

การวิเคราะห์คอนติเนนตเงินซีโดยการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและดัชนีสมรรถนะ



นาย อนุวัตร อภิวัดมนานนท์

ศูนย์วิทยพัทพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTINGENCY ANALYSIS USING GENETIC ALGORITHM AND PERFORMANCE INDEX



Mr. Anuwat Apiwattananon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์คอนติเนนซ์โดยการใช้อนุวิธีเชิง
พันธุกรรมและดัชนีสมรรถนะ

โดย

นาย อนุวัตร อภิวัฒน์นานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสทธิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์

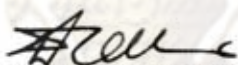
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

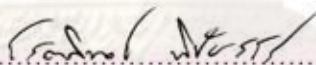
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรณรงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



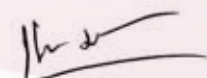
ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)



อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสทธิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนุวัตร อภิวัฒน์านนท์ : การวิเคราะห์คอนดินเจนซีโดยการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และดัชนีสมรรถนะ. (CONTINGENCY ANALYSIS USING GENETIC ALGORITHM AND PERFORMANCE INDEX) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.โสภณพงศ์ พิชัยสวัสดิ์, 129หน้า.

การวิเคราะห์คอนดินเจนซีเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของคอนดินเจนซีที่มีต่อระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาทั้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันบัล เพื่อให้ทราบถึงระดับความรุนแรงของคอนดินเจนซี ทั้งนี้นิยมใช้ดัชนีสมรรถนะเนื่องจากสะดวกและรวดเร็วในการประมวลผล โดยใช้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัลจากเอซีเพาเวอร์โฟลว์ แต่อย่างไรก็ตามหากระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ก็อาจส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการประมวลผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อาศัยหลักการจำลองคอนดินเจนซี ด้วยการฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยเข้าที่บัลที่เกิดคอนดินเจนซี ซึ่งปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยจะสัมพันธ์กับขนาดแรงดันบัลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเกิดคอนดินเจนซี โดยสร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของปัญหาค่าเหมาะสมเฉพาะที่แบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาขนาดแรงดันบัลหลังจากเกิดคอนดินเจนซี โดยพิจารณาเฉพาะบัลที่เกิดคอนดินเจนซีและบัลข้างเคียงเป็นหลัก ทำให้ลดระยะเวลาการประมวลผลและเหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์กับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ทั้งนี้ได้นำเสนอการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค เพื่อสนับสนุนการประมวลผลแบบออนไลน์ เนื่องจากสามารถใส่ค่าตอบได้แม้ว่าจะใช้จำนวนประชากรเพียงเล็กน้อย จากผลการทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัล, IEEE 57 บัล และระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย พบว่าได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต อนุวัตร อภิวัฒน์านนท์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก โสภณพงศ์ พิชัยสวัสดิ์

ปีการศึกษา 2551

4870550121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : CONTINGENCY ANALYSIS / MICRO GENETIC ALGORITHM /
PERFORMANCE INDEX / REACTIVE POWER COMPENSATION

ANUWAT APIWATTANANON : CONTINGENCY ANALYSIS USING GENETIC
ALGORITHM AND PERFORMANCE INDEX. ADVISOR : ASST.PROF.
SOTDHIPONG PHICHAISAWAT, Ph.D., 129 pp.

Contingency Analysis is usually recognized for study of severity level of contingency which causes line overloading or bus voltage violation. Performance Index is generally used for analysis because of high calculation speed. However, the computation time is increased when considering a large-scale power system.

This thesis proposes contingency simulation method by using reactive power compensation which relates to the change of bus voltage magnitudes. This relation can be formulated as a local nonlinear constrained optimization problem for a bounded network consisting of the affected bus and its neighboring buses. Therefore, the proposed method does not require excessive computation time and suitable for a large-scale power system. In addition, the micro – genetic algorithm is used for solving optimization in order to reach post outage bus voltage magnitudes, for which the algorithm usually converges with a few populations and suitable for online processing. The proposed method is applied to IEEE 30-bus, 57-bus and the southern of Thailand system with satisfactory results.

Department : ELECTRICAL ENGINEERING

Student's Signature : *A. Anunt*

Field of Study : ELECTRICAL ENGINEERING

Advisor's Signature : *Sotdhipong Phichaisawat*

Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสทธิพงษ์ พิชัยสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย รวมถึงกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ ดร.ชาญนรงค์ บาลมงคล และ อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ ที่ได้กรุณาให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ Professor Dr. Aydogan Ozdemir จาก Istanbul Technical University ที่ได้กรุณาอธิบายถึงหลักการและขั้นตอนต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองคอนตินเจนซี รวมถึงตอบข้อสงสัยในหลายประเด็น

ขอขอบคุณพีสมภพ อัมภมมงคล หัวหน้าแผนกวางแผนสายส่งและสถานีไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย รวมทั้งคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษา และให้กำลังใจเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน..... | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| 1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์..... | 4 |
| 2. การคำนวณเพาเวอร์ไฟลว์..... | 5 |
| 2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์เพาเวอร์ไฟลว์..... | 5 |
| 2.2 วงจรสมมูลขององค์ประกอบในระบบไฟฟ้ากำลัง..... | 5 |
| 2.3 สมการพื้นฐานในการคำนวณเพาเวอร์ไฟลว์..... | 10 |
| 2.4 การสร้างบัลแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอีลิเมนต์สแตมป์..... | 10 |
| 2.5 ชนิดของบัลในระบบไฟฟ้ากำลัง..... | 14 |
| 2.6 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า..... | 15 |
| 2.7 การวิเคราะห์เพาเวอร์ไฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน..... | 17 |
| 2.8 การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลง..... | 20 |
| 2.9 ขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์ไฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน..... | 21 |
| 2.10 การวิเคราะห์เพาเวอร์ไฟลว์ด้วยฟาสต์ดีคัปเปิล..... | 24 |
| 2.11 การวิเคราะห์เพาเวอร์ไฟลว์ด้วยการประมาณแบบเชิงเส้น..... | 27 |

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.12 สรุป..... | 28 |
| 3. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม..... | 29 |
| 3.1 ส่วนประกอบของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย..... | 29 |
| 3.1.1 การเข้ารหัสและถอดรหัส..... | 29 |
| 3.1.2 การกำหนดกลุ่มประชากรเริ่มต้น..... | 30 |
| 3.1.3 การประเมินความเหมาะสม..... | 30 |
| 3.1.4 ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม..... | 30 |
| 3.1.5 เงื่อนไขการหยุด..... | 36 |
| 3.2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค..... | 38 |
| 3.2.1 หลักการการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... | 38 |
| 3.2.2 การหาค่าเหมาะสมแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (MOEA)..... | 38 |
| 3.2.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาคที่มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (MOMGA)..... | 40 |
| 3.3 สรุป..... | 43 |
| 4. ความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง..... | 44 |
| 4.1 นิยามและหลักการ..... | 44 |
| 4.2 การวิเคราะห์คอนตินเจนซี..... | 45 |
| 4.3 การวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะ..... | 52 |
| 4.4 สรุป..... | 55 |
| 5. วิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค..... | 56 |
| 5.1 การจำลองคอนตินเจนซีโดยการฉีดกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟชดเชย..... | 56 |
| 5.1.1 การจำลองสายส่งทริป..... | 56 |
| 5.1.2 การจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทริป..... | 59 |
| 5.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับวิเคราะห์คอนตินเจนซี..... | 60 |
| 5.3 สรุป..... | 64 |

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 6. การทดสอบและวิเคราะห์ผล..... | 65 |
| 6.1 การทดสอบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำเสนอสำหรับวิเคราะห์คอนตินเจนซี ของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... | 65 |
| 6.2 การทดสอบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำเสนอสำหรับวิเคราะห์คอนตินเจนซี ของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส..... | 76 |
| 6.3 กรณีศึกษากระบวนการวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำเสนอสำหรับวิเคราะห์คอนตินเจนซี ของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย..... | 91 |
| 6.4 ตัวอย่างการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำมาใช้วิเคราะห์ คอนตินเจนซีของระบบทดสอบ 2383 บัส (Winter peak)..... | 104 |
| 6.5 วิเคราะห์ผลการศึกษา..... | 107 |
| 7. สรุปและข้อเสนอแนะ..... | 108 |
| 7.1 สรุปผลการวิจัย..... | 108 |
| 7.2 ข้อเสนอแนะ..... | 109 |
| รายการอ้างอิง..... | 110 |
| ภาคผนวก..... | 112 |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลระบบทดสอบ..... | 113 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 129 |

สารบัญญัตราสาร

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง..... | 15 |
| 6.1 (ก) ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนตินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3..... | 68 |
| (ข) ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนตินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ของกรณีศึกษาที่ 4 และ 5..... | 69 |
| 6.2 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของขนาดแรงดันที่บัสโหลดและระยะเวลา ในการประมวลผลของแต่ละกรณีศึกษา (IEEE 30 บัส)..... | 71 |
| 6.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีเอซีเพาเวอร์โฟลว์และ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... | 71 |
| 6.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... | 74 |
| 6.5 (ก) ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนตินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส ของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3..... | 78 |
| (ข) ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนตินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส ของกรณีศึกษาที่ 4 และ 5..... | 81 |
| 6.6 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของขนาดแรงดันที่บัสโหลดและระยะเวลา ในการประมวลผลของแต่ละกรณีศึกษา (IEEE 57 บัส)..... | 83 |
| 6.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีเอซีเพาเวอร์โฟลว์และ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส..... | 83 |
| 6.8 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส..... | 87 |
| 6.9 (ก) ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนตินเจนซีของระบบไฟฟ้าภาคใต้ ของประเทศไทยของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3..... | 94 |
| (ข) ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนตินเจนซีของระบบไฟฟ้าภาคใต้ ของประเทศไทยของกรณีศึกษาที่ 4 และ 5..... | 95 |
| 6.10 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของขนาดแรงดันที่บัสโหลดและระยะเวลา ในการประมวลผลของแต่ละกรณีศึกษา (ระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย)..... | 97 |

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 6.11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีเอซีเพาเวอร์โฟลว์และ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย..... | 97 |
| 6.12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย..... | 101 |
| 6.13 ขนาดแรงดันของบัลโหลดที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าหลังจากเกิดคอนตินเจนซี ของระบบทดสอบ 2383 บัส (Winter peak)..... | 105 |
| 6.14 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของขนาดแรงดันที่บัลโหลดและระยะเวลา ในการประมวลผลของระบบทดสอบ..... | 107 |
| ก.1.1 ข้อมูลบัลของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... | 113 |
| ก.1.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... | 115 |
| ก.1.3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... | 115 |
| ข.1.1 ข้อมูลบัลของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส..... | 117 |
| ข.1.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส..... | 119 |
| ข.1.3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส..... | 120 |
| ค.1.1 ข้อมูลบัลของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย..... | 123 |
| ค.1.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย..... | 125 |
| ค.1.3 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย..... | 125 |

สารบัญภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.1 | วงจรมุมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 6 |
| 2.2 | วงจรมุมูลของโหลด..... 6 |
| 2.3 | วงจรมุมูลพายที่ใช้แทนสายส่งไฟฟ้า..... 7 |
| 2.4 | (ก) แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า (ข) วงจรมุมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 7 |
| 2.5 | วงจรมุมูลของชั้นที่อิไลเมนต์..... 10 |
| 2.6 | แผนผังขั้นตอนการสร้างบัสแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิไลเมนต์แสดมภ์..... 13 |
| 2.7 | แผนผังขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน..... 23 |
| 3.1 | ตัวอย่างการคัดเลือกแบบ Roulette Wheel..... 31 |
| 3.2 | ตัวอย่างการคัดเลือกแบบ Stochastic Universal Sampling..... 32 |
| 3.3 | วิธีการครอสโอเวอร์แบบหนึ่งจุด..... 33 |
| 3.4 | ยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์..... 34 |
| 3.5 | วิธีการมิวเทชัน..... 35 |
| 3.6 | แผนผังขั้นตอนขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย..... 37 |
| 3.7 | แผนผังกระบวนการ MOMGA..... 42 |
| 4.1 | (ก) สภาพสายส่งก่อนหลุด (ข) สภาพสายส่งหลุดที่เกิดขึ้นจริง (ค) แบบจำลองสายส่งหลุด..... 49 |
| 4.2 | แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะ..... 53 |
| 5.1 | (ก) สายส่งหลุดที่เกิดขึ้นจริง (ข) แบบจำลองสายส่งหลุด..... 56 |
| 5.2 | (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดที่เกิดขึ้นจริง (ข) แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุด.... 59 |
| 5.3 | แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์สายส่งหลุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม..... 62 |
| 5.4 | แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดโดยใช้ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม..... 63 |
| 6.1 | ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส..... 68 |
| 6.2 | ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส..... 78 |
| 6.3 | ระบบไฟฟ้ากำลังภาคใต้ของประเทศไทย (39 บัส)..... 93 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความมั่นคง คือ ระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถทนต่อเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องต่างๆ โดยที่ยังคงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามปกติ ซึ่งเรียกเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่า คอนตินเจนซี (Contingency) ดังนั้นการวิเคราะห์ผลกระทบของคอนตินเจนซีที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังจึงเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมหรือปรับปรุงระบบไฟฟ้าต่อไป

คอนตินเจนซีในระบบไฟฟ้ากำลังอาจเกิดจากสายส่งหลุด (Line Outage) หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุด (Generator Trip) ออกจากระบบ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดโหลดเกินในสายส่ง (Line Overloading) หรือละเมิดขีดจำกัดของแรงดันบัส (Bus Voltage Violation) ซึ่งหากเกินขีดจำกัดความมั่นคง (Security Limit) อุปกรณ์ป้องกันจะปลดส่วนที่ได้รับผลกระทบออกจากระบบ ซึ่งหากผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถแก้ไขเพื่อนำระบบไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติได้ทัน ความเสียหายต่อระบบอาจขยายไปยังบริเวณอื่นๆ มากขึ้น (Cascading Outage) จนอาจเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง (Blackout)

การวิเคราะห์ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (System Security Analysis) แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลัก [1] คือ

1. การตรวจสอบสถานะ (System Monitoring) เป็นการนำข้อมูลทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า สถานะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ความถี่ของระบบ รวมทั้งตำแหน่งแท็บหม้อแปลงในขณะนั้น มาวิเคราะห์และตรวจสอบกับขีดจำกัด และแจ้งเตือนเมื่อสถานะดังกล่าวมีความเสี่ยงที่อาจเป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้า เช่น การเกิดโหลดเกินในสายส่งหรือแรงดันบัสเกินขอบเขต
2. การจ่ายโหลดอย่างเหมาะสม (Optimal Power Flow) เป็นการควบคุมให้ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดได้อย่างเพียงพอ โดยมีต้นทุนการผลิตต่ำสุด ภายใต้ขอบเขตความมั่นคง
3. การวิเคราะห์คอนตินเจนซี (Contingency Analysis) เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของคอนตินเจนซีที่มีต่อระบบไฟฟ้า เพื่อให้ทราบถึงระดับความรุนแรงของคอนตินเจนซี ภายใต้สภาวะต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

โดยทั่วไปการวิเคราะห์คอนตินเจนซีนิยมใช้ดัชนีสมรรถนะ (Performance Index) เพื่อบอกถึงระดับความรุนแรงของคอนตินเจนซี โดยคำนวณขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัลจากเอซีเพาเวอร์ฟลิว (AC Power Flow) [1],[2] ซึ่งเสียเวลาในการคำนวณมากหากระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ แม้ว่าจะมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ดี ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้วิธีการดังกล่าวไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์และแก้ปัญหาคอนตินเจนซีในเวลาอันจำกัด

โดยปกติแล้วการวิเคราะห์คอนตินเจนซีเป็นการวิเคราะห์แบบออนไลน์ เนื่องจากต้องสามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดจากคอนตินเจนซีได้ทันเวลา ดังนั้นการประมวลผลที่รวดเร็วจึงมีประโยชน์ในแง่ที่ว่าทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ตั้งแต่ช่วงเริ่มแรก ก่อนที่ความเสียหายจะขยายวงกว้างมากขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้อาศัยหลักการจำลองคอนตินเจนซี ด้วยการชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่พชดเซย (Reactive Power Compensation) [3],[4] เข้าที่บัลที่เกิดคอนตินเจนซี ซึ่งปริมาณกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่พชดเซยจะสัมพันธ์กับขนาดแรงดันบัลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเกิดคอนตินเจนซี ซึ่งหลักการดังกล่าวมีข้อดี คือ บัลแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์จะคงที่ตลอดการวิเคราะห์ กล่าวคือ สามารถใช้บัลแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ก่อนเกิดคอนตินเจนซีเท่านั้น เพื่อหาขนาดแรงดันบัลหลังเกิดคอนตินเจนซี โดยขนาดของกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่พชดเซยเป็นคำตอบของปัญหาค่าเหมาะสม

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค (Micro Genetic Algorithm) [5]-[11] เพื่อแก้ปัญหาค่าเหมาะสมแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากสามารถเข้าสู่คำตอบได้แม้ว่าจะกำหนดขนาดของกลุ่มประชากรเริ่มต้น (Initial Population) เพียงจำนวนเล็กน้อย โดยได้ผลลัพธ์เป็นขนาดแรงดันบัลหลังจากเกิดคอนตินเจนซี และปริมาณกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่พชดเซยที่ฉีดเข้าสู่บัลเพื่อจำลองคอนตินเจนซี ส่วนการคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งนั้นใช้หลักการประมาณเชิงเส้น หากคอนตินเจนซีใดมีแรงดันบัลและกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งละเมิดขีดจำกัดเป็นจำนวนมาก คอนตินเจนซีนั้นอาจเป็นอันตรายต่อระบบได้มาก

นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะ [13] โดยทดสอบกับระบบ IEEE 30 บัล, IEEE 57 บัล และระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย (39 บัล)

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ร่วมกับการจำลองคอนตินเจนซีด้วยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่พชดเซย
- 2) เปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธีการที่พัฒนาขึ้นกับการวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาผลกระทบของคอนตันเจนซี่ในสภาวะคงตัว (Steady State)
- 2) วิเคราะห์คอนตันเจนซี่แบบ $N - 1$ โดยเป็นคอนตันเจนซี่ที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือสายส่งไฟฟ้า ทั้งนี้ไม่พิจารณาคอนตันเจนซี่ของสายส่งไฟฟ้าที่ทำให้เกิด Islanding

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาผลกระทบจากคอนตันเจนซี่ต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า
- 2) ศึกษาหลักการพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์คอนตันเจนซี่จากหนังสือและบทความที่เกี่ยวข้อง
- 3) ศึกษาหลักการจำลองสายส่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดโดยใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชย
- 4) ศึกษาหลักการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อใช้สำหรับแก้ปัญหาค่าเหมาะสมแบบไม่เชิงเส้น (Non Linear Constrained Optimization) โดยได้ผลลัพธ์เป็นขนาดแรงดันบัลหลังจากเกิดคอนตันเจนซี่ และปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยที่ฉีดเข้าสู่บัลเพื่อจำลองคอนตันเจนซี่
- 5) ศึกษาหลักการคำนวณความไวเชิงเส้น (Linear Sensitivity Factor) และดัชนีสมรรถนะ (Performance Index)
- 6) วิเคราะห์คอนตันเจนซี่ด้วยวิธีการที่น่าเสนอ โดยทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส, IEEE 57 บัส และระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย
- 7) สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) ทำให้ทราบถึงระดับความรุนแรงของคอนตันเจนซี่ต่างๆ ที่มีต่อระบบไฟฟ้า ภายใต้การวิเคราะห์แบบออนไลน์
- 2) นำไปใช้สำหรับวางแผนด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้า และขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าในอนาคต

1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

- บทที่ 2 กล่าวถึงพื้นฐานการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ ด้วยวิธีนิวตัน – กราฟสัน (NR-Method) วิธีฟาสต์ดีคัปเปิล (Fast Decoupled Method) และวิธีเพาเวอร์โฟลว์เชิงเส้น (DC Power Flow) รวมถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี ซึ่งการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ทั้ง 3 วิธีนี้เป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า
- บทที่ 3 อธิบายหลักการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithm) และนำเสนอหลักการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาคที่มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Micro Genetic Algorithm) ซึ่งถูกประยุกต์ใช้สำหรับหาขนาดของแรงดันบัลหลังจากเกิดคอนตินเจนซีและปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยที่ฉีดเข้าสู่บัลเพื่อจำลองคอนตินเจนซี
- บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการและนิยามของความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (Power System Security) โดยเน้นที่การวิเคราะห์คอนตินเจนซีแบบต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะ (Performance Index) โดยพิจารณาทั้งขีดจำกัดด้านแรงดัน และขีดจำกัดในการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่ง นอกจากนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์อย่างง่ายโดยใช้การประมาณเชิงเส้น ที่เรียกว่า ความไวเชิงเส้น (Linear Sensitivity Factor) โดยพิจารณาแบ่งเป็นคอนตินเจนซีที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Gen Shift Factor) และสายส่ง (Line Outage Distribution Factor) โดยสุดท้ายได้นำเสนอแผนผังการวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะร่วมกับความไวเชิงเส้น
- บทที่ 5 นำเสนอหลักการและขั้นตอนการวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาคร่วมกับการจำลองการเกิดคอนตินเจนซีด้วยการฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นขนาดแรงดันบัลหลังจากเกิดคอนตินเจนซี
- บทที่ 6 แสดงผลการทดสอบการวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยใช้ดัชนีสมรรถนะ
- บทที่ 7 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

การคำนวณเพาเวอร์โพล์

การคำนวณเพาเวอร์โพล์เป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง และสามารถประยุกต์ใช้กับ การวิเคราะห์ฟลด์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ รวมทั้งการวางแผนและการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นต้น โดยคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์ในสภาวะต่างๆ จะได้ขนาดและมุมของแรงดันบัสต่างๆ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่งและหม้อแปลงในระบบ รวมทั้งกำลังไฟฟ้าสูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆ

2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์

2.1.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการวิเคราะห์เพาเวอร์โพล์เป็นระบบไฟฟ้าสมดุล 3 เฟส ในสภาวะคงตัว (Steady State)

2.1.2 ในการสร้างแอดมิตแดนซ์เมตริกและสมการเพาเวอร์โพล์ในนี้จะยึดบัสเป็นกรอบอ้างอิง (Bus Frame Of Reference)

2.1.3 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบมีบัสอ้างอิงเพียง 1 บัส

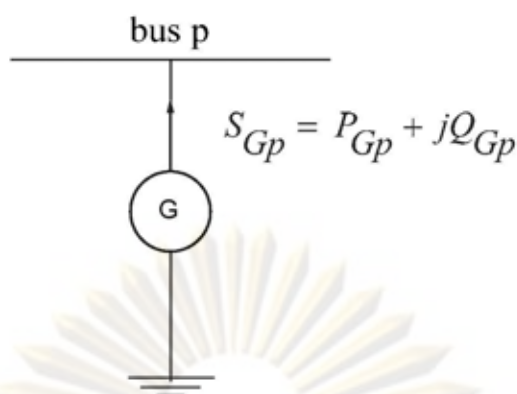
2.1.4 ให้ถือว่าโหลดทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลังคงที่

2.1.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงและสายส่งเป็นแบบ π

2.2 วงจรสมมูลขององค์ประกอบในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตจะปรับให้มีค่าคงที่ ส่วนกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟจะปรับเปลี่ยนได้เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้า แต่ต้องไม่เกินค่าขีดจำกัดสูงสุดและไม่น้อยกว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุด สำหรับวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแทนด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อบัส ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยกำหนดให้ P_{Gp} และ Q_{Gp} เป็นค่าบวกเมื่อจ่าย P_{Gp} และ Q_{Gp} เข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

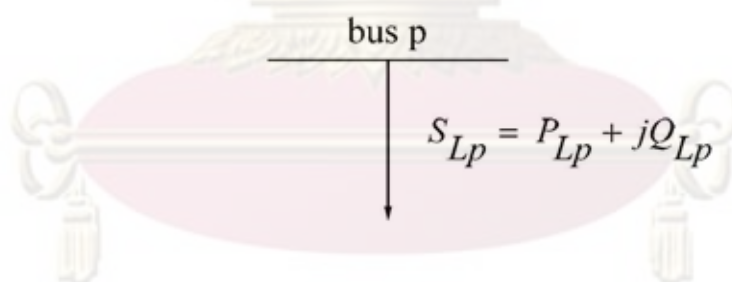
P_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าสู่บัส p

Q_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายเข้าสู่บัส p

S_{Gp} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่จ่ายเข้าสู่บัส p

2.2.2 โหลด (Load)

โหลดเป็นอุปกรณ์ที่รับกำลังไฟฟ้าจากบัส ซึ่งจะถือเป็นค่าคงที่และมีค่าเป็นลบในการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ โดยสัญลักษณ์ที่ใช้แทนโหลดในวงจรสมมูลคือ ลูกศร ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของโหลด

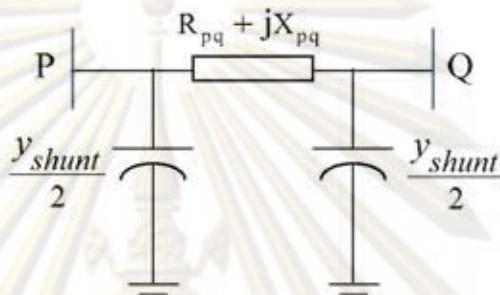
P_{Lp} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายให้โหลดที่บัส p

Q_{Lp} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายให้โหลดที่บัส p

S_{Lp} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่จ่ายให้โหลดที่บัส p

2.2.3 สายส่งไฟฟ้า (Transmission line)

สายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัสสองบัสใดๆ เช่น ระหว่างบัส p และบัส q สามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลพายซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน (Resistance : R_{pq}) ต่ออนุกรมกับอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive Reactance : X_{pq}) เชื่อมอยู่ระหว่างสองบัสนั้นๆ และมีชั้นท์คาปาซิแตนซ์ (Shunt Capacitance) เท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าอัดประจุสายส่ง (Half Line Charging Admittance : $y/2$) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

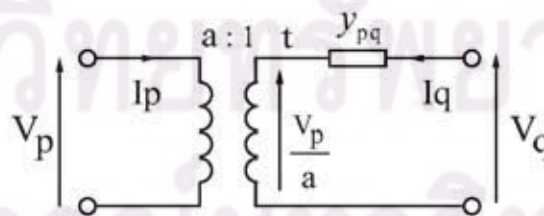


รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่งไฟฟ้า

- โดย R_{pq} คือ ความต้านทานของสายส่ง pq
- X_{pq} คือ อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่ง pq
- y_{shunt} คือ ค่าอัดประจุสายส่งของสายส่ง pq

2.2.4 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

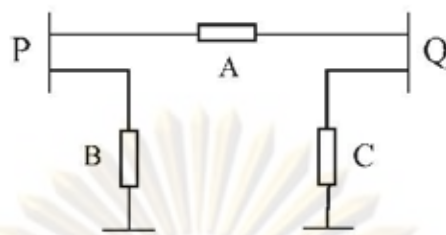
แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลงต่ออนุกรมกับหม้อแปลงอุดมคติ (Ideal Transformer) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก)



รูปที่ 2.4 (ก) แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

- โดย a คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง
- y_{pq} คือ แอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง

โดยวงจรสมมูลที่สอดคล้องกับแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบ π ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.4 (ข) วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับพารามิเตอร์ A , B และ C ของวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.4 (ข) มีค่าดังนี้

$$A = \frac{y_{pq}}{a^*} \quad (2.1)$$

$$B = \frac{y_{pq}}{a^*} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \quad (2.2)$$

$$C = y_{pq} \left(1 - \frac{1}{a^*} \right) \quad (2.3)$$

จากรูปที่ 2.4 (ก) พิจารณาในส่วนของหม้อแปลงอุดมคติจะได้ว่า กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) เข้าและออกจะต้องเท่ากัน นั่นคือ

$$S_p = S_t \quad (2.4)$$

โดย S_p คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลออกจากหม้อแปลงทางด้านบัส p มีค่าดังนี้

$$S_p = -V_p \cdot I_p^* \quad (2.5)$$

S_t คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลเข้าสู่หม้อแปลงทางด้านบัส t มีค่าดังนี้

$$S_t = \frac{V_p}{a} \cdot I_q^* \quad (2.6)$$

จาก (2.4), (2.5) และ (2.6) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} -V_p \cdot I_p^* &= \frac{V_p}{a} \cdot I_q^* \\ I_q^* &= -a \cdot I_p^* \\ I_q &= -a^* \cdot I_p \end{aligned} \quad (2.7)$$

อาศัยกฎของเคอร์ชอร์ฟ สามารถคำนวณหากระแส I_q ได้ดังนี้

$$I_q = y_{pq} \cdot \left(V_q - \frac{V_p}{a} \right) \quad (2.8)$$

จาก (2.7) จะได้ว่า

$$I_p = -\frac{I_q^*}{a} \quad (2.9)$$

แทนค่า I_q จาก (2.8) ลงใน (2.9) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} I_p &= -\frac{y_{pq}}{a^*} \cdot \left(V_q - \frac{V_p}{a} \right) \\ I_p &= -\frac{y_{pq}}{a^*} \cdot V_q + \frac{y_{pq}}{|a^2|} \cdot V_p \end{aligned} \quad (2.10)$$

จาก (2.8) และ (2.10) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองด้านของหม้อแปลงในรูปของสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

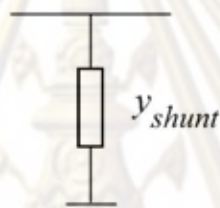
$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{pq}}{|a^2|} & -\frac{y_{pq}}{a^*} \\ -\frac{y_{pq}}{a} & y_{pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_q \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

โดยบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

$$[Y_{bus}] = \begin{bmatrix} \frac{y_{pq}}{|a|^2} & -\frac{y_{pq}}{a^*} \\ -\frac{y_{pq}}{a} & y_{pq} \end{bmatrix}$$

2.2.5 ชั้นทีอิลิเมนต์ (Shunt Element)

ชั้นทีอิลิเมนต์ที่ทำงานในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ คาปาซิเตอร์ (Capacitor) และรีแอคเตอร์ (Reactor) หน้าที่ของอุปกรณ์ดังกล่าว คือ ช่วยรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัสให้อยู่ในช่วงการทำงานตามที่กำหนด สำหรับวงจรสมมูลที่ใช้แทนชั้นทีอิลิเมนต์ ประกอบด้วย แอดมิตแตนซ์คงที่ y_{shunt} ต่อเข้ากับบัสและต่อลงดินดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของชั้นทีอิลิเมนต์

2.3 สมการพื้นฐานในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์

จากสมมติฐานในหัวข้อ 2.1 สมการพื้นฐานในการคำนวณเพาเวอร์โพลว์โดยการยึดบัสเป็นกรอบอ้างอิงเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัส และแรงดันบัสดังนี้

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (2.12)$$

โดย I_{bus} คือ เวกเตอร์ของกระแสบัส
 V_{bus} คือ เวกเตอร์ของแรงดันบัส
 Y_{bus} คือ บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

2.4 การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์ (Element stamp method)

การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยใช้วิธีอิลิเมนต์สแตมป์ [1] เป็นการหาบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ โดยการเพิ่มสายส่งของระบบไฟฟ้าเข้าไปที่ละเส้นจนครบ และเมื่อเพิ่มสายส่งจนครบ จะได้บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 สายส่งไฟฟ้า

สำหรับสายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัส P และ Q ตามรูปที่ 2.3 บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดัง (2.13)

$$\left. \begin{aligned} Y_{pp}^{new} &= Y_{pp}^{old} + y_{pq} + \frac{Y_{shunt}}{2} \\ Y_{qq}^{new} &= Y_{qq}^{old} + y_{pq} + \frac{Y_{shunt}}{2} \\ Y_{pq}^{new} &= Y_{qp}^{new} = Y_{pq}^{old} - y_{pq} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

โดย Y_{pp}^{new} คือ สมมาตริกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq
 Y_{pp}^{old} คือ สมมาตริกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq
 Y_{qq}^{new} คือ สมมาตริกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq
 Y_{qq}^{old} คือ สมมาตริกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก q ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq
 Y_{pq}^{new} คือ สมมาตริกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq
 Y_{qp}^{new} คือ สมมาตริกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว q และหลัก p หลังใส่สายส่งไฟฟ้า pq
 Y_{pq}^{old} คือ สมมาตริกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก q ก่อนใส่สายส่งไฟฟ้า pq
 y_{pq} คือ แอดมิตแตนซ์อนุกรม (Series Admittance) ของสายส่งไฟฟ้า pq
 Y_{shunt} คือ ค่าอัดประจุของสายส่งไฟฟ้า pq (Line Charging Admittance)

2.4.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างบัส p และ q ตามรูปที่ 2.4(ก) บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดัง (2.14)

$$\left. \begin{aligned} Y_{pp}^{new} &= Y_{pp}^{old} + y_{pq} + \frac{Y_{shunt}}{|a|^2} \\ Y_{qq}^{new} &= Y_{qq}^{old} + y_{pq} + \frac{Y_{shunt}}{2} \\ Y_{pq}^{new} &= Y_{qp}^{new} = Y_{pq}^{old} - y_{pq} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

โดย y_{pq} คือ แอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า pq
 a คือ อัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลงไฟฟ้า pq
 a^* คือ สังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของ a
 $|a|^2$ คือ ขนาดของ a ยกกำลังสอง

2.4.3 ชั้นทีอิลิเมนต์

สำหรับชั้นทีอิลิเมนต์ที่ต่อกับบัส p ตามรูปที่ 2.5 บัสแอดมิตแตนซ์ใหม่จะเป็นดัง (2.15)

$$Y_{pp}^{new} = Y_{pp}^{old} + y_p \quad (2.15)$$

โดย

Y_{pp}^{old} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p ก่อนใส่ชั้นทีอิลิเมนต์ที่บัส p

Y_{pp}^{new} คือ สมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์แถว p และหลัก p หลังใส่ชั้นทีอิลิเมนต์ที่บัส p

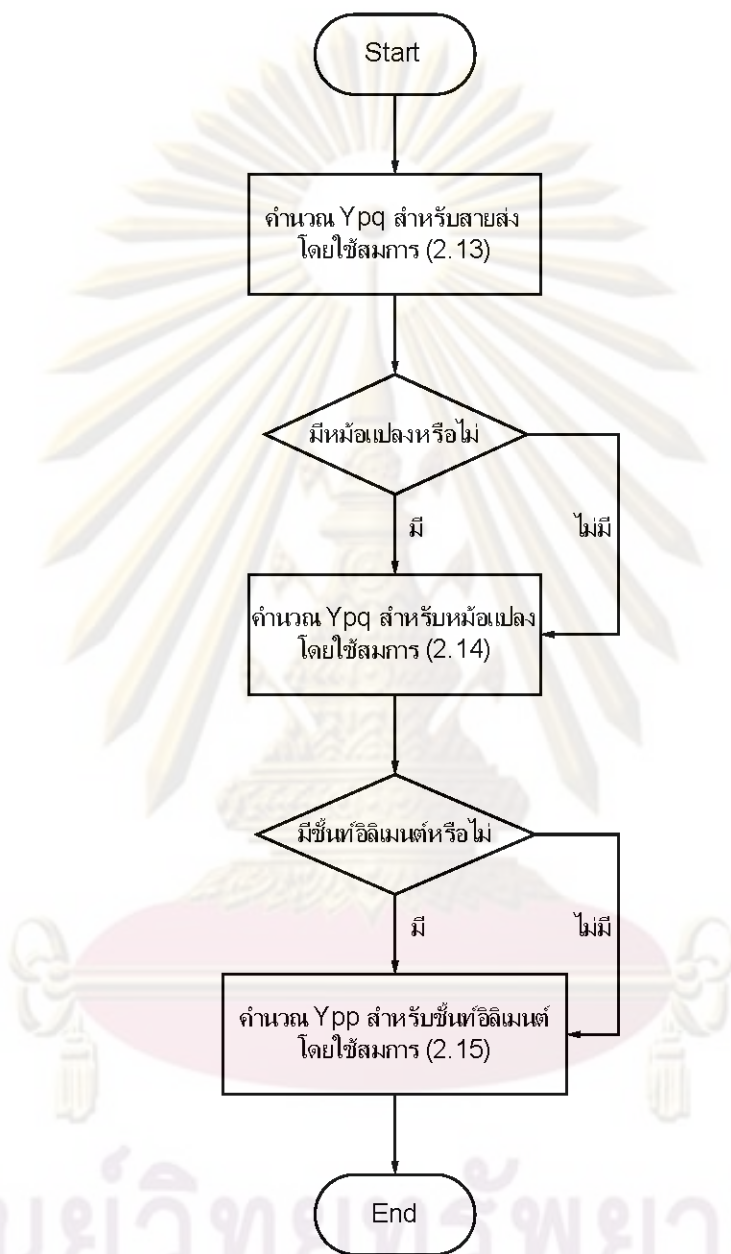
y_p คือ แอดมิตแตนซ์ของชั้นทีอิลิเมนต์ที่ต่อกับบัส p

2.4.4 ขั้นตอนการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์

จากหลักการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่กล่าวมา สามารถสรุปเป็นขั้นตอนที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นการคำนวณหาเวอริโพลว์ได้ดังนี้ และสรุปเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 2.6

- 1) อ่านข้อมูลของระบบ
- 2) กำหนดค่าเริ่มต้น $Y_{pp}^{new} = 0 + j0$ สำหรับทุกค่าของ p และ q
- 3) คำนวณสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของสายส่งไฟฟ้า โดย (2.13)
- 4) ตรวจสอบว่ามีหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่
 - 4.1) ถ้าไม่มีชั้นทีอิลิเมนต์ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8
 - 4.2) ถ้ามีหม้อแปลงไฟฟ้าให้ทำขั้นตอนที่ 5 ต่อไป
- 5) คำนวณสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดย (2.14)
- 6) ตรวจสอบว่ามีชั้นทีอิลิเมนต์ในระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่
 - 6.1) ถ้าไม่มีชั้นทีอิลิเมนต์ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8
 - 6.2) ถ้ามีชั้นทีอิลิเมนต์ให้ทำขั้นตอนที่ 7 ต่อไป

- 7) คำนวณสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของชั้นอีลิเมนต์ โดย (2.15)
- 8) สิ้นสุดการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์



รูปที่ 2.6 แผนผังขั้นตอนการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอีลิเมนต์แสดงมภ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

ชนิดบัสในระบบไฟฟ้ากำลังจำแนกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทที่ 1 บัสที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Bus) และประเภทที่ 2 บัสที่ไม่ได้ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ต่ออยู่กับโหลด ซึ่งเรียกว่าโหลดบัส (Load Bus)

ประเภทที่ 1 บัสที่มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสสามารถกำหนดได้โดยการควบคุมของอุปกรณ์รักษาแรงดัน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ ชั้นที่คาปาซิเตอร์ ซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าที่บัส ดังนั้น การวิเคราะห์ปัญหาทางเพาเวอร์โพลว์ สำหรับบัสชนิดนี้ จะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าคงที่และเรียกบัสประเภทนี้ว่า บัสควบคุมแรงดัน (Voltage Controlled Bus) ในบรรดาบัสควบคุมแรงดันทั้งหมดจะเลือก 1 บัส ที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังการผลิตที่ใหญ่ที่สุดเป็นบัสอ้างอิง (Reference Bus) เหตุที่จะต้องมีบัสอ้างอิงก็ด้วยความจำเป็น 2 ประการ กล่าวคือ ประการแรก เพื่อให้เป็นจุดอ้างอิงของระบบ เนื่องจากภายหลังการคำนวณเพาเวอร์โพลว์มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ซึ่งได้มานั้น เป็นมุมเปรียบเทียบกับมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงทั้งสิ้น เพื่อให้สามารถบอกได้ว่าที่บัสใดๆ จะมีมุมนำหน้า (Leading angle) หรือล้าหลัง (Lagging angle) มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง กรณีทั่วไปมักนิยมให้มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงเป็น 0.00 องศา ประการถัดมา เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงจะต้องรับภาระในการชดเชยกำลังสูญเสียและกำลังไฟฟ้าของโหลดที่ยังไม่ได้รับการจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆ ทั้งหมดในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณเพาเวอร์โพลว์ กำลังสูญเสียในระบบเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จึงไม่อาจบอกได้ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด จึงควรเลือกบัสที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังการผลิตที่สูงที่สุดเป็นบัสอ้างอิง เพื่อให้สามารถชดเชยกำลังสูญเสียของระบบได้อย่างเพียงพอ

ประเภท 2 บัสที่ไม่ได้ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเรียกกันว่า โหลดบัส อันได้แก่ บัสที่นอกเหนือไปจากบัสควบคุมแรงดันและบัสอ้างอิง โดยโหลดบัสมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟคงที่

ดังนั้นจากเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้น การวิเคราะห์ปัญหาทางเพาเวอร์โพลว์จึงจำแนกบัสในระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

2.5.1 บัสอ้างอิง (Reference Bus) จะกำหนดให้ขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าคงที่ ส่วนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

2.5.2 บัสควบคุมแรงดัน (PV Bus) จะกำหนดให้ขนาดของแรงดันและกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่บัสคงที่ ส่วนมุมของแรงดันและกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่ไหลเข้าสู่บัสเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

2.5.3 โหลดบัส (PQ Bus) จะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่บัสคงที่ ส่วนขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า

ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นบัสชนิดใดก็ตามจะทราบค่าตัวแปร 2 ตัวแปร และไม่ทราบค่าอีก 2 ตัวแปร ซึ่งจะต้องอาศัยการวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าดังกล่าว ทั้งนี้ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นตัวแปรที่ทราบค่าของบัสทุกชนิด โดยสรุปตัวแปรที่ทราบค่าและไม่ทราบค่าของบัสแต่ละชนิดในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

| ชนิดบัส | P_L | Q_L | P_G | Q_G | $ V $ | δ |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| บัสอ้างอิง | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ |
| บัสควบคุมแรงดัน | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | |
| โหลดบัส | ✓ | ✓ | | | | |

โดย $|V|$ คือ ขนาดของแรงดันบัส
 δ คือ มุมของแรงดันบัส
 P_G คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตที่บัส
 Q_G คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตที่บัส
 P_L คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลดที่บัส
 Q_L คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัส

2.6 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Equation)

สมการกำลังไฟฟ้าที่บัสเป็นสมการที่แสดงถึงผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของบัสต่างๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดัง (2.18)

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad S_p &= V_p \cdot I_p^* \\ P_p - jQ_p &= V_p^* \cdot I_p \end{aligned} \quad (2.16)$$

โดยที่ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่บัส p หาได้จาก (2.17)

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad (2.17)$$

แทนค่า I_p จาก (2.17) ลงใน (2.16) จะได้ว่า

$$P_p - jQ_p = V_p^* \cdot \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad (2.18)$$

โดย P_p คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส p

Q_p คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส p

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส

I_p คือ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่บัส p

n คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลัง

แปลง (2.18) ให้อยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้ว (Polar Form) ดังนี้

$$\text{จาก} \quad V_p^* = |V_p| e^{-j\delta_p} \quad (2.19)$$

$$V_q = |V_q| e^{j\delta_q} \quad (2.20)$$

$$Y_{pq} = |Y_{pq}| e^{j\theta_{pq}} \quad (2.21)$$

นำ (2.19) (2.20) และ (2.21) แทนใน (2.18) และแยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพจะได้ (2.22) และ (2.23) ตามลำดับ

$$P_p = |V_p| \sum_{q=1}^n |V_q Y_{pq}| \cos(\delta_q - \delta_p + \theta_{pq})$$

$$P_p = |V_p|^2 G_{pp} + |V_p| \sum_{q=1, q \neq p}^n |V_q Y_{pq}| \cos(\delta_q - \delta_p + \theta_{pq}) \quad (2.22)$$

$$Q_p = -|V_p| \sum_{q=1}^n |V_q Y_{pq}| \sin(\delta_q - \delta_p + \theta_{pq})$$

$$Q_p = -|V_p|^2 B_{pp} - |V_p| \sum_{q=1, q \neq p}^n |V_q Y_{pq}| \sin(\delta_q - \delta_p + \theta_{pq}) \quad (2.23)$$

โดย (2.22) และ (2.23) จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับคำนวณขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าในหัวข้อต่อไป โดย (2.22) ใช้สำหรับคำนวณขนาดแรงดันของ PV-bus และ PQ-bus ส่วน (2.23) ใช้สำหรับคำนวณมุมแรงดันของโหนดบัสเท่านั้น โดยไม่ต้องคำนวณขนาดและมุมแรงดันของบัสอ้างอิงเนื่องจากเป็นบัสที่ทราบขนาดและมุมของแรงดันแล้ว

2.7 การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน (Newton-Raphson Method)

เนื่องจากสมการกำลังไฟฟ้าในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นการหาคำตอบต่างๆ จากสมการดังกล่าวจึงทำได้ยาก ดังนั้นวิธีนิวตัน-ราฟสัน จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ยิมนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิว โดยใช้หลักการประมาณสมการไม่เชิงเส้นด้วยสมการเชิงเส้น โดยวิธีนี้จะได้ผลตอบใกล้เคียงกับผลตอบจริงเมื่อผลตอบนั้นอยู่ใกล้เคียงกับสภาวะเริ่มต้น (Initial Condition) ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้

วิธีนิวตัน-ราฟสัน อาศัยเทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iterative Technique) ด้วยการเริ่มต้นสมมติคำตอบ เพื่อคำนวณหาค่าปรับแต่ง (Correction) ของคำตอบในแต่ละรอบ เพื่อนำไปสู่การประมาณคำตอบในรอบถัดไป และคำนวณซ้ำจนกว่าความคลาดเคลื่อนของค่าปรับแต่งคำตอบน้อยกว่าค่าความผิดพลาด (Tolerance) ที่กำหนด โดยจำนวนรอบที่ใช้คำนวณจะต้องไม่เกินจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ และผลตอบที่ได้ในรอบสุดท้ายจะเป็นผลตอบของสมการ

วิธีดังกล่าวมีข้อดี คือ สามารถเข้าสู่คำตอบได้อย่างรวดเร็ว โดยจำนวนรอบของการคำนวณไม่ขึ้นกับขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง [1] แสดงสมการเชิงเส้นอนุพันธ์อันดับหนึ่ง สำหรับวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลิวด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

โดย

ΔP คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงของ PV bus และ PQ bus ซึ่งมีมิติเท่ากับ $(n-1) \times 1$ จำนวน ΔP ได้จาก $\Delta P = P_{sch} - P_{cal} = (P_{gen} - P_{load}) - P_{cal}$ โดยค่า P_{cal} จำนวนจาก (2.22) โดยทั่วไปจะเรียก ΔP ว่า “ ΔP mismatch”

ΔQ คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ PQ bus โดยมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนโหลดบัส ดังนั้นจึงมีมิติเท่ากับ $n_L \times 1$ จำนวน ΔQ ได้จาก $\Delta Q = (Q_{gen} - Q_{load}) - Q_{cal}$ โดย Q_{cal} จำนวนจาก (2.23) โดยทั่วไปจะเรียก ΔQ ว่า “ ΔQ mismatch”

$\Delta \delta$ คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของมุมแรงดันบัส ซึ่งมีมิติเท่ากับ ΔP โดย

$\frac{\Delta |V|}{|V|}$ คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของขนาดแรงดันบัส ซึ่งมีมิติเท่ากับ ΔQ

ทั้ง $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ เป็นคำตอบที่ได้จากการคำนวณในแต่ละรอบ จากนั้นนำค่า $\Delta\delta$ และ $\Delta|V|$ ไปคำนวณ δ^{new} และ $|V|^{\text{new}}$ เพื่อใช้สำหรับคำนวณรอบถัดไป ดังนี้

$$\delta^{\text{new}} = \delta^{\text{old}} + \Delta\delta \quad (2.25)$$

$$\Delta|V|^{\text{new}} = \Delta|V|^{\text{old}} + \Delta|V| \quad (2.26)$$

[J] คือ จาคอเบียนเมตริกซ์ ประกอบด้วยจาคอเบียนเมตริกซ์ย่อย J11, J12, J21 และ J22 ดัง (2.27) โดยที่สมาชิกใดๆ ของจาคอเบียนเมตริกซ์ย่อยเหล่านี้ ได้จากการหาอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential) โดยมีรายละเอียดการคำนวณ ดังนี้ [1]

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{12} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

2.7.1 จาคอเบียนเมตริกซ์ย่อย J11

J11 เป็นการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับมุมแรงดันบัสด โดยค่า J11 นอกแนวทแยงมุม (Off Diagonal) และแนวทแยงมุม (Diagonal) หาได้จาก (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = -|V_p V_q Y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_q - \delta_p) = |V_p V_q| (G_{pq} \sin \delta_{pq} - B_{pq} \cos \delta_{pq}) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = \sum_{q=1, q \neq p}^n |V_p V_q Y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_q - \delta_p) = -Q_p - |V_p|^2 B_{pp} \quad (2.29)$$

2.7.2 จาคอเบียนเมตริกซ์ย่อย J12

J12 เป็นการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงเทียบกับขนาดแรงดันบัสด โดยค่า J12 นอกแนวทแยงมุมและแนวทแยงมุมหาได้จาก (2.30) และ (2.31) ตามลำดับ

$$|V_q| \frac{\partial P_p}{\partial |V_q|} = |V_q| |V_p Y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_q - \delta_p) = -\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} \quad (2.30)$$

$$|V_p| \frac{\partial P_p}{\partial |V_p|} = \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} + 2|V_p|^2 G_{pp} = P_p + |V_p|^2 G_{pp} \quad (2.31)$$

2.7.3 จาคอเบียนเมตริกซ์ย่อย J21

J21 เป็นการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเทียบกับมุมแรงดันบัล โดยค่า J21 นอกแนวทแยงมุมและแนวทแยงมุมหาได้จาก (2.32) และ (2.33) ตามลำดับ

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = -|V_p V_q Y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_q - \delta_p) \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = \sum_{q=1, q \neq p}^n |V_p V_q Y_{pq}| \cos(\delta_q - \delta_p + \theta_{pq}) = P_p - |V_p|^2 G_{pp} \quad (2.33)$$

2.7.4 จาคอเบียนเมตริกซ์ย่อย J22

J22 เป็นการหาอนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเทียบกับขนาดแรงดันบัล โดยค่า J22 นอกแนวทแยงมุมและแนวทแยงมุมหาได้จาก (2.34) และ (2.35) ตามลำดับ

$$|V_q| \frac{\partial Q_p}{\partial |V_q|} = -|V_q| |V_p Y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_q - \delta_p) = \frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} \quad (2.34)$$

$$|V_p| \frac{\partial Q_p}{\partial |V_p|} = -\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} - 2|V_p|^2 B_{pp} = Q_p - |V_p|^2 B_{pp} \quad (2.35)$$

วิธีนิวตัน – กราฟสันจะคำนวณจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขการหยุด (Stopping Criteria) ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} |\Delta P^{\max}| \leq \varepsilon_p \\ |\Delta Q^{\max}| \leq \varepsilon_q \\ i \leq i^{\max} \end{array} \right\} \quad (2.36)$$

โดย

$|\Delta P^{\max}|$ คือ ขนาดของความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดทางกำลังไฟฟ้าจริง สำหรับการคำนวณในรอบที่ k ใดๆ

$|\Delta Q^{\max}|$ คือ ขนาดของความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากที่สุดทางกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ สำหรับการคำนวณในรอบที่ k ใดๆ

ε_p และ ε_q คือ ขอบเขตบนของค่าผิดพลาดมากที่สุดที่ยอมรับได้ของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ตามลำดับ

i^{\max} คือ จำนวนรอบทำซ้ำ (Iteration) สูงสุด

2.8 การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลง

เมื่อทราบขนาดและมุมแรงดันบัลต่างๆ ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ต่อไปก็จะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงได้ดังนี้

2.8.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

จากรูปที่ 2.3 สามารถแสดงสมการกระแสไฟฟ้าในสายส่งซึ่งเชื่อมระหว่างบัล p และบัล q ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} i_{pq} &= i_{\text{line}} + i_{\text{half-line}} \\ i_{pq} &= y_{pq} \cdot (V_p - V_q) + \frac{Y_{\text{shunt}}}{2} V_p \end{aligned} \quad (2.37)$$

โดย i_{pq} คือ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq
 i_{line} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง pq
 $i_{\text{half-line}}$ คือ กระแสไฟฟ้าอัดประจุ (Half Line Charging Current) ของสายส่ง pq ที่ฉีดเข้าสู่บัล p

แสดงสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง (Line Flow Equation) ดังนี้

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* \cdot i_{pq} \quad (2.38)$$

นำ (2.37) แทนใน (2.38) จะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจากบัล p ไปยังบัล q

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* \cdot (V_p - V_q) y_{pq} + V_p^* V_p \frac{Y_{\text{shunt}}}{2} \quad (2.39)$$

ส่วนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจากบัล q ไปยังบัล p ก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน

$$P_{qp} - jQ_{qp} = V_q^* \cdot (V_q - V_p) y_{pq} + V_q^* V_q \frac{Y_{\text{shunt}}}{2} \quad (2.40)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง pq หาได้จากผลรวมทางพีชคณิตของกำลังไฟฟ้าจริงจาก (2.39) และ (2.40)

$$P_{pq, loss} = P_{pq} + P_{qp} \quad (2.41)$$

2.8.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลง

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.4 (ก) สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส p ไปยังบัส q โดยอ้างอิงจาก (2.2) ได้ดังนี้

$$P_{pq} - jQ_{pq} = V_p^* \cdot \left(\frac{V_p}{a} - V_q \right) \frac{y_{pq}}{a^*} \quad (2.42)$$

ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส q ไปสู่อบัส p ก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน โดยอ้างอิงจาก (2.3)

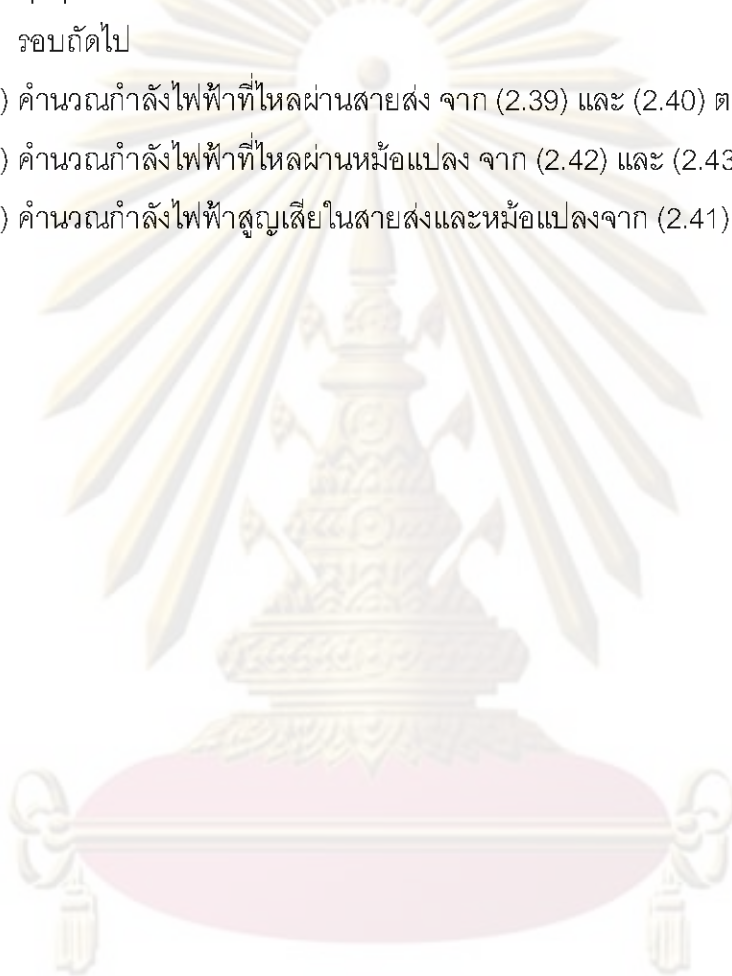
$$P_{qp} - jQ_{qp} = V_q^* \cdot \left(V_q - \frac{V_p}{a^*} \right) y_{pq} \quad (2.43)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงหาได้จากผลรวมทางพีชคณิตของกำลังไฟฟ้าจริงจาก (2.42) และ (2.43) เช่นเดียวกับ (2.41)

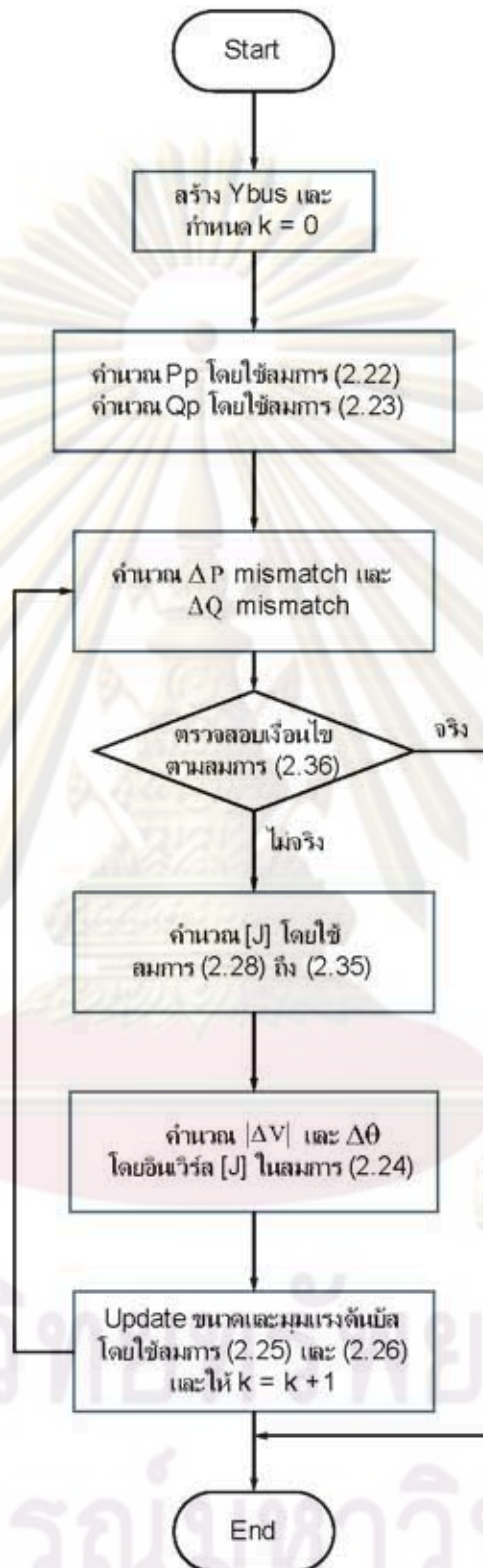
2.9 ขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน

- 1) สร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ Y_{bus} ตามหัวข้อ 2.4
- 2) สมมติค่าแรงดันเริ่มต้นที่บัสต่างๆ ยกเว้นที่บัสอ้างอิง $V_p^{(0)}$ โดยที่ $p = 1, 2, \dots, n$ และ $p \neq$ Reference bus
- 3) กำหนดให้ $k = 0$
- 4) คำนวณกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัส ตามหัวข้อ 2.6
 - 4.1) คำนวณกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส ทั้ง PV bus และ PQ bus จาก (2.22)
 - 4.2) คำนวณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัส คำนวณ เฉพาะ PQ bus จาก (2.23)
- 5) คำนวณค่าคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่บัส ตามหัวข้อ 2.7
 - 5.1) คำนวณ ΔP mismatch จาก $\Delta P = P_{sch} - P_{cal} = (P_{gen} - P_{load}) - P_{cal}$
 - 5.2) คำนวณ ΔQ mismatch จาก $\Delta Q = (Q_{gen} - Q_{load}) - Q_{cal}$
- 6) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดตาม (2.36) หากเงื่อนไขเป็นจริงให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 11 แต่หากเป็นเท็จให้ทำขั้นตอนที่ 7

- 7) คำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์ $[J]$ โดยใช้ (2.28) - (2.35)
- 8) นำค่าทั้งหมดที่คำนวณได้ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 แทนใน (2.24) เพื่อคำนวณ $\Delta|V|$ และ $\Delta\theta$ โดยการอินเวิร์สจาโคเบียนเมตริกซ์
- 9) คำนวณขนาดและมุมแรงดันบั๊ตที่ปรับปรุงใหม่จาก (2.25) และ (2.26) ตามลำดับ
- 10) ให้ $k = k + 1$ แล้วย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 4 โดยนำค่าขนาดและมุมแรงดันบั๊ต ($|V|^{new}$ และ θ^{new}) จากขั้นตอนที่ 9 ไปใช้สำหรับคำนวณปริมาณทางไฟฟ้าในรอบถัดไป
- 11) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง จาก (2.39) และ (2.40) ตามหัวข้อ 2.8
- 12) คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลง จาก (2.42) และ (2.43)
- 13) คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงจาก (2.41)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 แผนผังขั้นตอนการคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.10 การวิเคราะห์เพาเวอร์โฟลว์ด้วยฟาสต์ดีคัปเปิล (Fast Decoupled Method) [3]

เนื่องจากวิธีนิวตัน – ราฟสันมีขั้นตอนการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อน โดยเฉพาะขั้นตอนการคำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์ใหม่ในรอบการคำนวณทำให้ต้องใช้เวลาคำนวณค่อนข้างมากเมื่อใช้กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ วิธีฟาสต์ดีคัปเปิลเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีนิวตัน – ราฟสัน เพื่อให้สามารถคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ได้รวดเร็วขึ้น โดยตัดจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อยบางตัวที่ไม่มีผลต่อกันทิ้ง และประมาณค่าพารามิเตอร์บางตัว ทำให้ความคลาดเคลื่อนสูงกว่าวิธีนิวตัน – ราฟสัน ซึ่งจากการสังเกตวิธีนิวตัน – ราฟสันพบว่า

1. การเปลี่ยนแปลงของมุมแรงดันบัส ($\Delta\delta$) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส (ΔP) ค่อนข้างมาก แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส (ΔQ) น้อยมาก
2. การเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันบัส $\Delta|V|$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส (ΔQ) ค่อนข้างมาก แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส (ΔP) น้อยมาก

จากข้อสังเกตดังกล่าวทำให้เมตริกซ์ J12 และ J21 ของ (2.27) เป็นศูนย์ ทำให้สามารถแยก (2.27) เป็น (2.44) และ (2.45) ดังนี้

$$[\Delta P] = [J_{11}][\Delta\delta] \quad (2.44)$$

$$[\Delta Q] = [J_{22}] \begin{bmatrix} \Delta|V| \\ |V| \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

และเนื่องจากมุมของแรงดันบัสเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย กล่าวคือ $\delta_i \cong \delta_j$ ทำให้ $\cos(\delta_i - \delta_j) \cong 1$ และ $\sin(\delta_i - \delta_j) \cong \delta_i - \delta_j$ ซึ่งจากสมมติฐานข้างต้นทำให้ได้ว่า

$$G_{pq} \sin \delta_{pq} \ll B_{pq} \quad \text{และ} \quad Q_p \ll |V_p|^2 B_{pp}$$

ทำให้สามารถประมาณค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J11 และ J22 ได้ดังนี้

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = |V_q| \frac{\partial Q_p}{\partial |V_q|} = -|V_p V_q| B_{pq} \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = |V_p| \frac{\partial Q_p}{\partial |V_p|} = -|V_p|^2 B_{pp} \quad (2.47)$$

ทำให้เขียน (2.44) และ (2.45) ได้ใหม่เป็นดังนี้

$$[\Delta P_p] = [|V_p| V_q |B'_{pq}] [\Delta \delta_q] \quad (2.48)$$

$$[\Delta Q_p] = [|V_p| V_q |B''_{pq}] \left[\frac{\Delta |V_q|}{|V_q|} \right] \quad (2.49)$$

โดยที่ B'_{pq} และ B''_{pq} คือสมาชิกของเมตริกซ์ $[-B]$

นำ $|V_p|$ หาร (2.48) และ (2.49) และให้ $|V_q| = 1$

$$\left[\frac{\Delta P_p}{|V_p|} \right] = [B'] [\Delta \delta_q] \quad (2.50)$$

$$\left[\frac{\Delta Q_p}{|V_p|} \right] = [B''] [\Delta |V_q|] \quad (2.51)$$

โดย $[B']$ คือส่วนจินตภาพของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่ตัดแถวตัดหลักของบัสอ้างอิงออกไป

$[B'']$ คือส่วนจินตภาพของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ที่คิดเฉพาะบัสโหลด

ทำการปรับปรุง (2.50) โดย

1. สมมติให้ $r_{pq} \ll x_{pq}$ ดังนั้น $B'_{pq} = -\frac{1}{x_{pq}}$ และ $B'_{pp} = \sum_{q=1}^N \frac{1}{x_{pq}}$
2. ละเลยองค์ประกอบที่ส่งผลต่อการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เช่น ชั้นทรีแอกแตนซ์ และการปรับแท็ปหม้อแปลงไฟฟ้า

ทำการปรับปรุง (2.51) โดยละเลยผลของการเลื่อนมุมเฟส (Phase Shift) ของหม้อแปลง ซึ่งคำนวณค่า $[B'']$ ได้โดย

$$B''_{pq} = -\frac{x_{pq}}{r_{pq}^2 + x_{pq}^2} \quad \text{และ} \quad B''_{pp} = -\sum_{q=1}^N B''_{pq}$$

การคำนวณ $[B']$ และ $[B'']$ ข้างต้นเป็นการคำนวณแบบ XB (XB Scheme) ซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

1. คำนวณ $[B']$ โดยละเลยค่าความต้าน R_{pq} ($R_{pq} = 0$)
2. คำนวณ $[B'']$ โดยพิจารณาค่าความต้าน R_{pq} ด้วย ($R_{pq} \neq 0$)

แต่การคำนวณ $[B']$ และ $[B'']$ แบบ XB อาจทำให้ไม่สามารถหาคำตอบของเพาเวอร์โพลาร์ หากอัตราส่วน R/X มีค่าสูง จึงแก้ปัญหโดยใช้การคำนวณ $[B']$ และ $[B'']$ แบบ BX แทน ซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

1. คำนวณ $[B']$ โดยพิจารณาค่าความต้าน R_{pq} ด้วย ($R_{pq} \neq 0$)

$$\text{ดังนั้น } B'_{pq} = -\frac{x_{pq}}{r_{pq}^2 + x_{pq}^2} \quad (\text{สำหรับสายส่ง})$$

$$B'_{pq} = -y_{pq} \quad (\text{สำหรับหม้อแปลง})$$

$$\text{และ } B'_{pp} = -\sum_{q=1}^N B'_{pq-\text{branch}} - \sum_{q=1}^N B'_{pq-\text{transformer}}$$

2. คำนวณ $[B'']$ โดยละเลยค่าความต้าน R_{pq} ($R_{pq} = 0$)

$$\text{ดังนั้น } B''_{pq} = -\frac{1}{x_{pq}} \quad (\text{สำหรับสายส่ง})$$

$$B''_{pq} = -\frac{y_{pq}}{a^*} - \frac{y_{pq}}{a^*} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \quad (\text{สำหรับหม้อแปลงที่อยู่ทางบัส } p)$$

$$B''_{pq} = -\frac{y_{pq}}{a^*} - y_{pq} \left(1 - \frac{1}{a^*} \right) \quad (\text{สำหรับหม้อแปลงที่อยู่ทางบัส } q)$$

$$\text{และ } B''_{pp} = -\sum_{q=1}^N B''_{pq-\text{branch}} - \sum_{q=1}^N B''_{pq-\text{transformer}} - \sum Y_{\text{shunt}-p}$$

สรุปข้อดีและข้อเสียของวิธีฟาสต์ดีคัปเปิลได้ดังนี้

ข้อดี

1. เนื่องจากเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ $[B']$ และ $[B'']$ มีค่าคงที่ทำให้คำนวณอินเวอร์สเมตริกซ์เพียงครั้งเดียว ตลอดกระบวนการวิเคราะห์เพาเวอร์โพลาร์ ทำให้ประหยัดเวลาในการคำนวณ ซึ่ง แต่หากบัสควบคุมแรงดันเกิดละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (VAR Limit) จะทำให้ $[B']$ เปลี่ยนแปลง ทำให้ต้องคำนวณ $[B']$ ใหม่อีกครั้ง
2. เนื่องจากวิธีนี้คำนวณเฉพาะจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย J11 และ J22 ซึ่งอยู่ในรูปของ $[B']$ และ $[B'']$ ตามลำดับ จึงเสมือนกับว่าคำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์เพียงครั้งเดียว เมื่อเทียบกับการคำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์ด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน

ข้อเสีย

วิธีฟาสต์ดีคัปเปิลอาจไม่สามารถหาคำตอบได้ เนื่องจากการไม่ลู่เข้า หากสมมติฐานที่ว่า $r_{pq} \ll x_{pq}$ ไม่เป็นจริง ทั้งนี้ให้ใช้วิธีนิวตัน - กราฟสันแทน

2.11 การวิเคราะห์เพาเวอร์ฟลว์ด้วยการประมาณแบบเชิงเส้น (DC Power Flow Method) [3]

เพื่อทำการปรับปรุงวิธีฟาสต์ดีคัปเปิล โดยละเลยผลของกำลังไฟฟ้ร้แอกที่พห้มีต่อขนาดแรงดันบั้ด และพิจารณาเฉพาะผลของกำลังไฟฟ้าจริงที่มีต่อมุมแรงดันบั้ด ซึ่งเป็นผลให้พิจารณาเฉพาะ (2.50) และตัด (2.51) ทิ้งไป โดยกำหนดให้ $|V| = 1.0 \text{ pu}$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_p \\ |V_p| \end{bmatrix} = [B'] [\Delta \delta_q]$$

$$[\Delta P_p] = [B'] [\Delta \delta_q]$$

ดังนั้นการประมาณแบบดิซีจึงเหมาะสำหรับคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_{pq} = \frac{1}{x_{pq}} (\delta_p - \delta_q) \quad (2.52)$$

เขียน (2.52) ในรูปเมตริกซ์

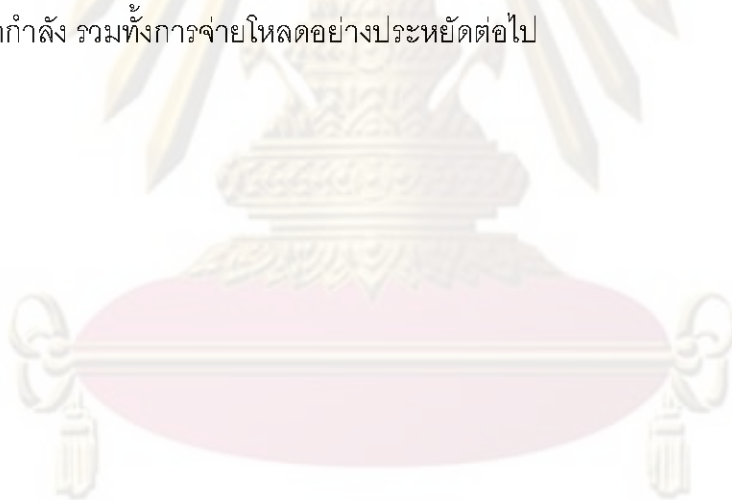
$$[P_p] = [B'] [\delta_q] \quad (2.53)$$

โดย P_p คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงที่บั้ด P

2.12 สรุป

บทนี้นำเสนอวงจรสมมูลขององค์ประกอบต่างๆ ในระบบไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้สำหรับสร้าง บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ และเมตริกซ์ดังกล่าวจะใช้เป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อหาผลตอบของระบบไฟฟ้าในสถานะต่างๆ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าที่บัส และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย โดยในบทนี้นำเสนอการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ คือ จำนวนรอบของการคำนวณไม่ขึ้นกับขนาดของระบบทดสอบ จึงทำให้สามารถลู่ออกคำตอบได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้สำหรับหาผลตอบของสมการไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี โดยอาศัยการประมาณแบบเชิงเส้นจากอนุพันธ์อันดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน อาจไม่สามารถหาผลตอบได้ในกรณีที่ผลตอบอยู่ไกลจากจุดทำงานมากๆ ทำให้คำตอบไม่ลู่ออกได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีไฟาสต์ดีคัปเปิลและการประมาณแบบดีซีซึ่งถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณจาโคเบียนเมตริกซ์ ทำให้ลดระยะเวลาในการประมวลผลลงได้ แต่อย่างไรก็ตามก็มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการประมาณค่าต่างๆ สูงกว่าวิธีนิวตัน – ราฟสัน ซึ่งวิธีต่างๆ ก็เหมาะสำหรับปัญหาต่างกัน จึงต้องพิจารณาเลือกใช้ตามความเหมาะสม

ทั้งนี้การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์ฟลด์ เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งการจ่ายไหลต่ออย่างประหยัดต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีค้นหาค่าเหมาะสมแบบสุ่ม (Stochastic Search Optimization) ซึ่งเลียนแบบหลักการถ่ายทอดพันธุกรรมทางธรรมชาติเพื่อหาค่าเหมาะสมโดยรวม (Global Optimum) โดยอาศัยการสุ่มค่าตอบให้กับกลุ่มประชากร และค่าตอบจะถูกปรับปรุงให้มีค่าฟิตเนสฟังก์ชันสูงขึ้นเรื่อยๆ รุ่น ซึ่งค่าเหมาะสมของประชากรรุ่นสุดท้าย ก็คือ ค่าตอบเหมาะสมโดยรวม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแต่ละรุ่นจะอาศัยตัวดำเนินการทางพันธุกรรม ซึ่งประกอบด้วย การรีโพรดักชัน (Reproduction) การครอสโอเวอร์ (Crossover) และการมิวเทชัน (Mutation) เพื่อให้กำเนิดประชากรใหม่ที่มีค่าตอบดีขึ้น โดยประชากรแต่ละตัวจะเก็บค่าตัวแปรโดยเข้ารหัสในรูปแบบของเลขฐานสอง [7]

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีข้อดีดังนี้

1. เนื่องจากเป็นกระบวนการซึ่งใช้การสุ่มและแทนค่าตัวแปร ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องหาอนุพันธ์ จึงสามารถใช้แก้ปัญหาทั้งตัวแปรต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องได้
2. เนื่องจากใช้ประชากรเริ่มต้น (Initial Population) จำนวนมาก ทำให้เพิ่มโอกาสในการค้นหาค่าตอบเหมาะสมโดยรวม

3.1 ส่วนประกอบของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithm)

3.1.1 การเข้ารหัสและถอดรหัส (Encoding and Decoding)

เนื่องจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมใช้การเข้ารหัสตัวแปรในการหาค่าเหมาะสม ดังนั้นถ้าเลือกวิธีการเข้ารหัสที่เหมาะสมยอมทำให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยทั่วไปนิยมเข้ารหัสเป็นเลขฐานสอง และใช้ความยาวสตริงเป็นตัวกำหนดความละเอียดของตัวแปรที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ตัวแปรต่อเนื่อง x มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 2 และต้องการความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 6 ดังนั้นในช่วงตัวแปร -1 ถึง 2 จึงควรถูกแบ่งออกเป็นอย่างน้อย $(2 - (-1)) * 1000000 = 3000000$ ช่วงย่อยๆ นั่นหมายถึงว่าต้องใช้สตริงที่มีความยาว 22 บิต เนื่องจาก

$$2097152 = 2^{21} < 3000000 < 2^{22} = 4194304$$

ส่วนการถอดรหัสจากสตริงให้เป็นค่าจริงของตัวแปรนั้นสามารถทำได้ 2 ขั้นตอนคือ

1. แปลงเลขฐานสอง $\langle b_{21}b_{20}\dots b_0 \rangle$ ให้เป็นฐานสิบโดย

$$x' = \sum_{i=0}^{21} b_i * 2^i \quad (3.1)$$

2. หาค่าจริงของตัวแปร x จากการประมาณค่าในช่วง (Linear Interpolation) ดังนี้

$$x = -1 + x' * \frac{(2 - (-1))}{2^{22} - 1} \quad (3.2)$$

โดยที่ -1 คือขอบล่างของตัวแปร และ 2 คือขอบบนของตัวแปร

3.1.2 การกำหนดกลุ่มประชากรเริ่มต้น (Initial Population)

ขั้นตอนนี้จะทำการสร้างกลุ่มประชากรเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่ม เพื่อให้เกิดความหลากหลายของประชากร ก่อนเริ่มต้นขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

3.1.3 การประเมินความเหมาะสม (Fitness Evaluation)

เป็นการประเมินค่าเหมาะสม (Fitness Function) ของฟังก์ชันเป้าหมาย เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าเป็นไปตามเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ เพื่อค้นหาประชากรที่มีค่าเหมาะสมสูงสุด ดังนั้นหากต้องการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) การประเมินความเหมาะสมจะหาได้จาก

$$\text{Fitness function} = \frac{1}{\text{Objective function}}$$

3.1.4 ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operator) [7]

3.1.4.1 การคัดเลือก (Selection)

เป็นขั้นตอนการพิจารณาและคัดเลือกประชากรด้วยค่าเหมาะสม หากประชากรตัวใดมีค่าเหมาะสมสูงก็มีโอกาสถูกคัดเลือกและถ่ายทอดคุณสมบัติไปยังรุ่นต่อไป ส่วนประชากรใดที่มีค่าเหมาะสมต่ำก็มีโอกาสถูกคัดเลือกต่ำและไม่ถูกถ่ายทอดไปยังรุ่นถัดไป ซึ่งการคัดเลือกมีหลากหลายวิธีดังนี้

1 Roulette Wheel Selection

เป็นกระบวนการคัดเลือกประชากรแบบสุ่ม (Stochastic Sampling) โดยแบ่งเป็นช่องว่างสำหรับใส่ประชากร หากช่องใดกว้างมากก็แสดงว่าประชากรในช่องนั้นมีโอกาสถูกคัดเลือกสูง แต่ก็มีข้อเสียคือ ประชากรที่ถูกคัดเลือกอาจมาจากช่องกว้างเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ขาดความหลากหลายของประชากรไป ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมโดยรวม โดยกระบวนการคัดเลือกแบบ Roulette Wheel มีขั้นตอนดังนี้

- 1.1 นำประชากรแต่ละตัวมาเรียงต่อกันเป็นเส้นตรงความยาวตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยให้ช่วงความยาวของเส้นตรงของแต่ละประชากรขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรง กล่าวคือหากมีความแข็งแรงมากก็จะมีช่วงความยาวบนเส้นตรงที่สร้างขึ้นแทนค่าของประชากรตัวนั้นยาว
- 1.2 สุ่มตัวเลขขึ้นมาเพื่อใช้เป็นตัวชี้ไปยังตำแหน่งบนเส้นตรง
- 1.3 หากตัวชี้ชี้ไปยังประชากรตัวใดแล้วก็ถือว่าประชากรตัวนั้นถูกเลือก เพื่อใช้ในการให้กำเนิดรุ่นถัดไป
- 1.4 ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 จนกระทั่งได้ประชากรครบจำนวนที่จะใช้ในการกำเนิดรุ่นถัดไป



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการคัดเลือกแบบ Roulette Wheel

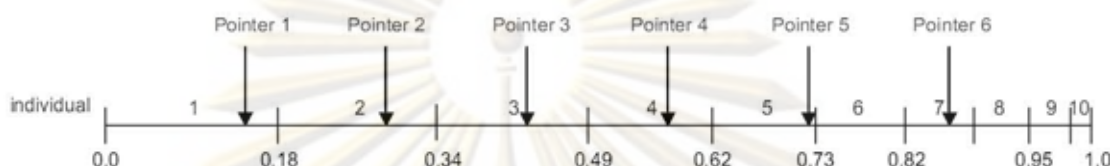
2 Stochastic Universal Sampling

วิธีนี้คล้ายกับการคัดเลือกแบบ Roulette Wheel แต่จะแตกต่างกันเพียงในขั้นตอนการสร้างตัวชี้ ซึ่งวิธีนี้จะให้ระยะห่างระหว่างตัวชี้คงที่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 2.1 นำประชากรแต่ละตัวมาเรียงต่อกันเป็นเส้นตรงความยาวตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยให้ช่วงความยาวของเส้นตรงของแต่ละประชากรขึ้นกับค่าความแข็งแรง
- 2.2 สร้างตัวชี้โดยระยะห่างระหว่างตัวชี้คำนวณได้จาก ผลต่างของค่ามากที่สุดและน้อยสุดของประชากรที่พิจารณาหารด้วยจำนวนตัวชี้ที่ต้องการ

$$\text{Distance} = \frac{\text{Max individual} - \text{Min individual}}{\text{Number of pointer}}$$

2.3 หากตัวชี้ชี้ไปยังประชากรตัวใดแล้วก็ถือว่าประชากรตัวนั้นถูกเลือก เพื่อใช้ในการให้กำเนิดรุ่นถัดไป



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการคัดเลือกแบบ Stochastic Universal Sampling

3 Local Selection

เป็นวิธีการคัดเลือกเฉพาะประชากรที่อยู่ภายในย่านที่กำหนด (Neighborhood) เพื่อจำกัดกลุ่มของประชากรที่จะถูกคัดเลือก ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่ต้องใช้จำนวนประชากรมาก การคัดเลือกแบบ Local มีขั้นตอนดังนี้

3.1 เลือกประชากรจากกลุ่มย่อย โดยอาจใช้วิธีสุ่มโดยตรงหรือใช้วิธีคัดเลือกแบบ Roulette Wheel หรือ Stochastic Universal Sampling

3.2 กำหนดย่านของประชากรที่ถูกเลือก พร้อมทั้งกำหนดระยะห่างที่พิจารณา

3.3 เลือกประชากรตัวที่มีความแข็งแกร่งที่สุดในย่านที่กำหนด เพื่อให้กำเนิดประชากรรุ่นถัดไป

3.4 ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 จนกระทั่งได้ประชากรครบตามจำนวน เพื่อใช้ในการกำเนิดรุ่นถัดไป

4 Truncation Selection

เป็นวิธีที่คัดเลือกประชากรที่จะใช้ในการให้กำเนิดรุ่นลูก โดยการตัดประชากรที่มีความแข็งแกร่งน้อยๆ ออกไปก่อน ซึ่งประชากรที่มีความแข็งแกร่งเกินกว่าค่าขีดจำกัดที่กำหนดไว้ (Threshold) เท่านั้นจึงจะมีสิทธิในการได้รับเลือกให้กำเนิดรุ่นลูกต่อไป

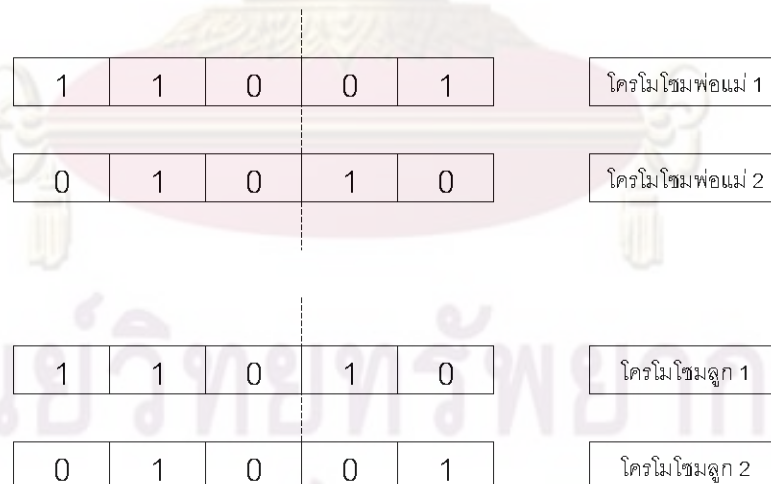
5 Tournament Selection

เป็นวิธีการคัดเลือกประชากรจากกลุ่มย่อยแต่ละกลุ่ม โดยประชากรที่มีความแข็งแกร่งที่สุดในแต่ละกลุ่มย่อยจะถูกคัดเลือกเพื่อกำเนิดรุ่นลูกต่อไป ซึ่งวิธีนี้คล้ายกับการค้นหาค่าตอบแบบ Local Search

3.1.4.2 การครอสโอเวอร์ (Crossover)

เป็นกระบวนการที่นำประชากรคู่ใดคู่หนึ่ง มาแลกเปลี่ยนบิตกันในบางตำแหน่งเพื่อให้กำเนิดประชากรใหม่ โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์ (Crossover Probability, P_c) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 และ 1 เพื่อบอกถึงความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ของประชากรแต่ละตัว

โดยในขั้นแรกจะสุ่มเลขจำนวนจริงในช่วง 0 และ 1 โดยใช้คำสั่ง rand(1) ถ้าเลขที่สุ่มมามีค่าสูงกว่า P_c ก็จะไม่ต้องครอสโอเวอร์ แต่หากว่าเลขที่สุ่มมามีค่าน้อยกว่า P_c ก็จะต้องทำการครอสโอเวอร์ โดยทั่วไปจะเรียกประชากรว่า โครโมโซม และเรียกโครโมโซมคู่ที่ถูกสุ่มขึ้นมาว่า โครโมโซมพ่อแม่ ทำการสุ่มตำแหน่งของการครอสโอเวอร์ (Cross site) โดยโครโมโซมคู่นั้นจะแลกเปลี่ยนบิตกันตั้งแต่ตำแหน่งที่อยู่หลังตำแหน่งของการครอสโอเวอร์เป็นต้นไป เพื่อให้กำเนิดโครโมโซมลูกและทำการสุ่มเลือกโครโมโซมพ่อแม่ตัวต่อไปสำหรับการครอสโอเวอร์เพื่อกำเนิดโครโมโซมลูกไปเรื่อยๆ จนได้จำนวนประชากรลูกครบตามต้องการ จึงถือว่าเสร็จขั้นตอนการครอสโอเวอร์ ซึ่งวิธีการครอสโอเวอร์อื่นๆ มีดังนี้



รูปที่ 3.3 วิธีการครอสโอเวอร์แบบหนึ่งจุด

1 ยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ (Uniform Crossover)

เนื่องจากการครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (Single Point Crossover) สามารถให้ผลตอบที่ดีในบางปัญหา เช่น ปัญหาที่มีตัวแปรควบคุมไม่มากนักและปัญหาที่มีความยาวบิตสตริงน้อยๆ แต่เมื่อปัญหาค่าเหมาะสมมีขนาดใหญ่ขึ้น ตัวแปรควบคุมในปัญหาก็จะมากขึ้น ดังนั้นการครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวจะให้ผลที่ไม่ดีนัก เนื่องจากผลลัพธ์หลังจากการครอสโอเวอร์จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการครอสโอเวอร์ กล่าวคือโครโมโซมคู่หนึ่งจะแลกเปลี่ยนบิตสตริงระหว่างกันในตำแหน่งที่อยู่หลังตำแหน่งของการครอสโอเวอร์ ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นว่าบิตสตริงที่อยู่ในตำแหน่งแรกของโครโมโซมพ่อแม่จะไม่มีโอกาสได้แลกเปลี่ยนบิตกับโครโมโซมอื่นเลย ซึ่งในบางครั้งโครโมโซมในตำแหน่งดังกล่าวอาจเป็นประโยชน์ต่อการแก้ปัญหาค่าเหมาะสม

จากเหตุผลข้างต้นจึงมีการนำเสนอยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ ซึ่งแต่ละบิตภายในโครโมโซมมีโอกาสแลกเปลี่ยนบิตกับโครโมโซมอื่นอย่างเท่าเทียมกัน ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งของการครอสโอเวอร์และความยาวบิตของโครโมโซมพ่อแม่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. สุ่มโครโมโซมขึ้นมา 1 ตัว ที่มีความยาวเท่ากับโครโมโซมพ่อแม่
2. หากบิตของโครโมโซมที่สุ่มขึ้นมาเป็น 1 ให้สลับบิตระหว่างโครโมโซมพ่อแม่ 1 และโครโมโซม 2
3. แต่หากบิตใดของโครโมโซมที่สุ่มขึ้นมาเป็น 0 ก็คงตำแหน่งบิตของโครโมโซมพ่อแม่ไว้ตำแหน่งเดิม โดยไม่ต้องสลับตำแหน่งกัน

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|------------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | โครโมโซมพ่อแม่ 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | โครโมโซมพ่อแม่ 2 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | สุ่ม |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | โครโมโซมลูก 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | โครโมโซมลูก 2 |

รูปที่ 3.4 ยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์

2 Shuffle Crossover

การครอสโอเวอร์วิธีนี้จะทำการสลับตำแหน่งของแต่ละบิตของประชากรแต่ละตัว ก่อนทำการครอสโอเวอร์ ทั้งนี้เพื่อลดผลของความสำคัญของลำดับข้อมูล ทำให้ประชากรรุ่นต่อไปมีความหลากหลายของคำตอบเพิ่มมากขึ้น และเมื่อทำการครอสโอเวอร์เสร็จก็จะจัดลำดับบิตกลับมาตามเดิม

3.1.4.3 การมิวเทชัน (Mutation)

เป็นกระบวนการสร้างความหลากหลายให้กับกลุ่มประชากร เพื่อป้องกันการลู่เข้าก่อนกำหนดและป้องกันไม่ให้อุณหภูมิเสียข้อมูลที่สำคัญอย่างไร้ประหวางกระบวนการถ่ายทอด โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นของการมิวเทชัน (Mutation Probability, P_m) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 และ 1 เพื่อบอกถึงความน่าจะเป็นในการมิวเทชันของแต่ละบิตในโครโมโซม

ขั้นตอนการมิวเทชันจะเริ่มจากสุ่มเลขจริงในช่วง 0 และ 1 โดยใช้คำสั่ง $\text{rand}(1)$ ถ้าเลขจากการสุ่มมีค่าสูงกว่า P_m ก็ไม่ต้องมิวเทชัน แต่หากว่าเลขจากการสุ่มมีค่าน้อยกว่า P_m ก็จะต้องทำการมิวเทชัน โดยสลับค่าบิตที่ตำแหน่งนั้นจาก 0 เป็น 1 หรือจาก 1 เป็น 0



รูปที่ 3.5 วิธีการมิวเทชัน

3.1.4.4 การแทนที่ (Reinsertion)

เป็นขั้นตอนการแทนที่ประชากรรุ่นใหม่ที่เกิดขึ้นในประชากรเดิม ซึ่งมีวิธีการแทนที่ที่หลากหลายแบบดังนี้

1. Pure Reinsertion คือ การแทนที่ประชากรเดิมทั้งหมดด้วยประชากรรุ่นใหม่ที่เกิดขึ้น
2. Uniform Reinsertion คือ การแทนที่ประชากรเดิมบางส่วนด้วยประชากรรุ่นใหม่ที่เกิดขึ้น ด้วยการสุ่ม วิธีการนี้ในบางครั้งทำให้ประชากรรุ่นเดิมที่มีความแข็งแกร่งถูกแทนที่ด้วยประชากร รุ่นใหม่ ซึ่งเป็นผลให้ข้อมูลบางส่วนหายไป
3. Elitist Reinsertion คือ การแทนที่ประชากรเดิมบางส่วนด้วยประชากรรุ่นใหม่ที่เกิดขึ้น โดยการแทนที่จะเริ่มจากการเรียงประชากรรุ่นเดิมตามค่าความแข็งแกร่ง แล้วจึง

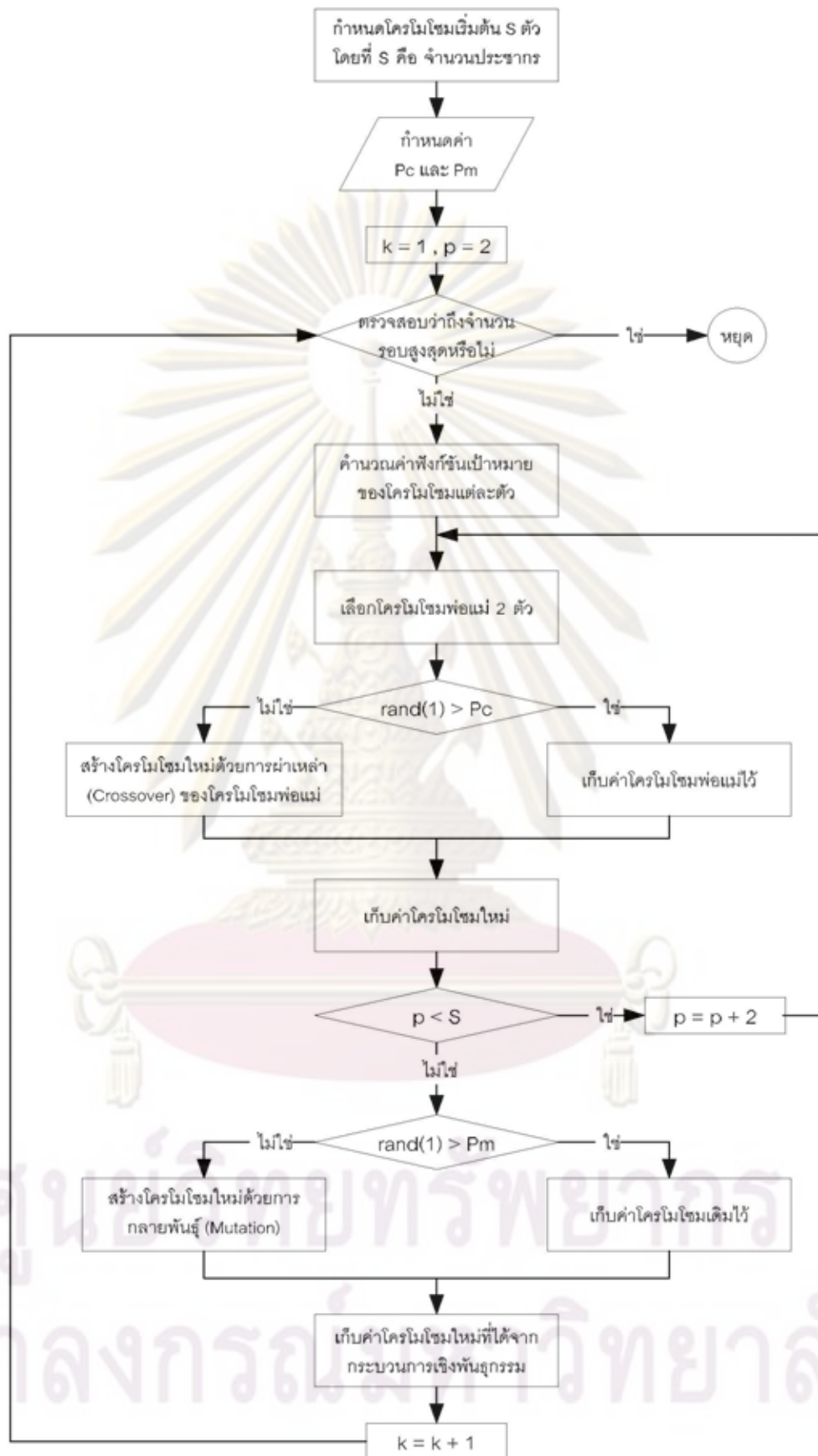
แทนประชากรรุ่นใหม่ลงไปตำแหน่งที่มีความแข็งแกร่งน้อยที่สุด และแทนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งประชากรรุ่นใหม่ที่เกิดขึ้นถูกแทนที่จนหมด

4. Fitness-Based Reinsertion คือ การแทนที่ประชากรเดิมบางส่วนหรือทั้งหมดด้วยประชากรรุ่นใหม่ที่มีความแข็งแกร่ง นั่นคือ ประชากรรุ่นใหม่ที่เกิดขึ้นมีเฉพาะส่วนที่มีความแข็งแกร่งเท่านั้นจึงจะมีสิทธิเข้าแทนที่ประชากรในกลุ่มเดิม ขั้นตอนการแทนที่จะเริ่มจากการคัดเฉพาะประชากรรุ่นใหม่ที่มีความแข็งแกร่ง จากนั้นจึงนำไปแทนที่ในประชากรเดิม แต่สิ่งที่ควรระวังก็คือ ผลจากการแทนที่ด้วยวิธีนี้อาจทำได้เพียงคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะที่ ซึ่งเป็นข้อเสียจากการคัดเลือกเฉพาะประชากรที่มีความแข็งแกร่งสูง

อย่างไรก็ตามวิธีการแทนที่แต่ละแบบอาจให้คำตอบที่เหมาะสมที่แตกต่างกัน และแต่ละวิธีก็เหมาะสมกับปัญหาแต่ละแบบแตกต่างกันไป ดังนั้นการตัดสินใจเลือกใช้วิธีการแทนที่แบบใดจึงอาจทำได้โดยทดลองใช้ทุกวิธี แล้วจึงเลือกวิธีที่ดีที่สุดมาใช้

3.1.5 เงื่อนไขการหยุด (Stopping Criteria)

1. จำนวนรุ่น (No. Generation) หยุดเมื่อจำนวนรุ่นเกินจำนวนรุ่นที่กำหนดไว้
2. เวลา (Time) หยุดเมื่อครบเวลาที่ตั้งไว้
3. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) หยุดเมื่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยกว่าค่าคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้
4. จำนวนรุ่นค้าง (Stall Generations) หยุดเมื่อไม่สามารถปรับปรุงค่าเหมาะสมของฟังก์ชันเป้าหมายให้ดีขึ้นได้แม้จะผ่านไปหลายรุ่น จนถึงจำนวนรุ่นค้างที่กำหนดไว้
5. ระยะเวลาค้าง (Stall Time Limit) หยุดเมื่อไม่สามารถปรับปรุงค่าเหมาะสมของฟังก์ชันเป้าหมายให้ดีขึ้นได้แม้จะผ่านไปเป็นเวลานาน จนถึงระยะเวลาค้างที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.6 แผนผังขั้นตอนขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย

3.2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค (Micro-Genetic Algorithm, μ GA) [7]-[9]

เนื่องจากการหาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithm) ยังมีข้อเสียในด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผล รวมทั้งคำตอบที่ได้บางครั้งเป็นเพียงค่าเหมาะสมเฉพาะที่ (Local Optimum) ดังนั้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการหาคำตอบให้ดีขึ้นทั้งแง่ของเวลาในการประมวลผล และความถูกต้องของคำตอบ เพื่อให้คำตอบใกล้เคียงค่าเหมาะสมโดยรวม (Global Optimum) จึงได้มีการนำเสนอ “ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค” (Micro-Genetic Algorithm)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค ใช้หลักการสุ่มเลือกประชากรเพียงจำนวนเล็กน้อย แต่สามารถลู่เข้าหาคำตอบในเวลาอันรวดเร็ว และได้คำตอบใกล้เคียงกับจุดเหมาะสมโดยรวมเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบเดิม โดยคำตอบที่ได้ในแต่ละเจนเนอเรชัน (Generation) จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำอีกส่วนหนึ่งที่เรียกว่า External Memory ซึ่งการแยกส่วนหน่วยความจำเป็นส่วนๆ มีข้อดีคือทำให้คำตอบที่ดีในแต่ละรอบยังคงอยู่ และไม่ถูกนำกลับเข้าปะปนกับประชากรที่มีค่าฟิตเนสฟังก์ชันต่ำ

3.2.1 หลักการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization)

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การหาค่าเหมาะสมที่มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) ซึ่งมีความซับซ้อนกว่าการหาค่าเหมาะสมที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงฟังก์ชันเดียว (Single-Objective Optimization) การหาค่าเหมาะสมแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เป็นการหาค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ของฟังก์ชันที่มีความขัดแย้งซึ่งกันและกันโดยคำตอบที่ได้จะต้องภายในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งโดยทั่วไปมีรูปแบบดังนี้

$$\text{Min } [f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X)]^T$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

subject to

$$h_i(X) = 0 ; i = 1, 2, \dots, p$$

$$g_i(X) \geq 0 ; i = 1, 2, \dots, m$$

3.2.2 การหาค่าเหมาะสมแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Evaluation Algorithm Optimization, MOEA)

เนื่องจากการหาค่าเหมาะสมแบบเดิมมีข้อเสียในด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผล และคำตอบที่ได้มักจะอยู่นอกขอบเขตที่ยอมรับได้ (Feasible set) ทำให้การค้นหาคำตอบที่แท้จริง

เป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบอื่นๆ ที่เรียกว่า Evolutionary Algorithm เช่น Tabu search, Simulated annealing, Ant colony เป็นต้น ซึ่งวิธีการเหล่านี้ใช้การค้นหาคำตอบแบบสุ่ม (Stochastic search) ซึ่งสามารถหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับค่าเหมาะสมโดยรวม กระบวนการสุ่มหาคำตอบแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ

1. Working memory : เป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บกลุ่มคำตอบที่มีโอกาสจะเป็นคำตอบเหมาะสม (Candidate solution)
2. Selection module : โมดูลนี้จะทำการคัดเลือกคำตอบจาก Working memory ด้วยวิธีการสุ่ม เพื่อให้เกิดความหลากหลายของคำตอบ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ลูเข้าสู่ค่าเหมาะสมโดยรวม
3. Variation module : โมดูลนี้จะทำการปรับเปลี่ยนค่าเหมาะสมของกลุ่มคำตอบด้วยกระบวนการต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้คำตอบหลังจากการปรับเปลี่ยนมีค่าใกล้เคียงกับค่าเหมาะสมโดยรวมมากที่สุด

โดยทั้ง 3 ขั้นตอนนี้จะดำเนินไปจนกว่าเงื่อนไขการหยุดจะเป็นจริง

MOEA จะคล้ายกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบเดิม แต่มีข้อแตกต่างตรงที่ MOEA มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แต่ GA แบบเดิมมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว ดังนั้นขั้นตอนการหาคำตอบของ MOEA จึงแตกต่างจาก GA แบบเดิม โดยมี MOEA มีขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน คือ

1. Aggregation base : เป็นการรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีมากกว่า 1 ฟังก์ชัน ให้เหลือฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวแทนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ ทั้งนี้ค่าเหมาะสมของฟังก์ชันรวม อาจไม่ใช่ค่าเหมาะสมของฟังก์ชันใดๆ เลย แต่เป็นค่าเหมาะสมที่ทำให้ค่าฟิตเนสฟังก์ชันรวมสูงสุด ภายใต้เงื่อนไขและขอบเขตที่กำหนด การรวม วิธีการรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหลายวิธีด้วยกัน โดยในที่นี้ขอเสนอการรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบพีชคณิต

$$f_{\text{total}} = |f_1| + |f_2| + \dots + |f_n|$$

2. Criterion base : เป็นการคัดเลือกประชากรที่มีโอกาสจะเป็นคำตอบเหมาะสมโดยรวม ใส่ใน Mating Pool โดยพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวมเป็นหลัก
3. Dominance base : เป็นการนำประชากรที่อยู่ใน Mating pool มาประเมินค่าฟิตเนสฟังก์ชันรวม โดยผ่านตัวดำเนินการต่างๆ ได้แก่ การครอสโอเวอร์ และการมิวเทชัน ซึ่งจะทำการปรับเปลี่ยนค่าระหว่างประชากรแต่ละตัว เพื่อให้ได้ค่าเหมาะสมที่

ใกล้เคียงกับค่าเหมาะสมโดยรวมของฟังก์ชันรวม ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนการประเมินค่าฟิตเนสฟังก์ชันรวม ด้วยตัวดำเนินการต่างๆ จะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.2.3

3.2.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาคที่มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-Objectives Micro Genetic Algorithm, MOMGA)

MOMGA ถูกพัฒนาขึ้นจากรูปแบบซึ่งนำเสนอโดย [7] โดยได้พัฒนาเพิ่มเติมขึ้นอีกหลายขั้นตอนได้แก่

- การแบ่งกลุ่มประชากร : เพื่อช่วยให้การค้นหาคำตอบรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น
- การคัดเลือกประชากร : เพื่อให้มีความหลากหลายของประชากร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเข้าสู่คำตอบเหมาะสมโดยรวม (Global Solution)

โดย MOMGA ประกอบด้วยกลุ่มประชากรที่สำคัญ 3 กลุ่ม คือ

- Replaceable Memory : เป็นกลุ่มประชากรที่สามารถถูกแทนที่ได้ ซึ่งประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยประชากรใหม่ ก็ต่อเมื่อค่าฟิตเนสฟังก์ชันของประชากรใหม่มีค่าสูงกว่าโดยประชากรใหม่นั้นได้จาก MOMGA แต่ละรุ่น ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า Replaceable Memory มีไว้เพื่อให้ MOMGA เข้าสู่คำตอบเหมาะสมโดยรวมได้รวดเร็วกว่าเดิม
- Non - Replaceable Memory : เป็นกลุ่มประชากรที่จะไม่ถูกแทนที่ด้วยประชากรอื่นตลอดกระบวนการ MOMGA ซึ่งมีประโยชน์สำหรับควบคุมความหลากหลาย (Diversity Control) ของประชากรในขั้นตอนการคัดเลือก
- External Memory : ใช้สำหรับเก็บกลุ่มประชากรที่มีโอกาสเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ตลอดกระบวนการ MOMGA ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดที่มีค่าฟิตเนสฟังก์ชันสูงสุด จะได้หลังจากสิ้นสุดกระบวนการ MOMGA

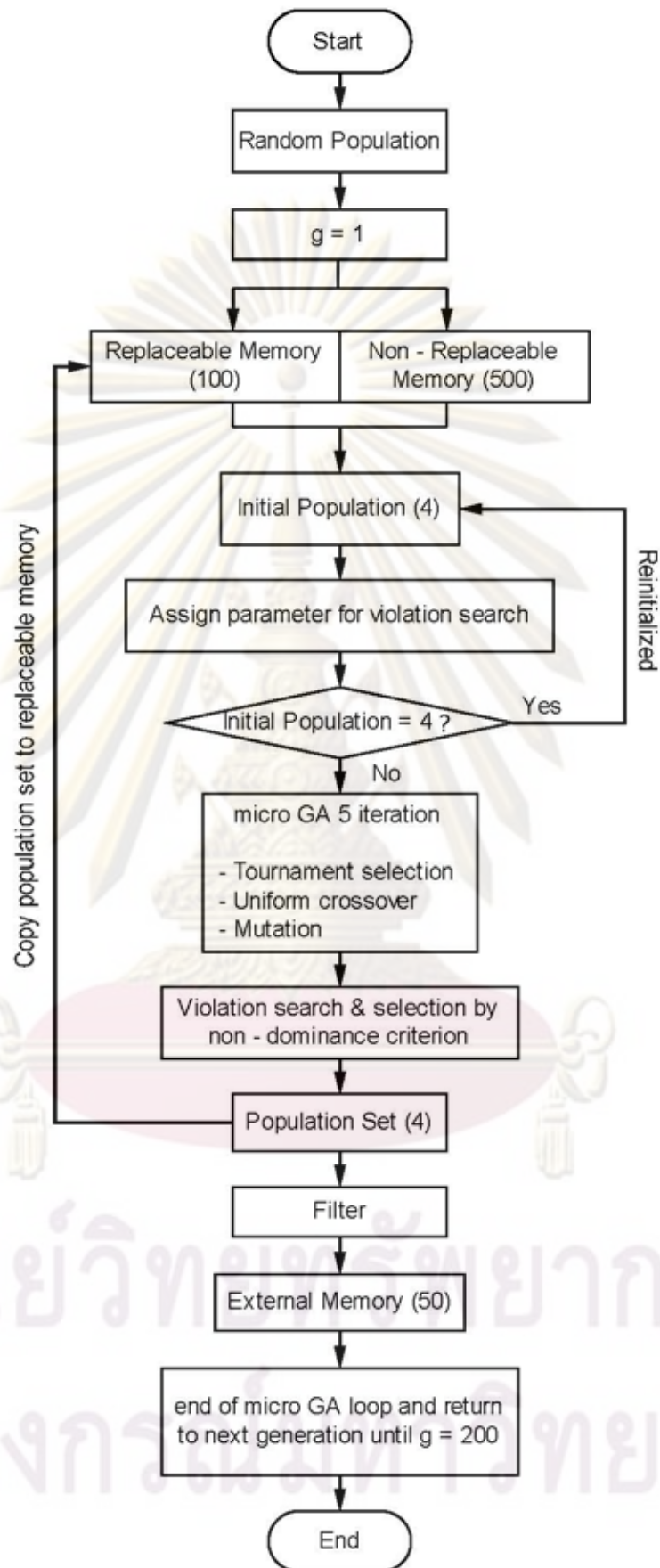
กระบวนการ MOMGA เริ่มจากสร้างประชากรโดยวิธีการสุ่มให้กับกลุ่มประชากรของ Replaceable และ Non - Replaceable Memory หลังจากนั้นจึงคัดเลือกประชากรจำนวน 4 ตัวจากกลุ่มประชากรทั้งสองตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ เพื่อใช้เป็นกลุ่มประชากรเริ่มต้น (Initial Population) ของ μ GA นำประชากรที่คัดเลือกไว้ไปตรวจสอบกับเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ หากคำตอบของประชากรใดไม่อยู่ในเงื่อนไขข้อจำกัดก็จะถูกตัดออกจากกลุ่มประชากรเริ่มต้น ทั้งนี้หากจำนวนประชากรที่เหลืออยู่มีน้อยกว่า 4 ตัว ประชากรตัวใหม่จะถูกคัดเลือกเข้ามาใหม่อีกครั้ง (Reinitialization) และตรวจสอบกับเงื่อนไขต่างๆ จนกว่าจะได้จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 4 ตัว

จากนั้นนำประชากรเริ่มต้นเข้าสู่กระบวนการ μ GA ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการวนซ้ำ (Iteration) จำนวน 5 - 10 ครั้ง ด้วยกระบวนการการคัดเลือก การครอสโอเวอร์และมิวเทชันตามลำดับ และเมื่อทำการวนซ้ำจนครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้ จะทำให้ได้จำนวนประชากรมากกว่า 4 ตัว จึงต้องทำการคัดเลือกให้เหลือประชากรเท่ากับ 4 ตัว ด้วยหลักการ Non - Dominance และเรียกประชากรทั้ง 4 ตัวสุดท้ายเหล่านี้ว่า Population Set ซึ่งจะเริ่มเข้าสู่คำตอบแบบหยาบๆ (Nominal Convergence) จากนั้นคัดลอกประชากรของ Population Set แทนที่ประชากรของ Replaceable Memory ที่มีค่า ฟิตเนสฟังก์ชันต่ำสุดจำนวน 4 ตัว

ส่วนประชากรของ Population Set ที่มีค่าฟิตเนสฟังก์ชันสูงสุดและต้องมากกว่าค่าฟิตเนสฟังก์ชันต่ำสุดของประชากรใน External Memory จะถูกคัดลอกเข้าสู่ External Memory แทนที่ประชากรที่มีค่าฟิตเนสฟังก์ชันต่ำกว่า ถือเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการ MOMGA 1 รุ่น

โดยทั่วไปกระบวนการ MOMGA จะกำหนดจำนวนรุ่น (Generation) ไว้เท่ากับ 100 - 200 รุ่น ซึ่งแต่ละรุ่นจะทำการวนซ้ำ (Iteration) จำนวน 5 - 10 ครั้ง โดยใช้ μ GA และเมื่อครบตามจำนวนรุ่นที่กำหนดไว้จะได้คำตอบที่เข้าสู่คำตอบเหมาะสมโดยรวม ซึ่งมีค่าฟิตเนสฟังก์ชันสูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 แผนผังกระบวนการ MOMGA

3.3 สรุป

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นกระบวนการหาค่าเหมาะสม ที่เลียนแบบการถ่ายทอดเชิงพันธุกรรมในธรรมชาติ โดยอาศัยการสุ่มคำตอบและตัวดำเนินการเชิงพันธุกรรม ดังนั้นวิธีดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับการหาค่าเหมาะสมแบบไม่เชิงเส้น และเนื่องจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมใช้การแทนค่าตัวแปรลงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าความเหมาะสม ทำให้หาค่าเหมาะสมได้โดยไม่ต้องหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน และสามารถนำไปใช้กับตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่องได้ดี แต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบเดิมยังมีข้อด้อยในด้านเวลาและความถูกต้องในการประมวลผล

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค เป็นวิธีที่ได้รับการปรับปรุงขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผลและให้คำตอบใกล้เคียงกับค่าเหมาะสมโดยรวม โดยใช้จำนวนประชากรเพียงเล็กน้อย วิธีดังกล่าวจะแบ่งหน่วยความจำออกเป็น 3 ชุด คือ Replaceable Memory, Non-Replaceable Memory และ External Memory โดย External Memory จะเก็บคำตอบที่ดีในแต่ละเจนเนอเรชันไว้ต่างหาก เพื่อรักษาคำตอบที่ดีไว้ตลอดการประมวลผล โดยไม่ถูกปรับเปลี่ยนค่าโดยตัวดำเนินการเชิงพันธุกรรม จนกลายเป็นคำตอบที่ไม่เหมาะสมไป ส่วน Replaceable Memory มีไว้เพื่อควบคุมให้ GA สามารถลู่เข้าสู่ค่าเหมาะสมโดยรวม ภายใต้กลุ่มประชากรที่มีความหลากหลายซึ่งควบคุมโดย Non- Replaceable Memory

บทที่ 4

ความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง

4.1 นิยามและหลักการ

ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (Power System Security) หมายถึง ความสามารถในการทนทานของระบบไฟฟ้าต่อการรบกวนต่างๆ ที่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดระบบไฟฟ้าขัดข้อง โดยที่ระบบไฟฟ้ายังคงทำงานได้ตามปกติหลังจากเกิดเหตุขัดข้อง

ส่วนสาเหตุไฟฟ้าขัดข้องอาจเกิดจากอุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด ความผิดพลาดของผู้ควบคุม สภาพแวดล้อม หรือสภาพของระบบไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม โดยเรียกเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องที่อาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง (Blackout) ว่า คอนตินเจนซี (Contingency)

คอนตินเจนซีที่มักจะนำมาพิจารณา คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือสายส่งไฟฟ้าที่รบกวนจากระบบ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดโหลดเกินในสายส่ง (Line Overloading) หรือละเมิดขีดจำกัดของแรงดัน (Bus Voltage Violation) และหากเกินขีดจำกัดความมั่นคง (Security Limit) ดังกล่าว อุปกรณ์ป้องกันจะปลดวงจรที่ได้รับผลกระทบจากคอนตินเจนซีออกจากระบบ ทั้งนี้หากผู้ควบคุมระบบไม่สามารถนำระบบกลับสู่สภาวะปกติได้ทัน จะทำให้ความเสียหายขยายบริเวณมากขึ้น (Cascading Outage) จนอาจเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง

การวิเคราะห์ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (System Security Analysis) แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลัก [3] คือ

1. System Monitoring เป็นการตรวจสอบสถานะของระบบ โดยนำข้อมูลแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า สถานะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ความถี่ของระบบ รวมทั้งตำแหน่งแท็บหม้อแปลงในขณะนั้น มาใช้สำหรับวิเคราะห์และตรวจสอบกับขีดจำกัด และทำการเตือนเมื่อสภาวะดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการเกิดโหลดเกินในสายส่ง ละเมิดขีดจำกัดของแรงดันบัส หรือเหตุการณ์ที่รุนแรงอย่างการเกิดแรงดันพังทลาย (Voltage Collapse) เป็นต้น

2. Security - Constrained Optimal Power Flow (SCOPF) เป็นการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างเหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดทางด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้า เพื่อควบคุมให้ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดได้อย่างเพียงพอ โดยมีต้นทุนการผลิตต่ำสุด และระบบยังคงทำงานได้ตามปกติ แม้ว่าจะเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องก็ตาม

3. Contingency Analysis เป็นการวิเคราะห์เหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องที่อาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า โดยมักจะพิจารณาคอนตินเจนซีที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือสายส่งไฟฟ้า ภายใต้ข้อจำกัดทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและแรงดันไฟฟ้าที่บัส ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงความรุนแรงของแต่ละคอนตินเจนซี

4.2 การวิเคราะห์คอนตินเจนซี

เนื่องจากการวิเคราะห์คอนตินเจนซีในแต่ละสภาวะของระบบไฟฟ้า อาจมีคอนตินเจนซีที่ต้องพิจารณาเป็นจำนวนมากขึ้นอยู่กับขนาดของระบบไฟฟ้า ซึ่งการวิเคราะห์คอนตินเจนซีทั้งหมดด้วยเอซีเพาเวอร์โฟลว์นั้นใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาการประมวลผลจึงมีการนำเสนอวิธีต่างๆ ดังนี้

1. ใช้การประมาณเชิงเส้นเพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผล (Linear Sensitivity)
2. คัดเลือกให้เหลือเฉพาะคอนตินเจนซีที่เป็นอันตรายต่อระบบ (Contingency Selection, Contingency Screening)
3. ใช้ระบบคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการประมวลผลสูงหรือใช้การประมวลผลแบบขนาน (Parallel Processing)

วิธีแรกเป็นวิธีที่นิยมใช้ โดยนำหลักการประมาณเชิงเส้นมาใช้สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบจากคอนตินเจนซีที่มีต่อบัสและสายส่งในระบบ วิธีดังกล่าวจะประมาณเอซีเพาเวอร์โฟลว์ (AC Power Flow) ด้วยดีซีเพาเวอร์โฟลว์ (DC Power Flow) ซึ่งคิดเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งต่อมุมแรงดันไฟฟ้า โดยละเลยผลของกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟและแรงดันไฟฟ้า วิธีนี้เรียกว่า “วิธีความไวเชิงเส้น” (Linear Sensitivity Factor) ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถคำนวณผลกระทบของคอนตินเจนซีที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็มีความคลาดเคลื่อนสูงเช่นเดียวกัน จึงเหมาะสำหรับคัดกรองคอนตินเจนซีเบื้องต้น

ส่วนวิธีที่สองนั้นเหมาะสำหรับวิเคราะห์คอนตินเจนซีในระดับที่สูงขึ้น ซึ่งทำการวิเคราะห์ผลของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งและแรงดันไฟฟ้าที่บัสในรูปของค่าดัชนี ซึ่งเรียกว่า ดัชนีสมรรถนะ (Performance Indices) โดยแบ่งเป็นดัชนีสมรรถนะกำลังไฟฟ้าและดัชนีสมรรถนะแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่าดัชนีจะบอกถึงระดับความรุนแรงของคอนตินเจนซี กล่าวคือหากค่าดัชนีสูงก็แสดงว่าคอนตินเจนซีนั้นส่งผลกระทบต่อระบบมาก โดยคอนตินเจนซีที่มีค่าดัชนีสมรรถนะสูงจะ

ถูกคัดเลือกเพื่อนำไปวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยใช้เอซีเพาเวอร์โพล์ต่อไป ส่วนดัชนีสมรรถนะที่มีค่าต่ำกว่าที่กำหนดจะถูกละเลยไม่นำไปวิเคราะห์ต่อ

และวิธีสุดท้ายเป็นการพัฒนาให้คอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น โดยใช้หลักการประมวลผลแบบขนานเข้ามาช่วย เพื่อลดการวนลูปของโปรแกรม ทำให้สามารถวิเคราะห์คอนตินเจนซีหลายๆ เหตุการณ์ได้ในเวลาเดียวกัน

4.2.1 ความไวเชิงเส้น (Linear Sensitivity Factors)

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วว่าวิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ จึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์คอนตินเจนซีที่มีจำนวนมาก ซึ่งมักใช้สำหรับคัดกรองคอนตินเจนซีเบื้องต้น โดยพิจารณาเฉพาะผลกระทบที่ทำให้เกิดโหลดเกินในสายส่งอันเกิดจากคอนตินเจนซี ซึ่งเป็นการพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งโดยละเลยผลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ สูตรสำหรับหาความไวเชิงเส้นประยุกต์จากดีซีเพาเวอร์โพล์ โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

4.2.1.1 Generation Shift Factor (GSF)

เป็นความไวเชิงเส้นที่ใช้บอกอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับมุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส

$$\Delta\theta = [X]\Delta P$$

$$a_{l,i} = \frac{\Delta f_l}{\Delta P_i} = \frac{d}{dP_i} \left[\frac{1}{x_l} (\theta_n - \theta_m) \right] = \frac{1}{x_l} \left(\frac{d\theta_n}{dP_i} - \frac{d\theta_m}{dP_i} \right)$$

$$a_{l,i} = \frac{1}{x_l} (X_{ni} - X_{mi}) \quad (4.1)$$

โดย $a_{l,i}$ คือ ความไวเชิงเส้นที่แสดงผลกระทบต่อสายส่ง l เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i หลุดออกจากระบบ

x_l คือ รีแอกแตนซ์ในสายส่ง l

X_{ni}, X_{mi} ได้จากบัสอิมพีแดนซ์ (Z-bus) ซึ่ง n และ m เป็นบัสที่สายส่ง l เกาะอยู่ ส่วน i เป็นบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกาะอยู่

กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง l หลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i หลุดออกจากระบบ
คำนวณได้ดังนี้

$$f_l = f_l^0 + a_{l,i} \cdot \Delta P_i \quad (4.2)$$

โดย $\Delta P_i = P_{i,new} - P_{i,old} = -P_{i,old}$

ซึ่งจะเกิดโหลดเกินในสายส่ง เมื่อไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้ $-f_l^{max} \leq f_l \leq f_l^{max}$

ส่วนมุมแรงดันบัสที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากระบบ
คำนวณได้ดังนี้ โดยอ้างอิงจาก (4.1)

$$\begin{aligned} a_{l,i} &= \frac{1}{x_l} (X_{ni} - X_{mi}) = \frac{1}{x_l} \left(\frac{\Delta \theta_n}{\Delta P_i} - \frac{\Delta \theta_m}{\Delta P_i} \right) \\ (X_{ni} - X_{mi}) &= \left(\frac{\Delta \theta_n}{\Delta P_i} - \frac{\Delta \theta_m}{\Delta P_i} \right) \\ X_{ni} &= \frac{\Delta \theta_n}{\Delta P_i} \\ \Delta \theta_n &= X_{ni} \cdot \Delta P_i \end{aligned} \quad (4.3)$$

เปลี่ยน $\Delta \theta_n$ และ X_{ni} ใน (4.3) เป็น $\Delta \theta_i$ และ X_{ig} ตามลำดับ

$$\Delta \theta_i = X_{ig} \cdot \Delta P_g \quad (4.4)$$

โดย $\Delta \theta_i$ คือ มุมแรงดันบัส i ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g หลุด

X_{ig} คือ ค่ารีแอกแตนซ์แถวที่ i หลักที่ g ของอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

$$\Delta P_g = P_{g,new} - P_g^0 = -P_g^0$$

ซึ่ง P_g^0 คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนเกิดคอนดินเจนซี

4.2.1.2 Line Outage Distribution Factor (LODF)

เป็นความไวเชิงเส้นที่ใช้บอกอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง ซึ่ง
ได้รับผลกระทบจากสายส่งเส้นอื่นหลุดออกจากระบบ

$$d_{l,k} = \frac{\Delta f_l}{f_k^0} = \frac{\frac{1}{x_l}(\Delta \theta_i - \Delta \theta_j)}{f_k^0}$$

$$d_{l,k} = \frac{1}{x_l} \left(\frac{\Delta \theta_i}{P_{nm}} - \frac{\Delta \theta_j}{P_{nm}} \right) \quad (4.5)$$

โดย $\Delta \theta_i$ และ $\Delta \theta_j$ คำนวณจาก (4.3)

$$\Delta \theta_i = (X_{in} - X_{im}) \cdot \Delta P_n \quad (4.6)$$

$$\Delta \theta_j = (X_{jn} - X_{jm}) \cdot \Delta P_n \quad (4.7)$$

$$\Delta P_n = \frac{x_k \cdot P_{mn}}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{mn})} \quad (4.8)$$

โดย

$d_{l,k}$ คือ ความไวเชิงเส้นที่แสดงผลกระทบต่อสายส่งเส้นที่ l เมื่อสายส่งเส้นที่ k หลุดออกจากระบบ

k คือ สายส่งเส้นที่หลุดซึ่งเกาะระหว่างบัส m และ n

l คือ สายส่งเส้นที่เกาะระหว่างบัส i และ j ซึ่งได้รับผลกระทบจากสายส่ง k หลุด

x_l คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง l

$X_{in}, X_{im}, X_{jn}, X_{jm}, X_{mm}, X_{nn}$ คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ซึ่ง i และ j เป็นบัสที่สายส่ง l เกาะอยู่ ส่วน n และ m เป็นบัสที่สายส่ง k เกาะอยู่

