

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

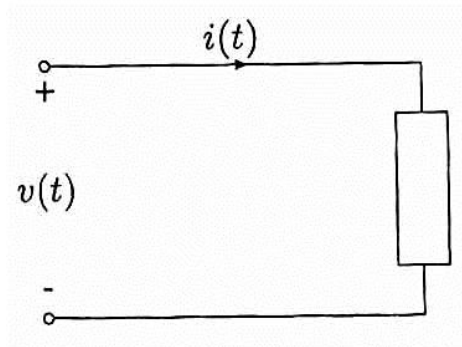
งานวิจัยนี้มีทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ นิยามและความสำคัญของกำลังไฟฟ้าจินตภาพ การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าภายในโรงงานด้วยวิธีนิวตันและราฟสัน (Newton-Raphson Power Flow) โดยเนื้อหาแต่ละส่วนอธิบายได้ดังนี้

2.1 กำลังไฟฟ้าจินตภาพ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงนิยาม ความหมาย และความสำคัญของกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนสำคัญในงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 นิยามของกำลังไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้าดังรูป



รูปที่ 2.1 วงจรระบบไฟฟ้าทั่วไป

สัญญาณแรงดันและกระแสสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad (2.1)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2.2)$$

กำลังไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ (Instantaneous Power) หาได้จากสมการ

$$p(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2.3)$$

จัดรูปสมการ (2.3) ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \{ \cos(\theta_v - \theta_i) + \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) \} \quad (2.4)$$

จัดรูปสมการ (2.4) ใหม่ได้เป็น (2.5)

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \{ \cos(\theta_v - \theta_i) + \cos[2(\omega t + \theta_v) - (\theta_v - \theta_i)] \} \quad (2.5)$$

กระจายเทอมผลต่างฟังก์ชันโคไซน์ของสมการ (2.5) ได้สมการที่ (2.6)

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m [\cos(\theta_v - \theta_i) + \cos 2(\omega t + \theta_v) \cos(\theta_v - \theta_i) + \sin 2(\omega t + \theta_v) \sin(\theta_v - \theta_i)] \quad (2.6)$$

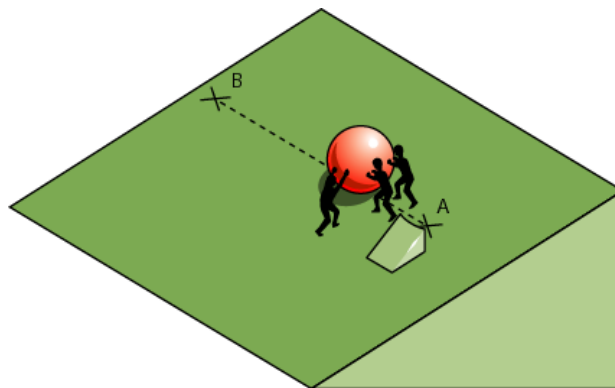
สมการที่ (2.6) แยกได้เป็นสองเทอมดังสมการ (2.7)

$$p(t) = \underbrace{VI \cos(\theta_v - \theta_i) (1 + \cos 2(\omega t + \theta_v))}_{\text{Real Power}} + \underbrace{VI \sin(\theta_v - \theta_i) \sin 2(\omega t + \theta_v)}_{\text{Reactive Power}} \quad (2.7)$$

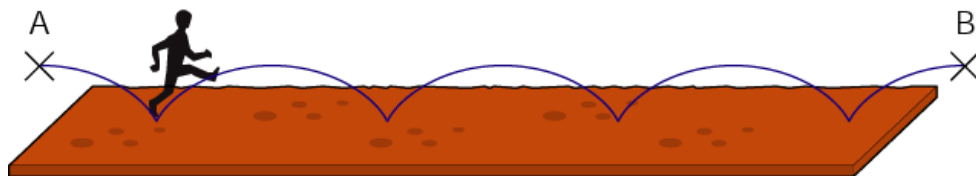
ขนาดของเทอมกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Q) ของสมการที่ (2.7) คือ $VI \cos \theta$ และ $VI \sin \theta$ ตามลำดับ ค่าโคไซน์ของมุม θ คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏเรียกว่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor)

2.1.2 ความสำคัญของกำลังไฟฟ้าจินตภาพ

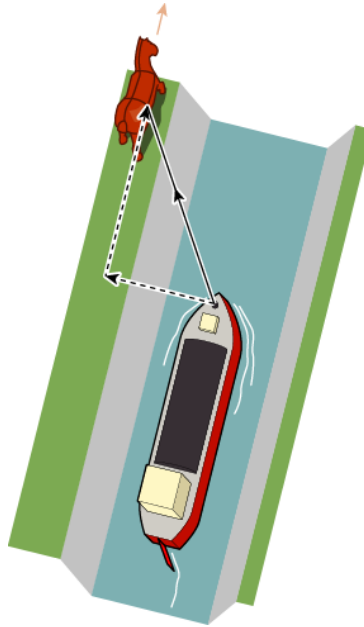
กำลังไฟฟ้าจินตภาพเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าใช้เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าสำหรับผลักดันกระแสให้ไหลในวงจรซึ่งจำเป็นสำหรับถ่ายโอนและส่งผ่านพลังงาน กำลังไฟฟ้าจินตภาพในระบบไฟฟ้ากำลังได้มาจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนิส สายส่ง และตัวเก็บประจุ ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าจินตภาพในระบบไฟฟ้าไม่เพียงพอแรงดันไฟฟ้าจะตกลงจนกระทั่งโหลดทำงานแบบไม่มีประสิทธิภาพ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำจะให้แรงบิดน้อยและหมุนไม่เต็มกำลัง หรืออาจจะหยุดเดินไปเลยเนื่องจากไม่สามารถขับเคลื่อนได้ และในกรณีโหลดไฟแทบทุกชนิดจะให้ปริมาณฟลักซ์แสงลดลง เป็นต้น การจัดการกำลังไฟฟ้าจินตภาพอย่างเหมาะสมจะช่วยลดภาระของการจ่ายพลังงานหรือทำให้กระบวนการใช้พลังงานเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอาจแสดงความสำคัญดังที่กล่าวได้จากเหตุการณ์จำลองดังรูปที่ 2.2 – 2.4



รูปที่ 2.2 การกลิ้งลูกกลมไปบนพื้นเอียงให้เป็นแนวตรงต้องใช้แรงต้านแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 2.3 การวิ่งไปบนพื้นนุ่มต้องใช้พลังงานมากกว่าการวิ่งบนพื้นแข็ง

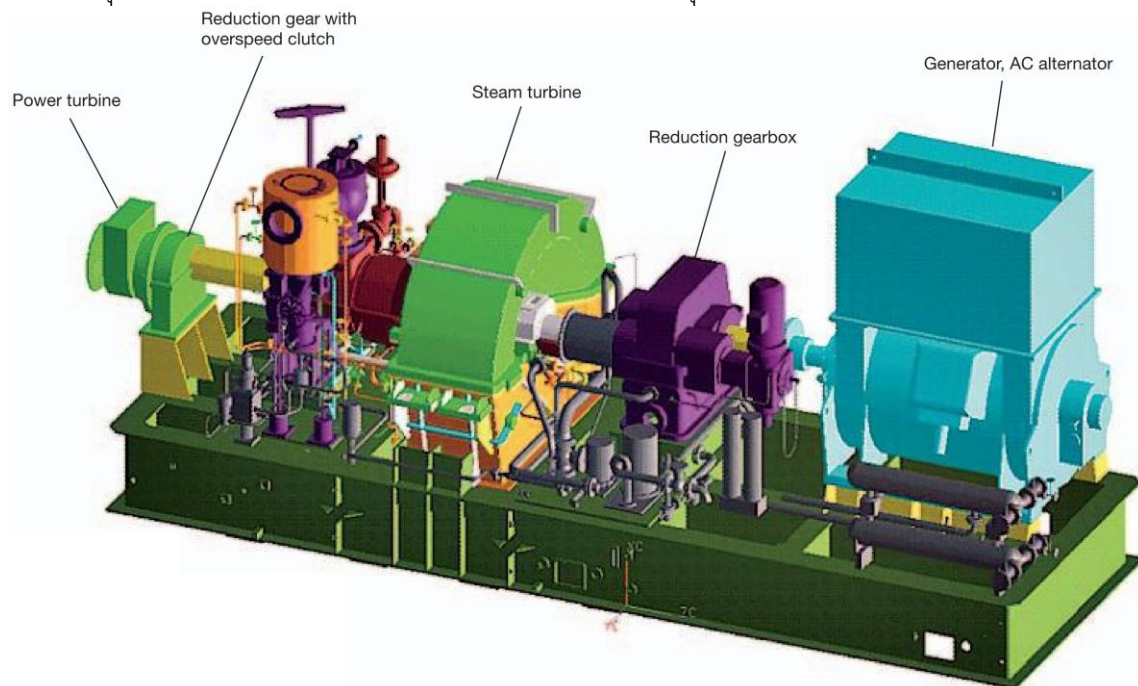


รูปที่ 2.4 ม้าลากเรือไปตามคลองต้องใช้แรงในทิศทางที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่

2.1.3 แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าจินตภาพ

แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าจินตภาพในระบบไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่

- **เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส** สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจินตภาพได้ด้วยการปรับกระแสกระตุ้น (Excitation Current) ซึ่งเป็นกระแส DC ใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก ในทางปฏิบัติสามารถทำการควบคุมที่ค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพโดยตรง หรือโดยการควบคุมค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



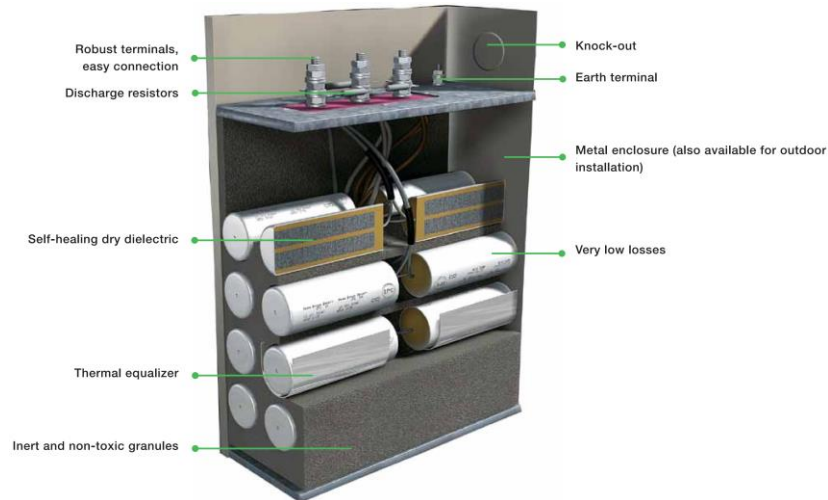
รูปที่ 2.5 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันไอน้ำที่ต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

- **สายส่งไฟฟ้ากำลัง** ในสายส่งไฟฟ้าโดยธรรมชาติมีค่าความเก็บประจุระหว่างสายและความเก็บประจุระหว่างสายกับดิน ซึ่งจะทำให้หน้าที่จ่ายกำลังเสมือนให้แก่ระบบสายส่งตลอดเวลา บางครั้งเรียกว่า Line Charging ทำให้โดยปกติแรงดันในระบบส่งไฟฟ้าจะไม่ตกลงไป และในสถานะที่โหลดไฟฟ้าในระบบมีค่าน้อยค่า Line Charging มีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบ (Ferranti Effect) จึงต้องมีการต่อรีแอกเตอร์ชานเข้าไปที่สถานีไฟฟ้าย่อยในระบบส่งเพื่อให้รับกำลังไฟฟ้าจินตภาพส่วนเกินนี้ออกจากในระบบ อย่างไรก็ตามในระบบจำหน่ายผลของ Line Charging จะมีค่าน้อยทำให้ในทางปฏิบัติการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายต้องวางแผนติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มเติมในสถานีไฟฟ้าย่อยปลายทางและในสายจำหน่ายโดยเฉพาะในสายป้อนที่มีโหลดมาก



รูปที่ 2.6 ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า

- **ตัวเก็บประจุนาน** เป็นแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าจินตภาพที่มีความสะดวกในการใช้งาน สำหรับในโรงงานอุตสาหกรรมจะนิยมติดตั้งตัวเก็บประจุนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า แต่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้านิยมติดตั้งเพื่อยกระดับแรงดันให้สูงขึ้น



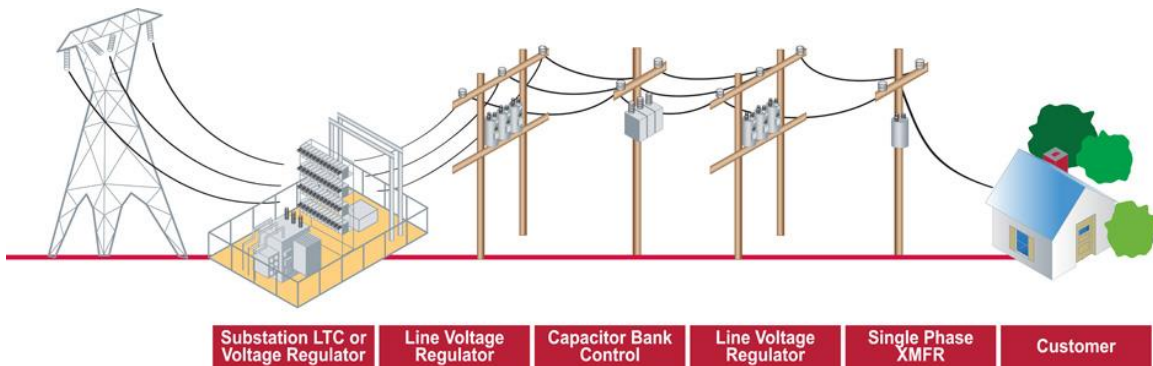
รูปที่ 2.7 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2.1.4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจินตภาพต่อแรงดันไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเป็นเงื่อนไขที่การไฟฟ้าต้องวางแผนและควบคุมให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด มีความสำคัญ ดังนี้

- ลดปัญหาแรงดันตกในบริเวณปลายสายหรือกลุ่มโหลดที่ใช้กำลังไฟฟ้ามากทำให้การใช้งานโหลดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ
- เพื่อลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงกำลัง ณ สถานีไฟฟ้าย่อย และในสายป้อน
- ทำให้หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า และสายป้อนย่อยใช้งานได้เต็มพิกัดกำลังไฟฟ้าจริง

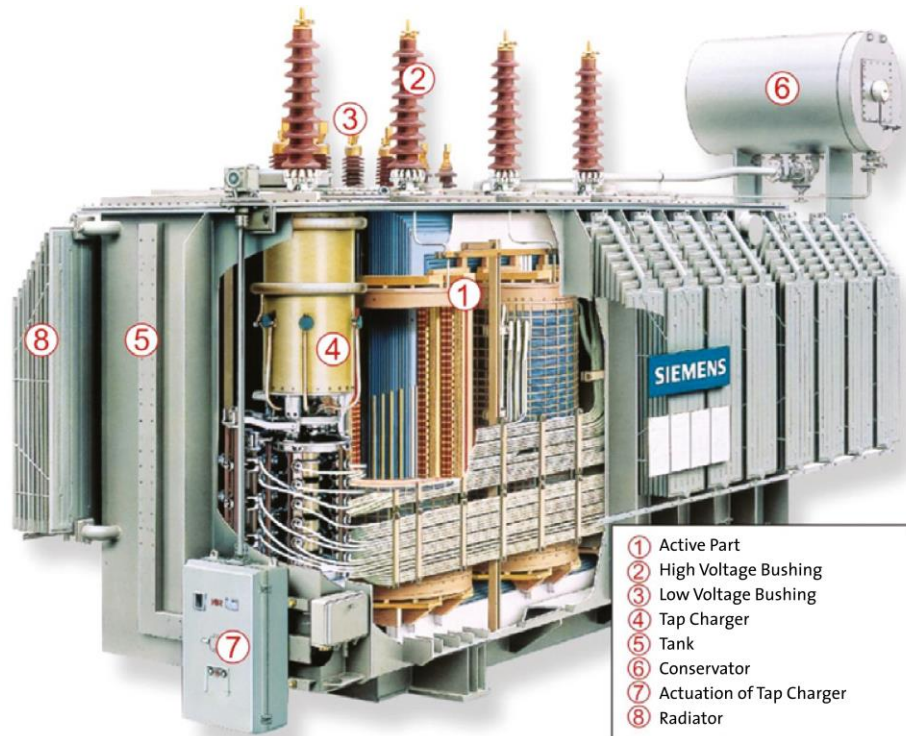
การควบคุมแรงดันไฟฟ้าในสายจำหน่ายโดยปกติสามารถทำได้ดังวิธีการดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

จากรูปที่ 2.8 อธิบายในรายละเอียดได้ดังนี้

- การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาจริงที่สถานีไฟฟ้าย่อยต้นทางทั้งโดยการปรับแท็ปหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยใช้ตัวปรับแท็ปอัตโนมัติขณะมีโหลด (On-Load Tap Changer) อุปกรณ์หมายเลข 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ร่วมกับการใช้งานตัวเก็บประจุ (Shunt Capacitor) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 40 MVA ของบริษัท Siemens



รูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุ ณ สถานีไฟฟ้าย่อยในระบบจำหน่าย

- การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาจริง ณ จุดบนสายจำหน่ายที่มีการติดตั้งอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันอัตโนมัติที่สาย (Line Voltage Regulator)



รูปที่ 2.11 LVR แบบที่มีอัตราส่วนแรงดันคงที่สำหรับติดตั้งบนเสา

- การควบคุมแรงดันไฟฟ้าโดยการวางแผนติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งแบบที่ติดตั้งคงที่และแบบสวิตช์ได้

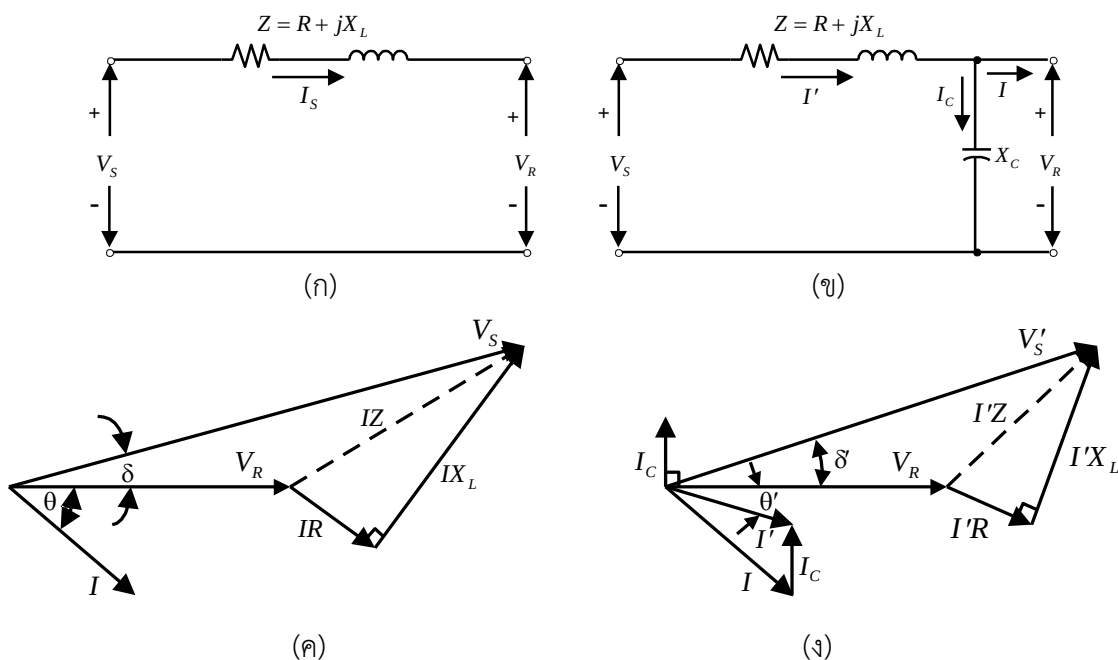


รูปที่ 2.12 ตัวเก็บประจุขนานสำหรับติดตั้งบนเสา

2.1.5 การวางแผนติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

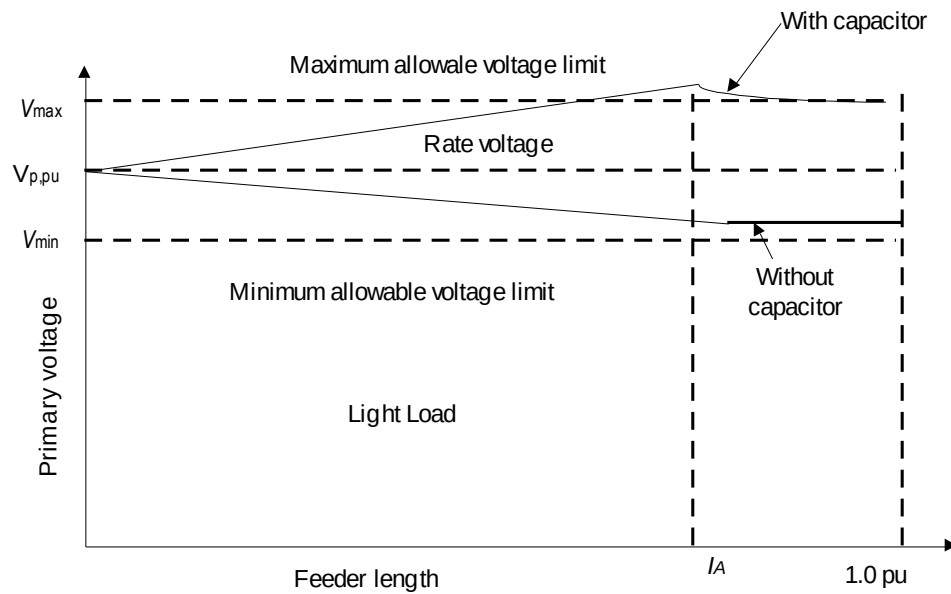
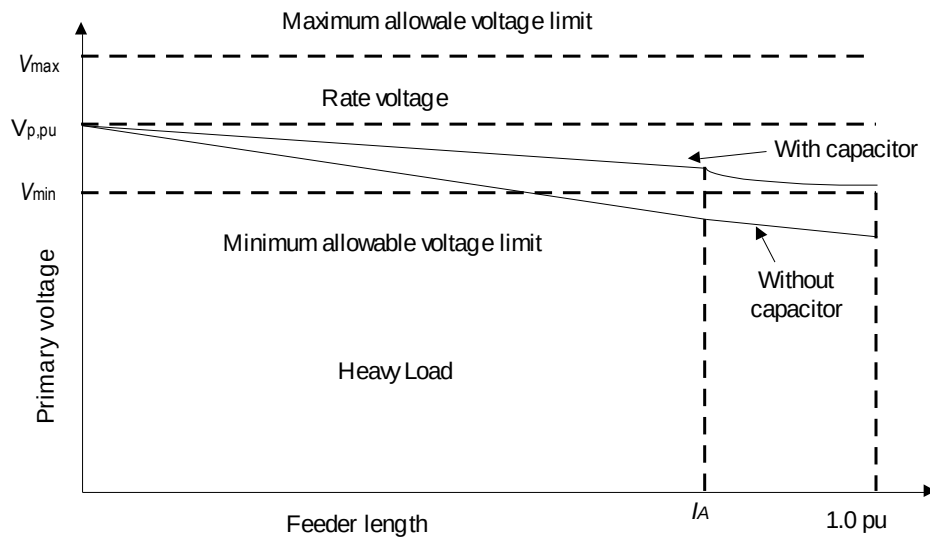
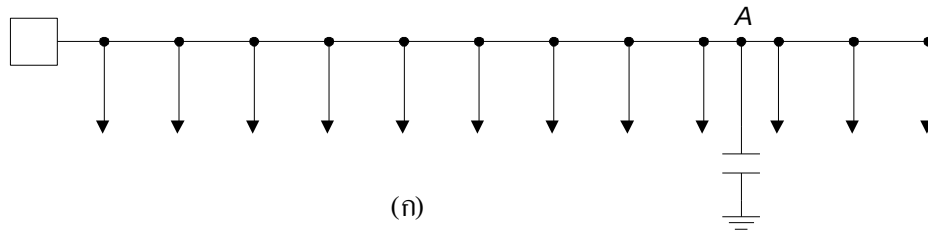
การวางแผนติดตั้งตัวเก็บประจุขนานบนสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถสร้างเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Problem) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็น ตำแหน่ง ขนาด และชนิดของตัวเก็บประจุที่จะทำการติดตั้ง ซึ่งเป็นผลลัพธ์ได้คำนวณได้ดีที่สุดจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งโดยส่วนใหญ่

มักจะคำนึงถึงพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของทั้งระบบและเงินลงทุน โดยที่ยังสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงสายป้อนให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยที่ข้อมูลพื้นฐานที่ต้องใช้ในการคำนวณ เช่น ลักษณะของกราฟโหลด (Load Profile) โครงสร้างการจ่ายไฟของระบบจำหน่าย เป็นต้น เมื่อต่อตัวเก็บประจุขนานเข้ากับสายจำหน่ายสำหรับโหลดแบบที่มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าล้าหลัง (Inductive Load) จะเห็นได้ว่าขนาดกระแสของแหล่งจ่ายจากสถานีไฟฟ้าย่อยต้นทางจะลดลงรวมถึงค่าตัวประกอบกำลังก็ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และผลที่ตามมาคือแรงดันตกคร่อมระหว่างจุดต้นทางกับโหลดจะลดลงด้วย ดังรูปที่ 2.13 (ก) และ (ค) แสดงแผนภาพเส้นเดียว (Single-line Diagram) ของสายป้อนและเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้า ก่อนทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 2.13 (ข) และ (ง) แสดงแผนภาพหลังจากที่ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานและเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าหลังทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 (ก), (ข) แผนภาพเส้นเดียวกรณีมีและไม่มีการต่อตัวเก็บประจุต่อขนาน
 (ค), (ง) เฟสเซอร์ไดอะแกรมแรงดันไฟฟ้ากรณีมีและไม่มีการต่อตัวเก็บประจุต่อขนาน

โดยทั่วไปตัวเก็บประจุบนสายป้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบที่มีค่าคงที่ติดตั้งถาวร และแบบที่สามารถสวิตช์ปลดเข้า-ปลดออกได้ ในการวางแผนติดตั้งตัวเก็บประจุแบบถาวรจะเหมาะสมกับระบบจำหน่ายในสถานะที่มีการใช้โหลดระดับหนึ่งเท่านั้น ส่วนตัวเก็บประจุแบบสามารถสวิตช์ปลดเข้า-ปลดออกได้จะถูกออกแบบเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถรองรับสถานะของระบบที่มีโหลดเพิ่มขึ้นได้ โดยแนวทางดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 โดยใช้ระบบจำลองอย่างง่ายที่มีโหลดกระจายอย่างสม่ำเสมอโดยสมมติให้มีการติดตั้งตัวเก็บประจุค่าหนึ่งที่จุด A ดังรูปที่ 2.14 (ก) รูปที่ 2.14 (ข) และ 2.14 (ค) แสดงผลของแรงดันในสถานะที่โหลดมีค่ามากและน้อยตามลำดับ



รูปที่ 2.14 (ก) ระบบทดสอบที่มีการกระจายของโหลดบนสายจำหน่ายอย่างสม่ำเสมอ
 (ข) ผลของแรงดันจากการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบคงที่ในสภาวะที่ระบบมีโหลดมาก
 (ค) ผลของแรงดันจากการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบคงที่ในสภาวะที่ระบบมีโหลดน้อย

2.2 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในโรงงาน

โหลดไฟฟ้าที่สำคัญในโรงงานประกอบด้วย โหลดมอเตอร์ และโหลดแสงสว่าง ซึ่งอาจติดตั้งมาพร้อมกับระบบเครื่องจักร ซึ่งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลดเหล่านี้แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลดประเภทต่างๆ

โหลด	ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
โหลดไส้	1
โหลดฟลูออเรสเซนต์ (ไม่ชดเชย)	0.5
โหลดฟลูออเรสเซนต์ (ชดเชย)	0.92 - 0.95
โหลดก๊าซดิสชาร์จ	0.4 - 0.6
เตาแบบอาร์ค	0.65 - 0.70
เตาเหนี่ยวนำ	0.90 - 1.0
คอนเวอร์เตอร์ SCR	0.50 - 0.90
มอเตอร์เหนี่ยวนำขณะขับโหลด	
25%	0.55
50%	0.75
75%	0.8
100%	0.85
มอเตอร์แบบกรงกระรอก	
ความเร็วรอบสูง	0.75 - 0.90
ความเร็วรอบต่ำ	0.85 - 0.92
วาวโรเตอร์	0.80 - 0.90

โดยทั่วไปสัดส่วนของโหลดเหล่านี้ในโรงงานแต่ละประเภทมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าตัวประกอบไฟฟ้ารวมในโรงงานแต่ละประเภทแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

อุตสาหกรรม	ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
ผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร	75-80
โรงงานสุรา	76-80
โรงงานซีเมนต์	80-85
โรงงานเคมี	65-75
เหมืองถ่านหิน	65-80
โรงงานตัดเย็บเสื้อผ้า	35-60
โรงงานชุบโลหะ	65-70
โรงหล่อ	75-80
โรงงานขึ้นรูปโลหะ	70-80
โรงพยาบาล	75-80

อุตสาหกรรม	ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
โรงงานผลิตเครื่องจักรกลหนัก	60-65
โรงงานทำผลิตภัณฑ์งานโลหะ	65-70
อาคารสำนักงาน	80-90
แท่นขุดเจาะน้ำมัน	40-60
โรงงานพ่นสี	55-65
โรงงานผลิตภัณฑ์จากพลาสติก	75-80
โรงงานป้อนเข้ารูปโลหะ	60-70
โรงงานเหล็ก	65-80
โรงงานทอผ้า	65-75
โรงกลึง	60-65

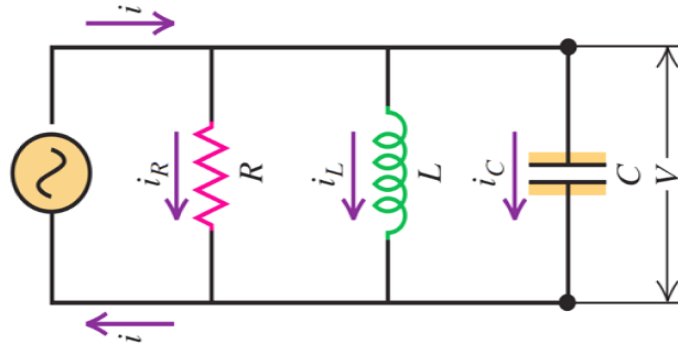
โดยพื้นฐานแล้วทั้งตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลดทั่วไปในแต่ละประเภท และภาพรวมทั้งอุตสาหกรรมมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภทจึงมีการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์และแนวทางดำเนินการดังจะได้อธิบายต่อไป

2.2.1 วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

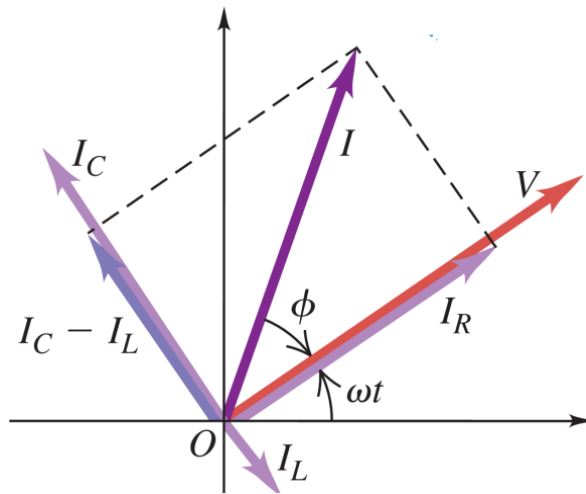
การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในโรงงานโดยการต่อตัวเก็บประจุขนาน มีเป้าหมายเพื่อแก้ผลกระทบของโหลดความเหนี่ยวนำในระบบ มีความสำคัญดังนี้

- ลดหรือป้องกันค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าตามระเบียบของการไฟฟ้า โดยการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายได้กำหนดค่าปรับจากตัวประกอบกำลังไฟฟ้า กับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ และประเภทที่ 5 กิจการเฉพาะอย่าง โดยจะคิดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากค่ากิโวลท์สูงสุดเฉพาะในส่วนที่เกินจากร้อยละ 61.97 ของค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในอัตรากิโวลท์ละ 56.14 บาท
- ลดกำลังสูญเสียในหม้อแปลง และสายป้อนย่อย ซึ่งถือว่าเป็นการอนุรักษ์พลังงานวิธีหนึ่ง
- ลดปัญหาแรงดันตกในบริเวณปลายสายหรือกลุ่มโหลดที่ใช้กำลังไฟฟ้ามาก
- ทำให้หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า และสายป้อนย่อยใช้งานได้เต็มพิกัดกำลังไฟฟ้าจริง เนื่องจากลดการนำเข้าของกระแสจากตัวเหนี่ยวนำจากต้นทางการไฟฟ้า ทำให้กำลังปรากฏลดลง

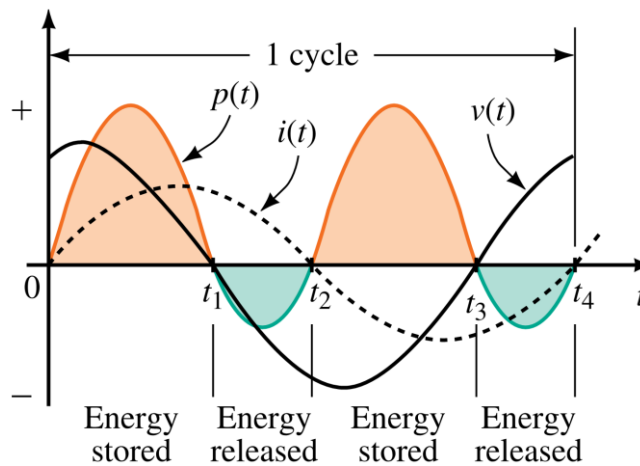
การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีทฤษฎีพื้นฐานมาจากกฎการไหลของกระแสไฟฟ้า ขณะจ่ายแรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลดสมมูล (Equivalent Load) ประเภท ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งได้เฟสเซอร์ของกระแสดังแสดงในรูปที่ 2.16 รูปคลื่นแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของโหลดทั่วไปที่มีองค์ประกอบของความเหนี่ยวนำกับความต้านทานรวมกันอยู่ ที่เรียกว่า Inductive Load จะมีมุมเฟสของกระแสตามหลังแรงดันเนื่องจากธรรมชาติของโหลดความเหนี่ยวนำในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.15 วงจรมี ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ต่อขนานกัน



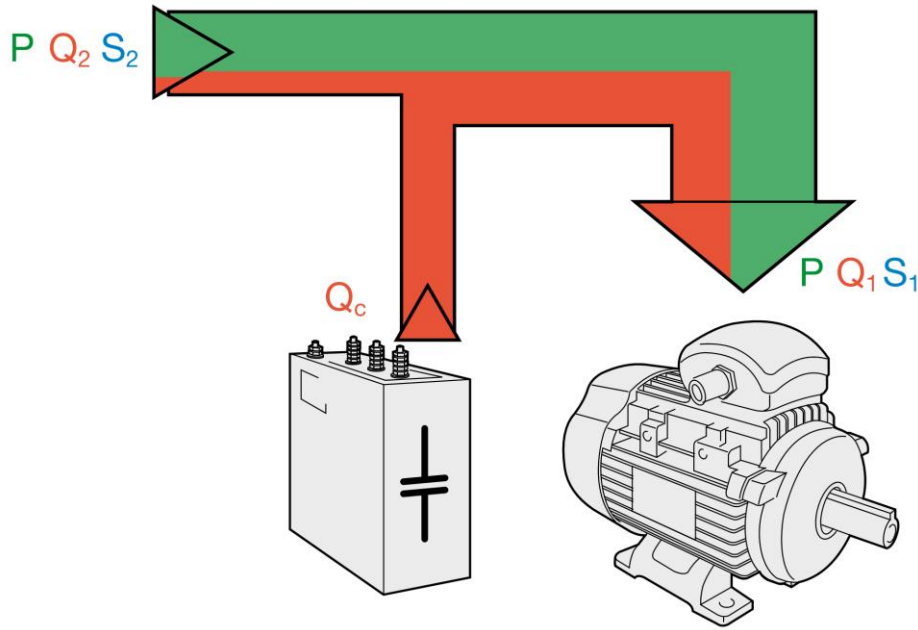
รูปที่ 2.16 เฟสเซอร์ของกระแสที่ผ่าน ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 เฟสเซอร์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของโหลดทั่วไป

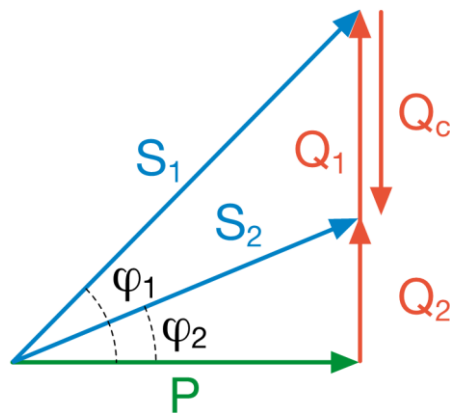
2.2.2 ขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม

ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การคำนวณหาค่าของขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมอย่างง่ายสามารถทำได้ดังสามารถแสดงได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์

จากรูปที่ 2.18 ขณะที่มอเตอร์ทำงาน ณ สถานะหนึ่งรับกำลังไฟฟ้าจริง P และกำลังไฟฟ้าจินตภาพ Q_1 ซึ่งรวมเป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ S_1 เมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจินตภาพขนาด Q_c ขนานเข้าที่ขั้วของมอเตอร์ ทำให้กำลังไฟฟ้าจินตภาพที่มอเตอร์รับมาจากระบบลดลงเหลือ Q_2 โดย $Q_2 = Q_1 - Q_c$ ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 เฟสเซอร์ของกำลังไฟฟ้าก่อนและหลังการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ก่อนปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่า $\cos(\varphi_1)$ กำลังไฟฟ้าจินตภาพมีค่า

$$Q_1 = P \tan(\varphi_1) \quad (2.8)$$

เป้าหมายของการปรับปรุงคือต้องการให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่า $\cos(\varphi_2)$ กำลังไฟฟ้าจินตภาพมีค่า

$$Q_2 = P \tan(\varphi_2) \quad (2.9)$$

ค่า Q_c ที่ต้องนำมาต่อเข้าไปมีค่า $Q_c = Q_2 - Q_1$ คำนวณได้จากสมการ

$$Q_c = P [\tan(\varphi_2) - \tan(\varphi_1)] \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.10) สามารถสร้างตารางเพื่อคำนวณค่าสัดส่วนของ Q_c ต่อ P ที่ต้องใช้เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากค่าเริ่มต้นไปยังค่าที่ต้องการปรับปรุงได้ดังตารางที่ 2.3

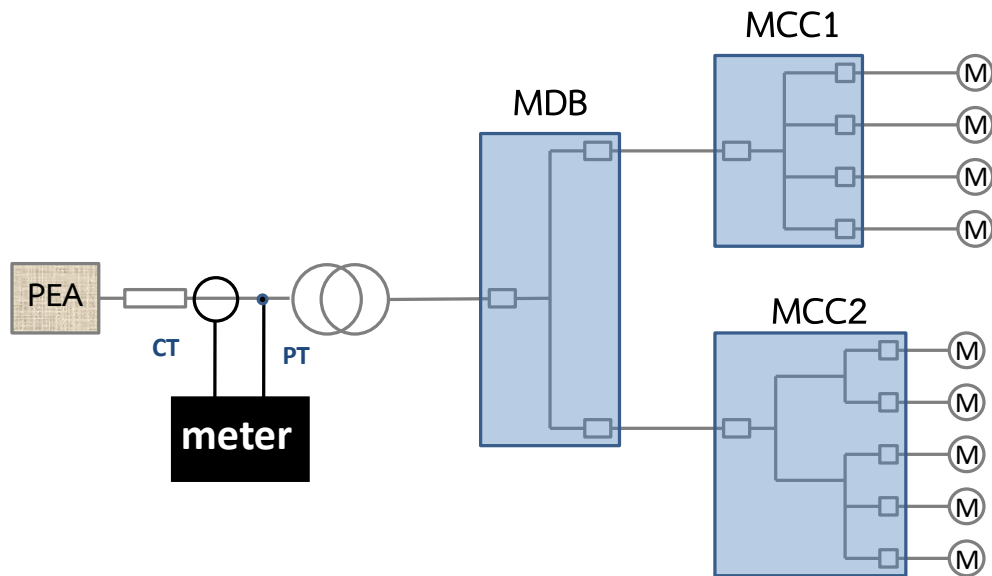
โดยทั่วไปสมมติฐานที่ใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคือ กำลังไฟฟ้าจริงและเสมือนของโหลดจะต้องมีค่าคงที่ก่อนและหลังการปรับปรุง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว ณ จุดที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุขนานกับระบบแรงดันจะมีค่าสูงขึ้น ทำให้จุดทำงานของโหลดเปลี่ยนไปเช่นกันเพราะในความเป็นจริงโหลดในทางไฟฟ้าขึ้นกับค่าแรงดันไฟฟ้า เหตุผลดังกล่าวทำให้เป็นที่มาของงานวิจัยซึ่งจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดในบทต่อไป

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนของ Q_c/P เพื่อใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

Initial P.F.	Improved P.F.											
	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.60	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80	0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750

2.2.3 ตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุ

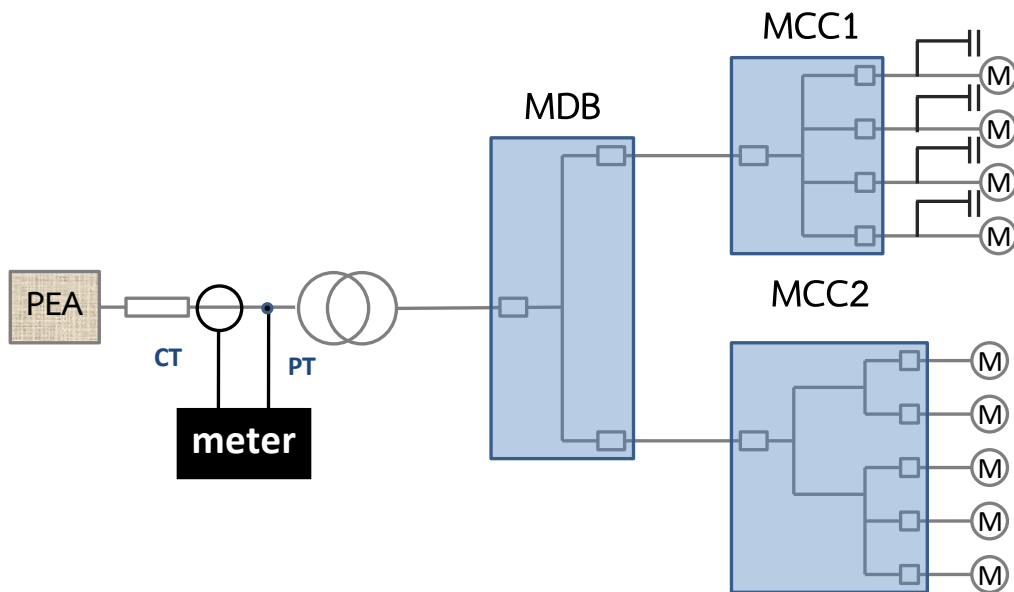
ตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุในโรงงานมีผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายแตกต่างกัน เพื่อให้เห็นภาพจะยกตัวอย่างโดยใช้ไดอะแกรมเส้นเดียวดังรูปที่ 2.20 เป็นตัวแทนแสดงตำแหน่งทั่วไปที่นิยมทำการติดตั้งตัวเก็บประจุดังนี้



รูปที่ 2.20 ไดอะแกรมเส้นเดียวของโรงงานทั่วไป

2.2.3.1 โหลดแต่ละตัว (Individual Compensation)

ทำได้โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไปที่ขั้วโหลด ดังแสดงในรูปที่ 2.21



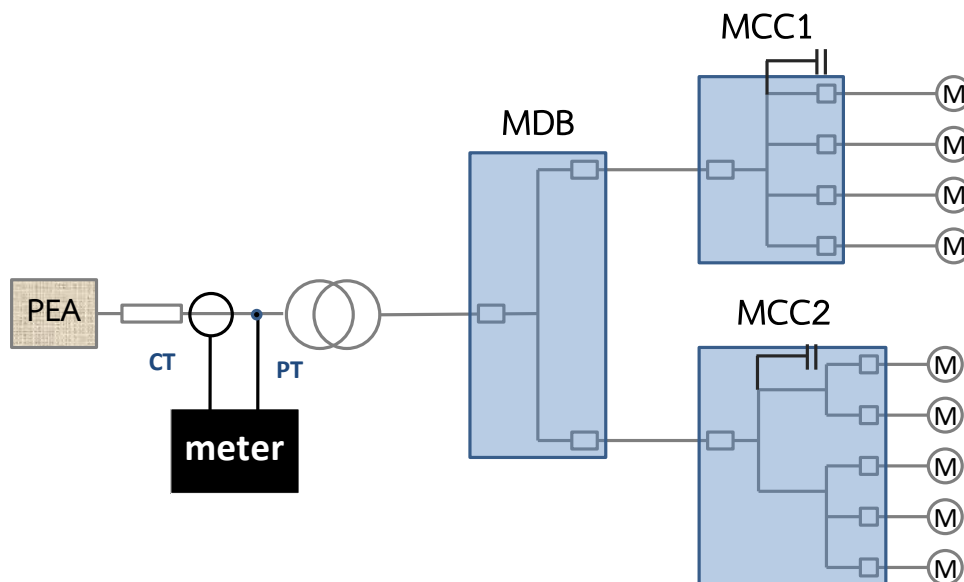
รูปที่ 2.21 ตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ขั้วโหลด

มีคุณลักษณะดังนี้

- สามารถลดค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้
- เป็นการติดตั้งที่มีประสิทธิภาพในการลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมากที่สุด
- มักใช้กับโหลดที่มีกำลังค่อนข้างคงที่ และโดยทั่วไปจะมีการออกแบบขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมาพร้อมติดตั้งกับโหลดไม่นิยมสร้างอุปกรณ์ควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเพิ่มเติม
- มักใช้กับโหลดพวกหลอดไฟและมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำเฟสเดียว
- เนื่องจากต้องติดตั้ง ณ ทุกค่าโหลด ทำให้มีต้นทุนสูงถ้ามีการออกแบบติดตั้งเพิ่มเติมภายหลัง

2.2.3.2 กลุ่มของโหลด (Group Compensation)

ทำได้โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไปที่ตู้ไฟกลุ่มโหลด เช่น ตู้ควบคุมมอเตอร์ (Motor Control Center; MCC) ดังแสดงในรูปที่ 2.22



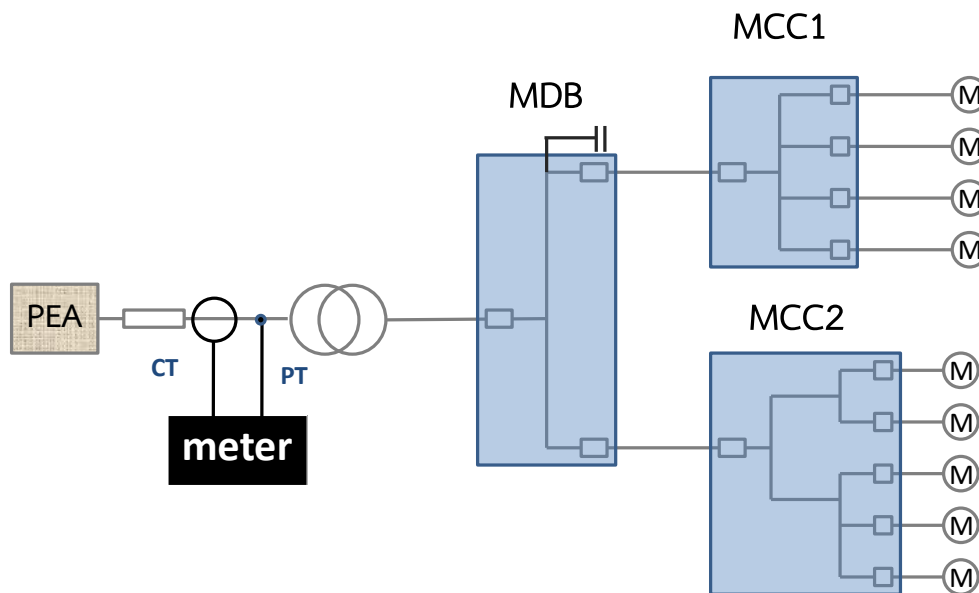
รูปที่ 2.22 ตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ตู้ควบคุมมอเตอร์

มีคุณลักษณะดังนี้

- สามารถลดค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้
- มีการออกแบบตู้ไฟสำหรับชุดตัวเก็บประจุแยกต่างหาก อาจมีการควบคุมด้วยชุดควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Power Factor Controller; APFC)
- APFC มักนิยมใช้กับกลุ่มโหลดที่กำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขณะทำงาน
- มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งค่อนข้างสูงเนื่องจากต้องติดตั้งระบบหลายชุด แต่ก็ยังมีประสิทธิภาพสูงในการลดพลังงานสูญเสีย

2.2.3.3 ศูนย์กลางของโหลด (Central Compensation)

หมายถึงการติดตั้งที่ตู้ควบคุมไฟหลัก (Main Distribution Board; MDB) ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ตำแหน่งการติดตั้งเก็บประจุที่ตู้ควบคุมไฟหลัก

มีคุณลักษณะดังนี้

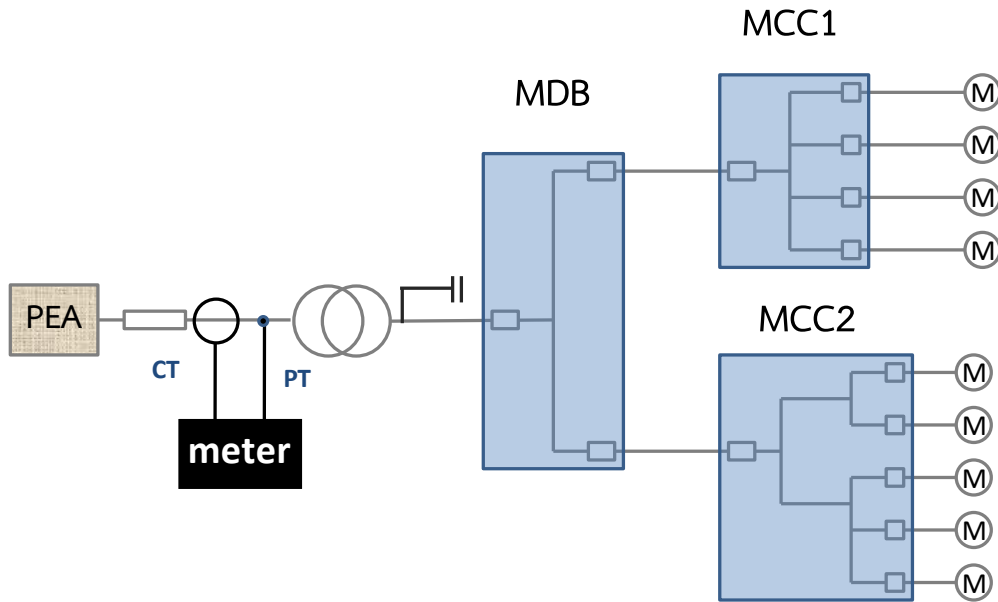
- สามารถลดค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้
- มีการออกแบบตู้ไฟสำหรับชุดตัวเก็บประจุแยกต่างหาก และควรมีการควบคุมด้วยชุดควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Power Factor Controller; APFC) เพื่อให้สามารถควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ตลอดเวลา
- มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งน้อย สามารถลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้เฉพาะส่วนขดลวดในหม้อแปลงและสายไฟจากหม้อแปลงมายังตู้ MDB

2.2.3.4 หม้อแปลงด้านแรงดันต่ำ (Transformer Compensation)

ส่วนใหญ่จะทำการติดตั้งกลางแจ้งที่บริเวณขั้วหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.24

มีคุณลักษณะดังนี้

- มีวัตถประสงค์เพื่อลดค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
- นิยมติดตั้งที่ขั้วหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำแบบกลางแจ้ง โดยไม่มีตู้ไฟสำหรับชุดตัวเก็บประจุจึงไม่สามารถควบคุมด้วย APFC
- มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งน้อยมาก สามารถลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้เฉพาะส่วนของขดลวดในหม้อแปลงเท่านั้น



รูปที่ 2.24 ตำแหน่งการติดตั้งเก็บประจุที่หม้อแปลงด้านแรงดันต่ำ

2.3 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ใช้การแก้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าภายในโรงงานเพื่อ หาจุดทำงานของระบบโดยจะใช้วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันและราฟสัน มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าในโรงงาน โดยขั้นตอนการคำนวณอธิบายได้ดังนี้

ในโรงงานทั่วไป การไหลของกำลังไฟฟ้า ณ เป็นต้นนี้

- ณ บัสต้นทาง หมายถึงบัสด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงจะมีกำลังไฟฟ้าไหลเข้าบัสจากการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย
- กำลังไฟฟ้า ณ บัสต้นทาง จะไหลออกไปยังตู้ไฟและโหลดบัสอื่นๆ ภายในโรงงาน

กำลังไฟฟ้าผลต่าง ณ บัสที่ i สามารถเขียนได้เป็น

$$P_{sch,i} + jQ_{sch,i} = (P_{G,i} + jQ_{G,i}) - (P_{L,i} + jQ_{L,i}) \quad (2.11)$$

โดยที่ อักษรตัวห้อย sch , G และ L หมายถึง ผลต่างระหว่างการไฟฟ้ากับโหลด การไฟฟ้า และ โหลด ตามลำดับ ซึ่งกำลังไฟฟ้าตามสมการ (2.11) จะไหลระหว่างสายป้อนภายในโรงงานที่เชื่อมต่อกับบัสนี้ ดังสมการ (2.12)

$$P_{sch,i} + jQ_{sch,i} = V_i I_i^* \quad (2.12)$$

โดยที่ค่า V หมายถึงค่าแรงดัน ณ บัส i และ I หมายถึงค่ากระแสรวมที่ไหลออกจากบัสที่ i ผ่านทางสายป้อนไปยังบัสอื่น โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

$$\begin{aligned}
I_i &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\
&= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n
\end{aligned} \tag{2.13}$$

โดยค่า y แทนแอดมิตแตนซ์ของสายป้อน เมื่อจัดรูปสมการ (2.13) ใหม่ จะได้สมการที่ (2.14) ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบเชิงขั้วได้ดังสมการ (2.15)

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \tag{2.14}$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \tag{2.15}$$

$|Y_{ij}|$ ใน (2.15) คือขนาดของค่าแอดมิตแตนซ์ ที่แถว i และหลัก j ของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ เพื่อให้ดูง่ายเราอาจเขียนสมการที่ (2.12) ในรูปของค่าสังยุค (Conjugate) แล้วแทนค่า I_i จากสมการที่ (2.51) ลงไป จะได้สมการที่ (2.16) ดังนี้

$$P_{sch,i} - jQ_{sch,i} = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \tag{2.16}$$

สมการที่ (2.16) สามารถแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพได้เป็นสมการที่ (2.17) และ (2.18) ตามลำดับ

$$P_{sch,i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{2.17}$$

$$Q_{sch,i} = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{2.18}$$

กระจายสมการที่ (2.17) และ (2.18) โดยอนุกรมเทย์เลอร์จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.19)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

สมการที่ (2.17) – (2.19) เป็นสมการไม่เชิงเส้น โดยมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือขนาดแรงดันและมุมแรงดันที่ทุกบัส ยกเว้น ณ บัสหมายเลขหนึ่งที่เป็นบัสต้นทางชั่วคราวแรงดันสูงของหม้อแปลงที่รับไฟมาจากการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายซึ่งกำหนดให้เป็นบัสอ้างอิงที่มุมแรงดันเป็นศูนย์องศา

เพื่อให้ดูง่ายขึ้นสมการที่ (2.19) สามารถเขียนใหม่ในรูปสมการที่ (2.20)

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{\Delta Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta \delta}{\Delta |V|} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

จะใช้สมการที่ (2.20) ในการคำนวณแบบวนรอบเพื่อปรับค่าขนาดแรงดันและมุมแรงดันที่ทุกบัสจนกระทั่งเงื่อนไขของการลู่เข้าสู่คำตอบเป็นจริง สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณแบบวนรอบเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta \delta}{\Delta |V|} \end{bmatrix}^{(k)} = \left(\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \right)^{(k-1)} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(k-1)} \quad (2.21)$$

อักษรตัวยก (k) ในสมการที่ (2.21) หมายถึงรอบในการคำนวณ ในการคำนวณเริ่มต้นจะกำหนดให้ขนาดและมุมของแรงดันที่ทุกบัสมีค่า 1 หน่วยและศูนย์ตามลำดับ ยกเว้นบัสที่ชั่วคราวแปลงด้านแรงดันสูงซึ่งอาจจะกำหนดให้สามารถควบคุมแรงดันได้ตามขนาดแรงดันไฟฟ้าจริงของระบบ ณ จุดที่โรงงานตั้งอยู่

เมตริกซ์ย่อย J_1 เป็นเมตริกซ์ ที่มีค่าในแนวทแยงมุมหลักและค่านอกแนวทแยงมุมหลัก ดังสมการที่ (2.22) และ (2.23) ตามลำดับ

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.23)$$

J_2 เป็นเมตริกซ์ ที่มีค่าในแนวทแยงมุมหลักและค่านอกแนวทแยงมุมหลัก ดังสมการที่ (2.24) และ (2.25) ตามลำดับ

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.25)$$

J_3 เป็นเมตริกซ์ ที่มีค่าในแนวทแยงมุมหลักและค่านอกแนวทแยงมุมหลัก ดังสมการที่ (2.26) และ (2.27) ตามลำดับ

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.27)$$

J_4 เป็นเมตริกซ์ ที่มีค่าในแนวทแยงมุมหลักและค่านอกแนวทแยงมุมหลัก ดังสมการที่ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.29)$$

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า จะมีการปรับปรุงขึ้นเพื่อให้สามารถใช้กับแบบจำลองโหลดที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าได้ โดยจะได้กล่าวถึงในบทที่ 4