บทที่ 2
การวางแผนกำลังรีแอคทีฟในระบบไฟฟ้ากำลัง

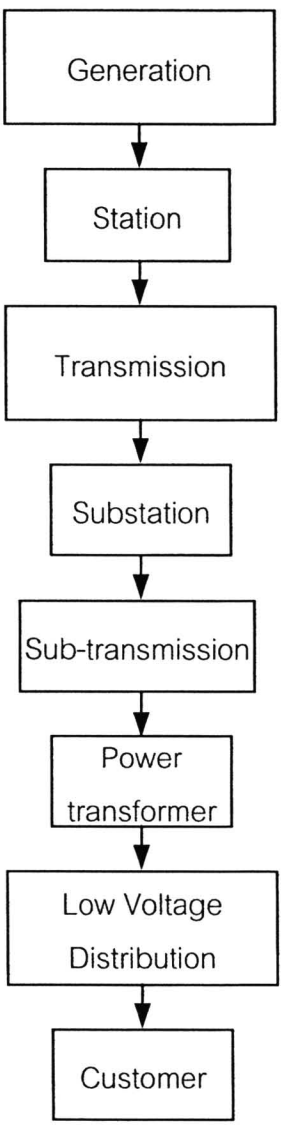
บทนี้จะกล่าวถึงจุดประสงค์การวางแผนกำลังรีแอคทีฟในระบบไฟฟ้ากำลัง รูปแบบของระบบไฟฟ้ากำลัง หลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุ ประโยชน์ที่ได้รับจากการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง แบบจำลองของตัวเก็บประจุ และแบบจำลองของโหลด ซึ่งจะมีการกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

2.1 จุดประสงค์การวางแผนกำลังรีแอคทีฟ

การวางแผนกำลังรีแอคทีฟเป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบส่งไฟฟ้ากำลัง ซึ่งหลักการโดยทั่วไปคือ การติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายหรือรับกำลังรีแอคทีฟในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสม อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแบ่งออกคร่าวๆ [3], [10] ได้เป็น 3 ประเภท คือ 1.อุปกรณ์ประเภทที่สามารถจ่ายและรับกำลังรีแอคทีฟได้ เช่น เครื่องจักรซิงโครนัส (Synchronous machine), SVC และ STATCOM เป็นต้น 2.อุปกรณ์ประเภทที่สามารถจ่ายกำลังรีแอคทีฟได้อย่างเดียว เช่น ตัวเก็บประจุ เป็นต้น และ 3.อุปกรณ์ประเภทที่สามารถรับกำลังรีแอคทีฟได้อย่างเดียว เช่น ตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน การเลือกใช้อุปกรณ์เหล่านี้จึงขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการติดตั้ง โดยคำนึงถึงเงินลงทุนและผลตอบแทนที่ได้จากการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟในระบบ วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ในการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอคทีฟเพื่อชะลอการลงทุนก่อสร้างสายส่ง ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ และเพิ่มความเชื่อได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อพิจารณาถึงจุดประสงค์การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแล้ว พบว่า การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งแรงดันต่ำ (Sub-transmission system; ≤ 115 kV) นั้นใช้เงินลงทุนต่ำกว่าการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งแรงดันสูง (High voltage transmission system; > 115 kV) และการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแรงดันต่ำก็จะมีผลทางอ้อมช่วยให้สามารถลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบแรงดันสูงที่อยู่ต้นทางได้ด้วย [11] ซึ่งการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งแรงดันต่ำนั้น นิยมใช้วิธีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากมากนักและใช้เงินลงทุนต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ วิธีการนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อมหลายอย่าง ดังนี้ ประโยชน์ทางตรง เช่น ช่วยทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าลดลง ช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ช่วยปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบให้ดีขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถรับโหลดได้ให้มากขึ้น เป็นต้น และประโยชน์ทางอ้อม เช่น ช่วยปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังให้ดีขึ้น ช่วยชะลอการลงทุนสำหรับการก่อสร้างอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น

2.2 รูปแบบของระบบไฟฟ้ากำลัง

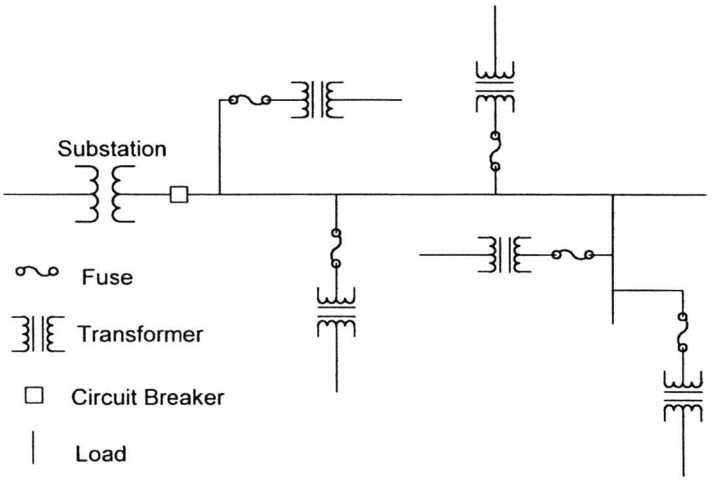
ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ระบบผลิตไฟฟ้า (Generating system) ระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission system) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution system) ซึ่งมีการเชื่อมโยงระบบดังกล่าว ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเชื่อมโยงระหว่างส่วนต่างๆ ในระบบไฟฟ้า ตั้งแต่ระบบผลิตไฟฟ้าจนถึงผู้ใช้ไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.1 จะพบว่า ระหว่างระบบส่งกำลังไฟฟ้าและระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีสถานีไฟฟ้าย่อย เป็นส่วนกลางเชื่อมโยงระบบทั้งสองเข้าด้วยกันโดยทำหน้าที่ในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าและส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งระบบจำหน่ายไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทต่างๆ สำหรับลักษณะรูปแบบของระบบจำหน่าย สามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ [12] คือ 1.ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบ

เรเดียล (Radial network) 2.ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวน (Ring network) และ 3.ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบร่างแห (Mesh network) ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมของแต่ละระบบมีดังต่อไปนี้

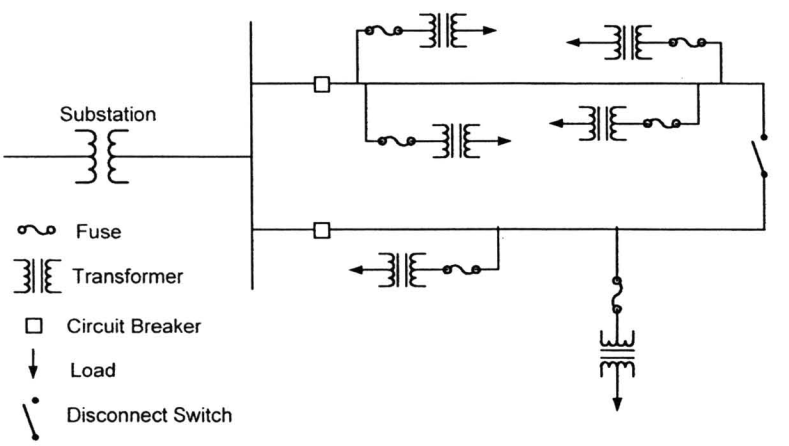


รูปที่ 2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล

2.2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลคือระบบที่มีการป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าไปในสายจำหน่ายเพียงด้านเดียวและมีสายแยกออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การวางแผนใช้ระบบจำหน่ายนี้หากมีโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในอนาคตก็สามารถที่จะเพิ่มระบบจำหน่ายแบบเรเดียลให้กลายเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวน หรือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบร่างแห ต่อไปได้

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลนิยมใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ทั่วไปหรือในชนบทเนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าประเภทที่ลงทุนต่ำ มีการป้องกันระบบได้โดยวิธีง่าย ๆ และลักษณะของการวางสายแบบนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าต่ำ

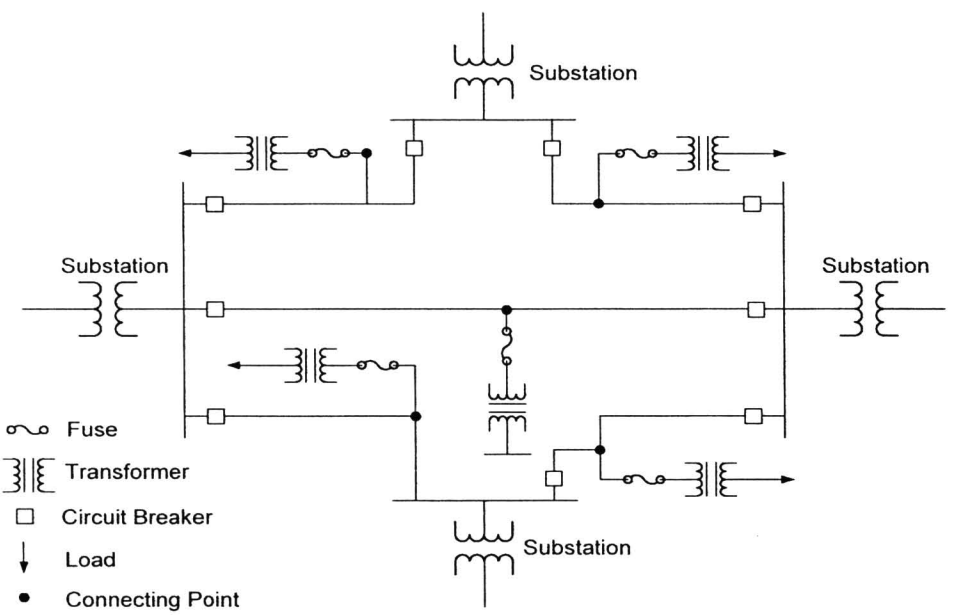


รูปที่ 2.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวน

2.2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวน

ลักษณะระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบนี้จะทำเป็นรูปแบบวงแหวนกล่าวคือมีการจ่ายไฟเข้าที่ต้นทางและปลายทางโดยสถานีจ่ายไฟฟ้าแห่งเดียวกันตามรูปที่ 2.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบนี้ในการใช้งานจริงบางครั้งจะเปิดวงจรออกทำให้ระบบเป็นวงจรแบบเรเดียลก็ได้ การกระทำเช่นนี้จะทำให้การจัดระบบป้องกันให้ทำงานประสานกันนั้นสามารถทำได้ง่ายขึ้น

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวนนี้สามารถนำไปใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับชุมชนใหญ่และโรงงานอุตสาหกรรมได้ ข้อดีของระบบนี้คือ เมื่ออุปกรณ์ตัวหนึ่งตัวใดเกิดขัดข้องก็สามารถทำการตัดส่วนนั้นออกไปและวงจรส่วนที่เหลืออยู่ก็สามารถทำการจ่ายไฟฟ้าต่อไปอีกได้ ทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้สูงขึ้นกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล แต่ข้อเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวนคือ การจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะกระทำได้โดยผ่านสถานีจ่ายไฟฟ้าเพียงสถานีเดียว ดังนั้นถ้าเกิดการขัดข้องขึ้นภายในสถานีจ่ายไฟฟ้า ย่อมทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง และระบบป้องกันของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวนก็ยังต้องมีขีดความสามารถสูงขึ้นกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลเนื่องจากระบบป้องกันต้องสามารถตรวจสอบว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นที่อุปกรณ์ตัวใดเพื่อที่จะทำการตัดอุปกรณ์ส่วนนั้นออกจากการจ่ายพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบร่างแห

2.2.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบร่างแห

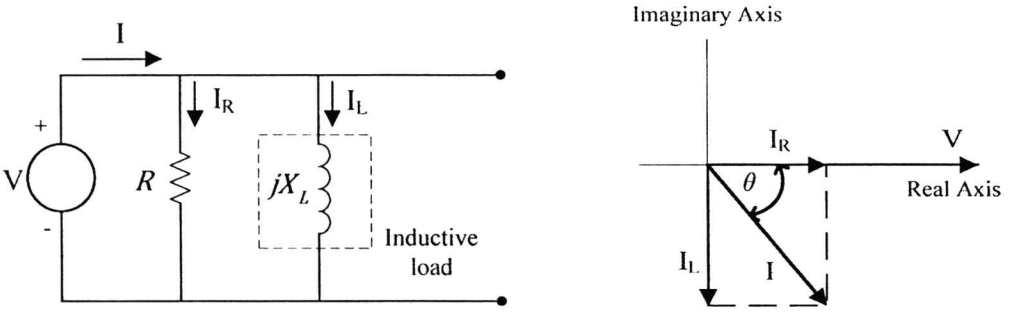
จากระบบจำหน่ายแบบร่างแห จะสังเกตได้ว่าการต่อกันของสายจำหน่ายจะมีลักษณะเหมือนแหที่กระจายออกไปครอบคลุมแหล่งผู้ใช้ไฟฟ้าต่างๆ และมีสถานีจ่ายไฟฟ้าเข้าในระบบจำหน่ายได้หลายจุดดังรูปที่ 2.4 ข้อดีของระบบนี้คือระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบนี้มีความเชื่อถือได้

สูงสุดกว่าทุกระบบที่กล่าวมาและสามารถสร้างสถานีจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ง่ายเมื่อโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบนี้ต้องลงทุนในการก่อสร้างระบบค่อนข้างสูงเช่นกัน เนื่องจากระบบดังกล่าวต้องสร้างสายส่งและอุปกรณ์ป้องกันจำนวนมาก และในขณะทำการจ่ายไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจร (Short circuit) จะทำให้กระแสลัดวงจรมีขนาดสูงมากได้

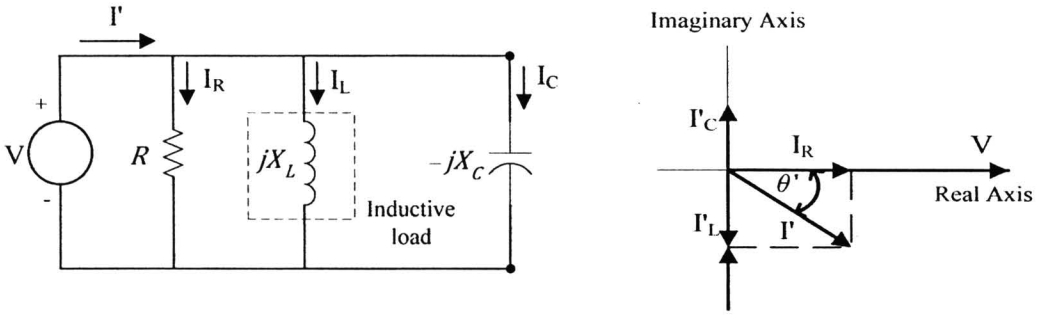
เมื่อพิจารณารูปแบบระบบไฟฟ้ากำลังทั้ง 3 ประเภท พบว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลจะไม่ส่งผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบให้ดีขึ้นได้ แต่การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวนและระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบร่างแหนั้นสามารถช่วยให้ระบบมีระดับความเชื่อถือได้ดีขึ้นได้ ซึ่งจะอธิบายถึงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.4 เพิ่มเติม

2.3 หลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุ

โดยทั่วไป โครงสร้างของตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยโลหะสองแผ่นที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric material) [10] ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่จัดหาได้ง่ายและมีราคาถูก จึงนิยมใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่จ่ายกำลังรีแอคทีฟด้วยการให้กระแสที่มีเฟสนำหน้าซึ่งจะไปหักล้างกับองค์ประกอบบางส่วนของกระแสที่มีเฟสล้าหลังจากอินดักทีฟโหลด (Inductive load) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพเฟสเซอร์ (Phasor diagram) ได้ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6

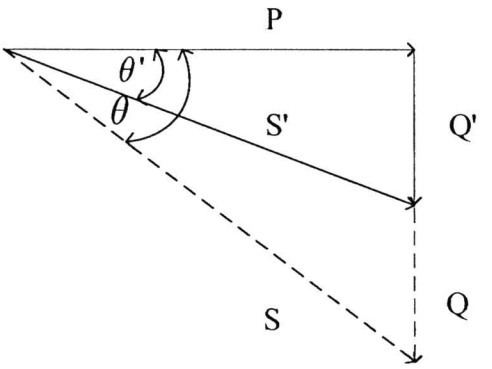


รูปที่ 2.5 วงจรไฟฟ้าและแผนภาพเฟสเซอร์ของวงจรไฟฟ้าก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.6 วงจรไฟฟ้าและแผนภาพเฟสเซอร์ของวงจรไฟฟ้าหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ

จากแผนภาพเฟสเซอร์รูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังปรากฏและกำลังจริงได้ ด้วยแผนภาพสามเหลี่ยมกำลัง ดังรูปที่ 2.7

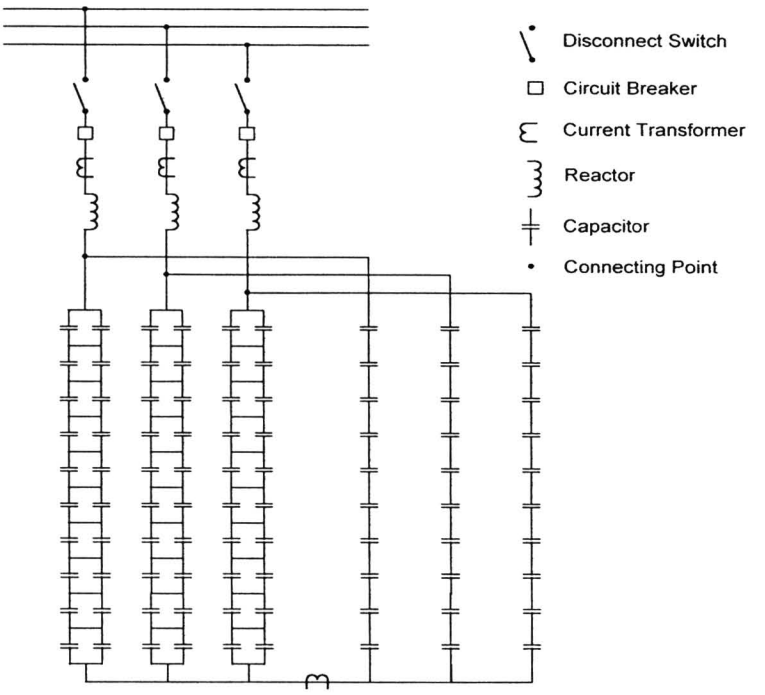


รูปที่ 2.7 แผนภาพสามเหลี่ยมกำลังเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ

จากแผนภาพเฟสเซอร์กำลังได้แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุจะทำให้กระแสโหลด(I)มีขนาดลดลงและมุมระหว่างกระแสกับแรงดันที่จุดโหลด(θ)มีขนาดเล็กลง และจากแผนภาพสามเหลี่ยมกำลังนั้น ได้แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุจะทำให้กำลังปรากฏที่จุดโหลดนั้นมีขนาดลดลงด้วย และจากนิยามที่ว่า ตัวประกอบกำลัง (Power factor) คือ ค่าโคซายน์ (cosine) ของมุมระหว่างกระแสกับแรงดันที่ตำแหน่งใดๆของระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้เราสามารถกล่าวได้ว่า ในภาวะที่โหลดมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำจะทำให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าต้องจ่ายกระแสมากกว่าภาวะที่โหลดมีค่าตัวประกอบกำลังสูงในการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงที่เท่ากัน ผลเสียจากโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ เช่น เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมาก เกิดแรงดันตกที่จุดโหลด เป็นต้น สิ่งต่างๆเหล่านี้เป็นผลเสียกับผู้จำหน่ายและผู้ใช้ไฟฟ้า ปัญหาเหล่านี้จึงนำไปสู่การปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้ดีขึ้น ด้วยการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไป ในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น จะติดตั้งตัวเก็บประจุโดยมีจุดประสงค์เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบให้มากที่สุด แต่ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า จะติดตั้งตัวเก็บประจุโดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มแรงดันโดยรวมให้มากที่สุด

2.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการติดตั้งตัวเก็บประจุ

การปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังในทางปฏิบัติมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 [13] ซึ่งเป็นการนำตัวเก็บประจุหลายๆตัวมาต่อรวมกัน แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาตัวเก็บประจุเหล่านี้รวมเป็นตัวเก็บประจุ 1 ตัว



รูปที่ 2.8 แบบวงจรแสดงการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลัง

และในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาประโยชน์ที่ได้รับจากการติดตั้งตั้งตัวเก็บประจุ 3 ส่วน คือ 1.การชะลอการก่อสร้างอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง 2.การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง และ 3.การช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การชะลอการลงทุนเพื่อก่อสร้างอุปกรณ์ใหม่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

โดยทั่วไปแล้ว การเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น หม้อแปลง สายส่ง สวิตช์เกียร์ อุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ฯลฯ จะเลือกอุปกรณ์ที่มีค่าพิกัดที่เหมาะสมกับปริมาณโหลด เช่น พิกัดของแรงดัน พิกัดของกระแส เป็นต้น เนื่องจากการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่าพิกัดสูงกว่าปริมาณโหลดมากจะทำให้ต้องใช้เงินลงทุนที่สูงกว่ามาก ดังนั้น ถ้าเราสามารถลดปริมาณโหลดลงได้จะทำให้เราสามารถลดการใช้เงินลงทุนให้น้อยลงได้ [14] ซึ่งการปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยตัวเก็บประจุเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้อินดักทีฟโหลดมีค่าลดลงได้ การปรับปรุงตัวประกอบกำลังที่ค่าตัวประกอบกำลังที่ค่าต่างๆ โดยกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงคงที่ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงผลการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง โดยกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงคงที่

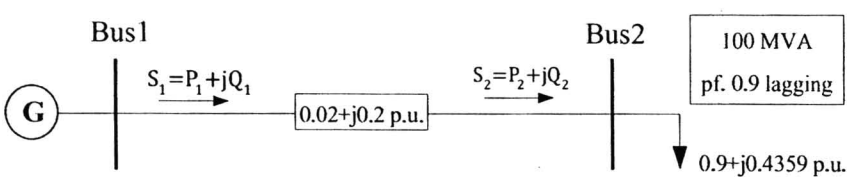
Power Factor	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Active Power (kW)	600	600	600	600	600
Reactive Power (kVAr)	800	612	450	291	0
Apparent Power (kVA)	1000	857	750	667	600

เมื่อพิจารณาผลการปรับปรุงที่ค่าตัวประกอบกำลังค่าต่างๆแล้ว พบว่า กำลังปรากฏในสภาวะที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำนั้นมีค่าสูงกว่ากำลังปรากฏในสภาวะที่มีค่าตัวประกอบกำลังสูง แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงให้ค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นนั้นเป็นการช่วยลดปริมาณโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังได้ อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังส่วนมากนั้นจะกำหนดส่วนเผื่อการใช้งานไว้เพื่อความปลอดภัยเมื่อเกิดเหตุไม่คาดหมาย (Contingencies) ซึ่งเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจที่จะสร้างอุปกรณ์ใหม่เพื่อที่จะสามารถรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นได้ เช่น เมื่อสายส่งมีการใช้งานถึง 70% ของพิกัดสายก็จะสร้างสายส่งเพิ่มเพื่อที่จะรองรับการใช้งาน เป็นต้น ดังนั้น การลดปริมาณโหลดด้วยการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจึงเป็นการทำให้การใช้งานอุปกรณ์ในระบบฟ้ากำลังน้อยลงหรือห่างไกลจากส่วนเผื่อนั้นมากขึ้น นั่นหมายถึง การปรับปรุงให้ค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นนั้นเป็นการช่วยชะลอการลงทุนก่อสร้างอุปกรณ์ใหม่ในระบบไฟฟ้ากำลังได้

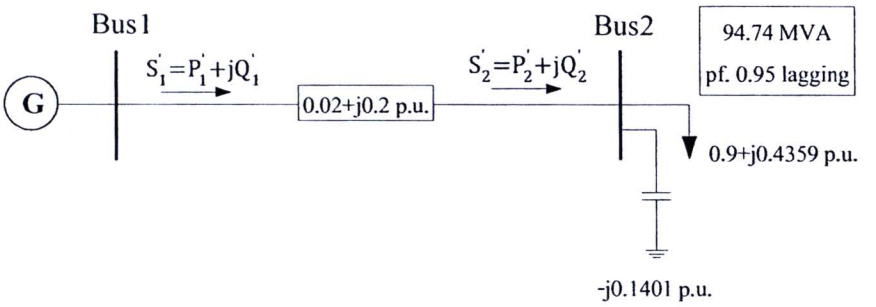
2.4.2 การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง

การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นเป็นวิธีที่ใช้กันมานานแล้ว ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.3 แต่ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างมาอธิบายการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ด้วยการเปรียบเทียบ กำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บัส 1 มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่เป็นด้านส่ง (Sending end) เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปยังบัสที่ 2 ซึ่งเป็นด้านรับ (Receiving end) โดยมีโหลดต่ออยู่ขนาด 100 MVA ตัวประกอบกำลัง 0.9 lagging (0.9+j0.4359 per unit) มีอิมพีแดนซ์ในสายขนาด 0.02+j0.2 per unit ดังรูปที่ 2.9 และเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานด้วยขนาด 14.01 MVAr (0.1401 per unit) เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังของโหลด ทำให้โหลดสุทธิมีขนาด 94.74 MVA ตัวประกอบกำลัง 0.95 lagging (0.9+j0.2958 per unit) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2 บัส ก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.10 ระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 2 บัส หลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ

เมื่อพิจารณาว่าขนาดแรงดันที่ด้านรับไม่ต่างจากขนาดแรงดันที่ด้านส่งและมีขนาดเข้าใกล้ 1.0 p.u. แล้ว สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$P_{loss} = I^2R = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V^2}R$$
$$= \frac{0.9^2 + 0.4359^2}{1.0^2}0.02$$
$$= 0.02 \text{ p. u.}$$
$$= 2 \text{ MW}$$

และสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$P_{loss} = I^2R = \frac{P'^2_2 + Q'^2_2}{V^2}R$$
$$= \frac{0.9^2 + 0.2958^2}{1.0^2}0.02$$
$$= 0.018 \text{ p. u.}$$
$$= 1.8 \text{ MW}$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง 0.2 MW (2-1.8) จากตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นได้ชัดว่าการปรับปรุงตัวประกอบกำลังสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังได้

2.4.3 การช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี [15], [16] เช่น การหุ้มฉนวนสายส่งเป็นการช่วยลดโอกาสการเกิดการผิดพร่อง (Fault) ในระบบไฟฟ้ากำลัง การเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันที่มีความสามารถเปิดและปิดวงจรได้แบบอัตโนมัติเป็นการทำให้ไม่ต้อง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 22 มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน 246155
เลขเรียกหนังสือ

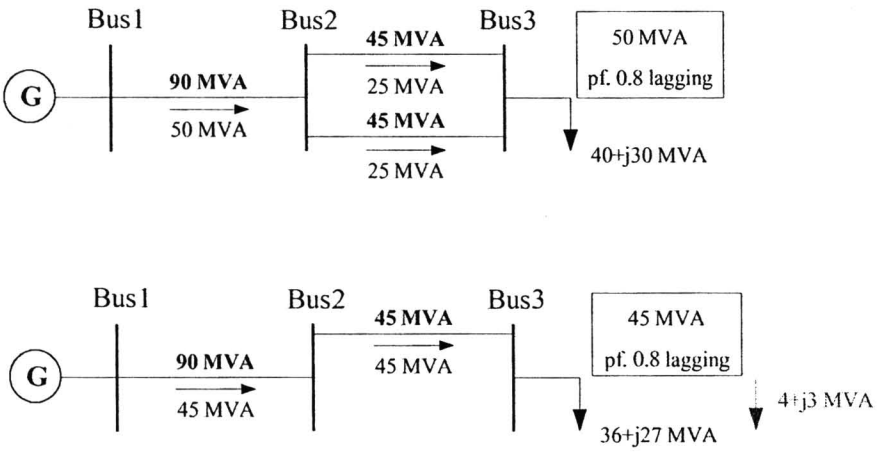
เสียเวลาตรวจสอบและแก้ไข เปลี่ยนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้อุปกรณ์ที่มีอัตราการเสีย (Failure rate) น้อยกว่าเดิม การจัดรูปแบบระบบไฟฟ้า (System reconfiguration) ในรูปแบบที่เหมาะสม เป็นต้น วิธีการเหล่านี้เป็นการลดโอกาสการเกิดเหตุไม่คาดหมายได้โดยตรง แต่ตัวเก็บประจุนั้นไม่ใช่อุปกรณ์ที่สามารถป้องกันการเกิดเหตุไม่คาดหมายได้โดยตรง ดังนั้น การปรับปรุงความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังจึงไม่พิจารณาการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าในระบบไฟฟ้ากำลัง แต่เมื่อพิจารณาการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยการติดตั้งตัวเก็บประจุ พบว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมสามารถช่วยลดปริมาณโหลดที่ต้องถูกตัดออกจากระบบเมื่อเกิดเหตุไม่คาดหมาย การติดตั้งตัวเก็บประจุจึงเป็นการเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังในทางอ้อม ซึ่งในปัจจุบัน มูลค่าความสูญเสียของโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้นมีราคาสูง ดังนั้น การวางแผนกำลังรีแอคทีฟโดยคำนึงถึงผลตอบแทนจะพิจารณามูลค่าความสูญเสียของโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าไว้ด้วย

การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อช่วยลดปริมาณโหลดที่ต้องถูกตัดออกจากระบบเมื่อเกิดเหตุไม่คาดหมาย จะยกตัวอย่างมาอธิบายเพื่อให้เกิดความชัดเจน โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

1. กรณีที่จุดโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.80
2. กรณีที่จุดโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.85
3. กรณีที่จุดโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.90

1. กรณีที่จุดโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.80

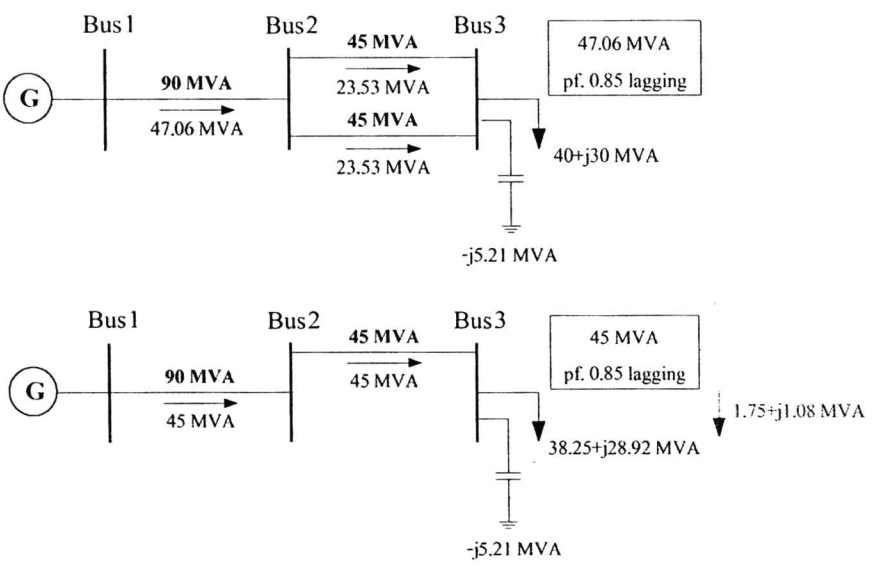
บัส 1 มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ โดยเชื่อมต่อกับบัส 2 ด้วยสายส่งที่มีพิกัด 90 MVA และบัส 2 เชื่อมต่อกับบัส 3 ด้วยสายส่งสองเส้นที่มีพิกัดเส้นละ 45 MVA โดยบัสที่ 3 มีโหลดต่ออยู่ขนาด 50 MVA ตัวประกอบกำลัง 0.8 lagging (40+j30 MVA) เมื่อละเลยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งทุกเส้นจะสามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.10 และเมื่อสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 กับบัส 3 หลุดออกจากระบบหนึ่งเส้น จะทำให้สายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 กับบัส 3 ที่เหลืออยู่นั้นไม่สามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอเนื่องจากเกินของสาย ดังนั้นผู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังจะทำการตัดโหลดให้น้อยที่สุดนั่นคือ 4+j3 MVA (ตัดโหลดแบบตัวประกอบกำลังคงที่) ซึ่งมีผลกับระบบ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 3 บัส ที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.80 เมื่อสายส่งระหว่างบัส 2 กับบัส 3 หลุดออกจากระบบหนึ่งเส้น

2. กรณีที่จุดโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.85

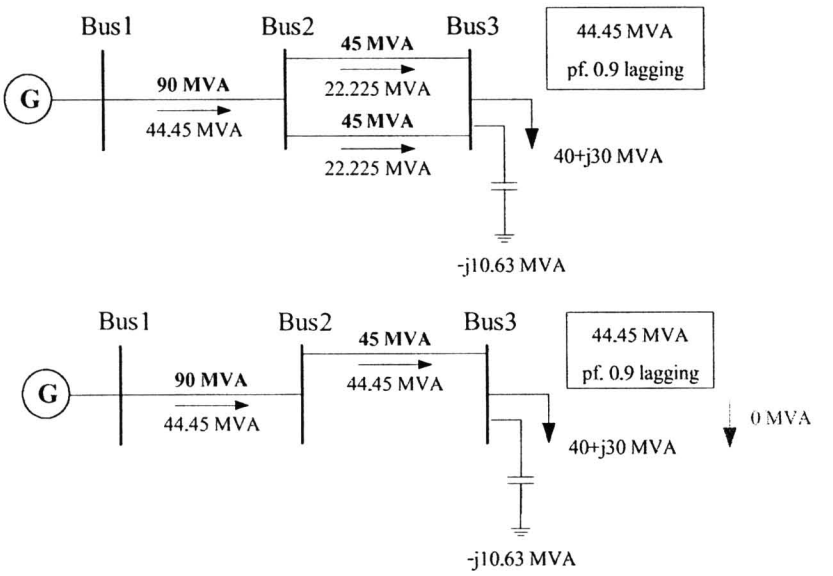
ในกรณีที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานด้วยขนาด 5.21 MVAr เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังของโหลด ทำให้โหลดสุทธิมีขนาด 47.06 MVA ตัวประกอบกำลัง 0.85 lagging และเมื่อสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 กับบัส 3 หลุดออกจากระบบหนึ่งเส้น จะทำให้สายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 กับบัส 3 ที่เหลืออยู่นั้นไม่สามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอ ผู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังจะทำการตัดโหลดที่น้อยที่สุดนั่นคือ 1.75+j1.08 MVA ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 3 บัส ที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.85 เมื่อสายส่งระหว่างบัส 2 กับบัส 3 หลุดออกจากระบบหนึ่งเส้น

3. กรณีที่จุดโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.90

ในกรณีที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานด้วยขนาด 10.63 MVAr เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังของโหลด ทำให้โหลดสุทธิมีขนาด 44.45 MVA ตัวประกอบกำลัง 0.9 lagging และเมื่อสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 กับบัส 3 หลุดออกจากระบบหนึ่งเส้น แต่สายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส 2 กับบัส 3 ที่เหลืออยู่นั้นยังสามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอ ผู้ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังจึงไม่จำเป็นต้องทำการตัดโหลด ดังรูปที่ 2.13



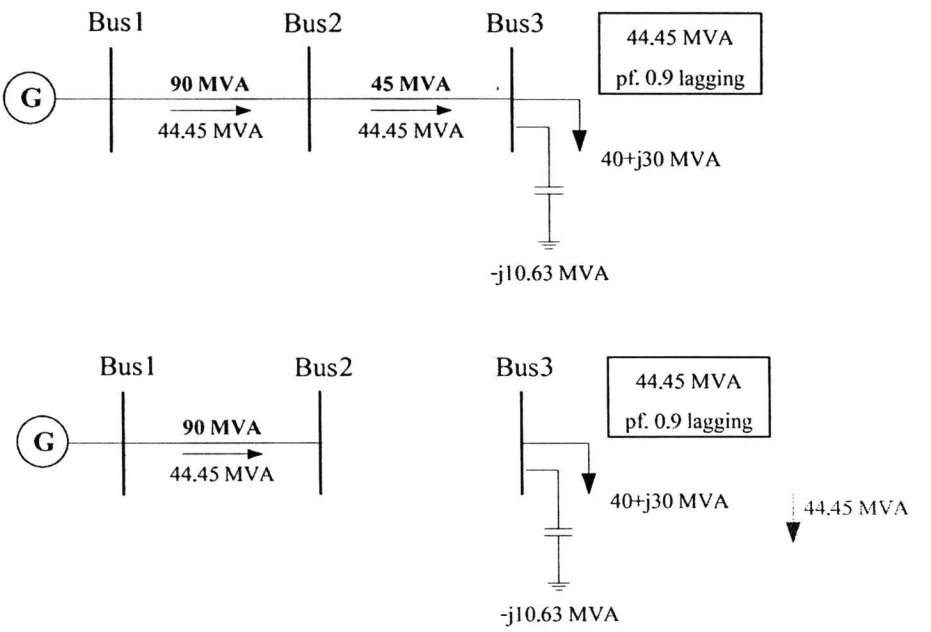
รูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบของระบบไฟฟ้าตัวอย่าง 3 บัส ที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.90 เมื่อสายส่งระหว่างบัส 2 กับบัส 3 หลุดออกจากระบบหนึ่งเส้น

ตารางที่ 2.2 การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อช่วยลดปริมาณโหลดที่ถูกตัดออกจากระบบที่ตัวประกอบกำลังค่าต่างๆ

Power Factor	Capacitor Size (MVAr)	Curtailing Load (MW)	Duration (hr)	Interruption Cost (Baht)
0.80	0.00	4.00	1	4.00*70,000=280,000
0.85	5.21	1.75	1	1.75*70,000=122,500
0.90	10.63	0.00	1	0

จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นได้ชัดว่าการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังเป็นการช่วยลดปริมาณโหลดที่ถูกตัดออกจากระบบเมื่อเกิดเหตุไม่คาดหมาย ซึ่งเป็นการลดมูลค่าความสูญเสียจากเหตุดังกล่าวด้วย ดังนั้น การติดตั้งตัวเก็บประจุจึงเป็นการช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังในส่วนที่เกี่ยวกับโหลดได้ในทางอ้อม

จากตัวอย่างทั้ง 3 กรณี เราสามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่ได้มีลักษณะเป็นแบบเรเดียลสามารถช่วยปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบให้ดีขึ้นได้ แต่เมื่อพิจารณาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบเรเดียลในกรณีที่ไม่มีวงจรขนานดังตัวอย่างในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ระบบไฟฟ้าจำหน่ายแบบเรเดียลขนาด 3 บัส ที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.90 เมื่อสายส่งระหว่างบัส 2 กับบัส 3 หลุดออกจากระบบหนึ่งเส้น

ตัวอย่างที่ในรูปที่ 2.14 ได้แสดงให้เห็นว่า ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลเมื่อเกิดเหตุไม่คาดหมาย นั่นคือ มีสายจำหน่ายเส้นใดเส้นหนึ่งหลุดออกจากระบบจะทำให้โหลดที่ต้องใช้สายจำหน่ายเส้นนั้นในการรับกำลังไฟฟ้าจะไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งหมด ไม่ว่าจะมีการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบมากเท่าไหร่ก็ตามก็ไม่สามารถลดปริมาณโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าลงได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลไม่สามารถช่วยปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบให้ดีขึ้นได้ ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะระบบส่งแรงดันต่ำเนื่องจากในระบบนี้จะมีลักษณะเป็นเครือข่ายทำให้ในการพิจารณาการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้น สามารถคำนึงถึงประโยชน์ที่ได้รับจากการเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังได้

2.5 แบบจำลองของตัวเก็บประจุ

แบบจำลองของตัวเก็บประจุในอดีต จะใช้เป็นแบบกำลังคงที่ (Power constant) นั่นคือ เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด Q_c (kVAr) แล้ว จะส่งผลให้กำลังรีแอคทีฟของโหลดที่บัสนั้นๆ

ลดลงเท่ากับ Q_c ซึ่งการใช้แบบจำลองนี้มีข้อดีคือ ทำให้นำไปใช้ในการคำนวณเพื่อการวิเคราะห์ต่างๆได้ง่าย แต่เนื่องจากกำลังรีแอคทีฟที่เกิดจากการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้น มีความสัมพันธ์กับขนาดแรงดันของบัสที่ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ (2.1)

$$Q = V^2 Y_c \tag{2.1}$$

โดยที่ Q คือ กำลังรีแอคทีฟจากตัวเก็บประจุ

V คือ ขนาดแรงดันของบัสที่ติดตั้งตัวเก็บประจุ

Y_c คือ แอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

ในกรณีที่แรงดันของบัสที่ติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นมีค่าไม่เท่ากับ 1 per unit จะทำให้กำลังรีแอคทีฟที่เกิดจากการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นไม่เท่ากับ Q_c ทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองของตัวเก็บประจุแบบแอดมิตแตนซ์คงที่ (Constant admittance) [2], [17] นั่นคือ เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด Q_c (kVAr) แล้ว จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$Y_{pp}^{New} = Y_{pp}^{Old} + Y_c \tag{2.2}$$

และค่าแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ Y_c สามารถคำนวณได้จาก

$$Y_c = -jQ_c/\text{BaseMVA} \tag{2.3}$$

โดยที่ p คือ บัสที่ติดตั้งตัวเก็บประจุ

Y_{pp}^{Old} คือ สมาชิกแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส p

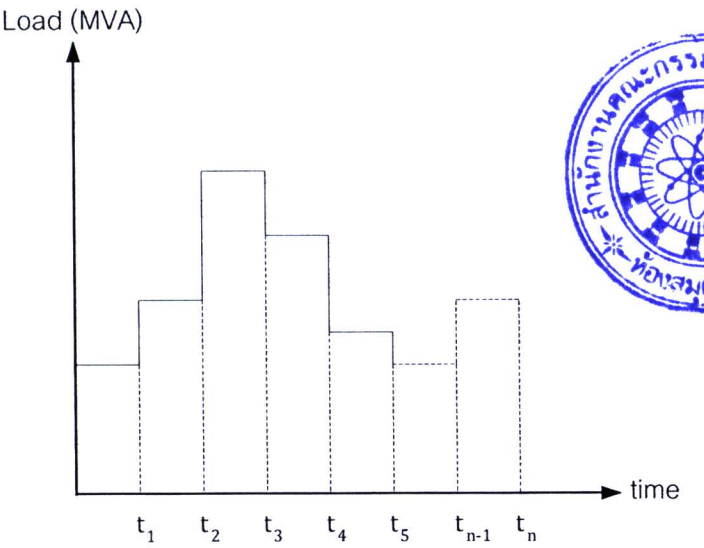
Y_{pp}^{New} คือ สมาชิกแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์หลังติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส p

BaseMVA คือ ค่ากำลังไฟฟ้าฐานของระบบ

2.6 แบบจำลองของโหลด

แบบจำลองของโหลดเป็นสิ่งสำคัญในการวางแผนติดตั้งตัวเก็บประจุ เนื่องจากแบบจำลองโหลดจะส่งผลต่อการคำนวณค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณฟังก์ชันเป้าหมาย เช่น กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ระดับแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น ดังนั้น การใช้แบบจำลองของโหลดที่เหมาะสมจะทำให้การวางแผนติดตั้งตัวเก็บประจุมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

โดยทั่วไป ความต้องการพลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าที่แต่ละจุดโหลดและในแต่ละช่วงเวลาจะไม่เหมือนกัน แต่ในอดีตสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ต่ำกว่าปัจจุบันมาก จึงทำให้งานวิจัยในอดีตนั้นนิยมใช้แบบจำลองโหลดเป็นแบบเส้นโค้งช่วงเวลาโหลด (Load duration curve) ซึ่งจะทำให้การคำนวณค่าต่างๆ เช่น กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ระดับแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง ดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้ แต่เนื่องจากในปัจจุบัน สมรรถนะของคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาให้สูงขึ้นมาก ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองโหลดเป็นแบบเส้นโค้งโหลดรายวัน (Daily load curve) [2], [18] สำหรับบัสต่างๆที่ค่าแปรเปลี่ยนตามเวลา (Time varying load) ที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงโหลดที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

$t_1, t_2, \ldots, t_n$ คือช่วงเวลาที่ t_1 จนถึงช่วงเวลาที่ t_n ยกตัวอย่างเช่น ถ้าใช้จำนวนช่วงเวลาโหลดเท่ากับ 24 ชั่วโมงในการคำนวณ เวลาเริ่มต้นจะเริ่มตั้งแต่ 0.00 นาฬิกา ดังนั้น t_1 จะเท่ากับ 1.00 นาฬิกา และช่วงเวลาจะห่างกัน 1 ชั่วโมง จนกระทั่ง t_n เป็น 24.00 นาฬิกา เป็นต้น โดยที่แบบจำลองของโหลดดังกล่าวในแต่ละบัส จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามประเภทของโหลดว่าเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทใด แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ข้อสมมติฐานที่ว่า การเปลี่ยนแปลงของโหลดที่แต่ละบัสนั้นจะมีลักษณะเหมือนกันทุกบัส

การสร้างแบบจำลองของโหลดนั้น จะใช้วิธีการเฉลี่ยข้อมูลการใช้ไฟฟ้า (Load profile) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [19] ซึ่งข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในช่วง 1 ปีนั้น ได้แบ่งข้อมูลการใช้ไฟฟ้าออกเป็น 12 เดือน ในแต่ละเดือนแบ่งออกเป็นวัน ซึ่งมีทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ 1.วันอาทิตย์ (Sunday) 2.วันเสาร์ (Saturday) 3.วันหยุดนักขัตฤกษ์ (Holiday) และ

4.วันทำงาน (Workday) โดยในแต่ละวันได้แบ่งข้อมูลไว้ 96 ช่วงๆละ 15 นาที แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะดัดแปลงเส้นโค้งโหลดรายวันให้ง่ายขึ้น ด้วยการใช้ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมาแบ่งเป็น 12 เดือน ในแต่ละเดือนแบ่งออกเป็นวัน ซึ่งมีทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ 1.วันอาทิตย์ (Sunday) 2.วันเสาร์ (Saturday) และ 3.วันทำงาน (Workday) และในแต่ละวันได้แบ่งข้อมูลไว้ 4 ช่วงๆละ 6 ชั่วโมง โดยแบบจำลองโหลดนี้ จะนำไปใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ระดับแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง และดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งวิธีการคำนวณค่าเหล่านี้จะกล่าวถึงในบทถัดไป