

บทที่ 6

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรมที่พัฒนา

6.1 บทนำ

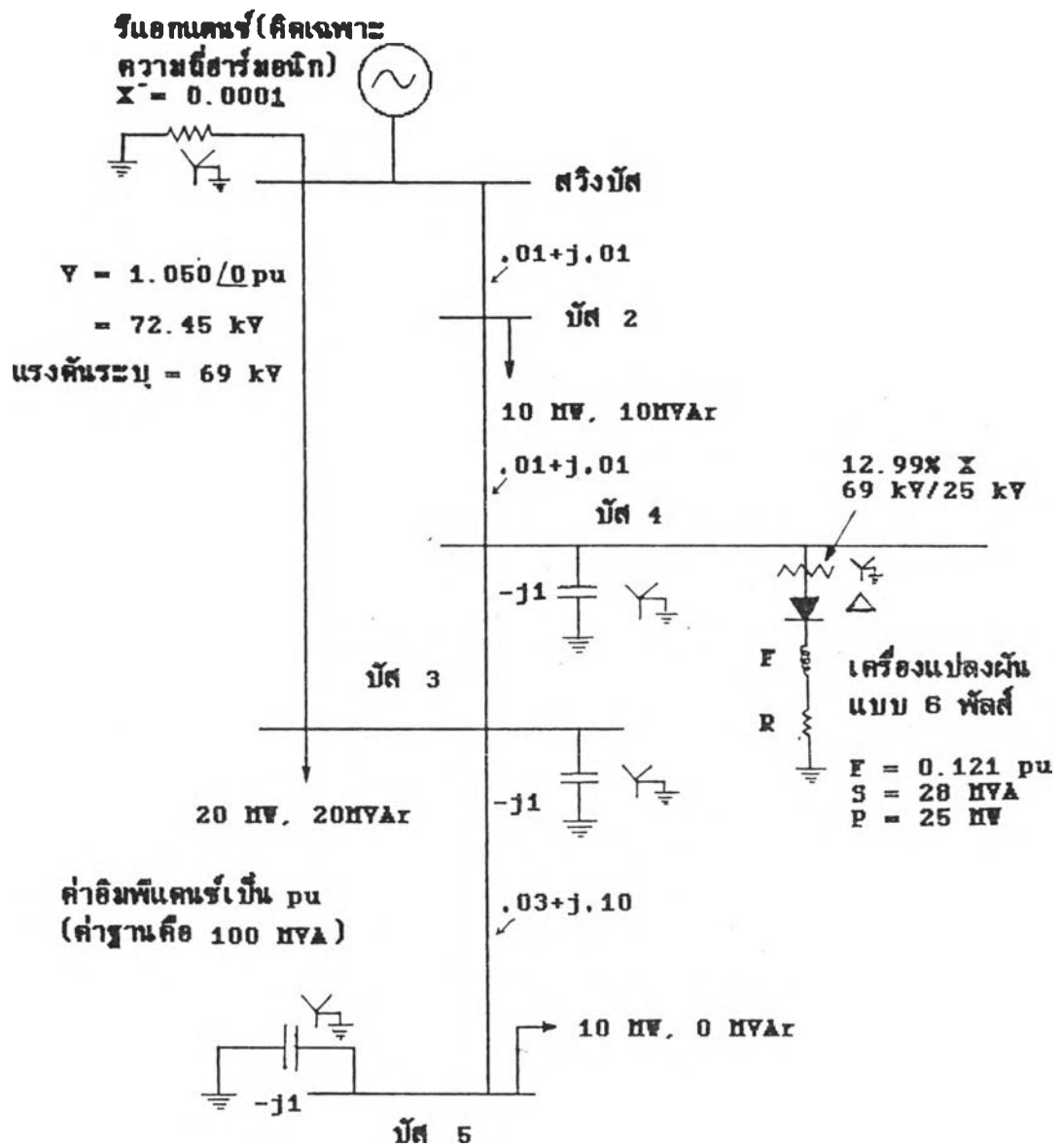
บทนี้แสดงการประยุกต์ใช้โปรแกรม HARMONIC คำนวณ 2 ตัวอย่าง ในตัวอย่างแรกเป็นระบบไฟฟ้า 5 บัส โดยมีเครื่องแปลงผันแบบพาสซีฟ 6 พัลส์ จะใช้โปรแกรมเพื่อดูความเป็นไปของการติดกะแปซิเตอร์ขนาดต่างๆและหาขนาดกะแปซิเตอร์ที่เหมาะสม ตัวอย่างที่สองเป็นระบบเรเดียล (Radial System) มีเครื่องแปลงผันแบบแยกที่ฟ 12 พัลส์ จะดูค่าพารามิเตอร์ของเครื่องแปลงผันเมื่อเปลี่ยนโหลดที่เครื่องแปลงผัน

6.2 การทดสอบโปรแกรม HARMONIC

รูปที่ 6.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่อง มีโหลดไม่เชิงเส้นที่บัส 4 ซึ่งเป็นเครื่องเรียงกระแส (Rectifier) แบบพาสซีฟ 6 พัลส์ ต่อผ่านหม้อแปลงแบบกราวด์วาย-เดลตา มีค่ารีแอคแตนซ์รั่วลำดับบวก (Positive Sequence Leakage Reactance) 0.075 pu ค่ารีแอคแตนซ์ในวงจรต้านกระแสตรง 0.121 pu (ที่ 50 Hz) กำลังไฟฟ้าจริง 0.25 pu กำลังไฟฟ้าเสมือน 0.28 pu ที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (สวิงบัส) มีขนาดแรงดันสูงกว่าแรงดันระบุ 5% และมีรีแอคแตนซ์ต่อไปดิน (X^-) มีขนาด 0.0001 pu (ที่ 50 Hz) ค่านี้เป็นอิมพีแดนซ์ที่ใช้คิดเฉพาะที่ฮาร์มอนิก (Harmonic Only Impedance)

ใช้โปรแกรม HARMONIC เพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดกะแปซิเตอร์ที่บัส 3 และ 5 โดยแยกเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ทำการคงขนาดกะแปซิเตอร์ที่บัส 3 ($Z_3 = -j1.0$ pu) แต่แปรขนาดที่บัส 5 จะได้ผลสรุปตามตารางที่ 6.1-6.3



รูปที่ 6.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

ตารางที่ 6.1
ขนาดแรงดันบัตรแปรตามขนาดกะแป้รีเตอร์

ขนาดกะแป้รีเตอร์ที่บัตร 5 (pu)	จำนวนการวนซ้ำ	ขนาดแรงดันบัตร 3 (RMS pu)	ขนาดแรงดันบัตร 5 (RMS pu)
0.1	7	0.91	0.01
0.2	7	0.91	0.01
0.3	7	1.15	1.70
0.4	7	1.13	1.49
0.5	7	1.11	1.38
0.6	7	1.10	1.32
0.7	7	1.10	1.28
0.8	7	1.09	1.25
0.9	7	1.09	1.22
1.0	7	1.09	1.21

หมายเหตุ : จำนวนการวนซ้ำ หมายถึง จำนวนครั้งของการวนซ้ำ (Number of Iterations) ของอัลกอริทึมการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์โมนิก

ตารางที่ 6.2
ขนาดกระแสแปรตามขนาดกะแป้รีเตอร์

ขนาดกะแป้รีเตอร์ที่บัส 5 (pu)	จำนวนการวนซ้ำ	ขนาดกระแส 2-4 (RMS pu)	ขนาดกระแส 4-3 (RMS pu)
0.1	7	3.17	3.68
0.2	7	3.17	3.68
0.3	7	3.59	2.59
0.4	7	2.71	1.75
0.5	7	2.28	1.33
0.6	7	2.02	1.08
0.7	7	1.85	0.92
0.8	7	1.73	0.81
0.9	7	1.64	0.72
1.0	7	1.57	0.66

ตารางที่ 6.3
ขนาดแรงดันฮาร์มอนิกแปรตามขนาดกะแปรีเตอร์

ขนาดกะแปรีเตอร์ที่บัส 5 (pu)	จำนวนการวนซ้ำ	แรงดันฮาร์มอนิก อันดับ 5 (ขนาด) ที่บัส 3	แรงดันฮาร์มอนิก อันดับ 5 (ขนาด) ที่บัส 5
0.1	7	0.0072	0.0003
0.2	7	0.0072	0.0006
0.3	7	0.0062	0.0008
0.4	7	0.0062	0.0012
0.5	7	0.0062	0.0015
0.6	7	0.0061	0.0019
0.7	7	0.0060	0.0023
0.8	7	0.0059	0.0028
0.9	7	0.0058	0.0032
1.0	7	0.0057	0.0038

กรณีที่ 2 ทำการคงขนาดคัปเปอเรเตอร์ที่บัส 5 ($Z_5 = -j1.0 \text{ pu}$) แต่แปรขนาดที่บัส 3 ได้ผลสรุปตามตารางที่ 6.4-6.6

ตารางที่ 6.4
ขนาดแรงดันบัสแปรตามขนาดคัปเปอเรเตอร์

ขนาดคัปเปอเรเตอร์ที่บัส 3 (pu)	จำนวนการวนซ้ำ	ขนาดแรงดันบัส 3 (RMS pu)	ขนาดแรงดันบัส 5 (RMS pu)
0.1	7	1.27	1.41
0.2	6	1.17	1.29
0.3	7	1.13	1.25
0.4	10	1.12	1.24
0.5	14	1.11	1.23
0.6	8	1.10	1.22
0.7	7	1.10	1.21
0.8	7	1.09	1.21
0.9	7	1.09	1.21
1.0	7	1.09	1.21

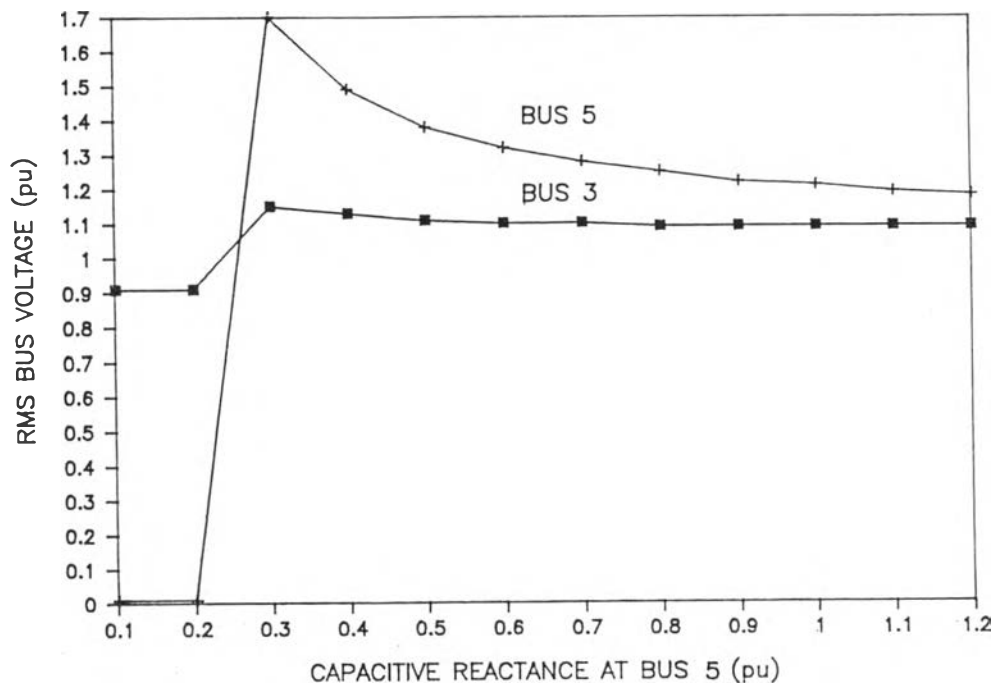
ตารางที่ 6.5
ขนาดกระแสแปรตามขนาดกะเป็ชเตอร์

ขนาดกะเป็ชเตอร์ที่บ้ช 3 (pu)	จำนวนการวนซ้ำ	ขนาดกระแส 2-4 (RMS pu)	ขนาดกระแส 4-3 (RMS pu)
0.1	7	6.84	5.80
0.2	6	3.71	2.74
0.3	7	2.78	1.84
0.4	10	2.34	1.40
0.5	14	2.08	1.15
0.6	8	1.91	0.98
0.7	7	1.79	0.86
0.8	7	1.70	0.78
0.9	7	1.63	0.71
1.0	7	1.57	0.66

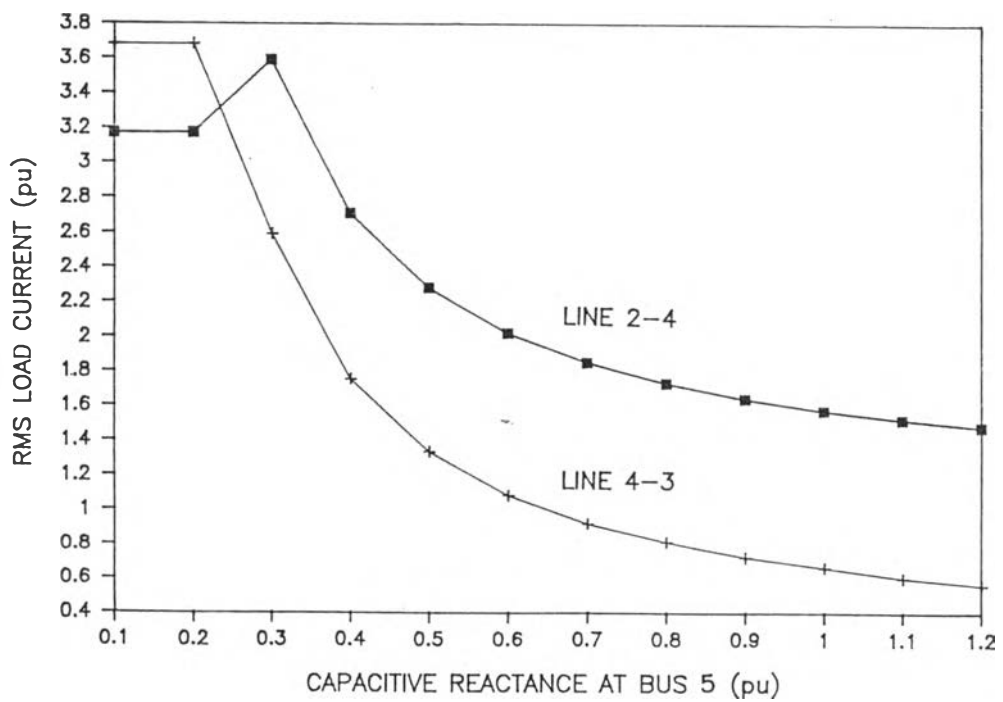
ตารางที่ 6.6
ขนาดแรงดันฮาร์มอนิกแปรตามขนาดกะแป้เตอร์

ขนาดกะแป้เตอร์ที่บัส 3 (pu)	จำนวนการวนซ้ำ	แรงดันฮาร์มอนิก อันดับ 5 (ขนาด) ที่บัส 3	แรงดันฮาร์มอนิก อันดับ 5 (ขนาด) ที่บัส 5
0.1	7	0.0013	0.0008
0.2	6	0.0042	0.0028
0.3	7	0.0131	0.0087
0.4	10	0.0202	0.0134
0.5	14	0.0118	0.0078
0.6	8	0.0087	0.0058
0.7	7	0.0073	0.0049
0.8	7	0.0065	0.0043
0.9	7	0.0060	0.0040
1.0	7	0.0057	0.0038

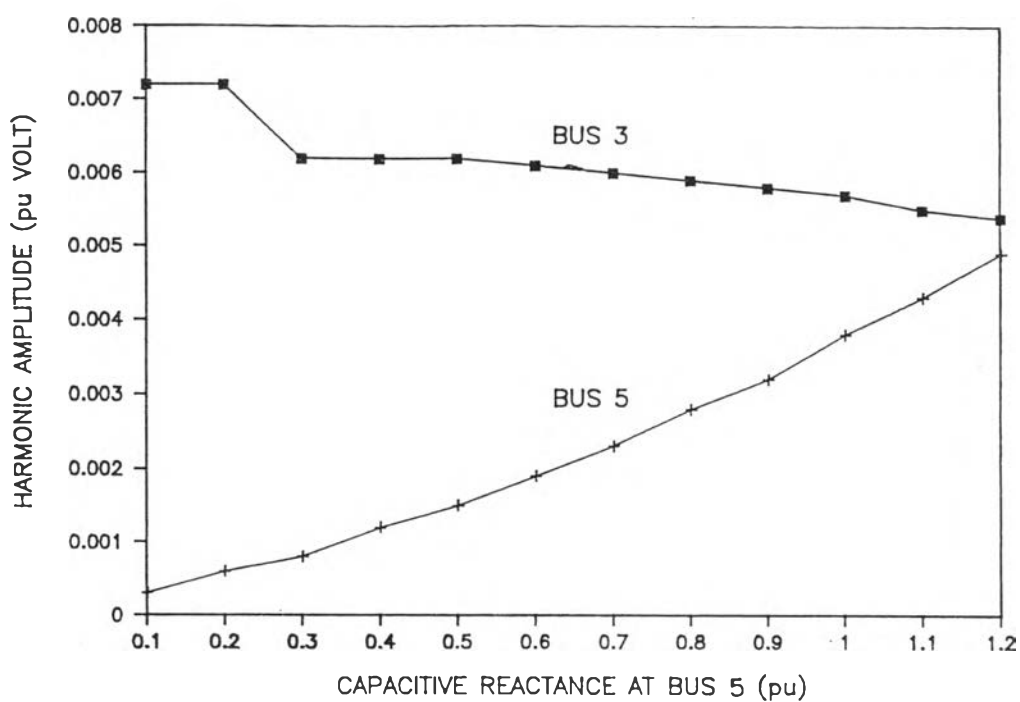
นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟเป็นไปตามรูปที่ 6.2-6.7



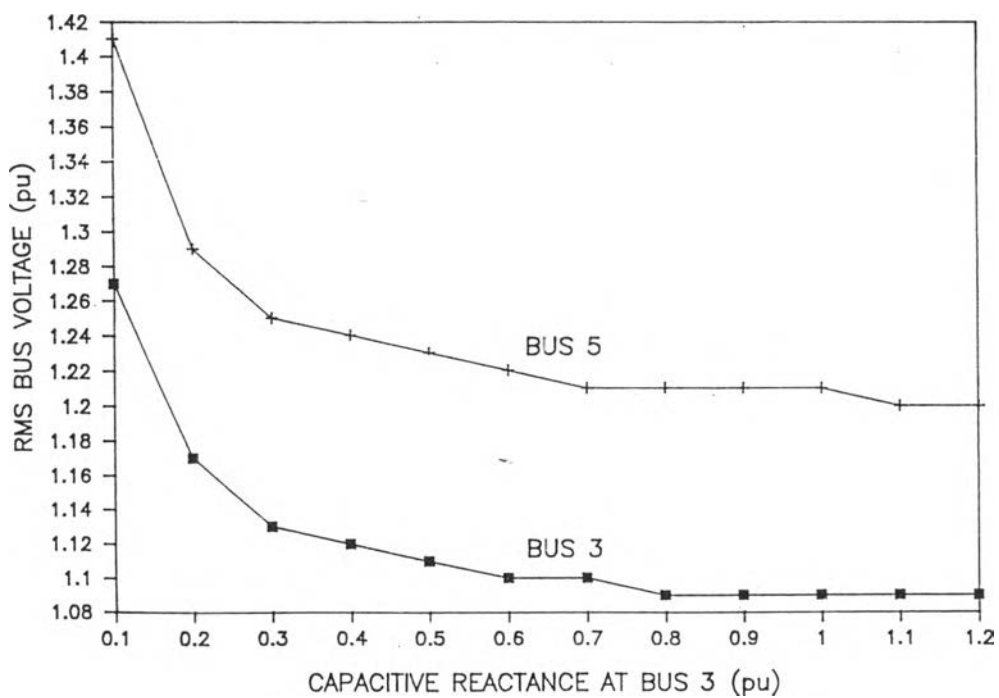
รูปที่ 6.2 แรงดันอาร์เอ็มเอสกับการเปลี่ยนขนาดคัปเคปรีเตอร์ที่บัส 5



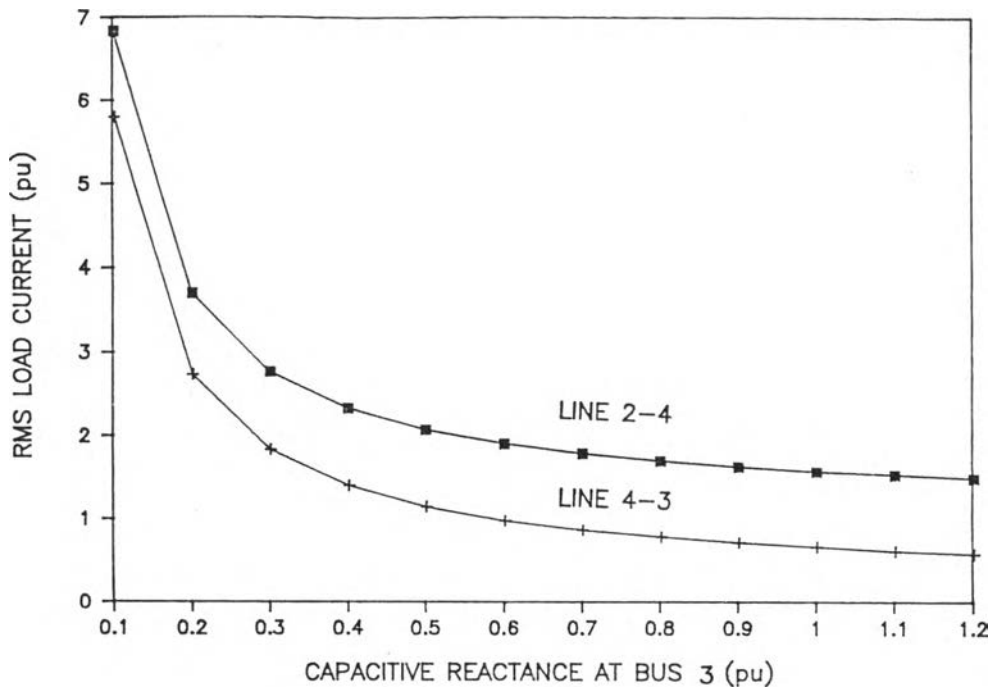
รูปที่ 6.3 กระแสอาร์เอ็มเอสกับการเปลี่ยนขนาดคัปเคปรีเตอร์ที่บัส 5



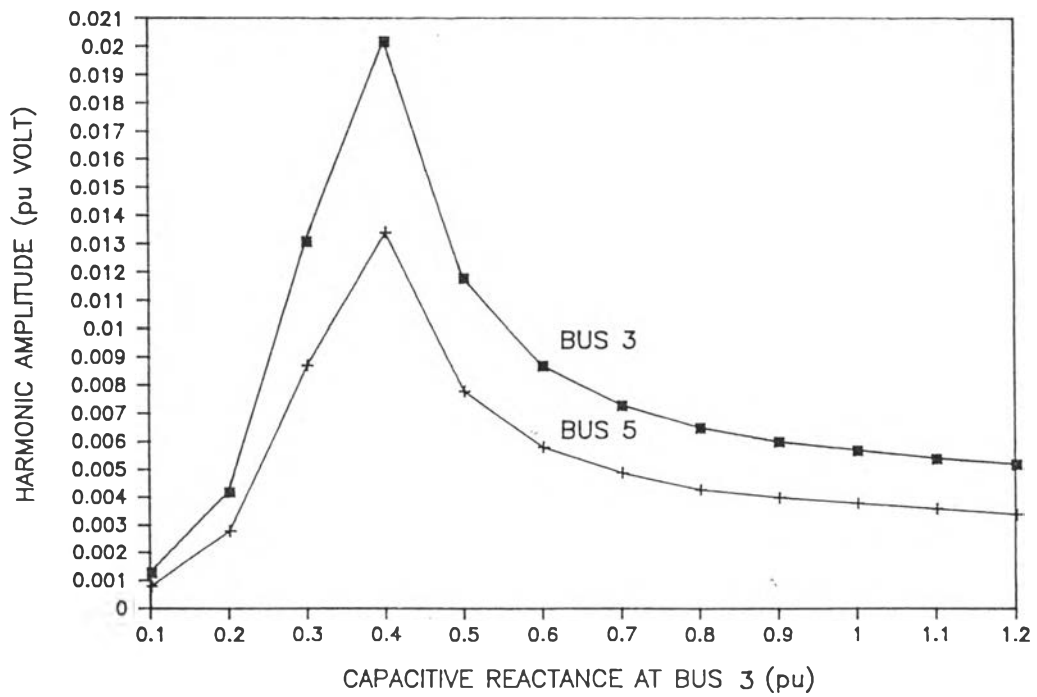
รูปที่ 6.4 ขนาดแรงดันฮาร์โมนิกอันดับ 5 กับการเปลี่ยนขนาดคัปเคปรีเตอร์ที่บัส 5



รูปที่ 6.5 แรงดันอาร์เอ็มเอสกับการเปลี่ยนขนาดคัปเคปรีเตอร์ที่บัส 3



รูปที่ 6.6 กระแสอาร์เอ็มเอสกับการเปลี่ยนขนาดค้ำแปซิเตอร์ที่บัส 3



รูปที่ 6.7 ขนาดแรงดันฮาร์โมนิกอันดับ 5 กับการเปลี่ยนขนาดค้ำแปซิเตอร์ที่บัส 3

กรณีที่ 1 เมื่อขนาดคเคแปซิเตอร์ที่บัส 3 แต่แปรขนาดคเคแปซิเตอร์ที่บัส 5 จะเห็นว่าเมื่อ z_5 มีขนาดน้อย แรงดันอาร์เอ็มเอสที่บัส 5 คล้ายกับเกิดการลัดวงจรคือ แรงดันลดลงใกล้ 0 (รูปที่ 6.2) เช่นเดียวกับแรงดันฮาร์มอนิกอันดับ 5 (รูปที่ 6.4) จากผลการคำนวณ ค่าแรงดันที่ความถี่หลักมุลมีผลต่อค่าอาร์เอ็มเอสมากกว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกอันดับ 5 การที่แรงดันอาร์เอ็มเอสลดลงใกล้ 0 เมื่อ z_5 มีขนาดน้อยเพราะแรงดันที่ความถี่หลักมุลลดขนาดลง สำหรับแรงดันที่บัส 3 ขนาดคเคแปซิเตอร์ไม่ค่อยมีผลมากนัก ขนาดกระแส (รูปที่ 6.3) มีลักษณะกลับกันคือ z_5 มีขนาดน้อย กระแสจะมีขนาดมาก เมื่อเพิ่ม z_5 กระแสจะลดลง

กรณีที่ 2 เมื่อขนาดคเคแปซิเตอร์ที่บัส 5 แต่แปรขนาดที่บัส 3 จะกลับกันกับกรณีที่ 1 คือ เมื่อเพิ่ม z_3 แรงดันอาร์เอ็มเอสที่บัส 3 และ 5 ลดลงจน $z_3 = -j0.8$ pu แรงดันจะเริ่มคงที่ (รูปที่ 6.5) เช่นเดียวกับขนาดกระแส (รูปที่ 6.6) เมื่อ z_3 เพิ่มกระแสจะลดลง สำหรับแรงดันฮาร์มอนิกอันดับ 5 (รูปที่ 6.7) เมื่อ $z_3 = -j0.4$ pu ที่บัสทั้งสองจะมีขนาดแรงดันสูงมาก แสดงว่าเข้าใกล้เรโซแนนซ์ z_3 บริเวณนี้เป็นค่าอันตรายเพราะจะทำให้เกิดแรงดันสูงที่บัสทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย

จากผลลัพธ์ในตารางที่ 6.1-6.6 และ รูปที่ 6.2-6.7 ได้จากการใช้โปรแกรม HARMONIC ค่าที่ได้สอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [6]

6.3 การประยุกต์ใช้โปรแกรม HARMONIC

การประยุกต์ใช้โปรแกรม HARMONIC เพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกจะใช้ 2 ตัวอย่างดังนี้

- ระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส
- ระบบเรเดียล (Radial System)

6.3.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง 5 บัส

การประยุกต์ใช้โปรแกรม HARMONIC เพื่อหาขนาดกะแปซิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น การวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลในหัวข้อ 6.2 และรูปที่ 1 โดยใช้ขนาดกะแปซิเตอร์ที่บัส 3, 4, และ 5 คือ $-j1.0$ pu เป็นหลัก โดยทำการวิเคราะห์เพิ่ม 2 กรณีคือ

- ไม่คิดเครื่องแปลงผัน
- คิดเครื่องแปลงผัน

กรณีที่ 1 วิเคราะห์ระบบโดยไม่มีเครื่องแปลงผันที่บัส 4 จะได้ผลที่ความถี่หลักมุดดังนี้

ตารางที่ 6.7

ขนาดแรงดันบัสที่ความถี่หลักมุดแปรตามขนาดกะแปซิเตอร์

บัสที่ติดกะแปซิเตอร์	ขนาดแรงดันบัส 3 (pu)	ขนาดแรงดันบัส 4 (pu)	ขนาดแรงดันบัส 5 (pu)
3, 4, 5	1.09	1.08	1.21
3, 4	1.07	1.07	1.07
4, 5	1.07	1.07	1.19
3, 5	1.08	1.07	1.20
3	1.06	1.06	1.06
4	1.05	1.06	1.05
5	1.06	1.06	1.18

กรณีที่ 2 วิเคราะห์ระบบโดยต่อเครื่องแปลงผันที่บัส 4 จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.8

ขนาดแรงดันบัสและกระแสสายแปรตามขนาดคเคแปริเตอร์

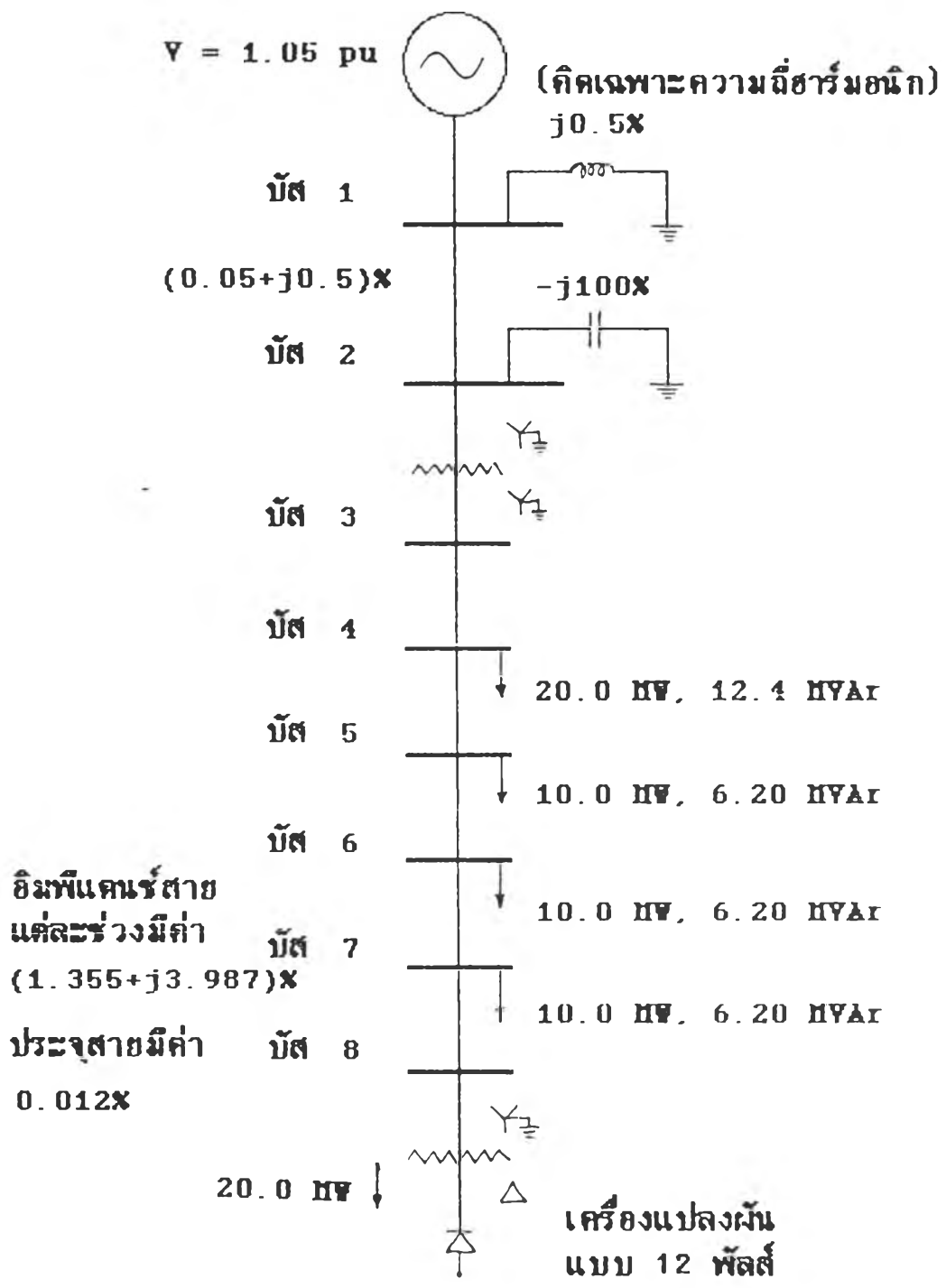
บัสที่ติด คเคแปริเตอร์	แรงดันบัสที่ ความถี่หลักมูล (pu)			แรงดันบัส ฮาร์มอนิกอันดับ 5 (pu)			กระแสอาร์เอ็มเอส (pu)	
	บัส 3	บัส 4	บัส 5	บัส 3	บัส 4	บัส 5	2-4	4-3
3,4,5	1.09	1.08	1.21	.0057	.0071	.0038	1.57	0.66
3,4	1.07	1.07	1.07	.0090	.0098	.0090	1.05	0.18
4,5	1.07	1.07	1.19	.0037	.0055	.0024	1.10	0.21
3,5	1.07	1.07	1.19	.0037	.0046	.0025	0.90	1.01
3	1.06	1.05	1.06	.0053	.0057	.0053	0.41	0.49
4	1.05	1.06	1.05	.0049	.0065	.0049	0.62	0.38
5	1.06	1.05	1.17	.0026	.0039	.0017	0.46	0.54

การหาค่าที่เหมาะสมในการติดคเคแปริเตอร์ที่บัส 3 และ 5 จากตารางที่ 6.7 และ 6.8 จะเห็นว่าเมื่อติดคเคแปริเตอร์ขนาด $-j1.0$ pu ที่บัส 3,4,5 จะได้แรงดันบัส 5 ขนาด 1.21 pu ซึ่งเป็นค่าสูงสุด และแรงดันบัส 3 มีค่า 1.09 pu ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเช่นกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อต่อเครื่องแปลงผันเข้าไปจะทำให้ค่าในระบบเปลี่ยนแปลงเป็นผลมาจากฮาร์มอนิก ซึ่งอาจทำให้แรงดันบัสมีค่าต่ำลงดังรูปที่ 6.2 คล้ายเกิดการลัดวงจร หรืออาจทำให้ระบบเข้าโหมดเรโซแนนซ์ดังรูปที่ 6.7 ดังนั้นการติดคเคแปริเตอร์ที่บัส 5 จะทำให้แรงดันบัส 5 มีค่าสูงหรือต่ำอย่างเห็นได้ชัด จึงควรระวังที่บัสนี้ให้มาก ถ้าคเคแปริเตอร์ที่บัส 3 และ 4 เป็น $-j1.0$ pu จะต้องไม่ใช้ค่ารีแอกแตนซ์ต่างๆที่

บัส 5 เพราะจะทำให้แรงดันตกลงมาก(รูปที่ 6.2) ในทางกลับกัน ถ้าคงค่าคะแปซิเตอร์ที่บัส 4 และ 5 เป็น $-j1.0$ pu ควรใช้ค่ารีแอกแตนซ์สูงๆที่บัส 3 โดยใช้ตั้งแต่ $-j0.7$ pu (ค่ารีแอกแตนซ์สูงคะแปซิเตอร์ตัวเล็ก) เป็นต้นไปเพราะค่าต่างๆจะทำให้เข้าใกล้เรโซแนนซ์ (รูปที่ 6.7)

6.3.2 ระบบเรเดียล (Radial System)

รูปที่ 6.8 แสดงระบบเรเดียล ซึ่งสามารถพบได้ในอุตสาหกรรม ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่อง มีโหลดไม่เชิงเส้นที่บัส 8 ซึ่งเป็นเครื่องเรียงกระแส (Rectifier) แบบแอกทีฟ 12 พัลส์ ต่อผ่านหม้อแปลงแบบกราวด์วาย-เดลตา ซ่อมุดเข้า(กำลังไฟฟ้าโหลดเท่ากับ 20 MW) และผลการวิเคราะห์โดยละเอียดชี้ให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบกำลังของเครื่องแปลงผันเป็น 0.85 โดยการเปลี่ยนโหลดที่เครื่องเรียงกระแสตั้งแต่ 5-30 MW นำพารามิเตอร์เครื่องเรียงกระแสและระดับฮาร์มอนิกเทียบกับโหลดได้ผลตามตารางที่ 6.9-6.12



รูปที่ 6.8 ระบบเรเดียล

ตารางที่ 6.9

พารามิเตอร์มุมเทียบกับกำลังไฟฟ้าโหลด

กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	จำนวนการวนซ้ำ	มุมประหวัง (α) (องศา)	มุมสับเปลี่ยน (μ) (องศา)
5	17	30.06	0.56
10	18	29.44	2.52
15	16	28.29	4.85
20	17	27.05	7.26
25	15	25.91	9.54
30	13	24.82	11.72

ตารางที่ 6.10

ความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่บัส 8 เทียบกับกำลังไฟฟ้าโหลด

กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	จำนวนการวนซ้ำ	ความเพี้ยนของกระแส (%)	ความเพี้ยนของแรงดัน (%)
5	17	8.62	1.13
10	18	9.94	3.11
15	16	10.31	4.98
20	17	9.94	6.22
25	15	9.19	6.82
30	13	8.32	7.06

ตารางที่ 6.11

ขนาดแรงดันฮาร์โมนิกที่บัส 8 เทียบกับกำลังไฟฟ้าโหลด

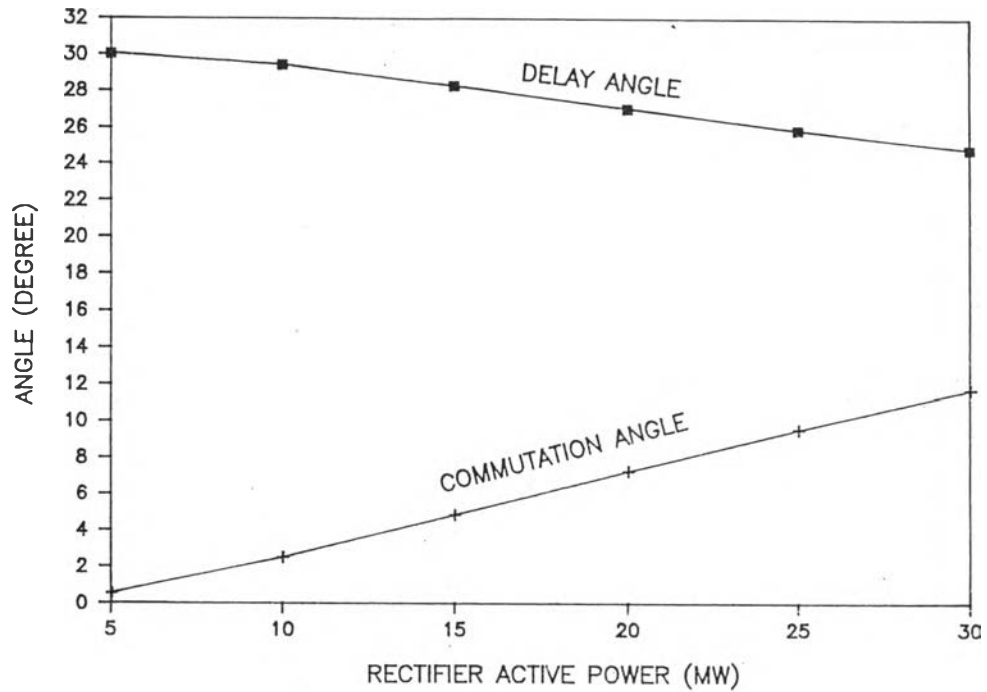
กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	แรงดันฮาร์โมนิก อันดับ 11 (%)	แรงดันฮาร์โมนิก อันดับ 13 (%)	แรงดันฮาร์โมนิก อันดับ 23 (%)	แรงดันฮาร์โมนิก อันดับ 25 (%)
5	0.8504	0.1666	0.7080	0.1645
10	1.7872	1.0382	1.8218	1.3659
15	2.6652	2.1279	2.6121	2.2997
20	3.4249	3.0922	2.8284	2.6408
25	4.0353	3.0731	2.4396	2.3175
30	4.4838	4.4249	1.5889	1.4748

ตารางที่ 6.12

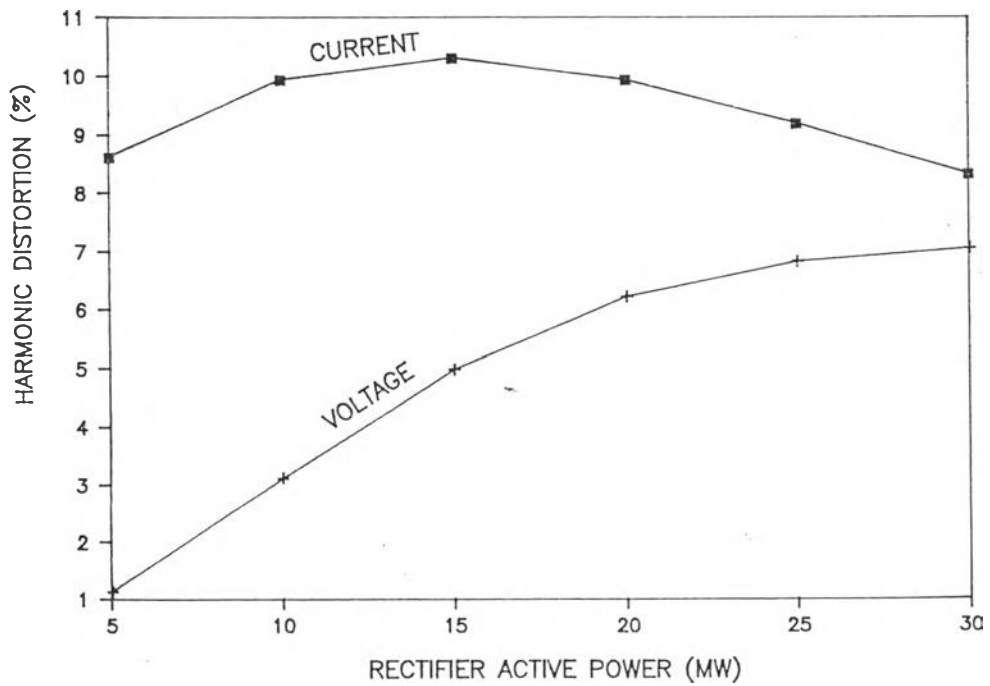
ขนาดกระแสฮาร์โมนิกที่บัส 8 เทียบกับกำลังไฟฟ้าโหลด

กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กระแสฮาร์โมนิก อันดับ 11 (%)	กระแสฮาร์โมนิก อันดับ 13 (%)	กระแสฮาร์โมนิก อันดับ 23 (%)	กระแสฮาร์โมนิก อันดับ 25 (%)
5	0.4809	0.0657	0.1465	0.0310
10	1.0107	0.4106	0.3769	0.2583
15	1.5077	0.8422	0.5406	0.4352
20	1.9366	1.2229	0.5851	0.4992
25	2.2818	1.5295	0.5048	0.4382
30	2.5354	1.7499	0.3287	0.2788

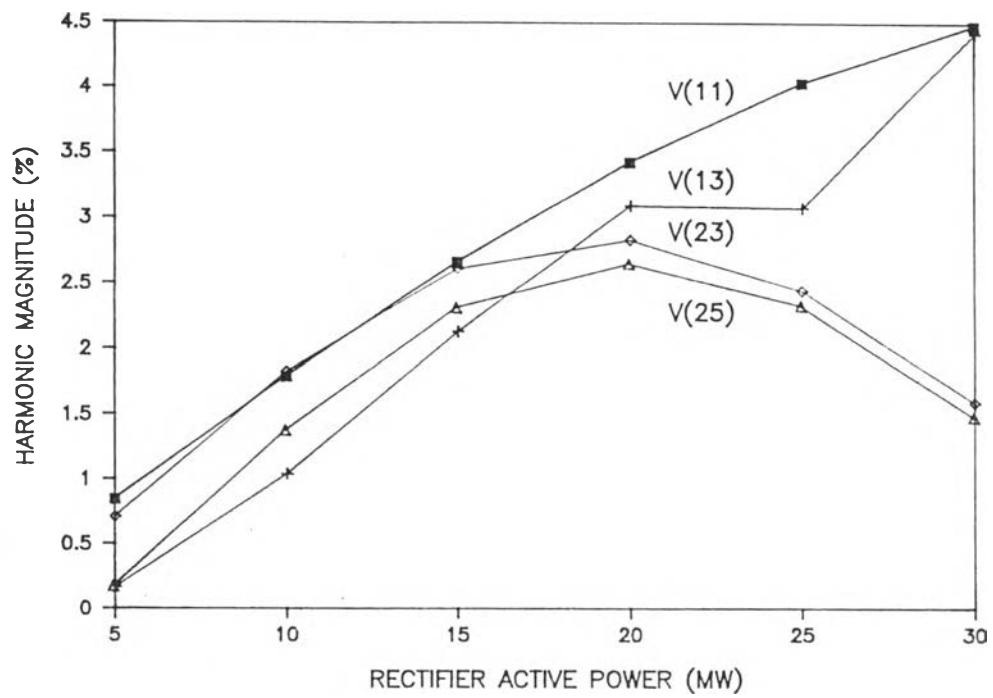
นำข้อมูลจากตารางมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 6.9-6.12



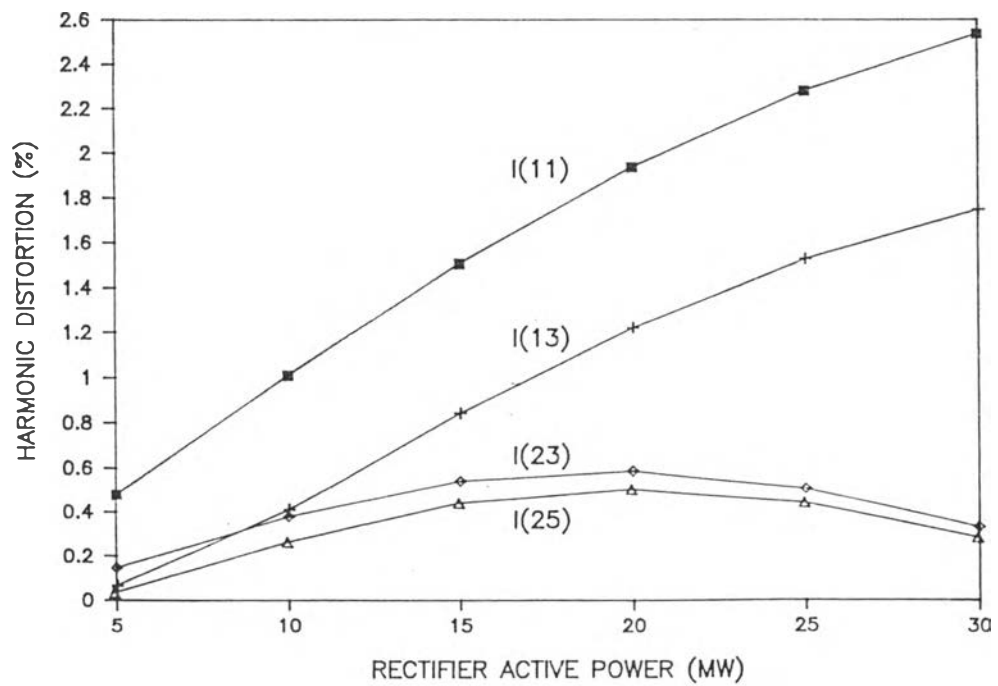
รูปที่ 6.9 พารามิเตอร์มุมเทียบกับกำลังไฟฟ้าโหลด



รูปที่ 6.10 ความเพี้ยนฮาร์โมนิกที่บัส 8 เทียบกับกำลังไฟฟ้าโหลด



รูปที่ 6.11 ขนาดแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 8 เทียบกับกำลังไฟฟ้าโหลด



รูปที่ 6.12 ขนาดกระแสฮาร์มอนิกที่บัส 8 เทียบกับกำลังไฟฟ้าโหลด

จากรูปที่ 6.9 จะเห็นว่ามุมประวิงและมุมสับเปลี่ยนประมาณได้เป็นฟังก์ชัน
เชิงเส้นของกำลังไฟฟ้า รูปที่ 6.10 แสดงความเพี้ยนของกระแสและแรงดันที่กำลังไฟฟ้า
ค่าต่างๆ รูปที่ 6.11 จะเห็นว่าแรงดันฮาร์มอนิกอันดับ 11 มีค่าสูงกว่าอันดับอื่นทุกค่า
ของกำลังไฟฟ้าจริง รูปที่ 6.12 กระแสฮาร์มอนิกอันดับ 11 มีค่าสูงกว่าอันดับอื่นทุกค่า
ของกำลังไฟฟ้าจริง และ กระแสฮาร์มอนิกอันดับ 25 มีค่าต่ำสุด