บทที่ 4

การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุต่อขนาน

จากความเจริญก้าวหน้าทางภาคอุตสาหกรรม พบว่าภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มีการนำเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังหรืออุปกรณ์จำพวกไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) เข้ามาประยุกต์ใช้ในงานควบคุมและการประหยัดพลังงานเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Variable-Speed Induction Motor Drives) คอนเวอร์เตอร์กำลังสถิต (Static Power Converter) เครื่องเชื่อมแบบอาร์ก (Arc Welding) และวงจรเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier) เป็นต้น ส่งผลกระทบทำให้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในระบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นที่มาของการเกิดกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกที่อาจเป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ได้

การกระจายของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับลักษณะและค่าพารามิเตอร์ของระบบ ซึ่งในบางครั้งอาจมีค่าสูงจนถึงขั้นวิกฤตต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบ เช่น ทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาดหรือไม่ทำงาน ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้เต็มพิกัด และโดยเฉพาะอย่างยิ่งทำให้ชุดตัวเก็บประจุเกิดความเสียหาย เนื่องจากในบางครั้งผลของค่าพารามิเตอร์ของวงจรตัวเก็บประจุอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (Resonance) กับค่าอินดักแตนซ์ (Inductance) ของระบบได้ที่ความถี่ฮาร์มอนิก (Harmonic Frequency) ส่งผลทำให้เกิดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูงเกินค่าพิกัดของตัวเก็บประจุ

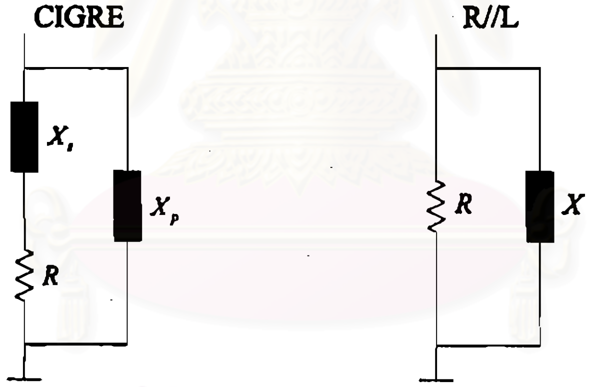
จากผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานในระบบจำหน่ายที่หาได้จากบทที่แล้ว ถ้าสามารถทำการตรวจสอบได้ว่า ตัวเก็บประจุต่อขนานจะเกิดความเสียหายหรือไม่จากการมีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้นในบางจุดของระบบจำหน่าย ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนและป้องกันต่อไป ดังนั้นในบทนี้จึงขอกล่าวถึงทฤษฎีการคำนวณหาค่าปริมาณทางฮาร์มอนิกที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถในการทนต่อผลของฮาร์มอนิกได้หรือไม่ของตัวเก็บประจุต่อขนาน โดยเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน ANSI/IEEE 18-1992 และมาตรฐาน IEC 60871-1 (1997-10)

4.1 แบบจำลองของระบบในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic modeling)

สำหรับแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตามแบบจำลองของซิเกร์ (CIGRE) [14] โดยคิดว่าระบบอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นจึงคิดค่าต่างๆ เป็นค่าต่อเฟสทั้งหมด ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 โหลด (Load)

โดยทั่วไปในการศึกษาเรื่องของฮาร์มอนิก แบบจำลองของโหลดมักจะถูกแสดงในรูปแบบอย่างง่าย ซึ่งประกอบด้วยผลรวมแบบอนุกรมหรือขนานของ R และ L แบบจำลองแบบนี้ได้ทำการละเลยลักษณะทางกายภาพบางอย่างของโหลดทิ้ง ทำให้การวิเคราะห์หากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าผิดพลาด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำแบบจำลองของโหลดที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกมาใช้งาน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ตามช่วงของความถี่ฮาร์มอนิกที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 แบบจำลองของโหลดตามแบบ CIGRE และแบบ R//L

CIGRE : แบบจำลองนี้จะสามารถใช้ได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ฮาร์มอนิกที่ 5 ถึงความถี่ฮาร์มอนิกที่ 20 จากรูปจะเห็นว่ามีค่ารีแอ็คแต๊นซ์ (X_s) อนุกรมอยู่กับค่าความต้านทาน (R) จากนั้นทั้งหมดต่อขนานอยู่กับค่ารีแอ็คแต็นซ์ (X_p) ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$R = \frac{U_{n,net}^2}{P_1} \qquad (4.1)$$

$$X_s = 0.073 \quad hR \qquad (4.2)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$X_p = \frac{hR}{6.7\tan\varphi_1 - 0.74} \tag{4.3}$$

โดยที่

$U_{n,net}$ = แรงดันปกติของระบบ

P_1 = กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของโหลดที่ความถี่มูลฐานภายใต้แรงดัน $U_{n,net}$

Q_1 = กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่ความถี่มูลฐานภายใต้แรงดัน $U_{n,net}$

$\tan\varphi_1$ = Q_1/P_1

h = ลำดับฮาร์มอนิก

R//L : แบบจำลองนี้จะสามารถใช้ได้เมื่อลำดับความถี่ฮาร์มอนิกเกิน 20 ขึ้นไป จากรูปที่ 4-1 จะเห็นว่ามีค่ารีแอกแตนซ์ (X) ต่อขนานอยู่กับค่าความต้านทาน (R) จะได้ว่า

$$R = \frac{U_{n,net}^2}{P_1} \tag{4.4}$$

$$X = h\frac{U_{n,net}^2}{Q_1} \tag{4.5}$$

4.1.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุสามารถแทนได้ด้วยค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (X_c) โดยไม่คิดค่าความต้านทาน ดังนั้นจะได้

$$X_c^h = -j\frac{1}{h2\pi\ f_1C} \tag{4.6}$$

$$y_c^h = \frac{1}{X_c^h} \tag{4.7}$$

โดยที่

X_c^h = คาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h

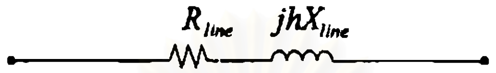
y_c^h = คาปาซิทีฟแอดมิตแตนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h

C = คาปาซิแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

f_1 = ความถี่มูลฐาน

4.1.3 สายป้อน (Feeder)

วงจรสมมูลของสายป้อนสามารถแทนได้ด้วยค่าความต้านทานของสายป้อน โดยต่ออนุกรมอยู่กับค่ารีแอกแตนซ์ของสายป้อน ดังรูปที่ 4-2 และสามารถหาค่าแอดมิตแตนซ์ของสายป้อนที่ลำดับความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ ได้ตามสมการที่ (4.8)



รูปที่ 4-2 วงจรสมมูลของสายป้อนโดยคิดผลของฮาร์มอนิก

$$y_{line}^{h} = \frac{1}{R_{line} + jhX_{line}} \tag{4.8}$$

โดยที่

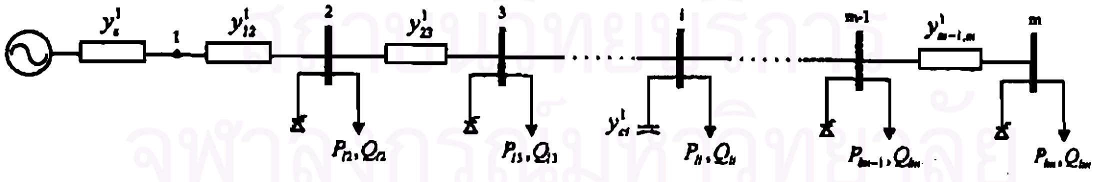
R_{line} = ความต้านทานของสายป้อน

X_{line} = รีแอกแตนซ์ของสายป้อนที่ความถี่มูลฐาน

y_{line}^{h} = แอดมิตแตนซ์ของสายป้อนที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h

4.2 การคำนวณค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย

การคำนวณค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายสามารถทำได้โดยพิจารณาระบบตัวอย่างดังรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3 ตัวอย่างระบบจำหน่ายในการวิเคราะห์ที่ความถี่มูลฐาน

โดยที่

y_{ij}^{1} = แอดมิตแตนซ์ของสายป้อนที่ความถี่มูลฐานระหว่างบัส i และบัส j

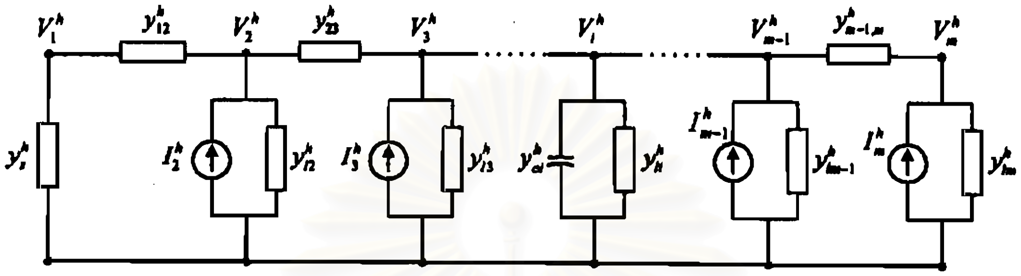
y_{ci}^{1} = คาปาซิทีฟแอดมิตแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานที่ต่ออยู่ที่บัส i

P_{li} = กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัส i

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Q_{li} = กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัส i

จากรูปที่ 4-3 สามารถสร้างระบบจำลองโดยคิดผลของฮาร์มอนิก ด้วยการแทนโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ ดังรูปที่ 4-4 [15]



รูปที่ 4-4 วงจรสมมูลของระบบตัวอย่างในการวิเคราะห์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก

โดยที่

y_{ij}^h = แอดมิตแตนซ์ของสายป้อนที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ระหว่างบัส i และบัส j

y_{ci}^h = คาปาซิทีฟแอดมิตแตนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัส i

y_{li}^h = แอดมิตแตนซ์ของโหลดที่บัส i ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h

y_s^h = แอดมิตแตนซ์ของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h

V_i^h = แรงดันที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัส i

I_i^h = แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัส i

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4-4 สามารถสร้าง $\left[Y_{bus}^h\right]$ หรือบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ได้จากค่าแอดมิตแตนซ์ขององค์ประกอบทางไฟฟ้าของระบบจำหน่าย ซึ่งหาได้จากแบบจำลองตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1 โดยมีรูปแบบดังนี้

$$\left[Y_{bus}^h\right] = \begin{bmatrix} Y_{11}^h & Y_{12}^h & 0 & & & 0 \\ Y_{21}^h & Y_{22}^h & . & & & \\ 0 & . & . & & & \\ & & & . & . & 0 \\ & & & . & Y_{m-1,m-1}^h & Y_{m-1,m}^h \\ 0 & & & 0 & Y_{m,m-1}^h & Y_{mm}^h \end{bmatrix} \qquad (4.9)$$

โดยที่
$$Y_{ij}^h = \begin{cases} -y_{ij}^h & if \quad j \neq i \\ y_{i-1,i}^h + y_{i,i+1}^h + y_{ii}^h + y_{ci}^h & if \quad j = i \neq 1 \\ y_{12}^h + y_s^h & if \quad j = i = 1 \end{cases}$$

จากสมการ $[I^h]=[Y^h][V^h]$ ดังนั้นเมื่อทราบค่า $[I^h]$และ $[Y^h]$จะสามารถหาค่าของ$[V^h]$ ซึ่งเป็นแรงดันที่ความถี่ฮาร์มอนิกของแต่ละบัสได้ จากการแก้สมการเชิงเส้นซึ่งเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_1^h \\ V_2^h \\ . \\ . \\ V_{m-1}^h \\ V_m^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^h & Y_{12}^h & 0 & & & 0 \\ Y_{21}^h & Y_{22}^h & . & & & \\ 0 & . & . & & & \\ & & & . & . & 0 \\ & & & . & Y_{m-1,m-1}^h & Y_{m-1,m}^h \\ 0 & & & 0 & Y_{m,m-1}^h & Y_{mm}^h \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_1^h \\ I_2^h \\ . \\ . \\ I_{m-1}^h \\ I_m^h \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

4.2.1 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสและค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่บัส

ค่าแรงดันฮาร์มอนิก V^h ที่บัสต่าง ๆ และค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน (Total Harmonic Distortion of Voltage : THD_V) ในวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาเฉพาะลำดับความถี่ฮาร์มอนิกตั้งแต่ 3 ถึง 25 เท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้ [16]

$$V_{T,i}^h = \sqrt{\sum_{h=3}^{25} \left|V_i^h\right|^2} \tag{4.11}$$

$$THD_{V,i} = \frac{V_{T,i}^h}{\left|V_i^1\right|} \times 100 \ \% \tag{4.12}$$

โดยที่

$V_{T,i}^h$ = แรงดันฮาร์มอนิกรวมที่บัส i

V_i^1 = แรงดันที่ความถี่มูลฐานที่บัส i

V_i^h = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัส i

$THD_{V,i}$ = ความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่บัส i

4.2.2 ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านโหลดที่บัสต่างๆ และค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของกระแสของโหลด

ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านโหลดที่บัสต่างๆ I_h และค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของกระแสของโหลด (Total Harmonic Distortion of Current : THD_I) สามารถหาค่าได้ โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับการหาค่าแรงดันฮาร์มอนิก ดังนี้ [16]

$$I^h_{T,i} = \sqrt{\sum_{h=3}^{25} \left| I^h_i \right|^2} \qquad (4.13)$$

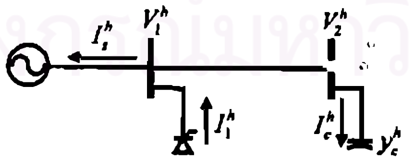
$$THD_{I,i} = \frac{I^h_{T,i}}{\left| I^1_i \right|} \times 100\% \qquad (4.14)$$

โดยที่

$I^h_{T,i}$	=	กระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านโหลดที่บัส i
I^1_i	=	กระแสที่ความถี่มูลฐานที่ไหลผ่านโหลดที่บัส i
I^h_i	=	กระแสฮาร์มอนิกลำดับ h ที่ไหลผ่านโหลดที่บัส i
$THD_{I,i}$	=	ความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของกระแสที่ไหลผ่านโหลดที่บัส i

4.3 การคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกและกระแส rms ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

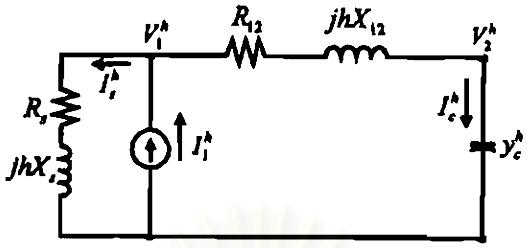
การหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ อาจพิจารณาได้จากระบบตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ระบบตัวอย่างในการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกผ่านตัวเก็บประจุ

จากระบบตัวอย่างในรูปที่ 4-5 กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจะไหลเข้าตัวเก็บประจุและไหลเข้าไปในระบบมากน้อยเพียงไร ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุกับค่า

อิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกนั้น ๆ การคำนวณเพื่อหาค่ากระแส ฮาร์มอนิก I_c^h และ I_s^h ทำได้โดยการหาวงจรสมมูลของระบบตัวอย่างในรูปที่ 4-5 ซึ่งจะได้ตามรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 วงจรสมมูลของระบบตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 4-6 สามารถหาค่ากระแสฮาร์มอนิกและกระแส rms ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ รวมถึงกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าระบบ ได้ดังนี้

$$I_c^h = y_c^h \cdot V_2^h \tag{4.15}$$

$$I_c^{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} \left| I_c^h \right|^2} \tag{4.16}$$

$$I_s^h = y_s^h \cdot V_1^h \tag{4.17}$$

$$y_s^h = \frac{1}{R_s + jhX_s} \tag{4.18}$$

โดยที่

I_c^h = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

y_c^h = คาปาซิทีฟแอดมิตแตนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h

I_c^{rms} = กระแส rms ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

I_s^h = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ไหลเข้าระบบ

R_s = ความต้านทานของระบบ

X_s = รีแอกแตนซ์ของระบบที่ความถี่มูลฐาน

V_1^h = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัส 1

V_2^h = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัส 2

X_{12} = รีแอกแตนซ์ของสายป้อนระหว่างบัส 1 และบัส 2

R_{12} = ความต้านทานของสายป้อนระหว่างบัส 1 และบัส 2

I_1^h = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่บัส 1

4.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุ

มาตรฐานที่กล่าวถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุ ในวิทยานิพนธ์นี้จะยึดตามมาตรฐานของ ANSI/IEEE Standard 18-1992 [17] และมาตรฐานของ IEC 60871-1 (1997-10) (International Electrotechnical Commission) [18] ซึ่งทั้ง 2 มาตรฐานจะมีข้อกำหนดในการใช้งานโดยยอมให้เกิดการใช้งานในลักษณะที่เกินค่าพิกัดของตัวเก็บประจุ โดยคำนึงถึงผลของฮาร์มอนิกที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายของตัวเก็บประจุ โดยมีรายละเอียดแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4-1 และตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-1 ขีดจำกัดของตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยมาตรฐาน ANSI/IEEE 18-1992

Item	Value
Percent of nameplate kVAr	135 %
Percent of rated rms voltage	110 %
Percent of rated rms current	180 %
Percent of peak voltage	120 %

ตารางที่ 4-2 ขีดจำกัดของตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 60871-1 (1997-10)

Item	Value
Percent of rated rms voltage	110 %
Percent of rated rms current	130 %
Percent of peak voltage	120 %

จากตารางที่ 4-1 และตารางที่ 4-2 จะเห็นได้ว่ามาตรฐาน IEC 60871-1 (1997-10) ไม่ได้กล่าวถึงค่า Percent of nameplate kVAr ของตัวเก็บประจุ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าตัวเก็บประจุที่ผลิตตามมาตรฐาน IEC 60871-1 (1997-10) นั้น จะทนค่า rated rms current ได้เพียง 130% ซึ่งน้อยกว่าตัวเก็บประจุที่ผลิตตามมาตรฐาน ANSI/IEEE 18-1992 โดยสามารถทนได้ถึง 180%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.1 การคำนวณปริมาณทางฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน

ปริมาณทางฮาร์มอนิกที่ถูกระบุไว้ตามมาตรฐานทั้ง 2 มาตรฐาน แบ่งออกได้เป็น 4 ค่า และสามารถหาได้ดังนี้ [16]

$$\text{Percent of rated rms voltage} = V_{ci}^{rms}(\%) = \sqrt{\sum_{h=1}^{25}\left|V_{ci}^{h}\right|^2} \times 100\ \% \qquad (4.18)$$

$$\text{Percent of rated rms current} = I_{ci}^{rms}(\%) = \sqrt{\sum_{h=1}^{25}\left|I_{ci}^{h}\right|^2} \times 100\ \% \qquad (4.19)$$

$$\text{Percent of peak voltage} = V_{ci}^{peak}(\%) = \sum_{h=1}^{25} V_{ci}^{h} \times 100\ \% \qquad (4.20)$$

$$\text{Percent of nameplate kVAr} = \sqrt{3}\,.\,I_{ci}^{rms}\,.\,V_{ci}^{rms} \times 100\ \% \qquad (4.21)$$

โดยที่

V_{ci}^{rms} = แรงดัน rms ของตัวเก็บประจุที่บัส i

V_{ci}^{h} = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของตัวเก็บประจุที่บัส i

V_{ci}^{peak} = แรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุที่บัส i

4.4.2 ขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณทางฮาร์มอนิก

จากวิธีการที่กล่าวมาสามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 4-7 หรือสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1) รับข้อมูลของระบบจำหน่าย เช่น ตำแหน่งบัสที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (% NL) และเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ (% I^h)
2) กำหนดลำดับฮาร์มอนิกเริ่มต้นที่ h เท่ากับ 3
3) คำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่บัสต่างๆ (I_i^h)
4) สร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกนั้น $\left[Y_{bus}^h\right]$ จากสมการที่ (4.9)
5) คำนวณหาค่าแรงดันฮาร์มอนิกของแต่ละบัส (V_i^h) จากสมการที่ (4.10)
6) คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่บัสต่างๆ (I_{ci}^h) ตามหัวข้อ4.3
7) เก็บข้อมูลของค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ในแต่ละลำดับ h

8) ตรวจสอบลำดับฮาร์มอนิกว่าครบหรือไม่ (h = 3 ถึง 25) หากยังไม่ครบให้เพิ่มลำดับฮาร์มอนิก $h = h + 2$ แล้วกลับไปทำในขั้นตอนที่ 3 หากลำดับฮาร์มอนิกถูกพิจารณาครบแล้วให้ทำขั้นตอนที่ 9
9) คำนวณปริมาณทางฮาร์มอนิกที่กำหนดโดยมาตรฐานตามหัวข้อ 4.4.1
10) เปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน เพื่อประเมินความเสียหายของตัวเก็บประจุ
11) จบการทำงาน

4.5 ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (Resonance)

ในบางครั้งการเสียหายของตัวเก็บประจุอาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ในกรณีที่มีความถี่ฮาร์มอนิกค่าหนึ่งเรียกว่า n ที่ทำให้ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์รวมของระบบมีขนาดเท่ากับค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดปริมาณของกระแสและแรงดันที่สูงมากที่ความถี่นั้น โดยค่าความถี่เรโซแนนซ์ของระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.22) [16]

$$n = \sqrt{\frac{kVA_{SC}}{Q_C}} \tag{4.22}$$

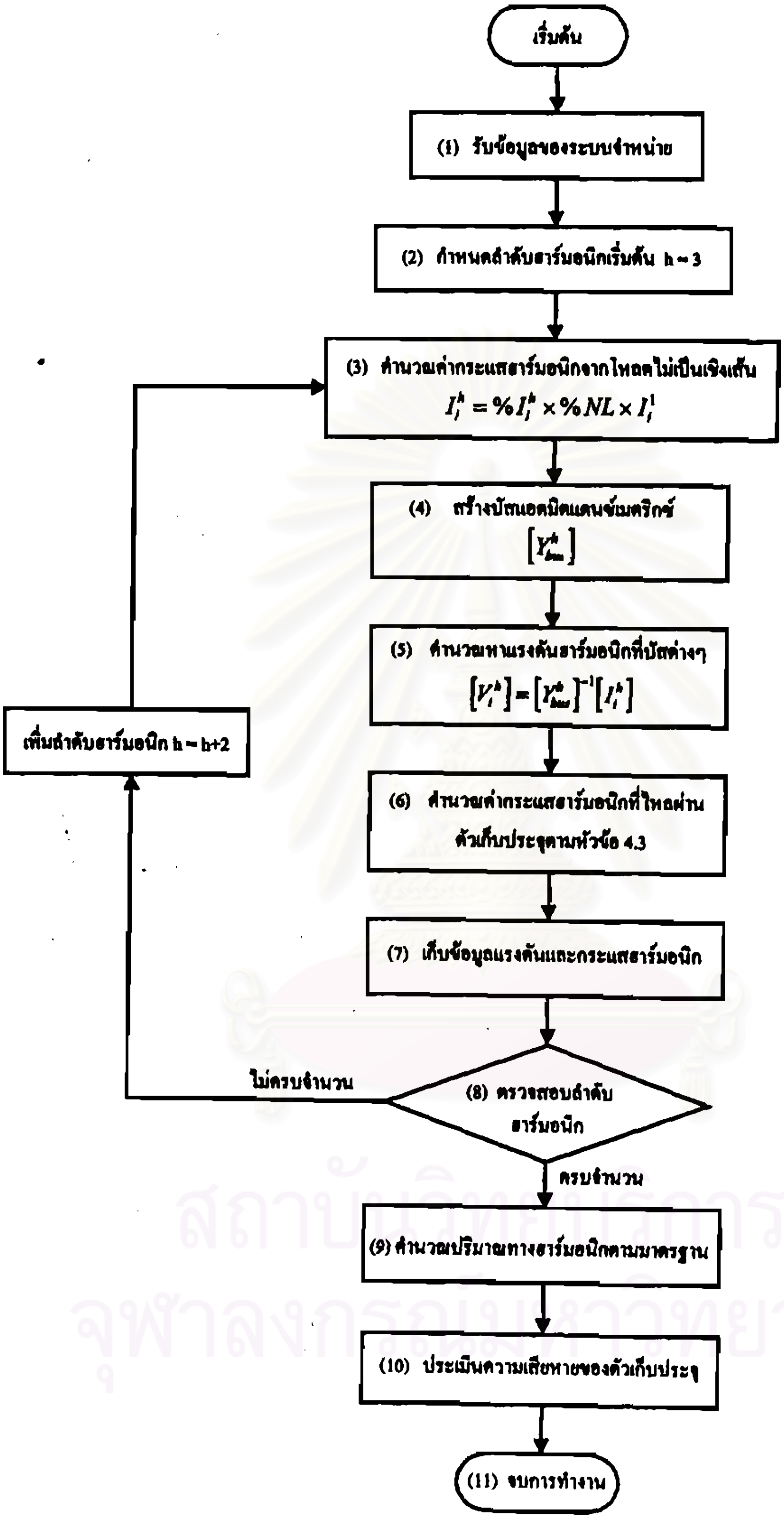
โดยที่

n	=	ลำดับฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์
kVA_{SC}	=	ค่า kVA ลัดวงจรของระบบจำหน่าย ณ จุดที่ติดตั้งตัวเก็บประจุ
Q_C	=	ค่า $kVAr$ ของตัวเก็บประจุ

การแก้ปัญหาจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์อาจกระทำได้ดังนี้

1) เปลี่ยนตำแหน่งที่ติดตั้งตัวเก็บประจุ
2) เปลี่ยนขนาดของตัวเก็บประจุ (Q_C)
3) ติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก (Harmonic Filter)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-7 ขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณทางฮาร์มอนิกที่กำหนดตามมาตรฐาน