

บทที่ 5

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงฮาร์มอนิก

การใช้วิธีกลุ่มอนุภาคเพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาการจัดการกำลังรีแอกทีฟต้องคำนวณค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ และตรวจสอบเงื่อนไขบังคับต่างๆ จากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ขนาดแรงดันบัส และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน ค่าเหล่านี้เป็นผลลัพธ์จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงฮาร์มอนิก เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงรายละเอียดวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายทั้งแบบเฟสเดียว (Single Phase) และแบบสามเฟส (Three Phase)

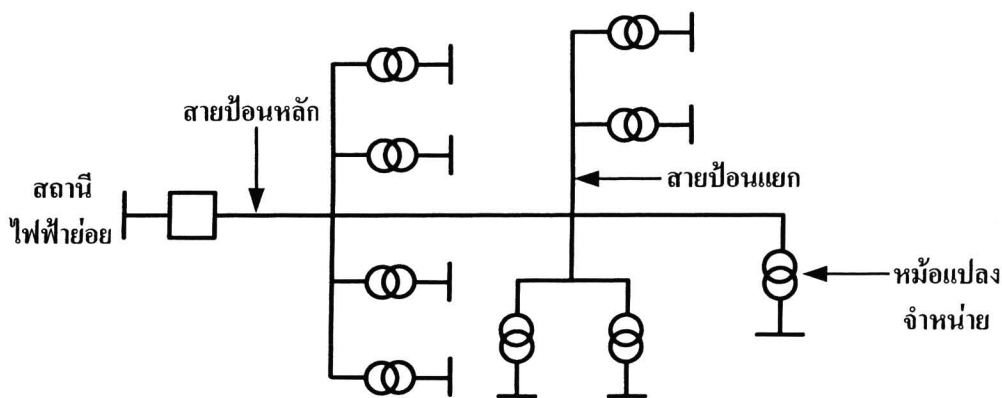
5.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งในแง่ของการวิเคราะห์และควบคุมสภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้า รวมถึงการวางแผนและออกแบบเพื่อขยายระบบไฟฟ้าในอนาคต การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าทำให้ทราบขนาดและมุมเฟสของแรงดัน ปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลในสายแต่ละเส้น รวมทั้งกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ ผลการคำนวณเหล่านี้จะใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังด้านต่างๆ อาทิ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การคำนวณกระแสลัดวงจร (พิชัย, 2552)

วิธีแก้ปัญหาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น ระเบียบวิธีเกาส์ (Gauss Method) ระเบียบวิธีเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel Method) และระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) ระเบียบวิธีทั้งสามใช้หลักการคำนวณของระเบียบวิธีทำซ้ำเพื่อหาผลเฉลยที่ต้องการ ระเบียบวิธีเกาส์และระเบียบวิธีเกาส์-ไซเดลเป็นวิธีที่ง่ายในการคำนวณ แต่เหมาะกับระบบไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งจำนวนบัสในระบบมีไม่มาก เพราะจำนวนรอบของการคำนวณจนเกิดการลู่เข้าสู่ผลเฉลยนั้น ขึ้นอยู่กับจำนวนบัสในระบบ ดังนั้น ระบบขนาดใหญ่ที่มีบัสจำนวนมาก ก็จะใช้เวลาในการคำนวณนานขึ้น (ชำนาญ, 2548) ส่วนระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ถึงแม้การคำนวณจะมีความซับซ้อนมากกว่า เพราะต้องสร้างเมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) ในทุกรอบการคำนวณ แต่ก็

เป็นระเบียบวิธีซึ่งมีประสิทธิภาพในการหาผลเฉลย โดยจำนวนรอบในการคำนวณจนเกิดการลู่เข้าสู่ผลเฉลยไม่ขึ้นกับจำนวนบัสในระบบ (ชำนาญ, 2548)

ระบบจำหน่ายโดยทั่วไปมีโครงสร้างเป็นแบบเรเดียล กล่าวคือ วงจรสายป้อนหนึ่งวงจรจะมีสายป้อนหลัก (Main Feeder) จำนวนหนึ่งชุดวิ่งออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลดในแนวสายป้อนหลัก และมีสายป้อนแยก (Lateral) แยกออกจากสายป้อนหลักเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลดอื่นๆ ที่อยู่นอกแนวสายป้อนหลัก โครงสร้างของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลในภาพที่ 5-1 แสดงให้เห็นว่า กระแสในสายป้อนจะมีค่าสูงสุดที่ต้นทางของสายป้อนหลักซึ่งออกจากสถานีไฟฟ้าย่อย จากนั้นกระแสในสายป้อนหลักจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดต่างๆ ทั้งที่อยู่ในแนวสายป้อนหลักและสายป้อนแยก ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ชนิดของบัสในระบบจำหน่ายประกอบด้วยบัสอ้างอิง (Reference Bus, Slack Bus) และบัสโหลด (Load Bus) บัสอ้างอิง คือ บัสต้นทางที่สถานีไฟฟ้าย่อย ส่วนบัสอื่นๆ ที่เหลือคือ บัสโหลด



ภาพที่ 5-1 ตัวอย่างโครงสร้างระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

ระบบจำหน่ายโดยทั่วไปมีบัสและกิ่ง (Branch) ทั้งที่เป็นสายป้อนหลักและสายป้อนแยกเป็นจำนวนมาก การแก้ปัญหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสันจึงใช้เวลานานขึ้น เพราะต้องสร้างเมทริกซ์จาโคเบียนซึ่งมีขนาดใหญ่ตามจำนวนบัสและกิ่งในระบบ นอกจากนี้ การที่อัตราส่วนค่าความต้านทานต่อค่ารีแอกแตนซ์ของสายป้อนหลักและสายป้อนแยกในระบบจำหน่ายมีค่าสูง ยังบั่นทอนความสามารถในการลู่เข้าสู่ผลเฉลยของระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Aravindhbabu, Ganapathy and Nayar, 2001)

เพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งมีความเหมาะสมกับโครงสร้างแบบเรเดียลของระบบจำหน่าย และมีขั้นตอนการคำนวณไม่ซับซ้อน

เป้าหมายการคำนวณ คือ การหาขนาดและมุมเฟสของแรงดันที่บัสโหลด แล้วนำมาคำนวณร่วมกับข้อมูลสายป้อนเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียของระบบ รวมทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟซึ่งบัสอ้างอิงต้องจ่ายให้แก่ระบบ วิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพทั้งด้านความสามารถในการเข้าสู่ผลเฉลย ความเร็วในการหาผลเฉลย และความถูกต้องของผลเฉลยที่ได้

รายละเอียดลำดับถัดไป เป็นขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายทั้งแบบเฟสเดียวและแบบสามเฟส การคำนวณแบบเฟสเดียวใช้กับระบบจำหน่ายสมดุล (Balanced System) ส่วนการคำนวณแบบสามเฟสใช้กับระบบจำหน่ายไม่สมดุล (Unbalanced System)

5.2 ขั้นตอนวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเฟสเดียว

วิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการกวาดแบบย้อนกลับ-เดินหน้า (Backward-forward Sweep Technique) เทคนิคการกวาดแบบย้อนกลับจะนำค่ากระแสโหลด (Load Current) ที่บัสโหลดทุกบัสมาหาค่ากระแสกิ่ง (Branch Current) ทั้งหมดทั้งกิ่งที่เป็นสายป้อนหลักและสายป้อนแยก โดยคำนวณจากกิ่งปลายทางย้อนกลับมายังกิ่งต้นทางเมื่อทราบค่ากระแสกิ่งในทุกกิ่งแล้ว จึงใช้เทคนิคการกวาดแบบเดินหน้าเพื่อหาขนาดแรงดันที่บัสโหลด โดยคำนวณจากบัสต้นทางไปยังบัสปลายทาง ข้อมูลอื่นๆ ที่ใช้คำนวณ ได้แก่ เมทริกซ์จากกิ่งถึงปม (Branch-to-node Matrix) ซึ่งใช้ในขั้นตอนการกวาดแบบย้อนกลับ และเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ปฐมฐาน (Primitive Impedance Matrix) ซึ่งใช้ในขั้นตอนการกวาดแบบเดินหน้า

สิ่งสำคัญประการหนึ่งในการใช้เทคนิคการกวาดแบบย้อนกลับ-เดินหน้าเพื่อคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย คือ การกำหนดหมายเลขให้กับบัสและกิ่งต่างๆ ในระบบซึ่งต้องมีความสอดคล้องกัน สำหรับหมายเลขบัส บัสอ้างอิงถูกกำหนดให้มีหมายเลขบัสเป็น 0 ส่วนบัสโหลดที่เหลือทั้งหมดจะมีหมายเลขบัสเริ่มต้นจาก 1 เรียงลำดับไปเรื่อยๆ จนถึง $NB - 1$ หรือ NL (NB คือ จำนวนบัสในระบบ และ NL คือ จำนวนกิ่งในระบบ) การเรียงลำดับของหมายเลขบัสต้องทำให้หมายเลขบัสซึ่งเป็นปลายด้านส่ง (Sending End) ของกิ่งใดๆ มีค่าน้อยกว่าหมายเลขบัสซึ่งเป็นปลายด้านรับ (Receiving End) ของกิ่งนั้นเสมอ จากนั้น จึงกำหนดหมายเลขกิ่ง โดยมีหลักว่าหมายเลขของกิ่งใดๆ ในระบบ จะกำหนดจากหมายเลขบัสซึ่งเป็นปลายด้านรับของกิ่งนั้น เช่น กิ่งหนึ่งในระบบมีหมายเลขบัสของปลายด้านส่งเป็น s และหมายเลขบัสของปลายด้านรับเป็น r (โดยที่ $s < r$) ดังนั้น กิ่งดังกล่าวก็จะมีหมายเลขกิ่งเท่ากับ r

วิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเฟสเดียวโดยใช้เทคนิคการกวาดแบบย้อนกลับ-เดินหน้า มีรายละเอียดดังนี้ (Aravindhbabu, Ganapathy and Nayar, 2001)

ขั้นตอนที่ 1: เตรียมข้อมูลของระบบจำหน่ายที่พิจารณา ได้แก่ ข้อมูลโหลด ข้อมูลสายป้อน
ค่าฐานของกำลังไฟฟ้าและค่าฐานของแรงดันไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2: สร้างเมทริกซ์อิมพีแดนซ์ปฐมฐาน (z_{pn}) ของระบบจากข้อมูลสายป้อน

ขั้นตอนที่ 3: สร้างเมทริกซ์แสดงการต่อของกิ่งและวิถี (Branch-path Incidence Matrix; K) (Stagg and El-Abiad, 1968) ของระบบ จากนั้นคำนวณหาเมทริกซ์จากกิ่งถึงบัส (c) ซึ่งสมาชิกแต่ละตัวมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$c = -K \quad (5-1)$$

ขั้นตอนที่ 4: กำหนดค่าแรงดันเริ่มต้น (Initial Voltage) สำหรับบัสโหลดทุกบัส โดยทั่วไปจะกำหนดให้เท่ากับ $1.0\angle 0^\circ$ pu หรือกำหนดให้เท่ากับขนาดแรงดันบัสอ้างอิง

ขั้นตอนที่ 5: สร้างเมทริกซ์แสดงค่ากระแสโหลดของทุกบัส (I_L) จากค่าแรงดันบัส ค่าความต้องการกำลังจริงและความต้องการกำลังรีแอกทีฟของโหลดที่แต่ละบัส

$$I_L = \begin{bmatrix} I_{L,1} \\ I_{L,2} \\ \dots \\ I_{L,i} \\ \dots \\ I_{L,NL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{D,1} - jQ_{D,1}}{V_1^*} \\ \frac{P_{D,2} - jQ_{D,2}}{V_2^*} \\ \dots \\ \frac{P_{D,i} - jQ_{D,i}}{V_i^*} \\ \dots \\ \frac{P_{D,NL} - jQ_{D,NL}}{V_{NL}^*} \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

ขั้นตอนที่ 6: สร้างเมทริกซ์แสดงค่ากระแสกิ่ง (I_b)

$$I_b = \begin{bmatrix} I_{b,1} \\ I_{b,2} \\ \dots \\ I_{b,k} \\ \dots \\ I_{b,NL} \end{bmatrix} = c \times I_L \quad (5-3)$$

ขั้นตอนที่ 7: สร้างเมทริกซ์แสดงค่าแรงดันตกในกิ่งต่างๆ (V_d)

$$\mathbf{V}_d = \begin{bmatrix} V_{d,1} \\ V_{d,2} \\ \dots \\ V_{d,k} \\ \dots \\ V_{d,NL} \end{bmatrix} = \mathbf{z}_{pri} \times \mathbf{I}_b \tag{5-4}$$

ขั้นตอนที่ 8: คำนวณค่าแรงดันที่แต่ละบัส เพื่อใช้ในการคำนวณรอบต่อไป

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_i \\ \dots \\ V_{NL} \end{bmatrix} = \mathbf{V}_{0(aug)} - (\mathbf{c}^t \times \mathbf{V}_d) \tag{5-5}$$

โดย $\mathbf{V}_{0(aug)}$ คือ เมทริกซ์แต่งเติม (Augmented Matrix) ของแรงดันบัสอ้างอิง ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{V}_{0(aug)} = \begin{bmatrix} V_{0,1} \\ V_{0,2} \\ \dots \\ V_{0,i} \\ \dots \\ V_{0,NL} \end{bmatrix} \tag{5-6}$$

ขั้นตอนที่ 9: คำนวณขั้นตอนที่ 5 จนถึงขั้นตอนที่ 8 วนซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งผลต่างของค่าแรงดันบัสที่ได้จากการคำนวณรอบปัจจุบันกับการคำนวณรอบก่อนหน้า มีค่าต่ำกว่าความคลาดเคลื่อนยินยอม (Tolerance) ที่กำหนดไว้ จึงหยุดการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 10: นำค่าแรงดันของบัสโหนดทั้งหมดไปคำนวณร่วมกับข้อมูลสายป้อนเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียของระบบ รวมทั้งกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟซึ่งบัสอ้างอิงต้องจ่ายให้แก่ระบบ

5.3 ขั้นตอนวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายสามเฟส

ความไม่สมดุลของระบบจำหน่ายเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ อาทิ โหลดแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน สายป้อนบางช่วงติดตั้งไม่ครบทั้งสามเฟส หรือพารามิเตอร์ของสายป้อนแต่ละเฟสมีค่าต่างกัน (Kersting, 2001) การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส (Teng, 2000) ถูกนำมาใช้กับระบบจำหน่ายไม่สมดุลเพื่อพิจารณาค่าในแต่ละเฟส โดยวิธีคำนวณมีขั้นตอนเหมือนกับการคำนวณแบบเฟสเดียว แต่เมทริกซ์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะมีขนาดหรือมิติที่ใหญ่ขึ้น เพราะต้องพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆ ให้ครบทั้งสามเฟส ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{11} & \mathbf{c}_{12} & \dots & \mathbf{c}_{1j} & \dots & \mathbf{c}_{1NL} \\ \mathbf{c}_{21} & \mathbf{c}_{22} & \dots & \mathbf{c}_{2j} & \dots & \mathbf{c}_{2NL} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{c}_{i1} & \mathbf{c}_{i2} & \dots & \mathbf{c}_{ij} & \dots & \mathbf{c}_{iNL} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{c}_{NL1} & \mathbf{c}_{NL2} & \dots & \mathbf{c}_{NLj} & \dots & \mathbf{c}_{NLNL} \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

$$\mathbf{c}_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

$$\mathbf{Z}_{pri} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{pri,11}^{ABC} & \mathbf{Z}_{pri,12}^{ABC} & \dots & \mathbf{Z}_{pri,1j}^{ABC} & \dots & \mathbf{Z}_{pri,1NL}^{ABC} \\ \mathbf{Z}_{pri,21}^{ABC} & \mathbf{Z}_{pri,22}^{ABC} & \dots & \mathbf{Z}_{pri,2j}^{ABC} & \dots & \mathbf{Z}_{pri,2NL}^{ABC} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Z}_{pri,i1}^{ABC} & \mathbf{Z}_{pri,i2}^{ABC} & \dots & \mathbf{Z}_{pri,ij}^{ABC} & \dots & \mathbf{Z}_{pri,iNL}^{ABC} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Z}_{pri,NL1}^{ABC} & \mathbf{Z}_{pri,NL2}^{ABC} & \dots & \mathbf{Z}_{pri,NLj}^{ABC} & \dots & \mathbf{Z}_{pri,NLNL}^{ABC} \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

$$\mathbf{Z}_{pri,ij}^{ABC} = \begin{bmatrix} z_{ij}^{AA} & z_{ij}^{AB} & z_{ij}^{CA} \\ z_{ij}^{BA} & z_{ij}^{BB} & z_{ij}^{BC} \\ z_{ij}^{CA} & z_{ij}^{CB} & z_{ij}^{CC} \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

$$\mathbf{I}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{L,1}^{ABC} \\ \mathbf{I}_{L,2}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{I}_{L,i}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{I}_{L,NL}^{ABC} \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

$$\mathbf{I}_{L,i}^{ABC} = \begin{bmatrix} I_{L,i}^A \\ I_{L,i}^B \\ I_{L,i}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{D,i}^A - jQ_{D,i}^A}{(V_i^A)^*} \\ \frac{P_{D,i}^B - jQ_{D,i}^B}{(V_i^B)^*} \\ \frac{P_{D,i}^C - jQ_{D,i}^C}{(V_i^C)^*} \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

$$\mathbf{I}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{b,1}^{ABC} \\ \mathbf{I}_{b,2}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{I}_{b,k}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{I}_{b,NL}^{ABC} \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

$$\mathbf{I}_{b,k}^{ABC} = \begin{bmatrix} I_{b,i}^A \\ I_{b,i}^B \\ I_{b,i}^C \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

$$\mathbf{V}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{d,1}^{ABC} \\ \mathbf{V}_{b,2}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{V}_{d,k}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{V}_{d,NL}^{ABC} \end{bmatrix} \quad (5-15)$$

$$\mathbf{V}_{d,k}^{ABC} = \begin{bmatrix} V_{d,k}^A \\ V_{d,k}^B \\ V_{d,k}^C \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

$$\mathbf{V}_{0(aug)} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{0,1}^{ABC} \\ \mathbf{V}_{0,2}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{V}_{0,i}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{V}_{0,NL}^{ABC} \end{bmatrix} \quad (5-17)$$

$$\mathbf{V}_{0,i}^{ABC} = \begin{bmatrix} V_0^A \angle 0^\circ \\ V_0^B \angle -120^\circ \\ V_0^C \angle 120^\circ \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

กำลังสูญเสียรวมทั้งสามเฟสสามารถคำนวณได้จาก (Chiang et al., 1995)

$$P_{Loss}^{ABC} = \sum_{k=1}^{NL} (\mathbf{I}_{b,k}^{ABC})^T \mathbf{R}_k^{ABC} \mathbf{I}_{b,k}^{ABC} \quad (5-19)$$

เมื่อ $\mathbf{R}_k^{ABC}$ มีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{R}_k^{ABC} = \begin{bmatrix} R_k^{AA} & R_k^{AB} & R_k^{CA} \\ R_k^{BA} & R_k^{BB} & R_k^{BC} \\ R_k^{CA} & R_k^{CB} & R_k^{CC} \end{bmatrix} \quad (5-20)$$

5.4 ขั้นตอนวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายเฟสเดียว

วัตถุประสงค์ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย คือ การหาค่าแรงดันฮาร์มอนิกอันดับ (Order) ต่างๆ ที่แต่ละบัส และค่ากำลังสูญเสียฮาร์มอนิก (Harmonic Losses) จากนั้น จึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณหาขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆ (ซึ่งรวมผลของแรงดันฮาร์มอนิกทุกอันดับ) ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคแยกการคำนวณ (Decoupled Harmonic Power Flow) เพื่อคำนวณค่าแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับ โดยกำหนดให้โหลดไม่เชิงเส้นซึ่งต่ออยู่ในระบบทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current Source) ขั้นตอนการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้ (Baghzouz, 1991)

ขั้นตอนที่ 1: เตรียมข้อมูลของระบบจำหน่ายได้แก่ ข้อมูลโหลด ข้อมูลสายป้อน ค่าฐานของกำลังไฟฟ้าและค่าฐานของแรงดันไฟฟ้า รวมถึงอันดับฮาร์มอนิกทั้งหมดที่ต้องการพิจารณา

ขั้นตอนที่ 2: สำหรับฮาร์มอนิกอันดับที่ h ให้คำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่แต่ละบัสจากความต้องการกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ ขนาดแรงดันบัสที่ความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ร้อยละความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด และอันดับฮาร์มอนิก ตามสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{I}^h = \begin{bmatrix} I_1^h \\ I_2^h \\ \vdots \\ I_i^h \\ \vdots \\ I_{NB}^h \end{bmatrix} \tag{5-21}$$

$$I_i^h = \rho_i \frac{(P_{D,i} - jQ_{D,i})}{h \times (V_i^1)^*} \tag{5-22}$$

ขั้นตอนที่ 3: สร้างเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์บัส (Bus Admittance Matrix) ที่ฮาร์มอนิกอันดับ h ($\mathbf{Y}_{bus}^h$) โดยแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า สายป้อน ตัวเก็บประจุ และโหลด ซึ่งใช้สร้างเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์บัสที่ฮาร์มอนิกอันดับ h มีรายละเอียดดังนี้

$$y_T^h = \frac{1}{(r_T + jhx_T)} \tag{5-23}$$

$$y_{F,k}^h = \frac{1}{(r_{F,k} + jhx_{F,k})} \tag{5-24}$$

$$y_C^h = \frac{h}{jhx_C} \tag{5-25}$$

$$y_{L,i}^h = \frac{(1-\rho_i)}{|V_i^1|^2} (P_{D,i} - j \frac{Q_{D,i}}{h}) \quad (5-26)$$

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณหาค่าแรงดันฮาร์โมนิกอันดับ h ที่แต่ละบัส

$$\mathbf{V}^h = \begin{bmatrix} V_1^h \\ V_2^h \\ \dots \\ V_i^h \\ \dots \\ V_{NB}^h \end{bmatrix} = [\mathbf{Y}_{bus}^h]^{-1} \mathbf{I}^h \quad (5-27)$$

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณกำลังสูญเสียที่ฮาร์โมนิกอันดับ h ในแต่ละช่วงของสายป้อน

$$P_{L,k}^h = R_k (|V_{s,k}^h - V_{r,k}^h| \times |y_{F,k}^h|)^2 \quad (5-28)$$

ขั้นตอนที่ 6: ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 5 จนครบทุกอันดับฮาร์โมนิกที่ต้องการพิจารณา

ขั้นตอนที่ 7: คำนวณค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Value; RMS Value) ของแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัส

$$\mathbf{V}_{rms} = \begin{bmatrix} V_{1,rms} \\ V_{2,rms} \\ \dots \\ V_{i,rms} \\ \dots \\ V_{NB,rms} \end{bmatrix} \quad (5-29)$$

$$V_{i,rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{nh} |V_i^h|^2} \quad (5-30)$$

ขั้นตอนที่ 8: คำนวณค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดันที่แต่ละบัส

$$\mathbf{THD}_V = \begin{bmatrix} THD_{V,1} \\ THD_{V,2} \\ \dots \\ THD_{V,i} \\ \dots \\ THD_{V,NB} \end{bmatrix} \quad (5-31)$$

$$THD_{V,i} (\%) = \frac{100}{|V_i^1|} \sqrt{\sum_{h=1}^{nh} |V_i^h|^2} \quad (5-32)$$

5.5 ขั้นตอนวิธีคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายสามเฟส

เมทริกซ์ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงฮาร์มอนิกแบบสามเฟสมีขนาดหรือมิติที่ใหญ่ขึ้น เพราะต้องพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆ ทั้งสามเฟส โดยค่าแอดมิตแตนซ์หรือค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละอุปกรณ์จะเป็นเมทริกซ์ขนาด 3×3 เพื่อแสดงค่าในแต่ละเฟสและค่าการเชื่อมร่วม (Mutual Coupling) ระหว่างเฟส ส่วนตัวแปรอื่นๆ ก็จะอยู่ในรูปสามเฟส ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\mathbf{y}^{ABC} = \begin{bmatrix} y^{AA} & y^{AB} & y^{AC} \\ y^{BA} & y^{BB} & y^{BC} \\ y^{CA} & y^{CB} & y^{CC} \end{bmatrix} \quad (5-33)$$

$$\mathbf{z}^{ABC} = \begin{bmatrix} z^{AA} & z^{AB} & z^{AC} \\ z^{BA} & z^{BB} & z^{BC} \\ z^{CA} & z^{CB} & z^{CC} \end{bmatrix} \quad (5-34)$$

$$\mathbf{I}^h = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1^{h,ABC} \\ \mathbf{I}_2^{h,ABC} \\ \dots \\ \mathbf{I}_i^{h,ABC} \\ \dots \\ \mathbf{I}_{NB}^{h,ABC} \end{bmatrix} \quad (5-35)$$

$$\mathbf{I}_i^{h,ABC} = \begin{bmatrix} I_i^{h,A} \\ I_i^{h,B} \\ I_i^{h,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_i^A \frac{(P_{D,i}^A - jQ_{D,i}^A)}{h \times (V_i^{1,A})^*} \\ \rho_i^B \frac{(P_{D,i}^B - jQ_{D,i}^B)}{h \times (V_i^{1,B})^*} \\ \rho_i^C \frac{(P_{D,i}^C - jQ_{D,i}^C)}{h \times (V_i^{1,C})^*} \end{bmatrix} \quad (5-36)$$

$$\mathbf{V}^h = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^{h,ABC} \\ \mathbf{V}_2^{h,ABC} \\ \dots \\ \mathbf{V}_i^{h,ABC} \\ \dots \\ \mathbf{V}_{NB}^{h,ABC} \end{bmatrix} \quad (5-37)$$

$$\mathbf{V}_i^{h,ABC} = \begin{bmatrix} V_i^{h,A} \\ V_i^{h,B} \\ V_i^{h,C} \end{bmatrix} \quad (5-38)$$

$$\mathbf{V}_{rms} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1,rms}^{ABC} \\ \mathbf{V}_{2,rms}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{V}_{i,rms}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{V}_{NB,rms}^{ABC} \end{bmatrix} \quad (5-39)$$

$$\mathbf{V}_{i,rms}^{ABC} = \begin{bmatrix} V_{i,rms}^A \\ V_{i,rms}^B \\ V_{i,rms}^C \end{bmatrix} \quad (5-40)$$

$$\mathbf{THD}_V = \begin{bmatrix} \mathbf{THD}_{V,1}^{ABC} \\ \mathbf{THD}_{V,2}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{THD}_{V,i}^{ABC} \\ \dots \\ \mathbf{THD}_{V,NB}^{ABC} \end{bmatrix}$$

(5-41)

$$\mathbf{THD}_{V,i}^{ABC} = \begin{bmatrix} THD_{V,i}^A \\ THD_{V,i}^B \\ THD_{V,i}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{100}{|V_i^{1,A}|} \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{nh} |V_i^{h,A}|^2} \\ \frac{100}{|V_i^{1,B}|} \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{nh} |V_i^{h,B}|^2} \\ \frac{100}{|V_i^{1,C}|} \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{nh} |V_i^{h,C}|^2} \end{bmatrix}$$

(5-42)

รายละเอียดวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงฮาร์โมนิกแบบสามเฟสมีขั้นตอน
เช่นเดียวกับการคำนวณแบบเฟสเดียว