแรกด้วย หลังจากนั้นเป็นการสร้างทางเลือกตามกระบวนการเดิม เกณฑ์การตัดสินใจในการคำนวณรอบที่สอง ว่าต้องคิด

ตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มหรือไม่ จะใช้ค่าเปรียบเทียบด้านราคาเป็นเกณฑ์ตัดสินซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนำราคาค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ในรอบแรก หักออกด้วยราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุดังกล่าว โดยถ้าการคำนวณในรอบที่สองมีผลการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมที่คิดที่สุดมีค่าต่ำกว่าค่าเปรียบเทียบราคาคงกล่าว ให้ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่สองเพิ่มที่บัสนั้นๆ ทั้งนี้รอบของการคำนวณจะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อไม่สามารถหาคำตอบของค่าใช้จ่ายรวมที่คิดกว่าได้อีก

ในการแก้ปัญหาจะเริ่มค้นหาที่ระดับโหลดต่ำสุดเป็นอันดับแรก โดยประเภทของตัวเก็บประจุที่ใช้พิจารณาในขั้นตอนนี้จะเป็นแบบต่อถาวรเท่านั้น และผลคำตอบของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรของระดับโหลดต่ำสุดจะมีผลต่อการคำนวณในระดับโหลดต่อไปด้วย ยกตัวอย่างการพิจารณาของระบบจำหน่ายขนาด 10 บัส ดังรูปที่ 3-5 โดยแบ่งระดับโหลดออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 50% , 80% และ 100%



รูปที่ 3-5 ตัวอย่างระบบจำหน่ายแบบเรเดียลขนาด 10 บัส

#### ก) การสร้างทางเลือกที่ระดับโหลด 50%

สมมติให้ค่าพลังงานสูญเสียของทั้งระบบที่ระดับโหลด 50% ก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุคิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ CL1 และผลการคำนวณในรอบแรกของระดับโหลด 50% ได้คำตอบที่คิดที่สุดของค่าใช้จ่ายรวมคิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ TC1 ( $TC1 < CL1$ ) โดยต้องติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 300 kVAr ที่บัส 9 ในการคำนวณรอบสุดท้ายของระดับโหลด 50% นี้ สมมติว่าต้องติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 600 kVAr ที่บัส 7 คิดเป็นค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ TC2 ( $TC2 < TC1$ -ราคาเงินลงทุนของตัวเก็บประจุขนาด 300 kVAr) จะสามารถแสดงผลการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลดอื่นๆ ได้ดังตารางที่ 3-1 โดยที่ F หมายถึงการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวร

ตารางที่ 3-1 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรของระดับโหลด 50%

ตำแหน่งติดตั้ง	ระดับ โหลด 50%	ระดับ โหลด 80%	ระดับ โหลด 100%
บัส 9	F 300	F 300	F 300
บัส 7	F 600	F 600	F 600



### ข) การสร้างทางเลือกที่ระดับโหลด 80%

การคำนวณที่ระดับโหลด 80% ประเภทของตัวเก็บประจุที่ใช้พิจารณาจะเป็นแบบสับเข้า-ปลดออกเท่านั้น โดยผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกที่หาได้ที่ระดับโหลด 80% นี้จะถือว่ามิสถานะการทำงานเป็น ON ที่ระดับโหลด 100% ด้วย เช่นสมมติให้ค่ากำลังงานสูญเสียของทั้งระบบที่ระดับโหลด 80% โดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรที่บัส 7 และ บัส 9 แต่ไม่นำราคาเงินลงทุนของตัวเก็บประจุที่บัส 7 และ 9 นี้เข้ามาพิจารณาด้วย คิดเป็นจำนวนเงินสูญเสียเท่ากับ CL2 ถ้ารอบการคำนวณสิ้นสุดลงที่ผลของค่าใช้จ่ายรวมที่คิดที่สุดคิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ TC3 ( $TC3 < CL2$ ) โดยต้องติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 900 kVAr ที่บัส 10 จะสามารถแสดงผลการติดตั้งได้ดังตารางที่ 3-2 โดยที่ S หมายถึงตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออก

ตารางที่ 3-2 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกของระดับโหลด 80%

ตำแหน่งติดตั้ง	ระดับโหลด 50%	ระดับโหลด 80%	ระดับโหลด 100%
บัส 10	-	S 900	S 900
บัส 9	F 300	F 300	F 300
บัส 7	F 600	F 600	F 600

### ค) การสร้างทางเลือกที่ระดับโหลด 100%

การคำนวณที่ระดับโหลด 100% จะมีการคิดเหมือนกับที่ระดับโหลด 80% โดยจะพิจารณาประเภทของตัวเก็บประจุเฉพาะแบบสับเข้า-ปลดออกเท่านั้น สมมติให้ค่ากำลังงานสูญเสียของทั้งระบบที่ระดับโหลด 100% โดยคิดผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรที่บัส 7 และ บัส 9 และแบบสับเข้า-ปลดออกที่บัส 10 แต่ไม่นำราคาเงินลงทุนของตัวเก็บประจุทั้ง 3 ตัวดังกล่าวเข้ามาพิจารณาด้วย คิดเป็นจำนวนเงินสูญเสียเท่ากับ CL3 ถ้ารอบการคำนวณสิ้นสุดลงที่ผลของค่าใช้จ่ายรวมที่คิดที่สุดคิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ TC4 ( $TC4 < CL3$ ) โดยต้องติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 900 kVAr ที่บัส 6 จะสามารถแสดงผลการติดตั้งได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกของระดับโหลด 100%

ตำแหน่งติดตั้ง	ระดับ โหลด 50%	ระดับ โหลด 80%	ระดับ โหลด 100%
บัส 6	-	-	S 900
บัส 10	-	S 900	S 900
บัส 9	F 300	F 300	F 300
บัส 7	F 600	F 600	F 600

### 3.3.3 การตรวจสอบเงื่อนไขของระดับแรงดัน (Feasibility Test)

ในการทดลองติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานแบบชั่วคราวในขั้นตอนการสร้างทางเลือก ทุกครั้งต้องมีการตรวจสอบระดับแรงดันของระบบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งค่าแรงดันของแต่ละบัสสามารถหาได้จากการคำนวณโหลดโฟลว์ แต่เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของระบบจำหน่ายที่มีค่าอัตราส่วน R/X ก่อนข้างสูง ดังนั้นการใช้วิธีการคำนวณโหลดโฟลว์โดยทั่วไปที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง อาจเกิดปัญหาการลู่ออก (Divergence) ของคำตอบได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำการประยุกต์ใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสัน เพื่อช่วยแก้ปัญหาคำนวณโหลดโฟลว์ในระบบจำหน่าย

### 3.4 การคำนวณโหลดโฟลว์ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน [12]

#### (Newton Raphson Method for Distribution System Power Flow Calculation)

การประยุกต์ใช้วิธีการของนิวตัน-ราฟสัน เพื่อแก้ปัญหาคำนวณโหลดโฟลว์ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มีลักษณะพิเศษคือการจัดรูปแบบของจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) ให้อยู่ในรูปของ  $UDU^T$  โดยที่  $U$  คือ เมตริกซ์คงที่แบบสามเหลี่ยมบน (Constant Upper Triangular Matrix) ซึ่งค่าของเมตริกซ์  $U$  จะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของระบบจำหน่ายที่ทำการวิเคราะห์ดังจะได้อธิบายในลำดับต่อไป ส่วน  $D$  คือ กลุ่มของเมตริกซ์แนวทแยง (Block Diagonal Matrix) จากการจัดรูปแบบของจาโคเบียนเมตริกซ์ดังกล่าว ทำให้การแก้ปัญหามีความง่ายและสะดวกขึ้น เนื่องจากสามารถใช้วิธีการคิดแบบ ไปข้างหน้า/ย้อนกลับ (Forward/Backward Sweep Method) ได้แทนวิธีการคิดแบบแยกตัวประกอบแอลยู (LU factorization) ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการขจัดปัญหาสภาพของระบบจำหน่ายที่มีค่าอัตราส่วน R/X สูงได้ (ill-condition) ทำให้ความถูกต้องแม่นยำและอัตราการลู่เข้า (Convergence) ของคำตอบมีประสิทธิภาพมากกว่าการคำนวณโหลดโฟลว์แบบเดิม

### 3.4.1 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐานของระบบจำหน่าย (Basic Circuit Theory in Distribution System)

สำหรับระบบจำหน่ายที่เป็นเชิงเส้น (Linear) ซึ่งหมายถึง วงจรที่ประกอบด้วยองค์ประกอบของ RLC กับแหล่งจ่ายสัญญาณแรงดันไซน์ซอซอด์ (Sinusoidal voltage) สามารถสร้างแบบจำลองและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) ดังนี้

$$\dot{I}_b = Y_b \dot{V}_b \quad (3.6)$$

โดยที่

- $\dot{I}_b$  = เวกเตอร์ของกระแสในกิ่ง (Branch current)
- $Y_b$  = เมตริกซ์แนวทแยงของค่าแอดมิตแตนซ์ของกิ่ง (Branch admittance matrix)
- $\dot{V}_b$  = เวกเตอร์ของแรงดันที่กิ่ง (Branch voltage)

ทิศทางของ  $\dot{I}_b$  และ  $\dot{V}_b$  จะต้องตรงกัน จากกฎของเกอ์ชอฟต์ (KCL : Kirchoff Current Law) จะได้ความสัมพันธ์

$$A \dot{I}_b = \dot{I}_n \quad (3.7)$$

โดยที่

- $\dot{I}_n$  = เวกเตอร์ของกระแสที่ไหลเข้าโหนด (Node injection current)
- $A$  = เมตริกซ์สัมพันธ์ระหว่างโหนดกับกิ่ง (Node-Branch Incidence matrix)

โดยที่เมตริกซ์สัมพันธ์ระหว่างโหนดกับกิ่ง [A] สามารถหาได้จาก

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ถ้ากิ่ง } j \text{ ต่อออกจากโหนด } i \\ -1, & \text{ถ้ากิ่ง } j \text{ ต่อเข้าหาโหนด } i \\ 0, & \text{ถ้ากิ่ง } j \text{ ไม่ได้ต่ออยู่กับโหนด } i \end{cases}$$

จากกฎของเคอร์ชอฟต์ (KVL : Kirchhoff Voltage Law) จะได้ความสัมพันธ์

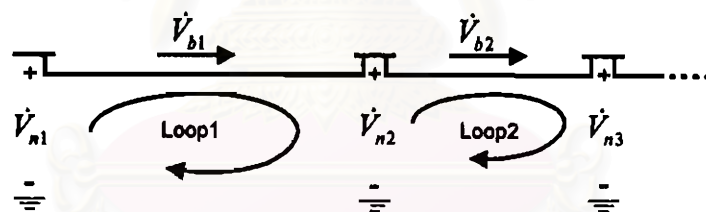
$$B\dot{V}_b = 0 \quad (3.8)$$

โดยที่  $B$  = เมตริกซ์รูป (Loop matrix)

และสามารถหาได้จาก

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ถ้ากิ่ง } j \text{ อยู่ในรูป } i \text{ และมีทิศทางเดียวกัน} \\ -1, & \text{ถ้ากิ่ง } j \text{ อยู่ในรูป } i \text{ และมีทิศทางตรงข้ามกัน} \\ 0, & \text{ถ้ากิ่ง } j \text{ ไม่อยู่ในรูป } i \end{cases}$$

สำหรับระบบจำหน่ายที่มี  $n$  โหนด และปราศจากกิ่งขนาน (Shunt branch) จำนวนช่วงสายทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ  $n-1$  ดังนั้นขนาดของเมตริกซ์  $A$  จะมีค่าเท่ากับ  $n \times (n-1)$



รูปที่ 3-6 วงจรพื้นฐานของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เมตริกซ์รูปสามารถสร้างได้จากกิ่งขนาน 2 กิ่ง แต่เนื่องจากในแบบจำลองไม่คำนึงถึงกิ่งขนาน ทำให้กิ่งขนานเปรียบเสมือนถูกแทนที่ด้วยแรงดันกึ่งกับแรงดันโหนด ดังแสดงในรูปที่ 3-6 และจากสมการที่ (3.8) จะได้ว่า

$$\dot{V}_b = A^T \dot{V}_n \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.6), (3.7) และ (3.9) จะได้ความสัมพันธ์

$$AY_b A^T \dot{V}_n = \dot{I}_n \quad (3.10)$$

ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีโหนดอ้างอิง (Reference node) และเพื่อความสะดวกมักกำหนดให้โหนดแรกเป็นโหนดอ้างอิง ดังนั้นกระแสที่ไหลเข้าสู่โหนดของจำนวน  $n-1$  โหนด สามารถหาได้จากสมการที่ (3.10) ซึ่งจะเหลือค่าแรงดันโหนดที่ไม่ทราบค่าอยู่จำนวน  $n-1$  โหนด ดังแสดงในสมการที่ (3.11)

$$A_{n-1} Y_b \begin{pmatrix} A_x^T & A_{n-1}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_s \\ \dot{V}_{n-1} \end{pmatrix} = \dot{I}_{n-1} \quad (3.11)$$

โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} A_s \\ A_{n-1} \end{bmatrix} \quad \dot{V}_n = \begin{bmatrix} \dot{V}_s \\ \dot{V}_{n-1} \end{bmatrix} \quad \dot{I}_n = \begin{bmatrix} \dot{I}_s \\ \dot{I}_{n-1} \end{bmatrix}$$

**หมายเหตุ** เมตริกซ์  $A_{n-1}$  เป็นเมตริกซ์จัตุรัส (Square matrix)

เนื่องจากทุกๆ โหนดนั้น ถูกต่อออกจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่ง ดังนั้นจะได้ว่า

$$A^T e_n = 0 \quad (3.12)$$

หรือ  $A_s^T + A_{n-1}^T e_{n-1} = 0 \quad (3.13)$

โดยที่  $e_n$  และ  $e_{n-1}$  เป็นเวกเตอร์คอลัมน์หนึ่งหน่วย (Unity column vectors) ที่มีขนาด  $n$  และ  $n-1$  ตามลำดับ

ดังนั้นจากสมการที่ (3.11) สามารถเขียนในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (3.14)

$$A_{n-1} Y_b A_{n-1}^T (\dot{V}_{n-1} - \dot{V}_s e_{n-1}) = \dot{I}_{n-1} \quad (3.14)$$

โดยที่  $A_{n-1} Y_b A_{n-1}^T$  คือโหนดแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Nodal Admittance Matrix) หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า โหนดแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สามารถสร้างได้จากผลคูณของเมตริกซ์จัตุรัส 3 เมตริกซ์

### 3.4.2 การวิเคราะห์แบบไปข้างหน้า / ย้อนกลับ (Forward / Backward Sweep Method)

การวิเคราะห์แบบไปข้างหน้า/ย้อนกลับ เพื่อหาคำตอบในการคำนวณสามารถกระทำได้ โดยจากสมการที่ (3.14) สามารถแยกและจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น 2 สมการดังนี้

$$A_{n-1} \dot{I}_L = \dot{I}_{n-1} \quad (3.15)$$

$$Y_b A_{n-1}^T (\dot{V}_{n-1} - \dot{V}_s e_{n-1}) = \dot{I}_L \quad (3.16)$$

การแก้สมการเพื่อหาค่า  $\dot{I}_L$  ในสมการที่ (3.15) ก็คือการคิดแบบย้อนกลับ (Backward Sweep) และการแก้สมการเพื่อหาค่า  $\dot{V}_{n-1}$  ในสมการที่ (3.16) ก็คือการคิดแบบไปข้างหน้า (Forward Sweep) จากหลักการพื้นฐานดังกล่าวเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างจาโคเบียนเมตริกซ์ในรูปของ  $UDU^T$

### 3.4.3 วิธีการคำนวณโหลดโฟลว์ของระบบจำหน่ายด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

จากวิธีการคำนวณโหลดโฟลว์ของนิวตัน-ราฟสัน ถ้าให้  $n$  เป็นจำนวนบัสทั้งหมดของระบบจะสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3.17) และ (3.18)

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{i(scheduled)} - P_{i(cal)} \quad i \neq \text{reference bus} \\ &= (P_{i(gen)} - P_{i(load)}) - P_{i(cal)} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= Q_{i(scheduled)} - Q_{i(cal)} \quad i \neq \text{reference bus} \\ &= (Q_{i(gen)} - Q_{i(load)}) - Q_{i(cal)} \end{aligned} \quad (3.18)$$

โดยที่

- $\Delta P_i$  = เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส  $i$
- $\Delta Q_i$  = เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส  $i$
- $P_{i(gen)}$  = กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ที่บัส  $i$
- $P_{i(load)}$  = กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายให้โหลดที่บัส  $i$
- $Q_{i(gen)}$  = กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตได้ที่บัส  $i$
- $Q_{i(load)}$  = กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายให้โหลดที่บัส  $i$

ค่า  $P_{i(cal)}$  และ  $Q_{i(cal)}$  คือค่ากำลังไฟฟ้าจริงสุทธิที่บัส  $i$  และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิที่บัส  $i$  ตามลำดับ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (3.19) และ (3.20)

$$P_{i(cal)} = V_i \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}] \quad (3.19)$$

$$Q_{i(cal)} = V_i \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}] \quad (3.20)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} V_i, V_j &= \text{ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส } i \text{ และบัส } j \\ \theta_i, \theta_j &= \text{มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส } i \text{ และบัส } j \\ G_{ij}, B_{ij} &= \text{สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ } [Y_{bus}] \\ \theta_{ij} &= \theta_i - \theta_j \\ Y_{ij} &= G_{ij} + jB_{ij} \end{aligned}$$

เนื่องจากสมการที่ (3.19) และ (3.20) มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ จะเปลี่ยนสมการดังกล่าวให้อยู่ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น โดยอยู่ในรูปของสมการความคลาดเคลื่อนของปริมาณทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.21)

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= \text{เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของมุมของแรงดันไฟฟ้า} \\ \Delta V &= \text{เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดของแรงดันไฟฟ้า} \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ สามารถทำได้โดยการแยกจาโคเบียนเมตริกซ์ออกเป็นจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย (Subjacobian Matrix)  $H, N, J$  และ  $L$  ซึ่งมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

$$H_{ij} = -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad j \neq i \quad (3.22)$$

$$H_{ii} = V_i \sum_{j \in J \neq i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3.23)$$

$$N_y = -V_i V_j (G_y \cos \theta_y + B_y \sin \theta_y) \quad j \neq i \quad (3.24)$$

$$N_{ii} = -V_i \sum_{j \neq i} V_j (G_y \cos \theta_y + B_y \sin \theta_y) - 2V_i^2 G_{ii} \quad (3.25)$$

$$J_y = V_i V_j (G_y \cos \theta_y + B_y \sin \theta_y) \quad j \neq i \quad (3.26)$$

$$J_{ii} = -V_i \sum_{j \neq i} V_j (G_y \cos \theta_y + B_y \sin \theta_y) \quad (3.27)$$

$$L_y = -V_i V_j (G_y \sin \theta_y - B_y \cos \theta_y) \quad j \neq i \quad (3.28)$$

$$L_{ii} = -V_i \sum_{j \neq i} V_j (G_y \sin \theta_y - B_y \cos \theta_y) + 2V_i^2 B_{ii} \quad (3.29)$$

โดยที่  $G_y + jB_y$  คือ โหนดแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ และเนื่องจากลักษณะของสายป้อนที่มีความยาวไม่มากทำให้ค่าแรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าระหว่างโหนด 2 โหนดที่อยู่ใกล้กันมีค่าต่างกันไม่มาก ดังนั้น  $G_{ii} + jB_{ii} = -\sum_{j \neq i} (G_y + jB_y)$  สำหรับระบบที่ไม่มีการติดกิ่งขนาน (Shunt branch) ค่าของจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อยสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$H_y \approx V_i V_j B_y \cos \theta_y \quad j \neq i \quad (3.30)$$

$$H_{ii} \approx -V_i \sum_{j \neq i} V_j B_y \cos \theta_y \quad (3.31)$$

$$N_y \approx -V_i V_j G_y \cos \theta_y \quad j \neq i \quad (3.32)$$

$$N_{ii} \approx V_i \sum_{j \neq i} V_j G_y \cos \theta_y \quad (3.33)$$

$$J_y \approx V_i V_j G_y \cos \theta_y \quad j \neq i \quad (3.34)$$

$$J_{ii} \approx -V_i \sum_{j \neq i} V_j G_y \cos \theta_y \quad (3.35)$$

$$L_y \approx V_i V_j B_y \cos \theta_y \quad j \neq i \quad (3.36)$$

$$L_{ii} \approx -V_i \sum_{j \neq i} V_j B_y \cos \theta_y \quad (3.37)$$



สมการที่ (3.30) ถึง (3.37) แสดงให้เห็นถึงการมีคุณสมบัติสมมาตรที่เหมือนกันทางโหนด แอคมิตแดนซ์เมตริกซ์ ของจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย  $H$ ,  $N$ ,  $J$  และ  $L$  ดังนั้นสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$H = L = A_{n-1} D_B A_{n-1}^T \quad (3.38)$$

$$J = -N = A_{n-1} D_G A_{n-1}^T \quad (3.39)$$

โดยที่  $D_B$  และ  $D_G$  เป็นเมตริกซ์แนวทแยง (Diagonal matrix) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$D_B = V_i V_j B_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (3.40)$$

$$D_G = V_i V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (3.41)$$

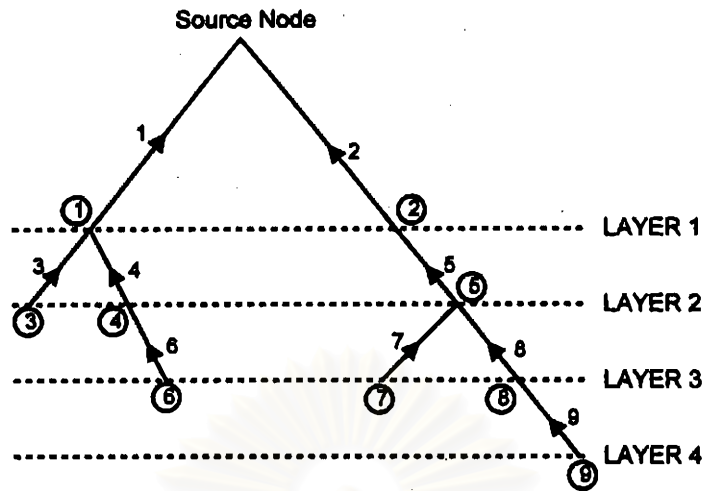
ดังนั้นจากสมการที่ (3.21) สามารถจัดรูปแบบใหม่ได้ดังสมการที่ (3.42)

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} & \\ & A_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_B & -D_G \\ D_G & D_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{n-1}^T \\ A_{n-1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

ในการสร้างเมตริกซ์  $A_{n-1}$  ถ้ามีการจัดลำดับความสัมพันธ์ระหว่างโหนดกับกิ่งอย่างเหมาะสมตามลักษณะของระบบ จะทำให้  $A_{n-1}$  เป็นเมตริกซ์สามเหลี่ยมบน (Upper Triangular Matrix) ที่มีสมาชิกในแนวทแยง (Diagonal) มีค่าเป็น 1 และสมาชิกที่อยู่นอกแนวทแยง (Off-Diagonal) มีค่าเป็น -1 หรือ 0 ตามลักษณะของการเชื่อมต่อระหว่างโหนดกับกิ่ง โดยจะมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณเนื่องจากลักษณะของระบบกำหนดไม่เปลี่ยนแปลง ดังอธิบายไว้ข้างต้น

อีกวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้เพื่อสร้างเมตริกซ์  $A_{n-1}$  คือการจัดลำดับกิ่ง (Branch Ordering) ให้เป็นชั้นๆ (Layers) จากโหนดหลัก (Root node) หรือโหนดอ้างอิง [13] โดยทิศทางของกิ่งแต่ละกิ่งจะไปทางโหนดหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3-7 และสามารถสร้างเมตริกซ์สัมพันธ์ระหว่างโหนดกับกิ่งที่มีขนาด  $n-1$  ได้ดังนี้

$$A_{n-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ & & & & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 1 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 1 & -1 \\ & & & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$



รูปที่ 3-7 การจัดลำดับระหว่างโหนดกับกิ่งของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

ดังนั้นจากสมการที่(3.42) จะสามารถสร้างเมตริกซ์จาโคเบียนได้จากผลคูณของเมตริกซ์จัตุรัสจำนวน 3 เมตริกซ์ การวิเคราะห์หาค่าตอบจะกระทำด้วยกระบวนการคิดแบบไปข้างหน้า/ย้อนกลับ โดยถ้ากำหนดให้

$$\dot{E} = \Delta\theta + j\Delta V / V \quad (3.43)$$

$$\dot{S} = \Delta P + j\Delta Q \quad (3.44)$$

$$\dot{W} = D_B + jD_G \quad (3.45)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.42) สามารถจัดรูปได้ใหม่เป็น

$$A_{n-1} \dot{W} A_{n-1}^T \dot{E} = \dot{S} \quad (3.46)$$

หรือ  $A_{n-1} \dot{S}_L = \dot{S} \quad (3.47)$

$$\dot{W} A_{n-1}^T \dot{E} = \dot{S}_L \quad (3.48)$$

โดยสมการที่ (3.47) คือการคิดแบบย้อนกลับ และสมการที่ (3.48) คือการคิดแบบไปข้างหน้า

การหาค่า  $\hat{E}$  ในสมการที่ (3.48) เมตริกซ์  $\hat{W}$  สามารถถูกอินเวอร์ส (Inversed) ได้ในแต่ละส่วนของสายป้อน โดยที่สมาชิกในแนวทแยงของเมตริกซ์  $\hat{W}^{-1}$  จะถูกแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของสายป้อน (Equivalent Line Impedance) ในแต่ละส่วน ดังแสดงในสมการที่ (3.49)

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (3.49)$$

โดยที่  $R_{eq} = X_y / (V_i V_j \cos \theta_y) \quad (3.50)$

$$X_{eq} = R_y / (V_i V_j \cos \theta_y) \quad (3.51)$$

$R_y$  และ  $X_y$  คือค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสายป้อนในส่วนระหว่างบัส  $i$ - $j$  ตามลำดับ

ในการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า (Power Mismatch) เพื่อหาจุดสิ้นสุดของการคำนวณโหลดฟลัวร์ จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของการเข้าสู่ค่าตอบดังนี้

$$\max \Delta |P^k| \leq \varepsilon_p \quad (3.52)$$

$$\max \Delta |Q^k| \leq \varepsilon_q \quad (3.53)$$

โดยที่

$\max \Delta |P^k|$  = ขนาดของความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดของกำลังไฟฟ้าจริง สำหรับการคำนวณในรอบที่  $k$  ใดๆ

$\max \Delta |Q^k|$  = ขนาดของความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดของกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ สำหรับการคำนวณในรอบที่  $k$  ใดๆ

$\varepsilon_p$  = ค่าความผิดพลาดที่กำหนดให้ยอมรับได้ทางกำลังไฟฟ้าจริง

$\varepsilon_q$  = ค่าความผิดพลาดที่กำหนดให้ยอมรับได้ทางกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ

โดยทั่วไปแล้วจะกำหนดให้  $\varepsilon_p = \varepsilon_q = \varepsilon$  ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 0.0001

### 3.4.4 ขั้นตอนการคำนวณโหลดโพล์ของระบบจำหน่ายด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณ โหลดโพล์ของระบบจำหน่ายด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ได้ดังนี้

- (1) สร้างเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์  $[Y_{bus}]$
- (2) จัดลำดับความสัมพันธ์ระหว่างโหนดกับกิ่งโดยการแบ่งออกเป็นชั้น เพื่อสร้างเมตริกซ์สัมพันธ์ระหว่างโหนดกับกิ่ง  $[A_{n-1}]$
- (3) สมมติค่าแรงดันเริ่มต้นที่บัสต่างๆ ยกเว้นที่บัสอ้างอิง
- (4) กำหนดดัชนีรอบการคำนวณ  $k = 0$
- (5) คำนวณปริมาณทางไฟฟ้าที่บัสทั้ง  $P_{i(cal)}$  และ  $Q_{i(cal)}$  ตามสมการที่ (3.19) และ (3.20)
- (6) คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณทางไฟฟ้าทั้ง  $\Delta P_i$  และ  $\Delta Q_i$  ตามสมการที่ (3.17) และ (3.18)
- (7) ตรวจสอบเงื่อนไขของการเข้าสู่ค่าตอบตามสมการที่ (3.52) และ (3.53) โดยถ้าเข้าสู่ค่าตอบให้จบการทำงานพร้อมทั้งคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง มิฉะนั้นให้ทำขั้นตอนที่ 8
- (8) คำนวณค่า  $[S_L]$  ในวิธีการคิดแบบย้อนกลับ ตามสมการที่ (3.47)
- (9) คำนวณค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของสายป้อน ตามสมการที่ (3.49)
- (10) คำนวณค่าปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าที่บัส  $[\dot{E}]$  ในวิธีการคิดแบบไปข้างหน้า เพื่อหาค่า  $\Delta \theta$  และ  $\Delta |V|$  ตามสมการที่ (3.48)
- (11) คำนวณแรงดันไฟฟ้าที่บัสใหม่ ดังนี้

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \text{real}(\dot{E}_i)$$

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \text{imag}(\dot{E}_i) * V_i^{(k)}$$

- (12) ให้ดัชนีรอบการคำนวณ  $k = k+1$  แล้วย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 5 โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสใหม่ซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 11

จากขั้นตอนการคำนวณโหลดโพล์ของระบบจำหน่ายด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนการคำนวณได้ดังรูปที่ 3-8

### 3.5 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนามาน

จากวิธีการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนามาน ที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณได้ดังนี้

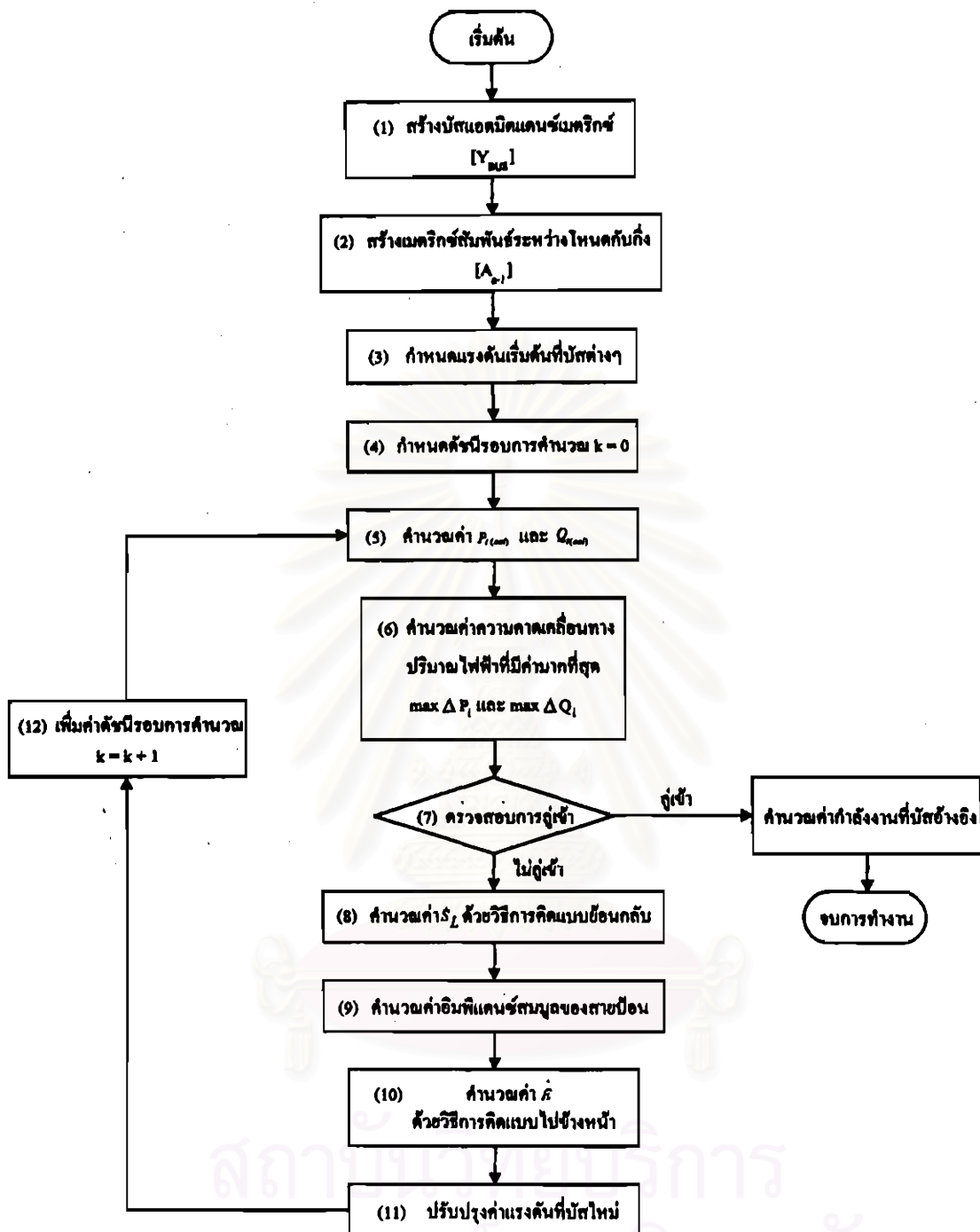
- (1) ป้อนข้อมูลให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เช่น ค่าแรงดันที่สถานีไฟฟ้าย่อย ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อน ค่าเปอร์เซ็นต์ของระดับโหลด รวมถึงค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังงานรีแอกทีฟของโหลดที่บัสต่างๆ เป็นต้น
- (2) เริ่มพิจารณาที่ระดับโหลดต่ำสุด โดยค่ากำลังงานจริงและกำลังงานรีแอกทีฟของโหลดจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามค่าเปอร์เซ็นต์ของระดับโหลด
- (3) คำนวณโหลดไฟลต์ว์ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน เพื่อคำนวณหาตำแหน่งบัสที่น่าจะได้รับการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนามาน โดยใช้การวิเคราะห์แบบเช่นชิตวิตตี สำหรับการคำนวณในรอบแรกให้ทำการสร้างไพออริตีลิสโดยเรียงลำดับบัสที่มีค่าเช่นชิตวิตตีแพกเคอร์จากมากไปหาน้อย
- (4) สร้างทางเลือกโดยการกำหนดให้มีการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนามาน ที่มีขนาดต่ำที่สุดตามมาตรฐาน ณ บัสที่อยู่บนสุดตามไพออริตีลิสแบบชั่วคราว
- (5) คำนวณโหลดไฟลต์ว์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อหาค่าแรงดันที่บัสต่างๆ
- (6) ตรวจสอบระดับแรงดันของทุกบัสว่าอยู่ในขอบเขตหรือไม่ โดยถ้าไม่อยู่ในขอบเขตให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 4 ซึ่งเป็นการสร้างทางเลือกใหม่โดยการย้ายตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนามานแบบชั่วคราวไปยังบัสถัดไปตามไพออริตีลิส แต่ถ้าระดับของแรงดันอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ให้ทำในขั้นตอนที่ 7
- (7) คำนวณค่าใช้จ่ายรวมตามสมการที่ (3.1)
- (8) เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมกับค่าตอบที่ดีที่สุดจากการคำนวณได้ในครั้งก่อน โดยถ้าค่าใช้จ่ายรวมที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าในครั้งก่อนให้ทำการเก็บค่าใหม่ไว้ แต่ถ้าค่าใช้จ่ายรวมที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าในครั้งก่อนให้ทำการเก็บค่าเดิมไว้ โดยกระบวนการจะสิ้นสุดลงเมื่อไม่สามารถหาค่าตอบของค่าใช้จ่ายรวมที่ดีกว่าได้อีก และทำการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนามานที่บัสซึ่งมีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด
- (9) เพิ่มรอบการคำนวณที่โหลดระดับเดิม และทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 ถึง 8 ถ้าไม่สามารถหาค่าตอบของค่าใช้จ่ายรวมที่ดีกว่าได้อีก ให้ทำขั้นตอนที่ (10)

- (10) ตรวจสอบจำนวนระดับโหลดว่าถูกพิจารณาครบแล้วหรือไม่ ถ้ายังไม่ครบให้เพิ่มระดับโหลดสูงขึ้น และทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 ถึง 9 แต่ถ้าระดับโหลดถูกพิจารณาครบแล้วให้ทำในขั้นตอนที่ 11
- (11) จบการทำงาน

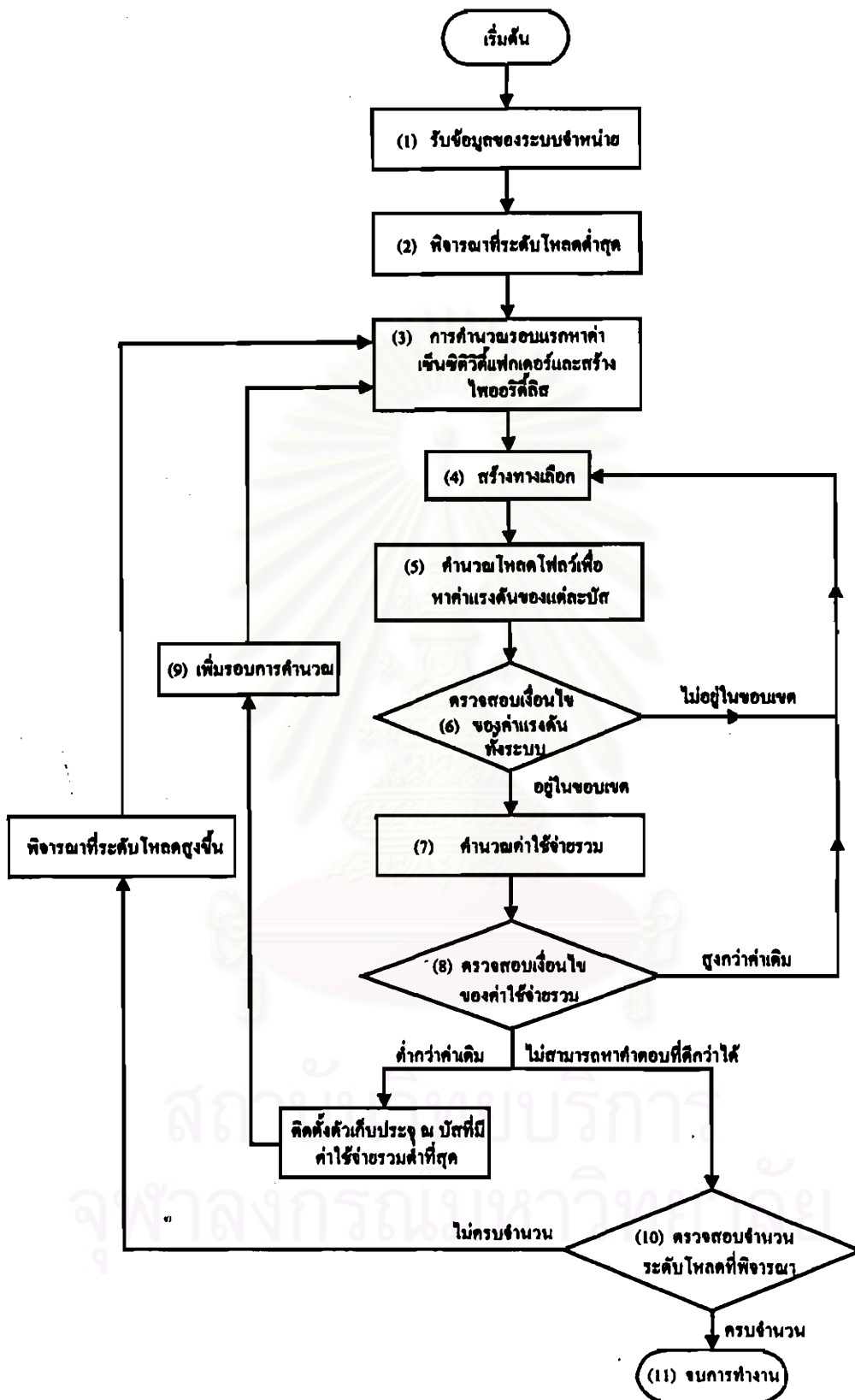
จากขั้นตอนการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนานในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนการคำนวณได้ดังรูปที่ 3-9



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-8 ขั้นตอนการคำนวณโหลดไฟฟ้ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน



รูปที่ 3-9 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนาน