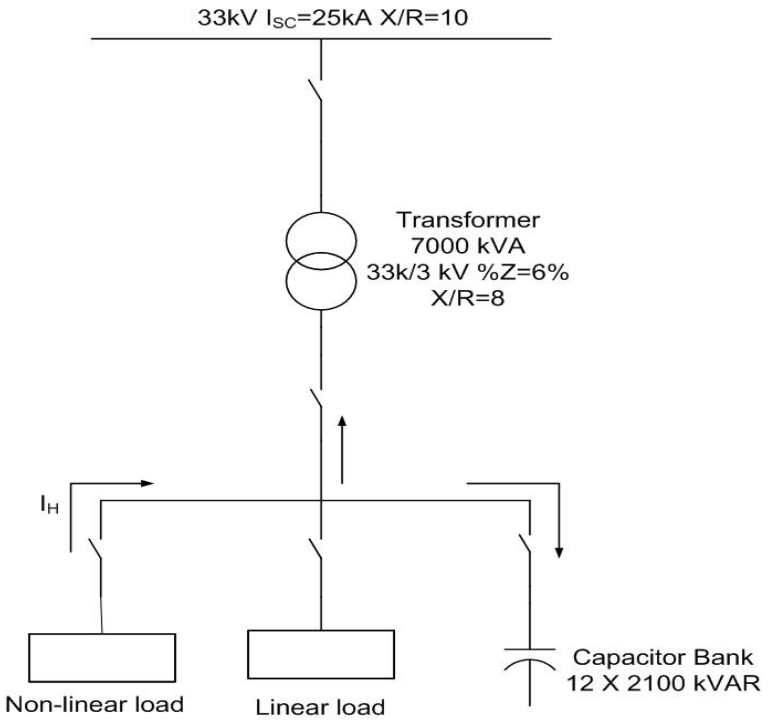
บทที่ 4

การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงผลต่างๆ ของการวัดค่าฮาร์มอนิกจากเครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าแบบ 3 เฟส จะเห็นการเกิดกระแสฮาร์มอนิกเพื่อตรงตามวัตถุประสงค์ ในบทนี้จึงได้วิเคราะห์การเกิดเรโซแนนซ์และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกเพื่อเทียบกับมาตรฐาน

4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าโรงงาน

จากการวัดผลที่ได้มีความสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า

4.2 การหาวงจรสมมูลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกและการเกิดเรโซแนนซ์

จากภาพที่ 4.1 จะแปลงโครงสร้างของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกได้ดังภาพที่ 4.2 และ 4.3

4.2.1 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ

ด้านแรงสูง 33 kV

$$I_{SC\text{แรงสูง}} = 25\ \text{kA}$$

$$S_{SC} = \sqrt{3} \times 33\text{kV} \times 25\text{kA} = 1428\ \text{MVA}$$

ด้านแรงต่ำ 3000 V

$$I_{SC\text{แรงต่ำ}} = \frac{S_{SC}}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{1428\,\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 3000} = 274.81\ \text{kA}$$

$$Z_S = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{SC}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 278.81\text{k}} = 0.006\ \Omega$$

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

$$R_S = Z_S \cos\theta = 0.006 \cos 84.29^\circ = 0.0006\ \Omega$$

$$X_S = Z_S \sin\theta = 0.006 \sin 84.29^\circ = 0.006\ \Omega$$

$$R_S + jX_S = 0.0006 + j0.006\ \Omega$$

4.2.2 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

$$I_{Trated} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{7000\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 1347\ A$$

$$Z_T = \%Z \times \frac{V_L / \sqrt{3}}{I_{Trated}} = (0.06) \times \left(\frac{3000 / \sqrt{3}}{1347} \right) = 0.077\ \Omega$$

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

$$R_T = Z_T \cos\theta = 0.077 \cos 82.87^\circ = 0.0095\ \Omega$$

$$X_T = Z_T \sin\theta = 0.077 \sin 82.87^\circ = 0.076\ \Omega$$

$$R_T + jX_T = 0.0095 + j0.076\ \Omega$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่า

$$R_{eq} + jX_{eq} = [(R_S + R_T) + j(X_S + X_T)]$$

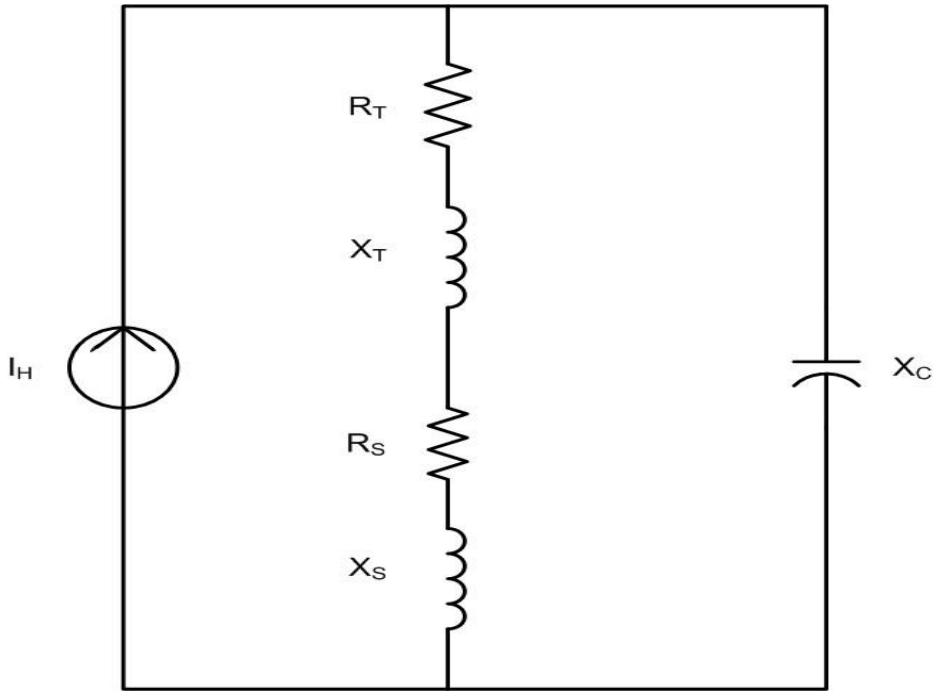
$$= [(0.0006 + 0.0095) + j(0.006 + 0.076)]$$

$$= (0.01 + j0.082)\ \Omega$$

4.2.3 การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{2100\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 404.145\ A$$

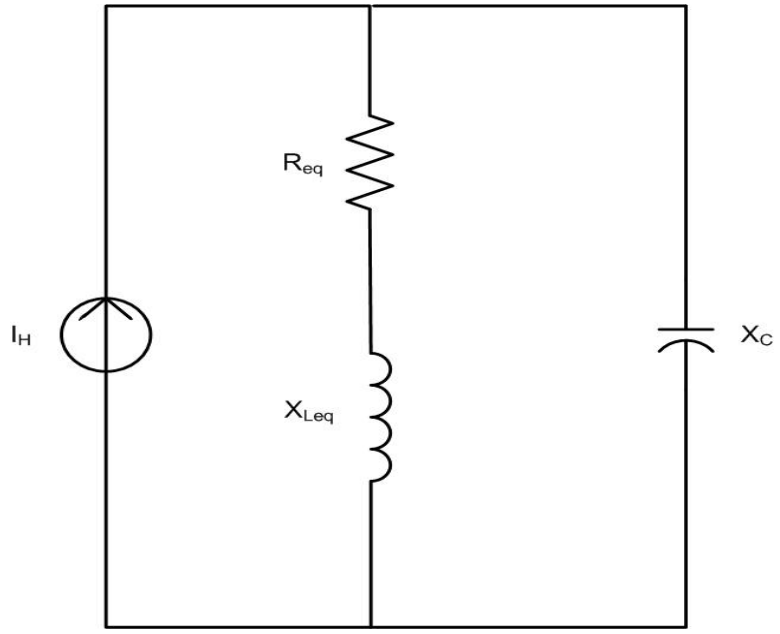
$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 404.145} = 4.285\ \Omega$$



ภาพที่ 4.2 วงจรสมมูลของแบบจำลอง

ตารางที่ 4.1 ค่าอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า

System Impedance (Z_S)	(0.006 + j0.006)	Ω
Transformer Impedance(Z_T)	(0.0095 + j0.076)	Ω
Capacitive Reactance (jX_C) ที่ 12 × 2100 kVAR	-j4.285	Ω



ภาพที่ 4.3 วงจรสมมูลของแบบจำลองเมื่อยุบรวมแล้ว

จากวงจรในรูปที่ 4.3 สามารถคำนวณค่าต่างๆได้ดังนี้

$$R_{eq} = R_T + R_S = 0.01\ \Omega$$

$$X_{Leq} = X_T + X_S = 0.082\ \Omega$$

$$X_C = 4.285\ \Omega$$

4.3 การคำนวณหาอันดับฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 1

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{2100\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 404.145\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 404.145} = 4.285\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{4.285}{0.006 + 0.076}} = 7.22 \text{ หรือ } 361\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 2

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{4200\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 808.29\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 808.29} = 2.143\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{2.143}{0.006 + 0.076}} = 5.11 \text{ หรือ } 255.5\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 3

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{6300\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 1212.43\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 1212.43} = 1.428\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{1.428}{0.006 + 0.076}} = 4.17 \text{ หรือ } 208.5\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 4

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{8400\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 1616.58\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 1616.58} = 1.07\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{1.07}{0.006 + 0.076}} = 3.61 \text{ หรือ } 180.5\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 5

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{10500\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 2020.71\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 2020.71} = 0.857\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{0.857}{0.006 + 0.076}} = 3.23 \text{ หรือ } 161.5\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 6

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{12600\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 2484.87\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 2484.87} = 0.714\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{0.714}{0.006 + 0.076}} = 2.95 \text{ หรือ } 147.5\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 7

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{14700\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 2829\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 2829} = 0.612\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{0.612}{0.006 + 0.076}} = 2.73 \text{ หรือ } 136.5\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 8

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{16800\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 3233.16\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 3233.16} = 0.535\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{0.535}{0.006 + 0.076}} = 2.55 \text{ หรือ } 127.5\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 9

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{18900\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 3637.31\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 3637.31} = 0.476\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{0.476}{0.006 + 0.076}} = 2.38 \text{ หรือ } 119\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 10

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{21000\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 4041.45\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 4041.45} = 0.428\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{0.428}{0.006 + 0.076}} = 2.28 \text{ หรือ } 114\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 11

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{23100\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 4445.6\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 4445.6} = 0.357\ \Omega$$

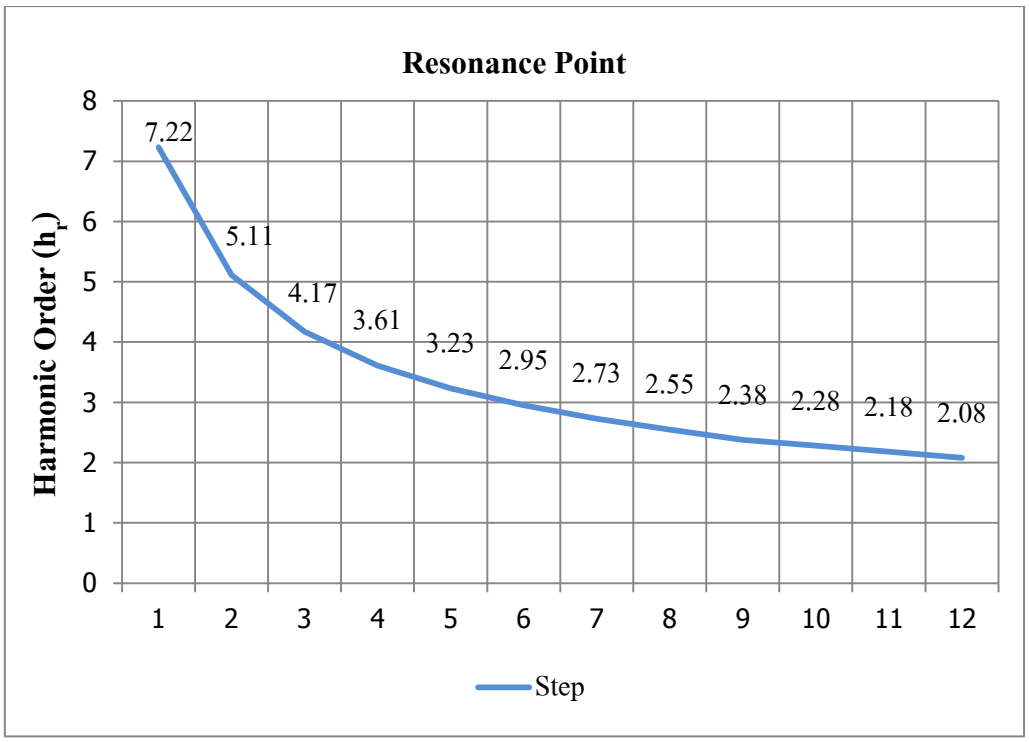
$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{0.357}{0.006 + 0.076}} = 2.18 \text{ หรือ } 109\ H_Z$$

การเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์ Step 12

$$I_{Crated} = \frac{kVAR}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{25200\,k}{\sqrt{3} \times 3000} = 4849.74\ A$$

$$X_C = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times I_{Crated}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 4849.74} = 0.357\ \Omega$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_S}} = \sqrt{\frac{0.357}{0.006 + 0.076}} = 2.08 \text{ หรือ } 104\ H_Z$$



ภาพที่ 4.4 ตำแหน่งการเกิดเรโซแนนซ์ที่คาปาซิเตอร์แต่ล่ะStep

4.4 การคำนวณหาอัตราส่วน I_{SC}/I_L เพื่อเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992

คำนวณหา I_{SC}

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{7000\,kVA}{\sqrt{3} \times 3000} = 1347\ A$$

$$I_{SC} = \frac{I_{FL}}{\%Z} = \frac{1347}{0.06} = 22.4\ kA$$

ค่าที่ได้จากเครื่องวัดที่บันทึกได้ กระแสโหลดสูงสุด (I_L) ที่แรงดัน 3000 V = 309.88 A และคำนวณหาอัตราส่วนของ I_{SC}/I_L เพื่อเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 ได้จากตารางที่ 2.1

คำนวณหาอัตราส่วนของ I_{SC}/I_L

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{22.4\,k}{309.88} = 72.28$$

4.5 การวิเคราะห์ผลการวัด

ผลการวัดจากเครื่องวัดที่บันทึกได้แสดงดังตารางที่ 4.2

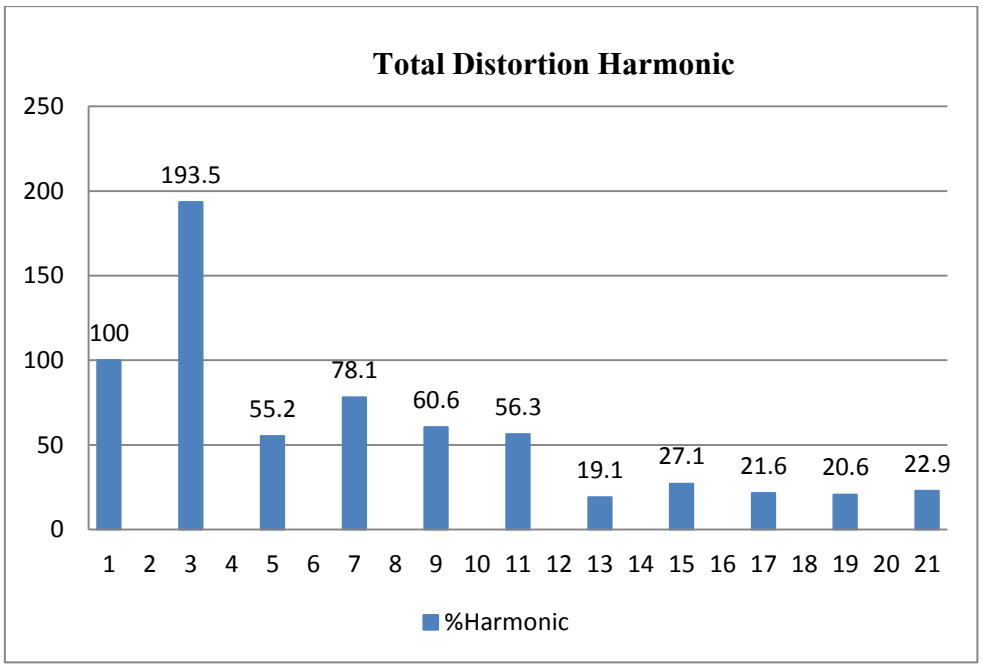
ตารางที่ 4.2 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก THD

Date	Time	THD
2/25/2014	6:40:16 AM	26.98
2/25/2014	6:57:20 AM	28.86
2/25/2014	7:14:24 AM	25.38
2/25/2014	7:31:28 AM	23.89
2/25/2014	7:48:32 AM	25.19
2/25/2014	8:05:36 AM	25.68
2/25/2014	8:22:40 AM	38.95
2/25/2014	8:39:44 AM	52.28
2/25/2014	8:56:48 AM	235.41
2/25/2014	9:13:52 AM	28.25
2/25/2014	9:30:56 AM	48.90
2/25/2014	9:48:00 AM	31.88
2/25/2014	10:05:04 AM	35.67

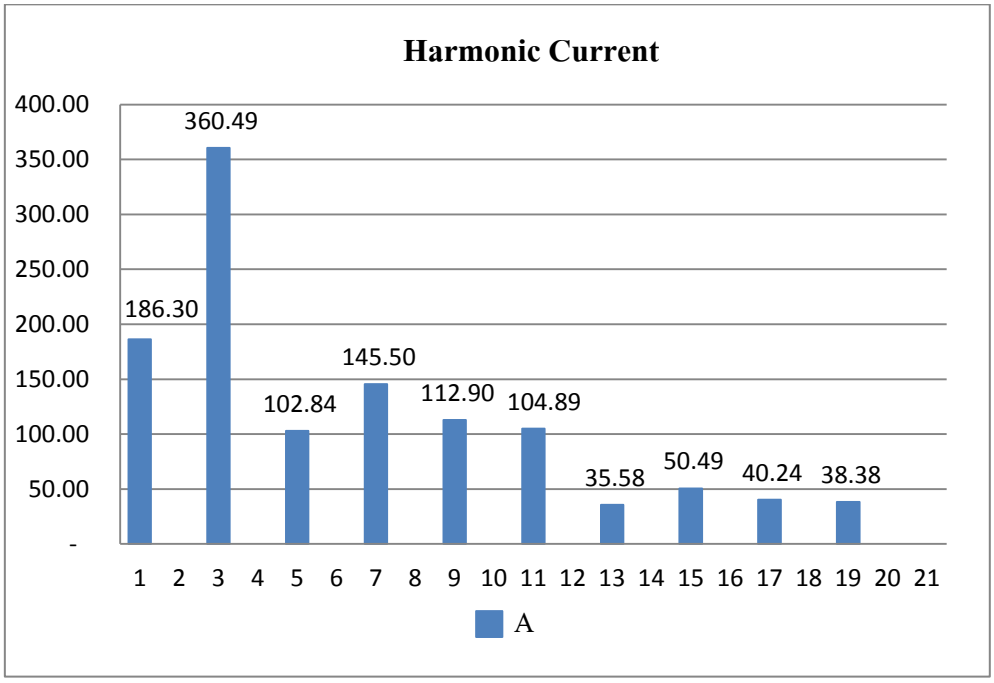
จากผลการวัดที่เครื่องบันทึกได้ จะเห็นได้ว่าช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณ THD มากที่สุดที่ 235.41% สันนิษฐานได้ว่าเวลาดังกล่าวอาจมีปริมาณฮาร์มอนิกที่เกินกว่ามาตรฐานกำหนดอยู่เป็นจำนวนมาก จากเวลาดังกล่าวจึงได้นำค่าฮาร์มอนิกวันและเวลาดังกล่าวมาแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณฮาร์มอนิก

อันดับ	Current	%Harmonic
1	186.30	100
2		
3	360.49	193.5
4		
5	102.84	55.2
6		
7	145.50	78.1
8		
9	112.90	60.6
10		
11	104.89	56.3
12		
13	35.58	19.1
14		
15	50.49	27.1
16		
17	40.24	21.6
18		
19	38.38	20.6
20		
21	42.66	22.9
TDD		141.53



ภาพที่ 4.5 ผลการวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิก



ภาพที่ 4.6 ผลการวัดกระแสฮาร์มอนิก

4.6 การคำนวณหาขนาดตัวกรองแบบ Tuned Filter

การคำนวณเพื่อหาขนาดตัวกรองแบบ Tuned Filter มีดังนี้

4.6.1 เลือกความถี่ที่ต้องการกรอง

จากการคำนวณที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าค่าคำนวณที่ทำให้เกิดอันดับเรโซแนนซ์เกิดที่คาปาซิเตอร์ตำแหน่งใดบ้าง แต่ตัวกรองที่จะกรองความถี่นั้นจะกรองได้ไม่สูงนักเพราะอันดับที่มีค่าสูงกว่าอันดับที่ 5 ($250H_Z$) จะทำให้เกิดสภาวะการขยายแรงดันและกระแส โดยการเลือกความถี่นั้นจะต้องเลือกความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ที่ต้องการกรองเพียงเล็กน้อย เพื่อเป็นการเผื่อความผิดพลาดที่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพิแดนซ์ของระบบ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่นำมาเป็นวงจรกรอง ซึ่งจะทำให้ความถี่ที่ต้องการมีความเปลี่ยนแปลงโดยจะเลือกกรองที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ดังนั้นควรกำหนดอันดับฮาร์มอนิกที่ 4.7

4.6.2 คำนวณหาแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

$$V_C = \frac{n^2}{n^2 - 1} \times V_H = \frac{4.7^2}{4.7^2 - 1} \times 33\,\text{kV} = 34.56\ \text{kV}$$

$$\frac{34.56}{\sqrt{3}} = 19.9\ \text{kV}$$

ดังนั้นเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดพิกัดแรงดัน 21.6 kV หรือ $21.6 \times \sqrt{3} = 37.4\ \text{kV}$

4.6.3 คำนวณหาค่ากำลังรีแอคทีฟ

$$\frac{1}{n^2-1}\times \text{kVAR} = \frac{1}{4.7^2-1}\times 2100 = 100\ \text{kVAR}$$

กำลังรีแอคทีฟรวม 2100 + 100 = 2200 kVAR ดังนั้นค่ากำลังรีแอคทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุควรมีค่าเท่ากับ

$$\left(\frac{37.4}{34.56}\right)^2 \times 2200 = 2576\ \text{kVAR}$$

จากการคำนวณที่ผ่านมาเลือกตัวเก็บประจุที่มีค่าพิกัด 2.6 MVAC, 37.4 kV

4.6.4 คำนวณหาค่ารีแอคแตนซ์ของตัวแหนี่ยวนำ

หาค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

$$X_{cap} = \frac{(kV_{LL})^2}{MVAC} = \frac{37.4^2}{2.6} = 538\ \Omega$$

หาค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ

$$X_L = \frac{X_{cap}}{n^2} = \frac{538}{4.7^2} = 24.35\ \Omega$$

4.7 การคำนวณหาขนาดตัวกรองแบบ Detune Filter

การคำนวณเพื่อหาขนาดตัวกรองแบบ Detune Filter มีดังนี้

4.7.1 รายละเอียดในการคำนวณตัวกรอง

กำหนดข้อมูลพื้นฐาน

- $f_1 = 50\ H_Z$
- $V_L = 3000$ V
- Capacitor = 2100 kVAR
- $X_C = 4.285\ \Omega$
- $\%X_L = 7\%$

กำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการออกแบบจากตารางที่ 2.4

- $\Delta V_L = 10\%$
- $V_3 = 0.5\%$
- $V_5 = 6\%$
- $V_7 = 5\%$
- $V_{11} = 3.5\%$
- $V_{13} = 3\%$

4.7.2 การคำนวณเพื่อออกแบบตัวกรอง

โดยกำหนดขนาดที่กำหนดของตัวเก็บประจุและตัวรีแอคเตอร์ที่เลือกใช้มีรายละเอียดดังนี้

$$I_{Crated} = \frac{2100\,kVAR}{\sqrt{3}\times 3000} = 404.145\ A$$

$$X_C - 0.07X_C = \left(\frac{3000}{\sqrt{3}}\right)\times\left(\frac{1}{404.145}\right) = 12.85\ \Omega$$

$$X_C = 4.285\ \Omega$$

$$X_L = 0.07X_C = 0.07\times 4.285 = 0.3\ \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi\times f_1} = \frac{0.3}{2\pi\times 50} = 0.954\ mH$$

$$I_{linear} = 1.9\times 404.145 = 767.87\ A$$

$$I_1 = \left(1.1\times\frac{3000}{\sqrt{3}}\right)\times\left(\frac{1}{4.285-0.3}\right) = 476.31\ A$$

$$I_3 = \left(0.005\times\frac{3000}{\sqrt{3}}\right)\times\left(\frac{1}{\frac{4.285}{3}-(0.3\times 3)}\right) = 16.39\ A$$

$$I_5 = \left(0.06\times\frac{3000}{\sqrt{3}}\right)\times\left(\frac{1}{\frac{4.285}{5}-(0.3\times 5)}\right) = 161.60\ A$$

$$I_7 = \left(0.05 \times \frac{3000}{\sqrt{3}}\right) \times \left(\frac{1}{\frac{4.285}{7} - (0.3 \times 7)}\right) = 58.19 \text{ A}$$

$$I_{11} = \left(0.035 \times \frac{3000}{\sqrt{3}}\right) \times \left(\frac{1}{\frac{4.285}{11} - (0.3 \times 11)}\right) = 20.79 \text{ A}$$

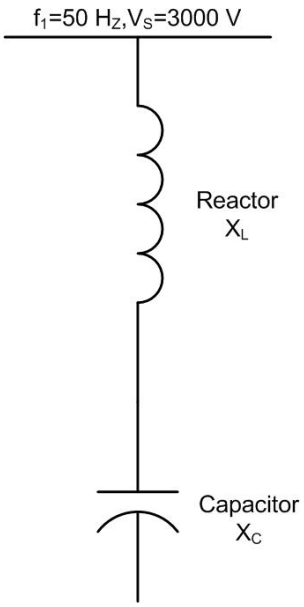
$$I_{13} = \left(0.03 \times \frac{3000}{\sqrt{3}}\right) \times \left(\frac{1}{\frac{4.285}{13} - (0.3 \times 13)}\right) = 14.54 \text{ A}$$

$$I_{rms} = I_{th} = \sqrt{476.31^2 + 16.39^2 + 161.60^2 + 58.19^2 + 20.79^2 + 14.54^2}$$

$$= 507.23 \text{ A}$$

$$V_C = \frac{3000}{1 - 0.07} = 3225 \text{ V}$$

กำหนดขนาดแรงดันของตัวเก็บประจุที่แรงดัน V_C = 3225 V (ควรเผื่อ V_C ประมาณ 10% จากค่าที่คำนวณการออกแบบ) ที่กระแส I_{th} = 507.23 A (I_{th} ให้มีค่า 507.23 A คงที่) และขนาดรีแอคเตอร์ L= 0.954 mH



ภาพที่ 4.7 การต่อวงจรกรองแบบ Passive Filter