

บทที่ 3

โมเดลที่ใช้ในโปรแกรม

3.1 บทนำ

ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นผลจากโหลดไม่เชิงเส้น ดังนั้นการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะแตกต่างกับแบบเดิมที่เคยใช้กันมา การคำนวณฮาร์มอนิกจำเป็นต้องใช้อย่างยิ่งที่จะต้องใช้โมเดลให้ถูกต้อง บทนี้จะกล่าวถึงโมเดลต่างๆที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม โดยเฉพาะโมเดลของโหลดไม่เชิงเส้นได้แก่ โมเดลของเครื่องแปลงผันแบบ 6 พัลส์ (Six Pulse Converter)

3.2 โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า [2, 6, 7, 8, 18]

การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกต่างกับที่ความถี่หลักมูลคือ ความถี่หลักมูลจะใช้ฮาร์มอนิกแคว้นลำดับบวก (Positive Sequence) แต่ฮาร์มอนิกจะใช้ฮาร์มอนิกแคว้นลำดับบวก,ลบ,หรือศูนย์ (Positive,Negative or Zero Sequence) ขึ้นกับลำดับเฟสของฮาร์มอนิก (Harmonic Phase Sequence) [ภาคผนวก ข] โมเดลที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อการวิเคราะห์มีดังนี้

3.3 องค์ประกอบวงจรข่าย (Network Elements)

วงจรข่ายส่งระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Transmission Network) ประกอบด้วย สายส่ง(Transmission Line), หม้อแปลง, ตัวเก็บประจุแบบขนาน

(Shunt Capacitor), ตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน (Shunt Inductor) หรืออิมพีแดนซ์แบบกลุ่มก้อนอื่นๆ (Other Lumped Impedance) จะกระทำการสมมติ (Assume) ดังนี้

- ส่วนประกอบวงจรชายทั้งหมด (All Network Component) เป็นเชิงเส้น และไม่มีการกระทำระหว่างกัน (Interaction) ของวงจรฮาร์มอนิกในวงจรชาย ข้อสมมตินี้ใช้ได้กับสายส่ง, องค์ประกอบรีแอคทีฟแบบขนาน (Shunt Reactive Element), และหม้อแปลงที่ไม่คำนึงถึงผลของความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากการอิ่มตัว (Saturation) และฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

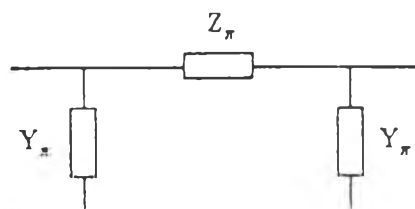
- โมเดลของอิมพีแดนซ์แบบกลุ่มก้อนจะแทนด้วย ตัวต้านทานคงที่ (Fixed Resistor), ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวเก็บประจุ (Capacitor)

องค์ประกอบของวงจรชายที่สำคัญที่ใช้ในโปรแกรมมีดังนี้

- สายส่ง (Transmission Line)
- หม้อแปลงกำลัง (Power Transformer)

3.3.1 โมเดลของสายส่ง [6, 7, 18]

โมเดลของสายส่ง แทนด้วยวงจรสมมูลเฟสเดียวแบบ π (Single Phase π Equivalent) เป็นแบบสายสั้น (Short Line) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โมเดลของสายส่ง

โดยที่

$$Z_{\pi} = (R + j\omega L)d \quad \Omega$$

$$Y_{\pi} = j\omega Cd \quad \Omega^{-1}$$

R - ความต้านทานอนุกรมต่อหนึ่งหน่วยความยาว

L - ความเหนี่ยวนำอนุกรมต่อหนึ่งหน่วยความยาว

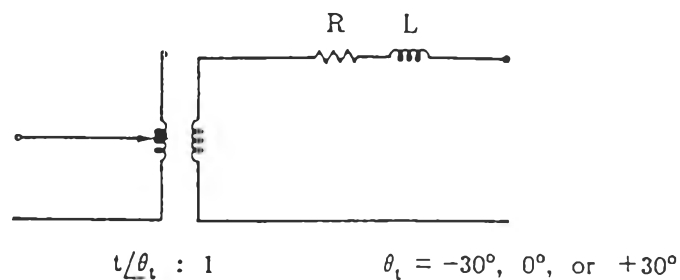
C - ความจุไฟฟ้าขนานต่อหนึ่งหน่วยความยาว

d = ความยาวของสายส่ง

ω - ความถี่

3.3.2 โมเดลของหม้อแปลงกำลัง [6, 7, 17, 18]

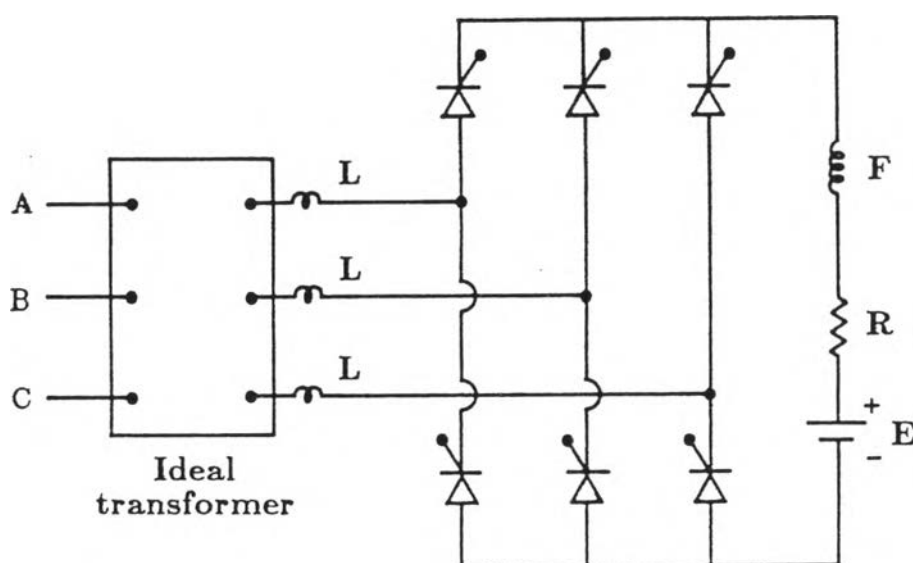
หม้อแปลงกำลังถือเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกแบบไม่เชิงเส้น โมเดลของมันแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานอนุกรมและความเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage Inductance) โดยไม่คิดพจน์สร้างสนามแม่เหล็กแบบขนาน (Shunt Magnetizing Term) ค่ารีแอกแตนซ์จะเพิ่ม (Scale) ตามความถี่ โมเดลนี้เป็นแบบอัตราส่วนแทปคงที่ที่ต่างจากระบุ (Off Nominal Fixed Tap Ratio) เนื่องจากฮาร์มอนิกมีลำดับบวก, ลบ, และศูนย์ ดังนั้นการต่อหม้อแปลงจึงต้องพิจารณาลำดับฮาร์มอนิกที่แค้นซ์ ซึ่งแต่ละแบบของการต่อจะมีผลต่างมุมเฟส (Phase Shift) ต่างกัน รูปที่ 3.2 เป็นการต่อแบบวาย-เดลตา (Wye-delta Connection) มีผลต่างมุมเฟสเป็น -30° , 0° , $+30^\circ$



รูปที่ 3.2 โมเดลของหม้อแปลงกำลัง

3.4 โมเดลของเครื่องแปลงผันแบบ 6 พัลส์ [2, 6, 7, 8]

โมเดลของเครื่องแปลงผันที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวข้องกับ เตารีด (Arc Furnace), มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor Drive), อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่, เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ เป็นต้น โมเดลของเครื่องแปลงผันแบบ 3 เฟส 6 พัลส์ แบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โมเดลของเครื่องแปลงผันแบบ 6 พัลส์

ระบบกระแสตรง (DC System) ใช้โมเดลของวงจรสมมูลเทวินินประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ F , ตัวต้านทาน R , และแรงดันกระแสตรง E

ความเหนี่ยวนำ F คือค่าของ

- ความเหนี่ยวนำของสายเคเบิลไปยังโหลดกระแสตรง
- รีแอกเตอร์ทางด้านกระแสตรง (DC-side Reactor) หรือ

ฟิลเตอร์รีแอคเตอร์ (Filter Reactor)

- ตัวเหนี่ยวนำหรือโช้ก (Choke) ในวงจรกระแสตรง

ความต้านทาน R คือค่าของ

- ความต้านทานของสายเคเบิลไปยังโหลดกระแสตรง
- ความต้านทานสมมูลเทวินิน (Thevenin Equivalent) ของโหลด

กระแสตรง

- ความต้านทานกระแสตรงของฟิลเตอร์รีแอคเตอร์หรือโช้ก

แหล่งกำเนิดแรงดัน E คือค่าของ

- แรงดันวงจรเปิดของแบตเตอรี่ (Battery Open Circuit Voltage) (ใช้ในการณีของเครื่องชาร์จแบตเตอรี่)
- มีค่าเป็นศูนย์ในการณีเป็นโหลดอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Loads) และขบวนการอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic processes)

โมเดลของเครื่องแปลงผันที่ใช้ในโปรแกรม Harmonic มี 2 แบบ คือ

- กรณี $E=0$ นั่นคือไม่มีแหล่งกำเนิดกระแสตรง (Without dc Voltage Source) เรียกว่าเครื่องเรียงกระแสแบบพาสซีฟ (Passive Rectifier)
- กรณี $E \neq 0$ นั่นคือมีแหล่งกำเนิดกระแสตรงเรียกว่าเครื่องเรียงกระแสแบบแอคทีฟ (Active Rectifier)

สมมติฐานของเครื่องแปลงผันที่ใช้ใน HARMONIC

1. L และ F ต้องรู้ค่า

2. กรณีเครื่องแปลงผันแบบพาสซีฟ ค่า $E = 0$ และ R ไม่รู้ค่า
3. กรณีเครื่องแปลงผันแบบแอคทีฟ ค่า E เป็นบวก แต่ไม่รู้ค่า และ R รู้ค่า
4. กรณีอินเวอร์เตอร์ ค่า E เป็นลบ แต่ไม่รู้ค่า และ R รู้ค่า

ด้านระบบกระแสสลับ (AC System) เครื่องแปลงผันจะต่อกับหม้อแปลงที่มีความเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage Inductance) เท่ากับ L การคำนวณจะแทนหม้อแปลงด้วยอัตราส่วนจำนวนรอบเชิงซ้อน (Complex Turns Ratio) ซึ่งมีผลต่างมุมเฟสเป็น $-30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ ของแต่ละฮาร์โมนิก โดยปกติค่า L จะมากกว่าค่าความเหนี่ยวนำของระบบไฟฟ้ากระแสสลับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ถ้าระบบมั่นคง (Stiff System) ค่า L คือค่าความเหนี่ยวนำสับเปลี่ยน (Commutating Inductance) ของเครื่องแปลงผัน

เครื่องแปลงผันจะต่อกับแรงดันสายกระแสสลับ (AC Line to Line Voltage) โดยผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเปิดเปิด (Switching Rectifier) เนื่องจากแรงดันสายไม่มีส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero Sequence Components) ดังนั้นระบบสมดุลจะไม่มีแรงดันฮาร์โมนิกจำนวนเท่าของสาม ($3n, n=1, 2, 3, \dots$) เข้าในวงจรสมดุลกระแสตรง (Equivalent DC Circuit) โดยปกติไม่มีการต่อลงดิน (Ground) หรือถ้ามีก็มีเพียง 1 จุดทางด้านกระแสตรง (DC Side) ของหม้อแปลง จึงไม่มีเส้นทางปิด (Closed Path) สำหรับกระแสลำดับศูนย์ที่จะไหลทางด้านกระแสตรงและอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีค่าใหญ่มาก (Infinity)

ดังนั้นการวิเคราะห์เครื่องแปลงผันแบบสมดุลจึงไม่ต้องคิดแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกจำนวนเท่าของสาม และเนื่องจากแรงดันสายเป็นฟังก์ชันคี่ (Odd Function) จึงไม่ต้องคิดแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกจำนวนคู่ (Even Harmonic of Voltage and Current) อันดับของกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากเครื่องแปลงผัน 6 พัลส์ หาได้จาก

$$k = 6q \pm 1 \quad (3.1)$$

โดยที่

k = อันดับของกระแสฮาร์โมนิก

q = เลขจำนวนเต็มบวก

การวิเคราะห์นิพจน์และอนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสในรูปแรงดัน โดยให้แรงดันเฟสทางค่านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ด้านเครื่องแปลงผัน) มีค่าดังนี้

$$u_{an}(t) = f'(t) = \sum_k \sqrt{2} u_k \sin(k\omega_0 t + \phi_k')$$

$$\begin{aligned} u_{bn}(t) = f'(t - \frac{T_0}{3}) &= \sum_k \sqrt{2} u_k \sin(k\omega_0(t - \frac{T_0}{3}) + \phi_k') \\ &= \sum_k \sqrt{2} u_k \sin(k\omega_0 t + \phi_k' - \frac{2\pi\delta_k}{3}) \end{aligned}$$

$$u_{cn}(t) = f'(t - \frac{2T_0}{3}) = \sum_k \sqrt{2} u_k \sin(k\omega_0 t + \phi_k' + \frac{2\pi\delta_k}{3})$$

โดยที่

ω_0 = ความถี่หลักมูล

T_0 = ช่วงเวลาสอดคล้อง (Corresponding Period)

u_k = สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์

$$\delta_k = \begin{pmatrix} 1 & k=1, 4, 7, \dots, \infty \\ -1 & k=2, 5, 8, \dots, \infty \\ 0 & k=3, 6, 9, \dots, \infty \end{pmatrix}$$

\sum_k = ผลรวมตั้งแต่ $k = 1$ ถึง h

จากรูปที่ 3.4 แสดงการทำงานของเครื่องแปลงผัน แต่ละครึ่งไซเคิล (Half Cycle) ประกอบด้วยช่วงเวลา 6 ช่วง กรณีเฟส a มีช่วงเวลาดังนี้

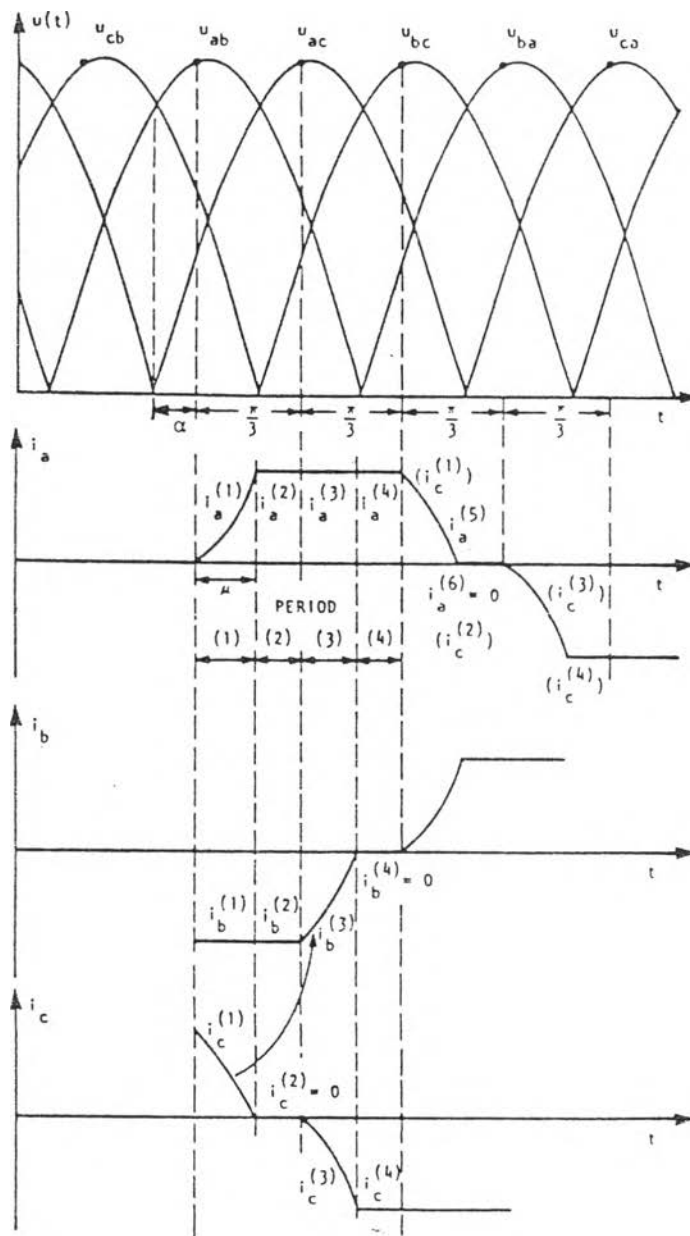
- ช่วงการสับเปลี่ยน (Commutation)
- ช่วงการนำ (Conduction)
- ช่วงการหยุดนำ (Off)

พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกสองตัวคือ มุมประวิง α (Delay Angle) ซึ่งปกติสามารถควบคุมมันได้ และมุมสับเปลี่ยน μ (Commutation Angle) ซึ่งสามารถควบคุมมันได้โดยกำหนดจุดทำงาน (Operating Point) และตัวแปรวงจรสาย (Network Variables) ค่า μ จะน้อยกว่า 60° ในที่นี้จะใช้ในช่วง $10^\circ - 30^\circ$

เครื่องเรียงกระแสไม่สามารถปิดวงจร (Switch on) ขณะไบแอสกลับทาง (Reverse Bias) เนื่องจากการไบแอสกลับทางจะเกิดก่อนเวลาสับเปลี่ยนธรรมชาติ (Natural Commutation Time) คือเวลาที่มุมประวิงเป็นศูนย์ และเช่นกันเครื่องเรียงกระแสจะไม่เปิดวงจร (Switch off) ขณะไบแอสตาม (Forward Bias) ดังนั้นมุมประวิงควรน้อยกว่า 180° กรณีที่มุมประวิงมีค่าน้อยเครื่องจะทำงานในโหมดเรียงกระแส (Rectifier Mode) ถ้ามุมประวิงมีค่ามาก (เกินกว่า 90°) เครื่องจะทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ (Inverter Mode) มุมประวิงนี้ใช้ในการประมาณค่าตัวประกอบกำลังของอุปกรณ์ ซึ่งก็คือผลต่างมุมเฟสสัมพัทธ์ (Relative Phase Shift) ระหว่างแรงดันจ่าย (Applied Voltage) กับกระแสลัพธ์ (Resultant Current)

จากภาคผนวก ข แรงดันเฟสของแหล่งจ่าย

- มีค่าลำดับบวก ถ้า $k = 1, 4, 7, 10, \dots$
- มีค่าลำดับลบ ถ้า $k = 2, 5, 8, 11, \dots$
- มีค่าลำดับศูนย์ ถ้า $k = 3, 6, 9, 12, \dots$



รูปที่ 3.4 การทำงานของเครื่องแปลงผันแบบ 6 พัลส์

สามารถหาแรงดันสายได้ดังนี้

$$u_{ab}(t) = u_a(t) - u_b(t) = \sum_k \sqrt{6} u_k \sin(k\omega_0 t + \theta_k) = f(t)$$

$$u_{bc}(t) = \sum_k \sqrt{6} u_k \sin(k\omega_0 t + \theta_k - \frac{2\pi\delta_k}{3}) = f(t - \frac{T_0}{3})$$

$$u_{ca}(t) = \sum_k \sqrt{6} u_k \sin(k\omega_0 t + \theta_k + \frac{2\pi\delta_k}{3}) = f(t - \frac{2T_0}{3})$$

โดยที่

$$\theta_k = \theta_k' + \delta_k \frac{\pi}{6}$$

$$\delta_k \frac{\pi}{6} = 30^\circ \quad \text{เมื่อ } k = 1, 4, 7, \dots$$

$$= -30^\circ \quad \text{เมื่อ } k = 2, 5, 8, \dots$$

ต่อไปนี้พิจารณาช่วงเวลาสลับเปลี่ยน ตามรูปที่ 3.4 ซึ่งมี 6 ช่วง ดังนี้

- ช่วงที่ 1 $\alpha \leq \omega_0 t \leq \alpha + \mu$
- ช่วงที่ 2 $\alpha + \mu \leq \omega_0 t \leq \alpha + \frac{\pi}{3}$
- ช่วงที่ 3 $\alpha + \frac{\pi}{3} \leq \omega_0 t \leq \alpha + \frac{\pi}{3} + \mu$
- ช่วงที่ 4 $\alpha + \frac{\pi}{3} + \mu \leq \omega_0 t \leq \alpha + \frac{2\pi}{3}$
- ช่วงที่ 5 $\alpha + \frac{2\pi}{3} \leq \omega_0 t \leq \alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu$
- ช่วงที่ 6 $\alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu \leq \omega_0 t \leq \pi$

1. ช่วง $\alpha \leq \omega_0 t \leq \alpha + \mu$

แรงดัน u_{cb} และ u_{ab} จำให้แก่วัฏรีสเตอร์ c_1 , a_1 , และ b_2 สามารถ

ลดรูปวงจรได้ดังรูปที่ 3.5 และเขียนสมการได้ดังนี้

$$Lp i_c^{(1)}(t) - Lp i_a^{(1)}(t) = u_{ca}(t) \quad (3.1)$$

$$Lp i_a^{(1)}(t) - [R + (L + F)p] i_b^{(1)}(t) + E = u_{ab}(t) \quad (3.2)$$

$$i_b(t) = -i_a(t) - i_c(t) \quad (3.3)$$

โดยที่ $p \equiv \frac{d}{dt}$

ดัชนีบน (1) แทนช่วงเวลาการสับเปลี่ยนช่วงที่ 1

แทนค่า (3.3) ใน (3.2)

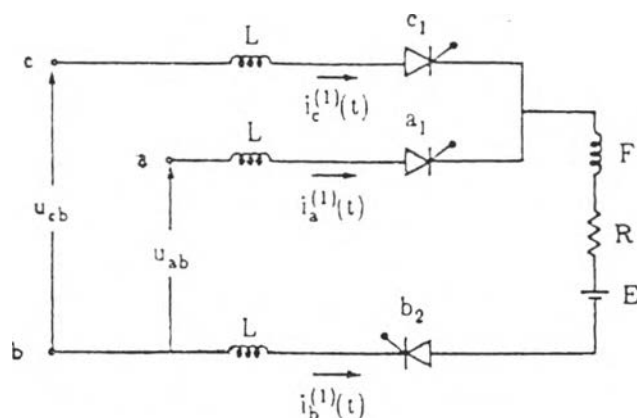
$$[R + (2L + F)p] i_a^{(1)}(t) + [R + (L + F)p] i_c^{(1)}(t) = u_{ab}(t) - E \quad (3.4)$$

จาก (3.1), (3.3), และ (3.4) แก้สมการจะได้

$$i_a(t) = K_1 + K_2 e^{P_1 t} + f_a(u_k, t) - \frac{E}{2R} \quad (3.5)$$

$$i_c(t) = -K_1 + K_2 e^{P_1 t} + f_c(u_k, t) - \frac{E}{2R} \quad (3.6)$$

$$i_b(t) = -2K_2 e^{P_1 t} - f_a(u_k, t) - f_c(u_k, t) + \frac{E}{R} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของเครื่องแปลงผัน ช่วงที่ 1

โดยที่

$$\begin{aligned}
 (1) \\
 f_a(u_k, t) &= \sum_{k=1,5,7,\dots} \frac{\sqrt{6}u_k}{z_{k1}} \sin(k\omega_0 t + \phi_k - \theta_{k1}) \\
 &\quad - \sum_{k=1,5,7,\dots} \frac{\sqrt{6}u_k}{z_{k1} z_{k3}} \sin(k\omega_0 t + \phi_k + \theta_{k2} - \theta_{k1} - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi\delta_k}{3}) \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (1) \\
 f_c(u_k, t) &= \sum_{k=1,5,7,\dots} \frac{\sqrt{6}u_k}{z_{k1}} \sin(k\omega_0 t + \phi_k - \theta_{k1}) \\
 &\quad + \sum_{k=1,5,7,\dots} \frac{\sqrt{6}u_k}{z_{k1} z_{k3}} \sin(k\omega_0 t + \phi_k + \theta_{k4} - \theta_{k1} - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi\delta_k}{3}) \quad (3.9)
 \end{aligned}$$

$$(1) \quad K = \text{ค่าคงที่ในช่วงที่ 1}$$

$$z_{k1} \text{Arg}(\theta_{k1}) = 2R + jk\omega_0(3L + 2F)$$

$$z_{k2} \text{Arg}(\theta_{k2}) = R + jk\omega_0(L + F)$$

$$z_{k3} \text{Arg}\left(\frac{\pi}{2}\right) = jk\omega_0 L$$

$$z_{k4} \text{Arg}(\theta_{k4}) = R + jk\omega_0(2L + F)$$

$$P_1 = \frac{-2R}{3L + 2F}$$

(A) Arg (B) หมายถึงขนาดเวกเตอร์ที่มีความยาว A และมีมุมเฟส B
เรเดียน

$$2. \text{ ช่วง } \alpha + \mu \leq \omega_0 t \leq \alpha + \frac{\pi}{3}$$

ใช้วิธีเช่นเดียวกับช่วงที่ 1 สามารถยุบเป็นวงจรดังรูปที่ 3.6 และเขียนเป็น
สมการได้ดังนี้

$$u_{ab}(t) - E = [R + (2L + F)p]^{(2)} i_a(t) \quad (3.10)$$

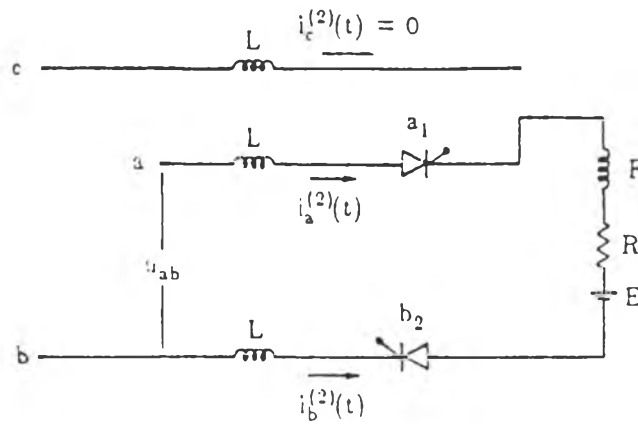
$$i_b(t)^{(2)} = -i_a(t)^{(2)} \quad (3.11)$$

$$i_c(t)^{(2)} = 0 \quad (3.12)$$

แก้สมการ (3.10), (3.11), และ (3.12) จะได้

$$i_a(t)^{(2)} = K_2 e^{P_2 t} + f_a(u_k, t) - \frac{E}{R} \quad (3.13)$$

$$i_b(t)^{(2)} = -K_2 e^{P_2 t} - f_a(u_k, t) + \frac{E}{R} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของเครื่องแปลงผัน ช่วงที่ 2

โดยที่

$$(2) \quad f_a(u_k, t) = \sum_{k=1,5,7,\dots} \frac{\sqrt{6}u_k}{2k4} \sin(k\omega_0 t + \phi_k - \theta_{k4}) \quad (3.15)$$

$$P_2 = \frac{-R}{2L+F}$$

(2) K_2 - ค่าคงที่ซึ่งหาจาก $i_a(t)$ ที่ $\omega_0 t = \alpha + \mu$

สำหรับช่วงที่ 3-6 ไม่จำเป็นต้องแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) เพียงแต่หาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงที่ 3-6 กับ ช่วงที่ 1 และ 2 โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.4 จะได้สมการกระแสดังนี้

$$(3) \quad i_a(t) = -\overset{(3)}{i_b(t)} - \overset{(3)}{i_c(t)} = \overset{(1)}{i_c(t - \frac{\pi}{3\omega_0})} + \overset{(1)}{i_a(t - \frac{\pi}{3\omega_0})} \quad (3.16)$$

$$\begin{matrix} (4) & (4) & (2) \\ i_a(t) = -i_c(t) & = & i_a(t - \frac{\pi}{3\omega_0}) \end{matrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{matrix} (5) & (1) \\ i_a(t) = i_c(t - \frac{2\pi}{3\omega_0}) \end{matrix} \quad (3.18)$$

$$\begin{matrix} (6) \\ i_a(t) = 0 \end{matrix} \quad (3.19)$$

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก จะใช้ $i_a(t)$ เป็นหลัก โดยพิจารณาจากการสับเปลี่ยน (Commutation) ว่าเกิดขึ้นหรือไม่

กรณีที่ 1 การสับเปลี่ยนไม่เกิดขึ้น จะเกิดผลดังนี้

- ช่วงเวลา 1, 3, และ 5 จะไม่เกิด
- $\mu = 0$

$$\begin{matrix} (2) & (2) \\ - i_a(\frac{\alpha}{\omega_0}) = 0 \end{matrix} \quad \text{ทำให้หา } K_2 \text{ ได้จาก}$$

$$\begin{matrix} (2) & (2) & (2) \\ i_a(\frac{\alpha}{\omega_0}) = K_2 e^{(P_2 \frac{\alpha}{\omega_0})} + f_a(u_k, \frac{\alpha}{\omega_0}) - \frac{E}{R} = 0 \end{matrix}$$

(2) เนื่องจากค่า $i_a(t)$ ในช่วงครึ่งไซเคิลไม่เป็นลบ สามารถตรวจสอบเครื่องหมาย

$$i_a(t) \text{ ได้โดยใช้ } \omega_0 t = \alpha + \frac{\pi}{3}$$

$$\text{กรณี } \omega_0 t = \alpha + \frac{\pi}{3}$$

(2)

- ถ้า $i_a(t) = 0$ แสดงว่าไม่เกิดการสับเปลี่ยน และเวลาสิ้นสุดที่

$$\omega_0 t = \alpha + \frac{\pi}{3}$$

(2)

- ถ้า $i_a(t) = 0$ มีค่าเป็นลบ แสดงว่าไม่เกิดการสับเปลี่ยน และเวลา

$$\text{สิ้นสุดลงก่อน } \omega_0 t = \alpha + \frac{\pi}{3}$$

การหาเวลาสิ้นสุดคือ $\omega_0 t_1$ หาได้จากการคำนวณแบบวนซ้ำ

$$i_a(t) = K_2 e^{p_2 t} - f_a(u_k, t) - \frac{E}{R} = 0$$

(2)

- ถ้า $i_a(t) = 0$ มีค่าเป็นบวก แสดงว่าเกิดการสับเปลี่ยน

(1) (1) (2)

เมื่อเกิดการสับเปลี่ยนการคำนวณหาค่า K_1 , K_2 , K_2 , และ μ หาได้จาก

สมการดังต่อไปนี้

$$i_a\left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right) = 0 \quad (3.20)$$

$$i_c\left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right) = -i_b\left(\frac{\alpha}{\omega_0} + \frac{\pi}{3\omega_0}\right) \quad (3.21)$$

$$i_c\left(\frac{\alpha+\mu}{\omega_0}\right) = 0 \quad (3.22)$$

$$i_a \left(\frac{\alpha + \mu}{\omega_0} \right) = i_a \left(\frac{\alpha + \mu}{\omega_0} \right) \quad (3.23)$$

แทนค่า (3.5) ถึง (3.9), (3.10), และ (3.11) ใน (3.20) ถึง (3.23) จะได้

$$\text{จาก (3.20)} \quad K_1 + K_2 = A \quad (3.24)$$

$$\text{จาก (3.21)} \quad -K_1 + K_2 + DK_3 = B \quad (3.25)$$

$$\text{จาก (3.22)} \quad -K_1 + H_1 K_2 = \frac{E}{2R} - f_c \left(u_k, \frac{\alpha + \mu}{\omega_0} \right) \quad (3.26)$$

$$\text{จาก (3.23)} \quad K_1 + H_1 K_2 - H_2 K_3 = f_a \left(u_k, \frac{\alpha + \mu}{\omega_0} \right) - f_a \left(u_k, \frac{\alpha + \mu}{\omega_0} \right) - \frac{E}{2R} \quad (3.27)$$

โดยที่

$$K_1 = K_1^{(1)}$$

$$K_2 = K_2^{(1)} e^{(P_1 \frac{\alpha}{\omega_0})}$$

$$K_3 = K_2^{(2)} e^{(P_2 \frac{\alpha}{\omega_0})}$$

$$A = \frac{E}{2R} - f_a \left(u_k, \frac{\alpha}{\omega_0} \right)^{(1)}$$

$$B = f_a \left(u_k, \frac{\alpha}{\omega_0} + \frac{\pi}{3\omega_0} \right)^{(2)} - f_c \left(u_k, \frac{\alpha}{\omega_0} \right)^{(1)} - \frac{E}{2R}$$

$$D = -e^{(P_2 \frac{\pi}{3\omega_0})}$$

$$H_1 = e^{(P_1 \frac{\mu}{\omega_0})}$$

$$H_2 = e^{(P_2 \frac{\mu}{\omega_0})}$$

(3.24)-(3.25) จะได้

$$K_1 = \frac{A - B + DK_3}{2} \quad (3.28)$$

(3.24)+(3.25) จะได้

$$K_2 = \frac{A + B - DK_3}{2} \quad (3.29)$$

แทนค่า (3.28), (3.29), ใน (3.27) จะได้

$$(D - H_2)K_3 + f_1(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) - G = F_1(K_3, \frac{\mu}{\omega_0}) = 0 \quad (3.30)$$

