บทที่ 3 วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลองและออกแบบการวิเคราะห์ปัญหาเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอันเนื่องมากจากการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุแรงดันต่ำร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า การวิเคราะห์ปัญหาเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะนำค่ากระแสของฮาร์มอนิกแต่ละลำดับมาจำลองด้วยซอฟแวร์ Orcad PSpice และทำการพล๊อตกราฟอิมพีแดนซ์หาค่าความถี่เรโซแนนซ์จากนั้นนำผลที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลจริงที่ได้จากการตรวจวัด โดยจะทำการทดลอง 4 กรณี เพื่อยืนยันความถูกต้องของการจำลอง

3.1 วิธีการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่

3.1.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ในแต่ละความถี่

$$|Z_h| = \frac{1}{|Y|} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}}\right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}}\right)^2}} \qquad (3.1)$$

เมื่อ Z_h คือ ค่าอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิก (Ω)

Y คือ ค่าความนำไฟฟ้า (mho)

R_{Load} คือ ค่าความต้านทานของหม้อแปลงขณะโหลดเต็มพิกัด (Ω)

C_{total} คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ทั้งหมดของชุดตัวเก็บประจุในวงจรขนาน (F)

L_{tx} คือ ค่าอินดักแตนซ์ของหม้อแปลง (H)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (Rad/S.)

3.1.2 วิธีการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ในแต่ละความถี่

การกำหนดค่าในสมการที่ (3.1) โดยจะมีค่า C_{total} และค่า L_{tx} สามารถหาได้จากค่าพิกัดของหม้อแปลงและตัวเก็บประจุดังแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงพิกัดต่าง ๆ

Rating Power (kVA)	Impedance Voltage (Z_{tx})		Reactance Voltage (X_L)		Resistance Voltage (R)	
	(mΩ)	%	(mΩ)	%	(mΩ)	%
100	64.00	4	59.00	3.69	24.80	1.55
160	40.00	4	37.79	3.78	13.13	1.31
250	25.60	4	24.46	3.82	7.55	1.18
400	16.00	4	15.32	3.83	4.60	1.15
630	10.16	4	9.81	3.86	2.62	1.03
800	12.00	4	11.68	5.84	2.75	1.38
1000	9.60	6	9.35	5.85	2.16	1.35
1500	6.40	6	6.26	5.87	1.34	1.26
2000	4.80	6	4.71	5.89	0.91	1.14
2500	3.84	6	3.78	5.90	0.69	1.07
3000	3.73	7	3.69	6.92	0.55	1.03

ตารางที่ 3.2 พิกัดกิโลวาร์ของตัวเก็บประจุที่ใช้ชดเชยตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

Compensate rating (kVAR)	Capacitor rating			
	400 V		440 V	
	Actual at 400 V	C_N (μF)	Actual at 400 V	C_N (μF)
10	10	3×66.3	8.26	3×54.8
12.5	12.5	3×82.9	10.33	3×68.5
20	20	3×132.6	16.53	3×109.6
25	25	3×165.8	20.66	3×137.0
30	30	3×198.9	24.79	3×164.4
40	40	3×265.3	33.06	3×219.2
50	50	3×331.6	41.32	3×274.0

ในส่วนของค่าความต้านทานโหลด (R_{Load}) หาได้จากค่าแรงดันทางด้านทุติยภูมิและค่าพิกัดโวลต์แอมป์ของหม้อแปลงตามสมการที่ (3.3)

$$R_{Load} = \sqrt{3} \times \frac{V^2}{VA} \tag{3.3}$$

เมื่อ V คือ แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (V)

VA คือ พิกัดหม้อแปลง (VA)

ในการเลือกใช้วิธีการหาค่า R_{Load} โดยให้เท่ากับวิธีการหาค่า R_{AC} ซึ่งค่า R_{AC} คือ ค่าความต้านทานของหม้อแปลงในขณะที่โหลดเต็มพิกัด เนื่องจากในความเป็นจริงนั้นการหา R_{Load} ของโหลดทั้งหมดภายในระบบในขณะนั้นทำได้ยาก จึงเลือกใช้ค่าความต้านทานของหม้อแปลงในขณะที่โหลดเต็มพิกัดมาใช้ในการประมาณค่า

3.1.3 ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกส์แต่ละลำดับ

การคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกแต่ละละดับจะคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง และชุดตัวเก็บประจุ โดยจะทำการคำนวณอิมพีแดนซ์ทั้งมด 4 ตัวอย่างดังนี้

1. ตัวอย่างที่ 1 ใช้หม้อแปลงพิกัด 400 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 100 กิโลวาร์

หม้อแปลงที่ใช้มีพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ 400 โวลต์ สามารถหาค่าความต้านทานขณะโหลดเต็มพิกัดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_{Load} &= \sqrt{3} \times \frac{400^2}{400000} \\ &= 0.69\Omega \end{aligned}$$

หาค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิจากค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลง 400 กิโลโวลต์แอมป์จากตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\begin{aligned} L &= \frac{X_L}{2\pi f} \\ &= \frac{15.32 \times 10^{-3}}{2\pi \times 50} \\ &= 0.04875\, mH \end{aligned} \tag{3.4}$$

จากพิกัดหม้อแปลงและตัวเก็บประจุจะได้พารามิเตอร์ดังนี้

R_{Load} = 0.867 Ω

L_{tx} = 0.04875 mH

C_{total} = 2 x 3 x 274 μF = 1,664 μF

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปคำนวณเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของฮาร์มอนิก โดยเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังสมการที่ (3.1) ซึ่งจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ลำดับฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงพิกัด 400 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุขนาด 100 กิโลวาร์ดังตารางที่ 3.3

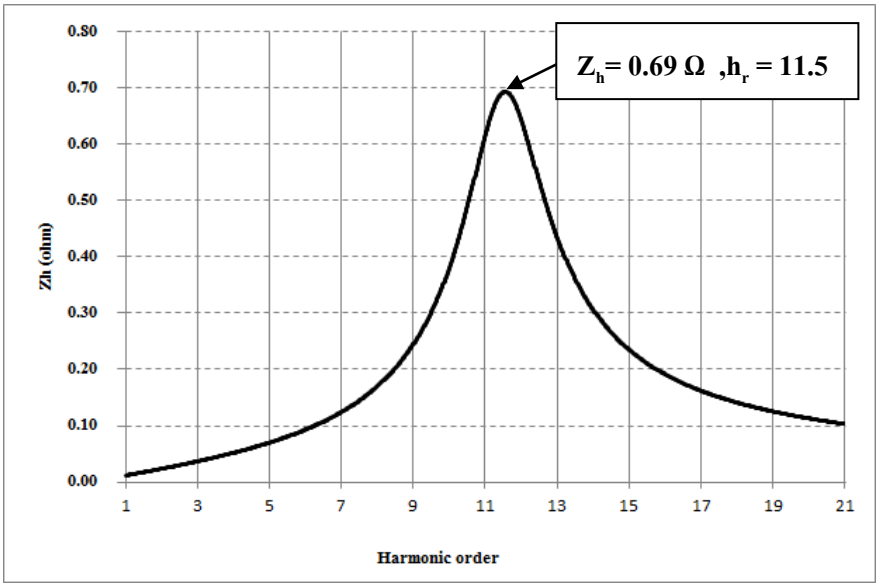
ตารางที่ 3.3 ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลำดับที่ได้จากการคำนวณของหม้อแปลง 400 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุ 100 กิโลวาร์

ลำดับฮาร์มอนิกส์	1	3	5	7	9	11	13
ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)	0.0115	0.0367	0.0699	0.1244	0.2451	0.6172	0.4334

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แทนในตารางในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของฮาร์มอนิกส์ (เปลี่ยนแปลงไปตาม ω ในสมการที่ 3.5)

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}}\right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}}\right)^2}} \qquad (3.5)$$

ในโปรแกรม Microsoft Excel เราจะให้ค่า ω เปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความถี่ขึ้นที่ละ 1 เฮิรตซ์ เพื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกส์ที่ได้มาพล็อตเป็นกราฟของค่าอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ที่เปลี่ยนไป และจะได้นำกราฟนั้นมาใช้ในการประเมินถึงโอกาสที่จะเกิดการเรโซแนนซ์ของระบบที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการพล็อตกราฟจะแสดงดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงพิกัด 400 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 100 กิโลวาร์

2. ตัวอย่างที่ 2 ใช้หม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์

หม้อแปลงที่ใช้มีพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ 400 โวลต์ สามารถหาค่าความต้านทานขณะโหลดเต็มพิกัดได้ดังนี้

$$R_{Load} = \sqrt{3} \times \frac{400^2}{3000000}$$
$$= 0.092\,\Omega$$

หาค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิจากค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ จากตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงได้ดังสมการที่ (3.4)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$
$$= \frac{6.92 \times 10^{-3}}{2\pi \times 50}$$
$$= 0.022\,mH$$

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์

พิกัดตัวเก็บประจุ (kVAR)	พิกัดแรงดัน (V)	ขนาดความจุไฟฟ้า (μF)
900	440	14,797

จากพิกัดหม้อแปลงในตารางที่ 3.1 และตัวเก็บประจุในตารางที่ 3.4 จะได้พารามิเตอร์ดังนี้

R_{Load} = 0.092 Ω

L_{tx} = 0.022 mH

C_{total} = 14,797 μF

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปคำนวณเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของฮาร์มอนิก โดยเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังสมการที่ (3.1) ซึ่งจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ลำดับฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุขนาด 900 กิโลวาร์ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลำดับที่ได้จากการคำนวณของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุ 900 กิโลวาร์

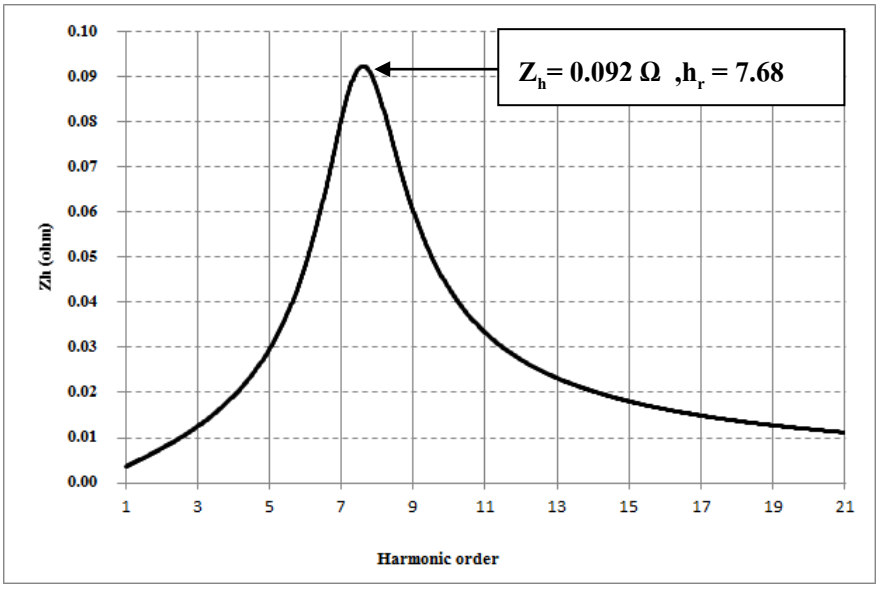
ลำดับฮาร์มอนิกส์	1	3	5	7	9	11	13
ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)	0.0036	0.0125	0.029	0.0806	0.06	0.033	0.023

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แทนในตารางในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของฮาร์มอนิกส์ (เปลี่ยนแปลงไปตาม ω ในสมการที่ 3.5)

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}}\right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}}\right)^2}}$$

ในโปรแกรม Microsoft Excel เราจะให้ค่า ω เปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความถี่ขึ้นที่ละ 1 เฮิรตซ์ เพื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกที่ได้มาพล็อตเป็นกราฟของค่าอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ที่

เปลี่ยนไป และจะได้นำกราฟนั้นมาใช้ในการประเมินถึงโอกาสที่จะเกิดการเรโซแนนซ์ของระบบที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการพล็อตกราฟจะแสดงดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์

3. ตัวอย่างที่ 3 ใช้หม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์

หม้อแปลงที่ใช้มีพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ 400 โวลต์ สามารถหาค่าความต้านทานขณะโหลดเต็มพิกัดได้ดังนี้

$$R_{Load} = \sqrt{3} \times \frac{400^2}{3000000}$$
$$= 0.092\,\Omega$$

หาค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิจากค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์จากตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงได้ดังสมการที่ (3.4)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$
$$= \frac{6.92 \times 10^{-3}}{2\pi \times 50}$$
$$= 0.022\,mH$$

ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์

พิกัดตัวเก็บประจุ (kVAR)	พิกัดแรงดัน (V)	ขนาดความจุไฟฟ้า (μF)
1,000	440	16,440

จากพิกัดหม้อแปลงในตารางที่ 3.1 และตัวเก็บประจุในตารางที่ 3.6 จะได้พารามิเตอร์ดังนี้

R_{Load} = 0.092 Ω

L_{tx} = 0.022 mH

C_{total} = 16,640 μF

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปคำนวณเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของฮาร์มอนิก โดยเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังสมการที่ (3.1) ซึ่งจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ลำดับฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุขนาด 1,000 กิโลวาร์ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลำดับที่ได้จากการคำนวณของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุ 1,000 กิโลวาร์

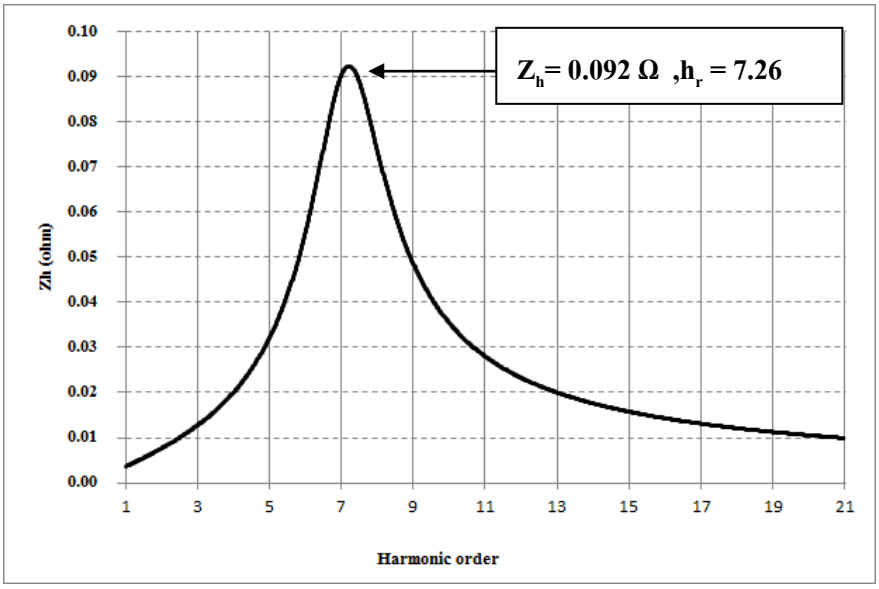
ลำดับฮาร์มอนิกส์	1	3	5	7	9	11	13
ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)	0.0036	0.0127	0.0321	0.905	0.0484	0.0279	0.0199

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แทนในตารางในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของฮาร์มอนิกส์ (เปลี่ยนแปลงไปตาม ω ในสมการที่ 3.5)

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}}\right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}}\right)^2}}$$

ในโปรแกรม Microsoft Excel เราจะให้ค่า ω เปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความถี่ขึ้นที่ละ 1 เฮิรตซ์ เพื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกส์ที่ได้มาพล็อตเป็นกราฟของค่าอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองต่อความถี่

ที่เปลี่ยนไป และจะได้นำกราฟนั้นมาใช้ในการประเมินถึงโอกาสที่จะเกิดการเรโซแนนซ์ของระบบที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการพล็อตกราฟจะแสดงดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์

4. ตัวอย่างที่ 4 ใช้หม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์

หม้อแปลงที่ใช้มีพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ 400 โวลต์ สามารถหาค่าความต้านทานขณะโหลดเต็มพิกัดได้ดังนี้

$$R_{Load} = \sqrt{3} \times \frac{400^2}{3000000}$$
$$= 0.092\,\Omega$$

หาค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิจากค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์จากตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงได้ดังสมการที่ (3.4)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$
$$= \frac{6.92 \times 10^{-3}}{2\pi \times 50}$$
$$= 0.022\,mH$$

ตารางที่ 3.8 ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์

พิกัดตัวเก็บประจุ (kVAR)	พิกัดแรงดัน (V)	ขนาดความจุไฟฟ้า (μF)
1,250	440	20,552

จากพิกัดหม้อแปลงในตารางที่ 3.1 และตัวเก็บประจุในตารางที่ 3.8 จะได้พารามิเตอร์ดังนี้

R_{Load} = 0.092 Ω

L_{tx} = 0.022 mH

C_{total} = 20,552 μF

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปคำนวณเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของฮาร์มอนิก โดยเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังสมการที่ (3.1) ซึ่งจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ลำดับฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุขนาด 1,250 กิโลวาร์ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลำดับที่ได้จากการคำนวณของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุ 1,250 กิโลวาร์

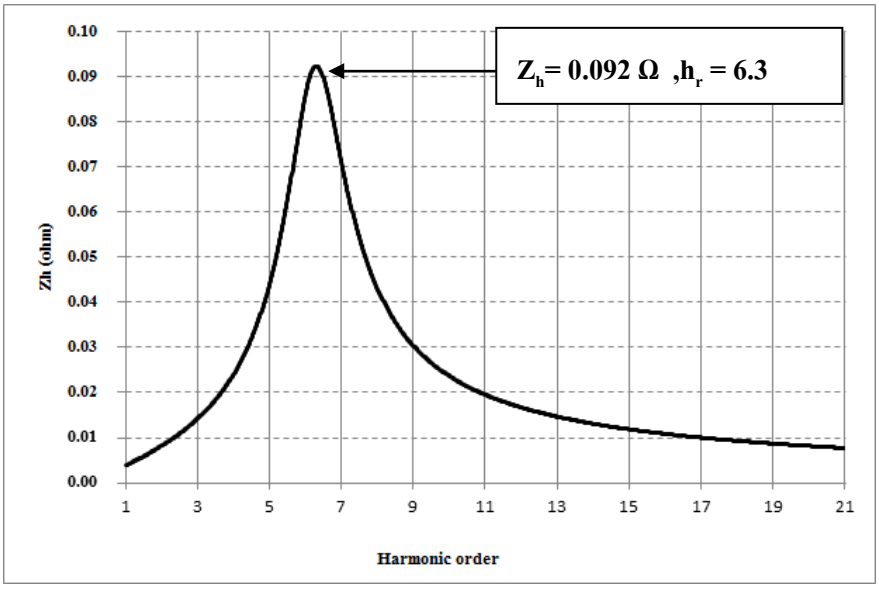
ลำดับฮาร์มอนิกส์	1	3	5	7	9	11	13
ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)	0.0038	0.0142	0.0441	0.709	0.0303	0.0195	0.0146

นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แทนในตารางในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของฮาร์มอนิกส์ (เปลี่ยนแปลงไปตาม ω ในสมการที่ 3.5)

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}}\right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}}\right)^2}}$$

ในโปรแกรม Microsoft Excel เราจะให้ค่า ω เปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความถี่ขึ้นที่ละ 1 เฮิรตซ์ เพื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกส์ที่ได้มาพล็อตเป็นกราฟของค่าอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองต่อความถี่

ที่เปลี่ยนไป และจะได้นำกราฟนั้นมาใช้ในการประเมินถึงโอกาสที่จะเกิดการเรโซแนนซ์ของระบบที่ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการพล็อตกราฟจะแสดงดังในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์

3.2 วิธีการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์จากพิกัดหม้อแปลงและพิกัดตัวเก็บประจุ

การหาลำดับของความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงและตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากค่าพิกัดกิโลโวลต์แอมป์ของหม้อแปลง ค่าเปอร์เซ็นอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง และค่าพิกัดกิโลวาร์ของชุดตัวเก็บประจุดังแสดงในสมการที่ (3.6) [8]

$$h_r \approx \sqrt{\frac{kVA_{tx} \times 100}{kVAR_{cap} \times Z_{tx}(\%)}} \tag{3.6}$$

เมื่อ h_r คือ ลำดับของความถี่เรโซแนนซ์

kVA_{tx} คือ ค่ากำลังงานที่ปรากฏที่พิกัดของหม้อแปลง (kVA)

$kVAR_{cap}$ คือ ค่ากำลังงานรีแอคตีฟที่พิกัดของชุดตัวเก็บประจุ (kVAR)

$X_{tx}(\%)$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์รีแอคแตนซ์ของหม้อแปลง

3.2.1 ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาลำดับของความถี่เรโซแนนซ์

การคำนวณหาลำดับของความถี่เรโซแนนซ์จะคำนวณพิกัดของหม้อแปลง พิกัดชุดตัวเก็บประจุ และค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง โดยจะทำการคำนวณอิมพีแดนซ์ทั้งหมด 4 ตัวอย่างดังนี้

1. ตัวอย่างที่ 1 ใช้หม้อแปลงพิกัด 400 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 100 กิโลวาร์

เมื่อใช้หม้อแปลงพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ 400 โวลต์ ขนาดพิกัด 400 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 100 กิโลวาร์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 440 โวลต์ เมื่อนำตัวเก็บประจุพิกัด 100 กิโลวาร์ 440 โวลต์ มาใช้งานที่แรงดัน 400 โวลต์ พิกัดตัวเก็บประจุจะลดลงตามสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$\begin{aligned} VAR &= 2\pi f V^2 C \\ &= 2\pi \times 50 \times 400^2 \times 1,664 \times 10^{-6} \\ &= 83.64\ kVAR \end{aligned} \tag{3.7}$$

จากตารางพิกัดหม้อแปลงและตัวเก็บประจุสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

เมื่อ kVA_{tx} มีค่าเท่ากับ 400 กิโลโวลต์แอมป์

$kVAR_{cap}$ มีค่าเท่ากับ 83.64 กิโลวาร์

$Z_{tx}(\%)$ มีค่าเท่ากับ 4

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงและตัวเก็บประจุสามารถหาค่าลำดับของความถี่เรโซแนนซ์โดยการแทนค่าลงในสมการที่ (3.6) จะได้ค่าดังนี้

$$h_r \approx \sqrt{\frac{kVA_{tx} \times 100}{kVAR_{cap} \times Z_{tx}(\%)}}$$

$$h_r \approx \sqrt{\frac{400 \times 100}{83.64 \times 4}}$$

$$h_r \approx 10.93$$

การคำนวณความถี่เรโซแนนซ์จากพิกัดหม้อแปลงและพิกัดตัวเก็บประจุพบว่าหม้อแปลง 400 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุ 100 กิโลวาร์ จะเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 10.93 หรือเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 546.7 เฮิรตซ์

2. ตัวอย่างที่ 2 ใช้หม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์

เมื่อใช้หม้อแปลงพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ 400 โวลต์ ขนาดพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 440 โวลต์ เมื่อนำตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์ 440 โวลต์ มาใช้งานที่แรงดัน 400 โวลต์ พิกัดตัวเก็บประจุจะลดลงตามสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$\begin{aligned} VAR &= 2\pi fV^2C \\ &= 2\pi \times 50 \times 400^2 \times 14,797 \times 10^{-6} \\ &= 743.7\ kVAR \end{aligned}$$

จากตารางพิกัดหม้อแปลงและตัวเก็บประจุสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

เมื่อ kVA_{tx} มีค่าเท่ากับ 3,000 กิโลโวลต์แอมป์

$kVAR_{cap}$ มีค่าเท่ากับ 743.7 กิโลวาร์

$Z_{tx}(\%)$ มีค่าเท่ากับ 7

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงและตัวเก็บประจุสามารถหาค่าลำดับของความถี่เรโซแนนซ์โดยการแทนค่าลงในสมการที่ (3.6) จะได้ค่าดังนี้

$$h_r \approx \sqrt{\frac{kVA_{tx} \times 100}{kVAR_{cap} \times Z_{tx}(\%)}}$$

$$h_r \approx \sqrt{\frac{3,000 \times 100}{743.7 \times 4}}$$

$$h_r \approx 7.59$$

การคำนวณความถี่เรโซแนนซ์จากพิกัดหม้อแปลงและพิกัดตัวเก็บประจุพบว่าหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุ 900 กิโลวาร์ จะเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7.59 หรือเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 379.5 เฮิรตซ์

3. ตัวอย่างที่ 3 ใช้หม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์

เมื่อใช้หม้อแปลงพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ 400 โวลต์ ขนาดพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 440 โวลต์ เมื่อนำตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์ 440 โวลต์ มาใช้งานที่แรงดัน 400 โวลต์ พิกัดตัวเก็บประจุจะลดลงตามสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$\begin{aligned} VAR &= 2\pi fV^2C \\ &= 2\pi \times 50 \times 400^2 \times 16,441 \times 10^{-6} \\ &= 826.4\ kVAR \end{aligned}$$

จากตารางพิกัดหม้อแปลงและตัวเก็บประจุสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

เมื่อ kVA_{tx} มีค่าเท่ากับ 3,000 กิโลโวลต์แอมป์

$kVAR_{cap}$ มีค่าเท่ากับ 826.4 กิโลวาร์

$Z_{tx}(\%)$ มีค่าเท่ากับ 7

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงและตัวเก็บประจุสามารถหาค่าลำดับของความถี่เรโซแนนซ์โดยการแทนค่าลงในสมการที่ (3.6) จะได้ค่าดังนี้

$$h_r \approx \sqrt{\frac{kVA_{tx} \times 100}{kVAR_{cap} \times Z_{tx}(\%)}}$$

$$h_r \approx \sqrt{\frac{3,000 \times 100}{826.4 \times 7}}$$

$$h_r \approx 7.2$$

การคำนวณความถี่เรโซแนนซ์จากพิกัดหม้อแปลงและพิกัดตัวเก็บประจุพบว่าหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุ 1,000 กิโลวาร์ จะเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7.2 หรือเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 360 เฮิรตซ์

4. ตัวอย่างที่ 4 ใช้หม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์

เมื่อใช้หม้อแปลงพิกัดแรงดันด้านทุติยภูมิ 400 โวลต์ ขนาดพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 440 โวลต์ เมื่อนำตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์ 440 โวลต์ มาใช้งานที่แรงดัน 400 โวลต์ พิกัดตัวเก็บประจุจะลดลงตามสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$\begin{aligned} VAR &= 2\pi fV^2C \\ &= 2\pi \times 50 \times 400^2 \times 20,552 \times 10^{-6} \\ &= 1,033\ kVAR \end{aligned}$$

จากตารางพิกัดหม้อแปลงและตัวเก็บประจุสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

เมื่อ kVA_{tx} มีค่าเท่ากับ 3,000 กิโลโวลต์แอมป์

$kVAR_{cap}$ มีค่าเท่ากับ 1,033 กิโลวาร์

$Z_{tx}(\%)$ มีค่าเท่ากับ 7

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงและตัวเก็บประจุสามารถหาค่าลำดับของความถี่เรโซแนนซ์โดยการแทนค่าลงในสมการที่ (3.6) จะได้ค่าดังนี้

$$h_r \approx \sqrt{\frac{kVA_{tx} \times 100}{kVAR_{cap} \times Z_{tx}(\%)}}$$

$$h_r \approx \sqrt{\frac{3,000 \times 100}{1,033 \times 7}}$$

$$h_r \approx 6.44$$

การคำนวณความถี่เรโซแนนซ์จากพิกัดหม้อแปลงและพิกัดตัวเก็บประจุพบว่าหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุ 1,250 กิโลวาร์ จะเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 6.44 หรือเกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 322 เฮิรตซ์

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลำดับของฮาร์มอนิก

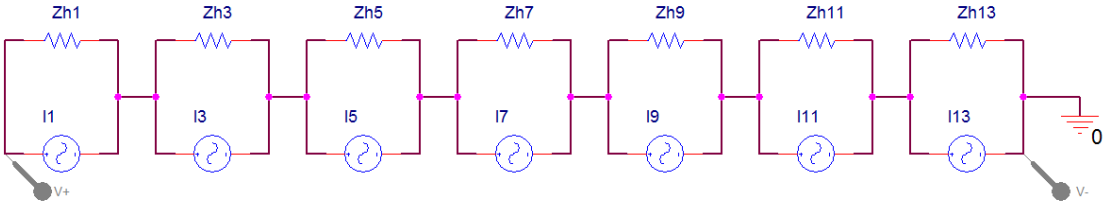
นำข้อมูลจากผลการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกส์แต่ละลำดับในระบบกับความถี่เรโซแนนซ์ไปออกแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Orcad PSpice เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าและลักษณะรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละลำดับที่ได้ทำการตรวจวัดจริงมาใช้เพื่อตรวจสอบว่าลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่จำลองจากค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกส์แต่ละลำดับในระบบที่คำนวณออกมาได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกันกับรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปตรวจวัดจริงหรือไม่ เพื่อให้เกิดความสอดคล้องกันระหว่างการวิเคราะห์ในภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ โดยจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลตรวจวัดจริง

3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในตรวจวัด

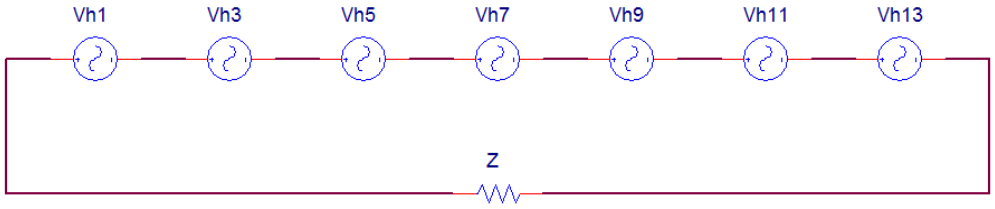
1. Power Analyzer ยี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น CA8334
2. Power Analyzer ยี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น CA8335

3.3.1 การจำลองรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใน

การจำลองรูปคลื่นแรงดันจะใช้โปรแกรม Orcad PSpice ช่วยในการจำลองโดยจะทำการจำลองแหล่งจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองจะแสดงในรูปที่ 3.5



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม
(ก) วงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกจากกระแสและค่าอิมพีแดนซ์
(ข) วงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 3.5 เป็นวงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองแหล่งจ่ายแรงดันจากกระแสฮาร์มอนิกของแต่ละลำดับที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอิมพีแดนซ์ของความถี่ลำดับต่าง ๆ ที่ได้จากคำนวณ เมื่อนำวงจรไปจำลองด้วยโปรแกรมแล้ว จะวัดรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่ายกระแสทั้งหมดแล้วนำรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจำลองไปเปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการตรวจวัด ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณถูกต้องรูปคลื่นที่จำลองได้จำมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นที่ได้จากการตรวจวัด โดยจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการตรวดวัดทั้งหมด 4 ตัวอย่างดังนี้

1. ตัวอย่างที่ 1 ใช้หม้อแปลงพิกัด 400 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 100 กิโลวาร์

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์จากสมการโดยผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงในตารางที่ 3.10

$$|Z_h| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}}\right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}}\right)^2}}$$

เมื่อ R_{Load} มีค่าเท่ากับ 0.867 Ω

L_{tx} มีค่าเท่ากับ 0.04875 mH

C_{total} มีค่าเท่ากับ 1,664 μF

ตารางที่ 3.10 ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลำดับที่ได้จากการคำนวณของหม้อแปลง 400 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุ 100 กิโลโวลต์แอมป์

ลำดับฮาร์มอนิกส์	3	5	7	9	11	13
ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)	0.0367	0.0699	0.1244	0.2451	0.6172	0.4334

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ซึ่งคำนวณได้จากค่าแรงดันสูงสุดและกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ที่ได้จากการวัดดังแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ของหม้อแปลง 400 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุ 100 กิโลโวลต์แอมป์

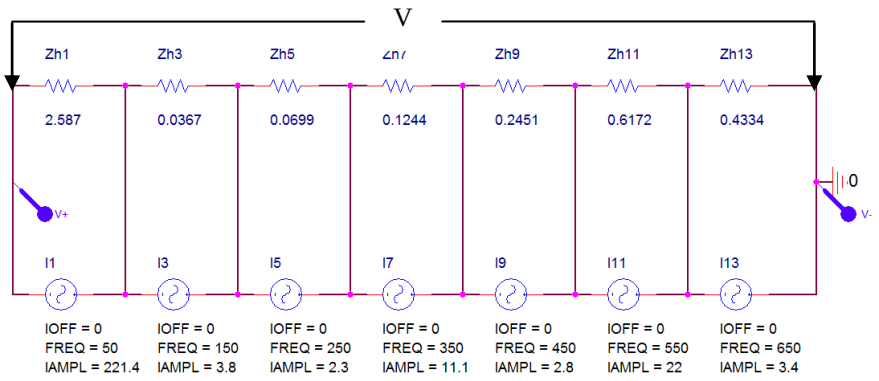
แรงดันสูงสุดจากการตรวจวัด (V)	กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 (A)	อิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 (Ω)
572.8	221.4	2.587

วัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้ายี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น CA8335 ที่ตำแหน่งหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 3.12 ไปจำลองในโปรแกรม Orcad PSpice

ตารางที่ 3.12 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์และมุมเฟสของฮาร์มอนิกที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงพิกัด 400 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 100 กิโลวาร์

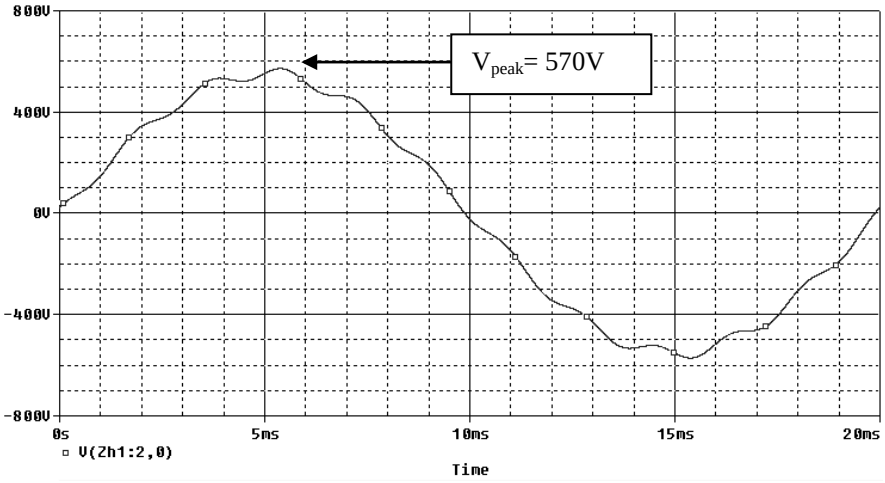
ลำดับฮาร์มอนิกส์	ค่ากระแสไฟฟ้า (A)	มุมเฟส (°)
1	221.4	0
3	3.8	-133
5	2.3	117
7	11.1	74
9	2.8	-101
11	37.7	-110
13	3.4	98

นำค่าพารามิเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณไปจำลองในโปรแกรม Orcad PSpice ดังแสดงในรูปที่ 3.6

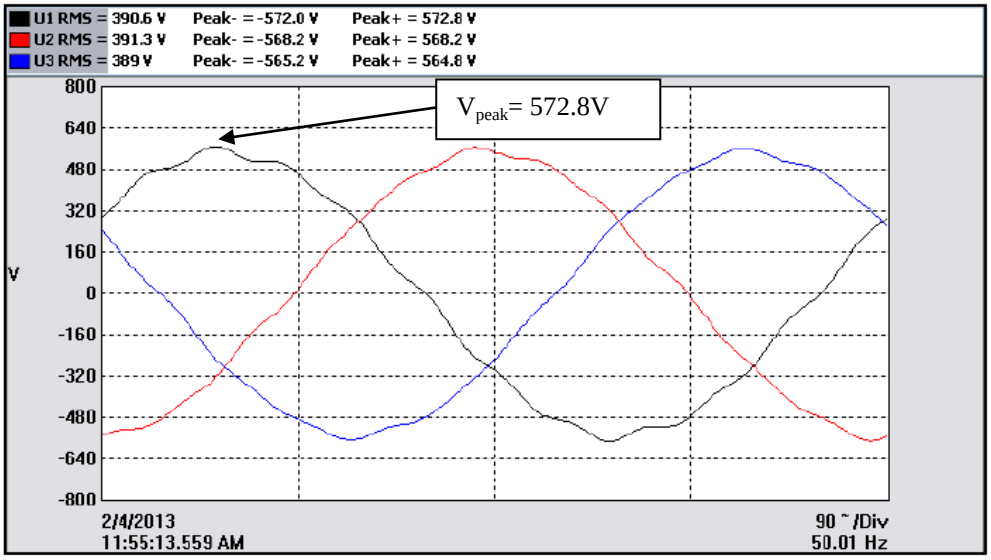


รูปที่ 3.6 วงจรที่ใช้จำลองรูปคลื่นแรงดันของหม้อแปลง 400 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุ 100 กิโลวาร์

นำรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.7 เปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 3.8

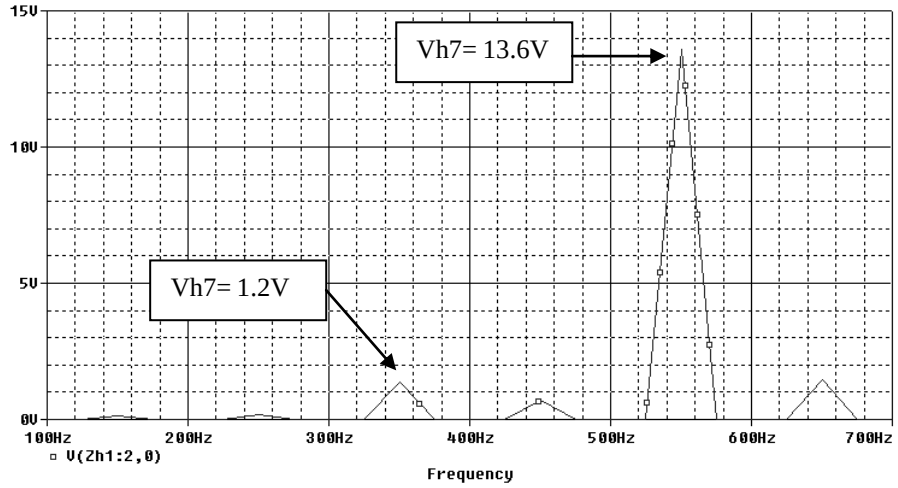


รูปที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจำลองของหม้อแปลง 400 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุ 100 กิโลวาร์

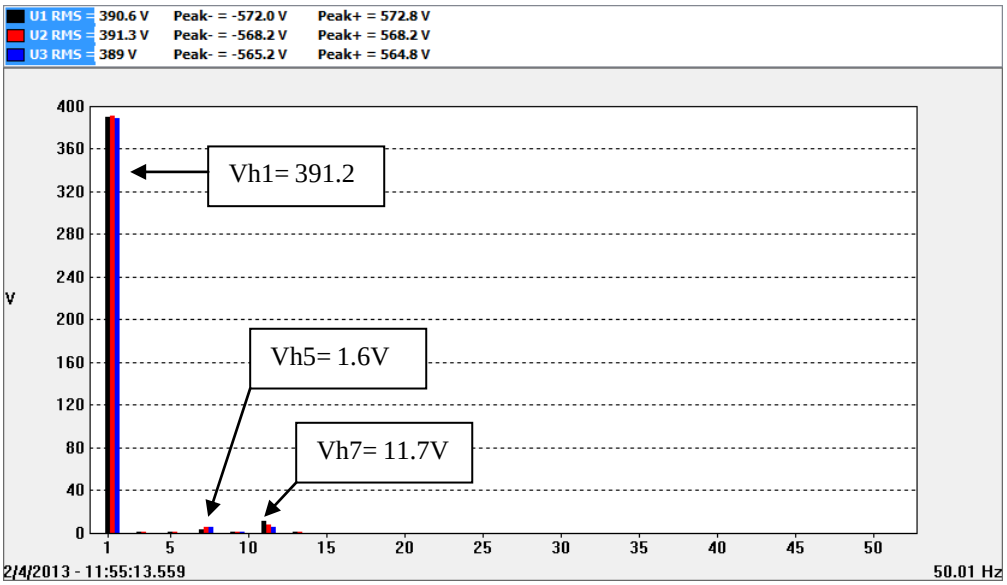


รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลง 400 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุ 100 กิโลวาร์

จากการจำลองพบว่ารูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.7 มีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยลักษณะของรูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนจากสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์



รูปที่ 3.9 สเปคตรัมแรงดันที่ได้จากการจำลองของหม้อแปลงพิกัด 400 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 100 กิโลวาร์



รูปที่ 3.10 สเปคตรัมแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดจริงของหม้อแปลงพิกัด 400 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 100 กิโลวาร์

จากผลจำลองพบว่ารูปคลื่นและสเปคตรัมของแรงดันมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 พบว่าฮาร์มอนิกของแรงดันลำดับที่ 11 มีค่าสูงกว่าลำดับอื่น ๆ

2. ตัวอย่างที่ 2 ใช้หม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์
คำนวณค่าอิมพีแดนซ์จากสมการโดยผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงในตารางที่ 3.13

$$|Z_h| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}}\right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}}\right)^2}}$$

เมื่อ R_{Load} มีค่าเท่ากับ 0.092 Ω
L_{tx} มีค่าเท่ากับ 0.022 mH
C_{total} มีค่าเท่ากับ 14,797 μF

ตารางที่ 3.13 ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลำดับที่ได้จากการคำนวณของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุ 900 กิโลโวลต์แอมป์

ลำดับฮาร์มอนิกส์	3	5	7	9	11	13
ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)	0.0125	0.029	0.0806	0.06	0.033	0.023

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ซึ่งคำนวณได้จากค่าแรงดันสูงสุดและกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ที่ได้จากการวัดดังแสดงในตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุ 900 กิโลวาร์

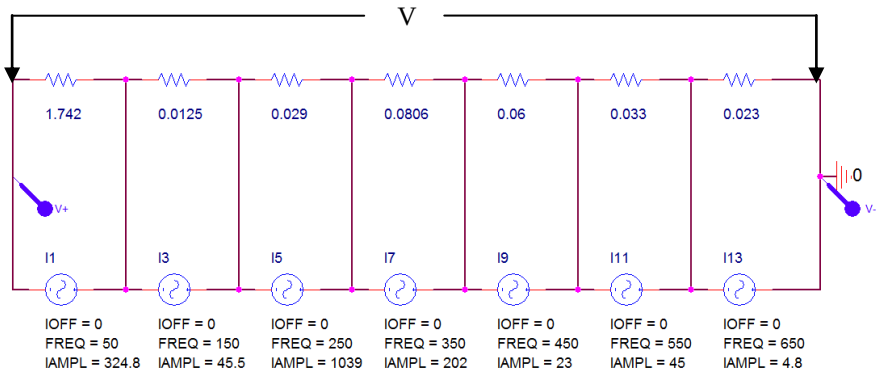
แรงดันสูงสุดจากการตรวจวัด (V)	กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 (A)	อิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 (Ω)
566	324.8	1.742

วัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้ายี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น CA8335 ที่ตำแหน่งหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 3.15 ไปจำลองในโปรแกรม Orcad PSpice

ตารางที่ 3.15 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์และมุมเฟสของฮาร์มอนิกที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์

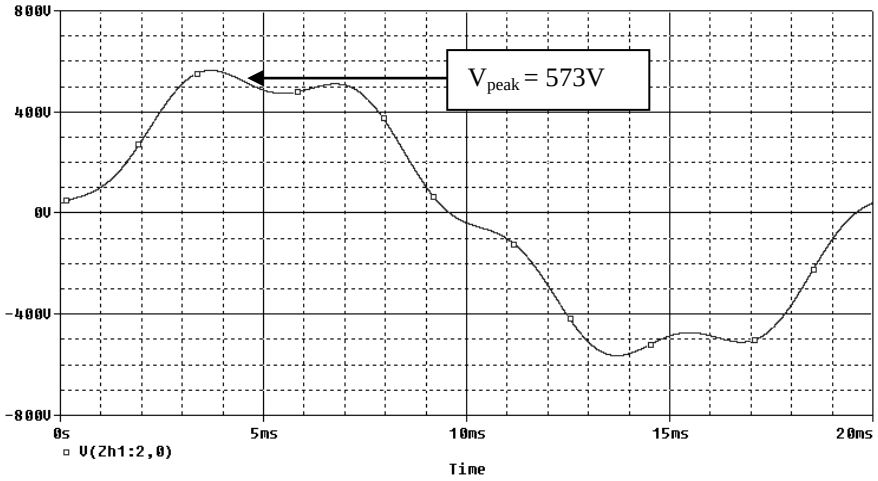
ลำดับฮาร์มอนิกส์	ค่ากระแสไฟฟ้า (A)	มุมเฟส (°)
1	324.8	0
3	45.5	138
5	1,039.0	146
7	202.0	-19
9	23.0	84
11	45.0	-120
13	4.8	107

นำค่าพารามิเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณไปจำลองในโปรแกรม Orcad Pspice ดังแสดงในรูปที่ 3.11

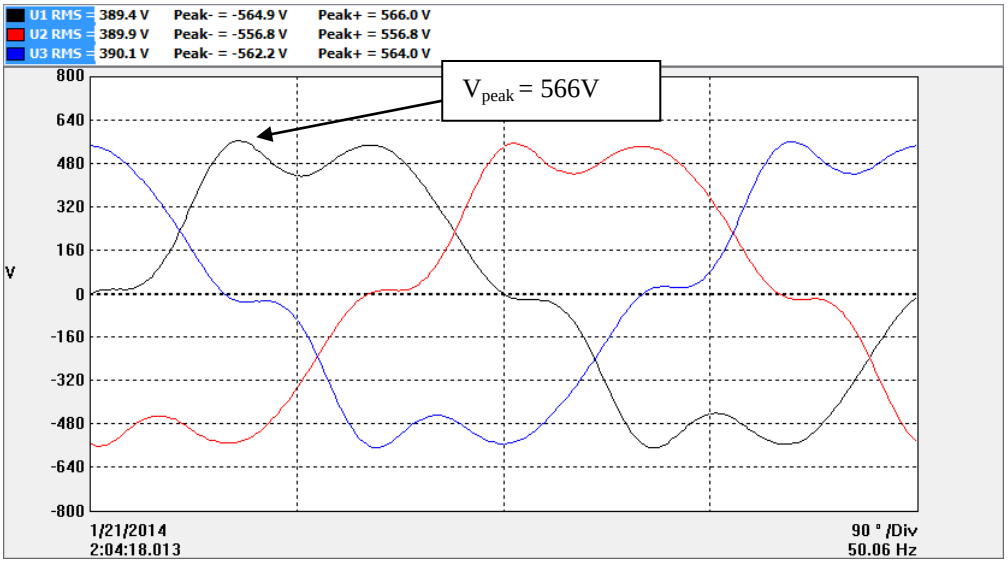


รูปที่ 3.11 วงจรที่ใช้จำลองรูปคลื่นแรงดันของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุ 900 กิโลวาร์

นำรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.12 เปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 3.13

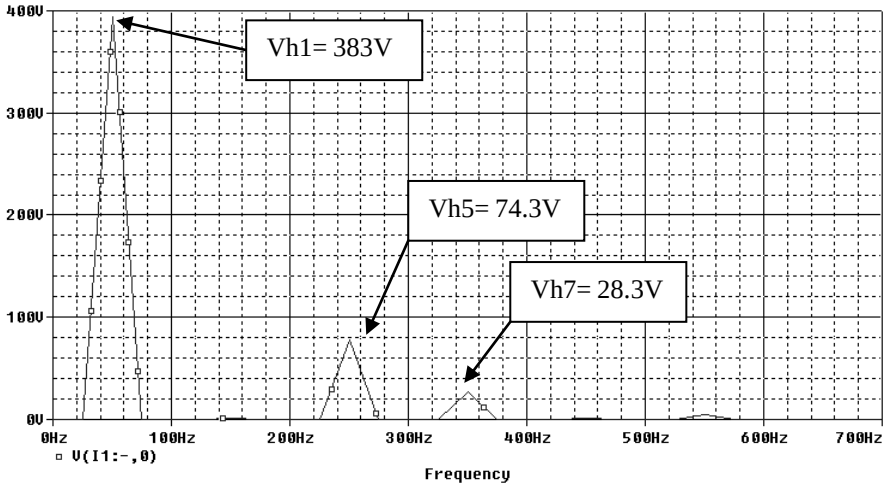


รูปที่ 3.12 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจำลองของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์

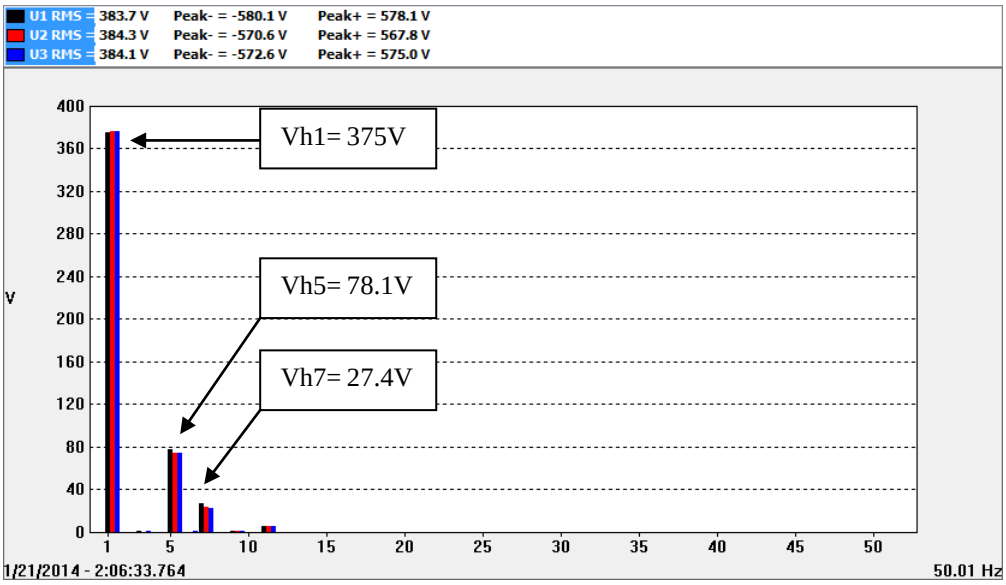


รูปที่ 3.13 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์

จากการจำลองพบว่ารูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.12 มีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยลักษณะของรูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนจากสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์



รูปที่ 3.14 สเปคตรัมแรงดันที่ได้จากการจำลองของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์



รูปที่ 3.15 สเปคตรัมแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดจริงของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 900 กิโลวาร์

จากผลจำลองพบว่ารูปคลื่นและสเปคตรัมของแรงดันมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15 พบว่าฮาร์มอนิกของแรงดันลำดับที่ 5 มีค่าสูงกว่าลำดับอื่น ๆ

3. ตัวอย่างที่ 3 ใช้หม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์
คำนวณค่าอิมพีแดนซ์จากสมการโดยผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงในตารางที่ 3.16

$$|Z_h| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}}\right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}}\right)^2}}$$

เมื่อ R_{Load} มีค่าเท่ากับ 0.092 Ω
L_{tx} มีค่าเท่ากับ 0.022 mH
C_{total} มีค่าเท่ากับ 16,440 μF

ตารางที่ 3.16 ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลำดับที่ได้จากการคำนวณของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุ 1,000 กิโลโวลต์แอมป์

ลำดับฮาร์มอนิกส์	3	5	7	9	11	13
ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)	0.0127	0.0321	0.905	0.0484	0.0279	0.0199

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ซึ่งคำนวณได้จากค่าแรงดันสูงสุดและกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ที่ได้จากการวัดดังแสดงในตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 ประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุ 1,000 กิโลโวลต์แอมป์

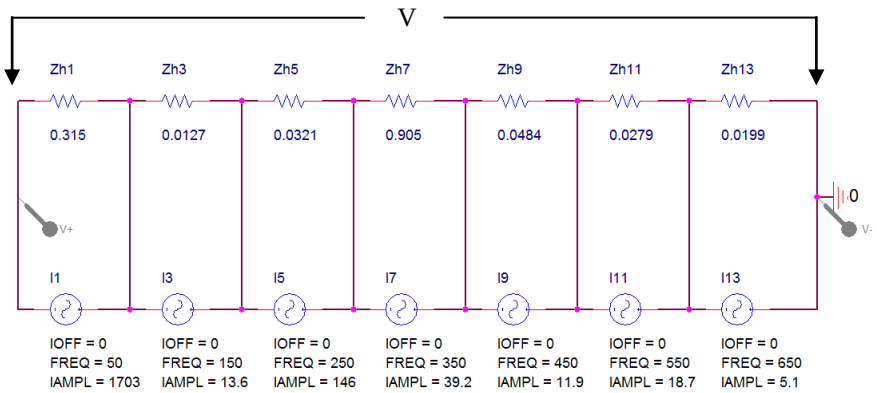
แรงดันสูงสุดจากการตรวจวัด (V)	กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 (A)	อิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 (Ω)
537.4	1,703	0.315

วัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้ายี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น CA8335 ที่ตำแหน่งหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 3.18 ไปจำลองในโปรแกรม Orcad PSpice

ตารางที่ 3.18 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์และมุมเฟสของฮาร์มอนิกที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์

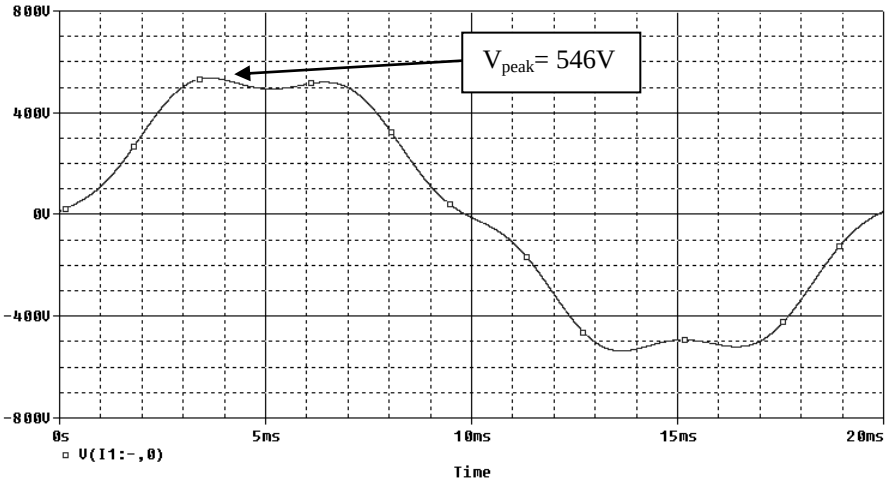
ลำดับฮาร์มอนิกส์	ค่ากระแสไฟฟ้า (A)	มุมเฟส (°)
1	1,703	0
3	13.6	112
5	146	69
7	39.2	-158
9	11.9	100
11	18.7	106
13	5.1	96

นำค่าพารามิเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณไปจำลองในโปรแกรม Orcad Pspice ดังแสดงในรูปที่ 3.16

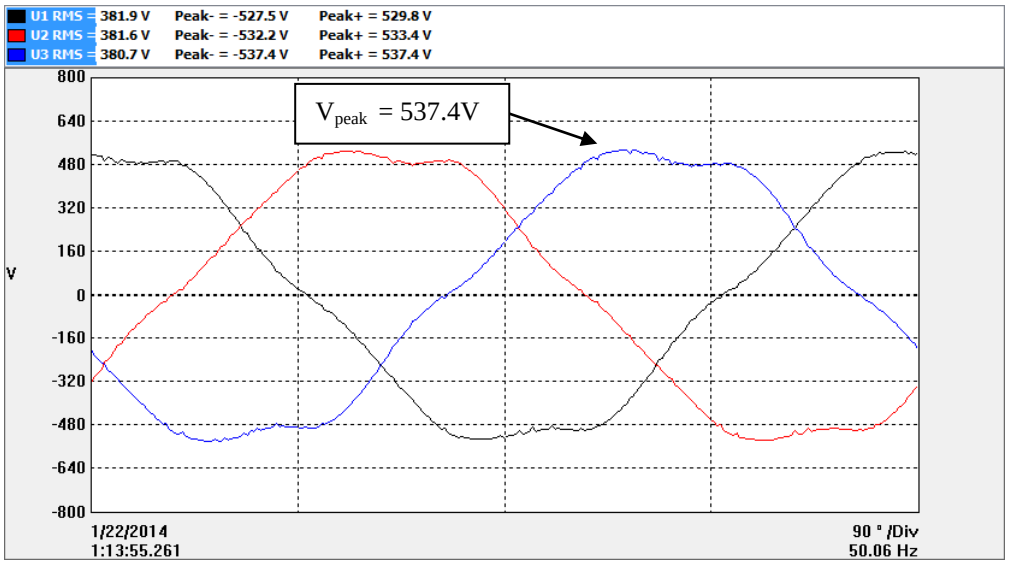


รูปที่ 3.16 วงจรที่ใช้จำลองรูปคลื่นแรงดันของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุ 1,000 กิโลวาร์

นำรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.17 เปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 3.18

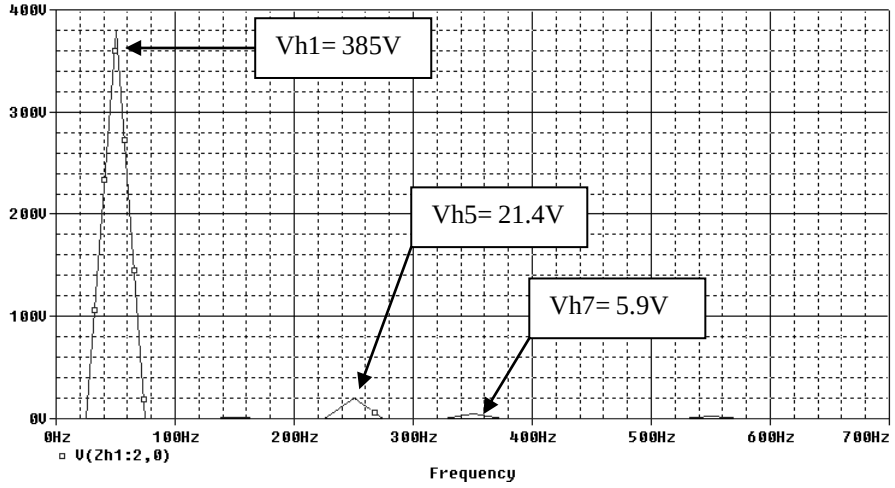


รูปที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจำลองของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์

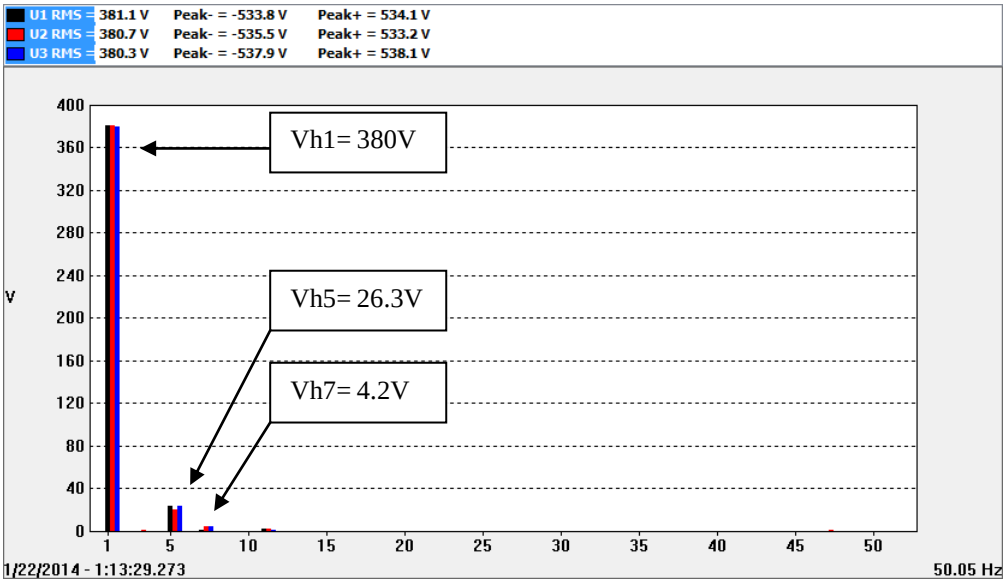


รูปที่ 3.18 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์

จากการจำลองพบว่ารูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.17 มีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยลักษณะของรูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนจากสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์



รูปที่ 3.19 สเปคตรัมแรงดันที่ได้จากการจำลองของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์



รูปที่ 3.20 สเปคตรัมแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดจริงของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 1,000 กิโลวาร์

จากผลจำลองพบว่ารูปคลื่นและสเปคตรัมของแรงดันมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 พบว่าฮาร์มอนิกของแรงดันลำดับที่ 5 มีค่าสูงกว่าลำดับอื่น ๆ

4. ตัวอย่างที่ 4 ใช้หม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์
คำนวณค่าอิมพีแดนซ์จากสมการโดยผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงในตารางที่ 3.19

$$|Z_h| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}}\right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}}\right)^2}}$$

เมื่อ R_{Load} มีค่าเท่ากับ 0.092 Ω
L_{tx} มีค่าเท่ากับ 0.022 mH
C_{total} มีค่าเท่ากับ 16,440 μF

ตารางที่ 3.19 ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละลำดับที่ได้จากการคำนวณของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุ 1,250 กิโลโวลต์แอมป์

ลำดับฮาร์มอนิกส์	3	5	7	9	11	13
ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)	0.0142	0.0441	0.709	0.0303	0.0195	0.0146

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ซึ่งคำนวณได้จากค่าแรงดันสูงสุดและกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ที่ได้จากการวัดดังแสดงในตารางที่ 3.20

ตารางที่ 3.20 ประมาณค่าอิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 ของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุ 1,250 กิโลโวลต์แอมป์

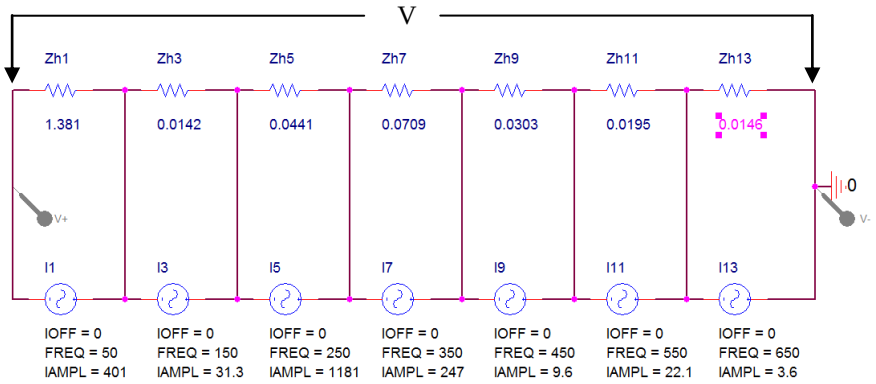
แรงดันสูงสุดจากการตรวจวัด (V)	กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 (A)	อิมพีแดนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 (Ω)
554	401	1.381

วัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้ายี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น CA8335 ที่ตำแหน่งหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 3.21 ไปจำลองในโปรแกรม Orcad PSpice

ตารางที่ 3.21 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์และมุมเฟสของฮาร์มอนิกที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และชุดตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์

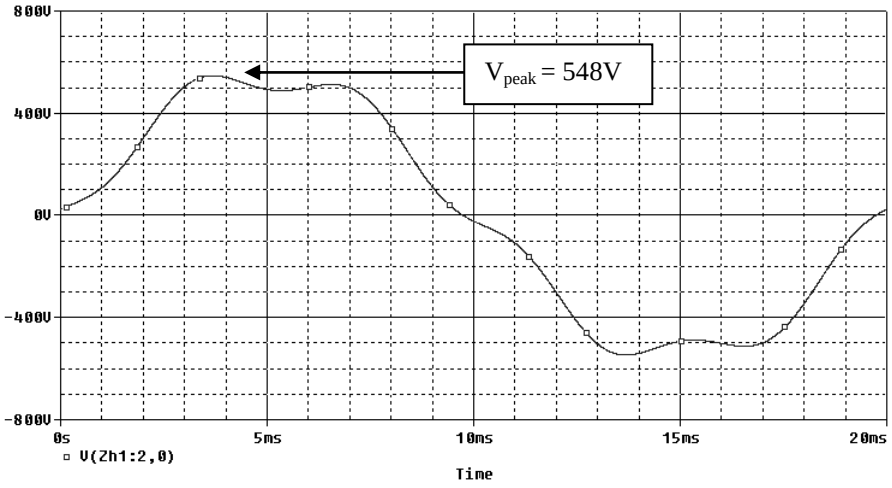
ลำดับฮาร์มอนิกส์	ค่ากระแสไฟฟ้า (A)	มุมเฟส (°)
1	401	0
3	31.1	156
5	1,181	55
7	247.4	-123
9	9.6	46
11	22.1	-33
13	3.6	-168

นำค่าพารามิเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการ และค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณไปจำลองในโปรแกรม Orcad Pspice ดังแสดงในรูปที่ 3.21

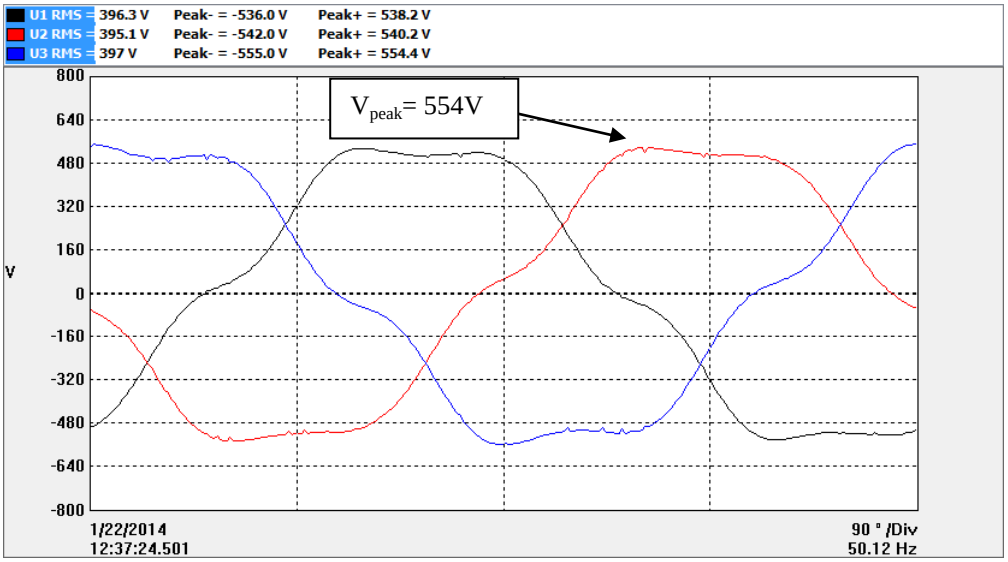


รูปที่ 3.21 วงจรที่ใช้จำลองรูปคลื่นแรงดันของหม้อแปลง 3,000 กิโลโวลต์แอมป์และตัวเก็บประจุ 1,250 กิโลวาร์

นำรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.22 เปรียบเทียบกับรูปคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 3.23

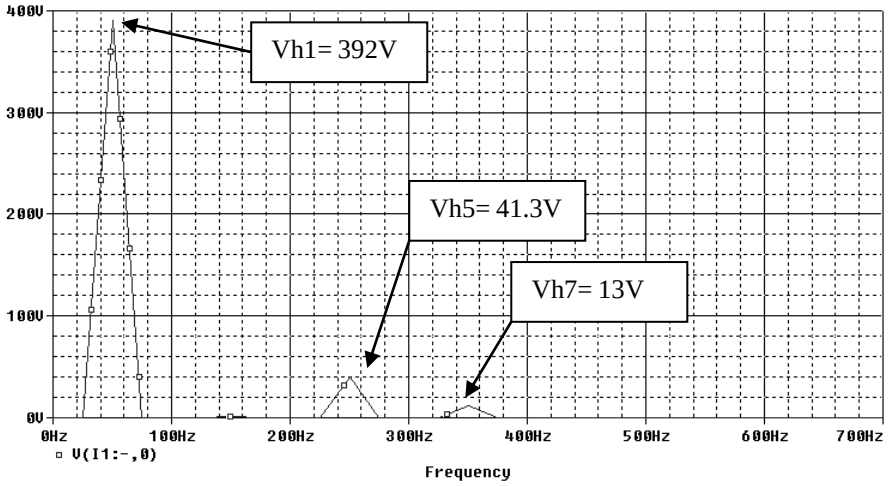


รูปที่ 3.22 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจำลองของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์

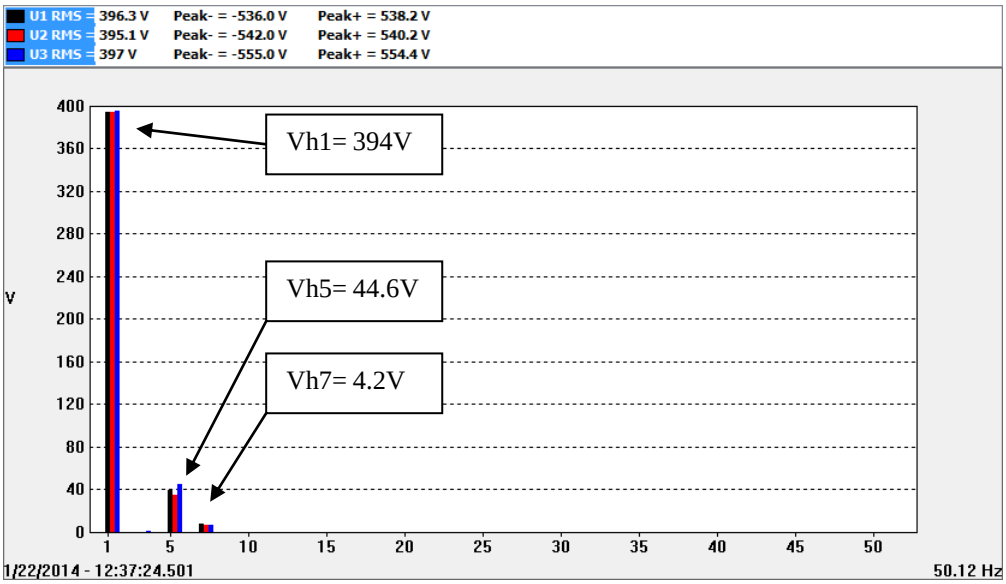


รูปที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์

จากการจำลองพบว่ารูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.22 มีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.23 โดยลักษณะของรูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนจากสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์



รูปที่ 3.24 สเปคตรัมแรงดันที่ได้จากการจำลองของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์



รูปที่ 3.25 สเปคตรัมแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดจริงของหม้อแปลงพิกัด 3,000 กิโลโวลต์แอมป์ และตัวเก็บประจุพิกัด 1,250 กิโลวาร์

จากผลจำลองพบว่ารูปคลื่นและสเปคตรัมของแรงดันมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 พบว่าฮาร์มอนิกของแรงดันลำดับที่ 5 มีค่าสูงกว่าลำดับอื่น ๆ