

บทที่ 2

แนวทางในการจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยทั่วไป

ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นระบบจำหน่ายไฟฟ้าจัดว่าเป็นระบบที่มีความสำคัญยิ่งอีกส่วนหนึ่ง การดำเนินการใด ๆ เพื่อให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีประสิทธิภาพดีขึ้น ย่อมหมายถึงประโยชน์ที่จะเกิดขึ้นกับตัวผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะได้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณที่เพียงพอและมีคุณภาพที่ดี ส่วนประโยชน์ที่จะเกิดกับผู้ดำเนินการคือกำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง อันหมายถึงค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นลดลงนั่นเอง ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพได้นั้นขึ้นอยู่กับงานตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนในการก่อสร้างหรือขยายระบบ งานควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกำลังรีแอกทีฟ (Voltage and Reactive Power Control) การต่อไหลดกลับเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า การปลดไหลด การเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นต้น การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นแนวทางหนึ่งที่ได้รับการพิจารณาในการลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น วิธีการที่ใช้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีหลายวิธีได้แก่

- 1) การติดตั้งคาปาซิเตอร์
- 2) การเปลี่ยนสายให้มีขนาดใหญ่ขึ้น
- 3) ปรับใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น
- 4) จัดไหลดให้สมดุลย์
- 5) การจัดเรียงสายป้อนใหม่

นอกจากนั้นประโยชน์ที่จะได้จากการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Electrical power loss) ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ายังพอที่จะสรุปได้ดังนี้ [9]

- ลดขนาดระบบผลิตไฟฟ้า
- ลดขนาดระบบส่งพลังงานไฟฟ้า
- ลดขนาดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- ลดขนาดของสายป้อนไฟฟ้า

การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถทำได้ในขั้นตอนการวางแผน การออกแบบ และการปฏิบัติการ แนวทางที่นิยมใช้ประกอบด้วยการจัดการกำลังรีแอกทีฟด้วยการชดเชยด้วยคาปาซิเตอร์ ผลที่ได้คือทำให้กระแสไฟฟ้าในสายลดลง และเนื่องจากกำลังจริง

(Real power หรือ Active power) ที่สูญเสียแปรตามค่ากำลังสองของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นกำลังจริงที่สูญเสียมีค่าลดลงด้วย อีกแนวทางหนึ่งในระดับปฏิบัติการที่จะลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ก็คือการจัดเรียงสายบ่อนใหม่ ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงสภาพปัญหาการจัดเรียงสายบ่อนใหม่ และแนวทางการแก้ปัญหาการจัดเรียงสายบ่อนใหม่ที่ได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่อดีต

2.1 สภาพปัญหาการจัดเรียงสายบ่อนใหม่

การจัดเรียงสายบ่อนใหม่ หรืออาจเรียกว่า การจัดเรียงระบบใหม่ (Network reconfiguration) การจัดเรียงโหลดใหม่ หรือ การจัดเรียงใหม่ (Reconfiguration) เหตุผลที่เลือกใช้คำว่า การจัดเรียงสายบ่อนใหม่เป็นเพราะเป้าหมายในการจัดเรียงใหม่ในวิทยานิพนธ์นี้ทำเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายบ่อน การจัดเรียงสายบ่อนใหม่คือ การจัดสถานะปิด/เปิดของสวิตช์หรืออุปกรณ์ตัดตอนว่าควรอยู่ในตำแหน่งปิดหรือควรอยู่ในตำแหน่งเปิดจึงจะเหมาะสม สวิตช์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างโหนด (Node) ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามสถานะคือสวิตช์ที่อยู่ในตำแหน่งเปิดเรียกว่าสวิตช์ถ่ายโอน (Tie switch) และสวิตช์ที่อยู่ในตำแหน่งปิดเรียกว่าสวิตช์ตัดตอน (Sectionalizing switch) การเปลี่ยนสถานะปิด/เปิดของสวิตช์ทำให้เกิดโครงสร้างของระบบในรูปแบบใหม่

การจัดเรียงสายบ่อนใหม่นับว่าเป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งนอกจากลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแล้ว อาจจะทำจัดเรียงสายบ่อนใหม่เพื่อวัตถุประสงค์อื่น ๆ เช่น เพื่อต่อโหลดกลับเข้าระบบ เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับระบบ เพื่อจัดโหลดให้สมดุล เป็นต้น สำหรับโครงสร้างรูปแบบใหม่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนอกจากเกิดจากการจัดเรียงสายบ่อนใหม่แล้ว อาจเกิดการเปลี่ยนสถานะปิด/เปิดของอุปกรณ์ตัดตอนเพื่อวัตถุประสงค์อื่น ๆ เช่น เพื่อกำจัดเหตุผิดปกติ (Fault) ที่เกิดขึ้นออกจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อป้องกันอันตรายหรือความเสียหายที่จะเกิดกับตัวบุคคลหรือตัวระบบเอง หรือให้สวิตช์อยู่ในตำแหน่งเปิดเพื่อทำการซ่อมบำรุงระบบ

การจัดเรียงสายบ่อนใหม่ที่จะกล่าวต่อไปในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการจัดเรียงสายบ่อนใหม่ที่มีเป้าหมายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายบ่อนของระบบจำหน่ายไฟฟ้า สำหรับสิ่งที่ควรคำนึงถึงในการจัดเรียงสายบ่อนใหม่คือ ระดับแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การจัดเรียงสายบ่อนใหม่จะต้องไม่ทำให้การจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าหยุดชะงัก ความไม่ต่อเนื่องในการจ่ายไฟจะทำให้

ผู้ใช้ไฟได้รับความเสียหายอีกทั้งผู้ดำเนินการก็ขาดรายได้อันควรจะได้รับ จากสภาพปัญหาการจัดเรียงสายบ่อนใหม่และข้อจำกัดที่กล่าวมาสามารถอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} \text{เป้าหมาย} \\ \text{เงื่อนไข} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Min } PL = \sum_i^l (r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2}) \\ PF_i \leq LC_i ; i = 1, 2, \dots, l \\ V_i \leq VC ; i = 1, 2, \dots, n \\ RI \geq RC \\ \sum_j^{m_j} S_j \geq 1 ; j = 1, 2, \dots, n \end{array} \quad (2.1)$$

โดยที่ PL คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

PF_i คือ กำลังที่ไหลในสายช่วง i

LC_i คือ กำลังที่สายช่วง i จะรองรับได้

VC คือ ระดับแรงดันที่ยอมรับได้

RI คือ ดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบสำหรับระบบแต่ละรูปแบบโครงสร้าง

RC คือ ค่าความเชื่อถือได้ที่ยอมรับได้

S_j คือ สถานะปิด/เปิดของอุปกรณ์ตัดตอน เมื่อปิด $S_j = 1$ และเปิด $S_j = 0$

m_j คือ จำนวนอุปกรณ์ตัดตอนที่ต่ออยู่กับโหนด ที่ j

n คือ จำนวนโหนดทั้งหมด

l คือ จำนวนการเชื่อมโยงระหว่างโหนดสองโหนด

r_i, P_i, Q_i, V_i คือ ความต้านทาน กำลังจริง กำลังรีแอกทีฟ และแรงดันของโหนด ที่ i ตามลำดับ

นอกจากเงื่อนไขกำหนดมาข้างต้นสำหรับกรณีของระบบจำหน่ายไฟฟ้านี้สภาพของระบบส่วนใหญ่จะเป็นแบบเรเดียล(Radial) หรือทำงานที่ภาวะปกติจะมีสภาพของระบบเป็นแบบเรเดียลเพื่อให้การป้องกันระบบทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ การพัฒนาแนวทางการแก้ปัญหาการจัดเรียงใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจึงมักรวมเงื่อนไขความเป็นเรเดียลของระบบเป็นเงื่อนไขที่สำคัญด้วย