โดยที่

$$G = B - A - \frac{E}{R}$$

$$f_1(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) = f_a^{(1)}(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) - f_c^{(1)}(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) - f_a^{(2)}(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) \quad (3.31)$$

(3.26)+(3.27) และแทนค่า (3.28), (3.29) ในสมการจะได้

$$-(H_2 + DH_1)K_3 + f_2(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) + CH_1 = F_2(K_3, \frac{\mu}{\omega_0}) = 0 \quad (3.32)$$

โดยที่

$$C = A + B$$

$$f_2(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) = f_a(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) + f_c(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) - f_a(u_k, \frac{\alpha+\mu}{\omega_0}) \quad (3.33)$$

พิจารณาสมการ(3.30)และ(3.31) พบว่า มีตัวไม่รู้ค่า 2 ตัวคือ K_3 และ μ
การแก้สมการใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน จะได้

$$\begin{pmatrix} K_3 \\ \mu \end{pmatrix} \text{การวนซ้ำที่ } k+1 = \begin{pmatrix} K_3 \\ \mu \end{pmatrix} \text{การวนซ้ำที่ } k + \Delta \text{การวนซ้ำที่ } k$$

$$\Delta \text{การวนซ้ำที่ } k = - \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial K_3} & \frac{\partial F_1}{\partial \mu} \\ \frac{\partial F_2}{\partial K_3} & \frac{\partial F_2}{\partial \mu} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} F_1(K_3, \mu) \\ F_2(K_3, \mu) \end{pmatrix} \text{การวนซ้ำที่ } k$$

โดยที่

$$\frac{\partial F_1}{\partial K_3} = D - H_2$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial K_3} = -(H_2 + DH_1)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \mu} = -\frac{P_2}{\omega_0} H_2 K_3 + \frac{\partial f_1}{\partial \mu}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \mu} = -(P_2 H_2 + DP_1 H_1) \frac{K_3}{\omega_0} + \frac{P_1}{\omega_0} CH_1 + \frac{\partial f_2}{\partial \mu}$$

และ $\frac{\partial f_1}{\partial \mu}$, $\frac{\partial f_2}{\partial \mu}$ คือนิพจน์อนุกรมโดยใช้สมการ (3.8), (3.9), (3.15), (3.31),
และ (3.33) เมื่อได้ค่า \mathcal{K}_3 และ μ สามารถหาค่า \mathcal{K}_1 และ \mathcal{K}_2 จากสมการ (3.25), (3.26)

ดังนั้นอัลกอริทึมการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์โมนิก ชั้นแรกจะต้องสมมติว่าไม่

เกิดการสับเปลี่ยนและใช้ค่า α สุดท้ายในการตรวจสอบ $i_a(\frac{\alpha}{\omega_0} + \frac{\pi}{3\omega_0})$ (2)

- ถ้ามีค่าบวก แสดงว่า เกิดการสับเปลี่ยน
- ถ้ามีค่าลบหรือศูนย์ แสดงว่า ไม่เกิดการสับเปลี่ยน

ทั้งสองกรณีนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1, 3.2

หลังจากที่หานิพจน์ของ $i_a(t)$ ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ

- หาอนุกรมฟูรีเยร์ของ $i_a(t)$
- สร้างยาโคบีเมตริกซ์ G และ H ตามภาคผนวก ง

เนื่องจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะอยู่ในรูป pu จึงจำเป็นต้องสร้าง
ปริมาณฐาน (Base Quantities) ทางด้านกระแสตรงของเครื่องแปลงผัน ซึ่งคำนวณได้
ตามภาคผนวก จ จะสังเกตว่า $\omega_0(\text{pu}) = 1$ และ 1 pu ของแรงดันเฟส = $\sqrt{3} \text{ pu}$
ของแรงดันสาย

ตารางที่ 3.1
สมการกระแสของเครื่องแปลงผันแบบ 6 พัลส์
(ไม่เกิดการสับเปลี่ยน)

ช่วงที่ k	มุม	$C^{(k)}$	$E^{(k)}(t)$	$F^{(k)}(t)$
2	$\alpha \leq \theta \leq \theta_2$	$-\frac{E}{R}$	$K_3 e^{P_2(t - \frac{\alpha}{\omega_0})}$	$f_a^{(2)}(t)$
4	$\alpha + \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \alpha + \frac{\pi}{3} + \theta_2$	$-\frac{E}{R}$	$K_3 e^{P_2(t - \frac{\alpha - \pi}{\omega_0 + 3\omega_0})}$	$f_a^{(2)}(t - \frac{\pi}{3\omega_0})$
6	$\alpha + \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \alpha + \pi$	0	0	0

โดยที่

$$i_a^{(k)}(t) = C^{(k)} + E^{(k)}(t) + F^{(k)}(t)$$

$$\theta = \omega_0 t$$

$$\theta_2 = \text{มุมในช่วงที่ 2}$$

(ช่วงที่ 1, 3, 5 จะไม่เกิด)

ตารางที่ 3.2
สมการกระแสของเครื่องแปลงผันแบบ 6 พัลส์
(เกิดการสับเปลี่ยน)

ช่วงที่ k	มุม	$C^{(k)}$	$E^{(k)}(t)$	$F^{(k)}(t)$
1	$\alpha \leq \theta \leq \alpha + \mu$	$K_1 - \frac{E}{2R}$	$K_2 e^{P_2(t - \frac{\alpha}{\omega_0})}$	$f_a^{(1)}(t)$
2	$\alpha + \mu \leq \theta \leq \alpha + \frac{\pi}{3}$	$-\frac{E}{R}$	$K_3 e^{P_2(t - \frac{\alpha}{\omega_0})}$	$f_a^{(2)}(t)$
3	$\alpha + \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \alpha + \frac{\pi}{3} + \mu$	$-\frac{E}{R}$	$2K_2 e^{P_1(t - \frac{\alpha - \pi}{\omega_0 3\omega_0})}$	$f_a^{(1)}(t - \frac{\pi}{3\omega_0})$ + $f_c^{(1)}(t - \frac{\pi}{3\omega_0})$
4	$\alpha + \frac{\pi}{3} + \mu \leq \theta \leq \alpha + \frac{2\pi}{3}$	$-\frac{E}{R}$	$K_3 e^{P_2(t - \frac{\alpha - \pi}{\omega_0 3\omega_0})}$	$f_a^{(2)}(t - \frac{\pi}{3\omega_0})$
5	$\alpha + \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu$	$-K_1 - \frac{E}{2R}$	$K_2 e^{P_1(t - \frac{\alpha - \pi}{\omega_0 3\omega_0})}$	$f_c^{(1)}(t - \frac{2\pi}{3\omega_0})$
6	$\alpha + \frac{2\pi}{3} + \mu \leq \theta \leq \pi$	0	0	0

โดยที่

$$i_a^{(k)}(t) = C^{(k)} + E^{(k)}(t) + F^{(k)}(t)$$

$$\theta = \omega_0 t$$

3.5 โมเดลของเครื่องแปลงผันแบบ 12 พัลส์

เครื่องแปลงผันแบบ 12 พัลส์ ประกอบด้วย เครื่องแปลงผันแบบ 6 พัลส์ 2 เครื่องต่อขนานกัน โดยผ่านหม้อแปลงวาย-วาย และ ยาย-เดลตา ดังรูปที่ 3.7 ลักษณะสมบัติของกระแสฮาร์มอนิกจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$k = 12q \pm 1 \quad (3.34)$$

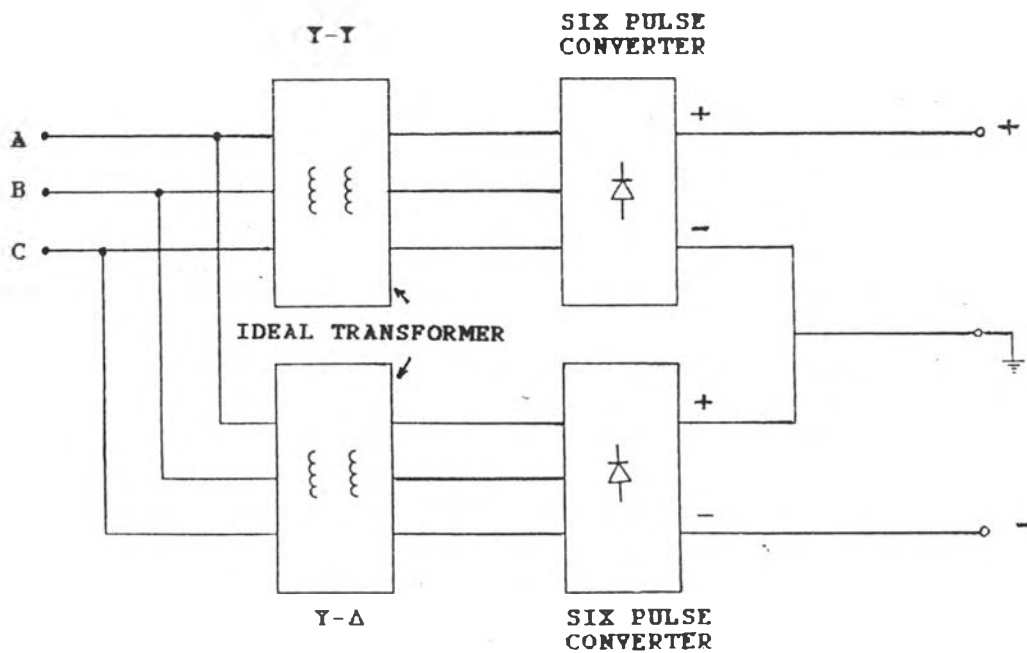
โดยที่

k = อันดับของกระแสฮาร์โมนิก

q = เลขจำนวนเต็มบวก

จะเห็นว่าฮาร์โมนิกต่ำสุดคือ 11 ส่วนฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 จะถูกกำจัดออกไปซึ่งเป็นผลมาจากมุมเฟสเลื่อนของหม้อแปลง ในการกำหนดโมเดลแบบ 12 พัลส์ เพื่อใช้ในโปรแกรมจะคล้ายกับแบบ 6 พัลส์ โดยมีสมมติฐานเพิ่มเติมดังนี้

- กระแสฮาร์โมนิก จะมีอันดับตามสมการที่ (3.34) นั่นคือ 11, 13, 23, 25, ...
- พารามิเตอร์ R, E, L และ F จะเป็นครึ่งหนึ่ง
- ค่า P, Q และ S จะเป็น 2 เท่า



รูปที่ 3.7 โมเดลของเครื่องแปลงผันแบบ 12 พัลส์