บทที่ 2

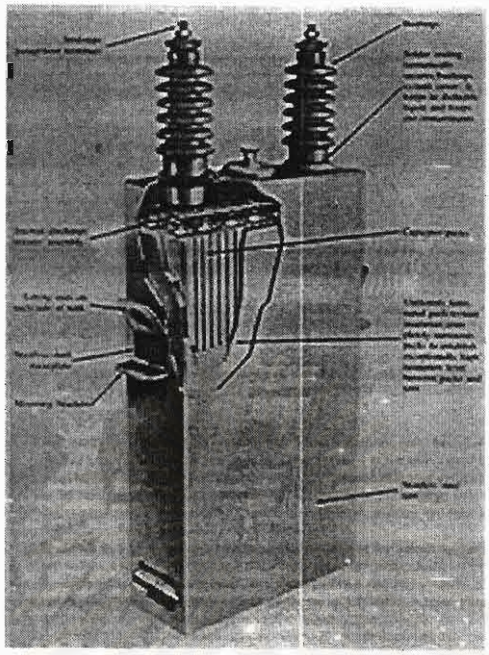
หลักพื้นฐานเกี่ยวกับตัวเก็บประจุและการประยุกต์ใช้งานในระบบจำหน่าย

เป็นที่ทราบกันดีว่า การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power factor correction) ของระบบไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นนั้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้านั้นๆ ดีขึ้นด้วย เนื่องจากสาเหตุหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น ทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้าลดลง ทำให้ระดับแรงดันในระบบไฟฟ้าสูงขึ้น และทำให้หม้อแปลงสามารถจ่ายโหลดได้มากขึ้น เป็นต้น สำหรับการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังนั้นอาจทำได้โดยการใช้ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor) หรืออาจใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นตัวทำหน้าที่จ่ายกระแสรีแอกทีฟเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก (Reactive magnetizing current) แทนที่ระบบไฟฟ้าจะทำการจ่ายเอง ทำให้กระแสที่ระบบจะต้องจ่ายให้กับโหลดมีค่าลดลง แต่เนื่องจากการนำตัวเก็บประจุเข้ามาต่อกับระบบไฟฟ้า สามารถทำได้ง่ายและสะดวกกว่าการนำเอาซิงโครนัสมอเตอร์มาใช้เป็นอย่างมาก ดังนั้นวัตถุประสงค์ของบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานของตัวเก็บประจุ และทฤษฎีเกี่ยวกับกำลังงานไฟฟ้าของระบบจำหน่าย [8] เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจในบทอื่นได้ต่อไป

2.1 ตัวเก็บประจุกำลัง (Power Capacitors)

ตัวเก็บประจุกำลังถูกสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีที่สูง และประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นกว่าตัวเก็บประจุโดยทั่วไป โดยเฉพาะวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นมีขนาดบางมากและมีค่าความเครียดทางไฟฟ้าสูง รูปที่ 2-1 แสดงถึงภาพของตัวเก็บประจุกำลังที่ใช้ในการปรับค่าตัวประกอบกำลัง (Power-Factor-Correction Capacitor)

ในอดีตตัวเก็บประจุกำลังส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์บริสุทธิ์ 2 แผ่น วางแยกจากกันด้วยชั้นของกระดาษชุบน้ำยาเคมีประมาณ 3 ชั้นหรือมากกว่า ตัวเก็บประจุกำลังได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางมากกว่า 30 ปีที่แล้ว เนื่องจากได้มีการปรับปรุงวัสดุไดอิเล็กตริก และประสิทธิภาพ รวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นจากขนาด 15 - 25 กิโลวาร์ เป็นขนาด 200 - 300 กิโลวาร์ ในปัจจุบันตัวเก็บประจุกำลังถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นมาก และสามารถนำไปใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ดีโดยมีราคาต่อกิโลวาร์ (Cost per Kvar) ต่ำ



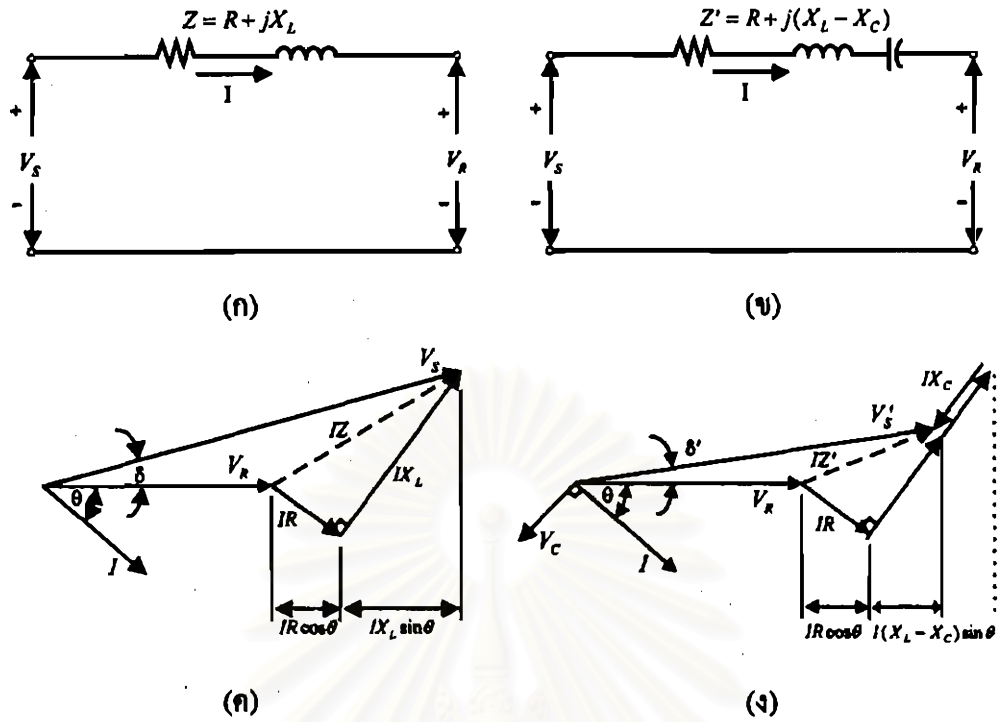
รูปที่ 2-1 ภาพตัดของตัวเก็บประจุกำลังที่ใช้ปรับค่าตัวประกอบกำลัง

2.2 ผลกระทบจากการต่อตัวเก็บประจุเข้ากับสายป้อน

จากที่กล่าวข้างต้นมาแล้วว่า หน้าที่ของตัวเก็บประจุคือ รักษาระดับแรงดันและจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟ ณ จุดที่ทำการติดตั้ง ทั้งนี้การต่อตัวเก็บประจุสามารถทำได้ 2 แบบ คือ การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (Series Capacitor) และการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (Shunt Capacitor) ซึ่งการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของโหลดให้ดีขึ้นได้ ในขณะที่การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) ของระบบที่ทำการติดตั้ง

2.3 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (Series Capacitors)

การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมมีการใช้อยู่ในวงจำกัดอย่างมากของระบบจำหน่าย เนื่องจากลักษณะพิเศษเฉพาะตัวซึ่งทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน แต่ในบางครั้งอาจเกิดปัญหาเฉพาะบางอย่างที่จำเป็นต้องติดตั้งตัวเก็บประจุ วิศวกรจะต้องศึกษาและตรวจสอบอย่างละเอียดก่อนที่จะทำการแก้ปัญหา ดังนั้นโดยทั่วไปจึงไม่ค่อยนิยมติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรม โดยเฉพาะตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2-2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแรงดันของวงจรสายป้อนที่มีตัวประกอบกำลังล้าหลัง

(ก) และ (ค) ไม่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม

(ข) และ (ง) ทำการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม

รูปที่ 2-2 แสดงการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม ซึ่งในกรณีนี้เป็นการชดเชยค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะมีค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์เป็นลบเมื่อเทียบกับค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) ของวงจรซึ่งมีค่าเป็นบวก ดังนั้นผลของการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมอันดับแรกคือ ช่วยลดหรือป้องกันแรงดันตกที่มีสาเหตุจากค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของระบบ ในบางครั้งอาจเรียกตัวเก็บประจุในกรณีนี้ว่าเป็นตัวรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator) ซึ่งมันสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นได้โดยเป็นปฏิภาคกับขนาดและค่าตัวประกอบกำลังของกระแสที่ไหลผ่าน ข้อดีอย่างหนึ่งของการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมคือ ระดับแรงดันจะสูงขึ้นอย่างทันทีทันใดในขณะที่มีการใช้โหลดมากขึ้น และในความเป็นจริงมันยังสามารถยกระดับแรงดันได้สูงขึ้นมากกว่าการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ที่ค่าตัวประกอบกำลังต่ำๆ แต่อย่างไรก็ตาม การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมมีความสามารถในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าได้น้อยกว่าการต่อตัวเก็บประจุต่อขนาน

พิจารณารูปวงจรสายป้อนและแผนภาพเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2-2 (ก) และ (ค) ค่าแรงดันตกในสายป้อน (Voltage Drop : VD) สามารถหาได้โดยประมาณดังสมการที่ (2.1)

$$VD \approx IR\cos\theta + IX_L\sin\theta \qquad \text{Volt} \qquad (2.1)$$

โดยที่

R = ค่าความต้านทานของสายป้อน

X_L = ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายป้อน

จะสังเกตุจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ว่าขนาดของเทอมที่สองของสมการที่ (2.1) มีค่ามากกว่าเทอมแรกมากๆ ซึ่งผลต่างนี้จะมีค่ามากขึ้นอีกเมื่อตัวประกอบกำลังและอัตราส่วนของ R/X_L มีค่าต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้ากับระบบดังแสดงในรูปที่ 2-2 (ข) และ(ง) ผลของแรงดันตกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$VD \approx IR\cos\theta + I(X_L - X_c)\sin\theta \quad \text{Volt} \qquad (2.2)$$

โดยที่

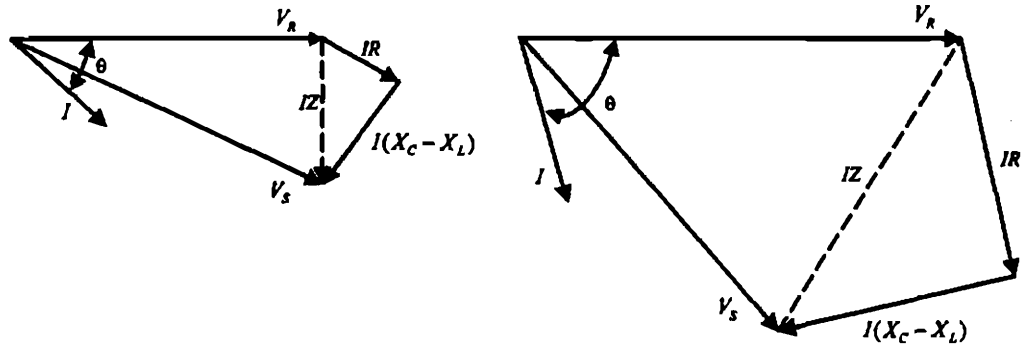
X_c = ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

2.3.1 การชดเชยเกิน (Overcompensation)

สามารถทำได้โดยการเลือกขนาดของตัวเก็บประจุแบบอนุกรมบนสายป้อนในระบบจำหน่าย ที่ทำให้ผลของค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์มากกว่าค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายป้อน แต่อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้งานจริงค่าความต้านทานของสายป้อนมีค่าน้อยกว่าค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์มากๆ ดังนั้นผลของแรงดันตกอาจหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$VD \approx IR\cos\theta + I(X_c - X_L)\sin\theta \quad \text{Volt} \qquad (2.3)$$

จากผลนี้เรียกว่าเป็นภาวะการชดเชยเกิน รูปที่ 2-3 (ก) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของภาวะการชดเชยเกินที่ภาวะโหลดปกติ ผลของแรงดันที่จุดปลาย (Receiving-end) ในภาวะนี้อาจจะผิดปกติ เนื่องจากกระแสที่ล้าหลังของมอเตอร์ขนาดใหญ่ขณะเริ่มเดินเครื่อง ทำให้เกิดค่าแรงดันที่สูงขึ้นมากผิดปกติ (ดูรูปที่ 2-3 (ข)) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุในการเกิดไฟกระพริบ (Flicker) ได้



(ก) (ข)

รูปที่ 2-3 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันที่จุดปลายในภาวะการชดเชยเกิน

(ก) ที่ภาวะโหลดปกติ

(ข) ขณะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ขนาดใหญ่

2.3.2 ตัวประกอบกำลังนำหน้า (Leading Power Factor)

ในการลดค่าแรงดันตกซึ่งพิจารณา ณ จุดต้นทาง (Sending-end) และจุดปลายทาง (Receiving-end) โดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม กระแสของโหลดต้องมีตัวประกอบกำลังล้าหลัง (lagging power factor) ยกตัวอย่างดังรูปที่ 2-4(ก) แสดงถึงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในขณะที่โหลดมีตัวประกอบกำลังนำหน้าและยังไม่มีการต่อตัวเก็บประจุในสาย ส่วนรูปที่ 2-4 (ข) แสดงถึงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในขณะที่โหลดมีตัวประกอบกำลังนำหน้าเหมือนกัน แต่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมในสาย จากรูปทั้งสองจะสังเกตุได้ว่าแรงดันที่จุดปลายทางจะมีค่าลดลงเป็นผลเนื่องจากการต่อตัวเก็บประจุ

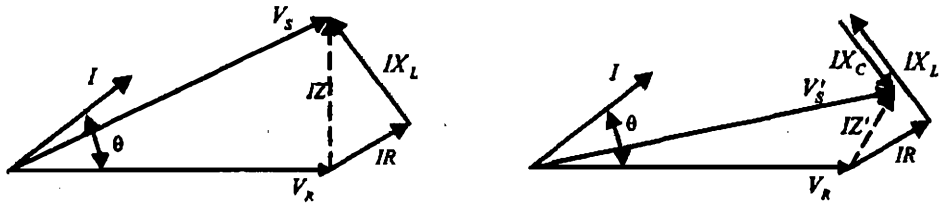
เมื่อ $\cos\theta = 1.0$ และ $\sin\theta \cong 0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$I(X_L - X_c)\sin\theta \cong 0 \qquad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.2) จะได้ว่า

$$VD \cong IR \qquad \text{Volt} \qquad (2.5)$$

ดังนั้นจากสมการที่ได้จะเห็นว่าการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมนั้นไม่ก่อให้เกิดประโยชน์



รูปที่ 2-4 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในภาวะโหลดมีตัวประกอบกำลังนำหน้า

(ก) ไม่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

(ข) มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

2.4 การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (Shunt Capacitors)

ความหมายของการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานก็คือการต่อตัวเก็บประจุขนานกับสายป้อนนั่นเอง ซึ่งมักนิยมใช้กันมากในระบบจำหน่าย โดยปกติตัวเก็บประจุต่อขนานจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของอินดักทีฟโหลด โดยการให้กระแสที่มีเฟสนำหน้าซึ่งจะหักล้างกับองค์ประกอบบางตัวที่มีเฟสล้าหลังของกระแสอินดักทีฟโหลด ณ จุดที่ทำการติดตั้ง ดังนั้นการต่อตัวเก็บประจุต่อขนาน จึงมีผลเปรียบเสมือนกับ ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser) ซิงโครนัสเจนเนอเรเตอร์ (Synchronous Generator) หรือซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) ในภาวะถูกกระตุ้นเกิน (Overexcited)

จากรูปที่ 2-5 เป็นการแสดงถึงการต่อตัวเก็บประจุต่อขนานเข้ากับสายป้อน จะเห็นได้ว่าขนาดของแหล่งจ่ายกระแสลดลงรวมถึงค่าตัวประกอบกำลังก็ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และผลที่ตามมาคือแรงดันตกระหว่างจุดต้นทางกับโหลดจะลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุต่อขนานจะไม่มีผลต่อกระแสหรือตัวประกอบกำลังที่จุดอื่นๆ รูปที่ 2-5 (ก) และ (ค) แสดงแผนภาพเส้นเดียว (Single-line Diagram) ของสายป้อน รวมทั้งเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันก่อนทำการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนาน ส่วนรูปที่ 2-5 (ข) และ (ง) แสดงแผนภาพหลังจากที่ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานแล้ว

ค่าแรงดันตกในสายป้อนในภาวะที่มีตัวประกอบกำลังล้าหลัง สามารถประมาณค่าได้ดังสมการที่ (2.6)

$$VD \approx I_R R + I_X X_L \qquad \text{Volt} \qquad (2.6)$$

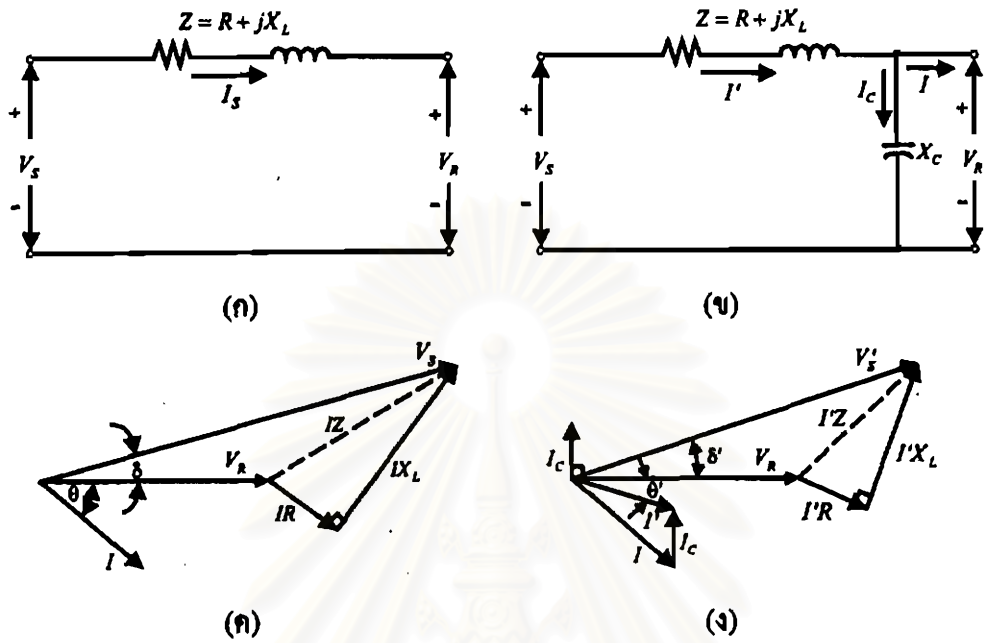
โดยที่

R = ค่าความต้านทานทั้งหมดของวงจรสายป้อน

X_L = ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ทั้งหมดของวงจรสายป้อน

I_R = องค์ประกอบของกระแสส่วนจริง

I_X = องค์ประกอบของกระแสส่วนจินตภาพที่ล้าหลังแรงดันเป็นมุม 90°



รูปที่ 2-5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันของวงจรสายป้อนที่มีตัวประกอบกำลังล้าหลัง

(ก), (ข) ไม่มีการต่อตัวเก็บประจุต่อขนาน

(ค), (ง) ทำการต่อตัวเก็บประจุต่อขนาน

เมื่อตัวเก็บประจุถูกติดตั้งที่จุดปลายของสายป้อนดังแสดงในรูปที่ 2-5 (ข) จะทำให้ผลของแรงดันตกสามารถคำนวณได้โดยประมาณดังสมการ (2.7)

$$VD \approx I_R R + I_X X_L - I_c X_c \quad \text{Volt} \quad (2.7)$$

โดยที่

I_c = องค์ประกอบของกระแสส่วนจินตภาพที่นำหน้าแรงดันเป็นมุม 90°

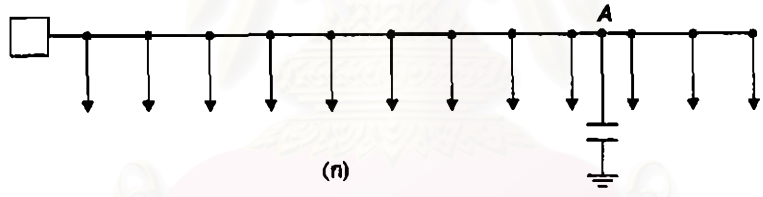
ความแตกต่างระหว่างค่าแรงดันตกที่คำนวณได้ในสมการที่ (2.6) กับสมการที่ (2.7) คือค่าแรงดันที่สูงขึ้น (Voltage Rise : VR) จากการติดตั้งตัวเก็บประจุ และสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.8)

$$VR \approx I_c X_c \quad \text{Volt} \quad (2.8)$$

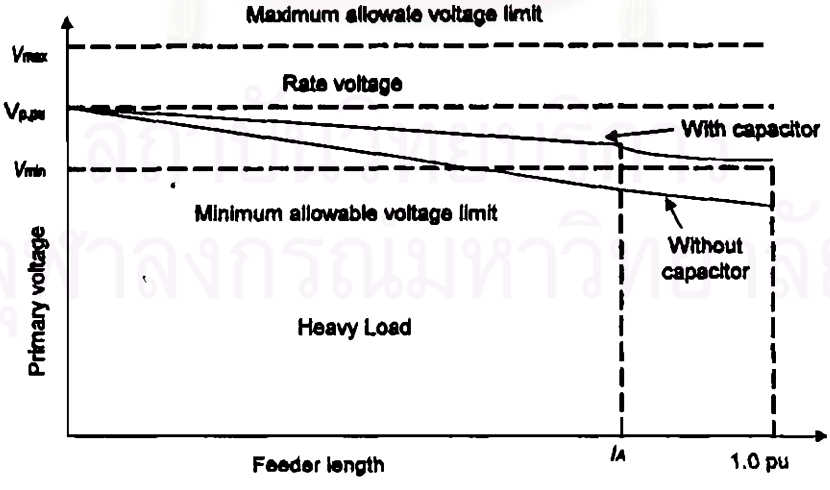
2.5 ประเภทของการติดตั้งตัวเก็บประจุ (Capacitor Installation Types)

โดยทั่วไปประเภทของการติดตั้งตัวเก็บประจุบนสายป้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การติดตั้งแบบถาวร (Fixed Type) และการติดตั้งแบบสับเข้า-ปลดออก (Switched Type)

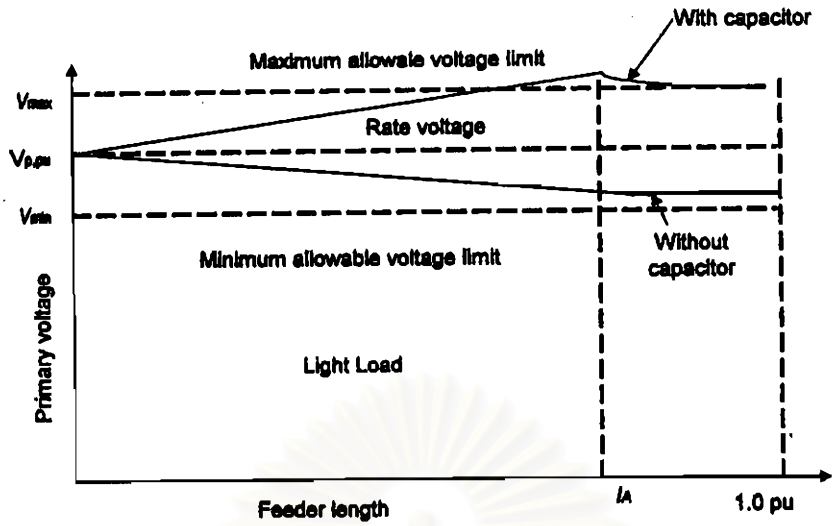
จากรูปที่ 2-6 เป็นการแสดงถึงผลกระทบของระดับแรงดันบนสายป้อนจากการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรที่จุด A โดยมีโหลดกระจายอย่างสม่ำเสมอ จะสังเกตุเห็นได้จากรูปที่ 2-6 (ค) ว่าในสภาวะที่ระบบมีการใช้โหลดน้อยจะทำให้เกิดค่าแรงดันที่สูงเกินบนสายป้อน ดังนั้นจึงควรมีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกเข้ากับระบบจำหน่ายจำนวนหนึ่งด้วย ซึ่งมันสามารถที่จะถูกปลดออกจากระบบได้ในสภาวะที่ระบบมีการใช้โหลดน้อย ดังนั้น ในการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุแบบถาวร จะทำการออกแบบให้มีขนาดเหมาะสมกับระบบจำหน่ายในสภาวะที่มีการใช้โหลดน้อย ส่วนตัวเก็บประจุแบบสับเข้า-ปลดออกจะถูกออกแบบให้สามารถรองรับสภาวะของระบบที่มีการเพิ่มขึ้นของโหลดได้



(ก)



(ข)



(ก)

รูปที่ 2-6 ผลของแรงดันจากการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบคงที่

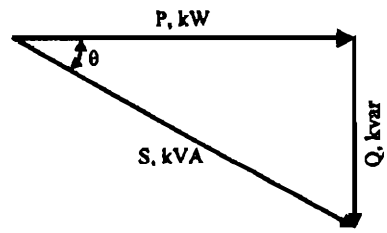
(ก) แสดงถึงการกระจายของโหลดบนสายป้อนอย่างสม่ำเสมอ

(ข) สภาวะที่ระบบมีการใช้โหลดมาก

(ค) สภาวะที่ระบบมีการใช้โหลดน้อย

2.6 ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

ตัวประกอบกำลัง (P.F.) คือค่าคงที่เฉพาะของโหลดตัวใดตัวหนึ่ง หรือค่าคงที่ของกลุ่มโหลดที่บอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนไปเป็นกำลังไฟฟ้าจริง จากรูปสามเหลี่ยมกำลังดังแสดงในรูปที่2-7 อาจหาค่าตัวประกอบกำลังได้จาก อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.9)



รูปที่ 2-7 สามเหลี่ยมกำลัง

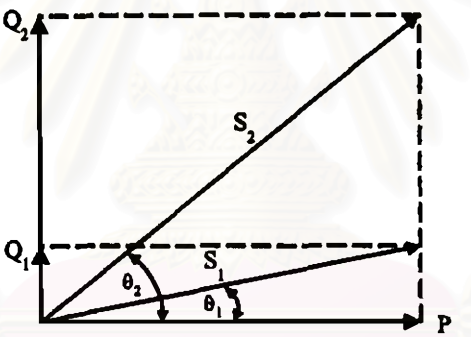
$$P.F. = real\ power\ /\ apparent\ powe \tag{2.9}$$

$$P.F. = VI\cos\theta\ /VI \tag{2.10}$$

$$P.F. = \cos\theta \tag{2.11}$$

2.6.1 ผลเสียที่เกิดจากตัวประกอบกำลังต่ำ

จากรูปที่ 2-8 เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ 2 ค่าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้เท่ากัน ถ้าเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าปรากฏให้อยู่ในรูปของเลขเชิงซ้อน (Complex number) จะได้ดังนี้คือ $S_1 = P + jQ_1$ และ $S_2 = P + jQ_2$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อแตกแรงออกเป็น 2 แนว จะได้กำลังไฟฟ้าจริงเท่ากัน แต่กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะแตกต่างกัน ตัวที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟมากกว่า จะมีตัวประกอบกำลังต่ำกว่า และมีมุม (θ) กว้างกว่า



รูปที่ 2-8 สามเหลี่ยมกำลังที่มีตัวประกอบกำลัง 2 ค่า

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าปรากฏเป็นผลคูณระหว่างแรงดันและกระแส ถ้าดูจากรูปที่ 2-8 จะเห็นว่าขนาด S_2 ยาวกว่า S_1 ดังนั้นกระแสโหลด (I_2) จึงมีค่ามากกว่ากระแสโหลด (I_1) หรืออาจสรุปได้ว่าโหลดที่มีตัวประกอบกำลังต่ำจะใช้กระแสสูงแต่ได้กำลังไฟฟ้าจริงต่ำ และการที่ใช้กระแสสูงนี้เอง จะก่อให้เกิดผลตามมาดังนี้คือ

1) เกิดแรงดันตกในสาย
2) เกิดกำลังสูญเสียในสาย
3) หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้น้อยกว่าที่ควร
4) เกิดแรงดันตกในหม้อแปลงไฟฟ้ามากกว่าที่ควร
5) เกิดกำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้ามากกว่าที่ควร

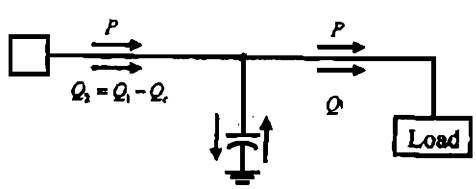
2.6.2 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

เนื่องจากระบบที่มีตัวประกอบกำลังต่ำมีผลเสียต่อระบบหลายประการ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้น แต่เนื่องจากโหลดโดยทั่วไปมีตัวประกอบกำลังเป็นชนิดล้าหลังเกือบทั้งหมด ดังนั้นการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจึงต้องใช้อุปกรณ์ที่มีตัวประกอบกำลังชนิดนำหน้ามาช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับโหลดโดยไม่ต้องดึงกำลังส่วนนี้ออกมาจากแหล่งจ่าย (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือหม้อแปลงไฟฟ้า) ซึ่งจะช่วยให้แหล่งจ่ายสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้แก่โหลดได้สูงขึ้น

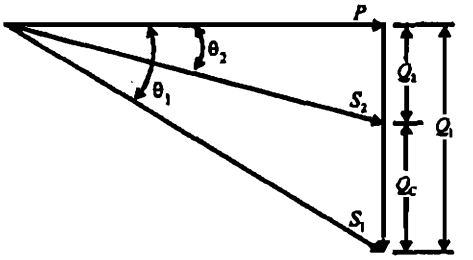
2.6.3 อุปกรณ์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

การปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นจะต้องต่ออุปกรณ์ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้ากับวงจรนั้น แต่จะใช้อุปกรณ์ชนิดใดช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าดังกล่าวจะต้องทราบว่าตัวประกอบกำลังของระบบนั้นเป็นชนิดใดเสียก่อน เช่น ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่มีโหลดปลายสายต่ำๆ จะทำให้กระแสอัดประจุ (Charging current) ของสาย ส่งผลให้ตัวประกอบกำลังของสายกลายเป็นชนิดนำหน้าและแรงดันปลายสายจะสูงมาก ในกรณีนี้จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่เรียกว่า รีแอกเตอร์ขนาน (Shunt Reactor) ต่อคร่อมที่ปลายสาย จึงจะช่วยลดแรงดันลงได้ แต่โดยทั่วไปแล้วตัวประกอบกำลังของโหลดเกือบทั้งหมดจะเป็นชนิดล้าหลัง ดังนั้นการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจึงต้องใช้ตัวเก็บประจุ หรืออุปกรณ์อื่นที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุ เช่น ซิงโครนัสมอเตอร์

ตามปกติการปรับปรุงตัวประกอบกำลังนิยมใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานเข้ากับวงจรมากที่สุด เพราะมีราคาค่อนข้างถูก และเกือบจะไม่ต้องทำการบำรุงรักษาเลย เพราะไม่มีส่วนเคลื่อนไหว และประการสำคัญคือ มีกำลังสูญเสียในตัวเองต่ำมาก ในปัจจุบันสามารถผลิตตัวเก็บประจุ ให้มีกำลังสูญเสียต่ำกว่า 0.5 วัตต์ / กิโลวาร์ ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2-9 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยตัวเก็บประจุต่อขนาน

จากรูปที่ 2-9(ก) ตัวเก็บประจุต่อขนานจะให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบนำหน้าจากแหล่งจ่าย (Source) และจะให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบล้าหลังกับโหลด สมมติว่าโหลดได้รับกำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบล้าหลัง (Q_1) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S_1) โดยที่

$$\cos\theta_1 = \frac{P}{S_1} \tag{2.12}$$

หรือ
$$\cos\theta_1 = \frac{P}{(P^2 + Q_1^2)^{1/2}} \tag{2.13}$$

เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานที่โหลด ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังถูกปรับปรุงเปลี่ยนจาก $\cos\theta_1$ เป็น $\cos\theta_2$ โดยที่

$$\cos\theta_2 = \frac{P}{S_2} \tag{2.14}$$

หรือ
$$\cos\theta_2 = \frac{P}{(P^2 + Q_2^2)^{1/2}} \tag{2.15}$$

หรือ
$$\cos\theta_2 = \frac{P}{[P^2 + (Q_1 - Q_c)^2]^{1/2}} \tag{2.16}$$

ดังนั้น จากรูปที่ 2-9 (ข) จะสังเกตุได้ว่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าลดลงจาก S_1 เป็น S_2 และเปลี่ยนจาก Q_1 เป็น Q_2 (โดยการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ Q_c) ตามลำดับ เป็นที่แน่ชัดว่าการลดลงของกระแสรีแอกทีฟเป็นผลทำให้กระแสรวมทั้งหมดลดลง รวมถึงทำให้กำลังสูญเสียลดลงด้วย อาจกล่าวได้ว่าการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังจะทำให้ระบบมี

เสถียรภาพมากขึ้น ในด้านของการมีระดับแรงดันที่คงที่ในเกณฑ์ที่กำหนด การเพิ่มความสามารถในการรองรับโหลดที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการลดค่ากำลังสูญเสียของอุปกรณ์ทางระบบไฟฟ้าทุก ชนิดในระหว่างจุดที่ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุกับแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งรวมถึงสายป้อน สถานีไฟฟ้าย่อย หม้อแปลง และสายส่ง

2.6.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

เมื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้น จะเกิดผลดีต่อระบบไฟฟ้าหลายประการ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ระบบไฟฟ้าสามารถรับโหลดได้เพิ่มขึ้น (Release of System Capacity)

เมื่อทำการปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นแล้ว จะทำให้กระแสของระบบมีค่าลดลง นั่นคือ ค่าโวลท์แอมแปร์ของระบบจะลดลง ทำให้ระบบสามารถจ่ายโหลดได้มากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นโหลด อาทิเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง เป็นต้น จะบอกค่าพิกัด (Rating) เป็นกระแสหรือเป็นโวลท์แอมแปร์ ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดมีค่าคงที่ เมื่อทำการเพิ่มตัวประกอบกำลัง จะทำให้กำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบมีค่าลดลง หรือกล่าวอีกนัยว่า ถ้ากำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบคงที่ ระบบจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้เพิ่มขึ้น

2) ปรับปรุงระดับแรงดันของระบบให้ดีขึ้น (Voltage Improvement)

เป็นที่ทราบกันดีว่า ค่าแรงดันตกระหว่างสาย (Line to Line Voltage Drop) ของระบบไฟฟ้าสามเฟส สามารถหาได้โดยประมาณจากสมการ (2.17)

$$VD \approx \sqrt{3}\ I(R\cos\theta + X_L \sin\theta) \qquad (2.17)$$

โดยที่

I = ค่ากระแสในสาย

R = ค่าความต้านทานของสาย

X_L = ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสาย

θ = มุมของตัวประกอบกำลัง

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่า การปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นนั้นจะทำให้ระบบสามารถจ่ายโหลดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าในขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบมีค่าคงที่แต่ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบจะลดลง และทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่เกิดจากการรวมกันทางเฟสเซอร์ของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าลดลง นั่นหมายความว่าค่าของกระแสในสายจะมีค่าลดลง และในขณะเดียวกันค่ามุมของตัวประกอบกำลังจะมีค่าลดลงด้วย เมื่อทำการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ซึ่งการลดลงของค่าทั้งสองนี้จะมีผลทำให้ค่าของแรงดันตกในสายไฟฟ้ามีค่าลดลง

3) ลดค่าแรงดันตกในหม้อแปลง (Reduce Transformer Voltage Drop)

เมื่อทำการปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น จะทำให้แรงดันที่ขั้วทุติยภูมิของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.18)

$$\%\text{ แรงดัน (เพิ่มขึ้น)} = \frac{\text{ขนาดของตัวเก็บประจุ} * \text{อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง}}{\text{ขนาดพิกัดของหม้อแปลง}} \quad (2.18)$$

4) ลดค่ากำลังสูญเสียภายในสาย (Reduce Line Power Loss)

เนื่องจากกำลังสูญเสียภายในสาย (P_L) แปรตามกระแสที่ไหลผ่านสายยกกำลังสอง แต่กระแสในสาย (I) จะลดลงเมื่อตัวประกอบกำลังมีค่าสูงขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่ากระแสในสายแปรผกผันกับตัวประกอบกำลัง ถ้ากำลังจริงที่โหลดเท่ากับ P และแรงดันคร่อมโหลดเท่ากับ V มีค่าคงที่ อาจเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.19)

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V \cos\theta} \quad (2.19)$$

ถ้า I_1 และ I_2 เป็นกระแสก่อนและหลังการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง $P.F._1$ และ $P.F._2$ เป็นตัวประกอบกำลังเดิมและตัวประกอบกำลังใหม่ อาจหากำลังสูญเสียในสายก่อนและหลังการปรับปรุงตัวประกอบกำลังได้ดังสมการที่ (2.20) และ (2.21)

กำลังสูญเสียในสายที่ตัวประกอบกำลังเดิม

$$P_{L1} = I_1^2 R = \frac{P^2 R}{3\ V^2 (P.F_1)^2} \tag{2.20}$$

กำลังสูญเสียในสายที่ตัวประกอบกำลังใหม่

$$P_{L2} = I_2^2 R = \frac{P^2 R}{3\ V^2 (P.F_2)^2} \tag{2.21}$$

หรือ

$$\frac{P_{L2}}{P_{L1}} = \frac{(P.F_1)^2}{(P.F_2)^2} \tag{2.22}$$

$$P_{L2} = \left[\frac{P.F_1}{P.F_2}\right]^2 P_{L1} \tag{2.23}$$

กำลังสูญเสียในสายภายหลังการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง อาจเปรียบเทียบกับก่อนการปรับปรุงตัวประกอบกำลังเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังสมการที่ (2.25)

$$Power\ Loss\ (\%) = \frac{P_{L2}}{P_{L1}} \times 100 \tag{2.24}$$

$$Power\ Loss\ (\%) = \left[\frac{P.F_1}{P.F_2}\right]^2 \times 100 \tag{2.25}$$

และกำลังสูญเสียลดลงเป็นเปอร์เซนต์อาจหาได้ดังสมการที่ (2.26)

$$Reduce\ Power\ Loss\ (\%) = \left[1 - \left(\frac{P.F_1}{P.F_2}\right)^2\right] \times 100 \tag{2.26}$$

5) ลดกำลังสูญเสียในหม้อแปลง (Reduce Transformer Power Loss)

กำลังสูญเสียในหม้อแปลงจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- *กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด* (No Load Loss) หมายถึงกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขณะที่หม้อแปลงยังไม่ได้จ่ายโหลด กำลังนี้เกิดขึ้นในแกนเหล็กเรียกว่า กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) ซึ่งประกอบด้วย กำลังสูญเสียฮีสเตอรีซีส (Hysteresis Loss) และกำลังสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

- *กำลังสูญเสียเนื่องจากโหลด* (Load Loss) หมายถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลง กำลังสูญเสียชนิดนี้เดิมเรียกว่ากำลังสูญเสียในขดลวด (Copper Loss) ค่าของกำลังสูญเสียนี้จะแปรตามค่ากำลังสองของกระแส

เมื่อทำการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นแล้ว กระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงจะมีค่าลดลง ทำให้กำลังสูญเสียเนื่องจากโหลดของหม้อแปลงมีค่าลดลงด้วย ซึ่งสามารถคำนวณหาได้เช่นเดียวกับกำลังสูญเสียภายในสาย

โดยสรุปแล้วจะเห็นได้ว่าผู้ได้รับประโยชน์จากการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้แก่ ผู้ใช้ไฟฟ้าเองและการไฟฟ้า ในที่นี้จะขอสรุปถึงประโยชน์ที่ได้รับของแต่ละฝ่ายโดยแยกเป็นดังนี้

ผู้ใช้ไฟฟ้า

1) ลดการสูญเสียในระบบจ่ายไฟฟ้าใช้งาน
2) เพิ่มปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าในระบบเดิมให้สูงขึ้น
3) ช่วยในการปรับปรุงระดับของแรงดันไฟฟ้าให้สม่ำเสมอ
4) ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนค่าปรับ เมื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้ได้มากกว่าหรือเท่ากับ 85 % และได้รับส่วนลดค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า เมื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้สูงกว่า 85 %

การไฟฟ้า

1) ลดค่ากำลังสูญเสียในระบบจ่ายไฟรวม
2) เพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าในเครือข่ายสายส่งให้มีค่าสูงขึ้น
3) ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่งดีขึ้น

การไฟฟ้าสามารถประหยัด หรือชดเชยการลงทุนในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าไปได้จำนวนมาก แต่สามารถเพิ่มการจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่จะถูกนำเอาไปใช้งานจริง