แนวทางการจัดการกับปัญหาการจัดเรียงสายบ่อนใหม่เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอาจจะเริ่มจากหารูปแบบโครงสร้าง(Configuration) ของระบบที่เป็นไปได้ทั้งหมด แต่ละรูปแบบโครงสร้างเป็นแบบเรเดียล ไม่มีโหนดใดที่ถูกตัดออกจากระบบ และค่าความเชื่อถือได้ของระบบอยู่ในเกณฑ์

ที่ยอมรับได้ จากนั้นใช้โปรแกรมโหนดโฟลว์เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขแรงดันและเงื่อนไขกำลังที่ไหลว่าเกินพิกัดหรือไม่ หากสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งสองก็หาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบสำหรับรูปแบบนั้นไว้ ขั้นตอนสุดท้ายก็เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่หาได้จากโหนดโฟลว์ของแต่ละรูปแบบ เพื่อหารูปแบบโครงสร้างที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำที่สุด หลักการดังกล่าวไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่ไม่สามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าจริงได้ เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีอุปกรณ์ตัดตอนเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณมากด้วย จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้แก้ปัญหา ณ เวลาจริง(Real time) สำหรับแนวทางการแก้ปัญหาการจัดเรียงสายป้อนใหม่ที่ได้พยายามพัฒนากันที่ผ่านมาในอดีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 วิธี คือ

- 1) วิธี Switch exchange (SE) [4,10-13]
- 2) วิธี Sequential switch opening (SSO) [6,16]
- 3) วิธี Simulated annealing (SA) [18-21]
- 4) ใช้เครือข่ายประสาทแบบป้อนสู่ด้านหน้า [24]

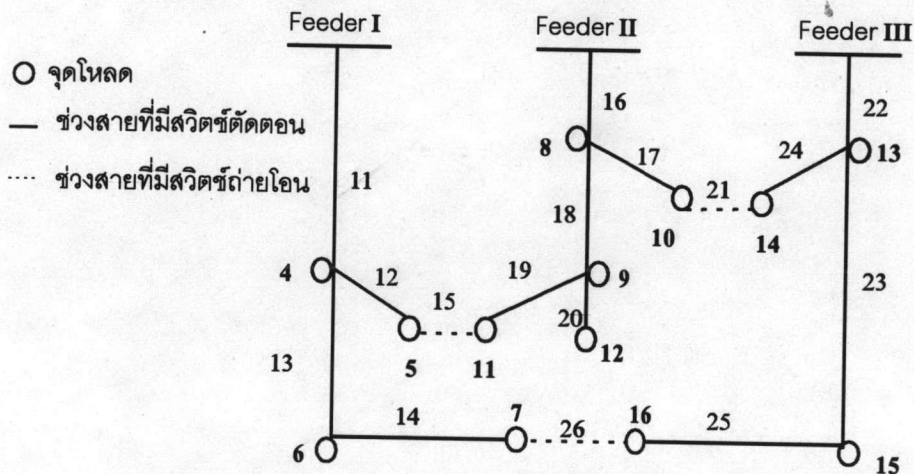
วิธีที่ 1) และวิธีที่ 2) จัดว่าเป็นวิธีฮิวริสติก (Heuristic) ซึ่งอาศัยกฎเกณฑ์ที่กำหนดได้ตั้งแต่ตอนต้น ทำให้ต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของตัวบุคคลเป็นพิเศษในการแก้ปัญหา จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้วิธีทั้งสองขาดความยืดหยุ่นในการใช้งาน ส่วนสองวิธีที่เหลือคือวิธีที่ 3) และวิธีที่ 4) นับได้ว่าเป็นการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทในการแก้ปัญหาการจัดเรียงสายป้อนใหม่ วิธี SA ให้คำตอบที่น่าพอใจแต่ยังใช้เวลาในการประมวลผลนาน

2.2 การจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยวิธี Switch exchange (SE)

วิธีการจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยวิธี SE นี้เริ่มพัฒนาและตีพิมพ์ลงวารสาร IEEE โดย Civanlar และคณะในปี ค.ศ. 1988 [10] Civanlar และคณะได้นำเสนอหลักการในการจัดเรียงสายป้อนใหม่ด้วยวิธี SE พร้อมทั้งพัฒนาการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ต่อมาได้มีการปรับปรุงและประยุกต์วิธีการดังกล่าวโดยนักวิจัยหลายท่าน [4,11-13] โดยมุ่งเน้นปรับปรุงประสิทธิภาพการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียให้เร็วขึ้นและปรับปรุงเกณฑ์ในการพิจารณา(Criteria)ว่าเป็นรูปแบบโครงสร้างที่มีความเป็นไปได้หรือไม่ ทั้งนี้เพื่อให้รูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่จะนำมาพิจารณามีจำนวนน้อยลง

2.2.1 แนวคิดการจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยวิธี SE

การจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยวิธี SE เริ่มจากการเลือกสวิตช์ตัดตอนที่อยู่ในสถานะปิดเพื่อจะเปลี่ยนสถานะเป็นเปิด ขณะเดียวกันก็เลือกสวิตช์ถ่ายโอนที่อยู่ในสถานะเปิดเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นปิด โดยที่การกระทำดังกล่าวจะต้องทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบลดลงขณะเดียวกันเงื่อนไขต่างๆของระบบจำหน่ายไฟฟ้าต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กระบวนการดังกล่าวอาจจะเลือกทำกับสวิตช์ครั้งละ 1 คู่ หรือครั้งละหลายคู่ก็ได้ โดยที่ในการกระทำแต่ละครั้งนั้นต้องทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงมากที่สุดสำหรับสภาวะนั้นๆ (Local optimal) จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าจะต้องทราบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง และเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใด หากใช้โปรแกรมไหลดโฟลว์คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แท้จริง จะต้องใช้เวลาในกระบวนการดังกล่าวนี้นาน แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่จะใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจเปลี่ยนสถานะของสวิตช์นั้นเพียงต้องการทราบค่าการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ (Relative Change) เท่านั้น [10,13] ซึ่งหมายความว่าสามารถใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงโดยประมาณแทนค่าการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริงได้นั่นเอง



ภาพที่ 2.1 แสดงระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีสายป้อน 3 ชุด

พิจารณาภาพที่ 2.1 ในปี ค.ศ. 1988 Civanlar [10] และคณะนำเสนอสมการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเนื่องจากการถ่ายโอนโหลดจากสายป้อน II (Feeder II) ไปยังสายป้อน I

$$\Delta P = \operatorname{Re} \left\{ 2 \left(\sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n)^* \right\} + R_{loop} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2 \quad (2.2)$$

โดยที่ D คือ กลุ่มโหนดที่ถ่ายโอนจากสายป้อน II ไปยังสายป้อน I

m คือ โหนดถ่ายโอน(Tie node) ของสายป้อน I ที่รับโหลดมาจากสายป้อน II

n คือ โหนดถ่ายโอนของสายป้อน II ซึ่งจะเชื่อมต่อเข้ากับโหนด m ของสายป้อน I

I_i คือ กระแสที่โหนด i (เป็นจำนวนเชิงซ้อน)

R_{loop} คือ ความต้านทานอนุกรมของสายป้อนทั้งหมดในเส้นทาง(Path) ที่เชื่อมต่อระหว่างสายป้อน I และสายป้อน II

$$E_m = (R_{bus,m}) \times (I_{bus,m})$$

$R_{bus,m}$ คือ เมทริกซ์ความต้านทาน(Bus resistance matrix) ของสายป้อน I ก่อนการถ่ายโอนโหลดโดยใช้โหนดต้นทางที่สถานีไฟฟ้าย่อยเป็นโหนดอ้างอิง

$I_{bus,m}$ คือ เวกเตอร์ของกระแสของสายป้อน I

$E_n = R_{bus,n} I_{bus,n}$; เช่นเดียวกับ E_m แต่เป็นค่าสำหรับโหนด n ของสายป้อน II

$\operatorname{Re}(\cdot), *, |\cdot|$ คือ ค่าส่วนจริงของจำนวนเชิงซ้อน ค่าสังยุค (Conjugate) และค่าขนาด(Magnitude) ตามลำดับ

จากสมการที่ 2.2 พจน์ที่สองด้านขวาของสมการมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียจะลดลงก็ต่อเมื่อพจน์แรกด้านขวาของสมการมีค่าเป็นลบ โดยปกติผลต่างระหว่างมุมของแรงดัน (Voltage phase angle) มีค่าน้อย และหากมีการชดเชยที่ตีมุมของกระแสจะเท่ากับมุมของแรงดัน (In phase) นั่นคือ พจน์แรงด้านขวาของสมการจะมีค่าเป็นลบถ้า

$$|E_m| < |E_n| \quad (2.3)$$

จากข้อสังเกตดังกล่าวหมายความว่าในการตัดสินใจจะสับสวิตช์หรือไม่นั้นเราต้องการทราบเพียงแรงดันที่โหนดด้านปลายทั้งสองของสวิตช์ถ่ายโอนเท่านั้น ผลจากการสังเกตที่ได้ในสมการที่ 2.3 นี้ Civanlar และคณะใช้เป็นเงื่อนไขในการจัดรูปแบบโครงสร้างของระบบทำให้รูปแบบของระบบที่จะนำมาพิจารณาต่อไปมีจำนวนลดน้อยลง นั่นคือเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็ลดลงด้วยเช่นกัน

ตัวอย่างการใช้สมการที่ 2.2

1) จากภาพที่ 2.1 สมมติว่าถ่ายโอนโหลดที่โหนด 11 จากสายป้อน II ไปยังสายป้อน I

โดยการปิดสวิตช์ถ่ายโอน 15 และเปิดสวิตช์ตัดตอน 19 ในกรณีนี้ $D = \{11\}$, $m = 5$, $n = 11$ จะ
ได้การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนโหลดดังนี้

$$\Delta P = \text{Re} \left[2I_{11}(E_5 - E_{11})^* \right] + R_{loop} |I_{11}|^2$$

โดยที่ R_{loop} คือ ความต้านทานของสายทั้งหมดประกอบด้วยความต้านทานของสายในช่วง 11, 12, 15, 19, 18, 16

2) สมมติว่าถ่ายโอนโหลดที่โหนด 9, 11, 12 จากสายป้อน II ไปยังสายป้อน I โดยการ
ปิดสวิตช์ถ่ายโอน 15 และเปิดสวิตช์ตัดตอน 18 สำหรับกรณีนี้ $D = \{9, 11, 12\}$, $m = 5$, $n = 11$
จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการถ่ายโอนดังนี้

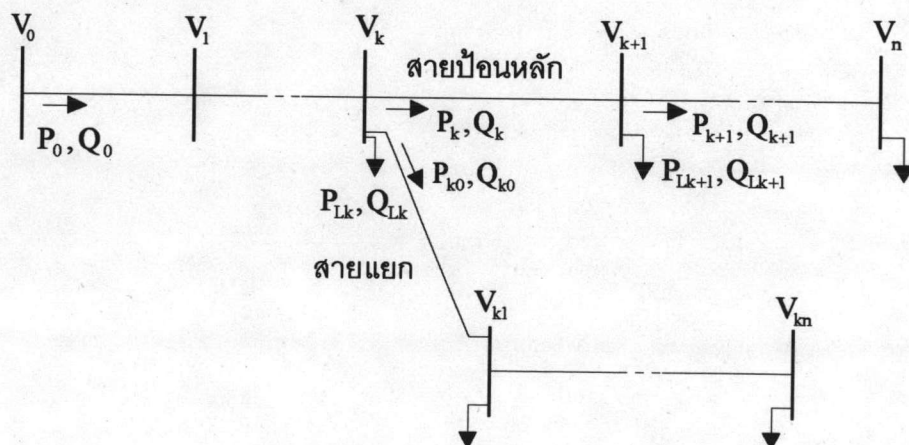
$$\Delta P = \text{Re} \left[2(I_9 + I_{11} + I_{12})(E_5 - E_{11})^* \right] + R_{loop} |I_9 + I_{11} + I_{12}|^2$$

โดยที่ R_{loop} มีค่าเหมือนในข้อ 1)

งานของ Civanlar และคณะนั้นเลือกพิจารณาที่สวิตช์ถ่ายโอนและสวิตช์ตัดตอนที่ละ 1 คู่ จาก
จุดเริ่มต้นนี้ได้มีการพัฒนาปรับปรุงวิธีการ SE ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในปี ค.ศ. 1989 Baran และ Wu [11] ได้นำหลักการของวิธี SE ใช้สำหรับปัญหาการจัด
เรียงสายป้อนใหม่เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและจัดโหลดให้สมดุลย์ Baran และ Wu ได้นำเสนอ
แนวทางการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้นใหม่ด้วยสมการโหลดโพลาร์สำหรับระบบจำหน่าย
ไฟฟ้าแบบเรเดียลที่เรียกว่า สมการ DistFlow branch เมื่อประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดเรียงสาย
ป้อนใหม่ Baran และ Wu ได้นำเสนอวิธีการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 2 แนวทางด้วยกันคือ

- 1) วิธี Backward and forward update of DistFlow
- 2) วิธี Simplified DistFlow



ภาพที่ 2.2 แสดงไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล

1) วิธี Backward and forward update of DistFlow

เป็นวิธีที่ใช้กระบวนการทำซ้ำกับชุดสมการ DistFlow branch จากภาพที่ 2.2 พิจารณาสายป้อนหลัก(Main Feeder)จะได้รับความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{L_{i+1}} \\ Q_{i+1} &= Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{L_{i+1}} \\ V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \end{aligned} \right\} \quad 2.4$$

โดยที่ P_i, Q_i, V_i คือ กำลังจริง กำลังรีแอกทีฟและแรงดันที่โหนด i

r_i, x_i คือ ความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของสายที่อยู่ระหว่างโหนด i กับ $i-1$

$P_{L_{i+1}}, Q_{L_{i+1}}$ คือ กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟของโหลดที่โหนด $i+1$ ตามลำดับ

สำหรับความหมายของตัวห้อย(Subscript) $i-1$ แสดงเป็นโหนดที่อยู่ก่อนหน้าโหนด i และโหนด $i+1$ คือโหนดที่อยู่ถัดจากโหนด i ส่วนตัวห้อย L บอกเราว่าเป็นค่าสำหรับโหลด ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.4 หากทราบข้อมูลที่โหนดต้นทางก็สามารถหาค่าต่าง ๆ ที่โหนดอื่นๆ ได้ เราเรียกชุดสมการนี้ว่า Forward update แต่ถ้าหากทราบค่าที่โหนดปลายทาง ก็สามารถปรับใช้สมการที่ 2.4 ในการหาค่าที่โหนดอื่นๆ ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} P_{i-1} &= P_i + r_i \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + P_{L_i} \\ Q_{i-1} &= Q_i + x_i \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + Q_{L_i} \\ V_{i-1}^2 &= V_i^2 + 2(r_i P_i' + x_i Q_i') - (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

โดยที่ $P_i' = P_i + P_{L_{i+1}}$

$Q_i' = Q_i + Q_{L_{i+1}}$

ทำนองเดียวกับสมการที่ 2.4 เราเรียกสมการที่ 2.5 ว่า Backward update วิธีการนี้ Baran และ Wu ใช้ประสพผลเป็นอย่างดีกับการหาขนาดคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล [14]

2) วิธี Simplified DistFlow

เป็นวิธีที่ได้จากการประมาณค่าต่าง ๆ ในสมการที่ 2.4 เนื่องจากพจน์กำลังสองที่อยู่ด้าน

ขวาของสมการมีค่าน้อยสามารถตัดค่าดังกล่าวทิ้ง จากสมการที่ 2.4 จึงได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - P_{Li+1} \\ Q_{i+1} &= Q_i - Q_{Li+1} \\ V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

เนื่องจากระบบเป็นแบบเรเดียลดังภาพที่ 2.2 สมการที่ 2.6 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} P_{i+1} &= \sum_{k=i+2}^n P_{Lk} \\ Q_{i+1} &= \sum_{k=i+2}^n Q_{Lk} \\ V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

โดยที่ n คือ โหนดสุดท้ายของแต่ละสายแยก(Lateral)

วิธีที่ 2) (Simplified DistFlow) ใช้เวลาในการคำนวณที่รวดเร็วมาก ขณะที่วิธีแรกให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำน่าเชื่อถือมากกว่า Baran และ Wu ได้แนะนำให้ใช้วิธีที่ 2) ในตอนแรกและเมื่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าน้อยให้เปลี่ยนไปใช้วิธีที่ 1) เพื่อให้ได้คำตอบที่แม่นยำ

กระบวนการที่ใช้โดย Civanlar และคณะ และ Baran และ Wu [10,14] เป็นการหาค่าคำตอบที่ดี ณ ตำแหน่งหรือภาวะนั้น ซึ่งอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับระบบก็ได้ ในปี ค.ศ. 1991 Nara, Satoh และ Kuwabara [12] ได้ทำวิธี SE ซ้ำจนกว่าได้คำตอบที่ดีที่สุด Nara และคณะเรียกว่าวิธีการดังกล่าวว่า Multi-stage branch exchange ในปี ค.ศ. 1992 Goswami และ Basu [13] ได้เสนอแนวทางในการเลือก ปิด/เปิด สวิตช์ โดยจะเลือกปิดสวิตช์ถ่ายโอนเพียง 1 สวิตช์เพื่อให้เกิดเป็นวงรอบ (Loop) ขึ้น จากนั้นใช้ Optimal flow ในการเลือกเปิดสวิตช์ที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าคงสภาพเป็นเรเดียล จากนั้นพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบว่าต่ำที่สุดแล้วหรือยัง หากยังไม่ใช่ก็ทำซ้ำโดยเริ่มจากการเลือกปิดสวิตช์ถ่ายโอนอีกครั้งจนกว่าได้คำตอบที่ดีที่สุด สำหรับคำตอบจากโหนดโพลาร์ที่ Goswami และ Basu ใช้ นั้นเป็นวิธีการที่ Goswami และ Basu ได้พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1991 [15]

2.3 การจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยวิธี Sequential switch opening (SSO)

ปี ค.ศ. 1989 Shirmohammadi และ Hong [16] ได้นำเสนอวิธีการจัดเรียงสายป้อนแบบ SSO ซึ่งได้พัฒนาโดย Merlin และ Back ในปี ค.ศ. 1975 และ Holmsky ในปี ค.ศ. 1975 ทั้ง

Shirmohammadi และ Hong ได้ใช้วิธีแก้ปัญหาโหลดโพลาร์ที่เขาคได้พัฒนาขึ้นสำหรับใช้กับระบบสายส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า [17] ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Roytelman และคณะ [6] ใช้วิธีการ SSO ในการจัดเรียงสายป้อนใหม่กับระบบ DMS (Distribution management system) ซึ่งพิจารณาเป้าหมายในการจัดเรียงสายป้อนใหม่หลายเป้าหมาย(Multi-object)

2.3.1 แนวคิดการจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยวิธี SSO

การจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยวิธีนี้เริ่มจากการปิดสวิตช์ถ่ายโอนทั้งหมด รูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าจึงเกิดเป็นแบบวงรอบ(Loop) หลังจากนั้นพิจารณาเลือกเปิดสวิตช์เพื่อให้เกิดระบบแบบเรเดียล และกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าน้อย นั่นคือวิธีการแก้ปัญหาโหลดโพลาร์ที่จะใช้กับการจัดเรียงสายป้อนด้วยวิธี SSO ต้องใช้ได้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เป็นทั้งแบบวงรอบและแบบเรเดียล จากแนวทางของวิธี SSO สภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในตอนเริ่มต้นทุกสวิตช์อยู่ในตำแหน่งปิดซึ่งหมายความว่าคำตอบของวิธีการดังกล่าวจะไม่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบในตอนเริ่มต้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบในปัจจุบัน ในการเลือกเปิดสวิตช์นั้น Shirmohammadi และ Hong [16] เลือกใช้วิธี Optimal flow เพื่อให้การเปิดสวิตช์ครั้งนั้นมีกระแสไหลในระบบต่ำที่สุด Shirmohammadi และ Hong ได้เลือกใช้แบบจำลองโหลดเป็นแบบกระแสคงที่(Current constant) แทนที่จะแบบจำลองแบบกำลังคงที่ซึ่งใช้ในการแก้ปัญหาโหลดโพลาร์โดยทั่วไป เช่น วิธีนิวตัน-ราฟสัน หรือวิธีฟาสต์ดีคัปเปิล

Optimal flow ที่นำเสนอโดย Shirmohammadi และ Hong ในงานที่ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1984 มีดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} \text{เป้าหมาย} \\ \text{เงื่อนไข} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Min} \sum_{i=1}^m R_i |J_i|^2 \\ \mathbf{AJ} = \mathbf{I} \end{array} \quad (2.8)$$

โดยที่ R_i คือ ความต้านทานของสายในช่วงสาย i

J_i คือ กระแสที่ไหลในช่วงสาย i

J คือ เวกเตอร์ของกระแส สมาชิกของเวกเตอร์ประกอบด้วย J_i ; $i = 1, 2, \dots, m$

I คือ เวกเตอร์ของค่าโหลดซึ่งแทนด้วยใช้จำลองแบบกระแสคงที่ มีสมาชิกทั้งหมด n ตัว

A คือ เมตริกซ์เชื่อมโยง(Incidence matrix) ขนาด $n \times m$ สมาชิกประกอบด้วย a_{ij}

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ถ้าช่วงสาย } i \text{ มีโหนดต้นทางคือโหนด } j \\ -1 & \text{ถ้าช่วงสาย } i \text{ มีโหนดปลายทางคือโหนด } j \\ 0 & \text{ถ้าช่วงสาย } i \text{ ไม่ต่อกับโหนด } j \end{cases}$$

m คือ จำนวนช่วงสายทั้งหมด

n คือ จำนวนโหนดทั้งหมด

2.4 การจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยวิธี Simulated annealing (SA)

การหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธี Simulated annealing (SA) เป็นเทคนิคที่เลียนแบบการปรับตัวสู่ภาวะเสถียรภาพอะตอมโลหะ โลหะประกอบด้วยอะตอมหลายอนุภาค ในภาวะที่โลหะมีสถานะเป็นก๊าซมีอุณหภูมิสูงและมีพลังงานสูงอะตอมต่าง ๆ จะจัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบ การจัดเรียงตัวของอนุภาคจะยึดโยงเป็นระเบียบที่สถานะของแข็งหากอุณหภูมิเริ่มต้นในสถานะก๊าซสูงเพียงพอและการเย็นตัวลง (อุณหภูมิลดลง) เป็นไปอย่างช้า ๆ เมื่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคของโลหะที่สถานะของแข็งเป็นระเบียบก็เกิดผลึกของโลหะที่แข็งแรงนั่นเอง กระบวนการดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้หาคำตอบที่เหมาะสม (Optimization) ผลลัพธ์ของปัญหาการจัดเรียงให้ได้มาซึ่งคำตอบที่เหมาะสมสามารถเทียบได้กับสถานะทางกายภาพของโลหะ ส่วนค่าของฟังก์ชันเป้าหมายเทียบได้กับระดับพลังงานในแต่ละสถานะของโลหะ สำหรับอุณหภูมิถูกใช้เป็นตัวแปรสำหรับควบคุมกระบวนการหาคำตอบ วิธี SA [18] จะเกี่ยวข้องกับกลไกต่างๆ เช่น การจัดโครงสร้าง (A configuration space) กลไกการกระตุ้น (A perturbation mechanism) ฟังก์ชันเป้าหมายและกระบวนการเย็นตัวลง (Cooling schedule)

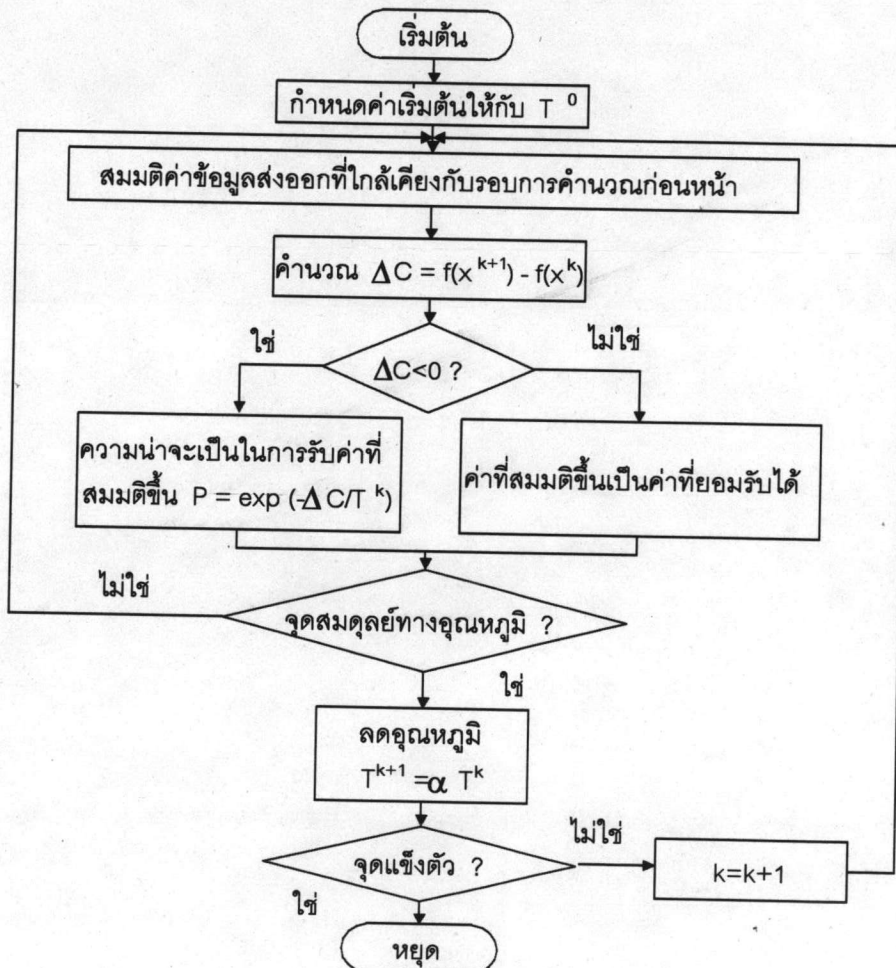
การแก้ปัญหาการจัดเรียงสายป้อนใหม่ด้วยวิธี SA ที่นำเสนอโดย Nara และ Kitagawa ในปี ค.ศ. 1991 [19] แทนด้วยสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขดังนี้

$$\text{ฟังก์ชันเป้าหมาย} \quad \text{Min} \sum_t \sum_i \sum_j \left\{ (I_{ji}^t)^2 + \frac{1}{3} (I_j^t)^2 \right\} r_j x_{ij} \quad (2.9)$$

เงื่อนไข

- ขีดจำกัดของสาย $\sum_{j \in J_k} I_{ji}^t x_{ij} \leq b_{ik} ; i = 1, 2, \dots, I ; t = 1, 2, \dots, T ;$
 $k = 1, 2, \dots, K$
- ขีดจำกัดของหม้อแปลง $\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} I_j^t x_{ij} \leq b_r ; r = 1, 2, \dots, R ; t = 1, 2, \dots, T$
- ขีดจำกัดแรงดันตก $\sum_{m \in I_l} \left(\sum_{q \in J_{il}} u_q^t x_{iq} \right) z_m \leq v_{il} ; i = 1, 2, \dots, I ; l = 1, 2, \dots, E_i ;$
 $t = 1, 2, \dots, T$

- ขั้นตอนที่ 4 : สุ่มเดาค่า r จากช่วง $[0,1)$ และหาค่าความเป็นไปได้ในการยอมรับคำตอบ (Probability of acceptance) $P = \exp(-\Delta C/T^k)$ ถ้า $r < P$ แสดงว่าค่าในขั้นตอนที่ 2 เป็นค่าที่ยอมรับได้และให้ทำขั้นตอนที่ 5 ต่อไป หาก $r \geq P$ ให้ย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2
- ขั้นตอนที่ 5 : ลดอุณหภูมิในรอบการคำนวณถัดไป $T^{k+1} = \alpha T^k$; $0 < \alpha < 1$
- ขั้นตอนที่ 6 : ถ้า $\Delta C < \epsilon$ เมื่อ ϵ คือค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ หรือ $T = T_{\min}$ เมื่อ T_{\min} คืออุณหภูมิต่ำสุดที่กำหนดให้แต่ละระบบหากสอดคล้องกับเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งแสดงว่าถึงจุดแข็งตัว (Freezing point) ให้จบการทำงาน แต่ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว ให้ $k = k+1$ และทำซ้ำขั้นตอนที่ 2



ภาพที่ 2.3 แสดงขั้นตอนวิธีสำหรับวิธี SA

การลดอุณหภูมิของวิธี SA นี้ใช้ค่าความน่าจะเป็นของโบลท์มานน์เพื่อตัดสินใจว่าคำตอบยอมรับได้หรือไม่ การลดอุณหภูมิของวิธี SA จึงถูกนำไปใช้กับเครือข่ายประสาทแบบ

โบลท์มานน์ จากข้อเท็จจริงดังกล่าวจึงมีนักวิจัยหลายท่านพิจารณาให้วิธี SA เป็นวิธีเครือข่าย
ประสาทดด้วย [22-23]

ฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขสำหรับการจัดเรียงสายป้อนใหม่เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย
ด้วยวิธี SA อีกแนวทางหนึ่งที่พัฒนาขึ้น [18,19,21]

$$\left. \begin{array}{l} \text{ฟังก์ชันเป้าหมาย} \\ \text{เงื่อนไข} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Min}_{g_i} \sum_{i=0}^{n_b-1} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \\ F(z, g_i) = 0 \\ G(x, g_i) \leq 0 \\ N(g_0, g_i) \leq n_d \end{array} \quad (2.10)$$

โดยที่ g_0 คือ รูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลในตอนเริ่มต้น

g_i คือ รูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลที่เป็นไปได้

n_d คือ จำนวนการปิดหรือเปิดสวิตช์สูงสุดที่เป็นไปได้

Z คือ $(P_{10}, Q_{10}, \dots, P_{m0}, Q_{m0}, P_{00}, Q_{00})^T$

n_b คือ จำนวนช่วงสายทั้งหมดของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

- $F(z, g_i) = 0$ คือ $F(z) = 0$ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลรูปแบบโครงสร้าง i

$F(z) = 0$ ประกอบด้วยชุดสมการ

$$P_{on} = \hat{P}_{on}(z_{00}, z_{10}, \dots, z_{ko}, |V_{00}|) = 0$$

$$Q_{on} = \hat{Q}_{on}(z_{00}, z_{10}, \dots, z_{ko}, |V_{00}|) = 0$$

$$P_{kn_k} = \hat{P}_{kn_k}(z_{00}, z_{10}, \dots, z_{jo}, |V_{00}|) = 0$$

$$Q_{kn_k} = \hat{Q}_{kn_k}(z_{00}, z_{10}, \dots, z_{jo}, |V_{00}|) = 0$$

โดยที่ $k \geq j; k = 1, 2, \dots, m$

z_{ko} คือ $[P_{ko}, Q_{ko}]$

m คือ จำนวนสายแยกทั้งหมด

P_{on}, Q_{on} คือ กำลังจริง กำลังรีแอกทีฟที่โหนดปลายทางของสายป้อนหลัก (Main feeder)

P_{kn_k}, Q_{kn_k} คือ กำลังจริง กำลังรีแอกทีฟที่โหนดปลายทางของสายแยก k

- $G(x, g_i) = 0$ คือ $G(x) = 0$ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลรูปแบบโครงสร้าง i

$G(x) = 0$ ประกอบด้วยชุดสมการ

$$V_{j,\min} \leq |V_j| \leq V_{j,\max}$$

$$I_{ij,\min} \leq |I_{ij}| \leq I_{ij,\max}; j = 1, 2, \dots, n$$

โดยที่ $|V_j|$ คือ ขนาดแรงดันที่โหนด j

$V_{j,\min}, V_{j,\max}$ คือ แรงดันต่ำสุดและแรงดันสูงสุดที่โหนด j ที่ยอมรับได้

$|l_{ij}|$ คือ ขนาดกระแสที่ไหลในสายระหว่างโหนด i กับโหนด j

$l_{ij,\min}, l_{ij,\max}$ คือ กระแสต่ำสุดและสูงสุดที่ยอมให้ไหลในสายระหว่าง โหนด i กับโหนด j

n คือ จำนวนโหนดทั้งหมด

- $N(g_o, g_i)$ คือ จำนวนการปิดหรือเปิดสวิตช์เพื่อเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างระบบจากตอนเริ่มแรก เป็นไปโครงสร้าง i

ในการเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างระบบนั้น Chiang และ Jean - Jumean [18,19] ได้นำเสนอวิธีเพิ่ม/หักออก (Add/subtract) ในฐานะของกลไกการกระตุ้น โดยกำหนดให้

$$\Omega_{\text{closed}} = (S_1, S_2, \dots, S_{n_s})$$

$$\Omega_{\text{open}} = (t_1, t_2, \dots, t_{n_t})$$

โดยที่ Ω_{closed} คือ กลุ่มของสวิตช์ตัดตอน

Ω_{open} คือ กลุ่มของสวิตช์ถ่ายโอน

n_s คือ จำนวนสวิตช์ตัดตอนทั้งหมด

n_t คือ จำนวนสวิตช์ถ่ายโอนทั้งหมด

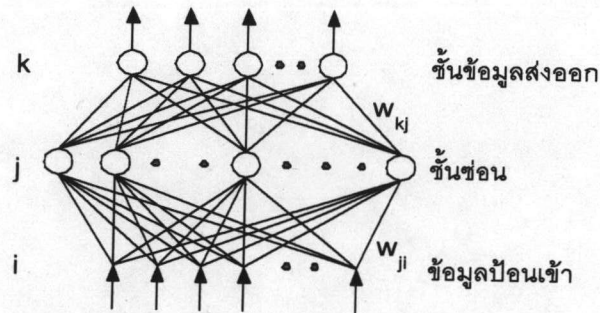
ขั้นตอนการเปลี่ยนโครงสร้างมี 2 ขั้นตอน คือ

- ขั้นตอนที่ 1. สุ่มเลือกสวิตช์ถ่ายโอน t_i เพื่อเปิดสวิตช์ทำให้เกิดวงรอบขึ้นมา ในขั้นตอนนี้ t_i จะถูกหักออกจาก Ω_{open} และจะไปเพิ่มสมาชิกให้กับ Ω_{closed}
- ขั้นตอนที่ 2. เพื่อให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ายังเป็นแบบเรเดียล สุ่มเลือกสวิตช์ตัดตอน S_i จาก Ω_{closed} ทำนองเดียวกับขั้นตอนที่ 1 จะหัก S_i ออกจาก Ω_{closed} และนำไปใส่ให้กับ Ω_{open}

2.5 การจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยวิธีเครือข่ายประสาทแบบป้อนสู่ด้านหน้า

วิธีการนี้นำเสนอโดย Kim, Ko และ Jung [24] เป็นการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทที่มีการเรียนรู้แบบมีการควบคุม (Supervised learning process) มาแก้ปัญหการจัดเรียงสายป้อนใหม่ เครือข่ายประสาทที่นำมาใช้เป็นแบบป้อนสู่ด้านหน้า เครือข่ายประสาทที่ถูกนำมาใช้ในการกำหนดระดับโหลด (Load level) และใช้ในการหาโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เหมาะสม

(Switch status topology) หลักการของเครือข่ายประสาทแบบป้อนสู่ด้านหน้าจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 2.4 แสดงเครือข่ายประสาทแบบป้อนสู่ด้านหน้า

2.5.1 เครือข่ายประสาทแบบป้อนสู่ด้านหน้า

เครือข่ายประสาทที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดเรียงสายป้อนใหม่ ในงานของทั้งสามคนเป็นแบบป้อนสู่ด้านหน้าหลายชั้น และมีการเรียนรู้แบบแพร่กระจายความผิดพลาดกลับ (Error back propagation) โครงสร้างเครือข่ายแบบป้อนสู่ด้านหน้า 2 ชั้น ประกอบด้วยชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นข้อมูลส่งออก ภาพที่ 2.4 การเรียนรู้แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ

กระบวนการแรกประกอบด้วย การแบ่งกระจายข้อมูลป้อนเข้าสู่ด้านหน้า เมื่อป้อนข้อมูลป้อนเข้าให้กับส่วนรับข้อมูลป้อนเข้า เพื่อปรับค่าข้อมูลป้อนเข้าด้วยการคูณค่าการเชื่อมโยง (Weight หรือ Connection หรือ Synapse) แล้วจะส่งผลที่ได้ให้กับชั้นซ่อน ข้อมูลป้อนเข้าของนิวรอน j (net_j) มีค่าดังนี้

$$net_j = \sum_{i \in S_j} w_{ji} y_i \quad (2.11)$$

โดยที่ net_j คือ ข้อมูลป้อนเข้าทั้งหมดของนิวรอน j

S_j คือ กลุ่มข้อมูลที่ป้อนให้กับนิวรอน j

w_{ji} คือ ค่าการเชื่อมโยงระหว่างนิวรอน i และนิวรอน j

y_i คือ ข้อมูลส่งออกของนิวรอน i

กำหนดให้ข้อมูลส่งออกของนิวรอน j คือ y_j จะได้

$$y_j = f_j(net_j) \quad (2.12)$$

โดยที่ $f_j(\)$ คือ ฟังก์ชันแอคทิเวชัน (Activation function) ของนิวรอน j

หากใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function) เป็นฟังก์ชันแอคทิเวชัน จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$y_j = \frac{1}{1 + \exp\left\{-\left(\sum_{i \in S_j} w_{ji} y_i + \theta_j\right)\right\}} \quad (2.13)$$

โดยที่ θ_j คือ ค่าขีดจำกัดของนิวรอน j

กระบวนการที่สองของการเรียนรู้เป็นการปรับค่า การเชื่อมโยงและค่าขีดจำกัด โดยการแพร่กระจายความผิดพลาดกลับเพื่อปรับค่าความแตกต่างให้มีค่าน้อยที่สุด กำหนดให้ฟังก์ชันค่าผิดพลาด มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Err = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_j (t_{pj} - y_{pj})^2 \quad (2.14)$$

โดยที่ P คือ จำนวนคู่ชุดข้อมูลป้อนเข้าและข้อมูลส่งออก

t_{pj} คือ ข้อมูลส่งออกที่ต้องการ

y_{pj} คือ ข้อมูลส่งออกที่ได้จริงจากเครือข่ายประสาท

กระบวนการปรับสอน (Training) ใช้กฎการเรียนรู้แบบเดลตา (Delta rule) ซึ่งมีพื้นฐานจากเทคนิคการหาค่าต่ำสุดแบบเกรเดียนต์เดสเซนท์ (Gradient descent minimization) การเปลี่ยนแปลงค่าการเชื่อมโยงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Delta w_{ji}^n = \eta \delta_{pj} y_{pi} \quad (2.15)$$

โดยที่ n คือ รอบการคำนวณ

η คือ อัตราการเรียนรู้

δ_{pj} คือ ค่าผิดพลาดจากนิวรอน j สำหรับชุดข้อมูล p

y_{pi} คือ ข้อมูลส่งออกของนิวรอน i สำหรับชุดข้อมูล p

ค่าผิดพลาดจะแตกต่างกันตามชั้นของเครือข่ายประสาทดังความสัมพันธ์

$$\delta_{pj} = \begin{cases} (t_{pj} - y_{pj}) y_{pj} (1 - y_{pj}) & \text{เมื่อ นิวรอน } j \text{ คือ นิวรอน ในชั้นข้อมูลส่งออก} \\ y_{pj} (1 - y_{pj}) \sum_k \delta_{pk} w_{kj} & \text{เมื่อ นิวรอน } j \text{ คือ นิวรอน ในชั้นซ่อน} \end{cases} \quad (2.16)$$

ค่าการเชื่อมโยงในรอบการคำนวณใหม่หาได้จาก

$$w_{ji}^{n+1} = w_{ji}^n + \Delta w_{ji}^n \quad (2.17)$$

เพื่อให้เครือข่ายลู่เข้าสู่คำตอบเร็วขึ้น อาจเพิ่มพจน์โมเมนตัม (Momentum term) ให้กับการเปลี่ยนแปลงค่าการเชื่อมโยงจากสมการที่ 2.15

$$\Delta w_{ji}^n = \eta \delta_{pj} y_{pi} + \alpha \Delta w_{ji}^{n-1} \quad (2.18)$$

โดยที่ α คือ โมเมนตัมแฟคเตอร์

2.5.2 การจัดเรียงสายป้อนใหม่โดยเครือข่ายประสาทแบบป้อนสู่ด้านหน้า

Kim และคณะได้นิยามปัญหาการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในรูปแบบที่สามารถแก้ปัญหาด้วยเทคนิคเครือข่ายประสาทแบบป้อนสู่ด้านหน้าดังนี้

$$\text{ฟังก์ชันเป้าหมาย} \quad \text{Min } PL = \sum_i^l \left(r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{เงื่อนไข} \quad & SL_i \leq LC_i ; i = 1, 2, \dots, l \\ & \left| \sum_{j \in LS(s,e)} \left(\sum_{\substack{i \in LS(s,e) \\ i \geq j}} I_i \right) Z_j \right| \leq Ve ; i = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (2.19)$$

โดยที่ PL คือกำลังจริงสูญเสียทั้งหมด

l คือ จำนวนช่วงสายระหว่างโหนดทั้งหมด

$Z_i, r_i, I_i, SL_i, LC_i$ คือ อิมพีแดนซ์สาย ความต้านทานสาย กระแสในสาย กำลังที่ไหลในสาย และกำลังที่สายรองรับได้ สำหรับช่วงสาย i ตามลำดับ

V_i, P_i, Q_i คือ แรงดัน กำลังจริง และกำลังรีแอกทีฟของโหนด i ตามลำดับ

$LS(s,e)$ คือ กลุ่มของช่วงสายในเส้นทาง (Path) $P(s,e)$ เรียงจากโหนดต้นทาง s ไปยังโหนดปลายทาง e

$\sum_{\substack{i \in LS(s,e) \\ i \geq j}} I_i$ คือ ผลรวมของกระแสทั้งหมดจากช่วงสาย i ไปยังช่วงสายสุดท้าย โดยที่ i เริ่มจากช่วงสาย j ไปยังช่วงสายสุดท้ายในเส้นทาง $P(s,e)$

Ve คือ แรงดันตกที่ยอมรับได้สำหรับโหนดปลายทาง (โหนด e)

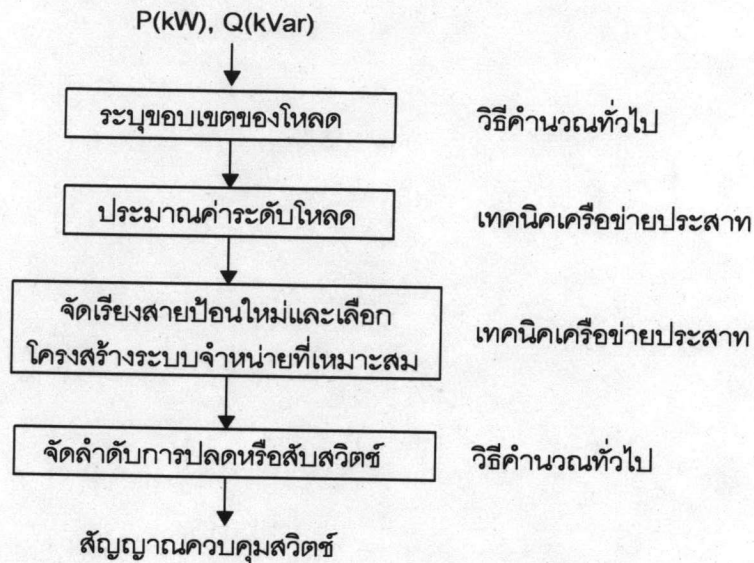
โครงสร้างการควบคุมดังแสดงในภาพที่ 2.5 ประกอบไปด้วย ส่วนคำนวณตามปกติคือการระบุขอบเขตของโหลด (Zone load) และการจัดลำดับการปลด/สับสวิตช์ และส่วนที่เหลือเป็นการใช้เทคนิคเครือข่ายประสาทป้อนสู่ด้านหน้า ได้แก่ การประมาณค่าระดับโหลด และการเลือกสถานะของสวิตช์ที่เหมาะสม

1) การระบุขอบเขตของโหลด เป็นส่วนที่ปรับข้อมูลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อจะป้อนให้กับเครือข่ายประสาทในขั้นตอนถัดไป กำหนดให้

$$ZL_i = LP_i - \sum_{j=1}^k LP_{ij} ; i = 1, 2, \dots, m \quad (2.20)$$

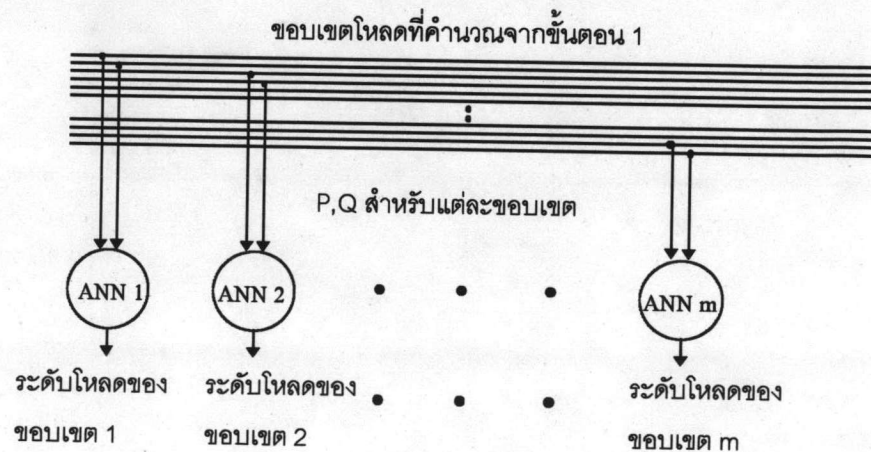
โดยที่ m คือ จำนวนขอบเขตของโหลด

ZL_i คือ กำลังที่ไหล (Load flow) ด้านแหล่งจ่าย (Source) สำหรับขอบเขต i
 LP_i คือ กำลังที่ไหลในสาย (Line flow) ด้านแหล่งจ่ายสำหรับขอบเขต i
 LP_{ij} คือ กำลังที่ไหลในชวงสาย j สำหรับขอบเขต i
 k คือ จำนวนชวงสายด้านโหลดสำหรับขอบเขต i

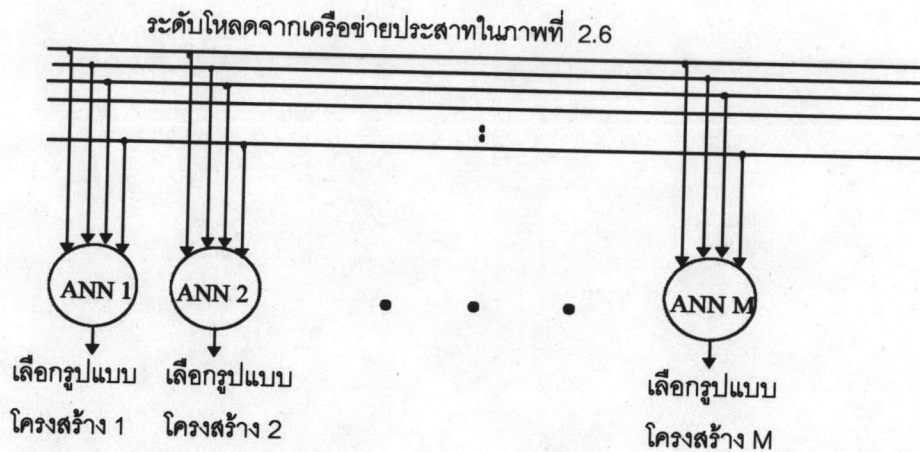


ภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างการควบคุม

2) การกำหนดระดับโหลด กำหนดให้จำนวนระดับโหลดเท่ากับ p และจำนวนขอบเขตของโหลดเท่ากับ m โหลดแต่ละขอบเขตจะถูกจัดระดับเป็นจำนวน p ระดับ การจัดเข้าระดับใดขึ้นอยู่กับค่าโหลดนั่นคือเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะต้องมีการจัดระดับของโหลดใหม่ เครือข่ายประสาทส่วนนี้จะมีความสามารถในการจำ (Recognize) รูปแบบโหลดที่คล้ายกัน ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แสดงการจัดระดับโหลดโดยเครือข่ายประสาท



ภาพที่ 2.7 แสดงเครือข่ายประสาทสำหรับการเลือกรูปแบบสถานะสวิตช์

3) การเลือกรูปแบบสถานะสวิตช์ที่เหมาะสม จำนวนรูปแบบสถานะสวิตช์มีค่าประมาณ $x!$ เมื่อ x คือจำนวนสวิตช์ แม้จะมีสวิตช์จำนวน 20 ชุด รูปแบบสถานะสวิตช์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดประมาณ 2×10^{18} รูปแบบซึ่งเป็นจำนวนมากหมายความว่าขนาดของเครือข่ายประสาทจะมีขนาดใหญ่ด้วย ส่งผลทำให้ต้องใช้เวลาในการประมวลผลต่อรอบสูงขึ้น หากจัดเตรียมข้อมูลป้อนเข้าเป็นโหลดที่แบ่งขอบเขตและจัดระดับแล้วก็จะทำให้ขนาดของเครือข่ายประสาทลดลง โครงสร้างของเครือข่ายประสาทสำหรับเลือกรูปแบบสถานะสวิตช์ที่เหมาะสมแสดงดังภาพที่ 2.7

นอกเหนือจากวิธีการทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมาข้างต้น มีการใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการแก้ปัญหาการจัดเรียงสายป้อนใหม่เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เช่น วิธีฮิวริสติก วิธีนี้เลือกพิจารณาเฉพาะรูปแบบโครงสร้างของระบบที่อาจจะเป็นโครงสร้างที่ดีที่สุด [9,25-27] เพื่อลดจำนวนรูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้น้อยลง วิธีแบ่งระบบออกเป็นส่วย่อย (Network partitioning) [28] การแบ่งระบบออกเป็นระบบย่อยๆสามารถแบ่งได้หลายแบบและผลลัพธ์ที่ได้ก็ขึ้นกับการแบ่งระบบออกเป็นส่วย่อยนี้ด้วย แก้ปัญหาโดยวิธีโปรแกรมเชิงเส้น Linear Programming (LP) [29] และแก้ปัญหาในลักษณะเดียวกับปัญหา Quadratic cost transshipment โดยกำหนดให้กระแสและกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linearization) เพื่อให้คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ง่ายและรวดเร็ว [30]

อย่างไรก็ตามแนวทางต่าง ๆ ที่ใช้แก้ปัญหการจัดเรียงสายป้อนใหม่ ยังไม่เป็นที่ยืนยันว่าสามารถใช้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ณ เวลาจริง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องมาจากงานต่าง ๆ อยู่ในระหว่างการพัฒนาและจำลองการทำงานของวิธีที่นำเสนอด้วยคอมพิวเตอร์ จึงอาจจะกล่าว

ได้ว่าปัญหาการจัดเรียงสายป้อนใหม่จึงเป็นปัญหาที่ต้องมีการพัฒนาค้นคว้าหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพเพียงพอเพื่อจะใช้แก้ปัญหาต่อไป

เนื่องจากแนวทางต่างๆ ที่มีการพัฒนาขึ้นในอดีตยังไม่มีวิธีการใดที่มีประสิทธิภาพเพียงพอ[6,18,28] งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางใหม่ในการแก้ปัญหาการจัดเรียงสายป้อนใหม่ โดยเลือกใช้เทคนิคเครือข่ายประสาทของ Hopfield [31] ซึ่งเป็นวิทยาการใหม่ในการแก้ปัญหาการหาคำตอบที่เหมาะสมที่พัฒนาประมาณสิบปีที่ผ่านมา