



รายงานการวิจัย

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ (Alternative Newton-Raphson Power Flow Calculation)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.ธนัชชัย กุลวรรณิษพงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายทศพล รัตน์นิยมชัย

นายบรรณลัญติ บริบูรณ์

นายนราวุธ พูลสวัสดิ์

นายอุดมศักดิ์ ทองกระจาย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2547

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้ และขอขอบคุณ คุณเกษม ขอบจตุกลาง วิศวกรไฟฟ้า แผนกควบคุมการจ่ายไฟ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดนครราชสีมา ที่อนุเคราะห์ข้อมูลระบบจำหน่าย 22 kV ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาแนวทางใหม่ของการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีพื้นฐานมาจากหลักการกระแสสมดุล การศึกษาดำเนินการโดยเปรียบเทียบเวลาในการคำนวณกับการไหลกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่ใช้สมการกำลังไฟฟ้าสมดุลด้วยวิธีนิวตันราฟสันซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย วิธีการแบบใหม่นี้อาศัยหลักการกระแสสมดุลที่ใช้สมการกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้รูปแบบของสมการที่ใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าลดความซับซ้อนลง การเปลี่ยนรูปสมการจากสมการกำลังไฟฟ้าเป็นสมการกระแสไฟฟ้าและการหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนใหม่ แสดงให้เห็นว่าถึงแม้รูปแบบของสมการจะเปลี่ยนแปลงไป แต่วิธีการนี้ยังมีลักษณะคุณสมบัติของการลู่เข้าแบบควอดราติก เช่นเดียวกับวิธีการนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิม วิธีการคำนวณแบบใหม่นี้ถูกนำมาทดสอบกับระบบทดสอบ ทั้งระบบส่งจ่ายและระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 5 บัส 6 บัส 10 บัส 25 บัส ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 24 บัส และ IEEE 30 บัส IEEE 37 บัส IEEE 118 บัส และ ระบบสายป้อนจำหน่าย 22 kV มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT feeder 159 บัส) ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า เวลาที่ใช้ในการประมวลผลจากวิธีการคำนวณแนวทางใหม่นี้มีค่าลดลงจากวิธีการดั้งเดิม ในขณะที่อัตราการลู่เข้าของวิธีการคำนวณทั้งสองแบบมีลักษณะใกล้เคียงกัน การพัฒนาวิธีการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแนวทางใหม่นี้จะทำให้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังง่ายขึ้น ใช้เวลาน้อยลง และลดความต้องการหน่วยความจำของซอฟต์แวร์

ABSTRACT

This research proposes an alternative approach of Newton-Raphson power flow calculation, which is based on the current-balanced principle. This study challenges the conventional Newton-Raphson method, in which intensive and careful comparisons must be performed. The main purpose leading this development is to improve the computational speed of the power flow algorithms and to reduce the use of memories required by power flow programs. The developed method employs non-linear current equations instead of the power-balanced equations. These equations can simplify the power flow calculation, however new derivation of Jacobian matrices is also needed. Although the algorithm has been changed, the proposed power flow method still has quadratic convergence as the original does. The newly developed power flow method in comparison with the standard Newton-Raphson, 5-bus, 6-bus, 10-bus, 25-bus, IEEE 24-bus, IEEE 30-bus, IEEE 37-bus, IEEE 118-bus and the SUT feeder 159 bus were used for test systems. The test results confirm that the execution time of the proposed method is considerably reduced when compared to that of the original method, while the comparative convergence curves between them are, slightly and insignificantly, different. The Development of the alternative Newton-Raphson power flow method will lead to the essential improvement in field of power flow computation in such a way that the execution time and memory requirement are considerably reduced.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความนำ.....	3
2.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิม.....	3
2.3 สรุป.....	13
บทที่ 3 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	
3.1 ความนำ.....	14
3.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่.....	14
3.3 ผลการทดสอบ.....	20
3.4 สรุป.....	26
บทที่ 4 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ สำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า	
4.1 ความนำ.....	27
4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่.....	27
4.3 ผลการทดสอบ.....	35
4.4 สรุป.....	43
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	

5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
บรรณานุกรม.....	46
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ระบบทดสอบ.....	ก-1
ภาคผนวก ข ผลผลิตจากงานวิจัย.....	ข-1
- IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC2005), Innsbruck, Austria, 16 – 18 February 2005	ข-2
- The 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE' 06), Prague, Czech Republic, 12-14 March 2006	ข-7
- The WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 3, Vol 5, March 2006	ข-11
ภาคผนวก ค ประวัตินักวิจัย.....	ก-1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ 5 บัส	20
ตารางที่ 3.2 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส	22
ตารางที่ 3.3 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ 24 บัส	23
ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	25
ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ 10 บัส	36
ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ 25 บัส	37
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 37 บัส	39
ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 118 บัส	40
ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ SUT feeder	42

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น	4
รูปที่ 2.2 แบบจำลองของหม้อแปลง.....	10
รูปที่ 2.3 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิม	12
รูปที่ 3.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น	14
รูปที่ 3.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่.....	19
รูปที่ 3.3 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 5 บัส	21
รูปที่ 3.4 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 6 บัส	22
รูปที่ 3.5 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE 24 บัส	24
รูปที่ 3.6 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส	25
รูปที่ 4.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น	14
รูปที่ 4.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่.....	34
รูปที่ 4.3 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 10 บัส.....	35
รูปที่ 4.4 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 25 บัส	38
รูปที่ 4.5 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE 37บัส	39
รูปที่ 4.6 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส.....	41
รูปที่ 4.7 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ SUT feeder 159 บัส.....	42
รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 5 บัส.....	ก-1
รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 6 บัส	ก-1
รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบ IEEE 24 บัส.....	ก-2
รูปที่ ก.4 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส.....	ก-2
รูปที่ ก.5 ระบบทดสอบ 10 บัส.....	ก-3
รูปที่ ก.6 ระบบทดสอบ 25 บัส.....	ก-3
รูปที่ ก.7 ระบบทดสอบ IEEE 37 บัส.....	ก-3
รูปที่ ก.8 ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส.....	ก-4
รูปที่ ก.9 ระบบทดสอบ SUT feeder 159 บัส.....	ก-5

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ระบบผลิต ส่งจ่ายและกระจายกำลังไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมากกว่าหนึ่งร้อยปีได้กลายเป็นรากฐานที่สำคัญและมั่นคงให้กับการพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่างๆ จนถึงทุกวันนี้ ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความซับซ้อนสูง มีสายส่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่กับระบบเป็นจำนวนมาก ทำให้การคำนวณมีความยุ่งยากเกินกว่าจะใช้การคำนวณด้วยมือได้ ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer: PC) ได้รับการพัฒนาจนมีขีดความสามารถในการคำนวณที่รวดเร็วและมีหน่วยความจำที่เพียงพอสำหรับใช้ในการคำนวณขั้นสูงทางวิศวกรรมได้ทำให้ผู้ออกแบบ วิเคราะห์ และควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังได้นำเอาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์มาใช้งาน อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญของการนำซอฟต์แวร์สำเร็จรูปมาใช้ก็คือค่าลิขสิทธิ์ของซอฟต์แวร์มีราคาสูง เช่น โปรแกรม Power world Simulator™ ของบริษัท PowerWorld Corporation (<http://www.powerworld.com>) ตั้งราคาไว้ที่ \$7,000 สำหรับลิขสิทธิ์โปรแกรมที่ใช้งานของเครื่องแรก [1] นอกจากนี้ในบางกรณีผู้ใช้ไม่สามารถดัดแปลงหรือแก้ไขโปรแกรมให้เหมาะสมกับสถานะการใช้งานจริงได้

จะเห็นว่าโปรแกรม PowerWorld Simulator™ เป็นโปรแกรมแบบโต้ตอบกับผู้ใช้งานผ่านการนำเสนอทางกราฟฟิก (Interactive Program and Graphic User Interface: GUI) มีการแสดงผลโดยใช้สีแสดงขนาดแรงดันบัสประกอบกับการใช้ภาพเคลื่อนไหว ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและเหมาะสำหรับใช้ฝึกอบรมวิศวกรหรือนักศึกษาวิศวกรรมระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับการเรียนการสอน และการทำวิจัยทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทยนั้นยังต้องอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปในลักษณะดังกล่าว ทำให้พัฒนาการทางด้านงานวิจัยมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากตัวซอฟต์แวร์เอง และเหตุผลในด้านราคาของซอฟต์แวร์ นอกจากนี้เพื่อรองรับการปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับตลาดค้าไฟฟ้าที่มีการแข่งขันแบบเสรี ที่จะเกิดขึ้นภายหลังจากการแปรรูปการไฟฟ้าทั้ง 3 แห่งของไทยในอนาคตอันใกล้ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาจะต้องตั้งอยู่บนพื้นฐานของระบบที่ใช้งานจริงในประเทศเพื่อช่วยให้บริษัทหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีศักยภาพในการแข่งขันที่สูงขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาอัลกอริทึมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทั้งในด้านของความเร็วในการจำลองผลและการลดพื้นที่การใช้งานหน่วยความจำ งานวิจัยนี้จะใช้อัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาขึ้นมาใหม่โดยใช้สมการกระแสแทนที่สมการแรงดันในการคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson) ซึ่งจากการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมเบื้องต้นพบว่าใช้เวลาในการคำนวณและใช้หน่วยความจำน้อยกว่าอัลกอริทึมแบบเดิม [2]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. พัฒนาอัลกอริทึมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง
2. พัฒนาโปรแกรมสำหรับการจำลองผลการไหลกำลังไฟฟ้าที่ใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นชนิด 3 เฟส แบบสมดุล
2. ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นชนิด 3 เฟส แบบไม่สมดุล
3. โหลดเป็นชนิดกำลังไฟฟ้าคงที่

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. พัฒนาการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสัน โดยใช้สมการกระแสไฟฟ้า
2. พัฒนาโปรแกรมจำลองการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสัน โดยใช้สมการกระแสไฟฟ้า
3. ปรับปรุงประสิทธิภาพการคำนวณสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโครงสร้างหรือเงื่อนไขการทำงานพิเศษที่ส่งผลต่อการรู้เข้าของกระบวนการคำนวณ
4. ปรับปรุงประสิทธิภาพการคำนวณสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อัลกอริทึมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
2. ได้โปรแกรมต้นแบบสำหรับจำลองผลการไหลกำลังไฟฟ้าที่สอดคล้องกับการพัฒนาประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความนำ

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า [3-5] จะคำนวณที่สภาวะสมดุลของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัสใดๆ ผลเฉลยของการไหลกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยข้อมูลของขนาดแรงดัน มุมของแรงดันกำลังไฟฟ้าจริง กำลังงานสูญเสียในการส่งจ่าย และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัสควบคุมแรงดัน ปัญหาของการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าจะมีตัวแปรที่สำคัญสองตัว คือ กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำให้สมการที่ใช้ในการคำนวณไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องหาคำตอบด้วยการประมาณค่าโดยอาศัยการวนรอบ วิธีการคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสันได้ถูกนำมาพัฒนาใช้ร่วมกับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า ทำให้การคำนวณมีการลู่เข้าเร็วมาก ทำให้สามารถค้นหาคำตอบได้ภายในการคำนวณประมาณ 3 – 5 รอบของการคำนวณเท่านั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับความละเอียดของผลเฉลยและแรงดันบัสเริ่มต้นที่กำหนด โดยแนวความคิด คือ การรวมพจน์อันดับสอง (second-order term) ที่เกิดจากการกระจายสมการกำลังไฟฟ้าสมดุลด้วยอนุกรมเทเลอร์ (Taylor-series expansion) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังระบบขนาดใหญ่ จำเป็นที่จะต้องมีการใช้การโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (computer programming) เข้ามาช่วยในการคำนวณ และพบว่า การคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสันช่วยลดเวลาในการคำนวณมากกว่าการคำนวณด้วยวิธีอื่นๆ จึงทำให้วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน นอกจากนี้วิธีการคำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสันยังได้รับการปรับปรุงให้มีความเร็วในการคำนวณ และการจัดการหน่วยความจำเพื่อการคำนวณที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นด้วย เช่น วิธีการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีดีคัปเปิล (Decoupled method) และวิธีฟาสต์ดีคัปเปิล (Fast-decoupled method) [6-7]

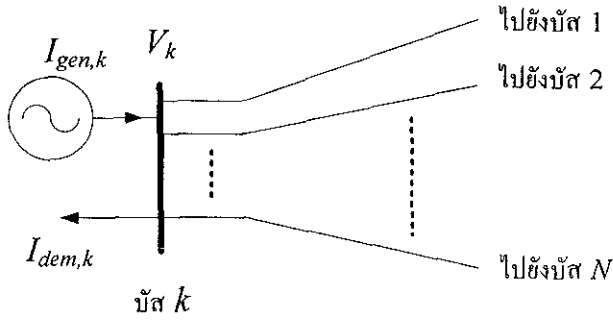
2.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิม

กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสทั้งสิ้น N บัส โดยที่กำหนดให้บัส 1 บัส มีขนาดและมุมของแรงดันมีค่าคงที่และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่า บัสอ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อบัสสลัค (slack bus)

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยการใช้วิธีวิเคราะห์โนด (nodal analysis) สมการกระแสสมดุล (KCL) ณ บัส k นี้ (การคำนวณจะไม่คิดบัสสลัค) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

$$I_{in} = I_{out}$$

$$I_{gen,k} = I_{dem,k} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N I_i \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น ๆ

จากสมการที่ 2.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า สมการกระแสสมมูลจะถูกเขียนใหม่

ให้อยู่ในรูปสมการของกำลังไฟฟ้าสมมูล จาก $I = \left(\frac{S}{V}\right)^* = yV$ ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\left(\frac{S_{gen,k}}{V_k}\right)^* = \left(\frac{S_{dem,k}}{V_k}\right)^* + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N y_{ki} (V_k - V_i)$$

$$\left(\frac{S_{gen,k} - S_{dem,k}}{V_k}\right)^* = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N y_{ki} (V_k - V_i)$$

$$S_{gen,k}^* - S_{dem,k}^* = V_k^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N y_{ki} (V_k - V_i) \quad (2.2)$$

โดยที่

$S_{gen,k}$ และ $S_{dem,k}$ แทนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่บัส k

ตามลำดับ

V_k แทนเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่บัส k

y_{ki} แทนแอดมิทแตนซ์ ที่ต่อระหว่างบัส k และบัส i (primitive admittance)

* แทนตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate)

จัดรูปสมการที่ 2.2 ใหม่ โดยแทน $S^* = P - jQ$ จะได้

$$(P_{\text{gen},k} - jQ_{\text{gen},k}) - (P_{\text{dem},k} - jQ_{\text{dem},k}) = V_k^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N y_{ki} (V_k - V_i)$$

$$(P_{\text{gen},k} - P_{\text{dem},k}) - j(Q_{\text{gen},k} - Q_{\text{dem},k}) = V_k^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N y_{ki} (V_k - V_i)$$

กำหนดให้ $P_{\text{sch}} = P_{\text{gen}} - P_{\text{dem}}$ และ $Q_{\text{sch}} = Q_{\text{gen}} - Q_{\text{dem}}$ และ $S_{\text{sch}} = P_{\text{sch}} + jQ_{\text{sch}}$ จะได้

$$\begin{aligned} P_{\text{sch},k} - jQ_{\text{sch},k} &= V_k^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N y_{ki} (V_k - V_i) \\ S_{\text{sch},k}^* &= V_k^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N y_{ki} (V_k - V_i) \end{aligned} \quad (2.3)$$

จากการคำนวณหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (bus admittance matrix)

$$[Y]_{\text{bus}} : \quad Y_{kk} = \sum_{i=1}^N y_{ki} \quad \text{และ} \quad Y_{ki} = -y_{ki}$$

จัดรูปสมการที่ 2.3 ใหม่จะได้

$$\begin{aligned} S_{\text{sch},k}^* &= V_k^* \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N y_{ki} V_k - \sum_{i=1}^N y_{ki} V_i \\ i \neq k \quad \quad \quad i \neq k \end{pmatrix} \\ S_{\text{sch},k}^* &= V_k^* \begin{pmatrix} Y_{kk} V_k + \sum_{i=1}^N Y_{ki} V_i \\ i \neq k \end{pmatrix} \\ S_{\text{sch},k}^* &= V_k^* \sum_{i=1}^N Y_{ki} V_i \end{aligned} \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 เป็นสมการของกำลังไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ ซึ่งสมการนี้เป็นสมการเริ่มต้นในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า จากสมการที่ 2.4 เมื่อพิจารณาในรูปของระบบเชิงขั้ว จะได้ว่า

ถ้ากำหนดนิยามดังต่อไปนี้

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k = |V_k| e^{j\delta_k} \quad (\text{แรงดันไฟฟ้าที่บัส } k)$$

$$Y_{ki} = |Y_{ki}| \angle \theta_{ki} = |Y_{ki}| e^{j\theta_{ki}} \quad (\text{สมาชิกแถวที่ } k \text{ หลักที่ } i \text{ ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์})$$

แทนนิยามในรูปเชิงขั้วลงในสมการที่ 2.4

$$S_{sch,k}^* = (|V_k| \angle -\delta_k) \sum_{i=1}^N [(|Y_{ki}| \angle \theta_{ki}) (|V_i| \angle \delta_i)]$$

$$S_{sch,k}^* = \sum_{i=1}^N |Y_{ki}| |V_i| |V_k| \angle \theta_{ki} + \delta_i - \delta_k \quad (2.5)$$

แยกพิจารณาสมการที่ 2.5 เป็นส่วนจริงกับส่วนจินตภาพ นั่นคือ $S_{sch}^* = P_{sch} - jQ_{sch}$ จะได้

$$P_{cal,k} = P_{sch,k} = \sum_{i=1}^N |Y_{ki}| |V_i| |V_k| \cos(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.6)$$

$$Q_{cal,k} = Q_{sch,k} = -\sum_{i=1}^N |Y_{ki}| |V_i| |V_k| \sin(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.7)$$

สมการที่ 2.6 และ 2.7 เป็นสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่คำนวณได้ที่บัส k ใด ๆ การคำนวณในลักษณะนี้จะเป็นการคำนวณที่บัสโหลด

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันได้ถูกนำมาประยุกต์เข้ากับการกระจายสมการดังกล่าวด้วยอนุกรมเทเลอร์ดังนี้

$$f(x + \Delta x) = f(x) + f'(x) \Delta x + \frac{f''(x) |\Delta x|^2}{2} + \dots$$

$$+ \frac{f^{(k)}(x) |\Delta x|^k}{k!} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 ค่าอนุกรมตั้งแต่อันดับ 2 ถึง k มีค่าน้อยมาก ประมาณให้มีค่าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 f(x + \Delta x) &= f(x) + f'(x)\Delta x \\
 f(x + \Delta x) - f(x) &= f'(x)\Delta x \\
 \Delta f &= f'(x)\Delta x \\
 \Delta x &= \left(\frac{1}{f'(x)} \right) \Delta f
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

เมื่อนำอนุกรมเทเลอร์ไปใช้ร่วมกับสมการของกำลังไฟฟ้าสมการที่ 2.6 และ 2.7 จะได้สมการการกระจายกำลังไฟฟ้าด้วยอนุกรมเทเลอร์ โดยการคำนวณจะไม่คิดที่บัสสแต็กเนื่องจากเป็นบัสอ้างอิง ซึ่งทราบค่าขนาดของแรงดันและมุมของแรงดันไฟฟ้าแล้ว การคำนวณจะคิดที่บัสโหลดเท่านั้น เนื่องจากยังไม่ทราบค่าขนาดของแรงดันและมุมของแรงดันไฟฟ้า จึงทำการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเทียบกับขนาดของแรงดันและมุมของแรงดันไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ

$$\Delta P_k = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} \right) \Delta \delta_i + \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} \right) \Delta |V_i| \tag{2.10}$$

$$\Delta Q_k = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} \right) \Delta \delta_i + \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial Q_k}{\partial |V_i|} \right) \Delta |V_i| \tag{2.11}$$

จากสมการที่ 2.10 และ 2.11 สามารถกระจายพจน์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \Delta P_1 &= \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \dots + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{N-1}} \Delta \delta_{N-1} \right) + \left(\frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} \Delta |V_1| + \frac{\partial P_1}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \dots + \frac{\partial P_1}{\partial |V_{N-1}|} \Delta |V_{N-1}| \right) \\
 \Delta P_2 &= \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \dots + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{N-1}} \Delta \delta_{N-1} \right) + \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_1|} \Delta |V_1| + \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \dots + \frac{\partial P_2}{\partial |V_{N-1}|} \Delta |V_{N-1}| \right) \\
 &\vdots \\
 \Delta P_{N-1} &= \left(\frac{\partial P_{N-1}}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial P_{N-1}}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \dots + \frac{\partial P_{N-1}}{\partial \delta_{N-1}} \Delta \delta_{N-1} \right) + \left(\frac{\partial P_{N-1}}{\partial |V_1|} \Delta |V_1| + \frac{\partial P_{N-1}}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \dots + \frac{\partial P_{N-1}}{\partial |V_{N-1}|} \Delta |V_{N-1}| \right) \\
 \\
 \Delta Q_1 &= \left(\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \dots + \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_{N-1}} \Delta \delta_{N-1} \right) + \left(\frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} \Delta |V_1| + \frac{\partial Q_1}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \dots + \frac{\partial Q_1}{\partial |V_{N-1}|} \Delta |V_{N-1}| \right) \\
 \Delta Q_2 &= \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \dots + \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_{N-1}} \Delta \delta_{N-1} \right) + \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_1|} \Delta |V_1| + \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \dots + \frac{\partial Q_2}{\partial |V_{N-1}|} \Delta |V_{N-1}| \right) \\
 &\vdots \\
 \Delta Q_{N-1} &= \left(\frac{\partial Q_{N-1}}{\partial \delta_1} \Delta \delta_1 + \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \dots + \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial \delta_{N-1}} \Delta \delta_{N-1} \right) + \left(\frac{\partial Q_{N-1}}{\partial |V_1|} \Delta |V_1| + \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \dots + \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial |V_{N-1}|} \Delta |V_{N-1}| \right)
 \end{aligned}$$

สามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{N-1} \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{N-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial |V_{N-1}|} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{N-1}} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_{N-1}|} \\ \vdots & \vdots & J_1 & \vdots & \vdots & \vdots & J_2 & \vdots \\ \frac{\partial P_{N-1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_{N-1}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_{N-1}}{\partial \delta_{N-1}} & \frac{\partial P_{N-1}}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_{N-1}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_{N-1}}{\partial |V_{N-1}|} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_{N-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_{N-1}|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_{N-1}} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_{N-1}|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial \delta_{N-1}} & \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_{N-1}}{\partial |V_{N-1}|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_{N-1} \\ \Delta |V_1| \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_{N-1}| \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

หรือ

Mismatches (power) = Jacobian \times Corrections (voltage)

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

จากสมการเมตริกซ์ที่ 2.12 สามารถหาสมาชิกของจาโคเบียนได้ดังนี้

$$\text{เมตริกซ์ย่อย } J_1: \quad \text{โดยที่ } [J_1] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & \dots & J_{1(N-1)} \\ J_{21} & J_{22} & \dots & J_{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{(N-1)1} & J_{(N-1)2} & \dots & J_{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ 2.6 จะได้

$$J_{ki}^1 = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = \frac{\partial \sum_{i=1}^N |Y_{ki} V_i V_k| \cos(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k)}{\partial \delta_i} = -|Y_{ki} V_i V_k| \sin(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.13)$$

$$J_{kk}^1 = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \frac{\partial \sum_{i=1}^N |Y_{ki} V_i V_k| \cos(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k)}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N |Y_{ki} V_i V_k| \sin(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.14)$$

เมตริกซ์ย่อย J_2 : จากสมการที่ 2.6 จะได้ว่า

$$J_{ki}^2 = \frac{\partial P_k}{\partial |V_i|} = |Y_{ki} V_k| \cos(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.15)$$

$$J_{kk}^2 = \frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} = 2|Y_{kk} V_k| \cos(\theta_{kk}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N |Y_{ki} V_k| \cos(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.16)$$

เมตริกซ์ย่อย J_3 : จากสมการที่ 2.7 จะได้ว่า

$$J_{ki}^3 = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{ki} V_i V_k| \cos(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.17)$$

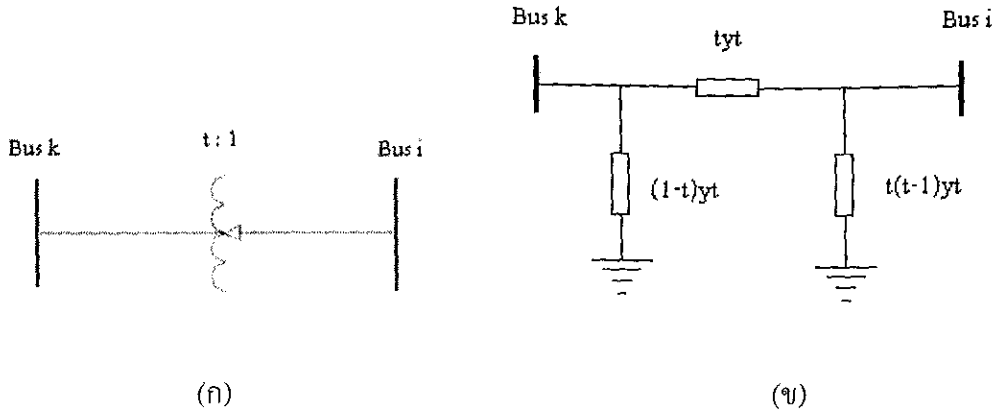
$$J_{kk}^3 = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N |Y_{ki} V_i V_k| \cos(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.18)$$

เมตริกซ์ย่อย J_4 : จากสมการที่ 2.7 จะได้ว่า

$$J_{ki}^4 = \frac{\partial Q_k}{\partial |V_i|} = -|Y_{ki} V_k| \sin(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.19)$$

$$J_{kk}^4 = \frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} = -2|Y_{kk} V_k| \sin(\theta_{kk}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N |Y_{ki} V_i| \sin(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (2.20)$$

ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าขั้นตอนที่สำคัญจะต้องมีการหาบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์ ซึ่งโดยทั่วไประบบไฟฟ้ากำลังจะมีหม้อแปลงต่อเชื่อมอยู่ในระบบ ดังนั้น ในการคำนวณจะต้องพิจารณาในส่วนของหม้อแปลงที่ต่ออยู่ระหว่างบัส k และบัส i ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถสรุปสมการคำนวณดังนี้



รูปที่ 2.2 แบบจำลองของหม้อแปลง

$$Y_{ki}^{(new)} = Y_{ki}^{(old)} + (-ty_t) \tag{2.21}$$

$$Y_{kk}^{(new)} = Y_{kk}^{(old)} + (1-t)y_t \tag{2.22}$$

$$Y_{ii}^{(new)} = Y_{ii}^{(old)} + t(t-1)y_t \tag{2.23}$$

เมื่อ $Y_{ki}^{(new)}$ คือ แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่ตำแหน่งแถวที่ k หลักที่ i ที่คิดเห็นของหม้อแปลง
 y_t คือ แอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส k และบัส i
 t คือ แท้ปของหม้อแปลง

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าจะต้องคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้นและกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่งด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

จาก $S = V \cdot I^*$
 จะได้ $S_{flow,ki} = \{V_k^* (V_k - V_i) y_{ki} + V_k^* (V_{kj} H_{ki})\}^*$ (2.31)

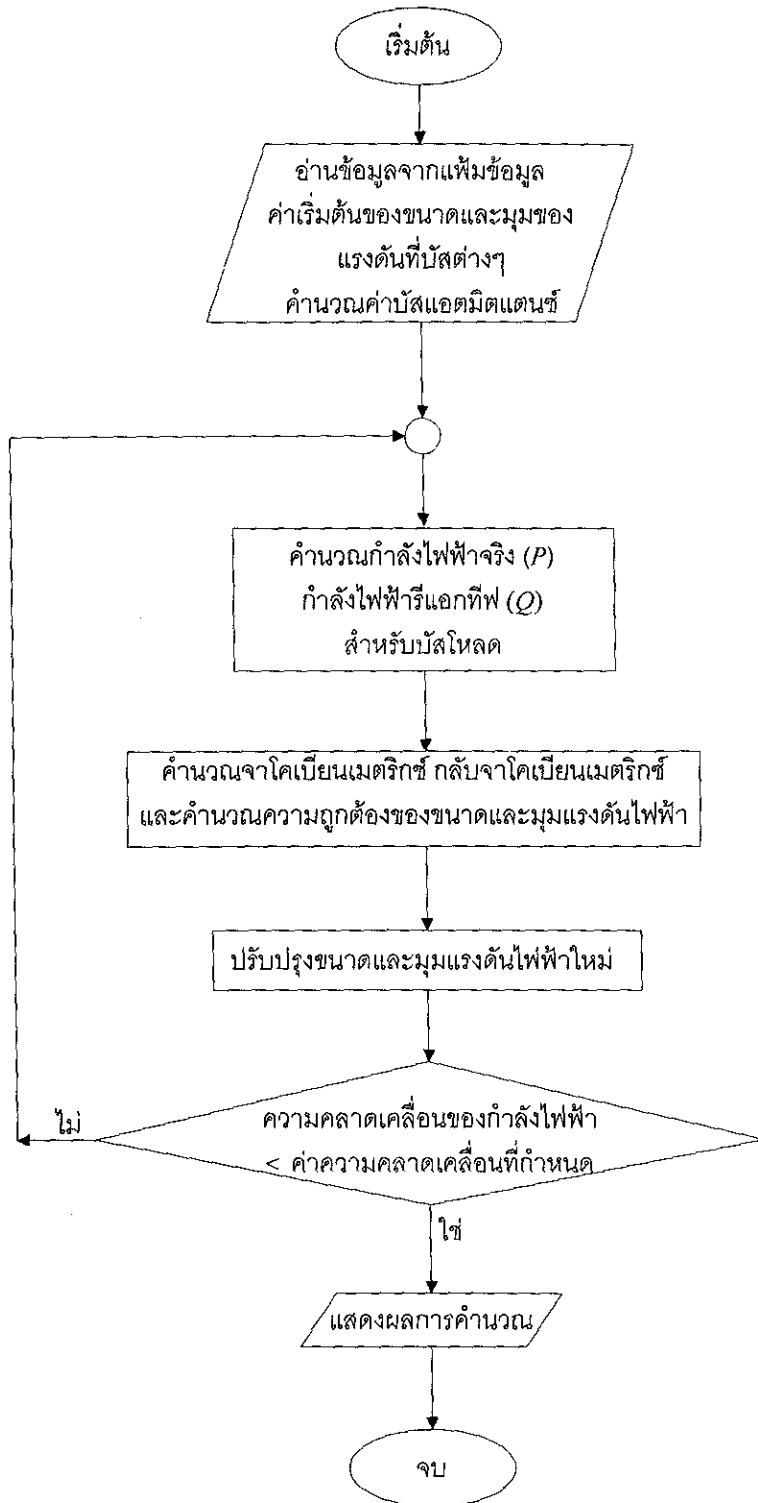
และ $P_{loss,ki} = \text{real}(S_{flow,ki} + S_{flow,ik})$ (2.32)

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อการทำซ้ำครั้งแรกและครั้งต่อไป
2. กำหนดค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit system)

3. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟสำหรับบัสโหลด ขนาดแรงดันไฟฟ้าสำหรับบัสควบคุมแรงดัน และความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า ΔP , ΔQ และขนาดแรงดันไฟฟ้า $\Delta|V|$ ที่บัสที่พิจารณา
4. คำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์ $J_1 - J_4$
5. คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนขนาดแรงดันไฟฟ้า $\Delta|V|$ และมุมของแรงดันไฟฟ้า $\Delta\delta$ ที่บัสที่พิจารณา
6. เปลี่ยนค่าโดยทำการปรับปรุงค่า $\Delta|V|$ และ $\Delta\delta$ ใหม่ ดังนี้ $V^{(k+1)} = V^{(k)} + \Delta|V|^{(k)}$ และ $\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta\delta^{(k)}$
7. ตรวจสอบค่า $\Delta|V|$ ถ้า $\Delta|V|$ มีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ (เช่น ความคลาดเคลื่อน = 1×10^{-6} เป็นต้น) ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่ แต่ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้คำนวณในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป
8. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบไฟฟ้า

สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ดังแผนภาพการทำงานในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิม

2.3 สรุป

บทนี้นำเสนอการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิม เพื่อใช้เป็นระเบียบวิธีการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ามาตรฐานสำหรับประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งได้อธิบายอย่างละเอียดในบทที่ 3 และบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 3

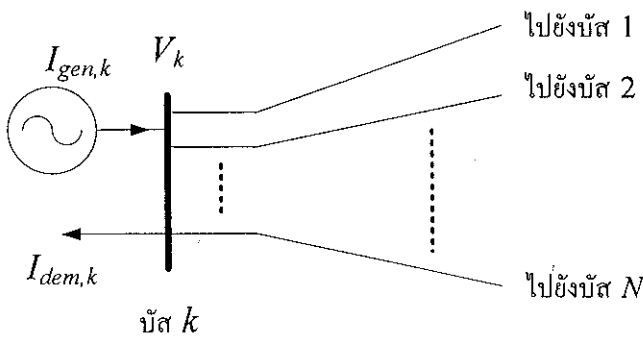
การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

3.1 ความนำ

ถึงแม้ว่าการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมจะมีประสิทธิภาพสูง และใช้เป็นมาตรฐานในตำราทางด้านวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังอย่างกว้างขวาง ความไม่เป็นเชิงเส้นของสมการกำลังไฟฟ้าทำให้การโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความซับซ้อนและทำความเข้าใจได้ยาก งานวิจัยนี้ได้แสดงรูปแบบของการคำนวณการไหลกำลังไฟฟารูปแบบใหม่ที่อาศัยสมการตั้งต้นเป็นสมการกระแสไฟฟ้าแทนที่สมการกำลังไฟฟ้า การเปลี่ยนรูปสมการจากสมการกำลังไฟฟ้าเป็นสมการกระแสไฟฟ้าและการหาสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียนใหม่ แสดงให้เห็นว่าถึงแม้รูปแบบของสมการจะเปลี่ยนแปลงไป แต่วิธีการนี้ยังมีลักษณะคุณสมบัติของการลู่เข้าแบบควอดราติกเช่นเดียวกับวิธีการนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิม การพัฒนาทางเลือกใหม่สำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้านี้คาดว่า จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณ และลดความซับซ้อนของการโปรแกรมคอมพิวเตอร์ลงได้ในระบบหนึ่ง

3.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่

กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสทั้งสิ้น N บัส โดยที่กำหนดให้บัส 1 บัส มีขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่าบัสอ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อบัสสลैค (slack bus)



รูปที่ 3.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่น ๆ

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยการใช้ KCL สมการกระแสไฟฟ้าสมดุล ณ บัส k สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.1 ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป สมการกระแสสมดุลจะถูกเขียนใหม่ในรูปสมการกำลังไฟฟ้าสมดุลดังสมการที่ 3.2

$$\left(I_{\text{gen},k} - I_{\text{dem},k} \right) - \sum_{i=1}^N y_{ki} (V_k - V_i) = 0 \quad (3.1)$$

$$\left(S_{\text{gen},k} - S_{\text{dem},k} \right)^* - V_k^* \sum_{i=1}^N y_{ki} (V_k - V_i) = 0 \quad (3.2)$$

โดยที่

$I_{\text{gen},k}$ และ $I_{\text{dem},k}$ แทนกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่บัส k ตามลำดับ

$S_{\text{gen},k}$ และ $S_{\text{dem},k}$ แทนกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่บัส k ตามลำดับ

V_k แทนเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่บัส k

y_{ki} แทนแอดมิตแตนซ์ที่ต่อระหว่างบัส k และบัส i

* แทนตัวกระทำสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate)

วิธีการที่ศึกษานี้จะใช้การวิเคราะห์หาผลเฉลยจากสมการที่ 3.1 โดยจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการผลรวมเชิงเส้นของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับแอดมิตแตนซ์บัส (bus admittance) ดังสมการที่ 3.3

$$\sum_{i=1}^N Y_{ki} V_i = I_{\text{gen},k} - I_{\text{dem},k} \quad (3.3)$$

โดยที่

Y_{ki} แทนสมาชิกบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (bus admittance matrix) แถวที่ k และหลักที่ i

เนื่องจากโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังนิยามกำหนดด้วยกำลังไฟฟ้ามากกว่ากระแสไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไข กระแสด้านขวามือของสมการที่ 3.3 ต้องเขียนให้อยู่ในรูปสังยุคเชิงซ้อนของอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนต่อเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ 3.4

$$F_k = \sum_{i=1}^N Y_{ki} V_i - \left(\frac{S_{\text{gen},k} - S_{\text{dem},k}}{V_k} \right)^* = 0 \quad (3.4)$$

กำหนดนิยามดังต่อไปนี้

$$F_k = G_k + j H_k \quad (\text{ความคลาดเคลื่อนกระแสไฟฟ้าที่บัส } k)$$

$$\begin{aligned}
 V_k &= |V_k| \angle \delta_k \\
 Y_{ki} &= |Y_{ki}| \angle \theta_{ki} \\
 S_{\text{gen},k} - S_{\text{dem},k} &= S_{\text{sch},k} = |S_{\text{sch},k}| \angle \varphi_k
 \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.4 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 F_k &= \sum_{i=1}^N |V_i Y_{ki}| \angle (\theta_{ki} + \delta_i) - \left| \frac{S_{\text{sch},k}}{V_k} \right| \angle (\delta_k - \varphi_k) \\
 &= \sum_{i=1}^N |V_i Y_{ki}| \left\{ \cos(\theta_{ki} + \delta_i) + j \sin(\theta_{ki} + \delta_i) \right\} \\
 &\quad - \left| \frac{S_{\text{sch},k}}{V_k} \right| \cos(\delta_k - \varphi_k) - j \left| \frac{S_{\text{sch},k}}{V_k} \right| \sin(\delta_k - \varphi_k)
 \end{aligned}$$

นั่นคือ

$$G_k = \sum_{i=1}^N |V_i Y_{ki}| \cos(\theta_{ki} + \delta_i) - \left| \frac{S_{\text{sch},k}}{V_k} \right| \cos(\delta_k - \varphi_k) \quad (3.5)$$

$$H_k = \sum_{i=1}^N |V_i Y_{ki}| \sin(\theta_{ki} + \delta_i) - \left| \frac{S_{\text{sch},k}}{V_k} \right| \sin(\delta_k - \varphi_k) \quad (3.6)$$

สมการที่ 3.5 และ 3.6 คือสมการความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าที่บัส k เมื่อแทนค่าผลเฉลยแรงดันบัสที่แท้จริงของระบบลงไปจะทำให้สมการทั้ง 2 มีค่าเป็นศูนย์ การหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันสามารถกระจายสมการดังกล่าวด้วยอนุกรมเทเลอร์ได้ดังนี้

$$G_k = \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial G_k}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial G_k}{\partial |V_i|} \Delta |V_i| \quad (3.7)$$

$$H_k = \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial H_k}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum_{i=1, i \neq s}^N \frac{\partial H_k}{\partial |V_i|} \Delta |V_i| \quad (3.8)$$

เมื่อ s แทนบัสเล็ก

จากตัวแปรเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่าจำนวน $N - 1$ ตัวแปรและการสร้างสมการความคลาดเคลื่อนของกระแสที่บัสทั้งสิ้น $N - 1$ บัส สมการเพื่อใช้ปรับปรุงผลเฉลยของการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการรวมสมการความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเขียนได้ดังสมการที่ 3.9

$$\begin{bmatrix} G \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial \delta} & \frac{\partial G}{\partial |V|} \\ \frac{\partial H}{\partial \delta} & \frac{\partial H}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.9 สมาชิกของจาโคเบียนเมตริกซ์คำนวณได้ดังนี้

เมตริกซ์ย่อย J_1 : จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$\frac{\partial G_k}{\partial \delta_i} = -|V_i Y_{ki}| \sin(\theta_{ki} + \delta_i) \quad \text{สำหรับ } k \neq i \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial G_k}{\partial \delta_k} = -|V_k Y_{kk}| \sin(\theta_{kk} + \delta_k) + \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k} \right| \sin(\delta_k - \varphi_k) \quad (3.11)$$

เมตริกซ์ย่อย J_2 : จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$\frac{\partial G_k}{\partial |V_i|} = |Y_{ki}| \cos(\theta_{ki} + \delta_i) \quad \text{สำหรับ } k \neq i \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial G_k}{\partial |V_k|} = |Y_{kk}| \cos(\theta_{kk} + \delta_k) + \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k^2} \right| \cos(\delta_k - \varphi_k) \quad (3.13)$$

เมตริกซ์ย่อย J_3 : จากสมการที่ 3.6 จะได้

$$\frac{\partial H_k}{\partial \delta_i} = |V_i Y_{ki}| \cos(\theta_{ki} + \delta_i) \quad \text{สำหรับ } k \neq i \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial H_k}{\partial \delta_k} = |V_k Y_{kk}| \cos(\theta_{kk} + \delta_k) - \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k} \right| \cos(\delta_k - \varphi_k) \quad (3.15)$$

เมตริกซ์ย่อย J_4 : จากสมการที่ 3.6 จะได้

$$\frac{\partial H_k}{\partial |V_i|} = |Y_{ki}| \sin(\theta_{ki} + \delta_i) \quad \text{สำหรับ } k \neq i \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial H_k}{\partial |V_k|} = |Y_{kk}| \sin(\theta_{kk} + \delta_k) + \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k^2} \right| \sin(\delta_k - \varphi_k) \quad (3.17)$$

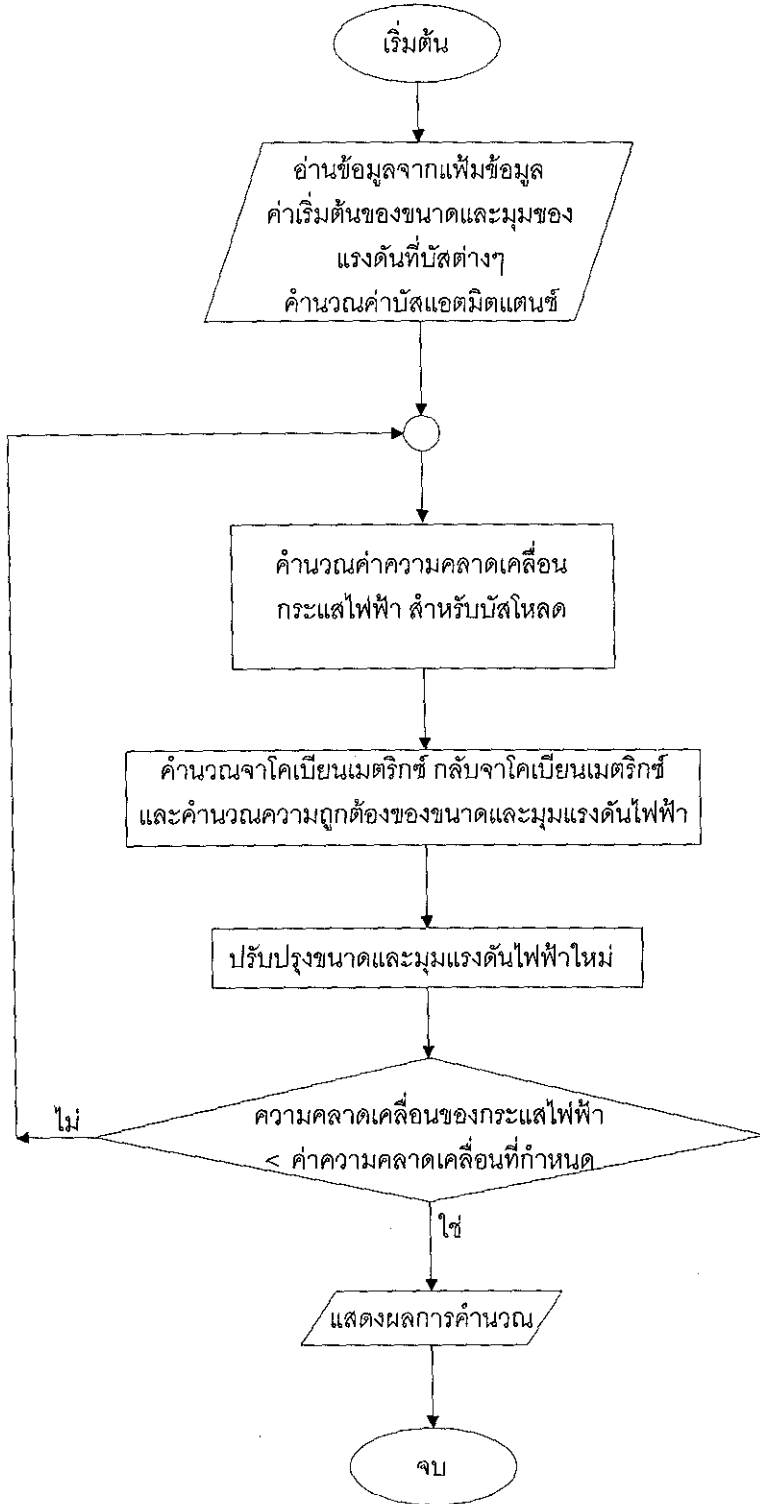
สำหรับการคำนวณบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ $[Y]_{\text{bus}}$ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในสายส่งนั้นสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกันกับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิม

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่าง ๆ เพื่อการทำซ้ำครั้งแรก และครั้งต่อไป
2. คำนวณค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit system)
3. คำนวณความคลาดเคลื่อนกระแสไฟฟ้า G_k และ H_k
4. คำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์ $J_1 - J_4$
5. คำนวณความคลาดเคลื่อนขนาดแรงดันไฟฟ้า $\Delta|V|$ และมุมของแรงดันไฟฟ้า $\Delta\delta$ ที่บัสที่พิจารณา
6. ปรับปรุงค่า $\Delta|V|$ และ $\Delta\delta$ ใหม่ ดังนี้

$$V^{(k+1)} = V^{(k)} + \Delta|V|^{(k)} \quad \text{และ} \quad \delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta\delta^{(k)}$$
7. ตรวจสอบ $\Delta|V|$ ถ้า $\Delta|V|$ มีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ (เช่น ความคลาดเคลื่อน = 1×10^{-6} เป็นต้น) ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่
 ถ้า $\Delta|V|$ มีค่าน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนด ให้คำนวณขั้นตอนที่ 8 ต่อไป
8. คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า

สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันกราฟัสแบบใหม่

3.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ ใช้ระบบทดสอบขนาด 5 บัส 6 บัส และระบบทดสอบของ IEEE 24 บัส และ 30 บัส โดยที่ระบบทั้งสี่มีการใช้โหลดโดยรวม (165 MW, 40 MVar) (510 MW, 90 MVar) (1055 MW, 570 MVar) และ (283.4 MW, 126.2 MVar) ตามลำดับ การทดสอบดำเนินการโดยใช้คอมพิวเตอร์ 3 เครื่องโดยมีคุณสมบัติดังนี้

เครื่องที่ 1 Intel Pentium IV 1.5 GHz, 256 DDR-RAM

เครื่องที่ 2 AMD Athlon (TM) XP 2000plus 1.67 GHz, 256 DDR-RAM

เครื่องที่ 3 Duron 1.2 GHz, 384 DDR-RAM

การทดสอบของโครงการนี้ กำหนดเงื่อนไขการหยุดไว้ที่ค่าความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันมีค่าสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 1×10^{-6} p.u. ซึ่งใช้สำหรับกรณีทดสอบทุกกรณีสำหรับจุดเริ่มต้นของการคำนวณที่ใช้กับระบบทดสอบทั้ง 4 ระบบนี้ได้ใช้จุดเริ่มต้นจุดเดียวกัน โดยกำหนดให้แรงดันบัสเริ่มต้นทุกบัสมีค่า $1.00 + j0.00$ p.u. สำหรับทุกบัสรวมทั้งบัสควบคุมแรงดันด้วย โปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าพัฒนาโดยใช้ MATLAB ผลการทดสอบเป็นดังนี้

3.3.1 ระบบทดสอบ 5 บัส

การทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิม และการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่ โดยกำหนดให้

SNR = วิธีนิวตันราฟสันมาตรฐาน (Standard Newton-Raphson Method)

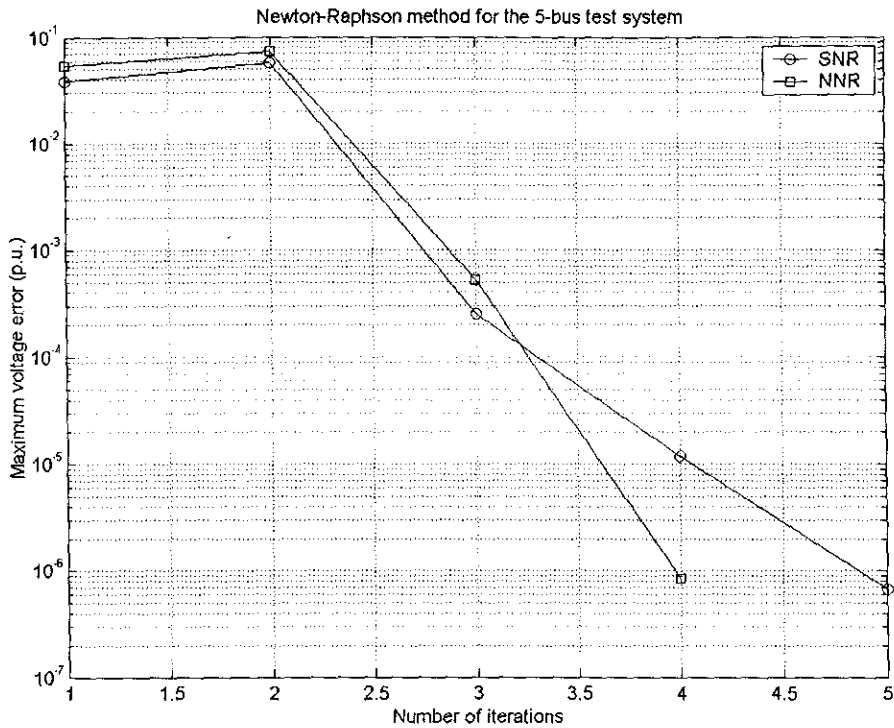
NNR = วิธีนิวตันราฟสันที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Newly Developed Newton-Raphson Method)

ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 3.1 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ 5 บัส

วิธีทดสอบ	จำนวนรอบการค้นหา			เวลาในการประมวลผล (วินาที)			อัตราส่วนเวลา (SNR/NNR)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
เครื่องที่									
SNR	5	5	5	0.0250	0.0156	0.0158	1.5625	1.0196	1.0000
NNR	4	4	4	0.0160	0.0153	0.0158			

คุณสมบัติการลู่เข้าของวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อนำมาใช้ทดสอบกับระบบทดสอบ 5 บัส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 5 บัส คำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาด 5 บัส โดยผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ การทดลองทำการทดสอบกับคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เมื่อพิจารณาที่ละวิธีจะได้ว่า

- เครื่องที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 5 รอบมากกว่าวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีจำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.016 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.025
- เครื่องที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 5 รอบมากกว่าวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีจำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.0153 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.0156 วินาที
- เครื่องที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 5 รอบมากกว่าวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีจำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งสองวิธีเท่ากัน โดยใช้เวลา 0.0158 วินาที

จากกราฟคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 5 บัส พบว่ารูปแบบของกราฟที่ได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยรูปที่ 3.3 เส้นกราฟการลู่เข้าของ SNR (5 รอบ) กับ NNR (4 รอบ) ใกล้เคียงกันมาก

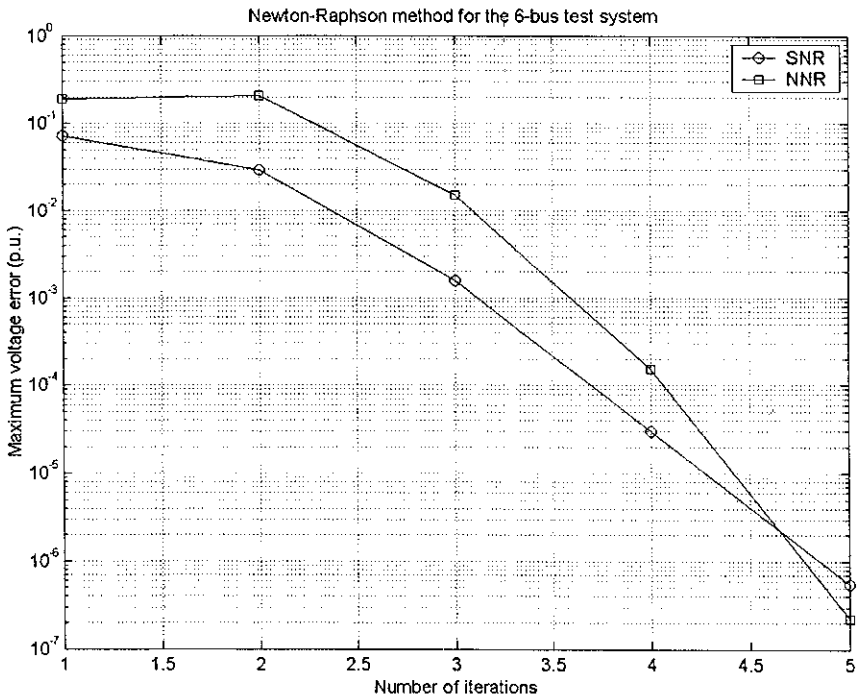
3.3.2 ระบบทดสอบ 6 บัส

ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 3.2 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ 6 บัส

วิธีทดสอบ	จำนวนรอบการคำนวณ			เวลาในการประมวลผล (วินาที)			อัตราส่วนเวลา (SNR/NNR)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SNR	5	5	5	0.0300	0.0154	0.0156	1.0000	1.0065	1.0130
NNR	5	5	5	0.0300	0.0153	0.0154			

คุณสมบัติการลู่เข้าของวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อนำมาใช้ทดสอบกับระบบทดสอบ 6 บัส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 6 บัส คำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาด 6 บัส โดยผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ การทดลองทำการทดสอบกับคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เมื่อพิจารณาทีละวิธีจะได้ว่า

- เครื่องที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 5 รอบเท่ากับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งสองวิธีเท่ากัน โดยใช้เวลา 0.030 วินาที

- เครื่องที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 5 รอบเท่ากับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.0153 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.0154 วินาที
- เครื่องที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 5 รอบเท่ากับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.0154 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.0156 วินาที

จากกราฟคุณสมบัติการดูเข้าของระบบทดสอบ 6 บั๊ต พบว่ารูปแบบของกราฟที่ได้ตามรูปที่ 3.4 มีลักษณะเส้นกราฟห่างกัน โดยอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนแรงดันสูงสุดของวิธี SNR (5 รอบ) จะดีกว่า NNR (5 รอบ)

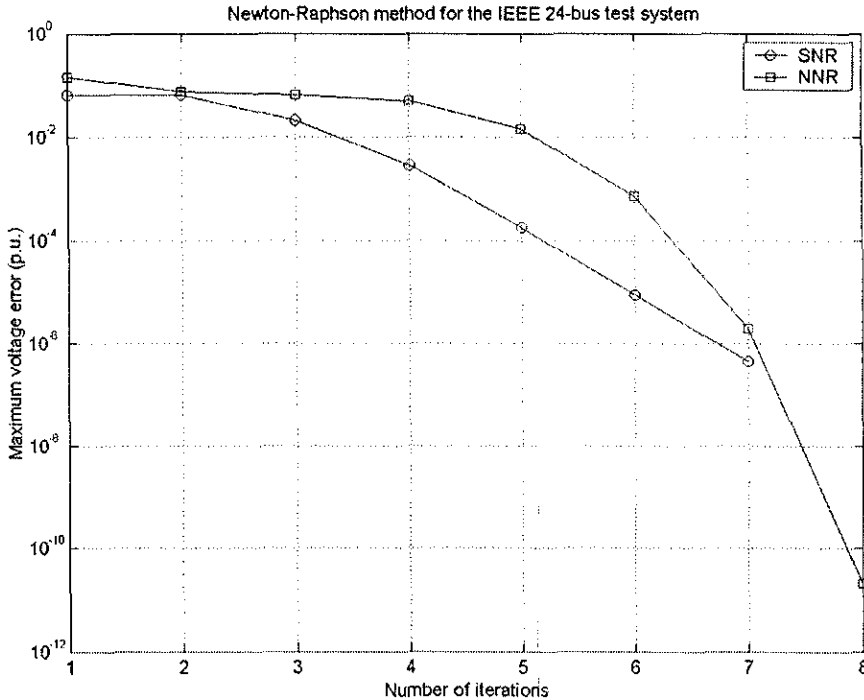
3.3.3 ระบบทดสอบ IEEE 24 บั๊ต

ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 3.3 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 24 บั๊ต

วิธีทดสอบ	จำนวนรอบการค้นหาคำตอบ			เวลาในการประมวลผล (วินาที)			อัตราส่วนเวลา (Standard/Newly)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
เครื่องที่ SNR	7	7	7	0.6160	0.3045	0.3594	1.1249	1.1473	1.1217
NNR	8	8	8	0.5476	0.2654	0.3204			

คุณสมบัติการดูเข้าของวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อนำมาใช้ทดสอบกับระบบทดสอบ 24 บั๊ต ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 24 บัส คำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.3 ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาด 24 บัส โดยผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ การทดลองทำการทดสอบกับคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เมื่อพิจารณาทีละวิธีจะได้ว่า

- เครื่องที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 7 รอบน้อยกว่าวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีจำนวนรอบการคำนวณ 8 รอบ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.5476 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.6160 วินาที
- เครื่องที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 7 รอบน้อยกว่าวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีจำนวนรอบการคำนวณ 8 รอบ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.2654 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.3045 วินาที
- เครื่องที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 7 รอบน้อยกว่าวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีจำนวนรอบการคำนวณ 8 รอบ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.3204 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.3594 วินาที

จากกราฟคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 24 บัส พบว่ารูปแบบของกราฟที่ได้ตามรูปที่ 3.5 เส้นกราฟห่างกันมากโดยอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนแรงดันสูงสุดของวิธี SNR (7 รอบ) จะดีกว่า NNR (8 รอบ)

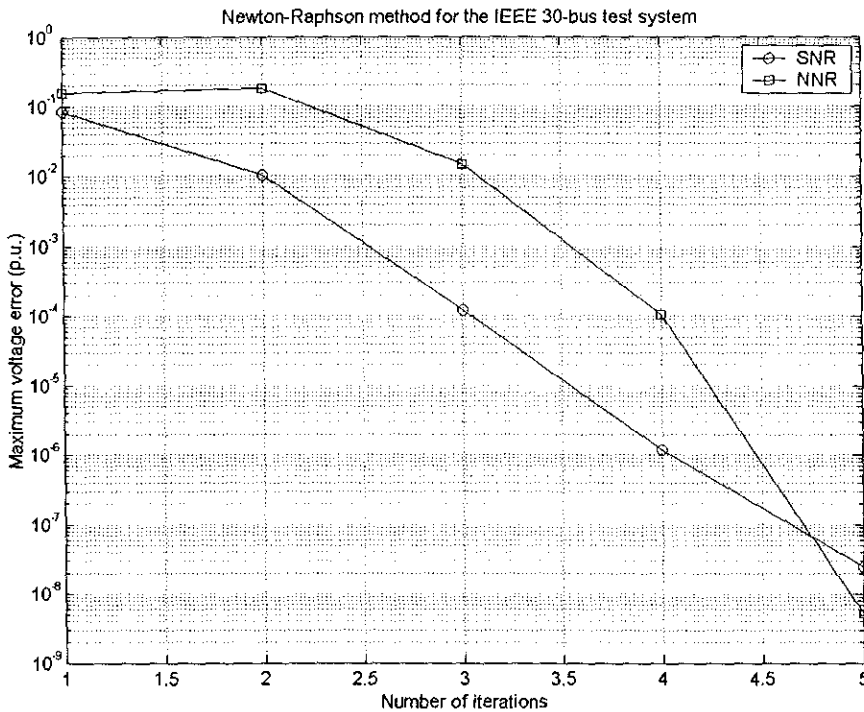
3.3.4 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

วิธีทดสอบ	จำนวนรอบการค้นหา			เวลาในการประมวลผล (วินาที)			อัตราส่วนเวลา (Standard/Newly)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SNR	5	5	5	0.7110	0.3377	0.4000	1.3443	1.3269	1.2862
NNR	5	5	5	0.5289	0.2545	0.3110			

คุณสมบัติการลู่เข้าของวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อนำมาใช้ทดสอบกับระบบทดสอบ 30 บัส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 30 บัส คำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.4 ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาด 30 บัส โดยผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ การทดลองทำการทดสอบกับคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เมื่อพิจารณาทีละวิธีจะได้ว่า

- เครื่องที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 5 รอบเท่ากันกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.5289 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.7110 วินาที

- เครื่องที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 5 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.2545 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.3377 วินาที
- เครื่องที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 5 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.3110 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.4000 วินาที

จากกราฟคุณสมบัติการสูญเสียของระบบทดสอบ 24 บิต พบว่ารูปแบบของกราฟที่ได้ตามรูปที่ 3.6 เส้นกราฟห่างกันมากโดยอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนแรงดันสูงสุดของวิธี SNR (5 รอบ) จะดีกว่า NNR (5 รอบ)

3.4 สรุป

จากผลการทดสอบกับระบบทดสอบทั้ง 4 ระบบ โดยระบบทั้งหมดเป็นระบบส่งจ่าย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณมีจำนวนรอบที่ใกล้เคียงกันและจากผลการทดสอบพบว่า การคำนวณ โดยใช้วิธีนิวตันราฟสันที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีนิวตันราฟสันมาตรฐาน

บทที่ 4

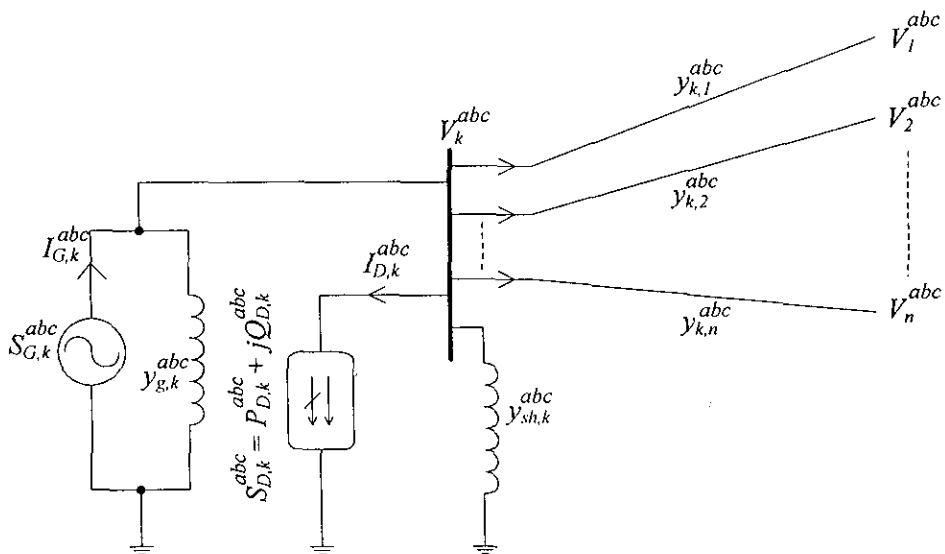
การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ สำหรับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

4.1 ความนำ

การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าในกรณีของระบบส่งจ่าย จะถือว่าระบบส่งจ่ายมีความสมดุลมากจึงสามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้ระบบต่อเฟสได้ ผลที่ได้จากการคำนวณจะถือว่ามีความเท่ากันทุกเฟส ซึ่งแตกต่างจากระบบจำหน่ายที่ความต้านทานสายส่งจะมีผลของความต้านทานระหว่างเฟสมาเกี่ยวข้องด้วย เนื่องจากระบบสายป้อนบางช่วงอาจมีการลากสายไปแค่สองเฟสหรืออาจเพียงเฟสใดเฟสหนึ่งเท่านั้น รวมทั้งปริมาณโหลดที่ใช้ในแต่ละเฟส โดยส่วนมากจะมีค่าไม่เท่ากันด้วย ส่งผลให้กระแสที่ไหลในสายแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากันทำให้แรงดันในแต่ละเฟสของบัสเดียวกันมีค่าไม่เท่ากันทำให้ระบบจำหน่ายไม่สามารถคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าได้ด้วยระบบต่อเฟส ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสามเฟสถูกนำมาใช้แทนระบบต่อเฟส

4.2 การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่

กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนบัสทั้งสิ้น n บัส โดยที่กำหนดให้บัส 1 บัส มีขนาดและมุมของแรงดันมีค่าคงที่และใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการคำนวณซึ่งจะเรียกบัสนี้ว่า บัสอ้างอิง (reference bus) หรือที่รู้จักกันในชื่อบัสสลैค (slack bus)



รูปที่ 4.1 บัส k ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด สายส่งเชื่อมต่ออยู่กับบัสอื่นๆ

พิจารณาบัส k ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยการใช้วิธีวิเคราะห์แบบโนด (nodal analysis) จะได้สมการสมดุลกระแสที่โนด k โดย ดังนี้

$$y_{k,1}^{abc} (V_k^{abc} - V_1^{abc}) + y_{k,2}^{abc} (V_k^{abc} - V_2^{abc}) + \dots + y_{k,n}^{abc} (V_k^{abc} - V_n^{abc}) = I_{G,k}^{abc} - I_{D,k}^{abc} \quad (4.1)$$

หรือ

$$\sum_{i=1}^n y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} = I_{G,k}^{abc} - I_{D,k}^{abc}$$

เนื่องจากโหลดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของกำลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจะได้ว่า

$$f_{I,k}^{abc} = \Delta I_k^{abc} = \left(\frac{S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc}}{V_k^{abc}} \right)^* - \sum_{i=1}^n y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} = 0 \quad (4.2)$$

กำหนดนิยามดังต่อไปนี้

$$S_{G,k}^{abc} = P_{G,k}^{abc} + jQ_{G,k}^{abc}; \quad V_k^{abc} = |V_k^{abc}| \angle \delta_k^{abc}$$

$$S_{D,k}^{abc} = P_{D,k}^{abc} + jQ_{D,k}^{abc}; \quad V_i^{abc} = |V_i^{abc}| \angle \delta_i^{abc}$$

$$Y_{k,i}^{abc} = |Y_{k,i}^{abc}| \angle \theta_{k,i}^{abc}; \quad \Delta I_k^{abc} = I_{sch,k}^{abc} - I_{cal,k}^{abc}$$

$$S_{G,k}^{abc} - S_{D,k}^{abc} = S_{sch,k}^{abc} = |S_{sch,k}^{abc}| \angle \phi_k^{abc}$$

แทนค่าในสมการที่ 4.2 จะได้ความสัมพันธ์ในรูปพิกัดเชิงขั้วดังนี้

$$f_{I,k}^{abc} = I_{sch,k}^{abc} - I_{cal,k}^{abc} = \frac{\left(\frac{P_{G,k}^{abc} - P_{D,k}^{abc}}{|V_k^{abc}| \angle -\delta_k^{abc}} \right) - j \left(\frac{Q_{G,k}^{abc} - Q_{D,k}^{abc}}{|V_k^{abc}| \angle -\delta_k^{abc}} \right)}{|V_k^{abc}| \angle -\delta_k^{abc}} - \sum_{i=1}^n \left(|Y_{k,i}^{abc}| \angle \theta_{k,i}^{abc} \right) \left(|V_i^{abc}| \angle \delta_i^{abc} \right)$$

หรือ

$$f_{I,k}^{abc} = I_{sch,k}^{abc} - I_{cal,k}^{abc} = \frac{\left| S_{sch,k}^{abc} \right| \angle -\varphi_k^{abc}}{\left| V_k^{abc} \right| \angle -\delta_k^{abc}} - \sum_{i=1}^n \frac{\left| Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \right| \angle \left(\theta_{k,i}^{abc} + \delta_i^{abc} \right)}{i}$$

$$f_{I,k}^{abc} = \Delta I_k^{abc} = \frac{\left| S_{sch,k}^{abc} \right|}{\left| V_k^{abc} \right|} \angle \left(-\varphi_k^{abc} + \delta_k^{abc} \right) - \sum_{i=1}^n \frac{\left| Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \right| \angle \left(\theta_{k,i}^{abc} + \delta_i^{abc} \right)}{i}$$

กำหนดให้ $I_{sch,k}^{abc} = F_{sch,k}^{abc} + jH_{sch,k}^{abc}$ และ $I_{cal,k}^{abc} = F_{cal,k}^{abc} + jH_{cal,k}^{abc}$

$$\Delta I_k^{abc} = \left(F_{sch,k}^{abc} - F_{cal,k}^{abc} \right) + j \left(H_{sch,k}^{abc} - H_{cal,k}^{abc} \right)$$

จะได้ว่า

$$= \frac{\left| S_{sch,k}^{abc} \right|}{\left| V_k^{abc} \right|} \angle \left(-\varphi_k^{abc} + \delta_k^{abc} \right) - \sum_{i=1}^n \frac{\left| Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \right| \angle \left(\theta_{k,i}^{abc} + \delta_i^{abc} \right)}{i}$$

กำหนดให้ $\Delta F_k^{abc} = F_{sch,k}^{abc} - F_{cal,k}^{abc}$ และ $\Delta H_k^{abc} = H_{sch,k}^{abc} - H_{cal,k}^{abc}$

จะได้ว่า

$$\Delta F_k^{abc} = \text{real} \left\{ \Delta I_k^{abc} \right\} = f_{F,k}^{abc}$$

$$\Delta H_k^{abc} = \text{im} \left\{ \Delta I_k^{abc} \right\} = f_{H,k}^{abc}$$

ใช้วิธีการวนรอบของนิวตันราฟสันประมาณผลเฉลยของระบบสมการที่รอบการคำนวณที่ $k+1$ ใดๆจะได้

$$f_{F,k+1}^{abc} = \Delta F_{k+1}^{abc} = \Delta F_k^{abc} + \left[\nabla f_{F,k}^{abc} \right]^T \cdot \Delta X^{abc} = 0$$

$$\Delta F_k^{abc} = - \left[\nabla f_{F,k}^{abc} \right]^T \cdot \Delta X^{abc}$$

เมื่อ $X = \left[\delta^{abc} \quad \left| V^{abc} \right| \right]^T$ นั่นคือ

$$\begin{aligned}\Delta F_k^{abc} &= - \left(\frac{\partial f_{F,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial f_{F,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \right) \\ &= - \frac{\partial (-f_{F,k}^{abc})}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial (-f_{F,k}^{abc})}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}|\end{aligned}$$

เนื่องจาก

$$f_{F_n,k}^{abc} = -f_{F,k}^{abc} = - \begin{pmatrix} F_{sch,k}^{abc} & -F_{cal,k}^{abc} \end{pmatrix} = F_{cal,k}^{abc} - F_{sch,k}^{abc} = \Delta F_k^{abc}$$

นั่นคือ

$$\Delta F_k^{abc} = \frac{\partial f_{F_n,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial f_{F_n,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \quad (4.3)$$

ในการทำงานเดียวกันสำหรับกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะได้

$$\Delta H_k^{abc} = \frac{\partial f_{H_n,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} \Delta \delta^{abc} + \frac{\partial f_{H_n,k}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \Delta |V^{abc}| \quad (4.4)$$

โดยที่

$$\frac{\partial f_{F_n,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} = \sum_{i=1}^n \left| Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \right| \cos \left(\theta_{k,i}^{abc} + \delta_i^{abc} \right) - \frac{\left| S_{sch,k}^{abc} \right|}{|V_k^{abc}|} \cos \left(\delta_k^{abc} - \phi_k^{abc} \right) \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial f_{H_n,k}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} = \sum_{i=1}^n \left| Y_{k,i}^{abc} V_i^{abc} \right| \sin \left(\theta_{k,i}^{abc} + \delta_i^{abc} \right) - \frac{\left| S_{sch,k}^{abc} \right|}{|V_k^{abc}|} \sin \left(\delta_k^{abc} - \phi_k^{abc} \right) \quad (4.6)$$

หรือ

$$\frac{\partial f_{F_n,k}^p}{\partial \delta^{abc}} = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c \left| Y_{k,i}^{p\phi} V_i^{p\phi} \right| \cos \left(\theta_{k,i}^{p\phi} + \delta_i^{p\phi} \right) - \frac{\left| S_{sch,k}^p \right|}{|V_k^p|} \cos \left(\delta_k^p - \phi_k^p \right) \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial f_{Hn,k}^p}{\partial \delta_{k,i}^p} = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c \left| Y_{k,i}^{p\phi} V_i^\phi \right| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} + \delta_i^\phi) - \frac{\left| S_{sch,k}^p \right|}{\left| V_k^p \right|} \sin(\delta_k^p - \phi_k^p) \quad (4.8)$$

โดยที่ $p \in \{a,b,c\}$ และ $\phi \in \{a,b,c\}$

รวมสมการเพื่อสร้างเมตริกซ์สำหรับปรับปรุงผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธีนิวตัน ราบสันที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta F^{abc} \\ \Delta H^{abc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{Fn}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} & \frac{\partial f_{Fn}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \\ \frac{\partial f_{Hn}^{abc}}{\partial \delta^{abc}} & \frac{\partial f_{Hn}^{abc}}{\partial |V^{abc}|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{abc} \\ \Delta |V^{abc}| \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} J_1^{abc} & J_2^{abc} \\ J_3^{abc} & J_4^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{abc} \\ \Delta |V^{abc}| \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.9)$$

เช่นเดียวกับการคำนวณสมาชิกของเมตริกซ์ย่อยจาโคเบียน ตาม ระเบียบวิธีการวนรอบของ นิวตันราบสัน ถ้าให้ บัสที่ m เป็นบัสสแล็กจากสมการที่ 4.9 หลักที่ $k = s$ และ แลวกที่ $k = s$ จะถูก กำจัดออกไปเหลือเมตริกซ์ขนาดเพียง $2(n-1) \times 2(n-1)$ เท่านั้น และสามารถหาสมาชิกของจาโคเบียน ได้ดังนี้

เมตริกซ์ย่อย J_1^{abc} : จากสมการที่ 4.7 จะได้

$$J_{Ikk}^{pp} = \frac{\partial f_{Fn,k}^p}{\partial \delta_k^p} = - \left| Y_{k,k}^{pp} V_k^p \right| \sin(\theta_{k,k}^{pp} + \delta_k^p) + \frac{\left| S_{sch,k}^p \right|}{\left| V_k^p \right|} \sin(\delta_k^p - \phi_k^p) \quad (4.10)$$

$$J_{Iki}^{p\phi} = \frac{\partial f_{Fn,k}^p}{\partial \delta_i^\phi} = - \left| Y_{k,i}^{p\phi} V_i^\phi \right| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (4.11)$$

เมตริกซ์ย่อย J_2^{abc} : จากสมการที่ 4.7 จะได้

$$J_{2kk}^{pp} = \frac{\partial f_{Fn,k}^p}{\partial |V_k^p|} = \left| Y_{k,k}^{pp} \right| \cos(\theta_{k,k}^{pp} + \delta_k^p) + \frac{|S_{sch,k}^p|}{|V_k^p|^2} \cos(\delta_k^p - \phi_k^p) \quad (4.12)$$

$$J_{2ki}^{p\phi} = \frac{\partial f_{Fn,k}^p}{\partial |V_i^\phi|} = \left| Y_{k,i}^{p\phi} \right| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (4.13)$$

เมตริกซ์ย่อย J_3^{abc} : จากสมการที่ 4.8 จะได้

$$J_{3kk}^{pp} = \frac{\partial f_{Hn,k}^p}{\partial \delta_k^p} = \left| Y_{k,k}^{pp} V_k^p \right| \cos(\theta_{k,k}^{pp} + \delta_k^p) - \frac{|S_{sch,k}^p|}{|V_k^p|} \cos(\delta_k^p - \phi_k^p) \quad (4.14)$$

$$J_{3ki}^{p\phi} = \frac{\partial f_{Hn,k}^p}{\partial \delta_i^\phi} = \left| Y_{k,i}^{p\phi} V_i^\phi \right| \cos(\theta_{k,i}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (4.15)$$

เมตริกซ์ย่อย J_4^{abc} : จากสมการที่ 4.8 จะได้

$$J_{4kk}^{pp} = \frac{\partial f_{Hn,k}^p}{\partial |V_k^p|} = \left| Y_{k,k}^{pp} \right| \sin(\theta_{k,k}^{pp} + \delta_k^p) + \frac{|S_{sch,k}^p|}{|V_k^p|^2} \sin(\delta_k^p - \phi_k^p) \quad (4.16)$$

$$J_{4ki}^{p\phi} = \frac{\partial f_{Hn,k}^p}{\partial |V_i^\phi|} = \left| Y_{k,i}^{p\phi} \right| \sin(\theta_{k,i}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad \text{ถ้า } i = k, p \neq \phi \quad (4.17)$$

จากสมการที่ 4.9 สามารถหาผลเฉลยในรอบที่ h+1 โดยการผันกลับ Jacobian จะได้

$$\begin{bmatrix} \delta^{abc} \\ |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta^{abc} \\ |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} \Delta \delta^{abc} \\ \Delta |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h)} = \begin{bmatrix} \delta^{abc} \\ |V^{abc}| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1(h)} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta H \end{bmatrix}^{(h)}$$

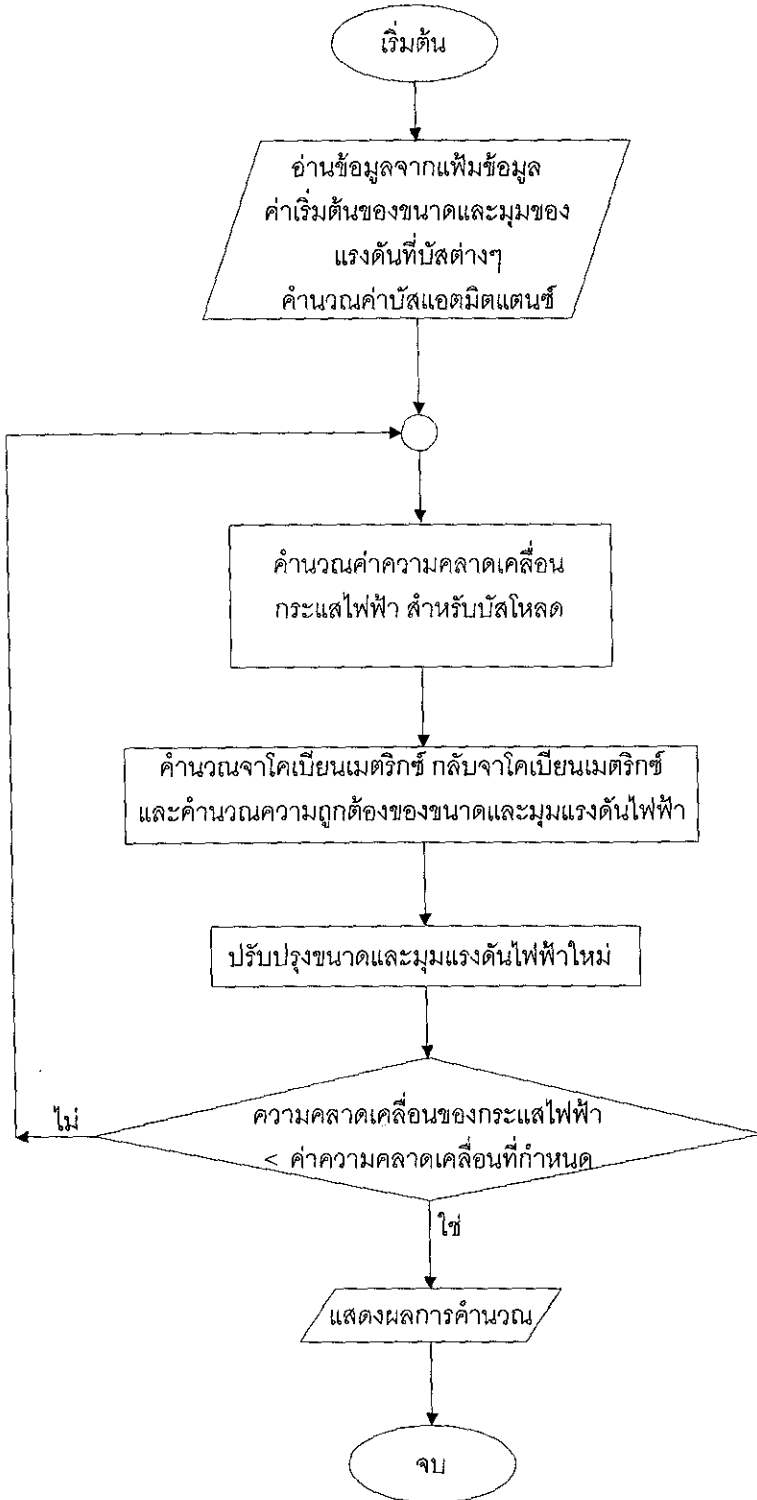
การคำนวณเพื่อปรับปรุงผลเฉลยแรงดันจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าสูงสุด maximum current mismatch: $\max\left(\left|\Delta F_{\text{mis,max}}^{\text{abc}}\right|,\left|\Delta H_{\text{mis,max}}^{\text{abc}}\right|\right)$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (maximum error allowance: ε_{tol}) หรือ

$$\max\left(\left|\Delta F_{\text{mis,max}}^{\text{abc}}\right|,\left|\Delta H_{\text{mis,max}}^{\text{abc}}\right|\right) < \varepsilon_{\text{tol}}$$

สรุปขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ เพื่อการทำซ้ำครั้งแรกและครั้งต่อไป
2. คำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ $Y_{\text{bus}}^{\text{abc}}$ ในรูประบบต่อหน่วย (per-unit-system)
3. คำนวณความคลาดเคลื่อนกระแสไฟฟ้า สำหรับบัสโหนด (ΔF_k^{abc} และ ΔH_k^{abc})
4. คำนวณค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ $J_1 - J_4$
5. คำนวณผลเฉลยของแรงดัน $\Delta \delta_k^{\text{abc}}$ และ $\Delta |V_k^{\text{abc}}|$ ที่บัสทุกบัส
6. คำนวณ δ_k^{abc} และ $|V_k^{\text{abc}}|$ ค่าใหม่โดยรวม $\Delta \delta_k^{\text{abc}}$ และ $\Delta |V_k^{\text{abc}}|$ กับค่าเก่า
7. ตรวจสอบค่า ΔF_k^{abc} และ ΔH_k^{abc} หรือค่า $\Delta \delta_k^{\text{abc}}$ และ $\Delta |V_k^{\text{abc}}|$ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้กลับไปคำนวณที่ขั้นตอนที่ 3 ใหม่
8. ถ้า ΔF_k^{abc} และ ΔH_k^{abc} หรือค่า $\Delta \delta_k^{\text{abc}}$ และ $\Delta |V_k^{\text{abc}}|$ มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ให้ยุติการคำนวณรอบและแสดงผลที่ทำการคำนวณได้

สามารถอธิบายอัลกอริทึมของโปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ได้ดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่

4.3 ผลการทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ ใช้ระบบทดสอบขนาด 10 บัส 25 บัส ระบบทดสอบ IEEE 37 บัส IEEE 118 บัส และระบบทดสอบ SUT feeder 159 บัส โดยระบบทดสอบทั้ง 5 ระบบมีการใช้โหลดโดยรวมดังนี้

ระบบ 10 บัส : เฟส A (450 kW, 300 kVar) เฟส B (200 kW, 100 kVar)

เฟส C (175 kW, 75 kVar)

ระบบ 25 บัส : เฟส A (513.3 kW, 385 kVar) เฟส B (473.3 kW, 355 kVar)

เฟส C (493.3 kW, 370 kVar)

ระบบ 37 บัส : เฟส A (727 kW, 357 kVar) เฟส B (639 kW, 314 kVar)

เฟส C (1091 kW, 530 kVar)

ระบบ 118 บัส : เฟส A (1420 kW, 775 kVar) เฟส B (915 kW, 515 kVar)

เฟส C (1155 kW, 635 kVar)

ระบบ 159 บัส : เฟส A (1361.44 kW, 659.39 kVar) เฟส B (1361.44 kW, 659.39 kVar)

เฟส C (1468.87 kW, 711.42 kVar)

ในการทดสอบดำเนินการ โดยใช้คอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง โดยมีคุณสมบัติดังนี้

เครื่องที่ 1 Intel Pentium IV 2.4 GHz, 512 DDR-RAM

เครื่องที่ 2 AMD Athlon(tm) 64 Processor 1.81 GHz 1.00 GB of RAM

เครื่องที่ 3 AMD Athlon(tm) 64 Processor 1.81 GHz 512 GB of RAM

การทดสอบของโครงการนี้ กำหนดเงื่อนไขการหยุดไว้ที่ค่าความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันมีค่าสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 1×10^{-6} p.u. ซึ่งใช้สำหรับกรณีทดสอบทุกกรณีสำหรับจุดเริ่มต้นของการคำนวณที่ใช้กับระบบทดสอบทั้ง 5 ระบบนี้ได้ใช้จุดเริ่มต้นจุดเดียวกัน โดยกำหนด ให้แรงดันบัสเริ่มต้นทุกบัสมีค่าเป็น $1 \angle 0^\circ$ สำหรับเฟส a $1 \angle -120^\circ$ สำหรับเฟส b และ $1 \angle 120^\circ$ สำหรับเฟส c โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าพัฒนาโดยใช้ MATLAB ผลการทดสอบเป็นดังนี้

4.3.1 ระบบทดสอบ 10 บัส

การทดสอบจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่ โดยกำหนดให้

SNR = วิธีนิวตันราฟสันมาตรฐาน (Standard Newton-Raphson Method)

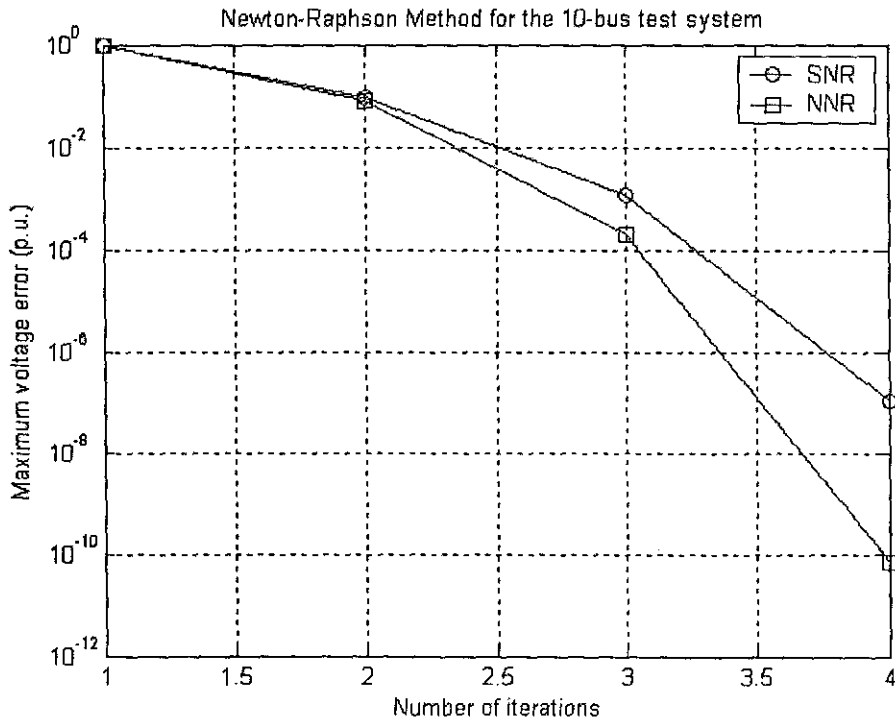
NNR = วิธีนิวตันราฟสันที่พัฒนาขึ้นใหม่ (Newly Developed Newton-Raphson Method)

ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ 10 บัส

วิธีทดสอบ	จำนวนรอบการค้นหา			เวลาในการประมวลผล (วินาที)			อัตราส่วนเวลา (SNR/NNR)		
	เครื่องที่ 1	2	3	1	2	3	1	2	3
SNR	4	4	4	0.2500	0.1720	0.1900	1.0638	1.0000	1.0556
NNR	4	4	4	0.2350	0.1720	0.1800			

คุณสมบัติการลู่เข้าของวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อนำมาใช้ทดสอบกับระบบทดสอบ 10 บัส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 10 บัส คำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาด 10 บัส โดยผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ การทดลองทำการทดสอบกับคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เมื่อพิจารณาทีละวิธีจะได้ว่า

- เครื่องที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.2350 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.2500 วินาที

- เครื่องที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งสองวิธีเท่ากัน โดยใช้เวลา 0.1720 วินาที
- เครื่องที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.1800 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.1900 วินาที

จากกราฟคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 10 บั๊ส พบว่ารูปแบบของกราฟที่ได้ตามรูปที่ 4.3 เส้นกราฟห่างกันมากโดยอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนแรงดันสูงสุดของวิธี NNR (4 รอบ) จะดีกว่า SNR (4 รอบ)

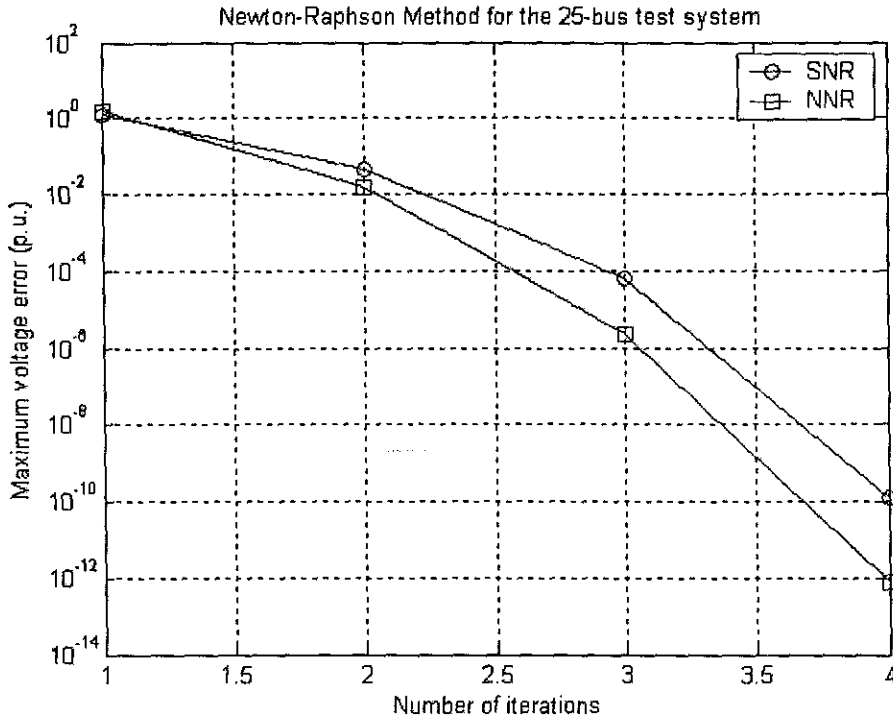
4.3.2 ระบบทดสอบ 25 บั๊ส

ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ 25 บั๊ส

วิธีทดสอบ เครื่องที่	จำนวนรอบ การค้นหา			เวลาในการประมวลผล (วินาที)			อัตราส่วนเวลา (SNR/NNR)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SNR	4	4	4	0.3600	0.2340	0.2800	1.1538	1.0685	1.2174
NNR	4	4	4	0.3120	0.2190	0.2300			

คุณสมบัติการลู่เข้าของวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อนำมาใช้ทดสอบกับระบบทดสอบ 25 บั๊ส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 25 บัส คำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาด 25 บัส โดยผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ การทดลองทำการทดสอบกับคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เมื่อพิจารณาทีละวิธีจะได้ว่า

- เครื่องที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.3120 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.3600 วินาที
- เครื่องที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.2190 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.2340 วินาที
- เครื่องที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.2300 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.2800 วินาที

จากกราฟคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 25 บัส พบว่ารูปแบบของกราฟที่ได้ตามรูปที่ 4.4 เส้นกราฟห่างกันมากโดยอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนแรงดันสูงสุดของวิธี NNR (4 รอบ) จะดีกว่า SNR (4 รอบ)

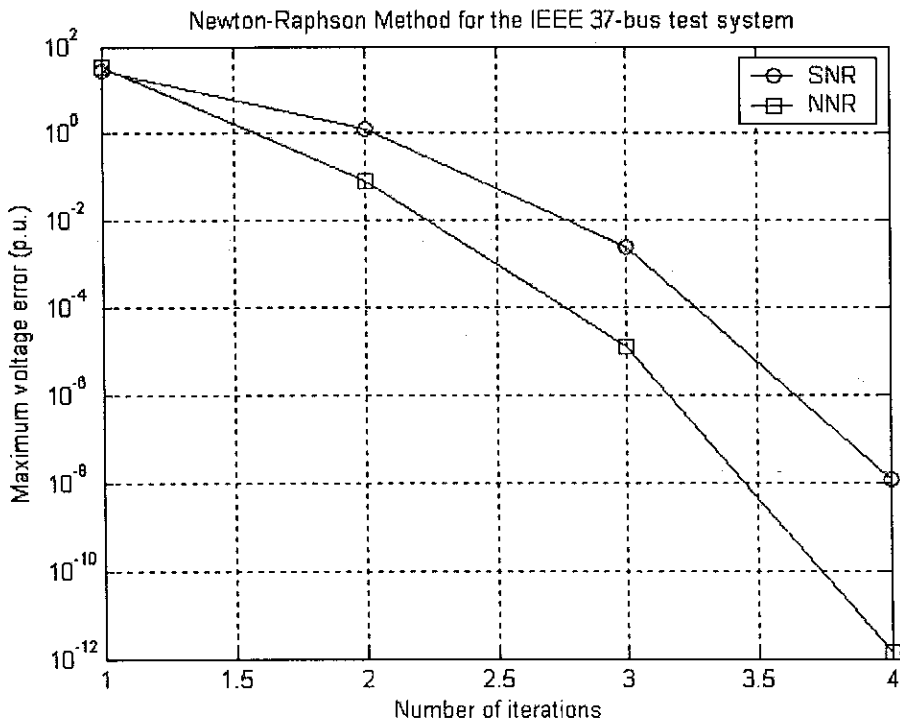
4.3.3 ระบบทดสอบ IEEE 37 บัส

ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 37 บัส

วิธีทดสอบ	จำนวนรอบการค้นหา			เวลาในการประมวลผล (วินาที)			อัตราส่วนเวลา (Standard/Newly)		
	เครื่องที่ 1	2	3	1	2	3	1	2	3
SNR	4	4	4	0.5780	0.3900	0.4910	1.1918	1.1337	1.2590
NNR	4	4	4	0.4850	0.3440	0.3900			

คุณสมบัติการลู่เข้าของวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อนำมาใช้ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 37 บัส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE 37 บัส คำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาด 37 บัส โดยผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ การทดลองทำการทดสอบกับคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เมื่อพิจารณาทีละวิธีจะได้ว่า

- เครื่องที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากันกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.4850 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.5780 วินาที
- เครื่องที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากันกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.3440 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.3900 วินาที
- เครื่องที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากันกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 0.3900 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 0.4910 วินาที

จากกราฟคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 37 บัส พบว่ารูปแบบของกราฟที่ได้ตามรูปที่ 4.5 เส้นกราฟห่างกันมากโดยอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนแรงดันสูงสุดของวิธี NNR (4 รอบ) จะดีกว่า SNR (4 รอบ)

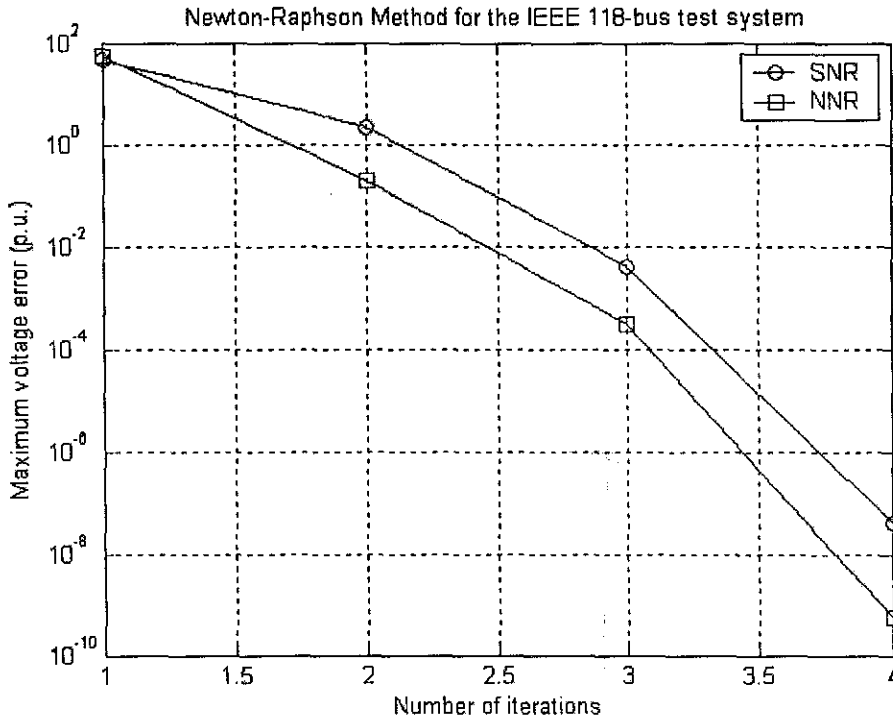
4.3.4 ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส

ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ IEEE 118 บัส

วิธีทดสอบ / เครื่องที่	จำนวนรอบการค้นหา			เวลาในการประมวลผล (วินาที)			อัตราส่วนเวลา (Standard/Newly)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
SNR	4	4	4	3.3910	2.5780	3.0640	1.1364	1.1302	1.1166
NNR	4	4	4	2.9840	2.2810	2.7440			

คุณสมบัติการลู่เข้าของวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อนำมาใช้ทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 118 บัส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 คุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ IEEE 118 บัส คำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาด 118 บัส โดยผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ การทดลองทำการทดสอบกับคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เมื่อพิจารณาทีละวิธีจะได้ว่า

- เครื่องที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 2.9840 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 3.3910 วินาที
- เครื่องที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 2.2810 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 2.5780 วินาที
- เครื่องที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับกับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 2.7440 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 3.0640 วินาที

จากกราฟคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 118 บัส พบว่ารูปแบบของกราฟที่ได้ตามรูปที่ 4.6 เส้นกราฟห่างกันมากโดยอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนแรงดันสูงสุดของวิธี NNR (4 รอบ) จะดีกว่า SNR (4 รอบ)

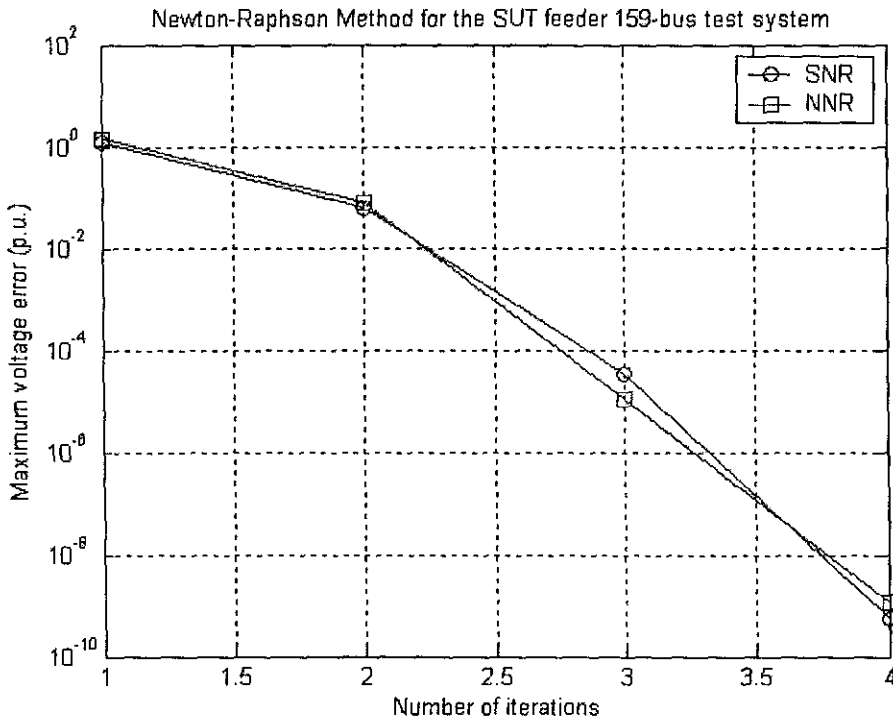
4.3.5 ระบบทดสอบ SUT feeder 159 บัส

ผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบ SUT feeder

วิธีทดสอบ	จำนวนรอบการค้นหา			เวลาในการประมวลผล (วินาที)			อัตราส่วนเวลา (Standard/Newly)		
	เครื่องที่ 1	2	3	1	2	3	1	2	3
SNR	4	4	4	9.7180	8.3440	9.5840	1.2030	1.1148	1.1903
NNR	4	4	4	8.0780	7.4850	8.0520			

คุณสมบัติการเข้าสู่ของวิธีการคำนวณทั้ง 2 วิธี เมื่อนำมาใช้ทดสอบกับระบบทดสอบ SUT feeder 159 บัส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 คุณสมบัติการเข้าสู่ของระบบทดสอบ SUT feeder 159 บัส คำนวณด้วยวิธีนิวตันราฟสัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นระบบทดสอบขนาด 159 บัส โดยผลการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ การทดลองทำการทดสอบกับคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เมื่อพิจารณาทีละวิธีจะได้ว่า

- เครื่องที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 8.0780 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 9.7180 วินาที

- เครื่องที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 7.4850 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 8.3440 วินาที
- เครื่องที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า SNR ใช้จำนวนรอบการคำนวณ 4 รอบเท่ากับวิธี NNR ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีใหม่นี้จะเร็วกว่า โดยใช้เวลา 8.0520 วินาที เมื่อเทียบกับวิธี SNR ที่ใช้เวลา 9.5840 วินาที

จากกราฟคุณสมบัติการลู่เข้าของระบบทดสอบ 159 บั๊ส พบว่ารูปแบบของกราฟที่ได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยรูปที่ 4.7 เส้นกราฟการลู่เข้าของ SNR (5 รอบ) กับ NNR (4 รอบ) ใกล้เคียงกันมาก

4.4 สรุป

จากผลการทดสอบกับระบบทดสอบทั้ง 5 ระบบโดยระบบทั้งหมดที่นำมาทดสอบนี้เป็นระบบจำหน่าย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณมีจำนวนรอบที่ใกล้เคียงกันและจากผลการทดสอบพบว่า การคำนวณโดยใช้วิธีนิวตันราฟสันที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีนิวตันราฟสันมาตรฐาน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยใช้พื้นฐานมาจากสมการกระแสสมดุลที่เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้น สมการความคลาดเคลื่อนของกระแสและสมาชิกของจาโคเบียนเมตริกซ์ได้แสดงไว้ในรายงานฉบับนี้แล้ว การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่นี้ ได้พัฒนาขึ้นสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยแยกรายละเอียดของระบบส่งจ่ายไว้ในบทที่ 3 ในขณะที่ระบบจำหน่ายนำเสนอไว้ในบทที่ 4 ดังนั้น ผลการทดสอบสามารถสรุปได้เป็นสองหัวข้อแยกจากกันดังต่อไปนี้

➤ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

จากการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB กับระบบทดสอบ 4 ระบบ พบว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความเร็วของการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบที่เหมือนกัน การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่สามารถคำนวณได้เร็วกว่าวิธีนิวตันราฟสันแบบดั้งเดิมสำหรับระบบทดสอบทั้ง 4 ระบบที่นำมาทดสอบ เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณซับซ้อนน้อยกว่า แต่ว่าอัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนแรงดันสูงสุดของวิธีแบบดั้งเดิมจะดีกว่า แต่จำนวนรอบที่ใช้ในการหาคำตอบมีค่าใกล้เคียงกัน การคำนวณการไหล

➤ การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

จากการทดสอบการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟสไม่สมดุล ด้วยโปรแกรม MATLAB ระบบทดสอบ 5 ระบบ พบว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟสไม่สมดุลนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบที่เหมือนกัน การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟสไม่สมดุลด้วย การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟสไม่สมดุล ด้วยวิธีนิวตันราฟสันมาตรฐาน เวลาที่ใช้ในการคำนวณช้ากว่าการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าแบบ 3 เฟสไม่สมดุล ด้วยวิธีนิวตันราฟสันที่พัฒนาขึ้นใหม่ เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีนิวตันราฟสันมาตรฐาน ทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณน้อยกว่าด้วย จำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณมีค่าต่ำ

กว่าเช่นกัน นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงทรัพยากรของระบบประมวลผลจะมีค่าน้อยกว่าวิธีนิวตันราฟสันมาตรฐาน

จะเห็นได้ว่า การประยุกต์ใช้การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่นี้ ช่วยให้การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าทำได้รวดเร็วและประหยัดหน่วยความจำด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาและพัฒนาคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแบบใหม่นี้ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะ ตลอดจนแนวทางในการทำวิจัยในอนาคต ดังนี้

1. พิจารณาผลกระทบของโหลดต่อคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย เช่น การศึกษาที่สภาวะการจ่ายโหลดเบา โหลดปานกลาง โหลดสูงสุด หรือแม้กระทั่งการคำนวณในสภาวะโหลดเกิน หรือเกิดความผิดพลาด เป็นต้น
2. พิจารณาผลกระทบของลักษณะโครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังต่อคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลย เช่น โครงสร้างระบบไฟฟ้าแบบคอขวด (bottle-neck network)
3. พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ากับระบบขนาดใหญ่ หลายร้อย บัสหรือมากกว่า 1,000 บัส
4. ปรับปรุงสมรรถนะของการคำนวณ โดยใช้เทคนิคการคำนวณเมตริกซ์มากเลขศูนย์ (sparse matrix computation) เข้าช่วย
5. ปรับปรุงสมรรถนะของการคำนวณ โดยใช้เทคนิคการคำนวณแบบขนาน (parallel computing) เข้าช่วย
6. การประยุกต์ใช้งานการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้ากับการวางแผนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง

บรรณานุกรม

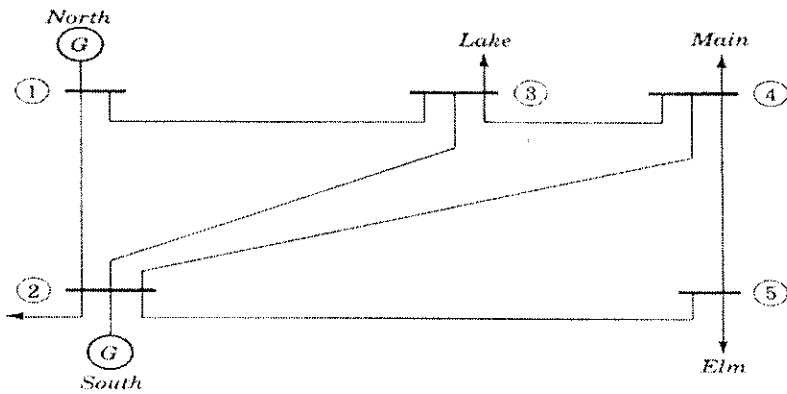
- [1] T.J. Overbye (2004), “Power system simulation: understandings small- and large system operations”, IEEE Power & Energy Magazine, IEEE Power Engineering Society, January 2004
- [2] ธนัตชัย กุลรวรานิชพงษ์, ธวัชชัย กุลรวรานิชพงษ์ และ เฟด็จ เผ่าละออ (2546), “การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันโดยใช้สมการกระแสสมดุล”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (EECON26), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ชะอำ, เพชรบุรี, พฤศจิกายน 2546
- [3] G.W. Stagg and A.H. El-Abiad (1968), Computer methods in power system analysis, McGraw-Hill: Singapore
- [4] H. Saadat (2004), Power system analysis, 2nd edition, McGraw-Hill: Singapore
- [5] R. Natarajan (2002), Computer-aided power system analysis, Marcel Dekker: New York
- [6] B. Stott (1972), “Decoupled Newton load flow”, IEEE Power Apparatus and Systems, Vol. 91, No. 5, pp. 1955–1959
- [7] P.S.N. Rao, K.S.P. Rao and J. Nanda (1982), “An exact fast decoupled load flow method including second order terms in rectangular coordinates”, IEEE Power Apparatus and Systems, Vol. 101, No. 10, pp. 3261–3268

ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

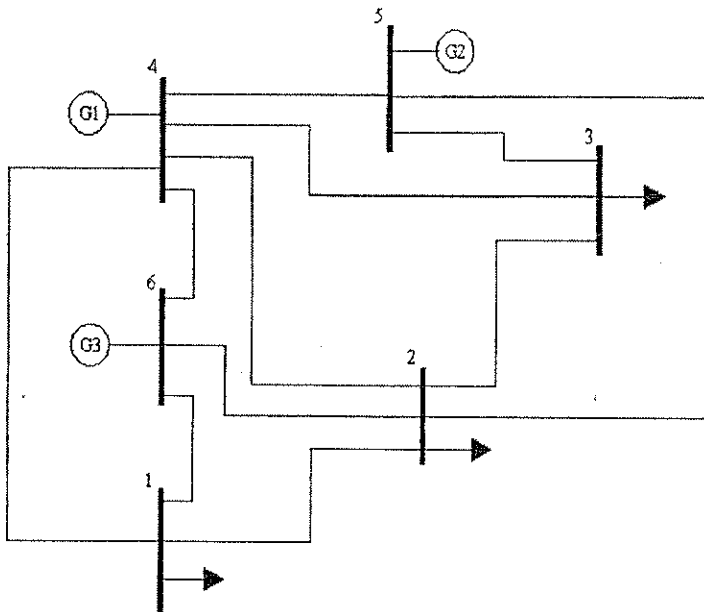
ระบบทดสอบที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยระบบทดสอบของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 4 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 5 บั๊ต 6 บั๊ต และระบบทดสอบ IEEE 24 บั๊ต และ 30 บั๊ต และระบบทดสอบของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า 5 ระบบ คือ ระบบทดสอบ 10 บั๊ต 25 บั๊ต ระบบทดสอบ IEEE 37 บั๊ต และ 118 บั๊ต และระบบทดสอบ มทส - SUT feeder 159 บั๊ต โดยที่ระบบทดสอบทุกระบบมีค่าฐานเท่ากับ 100 kVA รูปแสดงโครงสร้างของระบบทดสอบแสดงได้ดังนี้

1. ระบบทดสอบ 5 บั๊ต



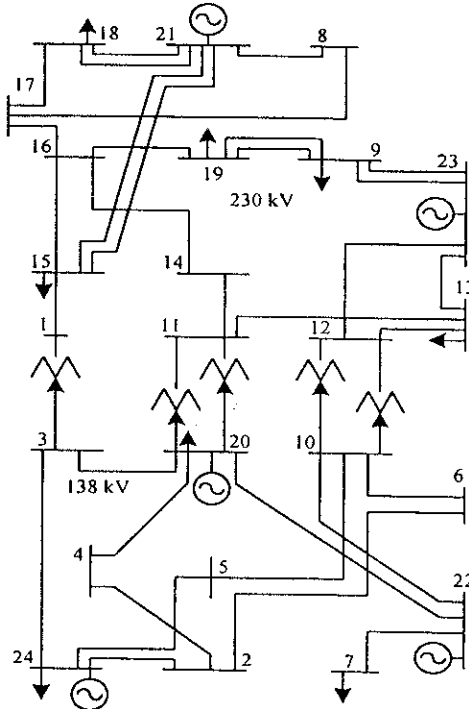
รูปที่ ก.1 ระบบทดสอบ 5 บั๊ต

2. ระบบทดสอบ 6 บั๊ต



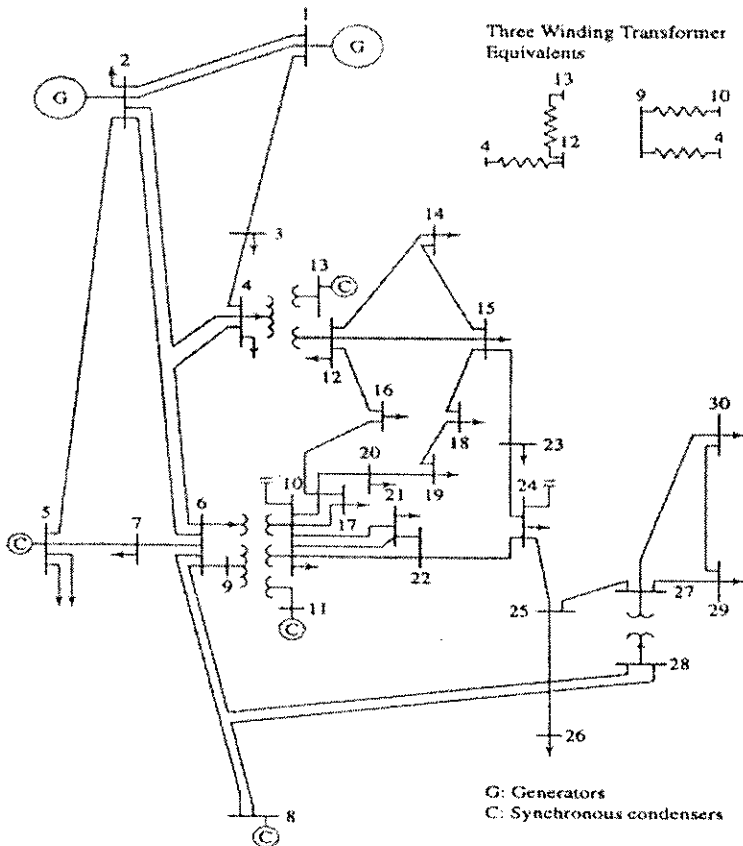
รูปที่ ก.2 ระบบทดสอบ 6 บั๊ต

3. ระบบทดสอบ IEEE 24 บัส



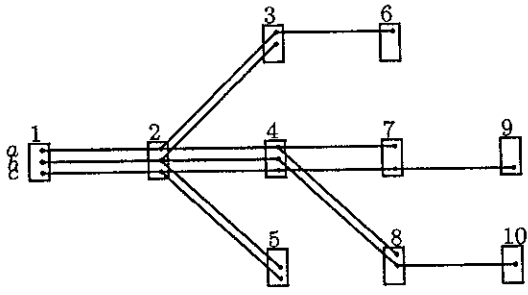
รูปที่ ก.3 ระบบทดสอบ IEEE 24 บัส

4. ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส



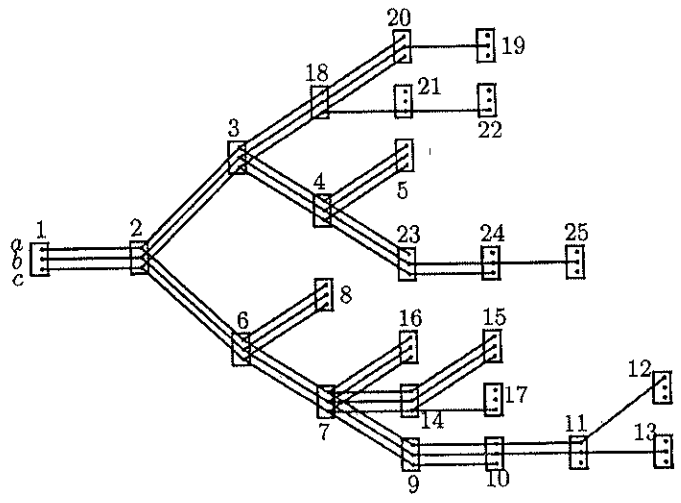
รูปที่ ก.4 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

5. ระบบทดสอบ 10 บัส



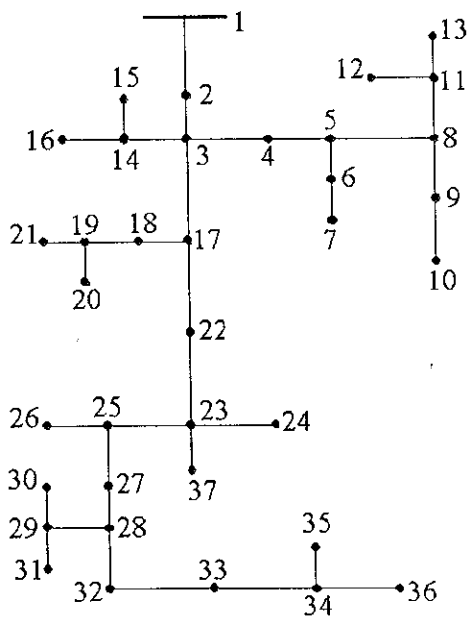
รูปที่ ก.5 ระบบทดสอบ 10 บัส

6. ระบบทดสอบ 25 บัส



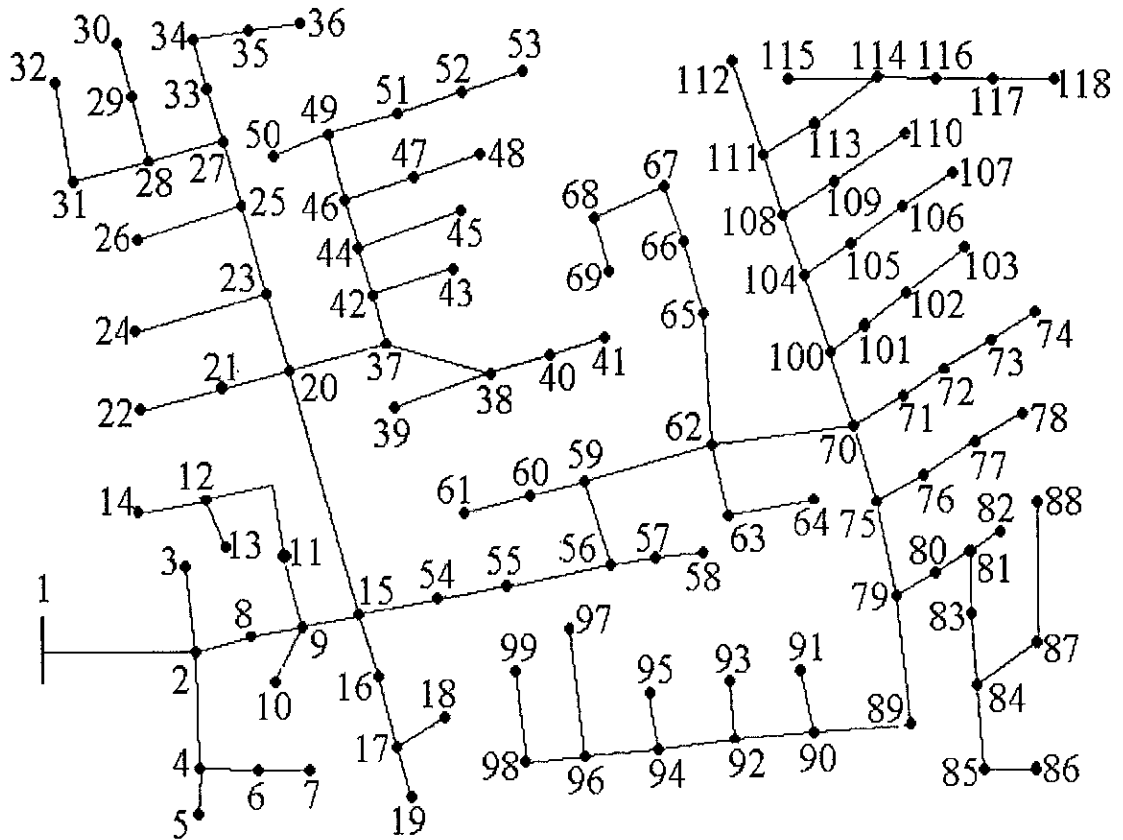
รูปที่ ก.6 ระบบทดสอบ 25 บัส

7. ระบบทดสอบ IEEE 37 โหนด



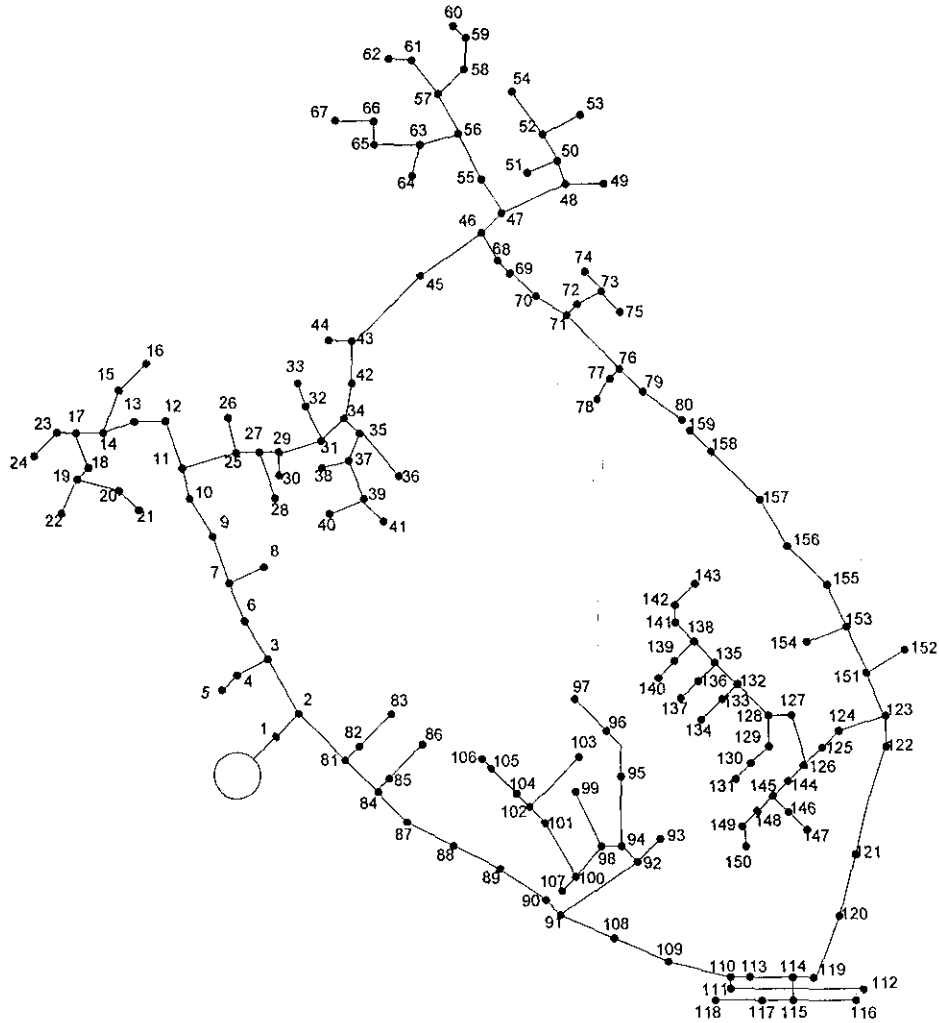
รูปที่ ก.7 ระบบทดสอบ IEEE 37 โหนด

8. ระบบทดสอบ IEEE 118 โหนด



รูปที่ ก.8 ระบบทดสอบ 118 โหนด

9. ระบบทดสอบ มทส - SUT feeder 159 โหนด



รูปที่ ก.9 ระบบทดสอบ มทส - SUT feeder 159 โหนด

ภาคผนวก ข

ผลผลิตจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มีผลิตผลซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

1. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จำนวน 2 เล่ม

- นายทศพล รัตนิมชัย. 2546. การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตันราฟสันแนวทางใหม่ในระบบพิกัดเชิงขั้ว. ปัญหาพิเศษทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- นายนราวุธ พูลสวัสดิ์ และ นายอุดมศักดิ์ ทองกระจาย. 2548. การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่าย 3 เฟสแบบไม่สมดุล. โครงการงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2. บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

2.1 ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- T. Kulworawanichpong, T. Ratniyomchai & B. Borriboon (2005), "An alternative Newton-Raphson power flow method based on current-balanced equations", IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC2005), Innsbruck, Austria, 16 – 18 February 2005
- U. Thongkrajay, N. Poolsawat, T. Ratniyomchai, T. Kulworawanichpong (2006), "Alternative Newton-Raphson Power Flow Calculation in Unbalanced Three-phase Power Distribution Systems", The 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE' 06), Prague, Czech Republic, 12-14 March 2006

2.2 วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- U. Thongkrajay, N. Poolsawat, T. Ratniyomchai, T. Kulworawanichpong (2006), "Unbalanced Three-phase Distribution Power Flow Using Alternative Newton-Raphson Method", The WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 3, Vol 5, pp. 403-410

3. เอกสารประกอบการสอน

ผู้เรียบเรียง รัชต์ชัย กุลวรวานิชพงษ์ (2548)

ชื่อเรื่อง เอกสารประกอบการสอน รายวิชา 429308 การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง
บทที่ 5 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแนวทางใหม่ด้วยสมการกระแสสมดุล
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

457-047

Management of Log Delay Time with Drumming Parameters*A.K. Hyvönen, A.H. Isokangas, K.E.E. Pöllänen, and J.J. Niinimäki (Finland)*

457-175

Implementation of H_2 Optimal Controller with Integral Action*J. Mikleš, M. Fikar, L. Čírka, and L. Dermíšek (Slovak Republic)*

457-142

A Robust 2DOF PID Controller Design for Time-Delay Systems based on H^2 Optimization*T. Kawabe (Japan)*

457-808

Time Delay Effects on the Frequency Domain Description of a Discrete Linear Heating System*M. Sarhan (USA)*

Robotics

457-093

Wave Theory Applied to Vibration Control of Elastic Robot Arms*T.W. Yang and W.J. O'Connor (Ireland)*

457-017

Sliding Mode-Iterative Learning Control Applied to DELTA Parallel Robot*R. Yakhlef and M. Hamerlain (Algeria)*

457-085

New Visual Control for Guidance of a Mobile Robot*L. Sun and S. Uchikado (Japan)*

457-157

A Fixed-Weight RNN Dynamic Controller for Multiple Mobile Robots*M. Oubbati, P. Levi, and M. Schanz (Germany)*

457-023

Experimental Results of an Impedance-Controlled PKM for Assembly Tasks*L. Bruzzone, R.M. Molfino, and M. Zoppi (Italy)*

457-188

Kinematic Model of Three Links Robot for Generating Elliptical Path*M.-H. Hsu, J.-Y. Liu, and L.-C. Hsieh (Taiwan)*

Energy and Power Systems

457-080

An Alternative Newton-Raphson Power Flow Method based on Current-Balanced Equations*T. Kulworawanichpong, T. Ratniyomchai, P. Pao-la-or, and B. Borriboon (Thailand)*

457-018

A Chaotic Mutation Sequence Evolutionary Programming for PID Parameters Optimization of Hydro Turbine Governing Systems*C. Jiang and X. Fang (PRC)*

457-108

Efficient Re-Formulation of Linear Cogeneration Planning Models*R. Lahdelma and A. Rong (Finland)*

457-035

The Modeling of Power Management for Complex System using Normal Distribution*T. Chen, J. Huang, H. Dai, and Huwei (PRC)*

457-051

Transfer Function Analysis of the Direct Methanol Fuel Cell's Response to Dynamic Changes in Cell Current*U. Krewer and K. Sundmacher (Germany)*

457-007

An Incremental Constructive Layer Neural Network based Power System Stabiliser*N.P. Bidargaddi, M. Chetty, and J. Kamruzzaman (Australia)*

457-101

Increasing the Electrical Power of Alternators - Numerical Simulation Approach*E. Ceuca, N. Crainic, and G. Chindriş (Romania)*

457-193

Dynamic Parameter Identification of Induction Motors using Intelligent Search Techniques*T. Kulworawanichpong, K.-L. Areerak, K.-N. Areerak, P. Pao-la-or, D. Puangdownreong, and S. Sujitjorn (Thailand)*

457-158

Model based Fault Detection for Hydraulic Motors*C. Angeli and A. Chatziniolaou (Greece)*

457-075

Modelling and Simulation for Magnetic Flux Distribution in Induction Motors*P. Pao-la-or, S. Peaiyoung, T. Kulworawanichpong, and S. Sujitjorn (Thailand)*

457-810

A Chaos Mutation and Metropolis Selection Evolutionary Programming for Multi-Objective Optimization in Power System*C. Jiang (PRC)*

457-811

A New Forecasting Method for Chaotic Electric Load Series with Higher Embedded Dimension*C. Jiang and C. Wang (PRC)*

Biomedical Applications

[[Conferences](#)] | [Membership](#) | [Publications](#) | [FAQ](#) | [Contact Us](#) | [Search](#) | [Home](#) |

TABLE OF CONTENTS MIC 2005

Innsbruck, Austria
February 16, 2005 to February 18, 2005

Control Systems

- 457-034
Decay Rate Fuzzy Controller Design with Piecewise Lyapunov Functions
M. Bernal and P. Hušek (Czech Republic)
- 457-111
A Study on Discrete Sliding Mode Control: Robustness Analysis and Experimental Investigation
K. Abidi and A. Şabanoviç (Turkey)
- 457-120
LQG Regulators with Prescribed Closed-Loop Poles
T. Fujinaka and S. Omatu (Japan)
- 457-161
A Design of Safety Controller with Damping Excessive Transient Energy Consumption of Vehicle Motion
Y. Yamane (Japan)
- 457-195
Convex Set of Matrices in Switched Systems
F. Rios and E. Rubio (Mexico)
- 457-038
Fractional Order Dynamics in Some Distributed Parameter Systems
J.A. Tenreiro Machado and I.S. Jesus (Portugal)
- 457-167
A Multi-Dimensional Scheme for Controlling Unstable Periodic Orbits in Chaotic Systems
N. Chakravarthy, K. Tsakalis, L.D. Iasemidis, and A. Spanias (USA)
- 457-110
Dynamic Canonical Descent and Densification: A Direct Method for Optimal Control

K. Bousson, S.D. Correia, and M.E. Baltazar (Portugal)

457-164
Properties of State-Feedback: Explained by Transfer Function Representations
Cs. Bányász and L. Keviczky (Hungary)

457-011
A Frequency Response based Design of Suboptimal Reduced Order Controller
M. Chetty (Australia)

457-134
IMC based, Robust PID Controller Tuning for SUT Building Energy Management System
M. Fardadi, A. Seik Ghafari, and S.K. Hannani (Iran)

457-187
Control of Molecular Orientation and Alignment by Monotonic Schemes
J. Salomon and G. Turinici (France)

Hybrid and Non-Linear Systems

- 457-185
A Hybrid Control Approach for Sampled Data Nonlinear Systems
J.M. Andrade Da Silva, P.A. Teppa Garrán, and J.J. Ferrer Suárez (Venezuela)
- 457-019
Design of an Augmented Automatic Choosing Control of Anti-Windup Type for Nonlinear Systems with Constrained Inputs
T. Nawata and H. Takata (Japan)
- 457-079
Monotonically Convergent Algorithms for Locally Constraint Quantum Controls
G. Turinici (France)
- 457-008
Second-Order LuGre Friction Model
L. Acho, J. Moreno, and R. Guerra (Mexico)
- 457-026
BIBO Stability for NOE Model Structure using HL CPWL Functions
L.R. Castro, J.L. Figueroa, and O.E. Agamennoni (Argentina)
- 457-067
Application of Uncertain Variables and Learning Process to Decision Making in a Class of Complex Systems
Z. Bubnicki (Poland)

Adaptive and Intelligent Control

Sub-matrix J_2 :

$$\frac{\partial H_k}{\partial \delta_i} = |V_k V_i| \cos(\theta_{ki} + \delta_i) \quad \text{for } k \neq i \quad (14)$$

$$\frac{\partial H_k}{\partial \delta_k} = |V_k V_i| \cos(\theta_{ki} + \delta_i) - \left| \frac{S_{kik}}{V_i} \right| \cos(\delta_i - \phi_i) \quad (15)$$

Sub-matrix J_3 :

$$\frac{\partial H_k}{\partial V_i} = |V_k V_i| \sin(\theta_{ki} + \delta_i) \quad (16)$$

$$\frac{\partial H_k}{\partial V_k} = |V_k V_i| \sin(\theta_{ki} + \delta_k) + \left| \frac{S_{kik}}{V_i} \right| \sin(\delta_i - \phi_i) \quad (17)$$

3. Performance Evaluation

To evaluate the effectiveness of the developed algorithm, a total number of arithmetic operations required by each algorithm needs to be compared. For the conventional power flow calculation, the matrix equation of the Newton-Raphson power flow can be expressed as

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (18)$$

Therefore, elements of the Jacobian matrices are computed. To carry out the comparison, only J_1 is chosen to give an example as described in Equations 19 and 20, while elements of J_1 of the developed method are already written in Equations 10 and 11.

Sub-matrix J_1 :

derived from power-balanced equations [1,2,8-11]

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = -|V_k V_i Y_{ki}| \sin(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad \text{for } k \neq i \quad (19)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{i=1}^N |V_k V_i Y_{ki}| \sin(\theta_{ki} + \delta_i - \delta_k) \quad (20)$$

For a power system having a total of N buses, dimension of J_1 is $N-1$. As can be seen, there are 3 multiplications and 2 additions for the conventional method in case of $k \neq i$ while 3 multiplications, 3 additions and 1 division are required by the new method. At this point, it seems to be no benefit for this simplification. However, for $k=i$, the conventional method requires $(N-1) \times 3$ multiplications and $(N-1) \times 2$ additions, whilst only 3 multiplications, 3 additions and 1 division are required by the new method. This explains that the total number of operations required by the conventional strongly depends on matrix dimension. For the developed method, a total number of operations is matrix-size-independent.

With this distinction, the overall execution time of the alternative Newton-power flow method is expected to be less than that of the conventional. As can be seen, the great advantage that can gain from this work is the reduction of the system complexity and the overall execution time. This may lead to a breakthrough in power flow calculation of the 21st century.

4. Simulation Results

The effectiveness of the alternative Newton-Raphson power flow calculation were tested against 6-bus, IEEE 24-bus and IEEE 57-bus test systems [12-14], which serve their total load of (510 MW, 90 Mvar), (1055 MW, 570 Mvar) and (1250 MW, 336 Mvar), respectively. The tests were performed by using a 1.7-GHz, 512-SDRAM Pentium 4 computer in which the power flow calculation programs were coded in MATLAB™. The test results are shown in Table 1.

Table 1 Results from the three test systems

Test system	Iteration		Time (s)		Performance index
	SNR	ANR	SNR	ANR	
6 bus	5	5	0.047	0.031	1.516
24 bus	7	7	0.578	0.328	1.762
57 bus	5	5	2.438	1.359	1.794

..., Where SNR denotes the standard Newton-Raphson power flow method using power-balanced equations, ANR denotes the alternative Newton-Raphson power flow method. Performance index is a factor of the time consumed by the SNR and the ANR methods.

Convergence property of each case is also illustrated in Figs 2 - 4 for the 6-bus, IEEE 24-bus and IEEE 57-bus test systems, respectively.

As a result, for the 6-bus test system, although both methods spent 5 iterations for obtaining the solution, the overall execution time consumed by the developed method was shorter (0.031 s) than the time (0.047 s) consumed by the conventional method. For the 24-bus test system, the total number of iterations required by both methods is 7 iterations. The time used by the conventional method was 0.578 s in this case. By applying the developed Newton-Raphson power flow method, the overall time consumed was reduced to 0.325 s only. For the 57-bus test system, 5 iterations were consumed by each method equally. The time of each method is 2.438 s

for the conventional and 1.359 s for the developed method.

From Figs 2 - 4, convergence comparisons between both methods are shown. The convergence curves of each test case describe that convergence rate of these two methods are close to each other. The maximum voltage-error allowance was set to 1×10^{-8} p.u. as one of stopping criteria for all cases. In addition, an initial solution used to start the Newton-Raphson process were 1.00 + j0.00 p.u. for all unknown bus voltages, including voltage-controlled buses. Furthermore, to illustrate the nature of convergence between them is important. Although the convergence rate of both is similar, directions of trial voltage solutions converging to the true solution were different, depending on the method used. For example, this characteristic of a selected bus of the 6-bus test case is shown in Fig. 5.

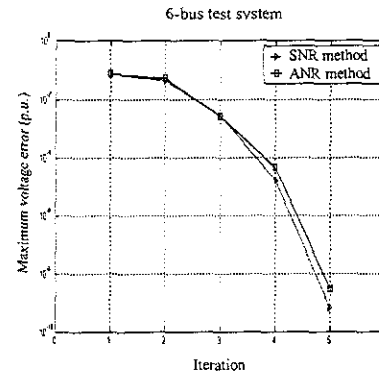


Fig. 2 Convergence of the 6-bus test case

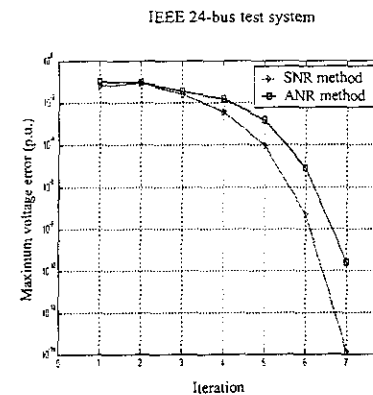


Fig. 3 Convergence of the IEEE 24-bus test case

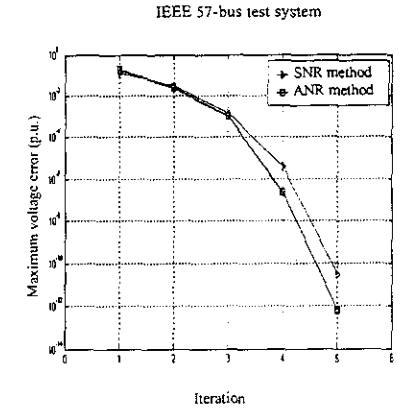


Fig. 4 Convergence of the IEEE 57-bus test case

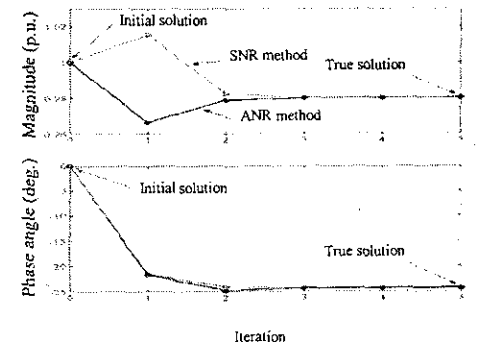


Fig. 5 Example of voltage convergence

5. Conclusion

This paper presents an alternative approach for Newton-Raphson power flow calculation. The developed method is based on the non-linear current-balanced equations, where the derivation of Jacobian matrices and their elements are fully provided. With performance evaluation found in Section 3, a total number of operations required by the developed method does not depend on size of the Jacobian matrix, while that of the conventional method does. This means that the execution time of the conventional Newton-Raphson method increases as a total bus number increases. From this advantage, the execution time consumed by the developed method is expected to be less than that of the conventional one. This can lead to

AN ALTERNATIVE NEWTON-RAPHSON POWER FLOW METHOD BASED ON CURRENT-BALANCED EQUATIONS

T. Kulworawanichpong, T. Ratniyomchai, P. Pao-la-or & B. Borriboon

Electrical Power and Energy System Research
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000
thanatch@ccs.sut.ac.th

ABSTRACT

This paper introduces a new approach for Newton-Raphson power flow calculation, which is based on the current-balanced principle rather than the widely-used power principle. This concept leads to the replacement of the power-balanced equations that are broadly used by conventional Newton-Raphson power flow methods for over half a century. The use of non-linear current equations can noticeably simplify the power flow problem but therefore requires new derivation of Jacobian matrices. Although the equations have been changed, the proposed power flow method still has quadratic convergence as the original does. To assess the effectiveness of the developed method in comparison with the conventional Newton-Raphson, 6-bus, IEEE 24-bus and IEEE 57-bus test systems were tested. Furthermore, the test results confirm that the execution time is greatly reduced when the proposed method is applied while the comparative convergence curves between them are, slightly and insignificantly, different.

KEY WORDS

Power flow solution, Newton-Raphson method, current-balanced equations

1. Introduction

Over several decades, electrical power systems have been characterised using the bus reference frame approach [1,2]. Nodal analysis [3] is always used to solve for a set of voltage solutions. However, electrical demands or so-called loads are in general defined in power form, this leads to non-linearity of nodal voltage equations. Since simple methods of solving linear equations are unable to handle this problem, some non-linear solution methods (e.g. Gauss-Seidel, Newton-Raphson, etc [1]), have been employed. To date, there is no objection that the Newton-Raphson power flow method is one of the most powerful algorithms, which has long history of development [4-8],

and is widely used to develop commercial power-flow solution software across the world.

Although the conventional Newton-Raphson power flow method is very efficient and widely used as the standard for the power flow calculation in several power system textbooks [1,2,9-11], to formulate a matrix equation requires complicated and long expressions. In this paper, the Newton-Raphson method is still applied as the main solution framework. The key difference is that the mismatch to formulate the matrix equation is derived directly from current-balanced equations rather than the power-balanced ones. This approach simplifies very long mathematical formulae to very simplistic ones. With this simplification, there are some advantages to reduce the overall execution time of the calculation.

To do so, all expressions to obtain elements of Jacobian matrices require being re-written. These are all in Section 2. Assessment of arithmetic operations resulting from the use of the developed method is carried out and then compares to the assessment of the classical Newton-Raphson. These assessment and comparison are in Section 3. Simulation results to confirm its performances, the conclusions and discussion leading to further works are provided in Sections 4 and 5.

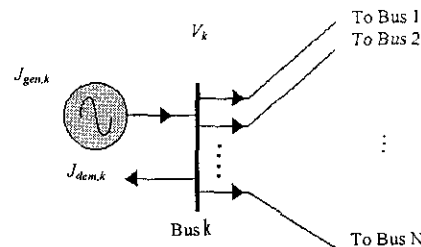


Fig. 1 Representation of bus k

2. Alternative Newton-Raphson Power Flow

Given that an N -bus power system, which one bus is treated as a slack bus of constant voltage magnitude and zero phase angle, is shown in Fig. 1.

Considering the k^{th} bus, current-balanced and power-balanced equations characterising this bus can be obtained by

$$(J_{gen,k} - J_{dem,k}) - \sum_{i=1}^N Y_{ki} (V_i - V_k) = 0 \quad (1)$$

$$(S_{gen,k} - S_{dem,k}) - V_k \sum_{i=1}^N Y_{ki} (V_i - V_k) = 0 \quad (2)$$

Where $J_{gen,k}$ denotes generator current at bus k

$J_{dem,k}$ denotes load current at bus k

$S_{gen,k}$ denotes generator power at bus k

$S_{dem,k}$ denotes load power at bus k

V_k denotes phasor voltage at bus k

Y_{ki} denotes the primitive admittance connecting between bus k and bus i

The conventional method starts with Equation 2 and then derivation of power mismatch equations is made, while the developed method uses Equation 1 instead. This replacement leads to current mismatch equations as

$$\sum_{i=1}^N Y_{ki} V_i = J_{gen,k} - J_{dem,k} \quad (3)$$

Where Y_{ki} represents the k^{th} -row and i^{th} -column element of the system bus admittance matrix.

Typically, loads in electrical power systems are in form of powers, therefore it is rather convenient to rewrite the right-hand side of Equation 3 into a function of powers as follows.

$$F_k = \sum_{i=1}^N Y_{ki} V_i - \left(\frac{S_{gen,k} - S_{dem,k}}{V_k} \right)^* = 0 \quad (4)$$

Define $F_k = G_k + jH_k$ is the current mismatch at bus k

$$V_k = |V_k| \angle \theta_k$$

$$Y_{ki} = |Y_{ki}| \angle \theta_{ki} \text{ is}$$

$$S_{gen,k} - S_{dem,k} = S_{sch,k} = |S_{sch,k}| \angle \phi_k$$

Substitute the above expressions into Equation 4, thus

$$F_k = \sum_{i=1}^N |Y_{ki}| V_i \angle (\theta_{ki} + \delta_i) - \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k} \right| \angle (\delta_k - \phi_k)$$

$$= \sum_{i=1}^N |Y_{ki}| V_i [\cos(\theta_{ki} + \delta_i) + j \sin(\theta_{ki} + \delta_i)]$$

$$- \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k} \right| \cos(\delta_k - \phi_k) - j \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k} \right| \sin(\delta_k - \phi_k)$$

$$G_k = \sum_{i=1}^N |Y_{ki}| V_i \cos(\theta_{ki} + \delta_i) - \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k} \right| \cos(\delta_k - \phi_k) \quad (5)$$

$$H_k = \sum_{i=1}^N |Y_{ki}| V_i \sin(\theta_{ki} + \delta_i) - \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k} \right| \sin(\delta_k - \phi_k) \quad (6)$$

Equations 5 and 6 are real and imaginary parts of the current mismatch at bus k . They will be approximately zero when all bus voltages are solved. To find a set of voltage solutions by using the Newton-Raphson method, these two equations must be expanded by Taylor series as written in Equations 7 and 8.

$$G_k = \sum_{i=1}^N \frac{\partial G_k}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum_{i=1}^N \frac{\partial G_k}{\partial |V_i|} \Delta |V_i| \quad (7)$$

$$H_k = \sum_{i=1}^N \frac{\partial H_k}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum_{i=1}^N \frac{\partial H_k}{\partial |V_i|} \Delta |V_i| \quad (8)$$

Where s denotes the slack bus

With $N-1$ unknowns of complex variable and $N-1$ complex current mismatches, a matrix equation used to update the voltage solution can be found in Equation 9.

$$\begin{bmatrix} G \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial \delta} & \frac{\partial G}{\partial |V|} \\ \frac{\partial H}{\partial \delta} & \frac{\partial H}{\partial |V|} \end{bmatrix} \Delta \delta = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \Delta \delta \quad (9)$$

Hence, elements of Jacobian matrices can be derived in the same manner as that of the conventional method and are summarised in Equations 10 - 17.

Sub-matrix J_1 :

$$\frac{\partial G_k}{\partial \delta_i} = -|Y_{ki}| V_i \sin(\theta_{ki} + \delta_i) \text{ for } k \neq i \quad (10)$$

$$\frac{\partial G_k}{\partial \delta_k} = -|Y_{kk}| V_k \sin(\theta_{kk} + \delta_k) + \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k} \right| \sin(\delta_k - \phi_k) \quad (11)$$

Sub-matrix J_2 :

$$\frac{\partial G_k}{\partial |V_i|} = |Y_{ki}| \cos(\theta_{ki} + \delta_i) \text{ for } k \neq i \quad (12)$$

$$\frac{\partial G_k}{\partial |V_k|} = |Y_{kk}| \cos(\theta_{kk} + \delta_k) + \left| \frac{S_{sch,k}}{V_k^2} \right| \cos(\delta_k - \phi_k) \quad (13)$$

PROGRAM
5th WSEAS International Conference on
APPLICATIONS of ELECTRICAL ENGINEERING
(AEE '06)

Prague, Czech Republic
 March 12-14, 2006

Sunday, March 12, 2006

Plenary Lecture 1:

**Projection of the Neuroinformatics and
 Brain Research into Transportation Science**

Prof. Ing. Mirko Novak, DrSc.,
 Joint Laboratory of System Reliability
 Department of Control Engineering and Telematics,
 Faculty of Transportation Sciences, Czech Technical University,
 Prague 1, Konviktska 20, Prague, CZECH REPUBLIC
mjirko@fd.cvut.cz

Plenary Lecture 2:
 (to be announced)

Plenary Lecture 3:
 (to be announced)

SESSION: Power Flow and Distribution Systems
Chair: Karamitsos Ioannis

A Simple Arc Starter and Arc Stabilizer Circuit for Inverter Based Arc Welding Power Supply	M. Tarafdar Haque, A. Atashi	513-109
Steady-State Power Flow Modeling for a Dynamic Voltage Restorer	T. Ratniyomchai, T. Kulworawanichpong	513-112
Non-Superconducting Fault Current Limiter	A. Charmin, M. Tarafdar Haque, M. Abapour	513-113
A ZVS Cycloconverter based Series Active Filter	M. Tarafdar Haque, M. Sabahi	513-115
Alternative Newton-Raphson Power Flow Calculation in Unbalanced Three-phase Power Distribution Systems	U. Thongkrajay, N. Poolsawat, T. Ratniyomchai & T. Kulworawanichpong	513-117
Available Transfer Capability Calculation	M. Gandchi, M. Tarafdar Haque, A.	513-127

with Transfer based Static Security - Constrained Optimal Power Flow	Yazdanpanah	
An Analytical approach for Dynamic Voltage Stability Analysis in Power Systems	Karamitsos Ioannis, Orfanidis Konstadinos	513-149
Finite Element Calculation of Winding Type Effect on Leakage Flux in Single Phase Shell Type Transformers	A. M. Kashtiban, A. R. Milani, M. T. Haque	513-174
Blackouts in Electric Power Transmission Systems	Karamitsos Ioannis, Orfanidis Konstantinos	513-182

SESSION: Signal Processing, Watermarking Techniques and Adaptive Filters
Chair: Milan Stork, Josef Hrusak

Robustness Evaluation of Multiwavelet-Based Image Watermarking Techniques	Prayoth Kumsawat, Kitti Attakitmongkol, Arthit Srikaew	513-108
A Modified HDWTSVD Image Coding System	Humberto Ochoa, K. R. Rao	513-135
One Dimensional Nonlinear Adaptive Filters for Impulse Noise Suppression	Milan Stork, Daniel Mayer, Josef Hrusak	513-141
A Study on the Copyright Protection using Watermarking Technique in Power Line Communication Network	Yang-Sun Lee, Heau-Jo Kang, Yoon-Ho Kim	513-154
High Resolution Analog-Digital Converter and Digital Polynomial Filter Applications	Milan Stork, Daniel Mayer, Josef Hrusak	513-165
Incorporating HVS Parameter into the Transform-based Watermarking	Yoon-Ho Kim, Heau-Jo Kang	513-169
The VoiceTRAN Speech-to-Speech Translation Communicator	Jermeja Zganec Gros, Mario Zganec	513-175

SESSION: Power Systems, Induction Motors and Electrical Machines
Chair: Athanasios Maglaras

Optimizing Voltage-Frequency Control Strategy for Single-Phase Induction Motor Drives	N. Naewngerndee, C. Sukcharoen, T. Kulworawanichpong	513-111
Thermal Modeling of a High-Speed Solid-Rotor Induction Motor	Janne Nerg	513-118
Terminal Models for Switching Overvoltage Studies in Electrical Machines	J. L. Guardado, V. Venegas, E. Melgoza	513-120
Experimental Study of the Influence of the Rotor Dimensions on the Performances of Solid Rotor Asynchronous Motor	Hachemi Mabrouk, Abdessamed Rachid	513-136
Approach for Solving Voltage Collapse Critical point Considering SVC Control and Load Increase Uncertainties Using Particle Swarm Optimization	Rui Ma, Hongwen Yan, Renmu He	513-160

Monday, March 13, 2006

improvement of power-flow software development in fast computational speed and effective memory usage.

The work described in this paper is only one part of a whole. The effectiveness of this method is continually improved. As the conventional method, fast-decoupled power flow can be formed. With these efficient algorithms together with efficient memory management and exploitation of sparsity, this method can be extended to large-scale power systems.

6. Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the financial support from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND, during a period of this work.

References:

- [1] G.W. Stagg, & A.H. El-Abiad, *Computer methods in power system analysis* (Singapore: McGraw-Hill, 1968).
- [2] J.J. Grainger, J.J. Grainger, & W.D. Stevenson, *Power system analysis* (London, UK: McGraw-Hill, 1994).
- [3] R.A. DeCarlo, *Linear circuit analysis: time domain, phasor, and laplace transform approach* (Oxford University Press, 2001).
- [4] K.R.C. Mamandur, G.J. Berg, Automatic adjustment of generator voltages in Newton-Raphson method of power flow solutions, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, 101(6), 1982, 1400–1409.
- [5] M.E. El-Hawary, and O.K. Wellon, The alpha-modified quasi-second order Newton-Raphson method for load flow solutions in rectangular form, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, 101(4), 1982, 854–866.
- [6] B. Stott, Decoupled Newton load flow, *IEEE Power Apparatus and Systems*, 91(5), 1972, 1955–1959.
- [7] P.S.N. Rao, K.S.P. Rao, and J. Nanda, An exact fast decoupled load flow method including second order terms in rectangular coordinates, *IEEE Power Apparatus and Systems*, 101(10), 1982, 3261–3268.
- [8] S.C. Tripathy, G.D. Prasad, O.P. Malik, and G.S. Hope, Load-flow solutions for ill-conditioned power systems by Newton-like method, *IEEE Power Apparatus and Systems*, 101(10), 1982, 3648–3657.
- [9] D.P. Kothari, & I.J. Nagrath, *Modern power system analysis* (New Delhi, India: TataMcGraw-Hill, 2003).
- [10] H. Saadat, *Power system analysis* (Singapore: McGraw-Hill, 2004).
- [11] A.R. Bergen, & V. Vittal, *Power system analysis* (Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2000).
- [12] A.J. Wood, & W.F. Wollenburg, *Power generation, operation and control* (New York, NY: Johns Wiley & Sons, 1996).
- [13] M.E. El-Hawary, *Electric Power Applications of Fuzzy Systems* (NJ: IEEE Press, 1998).
- [14] H.B. Wan, & Y.H. Song, Hybrid supervised and unsupervised neural network approach to voltage stability analysis, *Electric Power System Research*, 47, 1998, 115–122.

power flow equations as shown in Equation 4. Also, these equations can be decomposed into real and reactive power equations as in Equations 5 and 6.

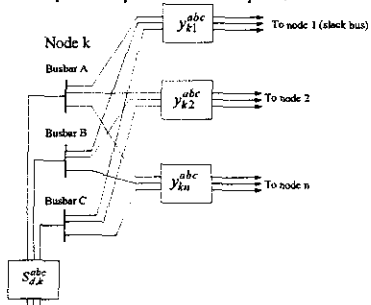


Fig. 4 Three-phase node in distribution systems

$$S_{sch,k}^{abc*} = P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc} = V_k^{abc} \sum_{i=1}^n Y_{ki}^{abc} V_i^{abc} \quad (4)$$

$$P_{cal,k}^p = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{p\phi} V_k^p V_i^\phi| \cos(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi - \delta_k^p) \quad (5)$$

$$Q_{cal,k}^p = - \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{p\phi} V_k^p V_i^\phi| \sin(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi - \delta_k^p) \quad (6)$$

where,

$$S_{sch,k}^{abc} = S_{gen,k}^{abc} - S_{d,k}^{abc}$$

$$P_{sch,k}^{abc} = P_{gen,k}^{abc} - P_{d,k}^{abc}$$

$$Q_{sch,k}^{abc} = Q_{gen,k}^{abc} - Q_{d,k}^{abc}$$

$S_{sch,k}^{abc}$ is scheduled complex power

$P_{sch,k}^{abc}$ is scheduled real power

$Q_{sch,k}^{abc}$ is scheduled reactive power

$S_{d,k}^{abc}$ is demand complex power

$P_{d,k}^{abc}$ is calculated real power

$Q_{d,k}^{abc}$ is calculated reactive power

V_k^{abc} is a three-phase voltage vector

Y_{ki}^{abc} is a k^{th} - column, i^{th} - row of $[Y_{bus}^{abc}]$

$p, \phi \in \{a, b, c\}$

The Proposed power flow method simplifies these equations by rearranging into Equations 7 – 9.

$$\left(\frac{S_{sch,k}^{abc}}{V_k^{abc}} \right)^* = I_k^{abc} = F_k^{abc} + jH_k^{abc} = \sum_{i=1}^n Y_{ki}^{abc} V_i^{abc} \quad (7)$$

$$F_{cal,k}^p = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{p\phi} V_i^\phi| \cos(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad (8)$$

$$- \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \cos(\delta_k^p - \varphi_k^p)$$

$$H_{cal,k}^p = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{p\phi} V_i^\phi| \sin(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad (9)$$

$$- \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \sin(\delta_k^p - \varphi_k^p)$$

where,

I_k^{abc} is mismatched complex current

$F_{cal,k}^{abc}$ is calculated real current

$H_{cal,k}^{abc}$ is calculated reactive current

Therefore, current mismatch equations are used to formulate the proposed Newton-Raphson updating equations as follows.

$$\begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \delta} & \frac{\partial F}{\partial V} \\ \frac{\partial H}{\partial \delta} & \frac{\partial H}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix} \quad (10)$$

To update node-voltage vectors, elements of the Jacobian matrix must be calculated. Without provision of any mathematical derivation herein, Jacobian sub-matrices can be expressed as follows.

Sub-matrix J_1 :

$$J_{1,kk}^{pp} = \frac{\partial F_k^p}{\partial \delta_k^p} = - |Y_{kk}^{pp} V_k^p| \sin(\theta_{kk}^{pp} + \delta_k^p) \quad (11a)$$

$$+ \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \sin(\delta_k^p - \varphi_k^p)$$

$$J_{1,ki}^{p\phi} = \frac{\partial F_k^p}{\partial \delta_i^\phi} = - |Y_{ki}^{p\phi} V_i^\phi| \sin(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad (11b)$$

(11b) is for $(i = k \text{ and } p \neq \phi)$.

Sub-matrix J_2 :

$$J_{2,kk}^{pp} = \frac{\partial F_k^p}{\partial V_k^p} = |Y_{kk}^{pp}| \cos(\theta_{kk}^{pp} + \delta_k^p) + \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \cos(\delta_k^p - \varphi_k^p) \quad (12a)$$

$$J_{2,ki}^{p\phi} = \frac{\partial F_k^p}{\partial V_i^\phi} = |Y_{ki}^{p\phi}| \cos(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad (12b)$$

(12b) is for $(i = k \text{ and } p \neq \phi)$.

Sub-matrix J_3 :

$$J_{3,kk}^{pp} = \frac{\partial H_k^p}{\partial \delta_k^p} = |Y_{kk}^{pp} V_k^p| \cos(\theta_{kk}^{pp} + \delta_k^p) \quad (13a)$$

$$- \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \cos(\delta_k^p - \varphi_k^p)$$

$$J_{3,ki}^{p\phi} = \frac{\partial H_k^p}{\partial \delta_i^\phi} = |Y_{ki}^{p\phi} V_i^\phi| \cos(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad (13b)$$

(13b) is for $(i = k \text{ and } p \neq \phi)$.

Sub-matrix J_4 :

$$J_{4,kk}^{pp} = \frac{\partial H_k^p}{\partial V_k^p} = |Y_{kk}^{pp}| \sin(\theta_{kk}^{pp} + \delta_k^p) + \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \sin(\delta_k^p - \varphi_k^p) \quad (14a)$$

$$+ \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \sin(\delta_k^p - \varphi_k^p)$$

$$J_{4,ki}^{p\phi} = \frac{\partial H_k^p}{\partial V_i^\phi} = |Y_{ki}^{p\phi}| \sin(\theta_{ki}^{p\phi} + \delta_i^\phi) \quad (14b)$$

(14b) is for $(i = k \text{ and } p \neq \phi)$.

With this computation, voltage magnitudes and phases can be updated iteratively by using the following equation where h indicates a counter for iteration.

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta H \end{bmatrix}^{(h)} \quad (15)$$

In addition, a power flow solution framework can be summarized in flow diagram of Fig. 5.

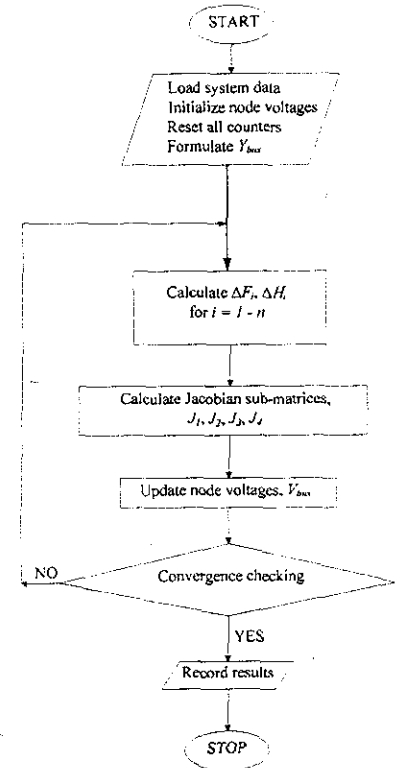


Fig. 5 Flow diagram for power flow calculation

4 Simulation Results

The effectiveness of the alternative Newton-Raphson power flow calculation was tested against 25-bus and IEEE 37-node test systems as shown in Figs 6 – 7, respectively. Table 1 shows total loads of each phase for each test system. The tests were performed by using a 2.4-GHz, 512-SDRAM Pentium 4 computer in which the power flow calculation programs were coded in MATLAB™.

Table 1 System loads for each test case

Test system	System load		
	Phase a	Phase b	Phase c
25 bus	513 kW 385 kvar	473 kW 355 kvar	493 kW 370 kvar
37 bus	727 kW 357 kvar	639 kW 314 kvar	1091 kW 530 kvar

Alternative Newton-Raphson Power Flow Calculation in Unbalanced Three-phase Power Distribution Systems

U. THONGKRAJAY, N. POOLSAWAT, T. RATNIYOMCHAI & T. KULWORAWANICHPONG
 Electrical Power and Energy System Research Group
 School of Electrical Engineering, Institute of Engineering
 Suranaree University of Technology
 111 University Avenue, Suranaree District, Nakhon Ratchasima
 THAILAND 30000
 thanatch@sut.ac.th

Abstract: - This paper proposes an alternative approach for Newton-Raphson power flow calculation, which is based on current-balanced equations rather than a widely-used power-balanced principle, especially for power distribution systems. This concept gives the replacement of the power-balanced equations that are broadly used by conventional Newton-Raphson power flow methods. The non-linear current equations can simplify very complicated power flow problems, however new mathematical derivation of Jacobian matrices is necessary. Although the power flow equations have been modified, the alternative power flow method still has quadratic convergence. It is sufficient to enhance calculation time required by the iterative processes. To distinguish the alternative method in comparison with the conventional Newton-Raphson, 25-bus and IEEE 37-node test feeders were tested. Moreover, the results reveal that solving the power flow problems with the alternative Newton-Raphson method can considerably reduce execution time consumed by simulation programs when comparing with the conventional methods.

Key-Words: - Power flow, Newton-Raphson method, Gauss-Seidel method, Fast-decouple method, Quadratic convergence, Electric power distribution system

1 Introduction

For many decades, electrical power systems have been analyzed using the bus reference frame approach [1]. Nodal analysis [2] is typically used to obtain voltage solutions. However, electrical demands or loads are usually defined in powers, this causes non-linearity of nodal voltage equations. Since simple methods to solve linear equations fail to handle this problem, some efficient numerical methods (e.g. Gauss-Seidel, Newton-Raphson, etc), have been used [1-3]. To date, there is no objection that the Newton-Raphson power flow method is one of the most powerful algorithms, which has long history of development [4-8], and is widely used to develop commercial power-flow solution software across the world.

Although the classical Newton-Raphson method is very efficient and becomes the standard for the power flow calculation in several power system textbooks, to formulate a matrix equation requires tedious and complicated mathematical expressions. In this paper, the Newton-Raphson method is still applied as the main numerical framework. The key difference is that the mismatch to formulate the matrix equation is derived directly from current-balanced equations rather than the power-balancing [9]. This concept simplifies very

long mathematical formulae to very simplistic ones. With this simplification, reduction of the overall execution time for power flow problem solving is expected.

In this paper, electric power distribution systems are of our focuses [10-13]. They have special features of radial feed configuration to distinguish them from electric power transmission systems. Besides feeding arrangement, unbalanced load services also make them special and need particular derivation of solution methods. Per-unit power flow calculation cannot be applied unlike the transmission systems.

To handle power distribution power flow problems, an intensified mathematical expression of power flow analysis is required. Therefore, in this paper the Newton-Raphson method will be modified to be able and to be suitable for solving unbalanced three-phase distribution power flow problems.

These are all in Section 2 and 3. Assessment of numerical computation resulting from the use of the developed method is carried out and then compares with the assessment of those obtained from the classical Newton-Raphson method. These assessment and comparison to confirm the effectiveness of the proposed method are in Section 4. Conclusion and discussion leading to further works are provided in Sections 5.

2 Three-phase Power System Models

In power distribution systems, one node or so-called bus consisting of three separate busbars of phases A, B and C. However, in many feeder portions where their far-end loads require a single-phase supply, it is unnecessary to build complete three-phase power lines for them. A pair of lines will be used, therefore at the end of this feeder section only two busbars exist. With an additional assumption of earth return, any customer load may consist of a single busbar, double busbars or triple busbars. This leads to a variety of feeder models as shown in Fig. 1.

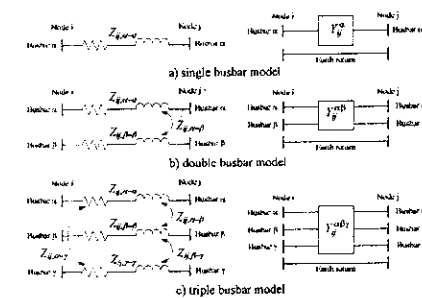


Fig. 1 Modeling of a feeder portion

Different busbar configuration of the two ends of any feeder causes different size of an admittance matrix characterizing the line portion. In the figure, α, β and γ are phase indices and they must represent one of {A, B, C}. With appropriate algebraic techniques of matrix, these matrices with different size can be rewritten into three-by-three matrices as shown in Equations 1 - 3, for single, double and triple busbar configuration, respectively. Consequently, when the system bus admittance matrix is successfully formulated, non-existing busbars can be eliminated by Kron's matrix reduction technique.

$$Y_{ij}^{\alpha} = [y_{ij}^{\alpha\alpha}] \rightarrow Y_{ij}^{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y_{ij}^{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & y_{ij}^{\alpha\beta} \\ y_{ij}^{\beta\alpha} & y_{ij}^{\beta\beta} \end{bmatrix} \rightarrow Y_{ij}^{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & y_{ij}^{\alpha\beta} & 0 \\ y_{ij}^{\beta\alpha} & y_{ij}^{\beta\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Y_{ij}^{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & y_{ij}^{\alpha\beta} & y_{ij}^{\alpha\gamma} \\ y_{ij}^{\beta\alpha} & y_{ij}^{\beta\beta} & y_{ij}^{\beta\gamma} \\ y_{ij}^{\gamma\alpha} & y_{ij}^{\gamma\beta} & y_{ij}^{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (3)$$

One of special feature of the distribution power system is to have only one feeding point that is the substation. Although many types of bus arrangement are possible, the substation for power flow problem is simply a current source in parallel with admittance as shown in Fig. 2.

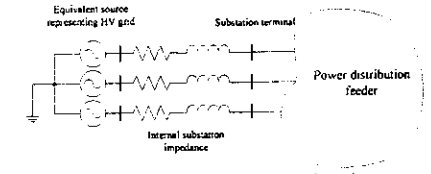


Fig. 2 Modeling of a power substation

Unlike the feeder models, the power substation consists of all three busbars, therefore a voltage vector representing HV grid is a 3×1 matrix, while its admittance is also a 3×3 matrix.

Customer demands are normally modeled as power loads. Any spot load can be single-phase, two-phase or three-phase. However the spot load draws power from busbar(s), therefore only a 3×1 column vector is sufficient to representing such a load, see Fig. 3 for detail.

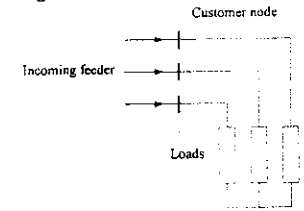


Fig. 3 Modeling of a spot load

3 Problem Formulation

A power distribution system defines as a set of several interconnected elements through between a pair of nodes as shown in Fig. 4. For simplification, most electric power apparatus in power distribution network can be classified into three major types, which are i) power source, ii) feeder line and iii) load. To analyze system characteristics, nonlinear nodal analysis is employed to formulate a set of complex



WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS

Issue 3, Volume 5, March 2006

ISSN 1109-2734

<http://www.wseas.org>

Asymptotic Model of Deterministic Randomness and its Application to Secure Communications	305
<i>Jiantao Zhou, Wenjiang Pei, Kai Wang, Zhenya He, Oscar Au</i>	
Thermal Analysis of a High-Speed Solid-Rotor Induction Motor with a Slitted Solid-Rotor	311
<i>Janne Nerg</i>	
Terminal Models for Switching Overvoltage Studies in Electrical Machines	319
<i>J. L. Guardado, V. Venegas, E. Melgoza</i>	
Influence of the Rotor Dimensions and the Supply Voltage on the Performances of Solid Rotor Asynchronous Motor	325
<i>Hachemi Mabrouk, Abdessemed Rachid</i>	
Computation Method of the Sensitivities for Steady State Two-Ports Circuits Using the Relative Values	332
<i>Horia Andrei, Fanica Spinei, Costin Cepisca, Mircea Popa, Marius Silaghi, Sorin-Dan Grigorescu</i>	
Optimized Performance of a 2-Mass Rotary System Using Adaptive Tabu Search	339
<i>Deacha Puangdownreong, Chatchai U-Thaiwasin, Sarawut Sujitjorn</i>	
Spiking Neural Networks Built in FPGAs: Fully Parallel Implementations	346
<i>Laszlo Bako, Sandor-Tihamer Brassai</i>	
Design of High Quality CMOS Active Inductances using Integrated Transformers	354
<i>G. Scandurra, C. Ciofi</i>	
System CFL: Formal Specification and Analysis of Hardware/Software Co-designs	361
<i>Ka L. Man</i>	
Simulation of Magnetic Hysteresis in Electronic Circuits Containing Ferromagnetic or Ferritic Core Inductors	369
<i>Petru Andrei</i>	
Parallel - Connected Single - Phase Induction Motors: Modelling and Simulation	377

A Voltage Collapse Critical point Approach Incorporated SVC and Load Increase Uncertainties	385
<i>Rui Ma, Hongwen Yan, Renmu He</i>	
A Study on the Copyright Protection and Tracking System of Still Image Content available Power Line Communication Network	391
<i>Yang-Sun Lee, Heau-Jo Kang, Yoon-Ho Kim, Sung-Eon Cho</i>	
Genetic Algorithm Engine for Scheduling Problems	397
<i>Masaya Yoshikawa, Hidekazu Terai</i>	
Unbalanced Three-phase Distribution Power Flow Using Alternative Newton-Raphson Method	403
<i>U. Thongkrajay, N. Poolsawat, T. Ratriyomchai, T. Kulworawanichpong</i>	
Integrated System for CAD Modelling and the Automatically Determining of the Machining Allowance for the Monoaxis Shafts	411
<i>Sorin Borza, Carmen Simion, Nicolae Cofaru</i>	
R-type HTS-FCL EMTDC Transient Model Considering Quenching and Recovery Characteristics	418
<i>Jae-Young Yoon, Seung-Ryul Lee, Jong-Yul Kim</i>	
The Economic Operation of Transformer Based on Fuzzy Decision	422
<i>Wenjun Zhang, Haozhong Cheng, Hugang Xiong, Dexiang Jia</i>	
Analytical Study and Design of aRF Filter Applicable in MEMS Technology	428
<i>Mehdi Vosooghi Dizaji, Mohammad Naghi Azarmanesh, Ebrahim Abbaspour</i>	



ISSN 1109-2734

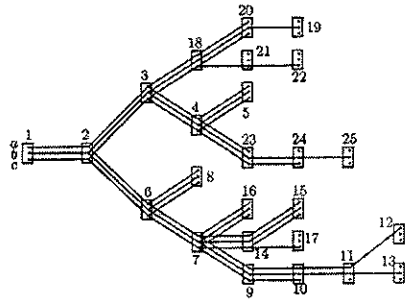


Fig. 6 25-bus test system [11]

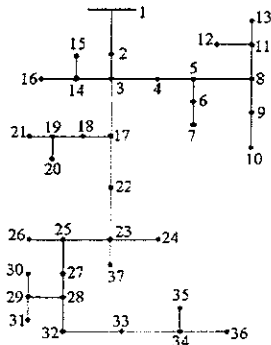


Fig. 7 IEEE 37-node test feeder [14]

To perform the tests, all initial node voltages are assumed to be 1.0 p.u. and to terminate iterative processes, maximum voltage error is set as 1×10^{-6} p.u. for both power flow methods. The results obtained are presented in Table 2.

