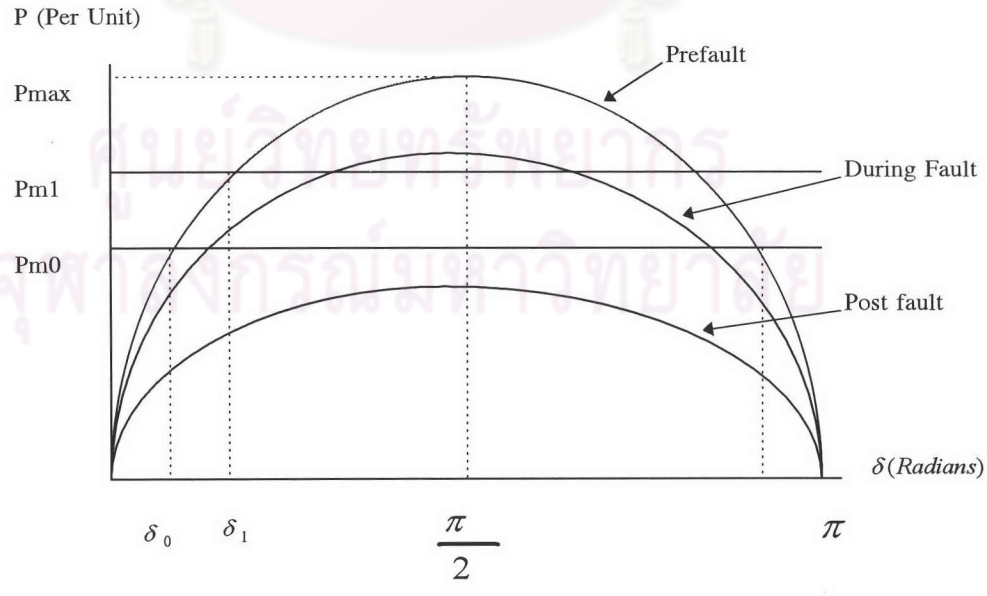
บทที่ 2
การพังทลายของแรงดันไฟฟ้า

โดยทั่วไป การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจะแบ่งออกเป็น การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว และวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วครู่ ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวมุ่งที่จะศึกษาถึงขอบเขตที่ระบบยังจะสามารถทำงานได้เมื่อมีผลกระทบเกิดขึ้นกับระบบหรือที่เรียกว่า ความทนทานของระบบ (System Robustness) เนื่องจากขณะที่ผลกระทบเกิดขึ้นกับระบบ ระบบยังสามารถที่จะปรับตัวเพื่อรับผลกระทบได้ในระดับหนึ่ง แต่ถ้าผลกระทบดังกล่าวมีค่ามากหรือเกิดขึ้นกับระบบเป็นระยะเวลานานแล้วก็จะทำให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะทำการศึกษาถึงมุมของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่สถานะต่างๆ ทั้งสถานะปกติและสถานะที่มีผลกระทบเกิดขึ้นกับระบบ โดยใช้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังจริงและมุมของโรเตอร์ (Power - Angle Curve) เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.1 และผลจากการวิเคราะห์ที่ได้คือขอบเขตของระบบที่ยังสามารถจะปรับตัวเพื่อรับผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับระบบ อันได้แก่ มุมมากที่สุดของโรเตอร์ก่อนที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพ (Critical clearing angle) หรือเวลามากที่สุดที่จะต้องกำจัดข้อผิดพร่องก่อนที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพ (Critical clearing time) ที่จะทำการคำนวณได้ถัดมาหลังจากที่ทราบค่ามุมที่มากที่สุดของโรเตอร์ก่อนที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพแล้ว



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงและมุมของโรเตอร์

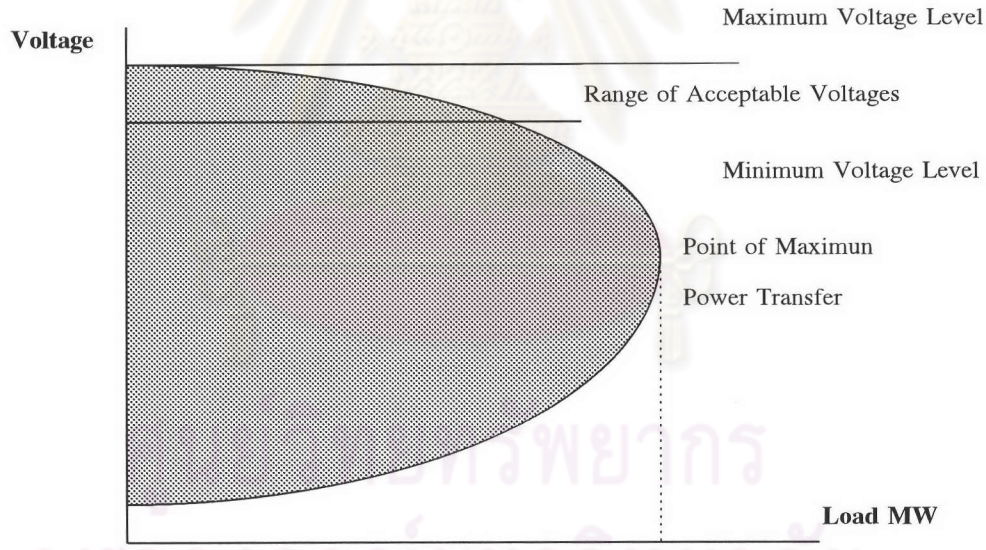
นอกเหนือจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าที่กล่าวถึงก็คือการวิเคราะห์เสถียรภาพของโหลดนั่นเอง (Load Stability) โดยการวิเคราะห์ดังกล่าวจะแตกต่างจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปที่ได้ศึกษามา [1,12,13] เนื่องการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปมักจะคำนึงถึงเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generation Stability) ขณะที่มีผลกระทบเกิดขึ้นกับระบบ และมุ่งจะวิเคราะห์หาขอบเขตสูงสุดที่ระบบสามารถจะปรับตัวเข้าสู่จุดทำงานที่มีเสถียรภาพได้ หลังจากเกิดผลกระทบดังกล่าว ทั้งในแง่ของระบบที่มีผลกระทบเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ หรือระบบที่มีผลกระทบขนาดต่างๆเกิดขึ้นกับระบบ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพของแรงดันจะคำนึงถึงด้านโหลดเป็นหลักโดยทำการศึกษาหาจุดที่ระบบสูญเสียเสถียรภาพ อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดที่เกินกว่าขอบเขตที่ระบบจะรับได้ โดยใช้วิธีการโหลดโฟลว์หรือวิธีอื่นๆคำนวณหาผลตอบ [3,5,6,8,10] จากสาเหตุดังกล่าวทำให้เห็นได้ชัดเจนว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบทั้ง 2 แบบแตกต่างกันทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และผลของการวิเคราะห์ที่ต้องการ

วิธีการคำนวณหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังไม่ว่าจะเป็น การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานะชั่วครู่ หรือการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้าก็ตาม ต่างได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลานาน [3,4,5,6,8] ดังนั้นจึงมีวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาคำตอบหลายวิธีด้วยกัน ทั้งวิธีที่ใช้มาแต่เดิมเช่น วิธีการคำนวณโหลดโฟลว์แบบ นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Load Flow) [1,2,4,6] หรือ เกาส์ไซเดล (Gauss Seidel Load Flow) [1,2] หรือวิธีที่มีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น วิธีการคำนวณโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง (Continuation Power Flow) [6,8] ซึ่งสามารถคำนวณหาจุดวิกฤติของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้รวดเร็วขึ้น และสามารถคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เพราะในการปฏิบัติการจริง วิธีการที่ใช้ในการคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบจะต้องสามารถคำนวณหาค่าจุดวิกฤติได้อย่างรวดเร็วเพื่อใช้เป็นเครื่องมือประกอบกับการตัดสินใจกระทำการอันใดอันหนึ่งของผู้ปฏิบัติการ ที่ทันเหตุการณ์ และถูกต้องในการแก้ไขปัญหาการพังทลายของแรงดัน

นอกจากหลักการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคำตอบโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ในการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง ยังจะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อผลการวิเคราะห์ และดรรชนีที่ใช้วัดค่าดังกล่าวด้วย โดยจะสามารถสรุปองค์ประกอบ และดรรชนีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังต่อไปนี้

2.1 การคำนวณค่าจุดวิกฤติของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

จุดวิกฤติ (Critical Point) หรือจุดส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Point of Maximum Power Transfer -PMPT) คือค่าสูงสุดที่จะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดได้ เนื่องจากในระบบปกติ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของโหลดจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงหนึ่งโดยไม่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ แต่ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของโหลดจะเปลี่ยนแปลงได้ภายในช่วงที่จะไม่ทำให้เกิดสภาวะแรงดันเกิน (Over Voltage) และสภาวะการพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) หรือมีค่าได้ไม่เกินค่าจุดวิกฤติของระบบ ซึ่ง ณ จุดวิกฤตินี้ถ้ามี การเพิ่มขึ้นของโหลดอีกเพียงเล็กน้อย จะทำให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะตกลงอย่างมากจนก่อให้เกิดความเสียหายให้แก่ระบบ หรือเกิดการพังทลายของแรงดันนั่นเอง ซึ่งการคำนวณหาจุดวิกฤติดังกล่าวนี้สามารถจะทำได้หลายวิธี ทั้งการใช้โหลดโฟลว์ซึ่งสามารถคำนวณหาจุดที่ใกล้เคียงกับจุดวิกฤติ การใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง หรือการใช้วิธีออปติไมซ์เซชั่นคำนวณหาจุดวิกฤติ ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงดันกับกำลังจริงและจุดวิกฤติได้ตามรูปที่ 2.2 ดังต่อไปนี้

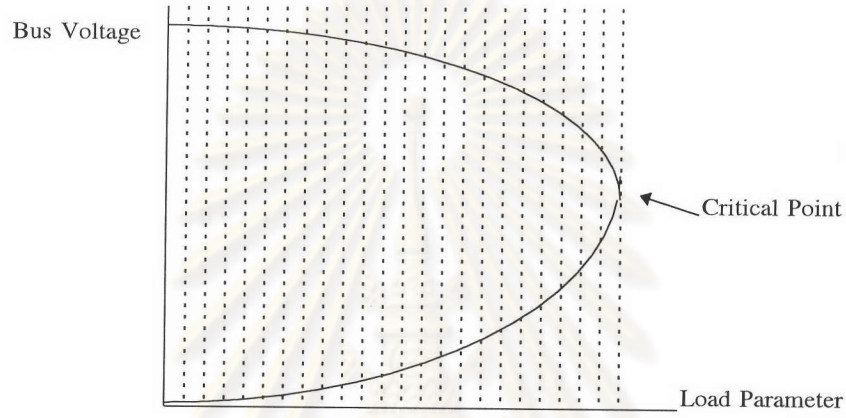


รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดและจุดวิกฤติ

2.1.1 การคำนวณค่าจุดวิกฤติโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์ [1,12,13]

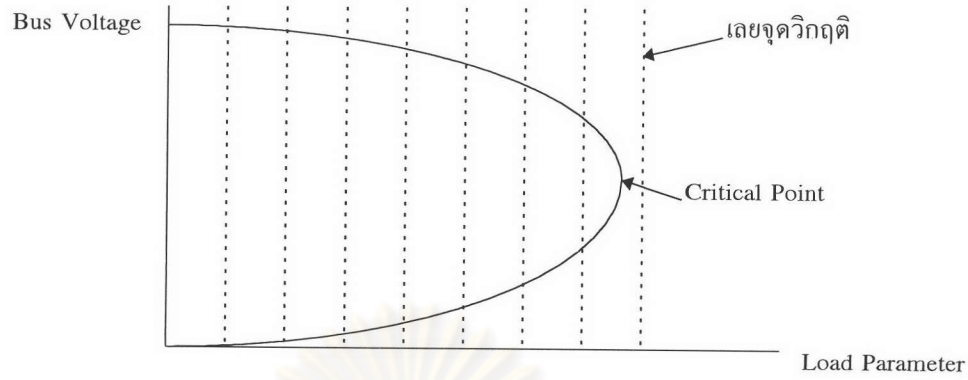
วิธีนี้เป็นวิธีดั้งเดิมและเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการหาจุดวิกฤติ โดยอาศัยการทำงานของวิธีการคำนวณโหลดโฟลว์หลายๆรอบ โดยค่อย ๆ เพิ่มโหลดทีละน้อยในแต่ละรอบของการคำนวณจนกระทั่งระบบถึงจุดวิกฤติ ซึ่งจะสามารถตรวจสอบการเข้าสู่จุดวิกฤติ

ของระบบได้คือ ค่าดีเทอร์มิแนนท์ (Determinant) ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์ที่จะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดวิกฤติและมีค่ามากกว่า 0 ในกรณีของเมื่อการคำนวณได้จุดที่เลยจุดวิกฤติ ซึ่งปกติการคำนวณโดยวิธีโหลดโฟลว์ดังกล่าว ถ้าต้องการคำตอบที่มีค่าผิดพลาดน้อยๆ จะต้องมีการกำหนดช่วงการคำนวณในแต่ละรอบเอาไว้ให้ มีค่าน้อยๆ ดังแสดงตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงวิธีการหาจุดวิกฤติของระบบโดยใช้ความกว้างของช่วงก้าวแคบ

วิธีการนี้มีข้อดี คือ เป็นวิธีการที่ง่ายไม่ต้องใช้เทคนิคอื่น ๆ มาเพิ่มเติม แต่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถคำนวณหาค่าผลตอบ ณ จุดวิกฤติได้ ทั้งนี้เพราะถ้าพิจารณาในทางคณิตศาสตร์แล้ว จุดวิกฤติคือจุดที่ค่าดีเทอร์มิแนนท์ ของจาโคเบียนเมตริกซ์ในการคำนวณโหลดโฟลว์มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อใช้วิธีโหลดโฟลว์คำนวณเพื่อหาค่าจะไม่ สามารถหาค่าคำตอบ ณ จุดวิกฤติได้เพราะไม่สามารถอินเวอร์สเมตริกซ์เพื่อหาคำตอบของสมการได้นั่นเอง ถ้าต้องการค่าจุดวิกฤติที่ถูกต้องใกล้เคียงกับจุดวิกฤติจริงของระบบมากๆ การเพิ่มขึ้นของโหลดในการคำนวณแต่ละขั้นจะต้องเพิ่มค่าช่วงของการคำนวณขึ้นทีละน้อยและเท่ากัน ซึ่งข้อจำกัดดังกล่าวทำให้การคำนวณหาค่าจุดวิกฤติของระบบใช้เวลามากเพราะจะต้องทำการคำนวณหลายรอบซ้ำกัน แต่ถ้าตั้งค่าช่วงของการคำนวณในแต่ละขั้นให้มากขึ้นถึงจะช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณก็จริงแต่ผลคำตอบของจุดวิกฤติที่คำนวณได้ก็จะมีโอกาสที่จะผิดพลาดสูงเนื่องจาก ผลการคำนวณเกิดการเลยจุดวิกฤติได้ง่าย ดังแสดงได้ดังรูป ที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงวิธีการหาจุดวิกฤติของระบบโดยใช้ความกว้างของช่วงก้าวกว้าง

2.1.2 การคำนวณค่าจุดวิกฤติโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง [6,11]

ข้อดีของวิธีการคำนวณโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง คือ การใช้ตัวคำนวณค่า (Predictor) และตัวปรับค่า (Corrector) ในการหาจุดวิกฤติของระบบซึ่ง ข้อดีที่สำคัญของวิธีนี้คือ สามารถที่จะคำนวณหาผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังได้ทุกจุดแม้กระทั่งจุดวิกฤติของระบบ อีกทั้งใน 1 รอบของการคำนวณ (Iteration) จะสามารถกำหนดขนาดของความกว้างในการทำนายค่าได้โดยอิสระ ซึ่งหากมีการคำนวณความกว้างของช่วงที่เหมาะสมคือจะทำให้การคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบใช้เวลาน้อยลง แต่ก็ยังมีปัญหาที่คล้ายคลึงกับวิธีการใช้โปรแกรมโหลดโฟลว์ซึ่งค่าความกว้างของช่วงมีค่าคงที่หาจุดวิกฤติของระบบนั่นคือ ถ้ากำหนดความกว้างในการทำนายมีค่ามากเกินไปก็อาจจะเลยจุดวิกฤติและไม่สามารถหาค่าคำตอบที่ถูกต้องได้ แต่ในกรณีของการคำนวณเลยจุดวิกฤติ วิธีการคำนวณโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่องจะได้เปรียบวิธีการคำนวณโหลดโฟลว์แบบธรรมดาเนื่องจาก ถ้ามีการทำนายค่าเลยจุดวิกฤติออกไปโปรแกรมจะสามารถรับรู้ได้ และทำการปรับค่าให้อยู่ในครึ่งล่างของกราฟโดยอัตโนมัติ ในขณะที่วิธีการคำนวณโหลดโฟลว์แบบธรรมดาการทำนายค่าเลยจุดวิกฤติออกไปซึ่งโปรแกรมมักจะไม่แสดงค่าออกมาเพราะเกิดการลู่ออก (Diverge) ของคำตอบ อันเนื่องมาจาก ณ จุดดังกล่าวไม่สอดคล้องกับสมการการจ่ายกำลังไฟฟ้าจึงไม่สามารถหาคำตอบของการวิเคราะห์ได้

2.1.3การคำนวณค่าจุดวิกฤติโดยใช้วิธีการคำนวณโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่องและการคำนวณความกว้างของช่วงโดยอัตโนมัติ[6,8]

วิธีการนี้ คือ การประยุกต์นำเอาวิธีการหาความกว้างของช่วงโดยอัตโนมัติมารวมเข้ากับวิธีการคำนวณโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง ทั้งนี้จากแนวความคิดที่ว่าในช่วงแรก ๆ

ของการคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบ ค่าความกว้างในแต่ละรอบการคำนวณควรจะมีค่ามาก ๆ เพราะจุดทำงานยังไกลจากจุดวิกฤติอยู่และเพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ ในขณะที่เมื่อเข้าใกล้จุดวิกฤติความกว้างในแต่ละรอบควรจะมีค่าน้อย ๆ เพื่อป้องกันปัญหาการเลยจุดวิกฤติ และได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดสูง

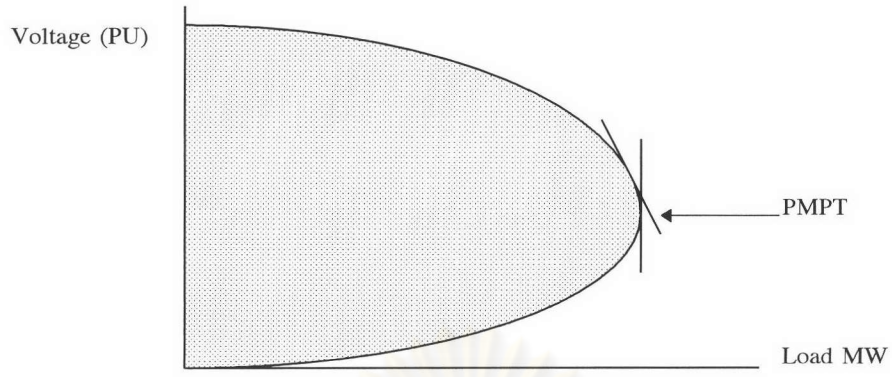
2.1.4 การคำนวณค่าจุดวิกฤติโดยใช้วิธีออปติไมซ์เซชั่น

การใช้วิธีการทางด้านออปติไมเซชั่นในการหาจุดวิกฤติของระบบนี้จะใช้หลักของการออปติไมซ์กำลังรีแอคทีฟของระบบโดยกำหนดให้ กำลังจริงมีค่าคงที่และกำลังรีแอคทีฟมีการเปลี่ยนแปลงค่าขึ้นอยู่กับแรงดันของระบบเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นการคำนวณหาจุดวิกฤติของ การจ่ายกำลังรีแอคทีฟให้กับระบบย่อมหมายถึงจุดการคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบตามไปด้วย

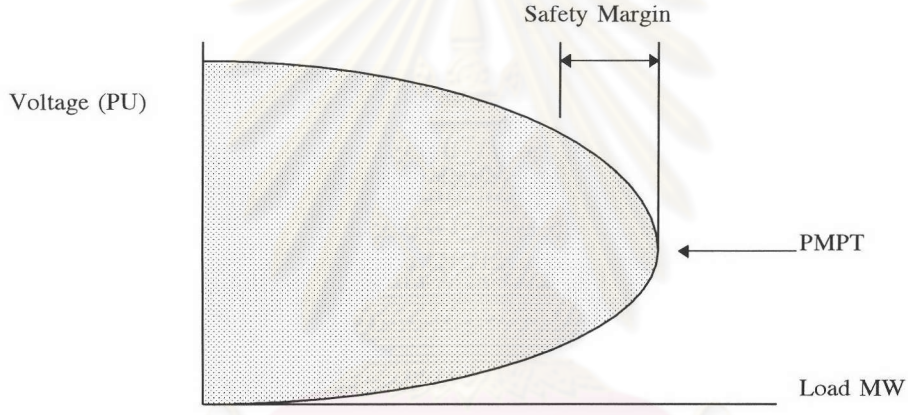
2.2 การกำหนดขอบเขตปลอดภัย (Safety Margin) [3,8,9,10]

ขอบเขตปลอดภัยของระบบคือระยะห่างจากจุดวิกฤติของระบบที่ถูกกำหนดไว้ตามมาตรฐานเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการแจ้งเตือนแก่ผู้ปฏิบัติการว่าระบบมีแนวโน้มจะเกิดการพังทลายของแรงดัน โดยการหาค่าขอบเขตปลอดภัยของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ขั้นแรกจะต้องทำการคำนวณหาค่าจุดวิกฤติของระบบโดยคร่าว ๆ ก่อน จากนั้นจึงทำการกำหนดขอบเขตความปลอดภัยตามมาตรฐานและทำการสร้างขอบเขตปลอดภัยโดยเทียบกับจุดวิกฤติ ซึ่งในที่นี้จะใช้ค่าขอบเขตอยู่ที่โหลด 1 เปอร์ยูนิตก่อนถึงจุดวิกฤติ [8] โดยจุดวิกฤติที่หาค่าได้มักจะมาจากการทำงานของโปรแกรมโหลดโฟลว์ (อาจจะแบบธรรมดา หรือแบบการไหลของไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง) 1 ครั้งก่อนจากนั้นจึงวัดค่าขอบเขตความปลอดภัยออกมาจากจุดวิกฤติตามค่ามาตรฐานก็จะได้จุดปฏิบัติการจริง ณ. ขอบเขตปลอดภัย (Stable Operation Point- SOP) ดังแสดงขั้นตอนการหาจุดวิกฤติของระบบ และขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการตามรูปที่ 2.5(ก) และ 2.5(ข)

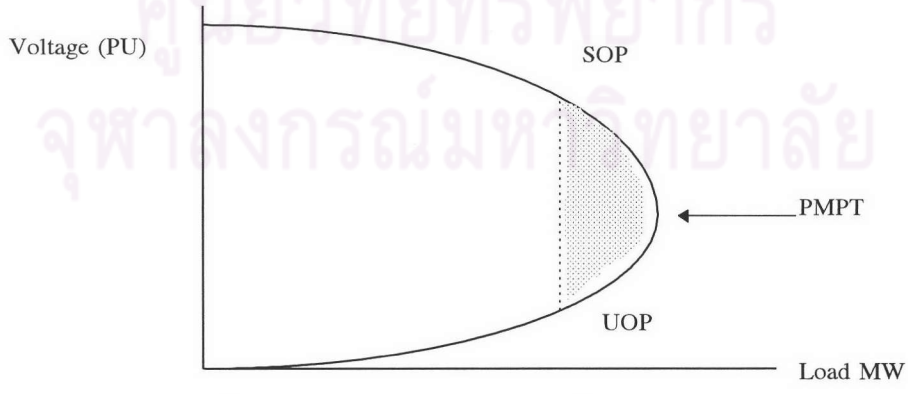
ในกรณีของการวัดค่ากำลังของระบบที่ยังสามารถจะจ่ายให้กับโหลดได้หรือกำลังที่ยังเหลืออยู่ในขอบเขตปลอดภัย จะต้องทำการลากกราฟจากจุดปฏิบัติงานจริง (จุดใดๆที่พิจารณาขนานไปกับแกน Y ผ่านลงไปตัดเส้นของจุดปฏิบัติการกราฟเสมือนข้างล่าง ซึ่ง ณ จุดตัดนี้เรียกว่า จุดทำงานที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Operating Point - UOP) จากผลที่ได้ พื้นที่ระหว่างทางด้านขวาของเส้นตั้งฉากกับกราฟของความสัมพันธ์จะแสดงถึงกำลังไฟฟ้าที่ยังสามารถจ่ายให้กับโหลดได้ดังแสดงดังตามรูปที่ 2.5(ค)



รูปที่ 2.5(ก) แสดงวิธีการหาจุดวิกฤติในการหาขอบเขตปลอดภัยของระบบ



รูปที่ 2.5(ข) แสดงวิธีการหากำหนดขอบเขตปลอดภัยของระบบ



รูปที่ 2.5(ค) แสดงวิธีการหากำลังที่ยังสามารถจ่ายโหลดได้
ในการหาขอบเขตปลอดภัยของระบบไฟฟ้ากำลัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ปัญหาการส่งผ่านกำลังรีแอคทีฟจากแหล่งกำเนิดไปสู่โหลด [4,5]

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกำลังทลายของแรงดันนั่นคือ การส่งผ่านกำลังรีแอคทีฟ จากแหล่งกำเนิดไปสู่โหลดเป็นไปได้ยากเนื่องจากกำลังรีแอคทีฟ มักจะสูญเสียไปกับสายส่ง และถูกจำกัดไว้ด้วยระดับแรงดันของระบบสายส่งซึ่งให้มีค่าอยู่ในช่วง 5% จากระดับแรงดันฐาน ดังนั้นจึงต้องอาศัยการชดเชยกำลังรีแอคทีฟโดยใช้อุปกรณ์ช่วยต่างๆช่วยจ่ายกำลังรีแอคทีฟแทนซึ่งปัญหาเหล่านี้มีสาเหตุมาจากองค์ประกอบต่างๆ ที่พอจะสรุปได้ดังนี้

2.3.1 โดยปกติการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่โหลด ทั้งในการวางแผนและการปฏิบัติงานมีหลักเกณฑ์ที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การพยายามควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ให้มีค่ามาก ๆ (เข้าใกล้ 1 ในทางทฤษฎี หรือ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.85 ในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) ทั้งนี้ก็เพื่อลดกำลังสูญเสียและจะทำให้กำลังจริงสามารถจะถูกส่งไปได้เป็นปริมาณมาก ดังแสดงตามสมการที่ (2.1)

$$P = IV\cos\phi \tag{2.1}$$

แต่ในขณะที่การส่งผ่านกำลังรีแอคทีฟจะเป็นไปตามสมการที่ (2.2)

$$Q = IV\sin\phi \tag{2.2}$$

ดังนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่าจากหลักการที่ใช้อยู่ในปัจจุบันกำลังรีแอคทีฟจะถูกส่งผ่านไปได้น้อยมาก อีกทั้งกำลังรีแอคทีฟมีความสัมพันธ์กับใกล้ชิดกับระดับแรงดัน เมื่อส่งผ่านกำลังรีแอคทีฟเข้าสู่ระบบมาก ๆ จะทำให้แรงดันของระบบสูงขึ้น แต่ในความเป็นจริงแรงดันของระบบมักจะถูกควบคุมไว้ไม่ให้เกิน 5% ของระดับแรงดันฐาน จุดนี้จึงเป็นอีกจุดหนึ่งซึ่งจำกัดการส่งผ่านกำลังรีแอคทีฟไปด้วย

2.3.2 หากพิจารณาถึงกำลังสูญเสีย (Losses) ที่เกิดขึ้นในการส่งกำลังไฟฟ้าแล้ว เราพอที่จะสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

ความสูญเสียเนื่องมาจากค่าอิมพิแดนซ์ (Impedance) ของสายส่งที่ต่ออนุกรม มีค่าเท่ากับ I^2R และ I^2X หรือ

$$I^2Z = I^2(R + jX) \tag{2.3}$$

โดยที่

$$I^2 = \bar{I}^*\bar{I} = \left[\frac{P - jQ}{\bar{V}^*}\right]^*\left[\frac{P + jQ}{\bar{V}}\right] = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \tag{2.4}$$

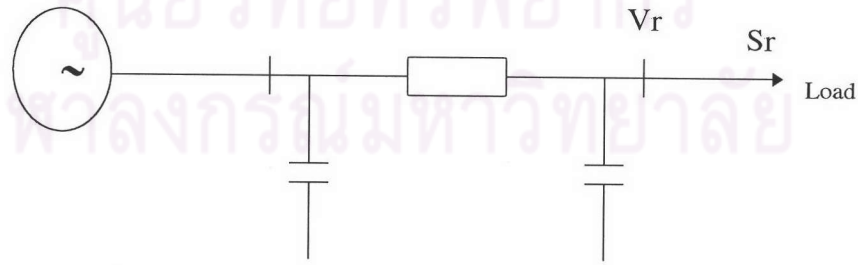
เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$P_{loss} = I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} R \qquad (2.5)$$

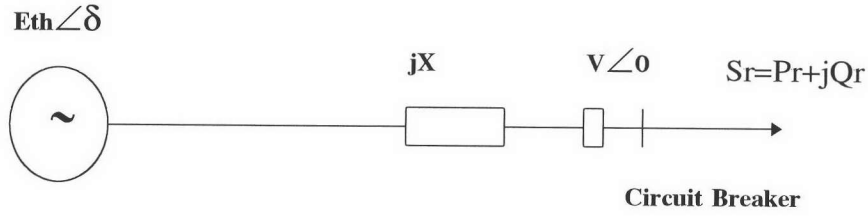
$$Q_{loss} = I^2 X = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} X \qquad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 ถ้าหากพยายามลดความความสูญเสียในการส่งผ่านกำลังแล้ว เนื่องจาก R และ X เป็นค่าคงที่ กำลังจริงเป็นค่าที่จะต้องพยายามส่งไปให้โหลดมากที่สุด และระดับแรงดันมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 5% จากระดับแรงดันฐาน ดังนั้นการลดค่ากำลังสูญเสียจะกระทำได้เพียงวิธีเดียว คือ การลดกำลังรีแอคทีฟที่ส่งจากแหล่งกำเนิดไปสู่โหลดลงซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวนี้เป็นสาเหตุอีกสาเหตุหนึ่งที่คอยจำกัดการส่งผ่านกำลังรีแอคทีฟ

2.3.3 การที่กำลังรีแอคทีฟมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับแรงดัน การส่งผ่านกำลังรีแอคทีฟปริมาณมาก ๆ เข้าสู่ระบบจะทำให้ระบบมีแรงดันสูงขึ้น (ภายใต้การจ่าย โหลดจริงที่ค่าใดค่าหนึ่ง) ซึ่งตามปกติก็จะมีผลดีแก่ระบบเมื่อมีโหลดเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้ามีการตัดตอนของอุปกรณ์ป้องกันทำให้โหลดบางส่วนหลุดออกจากระบบ หรือโหลดที่ต่ออยู่กับระบบมีขนาดลดลงมากๆ ผลที่ตามมาก็คือ ปัญหาแรงดันเกิน (Overvoltage) ซึ่งอาจจะทำให้อุปกรณ์บางอย่างเสียหายได้ โดยตัวอย่างของสาเหตุดังกล่าวสามารถทำการวิเคราะห์ผ่านรูปที่ 2.6 ถึงความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงดัน กำลังงาน ในรูปของสมการความสัมพันธ์ วงจรสมมูลย์ และเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังนี้



(ก)



รูปที่ 2.6 ก) แผนภาพแสดงการต่อเชื่อมส่วนประกอบต่างๆในระบบ
ข) วงจรสมมูลย์ของระบบ

จากวงจรสมมูลย์ของระบบสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_{th}\angle\delta &= V\angle 0 + jX\bar{I} \\ &= V + jX\bar{I} \\ &= V + \frac{XQ_r}{V} + j\frac{XP_r}{V} \end{aligned} \qquad (2.7)$$

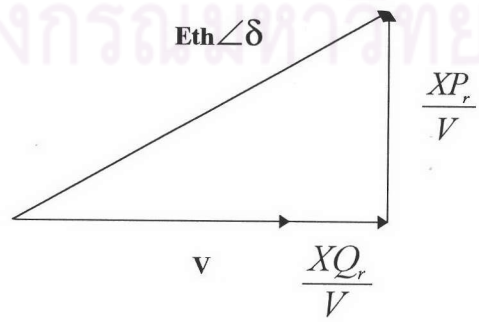
เมื่อ P_r, Q_r คือ กำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟที่โหลดบัส

X คือ ค่าอิมพิแดนซ์ของสายส่ง

V คือ แรงดัน ณ บัสที่จ่ายโหลด

δ คือ มุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสใดๆ

ซึ่งจากสมการที่ (2.7) สามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าในรูปของเฟสเซอร์ได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอคทีฟกับระดับแรงดันในรูปของเฟสเซอร์

จากหัวข้อที่ 2.3.1 ถึง 2.3.3 เป็นการกล่าวถึงสาเหตุที่ทำให้การส่งกำลังรีแอคทีฟไปสู่โหลดทำได้ยาก แต่ยังไม่ได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ที่ว่า เหตุใดเมื่อระบบไม่สามารถที่จะส่งกำลังรีแอคทีฟไปสู่โหลดได้อย่างพอเพียงแล้วจึงเกิดการลดลงของแรงดันจนกระทั่งเกิดการพังทลายของแรงดัน ซึ่งจะสามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังต่อไปนี้

สมการของกำลังงานรีแอคทีฟที่ บัสใดๆในสภาวะสมดุลย์จะได้

$$0 = Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_{Ti} \tag{2.8}$$

โดยที่

$$Q_{Ti} = \sum_{i=1}^{n} V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \tag{2.9}$$

Q_{Ti} แสดงถึงกำลังงานรีแอคทีฟที่ถูกจ่ายเข้าไปสู่ระบบ

Q_{Gi} แสดงถึงกำลังงานรีแอคทีฟที่ถูกจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Q_{Li} แสดงถึงกำลังงานรีแอคทีฟที่จ่ายให้กับโหลด

δ_i คือมุมของแรงดันที่บัส i

y_{ij} คือค่า ณ ตำแหน่งi,j ของบัสแอตมิตแตนซ์เมตริกซ์

γ_{ij} คือมุมเฟส ณ ตำแหน่ง i,j ของบัสแอตมิตแตนซ์เมตริกซ์

$$Q_{Li} = Q_{Li0} + \lambda(K_{Li} S_{\Delta base} \sin\varphi_i) \tag{2.10}$$

Q_{Li0} เป็นโหลดเดิมที่ติดตั้งอยู่กับบัส (Base Case)

K_{li} เป็นค่าคงที่ที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่บัส i

φ_i เป็นค่ามุมของตัวประกอบกำลังที่บัส i

$S_{\Delta BASE}$ เป็นค่ากำลังงานฐานซึ่งใช้เป็นหลักในการพิจารณา (Base Power)

เมื่อนำสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) แทนลงในสมการ (2.8) จะได้

$$0 = Q_{Gi0}(1 + \lambda K_{Gi}) - Q_{Li0} - \lambda(K_{Li} S_{\Delta base} \sin\varphi_i) - \sum_{i=1}^{n} V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \tag{2.11}$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ให้กำลังรีแอคทีฟที่จากแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ และตัวแปร Q_{Li0} ,K_{li} ,$S_{\Delta BASE}$,y_{ij} ,γ_{ij} ,φ_i , δ_i มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการการจ่ายกำลังรีแอคทีฟจะสามารถเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$0 = K_1 - K_2 - \lambda K_3 - V_i K_4 \qquad (2.12)$$

$$_iK_4 = K_1 - K_2 - \lambda K_3 \qquad (2.13)$$

ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าถ้าโหลดของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่กำลังรีแอคทีฟจากแหล่งกำเนิดที่จ่ายให้กับโหลดยังมีค่าคงที่ แรงดันของระบบจะมีค่าลดลงซึ่งผลของการลดลงของแรงดันดังกล่าว จะทำให้เกิดการพังทลายของแรงดันได้เนื่องมาจาก การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันดังตัวอย่างของเหตุการณ์ที่แสดงไว้ในบทที่ 1

2.4 วิธีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า [1,2,7]

จากหัวข้อ 2.3 เนื่องจากการส่งผ่านกำลังรีแอคทีฟจากแหล่งกำเนิดไปสู่โหลดทำได้ยากแต่เนื่องจากกำลังรีแอคทีฟก็มีความสำคัญต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบมาก ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การชดเชยกำลังรีแอคทีฟเข้าสู่ระบบจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นและมีความสำคัญมาก

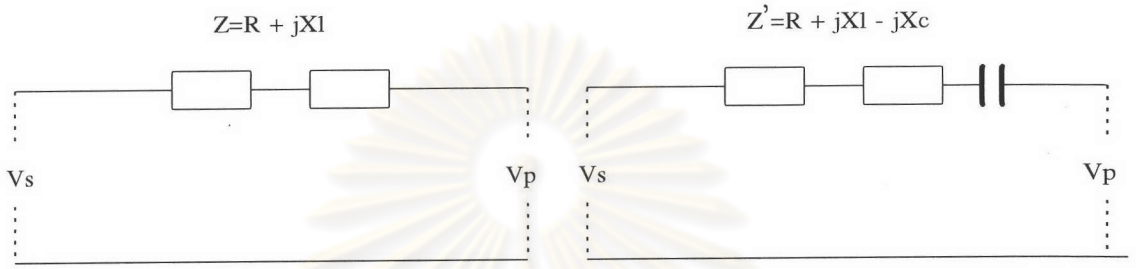
การชดเชยกำลังรีแอคทีฟเข้าสู่ระบบทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับสายส่ง (Series Capacitor Canpensator) การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าที่บัสใดบัสหนึ่ง (ShuntCapasator) แบบขนาน หรือการติดตั้งสแตติกวาร์คอมเพนเซเตอร์ (Statie Var Canpensator) เข้าสู่ระบบดังต่อไปนี้

2.4.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุอนุกรมเข้ากับสายส่ง

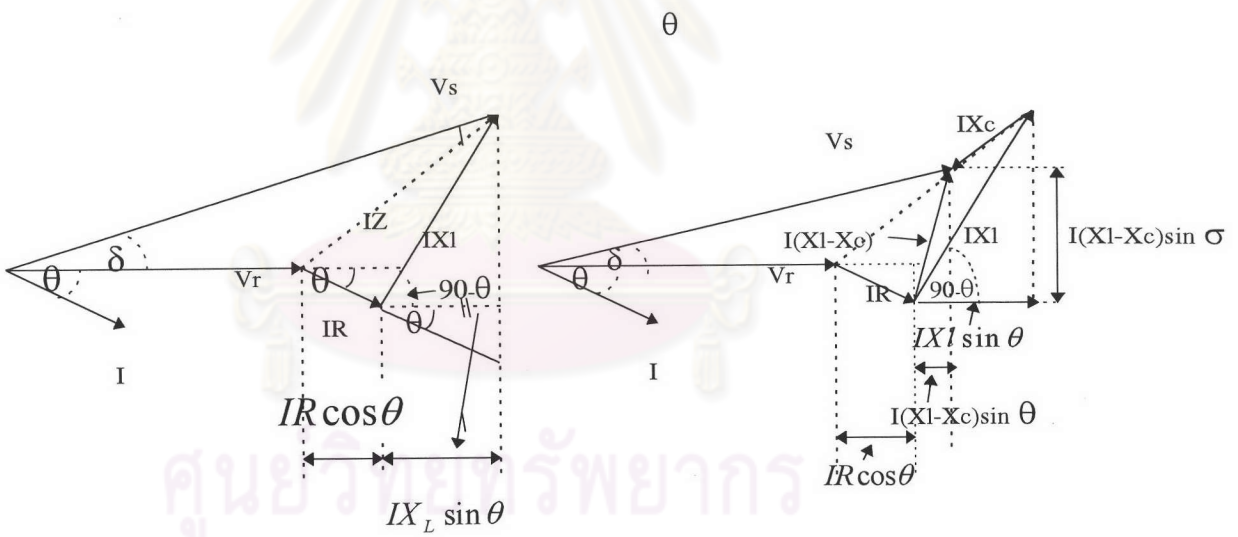
ในระบบสายส่งทั่ว ๆ ไปพบว่าเนื่องจากตัวนำที่ใช้ทำเป็นสายส่ง มักจะทำจากอลูมิเนียมหรือทองแดง ดังนั้นเมื่อสายมีความยาวมากขึ้นค่าอินดักทีฟ รีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance) อันเนื่องมาจากความเหนี่ยวนำของตัวนำเหล่านี้จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ระดับแรงดันมีค่าลดลง ตามความยาวของสายส่งนับจากแหล่งกำเนิด

การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะมีผลโดยตรง คือ ลดค่าอินดักทีฟ รีแอกแตนซ์ ของสายส่งลง เพราะตัวเก็บประจุจะฉีดกำลังรีแอคทีฟประเภท คาปาซิทีฟ รีแอกแตนซ์ (Capacitive Reactance) ซึ่งมีมุมเฟสต่างจากอินดักทีฟ รีแอกแตนซ์ 180 องศา เข้าไปหักล้างกับอินดักทีฟ รีแอกแตนซ์ของสายส่ง หรือสรุปก็คือ คาปาซิทีฟ รีแอกแตนซ์ จะส่งค่ากำลังรีแอคทีฟซึ่งมีค่าตรง

รีแอกแตนซ์ของสายส่ง หรือสรุปก็คือ คาปาซิทีฟ รีแอกแตนซ์ จะส่งค่ากำลังรีแอคทีฟซึ่งมีค่าตรงกันข้ามกับอินดักทีฟ รีแอกแตนซ์เข้าสู่ระบบทำให้แรงดันตกคร่อมในสายส่งลดลงอันจะส่งผลทำให้ ค่ากำลังสูญเสียลดลง แหล่งกำเนิดจ่ายกำลังน้อยลง นั่นคือเสถียรภาพของระบบดีขึ้นดังแสดงตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแสดงการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้ากับสายส่ง



รูปที่ 2.9 รูปแสดงเฟสเซอร์ของแรงดันเมื่อมีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้ากับสายส่ง

นอกจากนี้การส่งค่ากำลังคาปาซิทีฟเข้าสู่ระบบของตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะขึ้นอยู่กับกระแสที่วิ่งผ่านตัวมันเอง หรือกล่าวได้ว่ามีการปรับค่ากำลังรีแอคทีฟที่ฉีดเข้าสู่ระบบโดยอัตโนมัติขึ้นอยู่กับสภาวะการจ่ายโหลด ดังนั้นในกรณีของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมนี้จึงไม่ค่อยมีปัญหาเรื่องแรงดันเกิน โดยมีจ่ายกำลังรีแอคทีฟเข้าสู่ระบบเป็นไปตามสมการที่ (2.14)

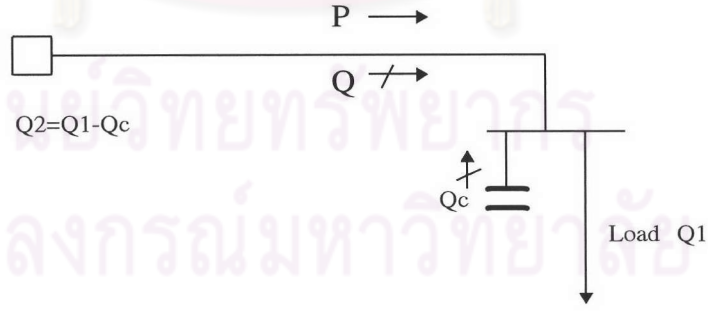
$$Q_c = I^2 X_c \sin\theta \qquad (2.14)$$

หรือกล่าวโดยสรุปก็คือ ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะมีผลโดยตรงกับสายส่ง แต่จะมีผลน้อยมากกับโหลดและแหล่งกำเนิด ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังที่โหลดบัสและขนาดของกระแส ณ. แหล่งกำเนิดจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.4.2 การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่บัสใดบัสหนึ่งของระบบ

การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยต่อขนานเข้ากับบัสใดบัสหนึ่ง เปรียบเสมือนการฉีดกำลังรีแอคทีฟเข้าไปที่จุดนั้น ๆ ซึ่งผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าไปจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรีแอคทีฟ ณ บัสที่ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยค่าของกำลังรีแอคทีฟเหนี่ยวนำ (Inductive Reactive Power) ซึ่งเกิดขึ้นจากการจ่ายโหลดจะมีค่าลดลง อันเป็นผลเนื่องมาจากการชดเชยกำลังรีแอคทีฟ ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังจะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น แต่ผลที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งตัวก็บประจุแบบขนานดังกล่าวจะเกิดขึ้นภายในบริเวณขอบเขต ตั้งแต่แหล่งกำเนิดถึงจุดที่ติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเท่านั้น

หรือกล่าวโดยสรุปก็คือ ตัวเก็บประจุแบบขนานจะมีผลโดยตรงกับค่ากำลังรีแอคทีฟของโหลดและแหล่งกำเนิดเท่านั้นโดยจะมีผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่ามากขึ้นและปริมาณกระแสที่เจนเนอเรเตอร์ต้องจ่ายให้กับโหลดมีขนาดลดลง โดยแสดงการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานดังรูปที่ 2.10 กำลังรีแอคทีฟที่เปลี่ยนไปในรูปของเฟสเซอร์ดังรูปที่ 2.11 และขนาดของแรงดันที่เปลี่ยนไปดังแสดงตามรูปที่ 2.12



เมื่อ

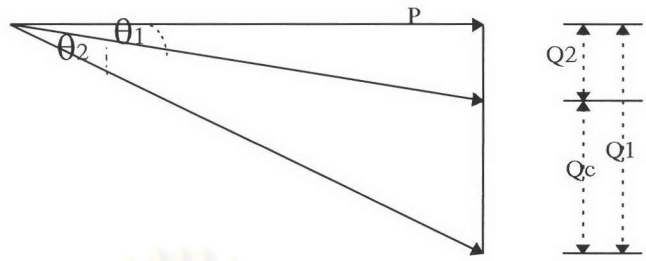
Q1 คือ กำลังรีแอคทีฟที่จ่ายให้กับโหลด

Q2 คือ กำลังรีแอคทีฟที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่าย

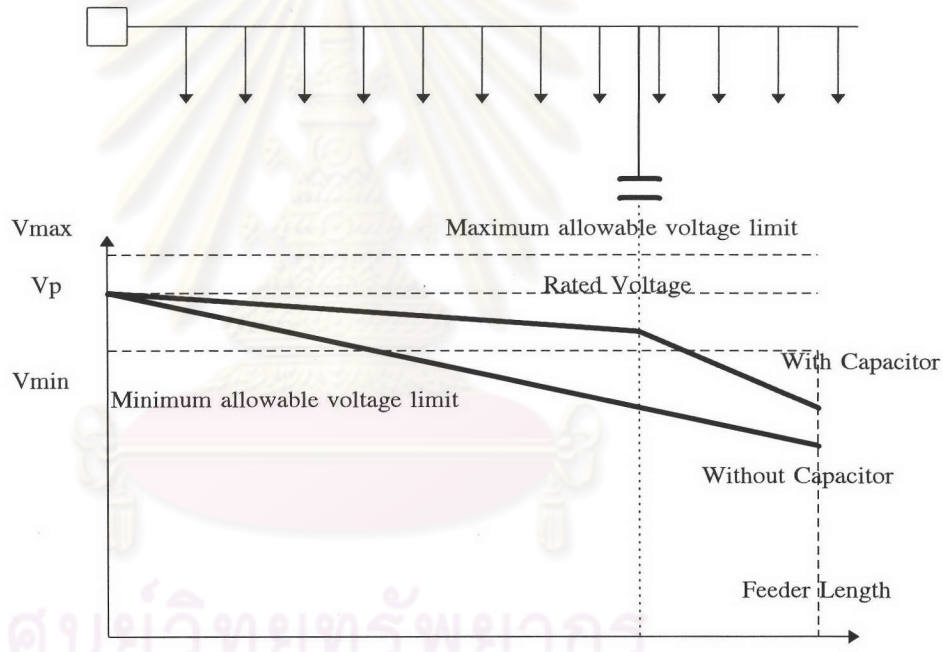
Qc คือ กำลังรีแอคทีฟที่ได้จากการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.10 รูปแสดงการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้ากับบัสใดบัสหนึ่ง



รูปที่ 2.11 รูปแสดงเฟสเซอร์ของกำลังเมื่อมีติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัสใดบัสหนึ่ง



รูปที่ 2.12 รูปแสดงผลกระทบต่อแรงดันเมื่อมีติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัสใดบัสหนึ่ง

2.4.3 การใช้หม้อแปลงเปลี่ยนแทปได้เพื่อรักษาเสถียรภาพของแรงดันระบบ [4]

หม้อแปลงเปลี่ยนแทปได้ (Load Tap Changing Transformer) เป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถช่วยปรับปรุงระดับแรงดันของระบบได้ โดยอาศัยหลักการที่ว่า ณ. จุดที่มีปัญหาแรงดันตก การติดตั้งหม้อแปลงเปลี่ยนค่าได้เข้าไปที่จุดนี้จะทำให้ระดับแรงดันทางด้านทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้นได้ ซึ่งหมายถึงการช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของระบบนั่นเอง

อย่างไรก็ตามการติดตั้งหม้อแปลงเปลี่ยนแทปได้เพื่อช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของแรงดันนั้น มักจะนำมาใช้ชดเชยแรงดันตกที่มีค่าไม่มากนัก ซึ่งต่างจากอุปกรณ์ประเภทตัวเก็บประจุ ทั้งนี้เพราะการใช้หม้อแปลงเปลี่ยนแทปได้จะไม่มีการส่งกำลังรีแอคทีฟที่ระบบกำลังต้องการ ขณะที่ระบบกำลังเข้าสู่ภาวะที่ระดับแรงดันมีค่าลดลงเนื่องจากโหลดเพิ่มขึ้น เข้าสู่ระบบเลย ดังนั้นความพยายามที่จะปรับปรุงเสถียรภาพของแรงดันโดยใช้หม้อแปลงเปลี่ยนแทปได้ เมื่อโหลดมีค่าสูงมากๆ กลับจะทำให้ระบบถึงจุดวิกฤติเร็วขึ้นดังแสดงได้ในการวิเคราะห์ต่อไปนี้

ในระบบที่มีการติดตั้งหม้อแปลงปรับค่าได้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง กรณีที่ระดับแรงดันทางด้านทุติยภูมิลดต่ำลงเนื่องจากโหลดมีปริมาณมากขึ้น หม้อแปลงปรับค่าได้จะพยายามปรับระดับแรงดันทางด้านทุติยภูมิให้มีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าในสายส่งทางด้านปฐมภูมิมีค่าเพิ่มมากขึ้น อันจะส่งผลให้กำลังสูญเสียในสายส่งมีค่าเพิ่มมากขึ้น

การที่กำลังสูญเสียในสายส่งเพิ่มขึ้นนี้นอกจากจะทำให้ระดับแรงดันทางด้านปฐมภูมิมีค่าลดลงแล้วยังจะทำให้อุปกรณ์ชดเชยประเภทตัวเก็บประจุแบบขนาน สามารถจะส่งกำลังรีแอคทีฟเข้ามาในระบบน้อยลงไปด้วย ดังนั้นถ้าโหลดยังมีการเพิ่มขึ้นอีกซึ่งหมายถึงระดับแรงดันทางด้านทุติยภูมิยังคงลดระดับลงไป หม้อแปลงปรับค่าได้จะยิ่งดึงกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิมากขึ้นทำให้กำลังสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นอีก จากสาเหตุนี้หม้อแปลงปรับค่าได้กลับจะเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ระดับแรงดันของระบบลดต่ำลงจนเกิดสภาวะการพังทลายได้เร็วขึ้นกว่าระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน ดังนั้นการพยายามปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน จะต้องทำการคัดเลือกชนิดของอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน โดยคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันดังกล่าวดังต่อไปนี้

กรณีของหม้อแปลงปรับค่าได้จะเหมาะสมกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่ไม่สูงนักแต่ในกรณีของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดสูงและรวดเร็วจะต้องมีการปฏิบัติการที่เหมาะสมกับหม้อแปลงปรับค่าได้ กล่าวคือถ้าโหลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จะต้องทำการปรับอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงปรับค่าได้ให้มีค่าคงที่ เพื่อป้องกันการปรับค่าอัตราส่วนแรงดันโดยอัตโนมัติหรือตัดหม้อแปลงปรับค่าได้ออกจากระบบเมื่อมีแนวโน้มว่าจะทำให้ระบบเสียเสถียรภาพ

การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานจะมีผลช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของระบบนับตั้งแต่แหล่งกำเนิดจนถึงจุดที่ติดตั้งเท่านั้น ดังนั้นการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบจะเหมาะกับระบบที่มีบัสใดบัสหนึ่งซึ่งก่อให้เกิดปัญหาเท่านั้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ตัวอื่นๆ อีกทั้งการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานจะต้องคำนึงถึงระดับของแรงดันเมื่อโหลดมีค่าไม่มากด้วยเพราะอาจทำให้เกิดภาวะแรงดันเกินเมื่อระบบมีโหลดน้อยๆได้

ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะมีผลกระทบต่อระบบโดยรวมโดยเฉพาะอย่างยิ่งสายส่งเส้นที่ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมติดตั้งอยู่ ดังนั้นการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบจะเหมาะกับระบบที่มีจุดวิกฤติเกิดเนื่องจากสายส่งไปยังบัสที่มีปัญหา เช่นระบบที่มีสายส่งมีความยาวมาก เป็นต้น ซึ่งการพิจารณาเลือกอุปกรณ์ชดเชยแรงดันชนิดใดจะต้องพิจารณาจากลักษณะของระบบเป็นหลัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย