

บทที่ 7

ตัวอย่างการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม

ในบทนี้จะนำเสนอตัวอย่างวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม โดยจะพิจารณาว่าเมื่อโรงงานนำอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกมาใช้ หรือ มีโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่แล้ว กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายตัวไปยังโหลดต่างๆของโรงงานอย่างไร และ สภาวะใดที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในโรงงาน นอกจากนี้จะวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ เช่น การเพิ่ม หรือ ลด ขนาด ของอุปกรณ์ และวิธีการแก้ปัญหาโดยการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิก เป็นต้น โดยในการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเป็นเครื่องมือช่วย

7.1 การวิเคราะห์เบื้องต้น

สำหรับแนวทางการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเบื้องต้นนั้น อาจพิจารณาได้ 2 ส่วน ดังนี้

7.1.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบขนาดของแหล่งกำเนิดกับระบบ

พิจารณาอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกว่ามีขนาดใหญ่เพียงใดเมื่อเทียบกับระบบ ถ้าพิจารณาตาม [10] จะใช้สมการเปรียบเทียบดังนี้

$$\frac{S_{DW}}{S_{SC}} \cdot 100\% \quad (7.1)$$

$$\text{เมื่อ } S_{DW} = \sum S_{Di} \cdot W_i \quad (7.2)$$

S_{Di} = ขนาดของโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ชุดที่ i

S_{DW} = ผลรวมขนาดของโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

S_{SC} = กำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่จุด PCC

W_i = องค์กรประกอบการถ่วง (Weighting Factor) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกชนิดต่างๆ

โดยทั่วไปแล้วค่าของ W_i จะมีค่ามากถ้าอุปกรณ์นั้นก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนสูง ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่าองค์ประกอบการถ่วง (Weighting Factor) สำหรับการพิจารณาการยอมรับโดยอัตโนมัติ

ชนิดของโหลด	W_i	ชนิดของโหลด	W_i
แหล่งจ่ายกำลังแบบโมดสวิตช์ (SMPS)	2.5	คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ มี Choke > 3%	1.0
Semiconverter	2.5	คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ที่มี ขดลวด (dc link) ขนาดใหญ่	0.8
คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ไม่มี Choke	2.0	คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์	0.5

เมื่อพิจารณาขนาดของโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกกับระบบแล้ว พบว่าน้อยกว่าร้อยละ 0.1 (< 0.1 %) ปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกจะไม่ค่อยเกิดขึ้นเพราะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระบบ แต่ทั้งนี้ยังระบุไม่ได้ว่าจะไม่สร้างปัญหาให้กับระบบ จะต้องพิจารณาเรื่องเรโซแนนซ์ประกอบด้วย เพราะอาจเกิดการขยายกระแสขึ้นได้ หากเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้น

7.1.2 วิเคราะห์หาจุดที่จะเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน

ปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิกที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ กรณีความถี่เรโซแนนซ์ (แบบขนาน) ไปตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในโรงงาน ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อโรงงานมีคาปาซิเตอร์อยู่ โดยทั่วไปแล้วโรงงานอุตสาหกรรมทุกแห่งต้องการให้ตัวประกอบกำลัง (Power factor) มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ดังนั้นจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง เมื่อเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานขึ้น จะเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์นั้น การคำนวณหาจุดเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของระบบ (X_L) กับค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ (X_C) ในโรงงาน หาได้จากสมการที่ (7.3)

$$h_r = \sqrt{\frac{kVA_{SC}}{kVA_{rCap}}} \quad (7.3)$$

เมื่อ kVA_{SC} = กำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบจ่ายไฟ (หน่วย เป็น KVA)

kVA_{rCap} = ขนาดกำลังรีแอกทีฟของคาปาซิเตอร์ (หน่วย เป็น KVA_r)

h_r = ลำดับฮาร์มอนิกที่จะเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน

หากพิจารณาที่จุดที่ต่อคาปาซิเตอร์ (ด้านทุติยภูมิ) ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรจะพิจารณาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (7.4)

$$kVA_{SC(Sec)} = \frac{kVA_{Tr}}{\frac{\%Z_{Tr}}{100} + \frac{kVA_{Tr}}{kVA_{SC}}} \quad (7.4)$$

จากสมการที่ (7.4) ถ้ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ (KVA_{sc}) มีค่ามากแล้ว จดเรโซแนนซ์จะคำนวณโดยการประมาณได้ตามสมการที่ (7.5)

$$h_r = \sqrt{\frac{kVA_{Tr} \times 100}{kVAR_{Cap} \times \%Z_{Tr}}} \tag{7.5}$$

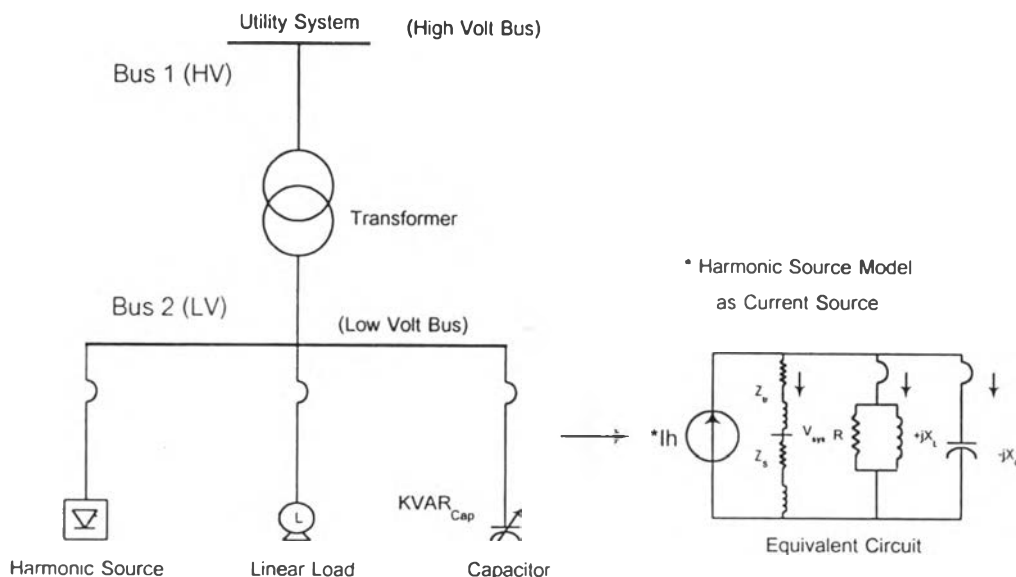
เมื่อ kVA_{Tr} = ค่าพิกัดกำลังของหม้อแปลง (หน่วย เป็น KVA)

$\%Z_{Tr}$ = แรงดันลัดวงจรพิกัดของหม้อแปลง เป็นร้อยละ

เมื่อเกิดสภาวะเรโซแนนซ์อุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดคือคาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลังเอง ดังนั้นการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะต้องพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการเลือกพิกัดของคาปาซิเตอร์ เมื่อโรงงานนั้นมีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ โดยเฉพาะกรณีที่มีการแบ่งชุดคาปาซิเตอร์เป็นขั้น (Step) เพื่อการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในค่าที่ต้องการ (Pfc Control :PFC) จะต้องพิจารณากำลังไฟรีแอกทีฟ (kVAR) ทุกชั้นว่าจุดเรโซแนนซ์เปลี่ยนไปอย่างไรตรงกับฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในโรงงานหรือไม่ ดังตัวอย่างการวิเคราะห์ที่จะได้กล่าวต่อไป

7.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์

(ก) ตัวอย่างที่ 1 โรงงานมีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก 1 ชุด ต่อใช้งานอยู่กับโหลดเชิงเส้น และต้องการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้ดีขึ้น ด้วยการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์ โดอะแกรมของระบบโรงงานตัวอย่างโดยสรุปแสดงดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 โดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 7.2 (ก) ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer rating	Linear load	SPC 6 Pulses	Capacitor
22 kV, 50 Hz	22 kV/400 V	Total load	500 kVA	Qc = 800 kVAr
MVA _{sc} = 350	2500 kVA	1500 kVA	Power factor	400 V
X/R = 20	%Z = 6, Loss 25 kW	Pf = 0.75 Lagging	0.75 Lagging	

ตารางที่ 7.2 (ข) ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์

Harm Order (h)	Mag (% of I _r)	Harm Order (h)	Mag (% of I _r)
5	19.2	19	2.7
7	13.2	23	2.0
11	7.3	25	1.6
13	5.7	29	1.4
17	3.5	31	1.2

วิเคราะห์เบื้องต้น

-พิจารณาขนาดของคอนเวอร์เตอร์เมื่อเทียบกับระบบของแหล่งจ่ายไฟ

จากสมการที่ (7.4) คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ดังนี้

$$kVA_{SC-sec} = \frac{2500}{0.06 + \frac{2500}{350000}} = 37.234 \quad MVA_{sc}$$

จากสมการที่ (7.2) จะได้ $S_{Dw} = \frac{500 \times 2}{37234} \times 100 = 2.68 \%$

จะเห็นได้ว่า ค่า S_{Dw} มากกว่าระดับที่จะยอมรับได้โดยอัตโนมัติ (0.1%) นั่นคือ กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นอาจส่งผลเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในโรงงานได้ ดังนั้นจะต้องให้ความสำคัญเกี่ยวกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์

-พิจารณาหาจุดเรโซแนนซ์แบบขนาน

การวิเคราะห์หาจุดเรโซแนนซ์ จะใช้ในกรณีที่โรงงานอุตสาหกรรมมีชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง เช่น ถ้า ขณะนั้น คาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลังชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ ได้ 800 กิโลวาร์ (kVAr)

จากสมการที่ (7.3) จุดเรโซแนนซ์แบบขนาน $h_r = \sqrt{\frac{37234}{800}} = 6.82$

ในกรณีที่มีการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังแบบอัตโนมัติ (Power Factor Control) เมื่อโหลดของโรงงานเปลี่ยน ค่า Qc จะเปลี่ยนไป (Capbank เปลี่ยน Step) จุดเรโซแนนซ์จะเปลี่ยนไป เช่น

$$Q_c \text{ 700 kVAr} \quad hr = \sqrt{\frac{37234}{700}} = 7.29$$

$$Q_c \text{ 600 kVAr} \quad hr = \sqrt{\frac{37234}{600}} = 7.88$$

จากการคำนวณจุดเรโซแนนซ์ พบว่าจะเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นที่ลำดับฮาร์โมนิกที่ใกล้เคียงกับฮาร์โมนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ที่มีอยู่ภายในโรงงาน ดังนั้นในการเลือกขนาดของคาปาซิเตอร์จะต้องพิจารณาสถานะนี้ด้วยว่า จะทำให้เกิดความเสียหายต่อ ชุดคาปาซิเตอร์ หรือไม่

วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์โมนิก

(ก) วิเคราะห์ระบบปกติ (ยังไม่มี การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 7.1 สามารถคำนวณได้ง่ายเนื่องจากมี แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกเพียง 1 ชุด โดยปกติแล้ว กระแสฮาร์โมนิกจะไหลในทิศทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำสุด และ จะแยกไหลไปตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ (Impedance Ratio) ผลการคำนวณหาแรงดันฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านแรงดันสูง และ ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 7.3 (ก)

ตารางที่ 7.3 (ก) ผลการคำนวณแรงดันฮาร์โมนิก

High Voltage Bus (Bus 1) :PCC						Low Voltage Bus (Bus 2)					
h	kV	%	h	kV	%	h	V	%	h	V	%
1	22.00	100.00	19	0.014	0.062	1	400	100	19	2.348	0.587
5	0.029	0.132	23	0.012	0.053	5	4.892	1.223	23	1.968	0.492
7	0.028	0.125	25	0.010	0.045	7	4.66	1.165	25	1.668	0.417
11	0.023	0.106	29	0.009	0.043	11	3.936	0.984	29	1.60	0.400
13	0.021	0.096	31	0.008	0.038	13	3.982	0.892	31	1.424	0.356
17	0.016	0.074				17	2.748	0.687			
High Voltage Bus (Bus 1) :PCC						Low Voltage Bus (Bus 2)					
V_{h_TOTAL}	0.059		0.27 %			V_{h_TOTAL}	10.00		2.48 %		
kV_{RMS}	22.00		100.00 %			V_{RMS}	400.00		100.03 %		

สำหรับผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์โมนิกไปยังส่วนโหลดและหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 7.3 (ข)

ตารางที่ 7.3 (ข) ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิก

Order	Harm Source		Transformer (22 kV)		Linear Load (400 V)	
	Amps	%(of I _r)	Amps	%(of I _r)	Amps	%(of I _r)
1	721.69	100.00	52.49	100.00	2165.10	100.00
5	138.56	19.20	2.42	4.61	20.16	0.93
7	95.26	13.20	1.65	3.14	19.07	0.88
11	52.68	7.30	0.89	1.69	16.03	0.74
13	41.14	5.70	0.68	1.29	14.52	0.67
17	25.26	3.50	0.40	0.76	11.17	0.52
19	19.49	2.70	0.30	0.57	9.40	0.43
23	14.43	2.00	0.21	0.40	8.00	0.37
25	11.55	1.60	0.16	0.31	6.77	0.31
29	10.10	1.40	0.14	0.26	6.5	0.30
31	8.66	1.20	0.11	0.22	5.78	0.27
<i>I_hTOTAL</i>	185.15	25.65	3.19	6.073	40.45	1.87
<i>I_{RMS}</i>	745.06	103.24	52.58	100.18	2165.48	100.02

จากตารางที่ 7.3(ก) และ(ข) จะพบว่าในสภาวะระบบปกติ ผลของการนำโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเข้ามาใช้ จะทำให้แรงดันที่บัส 400 V. มีค่า แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ประมาณ ร้อยละ 2.5 (THD_v ≈ 2.5 %) และ กระแสฮาร์มอนิก ที่ไหลผ่านไปยังโหลดแบบเชิงเส้นทำให้กระแสโหลดเพิ่มขึ้นประมาณ ร้อยละ 0.02 และ ในส่วนที่ไหลผ่านไปยังหม้อแปลง กระแสจะเพิ่มขึ้น ประมาณร้อยละ 0.184 ซึ่งถือว่าไม่มีผลต่อการทำงานของโหลด

(ข) วิเคราะห์ระบบเมื่อมีการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

เมื่อพิจารณาตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ พบว่ายังมีค่าต่ำอยู่ (0.75) ถ้าต้องการปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้ดีขึ้น จะต้องมีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังตามที่กำหนดเอาไว้ การหาขนาดของคาปาซิเตอร์เข้ามาใช้ในระบบสามารถหาได้จากสมการที่(7.6)

$$kVAR_{Cap} = kW_{Total} (\tan\phi_{orig} - \tan\phi_{new}) \quad (7.6)$$

ถ้าโรงงานต้องการปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้มีค่าเป็น 0.95 จะต้องใช้ค่ากำลังงานรีแอคทีฟจากคาปาซิเตอร์ดังนี้

กำลังงานไฟฟ้ารวม = $1500 \times 0.75 + 500 \times 0.75 = 1500$ kW ดังนั้น kVAr ของคาปาซิเตอร์ หาจากสมการที่(7.6) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{kVAr}_{\text{Cap}} &= 1500 \times \{\tan(\cos^{-1}(0.75)) - \tan(\cos^{-1}(0.95))\} \\ &= 829.72 \text{ kVAr} \end{aligned}$$

ดังนั้นเลือกใช้คาปาซิเตอร์ขนาด = 800 kVAr

เมื่อพิจารณาถึงกรณีโรงงานมีการทำ Power Factor Control (P.F.C) โดยสมมติให้ ระดับของโหลดมี 3 ระดับ และ ค่าตัวประกอบกำลังโดยรวม เปลี่ยนแปลงตามระดับของโหลด ค่า Qc ที่ต้องชดเชยเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังตามที่ต้องการสรุปได้ดังตารางที่ (7.4)

ตารางที่ 7.4 ขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ระดับโหลดต่างๆ

Load level (P_{total} :kW)	Pf_{orig}	Pf_{Target}	kVAr Compensate	kVAr _{Cap-IN}
900	0.75 _{Lag}	0.95 _{Lag}	497.83	500
1200	0.75 _{Lag}	0.95 _{Lag}	663.77	700
1500	0.75 _{Lag}	0.95 _{Lag}	829.72	800

ถ้า คาปาซิเตอร์ มีการเปลี่ยนค่า kVAr ไปเป็น 500,700,800 kVAr ตามระดับของโหลด ซึ่งแต่ละชั้นจะมีจุดเรโซแนนซ์เปลี่ยนไปดังตัวอย่างคำนวณข้างต้น ผลการวิเคราะห์แรงดันฮาร์มอนิก และการไหลของกระแสฮาร์มอนิก ที่ ค่า kVAr ของ คาปาซิเตอร์ขนาดต่างๆ แสดง ดังตารางที่ 7.5 และ 7.6 (ก-ค) ตามลำดับ ทั้งนี้สมมติว่า ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟไม่เปลี่ยนแปลง และ คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ค่าพิกัด ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของโหลดทั้ง 3 ระดับ เกิดจากการทำงานของโหลดแบบเชิงเส้น และ แหล่งจ่ายไฟไม่มีแรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนมาก่อน

Capbank = 500 kVAr					Capbank = 700 kVAr				Capbank = 800 kVAr			
Harm	Bus1 (22 kV) :PCC		Bus2 (400 V)		Bus1 (22 kV) :PCC		Bus2 (400 V)		Bus1 (22 kV) :PCC		Bus2 (400 V)	
Order	kV	%	kV	%	kV	%	kV	%	V	%	kV	%
1	22.00	100.00	0.400	100.00	22.00	100.00	0.400	100.00	22.00	100.00	0.400	100.00
5	0.044	0.20	0.007	1.85	0.053	0.24	0.009	2.23	0.057	0.26	0.010	2.42
7	0.076	0.35	0.013	3.21	0.140	0.64	0.024	5.93	0.125	0.57	0.021	5.29
11	0.041	0.19	0.007	1.73	0.020	0.09	0.003	0.85	0.016	0.07	0.003	0.67
13	0.019	0.09	0.003	0.79	0.011	0.05	0.002	0.46	0.009	0.04	0.002	0.38
17	0.007	0.03	0.001	0.28	0.004	0.02	0.001	0.18	0.004	0.02	0.001	0.15
19	0.004	0.02	0.001	0.18	0.003	0.01	-	-	0.002	0.01	-	-
23	0.002	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	0.002	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	0.001	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	0.001	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vh _{TOTAL}	0.099	0.45	0.02	4.18	0.152	0.69	0.026	6.41	0.139	0.62	0.023	5.87
V _{RMS}	22.00	100.00	0.400	100.09	22.00	100.00	0.401	100.21	22.00	100.00	0.401	100.17

หมายเหตุ

$$V_{h_{TOTAL}} = \sqrt{\sum_{h=5}^{31} V_h^2} \quad , \quad V_{RMS} = \sqrt{V_1^2 + \sum_{h=5}^{31} V_h^2}$$

ตารางที่ 7.5 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก เมื่อโหลด และ ค่า kVAr ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง เปลี่ยนแปลง

Harm Order	Source (SPC)		System (PCC)		Transformer (HV)		Linear Load		Capacitor	
	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%
1	721.69	100.00	28.79	100.00	28.79	100.00	1010.36	100.00	721.69	100.00
5	138.56	19.20	3.66	12.73	3.66	12.73	14.25	1.41	66.82	9.26
7	95.26	13.20	4.54	15.77	4.54	15.77	24.53	2.43	162.25	22.48
11	52.68	7.30	1.56	5.41	1.56	5.41	13.15	1.30	137.34	19.03
13	41.14	5.70	0.60	2.09	0.60	2.09	6.00	0.59	74.12	10.27
17	25.26	3.50	0.16	0.56	0.16	0.56	2.12	0.21	34.20	4.74
19	19.49	2.70	0.09	0.33	0.09	0.33	1.36	0.13	24.65	3.42
23	14.43	2.0	0.04	0.15	0.04	0.15	0.77	0.08	16.84	2.33
25	11.55	1.60	0.03	0.10	0.03	0.10	0.55	0.05	13.14	1.82
29	10.10	1.40	0.02	0.06	0.02	0.06	0.40	0.04	11.10	1.54
31	8.66	1.20	0.01	0.05	0.01	0.05	0.32	0.03	9.40	1.30
$I_{h_{TOTAL}}$	185.147	25.655	6.07	21.09	6.07	21.09	31.96	3.16	239.99	33.25
I_{RMS}	745.06	103.24	29.24	102.20	29.24	102.20	1010.86	100.05	760.54	105.38

หมายเหตุ

$$I_{h_{TOTAL}} = \sqrt{\sum_{h=5}^{31} I_h^2} \quad I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=5}^{31} I_h^2}$$

ตารางที่ 7.6 (ก) ผลการคำนวณ การไหลของกระแสฮาร์มอนิก เมื่อ Capbank = 500 kVAr

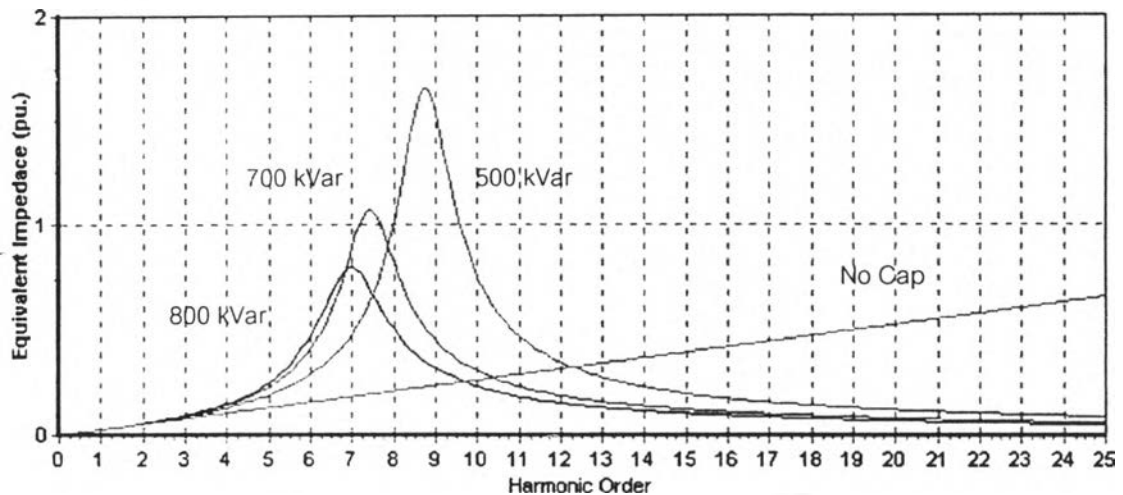
Harm Order	Source (SPC)		System (PCC)		Transformer (HV)		Linear Load		Capacitor	
	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%
1	721.69	100.00	38.22	100.00	38.22	100.00	1587.72	100.00	1010.36	100.00
5	138.56	19.20	4.40	11.52	4.40	11.52	26.91	1.70	112.44	11.13
7	95.26	13.20	8.38	21.92	8.38	21.92	71.12	4.48	419.11	41.48
11	52.68	7.30	0.76	2.00	0.76	2.00	10.15	0.64	94.43	9.25
13	41.14	5.70	0.35	0.92	0.35	0.92	4.48	0.35	60.34	5.97
17	25.26	3.50	0.11	0.28	0.11	0.28	2.16	0.14	31.06	3.07
19	19.49	2.70	0.06	0.16	0.06	0.16	1.42	0.09	22.92	2.27
23	14.43	2.0	0.03	0.08	0.03	0.08	0.82	0.05	16.08	1.59
25	11.55	1.60	0.02	0.05	0.02	0.05	0.60	0.04	12.64	1.25
29	10.10	1.40	0.01	0.03	0.01	0.03	0.44	0.03	10.80	1.07
31	8.66	1.20	0.01	0.03	0.01	0.03	0.35	0.02	9.18	0.91
I_{h_TOTAL}	185.147	25.655	9.50	24.86	9.50	24.86	76.97	4.85	450.52	44.59
I_{RMS}	745.06	103.24	39.38	103.04	39.38	103.04	1589.59	100.12	1106.05	109.49

ตารางที่ 7.6 (ข) ผลการคำนวณ การไหลของกระแสฮาร์มอนิก เมื่อ Capbank = 700 kVAr

Harm Order	Source (SPC)		System (PCC)		Transformer (HV)		Linear Load		Capacitor	
	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%
1	721.69	100.00	48.14	100.00	48.14	100.00	2165.08	100.00	1154.70	100.00
5	138.56	19.20	4.78	9.93	4.78	9.93	39.83	1.84	139.48	12.08
7	95.26	13.20	7.48	15.53	7.48	15.53	86.58	4.00	427.60	37.03
11	52.68	7.30	0.61	1.26	0.61	1.26	10.99	0.51	85.68	7.42
13	41.14	5.70	0.29	0.60	0.29	0.60	6.17	0.29	56.94	4.93
17	25.26	3.50	0.09	0.19	0.09	0.19	2.50	0.12	30.18	2.61
19	19.49	2.70	0.05	0.11	0.05	0.11	1.66	0.08	22.42	1.94
23	14.43	2.0	0.03	0.05	0.03	0.05	0.97	0.04	15.85	1.37
25	11.55	1.60	0.02	0.04	0.02	0.04	0.70	0.03	12.49	1.08
29	10.10	1.40	0.01	0.02	0.01	0.02	0.52	0.02	10.71	0.93
31	8.66	1.20	0.01	0.02	0.01	0.02	0.41	0.02	9.11	0.79
lh _{TOTAL}	185.147	25.655	8.90	18.49	8.90	18.49	96.19	4.44	463.57	40.15
I _{RMS}	745.06	103.238	48.96	101.69	48.96	101.69	2167.21	100.10	1244.28	107.76

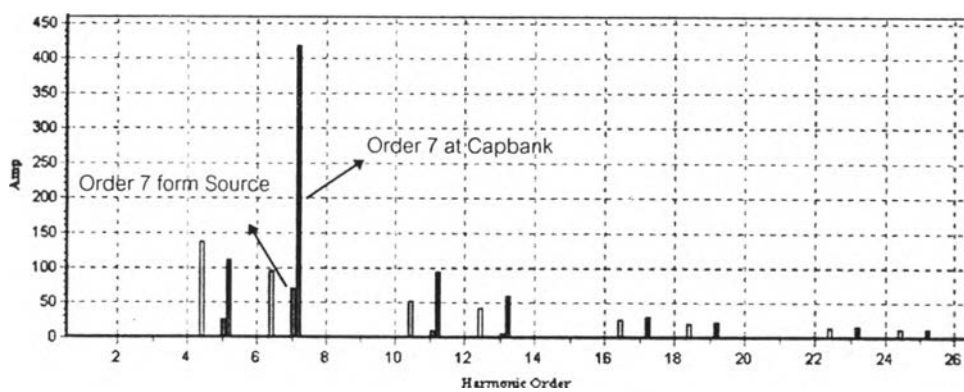
ตารางที่ 7.6 (ค) ผลการคำนวณ การไหลของกระแสฮาร์มอนิก เมื่อ Capbank = 800 kVAr

หากพิจารณาอิมพีแดนซ์สมมูล (บัลท์ที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่) ที่ความถี่ต่างๆร่วมกับขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของคาปาซิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของโหลดจะได้กราฟดังรูปที่ 7.2 ซึ่งกราฟนี้สามารถอธิบายสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานระหว่างคาปาซิเตอร์ของโรงงานกับค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของระบบได้



รูปที่ 7.2 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆเมื่อค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเปลี่ยนแปลง

จากการคำนวณหาจุดเรโซแนนซ์เบื้องต้นพบว่า ความถี่เรโซแนนซ์แบบขนาน จะเกิดขึ้นใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ซึ่งมีอยู่ในโรงงาน และหากพิจารณาจากกราฟอิมพีแดนซ์สมมูล เห็นได้ชัดเจนว่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 จะถูกขยาย แต่อัตราการขยายจะไม่เท่ากันทั้งนี้เนื่องจากที่ระดับโหลดต่างกัน ความต้านทานมีค่าต่างกันซึ่งจะเป็นตัวหน่วง (Damper) ไว้ กรณีที่คาปาซิเตอร์ขนาด 700 kVar จะถูกขยายมากที่สุดเมื่อเทียบกับกระแสที่ความถี่หลักมูล (41.48%) กราฟที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดการขยายกระแสของฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 แสดงดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 แสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิก ซึ่ง ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ถูกขยายเนื่องจากเรโซแนนซ์ (กรณี Capbank 800 kVar)

และหากพิจารณาผลกระทบเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟมีแรงดันฮาร์มอนิกอยู่ก่อน (Background harmonic voltage) โดยในตัวอย่างนี้จะสมมติให้แรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายไฟเป็นร้อยละของแรงดันปกติที่ความถี่หลักมูล ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 แรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายไฟ (ร้อยละของ แรงดันปกติของระบบที่ความถี่หลักมูล)

V_5	V_7	V_{11}	V_{13}	V_{17}	V_{19}	V_{23}	V_{25}	V_{29}	V_{31}
2.0	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5

จากข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกของแหล่งจ่ายไฟ เมื่อเข้าสู่กระบวนการคำนวณโปรแกรมจะทำการเปลี่ยนเป็นแหล่งกำเนิดกระแสซิดเข้าที่บัสต่อรวม (PCC บัส) โดยในกรณีนี้ จะพิจารณาร่วมกับสถานะที่ชุดคาปาซิเตอร์ทำการชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟที่ 800 kVar ผลการคำนวณได้ค่าของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก ดังตารางที่ 7.8 ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์จะถูกขยายเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 90.10 (จากเดิม ร้อยละ 37.03) และทำให้ผลรวมของกระแสประสิทธิผล (I_{RMS}) มีค่าเป็น ร้อยละ 137.89

เมื่อพิจารณาค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม (V_{h_TOTAL} และ I_{h_TOTAL}) ในกรณีต่างๆสรุปได้ดังตารางที่ 7.9 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 7.9 (ก) สรุปค่า แรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม

Case	High Volt Bus (Bus1) :PCC		Low Volt Bus (Bus 2)	
	V_{h_TOTAL} (kV)	THD _v (%)	V_{h_TOTAL} (kV)	THD _v (%)
No Cap	0.059	0.27	0.010	2.47
500 kVar	0.099	0.45	0.017	4.18
700 kVar	0.152	0.69	0.026	6.41
800 kVar	0.139	0.63	0.023	5.87
800 kVar + V_{h_Source}	0.859	3.90	0.056	14.10

ตารางที่ 7.9 (ข) สรุปค่า กระแสฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม

Case	System (PCC 22 kV)		Load (400 V)		Capacitor (400V)	
	I_{h_TOTAL}	THD _i (%)	I_{h_TOTAL}	THD _i (%)	I_{h_TOTAL}	THD _i (%)
No Cap	3.19	6.07	40.45	1.87	-	-
500 kVar	6.07	21.09	31.96	3.16	239.99	33.25
700 kVar	9.50	24.86	76.97	4.85	450.52	44.59
800 kVar	8.90	18.49	96.19	4.44	463.57	40.15
800 kVar + V_{h_Source}	*21.22(Tr)	*44.07 (Tr)	231.01	10.67	1096.25	94.94

หมายเหตุ * ค่าในตารางเป็นขนาดของกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลง ในกรณีที่พิจารณาผลของแรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายไฟ ร่วมกับ ผลของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกภายในโรงงาน

Capbank = 800 kVar					Harmonic Current Distribution						
Harm Order	Bus1 (22 kV) :PCC		Bus2 (400 V)		Hram Order	Transformer(HV)		Linear Load		Capacitor	
	kV	%	kV	%		Amp	%	Amp	%	Amp	%
1	22.00	100.00	0.400	100.00	1	48.15	100.00	2165.08	100.00	1154.70	100.00
5	0.510	2.32	0.023	5.73	5	8.46	17.57	94.41	4.36	330.57	28.63
7	0.414	1.88	0.051	12.87	7	19.32	40.12	210.66	9.73	1010.37	90.10
11	0.288	1.31	0.001	0.28	11	1.59	3.30	4.50	0.21	35.05	3.04
13	0.290	1.32	0.001	0.28	13	1.29	2.68	3.25	0.15	30.00	2.60
17	0.189	0.86	-	-	17	0.76	1.57	5.25	0.24	63.43	5.49
19	0.191	0.87	-	-	19	0.63	1.32	3.81	0.18	51.40	4.45
23	0.194	0.88	-	-	23	0.47	0.99	1.86	0.09	30.35	2.63
25	0.097	0.44	-	-	25	0.22	0.45	0.96	0.04	17.11	1.48
29	0.098	0.45	-	-	29	0.17	0.36	0.39	0.02	7.98	0.69
31	0.098	0.45	-	-	31	0.16	0.34	0.32	0.01	7.06	0.61
Vh _{TOTAL}	0.859	3.90	0.056	14.10	Ih _{TOTAL}	21.22	44.07	231.01	10.67	1096.25	94.94
V _{RMS}	22.02	100.08	0.404	100.99	I _{RMS}	52.61	109.28	2177.39	100.57	1592.20	137.89

ตารางที่ 7.8 ผลการคำนวณแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก

(เมื่อ แหล่งจ่ายไฟมี ความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกมาก่อน (Back ground harmonic voltage) และ kVar Capbank = 800 kVar)

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดอาจกล่าวได้ว่า เมื่อโรงงานต้องการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า จะต้องพิจารณาสภาวะที่คาปาซิเตอร์รับกระแสฮาร์มอนิกซึ่งอาจจะมาจากแหล่งกำเนิดภายในโรงงานเอง หรือ โรงงานข้างเคียง โดยจะต้องพิจารณาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์เป็นองค์ประกอบในการเลือกพิคัดของคาปาซิเตอร์ หากพิจารณาตามมาตรฐาน IEC 831-1-1996 ค่าจำกัดของคาปาซิเตอร์เมื่อทำงานต่อเนื่อง จะมีค่าจำกัดดังนี้

$$\text{ค่าแรงดันสูงสุด (Peak Voltage)} = 120 \% \text{ of Rated}$$

$$\text{ค่าของกระแส} = 130 \% \text{ of Rated}$$

$$\text{แรงดันประสิทธิผล (V}_{RMS}\text{)} = 110\% \text{ of Rated}$$

ดังนั้น เมื่อรวมผลของฮาร์มอนิกแล้วค่าต่างๆของคาปาซิเตอร์ จะต้องไม่เกินค่าจำกัดนี้ จึงจะไม่เกิดผลเสียหายต่อคาปาซิเตอร์ หากโรงงานมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้า และเมื่อผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ปัญหานั้นเกิดจากโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกภายในโรงงานเอง แนวทางการแก้ปัญหานี้วิธีการหนึ่งคือ การใช้ตัวกรอง (Filter) เพื่อกรองฮาร์มอนิกลำดับที่สำคัญที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกกำเนิดขึ้น สำหรับกรณีนี้จะนำตัวกรองแบบพาสซีฟ ชนิดปรับคลื่นเดี่ยวเข้ามาติดตั้งแทนชุดคาปาซิเตอร์ โดยที่ความถี่หลักมูลตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำหน้าที่แทนคาปาซิเตอร์ (ชดเชยกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟให้แก่ระบบ) ส่วนที่ความถี่ฮาร์มอนิกจะให้กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ปรับตั้งไว้ไหลผ่าน เมื่อพิจารณากระแสฮาร์มอนิกแล้วพบว่า ลำดับที่มีความสำคัญที่จะต้องกรองออกจากระบบ คือ ลำดับที่ 5 และ 7 โดยหลักการออกแบบตัวกรองนั้นนอกจากทางด้านเทคนิคแล้วจะต้องคำนึงถึงทางด้านราคาด้วย สิ่งที่จะต้องคำนวณหา คือ ขนาดของคาปาซิเตอร์ และ รีแอกเตอร์ จากการประเมินกระแสฮาร์มอนิกข้างต้น เลือกใช้ตัวกรองดังนี้

ตัวกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 5

$$\text{พิคัดแรงดันของ คาปาซิเตอร์} = 525 \text{ V.}$$

$$\text{พิคัดกำลังงานรีแอกทีฟ} = 750 \text{ kVAr}$$

$$\text{จุดปรับคลื่น} = 4.7$$

$$\text{ค่า Q factor} = 60$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 7

$$\text{พิคัดแรงดันของ คาปาซิเตอร์} = 525 \text{ V.}$$

$$\text{พิคัดกำลังงานรีแอกทีฟ} = 600 \text{ kVAr}$$

$$\text{จุดปรับคลื่น} = 6.8$$

$$\text{ค่า Q factor} = 60$$

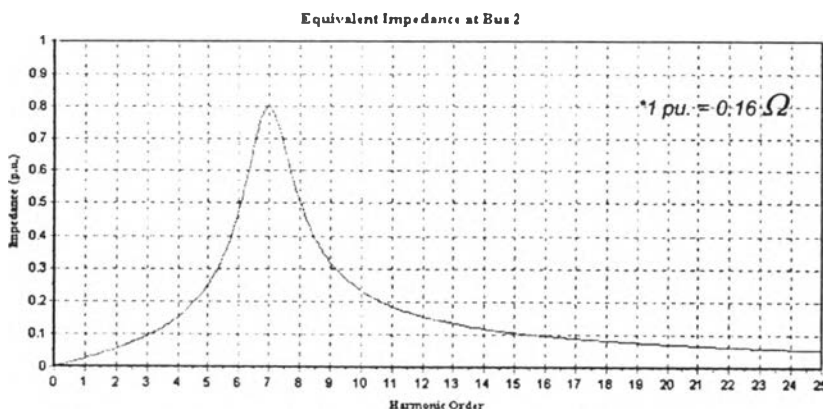
เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกติดตั้งในระบบแล้ว จะต้องทำการวิเคราะห์ว่าการกระจายของกระแสฮาร์มอนิกเป็นแบบใด และ กระแสส่วนที่ไหลเข้าตัวกรองจะต้องไม่ทำให้ตัวกรองเกิดผลเสียหายด้วย ผลการคำนวณในกรณีนี้ แสดงดังตารางที่ 7.10

จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่า กระแสฮาร์มอนิก ลำดับที่ 5 และ 7 จะถูกกรองโดยตัวกรองทั้งสอง ส่งผลให้ค่า THD_V และ ค่า THD_I ที่บัส 22 kV และ 400 V ลดลงมาก (เปรียบเทียบกับระบบที่ต้องการกำลังงานรีแอคทีฟ 800 kVar) ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 7.11

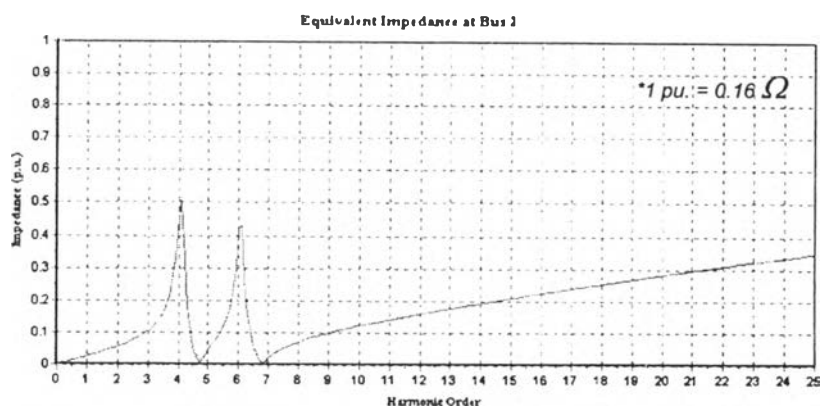
ตารางที่ 7.11 เปรียบเทียบ ค่า THD_V และ THD_I เมื่อใช้คาปาซิเตอร์ และ เมื่อใช้ ตัวกรองฮาร์มอนิก

Index	เมื่อใช้ Capacitor		เมื่อใช้ Filter	
	Bus 1 (HV)	Bus 2 (LV)	Bus 1 (HV)	Bus 2 (LV)
THD_V (%)	0.63	5.87	0.13	1.18
THD_I (%)	18.49 (at PCC)		2.85 (at PCC)	

เมื่อเปรียบเทียบกราฟของอิมพีแดนซ์สมมูลของวงจรก่อน และ หลัง การติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก จะได้ดังรูปที่ 7.4 และ 7.5 ตามลำดับ



รูปที่ 7.4 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของระบบเมื่อใช้คาปาซิเตอร์

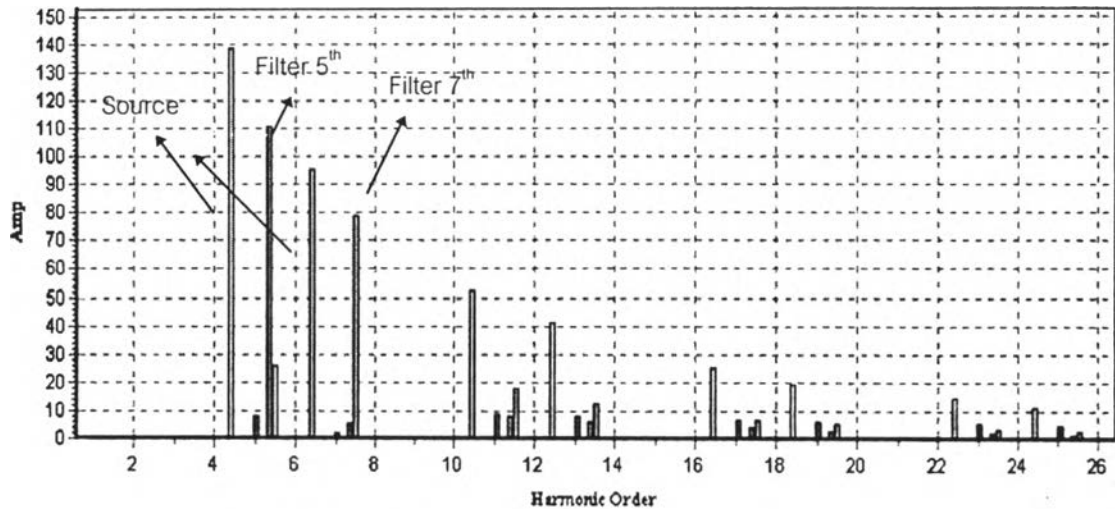


รูปที่ 7.5 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของระบบเมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิก

Harmonic Voltage Distortion					Harmonic Current Distribution								
Harm Order	Bus1 (22 kV) :PCC		Bus2 (400 V)		Harm Order	System(HV)		Linear Load		Filter #1 (5 th)		Filter #2 (7 th)	
	V	%	V	%		Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%
1	22.00	100.00	0.400	100.00	1	41.59	100.00	2165.08	100.00	658.20	100.00	513.84	100.00
5	0.011	0.05	0.002	0.468	5	0.93	2.23	7.72	0.36	110.67	16.81	25.61	4.98
7	0.003	0.02	0.001	0.139	7	0.20	0.47	2.28	0.11	5.03	0.75	79.00	15.37
11	0.012	0.06	0.002	0.517	11	0.46	1.12	8.42	0.39	7.98	1.21	17.67	3.44
13	0.012	0.05	0.002	0.504	13	0.38	0.92	8.20	0.38	6.19	0.94	12.40	2.41
17	0.010	0.05	0.002	0.419	17	0.24	0.59	6.81	0.31	3.7	0.56	6.81	1.33
19	0.009	0.04	0.001	0.25	19	0.19	0.45	5.88	0.27	2.82	0.43	5.08	0.99
23	0.008	0.04	0.001	0.25	23	0.14	0.33	5.23	0.24	2.03	0.31	3.57	0.69
25	0.007	0.03	0.001	0.25	25	0.11	0.26	4.52	0.21	1.60	0.24	2.79	0.54
29	0.007	0.03	0.001	0.25	29	0.09	0.23	4.49	0.21	1.36	0.21	2.35	0.46
31	0.006	0.03	0.001	0.25	31	0.08	0.19	4.07	0.19	1.15	0.17	1.97	0.38
V _{TOTAL}	0.028	0.13	0.005	1.18	I _{TOTAL}	1.18	2.85	19.19	0.89	111.38	16.92	86.40	16.81
V _{RMS}	22.00	100.00	0.400	100.01	I _{RMS}	41.60	100.04	2165.16	100.00	667.56	101.42	521.05	101.40

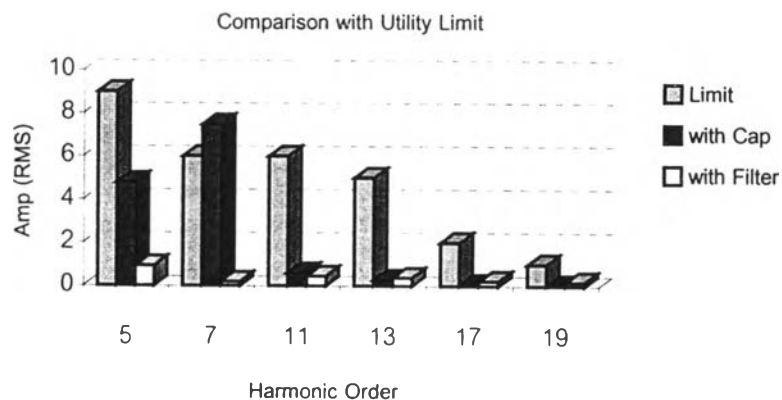
ตารางที่ 7.10 ผลการคำนวณแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิก แบบ พาสซีฟ ชนิดปรับคลื่นเดี่ยว ลำดับที่ 5 และ 7

จะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิก ลำดับที่ 5 และ 7 จะไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิก จึงไม่สร้างปัญหาให้กับระบบ และส่งผลให้ค่า THD_v และ THD_i ลดลงอยู่ในระดับที่มาตรฐานควบคุม กราฟรูปที่ 7.6 แสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิก ที่ไหลเข้าสู่ ตัวกรองฮาร์มอนิก



รูปที่ 7.6 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิก

หากเปรียบเทียบกับค่าจำกัดของการไฟฟ้า ก่อน และ หลัง การติดตั้ง ตัวกรองฮาร์มอนิก ได้กราฟดังรูปที่ 7.7

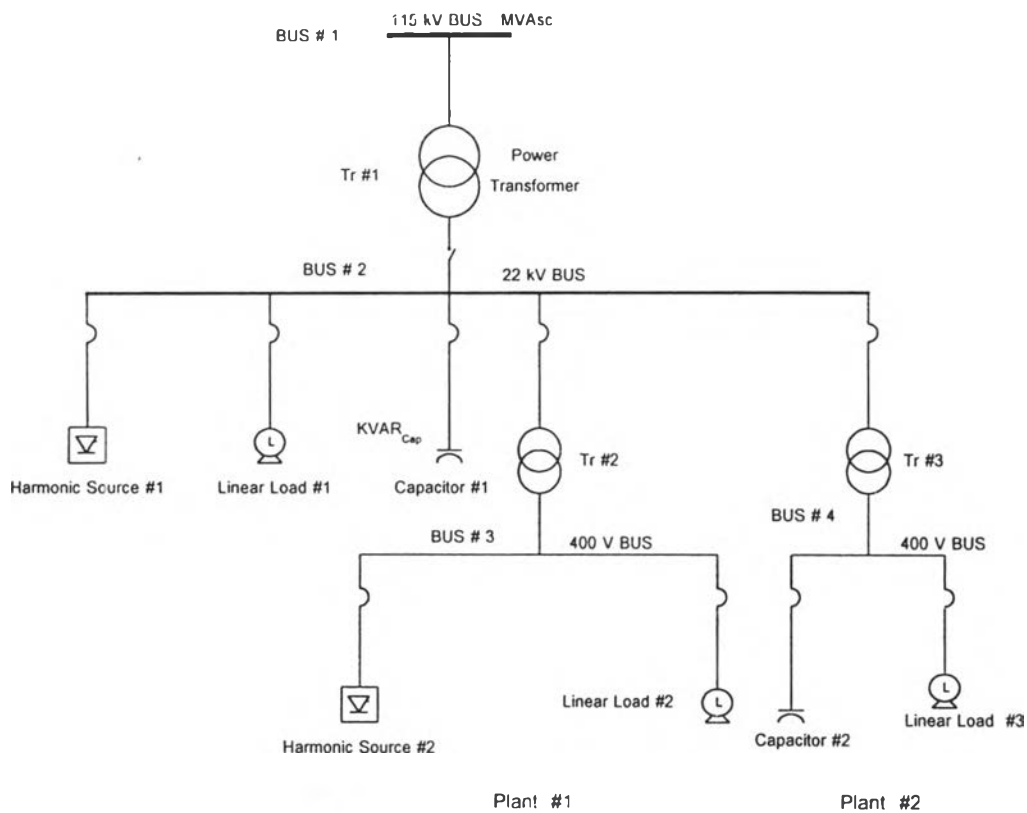


รูปที่ 7.7 แสดงสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่จุด PCC

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากแหล่งจ่ายไฟมีแรงดันมีฮาร์มอนิกปนอยู่พบว่าจะทำให้คาปาซิเตอร์ในโรงงานได้รับผลกระทบมากที่สุด ดังนั้น จึงเป็นเหตุผลที่การไฟฟ้าต้องจำกัดค่า แรงดัน

ฮาร์มอนิกรวมที่ จุดต่อร่วม (PCC บัส) ไว้ที่ค่าต่ำๆ เช่น ไม่เกิน ร้อยละ 4 ของแรงดันปกติ (สำหรับระบบ 22 และ 24 kV)

(ข) ตัวอย่างที่ 2 โรงงานอุตสาหกรรมที่มีสถานีไฟฟ้าย่อยเองรับไฟจากการไฟฟ้าในระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สำคัญอยู่ 2 จุด (ด้าน 22 kV และ 400 V) ไดอะแกรมที่ต้องการศึกษาเขียนโดยสรุปได้ดังรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 ไดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 2

-ข้อมูลเบื้องต้น

ตารางที่ 7.12 (ก) ข้อมูลเบื้องต้นของระบบตัวอย่างที่ 2

System	Transformer #1	Transformer #2,#3	SPC 6 Pulses #1	SPC 6 Pulses #2
115 kV, 50 Hz	115 kV/22kV	22 kV/400 V	22 kV	400 V
$MVA_{sc} = 4250$	36 MVA	1500 kVA	$P = 5.5$ MW	$P = 500$ kW
$X/R = 10$	$\%Z = 6.5 \%$ Loss 185 kW	$\%Z = 6.5 \%$ Loss 19.8 kW	$Q = 4.75$ kVAr	$Q = 375$ kVAr
Linear load #1	Capacitor #1	Capacitor #2	Linear load #2	Linear load #3
22 kV	22 kV	400 kV	400 V	400 V
$P = 6.8$ MW	8750 kVAr	400 kVAr	$P = 700$ kW	$P = 1000$ MW
$Q = 4.2$ MVAr			$Q = 525$ kVAr	$Q = 750$ kVAr

ตารางที่ 7.12 (ข) ข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจาก คอนเวอร์เตอร์แบบสถิต (SPC)

Harmonic	SPC #1 (HV)	SPC #2 (LV)	Harmonic	SPC #1 (HV)	SPC #2 (LV)
Order (h)	Mag (%of I_1)	Mag (%of I_1)	Order (h)	Mag (%of I_1)	Mag (%of I_1)
5	25.24	17.8	19	3.68	4.2
7	9.82	11.3	23	3.43	3.3
11	8.63	8.5	25	2.56	2.7
13	6.65	7.0	29	2.11	2.1
17	5.04	5.1	31	1.87	1.5

สิ่งที่ต้องการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างนี้ คือ การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 จะกระจายตัวไปยังส่วนต่างๆของระบบอย่างไร เมื่อแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ระบบไม่ใช้คาปาซิเตอร์ทั้งด้าน 22 kV และ ด้าน 400 V

กรณีที่ 2 ระบบมีคาปาซิเตอร์ทางด้าน 22 kV

กรณีที่ 3 ระบบมีคาปาซิเตอร์ทั้งทางด้าน 22 kV และ ด้าน 400 V

กรณีที่ 4 ระบบมีคาปาซิเตอร์ทั้งทางด้าน 22 kV และ ด้าน 400 V และ มีแรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายไฟ (Back ground harmonic Voltage) โดยค่าของแรงดันฮาร์มอนิกจะใช้ข้อมูลดังในตารางที่ 7.7

สำหรับข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกตามตารางที่ 7.12(ข) นั้น ในที่นี้จะไม่คิดถึงมุมเฟส แต่ในทางปฏิบัติมุมเฟสอาจจะมีส่วนที่จะเสริม หรือหักล้างกันได้ระหว่างกระแสฮาร์มอนิกลำดับเดียวกันจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 อย่างไรก็ตาม ถ้าข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกมีมุมเฟส ก็สามารถป้อนเข้าไปโปรแกรมได้ ผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างที่ 2 ในแต่ละกรณี แบ่งได้ดังนี้

-**ผลการวิเคราะห์ กรณีที่ 1** ค่าของแรงดัน และ กระแสฮาร์มอนิก แสดงในตารางที่ 7.13 และ 7.14 ตามลำดับ

-**ผลการวิเคราะห์ กรณีที่ 2** ค่าของแรงดัน และ กระแสฮาร์มอนิก แสดงในตารางที่ 7.15 และ 7.16 ตามลำดับ

-**ผลการวิเคราะห์ กรณีที่ 3** ค่าของแรงดัน และ กระแสฮาร์มอนิก แสดงในตารางที่ 7.17 และ 7.18 ตามลำดับ

-**ผลการวิเคราะห์ กรณีที่ 4** ค่าของแรงดัน และ กระแสฮาร์มอนิก แสดงในตารางที่ 7.19 และ 7.20 ตามลำดับ

Harm Order	Bus #1 (115 kV)		Bus #2 (22 kV)		Bus #3 (400 V)		Bus #4 (400 V)	
	kV	%	kV	%	kV	%	kV	%
1	115.00	100.00	22.00	100.00	0.400	100.00	0.400	100.00
5	0.256	0.223	0.426	1.94	0.017	4.14	0.007	1.82
7	0.143	0.125	0.238	1.08	0.012	3.03	0.004	1.00
11	0.192	0.167	0.319	1.45	0.015	3.63	0.005	1.27
13	0.174	0.151	0.288	1.31	0.013	3.37	0.004	1.11
17	0.167	0.145	0.278	1.26	0.012	3.08	0.004	1.00
19	0.136	0.118	0.225	1.02	0.011	2.65	0.003	0.780
23	0.147	0.128	0.244	1.11	0.010	2.49	0.003	0.778
25	0.118	0.103	0.196	0.892	0.008	2.08	0.002	0.600
29	0.109	0.095	0.182	0.826	0.007	1.78	0.002	0.510
31	0.101	0.088	0.168	0.756	0.006	1.41	0.002	0.460
Vh _{TOTAL}	0.507	0.441	0.826	3.75	0.036	9.11	0.013	3.20
V _{RMS}	115.00	100.00	22.02	100.07	0.402	100.41	0.400	100.05

ตารางที่ 7.13 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบไม่มีคาปาซิเตอร์ (กรณีที่ 1)

<i>Harm</i>	<i>Source #1</i> SPC	<i>Source #2</i> SPC	<i>System</i> (115 kV)	<i>Tr #1</i> (115 kV)	<i>Tr # 2</i> (400 V)	<i>Tr #3</i> (400 V)	<i>Load #1</i> (22 kV)	<i>Load #2</i> (400 V)	<i>Load #3</i> (400 V)	<i>Capacitor #1</i> (22 kV)	<i>Capacitor #2</i> (400 V)
<i>Order</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>
1	190.72	902.11	90.22	90.22	2165.06	1804.22	209.95	1262.95	1804.22	-	-
5	48.14	160.58	9.56	9.56	150.87	26.62	3.48	42.25	26.62	-	-
7	18.73	101.94	3.82	3.82	95.12	14.54	1.94	30.78	14.54	-	-
11	16.46	76.68	3.25	3.25	68.65	18.39	2.59	36.73	18.39	-	-
13	12.68	63.15	2.49	2.49	55.20	16.09	2.34	34.12	16.09	-	-
17	9.61	46.01	1.83	1.83	37.94	14.40	2.25	31.15	14.40	-	-
19	7.02	37.89	1.33	1.33	30.29	11.23	1.83	26.77	11.23	-	-
23	6.54	29.77	1.19	1.19	22.18	11.24	1.98	25.19	11.24	-	-
25	4.88	24.36	0.88	0.88	17.49	8.67	1.59	21.02	8.67	-	-
29	4.02	18.94	0.70	0.70	12.61	7.40	1.47	18.01	7.40	-	-
31	3.57	13.53	0.61	0.61	8.77	6.58	1.36	14.28	6.58	-	-
$I_{h_{TOTAL}}$	57.77	227.19	11.41	11.41	207.26	46.37	6.85	92.40	46.37	-	-
I_{RMS}	199.27	930.28	90.94	90.94	2174.96	1804.80	210.05	1266.33	1804.82	-	-

ตารางที่ 7.14 ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ต่างๆ เมื่อระบบไม่มีคาปาซิเตอร์ (กรณีที่ 1)

Harm Order	Bus #1 (115 kV)		Bus #2 (22 kV)		Bus #3 (400 V)		Bus #4 (400 V)	
	kV	%	kV	%	kV	%	kV	%
1	115.00	100.00	22.00	100.00	0.400	100.00	0.400	100.00
5	0.452	0.393	0.751	3.413	0.022	5.55	0.013	3.21
7	0.754	0.656	1.253	5.70	0.028	7.06	0.021	5.26
11	0.174	0.152	0.290	1.32	0.004	1.11	0.005	1.15
13	0.092	0.080	0.152	0.691	0.006	1.57	0.002	0.59
17	0.044	0.038	0.072	0.329	0.007	1.72	0.001	0.26
19	0.027	0.024	0.045	0.206	0.007	1.63	0.001	0.156
23	0.019	0.017	0.032	0.147	0.006	1.57	0.0004	0.103
25	0.013	0.011	0.022	0.099	0.005	1.33	0.0003	0.067
29	0.009	0.008	0.015	0.068	0.005	1.15	0.0002	0.042
31	0.007	0.006	0.012	0.055	0.003	0.853	0.0001	0.033
Vh _{TOTAL}	0.903	0.785	1.50	6.82	0.039	9.80	0.025	6.31
V _{RMS}	115.00	100.00	22.05	100.23	0.402	100.48	0.401	100.20

ตารางที่ 7.15 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ ด้านแรงสูง (กรณีที่ 2)

Harm	Source #1 SPC	Source #2 SPC	System (115 kV)	Tr #1 (115 kV)	Tr # 2 (400 V)	Tr #3 (400 V)	Load #1 (22 kV)	Load #2 (400 V)	Load #3 (400 V)	Capacitor #1 (22 kV)	Capacitor #2 (400 V)
Order	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp
1	190.72	902.11	82.42	82.42	2165.06	1804.22	209.95	1262.95	1804.22	229.63	-
5	48.14	160.58	16.85	16.85	147.04	46.92	6.13	56.65	46.92	39.15	-
7	18.73	101.94	20.08	20.08	66.20	76.43	10.20	71.71	76.42	91.50	-
11	16.46	76.68	2.96	2.96	71.19	16.71	2.35	11.27	16.71	33.25	-
13	12.68	63.15	1.31	1.31	57.68	8.49	1.23	15.92	8.49	20.63	-
17	9.61	46.01	0.48	0.48	40.29	3.75	0.59	17.40	3.75	12.83	-
19	7.02	37.89	0.27	0.27	32.39	2.26	0.37	16.47	2.26	8.98	-
23	6.54	29.77	0.16	0.16	24.18	1.49	0.26	15.28	1.49	7.77	-
25	4.88	24.36	0.10	0.10	19.25	0.97	0.18	13.48	0.97	5.70	-
29	4.02	18.94	0.06	0.06	14.15	0.61	0.12	11.66	0.61	4.54	-
31	3.57	13.53	0.04	0.04	9.82	0.48	0.10	8.62	0.48	3.94	-
$I_{h_{TOTAL}}$	57.77	227.19	26.42	26.42	195.76	91.75	12.22	99.66	91.73	108.68	-
I_{RMS}	199.27	930.28	86.55	86.55	2173.90	1806.55	210.30	1266.88	1806.55	254.05	-

ตารางที่ 7.16 ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ ด้านแรงสูง (กรณีที่ 2)

Harm Order	Bus #1 (115 kV)		Bus #2 (22 kV)		Bus #3 (400 V)		Bus #4 (400 V)	
	kV	%	kV	%	kV	%	kV	%
1	115.00	100.00	22.00	100.00	0.400	100.00	0.400	100.00
5	0.469	0.408	0.780	3.54	0.023	5.66	0.022	5.39
7	0.586	0.509	0.973	4.42	0.022	5.46	0.046	11.55
11	0.186	0.162	0.310	1.41	0.004	1.04	0.005	1.24
13	0.094	0.082	0.157	0.713	0.006	1.55	0.001	0.371
17	0.044	0.038	0.073	0.332	0.007	1.72	0.0003	0.084
19	0.027	0.024	0.046	0.207	0.007	1.63	0.0002	0.040
23	0.020	0.017	0.052	0.148	0.006	1.54	0.0001	0.018
25	0.013	0.011	0.022	0.100	0.005	1.33	0.0001	0.010
29	0.009	0.008	0.015	0.068	0.005	1.15	0.00002	0.005
31	0.007	0.006	0.012	0.055	0.003	0.853	0.00002	0.004
V _h _{TOTAL}	0.781	0.679	1.298	5.90	0.035	8.78	0.051	12.81
V _{RMS}	115.00	100.00	22.04	100.17	0.402	100.39	0.403	100.82

ตารางที่ 7.17 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ
เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ ด้าน 115 kV และ ด้าน 400 V (กรณี 3)

<i>Harm</i>	<i>Source #1</i>	<i>Source #2</i>	<i>System</i>	<i>Tr #1</i>	<i>Tr # 2</i>	<i>Tr #3</i>	<i>Load #1</i>	<i>Load #2</i>	<i>Load #3</i>	<i>Capacitor #1</i>	<i>Capacitor #2</i>
<i>Order</i>	<i>SPC</i>	<i>SPC</i>	<i>(115 kV)</i>	<i>(115 kV)</i>	<i>(400 V)</i>	<i>(400 V)</i>	<i>(22 kV)</i>	<i>(400 V)</i>	<i>(400 V)</i>	<i>(22 kV)</i>	<i>(400 V)</i>
	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>	<i>Amp</i>
1	190.72	902.11	82.11	82.11	2165.06	1695.75	209.95	1262.95	1804.22	229.63	577.35
5	48.14	160.58	17.49	17.49	145.69	163.67	6.37	57.86	78.69	40.66	155.64
7	18.73	101.94	15.60	15.60	59.00	479.00	7.92	55.46	167.68	71.06	466.83
11	16.46	76.68	3.16	3.16	71.08	79.85	2.52	10.54	18.00	35.56	79.01
13	12.68	63.15	1.35	1.35	57.71	28.04	1.27	15.72	5.36	21.28	27.83
17	9.61	46.01	0.48	0.48	40.30	8.31	0.59	17.37	1.22	12.97	8.27
19	7.02	37.89	0.27	0.27	32.39	4.42	0.37	16.46	0.58	9.04	4.41
23	6.54	29.77	0.16	0.16	24.18	2.46	0.26	15.27	0.27	7.80	2.45
25	4.88	24.36	0.10	0.10	19.25	1.50	0.18	13.47	0.15	5.72	1.49
29	4.02	18.94	0.06	0.06	14.15	0.86	0.12	11.65	0.07	4.55	0.86
31	3.57	13.53	0.04	0.04	9.82	0.65	0.10	8.62	0.05	3.95	0.65
I_{h_TOTAL}	57.77	227.19	23.70	23.70	192.39	513.30	10.58	89.32	186.18	93.81	499.27
I_{RMS}	199.27	930.28	85.46	85.46	2173.59	1771.74	210.21	1266.11	1813.80	247.99	763.28

ตารางที่ 7.18 ผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ ด้าน 115 kV และ ด้าน 400 V (กรณีที่ 3)

Harm Order	Bus #1 (115 kV)		Bus #2 (22 kV)		Bus #3 (400 V)		Bus #4 (400 V)	
	kV	%	kV	%	kV	%	kV	%
1	115.00	100.00	22.00	100.00	0.400	100.00	0.400	100.00
5	2.63	2.29	1.12	5.11	0.026	6.50	0.031	7.77
7	3.13	2.72	2.03	9.23	0.032	7.94	0.096	24.10
11	1.39	1.21	0.444	2.02	0.005	1.28	0.007	1.78
13	1.44	1.25	0.236	1.07	0.006	1.59	0.002	0.558
17	0.988	0.859	0.093	0.421	0.007	1.71	0.0004	0.107
19	0.994	0.864	0.063	0.285	0.006	1.62	0.0002	0.055
23	1.00	0.871	0.043	0.194	0.006	1.51	0.0001	0.024
25	0.502	0.437	0.025	0.113	0.005	1.33	0.00005	0.012
29	0.504	0.438	0.017	0.079	0.005	1.15	0.00002	0.006
31	0.505	0.439	0.014	0.065	0.003	0.853	0.00002	0.004
Vh _{TOTAL}	4.94	4.30	2.38	10.81	0.044	11.01	0.102	25.39
V _{RMS}	115.11	100.09	22.13	100.58	0.402	100.60	0.413	103.17

ตารางที่ 7.19 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ ด้าน 115 kV และ ด้าน 400 V และ มี Background harmonic voltage (กรณีที่ 4)

Harm	Source #1	Source #2	System	Tr #1	Tr # 2	Tr #3	Load #1	Load #2	Load #3	Capacitor #1	Capacitor #2
Order	SPC	SPC	(115 kV)	(115 kV)	(400 V)	(400 V)	(22 kV)	(400 V)	(400 V)	(22 kV)	(400 V)
	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp
1	190.72	902.11	82.11	82.11	2165.06	1695.75	209.95	1262.95	1804.22	229.63	577.35
5	48.14	160.58	98.09	17.73	110.68	235.91	9.18	66.37	113.43	58.63	224.34
7	18.73	101.94	83.36	26.91	62.97	999.50	16.53	80.70	349.89	148.29	974.12
11	16.46	76.68	23.36	7.01	84.22	114.35	3.60	12.92	25.77	50.91	113.15
13	12.68	63.15	20.59	4.47	64.86	42.19	1.91	16.10	8.06	31.99	41.86
17	9.61	46.01	10.83	1.86	42.47	10.52	0.75	17.31	1.54	16.41	10.47
19	7.02	37.89	9.75	1.56	34.01	6.09	0.51	16.42	0.80	12.43	6.06
23	6.54	29.77	8.12	1.21	25.16	3.23	0.35	15.25	0.35	10.23	3.22
25	4.88	24.36	3.75	0.55	19.64	1.70	0.20	13.46	0.17	6.50	1.70
29	4.02	18.94	3.24	0.46	14.42	0.99	0.14	11.65	0.09	5.23	0.99
31	3.57	13.53	3.04	0.43	10.05	0.76	0.12	8.62	0.06	4.60	0.75
I_{h_TOTAL}	57.77	227.19	133.65	33.41	178.34	1034.25	19.37	111.97	368.81	172.23	1006.95
I_{RMS}	199.27	930.28	156.86	88.64	2172.40	1986.27	210.84	1267.91	1841.53	287.04	1160.73

ตารางที่ 7.20 แสดงผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์โมนิกที่อุปกรณ์ต่างๆ เมื่อระบบมีคาปาซิเตอร์ ด้าน 115 kV และ ด้าน 400 V และ มี Back ground harmonic voltage (กรณี 4)

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดเมื่อนำมาเขียนสรุปเป็นค่า THD_v ของแต่ละบัส รวมทั้ง ค่า THD_i ของอุปกรณ์แต่ละอย่างได้ดังตารางที่ 7.21 ดังนี้

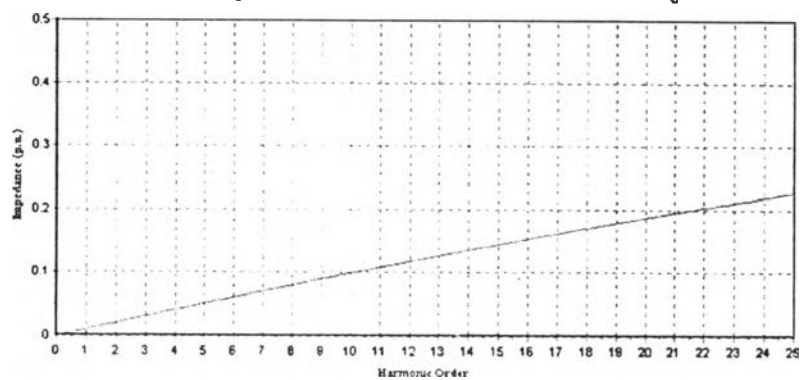
ตารางที่ 7.21(ก) สรุปค่า THD_v (% of V_i) ของ แต่ละบัส ในกรณีต่างๆ

Case	Bus #1 (115 kV)	Bus #2 (22 kV)	Bus #3 (400 V)	Bus #4 (400 V)
	THD_v (%)	THD_v (%)	THD_v (%)	THD_v (%)
1	0.44	3.83	9.11	3.19
2	0.78	6.82	9.80	6.31
3	0.68	5.90	8.78	12.81
4	4.30	10.81	11.01	25.39

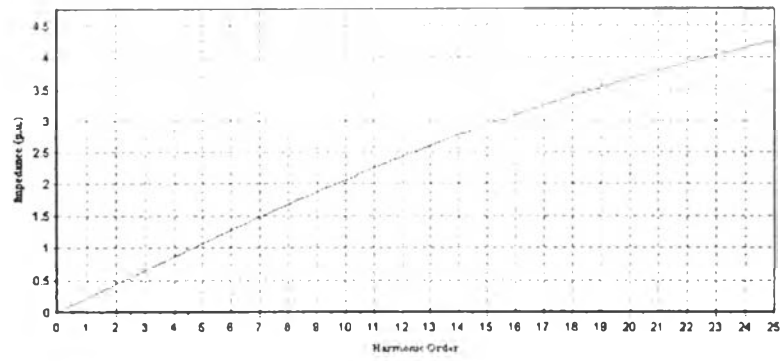
ตารางที่ 7.21(ข) สรุปค่า THD_i (% Of I_i) ของ อุปกรณ์ในระบบ ในกรณีต่างๆ

Case	Tr #1 (115 kV)	Tr #2 (400 V)	Tr #3 (400 V)	Load #1 (22 kV)	Load #2 (400 V)	Load #3 (400 V)	Cap #1 (22 kV)	Cap #2 (400 V)
	THD_i (%)	THD_i (%)	THD_i (%)	THD_i (%)	THD_i (%)	THD_i (%)	THD_i (%)	THD_i (%)
1	12.68	9.57	2.57	3.26	7.32	2.57	-	-
2	32.05	9.04	5.08	5.82	7.89	5.08	47.33	-
3	28.86	8.89	30.27	5.04	7.07	10.32	40.85	86.48
4	40.69	8.24	60.99	9.23	8.87	20.44	75.00	174.40

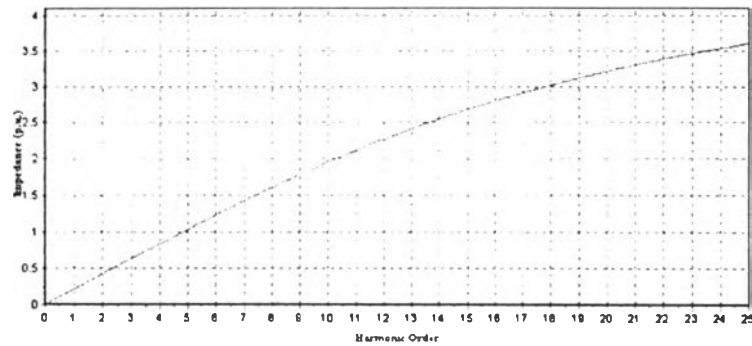
หากพิจารณา กราฟอิมพีแดนซ์สมมูล ของ บัส 2 , 3, และ 4 จะได้กราฟดังรูปที่ 7.9 ถึง รูปที่ 7.17



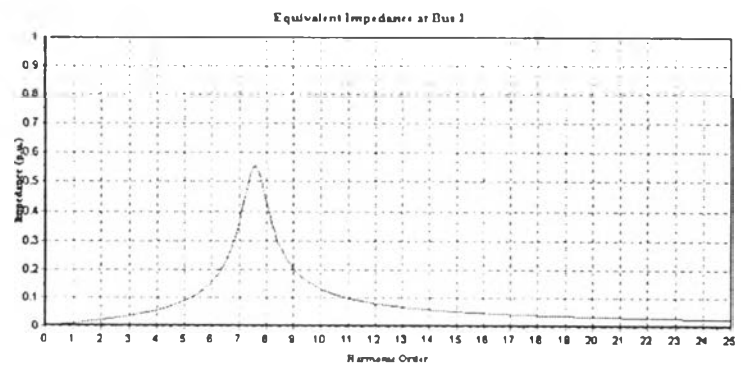
รูปที่ 7.9 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของ บัสที่ 2 ในกรณีที่ 1



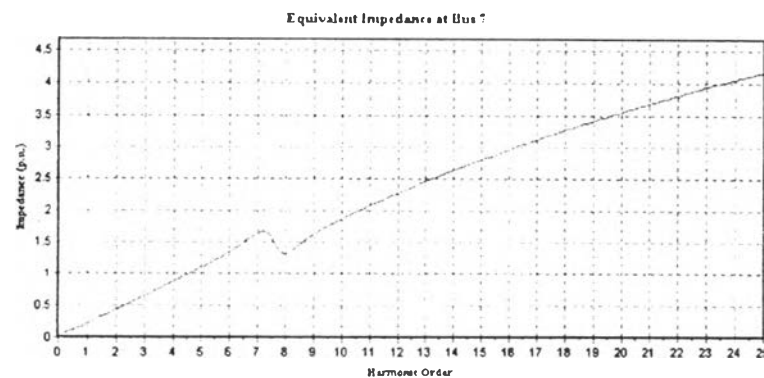
รูปที่ 7.10 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ บัสที่ 3 ในกรณีที่ 1



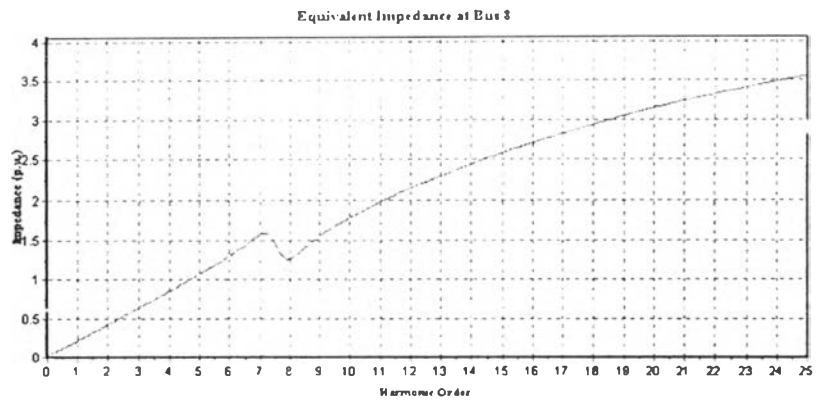
รูปที่ 7.11 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของ บัสที่ 4 ในกรณีที่ 1



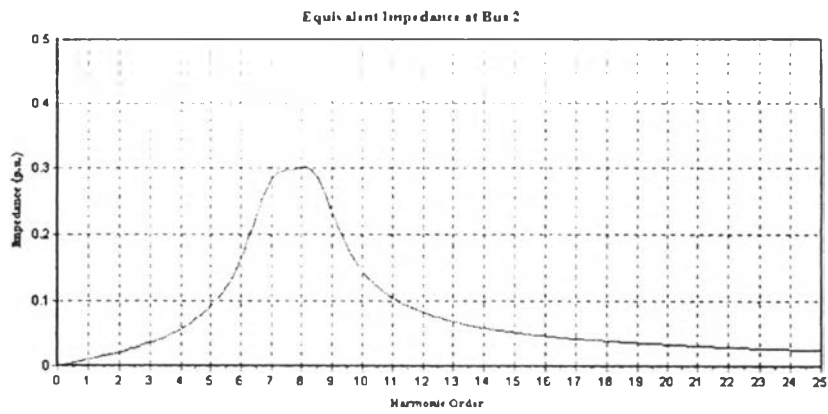
รูปที่ 7.12 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของ บัสที่ 2 ในกรณีที่ 2



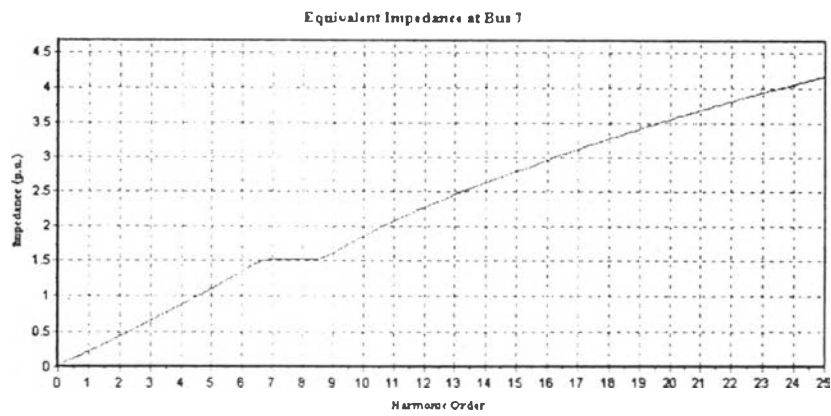
รูปที่ 7.13 อิมพีแดนซ์สมมูลฮาร์โมนิกลำดับต่างๆของ บัสที่ 3 ในกรณีที่ 2



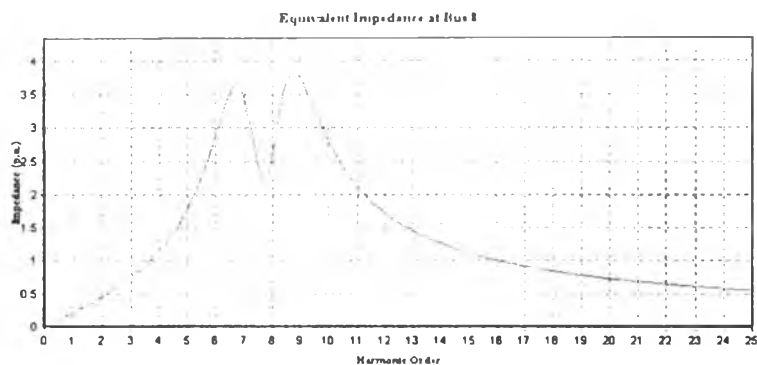
รูปที่ 7.14 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของ บัสที่ 4 ในกรณีที่ 2



รูปที่ 7.15 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของ บัสที่ 2 ในกรณีที่ 3



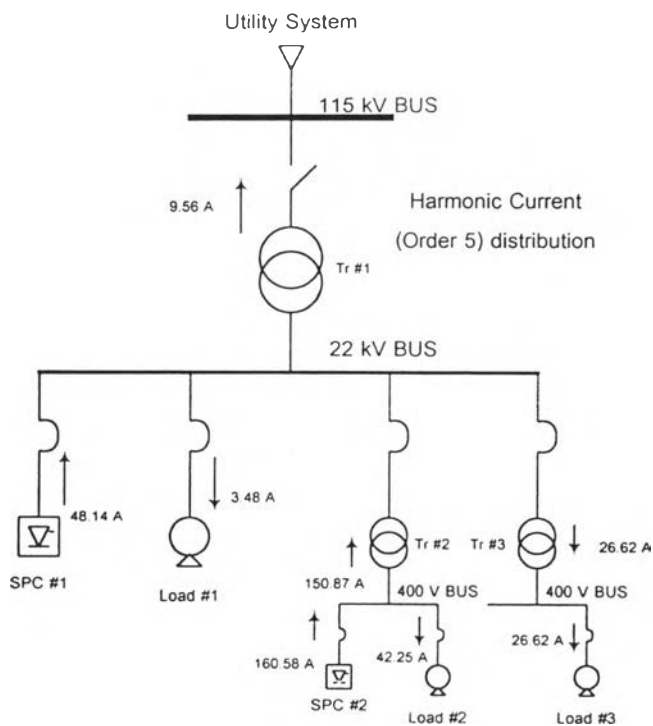
รูปที่ 7.16 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของ บัสที่ 3 ในกรณีที่ 3



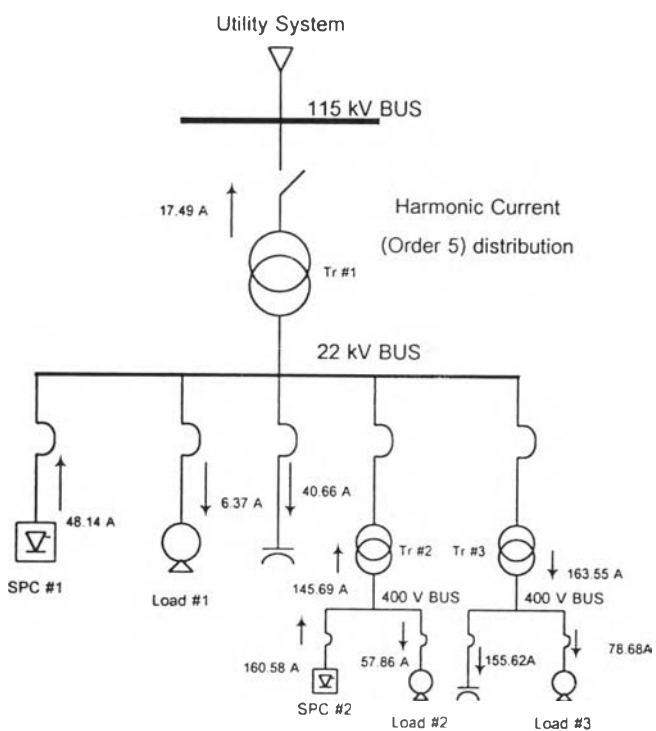
รูปที่ 7.17 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของ บัสที่ 4 ในกรณีที่ 3

จากข้อมูล และ กราฟอิมพีแดนซ์สมมูล ในกรณีต่างๆ จะเห็นได้ว่า ผลกระทบเนื่องจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกทางด้านแรงดันสูง และ แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกของโรงงานที่อยู่ข้างเคียง (Plant #1) หรือจากแรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายไฟเอง อาจส่งผลให้ อุปกรณ์ที่อยู่ในโรงงานที่ไม่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (Plant #2) โดยเฉพาะชุดคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังได้รับความเสียหายได้ ซึ่งจากตัวอย่างพบว่าในกรณีที่ 3 กระแสประสิทธิผล (I_{RMS}) ที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์ที่ต่อใช้งานอยู่ในโรงงานที่ 2 (Plant #2) มีค่าเป็น ร้อยละ 132.20 และ กรณีที่ 4 มีค่าเป็น ร้อยละ 201.04 ซึ่งเกินค่ามาตรฐานที่จะทนได้ของคาปาซิเตอร์ สาเหตุที่ทำให้กระแสไหลผ่านคาปาซิเตอร์มาก เนื่องจากเกิดการขยายของกระแสฮาร์มอนิกจากสภาวะเรโซแนนซ์ (ดูได้จากกราฟอิมพีแดนซ์สมมูลของบัสที่4) โดยเฉพาะลำดับที่ 5 และ 7 ซึ่งเป็นลำดับที่ใกล้เคียงกับจุดเรโซแนนซ์ สิ่งเหล่านี้เองอาจจะทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้

สำหรับตัวอย่างการกระจายตัวของกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 แสดงดังรูปที่ 7.18 และ รูปที่ 7.19



รูปที่ 7.18 การกระจายตัวของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 (กรณีที่ 1)



รูปที่ 7.19 การกระจายตัวของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 (กรณีที่ 3)

ในการแก้ปัญหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมเกินและป้องกันการเสียหายของ คาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งทั้งด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำนั้นจะต้องการดูผลกระทบจากต้นเหตุของปัญหา ว่ามาจากจุดใด สำหรับกรณีนี้ถือว่ามีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ 3 จุด ดังนั้นจะวิเคราะห์ว่า เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกที่ละจุดแล้วนั้น กระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์จะเป็นเท่าใด ผลการวิเคราะห์กระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์ทั้งสอง โดยพิจารณาที่ละจุด แสดงดังตารางที่ 7.22 จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า THD_i ของ คาปาซิเตอร์ที่โรงงานที่ 2 มีค่าดังนี้

- แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจากบัสแรงดันสูง THD_i (Cap at Plant #2) = 79.44 %
- แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจากบัสแรงดันต่ำ THD_i (Cap at Plant #2) = 7.22 %
- Back ground harmonic voltage THD_i (Cap at Plant #2) = 149 %

จะเห็นได้ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่เป็นของโรงงานอุตสาหกรรมที่สำคัญ คือ แหล่งกำเนิดที่ต่ออยู่ด้านแรงดันสูง ส่วนกรณีมาจากแหล่งจ่ายไฟนั้น โรงงานอุตสาหกรรมไม่สามารถควบคุมได้ ถึงแม้จะทำให้เกิดผลร้ายแรงที่สุดก็ตาม ดังนั้นแนวทางการแก้ปัญหาในส่วนของโรงงานเอง คือ ออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ใกล้เคียงกับจุดเกิดเรโซแนนซ์ออกจากระบบ และควรออกแบบติดตั้งด้านแรงดันสูง เนื่องจากจะก่อให้เกิดผลร้ายแรงกว่าด้านแรงดันต่ำ อีกทั้งยังจะช่วยกรองฮาร์มอนิกที่มาจากแหล่งจ่ายไฟของการไฟฟ้าด้วย ในที่นี้จะใช้ตัวกรองลำดับ ที่ 5 และ 7 ซึ่งจากการออกแบบวงจรกรอง ข้อมูลของตัวกรองแต่ละชุดออกแบบได้ ค่าพิกัดของคาปาซิเตอร์ดังนี้

ตัวกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 5

พิกัดแรงดัน ของ Cap	= 24 kV
kVAr ของ Cap	= 7500 kVAr
Tuning Point	= 4.8
Q-Factor	= 80

ตัวกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 7

พิกัดแรงดัน ของ Cap	= 24 kV
kVAr ของ Cap	= 3000 kVAr
Tuning Point	= 6.8
Q-Factor	= 80

เมื่อได้ค่าพิกัดของตัวกรองฮาร์มอนิกแล้วจะต้องวิเคราะห์ดูว่า ตัวกรองนั้นสามารถทนกับภาวะที่จะต้องให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านหรือไม่ ผลการคำนวณ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ และ กระแสฮาร์มอนิก ที่ไหลผ่านตัวกรองฮาร์มอนิก คาปาซิเตอร์ และส่วนที่ไหลกลับเข้าสู่ระบบของแหล่งจ่ายไฟ

Harm Order	แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกจากบัส แรงดันสูง (22 kV)				แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกจากบัส แรงดันต่ำ (400 kV)				แรงดันฮาร์โมนิกจากแหล่งจ่าย (Background harmonic voltage)			
	Capacitor #1		Capacitor #2		Capacitor #1		Capacitor #2		Capacitor #1		Capacitor #2	
	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%
1	229.63	100.00	577.35	100.00	229.63	100.00	577.35	100.00	229.63	100.00	577.35	100.00
5	38.43	16.74	147.13	25.48	2.25	0.98	8.59	1.49	41.24	17.96	157.78	27.33
7	65.04	28.32	427.23	74.00	6.14	2.67	40.33	6.98	128.08	55.78	841.73	145.70
11	33.08	14.41	73.48	12.73	2.60	1.13	5.78	1.0	35.38	15.14	78.63	13.62
13	19.74	8.60	25.82	4.47	1.63	0.71	2.13	0.37	23.18	10.10	30.34	5.26
17	21.14	5.29	7.74	1.34	0.92	0.40	0.59	0.10	9.59	4.17	6.12	1.06
19	8.42	3.67	4.10	0.71	0.70	0.31	0.34	0.06	8.15	3.55	3.98	0.69
23	7.38	3.21	2.32	0.40	0.49	0.22	0.16	0.03	6.33	2.76	1.99	0.34
25	5.44	2.35	1.41	0.24	0.39	0.17	0.10	0.02	2.86	1.24	0.75	0.13
29	4.34	1.89	0.81	0.14	0.28	0.12	0.05	0.01	2.40	1.04	0.45	0.08
31	3.81	1.66	0.64	0.11	0.19	0.08	0.03	0.01	2.22	0.97	0.36	0.06
I_{h_TOTAL}	86.75	37.78	458.61	79.44	7.44	3.20	41.69	7.22	141.81	61.76	860.27	149.00
I_{RMS}	245.47	106.90	737.33	127.71	229.75	100.05	578.85	100.26	269.89	117.53	1036.05	179.45

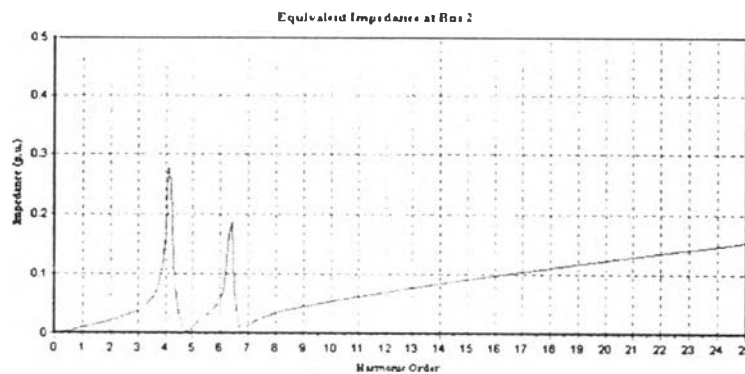
ตารางที่ 7.22 ผลการคำนวณกระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์ เมื่อคิดจากแหล่งกำเนิดที่ละจุด

แสดงดังตาราง ที่ 7.23 โดยในตารางที่ 7.23(ข) เป็นกรณีที่เกิดผลของแรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่าย ซึ่งถือว่าเป็นกรณีเลวร้ายสุด ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ว่า พิกัดของตัวกรองฮาร์มอนิกจะทนได้หรือไม่ และเมื่อเปรียบเทียบ ค่า THDi ค่ากระแสประสิทธิผล และ ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวม (I_{h_TOTAL}) ของ คาปาซิเตอร์ในโรงงานที่ 2 ก่อน และ หลัง การติดตั้ง ตัวกรองฮาร์มอนิก สรุปได้ดังตารางที่ 7.24 (โดยเปรียบเทียบกับกรณีที่ 3)

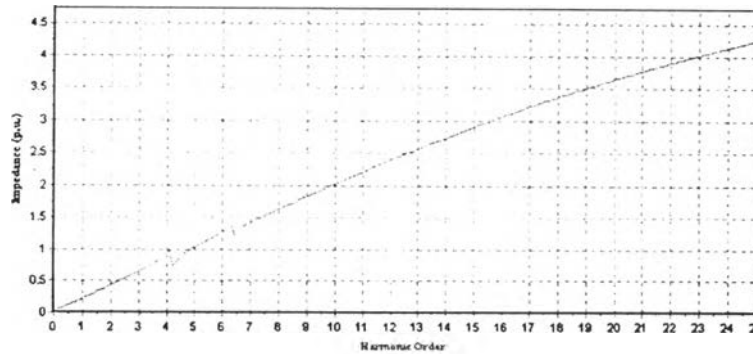
ตารางที่ 7.24 เปรียบเทียบค่า THD_v และ THD_i (ของคาปาซิเตอร์ที่บัส 4) เมื่อใช้คาปาซิเตอร์ และ เมื่อใช้ตัวกรองที่ บัสแรงดันสูงแทน

Index	เมื่อใช้ Capacitor	เมื่อใช้ Filter (at HV bus)
I_{h_TOTAL} (Amp)	499.27	68.58 (ลดลง 86.26 %)
I_{RMS} (Amp)	763.28 (132.2 % of I_1)	581.41(100.70 % of I_1)
THD _i (% Of I_1)	86.48 ($I_1 = 577.35$ Amp)	2.06 ($I_1 = 577.35$ Amp)

จากตารางที่ 7.24 เห็นได้ว่า ค่ากระแสประสิทธิผลของคาปาซิเตอร์แรงต่ำจะลดลงมาก ซึ่งช่วยป้องกันไม่ให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ หากพิจารณารูปกราฟอิมพีแดนซ์สมมูลของบัสที่ 2,3 และ 4 หลังการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกแทนคาปาซิเตอร์ จะได้กราฟดังรูปที่ 7.20



รูปที่ 7.20 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของบัสที่ 2 เมื่อติดตั้งตัวกรอง



รูปที่ 7.21 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของบัสที่ 3 เมื่อติดตั้งตัวกรอง

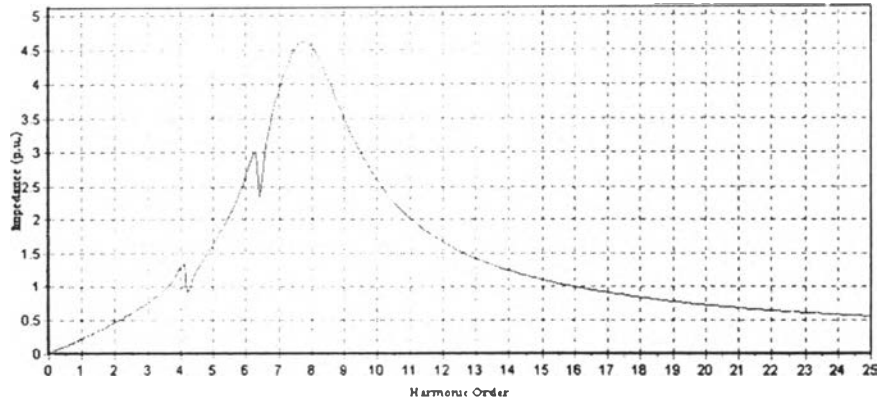
Harm Order	System (115 kV)		Filter #1 (5 th)		Filter #2 (7 th)		Capacitor #2	
	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%
1	73.10	100.00	172.89	100.00	67.92	100.00	577.35	100.00
5	2.19	3.00	42.66	24.67	3.20	4.73	19.51	3.38
7	0.69	0.94	2.01	1.16	14.84	21.94	20.64	3.58
11	1.82	2.49	3.47	2.01	3.65	5.40	45.53	7.89
13	1.48	2.02	2.64	1.53	2.52	3.73	30.39	5.26
17	1.15	1.58	1.94	1.12	1.70	2.52	17.79	3.43
19	0.85	1.17	1.41	0.81	1.21	1.79	13.95	2.42
23	0.79	1.08	1.27	0.73	1.07	1.58	12.14	2.10
25	0.59	0.80	0.94	0.54	0.79	1.16	8.91	1.54
29	0.48	0.65	0.76	0.44	0.63	0.93	7.07	1.22
31	0.42	0.57	0.66	0.38	0.54	0.80	6.12	1.06
I_{h_TOTAL}	3.77	5.16	43.04	24.89	16.03	23.70	68.58	11.88
I_{RMS}	73.19	100.13	178.17	103.05	69.49	102.77	581.41	100.70

ตารางที่ 7.23 (ก) แสดงผลการคำนวณกระแสที่ไหลผ่าน ไหลเข้าสู่ระบบ ตัวกรองฮาร์มอนิก และ คาปาซิเตอร์ โดยคิดผลจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 (SPC #1 + SPC #2)

Harm Order	Tr #1 (115 kV)		Filter #1 (5 th)		Filter #2 (7 th)		Capacitor #2	
	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%
1	73.10	100.00	172.89	100.00	67.92	100.00	577.35	100.00
5	7.55	10.33	61.52	35.58	4.61	6.82	28.02	4.85
7	5.71	7.81	4.19	2.43	30.96	45.79	42.93	7.43
11	2.10	2.87	4.97	2.87	5.23	7.73	65.12	11.28
13	1.64	2.24	3.97	2.30	3.79	5.61	45.66	7.91
17	1.08	1.48	2.45	1.42	2.15	3.19	25.02	4.33
19	0.79	1.08	1.93	1.12	1.67	2.46	19.17	3.32
23	0.68	0.94	1.66	0.96	1.40	2.07	15.92	2.76
25	0.51	0.69	1.07	0.62	0.89	1.32	10.13	1.75
29	0.40	0.54	0.87	0.50	0.72	1.07	8.12	1.41
31	0.34	0.46	0.77	0.44	0.63	0.94	7.12	1.23
$I_{h_{TOTAL}}$	9.97	13.65	62.11	35.93	32.13	47.52	102.08	17.68
I_{RMS}	73.77	100.93	183.71	106.26	74.86	110.72	586.31	101.55

ตารางที่ 7.23(ข) ผลการคำนวณกระแสที่ไหลผ่าน ผ่านหม้อแปลงกำลัง ตัวกรองฮาร์มอนิก และ คาปาซิเตอร์

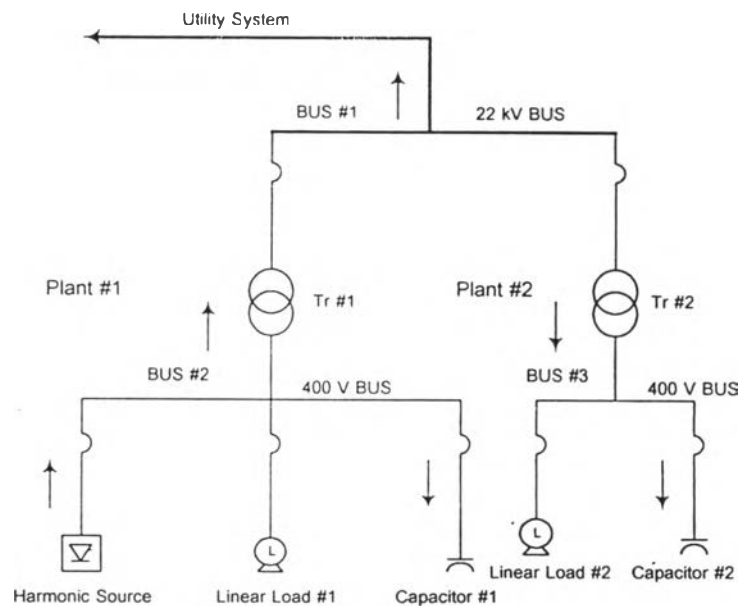
โดยคิดผลจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 (SPC #1 + SPC #2) และ แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจาก แหล่งจ่ายไฟ (Worst Case)



รูปที่ 7.22 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของบัสที่ 4 เมื่อติดตั้งตัวกรอง(ด้าน HV)

จากตัวอย่างนี้ จะสังเกตได้ ว่า ถึงแม้ว่า โรงงานที่ไม่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกอยู่ แต่อาจได้รับผลกระทบจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่อยู่ข้างเคียงได้ โดยเฉพาะถ้าโรงงานนั้นมีการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เพราะจะเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกเนื่องจากสถานะเรโซแนนซ์

(ค) ตัวอย่างที่ 3 เป็นการศึกษากาหนดผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกระหว่างโรงงานที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก กับโรงงานที่ไม่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก แต่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ ซึ่งคล้ายกับกรณีของตัวอย่างที่ 2 แต่ในตัวอย่างนี้ จะศึกษาผลของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่ต่ออยู่ด้านแรงต่ำ โดอะแกรมของโรงงานที่ศึกษาแสดงดังรูปที่ 7.23



รูปที่ 7.23 โดอะแกรมของโรงงานตัวอย่างที่ 3

สิ่งที่ต้องการศึกษาในตัวอย่างนี้ คือ ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโรงงานที่ 1 (Plant #1) จะไหลผ่านไปยัง หม้อแปลง คาปาซิเตอร์ และ ระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้ามากน้อยเพียงใด

-ข้อมูลเบื้องต้น สำหรับข้อมูลของโรงงานที่ 1 เป็นข้อมูลของระบบตัวอย่างที่ 1 ส่วนข้อมูลของโรงงานที่ 2 มีดังนี้

หม้อแปลง ขนาด 2000 kVA 22 kV/400 V Delta-Wyn ground, %Z = 6.5, Loss = 25 kW
แรงดันขณะทำงาน 400 V.

โหลด P = 1275 kW, Q = 790.2 kVAr

คาปาซิเตอร์ พิกัดแรงดัน 400 V ,900 kVAr

ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก ของแต่ละบัส แสดงดังตาราง ที่ 7.25 ดังนี้

ตารางที่ 7.25 แสดงผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกของตัวอย่างที่ 3

Order (h)	Bus #1 (PCC Bus :22 kV)		Bus # 2 (400 V)		Bus #3 (400 V)	
	kV	%	kV	%	kV	%
1	22.00	100.00	0.400	100.00	0.400	100.00
5	0.063	0.285	0.010	2.433	0.003	0.728
7	0.100	0.453	0.020	5.076	0.004	0.918
11	0.014	0.066	0.003	0.680	-	-
13	0.008	0.037	0.002	0.381	-	-
17	0.003	0.015	0.001	0.154	-	-
19	0.002	0.010	-	-	-	-
23	0.001	0.006	-	-	-	-
25	0.001	0.004	-	-	-	-
29	0.001	0.003	-	-	-	-
31	0.001	0.003	-	-	-	-
Vh _{TOTAL}	0.119	0.541	1.023	5.69	0.005	1.172
V _{RMS}	22.00	100.00	0.401	100.16	0.400	100.00

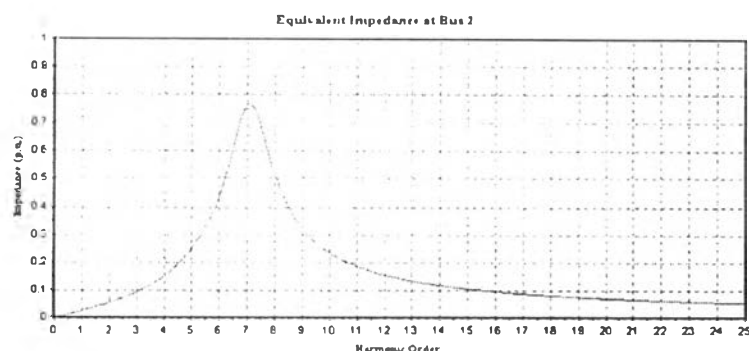
เมื่อพิจารณาข้อมูลเบื้องต้น และกราฟอิมพีแดนซ์สมมูลของโรงงานที่ 2 พบว่าจุดเรโซแนนซ์อยู่ที่ประมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5.6 นั้นหมายถึงเมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ใกล้เคียงจุดเรโซแนนซ์นี้ไหลเข้ามาจะเกิดการขยายกระแสได้ สำหรับผลการคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิก แสดงดังตารางที่ 7.27 ซึ่งจะเห็นได้ว่า กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ใกล้เคียงกับจุดเรโซแนนซ์จะเกิดการขยายขึ้น

จุดที่สนใจคือกระแสที่ไหลผ่านมายังคาปาซิเตอร์ของโรงงานที่ 2 มีขนาดเท่าใด และ กระแสในส่วนที่ไหลกลับเข้าไปยังระบบ จะเพิ่ม หรือ ลด เท่าใด เมื่อเทียบกับตอนที่โรงงานที่ 1 ทำงานเพียงโรงงานเดียว

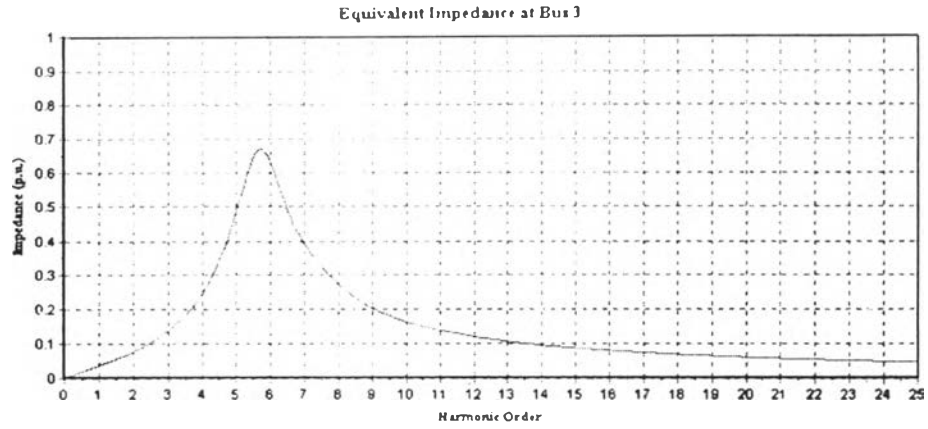
ตารางที่ 7.26 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบ เมื่อโรงงานที่ 1 ทำงานแห่งเดียว และ เมื่อโรงงานทั้ง 2 ทำงานพร้อมกัน

Harmonic Order	Plant #1 Operate Only	Plant #1, Plant #2 Operate
5	4.78	*5.23 (เพิ่มขึ้น)
7	7.47	5.95
11	0.51	0.55
13	0.29	0.26
17	0.09	0.08
19	0.05	0.05
23	0.03	0.02
25	0.02	0.02
29	0.01	0.01
31	0.01	0.01
I_{hTOTAL}	8.89	7.95

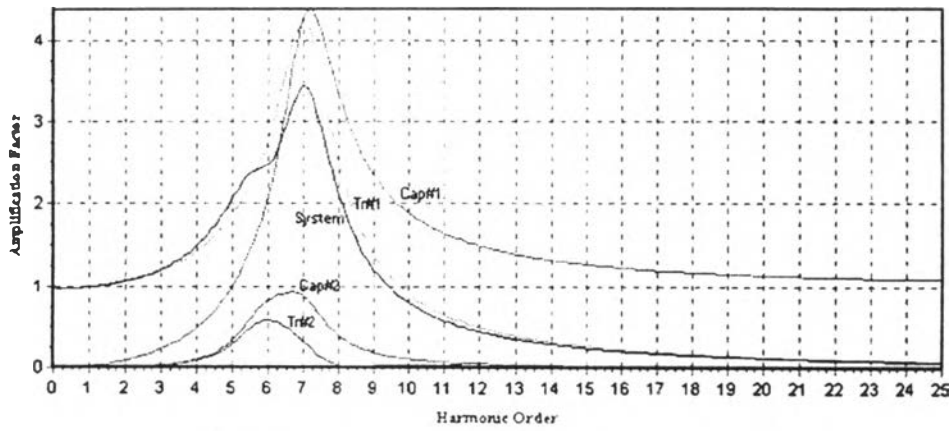
จากตารางที่ 7.26 พบว่าในกรณีที่โรงงานทั้ง 2 ทำงานพร้อมกันกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ที่ไหลเข้าสู่ระบบจะเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตอนที่โรงงานที่ 1 ทำงาน เพียงโรงเดียว ทั้งนี้เพราะสถานะเรโซแนนซ์จากโรงงานที่ 2 นั้นเอง เมื่อพิจารณาจากกราฟอัตราขยายกระแส ดังรูปที่ 7.26 จะเห็นได้ชัดเจนว่า กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้ามาที่ยังคาปาซิเตอร์ของโรงงานที่ 2 จะถูกขยายเพิ่มขึ้นอีก (เปรียบเทียบกับกระแสที่ผ่านหม้อแปลง) และจากตารางที่ 7.27 ถึงแม้ว่าค่ากระแสประสิทธิผลที่ไหลผ่าน คาปาซิเตอร์ชุดที่ 2 จะอยู่ในค่าจำกัดตามมาตรฐาน (100.27 %) และ ค่า THD_iเพียงร้อยละ 7.39 แต่สิ่งเหล่านี้จะส่งผลให้อายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์ลดน้อยลง และเมื่อสถานะที่จุดเรโซแนนซ์เกิดขึ้นตรงกับลำดับฮาร์มอนิกที่มีค่ามากของโรงงานที่ 1 อัตราการขยายกระแสจะเกิดมากกว่านี้ หากพิจารณากราฟอัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆแล้ว จะเห็นได้ชัดเจนว่า ผลกระทบจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่อยู่โรงงานข้างเคียงมีอิทธิพลมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 7.24 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของบัสที่ 2

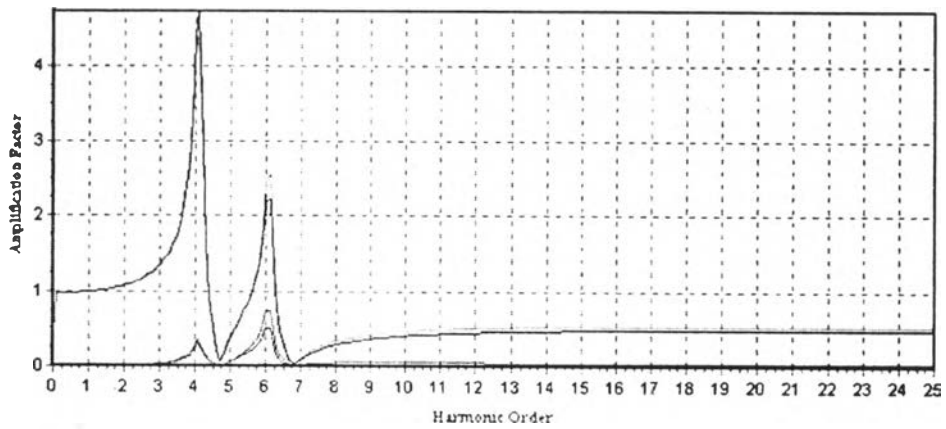


รูปที่ 7.25 อิมพีแดนซ์สมมูลที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆของบัสที่ 3



รูปที่ 7.26 กราฟแสดงอัตราขยาย (Amplification Factor)

เมื่อแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ต่ออยู่ที่บัสที่ 2



รูปที่ 7.27 กราฟแสดงอัตราขยาย (Amplification Factor) เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิก

หากหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะเดินเครื่องของโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ในขณะที่โรงงานที่ 2 กำลังทำงาน แนวทางการแก้ปัญหาของกรณีนี้ คือ พยายามลดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ด้วยการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก แทนชุดคาปาซิเตอร์ดังได้กล่าวมาแล้วในตัวอย่างที่ 1

Harm Order	Source (SPC)		System (PCC)		Tr #1 (HV)		Tr #2 (HV)	
	Amp	%	Amp	%	Amp	%	Amp	%
1	721.69	100.00	83.99	100.00	48.15	100.00	35.85	100.00
5	138.56	19.20	5.23	6.23	4.77	9.90	0.86	2.41
7	95.26	13.20	5.95	7.09	7.32	15.21	1.52	4.24
11	52.68	7.30	0.55	0.66	0.62	1.29	0.07	0.19
13	41.14	5.70	0.26	0.31	0.29	0.61	0.03	0.08
17	25.26	3.50	0.08	0.10	0.09	0.19	0.01	0.02
19	19.49	2.70	0.05	0.06	0.05	0.11	-	-
23	14.43	2.0	0.02	0.02	0.03	0.05	-	-
25	11.55	1.60	0.02	0.02	0.02	0.04	-	-
29	10.10	1.40	0.01	0.01	0.01	0.02	-	-
31	8.66	1.20	0.01	0.01	0.01	0.02	-	-
Ih _{TOTAL}	185.147	25.655	7.95	9.47	8.76	18.20	1.75	4.88
I _{RMS}	745.06	103.238	84.37	100.45	48.94	101.64	35.89	100.12

Harm Order	Cap # 1(LV)		Cap # 2(LV)	
	Amp	%	Amp	%
1	1154.70	100.00	1299.04	100.00
5	140.40	12.16	47.26	3.64
7	410.06	35.51	83.42	6.42
11	86.31	7.47	3.77	0.29*
13	57.18	4.95	1.63	0.13
17	30.24	2.62	0.46	0.04
19	22.45	1.94	0.27	0.02
23	15.86	1.37	0.12	0.01
25	12.50	1.08	0.08	0.01
29	10.71	0.93	-	-
31	9.11	0.79	-	-
Ih _{TOTAL}	447.89	38.79	95.97	7.39
I _{RMS}	1238.52	107.26	1302.58	100.27

ตารางที่ 7.27 ผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก ผ่านไปยังโรงงานที่ 2 (แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก อยู่ที่โรงงาน ที่ 1)