บทที่ 2

ทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า

2.1 <u>บทนำ</u>

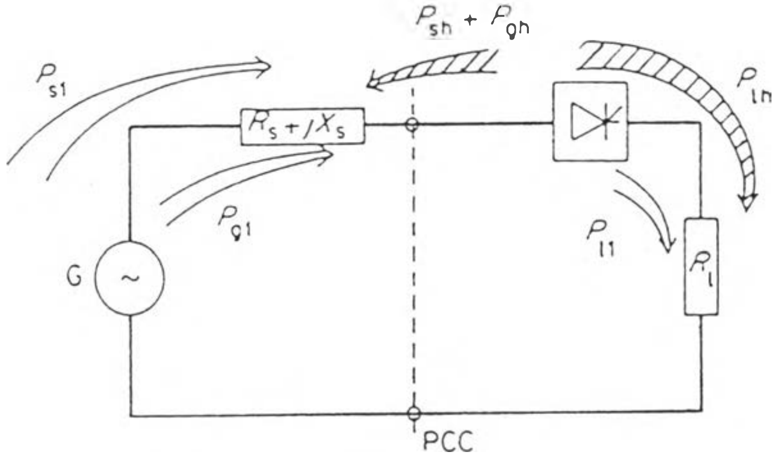
การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกแตกต่างกับที่ความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ซึ่งเป็นแบบดั้งเดิมที่เคยใช้กันมา การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกต้องใช้อัลกอริทึม (Algorithm) ที่สลับซับซ้อนกว่าเดิมมาก การตั้งสมการเพื่อหาค่าต่างๆ มีความยุ่งยาก อย่างไรก็ตามการที่จะสามารถหาคำตอบของฮาร์มอนิกได้นั้น ต้องผ่านขั้นตอนการคำนวณที่ความถี่หลักมูลก่อน นั่นคือใช้วิธีแบบดั้งเดิมเพื่อหาค่าเริ่มต้นแล้วจึงคำนวณที่ฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีแบบใหม่

2.2 <u>ทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก (Harmonic Power Flow)</u> [11]

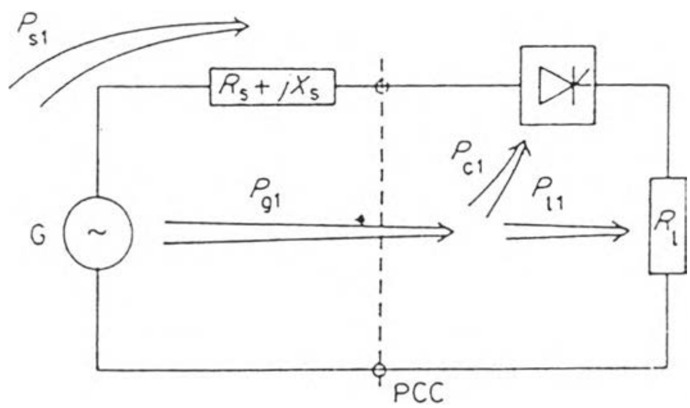
การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกอธิบายได้จากรูปที่ 2.1 ถึง 2.3

- รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลของระบบ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G ทำหน้าที่จ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้แก่เครื่องแปลงผันที่ใช้ควบคุมโหลดความต้านทาน (Converter Controlled Resistive Load) โดยผ่านอิมพีแดนซ์ระบบ R_s+jX_s จะเห็นว่ามีกำลังไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) และที่ความถี่ฮาร์มอนิกไหลอยู่ในวงจร
- รูปที่ 2.2 แสดงการไหลของวงจรไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้า P_{g1} ผ่าน PCC(Point of Common Coupling)และจ่ายกำลังสูญ P_{s1} ผ่าน R_s กำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ของ P_{g1} ไหลผ่านโหลดด้วยค่า P_{l1} กำลังไฟฟ้า

ส่วนน้อยไหลผ่านเครื่องแปลงผันด้วยค่า P_{o1} ค่า P_{o1} นี้จะเปลี่ยนเป็นกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก (Harmonic Power)



รูปที่ 2.1 การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่หลักมูล และที่ความถี่ฮาร์มอนิก

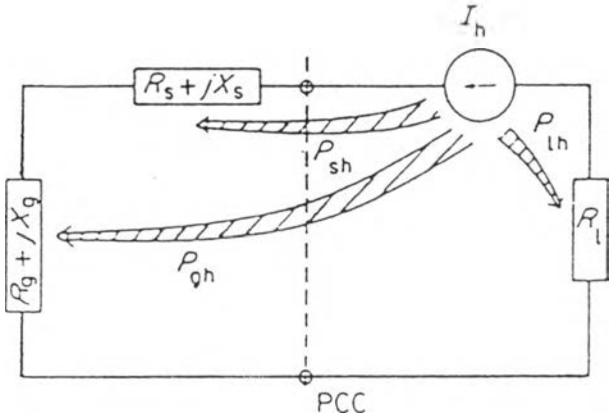


รูปที่ 2.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล

- รูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลที่มีการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก เนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นจึงสามารถแทนได้ด้วยฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ R_g+jX_g สำหรับเครื่องแปลงผันสามารถแทนได้ด้วยแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current Source) กำลังไฟฟ้า P_{c1} ในรูปที่ 2.3 จะเปลี่ยนเป็นกำลังไฟฟ้าสองพวก

- พวกหนึ่งมีกำลังไฟฟ้าน้อย ได้แก่ P_{sh} และ P_{gh} ซึ่งไหลกลับไปสู่ความต้านทานระบบ R_s และ R_g

- อีกพวกมีกำลังไฟฟ้ามากกว่า ได้แก่ P_{1h} ซึ่งไหลไปที่โหลด R_1



รูปที่ 2.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก

2.3 <u>การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า</u>

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าอาจใช้ 2 อย่างคือ

- อัลกอริทึมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม (Conventional Power Flow Algorithm)
- อัลกอริทึมการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก (Harmonic Power Flow Algorithm)

2.3.1 อัลกอริทึมการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม [17,19,20,21,22,23]

อัลกอริทึมนี้ใช้หาคำตอบสมการพีชคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Algebraic Equations) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าบัสในรูปเชิงซ้อน (Complex Bus Voltages) โดยกำหนดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่โหลดบัส (Load Bus) ตัวแปรจะเป็นแรงดันบัส อัลกอริทึมในการหาคำตอบมีมากมาย แต่ที่นิยมใช้ได้แก่ วิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson's Method) ซึ่งพัฒนาโดย Van Ness และ Griffin [22] อัลกอริทึมแบบนิวตัน-ราฟสัน จะใช้การลดค่าที่ไม่รับกัน (Mismatch) ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟให้อยู่ในค่าที่กำหนด โดยสมมติว่า

- ทุกค่ากระแสและแรงดัน จะมีเพียงส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency Components)
- อิมพีแดนซ์ของวงจรข่าย (Network Impedances) ถือว่าเป็นเชิงเส้น
- ระบบต้องไม่มีบัสที่ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Bus)

วิธีนิวตัน-ราฟสัน สามารถตั้งสมการให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ดังนี้

$$\underset{2(n-1)\times 1}{\begin{vmatrix} \Delta P \\ \\ \Delta Q \end{vmatrix}} = \underset{2(n-1)\times 2(n-1)}{\begin{vmatrix} \\ J \\ \\ \end{vmatrix}} \underset{2(n-1)\times 1}{\begin{vmatrix} \frac{\Delta\delta}{V} \\ \\ \Delta V \end{vmatrix}} \qquad (2.1)$$

โดยที่

$\Delta P, \Delta Q$ = เวกเตอร์ของค่าที่ไม่รับกันของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟในแต่ละบัส (ยกเว้นสวิงบัส)

$\Delta\delta, \Delta V$ = การปรับเวกเตอร์มุมและขนาดของแรงดันให้ถูกต้อง (Vector of Desired Voltage Angle and Magnitude Correction) ในแต่ละบัส (ยกเว้นสวิงบัส) เพื่อที่จะทำให้ค่า P, Q ที่ไม่รับกันเป็น 0

J = ยาโคบีเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) [ภาคผนวก ก] ของอนุพันธ์บางส่วนซึ่งสัมพันธ์กับการไม่รับกันของกำลังไฟฟ้า (Power Mismatch) ต่อ δ และ V

δ , V = เวกเตอร์ของมุมและขนาดในแต่ละบัส (ยกเว้นสวิงบัส)

n = จำนวนบัสของระบบ

จากสมการ (2.1) ตัวไม่รู้ค่า (Unknowns) ได้แก่

ขนาดและมุมของแรงดันในแต่ละบัส (ยกเว้นสวิงบัส)	= 2(n-1)
กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่สวิงบัส	= 2
รวมตัวไม่รู้ค่า	= 2n

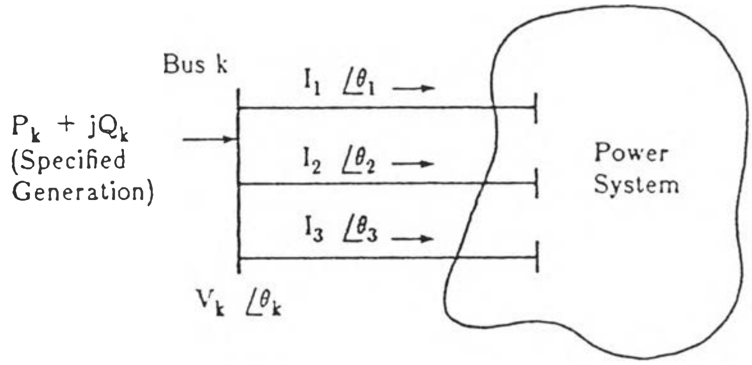
จากสมการ (2.1) สามารถตั้งสมการดังนี้

การดุล (Balance) ของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟในแต่ละบัส (ยกเว้นสวิงบัส)	= 2(n-1)
ขนาดและมุมของแรงดันที่สวิงบัส	= 2
รวมสมการ	= 2n

จะเห็นว่าในแต่ละบัสมีตัวไม่รู้ค่า 2n และสมการ 2n ดังนั้นจึงสามารถหาคำตอบได้ ขั้นตอนการหาคำตอบมีดังนี้

1. สมมติค่า δ, V
2. หาค่า J , ΔP, ΔQ (ดูรูปที่ 2.4)
3. คำนวณ $\Delta\delta$, ΔV โดยการอินเวอร์สเมตริกซ์(Matrix Inversion)
4. หาค่า δ , V ใหม่

ขั้นตอน 2-4 จะกระทำซ้ำกัน จนกระทั่งได้ค่า ΔP และ ΔQ อยู่ในช่วงกว้าง (Tolerance) ที่กำหนด



$$\Delta P = V_k I_1 \cos(\theta_k - \delta_1) + V_k I_2 \cos(\theta_k - \delta_2) + V_k I_3 \cos(\theta_k - \delta_3) - P_k$$

$$\Delta Q = V_k I_1 \sin(\theta_k - \delta_1) + V_k I_2 \sin(\theta_k - \delta_2) + V_k I_3 \sin(\theta_k - \delta_3) - Q_k$$

รูปที่ 2.4 แสดงการคำนวณการไม่รับกันของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล

2.3.2 อัลกอริทึมการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก [3,6,7,14]

กรณีแรงดันและกระแสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์(Nonsinusoidal Voltages and Currents) สามารถหากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟในรูปอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) ได้ [ภาคผนวก ข] Xiaและ Heydt [3]ได้สร้างอัลกอริทึมนี้ขึ้นมาสำหรับใช้กับเครื่องแปลงผันที่สับเปลี่ยนด้วยแรงดันในสาย แบบ 6 พัลส์ (Six-Pulse Line Commutated) ท่านสมมติว่าอิมพีแดนซ์ของวงจรข่ายเป็นแบบเชิงเส้น ขนาดและมุมของแรงดันที่ความถี่หลักมูล(Fundamental)และฮาร์มอนิกเป็นตัวไม่รู้ค่า สมการเพิ่มเติมที่ใช้ในการหาคำตอบคือ สมการการไม่รับกันของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ, รีแอกทีฟ, และ กำลัง

ไฟฟ้าปรากฏ(Apparent Power), กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์(Kirchhoff's Current Law) การแยกบัสออกเป็นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นในแต่ละฮาร์มอนิกใช้หลักดังนี้

- บัสกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่ไม่มีเครื่องแปลงผันต่ออยู่ จะถือเป็นบัสเชิงเส้น ส่วนบัสที่ควบคุมด้วยแรงดันที่ความถี่หลักมูล (บัส PV) และสวิงบัส จะถือเป็นเชิงเส้นเช่นกัน
- บัสที่มีเครื่องแปลงผันต่ออยู่ จะถือเป็นบัสไม่เชิงเส้น

ตัวไม่รู้ค่าในการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก ประกอบด้วย

ขนาดและมุมของแรงดันที่ความถี่หลักมูลในแต่ละบัส (ยกเว้นสวิงบัส)

$= 2(n-1)$

ขนาดและมุมของแรงดันที่ความถี่แต่ละฮาร์มอนิกในแต่ละบัส (รวมสวิงบัส)

$= 2nL$

กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่ความถี่หลักมูลที่สวิงบัส $= 2$

พารามิเตอร์สองตัวในแต่ละบัสไม่เชิงเส้น $= 2m$

รวมตัวไม่รู้ค่า $= 2n(1+L)+2m$

โดยที่

m = จำนวนบัสไม่เชิงเส้น

n = จำนวนบัสทั้งหมด

L = ตัวคูณฮาร์มอนิก (ไม่รวมความถี่หลักมูล)

สมการจะประกอบด้วย

การไม่รับกันของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟในแต่ละบัสเชิงเส้น (ยกเว้นสวิงบัส)

= 2(n-m-1)

ขนาดและมุมของแรงดันที่สวิงบัส = 2

การดุลของกระแสจริงและจินตภาพที่ความถี่หลักมูลในแต่ละบัสไม่เชิงเส้น

= 2m

การดุลของกระแสจริงและจินตภาพแต่ละฮาร์มอนิก (ไม่รวมที่ความถี่หลักมูล) ในแต่ละบัส

= 2nL

การไม่รับกันของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟในแต่ละบัสไม่เชิงเส้น

= 2m

รวมสมการ = 2n(1+L)+2m

ถ้าให้สวิงบัสเป็นบัสที่ 1 บัสเชิงเส้นมีตั้งแต่ 1 ถึง N และบัสไม่เชิงเส้นมีตั้งแต่ M ถึง N สามารถตั้งสมการให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{vmatrix} \Delta W \\ \Delta I^{(3)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta I^{(h)} \\ \Delta I^{(1)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} J^{(1)} & J^{(3)} & \cdots & J^{(h)} & O \\ TG^{(3,1)} & TG^{(3,3)} & \cdots & TG^{(3,h)} & H^{(3)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & \\ TG^{(h,1)} & TG^{(h,3)} & \cdots & TG^{(h,h)} & H^{(h)} \\ TG^{(1,1)} & TG^{(1,3)} & \cdots & TG^{(1,h)} & H^{(1)} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta V^{(1)} \\ \Delta V^{(3)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta V^{(h)} \\ \Delta \phi \end{vmatrix}$$

แต่ละตัวอักษรในเมตริกซ์อธิบายได้ดังนี้

: ΔW = การไม่รับกันของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟทุกบัส

$$= [\, f_{1,r} - P_1 ,\ f_{1,i} - Q_1 ,\ \ldots ,\ f_{n,r} - P_n ,\ f_{n,i} - Q_n \,]^T$$

โดยที่

$f_{t,r}$, $f_{t,i}$ = กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่ไหลจากบัส t เข้าไปในระบบ

P_t , Q_t = กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟระบุ (Specified Active and Reactive Power) ที่บัส t โดยบัสเชิงเส้นมีเพียงส่วนประกอบที่ความถี่หลักมูล แต่บัสไม่เชิงเส้นจะมีส่วนประกอบฮาร์มอนิก

: $\Delta I^{(1)}$ = การไม่รับกันของกระแสจริงและจินตภาพที่ความถี่หลักมูลในแต่ละบัสไม่เชิงเส้น

$$= [\, I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)} ,\ I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)} ,\ \ldots ,\ I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)} ,\ I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)} \,]^T$$

: $\Delta I^{(k)}$ = การไม่รับกันของกระแสจริงและจินตภาพที่ความถี่ฮาร์มอนิกในแต่ละบัส

$$= [\, I_{1,r}^{(k)} ,\ I_{1,i}^{(k)} ,\ \ldots ,\ I_{N,r}^{(k)} ,\ I_{N,i}^{(k)} ,\ I_{M,r}^{(k)} + g_{M,r}^{(k)} ,\ I_{M,i}^{(k)} + g_{M,i}^{(k)} ,\ \ldots ,\ I_{n,r}^{(k)} + g_{n,r}^{(k)} ,\ I_{n,i}^{(k)} + g_{n,i}^{(k)} \,]^T$$

โดยที่

$I_{t,r}^{(k)}$, $I_{t,i}^{(k)}$ = กระแสฉีด (Injection Current) จริงและจินตภาพที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ k ซึ่งไหลจากบัส t เข้าไปในระบบ

$g_{t,r}^{(k)}$, $g_{t,i}^{(k)}$ = กระแสโหลดจริงและจินตภาพที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ k ซึ่งไหลจากบัส t เข้าไปในอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น

k = 3 , 5 , 7 , . . . , h

: $\Delta V^{(k)}$ = ขนาดและมุมของแรงดันฮาร์มอนิกที่ k ในแต่ละบัส (รวมสวิงบัส)

$$= [\, V_1^{(k)} \Delta\delta_1^{(k)} , \Delta V_1^{(k)} , \ldots , V_n^{(k)} \Delta\delta_n^{(k)} , \Delta V_n^{(k)} \,]^T$$

โดยที่

k = 1, 3, 5, 7, . . . , h

: $\Delta\phi$ = ตัวแปรควบคุมที่ต้องการให้ถูกต้อง (Control Variable Correction) ของแต่ละอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น

$$= [\, \Delta\beta_M , \Delta\gamma_M , \ldots , \Delta\beta_n , \Delta\gamma_n \,]^T$$

: $J^{(k)}$ = ยาโคบีเมตริกซ์ที่ฮาร์มอนิกที่ k [ภาคผนวก ก]

$$J^{(k)} = \left|\begin{array}{c} O_{2N \times 2n} \\ \hline \text{อนุพันธ์บางส่วนของ } f_r, f_i \text{ เทียบกับ} \\ V^{(k)}, \delta^{(k)} \text{ (เฉพาะบัสไม่เชิงเส้นเท่านั้น)} \end{array}\right| , k \neq 1$$

โดยที่

$O_{j,k}$ = แถว (Array) ของศูนย์ที่มีมิติ (Dimension) j x k

: เมตริกซ์ TG ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

$$TG^{(k,j)} = \left| \begin{array}{ll} T^{(k,j)} + G^{(k,k)} , & k=j \\ G^{(k,j)} , & k \neq j \quad ; k=1,3,5,\ldots,h; \ j=1,3,5,\ldots h \end{array}\right.$$

โดยที่

$T^{(k,k)}$ = อนุพันธ์บางส่วนของกระแสฉีดฮาร์มอนิกที่ k (kth Harmonic Injection Currents) $I_r^{(k)}$, $I_i^{(k)}$ โดยเทียบกับแรงดันบัสฮาร์มอนิกที่ k (kth Harmonic Bus Voltages) ซึ่งได้มาจากเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบ (System Admittance Matrix)

$G^{(k,j)}$ = อนุพันธ์บางส่วนของกระแสโหลดในอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นที่ฮาร์มอนิก k (kth Harmonic Nonlinear Device Load Currents) $g_r^{(k)}$, $g_i^{(k)}$ โดยเทียบกับแรงดันฮาร์มอนิกที่ j ซึ่งกำหนดด้วยสมการของอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น

$$
G^{(k,j)} = \left|\begin{array}{c|cc|c|cc}
0_{2N,2N} & 0_{2N,2m} & & & & \\
\hline
0 & \dfrac{\partial g_{M,r}^{(k)}}{V_M^{(j)}\partial\delta_M^{(j)}} & \dfrac{\partial g_{M,r}^{(k)}}{\partial V_M^{(j)}} & 0 & 0 & \\
 & \dfrac{\partial g_{M,i}^{(k)}}{V_M^{(j)}\partial\delta_M^{(j)}} & \dfrac{\partial g_{M,i}^{(k)}}{\partial V_M^{(j)}} & & & \\
\hline
0_{2m,2N} & 0 & & \cdot & 0 & \\
\hline
 & 0 & & 0 & \dfrac{\partial g_{n,r}^{(k)}}{V_n^{(j)}\partial\delta_n^{(j)}} & \dfrac{\partial g_{n,r}^{(k)}}{\partial V_n^{(j)}} \\
 & & & & \dfrac{\partial g_{n,i}^{(k)}}{V_n^{(j)}\partial\delta_n^{(j)}} & \dfrac{\partial g_{n,i}^{(k)}}{\partial V_n^{(j)}}
\end{array}\right|
$$

: เมตริกซ์ H เป็นเมตริกซ์ทแยงมุม(Diagonal Matrix)ขนาด 2 x 2 ซึ่งประกอบด้วย อนุพันธ์บางส่วนของกระแสโหลดในอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น $g_r^{(k)}$, $g_i^{(k)}$ โดยเทียบกับตัวแปรควบคุมอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น

$$
H^{(k)} = \operatorname{diag}\left|\begin{array}{cc}
\dfrac{\partial g_{t,r}^{(k)}}{\partial\beta_t} & \dfrac{\partial g_{t,r}^{(k)}}{\partial\gamma_t} \\
\dfrac{\partial g_{t,i}^{(k)}}{\partial\beta_t} & \dfrac{\partial g_{t,i}^{(k)}}{\partial\gamma_t}
\end{array}\right| \quad ;t = M, \ldots n;\ k = 1,3,5,7,\ldots,h
$$

โดยที่

h = ค่าฮาร์มอนิกสูงสุด

m = จำนวนบัสไม่เชิงเส้น

M = บัสไม่เชิงเส้นบัสแรก (First Nonlinear Bus)

n = จำนวนบัส (เชิงเส้นและไม่เชิงเส้น)

N = จำนวนบัสเชิงเส้น

มิติ(Dimension)ของยาโคบีเมตริกซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

มิติของยาโคบีเมตริกซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก

เมตริกซ์	มิติ (แถว,คอลัมน์)
ΔW	2n, 1
$\Delta I^{(1)}$	2m, 1
$\Delta I^{(k)}$, k>1	2n, 1
$\Delta V^{(k)}$, k≥1	2n, 1
$\Delta\phi$	2m, 1
$J^{(k)}$, k≥1	2n, 2n
$T^{(1,1)}$	2m, 2n
$G^{(1,1)}$	2m, 2n
$T^{(k,k)}$, k>1	2n, 2n
$G^{(k,k)}$, k>1	2n, 2n
$G^{(k,j)}$, k>1, j≥1	2n, 2n
$H^{(1)}$	2m, 2m
$H^{(k)}$, k>1	2n, 2m

โดยที่

j , k = จำนวนเท่าฮาร์มอนิก

n = จำนวนบัส (เชิงเส้นและไม่เชิงเส้น)

m = จำนวนบัสไม่เชิงเส้น