หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
การคำนวณค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม ในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง

4.1 บทนำ

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม (optimum power flow : OPF) ได้แก่ การศึกษาประเด็นปัญหาใดปัญหาหนึ่ง หรือ หลายประเด็นปัญหาโดยพร้อมกัน หรือ ต่อเนื่องกัน ซึ่งสามารถอธิบายประเด็นปัญหาเหล่านั้น ด้วยสมการคณิตศาสตร์ในรูปของฟังก์ชันเป้าหมาย ซึ่งมักจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันเป้าหมายหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งฟังก์ชันก็ได้ (objective function or multi-objective function) ภายใต้เงื่อนไขบังคับ (constraints) คือ การทำงานที่เหมาะสมและไม่เกินขีดจำกัด (limits) ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ภายในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ในรูปของเงื่อนไขบังคับสมการ (equality constraints) และ เงื่อนไขบังคับอสมการ (inequality constraints) ทั้งนี้โดยปกติทั่วไป เงื่อนไขบังคับสมการจะประกอบด้วยสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า (power mismatch equation) รวมอยู่ด้วย ดังนั้นการแก้ปัญหา OPF ก็จะได้รับการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า (power flow or load flow) ไปพร้อมกัน ทำให้คำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหา OPF นอกจากจะบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้แล้ว ยังทำให้ทราบสถานะการทำงาน (state) ของระบบไฟฟ้าอีกด้วย ทั้งนี้การศึกษา OPF เริ่มเป็นที่รู้จักกันครั้งแรก เมื่อ Carpentier ได้นำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ในปี ค.ศ. 1962 [26] และได้รับการพัฒนาและขยายผลทางการศึกษาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงการจ่ายโหลดอย่างประหยัดทั้งในกรณีที่ไม่รวมผลของกำลังสูญเสีย และรวมผลของกำลังสูญเสีย ซึ่งทั้งสองกรณีมีเพียงหนึ่งเงื่อนไขบังคับสมการและหนึ่งเงื่อนไขบังคับอสมการเท่านั้น โดยเงื่อนไขบังคับสมการ คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้ากำลังต้องเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (3.12) และเงื่อนไขบังคับอสมการ คือ ขีดจำกัดการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะต้องไม่เกินค่ากำลังผลิตสูงสุดและต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนั้นๆ ดังสมการที่ (3.13) สำหรับกรณีไม่รวมผลของกำลังสูญเสียไม่ต้องอาศัยการทำ power flow ในขณะที่กรณีรวมผลของกำลังสูญเสียจะต้องทำการแก้ปัญหาร่วมกับการทำ power flow และทั้งสองกรณีต่างก็ต้องอ้างอิงอยู่กับหลักการเท่ากันของแลมดา ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการแรกๆ ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ปัจจุบันเรียกการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยวิธีหลักการเท่ากันของแลมดาว่า **การแก้ปัญหาการจัดสรรกำลังผลิตแบบดั้งเดิม** (classical economic dispatch) จากที่กล่าวมาจะพบว่าการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด กรณีรวมผลของ

กำลังสูญเสีย จะต้องอาศัยการทำ power flow ควบคู่ไปด้วย ทำให้สามารถกล่าวต่อไปได้ว่า ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นรูปแบบหนึ่งของปัญหา OPF เช่นกัน

เนื่องจากในปัจจุบันวิทยาการด้านคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และเจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว ทำให้การแก้ปัญหา OPF มีความถูกต้องและรวดเร็วมากขึ้น และมิได้จำกัดขอบเขตของปัญหาอยู่ที่การศึกษาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดแต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ปัญหา OPF ยังได้ขยายวงกว้างขึ้น และได้มีการศึกษาในแง่มุมปัญหาอื่นๆ อีกมากมาย เช่น [27,28]

1) การควบคุมกำลังสูญเสียภายในระบบไฟฟ้ากำลังให้มีค่าน้อยที่สุด (loss minimization problem or Q-problem) [29-31]
2) การจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยรวมเงื่อนไขขีดจำกัดสายส่งและอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้าต่างๆ [30,31]
3) การจ่ายโหลดแบบป้องกัน (preventive dispatch) โดยอาศัยผลการศึกษาสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้าในปัจจุบัน ควบคู่ไปกับการพยากรณ์ความต้องการกำลังไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (short-tern load forcast) [9]
4) การจ่ายโหลดแบบปรับแก้ (corrective dispatch) เป็นการศึกษาการจ่ายโหลดในกรณีภาวะฉุกเฉิน (emergency dispatch) คือ เมื่ออุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการ overload จะต้องมีวิธีการปรับแก้การทำงานของอุปกรณ์ภายในระบบเหล่านั้นเพื่อให้ระบบยังคงทำงานอยู่รอดต่อไปได้ [9]
5) การควบคุมจุดทำงานอย่างเหมาะสม (optimum setting) สำหรับอุปกรณ์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำงานหรือควบคุม ของแรงดันทั้งในเรื่องขนาด (magnitude) และมุม (phase angle) ของแรงดัน เช่น เครื่องกำเนิดแรงดัน (generator voltage) หรือ แทปของหม้อแปลง (transformer taps) สวิทช์ควบคุมตัวเก็บประจุ (switched capacitor) หรือ ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิตย์ (static var compensator) ปัญหานี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ปัญหา Voltage-var optimization [9]
6) การทนความเครียดได้สูงสุด (maximum stress withstand) สำหรับระบบส่งเพื่อใช้ในการวางแผน ด้านการส่งกำลังไฟฟ้า (transfer) ระหว่างเขตการไฟฟ้า หรือ การวางแผนติดตั้งระบบสายส่งเพิ่มเติม [9]
7) การศึกษาการจ่ายโหลดอย่างเหมาะสมภายหลังเกิดเหตุขัดข้องในระบบไฟฟ้า (post-contingency) เพื่อให้ระบบที่เหลืออยู่ สามารถทำงานต่อไปได้ โดยที่ปัญหานี้จัดอยู่ในกลุ่มซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า security-constraint OPF (SCOPF) [32-36]

8) การศึกษาการกำหนดค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง โดยใช้พารามิเตอร์ bus incremental cost (BIC) ในการวิเคราะห์ปัญหา เป็นต้น

นอกจากนี้การทำ OPF ยังช่วยให้การวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ สามารถรวมผลของเงื่อนไขบังคับสมการและเงื่อนไขบังคับอสมการ การทำงานของระบบและขีดจำกัดของอุปกรณ์ได้ครอบคลุมและถูกต้องตามสภาพความเป็นจริงของระบบมากขึ้น อาทิเช่น [9,27]

1) ขีดจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (branch flow limits)
2) ขีดจำกัดอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ (limit on all control variables)
3) ขีดจำกัดแรงดันที่แต่ละบัส (bus voltage limits)
4) ขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสำรอง (active/reactive reserve limits)
5) ขีดจำกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารีแอกทีฟ (generator MVAR limits)
6) ขีดจำกัดเส้นทางการเชื่อมต่อของระบบส่ง (corridor limits) เป็นต้น

ข้อสังเกตเกี่ยวกับเงื่อนไขบังคับสมการและเงื่อนไขบังคับอสมการ คือ โดยส่วนใหญ่แล้วเงื่อนไขบังคับสมการจะอยู่ในรูปฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับ (functional equality constraints) เช่น เงื่อนไขบังคับสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังสมการที่ (4.8) และ (4.9) (ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับถัดไป) ในขณะที่เงื่อนไขบังคับอสมการอาจจะอยู่ในรูปของขอบเขตตัวแปร เช่น เงื่อนไขบังคับพิกัดอุปกรณ์ต่างๆ เงื่อนไขบังคับขีดจำกัดแรงดันที่แต่ละบัส ดังสมการที่ (4.11) ถึง (4.15) เป็นต้น หรือ อาจจะอยู่ในรูปของเงื่อนไขบังคับอสมการแบบฟังก์ชัน (functional inequality constraints) เช่น ขีดจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟบนสายส่ง ดังสมการที่ (4.18) เป็นต้น

จากที่กล่าวมา จะพบว่าปัญหา OPF มีความซับซ้อนและหลากหลายอย่างมาก ทำให้การแก้ปัญหาโดยหลักการเท่ากันของแลมดาไม่สามารถใช้แก้ปัญหาได้ในทุกกรณี และสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นอยู่ในปัจจุบันก็คือ การแก้ปัญหา OPF ได้มีการนำเทคนิค และ วิธีการออปติไมซ์ทางคณิตศาสตร์หลายวิธีการเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา ดังจะได้อธิบายเปรียบเทียบสำหรับเทคนิคบางอย่าง ดังต่อไปนี้

1) **Gradient method** [37] วิธีการดังกล่าวการลู่เข้า (convergence) สู่คำตอบจะช้าและเมื่อปัญหาประกอบด้วยเงื่อนไขบังคับอสมการแบบฟังก์ชัน การแก้ปัญหาโดยวิธีนี้จะมีความไม่สะดวกและไม่เหมาะสม สำหรับวิธีการหลักการเท่ากันของแลมดาดังที่ได้กล่าวรายละเอียดแล้วในบทที่ 3 นั้นเป็นหนึ่งในวิธีการของวิธี gradient method เช่นกัน [26] ได้ทำการปรับปรุงวิธีหลักการเท่ากันของแลมดาโดยวิธี reduced gradient

technique ซึ่งพบว่าเมื่อรวมขีดจำกัดพิกัดของสายส่งซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับอสมการแบบฟังก์ชัน การแก้ปัญหาก็จะไม่สามารถทำได้ นอกจากจะมีการแปลงปัญหาโดยทำการเพิ่มฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักเข้าไป (penalty function) ซึ่งจะทำให้ปัญหามีความยุ่งยากมากขึ้นและการแก้ปัญหาก็จะยิ่งลู่เข้าช้า และ มีโอกาสที่ปัญหาจะไม่สามารถลู่เข้าสู่คำตอบได้มาก นอกจากนี้การวิ่งเข้าสู่คำตอบก็ไม่มีเสถียรภาพ (unstable) สูงด้วยเช่นกัน ทำให้ต้องอาศัยหลักการอื่นๆ เข้าร่วมในการแก้ปัญหา

2) **Newton 's method** [38] วิธีดังกล่าวมีข้อดี ก็คือ หากปัญหาที่พิจารณาเป็นปัญหาประเภท convex problem แล้วการลู่เข้าสู่คำตอบของปัญหาจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว อีกทั้งสามารถรับประกัน (guarantee) ในการได้คำตอบ แต่ปัญหาที่ใช้ในการทำ OPF มักจะเป็นปัญหาประเภท nonconvex problem ทำให้อาจไม่ได้คำตอบจากวิธีการดังกล่าว กล่าวคือ มีโอกาสที่ปัญหาจะลู่ออก (diverge) [39] นอกจากนี้การแก้ปัญหาอาจเกิดความไม่มีเสถียรภาพในเชิงตัวเลข (numerical unstable) เช่นกัน จำเป็นจะต้องมีการแก้ไขวิธีการให้เหมาะสม ดังแสดงใน [39,40] เป็นต้น หรือใช้วิธี quasi-Newton method เข้ามาเพื่อใช้ในการปรับแก้ปัญหา สำหรับข้อดีในการแก้ปัญหาด้วยวิธีดังกล่าว ก็คือ สามารถรวมเงื่อนไขบังคับอสมการเข้ามาพิจารณาร่วมในการแก้ปัญหาได้ แต่ผลที่เกิดขึ้นก็คือทำให้ระบบสมการในการแก้ปัญหามี hessian matrix ที่ sparse และ มีขนาดใหญ่ทำให้มีปัญหาในเรื่องหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องทำการแก้อนุพันธ์อันดับที่สองในทุก iteration ด้วย ทำให้การแก้ปัญหาต้องอาศัยการคำนวณอย่างมาก เป็นเหตุให้เสียเวลาในเรื่องดังกล่าว

3) **Linear programming method** (LPOPF) [41,42] เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมาก และสะดวกในการพิจารณาเงื่อนไขบังคับสมการและเงื่อนไขบังคับอสมการร่วมด้วย สามารถใช้ได้กับปัญหาทั้งที่เป็นเชิงเส้น (linear) และ ไม่เชิงเส้น (nonlinear) สำหรับปัญหาที่อยู่ในรูปไม่เชิงเส้น จะต้องทำการดัดแปลงเชิงเส้น (linearization) ปัญหาให้อยู่ในรูปเชิงเส้นเสียก่อน

4) **Interior point method** [43] วิธีนี้มีหลักการ (concept) ในการแก้ปัญหาอยู่หลายวิธีด้วยกัน และสามารถใช้ได้กับทั้งปัญหาเชิงเส้นและปัญหาไม่เชิงเส้นโดยตรง โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงปัญหาเชิงเส้นก่อน และนอกจากนี้ยังสามารถที่จะรวมเงื่อนไขบังคับสมการและเงื่อนไขบังคับอสมการได้โดยง่าย และมีความรวดเร็วในการแก้ปัญหาอีกด้วย

จากที่กล่าวมายังมีวิธีการและเทคนิคอื่น อีกมาก อาทิเช่น [27,28]

- Sequential quadratic programming
- Projected Augmented Lagrangian เป็นต้น

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ optimization toolbox ของ Matlab ซึ่งอาศัยวิธีการทำ sequential quadratic programming (SQP) ในการแก้ปัญหาออปติไมซ์เซชัน ซึ่งรายละเอียดการทำงานของ optimization toolbox ของ Matlab และหลักการที่เกี่ยวข้องในการทำออปติไมซ์ จะได้กล่าวรายละเอียดในภาคผนวก

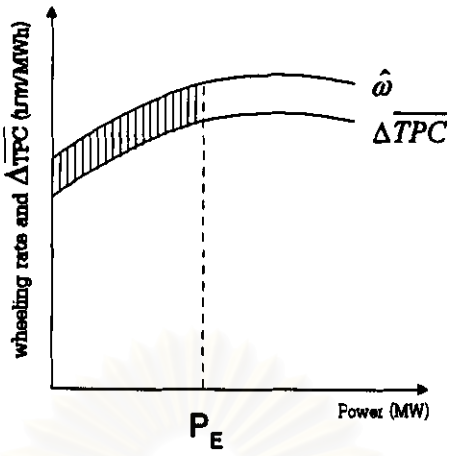
4.2 การกำหนดค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง

การกำหนดค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง ได้ใช้วิธีการซึ่งอาศัยส่วนเพิ่มต้นทุนการผลิต (incremental cost) [44-46] โดยจะพิจารณาไปที่ การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง และ การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อหน่วยของระบบไฟฟ้าคนกลาง ทั้งนี้ในขณะที่มิได้มีการขนส่งกำลังไฟฟ้า การแก้ปัญหา OPF สำหรับระบบไฟฟ้าคนกลางจะทำให้ทราบ ค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง และ ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อหน่วยของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าคนกลาง ค่าหนึ่ง

จากนั้นเมื่อมีการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางเกิดขึ้น พบว่าค่าใช้จ่ายในการผลิตรวม (total production cost) ของระบบไฟฟ้าคนกลาง และ ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าคนกลาง ได้เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น อธิบายได้ว่าเป็นผลเนื่องมาจากการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าของตนนั่นเอง

จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว นำมาใช้ในการกำหนดค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการขนส่งกำลังไฟฟ้าได้ โดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

1) กรณีที่ยินยอมให้มีการการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่าน แล้วทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง และ ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าคนกลางเพิ่มขึ้น กรณีเช่นนี้ค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายที่เรียกเก็บจากคู่สัญญาที่ซื้อขายกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง จะต้องมากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง และ การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าคนกลางที่เพิ่มขึ้น จึงจะเกิดการยินยอมให้มีการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางได้ ซึ่งถือว่ามีความสมเหตุสมผลในทางเศรษฐศาสตร์ และสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบอัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านโดยระบบไฟฟ้าคนกลาง และการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลางที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าที่ทำการขนส่ง

จากรูปที่ 4.1 สามารถอธิบายรายละเอียดที่เกิดขึ้นได้ ดังนี้

กำหนดให้

TPC คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง มีหน่วยเป็น บาท/MWh

ΔTPC คือ การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง และ

สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta TPC = TPC_{wh} - TPC_{base} \tag{4.1}$$

เมื่อ TPC_{wh} คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง ขณะที่มีการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบของตน มีหน่วยเป็น บาท/h

TPC_{base} คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง ขณะที่ไม่มีการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบของตน มีหน่วยเป็น บาท/h

เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลางต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าที่ขนส่ง จะพบว่า

$$\Delta\overline{TPC} = \frac{\Delta TPC}{P_E} \tag{4.2}$$

เมื่อ $\Delta\overline{TPC}$ คือ การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลางที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าที่ทำการขนส่ง

และ P_E คือ กำลังไฟฟ้าที่ทำการขนส่ง มีหน่วยเป็น MW

จากรูปที่ 4.1 สามารถพิจารณาเพิ่มเติมต่อไปได้ดังนี้

กำหนดให้

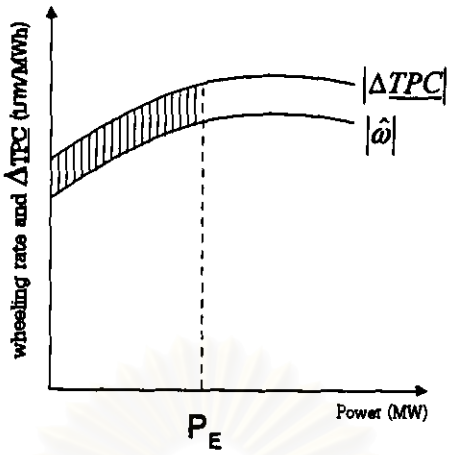
$\hat{\omega}$ คือ อัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง มีหน่วยเป็น บาท/MWh (ซึ่งจะได้แสดงวิธีการคำนวณโดยละเอียดในลำดับถัดไป)

พบว่า ค่า $\hat{\omega}$ จะต้องมีค่ามากกว่า $\Delta\overline{TPC}$ จึงจะเกิดการยินยอมให้มีการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางได้ และมีความสมเหตุสมผลในทางเศรษฐศาสตร์ นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาต่อไปจะพบว่า ผลกำไรที่เกิดขึ้นแก่ระบบไฟฟ้าคนกลาง ก็คือ พื้นที่บริเวณส่วนที่แรเงาในรูปที่ 4.1 และสามารถคำนวณเป็นสูตรได้ ดังนี้ คือ

$$\text{Wheeler}_{\text{Profit}} = (\hat{\omega} - \Delta\overline{TPC}) * P_E \qquad (4.3)$$

เมื่อ $\text{Wheeler}_{\text{profit}}$ คือ ผลกำไรที่เกิดขึ้นแก่ระบบไฟฟ้าคนกลาง เนื่องจากการให้บริการการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบของตน มีหน่วยเป็น บาท/h

2) ในทางกลับกัน กรณีที่ยินยอมให้มีการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง แล้วทำให้ ค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง และ ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าคนกลางลดลง (กรณีนี้เกิดขึ้นได้เช่นกัน และจะได้กล่าวรายละเอียดในบทถัดไป) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในที่นี้ จะหมายถึง การลดลงของค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง และ ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าคนกลางนั่นเอง จากการลดลงดังกล่าวนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายในการจ่ายคืนเงินให้กับคู่สัญญาซื้อขายกำลังไฟฟ้าที่ผ่านระบบของตนนั้นจะต้องไม่มากเกินไปกว่า การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง และ การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าคนกลางที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบอัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านโดยระบบไฟฟ้าคนกลาง และการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลางที่ลดลงต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าที่ทำการขนส่ง

เมื่อ $\Delta\underline{TPC}$ คือ การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลางที่ลดลงต่อหน่วยกำลังไฟฟ้าที่ทำการขนส่ง

คำนวณได้จาก

$$\Delta\underline{TPC} = \frac{\Delta TPC}{P_E} \tag{4.4}$$

และ $$\text{Wheeler}_{\text{Profit}} = (|\Delta\underline{TPC}| - |\hat{\omega}|) * P_E \tag{4.5}$$

การพิจารณาว่าระบบไฟฟ้าคนกลางสามารถจ่ายหรือรับเงินจากคู่สัญญาซื้อขายกำลังไฟฟ้าที่ผ่านระบบของตนได้นั้นก็ เนื่องมาจากการกำหนดค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าอาศัยวิธีการส่วนเพิ่มต้นทุนการผลิต (incremental cost) ซึ่งเป็นการพิจารณาในลักษณะระยะเวลาอันสั้นๆ (short term) เท่านั้น ดังนั้นต้นทุนการผลิต หรือ ค่าใช้จ่ายของระบบไฟฟ้าคนกลางในที่นี้ จึงเป็นแต่เพียงต้นทุนชนิดผันแปร (variable cost) โดยพิจารณาเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าใช้จ่ายเนื่องจากการขนส่งกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยมิได้มีผลต่อต้นทุนคงที่ (fixed cost) ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ระบบไฟฟ้าคนกลางจะต้องจ่ายออกไปอยู่แล้ว ไม่ว่าจะมีการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบของตนหรือไม่ก็ตาม หรือ ต้นทุนจม (sunk cost) [45,46] ซึ่งหมายถึง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ได้มีการลงทุนไปแล้ว ตัวอย่างของ ต้นทุนคงที่ และ ต้นทุนจม ก็คือ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากเครื่องจักรและอุปกรณ์การผลิตที่ติดตั้งไปแล้ว ค่าที่ดิน และ ค่าจ้างแรงงาน เป็นต้น

อัตราในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง หรือ wheeling rate สามารถคำนวณได้จาก ส่วนต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการผลิตของกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ดึงกำลังไฟฟ้าออกไป หรือ ที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าหรือบัสของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้า (buyer) ลบด้วย ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการผลิตของกำลังไฟฟ้าที่บัสที่ส่งกำลังไฟฟ้าเข้ามา หรือ ที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าหรือบัสของผู้ขายกำลังไฟฟ้า (seller) ดังนี้

$$\hat{\omega} = IC_B - IC_S \tag{4.6}$$

เมื่อ $\hat{\omega}$ คือ อัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง มีหน่วยเป็น บาท/MWh

IC_B , IC_S คือ incremental cost ของบัส B และ บัส S ของระบบไฟฟ้าคนกลาง ตามลำดับ มีหน่วยเป็น บาท/MWh

และค่าใช้จ่ายในขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง หรือ wheeling cost คำนวณได้จาก ผลคูณของอัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าที่ขนส่งผ่าน ดังนี้

$$\omega_C = \hat{\omega} * P_E \tag{4.7}$$

เมื่อ ω_C คือ ค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง มีหน่วยเป็น บาท/h

P_E คือ กำลังไฟฟ้าที่ทำการขนส่งผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง มีหน่วยเป็น MW

จากวิธีการกำหนดค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง โดยอาศัยวิธีส่วนเพิ่มต้นทุน ดังที่กล่าวมาแล้ว ต่อไปจะได้กล่าวถึง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ก่อนอื่นจะได้กล่าวถึงชนิดของบัส เพื่อให้เข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างพารามิเตอร์ที่ทราบค่าหรือพารามิเตอร์ค่าคงที่ กับ พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าหรือ พารามิเตอร์ที่ต้องการคำนวณหาก่อน

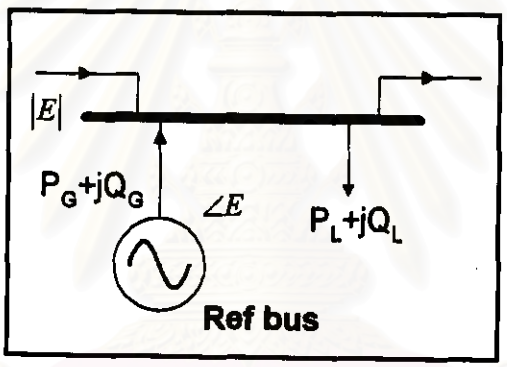
4.2.1 ชนิดของบัส

การทราบชนิดของบัส การกำหนดชนิดของบัสได้อย่างถูกต้อง และ การทราบรายละเอียดเกี่ยวกับบัสแต่ละชนิด จะช่วยให้การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า และ ปัญหา OPF เป็นไปอย่างถูกต้อง เนื่องจากบัสแต่ละชนิด จะมีพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ หรือ พารามิเตอร์ที่ทราบค่า และ พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าแตกต่างกัน โดยทั่วไปพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับบัสแต่ละชนิดจะประกอบด้วย พารามิเตอร์ 4 ค่า ดังต่อไปนี้คือ

- ขนาดของแรงดัน (voltage magnitude, $|E|$)
- มุมเฟสของแรงดัน (voltage angle, $\angle E$)
- ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (real power, P) และ
- ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power, Q)

การแบ่งชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งได้ 3 ชนิด ดังนี้ คือ

1) บัสอ้างอิง (reference bus or swing bus or slack bus) ปกติจะเป็นเป็นบัสที่ต่อร่วมอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง และใช้เป็นบัสชดเชยกำลังสูญเสียในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า และมีข้อสมมติว่าบัสอ้างอิงจะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ได้มากโดยที่ความถี่และขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับพารามิเตอร์ที่ทราบค่า คือ ขนาดของแรงดัน และ มุมเฟสของแรงดัน ส่วนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า คือ กำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิต

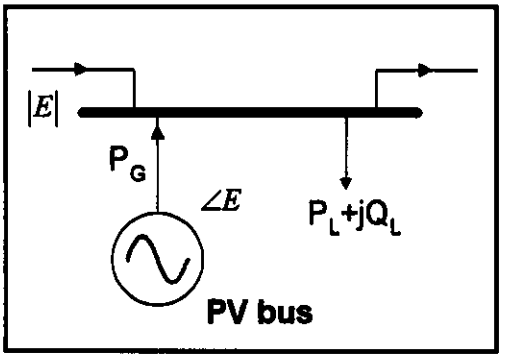


รูปที่ 4.3 บัสอ้างอิง

ตัวแปรที่ทราบค่า $|E|$ และ $\angle E$

ตัวแปรที่ต้องการคำนวณหาค่า P_G และ Q_G

2) บัสควบคุมแรงดัน (voltage controllesd bus, PV bus) เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดรองๆ ลงมาจากบัสอ้างอิงต่ออยู่ ปกติจะควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่ หรือ มีขนาดใกล้เคียงกับที่กำหนด พารามิเตอร์ที่ทราบค่า คือ ขนาดของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัสและขนาดของแรงดันที่บัส ส่วนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และ มุมเฟสของแรงดัน

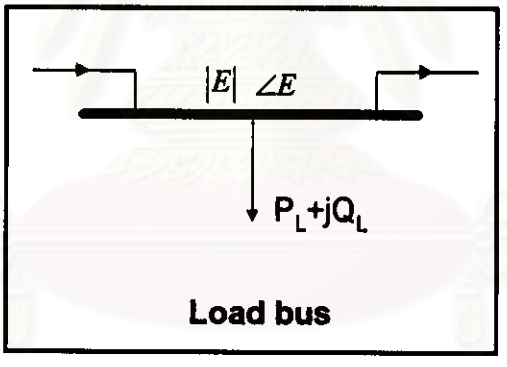


รูปที่ 4.4 บัสควบคุมแรงดัน

ตัวแปรที่ทราบค่า $|E|$ และ $P = P_G - P_L$

ตัวแปรที่ต้องการคำนวณหาค่า Q และ $\angle E$

3) โหลดบัส (load bus, PQ bus) คือบัสที่ต่อเข้ากับโหลดของระบบไฟฟ้า พารามิเตอร์ที่ทราบค่า คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ส่วนค่าพารมิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า คือ ค่าขนาดของแรงดัน และ มุมเฟสของแรงดัน



รูปที่ 4.5 โหลดบัส

ตัวแปรที่ทราบค่า $P = -P_L$ และ $Q = -Q_L$

ตัวแปรที่ต้องการคำนวณหาค่า $|E|$ และ $\angle E$

โดยสรุป การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า และ การแก้ปัญหา OPF ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหาจุดทำงาน (state) ภายในระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ในขณะที่พารามิเตอร์ที่ทราบค่าจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ในการคำนวณแต่ละรอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ความหมายของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยแท้ ก็คือการหารากคำตอบของฟังก์ชันศูนย์สำหรับสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับของระบบไฟฟ้าใดๆ ผลของการหารากคำตอบของฟังก์ชันศูนย์ จะช่วยให้เราทราบสถานะ (state) การทำงานของระบบ คือ รู้ ขนาดของแรงดัน มุมเฟส เป็นต้น เพื่อนำไปคำนวณสิ่งที่ต้องการอย่างอื่นต่อไป เช่น การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส เป็นต้น

สำหรับปัญหา OPF นั้นสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะเป็นส่วนหนึ่งของเงื่อนไขบังคับสมการ เช่นกัน แต่การแก้ปัญหา OPF บางวิธีไม่จำเป็นต้องมีการละเลยสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสอ้างอิงออก แล้วมาคำนวณภายหลัง (โดยสมมติว่าบัสอ้างอิงเป็นบัสชดเชยกำลังสูญเสียในระบบ) แต่สามารถรวมเข้ามาเป็นเงื่อนไขบังคับสมการทั้งหมดของปัญหา OPF แล้วคำนวณไปพร้อมเพรียงกันได้โดยตรงดังนี้

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{di} - P_i = 0 \qquad \text{เมื่อ i = 1 ถึง N} \qquad (4.8)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{di} - Q_i = 0 \qquad \text{เมื่อ i = 1 ถึง N} \qquad (4.9)$$

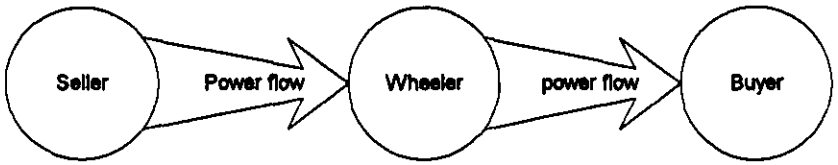
เมื่อ N คือ จำนวนบัสทั้งหมดภายในระบบ

P_i และ Q_i สามารถเขียนได้ตามสมการ (3.57) และ (3.58) ดังนี้

$$P_i = \sum_{k=1}^{N} \left\{ |E_i||E_k|[G_{ik}\cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik}\sin(\theta_i - \theta_k)] \right\} \qquad (3.57)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^{N} \left\{ |E_i||E_k|[G_{ik}\sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik}\cos(\theta_i - \theta_k)] \right\} \qquad (3.58)$$

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า การศึกษาการกำหนดอัตราและค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง เป็นรูปแบบหนึ่งของปัญหา OPF โดยที่ระบบที่ใช้ในการศึกษาในที่นี้จะประกอบด้วยระบบระบบไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมโยงกัน 3 ระบบ คือ ระบบไฟฟ้าผู้ขาย ระบบไฟฟ้าผู้ซื้อ และ ระบบไฟฟ้าคนกลาง ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง

โดยระบบไฟฟ้าคนกลางประกอบด้วยบัสผลิต บัสควบคุมแรงดัน และบัสโหลดต่างๆ จำนวนมาก ดังนั้นในการหาค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลาง เป้าหมายที่สำคัญอันหนึ่งก็คือ การพิจารณาต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมของระบบไฟฟ้าคนกลางให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ฟังก์ชันเป้าหมาย : $$Min \quad TPC = \sum_{i=1}^{m} C_i(P_{GI}) \tag{4.10}$$

เมื่อ m คือ จำนวนบัสผลิตทั้งหมดภายในระบบ

ในสภาวะการทำงานปกติ ขณะที่ยังไม่มีการขนส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง จำเป็นต้องพิจารณา เงื่อนไขบังคับที่จำเป็นและสำคัญ ซึ่งแบ่งได้เป็น เงื่อนไขบังคับสมการ และ เงื่อนไขบังคับอสมการ ดังต่อไปนี้

เงื่อนไขบังคับสมการของระบบไฟฟ้าคนกลาง ประกอบด้วย สมการที่ (4.8) และ (4.9)
เงื่อนไขบังคับอสมการของระบบไฟฟ้าคนกลาง ประกอบด้วย

สำหรับบัสอ้างอิง

$$P_{GI,\min} \le P_{GI} \le P_{GI,\max} \tag{4.11}$$

$$Q_{GI,\min} \le Q_{GI} \le Q_{GI,\max} \tag{4.12}$$

สำหรับบัสควบคุมแรงดัน

$$|E_i|_{\min} \le |E_i| \le |E_i|_{\max} \tag{4.13}$$

$$Q_{GI,min} \le Q_{GI} \le Q_{GI,max} \tag{4.14}$$

สำหรับโหลดบัส

$$|E_i|_{\min} \le |E_i| \le |E_i|_{\max} \tag{4.15}$$

จากนั้นเมื่อได้มีการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางเกิดขึ้น กำหนดให้ผู้ขายกำลังไฟฟ้าส่งกำลังไฟฟ้าผ่านระบบไฟฟ้าคนกลางที่บัส S และ ผู้ซื้อกำลังไฟฟ้าดึงกำลังไฟฟ้าออกจากระบบไฟฟ้าคนกลางที่บัส B ทำให้เงื่อนไขบังคับสมการที่ (4.8) สำหรับบัส S และ บัส B เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$\Delta P_S = (P_{GS} - P_{DS} + P_E) - P_S = 0 \tag{4.16}$$

$$\Delta P_B = (P_{GB} - P_{DB} - P_E) - P_B = 0 \tag{4.17}$$

เมื่อ ΔP_S คือ สมการความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสของระบบไฟฟ้าคนกลาง ที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าของผู้ขายกำลังไฟฟ้า

ΔP_B คือ สมการความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสของระบบไฟฟ้าคนกลาง ที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าของผู้ซื้อกำลังไฟฟ้า

ปัญหาที่ทำการศึกษาแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

4.2.2.1 กรณีไม่รวมผลเงื่อนไขขีดจำกัดของสายส่ง ประกอบด้วยสมการที่ (4.8)-(4.17)

4.2.2.2 กรณีรวมผลเงื่อนไขขีดจำกัดของสายส่ง จะมีระบบสมการที่ใช้ในการแก้ปัญหาเช่นเดียวกับ 4.2.2.1 เพียงแต่เพิ่มเงื่อนไขบังคับอสมการแบบฟังก์ชัน สำหรับขีดจำกัดของสายส่งที่ต้องการศึกษาเข้าไปดังนี้

$$|S_{ij}| < S_{ij,\max} \tag{4.18}$$

เมื่อ i และ j หมายถึง ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจาก บัสที่ i ไปยังบัสที่ j และ

S_{ij} คือ การไหลของกำลังไฟฟ้าปรากฏจากบัส i ไปยังบัส j มีหน่วยเป็น MVA

และสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$S_{ij} = E_i I_{ij}^* + j|E_i|^2 \frac{C_{ch\,ij}}{2} \tag{4.19}$$

เมื่อ E_i คือ แรงดันที่บัส i เป็นปริมาณเชิงซ้อน เขียนในรูปเชิงขั้วได้ดังนี้

$$E_i = |E_i| \angle E_i^\circ \tag{4.20}$$

I_{ij} คือ กระแสที่ไหลจากบัส i ไปยัง บัส j คำนวณในรูปปริมาณเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$I_{ij} = (E_i - E_j) * y_{ij} \qquad (4.21)$$

y_{ij} คือ ค่า สมาชิกใน Y-bus ณ แถวที่ i และ หลักที่ j

C_{charge} คือ ค่า Line charging ของสายส่ง

ค่า S_{ij}, E_i, I_{ij} จากสมการที่ (4.19), (4.20) และ (4.21) ในที่นี้เป็นปริมาณเชิงซ้อน

4.3 ขั้นตอนการแก้ปัญหา

สามารถเขียนเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : ป้อนค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง (R_{ij}+jX_{ij}) และ ค่า line charging ของสายส่ง (C_{charge}) และคำนวณค่า Y-bus matrix

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดค่าเวกเตอร์

- พารามิเตอร์ที่ทราบค่า หรือ พารามิเตอร์ค่าคงที่
- พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า หรือ พารามิเตอร์ที่ต้องการคำนวณ เริ่มต้น และ
- ขอบเขตของตัวแปรต่างๆ ดังนี้

สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันค่าใช้จ่าย (α, β, γ) ราคาค่าเชื้อเพลิง (k_i) ค่าขนาดของแรงดัน ($|E|$) ขอบเขตของแรงดัน ($|E|_{min}, |E|_{max}$) ค่ามุมเฟสของแรงดัน ($\angle E$) ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิต (P_G) ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ ($P_{G,min}, P_{G,max}$) ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าจริง (P_D) ค่ากำลังไฟฟ้าที่ขนส่ง (P_E) ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิต (Q_G) และ ค่าโหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q_D)

จากค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดข้างต้นสามารถแยกเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าและต้องการคำนวณหา ดังนี้

ค่ามุมเฟสของแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันและบัสโหลด

ค่าขนาดของแรงดันที่บัสโหลด

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตที่บัสอ้างอิงและบัสควบคุมแรงดัน

ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสอ้างอิงและบัสควบคุมแรงดัน

ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณค่าฟังก์ชันตามสมการที่ (4.10)

- ภายใต้เงื่อนไขบังคับสมการ (4.8) และ (4.9) สำหรับบัสอื่นที่มิใช่บัส S และ บัส B สำหรับ บัส S และ บัส B มีเงื่อนไขบังคับสมการตามสมการ (4.16) และ (4.17) ตาม

ลำดับ นอกจากนี้ยังมีเงื่อนไขบังคับอื่นๆ อีกตามสมการที่ (4.11) ถึง (4.15) สำหรับกรณีที่ไม่รวมเงื่อนไขขีดจำกัดสายส่ง

- ภายใต้เงื่อนไขบังคับสมการ (4.8) และ (4.9) สำหรับบัสอื่นที่มิใช่บัส S และ บัส B สำหรับ บัส S และ บัส B มีเงื่อนไขบังคับสมการตามสมการ (4.16) และ (4.17) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีเงื่อนไขบังคับอื่นๆ อีกตามสมการที่ (4.11) ถึง (4.15) และ (4.18) สำหรับกรณีที่รวมเงื่อนไขขีดจำกัดสายส่ง

ขั้นตอนที่ 4 : ผลที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า S_{ij}, I_{ij} ตามสมการที่ (4.21) และ (4.19) ตามลำดับ นอกจากนั้น คำนวณค่า P_{ij} Q_{ij} P_{loss} Q_{loss} P_{Dtotal} Q_{Dtotal} ดังนี้

$$P_{ij} = \mathrm{Re}[S_{ij}] \tag{4.22}$$

$$Q_{ij} = \mathrm{Im}[S_{ij}] \tag{4.23}$$

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^{line} \left| P_{ij} + P_{ji} \right|_k \tag{4.24}$$

$$Q_{loss} = \sum_{k=1}^{line} \left| Q_{ij} + Q_{ji} \right|_k \tag{4.25}$$

เมื่อ $line$ คือ จำนวนสายส่งทั้งหมดภายในระบบไฟฟ้า

k คือ สายส่งเส้นที่ k และต่ออยู่ระหว่างบัสที่ i กับบัสที่ j

$$P_{Dtotal} = \sum_{i=1}^{N} P_{di} \tag{4.26}$$

$$Q_{Dtotal} = \sum_{i=1}^{N} Q_{di} \tag{4.27}$$

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่า jacobian matrix ตามสมการที่ (3.68)

ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณค่า β_{Pi} และ pf_i ตามสมการที่ (3.74) และ (3.34) ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 7 : คำนวณ ค่า incremental cost และ λ_i ของบัสผลิต ซึ่งได้แก่ บัสอ้างอิง และ บัสควบคุมแรงดัน ตามสมการที่ (3.10) และ สมการที่ (3.33) ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 8 : กำหนด ค่า iteration = 1 ถึง 2n และ k = 1 ถึง l

เมื่อ l คือจำนวนโหลดบัส

iteration = 1 หมายถึง ให้ปรับค่า $P_{Dload}(k) = P^0_{Dload}(k) + 0.01$

iteration = 2 หมายถึง ให้ปรับค่า $P_{Dload}(k) = P^0_{Dload}(k) - 0.01$

iteration = 3 หมายถึง ให้ปรับค่า $P_{Dload}(k+1) = P^0_{Dload}(k+1) + 0.01$

iteration = 4 หมายถึง ให้ปรับค่า $P_{Dload}(k+1) = P^0_{Dload}(k+1) - 0.01$

ความหมายเป็นดังนี้เรื่อยไปจนกระทั่ง iteration = 2l และ k = l

ที่รอบ iteration ใดๆ ให้ reset ค่าเริ่มต้นสำหรับพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในขั้นตอนที่ 2 ใหม่ จากนั้นทำการคำนวณในขั้นตอนที่ 4 และ คำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดเก็บเอาไว้

ขั้นตอนที่ 9 : คำนวณค่า incremental cost ของโหลดบัสตามหลักการทำ Finite differentiation [47] ดังนี้

$$IC(k) = \frac{Total_cost(P_{Dload}(k) + \Delta P_{Dload}(k)) - Total_cost(P_{Dload}(k) - \Delta P_{Dload}(k))}{2} \qquad (4.28)$$

ขั้นตอนที่ 10 : คำนวณค่า λ ของโหลดบัส จาก สมการ (3.33)

ขั้นตอนที่ 11 : คำนวณอัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าจาก สมการที่ (4.6) และ คำนวณค่าใช้จ่ายในการขนส่งกำลังไฟฟ้าจาก สมการที่ (4.7)

ขั้นตอนที่ 12 : คำนวณค่าต่างๆ ที่ต้องการและบันทึกผลเก็บไว้ในไฟล์ (file) เก็บข้อมูล

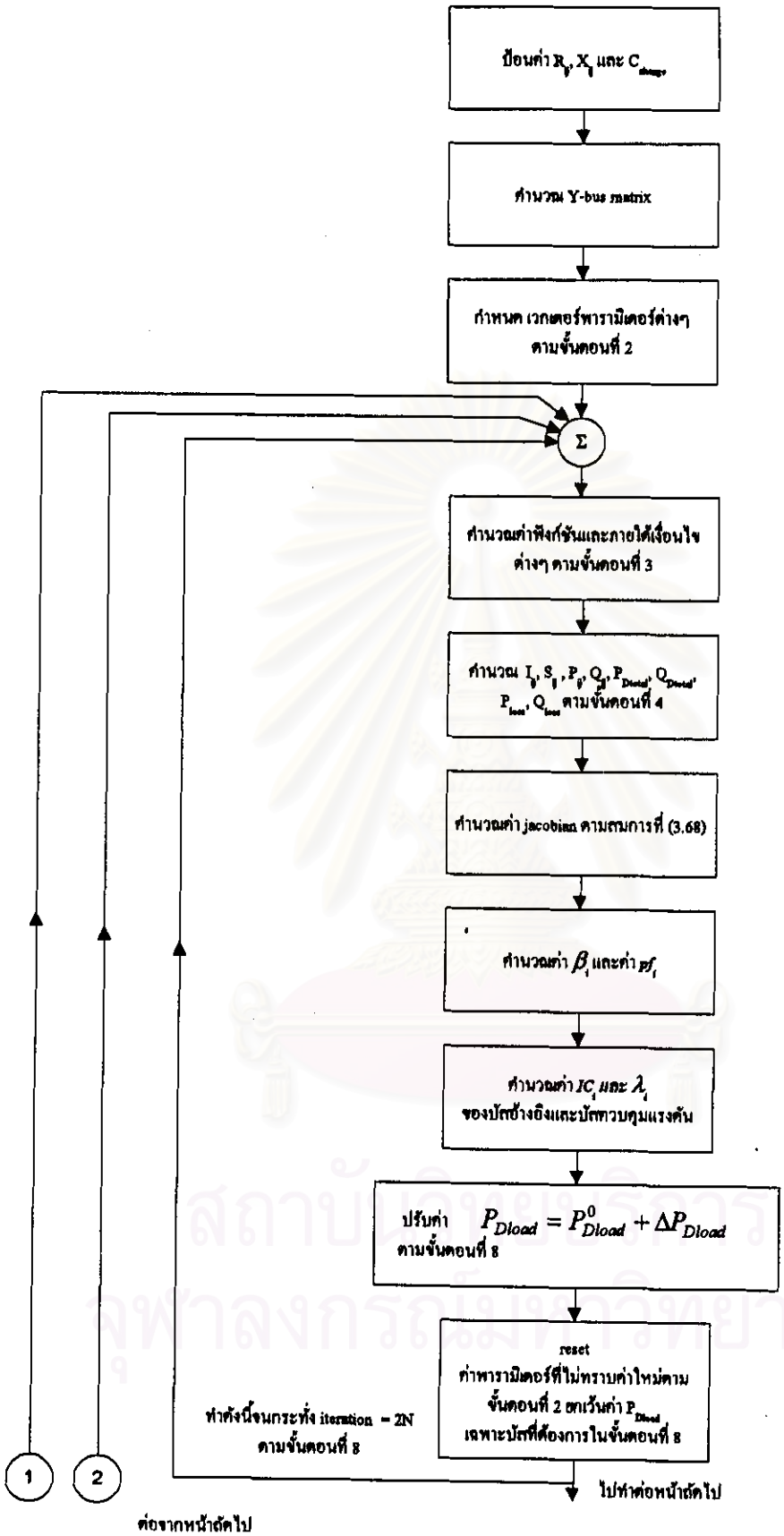
ขั้นตอนที่ 13 : ปรับค่า $P_E = -P_E$ แล้ว reset ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 2 แล้วทำขั้นตอนที่ 3-12 ใหม่

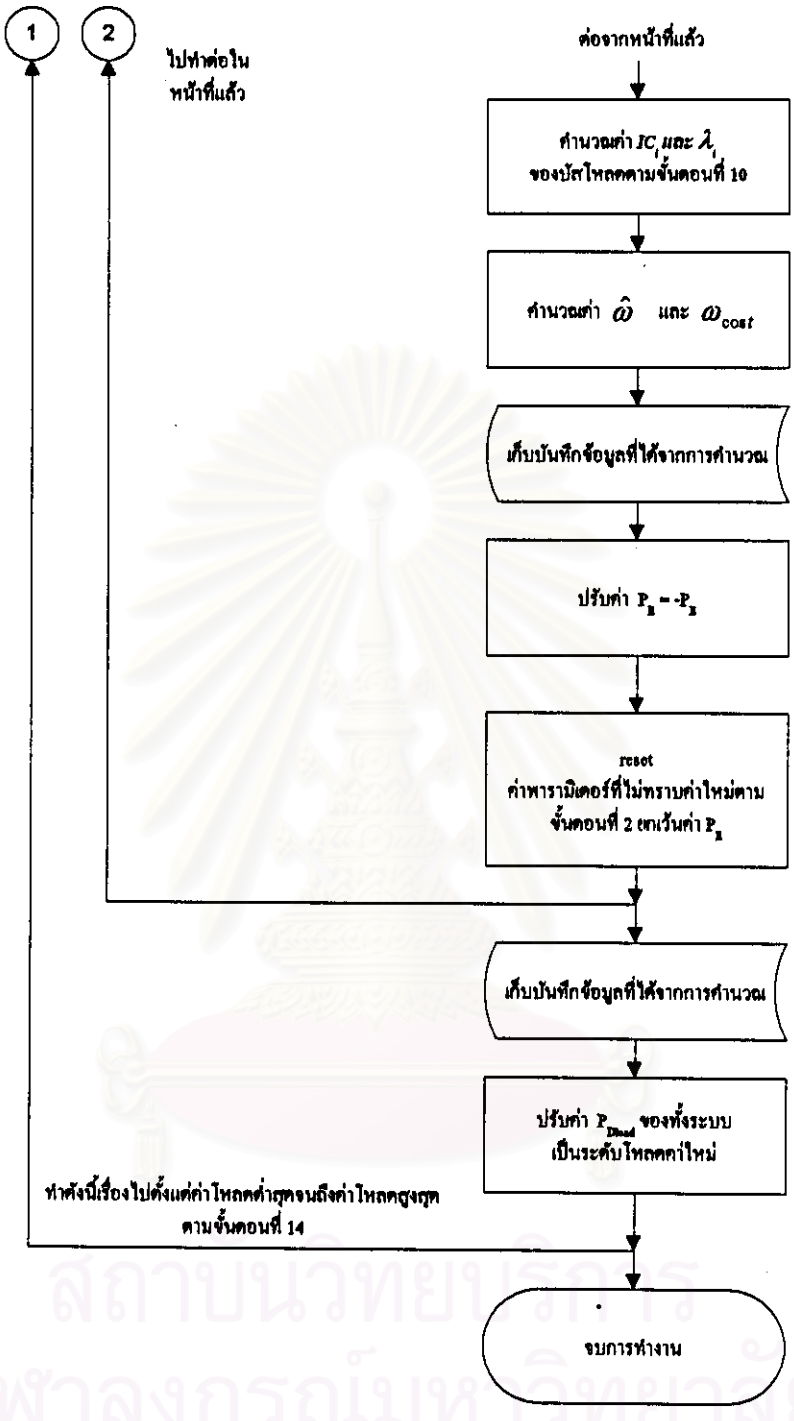
ขั้นตอนที่ 14 : ปรับค่า P_D เป็นระดับโหลดของระบบเป็นค่าใหม่ แล้วทำขั้นตอนที่ 13 ใหม่

ขั้นตอนที่ 15 : จบการทำงาน

จากขั้นตอนต่างๆ สามารถนำมาเขียนเป็นผังการทำงานได้ดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ป้อนค่า R_{ij}, X_{ij} และ C_{shunt_i}
คำนวณ Y-bus matrix
กำหนด เวกเตอร์พารามิเตอร์ต่างๆ ตามขั้นตอนที่ 2
Σ
คำนวณค่าฟังก์ชันและภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ตามขั้นตอนที่ 3
คำนวณ I_{ij}, S_{ij}, P_{ij}, Q_{ij}, P_{Dload_i}, Q_{Dload_i}, P_{loss}, Q_{loss} ตามขั้นตอนที่ 4
คำนวณค่า jacobian ตามสมการที่ (3.68)
คำนวณค่า β_i และค่า pf_i
คำนวณค่า IC_i และ λ_i ของบัสอ้างอิงและบัสควบคุมแรงดัน
ปรับค่า $P_{Dload} = P^0_{Dload} + \Delta P_{Dload}$ ตามขั้นตอนที่ 8
reset ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าใหม่ตามขั้นตอนที่ 2 ยกเว้นค่า P_{Dload} เฉพาะบัสที่ต้องการในขั้นตอนที่ 8
ทำดังนี้จนกระทั่ง iteration = 2N ตามขั้นตอนที่ 8
ไปทำต่อหน้าถัดไป
1
2
ต่อจากหน้าถัดไป



รูปที่ 4.7 ผังการทำงานในการคำนวณค่าใช้จ่ายและอัตราค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม
ในการขนส่งกำลังไฟฟ้าโดยผ่านระบบไฟฟ้าคนกลาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย