การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อย

APPLICATIONS OF SPARSE MATRIX AND PIECEWISE SOLUTION FOR FAST DECOUPLED LOAD FLOW ANALYSIS

พรสิน ชัยศิริพงศ์

PORNSIN CHAISRIPONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-146-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิค สปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อย

APPLICATIONS OF SPARSE MATRIX AND PIECEWISE SOLUTION FOR FAST DECOUPLED LOAD FLOW ANALYSIS

พรสิน ชัยศิริพงศ์

PORNSIN CHAISIRIPONG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 45653
วัน, เดือน, ปี 12 ก.พ. 2546

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-324-146-9

APPLICATIONS OF SPARSE MATRIX AND PIECEWISE SOLUTION FOR FAST DECOUPLED LOAD FLOW ANALYSIS

PORNSIN CHAISIRIPONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEER IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKABANG

2002

ISBN 974-324-146-9

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อย
นักศึกษา	นายพรสิน ชัยศิริพงศ์
รหัสประจำตัว	42061108
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อย ตัวโปรแกรมที่ใช้เขียนด้วยภาษาแมทแลป ลักษณะการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์ ด้วยวิธีนี้คือ จากระบบไฟฟ้ากำลัง เราจะทำการแบ่งส่วนของระบบทั้งหมดออกเป็นระบบย่อยๆ จากนั้นทำการคำนวณหาผลลัพธ์ของทุกๆส่วนย่อย แล้วนำผลลัพธ์ของส่วนย่อยทั้งหมดมารวมเข้าด้วยกัน และได้มีการนำเอาฟังก์ชั่นสปาซเมตริกซ์มาประยุกต์ใช้กับเทคนิคนี้ ผลที่ได้มีลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบ และเหมือนกันกับระบบที่ไม่ได้แบ่งส่วน นอกจากนั้นมันยังสามารถลดการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บเมตริกต์ของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่.

Thesis Title	Applications of Sparse Matrix and Piecewise Solution for Fast Decoupled Load Flow Analysis
Student	Mr.Pornsin Chaisiripong
Student ID.	42061108
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Monthon Leelachindakaileark

ABSTRACT

The research presented in this thesis concerns a method for applications of Sparse Matrix and Piecewise Solution for Fast Decoupled Load Flow Analysis. The developed program is written using MATLAB. The method is suitable for a large-scale power system.The system is torn into a number of subdivisions that are solved separately. The results are combined to yield the solution of the total system together with the correction factors to obtain the proper values because Sparse Matrices is applied in process of this technique. The result has the same convergence characteristics and gives the same solution similar to that the system has never been torn . Moreover, the technique can reduce the storing matrix memory in the large sized Electric Power System.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยได้รับคำแนะนำจากท่านรองศาสตราจารย์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ รศ. ศิริวัฒน์ โพธิกุล ดร.อานันทวัฒน์ คุณากร ดร.สมชาติ จิริวิภากร ตลอดคณาจารย์ทุกท่านที่ได้แนะนำปัญหา ข้อผิดพลาดและข้อคิดเห็นในการปรับปรุงวิจัยเพิ่มเติมซึ่งเป็นประโยชน์และการเรียนรู้ในการพัฒนาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

และสุดท้ายขอขอบคุณ พระคุณบิดา และมารดา อาจารย์ วีรพล และ รอ.ฉัตรชัย ชัยศิริพงศ์และครอบครัว คุณดวงใจ ภู่วิจิตรที่ได้คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือทุกๆด้านต่อการศึกษา

พรสิน ชัยศิริพงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VI

สารบัญรูป.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....1

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....1

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....2

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....2

1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....2

บทที่ 2 การประยุกต์ใช้วิธีการแยกส่วนย่อยในระบบไฟฟ้ากำลัง.....4

2.1 บทนำ.....4

2.2 การเพิ่มและปลดสายส่งหลายๆสายส่งออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง.....4

2.3 การหาผลลัพธ์แบบแยกส่วนย่อย.....9

2.3.1 ขั้นตอนในการหา Z_4.....14

2.3.2 ตัวอย่างในการหาผลลัพธ์.....18

บทที่ 3 การวิเคราะห์โหลดโฟลว์.....23

3.1 บทนำ.....23

3.2 ปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้า.....23

3.3 การสร้างบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์.....28

3.3.1 สายส่งไฟฟ้า.....28

3.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า.....29

3.3.3 ชันท์อิลิเมนต์.....34

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4 การคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน ราฟสัน.....34

3.4.1 การประยุกต์วิธีนิวตัน ราฟสัน ในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์.....36

3.5 การคำนวนโหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล 38

3.5.1 ข้อกำหนดในการหา $[B']$ และ $[B'']$.....41

บทที่ 4 การประยุกต์ใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....43

4.1 บทนำ.....43

4.2 การเก็บบันทึกค่า nodal self admittance และ mutual admittance.....43

4.3 วิธีการการเทคนิคสปาซเมตริกซ์ นำไปใช้.....45

4.4 การนำเทคนิคสปาซเมตริกซ์ใช้ในวิเคราะห์ โหลดโฟลว์..... 48

4.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 52

บทที่ 5 บันทึกและแสดงผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง.....60

5.1 บทนำ.....60

5.2 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง.....60

5.2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส.....61

5.2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส.....66

5.2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส.....73

5.3 การทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์.....86

5.4 ทดสอบบ่ระสิทธิภาพการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่.....88

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....93

6.1 สรุปผลการทดลอง.....93

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....94

เอกสารอ้างอิง.....95

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ข้อมูลของระบบทดสอบการคำนวณโหลดโฟลว์ของระบบไฟฟ้ากำลัง.....96

ภาคผนวกข. ข้อควรระวังในการดัทลาย.....111

ภาคผนวกค. การเตรียมข้อมูลลงใน busdata และ linedata.....115

ภาคผนวกง. แผนผังแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมของโปรแกรม.....118

ภาคผนวกจ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....146

ประวัติผู้เขียน.....154

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 สรุปปัญหาโหลดโฟลว์.....28

4.1 ข้อมูลตัวอย่างสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 14บัส 20สายส่งแบบเปอร์ยูนิต.....45

5.1 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดัน ที่ได้จาก SPF เทียบกับแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 6 บัส.....63

5.2 แสดงค่าผิดพลาดของมุม ที่ได้ SPFเทียบกับ มุมที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้า กำลังIEEE 6 บัส 64

5.3 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส.....65

5.4 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ ที่ได้จากวิธีนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 6 บัส.....65

5.5 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดันที่ได้จาก SPF เทียบกับแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส.....69

5.6 แสดงค่าผิดพลาดของมุม ที่ได้จาก SPF เทียบกับมุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส.....70

5.7 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส.....72

5.8 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ ที่ได้จากวิธีนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส.....72

5.9 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดันที่ได้จาก SPF เทียบกับแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 1.....75

5.10 แสดงค่าผิดพลาดของมุม ที่ได้จาก SPFเทียบกับ มุมที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 1.....77

5.11 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดันที่ได้จาก SPF เทียบกับแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 2.....80

5.12 แสดงค่าผิดพลาดของมุมที่ได้จาก SPF เทียบกับมุมที่ได้จาก นิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 2.....82

5.13 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ ที่ได้จาก SPF ของระบบไฟฟ้า.....84

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.14 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ ที่ได้จากวิธีนิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัส.....84

5.15 ค่าของเวลา ,จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 6 บัส 86

5.16 ค่าของเวลา ,จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 14 บัส.....86

5.17 ค่าของเวลา ,จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 30 บัสแบบที่ 1.....86

5.18 ค่าของเวลา ,จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 30 บัสแบบที่ 2.....86

ผ.5.1 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส.....97

ผ.5.2 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส 97

ผ.5.3 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส 98

ผ.5.4 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส.....99

ผ.5.5 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส.....100

ผ.5.6 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส.....101

ผ.5.7 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส.....104

ผ.5.8 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส.....107

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ระบบเริ่มต้นที่มีแรงดันที่บัสเป็น ($V_1, V_2, \ldots V_N$) และกระแสที่ไหลเข้าบัสเป็น($I_1, I_2, \ldots I_N$).....5

2.2 ระบบเริ่มต้นที่เปลี่ยนแรงดันบัสจาก V_i เป็น V_i โดย (ก) เพิ่มอิมพีแดนซ์ Z_a และ Z_b เข้าระบบหรือ (ข) โดยสมมติกระแสชดเชยไหลเข้าที่บัส.....6

2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง 9 บัส 12สายส่ง.....9

2.4 แสดงกระแสและแรงดันระหว่างระบบทั้งสองที่ถูกแบ่ง.....10

2.5 แสดงแรงดัน และกระแสชดเชย ของระบบย่อย.....10

2.6 แสดงระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส.....15

2.7 ระบบไฟฟ้ากำลังหลังแบ่งโซน.....15

2.8 แสดงการสมมุติทิศทางกระแสคัทลายหลังแบ่งโซน.....16

2.9 แสดงข่ายวงจรซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 ระบบย่อย.....18

3.1 (ก) แอกทีฟเพาเวอร์ และ (ข) รีแอกทีฟเพาเวอร์ที่บัส i สำหรับการศึกษาโหลดโฟลว์.....25

3.2 วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง.....29

3.3 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติ.....30

3.4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า.....30

3.5 วงจรสมมูลพายของหม้อแปลงไฟฟ้า.....33

3.6 ระบบเครือข่ายเริ่มต้น.....41

3.7 เครือข่าย B' 41

3.8 เครือข่าย B'' 42

4.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง 4 บัส 4 สายส่ง.....44

4.2 ลักษณะการบันทึกของ self และ mutual admittance ซึ่งจะต้องใช้ core storage เท่ากับ 8 word.....44

4.3 ลักษณะการบันทึกของ self และ mutual admittance แบบ two dimension array.....45

4.4 ลักษณะการบันทึกของ self admittance ซึ่ง core storage จะแปรผันตามจำนวนบัส และ mutual admittanceซึ่ง core storage จะแปรผันตามจำนวนสายส่ง.....48

4.5 แสดงความสัมพันธ์ ของ self และ mutual admittance ด้วยวิธีสปาซเมตริกซ์ ในการสร้าง $[B']$ และ $[B'']$.....50

4.6 แผนผังโปรแกรมการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ลโดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อย.....53

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส.....61

5.2 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส.....61

5.3 บันทึกผลการคำนวณ mutual admittance และ self admittance ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส.....62

5.4 เปรียบเทียบแรงดัน ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และSPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส.....63

5.5 เปรียบเทียบมุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส.....64

5.6 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส.....66

5.7 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส.....67

5.8 บันทึกผลการคำนวณ mutual admittance ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส.....68

5.9 บันทึกผลการคำนวณ self admittance ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส.....68

5.10 เปรียบเทียบแรงดัน ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และSPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส...70

5.11 เปรียบเทียบมุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และSPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส.....71

5.12 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส.....73

5.13 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 1.....74

5.14 เปรียบเทียบแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสันและ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 1.....76

5.15 เปรียบเทียบมุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE30 บัส แบบที่ 1.....78

5.16 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 2.....79

5.17 เปรียบเทียบแรงดัน ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 2.....81

5.18 เปรียบเทียบมุมที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบทดสอบIEEE 30 บัส แบบที่ 2.....83

5.19 แสดงหน่วยความจำทั้งหมดในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตันราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส.....85

5.20 แสดงหน่วยความจำทั้งหมดที่ได้จาก SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 2.....85

5.21 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส.....88

5.22 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส.....89

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.23 แสดงผลการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วย SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส.....90

5.24 แสดงผลการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส.....91

5.25 แสดงผลการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสต์ดีคัปเบิ้ล ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส.....92

ผ.5.1 แสดงการคัทลายในการตัดบัส อิสระออก.....112

ผ.5.2 แสดงการคัทลายบัสส่ง หรือบัสรับบัสใดบัสหนึ่งไม่ได้เชื่อมโยงเข้ากับบัสอื่น.....113

ผ.5.3 แสดงการคัทลายในการตัดบัสออกนอกระบบ.....114

ผ.5.4 แผนผังแสดงการหาตัวนับบัสในแต่ละระบบย่อย.....119

ผ.5.5 แผนผังแสดงการจัดข้อมูลบัสให้อยู่ในระบบบัสย่อยเดียวกัน.....120

ผ.5.6 แผนผังแสดงการหา self admittance.....122

ผ.5.7 แผนผังแสดงการหาจำนวนบัสที่ไม่มีบัสแสลก (NB1)และตัวนับบัสโหลด(NB2).....124

ผ.5.8 แผนผังแสดงการหาตัวนับคัทลาย บัสส่ง และ บัสรับ ของสายคัทลาย.....126

ผ.5.9 แผนผังแสดงการบันทึก self admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B' 127

ผ.5.10 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B' 129

ผ.5.11 แผนผังแสดงการบันทึก self admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B'' 132

ผ.5.12 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B'' 134

ผ.5.13 แผนผังแสดงการหา Z_2 จาก B' 137

ผ.5.14 แผนผังแสดงการหา Z_2 จาก B'' 139

ผ.5.15 แผนผังแสดงการหา Z_4 จาก B' 141

ผ.5.16 แผนผังแสดงการหา NELของ สายคัทลาย.....143

ผ.5.17 แผนผังแสดงการรวมสายคัทลายลงใน Z_4 ตามแนวทแยงมุม.....145

บทที่1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการใช้ไฟฟ้ามีอัตราเพิ่มสูงขึ้นมาก จึงต้องมีการขยายเครือข่ายของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม การวิเคราะห์โหลดโฟลว์จึงมีส่วนสำคัญในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อใช้ในการวางแผนการเพิ่มระบบขึ้นมาใหม่ เพิ่มเติมระบบใหม่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเก่า หรือช่วยในการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้ากำลัง

คอมพิวเตอร์จัดเป็นส่วนหนึ่งที่อำนวยความสะดวกที่สุดในการคิดคำนวณโหลดโฟลว์ได้มีการพัฒนาหลายๆเทคนิคในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ไม่ว่า การใช้วิธีของเกาส์ ไซเดิล วิธีนิวตันราฟสัน และพัฒนาไปสู่เทคนิคการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ในการคำนวณโหลดโฟลว์ การคำนวณโหลดโฟลว์แบบวิธีแยกส่วนย่อย จัดเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ที่มีขนาดใหญ่ [1.2.3] ช่วยลดจาโคเบียนของเมตริกซ์ ให้เล็กลง แต่ก็มีจุดอ่อนที่ยังมิได้มีการแก้ไขแม้ปัจจุบัน คือในส่วนของการหาแอดมิแตนท์เมตริกซ์ ยังนิยมใช้จัดเก็บเมตริกซ์แบบ อะเรย์สองมิติ nxn ซึ่งเป็นเมตริกซ์จตุรัส ทำให้ หน่วยความจำในการจัดเก็บเมตริกซ์มีขนาดใหญ่แม้จะแยกส่วนย่อยแล้วก็ตาม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้เพื่อนำวิธีสปาซเมตริกซ์ และวิธีการแยกส่วนย่อย มาใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ลอันเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคในการคำนวณโหลดโฟลว์แบบเก่า

1.3 สมมุติฐานในการศึกษา

สำหรับสมมติฐานของการศึกษาจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อใหญ่

1. การนำเทคนิคสปาซเมตริกซ์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคฟาสต์ดีคัปเปิ้ล เพื่อใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อย น่าจะช่วยลดขนาดการจัดเก็บหน่วยความจำของแอดมิแตนท์เมตริกซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ผลของการหาโหลดโฟลว์ที่ได้จากการนำเทคนิคสปาซเมตริกซ์ และเทคนิคฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ในการคำนวณโหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยจะมีลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบเหมือนกันกับระบบที่ไม่ได้แบ่งส่วน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย

เป็นการนำวิธีสปาซเมตริกซ์ด้วยวิธีจัดเก็บแอดมิแตนท์แบบอะเรย์ 1 มิติ มาจัดเก็บแอดมิแตนท์ซึ่งแบบเดิมที่นิยมจัดเก็บแอดมิแตนท์ในรูปเมตริกซ์2มิติ เพื่อคำนวณในส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน และคำนวณหาจาโคเบียนเมตริกซ์ ซึ่งถ้าเป็นในส่วนของฟาสดีคัปเปิลก็คือ B' และ B'' วิธีสปาซเมตริกซ์แบบอะเรย์ 1มิติ จะใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บน้อยกว่า และยังสามารถที่จะใช้ในการหา B' และ B'' โดยไม่ต้องใช้แอดมิแตนท์แบบอะเรย์2 มิติ เนื่องจากการแบ่งส่วนย่อยและฟาสต์ดีคัปเปิ้ล จะช่วยในการลดจาโคเบียนเมตริกซ์ แต่มิได้ลดในส่วนของแอดมิแตนท์ ดังนั้น สปาซเมตริกซ์แบบอะเรย์1มิติจึงมีประโยชน์มากที่จะนำมาใช้กับวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล แบบแยกส่วนย่อย

1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ โดยเลือกเทคนิคสปาซเมตริกซ์มาใช้ในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ และนำแอดมิแตนท์ที่ได้ มาคำนวณโหลดโฟลว์ แบบแยกส่วนย่อย รวมถึงการสร้างจาโคเบียน เพื่อใช้กับวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ค่าที่ได้จากเทคนิคฟาสต์ดีคัปเปิ้ลจะเข้าสู่ขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีการแยกส่วนย่อย จากนั้นจะทดสอบความแม่นยำในการคำนวณโดยเปรียบเทียบกับโปรแกรมการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตัน ราฟสัน ทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมด้าน เวลา, จำนวนรอบ และหน่วยความจำทั้งหมด โดยทดสอบกับโปรแกรมการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตัน ราฟสัน, ฟาสต์ดีคัปเปิ้ล และทดสอบการนำมาใช้คำนวณระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส [4]

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อย โดยมีรายละเอียดแบ่งเป็น 6 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา แนวความคิดที่ใช้ในการแก้ปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตการวิจัย

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธีการแยกส่วนย่อยในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยในบทนี้จะแสดงถึงที่มาของสมการการแยกส่วนย่อย การหาเมตริกซ์ตัวเชื่อมที่ได้จากการดัทลายเพื่อใช้ในการหาผลลัพธ์

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้า การสร้างบัสแอดมิแตนซ์เมริกซ์ การวิเคราะโหลดโฟลว์แบบนิวตันราฟสัน และแสดงถึงที่มาของทฤษฎีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการบันทึก self admittance และ mutual admittance ด้วยการใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ คือการจัดเก็บ mutual admittanceเป็นแบบเมตริกซ์อะเรย์ 1 มิติ และหาค่า self admittance จาก mutual admittance โดยยังคงจัดเก็บเป็นเมตริกซ์อะเรย์ 1 มิติเช่นกันจากนั้น เป็นการประยุกต์เทคนิคสปาซเมตริกซ์เข้ากับเทคนิคฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยแสดงถึงการหา mutual admittance และ self admittance และนำค่าที่ได้ มาหา B' และ B'' และได้แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม โดยนำเทคนิคสปาซเมตริกซ์ใช้ในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ โดยเริ่มจากการหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน ที่ได้จากขั้นตอนการแยกส่วนย่อยแล้ว เข้าสู่การใช้เทคนิคฟาสต์ดีคัปเปิ้ล เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์และได้แสดงถึงแผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในบทนี้

บทที่ 5 ได้แสดงถึงผลการวิจัย และผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทดสอบ 3 ขั้นตอน คือทดสอบความถูกต้อง ทดสอบประสิทธิภาพ และทดสอบการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 57 บัสเปรียบเทียบกับโปรแกรมนิวตันราฟสัน และฟาสต์ดีคัปเปิ้ล

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะต่างๆ

และในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์คือภาคผนวก

บทที่ 2
การประยุกต์ใช้วิธีการแยกส่วนย่อยในระบบไฟฟ้ากำลัง

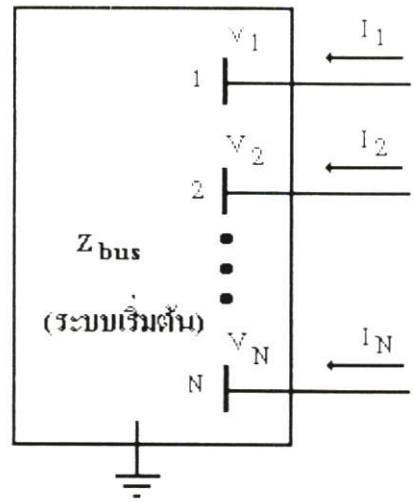
2.1 บทนำ

ในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบธรรมดา จะใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บหน่วยความจำมากไปกับในส่วนของจาโคเบียนเมตริกซ์ แต่ถ้าเราแยกระบบทีละระบบมาทำการวิเคราะห์โหลดโฟลว์จะช่วยให้สามารถลดขนาดการจัดเก็บจาโคเบียนเมตริกซ์ได้ดีกว่า ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอวิธีการหาผลลัพธ์แบบแยกส่วนย่อย โดยจะแสดงถึงที่มาของสมการการแยกส่วนย่อยโดยอาศัยความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่สัมพันธ์กับสายส่งซึ่งเป็นตัวเชื่อมโยงกันของระบบที่ถูกแยกออกดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

2.2 การเพิ่มและปลดสายส่งหลายๆสายส่งออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง [5]

ในการเพิ่มหรือปลดหลายๆสายส่งจากระบบนั้นๆ ไม่จำเป็นที่จะต้องปรับปรุง Z_{bus} ใหม่ เพราะจะทำให้เสียเวลามากในกรณีที่สนใจเพียงแรงดันที่เปลี่ยนแปลงและกระแสที่ไหลในสายส่งเท่านั้น จะใช้วิธีพิจารณากระแสชดเชยซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วมาก ตัวอย่างเช่นกำหนดระบบเริ่มต้นใดๆขึ้นมา เมื่อพิจารณาแบบต่อเฟสพื้นฐานจะได้สมการคือ

$$
\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_m \\ V_n \\ V_p \\ V_q \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}
=
\begin{array}{c} \\ 1 \\ \vdots \\ m \\ n \\ p \\ q \\ \vdots \\ N \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{ccccccccc} 1 & & m & n & p & q & & N \end{array} \\
\begin{bmatrix}
Z_{11} & \cdots & Z_{1m} & Z_{1n} & Z_{1p} & Z_{1q} & \cdots & Z_{1N} \\
\vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
Z_{m1} & \cdots & Z_{mm} & Z_{mn} & Z_{mp} & Z_{mq} & \cdots & Z_{mN} \\
Z_{n1} & \cdots & Z_{nm} & Z_{nn} & Z_{np} & Z_{nq} & \cdots & Z_{nN} \\
Z_{p1} & \cdots & Z_{pm} & Z_{pn} & Z_{pp} & Z_{pq} & \cdots & Z_{pN} \\
Z_{q1} & \cdots & Z_{qm} & Z_{qn} & Z_{qp} & Z_{qq} & \cdots & Z_{qN} \\
\vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
Z_{N1} & \cdots & Z_{Nm} & Z_{Nn} & Z_{Np} & Z_{Nq} & \cdots & Z_{NN}
\end{bmatrix}
\end{array}
\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \\ I_n \\ I_p \\ I_q \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix}
\tag{2.1}
$$



รูปที่ 2.1 ระบบเริ่มต้นที่มีแรงดันที่บัสเป็น ($V_1, V_2, \ldots V_N$) และกระแสที่ไหลเข้าบัสเป็น ($I_1, I_2, \ldots I_N$)

จากรูปที่ 2.1 เราได้สมมติแรงดันบัส $V_1, V_2, \ldots V_N$ ในระบบเริ่มต้น (ปราศจาก Z_a และ Z_b) โดยทราบค่ากระแส($I_1, I_2, \ldots I_N$) เมื่อเพิ่ม Z_a และ Z_b เข้าไประหว่างบัส m-n และ p-q ตามลำดับดังรูปที่ 2.2 จะได้แรงดันใหม่ที่บัส คือ V เพราะฉะนั้นแรงดันที่เปลี่ยนแปลงของบัส k คือ

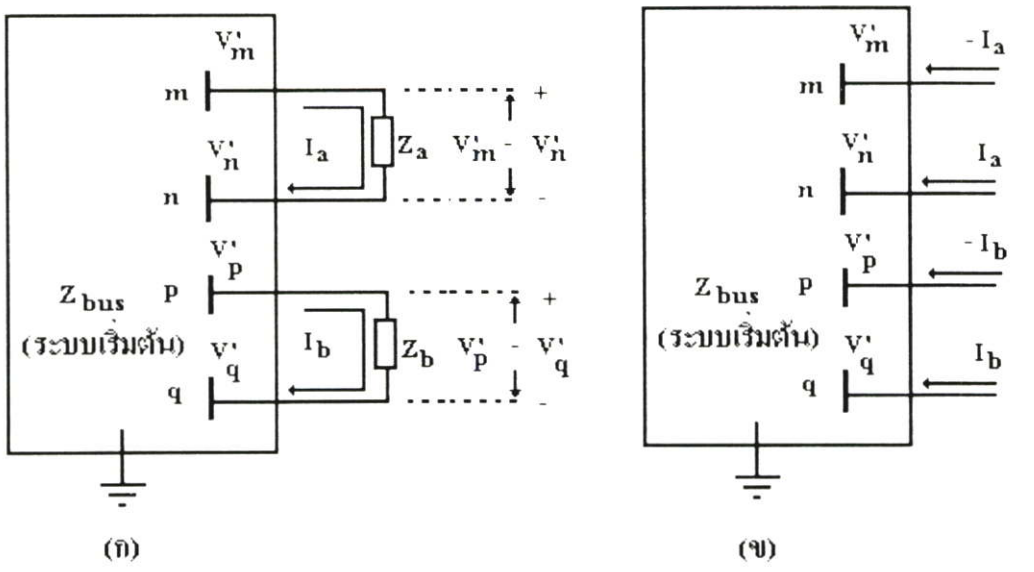
$$\Delta V_k = V_k' - V_k \tag{2.2}$$

เมื่อ V_k' = แรงดันที่บัส k เมื่อเพิ่ม Z_a และ Z_b เข้าไประหว่างบัส m-n และ p-q แล้ว

V_k = แรงดันที่บัส k ของระบบเริ่มต้น

กระแส I_a และ I_b ที่ไหลผ่าน Z_a และ Z_b มีความสัมพันธ์กับแรงดันใหม่ที่บัส คือ

$$Z_a I_a = V_m' - V_n' \,,\; Z_b I_b = V_p' - V_q' \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.2 ระบบเริ่มต้นที่เปลี่ยนแรงดันบัสจาก V_i เป็น V_i' โดย (ก) เพิ่มอิมพีแดนซ์ Z_a และ Z_b เข้าระบบหรือ (ข)โดยสมมติกระแสชดเชยไหลเข้าที่บัส

จากสมการ(2.3) สามารถเขียนในรูปเวคเตอร์ เมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Z_a & 0 \\ 0 & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{matrix} \\ a \\ b \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & \cdots & m & n & p & q & \cdots & N \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} V_1' \\ \vdots \\ V_m' \\ V_n' \\ V_p' \\ V_q' \\ \vdots \\ V_N' \end{bmatrix} = A_c V' \tag{2.4}$$

จากสมการ (2.4) จะได้

$$\begin{bmatrix} I_a Z_a \\ I_b Z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m' - V_n' \\ V_p' - V_q' \end{bmatrix} = A_c V' \tag{2.5}$$

เมื่อ A_c คือ ทิศทางกระแสจาก branch ถึง node โดยที่

ถ้ากระแสไหลออกจากโหนด ค่าสมาชิกให้มีค่าเป็น +1

ถ้ากระแสไหลเข้าหาโหนด ค่าสมาชิกให้มีค่าเป็น -1

ถ้ากระแสไหลไม่เกี่ยวข้องกับโหนดเลย ค่าสมาชิกให้มีค่าเป็น 0

กระแส I_a และ I_b จะทำให้แรงดันที่บัสของระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยมี

กระแส $-I_a$ ไหลเข้าที่บัส m และ $+I_a$ ไหลเข้าที่บัส n

กระแส $-I_b$ ไหลเข้าที่บัส p และ $+I_b$ ไหลเข้าที่บัส q ดังรูปที่ 2.2 (ข)

กระแสเหล่านี้เรียกว่า กระแสชดเชย และจะมีผลทำให้เกิดแรงดันใหม่ที่บัส คือ $(V_1', V_2', \ldots, V_N')$ และสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$I_{comp} = \begin{matrix} \\ 1 \\ \vdots \\ m \\ n \\ p \\ q \\ \vdots \\ N \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_a \\ I_a \\ -I_b \\ I_b \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{matrix} \\ 1 \\ \vdots \\ m \\ n \\ p \\ q \\ \vdots \\ N \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} a & b \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = -A_c^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \qquad (2.6)$$

หาแรงดันใหม่ที่บัส V ได้จาก

$$V' = V - Z_{bus} I_{comp} \qquad (2.7)$$

แทนค่าสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.7) จะได้

$$V' = V - Z_{bus} A_C^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \qquad (2.8)$$

หาค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละบัส ได้จาก

$$\Delta V = V' - V \qquad (2.9)$$

แทนค่าสมการ (2.8) ลงในสมการ (2.9) จะได้

$$\Delta V = -Z_{bus} A_C^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \qquad (2.10)$$

การหา ΔV สามารถหาได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 จากสมการที่ (2.4) และ (2.8)

$$\begin{bmatrix} Z_a & 0 \\ 0 & Z_b \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = A_C V - A_C Z_{bus} A_C^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

ขั้นที่ 2 จากสมการที่ (2.11) จะได้

$$\underbrace{\left(\begin{bmatrix} Z_a & 0 \\ 0 & Z_b \end{bmatrix} + A_c Z_{bus} A_c^T \right)}_{Z} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = A_c V = \begin{bmatrix} V_m - V_n \\ V_p - V_q \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

เมื่อ Z คือ ลูปอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

จากสมการที่ (2.12)กระแส I_a และ I_b หาจาก

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = Z^{-1} A_C V = Z^{-1} \begin{bmatrix} V_m - V_n \\ V_p - V_q \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

เมื่อ $V_m - V_n$ และ $V_p - V_q$ เป็น 0pen circuit voltage drop ระหว่าง บัส m – n และ p – q ในระบบเริ่มต้นใน branch impedances Z_a และ Z_b ดังในรูปที่ 2.2 (ก)

หาเมตริกซ์ Z ในสมการที่ (2.12)

$$A_c Z_{bus} A_c^T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} m \\ n \\ p \\ q \end{matrix} \begin{bmatrix} Z_{mm} & Z_{mn} & Z_{mp} & Z_{mq} \\ Z_{nm} & Z_{nn} & Z_{np} & Z_{nq} \\ Z_{pm} & Z_{pn} & Z_{pp} & Z_{pq} \\ Z_{qm} & Z_{qn} & Z_{qp} & Z_{qq} \end{bmatrix} \begin{matrix} a & b \\ \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

หรือเขียนในรูปเมตริกซ์ใหม่ ได้ว่า

$$A_c Z_{bus} A_c^T = \begin{array}{c} \\ a \\ b \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cc} a & b \end{array} \\ \left[\begin{array}{c|c} (Z_{mm} - Z_{mn}) - (Z_{nm} - Z_{nn}) & (Z_{mp} - Z_{mq}) - (Z_{np} - Z_{nq}) \\ \hline (Z_{pm} - Z_{pn}) - (Z_{qm} - Z_{qn}) & (Z_{pp} - Z_{pq}) - (Z_{qp} - Z_{qq}) \end{array}\right] \end{array} \tag{2.15}$$

แทนสมการ (2.15) ลงในสมการ (2.12) จะได้

$$\underbrace{\begin{array}{c} \\ a \\ b \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cc} a & b \end{array} \\ \left[\begin{array}{c|c} (Z_{mm} - Z_{mn}) - (Z_{nm} - Z_{nn}) + Z_a & (Z_{mp} - Z_{mq}) - (Z_{np} - Z_{nq}) \\ \hline (Z_{pm} - Z_{pn}) - (Z_{qm} - Z_{qn}) & (Z_{pp} - Z_{pq}) - (Z_{qp} - Z_{qq}) + Z_b \end{array}\right] \end{array}}_{Z} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m - V_n \\ V_p - V_q \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

ดังนั้น จากสมการ (2.16) หาค่าสมาชิกของเมตริกซ์ Z หาได้จาก

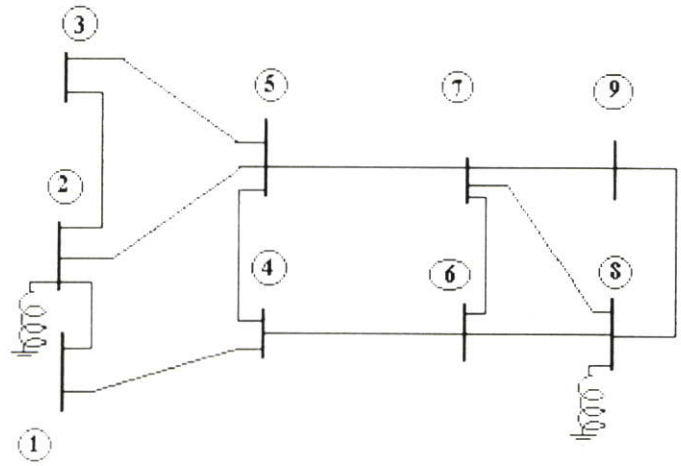
Z_{aa}คือ(แถวที่ m – แถวที่ n) ของ $Z_{bus}^{(m-n)} + Z_a$

Z_{ab}คือ(แถวที่ m – แถวที่ n) ของ $Z_{bus}^{(p-q)}$

Z_{ba}คือ(แถวที่ p – แถวที่ q) ของ $Z_{bus}^{(m-n)}$

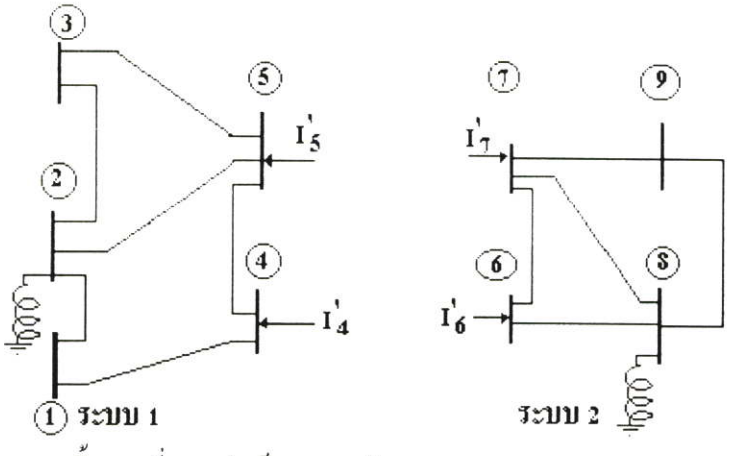
Z_{bb}คือ(แถวที่ p – แถวที่ q) ของ $Z_{bus}^{(p-q)} + Z_b$

2.3 การหาผลลัพธ์แบบแยกส่วนย่อย

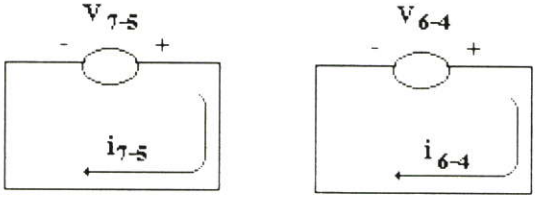


รูปที่ 2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง 9 บัส 12สายส่ง

จากหัวข้อ 2.2 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาผลลัพธ์แบบแยกส่วนย่อยดังนี้คือ จากรูปที่ 2.3 ระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย9บัส 12 สายส่งเมื่อแยกระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็นสองระบบย่อย คือระบบย่อยระบบที่1 และระบบย่อยระบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงระบบทั้งสองที่ถูกแบ่งเป็นระบบย่อย



รูปที่ 2.5 แสดงแรงดัน และกระแสชดเชย ของระบบย่อย

จากรูปที่2.5 สามารถเขียนสมการในรูปเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของระบบย่อยกับกระแสที่ถูกแยกออก ได้คือ

$$I'_5 = +i_{7-5}$$
$$I'_4 = +i_{6-4}$$
$$I'_7 = -i_{7-5}$$
$$I'_6 = -i_{6-4}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างบัสอื่นๆที่ไม่ได้ถูกแบ่ง กับ บัสที่ถูกแบ่ง สามารถจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ได้คือ

$$\begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ I'_3 \\ I'_4 \\ I'_5 \\ I'_6 \\ I'_7 \\ I'_8 \\ I'_9 \end{bmatrix} = \begin{matrix} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} 7\text{-}5 & 6\text{-}4 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} & \\ & \\ & \\ & 1 \\ 1 & \\ & -1 \\ -1 & \\ & \\ & \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ i_{7\text{-}5} \\ i_{6\text{-}4} \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \tag{2.17}$$

หรือเขียนสมการในรูปทั่วไปได้คือ

$$I'_A = A_C i_C \tag{2.18}$$

โดยที่ A_Cแสดงทิศทางกระแสคัทลายเทียบกับทิศทางกระแสของระบบ

และจากรูป 2.5เช่นเดียวกัน สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดแรงดันคร่อมระบบย่อยทั้งสองได้ดังนี้คือ

$$V_{7\text{-}5} = V_7 - V_5$$

$$V_{6\text{-}4} = V_6 - V_4$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{7\text{-}5} \\ V_{6\text{-}4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ & & & -1 & & & 1 & & \\ & & & & & & & & \\ & & & -1 & & & 1 & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \\ V5 \\ V6 \\ V7 \\ V8 \\ V9 \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

หรือสามารถเขียนสมการในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$V_C = -A_C^T V_A \tag{2.20}$$

โดยที่

V_A คือแรงดันคร่อมระบบย่อยที่1 หรือ ระบบย่อยที่ 2

V_C คือแรงดันคร่อมคัทลาย

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในระบบย่อย และแรงดันบัส สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Y_A V_A = I_A + I_A^{'}$$

$$V_A = Z_A I_A + Z_A I_A^{'} \tag{2.21}$$

แทนค่า $I_A^{'}$ จากสมการที่ (2.18) ลงในสมการที่ (2.21)

$$V_A = Z_A I_A + Z_A A_C i_C \tag{2.22}$$

แรงดันและกระแสที่ถูกคัทลาย ระบบทั้งสองสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ว่า

$$\begin{bmatrix} V_{7-5} \\ V_{6-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{75} & 0 \\ 0 & Z_{64} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{7-5} \\ i_{6-4} \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

หรือ เขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$V_C = Z_C i_C \tag{2.24}$$

โดย Z_C คืออิมแดนท์ที่ถูกคัทลาย

แทนสมการที่ (2.24) ลงในสมการที่ (2.20)

$$Z_C i_C = -A_C^T V_A \tag{2.25}$$

แทนสมการที่(2.22) ลงในสมการที่(2.25)

$$A_C^T Z_A I_A + \left[A_C^T Z_A A_C + Z_C\right] i_C = 0 \tag{2.26}$$

จากสมการที่(2.22) และ สมการที่ (2.26) สามารถจัดรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} V_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & Z_A A_C \\ A_C^T Z_A & A_C^T Z_A A_C + Z_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} V_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z1 & Z2 \\ Z3 & Z4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

โดยที่

$$Z_1 = Z_A \quad (2.29)$$

$$Z_2 = Z_A A_C \quad (2.30)$$

$$Z_3 = A_C^T Z_A \quad (2.31)$$

$$Z_4 = A_C^T Z_A A_C + Z_C \quad (2.32)$$

การหา V_A เมื่อรู้ค่า I_A ทำได้โดยเขียนสมการ (2.21) อีกครั้ง คือ

$$V_A = Z_A I_A + Z_A I'_A$$

แทนค่า I_A จากสมการ(2.18) ลงในสมการ (2.21) จะได้

$$V_A = Z_A I_A + Z_A (A_C i_C) \quad (2.33)$$

จากสมการ(2.26) เขียนใหม่เป็น

$$i_C = Z_4^{-1} \left[- A_C^T (Z_A I_A) \right] \quad (2.34)$$

หรือ

$$i_C = Z_4^{-1} \left[- A_C^T (V_A) \right] \quad (2.35)$$

แทนค่าสมการ(2.20) ลงในสมการ (2.35)
จะได้สมการหาที่ใช้หากระแสคัทลายน์

$$i_C = Z_4^{-1} V_C \tag{2.36}$$

แทนสมการ (2.34)ลงในสมการ(2.33) จะได้

$$V_A = Z_A I_A + Z_A\left[A_C\left[Z_4^{-1}\left[-A_C^T\left[Z_A I_A\right]\right]\right]\right] \tag{2.37}$$

จากสมการ (2.37) สามารถเขียนขั้นตอนวิธีการแยกส่วนย่อยจากวงเล็บในสุดได้ดังนี้คือ

1) $V_1^{(0)} = Z_1 I_1$

2) $V_C = -A^T_C V_1^{(0)}$

3) $i_C = Z_4^{-1} V_C$

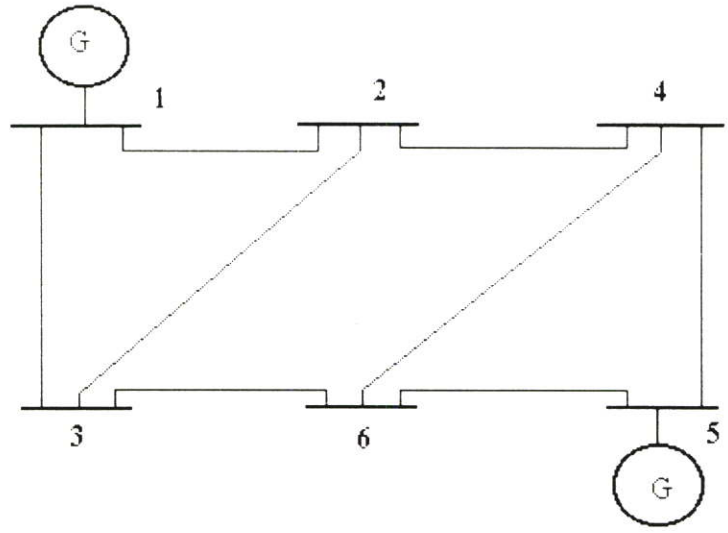
4) $I'_A = A_C i_C$

5) $V_A^{(1)} = Z_A I'_A$

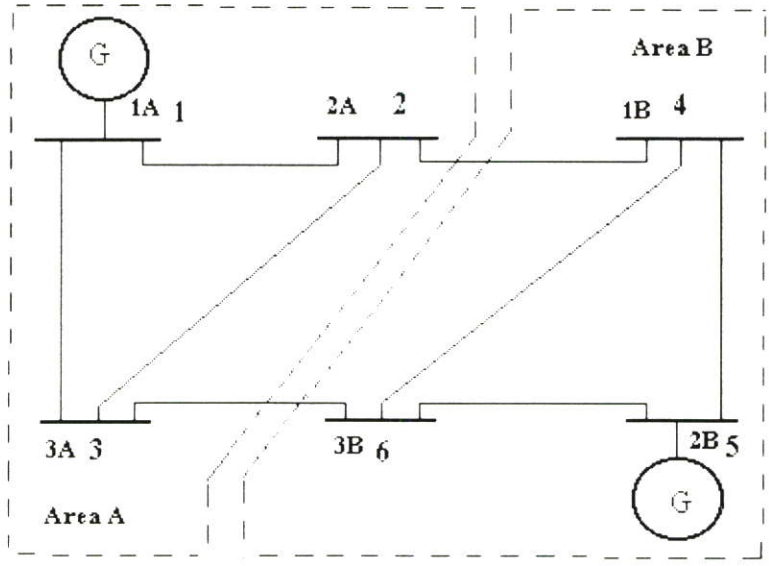
6) $V_1 = V_1^{(0)} - V_1^{(1)}$

2.3.1 ขั้นตอนในการหา Z_4

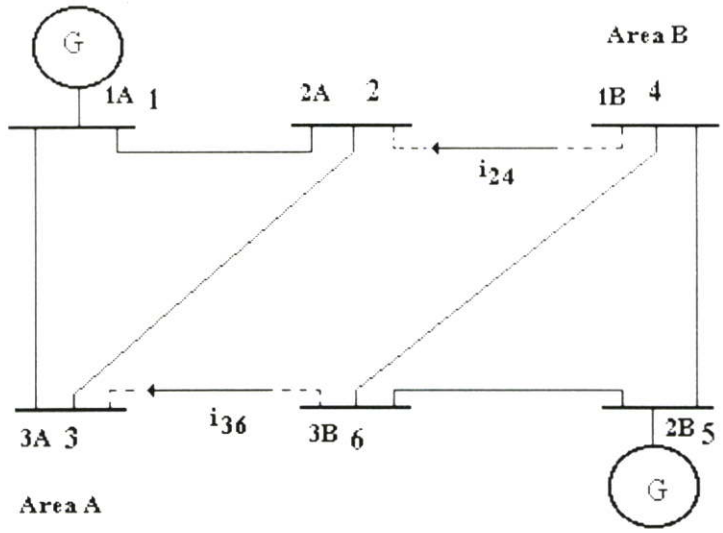
ในการหา Z_4 เราจะเริ่มจากการหา Z_2 โดยจะไม่ใช้การหา จากผลคูณ$Z_1 A_C$ โดยตรง เนื่องจากเมตริกซ์ A_C ซึ่งจะประกอบด้วย 0,1และ-1เท่านั้น แต่จะอาศัยการหาจากทิศทางของกระแสคัทลายน์ จากรูปที่ 2.6 แสดงระบบไฟฟ้ากำลัง 6บัส เราจะแบ่งออกเป็นสองระบบย่อย ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แสดงระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส



รูปที่ 2.7 ระบบไฟฟ้ากำลังหลังแบ่งโซน



รูปที่ 2.8 แสดงการสมมุติทิศทางกระแสคัทลายหลังแบ่งโซน

จากรูปที่ 2.8 สามารถเขียนเมตริกซ์ Z_1 ได้คือ

$$Z_1 = \begin{array}{c|ccc|ccc} & 1A & 2A & 3A & 1B & 2B & 3B \\ \hline 1A & z_{11} & z_{12} & z_{13} & & & \\ 2A & z_{21} & z_{22} & z_{23} & & & \\ 3A & z_{31} & z_{32} & z_{33} & & & \\ \hline 1B & & & & z_{44} & z_{45} & z_{46} \\ 2B & & & & z_{54} & z_{55} & z_{56} \\ 3B & & & & z_{64} & z_{65} & z_{66} \end{array}$$

Z_2 เราจะหาจากทิศทางของกระแสคัทลาย โดยเน้นที่หมายเลขบัสที่เชื่อมระหว่างอิมพีแดนท์ที่คัทลายเป็นหลัก จากรูปที่ 2.8

- สมาชิกแถวตั้ง 2A ลบด้วยสมาชิกแถวตั้ง 1B
- สมาชิกแถวตั้ง 3A ลบด้วยสมาชิกแถวตั้ง 3B

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$Z_2 =$

	2A - 1B	3A - 3B
1A	$z_{12} - 0$	$z_{13} - 0$
2A	$z_{22} - 0$	$z_{23} - 0$
3A	$z_{32} - 0$	$z_{33} - 0$
1B	$0 - z_{44}$	$0 - z_{46}$
2B	$0 - z_{54}$	$0 - z_{56}$
3B	$0 - z_{64}$	$0 - z_{66}$

Z_4 หาจาก Z_2 ด้วยวิธีนี้ คือ

- สมาชิกแถวนอน 2A ลบด้วยสมาชิกแถวนอน 1B
- สมาชิกแถวนอน 3A ลบด้วยสมาชิกแถวนอน 3B

และจากสมการ (2.32)

$$Z_4 = A_C^{-1} Z_A A_C - Z_C$$

โดยที่ Z_C คือ Z_{24} และ Z_{36}

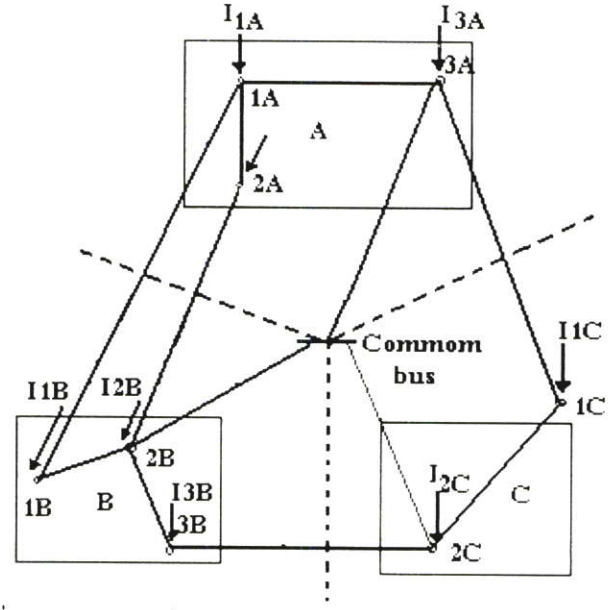
ดังนั้น

$Z_4 =$

	2A - 1B	3A - 3B
2A - 1B	$z_{22} + z_{44} + z_{24}$	$z_{23} + z_{46}$
3A - 3B	$z_{32} + z_{64}$	$z_{33} + z_{66} + z_{36}$

2.3.2 ตัวอย่างในการหาผลลัพธ์[1,2]

การหาผลลัพธ์แบบแยกส่วนย่อย ใช้วิธีการแบ่งวงจรออกเป็นส่วนย่อย แล้วหาผลลัพธ์ นำผลลัพธ์ของส่วนย่อยมารวมกับผลอันเนื่องมาจากการแบ่ง ก็จะได้ผลลัพธ์รวมของข่ายวงจรทั้งหมดซึ่งแสดงวิธีการหาดังนี้



รูปที่ 2.9 แสดงข่ายวงจรซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 ระบบย่อย

ข่ายวงจรในรูปที่ 2.9 แบ่งระบบย่อย ออกเป็น 3 ส่วน เรียกว่า โซน A. B. และ C จากรูปเส้นที่แบ่งโซนจะผ่านบัสอยู่บัสหนึ่งเรียกว่า บัสร่วม (Common Bus) สายที่เชื่อมระหว่างโซนที่ถูกตัดเรียกว่าคัทลายน์ โดยสมมติให้วงจรมีอิมพีแดนซ์ของสายทุกเส้นเป็น 1 pu. กระแสที่ไหลเข้าบัสเป็น 0.5 pu จะได้ผลลัพธ์ของแรงดัน ดังนี้

ก. หาบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ของแต่ละระบบย่อย

$$Z_1 =$$

	1A	2A	3A	1B	2B	3B	1C	2C
1A	2	2	1					
2A	2	3	1					
3A	1	1	1					
1B				2	1	1		
2B				1	1	1		
3B				1	1	2		
1C							2	1
2C							1	1

ข. หาเมตริกซ์ Z_2

Z_2 อาจหาได้จากผลคูณของเมตริกซ์ Z_1A_C ก็ได้ แต่ในที่นี้จะหาโดยไม่ใช้ A_C จะเห็นว่า A_C เป็นเมตริกซ์ที่มีสมาชิกประกอบด้วย 0 , 1 , -1 ดังนั้น Z_2 หรือคูณของ Z_1A_C ประกอบด้วยสมาชิกใน Z_1 โดยกำหนดเครื่องหมายจากทิศทางของคัทลายน์ สมมติคัทลายน์ L_1 เชื่อมระหว่างโซน A และโซนB มีทิศทางจากบัส 1_B ไปบัส 1_A ค่าสมาชิกในแกนตั้ง C_1ของ Z_2 ก็คือ สมาชิกในแถวตั้ง 1_A ลบด้วยสมาชิกในแถวตั้ง 1_Bของ Z_1 สำหรับคัทลายน์อื่นหาได้เช่นเดียวกันดังนี้

Z_2 =

	C_1 1A - 1B	C_2 2B - 2A	C_3 3B - 2A	C_4 1C - 3C
1A	2	-2		-1
2A	2	-3		-1
3A	1	-1		-1
1B	-2	1	1	
2B	-1	1	1	
3B	-1	1	2	
1C			-1	2
2C			-1	1

ค. หาเมตริกซ์ Z_4

Z_4 หาได้จาก Z_2 ด้วยวิธีดังนี้ สมาชิกในแถวนอน C_1 ของ Z_4 เท่ากับ สมาชิกในแถวนอน 1A ลบด้วยสมาชิกในแถวนอน 1B ของ Z_2 สมาชิกในแถวนอน C_2 ของ Z_4 เท่ากับสมาชิกในแถวนอน 2B ลบด้วยสมาชิกในแถวนอน 2A ของ Z_2 สมาชิกในแถวนอน C_3 และ C_4 หาได้เช่นเดียวกัน สำหรับสมาชิกในแนวทะแยงให้บวกเพิ่มด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของคัทลายน์ Z_4 ดังนี้

$Z_4 =$

	C_1 1A - 1B	C_2 2B - 2A	C_3 3B - 2C	C_4 1C - 3A
C_1 1A - 1B	5	-3	-1	-1
C_2 2B - 2A	-3	5	1	1
C_3 3B - 2C	-1	1	4	-1
C_4 1C - 3A	-1	1	-1	4

ง. หาเมตริกซ์ Z_4^{-1}

$Z_4^{-1} =$

	1A - 1B	2B - 2A	3B - 2C	1C - 3A
1A - 1B	0.370370	0.259259	0.037037	0.037037
2B - 2A	0.259259	0.481481	-0.074074	-0.074074
3B - 2C	0.037037	-0.074074	0.303704	0.103704
1C - 3A	0.037037	-0.074074	0.103704	0.303704

จ. หาผลลัพธ์ตามขั้นตอนดังนี้

1. $V_1^{(0)} = Z_1 I_1$

$I_1 = 0.5$

$$V_A^{(0)} = \begin{matrix} 1A \\ 2A \\ 3A \\ 1B \\ 2B \\ 3B \\ 1C \\ 2C \end{matrix} \begin{bmatrix} V_{1A}^{(0)} = 2.5 \\ V_{2A}^{(0)} = 3.0 \\ V_{3A}^{(0)} = 1.5 \\ V_{1B}^{(0)} = 2.0 \\ V_{2B}^{(0)} = 1.5 \\ V_{3B}^{(0)} = 2.0 \\ V_{1C}^{(0)} = 1.5 \\ V_{2C}^{(0)} = 1 \end{bmatrix}$$

2. $V_C = -A^T{}_C V_1^{(0)}$

$$V_C^{(0)} = \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{matrix} \begin{bmatrix} V_{1B}^{(0)} - V_{1A}^{(0)} = -0.5 \\ V_{2A}^{(0)} - V_{2B}^{(0)} = 1.5 \\ V_{2C}^{(0)} - V_{3B}^{(0)} = -1.0 \\ V_{3A}^{(0)} - V_{1C}^{(0)} = 0 \end{bmatrix}$$

3. $i_C = Z_4^{-1} V_C$

$$i_C = \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{matrix} \begin{bmatrix} i_{c1} = 0.1666 \\ i_{c2} = 0.6666 \\ i_{c3} = -0.4333 \\ i_{c4} = -0.2333 \end{bmatrix}$$

4. $I'_A = A_C i_C$

$$I'_A = \begin{matrix} 1A \\ 2A \\ 3A \\ 1B \\ 2B \\ 3B \\ 1C \\ 2C \end{matrix} \begin{bmatrix} I'_{1A} = i_{c1} = 0.1666 \\ I'_{2A} = -i_{c2} = -0.6666 \\ I'_{3A} = -i_{c4} = 0.2333 \\ I'_{1B} = -i_{c1} = -0.1666 \\ I'_{2B} = i_{c2} = 0.6666 \\ I'_{3B} = i_{c3} = -0.4333 \\ I'_{1C} = i_{c4} = -0.2333 \\ I'_{2C} = -i_{c3} = 0.4333 \end{bmatrix}$$

5. $V_A^{(1)} = Z_A i'_A$

$$V_A^{(1)} = \begin{matrix} 1A \\ 2A \\ 3A \\ 1B \\ 2B \\ 3B \\ 1C \\ 2C \end{matrix} \begin{bmatrix} V_{1A}^{(1)} = -0.7667 \\ V_{2A}^{(1)} = 1.4333 \\ V_{3A}^{(1)} = -0.2666 \\ V_{1B}^{(1)} = -0.1 \\ V_{2B}^{(1)} = 0.0666 \\ V_{3B}^{(1)} = -0.3666 \\ V_{1C}^{(1)} = -0.0333 \\ V_{2C}^{(1)} = 0.2 \end{bmatrix}$$

6. $V_\backslash = V_\backslash^{(0)} - V_\backslash^{(1)}$

$$V_A = \begin{matrix} 1A \\ 2A \\ 3A \\ 1B \\ 2B \\ 3B \\ 1C \\ 2C \end{matrix} \begin{bmatrix} V_{1A} = 1.7333 \\ V_{2A} = 1.5666 \\ V_{3A} = 1.2333 \\ V_{1B} = 1.9 \\ V_{2B} = 1.5666 \\ V_{3B} = 1.6333 \\ V_{1C} = 1.4666 \\ V_{2C} = 1.2 \end{bmatrix}$$

บทที่3
การวิเคราะห์โหลดโฟลว์

3.1 บทนำ

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ถือเป็นสิ่งสำคัญและเป็นพื้นฐานของการศึกษากรณีต่างๆในระบบกำลังไฟฟ้าที่จะนำไปใช้ในการวางแผนและออกแบบกับการขยายระบบไฟฟ้าที่จะทำการขยายกำลังผลิตในอนาคต ซึ่งจะต้องมีการกำหนดตัดสินใจในเรื่องของการควบคุมระบบที่มีอยู่ให้ดีที่สุด หลักการก็คือนำข้อมูลที่ได้มาทำการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งก็คือขนาดและมุมเฟสของแรงดันแต่ละบัส รวมไปถึงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งในแต่ละเส้น แต่อย่างไรก็ตามตามค่าของข้อมูลทั้งหมดนี้อาจพิมพ์แสดงผลออกมาโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจะทดสอบวิธีการต่างในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นพื้นฐานในการแก้ปัญหาและค่าต่างๆของการไหลของกำลังไฟฟ้าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและควบคุมระบบไฟฟ้าจะแสดงผลออกมาให้เห็น

3.2 ปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้า [5]

ค่า self-admittance และค่า mutual-admittance ในแต่ละบัสซึ่งจะเป็นส่วนประกอบของบัสแอดมิแตนซ์ Y_{bus} หรือจะเปลี่ยนไปเป็นบัสอิมพีแดนซ์ Z_{bus} จะถูกนำไปใช้แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า และอาจจะจำกัดขอบเขตในการศึกษาโดยใช้วิธีการใช้แอดมิแตนซ์ โดยตอนแรกข้อมูลที่ได้รับมาจะต้องถูกป้อนให้แก่คอมพิวเตอร์โดยเป็น One-line diagram ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าจะถูกแสดงเป็นวงจรต่อเฟส และมีวงจรเทียบเคียงเป็นแบบพายน์(π) ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรม และค่าผลรวม line-charging admittance Y ในสายส่งแต่ละเส้น (ปกติอยู่ในเทอมของ line-charging megavars ที่แรงดันปกติของระบบ) ซึ่งจะมีความจำเป็นมากในการที่จะทำให้คอมพิวเตอร์สามารถกำหนดตัดสินใจเลือกขนาดของ บัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ NxN ใดๆของ Y_{ij} แต่ละตัวซึ่งก็คือ

$$Y_{ij} = |Y_{ij}|\angle\theta_{ij} = |Y_{ij}|\cos\theta_{ij} + j|Y_{ij}|\sin\theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \qquad (3.1)$$

ข้อมูลที่มีความสำคัญอาจรวมไปถึง พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัดของชันท์ – คาปาซิเตอร์ และการปรับแทปของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า แรงดันบัส และกำลังไฟฟ้าที่จะถูกส่งออกมาจะต้องถูกกำหนดให้ทราบ

แรงดันไฟฟ้าที่บัส i ของระบบจะถูกกำหนดให้เป็นโพลาร์ – โคออร์ดิเนทโดย

$$V_i = |V_i|\angle\delta_i = |V_i|(\cos\delta_i + j\sin\delta_i) \qquad (3.2)$$

และแรงดันไฟฟ้าที่บัส j จะถูกเขียนคล้ายๆกัน โดยเปลี่ยนสับสคริปท์จาก i เป็น j กระแสไฟฟ้าสุทธิที่ไหลเข้าไปในเครือข่ายที่บัส i ในเทอมของ Y_{in} ของ Y_{bus} จะถูกกำหนดให้เป็นผลรวมโดย

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \ldots + Y_{iN}V_N = \sum_{n=1}^{N} Y_{in}V_n \qquad (3.3)$$

ให้ P_i และ Q_i ใช้แทนกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิที่ไหลเข้าไปในเครือข่ายที่บัส i

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^{N} Y_{in}V_n \qquad (3.4)$$

และจากสมการ(3.1) และ (3.2) ซึ่งจะได้ว่า

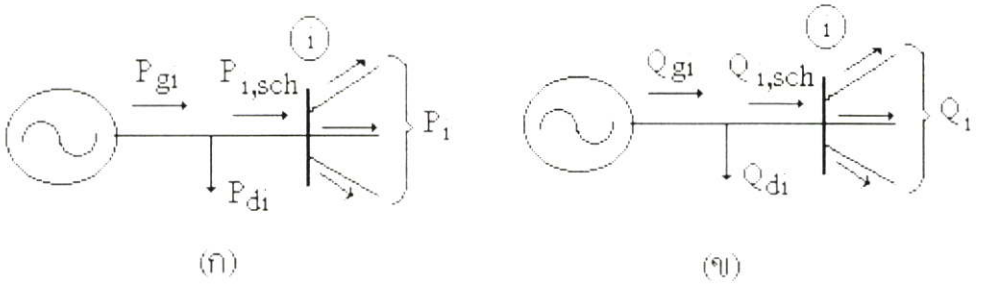
$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^{N} |Y_{in}V_iV_n| \angle(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \qquad (3.5)$$

จากสมการนี้จะสามารถแยกเป็นส่วนของสมการของส่วนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ว่า

$$P_i = \sum_{n=1}^{N} |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \qquad (3.6)$$

$$Q_i = -\sum_{n=1}^{N} |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \qquad (3.7)$$

สมการ(3.6) และ (3.7)จะประกอบด้วยโพลาร์ฟอร์มของสมการโหลดโฟลว์ ซึ่งสมการนี้จะใช้เตรียมสำหรับคำนวณค่าสำหรับค่าของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิ P_i และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิ Q_iที่ไหลเข้าไปในเครือข่ายที่บัส i ให้ P_{gi} แทนด้วยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตส่งไปที่บัส i และให้ P_{di}แทนด้วยความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดที่บัส i และ $P_{i,sch} = P_{gi}-P_{di}$ ซึ่งจะเป็นค่าของกำลังไฟฟ้าจริงที่กำหนดที่ ไหลเข้าสู่เครือข่ายที่บัส i แสดงดังรูป 3.1(a)



รูปที่ 3.1 (ก) แอกทีฟเพาเวอร์ และ (ข) รีแอกทีฟเพาเวอร์ที่บัส i สำหรับการศึกษาโหลดโฟลว์

แทนค่าที่ใช้คำนวณค่าของ P_i ด้วย $P_{i,sch}$ ค่ามิสแมทช์ ΔP_i จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่กำหนด $P_{i,sch}$ ลบด้วยกำลังไฟฟ้าจริงที่คำนวณ $P_{i,cal}$

$$\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,cal} = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,cal} \qquad (3.8)$$

ทำนองเดียวกัน กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i จะได้ว่า

$$\Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,cal} = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,cal} \qquad (3.9)$$

ดังแสดงในรูป 3.1(ข) ค่ามิสแมทช์ที่ปรากฏในวิธีของการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์เมื่อค่าที่คำนวณ P_i และ Q_i เกิดขึ้นไม่พร้อมกับค่าที่กำหนด แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าจริงที่คำนวณ $P_{i,cal}$ และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณ $Q_{i,cal}$ แมทช์กับกำลังไฟฟ้าที่กำหนดอย่างสมบูรณ์แล้วละก็ ก็จะสามารถกล่าวได้ว่าค่ามิสแมทช์ ΔP_i และ ΔQ_i นั้นเป็นศูนย์ที่บัส i และสามารถที่จะเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าสมดุลย์ได้ว่า

$$g_{i'} = P_i - P_{i,sch} = P_i - (P_{gi} - P_{di}) = 0 \qquad (3.10)$$

$$g_{i''} = Q_i - Q_{i,sch} = Q_i - (Q_{gi} - Q_{di}) = 0 \qquad (3.11)$$

เราสมมติฟังก์ชั่น $g_{i'}$ และ $g_{i''}$ เพื่อสะดวกสำหรับสมการที่จะอ้างอิงถึงค่ามิสแมทช์ ΔP_i และ ΔQ_i ถ้าบัส i ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือไม่มีโหลดเทอมที่เหมาะสมที่จะต้องถูกปรับให้เท่ากับศูนย์ในสมการ (3.10)และ (3.11) ในแต่ละบัสของเครือข่ายจะมีสมการอยู่สองสมการและปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้าจะถูกแก้โดยใช้สมการ (3.6) และ (3.7) สำหรับค่าของแรงดันบัสที่ยังไม่ทราบค่า สมการ(3.10) และ (3.11) จะให้ค่าที่ยอมรับได้ที่แต่ละบัส ถ้าไม่มีค่าที่กำหนดสำหรับบัส i นั้นค่ามิสแมทช์ $\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,cal}$ จะไม่สามารถกำหนดได้ และสมการที่ (3.10)ก็จะนำมาใช้ไม่ได้

ในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์ ในทำนองเดียวกันถ้า $Q_{i,sch}$ ไม่มีที่บัส iสมการ(3.11)ก็จะใช้ไม่ได้ด้วยเช่นกัน

ปริมาณทั้งสี่ปริมาณที่ยังไม่ทราบที่มีอยู่ในแต่ละบัส i ซึ่งก็คือ P_i , Q_i , มุมของแรงดันไฟฟ้า δ_i และขนาดของแรงดันไฟฟ้า V_i ค่าทั้งหมดนี้จะอยู่ในสมการสองสมการนั่นก็คือสมการ (3.10) และ (3.11) ที่ใช้สำหรับโหนดแต่ละโหนด ดังนั้นจะต้องพิจารณาว่าจะต้องทำอย่างไรกับปริมาณที่ยังไม่ทราบว่า จะสามารถลดทอนเพื่อให้สอดคล้องกับจำนวนของสมการที่มีอยู่เพื่อที่จะแก้ปัญหาของโหลดโฟลว์ ในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปในการศึกษาโหลดโฟลว์จะแบ่งชนิดของบัสในระบบไฟฟ้าออกเป็น 3 ชนิด ในแต่ละบัส i ใดๆ ที่มีค่าอยู่สองค่าที่ทราบจากค่าทั้งหมดสี่ค่า คือ δ_i, V_i ,P_i และ Q_i ในส่วนของค่าที่เหลือที่ยังไม่ทราบอีกสองค่าจะถูกคำนวณหา โดยสามารถแบ่งแยกชนิดของบัสทั้งสามชนิดได้ดังนี้

1. โหลดบัส(Load Bus) บัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จะถูกเรียกว่าโหลดบัส ค่า P_{gi} และค่า Q_{gi} จะเป็นศูนย์และค่ากำลังไฟฟ้าจริง P_{di} และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q_{di} จะไหลจากระบบไปสู่โหลด(เป็นลบแสดงว่าไหลเข้าระบบ)จะทราบจากการบันทึก การคำนวณโหลดหรือการวัดใดๆ บ่อยๆครั้งในทางปฏิบัติค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้นที่จะทราบ ส่วนค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะหาจากค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่ค่า 0.85 หรือสูงกว่า โหลดบัส i บ่อยครั้งจะเรียก PQ บัสเพราะว่าค่าที่กำหนด $P_{i,sch} = - P_{di}$ และ $Q_{i,sch} = - Q_{di}$จะทราบได้และค่ามิสแมทช์ ΔP_i และΔQ_i จะสามารถได้จากสมการ (3.10) และ (3.11) และค่าที่ต้องหาสองค่าสำหรับโหลดบัสคือ δ_iและ V_i

2. บัสควบคุมแรงดัน(Voltage-Controlled Bus) บัสใดๆในระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันคงที่จะถูกเรียกว่ามีการควบคุมแรงดัน บัสใดๆที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ จะสามารถควบคุมเครื่องกำเนิดได้โดยการปรับที่ไพร์ม-มูฟเวอร์ และขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะสามารถควบคุมได้โดยการปรับที่ระบบการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นที่บัสควบคุมแรงดัน i ใดๆจะพบว่ามีค่า P_{gi} และ V_i ที่เหมาะสม ค่า P_{di} ที่ทราบเราจะสามารถที่กำหนดค่ามิสแมทช์ ΔP_i ตามสมการ (3.8) การจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q_{gi} ที่ต้องการให้กับแรงดันที่กำหนด V_i จะไม่สามารถทราบได้ล่วงหน้า และดังนั้นค่ามิสแมทช์ ΔQ_i จะไม่สามารถกำหนดขึ้นได้ที่บัสควบคุมแรงดัน i มุมของแรงดันδ_i จะเป็นปริมาณที่ยังไม่ทราบ และสมการ (3.10) จะสามารถหาค่า P_i ได้หลังจากนั้น แก้ปัญหาโหลดโฟลว์ ค่า Q_i จะสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.7)

3. สแลคบัส (Slack Bus) เพื่อความสะดวกในการพิจารณา บัส 1 จะถูกพิจารณาให้เป็นสแลคบัส เสมอ มุมของแรงดันของสแลคบัสจะถูกใช้อ้างอิงกับมุมของแรงดันที่บัสอื่นๆ มุมของแรงดันของสแลคบัสจะไม่มีความสำคัญเพราะว่าความแตกต่างของมุมของแรงดันจะเป็นตัวกำหนดค่าคำนวณของ P_i และ Q_i ในสมการ(3.6)และ(3.7) ในทางปฏิบัติโดยทั่วๆไปจะให้ $\delta_1 = 0$ ค่ามิสแมทช์จะไม่ถูกกำหนดสำหรับสแลคบัส เพราะว่าขนาดของแรงดัน V_1 จะทราบได้ที่เป็นปริมาณที่มีมุม

$\delta_1 = 0^\circ$ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะใช้สมการ (3.10) หรือ (3.11) สำหรับสแลคบัสในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์

เพื่อที่จะเข้าใจว่าทำไมค่า P_i และ Q_i ไม่กำหนดที่สแลคบัสโดยพิจารณาที่แต่ละ N บัสของระบบดังสมการ (3.10) จะสามารถเขียนiให้มีขอบเขตจาก 1 ถึง N เมื่อผลลัพธ์ของจำนวนสมการ N สมการถูกพิจารณารวมเข้าด้วยกันจะได้ว่า

$$\underbrace{P_L}_{\text{กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย}} = \sum_{i=1}^{N} P_i = \underbrace{\sum_{i=1}^{N} P_{gi}}_{\text{ผลรวมของการผลิต}} = \underbrace{\sum_{i=1}^{N} P_{di}}_{\text{ผลรวมโหลด}} \qquad (3.12)$$

เทอมของ P_L ในสมการนี้จะเห็นได้เด่นชัดในเทอมของผลรวมการสูญเสีย I^2R ในสายส่งกำลังไฟฟ้าและหม้อแปลงของระบบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าแต่ละเส้นของระบบจะไม่สามารถคำนวณหาได้จนกระทั่งหลังจากทราบขนาดและมุมเฟสของแรงดันแล้วทุกๆบัสในระบบไฟฟ้า สำหรับค่า P_i นั้นช่วงเริ่มแรกจะไม่ทราบและสมการ (3.12) จะนำมาใช้คำนวณไม่ได้ ในสูตรของการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์จะเลือกบัสหนึ่งเป็นสแลคบัสที่มีค่า P_g ที่มีลักษณะไม่แน่นอนหลังจากนั้นปัญหาของโหลดโฟลว์จะถูกทำการแก้ปัญหา ค่าแตกต่างระหว่างผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริง P ที่ไหลเข้าสู่ระบบที่บัสอื่นๆทั้งหมด และผลรวมของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท P บวกด้วยค่าการสูญเสีย I^2R ที่ถูกกำหนดไปในสแลคบัส ดังนั้นจึงทำให้บัสควบคุมแรงดันจะถูกพิจารณาเป็นสแลคบัส ค่าความแตกต่างของผลรวมที่ถูกจ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส และค่ารับ โดยโหลด จะถูกกำหนดให้เป็น

$$\sum_{i=1}^{N} Q_i = \sum_{i=1}^{N} Q_{gi} - \sum_{i=1}^{N} Q_{di} \qquad (3.13)$$

สมการนี้จะเห็นชัดเจนเมื่อเป็นบัสที่มีลักษณะเฉพาะดังสมการ (3.11) ที่แต่ละบัส iในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์ ค่า Q_i จะสามารถประมาณค่าได้จากสมการ (3.7) หลังจากแก้ปัญหาโหลดโฟวส์ได้แล้วจากนั้นปริมาณที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของสมการ (3.13) จะเป็นค่าที่รวมกันของไลน์ชาร์จกิง ชันท์คาปาซิเตอร์และรีแอกเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ที่บัส และมันจะเรียกว่าค่าความสูญเสีย I^2X ที่เกิดขึ้นภายในรีแอกแตนซ์อนุกรมของสายส่งกำลังไฟฟ้า

มุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าของบัสที่ไม่เป็นค่าที่กำหนด ในข้อมูลอินพุทของการศึกษาโหลดโฟลว์จะเรียกว่า สถานะที่ไม่คงที่ (state variable)หรือ ดีเพ็นเด็นท์วาริเอเบิล(dependent variables)ซึ่งค่าเหล่านี้จะบอกให้ทราบถึงสถานะของระบบซึ่งจะเป็นผลมาจากปริมาณที่เป็นลักษณะเฉพาะของบัสทั้งหมด ปัญหาโหลดโฟลว์จะเป็นตัวกำหนดค่าสถานะที่เปลี่ยนแปลงไปทั้ง

หมดโดยการแก้ปัญหาของจำนวนของสมการโหลดโฟลว์ในส่วนของข้อมูลอินพุทถ้ามีบัสควบคุมแรงดันจำนวน Ng บัส(ไม่นับสแลคบัส) ในระบบของ N บัส มันจะเป็น (2N-Ng-2)สมการที่ใช้แก้ปัญหา(2N-Ng-2)สำหรับสถานะที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในตารางที่3.1 สถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอีกครั้งจะถูกคำนวณ สถานะที่สมบูรณ์ของระบบจะสามารถหาได้ และปริมาณทั้งหมดจะเป็นผลตามสภาวะที่เปลี่ยนแปลงและสามารถกำหนดได้ ปริมาณอย่างเช่น P_i และ Q_i ที่สแลคบัส Q_iที่บัสควบคุมแรงดันแต่ละบัส และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย P_l ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ถูกควบคุม

ตารางที่ 3.1 สรุปปัญหาโหลดโฟลว์

ชนิดของบัส	จำนวนบัส	ค่าที่ทราบ	จำนวนสมการ	จำนวนสภาวะการเปลี่ยนแปลง δ_i, V_i
สแลคบัส i = 1	1	δ_i, V_i	0	0
บัสควบคุมแรงดัน (i=2.....Ng-1)	Ng	P_i, V_i	Ng	Ng
โหลดบัส (i=Ng-2.....N)	N-Ng-1	P_i, Q_i	2(N-Ng-1)	2(N-Ng-1)
ผลรวม	N	2N	2N-Ng-2	2N-Ng-2

ฟังก์ชั่น P_i และ Q_i ของสมการ (3.6) และ (3.7) เป็นฟังก์ชั่นที่ไม่เป็นเชิงเส้นของสภาวะที่เปลี่ยนแปลงของδ_i และV_i การคำนวณโหลดโฟลว์โดยปกติจะใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำแล้วซ้ำอีกอย่างเช่นวิธีการของนิวตัน ราฟสันโดยวิธีนิวตันราฟสันจะเป็นการแก้ปัญหาในรูปแบบโพลาร์ฟอร์มของสมการโหลดโฟลว์จนกระทั่งค่ามิสแมทช์ΔP และΔQ ที่บัสทั้งหมดมีค่าเข้าใกล้ค่าที่ยอมรับได้

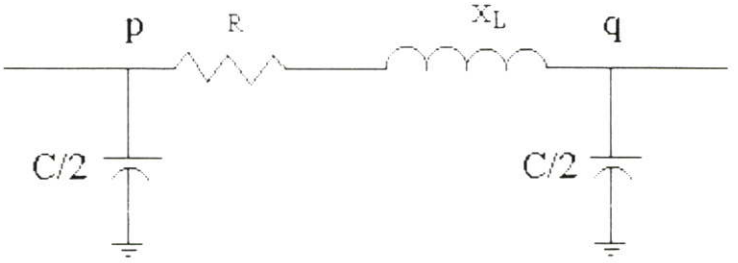
3.3 การสร้างบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์(Element stamp method)

การสร้างบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอีลิเมนต์แสตมป์[11] เป็นวิธีการคำนวณหาบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ โดยใส่องค์ประกอบของระบบกำลังไฟฟ้า เข้าไปทีละตัวจนครบทุกตัว บัสแอดมิแตนซ์ที่ได้หลังจากใส่องค์ประกอบตัวสุดท้ายจะเป็นบัสแอดมิแตนท์เมตริกซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ต้องการ มีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 สายส่งไฟฟ้า (Transmission line)

สายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างสองบัสใดๆสามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลพาย ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน (Resistance .R) ต่ออนุกรมกับอินดักตีฟรีแอกแตนซ์ (inductive reactance. X_l)

เชื่อมอยู่ระหว่างสองบัสนั้นๆ และมีชันท์คาปาซิแตนท์ (Shunt capacitance ,C) เท่ากับครึ่งหนึ่งของชันท์คาปาซิแตนซ์ของสายส่งทั้งหมดตลอดสาย ต่ออยู่ที่บัสแต่ละบัส ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง

โดยที่ R คือความต้านทานของสายส่ง

X_l คืออินดักตีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่ง

C คือชันท์คาปาซิแตนซ์ของสายส่ง

ถ้าใส่สายส่งไฟฟ้า pq (สายส่งไฟฟ้าที่ต่อระหว่างบัส p และบัส q) บัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$\left.\begin{aligned} Y_{pp}^{new} &= Y_{pp}^{old} + y_{serpq} + \frac{1}{2} y_{shtpq} \\ Y_{qq}^{new} &= Y_{qq}^{old} + y_{serpq} + \frac{1}{2} y_{shtpq} \\ Y_{pq}^{new} &= Y_{pq}^{old} - y_{serpq} \\ Y_{qp}^{new} &= Y_{qp}^{old} - y_{serpq} \end{aligned}\right\} \qquad (3.14)$$

โดยที่ Y_{pq}^{old} เป็นสมาชิกบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์แถวที่ p และหลักที่ q ก่อนใส่สายส่ง pq

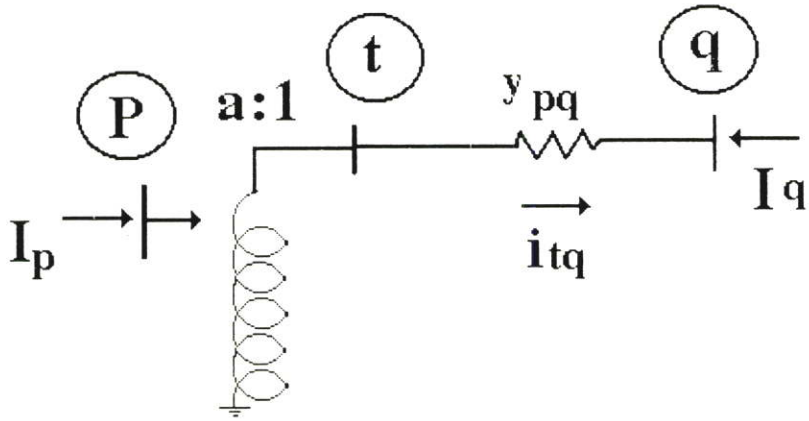
Y_{pq}^{new} เป็นสมาชิกบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์แถวที่ p และหลักที่ q หลังใส่สายส่ง pq

y_{serpq} เป็นแอดมิแตนท์อนุกรม (Series admittance) ของสายส่ง pq

y_{shtpq} เป็นไลน์ชาร์จจิงแอดมิแตนท์ (Line charging admittance) ของสายส่ง pq

3.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Trans former)

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์ หรือแอดมิแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าต่ออนุกรมกับหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติดังแสดงในรูปที่ 3.3

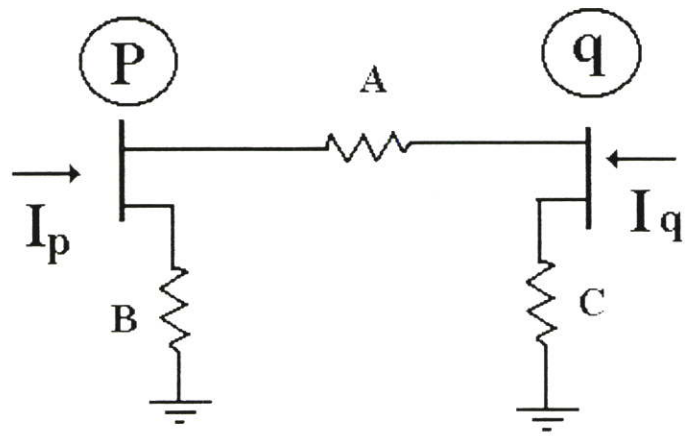


รูปที่ 3.3 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติ

โดยที่ a คืออัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า

y_{pq} คือค่าแอดมิแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยวงจรสมมูลที่สอดคล้องกับแบบจำลองดังกล่าว เป็นแบบพาย ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับตัวแปร A ,B และ C ของวงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 3.4 สามารถ คำนวณได้ดังนี้ พิจารณากระแสไฟฟ้าที่บัส p จากรูปที่ 3.3

$$I_p = \frac{i_{tq}}{a^*} \qquad (3.15)$$

โดยที่ a* คือสังยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของ a

i_{tq} คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัสสมมติ t ไปยังบัส q

i_{tq} หาจาก

$$i_{tq} = (V_t - V_q) \cdot y_{pq} \qquad (3.16)$$

แทนค่า i_{tq} จากสมการ (3.16) ลงใน(3.15)

$$I_p = (V_t - V_q) \cdot \frac{Y_{pq}}{a^*} \qquad (3.17)$$

อาศัยคุณสมบัติของหม้อแปลงอุดมคติ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่บัส p และ t ใน เทอมของอัตราส่วนการแปลง a คือ

$$V_t = \frac{V_p}{a} \qquad (3.18)$$

แทนค่า V_t จากสมการ (3.18) ลงในสมการ (3.17) จะได้ว่า

$$I_p = \left(\frac{V_p}{a} - V_q \right) \cdot \frac{Y_{pq}}{a^*}$$

$$I_q = (V_q - V_t) \cdot y_{pq} \qquad (3.19)$$

โดยที่ $a^2 = a \cdot a^*$

ในทำนองเดียวกันพิจารณากระแสไฟฟ้าที่บัส q จากรูปที่ 3.3 จะได้ว่า

$$I_p = (V_p - aV_q) \cdot \frac{Y_{pq}}{|a|^2} \qquad (3.20)$$

แทนค่า V_t จากสมการที่(3.18) ลงในสมการที่ (3.20) จะได้ว่า

$$I_q = (aV_q - V_p) \cdot \frac{Y_{pq}}{a} \qquad (3.21)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าที่บัส p และ q ของวงจรสมมูลพายในรูปที่3.4 คำนวณได้ดังนี้

$$I_p = i_{pq} + i_{po}$$

$$I_p = (V_p - V_q) \cdot A + V_p \cdot B \qquad (3.22)$$

$$I_q = (i_{qp} + i_{qo})$$

$$I_q = (V_q - V_p) \cdot A + V_q \cdot C \qquad (3.23)$$

กำหนดให้ $V_p = 0$ และ $V_q = 1$ แทนค่าในสมการ (3.19) และ (3.22) จะได้ตัวแปร A ดังนี้

$$A = \frac{y_{pq}}{a^*} \qquad (3.24)$$

ในทำนองเดียวกัน แทนค่า $V_p = 0$ และ $V_q = 1$ ลงในสมการ(3.21) และ (3.23)จะได้ว่า

$$A + C = y_{pq}$$

หรือ

$$C = y_{pq} - A \qquad (3.25)$$

แทนค่า A จากสมการที่ (3.24) ลงในสมการที่ (3.25) จะได้ตัวแปร C คือ

$$C = y_{pq} - \frac{y_{pq}}{a^*}$$

$$C = \left(1 - \frac{1}{a^*}\right) \cdot y_{pq} \qquad (3.26)$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้า I_p จากสมการที่ (3.19)และ(3.22) มีค่าเท่ากัน คือ

$$(V_p - aV_q) \cdot \frac{y_{pq}}{|a|^2} = (V_p - V_q) \cdot A + V_p \cdot B \qquad (3.27)$$

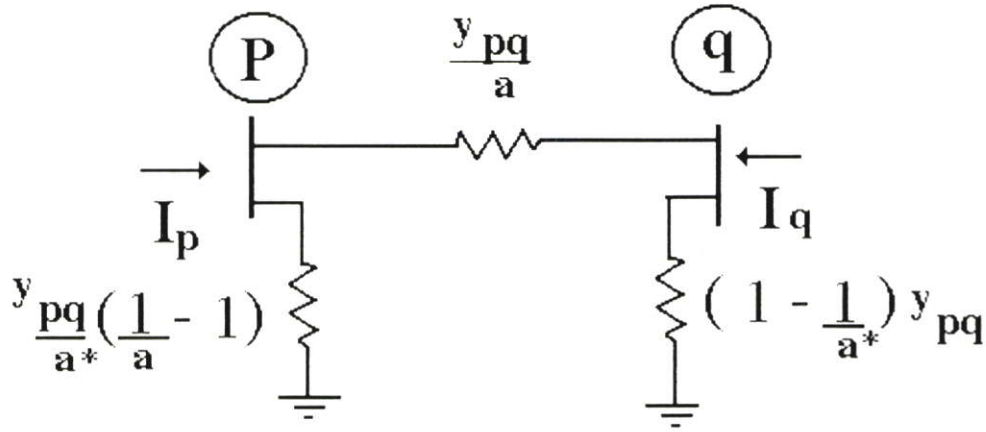
แทนค่า A จากสมการที่ (3.24) ลงในสมการที่ (3.27) จะได้ค่าตัวแปร B คือ

$$B = \frac{(V_p - aV_q)\cdot \frac{y_{pq}}{|a|^2} - (V_p - V_q)\cdot \frac{y_{pq}}{a^*}}{V_p}$$

$$= \frac{y_{pq}}{|a|^2} - \frac{y_{pq}}{a^*}$$

$$B = \frac{1}{a^*}\left(\frac{1}{a} - 1\right)\cdot y_{pq} \qquad (3.28)$$

ดังนั้นวงจรสมมูลพายที่มีค่าตัวแปรในเทอมอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า a และแอดมิแตนซ์ y_{pq} ของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลพายของหม้อแปลงไฟฟ้า

ถ้าใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq (หม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อระหว่างบัส p และ บัส q) ตามรูปที่ 3.5 บัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$\left.\begin{aligned} Y_{pp}^{new} &= Y_{pp}^{old} + \frac{1}{|a|^2} \cdot y_{pq} \\ Y_{qq}^{new} &= Y_{qq}^{old} + y_{pq} \\ Y_{pq}^{new} &= Y_{pq}^{old} - \frac{1}{a^*} y_{pq} \\ Y_{qp}^{new} &= Y_{qp}^{old} - \frac{1}{a} y_{pq} \end{aligned}\right\} \qquad (3.29)$$

3.3.3 ชันท์อิลิเมนต์ (Shunt element)

ชันท์อิลิเมนต์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่คาปาซิเตอร์ (Capacitor) และ รีแอกเตอร์ (Reactor) ในระบบไฟฟ้ากำลังมักจะมีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ที่สถานีไฟฟ้าย่อยปลายทางเพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าปลายทางให้สูงขึ้น และลดกำลังสูญเสียในสายส่ง เพราะคาปาซิเตอร์จะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟเข้าที่บัส หรือในบางจุดจะมีการติดตั้งรีแอกเตอร์เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้า

$$Y_{pp}^{new} = Y_{pp}^{old} + y_p \qquad (3.30)$$

ที่บัสนั้น เพราะรีแอกเตอร์จะทำหน้าที่ดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟออกจากบัส จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าชันท์อิลิเมนต์เป็นอุปกรณ์ที่มีส่วนช่วยปรับแรงดันที่บัสให้เป็นไปตามที่กำหนด สำหรับวงจรสมมูลที่ใช้แทนชันท์อิลิเมนต์ประกอบด้วย อิมพีแดนท์คงที่ต่อเข้าที่บัสและลงสู่กราวด์ ถ้าใส่ชั้นท์อิลิเมนต์ที่ต่อกับบัส p บัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

โดยที่ y_p เป็นแอดมิแตนซ์ของชันท์อิลิเมนต์ที่ต่อกับบัส p

3.4 การคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน ราฟสัน [5,6]

วิธีของนิวตัน ราฟสันกล่าวคือ เป็นการนำทฤษฎีของอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series)มาเป็นเครื่องมือช่วยในการแก้ปัญหาของการคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ (3.31) สำหรับ f(x) ที่แทน x ด้วย x_0

$$u = f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(\Delta x) + \frac{f''(x_0)}{2!}(\Delta x)^2 + \ldots \qquad (3.31)$$

ถ้า Δx มีค่าน้อยมากตั้งแต่เทอมที่สามทางขวามือของสมการที่(3.31) จึงอาจตัดทิ้งได้สมการ f(x) จึงเขียนโดยประมาณได้

$$u = f(x) = f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx}\Delta x \tag{3.32}$$

กรณีที่ฟังก์ชั่น f มีตัวแปรหลายตัว สามารถประยุกต์เขียนสมการที่ (3.32) ใหม่ได้เป็น

$$u = f(x_1, x_2, \ldots, x_n) = f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f}{\partial x_1}\Big|_{(0)}\Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\Big|_{(0)}\Delta x_2 + \ldots + \frac{\partial f}{\partial x_n}\Big|_{(0)}\Delta x_n \tag{3.33}$$

ให้ $x_1^{(0)}, x_2^{(0)} \ldots\ldots x_n^{(0)}$ เป็นค่าเริ่มต้นที่แทนเข้าไปในฟังก์ชั่น $\frac{\partial f}{\partial x}\Big|_{(0)}$ เป็นค่าพาเชียลดิฟเฟอเรนเชียลที่ และจัดสมการที่ (3.33) ใหม่เขียนได้เป็น

$$\Delta u = u - f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}) = \frac{\partial f}{\partial x_1}\Big|_{(0)}\Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\Big|_{(0)}\Delta x_2 + \ldots + \frac{\partial f}{\partial x_n}\Big|_{(0)}\Delta x_n \tag{3.34}$$

สำหรับสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นใดๆ n สมการ สามารถเขียนได้โดยใช้สมการที่ (3.34) โดยจัดรูปเมตริกซ์ใหม่ได้ คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \vdots \\ \Delta u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

หรือเขียนแทนด้วยสมการเมตริกซ์เป็น

$$[\Delta u] = [J]\cdot[\Delta x] \tag{3.36}$$

โดยที่ [J] คือจาโคเบียนเมตริกซ์

3.4.1 การประยุกต์วิธีนิวตัน ราฟสัน ในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์ [9]

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตัน ราฟสันใช้วิธีเปลี่ยนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}J_1 & J_2\\ J_3 & J_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \Delta|V|\end{bmatrix} \tag{3.37}$$

โดยที่ ΔP คือ ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าบัส ซึ่งคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่กำหนด ลบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่คำนวณ นั้นคือ

$$\Delta P = P_{\text{กำหนด}} - P_{\text{คำนวณ}} \tag{3.38}$$

และ ΔQ คือ ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟที่ไหลเข้าบัส ซึ่งคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟที่กำหนด ลบด้วยค้ากำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟที่คำนวณ นั้นคือ

$$\Delta Q = Q_{\text{กำหนด}} - Q_{\text{คำนวณ}} \tag{3.39}$$

J_1, J_2, J_3 และ J_4 เป็นจาโคเบียนเมตริกซ์ ย่อย

สมการในแนวเส้นทแยงมุมและนอกเส้นทแยงมุม ของ J_1 สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{3.40}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i \tag{3.41}$$

สมการในแนวเส้นทแยงมุมและนอกเส้นทแยงมุม ของ J$_2$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} |V_j| \, |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + 2|V_i||Y_{ii}| \cos\theta_{ii} \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i \quad (3.43)$$

สมการในแนวเส้นทแยงมุมและนอกเส้นทแยงมุม ของ J$_3$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} |V_i||V_j| \, |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i \quad (3.45)$$

สมการในแนวเส้นทแยงมุมและนอกเส้นทแยงมุม ของ J$_4$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} |V_j| \, |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) - 2|V_i||Y_{ii}| \sin\theta_{ii} \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i \quad (3.47)$$

$\Delta\delta$ คือ ค่าของมุมที่เปลี่ยนแปลงในการวนรอบ

$\Delta|V|$ คือ ค่าของขนาดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงในการวนรอบ

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตันราฟสัน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คำนวณ P_i ,Q_i จากค่าแรงดันที่สมมติในตอนเริ่มต้น หรือจากค่าแรงดันบัสที่คำนวณได้ในการวนรอบ ครั้งที่ผ่านมา

2. คำนวณ ΔP , ΔQ ถ้าค่าความแตกต่างนี้น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้(Tolerance) แสดงว่าค่าแรงดันซึ่งใช้คำนวณ P_i ,Q_i นี้คือ ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์

3. ถ้า ΔP , ΔQ มีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้ จะต้องคำนวณ $\Delta\delta$, $\Delta|V|$ เพื่อคำนวณแรงดันบัสค่าใหม่จาก

$$\delta^{k+1} = \delta^{k} - \Delta\delta^{k} \tag{3.48}$$

$$|V|^{k+1} = |V|^{k} - \Delta|V|^{k} \tag{3.49}$$

โดยที่ k คือจำนวนรอบ

4. กลับไปทำขั้นตอนในข้อ 1 ใหม่ จนกระทั่งได้ผลลัพธ์

3.5 การคำนวนโหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล

ในความเป็นจริงแล้วระบบไฟฟ้ากำลัง จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันในกำลังไฟฟ้าจริง (real power) ในสายส่งไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และการเปลี่ยนแปลงมุมในกำลังไฟฟ้ารีแอคตีฟ (reactive power)แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากสมการเดิม(3.37) เขียนใหม่ เป็น

$$\begin{bmatrix}\Delta P \\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}J_1 & 0 \\ 0 & J_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta \\ \Delta|V|\end{bmatrix} \tag{3.50}$$

หรือสามารถเขียนเป็นสมการได้ใหม่ว่า

$$\Delta P = J_1\Delta\delta = \left[\frac{\partial P}{\partial\delta}\right]\Delta\delta \tag{3.51}$$

และ

$$\Delta Q = J_4\Delta|V| = \left[\frac{\partial Q}{\partial|V|}\right]\Delta|V| \tag{3.52}$$

จากสมการ(3.40) สมการในแนวเส้นทแยงมุมของ J_1 สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial P_i}{\partial\delta_i} = \sum_{j=1}^{n}|V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) - |V_i|^2|Y_{ii}|\sin\theta_{ii}$$

แทนค่าเทอมแรกของสมการ (3.40) ด้วย $-Q_i$ จากสมการ (3.7)

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \qquad (3.53)$$

เมื่อ $B_{ii} = |Y_{ii}| \sin\theta_{ii}$ เป็นส่วนจินตภาพของเมตริกซ์ย่อยแนวเส้นทแยงมุมของบัสแอดมิแตนท์เมตริกซ์

ในระบบไฟฟ้ากำลัง self susceptances $B_{ii} >> Q_i$ และ $|V_i|^2 \approx |V_i|$

ดังนั้น

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| B_{ii} \qquad (3.54)$$

จากสมการ(3.41) สมการนอกแนวเส้นทแยงมุมของ J_1 สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i$$

สมมติว่าค่าความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆมีค่าแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจาก $\delta_j - \delta_i$ มีขนาดน้อยมาก

จะ ได้ว่า $\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ij}$

ดังนั้น $$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j|B_{ij} \qquad (3.55)$$

สมมติให้ $|V_j| \approx 1$

ดังนั้น

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i|B_{ij} \qquad (3.56)$$

จากสมการ(3.46) สมการในแนวเส้นทแยงมุมของ J_4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -\sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) - |V_i||Y_{ii}| \sin\theta_{ii}$$

แทนค่าเทอมแรกของสมการ (3.46) ด้วย $-Q_i$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = Q_i - |V_i||Y_{ii}| \sin\theta_{ii}$$

$$= Q_i - |V_i| B_{ii} \qquad (3.57)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อ $B_{ii} = Y_{ii} \sin\theta_{ii} \geq Q_i$ เราจะตัด Q_i ทิ้ง ดังนั้นสมการ(3.57) ในแนวเส้นทแยงมุมของ J $_4$สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = - |V_i| B_{ii} \qquad (3.58)$$

จากสมการ(3.47) สมการนอกแนวเส้นทแยงมุมของ J $_4$สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i$$

เนื่องจาก $\delta_j - \delta_i$ มีน้อยมาก จะ ได้ว่า $\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ij}$ ดังนั้นสมการในนอกแนวเส้นทแยงมุมของ J $_4$สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| B_{ij} \qquad (3.59)$$

เมื่อทำการปรับปรุงวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล แล้ว จะได้สมการสุดท้ายเป็น

$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = - B' \Delta\delta \qquad (3.60)$$

$$\frac{\Delta Q}{|V_i|} = -B'' \Delta |V| \qquad (3.61)$$

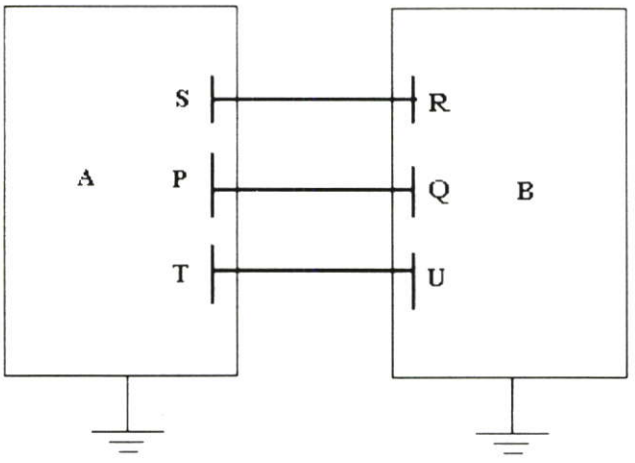
ดังนั้น

$$\Delta\delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V_i|} \qquad (3.62)$$

$$\Delta |V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V_i|} \qquad (3.63)$$

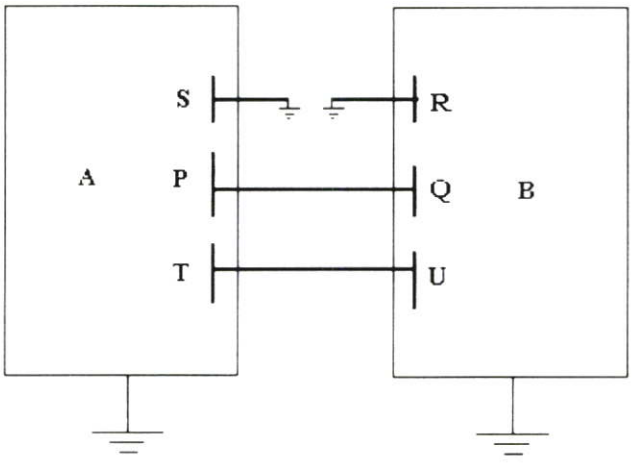
3.5.1 ข้อกำหนดในการหา $[B']$ และ $[B'']$ [3]

จากสมการ (3.62) และ (3.63) จะเห็นว่า $-[B']$ และ $-[B'']$ ก็คือส่วนจินตภาพของแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ในการหา $[B']$และ$[B'']$ มีข้อกำหนดที่สำคัญ โดยจะพิจารณาจากรูปที่ 3.6



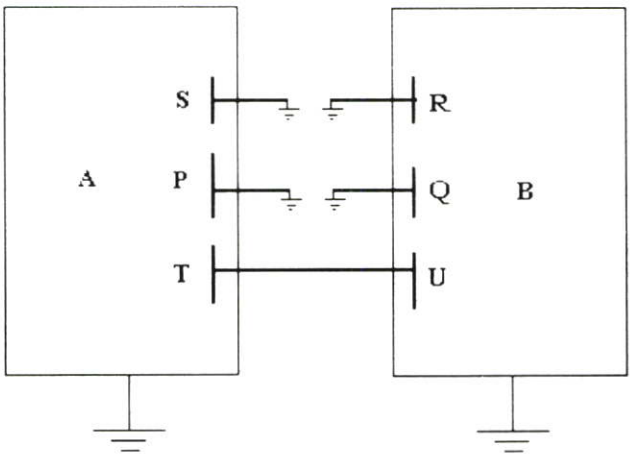
รูปที่ 3.6 ระบบเครือข่ายเริ่มต้น

จากรูปที่ 3.6 แสดงระบบเครือข่ายเริ่มต้น ที่ประกอบด้วยสองระบบย่อย คือระบบย่อยA และระบบย่อย B ระบบย่อย A ประกอบด้วยสแลกบัส (บัส S). บัสโหลด (บัส P และบัส T) ระบบย่อย B ประกอบด้วย บัสควบคุมแรงดัน (บัส Q) . บัสโหลด(บัส R และ บัส U)



รูปที่ 3.7 เครือข่าย B'

เนื่องจากในการหา $[B']$ จะไม่รวมสแลกบัสมาเป็นสมาชิก ดังนั้นถ้ามีสายส่ง หรือบัสใดบัสหนึ่ง ต่อร่วมกับบัสสแลก ก็จะไม่ถูกรวมเป็นสมาชิกของเมตริกซ์ $[B']$ ดังเช่นบัส R ที่เชื่อมต่อกับบัส S ซึ่งเป็นสแลกบัส บัส R และบัส S จะถูกพิจารณาเป็นกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 เครือข่าย B''

ในทำนองเดียวกันเนื่องจากในการหา $[B'']$ จะไม่รวมแสลกบัส และบัสควบคุมแรงดันหรือบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาเป็นสมาชิก ดังนั้นถ้ามีสายส่งหรือบัสใดบัสหนึ่งต่อร่วมกับบัสสแลก และบัสควบคุมแรงดันหรือบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก็จะไม่ถูกรวมเป็นสมาชิกของเมตริกซ์ $[B'']$ ดังเช่น บัส R ที่เชื่อมต่อกับบัส S ซึ่งเป็นสแลกบัส และบัส P ที่เชื่อมต่อกับบัส Q ซึ่งเป็นบัสควบคุมแรงดันหรือบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะถูกตัดออกไปเป็นกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

บทที่ 4
การประยุกต์ใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

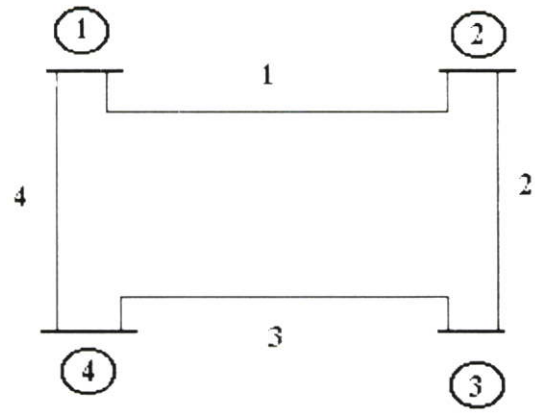
4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการบันทึก self และ mutual admittance ด้วยวิธีสปาซเมตริกซ์ โดยจัดเก็บในลักษณะเมตริกซ์อะเรย์ 1 มิติซึ่งสามารถลดค่าศูนย์ที่ไม่ได้นำมาใช้ ได้มากกว่าการจัดเก็บแบบเดิมที่บันทึกแบบ two dimension array และยังได้กล่าวถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อย ดังจะนำเสนอรายละเอียดต่างๆดังนี้

4.2 การเก็บบันทึกค่า nodal self admittance และ mutual admittance [8,12]

การบันทึก nodal self admittance และ mutual admittance ลงใน core storage นั้น ถ้าบันทึกอยู่ใน รูปแบบเมตริกซ์ จะเป็นการบันทึกแบบ two dimension array แล้วจะต้องสิ้นเปลือง core storage มาก เพราะจำนวน mutual admittance elements ต่างๆของเมตริกซ์ ที่มีค่าเป็นศูนย์มีมากไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณเลย แต่ก็ต้องการ core storage เหมือนกัน ดังนั้นวิธีการที่ดีที่สุดที่ช่วยลดการจัดเก็บค่าศูนย์ หรือ เรียกอย่างหนึ่งว่า เทคนิคสปาซเมตริกซ์ โดยใช้วิธีการบันทึก nodal self admittance และ mutual admittance ในลักษณะของ One dimension array ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

ข้อมูล line 1 line จะประกอบด้วย บัสส่ง (nl) ,บัสรับ (nr) ค่า admittance ของ line แต่ละ line ที่ป้อนเข้าไปเป็นข้อมูล จะถูกจัดให้มี line number (NEL) ประจำ line นั้น การบันทึกค่า mutual admittance (ym) จะใช้ line number เป็น subscript variable ดังนี้คือ ym (NEL)
การเก็บบันทึก ของ self admittance (YS) ของบัสนี้ จะใช้ nl และnr ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ NEL อยู่แล้ว เป็นตัว subscript variable ดังนี้ คือ YS(nl(NEL)) , YS (nr(NEL)) โยงซึ่งกันและกัน การเก็บบันทึกค่า self และ mutual admittance จะ สมมติเครือข่ายดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง 4 บัส 4 สายส่ง

บัส(1) และบัส (2) NEL =1 nl(1)=1 . nr(1) = 2

บัส(2) และบัส (3) NEL =2 nl(2)=2 . nr(2) = 3

บัส(3) และบัส (4) NEL =3 nl(3)=3 . nr(3) = 4

บัส(4) และบัส (1) NEL =4 nl(4)=4 . nr(4) = 1

หมายเหตุ ค่า nl และ nr สามารถกำหนดให้สับที่ได้
ลักษณะการบันทึก self และ mutual admittance ดังนี้

YS(1)	YS(2)	YS(3)	YS(4)

ym(1)	ym(2)	ym(3)	ym(4)

รูปที่ 4.2 ลักษณะการบันทึกของ self และ mutual admittance ซึ่งจะต้องใช้ core storage เท่ากับ 8 word

จากรูปที่ 4.2 แสดงการจัดเก็บ self และ mutual admittance ซึ่งอยู่ในรูปเมตริกซ์ หนึ่งมิติ ซึ่งจะต้องใช้ core storage เท่ากับ 8 word แต่ถ้าหาก เก็บบันทึกแบบเมตริกซ์ แบบ two dimension array แล้วจะต้องสิ้นเปลือง core storage เท่ากับ 16 ดังนี้

Y(1,1)	Y(1,2)	Y(1,3)	Y(1,4)
Y(2,1)	Y(2,2)	Y(2,3)	Y(2,4)
Y(3,1)	Y(3,2)	Y(3,3)	Y(3,4)
Y(4,1)	Y(4,2)	Y(4,3)	Y(4,4)

รูปที่ 4.3 ลักษณะการบันทึกของ self และ mutual admittance แบบ two dimension array

4.3 วิธีการการนำเทคนิคสปาซเมตริกซ์ ไปใช้

สมมุติระบบไฟฟ้ากำลังมี 14 บัส 20 สายส่ง โดย nl แทนบัสส่ง nr แทนบัสรับ R แทนรีซิสแตนท์ X แทนรีแอกแตนท์ NEL แทน หมายเลขสายส่ง

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลตัวอย่างสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง 14บัส 20สายส่งแบบเปอร์ยูนิต[4]

NEL	nl	nr	R	X	NEL	nl	nr	R	X
1	1	2	0.01938	0.05917	11	4	9	0	0.55618
2	2	3	0.04699	0.19797	12	7	9	0	0.11001
3	2	4	0.05811	0.17632	13	9	10	0.03181	0.045
4	1	5	0.05403	0.22304	14	6	11	0.09498	0.1989
5	2	5	0.05695	0.17388	15	6	12	0.12291	0.25581
6	3	4	0.06701	0.17103	16	6	13	0.06615	0.13027
7	4	5	0.01335	0.04211	17	9	14	0.12711	0.27038
8	5	6	0	0.25202	18	10	11	0.08205	0.19207
9	4	7	0	0.20912	19	12	13	0.22092	0.19988
10	7	8	0	0.17615	20	13	14	0.17093	0.34802

เราสามารถหา mutual admittance ได้ จากสมการ

$$ym(NEL) = 1/(R(NEL)-j*x(NEL)) \qquad (4.1)$$

ตัวอย่างการคำนวณเช่น

$$ym(1)=1/(0.01938-j*0.05917)$$

ym(2)=1/(0.04699−j*0.19797)

•

•

•

ym(19)=1/(0.22092−j*0.19988)

ym(20)=1/(0.17093−j*0.34802)

ผลลัพธ์ที่ได้คือ

nl	nr	R	X	ym
1	2	0.01938	0.05917	4.9991 -15.2631i
2	3	0.04699	0.19797	1.1350 - 4.7819i
2	4	0.05811	0.17632	1.6860 - 5.1158i
1	5	0.05403	0.22304	1.0259 - 4.2350i
2	5	0.05695	0.17388	1.7011 - 5.1939i
3	4	0.06701	0.17103	1.9860 - 5.0688i
4	5	0.01335	0.04211	6.8410 -21.5786i
5	6	0	0.25202	0 - 3.9679i
4	7	0	0.20912	0 - 4.7819i
7	8	0	0.17615	0 - 5.6770i
4	9	0	0.55618	0 - 1.7980i
7	9	0	0.11001	0 - 9.0901i
9	10	0.03181	0.045	10.4746 -14.8179i
6	11	0.09498	0.1989	1.9550 - 4.0941i
6	12	0.12291	0.25581	1.5260 - 3.1760i
6	13	0.06615	0.13027	3.0989 - 6.1028i
9	14	0.12711	0.27038	1.4240 - 3.0291i
10	11	0.08205	0.19207	1.8809 - 4.4029i
12	13	0.22092	0.19988	2.4890 - 2.2520i
13	14	0.17093	0.34802	1.1370 - 2.3150i

เราหา self admittance โดยอาศัยความสัมพันธ์บัสส่ง บัสรับ และ NELและบัสสายส่ง ดังสมการ

$$YS(nl(NEL)) = YS(nl(NEL)) - ym(nl(NEL)) \quad (4.2)$$

$$YS(nr(NEL)) = YS(nr(NEL)) - ym(nr(NEL)) \quad (4.3)$$

ตัวอย่างเช่นการหา self admittance ของบัสที่ 2

หาผลรวม self admittance ของบัสที่ 2 เมื่อเทียบกับบัสส่ง หรือ nl เท่ากับ 2

$$YS(2) = (1.1350-4.7819i - 1.686-5.1158i - 1.7011-5.1939i)$$

$$= 4.5221 - 15.0916i$$

นำผลรวม self admittance ของบัสที่ 2 เมื่อเทียบกับบัสส่ง ที่ได้รวมกับผลรวมของบัสรับ

$$YS(2) = (4.5221 - 15.0916i) + 4.9991 - 15.2631i$$

$$= 9.5212 - 30.3547i$$

สรุปผลลัพธ์โดยรวมของการหา self admittance คือ

nl	nr	ym
1	2	4.9991 -15.2631i
2	3	1.1350 - 4.7819i
2	4	1.6860 - 5.1158i
1	5	1.0259 - 4.2350i
2	5	1.7011 - 5.1939i
3	4	1.9860 - 5.0688i
4	5	6.8410 -21.5786i
5	6	0 - 3.9679i
4	7	0 - 4.7819i
7	8	0 - 5.6770i
4	9	0 - 1.7980i
7	9	0 - 9.0901i
9	10	10.4746 - 14.8179i
6	11	1.9550 - 4.0941i
6	12	1.5260 - 3.1760i
6	13	3.0989 - 6.1028i
9	14	1.4240 - 3.0291i
10	11	1.8809 - 4.4029i
12	13	2.4890 - 2.2520i
13	14	1.1370 - 2.3150i

บัส	YS
1	6.0250 - 19.4981i
2	9.5212 - 30.3547i
3	3.1210 - 9.8507i
4	10.5130 - 38.3411i
5	9.5680 - 34.8973i
6	6.5799 - 17.3408i
7	0 - 19.5490i
8	0 - 5.6770i
9	11.8870 - 28.7351i
10	12.3555 - 19.2203i
11	3.8359 - 8.4964i
12	4.0150 - 5.4280i
13	6.7249 - 10.6698i
14	2.5610 - 5.3441i

4.4 การนำเทคนิคสปาซเมตริกซ์ใช้ในวิเคราะห์ โหลดโฟลว์

เมื่อเราได้แบ่งระบบออกเป็นส่วนย่อยแล้ว ทำการหาค่า mutual admittance จากผลหาร R-X*j เก็บค่าในเมตริกซ์ ym และนำมาคำนวณหาค่า self admittance โดยอาศัยความสัมพันธ์ ของเลขประจำสายส่ง NEL เก็บในเมตริกซ์ YS ซึ่งค่าทั้งหมดจะอยู่ในรูปเมตริกซ์อะเรย์ 1มิติ

YS (1)	YS(2)	YS(3)	...	YS(nbus)

ym(NEL(1))	ym(NEL(2))	ym(NEL(3))	...	ym(NEL(nbr))

รูปที่ 4.4 ลักษณะการบันทึกของ self admittance ซึ่ง core storage จะแปรผันตามจำนวนบัส และ mutual admittance ซึ่ง core storage จะแปรผันตามจำนวนสายส่ง

โดยที่

nbus คือจำนวนบัสทั้งหมด

nbr คือจำนวนสายส่งทั้งหมด

สมมติให้ i แทน บัสระบบย่อย

J แทน บัสระบบย่อย อีกระบบย่อยหนึ่ง

nl แทน บัสส่ง

nr แทน บัสรับ

V แทน แรงดันบัสระบบย่อย

angle(x) แทนมุมของตัวแปร x ใดๆ

หากำลังไฟฟ้าจริง

$$P(i) = V(i) * V(i) *|(YS(i))|*\cos(\text{angle}(YS(i))) \qquad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.4) เป็นการหากำลังไฟฟ้าจริง โดยจะหาในส่วน ของ self แอดมิแตนซ์ หรือ อาจกล่าวได้ว่าเป็นการอ้างอิงตามหมายเลขบัส ในระบบย่อย โดยที่ NEL ของข้อมูลบัส หรือ i จะไม่รวมสแลกบัส

$$P(nl(NEL)) = \sum |V(nl(NEL))| * |V(nr(NEL))| * |ym(nl(NEL))| * \cos(\text{angle}(ym(nl(NEL)) - \delta(nr(NEL)) - \delta(nl(NEL))) \qquad (4.5)$$

$$P(nr(NEL))= \sum V(nl(NEL))* V(nr(NEL)) * ym(nr(NEL))*\cos(angle(ym(nr(NEL)) -\delta(nl(NEL))- \delta(nr(NEL))) \quad (4.6)$$

จากสมการ (4.5) และ (4.6) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของบัสส่ง บัสรับ และ mutual admittance หรือ อาจกล่าวได้ว่าเป็นการอ้างอิงตามหมายเลขสายส่ง หรือ NELของข้อมูลสายส่ง

หากระแสคัทลายจาก

$$ITIE(NEL(\text{คัทลาย})) = (V(i(\text{โซนที่สูงกว่า})) - V(J(\text{โซนที่ต่ำกว่า})))*ym(NEL(\text{คัทลาย})) \quad (4.7)$$

$$P(i(\text{คัทลาย})) =\pm\sum real(V(nl(\text{คัทลาย}))* conj (ITIE(nl(NEL(\text{คัทลาย})))) \quad (4.8)$$

$$P(i(\text{คัทลาย})) =\pm\sum real(V(nr(\text{คัทลาย}))* conj (ITIE(nr(NEL(\text{คัทลาย})))) \quad (4.9)$$

ในสมการที่ (4.7) , (4.8) และ (4.9) จะเป็นการหากระแสคัทลายน์ และกำลังไฟฟ้าจริง ในส่วนคัทลายน์ โดยวิธีสปาซเมตริกซ์จะมีบทบาทสำคัญแทนการหาแบบ two dimension array โดยสมการ จะอ้างอิง mutual admittance , NEL ,บัสส่ง และบัสรับ ของสายส่งเพื่อหาค่าผลลัพธ์รวม จากนั้น กำหนดทิศทางกระแส ITIE อีกครั้งหนึ่งโดยเปลี่ยนทิศทางให้กระแสไหลเข้าสู่บัส โดย ถ้าระบบย่อยโซนที่สูงกว่า P(i(คัทลาย)) เป็นบวก ระบบย่อยโซนที่ต่ำกว่า P(i(คัทลาย))เป็นลบ

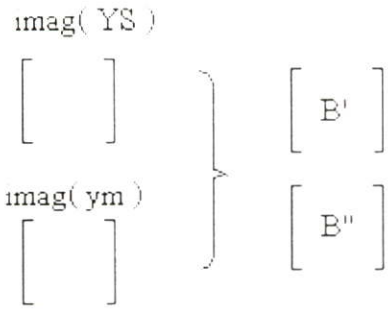
หาผลรวมของ Pcal

$$Pcal(i)= P(i) - P(i(\text{คัทลาย})) \quad (4.10)$$

ความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัสคือ

$$\Delta P(i)= Psh(i)- Pcal(i) \quad (4.11)$$

เราสร้างจาโคเบียนเมตริกซ์ $[B']$และ $[B'']$ได้จากเมตริกซ์ [ym].[YS]



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ ของ self และ mutual admittance ด้วยวิธีสปาซเมตริกซ์ ในการสร้าง [B'] และ [B'']

จากรูปที่ 4.5 ในการหาเมตริกซ์ [B'] และ [B''] จะใช้วิธีการป้อนสมาชิก self admittance (YS) ตามแนวเส้นทแยงมุม และป้อนสมาชิก mutual admittance (Ym) ตามนอกแนวเส้นทแยงมุม โดยที่ ym(nl.nr) = ym(nr.nl) ในการหาเมตริกซ์ [B'] จะไม่รวม สมาชิกที่เป็นสแลกบัส และในการหาเมตริกซ์ [B''] จะไม่รวม สมาชิกที่เป็นสแลกบัสและบัสควบคุมแรงดัน ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.5.1

นำค่า B' ที่ได้จากส่วนจินตภาพของแอดมิแตนท์เมตริกซ์ ym และ YS มาหา $\Delta\delta$

$$\Delta\delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P_{(i)}}{|V_i|} \qquad (4.12)$$

คำนวณกระแสคัทลายจาก

$$\text{ITIE(NEL(คัทลาย))} = (\Delta\delta \text{ (i(โซนที่สูงกว่า))} - \Delta\delta \text{ (J(โซนที่ต่ำกว่า)))} / Z_4 B' \qquad (4.13)$$

$$\text{IT(i)} = \pm\sum \text{ITIE(i(NEL(คัทลาย)))} \qquad (4.14)$$

กำหนดทิศทางกระแส ITIE อีกครั้งหนึ่งโดยเปลี่ยนทิศทางให้กระแสไหลเข้าสู่บัส โดย ถ้าระบบย่อยโซนที่สูงกว่า IT เป็นบวก ระบบย่อยโซนที่ต่ำกว่า IT เป็นลบ

หาผลลัพธ์

$$\Delta\delta \text{ จริง} = -[B']^{-1} * \text{IT} - \Delta\delta \qquad (4.15)$$

ปรับปรุงค่ามุม

$$\delta_{new} = \delta_{old} + \Delta\delta \tag{4.16}$$

นำค่ามุมปรับปรุงแล้วหาแรงดัน

$$V = V'*(\cos(\delta) - j*\sin(\delta)) \tag{4.17}$$

หากำลังไฟฟ้าเสมือน

$$Q(i) = -|V(i)|*|V(i)|*(YS(i))|*\sin(\text{angle}(YS(i))) \tag{4.18}$$

โดยที่ i จะรวมเฉพาะบัสโหลด

$$Q(nl(NEL)) = -\sum|V(nl(NEL))|*|V(nr(NEL))|*|ym(nl(NEL))|*\sin(\text{angle}(ym(nl(NEL)) + \delta(nr(NEL)) - \delta(nl(NEL))) \tag{4.19}$$

$$Q(nr(NEL)) = -\sum|V(nl(NEL))|*|V(nr(NEL))|*|ym(nr(NEL))|*\sin(\text{angle}(ym(nr(NEL)) + \delta(nl(NEL)) - \delta(nr(NEL))) \tag{4.20}$$

หากระแสคัทลายจาก

$$ITIE(NEL(\text{คัทลาย})) = (V(i(\text{โซนที่สูงกว่า})) - V(J(\text{โซนที่ต่ำกว่า})))*ym(NEL(\text{คัทลาย})) \tag{4.21}$$

$$Q(i(\text{คัทลาย})) = \pm\sum\text{imag}((V(nl(\text{คัทลาย})))* \text{conj}(ITIE(nl(NEL(\text{คัทลาย}))))) \tag{4.22}$$

$$Q(i(\text{คัทลาย})) = \pm\sum\text{imag}((V(nr(\text{คัทลาย})))* \text{conj}(ITIE(nr(NEL(\text{คัทลาย}))))) \tag{4.23}$$

กำหนดทิศทางกระแส ITIE อีกครั้งหนึ่งโดยเปลี่ยนทิศทางให้กระแสไหลเข้าสู่บัส โดย ถ้าระบบย่อยโซนที่สูงกว่า Q(i(คัทลาย)) เป็นบวก ระบบย่อยโซนที่ต่ำกว่าQ(i(คัทลาย))เป็นลบ

หาผลรวม Qcal

$$Qcal(i) = Q(i) - Q(i(\text{คัทลาย})) \tag{4.24}$$

ความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่บัสคือ

$$\Delta Q(i) = Qsh(i) - Qcal(i) \tag{4.25}$$

นำค่า B'' ที่ได้จากส่วนจินตภาพของแอดมิแตนท์เมตริกซ์ ym และ YS มาหา ΔV

$$\Delta|V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q_{(i)}}{|V_i|} \tag{4.26}$$

คำนวณกระแสคัทลายจาก

$$ITIE(NEL(\text{คัทลาย})) = (\Delta|V| (i(\text{โซนที่สูงกว่า})) - \Delta|V| (J(\text{โซนที่ต่ำกว่า})))/Z_i B'' \tag{4.27}$$

$$IT(i) = \pm \sum ITIE(i(NEL(\text{คัทลาย}))) \tag{4.28}$$

กำหนดทิศทางกระแส ITIE อีกครั้งหนึ่งโดยเปลี่ยนทิศทางให้กระแสไหลเข้าสู่บัส โดย ถ้าระบบย่อยโซนที่สูงกว่า IT เป็นบวก ระบบย่อยโซนที่ต่ำกว่า ITเป็นลบ

หาผลลัพธ์

$$\Delta|V| \text{ จริง} = -[B'']^{-1} * IT - \Delta|V| \tag{4.29}$$

ปรับปรุงแรงดัน

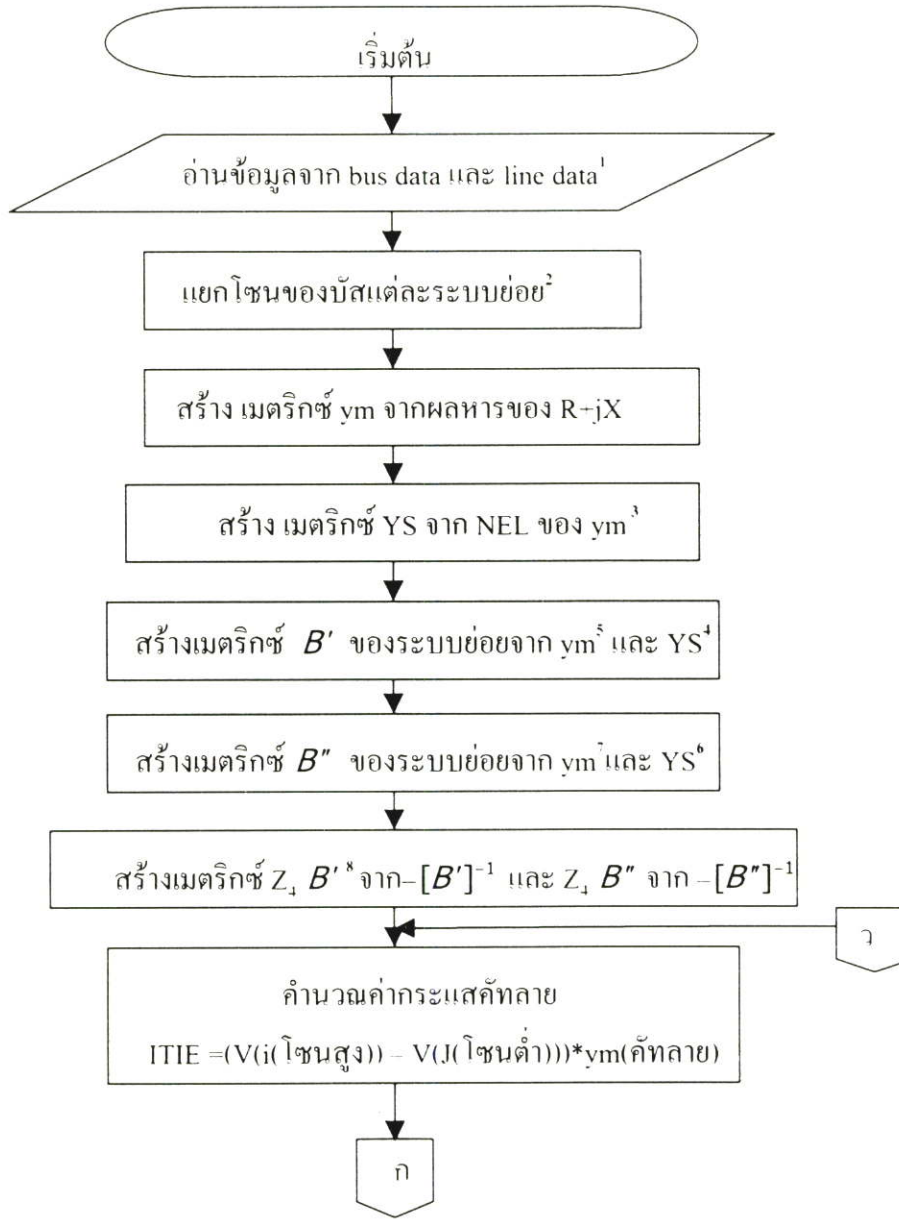
$$|V|_{new} = |V|_{old} + \Delta|V| \tag{4.30}$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$V = |V| * (\cos(\delta) - j * \sin(\delta)) \tag{4.31}$$

4.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์หรือเรียกย่อๆว่า SPF ได้เขียนขึ้นด้วย ภาษาแมทแลบ เวอชั่น 5.3 สำหรับการป้อนข้อมูลอันได้แก่ ข้อมูลบัส ข้อมูลสายส่งได้แสดงไว้แล้วในภาคผนวก ค. ในส่วนขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่จะแสดงต่อไปนี้ ได้เขียนเป็นแผนผังโดยสรุปในส่วนที่ครอบคลุมในรายละเอียดที่สำคัญของโปรแกรม สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมของแผนผังจะได้แสดงในส่วนภาคผนวก ง.



รูปที่4.6 แผนผังโปรแกรมการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ลโดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อย

[1]ตัวอย่าง ผ. 5.1 แสดงการเตรียมข้อมูล ลงใน busdata และ linedata หน้า 116

[2]รูปที่ ผ.5.5 แผนผังแสดงการจัดข้อมูลบัสให้อยู่ในระบบบัสย่อยเดียวกัน หน้า 120

[3]รูปที่ ผ.5.6 แผนผังแสดงการหา self admittance หน้า 122

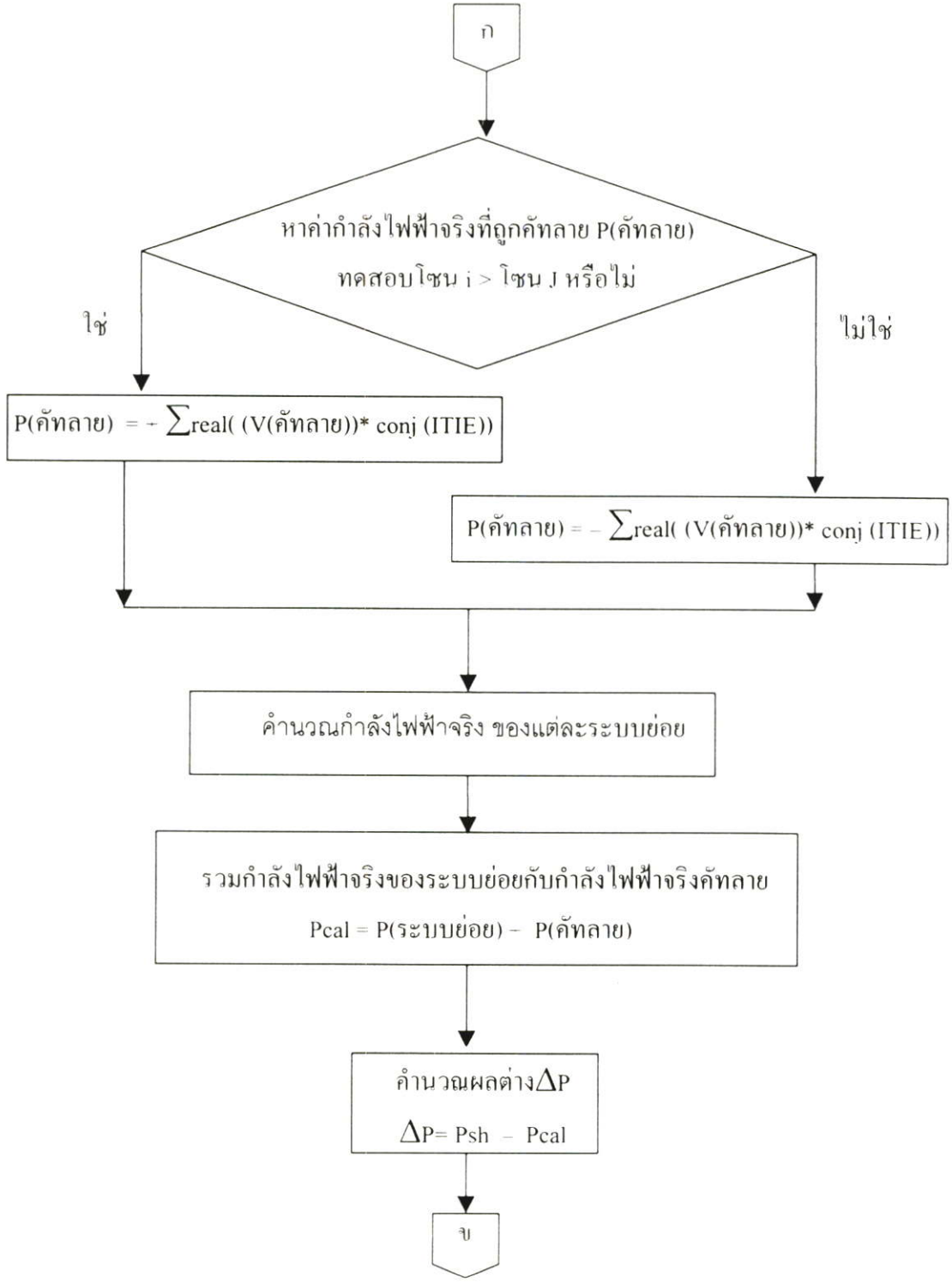
[4]รูปที่ ผ.5.9 แผนผังแสดงการบันทึก self admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B' หน้า 127

[5]รูปที่ ผ.5.10 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B' หน้า 129

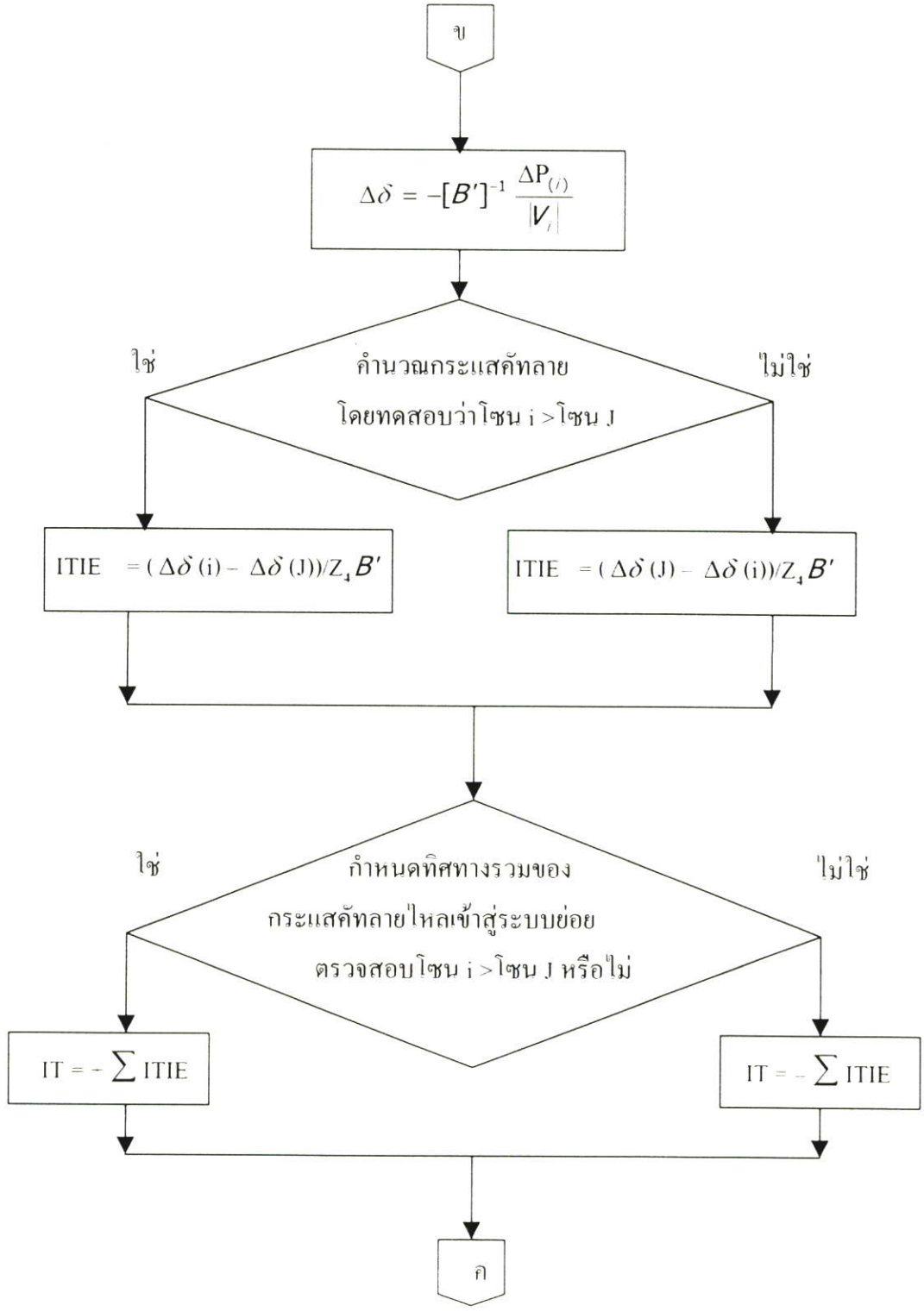
[6]รูปที่ ผ.5.11 แผนผังแสดงการบันทึก self admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B'' หน้า 132

[7]รูปที่ ผ.5.12 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B'' หน้า 134

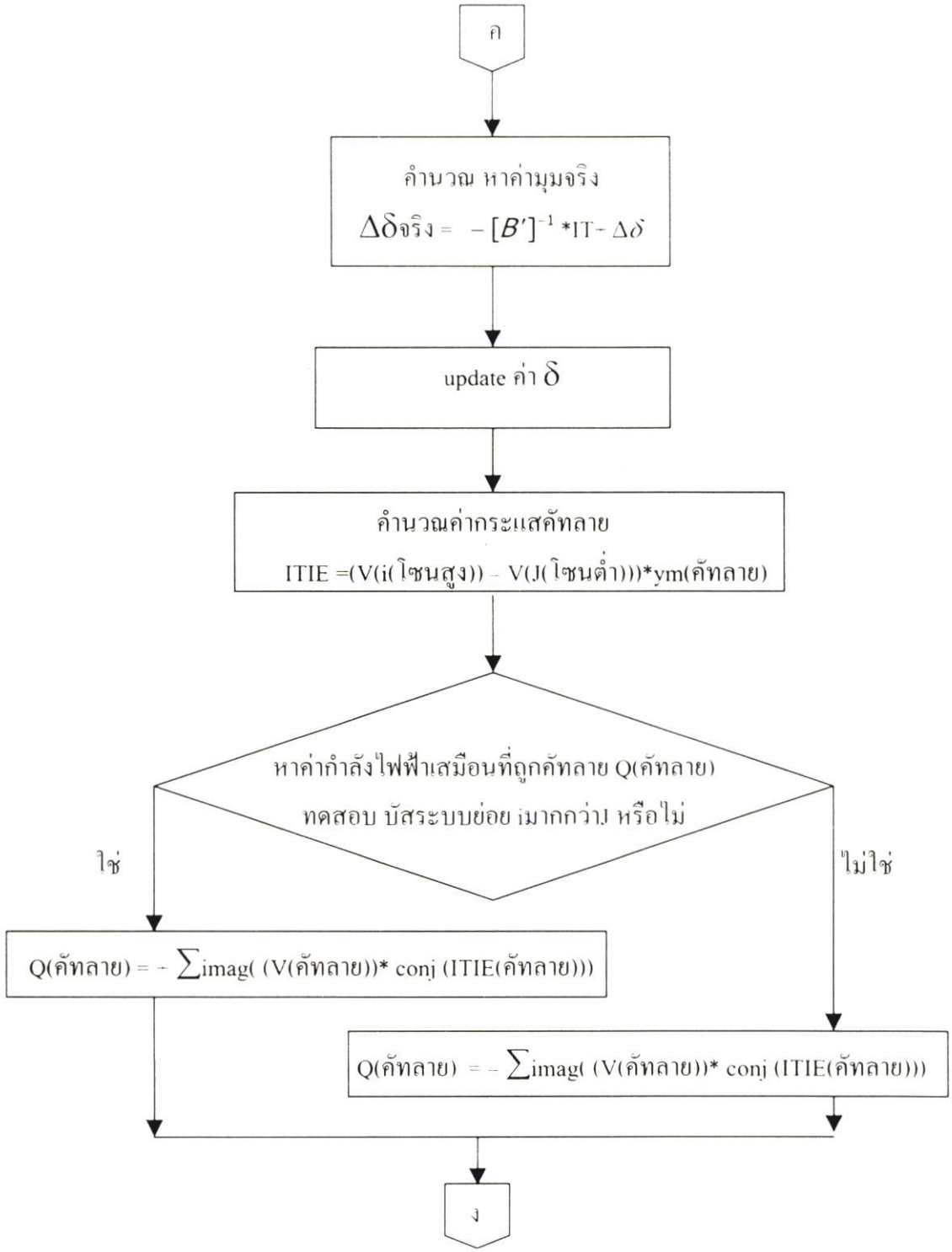
[8]รูปที่ ผ.5.15 แผนผังแสดงการหา Z_i จาก B' หน้า 141


ก
หาค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ถูกคัทลาย P(คัทลาย)
ทดสอบโซน i > โซน J หรือไม่
ใช่
ไม่ใช่
P(คัทลาย) = - ∑real((V(คัทลาย))* conj (ITIE))
P(คัทลาย) = - ∑real((V(คัทลาย))* conj (ITIE))
คำนวณกำลังไฟฟ้าจริง ของแต่ละระบบย่อย
รวมกำลังไฟฟ้าจริงของระบบย่อยกับกำลังไฟฟ้าจริงคัทลาย
Pcal = P(ระบบย่อย) - P(คัทลาย)
คำนวณผลต่างΔP
ΔP= Psh - Pcal
ข

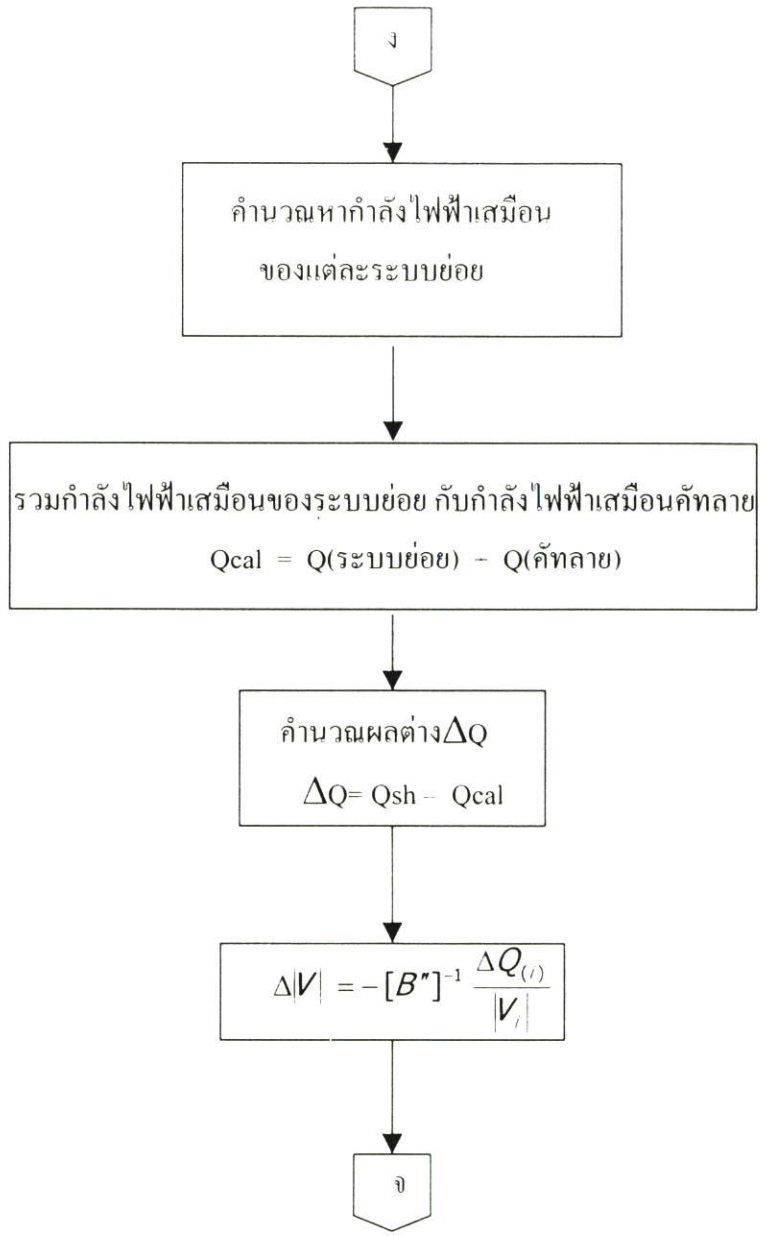
รูปที่4.6 (ต่อ)


จ
$\Delta\delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P_{(i)}}{|V_i|}$
ใช่
คำนวณกระแสคัทลาย
โดยทดสอบว่าโซน i > โซน J
ไม่ใช่
ITIE = (Δδ (i) – Δδ (J))/Z$_4$B′
ITIE = (Δδ (J) – Δδ (i))/Z$_4$B′
ใช่
กำหนดทิศทางรวมของ
กระแสคัทลายไหลเข้าสู่ระบบย่อย
ตรวจสอบโซน i > โซน J หรือไม่
ไม่ใช่
IT = - ∑ ITIE
IT = - ∑ ITIE
ก

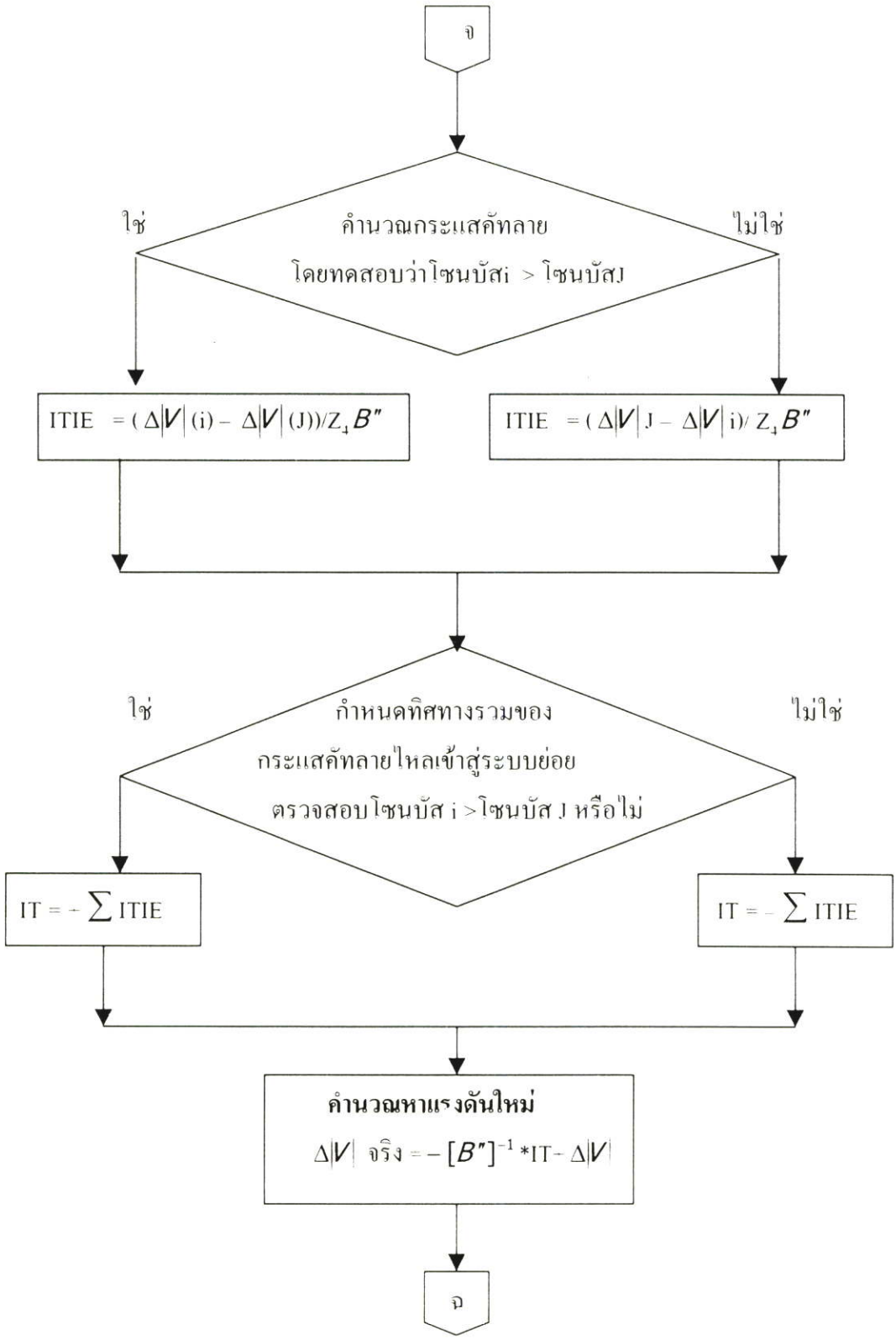
รูปที่4.6 (ต่อ)


ค
คำนวณ หาค่ามุมจริง
$\Delta\delta$จริง = $-[B']^{-1}$ *IT- $\Delta\delta$
update ค่า δ
คำนวณค่ากระแสคัทลาย
ITIE =(V(i(โซนสูง)) – V(J(โซนต่ำ)))*ym(คัทลาย)
หาค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกคัทลาย Q(คัทลาย)
ทดสอบ บัสระบบย่อย เมากกว่า หรือไม่
ใช่
ไม่ใช่
Q(คัทลาย) = – ∑imag((V(คัทลาย))* conj (ITIE(คัทลาย)))
Q(คัทลาย) = – ∑imag((V(คัทลาย))* conj (ITIE(คัทลาย)))
ง

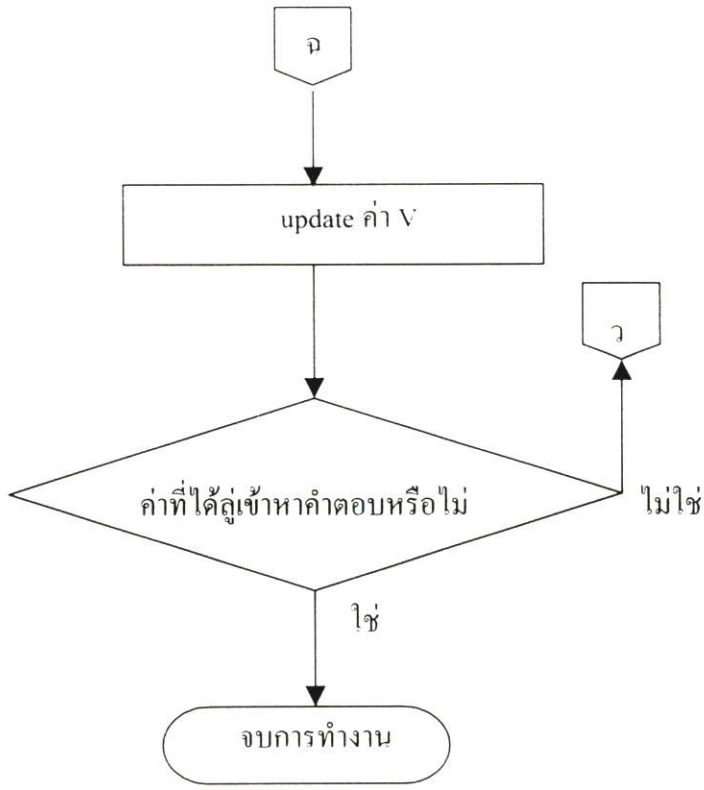
รูปที่4.6 (ต่อ)


ง
คำนวณหากำลังไฟฟ้าเสมือน
ของแต่ละระบบย่อย
รวมกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบย่อย กับกำลังไฟฟ้าเสมือนคัทลาย
Qcal = Q(ระบบย่อย) – Q(คัทลาย)
คำนวณผลต่างΔQ
ΔQ= Qsh – Qcal
$\Delta|V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q_{(i)}}{|V_i|}$
จ

รูปที่4.6 (ต่อ)


จ
ใช่
คำนวณกระแสคัทลาย
โดยทดสอบว่าโซนบัสi > โซนบัสJ
ไม่ใช่
ITIE = (Δ|V| (i) – Δ|V| (J))/Z⊥B″
ITIE = (Δ|V| J – Δ|V| i)/ Z⊥B″
ใช่
กำหนดทิศทางรวมของ
กระแสคัทลายไหลเข้าสู่ระบบย่อย
ตรวจสอบโซนบัส i >โซนบัส J หรือไม่
ไม่ใช่
IT = – ∑ ITIE
IT = – ∑ ITIE
คำนวณหาแรงดันใหม่
Δ|V| จริง = – [B″]⁻¹ *IT– Δ|V|
จ

รูปที่4.6 (ต่อ)



รูปที่4.6 (ต่อ)

บทที่ 5
บันทึกและแสดงผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

5.1 บทนำ

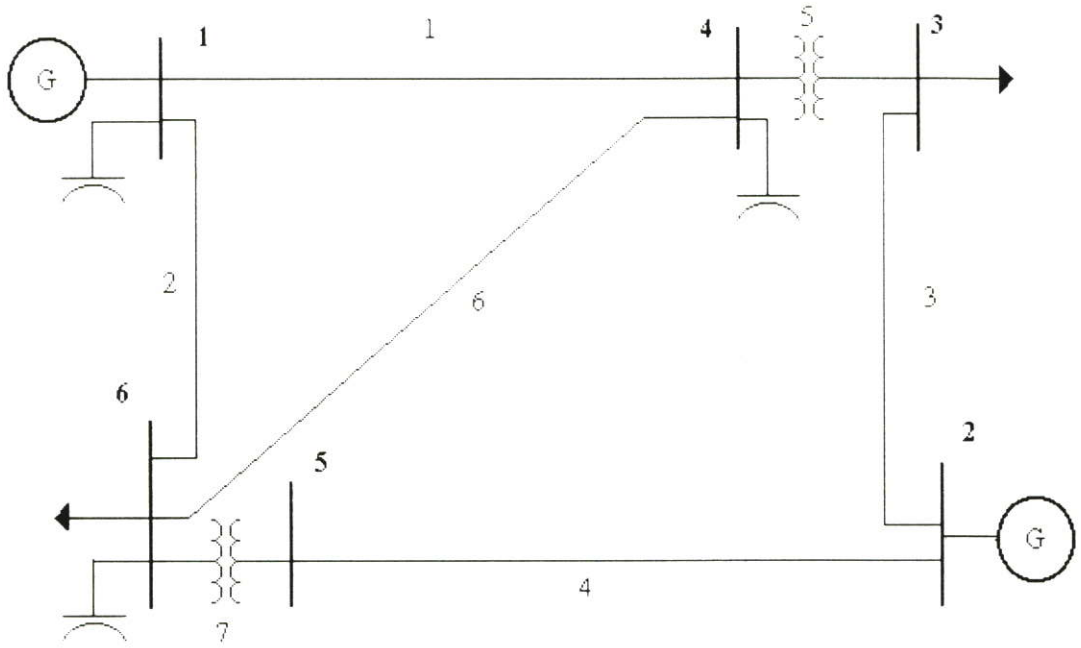
เนื้อหาในบทนี้จะแสดงผลการคำนวณโหลดโฟลว์ ของระบบไฟฟ้ากำลังทั้งระบบกับระบบไฟฟ้ากำลังที่แยกส่วนย่อย โดยเลือกระบบไฟฟ้ากำลัง ตามมาตราฐาน IEEE 6 บัส 14 บัส 30 บัส และ57บัส ได้เลือกนำโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตัน ราฟสัน และฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ของ Hadi Saatdat [9] เป็นโปรแกรมเปรียบเทียบ กับโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ โดยในที่นี้จะใช้อักษรย่อ "SPF"แทนการที่จะกล่าวถึงโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ ที่จะกล่าวถึงต่อไป ในการทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่

- การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยเทียบกับการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ของระบบไฟฟ้ากำลังของระบบที่ไม่ได้แยกส่วน กับระบบที่แยกส่วน ในการทดสอบได้เลือกนำโปรแกรมนิวตัน ราฟสันเป็นโปรแกรมเปรียบเทียบ
- การทดสอบประสิทธิภาพของ SPF ในการทดสอบนี้จะเปรียบเทียบ เวลา.จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำทั้งหมดที่ใช้ โดยเลือกโปรแกรม นิวตัน ราฟสัน. ฟาสต์ดีคัปเปิ้ล เป็นโปรแกรมเปรียบเทียบ
- ทดสอบการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ IEEE 57 บัส

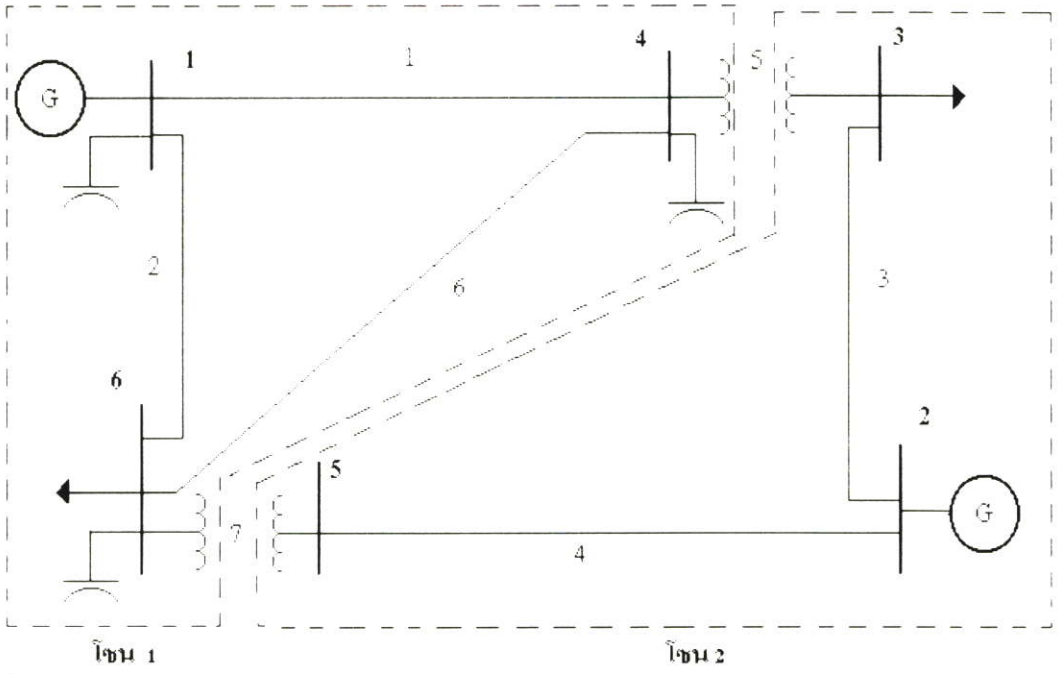
5.2 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการทดสอบความถูกต้อง ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ได้เลือกนำ ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส 14 บัส และ 30 บัส เป็นตัวอ้างอิง และเลือกโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์นิวตัน ราฟสัน เป็นโปรแกรมเปรียบเทียบ และได้เปรียบเทียบหน่วยความจำของการจัดเก็บแอดมิแตนท์เมตริกซ์ของระบบที่ไม่ได้แยกส่วน เทียบกับโปรแกรมที่ทดสอบ

5.2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส

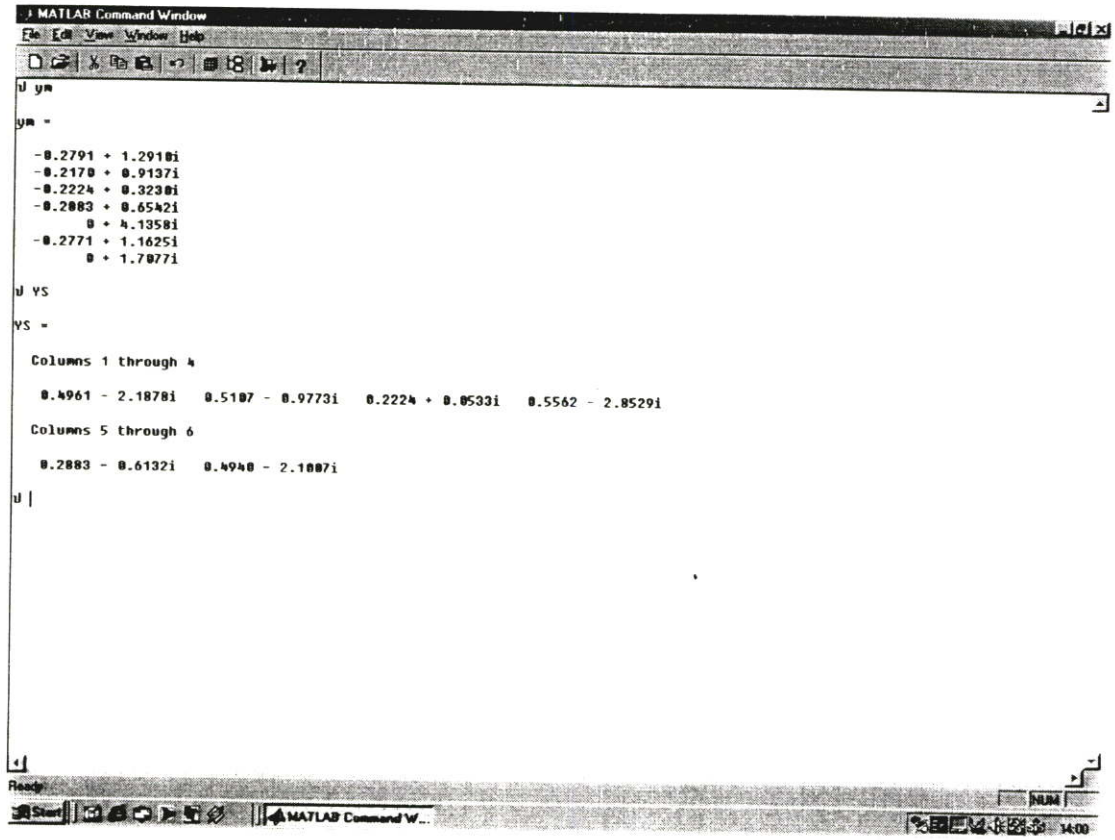


รูปที่5.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส [2]



รูปที่5.2 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส

จากระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัสดังรูปที่ 5.1 ได้ทำการแบ่งระบบออกเป็นสองระบบย่อย ดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยจะเลือกคัทลายในตำแหน่งสายส่งที่สามารถแบ่งระบบออกเป็นระบบย่อยได้และต้องมีจำนวนสายคัทลายน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเลือกคัทลายสายส่งที่บัส 3-4 และ 5-6



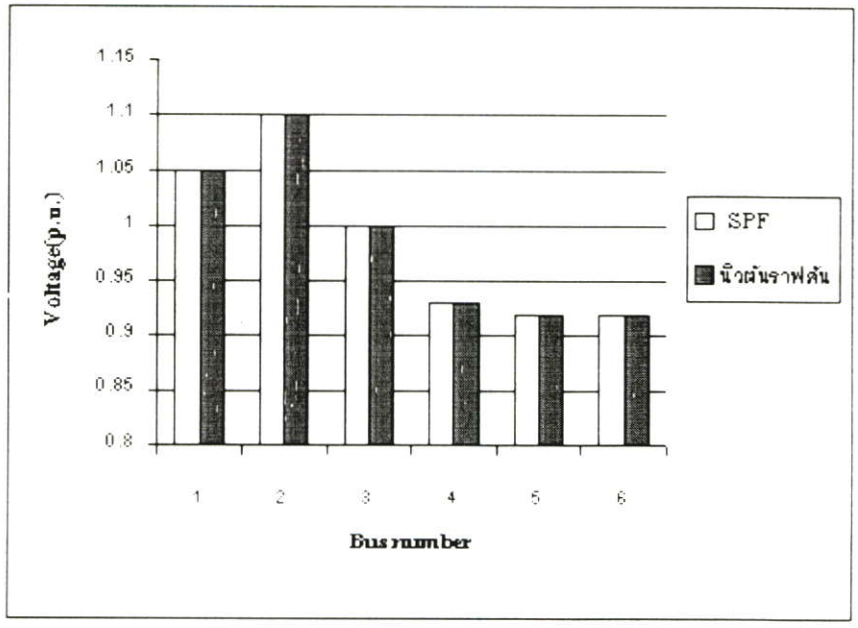
รูปที่5.3 บันทึกผลการคำนวณ mutual admittance และ self admittance ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 6 บัส

ในรูปที่ 5.3 เป็นผลจากการคำนวณ mutual admittance และ self admittance จะเห็นได้ว่า mutual admittance อยู่ในรูปเมตริกซ์อะเรย์หนึ่งมิติ 7x1 และ self admittanceอยู่ในรูปเมตริกซ์อะเรย์หนึ่งมิติ 1x6

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดัน ที่ได้จาก SPF เทียบกับแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 6 บัส

แรงดัน			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
1	1.050	1.050	0
2	1.100	1.100	0
3	1.001	1.001	0
4	0.930	0.930	0
5	0.919	0.919	0
6	0.919	0.919	0

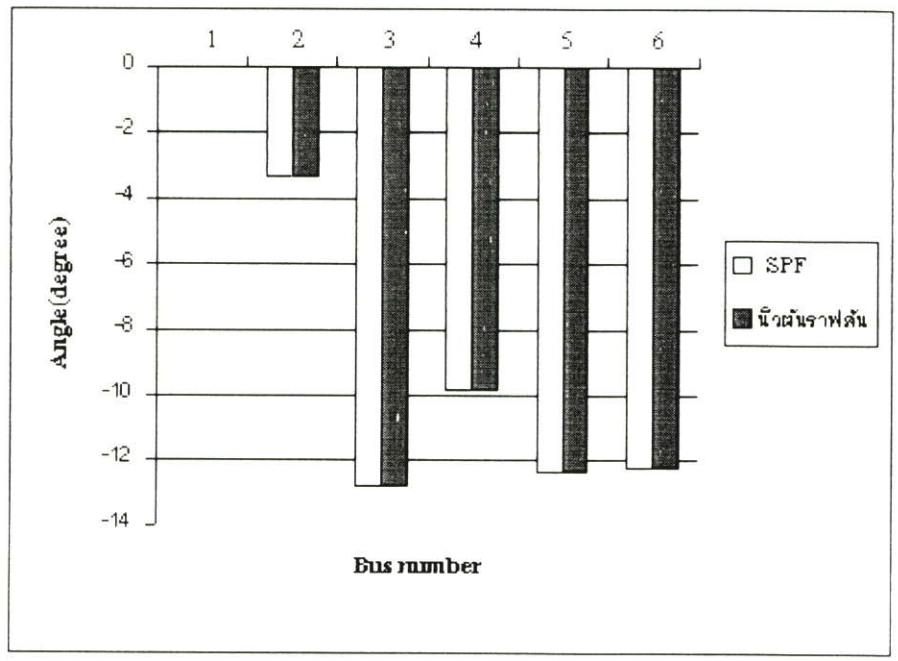
จากตาราง 5.1 เป็นผลที่ได้จากการคำนวณโหลดโฟลว์ ด้วยวิธี SPF เปรียบเทียบกับความถูกต้องของแรงดัน กับวิธี นิวตันราฟ สัน สามารถเขียนสรุปเป็นแผนภูมิดังแสดงในรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่า มีค่าผิดพลาดของแรงดัน น้อยมาก หรือแทบจะไม่เห็นผลต่างของวิธีทั้งสอง



รูปที่5.4 เปรียบเทียบแรงดัน ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และSPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าผิดพลาดของมุม ที่ได้ SPFเทียบกับ มุมที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 6 บัส

มุม			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
1	0	0	0
2	-3.364	-3.361	0.003
3	-12.788	-12.787	0.001
4	-9.838	- 9.837	0.001
5	-12.339	-12.338	0.001
6	-12.242	-12.241	0.001



รูปที่5.5 เปรียบเทียบมุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส

จากตาราง 5.2 เป็นผลที่ได้จากการคำนวณโหลดโฟลว์ ด้วยวิธี SPF เปรียบเทียบกับความถูกต้องของมุมเฟส กับวิธี นิวตันราฟ สัน สามารถเขียนสรุปเป็นแผนภูมิดังแสดงในรูปที่ 5.5 เมื่อดูจากผลค่าผิดพลาดแล้ว คลาดเคลื่อนน้อยมาก

ตารางที่ 5.3 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 6 บัส

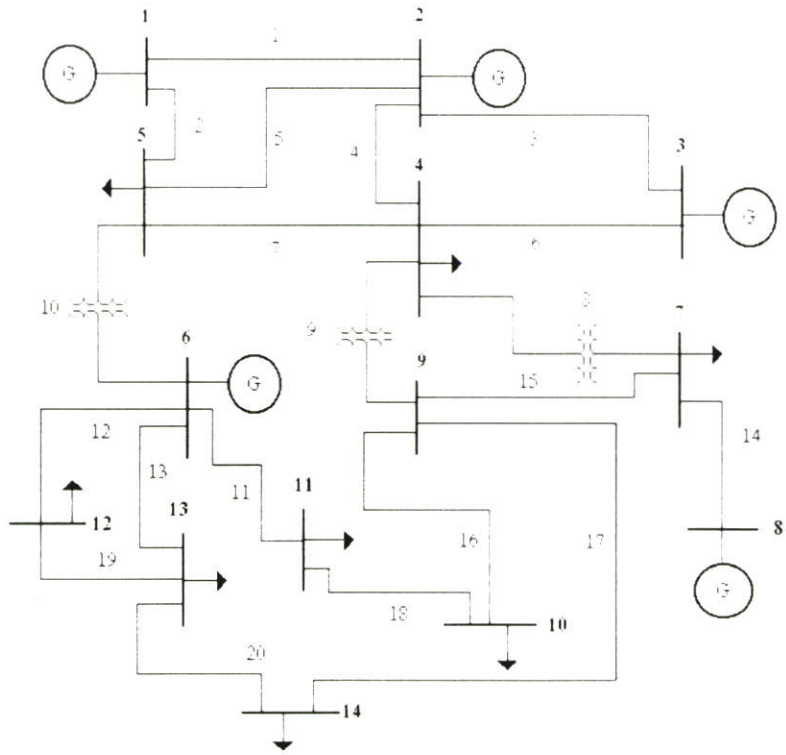
SPF	
แอดมิแตนท์	พื้นที่ที่เก็บค่าแอดมิแตนท์
ym	7x1
YS	1X6
รวม	13

ตารางที่ 5.4 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ ที่ได้จากวิธีนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 6 บัส

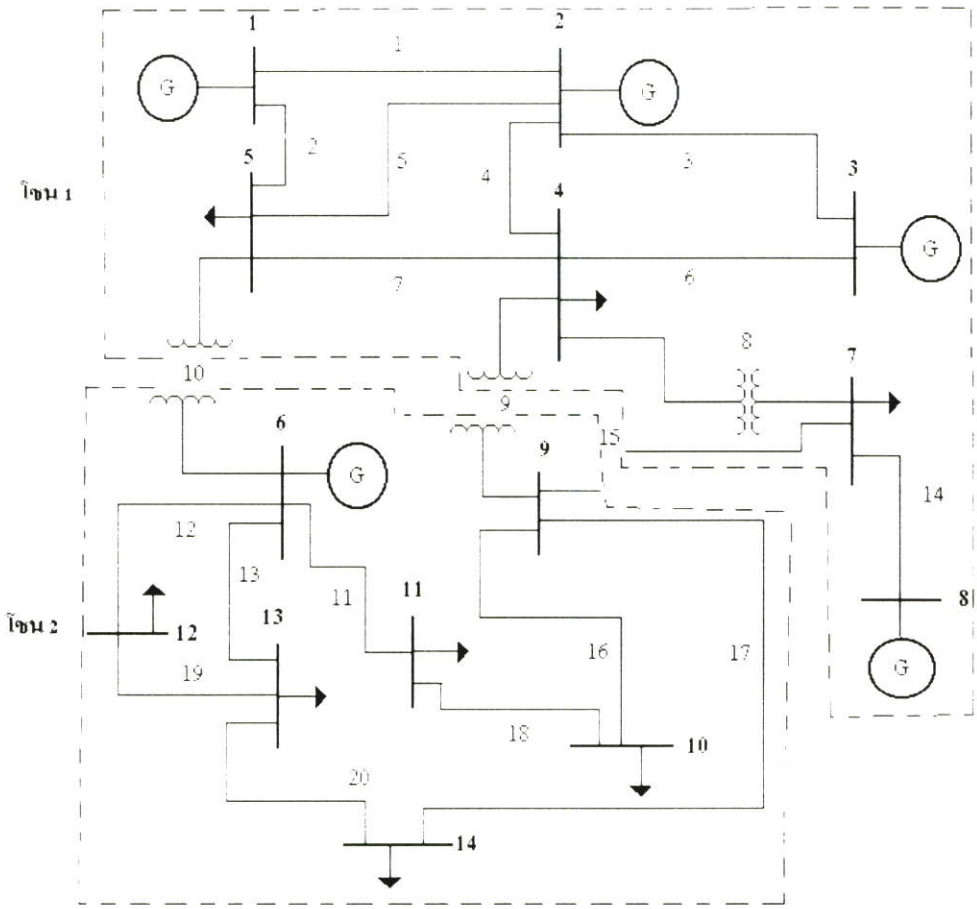
นิวตัน ราฟสัน	
แอดมิแตนท์	พื้นที่ที่เก็บค่าแอดมิแตนท์
Ybus	6x6
รวม	36

เมื่อเปรียบเทียบการบันทึกหน่วยความจำในการจัดเก็บค่าแอดมิแตนท์การจัดเก็บแบบ SPF ดังแสดงในตารางที่ 5.3 ใช้พื้นที่การจัดน้อยกว่า การจัดเก็บแบบนิวตัน ราฟสันดังแสดงในตารางที่ 5.4 มาก

5.2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส



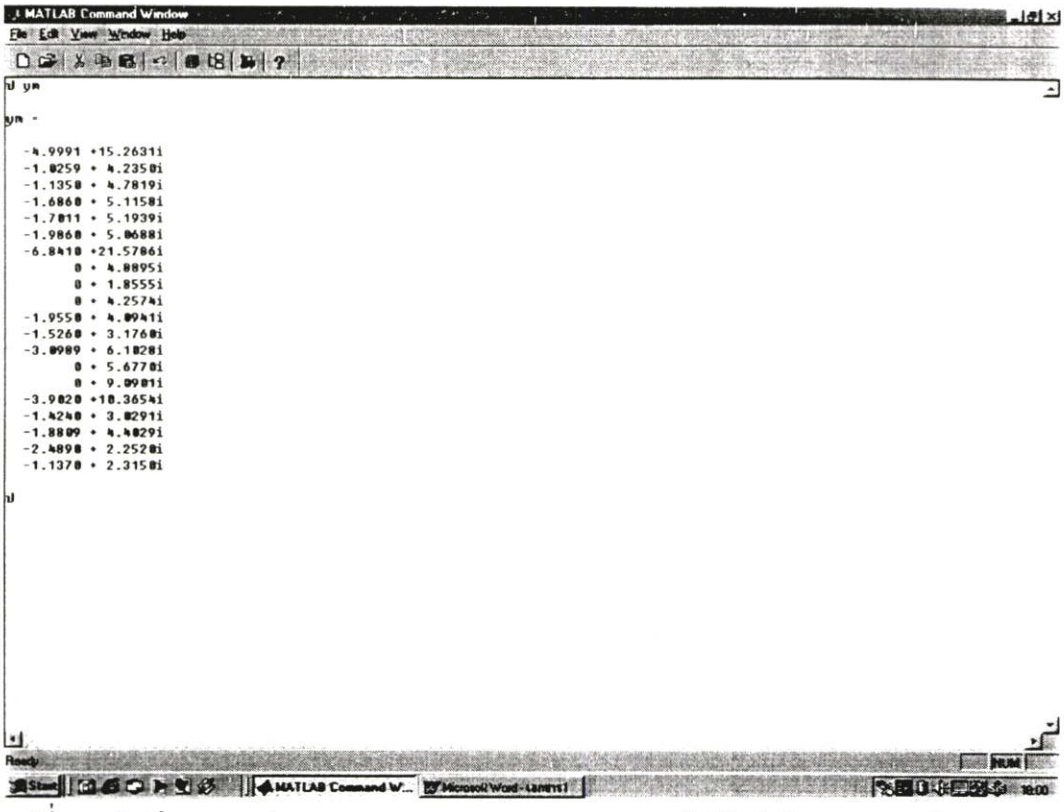
รูปที่5.6 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส[10]



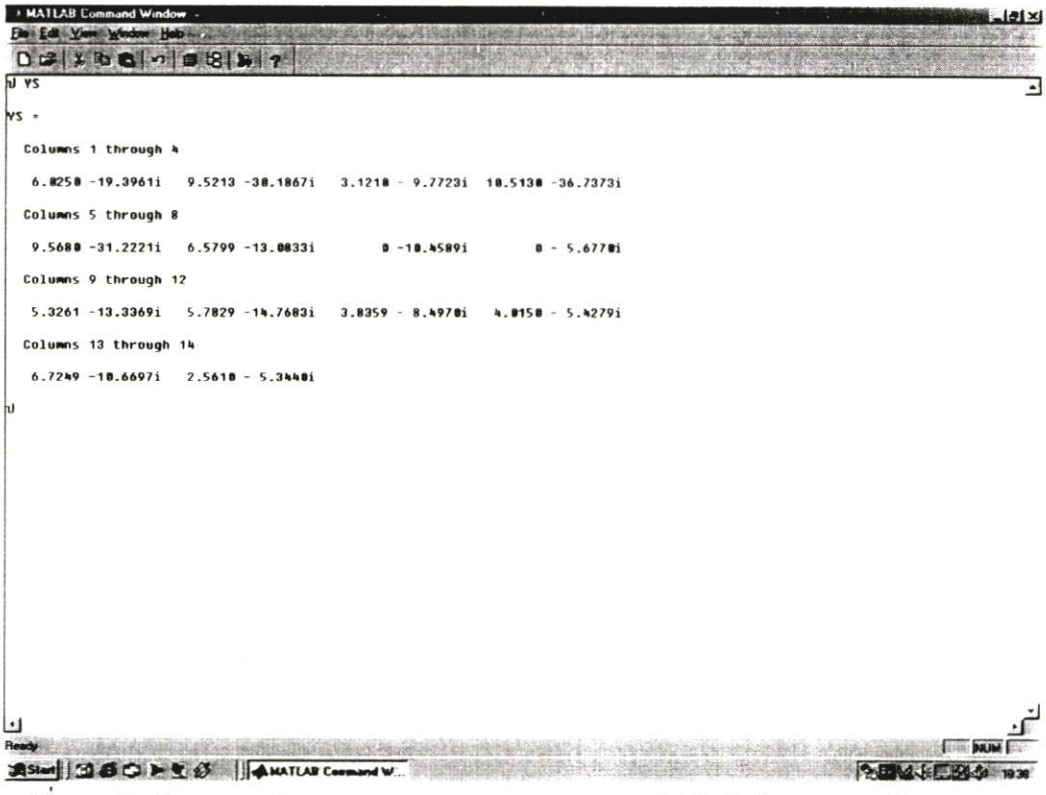
รูปที่5.7 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส

วิธีในการคัทลาย ของระบบ IEEE14 บัส นั้นพิจารณาสายส่ง อาศัยหลักเกณฑ์ที่ควรระวังในการคัทลายดังแสดงในภาคผนวกข. และจะเลือกสายคัทลายจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถแบ่งระบบเป็นสองระบบย่อยเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปแล้วจึงเลือกคัทลายที่สายส่งตรงตำแหน่งบัส 5-6,4-9 และ 7-9

จากรูปที่ 5.8 และ 5.9 แสดงผลการคำนวณ mutual admittance และ self admittance ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส จากรูปที่ 7.8 จะพบว่า mutual admittance มีเมตริกซ์อะเรย์เป็น 20x1 และ self admittanceจากรูปที่ 7.9มีเมตริกซ์อะเรย์เป็น 1x14



รูปที่5.8 บันทึกผลการคำนวณ mutual admittance ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส

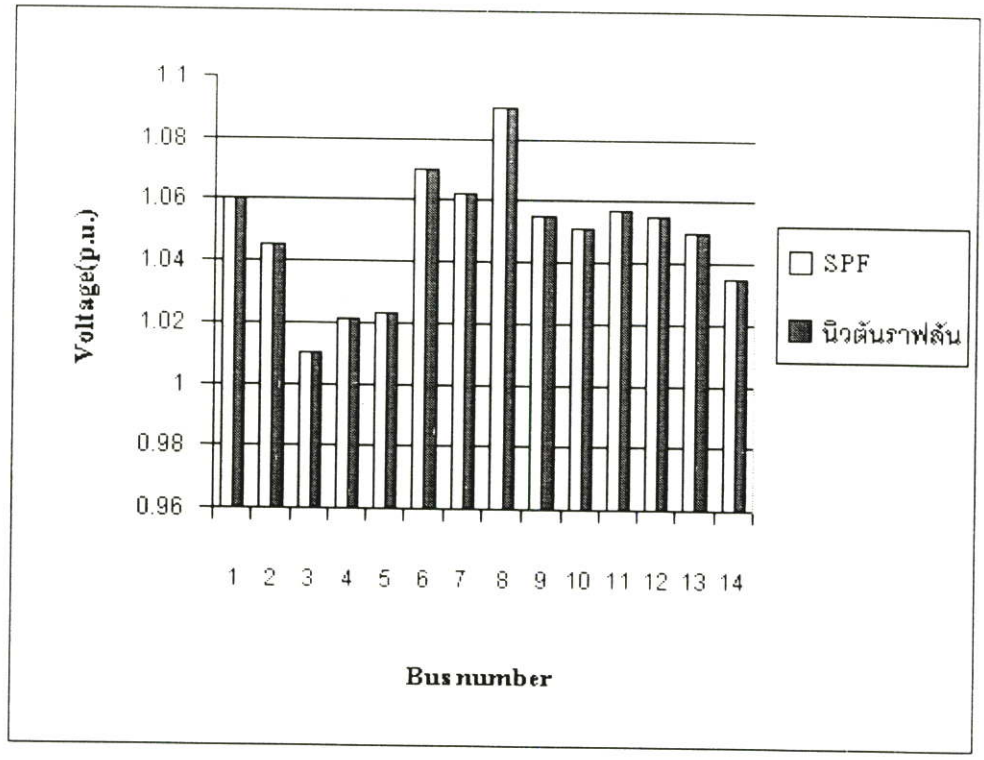


รูปที่5.9 บันทึกผลการคำนวณ self admittance ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดันที่ได้จาก SPF เทียบกับแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส

แรงดัน			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
1	1.06	1.06	0
2	1.045	1.045	0
3	1.01	1.01	0
4	1.021	1.021	0
5	1.023	1.023	0
6	1.07	1.07	0
7	1.062	1.062	0
8	1.09	1.09	0
9	1.055	1.055	0
10	1.051	1.051	0
11	1.057	1.057	0
12	1.055	1.055	0
13	1.05	1.05	0
14	1.035	1.035	0

ผลจากตารางตารางที่ 5.5 เป็นผลจากการคำนวณแรงดันด้วยวิธี SPF เปรียบเทียบกับวิธีนิวตันราฟสัน จะเห็นว่า ค่าผิดพลาดน้อยมาก แทบจะไม่มี ซึ่งได้ถ้าดูผลจากการสร้างแผนภูมิแท่งดังในรูปที่ 5.10 จะเห็นว่าไม่พบค่าผิดพลาดเลย



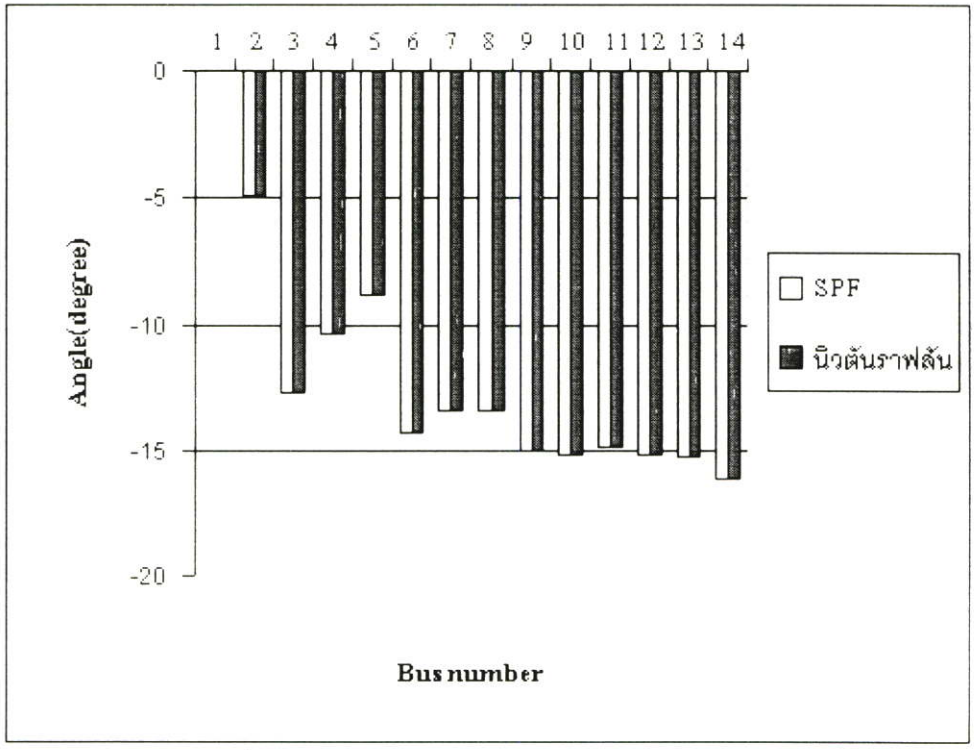
รูปที่5.10 เปรียบเทียบแรงดัน ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และSPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าผิดพลาดของมุม ที่ได้จาก SPF เทียบกับมุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส

มุม			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
1	0	0	0
2	-4.974	-4.974	0
3	-12.694	-12.694	0
4	-10.35	-10.35	0
5	-8.818	-8.818	0
6	-14.25	-14.25	0

ตารางที่5.6 แสดงค่าผิดพลาดของมุมที่ได้จาก SPF เทียบกับ มุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส (ต่อ)

มุม			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
7	-13.381	-13.381	0
8	-13.381	-13.381	0
9	-14.958	-14.958	0
10	-15.119	-15.119	0
11	-14.815	-14.815	0
12	-15.107	-15.104	0.003
13	-15.182	-15.184	-0.002
14	-16.057	-16.057	0



รูปที่5.11 เปรียบเทียบมุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และSPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส

จากตารางที่ 5.6 และ รูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่า มีค่าผิดพลาดน้อยมาก จากนั้นได้แสดงผลของหน่วยความจำที่ใช้ไปในการจัดเก็บแอดมิแตนท์เมตริกซ์ ดังตารางที่ 5.7และตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.7 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส

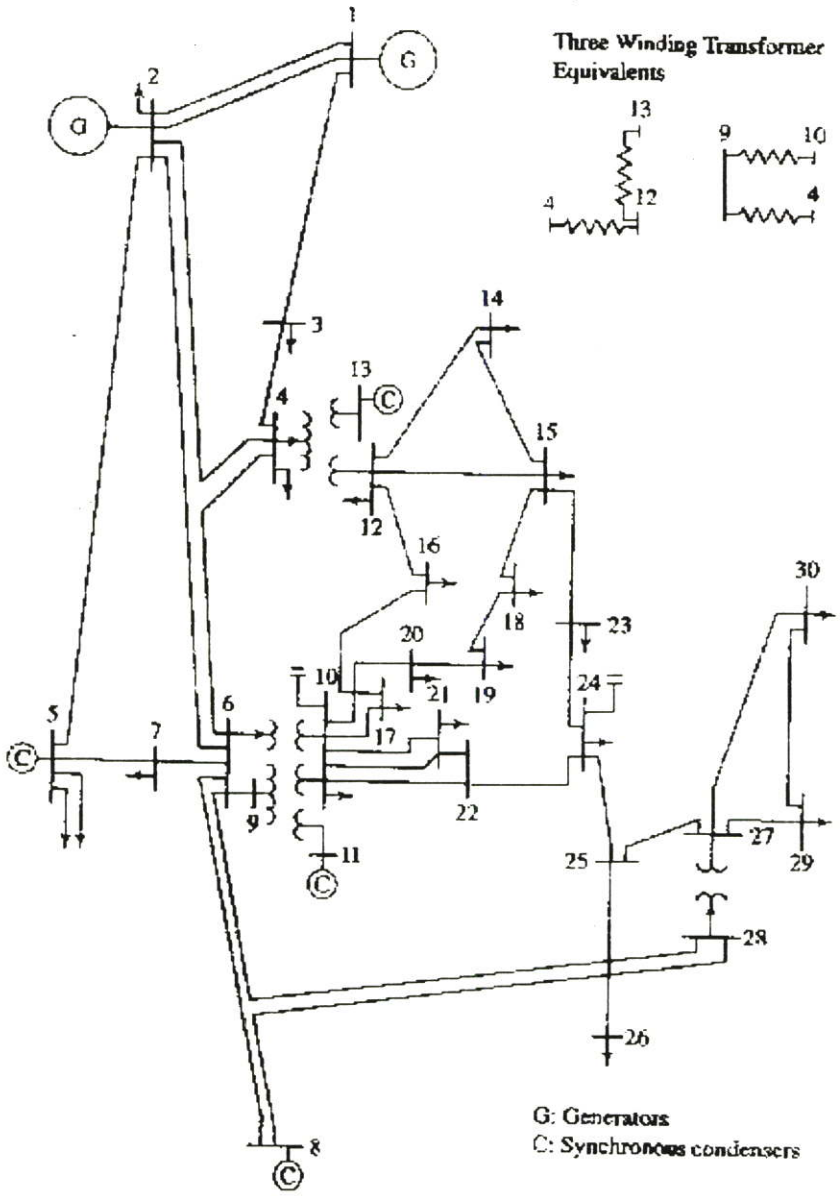
SPF	
แอดมิแตนท์	พื้นที่ที่เก็บค่าแอดมิแตนท์
ym	20x1
YS	1X14
รวม	34

ตารางที่ 5.8 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ ที่ได้จากวิธีนิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส

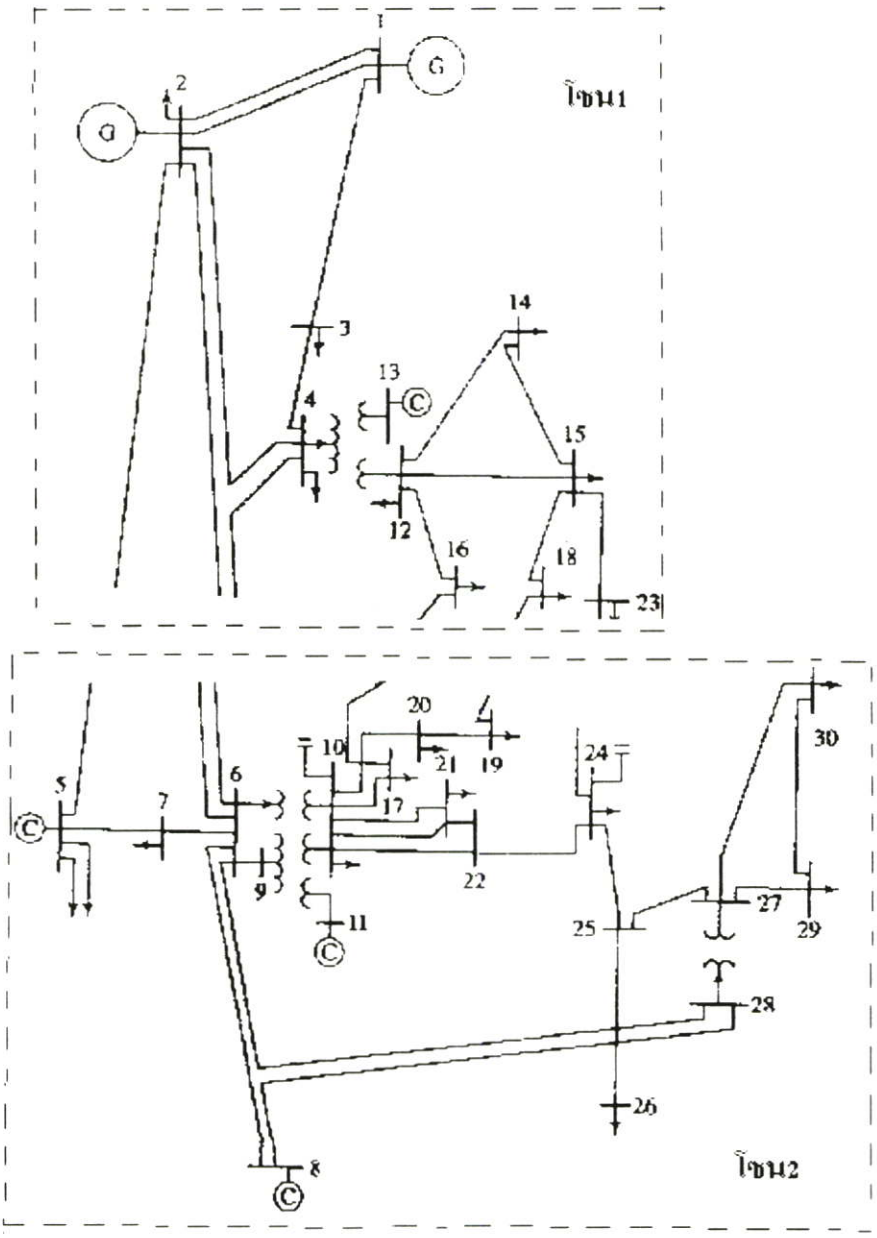
นิวตัน ราฟสัน	
แอดมิแตนท์	พื้นที่ที่เก็บค่าแอดมิแตนท์
Ybus	14x14
รวม	196

จากตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8 เป็นผลของการจัดเก็บแอดมิแตนท์เมตริกซ์ โดยคิดเป็นตารางหน่วย จะเห็นว่าวิธี SPF ใช้พื้นที่น้อยกว่าวิธี นิวตัน ราฟสัน

5.2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส



รูปที่5.12 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส[9]



รูปที่5.13 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 1

สำหรับวิธีในการคัทลาย ของระบบ IEEE 30 บัส นั้นพิจารณา branch สายส่ง อาศัยหลักเกณฑ์ที่ควรระวังในการคัทลายดังแสดงในภาคผนวก ข.เป็นสำคัญ เช่นการคัทลาย IEEE 30 บัส แบบที่ 1ที่คัทลายแบบสุ่มบัสที่ใกล้ๆกันออกเป็นสองกลุ่มย่อยๆ โดยจะพบว่าไม่มีบัสใดบัสหนึ่งหลุดออกนอกโซนทั้งสอง

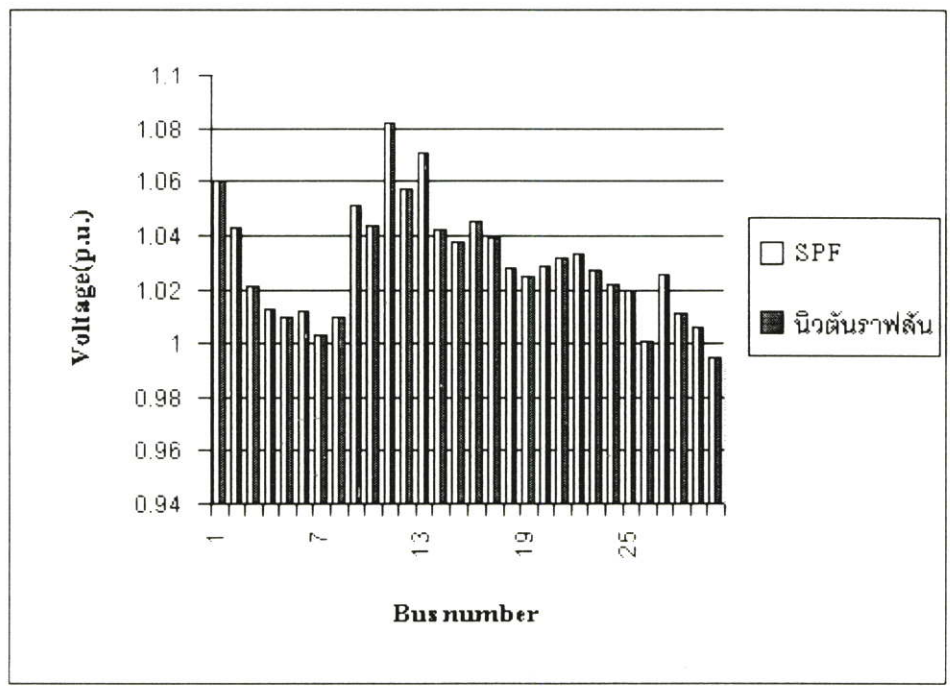
ตารางที่ 5.9 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดันที่ได้จาก SPF เทียบกับแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 1

แรงดัน			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
1	1.06	1.06	0
2	1.043	1.043	0
3	1.022	1.022	0
4	1.013	1.013	0
5	1.01	1.01	0
6	1.012	1.012	0
7	1.003	1.003	0
8	1.01	1.01	0
9	1.051	1.051	0
10	1.044	1.044	0
11	1.082	1.082	0
12	1.057	1.057	0
13	1.071	1.071	0
14	1.043	1.042	-0.001
15	1.038	1.038	0
16	1.045	1.045	0
17	1.039	1.039	0
18	1.028	1.028	0
19	1.025	1.025	0
20	1.029	1.029	0
21	1.031	1.032	0.001
22	1.034	1.033	-0.001
23	1.028	1.027	-0.001
24	1.022	1.022	0
25	1.019	1.019	0

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดันที่ได้จาก SPF เทียบกับ แรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 1(ต่อ)

แรงดัน			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
26	1.002	1.001	-0.001
27	1.026	1.026	0
28	1.011	1.011	0
29	1.006	1.006	0
30	0.995	0.995	0

จากตารางที่ 5.9สามารถเขียน แผนภูมิแท่ง เปรียบเทียบแรงดันทั้งสองวิธีได้ ดังรูปที่ 5.9



รูปที่5.14 เปรียบเทียบแรงดัน ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 1

จากตารางที่ 5.9 ได้แสดงเป็นกราฟแผนภูมิแท่งแสดงผลของการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแรงดันดังรูปที่5.14 จะเห็นว่ามีค่าผิดพลาดน้อยมาก

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าผิดพลาดของมุม ที่ได้จาก SPFเทียบกับ มุมที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 1

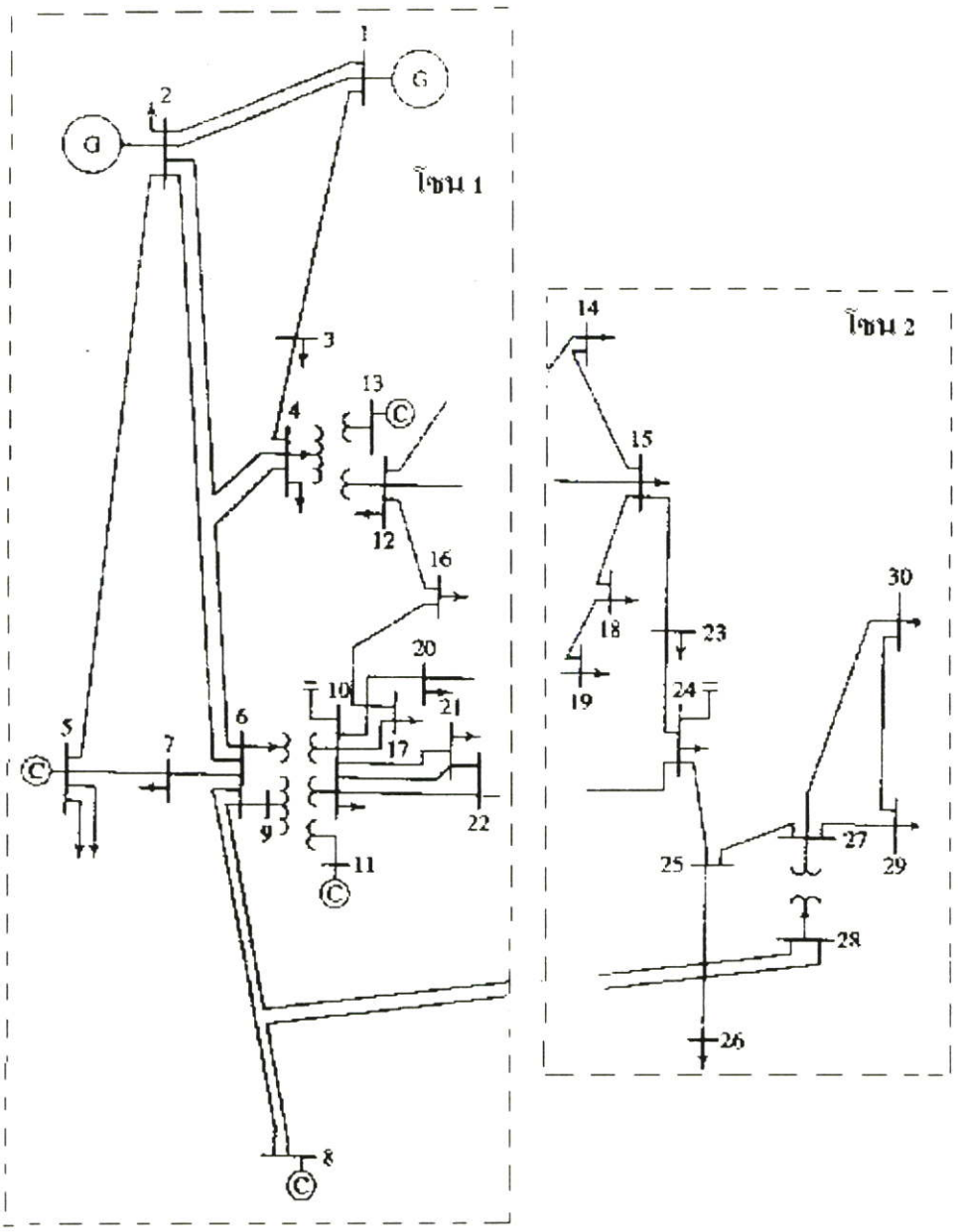
มุม			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
1	0	0	0
2	-5.497	-5.496	0.001
3	-8.003	-8.002	0.001
4	-9.66	-9.659	0.001
5	-14.389	-14.38	0.009
6	-11.396	-11.396	0
7	-13.161	-13.149	0.012
8	-12.113	-12.114	-0.001
9	-14.438	-14.432	0.006
10	-16.032	-16.024	0.008
11	-14.438	-14.432	0.006
12	-15.298	-15.301	-0.003
13	-15.298	-15.3	-0.002
14	-16.183	-16.19	-0.007
15	-16.272	-16.276	-0.004
16	-15.881	-15.879	0.002
17	-16.194	-16.187	0.007
18	-16.882	-16.881	0.001
19	-17.054	-17.049	0.005
20	-16.856	-16.851	0.005
21	-16.509	-16.468	0.041
22	-16.411	-16.455	- 0.044
23	-16.645	-16.66	-0.015
24	-16.798	-16.829	-0.031

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าผิดพลาดของมุม ที่ได้จาก SPF เทียบกับมุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 1(ต่อ)

มุม			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
25	-16.4	-16.423	-0.023
26	-16.818	-16.835	-0.017
27	-15.893	-15.913	-0.02
28	-12.054	-12.056	-0.002
29	-17.117	-17.133	-0.016
30	-17.995	-18.016	-0.021

รูปที่5.15 เปรียบเทียบมุม ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE30 บัสแบบที่ 1

จากตารางที่ 5.10 ได้แสดงเป็นกราฟแผนภูมิแท่งแสดงผลของการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของมุมเฟสดังรูปที่ 5.15 จะเห็นว่ามีค่าผิดพลาดน้อยมากเช่นกัน



รูปที่5.16 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 2

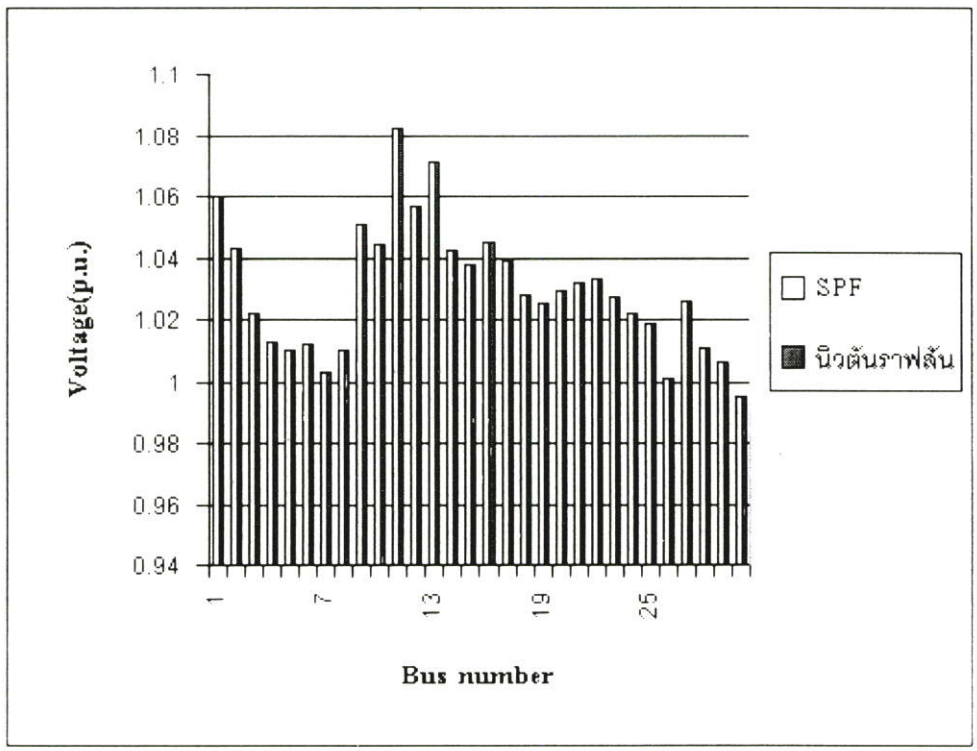
สำหรับวิธีในการคัทลายของระบบ IEEE 30 บัสแบบที่2 นั้นพิจารณา branch สายส่ง อาศัยหลักเกณฑ์ที่ควรระวังในการคัทลายดังแสดงในภาคผนวกข. เช่นเดียวกับการคัทลายแบบที่1 แต่จะเพิ่มการพิจารณาในการแบ่งโซนให้หมายเลขบัสอยู่ในกลุ่มเดียวกันแบบเรียงลำดับหมายเลขบัสแบบอนุกรมให้มากที่สุด

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดันที่ได้จาก SPF เทียบกับแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 2

แรงดัน			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
1	1.06	1.06	0
2	1.043	1.043	0
3	1.022	1.022	0
4	1.013	1.013	0
5	1.01	1.01	0
6	1.012	1.012	0
7	1.003	1.003	0
8	1.01	1.01	0
9	1.051	1.051	0
10	1.044	1.044	0
11	1.082	1.082	0
12	1.057	1.057	0
13	1.071	1.071	0
14	1.043	1.042	-0.001
15	1.038	1.038	0
16	1.045	1.045	0
17	1.039	1.039	0
18	1.028	1.028	0
19	1.025	1.025	0
20	1.029	1.029	0
21	1.031	1.032	0.001
22	1.034	1.033	-0.001
23	1.028	1.027	-0.001
24	1.022	1.022	0
25	1.019	1.019	0

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าผิดพลาดของแรงดันที่ได้จาก SPF เทียบกับแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 2(ต่อ)

แรงดัน			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
26	1.002	1.001	-0.001
27	1.026	1.026	0
28	1.011	1.011	0
29	1.006	1.006	0
30	0.995	0.995	0



รูปที่5.17 เปรียบเทียบแรงดัน ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 2

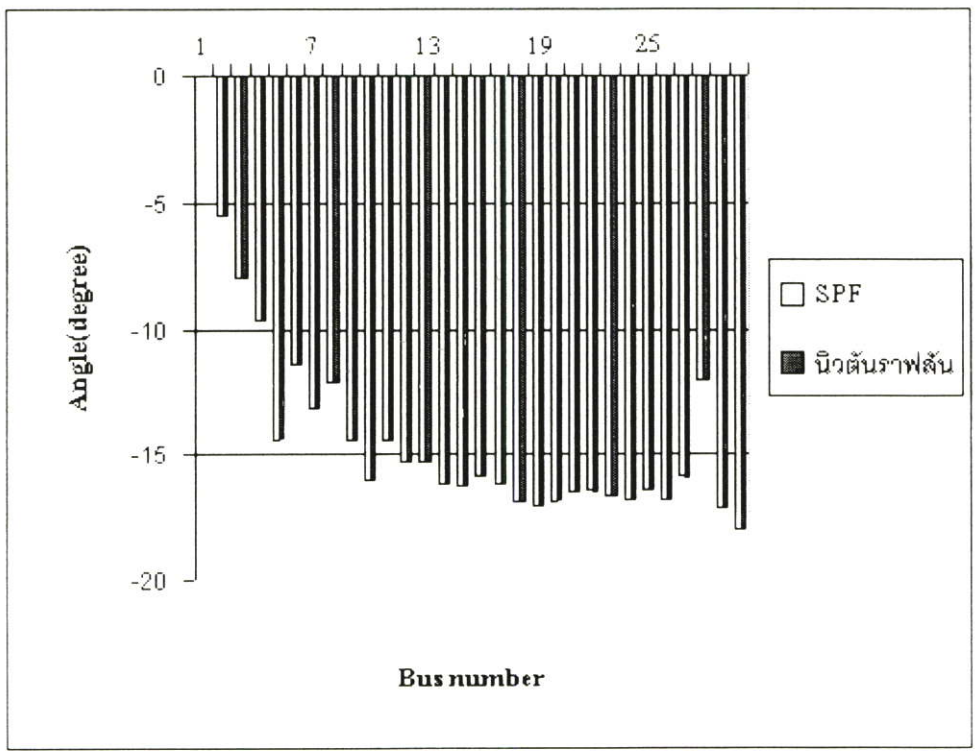
จากตารางที่ 5.11 ได้แสดงเป็นกราฟแผนภูมิแท่งแสดงผลของการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแรงดันดังรูปที่5.17 จะเห็นว่ามีค่าผิดพลาดน้อยมาก

ตารางที่ 5.12 แสดงค่าผิดพลาดของมุมที่ได้จาก SPF เทียบกับมุมที่ได้จาก นิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 2

มุม			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
1	0	0	0
2	-5.497	-5.496	0.001
3	-8.003	-8.002	0.001
4	-9.66	-9.659	0.001
5	-14.389	-14.38	0.009
6	-11.396	-11.396	0
7	-13.161	-13.149	0.012
8	-12.113	-12.114	-0.001
9	-14.438	-14.432	0.006
10	-16.032	-16.024	0.008
11	-14.438	-14.432	0.006
12	-15.298	-15.301	-0.003
13	-15.298	-15.3	-0.002
14	-16.189	-16.19	-0.001
15	-16.27	-16.276	-0.006
16	-15.881	-15.879	0.002
17	-16.194	-16.187	0.007
18	-16.881	-16.881	0
19	-17.053	-17.049	0.004
20	-16.855	-16.851	0.004
21	-16.509	-16.468	0.041
22	-16.410	-16.455	-0.045
23	-16.644	-16.66	-0.016
24	-16.797	-16.829	-0.032
25	-16.4	-16.423	-0.023
26	-16.817	-16.835	-0.018

ตารางที่ 5.12 แสดงค่าผิดพลาดของมุมที่ได้จาก SPF เทียบกับมุม ที่ได้จาก นิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัสแบบที่ 2(ต่อ)

มุม			
บัส	SPF	นิวตัน ราฟสัน	ค่าผิดพลาด
27	-15.893	-15.913	-0.02
28	-12.054	-12.056	-0.002
29	-17.117	-17.133	-0.016
30	-17.994	-18.016	-0.022



รูปที่5.18 เปรียบเทียบมุมที่ได้จาก นิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบ ทดสอบ IEEE 30 บัส แบบที่ 2

ในการเปรียบเทียบมุมเฟสจากตารางที่ 5.12 หรือจากรูปที่ 5.18 จะเห็นว่ามีค่าผิดพลาดน้อยมาก เมื่อมาวิเคราะห์พื้นที่หน่วยความจำที่ใช้ไป ดังตารางที่ 5.13 และ ตารางที่ 5.14 SPF จะใช้พื้นที่ในการจัดเก็บค่าแอดมิแตนท์น้อยกว่ามาก

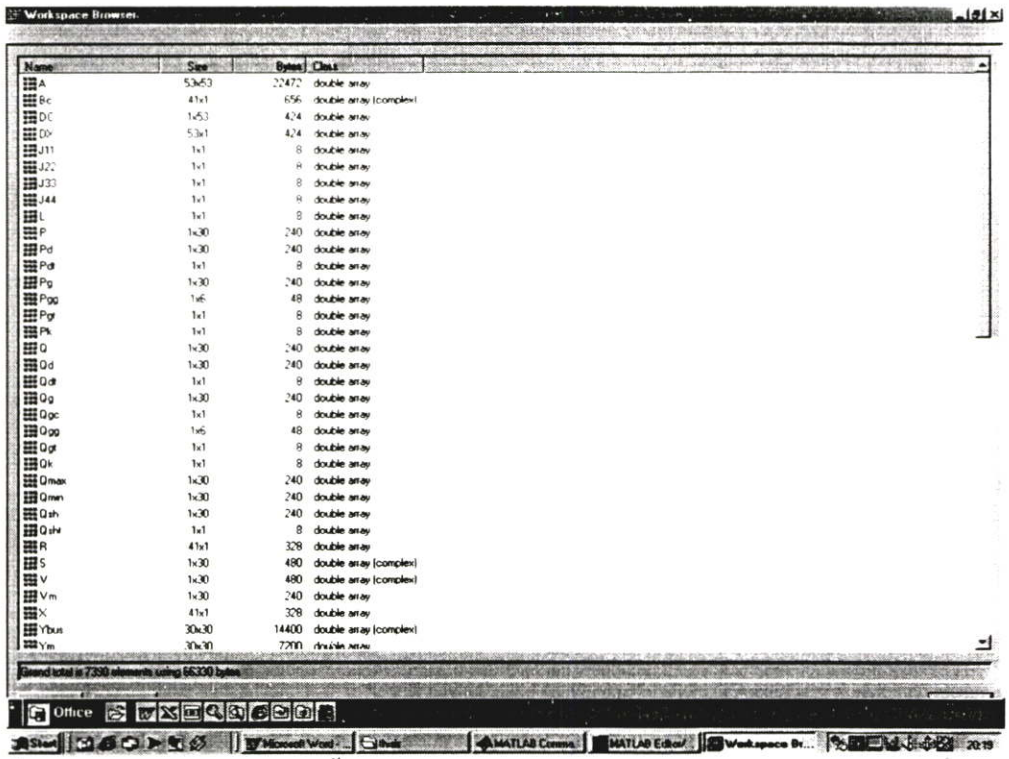
ตารางที่ 5.13 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ ที่ได้จาก SPF ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัส

SPF	
แอดมิแตนท์	พื้นที่ที่เก็บค่าแอดมิแตนท์
ym	41x1
YS	1X30
รวม	71

ตารางที่ 5.14 แสดงการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บแอดมิแตนท์ ที่ได้จากวิธีนิวตัน ราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 30 บัส

นิวตัน ราฟสัน	
แอดมิแตนท์	พื้นที่ที่เก็บค่าแอดมิแตนท์
Ybus	30x30
รวม	900

ผลจากการทดสอบแรงดัน และมุมจาก SPF มีค่าใกล้เคียงกับแรงดัน และมุมที่ได้จากโปรแกรมการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยนิวตันราฟสัน และจากรูปที่ 5.13 และ 5.16 เป็นการคัทลายแบ่งระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบแตกต่างกัน พบว่าค่าแรงดันและมุมที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยนิวตันราฟสัน และเมื่อเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บค่าแอดมิแตนท์ ดังแสดงในตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบกับตารางที่5.4 . ตารางที่5.7 เปรียบเทียบกับตารางที่ 5.8 และตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบกับตารางที่ 5.14 SPF จะใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บค่าแอดมิแตนท์น้อยกว่ามากเนื่องจาก เป็นเมตริกซ์อะเรย์หนึ่งมิติ โดยที่จำนวน mutual admittance จะแปรผันโดยตรงกับจำนวนสายส่ง และ self admittance จะแปรผันโดยตรงกับจำนวนบัส ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่4 ซึ่งถ้าเมื่อเทียบกับวิธีการแยกส่วนย่อยแบบเดิมที่ยังใช้การจัดเก็บแอดมิแตนท์แบบสองมิติ เช่น 30 บัส แบบเดิม[3] จะแบ่งเป็นสองโซน โซนละ 15 บัส จะใช้เนื้อที่จัดเก็บแอดมิแตนท์ทั้งหมด 450 ตารางหน่วย แต่ถ้าเป็น SPF จะใช้ 71 ตารางหน่วย ดังแสดงใน ตารางที่5.13



รูปที่ 5.19 แสดงหน่วยความจำทั้งหมดในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตันราฟสันของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส

รูปที่ 5.20 แสดงหน่วยความจำทั้งหมดที่ได้จาก SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส แบบที่ 2

5.3 การทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์

ในการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ได้นำโปรแกรม วิเคราะห์โหลดโฟลว์ นิวตัน ราฟสัน และ โปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ฟาสต์ดีคัปเปิ้ล มาเป็นตัวเปรียบเทียบ โดยจะทดสอบ เวลา,จำนวนรอบที่เข้าสู่คำตอบและหน่วยความจำทั้งหมด โดยดูผลของหน่วยความจำจาก Workspace Browser ดังแสดงในรูป5.19 และรูป5.20 ซึ่งจะแสดงค่าตัวแปร หรือหน่วยความจำทั้งหมดที่ใช้ไป

ตารางที่ 5.15 ค่าของเวลา ,จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 6 บัส

โปรแกรมการคำนวณ	เวลาที่ใช้ไป (วินาที)	จำนวนรอบ	หน่วยความจำทั้งหมดที่ใช้ไป (ไบต์)
Newton-raphson	0.72	4	5.346
Fastdecouple	0.71	6	4.386
SPF	0.11	4	4.916

ตารางที่ 5.16 ค่าของเวลา ,จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 14 บัส

โปรแกรมการคำนวณ	เวลาที่ใช้ไป (วินาที)	จำนวนรอบ	หน่วยความจำทั้งหมดที่ใช้ไป (ไบต์)
Newton-raphson	2.09	3	17.762
Fastdecouple	2.25	19	13.258
SPF	0.94	14	11.756

ตารางที่ 5.17 ค่าของเวลา ,จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 30 บัสแบบที่ 1

โปรแกรมการคำนวณ	เวลาที่ใช้ไป (วินาที)	จำนวนรอบ	หน่วยความจำทั้งหมดที่ใช้ไป (ไบต์)
Newton-raphson	5.05	4	66.354
Fastdecouple	5	15	42.610
SPF	6.59	11	33.396

ตารางที่ 5.18 ค่าของเวลา ,จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 30 บัสแบบที่ 2

โปรแกรมการคำนวณ	เวลาที่ใช้ไป (วินาที)	จำนวนรอบ	หน่วยความจำทั้งหมดที่ใช้ไป (ไบต์)
Newton-raphson	5.05	4	66.354
Fastdecouple	5	15	42.610
SPF	5.71	10	31.988

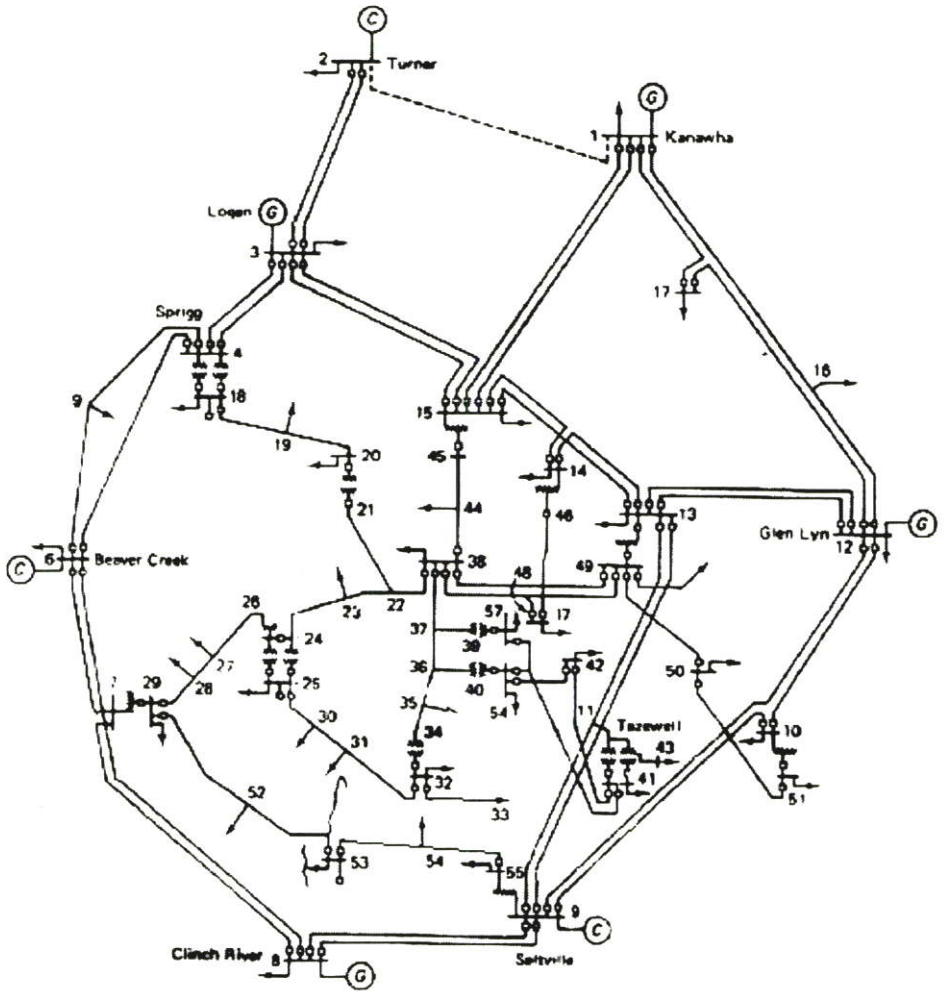
ผลจากการเปรียบเทียบเวลา จะพบว่า SPF จะใช้เวลาในการคำนวณเร็วกว่าโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์นิวตันราฟสันและโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ก็ต่อเมื่อขนาดระบบไฟฟ้ากำลังไม่ใหญ่มากดังแสดงในช่อง TIME ของตาราง 5.15 และตาราง 5.16 ในทางกลับกันถ้าระบบมีขนาดใหญ่ จะใช้เวลานานกว่านิวตัน ราฟสันและฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ดังแสดงในช่องเวลา ของตารางที่ 5.17 และ 5.18

ผลจากการเปรียบเทียบด้านหน่วยความจำ ยิ่งถ้าระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่ SPF จะลดการใช้หน่วยความจำได้ดีกว่า โปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ นิวตัน ราฟสันและฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ดังตารางที่ 5.16 ,5.17 และ 5.18ในช่องหน่วยความจำทั้งหมดที่ใช้ไป

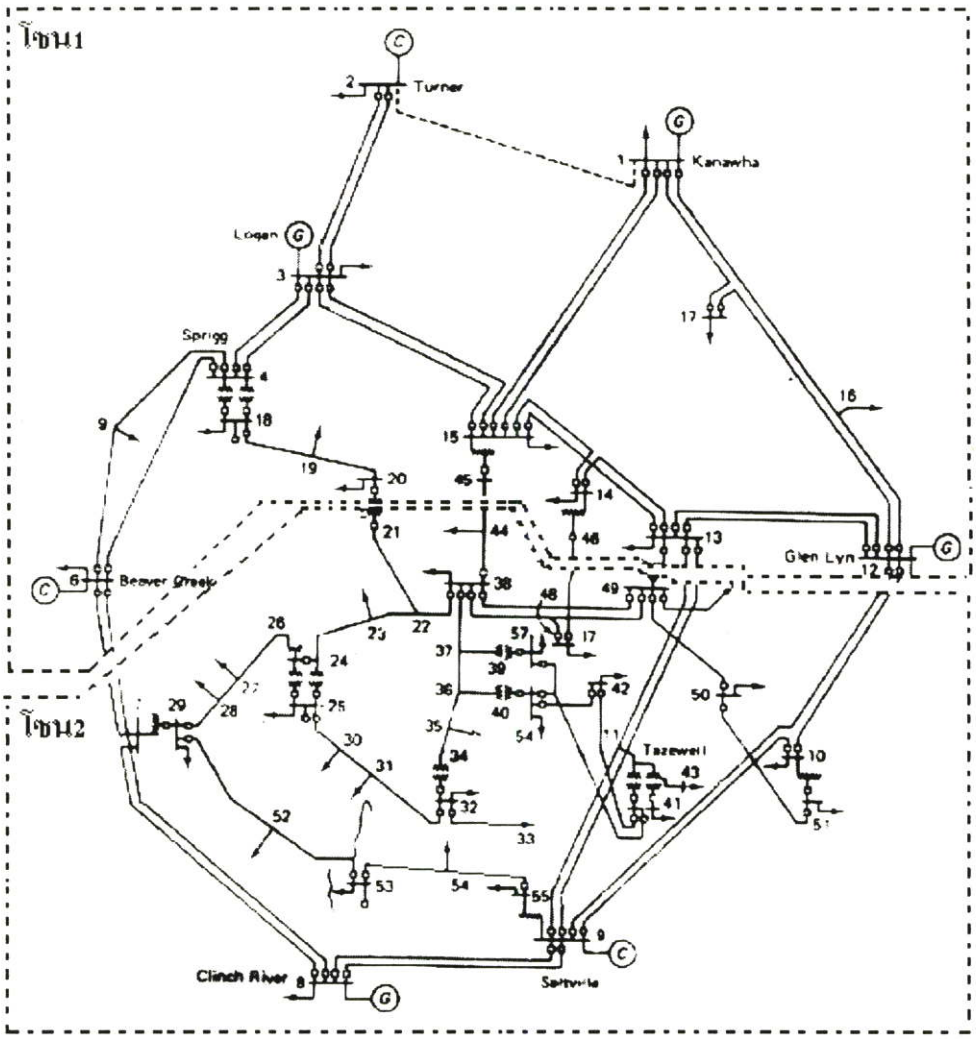
ผลจากการเปรียบเทียบจำนวนรอบของการเข้าลู่เข้าหาคำตอบ โปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ นิวตัน ราฟสันจะใช้จำนวนรอบน้อยกว่า SPF และในทำนองเดียวกัน SPF จะใช้จำนวนรอบน้อยกว่าโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสต์ดีคัปเปิ้ล

5.4 ทดสอบประสิทธิภาพการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่

ในการทดสอบนี้จะทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ IEEE 57บัส โดยจะแสดงผลของการคำนวณแรงดัน มุม และกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน และเวลาที่ใช้ไป

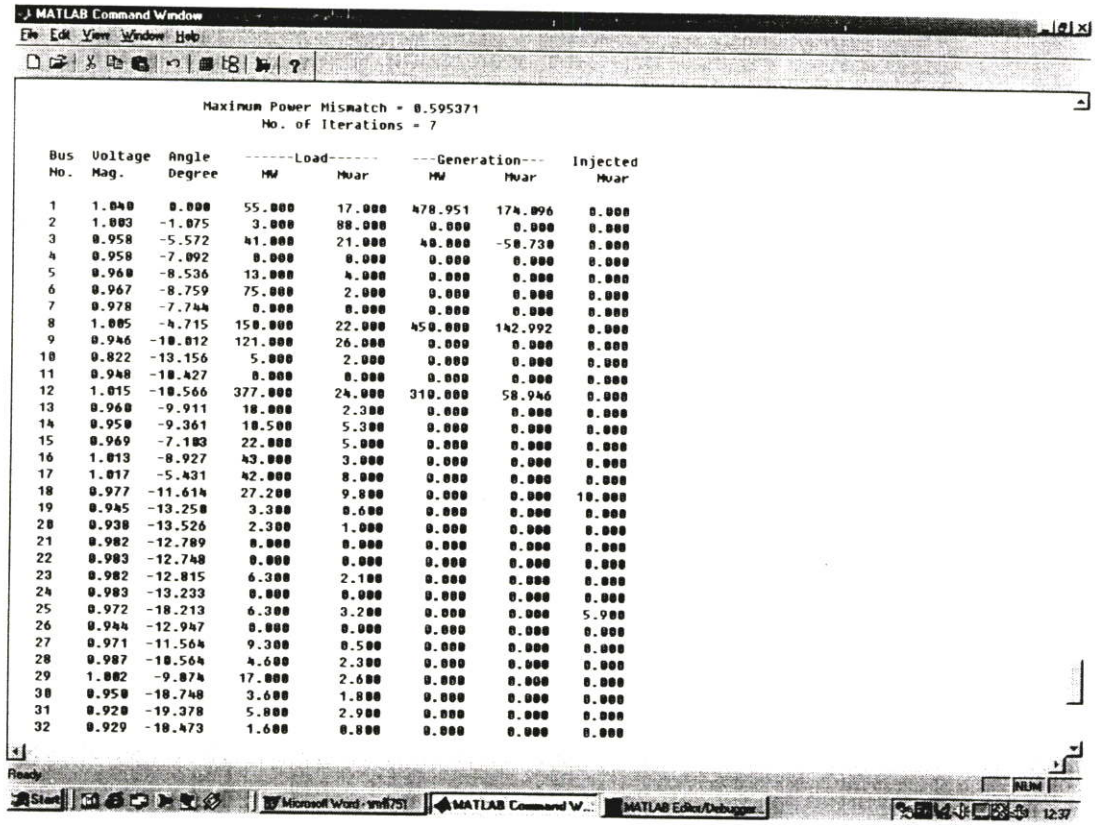


รูปที่5.21 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส[4]



รูปที่5.22 การแยกส่วนย่อยของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส

สำหรับวิธีในการคัทลายของระบบ IEEE 57 บัส ใช้หลักเกณฑ์ที่ควรระวังในการคัทลายดังแสดงในภาคผนวกข. และจะพิจารณาเลือกคัทลาย branch สายส่งให้มีจำนวนน้อยที่สุดอีกทั้งคำนึงถึงหมายเลขบัสที่จะแบ่งในแต่ละระบบย่อยให้เรียงลำดับหมายเลขบัสแบบอนุกรมให้มากที่สุด



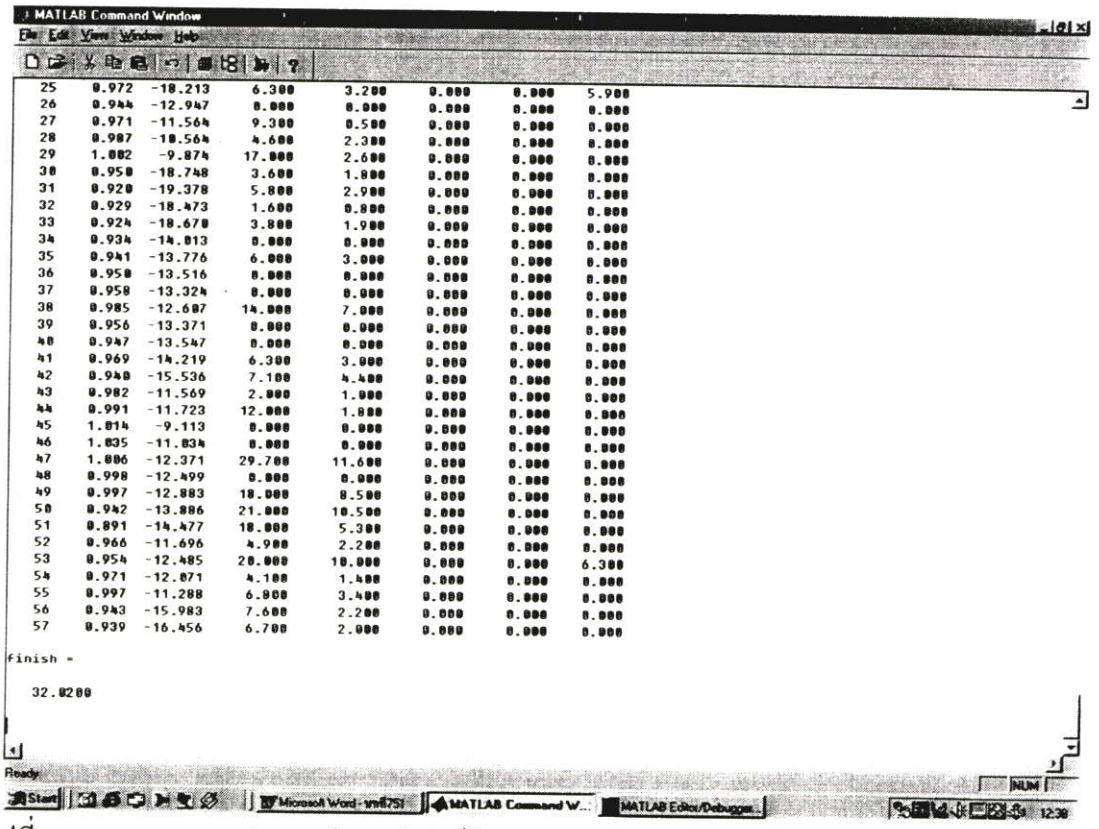
MATLAB Command Window

File Edit View Window Help

Maximum Power Mismatch = 0.595371
No. of Iterations = 7

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	Load MW	Load Mvar	Generation MW	Generation Mvar	Injected Mvar
1	1.040	0.000	55.000	17.000	478.951	174.096	0.000
2	1.003	-1.075	3.000	88.000	0.000	0.000	0.000
3	0.958	-5.572	41.000	21.000	40.000	-58.730	0.000
4	0.958	-7.092	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.960	-8.536	13.000	4.000	0.000	0.000	0.000
6	0.967	-8.759	75.000	2.000	0.000	0.000	0.000
7	0.978	-7.744	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.005	-4.715	150.000	22.000	450.000	142.992	0.000
9	0.946	-10.012	121.000	26.000	0.000	0.000	0.000
10	0.822	-13.156	5.000	2.000	0.000	0.000	0.000
11	0.948	-10.427	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	1.015	-10.566	377.000	24.000	310.000	58.946	0.000
13	0.960	-9.911	18.000	2.300	0.000	0.000	0.000
14	0.958	-9.361	10.500	5.300	0.000	0.000	0.000
15	0.969	-7.103	22.000	5.000	0.000	0.000	0.000
16	1.013	-8.927	43.000	3.000	0.000	0.000	0.000
17	1.017	-5.431	42.000	8.000	0.000	0.000	0.000
18	0.977	-11.614	27.200	9.800	0.000	0.000	10.000
19	0.945	-13.258	3.300	0.600	0.000	0.000	0.000
20	0.938	-13.526	2.300	1.000	0.000	0.000	0.000
21	0.982	-12.789	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	0.983	-12.748	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	0.982	-12.815	6.300	2.100	0.000	0.000	0.000
24	0.983	-13.233	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25	0.972	-18.213	6.300	3.200	0.000	0.000	5.900
26	0.944	-12.947	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
27	0.971	-11.564	9.300	0.500	0.000	0.000	0.000
28	0.987	-10.564	4.600	2.300	0.000	0.000	0.000
29	1.002	-9.874	17.000	2.600	0.000	0.000	0.000
30	0.950	-18.748	3.600	1.800	0.000	0.000	0.000
31	0.920	-19.378	5.800	2.900	0.000	0.000	0.000
32	0.929	-18.473	1.600	0.800	0.000	0.000	0.000

Ready



MATLAB Command Window

File Edit View Window Help

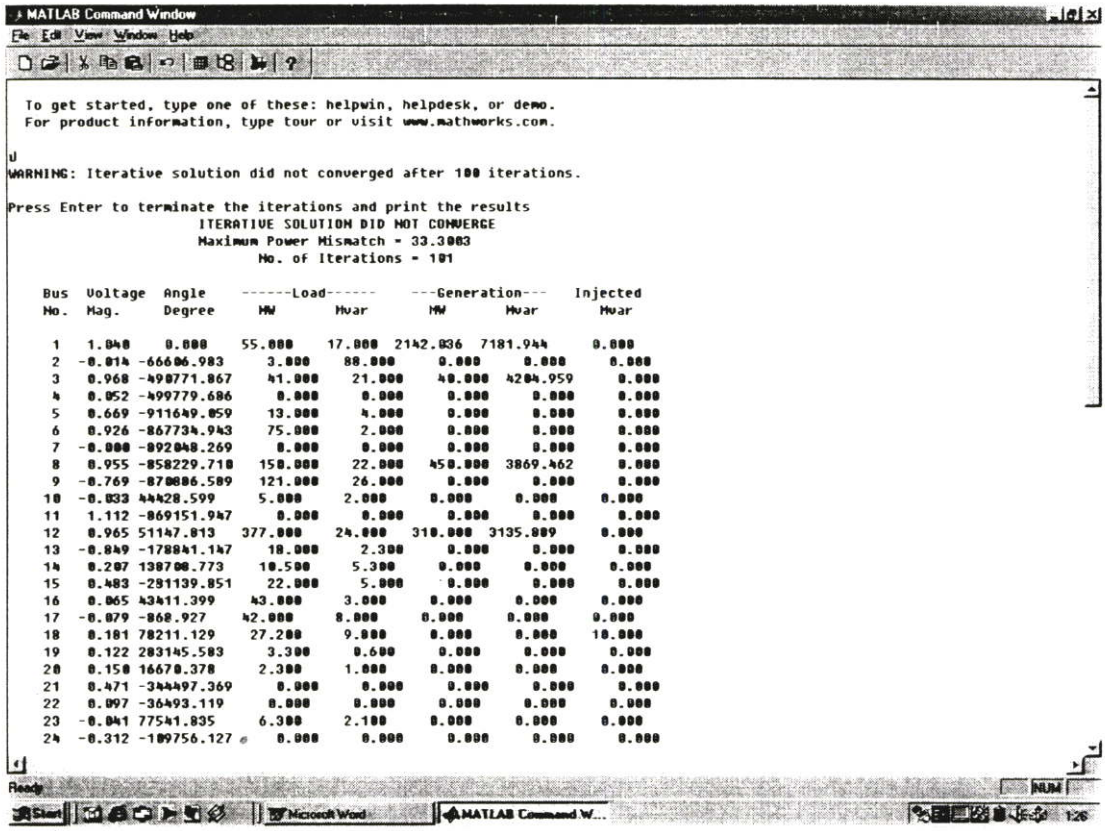
25	0.972	-18.213	6.300	3.200	0.000	0.000	5.900
26	0.944	-12.947	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
27	0.971	-11.564	9.300	0.500	0.000	0.000	0.000
28	0.987	-10.564	4.600	2.300	0.000	0.000	0.000
29	1.002	-9.874	17.000	2.600	0.000	0.000	0.000
30	0.950	-18.748	3.600	1.800	0.000	0.000	0.000
31	0.920	-19.378	5.800	2.900	0.000	0.000	0.000
32	0.929	-18.473	1.600	0.800	0.000	0.000	0.000
33	0.924	-18.670	3.800	1.900	0.000	0.000	0.000
34	0.934	-14.813	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
35	0.941	-13.776	6.000	3.000	0.000	0.000	0.000
36	0.950	-13.516	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
37	0.958	-13.324	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
38	0.985	-12.687	14.000	7.000	0.000	0.000	0.000
39	0.956	-13.371	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40	0.947	-13.547	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
41	0.969	-14.219	6.300	3.000	0.000	0.000	0.000
42	0.948	-15.536	7.100	4.400	0.000	0.000	0.000
43	0.982	-11.569	2.000	1.000	0.000	0.000	0.000
44	0.991	-11.723	12.000	1.800	0.000	0.000	0.000
45	1.014	-9.113	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
46	1.035	-11.834	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
47	1.006	-12.371	29.700	11.600	0.000	0.000	0.000
48	0.998	-12.499	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
49	0.997	-12.883	18.000	8.500	0.000	0.000	0.000
50	0.942	-13.886	21.000	10.500	0.000	0.000	0.000
51	0.891	-14.477	18.000	5.300	0.000	0.000	0.000
52	0.966	-11.696	4.900	2.200	0.000	0.000	0.000
53	0.954	-12.485	20.000	10.000	0.000	0.000	6.300
54	0.971	-12.071	4.100	1.400	0.000	0.000	0.000
55	0.997	-11.288	6.800	3.400	0.000	0.000	0.000
56	0.943	-15.983	7.600	2.200	0.000	0.000	0.000
57	0.939	-16.456	6.700	2.000	0.000	0.000	0.000

finish =

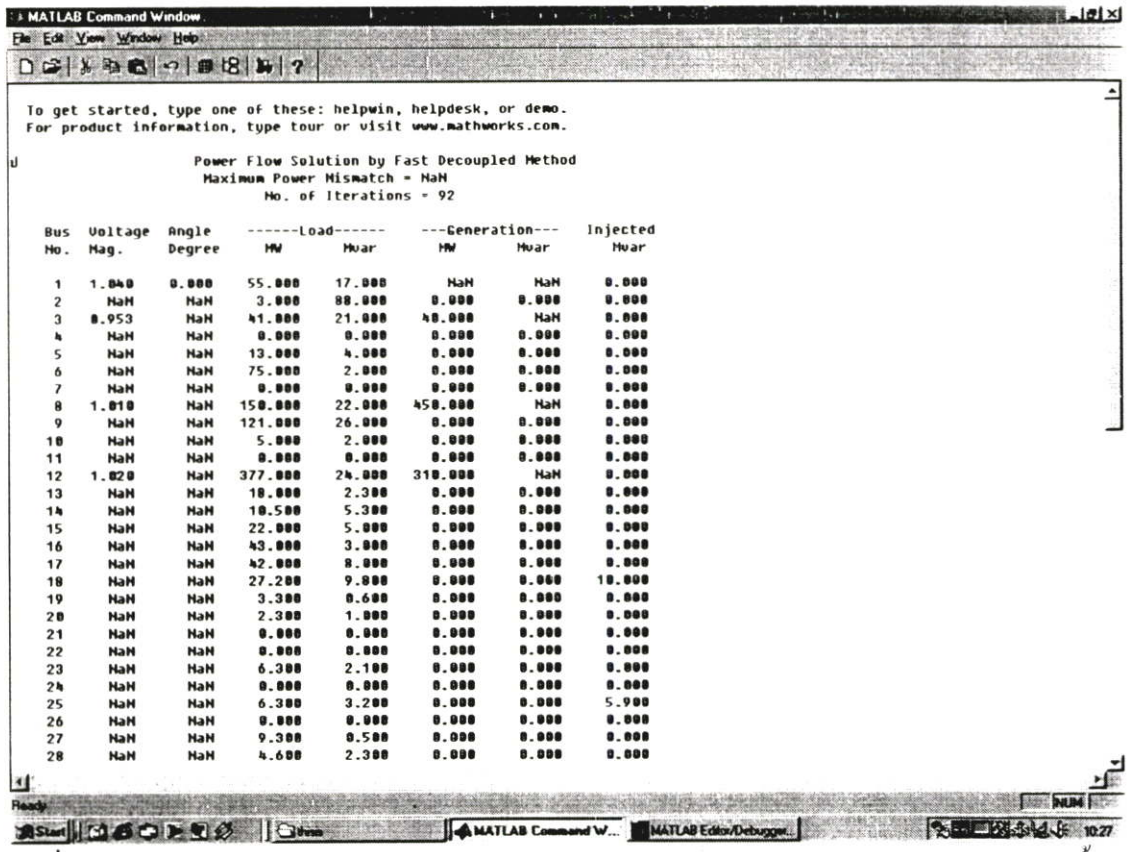
32.0200

Ready

รูปที่5.23 แสดงผลการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วย SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส



รูปที่5.24 แสดงผลการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตัน ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส



รูปที่5.25 แสดงผลการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส

จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ SPF สามารถคำนวณหาโหลดโฟลว์ดังรูปที่ 5.23 โดยใช้จำนวนรอบ 7 รอบ เวลา 32.02 วินาที แต่เมื่อทดสอบกับโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตันราฟสันดังรูปที่ 5.24 และฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ดังรูปที่ 5.25 พบว่าไม่สามารถคำนวณลู่เข้าหาคำตอบได้ อาจเนื่องมาจากเกินขอบเขตขนาดการจัดเก็บเมตริกอะเรย์ของโปรแกรมแมทแลบ ดังนั้นการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการลดขนาดเมตริกซ์ จาโคเบียนเมตริกซ์โดยอาศัยคุณสมบัติของการแยกส่วนย่อย แอดมิแตนท์เมตริกซ์โดยอาศัยคุณสมบัติของสปาซเมตริกซ์ ที่มีผลต่อการคำนวณโหลดโฟลว์ให้เล็กลง ทำให้สามารถคำนวณระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ด้วยโปรแกรมแมทแลบที่มีขอบเขตจำกัดของการจัดเก็บหน่วยความจำของเมตริกซ์อะเรย์ได้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์หรือเรียก ย่อๆว่า SPF เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากวิธีการแยกส่วนย่อยแบบเดิม โดยที่จะใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ ซึ่งกุญแจสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่ ใช้เมตริกซ์หนึ่งมิติในการจัดเก็บค่าแอดมิแตนท์แทนการจัดเก็บแอดมิแตนท์ด้วยเมตริกซ์สองมิติ และได้นำวิธีแยกส่วนย่อยมาช่วยลดขนาดของจาโคเบียนเมตริกซ์ของระบบใหญ่ให้เล็กลง และนำวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ในส่วนช่วยการลดขนาดของจาโคเบียนเมตริกซ์หลังจากที่ได้แบ่งแยกระบบเป็นส่วนย่อยแล้ว อีกชั้นหนึ่ง

ในการทดสอบ ได้แบ่งการทดสอบ ออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การทดสอบความถูกต้องแม่นยำของโปรแกรม การทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรม และการทดสอบโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ โดยได้เลือกนำโปรแกรม นิวตันราฟสัน โปรแกรมฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ของ Hadi Saatda เป็นโปรแกรมอ้างอิง เพื่อทดสอบความถูกต้อง จากผลการทดสอบ สามารถสรุปได้เป็นประเด็นหลักดังนี้คือ

1. ผลการทดสอบในหัวข้อ 5.2 ในส่วนของ การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม ได้ทดสอบเทียบกับโปรแกรมนิวตันราฟสัน ซึ่งผลคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์มีค่าใกล้เคียงกับ นิวตัน ราฟสัน และวิธีการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ ใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บค่าแอดมิแตนท์ น้อยกว่า นิวตัน ราฟสันมากหลายเท่าตัว

2. ผลการทดสอบหัวข้อ 5.3 เป็นการทดสอบ เวลา จำนวนรอบเข้าสู่คำตอบ และหน่วยความจำทั้งหมดที่ใช้ไป โดยเปรียบเทียบเทียบกับโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ นิวตันราฟสัน โปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ฟาสต์ดีคัปเปิ้ล พบว่าถ้าระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดเล็ก การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์จะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยนิวตันราฟสัน และฟาสต์ดีคัปเปิ้ล แต่ในทางกลับกันถ้าระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่จะใช้เวลามากกว่า

3. ผลจากการทดสอบหน่วยความจำทั้งหมด จากการรันโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ด้วยวิธี นิวตันราฟสัน. ฟาสต์ดีคัปเปิ้ล และ SPF พบว่าวิธี SPF จะใช้หน่วยความจำน้อยกว่ามาก

4. ผลจากการทดสอบจำนวนรอบ สามารถสรุปได้ว่า

จำนวนรอบ ของ นิวตัน ราฟสัน < จำนวนรอบ ของ SPF < จำนวนรอบของฟาสต์ดีคัปเปิ้ล

5. ผลการทดสอบในหัวข้อ 5.4 เพื่อ ทดสอบประสิทธิภาพการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ พบว่าการวิธีแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์จะสามารถหาคำตอบในการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ได้ดีกว่าวิธี นิวตันราฟสัน และ ฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ด้วยโปรแกรมแมทแลบ

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

1. ควรพัฒนาที่จะทำให้โปรแกรมสามารถเรียนรู้และเลือกคัทลายได้ด้วยตัวเอง โดยเลือกคัทลายให้แต่ละโซนมีสมาชิกเท่ากันหรือให้เหมาะสมที่สุดและสามารถหลีกเลี่ยงการคัทลายที่ควรระวังดังแสดงในภาคผนวก ข

2. ควรปรับปรุงให้โปรแกรมสามารถใช้เวลาในการคำนวณระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆ ได้เร็วขึ้น

3. ควรนำระบบจัดเก็บฐานข้อมูลมาประยุกต์ใช้ เพื่อที่จะสามารถนำมาพัฒนา ผ่านเครือข่าย online ได้

4. อาจนำเอาวิธี SPF มาพัฒนา การวิเคราะห์แบบอื่นๆได้นอกเหนือกับการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ หรือลองนำวิธีที่เห็นว่าเหมาะสมมาพัฒนา ให้มีประสิทธิภาพมาขึ้น (ขอแนะนำให้ศึกษา SPF ให้เข้าใจก่อน)

5. เนื่องจาก SPF เขียน ขึ้นด้วยภาษาแมทแลบ ปัญหาจึงเกิดตรงที่ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่ได้ลงโปรแกรมแมทแลบไว้ก่อนก็จะไม่สามารถเปิดโปรแกรมได้ จึงขอแนะนำให้พัฒนาในส่วนการเขียนโปรแกรมให้สามารถรันเป็น .exe เพื่อที่สามารถเปิดโปรแกรมใช้ได้เลย

6. ในการคัทลายน์ยังต้องพึ่งรูประบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากจะคัทลายน์จะยึดสายส่ง เป็นหลักดังนั้น ถ้าไม่มีรูประบบไฟฟ้ากำลังเป็นแม่แบบแล้ว จะคัทลายน์ได้ลำบาก จึงควรพัฒนาในส่วนนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] วุฒินัน สุรพลชัย. "การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่โดยวิธีแยกส่วนย่อย." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2523.

[2] สุนทร ปียรัตนวงศ์. "การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตัน - ราฟสัน ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่โดยวิธีแยกส่วนย่อย." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2529.

[3] ทรงศักดิ์ คงน้อย. " วิธีคำนวณแบบแยกส่วนย่อยสำหรับฟาสต์ดีคัปเปิ้ลโหลดโฟลว์ แบบปรับปรุง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2534.

[4] Wallach.Y **Calculations and Programs For Power System Networks.** New Jersy : Prentice-Hall.Inc. 1986.

[5] John J.Granger.William D. Stevenson.Jr. **Power System Analysis.** Singapore : McGraw-Hill.Inc. 1994.

[6] Stagg G.W.. EL-Abiad A.H.**Computer Methods in Power System Analysis** : MCGraw-Hill.Inc. 1986.

[7] Happ H.H.. Young C.C. "Tearing Algorithms for Large Scale Network Programs." IEEE Trans. Vol.PAS-90. Dec 1971. pp.2639-2649 .

[8] วิเศษ จูภิบาล."โปรแกรมโหลดโฟลว์อัตโนมัตสำหรับระบบไฟฟ้าเชื่อมโยงภายในขนาดใหญ่." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2513.

[9] Saadat H. **Power System Analysis**. Singapore : WCB McGraw-Hil.Inc. 1999

[10] กีรติ นาราช และ คณะ. "การแก้ไขปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีฟาส - ดีคัพเพอร์ โดยใช้ โปรแกรมแมทแล็ป." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีมหานคร.2543.

[11] ประดิษฐ์ เฟื่องฟู "การคำนวณโหลดโฟลว์โดยใช้เครือข่ายประสาท" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.

[12] Heydt G.T. **Computer Analysis Metods for Power system**. Newyork :Macmillan Publishing Company. 1986.

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลของระบบทดสอบการคำนวณโหลดโฟลว์ของระบบไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ ผ.5.1 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส [2]

Bus	kb code	Volt Mag	Angle Degree	Pd MW	Qd Mvar	Pg MW	Qg Mvar	Qc Mvar
1	3	1.05	0	0	0	0	0	0
2	2	1.1	0	0	0	25	0	0
3	1	1	0	27.5	6.5	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	15	9	0	0	0
6	1	1	0	25	2.5	0	0	0

ตารางที่ ผ.5.2 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 6 บัส

Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	BC 2 pu	Tap
1	4	0.16	0.7	0.007	1
1	6	0.246	1.036	0.0099	1
2	3	1.446	2.1	0	1
5	2	0.564	1.28	0	1
4	3	0	0.266	0	0.909
4	6	0.194	0.814	0.0076	1
6	5	0	0.6	0	0.976

ตารางที่ ผ.5.3 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส [10]

Bus	kb code	Volt Mag	Angle Degree	Pd MW	Qd Mvar	Pg MW	Qg Mvar	Qc Mvar
1	3	1.06	0	0	0	232.4	-16.9	0
2	2	1.045	0	21.7	12.7	40	42.4	0
3	2	1.01	0	94.2	19	0	23.4	0
4	1	1	0	47.8	-3.9	0	0	0
5	1	1	0	7.6	1.6	0	0	0
6	2	1.07	0	11.2	7.5	0	12.2	0
7	1	1	0	0	0	0	0	0
8	2	1.09	0	0	0	0	17.4	0
9	1	1	0	29.5	16.6	0	0	19
10	1	1	0	9	5.8	0	0	0
11	1	1	0	3.5	1.8	0	0	0
12	1	1	0	6.1	1.6	0	0	0
13	1	1	0	13.5	5.8	0	0	0
14	1	1	0	14.9	5	0	0	0

ตารางที่ ผ.5.4 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 บัส

Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	BC 2 pu	Tap
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	1
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	1
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1
2	4	0.05811	0.17632	0.0374	1
2	5	0.05695	0.17388	0.034	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0346	1
4	5	0.01335	0.04211	0.0128	1
4	7	0	0.20912	0	0.978
4	9	0	0.55618	0	0.969
5	6	0	0.25202	0	0.932
6	11	0.09498	0.1989	0	1
6	12	0.12291	0.25581	0	1
6	13	0.06615	0.13027	0	1
7	8	0	0.17615	0	1
7	9	0	0.11001	0	1
9	10	0.03181	0.0845	0	1
9	14	0.12711	0.27038	0	1
10	11	0.08205	0.19207	0	1
12	13	0.22092	0.19988	0	1
13	14	0.17093	0.34802	0	1

ตารางที่ ผ.5.5 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส [9]

Bus	kb code	Volt Mag	Angle Degree	Pd MW	Qd Mvar	Pg MW	Qg Mvar	Qc Mvar
1	3	1.06	0	0	0	0	0	0
2	2	1.043	0	21.7	12.7	40	0	0
3	1	1	0	2.4	1.2	0	0	0
4	1	1.06	0	7.6	1.6	0	0	0
5	2	1.01	0	94.2	19	0	0	0
6	1	1	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	22.8	10.9	0	0	0
8	2	1.01	0	30.0	30	0	0	0
9	1	1	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	5.8	2	0	0	19
11	2	1.082	0	0	0	0	0	0
12	1	1	0	11.2	7.5	0	0	0
13	2	1.071	0	0	0	0	0	0
14	1	1	0	6.2	1.6	0	0	0
15	1	1	0	8.2	2.5	0	0	0
16	1	1	0	3.5	1.8	0	0	0
17	1	1	0	9	5.8	0	0	0
18	1	1	0	3.2	0.9	0	0	0
19	1	1	0	9.5	3.4	0	0	0
20	1	1	0	2.2	0.7	0	0	0
21	1	1	0	17.5	11.2	0	0	0
22	1	1	0	0	0	0	0	0
23	1	1	0	3.2	1.6	0	0	0
24	1	1	0	8.7	6.7	0	0	4.3
25	1	1	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ผ.5.5 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส (ต่อ)

Bus	kb code	Volt Mag	Angle Degree	Pd MW	Qd Mvar	Pg MW	Qg Mvar	Qc Mvar
26	1	1	0	3.5	2.3	0	0	0
27	1	1	0	0	0	0	0	0
28	1	1	0	0	0	0	0	0
29	1	1	0	2.4	0.9	0	0	0
30	1	1	0	10.6	1.9	0	0	0

ตารางที่ ผ.5.6 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส

Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	BC/2 pu	Tap
1	2	0.0192	0.0575	0.0264	1
1	3	0.0452	0.1852	0.0204	1
2	4	0.057	0.1737	0.0184	1
3	4	0.0132	0.0379	0.0042	1
2	5	0.0472	0.1983	0.0209	1
2	6	0.0581	0.1763	0.0187	1
4	6	0.0119	0.0414	0.0045	1
5	7	0.046	0.116	0.0102	1
6	7	0.0267	0.0828	0.0085	1
6	8	0.012	0.0420	0.0045	1
6	9	0	0.2080	0	0.978
6	10	0	0.556	0	0.969
9	11	0	0.208	0	1
9	10	0	0.11	0	1

ตารางที่ ผ.5.6 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส (ต่อ)

Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	BC 2 pu	Tap
4	12	0	0.256	0	0.932
12	13	0	0.14	0	1
12	14	0.1231	0.2559	0	1
12	15	0.0662	0.1304	0	1
12	16	0.0945	0.1987	0	1
14	15	0.221	0.1997	0	1
16	17	0.0824	0.1923	0	1
15	18	0.1073	0.2185	0	1
18	19	0.0639	0.1292	0	1
19	20	0.034	0.068	0	1
10	20	0.0936	0.209	0	1
10	17	0.0324	0.0845	0	1
10	21	0.0348	0.0749	0	1
10	22	0.0727	0.1499	0	1
21	22	0.0116	0.236	0	1
15	23	0.1	0.202	0	1
22	24	0.115	0.179	0	1
23	24	0.132	0.27	0	1
24	25	0.1885	0.3292	0	1
25	26	0.2544	0.38	0	1
25	27	0.1093	0.2087	0	1
28	27	0	0.396	0	0.968
27	29	0.2198	0.4153	0	1
27	30	0.3202	0.6027	0	1

ตารางที่ ผ.5.6 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส (ต่อ)

Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	BC 2 pu	Tap
29	30	0.2399	0.4533	0	1
8	28	0.0636	0.2	0.0214	1
6	28	0.0169	0.0599	0.065	1

ตารางที่ ผ.5.7 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส [4]

Bus	kb code	Volt Mag	Angle Degree	Pd MW	Qd Mvar	Pg MW	Qg Mvar	Qc Mvar
1	3	1.04	0	55	17	0	0	0
2	1	1.01	0	3	88	0	0	0
3	2	0.958	0	41	21	40	0	0
4	1	1	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	13	4	0	0	0
6	1	0.98	0	75	2	0	0	0
7	1	1	0	0	0	0	0	0
8	2	1.005	0	150	22	450	0	0
9	1	0.98	0	121	26	0	0	0
10	1	1	0	5	2	0	0	0
11	1	1	0	0	0	0	0	0
12	2	1.015	0	377	24	310	0	0
13	1	1	0	18	2.3	0	0	0
14	1	1	0	10.5	5.3	0	0	0
15	1	1	0	22	5	0	0	0
16	1	1	0	43	3	0	0	0
17	1	1	0	42	8	0	0	0
18	1	1	0	27.2	9.8	0	0	10
19	1	1	0	3.3	0.6	0	0	0
20	1	1	0	2.3	1	0	0	0
21	1	1	0	0	0	0	0	0
22	1	1	0	0	0	0	0	0
23	1	1	0	6.3	2.1	0	0	0
24	1	1	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ผ.5.7 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส (ต่อ)

Bus	kb code	Volt Mag	Angle Degree	Pd MW	Qd Mvar	Pg MW	Qg Mvar	Qc Mvar
25	1	1	0	6.3	3.2	0	0	5.9
26	1	1	0	0	0	0	0	0
27	1	1	0	9.3	0.5	0	0	0
28	1	1	0	4.6	2.3	0	0	0
29	1	1	0	17	2.6	0	0	0
30	1	1	0	3.6	1.8	0	0	0
31	1	1	0	5.8	2.9	0	0	0
32	1	1	0	1.6	0	.8	0	0
33	1	1	0	3.8	1.9	0	0	0
34	1	1	0	0	0	0	0	0
35	1	1	0	6	3	0	0	0
36	1	1	0	0	0	0	0	0
37	1	1	0	0	0	0	0	0
38	1	1	0	14	7	0	0	0
39	1	1	0	0	0	0	0	0
40	1	1	0	0	0	0	0	0
41	1	1	0	6.3	3	0	0	0
42	1	1	0	7.1	4.4	0	0	0
43	1	1	0	2	1	0	0	0
44	1	1	0	12	1.8	0	0	0
45	1	1	0	0	0	0	0	0
46	1	1	0	0	0	0	0	0
47	1	1	0	29.7	11.6	0	0	0
48	1	1	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ผ.5.7 ข้อมูลของบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส (ต่อ)

Bus	kb code	Volt Mag	Angle Degree	Pd MW	Qd Mvar	Pg MW	Qg Mvar	Qc Mvar
49	1	1	0	18	8.5	0	0	0
50	1	1	0	21	10.5	0	0	0
51	1	1	0	18	5.3	0	0	0
52	1	1	0	4.9	2.2	0	0	0
53	1	1	0	20	10	0	0	6.3
54	1	1	0	4.1	1.4	0	0	0
55	1	1	0	6.8	3.4	0	0	0
56	1	1	0	7.6	2.2	0	0	0
57	1	1	0	6.7	2	0	0	0

ตารางที่ ผ.5.8 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส

Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	BC 2 pu	Tap
1	2	0.0083	0.028	0.0645	1
2	3	0.0298	0.085	0.0409	1
3	4	0.0112	0.0366	0.019	1
4	5	0.0625	0.132	0.0129	1
4	6	0.043	0.148	0.0174	1
6	7	0.02	0.102	0.0138	1
6	8	0.0339	0.173	0.0235	1
8	9	0.0099	0.0505	0.0274	1
9	10	0.0369	0.1679	0.022	1
9	11	0.0258	0.0848	0.0109	1
9	12	0.0648	0.295	0.0386	1
9	13	0.0481	0.158	0.0203	1
13	14	0.0132	0.0434	0.0055	1
13	15	0.0269	0.0869	0.0115	1
1	15	0.0178	0.091	0.0494	1
1	16	0.0454	0.206	0.0273	1
1	17	0.0238	0.108	0.0143	1
3	15	0.0162	0.053	0.0272	1
4	18	0	0.555	0	0.97
4	18	0	0.43	0	0.978
5	6	0.0302	0.0641	0.0062	1
7	8	0.0139	0.0712	0.0097	1
10	12	0.0277	0.1262	0.0164	1
11	13	0.0223	0.0732	0.0094	1

ตารางที่ ผ.5.8 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส (ต่อ)

Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	BC 2 pu	Tap
12	13	0.0178	0.058	0.0302	1
12	16	0.018	0.0813	0.0108	1
12	17	0.0397	0.179	0.0238	1
14	15	0.0171	0.0547	0.0074	1
18	19	0.461	0.685	0	1
19	20	0.283	0.434	0	1
21	20	0	0.7767	0	1.043
21	22	0.0736	0.117	0	1
22	23	0.0099	0.0152	0	1
23	24	0.166	0.256	0.0042	1
24	25	0	1.182	0	1
24	25	0	1.23	0	1
24	26	0	0.0473	0	1.043
26	27	0.165	0.254	0	1
27	28	0.0618	0.0954	0	1
28	29	0.0418	0.0587	0	1
7	29	0	0.0648	0	0.967
25	30	0.135	0.2020	0	1
30	31	0.326	0.497	0	1
31	32	0.507	0.755	0	1
32	33	0.0392	0.036	0	1
34	32	0	0.953	0	0.975
34	35	0.052	0.078	0.0016	1
35	36	0.043	0.0537	0.0008	1

ตารางที่ ผ.5.8 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส (ต่อ)

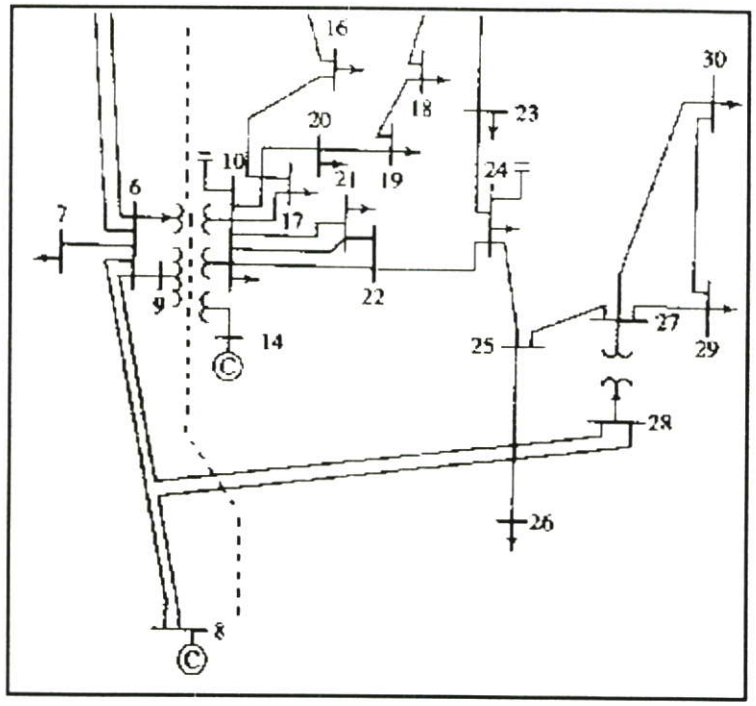
Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	BC/2 pu	Tap
36	37	0.029	0.0366	0	1
37	38	0.0651	0.1009	0.001	1
37	39	0.0239	0.0379	0	1
36	40	0.03	0.0466	0	1
22	38	0.0192	0.0295	0	1
11	41	0	0.749	0	0.955
41	42	0.207	0.352	0	1
41	43	0	0.412	0	1
38	44	0.0289	0.0585	0.001	1
15	45	0	0.1042	0	0.955
14	46	0	0.0735	0	0.9
46	47	0.023	0.068	0.0016	1
47	48	0.0182	0.0233	0	1
48	49	0.0834	0.129	0.0024	1
49	50	0.0801	0.128	0	1
50	51	0.1386	0.22	0	1
10	51	0	0.0712	0	0.93
13	49	0	0.191	0	0.895
29	52	0.1442	0.187	0	1
52	53	0.0762	0.0984	0	1
53	54	0.1878	0.232	0	1
54	55	0.1732	0.2265	0	1
11	43	0	0.153	0	0.958
44	45	0.0624	0.1242	0.002	1
40	56	0	1.195	0	0.958

ตารางที่ ผ.5.8 ข้อมูลของสายส่งของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 บัส (ต่อ)

Bus nl	Bus nr	R pu	X pu	BC 2 pu	Tap
56	41	0.553	0.549	0	1
56	42	0.2125	0.354	0	1
39	57	0	1.355	0	0.98
57	56	0.174	0.26	0	1
38	49	0.115	0.177	0.003	1
38	48	0.0312	0.0482	0	1
9	55	0	0.1205	0	0.94

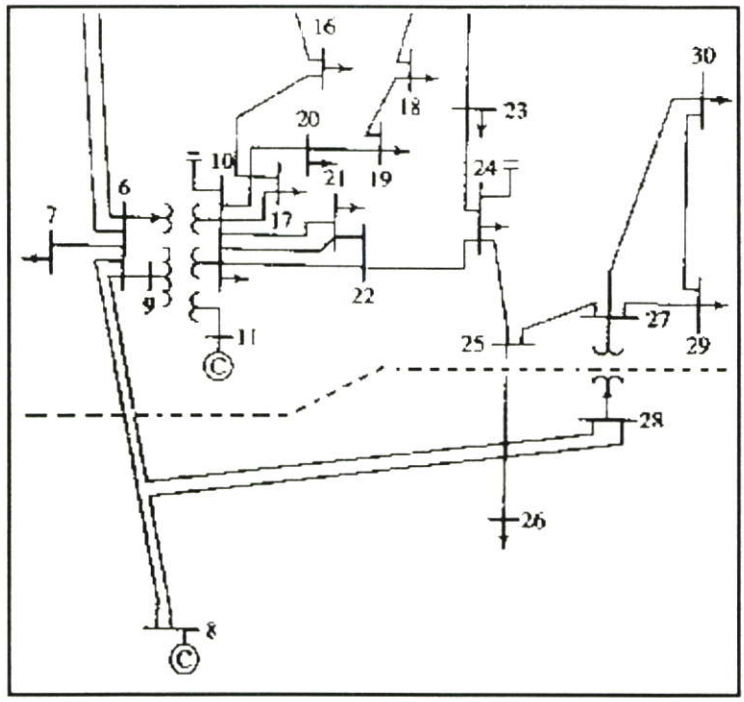
ภาคผนวก ข.
ข้อควรระวังในการคัทลาย

สิ่งสำคัญในการคัทลายควรหลีกเลียงการคัทลายดังต่อไปนี้



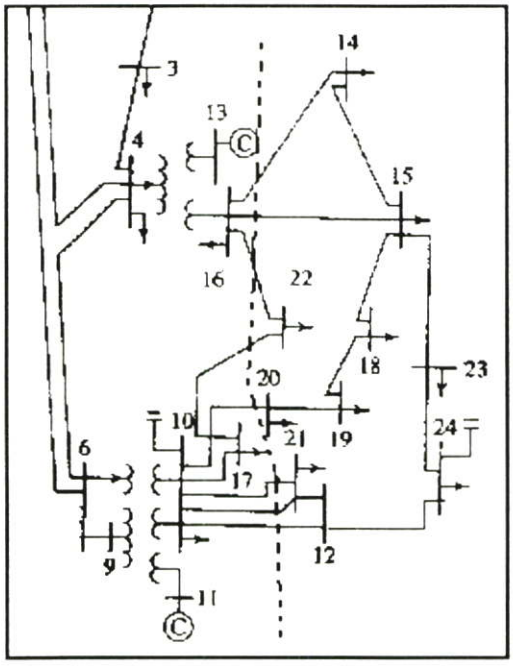
รูปที่ ผ.5.1 แสดงการคัทลายในการตัดบัส อิสระออก

จากรูป เป็นการคัทลายที่ตัดบัสอิสระ คือบัส 14 ออก ทำให้ในการคำนวณในโซนแต่ละโซน โปรแกรมจะไม่สามารถหาบัสที่ 14 เจอ จึงส่งผลให้บัสที่ 14 กลายเป็น บัสกราว ไม่ถูกรวมในแอดมิแตนท์เมตริตซ์ส่งผลให้การคำนวณผิดพลาด



รูปที่ ผ.5.2 แสดงการคัทลายบัสส่ง หรือบัสรับบัสใดบัสหนึ่งไม่ได้เชื่อมโยงเข้ากับบัสอื่นอีก

จากรูป เป็นการคัทลายที่ตัดบัสส่ง และบัสรับ ที่บัสใดบัสหนึ่งไม่ได้เชื่อมโยงเข้ากับบัสอื่น ดังนั้น จากรูปโปรแกรมจะไม่สามารถหา บัสที่ 26 พบเนื่องจากถูกตัดขาดออกจากระบบไม่ได้อยู่ในโซนใดโซนหนึ่ง มีส่วนทำให้การคำนวณผิดพลาด



รูปที่ ผ.5.3 แสดงการคัทลายในการตัดบัสออกนอกระบบ

จากรูป เป็นการคัทลายที่ทำให้บัสที่ 16.21และ 22 ออกนอกระบบ ทำให้ในการคำนวณโหลดโฟลว์โปรแกรมไม่สามารถหาบัสที่ 16.21และ22 พบ

ภาคผนวก ค.

การเตรียมข้อมูลลงใน bus data และ line data

ตัวอย่าง ผ. 5.1 แสดงการเตรียมข้อมูล ลงใน busdata และ linedata

```
basemva = 100:  accuracy =0.001: maxiter = 6:nozon= 2:

                bus  kb  Vm    delta   Pd    Qd    Pg   Qg   Qc   zon
busdata = [     1    3   1.05    0     0     0     0    0    0    1
                2    2   1.1     0     0     0    25    0    0    2
                3    1   1       0    27.5   6.5   0    0    0    2
                4    1   1       0     0     0     0    0    0    1
                5    1   1       0    15     9     0    0    0    2
                6    1   1       0    25     2.5   0    0    0    1 ]:

                nl   n r   R       X       BC/2      Tap
linedata = [    1    4    0.16    0.74     0.007     1
                1    6    0.246   1.036    0.0099    1
                2    3    1.446   2.1      0         1
                5    2    0.564   1.28     0         1
                4    3     0      0.266    0         0.909
                4    6    0.194   0.814    0.0076    1
                6    5     0      0.6      0         0.976 ]:
```

โดยที่

nozon คือ จำนวนระบบย่อยหรือจำนวนโซนทั้งหมด

basemva คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเบสของระบบไฟฟ้ากำลัง

accuracy คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

Maxiter คือ จำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้

ในส่วนของ busdata ประกอบด้วย

bus คือ หมายเลขบัส

kb คือ ชนิดของบัส โดยถ้า kb เท่ากับ 1 หมายถึง บัสโหลด, 2 หมายถึง บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ 3 หมายถึง บัสแสลก

Vm คือ แรงดัน มีหน่วยเป็น เปอร์ยูนิต (p.u.)

delta คือ มุม มีหน่วยเป็น ดีกรี (Degree)

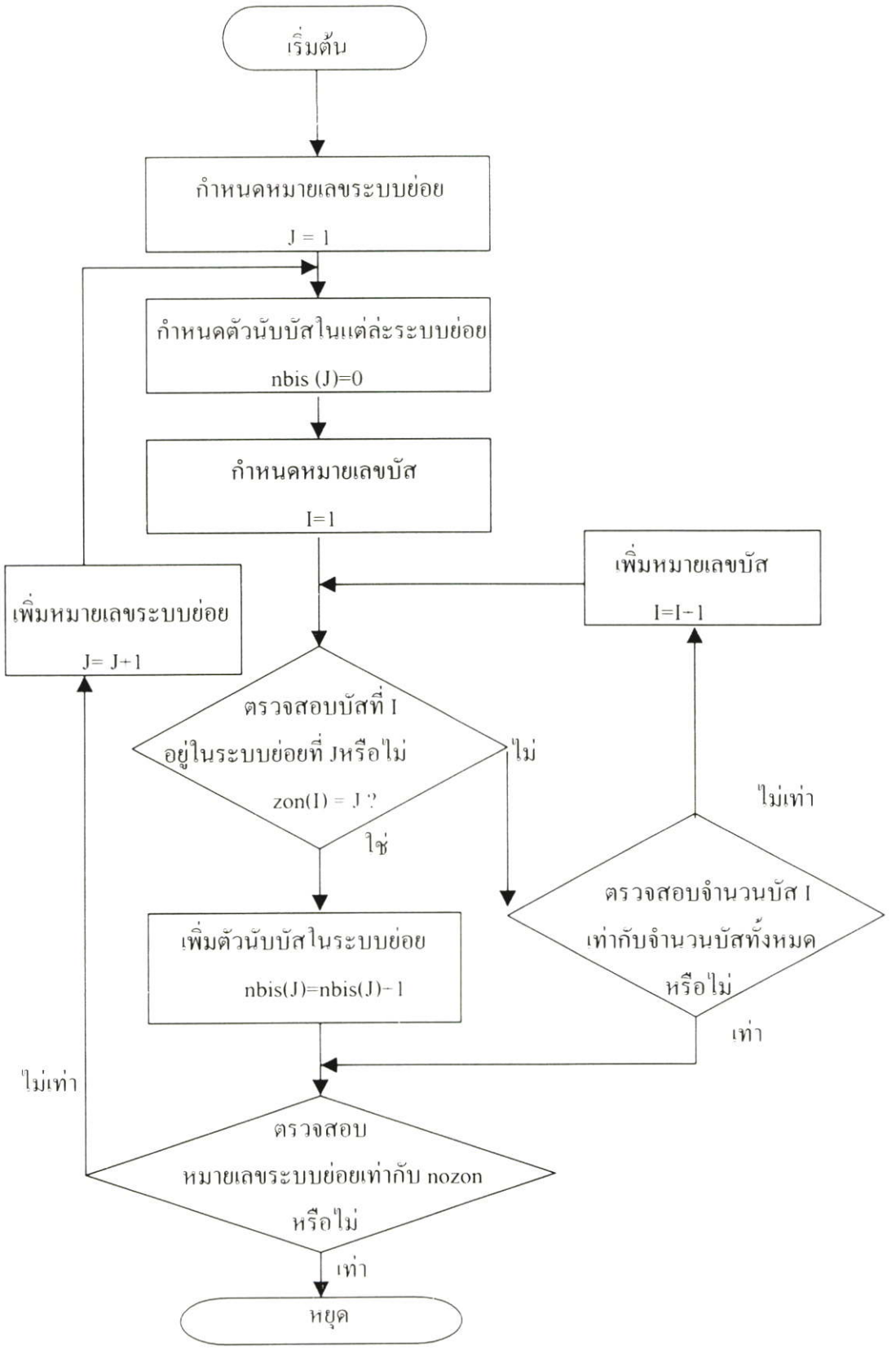
Pd คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของโหลด หน่วยเป็นเมกกะวัต (MW)

Qd	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของโหลด หน่วยเป็นเม็กกะวา (Mvar)
Pg	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หน่วยเป็นเม็กกะวัต (MW)
Qg	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หน่วยเป็นเม็กกะวา (Mvar)
Qc	คือ	ชั้นท์ คาปาซิเตอร์ หรือ ชั้นท์รีแอกเตอร์ ที่ต่ออยู่ที่บัสหน่วยเป็นเม็กกะวา (Mvar)
zon	คือ	หมายเลขระบบย่อยที่ถูกเลือกเพื่อใช้ในการแบ่งบัสออกเป็นระบบย่อย

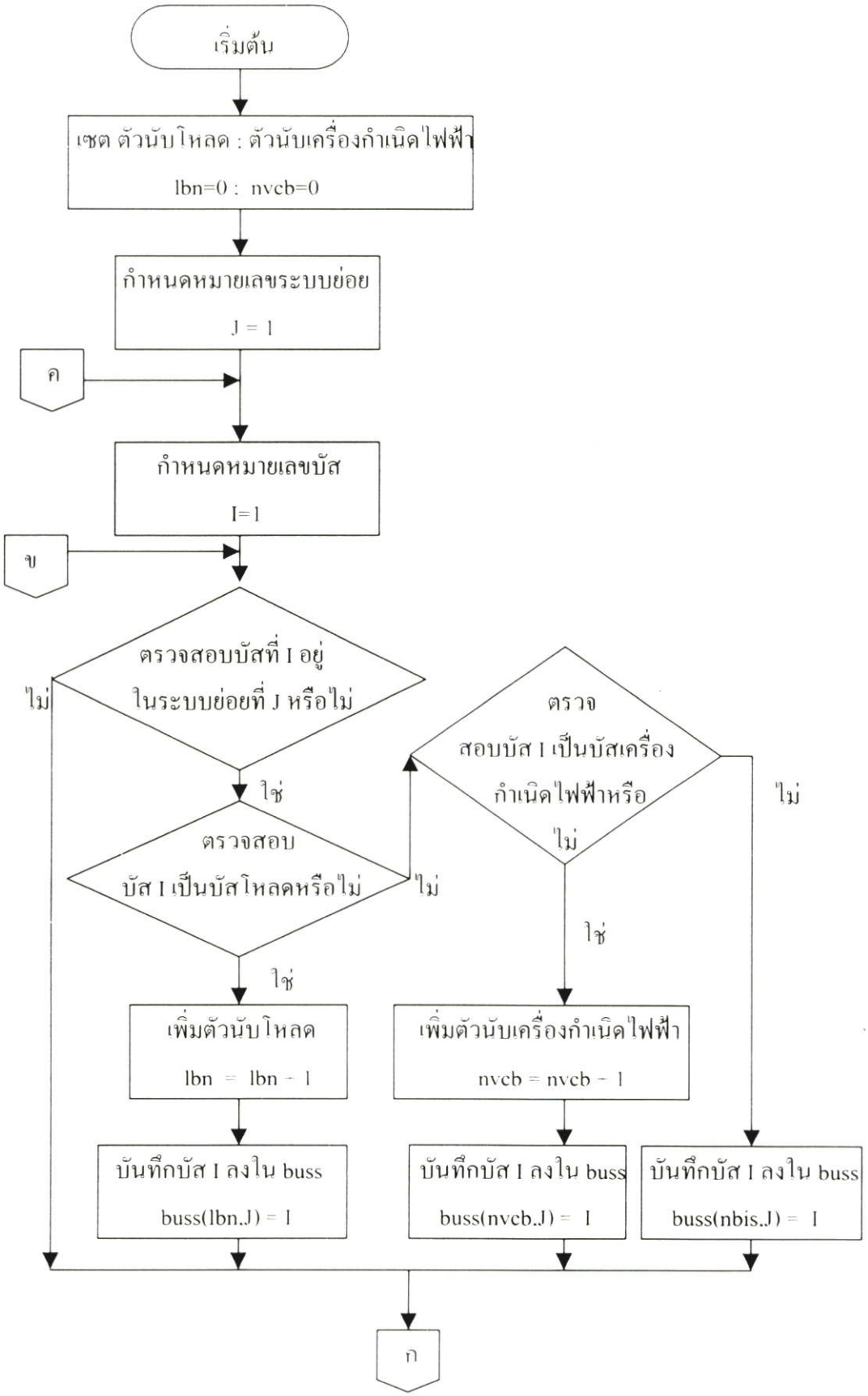
ในส่วนของ linedata ประกอบด้วย

nl	คือ	หมายเลขบัสส่ง
nr	คือ	หมายเลขบัสรับ
R	คือ	รีซิสแตนท์มีหน่วยเป็นเปอร์ยูนิต (p.u.)
X	คือ	รีแอกแตนท์มีหน่วยเป็นเปอร์ยูนิต (p.u.)
BC/2	คือ	ค่า ฮาฟไลน์ชาร์จซิ่ง ของสายส่ง
Tap	คือ	ค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง

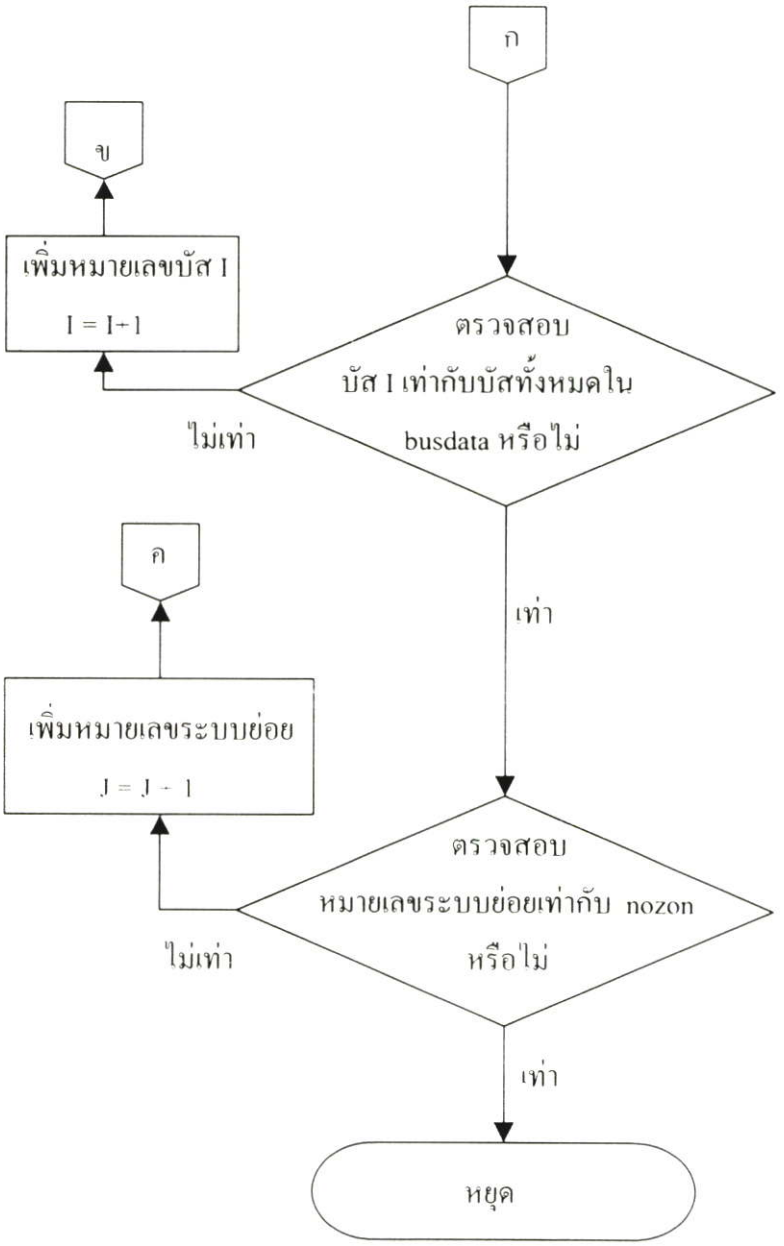
ภาคผนวก ง.
แผนผังแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมของโปรแกรม



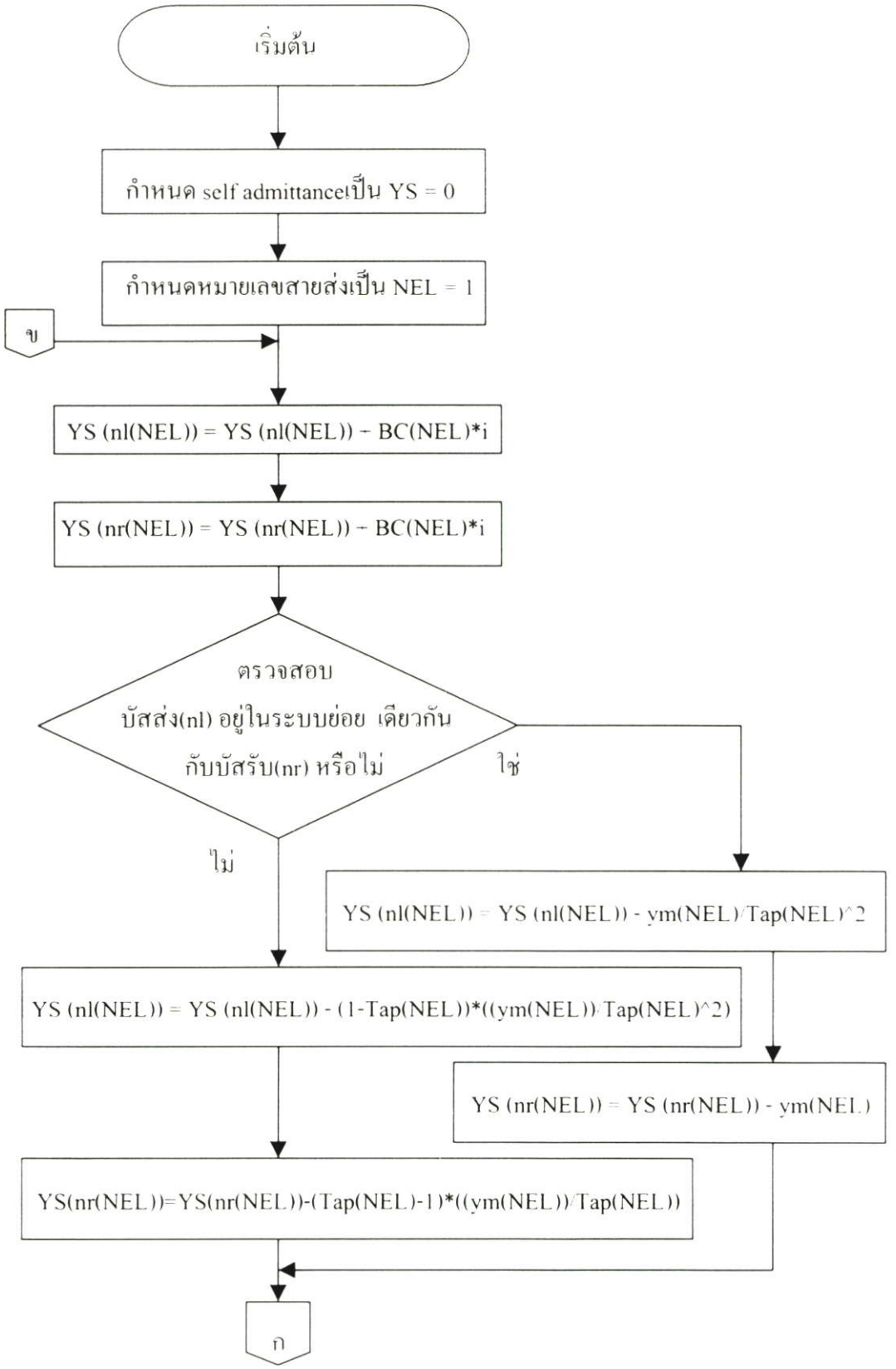
รูปที่ ผ.5.4 แผนผังแสดงการหาตัวนับบัสในแต่ละระบบย่อย



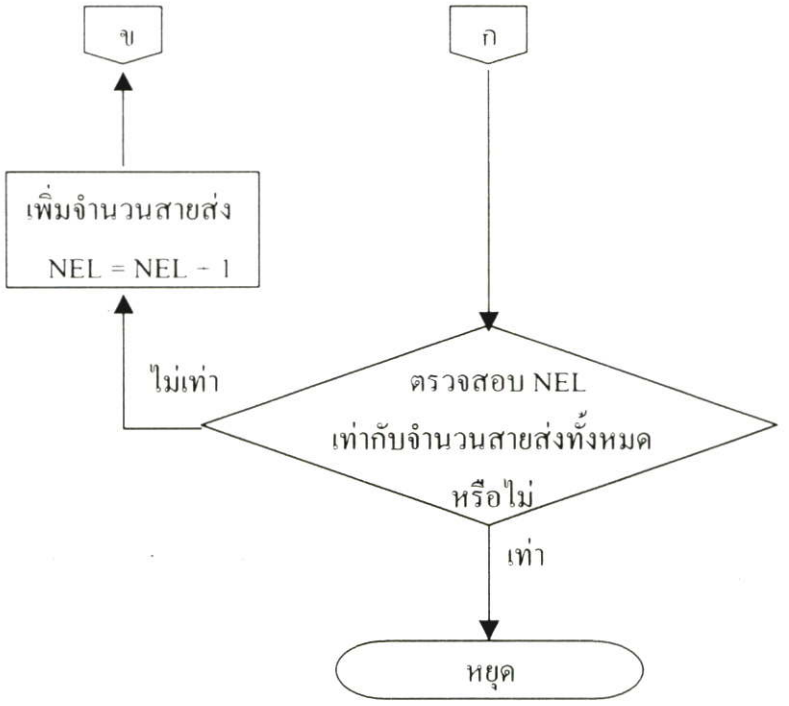
รูปที่ ผ.5.5 แผนผังแสดงการจัดข้อมูลบัสให้อยู่ในระบบบัสย่อยเดียวกัน



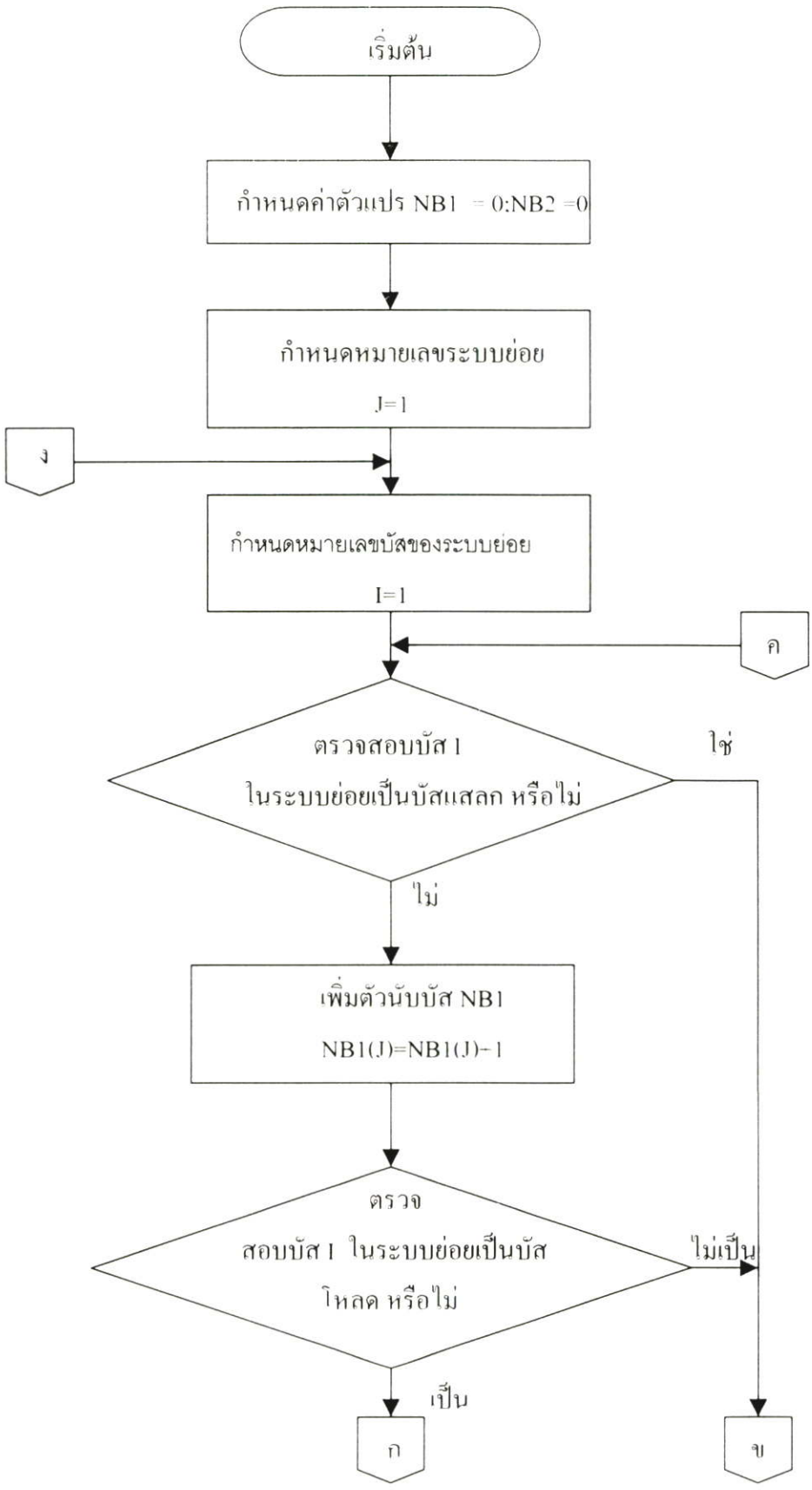
รูปที่ ผ.5.5 แผนผังแสดงการจัดข้อมูลบัสให้อยู่ในระบบบัสย่อยเดียวกัน(ต่อ)



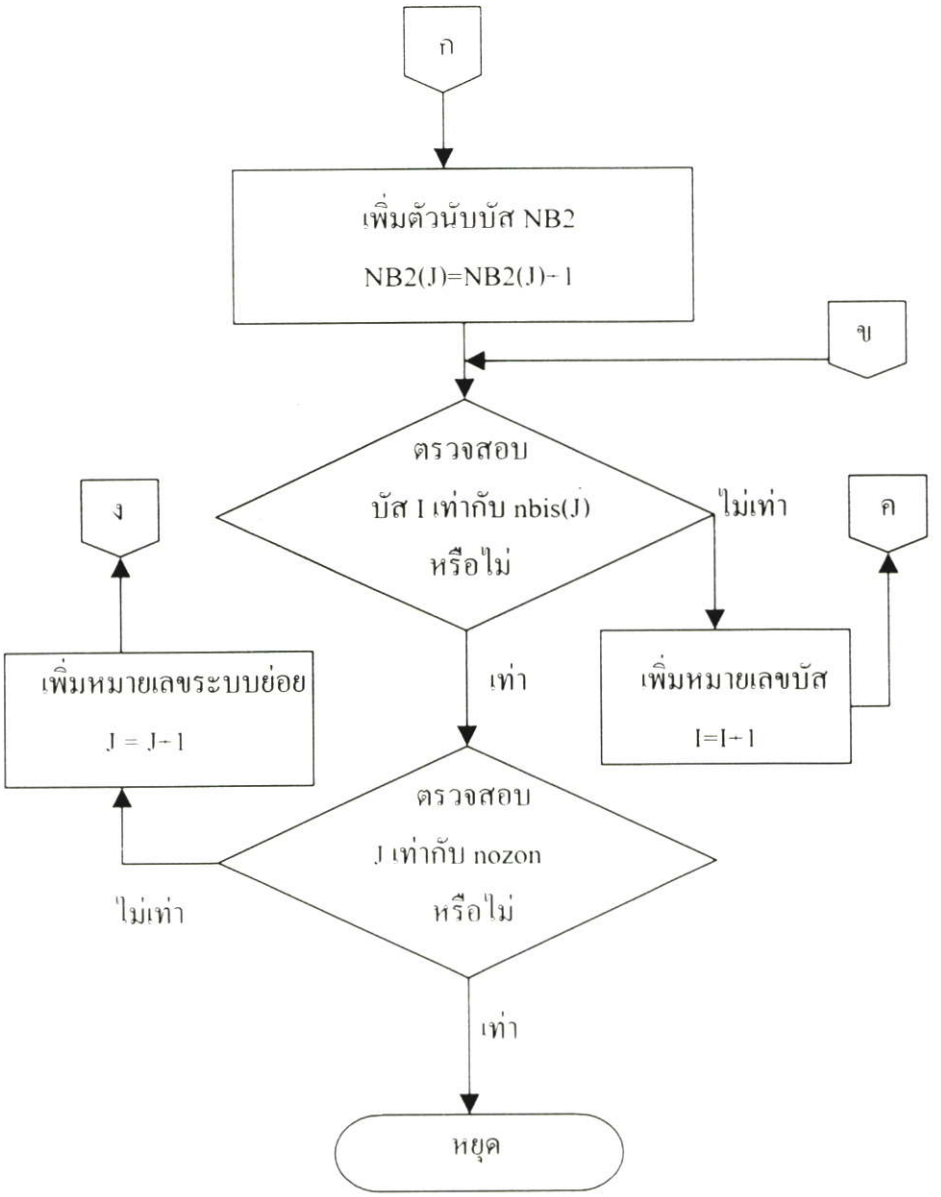
รูปที่ ผ.5.6 แผนผังแสดงการหา self admittance



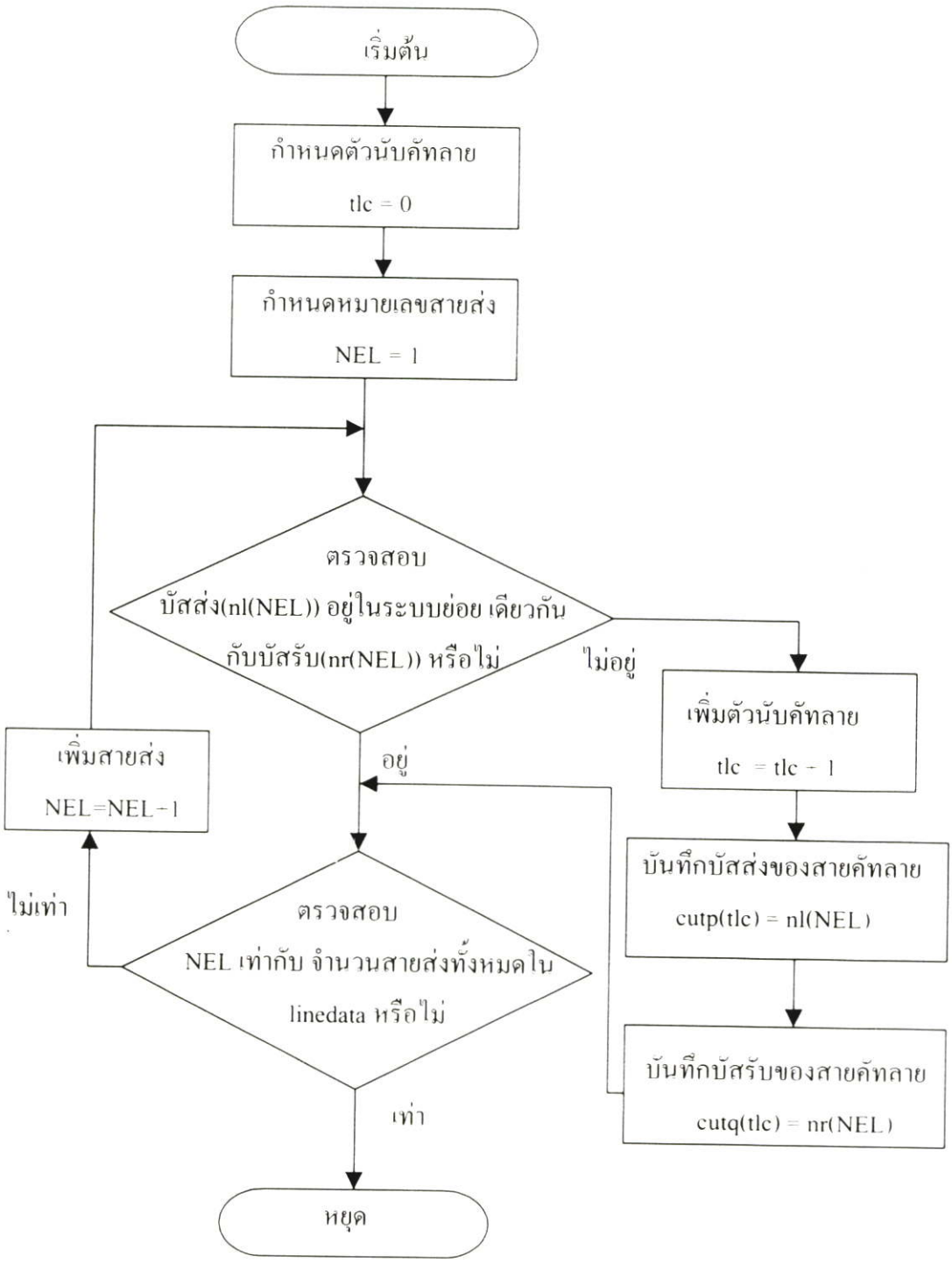
รูปที่ ผ.5.6 แผนผังแสดงการหา self admittance (ต่อ)



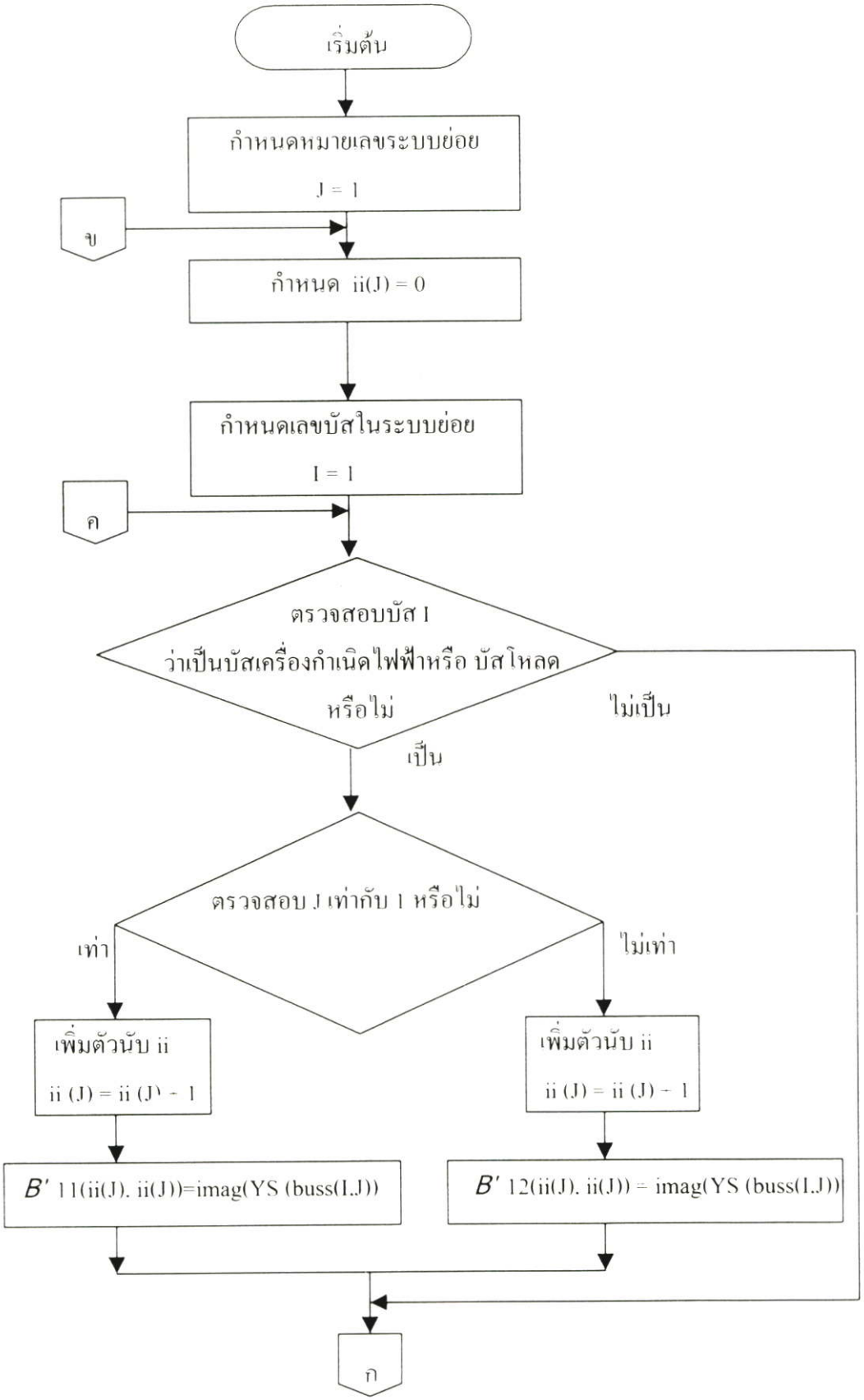
รูปที่ ผ.5.7 แผนผังแสดงการหาจำนวนบัสที่ไม่มีบัสแสลก (NB1)และตัวนับบัสโหลด(NB2)



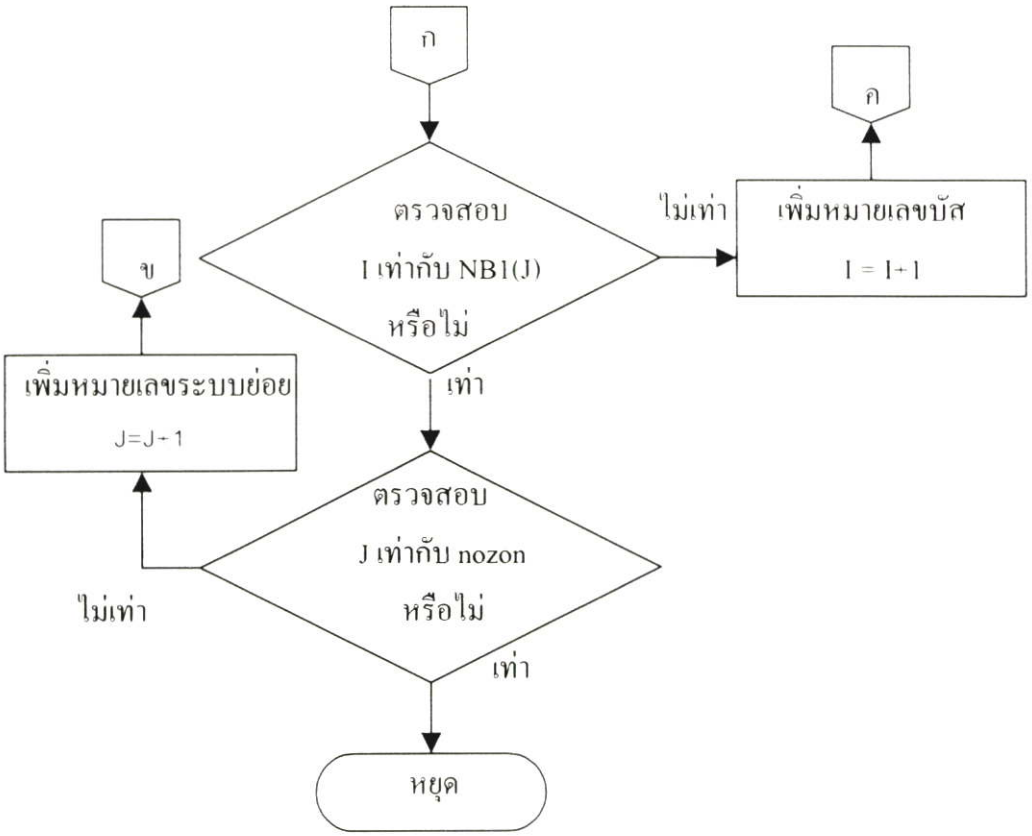
รูปที่ ผ.5.7 แผนผังแสดงการหาจำนวนบัสที่ไม่มีบัสแสลก (NB1)และตัวนับบัสโหลด(NB2)(ต่อ)



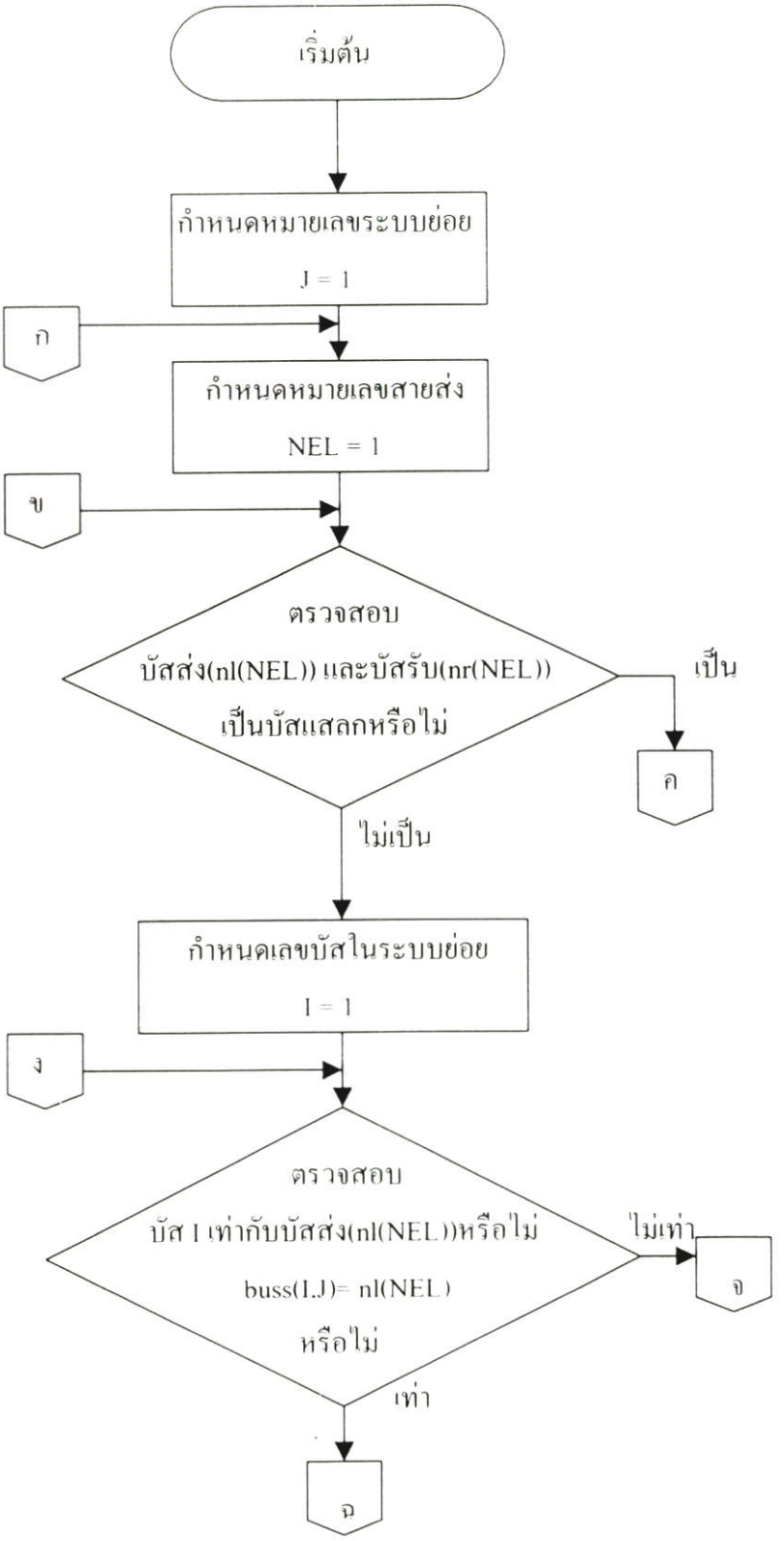
รูปที่ ผ.5.8 แผนผังแสดงการหาตัวนับคัทลาย บัสส่ง และ บัสรับ ของสายคัทลาย



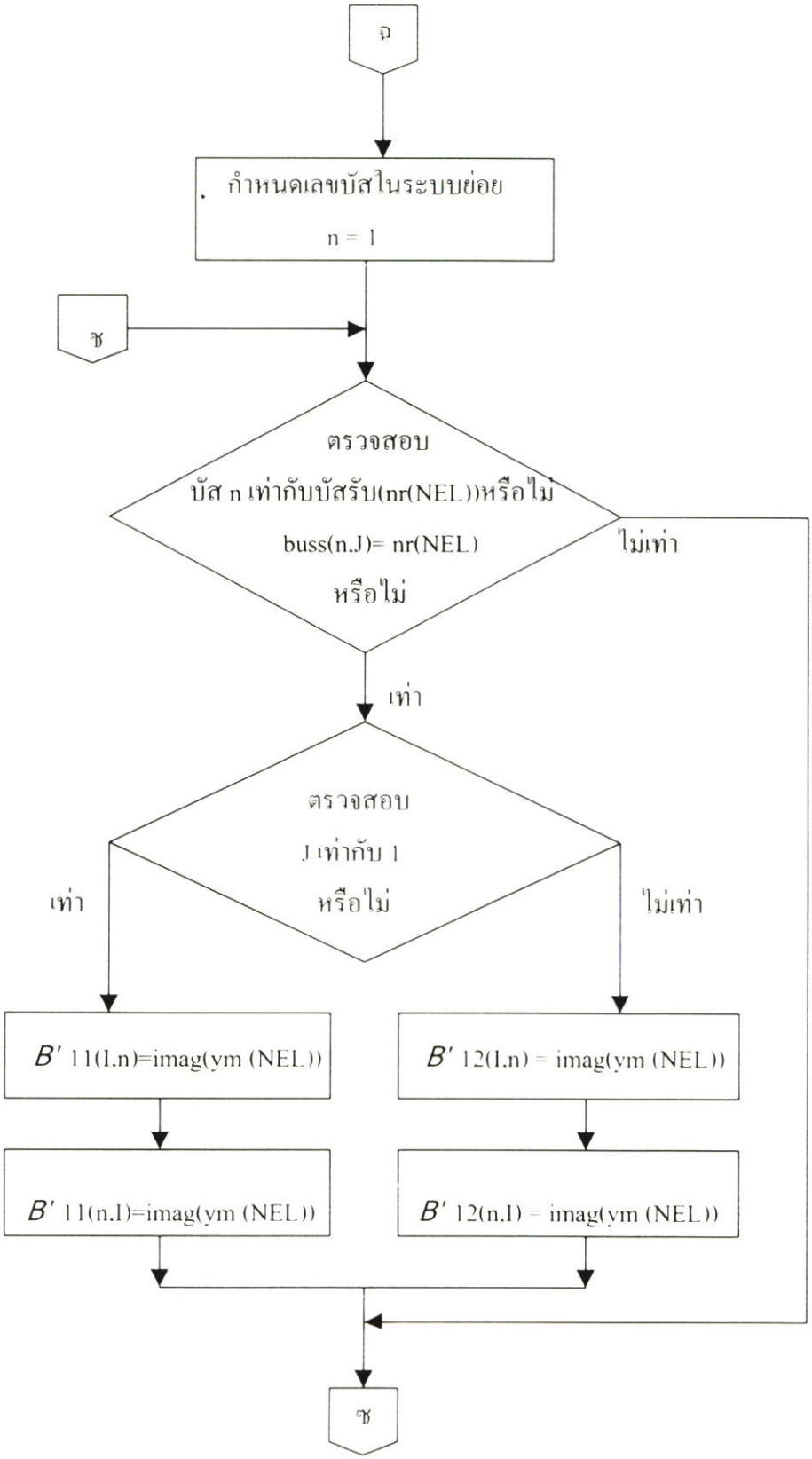
รูปที่ ผ.5.9 แผนผังแสดงการบันทึก self admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B'



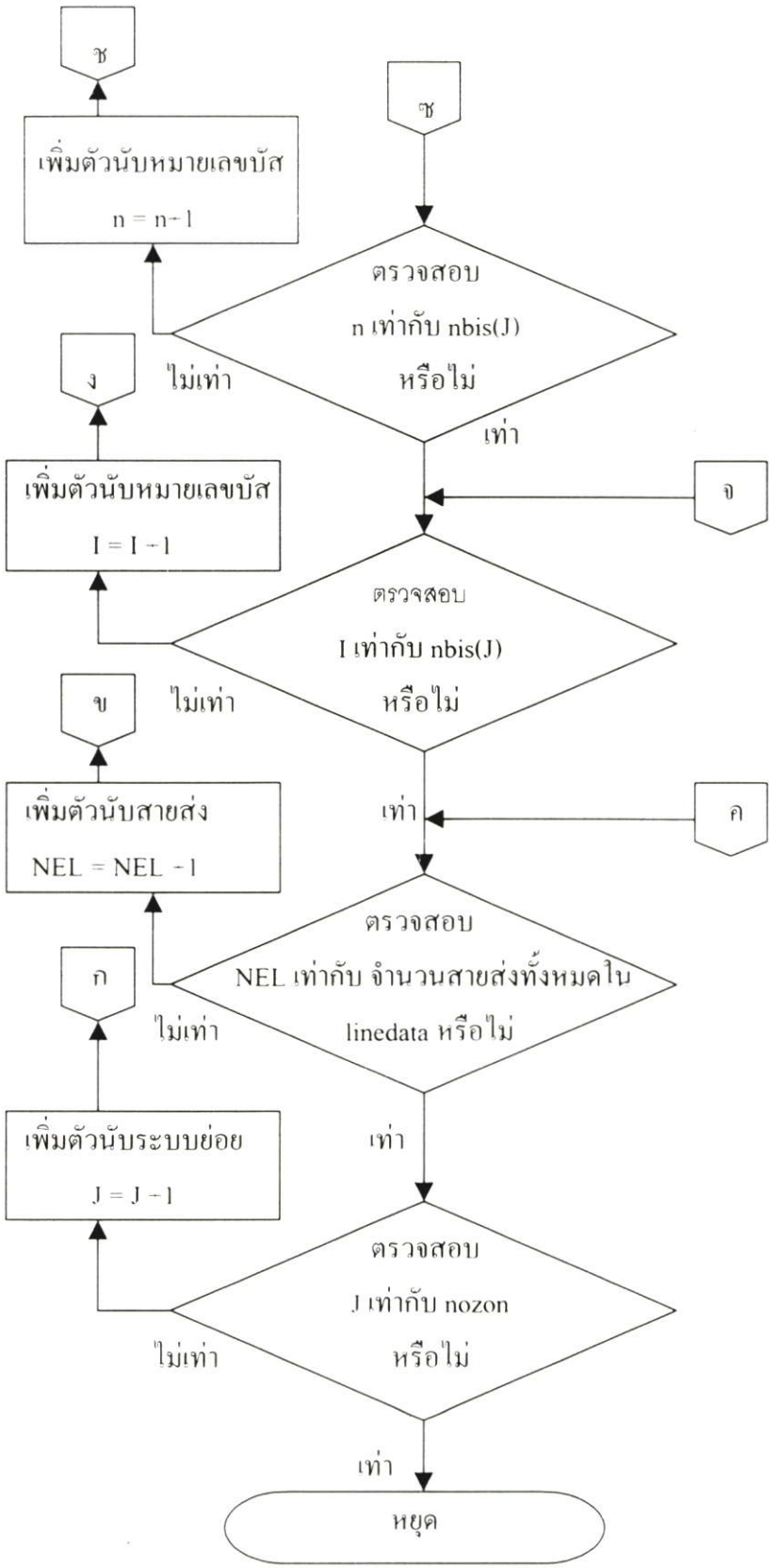
รูปที่ ผ.5.9 แผนผังแสดงการบันทึก self admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B' (ต่อ)



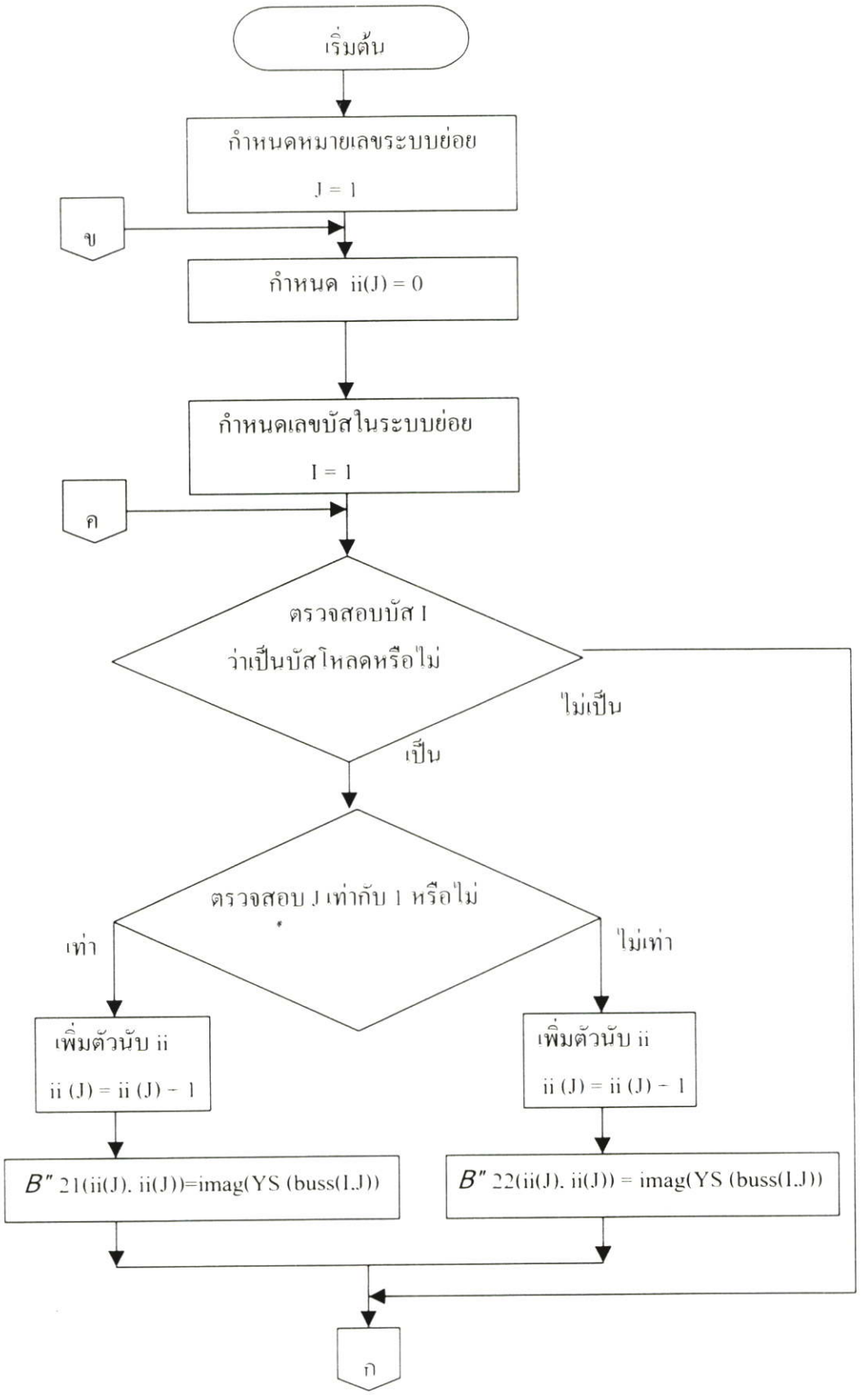
รูปที่ ผ.5.10 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B'



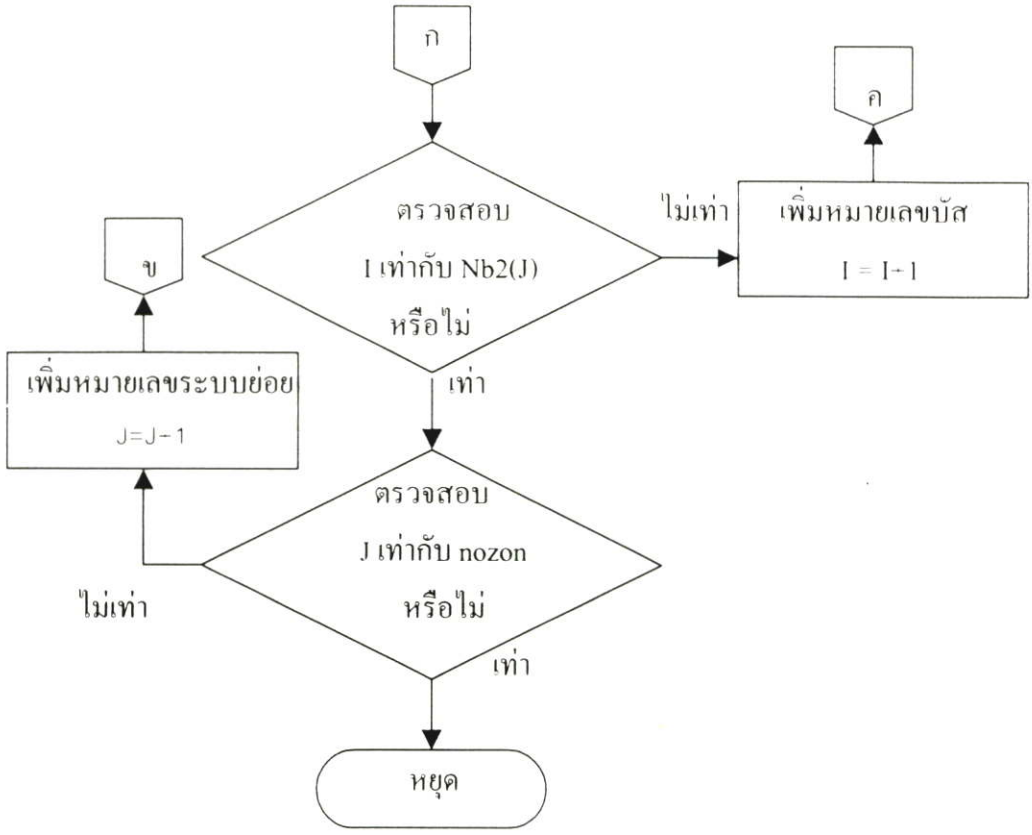
รูปที่ ผ.5.10 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B' (ต่อ)



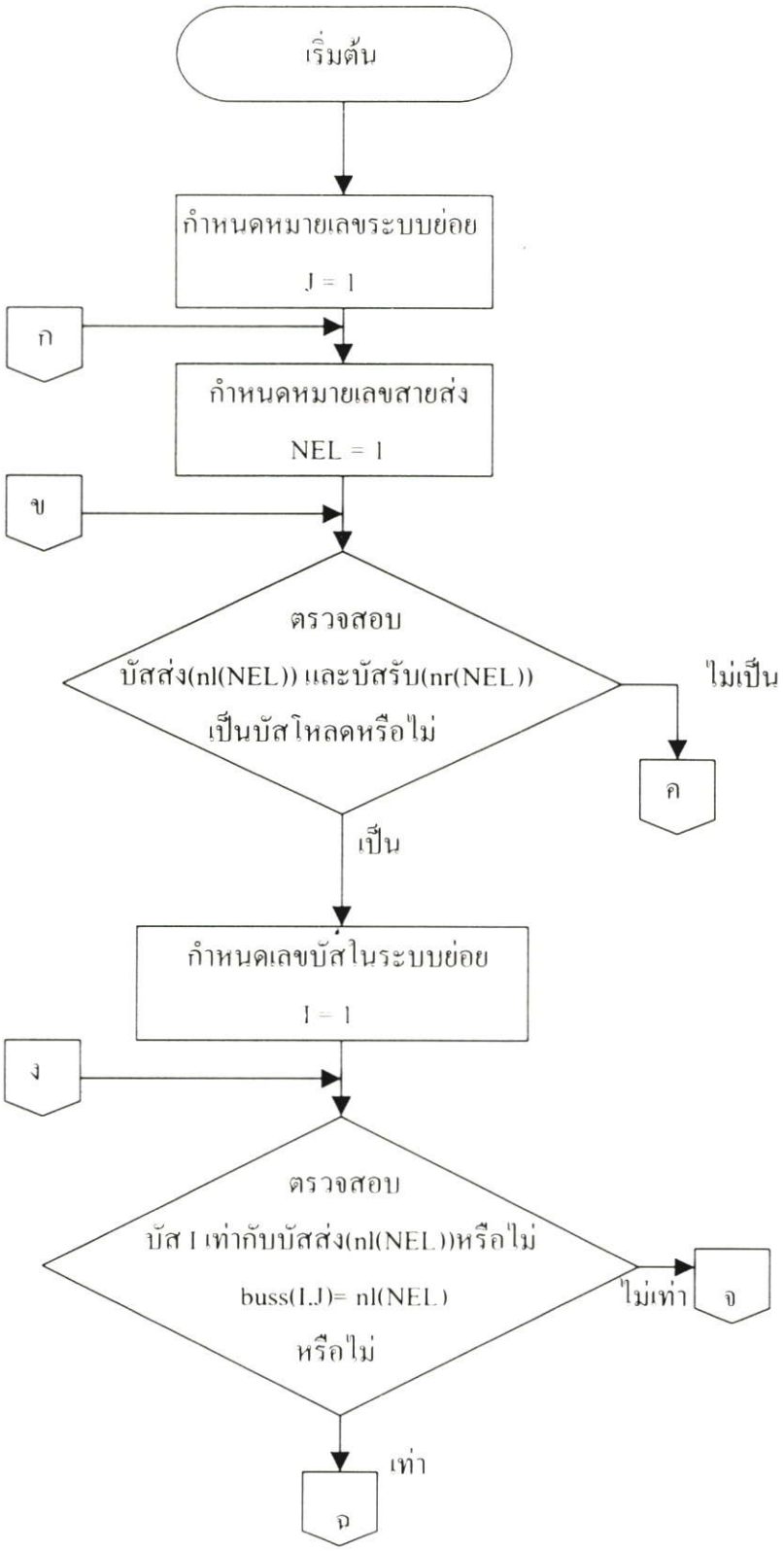
รูปที่ ผ.5.10 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B' (ต่อ)



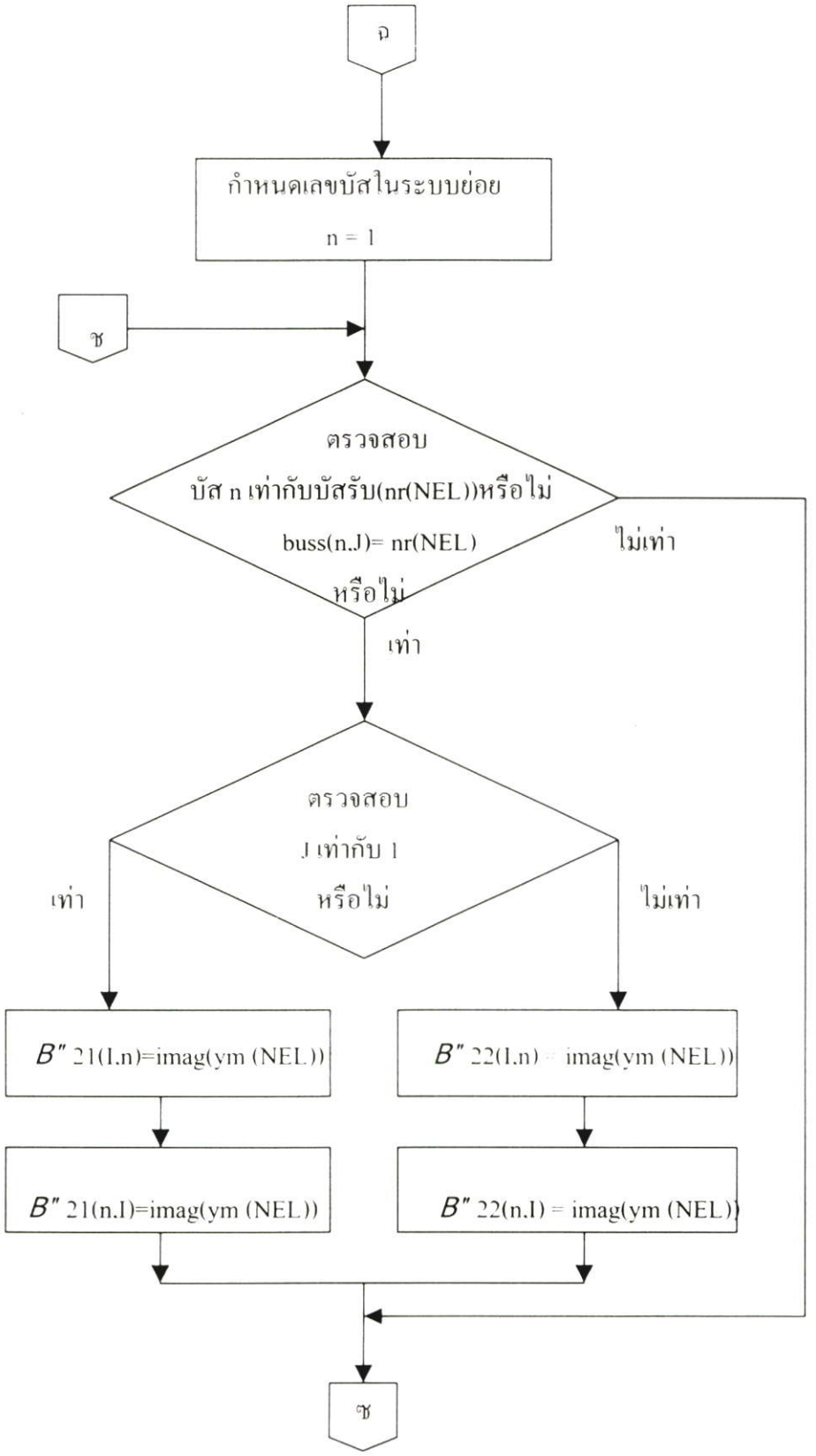
รูปที่ ผ.5.11 แผนผังแสดงการบันทึก self admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B''



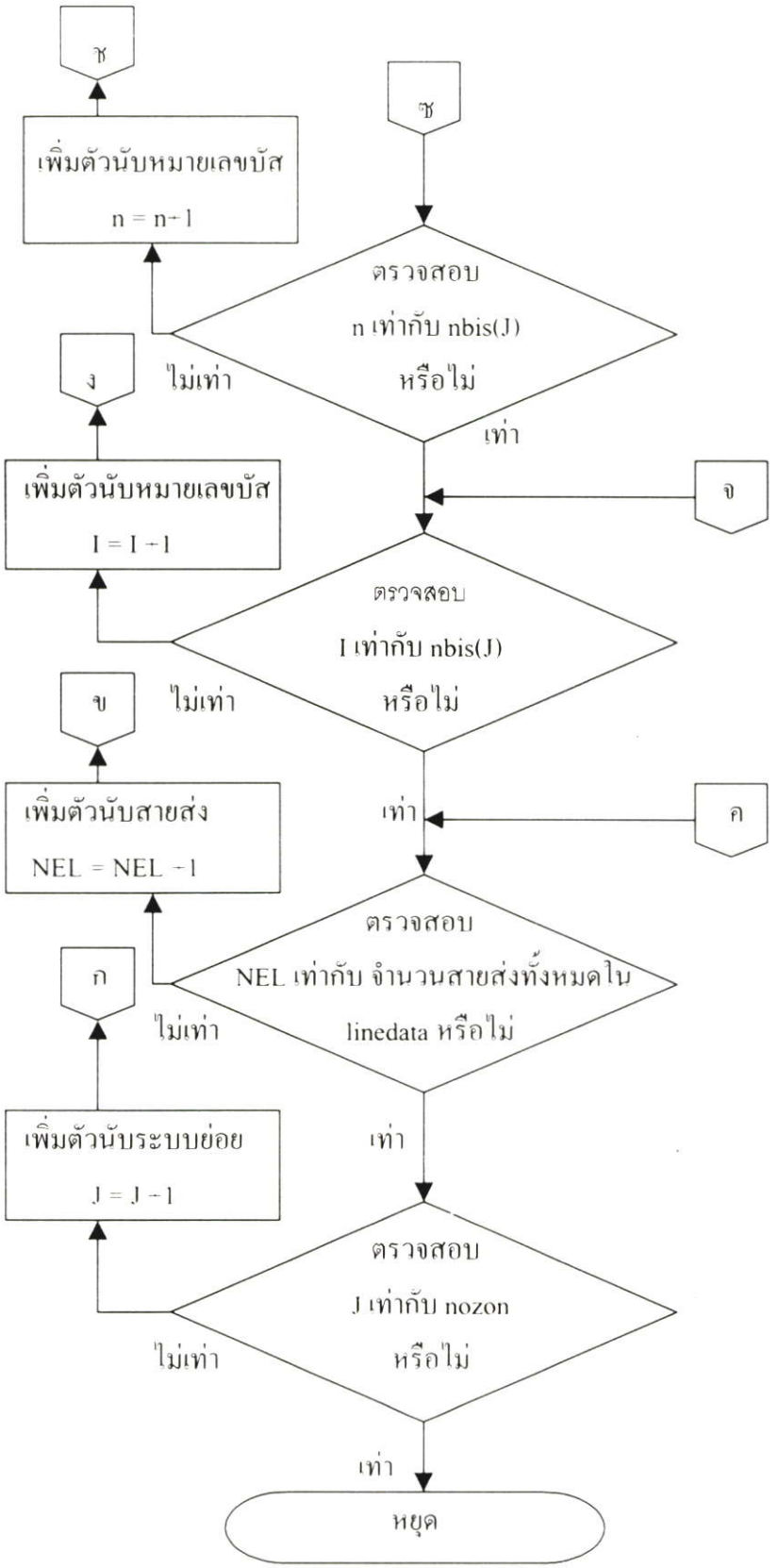
รูปที่ ผ.5.11 แผนผังแสดงการบันทึก self admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B'' (ต่อ)



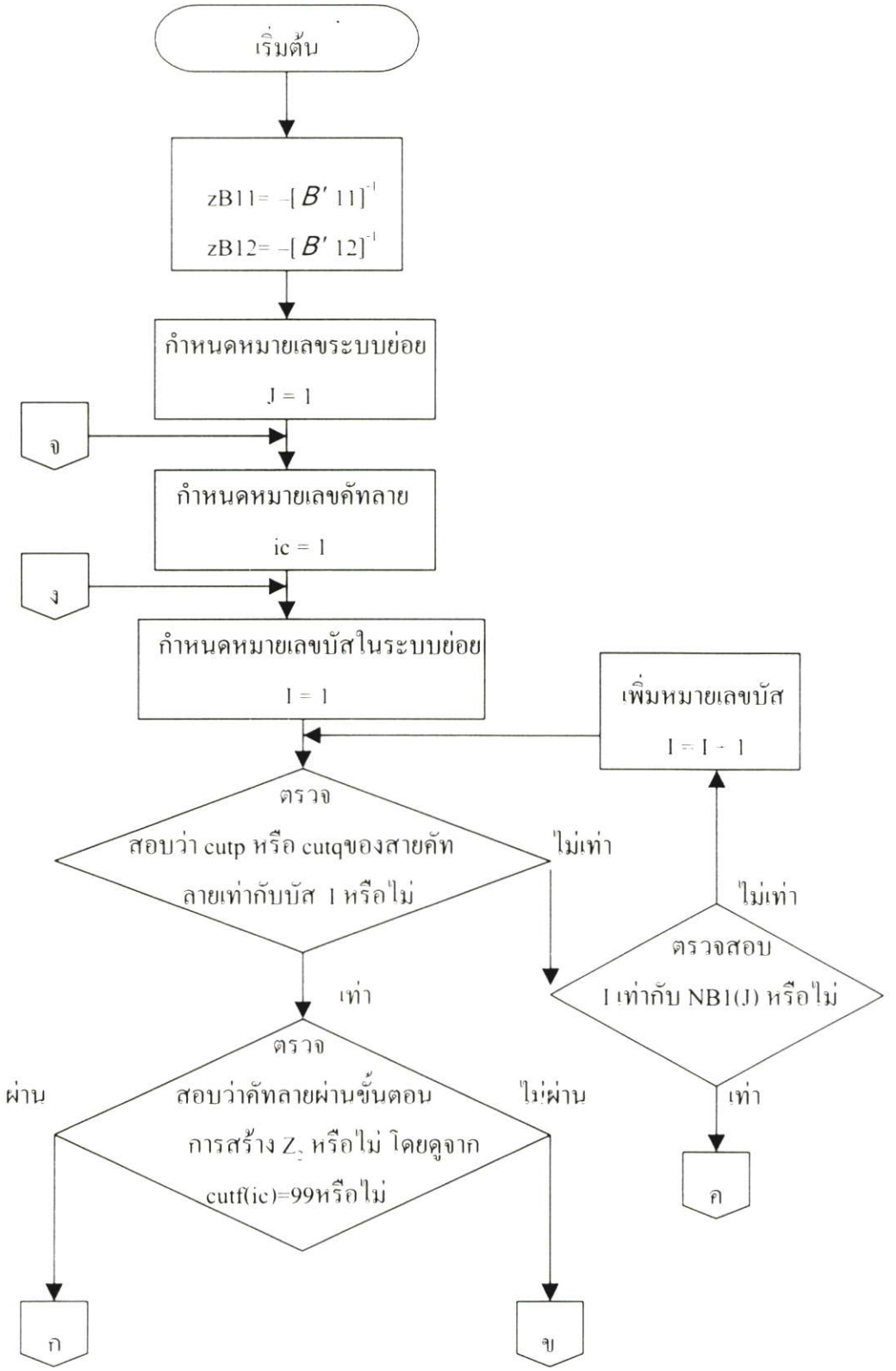
รูปที่ ผ.5.12 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B''



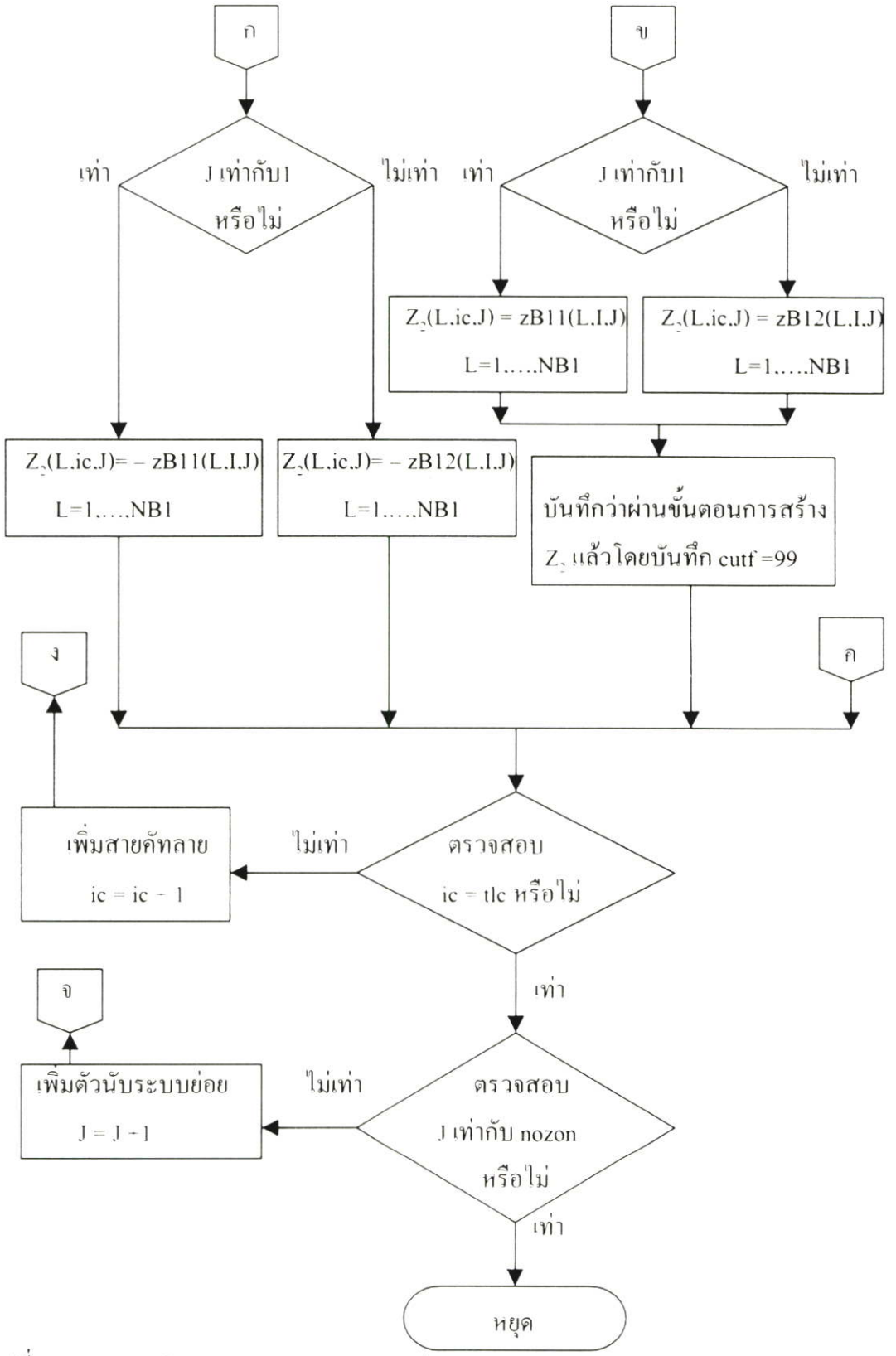
รูปที่ ผ.5.12 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B'' (ต่อ)



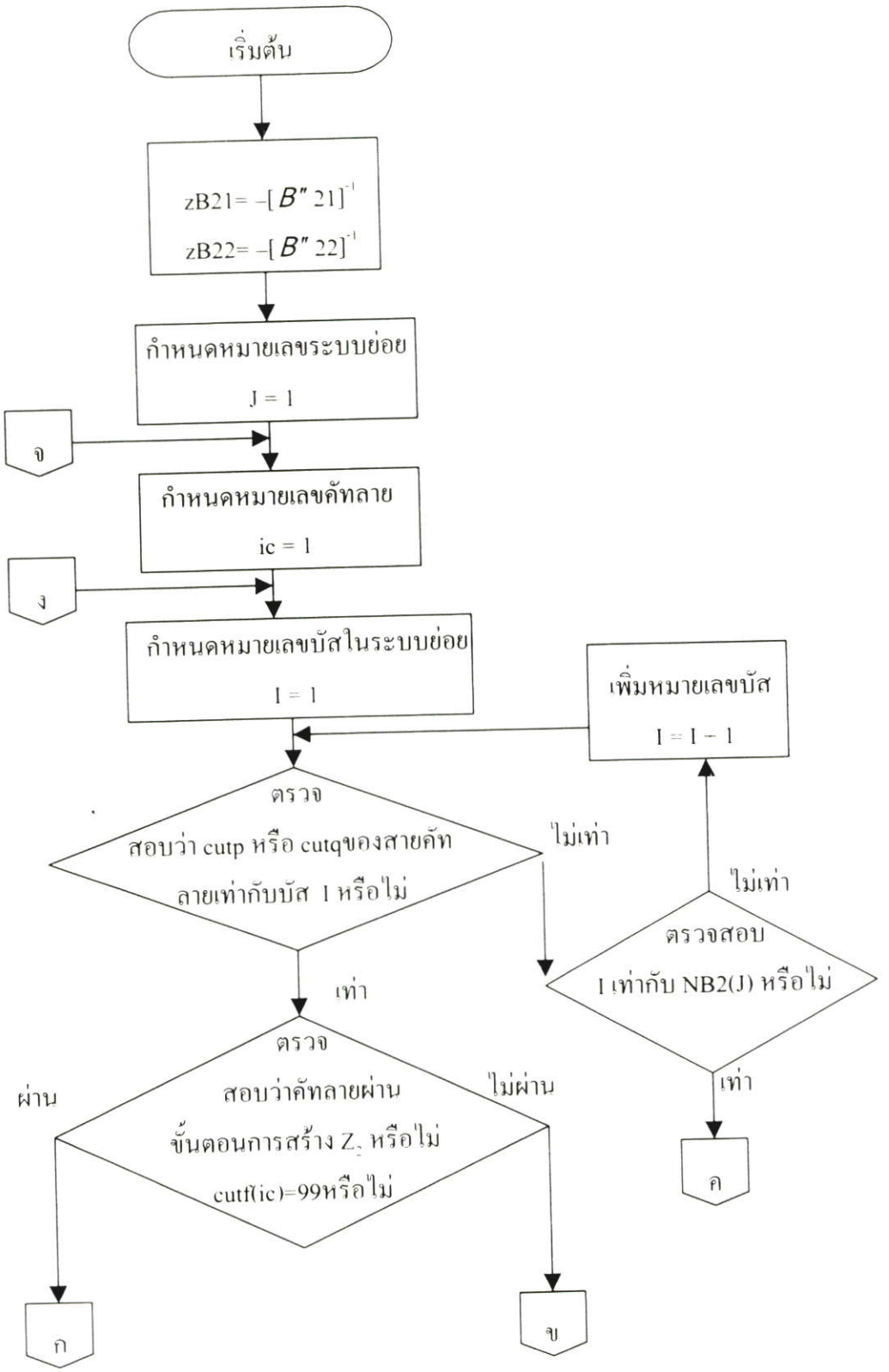
รูปที่ ผ.5.12 แผนผังแสดงการบันทึก mutual admittance ของแต่ละระบบย่อย ลงใน B'' (ต่อ)



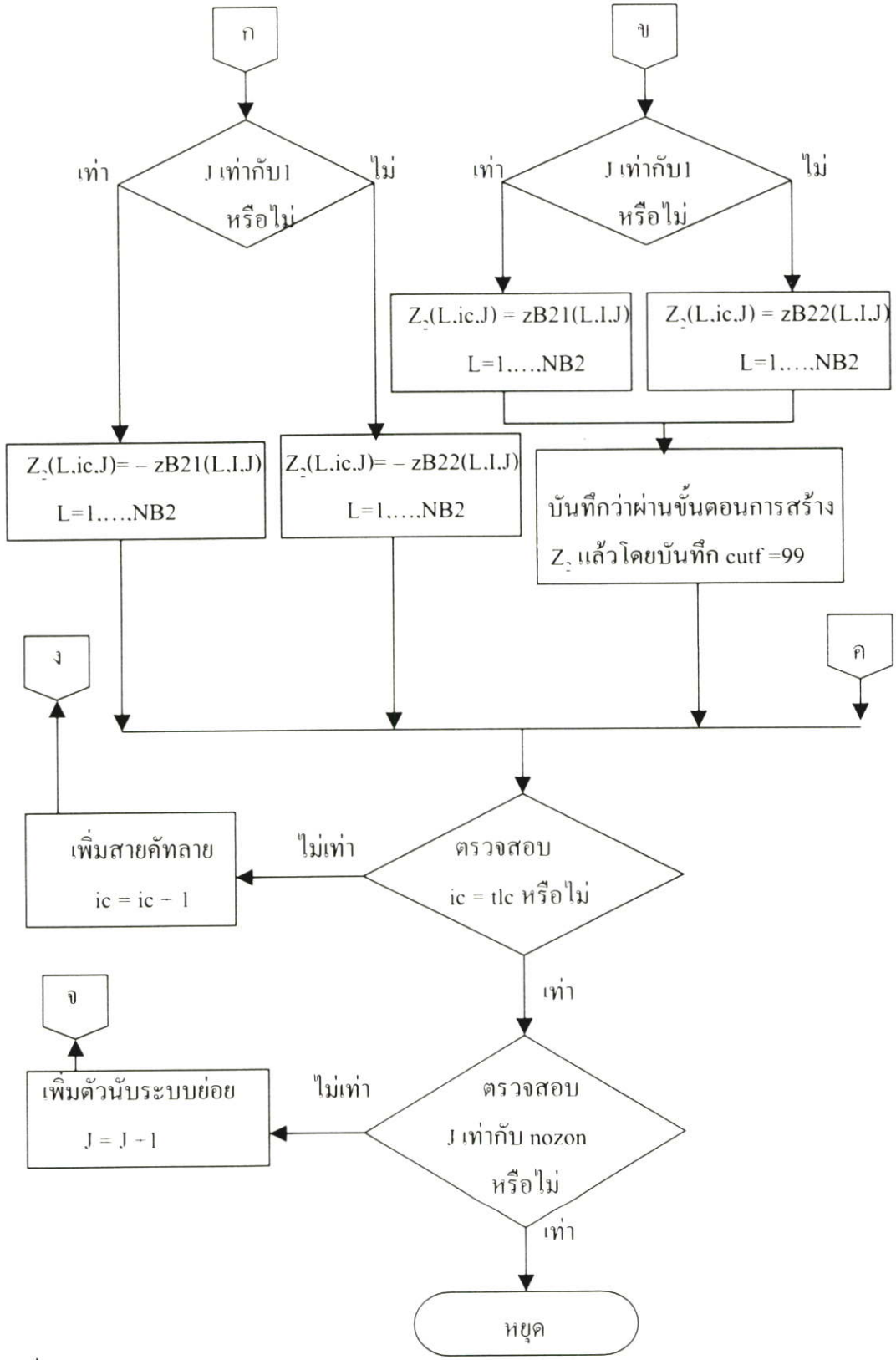
รูปที่ ผ.5.13 แผนผังแสดงการหา $Z_{,}$ จาก B'



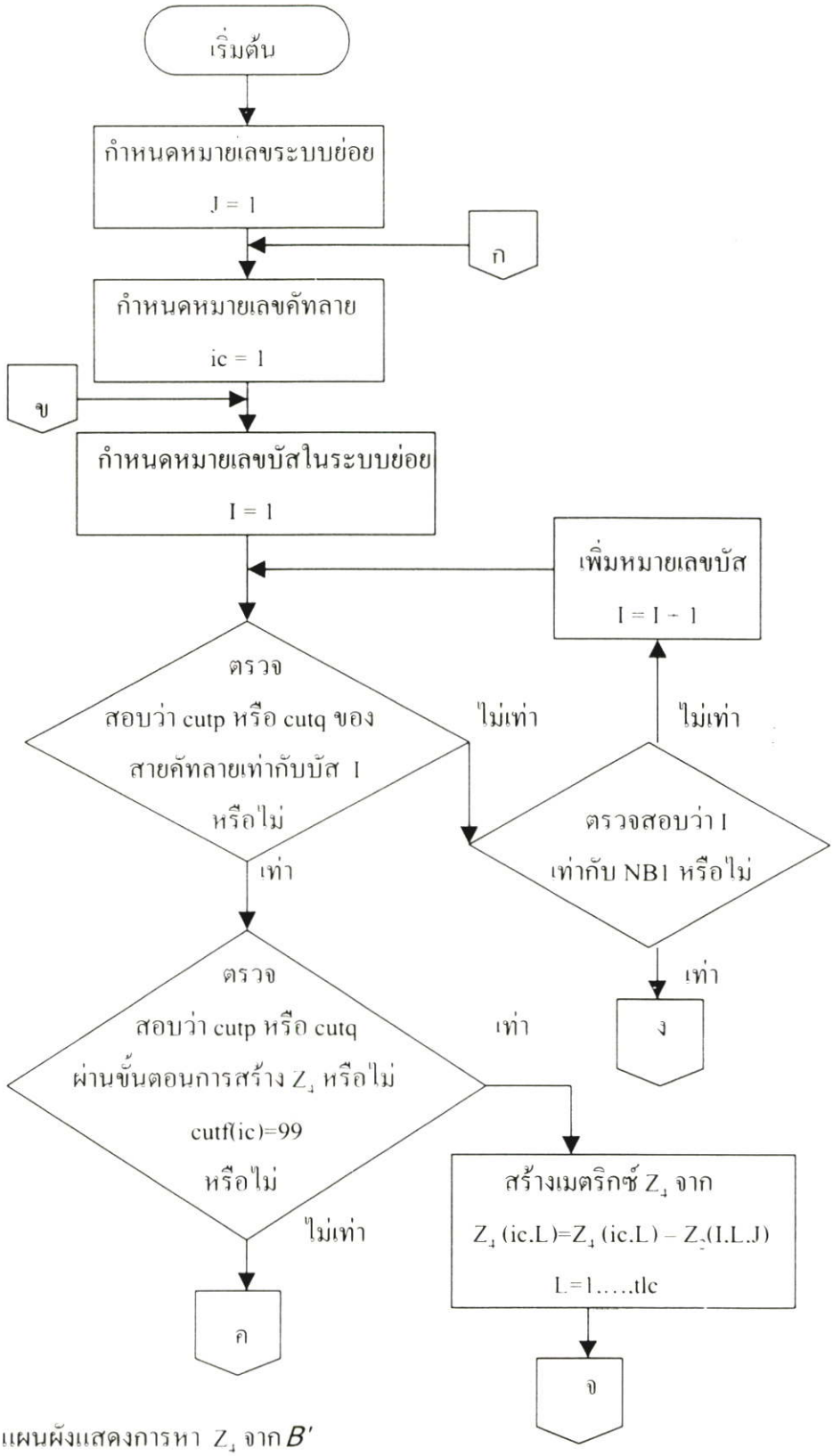
รูปที่ ผ.5.13 แผนผังแสดงการหา Z_2 จาก B' (ต่อ)



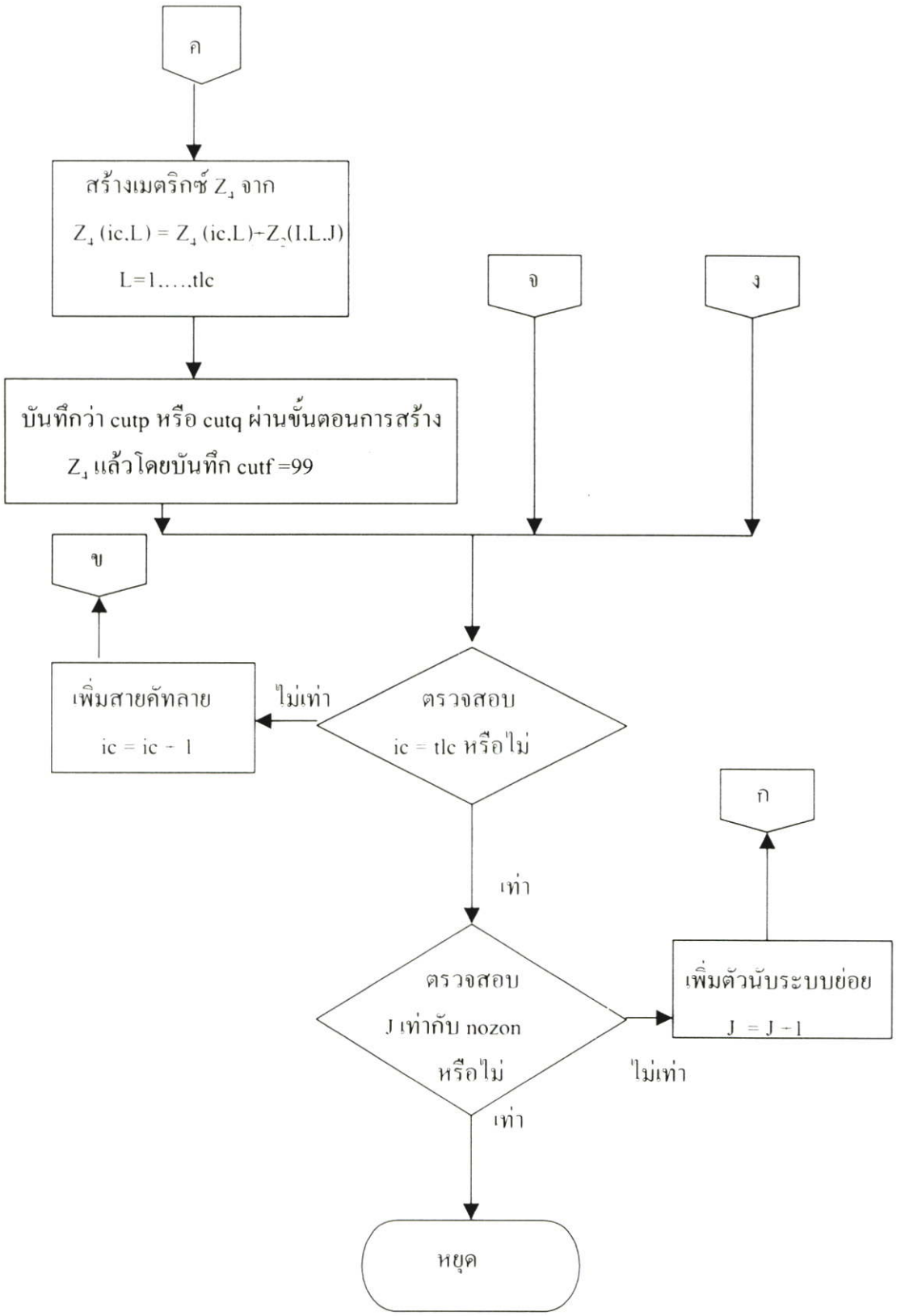
รูปที่ ผ.5.14 แผนผังแสดงการหา $Z_{,}$ จาก B''



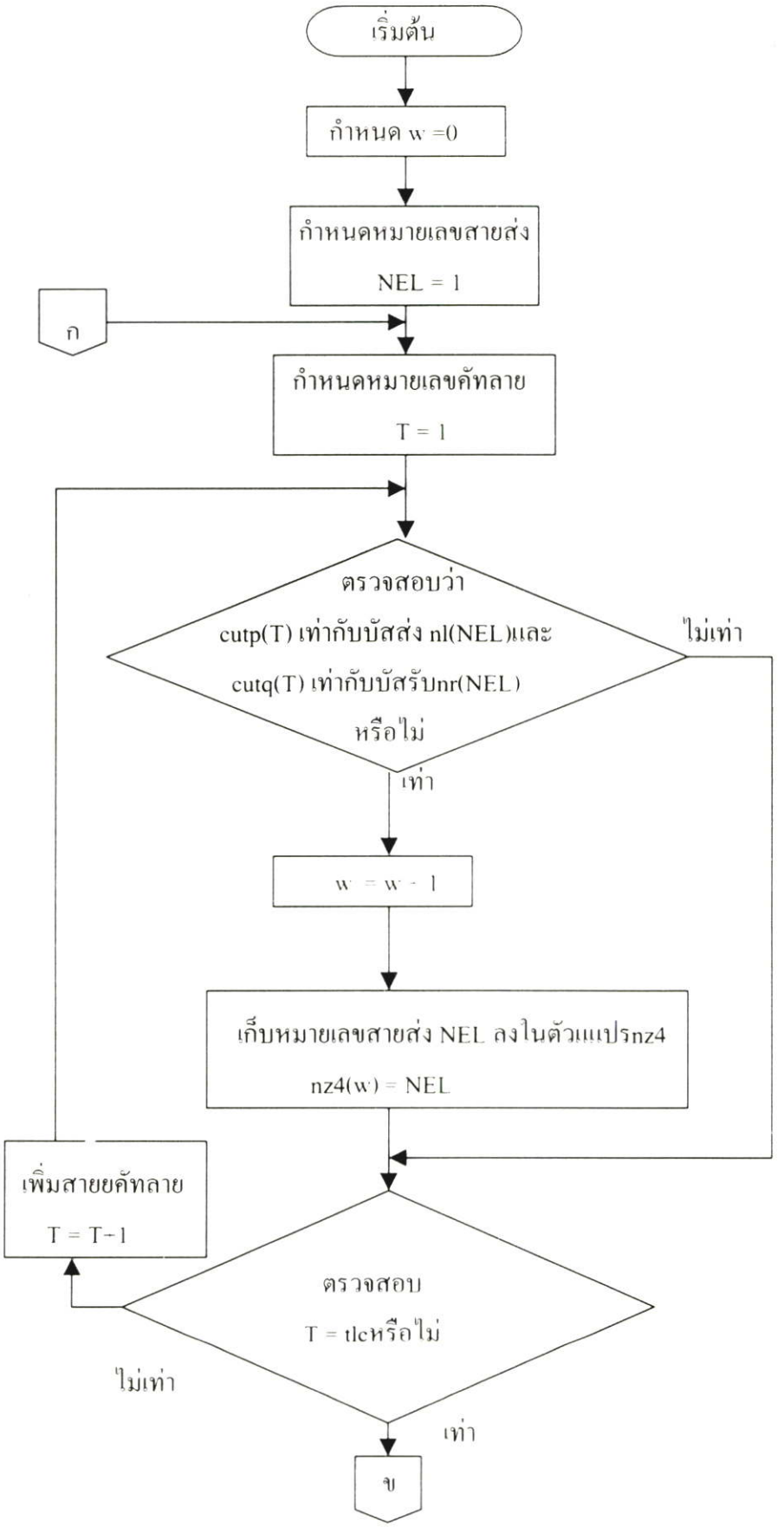
รูปที่ ผ.5.14 แผนผังแสดงการหา Z_c จาก B'' (ต่อ)



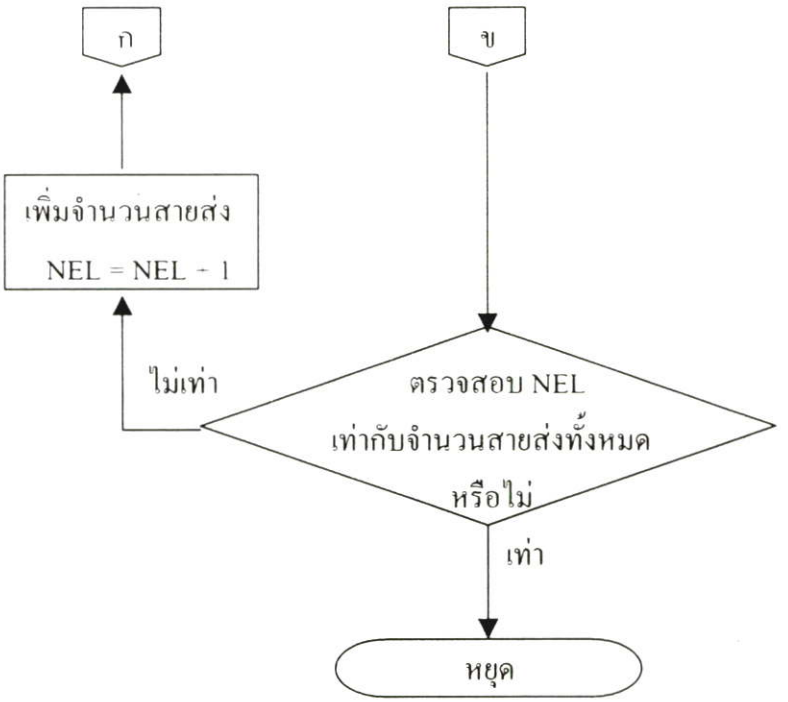
รูปที่ ผ.5.15 แผนผังแสดงการหา Z_4 จาก B'



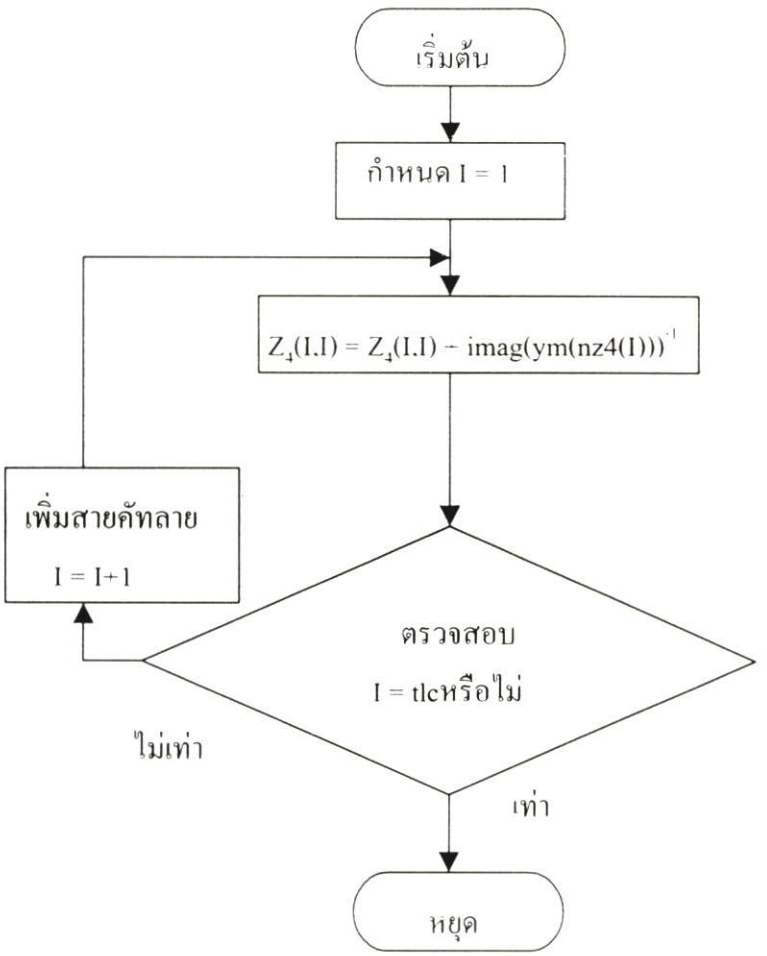
รูปที่ ผ.5.15 แผนผังแสดงการหา Z_4 จาก B' (ต่อ)



รูปที่ ผ.5.16 แผนผังแสดงการหา NELของ สายคัทลาย



รูปที่ ผ.5.16 แผนผังแสดงการหา NELของ สายคัทลาย(ต่อ)



รูปที่ ผ.5.17 แผนผังแสดงการรวมสายคัทลายลงใน Z_4 ตามแนวทแยงมุม

ภาคผนวก จ.
บทความที่ได้รับตีพิมพ์

ISSN 0125-1724

วิศวสาร ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2545

1. การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเนื่องจากภาระไม่เป็นเชิงเส้น 1
ประภาพรรณ เคลือบวัณณรัตน์ ศุลี บรรจงจิตร บุญเลิศ สื่อเฉย ปัญญา มาลีวัตร

2. การจำลองสภาพวัฏจักรโหลดเพื่อศึกษาค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน 7
สิริวิช หัดสวน ธวัชชัย ธรรมประสิทธิ์ วิจิตร กิณเรศ ศุลี บรรจงจิตร บุญเลิศ สื่อเฉย

3. การเปรียบเทียบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเลื่อนเฟส FB-ZVS-PWM กับคอนเวอร์เตอร์แบบเลื่อนเฟส FB-ZVS-PWM ที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำอิ่มตัว 13
จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว วุฒิพันธ์ ศิลปวรณวิวัฒน์ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

4. ชุดจำลองโหลดทางกลเพื่อการทดสอบสมรรถนะของพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 19
ธำรงศักดิ์ ศรีวิเศษ วิจิตร กิณเรศ

5. การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเบิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อยแบบปรับปรุง 25
พรสิน ชัยศิริพงศ์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

6. การวิเคราะห์อายุการใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อมีผลกระทบจากแหล่งจ่ายที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ 31
สุทัศน์ พิลา ศุลี บรรจงจิตร บุญเลิศ สื่อเฉย ปัญญา มาลีวัตร

7. TCSC ในมุมมองของการปรับลดราคาตลาดของไฟฟ้า 37
สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์ ศุลี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา วิมลแข วงศ์สะสิน

8. การศึกษาผลกระทบสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงด้านสมรรถนะของหัวเผาน้ำมันมะพร้าว 43
จารุวัตร เจริญสุข สนธยา มิเลียง

9. การเปรียบเทียบสมรรถนะของหัวเผาน้ำมันพืชเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ในครัวเรือน 49
จารุวัตร เจริญสุข สุรชัย จึงจตุพวชัย

10. โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาเวลาในการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง 55
พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ ดำเกิง โตประเสริฐพงศ์ วนิษทร วิโรจน์วรานุรักษ์ อรนุช พันธ์ไม้สี วันชัย สุทธินุ่น

11. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณมัธยฐานด้วยซีมอส 61
อังคณา จารุวาระกูล กอบชัย เดชหาญ

12. วงจรบูตสแตรป ไบซีมอส อินเวอร์เตอร์ ทำงานแบบเต็มย่านที่ศักดาไฟเลี้ยง 1 โวลท์ 65
คำผอง คงสมบูรณ์ กอบชัย เดชหาญ เอกกมล นิลอาชา

13. การออกแบบวงจรบูตสแตรป ไบเอ็นมอส ทำงานที่ระดับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำ 70
ศิริวัฒน์ ลิ้มไพบูลย์ กอบชัย เดชหาญ ชัยวุฒิ อาริยพัฒนกุล สุชาติ คุณทวีเทพ

14. วงจรบูตสแตรปซีมอสไดรสเตทบัฟเฟอร์ความเร็วสูง 76
ทวิช ชูเมือง กอบชัย เดชหาญ พิศิษฐ โรจน์ทองคำ สุชาติ คุณทวีเทพ

15. วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ปรับค่าความถี่ได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าย่านความถี่ 700MHz-1.2GHz ด้วยสายส่งไมโครสตริป 81
ยงยุทธ พิมพ์จำปา สมยศ จุณณะปิยะ

16. การออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขแบบหลายแถบความถี่ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคสไปลน์ทรานซิสชั่นฟังก์ชั่น 87
ศรวัฒน์ ชิวปรีชา กอบชัย เดชหาญ พิสิทธิ์ เสนีย์วงศ์ ณ อยุธยา

17. การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด 93
ชูสิทธิ์ ประดับเพ็ชร์ วัชรพงศ์ หินจิตร์ สุรพันธ์ ถิ่มมั่น กอบชัย เดชหาญ

18. การกำจัดฮาร์โมนิคที่ไม่ต้องการของดิจิตอลคอมบ์ฟิลเตอร์โดยโมเมนต์ของราก 99
เพ็ญฤดี ตั้งสมวรพงษ์ ฟูศักดิ์ ชีวสุวิทย์

19. การแบ่งส่วนภาพโดยทฤษฎีกราฟของภาพจากการต่อแบบหลายความละเอียดที่ผ่านการรักษาขอบแบบปรับเปลี่ยน 105
พรพจน์ โพธิ์พงศ์วิวัฒน์ ฟูศักดิ์ ชีวสุวิทย์

20. การออกแบบระบบเชื่อมต่อข้อมูลแบบจุดต่อจุดผ่านเครือข่าย SDH 111
ไพโรจน์ หาดอ้าน กอบชัย เดชหาญ

21. การวิเคราะห์ระบบเครือข่ายไร้สายที่ใช้การมอดูเลตแบบ GMSK 117
พิเชษฐ ร่วมสมัคร สุรพล บุญจันทร์ เกรียงไกร วงศ์โรจน์ภรณ์ สุวิพล สิทธิชีวภาค

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยก ส่วนย่อยแบบปรับปรุง

Applications of Modified Sparse Matrix and Piecewise Solution for Fast Decoupled Load Flow

พรสิน ชัยศิริพงศ์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ และการแยกส่วนย่อย โดยในส่วนเทคนิคสปาซเมตริกซ์ได้ใช้วิธีการจัดเก็บแอดมิแตนท์เมตริกซ์ในลักษณะของอะเรย์หนึ่งมิติ จากนั้นทำการคำนวณหาผลลัพธ์ของทุกๆส่วนย่อย แล้วนำผลลัพธ์ของส่วนย่อยทั้งหมดมารวมเข้าด้วยกัน และได้มีการนำเอาฟังก์ชั่นสปาซเมตริกซ์มาประยุกต์ใช้กับเทคนิคนี้ ผลที่ได้มีลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบ และเหมือนกันกับระบบที่ไม่ได้แบ่งส่วน นอกจากนั้นมันยังสามารถลดการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บเมตริกต์ของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่.

Abstract

This paper presents a method for Applications of Modified Sparse Matrix and Piecewise Solution for Fast Decoupled Load Flow Analysis. In part of Sparse Matrix uses the techniques that try to save admittance in to only one dimension array. when large-scale power system is torn into a number of subdivisions that are solved separately. The results are combined to yield the solution of the total system together with the correction factors to obtain the proper values . The result has the same convergence characteristics and gives the same solution as if the system has never been torn and was solved as whole. Moreover. it can reduce the storing matrix memory in large sized Electric Power System

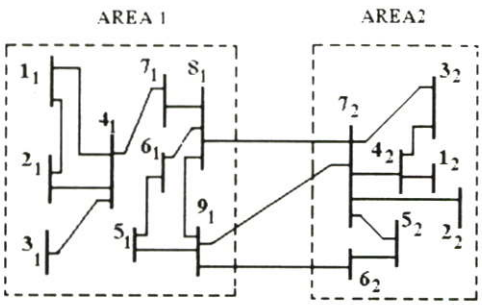
1.บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการไฟฟ้ามีอัตราสูงขึ้น ระบบไฟฟ้ากำลังจึงมีการขยายระบบขึ้นตามมา ทำให้ความจำเป็นที่จะต้องวางแผนในส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่ง อาจใช้วิธีของเกาส์ เกาส์-ไซเดล นิวตัน-ราฟสันหรือพัฒนาโดยการนำวิธีแยกส่วยย่อยมาใช้ วิธีการแยกส่วนย่อยจัดว่ามีบทบาทสำคัญในการคำนวณระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการปรับปรุงวิธีการแยกส่วนย่อย โดยการนำเทคนิคสปาซเมตริกซ์มาใช้ โดยใช้การบันทึกแอดมิแตนท์เมตริกซ์ ด้วยเมตริกซ์อะเรย์หนึ่งมิติ แทนการจัดเก็บแบบเดิมที่ใช้สองมิติ และนำวิธีฟาสดีคับเปิ้ล มาช่วยลดขนาดของจาโคเบียนเมตริกซ์อีกต่อหนึ่ง หลังจากใช้วิธีแยกส่วนย่อยลดขนาดจาโคเบียนเมตริกซ์แล้ว ทำให้สามารถแก้ปัญหาของโปรแกรม

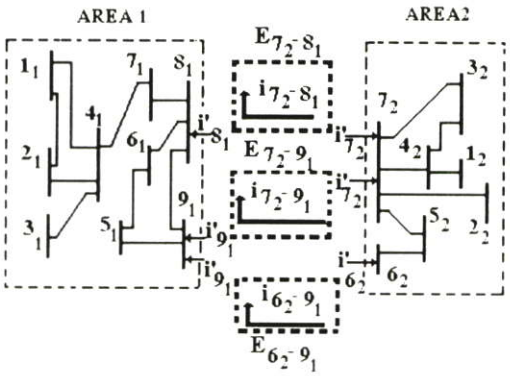
แมทแลบที่มีปัญหาต่อการคำนวณระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่

2.ทฤษฎี และหลักการ

2.1 สมการแยกส่วนย่อย(Piecewise Solution)[1,2]



รูปที่ 1 การแบ่งส่วน ระบบ 16 บัส



รูปที่ 2 แสดงกระแส และ แรงดันสมมูลย์ระหว่าง 2 โซน

จากรูปที่ 2 เขียนสมการเวคเตอร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางกระแสสมมูลย์หรือกระแสที่ไหลเข้าบัส และ กระแสคัทลายน์ ได้ว่า

$$i'_A = A_C\, i_C \qquad (1)$$

โดยที่ i'_A คือ กระแสสมมูลย์ที่ไหลเข้าแต่ละบัส

i_C คือกระแสคัทลายน์ ตัวอย่างเช่น จากรูปที่2 คือ $i_{7_2-8_1}$, $i_{7_2-9_1}$ และ $i_{6_2-9_1}$

A_C คือทิศทางของกระแสคัทลายน์เมื่อเทียบกับทิศทางของกระแสสมมูลย์

และ สามารถเขียนสมการเวคเตอร์แรงดันสมบูรณ์ที่ถูกแยกระหว่างโซน ได้ว่า

$$E_C = -A_C^T E_A \qquad (2)$$

โดยที่ E_C คือแรงดันสมบูรณ์ที่คัทลายน์

E_A คือแรงดันคร่อมของระบบย่อย Area1 และ Area2

สามารถเขียนสมการของกระแสที่ไหลเข้าในแต่บัส คือ

$$y_A E_A = i_A + i'_A$$

$$E_A = z_A\, i_A + z_A i'_A \qquad (3)$$

แทนค่า i'_A จากสมการที่ (1)ลงในสมการที่ (3)

$$E_A = z_A\, i_A + z_A A_C i_C \qquad (4)$$

แรงดันสมมูลและกระแสสมมูลที่ถูกคัทลายน์ระหว่างโซนทั้งสองสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ว่า

$$E_C = z_C\, i_C \qquad (5)$$

โดยที่ z_C คือบัสอิมพีแดนท์ที่ถูกคัทลายน์

แทนสมการ(5)ลงในสมการที่ (2)

$$z_C\, i_C = -A_C^T E_A \qquad (6)$$

แทนสมการที่ (3)ลงในสมการที่ (6)

$$0 = A_C^T z_A i_A + \left[A_C^T z_A A_C + z_C\right] i_C \qquad (7)$$

จากสมการ(4)และ(7)

$$\begin{vmatrix} E_A \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} z_A & z_A A_C \\ A_C^T z_A & A_C^T z_A A_C + z_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_C \end{bmatrix}$$

กำหนดให้

$$z_1 = z_A \qquad (8)$$

$$z_2 = z_A\, A_C \qquad (9)$$

$$z_3 = A_C^T z_A \qquad (10)$$

$$z_4 = A_C^T z_A A_C + z_C \qquad (11)$$

จากสมการที่ (2),(7)และ (11) เขียนสมการกระแส i_C ได้ว่า

$$i_C = z_4^{-1}\left[E_L\right] \qquad (12)$$

2.2 ทฤษฎี การวิเคราะห์ด้วยวิธีฟาสดีคัปเปิ้ล[3]

การเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันในกำลังไฟฟ้าจริง (real power) ในสายส่งไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และการเปลี่ยนแปลงมุมในกำลังไฟฟ้าเสมือน(reactive power)แทบจะ ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น สามารถประยุกต์หาผลต่างของมุม และแรงดันได้ดังสมการที่(13)และ(14)

$$\Delta\delta = -\left[B'\right]^{-1}\frac{\Delta P}{|V_i|} \qquad (13)$$

$$\Delta|V| = -\left[B''\right]^{-1}\frac{\Delta Q}{|V_i|} \qquad (14)$$

ข้อสังเกต $-\left[B'\right]^{-1}$ และ $-\left[B''\right]^{-1}$ เท่ากับ Z_A ทำให้สามารถหา Z_4 ได้จาก สมการ (11) โดยตรง

2.3 วิธีการของ สปาซเมตริกซ์[4]

วิธีการสปาซเมตริกซ์ ได้นำใช้วิธี one dimension array ด้วยวิธีการต่อไปนี้

ข้อมูลแต่ล่ะสายส่งประกอบด้วยหมายเลขสายส่ง (nl)และหมายเลขบัสรับ(nr) และแต่ล่ะสายส่งที่ป้อนข้อมูลจะมี หมายเลขสายส่ง(NEL) ประจำสายส่ง ดังนั้นการบันทึกค่า mutual admittance(ym) จะใช้ หมายเลขสายส่ง เป็นตัวแปรย่อยดังนี้

ym(NEL)=1 /(R(NEL)-X(NEL)*j) (15)

จากนั้นนำ ym มาสร้าง self admittance(YS) ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง nl ,nr และ NEL ของ ym

$$YS(nl(NEL)) = -\sum ym(nl(NEL)) \qquad (16)$$

$$YS(nr(NEL)) = -\sum ym(nr(NEL)) \qquad (17)$$

ทั้งนี้ ym และ YS จะถูก จัดเก็บในรูปเมตริกซ์อะเรย์ 1 มิติ

YS(1)	YS(2)	YS(3)	YS(4)

ym(1)	ym(2)	ym(3)	ym(4)

รูปที่ 3 การบันทึก YS และ ym ด้วยวิธีสปาซเมตริกซ์

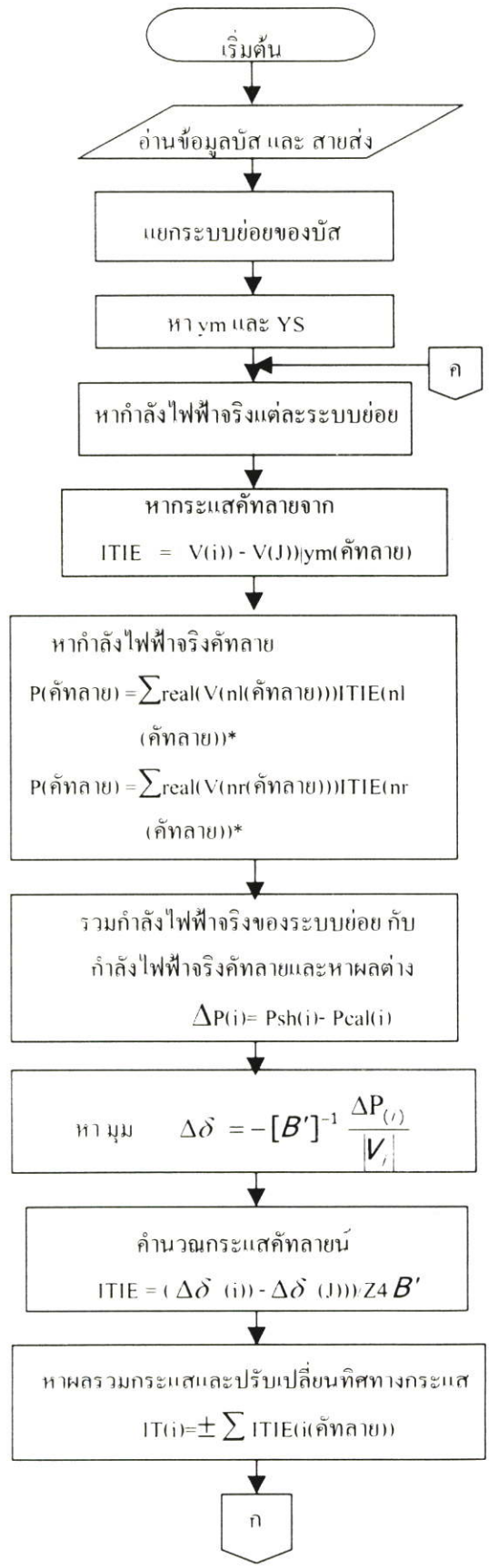
2.4 การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยโดยนำเทคนิคสปาซเมตริกซ์และฟาสดีคับเปิ้ลมาใช้

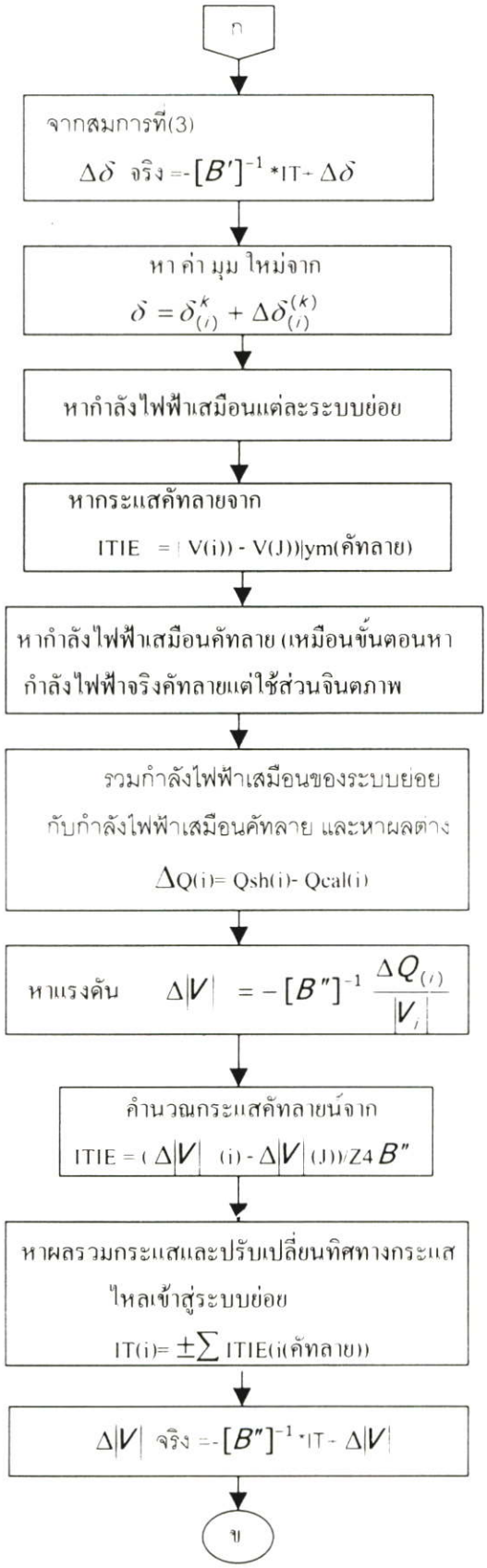
สมมติให้ i แทน บัสระบบย่อย

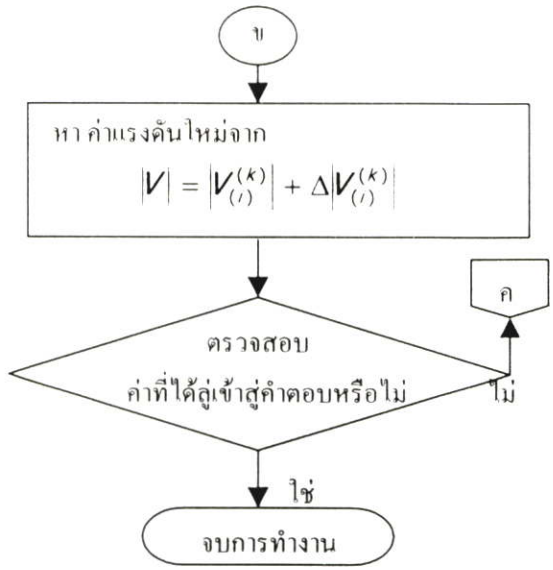
J แทน i อีกระบบย่อยหนึ่ง

nl แทน บัสส่งระบบย่อย

nr แทน บัสรับระบบย่อย





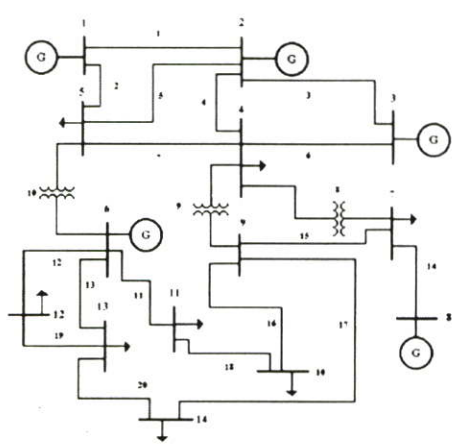


รูปที่ 4 โฟลว์ชาร์ทแสดงการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบ SPF

3.การทดลอง และผลการทดลอง

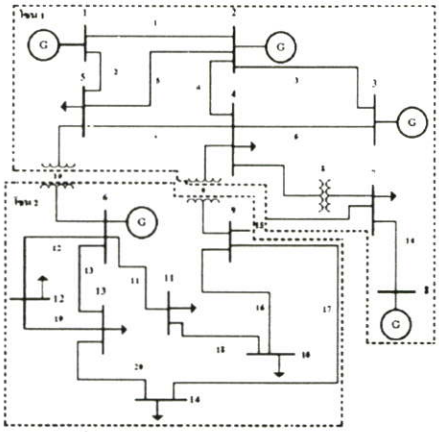
3.1 เปรียบเทียบความถูกต้องของการคำนวณ

ในการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณได้เลือกระบบไฟฟ้ากำลัง14และ 30 บัส เปรียบเทียบความถูกต้อง กับโปรแกรม นิวตันราฟสัน โดยในที่นี้จะใช้อักษรย่อ "SPF"แทนการที่จะกล่าวถึงโปรแกรมวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบแยกส่วนย่อยด้วยวิธีฟาสดีคับเปิ้ลโดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์ ที่จะกล่าวถึงต่อไป



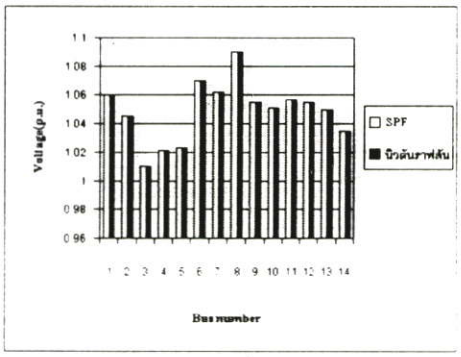
รูปที่5 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส[6]

จากรูปที่ 5 แบ่งระบบออกเป็นระบบย่อยดังรูปที่6

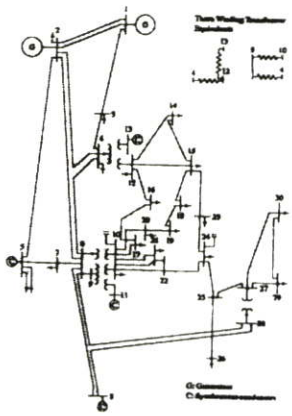


รูปที่ 6 การแยกส่วนย่อย IEEE 14 บัส

ผลของการทดสอบการคำนวณโหลดโฟลว์เปรียบเทียบแรงดัน เป็นดังรูปที่ 7

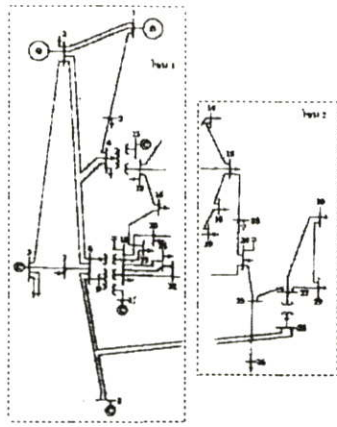


รูปที่ 7 เปรียบเทียบแรงดัน ที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลังIEEE 14 บัส



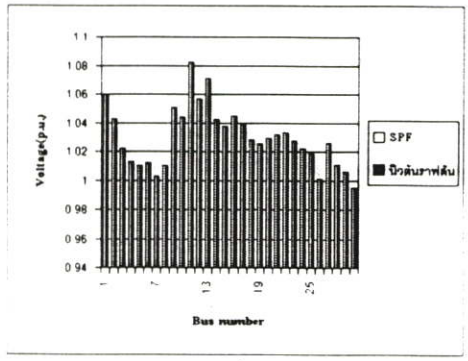
รูปที่8 ระบบทดสอบ IEEE 30 บัส[3]

จากรูปที่8 แบ่งระบบย่อยเป็นดังรูปที่9



รูปที่9 การแยกส่วนย่อย IEEE 30 บัส

ผลของการทดสอบการคำนวณโหลดโฟลว์เปรียบเทียบแรงดัน เป็นดังรูปที่10



รูปที่10 เปรียบเทียบแรงดันที่ได้จากนิวตัน ราฟสัน และ SPF ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส

ผลการทดสอบการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบSPF มีค่าใกล้เคียงกับ นิวตัน ราฟสัน

3.2 เปรียบเทียบ เวลา จำนวนรอบ และจำนวนหน่วยความจำ

วิธีการคำนวณ	เวลา (วินาที)	จำนวนรอบ	หน่วยความจำ (ไบต์)
นิวตันราฟสัน	2.09	3	17.762
ฟาสดีคับเปิล	2.25	19	13.258
SPF	0.94	14	11.756

ตารางที่ 1 ค่าของเวลา จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 14 บัส

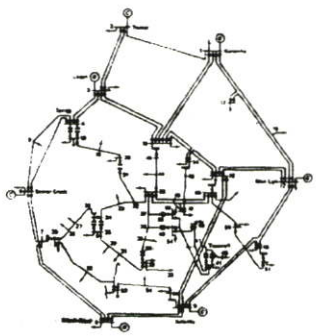
วิธีการคำนวณ	เวลา (วินาที)	จำนวนรอบ	หน่วยความจำ (ไบต์)
นิวตันราฟสัน	5.05	4	66.354
ฟาสดีคับเปิล	5	15	42.610
SPF	5.71	10	31.988

ตารางที่ 2 ค่าของเวลา ,จำนวนรอบ และหน่วยความจำที่ใช้ของระบบ IEEE 30 บัส

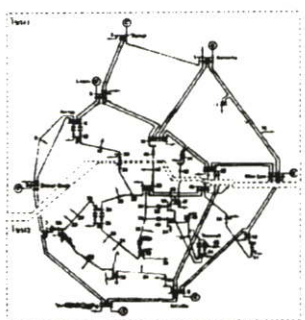
ผลการทดสอบถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็ก SPF จะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า นิวตันราฟสัน และฟาสดีคับเปิ้ล แต่ถ้าเป็นระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ จะใช้เวลามากเนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ จะมีจำนวนสายคัทลายเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้จะเสียไปกับสมการคัทลาย สำหรับหน่วยความจำ SPF จะใช้เนื้อที่น้อยกว่านิวตันราฟสัน และฟาสดีคับเปิ้ล และผลจำนวนรอบในการลู่เข้าหาคำตอบ

นิวตัน ราฟสัน < SPF <ฟาสดีคับเปิ้ล

3.3 ทดสอบด้วยระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่



รูปที่11 ระบบทดสอบ IEEE 57 บัส[5]



รูปที่12 แยกส่วนย่อย IEEE 57 บัส

วิธีคำนวณ	เวลา (วินาที)	การลู่เข้าหาคำตอบ	จำนวนรอบในการคำนวณ
นิวตันราฟสัน	32.24	ไม่ดี	101
ฟาสดีคับเปิ้ล	14.07	ไม่ดี	92
SPF	32.02	ดี	7

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบวิธีการคำนวณโหลดโฟลว์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ด้วยโปรแกรมแมทแลบ

4.สรุปผลการทดลอง

ในการทดสอบวิธีการ "SPF" สามารถคำนวณผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงกับการคำนวณโหลดโฟลว์แบบธรรมดาและใช้เนื้อที่หน่วยความจำน้อย โดยอาศัยวิธีสปาซเมตริกซ์ ในการลดขนาดการจัดเก็บแอดมิแตนท์ และใช้ฟาสดีคับเปิ้ลมาช่วยลดขนาดจาโคเบียนอีกต่อหนึ่งหลังจากที่ได้ใช้วิธีการแยกส่วนย่อยลดขนาดจาโคเบียนไปแล้ว สำหรับข้อเสีย SPF คือความช้าในการคำนวณระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีจำนวนสายที่คัทลายเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาการคำนวณสมการคัทลายเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5.เอกสารอ้างอิง

[1] H.H. Happ and C.C Young. "Tearing Algorithms for Large Scale Network Programs." IEEE Trans.Power Apparatus and system. pp. 2639-2649. Dec. 1971.

[2] J.Granger,W D. Stevenson,Jr. Power System Analysis. Singapore : McGraw-Hill,Inc. 1994

[3] S.Hadi."Power System Analysis." McGraw- Hill .1999.

[4] วิเศษ จูภิบาล. " โปรแกรมโหลดโฟลว์อัตโนมัติสำหรับระบบไฟฟ้าเชื่อมโยงภายในขนาดใหญ่. " วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2513

[5] Y.Wallach. " Calculations and Programs For Power System Networks." New Jersy : Prentice-Hall,Inc. 1986

ประวัติผู้เขียน

นายพรสิน ชัยศิริพงศ์ เกิดเมื่อ วันที่ 4 กันยายน ที่อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย พระจอมเกล้าธนบุรี