Table 2 Simulation results

Test system	Iteration used		Execution time	
	SNR	ANR	SNR	ANR
25-bus	4	4	100%	86%
37-bus	4	4	100%	84%

* SNR denotes Standard Newton-Raphson method
ANR denotes Alternative Newton-Raphson method

As a result, the alternative Newton-Raphson power flow calculation can reduce calculation time by 15% (average value). The number of iteration used is equal for both methods. This implies that their convergence property is quite similar. The readers can observe their convergences for each test case in Figs 8 – 11.

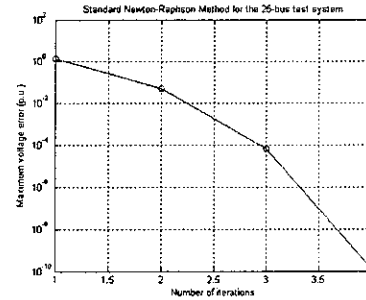


Fig. 8 Convergence of SNR for the 25-bus system

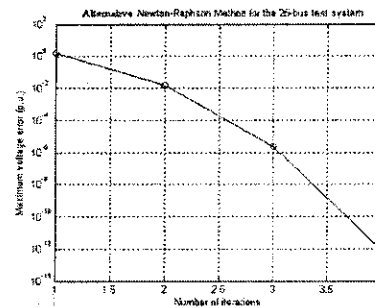


Fig. 9 Convergence of ANR for the 25-bus system

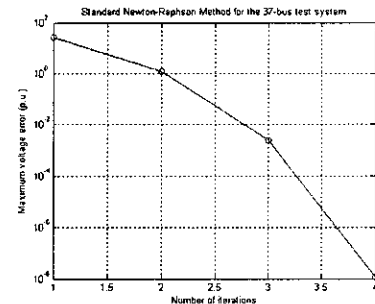


Fig. 10 Convergence of SNR for the 37-bus system

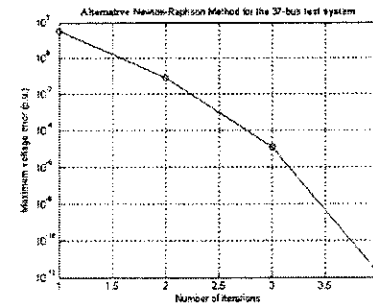


Fig. 11 Convergence of ANR for the 37-bus system

5 Conclusions

This paper proposes an alternative approach for Newton-Raphson power flow calculation, especially in electric power distribution systems. The developed method is based on the nonlinear current-balanced equations, where the derivation of Jacobian matrices and their elements are fully provided. With its simpler updating formulae, shorter execution time consumed is expected. As confirmed by simulation results, the calculation time can be reduced by 15% of the time used by the standard Newton-Raphson method. This advantage can lead to great improvement of power-flow software development in fast computational speed and effective memory usage.

6 Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the financial support of the research grant (SUT7-711-47-12-52) from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND, during a period of this work.

References:

- [1] G.W. Stagg & A.H. El-Abiad, *Computer methods in power system analysis*, McGraw-Hill, 1968
- [2] J.J. Grainger, J.J. Grainger & W.D. Stevenson, *Power system analysis*, McGraw-Hill, 1994
- [3] H. Saadat, *Power system analysis*, McGraw-Hill, 2004
- [4] K.R.C. Mamandur & G.J. Berg, Automatic adjustment of generator voltages in Newton-Raphson method of power flow solutions, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 6, 1982, pp. 1400-1409
- [5] M.E. El-Hawary & O.K. Wellon, The alpha-modified quasi-second order Newton-Raphson method for load flow solutions in

- rectangular form, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 4, 1982, pp. 854-866
- [6] B. Stott, Decoupled Newton load flow, *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vol. 91, No. 5, 1972, pp. 1955-1959
- [7] P.S.N. Rao, K.S.P. Rao & J. Nanda, An exact fast decoupled load flow method including second order terms in rectangular coordinates, *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 10, 1982, pp. 3261-3268
- [8] S.C. Tripathy, G.D. Prasad, O.P. Malik & G.S. Hope, Load-flow solutions for ill-conditioned power systems by Newton-like method, *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 10, 1982, pp. 3648-3657
- [9] T. Kulworawanichpong, T. Ratniyomchai & B. Borriboon, An alternative Newton-Raphson power flow method based on current-balanced equations, *IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC2005)*, Innsbruck, Austria, 16 - 18 February 2005
- [10] E.R. Ramos, A.G. Expósito & G.Á. Cordero, Quasi-coupled three-phase radial load flow, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 19, pp. 776 - 781, 2004
- [11] S.K. Goswami & S.K. Basu, Direct solution of distribution systems, *Proc. Inst. Electr. Eng. C*, vol. 138, 1991
- [12] J. Teng, A modified Gauss-Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution network, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 24, 2002, pp. 97 - 102
- [13] W. Lin, Y. Su, H. Chin & J. Teng, Three-phase unbalanced distribution power flow solutions with minimum data preparation, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, 1999, pp. 1179 - 1183
- [14] Distribution system analysis subcommittee, *IEEE 37-node test feeder*, IEEE Power Engineering Society

Unbalanced Three-phase Distribution Power Flow Using Alternative Newton-Raphson Method

U. THONGKRAJAY, N. POOLSAWAT, T. RATNIYOMCHAI & T. KULWORAWANICHPONG
 Electrical Power and Energy System Research Group
 School of Electrical Engineering, Institute of Engineering
 Suranaree University of Technology
 111 University Avenue, Suranaree District, Nakhon Ratchasima
 THAILAND 30000
 thanatch@sut.ac.th

Abstract: - This paper utilizes the newly developed approach for Newton-Raphson power flow calculation, which is based on current-balanced equations rather than a widely-used power-balanced principle, especially for power distribution systems. This concept gives the replacement of the power-balanced equations that are broadly used by conventional Newton-Raphson power flow methods. The non-linear current equations can simplify very complicated power flow problems, however new mathematical derivation of Jacobian matrices is necessary. Although the power flow equations have been modified, the alternative power flow method still has quadratic convergence. It is sufficient to enhance calculation time required by the iterative processes. To distinguish the alternative method in comparison with the conventional Newton-Raphson, 25-bus, IEEE 37-node, modified 118-node test feeders and the 159-node, 22-kV distribution feeder of Suranaree University of Technology were tested. Moreover, the results reveal that solving the power flow problems with the alternative Newton-Raphson method can considerably reduce execution time consumed by simulation programs when comparing with the conventional methods.

Key-Words: - Power flow, Newton-Raphson method, Gauss-Seidel method, Fast-decouple method, Quadratic convergence, Electric power distribution system

1 Introduction

For many decades, electrical power systems have been analyzed using the bus reference frame approach [1]. Nodal analysis [2] is typically used to obtain voltage solutions. However, electrical demands or loads are usually defined in powers, this causes non-linearity of nodal voltage equations. Since simple methods to solve linear equations fail to handle this problem, some efficient numerical methods (e.g. Gauss-Seidel, Newton-Raphson, etc), have been used [1-3]. To date, there is no objection that the Newton-Raphson power flow method is one of the most powerful algorithms, which has long history of development [4-8], and is widely used to develop commercial power-flow solution software across the world.

Although the classical Newton-Raphson method is very efficient and becomes the standard for the power flow calculation in several power system textbooks, to formulate a matrix equation requires tedious and complicated mathematical expressions. In this paper, the Newton-Raphson method is still applied as the main numerical framework. The key difference is that the mismatch to formulate the matrix equation is derived directly from current-balanced equations rather than the

power-balancing [9]. This concept simplifies very long mathematical formulae to very simplistic ones. With this simplification, reduction of the overall execution time for power flow problem solving is expected.

In this paper, electric power distribution systems are of our focuses [10-13]. They have special features of radial feed configuration to distinguish them from electric power transmission systems. Besides feeding arrangement, unbalanced load services also make them special and need particular derivation of solution methods. Per-unit power flow calculation cannot be applied unlike the transmission systems.

To handle power distribution power flow problems, an intensified mathematical expression of power flow analysis is required. Therefore, in this paper the Newton-Raphson method will be modified to be able and to be suitable for solving unbalanced three-phase distribution power flow problems.

These are all in Section 2 and 3. Assessment of numerical computation resulting from the use of the developed method is carried out and then compares with the assessment of those obtained from the classical Newton-Raphson method. These assessment and comparison to confirm the effectiveness of the proposed method are in Section

4. Conclusion and discussion leading to further works are provided in Sections 5.

2 Three-phase Power System Models

In power distribution systems, one node or so-called bus consisting of three separate busbars of phases A, B and C. However, in many feeder portions where their far-end loads require a single-phase supply, it is unnecessary to build complete three-phase power lines for them. A pair of lines will be used, therefore at the end of this feeder section only two busbars exist. With an additional assumption of earth return, any customer load may consist of a single busbar, double busbars or triple busbars. This leads to a variety of feeder models as shown in Fig. 1.

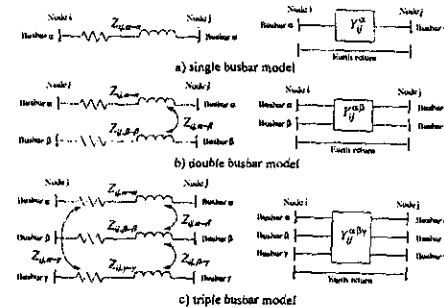


Fig. 1 Modeling of a feeder portion

Different busbar configuration of the two ends of any feeder causes different size of an admittance matrix characterizing the line portion. In the figure, α , β and γ are phase indices and they must represent one of {A, B, C}. With appropriate algebraic techniques of matrix, these matrices with different size can be rewritten into three-by-three matrices as shown in Equations 1 - 3, for single, double and triple busbar configuration, respectively. Consequently, when the system bus admittance matrix is successfully formulated, non-existing busbars can be eliminated by Kron's matrix reduction technique.

$$Y_{ij}^{\alpha} = [y_{ij}^{\alpha\alpha}] \rightarrow Y_{ij}^{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y_{ij}^{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & y_{ij}^{\alpha\beta} \\ y_{ij}^{\beta\alpha} & y_{ij}^{\beta\beta} \end{bmatrix} \rightarrow Y_{ij}^{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & y_{ij}^{\alpha\beta} & 0 \\ y_{ij}^{\beta\alpha} & y_{ij}^{\beta\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Y_{ij}^{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & y_{ij}^{\alpha\beta} & y_{ij}^{\alpha\gamma} \\ y_{ij}^{\beta\alpha} & y_{ij}^{\beta\beta} & y_{ij}^{\beta\gamma} \\ y_{ij}^{\gamma\alpha} & y_{ij}^{\gamma\beta} & y_{ij}^{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (3)$$

One of special feature of the distribution power system is to have only one feeding point that is the substation. Although many types of bus arrangement are possible, the substation for power flow problem is simply a current source in parallel with admittance as shown in Fig. 2.

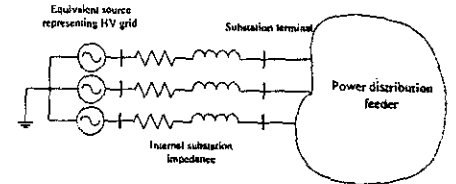


Fig. 2 Modeling of a power substation

Unlike the feeder models, the power substation consists of all three busbars, therefore a voltage vector representing HV grid is a 3×1 matrix, while its admittance is also a 3×3 matrix.

Customer demands are normally modeled as power loads. Any spot load can be single-phase, two-phase or three-phase. However the spot load draws power from busbar(s), therefore only a 3×1 column vector is sufficient to representing such a load, see Fig. 3 for detail.

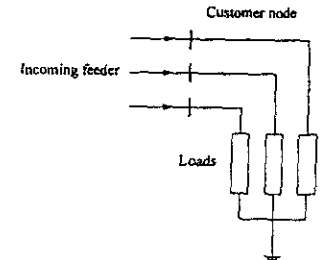


Fig. 3 Modeling of a spot load

3 Problem Formulation

A power distribution system defines as a set of several interconnected elements through between a pair of nodes as shown in Fig. 4. For simplification, most electric power apparatus in power distribution network can be classified into three major types, which are i) power source, ii) feeder line and iii) load. To analyze system characteristics, nonlinear nodal

EDITOR IN CHIEF

MLADENOV V., Technical University of Sofia, BULGARIA

HONORARY EDITOR

ZADEH L., University of Berkeley, USA

ASSOCIATE EDITORS

AKAN A., Istanbul University, Istanbul, TURKEY
CHUA L., University of Berkeley, California, USA
GONOS I., National Technical University of Athens, GREECE
IRACLEOUS D., MIUE, Hellenic Naval Academy, GREECE
KUMMERT A., University of Wuppertal, GERMANY
LAKSHMIKANTHAM V., FIT Dept. Applied Mathematics, Florida, USA
LAPLANTE P., Penn State University, PA, USA
LI YIMING, National Chiao Tung University, Hsinchu, TAIWAN
STATHOPOULOS I., National Technical University of Athens, GREECE
SLAVOVA A., Technical University of Sofia, BULGARIA
VIDYASAGAR M., Tata Consultancy Services, INDIA
YEN K., Florida State University, Miami, FL, USA
ZEMLIAK A., Puebla Autonomous University, MEXICO

TOPICS: Fundamental Theory of Circuits, Network Theory and Applications, Electronics: Components, Devices, Systems. Silicon Devices: Technology, Modeling, Reliability. Optoelectronic Devices, Electron Devices for Control and Robotics, Electron Devices for Power Technology, High Voltages and Electric Machines. Device Physics. Physical Design. High-Level Synthesis and Testing. Non-Linear Circuits. Formal Verification. Semiconductors. Superconductivity Circuits, Computer-Aided Design. Microelectronics, Microcircuits. Very Large Scale Integration Systems (VLSI), Applications. Military Electronics, Electronics for Space exploration, Consumer Electronics, Circuits in Power Technology, Electron Devices for Video Technology. Circuits for Antennas Technology, Electron Devices and Systems for Radar and Sonar Systems. Circuit Models, Electrical and Electronic Measurement, Instrumentation. Laser and Optical Systems. Sensor Technology. Instrument-Computer Interface. Circuits for Industrial Applications. Circuit models for Electromagnetic Fields. Electronics for Signal Processing and other applications.

Systems Theory, Control Systems, Robotics, Artificial Intelligence, Fuzzy Systems, Neural Networks, VLSI Realization of Neural Networks, Computational Intelligence in Systems Theory, Knowledge Modelling, Decision Support Systems, Hierarchical Control Systems, Aerospace Systems, Lightwave Engineering, Stochastic Systems, Non-linear Systems, Telecommunication Systems, Information Systems, Signal Processing Systems, Multidimensional Systems, Multivariable systems, Hybrid Systems, Multirate Systems, Speech and Image Processing Systems, Discrete Event Dynamic Systems, Manufacturing Systems, Decentralised Systems, Remote Sensing, Microelectromechanical Systems, Human-Machine Systems. Environment Modeling, Sonar and underwater acoustic systems. Undersea Systems. Navigation and Tracking Systems. Space Systems. Wavelets. Systems Techniques for Wireless Applications. Filter design. Verification and Validation. Systems for Statistical Signal and Array Processing.

HOW TO SUBMIT: <http://www.wseas.org>, <http://www.worldses.org>

SUBSCRIPTION: <http://www.wseas.org>, <http://www.worldses.org>

FORMAT OF THE PAPERS: <http://www.worldses.org/journals>

ISSN: 1109-2734

WSEAS E-LIBRARY: <http://www.wseas.org/data>

WSEAS CHAPTERS: <http://www.wseas.org/chapters>

Each paper of this issue was published after review by 3 independent reviewers

Athens, New York, Miami, Rio De Janeiro, Mexico City, Sofia, Taipei, Madrid

Ag. I. Theologou 17-23, 15773, Zographou, Athens, Greece.

Tel: (+30) 210 7473313, Fax: (+30) 210 7473314



WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS

Issue 3, Volume 5, March 2006

ISSN 1109-2734 <http://www.wseas.org>

Asymptotic Model of Deterministic Randomness and its Application to Secure Communications <i>Jiantao Zhou, Wenjiang Pei, Kai Wang, Zhenya He, Oscar Au</i>	305
Thermal Analysis of a High-Speed Solid-Rotor Induction Motor with a Slitted Solid-Rotor <i>Janne Nerg</i>	311
Terminal Models for Switching Overvoltage Studies in Electrical Machines <i>J. L. Guardado, V. Venegas, E. Melgoza</i>	319
Influence of the Rotor Dimensions and the Supply Voltage on the Performances of Solid Rotor Asynchronous Motor <i>Hachemi Mabrouk, Abdessemed Rachid</i>	325
Computation Method of the Sensitivities for Steady State Two-Ports Circuits Using the Relative Values <i>Horia Andrei, Fanica Spinei, Costin Cepisca, Mircea Popa, Marius Silaghi, Sorin-Dan Grigorescu</i>	332
Optimized Performance of a 2-Mass Rotary System Using Adaptive Tabu Search <i>Deacha Puangdownreong, Chatchai U-Thaiwasin, Sarawut Sujitjorn</i>	339
Spiking Neural Networks Built in FPGAs: Fully Parallel Implementations <i>Laszlo Bako, Sandor-Tihamer Brassai</i>	346
Design of High Quality CMOS Active Inductances using Integrated Transformers <i>G. Scandurra, C. Ciofi</i>	354
System CFL: Formal Specification and Analysis of Hardware/Software Co-designs <i>Ka L. Man</i>	361
Simulation of Magnetic Hysteresis in Electronic Circuits Containing Ferromagnetic or Ferritic Core Inductors <i>Petru Andrei</i>	369
Parallel Connected Single-Phase Induction Motors: Modelling and Simulation	377

A Voltage Collapse Critical point Approach Incorporated SVC and Load Increase Uncertainties <i>Rui Ma, Hongwen Yan, Renmu He</i>	385
A Study on the Copyright Protection and Tracking System of Still Image Content available Power Line Communication Network <i>Yang-Sun Lee, Heau-Jo Kang, Yoon-Ho Kim, Sung-Eon Cho</i>	391
Genetic Algorithm Engine for Scheduling Problems <i>Masaya Yoshikawa, Hidekazu Terai</i>	397
Unbalanced Three-phase Distribution Power Flow Using Alternative Newton-Raphson Method <i>U. Thongkrajay, N. Poolsawat, T. Ratriyomchai, T. Kulworawanichpong</i>	403
Integrated System for CAD Modelling and the Automatically Determining of the Machining Allowance for the Monoaxis Shafts <i>Sorin Borza, Carmen Simion, Nicolae Cofaru</i>	411
R-type HTS-FCL EMTDC Transient Model Considering Quenching and Recovery Characteristics <i>Jae-Young Yoon, Seung-Ryul Lee, Jong-Yul Kim</i>	418
The Economic Operation of Transformer Based on Fuzzy Decision <i>Wenjun Zhang, Haozhong Cheng, Hugang Xiong, Dexiang Jia</i>	422
Analytical Study and Design of aRF Filter Applicable in MEMS Technology <i>Mehdi Vosooghi Dizaji, Mohammad Naghi Azarmanesh, Ebrahim Abbaspour</i>	428



ISSN 1109-2734

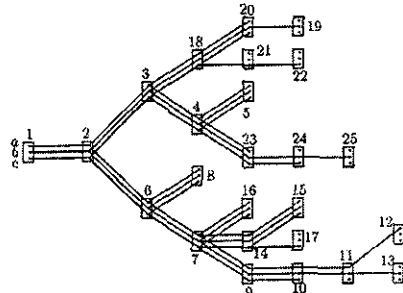


Fig. 6 25-bus test system [11]

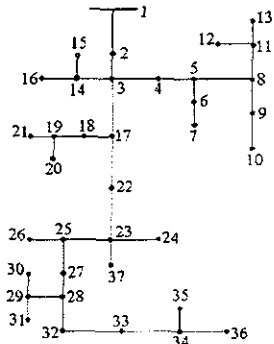


Fig. 7 IEEE 37-node test feeder [14]

To perform the tests, all initial node voltages are assumed to be 1.0 p.u. and to terminate iterative processes, maximum voltage error is set as 1×10^{-6} p.u. for both power flow methods. The results obtained are presented in Table 2.

Table 2 Simulation results

Test system	Iteration used		Execution time	
	SNR	ANR	SNR	ANR
25-bus	4	4	100%	86%
37-bus	4	4	100%	84%

* SNR denotes Standard Newton-Raphson method
ANR denotes Alternative Newton-Raphson method

As a result, the alternative Newton-Raphson power flow calculation can reduce calculation time by 15% (average value). The number of iteration used is equal for both methods. This implies that their convergence property is quite similar. The readers can observe their convergences for each test case in Figs 8 – 11.

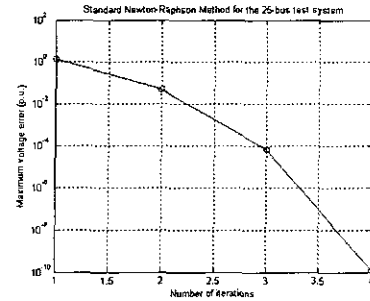


Fig. 8 Convergence of SNR for the 25-bus system

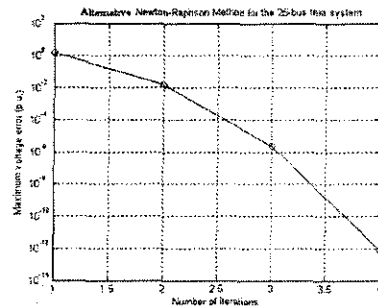


Fig. 9 Convergence of ANR for the 25-bus system

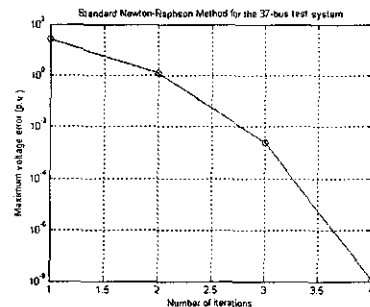


Fig. 10 Convergence of SNR for the 37-bus system

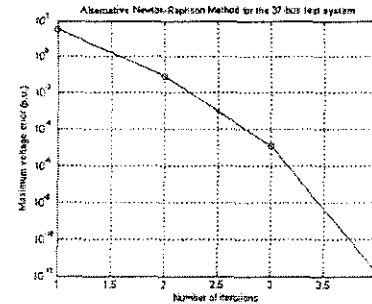


Fig. 11 Convergence of ANR for the 37-bus system

5 Conclusions

This paper proposes an alternative approach for Newton-Raphson power flow calculation, especially in electric power distribution systems. The developed method is based on the nonlinear current-balanced equations, where the derivation of Jacobian matrices and their elements are fully provided. With its simpler updating formulae, shorter execution time consumed is expected. As confirmed by simulation results, the calculation time can be reduced by 15% of the time used by the standard Newton-Raphson method. This advantage can lead to great improvement of power-flow software development in fast computational speed and effective memory usage.

6 Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the financial support of the research grant (SUT7-711-47-12-52) from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND, during a period of this work.

References:

- [1] G.W. Stagg & A.H. El-Abiad, *Computer methods in power system analysis*, McGraw-Hill, 1968
- [2] J.J. Grainger, J.J. Grainger & W.D. Stevenson, *Power system analysis*, McGraw-Hill, 1994
- [3] H. Saadat, *Power system analysis*, McGraw-Hill, 2004
- [4] K.R.C. Mamandur & G.J. Berg, Automatic adjustment of generator voltages in Newton-Raphson method of power flow solutions, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 6, 1982, pp. 1400-1409
- [5] M.E. El-Hawary & O.K. Wellon, The alpha-modified quasi-second order Newton-Raphson method for load flow solutions in

- rectangular form, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 4, 1982, pp. 854-866
- [6] B. Stott, Decoupled Newton load flow, *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vol. 91, No. 5, 1972, pp. 1955-1959
- [7] P.S.N. Rao, K.S.P. Rao & J. Nanda, An exact fast decoupled load flow method including second order terms in rectangular coordinates, *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 10, 1982, pp. 3261-3268
- [8] S.C. Tripathy, G.D. Prasad, O.P. Malik & G.S. Hope, Load-flow solutions for ill-conditioned power systems by Newton-like method, *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 10, 1982, pp. 3648-3657
- [9] T. Kulworawanichpong, T. Ratniyomchai & B. Borriboon, An alternative Newton-Raphson power flow method based on current-balanced equations, *IATED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC2005)*, Innsbruck, Austria, 16 - 18 February 2005
- [10] E.R. Ramos, A.G. Expósito & G.Á. Cordero, Quasi-coupled three-phase radial load flow, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 19, pp. 776 - 781, 2004
- [11] S.K. Goswami & S.K. Basu, Direct solution of distribution systems, *Proc. Inst. Electr. Eng. C*, vol. 138, 1991
- [12] J. Teng, A modified Gauss-Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution network, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 24, 2002, pp. 97 - 102
- [13] W. Lin, Y. Su, H. Chin & J. Teng, Three-phase unbalanced distribution power flow solutions with minimum data preparation, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, 1999, pp. 1179 - 1183
- [14] Distribution system analysis subcommittee, *IEEE 37-node test feeder*, IEEE Power Engineering Society

Unbalanced Three-phase Distribution Power Flow Using Alternative Newton-Raphson Method

U. THONGKRAJAY, N. POOLSAWAT, T. RATNIYOMCHAI & T. KULWORAWANICHPONG

Electrical Power and Energy System Research Group
 School of Electrical Engineering, Institute of Engineering
 Suranaree University of Technology
 111 University Avenue, Suranaree District, Nakhon Ratchasima
 THAILAND 30000
 thanatch@sut.ac.th

Abstract: - This paper utilizes the newly developed approach for Newton-Raphson power flow calculation, which is based on current-balanced equations rather than a widely-used power-balanced principle, especially for power distribution systems. This concept gives the replacement of the power-balanced equations that are broadly used by conventional Newton-Raphson power flow methods. The non-linear current equations can simplify very complicated power flow problems, however new mathematical derivation of Jacobian matrices is necessary. Although the power flow equations have been modified, the alternative power flow method still has quadratic convergence. It is sufficient to enhance calculation time required by the iterative processes. To distinguish the alternative method in comparison with the conventional Newton-Raphson, 25-bus, IEEE 37-node, modified 118-node test feeders and the 159-node, 22-kV distribution feeder of Suranaree University of Technology were tested. Moreover, the results reveal that solving the power flow problems with the alternative Newton-Raphson method can considerably reduce execution time consumed by simulation programs when comparing with the conventional methods.

Key-Words: - Power flow, Newton-Raphson method, Gauss-Seidel method, Fast-decouple method, Quadratic convergence, Electric power distribution system

1 Introduction

For many decades, electrical power systems have been analyzed using the bus reference frame approach [1]. Nodal analysis [2] is typically used to obtain voltage solutions. However, electrical demands or loads are usually defined in powers, this causes non-linearity of nodal voltage equations. Since simple methods to solve linear equations fail to handle this problem, some efficient numerical methods (e.g. Gauss-Seidel, Newton-Raphson, etc), have been used [1-3]. To date, there is no objection that the Newton-Raphson power flow method is one of the most powerful algorithms, which has long history of development [4-8], and is widely used to develop commercial power-flow solution software across the world.

Although the classical Newton-Raphson method is very efficient and becomes the standard for the power flow calculation in several power system textbooks, to formulate a matrix equation requires tedious and complicated mathematical expressions. In this paper, the Newton-Raphson method is still applied as the main numerical framework. The key difference is that the mismatch to formulate the matrix equation is derived directly from current-balanced equations rather than the

power-balancing [9]. This concept simplifies very long mathematical formulae to very simplistic ones. With this simplification, reduction of the overall execution time for power flow problem solving is expected.

In this paper, electric power distribution systems are of our focuses [10-13]. They have special features of radial feed configuration to distinguish them from electric power transmission systems. Besides feeding arrangement, unbalanced load services also make them special and need particular derivation of solution methods. Per-unit power flow calculation cannot be applied unlike the transmission systems.

To handle power distribution power flow problems, an intensified mathematical expression of power flow analysis is required. Therefore, in this paper the Newton-Raphson method will be modified to be able and to be suitable for solving unbalanced three-phase distribution power flow problems.

These are all in Section 2 and 3. Assessment of numerical computation resulting from the use of the developed method is carried out and then compares with the assessment of those obtained from the classical Newton-Raphson method. These assessment and comparison to confirm the effectiveness of the proposed method are in Section

4. Conclusion and discussion leading to further works are provided in Sections 5.

2 Three-phase Power System Models

In power distribution systems, one node or so-called bus consisting of three separate busbars of phases A, B and C. However, in many feeder portions where their far-end loads require a single-phase supply, it is unnecessary to build complete three-phase power lines for them. A pair of lines will be used, therefore at the end of this feeder section only two busbars exist. With an additional assumption of earth return, any customer load may consist of a single busbar, double busbars or triple busbars. This leads to a variety of feeder models as shown in Fig. 1.

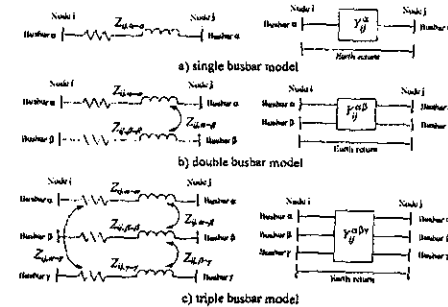


Fig. 1 Modeling of a feeder portion

Different busbar configuration of the two ends of any feeder causes different size of an admittance matrix characterizing the line portion. In the figure, α , β and γ are phase indices and they must represent one of {A, B, C}. With appropriate algebraic techniques of matrix, these matrices with different size can be rewritten into three-by-three matrices as shown in Equations 1 - 3, for single, double and triple busbar configuration, respectively. Consequently, when the system bus admittance matrix is successfully formulated, non-existing busbars can be eliminated by Kron's matrix reduction technique.

$$Y_{ij}^{\alpha} = [y_{ij}^{\alpha\alpha}] \rightarrow Y_{ij}^{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y_{ij}^{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & y_{ij}^{\alpha\beta} \\ y_{ij}^{\beta\alpha} & y_{ij}^{\beta\beta} \\ y_{ij}^{\gamma\alpha} & y_{ij}^{\gamma\beta} \end{bmatrix} \rightarrow Y_{ij}^{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & y_{ij}^{\alpha\beta} & 0 \\ y_{ij}^{\beta\alpha} & y_{ij}^{\beta\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Y_{ij}^{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{\alpha\alpha} & y_{ij}^{\alpha\beta} & y_{ij}^{\alpha\gamma} \\ y_{ij}^{\beta\alpha} & y_{ij}^{\beta\beta} & y_{ij}^{\beta\gamma} \\ y_{ij}^{\gamma\alpha} & y_{ij}^{\gamma\beta} & y_{ij}^{\gamma\gamma} \end{bmatrix} \quad (3)$$

One of special feature of the distribution power system is to have only one feeding point that is the substation. Although many types of bus arrangement are possible, the substation for power flow problem is simply a current source in parallel with admittance as shown in Fig. 2.

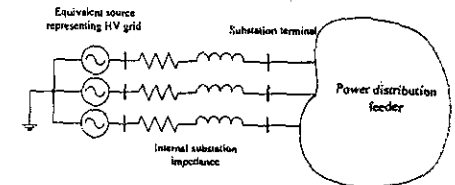


Fig. 2 Modeling of a power substation

Unlike the feeder models, the power substation consists of all three busbars, therefore a voltage vector representing HV grid is a 3×1 matrix, while its admittance is also a 3×3 matrix.

Customer demands are normally modeled as power loads. Any spot load can be single-phase, two-phase or three-phase. However the spot load draws power from busbar(s), therefore only a 3×1 column vector is sufficient to representing such a load, see Fig. 3 for detail.

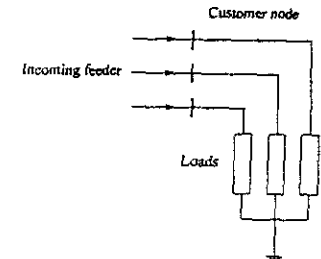


Fig. 3 Modeling of a spot load

3 Problem Formulation

A power distribution system defines as a set of several interconnected elements through between a pair of nodes as shown in Fig. 4. For simplification, most electric power apparatus in power distribution network can be classified into three major types, which are i) power source, ii) feeder line and iii) load. To analyze system characteristics, nonlinear nodal

EDITOR IN CHIEF

MLADENOV V., Technical University of Sofia, BULGARIA

HONORARY EDITOR

ZADEH L., University of Berkeley, USA

ASSOCIATE EDITORS

AKAN A., Istanbul University, Istanbul, TURKEY
CHUA L., University of Berkeley, California, USA
GONOS I., National Technical University of Athens, GREECE
IRACLEOUS D., MIUE, Hellenic Naval Academy, GREECE
KUMMERT A., University of Wuppertal, GERMANY
LAKSHMIKANTHAM V., FIT Dept. Applied Mathematics, Florida, USA
LAPLANTE P., Penn State University, PA, USA
LI YIMING, National Chiao Tung University, Hsinchu, TAIWAN
STATHOPOULOS I., National Technical University of Athens, GREECE
SLAVOVA A., Technical University of Sofia, BULGARIA
VIDYASAGAR M., Tata Consultancy Services, INDIA
YEN K., Florida State University, Miami, FL, USA
ZEMLIAK A., Puebla Autonomous University, MEXICO

TOPICS: Fundamental Theory of Circuits, Network Theory and Applications, Electronics: Components, Devices, Systems. Silicon Devices: Technology, Modeling, Reliability. Optoelectronic Devices, Electron Devices for Control and Robotics, Electron Devices for Power Technology, High Voltages and Electric Machines. Device Physics. Physical Design. High-Level Synthesis and Testing. Non-Linear Circuits. Formal Verification. Semiconductors. Superconductivity Circuits, Computer-Aided Design. Microelectronics, Microcircuits. Very Large Scale Integration Systems (VLSI), Applications. Military Electronics, Electronics for Space exploration, Consumer Electronics, Circuits in Power Technology. Electron Devices for Video Technology. Circuits for Antennas Technology. Electron Devices and Systems for Radar and Sonar Systems. Circuit Models, Electrical and Electronic Measurement, Instrumentation. Laser and Optical Systems. Sensor Technology. Instrument-Computer Interface. Circuits for Industrial Applications. Circuit models for Electromagnetic Fields. Electronics for Signal Processing and other applications.

Systems Theory, Control Systems, Robotics, Artificial Intelligence, Fuzzy Systems, Neural Networks, VLSI Realization of Neural Networks, Computational Intelligence in Systems Theory, Knowledge Modelling, Decision Support Systems, Hierarchical Control Systems, Aerospace Systems, Lightwave Engineering, Stochastic Systems, Non-linear Systems, Telecommunication Systems, Information Systems, Signal Processing Systems, Multidimensional Systems, Multivariable systems, Hybrid Systems, Multirate Systems, Speech and Image Processing Systems, Discrete Event Dynamic Systems, Manufacturing Systems, Decentralised Systems, Remote Sensing, Microelectromechanical Systems, Human-Machine Systems. Environment Modeling, Sonar and underwater acoustic systems. Undersea Systems. Navigation and Tracking Systems. Space Systems. Wavelets. Systems Techniques for Wireless Applications. Filter design. Verification and Validation. Systems for Statistical Signal and Array Processing.

HOW TO-SUBMIT: <http://www.wseas.org>, <http://www.worldses.org>

SUBSCRIPTION: <http://www.wseas.org>, <http://www.worldses.org>

FORMAT OF THE PAPERS: <http://www.worldses.org/journals>

ISSN: 1109-2734

WSEAS E-LIBRARY: <http://www.wseas.org/data>

WSEAS CHAPTERS: <http://www.wseas.org/chapters>

Each paper of this issue was published after review by 3 independent reviewers

Athens, New York, Miami, Rio De Janeiro, Mexico City, Sofia, Taipei, Madrid

Ag. I. Theologou 17-23, 15773, Zographou, Athens, Greece.

Tel: (+30) 210 7473313, Fax: (+30) 210 7473314

A
a
tl
c
ti

Table 1 System loads for each test case

Test system	System load		
	Phase a	Phase b	Phase c
25 node	513 kW	473 kW	493 kW
	385 kvar	355 kvar	370 kvar
37 node	727 kW	639 kW	1091 kW
	357 kvar	314 kvar	530 kvar
118 node	1420 kW	915 kW	1155 kW
	775 kvar	515 kvar	635 kvar
SUT feeder	1361 kW	1361 kW	1469 kW
	659 kvar	659 kvar	711 kvar

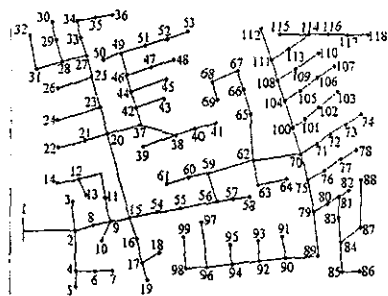


Fig. 8 modified 118-node test feeder

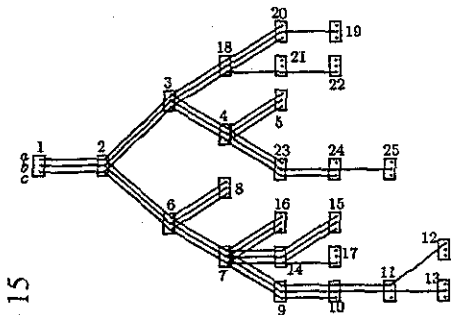


Fig. 6 25-bus test system [11]

91 - 15

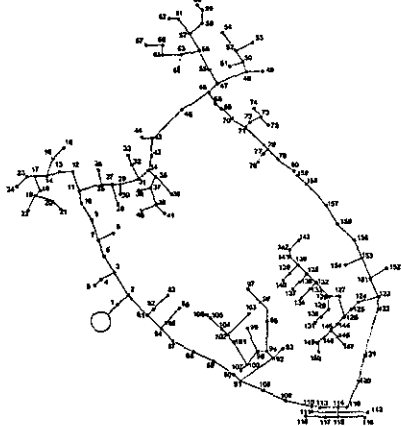


Fig. 9 159-node SUT distribution feeder

To perform the tests, all initial node voltages are assumed to be 1.0 p.u. and to terminate iterative processes, maximum voltage error is set as 1×10^{-6} p.u. for both power flow methods. The results obtained are presented in Table 2.

Table 2 Simulation results

Test system	Iteration used		Execution time	
	SNR	ANR	SNR	ANR
25-bus	4	4	100%	86%
37-bus	4	4	100%	84%
118-bus	4	4	100%	88%
SUT	4	4	100%	83%

* SNR denotes Standard Newton-Raphson method
ANR denotes Alternative Newton-Raphson method

As a result, the alternative Newton-Raphson power flow calculation can reduce calculation time by 15% (average value). The number of iteration used is

equal for both methods. This implies that their convergence property is quite similar. The readers can observe their convergences for each test case in Figs 10 - 17.

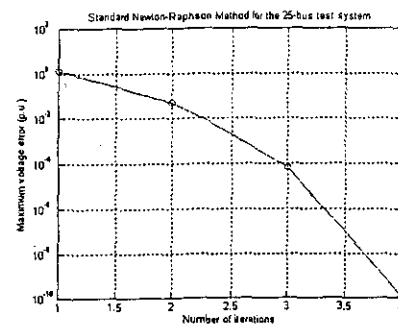


Fig. 10 Convergence of SNR for the 25-bus system

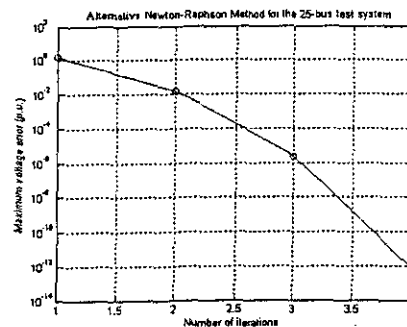


Fig. 11 Convergence of ANR for the 25-bus system

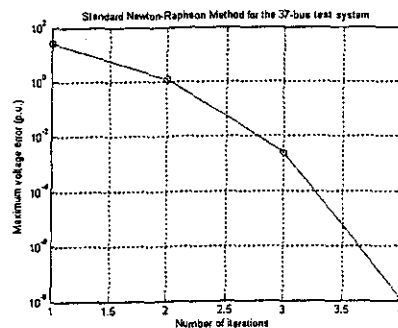


Fig. 12 Convergence of SNR for the 37-bus system

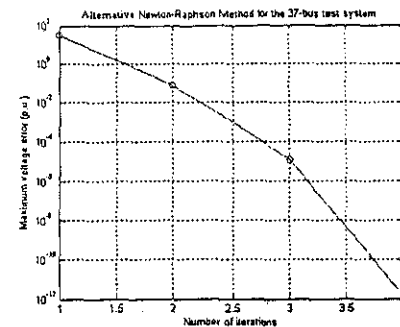


Fig. 13 Convergence of ANR for the 37-bus system

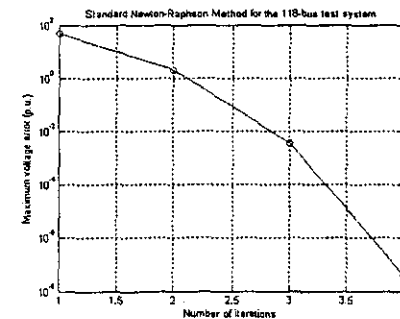


Fig. 14 Convergence of SNR for the 118-bus system

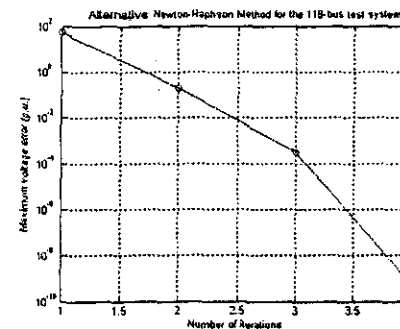


Fig. 15 Convergence of ANR for the 118-bus system

analysis is employed to formulate a set of complex power flow equations as shown in Equation 4. Also, these equations can be decomposed into real and reactive power equations as in Equations 5 and 6.

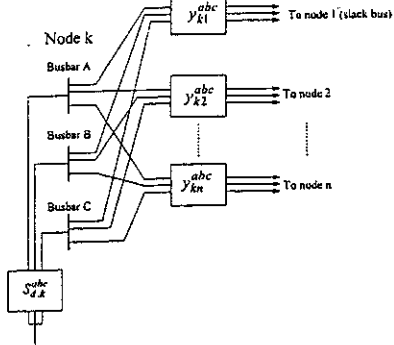


Fig. 4 Three-phase node in distribution systems

$$S_{sch,k}^{abc*} = P_{sch,k}^{abc} - jQ_{sch,k}^{abc} = V_k^{abc} \sum_{i=1}^n Y_{ki}^{abc} V_i^{abc} \quad (4)$$

$$P_{cal,k}^{pp} = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{pp\phi} V_k^p V_i^{\phi}| \cos(\theta_{ki}^{pp\phi} + \delta_i^{\phi} - \delta_k^p) \quad (5)$$

$$Q_{cal,k}^p = -\sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{pp\phi} V_k^p V_i^{\phi}| \sin(\theta_{ki}^{pp\phi} + \delta_i^{\phi} - \delta_k^p) \quad (6)$$

where,

$$S_{sch,k}^{abc} = S_{gen,k}^{abc} - S_{d,k}^{abc}$$

$$P_{sch,k}^{abc} = P_{gen,k}^{abc} - P_{d,k}^{abc}$$

$$Q_{sch,k}^{abc} = Q_{gen,k}^{abc} - Q_{d,k}^{abc}$$

$S_{sch,k}^{abc}$ is scheduled complex power

$P_{sch,k}^{abc}$ is scheduled real power

$Q_{sch,k}^{abc}$ is scheduled reactive power

$S_{d,k}^{abc}$ is demand complex power

$P_{cal,k}^{abc}$ is calculated real power

$Q_{cal,k}^{abc}$ is calculated reactive power

V_k^{abc} is a three-phase voltage vector

Y_{ki}^{abc} is an k^{th} - column, i^{th} - row of $[Y_{bus}^{abc}]$

$p, \phi \in \{a, b, c\}$

The Proposed power flow method simplifies these equations by rearranging into Equations 7 - 9.

$$\begin{bmatrix} S_{sch,k}^{abc} \\ V_k^{abc} \end{bmatrix} = I_k^{abc} = F_k^{abc} + jH_k^{abc} = \sum_{i=1}^n Y_{ki}^{abc} V_i^{abc} \quad (7)$$

$$F_{cal,k}^p = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{pp\phi} V_k^p V_i^{\phi}| \cos(\theta_{ki}^{pp\phi} + \delta_i^{\phi}) \quad (8)$$

$$\left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \cos(\delta_k^p - \phi_k^p)$$

$$H_{cal,k}^p = \sum_{i=1}^n \sum_{\phi=a}^c |Y_{ki}^{pp\phi} V_k^p V_i^{\phi}| \sin(\theta_{ki}^{pp\phi} + \delta_i^{\phi}) \quad (9)$$

$$\left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \sin(\delta_k^p - \phi_k^p)$$

where,

I_k^{abc} is mismatched complex current

$F_{cal,k}^{abc}$ is calculated real current

$H_{cal,k}^{abc}$ is calculated reactive current

Therefore, current mismatch equations are used to formulate the proposed Newton-Raphson updating equations as follows.

$$\begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \delta} & \frac{\partial F}{\partial V} \\ \frac{\partial H}{\partial \delta} & \frac{\partial H}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix} \quad (10)$$

To update node-voltage vectors, elements of the Jacobian matrix must be calculated. Without provision of any mathematical derivation herein, Jacobian sub-matrices can be expressed as follows.

Sub-matrix J_1 :

$$J_{1,kk}^{pp} = \frac{\partial F_k^p}{\partial \delta_k^p} = -|Y_{kk}^{pp} V_k^p| \sin(\theta_{kk}^{pp} + \delta_k^p) \quad (11a)$$

$$+ \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \sin(\delta_k^p - \phi_k^p)$$

$$J_{1,ki}^{p\phi} = \frac{\partial F_k^p}{\partial \delta_i^{\phi}} = -|Y_{ki}^{pp\phi} V_i^{\phi}| \sin(\theta_{ki}^{pp\phi} + \delta_i^{\phi}) \quad (11b)$$

(11b) is for $(i = k \text{ and } p \neq \phi)$.

Sub-matrix J_2 :

$$J_{2,kk}^{pp} = \frac{\partial F_k^p}{\partial V_k^p} = |Y_{kk}^{pp}| \cos(\theta_{kk}^{pp} + \delta_k^p) \quad (12a)$$

$$+ \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \cos(\delta_k^p - \phi_k^p)$$

$$J_{2,ki}^{p\phi} = \frac{\partial F_k^p}{\partial V_i^{\phi}} = |Y_{ki}^{pp\phi}| \cos(\theta_{ki}^{pp\phi} + \delta_i^{\phi}) \quad (12b)$$

(12b) is for $(i = k \text{ and } p \neq \phi)$.

Sub-matrix J_3 :

$$J_{3,kk}^{pp} = \frac{\partial H_k^p}{\partial \delta_k^p} = |Y_{kk}^{pp} V_k^p| \cos(\theta_{kk}^{pp} + \delta_k^p) \quad (13a)$$

$$\left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \cos(\delta_k^p - \phi_k^p)$$

$$J_{3,ki}^{p\phi} = \frac{\partial H_k^p}{\partial \delta_i^{\phi}} = |Y_{ki}^{pp\phi} V_i^{\phi}| \cos(\theta_{ki}^{pp\phi} + \delta_i^{\phi}) \quad (13b)$$

(13b) is for $(i = k \text{ and } p \neq \phi)$.

Sub-matrix J_4 :

$$J_{4,kk}^{pp} = \frac{\partial H_k^p}{\partial V_k^p} = |Y_{kk}^{pp}| \sin(\theta_{kk}^{pp} + \delta_k^p) \quad (14a)$$

$$+ \left| \frac{S_{sch,k}^p}{V_k^p} \right| \sin(\delta_k^p - \phi_k^p)$$

$$J_{4,ki}^{p\phi} = \frac{\partial H_k^p}{\partial V_i^{\phi}} = |Y_{ki}^{pp\phi}| \sin(\theta_{ki}^{pp\phi} + \delta_i^{\phi}) \quad (14b)$$

(14b) is for $(i = k \text{ and } p \neq \phi)$.

With this computation, voltage magnitudes and phases can be updated iteratively by using the following equation where h indicates a counter for iteration.

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta H \end{bmatrix}^{(h)} \quad (15)$$

In addition, a power flow solution framework can be summarized in flow diagram of Fig. 5.

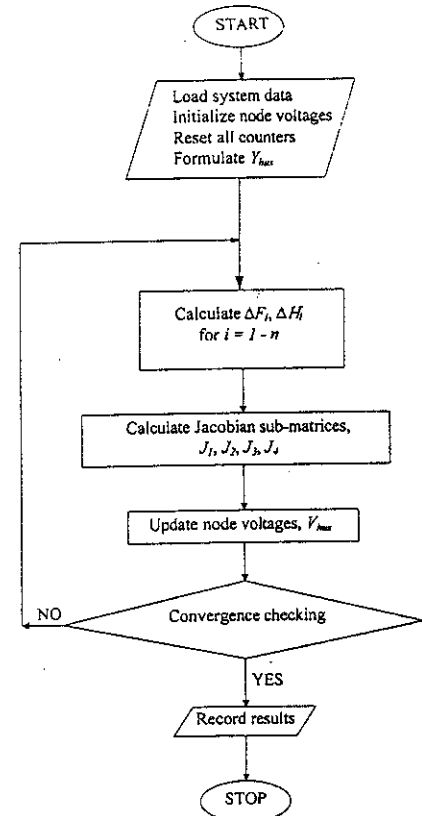


Fig. 5 Flow diagram for power flow calculation

4 Simulation Results

The effectiveness of the alternative Newton-Raphson power flow calculation was tested against 25-node IEEE 37-node, 118-node test feeders and the 159-node, 22-kV Suranaree University of Technology (SUT) distribution feeder as shown in Figs 6 - 9, respectively. Table 1 shows total loads of each phase for each test system. The tests were performed by using a 2.4-GHz, 512-SDRAM Pentium 4 computer in which the power flow calculation programs were coded in MATLAB™.

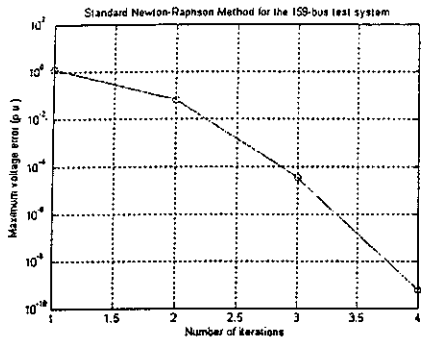


Fig. 16 Convergence of SNR for the 159-bus system

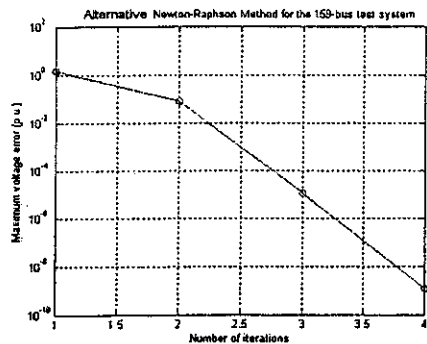


Fig. 17 Convergence of ANR for the 159-bus system

5 Conclusion

This paper proposes an alternative approach for Newton-Raphson power flow calculation, especially in electric power distribution systems. The developed method is based on the nonlinear current-balanced equations, where the derivation of Jacobian matrices and their elements are fully provided. With its simpler updating formulae, shorter execution time consumed is expected. As confirmed by simulation results, the calculation time can be reduced by 15% of the time used by the standard Newton-Raphson method. This advantage can lead to great improvement of power-flow software development in fast computational speed and effective memory usage.

6 Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the financial support of the research grant (SUT7-711-47-12-57) from Suranaree University of Technology, Nakhon

Ratchasima, THAILAND, during a period of this work.

References:

- [1] G.W. Stagg & A.H. El-Abiad, *Computer methods in power system analysis*, McGraw-Hill, 1968
- [2] J.J. Grainger, J.J. Grainger & W.D. Stevenson, *Power system analysis*, McGraw-Hill, 1994
- [3] H. Saadat, *Power system analysis*, McGraw-Hill, 2004
- [4] K.R.C. Mamandur & G.J. Berg, Automatic adjustment of generator voltages in Newton-Raphson method of power flow solutions, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 6, 1982, pp. 1400-1409
- [5] M.E. El-Hawary & O.K. Wellon, The alpha-modified quasi-second order Newton-Raphson method for load flow solutions in rectangular form, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 4, 1982, pp. 854-866
- [6] B. Stott, Decoupled Newton load flow, *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vol. 91, No. 5, 1972, pp. 1955-1959
- [7] P.S.N. Rao, K.S.P. Rao & J. Nanda, An exact fast decoupled load flow method including second order terms in rectangular coordinates, *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 10, 1982, pp. 3261-3268
- [8] S.C. Tripathy, G.D. Prasad, O.P. Malik & G.S. Hope, Load-flow solutions for ill-conditioned power systems by Newton-like method, *IEEE Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 10, 1982, pp. 3648-3657
- [9] T. Kulworawanichpong, T. Ratniyomchai & B. Borriboon, An alternative Newton-Raphson power flow method based on current-balanced equations, *IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC2005)*, Innsbruck, Austria, 16 - 18 February 2005
- [10] E.R. Ramos, A.G. Expósito & G.Á. Cordero, Quasi-coupled three-phase radial load flow, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 19, pp. 776 - 781, 2004
- [11] S.K. Goswami & S.K. Basu, Direct solution of distribution systems, *Proc. Inst. Electr. Eng. C*, vol. 138, 1991
- [12] J. Teng, A modified Gauss-Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution network, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 24, 2002, pp. 97 - 102
- [13] W. Lin, Y. Su, H. Chin & J. Teng, Three-phase unbalanced distribution power flow solutions with minimum data preparation, *IEEE Trans. on*

ภาคผนวก ค

ประวัตินักวิจัย

รณัดชัย กุลวรรณิขพงษ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ด้วยเกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2540 ด้วยทุนส่งเสริมผู้มีศักยภาพเป็นอาจารย์มหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย ต่อมาได้รับทุนพัฒนาอาจารย์จากทบวงมหาวิทยาลัยเพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาโท และในปี พ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโททางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้น ได้รับทุนจากสำนักงานแผนและนโยบายพลังงาน กระทรวงพลังงาน เพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาเอก และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกทางด้านไฟฟ้ากำลังและระบบควบคุมสำหรับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงระยะไกล จากมหาวิทยาลัยแห่งเบอร์มิงแฮม ประเทศอังกฤษ ในปี พ.ศ. 2546 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้ทำการสอนและดำเนินงานวิจัยทางด้านการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุม การหาค่าเหมาะที่สุด และปัญญาประดิษฐ์ อย่างต่อเนื่อง