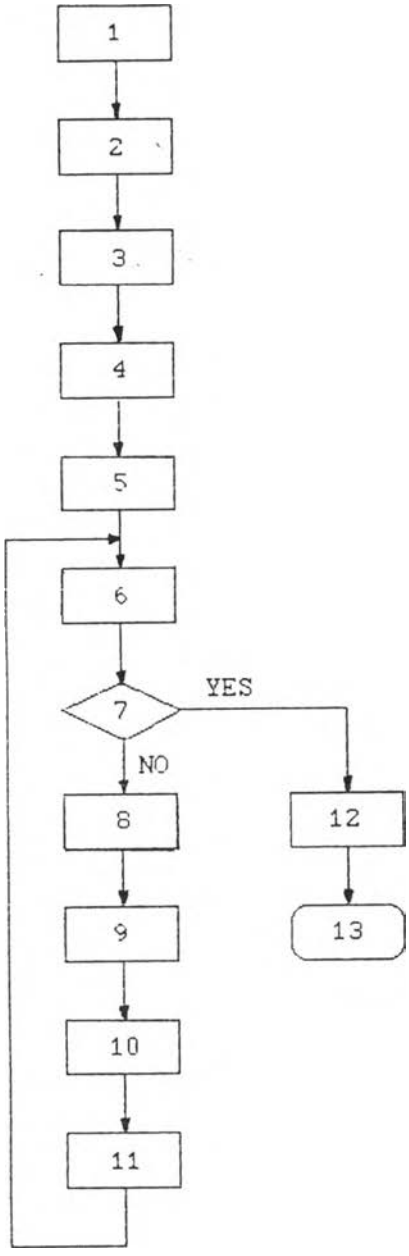
บทที่ 4

โครงสร้างโปรแกรม

4.1 บทนำ

โปรแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกหรือ HARMONIC เขียนในรูปของภาษาฟอร์แทรน 77 (Fortran 77) [24,25] สามารถใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยเครื่องแปลงผันกำลังที่คอมมิวเตตด้วยแรงดันสายแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ (Six and Twelve Pulse Line Commutated Power Converter)

4.2 ผังโปรแกรม (Flow Chart)



1. อ่านข้อมูลของระบบและกำหนดค่าผิดพลาดเริ่มต้น(Initial Error Check)
2. สร้างแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์
3. ประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น และตรวจสอบความเป็นไปได้ของค่านี้
4. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลแบบดั้งเดิมและพิมพ์ผล
5. เปลี่ยนแปลงข้อมูล(Update)ของพารา-มิเตอร์อุปกรณ์ไม่เชิงเส้น (ถ้าต้องการ)
6. คำนวณกระแสของเครื่องแปลงผัน
7. ตรวจสอบ ΔW, ΔI เพื่อการคอนเวิร์จ ถ้าคอนเวิร์จเลื่อนไป 12
8. คำนวณเมตริกซ์ T และ G
9. คำนวณเมตริกซ์ H
10. สร้างฮาร์มอนิกยาโคบี (Harmonic Jacobian)
11. หาข้อมูลพารามิเตอร์ใหม่ เลื่อนไปที่ 6
12. พิมพ์ผลลัพธ์
13. หยุด

4.3 โปรแกรมย่อย (Subroutine)

โปรแกรมย่อยใน HARMONIC มีหลายโปรแกรม สามารถสรุปหน้าที่ของแต่ละโปรแกรมย่อยได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1
โปรแกรมย่อยใน HARMONIC

HARMONIC	โปรแกรมหลัก
AMP2	คำนวณกระแสเฟสของเครื่องแปลงผันในช่วงเวลาที่ 2
COMANGLE	หาค่ามุมคอมมิวเตต(Commutation Angle)ของเครื่องแปลงผัน
CONVERGE	ตรวจสอบว่าโปรแกรมคอนเวิร์จหรือไม่
ERROR	พิมพ์ข้อความผิดพลาด
FA1	หาฟังก์ชัน fa1 ของเครื่องแปลงผัน
FA1PRI	หาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน fa1 เทียบกับมุม
FA2	หาฟังก์ชัน fa2 ของเครื่องแปลงผัน
FA2PRI	หาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน fa2 เทียบกับมุม
FC1	หาฟังก์ชัน fc1 ของเครื่องแปลงผัน
FC1PRI	หาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน fc1 เทียบกับมุม
FFINT	อินทีเกรตฟังก์ชันบังคับ (Forcing Function) เพื่อหาอนุกรมฟูริเยร์ของกระแสเครื่องแปลงผัน
HARBUILD	สร้างเวกเตอร์ฮาร์มอนิกเพื่อเตรียมใช้ในการไหลกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก
HARSTART	กำหนดค่าเริ่มต้นของแรงดันบัสและตัวแปรอื่นๆ
HARSTAT	คำนวณแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก
JABUILD	สร้างยาโคบีเมตริกซ์
LBUSDATA	อ่านข้อมูลแต่ละบัส
LINEDATA	อ่านข้อมูลของสายส่งและหม้อแปลง
LOADI	คำนวณกระแสโหลดและยาโคบีของโหลดไม่เชิงเส้น
LOADPAR	ประมาณอนุพันธ์บางส่วน (Partial Derivative) ของกระแสของเครื่องแปลงผันโดยใช้วิธีของผลต่าง (Method of Differences)
MESSAGE	พิมพ์ข้อความของโปรแกรม
NL1DATA	อ่านข้อมูลบัสของโหลดไม่เชิงเส้นแบบที่ 1 (แบบพาสซีฟ)

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

โปรแกรมย่อยใน HARMONIC

NL2DATA	อ่านข้อมูลบัสของโหลดไม่เชิงเส้นแบบที่ 2 (แบบแอกทีฟ)
ORDER	จัดลำดับของบัสใหม่
OUTPUT	พิมพ์ผลลัพธ์
PQMOD	ทำการวนซ้ำย่อย (Sub-iterative) เพื่อปรับค่ากำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสซึ่งไม่ได้กำหนดค่าทั้งสอง
REDUCE	ลดแถว (Row) ของยาโคบีเมตริกซ์และหาเวกเตอร์ใหม่ (Update)
ROTATE	หมุนจำนวนเชิงซ้อนตามมุมที่กำหนด
SERIES	คำนวณอนุกรมฟูริเยร์ของกระแสในเครื่องแปลงผัน
SUMMARY	พิมพ์กระแส, กำลังไฟฟ้า, และแรงดันฮาร์มอนิก
YBUILD	สร้างเมตริกซ์ YBUS
ZLINE	ปรับพารามิเตอร์ของสายส่งตามความถี่
ZTRAN	ปรับพารามิเตอร์ของหม้อแปลงตามความถี่

4.4 ชนิดของบัสที่ใช้ในโปรแกรม

บัสที่ใช้ในโปรแกรม HARMONIC แบ่งได้ 2 กลุ่ม

1. บัสเชิงเส้น
2. บัสไม่เชิงเส้น

ถ้าแยกโดยละเอียดตามการกำหนดตัวแปรในบัส จะได้

1. สวิงบัส (Swing Bus) หรือบัส SB
2. บัสควบคุมแรงดัน (Voltage Controlled Bus) หรือบัส PV
3. โหลดบัส (Load Bus) หรือบัส PQ

4. บัส PS คือบัสไม่เชิงเส้นที่กำหนดกำลังไฟฟ้าจริงและโวลต์แอมแปร์ปรากฏ (Apparent Voltamperes)

5. บัส Pα คือบัสไม่เชิงเส้นที่กำหนดกำลังไฟฟ้าจริงและมุมประวิง (Delay Angle)

6. บัส Eα คือบัสไม่เชิงเส้นที่กำหนดแรงดันกระแสตรงและมุมประวิง

4.5 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปร (Variable Initialization)

การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ของโหลดไม่เชิงเส้นเพื่อทำให้โปรแกรมคอนเวิร์จเป็นสิ่งสำคัญมาก ก่อนการใช้โปรแกรม HARMONIC จะต้องหาค่าเริ่มต้นทั้งขนาดและมุมของแรงดันหลักมูลจากโปรแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล

4.5.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q

บัส PS ต้องการค่าเริ่มต้น Q เนื่องจากเครื่องแปลงผันต้องการ Q โดยเครื่องหมายของ Q ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าเป็นบวก (Positive Load) จากสมการความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \qquad (4.1)$$

ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสสำหรับโมเดลของเครื่องแปลงผัน

$$I_{RMS}^2 = I_1^2 \left[1 + \left(\frac{1}{5^2}\right) + \left(\frac{1}{7^2}\right) + \left(\frac{1}{11^2}\right) + \ldots \right] \qquad (4.2)$$

โดยที่

I_1 = ส่วนประกอบหลักมูลของกระแส

เศษส่วนที่เหลือจะแทนพจน์ฮาร์มอนิก

ในที่นี้ถือว่าการจ่ายแรงดัน (Applied Voltage) มีเพียงความถี่หลักมูล

$$S^2 = V_1^2 I_{rms}^2 \qquad (4.3)$$

$$P^2 = V_1^2 I_1^2 \cos^2 \theta \qquad (4.4)$$

$$Q^2 = V_1^2 I_1^2 \sin^2 \theta \qquad (4.5)$$

จาก (4.1) จะได้

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2$$

$$= V_1^2 I_{rms}^2 - V_1^2 I_1^2$$

$$= V_1^2 I_1^2 \left[\left(\frac{1}{5^2}\right) + \left(\frac{1}{7^2}\right) + \left(\frac{1}{11^2}\right) + \ldots \right]$$

สามารถแสดง Q ในเทอมของ S โดยใช้นุกรม

$$\sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(2N+1)^2} = \frac{\pi^2}{8} = 1 + \left(\frac{1}{3^2}\right) + \left(\frac{1}{5^2}\right) + \left(\frac{1}{7^2}\right) + \ldots$$

จากอนุกรมต่อไปนี้คือ

$$\sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{(6N-3)^2} = \left(\frac{1}{3^2}\right) + \left(\frac{1}{9^2}\right) + \left(\frac{1}{15^2}\right) + \ldots$$

$$\sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{(3)^2(2N-1)^2} = \frac{1}{9} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(2N+1)^2} = \frac{1}{9}\frac{\pi^2}{8}$$

ดังนั้น

$$1 + \left(\frac{1}{5^2}\right) + \left(\frac{1}{7^2}\right) + \left(\frac{1}{11^2}\right) + \ldots = \frac{\pi^2}{8} - \frac{1}{9}\frac{\pi^2}{8} = \frac{\pi^2}{9}$$

จะได้

$$[I_{rms}]^2 = I_1^2 \left(\frac{\pi^2}{9}\right)$$

$$S^2 = V_1^2 I_1^2 \left(\frac{\pi^2}{9}\right)$$

$$D^2 = V_1^2 I_1^2 \left(\frac{\pi^2}{9}\right) - P^2 - Q^2$$

$$= V_1^2 I_1^2 \left(\frac{\pi^2}{9} - 1\right)$$

$$D^2 = S^2 \left(\frac{\frac{\pi^2}{9}-1}{\frac{\pi^2}{9}}\right) = S^2 \left(1-\frac{9}{\pi^2}\right)$$

$$D = S\sqrt{1-\frac{9}{\pi^2}}$$

จาก (4.1)

$$Q^2 = S^2 - P^2 - D^2 = S^2 - P^2 - S^2\left(1-\frac{9}{\pi^2}\right)$$

$$= \left(\frac{3S}{\pi}\right)^2 - P^2 \qquad (4.6)$$

สมการ(4.6)ใช้ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของ Q ที่ทุกๆ บัสของเครื่องแปลงผัน ที่ไม่ได้มีการกำหนดค่า Q และเนื่องจาก $Q^2 \geq 0$ ดังนั้น

$$P_{max}^2 \leq \left(\frac{3S}{\pi}\right)^2$$

$$P_{max} \leq \left(\frac{3S}{\pi}\right) \qquad (4.7)$$

สมการ (4.7) ใช้ในการตรวจสอบข้อมูลของ P ที่บัสเครื่องแปลงผัน จากสมการตัวประกอบกำลัง

$$PF = \frac{P}{S}$$

จะได้ค่าสูงสุดของตัวประกอบกำลังของเครื่องแปลงผันดังนี้

$$PF_{max} = \frac{P_{max}}{S} = \frac{3}{\pi} = 0.955$$

สำหรับบัส Pα การกำหนดค่าเริ่มต้นของ Q ขึ้นกับการสมมติค่ามุมประวิง (Delay Angle) ให้เท่ากับตัวประกอบกำลัง (โดยไม่คิดผลของฮาร์มอนิก) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{Q}{P} = \tan \alpha$$

$$Q = P \tan \alpha \qquad (4.8)$$

โดยที่เครื่องหมายของ Q มีค่าเป็นบวก และไม่คิดผลของการสับเปลี่ยน (Commutation)

4.5.2 <u>การกำหนดค่ามุมสับเปลี่ยน μ</u>

ไม่มีวิธีที่ถูกต้องแน่นอนของการกำหนดค่ามุมสับเปลี่ยน (Commutation Angle = μ) ของเครื่องแปลงผัน เพื่อให้ง่ายและสะดวกจะกำหนดให้ $\mu = 0$

4.5.3 <u>การกำหนดค่าแรงดัน E และความต้านทาน R</u>

การกำหนดค่า E และ R เป็นสิ่งที่ซับซ้อน ต้องคำนึงถึง 2 กรณีดังต่อไปนี้

4.5.3.1 <u>กรณีเครื่องแปลงผันแบบพาสซีฟ</u>

ค่า RMS ของแรงดันกระแสตรงของเครื่องแปลงผัน หาได้จากสมการในภาคผนวก จ

$$V_{DC} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{-\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \left[\sqrt{6}\ V_{AC(1-n)} \right]^2 \cos^2\theta\ d\theta \qquad (4.9)$$

$$V_{DC}^{\ 2} = 3\ V_{AC\ (1-n)}^{\ 2} \left[1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cos 2\alpha \right] \quad , 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3} \qquad (4.10)$$

$$V_{DC}^{\ 2} = 3V_{AC\ (1-n)}^{\ 2} \left[2 - \frac{3\alpha}{\pi} - \frac{3}{2\pi} \sin(2\alpha - \frac{\pi}{3}) \right] \ , \ \frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{2\pi}{3} \qquad (4.11)$$

เมื่อแปลง V_{DC} ให้เป็น pu และจากภาคผนวก จ ,สมการ (จ1) จะหา R ได้ดังนี้

$$R = \frac{V_{DC(pu)}^{2}}{3P} \qquad (4.12)$$

โดยที่

P = กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด

E = 0 (กรณีเครื่องแปลงผันแบบพาสซีฟ)

4.5.3.2 <u>กรณีเครื่องแปลงผันแบบแอกทีฟ</u>

กรณีเครื่องแปลงผันแบบแอกทีฟ จะมีมุมประจุวิ่งตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา ดังนั้นแรงดันที่จ่ายโดยเครื่องแปลงผัน จะมีค่าทั้งบวกและลบ จึงควรหาค่าเฉลี่ยดังนี้

$$V_{avg} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{-\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \left[\sqrt{6}\, V_{AC\,(1-n)} \right] \cos\theta \, d\theta \qquad (4.13)$$

การหาค่าเริ่มต้นของ E ในกรณีโหลดบัสหาได้จากค่าบวกของแรงดัน ในกรณีบัสกำเนิด (Generator Bus) หาได้จากค่าลบของแรงดัน นั่นคือ

$$V_{avg} = \frac{3\sqrt{6}V_{AC(1-n)}}{\pi} \cos\alpha \quad , 0 \le \alpha \le \frac{\pi}{3} \text{ หรือ } \frac{2\pi}{3} \le \alpha \le \pi \qquad (4.14)$$

กรณีโหลดบัสจะได้

$$V_{avg} = \frac{3\sqrt{6}V_{AC(1-n)}}{\pi} \left[1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6} \right) \right] \quad , \alpha \ge \frac{\pi}{3} \qquad (4.15)$$

กรณีบัสทำเนิดจะได้

$$V_{avg} = \frac{3\sqrt{6}V_{AC(1-n)}}{\pi}\left[\sin(\alpha + \frac{\pi}{6}) - 1\right] \quad , \alpha \leq \frac{\pi}{3} \qquad (4.16)$$

จากแรงดันเฉลี่ยกระแสตรง, กำลังไฟฟ้าโหลด, และความต้านทานวงจรด้านกระแสตรง สามารถหาค่า E ได้ดังนี้

$$P = V_{avg} I_{avg} = V_{avg}\left[\frac{V_{avg}-E}{R}\right]$$

$$E = V_{avg} - \frac{P \cdot R}{V_{avg}} \qquad (4.17)$$

4.6 <u>การหาอนุพันธ์บางส่วนสัมพันธ์กับตัวแปรควบคุม</u> (Partial Derivatives Related to Control Variables)

การสร้างเมตริกซ์ H ต้องทำการหาอนุพันธ์บางส่วนที่เกิดจากเครื่องแปลงผันเทียบกับตัวแปรควบคุม(R, E, และ α) การหาอนุพันธ์บางส่วนนี้จะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์(Method of Finite Differences) พิจารณาสมการกระแสฮาร์มอนิก(ง1)และ(ง2) ในภาคผนวก ง โดยใช้ค่าในตารางที่ 3.1 และ 3.2 สมมติว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า μ, $E^{(1)}$, $F^{(1)}$, T_1, และ B_1 จึงสามารถหาอนุพันธ์บางส่วนของกระแสโดยเทียบกับตัวแปรควบคุม ดังนั้น

- ค่าแรงดันกระแสตรง E มีผลต่อพจน์ $C^{(1)}$
- ค่ามุมประจุ มีผลต่อลิมิต T_1, B_1 และพจน์เอ็กซ์โปเนนเชียล $E^{(1)}$
- ค่าความต้านทานกระแสตรงR มีผลต่อ $C^{(1)}, E^{(1)}$ และพจน์บังคับ $F^{(1)}$

วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะใช้ค่า Δ ในการเปลี่ยนพารามิเตอร์ควบคุม โดยให้ $\Delta = 0.001$ pu หรือเรเดียน

4.7 การหาค่ายอดของสัญญาณฮาร์มอนิก (Peak Values of Harmonic Signals)

สัญญาณฮาร์มอนิกอยู่ในรูปของอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) ดังเช่น

$$v(t) = \sum_{k=1}^{h} V^{(k)} \sin(k\omega_0 t + \delta^{(k)}) \ , \quad k,h = \text{เลขคี่}$$

การวิเคราะห์หาค่ายอดของแรงดันนี้ไม่สามารถทำได้ นอกจากจะใช้การสแกนรูปคลื่น (Scanning Waveform) ค่าที่ได้จะมีค่าผิดพลาด (Error) ซึ่งสามารถทำให้ค่าผิดพลาดน้อยลงโดยการลดช่วงสแกน

สมมติให้ช่วงสแกนเป็น Δ ค่าผิดพลาดที่ความถี่หลักมูลคือ

$$e^{(1)} = V^{(1)} \sin\left(\frac{\Delta}{2h}\right)$$

ค่าผิดพลาดที่ความถี่ฮาร์มอนิก k คือ

$$e^{(k)} = V^{(k)} \sin\left(\frac{k\Delta}{2h}\right)$$

ดังนั้นความผิดพลาดรวมในการหาค่ายอดของแรงดันฮาร์มอนิกคือ

$$e_{MAX} = \sum_{k=1}^{h} V^{(k)} \sin\left(\frac{k\Delta}{2h}\right) \qquad (4.18)$$

ค่าที่ตั้งไว้ในโปรแกรมคือ 5° ดังนั้นค่าผิดพลาดที่ความถี่หลักมูลคือ

$$e_{MAX} = V^{(1)} \sin(2.5^{\circ}) = 0.0436\ V^{(1)}$$

ถ้าฮาร์มอนิกมีถึงอันดับที่ 25 ค่าผิดพลาดรวมคือ

$$e_{MAX} = 0.0017\ V^{(1)} + ... + 0.0436\ V^{(25)}$$

ถ้าหาคำตอบของ $V^{(k)}$ หรือ $I^{(k)}$ แล้ว ค่าผิดพลาดสูงสุดของการหาค่ายอดสามารถคำนวณได้

4.8 การคอนเวิร์จของโปรแกรม

โปรแกรม HARMONIC ได้มีการกำหนดการคอนเวิร์จโดยใช้ค่าที่น้อยเพียงพอเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม กรณีการไม่รับกัน (Mismatch) ของ P,Q,S และ I จะใช้ช่วงกว้าง(Tolerance) 0.0001pu สำหรับมุมสับเปลี่ยนและเวลาสิ้นสุดของกระแสช่วงที่ 2 ของเครื่องแปลงผันจะใช้ช่วงกว้าง 0.0001pu เช่นกัน