

เทคนิคการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าดีจนเพื่อป้องกันการชดเชยเกินในเครื่องรีดเหล็ก

Detune Filter Installation Technics to Protect Overcompensation in Steel Rolling Mill

นวลวรรณ จิรวัดนา และ จงรักษ์ บุญเส็ง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทรศัพท์ 7372500-47 โทรสาร 326-7338

บทคัดย่อ

ในโรงรีดเหล็กซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงหลายตัว การทำงานของระบบมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงมาก บางครั้งเกิดการชดเชยเกินหรือมีค่าพาสซีฟมากเกินไป ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเกิน นอกจากนี้ผลของฮาร์โมนิกสในระบบไฟฟ้าจะเป็นผลจากวงจรควบคุมการขับ DC Motor ซึ่งผลของฮาร์โมนิกส์จะทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ ในงานวิจัยนี้รายงานถึงการจัดการการป้องกันสัญญาณฮาร์โมนิกส์และการป้องกันการชดเชยเกินโดยใช้วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าดีจนนำมาต่อเข้าไปในระบบ ทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ผลการทดลองปรากฏว่าสามารถแก้ปัญหาการชดเชยเกินในระบบไฟฟ้าพอลิ และตัวคาปาซิเตอร์ยังไม่ได้รับอันตรายจากสัญญาณฮาร์โมนิกส์ด้วย

Abstract

In steel rolling mill consisting of DC motors, the system has very high power factor changes. Sometimes, overcompensation or overcapacitive effect can occur and result in over-voltage. In addition, harmonics from DC motor controllers may harm capacitors. This paper reports the harmonic and overcompensation protection by detune filter connected to the system. The results show that overcompensation problems can be reduced and capacitors will not be damaged.

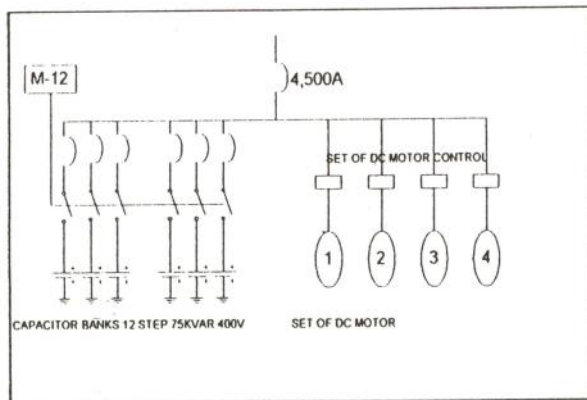
1. บทนำ

ในการทำงานของเครื่องรีดเหล็กส่วนมากจะใช้ระบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นตัวต้นกำลังสำหรับการขับเคลื่อนตัวรีดเหล็ก ตัวรีดเหล็กจะมีขนาดต่างๆ ในระบบการรีดเหล็กจะมีมอเตอร์กระแสตรงประมาณ 10-20 ตัว การใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีผลต่อระบบไฟฟ้าคือ เกิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์สูงมาก ส่งผลให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวคาปาซิเตอร์สูงขึ้น และเป็นสาเหตุที่ทำให้ตัวคาปาซิเตอร์ที่ใช้นำไปปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าเสียหาย แรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณรอยต่อ(point of common coupling) ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง

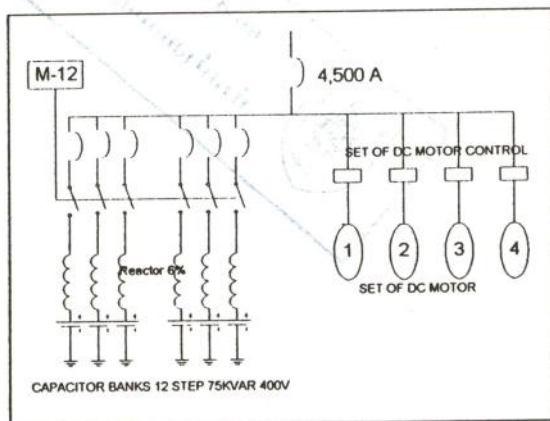
ของตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า สำหรับปัญหาที่พบบ่อยมากคือ เมื่อมีการลดความเร็วของระบบลงหรือหยุดเดินเครื่องรีดเหล็ก ตัวประกอบกำลังมักมีค่าติดลบ หรือเกิดปรากฏการณ์ชดเชยเกิน หมายความว่าในระบบไฟฟ้ามีค่ากำลังรีแอคทีฟ (reactive power) มากเกินไปซึ่งอาจจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเกิน(over-voltage)และทำให้เกิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์ให้แรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลต่อตัวคาปาซิเตอร์โดยตรงและเกิดความเสียหาย

2. ทฤษฎีและวงจร

วงจรทั่วไปสำหรับชดเชยกำลังรีแอคทีฟจะมีการติดตั้งวงจร Capacitor banks เพื่อจ่ายค่า kvar ซึ่งให้กับระบบโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 1 และในขณะที่มอเตอร์ทำงานจะมีสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่สูงมาก ส่งผลให้เพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำมาก ดังนั้นเครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power Regulator) จะช่วยทำการตัดต่อตัวคาปาซิเตอร์เข้าระบบ เพื่อเพิ่มจำนวนค่า kvar ปกติจะต่อเข้าทั้ง 12 ตัว 900 kvar และผลตามมาหลังจากมีการชดเชยกำลังรีแอคทีฟมี 2 กรณี คือในกรณีแรกจะทำให้คาปาซิเตอร์ถูกทำลายอันเนื่องมาจากสัญญาณฮาร์โมนิกส์ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว และเกิดรีโซแนนซ์แบบอนุกรมและขนาน การแก้ไขปัญหาโดยนำเอา Reactor ขนาด 6% มาต่ออนุกรมกับตัวคาปาซิเตอร์ดังในรูปที่ 2 แต่การใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 400 Volt เมื่อต่อตัว Reactor ขนาด 6% แล้วมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมประมาณ 25-30 Volt โดยปกติแรงดันไฟฟ้าที่ใช้นิโรงงานอุตสาหกรรมขนาด 380-390 Volt ดังนั้นเมื่อต่อ Reactor ขนาด 6% มีผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ตัวคาปาซิเตอร์เพิ่มเป็น 405-420 Volt ตัวคาปาซิเตอร์จะเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน ในกรณีหลังนี้เกิดการชดเชยเกินขณะที่มีการหยุดการทำงานของตัวมอเตอร์และในกระบวนการผลิตจะมีการหยุดชั่วขณะบ่อยๆ ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังติดลบหรือเกิดการชดเชยเกินเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟมอเตอร์ลดลงภายใน 5-10 วินาที และสาเหตุหลักคือการที่เส้นลวดเหล็กขาดหรือกรณีเปลี่ยนขนาดลวดใหม่ซึ่งจะต้องมีการหยุดเดินเครื่องอย่างน้อย 1-2 นาที แต่การตัดตัวคาปาซิเตอร์โดยใช้เครื่องควบคุมกำลังรีแอคทีฟตัดออกจะใช้เวลาประมาณ 30 วินาที/ตัว ดังนั้นจะส่งผลทำให้ค่าของตัวประกอบกำลังติดลบ



รูปที่ 1 วงจรควบคุม Reactive Power ประกอบด้วย Capacitor banks ขนาด 900 kvar 12 Step



รูปที่ 2 วงจรควบคุม Reactive Power ประกอบด้วย Detune Filter ขนาด 900 kvar 12 Step

3. การออกแบบวงจรดีจูน

การออกแบบวงจรดีจูนกระทำได้โดยการวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเช่น แรงดัน กระแสไฟฟ้า กำลังรีแอกทีฟ ตัวประกอบกำลัง % THDV และ %THDI บริเวณ PCC จากนั้นนำมาหาพิคกิ้งของตัวคาปาซิเตอร์

$$f_0 = f \sqrt{\frac{\%X_c}{\%X_L}}$$

หาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเมื่อต่อรีแอกเตอร์

$$V_c = V_{sys} \frac{100}{100-p}$$

คำนวณกำลังรีแอกทีฟที่ต้องการได้จาก

$$Q_c = \left(1 - \frac{P}{100}\right) \frac{V_c^2}{V_{rate}^2} Q_{rate}$$

$$Q_{rate} = \text{กำลังรีแอกทีฟรวมที่ } V_{rate}$$

หาค่าคาปาซิเตอร์และรีแอกเตอร์จากสมการ

$$C = Q_{rate} \frac{\left(1 - \frac{P}{100}\right)}{V_{sys}^2 2\pi f}$$

$$L = \frac{P}{100 \cdot (4) \pi^2 f^2 C}$$

หาเปอร์เซ็นต์ของรีแอกเตอร์จาก

$$p = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 100 \text{ หรือ } p = 100 \frac{X_L}{X_c} = 100 \cdot (4) \cdot \pi^2 f^2 L C$$

แรงดันไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิกส์เข้าคาปาซิเตอร์

$$V_n = \sqrt{3(X/R)_{sys}} X_C I_n$$

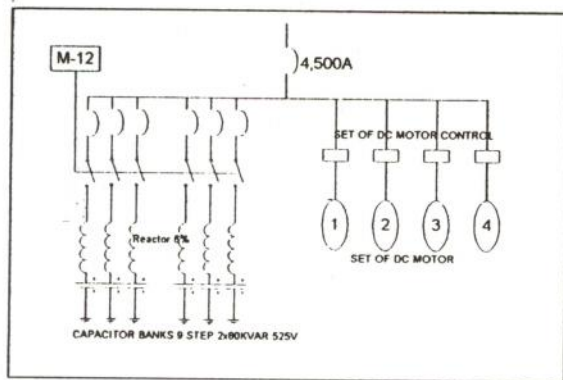
4. การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ในโรงงานอุตสาหกรรมมักนิยมใช้เครื่องควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีขายทั่วไป สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องควบคุมของ Nokia รุ่น M-12 และ M-6 ซึ่งมีข้อดีในการควบคุมและมีการตั้งเวลาลำช้าได้ในช่วง 0-120 วินาที ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการชดเชยเกินถ้าต้องการลดเวลาในการชดเชยเกิน ควรที่จะปรับระยะเวลาลำช้าให้เหลือประมาณ 5 วินาที ดังนั้นจะลดระยะเวลาที่เกิดการชดเชยเกินไป 25 วินาที/ตัว แต่ต้องมั่นใจว่าตัวคาปาซิเตอร์จะคายประจุที่ค้างในตัวเองหมดใน 5 วินาที จำเป็นต้องคำนวณความต้านทานใหม่ตามสมการที่ 1 ดังนี้

$$R \leq \frac{60}{C_R \left(\frac{\ln V \sqrt{2}}{50} \right)} \quad (1)$$

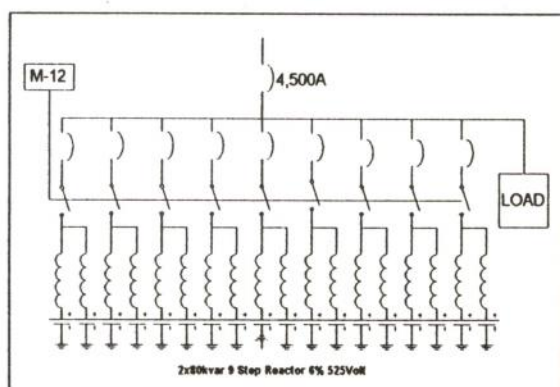
5. การติดตั้งวงจร Detune Filter

จากปัญหาการเกิดแรงดันเกินตกคร่อมตัวคาปาซิเตอร์มากกว่า 400 โวลต์ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงขนาดพิคกิ้งของแรงดันไฟฟ้าของตัวคาปาซิเตอร์ให้ทนแรงดันได้สูงขึ้น การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงมีผลให้เกิดสัญญาณฮาร์โมนิกสัณฐาน ซึ่งแสดงโดยค่า %THD (Total Harmonic Distortion) มีมากประมาณ 70-200% จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ต้องเลือกพิคกิ้งแรงดันไฟฟ้าให้ทนแรงดันได้ถึง 525 โวลต์ 80 kvar ซึ่งสามารถจ่าย kvar ที่ 400 โวลต์ ประมาณ 50 kvar จำนวน 18 ตัวเพื่อให้ได้ kvar ที่ 900 kvar และใช้ Reactor 6% จำนวน 18 ตัว เช่นในรูปที่ 3



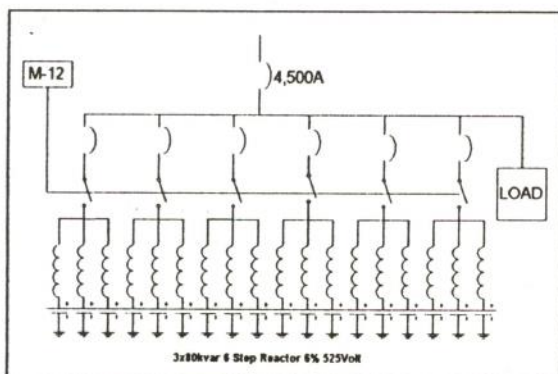
รูปที่ 3 วงจรควบคุม Reactive Power โดยเฉลี่ยจากระบบ 400 โวลต์ เป็น 525 โวลต์ : 2x80 kvar 9 Step

จากรูปที่ 3 จะปลดคาปาซิเตอร์ออก step ละ 100 kvar/5 วินาที ในการออกแบบ step ของการชดเชยรีแอคทีฟต้องคำนึงถึงผลที่เกิดขึ้นจริง เพื่อที่จะได้ตัดต่อคาปาซิเตอร์เข้าระบบได้อย่างถูกต้อง และไม่ก่อให้เกิดการชดเชยเกิน การต่อมีหลายแบบดังต่อไปนี้



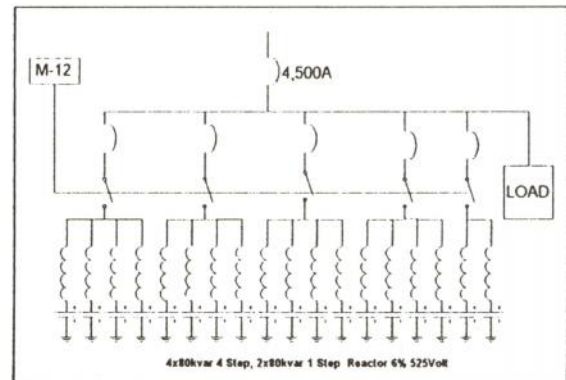
รูปที่ 4 การต่อวงจร 2x80 kvar 9 Step

จากรูปที่ 4 ปลดคาปาซิเตอร์ออก step ละ 100 kvar/5 sec ในการต่อของรูปที่ 4 เราใช้ Detune Filter 2 ชุดต่อขนานเพื่อให้ได้ 100 kvar ต่อ 1 state จำนวน 9 state ในการตัดต่อจะให้ state ที่ 9-1 ตามลำดับ ค่า kvar และเวลาที่ใช้ในการตัดต่อออกดังตารางที่ 1 และ 2



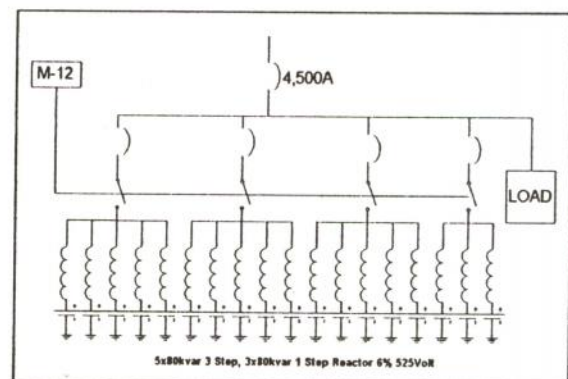
รูปที่ 5 การต่อวงจร 3x80 kvar 6 Step

จากรูปที่ 5 ปลดคาปาซิเตอร์ออก step ละ 150 kvar/5 sec ในการต่อของรูปที่ 5 เราใช้ Detune Filter 3 ชุดต่อขนานเพื่อให้ได้ 150 kvar ต่อ 1 state จำนวน 6 state ในการตัดต่อจะให้ state ที่ 6-1 ตามลำดับ ค่า kvar และเวลาที่ใช้ในการตัดต่อออกดังตารางที่ 1 และ 2



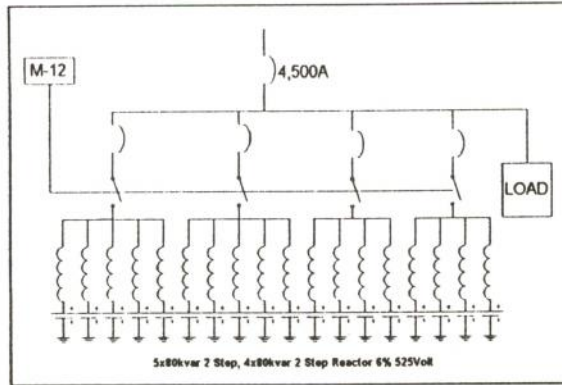
รูปที่ 6 การต่อวงจร 4x80 kvar 4 Step + 2x80 kvar 1 Step

จากรูปที่ 6 ปลดคาปาซิเตอร์ออก 5 step : 200 kvar/5 sec 4 step, 100 kvar/ 5 sec 1 step ในการต่อของรูปที่ 6 เราใช้ Detune Filter 4 ชุดต่อขนานเพื่อให้ได้ 200 kvar ต่อ 1 state จำนวน 4 state และ Detune Filter 2 ชุดต่อขนานเพื่อให้ได้ 100 kvar ต่อ 1 state จำนวน 1 state ในการตัดต่อจะให้ state ที่ 5 คือ state ที่มีค่า 200 kvar จากนั้น จะตัด state ที่ 4-1 ตามลำดับ ค่า kvar และเวลาที่ใช้ในการตัดต่อออกดังตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 7 การต่อวงจร 5x80 kvar 3 Step + 3x80 kvar 1 Step

จากรูปที่ 7 ปลดคาปาซิเตอร์ออกเป็น 4 step : 200 kvar/ 5 sec 3 step, 150 kvar/ 5 sec 1 step ในการต่อของรูปที่ 7 เราใช้ Detune Filter 5 ชุดต่อขนานเพื่อให้ได้ 250 kvar ต่อ 1 state จำนวน 3 state และ Detune Filter 3 ชุดต่อขนานเพื่อให้ได้ 150 kvar ต่อ 1 state จำนวน 1 state ในการตัดต่อจะให้ state ที่ 4 คือ state ที่มีค่า 250 kvar จากนั้น จะตัด state ที่ 3-1 ตามลำดับ ค่า kvar และเวลาที่ใช้ในการตัดต่อออกดังตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 8 การต่อวงจร 5x80 kvar 2 Step + 3x80 kvar 2 Step

จากรูปที่ 8 ปลดคาปาซิเตอร์ออกเป็น 4 step : 250 kvar/ 5 sec 2 step, 100 kvar/5 sec 2 step ในการต่อของรูปที่ 8 เราใช้ Detune Filter 5 ชุดต่อขนาน เพื่อให้ได้ 250 kvar ต่อ 1 state จำนวน 2 state และ Detune Filter 4 ชุดต่อขนาน เพื่อให้ได้ 200 kvar ต่อ 1 state จำนวน 2 state ในการตัดต่อจะให้ state ที่ 4 คือ state ที่มีค่า 250 kvar จากนั้นจะตัด state ที่ 3-1 ตามลำดับ ค่า kvar และเวลาที่ใช้ในการตัดต่อออกดังตารางที่ 1 และ 2

6. ผลการทดลอง

ในการทดสอบระบบดึง ใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 80 kvar 525 โวลต์ ของ Nokia และ reactor 6% โดยใช้การตัดต่อคาปาซิเตอร์ Model M-12 ของ Nokia ซึ่งได้ทำการทดสอบและวัด parameter ทางไฟฟ้าโดยใช้ Power meter and Analyzer SATEL Model H290 ผลการทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เวลาใช้ในการตัดตัวคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ

วงจร	$T_d(\text{sec})$	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
2	30	30	60	90	120	150
3	5	5	10	15	20	25
4	5	5	10	15	20	25
5	5	5	10	15	20	25
6	5	5	10	15	20	25
7	5	5	10	15	20	25
8	5	5	10	15	20	25

จากรูปที่ 1 เวลาของการตัดคาปาซิเตอร์ของแต่ละวงจร โดยที่เวลาในการตัดของคาปาซิเตอร์ คือ T_d ในแต่ละ step ดังนั้นแต่ละวงจรจะใช้เวลาในการตัดคาปาซิเตอร์ ดังตาราง ซึ่งในวงจรที่ค่า T_d มากกว่าจะใช้เวลาเมื่อเทียบกับจำนวน step ที่เท่ากันของวงจรอื่น โดยดูจาก C_1 ถึง C_5

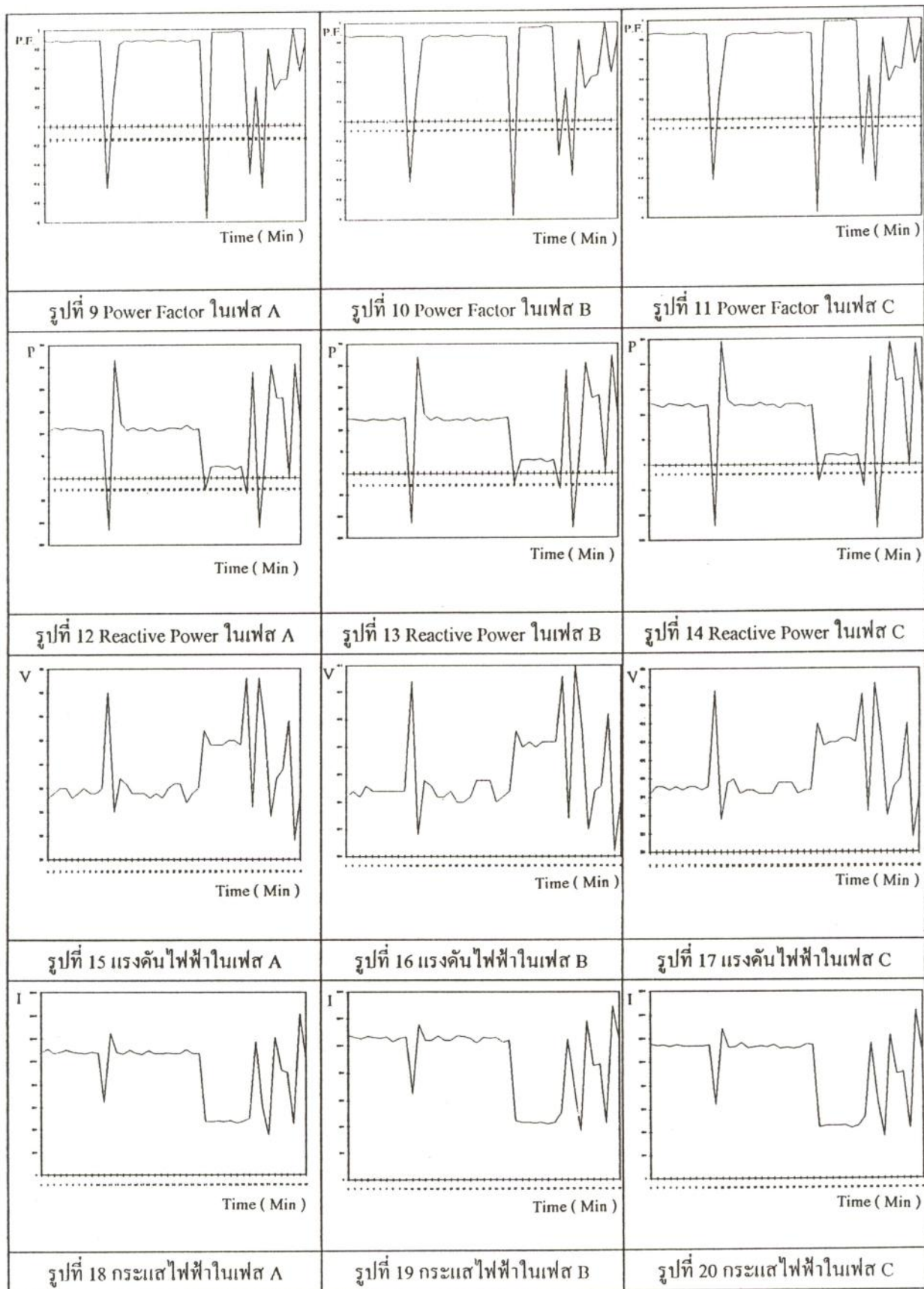
ตารางที่ 2 kvar ในการตัดตัวคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ

วงจร	KVAR	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
2	900	825	750	675	600	525
3	900	800	700	600	500	400
4	900	800	700	600	500	400
5	900	750	600	450	300	150
6	900	700	500	300	100	0
7	900	650	400	150	0	0
8	900	650	400	200	0	0

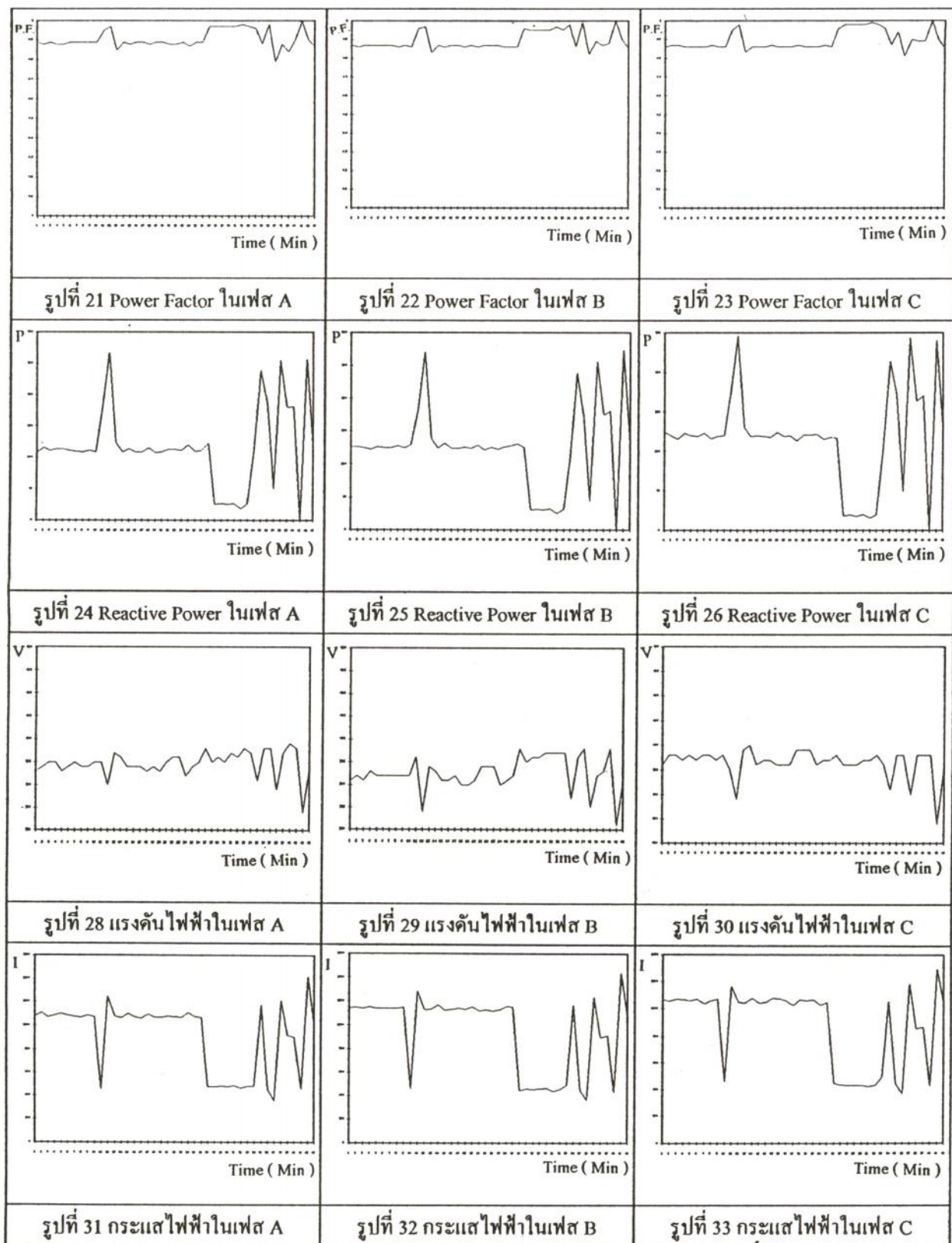
จากรูปที่ 2 นั้น 900 kvar เป็นค่าที่ต้องการตัดออกจากวงจร ซึ่งในแต่ละวงจรมีการจัดกลุ่มคาปาซิเตอร์แต่ละ step แตกต่างกันไปเพื่อความเหมาะสม

เมื่อนำผลของตารางที่ 1 และ 2 มาพิจารณา จะได้ว่า วงจรที่ 2 ใช้เวลาตัดคาปาซิเตอร์ step ละ 30 sec จะใช้เวลา 150 sec สามารถลดค่า kvar ออกได้ 375 kvar ซึ่งเหลืออยู่ 525 kvar เพราะฉะนั้นถ้าจะลดค่า kvar ให้เหลือศูนย์ จะใช้เวลา 360 sec วงจรที่ 3 ใช้เวลาตัดคาปาซิเตอร์ step ละ 5 sec จะใช้เวลา 25 sec สามารถลดค่า kvar ออกได้ 500 kvar ซึ่งเหลืออยู่ 400 kvar เพราะฉะนั้นถ้าจะลดค่า kvar ให้เหลือศูนย์ จะใช้เวลา 45 sec วงจรที่ 4 ใช้เวลาตัดคาปาซิเตอร์ step ละ 5 sec จะใช้เวลา 25 sec สามารถลดค่า kvar ออกได้ 500 kvar ซึ่งเหลืออยู่ 400 kvar เพราะฉะนั้นถ้าจะลดค่า kvar ให้เหลือศูนย์ จะใช้เวลา 45 sec วงจรที่ 5 ใช้เวลาตัดคาปาซิเตอร์ step ละ 5 sec จะใช้เวลา 25 sec สามารถลดค่า kvar ออกได้ 750 kvar ซึ่งเหลืออยู่ 100 kvar เพราะฉะนั้นถ้าจะลดค่า kvar ให้เหลือศูนย์ จะใช้เวลา 30 sec วงจรที่ 6 ใช้เวลาตัดคาปาซิเตอร์ step ละ 5 sec ต้องใช้เวลา 25 sec ก็สามารถลดค่า kvar ให้เหลือศูนย์ วงจรที่ 7 ใช้เวลาตัดคาปาซิเตอร์ step ละ 5 sec ต้องใช้เวลา 20 sec ก็สามารถลดค่า kvar ให้เหลือศูนย์ วงจรที่ 8 ใช้เวลาตัดคาปาซิเตอร์ step ละ 5 sec ต้องใช้เวลา 20 sec ก็สามารถลดค่า kvar ให้เหลือศูนย์ แต่ในวงจรที่ 7 ที่เวลา 15 sec สามารถตัด kvar ได้ถึง 750 kvar แต่วงจรที่ 8 จะลดค่า kvar ได้เพียง 700 kvar เท่านั้น พิจารณาที่ power factor และ ค่า reactive power ทั้งเฟส A, B และ C จะเห็นได้ว่าในบางช่วงมีค่าผิดปกติ แรงดันไฟฟ้าในเฟส A, B และ C มีค่าพุ่งขึ้นสูงมาก เพราะมีการชดเชยที่ไม่เหมาะสม ในช่วงดังกล่าวจะเกิด power factor และ reactive power ผิดปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากการชดเชยเกิน แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงมาก ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อตัวคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 3 กราฟแสดงค่า Power factor, Reactive Power, แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าในเฟส A, B และ C ซึ่งยังไม่มีการใช้เทคนิคการติดตั้ง วงจรกรองสัญญาณไฟฟ้า



ตารางที่ 4 กราฟแสดงค่า Poer Factor, Reactive Power, แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าในเฟส A, B และ C เมื่อมีวงจรกรองสัญญาณไฟฟ้าดีจนเพื่อป้องกันการชดเชยเกิน



7. สรุป

จากการติดตั้งวงจรดีจูนและการทดสอบ เพื่อแก้ปัญหาการชดเชยเกินในเครื่องรีดเหล็ก ซึ่งผลที่ได้สามารถป้องกันการชดเชยเกินได้ในระดับหนึ่งเป็นที่น่าสนใจ สามารถป้องกันการชดเชยเกินในขณะที่กำลังไฟฟ้าลดลงประมาณ 1/3 ของระบบ การลดลงของพลังงานไฟฟ้านี้เป็นสาเหตุหนึ่งของการชดเชยเกินที่สามารถแก้ไขได้ แต่การชดเชยเกินเนื่องจากผลกระทบทางด้านฮาร์โมนิกส์หรือการแกว่งของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไม่สามารถแก้ไขได้ ต้องใช้วงจร TCR ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายสูงมาก และทำให้ส่วนของไฟฟ้าแรงต่ำจะไม่คุ้มกับการลงทุน ดังนั้นวิธีที่คณะวิจัยได้เสนอนั้นเป็นวิธีที่ได้ดีพอสมควร แต่จะประหยัดค่าใช้จ่ายและมีประสิทธิภาพสูง ตลอดจนความเชื่อถือในการใช้งานมีสูงมาก

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ฮาร์โมนิกส์ เมเซอริง แอนด์ ดีไซน์ จำกัด ที่ให้ข้อมูลในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เทพชัย แซ่เต็ง ประวิทย์ ดวงดี สิทธิพงศ์ เกศมณี และสุลักษณ์ ใจสรรสนุสนธิ์ “การชดเชยระบบไฟฟ้าโดยใช้วงจรจันบันได” ปรินูญานิพนธ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2539.
- [2] จงรักษ์ บุญเส็ง “การติดตั้งวงจรดีจูล” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2539.
- [3] Damian A. Gonzales and John C. Maccall, “Design of filter to reduce harmonic distortion in industrial power system”, *“IEEE Trans. Ind. Appl.”*, Vol-AI 23, pp. 504-511, May/June 1987.