

4.2 การหาวงจรมูลการไหลของกระแสฮาร์โมนิก และการเกิดรีโซแนนซ์

จากภาพที่ 4.1 จะแปลงโครงสร้างของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในรูปวงจรมูลการไหลของกระแสฮาร์โมนิกได้ดังภาพที่ 4.2 และ 4.3

4.2.1 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ

ด้านแรงสูง 24 kV

$$I_{SC\text{แรงสูง}} = 6.88 \text{ kA} \text{ ค่าได้จากการสอบถามสถานีบางเขนการไฟฟ้านครหลวง}$$

$$S_{SC} = \sqrt{3} \times 24 \text{ kV} \times 6.88 \text{ kA} = 285 \text{ MVA}$$

ด้านแรงต่ำ 415/240 V

$$I_{SC\text{แรงต่ำ}} = \frac{S_{SC}}{\sqrt{3} \times 415} = \frac{285 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 415} = 396.49 \text{ kA}$$

$$Z_S = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{SC}} = \frac{415}{\sqrt{3} \times 396.49 \times 10^3} = 0.0006 \Omega$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R} = \tan^{-1} 10 = 84.29^\circ$$

$$R_S = Z_S \cos \theta = 0.0006 \cos 84.29^\circ = 0.00006 \Omega$$

$$X_S = Z_S \sin \theta = 0.0006 \sin 84.29^\circ = 0.0006 \Omega$$

$$R_S + jX_S = 0.00006 + j0.0006 \Omega$$

4.2.2 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

$$I_{T \text{ rated}} = \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{2000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 2,775.72 \text{ A}$$

$$Z_T = \%Z \times \frac{V_L \times \sqrt{3}}{I_{T \text{ rated}}} = \left(\frac{6.6}{100} \right) \times \left(\frac{416/\sqrt{3}}{2,775.72} \right) = 5.71 \times 10^{-3} \Omega$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R} = \tan^{-1} 8 = 82.87^\circ$$

$$R_T = Z_T \cos \theta = 5.71 \times 10^{-3} \cos 82.87^\circ = 0.7087 \times 10^{-3} \Omega$$

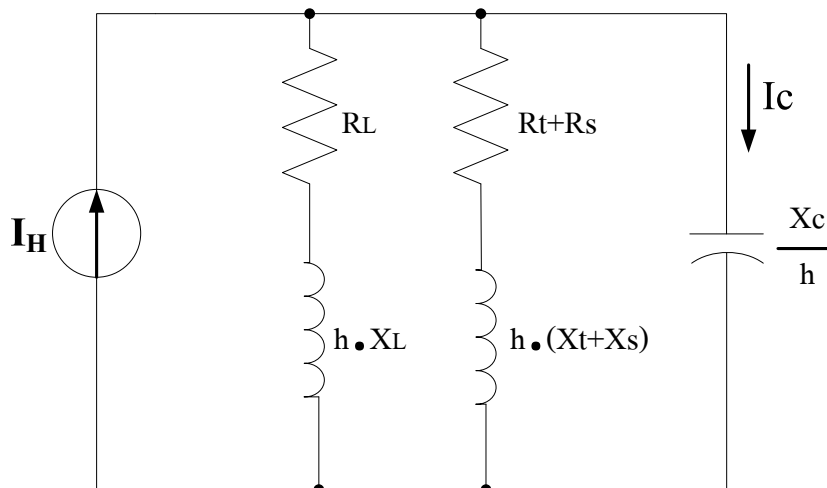
$$\begin{aligned}
 X_T &= Z_T \sin \theta = 5.71 \times 10^{-3} \sin 82.87^\circ \\
 &= 5.67 \times 10^{-3} \Omega \\
 R_T + jX_T &= 0.0007087 + j0.00567 \Omega
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่า

$$\begin{aligned}
 R_{eq} + jX_{eq} &= R_{S+T} + jX_{S+T} \\
 R_{eq} + jX_{eq} &= [(R_S + jR_T) + j(X_S + X_T)] \\
 &= (0.00006 + 0.0007087) + j(0.0006 + 0.00567) \\
 &= (0.0007687 + j0.00627) \Omega
 \end{aligned}$$

4.2.3 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของโหลด

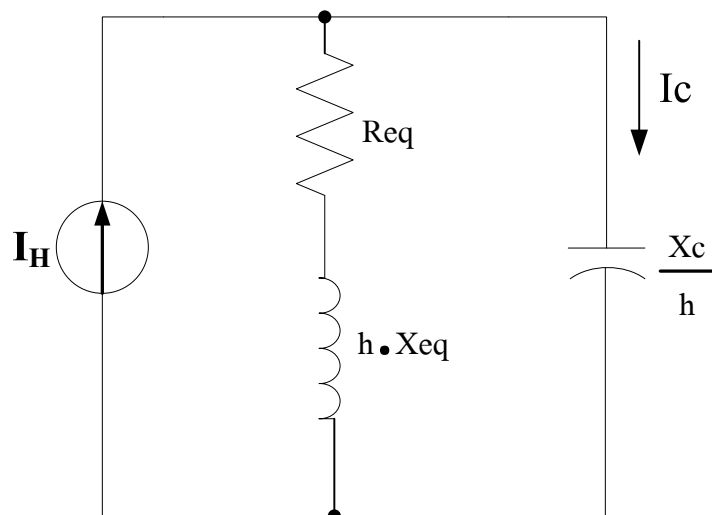
$$\begin{aligned}
 I_{Load} &= \frac{S_{1\phi}}{V_P} = \frac{11175.5}{229.9} = 48.61 \text{ A} \\
 Z_{Load} &= \frac{V_P}{I_{Load}} = \frac{229.9}{48.61} = 4.729 \Omega \\
 \theta &= \cos^{-1} 0.99 = 8.11^\circ \\
 R_L &= Z_L \cos \theta = 4.729 \cos 8.11^\circ = 4.6817 \Omega \\
 X_L &= Z_L \sin \theta = 4.729 \sin 8.11^\circ = 0.66714 \Omega \\
 R_L + jX_L &= 4.6817 + j0.66714 \Omega
 \end{aligned}$$



ภาพที่ 4.2 วงจรสมมูลของแบบจำลอง

ตารางที่ 4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า

System Impedance (Z_s)	$(0.00006 + j0.0006)$	Ω
Transformer Impedance(Z_T)	$(0.0007087 + j0.00567)$	Ω
Load Impedance(Z_L)	$(4.6817 + j0.66714)$	Ω
Capacitive Reactance (jX_C)ที่ $12 \times 50 \text{ kVAR}$	$-j3.46112$	Ω



ภาพที่ 4.3 วงจรสมมูลของแบบจำลองเมื่อยุบรวมแล้ว

จากวงจรในรูปที่ 4.3 สามารถคำนวณค่าต่างๆได้ดังนี้

$$R_{eq} = R_{trans} + R_{sys} = 0.0007687 \Omega$$

$$X_{eq} = X_{trans} + X_{sys} = 0.00627 \Omega$$

$$X_c/h = 3.46112 \Omega/h$$

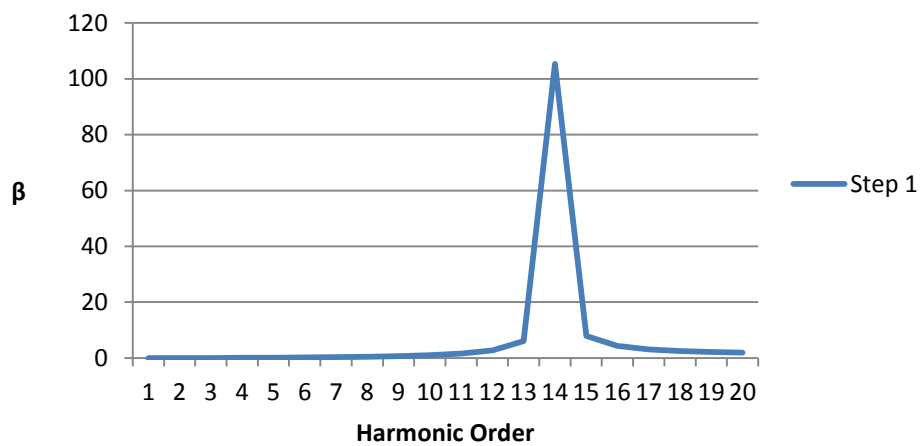
4.2.4 การคำนวณหาค่า Resonance point

โดยจะเป็น ค่าที่ได้จาก Microsoft Excel เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จาก MATLAB

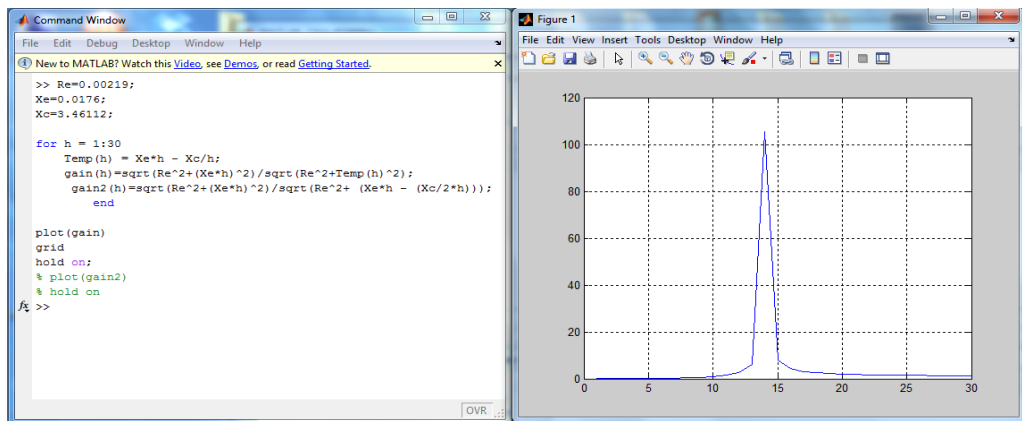
Step 1

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{50 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 69.3936 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 69.3936} = 3.46112 \ \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



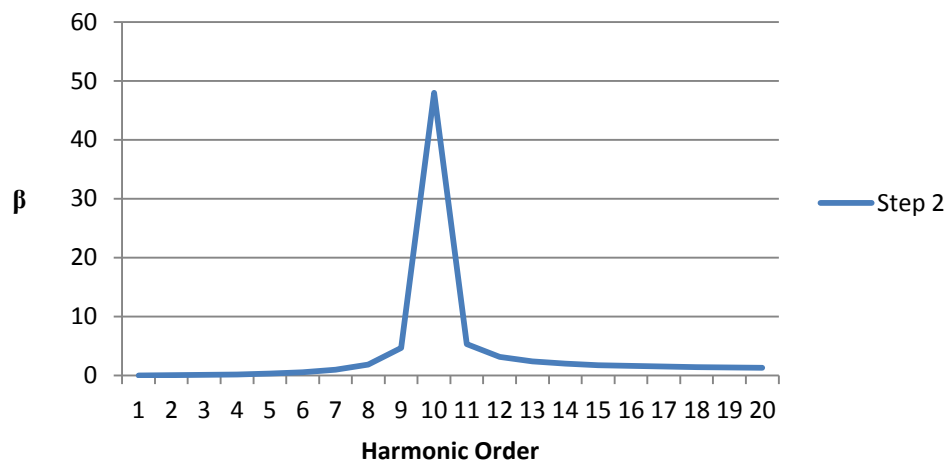
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียง โปรแกรม คอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.4 การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ลำดับที่ 1

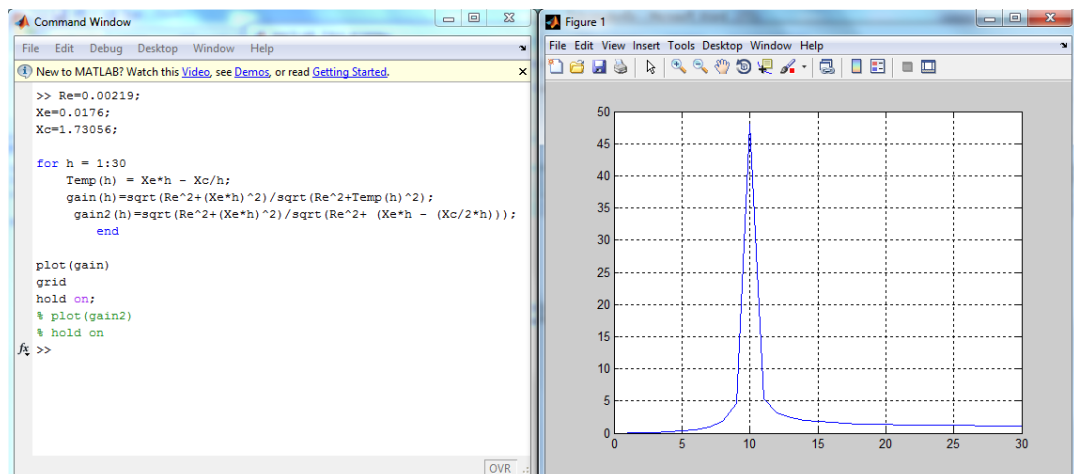
Step 2

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 138.7861 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 138.7861} = 1.70356 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



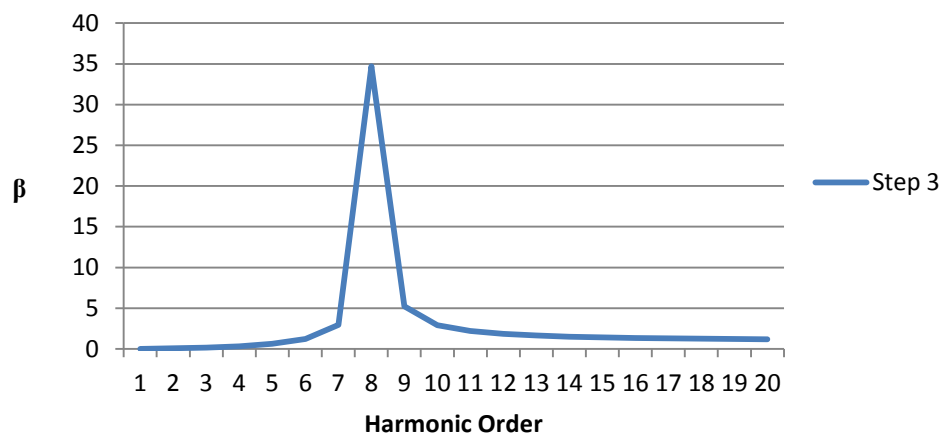
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.5 การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สแต็ปลำดับที่ 2

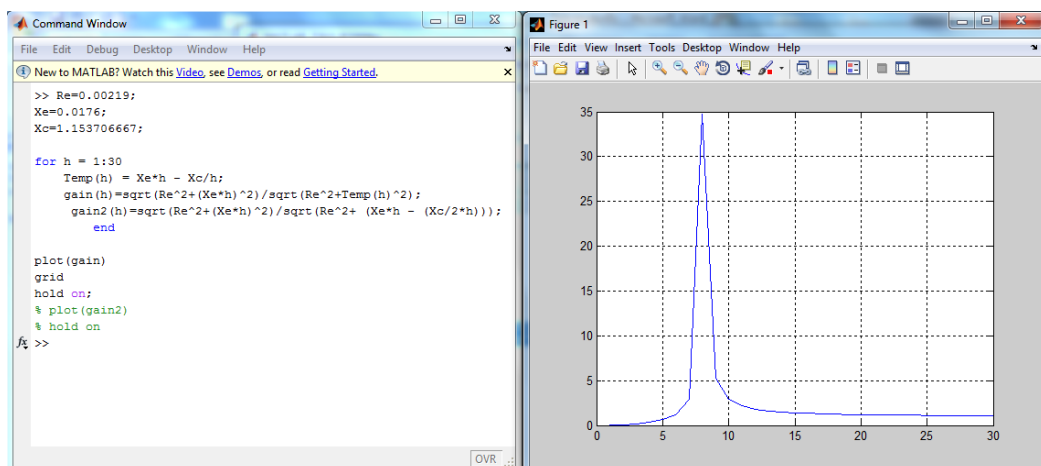
Step 3

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 208.7192 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 208.7192} = 1.153707 \text{ } \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



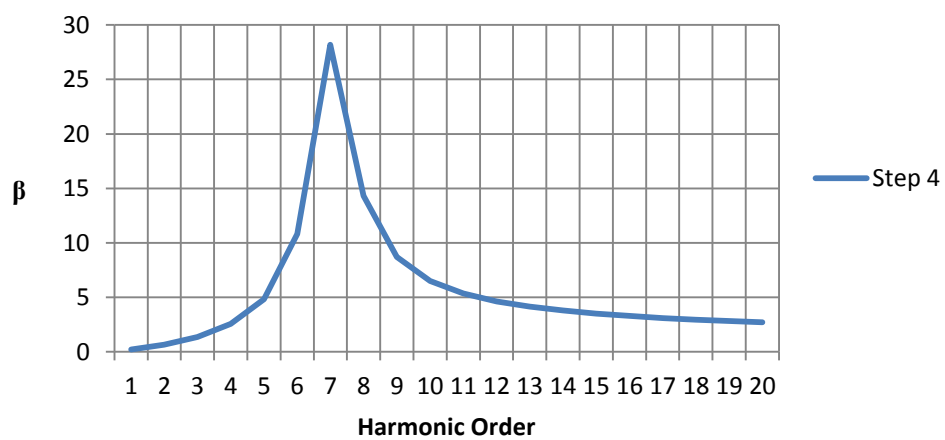
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.6 การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สแต็ปลำดับที่ 3

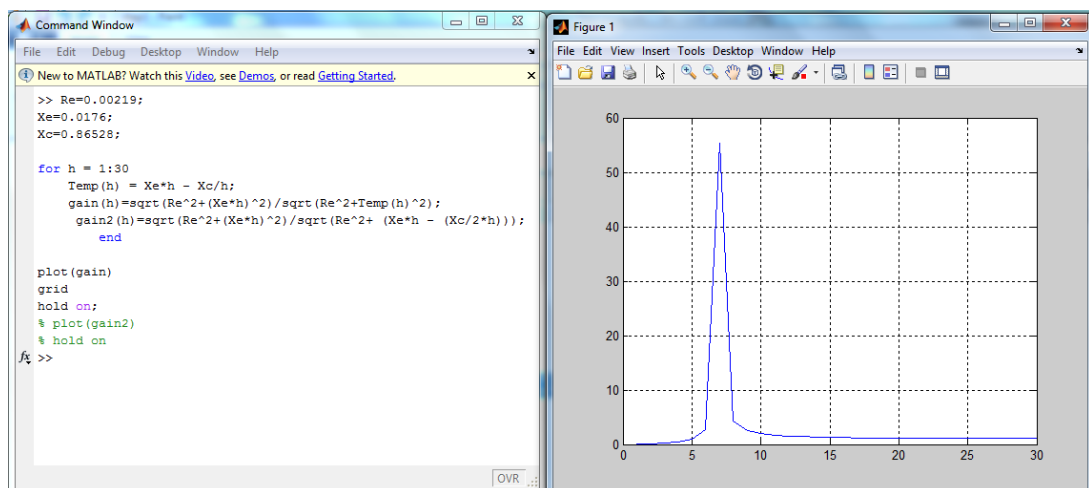
Step 4

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{200 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 277.5722 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 277.5722} = 0.86528 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



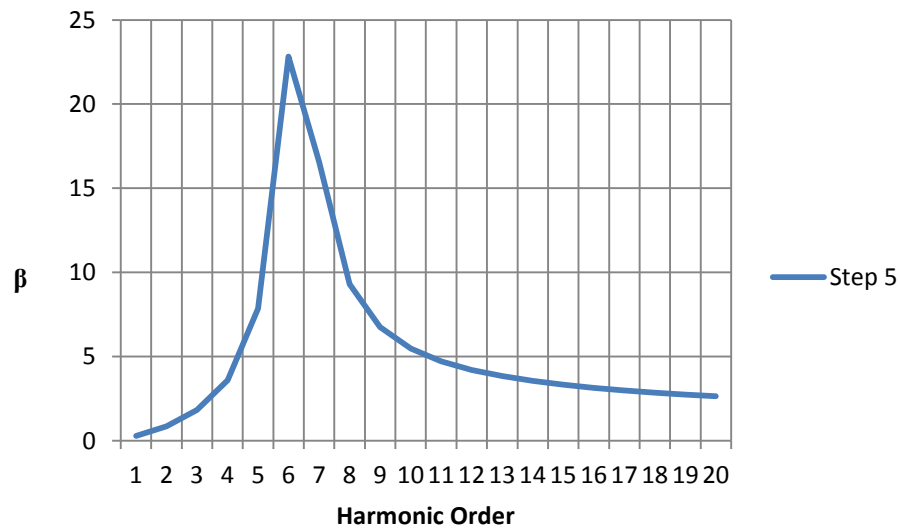
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.7 การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สแต็ปลำดับที่ 4

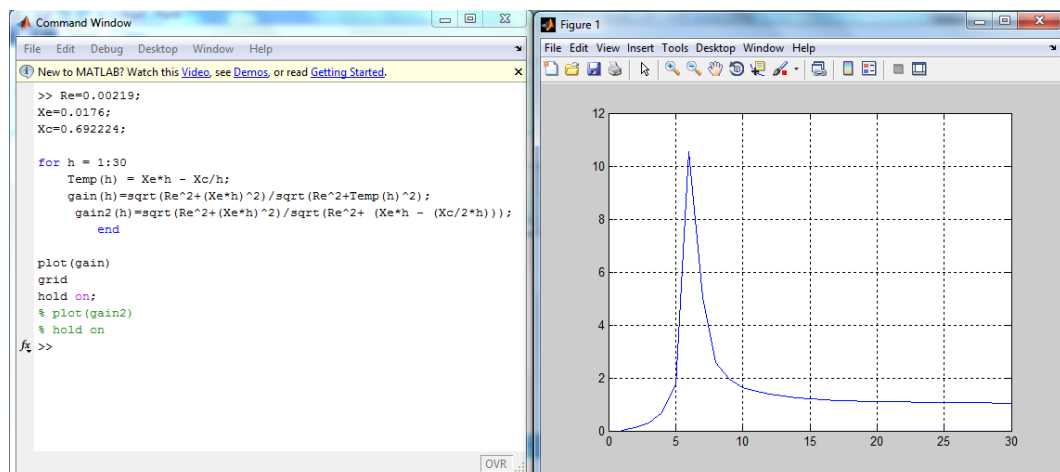
Step 5

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{250 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 346.9653 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 346.9653} = 0.692224 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



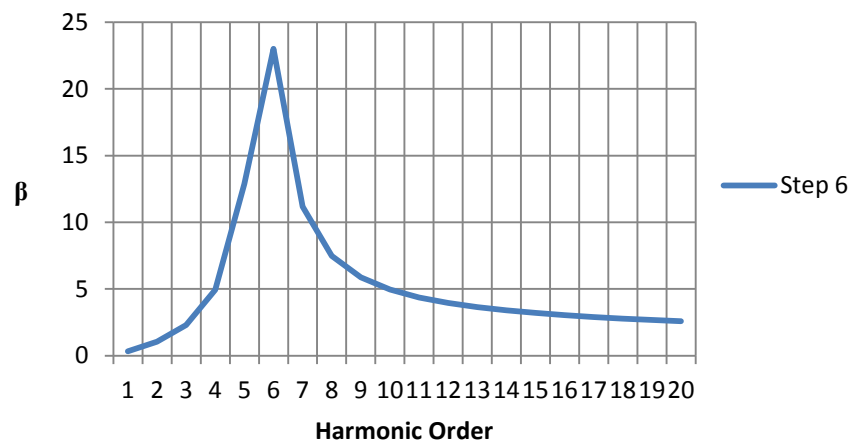
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.8 การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สตีปลำดับที่ 5

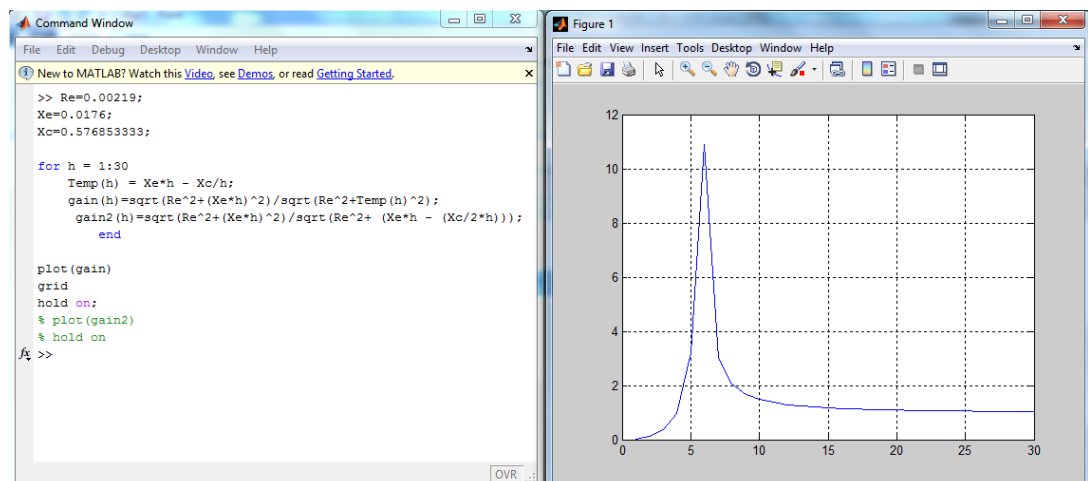
Step 6

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{300 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 416.3584 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 416.3584} = 0.576853 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



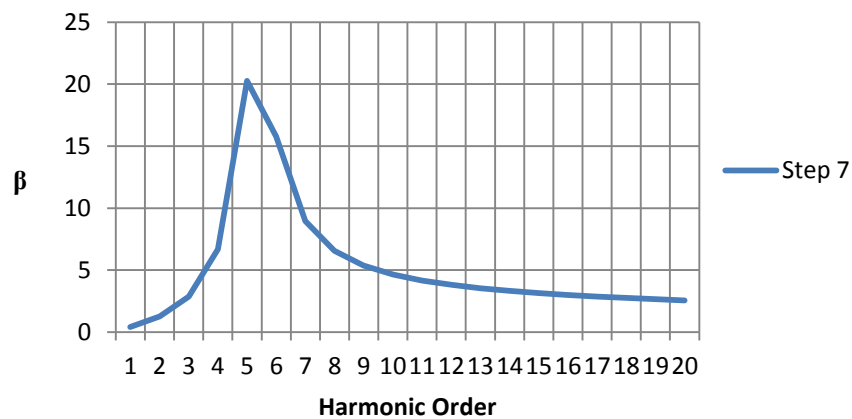
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียง โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.9 การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สแต็ปลำดับที่ 6

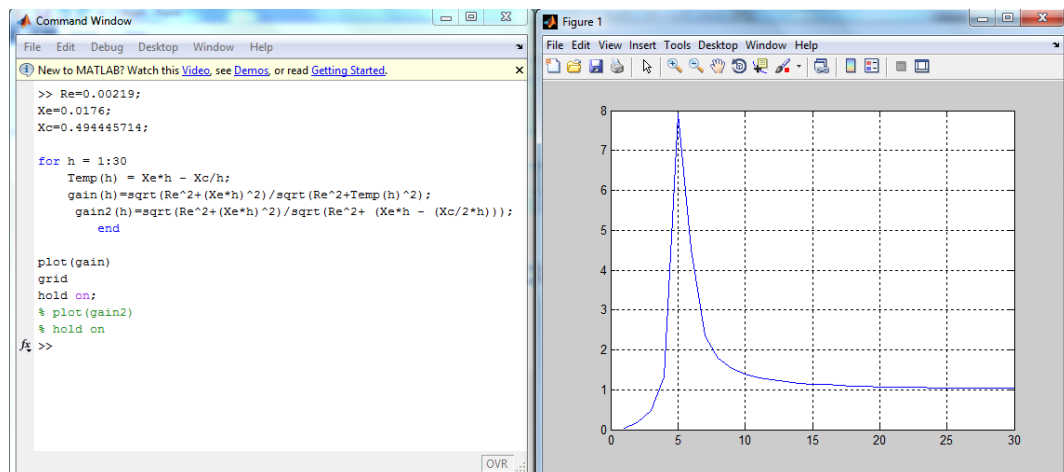
Step 7

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{350 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 485.7514 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 485.7514} = 0.494446 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



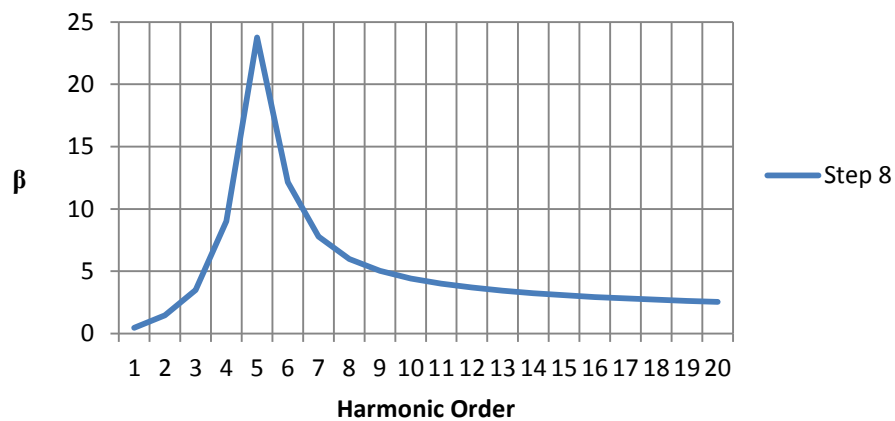
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.10 การเกิดเรโซแนนซ์ที่ค่าปาริเตอร์สตีปลำดับที่ 7

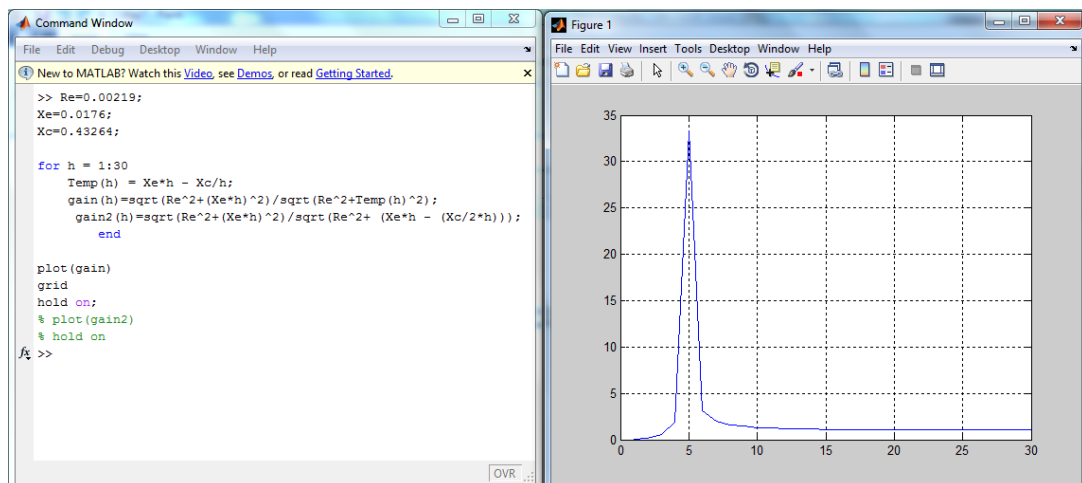
Step 8

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{400 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 555.1445 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 555.1445} = 0.43264 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



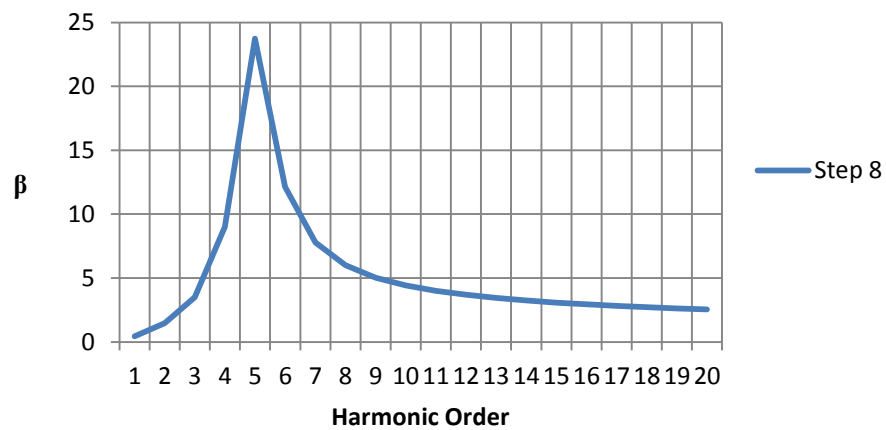
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.11 การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สตีปลำดับที่ 8

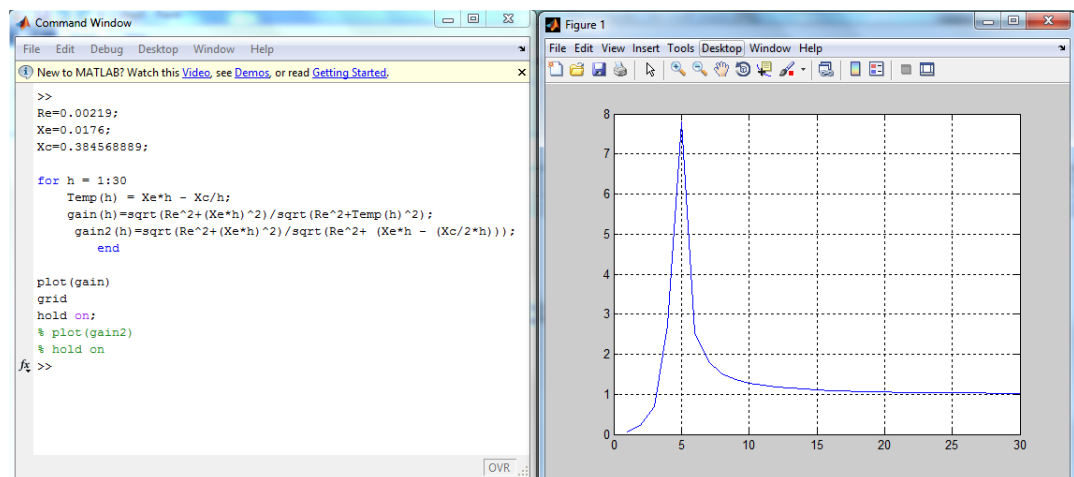
Step 9

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{450 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 624.5376 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 624.5376} = 0.384569 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.12 การเกิดเรโซแนนซ์ที่ค่าปาดเตอร์สดีปลำดับที่ 9

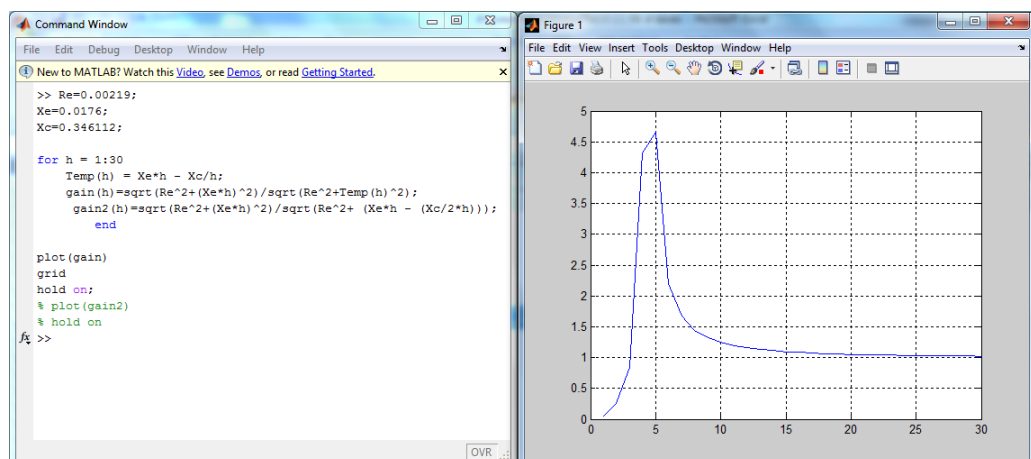
Step 10

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{500 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 693.9306 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 693.9306} = 0.346112 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



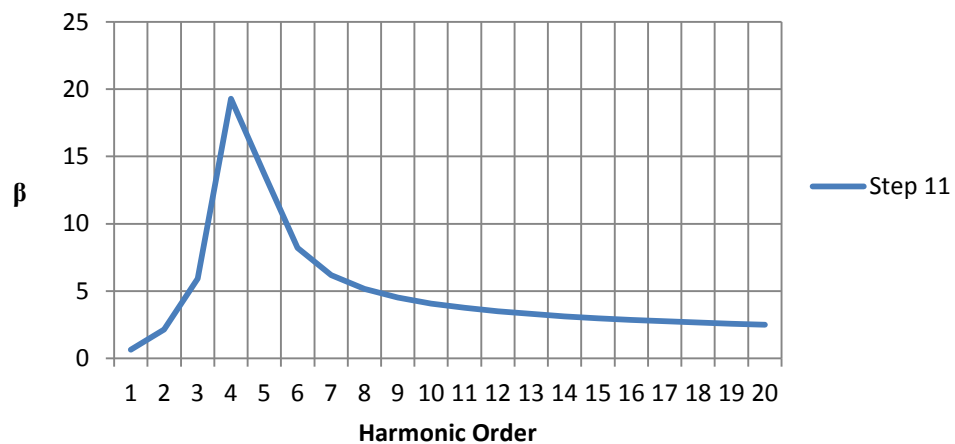
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.13 การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สตีปลำดับที่ 10

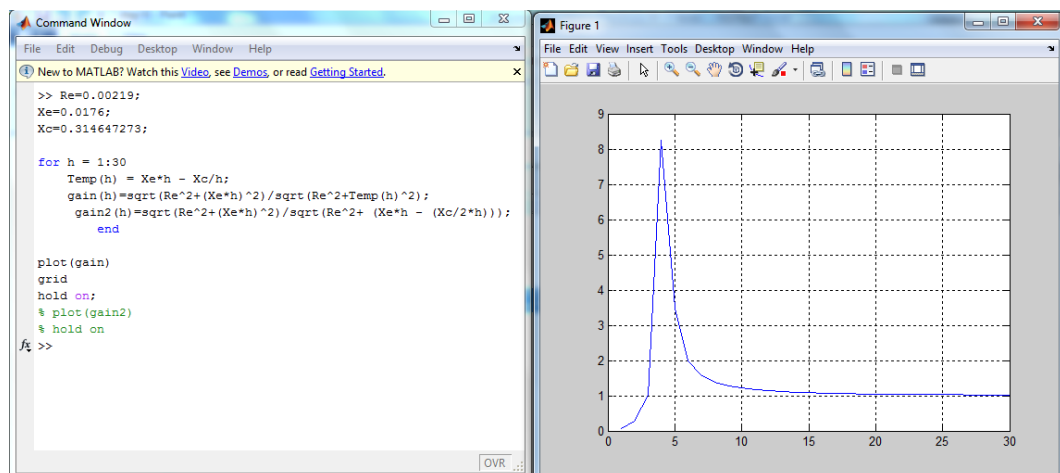
Step 11

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{550 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 763.3639 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 763.3639} = 0.314647 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก



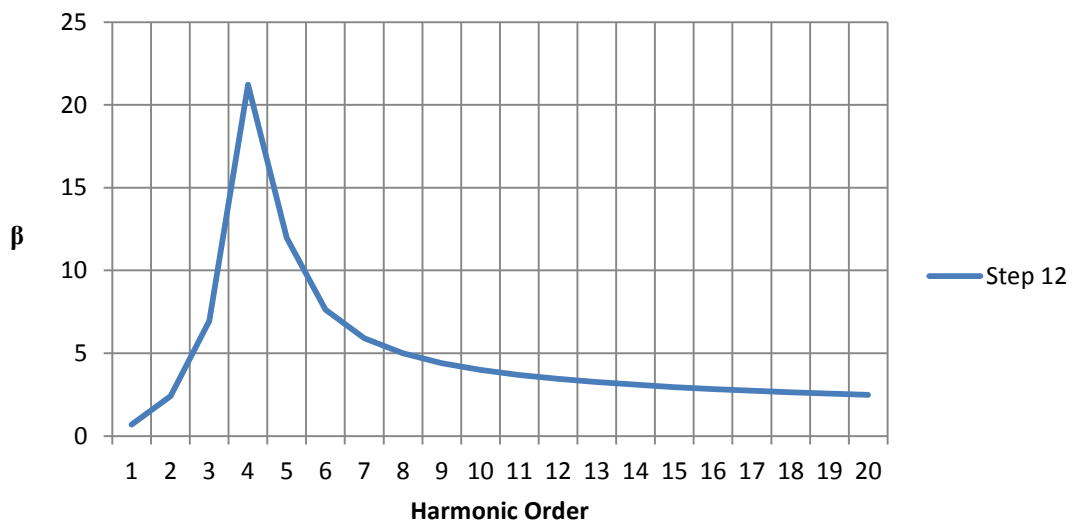
ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ภาพที่ 4.14 การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สตีปลำดับที่ 11

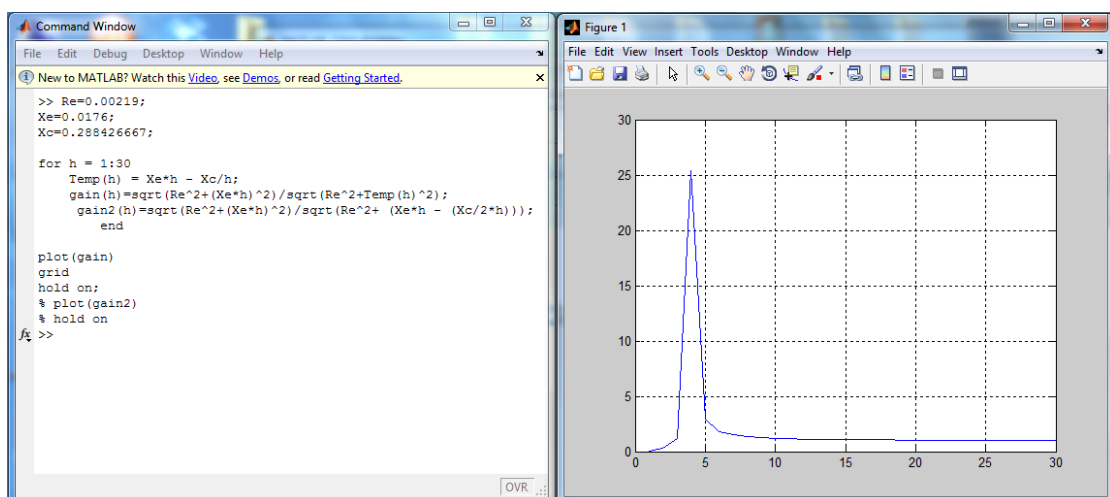
Step 12

$$I_{C \text{ rated}} = \frac{\text{kVAR}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{600 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 416} = 832.7167 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{C \text{ rated}}} = \frac{416}{\sqrt{3} \times 832.7167} = 0.288427 \Omega$$



ก. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิก

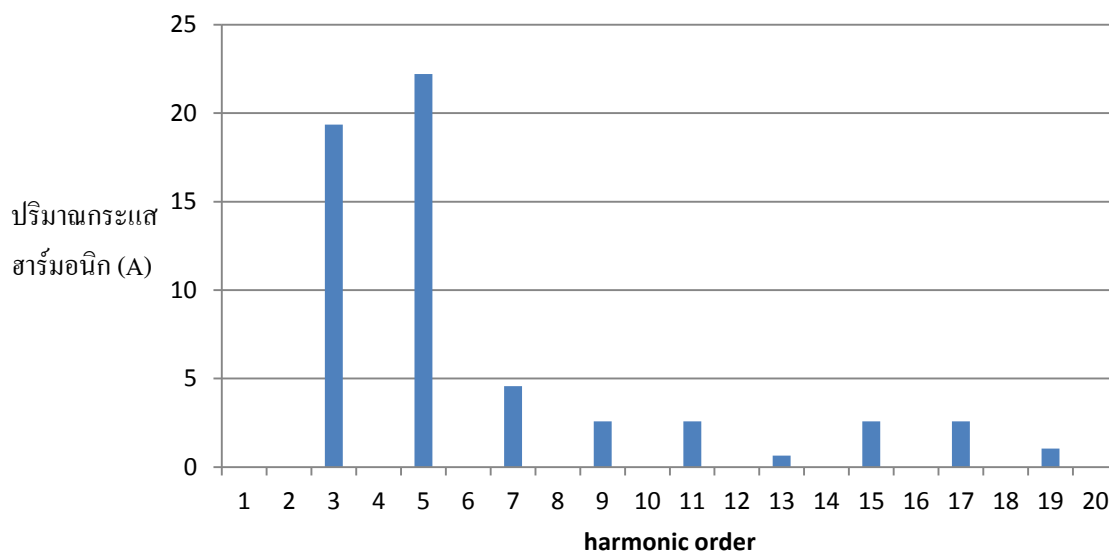


ข. ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ของกระแสฮาร์มอนิกเทียบเคียงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

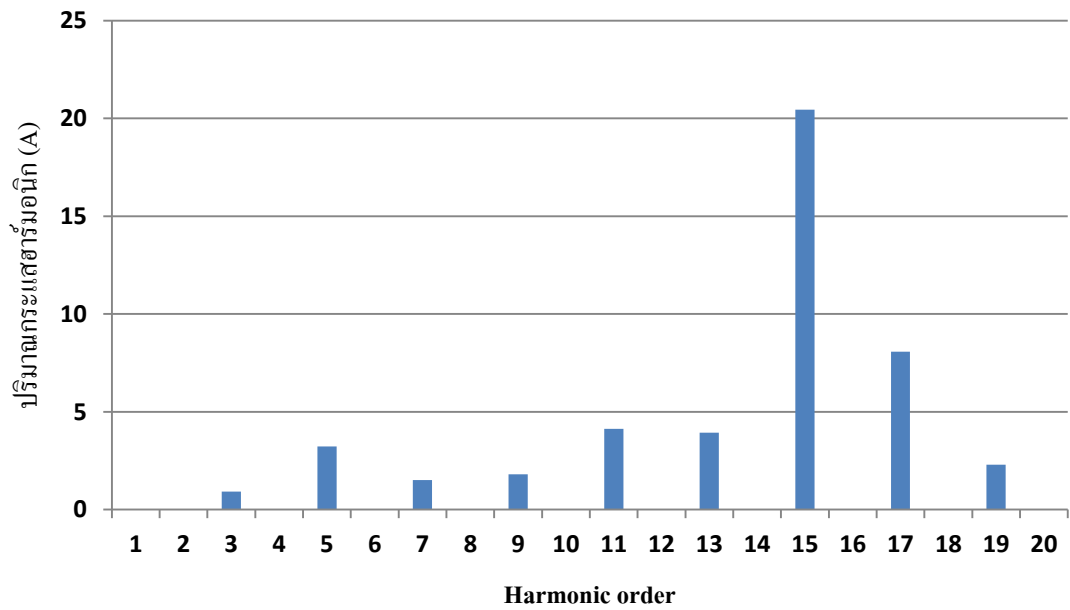
ภาพที่ 4.15 การเกิดเรโซแนนซ์ที่ค่าพหุคูณอันดับที่ 12

4.3 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกและการขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อเกิดเรโซแนนซ์

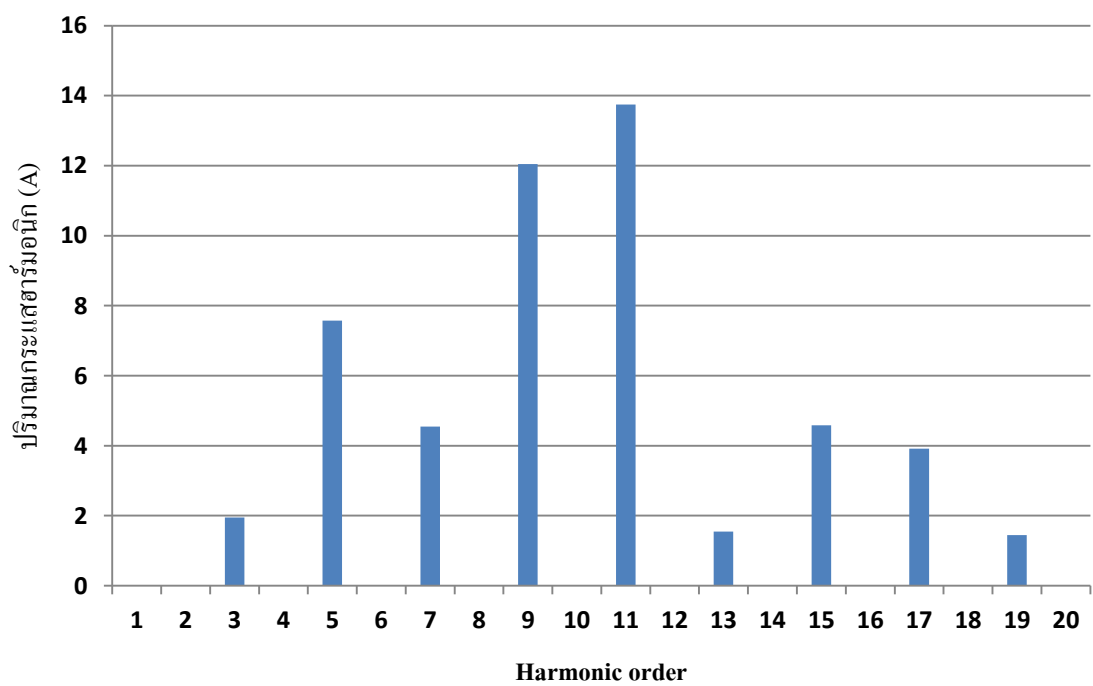
หลังจากทำการวัดค่าสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากจุดmeasuring หน้า MDB (Main Distribution Board) หน้าหม้อแปลงทั้งสองตัวทำให้เห็นพฤติกรรมของฮาร์มอนิกที่เกิดจากกระแสมีค่าสูงในเวลากลางคืน(ประมาณช่วง 21-8 นาฬิกา) รวมถึงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ต่ำในช่วงเวลาดังกล่าวต่อไปเป็นการวิเคราะห์หาตำแหน่งของการเกิดเรโซแนนซ์โดยคำนวณหา ค่าอัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิก เมื่อคาปาซิเตอร์เปลี่ยนระดับต่างๆ (ดังแสดงในภาพที่ 4.4 – 4.15) เพื่อปรับค่าตัวประกอบกำลังให้คงที่ จากสมการ 2.15 นำมาสร้างโปรแกรมการวิเคราะห์ เพื่อหาตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์และอัตราการขยายกระแสสูงสุด ในระดับ 1 - 12 ของการปรับคาปาซิเตอร์ จะพบว่าเมื่อระดับของการเปลี่ยนระดับของคาปาซิเตอร์เพิ่มมากขึ้น ลำดับความถี่เรโซแนนซ์จะน้อยลงเรื่อยๆ ค่าอัตราการขยายกระแสจะเปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งลดลำดับความถี่จะทำให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกสูงขึ้น



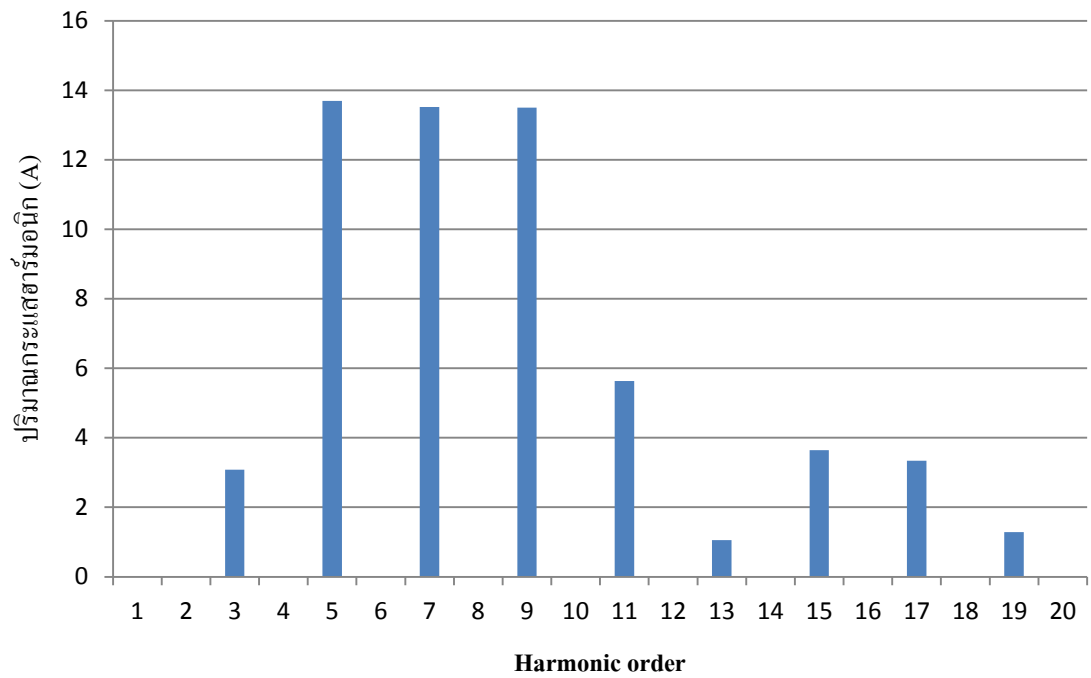
ภาพที่ 4.16 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (จุด A) ไปสู่ระบบภายนอกและวงจรคาปาซิเตอร์



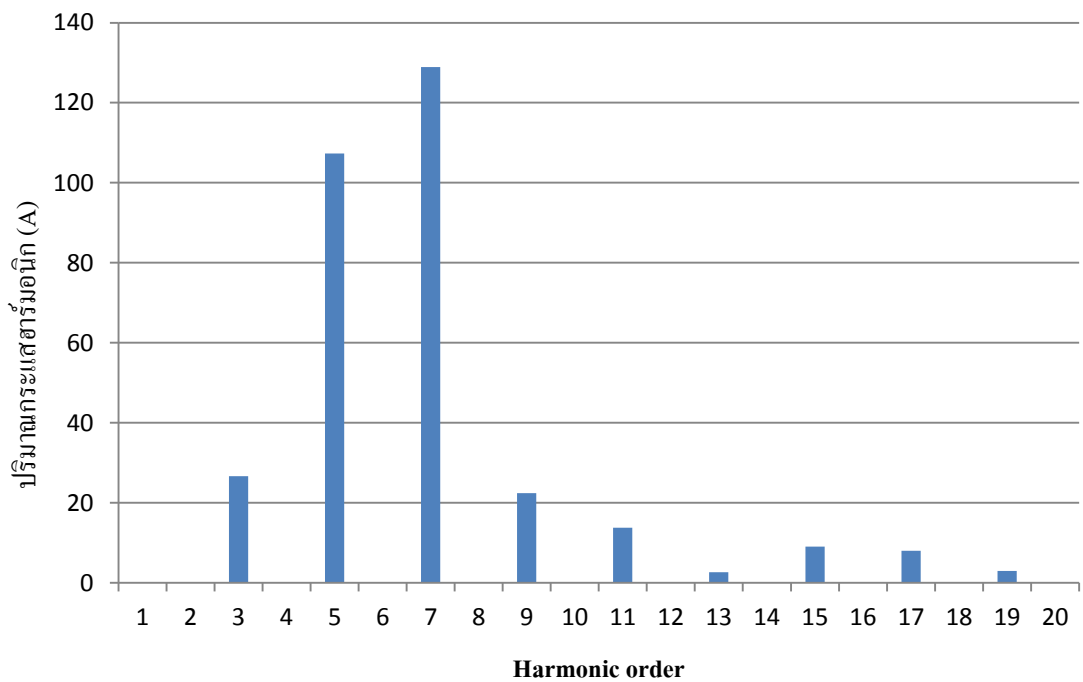
ภาพที่ 4.17 ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มป์ลำดับที่ 1



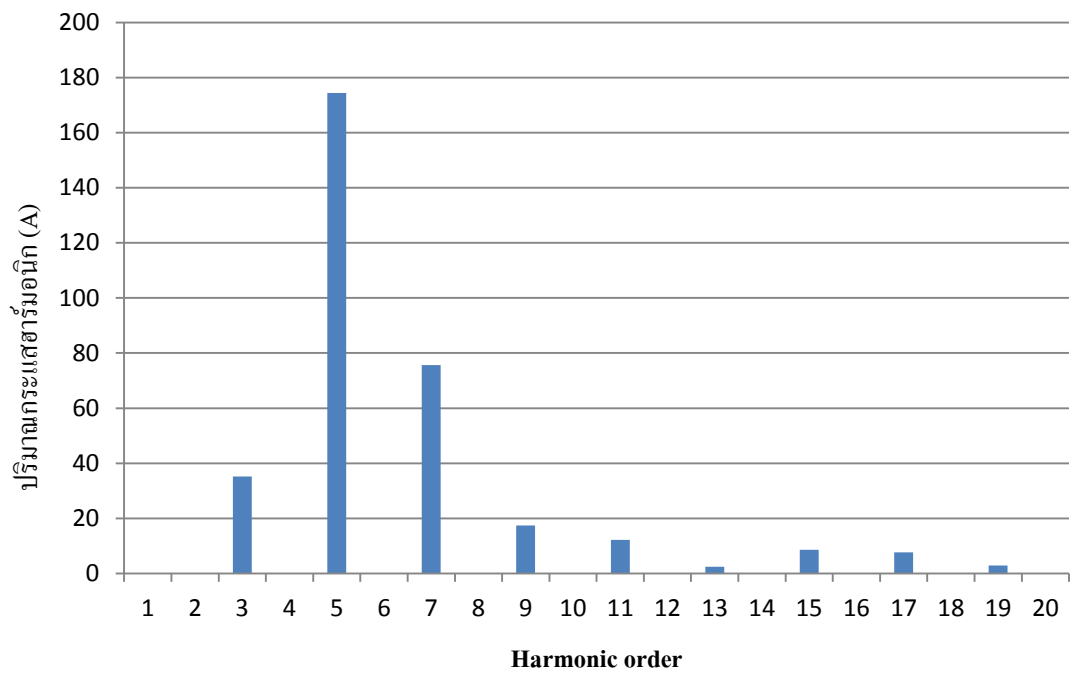
ภาพที่ 4.18 ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มป์ลำดับที่ 2



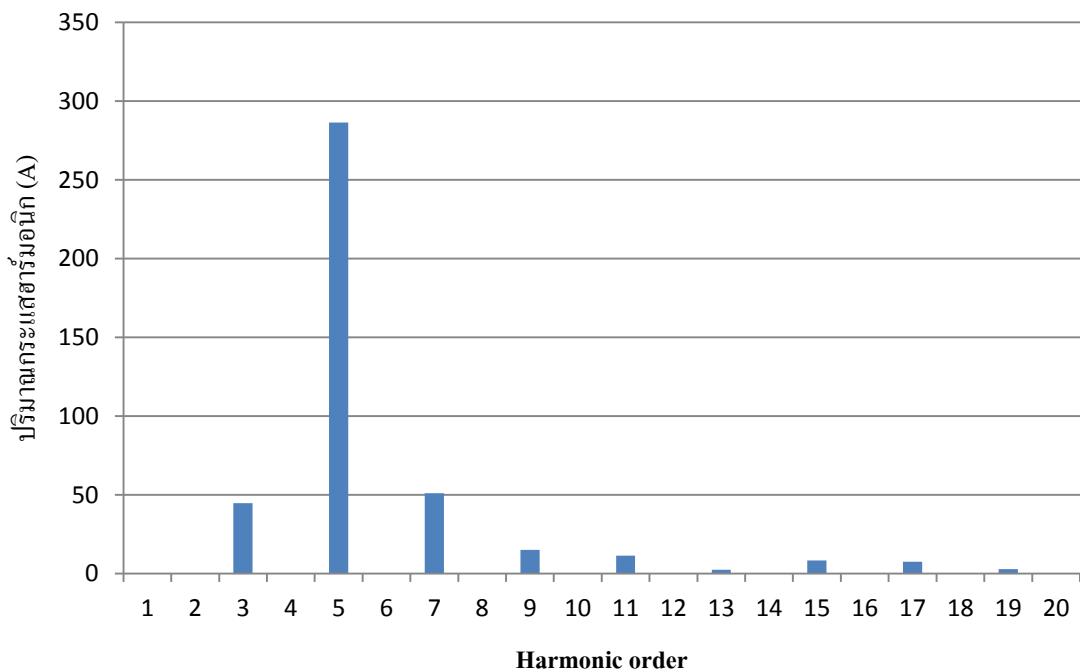
ภาพที่ 4.19 ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มลำดับที่ 3



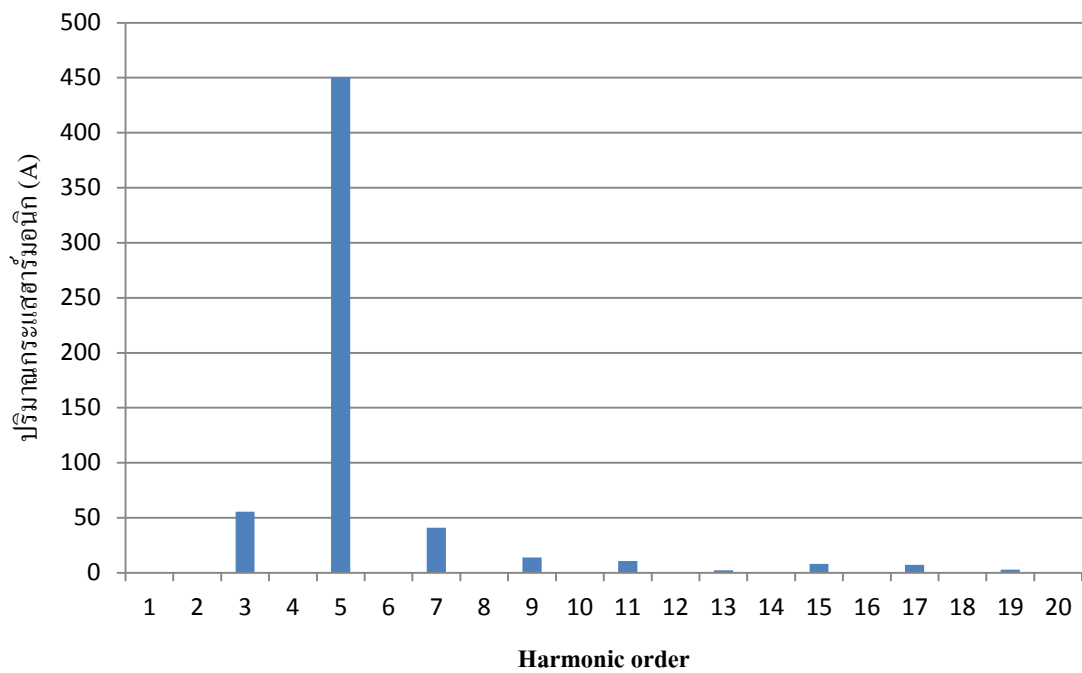
ภาพที่ 4.20 ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มลำดับที่ 4



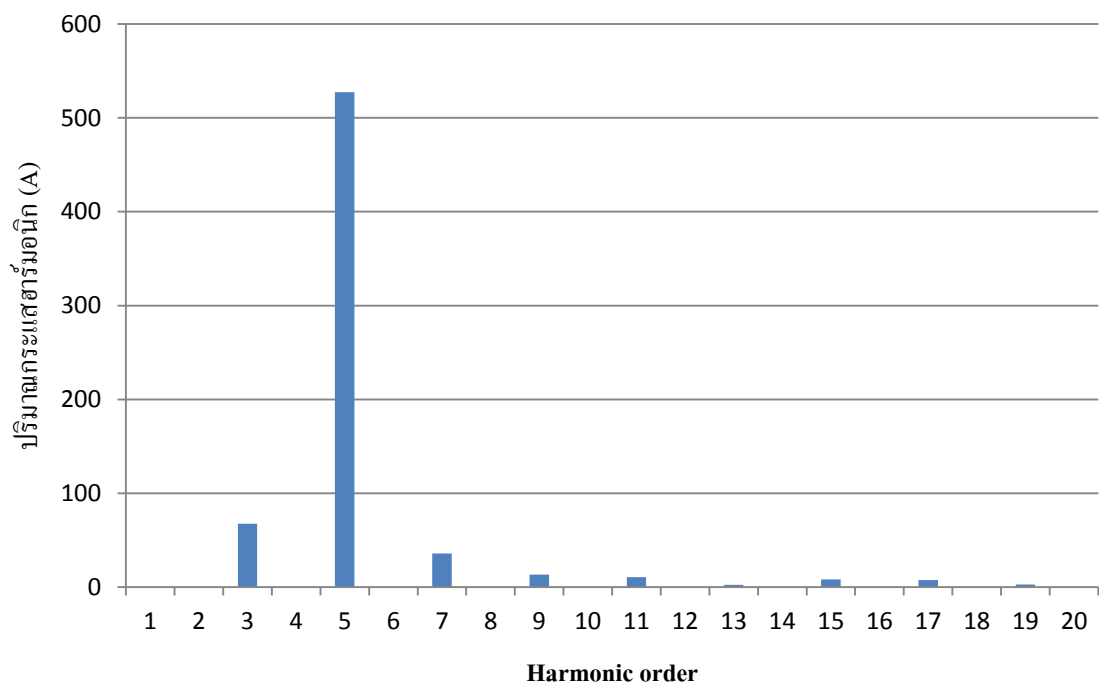
ภาพที่ 4.21 ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สแตปลำดับที่ 5



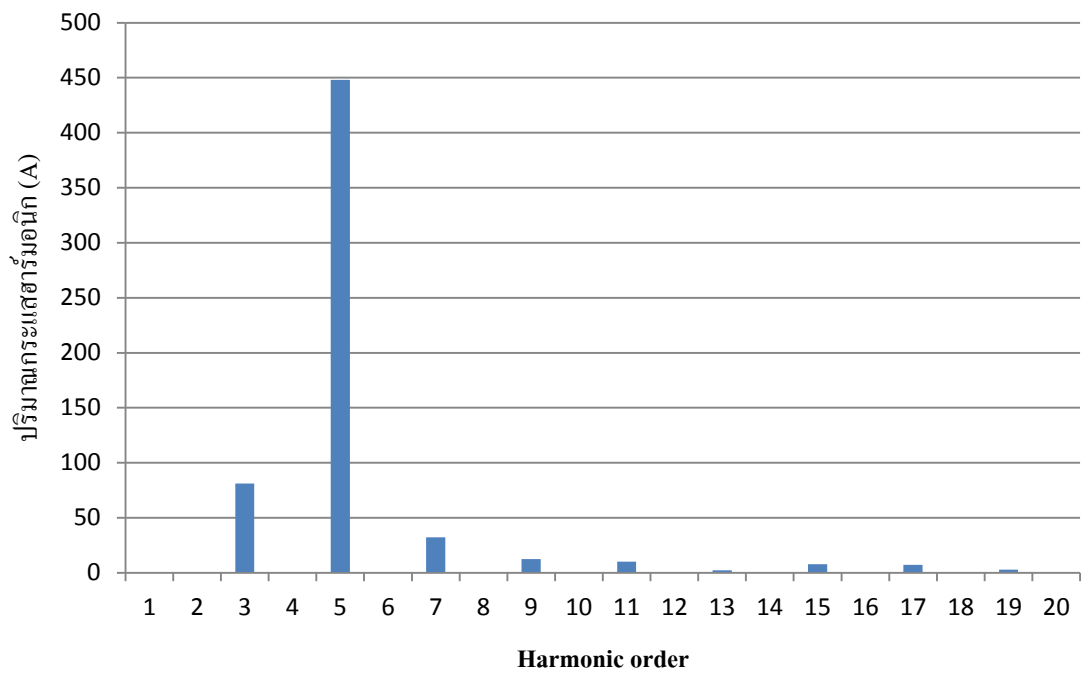
ภาพที่ 4.22 ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สแตปลำดับที่ 6



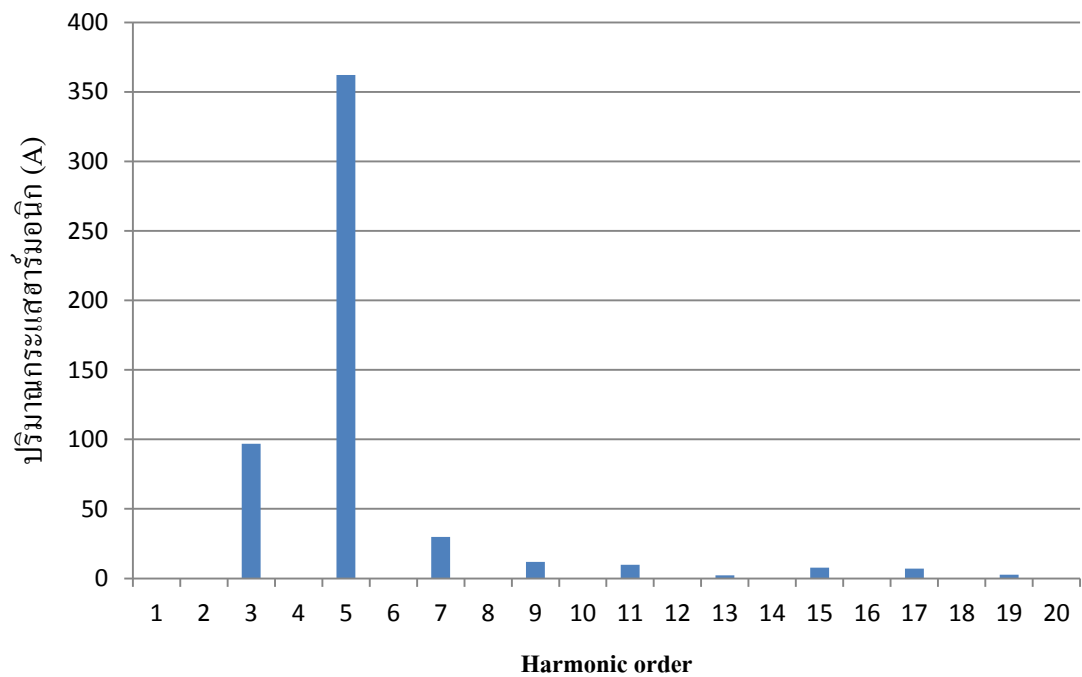
ภาพที่ 4.23 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มลำดับที่ 7



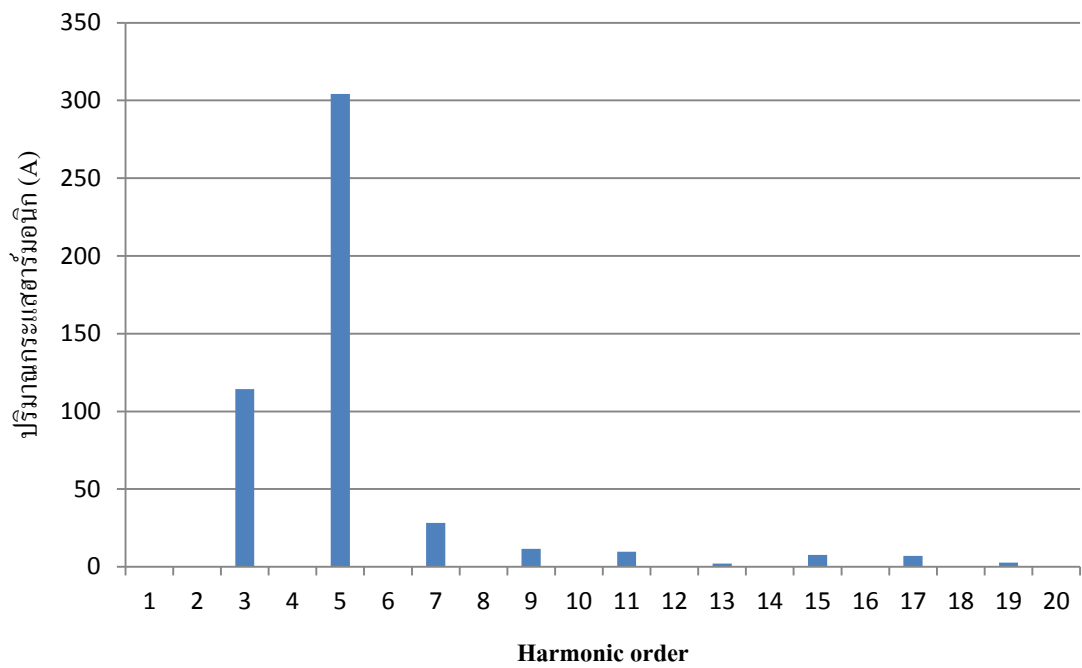
ภาพที่ 4.24 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มลำดับที่ 8



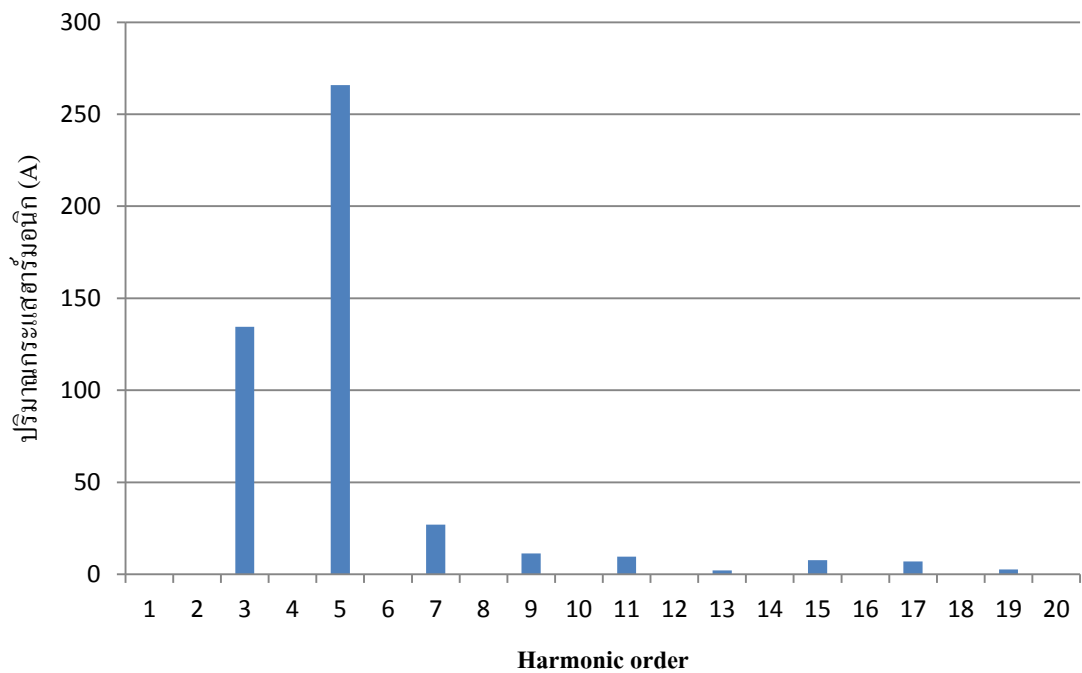
ภาพที่ 4.25 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มป์ลำดับที่ 9



ภาพที่ 4.26 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มป์ลำดับที่ 10



ภาพที่ 4.27 ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มลำดับที่ 11



ภาพที่ 4.28 ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่คูณอัตราขยายเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์สเต็มลำดับที่ 12