$\Delta \theta_i$ และ $\Delta \theta_j$ คือ มุมแรงดันบัส i และ j ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสายส่ง k หลุด

ΔP_n คือ กำลังจริงขดเซยที่ฉีดเข้าบัส n เพื่อจำลองสายส่งหลุด โดย $\Delta P_n = -\Delta P_m$

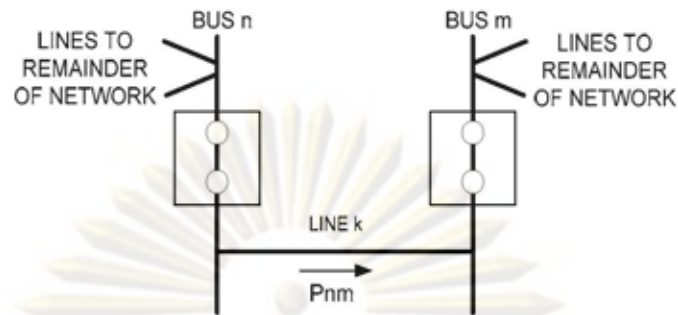
P_{nm} คือ f_k^0 ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งก่อนเกิดคอนดินเจนซี (Base Case Line Flow)

กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง l หลังจากสายส่ง k หลุดออกจากระบบคำนวณได้ดังนี้

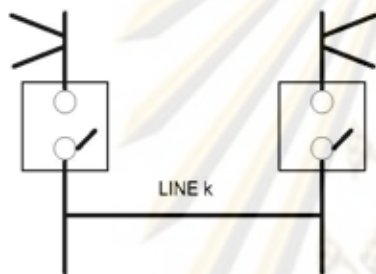
$$f_l = f_l^0 + d_{l,k} \cdot f_k^0 \quad (4.9)$$

ซึ่งจะเกิดโหลดเกินในสายส่งเมื่อ ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้ $-f_l^{max} \leq f_l \leq f_l^{max}$

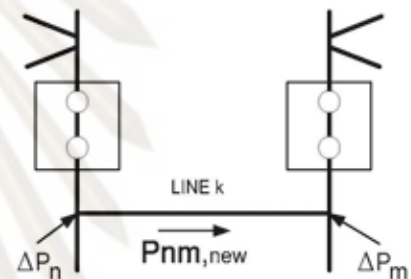
(4.8) มีที่มาดังนี้ [3]



รูปที่ 4.1 ก สภาพสายส่งก่อนหลุด



รูปที่ 4.1 ข สภาพสายส่งหลุดที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 4.1 ค แบบจำลองสายส่งหลุด

การจำลองสายส่งหลุดโดยไม่ปลดสายส่งเพื่อคงบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ก่อนเกิดคอนดินเจนซีไว้ สามารถทำได้โดยฉีดกำลังไฟฟ้าเข้าที่บัสที่เกิดคอนดินเจนซี ซึ่งจะมีผลเสมือนกับว่าสายส่งเส้นดังกล่าวหลุดออกจากระบบได้จริง แสดงแนวคิดการจำลองสายส่ง k หลุดดังรูปที่ 4.1 โดยฉีดกำลังไฟฟ้า ΔP_m และ ΔP_n เข้าที่บัส m และ n ตามลำดับ เมื่อฉีด ΔP_n เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง k หลังจากสายส่ง k หลุด ($P_{nm,new}$) และฉีด $\Delta P_m = -P_{nm,new}$ จะเสมือนกับว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในสายส่งแม้ว่าสถานะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ยังคงเป็นสถานะปิดอยู่ (Close) ซึ่งเมื่อพิจารณาทั้งระบบ จะพบว่าสายส่งที่จำลองการหลุดไว้จะถูกแยกออกจากระบบ (Disconnect) แม้ว่าจะยังคงมีสายส่งต่ออยู่ก็ตาม

ดังนั้นเกณฑ์การจำลองสายส่งหลุด คือ $P_{nm,new} = \Delta P_n = -\Delta P_m$

หาค่า ΔP_n ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{nm,new} &= P_{nm,0} + \Delta P_{nm} \\
 \Delta P_n &= P_{nm,0} + \frac{1}{x_k} (\Delta \theta_n - \Delta \theta_m) \\
 \Delta P_n &= P_{nm,0} + \frac{1}{x_k} (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm}) \Delta P_n \\
 \Delta P_n &= \frac{x_k \cdot P_{nm,0}}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})}
 \end{aligned}$$

4.2.2 การคัดกรองคอนตินเจนซี (Contingency Screening)

เนื่องจากคอนตินเจนซีที่ต้องนำมาวิเคราะห์นั้นมีจำนวนมาก ดังนั้นหากต้องวิเคราะห์คอนตินเจนซีทั้งหมดด้วยเอชพีเพาเวอร์โพล์ อาจทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทัน และอาจเกิดความเสียหายต่อระบบก่อนที่จะวิเคราะห์เสร็จ ดังนั้นเพื่อลดจำนวนคอนตินเจนซีให้เหลือเฉพาะคอนตินเจนซีที่อาจก่ออันตรายต่อระบบไฟฟ้า จึงใช้การคำนวณค่าดัชนีสมรรถนะที่บอกถึงระดับความรุนแรงของแต่ละคอนตินเจนซี โดยแบ่งค่าดัชนีสมรรถนะออกเป็น 2 ชนิดดังนี้

1. ดัชนีสมรรถนะกำลังไฟฟ้า (Active Power Performance Index)

$$\text{PI}_p = \sum_{l=1}^{n_{br}} w_{pl} \left(\frac{P_l}{P_{l,max}} \right)^{2m} \quad (4.10)$$

โดย n_{br} คือ จำนวนสายส่งในระบบ

w_{pl} คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor)

P_l คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่งที่ l

$P_{l,max}$ คือ ขีดจำกัดการส่งกำลังไฟฟ้าจริงของสายส่งที่ l

2. ดัชนีสมรรถนะแรงดันไฟฟ้า (Voltage Performance Index)

$$\text{PI}_v = \sum_{i=1}^{n_{bus}} w_{vi} \left(\frac{|V_i| - |V_i^{SP}|}{\Delta |V_i, limit|} \right)^{2n} \quad (4.11)$$

โดย n_{bus} คือ จำนวนบัสในระบบ
 ω_{vi} คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor)
 $|V_i|$ คือ ขนาดแรงดันบัสที่ i
 $|V_i^{SP}|$ คือ ขีดจำกัดของขนาดแรงดันบัสที่ i
 $\Delta|V_{i,limit}|$ คือ ขีดจำกัดการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันบัสที่ i

ซึ่ง $|V_i^{SP}|$ และ $\Delta|V_{i,limit}|$ คำนวณจาก

$$|V_i^{SP}| = \frac{V_{i,max} + V_{i,min}}{2} \quad (4.12)$$

$$\Delta|V_{i,limit}| = \frac{V_{i,max} - V_{i,min}}{2} \quad (4.13)$$

นำดัชนีสมรรถนะกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามาใช้คำนวณดัชนีความมั่นคง (Security Index, SI) ได้ดังนี้

$$SI = PI_p + PI_v \quad (4.14)$$

โดยค่า P_l และ $|V_i|$ ที่ใช้ใน (4.10) และ (4.11) คำนวณจากฟาสต์ดีคัปเปิลเพาเวอร์โฟลว์ (Fast Decoupled Power Flow) หรือที่เรียกว่าวิธี 1P1Q (1P1Q Method) ทั้งนี้เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผล ทำให้การคัดกรองรวดเร็วขึ้น

และหากค่า n และ m ใน (4.10) และ (4.11) มีค่ามากจะทำให้สามารถแยกแยะระหว่างเหตุการณ์โหลดเกินในสายส่งหรือแรงดันบัสเกินขอบเขต กับเหตุการณ์ปกติได้ชัดเจนมากขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงหรืออัตราส่วนของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของ (4.10) และ (4.11) ตามลำดับ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ามีการละเมิดขีดจำกัดและเมื่อค่า n และ m มีค่ามากด้วยแล้ว ก็ทำให้ดัชนีสมรรถนะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกันหากอัตราส่วนข้างต้นมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าไม่เกิดการละเมิดขีดจำกัด ทำให้ดัชนีสมรรถนะมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ทั้งนี้มักกำหนดค่า n และ m ให้เท่ากับ 5 [3]

อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องระวังในการคัดกรองคอนตินเจนซีด้วยวิธีนี้ คือความคลาดเคลื่อนในการคัดกรอง (Masking Error) ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

1. คัดกรองคอนตินเจนซีมากเกินไป (Placing too many cases) ส่งผลให้ต้องใช้เวลาวิเคราะห์คอนตินเจนซีมากขึ้น ทั้งๆ ที่บางคอนตินเจนซีอาจมีผลต่อระบบน้อยมากจนสามารถละเลยไม่นำมาพิจารณาได้

2. คัดกรองคอนตินเจนซีมาน้อยเกินไป (Skipping cases) แม้ว่าจะใช้เวลาวิเคราะห์คอนตินเจนซีน้อยลง แต่อาจไม่สามารถคัดเลือกคอนตินเจนซีที่เป็นอันตรายต่อระบบได้ครบ โดยบางเหตุการณ์ที่มีความรุนแรงมากอาจไม่ถูกคัดเลือกเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยเอซีเพาเวอร์ไฟลว์

4.3 การวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะ [13]

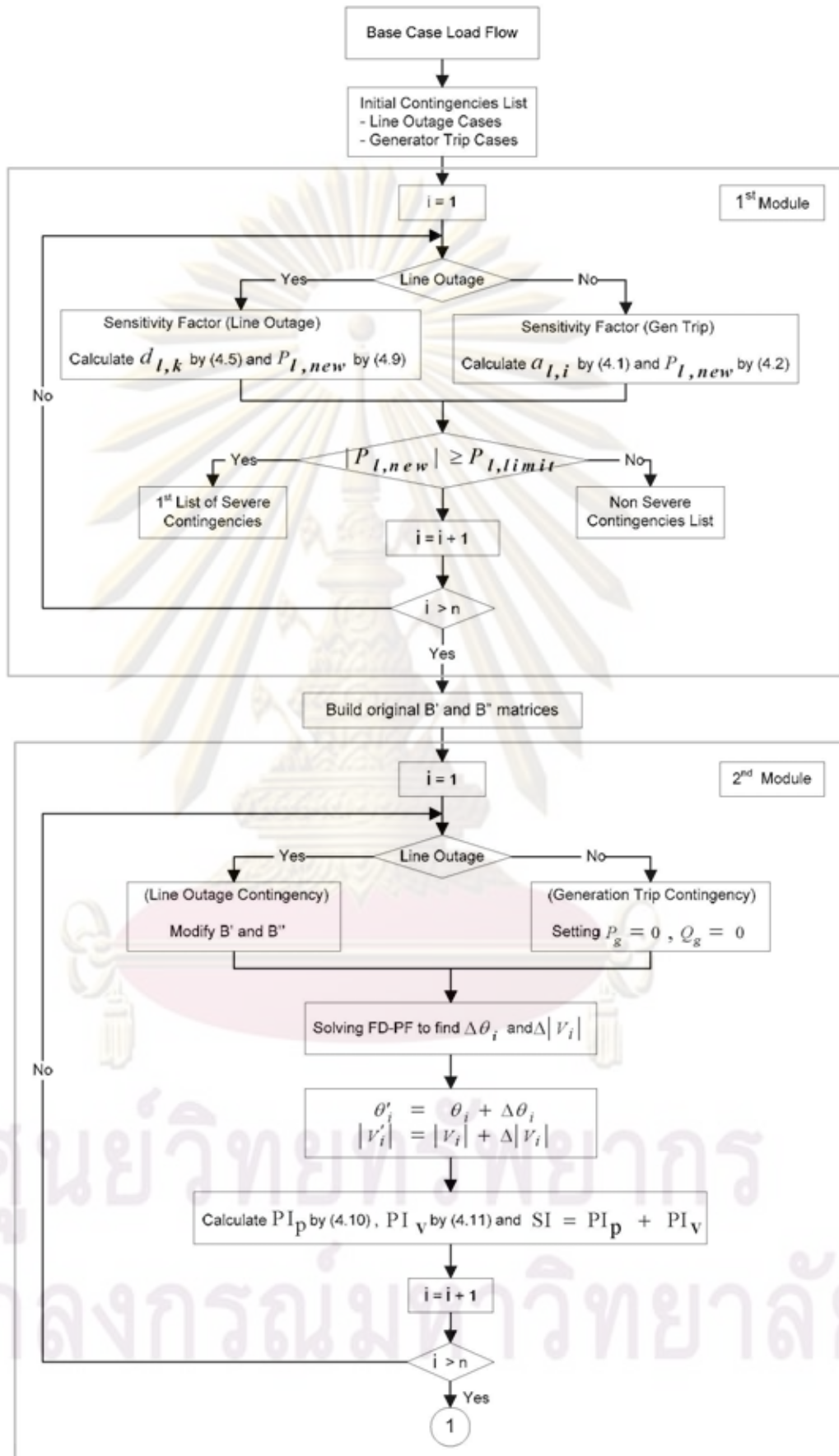
การวิเคราะห์คอนตินเจนซีด้วยดัชนีสมรรถนะต่างจากการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมคือ

- การวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ใช้การลดจำนวนบัสและสายส่งที่ต้องวิเคราะห์ โดยเลือกพิจารณาเฉพาะบัสและสายส่งที่อยู่ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากคอนตินเจนซี
- ส่วนการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะจะลดจำนวนคอนตินเจนซีด้วยการคัดกรองตามลำดับชั้น

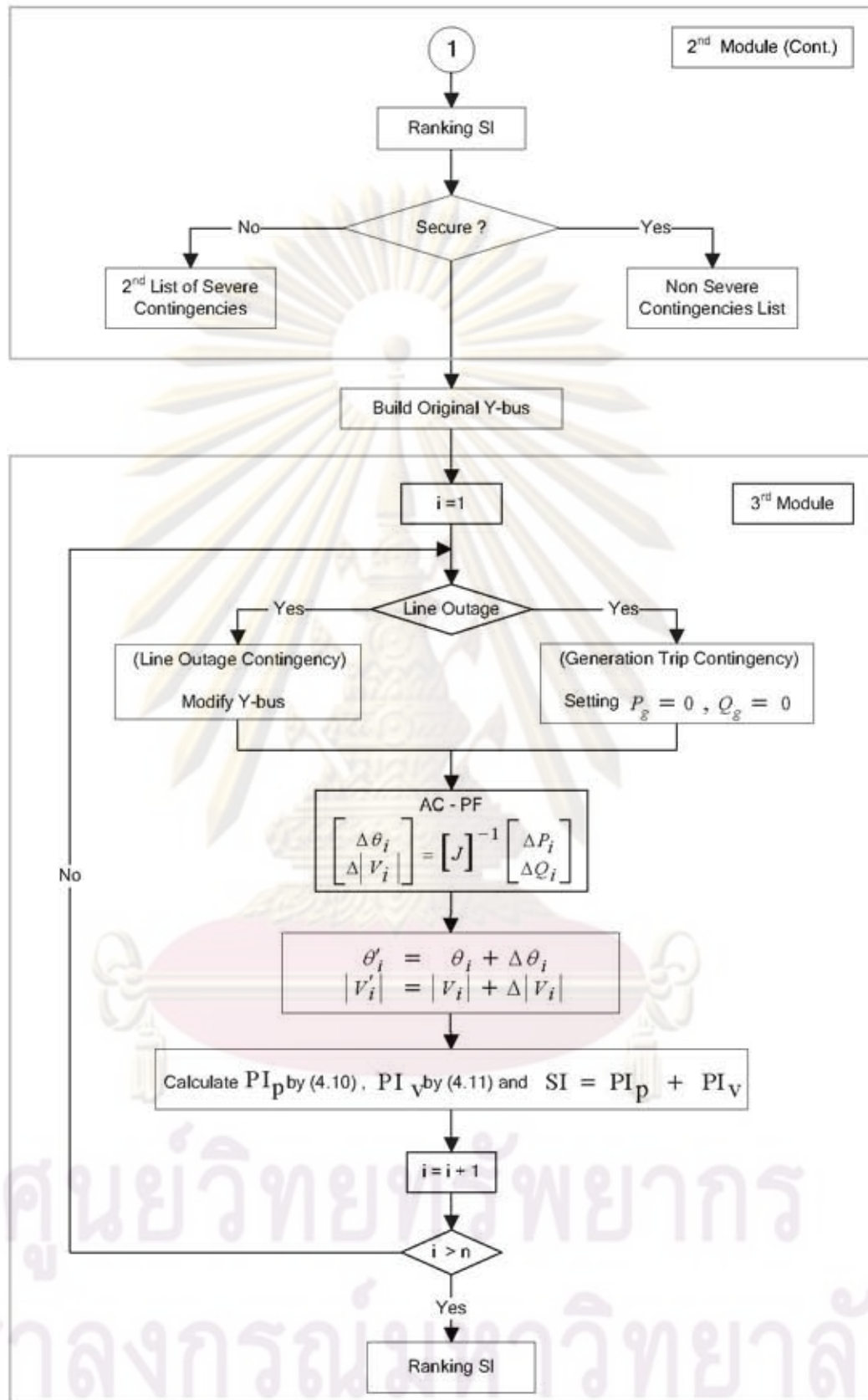
ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาในการวิเคราะห์คอนตินเจนซี

การวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะเป็นการคัดกรองคอนตินเจนซีให้เหลือเฉพาะคอนตินเจนซีที่มีผลกระทบต่อระบบสูง แล้วจึงนำคอนตินเจนซีเหล่านั้นมาวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยเอซีเพาเวอร์ไฟลว์ ซึ่งวิธีการคัดกรองที่นำเสนอประกอบด้วย 3 โมดูลดังนี้

- โมดูลที่ 1 คัดกรองด้วยความไวเชิงเส้น (หัวข้อ 4.2.1) โดยใช้ (4.1) และ (4.5) ซึ่งเป็นขั้นตอนการคัดกรองเบื้องต้นและใช้เวลาวิเคราะห์สั้นที่สุด จึงเหมาะสำหรับคัดกรองคอนตินเจนซีที่มีเป็นจำนวนมาก
- โมดูลที่ 2 คัดกรองด้วยดัชนีสมรรถนะโดยใช้ฟาสต์ดีคัปเปิลเพาเวอร์ไฟลว์ ซึ่งเป็นขั้นตอนการคัดกรองที่ละเอียดมากขึ้นกว่าโมดูลที่ 1 โดยรับคอนตินเจนซีจากโมดูลที่ 1 มาคัดกรองอีกทอดหนึ่ง
- โมดูลที่ 3 คัดกรองด้วยดัชนีสมรรถนะโดยใช้เอซีเพาเวอร์ไฟลว์ ซึ่งเป็นขั้นตอนการคัดกรองอย่างละเอียดและใช้เวลาวิเคราะห์นานที่สุด จึงเหมาะสำหรับการคัดกรองคอนตินเจนซีจำนวนไม่มาก ขั้นตอนนี้รับคอนตินเจนซีจากโมดูลที่ 2 มาคัดกรองเป็นครั้งสุดท้าย เพื่อให้เหลือเฉพาะคอนตินเจนซีที่เป็นอันตรายต่อระบบเท่านั้น



รูปที่ 4.2 แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะ



รูปที่ 4.2 (ต่อ) แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์คอนติเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะ

4.4 สรุป

การวิเคราะห์ความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังมีความสำคัญทั้งในด้านการควบคุมระบบไฟฟ้าและการวางแผนระบบไฟฟ้า ซึ่งระบบไฟฟ้าที่มีความมั่นคงจะต้องสามารถทนทานต่อการรบกวนต่างๆ ได้ โดยที่ยังคงสามารถทำงานได้ตามปกติ ซึ่งเรียกการรบกวนที่สามารถส่งผลกระทบต่อที่รุนแรงต่อระบบไฟฟ้าว่า คอนตันเจนซี ทั้งนี้คอนตันเจนซีมักนำมาพิจารณา คือ คอนตันเจนซีที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือสายส่งไฟฟ้า โดยพิจารณาคอนตันเจนซีแบบ $N - 1$ สำหรับบนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความมั่นคงแบบต่างๆ ได้แก่ ค่าความไวเชิงเส้น และดัชนีสมรรถนะ เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผลและคัดกรองให้เหลือเฉพาะคอนตันเจนซีที่มีกระทบต่อระบบไฟฟ้ามาก ก่อนจะนำคอนตันเจนซีที่ผ่านการคัดกรองเหล่านี้ไปวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยเอซีเพาเวอร์ฟลูว์ต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การวิเคราะห์คอนดินเจนซีโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค

เนื่องจากการวิเคราะห์คอนดินเจนซีโดยใช้เอชพีเพาเวอร์โฟลว์ ใช้เวลาในประมวลผลนาน ซึ่งเป็นอุปสรรคเมื่อต้องวิเคราะห์คอนดินเจนซีจำนวนมากภายในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งอาจทำให้ไม่ทันต่อการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ในบทนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์คอนดินเจนซี โดยนำคุณสมบัติที่ดีในการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาคที่สามารถหาคำตอบเหมาะสมโดยรวมได้โดยใช้จำนวนประชากรเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย โดยใช้กระบวนการ MOMGA ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ร่วมกับการจำลองคอนดินเจนซีโดยการฉีดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชย

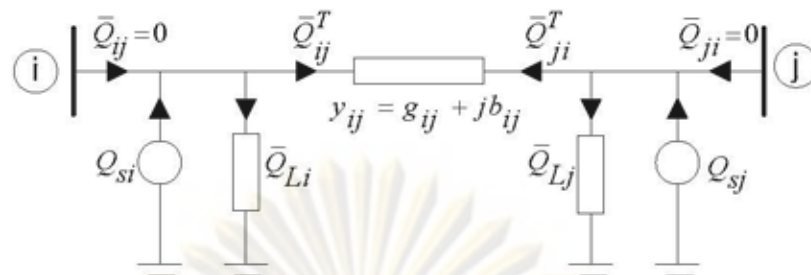
5.1 การจำลองคอนดินเจนซีโดยการฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชย [4] - [6]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้การจำลองคอนดินเจนซีโดยใช้หลักการฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชย (Reactive Power Compensation) เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณบัลลัดแอมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่ทุกครั้งที่เกิดคอนดินเจนซี โดยหลักการดังกล่าวสามารถใช้บัลลัดแอมิตแตนซ์เมตริกซ์เดิมก่อนเกิดคอนดินเจนซีในการจำลองคอนดินเจนซีและคำนวณแรงดันบัลลัดหลังจากเกิดคอนดินเจนซี โดยใช้หลักการว่าหากสามารถฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยได้เท่ากับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายออกจากบัลลัดหลังจากเกิดคอนดินเจนซี ก็จะมีผลเหมือนกับว่าเกิดคอนดินเจนซีขึ้นจริงโดยไม่ต้องปลดสายส่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ ทั้งนี้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยที่ฉีดเข้าสู่บัลลัดที่เกิดคอนดินเจนซีจะสัมพันธ์กับแรงดันบัลลัดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคำนวณได้จากกระบวนการ MOMGA ที่ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามเงื่อนไขการจำลองคอนดินเจนซี ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ สายส่งไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุด ดังนี้

5.1.1 กรณีสายส่งหลุด



รูปที่ 5.1 (ก) สายส่งหลุดที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 5.1 (ข) แบบจำลองสายส่งหลุด

\bar{Q}_{ij} คือ กำลังไฟฟ้ารี่เอกที่ฟที่จ่ายออกจากบัส i ไปยังบัส j

\bar{Q}_{ji} คือ กำลังไฟฟ้ารี่เอกที่ฟที่จ่ายออกจากบัส j ไปยังบัส i

\bar{Q}_{ij}^T คือ กำลังไฟฟ้ารี่เอกที่ฟที่ไหลในสายส่งจากบัส i ไปยังบัส j

\bar{Q}_{ji}^T คือ กำลังไฟฟ้ารี่เอกที่ฟที่ไหลในสายส่งจากบัส j ไปยังบัส i โดย $\bar{Q}_{ji}^T = -\bar{Q}_{ij}^T$

Q_{si}, Q_{sj} คือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารี่เอกที่ฟชดเชยของบัส i และ j ตามลำดับ

$\bar{Q}_{Li}, \bar{Q}_{Lj}$ คือ กำลังไฟฟ้ารี่เอกที่ฟสูญเสียของบัส i และ j ตามลำดับ

$\bar{\delta}_i$ คือ มุมแรงดันบัสหลังจากเกิดคอนดินเจนซี ซึ่งคำนวณโดยการประมาณเชิงเส้นในบทที่ 4

จากรูปที่ 5.1 (ข) จะได้ว่า $\bar{Q}_{ij} + Q_{si} = \bar{Q}_{Li} + \bar{Q}_{ij}^T$

เมื่อสายส่งหลุด $\bar{Q}_{ij} = 0$ ดังนั้น

$$Q_{si} = \bar{Q}_{Li} + \bar{Q}_{ij}^T \quad (5.1)$$

แสดงว่าต้องฉีดกำลังไฟฟ้ารี่เอกที่ฟชดเชยดัง (5.1) เพื่อจำลองสายส่งหลุด ซึ่งปริมาณกำลังไฟฟ้ารี่เอกที่ฟชดเชยจะสัมพันธ์กับขนาดแรงดันบัสที่เปลี่ยนแปลงหลังจากเกิดคอนดินเจนซี และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง \bar{Q}_{Li} ส่งผลต่อขนาดแรงดันบัสน้อยมาก จึงละเลยการพิจารณาผลของ

\bar{Q}_{Li} โดยให้ $\bar{Q}_{Li} = 0$ [4] ดังนั้น

$$Q_{si} = \bar{Q}_{ij}^T \quad (5.2)$$

$$\text{โดยที่ } \bar{Q}_{ij}^T = \frac{-(b_{ij} + 0.5b_{i0})}{2} (|\bar{V}_i|^2 - |\bar{V}_j|^2) + (g_{ij} \cdot \sin \delta_{ji}) |\bar{V}_i| |\bar{V}_j| \quad (5.3)$$

ซึ่ง (5.3) มีที่มาดังนี้

จากรูปที่ 5.1 (ข) จะได้

$$Q_{ij}^T = \frac{Q_{ij} - Q_{ji}}{2} \quad (5.4)$$

$$Q_{ij} = -\text{Im}[V_i^* (I_i^{\text{line}} + I_i^{\text{charging}})] \quad (5.5)$$

$$Q_{ji} = -\text{Im}[V_j^* (I_j^{\text{line}} + I_j^{\text{charging}})] \quad (5.6)$$

จาก (5.5) จะได้
$$Q_{ij} = -\text{Im}[V_i^* ((V_i - V_j) \cdot y_{ij} + V_i \cdot \frac{y'_{ij}}{2})]$$

จาก (5.6) จะได้
$$Q_{ji} = -\text{Im}[V_j^* ((V_j - V_i) \cdot y_{ij} + V_j \cdot \frac{y'_{ji}}{2})]$$

โดย $V_i = |V_i| \sin \delta_i$ และ $V_j = |V_j| \sin \delta_j$

$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$ และ $y'_{ij} = y'_{ji} = j b_{i0}$; Line charging admittance

ดังนั้น

$$Q_{ij} = -(b_{ij} + \frac{b_{i0}}{2}) |V_i|^2 + |V_i| |V_j| (g_{ij} \sin \delta_{ji} + b_{ij} \cos \delta_{ji}) \quad (5.7)$$

และ

$$Q_{ji} = -(b_{ij} + \frac{b_{i0}}{2}) |V_j|^2 + |V_i| |V_j| (g_{ij} \sin \delta_{ij} + b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (5.8)$$

โดย $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ และ $\delta_{ji} = \delta_j - \delta_i$

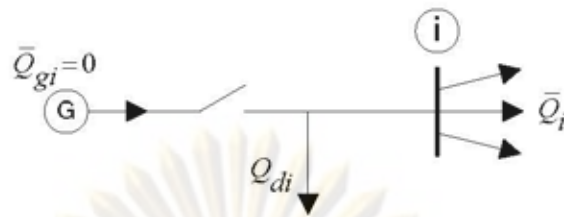
นำ (5.7) และ (5.8) แทนใน (5.4) โดยให้ $\frac{b_{i0}}{2} = 0$ จะได้ (5.3)

ส่วน Q_{Li} หาได้จาก

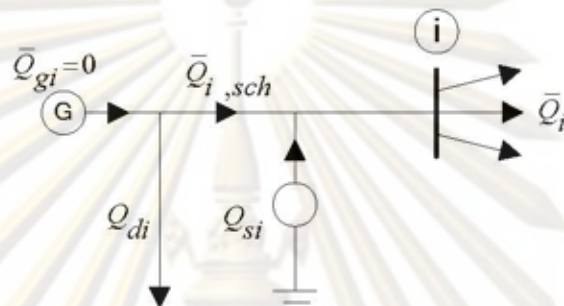
$$Q_{ij}^T = \frac{Q_{ij} + Q_{ji}}{2} \quad (5.9)$$

$$Q_{Li} = \frac{-(b_{ij} + 0.5b_{i0})}{2} (|\bar{V}_i|^2 + |\bar{V}_j|^2) + (b_{ij} \cdot \cos \delta_{ji}) |\bar{V}_i| |\bar{V}_j| \quad (5.10)$$

5.1.2 กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.2 (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดที่เกิดขึ้นจริง



รูปที่ 5.2 (ข) แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุด

\bar{Q}_{gi} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i หลังจากเกิดคอนดินเจนซี

Q_{gi} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i ก่อนเกิดคอนดินเจนซี

Q_{di} คือ รีแอกทีฟโหลดของบัส i

Q_{si} คือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยของบัส i

\bar{Q}_i คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิของบัส i หลังจากเกิดคอนดินเจนซี

δ_i คือ มุมแรงดันบัสหลังจากเกิดคอนดินเจนซี ซึ่งคำนวณโดยการประมาณเชิงเส้นในบทที่ 4

จากรูปที่ 5.2 (ข) จะได้ว่า

$$\bar{Q}_i = Q_i^0 + \Delta Q_i$$

$$\bar{Q}_{gi} - Q_{di} = Q_{gi} - Q_{di} + \Delta Q_i$$

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุด $\bar{Q}_{gi} = 0$ ดังนั้น

$$Q_{si} = \Delta Q_i = -Q_{gi} \quad (5.11)$$

แสดงว่าต้องฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยดัง (5.9) เพื่อจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุด ซึ่งปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยจะสัมพันธ์กับขนาดแรงดันบัลที่เปลี่ยนแปลงหลังจากเกิดคอนดินเจนซี โดย \bar{Q}_i คำนวณจาก

$$\bar{Q}_i = |\bar{V}_i| \sum_{j=1}^N |\bar{V}_j| (G_{ij} \sin \bar{\delta}_{ij} - B_{ij} \cos \bar{\delta}_{ij}) \quad (5.12)$$

5.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับวิเคราะห์คอนดินเจนซี

เนื่องจากปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยจะสัมพันธ์กับขนาดแรงดันบัลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเกิดคอนดินเจนซี สร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปปัญหาค่าเหมาะสมเฉพาะที่แบบไม่เชิงเส้น โดยพิจารณาเฉพาะบัลที่เกิดคอนดินเจนซีและบัลข้างเคียงเป็นหลัก

5.2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีสายส่งหลุด

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \left\| \begin{array}{l} \bar{Q}_i - \bar{Q}_{ij}^T - \bar{Q}_{Li} + Q_{di} \\ \bar{Q}_j + \bar{Q}_{ij}^T - \bar{Q}_{Lj} + Q_{dj} \end{array} \right\| \\ \text{wrt } \bar{Q}_{ij}^T \quad & \\ \text{s.t.} \quad & \Delta |V| = X \Delta Q \end{aligned} \quad (5.13)$$

โดยที่ $\Delta Q = \begin{cases} \Delta Q_i = -\Delta Q_j = \bar{Q}_{ij}^T \\ \Delta Q_k = 0; \text{ for } k \neq i, j \end{cases}$

5.2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุด

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \left\| \bar{Q}_i + Q_{di} \right\| \\ \text{wrt } \Delta Q_i \quad & \\ \text{s.t.} \quad & \Delta |V| = X \Delta Q \end{aligned} \quad (5.14)$$

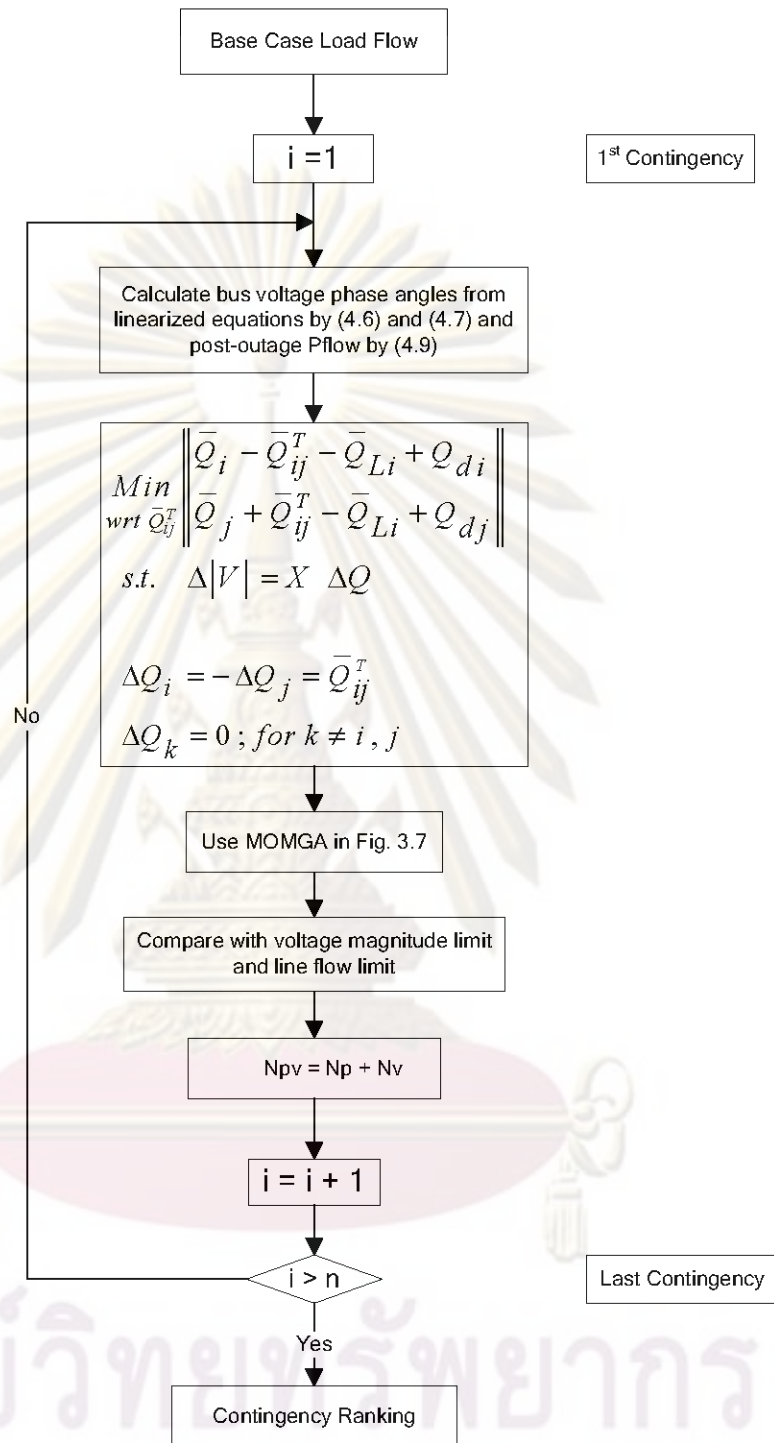
โดยที่ $\Delta Q = \begin{cases} \Delta Q_i = -Q_g^0 \\ \Delta Q_k = 0; \text{ for } k \neq i \end{cases}$

ซึ่งมี \bar{Q}_{ij}^T และ Q_g^0 เป็นตัวแปรควบคุม (Control Variable), ขนาดแรงดันของบัลโหลด $|V|$ เป็นตัวแปรตาม (Dependent Variable) และ ΔQ_i เป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) โดยคำนวณมุมเฟสของแรงดันบัลโหลดหลังจากเกิดคอนตันเจนขึ้นด้วยการประมาณเชิงเส้น [1],[5] และนำมุมเฟสดังกล่าวไปใช้ประมาณกำลังไฟฟ้ที่สูญเสียหลังจากเกิดคอนตันเจนที่ \bar{Q}_{Li}

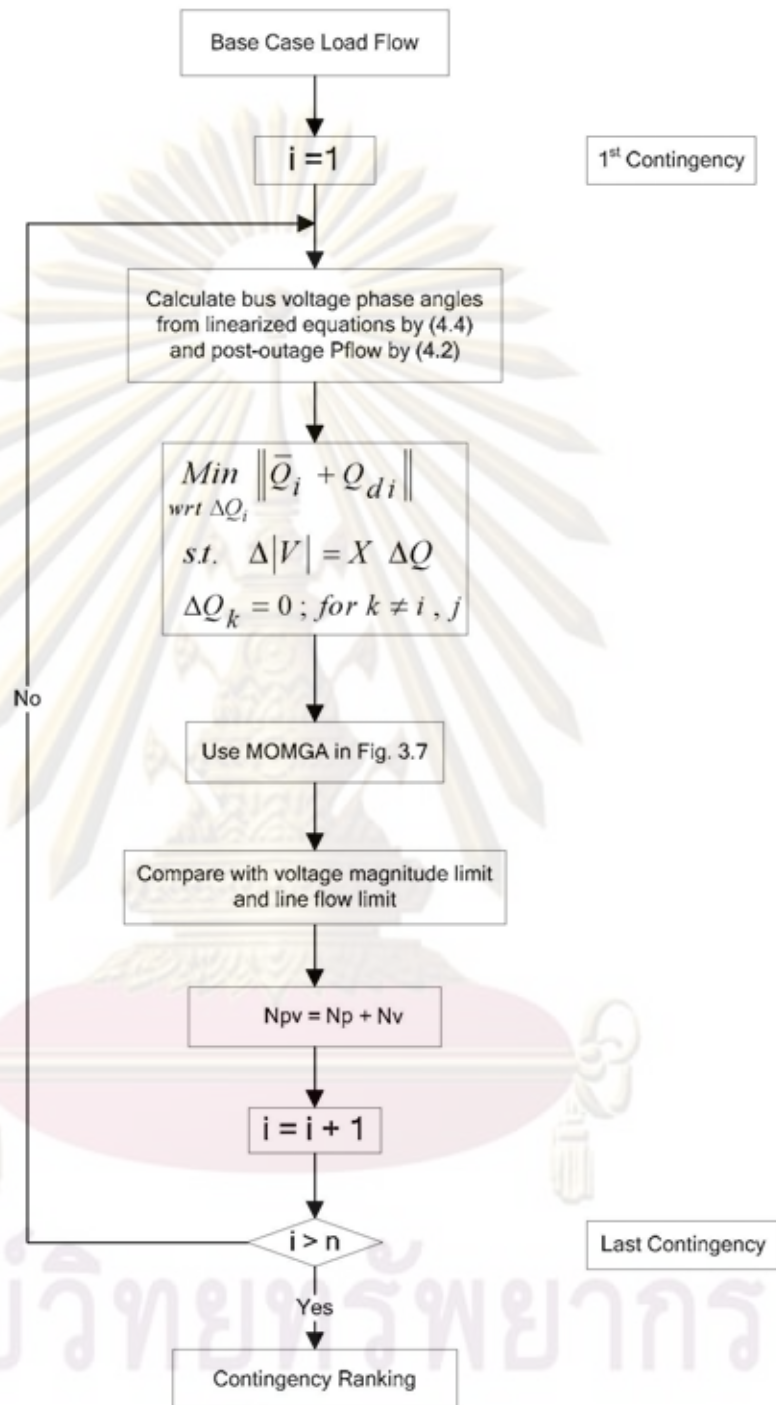
การวิเคราะห์คอนตันเจนจะทำให้ทราบจำนวนสายส่งที่เกิดโหลดเกิน (N_p) และจำนวนบัลที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดัน (N_v) โดยผลรวมของจำนวนบัลและสายส่งที่ได้รับผลกระทบ (N_{pv}) จะบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของคอนตันเจนขึ้น

$$N_{pv} = N_p + N_v \quad (5.15)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์สายส่งหลุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม



รูปที่ 5.4 แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

5.3 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์คอนตินเจนซี โดยพิจารณาคอนตินเจนซีที่เกิดจากสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาคร่วมกับการจำลองการเกิดคอนตินเจนซีด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชย ซึ่งขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยที่ฉีดเข้ายังบัสที่เกิดคอนตินเจนซีจะสัมพันธ์กับขนาดแรงดันบัสที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเกิดคอนตินเจนซี สามารถสร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของปัญหาค่าเหมาะสมเฉพาะที่แบบไม่เชิงเส้นที่มีหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยมีขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยเป็นตัวแปรควบคุม และขนาดแรงดันบัสหลังจากเกิดคอนตินเจนซีเป็นตัวแปรตาม ทั้งนี้จำนวนสายส่งที่รับกำลังไฟฟ้าเกินพิกัดและจำนวนบัสที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดัน จะบ่งบอกถึงผลกระทบของคอนตินเจนซีที่มีต่อระบบไฟฟ้า



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้เป็นการทดสอบการวิเคราะห์คอนดินเจนซีโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและดัชนีสมรรถนะ ซึ่งนำเสนอในบทที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยทำการทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส, IEEE 57 บัส และระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย โดยพิจารณาผลกระทบทั้งด้านกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของคอนดินเจนซีที่มีต่อระบบไฟฟ้า โดยให้สายส่งที่ต่อกับบัสอ้างอิงต่ออยู่กับระบบตลอดเวลา รวมทั้งไม่พิจารณาคอนดินเจนซีกรณีสายส่งหลุดแล้วทำให้เกิด Islanding โดยแสดงตัวอย่างกรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์คอนดินเจนซี ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 กรณีดังนี้

- กรณีศึกษาที่ 1 คอนดินเจนซีของสายส่งที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าสูง
- กรณีศึกษาที่ 2 คอนดินเจนซีของสายส่งที่มีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านปริมาณมาก
- กรณีศึกษาที่ 3 คอนดินเจนซีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมาก
- กรณีศึกษาที่ 4 คอนดินเจนซีของสายส่งที่เกิดกับบัสที่มีขนาดแรงดันบัสก่อนเกิดคอนดินเจนซีใกล้กับขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้า
- กรณีศึกษาที่ 5 อื่นๆ

ผลการทดสอบที่แสดงในบทนี้ได้จากการประมวลผลโดยใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ACER รุ่น TRAVELMATE 4720 INTEL CORE 2 DUO (2.2 GHz, 789 MHz), RAM 2 GB

6.1 การทดสอบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำเสนอสำหรับวิเคราะห์คอนดินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์คอนดินเจนซีของระบบ IEEE 30 บัส โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเปรียบเทียบกับวิธีเอซีเพาเวอร์โพล์ โดยพิจารณาผลกระทบทั้งด้านกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจำนวนบัสและสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดจะบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของคอนดินเจนซีที่มีต่อระบบไฟฟ้า โดยมีขีดจำกัดของขนาดแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.94 – 1.06 pu มีจำนวนคอนดินเจนซีที่พิจารณาทั้งสิ้น 41 กรณี

กรณีศึกษาที่ 1 คอนดินเจนซีของสายส่งที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าสูง

วิเคราะห์คอนดินเจนซีของสายส่งเส้นที่ 36 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 27 และ 28 และเป็นบัสที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าต่ออยู่ โดยก่อนเกิดคอนดินเจนซีมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 18.07 MW ซึ่งมีพิคกที่ 65 MVA โดยผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าคอนดินเจนซีดังกล่าวทำให้บัสโหลดและสายส่งละเมิดขีดจำกัดจำนวน 5 บัสและ 3 เส้นตามลำดับ ซึ่งเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โฟลว์ แสดงขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.1 โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.271% ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 1 จากทั้งหมด 41 คอนดินเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.3 และมีอันดับความรุนแรงเท่ากับผลจากการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.4 ก

กรณีศึกษาที่ 2 คอนดินเจนซีของสายส่งที่มีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านปริมาณมาก

วิเคราะห์คอนดินเจนซีของสายส่งเส้นที่ 7 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 4 และ 6 โดยก่อนเกิดคอนดินเจนซีมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 72.13 MW ซึ่งมีพิคกที่ 90 MVA ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าไม่มีบัสโหลดใดละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าแต่มีสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจำนวน 2 เส้น ซึ่งใกล้เคียงผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โฟลว์ (0 บัส, 3 เส้น) แสดงขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.1 โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.336% ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 10 ดังแสดงในตารางที่ 6.3 และใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.4 ก

กรณีศึกษาที่ 3 คอนดินเจนซีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมาก

วิเคราะห์คอนดินเจนซีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 2 ซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าวาร์แยกทีฟ 40 MW และ 56.07 MVAR ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าไม่มีบัสโหลดใดละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าแต่มีสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าจำนวน 1 เส้น ซึ่งเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โฟลว์ แสดงขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.1 โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.053% ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 37 ดังแสดงในตารางที่ 6.3 และใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.4 ก

กรณีศึกษาที่ 4 คอนตันเจนซีของสายส่งที่เกิดกับบัลที่มีขนาดแรงดันบัลก่อนเกิดคอนตันเจนซีใกล้กับขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้า

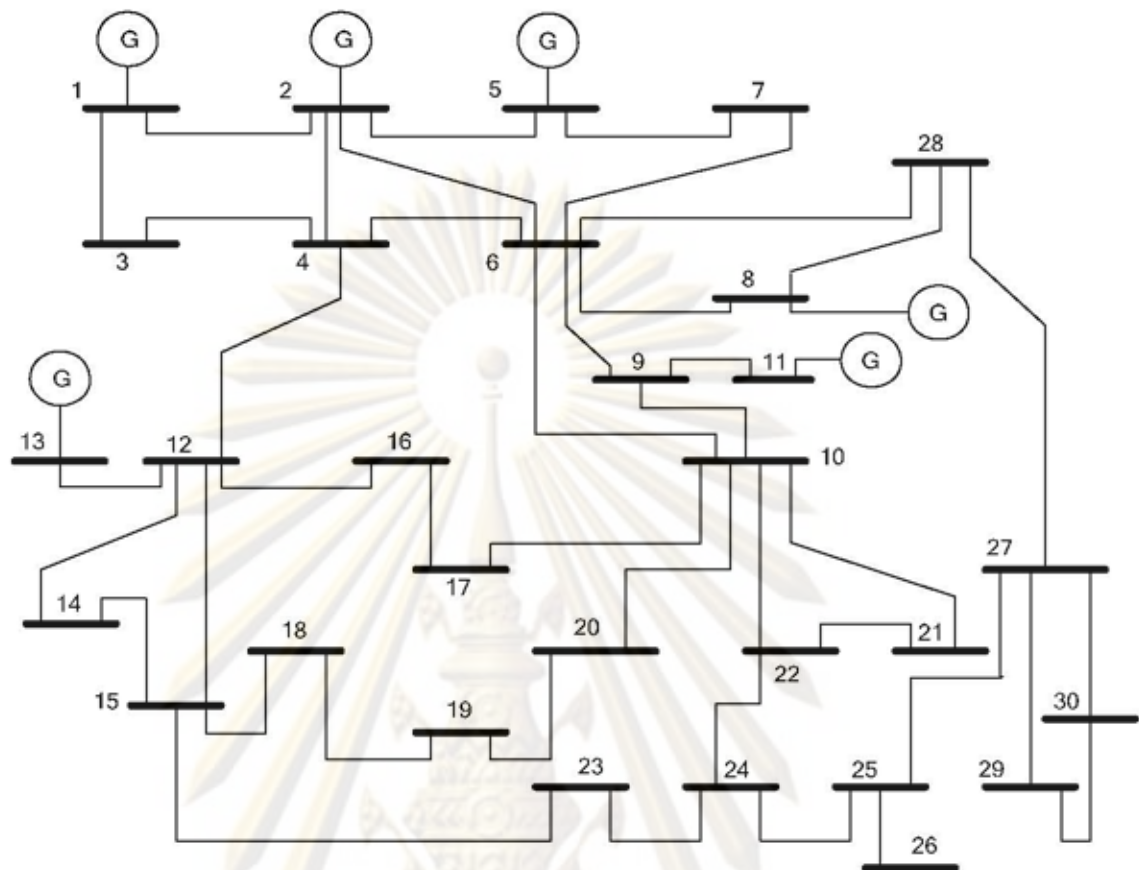
วิเคราะห์คอนตันเจนซีของสายส่งเส้นที่ 18 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัลที่ 12 และ 15 โดยก่อนเกิดคอนตันเจนซีมีแรงดันบัลเท่ากับ 1.057 pu และกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 17.89 MW ซึ่งมีพิคัดที่ 32 MVA ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าคอนตันเจนซีดังกล่าวทำให้บัลโหลดและสายส่งละเมิดขีดจำกัดจำนวน 1 บัลและ 1 เส้นตามลำดับ ซึ่งเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โฟลว์ แสดงขนาดแรงดันของบัลโหลดหลังจากเกิดคอนตันเจนซีดังตารางที่ 6.1 โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.024% ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ทั้งนี้คอนตันเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 4 ดังแสดงในตารางที่ 6.3 และใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.4 ข

กรณีศึกษาที่ 5 คอนตันเจนซีของสายส่งเส้นที่ 27 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัลที่ 10 และ 21

ก่อนเกิดคอนตันเจนซีมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 15.79 MW ซึ่งมีพิคัดที่ 32 MVA ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าคอนตันเจนซีดังกล่าวทำให้บัลโหลดและสายส่งละเมิดขีดจำกัดจำนวน 2 บัลและ 1 เส้นตามลำดับ ซึ่งเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โฟลว์ แสดงขนาดแรงดันของบัลโหลดหลังจากเกิดคอนตันเจนซีดังตารางที่ 6.1 โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.014% ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ทั้งนี้คอนตันเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 25 ดังแสดงในตารางที่ 6.3 และเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.4 ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ตารางที่ 6.1 ก ขนาดแรงแดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3

| Bus No. | Basecase | Case1 br36(28-27) | | | Case2 br7(4-6) | | | Case3 PV2 | | |
|---------|----------|-------------------|-------|--------|----------------|-------|--------|-----------|-------|--------|
| | | GA* | ACPF | %error | GA* | ACPF | %error | GA* | ACPF | %error |
| 2 (PV) | 1.045 | 1.045 | 1.045 | 0.00 | 1.045 | 1.045 | 0.00 | 1.018 | 1.022 | 0.39 |
| 3 | 1.021 | 1.021 | 1.020 | 0.10 | 1.022 | 1.023 | 0.10 | 1.005 | 1.015 | 0.99 |
| 4 | 1.012 | 1.012 | 1.011 | 0.10 | 1.014 | 1.014 | 0.00 | 0.993 | 1.005 | 1.19 |
| 6 | 1.011 | 1.011 | 1.010 | 0.10 | 1.009 | 1.009 | 0.00 | 0.989 | 1.006 | 1.69 |
| 7 | 1.003 | 1.003 | 1.002 | 0.10 | 1.002 | 1.001 | 0.10 | 0.980 | 1.000 | 2.00 |
| 9 | 1.051 | 1.046 | 1.046 | 0.00 | 1.050 | 1.048 | 0.19 | 1.028 | 1.048 | 1.91 |
| 10 | 1.045 | 1.035 | 1.036 | 0.10 | 1.045 | 1.039 | 0.58 | 1.023 | 1.042 | 1.82 |
| 12 | 1.057 | 1.053 | 1.053 | 0.00 | 1.058 | 1.059 | 0.09 | 1.035 | 1.055 | 1.90 |
| 14 | 1.043 | 1.035 | 1.035 | 0.00 | 1.043 | 1.044 | 0.10 | 1.020 | 1.040 | 1.92 |

ตารางที่ 6.1 ก ขนาดแรงแดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส
ของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3

| Bus No. | Basecase | Case1 br36(28-27) | | | Case2 br7(4-6) | | | Case3 PV2 | | |
|-----------|----------|-------------------|-------|--------|----------------|-------|--------|-----------|-------|--------|
| | | GA* | ACPF | %error | GA* | ACPF | %error | GA* | ACPF | %error |
| 15 | 1.038 | 1.028 | 1.027 | 0.10 | 1.038 | 1.037 | 0.10 | 1.016 | 1.035 | 1.84 |
| 16 | 1.045 | 1.037 | 1.038 | 0.10 | 1.045 | 1.041 | 0.38 | 1.022 | 1.042 | 1.92 |
| 17 | 1.040 | 1.031 | 1.032 | 0.10 | 1.040 | 1.035 | 0.48 | 1.017 | 1.037 | 1.93 |
| 18 | 1.028 | 1.018 | 1.018 | 0.00 | 1.028 | 1.025 | 0.29 | 1.006 | 1.025 | 1.85 |
| 19 | 1.026 | 1.016 | 1.016 | 0.00 | 1.026 | 1.021 | 0.49 | 1.003 | 1.023 | 1.96 |
| 20 | 1.030 | 1.020 | 1.020 | 0.00 | 1.030 | 1.025 | 0.49 | 1.007 | 1.027 | 1.95 |
| 21 | 1.033 | 1.019 | 1.019 | 0.00 | 1.032 | 1.027 | 0.49 | 1.010 | 1.030 | 1.94 |
| 22 | 1.034 | 1.018 | 1.018 | 0.00 | 1.033 | 1.027 | 0.58 | 1.011 | 1.030 | 1.84 |
| 23 | 1.027 | 1.007 | 1.005 | 0.20 | 1.027 | 1.025 | 0.20 | 1.005 | 1.024 | 1.86 |
| 24 | 1.022 | 0.987 | 0.984 | 0.30 | 1.021 | 1.017 | 0.39 | 0.999 | 1.019 | 1.96 |
| 25 | 1.018 | 0.932 | 0.925 | 0.76 | 1.017 | 1.011 | 0.59 | 0.995 | 1.014 | 1.87 |
| 26 | 1.000 | 0.914 | 0.905 | 0.99 | 0.999 | 0.994 | 0.50 | 0.977 | 0.996 | 1.91 |
| 27 | 1.024 | 0.907 | 0.900 | 0.78 | 1.023 | 1.017 | 0.59 | 1.001 | 1.020 | 1.86 |
| 28 | 1.007 | 1.013 | 1.011 | 0.20 | 1.006 | 1.006 | 0.00 | 0.985 | 1.004 | 1.89 |
| 29 | 1.004 | 0.887 | 0.877 | 1.14 | 1.003 | 0.997 | 0.60 | 0.981 | 1.000 | 1.90 |
| 30 | 0.992 | 0.876 | 0.864 | 1.39 | 0.991 | 0.985 | 0.61 | 0.970 | 0.988 | 1.82 |
| Load Bus | 0 | 5 | 5 | | 0 | 0 | | 0 | 0 | |
| Violation | | | | | | | | | | |

ตารางที่ 6.1 ข ขนาดแรงแดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส
ของกรณีศึกษาที่ 4 และ 5

| Bus No. | Basecase | Case4 br18(12-15) | | | Case5 br27(10-21) | | |
|---------|----------|-------------------|-------|---------|-------------------|-------|---------|
| | | GA* | ACPF | % error | GA* | ACPF | % error |
| 3 | 1.021 | 1.021 | 1.021 | 0.00 | 1.021 | 1.021 | 0.00 |
| 4 | 1.012 | 1.012 | 1.013 | 0.10 | 1.012 | 1.012 | 0.00 |
| 6 | 1.011 | 1.010 | 1.010 | 0.00 | 1.011 | 1.011 | 0.00 |

ตารางที่ 6.1 ข ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส
ของกรณีศึกษาที่ 4 และ 5

| Bus No. | Basecase | Case4 br18(12-15) | | | Case5 br27(10-21) | | |
|----------------|----------|-------------------|-------|---------|-------------------|-------|---------|
| | | GA* | ACPF | % error | GA* | ACPF | % error |
| 7 | 1.003 | 1.002 | 1.002 | 0.00 | 1.003 | 1.003 | 0.00 |
| 9 | 1.051 | 1.048 | 1.047 | 0.10 | 1.052 | 1.052 | 0.00 |
| 10 | 1.045 | 1.038 | 1.038 | 0.00 | 1.047 | 1.047 | 0.00 |
| 12 | 1.057 | 1.061 | 1.061 | 0.00 | 1.057 | 1.057 | 0.00 |
| 14 | 1.043 | 1.030 | 1.030 | 0.00 | 1.041 | 1.041 | 0.00 |
| 15 | 1.038 | 1.003 | 1.002 | 0.10 | 1.036 | 1.035 | 0.10 |
| 16 | 1.045 | 1.044 | 1.043 | 0.10 | 1.045 | 1.045 | 0.00 |
| 17 | 1.040 | 1.035 | 1.035 | 0.00 | 1.041 | 1.041 | 0.00 |
| 18 | 1.028 | 1.003 | 1.003 | 0.00 | 1.027 | 1.027 | 0.00 |
| 19 | 1.026 | 1.007 | 1.006 | 0.10 | 1.026 | 1.026 | 0.00 |
| 20 | 1.030 | 1.014 | 1.013 | 0.10 | 1.030 | 1.030 | 0.00 |
| 21 | 1.033 | 1.025 | 1.025 | 0.00 | 1.010 | 1.009 | 0.10 |
| 22 | 1.034 | 1.025 | 1.025 | 0.00 | 1.014 | 1.014 | 0.00 |
| 23 | 1.027 | 1.001 | 1.001 | 0.00 | 1.021 | 1.020 | 0.10 |
| 24 | 1.022 | 1.007 | 1.007 | 0.00 | 1.009 | 1.009 | 0.00 |
| 25 | 1.018 | 1.008 | 1.008 | 0.00 | 1.010 | 1.010 | 0.00 |
| 26 | 1.000 | 0.991 | 0.990 | 0.10 | 0.992 | 0.992 | 0.00 |
| 27 | 1.024 | 1.018 | 1.018 | 0.00 | 1.019 | 1.019 | 0.00 |
| 28 | 1.007 | 1.006 | 1.006 | 0.00 | 1.006 | 1.006 | 0.00 |
| 29 | 1.004 | 0.998 | 0.998 | 0.00 | 0.999 | 0.999 | 0.00 |
| 30 | 0.992 | 0.986 | 0.986 | 0.00 | 0.987 | 0.987 | 0.00 |
| Total Load Bus | | | | | | | |
| Violation | 0 | 1 | 1 | | 0 | 0 | |

* GA : Proposed Genetic Algorithms

ACPF : AC Power Flow

ตารางที่ 6.2 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของขนาดแรงดันที่บัลโหลดและระยะเวลาในการประมวลผลของแต่ละกรณีศึกษา (IEEE 30 บัส)

| Case Study | Mean (%) | Min | Max | SD | Comp Time (sec) | |
|-------------------|----------|-------|-------|-------|-----------------|--------|
| | | | | | GA* | ACPF |
| Case1 br36(28-27) | 0.271 | 0.008 | 1.348 | 0.399 | 1.7956 | 0.0268 |
| Case2 br7(4-6) | 0.336 | 0.030 | 0.615 | 0.213 | 1.0304 | 0.0223 |
| Case3 PV2 | 0.053 | 0.022 | 0.098 | 0.017 | 1.0016 | 0.0235 |
| Case4 br18(12-15) | 0.024 | 0.000 | 0.070 | 0.017 | 1.1315 | 0.0252 |
| Case5 br27(10-21) | 0.014 | 0.001 | 0.036 | 0.010 | 1.0902 | 0.0244 |

* GA : Proposed Genetic Algorithms

วิเคราะห์ผลการทดสอบ (ระบบ IEEE 30 บัส)

จากกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณีพบว่า เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของแรงดันบัลหลังจากเกิดคอนดินเจนซีค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอก็สามารถตรวจจับบัลที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับวิธีเอซีเพาเวอร์โพลว์ดังแสดงในตารางที่ 6.3 และสามารถจัดอันดับความรุนแรงได้ใกล้เคียงกับวิธีดัชนีสมรรถนะ ดังแสดงในตารางที่ 6.4 เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาประมวลผลพบว่าใช้เวลามากกว่าในทุกกรณี แต่เนื่องจากระยะเวลาประมวลผลของวิธีการที่นำเสนอไม่ขึ้นกับขนาดของระบบทดสอบ ทำให้ใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่าเมื่อทดสอบกับระบบที่มีขนาดใหญ่ ดังจะได้อธิบายต่อไป

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนดินเจนซีระหว่างวิธีเอซีเพาเวอร์โพลว์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | | Total : (1) + (2) | | |
|-----|---------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|-------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % | GA + Dist fact | ACPF | Capture rate % |
| 1 | br36(28-27)** | 7 | 7 | 100 | 3 | 3 | 100 | 10 | 10 | 100 |
| 2 | br4(3-4) | 3 | 3 | 100 | 3 | 3 | 100 | 6 | 6 | 100 |
| 3 | br11(6-9)** | 3 | 2 | 150 | 1 | 1 | 100 | 4 | 3 | 133 |
| 4 | br18(12-15) | 3 | 3 | 100 | 1 | 1 | 100 | 4 | 4 | 100 |

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนดินเจนซีระหว่างวิธีเอซีเพาเวอร์โฟลว์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | | Total : (1) + (2) | | |
|-----|--------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|-------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % | GA + Dist fact | ACPF | Capture rate % |
| 5 | br19(12-16) | 3 | 3 | 100 | 1 | 1 | 100 | 4 | 4 | 100 |
| 6 | br38(27-30) | 3 | 3 | 100 | 1 | 1 | 100 | 4 | 4 | 100 |
| 7 | br3(2-4) | 2 | 2 | 100 | 2 | 2 | 100 | 4 | 4 | 100 |
| 8 | br5(2-5) | 2 | 2 | 100 | 5 | 5 | 100 | 7 | 7 | 100 |
| 9 | br6(2-6) | 2 | 2 | 100 | 3 | 3 | 100 | 5 | 5 | 100 |
| 10 | br7(4-6) | 2 | 2 | 100 | 2 | 3 | 67 | 4 | 5 | 80 |
| 11 | br8(5-7) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 12 | br9(6-7) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 13 | br10(6-8) | 2 | 2 | 100 | 2 | 2 | 100 | 4 | 4 | 100 |
| 14 | br12(6-10)** | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 15 | br14(9-10) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 16 | br15(4-12)** | 2 | 2 | 100 | 4 | 4 | 100 | 6 | 6 | 100 |
| 17 | br17(12-14) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 18 | br20(14-15) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 19 | br21(16-17) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 20 | br22(15-18) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 21 | br23(18-19) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 22 | br24(19-20) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 23 | br25(10-20) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 24 | br26(10-17) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 25 | br27(10-21) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 26 | br28(10-22) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 27 | br29(21-22) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนดินเจนซีระหว่างวิธีเอซีเพาเวอร์โพลว์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | | Total : (1) + (2) | | |
|-----|-------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|-------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % | GA + Dist fact | ACPF | Capture rate % |
| 28 | br30(15-23) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 29 | br31(22-24) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 30 | br32(23-24) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 31 | br33(24-25) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 32 | br35(25-27) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 33 | br37(27-29) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 34 | br39(29-30) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 35 | br40(8-28) | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 36 | br41(6-28) | 2 | 2 | 100 | 2 | 2 | 100 | 4 | 4 | 100 |
| 37 | PV2 | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 38 | PV5 | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 39 | PV8 | 2 | 2 | 100 | 1 | 1 | 100 | 3 | 3 | 100 |
| 40 | PV11 | 1 | 1 | 100 | 1 | 1 | 100 | 2 | 2 | 100 |
| 41 | PV13 | 1 | 1 | 100 | 1 | 1 | 100 | 2 | 2 | 100 |
| | | | Mean | 101 | | Mean | 99 | | Mean | 100 |
| | | | Min | 100 | | Min | 67 | | Min | 80 |
| | | | Max | 150 | | Max | 100 | | Max | 133 |

* GA : Proposed Genetic Algorithms, Dist fact : Distribution factors

** หม้อแปลงไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|---------------|---------------|---------|---------------|----------|
| | Contingency | No. Violation | | Contingency | SI |
| 1 | br36(28-27)** | 10 | 1 | br36(28-27)** | 5154.495 |
| 2 | br5(2-5) | 7 | 3 | br4(3-4) | 1436.945 |
| 3 | br4(3-4) | 6 | 2 | br5(2-5) | 181.268 |
| 4 | br15(4-12)** | 6 | 7 | br7(4-6) | 163.802 |
| 5 | br6(2-6) | 5 | 37 | PV2 | 141.801 |
| 6 | br3(2-4) | 4 | 8 | br10(6-8) | 103.610 |
| 7 | br7(4-6) | 4 | 13 | br41(6-28) | 80.357 |
| 8 | br10(6-8) | 4 | 4 | br15(4-12)** | 65.690 |
| 9 | br11(6-9)** | 4 | 15 | br9(6-7) | 63.603 |
| 10 | br18(12-15) | 4 | 14 | br8(5-7) | 52.810 |
| 11 | br19(12-16) | 4 | 12 | br38(27-30) | 51.186 |
| 12 | br38(27-30) | 4 | 10 | br18(12-15) | 50.354 |
| 13 | br41(6-28) | 4 | 34 | br37(27-29) | 49.848 |
| 14 | br8(5-7) | 3 | 24 | br25(10-20) | 49.786 |
| 15 | br9(6-7) | 3 | 11 | br19(12-16) | 49.723 |
| 16 | br12(6-10)** | 3 | 29 | br30(15-23) | 49.597 |
| 17 | br14(9-10) | 3 | 20 | br21(16-17) | 49.542 |
| 18 | br17(12-14) | 3 | 21 | br22(15-18) | 49.435 |
| 19 | br20(14-15) | 3 | 18 | br17(12-14) | 49.320 |
| 20 | br21(16-17) | 3 | 5 | br6(2-6) | 48.719 |
| 21 | br22(15-18) | 3 | 36 | br40(8-28) | 18.952 |
| 22 | br23(18-19) | 3 | 22 | br23(18-19) | 18.932 |
| 23 | br24(19-20) | 3 | 31 | br32(23-24) | 18.928 |
| 24 | br25(10-20) | 3 | 30 | br31(22-24) | 18.896 |
| 25 | br26(10-17) | 3 | 27 | br28(10-22) | 18.893 |
| 26 | br27(10-21) | 3 | 26 | br27(10-21) | 18.890 |

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธี
เชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|-------------|---------------|---------|--------------|--------|
| | Contingency | No. Violation | | Contingency | SI |
| 27 | br28(10-22) | 3 | 35 | br39(29-30) | 18.881 |
| 28 | br29(21-22) | 3 | 19 | br20(14-15) | 18.879 |
| 29 | br30(15-23) | 3 | 28 | br29(21-22) | 18.862 |
| 30 | br31(22-24) | 3 | 38 | PV5 | 18.861 |
| 31 | br32(23-24) | 3 | 39 | PV8 | 18.861 |
| 32 | br33(24-25) | 3 | 40 | PV11 | 18.861 |
| 33 | br35(25-27) | 3 | 41 | PV13 | 18.861 |
| 34 | br37(27-29) | 3 | 23 | br24(19-20) | 18.820 |
| 35 | br39(29-30) | 3 | 32 | br33(24-25) | 18.791 |
| 36 | br40(8-28) | 3 | 25 | br26(10-17) | 18.665 |
| 37 | PV2 | 3 | 33 | br35(25-27) | 18.608 |
| 38 | PV5 | 3 | 9 | br11(6-9)** | 18.600 |
| 39 | PV8 | 3 | 17 | br14(9-10) | 18.600 |
| 40 | PV11 | 2 | 16 | br12(6-10)** | 18.581 |
| 41 | PV13 | 2 | 6 | br3(2-4) | 14.248 |

** หม้อแปลงไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 การทดสอบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำเสนอสำหรับวิเคราะห์คอนดินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์คอนดินเจนซีของระบบ IEEE 57 บัส โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเปรียบเทียบกับวิธีเอซีเพาเวอร์โฟลว์ โดยพิจารณาผลกระทบทั้งด้านกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจำนวนบัสและสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดจะบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของคอนดินเจนซีที่มีต่อระบบไฟฟ้า โดยมีขีดจำกัดของขนาดแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.94 – 1.06 pu มีจำนวนคอนดินเจนซีที่พิจารณาทั้งสิ้น 80 กรณี

กรณีศึกษาที่ 1 คอนดินเจนซีของสายส่งที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าสูง

วิเคราะห์คอนดินเจนซีของสายส่งเส้นที่ 41 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 7 และ 29 และเป็นบัสที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าต่ออยู่ โดยก่อนเกิดคอนดินเจนซีมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 60.09 MW ซึ่งมีพิกัดที่ 70 MVA โดยผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าคอนดินเจนซีดังกล่าวพบว่ามีบัสโหลดและสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดจำนวน 15 บัสและ 12 เส้นตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โฟลว์ (ละเมิด 19 บัส, 13 เส้น) แสดงขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.5 ก โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.977% ดังแสดงในตารางที่ 6.6 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 1 จากทั้งหมด 80 คอนดินเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.7 และใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.8

กรณีศึกษาที่ 2 คอนดินเจนซีของสายส่งที่มีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านปริมาณมาก

วิเคราะห์คอนดินเจนซีของสายส่งเส้นที่ 2 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 บัส คือ บัสที่ 2 และ 3 โดยก่อนเกิดคอนดินเจนซีมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 97.77 MW ซึ่งมีพิกัดที่ 150 MVA ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่ามีบัสโหลดและสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดจำนวน 1 บัสและ 1 เส้นตามลำดับ ซึ่งเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โฟลว์ ถือว่าเป็นคอนดินเจนซีที่มีความรุนแรงน้อย แสดงขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.5 ก โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 0.064% ดังแสดงในตารางที่ 6.6 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 44 จากทั้งหมด 80 คอนดินเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.7 และใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.8

กรณีศึกษาที่ 3 คอนตันเจนซีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมาก

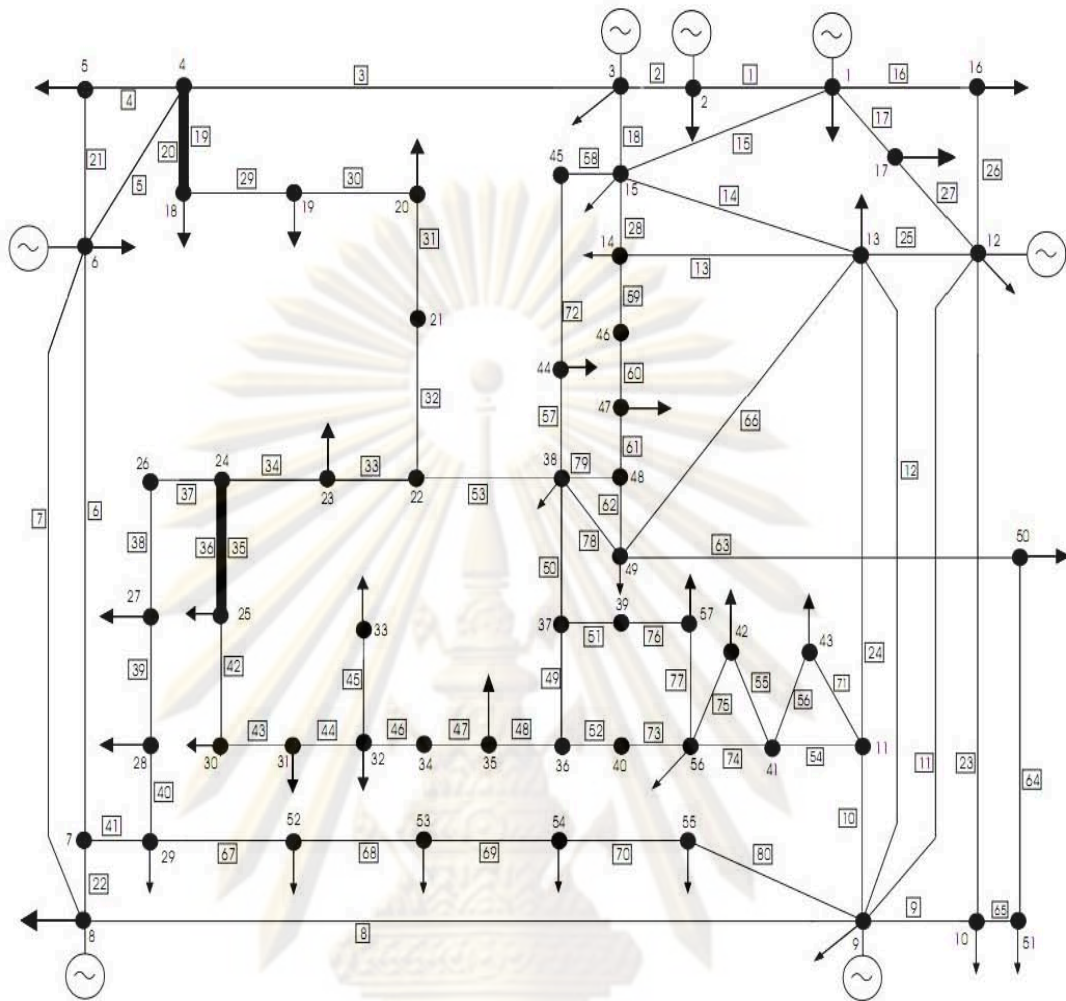
วิเคราะห์คอนตันเจนซีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสที่ 12 ซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ 310 MW และ 128.63 MVAR ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่า มีบัลโหลดและสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดจำนวน 31 บัสและ 8 เส้นตามลำดับ ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามากที่สุด เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โพลว์ (ละเมิด 20 บัส, 10 เส้น) แสดงขนาดแรงดันของบัลโหลดหลังจากเกิดคอนตันเจนซีดังตารางที่ 6.5 ก โดยมี ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.437% ซึ่งมากกว่า 1% ดังแสดงในตารางที่ 6.6 ทั้งนี้คอนตันเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 4 จากทั้งหมด 80 คอนตันเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.7 และใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะที่มีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 7 ดังแสดงในตารางที่ 6.8

กรณีศึกษาที่ 4 คอนตันเจนซีของสายส่งที่เกิดกับบัลที่มีขนาดแรงดันบัลก่อนเกิดคอนตันเจนซีใกล้เคียงกับขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้า

วิเคราะห์คอนตันเจนซีของสายส่งเส้นที่ 43 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 30 และ 31 โดยก่อนเกิดคอนตันเจนซีมีแรงดันบัลเท่ากับ 0.936 pu และกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 3.85 MW ซึ่งมีพิกัดที่ 30 MVA ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าไม่มีสายส่งใดละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า แต่มีบัลที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าจำนวน 3 บัส ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โพลว์ (ละเมิด 4 บัส) แสดงขนาดแรงดันของบัลโหลดหลังจากเกิดคอนตันเจนซีดังตารางที่ 6.5 ข โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.092% ดังแสดงในตารางที่ 6.6 ทั้งนี้คอนตันเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 28 จากทั้งหมด 80 คอนตันเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.7 และใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.8

กรณีศึกษาที่ 5 คอนตันเจนซีของสายส่งเส้นที่ 53 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 22 และ 38

ก่อนเกิดคอนตันเจนซีมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 10.76 MW ซึ่งมีพิกัดที่ 30 MVA ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่า มีบัลโหลดและสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดจำนวน 6 บัส และ 1 เส้นตามลำดับ ซึ่งเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โพลว์ แสดงขนาดแรงดันของบัลโหลดหลังจากเกิดคอนตันเจนซีดังตารางที่ 6.5 ข โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 0.130% ดังแสดงในตารางที่ 6.6 ทั้งนี้คอนตันเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 17 จากทั้งหมด 80 คอนตันเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.7 ซึ่งใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะที่พบว่ามี ความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 17 ดังแสดงในตารางที่ 6.8



รูปที่ 6.2 ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

ตารางที่ 6.5 ก ขนาดแรงดันของบัสไหลหลังจากเกิดคอนดินเจนซ์ของระบบทดสอบ IEEE 57 บัสของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3

| Bus No. | Basecase | Case1 br41(7-29) | | | Case2 br2(2-3) | | | Case3 PV12 | | |
|---------|----------|------------------|-------|--------|----------------|-------|--------|------------|-------|--------|
| | | GA | ACPF | %error | GA | ACPF | %error | GA | ACPF | %error |
| 4 | 0.981 | 0.980 | 0.980 | 0.00 | 0.981 | 0.981 | 0.00 | 0.943 | 0.980 | 3.78 |
| 5 | 0.976 | 0.976 | 0.976 | 0.00 | 0.976 | 0.977 | 0.10 | 0.931 | 0.976 | 4.61 |
| 7 | 0.984 | 0.998 | 0.995 | 0.30 | 0.984 | 0.984 | 0.00 | 0.928 | 0.983 | 5.60 |
| 10 | 0.986 | 0.984 | 0.984 | 0.00 | 0.986 | 0.986 | 0.00 | 0.910 | 0.916 | 0.66 |
| 11 | 0.974 | 0.971 | 0.969 | 0.21 | 0.974 | 0.974 | 0.00 | 0.910 | 0.943 | 3.50 |
| 12 (PV) | 1.015 | 1.015 | 1.015 | 0.00 | 1.015 | 1.015 | 0.00 | 0.925 | 0.894 | 3.47 |
| 13 | 0.979 | 0.975 | 0.973 | 0.21 | 0.979 | 0.979 | 0.00 | 0.917 | 0.923 | 0.65 |

ตารางที่ 6.5 ก ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนตันเงินซีของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส
ของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3

| Bus No. | Basecase | Case1 br41(7-29) | | | Case2 br2(2-3) | | | Case3 PV12 | | |
|---------|----------|------------------|-------|--------|----------------|-------|--------|------------|-------|--------|
| | | GA | ACPF | %error | GA | ACPF | %error | GA | ACPF | %error |
| 14 | 0.970 | 0.964 | 0.961 | 0.31 | 0.970 | 0.970 | 0.00 | 0.918 | 0.924 | 0.65 |
| 15 | 0.988 | 0.984 | 0.982 | 0.20 | 0.988 | 0.987 | 0.10 | 0.949 | 0.959 | 1.04 |
| 16 | 1.013 | 1.013 | 1.013 | 0.00 | 1.013 | 1.011 | 0.20 | 0.949 | 0.910 | 4.29 |
| 17 | 1.017 | 1.017 | 1.017 | 0.00 | 1.017 | 1.015 | 0.20 | 0.983 | 0.954 | 3.04 |
| 18 | 1.001 | 0.997 | 0.997 | 0.00 | 1.001 | 1.000 | 0.10 | 0.959 | 0.996 | 3.71 |
| 19 | 0.970 | 0.954 | 0.948 | 0.63 | 0.970 | 0.972 | 0.21 | 0.924 | 0.948 | 2.53 |
| 20 | 0.964 | 0.940 | 0.930 | 1.08 | 0.964 | 0.967 | 0.31 | 0.914 | 0.930 | 1.72 |
| 21 | 1.008 | 0.974 | 0.966 | 0.83 | 1.008 | 1.008 | 0.00 | 0.951 | 0.966 | 1.55 |
| 22 | 1.010 | 0.973 | 0.965 | 0.83 | 1.010 | 1.009 | 0.10 | 0.951 | 0.965 | 1.45 |
| 23 | 1.008 | 0.967 | 0.958 | 0.94 | 1.008 | 1.008 | 0.00 | 0.949 | 0.964 | 1.56 |
| 24 | 0.999 | 0.876 | 0.857 | 2.22 | 0.999 | 0.999 | 0.00 | 0.939 | 0.966 | 2.80 |
| 25 | 0.983 | 0.870 | 0.841 | 3.45 | 0.983 | 0.982 | 0.10 | 0.920 | 0.943 | 2.44 |
| 26 | 0.959 | 0.829 | 0.817 | 1.47 | 0.959 | 0.958 | 0.10 | 0.901 | 0.930 | 3.12 |
| 27 | 0.982 | 0.760 | 0.747 | 1.74 | 0.982 | 0.981 | 0.10 | 0.923 | 0.968 | 4.65 |
| 28 | 0.997 | 0.740 | 0.730 | 1.37 | 0.997 | 0.996 | 0.10 | 0.938 | 0.989 | 5.16 |
| 29 | 1.010 | 0.732 | 0.724 | 1.10 | 1.010 | 1.009 | 0.10 | 0.952 | 1.006 | 5.37 |
| 30 | 0.963 | 0.858 | 0.827 | 3.75 | 0.963 | 0.962 | 0.10 | 0.901 | 0.921 | 2.17 |
| 31 | 0.936 | 0.849 | 0.820 | 3.54 | 0.936 | 0.935 | 0.11 | 0.874 | 0.891 | 1.91 |
| 32 | 0.950 | 0.890 | 0.871 | 2.18 | 0.950 | 0.950 | 0.00 | 0.888 | 0.902 | 1.55 |
| 33 | 0.948 | 0.888 | 0.868 | 2.30 | 0.948 | 0.947 | 0.11 | 0.886 | 0.900 | 1.56 |
| 34 | 0.959 | 0.924 | 0.911 | 1.43 | 0.959 | 0.959 | 0.00 | 0.900 | 0.911 | 1.21 |
| 35 | 0.966 | 0.934 | 0.923 | 1.19 | 0.966 | 0.966 | 0.00 | 0.907 | 0.918 | 1.20 |
| 36 | 0.976 | 0.946 | 0.936 | 1.07 | 0.976 | 0.975 | 0.10 | 0.916 | 0.928 | 1.29 |
| 37 | 0.985 | 0.956 | 0.947 | 0.95 | 0.985 | 0.984 | 0.10 | 0.926 | 0.938 | 1.28 |
| 38 | 1.013 | 0.985 | 0.979 | 0.61 | 1.013 | 1.012 | 0.10 | 0.954 | 0.966 | 1.24 |
| 39 | 0.983 | 0.954 | 0.946 | 0.85 | 0.983 | 0.982 | 0.10 | 0.923 | 0.935 | 1.28 |

ตารางที่ 6.5 ก ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส
ของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3

| Bus No. | Basecase | Case1 br41(7-29) | | | Case2 br2(2-3) | | | Case3 PV12 | | |
|-----------------------|----------|------------------|-------|--------|----------------|-------|--------|------------|-------|--------|
| | | GA | ACPF | %error | GA | ACPF | %error | GA | ACPF | %error |
| 40 | 0.973 | 0.944 | 0.934 | 1.07 | 0.973 | 0.972 | 0.10 | 0.913 | 0.925 | 1.30 |
| 41 | 0.996 | 0.988 | 0.984 | 0.41 | 0.996 | 0.996 | 0.00 | 0.931 | 0.958 | 2.82 |
| 42 | 0.967 | 0.953 | 0.947 | 0.63 | 0.967 | 0.966 | 0.10 | 0.902 | 0.927 | 2.70 |
| 43 | 1.010 | 1.005 | 1.002 | 0.30 | 1.010 | 1.009 | 0.10 | 0.944 | 0.976 | 3.28 |
| 44 | 1.017 | 0.994 | 0.989 | 0.51 | 1.017 | 1.016 | 0.10 | 0.962 | 0.974 | 1.23 |
| 45 | 1.036 | 1.024 | 1.022 | 0.20 | 1.036 | 1.035 | 0.10 | 0.988 | 1.003 | 1.50 |
| 46 | 1.060 | 1.047 | 1.045 | 0.19 | 1.060 | 1.060 | 0.00 | 1.001 | 1.010 | 0.89 |
| 47 | 1.033 | 1.015 | 1.011 | 0.40 | 1.033 | 1.033 | 0.00 | 0.973 | 0.983 | 1.02 |
| 48 | 1.027 | 1.007 | 1.002 | 0.50 | 1.027 | 1.027 | 0.00 | 0.967 | 0.977 | 1.02 |
| 49 | 1.036 | 1.021 | 1.018 | 0.29 | 1.036 | 1.036 | 0.00 | 0.972 | 0.978 | 0.61 |
| 50 | 1.023 | 1.012 | 1.010 | 0.20 | 1.023 | 1.024 | 0.10 | 0.953 | 0.957 | 0.42 |
| 51 | 1.052 | 1.049 | 1.049 | 0.00 | 1.052 | 1.053 | 0.09 | 0.973 | 0.975 | 0.21 |
| 52 | 0.980 | 0.762 | 0.744 | 2.42 | 0.980 | 0.980 | 0.00 | 0.919 | 0.976 | 5.84 |
| 53 | 0.971 | 0.785 | 0.762 | 3.02 | 0.971 | 0.970 | 0.10 | 0.908 | 0.967 | 6.10 |
| 54 | 0.996 | 0.893 | 0.881 | 1.36 | 0.996 | 0.996 | 0.00 | 0.931 | 0.993 | 6.24 |
| 55 | 1.031 | 1.005 | 1.010 | 0.50 | 1.031 | 1.031 | 0.00 | 0.963 | 1.029 | 6.41 |
| 56 | 0.968 | 0.951 | 0.943 | 0.85 | 0.968 | 0.968 | 0.00 | 0.904 | 0.928 | 2.59 |
| 57 | 0.965 | 0.945 | 0.936 | 0.96 | 0.965 | 0.964 | 0.10 | 0.901 | 0.924 | 2.49 |
| Load Bus Violation | 1 | 15 | 19 | | 1 | 1 | | 31 | 20 | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.5 ข ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส
ของกรณีศึกษาที่ 4 และ 5

| Bus No. | Basecase | Case4 br43(30-31) | | | Case5 br53(22-38) | | |
|---------|----------|-------------------|-------|---------|-------------------|-------|---------|
| | | GA | ACPF | % error | GA | ACPF | % error |
| 4 | 0.981 | 0.981 | 0.981 | 0.00 | 0.980 | 0.980 | 0.00 |
| 5 | 0.976 | 0.976 | 0.976 | 0.00 | 0.976 | 0.976 | 0.00 |
| 7 | 0.984 | 0.985 | 0.985 | 0.00 | 0.982 | 0.982 | 0.00 |
| 10 | 0.986 | 0.986 | 0.986 | 0.00 | 0.987 | 0.987 | 0.00 |
| 11 | 0.974 | 0.974 | 0.973 | 0.10 | 0.975 | 0.975 | 0.00 |
| 13 | 0.979 | 0.979 | 0.978 | 0.10 | 0.980 | 0.980 | 0.00 |
| 14 | 0.970 | 0.970 | 0.970 | 0.00 | 0.972 | 0.972 | 0.00 |
| 15 | 0.988 | 0.988 | 0.988 | 0.00 | 0.989 | 0.989 | 0.00 |
| 16 | 1.013 | 1.013 | 1.013 | 0.00 | 1.013 | 1.013 | 0.00 |
| 17 | 1.017 | 1.017 | 1.017 | 0.00 | 1.017 | 1.017 | 0.00 |
| 18 | 1.001 | 1.001 | 1.001 | 0.00 | 0.995 | 0.995 | 0.00 |
| 19 | 0.970 | 0.970 | 0.970 | 0.00 | 0.945 | 0.941 | 0.43 |
| 20 | 0.964 | 0.964 | 0.963 | 0.10 | 0.927 | 0.920 | 0.76 |
| 21 | 1.008 | 1.008 | 1.008 | 0.00 | 0.954 | 0.953 | 0.10 |
| 22 | 1.010 | 1.009 | 1.009 | 0.00 | 0.952 | 0.951 | 0.11 |
| 23 | 1.008 | 1.009 | 1.008 | 0.10 | 0.952 | 0.950 | 0.21 |
| 24 | 0.999 | 1.010 | 1.010 | 0.00 | 0.963 | 0.961 | 0.21 |
| 25 | 0.983 | 1.017 | 1.015 | 0.20 | 0.951 | 0.947 | 0.42 |
| 26 | 0.959 | 0.968 | 0.969 | 0.10 | 0.926 | 0.924 | 0.22 |
| 27 | 0.982 | 0.986 | 0.986 | 0.00 | 0.966 | 0.965 | 0.10 |
| 28 | 0.997 | 0.999 | 1.000 | 0.10 | 0.988 | 0.987 | 0.10 |
| 29 | 1.010 | 1.012 | 1.012 | 0.00 | 1.005 | 1.006 | 0.10 |
| 30 | 0.963 | 1.009 | 1.006 | 0.30 | 0.935 | 0.930 | 0.54 |
| 31 | 0.936 | 0.826 | 0.824 | 0.24 | 0.916 | 0.912 | 0.44 |
| 32 | 0.950 | 0.888 | 0.887 | 0.11 | 0.942 | 0.940 | 0.21 |
| 33 | 0.948 | 0.886 | 0.885 | 0.11 | 0.940 | 0.938 | 0.21 |

ตารางที่ 6.5 ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส
ของกรณีศึกษาที่ 4 และ 5

| Bus No. | Basecase | Case4 br43(30-31) | | | Case5 br53(22-38) | | |
|--------------------|----------|-------------------|-------|---------|-------------------|-------|---------|
| | | GA | ACPF | % error | GA | ACPF | % error |
| 34 | 0.959 | 0.940 | 0.936 | 0.43 | 0.962 | 0.959 | 0.31 |
| 35 | 0.966 | 0.953 | 0.949 | 0.42 | 0.970 | 0.967 | 0.31 |
| 36 | 0.976 | 0.966 | 0.964 | 0.21 | 0.980 | 0.978 | 0.20 |
| 37 | 0.985 | 0.978 | 0.975 | 0.31 | 0.990 | 0.988 | 0.20 |
| 38 | 1.013 | 1.011 | 1.010 | 0.10 | 1.020 | 1.019 | 0.10 |
| 39 | 0.983 | 0.976 | 0.973 | 0.31 | 0.988 | 0.986 | 0.20 |
| 40 | 0.973 | 0.963 | 0.961 | 0.21 | 0.977 | 0.975 | 0.21 |
| 41 | 0.996 | 0.994 | 0.993 | 0.10 | 0.998 | 0.997 | 0.10 |
| 42 | 0.967 | 0.963 | 0.962 | 0.10 | 0.969 | 0.968 | 0.10 |
| 43 | 1.010 | 1.009 | 1.008 | 0.10 | 1.011 | 1.010 | 0.10 |
| 44 | 1.017 | 1.016 | 1.015 | 0.10 | 1.023 | 1.022 | 0.10 |
| 45 | 1.036 | 1.035 | 1.035 | 0.00 | 1.039 | 1.038 | 0.10 |
| 46 | 1.060 | 1.059 | 1.059 | 0.00 | 1.063 | 1.062 | 0.09 |
| 47 | 1.033 | 1.032 | 1.032 | 0.00 | 1.038 | 1.037 | 0.10 |
| 48 | 1.027 | 1.026 | 1.026 | 0.00 | 1.033 | 1.032 | 0.10 |
| 49 | 1.036 | 1.035 | 1.035 | 0.00 | 1.040 | 1.039 | 0.10 |
| 50 | 1.023 | 1.023 | 1.022 | 0.10 | 1.026 | 1.025 | 0.10 |
| 51 | 1.052 | 1.052 | 1.052 | 0.00 | 1.053 | 1.053 | 0.00 |
| 52 | 0.980 | 0.981 | 0.982 | 0.10 | 0.977 | 0.977 | 0.00 |
| 53 | 0.971 | 0.972 | 0.972 | 0.00 | 0.968 | 0.968 | 0.00 |
| 54 | 0.996 | 0.997 | 0.997 | 0.00 | 0.994 | 0.995 | 0.10 |
| 55 | 1.031 | 1.031 | 1.031 | 0.00 | 1.030 | 1.031 | 0.10 |
| 56 | 0.968 | 0.963 | 0.962 | 0.10 | 0.971 | 0.971 | 0.00 |
| 57 | 0.965 | 0.959 | 0.958 | 0.10 | 0.968 | 0.968 | 0.00 |
| Load Bus Violation | 1 | 3 | 4 | | 6 | 6 | |

ตารางที่ 6.6 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของขนาดแรงดันที่บัลโหลดและระยะเวลาในการประมวลผลของแต่ละกรณีศึกษา (IEEE 57 บัส)

| Case Study | Mean (%) | Min | Max | SD | Comp Time (sec) | |
|-------------------|----------|-------|-------|-------|-----------------|--------|
| | | | | | GA* | ACPF |
| Case1 br41(7-29) | 0.977 | 0.000 | 3.670 | 0.970 | 2.1153 | 0.0372 |
| Case2 br2(2-3) | 0.064 | 0.003 | 0.366 | 0.063 | 1.1940 | 0.0284 |
| Case3 PV12 | 1.437 | 0.140 | 2.275 | 0.657 | 1.1659 | 0.0325 |
| Case4 br43(30-31) | 0.092 | 0.000 | 0.439 | 0.101 | 1.9802 | 0.0353 |
| Case5 br53(22-38) | 0.130 | 0.000 | 0.667 | 0.153 | 1.7883 | 0.0282 |

* GA : Proposed Genetic Algorithms

วิเคราะห์ผลการทดสอบ (ระบบ IEEE 57 บัส)

จากกรณีศึกษาทั้ง 5 กรณีพบว่า เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของแรงดันบัลหลังจากเกิดคอนดินเจนซีค่อนข้างต่ำ ยกเว้นคอนดินเจนซีที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 1% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจะแปรผันตรงกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอก็สามารถตรวจจับที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับวิธีเอชไอเพาเวอร์โพล์ดังแสดงในตารางที่ 6.7 และสามารถจัดอันดับความรุนแรง 10 อันดับแรกได้ใกล้เคียงกับวิธีดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.8 เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาประมวลผลพบว่าใช้เวลามากกว่าในทุกกรณี แต่เนื่องจากระยะเวลาประมวลผลของวิธีการที่นำเสนอไม่ขึ้นกับขนาดของระบบทดสอบ จึงเหมาะสำหรับวิเคราะห์คอนดินเจนซีของระบบทดสอบที่มีขนาดใหญ่ ดังจะได้แสดงต่อไป

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนดินเจนซีระหว่างวิธีเอชไอเพาเวอร์โพล์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | | Total : (1) + (2) | | |
|-----|--------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|-------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % | GA + Dist fact | ACPF | Capture rate % |
| 1 | br41(7-29)** | 15 | 19 | 79 | 1 | 1 | 100 | 16 | 20 | 80 |
| 2 | br50(37-38) | 14 | 16 | 88 | 5 | 5 | 100 | 19 | 21 | 90 |

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตันเงินซึ่งระหว่างวิธีไอซีเพาเวอร์โฟลว์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | | Total : (1) + (2) | | |
|-----|---------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|-------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % | GA + Dist fact | ACPF | Capture rate % |
| 3 | br49(36-37) | 12 | 13 | 92 | 2 | 2 | 100 | 14 | 15 | 93 |
| 4 | PV12 | 12 | 20 | 60 | 2 | 2 | 100 | 14 | 22 | 64 |
| 5 | br60(46-47) | 11 | 11 | 100 | 0 | 0 | - | 11 | 11 | 100 |
| 6 | br40(28-29) | 10 | 10 | 100 | 1 | 1 | 100 | 11 | 11 | 100 |
| 7 | br33(22-23) | 7 | 8 | 88 | 13 | 13 | 100 | 20 | 21 | 95 |
| 8 | br39(27-28) | 7 | 9 | 78 | 0 | 0 | - | 7 | 9 | 78 |
| 9 | br46(34-32)** | 7 | 6 | 117 | 2 | 3 | 67 | 9 | 9 | 100 |
| 10 | br47(34-35) | 7 | 7 | 100 | 0 | 0 | - | 7 | 7 | 100 |
| 11 | br59(14-46)** | 7 | 10 | 70 | 0 | 0 | - | 7 | 10 | 70 |
| 12 | br42(25-30) | 6 | 7 | 86 | 3 | 3 | 100 | 9 | 10 | 90 |
| 13 | br53(22-38) | 6 | 6 | 100 | 2 | 2 | 100 | 8 | 8 | 100 |
| 14 | br61(47-48) | 5 | 5 | 100 | 1 | 1 | 100 | 6 | 6 | 100 |
| 15 | br67(29-52) | 5 | 4 | 125 | 0 | 1 | 0 | 5 | 5 | 100 |
| 16 | br79(38-48) | 5 | 5 | 100 | 0 | 1 | 0 | 5 | 6 | 83 |
| 17 | br80(9-55)** | 5 | 5 | 100 | 0 | 0 | - | 5 | 5 | 100 |
| 18 | br35(24-25) | 4 | 3 | 133 | 4 | 4 | 100 | 8 | 7 | 114 |
| 19 | br36(24-25) | 4 | 3 | 133 | 0 | 1 | 0 | 4 | 4 | 100 |
| 20 | br37(24-26)** | 4 | 4 | 100 | 0 | 0 | - | 4 | 4 | 100 |
| 21 | br51(37-39) | 4 | 4 | 100 | 0 | 1 | 0 | 4 | 5 | 80 |
| 22 | br55(41-42) | 4 | 5 | 80 | 2 | 2 | 100 | 6 | 7 | 86 |
| 23 | br65(10-51)** | 4 | 4 | 100 | 2 | 2 | 100 | 6 | 6 | 100 |
| 24 | br66(13-49)** | 4 | 7 | 57 | 4 | 4 | 100 | 8 | 11 | 73 |
| 25 | br70(54-55) | 4 | 4 | 100 | 1 | 3 | 33 | 5 | 7 | 71 |

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตันเงินระหว่างวิธีไอซีเพาเวอร์โพล์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | | Total : (1) + (2) | | |
|-----|---------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|-------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % | GA + Dist fact | ACPF | Capture rate % |
| 26 | br25(12-13) | 3 | 3 | 100 | 0 | 0 | - | 3 | 3 | 100 |
| 27 | br29(18-19) | 3 | 2 | 150 | 0 | 0 | - | 3 | 2 | 150 |
| 28 | br43(30-31) | 3 | 4 | 75 | 0 | 0 | - | 3 | 4 | 75 |
| 29 | br58(15-45)** | 3 | 3 | 100 | 1 | 1 | 100 | 4 | 4 | 100 |
| 30 | br68(52-53) | 3 | 2 | 150 | 0 | 0 | - | 3 | 2 | 150 |
| 31 | br72(44-45) | 3 | 3 | 100 | 0 | 0 | - | 3 | 3 | 100 |
| 32 | br76(39-57)** | 3 | 3 | 100 | 0 | 0 | - | 3 | 3 | 100 |
| 33 | br18(3-15) | 2 | 2 | 100 | 3 | 4 | 75 | 5 | 6 | 83 |
| 34 | br24(11-13) | 2 | 2 | 100 | 3 | 4 | 75 | 5 | 6 | 83 |
| 35 | br31(21-20)** | 2 | 2 | 100 | 4 | 4 | 100 | 6 | 6 | 100 |
| 36 | br32(21-22) | 2 | 2 | 100 | 7 | 7 | 100 | 9 | 9 | 100 |
| 37 | br34(23-24) | 2 | 2 | 100 | 12 | 13 | 92 | 14 | 15 | 93 |
| 38 | br38(26-27) | 2 | 5 | 40 | 0 | 3 | 0 | 2 | 8 | 25 |
| 39 | br52(36-40) | 2 | 2 | 100 | 0 | 0 | - | 2 | 2 | 100 |
| 40 | br63(49-50) | 2 | 2 | 100 | 0 | 0 | - | 2 | 2 | 100 |
| 41 | br64(50-51) | 2 | 2 | 100 | 0 | 0 | - | 2 | 2 | 100 |
| 42 | br69(53-54) | 2 | 2 | 100 | 0 | 0 | - | 2 | 2 | 100 |
| 43 | br77(57-56) | 2 | 1 | 200 | 1 | 1 | 100 | 3 | 2 | 150 |
| 44 | br2(2-3) | 1 | 1 | 100 | 1 | 2 | 50 | 2 | 3 | 67 |
| 45 | br3(3-4) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 46 | br4(4-5) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 47 | br5(4-6) | 1 | 1 | 100 | 1 | 1 | 100 | 2 | 2 | 100 |
| 48 | br6(6-7) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตันเงินซึ่งระหว่างวิธีไอซีเพาเวอร์โพล์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | | Total : (1) + (2) | | |
|-----|---------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|-------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % | GA + Dist fact | ACPF | Capture rate % |
| 49 | br7(6-8) | 1 | 1 | 100 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | 50 |
| 50 | br8(8-9) | 1 | 4 | 25 | 1 | 1 | 100 | 2 | 5 | 40 |
| 51 | br9(9-10) | 1 | 2 | 50 | 6 | 6 | 100 | 7 | 8 | 88 |
| 52 | br10(9-11) | 1 | 1 | 100 | 7 | 7 | 100 | 8 | 8 | 100 |
| 53 | br11(9-12) | 1 | 1 | 100 | 6 | 7 | 86 | 7 | 8 | 88 |
| 54 | br12(9-13) | 1 | 1 | 100 | 6 | 7 | 86 | 7 | 8 | 88 |
| 55 | br13(13-14) | 1 | 1 | 100 | 1 | 1 | 100 | 2 | 2 | 100 |
| 56 | br14(13-15) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 57 | br19(4-18)** | 1 | 1 | 100 | 1 | 2 | 50 | 2 | 3 | 67 |
| 58 | br20(4-18)** | 1 | 1 | 100 | 2 | 3 | 67 | 3 | 4 | 75 |
| 59 | br21(5-6) | 1 | 1 | 100 | 4 | 4 | 100 | 5 | 5 | 100 |
| 60 | br22(7-8) | 1 | 1 | 100 | 5 | 5 | 100 | 6 | 6 | 100 |
| 61 | br23(10-12) | 1 | 1 | 100 | 1 | 3 | 33 | 2 | 4 | 50 |
| 62 | br26(12-16) | 1 | 1 | 100 | 0 | 2 | 0 | 1 | 3 | 33 |
| 63 | br27(12-17) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 64 | br28(14-15) | 1 | 1 | 100 | 1 | 3 | 33 | 2 | 4 | 50 |
| 65 | br30(19-20) | 1 | 1 | 100 | 1 | 1 | 100 | 2 | 2 | 100 |
| 66 | br44(31-32) | 1 | 1 | 100 | 7 | 7 | 100 | 8 | 8 | 100 |
| 67 | br54(11-41)** | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 68 | br56(41-43) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 69 | br57(38-44) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 70 | br62(48-49) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 71 | br71(11-43)** | 1 | 2 | 50 | 0 | 0 | - | 1 | 2 | 50 |

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตันเงินระหว่างวิธีไฮซีเพาเวอร์โพล์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | | Total : (1) + (2) | | |
|-----|---------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|-------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % | GA + Dist fact | ACPF | Capture rate % |
| 72 | br73(40-56)** | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 73 | br74(56-41) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 74 | br75(56-42) | 1 | 1 | 100 | 4 | 4 | 100 | 5 | 5 | 100 |
| 75 | br78(38-49) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 76 | PV2 | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 77 | PV3 | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - | 1 | 1 | 100 |
| 78 | PV6 | 1 | 1 | 100 | 15 | 15 | 100 | 16 | 16 | 100 |
| 79 | PV8 | 1 | 6 | 17 | 0 | 0 | - | 1 | 6 | 17 |
| 80 | PV9 | 1 | 1 | 100 | 8 | 10 | 80 | 9 | 11 | 82 |
| | | | Mean | 97 | | Mean | 76 | | Mean | 90 |
| | | | Min | 17 | | Min | 0 | | Min | 17 |
| | | | Max | 200 | | Max | 100 | | Max | 150 |

* GA : Proposed Genetic Algorithms, Dist fact : Distribution factors

** หม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตันเงินระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|--------------|---------------------|---------|--------------|-----------|
| | Contingency | number of violation | | Contingency | SI |
| 1 | br41(7-29)** | 27 | 23 | br42(25-30) | 2.10E+08 |
| 2 | PV12 | 20 | 1 | br41(7-29)** | 1.25E+07 |
| 3 | br40(28-29) | 17 | 14 | br80(9-55)** | 3.22E+05 |
| 4 | br60(46-47) | 17 | 5 | PV8 | 87641.586 |
| 5 | PV8 | 16 | 3 | br40(28-29) | 69605.229 |

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|---------------|---------------------|---------|---------------|-----------|
| | Contingency | number of violation | | Contingency | SI |
| 6 | br50(37-38) | 15 | 25 | br67(29-52) | 12953.224 |
| 7 | br8(8-9) | 14 | 2 | PV12 | 8624.858 |
| 8 | br49(36-37) | 13 | 7 | br8(8-9) | 1934.292 |
| 9 | br59(14-46)** | 13 | 10 | br39(27-28) | 1889.116 |
| 10 | br39(27-28) | 11 | 29 | br70(54-55) | 392.987 |
| 11 | br58(15-45)** | 10 | 4 | br60(46-47) | 383.159 |
| 12 | br72(44-45) | 10 | 9 | br59(14-46)** | 313.487 |
| 13 | br66(13-49)** | 9 | 27 | br28(14-15) | 262.606 |
| 14 | br80(9-55)** | 9 | 15 | br33(22-23) | 193.156 |
| 15 | br33(22-23) | 8 | 13 | br66(13-49)** | 136.833 |
| 16 | br65(10-51)** | 8 | 16 | br65(10-51)** | 113.756 |
| 17 | br37(24-26)** | 7 | 20 | br53(22-38) | 91.991 |
| 18 | br46(34-32)** | 7 | 28 | br38(26-27) | 74.572 |
| 19 | br47(34-35) | 7 | 12 | br72(44-45) | 69.629 |
| 20 | br53(22-38) | 7 | 11 | br58(15-45)** | 68.752 |
| 21 | br57(38-44) | 7 | 17 | br37(24-26)** | 68.374 |
| 22 | br3(3-4) | 6 | 22 | br3(3-4) | 42.820 |
| 23 | br42(25-30) | 6 | 24 | br61(47-48) | 40.901 |
| 24 | br61(47-48) | 6 | 41 | br14(13-15) | 37.923 |
| 25 | br67(29-52) | 6 | 21 | br57(38-44) | 28.288 |
| 26 | br22(7-8) | 5 | 47 | br63(49-50) | 23.010 |
| 27 | br28(14-15) | 5 | 26 | br22(7-8) | 20.640 |
| 28 | br38(26-27) | 5 | 45 | br27(12-17) | 19.245 |
| 29 | br70(54-55) | 5 | 58 | br69(53-54) | 17.013 |
| 30 | br79(38-48) | 5 | 32 | br29(18-19) | 16.477 |
| 31 | br13(13-14) | 4 | 59 | br71(11-43)** | 15.489 |

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|---------------|---------------------|---------|---------------|--------|
| | Contingency | number of violation | | Contingency | SI |
| 32 | br29(18-19) | 4 | 37 | br64(50-51) | 14.455 |
| 33 | br35(24-25) | 4 | 44 | br26(12-16) | 13.672 |
| 34 | br36(24-25) | 4 | 57 | br56(41-43) | 12.993 |
| 35 | br51(37-39) | 4 | 31 | br13(13-14) | 11.438 |
| 36 | br55(41-42) | 4 | 71 | br54(11-41)** | 11.033 |
| 37 | br64(50-51) | 4 | 40 | br10(9-11) | 10.351 |
| 38 | br4(4-5) | 3 | 66 | br20(4-18)** | 10.126 |
| 39 | br5(4-6) | 3 | 65 | br19(4-18)** | 10.096 |
| 40 | br10(9-11) | 3 | 39 | br5(4-6) | 9.152 |
| 41 | br14(13-15) | 3 | 38 | br4(4-5) | 5.264 |
| 42 | br18(3-15) | 3 | 36 | br55(41-42) | 5.242 |
| 43 | br25(12-13) | 3 | 48 | br68(52-53) | 5.174 |
| 44 | br26(12-16) | 3 | 74 | br74(56-41) | 5.118 |
| 45 | br27(12-17) | 3 | 60 | br77(57-56) | 5.077 |
| 46 | br43(30-31) | 3 | 69 | br30(19-20) | 5.072 |
| 47 | br63(49-50) | 3 | 46 | br43(30-31) | 5.027 |
| 48 | br68(52-53) | 3 | 64 | br12(9-13) | 4.920 |
| 49 | br76(39-57)** | 3 | 33 | br35(24-25) | 4.915 |
| 50 | br2(2-3) | 2 | 34 | br36(24-25) | 4.908 |
| 51 | br7(6-8) | 2 | 75 | br75(56-42) | 4.902 |
| 52 | br24(11-13) | 2 | 55 | br34(23-24) | 4.897 |
| 53 | br31(21-20)** | 2 | 18 | br46(34-32)** | 4.864 |
| 54 | br32(21-22) | 2 | 19 | br47(34-35) | 4.864 |
| 55 | br34(23-24) | 2 | 67 | br21(5-6) | 4.856 |
| 56 | br52(36-40) | 2 | 76 | br78(38-49) | 4.848 |
| 57 | br56(41-43) | 2 | 77 | PV2 | 4.840 |

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตันเงินที่ระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธี
เชิงพันธุกรรมของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|---------------|---------------------|---------|---------------|-------|
| | Contingency | number of violation | | Contingency | SI |
| 58 | br69(53-54) | 2 | 79 | PV6 | 4.840 |
| 59 | br71(11-43)** | 2 | 80 | PV9 | 4.840 |
| 60 | br77(57-56) | 2 | 72 | br62(48-49) | 4.836 |
| 61 | br6(6-7) | 1 | 63 | br11(9-12) | 4.818 |
| 62 | br9(9-10) | 1 | 70 | br44(31-32) | 4.809 |
| 63 | br11(9-12) | 1 | 43 | br25(12-13) | 4.798 |
| 64 | br12(9-13) | 1 | 68 | br23(10-12) | 4.745 |
| 65 | br19(4-18)** | 1 | 52 | br24(11-13) | 4.663 |
| 66 | br20(4-18)** | 1 | 53 | br31(21-20)** | 4.646 |
| 67 | br21(5-6) | 1 | 54 | br32(21-22) | 4.646 |
| 68 | br23(10-12) | 1 | 78 | PV3 | 4.619 |
| 69 | br30(19-20) | 1 | 49 | br76(39-57)** | 4.584 |
| 70 | br44(31-32) | 1 | 35 | br51(37-39) | 4.583 |
| 71 | br54(11-41)** | 1 | 73 | br73(40-56)** | 4.579 |
| 72 | br62(48-49) | 1 | 56 | br52(36-40) | 4.579 |
| 73 | br73(40-56)** | 1 | 61 | br6(6-7) | 4.554 |
| 74 | br74(56-41) | 1 | 51 | br7(6-8) | 4.516 |
| 75 | br75(56-42) | 1 | 62 | br9(9-10) | 4.441 |
| 76 | br78(38-49) | 1 | 30 | br79(38-48) | 4.216 |
| 77 | PV2 | 1 | 8 | br49(36-37) | 4.183 |
| 78 | PV3 | 1 | 50 | br2(2-3) | 4.102 |
| 79 | PV6 | 1 | 6 | br50(37-38) | 3.969 |
| 80 | PV9 | 1 | 42 | br18(3-15) | 3.907 |

** หม้อแปลงไฟฟ้า

6.3 กรณีศึกษาการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำเสนอมาใช้วิเคราะห์คอนดินเจนซีของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์คอนดินเจนซีของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทยจำนวน 39 บัส โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเปรียบเทียบกับวิธีเอซีเพาเวอร์ฟลิว โดยพิจารณาผลกระทบทั้งด้านกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจำนวนบัสและสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดจะบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของคอนดินเจนซีที่มีต่อระบบไฟฟ้า โดยมีขีดจำกัดของขนาดแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.98 – 1.05 pu และมีจำนวนคอนดินเจนซีที่พิจารณาทั้งสิ้น 77 กรณี

กรณีศึกษาที่ 1 คอนดินเจนซีของสายส่งที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าสูง

วิเคราะห์คอนดินเจนซีของสายส่งเส้นที่ 6 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 31707 และ 31738 โดยก่อนเกิดคอนดินเจนซีมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 29.39 MW ซึ่งมีพิกัดที่ 120 MVA โดยผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าคอนดินเจนซีดังกล่าวไม่ทำให้สายส่งใดละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า แต่มีบัสที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าจำนวนเพียง 2 บัส ซึ่งเท่ากับการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์ฟลิว โดยพบว่าบัสที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าทั้งสองบัสนั้น มีขนาดแรงดันเปลี่ยนแปลงไปมาก ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 6.10 แสดงขนาดแรงดันของบัสไหลหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.9 ก โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.327% แต่ผลจากที่บางบัสมีขนาดแรงดันบัสเปลี่ยนแปลงไปมาก ก็ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดสูงถึง 4.175% ดังแสดงในตารางที่ 6.10 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 2 จากทั้งหมด 77 คอนดินเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.11 แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะพบว่ามีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 48 ดังแสดงในตารางที่ 6.12 แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีก็สามารถวิเคราะห์ได้ว่าคอนดินเจนซีดังกล่าวไม่เป็นอันตรายต่อระบบ

กรณีศึกษาที่ 2 คอนดินเจนซีของสายส่งที่มีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านปริมาณมาก

วิเคราะห์คอนดินเจนซีของสายส่งเส้นที่ 16 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 31709 และ 31809 โดยก่อนเกิดคอนดินเจนซีมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 117.06 MW ซึ่งมีพิกัดที่ 200 MVA ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าไม่มีบัสหรือสายส่งใดที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์ฟลิว แสดงขนาดแรงดันของบัสไหลหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.9 ก โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.092% ดังแสดงในตารางที่ 6.10 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 30 จากทั้งหมด 77 คอนดินเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.11 แต่มีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 15 เมื่อวิเคราะห์ด้วยดัชนี

สมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.12 แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีก็สามารถวิเคราะห์ได้ว่าคอนดินเจนซีดังกล่าวไม่เป็นอันตรายต่อระบบ เนื่องจากไม่ส่งผลให้บัลหรือสายส่งใดละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

กรณีศึกษาที่ 3 คอนดินเจนซีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมาก

วิเคราะห์คอนดินเจนซีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัลที่ 31838 ซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ 346 MW และ 56.36 MVAR ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าไม่มีบัลหรือสายส่งใดที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์ฟลิว แสดงขนาดแรงดันของบัลโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.9 ก โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.234% ดังแสดงในตารางที่ 6.10 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับสุดท้ายจากทั้งหมด 77 คอนดินเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.11 แต่มีอันดับความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 12 เมื่อวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.12 แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีก็สามารถวิเคราะห์ได้ว่าคอนดินเจนซีดังกล่าวไม่เป็นอันตรายต่อระบบ

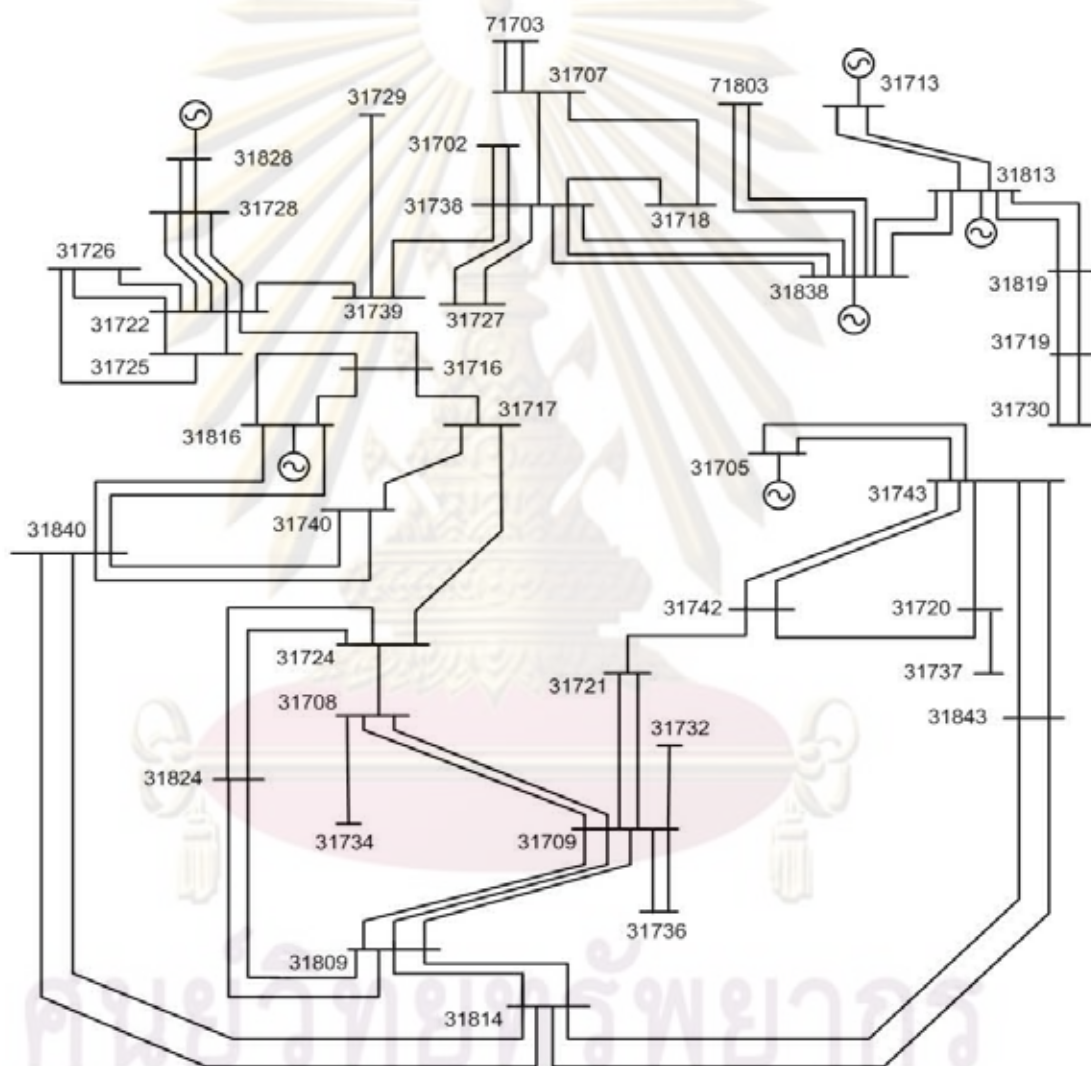
กรณีศึกษาที่ 4 คอนดินเจนซีของสายส่งที่เกิดกับบัลที่มีขนาดแรงดันบัลก่อนเกิดคอนดินเจนซีใกล้เคียงกับขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้า

วิเคราะห์คอนดินเจนซีของสายส่งเส้นที่ 26 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัลที่ 31717 และ 31740 โดยก่อนเกิดคอนดินเจนซีบัล 31717 มีขนาดแรงดันบัลเท่ากับ 0.988 pu และกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 40.67 MW ซึ่งมีพิคกที่ 163 MVA ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าไม่มีสายส่งใดละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้า แต่มีบัลที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าจำนวน 1 บัล ซึ่งเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์ฟลิว แสดงขนาดแรงดันของบัลโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.9 ข โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.054% ดังแสดงในตารางที่ 6.10 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 7 จากทั้งหมด 77 คอนดินเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.11 และใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.12

กรณีศึกษาที่ 5 คอนดินเจนซีของสายส่งเส้นที่ 34 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัลที่ 31720 และ 31743

ก่อนเกิดคอนดินเจนซีมีกำลังไฟฟ้าจริงไหลผ่าน 28.01 MW ซึ่งมีพิคกที่ 163 MVA ผลการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพบว่าไม่มีบัลโหลดและสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดจำนวน 2 บัล แต่ไม่มีสายส่งใดที่รับกำลังไฟฟ้าเกินพิคก ซึ่งเท่ากับผลการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์ฟลิว แสดงขนาดแรงดันของบัลโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีดังตารางที่ 6.9 ข โดยมีความคลาดเคลื่อน

เฉลี่ยเพียง 0.017% ดังแสดงในตารางที่ 6.10 ทั้งนี้คอนดินเจนซีดังกล่าวมีความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 3 จากทั้งหมด 77 คอนดินเจนซี ดังแสดงในตารางที่ 6.11 แต่มีอันดับความรุนแรงอยู่ในอันดับที่ 42 เมื่อวิเคราะห์ด้วยดัชนีสมรรถนะดังแสดงในตารางที่ 6.12 ดังนั้นในกรณีนี้การวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถตรวจจับจำนวนบัลที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าได้ดีกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีดัชนีสมรรถนะ



รูปที่ 6.3 ระบบไฟฟ้ากำลังภาคใต้ของประเทศไทย (39 บัล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.9 ก ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทยของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3

| Bus No. | Basecase | Case1 br6(31707-31738) | | | Case2 br16(31809-31709) | | | Case3 PV31838 | | |
|---------|----------|---------------------------|-------|---------|----------------------------|-------|---------|------------------|-------|---------|
| | | GA* | ACPF | % error | GA* | ACPF | % error | GA* | ACPF | % error |
| 31702 | 1.029 | 1.019 | 1.014 | 0.49 | 1.029 | 1.029 | 0.00 | 1.019 | 1.018 | 0.10 |
| 31707 | 0.996 | 0.816 | 0.788 | 3.55 | 0.996 | 0.996 | 0.00 | 0.984 | 0.981 | 0.31 |
| 31708 | 1.007 | 1.007 | 1.007 | 0.00 | 0.995 | 0.992 | 0.30 | 1.004 | 1.000 | 0.40 |
| 31709 | 1.012 | 1.012 | 1.012 | 0.00 | 0.999 | 0.997 | 0.20 | 1.009 | 1.006 | 0.30 |
| 31716 | 1.035 | 1.034 | 1.034 | 0.00 | 1.034 | 1.034 | 0.00 | 1.034 | 1.034 | 0.00 |
| 31717 | 0.988 | 0.988 | 0.988 | 0.00 | 0.986 | 0.986 | 0.00 | 0.985 | 0.983 | 0.20 |
| 31718 | 1.001 | 0.873 | 0.838 | 4.18 | 1.001 | 1.001 | 0.00 | 0.990 | 0.986 | 0.41 |
| 31719 | 1.016 | 1.016 | 1.016 | 0.00 | 1.014 | 1.013 | 0.10 | 1.013 | 1.010 | 0.30 |
| 31720 | 1.004 | 1.004 | 1.004 | 0.00 | 1.001 | 1.000 | 0.10 | 1.003 | 1.001 | 0.20 |
| 31721 | 1.003 | 1.003 | 1.003 | 0.00 | 0.995 | 0.993 | 0.20 | 1.001 | 0.998 | 0.30 |
| 31722 | 1.021 | 1.019 | 1.018 | 0.10 | 1.021 | 1.021 | 0.00 | 1.019 | 1.017 | 0.20 |
| 31724 | 1.015 | 1.015 | 1.015 | 0.00 | 1.011 | 1.010 | 0.10 | 1.012 | 1.009 | 0.30 |
| 31725 | 1.006 | 1.005 | 1.003 | 0.20 | 1.006 | 1.006 | 0.00 | 1.005 | 1.003 | 0.20 |
| 31726 | 0.993 | 0.991 | 0.990 | 0.10 | 0.993 | 0.993 | 0.00 | 0.991 | 0.989 | 0.20 |
| 31727 | 1.034 | 1.024 | 1.019 | 0.49 | 1.034 | 1.034 | 0.00 | 1.024 | 1.023 | 0.10 |
| 31728 | 1.041 | 1.040 | 1.040 | 0.00 | 1.041 | 1.041 | 0.00 | 1.040 | 1.040 | 0.00 |
| 31729 | 1.036 | 1.030 | 1.025 | 0.49 | 1.036 | 1.036 | 0.00 | 1.030 | 1.026 | 0.39 |
| 31730 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.00 | 0.998 | 0.998 | 0.00 | 0.997 | 0.994 | 0.30 |
| 31732 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.00 | 0.985 | 0.982 | 0.31 | 0.995 | 0.991 | 0.40 |
| 31734 | 1.003 | 1.003 | 1.003 | 0.00 | 0.990 | 0.985 | 0.51 | 1.000 | 0.996 | 0.40 |
| 31736 | 1.005 | 1.005 | 1.005 | 0.00 | 0.993 | 0.990 | 0.30 | 1.002 | 0.999 | 0.30 |
| 31737 | 0.995 | 0.995 | 0.995 | 0.00 | 0.991 | 0.990 | 0.10 | 0.993 | 0.991 | 0.20 |
| 31738 | 1.037 | 1.027 | 1.022 | 0.49 | 1.037 | 1.037 | 0.00 | 1.027 | 1.025 | 0.20 |
| 31739 | 1.016 | 1.012 | 1.008 | 0.40 | 1.016 | 1.016 | 0.00 | 1.011 | 1.009 | 0.20 |
| 31740 | 1.008 | 1.008 | 1.008 | 0.00 | 1.006 | 1.006 | 0.00 | 1.004 | 1.002 | 0.20 |

ตารางที่ 6.9 ก ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทยของกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3

| Bus No. | Basecase | Case1 br6(31707-31738) | | | Case2 br16(31809-31709) | | | Case3 PV31838 | | |
|--------------------|----------|---------------------------|-------|---------|----------------------------|-------|---------|------------------|-------|---------|
| | | GA* | ACPF | % error | GA* | ACPF | % error | GA* | ACPF | % error |
| 31742 | 1.019 | 1.019 | 1.019 | 0.00 | 1.016 | 1.015 | 0.10 | 1.018 | 1.016 | 0.20 |
| 31743 | 1.020 | 1.020 | 1.020 | 0.00 | 1.017 | 1.016 | 0.10 | 1.019 | 1.017 | 0.20 |
| 31809 | 1.019 | 1.019 | 1.019 | 0.00 | 1.014 | 1.012 | 0.20 | 1.016 | 1.013 | 0.30 |
| 31814 | 1.024 | 1.023 | 1.023 | 0.00 | 1.019 | 1.017 | 0.20 | 1.021 | 1.018 | 0.29 |
| 31819 | 1.024 | 1.024 | 1.024 | 0.00 | 1.023 | 1.022 | 0.10 | 1.022 | 1.019 | 0.29 |
| 31824 | 1.019 | 1.019 | 1.019 | 0.00 | 1.016 | 1.015 | 0.10 | 1.017 | 1.014 | 0.30 |
| 31838(PV) | 1.040 | 1.040 | 1.040 | 0.00 | 1.040 | 1.040 | 0.00 | 1.030 | 1.029 | 0.10 |
| 31840 | 1.029 | 1.029 | 1.029 | 0.00 | 1.028 | 1.028 | 0.00 | 1.025 | 1.024 | 0.10 |
| 31843 | 1.022 | 1.022 | 1.022 | 0.00 | 1.018 | 1.017 | 0.10 | 1.020 | 1.018 | 0.20 |
| Load Bus Violation | 0 | 2 | 2 | | 0 | 0 | | 0 | 0 | |

ตารางที่ 6.9 ข ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทยของกรณีศึกษาที่ 4 และ 5

| Bus No. | Basecase | Case4 br26(31717-31740) | | | Case5 br34(31720-31743) | | |
|---------|----------|-------------------------|-------|---------|-------------------------|-------|---------|
| | | GA* | ACPF | % error | GA* | ACPF | % error |
| 31702 | 1.029 | 1.029 | 1.029 | 0.00 | 1.029 | 1.029 | 0.00 |
| 31707 | 0.996 | 0.996 | 0.996 | 0.00 | 0.996 | 0.996 | 0.00 |
| 31708 | 1.007 | 1.003 | 1.004 | 0.10 | 1.005 | 1.005 | 0.00 |
| 31709 | 1.012 | 1.008 | 1.009 | 0.10 | 1.010 | 1.010 | 0.00 |
| 31716 | 1.035 | 1.030 | 1.031 | 0.10 | 1.034 | 1.034 | 0.00 |
| 31717 | 0.988 | 0.935 | 0.936 | 0.11 | 0.988 | 0.987 | 0.10 |
| 31718 | 1.001 | 1.001 | 1.001 | 0.00 | 1.001 | 1.001 | 0.00 |
| 31719 | 1.016 | 1.014 | 1.014 | 0.00 | 1.015 | 1.015 | 0.00 |
| 31720 | 1.004 | 1.003 | 1.003 | 0.00 | 0.960 | 0.960 | 0.00 |

ตารางที่ 6.9 ข ขนาดแรงดันของบัสโหลดหลังจากเกิดคอนดินเจนซีของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทยของกรณีศึกษาที่ 4 และ 5

| Bus No. | Basecase | Case4 br26(31717-31740) | | | Case5 br34(31720-31743) | | |
|--------------------|----------|-------------------------|-------|---------|-------------------------|-------|---------|
| | | GA* | ACPF | % error | GA* | ACPF | % error |
| 31721 | 1.003 | 1.000 | 1.001 | 0.10 | 0.999 | 1.000 | 0.10 |
| 31722 | 1.021 | 1.020 | 1.020 | 0.00 | 1.021 | 1.021 | 0.00 |
| 31724 | 1.015 | 1.005 | 1.008 | 0.30 | 1.014 | 1.014 | 0.00 |
| 31725 | 1.006 | 1.006 | 1.006 | 0.00 | 1.006 | 1.006 | 0.00 |
| 31726 | 0.993 | 0.992 | 0.992 | 0.00 | 0.993 | 0.993 | 0.00 |
| 31727 | 1.034 | 1.034 | 1.034 | 0.00 | 1.034 | 1.034 | 0.00 |
| 31728 | 1.041 | 1.041 | 1.041 | 0.00 | 1.041 | 1.041 | 0.00 |
| 31729 | 1.036 | 1.035 | 1.035 | 0.00 | 1.036 | 1.036 | 0.00 |
| 31730 | 1.000 | 0.998 | 0.999 | 0.10 | 0.999 | 0.999 | 0.00 |
| 31732 | 0.998 | 0.994 | 0.995 | 0.10 | 0.996 | 0.996 | 0.00 |
| 31734 | 1.003 | 0.999 | 0.999 | 0.00 | 1.001 | 1.001 | 0.00 |
| 31736 | 1.005 | 1.001 | 1.002 | 0.10 | 1.003 | 1.003 | 0.00 |
| 31737 | 0.995 | 0.993 | 0.993 | 0.00 | 0.949 | 0.948 | 0.11 |
| 31738 | 1.037 | 1.037 | 1.037 | 0.00 | 1.037 | 1.037 | 0.00 |
| 31739 | 1.016 | 1.015 | 1.015 | 0.00 | 1.016 | 1.016 | 0.00 |
| 31740 | 1.008 | 1.010 | 1.011 | 0.10 | 1.007 | 1.007 | 0.00 |
| 31742 | 1.019 | 1.017 | 1.018 | 0.10 | 1.015 | 1.015 | 0.00 |
| 31743 | 1.020 | 1.018 | 1.019 | 0.10 | 1.016 | 1.017 | 0.10 |
| 31809 | 1.019 | 1.016 | 1.016 | 0.00 | 1.017 | 1.017 | 0.00 |
| 31814 | 1.024 | 1.020 | 1.021 | 0.10 | 1.022 | 1.022 | 0.00 |
| 31819 | 1.024 | 1.023 | 1.023 | 0.00 | 1.024 | 1.024 | 0.00 |
| 31824 | 1.019 | 1.015 | 1.015 | 0.00 | 1.018 | 1.018 | 0.00 |
| 31840 | 1.029 | 1.029 | 1.030 | 0.10 | 1.029 | 1.029 | 0.00 |
| 31843 | 1.022 | 1.020 | 1.020 | 0.00 | 1.019 | 1.020 | 0.10 |
| Load Bus Violation | 0 | 1 | 1 | | 2 | 2 | |

ตารางที่ 6.10 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของขนาดแรงดันที่บัลโหลดและระยะเวลาในการประมวลผลของแต่ละกรณีศึกษา (ระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย)

| Case Study | Mean (%) | Min | Max | SD | Comp Time (sec) | |
|--------------------------|----------|-------|-------|-------|-----------------|--------|
| | | | | | GA* | ACPF |
| Case1 br6(31707-31738) | 0.327 | 0.001 | 4.175 | 0.942 | 1.5574 | 0.0219 |
| Case2 br16 (31809-31709) | 0.092 | 0.000 | 0.489 | 0.120 | 1.3750 | 0.0248 |
| Case3 PV31838 | 0.234 | 0.011 | 0.435 | 0.107 | 1.0027 | 0.0242 |
| Case4 br26(31717-31740) | 0.054 | 0.006 | 0.252 | 0.046 | 1.3095 | 0.0225 |
| Case5 br34(31720-31743) | 0.017 | 0.000 | 0.127 | 0.028 | 1.6156 | 0.0218 |

* GA : Proposed Genetic Algorithms

วิเคราะห์ผลการทดสอบ (ระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย)

จากกรณีศึกษาทั้ง 5 กรณีพบว่า เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงดันบัลหลังจากเกิดคอนตินเจนซีค่อนข้างต่ำ โดยคอนตินเจนซีที่ควรได้รับการพิจารณาเป็นอันดับต้นๆ คือ คอนตินเจนซีที่ส่งผลกระทบต่อให้บัลหรือสายส่งละเมิดขีดจำกัด ดังที่ได้แสดงไว้ในกรณีศึกษาที่ 1 ส่วนเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาประมวลผลพบว่าใช้เวลามากกว่าวิธีเอซีเพาเวอร์โพลว์ในทุกกรณี แต่เนื่องจากระยะเวลาประมวลผลของวิธีการที่นำเสนอไม่ขึ้นกับขนาดของระบบทดสอบ ทำให้ใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่าเมื่อทดสอบกับระบบที่มีขนาดใหญ่ ดังจะได้อธิบายต่อไป

ตารางที่ 6.11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีเอซีเพาเวอร์โพลว์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | |
|-----|-------------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % |
| 1 | PV31705 | 8 | 14 | 57 | 0 | 0 | - |
| 2 | br6(31707-31738) | 2 | 2 | 100 | 0 | 0 | - |
| 3 | br34(31720-31743) | 2 | 2 | 100 | 0 | 0 | - |

ตารางที่ 6.11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีเอชพีเพาเวอร์โพลว์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | |
|-----|-------------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % |
| 4 | br5(31707-31718) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 5 | br21(31716-31717) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 6 | br25(31717-31724) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 7 | br26(31717-31740) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 8 | br28(31719-31730) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 9 | br29(31719-31730) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 10 | br35(31721-31742) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 11 | br38(31722-31726) | 1 | 2 | 50 | 0 | 0 | - |
| 12 | br39(31722-31726) | 1 | 2 | 50 | 0 | 0 | - |
| 13 | br42(31722-31728) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 14 | br43(31722-31728) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 15 | br47(31725-31726) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 16 | br57(31840-31740) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 17 | br58(31840-31740) | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 18 | PV31816 | 1 | 1 | 100 | 0 | 0 | - |
| 19 | br1(31702-31738) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 20 | br2(31702-31738) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 21 | br3(31705-31743) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | - |
| 22 | br4(31705-31743) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | - |
| 23 | br7(31708-31709) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 24 | br8(31708-31709) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 25 | br9(31708-31724) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 26 | br11(31709-31721) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 27 | br12(31709-31721) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |

ตารางที่ 6.11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซ์ระหว่างวิธีเอชพีเพาเวอร์โพลว์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | |
|-----|---------------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % |
| 28 | br14(31709-31736) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 29 | br15(31709-31736) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 30 | br16(31809-31709) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 31 | br17(31809-31709) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 32 | br18(31809-31709) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 33 | br22(31716-31722) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 34 | br23(31816-31716) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 35 | br24(31816-31716) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 36 | br30(31819-31719) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 37 | br31(31819-31719) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 38 | br33(31720-31742) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 39 | br36(31722-31725) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 40 | br37(31722-31725) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 41 | br40(31722-31728) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | - |
| 42 | br41(31722-31728) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | - |
| 43 | br45(31824-31724) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 44 | br46(31824-31724) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 45 | br48(31727-31738) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 46 | br49(31727-31738) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 47 | br50(31828-31728) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 48 | br51(31828-31728) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 49 | br53(31738-31739) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 50 | br54(31838-31738)** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | - |
| 51 | br55(31838-31738)** | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |

ตารางที่ 6.11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีเอชพีเพาเวอร์โพลว์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | |
|-----|---------------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % |
| 52 | br56(31838-31738)** | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 53 | br59(31742-31743) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 54 | br60(31742-31743) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 55 | br61(31843-31743) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 56 | br62(31843-31743) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 57 | br63(31809-31814) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 58 | br64(31809-31814) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 59 | br65(31809-31824) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 60 | br66(31809-31824) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 61 | br71(31814-31840) | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | - |
| 62 | br72(31814-31840) | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | - |
| 63 | br73(31814-31843) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 64 | br74(31814-31843) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 65 | br75(31816-31840) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 66 | br76(31816-31840) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 67 | br77(31819-31824) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 68 | br78(31819-31824) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 69 | br79(31819-31840) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 70 | br80(31819-31840) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 71 | br81(31828-31838) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 72 | br82(31828-31838) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 73 | br83(31838-31840) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 74 | br84(31838-31840) | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 75 | PV31713 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |

ตารางที่ 6.11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาคอนดินเจนซีระหว่างวิธีเอซีเพาเวอร์โพลว์และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| No. | Contingency | Number of bus voltage magnitude violation (1) | | | Number of branch overloading (2) | | |
|-----|-------------|---|------|----------------|----------------------------------|------|----------------|
| | | GA* | ACPF | Capture rate % | Dist fact* | ACPF | Capture rate % |
| 76 | PV31828 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| 77 | PV31838 | 0 | 0 | - | 0 | 0 | - |
| | | | Mean | 66 | | Mean | - |
| | | | Min | 0 | | Min | - |
| | | | Max | 100 | | Max | - |

* GA : Proposed Genetic Algorithms, Dist fact : Distribution factors

** หม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 6.12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาคอนดินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|-------------------|---------------------|---------|---------------------|------------|
| | Contingency | number of violation | | Contingency | SI |
| 1 | PV31705 | 8 | 1 | PV31705 | 61775.3072 |
| 2 | br6(31707-31738) | 2 | 7 | br26(31717-31740) | 3291.7920 |
| 3 | br34(31720-31743) | 2 | 10 | br35(31721-31742) | 52.1396 |
| 4 | br5(31707-31718) | 1 | 18 | PV31816 | 17.1794 |
| 5 | br21(31716-31717) | 1 | 16 | br57(31840-31740) | 15.6940 |
| 6 | br25(31717-31724) | 1 | 17 | br58(31840-31740) | 15.6940 |
| 7 | br26(31717-31740) | 1 | 13 | br42(31722-31728) | 5.1373 |
| 8 | br28(31719-31730) | 1 | 14 | br43(31722-31728) | 5.1373 |
| 9 | br29(31719-31730) | 1 | 50 | br54(31838-31738)** | 2.9428 |
| 10 | br35(31721-31742) | 1 | 51 | br55(31838-31738)** | 2.5216 |
| 11 | br38(31722-31726) | 1 | 52 | br56(31838-31738)** | 2.5216 |

ตารางที่ 6.12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|-------------------|---------------------|---------|-------------------|--------|
| | Contingency | number of violation | | Contingency | SI |
| 12 | br39(31722-31726) | 1 | 77 | PV31838 | 1.7427 |
| 13 | br42(31722-31728) | 1 | 41 | br40(31722-31728) | 1.6410 |
| 14 | br43(31722-31728) | 1 | 42 | br41(31722-31728) | 1.6410 |
| 15 | br47(31725-31726) | 1 | 30 | br16(31809-31709) | 1.6153 |
| 16 | br57(31840-31740) | 1 | 32 | br18(31809-31709) | 1.4665 |
| 17 | br58(31840-31740) | 1 | 31 | br17(31809-31709) | 1.4380 |
| 18 | PV31816 | 1 | 49 | br53(31738-31739) | 1.1819 |
| 19 | br1(31702-31738) | 0 | 73 | br83(31838-31840) | 1.1811 |
| 20 | br2(31702-31738) | 0 | 74 | br84(31838-31840) | 1.1811 |
| 21 | br3(31705-31743) | 0 | 67 | br77(31819-31824) | 0.9328 |
| 22 | br4(31705-31743) | 0 | 68 | br78(31819-31824) | 0.9328 |
| 23 | br7(31708-31709) | 0 | 48 | br51(31828-31728) | 0.9284 |
| 24 | br8(31708-31709) | 0 | 47 | br50(31828-31728) | 0.8220 |
| 25 | br9(31708-31724) | 0 | 63 | br73(31814-31843) | 0.6909 |
| 26 | br11(31709-31721) | 0 | 64 | br74(31814-31843) | 0.6909 |
| 27 | br12(31709-31721) | 0 | 25 | br9(31708-31724) | 0.5901 |
| 28 | br14(31709-31736) | 0 | 36 | br30(31819-31719) | 0.5578 |
| 29 | br15(31709-31736) | 0 | 37 | br31(31819-31719) | 0.5539 |
| 30 | br16(31809-31709) | 0 | 76 | PV31828 | 0.5536 |
| 31 | br17(31809-31709) | 0 | 33 | br22(31716-31722) | 0.4915 |
| 32 | br18(31809-31709) | 0 | 24 | br8(31708-31709) | 0.4724 |
| 33 | br22(31716-31722) | 0 | 28 | br14(31709-31736) | 0.4668 |
| 34 | br23(31816-31716) | 0 | 29 | br15(31709-31736) | 0.4668 |
| 35 | br24(31816-31716) | 0 | 34 | br23(31816-31716) | 0.4508 |
| 36 | br30(31819-31719) | 0 | 35 | br24(31816-31716) | 0.4508 |

ตารางที่ 6.12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|---------------------|---------------------|---------|-------------------|--------|
| | Contingency | number of violation | | Contingency | SI |
| 37 | br31(31819-31719) | 0 | 55 | br61(31843-31743) | 0.4433 |
| 38 | br33(31720-31742) | 0 | 56 | br62(31843-31743) | 0.4433 |
| 39 | br36(31722-31725) | 0 | 75 | PV31713 | 0.4368 |
| 40 | br37(31722-31725) | 0 | 43 | br45(31824-31724) | 0.0627 |
| 41 | br40(31722-31728) | 0 | 44 | br46(31824-31724) | 0.0627 |
| 42 | br41(31722-31728) | 0 | 3 | br34(31720-31743) | 0.0616 |
| 43 | br45(31824-31724) | 0 | 23 | br7(31708-31709) | 0.0614 |
| 44 | br46(31824-31724) | 0 | 71 | br81(31828-31838) | 0.0613 |
| 45 | br48(31727-31738) | 0 | 72 | br82(31828-31838) | 0.0613 |
| 46 | br49(31727-31738) | 0 | 21 | br3(31705-31743) | 0.0611 |
| 47 | br50(31828-31728) | 0 | 22 | br4(31705-31743) | 0.0611 |
| 48 | br51(31828-31728) | 0 | 2 | br6(31707-31738) | 0.0611 |
| 49 | br53(31738-31739) | 0 | 6 | br25(31717-31724) | 0.0606 |
| 50 | br54(31838-31738)** | 0 | 5 | br21(31716-31717) | 0.0605 |
| 51 | br55(31838-31738)** | 0 | 61 | br71(31814-31840) | 0.0605 |
| 52 | br56(31838-31738)** | 0 | 62 | br72(31814-31840) | 0.0605 |
| 53 | br59(31742-31743) | 0 | 65 | br75(31816-31840) | 0.0605 |
| 54 | br60(31742-31743) | 0 | 66 | br76(31816-31840) | 0.0605 |
| 55 | br61(31843-31743) | 0 | 53 | br59(31742-31743) | 0.0602 |
| 56 | br62(31843-31743) | 0 | 54 | br60(31742-31743) | 0.0602 |
| 57 | br63(31809-31814) | 0 | 11 | br38(31722-31726) | 0.0601 |
| 58 | br64(31809-31814) | 0 | 12 | br39(31722-31726) | 0.0601 |
| 59 | br65(31809-31824) | 0 | 39 | br36(31722-31725) | 0.0600 |
| 60 | br66(31809-31824) | 0 | 40 | br37(31722-31725) | 0.0600 |
| 61 | br71(31814-31840) | 0 | 19 | br1(31702-31738) | 0.0600 |

ตารางที่ 6.12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คอนตินเจนซีระหว่างวิธีดัชนีสมรรถนะและขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| Ranking | GA | | Ranking | PI | |
|---------|-------------------|---------------------|---------|-------------------|--------|
| | Contingency | number of violation | | Contingency | SI |
| 62 | br72(31814-31840) | 0 | 20 | br2(31702-31738) | 0.0600 |
| 63 | br73(31814-31843) | 0 | 4 | br5(31707-31718) | 0.0600 |
| 64 | br74(31814-31843) | 0 | 45 | br48(31727-31738) | 0.0600 |
| 65 | br75(31816-31840) | 0 | 46 | br49(31727-31738) | 0.0600 |
| 66 | br76(31816-31840) | 0 | 8 | br28(31719-31730) | 0.0600 |
| 67 | br77(31819-31824) | 0 | 9 | br29(31719-31730) | 0.0600 |
| 68 | br78(31819-31824) | 0 | 15 | br47(31725-31726) | 0.0600 |
| 69 | br79(31819-31840) | 0 | 38 | br33(31720-31742) | 0.0599 |
| 70 | br80(31819-31840) | 0 | 69 | br79(31819-31840) | 0.0599 |
| 71 | br81(31828-31838) | 0 | 70 | br80(31819-31840) | 0.0599 |
| 72 | br82(31828-31838) | 0 | 57 | br63(31809-31814) | 0.0592 |
| 73 | br83(31838-31840) | 0 | 58 | br64(31809-31814) | 0.0592 |
| 74 | br84(31838-31840) | 0 | 59 | br65(31809-31824) | 0.0580 |
| 75 | PV31713 | 0 | 60 | br66(31809-31824) | 0.0580 |
| 76 | PV31828 | 0 | 26 | br11(31709-31721) | 0.0579 |
| 77 | PV31838 | 0 | 27 | br12(31709-31721) | 0.0579 |

** หม้อแปลงไฟฟ้า

6.4 ตัวอย่างการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่นำเสนอมาใช้วิเคราะห์คอนตินเจนซีของระบบทดสอบ 2383 บัส (Winter peak)

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์คอนตินเจนซีของระบบทดสอบ 2383 บัส ที่มีโหลดสูงสุดในช่วงฤดูหนาว ซึ่งเป็นระบบทดสอบในโปรแกรม MATPOWER 3.0 [14] โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเปรียบเทียบกับวิธีเอชไอเพาเวอร์โพล์ โดยพิจารณาเฉพาะผลกระทบด้านแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจำนวนบัสที่จะเกิดขีดจำกัดจะบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของคอนตินเจนซีที่มีต่อระบบทดสอบ โดยมีขีดจำกัดของขนาดแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.95 – 1.12 pu ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างการคำนวณของคอนตินเจนซีของสายส่งเส้นที่ 10 และ 32 ดังตารางที่ 6.13 โดย

แสดงเฉพาะขนาดแรงดันของบัสโหลดที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งสิ้น 38 บัส ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าวิธีการที่นำเสนอใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่า และได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับวิธีเอชพีเพาเวอร์ฟูลวี่ (ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.5%)

ตารางที่ 6.13 ขนาดแรงดันของบัสโหลดที่ละเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าหลังจากเกิดคอนตันเจนท์ของระบบทดสอบ 2383 บัส (Winter peak)

| Bus No. | V min | V max | basecase | br10(14-4) | | | br30(321-7) | | |
|---------|--------|--------|----------|------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| | | | | GA* | ACPF | %error | GA* | ACPF | %error |
| 15 | 0.95 | 1.05 | 0.9480 | 0.9480 | 0.9470 | 0.103 | 0.9480 | 0.9478 | 0.030 |
| 115 | 0.95 | 1.05 | 0.9346 | 0.9346 | 0.9344 | 0.026 | 0.9346 | 0.9346 | 0.000 |
| 116 | 0.95 | 1.05 | 0.9345 | 0.9345 | 0.9343 | 0.026 | 0.9345 | 0.9345 | 0.000 |
| 130 | 0.95 | 1.11 | 0.9387 | 0.9387 | 0.9386 | 0.010 | 0.9387 | 0.9387 | 0.001 |
| 137 | 0.95 | 1.05 | 0.9410 | 0.9410 | 0.9407 | 0.033 | 0.9410 | 0.9410 | 0.000 |
| 138 | 0.95 | 1.05 | 0.9410 | 0.9410 | 0.9407 | 0.033 | 0.9410 | 0.9410 | 0.000 |
| 145 | 0.95 | 1.05 | 0.9115 | 0.9115 | 0.9116 | 0.008 | 0.9115 | 0.9115 | 0.001 |
| 146 | 0.95 | 1.05 | 0.9115 | 0.9115 | 0.9116 | 0.008 | 0.9115 | 0.9115 | 0.001 |
| 154 | 0.95 | 1.11 | 0.9380 | 0.9380 | 0.9380 | 0.005 | 0.9380 | 0.9380 | 0.001 |
| 165 | 0.95 | 1.05 | 0.9399 | 0.9399 | 0.9393 | 0.064 | 0.9399 | 0.9399 | 0.009 |
| 188 | 0.95 | 1.12 | 0.9348 | 0.9348 | 0.9347 | 0.005 | 0.9348 | 0.9348 | 0.002 |
| 189 | 0.95 | 1.12 | 0.9234 | 0.9234 | 0.9232 | 0.020 | 0.9235 | 0.9232 | 0.034 |
| 221 | 0.95 | 1.12 | 0.9067 | 0.9067 | 0.9066 | 0.009 | 0.9067 | 0.9067 | 0.003 |
| 230 | 0.95 | 1.12 | 0.9020 | 0.9020 | 0.9020 | 0.009 | 0.9020 | 0.9021 | 0.003 |
| 240 | 0.95 | 1.12 | 0.9110 | 0.9110 | 0.9109 | 0.009 | 0.9110 | 0.9110 | 0.002 |
| 340 | 0.95 | 1.12 | 0.9369 | 0.9369 | 0.9368 | 0.009 | 0.9369 | 0.9369 | 0.002 |
| 401 | 0.95 | 1.12 | 0.9114 | 0.9114 | 0.9113 | 0.008 | 0.9114 | 0.9114 | 0.002 |
| 414 | 0.95 | 1.12 | 0.9075 | 0.9075 | 0.9074 | 0.009 | 0.9075 | 0.9075 | 0.002 |
| 434 | 0.95 | 1.12 | 0.9147 | 0.9147 | 0.9147 | 0.008 | 0.9148 | 0.9148 | 0.002 |
| 443 | 0.95 | 1.12 | 0.9354 | 0.9354 | 0.9353 | 0.019 | 0.9355 | 0.9352 | 0.033 |
| 466 | 0.95 | 1.12 | 0.8975 | 0.8975 | 0.8974 | 0.009 | 0.8975 | 0.8975 | 0.003 |
| 487 | 0.95 | 1.12 | 0.9496 | 0.9496 | 0.9494 | 0.018 | 0.9497 | 0.9494 | 0.032 |

ตารางที่ 6.13 ขนาดแรงดันของบัสโหลดที่จะเมิดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าหลังจากเกิดคอนตินเจนซี
ของระบบทดสอบ 2383 บัส (Winter peak)

| Bus No. | V min | V max | basecase | br10(14-4) | | | br30(321-7) | | |
|---------|--------|--------|----------|------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| | | | | GA* | ACPF | %error | GA* | ACPF | %error |
| 513 | 0.95 | 1.12 | 0.9236 | 0.9236 | 0.9235 | 0.020 | 0.9237 | 0.9234 | 0.034 |
| 552 | 0.95 | 1.12 | 0.9426 | 0.9426 | 0.9426 | 0.004 | 0.9426 | 0.9425 | 0.012 |
| 553 | 0.95 | 1.12 | 0.9409 | 0.9409 | 0.9409 | 0.004 | 0.9409 | 0.9408 | 0.013 |
| 588 | 0.95 | 1.12 | 0.9446 | 0.9446 | 0.9446 | 0.003 | 0.9446 | 0.9445 | 0.010 |
| 595 | 0.95 | 1.12 | 0.9456 | 0.9456 | 0.9455 | 0.004 | 0.9456 | 0.9455 | 0.011 |
| 643 | 0.95 | 1.12 | 0.9484 | 0.9484 | 0.9484 | 0.001 | 0.9485 | 0.9484 | 0.006 |
| 658 | 0.95 | 1.12 | 0.9441 | 0.9441 | 0.9441 | 0.003 | 0.9441 | 0.9440 | 0.010 |
| 771 | 0.95 | 1.12 | 0.9484 | 0.9484 | 0.9483 | 0.006 | 0.9484 | 0.9483 | 0.012 |
| 1060 | 0.95 | 1.12 | 0.9399 | 0.9399 | 0.9399 | 0.000 | 0.9399 | 0.9399 | 0.000 |
| 1745 | 0.95 | 1.12 | 0.9471 | 0.9471 | 0.9471 | 0.001 | 0.9471 | 0.9471 | 0.000 |
| 1905 | 0.95 | 1.12 | 0.8938 | 0.8938 | 0.8938 | 0.000 | 0.8938 | 0.8938 | 0.000 |
| 2130 | 0.95 | 1.12 | 0.9349 | 0.9349 | 0.9349 | 0.002 | 0.9349 | 0.9349 | 0.001 |
| 2137 | 0.95 | 1.12 | 0.9384 | 0.9384 | 0.9384 | 0.002 | 0.9384 | 0.9384 | 0.001 |
| 2142 | 0.95 | 1.12 | 0.9393 | 0.9393 | 0.9392 | 0.002 | 0.9393 | 0.9393 | 0.001 |
| 2146 | 0.95 | 1.12 | 0.9304 | 0.9304 | 0.9304 | 0.002 | 0.9304 | 0.9304 | 0.001 |
| 2189 | 0.95 | 1.12 | 0.9300 | 0.9300 | 0.9299 | 0.002 | 0.9300 | 0.9300 | 0.001 |

6.5 วิเคราะห์ผลการศึกษา

จากผลการทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 30 บัส, IEEE 57 บัส, ระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย และระบบทดสอบ 2383 บัส พบว่า

- คอนตินเจนซีที่ส่งผลให้แรงดันเปลี่ยนแปลงไปมากอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและระยะเวลาประมวลผลของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม รวมทั้งจำนวนบัสที่เชื่อมต่อกับบัสที่เกิดคอนตินเจนซีก็ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาประมวลผลเช่นกัน
- ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันบัสหลังจากเกิดคอนตินเจนซีและระยะเวลาในการประมวลผลของวิธีการที่นำเสนอขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันบัสที่เปลี่ยนแปลงไป แต่ไม่ขึ้นกับขนาดของระบบทดสอบ ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงเหมาะสำหรับวิเคราะห์คอนตินเจนซีของระบบที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก รวมทั้งใช้ระยะเวลาในการประมวลผลน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยเอซีเพาเวอร์โฟลว์
- เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีดัชนีสมรรถนะพบว่าทั้งสองวิธีสามารถจัดอันดับความรุนแรงของคอนตินเจนซีได้ใกล้เคียงกัน โดยวิธีการที่นำเสนอเน้นพิจารณาจำนวนบัสและสายส่งที่ละเมิดขอบเขตเป็นหลัก ส่วนวิธีดัชนีสมรรถนะนั้นดูผลกระทบต่อระบบเป็นหลัก
- คอนตินเจนซีที่เป็นอันตรายต่อระบบมากที่สุด คือ คอนตินเจนซีที่ทำให้มีจำนวนบัสและสายส่งที่ละเมิดขีดจำกัดจำนวนมาก ดังที่ได้แสดงในกรณีศึกษาที่ 1 ของระบบทดสอบต่างๆ

ตารางที่ 6.14 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของขนาดแรงดันที่บัสโหลดและระยะเวลาในการประมวลผลของระบบทดสอบ

| Test System | Number of Contingencies | Comp Time* (sec) | | % error of VM | |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------|--------|---------------|--------|
| | | GA | ACPF | Mean | SD |
| IEEE 30-bus | 41 | 1.3735 | 0.0285 | 0.2769 | 0.5671 |
| IEEE 57-bus | 80 | 1.9028 | 0.0423 | 0.2088 | 0.4205 |
| ระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย (39 บัส) | 77 | 1.4272 | 0.0409 | 0.1011 | 0.2537 |
| case 2383-bus winter peak | 2 | 2.1464 | 4.9973 | 0.0030 | 0.0012 |

* Average computation time per contingency

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบจุลภาค (Micro GA) เพื่อคำนวณแรงดันบัลหลังจากเกิดคอนตินเจนซี ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (MOMGA) โดยศึกษาคอนตินเจนซีที่เกิดจากสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และพิจารณาผลกระทบทั้งในแง่ของแรงดันบัลเกินขอบเขตและโหลดเกินในสายส่ง พร้อมทั้งนำเสนอการจำลองการเกิดคอนตินเจนซีด้วยการฉีดกำลังไฟฟ้าย้อนที่ฟีดเซช โดยพิจารณาเฉพาะบัลที่เกิดคอนตินเจนซีและบัลข้างเคียงเป็นหลัก (Bounded Network) เพื่อประโยชน์ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมแบบเฉพาะที่ ซึ่งจำนวนของบัลและสายส่งที่ได้รับผลกระทบ จะบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของคอนตินเจนซี นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยใช้ดัชนีสมรรถนะ ซึ่งสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. เมื่อขนาดแรงดันบัลเปลี่ยนแปลงมากอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและระยะเวลาประมวลผล แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาประมวลผลของวิธีที่นำเสนอขึ้นไม่ขึ้นกับขนาดของระบบทดสอบ นอกจากนี้จำนวนบัลที่เชื่อมต่อกับบัลที่เกิดคอนตินเจนซีก็ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการคำนวณเช่นกัน
2. การวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ Micro GA ร่วมกับการจำลองคอนตินเจนซีด้วยการฉีดกำลังไฟฟ้าย้อนที่ฟีดเซชเหมาะสำหรับการวิเคราะห์คอนตินเจนซีของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ เนื่องจากใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าและสามารถพิจารณาผลกระทบเมื่อกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าละเมิดขีดจำกัดได้ชัดเจนกว่าการวิเคราะห์โดยใช้ดัชนีสมรรถนะ แต่อย่างไรก็ตามวิธีดัชนีสมรรถนะก็มีความเหมาะสมสำหรับการพิจารณาผลกระทบโดยรวมด้านกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่มีต่อระบบไฟฟ้า
3. การวิเคราะห์คอนตินเจนซีโดยใช้ดัชนีสมรรถนะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการวิเคราะห์โดย Micro GA แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ในโมดูลที่ 1 ซึ่งใช้การประมาณเชิงเส้นสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นวิธีสมรรถนะจึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ในเบื้องต้น

4. การจำลองคอนตินเจนซีด้วยการขีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชย โดยพิจารณาเฉพาะ บัสที่อยู่ภายใน Bounded Network เป็นสมการข้อจำกัด ของปัญหาค่าเหมาะสม แบบไม่เชิงเส้น เพื่อใช้คำนวณขนาดแรงดันบัสที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเกิดคอนตินเจนซี ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชย ส่งผลต่อการลดระยะเวลาการประมวลผล และลดความคลาดเคลื่อนของปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ดี
5. การกำหนดจำนวนคอนตินเจนซีที่ต้องการคัดเลือกส่งผลต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์คอนตินเจนซี กล่าวคือ การกำหนดจำนวนคอนตินเจนซีมากเกินไป อาจสามารถคัดกรองคอนตินเจนซีที่รุนแรงได้ดี แต่ก็ใช้เวลาในการประมวลผลนานขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกันหากกำหนดจำนวนคอนตินเจนซีน้อยเกินไป อาจทำให้คอนตินเจนซีที่รุนแรงบางเหตุการณ์ไม่ถูกคัดเลือกหรือตรวจจับได้ แม้ว่าจะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยก็ตาม ซึ่งข้อผิดพลาดทั้งสองที่เกิดขึ้นนี้รวมเรียกว่า Masking Effect

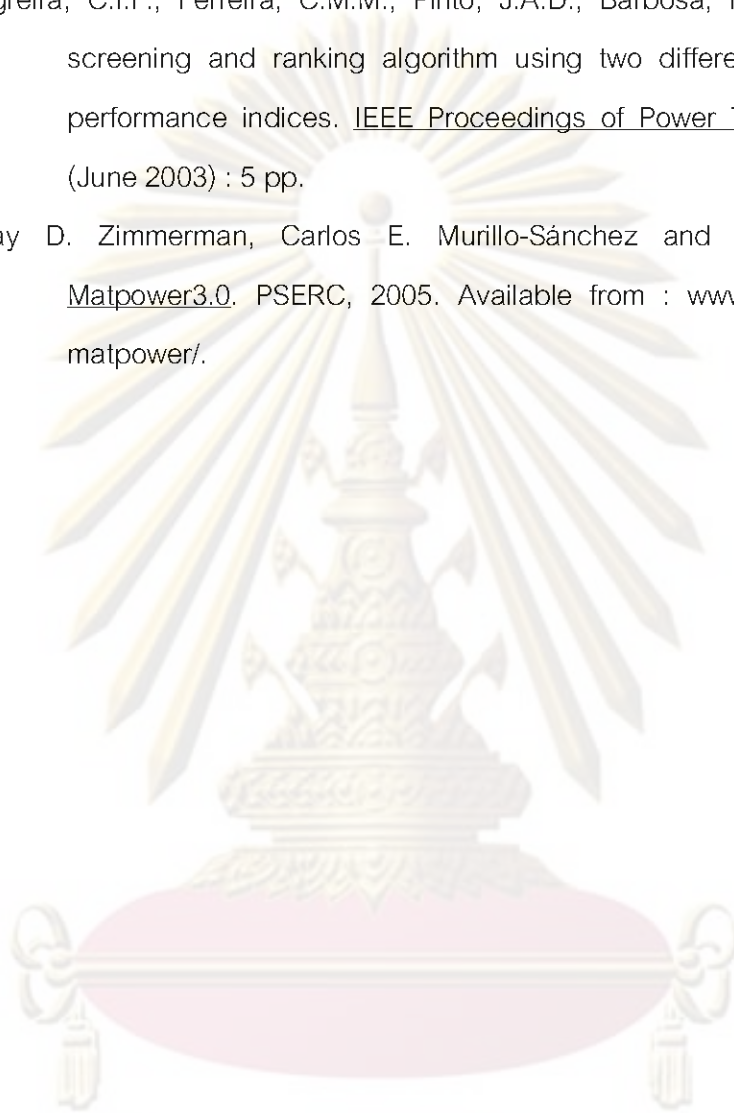
7.2 ข้อเสนอแนะ

1. พิจารณาคอนตินเจนซีแบบ $N - k$ เพื่อประเมินความแข็งแกร่งของระบบและสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับวางแผนระบบส่งกำลังไฟฟ้าต่อไป
2. ปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์คอนตินเจนซีที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. พิจารณามลที่เกิดขึ้นเมื่อบัสควบคุมแรงดันละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (VAR Limit) ซึ่งทำให้เปลี่ยนสถานะจากบัสควบคุมแรงดันกลายเป็นบัสโหลด

รายการอ้างอิง

- [1] John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. Power System Analysis. International Ed. New York : McGraw-Hill, 1994.
- [2] Glenn W. Stagg, Ahmed H. El-Abiad. Computer Methods in Power System Analysis. New York : McGraw-Hill, 1968.
- [3] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg. Power Generation, Operation, and Control. 2nd Ed. New York : John Wiley & Sons, 1996.
- [4] Ozdemir, A.; Jae Yun Lim; Singh, C. Branch outage simulation for MVar flows: bounded network solution. IEEE Transactions on Power Systems 18 (November 2003) : 1523 – 1528.
- [5] Ozdemir, A.; Lim, J.Y.; Singh, C. Contingency screening for steady state security analysis by using genetic algorithms. IEEE Summer Meeting on Power Engineering 3 (July 2002) : 1142 – 1147.
- [6] Ozdemir, A.; Jae Yun Lim; Singh, C. Post-Outage Reactive Power Flow Calculations by Genetic Algorithms: Constrained Optimization Approach. IEEE Transactions on Power Systems 20 (August 2005) : 1266 – 1272.
- [7] Goldberg, D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Boston : Addison-Wesley, 1989.
- [8] Bakare, G.A.; Venayagamoorthy, G.K.; Aliyu, U.O. Reactive Power and Voltage Control of the Nigerian Grid System Using Micro-Genetic Algorithm. IEEE Power Engineering Society 2 (June 2005) : 1916- 1922.
- [9] Yaowiwat, S. Multi Objective Micro Genetic Algorithm for Combine and Reroute problem. World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET) 26 (December 2007) : 245 – 255.
- [10] The MathWorks. Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox User's Guide. MA : The MathWorks, 2004. Available from : www.mathworks.com/access/helpdesk_r13/help/pdf_doc/gads/gads_tb.pdf/.
- [11] ปฐม อุตตวิริยะนุภาพ. การทำออปติ้มัลเพาเวอร์ฟลิวโดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

- [12] Lee, C.-Y.; Chen, N. Distribution factors of reactive power flow in transmission line and transformer outage studies. IEEE Transactions on Power Systems 7 (February 1992) : 194 – 200.
- [13] Agreira, C.I.F.; Ferreira, C.M.M.; Pinto, J.A.D.; Barbosa, F.P.M. Contingency screening and ranking algorithm using two different sets of security performance indices. IEEE Proceedings of Power Tech Conference 4 (June 2003) : 5 pp.
- [14] Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez and Deqiang D. Gan. Matpower3.0. PSERC, 2005. Available from : www.pserc.cornell.edu/matpower/.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลระบบทดสอบ

ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลระบบ IEEE 30 บัส, IEEE 57 บัส และระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย โดยแต่ละระบบจะแสดงข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่งตามลำดับ

ก.1 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส ซึ่งมีสายส่งทั้งหมด 41 สายส่ง ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่ง แสดงในตาราง ก.1.1 ก.1.2 และ ก.1.3 ตามลำดับ โดยใช้ค่ากำลังไฟฟ้าฐานเท่ากับ 100 MVA และมีบัสอ้างอิงอยู่ที่บัสที่ 1

ตาราง ก.1.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| บัสที่ | Type* | baseKV | Pd (MW) | Qd (MVAR) | Gs (MW) | Bs (MVAR) | Vm (pu) | Va (deg) | Vmax (pu) | Vmin (pu) |
|--------|-------|--------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 1 | 3 | 132 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.06 | 0 | 1.06 | 0.94 |
| 2 | 2 | 132 | 21.7 | 12.7 | 0 | 0 | 1.043 | -5.48 | 1.06 | 0.94 |
| 3 | 1 | 132 | 2.4 | 1.2 | 0 | 0 | 1.021 | -7.96 | 1.06 | 0.94 |
| 4 | 1 | 132 | 7.6 | 1.6 | 0 | 0 | 1.012 | -9.62 | 1.06 | 0.94 |
| 5 | 2 | 132 | 94.2 | 19 | 0 | 0 | 1.01 | -14.37 | 1.06 | 0.94 |
| 6 | 1 | 132 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.01 | -11.34 | 1.06 | 0.94 |
| 7 | 1 | 132 | 22.8 | 10.9 | 0 | 0 | 1.002 | -13.12 | 1.06 | 0.94 |
| 8 | 2 | 132 | 30 | 30 | 0 | 0 | 1.01 | -12.1 | 1.06 | 0.94 |
| 9 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.051 | -14.38 | 1.06 | 0.94 |
| 10 | 1 | 33 | 5.8 | 2 | 0 | 19 | 1.045 | -15.97 | 1.06 | 0.94 |
| 11 | 2 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.082 | -14.39 | 1.06 | 0.94 |
| 12 | 1 | 33 | 11.2 | 7.5 | 0 | 0 | 1.057 | -15.24 | 1.06 | 0.94 |
| 13 | 2 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.071 | -15.24 | 1.06 | 0.94 |

ตาราง ก.1.1 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| บัสที่ | Type* | baseKV | Pd (MW) | Qd (MVAR) | Gs (MW) | Bs (MVAR) | Vm (pu) | Va (deg) | Vmax (pu) | Vmin (pu) |
|--------|-------|--------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 14 | 1 | 33 | 6.2 | 1.6 | 0 | 0 | 1.042 | -16.13 | 1.06 | 0.94 |
| 15 | 1 | 33 | 8.2 | 2.5 | 0 | 0 | 1.038 | -16.22 | 1.06 | 0.94 |
| 16 | 1 | 33 | 3.5 | 1.8 | 0 | 0 | 1.045 | -15.83 | 1.06 | 0.94 |
| 17 | 1 | 33 | 9 | 5.8 | 0 | 0 | 1.04 | -16.14 | 1.06 | 0.94 |
| 18 | 1 | 33 | 3.2 | 0.9 | 0 | 0 | 1.028 | -16.82 | 1.06 | 0.94 |
| 19 | 1 | 33 | 9.5 | 3.4 | 0 | 0 | 1.026 | -17 | 1.06 | 0.94 |
| 20 | 1 | 33 | 2.2 | 0.7 | 0 | 0 | 1.03 | -16.8 | 1.06 | 0.94 |
| 21 | 1 | 33 | 17.5 | 11.2 | 0 | 0 | 1.033 | -16.42 | 1.06 | 0.94 |
| 22 | 1 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.033 | -16.41 | 1.06 | 0.94 |
| 23 | 1 | 33 | 3.2 | 1.6 | 0 | 0 | 1.027 | -16.61 | 1.06 | 0.94 |
| 24 | 1 | 33 | 8.7 | 6.7 | 0 | 4.3 | 1.021 | -16.78 | 1.06 | 0.94 |
| 25 | 1 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.017 | -16.35 | 1.06 | 0.94 |
| 26 | 1 | 33 | 3.5 | 2.3 | 0 | 0 | 1 | -16.77 | 1.06 | 0.94 |
| 27 | 1 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.023 | -15.82 | 1.06 | 0.94 |
| 28 | 1 | 132 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.007 | -11.97 | 1.06 | 0.94 |
| 29 | 1 | 33 | 2.4 | 0.9 | 0 | 0 | 1.003 | -17.06 | 1.06 | 0.94 |
| 30 | 1 | 33 | 10.6 | 1.9 | 0 | 0 | 0.992 | -17.94 | 1.06 | 0.94 |

* บัส Type 1 หมายถึง บัสโหลด (PQ Bus)

บัส Type 2 หมายถึง บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (PV Bus)

บัส Type 3 หมายถึง บัสอ้างอิง (Reference Bus)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.1.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| บัสที่ | Pg (MW) | Qg (MVAR) | Qmax (MVAR) | Qmin (MVAR) | Vg (pu) | Pmax (MW) | Pmin (MW) |
|--------|---------|-----------|-------------|-------------|---------|-----------|-----------|
| 1 | 260.2 | -16.1 | 10 | 0 | 1.06 | 360.2 | 0 |
| 2 | 40 | 50 | 50 | -40 | 1.045 | 140 | 0 |
| 5 | 0 | 37 | 40 | -40 | 1.01 | 100 | 0 |
| 8 | 0 | 37.3 | 40 | -10 | 1.01 | 100 | 0 |
| 11 | 0 | 16.2 | 24 | -6 | 1.082 | 100 | 0 |
| 13 | 0 | 10.6 | 24 | -6 | 1.071 | 100 | 0 |

ตาราง ก.1.3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| สายส่งที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|------------|-------------|
| 1 | 1 | 2 | 0.0192 | 0.0575 | 0.0528 | 130 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 3 | 0.0452 | 0.1652 | 0.0408 | 130 | 0 | 0 |
| 3 | 2 | 4 | 0.057 | 0.1737 | 0.0368 | 65 | 0 | 0 |
| 4 | 3 | 4 | 0.0132 | 0.0379 | 0.0084 | 130 | 0 | 0 |
| 5 | 2 | 5 | 0.0472 | 0.1983 | 0.0418 | 130 | 0 | 0 |
| 6 | 2 | 6 | 0.0581 | 0.1763 | 0.0374 | 65 | 0 | 0 |
| 7 | 4 | 6 | 0.0119 | 0.0414 | 0.009 | 90 | 0 | 0 |
| 8 | 5 | 7 | 0.046 | 0.116 | 0.0204 | 70 | 0 | 0 |
| 9 | 6 | 7 | 0.0267 | 0.082 | 0.017 | 130 | 0 | 0 |
| 10 | 6 | 8 | 0.012 | 0.042 | 0.009 | 32 | 0 | 0 |
| 11 | 6 | 9 | 0 | 0.208 | 0 | 65 | 0.978 | 0 |
| 12 | 6 | 10 | 0 | 0.556 | 0 | 32 | 0.969 | 0 |
| 13 | 9 | 11 | 0 | 0.208 | 0 | 65 | 0 | 0 |
| 14 | 9 | 10 | 0 | 0.11 | 0 | 65 | 0 | 0 |
| 15 | 4 | 12 | 0 | 0.256 | 0 | 65 | 0.932 | 0 |

ตาราง ก.1.3 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 30 บัส

| สายส่ง ที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|---------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------------|----------------|
| 16 | 12 | 13 | 0 | 0.14 | 0 | 65 | 0 | 0 |
| 17 | 12 | 14 | 0.1231 | 0.2559 | 0 | 32 | 0 | 0 |
| 18 | 12 | 15 | 0.0662 | 0.1304 | 0 | 32 | 0 | 0 |
| 19 | 12 | 16 | 0.0945 | 0.1987 | 0 | 32 | 0 | 0 |
| 20 | 14 | 15 | 0.221 | 0.1997 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 21 | 16 | 17 | 0.0524 | 0.1923 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 22 | 15 | 18 | 0.1073 | 0.2185 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 23 | 18 | 19 | 0.0639 | 0.1292 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 24 | 19 | 20 | 0.034 | 0.068 | 0 | 32 | 0 | 0 |
| 25 | 10 | 20 | 0.0936 | 0.209 | 0 | 32 | 0 | 0 |
| 26 | 10 | 17 | 0.0324 | 0.0845 | 0 | 32 | 0 | 0 |
| 27 | 10 | 21 | 0.0348 | 0.0749 | 0 | 32 | 0 | 0 |
| 28 | 10 | 22 | 0.0727 | 0.1499 | 0 | 32 | 0 | 0 |
| 29 | 21 | 22 | 0.0116 | 0.0236 | 0 | 32 | 0 | 0 |
| 30 | 15 | 23 | 0.1 | 0.202 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 31 | 22 | 24 | 0.115 | 0.179 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 32 | 23 | 24 | 0.132 | 0.27 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 33 | 24 | 25 | 0.1885 | 0.3292 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 34 | 25 | 26 | 0.2544 | 0.38 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 35 | 25 | 27 | 0.1093 | 0.2087 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 36 | 28 | 27 | 0 | 0.396 | 0 | 65 | 0.968 | 0 |
| 37 | 27 | 29 | 0.2198 | 0.4153 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 38 | 27 | 30 | 0.3202 | 0.6027 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 39 | 29 | 30 | 0.2399 | 0.4533 | 0 | 16 | 0 | 0 |
| 40 | 8 | 28 | 0.0636 | 0.2 | 0.0428 | 32 | 0 | 0 |
| 41 | 6 | 28 | 0.0169 | 0.0599 | 0.013 | 32 | 0 | 0 |

ก.2 ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส ซึ่งมีสายส่งทั้งหมด 80 สายส่ง ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่ง แสดงในตาราง ก.2.1 ก.2.2 และ ก.2.3 ตามลำดับ โดยใช้ค่ากำลังไฟฟ้าฐานเท่ากับ 100 MVA และมีบัสอ้างอิงอยู่ที่บัสที่ 1

ตาราง ก.2.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| บัสที่ | Type* | Pd (MW) | Qd (MVAR) | Gs (MW) | Bs (MVAR) | Vm (pu) | Va (deg) | Vmax (pu) | Vmin (pu) |
|--------|-------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 1 | 3 | 55 | 17 | 0 | 0 | 1.04 | 0 | 1.06 | 0.94 |
| 2 | 2 | 3 | 88 | 0 | 0 | 1.01 | -1.18 | 1.06 | 0.94 |
| 3 | 2 | 41 | 21 | 0 | 0 | 0.985 | -5.97 | 1.06 | 0.94 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.981 | -7.32 | 1.06 | 0.94 |
| 5 | 1 | 13 | 4 | 0 | 0 | 0.976 | -8.52 | 1.06 | 0.94 |
| 6 | 2 | 75 | 2 | 0 | 0 | 0.98 | -8.65 | 1.06 | 0.94 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.984 | -7.58 | 1.06 | 0.94 |
| 8 | 2 | 150 | 22 | 0 | 0 | 1.005 | -4.45 | 1.06 | 0.94 |
| 9 | 2 | 121 | 26 | 0 | 0 | 0.98 | -9.56 | 1.06 | 0.94 |
| 10 | 1 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0.986 | -11.43 | 1.06 | 0.94 |
| 11 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.974 | -10.17 | 1.06 | 0.94 |
| 12 | 2 | 377 | 24 | 0 | 0 | 1.015 | -10.46 | 1.06 | 0.94 |
| 13 | 1 | 18 | 2.3 | 0 | 0 | 0.979 | -9.79 | 1.06 | 0.94 |
| 14 | 1 | 10.5 | 5.3 | 0 | 0 | 0.97 | -9.33 | 1.06 | 0.94 |
| 15 | 1 | 22 | 5 | 0 | 0 | 0.988 | -7.18 | 1.06 | 0.94 |
| 16 | 1 | 43 | 3 | 0 | 0 | 1.013 | -8.85 | 1.06 | 0.94 |
| 17 | 1 | 42 | 8 | 0 | 0 | 1.017 | -5.39 | 1.06 | 0.94 |
| 18 | 1 | 27.2 | 9.8 | 0 | 10 | 1.001 | -11.71 | 1.06 | 0.94 |
| 19 | 1 | 3.3 | 0.6 | 0 | 0 | 0.97 | -13.2 | 1.06 | 0.94 |
| 20 | 1 | 2.3 | 1 | 0 | 0 | 0.964 | -13.41 | 1.06 | 0.94 |
| 21 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.008 | -12.89 | 1.06 | 0.94 |

ตาราง ก.2.1 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| บัสที่ | Type* | Pd (MW) | Qd (MVAR) | Gs (MW) | Bs (MVAR) | Vm (pu) | Va (deg) | Vmax (pu) | Vmin (pu) |
|--------|-------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 22 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.01 | -12.84 | 1.06 | 0.94 |
| 23 | 1 | 6.3 | 2.1 | 0 | 0 | 1.008 | -12.91 | 1.06 | 0.94 |
| 24 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.999 | -13.25 | 1.06 | 0.94 |
| 25 | 1 | 6.3 | 3.2 | 0 | 5.9 | 0.982 | -18.13 | 1.06 | 0.94 |
| 26 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.959 | -12.95 | 1.06 | 0.94 |
| 27 | 1 | 9.3 | 0.5 | 0 | 0 | 0.982 | -11.48 | 1.06 | 0.94 |
| 28 | 1 | 4.6 | 2.3 | 0 | 0 | 0.997 | -10.45 | 1.06 | 0.94 |
| 29 | 1 | 17 | 2.6 | 0 | 0 | 1.01 | -9.75 | 1.06 | 0.94 |
| 30 | 1 | 3.6 | 1.8 | 0 | 0 | 0.962 | -18.68 | 1.06 | 0.94 |
| 31 | 1 | 5.8 | 2.9 | 0 | 0 | 0.936 | -19.34 | 1.06 | 0.94 |
| 32 | 1 | 1.6 | 0.8 | 0 | 0 | 0.949 | -18.46 | 1.06 | 0.94 |
| 33 | 1 | 3.8 | 1.9 | 0 | 0 | 0.947 | -18.5 | 1.06 | 0.94 |
| 34 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.959 | -14.1 | 1.06 | 0.94 |
| 35 | 1 | 6 | 3 | 0 | 0 | 0.966 | -13.86 | 1.06 | 0.94 |
| 36 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.976 | -13.59 | 1.06 | 0.94 |
| 37 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.985 | -13.41 | 1.06 | 0.94 |
| 38 | 1 | 14 | 7 | 0 | 0 | 1.013 | -12.71 | 1.06 | 0.94 |
| 39 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.983 | -13.46 | 1.06 | 0.94 |
| 40 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.973 | -13.62 | 1.06 | 0.94 |
| 41 | 1 | 6.3 | 3 | 0 | 0 | 0.996 | -14.05 | 1.06 | 0.94 |
| 42 | 1 | 7.1 | 4.4 | 0 | 0 | 0.966 | -15.5 | 1.06 | 0.94 |
| 43 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1.01 | -11.33 | 1.06 | 0.94 |
| 44 | 1 | 12 | 1.8 | 0 | 0 | 1.017 | -11.86 | 1.06 | 0.94 |
| 45 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.036 | -9.25 | 1.06 | 0.94 |
| 46 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.05 | -11.89 | 1.06 | 0.94 |
| 47 | 1 | 29.7 | 11.6 | 0 | 0 | 1.033 | -12.49 | 1.06 | 0.94 |

ตาราง ก.2.1 (ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| บัสที่ | Type* | Pd (MW) | Qd (MVAR) | Gs (MW) | Bs (MVAR) | Vm (pu) | Va (deg) | Vmax (pu) | Vmin (pu) |
|--------|-------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 48 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.027 | -12.59 | 1.06 | 0.94 |
| 49 | 1 | 18 | 8.5 | 0 | 0 | 1.036 | -12.92 | 1.06 | 0.94 |
| 50 | 1 | 21 | 10.5 | 0 | 0 | 1.023 | -13.39 | 1.06 | 0.94 |
| 51 | 1 | 18 | 5.3 | 0 | 0 | 1.052 | -12.52 | 1.06 | 0.94 |
| 52 | 1 | 4.9 | 2.2 | 0 | 0 | 0.98 | -11.47 | 1.06 | 0.94 |
| 53 | 1 | 20 | 10 | 0 | 6.3 | 0.971 | -12.23 | 1.06 | 0.94 |
| 54 | 1 | 4.1 | 1.4 | 0 | 0 | 0.996 | -11.69 | 1.06 | 0.94 |
| 55 | 1 | 6.8 | 3.4 | 0 | 0 | 1.031 | -10.78 | 1.06 | 0.94 |
| 56 | 1 | 7.6 | 2.2 | 0 | 0 | 0.968 | -16.04 | 1.06 | 0.94 |
| 57 | 1 | 6.7 | 2 | 0 | 0 | 0.965 | -16.56 | 1.06 | 0.94 |

* บัส Type 1 หมายถึง บัสโหลด (PQ Bus)

บัส Type 2 หมายถึง บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (PV Bus)

บัส Type 3 หมายถึง บัสอ้างอิง (Reference Bus)

ตาราง ก.2.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| บัสที่ | Pg (MW) | Qg (MVAR) | Qmax (MVAR) | Qmin (MVAR) | Vg (pu) | Pmax (MW) | Pmin (MW) |
|--------|---------|--------------|----------------|----------------|------------|--------------|--------------|
| 1 | 128.9 | -16.1 | 200 | -140 | 1.040 | 575.88 | 0 |
| 2 | 0 | -0.8 | 50 | -17 | 1.010 | 100 | 0 |
| 3 | 40 | -1 | 60 | -10 | 0.985 | 140 | 0 |
| 6 | 0 | 0.8 | 25 | -8 | 0.980 | 100 | 0 |
| 8 | 450 | 62.1 | 200 | -140 | 1.005 | 550 | 0 |
| 9 | 0 | 2.2 | 9 | -3 | 0.980 | 100 | 0 |
| 12 | 310 | 128.5 | 155 | -150 | 1.015 | 410 | 0 |

ตาราง ก.2.3 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| สายส่ง ที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|---------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------------|----------------|
| 1 | 1 | 2 | 0.0083 | 0.0280 | 0.1290 | 500 | 0 | 0 |
| 2 | 2 | 3 | 0.0298 | 0.0850 | 0.0818 | 150 | 0 | 0 |
| 3 | 3 | 4 | 0.0112 | 0.0366 | 0.0380 | 150 | 0 | 0 |
| 4 | 4 | 5 | 0.0625 | 0.1320 | 0.0258 | 30 | 0 | 0 |
| 5 | 4 | 6 | 0.0430 | 0.1480 | 0.0348 | 150 | 0 | 0 |
| 6 | 6 | 7 | 0.0200 | 0.1020 | 0.0276 | 150 | 0 | 0 |
| 7 | 6 | 8 | 0.0339 | 0.1730 | 0.0470 | 150 | 0 | 0 |
| 8 | 8 | 9 | 0.0099 | 0.0505 | 0.0548 | 200 | 0 | 0 |
| 9 | 9 | 10 | 0.0369 | 0.1679 | 0.0440 | 150 | 0 | 0 |
| 10 | 9 | 11 | 0.0258 | 0.0848 | 0.0218 | 150 | 0 | 0 |
| 11 | 9 | 12 | 0.0648 | 0.2950 | 0.0772 | 150 | 0 | 0 |
| 12 | 9 | 13 | 0.0481 | 0.1580 | 0.0406 | 150 | 0 | 0 |
| 13 | 13 | 14 | 0.0132 | 0.0434 | 0.0110 | 30 | 0 | 0 |
| 14 | 13 | 15 | 0.0269 | 0.0869 | 0.0230 | 50 | 0 | 0 |
| 15 | 1 | 15 | 0.0178 | 0.0910 | 0.0988 | 500 | 0 | 0 |
| 16 | 1 | 16 | 0.0454 | 0.2060 | 0.0546 | 500 | 0 | 0 |
| 17 | 1 | 17 | 0.0238 | 0.1080 | 0.0286 | 500 | 0 | 0 |
| 18 | 3 | 15 | 0.0162 | 0.0530 | 0.0544 | 150 | 0 | 0 |
| 19 | 4 | 18 | 0 | 0.5550 | 0 | 30 | 0.970 | 0 |
| 20 | 4 | 18 | 0 | 0.4300 | 0 | 30 | 0.978 | 0 |
| 21 | 5 | 6 | 0.0302 | 0.0641 | 0.0124 | 150 | 0 | 0 |
| 22 | 7 | 8 | 0.0139 | 0.0712 | 0.0194 | 150 | 0 | 0 |
| 23 | 10 | 12 | 0.0277 | 0.1262 | 0.0328 | 150 | 0 | 0 |
| 24 | 11 | 13 | 0.0223 | 0.0732 | 0.0188 | 30 | 0 | 0 |
| 25 | 12 | 13 | 0.0178 | 0.0580 | 0.0604 | 150 | 0 | 0 |
| 26 | 12 | 16 | 0.0180 | 0.0813 | 0.0216 | 150 | 0 | 0 |

ตาราง ก.2.3 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| สายส่ง ที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|---------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------------|----------------|
| 27 | 12 | 17 | 0.0397 | 0.1790 | 0.0476 | 150 | 0 | 0 |
| 28 | 14 | 15 | 0.0171 | 0.0547 | 0.0148 | 70 | 0 | 0 |
| 29 | 18 | 19 | 0.4610 | 0.6850 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 30 | 19 | 20 | 0.2830 | 0.4340 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 31 | 21 | 20 | 0 | 0.7767 | 0 | 30 | 1.043 | 0 |
| 32 | 21 | 22 | 0.0736 | 0.1170 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 33 | 22 | 23 | 0.0099 | 0.0152 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 34 | 23 | 24 | 0.1660 | 0.2560 | 0.0084 | 30 | 0 | 0 |
| 35 | 24 | 25 | 0 | 1.1820 | 0 | 30 | 1 | 0 |
| 36 | 24 | 25 | 0 | 1.2300 | 0 | 30 | 1 | 0 |
| 37 | 24 | 26 | 0 | 0.0473 | 0 | 30 | 1.043 | 0 |
| 38 | 26 | 27 | 0.1650 | 0.2540 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 39 | 27 | 28 | 0.0618 | 0.0954 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 40 | 28 | 29 | 0.0418 | 0.0587 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 41 | 7 | 29 | 0 | 0.0648 | 0 | 70 | 0.967 | 0 |
| 42 | 25 | 30 | 0.1350 | 0.2020 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 43 | 30 | 31 | 0.3260 | 0.4970 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 44 | 31 | 32 | 0.5070 | 0.7550 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 45 | 32 | 33 | 0.0392 | 0.0360 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 46 | 34 | 32 | 0 | 0.9530 | 0 | 30 | 0.975 | 0 |
| 47 | 34 | 35 | 0.0520 | 0.0780 | 0.0032 | 30 | 0 | 0 |
| 48 | 35 | 36 | 0.0430 | 0.0537 | 0.0016 | 30 | 0 | 0 |
| 49 | 36 | 37 | 0.0290 | 0.0366 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 50 | 37 | 38 | 0.0651 | 0.1009 | 0.0020 | 30 | 0 | 0 |
| 51 | 37 | 39 | 0.0239 | 0.0379 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 52 | 36 | 40 | 0.0300 | 0.0466 | 0 | 30 | 0 | 0 |

ตาราง ก.2.3 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| สายส่ง ที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|---------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------------|----------------|
| 53 | 22 | 38 | 0.0192 | 0.0295 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 54 | 11 | 41 | 0 | 0.7490 | 0 | 30 | 0.955 | 0 |
| 55 | 41 | 42 | 0.2070 | 0.3520 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 56 | 41 | 43 | 0 | 0.4120 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 57 | 38 | 44 | 0.0289 | 0.0585 | 0.002 | 30 | 0 | 0 |
| 58 | 15 | 45 | 0 | 0.1042 | 0 | 50 | 0.955 | 0 |
| 59 | 14 | 46 | 0 | 0.0735 | 0 | 50 | 0.900 | 0 |
| 60 | 46 | 47 | 0.023 | 0.0680 | 0.0032 | 50 | 0 | 0 |
| 61 | 47 | 48 | 0.0182 | 0.0233 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 62 | 48 | 49 | 0.0834 | 0.1290 | 0.0048 | 30 | 0 | 0 |
| 63 | 49 | 50 | 0.0801 | 0.1280 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 64 | 50 | 51 | 0.1386 | 0.2200 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 65 | 10 | 51 | 0 | 0.0712 | 0 | 30 | 0.930 | 0 |
| 66 | 13 | 49 | 0 | 0.1910 | 0 | 50 | 0.895 | 0 |
| 67 | 29 | 52 | 0.1442 | 0.1870 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 68 | 52 | 53 | 0.0762 | 0.0984 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 69 | 53 | 54 | 0.1878 | 0.2320 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 70 | 54 | 55 | 0.1732 | 0.2265 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 71 | 11 | 43 | 0 | 0.1530 | 0 | 30 | 0.958 | 0 |
| 72 | 44 | 45 | 0.0624 | 0.1242 | 0.004 | 50 | 0 | 0 |
| 73 | 40 | 56 | 0 | 1.1950 | 0 | 30 | 0.958 | 0 |
| 74 | 56 | 41 | 0.5530 | 0.5490 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 75 | 56 | 42 | 0.2125 | 0.3540 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 76 | 39 | 57 | 0 | 1.3550 | 0 | 30 | 0.980 | 0 |
| 77 | 57 | 56 | 0.1740 | 0.2600 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 78 | 38 | 49 | 0.1150 | 0.1770 | 0.003 | 30 | 0 | 0 |

ตาราง ก.2.3 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 57 บัส

| สายส่ง ที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|---------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------------|----------------|
| 79 | 38 | 48 | 0.0312 | 0.0482 | 0 | 30 | 0 | 0 |
| 80 | 9 | 55 | 0 | 0.1205 | 0 | 150 | 0.94 | 0 |

ก.3 ระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

ระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทยมีจำนวนบัสทั้งสิ้น 39 บัส ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่ง แสดงในตาราง ก.3.1 ก.3.2 และ ก.3.3 ตามลำดับโดยใช้ค่ากำลังไฟฟ้าฐานเท่ากับ 100 MVA และมีบัสอ้างอิงอยู่บัสที่ 31813

ตาราง ก.3.1 ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| บัสที่ | Type* | baseKV | Pd (MW) | Qd (MVAR) | Gs (MW) | Bs (MVAR) | Vm (pu) | Va (deg) | Vmax (pu) | Vmin (pu) |
|--------|-------|--------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 31702 | 1 | 115 | 44.424 | 24.579 | 0 | 0 | 1.0321 | -2.6827 | 1.05 | 0.98 |
| 31705 | 2 | 115 | 10.096 | 5.586 | 0 | 0 | 1.043 | -13.443 | 1.05 | 0.98 |
| 31707 | 1 | 115 | 41.36 | 22.884 | 0 | 24.06 | 1.02 | -8.6315 | 1.05 | 0.98 |
| 31708 | 1 | 115 | 59.648 | 33.002 | 0 | 25.24 | 1.0062 | -15.785 | 1.05 | 0.98 |
| 31709 | 1 | 115 | 150.24 | 83.125 | 0 | 65.04 | 1.0113 | -15.347 | 1.05 | 0.98 |
| 31713 | 2 | 115 | 65.696 | 36.349 | 0 | 0 | 1.02 | 5.9708 | 1.05 | 0.98 |
| 31716 | 1 | 115 | 50.864 | 28.142 | 0 | 0 | 1.0347 | -3.0143 | 1.05 | 0.98 |
| 31717 | 1 | 115 | 84.456 | 46.728 | 0 | 38.89 | 0.9879 | -9.4807 | 1.05 | 0.98 |
| 31718 | 1 | 115 | 19.376 | 10.72 | 0 | 9.15 | 1.0199 | -7.8759 | 1.05 | 0.98 |
| 31719 | 1 | 115 | 89.872 | 49.725 | 0 | 27.74 | 1.0149 | -4.8452 | 1.05 | 0.98 |
| 31720 | 1 | 115 | 29.648 | 16.404 | 0 | 14.4 | 1.0042 | -17.251 | 1.05 | 0.98 |
| 31721 | 1 | 115 | 67.128 | 37.141 | 0 | 36.59 | 1.0025 | -17.44 | 1.05 | 0.98 |
| 31722 | 1 | 115 | 27.624 | 15.284 | 0 | 21.68 | 1.0206 | -7.1648 | 1.05 | 0.98 |
| 31724 | 1 | 115 | 39.544 | 21.879 | 0 | 0 | 1.0144 | -9.1842 | 1.05 | 0.98 |

ตาราง ก.3.1 (ต่อ) ข้อมูลบัลของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| บัลที่ | Type* | baseKV | Pd (MW) | Qd (MVAR) | Gs (MW) | Bs (MVAR) | Vm (pu) | Va (deg) | Vmax (pu) | Vmin (pu) |
|--------|-------|--------|------------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 31725 | 1 | 115 | 35.208 | 19.48 | 0 | 44.08 | 1.0064 | -11.136 | 1.05 | 0.98 |
| 31726 | 1 | 115 | 96.112 | 53.177 | 0 | 22.04 | 0.99274 | -11.722 | 1.05 | 0.98 |
| 31727 | 1 | 115 | 35.896 | 19.861 | 0 | 0 | 1.0368 | -2.444 | 1.05 | 0.98 |
| 31728 | 1 | 115 | 6.216 | 3.439 | 0 | 0 | 1.0408 | -1.9594 | 1.05 | 0.98 |
| 31729 | 1 | 115 | 38.272 | 21.175 | 0 | 43.81 | 1.037 | -20.606 | 1.05 | 0.98 |
| 31730 | 1 | 115 | 29.232 | 16.174 | 0 | 6.06 | 0.99922 | -6.6173 | 1.05 | 0.98 |
| 31732 | 1 | 115 | 28.912 | 15.997 | 0 | 15.08 | 0.99745 | -17.493 | 1.05 | 0.98 |
| 31734 | 1 | 115 | 39.192 | 21.684 | 0 | 33.86 | 1.0026 | -21.244 | 1.05 | 0.98 |
| 31736 | 1 | 115 | 71.096 | 39.336 | 0 | 41.55 | 1.0047 | -16.543 | 1.05 | 0.98 |
| 31737 | 1 | 115 | 20.544 | 11.367 | 0 | 10.8 | 0.99445 | -18.811 | 1.05 | 0.98 |
| 31738 | 1 | 115 | 17.616 | 9.747 | 0 | 0 | 1.0396 | -2.3029 | 1.05 | 0.98 |
| 31739 | 1 | 115 | 22.072 | 12.212 | 0 | 18.3 | 1.0167 | -10.536 | 1.05 | 0.98 |
| 31740 | 1 | 115 | 141.21 | 78.128 | 0 | 21.68 | 1.0076 | -6.4348 | 1.05 | 0.98 |
| 31742 | 1 | 115 | 48.488 | 26.827 | 0 | 0 | 1.0189 | -14.726 | 1.05 | 0.98 |
| 31743 | 1 | 115 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0199 | -14.583 | 1.05 | 0.98 |
| 31809 | 1 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0187 | -11.114 | 1.05 | 0.98 |
| 31813 | 2 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.037 | 5.776 | 1.05 | 0.98 |
| 31814 | 1 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0231 | -10.643 | 1.05 | 0.98 |
| 31816 | 2 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.04 | -1.0955 | 1.05 | 0.98 |
| 31819 | 1 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0237 | -2.7115 | 1.05 | 0.98 |
| 31824 | 1 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0188 | -7.6964 | 1.05 | 0.98 |
| 31828 | 2 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.04 | 1.3478 | 1.05 | 0.98 |
| 31838 | 2 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.04 | 1.6139 | 1.05 | 0.98 |
| 31840 | 1 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0291 | -3.1749 | 1.05 | 0.98 |
| 31843 | 1 | 230 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.022 | -12.921 | 1.05 | 0.98 |

ตาราง ก.3.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| บัสที่ | Pg (MW) | Qg (MVAR) | Qmax (MVAR) | Qmin (MVAR) | Vg (pu) | Pmax (MW) | Pmin (MW) |
|--------|------------|--------------|----------------|----------------|------------|--------------|--------------|
| 31705 | 59 | 24.386 | 44.7 | -21 | 1.043 | 72 | 0 |
| 31816 | 225 | 20.968 | 180 | -90 | 1.04 | 300 | 0 |
| 31713 | 71.5 | 8.3665 | 46.5 | -23 | 1.02 | 75 | 0 |
| 31813 | 718.5 | -29.722 | 464.1 | -229 | 1.037 | 761 | 0 |
| 31828 | 159 | -2.1272 | 141 | -222 | 1.04 | 240 | 0 |
| 31838 | 346 | 18.602 | 186 | -120 | 1.04 | 360 | 0 |

ตาราง ก.3.3 ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| สายส่ง ที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|---------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------------|----------------|
| 1 | 31702 | 31738 | 0.0136 | 0.03937 | 0.00518 | 120 | 0 | 0 |
| 2 | 31702 | 31738 | 0.0136 | 0.03937 | 0.00518 | 120 | 0 | 0 |
| 3 | 31705 | 31743 | 0.05389 | 0.10905 | 0.01464 | 96 | 0 | 0 |
| 4 | 31705 | 31743 | 0.05389 | 0.10905 | 0.01464 | 96 | 0 | 0 |
| 5 | 31707 | 31718 | 0.05879 | 0.16502 | 0.02316 | 120 | 0 | 0 |
| 6 | 31707 | 31738 | 0.17662 | 0.49874 | 0.07050 | 120 | 0 | 0 |
| 7 | 31708 | 31709 | 0.01136 | 0.02421 | 0.00292 | 96 | 0 | 0 |
| 8 | 31708 | 31709 | 0.00893 | 0.02625 | 0.00335 | 120 | 0 | 0 |
| 9 | 31708 | 31724 | 0.15526 | 0.26493 | 0.02880 | 82 | 0 | 0 |
| 10 | 31708 | 31734 | 0.07434 | 0.21874 | 0.02793 | 120 | 0 | 0 |
| 11 | 31709 | 31721 | 0.09608 | 0.26999 | 0.03796 | 120 | 0 | 0 |
| 12 | 31709 | 31721 | 0.09608 | 0.26999 | 0.03796 | 120 | 0 | 0 |
| 13 | 31709 | 31732 | 0.04452 | 0.13091 | 0.01670 | 120 | 0 | 0 |
| 14 | 31709 | 31736 | 0.0209 | 0.05863 | 0.00822 | 120 | 0 | 0 |
| 15 | 31709 | 31736 | 0.0209 | 0.05863 | 0.00822 | 120 | 0 | 0 |

ตาราง ก.3.3 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| สายส่ง ที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|---------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------------|----------------|
| 16 | 31809 | 31709 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 17 | 31809 | 31709 | 0 | 0.06692 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 18 | 31809 | 31709 | 0 | 0.06658 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 19 | 31813 | 31713 | 0 | 0.13000 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| 20 | 31813 | 31713 | 0 | 0.11833 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| 21 | 31716 | 31717 | 0.16073 | 0.27696 | 0.02953 | 82 | 0 | 0 |
| 22 | 31716 | 31722 | 0.18486 | 0.31872 | 0.03400 | 82 | 0 | 0 |
| 23 | 31816 | 31716 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 24 | 31816 | 31716 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 25 | 31717 | 31724 | 0.12065 | 0.20573 | 0.02235 | 82 | 0 | 0 |
| 26 | 31717 | 31740 | 0.03105 | 0.13644 | 0.02044 | 163 | 0 | 0 |
| 27 | 31718 | 31738 | 0.1278 | 0.35972 | 0.05065 | 120 | 0 | 0 |
| 28 | 31719 | 31730 | 0.05146 | 0.22641 | 0.03393 | 163 | 0 | 0 |
| 29 | 31719 | 31730 | 0.05146 | 0.22641 | 0.03393 | 163 | 0 | 0 |
| 30 | 31819 | 31719 | 0 | 0.06470 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 31 | 31819 | 31719 | 0 | 0.06495 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 32 | 31720 | 31737 | 0.04695 | 0.13183 | 0.01847 | 120 | 0 | 0 |
| 33 | 31720 | 31742 | 0.08729 | 0.18627 | 0.02248 | 96 | 0 | 0 |
| 34 | 31720 | 31743 | 0.03983 | 0.17505 | 0.02624 | 163 | 0 | 0 |
| 35 | 31721 | 31742 | 0.03996 | 0.11749 | 0.01499 | 120 | 0 | 0 |
| 36 | 31722 | 31725 | 0.07686 | 0.21799 | 0.03001 | 120 | 0 | 0 |
| 37 | 31722 | 31725 | 0.07686 | 0.21799 | 0.03001 | 120 | 0 | 0 |
| 38 | 31722 | 31726 | 0.03407 | 0.23506 | 0.03257 | 215 | 0 | 0 |
| 39 | 31722 | 31726 | 0.03407 | 0.23506 | 0.03257 | 215 | 0 | 0 |
| 40 | 31722 | 31728 | 0.07363 | 0.20696 | 0.02901 | 120 | 0 | 0 |
| 41 | 31722 | 31728 | 0.07363 | 0.20696 | 0.02901 | 120 | 0 | 0 |

ตาราง ก.3.3 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| สายส่ง ที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|---------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------------|----------------|
| 42 | 31722 | 31728 | 0.04958 | 0.21804 | 0.03270 | 163 | 0 | 0 |
| 43 | 31722 | 31728 | 0.04958 | 0.21804 | 0.03270 | 163 | 0 | 0 |
| 44 | 31722 | 31739 | 0.08537 | 0.14551 | 0.01580 | 82 | 0 | 0 |
| 45 | 31824 | 31724 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 46 | 31824 | 31724 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 47 | 31725 | 31726 | 0.01806 | 0.05117 | 0.00703 | 120 | 0 | 0 |
| 48 | 31727 | 31738 | 0.00629 | 0.01822 | 0.00240 | 120 | 0 | 0 |
| 49 | 31727 | 31738 | 0.00629 | 0.01822 | 0.00240 | 120 | 0 | 0 |
| 50 | 31828 | 31728 | 0 | 0.06965 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 51 | 31828 | 31728 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 52 | 31729 | 31739 | 0.16706 | 0.35834 | 0.04310 | 96 | 0 | 0 |
| 53 | 31738 | 31739 | 0.21604 | 0.36926 | 0.04020 | 82 | 0 | 0 |
| 54 | 31838 | 31738 | 0 | 0.118170 | 0 | 100 | 0.9875 | 0 |
| 55 | 31838 | 31738 | 0 | 0.125000 | 0 | 100 | 0.9875 | 0 |
| 56 | 31838 | 31738 | 0 | 0.125000 | 0 | 100 | 0.9875 | 0 |
| 57 | 31840 | 31740 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 58 | 31840 | 31740 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 59 | 31742 | 31743 | 0.00075 | 0.00472 | 0.00138 | 326 | 0 | 0 |
| 60 | 31742 | 31743 | 0.00075 | 0.00472 | 0.00138 | 326 | 0 | 0 |
| 61 | 31843 | 31743 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 62 | 31843 | 31743 | 0 | 0.06500 | 0 | 200 | 0 | 0 |
| 63 | 31809 | 31814 | 0.0015 | 0.01168 | 0.08750 | 858 | 0 | 0 |
| 64 | 31809 | 31814 | 0.0015 | 0.01168 | 0.08750 | 858 | 0 | 0 |
| 65 | 31809 | 31824 | 0.00877 | 0.06327 | 0.13957 | 429 | 0 | 0 |
| 66 | 31809 | 31824 | 0.00877 | 0.06327 | 0.13957 | 429 | 0 | 0 |
| 67 | 31813 | 31819 | 0.00971 | 0.07048 | 0.15372 | 429 | 0 | 0 |

ตาราง ก.3.3 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้าภาคใต้ของประเทศไทย

| สายส่ง ที่ | จากบัส | ถึงบัส | r (pu) | x (pu) | b (pu) | rating (MVA) | ratio (pu) | angle (deg) |
|---------------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------------|---------------|----------------|
| 68 | 31813 | 31819 | 0.00971 | 0.07048 | 0.15372 | 429 | 0 | 0 |
| 69 | 31813 | 31838 | 0.00762 | 0.05519 | 0.12066 | 429 | 0 | 0 |
| 70 | 31813 | 31838 | 0.00762 | 0.05519 | 0.12066 | 429 | 0 | 0 |
| 71 | 31814 | 31840 | 0.01031 | 0.10941 | 0.45164 | 858 | 0 | 0 |
| 72 | 31814 | 31840 | 0.01031 | 0.10941 | 0.45164 | 858 | 0 | 0 |
| 73 | 31814 | 31843 | 0.01215 | 0.08775 | 0.19412 | 429 | 0 | 0 |
| 74 | 31814 | 31843 | 0.01215 | 0.08775 | 0.19412 | 429 | 0 | 0 |
| 75 | 31816 | 31840 | 0.00965 | 0.06962 | 0.15376 | 429 | 0 | 0 |
| 76 | 31816 | 31840 | 0.00965 | 0.06962 | 0.15376 | 429 | 0 | 0 |
| 77 | 31819 | 31824 | 0.00892 | 0.06472 | 0.14110 | 429 | 0 | 0 |
| 78 | 31819 | 31824 | 0.00892 | 0.06472 | 0.14110 | 429 | 0 | 0 |
| 79 | 31819 | 31840 | 0.00539 | 0.03880 | 0.08554 | 429 | 0 | 0 |
| 80 | 31819 | 31840 | 0.00539 | 0.03880 | 0.08554 | 429 | 0 | 0 |
| 81 | 31828 | 31838 | 0.00512 | 0.03688 | 0.08123 | 429 | 0 | 0 |
| 82 | 31828 | 31838 | 0.00512 | 0.03688 | 0.08123 | 429 | 0 | 0 |
| 83 | 31838 | 31840 | 0.00606 | 0.06391 | 0.26166 | 858 | 0 | 0 |
| 84 | 31838 | 31840 | 0.00606 | 0.06391 | 0.26166 | 858 | 0 | 0 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอนุวัตร อภิวัดมนานนท์ เกิดวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2544 จากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันเป็นวิศวกรระดับ 4 แผนกวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า กองควบคุมการจ่ายไฟฟ้าฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย