# การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์

# ANALYSIS OF OVERLOAD IN ELECTRIC POWER SYSTEM BY Z-MATRIX COMPARED WITH LINEAR SENSITIVITY FACTORS


สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล

SITTHIDET VACHIRASRICIRIKUL


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546


ISBN 974-324-855-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธี แซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์

# ANALYSIS OF OVERLOAD IN ELECTRIC POWER SYSTEM BY Z-MATRIX COMPARED WITH LINEAR SENSITIVITY FACTORS

สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล

SITTHIDET VACHIRASRICIRIKUL

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 49293
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974 – 324 – 855 - 2

# ANALYSIS OF OVERLOAD IN ELECTRIC POWER SYSTEM BY Z-MATRIX COMPARED WITH LINEAR SENSITIVITY FACTORS

SITTHIDET VACHIRASRICIRIKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

ISBN 974 – 324 – 855 - 2

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

**บัณฑิตวิทยาลัย**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตีแฟกเตอร์

ANALYSIS OF OVERLOAD IN ELECTRIC POWER SYSTEM BY Z-MATRIX COMPARED WITH LINEAR SENSITIVITY FACTORS

**ชื่อนักศึกษา** นายสิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล

**รหัสประจำตัว** 42061018

**หลักสูตร** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

**อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์** รศ.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|---|---|---|
| รศ.ศิริวัฒน์ | โพธิเวชกุล | |
| ผศ.ดร.สมชาติ | จิริวิภากร | |
| ผศ.ดร.อานันทวัฒน์ | คุณากร | |
| รศ.ศุลี | บรรจงจิตร | |
| รศ.มณฑล | ลีลาจินดาไกรฤกษ์0 | |

**วัน/เดือน/ปี ที่สอบ** 16 ตุลาคม 2546 เวลา 14.00-16.00 น.

**สถานที่สอบ** ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

**บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว**

**(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)**

**คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย**

**วันที่** 13 **เดือน** พฤศจิกายน **พ.ศ.** 2546

| | |
|---|---|
| **หัวข้อวิทยานิพนธ์** | การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ |
| **นักศึกษา** | นายสิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล |
| **รหัสประจำตัว** | 42061018 |
| **ปริญญา** | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| **พ.ศ.** | 2546 |

**อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์** ร.ศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

## บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอถึงการวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ ตัวโปรแกรมที่ใช้เขียนด้วยภาษาวิชวลเบสิก 6.0 และ ทำการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยจะทำการวิเคราะห์โหลดเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยการทดสอบเอาท์เตจอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะพิจารณา 2 กรณี กรณีที่หนึ่งทดสอบการเอาท์เตจไลน์ กรณีที่สองทดสอบเอาท์เตจเจนเนอเรเตอร์ และ ทำการป้องกันผลของโหลดเกินที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์เพื่อที่จะขจัดหรือบรรเทาโหลดเกินที่เกิดขึ้นนี้ให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง

| | |
|---|---|
| **Thesis Title** | Analysis of Overload in Electric Power System by Z-Matrix Compared With Linear Sensitivity Factors |
| **Student** | Mr.Sitthidet Vachirasricirikul |
| **Student ID.** | 42061018 |
| **Degree** | Master of Engineering |
| **Programme** | Electrical Engineering |
| **Year** | 2003 |
| **Thesis Advisor** | Assoc.Prof.Monthon Leelachindakaileark |


## ABSTRACT

The research presented in this thesis concerns a method for analysing an overload condition in an electric power system using Z-Matrix method compared with Linear Sensitivity Factors. The developed program is written using microsoft visual basic 6.0 and calculating load flow by fast decoupled load flow. Overload condition in the electric power system an performed by outaging of equipment. Two cases are considered; the first case is for testing outage transmission line, and the second case is for testing outage generator. The protection of the overload by selecting switched line to eliminate or to reduce the overload is presented.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาจากท่าน ร.ศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ และตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้แนะนำข้อคิดเห็น ปัญหา และข้อผิดพลาดต่างๆในการแก้ไขปรับปรุงผลงานวิจัยฉบับนี้

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณ พระคุณบิดา และมารดา ญาติพี่น้อง ตลอดจนเพื่อนๆนักศึกษา และเพื่อนสนิททุกๆท่านที่ได้คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือทุกๆด้านต่อการศึกษาในครั้งนี้

สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....IX

**บทที่ 1 บทนำ**.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....1

1.3 สมมุติฐานในการศึกษา.....1

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย.....2

1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....2

1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....3

**บทที่ 2 การวิเคราะห์โหลดโฟลว์**.....4

2.1 บทนำ.....4

2.2 ปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้า.....4

2.3 การสร้างบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์.....9

2.3.1 สายส่งไฟฟ้ากำลัง.....10

2.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า.....11

2.3.3 ชันท์อิลิเมนต์.....15

2.4 การคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตันราฟสัน.....15

2.4.1 การประยุกต์วิธีนิวตันราฟสันในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์.....16

2.5 การคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล.....18

**บทที่ 3 ทฤษฎีและเทคนิคการเลือกสวิทช์ไลน์ด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors**.....22

3.1 บทนำ.....22

3.2 วิธี Linear Sensitivity Factors.....22

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า


3.2.1 The Generation Shift Factors ($a_{ii}$).....22

3.2.2 The Line Outage Distribution Factors ($d_{i,k}$).....24

3.3 เทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors.....29

3.4 ตัวอย่างในการคำนวณ.....29

**บทที่ 4 ทฤษฎีและเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วยวิธี Z-Matrix**.....34

4.1 บทนำ.....34

4.2 การสร้าง Bus Impedance Matrix ($Z_{bus}$).....34

4.2.1 การ addition of a branch.....35

4.2.2 การ addition of a link.....37

4.3 วิธี Z-Matrix แบบเดิม.....40

4.4 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....45

4.4.1 เพิ่มการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload ที่ line อื่น.....45

4.5 เทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วยวิธี Z-Matrix.....45

4.5.1 วิธี Z-Matrix แบบเดิม.....45

4.5.2 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....46

4.6 ตัวอย่างในการคำนวณ.....46

**บทที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม**.....49

5.1 ศึกษาขั้นตอนการเขียนโปรแกรม Visual Basic 6.0.....49

5.2 วิธีใช้งานซอฟต์แวร์ของโปรแกรม.....50

5.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมโหลดโฟลว์วิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล.....58

5.4 ขั้นตอนการเลือก Outage line และ Generator.....59

5.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธี Linear Sensitivity Factors.....60

5.6 ขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Linear Sensitivity Factors.....61

5.7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธี Z-Matrix แบบเดิม.....62

5.8 ขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Z-Matrix แบบเดิม.....64

5.9 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....65

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.10 ขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....67

**บทที่ 6 ผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง**.....68

6.1 บทนำ.....68

6.2 ผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง.....68

6.2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....69

6.2.1.1 ทดสอบ outage line.....75

6.2.1.2 ทดสอบ outage generator.....86

6.2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....94

6.2.2.1 ทดสอบ outage line.....100

6.2.2.2 ทดสอบ outage generator.....113

6.2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus.....119

6.2.3.1 ทดสอบ outage line.....127

**บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ**.....149

7.1 สรุปผลการทดลอง.....149

7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....153

**เอกสารอ้างอิง**.....154

**ภาคผนวก**.....155

ภาคผนวก ก. ตารางการเปรียบเทียบ line flow กับมาตรฐาน.....155

ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....191

**ประวัติผู้เขียน**.....214

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

2.1 สรุปปัญหาโหลดโฟลว์.....9

3.1 ค่า Generation Shift Factor ($a_{li}$) ของ six-bus network.....30

3.2 ค่า Line Outage Distribution Factors ($d_{l,k}$) ของ six-bus network.....31

6.1 แสดงข้อมูลทั่วไปของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....70

6.2 แสดงข้อมูล Bus ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....70

6.3 แสดงข้อมูล Line ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....71

6.4 แสดงข้อมูล Transformer ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....73

6.5 แสดงค่า power flow หลังจากเลือก switch L9 (6 -> 7).....77

6.6 สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line.....84

6.7 สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line.....92

6.8 แสดงข้อมูลทั่วไปของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....94

6.9 แสดงข้อมูล Bus ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....95

6.10 แสดงข้อมูล Line ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....96

6.11 แสดงข้อมูล Transformer ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....98

6.12 แสดงค่า power flow หลังจากเลือก switch L17 (10 -> 11).....102

6.13 สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line.....111

6.14 สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line.....118

6.15 แสดงข้อมูลทั่วไปของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus.....120

6.16 แสดงข้อมูล Bus ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus.....120

6.17 แสดงข้อมูล Line ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus.....122

6.18 แสดงข้อมูล Transformer ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus.....125

6.19 แสดงค่า power flow หลังจากเลือก switch L42 (37 -> 38).....131

6.20 สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line.....147

7.1 สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line รวมกรณี outage line.....150

7.2 สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line รวมกรณี outage generator.....150

7.3 สรุปผลการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload ที่ line อื่นๆหลังจากเลือก switch line ตามวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....152

ก.1 การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0 กรณี base case.....161

# สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.2 การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0
กรณี outage L5 (2 -> 6).....166
ก.3 การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0
กรณี outage L5 (2 -> 6) + switch line no. 9 (6 -> 7).....171
ก.4 การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0 กรณี base case.....178
ก.5 การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0
กรณี outage L10 (5 -> 6).....184
ก.6 การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0
กรณี outage L10 (5 -> 6) + switch line no. 17 (10 -> 11).....190

# สารบัญรูป


รูปที่ หน้า

2.1 (a) แอกทีฟเพาเวอร์ และ (b) รีแอกทีฟเพาเวอร์ที่บัส i สำหรับการศึกษาโหลดโฟลว์.....6

2.2 วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง.....10

2.3 แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติ.....11

2.4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า.....11

2.5 วงจรสมมูลพายของหม้อแปลงไฟฟ้า.....14

3.1 line outage modeling โดยใช้ injections.....25

3.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง six-bus network.....29

3.3 outage line 3-5.....32

3.4 outage generator บน bus 3 ; lost generation picked up บน generator 1.....33

4.1 partial network.....34

4.2 addition of a branch p-q.....35

4.3 addition of a link p-q.....37

4.4 ตัวอย่างของระบบไฟฟ้ากำลัง.....40

4.5 $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง.....41

4.6 Z-Matrix elements ที่ต้องการทดสอบ.....41

4.7 ค่า inject current ที่ bus i , voltage ที่ bus a , b , i และ j.....42

4.8 $Z'$-Matrix เมื่อ line i – j remove.....42

4.9 current inject ที่ bus i ก่อนและหลัง remove line i – j.....43

4.10 ระบบไฟฟ้ากำลัง 6 bus.....46

4.11 ค่า $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 6 bus.....47

4.12 ค่า $Z'_{bus}$ เมื่อ outage transformer (Tr2) ที่ bus 4 – 3.....47

4.13 ระบบไฟฟ้ากำลัง 6 bus เมื่อ outage transformer (Tr2) ที่ bus 4 – 3.....48

5.1 แสดงหน้าจอ dialog box.....49

5.2 แสดงส่วนประกอบต่างๆบนหน้าจอการออกแบบ.....50

5.3 แสดงหน้าจอกลุ่มโปรแกรม powersystem.vbp.....51

5.4 แสดงหน้าจอก่อนการเข้าสู่โปรแกรม.....51

5.5 แสดง file database ของระบบที่ใช้ทดสอบ.....52

# สารบัญรูป(ต่อ)


รูปที่ หน้า

5.6 แสดงระบบ IEEE30-Bus.mdb ที่ใช้ในการทดสอบ.....53

5.7 แสดงการคลิกที่เมนูหลัก "Calculate" แล้วเลือกเมนูย่อย "Loadflow".....53

5.8 แสดงข้อมูลทั่วไปของระบบ IEEE30-Bus.mdb.....54

5.9 แสดงข้อมูล bus ของระบบ IEEE30-Bus.mdb.....54

5.10 แสดงข้อมูล transmission line ของระบบ IEEE30-Bus.mdb.....55

5.11 แสดงข้อมูล transformer ของระบบ IEEE30-Bus.mdb.....55

5.12 แสดงการคลิกที่เมนูหลัก "Analysis" แล้วเลือกเมนูย่อย "The Fast Decoupled Method"...56

5.13 แสดงการคลิกที่เมนูหลัก "Analysis" แล้วเลือกเมนูย่อย "Contingency Analysis".....57

5.14 แสดงการเลือกชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทดสอบ outage และ เทคนิควิธีคำนวณต่างๆ.....57

5.15 แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการคำนวณโหลดโฟลว์วิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล.....58

5.16 แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการคำนวณวิธี Linear Sensitivity Factors.....60

5.17 แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Linear Sensitivity Factors.....61

5.18 แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการคำนวณวิธี Z-Matrix แบบเดิม.....62

5.19 แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Z-Matrix แบบเดิม.....64

5.20 แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการคำนวณวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....65

5.21 แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....67

6.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....69

6.2 แสดงค่า the generation shift factors ($a_{li}$) ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....74

6.3 แสดงค่า the line outage distribution factors ($d_{l,k}$) ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....74

6.4 แสดงการทดสอบ outage L5 (2 -> 6).....75

6.5 แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors.....76

6.6 แสดงค่า $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....78

6.7 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2-Z1 ใน L2 , L3 และ L7.....79

6.8 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง power flow ใน L2 , L3 และ L7 หลัง switch line & tr.....80

6.9 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch...81

6.10 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....82

6.11 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงค่าการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload.....83

6.12 สรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....84

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า


6.13 แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 5 (2 -> 6).....85

6.14 แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 5 (2 -> 6) + switch line no. 9 (6 -> 7).....85

6.15 แสดงการทดสอบ outage generator no. 2 ที่ bus 2.....86

6.16 แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors.....87

6.17 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2-Z1 ใน L1.....88

6.18 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch...89

6.19 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....90

6.20 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงแสดงค่าการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload.....91

6.21 สรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....92

6.22 แสดงภาพ graphic ของการ outage generator no. 2 ที่ bus 2.....93

6.23 ระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....94

6.24 แสดงค่า the generation shift factors ($a_{li}$)
ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....99

6.25 แสดงค่า the line outage distribution factors ($d_{l,k}$)
ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....99

6.26 แสดงการทดสอบ outage L10 (5 -> 6).....100

6.27 แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors.....101

6.28 แสดงค่า $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....103

6.29 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2-Z1 ใน L12.....104

6.30 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch..105

6.31 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....106

6.32 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงค่าการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload.....108

6.33 สรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....111

6.34 แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 10 (5 -> 6).....112

6.35 แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 10 (5 -> 6) + switch line no. 17 (10 -> 11)..112

6.36 แสดงการทดสอบ outage generator no. 8 ที่ bus 37.....113

6.37 แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors.....114

6.38 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2-Z1 ใน L3.....115

# สารบัญรูป(ต่อ)


รูปที่ หน้า

6.39 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch...116

6.40 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....117

6.41 แสดงภาพ graphic ของการ outage generator no. 8 (bus no. 38).....118

6.42 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus.....119

6.43 แสดงค่า the generation shift factors ($a_{li}$) ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus.....126

6.44 แสดงค่า the line outage distribution factors ($d_{l,k}$) ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus....126

6.45 แสดงการทดสอบ outage L58 (44 -> 45).....127

6.46 แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors.....129

6.47 แสดงค่า $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus.....132

6.48 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2-Z1 ใน L63.....133

6.49 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch..135

6.50 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....138

6.51 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงค่าการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload.....139

6.52 สรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง.....147

6.53 แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 58 (44 -> 45).....148

6.54 แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 58 (44 -> 45)
+ switch line no. 42 (37 -> 38).....148

7.1 กราฟเปรียบเทียบค่าเวลาและจำนวน bus ที่ใช้ในการทดสอบ กรณีของ outage line.....150

ก.1 แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus.....156

ก.2 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow.....157

ก.3 แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus กรณี outage L5 (2 -> 6).....162

ก.4 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow กรณี outage L5 (2 -> 6).....162

ก.5 แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus กรณี outage L5 (2 -> 6)
+ switch line no. 9 (6 -> 7).....167

ก.6 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow กรณี outage L5 (2 -> 6)
+ switch line no. 9 (6 -> 7).....167

ก.7 แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System.....172

ก.8 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow..... 174

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

ก.9 แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System
กรณี outage line no. 10 (5 -> 6).....179
ก.10 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow กรณี outage L10 (5 -> 6).....179
ก.11 แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System
กรณี outage line no. 10 (5 -> 6) + switch line no. 17 (10 -> 11).....185
ก.12 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow
กรณี outage line no. 10 (5 -> 6) + switch line no. 17 (10 -> 11).....186

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องวางแผนเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคต โดยระบบจะต้องมีความน่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น การศึกษาทางด้าน contingency analysis จึงมีความสำคัญอย่างมากโดยเมื่อเกิดการ outage ขึ้นที่อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังใดๆ อาจจะส่งผลให้เกิดสภาวะ overload ขึ้นที่อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังใดๆในระบบได้ ดังนั้นจะต้องมีการป้องกันผลโดยจะต้องขจัดหรือบรรเทา overload ที่เกิดขึ้นนี้ให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลังโดยเร็วที่สุด ซึ่งถ้าไม่สามารถป้องกันผลของ overload ที่เกิดขึ้นนี้ได้ทันท่วงทีแล้วนั้น อาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังใดๆที่ต่ออยู่และจะส่งผลให้ความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลังลดน้อยลงไปได้ ดังนั้นปัญหานี้จึงเป็นปัญหาที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเทคนิคในการป้องกันผลของ overload ที่เกิดขึ้นด้วยการเลือกสวิทซ์ไลน์เพื่อขจัดหรือบรรเทา overload ที่เกิดขึ้นให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลังโดยเร็วที่สุด

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อที่จะปรับปรุงพัฒนาเทคนิคในการป้องกันผลของ overload ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ outage อุปกรณ์ไฟฟ้า ด้วยการเลือกสวิทซ์ไลน์โดยจะทำการปรับปรุงวิธี Z-Matrix แบบเดิม [1] ใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม เนื่องจากว่า [1] ให้ความถูกต้องในการเลือกสวิทซ์ไลน์ที่ไม่ดีพอ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการปรับปรุงวิธี Z-Matrix แบบเดิม [1] ใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม โดยสามารถคำนวณให้ความถูกต้องในการเลือกสวิทซ์ไลน์ที่ดีกว่า ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับวิธี Linear Sensitivity Factors [2] ว่าให้ผลลัพธ์ในการเลือกสวิทซ์ไลน์ตรงกันหรือไม่ เวลาที่ใช้ในการคำนวณต่างกันอย่างไร

## 1.3 สมมุติฐานในการศึกษา

สำหรับสมมุติฐานของการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่

1. ทำการปรับปรุงเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Z-Matrix แบบเดิม ใหม่โดยหลังจากที่ได้ทำการปรับปรุงใหม่แล้วนั้นน่าจะให้ความถูกต้องในการเลือกสวิทซ์ไลน์ที่ดีกว่าเก่า

2. เมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากวิธี Z-Matrix ที่ปรับปรุงใหม่ กับวิธี Linear Sensitivity Factors แล้วนั้นน่าจะให้ผลลัพธ์ในการเลือกสวิทซ์ไลน์ที่ตรงกัน และใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ วิธี Z-Matrix แบบเดิม ได้มีการนำเสนอหลักการใหม่ โดยได้ทำการปรับปรุงใหม่ให้ดีขึ้นกว่าของเดิม [1] เหตุผลเพราะว่า วิธี Z-Matrix แบบเดิมนี้ หลังจากที่ได้ทำการเลือก สวิทซ์ไลน์ที่เหมาะสมที่สุดแล้วนั้น จริงอยู่สามารถที่จะขจัดหรือบรรเทา overload ที่เกิดขึ้นในไลน์นั้นๆได้จริง แต่ไม่สามารถที่จะรู้ได้ว่าไลน์อื่นๆนอกเหนือจากไลน์ที่ได้ป้องกันไปแล้วนั้นจะเกิด overload ขึ้นมาใหม่อีกหรือไม่ ดังนั้นวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงใหม่นี้ จะเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์ผลข้างเคียงของ overload ที่เกิดขึ้นที่ไลน์อื่นๆอีก เพื่อเป็นการเปรียบเทียบยืนยันว่าได้เลือกสวิทซ์ไลน์ที่เหมาะสมที่สุดแล้ว โดยจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณวิธี Linear Sensitivity Factors , วิธี Z-Matrix แบบเดิม และ วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงใหม่ ว่าให้ผลลัพธ์ในการเลือกสวิทซ์ไลน์ตรงกันหรือไม่ เวลาที่ใช้ในการคำนวณต่างกันอย่างไร

## 1.5 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

สำหรับขอบเขตวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่

1. ทำการวิเคราะห์โหลดเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยการทดสอบ outage อุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะพิจารณา 2 กรณี กรณีที่หนึ่ง ทดสอบการ outage line กรณีที่สองทดสอบ outage generator

2. ทำการป้องกันผลของโหลดเกินที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์เพื่อที่จะขจัดหรือบรรเทาโหลดเกินที่เกิดขึ้นนี้ให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีดังต่อไปนี้

   2.1 วิธี Linear Sensitivity Factors [2]

   2.2 วิธี Z-Matrix แบบเดิม [1]

   2.3 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

3. ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณวิธี Linear Sensitivity Factors , วิธี Z-Matrix แบบเดิม และ วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง ว่าให้ผลลัพธ์ในการเลือกสวิทซ์ไลน์ตรงกันหรือไม่ เวลาที่ใช้ในการคำนวณต่างกันอย่างไร

4. ทำการทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณกับการ run load flow จริงว่า ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันหรือไม่ และทำการทดสอบประสิทธิภาพการคำนวณของโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ IEEE 57 B us [3] ว่าใช้เวลาในการคำนวณแตกต่างกันอย่างไร

โดยจะทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus [3] , 39-Bus New England System [12] และ IEEE 57 B us [3]

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการการวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ โดยมีรายละเอียดแบ่งเป็น 7 บท ดังต่อไปนี้

บทที่1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา แนวความคิดที่ใช้ในการแก้ปัญหา วัตถุประสงค์ และ ขอบเขตการวิจัย

บทที่2 เป็นการกล่าวถึงการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้า การสร้างบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตันราฟสัน , แบบฟาสต์ดีคัปเปิ้ล

บทที่3 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและเทคนิคในการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors

บทที่4 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและเทคนิคในการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วยวิธี Z-Matrix แบบเดิม และ วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

บทที่5 เป็นการศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษา Visual Basic 6.0 และกล่าวถึงขั้นตอนการเลือก outage line และ generator , การทำงานของโปรแกรมวิธี Linear Sensitivity Factors , วิธี Z-Matrix แบบเดิม และ วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

บทที่6 เป็นการกล่าวถึงผลการทดสอบวิเคราะห์การทำงานของโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบและทำการทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณกับการ run load flow จริง , ทำการทดสอบประสิทธิภาพการคำนวณของโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ IEEE 57 B us [3]

บทที่7 เป็นบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะต่างๆ

# บทที่ 2
# การวิเคราะห์โหลดโฟลว์

## 2.1 บทนำ

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ถือเป็นสิ่งสำคัญและเป็นพื้นฐานของการศึกษากรณีต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลังที่จะนำไปใช้ในการวางแผนและออกแบบการขยายระบบไฟฟ้ากำลังที่จะทำการขยายกำลังผลิตในอนาคต ซึ่งจะต้องมีการกำหนดตัดสินใจในเรื่องของการควบคุมระบบที่มีอยู่ให้ดีที่สุด หลักการก็คือนำข้อมูลที่ได้มาทำการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งก็คือขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าแต่ละบัส , กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงค่า losses โดยจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง

## 2.2 ปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้า [9]

ค่า self-admittance และค่า mutual-admittance ในแต่ละบัสซึ่งจะเป็นส่วนประกอบของบัสแอดมิแตนซ์ $Y_{bus}$ หรือจะเปลี่ยนไปเป็นบัสอิมพีแดนซ์ $Z_{bus}$ จะถูกนำไปใช้แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า และอาจจะจำกัดขอบเขตในการศึกษาโดยใช้วิธีการใช้แอดมิแตนซ์ โดยตอนแรกข้อมูลที่ได้รับมาจะต้องถูกป้อนให้แก่คอมพิวเตอร์โดยเป็น one-line diagram ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าจะถูกแสดงเป็นวงจรต่อเฟส และมีวงจรเทียบเคียงเป็นแบบพายน์ ($\pi$) ค่าอิมพิแดนซ์อนุกรมและค่าผลรวม line-charging admittance Y ในสายส่งแต่ละเส้น (ปกติอยู่ในเทอมของ line-charging megavars ที่แรงดันปกติของระบบ) ซึ่งจะมีความจำเป็นมากในการที่จะทำให้คอมพิวเตอร์สามารถกำหนดตัดสินใจเลือกขนาดของบัสแอดมิแตนซ์ N×N ใดๆของ $Y_{ij}$ แต่ละตัวซึ่งก็คือ

$$Y_{ij} = |Y_{ij}|\angle\theta_{ij} = |Y_{ij}|\cos\theta_{ij} + j|Y_{ij}|\sin\theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \qquad (2.1)$$

ข้อมูลที่มีความสำคัญอาจรวมไปถึงพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าอิมพิแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า พิกัดของชันท์-คาปาซิเตอร์ และการปรับแทปของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่จะถูกส่งออกมาจะต้องถูกกำหนดให้ทราบ

แรงดันไฟฟ้าที่บัส i ของระบบจะถูกกำหนดให้เป็นโพลาร์-โคออร์ดิเนทโดย

$$V_i = |V_i|\angle\delta_i = |V_i|(\cos\delta_i + j\sin\delta_i) \qquad (2.2)$$

และแรงดันไฟฟ้าที่บัส j จะถูกเขียนคล้ายๆกันโดยเปลี่ยนสับสคริปท์จาก i เป็น j กระแสไฟฟ้าสุทธิที่ไหลเข้าไปในเครือข่ายที่บัส i ในเทอมของ $Y_{in}$ ของ $Y_{bus}$ จะถูกกำหนดให้เป็นผลรวมโดย

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \ldots + Y_{in}V_n = \sum_{n=1}^{N} Y_{in}V_n \tag{2.3}$$

ให้ $P_i$ และ $Q_i$ ใช้แทนกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิเข้าไปในเครือข่ายที่บัส i

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^{N} Y_{in}V_n \tag{2.4}$$

และจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ซึ่งจะได้ว่า

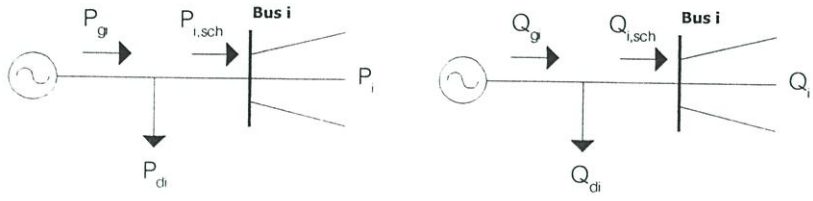
$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^{N} |Y_{in}V_iV_n| \angle(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{2.5}$$

จากสมการนี้จะสามารถแยกเป็นส่วนของสมการของส่วนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ว่า

$$P_i = \sum_{n=1}^{N} |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{2.6}$$

$$Q_i = -\sum_{n=1}^{N} |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{2.7}$$

สมการที่ (2.6) และ (2.7) จะประกอบด้วยโพลาร์ฟอร์มของสมการโหลดโฟลว์ ซึ่งสมการนี้จะใช้เตรียมสำหรับคำนวณค่าของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิ $P_i$ และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสุทธิ $Q_i$ ที่ไหลเข้าไปในเครือข่ายที่บัส i ให้ $P_{gi}$ แทนด้วยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตส่งไปที่บัส i และให้ $P_{di}$ แทนด้วยความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดที่บัส i และ $P_{i.sch} = P_{gi} - P_{di}$ ซึ่งจะเป็นค่าของกำลังไฟฟ้าจริงที่กำหนดให้ไหลเข้าสู่เครือข่ายที่บัส i แสดงได้ดังรูป 2.1(a)




(a) (b)

**รูปที่ 2.1** (a) แอกทีฟเพาเวอร์ และ (b) รีแอกทีฟเพาเวอร์ที่บัส i สำหรับการศึกษาโหลดโฟลว์

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

$$\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,cal} = \left(P_{gi} - P_{di}\right) - P_{i,cal} \tag{2.8}$$

ทำนองเดียวกัน กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i จะได้ว่า

$$\Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,cal} = \left(Q_{gi} - Q_{di}\right) - Q_{i,cal} \tag{2.9}$$

ดังแสดงในรูปที่ 2.1(b) ค่ามิสแมทช์ที่ปรากฏในวิธีของการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์เมื่อค่าที่คำนวณ $P_i$ และ $Q_i$ เกิดขึ้นไม่พร้อมกับค่าที่กำหนด แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าจริงที่คำนวณ $P_{i,cal}$ และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณ $Q_{i,cal}$ แมทช์กับกำลังไฟฟ้าที่กำหนดอย่างสมบูรณ์แล้ว ก็จะสามารถกล่าวได้ว่าค่ามิสแมทช์ $\Delta P_i$ และ $\Delta Q_i$ นั้นเป็นศูนย์ที่บัส i และสามารถที่จะเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าสมดุลย์ได้ว่า

$$g_{i'} = P_i - P_{i,sch} = P_i - \left(P_{gi} - P_{di}\right) = 0 \tag{2.10}$$

$$g_{i''} = Q_i - Q_{i,sch} = Q_i - \left(Q_{gi} - Q_{di}\right) = 0 \tag{2.11}$$

สมมุติฟังชั่น $g_{i'}$ และ $g_{i''}$ เพื่อความสะดวกสำหรับสมการที่จะอ้างอิงถึงค่ามิสแมทช์ $\Delta P_i$ และ $\Delta Q_i$ ถ้าบัส i ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือไม่มีโหลดเทอมที่เหมาะสมที่จะต้องถูกปรับให้เท่ากับศูนย์ในสมการที่ (2.10) และ (2.11) ในแต่ละบัสของเครือข่าย จะมีสมการอยู่สองสมการ และ

ปัญหาของการไหลของกำลังไฟฟ้าจะถูกแก้โดยใช้สมการที่ (2.6) และ (2.7) สำหรับค่าของแรงดันบัสที่ยังไม่ทราบค่าสมการที่ (2.10) และ (2.11) จะให้ค่าที่ยอมรับได้ที่แต่ละบัส ถ้าไม่มีค่าที่กำหนดสำหรับบัส i นั้นค่ามิสแมทช์ $\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,cal}$ จะไม่สามารถกำหนดได้ และสมการที่ (2.10) ก็จะนำมาใช้ไม่ได้ในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์ ในทำนองเดียวกันถ้า $Q_{i,cal}$ ไม่มีที่บัส i สมการที่ (2.11) ก็จะใช้ไม่ได้ด้วยเช่นกัน

ปริมาณทั้งสี่ปริมาณที่ยังไม่ทราบที่มีอยู่แต่ละบัส i ซึ่งก็คือ P , Q , มุมของแรงดันไฟฟ้า $\delta$ และขนาดของแรงดันไฟฟ้า V ค่าทั้งหมดนี้จะอยู่ในสมการทั้งสองสมการนั่นก็คือสมการที่ (2.10) และ (2.11) ที่ใช้สำหรับโหนดแต่ละโหนด ดังนั้นจะต้องพิจารณาว่าจะต้องทำอย่างไรกับปริมาณที่ยังไม่ทราบว่า จะสามารถลดทอนเพื่อให้สอดคล้องกับจำนวนของสมการที่มีอยู่เพื่อที่จะแก้ปัญหาของโหลดโฟลว์ ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปในการศึกษาโหลดโฟลว์จะแบ่งชนิดของบัสในระบบไฟฟ้าออกเป็น 3 ชนิด ในแต่ละบัส i ใดๆ ที่มีค่าอยู่สองค่าที่ทราบจากค่าทั้งหมดสี่ค่า คือ $\delta_i$ , $V_i$ , $P_i$ และ $Q_i$ ในส่วนของค่าที่เหลือที่ยังไม่ทราบอีกสองค่าจะถูกคำนวณหา โดยสามารถแบ่งแยกชนิดของบัสทั้งสามชนิดได้ดังนี้

1. โหลดบัส (Load Bus) คือบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ค่า $P_{gi}$ และ $Q_{gi}$ จะเป็นศูนย์และค่ากำลังไฟฟ้าจริง $P_{di}$ และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ $Q_{di}$ จะไหลจากระบบไปสู่โหลด (เป็นลบแสดงว่าไหลเข้าระบบ) จะทราบจากการบันทึก การคำนวณโหลดหรือการวัดใดๆบ่อยๆครั้งในทางปฏิบัติค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้นที่จะทราบ ส่วนค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะหาจากค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่ค่า 0.85 หรือสูงกว่าโหลดบัส i บ่อยครั้งจะเรียก PQ บัส เพราะว่าค่าที่กำหนด $P_{i,sch} = - P_{di}$ และ $Q_{i,sch} = - Q_{di}$ จะทราบได้และค่ามิสแมทช์ $\Delta P_i$ และ $\Delta Q_i$ จะสามารถได้จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) และค่าที่ต้องหาสองค่าสำหรับโหลดบัสคือ $\delta_i$ และ $V_i$

2. บัสควบคุมแรงดัน (Voltage-Controlled Bus) บัสใดๆในระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันคงที่จะถูกเรียกว่ามีการควบคุมแรงดัน บัสใดๆที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ จะสามารถควบคุมเครื่องกำเนิดได้โดยการปรับที่ไพร์ม-มูฟเวอร์ และขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะสามารถควบคุมได้โดยการปรับที่ระบบการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นที่บัสควบคุมแรงดัน i ใดๆจะพบว่ามีค่า $P_{gi}$ และ V ที่เหมาะสม ค่า $P_{di}$ ที่ทราบจะสามารถที่จะกำหนดค่ามิสแมทช์ $\Delta P_i$ ตามสมการที่ (2.8) การจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ $Q_{gi}$ ที่ต้องการให้กับแรงดันที่กำหนด $V_i$ จะไม่สามารถทราบได้ล่วงหน้า และดังนั้นค่ามิสแมทช์ $\Delta Q_i$ จะไม่สามารถกำหนดขึ้นได้ที่บัสควบคุมแรงดัน i มุมของแรงดัน $\delta$ จะเป็นปริมาณที่ยังไม่ทราบ และสมการที่ (2.10) จะสามารถหาค่า $P_i$ ได้หลังจากนั้นแก้ปัญหาโหลดโฟลว์ ค่า $Q_i$ จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7)

3. สแลคบัส (Slack Bus) เพื่อความสะดวกในการพิจารณาบัส 1 จะถูกกำหนดให้เป็นสแลคบัสเสมอ มุมของแรงดันของสแลคบัสจะถูกใช้อ้างอิงกับมุมของแรงดันที่บัสอื่นๆมุมของ

แรงดันของสแลคบัสจะไม่มีความสำคัญเพราะว่าความแตกต่างของมุมของแรงดันจะเป็นตัวกำหนดค่าคำนวณของ $P_i$ และ $Q_i$ ในสมการที่ (2.6) และ (2.7) ในทางปฏิบัติโดยทั่วๆไปจะให้ $\delta_1 = 0$ และค่ามิสแมทช์จะไม่ถูกกำหนดสำหรับสแลคบัส เพราะว่าขนาดของแรงดัน $V_1$ จะทราบได้ที่เป็นปริมาณที่มีมุม $\delta_1 = 0$ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะใช้สมการที่ (2.10) และ (2.11) สำหรับสแลคบัสในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์

เพื่อที่จะเข้าใจว่าทำไมค่า $P_1$ และ $Q_1$ จะไม่กำหนดที่สแลคบัส โดยพิจารณาที่แต่ละ N บัสของระบบดังสมการที่ (2.10) จะสามารถเขียนให้มีขอบเขตจาก 1 ถึง N เมื่อผลลัพธ์ของจำนวนสมการ N สมการถูกพิจารณารวมเข้าด้วยกันจะได้ว่า

$$P_L = \sum_{i=1}^{N} P_i = \sum_{i=1}^{N} P_{gi} = \sum_{i=1}^{N} P_{di} \tag{2.12}$$

เทอมของ $P_L$ ในสมการนี้จะเห็นได้ชัดเจนในเทอมของผลรวมการสูญเสีย $I^2R$ ในสายส่งกำลังไฟฟ้าและหม้อแปลงของระบบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งไฟฟ้าแต่ละเส้นของระบบจะไม่สามารถคำนวณหาได้จนกระทั่งหลังจากทราบขนาดและมุมเฟสของแรงดันแล้วทุกๆบัสในระบบไฟฟ้า สำหรับค่า $P_1$ นั้นช่วงเริ่มแรกจะไม่ทราบและสมการที่ (2.12) จะนำมาใช้คำนวณไม่ได้ในสูตรของการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์จะเลือกบัสหนึ่งเป็นสแลคบัส ที่มีค่า $P_g$ ที่มีลักษณะไม่แน่นอน หลังจากนั้นจะทำการแก้ปัญหาค่าแตกต่างระหว่างผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริง P ที่ไหลเข้าสู่ระบบที่บัสอื่นๆทั้งหมด และผลรวมของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท P บวกด้วยค่าการสูญเสีย $I^2R$ ที่ถูกกำหนดไปในสแลคบัส ดังนั้นจึงทำให้บัสควบคุมแรงดันจะถูกพิจารณาเป็นสแลคบัส ค่าความแตกต่างของผลรวมที่ถูกจ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส และค่ารับโดยโหลดจะถูกกำหนดให้เป็น

$$\sum_{i=1}^{N} Q_i = \sum_{i=1}^{N} Q_{gi} - \sum_{i=1}^{N} Q_{di} \tag{2.13}$$

สมการนี้จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อเป็นบัสที่มีลักษณะเฉพาะดังสมการที่ (2.11) ที่แต่ละบัส i ในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์ ค่า $Q_i$ จะสามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ (2.7) หลังจากแก้ปัญหาโหลดโฟลว์ได้แล้วจากนั้นปริมาณที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (2.13) จะเป็นค่าที่รวมกันของไลน์ชาร์จกิง ชันท์คาปาซิเตอร์และรีแอกเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ที่บัส และจะเรียกว่าค่าความสูญเสีย $I^2X$ ที่เกิดขึ้นภายในรีแอกแตนซ์อนุกรมของสายส่งกำลังไฟฟ้า

มุมและขนาดของแรงดันไฟฟ้าของบัสที่ไม่เป็นค่าที่กำหนด ในข้อมูลอินพุทของการศึกษาโหลดโฟลว์จะเรียกว่า สถานะที่ไม่คงที่ (state variable) หรือดีเพ็นเด็นท์วาริเอเบิล (dependent variables) ซึ่งค่าเหล่านี้จะบอกให้ทราบถึงสถานะของระบบซึ่งจะเป็นผลมาจากปริมาณที่เป็น

ลักษณะเฉพาะของบัสทั้งหมด ปัญหาโหลดโฟลว์จะเป็นตัวกำหนดค่าสถานะที่เปลี่ยนแปลงไปทั้งหมด โดยการแก้ปัญหาของจำนวนของสมการในส่วนของข้อมูลอินพุท ถ้ามีบัสควบคุมแรงดันที่มีจำนวน $N_g$ บัส (ไม่นับสแลคบัส) ในระบบของ N บัส จะเป็น (2N-$N_g$-2) สมการที่ใช้แก้ปัญหา (2N-$N_g$-2) สำหรับสถานะที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในตารางที่ 2.1 สถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอีกครั้งจะถูกคำนวณ สถานะที่สมบรูณ์ของระบบจะสามารถหาได้ และปริมาณทั้งหมดจะเป็นผลตามสภาวะที่เปลี่ยนแปลงและสามารถกำหนดได้ปริมาณอย่างเช่น ค่า $P_i$ และ $Q_i$ ที่สแลคบัส , $Q_i$ ที่บัสควบคุมแรงดันแต่ละบัส และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย $P_L$ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ถูกควบคุม

**ตารางที่ 2.1** สรุปปัญหาโหลดโฟลว์

| ชนิดของบัส | จำนวนบัส | ค่าที่ทราบ | จำนวนสมการ | จำนวนสภาวะการเปลี่ยนแปลง $\delta_i$ , $\|V_i\|$ |
|---|---|---|---|---|
| สแลคบัส i = 1 | 1 | $\delta_i$ , $\|V_i\|$ | 0 | 0 |
| บัสควบคุมแรงดัน (i = 2,...., $N_g$+1) | $N_g$ | $P_i$ , $\|V_i\|$ | $N_g$ | $N_g$ |
| โหลดบัส (i = $N_g$+2 , ..., N) | N- $N_g$-1 | $P_i$ , $Q_i$ | 2(N- $N_g$-1) | 2(N- $N_g$-1) |
| ผลรวม | N | 2N | 2N- $N_g$-2 | 2N- $N_g$-2 |

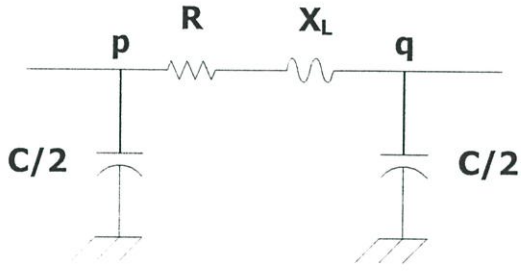
ฟังก์ชั่น $P_i$ และ $Q_i$ ของสมการที่ (2.6) และ (2.7) เป็นฟังก์ชั่นที่ไม่เป็นเชิงเส้นของสภาวะที่เปลี่ยนแปลงของ $\delta_i$ และ $V_i$ การคำนวณโหลดโฟลว์โดยปกติจะใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำแล้วซ้ำอีกอย่างเช่นวิธีการนิวตันราฟสัน โดยวิธีนิวตันราฟสันจะเป็นการแก้ปัญหาในรูปแบบโพลาร์ฟอร์มของสมการโหลดโฟลว์จนกระทั่งค่ามิสแมทช์ $\Delta P$ และ $\Delta Q$ ที่บัสทั้งหมดมีค่าเข้าใกล้ค่าที่ยอมรับได้

## 2.3 การสร้างบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์ (Element Stamp Method)

การสร้างบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์ [10] เป็นวิธีการคำนวณหาบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ โดยใส่องค์ประกอบของระบบไฟฟ้ากำลังเข้าไปทีละตัวจนครบทุกตัว บัสแอดมิแตนซ์ที่ได้หลังจากใส่องค์ประกอบตัวสุดท้ายจะเป็นบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ต้องการ มีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 สายส่งไฟฟ้ากำลัง (Transmission Line)

สายส่งไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อระหว่างสองบัสใดๆ สามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูลพาย ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน (resistance : R) ต่ออนุกรมกับอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (inductive reactance : $X_L$) เชื่อมอยู่ระหว่างสองบัสนั้นๆ และมีค่าชันท์คาปาซิแตนซ์ (shunt capacitance : C) เท่ากับครึ่งหนึ่งของชันท์คาปาซิแตนซ์ของสายส่งทั้งหมดตลอดสายต่ออยู่ที่บัสแต่ละบัส ดังแสดงในรูปที่ 2.2




**รูปที่ 2.2** วงจรสมมูลพายที่ใช้แทนสายส่ง

โดย R = ค่าความต้านทานของสายส่ง

$X_L$ = ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายส่ง

C = ค่าชันท์คาปาซิแตนซ์ของสายส่ง

ถ้าใส่สายส่งไฟฟ้า pq (สายส่งไฟฟ้าที่ต่อระหว่างบัส p และบัส q) บัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการที่ (2.14)

$$
\begin{aligned}
Y_{pp}^{new} &= Y_{pp}^{old} + y_{serpq} + \frac{1}{2} y_{shtpq} \\
Y_{qq}^{new} &= Y_{qq}^{old} + y_{serpq} + \frac{1}{2} y_{shtpq} \\
Y_{pq}^{new} &= Y_{pq}^{old} - y_{serpq} \\
Y_{qp}^{new} &= Y_{qp}^{old} - y_{serpq}
\end{aligned}
\qquad (2.14)
$$

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

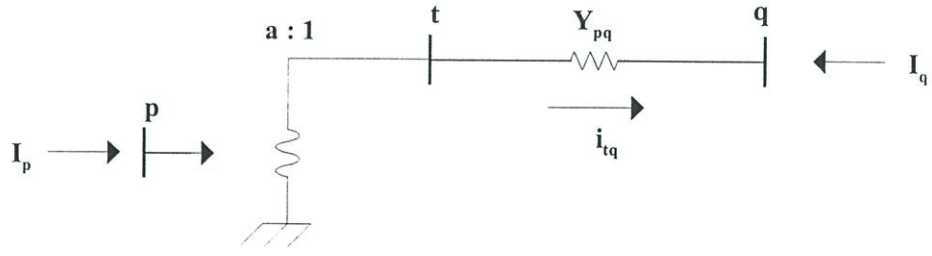
$Y_{pq}^{new}$ = เป็นสมาชิกบัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์แถวที่ p และหลักที่ q หลังใส่สายส่ง pq

$Y_{serpq}$ = เป็นแอดมิแตนซ์อนุกรม (series admittance) ของสายส่ง pq

$Y_{shtpq}$ = เป็นไลน์ชาร์จจิงแอดมิแตนซ์ (line charging admittance) ของสายส่ง pq

### 2.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแทนได้ด้วยอิมพีแดนซ์ หรือแอดมิแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าต่ออนุกรมกับหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติดังแสดงได้ในรูปที่ 2.3

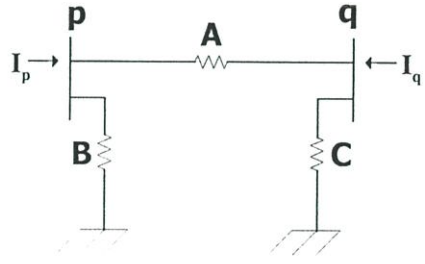



**รูปที่ 2.3** แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติ

โดย a = ค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า

$y_{pq}$ = ค่าแอดมิแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

โดยวงจรสมมูลที่สอดคล้องกับแบบจำลองดังกล่าวเป็นพาย ดังรูปที่ 2.4




**รูปที่ 2.4** วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับตัวแปร A , B และ C ของวงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 2.4 สามารถคำนวณได้ดังนี้

พิจารณากระแสไฟฟ้าที่บัส p จากรูปที่ 2.3

$$I_p = \frac{i_{tq}}{a^*} \tag{2.15}$$

โดย $a^*$ = ค่าสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate) ของ a

$i_{tq}$ = ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัสสมมุติไปยังบัส q

ค่า $i_{tq}$ หาได้จาก

$$i_{tq} = (V_t - V_q)y_{pq} \tag{2.16}$$

แทนค่า $i_{tq}$ จากสมการที่ (2.16) ลงในสมการที่ (2.15) จะได้

$$I_p = (V_t - V_q)\frac{y_{pq}}{a^*} \tag{2.17}$$

อาศัยคุณสมบัติของหม้อแปลงอุดมคติ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่บัส p และ t ในเทอมของอัตราส่วนการแปลง a คือ

$$V_t = \frac{V_p}{a} \tag{2.18}$$

แทนค่า $V_t$ จากสมการที่ (2.18) ลงในสมการที่ (2.17) จะได้

$$\begin{aligned} I_p &= \left(\frac{V_p}{a} - V_q\right)\frac{y_{pq}}{a^*} \\ I_q &= (V_q - V_t)y_{pq} \end{aligned} \tag{2.19}$$

โดยที่ $a^2 = a.a^*$

ในทำนองเดียวกันพิจารณากระแสไฟฟ้าที่บัส q จากรูปที่ 2.3 จะได้ว่า

$$I_p = (V_p - aV_q)\frac{y_{pq}}{|a|^2} \tag{2.20}$$

แทนค่า $V_t$ จากสมการที่ (2.18) ลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$I_q = (aV_q - V_p)\frac{y_{pq}}{a} \tag{2.21}$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าที่บัส p และ q ของวงจรสมมูลพายในรูปที่ 2.4 คำนวณได้ดังนี้

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

$$I_p = (V_p - V_q)A + V_p B \tag{2.22}$$

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

$$I_q = (V_q - V_p)A + V_q C \tag{2.23}$$

กำหนดให้ $V_p = 0$ และ $V_q = 1$ แทนค่าในสมการที่ (2.19) และ (2.22) จะได้ตัวแปร A ดังนี้

$$A = \frac{Y_{pq}}{a^*} \tag{2.24}$$

ในทำนองเดียวกัน แทนค่า $V_p = 0$ และ $V_q = 1$ แทนค่าในสมการที่ (2.21) และ (2.23) จะได้ว่า

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

$$C = Y_{pq} - A \tag{2.25}$$

แทนค่า A จากสมการที่ (2.24) ลงในสมการที่ (2.25) จะได้ตัวแปร C คือ

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

$$C = \left(1 - \frac{1}{a^*}\right) Y_{pq} \tag{2.26}$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้า Ip จากสมการที่ (2.19) และ (2.22) มีค่าเท่ากัน คือ

$$(V_p - aV_q)\frac{Y_{pq}}{|a|^2} = (V_p - V_q)A + V_p B \tag{2.27}$$

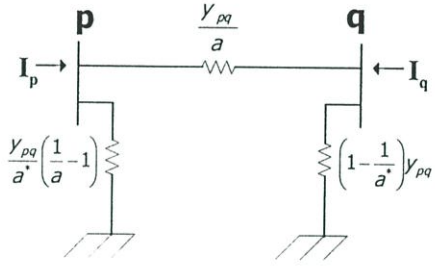
แทนค่า A จากสมการที่ (2.24) ลงในสมการที่ (2.27) จะได้ตัวแปร B คือ

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

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

$$B = \frac{1}{a^*}\left(\frac{1}{a} - 1\right)y_{pq} \qquad (2.28)$$

ดังนั้นวงจรสมมูลพายที่มีค่าตัวแปรในเทอมอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า a และแอดมิแตนซ์ $y_{pq}$ ของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.5




**รูปที่ 2.5** วงจรสมมูลพายของหม้อแปลงไฟฟ้า

ถ้าใส่หม้อแปลงไฟฟ้า pq (หม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อระหว่างบัส p และ บัส q) ตามรูปที่ 2.5 บัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะได้

$$Y_{pp}^{new} = Y_{pp}^{old} + \frac{1}{|a|^2}y_{pq}$$

$$Y_{qq}^{new} = Y_{qq}^{old} + y_{pq}$$

$$Y_{pq}^{new} = Y_{pq}^{old} - \frac{1}{a^*}y_{pq}$$

$$Y_{qp}^{new} = Y_{qp}^{old} - \frac{1}{a}y_{pq} \qquad (2.29)$$

### 2.3.3 ชันท์อิลิเมนต์ (Shunt Element)

ชันท์อิลิเมนต์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ คาปาซิเตอร์ (capacitor) และรีแอกเตอร์ (reactor) ในระบบไฟฟ้ากำลังมักจะมีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ที่สถานีไฟฟ้าย่อยปลายทาง เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าปลายทางให้สูงขึ้น และลดกำลังสูญเสียในสายส่ง เพราะคาปาซิเตอร์จะทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าที่บัส หรือในบางจุดจะมีการติดตั้งรีแอกเตอร์เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสนั้น เพราะรีแอกเตอร์จะทำหน้าที่ดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟออกจากบัส จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าชันท์อิลิเมนต์เป็นอุปกรณ์ที่มีส่วนช่วยปรับแรงดันที่บัสให้เป็นไปตามที่กำหนด สำหรับวงจรสมมูลที่ใช้แทนชันท์อิลิเมนต์ประกอบด้วยอิมพิแดนท์คงที่ต่อเข้าที่บัสและลงสู่กราวด์ ถ้าใส่ชันท์อิลิเมนต์ที่ต่อกับที่บัส p บัสแอดมิแตนซ์เมตริกซ์ใหม่จะเป็นดังสมการ

$$Y_{pp}^{new} = Y_{pp}^{old} + y_p \tag{2.30}$$

โดย $y_p$ = ค่าแอดมิแตนซ์ของชันท์อิลิเมนต์ที่ต่อกับบัส p

## 2.4 การคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตันราฟสัน [9]

วิธีของนิวตันราฟสันกล่าวคือเป็นการนำทฤษฎีของอนุกรมเทย์เลอร์ (taylor series) มาเป็นเครื่องมือช่วยในการแก้ปัญหา ดังแสดงในสมการที่ (2.31) สำหรับ f(x) ที่แทน x ด้วย $x_0$

$$u = f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(\Delta x) + \frac{f''(x_0)}{2!}(\Delta x)^2 + \ldots \tag{2.31}$$

ถ้า $\Delta x$ มีค่าน้อยมากตั้งแต่เทอมที่สามทางขวามือของสมการที่ (2.31) จึงตัดทิ้งได้ดังนั้นเขียนใหม่ได้

$$u = f(x) = f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx}\Delta x \tag{2.32}$$

กรณีที่ฟังก์ชั่น f มีตัวแปรหลายตัว สามารถประยุกต์เขียนสมการที่ (2.32) ใหม่ได้เป็น

$$u = f(x_1, x_2, \ldots, x_n) = f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f}{\partial x_1}\Big|_{(0)}\Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\Big|_{(0)}\Delta x_2 + \ldots$$
$$+ \frac{\partial f}{\partial x_n}\Big|_{(0)}\Delta x_n \tag{2.33}$$

ให้ $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}$ เป็นค่าเริ่มต้นที่แทนเข้าไปในฟังก์ชั่น และจัดรูปสมการที่ (2.33) ใหม่ได้

$$\Delta u = u - f\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}\right) = \frac{\partial f}{\partial x_1}\Big|_{(0)}\Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\Big|_{(0)}\Delta x_2 + \ldots + \frac{\partial f}{\partial x_n}\Big|_{(0)}\Delta x_n \quad (2.34)$$

สำหรับสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นใดๆ n สมการ สามารถเขียนได้โดยใช้สมการที่ (2.34) โดยจัดรูปเมตริกซ์ใหม่ได้คือ

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

หรือเขียนแทนด้วยสมการเมตริกซ์เป็น

$$[\Delta u] = [J][\Delta x] \quad (2.36)$$

โดย [J] = ค่าจาโคเบียนเมตริกซ์

### 2.4.1 การประยุกต์วิธีนิวตันราฟสันในการแก้ปัญหาโหลดโฟลว์

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตันราฟสันใช้วิธีเปลี่ยนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

โดย $\Delta P$ = ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าบัส ซึ่งคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่กำหนด ลบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่คำนวณนั้นคือ

$$\Delta P = P_{spec} - P_{cal} \quad (2.38)$$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



และค่า $\Delta Q$ = ค่าความแตกต่างของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลเข้าบัส ซึ่งคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่กำหนด ลบด้วยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณนั้นคือ

$$\Delta Q = Q_{spec} - Q_{cal} \tag{2.39}$$

ค่า $J_1$ , $J_2$ , $J_3$ , $J_4$ คือค่าจาโคเบียนเมตริกซ์ย่อย

สมการในแนวเส้นทะแยงมุมและนอกเส้นทะแยงมุมของ $J_1$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{2.40}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \tag{2.41}$$

สมการในแนวเส้นทะแยงมุมและนอกเส้นทะแยงมุมของ $J_2$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} |V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + 2|V_i||Y_{ii}| \cos\theta_{ii} \tag{2.42}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \tag{2.43}$$

สมการในแนวเส้นทะแยงมุมและนอกเส้นทะแยงมุมของ $J_3$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{2.44}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \tag{2.45}$$

49298

สมการในแนวเส้นทะแยงมุมและนอกเส้นทะแยงมุมของ $J_4$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} |V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) - 2|V_i||Y_{ii}| \sin\theta_{ii} \tag{2.46}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \tag{2.47}$$

โดย $\Delta\delta$ = ค่าของมุมที่เปลี่ยนแปลงในการวนรอบ

$\Delta|V|$ = ค่าของขนาดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงในการวนรอบ

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนิวตันราฟสันสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คำนวณค่า $P_i$ , $Q_i$ จากค่าแรงดันที่สมมุติในตอนเริ่มต้นหรือจากค่าแรงดันบัสที่คำนวณได้ในการวนรอบครั้งที่ผ่านมา

2. คำนวณค่า $\Delta P$ , $\Delta Q$ ถ้าค่าความแตกต่างนี้น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ (tolerance) แสดงว่าค่าแรงดันซึ่งใช้คำนวณค่า $P_i$ , $Q_i$ นี้คือผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์

3. ถ้าค่า $\Delta P$ , $\Delta Q$ มีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้จะต้องคำนวณค่า $\Delta\delta$ , $\Delta|V|$ เพื่อคำนวณแรงดันบัสค่าใหม่จาก

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta\delta^k \tag{2.48}$$

$$|V|^{k+1} = |V|^k + \Delta|V|^k \tag{2.49}$$

4. กลับไปทำขั้นตอนในข้อที่ 1 ใหม่จนกระทั่งได้ผลลัพธ์

## 2.5 การคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล

ในความเป็นจริงแล้วระบบไฟฟ้ากำลัง จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันในกำลังไฟฟ้าจริง (real power) ในสายส่งไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และการเปลี่ยนแปลงมุมในกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power) แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากสมการ (2.37) เขียนใหม่

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \tag{2.50}$$

หรือสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ว่า

$$\Delta P = J_1 \Delta\delta = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right]\Delta\delta \tag{2.51}$$

$$\Delta Q = J_4 \Delta|V| = \left[\frac{\partial Q}{\partial |V|}\right]\Delta|V| \tag{2.52}$$

จากสมการที่ (2.40) สมการในแนวเส้นทแยงมุมของ $J_1$ สามารถเขียนได้เป็น

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

แทนค่าเทอมแรกของสมการที่ (2.40) ด้วย $-Q_i$ จากสมการที่ (2.7)

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \tag{2.53}$$

เมื่อ $B_{ii} = |Y_{ii}|\sin\theta_{ii}$ เป็นส่วนจินตภาพของเมตริกซ์ย่อยแนวเส้นทแยงมุมของบัสแอดมิแตนท์เมตริกซ์ ในระบบไฟฟ้ากำลัง self susceptances $B_{ii} >> Q_i$ และ $|V_i|^2 \approx |V_i|$ ดังนั้น

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i|B_{ii} \tag{2.54}$$

จากสมการที่ (2.41) สมการนอกแนวเส้นทแยงมุมของ $J_1$ สามารถเขียนได้เป็น

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

สมมุติว่าค่าความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆมีค่าแตกต่างกันไม่มากเนื่องจาก $\delta_j - \delta_i$ มีขนาดน้อยมาก จะได้ว่า

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

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j|B_{ij} \tag{2.55}$$

สมมุติให้ $|V_j| \approx 1$ ดังนั้น

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i|B_{ij} \tag{2.56}$$

จากสมการที่ (2.46) สมการในแนวเส้นทแยงมุมของ $J_4$ สามารถเขียนได้เป็น

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

แทนค่าเทอมแรกของสมการที่ (2.46) ด้วย $-Q_i$

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

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = Q_i - |V_i|B_{ii} \tag{2.57}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อ $B_{ii} = |Y_{ii}|\sin\theta_{ii} >> Q_i$ จะตัด $Q_i$ ทิ้ง
ดังนั้นสมการที่ (2.57) สมการในแนวเส้นทแยงมุมของ $J_4$ สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i|B_{ii} \tag{2.58}$$

จากสมการที่ (2.47) สมการนอกแนวเส้นทแยงมุมของ $J_4$ สามารถเขียนได้เป็น

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

เนื่องจาก $\delta_j - \delta_i$ มีค่าน้อยมาก จะได้ว่า $\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ij}$

ดังนั้นสมการนอกแนวเส้นทแยงมุมของ $J_4$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| B_{ij} \tag{2.59}$$

เมื่อทำการปรับปรุงวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ลแล้ว จะได้สมการสุดท้ายเป็น

$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = -B' \Delta \delta \tag{2.60}$$

$$\frac{\Delta Q}{|V_i|} = -B'' \Delta |V| \tag{2.61}$$

$$\Delta \delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V_i|} \tag{2.62}$$

$$\Delta |V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V_i|} \tag{2.63}$$

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสต์ดีคัปเปิ้ลสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คำนวณค่าเริ่มต้น $\Delta P / |V|$
2. หาค่า $\Delta\delta$ จากสมการที่ (2.62)
3. ปรับเปลี่ยนค่ามุม $\delta$ แล้วนำไปคำนวณค่า $\Delta Q / |V|$
4. แก้สมการที่ (2.63) เพื่อหาค่า $\Delta |V|$ แล้วปรับเปลี่ยนค่าขนาดแรงดันไฟฟ้า $|V|$ กลับไปคำนวณสมการที่ (2.62) ทำซ้ำรอบของการคำนวณต่อไปจนกระทั่งค่า $\Delta P$ และ $\Delta Q$ ทั้งหมดอยู่ในค่าความผิดพลาดที่กำหนดไว้

# บทที่ 3
# ทฤษฎีและเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วย
# วิธี Linear Sensitivity Factors

## 3.1 บทนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องวางแผนเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคต โดยระบบจะต้องมีความน่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น อย่างเช่นในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งในระบบเกิดการล้มเหลวขึ้นหรือเกิดการ outage ขึ้น ตัวอย่างเช่น generator เครื่องใดเครื่องหนึ่งอาจจะถูกตัดออกจากระบบเนื่องจากการทริปของอุปกรณ์ป้องกันเนื่องจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งก็ตาม หรือในกรณีที่ transmission line อาจจะถูกทำให้เสียหายจากพายุหรือถูกปลดโดยอัตโนมัติจากอุปกรณ์ป้องกันเนื่องจากสาเหตุ fault ใดๆก็ตามนั้น อาจจะทำให้ transmission line อื่นๆที่เหลืออยู่ต้องรับภาระทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น บางครั้งอาจจะทำให้เกิดสภาวะ overload ขึ้นมาที่อุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งของระบบได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องทำการป้องกันระบบโดยจะต้องขจัดหรือบรรเทา overload ที่เกิดขึ้นนี้ให้ออกจากระบบโดยเร็วที่สุด เพื่อที่จะรักษาระบบโดยรวมให้สามารถทำงานอยู่ได้ตลอดเวลาและมีความน่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาไฟฟ้าดับขึ้นมาได้ ดังนั้นวิธี Linear Sensitivity Factors จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และป้องกันผลของ overload ที่เกิดขึ้น โดยจะใช้เป็นเทคนิคในการเลือกสวิทซ์ไลน์

## 3.2 วิธี Linear Sensitivity Factors [2]

ปัญหาสำคัญส่วนใหญ่ของการศึกษาทางด้าน contingency analysis คือเวลา เพราะว่าบางครั้งในกรณีที่ทำการศึกษาการ outage นั้นอาจจะมี transmission line ต่ออยู่ในระบบเป็นจำนวนมากทำให้เสียเวลาในการคำนวณเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีวิธีการหนึ่งที่จะช่วยในการคำนวณได้อย่างรวดเร็วก็คือวิธี Linear Sensitivity Factors เป็นการคำนวณหาค่า factors เพื่อประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงไปของ power flow หลังจากเกิดการ outage ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะพิจารณาค่า factors จากการ outage ได้ 2 กรณี ดังนี้

### 3.2.1 The Generation Shift Factors ($a_{li}$)

ค่า $a_{li}$ คือค่า factors ที่ใช้ประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงไปของ line flow l เมื่อเกิดการ outage ขึ้นที่ genertion ที่ บัส i ใดๆโดยจะไม่ทำการ outage generation ที่ slack bus ซึ่งค่า $a_{li}$ ที่ slack bus นี้จะมีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด พิจารณาการ derive ค่า $a_{li}$ ได้ดังต่อไปนี้

ทำการหาค่า X matrix ของระบบโดยพิจารณาได้จากสมการที่ (3.1)

$$\theta = [X]P \tag{3.1}$$

จากสมการที่ (3.1) คือ matrix มาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณของ dc load flow ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่ bus power injections ($\Delta$P) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่ bus phase angle ($\Delta\theta$) โดยดูได้จากสมการที่ (3.2)

$$\Delta\theta = [X]\Delta P \tag{3.2}$$

จากสมการที่ (3.2) ค่า the net perturbation ของ swing bus มีค่าเท่ากับค่าผลรวมของ the perturbation ทั้งหมดของ bus อื่นๆ

สมมุติว่ากำหนดให้ค่า the perturbation บน bus i ถึง +1 และค่า the perturbation ทั้งหมดของ bus อื่นๆ ถึงศูนย์ ดังนั้นทำการ solve เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงไปใน bus phase angle โดยใช้ matrix ในการคำนวณ ดูได้จากสมการที่ (3.3)

$$\Delta\theta = [X]\begin{bmatrix} +1 \\ \\ -1 \end{bmatrix}^{-rowi}_{-refrow} \tag{3.3}$$

จากสมการที่ (3.3) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง power เพิ่มขึ้น 1 pu ที่ bus i จะมีการเปลี่ยนแปลงชดเชย power ลดลง 1 pu ที่ reference bus โดยค่า $\Delta\theta$ จะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงไปของ bus angle ที่เป็นสัดส่วนต่อการเปลี่ยนแปลงใน power injection ที่ bus i ดังนั้น ค่า $a_{li}$ ดูได้จากสมการที่ (3.4)

$$a_{li} = \frac{df_l}{dP_i} = \frac{d}{dP_i}\left(\frac{1}{x_l}(\theta_n - \theta_m)\right)$$

$$a_{li} = \frac{1}{x_l}\left(\frac{d\theta_n}{dP_i} - \frac{d\theta_m}{dP_i}\right) = \frac{1}{x_l}(X_{ni} - X_{mi}) \tag{3.4}$$

โดย $a_{li}$ = ค่า generation shift factors

$x_l$ = ค่า line reactance ของ line l

line l = บัส n -> บัส m

i = บัส ที่ generator ต่ออยู่

$X_{ni}$ , $X_{mi}$ = ค่า X matrix ของ ระบบที่ทดสอบ

ส่วนการคำนวณค่า power flow บน line l ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ outage generator ที่ bus i นั้น พิจารณาได้จากสมการที่ (3.5)

$$f_l = f_l^0 + a_{li}\Delta P_i \tag{3.5}$$

โดย $f_l$ = ค่า power flow บน line l หลังจาก outage generator ที่ บัส i

$f_l^0$ = ค่า power flow บน line l ก่อน outage generator ที่ บัส i

$\Delta P_i$ = ค่าที่เปลี่ยนแปลงของ generation ที่ บัส i

จากสมการที่ (3.5) ค่า $\Delta P_i$ เวลาคำนวณจะกำหนดให้มีค่า $\Delta P_i = -P_i^0$ โดยให้มีค่าตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงไปใน generation ที่ reference bus

### 3.2.2 The Line Outage Distribution Factors ($d_{l,k}$)

ค่า $d_{l,k}$ คือค่า factors ที่ใช้ประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงไปของ line flow l เมื่อเกิดการ outage ขึ้นที่ line k พิจารณาการ derive ค่า $d_{l,k}$ ได้จากรูปที่ 3.1

จากรูปที่ 3.1 สมมุติว่า line k จาก bus n ไป bus m ถูกเปิดวงจรโดย circuit breakers ทำให้ line k ถูกแยกออกจากระบบโดยสมบรูณ์ ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จากรูปด้านล่างสุดของรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า circuit breakers ยังคงปิดวงจรอยู่ แต่มีการ injections $\Delta P_n$ และ $\Delta P_m$ เข้าไปที่ bus n และ m ตามลำดับ โดยมีค่าดังนี้

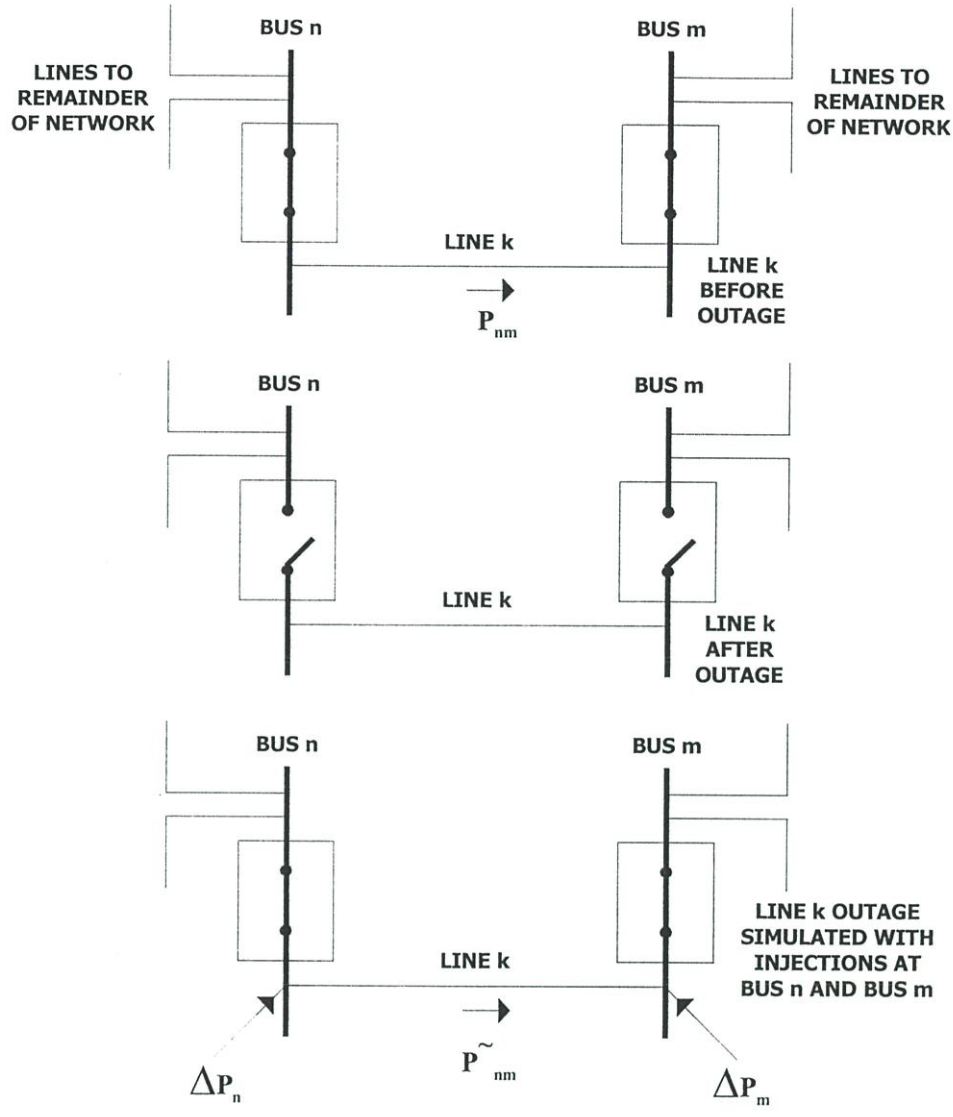
$$\Delta P_n = \tilde{P}_{nm}$$

$$\Delta P_m = -\tilde{P}_{nm}$$

$$\tilde{P}_{nm} = P_{nm}$$

จากสมการที่ (3.2) ค่า $\Delta P$ พิจารณาได้ดังนี้

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_n \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_m \end{bmatrix}$$




**รูปที่ 3.1** line outage modeling โดยใช้ injections

ค่า $\Delta\theta_n$ และ $\Delta\theta_m$ ดูได้จากสมการที่ (3.6)

$$\Delta\theta_n = X_{nn}\Delta P_n + X_{nm}\Delta P_m$$
$$\Delta\theta_m = X_{mn}\Delta P_n + X_{mm}\Delta P_m \qquad (3.6)$$

โดย $\theta_n, \theta_m$ = ค่า bus phase angles ก่อนการ outage

$P_{nm}$ = ค่า power flow บน line k จาก bus n ไป bus m

$\Delta\theta_n, \Delta\theta_m, \Delta P_{nm}$ = ค่า the incremental changes จากการ outage

$\tilde{\theta}_n, \tilde{\theta}_m, \tilde{P}_{nm}$ = ค่า exist หลังจาก outage

จากที่กล่าวมาข้างต้น ค่า $P^{\sim}_{nm} = \Delta P_n = -\Delta P_m$ และ กำหนดให้ line reactance = $x_k$ จะได้ค่า $P^{\sim}_{nm}$ ดังนี้

$$\tilde{P}_{nm} = \frac{1}{X_k}\left(\tilde{\theta}_n - \tilde{\theta}_m\right) \tag{3.7}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}\Delta\theta_n &= (X_{nn} - X_{nm})\Delta P_n \\ \Delta\theta_m &= (X_{mn} - X_{mm})\Delta P_m\end{aligned} \tag{3.8}$$

และ

$$\begin{aligned}\tilde{\theta}_n &= \theta_n + \Delta\theta_n \\ \tilde{\theta}_m &= \theta_m + \Delta\theta_m\end{aligned} \tag{3.9}$$

จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$\tilde{P}_{nm} = \frac{1}{X_k}\left(\tilde{\theta}_n - \tilde{\theta}_m\right) = \frac{1}{X_k}(\theta_n - \theta_m) + \frac{1}{X_k}(\Delta\theta_n - \Delta\theta_m)$$

$$\tilde{P}_{nm} = P_{nm} + \frac{1}{X_k}(X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})\Delta P_n \tag{3.10}$$

ดังนั้น (ในความเป็นจริง ค่า $P^{\sim}_{nm}$ จะ set to $\Delta P_n$)

$$\Delta P_n = \left[\frac{1}{1 - \frac{1}{X_k}(X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})}\right] P_{nm} \tag{3.11}$$

คำนิยามของ a sensitivity factor $\delta$ คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงใน phase angle $\theta$ ดังนั้นจะได้

$$\delta_{i,nm} = \frac{\Delta\theta_i}{P_{nm}} \tag{3.12}$$

ถ้า bus n หรือ m ไม่ใช่ reference bus ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงใน phase angle ที่ bus i คือ

$$\Delta\theta_i = X_{in}\Delta P_n + X_{im}\Delta P_m \tag{3.13}$$

ดังนั้นใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_n$ และ $\Delta P_m$ หาค่า $\delta$ factor ได้ดังนี้

$$\delta_{i,nm} = \frac{(X_{in} - X_{im})x_k}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})} \tag{3.14}$$

ถ้า bus n หรือ m ไม่ใช่ reference bus , มีเพียงหนึ่ง injection เท่านั้นที่ใช้ ดังนั้นค่า $\delta$ factor คือ

$$\delta_{i,nm} = \frac{X_{in}x_k}{(X_{nm} - X_{nn})} \qquad \text{For m = ref}$$

$$\delta_{i,nm} = \frac{-X_{im}x_k}{(X_{nm} - X_{mm})} \qquad \text{For n = ref} \tag{3.15}$$

ถ้า bus i คือ reference bus ดังนั้น $\delta_{i,nm} = 0$ แสดงว่าค่า bus angle ของ reference bus มีค่าคงที่ ดังนั้นค่า $d_{l,k}$ คือ

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

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

$$d_{l,k} = \frac{1}{x_l}(\delta_{i,nm} - \delta_{j,nm}) \tag{3.16}$$

ถ้า i หรือ j ไม่ใช่ reference bus ดังนั้นค่า $d_{l,k}$ แสดงได้ดังนี้

$$d_{l,k} = \frac{1}{x_l}\left(\frac{(X_{in} - X_{im})x_k - ((X_{jn} - X_{jm})x_k)}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})}\right)$$

$$d_{l,k} = \frac{\frac{x_k}{x_l}(X_{in} - X_{jn} - X_{im} + X_{jm})}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})} \tag{3.17}$$

ส่วนการคำนวณค่า power flow บน line l ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ outage line k พิจารณาจากสมการที่ (3.18)

$$f_l = f_l^0 + d_{l,k} f_k^0 \tag{3.18}$$

โดย $f_l^0$ , $f_k^0$ = ค่า preoutage power flow บน line l , k

$f_l$ = ค่า power flow บน line l เมื่อ line k outage

ส่วนการคำนวณค่า power flow บน line l ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ outage line k และ switch line s พิจารณาได้จากสมการที่ (3.19)

$$f_l = f_l^0 + d'_{l,k} f_k^0 + d'_{l,s} f_s^0 \tag{3.19}$$

$$d'_{l,k} = \frac{d_{l,k} + (d_{l,s} d_{s,k})}{1 - (d_{s,k} d_{k,s})}$$

$$d'_{l,s} = \frac{d_{l,s} + (d_{l,k} d_{k,s})}{1 - (d_{k,s} d_{s,k})}$$

ส่วนการคำนวณค่า power flow บน line l ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ outage generator ที่ bus i และ switch line k นั้น พิจารณาได้จากสมการที่ (3.20)

$$f_l = f_l^0 + (a_{li} + d_{l,k} a_{k,i}) \Delta P_i \tag{3.20}$$

โดย $f_l$ = ค่า power flow บน line l หลังจาก outage generator ที่ บัส i และ switch line k

$f_l^0$ = ค่า power flow บน line l ก่อน outage generator ที่ บัส i และ switch line k

$\Delta P_i$ = ค่าที่เปลี่ยนแปลงของ generation ที่ บัส i

จากสมการที่ (3.20) ค่า $\Delta P_i$ เวลาคำนวณจะกำหนดให้มีค่า $\Delta P_i = -P_i^0$ โดยให้มีค่าตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงไปใน generation ที่ reference bus

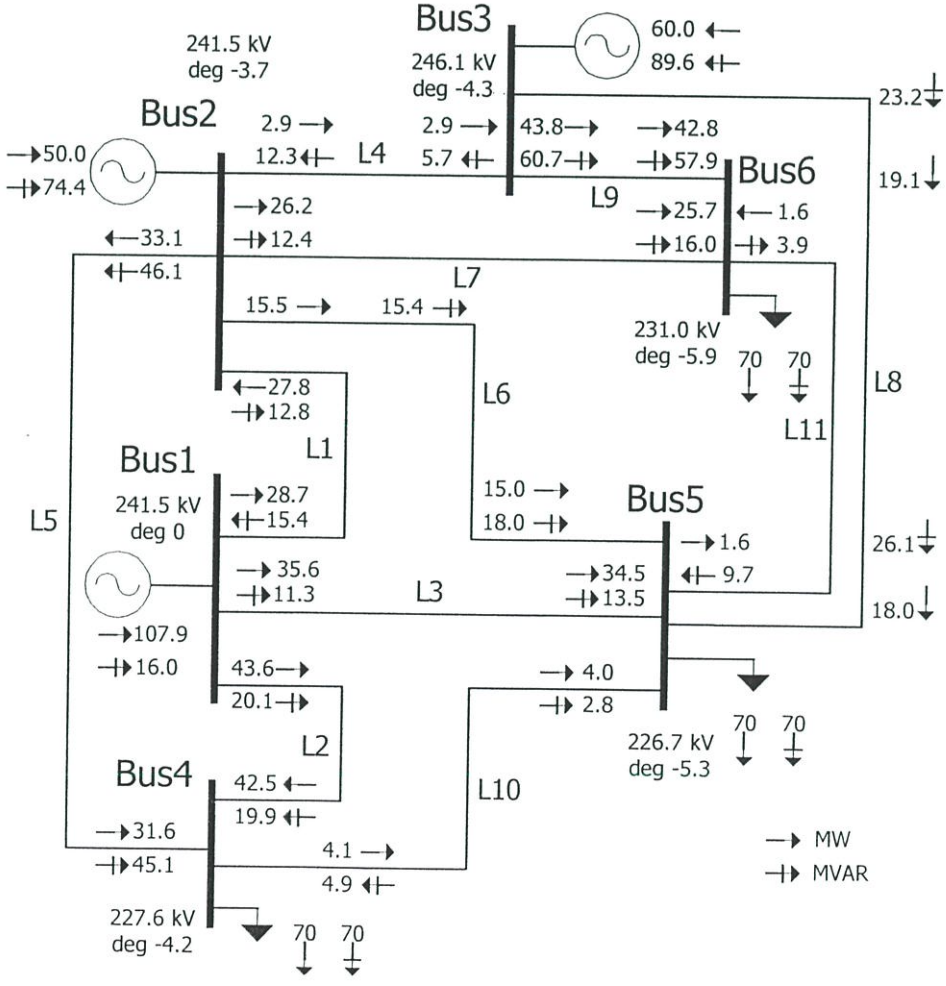
## 3.3 เทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors

หลังจากที่ได้ switch line ที่สามารถ switch ได้ไปทั้งหมดแล้ว และได้หาค่าจำนวนของ overload , ค่า total power losses ได้ทั้งหมดแล้ว ก็จะทำการเลือก switch line โดยพิจารณาจาก

ขั้นตอนที่ 1 กรณีที่ได้เลือก switch line แล้วสามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างสมบรูณ์มีหลาย line (มีจำนวน overload = 0) จะทำการเลือก switch line ที่มีค่า total power losses ต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 กรณีที่ได้เลือก switch line แล้วไม่สามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างสมบรูณ์ แต่สามารถบรรเทา overload ได้หลาย line (มีจำนวน overload > 0) จะทำการเลือก switch line ที่สามารถบรรเทา overload ได้มากที่สุด คือเหลือจำนวนของ overload น้อยที่สุด และมีค่า total power losses ต่ำที่สุด

## 3.4 ตัวอย่างในการคำนวณ [2]




รูปที่ 3.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง six-bus network

จากรูปที่ 3.2 ทำการคำนวณหาค่า X Matrix (referenceที่ bus 1) , $a_{li}$ และ $d_{l,k}$ แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$[X] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.09412 & 0.08051 & 0.06298 & 0.06435 & 0.08129 \\ 0 & 0.08051 & 0.16590 & 0.05897 & 0.09077 & 0.12895 \\ 0 & 0.06298 & 0.05897 & 0.10088 & 0.05422 & 0.05920 \\ 0 & 0.06435 & 0.09077 & 0.05422 & 0.12215 & 0.08927 \\ 0 & 0.08129 & 0.12895 & 0.05920 & 0.08927 & 0.16328 \end{bmatrix}$$

**ตารางที่ 3.1** ค่า Generation Shift Factor ($a_{li}$) ของ six-bus network

| $a_{li}$ | Bus 1 | Bus 2 | Bus 3 |
|---|---|---|---|
| l = 1 (line 1-2) | 0 | -0.47 | -0.4 |
| l = 2 (line 1-4) | 0 | -0.31 | -0.29 |
| l = 3 (line 1-5) | 0 | -0.21 | -0.3 |
| l = 4 (line 2-3) | 0 | 0.05 | -0.34 |
| l = 5 (line 2-4) | 0 | 0.31 | 0.22 |
| l = 6 (line 2-5) | 0 | 0.1 | -0.03 |
| l = 7 (line 2-6) | 0 | 0.06 | -0.24 |
| l = 8 (line 3-5) | 0 | 0.06 | 0.29 |
| l = 9 (line 3-6) | 0 | -0.01 | 0.37 |
| l = 10 (line 4-5) | 0 | 0 | -0.08 |
| l = 11 (line 5-6) | 0 | -0.06 | -0.13 |

**ตารางที่ 3.2** ค่า Line Outage Distribution Factors ($d_{l,k}$) ของ six-bus network

| $d_{l,k}$ | k = 1 (line 1-2) | k = 2 (line 1-4) | k = 3 (line 1-5) | k = 4 (line 2-3) | k = 5 (line 2-4) |
|---|---|---|---|---|---|
| l = 1 (line 1-2) | --- | 0.64 | 0.54 | -0.11 | -0.5 |
| l = 2 (line 1-4) | 0.59 | --- | 0.46 | -0.03 | 0.61 |
| l = 3 (line 1-5) | 0.41 | 0.36 | --- | 0.15 | -0.11 |
| l = 4 (line 2-3) | -0.1 | -0.03 | 0.18 | --- | 0.12 |
| l = 5 (line 2-4) | -0.59 | 0.76 | -0.17 | 0.16 | --- |
| l = 6 (line 2-5) | -0.19 | -0.06 | 0.33 | 0.22 | 0.23 |
| l = 7 (line 2-6) | -0.12 | -0.04 | 0.21 | 0.51 | 0.15 |
| l = 8 (line 3-5) | -0.12 | -0.04 | 0.2 | -0.38 | 0.14 |
| l = 9 (line 3-6) | 0.01 | 0 | -0.03 | -0.62 | -0.02 |
| l = 10 (line 4-5) | 0.01 | -0.24 | 0.29 | 0.13 | -0.39 |
| l = 11 (line 5-6) | 0.11 | 0.03 | -0.18 | 0.12 | -0.13 |

| $d_{l,k}$ | k = 6 (line 2-5) | k = 7 (line 2-6) | k = 8 (line 3-5) | k = 9 (line 3-6) | k = 10 (line 4-5) | k = 11 (line 5-6) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| l = 1 (line 1-2) | -0.21 | -0.12 | -0.14 | 0.01 | 0.01 | 0.13 |
| l = 2 (line 1-4) | -0.06 | -0.04 | -0.04 | 0 | -0.33 | 0.04 |
| l = 3 (line 1-5) | 0.27 | 0.16 | 0.18 | -0.02 | 0.32 | -0.17 |
| l = 4 (line 2-3) | 0.23 | 0.47 | -0.4 | -0.53 | 0.17 | 0.13 |
| l = 5 (line 2-4) | 0.3 | 0.17 | 0.19 | -0.02 | -0.67 | -0.19 |
| l = 6 (line 2-5) | --- | 0.24 | 0.27 | -0.03 | 0.31 | -0.26 |
| l = 7 (line 2-6) | 0.27 | --- | -0.2 | 0.58 | 0.2 | 0.44 |
| l = 8 (line 3-5) | 0.27 | -0.17 | --- | 0.47 | 0.19 | -0.42 |
| l = 9 (line 3-6) | -0.03 | 0.64 | 0.6 | --- | -0.02 | 0.56 |
| l = 10 (line 4-5) | 0.24 | 0.14 | 0.15 | -0.02 | --- | -0.15 |
| l = 11 (line 5-6) | -0.23 | 0.36 | -0.4 | 0.42 | -0.18 | --- |

ทำการทดสอบ outage line 3-5 แล้วหาค่า power flow ที่ line 3-6 ได้ดังต่อไปนี้

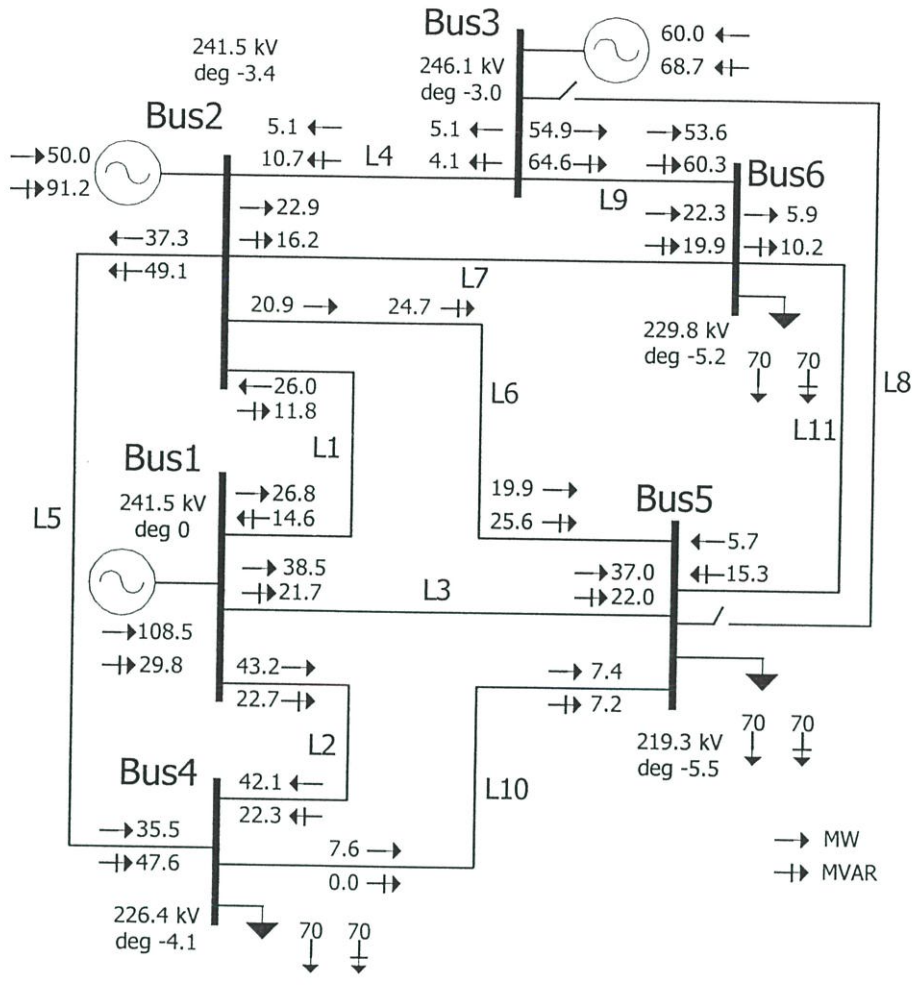
จากรูปที่ 3.2 base case ของ line 3-5 = 19.1 MW

base case ของ line 3-6 = 43.8 MW

จากตารางที่ 3.2 $d_{3\text{-}6\,,\,3\text{-}5} = 0.60$

จากสมการที่ (3.18) $f_{3\text{-}6} = f^{0}_{3\text{-}6} + (d_{3\text{-}6\,,\,3\text{-}5} * f^{0}_{3\text{-}5}) = 43.8 + (0.60*19.1) = 55.26$ MW

โดยค่าที่ได้นี้เป็นค่าจากการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อทำการ run load flow ($f_{3\text{-}6} = 54.9$ MW) แสดงได้ดังรูปที่ 3.3




**รูปที่ 3.3** outage line 3-5

ทำการทดสอบ outage generator บน bus 3 แล้วหาค่า power flow ที่ line 1-4 ได้ดังต่อไปนี้

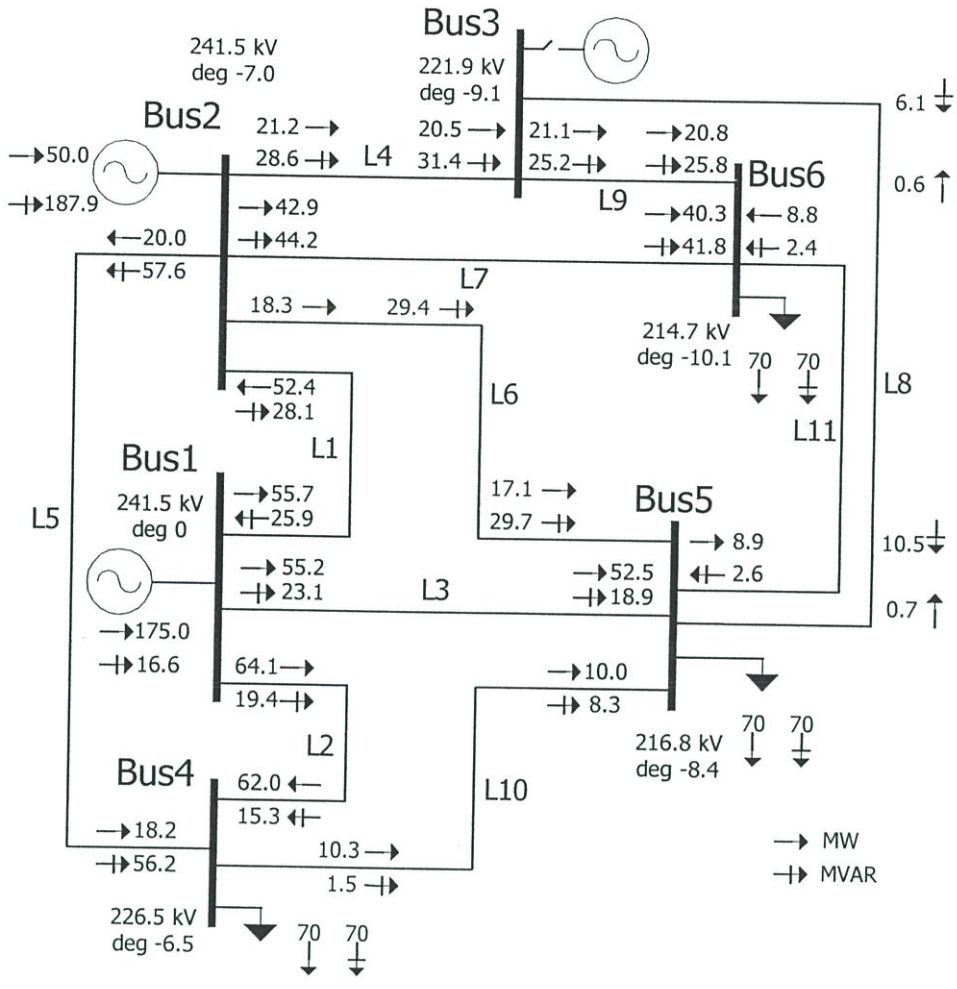
จากรูปที่ 3.2 base case ของ line 1-4 = 43.6 MW

base case ของ generator บน bus 3 = 60 MW

จากตารางที่ 3.1 $a_{1\text{-}4\,,\,3} = -0.29$

จากสมการที่ (3.5) $f_{1\text{-}4} = f^{0}_{1\text{-}4} + (a_{1\text{-}4\,,\,3} * \Delta P_3) = 43.6 + ((-0.29)*(-60)) = 61$ MW

โดยค่าที่ได้นี้เป็นค่าจากการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อทำการ run load flow ($f_{1\text{-}4} = 64.1$ MW) แสดงได้ดังรูปที่ 3.4




**รูปที่ 3.4** outage generator บน bus 3 ; lost generation picked up บน generator 1

# บทที่ 4
# ทฤษฎีและเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วย
# วิธี Z-Matrix

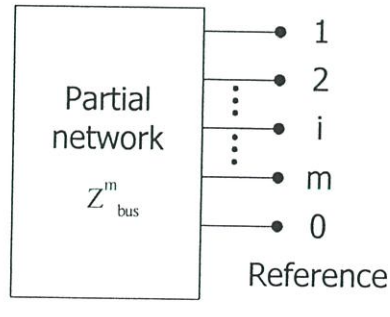
## 4.1 บทนำ [1]

มีเทคนิควิธีการต่างๆมากมายที่นำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาของ overload ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การ shift generation , phase shifter adjustments หรือ generation reschedule and /or load sheding เป็นต้น ซึ่งเทคนิคที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถที่จะนำมาใช้ในการป้องกัน overload ที่เกิดขึ้นได้ แต่ไม่ใช่เป็นการเลือก switch line เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาของ overload

ความหมายของการคำนวณ power flow ใน line ขณะศึกษาทางด้าน contingency นั้นในทางปฏิบัติ หรือ economic จะไม่ใช้การ run load flow ในการคำนวณ เพราะว่าทำให้เสียเวลามากและไม่เหมาะสมที่จะใช้คำนวณแบบ a real time situation เนื่องจากว่าขณะคำนวณทางด้าน contingency นั้นจะมี line เพียง 2-3 line เท่านั้นที่เกิด overload ดังนั้นจึงใช้วิธี Z-Matrix ในการวิเคราะห์ เพราะว่าสามารถคำนวณเฉพาะ axes of line ที่เกิด overload , สามารถตัดสินใจในการเลือก switch line เพื่อแก้ไขปัญหาของ overload ได้อย่างรวดเร็วกว่าวิธีอื่นๆ และยังสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณแบบ on-line ได้เป็นอย่างดี

## 4.2 การสร้าง Bus Impedance Matrix ($Z_{bus}$) [8]

การสร้าง bus impedance matrix นั้นสามารถเริ่มสร้างได้ตั้งแต่ element แรก ไปจนหมดทุกๆ nodes และ ทุกๆ elements สมมุติว่า $Z_{bus}$ สำหรับ a partial network มี m buses และ มี reference bus ที่ bus 0 แสดงได้ดังรูปที่ 4.1

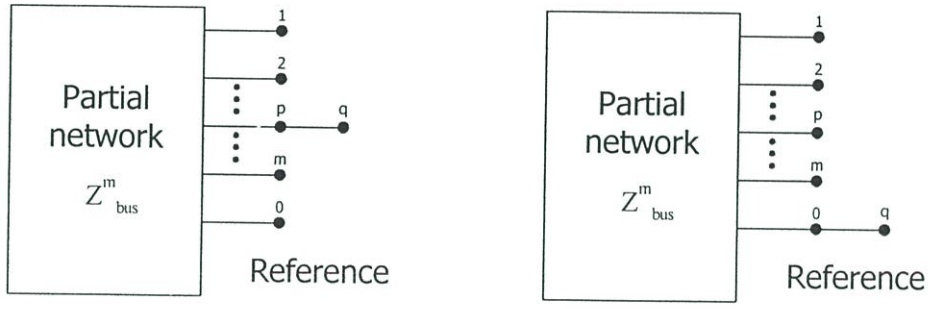



**รูปที่ 4.1** partial network

จากรูปที่ 4.1 ค่า $Z_{bus}$ มีขนาด m × m ทำการสร้าง bus impedance matrix โดยเริ่มสร้างตั้งแต่ element แรก ไปจนหมดทุกๆ elements ได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

### 4.2.1 การ addition of a branch

เมื่อทำการ add element คือ หนึ่ง branch เข้ากับ partial network จะทำให้เกิด bus ใหม่ขึ้นมา โดยมีขนาด (m+1) × (m+1) สมมุติให้ add branch ที่มีขนาด impedance = $z_{pq}$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 (a)




(a) (b)

**รูปที่ 4.2** addition of a branch p-q

จากรูปที่ 4.2 (a) สมการที่ใช้ในการคำนวณพิจารณาได้จากสมการที่ (4.1)

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_p \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_m \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1p} & \cdots & Z_{1m} & Z_{1q} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2p} & \cdots & Z_{2m} & Z_{2q} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{p1} & Z_{p2} & \cdots & Z_{pp} & \cdots & Z_{pm} & Z_{pq} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mp} & \cdots & Z_{mm} & Z_{mq} \\ Z_{q1} & Z_{q2} & \cdots & Z_{qp} & \cdots & Z_{qm} & Z_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_p \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_m \\ I_q \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

การ addition ของ branch จะต้องไม่มีผลกระทบต่อ original matrix แต่ต้องการที่จะคำนวณ element ใน q row และ column ดังนั้น element ของ power system network ก็คือ linear และ bilateral ที่มีค่า $Z_{qi} = Z_{iq}$ (q = 1 , … , m)

อันดับแรกทำการคำนวณ element ของ $Z_{qi}$ (i = 1 , ... , m และ $i \neq q$) โดย element เหล่านี้จะใช้ current source = 1 pu ที่ bus i เช่น $I_i = 1$ pu และ bus ยังคงเปิดวงจรอยู่ เช่น $I_k = 0$ ; k = 1 , ... , m และ $k \neq i$ จากสมการที่ (4.1) จะได้

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{1i} \\ V_2 &= Z_{2i} \\ &\vdots \\ V_p &= Z_{pi} \\ &\vdots \\ V_m &= Z_{mi} \\ V_q &= Z_{qi} \end{aligned} \tag{4.2}$$

จากรูปที่ 4.2 (a)

$$V_q = V_p - v_{pq} \tag{4.3}$$

$$v_{pq} = z_{pq} i_{pq} \tag{4.4}$$

ดังนั้นเมื่อได้ add brach ของ element p-q แล้วค่า $i_{pq} = 0$ ; $v_{pq} = 0$ และจากสมการที่ (4.3) ลดรูปแล้วได้

$$Z_{qi} = Z_{pi} \qquad i = 1 , \ldots , m \ ; \ i \neq q \tag{4.5}$$

คำนวณค่า diagonal element คือ $Z_{qq}$ ได้โดยการ inject current source = 1 pu ที่ bus q และจากสมการที่ (4.1) จะได้

$$V_q = Z_{qq} \tag{4.6}$$

ดังนั้นเมื่อได้ทำการ inject current source = 1 pu ที่ bus q แล้วจะได้ $i_{pq} = -I_q = -1$ จากสมการที่ (4.4) ลดรูปแล้วได้

$$v_{pq} = -z_{pq} \tag{4.7}$$

แทนค่าสมการที่ (4.7) ลงในสมการที่ (4.3) จะได้

$$V_q = V_p + z_{pq} \tag{4.8}$$

จากสมการที่ (4.2) เมื่อ i = q , $V_q = Z_{qq}$ และ $V_p = Z_{pq}$ แทนค่าในสมการที่ (4.8) แล้วจะได้

$$Z_{qq} = Z_{pq} + z_{pq} \tag{4.9}$$

ถ้า node p คือ reference node จากรูปที่ 4.2 (b) $V_p = 0$ ดังนั้นจะได้

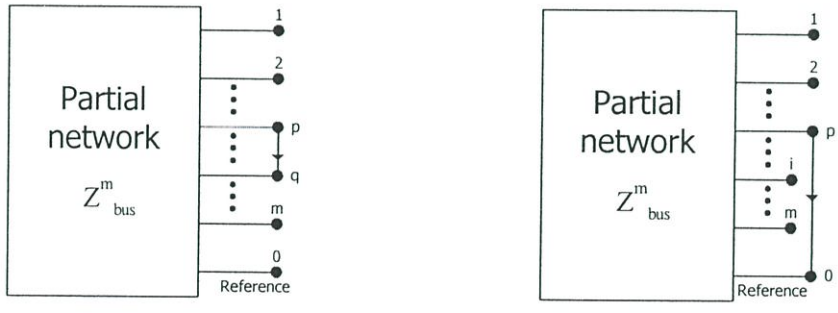
$$Z_{qi} = Z_{pi} = V_p = 0 \qquad i = 1, \ldots, m \; ; \; i \neq q \tag{4.10}$$

จากสมการที่ (4.9) ค่า diagonal element จะเปลี่ยนเป็น

$$Z_{qq} = z_{pq} \tag{4.11}$$

### 4.2.2 การ addition of a link

เมื่อทำการ add element คือ a cotree link ระหว่าง bus p และ bus q โดยไม่มีการสร้าง bus ใหม่ ขนาดของ $Z_{bus}$ ยังคงเท่าเดิม แต่ element ทั้งหมดเปลี่ยนแปลงค่าไปใหม่ สมมุติว่า add a link มีขนาด impedance = $z_{pq}$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3




**รูปที่ 4.3** addition of a link p-q

จากรูปที่ 4.3 (a) ถ้า $I_l$ คือ กระแสที่ไหลผ่านตลอด add link ในทิศทางที่กำหนดจะได้

$$z_{pq} I_l = V_p - V_q \tag{4.12}$$

หรือ

$$V_q - V_p + z_{pq} I_l = 0 \tag{4.13}$$

ทำการ modify ค่ากระแสของ add link คือ จาก $I_p$ เป็น $(I_p - I_l)$ และ $I_q$ เป็น $(I_q + I_l)$ ดังนั้น สมการ the network equation จะกลายเป็น

$$\begin{aligned}
V_1 &= Z_{11}I_1 + \ldots + Z_{1p}(I_p - I_l) + Z_{1q}(I_q + I_l) + \ldots + Z_{1m}I_m \\
&\vdots \\
V_p &= Z_{p1}I_1 + \ldots + Z_{pp}(I_p - I_l) + Z_{pq}(I_q + I_l) + \ldots + Z_{pm}I_m \\
V_q &= Z_{q1}I_1 + \ldots + Z_{qp}(I_p - I_l) + Z_{qq}(I_q + I_l) + \ldots + Z_{qm}I_m \\
&\vdots \\
V_m &= Z_{m1}I_1 + \ldots + Z_{mp}(I_p - I_l) + Z_{mq}(I_q + I_l) + \ldots + Z_{mm}I_m
\end{aligned} \tag{4.14}$$

จากสมการที่ (4.14) นำค่า $V_p$ และ $V_q$ ลบกันแล้วแทนค่าในสมการที่ (4.13) จะได้ค่า

$$\begin{aligned}
&(Z_{q1} - Z_{p1})I_1 + \ldots + (Z_{qp} - Z_{pp})I_p + \ldots + (Z_{qq} - Z_{pq})I_q + \ldots + \\
&(Z_{qm} - Z_{pm})I_m + (z_{pq} + Z_{pp} + Z_{qq} - 2Z_{pq})I_l = 0
\end{aligned} \tag{4.15}$$

นำสมการที่ (4.14) รวมกับสมการที่ (4.15) ผลลัพธ์ที่ได้มี m+1 equations เขียนในรูปของ matrix ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_p \\ V_q \\ \vdots \\ V_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1p} & Z_{1q} & \cdots & Z_{1m} & Z_{1l} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Z_{p1} & \cdots & Z_{pp} & Z_{pq} & \cdots & Z_{pm} & Z_{pl} \\ Z_{q1} & \cdots & Z_{qp} & Z_{qq} & \cdots & Z_{qm} & Z_{ql} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Z_{m1} & \cdots & Z_{mp} & Z_{mq} & \cdots & Z_{mm} & Z_{ml} \\ Z_{l1} & \cdots & Z_{lp} & Z_{lq} & \cdots & Z_{lm} & Z_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_p \\ I_q \\ \vdots \\ I_m \\ I_l \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

โดย

$$Z_{li} = Z_{il} = Z_{iq} - Z_{ip} \tag{4.17}$$

และ

$$Z_{ll} = z_{pq} + Z_{pp} + Z_{qq} - 2Z_{pq} \tag{4.18}$$

จากสมการที่ (4.16) นำมาจัดรูปใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_{bus} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{bus}^{old} & \Delta Z \\ \Delta Z^T & Z_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{bus} \\ I_l \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

โดย

$$\Delta Z = \begin{bmatrix} Z_{1l} & . & . & . & Z_{pl} & Z_{ql} & . & . & . & Z_{ml} \end{bmatrix}^T \tag{4.20}$$

จากสมการที่ (4.19) จัดรูปใหม่จะได้

$$\begin{aligned} V_{bus} &= Z_{bus}^{old} I_{bus} + \Delta Z I_l \\ 0 &= \Delta Z^T I_{bus} + Z_{ll} I_l \end{aligned} \tag{4.21}$$

จากสมการที่ (4.21) หาค่า $I_l$ ได้ดังนี้

$$I_l = -\frac{\Delta Z^T}{Z_{ll}} I_{bus} \tag{4.22}$$

จากสมการที่ (4.22) แทนค่าในสมการที่ (4.21) จะได้

$$V_{bus} = \left[ Z_{bus}^{old} - \frac{\Delta Z \Delta Z^T}{Z_{ll}} \right] I_{bus} \tag{4.23}$$

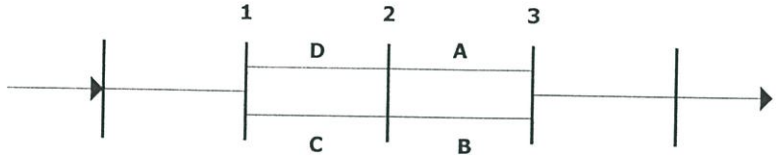
หรือ

$$\begin{aligned} V_{bus} &= Z_{bus}^{new} I_{bus} \\ Z_{bus}^{new} &= Z_{bus}^{old} - \frac{\Delta Z \Delta Z^T}{Z_{ll}} \end{aligned} \tag{4.24}$$

จากสมการที่ (4.24) นี้เรียกว่า kron reduction จะใช้ทำการลดขนาดของ matrix กับสู่ขนาดเดิมตอนก่อนเริ่มต้นคำนวณ

## 4.3 วิธี Z-Matrix แบบเดิม [1]

พิจารณาตัวอย่างระบบรูปที่ 4.4

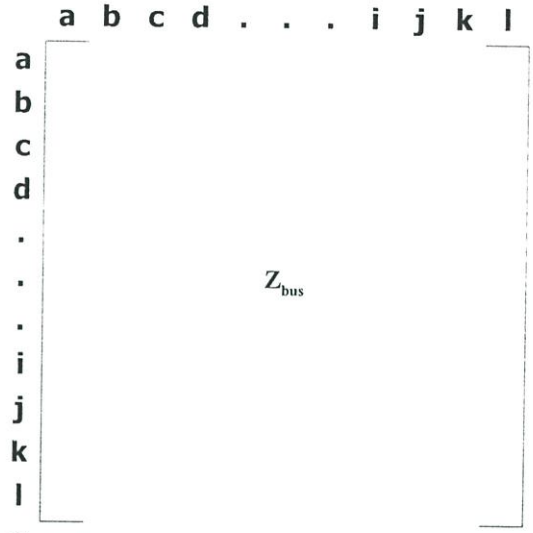



**รูปที่ 4.4** ตัวอย่างของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 4.4 เมื่อ line B เปิดวงจร จะทำให้เกิด overload ขึ้นที่ line A ดังนั้นวิธีการง่ายๆที่จะใช้ในการป้องกันคือทำการเลือก switch line , เมื่อเปิดวงจร line C จะทำให้ค่า impedance ระหว่าง bus 1 และ bus 2 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สามารถลดค่ากระแสไฟฟ้าลงได้ ส่งผลให้ค่า overload ใน line A ลดลงได้ จะเห็นได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่ายๆ ที่มีแนวการคิดใกล้เคียงกับการคำนวณ interchange capability and contingency analysis [5,6] แต่ในความเป็นจริงระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นวิธีการดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการคำนวณ อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าขนาดของ line flow ที่เปลี่ยนแปลงนั้นยังไม่เหมาะสมเพราะว่าเสียเวลาในการคำนวณเป็นอย่างมาก แต่ถ้าคำนวณเฉพาะค่าเครื่องหมายที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ outage line หรือ add line นั้นจะเหมาะสมมากกว่าเพราะว่าใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงนำเสนอวิธี Z-Matrix มาใช้ในการคำนวณ

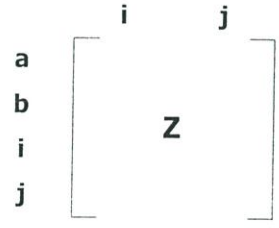
ทำการคำนวณหาค่า $Z_{bus}$ โดยใช้วิธีการ add branch เข้ากับระบบ , add link ระหว่าง two exist node ภายในระบบ และ kron reduction โดยข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณนั้นจะอยู่ในรูปแบบ (R+jX) , ค่า a single arbitrary ground tie จะถูกกำหนดให้ที่ any convenient bus เพื่อให้สามารถคำนวณค่า $Z_{bus}$ ได้ , ส่วนค่า ground tie อื่นๆ(customer load impedance , line charging , ground tie reactors , transformer ground legs , etc.) จะถูกยกเว้นไม่นำมาใช้ในการคำนวณ โดยดูค่า $Z_{bus}$ ได้จากรูปที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า axes a , b , c , d คือ axes ของ bus ที่ line เกิด overload และ axes i , j , k , l คือ axes ของ bus ที่ line ถูก switch ออกจากระบบหรือ add เข้ากับระบบ




**รูปที่ 4.5** $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง

อันดับแรกทดสอบการ remove ของ line i – j โดยจะทำการทดสอบเครื่องหมายที่เปลี่ยนแปลงไป (เพิ่มขึ้นหรือลดลง) ของ overload ใน line a - b เมื่อ line i - j remove, โดยทำการสร้าง matrix ที่เลือกจากรูปที่ 4.5 แสดงได้ดังรูปที่ 4.6

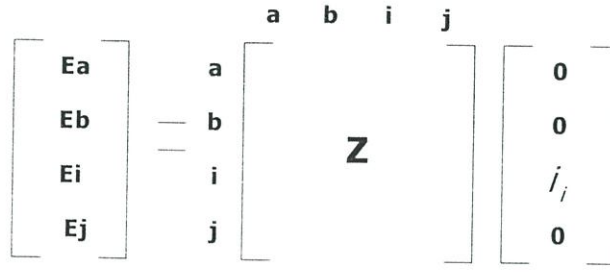



**รูปที่ 4.6** Z-Matrix elements ที่ต้องการทดสอบ

จากรูปที่ 4.6 ทำการเลือกสมาชิก matrix จาก $Z_{bus}$ ทั้งหมดโดย a , b คือ bus ของ line ที่เกิด overload ; ส่วน i , j คือ bus ของ line ก่อนทำการ remove

ทำการ inject current เข้าไปที่ bus i หรือ j ของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อที่จะสร้าง voltage difference ระหว่าง 2 bus เช่น ที่ Bus a และ b

สมมุติว่าทำการทดสอบ inject current เข้าไปที่ bus i ดังนั้น voltage ที่ bus a , b , i , j แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



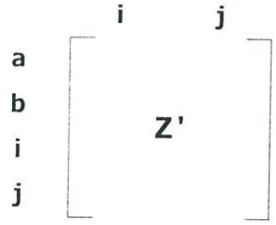

**รูปที่ 4.7** ค่า inject current ที่ bus i , voltage ที่ bus a , b , i และ j

จากรูปที่ 4.7 ค่า $I_i$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.25)

$$I_{ab} = \frac{(E_a - E_b)}{Z_{ab}} = \frac{(Z_{ai} - Z_{bi})I_i}{Z_{ab}} \qquad (4.25)$$

จากสมการที่ (4.25) ค่า $I_{ab}$ สามารถรู้ได้จาก telemeter data , ค่า $Z_{ai}$ และ $Z_{bi}$ สามารถหาได้จาก $Z_{bus}$ , ค่า line impedance ของ $z_{ab}$ หาได้จาก data ของ line ดังนั้นค่า $I_i$ สามารถถูกคำนวณได้

สมมุติว่าถ้าการ remove ของ line ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าผลรวมของ generation ของระบบไฟฟ้ากำลัง จาก $Z_{bus}$ รูปที่ 4.5 ทำการ modify โดยทำการ remove line i – j ด้วยการ add line i - j ที่มีค่าตรงกันข้ามกับค่าเดิมแล้ว add link ระหว่าง two exist node ภายในระบบ และ kron reduction คำนวณค่าใหม่ แสดงเป็น matrix ได้ดังรูปที่ 4.8




**รูปที่ 4.8** $Z'$-Matrix เมื่อ line i - j remove

และในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (4.25) สามารถหาค่า new current ของ line a – b หลังจาก remove line i – j ($I'_{ab}$) ได้จากสมการที่ (4.26) คือ

$$I'_{ab} = \frac{(E'_a - E'_b)}{Z_{ab}} = \frac{(Z'_{ai} - Z'_{bi})I_i}{Z_{ab}} \qquad (4.26)$$

โดย $I_{ab}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของ line a – b ก่อนเกิดการ remove line i – j

$I'_{ab}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของ line a – b ที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจาก remove line i – j

จากสมการที่ (4.25) และ (4.26) ทำการเปรียบเทียบ $I_{ab}$ และ $I'_{ab}$ ได้ดังนี้

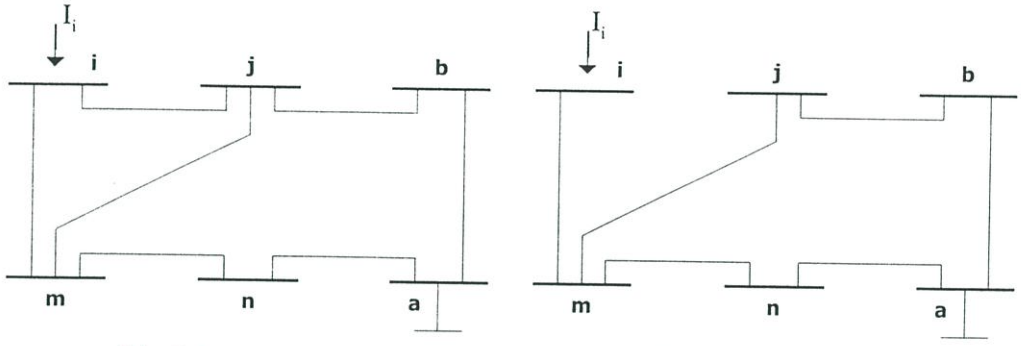
- ถ้า $I'_{ab} > I_{ab}$ ดังนั้น $|Z'_{ai} - Z'_{bi}| > |Z_{ai} - Z_{bi}|$

แสดงว่าค่า overload ของ line a – b จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อ line i – j remove

- ถ้า $I'_{ab} < I_{ab}$ ดังนั้น $|Z'_{ai} - Z'_{bi}| < |Z_{ai} - Z_{bi}|$

แสดงว่าค่า overload ของ line a – b จะลดลงจากเดิม เมื่อ line i - j remove

โดยสามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนได้ดังรูปที่ 4.9




(a) line i – j in service (b) line i – j open

**รูปที่ 4.9** current inject ที่ bus i ก่อนและหลัง remove line i - j

จากรูปที่ 4.9 กระบวนการคำนวณจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งพบ line ที่เมื่อ switch แล้วสามารถลดค่า overload ใน line a – b ได้ เช่น line m – n เป็นต้น

ทำการคำนวณค่า power flow ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ switch line โดยทำการ derive ได้ดังต่อไปนี้

จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อ inject current ที่ bus i ($I_i$) จะทำให้สร้าง voltage difference ขึ้นมาตามสมการที่ (4.27)

$$I_i = \frac{(E_a - E_b)}{(Z_{ai} - Z_{bi})} \tag{4.27}$$

หลังจาก remove line i – j จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า current flow ใน line a – b โดยดูได้จากสมการที่ (4.28)

$$\Delta I_{ab} = \frac{(\Delta E_{ab})}{Z_{ab}}$$

$$\Delta I_{ab} = \frac{\left[\left(E'_a - E'_b\right) - \left(E_a - E_b\right)\right]}{Z_{ab}} \tag{4.28}$$

โดย $z_{ab}$ = ค่า impedance ของ line a – b

ดังนั้นค่าผลรวมของ current ใน line a – b ($I'_{ab}$) ดูได้จากสมการที่ (4.29)

$$I'_{ab} = I_{ab} + \Delta I_{ab}$$

$$I'_{ab} = \frac{\left\{\left(E_a - E_b\right) + \left[\left(E'_a - E'_b\right) - \left(E_a - E_b\right)\right]\right\}}{Z_{ab}}$$

$$I'_{ab} = \frac{\left(E'_a - E'_b\right)}{Z_{ab}} \tag{4.29}$$

ดังนั้น ค่า new power flow ดูได้จากสมการที่ (4.30)

$$P'_{ab} + jQ'_{ab} = \frac{\left[E_a\left(E'_a - E'_b\right)^*\right]}{Z^*_{ab}} \tag{4.30}$$

แต่จาก

$$E'_a - E'_b \approx I_i\left(Z'_{ai} - Z'_{bi}\right) \tag{4.31}$$

จากสมการที่ (4.31) แทนค่าลงในสมการที่ (4.30) จะได้

$$P'_{ab} + jQ'_{ab} = \frac{E_a I_i^*\left(Z'_{ai} - Z'_{bi}\right)^*}{Z^*_{ab}}$$

$$P'_{ab} + jQ'_{ab} = \frac{\left(E_a\left(E_a - E_b\right)^*\left(Z'_{ai} - Z'_{bi}\right)^*\right)}{\left(Z_{ai} - Z_{bi}\right)^* Z^*_{ab}} \tag{4.32}$$

แต่

$$P_{ab} + jQ_{ab} = \frac{E_a\left(E_a - E_b\right)^*}{Z^*_{ab}} \tag{4.33}$$

ดังนั้น

$$P'_{ab} + jQ'_{ab} = \frac{(P_{ab} + jQ_{ab})(Z'_{ai} - Z'_{bi})^*}{(Z_{ai} - Z_{bi})^*} \quad (4.34)$$

โดย $P'_{ab}$ , $Q'_{ab}$ = ค่า power flow ที่เปลี่ยนแปลงไปใน line a - b หลังจาก remove line i – j

## 4.4 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงนี้จะแตกต่างจากวิธี Z-Matrix แบบเดิม [1] โดยได้ทำการปรับปรุงใหม่ดังต่อไปนี้

### 4.4.1 เพิ่มการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload ที่ line อื่น

วิธี Z-Matrix แบบเดิมนี้หลังจากที่ได้ทำการเลือก switch line ที่เหมาะสมที่สุดแล้วนั้นจริงอยู่สามารถที่จะขจัดหรือบรรเทา overload ที่เกิดขึ้นใน line นั้นๆ ได้จริง แต่ไม่สามารถที่จะรู้ได้ว่า line อื่นๆนอกเหนือจาก line ที่ได้ป้องกันไปแล้วนั้นจะเกิด overload ขึ้นมาใหม่อีกหรือไม่ ดังนั้นวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงนี้จะเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์ผลข้างเคียงของ overload ที่เกิดขึ้นที่ line อื่นๆอีกเพื่อเป็นการเปรียบเทียบยืนยันว่าได้เลือก switch line ที่เหมาะสมที่สุดแล้ว

ดังนั้นสรุปได้ว่าวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงนี้สามารถปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพได้มากกว่าวิธี Z-Matrix แบบเดิม [1] โดยสามารถคำนวณให้ความถูกต้องในการเลือก switch line ที่ดีกว่าเก่า

## 4.5 เทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วยวิธี Z-Matrix

ทำการเลือก switch line โดยพิจารณาจาก

### 4.5.1 วิธี Z-Matrix แบบเดิม [1]

ขั้นตอนที่ 1 กรณีที่ได้เลือก switch line แล้วสามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างสมบูรณ์ มีค่า $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ หลายค่า จะพิจารณาเลือก switch line ที่มีค่า $P''_{ab}$ ต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 กรณีที่ไม่สามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้สมบูรณ์แต่สามารถบรรเทา overload ได้มีค่า $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ หลายค่า จะพิจารณาเลือก switch line ที่สามารถบรรเทา overload ได้มากที่สุด คือเหลือจำนวนของ overload น้อยที่สุด และมีค่าผลรวม $P''_{ab}$ ของ line ที่เกิด overload ต่ำที่สุด

### 4.5.2 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

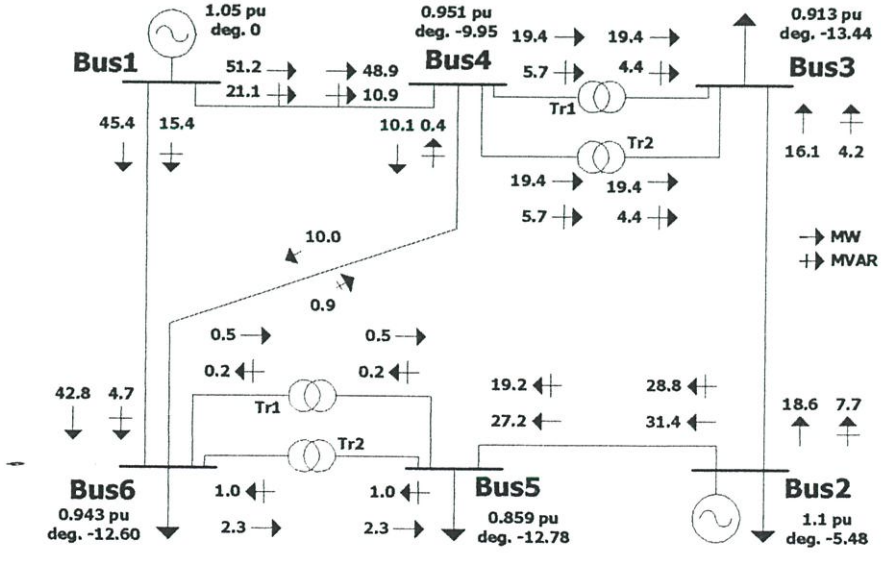
- ถ้าค่า $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ แสดงว่าเมื่อ switch line i - j แล้วค่า overload ของ line a – b จะลดลงจากเดิม หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload นอกเหนือจาก line a – b ว่าทุก ๆ line เมื่อได้ switch line i – j แล้วนั้นจะเกิด overload ขึ้นมาบน line อื่นๆ อีกหรือไม่ ถ้าเกิด overload ขึ้นมาบน line อื่นๆอีก จะไม่พิจารณาเลือก switch line i – j นั้นๆ ที่ถึงแม้ว่าจะลดค่า overload บน line a – b ได้จริง แต่ถ้าไม่เกิด overload ขึ้นมาอีกจะเลือก switch line ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กรณีที่ได้เลือก switch line แล้วสามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างสมบรูณ์ มีค่า $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ หลายค่า จะพิจารณาเลือก switch line ที่มีค่า total power losses ต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 กรณีที่ไม่สามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้สมบรูณ์แต่สามารถบรรเทา overload ได้มีค่า $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ หลายค่า จะพิจารณาเลือก switch line ที่สามารถบรรเทา overload ได้มากที่สุด คือเหลือจำนวนของ overload น้อยที่สุด และมีค่า total power losses ต่ำที่สุด

## 4.6 ตัวอย่างในการคำนวณ [7]

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณดูได้จากจากรูปที่ 4.10




**รูปที่ 4.10** ระบบไฟฟ้ากำลัง 6 bus [7]

จากรูปที่ 4.10 หาค่า $Z_{bus}$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.11

$$[Z_{bus}] = \begin{bmatrix} 0.983668\angle 54.451 & 0.757737\angle 48.015 & 0.8347\angle 49.668 & 0.840206\angle 50.119 & 0.719217\angle 46.356 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.757737\angle 48.015 & 1.309157\angle 56.423 & 0.83017\angle 52.613 & 0.794355\angle 49.971 & 0.874371\angle 53.802 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.8347\angle 49.668 & 0.83017\angle 52.613 & 1.024119\angle 56.023 & 0.92723\angle 52.313 & 0.734746\angle 48.514 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.840206\angle 50.119 & 0.794355\angle 49.971 & 0.92723\angle 52.313 & 0.937091\angle 52.983 & 0.727826\angle 47.306 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.719217\angle 46.356 & 0.874371\angle 53.802 & 0.734746\angle 48.514 & 0.727826\angle 47.306 & 0.945744\angle 56.902 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 \end{bmatrix}$$

**รูปที่ 4.11** ค่า $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 6 bus [7]

ทำการทดสอบ outage transformer (Tr2) ที่ bus 4 – 3 หาค่า $Z'_{bus}$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.12

$$[Z'_{bus}] = \begin{bmatrix} 0.983969\angle 54.476 & 0.75611\angle 47.814 & 0.829927\angle 49.320 & 0.804658\angle 50.171 & 0.718976\angle 46.277 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.75611\angle 47.814 & 1.321909\angle 57.023 & 0.862216\angle 54.443 & 0.791459\angle 49.654 & 0.876849\angle 54.169 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.829927\angle 49.320 & 0.862216\angle 54.443 & 1.108082\angle 58.252 & 0.918755\angle 51.795 & 0.7414\angle 49.442 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.804658\angle 50.171 & 0.791459\angle 49.654 & 0.918755\angle 51.795 & 0.937918\angle 53.060 & 0.727401\angle 47.173 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.718976\angle 46.277 & 0.876849\angle 54.169 & 0.7414\angle 49.442 & 0.727401\angle 47.173 & 0.946113\angle 57.021 & 0.70707\angle 45.0 \\ 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 & 0.70707\angle 45.0 \end{bmatrix}$$

**รูปที่ 4.12** ค่า $Z'_{bus}$ เมื่อ outage transformer (Tr2) ที่ bus 4 – 3

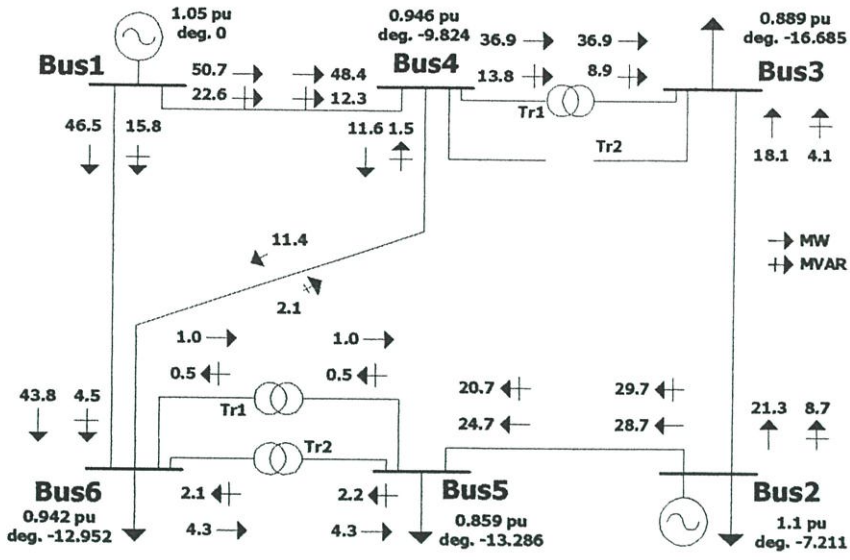
หาค่า power flow ที่เปลี่ยนแปลงไปของ Tr1 (3-4) หลังจาก outage transformer (Tr2) ที่ bus 4 – 3 ได้ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ (4.34) ทำการ inject current ที่ bus 4 แทนค่าจะได้

$$P'_{34} + jQ'_{34} = \frac{(-19.4 - j4.4)(0.918755\angle 51.795 - 0.937918\angle 53.060)^*}{(0.92723\angle 52.313 - 0.937091\angle 52.983)^*}$$

$$P'_{34} + jQ'_{34} = -36.96 - j8.4$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้นี้เป็นค่าจากการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อทำการ run load flow ($P'_{34} + jQ'_{34} = -36.9 - j8.9$) แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



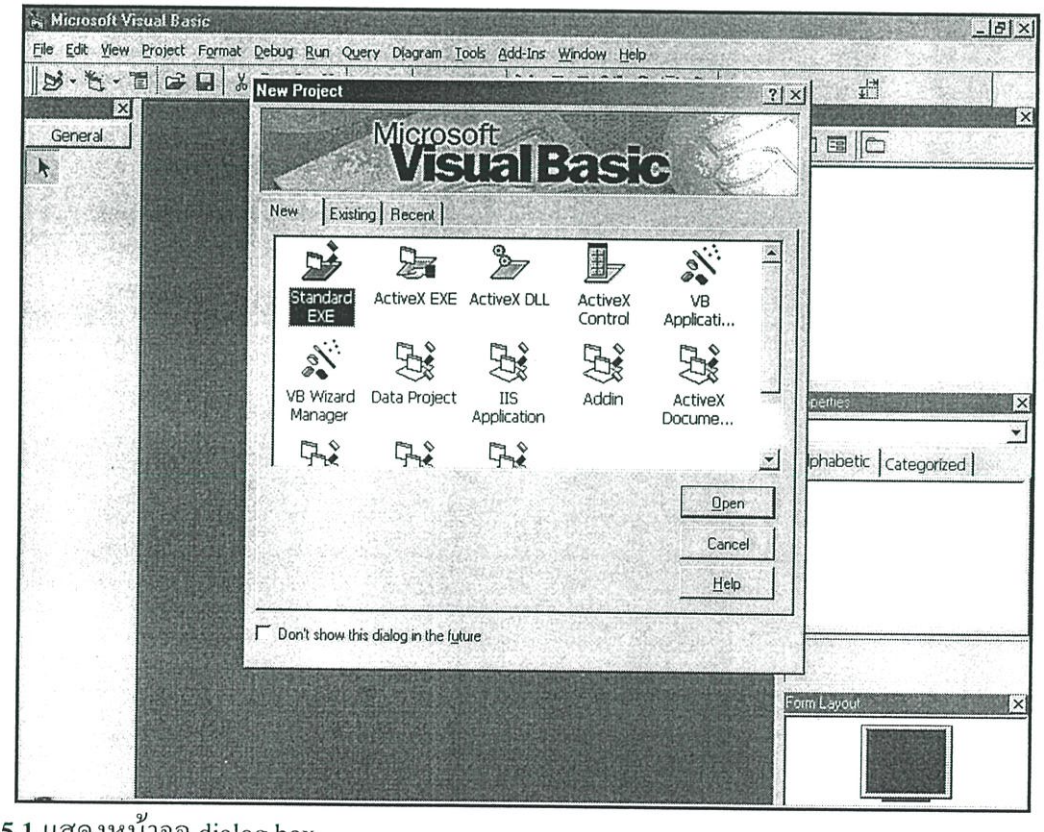

**รูปที่ 4.13** ระบบไฟฟ้ากำลัง 6 bus [7] เมื่อ outage transformer (Tr2) ที่ bus 4 – 3

# บทที่ 5
# ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

## 5.1 ศึกษาขั้นตอนการเขียนโปรแกรม Visual Basic 6.0

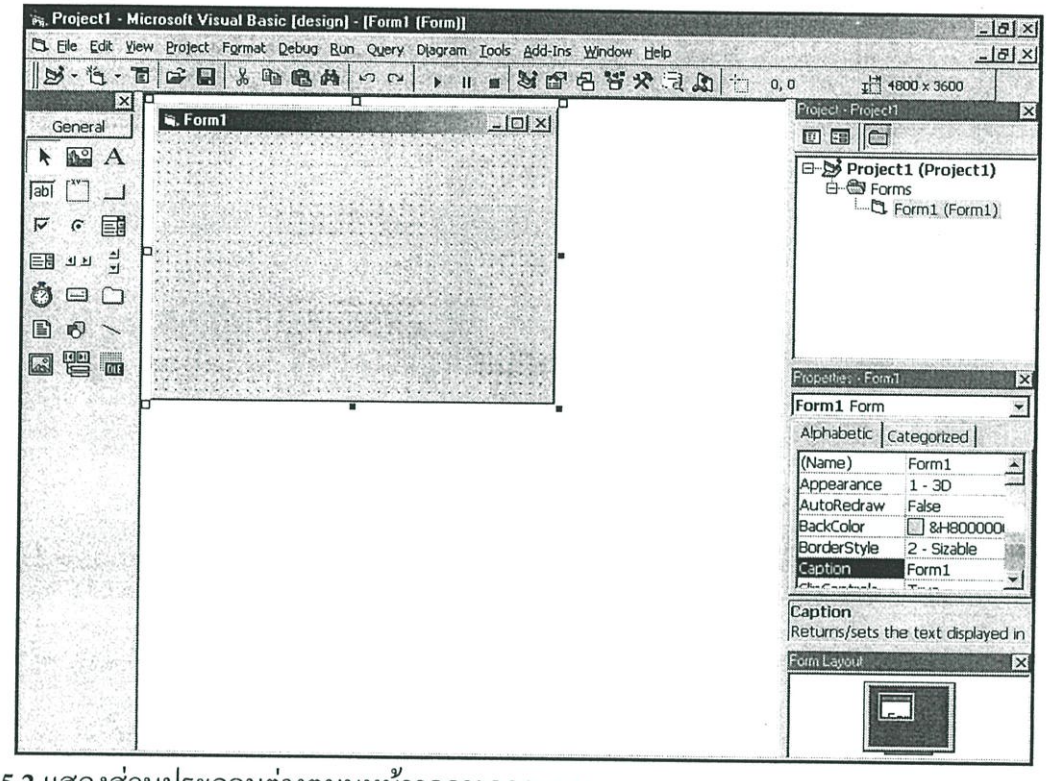
โปรแกรม visual basic 6.0 เป็นการออกแบบการเขียนโปรแกรมที่ run บน window ซึ่งการออกแบบนั้นจะใช้การกำหนดตำแหน่งของ object ลงบนหน้าจอ เพื่อติดต่อกับผู้ใช้โดยตรง object เหล่านี้จะเปลี่ยนไปตามเหตุการณ์ (even) ต่างๆเช่น การคลิกเม้าส์ หรือรับข้อมูลจากคีย์บอด ดังนั้นโปรแกรม visual basic 6.0 จึงสามารถใช้ในการออกแบบเขียนโปรแกรม เพื่อความสะดวกสบายต่อผู้ใช้โปรแกรม

5.1.1 เมื่อเริ่มเปิดโปรแกรม visual basic 6.0 แล้วก็จะแสดง dialog box ที่ใช้สำหรับพัฒนาหรือเรียกใช้ project ต่างๆที่จะทำการออกแบบโปรแกรม




**รูปที่ 5.1** แสดงหน้าจอ dialog box

5.1.2 เลือกรูปแบบ project การใช้งาน และคลิกที่ปุ่ม open ก็จะแสดงหน้าจอ เพื่อเข้าสู่หน้าจอของโปรแกรม visual basic 6.0 ในส่วนของ "Standard EXE" แสดงได้ดังรูปที่ 5.2




**รูปที่ 5.2** แสดงส่วนประกอบต่างๆบนหน้าจอการออกแบบ

จากรูปที่ 5.2 ส่วนประกอบและอุปกรณ์ต่างๆของการออกแบบโปรแกรมมีดังนี้

- toolbox ประกอบด้วย icon ต่างๆ โดยจะใช้กำหนดการ control ลงบน form
- project explorer window สำหรับเรียก form และ module ของ project ต่างๆขึ้นมาแก้ไข
- property window กำหนดคุณสมบัติให้กับ form และ object ต่างๆที่อยู่บน form
- form layout window สำหรับเลือกตำแหน่งของ form

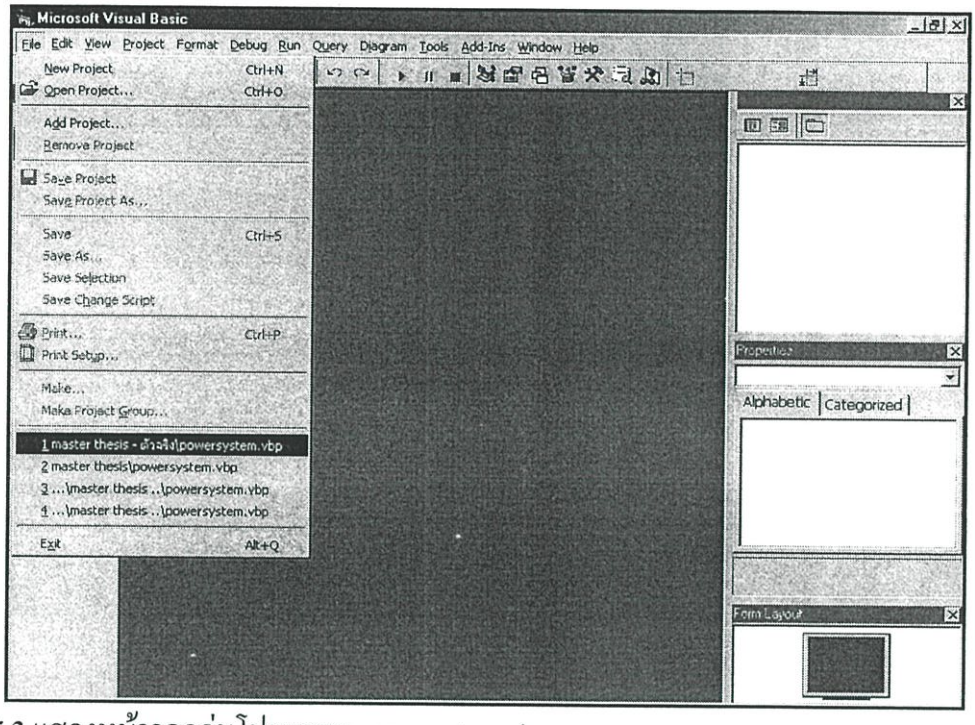
## 5.2 วิธีใช้งานซอฟต์แวร์ของโปรแกรม

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวิธีแซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ โดยใช้โปรแกรม visual basic 6.0 เป็นเครื่องมือในการเขียนโปรแกรม ซึ่งมีรายละเอียดของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ดังต่อไปนี้

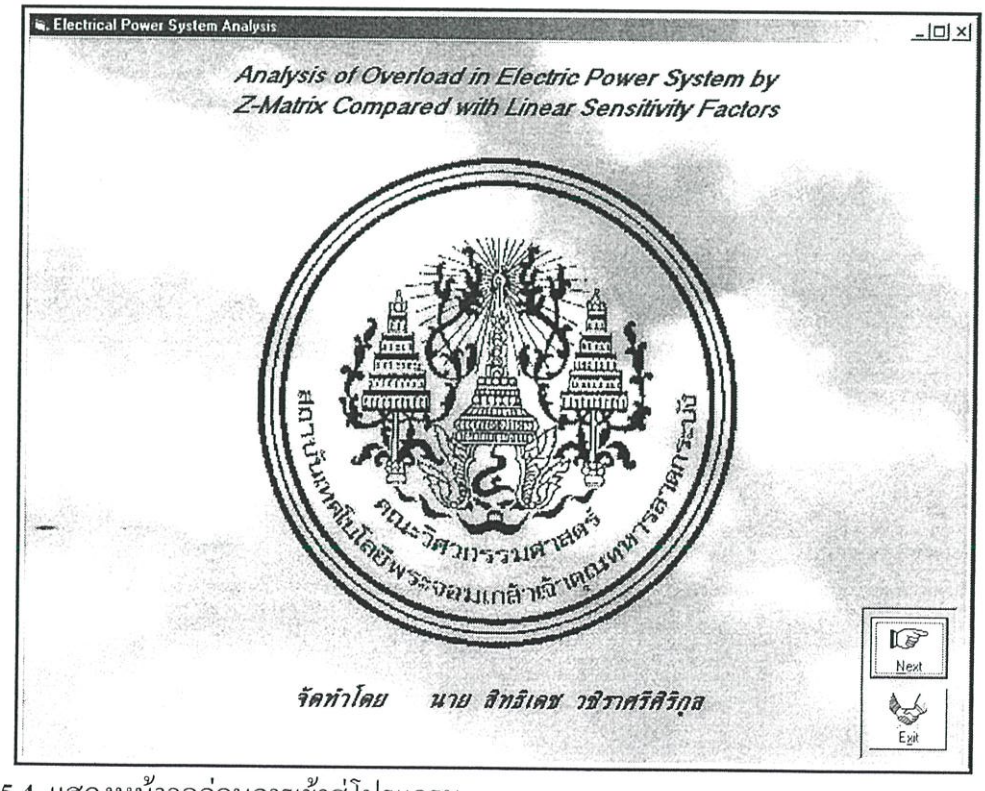
- ขนาด CPU AMD-K6(tm)- III / 500 MHz
- ขนาดหน่วยความจำหลัก SDRAM 256 MB

การเริ่มการทำงานของโปรแกรมสามารถทำได้โดยการใช้เมาส์ดับเบิ้ลคลิก (คลิกสองครั้งติดต่อกัน) ที่ไอคอนชื่อ "powersystem.vbp" ที่อยู่บนเมนูหลักของโปรแกรม visual basic 6.0

แสดงได้ดังรูปที่ 5.3 เมื่อ powersystem.vbp เริ่มทำงานจะปรากฏภาพบนหน้าจอรูปที่ 5.4 ซึ่งผู้ใช้สามารถที่จะเริ่มการใช้งานโดยการคลิกที่คำสั่ง "Next" ในหน้าจอหลักตามต้องการ ส่วนการจบการทำงานก็จะทำการคลิกที่คำสั่ง "Exit" ในหน้าจอหลัก

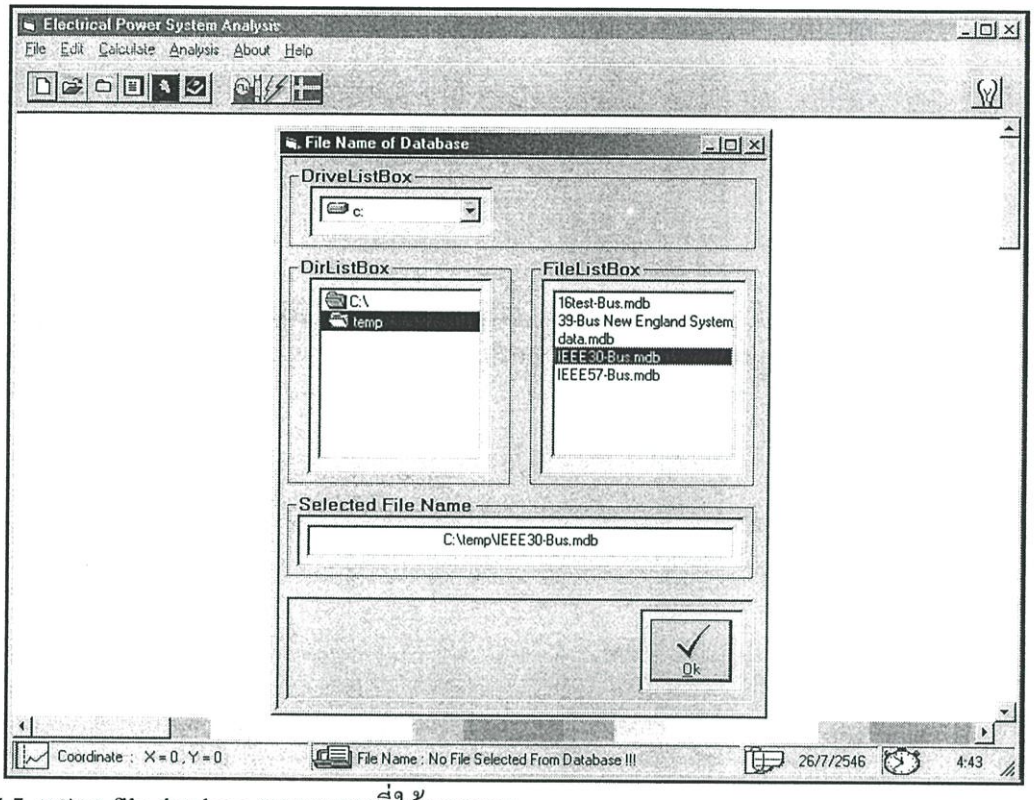



**รูปที่ 5.3** แสดงหน้าจอกลุ่มโปรแกรม powersystem.vbp




**รูปที่ 5.4** แสดงหน้าจอก่อนการเข้าสู่โปรแกรม

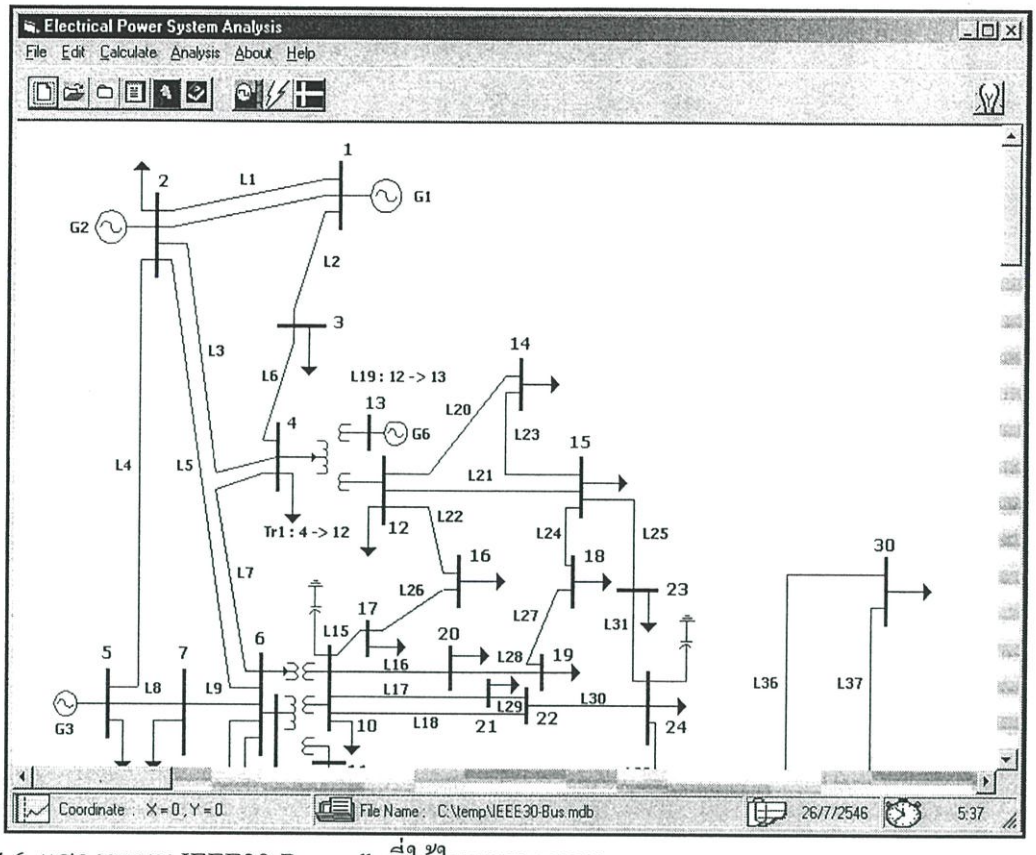
ส่วนของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณนั้นจะเป็นข้อมูลที่ถูกจัดเก็บในรูปไฟล์ฐานข้อมูล (file database) ของโปรแกรม microsoft access ซึ่งโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0 นี้สามารถที่จะเชื่อมโยงต่อกับโปรแกรม microsoft access ได้ แสดงได้ดังรูปที่ 5.5



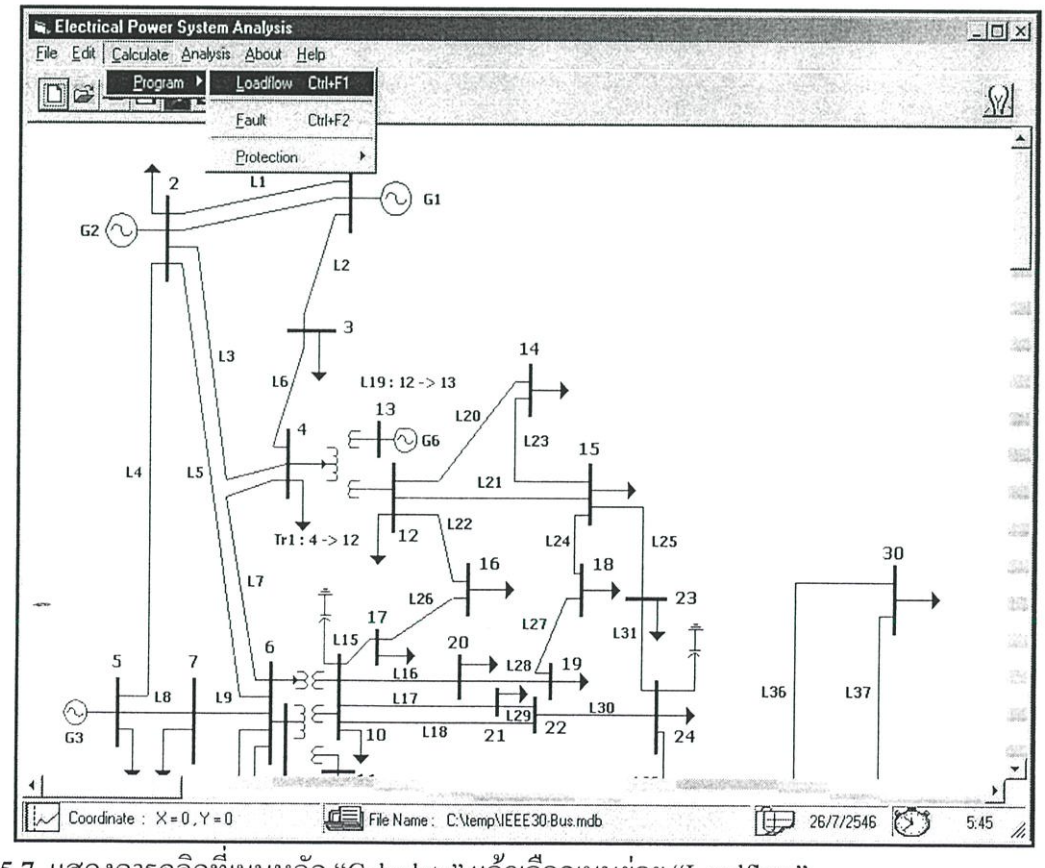

**รูปที่ 5.5** แสดง file database ของระบบที่ใช้ทดสอบ

จากรูปที่ 5.5 หลังจากเลือกระบบที่ใช้ในการทดสอบซึ่งถูกจัดเก็บในรูปไฟล์ฐานข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว (สมมุติเลือก IEEE30-Bus.mdb) แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ก็ทำการคำนวณโดยคลิกที่เมนูหลัก "Calculate" แล้วเลือกเมนูย่อย "Loadflow" แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 หลังจากคลิกที่ "Loadflow" แล้วโปรแกรมจะแสดงข้อมูลที่ถูกจัดเก็บในรูปไฟล์ฐานข้อมูลออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้

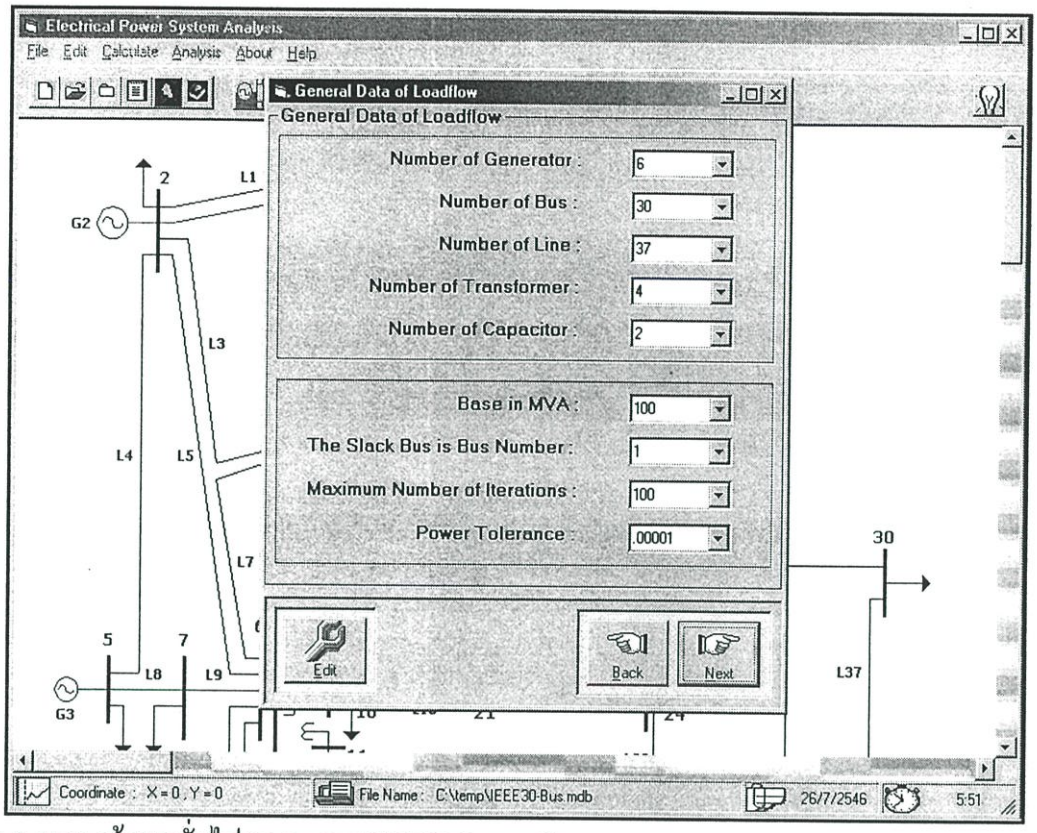
- ข้อมูลทั่วไปของระบบที่ใช้ทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.8
- ข้อมูล bus แสดงได้ดังรูปที่ 5.9
- ข้อมูล transmission line แสดงได้ดังรูปที่ 5.10
- ข้อมูล transformer แสดงได้ดังรูปที่ 5.11



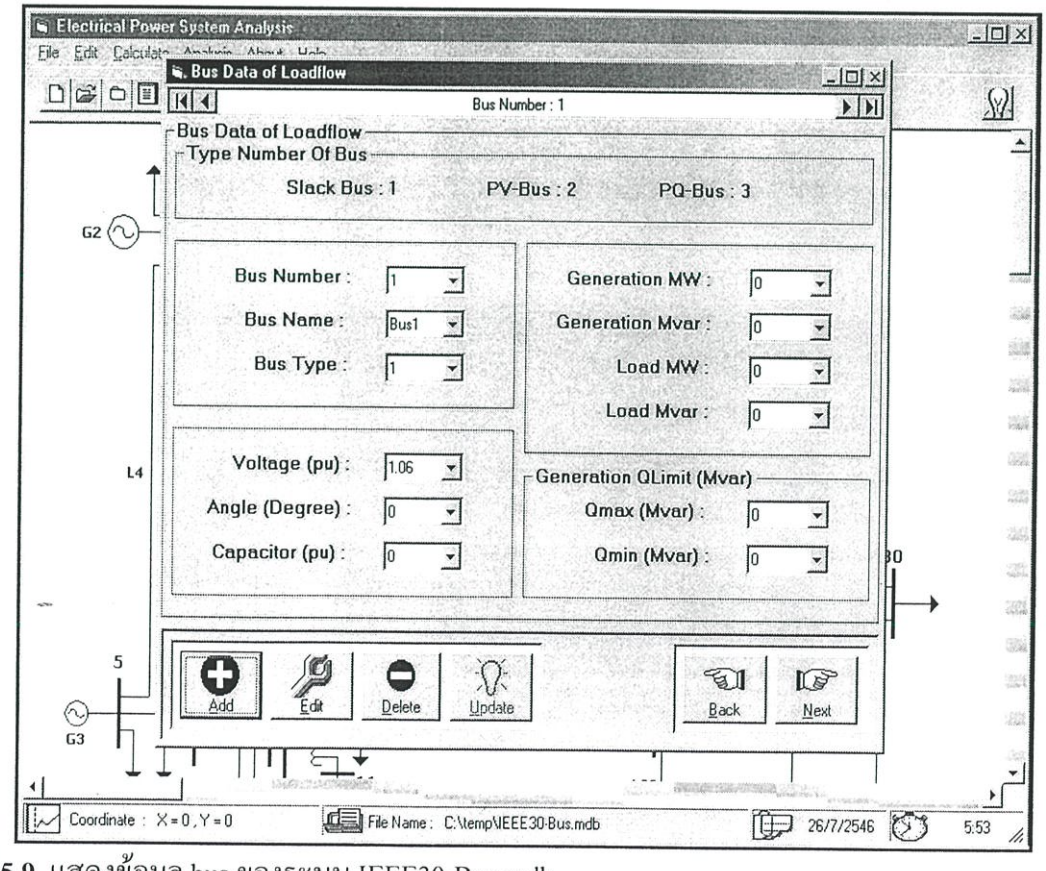

**รูปที่ 5.6** แสดงระบบ IEEE30-Bus.mdb ที่ใช้ในการทดสอบ



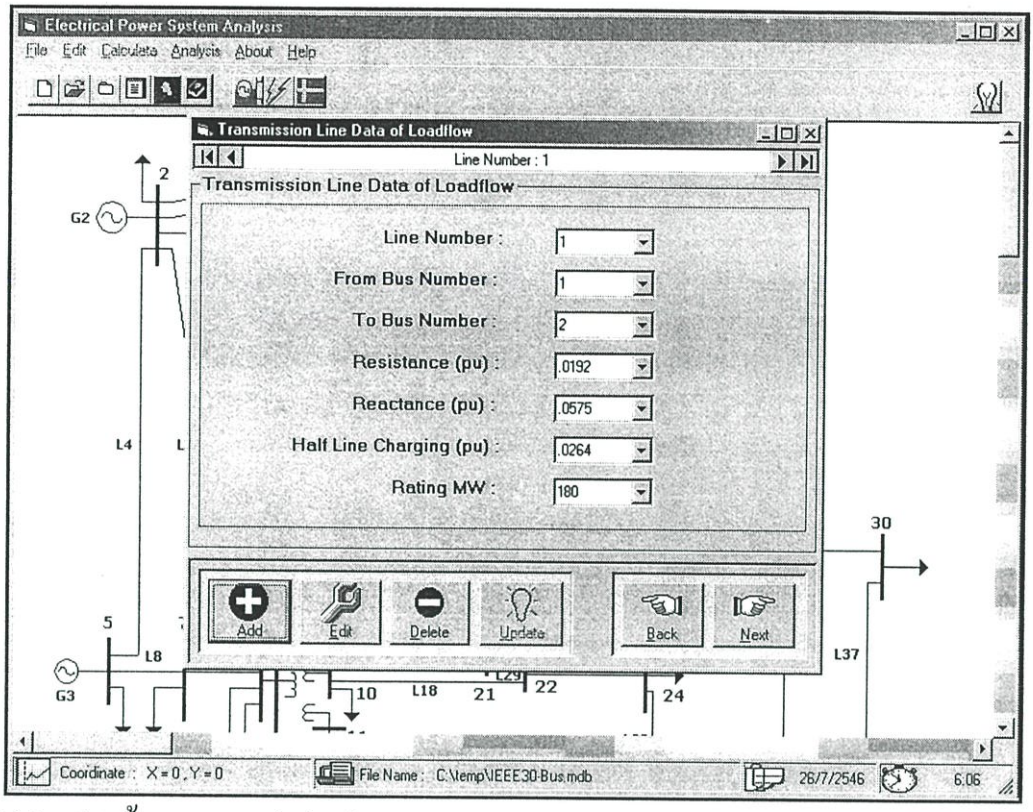

**รูปที่ 5.7** แสดงการคลิกที่เมนูหลัก "Calculate" แล้วเลือกเมนูย่อย "Loadflow"



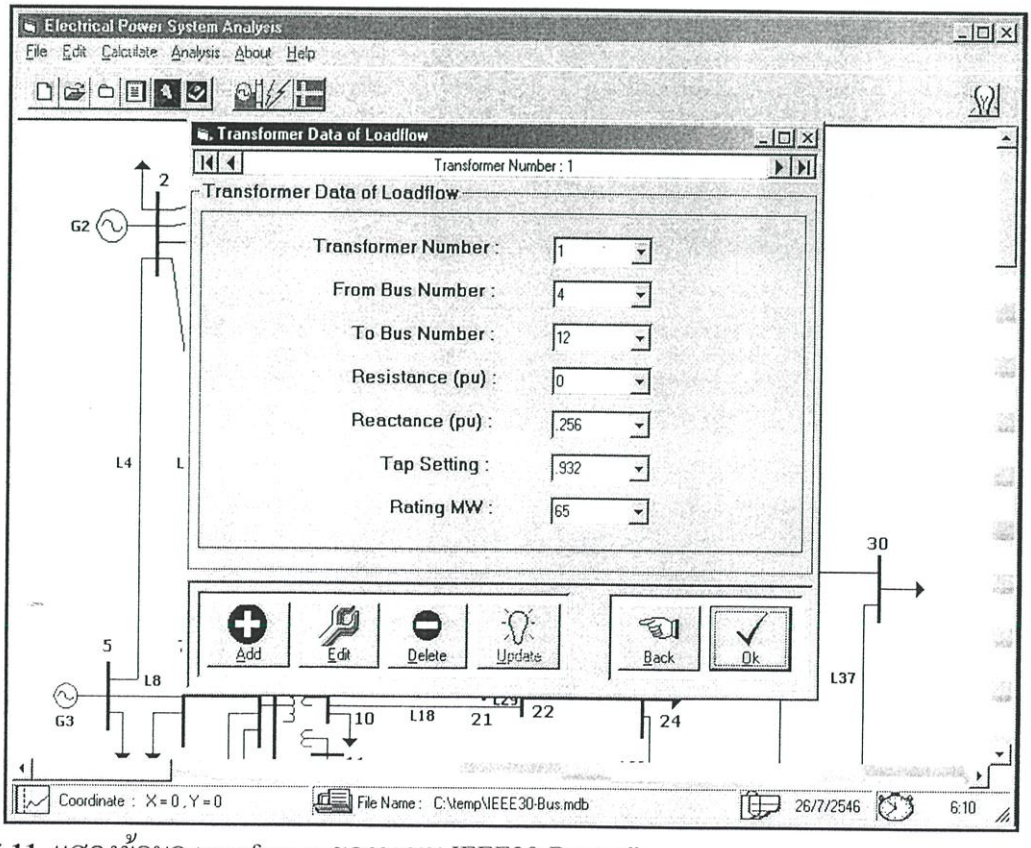

**รูปที่ 5.8** แสดงข้อมูลทั่วไปของระบบ IEEE30-Bus.mdb




**รูปที่ 5.9** แสดงข้อมูล bus ของระบบ IEEE30-Bus.mdb

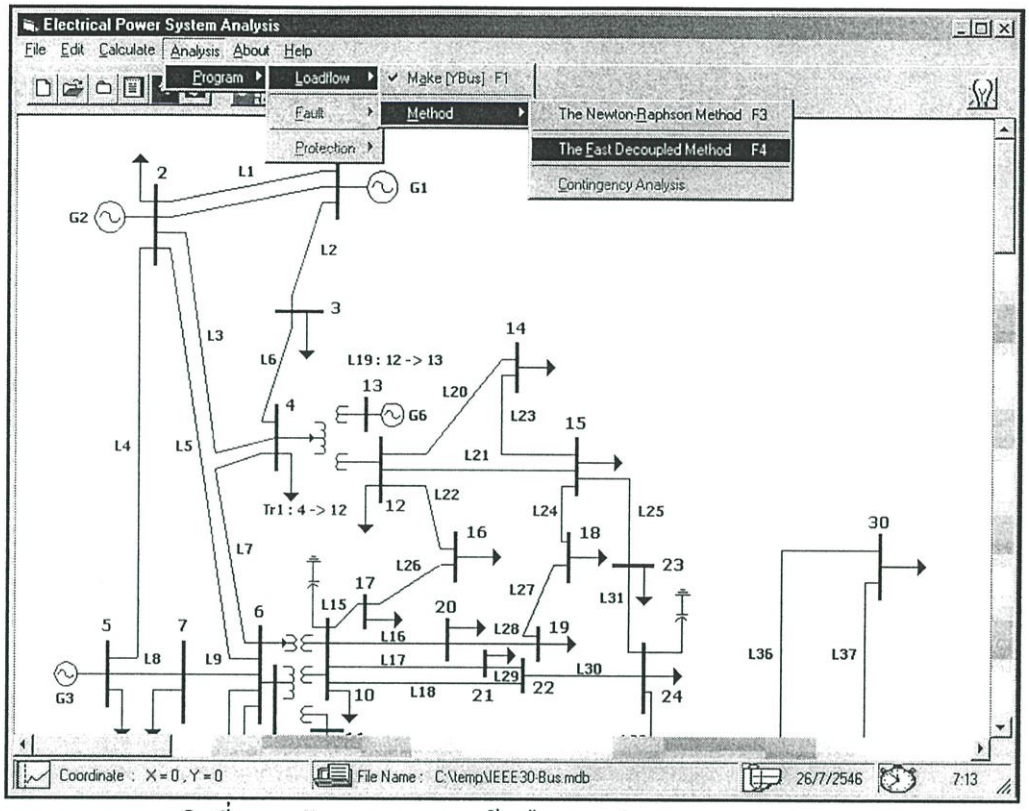



**รูปที่ 5.10** แสดงข้อมูล transmission line ของระบบ IEEE30-Bus.mdb




**รูปที่ 5.11** แสดงข้อมูล transformer ของระบบ IEEE30-Bus.mdb

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล ทำการคำนวณโดยคลิกที่เมนูหลัก "Analysis" แล้วเลือกเมนูย่อย "The Fast Decoupled Method" แสดงได้ดังรูปที่ 5.12

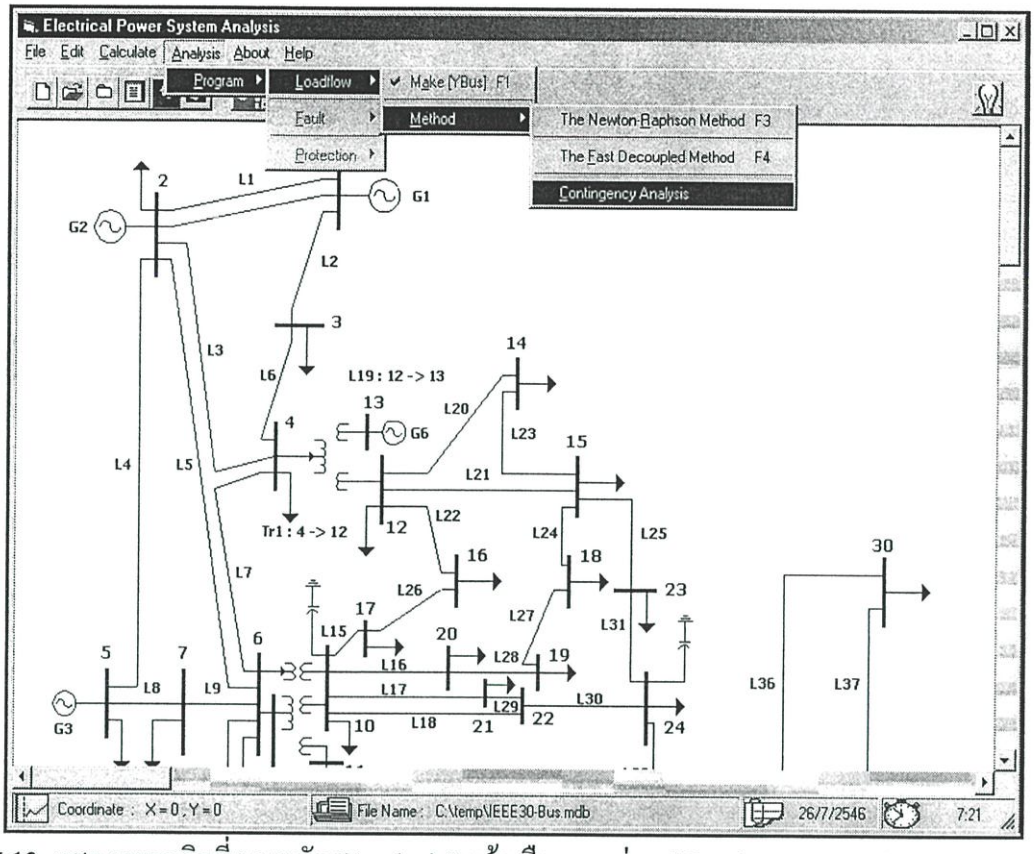



**รูปที่ 5.12** แสดงการคลิกที่เมนูหลัก "Analysis" แล้วเลือกเมนูย่อย "The Fast Decoupled Method"

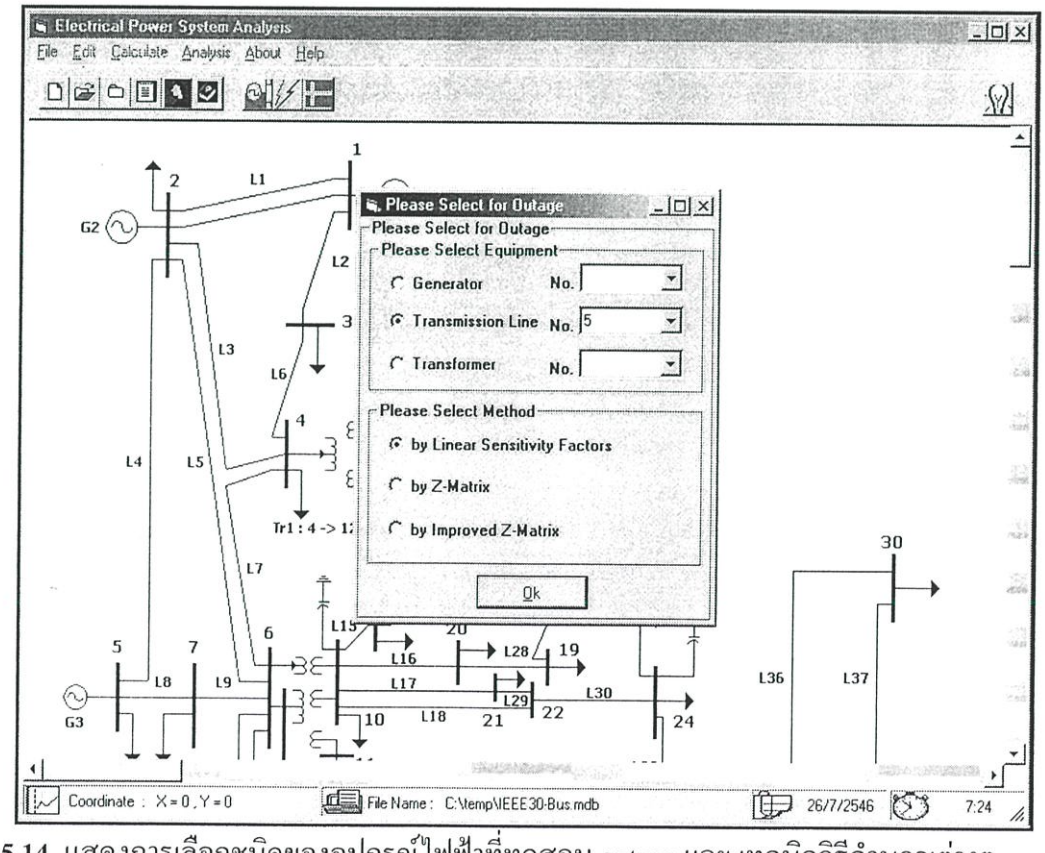
หลังจากคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ลเสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะทำการคำนวณ contingency analysis ด้วยการคลิกที่เมนูหลัก "Analysis" แล้วเลือกเมนูย่อย "Contingency Analysis" แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 หลังจากนี้ก็จะทำการคำนวณหาค่า X Matrix , the generation shift factors ($a_{ij}$) , the line outage distribution factors ($d_{l,k}$) แล้วจึงค่อยทำการเลือกชนิดของอุปกรณ์ ไฟฟ้ากำลังที่ต้องการทดสอบ Outage และเทคนิควิธีการคำนวณต่างๆมีดังต่อไปนี้

- วิธี Linear Sensitivity Factors
- วิธี Z-Matrix
- วิธี Improved Z-Matrix

ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.14

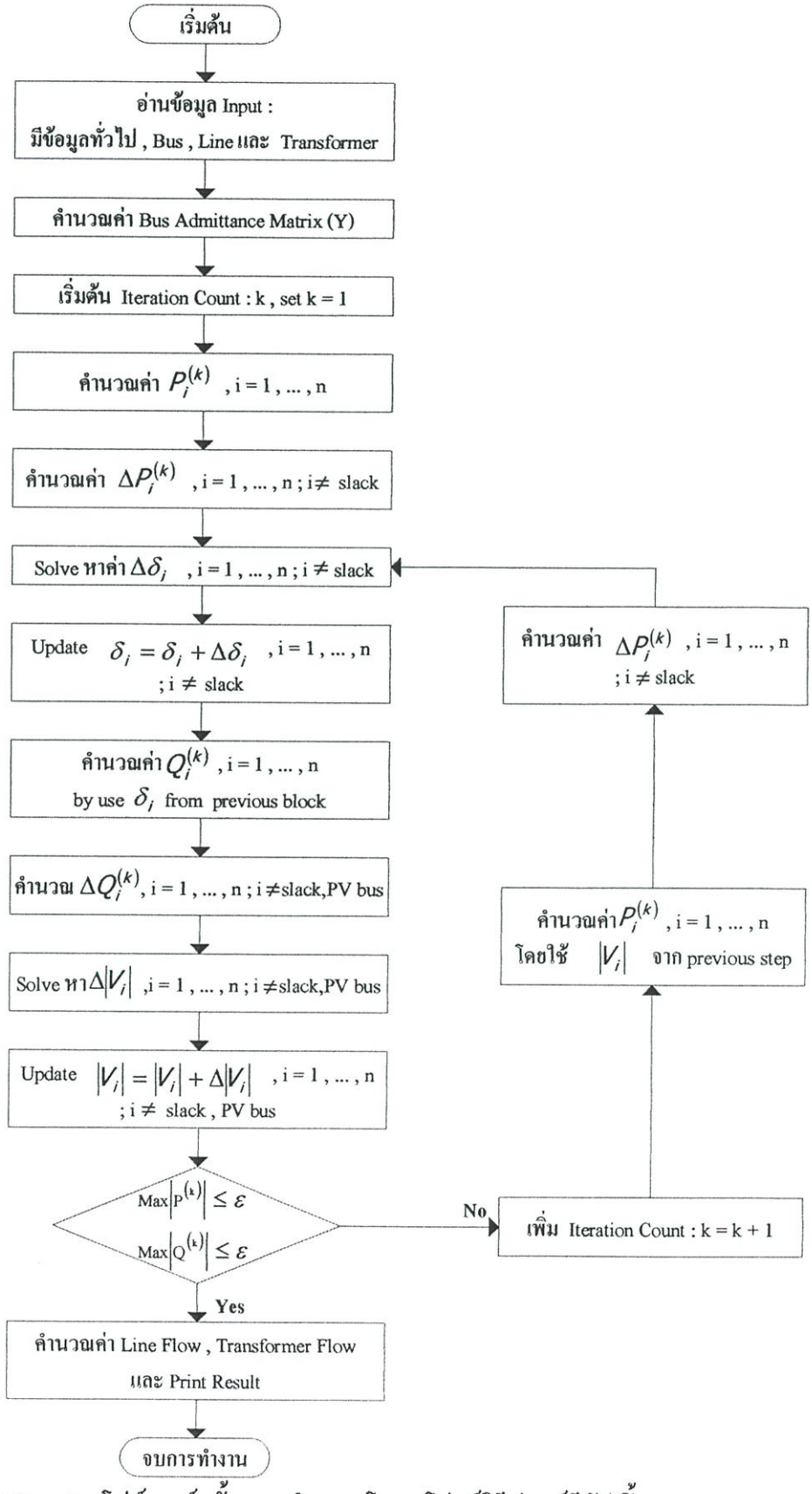



**รูปที่ 5.13** แสดงการคลิกที่เมนูหลัก "Analysis" แล้วเลือกเมนูย่อย "Contingency Analysis"




**รูปที่ 5.14** แสดงการเลือกชนิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทดสอบ outage และ เทคนิควิธีคำนวณต่างๆ

## 5.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมโหลดโฟลว์วิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล



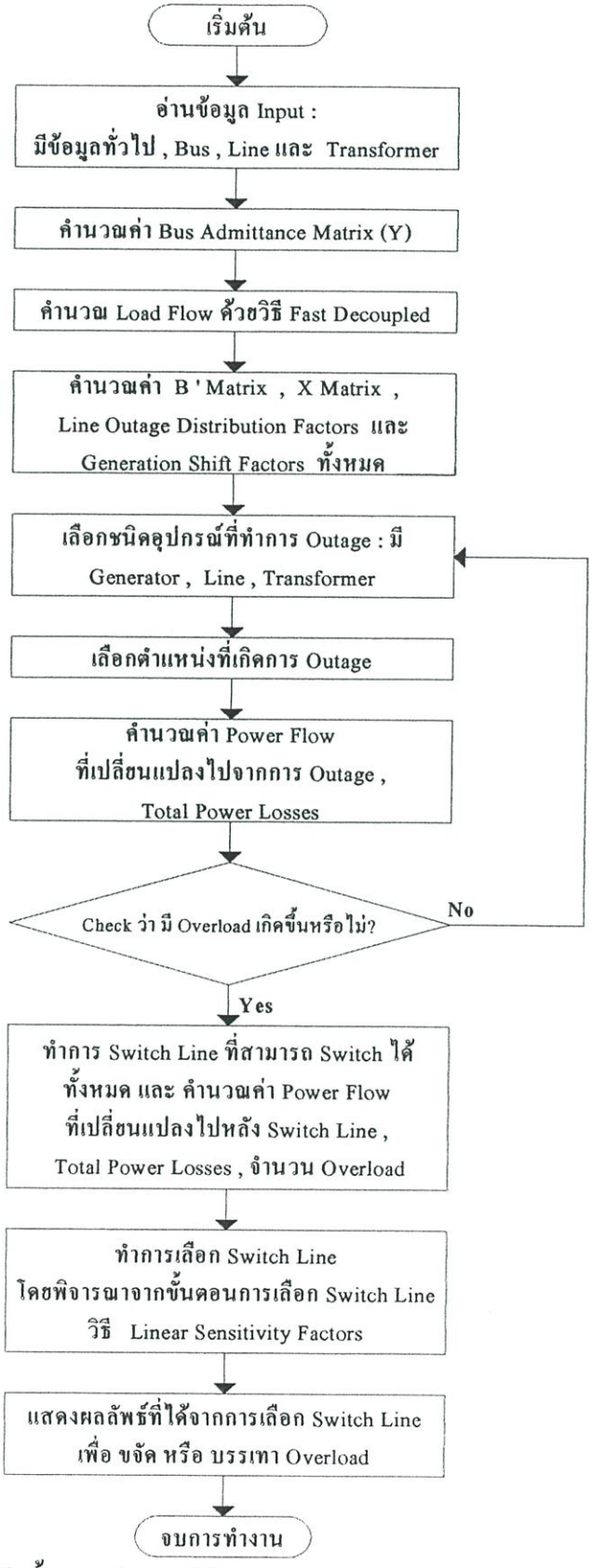

**รูปที่ 5.15** แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนคำนวณโหลดโฟลว์วิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล

## 5.4 ขั้นตอนการเลือก Outage line และ Generator

ในทางปฏิบัติการเลือก outage line และ generator ที่ถูกต้องนั้น จะต้องศึกษาทางด้าน stability ให้เข้าใจเสียก่อน จึงจะค่อยทำการตัดสินใจเลือก outage line และ generator แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ทำการศึกษาในส่วนของ stability

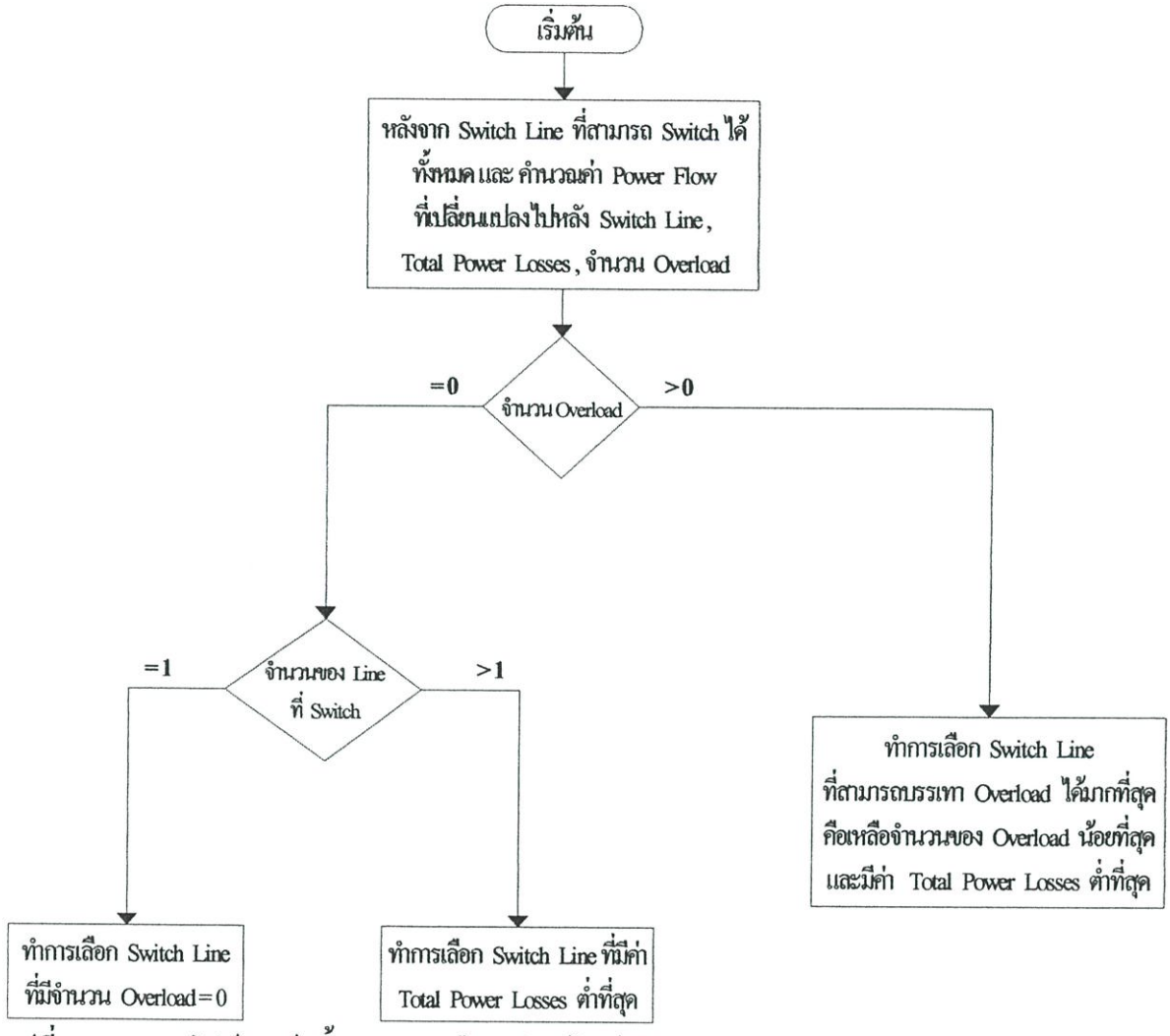
ดังนั้นขั้นตอนการเลือก outage line และ generator ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงเป็นการศึกษาโดยการสุ่มสมมุติเลือก outage line และ generator เพื่อทำการศึกษาเป็นกรณีๆไป เช่น ทำการทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus โดยการสมมุติเลือกทดสอบ outage line no. 5 (2 -> 6) หรือ สมมุติเลือกทดสอบ outage generator ที่ bus 2 เป็นต้น

## 5.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธี Linear Sensitivity Factors [2]



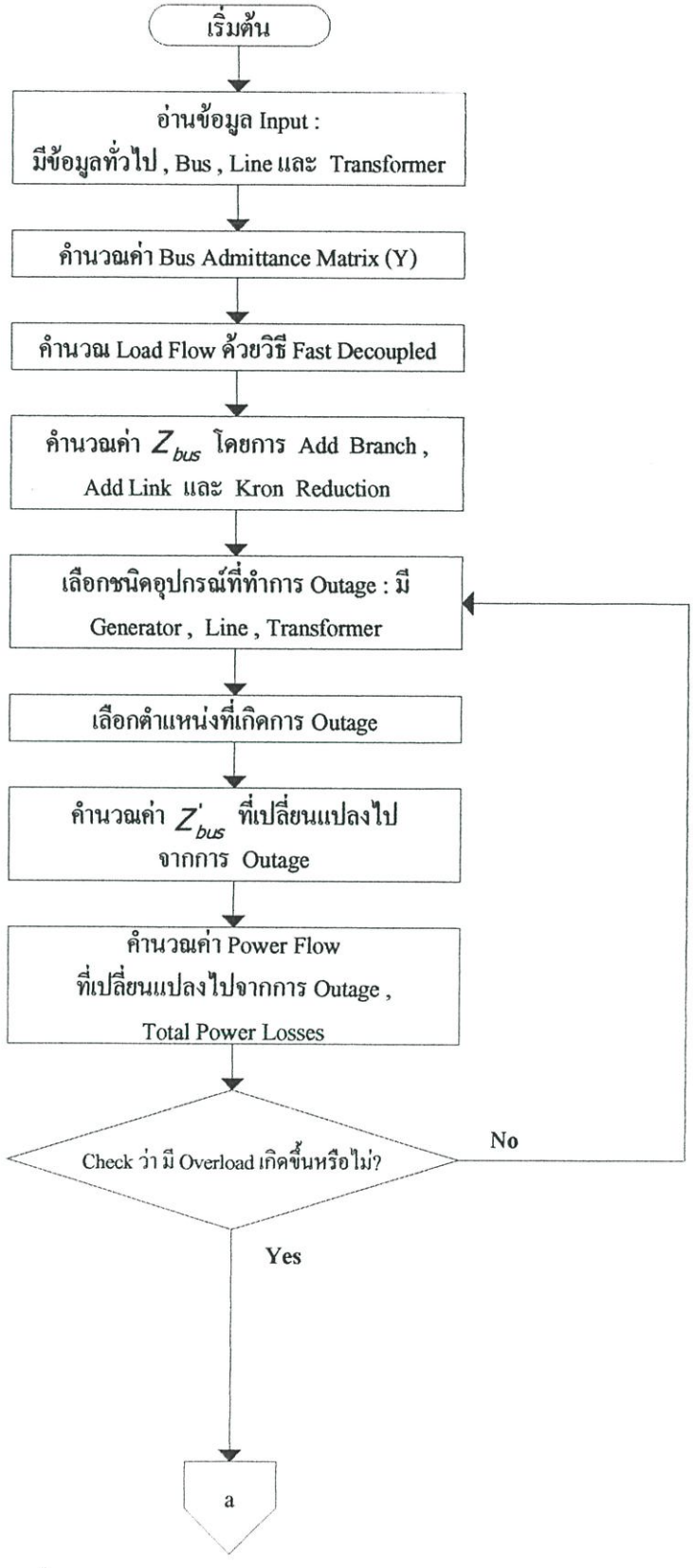

**รูปที่ 5.16** แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนคำนวณวิธี Linear Sensitivity Factors [2]

## 5.6 ขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Linear Sensitivity Factors [2]

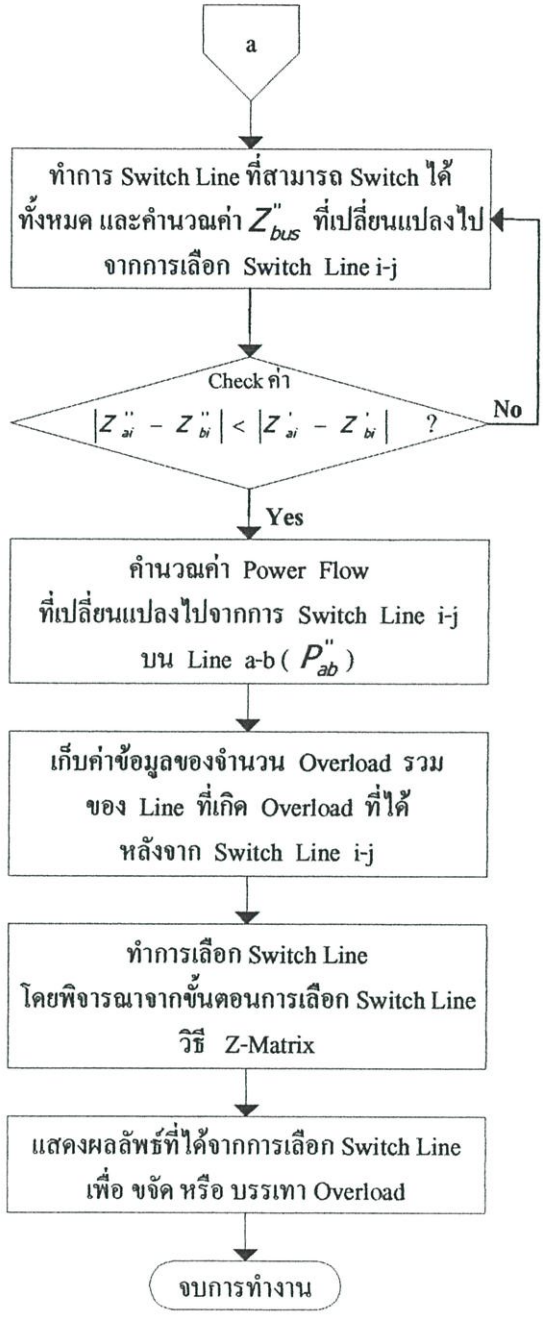



**รูปที่ 5.17** แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Linear Sensitivity Factors [2]

## 5.7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธี Z-Matrix แบบเดิม [1]

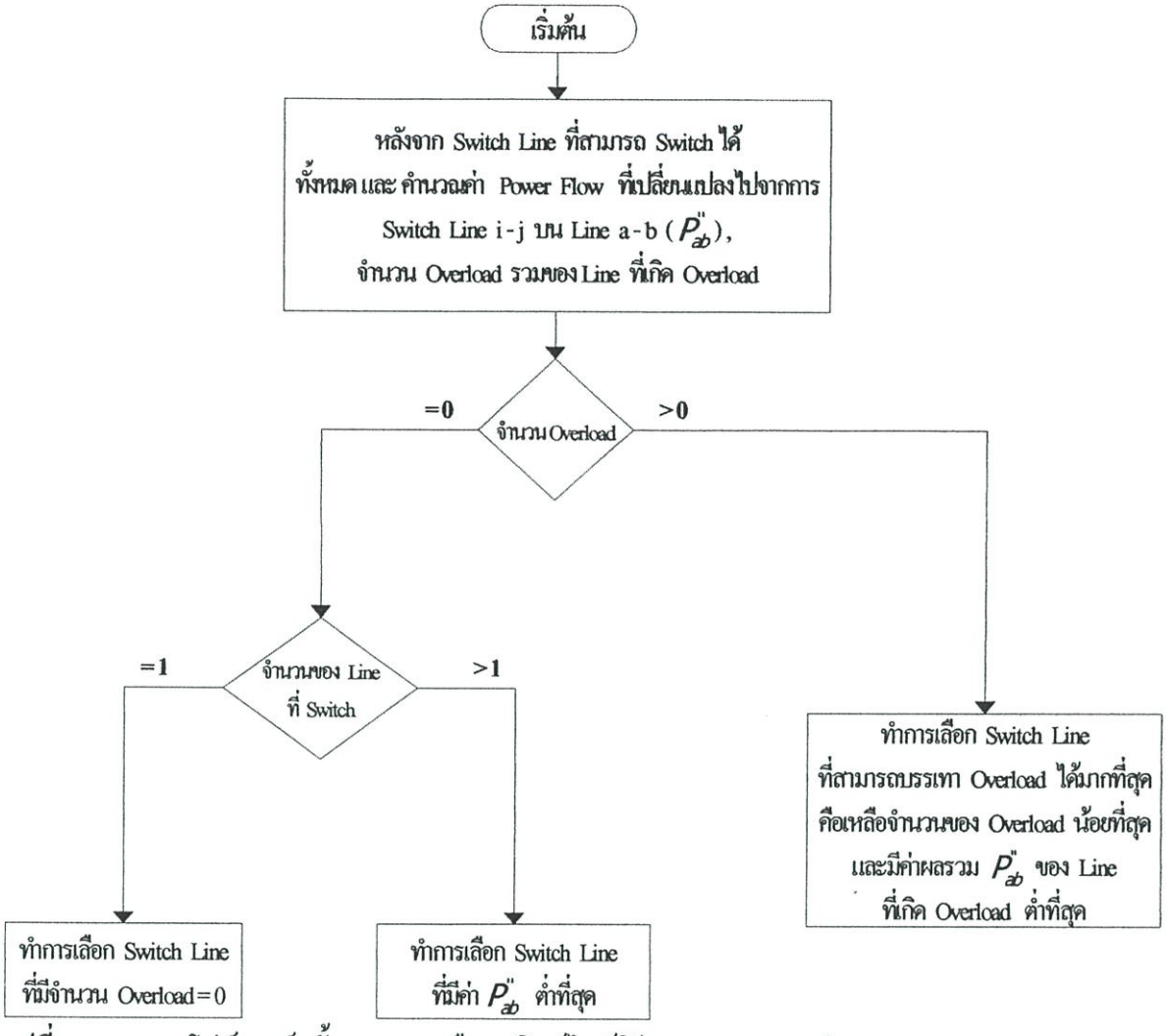



**รูปที่ 5.18** แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนคำนวณวิธี Z-Matrix แบบเดิม [1]


a
ทำการ Switch Line ที่สามารถ Switch ได้
ทั้งหมด และคำนวณค่า $Z''_{bus}$ ที่เปลี่ยนแปลงไป
จากการเลือก Switch Line i-j
Check ค่า
$|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ ?
No
Yes
คำนวณค่า Power Flow
ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ Switch Line i-j
บน Line a-b ( $P''_{ab}$ )
เก็บค่าข้อมูลของจำนวน Overload รวม
ของ Line ที่เกิด Overload ที่ได้
หลังจาก Switch Line i-j
ทำการเลือก Switch Line
โดยพิจารณาจากขั้นตอนการเลือก Switch Line
วิธี Z-Matrix
แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการเลือก Switch Line
เพื่อ ขจัด หรือ บรรเทา Overload
จบการทำงาน

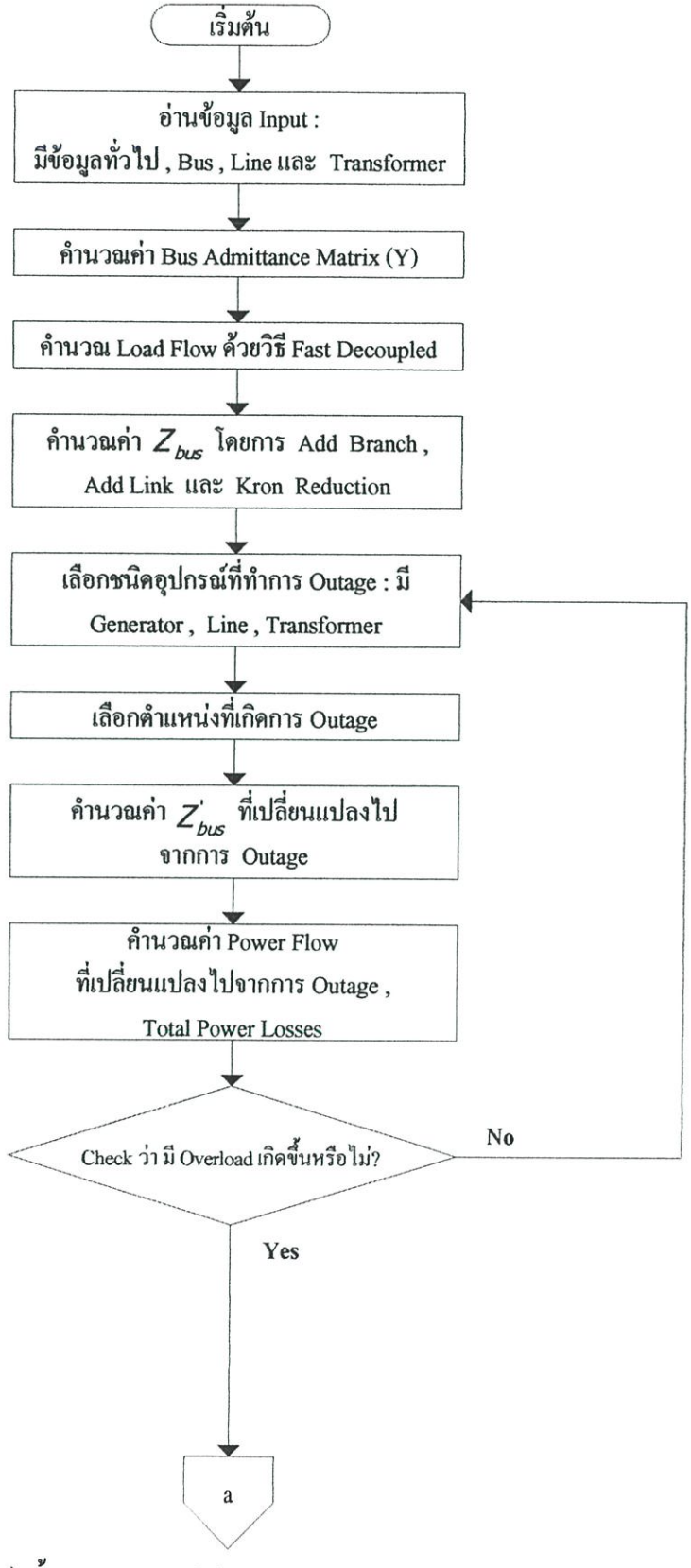
**รูปที่ 5.18** (ต่อ)

## 5.8 ขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Z-Matrix แบบเดิม [1]

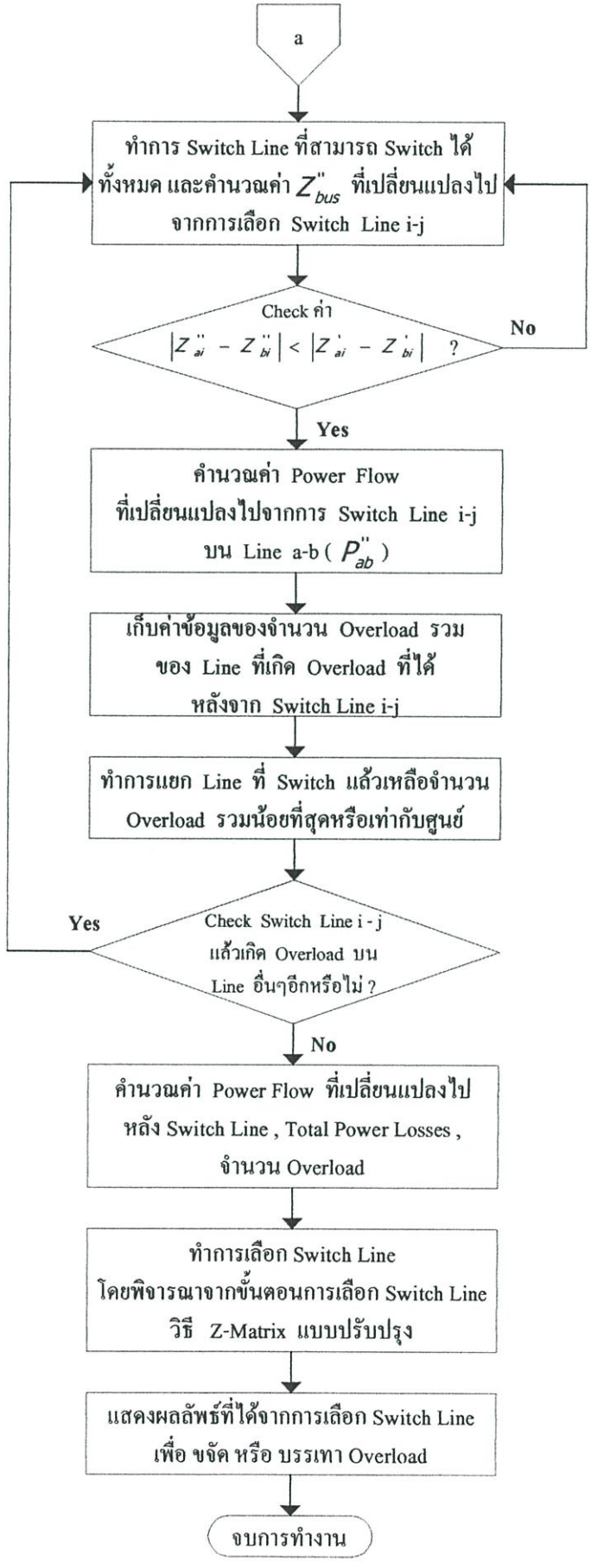



**รูปที่ 5.19** แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Z-Matrix แบบเดิม [1]

## 5.9 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

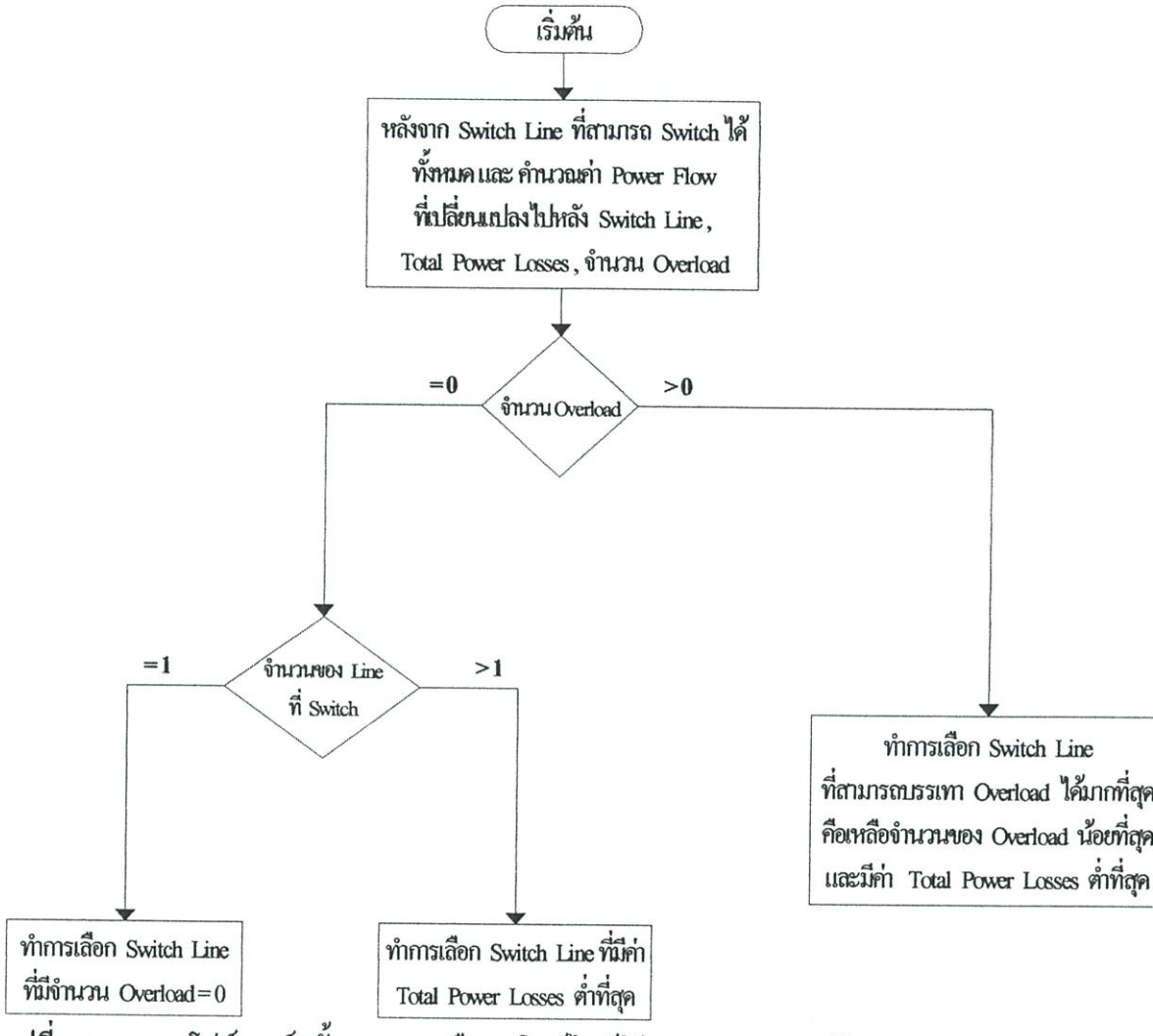



**รูปที่ 5.20** แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนคำนวณวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง


a
ทำการ Switch Line ที่สามารถ Switch ได้ทั้งหมด และคำนวณค่า $Z''_{bus}$ ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเลือก Switch Line i-j
Check ค่า $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ ?
No
Yes
คำนวณค่า Power Flow ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ Switch Line i-j บน Line a-b ( $P''_{ab}$ )
เก็บค่าข้อมูลของจำนวน Overload รวมของ Line ที่เกิด Overload ที่ได้หลังจาก Switch Line i-j
ทำการแยก Line ที่ Switch แล้วเหลือจำนวน Overload รวมน้อยที่สุดหรือเท่ากับศูนย์
Yes
Check Switch Line i - j แล้วเกิด Overload บน Line อื่นๆอีกหรือไม่ ?
No
คำนวณค่า Power Flow ที่เปลี่ยนแปลงไปหลัง Switch Line , Total Power Losses , จำนวน Overload
ทำการเลือก Switch Line โดยพิจารณาจากขั้นตอนการเลือก Switch Line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง
แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการเลือก Switch Line เพื่อ ขจัด หรือ บรรเทา Overload
จบการทำงาน

**รูปที่ 5.20** (ต่อ)

## 5.10 ขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง




**รูปที่ 5.21** แสดงโฟล์วชาร์ตขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

# บทที่ 6
# ผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

## 6.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงผลการทดสอบวิเคราะห์การทำงานของโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบมี IEEE 30 Bus [3] , 39-Bus New England System [12] และ IEEE 57 Bus [3] โดยจะทำการวิเคราะห์โหลดเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยการทดสอบ outage อุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะพิจารณา 2 กรณี กรณีที่หนึ่งทดสอบ outage line กรณีที่สองทดสอบ outage generator และทำการป้องกันผลของ overload ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์เพื่อที่จะขจัดหรือบรรเทา overload ที่เกิดขึ้นนี้ให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง และทำการทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณกับการ run load flow จริง , ทำการทดสอบประสิทธิภาพการคำนวณของโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ IEEE 57 Bus

## 6.2 ผลการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการทดสอบกับระบบดังนี้

- IEEE 30 Bus
- 39-Bus New England System

โดยจะทำการวิเคราะห์โหลดเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังทั้ง 2 ระบบนี้ด้วยการทดสอบ outage อุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะพิจารณา 2 กรณี กรณีที่หนึ่งทดสอบ outage line กรณีที่สองทดสอบ outage generator

และจะทำการทดสอบประสิทธิภาพการคำนวณของโปรแกรมกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ดังนี้

- IEEE 57 Bus

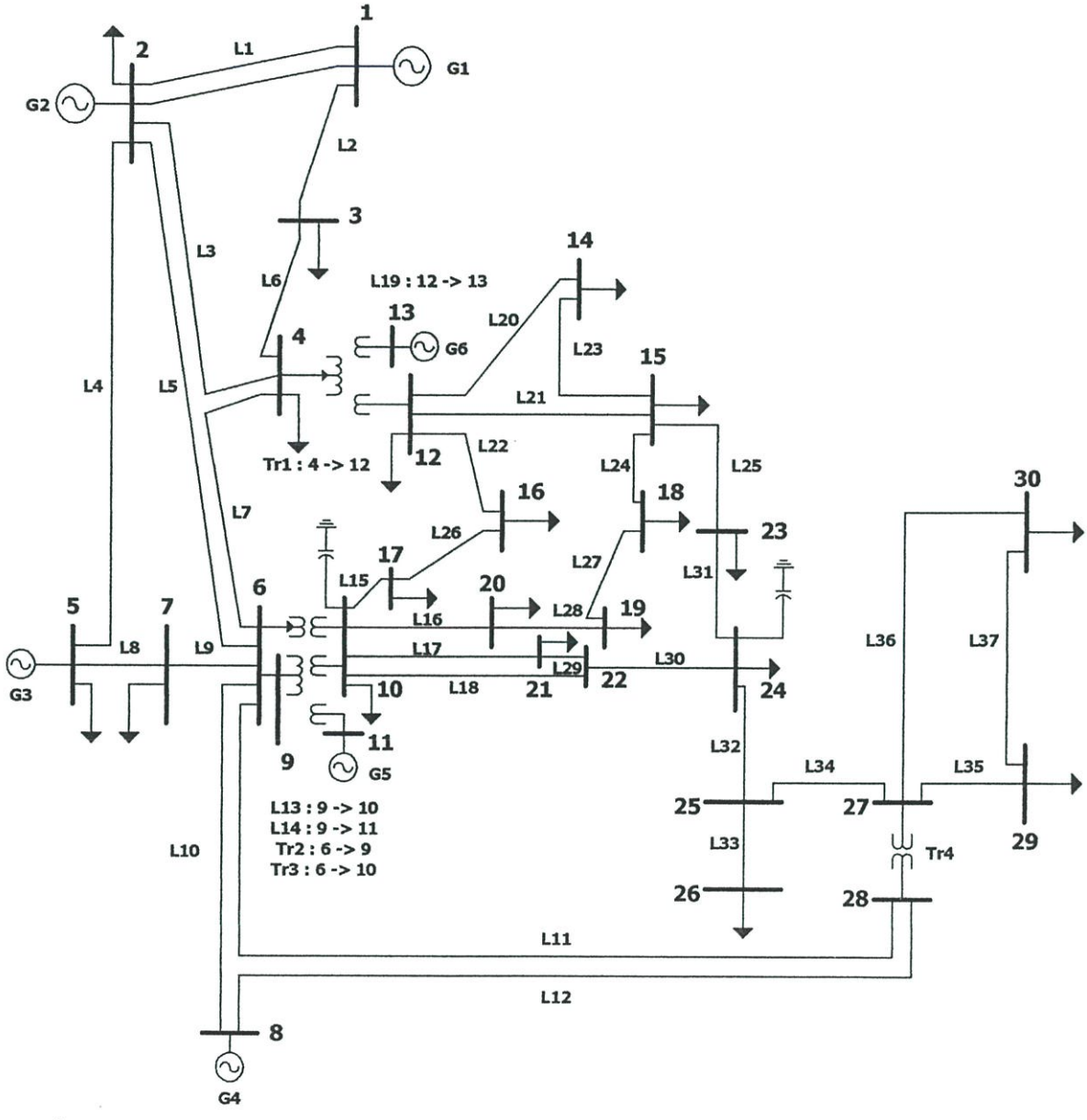
โดยจะทำการวิเคราะห์โหลดเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่นี้ด้วยการทดสอบ outage line

และหลังจากนั้นจะทำการป้องกันผลของ overload ที่เกิดขึ้นนี้ด้วยเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์ดังนี้

- วิธี Linear Sensitivity Factors
- วิธี Z-Matrix แบบเดิม
- วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

### 6.2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus [3]

ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus แสดงได้ดังรูปที่ 6.1




**รูปที่ 6.1** ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus [3]

โดยมีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 6.1** แสดงข้อมูลทั่วไปของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus

| ชนิดของข้อมูลทั่วไป | ข้อมูล |
|---|---|
| จำนวน Generator | 6 |
| จำนวน Bus | 30 |
| จำนวน Line | 37 |
| จำนวน Transformer | 4 |
| จำนวน Capacitor | 2 |
| ฐานของ MVA | 100 |
| บัสอ้างอิง | 1 |
| จำนวนรอบการคำนวณซ้ำสูงสุด | 100 |
| ค่าความผิดพลาดของกำลังไฟฟ้า | 0.00001 |

**ตารางที่ 6.2** แสดงข้อมูล Bus ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus

| Bus No. | Bus Type | Volt (pu) | Angle (degree) | Generation MW | Generation MVAR | Load MW | Load MVAR | $Q_{max}$ MVAR | $Q_{min}$ MVAR | $Q_c$ MVAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Slack | 1.06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | PV | 1.045 | 0 | 40.0 | 0 | 21.7 | 12.7 | 50 | -40 | 0 |
| 3 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 2.4 | 1.2 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 7.6 | 1.6 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | PV | 1.01 | 0 | 0 | 0 | 94.2 | 19.0 | 40 | -40 | 0 |
| 6 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 22.8 | 10.9 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | PV | 1.01 | 0 | 0 | 0 | 30.0 | 30.0 | 40 | -10 | 0 |
| 9 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 5.8 | 2.0 | 0 | 0 | 19.0 |
| 11 | PV | 1.082 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | -6 | 0 |
| 12 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 11.2 | 7.5 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | PV | 1.071 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | -6 | 0 |
| 14 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 6.2 | 1.6 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 8.2 | 2.5 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 3.5 | 1.8 | 0 | 0 | 0 |

**ตารางที่ 6.2** (ต่อ)

| Bus No. | Bus Type | Volt (pu) | Angle (degree) | Generation MW | Generation MVAR | Load MW | Load MVAR | $Q_{max}$ MVAR | $Q_{min}$ MVAR | $Q_c$ MVAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 9.0 | 5.8 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 3.2 | 0.9 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 9.5 | 3.4 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 2.2 | 0.7 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 17.5 | 11.2 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 3.2 | 1.6 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 8.7 | 6.7 | 0 | 0 | 4.3 |
| 25 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 3.5 | 2.3 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 2.4 | 0.9 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 10.6 | 1.9 | 0 | 0 | 0 |

**ตารางที่ 6.3** แสดงข้อมูล Line ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus

| Line No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | BC/2 (pu) | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | 0.0192 | 0.0575 | 0.0264 | 180 |
| 2 | 1 | 3 | 0.0452 | 0.1852 | 0.0204 | 100 |
| 3 | 2 | 4 | 0.0570 | 0.1737 | 0.0184 | 72 |
| 4 | 2 | 5 | 0.0472 | 0.1983 | 0.0209 | 130 |
| 5 | 2 | 6 | 0.0581 | 0.1763 | 0.0187 | 100 |
| 6 | 3 | 4 | 0.0132 | 0.0379 | 0.0042 | 100 |
| 7 | 4 | 6 | 0.0119 | 0.0414 | 0.0045 | 105 |
| 8 | 5 | 7 | 0.0460 | 0.1160 | 0.0102 | 130 |
| 9 | 6 | 7 | 0.0267 | 0.0820 | 0.0085 | 130 |
| 10 | 6 | 8 | 0.0120 | 0.0420 | 0.0045 | 65 |
| 11 | 6 | 28 | 0.0169 | 0.0599 | 0.0065 | 72 |

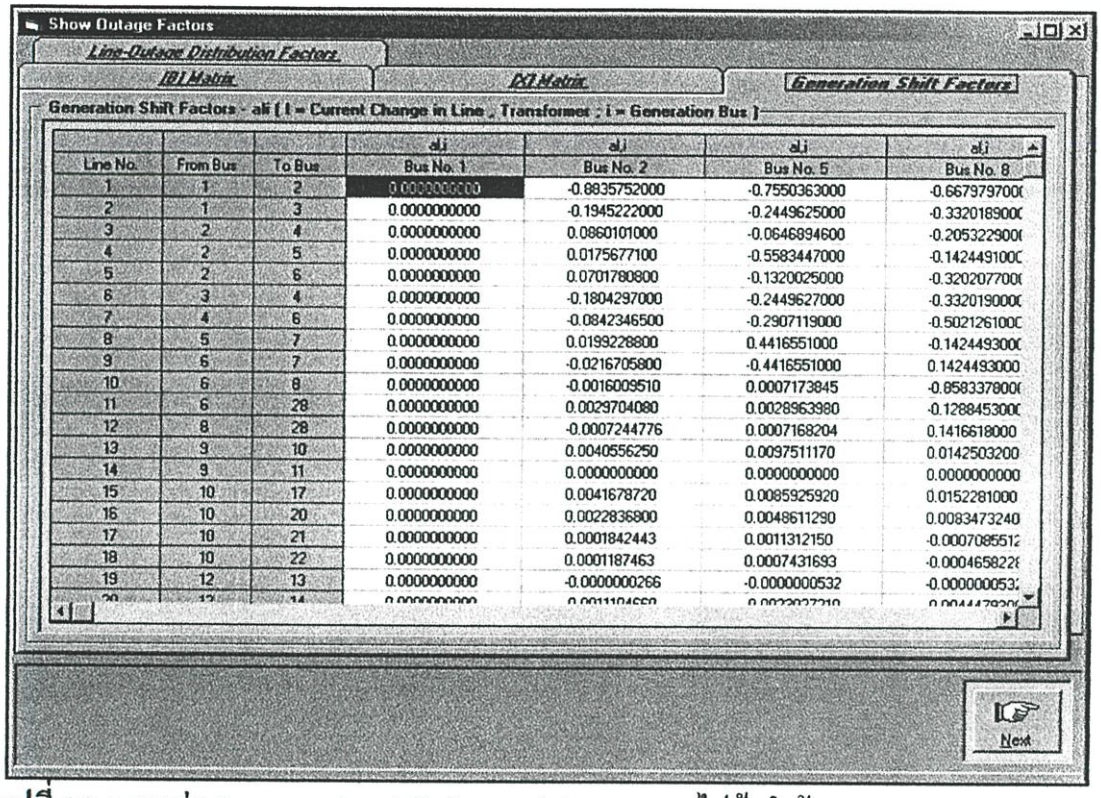
**ตารางที่ 6.3** (ต่อ)

| Line No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | BC/2 (pu) | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 8 | 28 | 0.0636 | 0.2000 | 0.0214 | 65 |
| 13 | 9 | 10 | 0 | 0.1100 | 0 | 65 |
| 14 | 9 | 11 | 0 | 0.2080 | 0 | 65 |
| 15 | 10 | 17 | 0.0324 | 0.0845 | 0 | 32 |
| 16 | 10 | 20 | 0.0936 | 0.2090 | 0 | 32 |
| 17 | 10 | 21 | 0.0348 | 0.0749 | 0 | 32 |
| 18 | 10 | 22 | 0.0727 | 0.1499 | 0 | 32 |
| 19 | 12 | 13 | 0 | 0.1400 | 0 | 130 |
| 20 | 12 | 14 | 0.1231 | 0.2559 | 0 | 65 |
| 21 | 12 | 15 | 0.0662 | 0.1304 | 0 | 65 |
| 22 | 12 | 16 | 0.0945 | 0.1987 | 0 | 65 |
| 23 | 14 | 15 | 0.2210 | 0.1997 | 0 | 32 |
| 24 | 15 | 18 | 0.1070 | 0.2185 | 0 | 32 |
| 25 | 15 | 23 | 0.1000 | 0.2020 | 0 | 32 |
| 26 | 16 | 17 | 0.0824 | 0.1923 | 0 | 65 |
| 27 | 18 | 19 | 0.0639 | 0.1292 | 0 | 32 |
| 28 | 19 | 20 | 0.0340 | 0.0680 | 0 | 32 |
| 29 | 21 | 22 | 0.0116 | 0.0236 | 0 | 32 |
| 30 | 22 | 24 | 0.1150 | 0.1790 | 0 | 32 |
| 31 | 23 | 24 | 0.1320 | 0.2700 | 0 | 32 |
| 32 | 24 | 25 | 0.1885 | 0.3292 | 0 | 32 |
| 33 | 25 | 26 | 0.2544 | 0.3800 | 0 | 32 |
| 34 | 25 | 27 | 0.1093 | 0.2087 | 0 | 32 |
| 35 | 27 | 29 | 0.2198 | 0.4153 | 0 | 32 |
| 36 | 27 | 30 | 0.3202 | 0.6027 | 0 | 32 |
| 37 | 29 | 30 | 0.2399 | 0.4533 | 0 | 32 |

**ตารางที่ 6.4** แสดงข้อมูล Transformer ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus

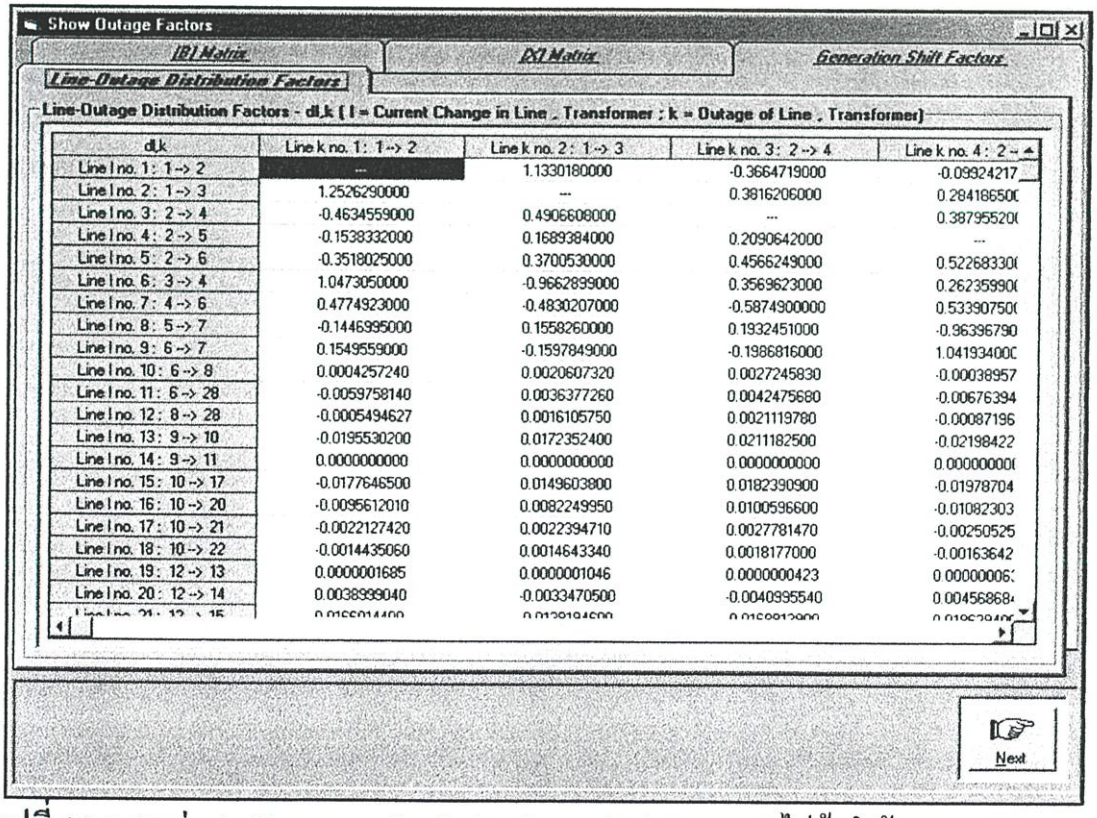
| Tr No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | Tap | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 | 12 | 0 | 0.256 | 0.932 | 65 |
| 2 | 6 | 9 | 0 | 0.208 | 0.978 | 65 |
| 3 | 6 | 10 | 0 | 0.556 | 0.969 | 32 |
| 4 | 28 | 27 | 0 | 0.396 | 0.968 | 65 |

หาค่า the generation shift factors ($a_{li}$) , the line outage distribution factors ($d_{l,k}$) แสดงได้ดังนี้




| Line No. | From Bus | To Bus | al,i Bus No. 1 | al,i Bus No. 2 | al,i Bus No. 5 | al,i Bus No. 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | 0.0000000000 | -0.8835752000 | -0.7550363000 | -0.667979700( |
| 2 | 1 | 3 | 0.0000000000 | -0.1945222000 | -0.2449625000 | -0.332018900( |
| 3 | 2 | 4 | 0.0000000000 | 0.0860101000 | -0.0646894600 | -0.205322900( |
| 4 | 2 | 5 | 0.0000000000 | 0.0175677100 | -0.5583447000 | -0.142449100( |
| 5 | 2 | 6 | 0.0000000000 | 0.0701780800 | -0.1320025000 | -0.320207700( |
| 6 | 3 | 4 | 0.0000000000 | -0.1804297000 | -0.2449627000 | -0.332019000( |
| 7 | 4 | 6 | 0.0000000000 | -0.0842346500 | -0.2907119000 | -0.502126100( |
| 8 | 5 | 7 | 0.0000000000 | 0.0199228800 | 0.4416551000 | -0.142449300( |
| 9 | 6 | 7 | 0.0000000000 | -0.0216705800 | -0.4416551000 | 0.1424493000 |
| 10 | 6 | 8 | 0.0000000000 | -0.0016009510 | 0.0007173845 | -0.858337800( |
| 11 | 6 | 28 | 0.0000000000 | 0.0029704080 | 0.0028963980 | -0.128845300( |
| 12 | 8 | 28 | 0.0000000000 | -0.0007244776 | 0.0007168204 | 0.1416618000 |
| 13 | 9 | 10 | 0.0000000000 | 0.0040556250 | 0.0097511170 | 0.0142503200 |
| 14 | 9 | 11 | 0.0000000000 | 0.0000000000 | 0.0000000000 | 0.0000000000 |
| 15 | 10 | 17 | 0.0000000000 | 0.0041678720 | 0.0085925920 | 0.0152281000 |
| 16 | 10 | 20 | 0.0000000000 | 0.0022836800 | 0.0048611290 | 0.0083473240 |
| 17 | 10 | 21 | 0.0000000000 | 0.0001842443 | 0.0011312150 | -0.000708551( |
| 18 | 10 | 22 | 0.0000000000 | 0.0001187463 | 0.0007431693 | -0.000465822( |
| 19 | 12 | 13 | 0.0000000000 | -0.0000000266 | -0.0000000532 | -0.000000053( |

**รูปที่ 6.2** แสดงค่า the generation shift factors ($a_{li}$) ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus



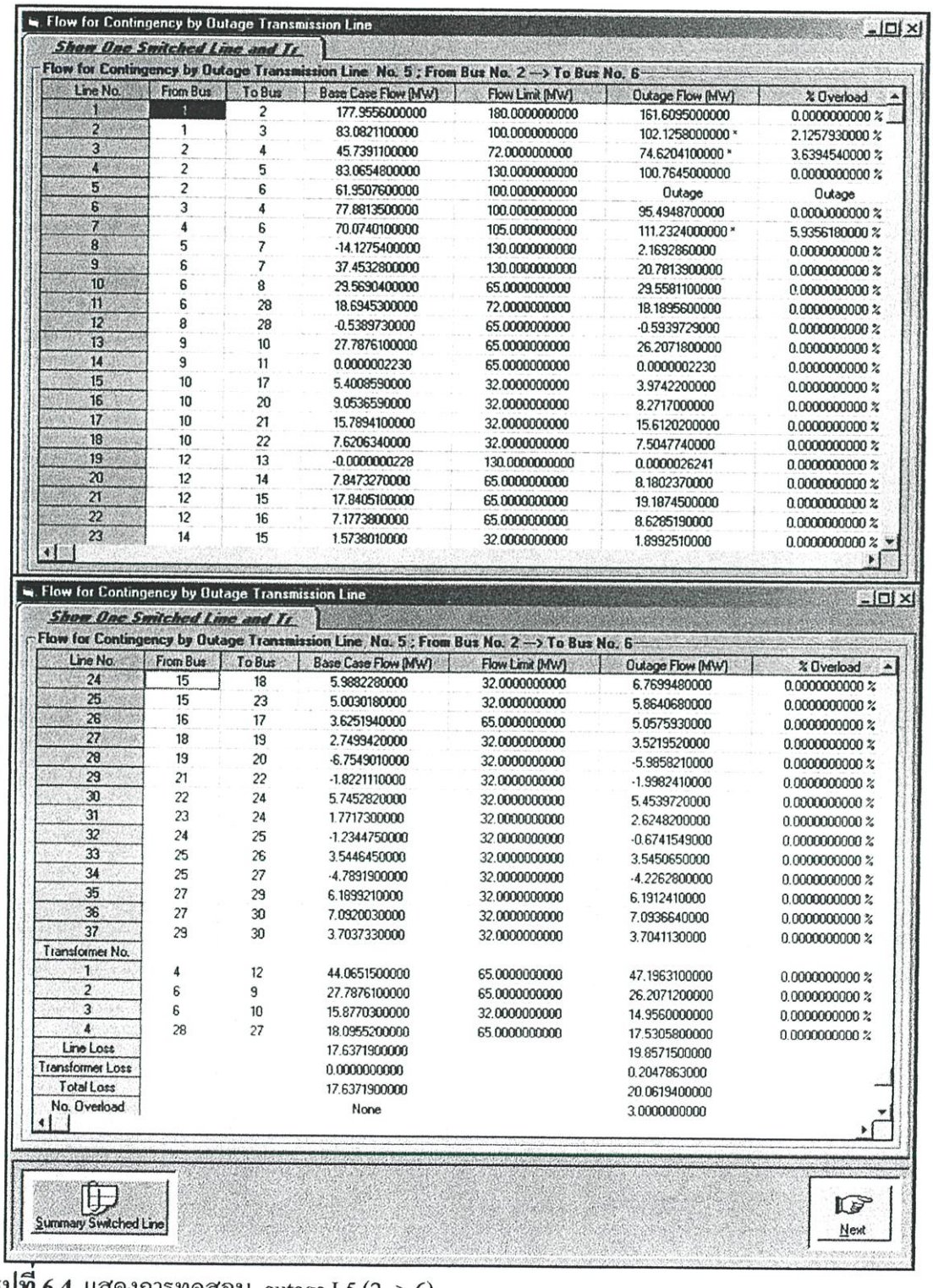

| dl,k | Line k no. 1: 1--> 2 | Line k no. 2: 1--> 3 | Line k no. 3: 2--> 4 | Line k no. 4: 2--> |
|---|---|---|---|---|
| Line l no. 1: 1--> 2 | --- | 1.1330180000 | -0.3664719000 | -0.09324217 |
| Line l no. 2: 1--> 3 | 1.2526290000 | --- | 0.3816206000 | 0.284186500 |
| Line l no. 3: 2--> 4 | -0.4634559000 | 0.4906608000 | --- | 0.387955200 |
| Line l no. 4: 2--> 5 | -0.1538332000 | 0.1689384000 | 0.2090642000 | --- |
| Line l no. 5: 2--> 6 | -0.3518025000 | 0.3700530000 | 0.4566249000 | 0.522683300 |
| Line l no. 6: 3--> 4 | 1.0473050000 | -0.9662899000 | 0.3569623000 | 0.262359900 |
| Line l no. 7: 4--> 6 | 0.4774923000 | -0.4830207000 | -0.5874900000 | 0.533907500 |
| Line l no. 8: 5--> 7 | -0.1446995000 | 0.1558260000 | 0.1932451000 | -0.96396790 |
| Line l no. 9: 6--> 7 | 0.1549559000 | -0.1597849000 | -0.1986816000 | 1.041934000 |
| Line l no. 10: 6--> 8 | 0.0004257240 | 0.0020607320 | 0.0027245830 | -0.00038957 |
| Line l no. 11: 6--> 28 | -0.0059758140 | 0.0036377260 | 0.0042475680 | -0.00676394 |
| Line l no. 12: 8--> 28 | -0.0005494627 | 0.0016105750 | 0.0021119780 | -0.00087196 |
| Line l no. 13: 9--> 10 | -0.0195530200 | 0.0172352400 | 0.0211182500 | -0.02198422 |
| Line l no. 14: 9--> 11 | 0.0000000000 | 0.0000000000 | 0.0000000000 | 0.000000000 |
| Line l no. 15: 10--> 17 | -0.0177646500 | 0.0149603800 | 0.0182390900 | -0.01978704 |
| Line l no. 16: 10--> 20 | -0.0095612010 | 0.0082249950 | 0.0100596600 | -0.01082303 |
| Line l no. 17: 10--> 21 | -0.0022127420 | 0.0022394710 | 0.0027781470 | -0.00250525 |
| Line l no. 18: 10--> 22 | -0.0014435060 | 0.0014643340 | 0.0018177000 | -0.00163642 |
| Line l no. 19: 12--> 13 | 0.0000001685 | 0.0000001046 | 0.0000000423 | 0.000000063 |
| Line l no. 20: 12--> 14 | 0.0038999040 | -0.0033470500 | -0.0040995540 | 0.004568684 |

**รูปที่ 6.3** แสดงค่า the line outage distribution factors ($d_{l,k}$) ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus

ทำการทดสอบ outage อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังได้ดังต่อไปนี้

6.2.1.1 ทดสอบ outage line

สมมุติเลือกทดสอบ outage L5 (2 -> 6) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 6.4



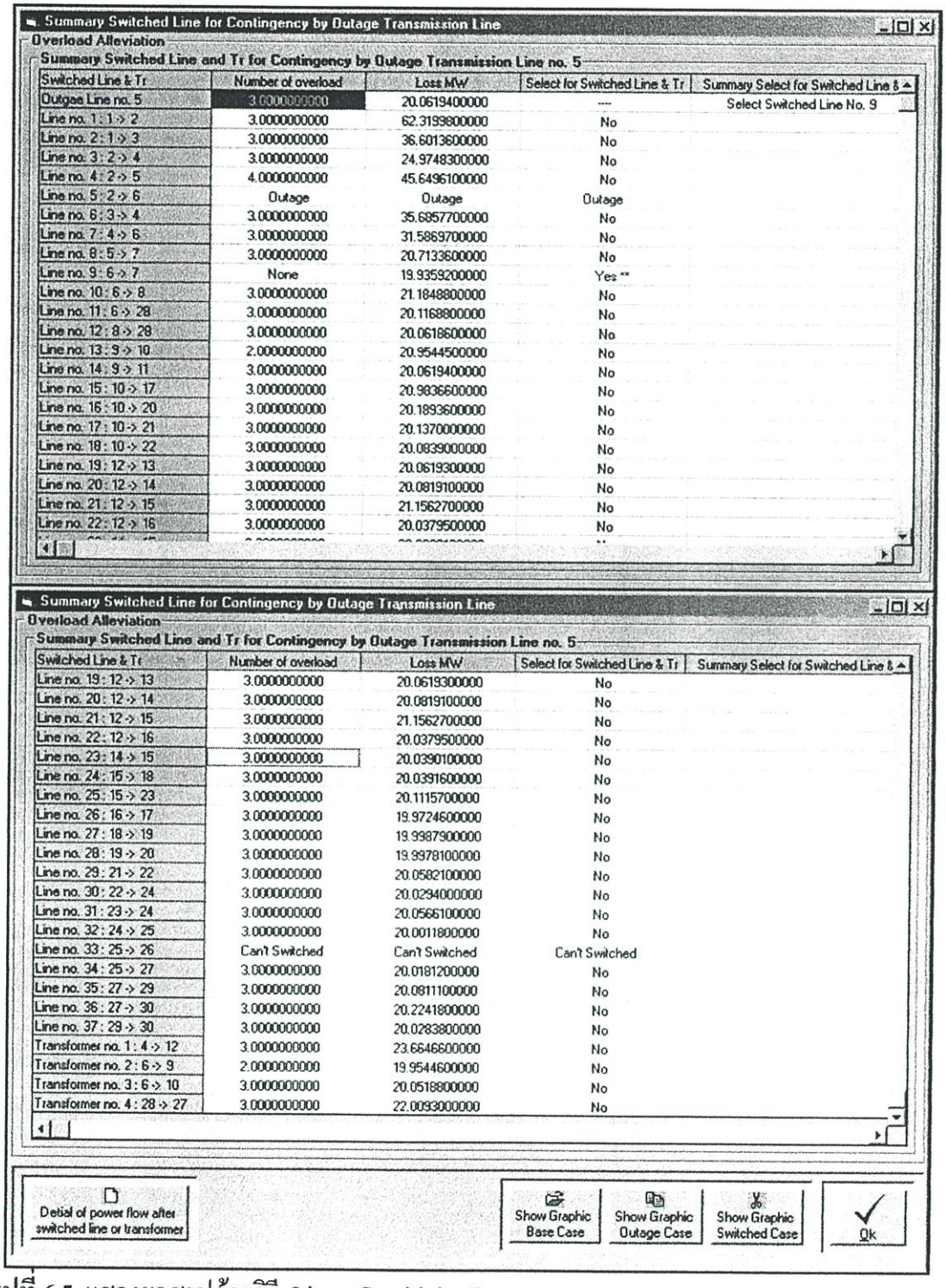

| Line No. | From Bus | To Bus | Base Case Flow (MW) | Flow Limit (MW) | Outage Flow (MW) | % Overload |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | 177.9556000000 | 180.0000000000 | 161.6095000000 | 0.0000000000 % |
| 2 | 1 | 3 | 83.0821100000 | 100.0000000000 | 102.1258000000 * | 2.1257930000 % |
| 3 | 2 | 4 | 45.7391100000 | 72.0000000000 | 74.6204100000 * | 3.6394540000 % |
| 4 | 2 | 5 | 83.0654800000 | 130.0000000000 | 100.7645000000 | 0.0000000000 % |
| 5 | 2 | 6 | 61.9507600000 | 100.0000000000 | Outage | Outage |
| 6 | 3 | 4 | 77.8813500000 | 100.0000000000 | 95.4948700000 | 0.0000000000 % |
| 7 | 4 | 6 | 70.0740100000 | 105.0000000000 | 111.2324000000 * | 5.9356180000 % |
| 8 | 5 | 7 | -14.1275400000 | 130.0000000000 | 2.1692860000 | 0.0000000000 % |
| 9 | 6 | 7 | 37.4532800000 | 130.0000000000 | 20.7813900000 | 0.0000000000 % |
| 10 | 6 | 8 | 29.5690400000 | 65.0000000000 | 29.5581100000 | 0.0000000000 % |
| 11 | 6 | 28 | 18.6945300000 | 72.0000000000 | 18.1895600000 | 0.0000000000 % |
| 12 | 8 | 28 | -0.5389730000 | 65.0000000000 | -0.5939729000 | 0.0000000000 % |
| 13 | 9 | 10 | 27.7876100000 | 65.0000000000 | 26.2071800000 | 0.0000000000 % |
| 14 | 9 | 11 | 0.0000002230 | 65.0000000000 | 0.0000002230 | 0.0000000000 % |
| 15 | 10 | 17 | 5.4008590000 | 32.0000000000 | 3.9742200000 | 0.0000000000 % |
| 16 | 10 | 20 | 9.0536590000 | 32.0000000000 | 8.2717000000 | 0.0000000000 % |
| 17 | 10 | 21 | 15.7894100000 | 32.0000000000 | 15.6120200000 | 0.0000000000 % |
| 18 | 10 | 22 | 7.6206340000 | 32.0000000000 | 7.5047740000 | 0.0000000000 % |
| 19 | 12 | 13 | -0.0000000228 | 130.0000000000 | 0.0000026241 | 0.0000000000 % |
| 20 | 12 | 14 | 7.8473270000 | 65.0000000000 | 8.1802370000 | 0.0000000000 % |
| 21 | 12 | 15 | 17.8405100000 | 65.0000000000 | 19.1874500000 | 0.0000000000 % |
| 22 | 12 | 16 | 7.1773800000 | 65.0000000000 | 8.6285190000 | 0.0000000000 % |
| 23 | 14 | 15 | 1.5738010000 | 32.0000000000 | 1.8992510000 | 0.0000000000 % |
| 24 | 15 | 18 | 5.9882280000 | 32.0000000000 | 6.7699480000 | 0.0000000000 % |
| 25 | 15 | 23 | 5.0030180000 | 32.0000000000 | 5.8640680000 | 0.0000000000 % |
| 26 | 16 | 17 | 3.6251940000 | 65.0000000000 | 5.0575930000 | 0.0000000000 % |
| 27 | 18 | 19 | 2.7499420000 | 32.0000000000 | 3.5219520000 | 0.0000000000 % |
| 28 | 19 | 20 | -6.7549010000 | 32.0000000000 | -5.9858210000 | 0.0000000000 % |
| 29 | 21 | 22 | -1.8221110000 | 32.0000000000 | -1.9982410000 | 0.0000000000 % |
| 30 | 22 | 24 | 5.7452820000 | 32.0000000000 | 5.4539720000 | 0.0000000000 % |
| 31 | 23 | 24 | 1.7717300000 | 32.0000000000 | 2.6248200000 | 0.0000000000 % |
| 32 | 24 | 25 | -1.2344750000 | 32.0000000000 | -0.6741549000 | 0.0000000000 % |
| 33 | 25 | 26 | 3.5446450000 | 32.0000000000 | 3.5450650000 | 0.0000000000 % |
| 34 | 25 | 27 | -4.7891900000 | 32.0000000000 | -4.2262800000 | 0.0000000000 % |
| 35 | 27 | 29 | 6.1899210000 | 32.0000000000 | 6.1912410000 | 0.0000000000 % |
| 36 | 27 | 30 | 7.0920030000 | 32.0000000000 | 7.0936640000 | 0.0000000000 % |
| 37 | 29 | 30 | 3.7037330000 | 32.0000000000 | 3.7041130000 | 0.0000000000 % |
| Transformer No. | | | | | | |
| 1 | 4 | 12 | 44.0651500000 | 65.0000000000 | 47.1963100000 | 0.0000000000 % |
| 2 | 6 | 9 | 27.7876100000 | 65.0000000000 | 26.2071200000 | 0.0000000000 % |
| 3 | 6 | 10 | 15.8770300000 | 32.0000000000 | 14.9560000000 | 0.0000000000 % |
| 4 | 28 | 27 | 18.0955200000 | 65.0000000000 | 17.5305800000 | 0.0000000000 % |
| Line Loss | | | 17.6371900000 | | 19.8571500000 | |
| Transformer Loss | | | 0.0000000000 | | 0.2047863000 | |
| Total Loss | | | 17.6371900000 | | 20.0619400000 | |
| No. Overload | | | None | | 3.0000000000 | |

**รูปที่ 6.4** แสดงการทดสอบ outage L5 (2 -> 6)

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าเกิด overload ขึ้นที่ L2 (1 -> 3) , L3 (2 -> 4) และ L7 (4 -> 6)

ดังนั้นจึงทำการเลือก switch line เพื่อขจัดหรือบรรเทา overload ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1. วิธี Linear Sensitivity Factors ผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.5




**รูปที่ 6.5** แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors

จากรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch L9 (6 -> 7) ไปแล้วนั้นสามารถที่จะขจัด

overload ได้อย่างสมบรูณ์ ดังนั้นจึงทำการเลือก switch L9 (6 -> 7) จึงจะเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 1.140625 s) #

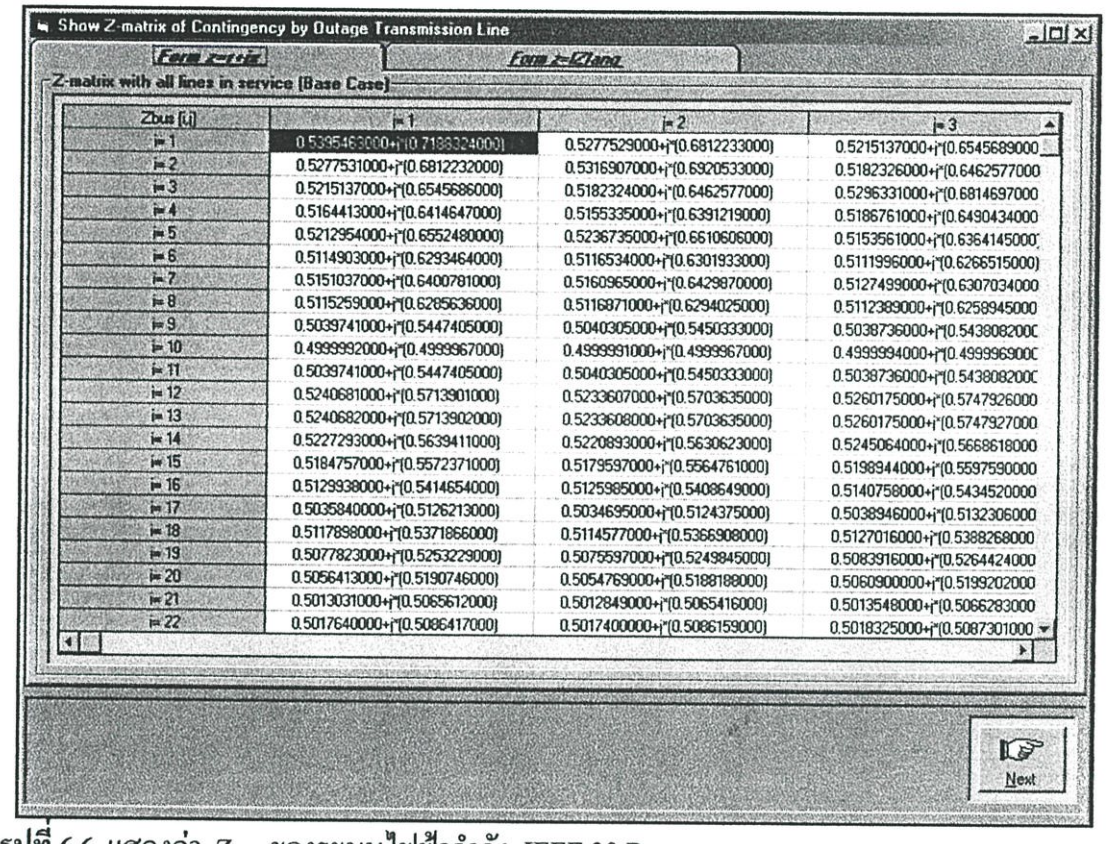
ส่วนค่า power flow หลังจากเลือก switch L9 (6 -> 7) ไปแล้วนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 6.5

**ตารางที่ 6.5** แสดงค่า power flow หลังจากเลือก switch L9 (6 -> 7)

| | Outage Flow (MW) | Limit (MW) | OL5+SwL9 | OL5+SwL9 (Run Load flow) |
|---|---|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | 161.6095 | 180 | 171.0515 | 171.0774 |
| L2 : 1 -> 3 | 102.1258 | 100 | 93.2272 | 93.10855 |
| L3 : 2 -> 4 | 74.62041 | 72 | 60.62229 | 60.36384 |
| L4 : 2 -> 5 | 100.7645 | 130 | 123.5334 | 123.9354 |
| L5 : 2 -> 6 | Outage | 100 | Outage | Outage |
| L6 : 3 -> 4 | 95.49487 | 100 | 87.2043 | 87.19252 |
| L7 : 4 -> 6 | 111.2324 | 105 | 91.30496 | 91.38759 |
| L8 : 5 -> 7 | 2.169286 | 130 | 23.06231 | 23.0915 |
| L9 : 6 -> 7 | 20.78139 | 130 | Switched | Switched |
| L10 : 6 -> 8 | 29.55811 | 65 | 29.57106 | 29.55922 |
| L11 : 6 -> 28 | 18.18956 | 72 | 18.44024 | 18.43018 |
| L12 : 8 -> 28 | -0.5939729 | 65 | -0.5691099 | -0.56677 |
| L13 : 9 -> 10 | 26.20718 | 65 | 26.97015 | 26.97027 |
| L14 : 9 -> 11 | 0.0000002230 | 65 | 0.0000002230 | 0.00000 |
| L15 : 10 -> 17 | 3.97422 | 32 | 4.664048 | 4.66275 |
| L16 : 10 -> 20 | 8.2717 | 32 | 8.650366 | 8.64895 |
| L17 : 10 -> 21 | 15.61202 | 32 | 15.69676 | 15.69808 |
| L18 : 10 -> 22 | 7.756946 | 32 | 7.811883 | 7.56104 |
| L19 : 12 -> 13 | -0.0000054592 | 130 | 0.0000111875 | 0.00000 |
| L20 : 12 -> 14 | 8.031364 | 65 | 7.875375 | 8.01955 |
| L21 : 12 -> 15 | 18.74588 | 65 | 18.12044 | 18.5376 |
| L22 : 12 -> 16 | 8.119305 | 65 | 7.444864 | 7.92727 |
| L23 : 14 -> 15 | 1.746991 | 32 | 1.59365 | 1.74303 |
| L24 : 15 -> 18 | 6.420617 | 32 | 6.056365 | 6.3926 |
| L25 : 15 -> 23 | 5.614565 | 32 | 5.215755 | 5.44889 |
| L26 : 16 -> 17 | 4.555853 | 65 | 3.889923 | 4.3658 |
| L27 : 18 -> 19 | 3.17515 | 32 | 2.815414 | 3.14937 |
| L28 : 19 -> 20 | -6.331605 | 32 | -6.690086 | -6.35674 |
| L29 : 21 -> 22 | -1.641013 | 32 | -1.557201 | -1.91239 |
| L30 : 22 -> 24 | 6.050776 | 32 | 6.189208 | 5.59505 |
| L31 : 23 -> 24 | 2.375245 | 32 | 1.980127 | 2.21367 |
| L32 : 24 -> 25 | -0.3555189 | 32 | -0.6121299 | -0.94327 |
| L33 : 25 -> 26 | 3.550169 | 32 | 3.549896 | 3.54483 |
| L34 : 25 -> 27 | -3.926008 | 32 | -4.184014 | -4.49653 |
| L35 : 27 -> 29 | 6.206653 | 32 | 6.205823 | 6.19061 |
| L36 : 27 -> 30 | 7.093664 | 32 | 7.092838 | 7.09287 |
| L37 : 29 -> 30 | 3.704113 | 32 | 3.703908 | 3.70394 |
| Tr1 : 4 -> 12 | 47.19631 | 65 | 45.68345 | 45.6843 |
| Tr2 : 6 -> 9 | 26.20712 | 65 | 26.97012 | 26.97028 |
| Tr3 : 6 -> 10 | 14.956 | 32 | 15.40165 | 15.40026 |
| Tr4 : 28 ->27 | 17.53058 | 65 | 17.80709 | 17.80168 |
| Total Losses | 20.06194 | | 19.93592 | 20.78559 |
| No.of Overload | 3 | | 0 | 0 |

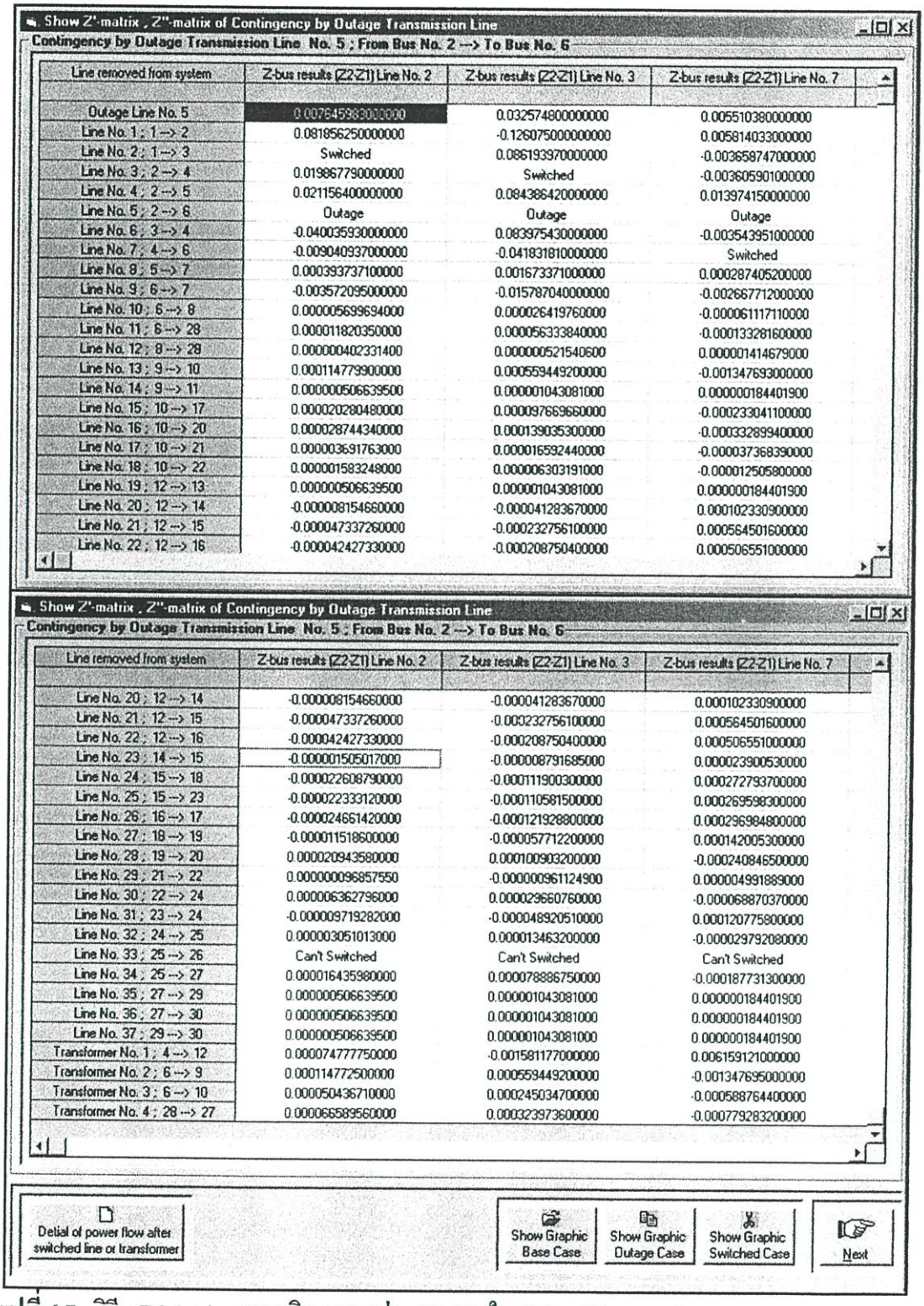
2. วิธี Z-Matrix แบบเดิม

ทำการคำนวณหาค่า $Z_{bus}$ ผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.6 , ใช้วิธี Z-Matrix แบบเดิม คำนวณผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.7 , 6.8 , 6.9 ตามลำดับ

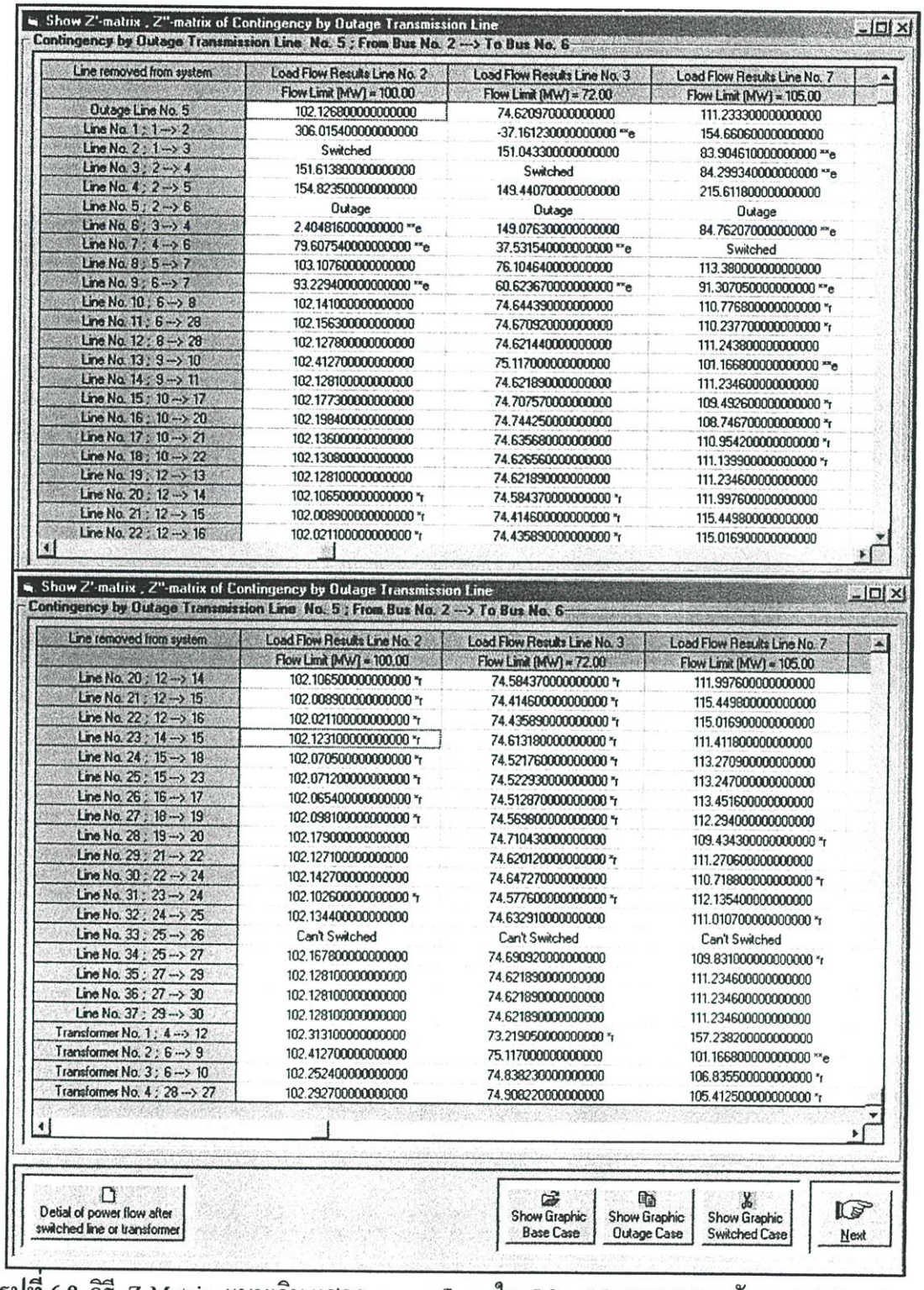



| Zbus (i,j) | j = 1 | j = 2 | j = 3 |
|---|---|---|---|
| i = 1 | 0.5395463000+j*(0.7188324000) | 0.5277529000+j*(0.6812233000) | 0.5215137000+j*(0.6545689000 |
| i = 2 | 0.5277531000+j*(0.6812232000) | 0.5316907000+j*(0.6920533000) | 0.5182326000+j*(0.6462577000 |
| i = 3 | 0.5215137000+j*(0.6545686000) | 0.5182324000+j*(0.6462577000) | 0.5296331000+j*(0.6814697000 |
| i = 4 | 0.5164413000+j*(0.6414647000) | 0.5155335000+j*(0.6391219000) | 0.5186761000+j*(0.6490434000 |
| i = 5 | 0.5212954000+j*(0.6552480000) | 0.5236735000+j*(0.6610606000) | 0.5153561000+j*(0.6364145000 |
| i = 6 | 0.5114903000+j*(0.6293464000) | 0.5116534000+j*(0.6301933000) | 0.5111996000+j*(0.6266515000) |
| i = 7 | 0.5151037000+j*(0.6400781000) | 0.5160965000+j*(0.6429870000) | 0.5127499000+j*(0.6307034000 |
| i = 8 | 0.5115259000+j*(0.6285636000) | 0.5116871000+j*(0.6294025000) | 0.5112389000+j*(0.6258945000 |
| i = 9 | 0.5039741000+j*(0.5447405000) | 0.5040305000+j*(0.5450333000) | 0.5038736000+j*(0.543808200( |
| i = 10 | 0.4999992000+j*(0.4999967000) | 0.4999991000+j*(0.4999967000) | 0.4999994000+j*(0.499996900( |
| i = 11 | 0.5039741000+j*(0.5447405000) | 0.5040305000+j*(0.5450333000) | 0.5038736000+j*(0.543808200( |
| i = 12 | 0.5240681000+j*(0.5713901000) | 0.5233607000+j*(0.5703635000) | 0.5260175000+j*(0.5747926000 |
| i = 13 | 0.5240682000+j*(0.5713902000) | 0.5233608000+j*(0.5703635000) | 0.5260175000+j*(0.5747927000 |
| i = 14 | 0.5227293000+j*(0.5639411000) | 0.5220893000+j*(0.5630623000) | 0.5245064000+j*(0.5668618000 |
| i = 15 | 0.5184757000+j*(0.5572371000) | 0.5179597000+j*(0.5564761000) | 0.5198944000+j*(0.5597590000 |
| i = 16 | 0.5129938000+j*(0.5414654000) | 0.5125985000+j*(0.5408649000) | 0.5140758000+j*(0.5434520000 |
| i = 17 | 0.5035840000+j*(0.5126213000) | 0.5034695000+j*(0.5124375000) | 0.5038946000+j*(0.5132306000 |
| i = 18 | 0.5117898000+j*(0.5371866000) | 0.5114577000+j*(0.5366908000) | 0.5127016000+j*(0.5388268000 |
| i = 19 | 0.5077823000+j*(0.5253229000) | 0.5075597000+j*(0.5249845000) | 0.5083916000+j*(0.5264424000 |
| i = 20 | 0.5056413000+j*(0.5190746000) | 0.5054769000+j*(0.5188188000) | 0.5060900000+j*(0.5199202000 |
| i = 21 | 0.5013031000+j*(0.5065612000) | 0.5012849000+j*(0.5065416000) | 0.5013548000+j*(0.5066283000 |
| i = 22 | 0.5017640000+j*(0.5086417000) | 0.5017400000+j*(0.5086159000) | 0.5018325000+j*(0.5087301000 |

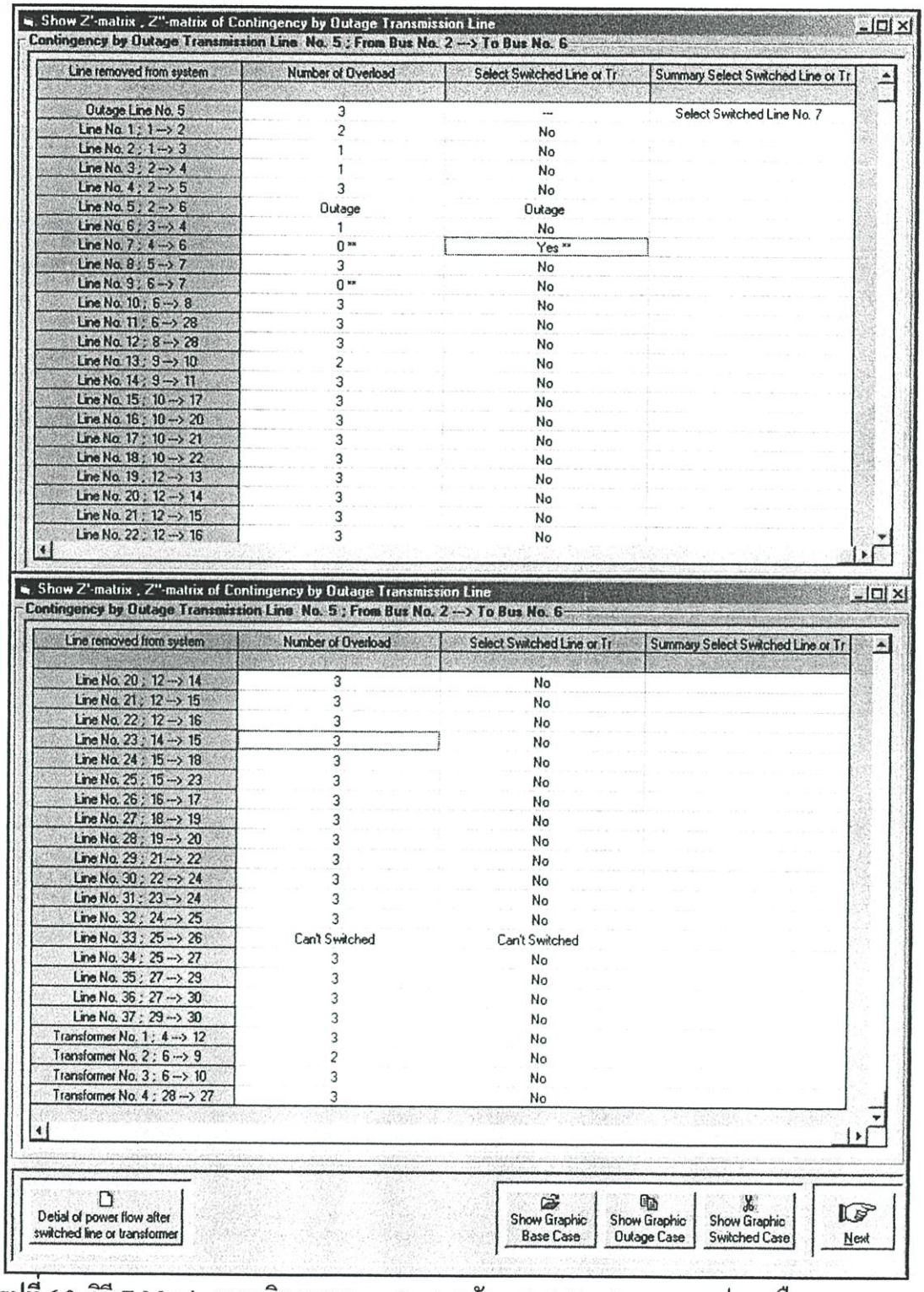
**รูปที่ 6.6** แสดงค่า $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus




**รูปที่ 6.7** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2-Z1 ใน L2 , L3 และ L7




**รูปที่ 6.8** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง power flow ใน L2 , L3 และ L7 หลัง switch line & tr




**รูปที่ 6.9** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr ,ผลสรุปการเลือก switch

รูปที่ 6.9 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch จะเห็นได้ว่าเมื่อเลือก switch L7 (4 -> 6) หรือ L9 (6 -> 7) สามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ (มีจำนวน overload = 0) ดังนั้นจึงทำการเลือก switch line ตามขั้นตอนการเลือกวิธี Z-Matrix แบบเดิม (รูปที่ 5.19) โดยดูจากรูปที่ 6.8 จะได้ค่าดังนี้

เมื่อเลือก switch L7 (4 -> 6)

- ค่า L2 (1 -> 3) $P''_{13}$ = 79.60754 MW
- ค่า L3 (2 -> 4) $P''_{24}$ = 37.53154 MW
- ค่า L7 (4 -> 6) $P''_{46}$ = 0 MW

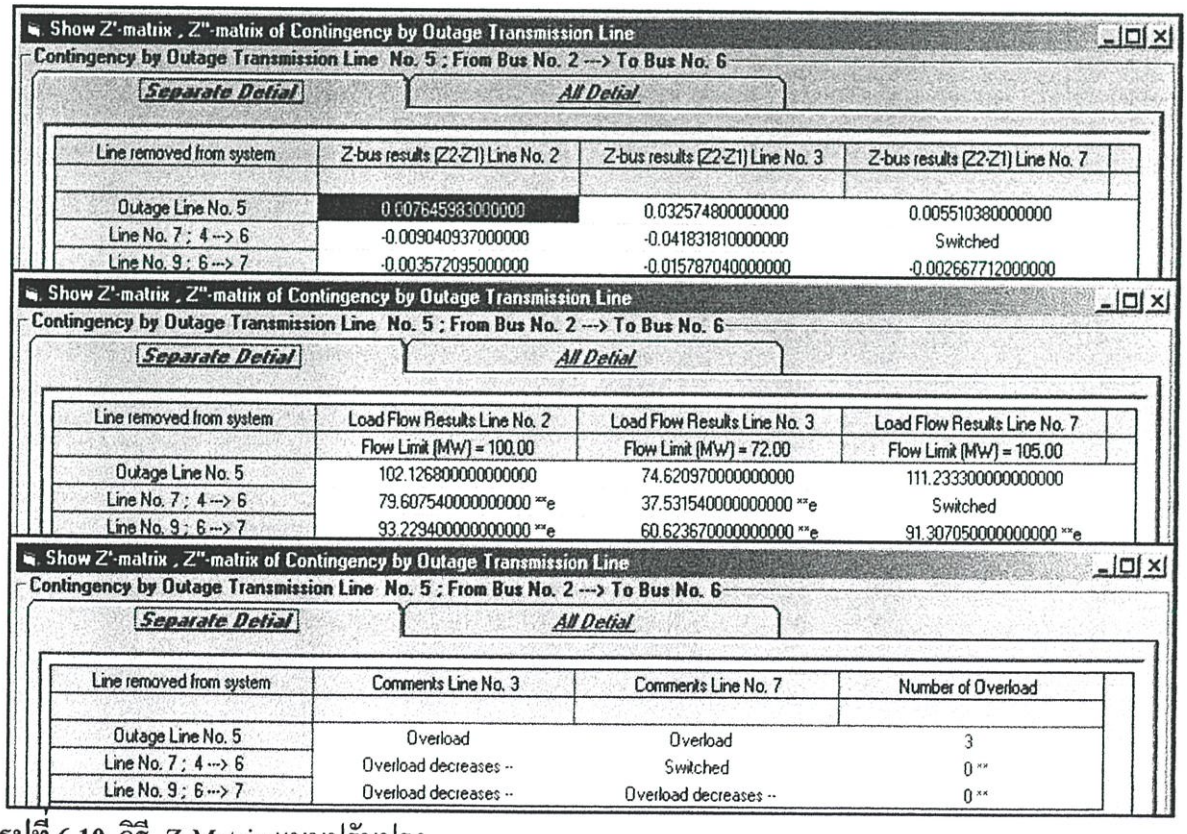
เมื่อเลือก switch L9 (6 -> 7)

- ค่า L2 (1 -> 3) $P''_{13}$ = 93.2294 MW
- ค่า L3 (2 -> 4) $P''_{24}$ = 60.62367 MW
- ค่า L7 (4 -> 6) $P''_{46}$ = 91.30705 MW

จะเห็นได้ว่าเมื่อเลือก switch L7 (4 -> 6) แล้วนั้นค่า $P''_{13}$ , $P''_{24}$ , $P''_{46}$ มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเลือก switch L9 (6 -> 7) ดังนั้นจึงทำการเลือก switch L7 (4 -> 6) จึงจะเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 0.2078857 s) #

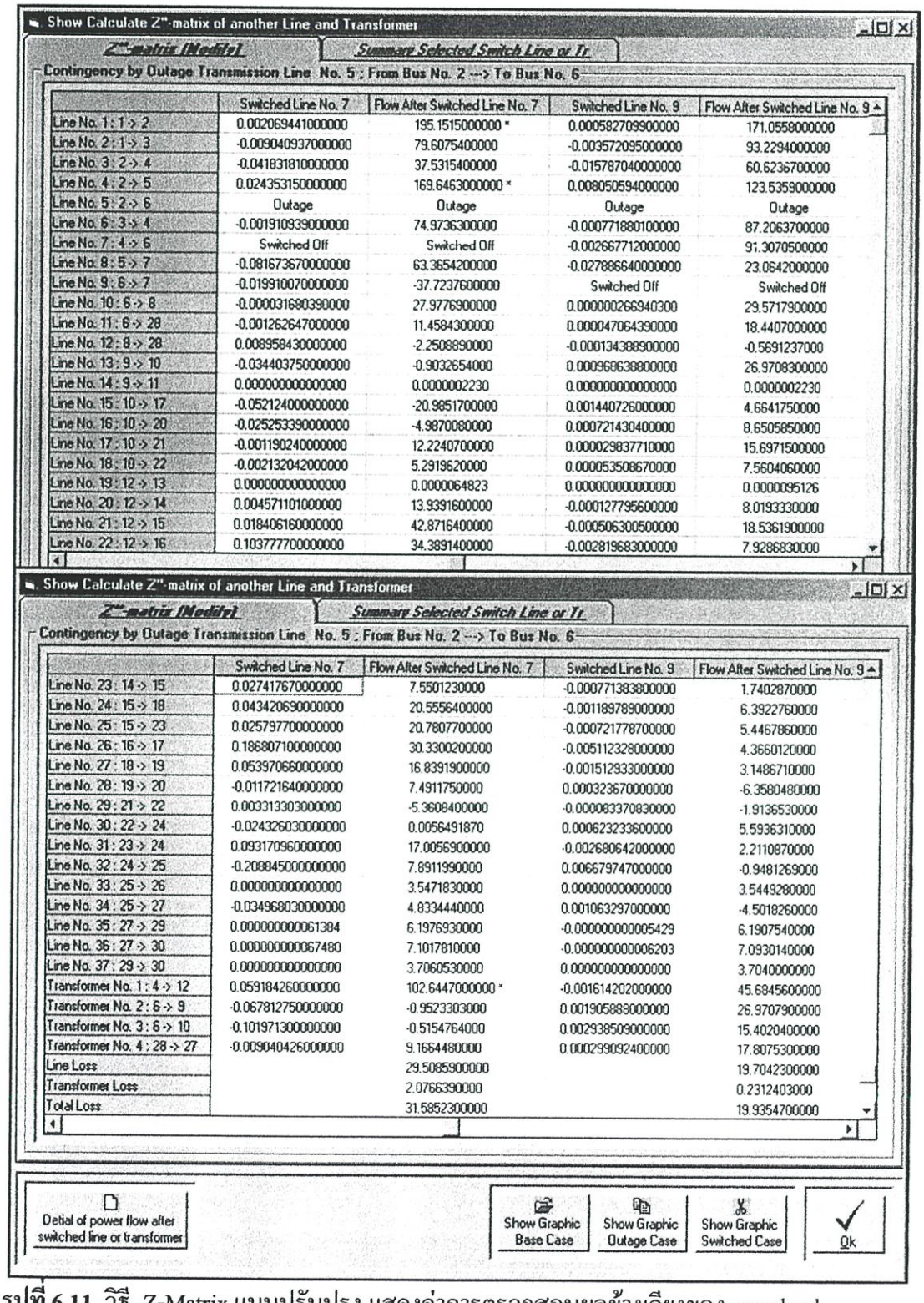
3. วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

ใช้วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง คำนวณโดยทำการเลือกตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และ ทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วมีจำนวน overload เหลือน้อยที่สุด หรือมีจำนวน overload = 0 ออกมาจากการเลือก switch line & tr ทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 6.10



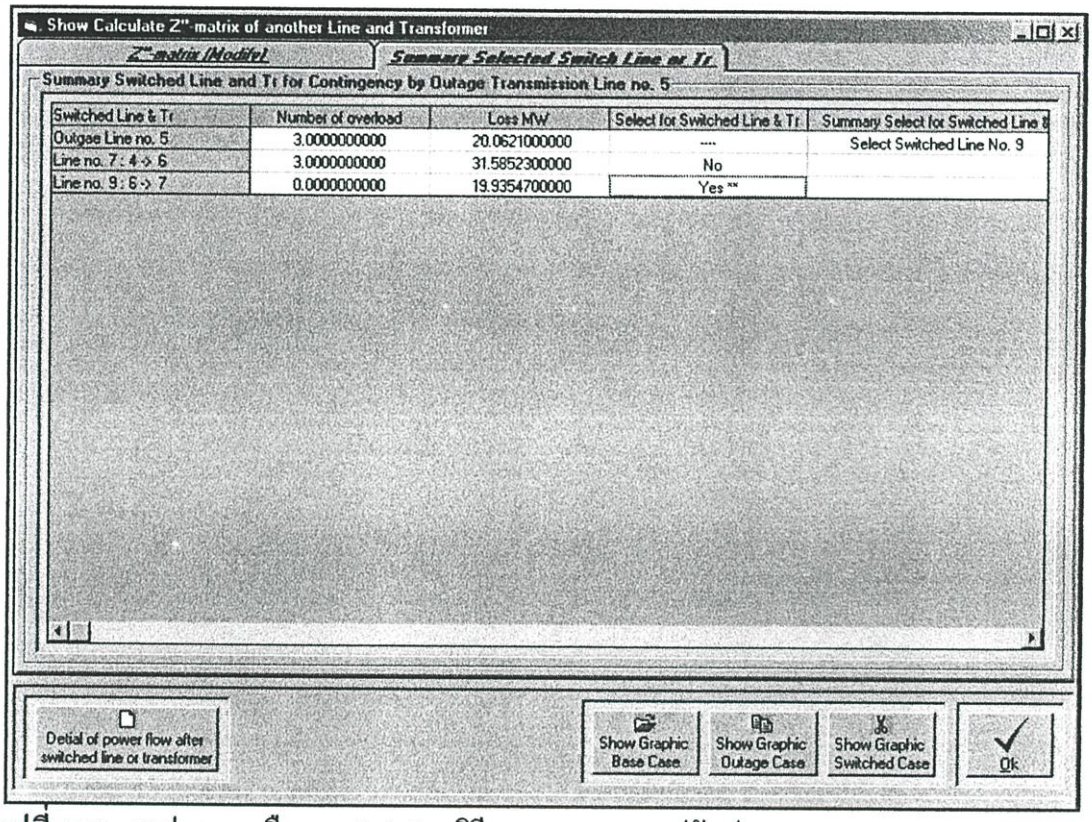

**รูปที่ 6.10** วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

จากรูปที่ 6.10 หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อเลือก switch L7 (4 -> 6) หรือ L9 (6 -> 7) จะมีจำนวน overload รวมเหลือ = 0 ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload แสดงได้ดังรูปที่ 6.11




**รูปที่ 6.11** วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงค่าการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload

จากรูปที่ 6.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload แล้วนั้น เมื่อเลือก switch L7 (4 -> 6) จะเกิด overload ขึ้นที่ L1 (1 -> 2) , L4 (2 -> 5) และ Tr1 (4 -> 12) แต่เมื่อเลือก switch L9 (6 -> 7) จะไม่เกิด overload เพิ่มขึ้นมาอีก ดังนั้นดูสรุปผลการเลือกได้ที่รูป 6.12



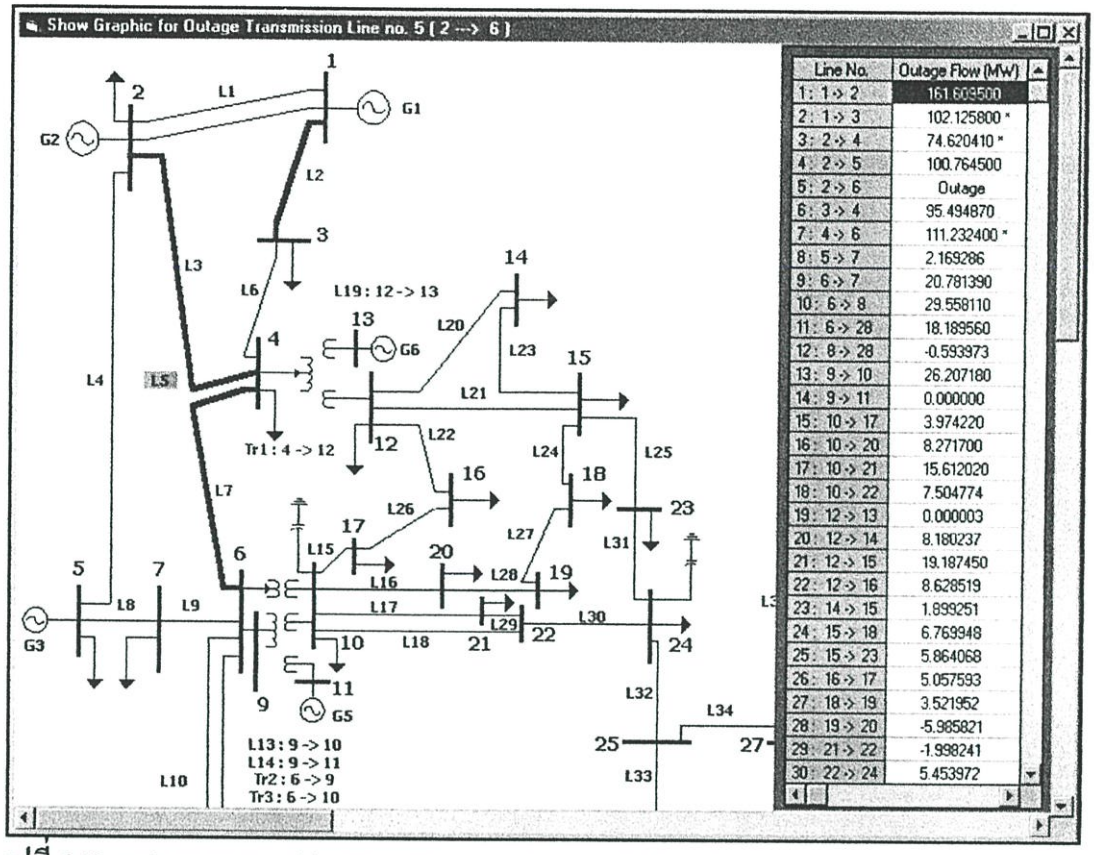

**รูปที่ 6.12** สรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

จากรูปที่ 6.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อเลือก switch L9 (6 -> 7) ไปแล้วนั้นสามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ คือมีจำนวน overload = 0 ดังนั้นจึงทำการเลือก switch L9 (6 -> 7) จึงจะเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 0.2629395 s) #

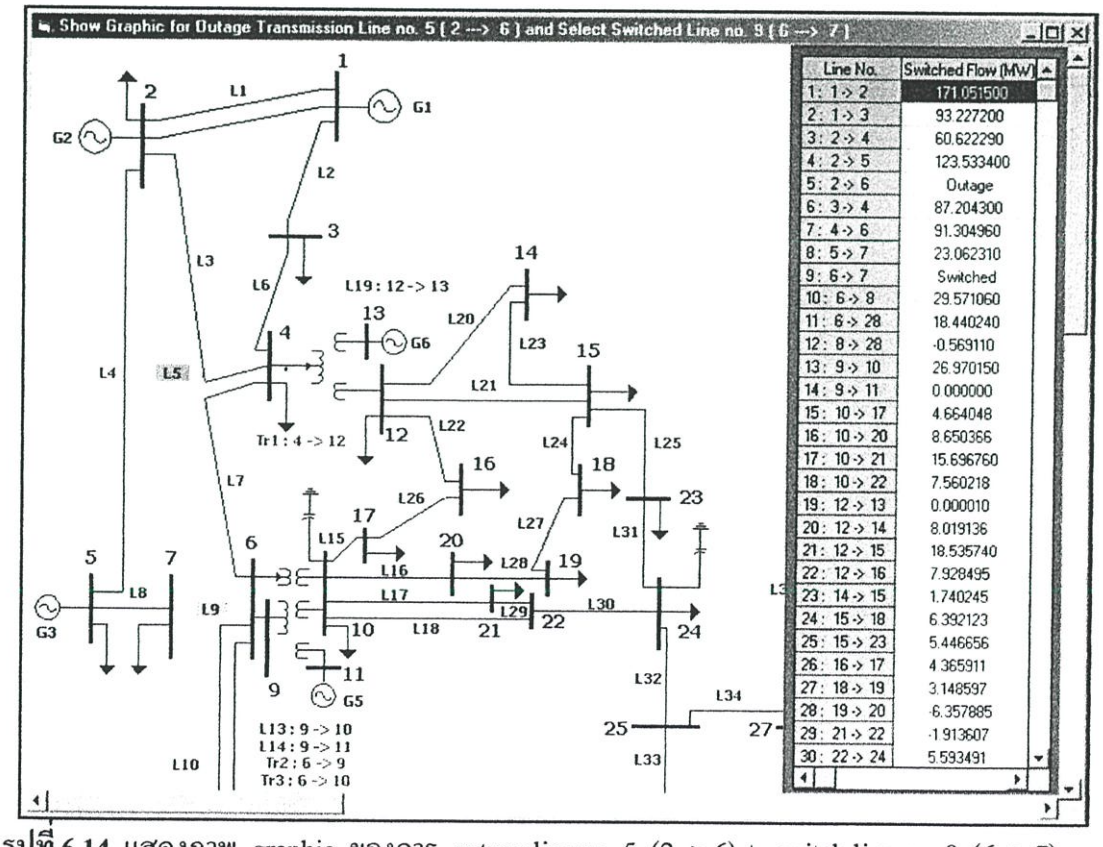
ส่วนค่า power flow หลังจากเลือก switch L9 (6 -> 7) ไปแล้วนั้นดูได้จากรูปที่ 6.11 (ในส่วนของ column ที่แสดงค่าว่า "Flow After Switched Line No. 9") และ เพื่อให้เห็นภาพรวมได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นจึงทำการจัดแสดงภาพ graphic ของการ outage line และ ภาพ graphic หลังจากที่ได้เลือก switch line ที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังรูปที่ 6.13 และ 6.14 ตามลำดับ , สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line แสดงได้ดังตารางที่ 6.6

**ตารางที่ 6.6** สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line

| | เวลา (s) | เลือก Switched Line |
|---|---|---|
| | Outage Line no.5 | Outage Line no.5 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 1.1406250 | Line no.9 (6 -> 7) |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 0.2078857 | Line no.7 (4 -> 6) ; Line no.9 (6 -> 7) |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 0.2629395 | Line no.9 (6 -> 7) |



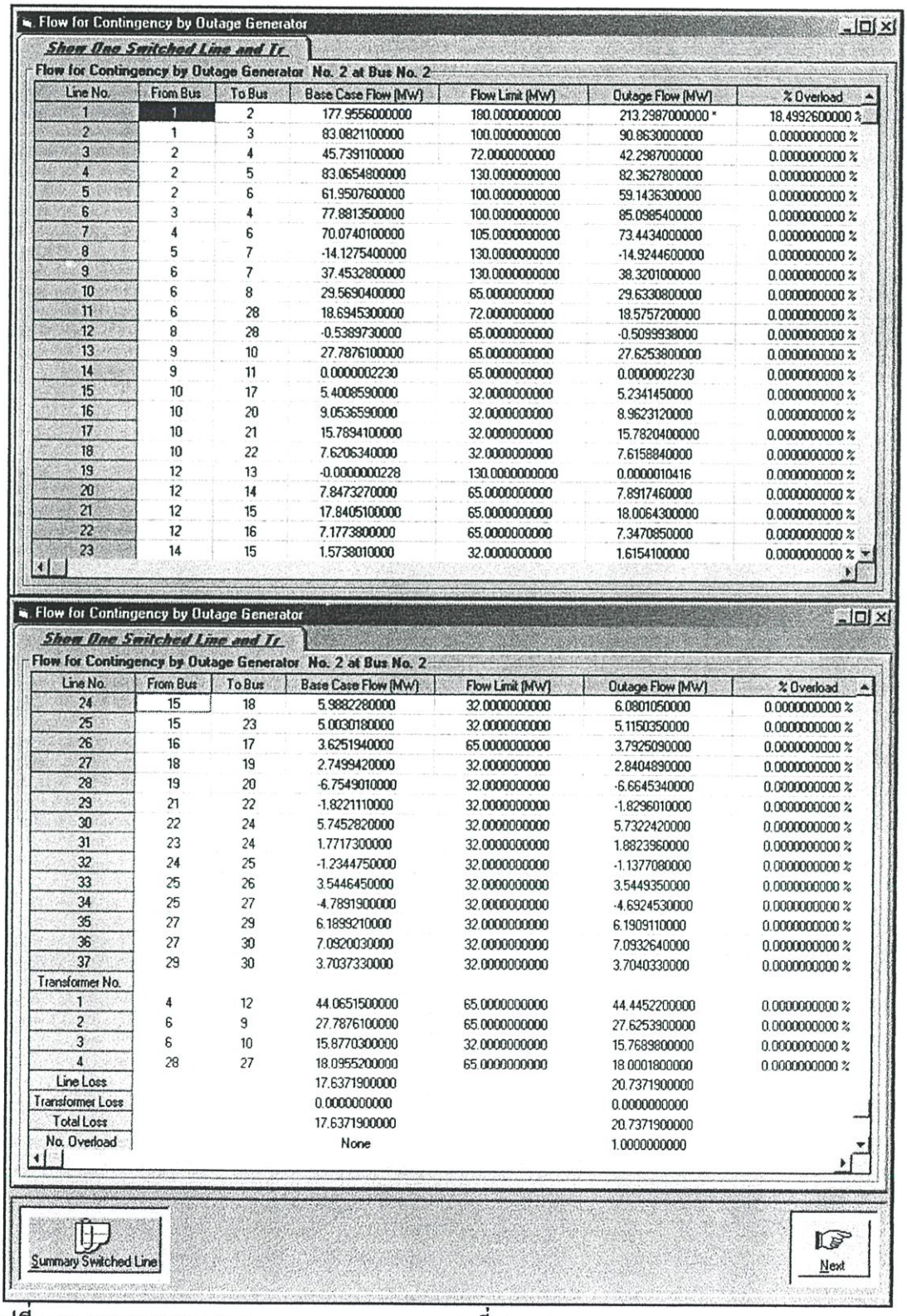

**รูปที่ 6.13** แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 5 (2 -> 6)




**รูปที่ 6.14** แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 5 (2 -> 6) + switch line no. 9 (6 -> 7)

6.2.1.2 ทดสอบ outage generator

สมมุติเลือกทดสอบ outage generator ที่ bus 2 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 6.15



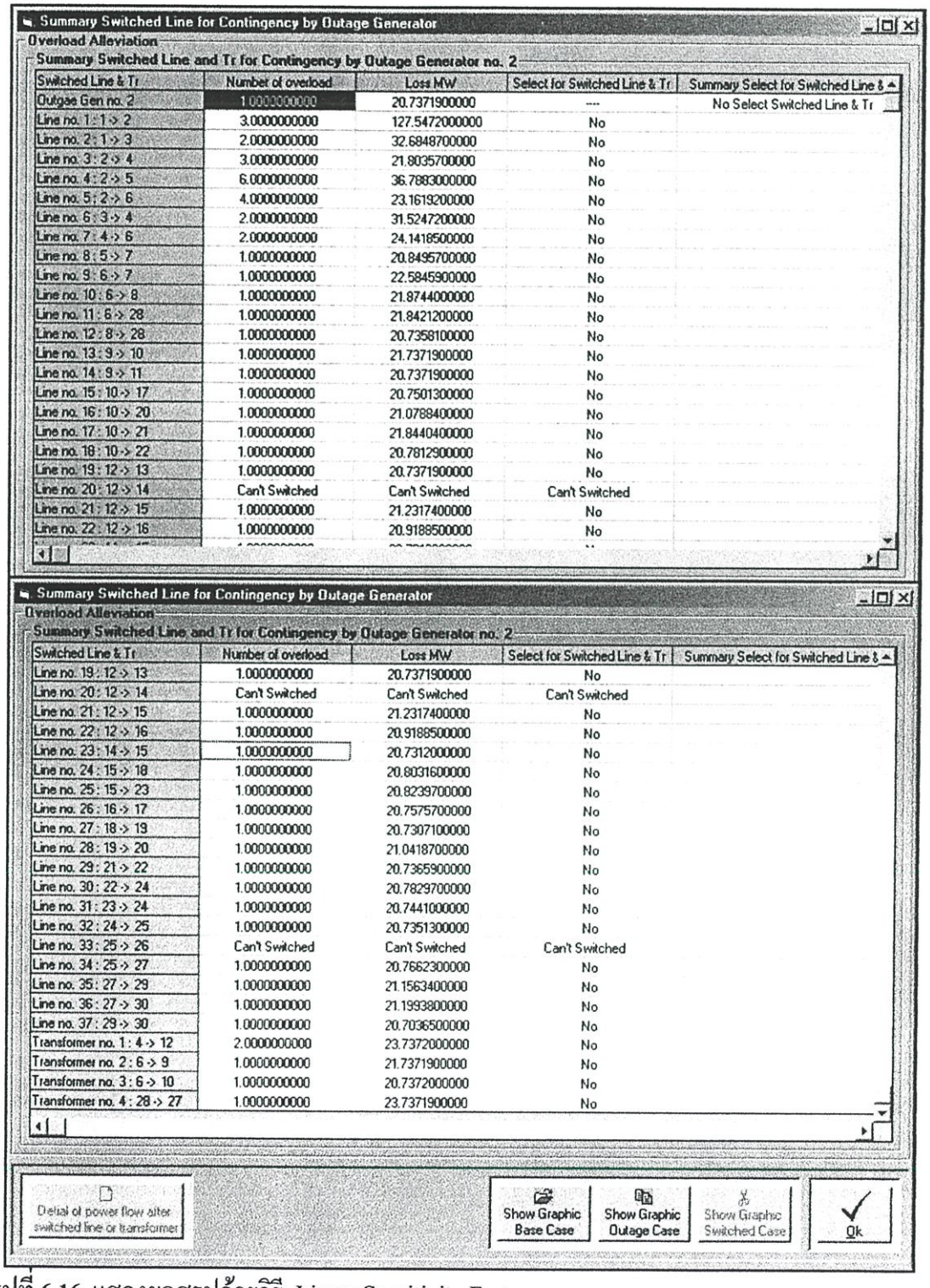

| Line No. | From Bus | To Bus | Base Case Flow (MW) | Flow Limit (MW) | Outage Flow (MW) | % Overload |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | 177.9556000000 | 180.0000000000 | 213.2987000000 * | 18.4992600000 % |
| 2 | 1 | 3 | 83.0821100000 | 100.0000000000 | 90.8630000000 | 0.0000000000 % |
| 3 | 2 | 4 | 45.7391100000 | 72.0000000000 | 42.2987000000 | 0.0000000000 % |
| 4 | 2 | 5 | 83.0654800000 | 130.0000000000 | 82.3627800000 | 0.0000000000 % |
| 5 | 2 | 6 | 61.9507600000 | 100.0000000000 | 59.1436300000 | 0.0000000000 % |
| 6 | 3 | 4 | 77.8813500000 | 100.0000000000 | 85.0985400000 | 0.0000000000 % |
| 7 | 4 | 6 | 70.0740100000 | 105.0000000000 | 73.4434000000 | 0.0000000000 % |
| 8 | 5 | 7 | -14.1275400000 | 130.0000000000 | -14.9244600000 | 0.0000000000 % |
| 9 | 6 | 7 | 37.4532800000 | 130.0000000000 | 38.3201000000 | 0.0000000000 % |
| 10 | 6 | 8 | 29.5690400000 | 65.0000000000 | 29.6330800000 | 0.0000000000 % |
| 11 | 6 | 28 | 18.6945300000 | 72.0000000000 | 18.5757200000 | 0.0000000000 % |
| 12 | 8 | 28 | -0.5389730000 | 65.0000000000 | -0.5099938000 | 0.0000000000 % |
| 13 | 9 | 10 | 27.7876100000 | 65.0000000000 | 27.6253800000 | 0.0000000000 % |
| 14 | 9 | 11 | 0.0000002230 | 65.0000000000 | 0.0000002230 | 0.0000000000 % |
| 15 | 10 | 17 | 5.4008590000 | 32.0000000000 | 5.2341450000 | 0.0000000000 % |
| 16 | 10 | 20 | 9.0536590000 | 32.0000000000 | 8.9623120000 | 0.0000000000 % |
| 17 | 10 | 21 | 15.7894100000 | 32.0000000000 | 15.7820400000 | 0.0000000000 % |
| 18 | 10 | 22 | 7.6206340000 | 32.0000000000 | 7.6158840000 | 0.0000000000 % |
| 19 | 12 | 13 | -0.0000000228 | 130.0000000000 | 0.0000010416 | 0.0000000000 % |
| 20 | 12 | 14 | 7.8473270000 | 65.0000000000 | 7.8917460000 | 0.0000000000 % |
| 21 | 12 | 15 | 17.8405100000 | 65.0000000000 | 18.0064300000 | 0.0000000000 % |
| 22 | 12 | 16 | 7.1773800000 | 65.0000000000 | 7.3470850000 | 0.0000000000 % |
| 23 | 14 | 15 | 1.5738010000 | 32.0000000000 | 1.6154100000 | 0.0000000000 % |
| 24 | 15 | 18 | 5.9882280000 | 32.0000000000 | 6.0801050000 | 0.0000000000 % |
| 25 | 15 | 23 | 5.0030180000 | 32.0000000000 | 5.1150350000 | 0.0000000000 % |
| 26 | 16 | 17 | 3.6251940000 | 65.0000000000 | 3.7925090000 | 0.0000000000 % |
| 27 | 18 | 19 | 2.7499420000 | 32.0000000000 | 2.8404890000 | 0.0000000000 % |
| 28 | 19 | 20 | -6.7549010000 | 32.0000000000 | -6.6645340000 | 0.0000000000 % |
| 29 | 21 | 22 | -1.8221110000 | 32.0000000000 | -1.8296010000 | 0.0000000000 % |
| 30 | 22 | 24 | 5.7452820000 | 32.0000000000 | 5.7322420000 | 0.0000000000 % |
| 31 | 23 | 24 | 1.7717300000 | 32.0000000000 | 1.8823960000 | 0.0000000000 % |
| 32 | 24 | 25 | -1.2344750000 | 32.0000000000 | -1.1377080000 | 0.0000000000 % |
| 33 | 25 | 26 | 3.5446450000 | 32.0000000000 | 3.5449350000 | 0.0000000000 % |
| 34 | 25 | 27 | -4.7891900000 | 32.0000000000 | -4.6924530000 | 0.0000000000 % |
| 35 | 27 | 29 | 6.1899210000 | 32.0000000000 | 6.1909110000 | 0.0000000000 % |
| 36 | 27 | 30 | 7.0920030000 | 32.0000000000 | 7.0932640000 | 0.0000000000 % |
| 37 | 29 | 30 | 3.7037330000 | 32.0000000000 | 3.7040330000 | 0.0000000000 % |
| Transformer No. | | | | | | |
| 1 | 4 | 12 | 44.0651500000 | 65.0000000000 | 44.4452200000 | 0.0000000000 % |
| 2 | 6 | 9 | 27.7876100000 | 65.0000000000 | 27.6253900000 | 0.0000000000 % |
| 3 | 6 | 10 | 15.8770300000 | 32.0000000000 | 15.7689800000 | 0.0000000000 % |
| 4 | 28 | 27 | 18.0955200000 | 65.0000000000 | 18.0001800000 | 0.0000000000 % |
| Line Loss | | | 17.6371900000 | | 20.7371900000 | |
| Transformer Loss | | | 0.0000000000 | | 0.0000000000 | |
| Total Loss | | | 17.6371900000 | | 20.7371900000 | |
| No. Overload | | | None | | 1.0000000000 | |

**รูปที่ 6.15** แสดงการทดสอบ outage generator no.2 ที่ bus 2

จากรูปที่ 6.15 จะเห็นได้ว่าเกิด overload ที่ L1 (1 -> 2) ขึ้น 18.49926 % ดังนั้นจึงทำ

การเลือก switch line เพื่อขจัดหรือบรรเทา overload ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1. วิธี Linear Sensitivity Factors ผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.16



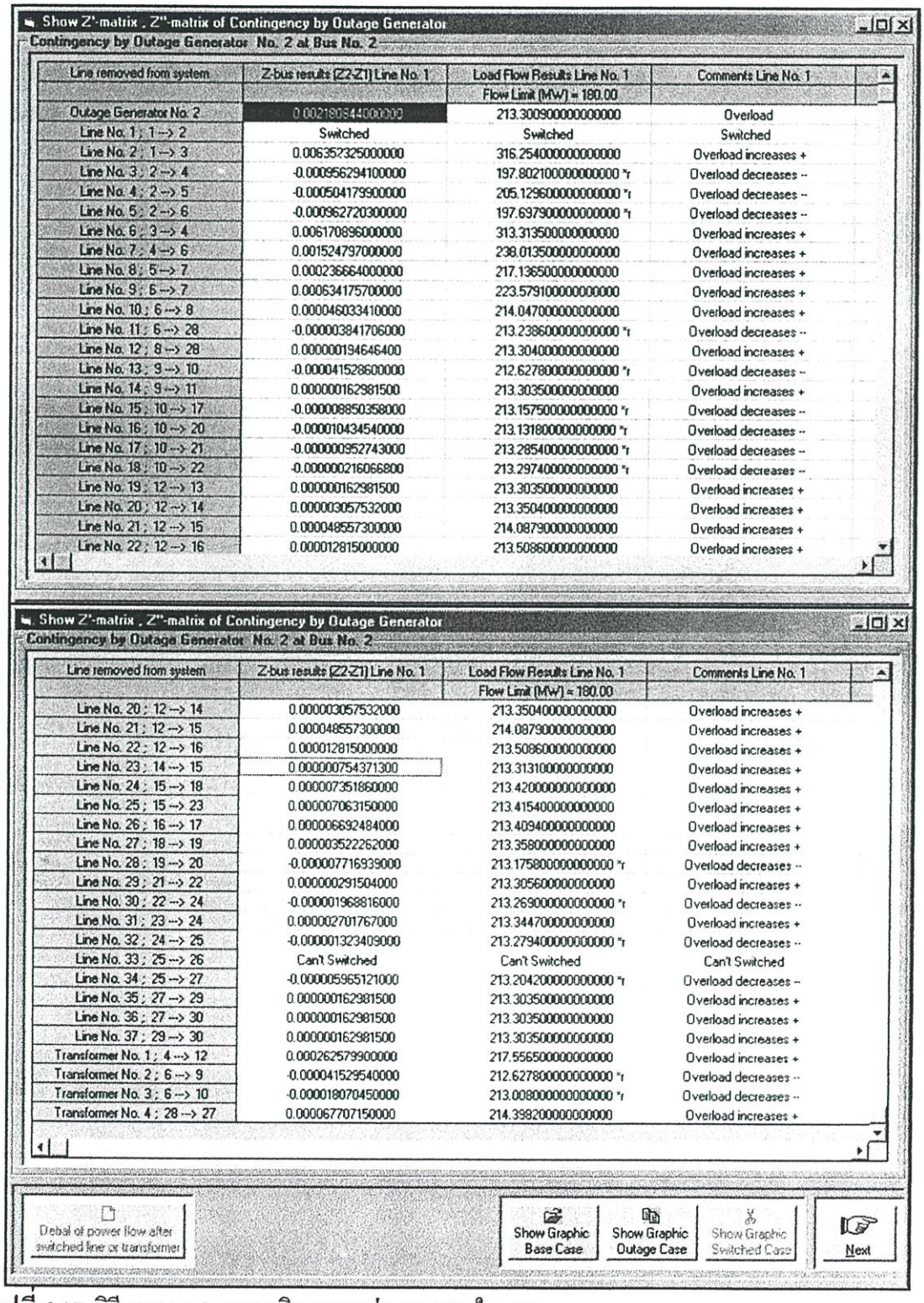

**รูปที่ 6.16** แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors

จากรูปที่ 6.16 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch line & tr ไปทั้งหมดแล้วนั้น ไม่สามารถ

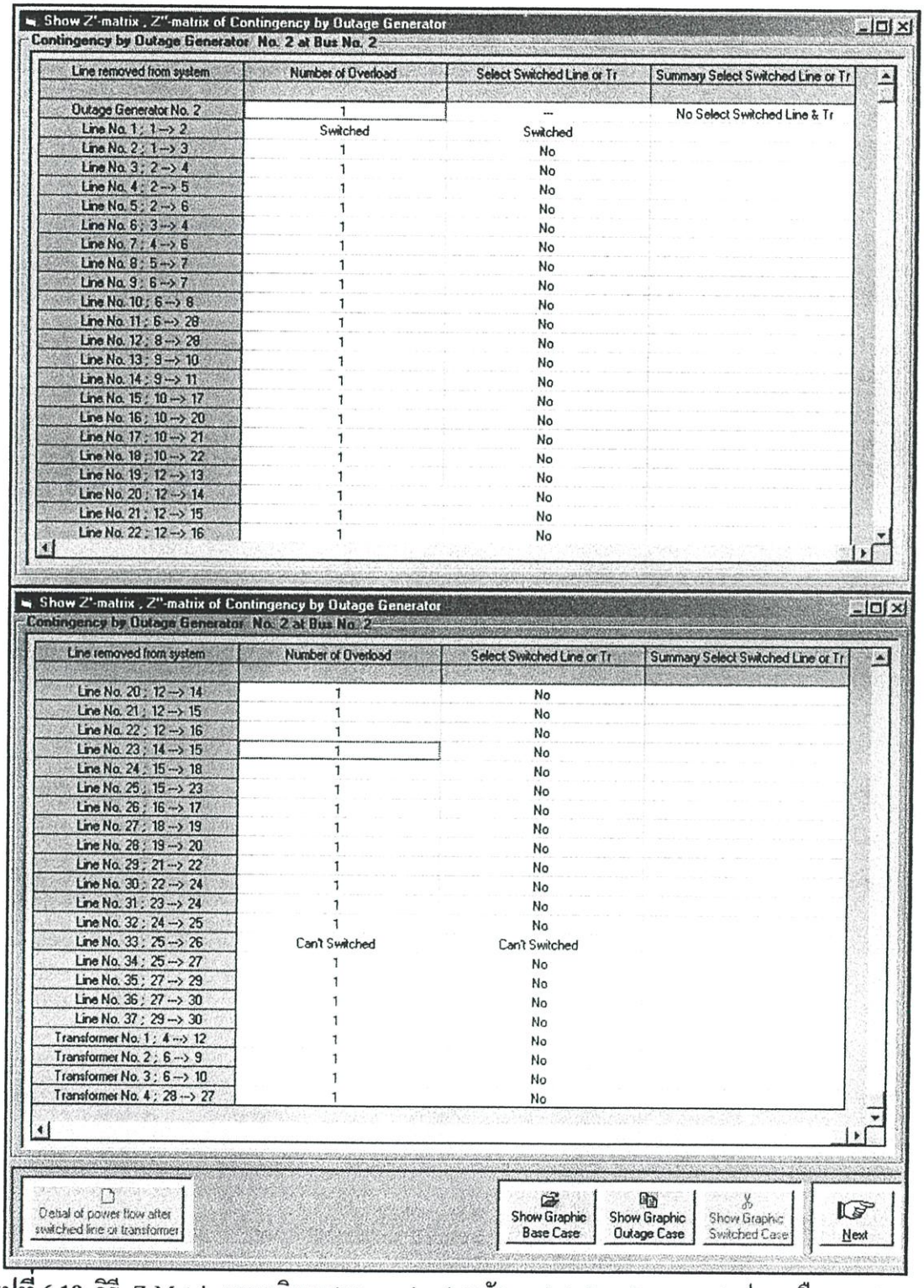
ที่จะขจัดหรือบรรเทา overload ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่สามารถที่จะเลือก switch line or tr ที่สามารถขจัดหรือบรรเทา overload ได้ (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 0.8203125 s) #

2. วิธี Z-Matrix แบบเดิม

ใช้วิธี Z-Matrix แบบเดิม คำนวณผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.17 , 6.18 ตามลำดับ




**รูปที่ 6.17** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2-Z1 ใน L1

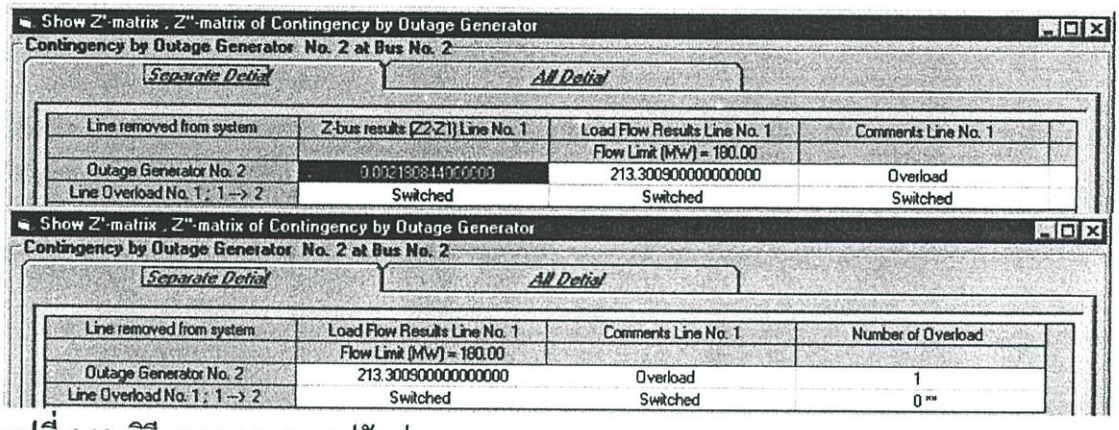



**รูปที่ 6.18** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch

จากรูปที่ 6.18 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch line & tr ไปทั้งหมดแล้วนั้น ไม่สามารถที่จะขจัดหรือบรรเทา overload ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่สามารถที่จะเลือก switch line or tr ที่สามารถขจัดหรือบรรเทา overload ได้ (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 0.2003174 s) #

3. วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

ใช้วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง คำนวณหาผลลัพธ์โดยทำการเลือกตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และ ทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วมีจำนวน overload เหลือน้อยที่สุดหรือมีจำนวน overload = 0 ออกมาจากการเลือก switch line & tr ทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 6.19

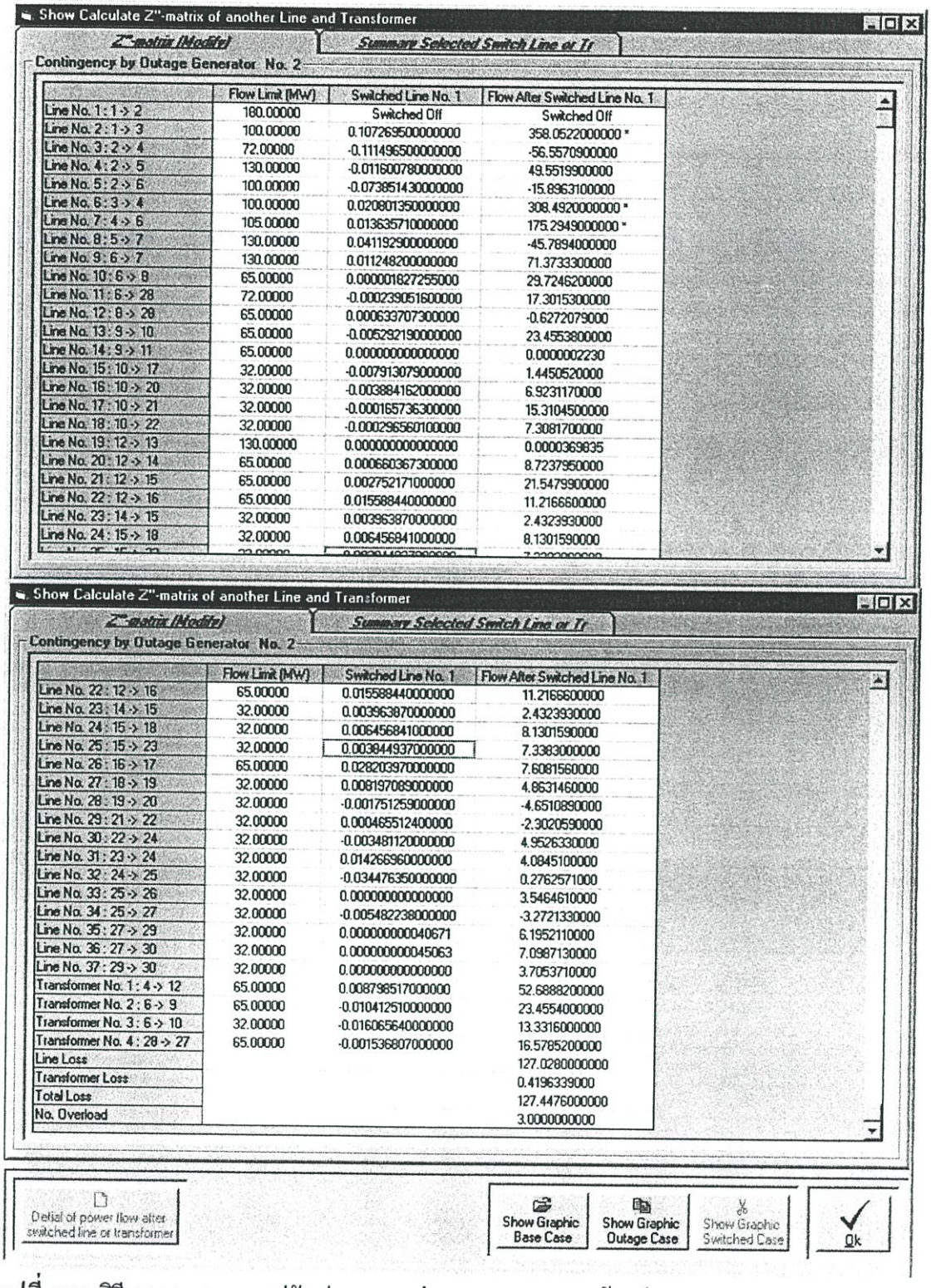



**รูปที่ 6.19** วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

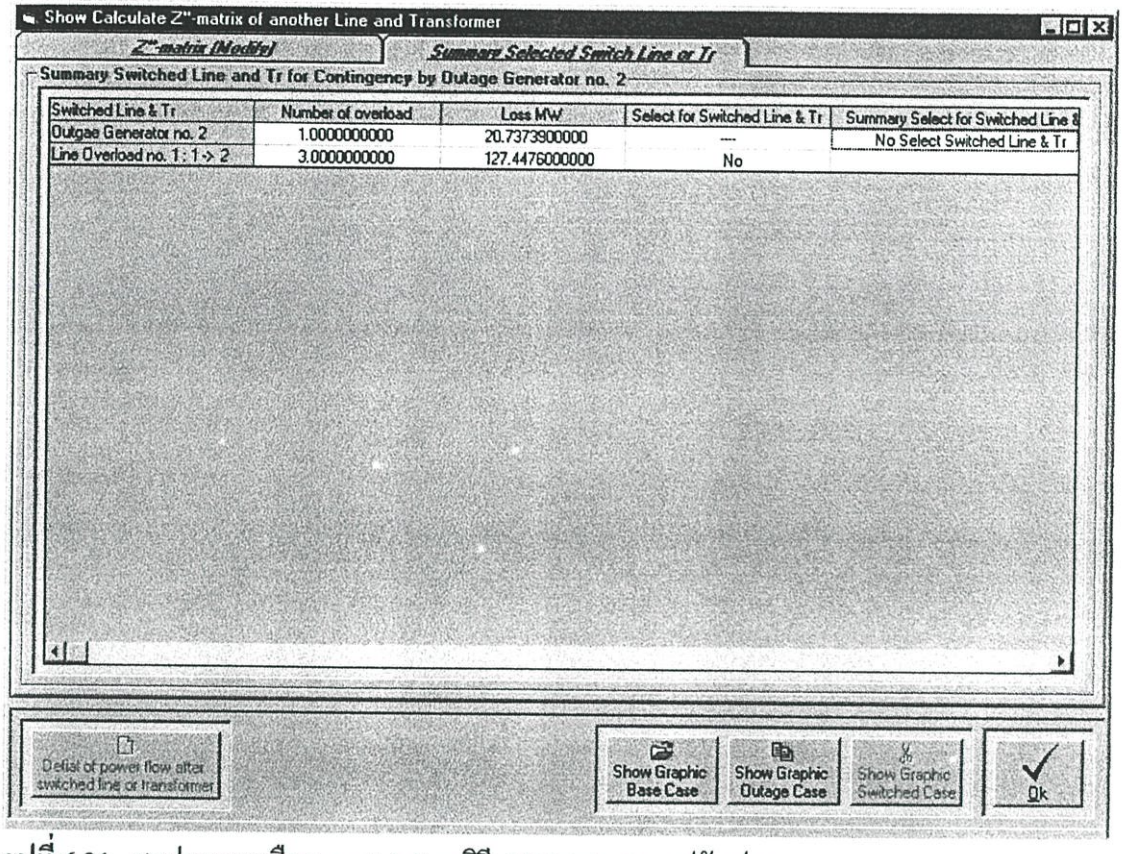
จากรูปที่ 6.19 หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อเลือก switch L1 (1 -> 2) จะมีจำนวน overload รวมเหลือ = 0 ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload แสดงได้ดังรูปที่ 6.20 และสรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงได้ดังรูปที่ 6.21

จากรูป 6.21 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch line & tr ไปทั้งหมดแล้วนั้น ไม่สามารถที่จะขจัดหรือบรรเทา overload ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่สามารถที่จะเลือก switch line or tr ที่สามารถขจัดหรือบรรเทา overload ได้ (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 0.2478027 s) #

เพื่อให้เห็นภาพรวมได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นจึงทำการจัดแสดงภาพ graphic ของการ outage generator แสดงดังรูปที่ 6.22 และ , สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line แสดงได้ดังตารางที่ 6.7



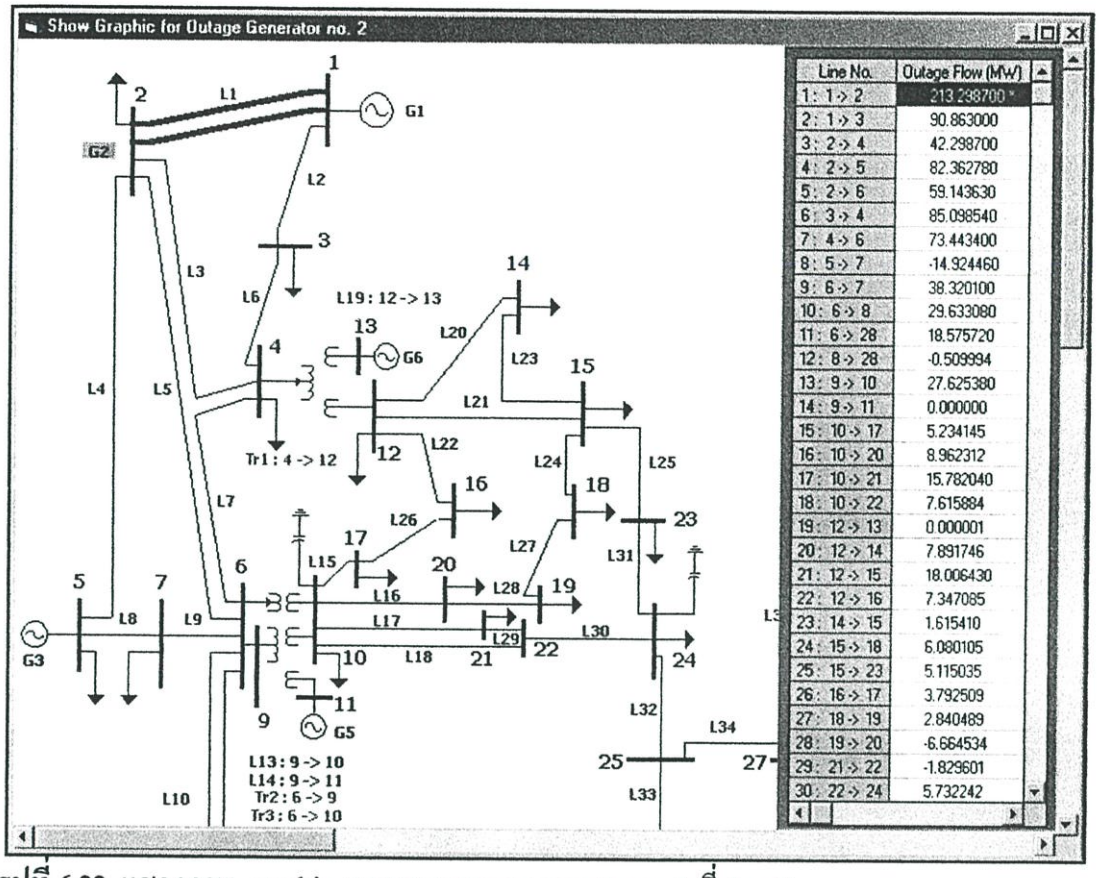

**รูปที่ 6.20** วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงค่าการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload




**รูปที่ 6.21** สรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

**ตารางที่ 6.7** สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line

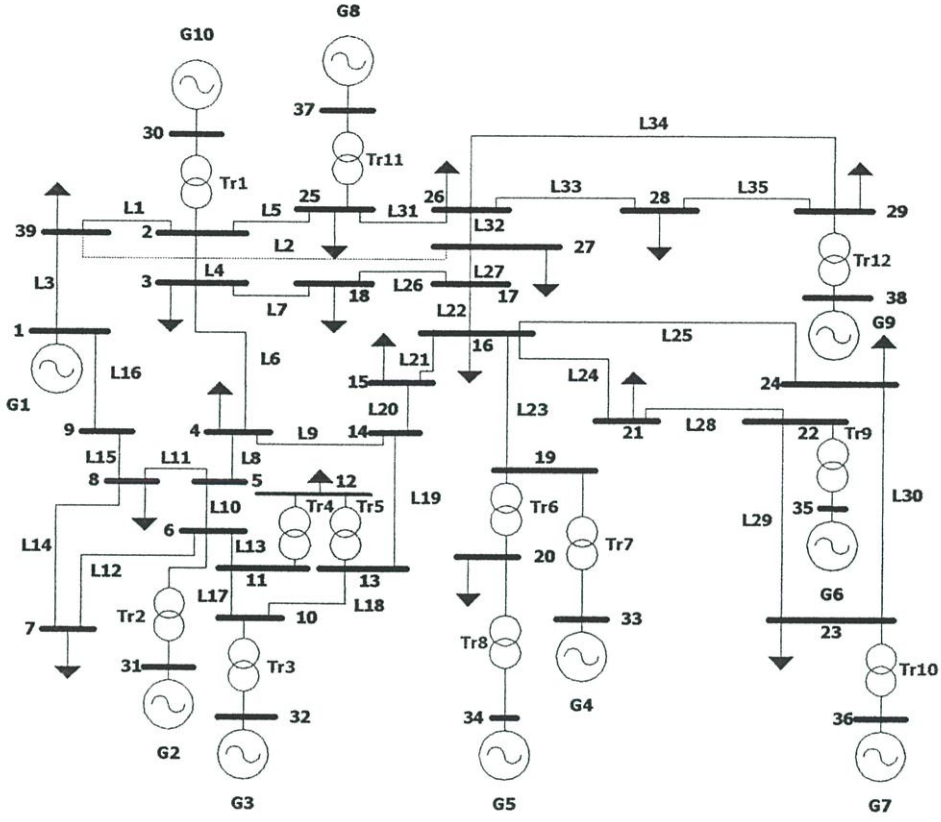
| | เวลา (s) | เลือก Switched Line |
|---|---|---|
| | Outage Gen no.2 | Outage Gen no.2 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 0.8203125 | - |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 0.2003174 | - |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 0.2478027 | - |




**รูปที่ 6.22** แสดงภาพ graphic ของการ outage generator no.2 ที่ bus 2

### 6.2.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System [12]

ระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System แสดงได้ดังรูปที่ 6.23




**รูปที่ 6.23** ระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System [12]

โดยมีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 6.8** แสดงข้อมูลทั่วไปของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System

| ชนิดของข้อมูลทั่วไป | ข้อมูล |
|---|---|
| จำนวน Generator | 10 |
| จำนวน Bus | 39 |
| จำนวน Line | 35 |
| จำนวน Transformer | 12 |
| จำนวน Capacitor | 0 |
| ฐานของ MVA | 100 |
| บัสอ้างอิง | 1 |
| จำนวนรอบการคำนวณซ้ำสูงสุด | 100 |
| ค่าความผิดพลาดของกำลังไฟฟ้า | 0.00006 |

**ตารางที่ 6.9** แสดงข้อมูล Bus ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System

| Bus No. | Bus Type | Volt (pu) | Angle (degree) | Generation MW | Generation MVAR | Load MW | Load MVAR | $Q_{max}$ MVAR | $Q_{min}$ MVAR | $Q_c$ MVAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Slack | 1.054 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 322.0 | 2.0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 500.0 | 184.0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 234.0 | 84.0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 522.0 | 177.0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 104.0 | 125.0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 9.0 | 88.0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 320.0 | 153.0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 329.0 | 32.0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 158.0 | 30.0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 680.0 | 103.0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 274.0 | 115.0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 248.0 | 85.0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 309.0 | -92.0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 224.0 | 47.0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 139.0 | 17.0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 281.0 | 76.0 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 206.0 | 28.0 | 0 | 0 | 0 |

**ตารางที่ 6.9** (ต่อ)

| Bus No. | Bus Type | Volt (pu) | Angle (degree) | Generation MW | Generation MVAR | Load MW | Load MVAR | Qmax MVAR | Qmin MVAR | Qc MVAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 29 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 284.0 | 27.0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | PV | 1.048 | 0 | 250.0 | 0 | 0 | 0 | 180 | -60 | 0 |
| 31 | PV | 0.974 | 0 | 545.0 | 0 | 0 | 0 | 140 | -47 | 0 |
| 32 | PV | 0.982 | 0 | 650.0 | 0 | 0 | 0 | 180 | -60 | 0 |
| 33 | PV | 0.996 | 0 | 632.0 | 0 | 0 | 0 | 50 | -40 | 0 |
| 34 | PV | 1.012 | 0 | 505.2 | 0 | 0 | 0 | 155 | -50 | 0 |
| 35 | PV | 1.051 | 0 | 700.0 | 0 | 0 | 0 | 280 | -165 | 0 |
| 36 | PV | 1.062 | 0 | 560.0 | 0 | 0 | 0 | 200 | -140 | 0 |
| 37 | PV | 1.031 | 0 | 540.0 | 0 | 0 | 0 | 30 | -10 | 0 |
| 38 | PV | 1.025 | 0 | 800.0 | 0 | 0 | 0 | 30 | -10 | 0 |
| 39 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**ตารางที่ 6.10** แสดงข้อมูล Line ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System

| Line No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | BC/2 (pu) | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 39 | 0.0035 | 0.0411 | 0.34935 | 208.05 |
| 2 | 27 | 39 | 0.003 | 0.032 | 0 | 228.2 |
| 3 | 1 | 39 | 0.0010 | 0.025 | 0.375 | 208.04 |
| 4 | 2 | 3 | 0.0013 | 0.0151 | 0.1286 | 819.39 |
| 5 | 2 | 25 | 0.007 | 0.0086 | 0.073 | 401.66 |
| 6 | 3 | 4 | 0.0013 | 0.0213 | 0.1107 | 237.79 |
| 7 | 3 | 18 | 0.0011 | 0.0133 | 0.1069 | 117.7 |
| 8 | 4 | 5 | 0.0008 | 0.0128 | 0.0671 | 443.8 |
| 9 | 4 | 14 | 0.0008 | 0.0129 | 0.0691 | 559.5 |
| 10 | 5 | 6 | 0.0002 | 0.0026 | 0.0217 | 818.8 |
| 11 | 5 | 8 | 0.0008 | 0.0112 | 0.0738 | 526.55 |

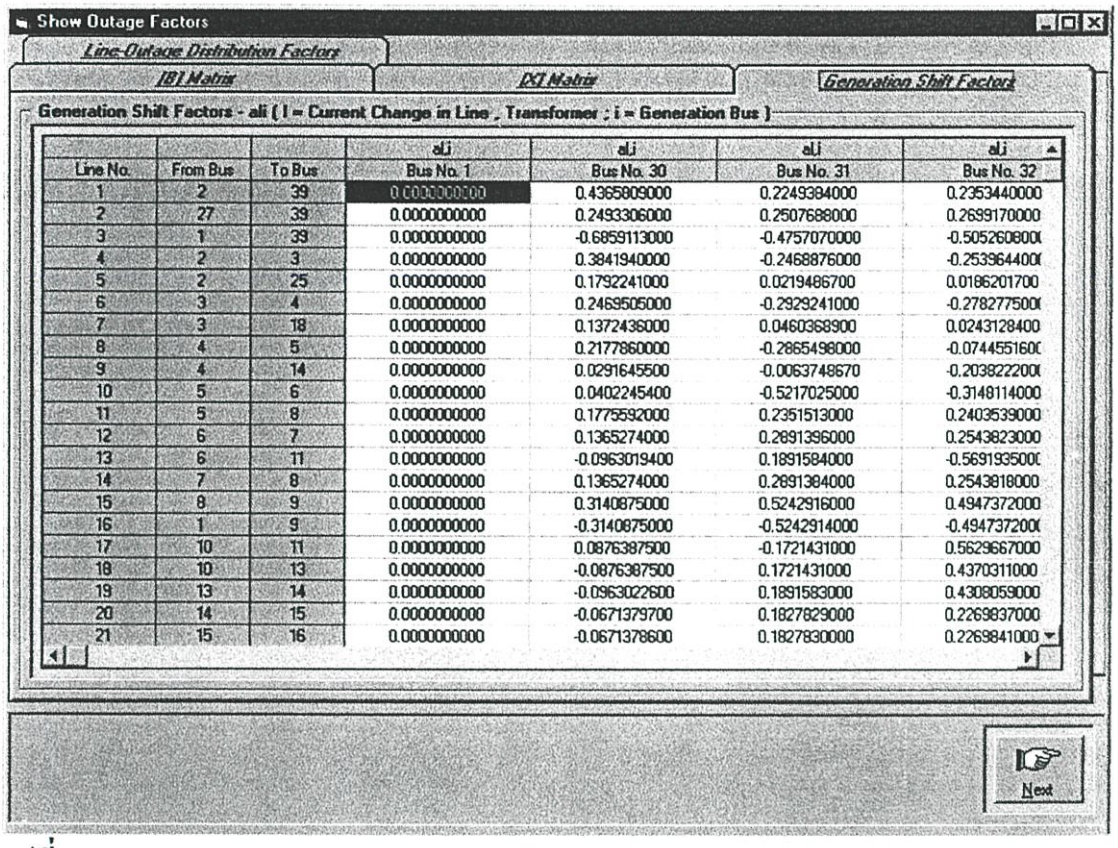
**ตารางที่ 6.10** (ต่อ)

| Line No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | BC/2 (pu) | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 6 | 7 | 0.0006 | 0.0092 | 0.0565 | 714.65 |
| 13 | 6 | 11 | 0.0007 | 0.0082 | 0.06945 | 719.494 |
| 14 | 7 | 8 | 0.0004 | 0.0046 | 0.039 | 559.5 |
| 15 | 8 | 9 | 0.0023 | 0.0363 | 0.1902 | 246.93 |
| 16 | 1 | 9 | 0.001 | 0.0250 | 0.6 | 295.69 |
| 17 | 10 | 11 | 0.0004 | 0.0043 | 0.03645 | 495.94 |
| 18 | 10 | 13 | 0.0004 | 0.0043 | 0.03645 | 789.8 |
| 19 | 13 | 14 | 0.0009 | 0.0101 | 0.08615 | 595.79 |
| 20 | 14 | 15 | 0.0018 | 0.0217 | 0.183 | 240.4 |
| 21 | 15 | 16 | 0.0009 | 0.0094 | 0.0855 | 421.416 |
| 22 | 16 | 17 | 0.0007 | 0.0089 | 0.0671 | 295.69 |
| 23 | 16 | 19 | 0.0016 | 0.0195 | 0.152 | 595.79 |
| 24 | 16 | 21 | 0.0008 | 0.0135 | 0.1274 | 412.7 |
| 25 | 16 | 24 | 0.0003 | 0.0059 | 0.034 | 66.28 |
| 26 | 17 | 18 | 0.0007 | 0.0082 | 0.06595 | 270.64 |
| 27 | 17 | 27 | 0.0013 | 0.0173 | 0.1608 | 131.33 |
| 28 | 21 | 22 | 0.0008 | 0.014 | 0.12825 | 848.2 |
| 29 | 22 | 23 | 0.0006 | 0.0096 | 0.0923 | 88.38 |
| 30 | 23 | 24 | 0.0022 | 0.035 | 0.1805 | 480.1 |
| 31 | 25 | 26 | 0.0032 | 0.0323 | 0.2565 | 228.2 |
| 32 | 26 | 27 | 0.0014 | 0.0147 | 0.1198 | 410.01 |
| 33 | 26 | 28 | 0.0043 | 0.0474 | 0.3901 | 163.2 |
| 34 | 26 | 29 | 0.0057 | 0.0625 | 0.5145 | 242.7 |
| 35 | 28 | 29 | 0.0014 | 0.0151 | 0.1245 | 488.8 |

**ตารางที่ 6.11** แสดงข้อมูล Transformer ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System

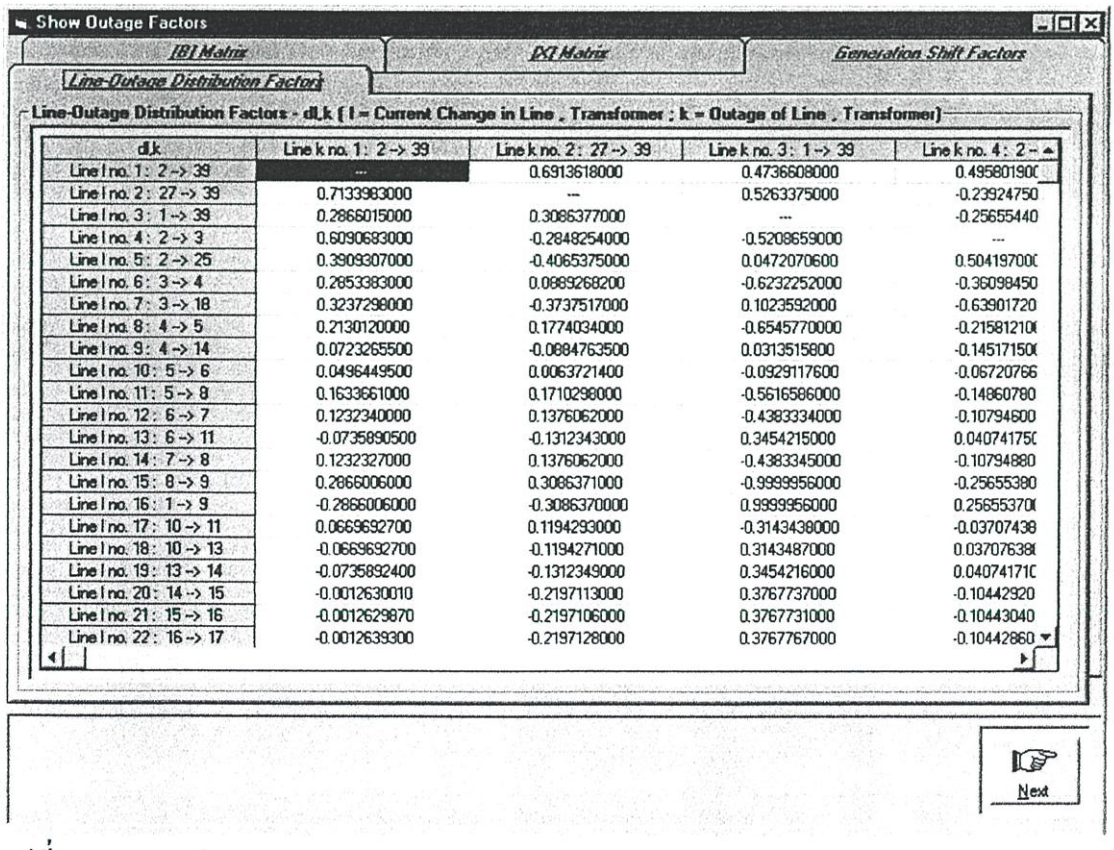
| Tr No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | BC/2 (pu) | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 30 | 0 | 0.0181 | 0 | 676.18 |
| 2 | 6 | 31 | 0 | 0.025 | 0 | 1092.22 |
| 3 | 10 | 32 | 0 | 0.02 | 0 | 970.7 |
| 4 | 11 | 12 | 0.0016 | 0.0435 | 0 | 73.5 |
| 5 | 12 | 13 | 0.0016 | 0.0435 | 0 | 88.38 |
| 6 | 19 | 20 | 0.0007 | 0.0138 | 0 | 347.9 |
| 7 | 19 | 33 | 0.0007 | 0.0142 | 0 | 890.7 |
| 8 | 20 | 34 | 0.0009 | 0.018 | 0 | 712 |
| 9 | 22 | 35 | 0 | 0.0143 | 0 | 924.1 |
| 10 | 23 | 36 | 0.0005 | 0.0272 | 0 | 789.8 |
| 11 | 25 | 37 | 0.0006 | 0.0232 | 0 | 850.69 |
| 12 | 29 | 38 | 0.0008 | 0.0156 | 0 | 1172.9 |

หาค่า the generation shift factors ($a_{li}$) , the line outage distribution factors ($d_{l,k}$) แสดงได้ดังรูปที่ 6.24 และ 6.25 ตามลำดับ




| Line No. | From Bus | To Bus | ali Bus No. 1 | ali Bus No. 30 | ali Bus No. 31 | ali Bus No. 32 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 39 | 0.0000000000 | 0.4365809000 | 0.2249384000 | 0.2353440000 |
| 2 | 27 | 39 | 0.0000000000 | 0.2493306000 | 0.2507688000 | 0.2699170000 |
| 3 | 1 | 39 | 0.0000000000 | -0.6859113000 | -0.4757070000 | -0.5052608000 |
| 4 | 2 | 3 | 0.0000000000 | 0.3841940000 | -0.2468876000 | -0.2539644000 |
| 5 | 2 | 25 | 0.0000000000 | 0.1792241000 | 0.0219486700 | 0.0186201700 |
| 6 | 3 | 4 | 0.0000000000 | 0.2469505000 | -0.2929241000 | -0.2782775000 |
| 7 | 3 | 18 | 0.0000000000 | 0.1372436000 | 0.0460368900 | 0.0243128400 |
| 8 | 4 | 5 | 0.0000000000 | 0.2177860000 | -0.2865498000 | -0.0744551600 |
| 9 | 4 | 14 | 0.0000000000 | 0.0291645500 | -0.0063748670 | -0.2038222000 |
| 10 | 5 | 6 | 0.0000000000 | 0.0402245400 | -0.5217025000 | -0.3148114000 |
| 11 | 5 | 8 | 0.0000000000 | 0.1775592000 | 0.2351513000 | 0.2403539000 |
| 12 | 6 | 7 | 0.0000000000 | 0.1365274000 | 0.2691396000 | 0.2543823000 |
| 13 | 6 | 11 | 0.0000000000 | -0.0963019400 | 0.1891584000 | -0.5691935000 |
| 14 | 7 | 8 | 0.0000000000 | 0.1365274000 | 0.2691384000 | 0.2543818000 |
| 15 | 8 | 9 | 0.0000000000 | 0.3140875000 | 0.5242916000 | 0.4947372000 |
| 16 | 1 | 9 | 0.0000000000 | -0.3140875000 | -0.5242914000 | -0.4947372000 |
| 17 | 10 | 11 | 0.0000000000 | 0.0876387500 | -0.1721431000 | 0.5629667000 |
| 18 | 10 | 13 | 0.0000000000 | -0.0876387500 | 0.1721431000 | 0.4370311000 |
| 19 | 13 | 14 | 0.0000000000 | -0.0963022600 | 0.1891583000 | 0.4308059000 |
| 20 | 14 | 15 | 0.0000000000 | -0.0671379700 | 0.1827829000 | 0.2269837000 |
| 21 | 15 | 16 | 0.0000000000 | -0.0671378600 | 0.1827830000 | 0.2269841000 |

**รูปที่ 6.24** แสดง the generation shift factors ($a_{li}$) ของระบบ 39-Bus New England System



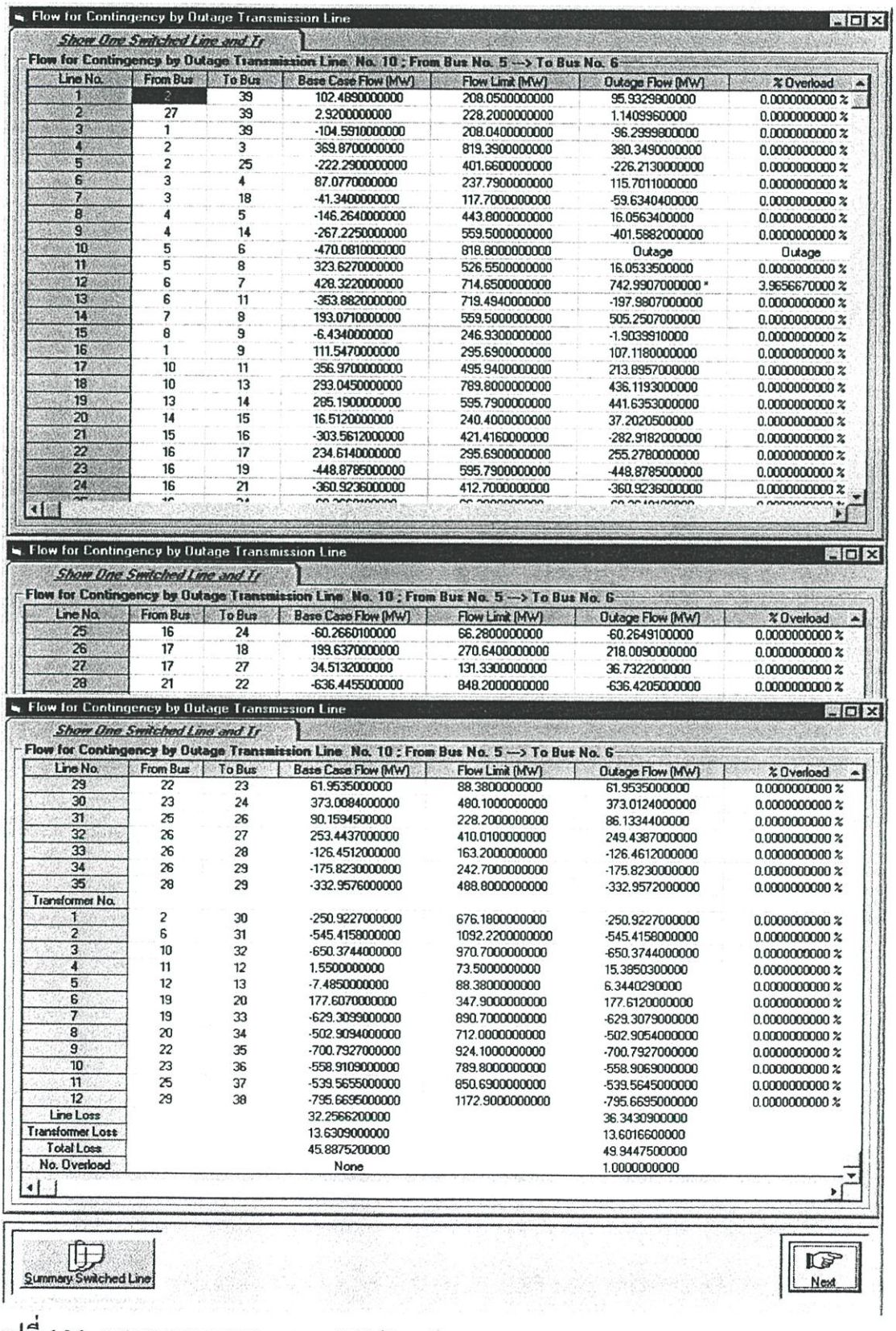

| dLk | Line k no. 1: 2 -> 39 | Line k no. 2: 27 -> 39 | Line k no. 3: 1 -> 39 | Line k no. 4: 2 - |
|---|---|---|---|---|
| Line l no. 1: 2 -> 39 | --- | 0.6913618000 | 0.4736608000 | 0.4958019000 |
| Line l no. 2: 27 -> 39 | 0.7133983000 | --- | 0.5263375000 | -0.2392475 |
| Line l no. 3: 1 -> 39 | 0.2866015000 | 0.3086377000 | --- | -0.2565544 |
| Line l no. 4: 2 -> 3 | 0.6090683000 | -0.2848254000 | -0.5208659000 | --- |
| Line l no. 5: 2 -> 25 | 0.3909307000 | -0.4065375000 | 0.0472070600 | 0.5041970 |
| Line l no. 6: 3 -> 4 | 0.2653383000 | 0.0889268200 | -0.6232252000 | -0.3609845 |
| Line l no. 7: 3 -> 18 | 0.3237298000 | -0.3737517000 | 0.1023592000 | -0.6390172 |
| Line l no. 8: 4 -> 5 | 0.2130120000 | 0.1774034000 | -0.6545770000 | -0.2158121 |
| Line l no. 9: 4 -> 14 | 0.0723265500 | -0.0884763500 | 0.0313515800 | -0.1451715 |
| Line l no. 10: 5 -> 6 | 0.0496449500 | 0.0063721400 | -0.0929117600 | -0.0672076 |
| Line l no. 11: 5 -> 8 | 0.1633661000 | 0.1710298000 | -0.5616586000 | -0.1486078 |
| Line l no. 12: 6 -> 7 | 0.1232340000 | 0.1376062000 | -0.4383334000 | -0.1079460 |
| Line l no. 13: 6 -> 11 | -0.0735890500 | -0.1312343000 | 0.3454215000 | 0.0407417 |
| Line l no. 14: 7 -> 8 | 0.1232327000 | 0.1376062000 | -0.4383345000 | -0.1079488 |
| Line l no. 15: 8 -> 9 | 0.2866006000 | 0.3086371000 | -0.9999956000 | -0.2565538 |
| Line l no. 16: 1 -> 9 | -0.2866006000 | -0.3086370000 | 0.9999956000 | 0.2565537 |
| Line l no. 17: 10 -> 11 | 0.0669692700 | 0.1194293000 | -0.3143438000 | -0.0370743 |
| Line l no. 18: 10 -> 13 | -0.0669692700 | -0.1194271000 | 0.3143487000 | 0.0370763 |
| Line l no. 19: 13 -> 14 | -0.0735892400 | -0.1312349000 | 0.3454216000 | 0.0407417 |
| Line l no. 20: 14 -> 15 | -0.0012630010 | -0.2197113000 | 0.3767737000 | -0.1044292 |
| Line l no. 21: 15 -> 16 | -0.0012629870 | -0.2197106000 | 0.3767731000 | -0.1044304 |
| Line l no. 22: 16 -> 17 | -0.0012639300 | -0.2197128000 | 0.3767767000 | -0.1044286 |

**รูปที่ 6.25** แสดงค่า the line outage distribution factors ($d_{l,k}$) ของ 39-Bus New England System

ทำการทดสอบ outage อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังได้ดังต่อไปนี้

6.2.2.1 ทดสอบ outage line

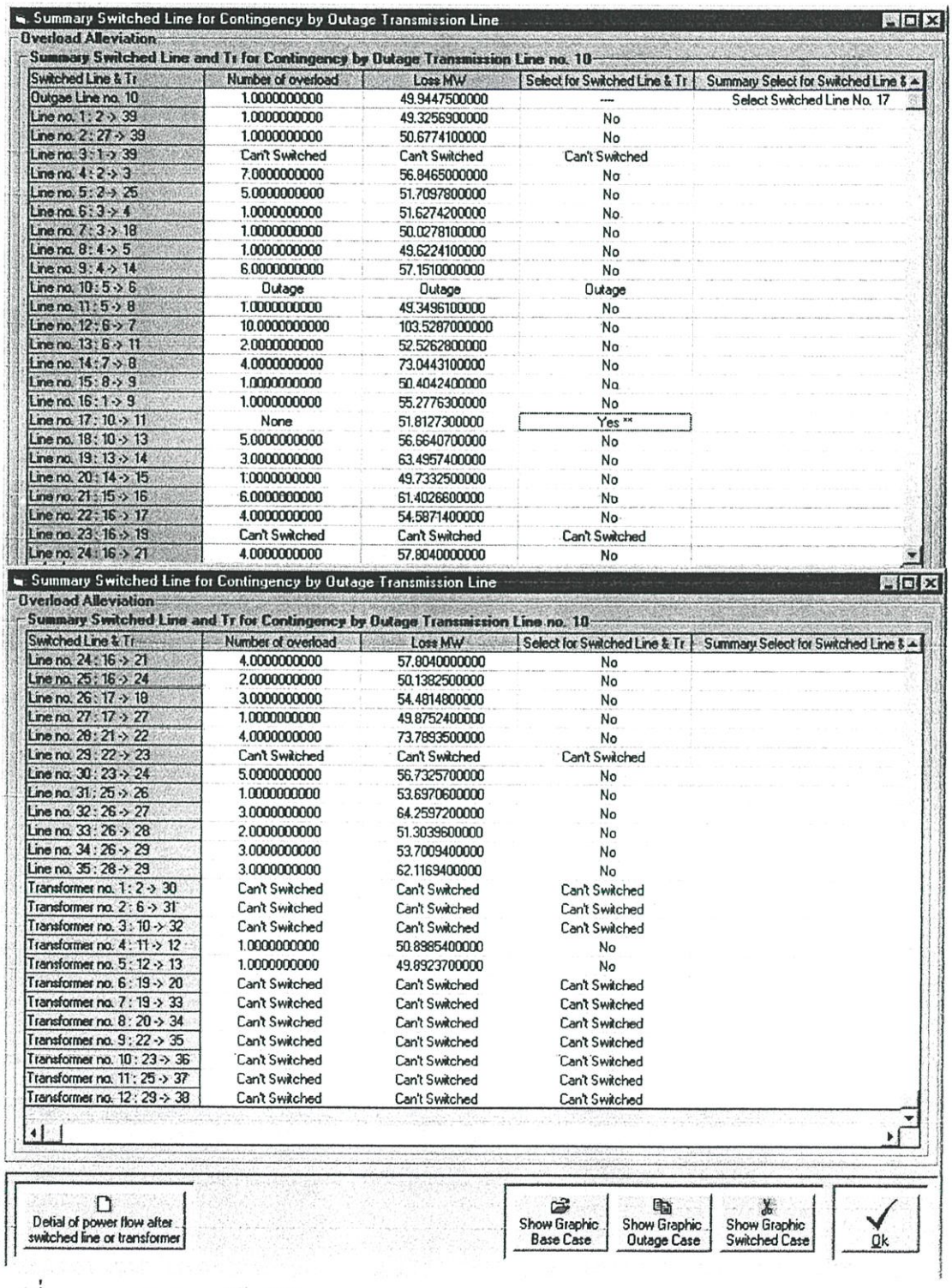
สมมุติเลือกทดสอบ outage L10 (5 -> 6) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 6.26




**รูปที่ 6.26** แสดงการทดสอบ outage L10 (5 -> 6)

จากรูปที่ 6.29 เกิด overload ที่ L12 (6 -> 7) ดังนั้นจึงทำการเลือก switch line ดังต่อไปนี้

1. วิธี Linear Sensitivity Factors ผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.27




**รูปที่ 6.27** แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors

จากรูปที่ 6.27 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch L17 (10 -> 11) ไปแล้วนั้นสามารถที่จะขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ ดังนั้นจึงทำการเลือก switch L17 (10 -> 11) จึงเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 1.585938 s) #

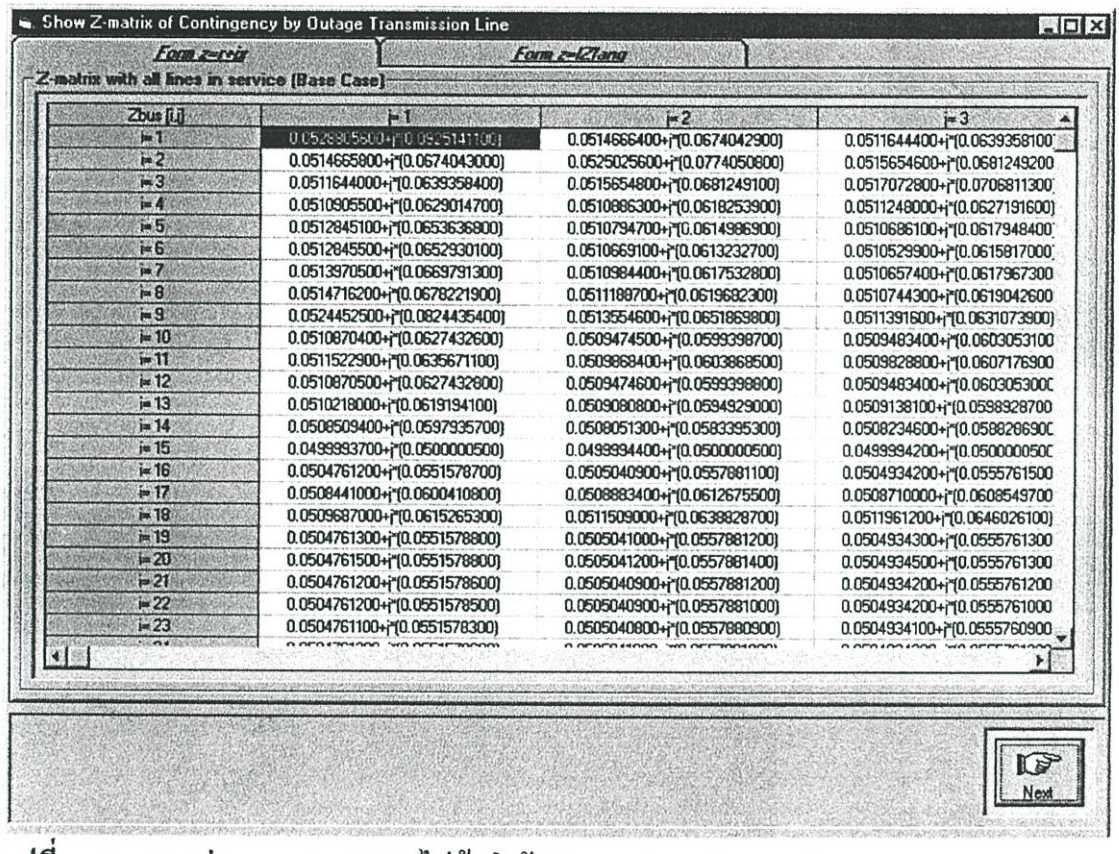
ส่วนค่า power flow หลังจากเลือก switch L17 (10 -> 11) ไปแล้วแสดงได้ดังตารางที่ 6.12

**ตารางที่ 6.12** แสดงค่า power flow หลังจากเลือก switch L17 (10 -> 11)

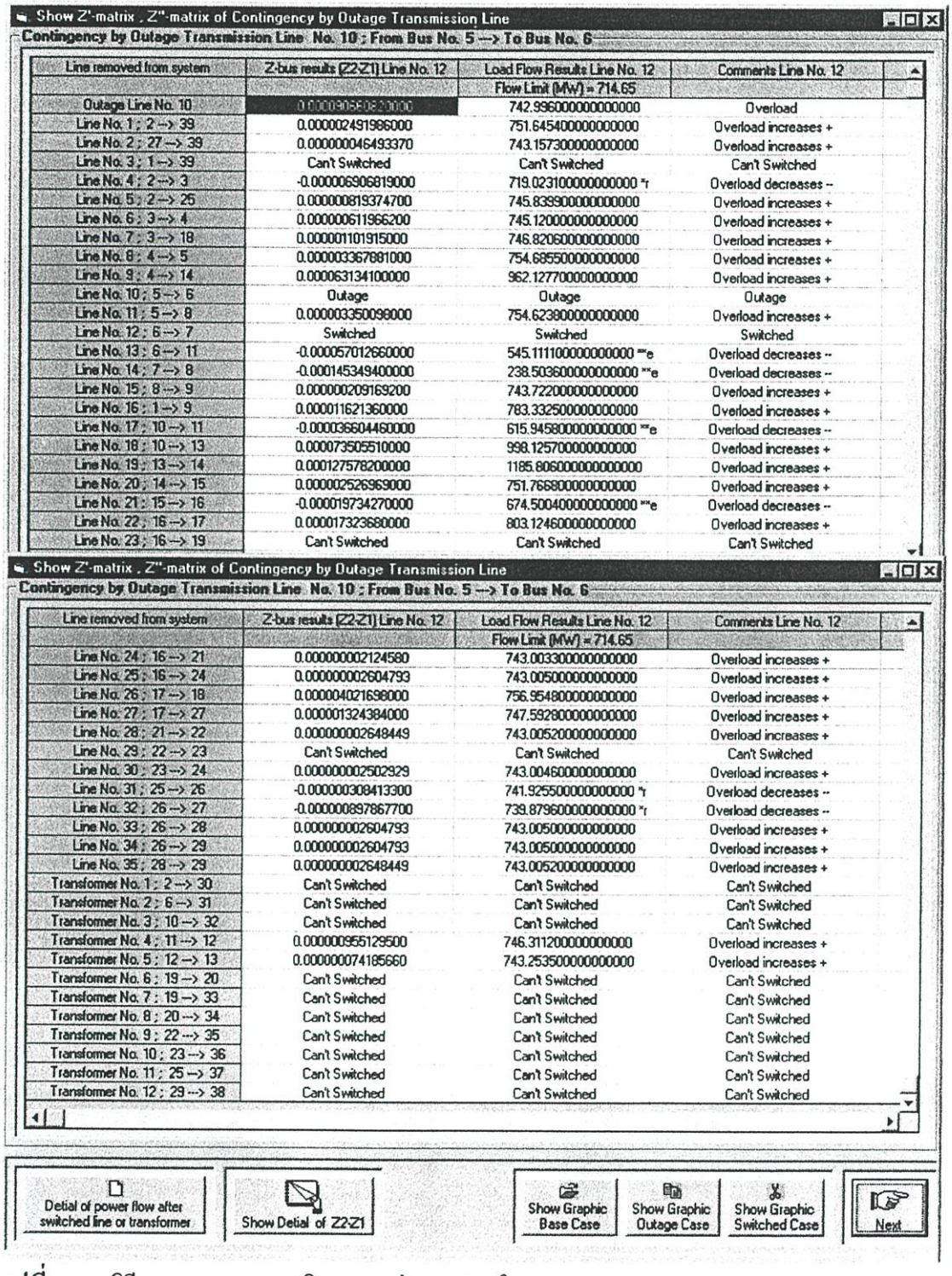
| | Outage Flow (MW) | Limit (MW) | OL10+SwL17 (LSF) | OL10+SwL17 (Run Load flow) |
|---|---|---|---|---|
| L1 : 2 -> 39 | 95.93298 | 208.05 | 106.09190 | 106.09200 |
| L2 : 27 -> 39 | 1.14100 | 228.2 | 16.22759 | 16.23400 |
| L3 : 1 -> 39 | -96.29998 | 208.04 | -121.38980 | -121.37950 |
| L4 : 2 -> 3 | 380.34900 | 819.39 | 371.67230 | 371.57900 |
| L5 : 2 -> 25 | -226.21300 | 401.66 | -227.69590 | -227.68500 |
| L6 : 3 -> 4 | 115.70110 | 237.79 | 117.38630 | 117.37800 |
| L7 : 3 -> 18 | -59.63404 | 117.7 | -69.95731 | -69.95640 |
| L8 : 4 -> 5 | 16.05634 | 443.8 | 115.45490 | 115.47200 |
| L9 : 4 -> 14 | -401.58820 | 559.5 | -499.19400 | -499.20000 |
| L10 : 5 -> 6 | Outage | 818.8 | Outage | Outage |
| L11 : 5 -> 8 | 16.05335 | 526.55 | 115.49780 | 115.57800 |
| L12 : 6 -> 7 | 742.99070 | 714.65 | 615.93230 | 615.93410 |
| L13 : 6 -> 11 | -197.98070 | 719.494 | -70.83727 | -70.90120 |
| L14 : 7 -> 8 | 505.25070 | 559.5 | 379.11420 | 379.13790 |
| L15 : 8 -> 9 | -1.90399 | 246.93 | -28.55804 | -28.61030 |
| L16 : 1 -> 9 | 107.11800 | 295.69 | 133.98340 | 133.99210 |
| L17 : 10 -> 11 | 213.89570 | 495.94 | Switched | Switched |
| L18 : 10 -> 13 | 436.11930 | 789.8 | 650.01460 | 650.00020 |
| L19 : 13 -> 14 | 441.63530 | 595.79 | 568.20310 | 568.21450 |
| L20 : 14 -> 15 | 37.20205 | 240.4 | 64.27630 | 64.25130 |
| L21 : 15 -> 16 | -282.91820 | 421.416 | -255.90820 | -255.94370 |
| L22 : 16 -> 17 | 255.27800 | 295.69 | 282.36270 | 282.37650 |
| L23 : 16 -> 19 | -448.87850 | 595.79 | -448.87050 | -448.37410 |
| L24 : 16 -> 21 | -360.92360 | 412.7 | -360.89310 | -359.81480 |
| L25 : 16 -> 24 | -60.26491 | 66.28 | -60.25508 | -60.02668 |
| L26 : 17 -> 18 | 218.00900 | 270.64 | 228.37800 | 228.36720 |
| L27 : 17 -> 27 | 36.73220 | 131.33 | 53.34692 | 53.45120 |
| L28 : 21 -> 22 | -636.42050 | 848.2 | -636.40300 | -634.88270 |
| L29 : 22 -> 23 | 61.95350 | 88.38 | 61.96294 | 61.71690 |
| L30 : 23 -> 24 | 373.01240 | 480.1 | 373.01540 | 372.13210 |
| L31 : 25 -> 26 | 86.13344 | 228.2 | 84.62222 | 84.56045 |
| L32 : 26 -> 27 | 249.43870 | 410.01 | 247.93530 | 246.57520 |
| L33 : 26 -> 28 | -126.46120 | 163.2 | -126.47030 | -125.93300 |
| L34 : 26 -> 29 | -175.82300 | 242.7 | -175.81070 | -175.30460 |
| L35 : 28 -> 29 | -332.95720 | 488.8 | -332.96900 | -332.59800 |
| Tr1 : 2 -> 30 | -250.92270 | 676.18 | -250.92270 | -250.00000 |
| Tr2 : 6 -> 31 | -545.41580 | 1092.22 | -545.41580 | -544.99980 |
| Tr3 : 10 -> 32 | -650.37440 | 970.7 | -650.37440 | -650.00010 |
| Tr4 : 11 -> 12 | 15.38503 | 73.5 | -70.64616 | -70.58133 |
| Tr5 : 12 -> 13 | 6.34403 | 88.38 | -79.84222 | -79.67324 |
| Tr6 : 19 -> 20 | 177.61200 | 347.9 | 177.61550 | 177.45030 |
| Tr7 : 19 -> 33 | -629.30790 | 890.7 | -629.30630 | -629.16490 |
| Tr8 : 20 -> 34 | -502.90540 | 712 | -502.90230 | -502.77640 |
| Tr9 : 22 -> 35 | -700.79270 | 924.1 | -700.79270 | -700.00010 |
| Tr10 : 23 -> 36 | -558.90690 | 789.8 | -558.90390 | -558.43880 |
| Tr11 : 25 -> 37 | -539.56450 | 850.69 | -539.56410 | -538.34850 |
| Tr12 : 29 -> 38 | -795.66950 | 1172.9 | -795.66950 | -795.11940 |
| Total Losses | 49.94475 | | 51.81273 | 51.5928 |
| No. of Overload | 1 | | 0 | 0 |

2. วิธี Z-Matrix แบบเดิม

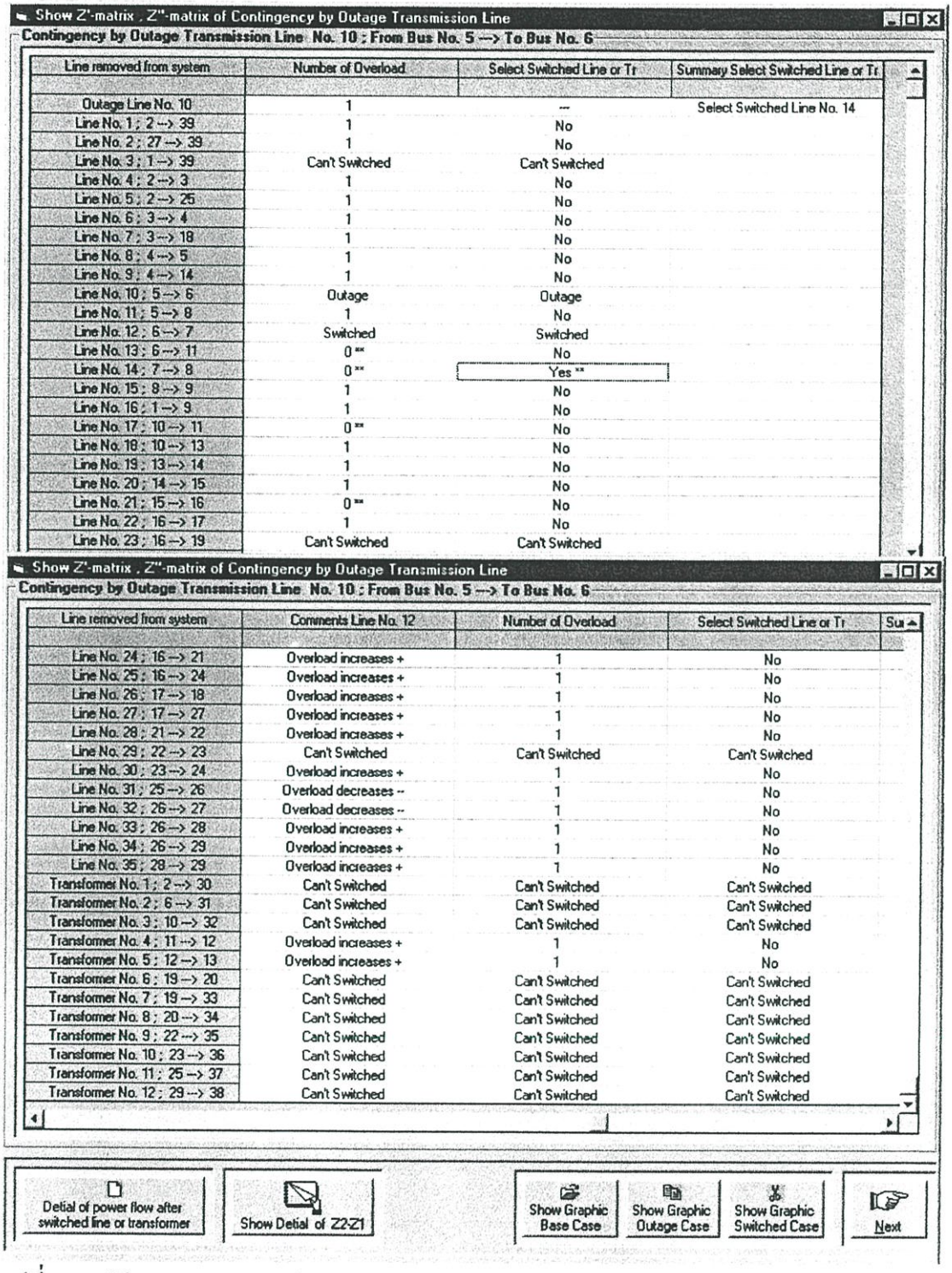
ทำการคำนวณหาค่า $Z_{bus}$ ผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.28 , ใช้วิธี Z-Matrix แบบเดิม คำนวณผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.29 , 6.30 ตามลำดับ




**รูปที่ 6.28** แสดงค่า $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System




**รูปที่ 6.29** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2-Z1 ใน L12




**รูปที่ 6.30** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch

รูปที่ 6.30 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch จะเห็นได้ว่าเมื่อเลือก switch L13 (6 -> 11) , L14 (7 -> 8) , L17 (10 -> 11) , L21 (15 -> 16) สามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ (มีจำนวน overload = 0) ดังนั้นจึงทำการเลือก switch line ตามขั้นตอนการเลือกวิธี Z-Matrix แบบเดิม (รูปที่ 5.19) โดยดูจากรูปที่ 6.29 จะได้

เมื่อเลือก switch L13 (6 -> 11)

- ค่า L12 (6 -> 7) $P''_{67}$ = 545.1111 MW

เมื่อเลือก switch L14 (7 -> 8)

- ค่า L12 (6 -> 7) $P''_{67}$ = 238.5036 MW

เมื่อเลือก switch L17 (10 -> 11)

- ค่า L12 (6 -> 7) $P''_{67}$ = 615.9458 MW

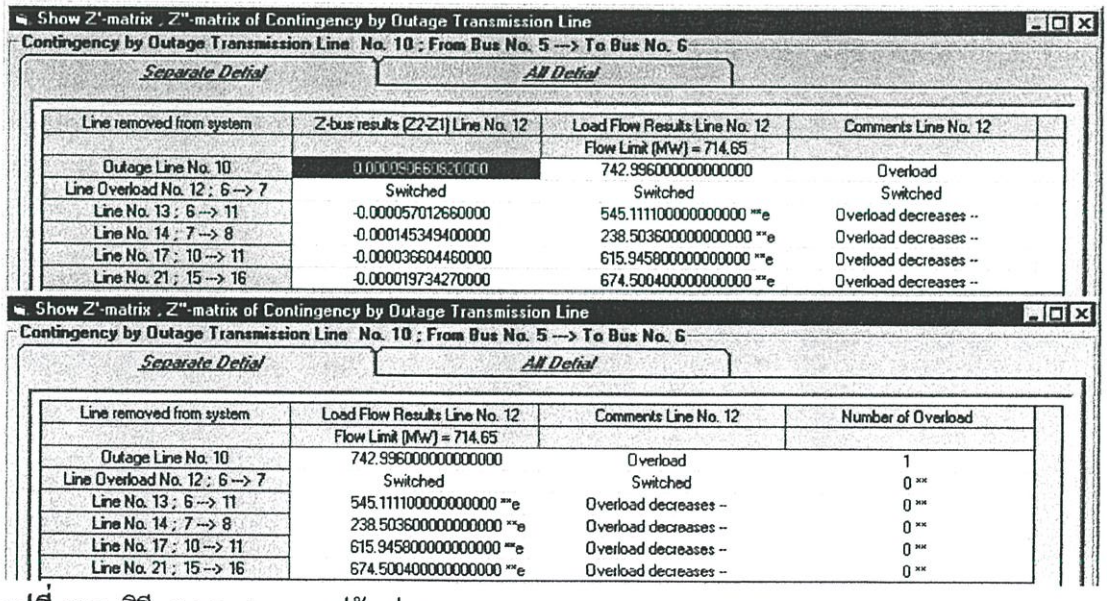
เมื่อเลือก switch L21 (15 -> 16)

- ค่า L12 (6 -> 7) $P''_{67}$ = 674.5004 MW

จะเห็นได้ว่าเมื่อเลือก switch L14 (7 -> 8) แล้วนั้นค่า $P''_{67}$ มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นจึงทำการเลือก switch L14 (7 -> 8) จึงจะเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 0.3942871 s) #

3. วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

ใช้วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง คำนวณหาผลลัพธ์โดยทำการเลือกตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และ ทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วมีจำนวน overload เหลือน้อยที่สุดหรือมีจำนวน overload = 0 ออกมาจากการเลือก switch line & tr ทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 6.31

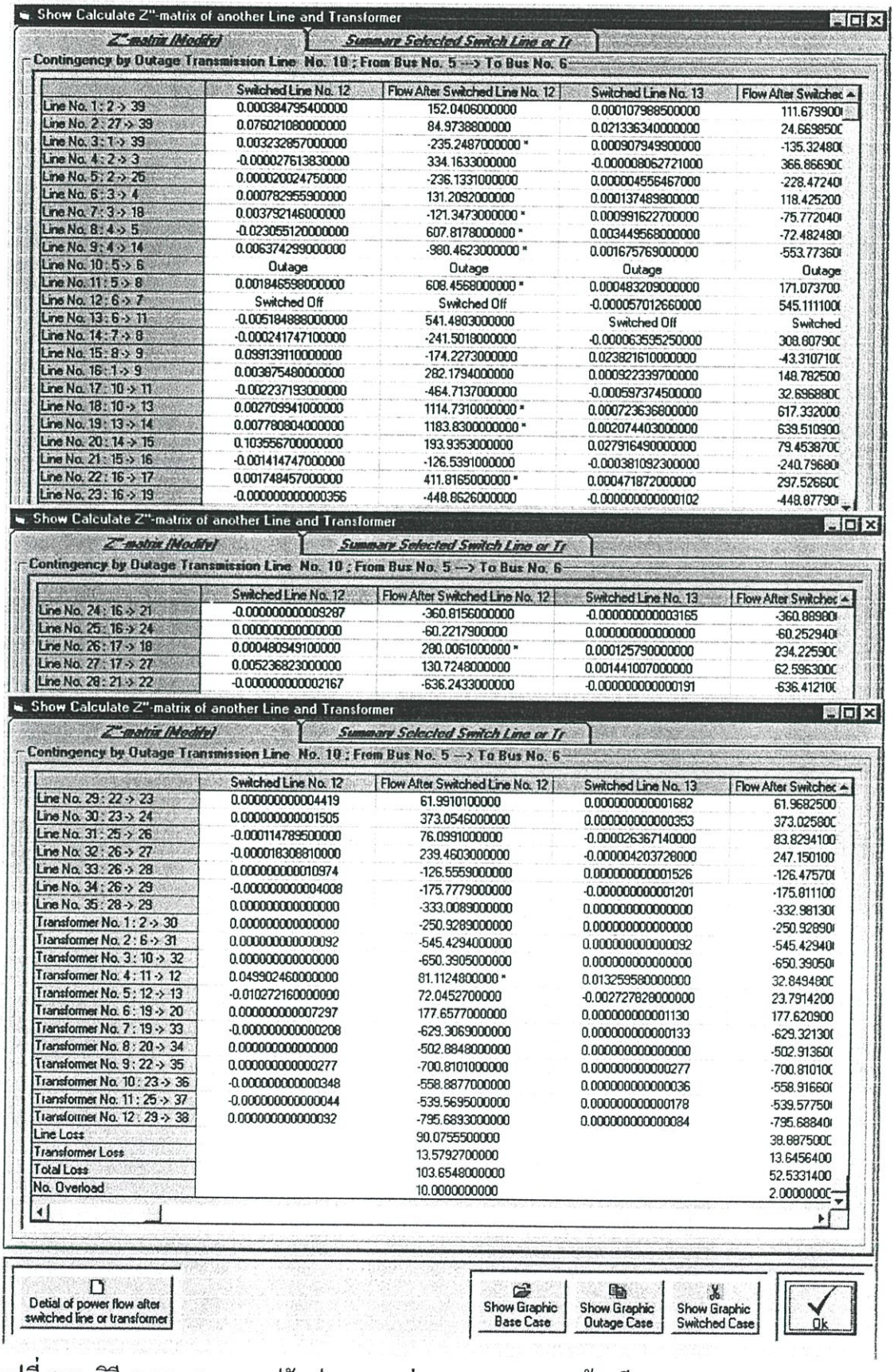



**รูปที่ 6.31** วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

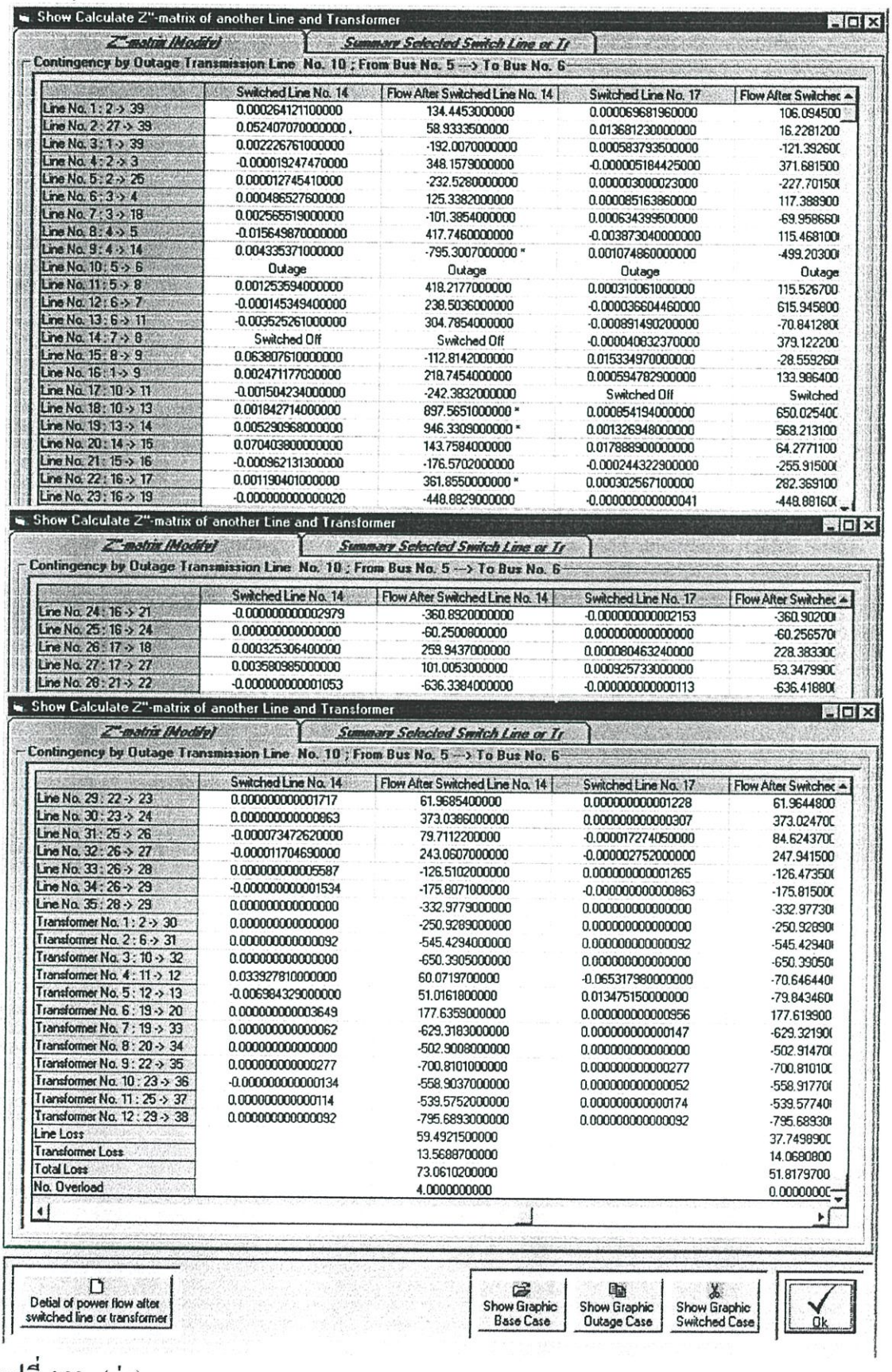
จากรูปที่ 6.31 หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วมีจำนวน overload เหลือน้อยที่สุดหรือมีจำนวน overload = 0 ออกมาจากการเลือก switch line & tr ทั้งหมดแล้วนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อ switch L12 (6 -> 7) , L13 (6 -> 11) , L14 (7 -> 8) , L17 (10 -> 11) , L21 (15 -> 16) จะมีจำนวน overload รวมเหลือ = 0 ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload แสดงได้ดังรูปที่ 6.32 และสรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงได้ดังรูปที่ 6.33

จากรูปที่ 6.33 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch L17 (10 -> 11) ไปแล้วนั้นสามารถที่จะขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ ดังนั้นจึงทำการเลือก switch L17 (10 -> 11) จึงจะเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 0.460083 s) #

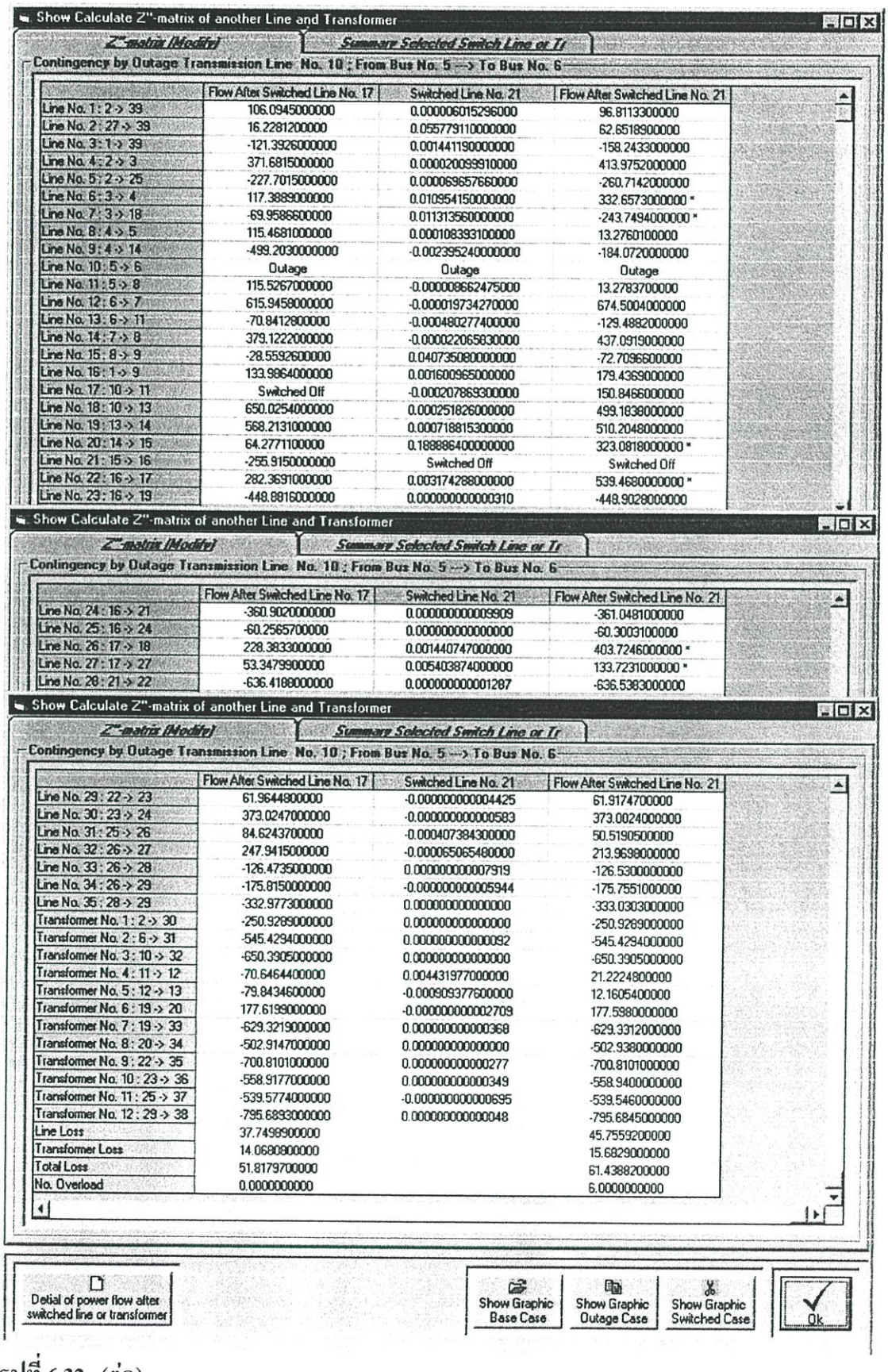
ส่วนค่า power flow หลังจากเลือก switch L17 (10 -> 11) ไปแล้วนั้นดูได้จากรูปที่ 6.32 (ในส่วนของ column ที่แสดงค่าว่า "Flow After Switched Line No. 17") และ เพื่อให้เห็นภาพรวมได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นจึงทำการจัดแสดงภาพ graphic ของการ outage line และ ภาพ graphic หลังจากที่ได้เลือก switch line ที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังรูปที่ 6.34 และ 6.35 ตามลำดับ , สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line แสดงได้ดังตารางที่ 6.13



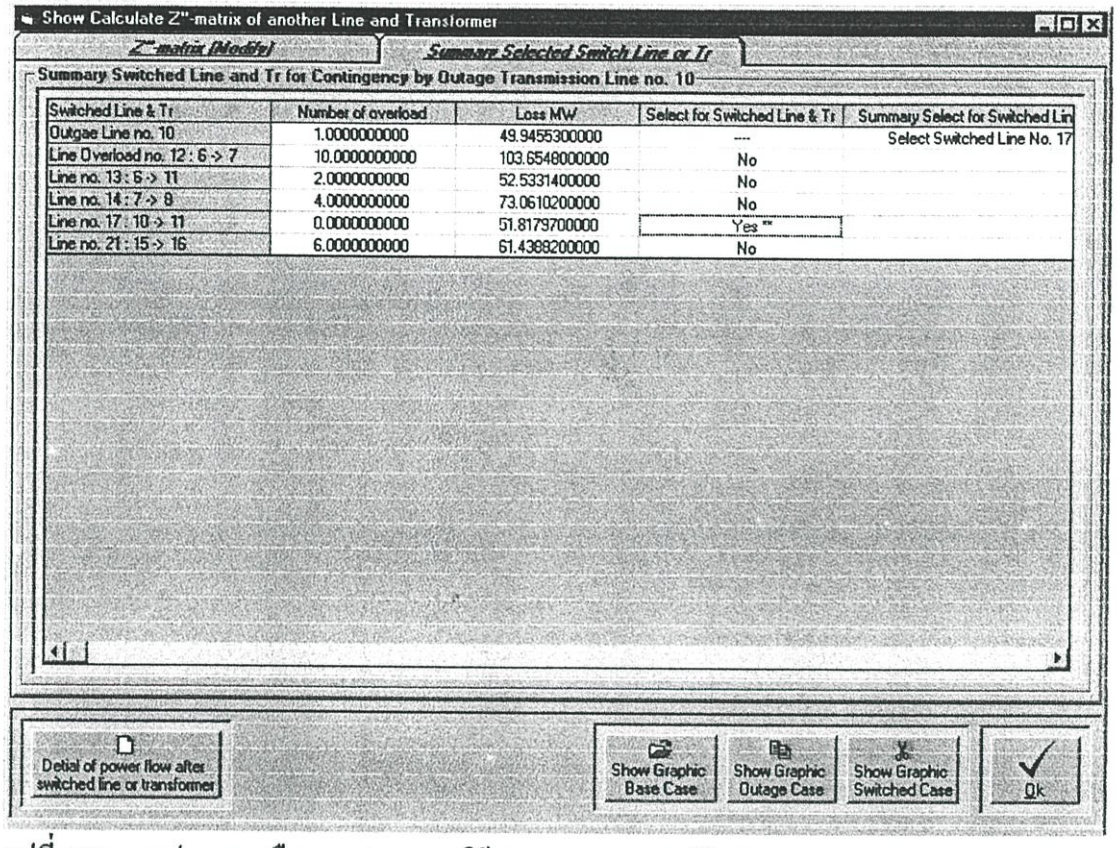

**รูปที่ 6.32** วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงค่าการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload


Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 10 ; From Bus No. 5 --> To Bus No. 6
Switched Line No. 14
Flow After Switched Line No. 14
Switched Line No. 17
Flow After Switched
Line No. 1 : 2 -> 39
Line No. 2 : 27 -> 39
Line No. 3 : 1 -> 39
Line No. 4 : 2 -> 3
Line No. 5 : 2 -> 25
Line No. 6 : 3 -> 4
Line No. 7 : 3 -> 18
Line No. 8 : 4 -> 5
Line No. 9 : 4 -> 14
Line No. 10 : 5 -> 6
Line No. 11 : 5 -> 8
Line No. 12 : 6 -> 7
Line No. 13 : 6 -> 11
Line No. 14 : 7 -> 8
Line No. 15 : 8 -> 9
Line No. 16 : 1 -> 9
Line No. 17 : 10 -> 11
Line No. 18 : 10 -> 13
Line No. 19 : 13 -> 14
Line No. 20 : 14 -> 15
Line No. 21 : 15 -> 16
Line No. 22 : 16 -> 17
Line No. 23 : 16 -> 19
0.000264121100000 134.4453000000 0.000069681960000 106.094500
0.052407070000000 58.9333500000 0.013681230000000 16.2281200
0.002226761000000 -192.0070000000 0.000583793500000 -121.39260
-0.000019247470000 348.1579000000 -0.000005184425000 371.681500
0.000012745410000 -232.5280000000 0.000003000023000 -227.70150
0.000486527600000 125.3382000000 0.000085163860000 117.388900
0.002565519000000 -101.3854000000 0.000634399500000 -69.958660
-0.015649870000000 417.7460000000 -0.003873040000000 115.468100
0.004335371000000 -795.3007000000 * 0.001074860000000 -499.20300
Outage Outage Outage Outage
0.001253594000000 418.2177000000 0.000310061000000 115.526700
-0.000145349400000 238.5036000000 -0.000036604460000 615.945800
-0.003525261000000 304.7854000000 -0.000891490200000 -70.841280
Switched Off Switched Off -0.000040832370000 379.122200
0.063807610000000 -112.8142000000 0.015334970000000 -28.559260
0.002471177000000 218.7454000000 0.000594782900000 133.986400
-0.001504234000000 -242.3832000000 Switched Off Switched
0.001842714000000 897.5651000000 * 0.000854194000000 650.025400
0.005290968000000 946.3309000000 * 0.001326948000000 568.213100
0.070403800000000 143.7584000000 0.017888900000000 64.2771100
-0.000962131300000 -176.5702000000 -0.000244322900000 -255.91500
0.001190401000000 361.8550000000 * 0.000302567100000 282.369100
-0.000000000000020 -448.8829000000 -0.000000000000041 -448.88160
Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 10 ; From Bus No. 5 --> To Bus No. 6
Switched Line No. 14
Flow After Switched Line No. 14
Switched Line No. 17
Flow After Switched
Line No. 24 : 16 -> 21
Line No. 25 : 16 -> 24
Line No. 26 : 17 -> 18
Line No. 27 : 17 -> 27
Line No. 28 : 21 -> 22
-0.000000000002979 -360.8920000000 -0.000000000002153 -360.90200
0.000000000000000 -60.2500800000 0.000000000000000 -60.256570
0.000325306400000 259.9437000000 0.000080463240000 228.383300
0.003580985000000 101.0053000000 0.000925733000000 53.347990
-0.000000000001053 -636.3384000000 -0.000000000000113 -636.41880
Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 10 ; From Bus No. 5 --> To Bus No. 6
Switched Line No. 14
Flow After Switched Line No. 14
Switched Line No. 17
Flow After Switched
Line No. 29 : 22 -> 23
Line No. 30 : 23 -> 24
Line No. 31 : 25 -> 26
Line No. 32 : 26 -> 27
Line No. 33 : 26 -> 28
Line No. 34 : 26 -> 29
Line No. 35 : 28 -> 29
Transformer No. 1 : 2 -> 30
Transformer No. 2 : 6 -> 31
Transformer No. 3 : 10 -> 32
Transformer No. 4 : 11 -> 12
Transformer No. 5 : 12 -> 13
Transformer No. 6 : 19 -> 20
Transformer No. 7 : 19 -> 33
Transformer No. 8 : 20 -> 34
Transformer No. 9 : 22 -> 35
Transformer No. 10 : 23 -> 36
Transformer No. 11 : 25 -> 37
Transformer No. 12 : 29 -> 38
Line Loss
Transformer Loss
Total Loss
No. Overload
0.000000000001717 61.9685400000 0.000000000001228 61.9644800
0.000000000000863 373.0386000000 0.000000000000307 373.02470
-0.000073472620000 79.7112200000 -0.000017274050000 84.624370
-0.000011704690000 243.0607000000 -0.000002752000000 247.941500
0.000000000005587 -126.5102000000 0.000000000001265 -126.47350
-0.000000000001534 -175.8071000000 -0.000000000000863 -175.81500
0.000000000000000 -332.9779000000 0.000000000000000 -332.97730
0.000000000000000 -250.9289000000 0.000000000000000 -250.92890
0.000000000000092 -545.4294000000 0.000000000000092 -545.42940
0.000000000000000 -650.3905000000 0.000000000000000 -650.39050
0.033927810000000 60.0719700000 -0.065317980000000 -70.646440
-0.006984329000000 51.0161800000 0.013475150000000 -79.843460
0.000000000003649 177.6359000000 0.000000000000956 177.619900
0.000000000000062 -629.3183000000 0.000000000000147 -629.32190
0.000000000000000 -502.9008000000 0.000000000000000 -502.91470
0.000000000000277 -700.8101000000 0.000000000000277 -700.81010
-0.000000000000134 -558.9037000000 0.000000000000052 -558.91770
0.000000000000114 -539.5752000000 0.000000000000174 -539.57740
0.000000000000092 -795.6893000000 0.000000000000092 -795.68930
59.4921500000 37.749890
13.5688700000 14.0680800
73.0610200000 51.8179700
4.0000000000 0.000000
Detial of power flow after switched line or transformer
Show Graphic Base Case
Show Graphic Outage Case
Show Graphic Switched Case
Ok

**รูปที่ 6.32** (ต่อ)


Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 10 ; From Bus No. 5 --> To Bus No. 6
Flow After Switched Line No. 17
Switched Line No. 21
Flow After Switched Line No. 21
Line No. 1 : 2 -> 39 106.0945000000 0.000006015296000 96.8113300000
Line No. 2 : 27 -> 39 16.2281200000 0.055779110000000 62.6518900000
Line No. 3 : 1 -> 39 -121.3926000000 0.001441190000000 -158.2433000000
Line No. 4 : 2 -> 3 371.6815000000 0.000020099910000 413.9752000000
Line No. 5 : 2 -> 25 -227.7015000000 0.000069657660000 -260.7142000000
Line No. 6 : 3 -> 4 117.3889000000 0.010954150000000 332.6573000000 *
Line No. 7 : 3 -> 18 -69.9586500000 0.011313560000000 -243.7494000000 *
Line No. 8 : 4 -> 5 115.4681000000 0.000108393100000 13.2760100000
Line No. 9 : 4 -> 14 -499.2030000000 -0.002395240000000 -184.0720000000
Line No. 10 : 5 -> 6 Outage Outage Outage
Line No. 11 : 5 -> 8 115.5267000000 -0.000008662475000 13.2783700000
Line No. 12 : 6 -> 7 615.9458000000 -0.000019734270000 674.5004000000
Line No. 13 : 6 -> 11 -70.8412800000 -0.000480277400000 -129.4882000000
Line No. 14 : 7 -> 8 379.1222000000 -0.000022065830000 437.0919000000
Line No. 15 : 8 -> 9 -28.5592600000 0.040735080000000 -72.7096500000
Line No. 16 : 1 -> 9 133.9864000000 0.001600965000000 179.4369000000
Line No. 17 : 10 -> 11 Switched Off -0.000207869300000 150.8466000000
Line No. 18 : 10 -> 13 650.0254000000 0.000251826000000 499.1638000000
Line No. 19 : 13 -> 14 568.2131000000 0.000718815300000 510.2048000000
Line No. 20 : 14 -> 15 64.2771100000 0.188886400000000 323.0818000000 *
Line No. 21 : 15 -> 16 -255.9150000000 Switched Off Switched Off
Line No. 22 : 16 -> 17 282.3691000000 0.003174288000000 539.4680000000 *
Line No. 23 : 16 -> 19 -448.8816000000 0.000000000000310 -448.9029000000
Line No. 24 : 16 -> 21 -360.9020000000 0.000000000009909 -361.0481000000
Line No. 25 : 16 -> 24 -60.2565700000 0.000000000000000 -60.3003100000
Line No. 26 : 17 -> 18 228.3833000000 0.001440747000000 403.7246000000 *
Line No. 27 : 17 -> 27 53.3479900000 0.005403874000000 133.7231000000 *
Line No. 28 : 21 -> 22 -636.4188000000 0.000000000001287 -636.5383000000
Line No. 29 : 22 -> 23 61.9644800000 -0.000000000004425 61.9174700000
Line No. 30 : 23 -> 24 373.0247000000 -0.000000000000583 373.0024000000
Line No. 31 : 25 -> 26 84.6243700000 -0.000407384300000 50.5190500000
Line No. 32 : 26 -> 27 247.9415000000 -0.000065065480000 213.9698000000
Line No. 33 : 26 -> 28 -126.4735000000 0.000000000007919 -126.5300000000
Line No. 34 : 26 -> 29 -175.8150000000 -0.000000000005944 -175.7551000000
Line No. 35 : 28 -> 29 -332.9773000000 0.000000000000000 -333.0303000000
Transformer No. 1 : 2 -> 30 -250.9289000000 0.000000000000000 -250.9289000000
Transformer No. 2 : 6 -> 31 -545.4294000000 0.000000000000092 -545.4294000000
Transformer No. 3 : 10 -> 32 -650.3905000000 0.000000000000000 -650.3905000000
Transformer No. 4 : 11 -> 12 -70.6464400000 0.004431977000000 21.2224800000
Transformer No. 5 : 12 -> 13 -79.8434600000 -0.000909377600000 12.1605400000
Transformer No. 6 : 19 -> 20 177.6199000000 -0.000000000002709 177.5980000000
Transformer No. 7 : 19 -> 33 -629.3219000000 0.000000000000368 -629.3312000000
Transformer No. 8 : 20 -> 34 -502.9147000000 0.000000000000000 -502.9380000000
Transformer No. 9 : 22 -> 35 -700.8101000000 0.000000000000277 -700.8101000000
Transformer No. 10 : 23 -> 36 -558.9177000000 0.000000000000349 -558.9400000000
Transformer No. 11 : 25 -> 37 -539.5774000000 -0.000000000000695 -539.5460000000
Transformer No. 12 : 29 -> 38 -795.6893000000 0.000000000000048 -795.6845000000
Line Loss 37.7499900000 45.7559200000
Transformer Loss 14.0680800000 15.6829000000
Total Loss 51.8179700000 61.4388200000
No. Overload 0.0000000000 6.0000000000
Detial of power flow after switched line or transformer
Show Graphic Base Case
Show Graphic Outage Case
Show Graphic Switched Case
Ok

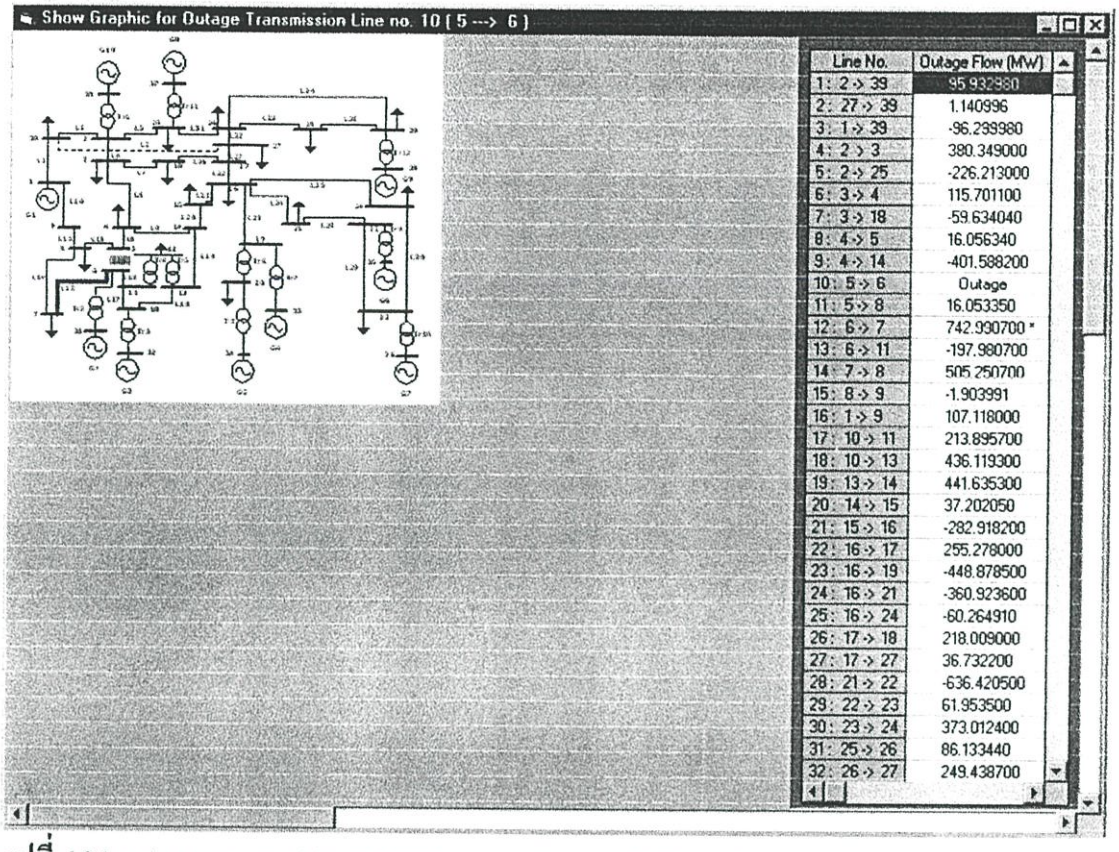
**รูปที่ 6.32** (ต่อ)



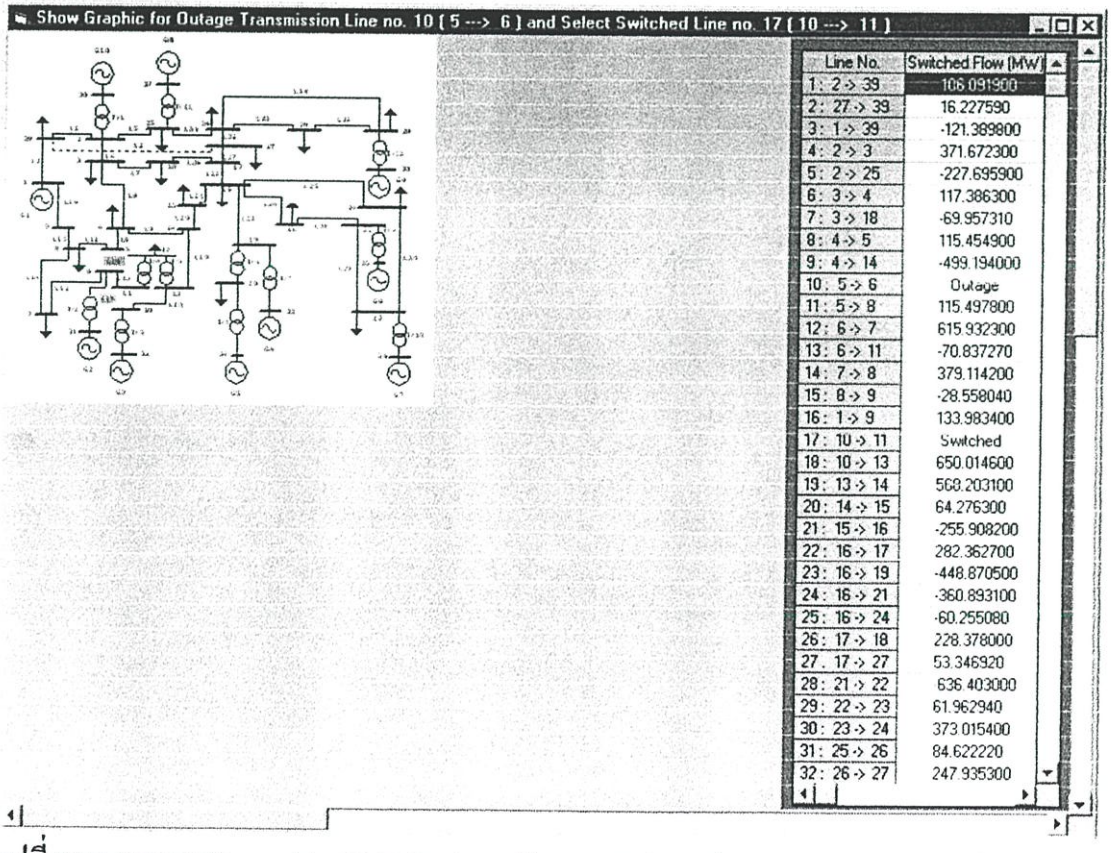

**รูปที่ 6.33** สรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

**ตารางที่ 6.13** สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line

| | เวลา (s) | เลือก Switched Line |
|---|---|---|
| | Outage Line no. 10 | Outage Line no. 10 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 1.5859380 | Line no. 17 (10 -> 11) |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 0.3942871 | Line no. 13 (6 -> 11) ; Line no. 14 (7 -> 8) |
| | | Line no. 17 (10 -> 11) ; Line no. 21 (15 -> 16) |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 0.4600830 | Line no. 17 (10 -> 11) |




**รูปที่ 6.34** แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 10 (5 -> 6)




**รูปที่ 6.35** แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 10 (5 -> 6) + switch line no. 17 (10 -> 11)

6.2.2.2 ทดสอบ outage generator

สมมุติเลือกทดสอบ outage generator ที่ bus 37 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 6.36

Flow for Contingency by Outage Generator

Show One Switched Line and Tr

Flow for Contingency by Outage Generator No. 8 at Bus No. 37

| Line No. | From Bus | To Bus | Base Case Flow (MW) | Flow Limit (MW) | Outage Flow (MW) | % Overload |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 39 | 102.4890000000 | 208.0500000000 | -115.1255000000 | 0.0000000000 % |
| 2 | 27 | 39 | 2.9200000000 | 228.2000000000 | -159.9557000000 | 0.0000000000 % |
| 3 | 1 | 39 | -104.5910000000 | 208.0400000000 | 277.2082000000 * | 33.2475500000 % |
| 4 | 2 | 3 | 369.8700000000 | 819.3900000000 | 210.3053000000 | 0.0000000000 % |
| 5 | 2 | 25 | -222.2900000000 | 401.6600000000 | 154.8902000000 | 0.0000000000 % |
| 6 | 3 | 4 | 87.0770000000 | 237.7900000000 | -26.7357600000 | 0.0000000000 % |
| 7 | 3 | 18 | -41.3400000000 | 117.7000000000 | -86.0209000000 | 0.0000000000 % |
| 8 | 4 | 5 | -146.2640000000 | 443.8000000000 | -251.3098000000 | 0.0000000000 % |
| 9 | 4 | 14 | -267.2250000000 | 559.5000000000 | -275.9760000000 | 0.0000000000 % |
| 10 | 5 | 6 | -470.0810000000 | 818.8000000000 | -488.2509000000 | 0.0000000000 % |
| 11 | 5 | 8 | 323.6270000000 | 526.5500000000 | 236.3772000000 | 0.0000000000 % |
| 12 | 6 | 7 | 428.3220000000 | 714.6500000000 | 361.0331000000 | 0.0000000000 % |
| 13 | 6 | 11 | -353.8820000000 | 719.4940000000 | -304.7991000000 | 0.0000000000 % |
| 14 | 7 | 8 | 193.0710000000 | 559.5000000000 | 126.1331000000 | 0.0000000000 % |
| 15 | 8 | 9 | -6.4340000000 | 246.9300000000 | -160.0947000000 | 0.0000000000 % |
| 16 | 1 | 9 | 111.5470000000 | 295.6900000000 | 266.2767000000 | 0.0000000000 % |
| 17 | 10 | 11 | 356.9700000000 | 495.9400000000 | 311.8721000000 | 0.0000000000 % |
| 18 | 10 | 13 | 293.0450000000 | 789.8000000000 | 338.1429000000 | 0.0000000000 % |
| 19 | 13 | 14 | 285.1900000000 | 595.7900000000 | 334.5319000000 | 0.0000000000 % |
| 20 | 14 | 15 | 16.5120000000 | 240.4000000000 | 56.7629100000 | 0.0000000000 % |
| 21 | 15 | 16 | -303.5612000000 | 421.4160000000 | -263.3723000000 | 0.0000000000 % |
| 22 | 16 | 17 | 234.6140000000 | 295.6900000000 | 275.0139000000 | 0.0000000000 % |
| 23 | 16 | 19 | -448.8785000000 | 595.7900000000 | -448.8795000000 | 0.0000000000 % |
| 24 | 16 | 21 | -360.9236000000 | 412.7000000000 | -360.9255000000 | 0.0000000000 % |

Flow for Contingency by Outage Generator

Show One Switched Line and Tr

Flow for Contingency by Outage Generator No. 8 at Bus No. 37

| Line No. | From Bus | To Bus | Base Case Flow (MW) | Flow Limit (MW) | Outage Flow (MW) | % Overload |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 16 | 24 | -60.2660100000 | 66.2800000000 | -60.2660100000 | 0.0000000000 % |
| 26 | 17 | 18 | 199.6370000000 | 270.6400000000 | 244.5189000000 | 0.0000000000 % |
| 27 | 17 | 27 | 34.5132000000 | 131.3300000000 | 29.8822100000 | 0.0000000000 % |
| 28 | 21 | 22 | -636.4455000000 | 848.2000000000 | -636.4475000000 | 0.0000000000 % |

Flow for Contingency by Outage Generator

Show One Switched Line and Tr

Flow for Contingency by Outage Generator No. 8 at Bus No. 37

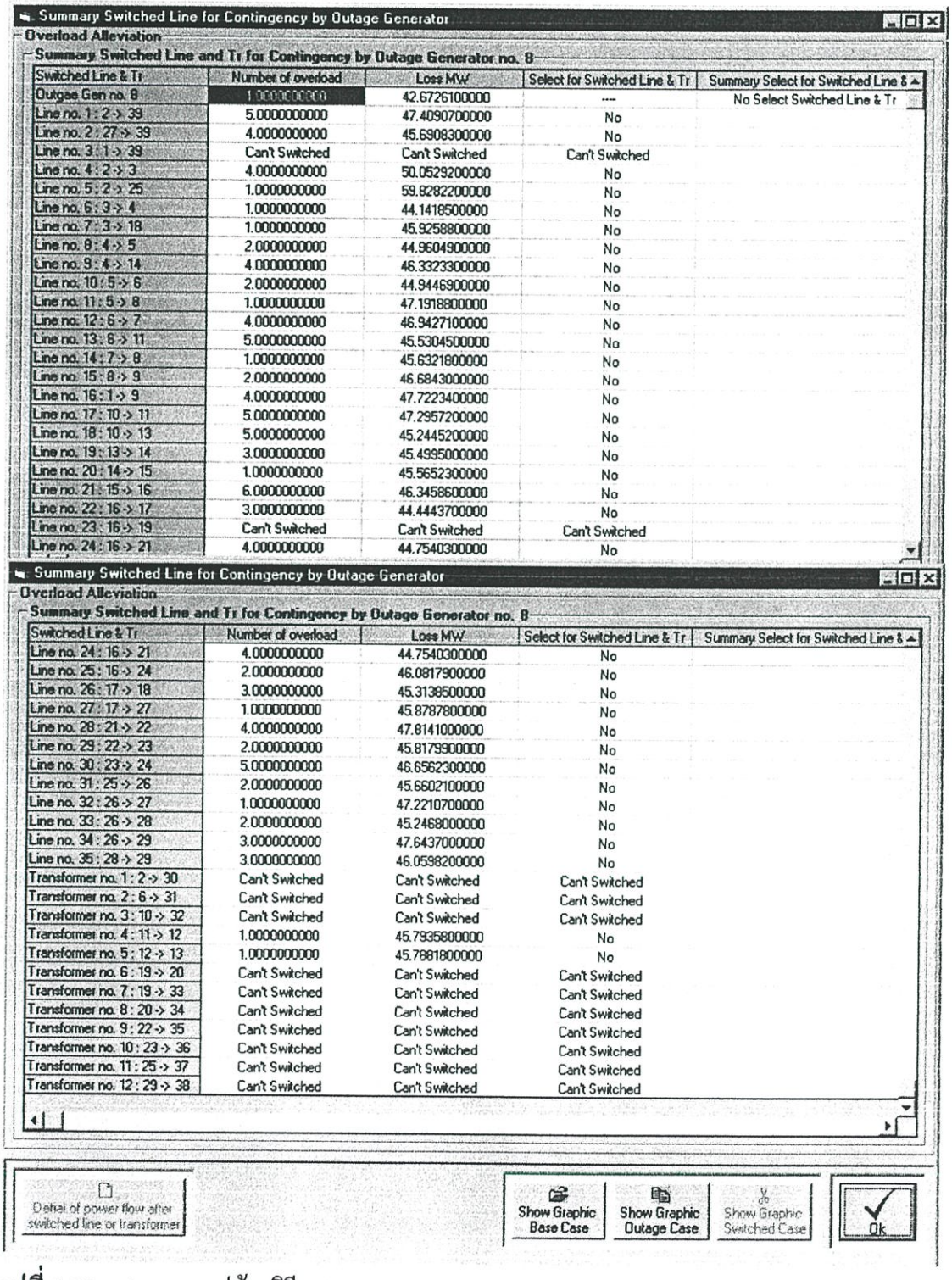
| Line No. | From Bus | To Bus | Base Case Flow (MW) | Flow Limit (MW) | Outage Flow (MW) | % Overload |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 29 | 22 | 23 | 61.9535000000 | 88.3800000000 | 61.9525000000 | 0.0000000000 % |
| 30 | 23 | 24 | 373.0084000000 | 480.1000000000 | 373.0074000000 | 0.0000000000 % |
| 31 | 25 | 26 | 90.1594500000 | 228.2000000000 | -68.9252200000 | 0.0000000000 % |
| 32 | 26 | 27 | 253.4437000000 | 410.0100000000 | 94.4350200000 | 0.0000000000 % |
| 33 | 26 | 28 | -126.4512000000 | 163.2000000000 | -126.5042000000 | 0.0000000000 % |
| 34 | 26 | 29 | -175.8230000000 | 242.7000000000 | -175.7670000000 | 0.0000000000 % |
| 35 | 28 | 29 | -332.9576000000 | 488.8000000000 | -333.0086000000 | 0.0000000000 % |
| Transformer No. | | | | | | |
| 1 | 2 | 30 | -250.9227000000 | 676.1800000000 | -250.9227000000 | 0.0000000000 % |
| 2 | 6 | 31 | -545.4158000000 | 1092.2200000000 | -545.4158000000 | 0.0000000000 % |
| 3 | 10 | 32 | -650.3744000000 | 970.7000000000 | -650.3744000000 | 0.0000000000 % |
| 4 | 11 | 12 | 1.5500000000 | 73.5000000000 | 5.9169910000 | 0.0000000000 % |
| 5 | 12 | 13 | -7.4850000000 | 88.3800000000 | -3.1200930000 | 0.0000000000 % |
| 6 | 19 | 20 | 177.6070000000 | 347.9000000000 | 177.6070000000 | 0.0000000000 % |
| 7 | 19 | 33 | -629.3099000000 | 890.7000000000 | -629.3099000000 | 0.0000000000 % |
| 8 | 20 | 34 | -502.9094000000 | 712.0000000000 | -502.9104000000 | 0.0000000000 % |
| 9 | 22 | 35 | -700.7927000000 | 924.1000000000 | -700.7927000000 | 0.0000000000 % |
| 10 | 23 | 36 | -558.9109000000 | 789.8000000000 | -558.9119000000 | 0.0000000000 % |
| 11 | 25 | 37 | -539.5655000000 | 850.6900000000 | -1.2136020000 | 0.0000000000 % |
| 12 | 29 | 38 | -795.6695000000 | 1172.9000000000 | -795.6665000000 | 0.0000000000 % |
| Line Loss | | | 32.2566200000 | | 26.7300000000 | |
| Transformer Loss | | | 13.6309000000 | | 15.9426100000 | |
| Total Loss | | | 45.8875200000 | | 42.6726100000 | |
| No. Overload | | | None | | 1.0000000000 | |

Summary Switched Line

Next

**รูปที่ 6.36** แสดงการทดสอบ outage generator no. 8 ที่ bus 37

จากรูปที่ 6.36 เกิด overload ที่ L3 (1 -> 39) ดังนั้นจึงทำการเลือก switch line ดังต่อไปนี้ วิธี Linear Sensitivity Factors ผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.37



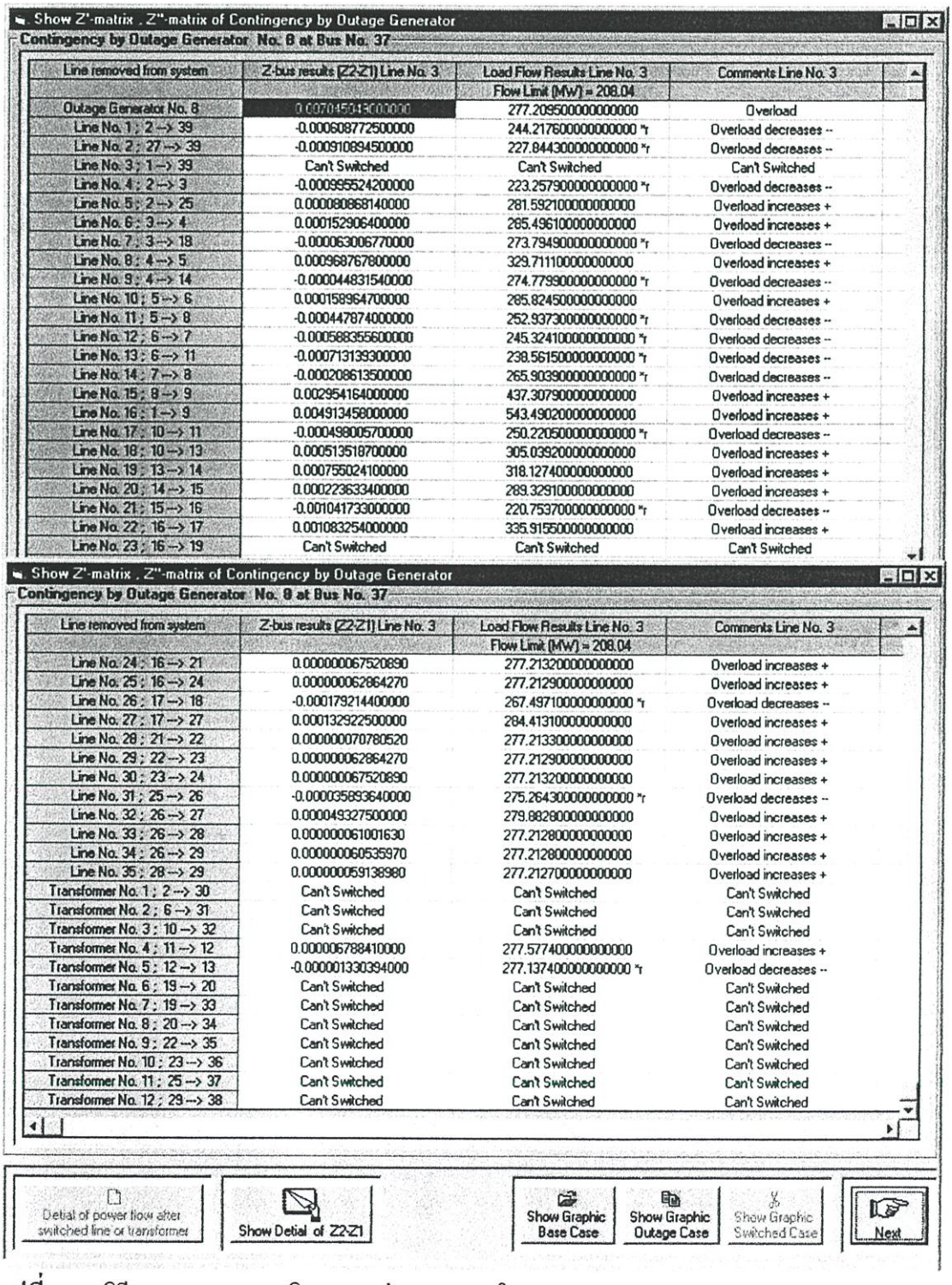

**รูปที่ 6.37** แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors

จากรูปที่ 6.37 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch line & tr ไปทั้งหมดแล้วนั้น ไม่สามารถ

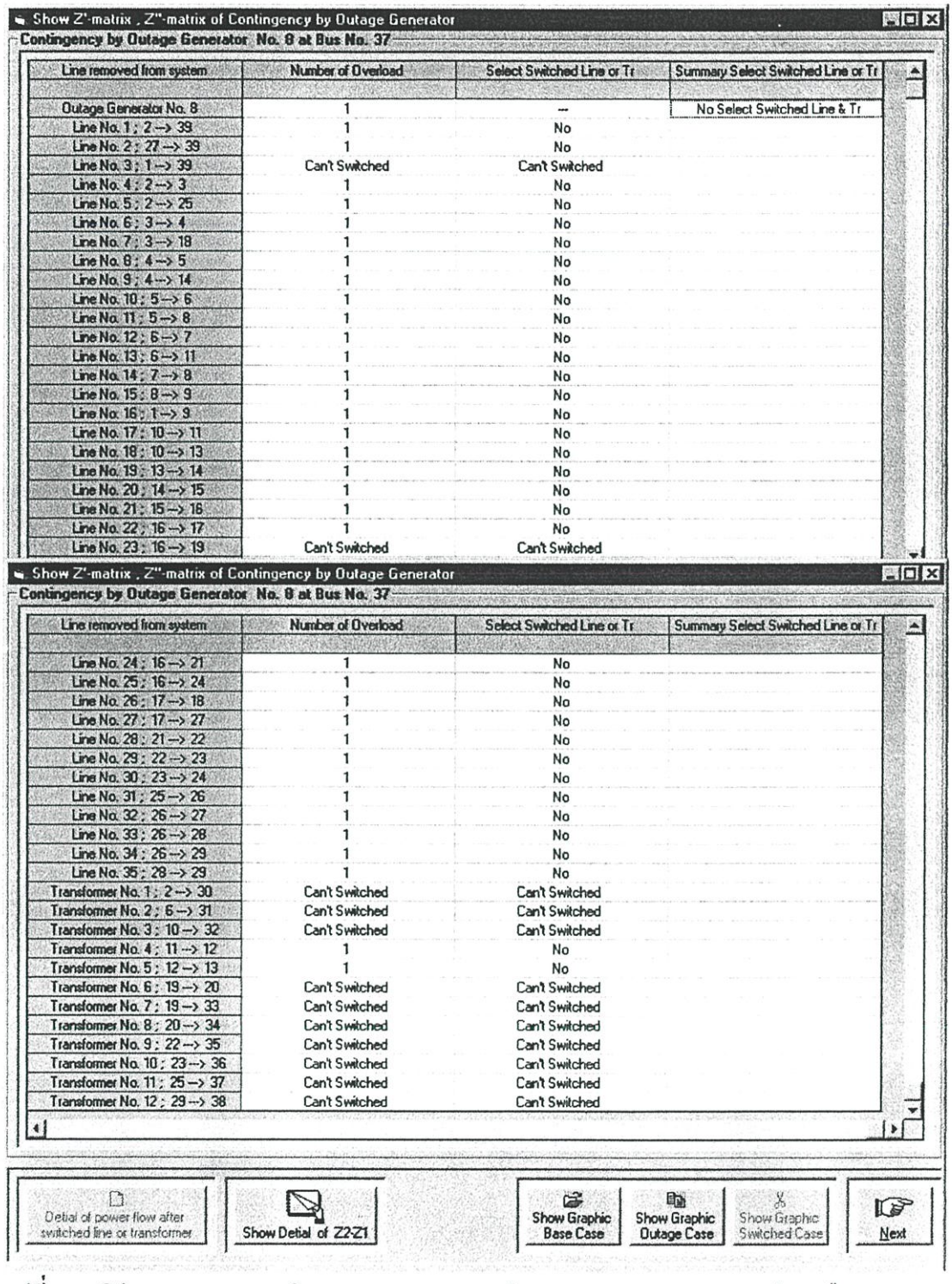
ที่จะขจัดหรือบรรเทา overload ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่สามารถที่จะเลือก switch line or tr ที่สามารถขจัดหรือบรรเทา overload ได้ (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 1.503125 s) #

2. วิธี Z-Matrix แบบเดิม

ใช้วิธี Z-Matrix แบบเดิม คำนวณผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.38 , 6.39 ตามลำดับ




**รูปที่ 6.38** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2 - Z1 ใน L3

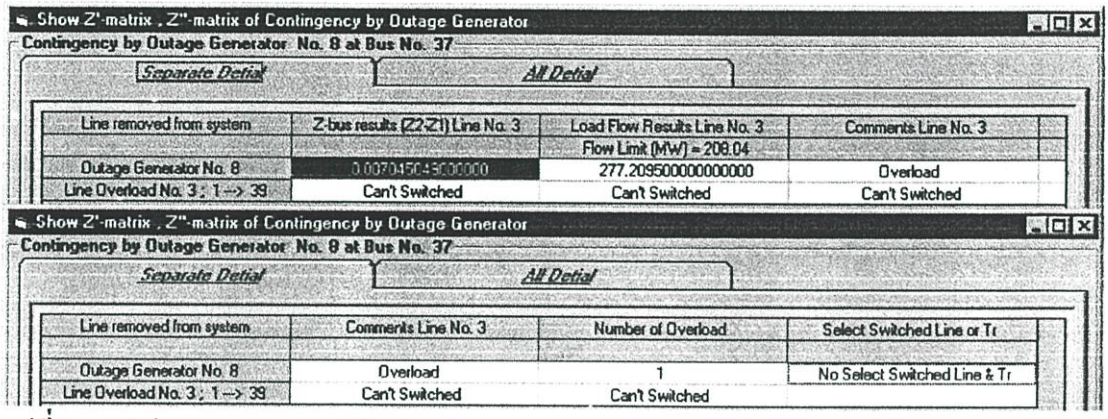



**รูปที่ 6.39** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch

จากรูปที่ 6.39 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch line & tr ไปทั้งหมดแล้วนั้น ไม่สามารถที่จะขจัดหรือบรรเทา overload ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่สามารถที่จะเลือก switch line or tr ที่สามารถขจัดหรือบรรเทา overload ได้ (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 0.3546875 s) #

3. วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

ใช้วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง คำนวณหาผลลัพธ์โดยทำการเลือกตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และ ทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วมีจำนวน overload เหลือน้อยที่สุดหรือมีจำนวน overload = 0 ออกมาจากการเลือก switch line & tr ทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 6.40



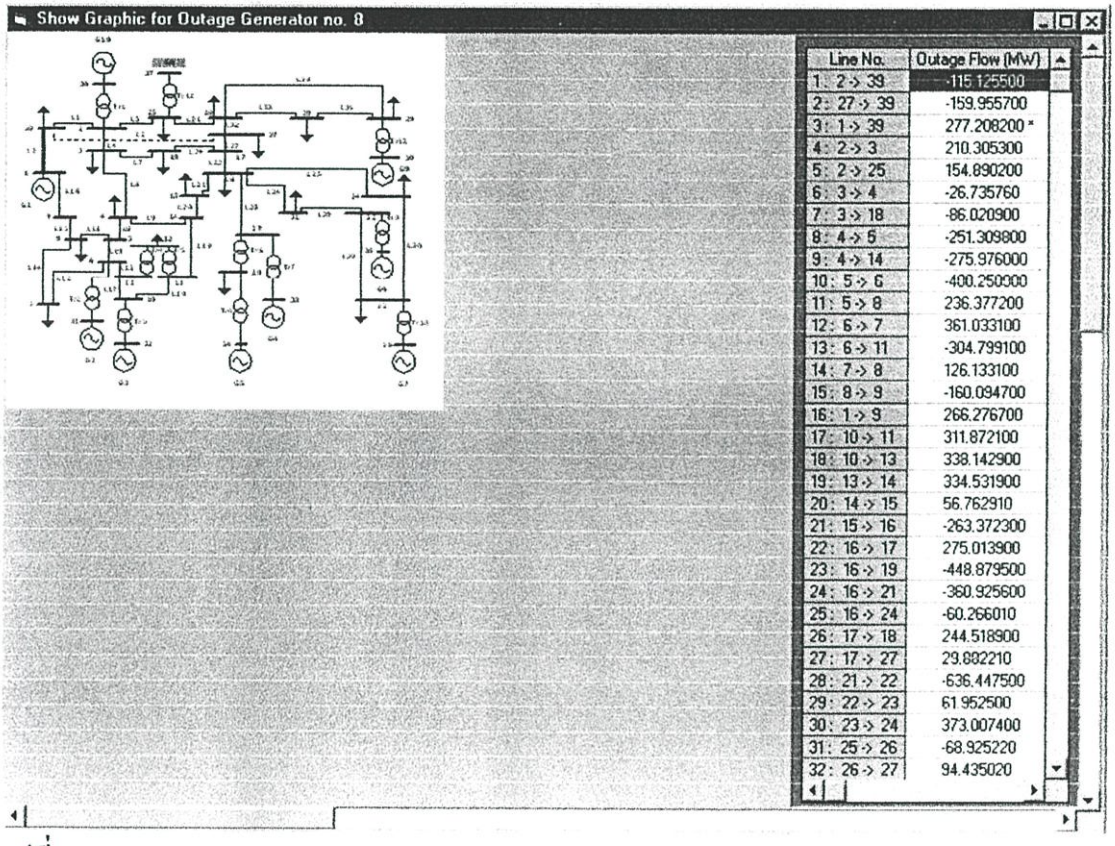

**รูปที่ 6.40** วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

จากรูปที่ 6.40 หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วนั้น จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch line & tr ไปทั้งหมดแล้วนั้น ไม่สามารถที่จะขจัดหรือบรรเทา overload ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่สามารถที่จะเลือก switch line or tr ที่สามารถขจัดหรือบรรเทา overload ได้ (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 0.3703125 s) #

เพื่อให้เห็นภาพรวมได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นจึงทำการจัดแสดงภาพ graphic ของการ outage generator แสดงดังรูปที่ 6.41 และ , สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line แสดงได้ดังตารางที่ 6.14

**ตารางที่ 6.14** สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line

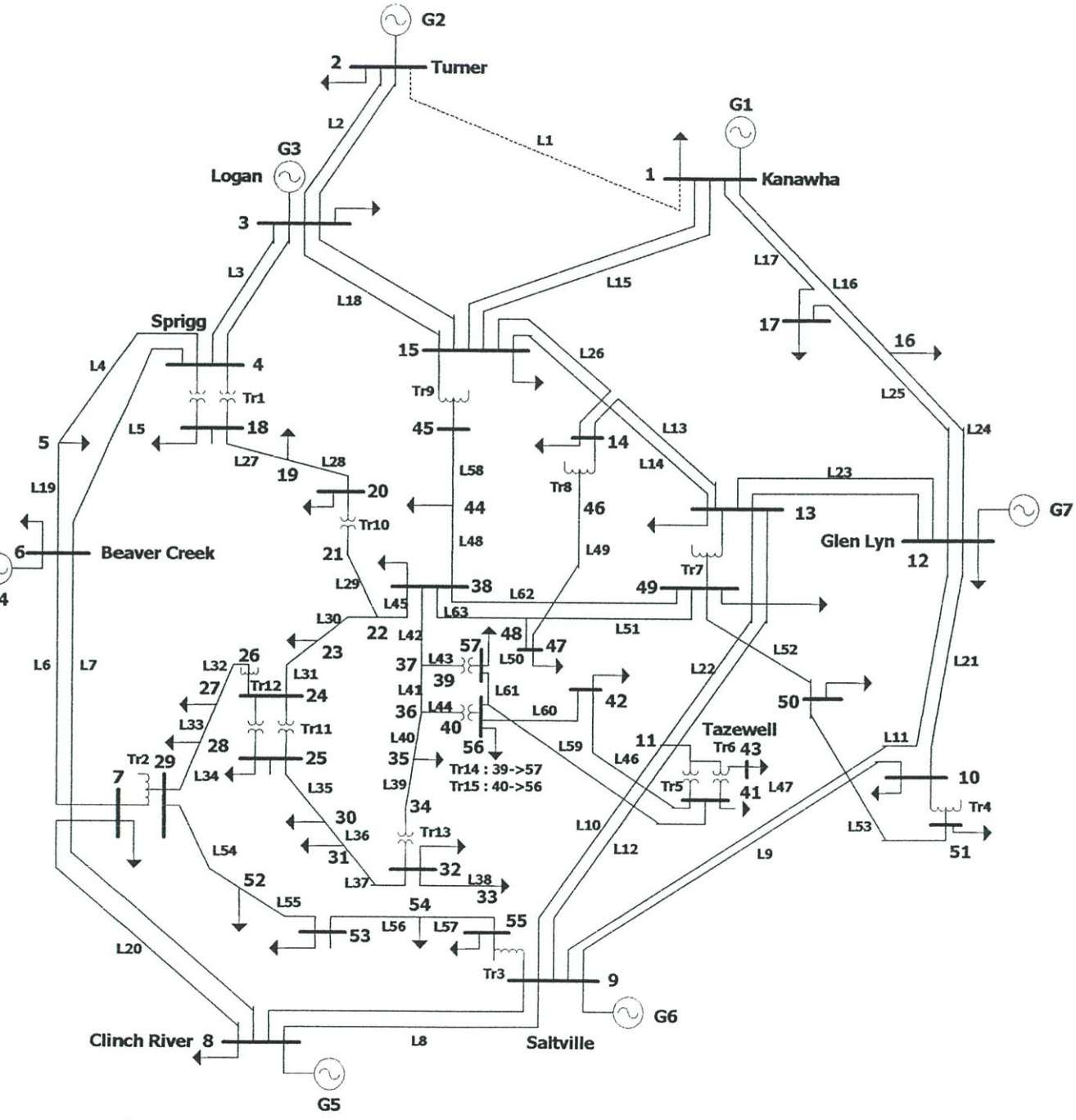
| | เวลา (s) | เลือก Switched Line |
|---|---|---|
| | Outage Gen no.8 | Outage Gen no.8 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 1.5031250 | - |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 0.3546875 | - |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 0.3703125 | - |




**รูปที่ 6.41** แสดงภาพ graphic ของการ outage generator no. 8 (bus no. 37)

### 6.2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus [3]

ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus แสดงได้ดังรูปที่ 6.42




**รูปที่ 6.42** ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus [3]

โดยมีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 6.15** แสดงข้อมูลทั่วไปของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus

| ชนิดของข้อมูลทั่วไป | ข้อมูล |
|---|---|
| จำนวน Generator | 7 |
| จำนวน Bus | 57 |
| จำนวน Line | 63 |
| จำนวน Transformer | 15 |
| จำนวน Capacitor | 3 |
| ฐานของ MVA | 100 |
| บัสอ้างอิง | 1 |
| จำนวนรอบการคำนวณซ้ำสูงสุด | 100 |
| ค่าความผิดพลาดของกำลังไฟฟ้า | 0.0535 |

**ตารางที่ 6.16** แสดงข้อมูล Bus ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus

| Bus No. | Bus Type | Volt (pu) | Angle (degree) | Generation MW | Generation MVAR | Load MW | Load MVAR | $Q_{max}$ MVAR | $Q_{min}$ MVAR | $Q_c$ MVAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Slack | 1.04 | 0 | 0 | 0 | 55.0 | 17.0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | PV | 1.01 | 0 | 0 | 0 | 3.0 | 88.0 | 50 | -17 | 0 |
| 3 | PV | 0.985 | 0 | 40.0 | 0 | 41.0 | 21.0 | 60 | -10 | 0 |
| 4 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 13.0 | 4.0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | PV | 0.98 | 0 | 0 | 0 | 75.0 | 2.0 | 25 | -8 | 0 |
| 7 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | PV | 1.005 | 0 | 450.0 | 0 | 150.0 | 22.0 | 200 | -140 | 0 |
| 9 | PV | 0.98 | 0 | 0 | 0 | 121.0 | 26.0 | 9 | -3 | 0 |
| 10 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 5.0 | 2.0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | PV | 1.015 | 0 | 310.0 | 0 | 377.0 | 24.0 | 155 | -50 | 0 |
| 13 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 18.0 | 2.3 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 10.5 | 5.3 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 22.0 | 5.0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 43.0 | 3.0 | 0 | 0 | 0 |

**ตารางที่ 6.16** (ต่อ)

| Bus No. | Bus Type | Volt (pu) | Angle (degree) | Generation MW | Generation MVAR | Load MW | Load MVAR | $Q_{max}$ MVAR | $Q_{min}$ MVAR | $Q_c$ MVAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 42.0 | 8.0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 27.2 | 9.8 | 0 | 0 | 10.0 |
| 19 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 3.3 | 0.6 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 2.3 | 1.0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 6.3 | 2.1 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 6.3 | 3.2 | 0 | 0 | 5.9 |
| 26 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 9.3 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 4.6 | 2.3 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 17.0 | 2.6 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 3.6 | 1.8 | 0 | 0 | 0 |
| 31 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 5.8 | 2.9 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 1.6 | 0.8 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 3.8 | 1.9 | 0 | 0 | 0 |
| 34 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 6.0 | 3.0 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 37 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 38 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 14.0 | 7.0 | 0 | 0 | 0 |
| 39 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 41 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 6.3 | 3.0 | 0 | 0 | 0 |
| 42 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 7.1 | 4.4 | 0 | 0 | 0 |
| 43 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 2.0 | 1.0 | 0 | 0 | 0 |
| 44 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 12.0 | 1.8 | 0 | 0 | 0 |

**ตารางที่ 6.16** (ต่อ)

| Bus No. | Bus Type | Volt (pu) | Angle (degree) | Generation MW | Generation MVAR | Load MW | Load MVAR | Qmax MVAR | Qmin MVAR | Qc MVAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 45 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 46 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 47 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 29.7 | 11.6 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 49 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 18.0 | 8.5 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 21.0 | 10.5 | 0 | 0 | 0 |
| 51 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 18.0 | 5.3 | 0 | 0 | 0 |
| 52 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 4.9 | 2.2 | 0 | 0 | 0 |
| 53 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 20.0 | 10.0 | 0 | 0 | 6.3 |
| 54 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 4.1 | 1.4 | 0 | 0 | 0 |
| 55 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 6.8 | 3.4 | 0 | 0 | 0 |
| 56 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 7.6 | 2.2 | 0 | 0 | 0 |
| 57 | PQ | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 6.7 | 2.0 | 0 | 0 | 0 |

**ตารางที่ 6.17** แสดงข้อมูล Line ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus

| Line No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | BC/2 (pu) | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | 0.0083 | 0.028 | 0.0645 | 130 |
| 2 | 2 | 3 | 0.0298 | 0.085 | 0.0409 | 130 |
| 3 | 3 | 4 | 0.0112 | 0.0366 | 0.019 | 100 |
| 4 | 4 | 5 | 0.0625 | 0.132 | 0.0129 | 32 |
| 5 | 4 | 6 | 0.043 | 0.148 | 0.0174 | 32 |
| 6 | 6 | 7 | 0.02 | 0.102 | 0.0138 | 65 |
| 7 | 6 | 8 | 0.0339 | 0.173 | 0.0235 | 65 |
| 8 | 8 | 9 | 0.0099 | 0.0505 | 0.0274 | 200 |
| 9 | 9 | 10 | 0.0369 | 0.1679 | 0.022 | 32 |
| 10 | 9 | 11 | 0.0258 | 0.0848 | 0.0109 | 32 |
| 11 | 9 | 12 | 0.0648 | 0.295 | 0.0386 | 32 |

**ตารางที่ 6.17** (ต่อ)

| Line No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | BC/2 (pu) | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 9 | 13 | 0.0481 | 0.1580 | 0.0203 | 32 |
| 13 | 13 | 14 | 0.0132 | 0.0434 | 0.0055 | 32 |
| 14 | 13 | 15 | 0.0269 | 0.0869 | 0.0115 | 72 |
| 15 | 1 | 15 | 0.0178 | 0.091 | 0.0494 | 200 |
| 16 | 1 | 16 | 0.0454 | 0.2060 | 0.0273 | 100 |
| 17 | 1 | 17 | 0.0238 | 0.108 | 0.0143 | 130 |
| 18 | 3 | 15 | 0.0162 | 0.053 | 0.0272 | 65 |
| 19 | 5 | 6 | 0.0302 | 0.0641 | 0.0062 | 32 |
| 20 | 7 | 8 | 0.0139 | 0.0712 | 0.0097 | 100 |
| 21 | 10 | 12 | 0.0277 | 0.1262 | 0.0164 | 32 |
| 22 | 11 | 13 | 0.0223 | 0.0732 | 0.0094 | 32 |
| 23 | 12 | 13 | 0.0178 | 0.058 | 0.0302 | 32 |
| 24 | 12 | 16 | 0.0180 | 0.0813 | 0.0108 | 65 |
| 25 | 12 | 17 | 0.0397 | 0.1790 | 0.0238 | 65 |
| 26 | 14 | 15 | 0.0171 | 0.0547 | 0.0074 | 100 |
| 27 | 18 | 19 | 0.461 | 0.685 | 0 | 32 |
| 28 | 19 | 20 | 0.283 | 0.434 | 0 | 32 |
| 29 | 21 | 22 | 0.0736 | 0.117 | 0 | 32 |
| 30 | 22 | 23 | 0.0099 | 0.0152 | 0 | 32 |
| 31 | 23 | 24 | 0.166 | 0.256 | 0.0042 | 32 |
| 32 | 26 | 27 | 0.165 | 0.254 | 0 | 32 |
| 33 | 27 | 28 | 0.0618 | 0.0954 | 0 | 32 |
| 34 | 28 | 29 | 0.0418 | 0.0587 | 0 | 65 |
| 35 | 25 | 30 | 0.135 | 0.202 | 0 | 32 |
| 36 | 30 | 31 | 0.326 | 0.497 | 0 | 32 |
| 37 | 31 | 32 | 0.507 | 0.755 | 0 | 32 |
| 38 | 32 | 33 | 0.0392 | 0.036 | 0 | 32 |
| 39 | 34 | 35 | 0.052 | 0.078 | 0.0016 | 32 |

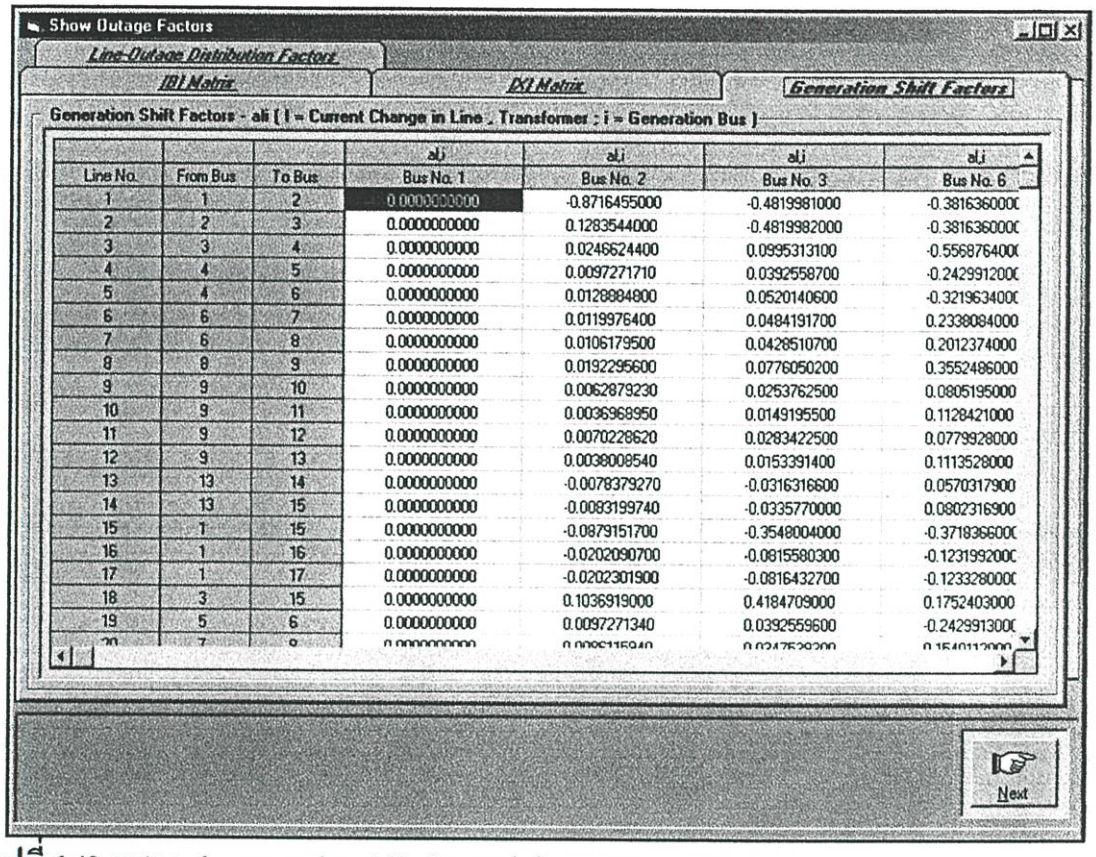
**ตารางที่ 6.17** (ต่อ)

| Line No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | BC/2 (pu) | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 | 35 | 36 | 0.043 | 0.0537 | 0.0008 | 32 |
| 41 | 36 | 37 | 0.029 | 0.0366 | 0 | 32 |
| 42 | 37 | 38 | 0.0651 | 0.1009 | 0.001 | 32 |
| 43 | 37 | 39 | 0.0239 | 0.0379 | 0 | 32 |
| 44 | 36 | 40 | 0.03 | 0.0466 | 0 | 32 |
| 45 | 22 | 38 | 0.0192 | 0.0295 | 0 | 32 |
| 46 | 41 | 42 | 0.207 | 0.352 | 0 | 32 |
| 47 | 41 | 43 | 0 | 0.4120 | 0 | 32 |
| 48 | 38 | 44 | 0.0289 | 0.0585 | 0.001 | 32 |
| 49 | 15 | 45 | 0 | 0.1042 | 0 | 65 |
| 50 | 47 | 48 | 0.0182 | 0.0233 | 0 | 32 |
| 51 | 48 | 49 | 0.0834 | 0.129 | 0.0024 | 32 |
| 52 | 49 | 50 | 0.0801 | 0.128 | 0 | 32 |
| 53 | 50 | 51 | 0.1386 | 0.2200 | 0 | 32 |
| 54 | 29 | 52 | 0.1442 | 0.187 | 0 | 32 |
| 55 | 52 | 53 | 0.0762 | 0.0984 | 0 | 32 |
| 56 | 53 | 54 | 0.1878 | 0.232 | 0 | 32 |
| 57 | 54 | 55 | 0.1732 | 0.2265 | 0 | 32 |
| 58 | 44 | 45 | 0.0624 | 0.1242 | 0.002 | 65 |
| 59 | 56 | 41 | 0.553 | 0.549 | 0 | 32 |
| 60 | 56 | 42 | 0.2125 | 0.354 | 0 | 32 |
| 61 | 57 | 56 | 0.174 | 0.26 | 0 | 32 |
| 62 | 38 | 49 | 0.115 | 0.177 | 0.003 | 32 |
| 63 | 38 | 48 | 0.0312 | 0.0482 | 0 | 32 |

**ตารางที่ 6.18** แสดงข้อมูล Transformer ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus

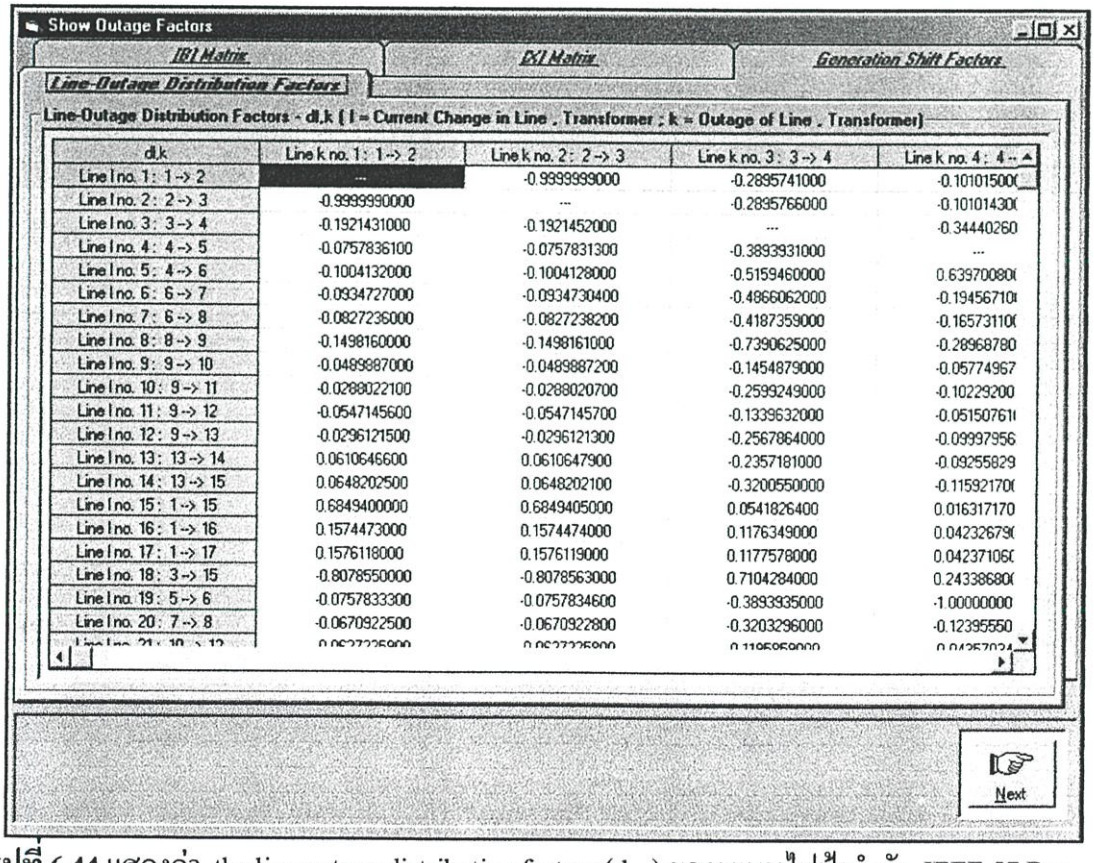
| Tr No. | From Bus No. | To Bus No. | R (pu) | X (pu) | Tap | Flow Limit (MW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 | 18 | 0 | 0.24228 | 0.978 | 65 |
| 2 | 7 | 29 | 0 | 0.0648 | 0.967 | 72 |
| 3 | 9 | 55 | 0 | 0.1205 | 0.94 | 65 |
| 4 | 10 | 51 | 0 | 0.0712 | 0.93 | 65 |
| 5 | 11 | 41 | 0 | 0.749 | 0.955 | 32 |
| 6 | 11 | 43 | 0 | 0.153 | 0.958 | 32 |
| 7 | 13 | 49 | 0 | 0.191 | 0.895 | 65 |
| 8 | 14 | 46 | 0 | 0.0735 | 0.9 | 65 |
| 9 | 15 | 45 | 0 | 0.1042 | 0.955 | 65 |
| 10 | 21 | 20 | 0 | 0.7767 | 1.043 | 32 |
| 11 | 24 | 25 | 0 | 0.60276 | 1 | 32 |
| 12 | 24 | 26 | 0 | 0.0473 | 1.043 | 32 |
| 13 | 34 | 32 | 0 | 0.953 | 0.975 | 32 |
| 14 | 39 | 57 | 0 | 1.355 | 0.98 | 32 |
| 15 | 40 | 56 | 0 | 1.195 | 0.958 | 32 |

หาค่า the generation shift factors ($a_{li}$) , the line outage distribution factors ($d_{l,k}$) แสดงได้ดังรูปที่ 6.43 และ 6.44 ตามลำดับ




| Line No. | From Bus | To Bus | ali Bus No. 1 | ali Bus No. 2 | ali Bus No. 3 | ali Bus No. 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | 0.0000000000 | -0.8716455000 | -0.4819981000 | -0.3816360000 |
| 2 | 2 | 3 | 0.0000000000 | 0.1283544000 | -0.4819982000 | -0.3816360000 |
| 3 | 3 | 4 | 0.0000000000 | 0.0246624400 | 0.0995313100 | -0.5568764000 |
| 4 | 4 | 5 | 0.0000000000 | 0.0097271710 | 0.0392558700 | -0.2429912000 |
| 5 | 4 | 6 | 0.0000000000 | 0.0128884800 | 0.0520140600 | -0.3219634000 |
| 6 | 6 | 7 | 0.0000000000 | 0.0119976400 | 0.0484191700 | 0.2338084000 |
| 7 | 6 | 8 | 0.0000000000 | 0.0106179500 | 0.0428510700 | 0.2012374000 |
| 8 | 8 | 9 | 0.0000000000 | 0.0192295600 | 0.0776050200 | 0.3552486000 |
| 9 | 9 | 10 | 0.0000000000 | 0.0062879230 | 0.0253762500 | 0.0805195000 |
| 10 | 9 | 11 | 0.0000000000 | 0.0036968950 | 0.0149195500 | 0.1128421000 |
| 11 | 9 | 12 | 0.0000000000 | 0.0070228620 | 0.0283422500 | 0.0779928000 |
| 12 | 9 | 13 | 0.0000000000 | 0.0038008540 | 0.0153391400 | 0.1113528000 |
| 13 | 13 | 14 | 0.0000000000 | -0.0078379270 | -0.0316316600 | 0.0570317900 |
| 14 | 13 | 15 | 0.0000000000 | -0.0083199740 | -0.0335770000 | 0.0802316900 |
| 15 | 1 | 15 | 0.0000000000 | -0.0879151700 | -0.3548004000 | -0.3718366000 |
| 16 | 1 | 16 | 0.0000000000 | -0.0202090700 | -0.0815580300 | -0.1231992000 |
| 17 | 1 | 17 | 0.0000000000 | -0.0202301900 | -0.0816432700 | -0.1233280000 |
| 18 | 3 | 15 | 0.0000000000 | 0.1036919000 | 0.4184709000 | 0.1752403000 |
| 19 | 5 | 6 | 0.0000000000 | 0.0097271340 | 0.0392559600 | -0.2429913000 |

**รูปที่ 6.43** แสดง the generation shift factors ($a_{li}$) ของระบบ IEEE 57 Bus




| dl,k | Line k no. 1 : 1 --> 2 | Line k no. 2 : 2 --> 3 | Line k no. 3 : 3 --> 4 | Line k no. 4 : 4 -- |
|---|---|---|---|---|
| Line l no. 1 : 1 --> 2 | --- | -0.9999999000 | -0.2895741000 | -0.1010150 |
| Line l no. 2 : 2 --> 3 | -0.9999990000 | --- | -0.2895766000 | -0.1010143 |
| Line l no. 3 : 3 --> 4 | -0.1921431000 | -0.1921452000 | --- | -0.3444026 |
| Line l no. 4 : 4 --> 5 | -0.0757836100 | -0.0757831300 | -0.3893931000 | --- |
| Line l no. 5 : 4 --> 6 | -0.1004132000 | -0.1004128000 | -0.5159460000 | 0.6397008 |
| Line l no. 6 : 6 --> 7 | -0.0934727000 | -0.0934730400 | -0.4866062000 | -0.1945671 |
| Line l no. 7 : 6 --> 8 | -0.0827236000 | -0.0827238200 | -0.4187359000 | -0.1657311 |
| Line l no. 8 : 8 --> 9 | -0.1498160000 | -0.1498161000 | -0.7390625000 | -0.2896878 |
| Line l no. 9 : 9 --> 10 | -0.0489887000 | -0.0489887200 | -0.1454879000 | -0.0577496 |
| Line l no. 10 : 9 --> 11 | -0.0288022100 | -0.0288020700 | -0.2599249000 | -0.1022920 |
| Line l no. 11 : 9 --> 12 | -0.0547145600 | -0.0547145700 | -0.1339632000 | -0.0515076 |
| Line l no. 12 : 9 --> 13 | -0.0296121500 | -0.0296121300 | -0.2567864000 | -0.0999795 |
| Line l no. 13 : 13 --> 14 | 0.0610646600 | 0.0610647900 | -0.2357181000 | -0.0925582 |
| Line l no. 14 : 13 --> 15 | 0.0648202500 | 0.0648202100 | -0.3200550000 | -0.1159217 |
| Line l no. 15 : 1 --> 15 | 0.6849400000 | 0.6849405000 | 0.0541826400 | 0.0163171 |
| Line l no. 16 : 1 --> 16 | 0.1574473000 | 0.1574474000 | 0.1176349000 | 0.0423267 |
| Line l no. 17 : 1 --> 17 | 0.1576118000 | 0.1576119000 | 0.1177578000 | 0.0423710 |
| Line l no. 18 : 3 --> 15 | -0.8078550000 | -0.8078563000 | 0.7104284000 | 0.2433868 |
| Line l no. 19 : 5 --> 6 | -0.0757833300 | -0.0757834600 | -0.3893935000 | -1.0000000 |
| Line l no. 20 : 7 --> 8 | -0.0670922500 | -0.0670922800 | -0.3203296000 | -0.1239555 |

**รูปที่ 6.44** แสดงค่า the line outage distribution factors ($d_{l,k}$) ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus

ทำการทดสอบ outage อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังได้ดังต่อไปนี้

6.2.3.1 ทดสอบ outage line

สมมุติเลือกทดสอบ outage L58 (44 -> 45) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 6.45

Flow for Contingency by Outage Transmission Line

Show One Switched Line and Tr

Flow for Contingency by Outage Transmission Line No. 58 ; From Bus No. 44 ---> To Bus No. 45

| Line No. | From Bus | To Bus | Base Case Flow (MW) | Flow Limit (MW) | Outage Flow (MW) | % Overload |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | 102.1567000000 | 130.0000000000 | 102.3205000000 | 0.0000000000 % |
| 2 | 2 | 3 | 97.8372700000 | 130.0000000000 | 98.0022100000 | 0.0000000000 % |
| 3 | 3 | 4 | 60.2048600000 | 100.0000000000 | 65.9195600000 | 0.0000000000 % |
| 4 | 4 | 5 | 13.7801600000 | 32.0000000000 | 15.4226700000 | 0.0000000000 % |
| 5 | 4 | 6 | 14.2072000000 | 32.0000000000 | 16.6174900000 | 0.0000000000 % |
| 6 | 6 | 7 | -17.7698600000 | 65.0000000000 | -15.1268100000 | 0.0000000000 % |
| 7 | 6 | 8 | -42.4735400000 | 65.0000000000 | -41.2317900000 | 0.0000000000 % |
| 8 | 8 | 9 | 178.0684000000 | 200.0000000000 | 178.5132000000 | 0.0000000000 % |
| 9 | 9 | 10 | 17.1604200000 | 32.0000000000 | 18.0251400000 | 0.0000000000 % |
| 10 | 9 | 11 | 12.9572100000 | 32.0000000000 | 13.3889200000 | 0.0000000000 % |
| 11 | 9 | 12 | 2.5274440000 | 32.0000000000 | 1.8993740000 | 0.0000000000 % |
| 12 | 9 | 13 | 2.2917040000 | 32.0000000000 | 1.6686340000 | 0.0000000000 % |
| 13 | 13 | 14 | -10.3566500000 | 32.0000000000 | -11.0592300000 | 0.0000000000 % |
| 14 | 13 | 15 | -49.0061700000 | 72.0000000000 | -60.0068600000 | 0.0000000000 % |
| 15 | 1 | 15 | 149.0823000000 | 200.0000000000 | 145.8017000000 | 0.0000000000 % |
| 16 | 1 | 16 | 79.3082500000 | 100.0000000000 | 81.8655700000 | 0.0000000000 % |
| 17 | 1 | 17 | 93.4068900000 | 130.0000000000 | 95.9651600000 | 0.0000000000 % |
| 18 | 3 | 15 | 33.7648600000 | 65.0000000000 | 28.2090100000 | 0.0000000000 % |
| 19 | 5 | 6 | 0.8159406000 | 32.0000000000 | 2.2958810000 | 0.0000000000 % |
| 20 | 7 | 8 | -77.8870000000 | 100.0000000000 | -78.6536600000 | 0.0000000000 % |
| 21 | 10 | 12 | -17.6400300000 | 32.0000000000 | -20.2857300000 | 0.0000000000 % |
| 22 | 11 | 13 | -10.0398200000 | 32.0000000000 | -11.8451900000 | 0.0000000000 % |
| 23 | 12 | 13 | -0.4506805000 | 32.0000000000 | 0.8872995000 | 0.0000000000 % |

Flow for Contingency by Outage Transmission Line

Show One Switched Line and Tr

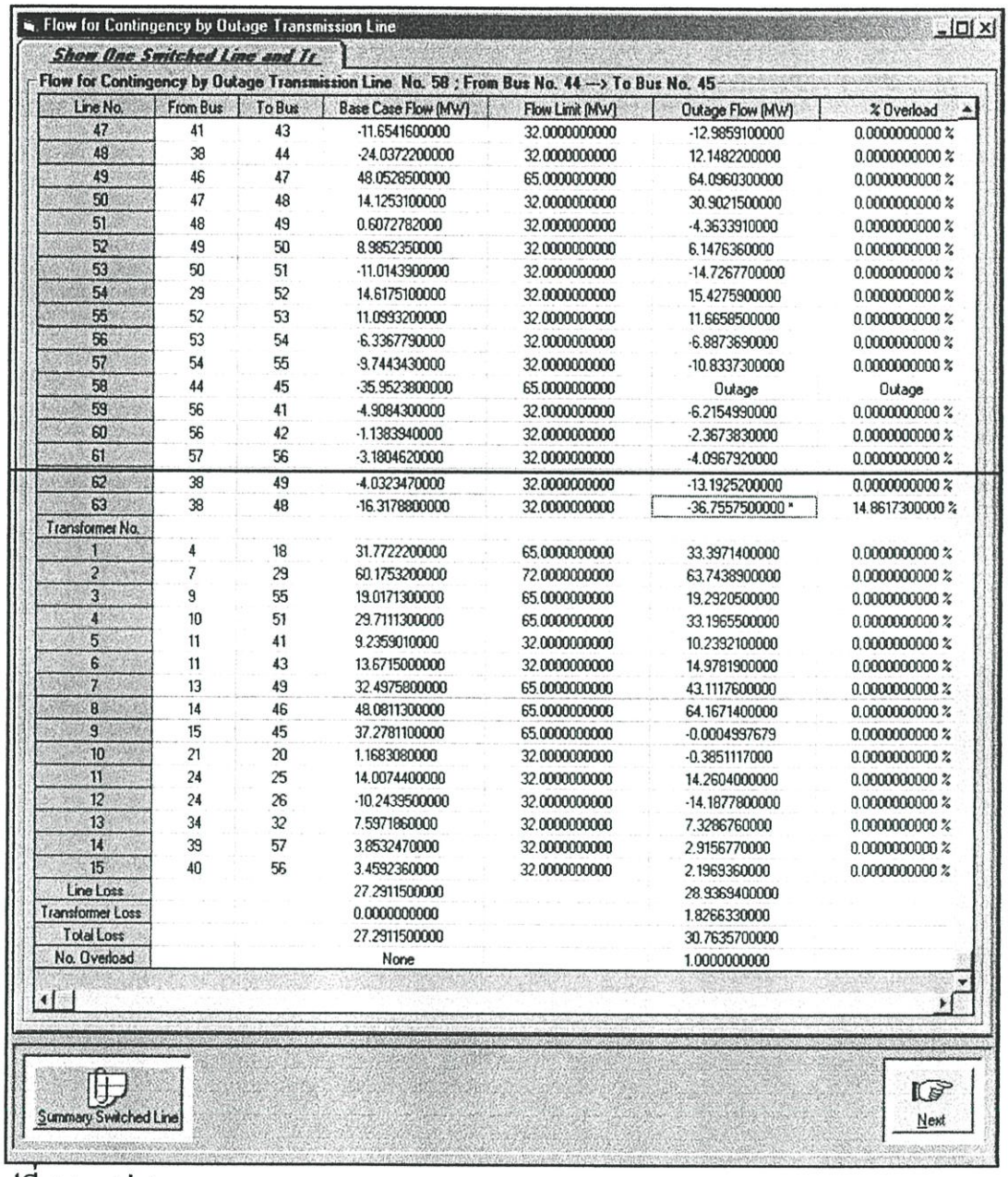
Flow for Contingency by Outage Transmission Line No. 58 ; From Bus No. 44 ---> To Bus No. 45

| Line No. | From Bus | To Bus | Base Case Flow (MW) | Flow Limit (MW) | Outage Flow (MW) | % Overload |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 24 | 12 | 16 | -33.4467100000 | 65.0000000000 | -35.8009100000 | 0.0000000000 % |
| 25 | 12 | 17 | -48.5135300000 | 65.0000000000 | -50.8690600000 | 0.0000000000 % |
| 26 | 14 | 15 | -69.0136900000 | 100.0000000000 | -85.7223900000 | 0.0000000000 % |
| 27 | 18 | 19 | 4.3910230000 | 32.0000000000 | 6.0179930000 | 0.0000000000 % |
| 28 | 19 | 20 | 1.1358790000 | 32.0000000000 | 2.7213380000 | 0.0000000000 % |
| 29 | 21 | 22 | -1.1135180000 | 32.0000000000 | 0.4187920000 | 0.0000000000 % |
| 30 | 22 | 23 | 8.9313460000 | 32.0000000000 | 6.2925770000 | 0.0000000000 % |
| 31 | 23 | 24 | 2.8981680000 | 32.0000000000 | -0.0140021800 | 0.0000000000 % |
| 32 | 26 | 27 | -10.3900900000 | 32.0000000000 | -14.0557200000 | 0.0000000000 % |
| 33 | 27 | 28 | -19.5850100000 | 32.0000000000 | -23.4023500000 | 0.0000000000 % |
| 34 | 28 | 29 | -22.6283800000 | 65.0000000000 | -26.8742200000 | 0.0000000000 % |
| 35 | 25 | 30 | 7.3765440000 | 32.0000000000 | 7.7935030000 | 0.0000000000 % |
| 36 | 30 | 31 | 3.8097040000 | 32.0000000000 | 4.0981640000 | 0.0000000000 % |
| 37 | 31 | 32 | -2.1169970000 | 32.0000000000 | -1.8463270000 | 0.0000000000 % |
| 38 | 32 | 33 | -3.3054140000 | 32.0000000000 | 0.6389153000 | 0.0000000000 % |
| 39 | 34 | 35 | -7.5868280000 | 32.0000000000 | -7.3536280000 | 0.0000000000 % |
| 40 | 35 | 36 | -11.5472400000 | 32.0000000000 | -12.5444900000 | 0.0000000000 % |
| 41 | 36 | 37 | -14.4999600000 | 32.0000000000 | -14.4090700000 | 0.0000000000 % |
| 42 | 37 | 38 | -20.1191900000 | 32.0000000000 | -18.0808900000 | 0.0000000000 % |
| 43 | 37 | 39 | 3.5103110000 | 32.0000000000 | 2.7141210000 | 0.0000000000 % |
| 44 | 36 | 40 | 3.4288330000 | 32.0000000000 | 1.9869330000 | 0.0000000000 % |
| 45 | 22 | 38 | -9.9889690000 | 32.0000000000 | -5.8628690000 | 0.0000000000 % |
| 46 | 41 | 42 | 8.2872910000 | 32.0000000000 | 9.5860300000 | 0.0000000000 % |

Summary Switched Line

Next

**รูปที่ 6.45** แสดงการทดสอบ outage L58 (44 -> 45)

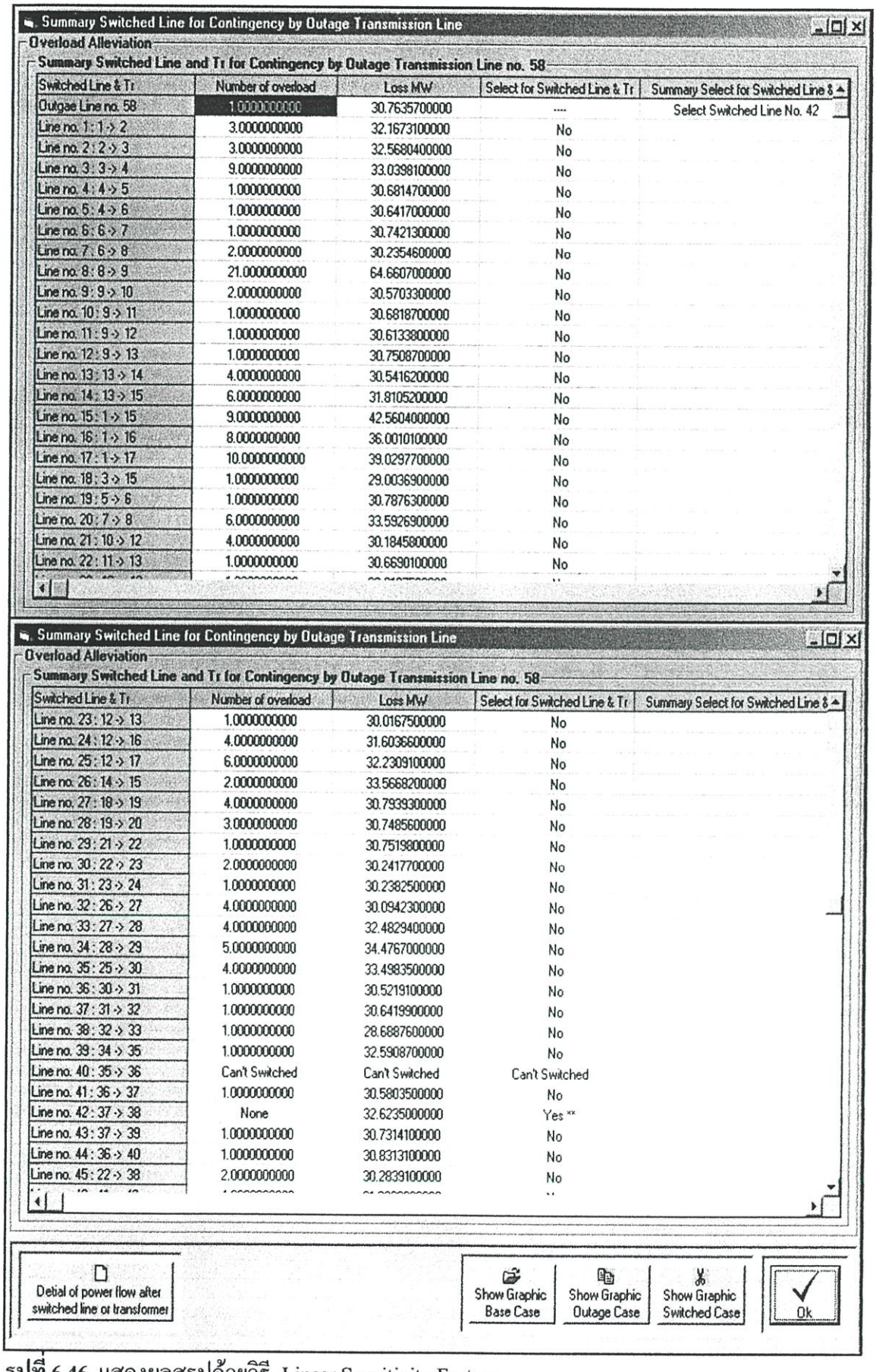



| Line No. | From Bus | To Bus | Base Case Flow (MW) | Flow Limit (MW) | Outage Flow (MW) | % Overload |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 47 | 41 | 43 | -11.6541600000 | 32.0000000000 | -12.9859100000 | 0.0000000000 % |
| 48 | 38 | 44 | -24.0372200000 | 32.0000000000 | 12.1482200000 | 0.0000000000 % |
| 49 | 46 | 47 | 48.0528500000 | 65.0000000000 | 64.0960300000 | 0.0000000000 % |
| 50 | 47 | 48 | 14.1253100000 | 32.0000000000 | 30.9021500000 | 0.0000000000 % |
| 51 | 48 | 49 | 0.6072782000 | 32.0000000000 | -4.3633910000 | 0.0000000000 % |
| 52 | 49 | 50 | 8.9852350000 | 32.0000000000 | 6.1476360000 | 0.0000000000 % |
| 53 | 50 | 51 | -11.0143900000 | 32.0000000000 | -14.7267700000 | 0.0000000000 % |
| 54 | 29 | 52 | 14.6175100000 | 32.0000000000 | 15.4275900000 | 0.0000000000 % |
| 55 | 52 | 53 | 11.0993200000 | 32.0000000000 | 11.6658500000 | 0.0000000000 % |
| 56 | 53 | 54 | -6.3367790000 | 32.0000000000 | -6.8873690000 | 0.0000000000 % |
| 57 | 54 | 55 | -9.7443430000 | 32.0000000000 | -10.8337300000 | 0.0000000000 % |
| 58 | 44 | 45 | -35.9523800000 | 65.0000000000 | Outage | Outage |
| 59 | 56 | 41 | -4.9084300000 | 32.0000000000 | -6.2154990000 | 0.0000000000 % |
| 60 | 56 | 42 | -1.1383940000 | 32.0000000000 | -2.3673830000 | 0.0000000000 % |
| 61 | 57 | 56 | -3.1804620000 | 32.0000000000 | -4.0967920000 | 0.0000000000 % |
| 62 | 38 | 49 | -4.0323470000 | 32.0000000000 | -13.1925200000 | 0.0000000000 % |
| 63 | 38 | 48 | -16.3178800000 | 32.0000000000 | -36.7557500000 * | 14.8617300000 % |
| Transformer No. | | | | | | |
| 1 | 4 | 18 | 31.7722200000 | 65.0000000000 | 33.3971400000 | 0.0000000000 % |
| 2 | 7 | 29 | 60.1753200000 | 72.0000000000 | 63.7438900000 | 0.0000000000 % |
| 3 | 9 | 55 | 19.0171300000 | 65.0000000000 | 19.2920500000 | 0.0000000000 % |
| 4 | 10 | 51 | 29.7111300000 | 65.0000000000 | 33.1965500000 | 0.0000000000 % |
| 5 | 11 | 41 | 9.2359010000 | 32.0000000000 | 10.2392100000 | 0.0000000000 % |
| 6 | 11 | 43 | 13.6715000000 | 32.0000000000 | 14.9781900000 | 0.0000000000 % |
| 7 | 13 | 49 | 32.4975800000 | 65.0000000000 | 43.1117600000 | 0.0000000000 % |
| 8 | 14 | 46 | 48.0811300000 | 65.0000000000 | 64.1671400000 | 0.0000000000 % |
| 9 | 15 | 45 | 37.2781100000 | 65.0000000000 | -0.0004997679 | 0.0000000000 % |
| 10 | 21 | 20 | 1.1683080000 | 32.0000000000 | -0.3851117000 | 0.0000000000 % |
| 11 | 24 | 25 | 14.0074400000 | 32.0000000000 | 14.2604000000 | 0.0000000000 % |
| 12 | 24 | 26 | -10.2439500000 | 32.0000000000 | -14.1877800000 | 0.0000000000 % |
| 13 | 34 | 32 | 7.5971860000 | 32.0000000000 | 7.3286760000 | 0.0000000000 % |
| 14 | 39 | 57 | 3.8532470000 | 32.0000000000 | 2.9156770000 | 0.0000000000 % |
| 15 | 40 | 56 | 3.4592360000 | 32.0000000000 | 2.1969360000 | 0.0000000000 % |
| Line Loss | | | 27.2911500000 | | 28.9369400000 | |
| Transformer Loss | | | 0.0000000000 | | 1.8266330000 | |
| Total Loss | | | 27.2911500000 | | 30.7635700000 | |
| No. Overload | | | None | | 1.0000000000 | |

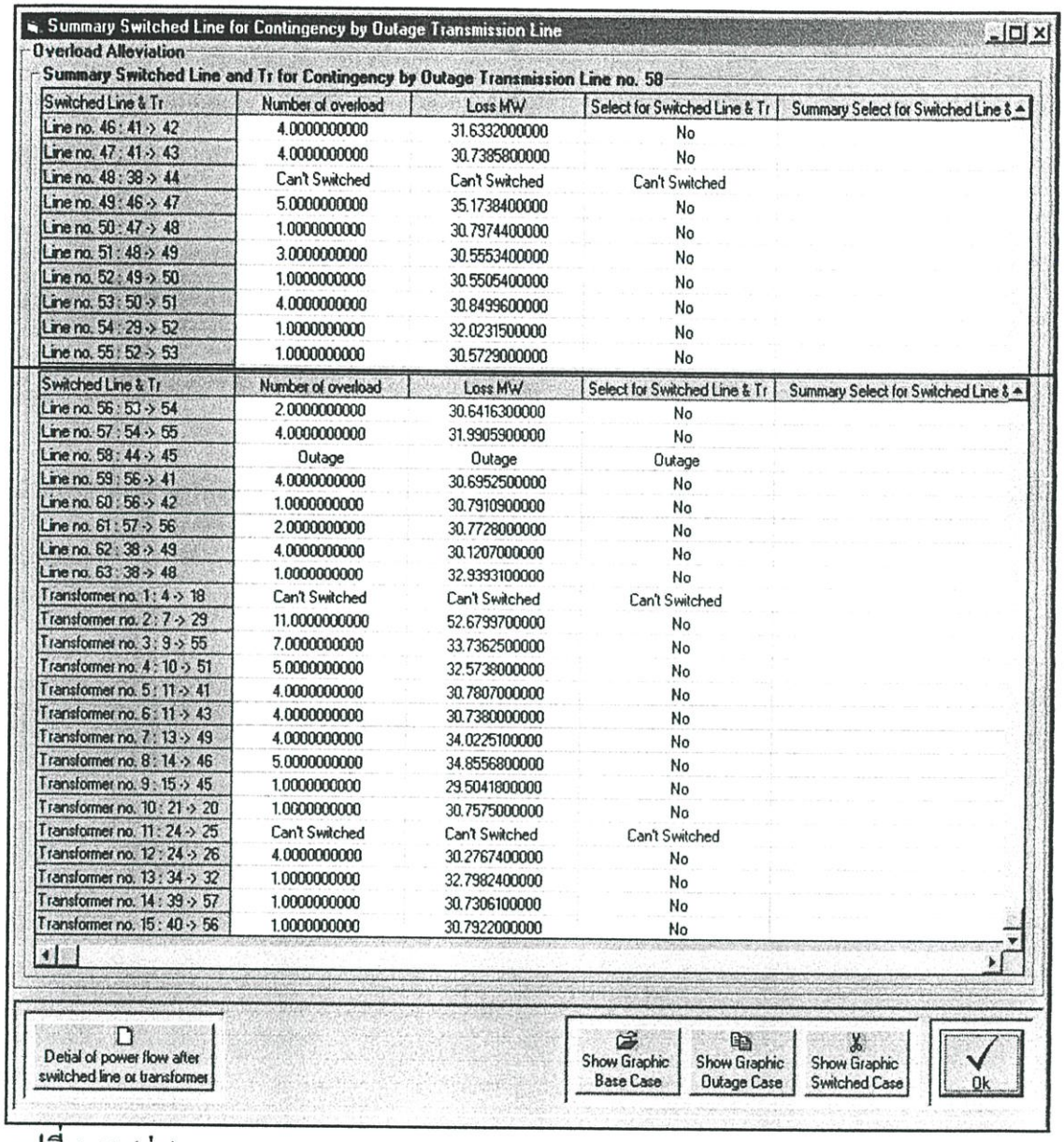
**รูปที่ 6.45** (ต่อ)

จากรูปที่ 6.45 เกิด overload ที่ L63 (38 -> 48) ขึ้น 14.86173 % ดังนั้นจึงทำการเลือก switch line ดังต่อไปนี้

1. วิธี Linear Sensitivity Factors ผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.46




**รูปที่ 6.46** แสดงผลสรุปด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors




| Switched Line & Tr | Number of overload | Loss MW | Select for Switched Line & Tr | Summary Select for Switched Line & |
|---|---|---|---|---|
| Line no. 46 : 41 -> 42 | 4.0000000000 | 31.6332000000 | No | |
| Line no. 47 : 41 -> 43 | 4.0000000000 | 30.7385800000 | No | |
| Line no. 48 : 38 -> 44 | Can't Switched | Can't Switched | Can't Switched | |
| Line no. 49 : 46 -> 47 | 5.0000000000 | 35.1738400000 | No | |
| Line no. 50 : 47 -> 48 | 1.0000000000 | 30.7974400000 | No | |
| Line no. 51 : 48 -> 49 | 3.0000000000 | 30.5553400000 | No | |
| Line no. 52 : 49 -> 50 | 1.0000000000 | 30.5505400000 | No | |
| Line no. 53 : 50 -> 51 | 4.0000000000 | 30.8499600000 | No | |
| Line no. 54 : 29 -> 52 | 1.0000000000 | 32.0231500000 | No | |
| Line no. 55 : 52 -> 53 | 1.0000000000 | 30.5729000000 | No | |
| Line no. 56 : 53 -> 54 | 2.0000000000 | 30.6416300000 | No | |
| Line no. 57 : 54 -> 55 | 4.0000000000 | 31.9905900000 | No | |
| Line no. 58 : 44 -> 45 | Outage | Outage | Outage | |
| Line no. 59 : 56 -> 41 | 4.0000000000 | 30.6952500000 | No | |
| Line no. 60 : 56 -> 42 | 1.0000000000 | 30.7910900000 | No | |
| Line no. 61 : 57 -> 56 | 2.0000000000 | 30.7728000000 | No | |
| Line no. 62 : 38 -> 49 | 4.0000000000 | 30.1207000000 | No | |
| Line no. 63 : 38 -> 48 | 1.0000000000 | 32.9393100000 | No | |
| Transformer no. 1 : 4 -> 18 | Can't Switched | Can't Switched | Can't Switched | |
| Transformer no. 2 : 7 -> 29 | 11.0000000000 | 52.6799700000 | No | |
| Transformer no. 3 : 9 -> 55 | 7.0000000000 | 33.7362500000 | No | |
| Transformer no. 4 : 10 -> 51 | 5.0000000000 | 32.5738000000 | No | |
| Transformer no. 5 : 11 -> 41 | 4.0000000000 | 30.7807000000 | No | |
| Transformer no. 6 : 11 -> 43 | 4.0000000000 | 30.7380000000 | No | |
| Transformer no. 7 : 13 -> 49 | 4.0000000000 | 34.0225100000 | No | |
| Transformer no. 8 : 14 -> 46 | 5.0000000000 | 34.8556800000 | No | |
| Transformer no. 9 : 15 -> 45 | 1.0000000000 | 29.5041800000 | No | |
| Transformer no. 10 : 21 -> 20 | 1.0000000000 | 30.7575000000 | No | |
| Transformer no. 11 : 24 -> 25 | Can't Switched | Can't Switched | Can't Switched | |
| Transformer no. 12 : 24 -> 26 | 4.0000000000 | 30.2767400000 | No | |
| Transformer no. 13 : 34 -> 32 | 1.0000000000 | 32.7982400000 | No | |
| Transformer no. 14 : 39 -> 57 | 1.0000000000 | 30.7306100000 | No | |
| Transformer no. 15 : 40 -> 56 | 1.0000000000 | 30.7922000000 | No | |

**รูปที่ 6.46** (ต่อ)

จากรูปที่ 6.46 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch L42 (37 -> 38) ไปแล้วนั้นสามารถที่จะขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ ดังนั้นจึงทำการเลือก switch L42 (37 -> 38) จึงจะเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 3.796875 s) #

ส่วนค่า power flow หลังจากเลือก switch L42 (37 -> 38) ไปแล้วนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 6.19

**ตารางที่ 6.19** แสดงค่า power flow หลังจากเลือก switch L42 (37 -> 38)

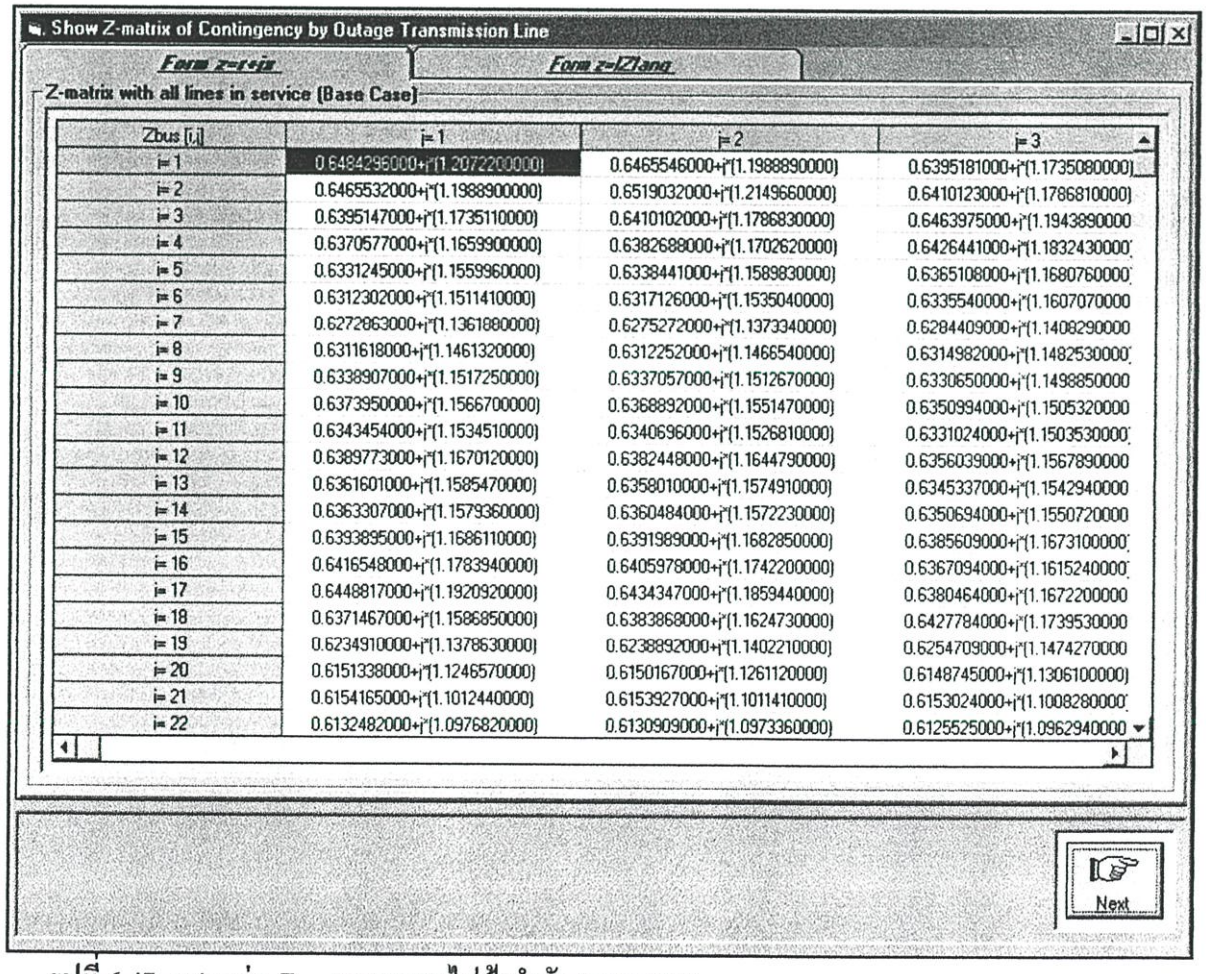
| | Outage Flow (MW) | Limit (MW) | OL58+SwL42 (LSF) | OL58+SwL42 (Run Load flow) |
|---|---|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | 102.32050 | 130 | 103.16610 | 103.20870 |
| L2 : 2 -> 3 | 98.00222 | 130 | 98.83558 | 98.87888 |
| L3 : 3 -> 4 | 65.91955 | 100 | 67.14252 | 67.08829 |
| L4 : 4 -> 5 | 15.42267 | 32 | 16.11901 | 16.10335 |
| L5 : 4 -> 6 | 16.61748 | 32 | 17.64523 | 17.61084 |
| L6 : 6 -> 7 | -15.12681 | 65 | -14.14392 | -14.19433 |
| L7 : 6 -> 8 | -41.23179 | 65 | -40.49880 | -40.50762 |
| L8 : 8 -> 9 | 178.51320 | 200 | 179.76520 | 179.78940 |
| L9 : 9 -> 10 | 18.02514 | 32 | 16.18609 | 16.12228 |
| L10 : 9 -> 11 | 13.38892 | 32 | 18.98627 | 18.99814 |
| L11 : 9 -> 12 | 1.89937 | 32 | 0.8850829 | 0.89433 |
| L12 : 9 -> 13 | 1.66863 | 32 | 0.1218063 | 0.18498 |
| L13 : 13 -> 14 | -11.05923 | 32 | -15.82023 | -15.73053 |
| L14 : 13 -> 15 | -60.00686 | 72 | -61.70563 | -61.64095 |
| L15 : 1 -> 15 | 145.80170 | 200 | 146.86620 | 146.89560 |
| L16 : 1 -> 16 | 81.86557 | 100 | 82.61676 | 82.61473 |
| L17 : 1 -> 17 | 95.96516 | 130 | 96.71719 | 96.71571 |
| L18 : 3 -> 15 | 28.20901 | 65 | 27.82695 | 27.91411 |
| L19 : 5 -> 6 | 2.29588 | 32 | 2.987943 | 2.96083 |
| L20 : 7 -> 8 | -78.65366 | 100 | -78.174490 | -78.13712 |
| L21 : 10 -> 12 | -20.28573 | 32 | -20.14682 | -20.03989 |
| L22 : 11 -> 13 | -11.84519 | 32 | -21.53169 | -21.38583 |
| L23 : 12 -> 13 | 0.88730 | 32 | 1.467527 | 1.58640 |
| L24 : 12 -> 16 | -35.80091 | 65 | -36.49299 | -36.48692 |
| L25 : 12 -> 17 | -50.86907 | 65 | -51.56132 | -51.55618 |
| L26 : 14 -> 15 | -85.72239 | 100 | -84.77251 | -84.80175 |
| L27 : 18 -> 19 | 6.01799 | 32 | 5.524209 | 5.52432 |
| L28 : 19 -> 20 | 2.72134 | 32 | 2.241002 | 2.23978 |
| L29 : 21 -> 22 | 0.41879 | 32 | -0.03822155 | -0.05488 |
| L30 : 22 -> 23 | 6.29258 | 32 | 13.23949 | 13.40086 |
| L31 : 23 -> 24 | -0.01400 | 32 | 7.135605 | 7.15435 |
| L32 : 26 -> 27 | -14.05572 | 32 | -14.66695 | -14.47680 |
| L33 : 27 -> 28 | -23.40235 | 32 | -23.81461 | -23.88965 |
| L34 : 28 -> 29 | -26.87422 | 65 | -27.63429 | -27.38269 |
| L35 : 25 -> 30 | 7.79350 | 32 | 15.24630 | 15.20330 |
| L36 : 30 -> 31 | 4.09816 | 32 | 11.05113 | 11.16247 |
| L37 : 31 -> 32 | -1.84633 | 32 | 4.468369 | 4.53429 |
| L38 : 32 -> 33 | 0.63892 | 32 | 2.303357 | 2.48837 |
| L39 : 34 -> 35 | -7.35363 | 32 | -1.193857 | -1.21428 |
| L40 : 35 -> 36 | -12.54449 | 32 | -7.26931 | -7.41452 |
| L41 : 36 -> 37 | -14.40907 | 32 | -2.54570 | -2.62334 |
| L42 : 37 -> 38 | -18.08089 | 32 | Switched | Switched |
| L43 : 37 -> 39 | 2.71412 | 32 | -2.589175 | -2.58352 |
| L44 : 36 -> 40 | 1.98693 | 32 | -4.989744 | -4.83628 |
| L45 : 22 -> 38 | -5.86287 | 32 | -13.19951 | -13.42569 |
| L46 : 41 -> 42 | 9.58603 | 32 | 16.65081 | 16.06358 |
| L47 : 41 -> 43 | -12.98591 | 32 | -21.54613 | -21.53976 |
| L48 : 38 -> 44 | 12.14822 | 32 | 12.15021 | 12.09495 |
| L49 : 46 -> 47 | 64.09603 | 65 | 58.38313 | 58.47905 |
| L50 : 47 -> 48 | 30.90215 | 32 | 26.54203 | 26.27785 |
| L51 : 48 -> 49 | -4.36339 | 32 | -2.172633 | -2.17992 |
| L52 : 49 -> 50 | 6.14764 | 32 | 8.157515 | 8.19461 |
| L53 : 50 -> 51 | -14.72677 | 32 | -12.81030 | -12.72312 |
| L54 : 29 -> 52 | 15.42759 | 32 | 15.30181 | 15.35180 |
| L55 : 52 -> 53 | 11.66585 | 32 | 11.52787 | 11.60357 |
| L56 : 53 -> 54 | -6.88737 | 32 | -6.976142 | -6.94911 |
| L57 : 54 -> 55 | -10.83373 | 32 | -10.87703 | -10.91287 |
| L58 : 44 -> 45 | Outage | 65 | Outage | Outage |
| L59 : 56 -> 41 | -6.21550 | 32 | -13.78038 | -13.30634 |
| L60 : 56 -> 42 | -2.36738 | 32 | -8.040161 | -7.99255 |
| L61 : 57 -> 56 | -4.09679 | 32 | -9.394363 | -9.60015 |
| L62 : 38 -> 49 | -13.19252 | 32 | -9.578671 | -9.66565 |
| L63 : 38 -> 48 | -36.75575 | 32 | -29.58978 | -29.58480 |

**ตารางที่ 6.19** (ต่อ)

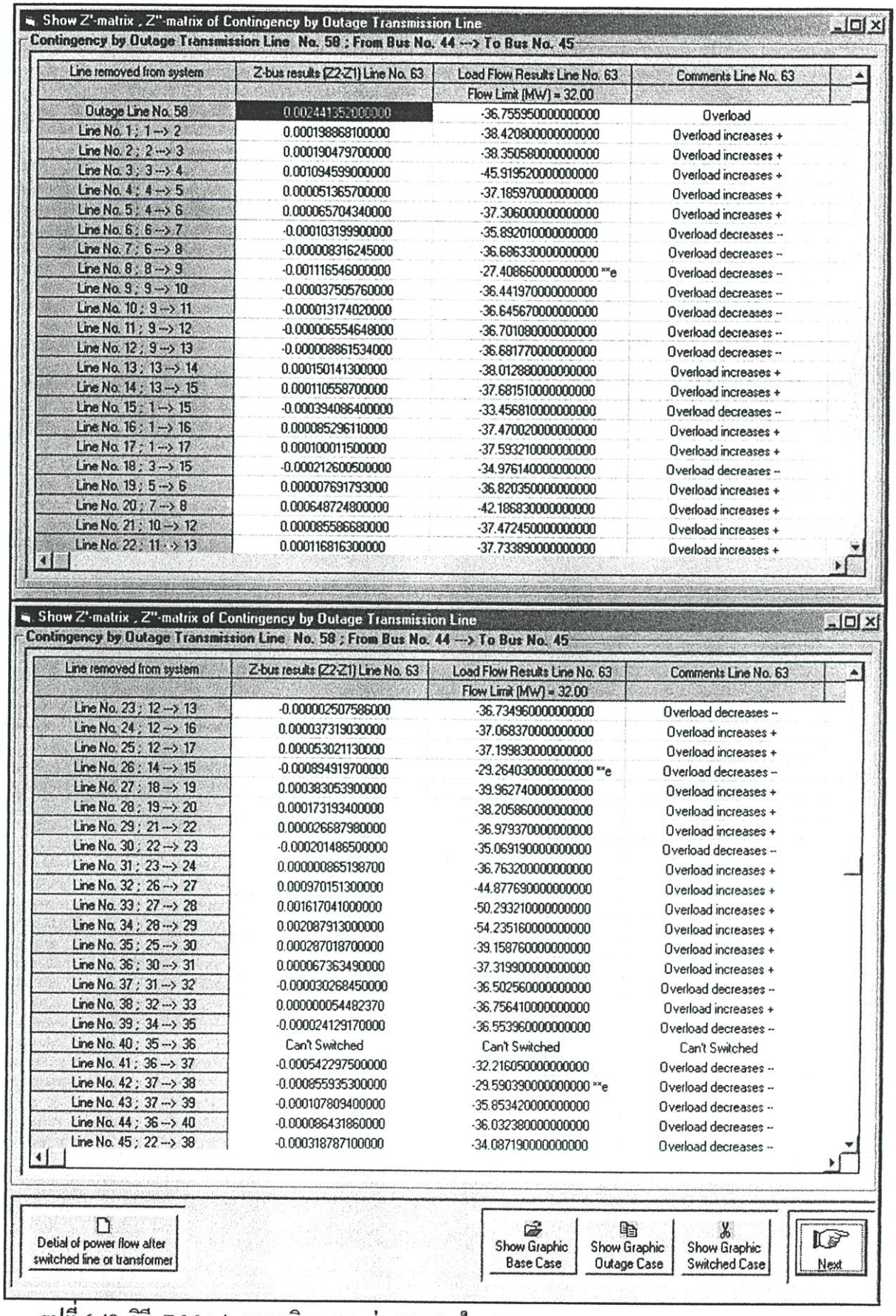
| | Outage Flow (MW) | Limit (MW) | OL58+SwL42 (LSF) | OL58+SwL42 (Run Load flow) |
|---|---|---|---|---|
| Tr1 : 4 -> 18 | 33.39714 | 65 | 32.86830 | 32.85855 |
| Tr2 : 7 -> 29 | 63.74389 | 72 | 64.21575 | 64.13461 |
| Tr3 : 9 -> 55 | 19.29205 | 65 | 19.39282 | 19.37191 |
| Tr4 : 10 -> 51 | 33.19655 | 65 | 31.24416 | 31.06257 |
| Tr5 : 11 -> 41 | 10.23921 | 32 | 16.71527 | 16.70273 |
| Tr6 : 11 -> 43 | 14.97819 | 32 | 23.57397 | 23.53332 |
| Tr7 : 13 -> 49 | 43.11176 | 65 | 38.75440 | 38.89703 |
| Tr8 : 14 -> 46 | 64.16714 | 65 | 58.46460 | 58.49828 |
| Tr9 : 15 -> 45 | -0.00050 | 65 | 0.000176557 | 0.00100 |
| Tr10 : 21 -> 20 | -0.38511 | 32 | 0.1115173 | 0.11000 |
| Tr11 : 24 -> 25 | 14.26039 | 32 | 21.42301 | 21.62591 |
| Tr12 : 24 -> 26 | -14.18778 | 32 | -14.64664 | -14.45396 |
| Tr13 : 34 -> 32 | 7.32868 | 32 | 1.174529 | 1.10404 |
| Tr14 : 39 -> 57 | 2.91568 | 32 | -2.71767 | -2.57570 |
| Tr15 : 40 -> 56 | 2.19694 | 32 | -4.842611 | -4.68898 |
| Total Losses | 30.76357 | | 32.62350 | 32.87923 |
| No. of Overload | 1 | | 0 | 0 |

2. วิธี Z-Matrix แบบเดิม

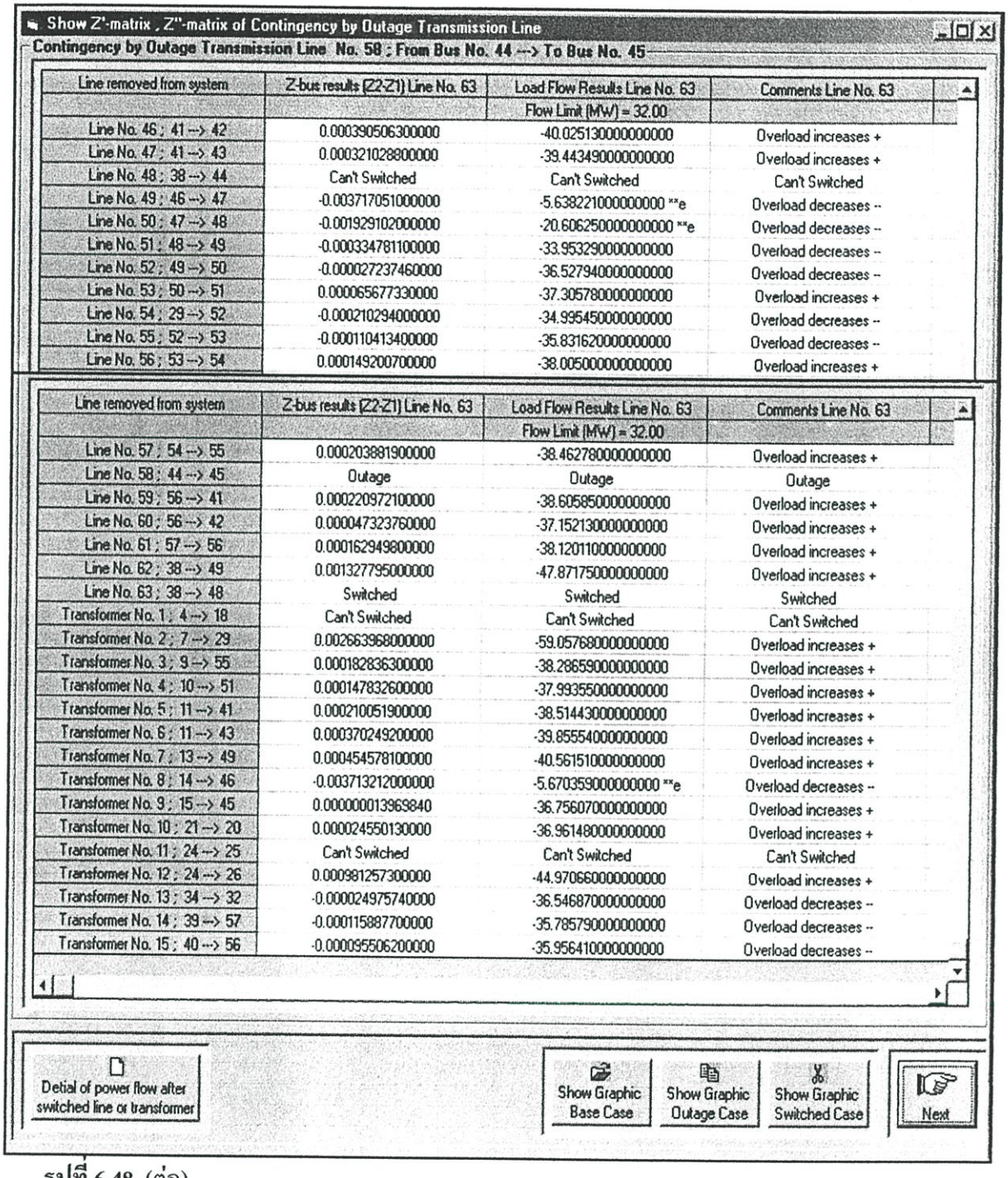
ทำการคำนวณหาค่า $Z_{bus}$ ผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.47 , ใช้วิธี Z-Matrix แบบเดิม คำนวณผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 6.48 , 6.49 ตามลำดับ




**รูปที่ 6.47** แสดงค่า $Z_{bus}$ ของระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus



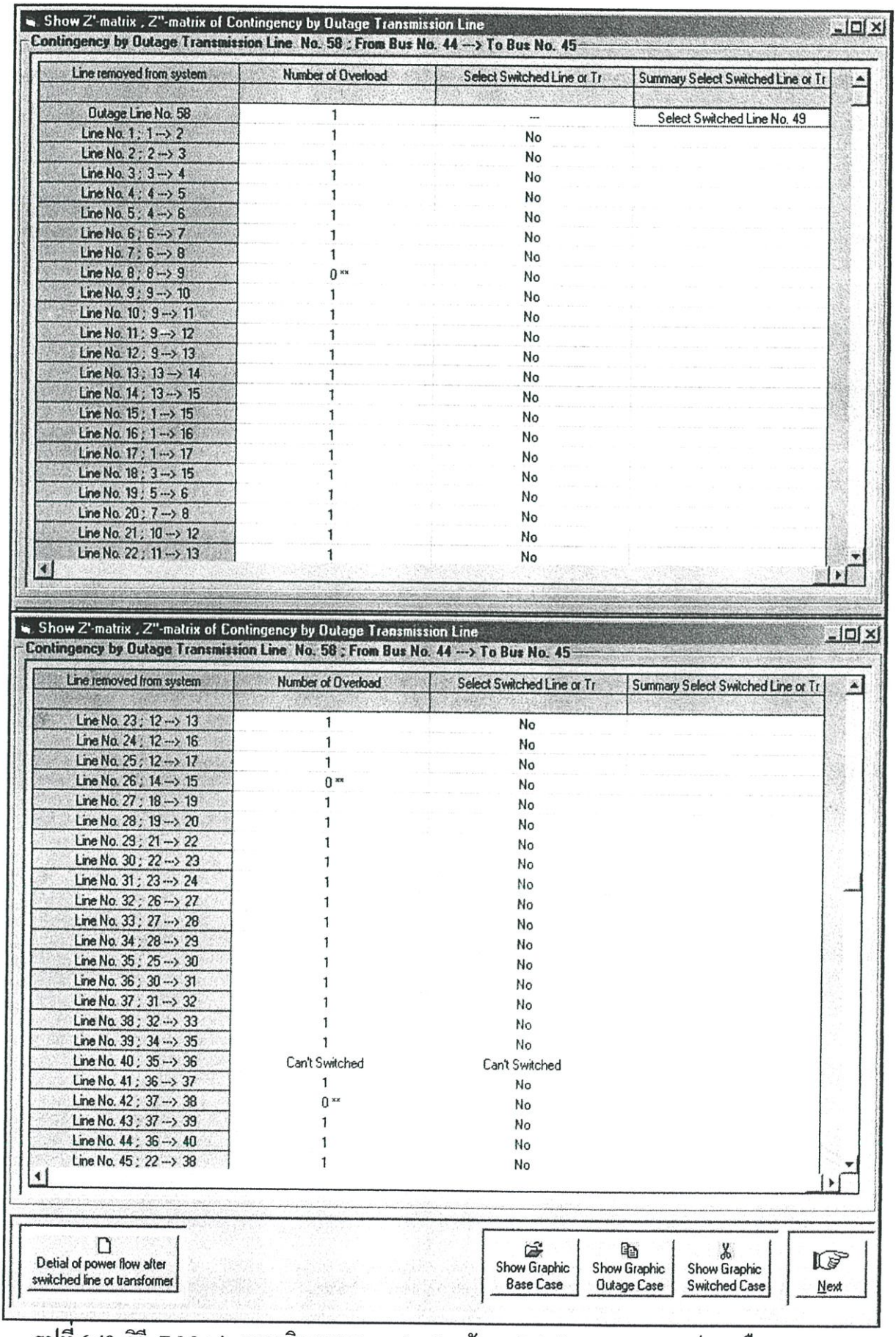

**รูปที่ 6.48** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดงค่า Z2-Z1 ใน L63



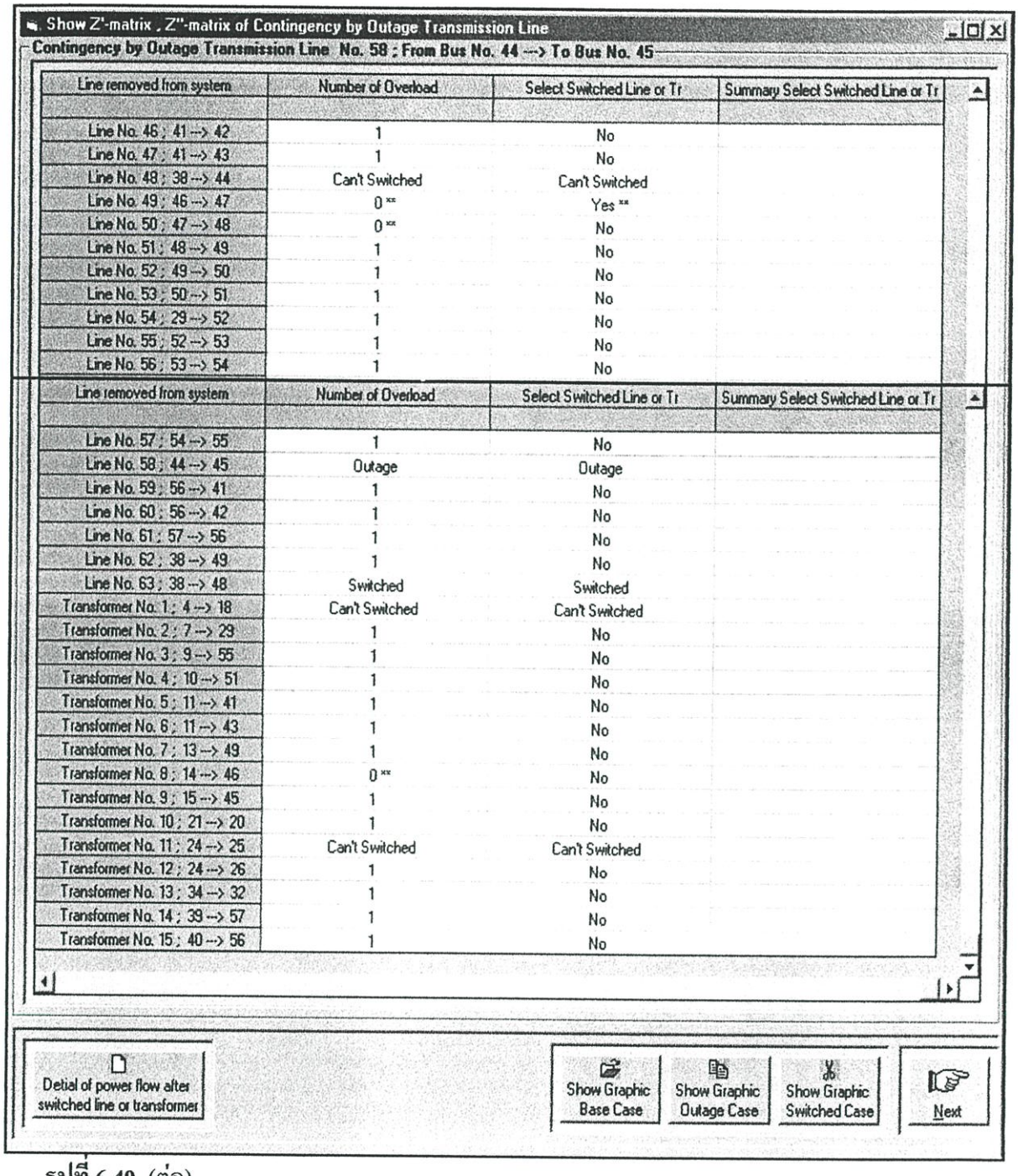

| Line removed from system | Z-bus results (Z2-Z1) Line No. 63 | Load Flow Results Line No. 63 | Comments Line No. 63 |
|---|---|---|---|
| | | Flow Limit (MW) = 32.00 | |
| Line No. 46 ; 41 --> 42 | 0.000390506300000 | -40.025130000000000 | Overload increases + |
| Line No. 47 ; 41 --> 43 | 0.000321028800000 | -39.443490000000000 | Overload increases + |
| Line No. 48 ; 38 --> 44 | Can't Switched | Can't Switched | Can't Switched |
| Line No. 49 ; 46 --> 47 | -0.003717051000000 | -5.638221000000000 **e | Overload decreases -- |
| Line No. 50 ; 47 --> 48 | -0.001929102000000 | -20.606250000000000 **e | Overload decreases -- |
| Line No. 51 ; 48 --> 49 | -0.000334781100000 | -33.953290000000000 | Overload decreases -- |
| Line No. 52 ; 49 --> 50 | -0.000027237460000 | -36.527940000000000 | Overload decreases -- |
| Line No. 53 ; 50 --> 51 | 0.000065677330000 | -37.305780000000000 | Overload increases + |
| Line No. 54 ; 29 --> 52 | -0.000210294000000 | -34.995450000000000 | Overload decreases -- |
| Line No. 55 ; 52 --> 53 | -0.000110413400000 | -35.831620000000000 | Overload decreases -- |
| Line No. 56 ; 53 --> 54 | 0.000149200700000 | -38.005000000000000 | Overload increases + |

| Line removed from system | Z-bus results (Z2-Z1) Line No. 63 | Load Flow Results Line No. 63 | Comments Line No. 63 |
|---|---|---|---|
| | | Flow Limit (MW) = 32.00 | |
| Line No. 57 ; 54 --> 55 | 0.000203881900000 | -38.462780000000000 | Overload increases + |
| Line No. 58 ; 44 --> 45 | Outage | Outage | Outage |
| Line No. 59 ; 56 --> 41 | 0.000220972100000 | -38.605850000000000 | Overload increases + |
| Line No. 60 ; 56 --> 42 | 0.000047323760000 | -37.152130000000000 | Overload increases + |
| Line No. 61 ; 57 --> 56 | 0.000162949800000 | -38.120110000000000 | Overload increases + |
| Line No. 62 ; 38 --> 49 | 0.001327795000000 | -47.871750000000000 | Overload increases + |
| Line No. 63 ; 38 --> 48 | Switched | Switched | Switched |
| Transformer No. 1 ; 4 --> 18 | Can't Switched | Can't Switched | Can't Switched |
| Transformer No. 2 ; 7 --> 29 | 0.002663968000000 | -59.057680000000000 | Overload increases + |
| Transformer No. 3 ; 9 --> 55 | 0.000182836300000 | -38.286590000000000 | Overload increases + |
| Transformer No. 4 ; 10 --> 51 | 0.000147832600000 | -37.993550000000000 | Overload increases + |
| Transformer No. 5 ; 11 --> 41 | 0.000210051900000 | -38.514430000000000 | Overload increases + |
| Transformer No. 6 ; 11 --> 43 | 0.000370249200000 | -39.855540000000000 | Overload increases + |
| Transformer No. 7 ; 13 --> 49 | 0.000454578100000 | -40.561510000000000 | Overload increases + |
| Transformer No. 8 ; 14 --> 46 | -0.003713212000000 | -5.670359000000000 **e | Overload decreases -- |
| Transformer No. 9 ; 15 --> 45 | 0.000000013969840 | -36.756070000000000 | Overload increases + |
| Transformer No. 10 ; 21 --> 20 | 0.000024550130000 | -36.961480000000000 | Overload increases + |
| Transformer No. 11 ; 24 --> 25 | Can't Switched | Can't Switched | Can't Switched |
| Transformer No. 12 ; 24 --> 26 | 0.000981257300000 | -44.970660000000000 | Overload increases + |
| Transformer No. 13 ; 34 --> 32 | -0.000024975740000 | -36.546870000000000 | Overload decreases -- |
| Transformer No. 14 ; 39 --> 57 | -0.000115887700000 | -35.785790000000000 | Overload decreases -- |
| Transformer No. 15 ; 40 --> 56 | -0.000095506200000 | -35.956410000000000 | Overload decreases -- |

**รูปที่ 6.48** (ต่อ)




**รูปที่ 6.49** วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch




**รูปที่ 6.49** (ต่อ)

รูปที่ 6.49 วิธี Z-Matrix แบบเดิม แสดง overload หลัง switch line & tr , ผลสรุปการเลือก switch จะเห็นได้ว่าเมื่อเลือก switch L8 (8 -> 9) , L26 (14 -> 15) , L42 (37 -> 38) , L49 (46 -> 47) , L50 (47 -> 48) , Tr8 (14 -> 46) สามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ (มีจำนวน overload = 0)

ดังนั้นจึงทำการเลือก switch line ตามขั้นตอนการเลือกวิธี Z-Matrix แบบเดิม (รูปที่ 5.19) โดยดูจากรูปที่ 6.48 จะได้ค่าดังต่อไปนี้

เมื่อเลือก switch L8 (8 -> 9)

- ค่า L63 (38 -> 48) $P''_{3848}$ = -27.40866 MW

เมื่อเลือก switch L26 (14 -> 15)

- ค่า L63 (38 -> 48) $P''_{3848}$ = -29.26403 MW

เมื่อเลือก switch L42 (37 -> 38)

- ค่า L63 (38 -> 48) $P''_{3848}$ = -29.59039 MW

เมื่อเลือก switch L49 (46 -> 47)

- ค่า L63 (38 -> 48) $P''_{3848}$ = -5.638221 MW

เมื่อเลือก switch L50 (47 -> 48)

- ค่า L63 (38 -> 48) $P''_{3848}$ = -20.60625 MW

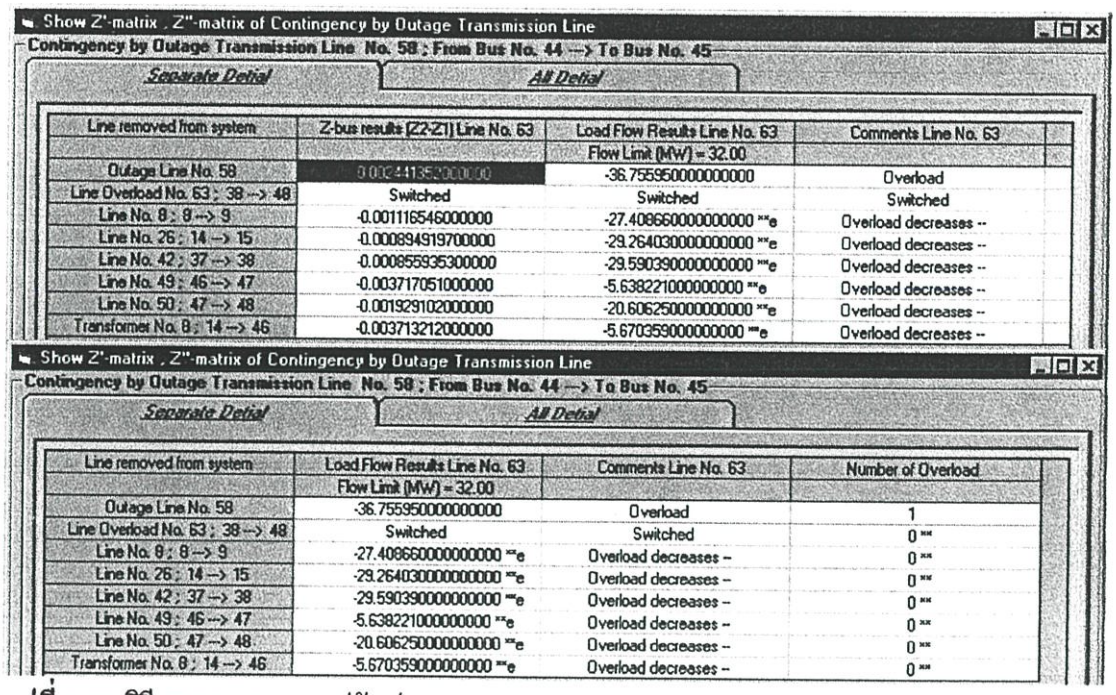
เมื่อเลือก switch Tr8 (14 -> 46)

- ค่า L63 (38 -> 48) $P''_{3848}$ = -5.670359 MW

จะเห็นได้ว่าเมื่อเลือก switch L49 (46 -> 47) แล้วนั้นค่า $P''_{3848}$ มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นจึงทำการเลือก switch L49 (46 -> 47) จึงจะเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 1.096313 s) #

3. วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

ใช้วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง คำนวณหาผลลัพธ์โดยทำการเลือกตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และ ทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วมีจำนวน overload เหลือน้อยที่สุดหรือมีจำนวน overload = 0 ออกมาจากการเลือก switch line & tr ทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 6.50



Show Z'-matrix , Z''-matrix of Contingency by Outage Transmission Line

Contingency by Outage Transmission Line No. 58 ; From Bus No. 44 --> To Bus No. 45

Separate Detail | All Detail

| Line removed from system | Z-bus results [Z2-Z1] Line No. 63 | Load Flow Results Line No. 63 | Comments Line No. 63 |
|---|---|---|---|
| | | Flow Limit (MW) = 32.00 | |
| Outage Line No. 58 | 0.0024135[illegible] | -36.755950000000000 | Overload |
| Line Overload No. 63 ; 38 --> 48 | Switched | Switched | Switched |
| Line No. 8 ; 8 --> 9 | -0.001116546000000 | -27.408660000000000 **e | Overload decreases -- |
| Line No. 26 ; 14 --> 15 | -0.000894919700000 | -29.264030000000000 **e | Overload decreases -- |
| Line No. 42 ; 37 --> 38 | -0.000855935300000 | -29.590390000000000 **e | Overload decreases -- |
| Line No. 49 ; 46 --> 47 | -0.003717051000000 | -5.638221000000000 **e | Overload decreases -- |
| Line No. 50 ; 47 --> 48 | -0.001929102000000 | -20.606250000000000 **e | Overload decreases -- |
| Transformer No. 8 ; 14 --> 46 | -0.003713212000000 | -5.670359000000000 **e | Overload decreases -- |

Show Z'-matrix , Z''-matrix of Contingency by Outage Transmission Line

Contingency by Outage Transmission Line No. 58 ; From Bus No. 44 --> To Bus No. 45

Separate Detail | All Detail

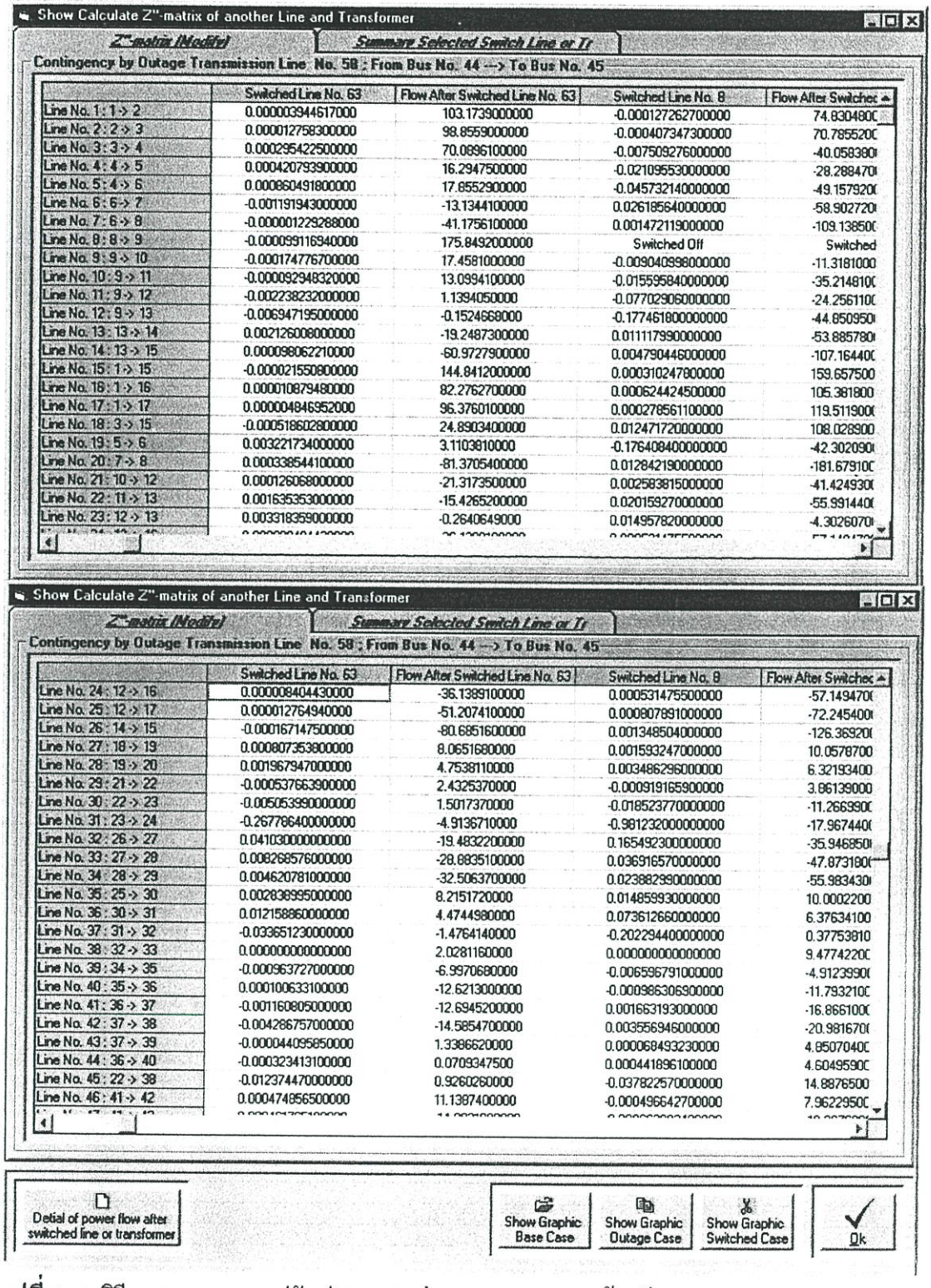
| Line removed from system | Load Flow Results Line No. 63 | Comments Line No. 63 | Number of Overload |
|---|---|---|---|
| | Flow Limit (MW) = 32.00 | | |
| Outage Line No. 58 | -36.755950000000000 | Overload | 1 |
| Line Overload No. 63 ; 38 --> 48 | Switched | Switched | 0 ** |
| Line No. 8 ; 8 --> 9 | -27.408660000000000 **e | Overload decreases -- | 0 ** |
| Line No. 26 ; 14 --> 15 | -29.264030000000000 **e | Overload decreases -- | 0 ** |
| Line No. 42 ; 37 --> 38 | -29.590390000000000 **e | Overload decreases -- | 0 ** |
| Line No. 49 ; 46 --> 47 | -5.638221000000000 **e | Overload decreases -- | 0 ** |
| Line No. 50 ; 47 --> 48 | -20.606250000000000 **e | Overload decreases -- | 0 ** |
| Transformer No. 8 ; 14 --> 46 | -5.670359000000000 **e | Overload decreases -- | 0 ** |

**รูปที่ 6.50** วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

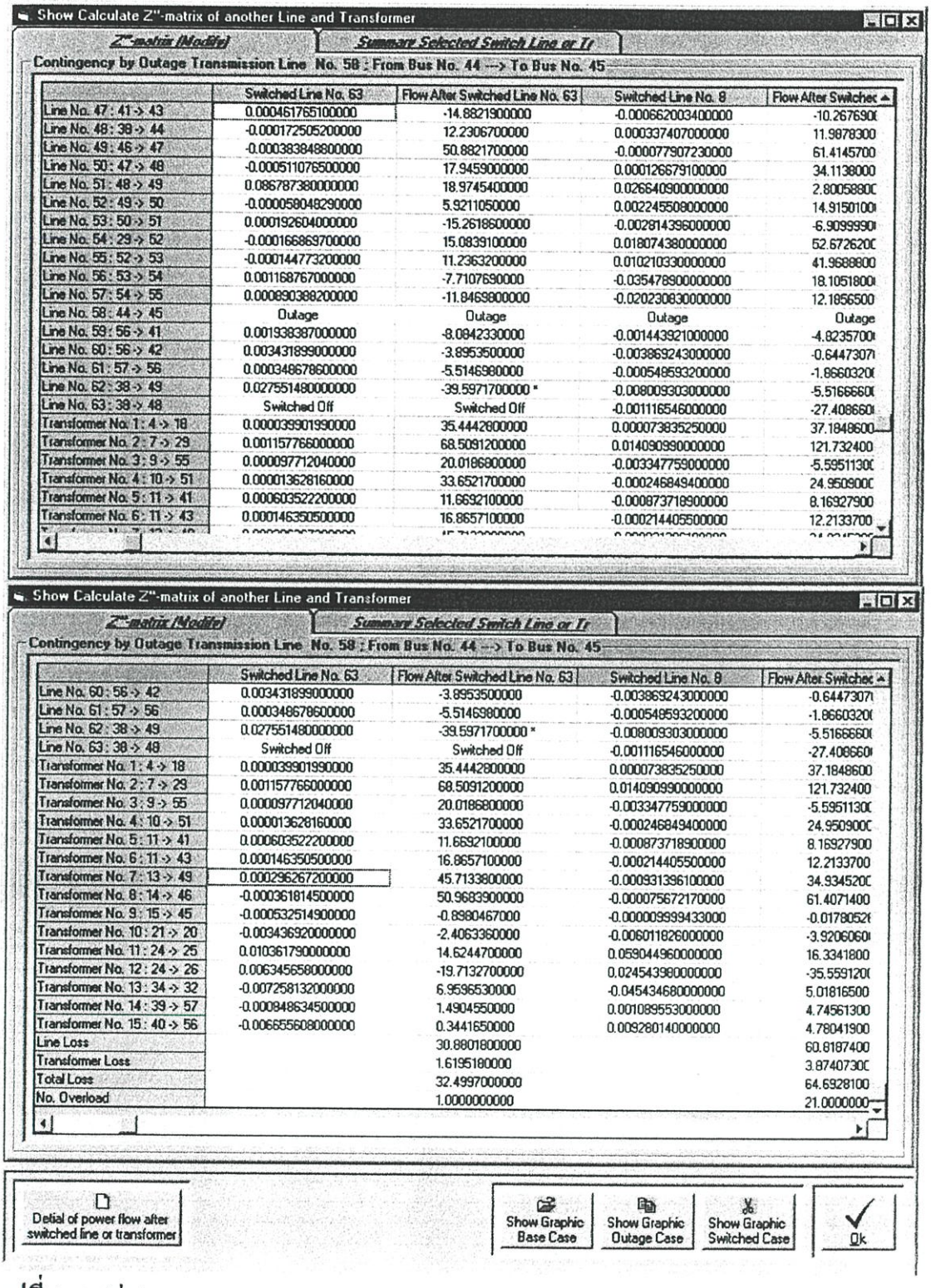
จากรูปที่ 6.50 หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบตามเงื่อนไข $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ และทำการแยก line หรือ tr ที่เลือก switch แล้วมีจำนวน overload เหลือน้อยที่สุดหรือมีจำนวน overload = 0 ออกมาจากการเลือก switch line & tr ทั้งหมดแล้วนั้นจะเห็นว่าเมื่อ switch L63 (38 -> 48) , L8 (8 -> 9) , L26 (14 -> 15) , L42 (37 -> 38) , L49 (46 -> 47) , L50 (47 -> 48) , Tr8 (14 -> 46) แล้วนั้นจะมีจำนวน overload รวมเหลือ = 0 ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload แสดงได้ดังรูปที่ 6.51 และสรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงได้ดังรูปที่ 6.52

จากรูปที่ 6.52 จะเห็นได้ว่าหลังจากเลือก switch L42 (37 -> 38) ไปแล้วนั้นสามารถที่จะขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ ดังนั้นจึงทำการเลือก switch L42 (37 -> 38) จึงจะเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด = 1.296875 s) #

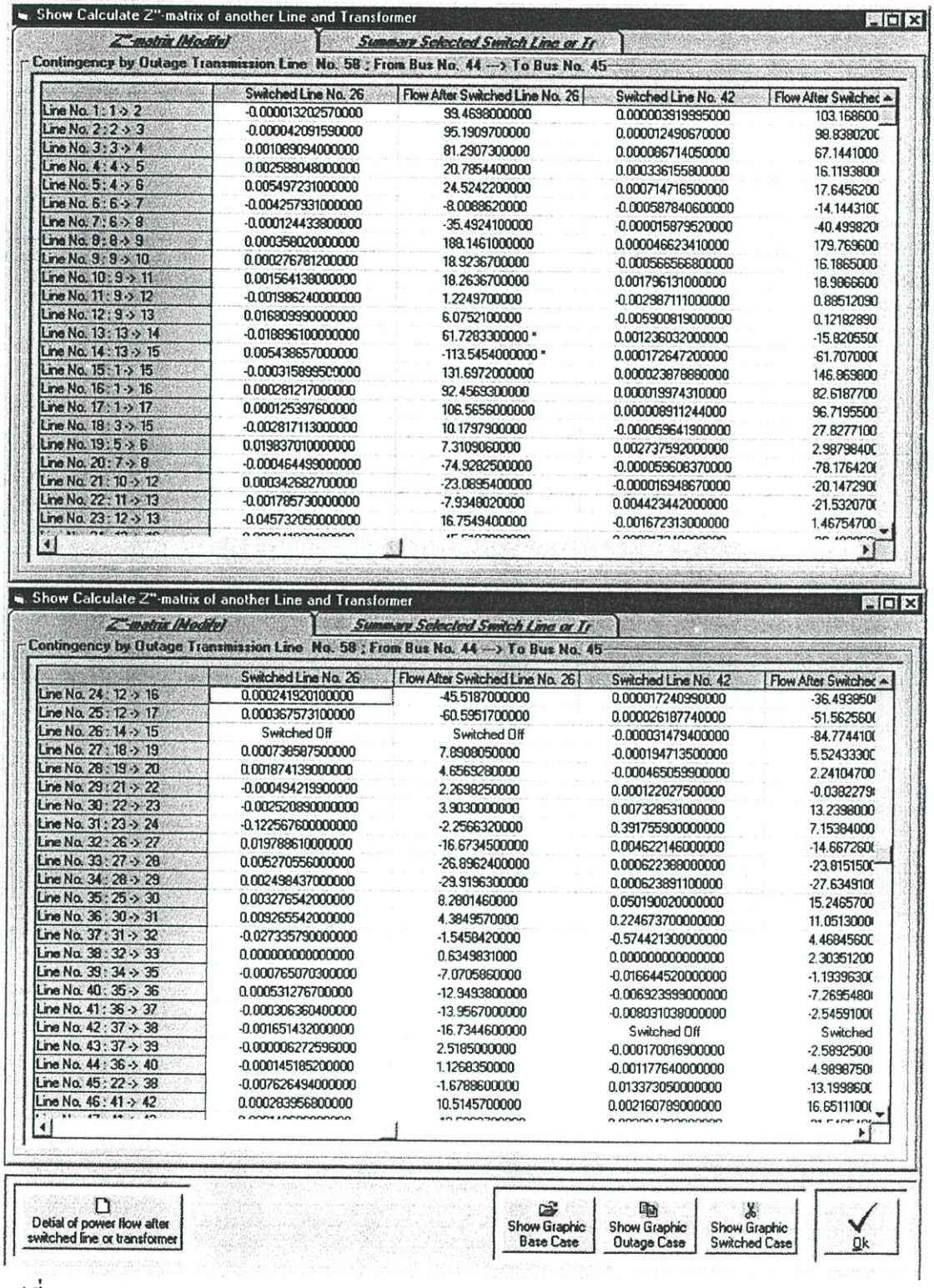
ส่วนค่า power flow หลังจากเลือก switch L42 (37 -> 38) ไปแล้วนั้นดูได้จากรูปที่ 6.51 (ในส่วนของ column ที่แสดงค่าว่า "Flow After Switched Line No. 42") และ เพื่อให้เห็นภาพรวมได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นจึงทำการจัดแสดงภาพ graphic ของการ outage line และ ภาพ graphic หลังจากที่ได้เลือก switch line ที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังรูปที่ 6.53 และ 6.54 ตามลำดับ , สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line แสดงได้ดังตารางที่ 6.20



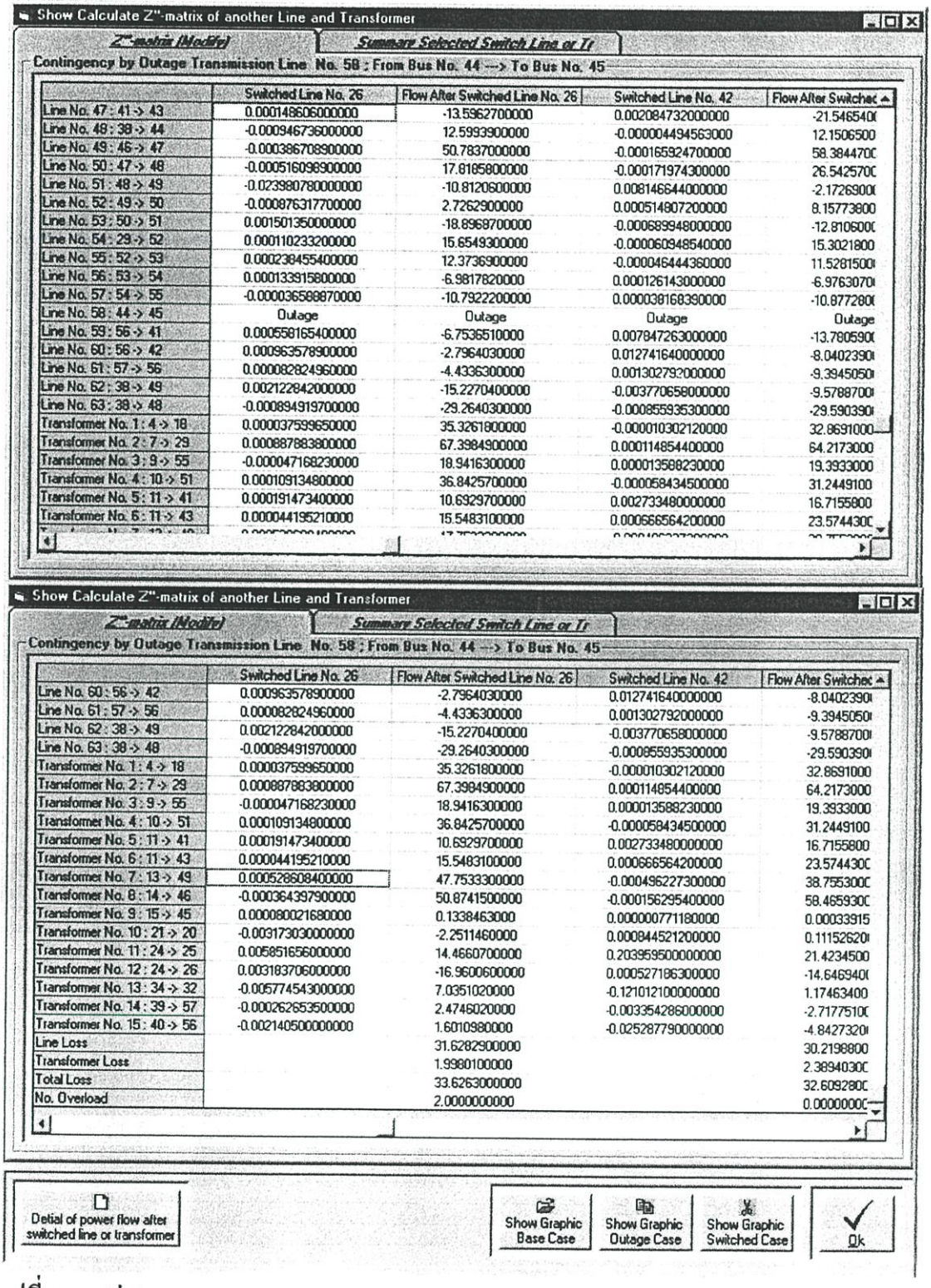

**รูปที่ 6.51** วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงค่าการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload


Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 : From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Switched Line No. 63
Flow After Switched Line No. 63
Switched Line No. 8
Flow After Switchec
Line No. 47 : 41 -> 43 0.000461765100000 -14.8821900000 -0.000662003400000 -10.267690
Line No. 48 : 38 -> 44 -0.000172505200000 12.2306700000 0.000337407000000 11.9878300
Line No. 49 : 46 -> 47 -0.000383848800000 50.8821700000 -0.000077907230000 61.4145700
Line No. 50 : 47 -> 48 -0.000511076500000 17.9459000000 0.000126679100000 34.1138000
Line No. 51 : 48 -> 49 0.086787380000000 18.9745400000 0.026640900000000 2.8005880
Line No. 52 : 49 -> 50 -0.000058048290000 5.9211050000 0.002245508000000 14.9150100
Line No. 53 : 50 -> 51 0.000192604000000 -15.2618600000 -0.002814396000000 -6.9099990
Line No. 54 : 29 -> 52 -0.000166869700000 15.0839100000 0.018074380000000 52.672620
Line No. 55 : 52 -> 53 -0.000144773200000 11.2363200000 0.010210330000000 41.9688800
Line No. 56 : 53 -> 54 0.001168767000000 -7.7107690000 -0.035478900000000 18.1051800
Line No. 57 : 54 -> 55 0.000890388200000 -11.8469800000 -0.020230830000000 12.1856500
Line No. 58 : 44 -> 45 Outage Outage Outage Outage
Line No. 59 : 56 -> 41 0.001938387000000 -8.0842330000 -0.001443921000000 -4.8235700
Line No. 60 : 56 -> 42 0.003431899000000 -3.8953500000 -0.003869243000000 -0.6447307
Line No. 61 : 57 -> 56 0.000348678600000 -5.5146980000 -0.000548593200000 -1.8660320
Line No. 62 : 38 -> 49 0.027551480000000 -39.5971700000 * -0.008009303000000 -5.5166660
Line No. 63 : 38 -> 48 Switched Off Switched Off -0.001116546000000 -27.408660
Transformer No. 1 : 4 -> 18 0.000039901990000 35.4442800000 0.000073835250000 37.1848600
Transformer No. 2 : 7 -> 29 0.001157766000000 68.5091200000 0.014090990000000 121.732400
Transformer No. 3 : 9 -> 55 0.000097712040000 20.0186800000 -0.003347759000000 -5.5951130
Transformer No. 4 : 10 -> 51 0.000013628160000 33.6521700000 -0.000246849400000 24.950900
Transformer No. 5 : 11 -> 41 0.000603522200000 11.6692100000 -0.000873718900000 8.16927900
Transformer No. 6 : 11 -> 43 0.000146350500000 16.8657100000 -0.000214405500000 12.2133700
Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 : From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Switched Line No. 63
Flow After Switched Line No. 63
Switched Line No. 8
Flow After Switchec
Line No. 60 : 56 -> 42 0.003431899000000 -3.8953500000 -0.003869243000000 -0.6447307
Line No. 61 : 57 -> 56 0.000348678600000 -5.5146980000 -0.000548593200000 -1.8660320
Line No. 62 : 38 -> 49 0.027551480000000 -39.5971700000 * -0.008009303000000 -5.5166660
Line No. 63 : 38 -> 48 Switched Off Switched Off -0.001116546000000 -27.408660
Transformer No. 1 : 4 -> 18 0.000039901990000 35.4442800000 0.000073835250000 37.1848600
Transformer No. 2 : 7 -> 29 0.001157766000000 68.5091200000 0.014090990000000 121.732400
Transformer No. 3 : 9 -> 55 0.000097712040000 20.0186800000 -0.003347759000000 -5.5951130
Transformer No. 4 : 10 -> 51 0.000013628160000 33.6521700000 -0.000246849400000 24.950900
Transformer No. 5 : 11 -> 41 0.000603522200000 11.6692100000 -0.000873718900000 8.16927900
Transformer No. 6 : 11 -> 43 0.000146350500000 16.8657100000 -0.000214405500000 12.2133700
Transformer No. 7 : 13 -> 49 0.000296267200000 45.7133800000 -0.000931396100000 34.934520
Transformer No. 8 : 14 -> 46 -0.000361814500000 50.9683900000 -0.000075672170000 61.4071400
Transformer No. 9 : 15 -> 45 -0.000532514900000 -0.8980467000 -0.000009999433000 -0.0178052
Transformer No. 10 : 21 -> 20 -0.003436920000000 -2.4063360000 -0.006011826000000 -3.9206060
Transformer No. 11 : 24 -> 25 0.010361790000000 14.6244700000 0.059044960000000 16.3341800
Transformer No. 12 : 24 -> 26 0.006345658000000 -19.7132700000 0.024543980000000 -35.559120
Transformer No. 13 : 34 -> 32 -0.007258132000000 6.9596530000 -0.045434680000000 5.01816500
Transformer No. 14 : 39 -> 57 -0.000848634500000 1.4904550000 0.001089553000000 4.74561300
Transformer No. 15 : 40 -> 56 -0.006655608000000 0.3441650000 0.009280140000000 4.78041900
Line Loss 30.8801800000 60.8187400
Transformer Loss 1.6195180000 3.8740730
Total Loss 32.4997000000 64.6928100
No. Overload 1.0000000000 21.0000000
Detial of power flow after switched line or transformer
Show Graphic Base Case
Show Graphic Outage Case
Show Graphic Switched Case
Ok

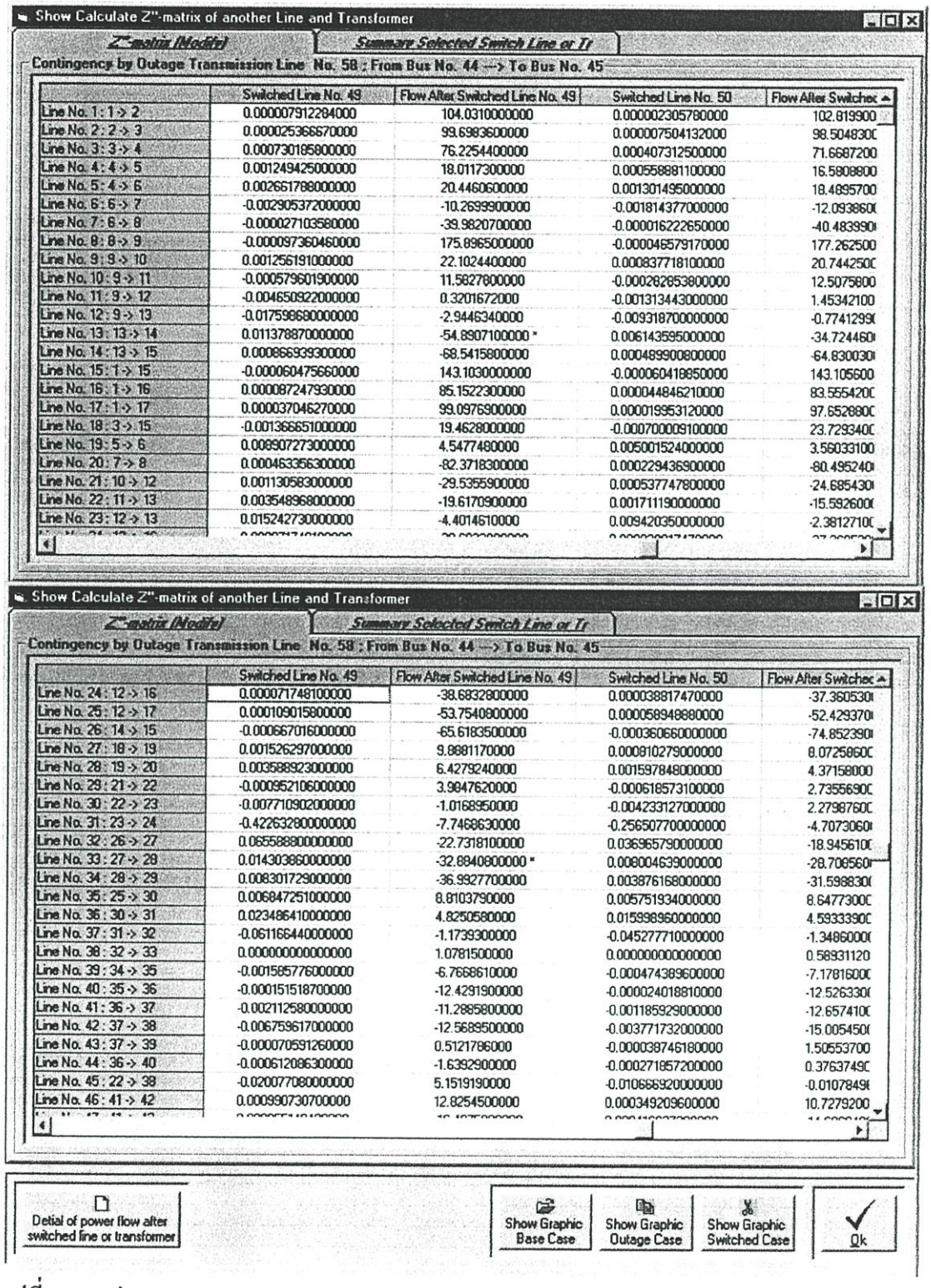
**รูปที่ 6.51** (ต่อ)


Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 ; From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Switched Line No. 26
Flow After Switched Line No. 26
Switched Line No. 42
Flow After Switched
Line No. 1 : 1 -> 2 -0.000013202570000 99.4698000000 0.000003919995000 103.168600
Line No. 2 : 2 -> 3 -0.000042091590000 95.1909700000 0.000012490670000 98.8380200
Line No. 3 : 3 -> 4 0.001089094000000 81.2907300000 0.000086714050000 67.1441000
Line No. 4 : 4 -> 5 0.002588048000000 20.7854400000 0.000336155800000 16.1193800
Line No. 5 : 4 -> 6 0.005497231000000 24.5242200000 0.000714716500000 17.6456200
Line No. 6 : 6 -> 7 -0.004257931000000 -8.0088620000 -0.000587840600000 -14.144310
Line No. 7 : 6 -> 8 -0.000124433800000 -35.4924100000 -0.000015879520000 -40.499820
Line No. 8 : 8 -> 9 0.000358020000000 189.1461000000 0.000046623410000 179.769600
Line No. 9 : 9 -> 10 0.000276781200000 18.9236700000 -0.000566566800000 16.1865000
Line No. 10 : 9 -> 11 0.001564138000000 18.2636700000 0.001796131000000 18.9866600
Line No. 11 : 9 -> 12 -0.001986240000000 1.2249700000 -0.002987111000000 0.88512090
Line No. 12 : 9 -> 13 0.016809990000000 6.0752100000 -0.005900819000000 0.12182890
Line No. 13 : 13 -> 14 -0.018896100000000 61.7283300000 * 0.001236032000000 -15.820550
Line No. 14 : 13 -> 15 0.005438657000000 -113.5454000000 * 0.000172647200000 -61.707000
Line No. 15 : 1 -> 15 -0.000315899500000 131.6972000000 0.000023878680000 146.869800
Line No. 16 : 1 -> 16 0.000281217000000 92.4569300000 0.000019974310000 82.6187700
Line No. 17 : 1 -> 17 0.000125397600000 106.5656000000 0.000008911244000 96.7195500
Line No. 18 : 3 -> 15 -0.002817113000000 10.1797900000 -0.000059641900000 27.8277100
Line No. 19 : 5 -> 6 0.019837010000000 7.3109060000 0.002737592000000 2.9879840
Line No. 20 : 7 -> 8 -0.000464499000000 -74.9282500000 -0.000059608370000 -78.176420
Line No. 21 : 10 -> 12 0.000342682700000 -23.0895400000 -0.000016948670000 -20.147290
Line No. 22 : 11 -> 13 -0.001785730000000 -7.9348020000 0.004423442000000 -21.532070
Line No. 23 : 12 -> 13 -0.045732050000000 16.7549400000 -0.001672313000000 1.46754700
Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 ; From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Switched Line No. 26
Flow After Switched Line No. 26
Switched Line No. 42
Flow After Switched
Line No. 24 : 12 -> 16 0.000241920100000 -45.5187000000 0.000017240990000 -36.493850
Line No. 25 : 12 -> 17 0.000367573100000 -60.5951700000 0.000026187740000 -51.562560
Line No. 26 : 14 -> 15 Switched Off Switched Off -0.000031479400000 -84.774410
Line No. 27 : 18 -> 19 0.000736587500000 7.8908050000 -0.000194713500000 5.5243330
Line No. 28 : 19 -> 20 0.001874139000000 4.6569280000 -0.000465059900000 2.24104700
Line No. 29 : 21 -> 22 -0.000494219900000 2.2698250000 0.000122027500000 -0.038227
Line No. 30 : 22 -> 23 -0.002520890000000 3.9030000000 0.007328531000000 13.2398000
Line No. 31 : 23 -> 24 -0.122567600000000 -2.2566320000 0.391755900000000 7.15384000
Line No. 32 : 26 -> 27 0.019788610000000 -16.6734500000 0.004622146000000 -14.667260
Line No. 33 : 27 -> 28 0.005270556000000 -26.8962400000 0.000622388000000 -23.815150
Line No. 34 : 28 -> 29 0.002498437000000 -29.9196300000 0.000623891100000 -27.634910
Line No. 35 : 25 -> 30 0.003276542000000 8.2601460000 0.050190020000000 15.2465700
Line No. 36 : 30 -> 31 0.009265542000000 4.3849570000 0.224673700000000 11.0513000
Line No. 37 : 31 -> 32 -0.027335790000000 -1.5458420000 -0.574421300000000 4.4684560
Line No. 38 : 32 -> 33 0.000000000000000 0.6349831000 0.000000000000000 2.30351200
Line No. 39 : 34 -> 35 -0.000765070300000 -7.0705860000 -0.016644520000000 -1.1939630
Line No. 40 : 35 -> 36 0.000531276700000 -12.9493800000 -0.006923999000000 -7.2695480
Line No. 41 : 36 -> 37 -0.000306360400000 -13.9567000000 -0.008031038000000 -2.5459100
Line No. 42 : 37 -> 38 -0.001651432000000 -16.7344600000 Switched Off Switched
Line No. 43 : 37 -> 39 -0.000006272596000 2.5185000000 -0.000170016900000 -2.5892500
Line No. 44 : 36 -> 40 -0.000145185200000 1.1268350000 -0.001177640000000 -4.9898750
Line No. 45 : 22 -> 38 -0.007626494000000 -1.6788600000 0.013373050000000 -13.199860
Line No. 46 : 41 -> 42 0.000283956800000 10.5145700000 0.002160789000000 16.6511100
Detial of power flow after switched line or transformer
Show Graphic Base Case
Show Graphic Outage Case
Show Graphic Switched Case
Ok

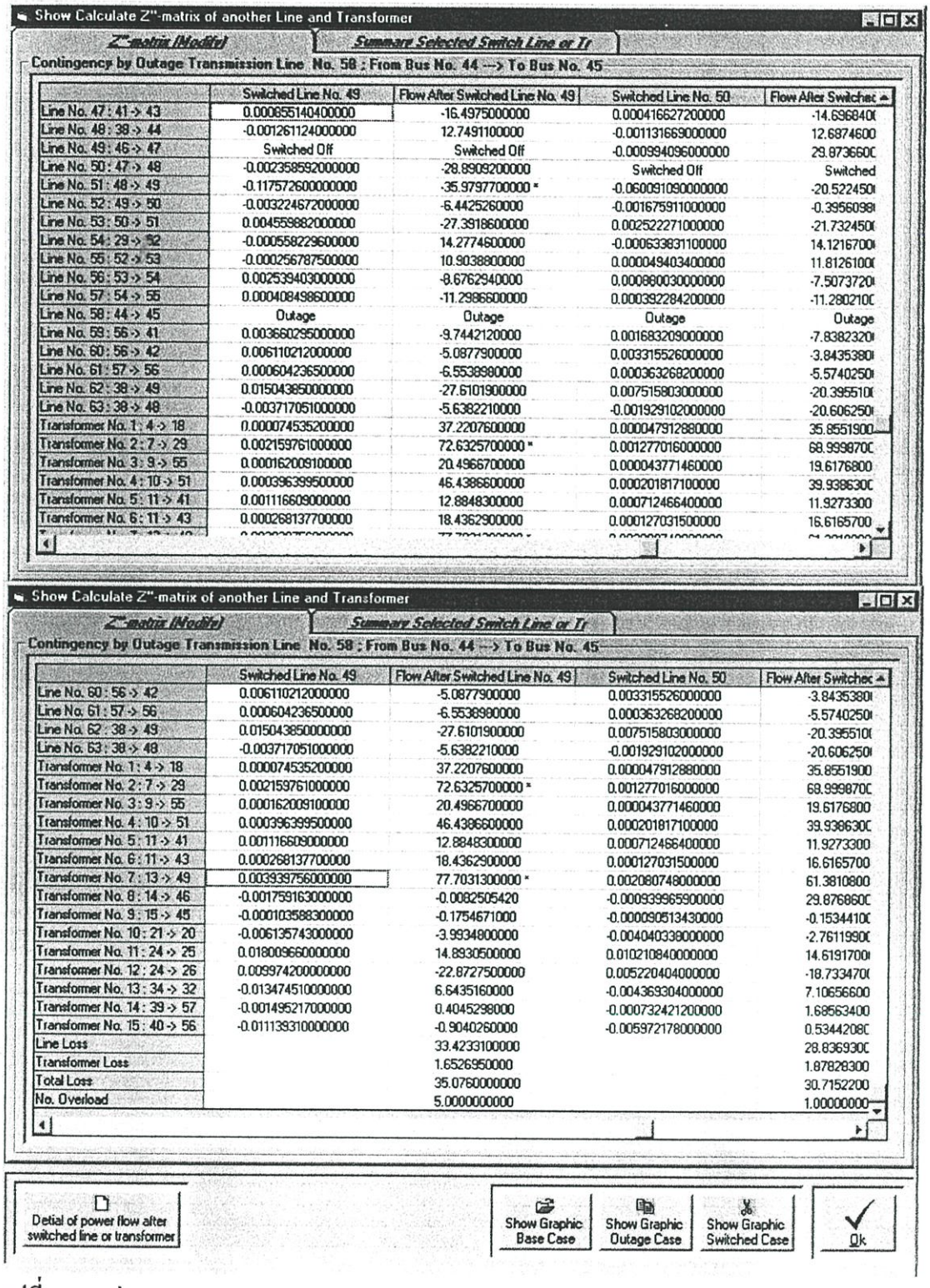
**รูปที่ 6.51** (ต่อ)


Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 : From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Switched Line No. 26
Flow After Switched Line No. 26
Switched Line No. 42
Flow After Switched
Line No. 47 : 41 -> 43 0.000148606000000 -13.5962700000 0.002084732000000 -21.546540
Line No. 48 : 38 -> 44 -0.000946736000000 12.5993900000 -0.000004494563000 12.1506500
Line No. 49 : 46 -> 47 -0.000386708900000 50.7837000000 -0.000165924700000 58.384470
Line No. 50 : 47 -> 48 -0.000516096900000 17.6185800000 -0.000171974300000 26.542570
Line No. 51 : 48 -> 49 -0.023980780000000 -10.8120600000 0.008146644000000 -2.1726900
Line No. 52 : 49 -> 50 -0.000876317700000 2.7262900000 0.000514907200000 8.15773800
Line No. 53 : 50 -> 51 0.001501350000000 -18.8968700000 -0.000689948000000 -12.810600
Line No. 54 : 29 -> 52 0.000110233200000 15.6549300000 -0.000060948540000 15.3021800
Line No. 55 : 52 -> 53 0.000238455400000 12.3736900000 -0.000046444360000 11.5281500
Line No. 56 : 53 -> 54 0.000133915800000 -6.9817820000 0.000126143000000 -6.9763070
Line No. 57 : 54 -> 55 -0.000036588870000 -10.7922200000 0.000038168390000 -10.877280
Line No. 58 : 44 -> 45 Outage Outage Outage Outage
Line No. 59 : 56 -> 41 0.000558165400000 -6.7536510000 0.007847263000000 -13.780590
Line No. 60 : 56 -> 42 0.000963578900000 -2.7964030000 0.012741640000000 -8.0402390
Line No. 61 : 57 -> 56 0.000082824960000 -4.4336300000 0.001302792000000 -9.3945050
Line No. 62 : 38 -> 49 0.002122842000000 -15.2270400000 -0.003770658000000 -9.5788700
Line No. 63 : 38 -> 48 -0.000894919700000 -29.2640300000 -0.000855935300000 -29.590390
Transformer No. 1 : 4 -> 18 0.000037599650000 35.3261800000 -0.000010302120000 32.8691000
Transformer No. 2 : 7 -> 29 0.000887883800000 67.3984900000 0.000114854400000 64.2173000
Transformer No. 3 : 9 -> 55 -0.000047168230000 18.9416300000 0.000013588230000 19.3933000
Transformer No. 4 : 10 -> 51 0.000109134800000 36.8425700000 -0.000058434500000 31.2449100
Transformer No. 5 : 11 -> 41 0.000191473400000 10.6929700000 0.002733480000000 16.7155800
Transformer No. 6 : 11 -> 43 0.000044195210000 15.5483100000 0.000666564200000 23.574430
Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 : From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Switched Line No. 26
Flow After Switched Line No. 26
Switched Line No. 42
Flow After Switched
Line No. 60 : 56 -> 42 0.000963578900000 -2.7964030000 0.012741640000000 -8.0402390
Line No. 61 : 57 -> 56 0.000082824960000 -4.4336300000 0.001302792000000 -9.3945050
Line No. 62 : 38 -> 49 0.002122842000000 -15.2270400000 -0.003770658000000 -9.5788700
Line No. 63 : 38 -> 48 -0.000894919700000 -29.2640300000 -0.000855935300000 -29.590390
Transformer No. 1 : 4 -> 18 0.000037599650000 35.3261800000 -0.000010302120000 32.8691000
Transformer No. 2 : 7 -> 29 0.000887883800000 67.3984900000 0.000114854400000 64.2173000
Transformer No. 3 : 9 -> 55 -0.000047168230000 18.9416300000 0.000013588230000 19.3933000
Transformer No. 4 : 10 -> 51 0.000109134800000 36.8425700000 -0.000058434500000 31.2449100
Transformer No. 5 : 11 -> 41 0.000191473400000 10.6929700000 0.002733480000000 16.7155800
Transformer No. 6 : 11 -> 43 0.000044195210000 15.5483100000 0.000666564200000 23.574430
Transformer No. 7 : 13 -> 49 0.000528608400000 47.7533300000 -0.000496227300000 38.755300
Transformer No. 8 : 14 -> 46 -0.000364397900000 50.8741500000 -0.000156295400000 58.465930
Transformer No. 9 : 15 -> 45 0.000080021680000 0.1338463000 0.000000771180000 0.00033915
Transformer No. 10 : 21 -> 20 -0.003173030000000 -2.2511460000 0.000844521200000 0.11152620
Transformer No. 11 : 24 -> 25 0.005851656000000 14.4660700000 0.203959500000000 21.4234500
Transformer No. 12 : 24 -> 26 0.003183706000000 -16.9600600000 0.000527186300000 -14.646940
Transformer No. 13 : 34 -> 32 -0.005774543000000 7.0351020000 -0.121012100000000 1.17463400
Transformer No. 14 : 39 -> 57 -0.000262653500000 2.4746020000 -0.003354286000000 -2.7177510
Transformer No. 15 : 40 -> 56 -0.002140500000000 1.6010980000 -0.025287790000000 -4.8427320
Line Loss 31.6282900000 30.2198800
Transformer Loss 1.9980100000 2.3894030
Total Loss 33.6263000000 32.609280
No. Overload 2.0000000000 0.0000000
Detial of power flow after switched line or transformer
Show Graphic Base Case
Show Graphic Outage Case
Show Graphic Switched Case
Ok

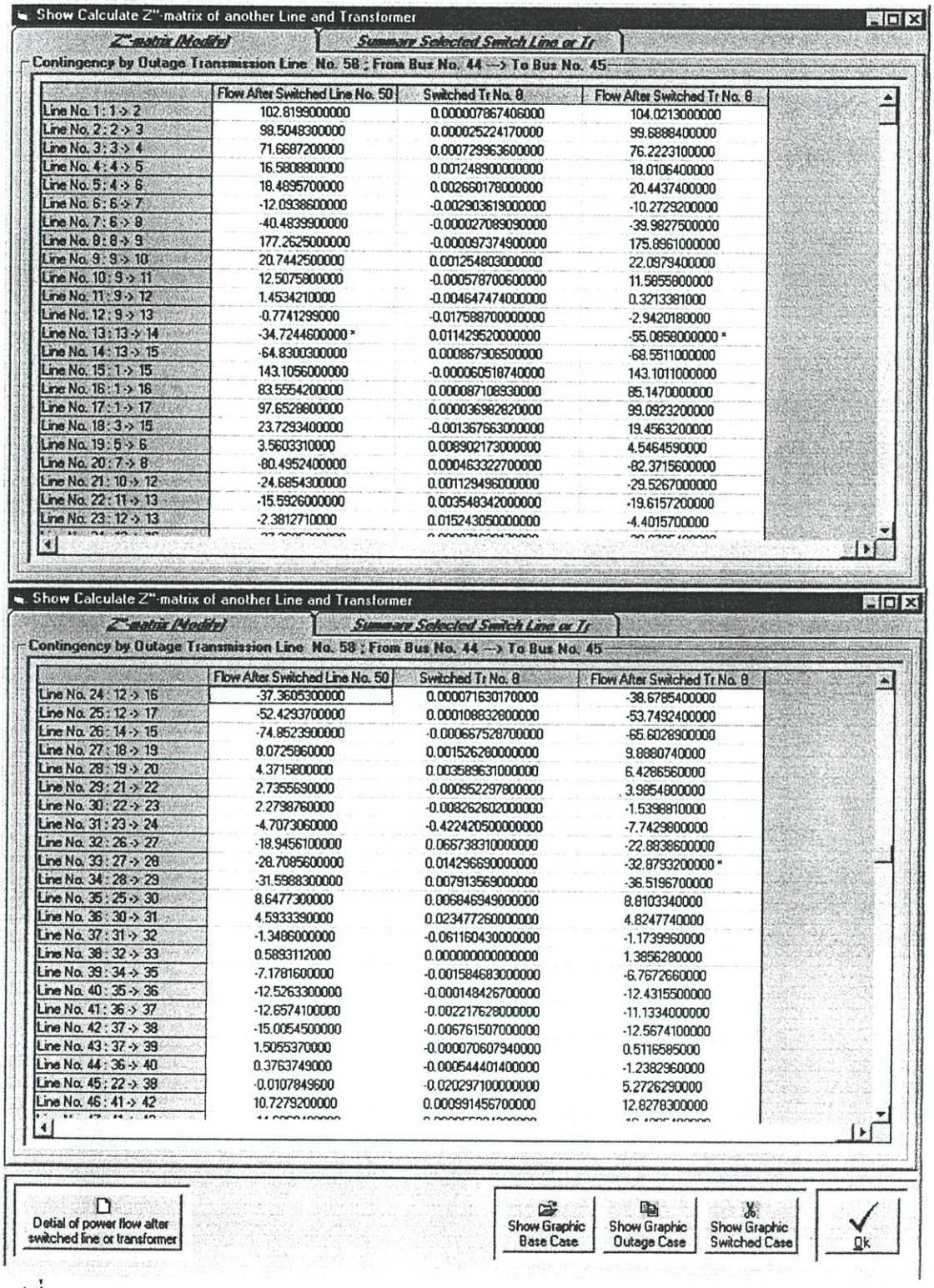
**รูปที่ 6.51** (ต่อ)


Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 : From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Switched Line No. 49
Flow After Switched Line No. 49
Switched Line No. 50
Flow After Switchec
Line No. 1 : 1 -> 2 0.000007912284000 104.0310000000 0.000002305780000 102.819900
Line No. 2 : 2 -> 3 0.000025368670000 99.6983600000 0.000007504132000 98.504830
Line No. 3 : 3 -> 4 0.000730185800000 76.2254400000 0.000407312500000 71.6687200
Line No. 4 : 4 -> 5 0.001249425000000 18.0117300000 0.000558881100000 16.5808800
Line No. 5 : 4 -> 6 0.002661788000000 20.4460600000 0.001301495000000 18.4895700
Line No. 6 : 6 -> 7 -0.002905372000000 -10.2699900000 -0.001814377000000 -12.093860
Line No. 7 : 6 -> 8 -0.000027103580000 -39.9820700000 -0.000016222650000 -40.483990
Line No. 8 : 8 -> 9 -0.000097360460000 175.8965000000 -0.000046579170000 177.262500
Line No. 9 : 9 -> 10 0.001256191000000 22.1024400000 0.000837718100000 20.744250
Line No. 10 : 9 -> 11 -0.000579601900000 11.5827800000 -0.000262853800000 12.5075800
Line No. 11 : 9 -> 12 -0.004650922000000 0.3201672000 -0.001313443000000 1.45342100
Line No. 12 : 9 -> 13 -0.017598680000000 -2.9446340000 -0.009318700000000 -0.774129
Line No. 13 : 13 -> 14 0.011378870000000 -54.8907100000 0.006143595000000 -34.724460
Line No. 14 : 13 -> 15 0.000866939300000 -68.5415800000 0.000489900800000 -64.830030
Line No. 15 : 1 -> 15 -0.000060475660000 143.1030000000 -0.000060419850000 143.105600
Line No. 16 : 1 -> 16 0.000087247930000 85.1522300000 0.000044846210000 83.555420
Line No. 17 : 1 -> 17 0.000037046270000 99.0976900000 0.000019953120000 97.652880
Line No. 18 : 3 -> 15 -0.001366651000000 19.4628000000 -0.000700009100000 23.729340
Line No. 19 : 5 -> 6 0.008907273000000 4.5477480000 0.005001524000000 3.56033100
Line No. 20 : 7 -> 8 0.000463356300000 -82.3718300000 0.000229436900000 -80.495240
Line No. 21 : 10 -> 12 0.001130583000000 -29.5355900000 0.000537747800000 -24.685430
Line No. 22 : 11 -> 13 0.003548968000000 -19.6170900000 0.001711190000000 -15.582600
Line No. 23 : 12 -> 13 0.015242730000000 -4.4014610000 0.009420350000000 -2.38127100
Line No. 24 : 12 -> 16 0.000071748100000 -38.6832800000 0.000038817470000 -37.360530
Line No. 25 : 12 -> 17 0.000109015800000 -53.7540800000 0.000058948680000 -52.429370
Line No. 26 : 14 -> 15 -0.000667016000000 -65.6183500000 -0.000360660000000 -74.852390
Line No. 27 : 18 -> 19 0.001526297000000 9.8881170000 0.000810279000000 8.0725860
Line No. 28 : 19 -> 20 0.003588923000000 6.4279240000 0.001597848000000 4.37158800
Line No. 29 : 21 -> 22 -0.000952106000000 3.9847620000 -0.000618573100000 2.73556900
Line No. 30 : 22 -> 23 -0.007710902000000 -1.0168950000 -0.004233127000000 2.2798760
Line No. 31 : 23 -> 24 -0.422632800000000 -7.7468630000 -0.256507700000000 -4.7073060
Line No. 32 : 26 -> 27 0.065588800000000 -22.7318100000 0.036965790000000 -18.945610
Line No. 33 : 27 -> 28 0.014303660000000 -32.8840800000 0.008004639000000 -28.706560
Line No. 34 : 28 -> 29 0.008301729000000 -36.9927700000 0.003876168000000 -31.598830
Line No. 35 : 25 -> 30 0.006847251000000 8.8103790000 0.005751934000000 8.6477300
Line No. 36 : 30 -> 31 0.023486410000000 4.8250580000 0.015989860000000 4.5933390
Line No. 37 : 31 -> 32 -0.061166440000000 -1.1739300000 -0.045277710000000 -1.348600
Line No. 38 : 32 -> 33 0.000000000000000 1.0781500000 0.000000000000000 0.58931120
Line No. 39 : 34 -> 35 -0.001585776000000 -6.7668610000 -0.000474389600000 -7.178160
Line No. 40 : 35 -> 36 -0.000151518700000 -12.4291900000 -0.000024018810000 -12.526330
Line No. 41 : 36 -> 37 -0.002112580000000 -11.2885800000 -0.001185929000000 -12.657410
Line No. 42 : 37 -> 38 -0.006759617000000 -12.5689500000 -0.003771732000000 -15.005450
Line No. 43 : 37 -> 39 -0.000070591260000 0.5121786000 -0.000039746180000 1.50553700
Line No. 44 : 36 -> 40 -0.000612086300000 -1.6392900000 -0.000271857200000 0.3763749
Line No. 45 : 22 -> 38 -0.020077080000000 5.1519190000 -0.010666920000000 -0.010784
Line No. 46 : 41 -> 42 0.000990730700000 12.8254500000 0.000349209600000 10.7279200
Detial of power flow after switched line or transformer
Show Graphic Base Case
Show Graphic Outage Case
Show Graphic Switched Case
Ok

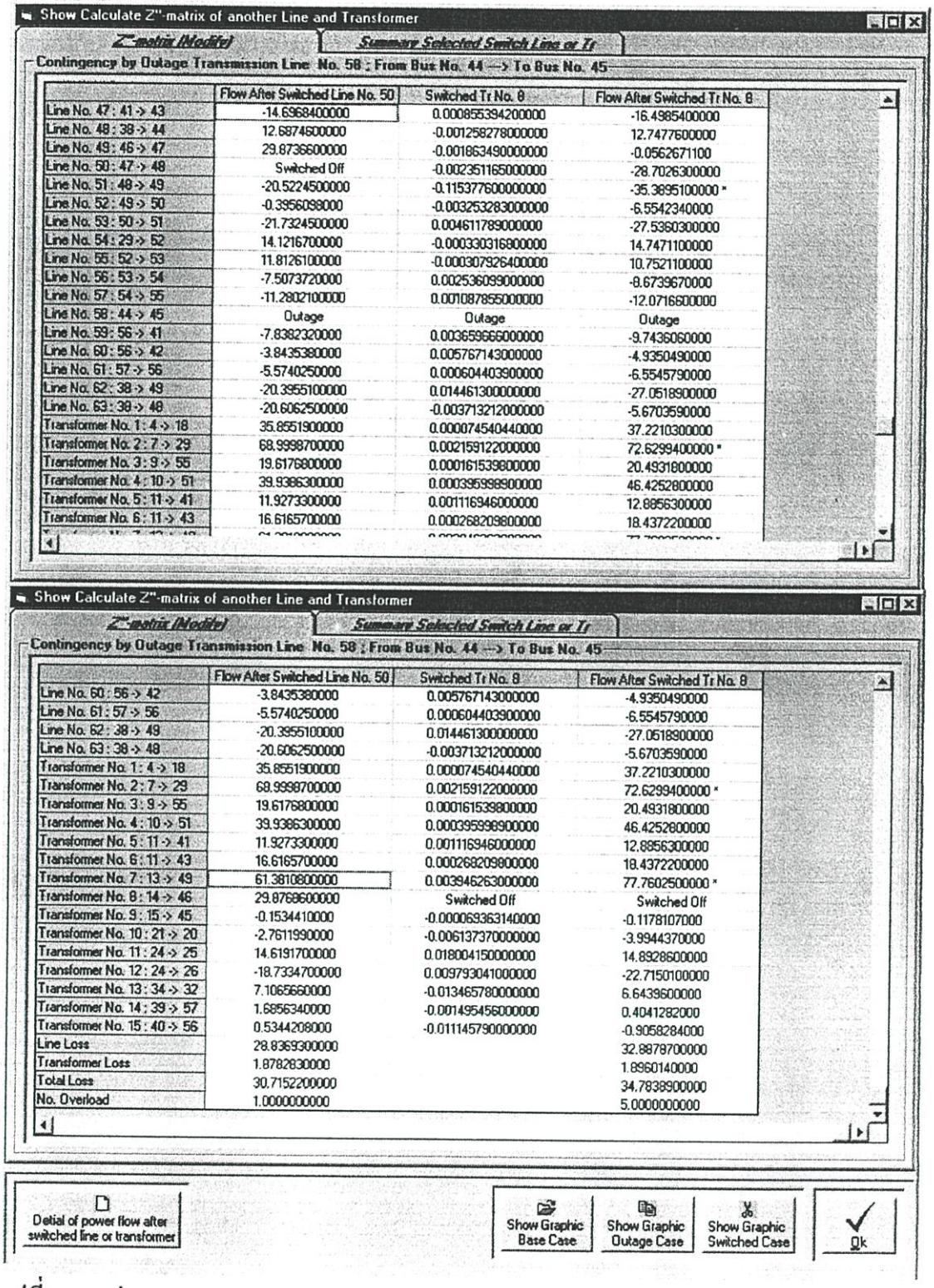
**รูปที่ 6.51** (ต่อ)


Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 : From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Switched Line No. 49
Flow After Switched Line No. 49
Switched Line No. 50
Flow After Switched
Line No. 47 : 41 -> 43 0.000655140400000 -16.4975000000 0.000416627200000 -14.6968400
Line No. 48 : 38 -> 44 -0.001261124000000 12.7491100000 -0.001131669000000 12.6874600
Line No. 49 : 46 -> 47 Switched Off Switched Off -0.000994096000000 29.873660C
Line No. 50 : 47 -> 48 -0.002358592000000 -28.8909200000 Switched Off Switched
Line No. 51 : 48 -> 49 -0.117572600000000 -35.9797700000 * -0.060091090000000 -20.5224500
Line No. 52 : 49 -> 50 -0.003224672000000 -6.4425260000 -0.001675911000000 -0.3956098
Line No. 53 : 50 -> 51 0.004559882000000 -27.3918600000 0.002522271000000 -21.7324500
Line No. 54 : 29 -> 52 -0.000558229600000 14.2774600000 -0.000633831100000 14.1216700
Line No. 55 : 52 -> 53 -0.000256787500000 10.9038800000 0.000049403400000 11.8126100
Line No. 56 : 53 -> 54 0.002539403000000 -8.6762940000 0.000880030000000 -7.5073720
Line No. 57 : 54 -> 55 0.000408498600000 -11.2986800000 0.000392284200000 -11.2802100
Line No. 58 : 44 -> 45 Outage Outage Outage Outage
Line No. 59 : 56 -> 41 0.003660295000000 -9.7442120000 0.001683209000000 -7.8382320
Line No. 60 : 56 -> 42 0.006110212000000 -5.0877900000 0.003315526000000 -3.8435380
Line No. 61 : 57 -> 56 0.000604236500000 -6.5538980000 0.000363268200000 -5.5740250
Line No. 62 : 38 -> 49 0.015043850000000 -27.6101900000 0.007515803000000 -20.3955100
Line No. 63 : 38 -> 48 -0.003717051000000 -5.6382210000 -0.001929102000000 -20.6062500
Transformer No. 1 : 4 -> 18 0.000074535200000 37.2207600000 0.000047912880000 35.8551900
Transformer No. 2 : 7 -> 29 0.002159761000000 72.6325700000 * 0.001277016000000 68.9998700
Transformer No. 3 : 9 -> 55 0.000162009100000 20.4966700000 0.000043771460000 19.6176800
Transformer No. 4 : 10 -> 51 0.000396399500000 46.4386600000 0.000201817100000 39.9386300
Transformer No. 5 : 11 -> 41 0.001116609000000 12.8848300000 0.000712466400000 11.9273300
Transformer No. 6 : 11 -> 43 0.000268137700000 18.4362900000 0.000127031500000 16.6165700
Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 : From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Switched Line No. 49
Flow After Switched Line No. 49
Switched Line No. 50
Flow After Switched
Line No. 60 : 56 -> 42 0.006110212000000 -5.0877900000 0.003315526000000 -3.8435380
Line No. 61 : 57 -> 56 0.000604236500000 -6.5538980000 0.000363268200000 -5.5740250
Line No. 62 : 38 -> 49 0.015043850000000 -27.6101900000 0.007515803000000 -20.3955100
Line No. 63 : 38 -> 48 -0.003717051000000 -5.6382210000 -0.001929102000000 -20.6062500
Transformer No. 1 : 4 -> 18 0.000074535200000 37.2207600000 0.000047912880000 35.8551900
Transformer No. 2 : 7 -> 29 0.002159761000000 72.6325700000 * 0.001277016000000 68.9998700
Transformer No. 3 : 9 -> 55 0.000162009100000 20.4966700000 0.000043771460000 19.6176800
Transformer No. 4 : 10 -> 51 0.000396399500000 46.4386600000 0.000201817100000 39.9386300
Transformer No. 5 : 11 -> 41 0.001116609000000 12.8848300000 0.000712466400000 11.9273300
Transformer No. 6 : 11 -> 43 0.000268137700000 18.4362900000 0.000127031500000 16.6165700
Transformer No. 7 : 13 -> 49 0.003939756000000 77.7031300000 * 0.002080748000000 61.3810800
Transformer No. 8 : 14 -> 46 -0.001759163000000 -0.0082505420 -0.000939965900000 29.8768600
Transformer No. 9 : 15 -> 45 -0.000103588300000 -0.1754671000 -0.000090513430000 -0.1534410
Transformer No. 10 : 21 -> 20 -0.006135743000000 -3.9934800000 -0.004040338000000 -2.7611990
Transformer No. 11 : 24 -> 25 0.018009660000000 14.8930500000 0.010210840000000 14.6191700
Transformer No. 12 : 24 -> 26 0.009974200000000 -22.8727500000 0.005220404000000 -18.7334700
Transformer No. 13 : 34 -> 32 -0.013474510000000 6.6435160000 -0.004369304000000 7.1065660
Transformer No. 14 : 39 -> 57 -0.001495217000000 0.4045298000 -0.000732421200000 1.6856340
Transformer No. 15 : 40 -> 56 -0.011139310000000 -0.9040260000 -0.005972178000000 0.5344208
Line Loss 33.4233100000 28.8369300
Transformer Loss 1.6526950000 1.8782830
Total Loss 35.0760000000 30.7152200
No. Overload 5.0000000000 1.0000000
Detial of power flow after switched line or transformer
Show Graphic Base Case
Show Graphic Outage Case
Show Graphic Switched Case
Ok

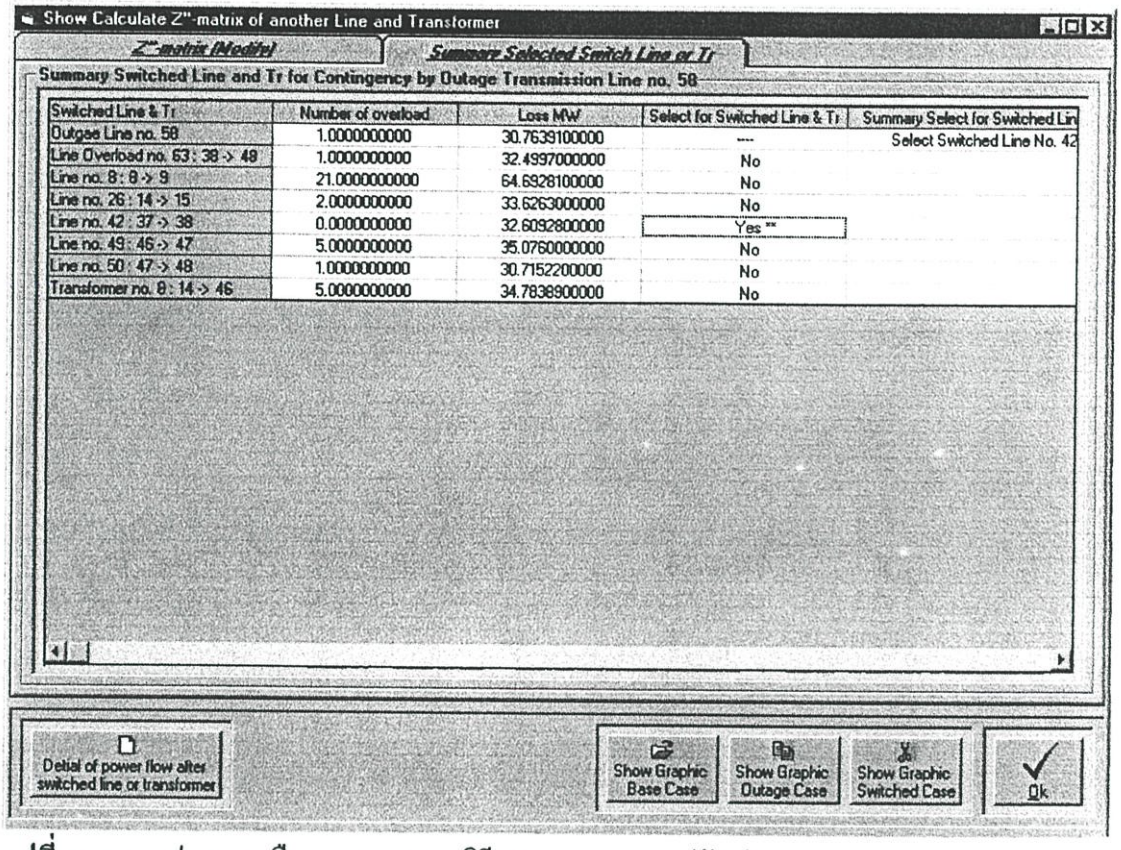
**รูปที่ 6.51** (ต่อ)


Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 ; From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Flow After Switched Line No. 50
Switched Tr No. 8
Flow After Switched Tr No. 8
Line No. 1 : 1 -> 2 102.8199000000 0.000007867406000 104.0213000000
Line No. 2 : 2 -> 3 98.5048300000 0.000025224170000 99.6888400000
Line No. 3 : 3 -> 4 71.6687200000 0.000729963600000 76.2223100000
Line No. 4 : 4 -> 5 16.5808800000 0.001248900000000 18.0106400000
Line No. 5 : 4 -> 6 18.4895700000 0.002660178000000 20.4437400000
Line No. 6 : 6 -> 7 -12.0938600000 -0.002903619000000 -10.2729200000
Line No. 7 : 6 -> 8 -40.4839900000 -0.000027089090000 -39.9827500000
Line No. 8 : 8 -> 9 177.2625000000 -0.000097374900000 175.8961000000
Line No. 9 : 9 -> 10 20.7442500000 0.001254803000000 22.0979400000
Line No. 10 : 9 -> 11 12.5075800000 -0.000578700600000 11.5655800000
Line No. 11 : 9 -> 12 1.4534210000 -0.004647474000000 0.3213381000
Line No. 12 : 9 -> 13 -0.7741299000 -0.017588700000000 -2.9420180000
Line No. 13 : 13 -> 14 -34.7244600000 * 0.011429520000000 -55.0858000000 *
Line No. 14 : 13 -> 15 -64.8300300000 0.000857906500000 -68.5511000000
Line No. 15 : 1 -> 15 143.1056000000 -0.000060518740000 143.1011000000
Line No. 16 : 1 -> 16 83.5554200000 0.000087108930000 85.1470000000
Line No. 17 : 1 -> 17 97.6528600000 0.000036982820000 99.0923200000
Line No. 18 : 3 -> 15 23.7293400000 -0.001367663000000 19.4563200000
Line No. 19 : 5 -> 6 3.5603310000 0.008902173000000 4.5464590000
Line No. 20 : 7 -> 8 -80.4952400000 0.000463322700000 -82.3715600000
Line No. 21 : 10 -> 12 -24.6854300000 0.001129496000000 -29.5267000000
Line No. 22 : 11 -> 13 -15.5926000000 0.003548342000000 -19.6157200000
Line No. 23 : 12 -> 13 -2.3812710000 0.015243050000000 -4.4015700000
Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 ; From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Flow After Switched Line No. 50
Switched Tr No. 8
Flow After Switched Tr No. 8
Line No. 24 : 12 -> 16 -37.3605300000 0.000071630170000 -38.6785400000
Line No. 25 : 12 -> 17 -52.4293700000 0.000108832600000 -53.7492400000
Line No. 26 : 14 -> 15 -74.8523900000 -0.000667528700000 -65.6028900000
Line No. 27 : 18 -> 19 8.0725860000 0.001526280000000 9.8880740000
Line No. 28 : 19 -> 20 4.3715800000 0.003589631000000 6.4286560000
Line No. 29 : 21 -> 22 2.7355690000 -0.000952297800000 3.9854800000
Line No. 30 : 22 -> 23 2.2798760000 -0.008262602000000 -1.5398810000
Line No. 31 : 23 -> 24 -4.7073060000 -0.422420500000000 -7.7429800000
Line No. 32 : 26 -> 27 -18.9456100000 0.066738310000000 -22.8838600000
Line No. 33 : 27 -> 28 -28.7085600000 0.014296690000000 -32.8793200000 *
Line No. 34 : 28 -> 29 -31.5988300000 0.007913569000000 -36.5196700000
Line No. 35 : 25 -> 30 8.6477300000 0.006846949000000 8.8103340000
Line No. 36 : 30 -> 31 4.5933390000 0.023477260000000 4.8247740000
Line No. 37 : 31 -> 32 -1.3486000000 -0.061160430000000 -1.1739960000
Line No. 38 : 32 -> 33 0.5893112000 0.000000000000000 1.3856280000
Line No. 39 : 34 -> 35 -7.1781600000 -0.001584683000000 -6.7672660000
Line No. 40 : 35 -> 36 -12.5263300000 -0.000148426700000 -12.4315500000
Line No. 41 : 36 -> 37 -12.6574100000 -0.002217628000000 -11.1334000000
Line No. 42 : 37 -> 38 -15.0054500000 -0.006761507000000 -12.5674100000
Line No. 43 : 37 -> 39 1.5055370000 -0.000070607940000 0.5116585000
Line No. 44 : 36 -> 40 0.3763749000 -0.000544401400000 -1.2382960000
Line No. 45 : 22 -> 38 -0.0107849600 -0.020297100000000 5.2726290000
Line No. 46 : 41 -> 42 10.7279200000 0.000991456700000 12.8278300000
Detial of power flow after switched line or transformer
Show Graphic Base Case
Show Graphic Outage Case
Show Graphic Switched Case
Ok

**รูปที่ 6.51** (ต่อ)


Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 : From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Flow After Switched Line No. 50
Switched Tr No. 8
Flow After Switched Tr No. 8
Line No. 47 : 41 -> 43 -14.6968400000 0.000855394200000 -16.4985400000
Line No. 48 : 38 -> 44 12.6874600000 -0.001258278000000 12.7477600000
Line No. 49 : 46 -> 47 29.8736600000 -0.001863490000000 -0.0562671100
Line No. 50 : 47 -> 48 Switched Off -0.002351165000000 -28.7026300000
Line No. 51 : 48 -> 49 -20.5224500000 -0.115377600000000 -35.3695100000 *
Line No. 52 : 49 -> 50 -0.3956098000 -0.003253283000000 -6.5542340000
Line No. 53 : 50 -> 51 -21.7324500000 0.004611789000000 -27.5360300000
Line No. 54 : 29 -> 52 14.1216700000 -0.000330316800000 14.7471100000
Line No. 55 : 52 -> 53 11.8126100000 -0.000307926400000 10.7521100000
Line No. 56 : 53 -> 54 -7.5073720000 0.002536099000000 -8.6739670000
Line No. 57 : 54 -> 55 -11.2802100000 0.001087855000000 -12.0716600000
Line No. 58 : 44 -> 45 Outage Outage Outage
Line No. 59 : 56 -> 41 -7.8382320000 0.003659666000000 -9.7436060000
Line No. 60 : 56 -> 42 -3.8435380000 0.005767143000000 -4.9350490000
Line No. 61 : 57 -> 56 -5.5740250000 0.000604403900000 -6.5545790000
Line No. 62 : 38 -> 49 -20.3955100000 0.014461300000000 -27.0518900000
Line No. 63 : 38 -> 48 -20.6062500000 -0.003713212000000 -5.6703590000
Transformer No. 1 : 4 -> 18 35.8551900000 0.000074540440000 37.2210300000
Transformer No. 2 : 7 -> 29 68.9998700000 0.002159122000000 72.6299400000 *
Transformer No. 3 : 9 -> 55 19.6176800000 0.000161539800000 20.4931800000
Transformer No. 4 : 10 -> 51 39.9386300000 0.000395998900000 46.4252800000
Transformer No. 5 : 11 -> 41 11.9273300000 0.001116946000000 12.8856300000
Transformer No. 6 : 11 -> 43 16.6165700000 0.000268209800000 18.4372200000
Show Calculate Z''-matrix of another Line and Transformer
Z''-matrix (Modify)
Summary Selected Switch Line or Tr
Contingency by Outage Transmission Line No. 58 : From Bus No. 44 --> To Bus No. 45
Flow After Switched Line No. 50
Switched Tr No. 8
Flow After Switched Tr No. 8
Line No. 60 : 56 -> 42 -3.8435380000 0.005767143000000 -4.9350490000
Line No. 61 : 57 -> 56 -5.5740250000 0.000604403900000 -6.5545790000
Line No. 62 : 38 -> 49 -20.3955100000 0.014461300000000 -27.0518900000
Line No. 63 : 38 -> 48 -20.6062500000 -0.003713212000000 -5.6703590000
Transformer No. 1 : 4 -> 18 35.8551900000 0.000074540440000 37.2210300000
Transformer No. 2 : 7 -> 29 68.9998700000 0.002159122000000 72.6299400000 *
Transformer No. 3 : 9 -> 55 19.6176800000 0.000161539800000 20.4931800000
Transformer No. 4 : 10 -> 51 39.9386300000 0.000395998900000 46.4252800000
Transformer No. 5 : 11 -> 41 11.9273300000 0.001116946000000 12.8856300000
Transformer No. 6 : 11 -> 43 16.6165700000 0.000268209800000 18.4372200000
Transformer No. 7 : 13 -> 49 61.3810800000 0.003946263000000 77.7602500000 *
Transformer No. 8 : 14 -> 46 29.8768600000 Switched Off Switched Off
Transformer No. 9 : 15 -> 45 -0.1534410000 -0.000069363140000 -0.1178107000
Transformer No. 10 : 21 -> 20 -2.7611990000 -0.006137370000000 -3.9944370000
Transformer No. 11 : 24 -> 25 14.6191700000 0.018004150000000 14.8928600000
Transformer No. 12 : 24 -> 26 -18.7334700000 0.009793041000000 -22.7150100000
Transformer No. 13 : 34 -> 32 7.1065660000 -0.013465780000000 6.6439600000
Transformer No. 14 : 39 -> 57 1.6856340000 -0.001495456000000 0.4041282000
Transformer No. 15 : 40 -> 56 0.5344208000 -0.011145790000000 -0.9058284000
Line Loss 28.8369300000 32.8878700000
Transformer Loss 1.8782630000 1.8960140000
Total Loss 30.7152200000 34.7838900000
No. Overload 1.0000000000 5.0000000000
Detial of power flow after switched line or transformer
Show Graphic Base Case
Show Graphic Outage Case
Show Graphic Switched Case
Ok

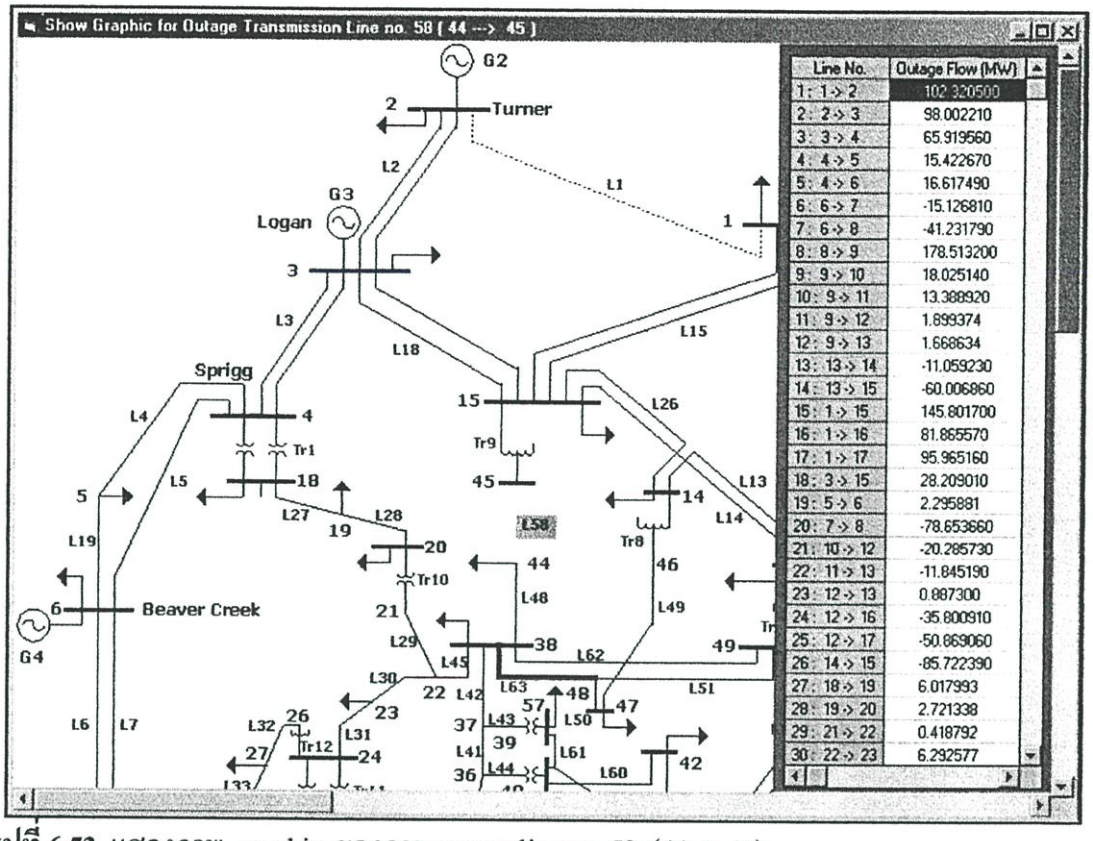
**รูปที่ 6.51** (ต่อ)



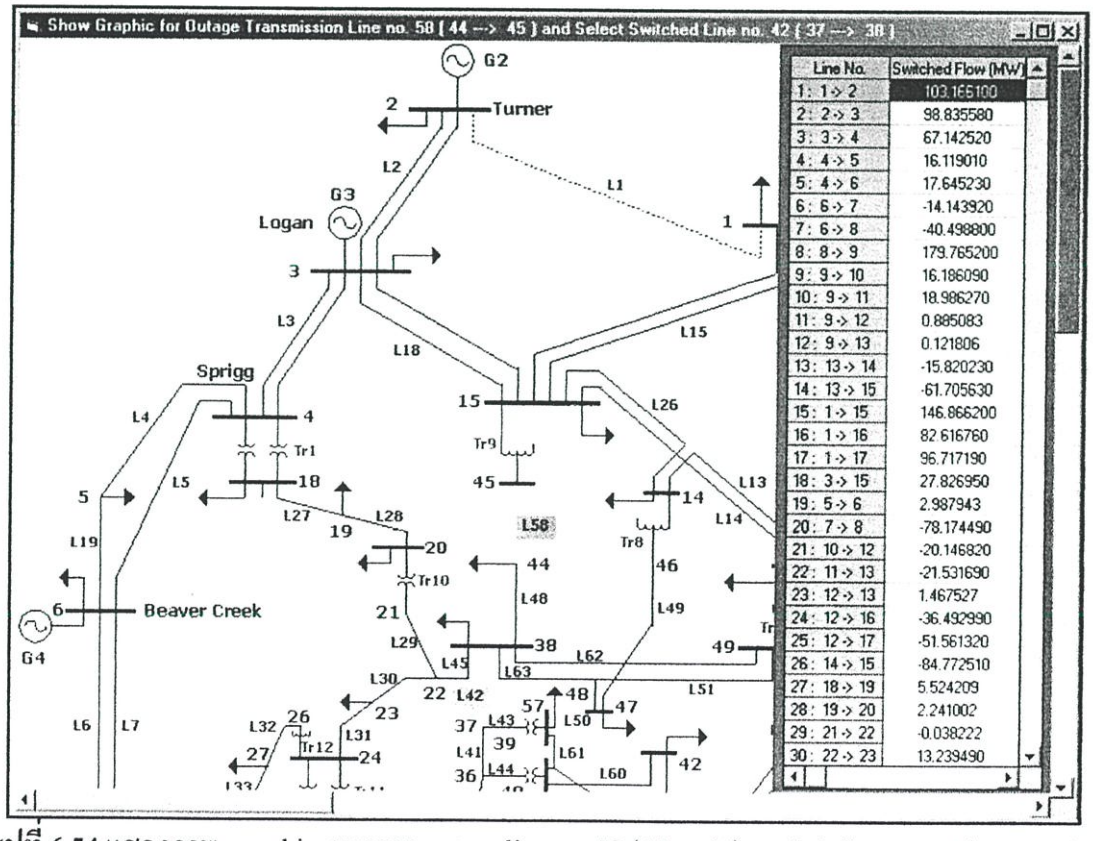

**รูปที่ 6.52** สรุปผลการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

**ตารางที่ 6.20** สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line

| | เวลา (s) | เลือก Switched Line |
|---|---|---|
| | Outage Line no. 58 | Outage Line no. 58 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 3.7968750 | Line no. 42 (37 -> 38) |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 1.0963130 | Line no. 8 (8 -> 9) ; Line no. 26 (14 -> 15) |
| | | Line no. 42 (37 -> 38) ; Line no. 49 (46 -> 47) |
| | | Line no. 50 (47 -> 48) ; Tr no. 8 (14 -> 46) |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 1.2968750 | Line no. 42 (37 -> 38) |




**รูปที่ 6.53** แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 58 (44 -> 45)




**รูปที่ 6.54** แสดงภาพ graphic ของการ outage line no. 58 (44 -> 45)+switch line no. 42 (37 -> 38)

# บทที่ 7
# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นจากภาษาวิชวลเบสิก 6.0 และ ทำการคำนวณโหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ล โดยทำการวิเคราะห์โหลดเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบคือ IEEE 30 Bus [3] , 39-Bus New England System [12] และ IEEE 57 B us [3] ด้วยการทดสอบเอาท์เตจอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะพิจารณา 2 กรณี กรณีที่หนึ่งทดสอบการเอาท์เตจไลน์ กรณีที่สองทดสอบเอาท์เตจเจนเนอเรเตอร์ และทำการป้องกันผลของโหลดเกินที่เกิดขึ้นนี้ด้วยเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์เพื่อที่จะขจัดหรือบรรเทาโหลดเกินที่เกิดขึ้นให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการดังนี้

7.1.1 วิธี Linear Sensitivity Factors [2]

7.1.2 วิธี Z-Matrix แบบเดิม [1]

7.1.3 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

สามารถสรุปผลการทดลองโดยสามารถดูตารางสรุปค่าเวลาและการเลือก switch line รวมกรณี outage lineได้จากตารางที่ 7.1 และ กรณี outage generator ได้จากตารางที่ 7.2 ซึ่งการคิดค่าเวลาของการคำนวณวิธีการดังกล่าวนี้พิจารณาได้ดังนี้

- วิธี Linear Sensitivity Factors เริ่มคิดเวลาตั้งแต่คำนวณค่า B' Matrix , X Matrix , Line Outage Distribution Factors และ Generation Shift Factors จนจบขั้นตอนการเลือก switch line วิธี Linear Sensitivity Factors
- วิธี Z-Matrix แบบเดิม เริ่มคิดเวลาตั้งแต่คำนวณค่า $Z_{bus}$ จนจบขั้นตอนการเลือก switch line วิธี Z-Matrix
- วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง เริ่มคิดเวลาตั้งแต่คำนวณค่า $Z_{bus}$ จนจบขั้นตอนการเลือก switch line วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

ส่วนค่าเวลาในการคำนวณ load flow วิธี fast decoupled นั้นจะไม่ถูกนำมาคิดค่าเวลา

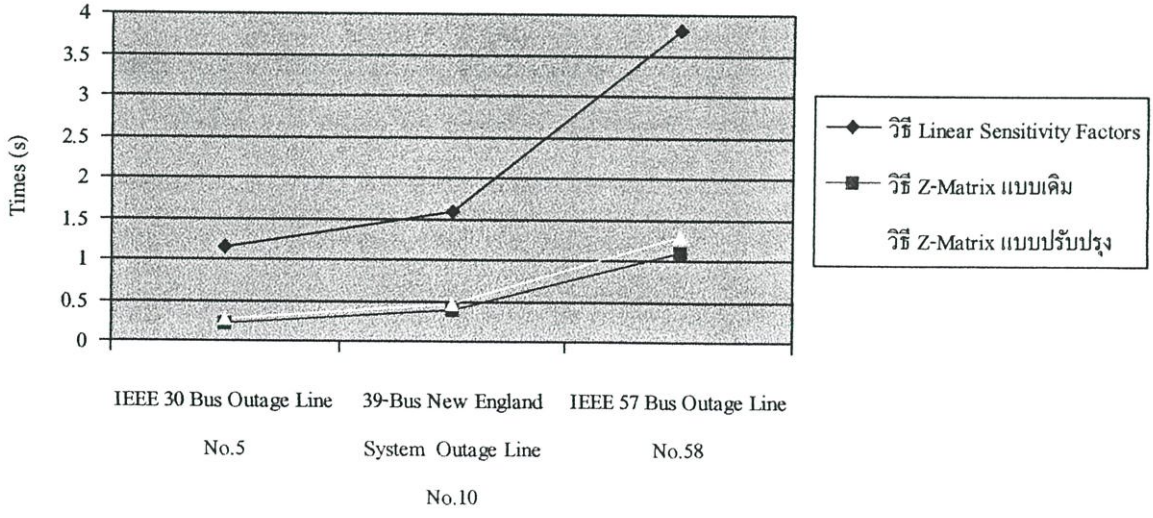
**ตารางที่ 7.1** สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line รวมกรณี outage line

| | เวลา (s) | เลือก Switched Line |
|---|---|---|
| IEEE 30 Bus | Outage Line no. 5 | Outage Line no. 5 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 1.1406250 | Line no. 9 (6 -> 7) |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 0.2078857 | Line no. 7 (4 -> 6) ; Line no. 9 (6 -> 7) |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 0.2629395 | Line no. 9 (6 -> 7) |
| 39-Bus New England System | Outage Line no. 10 | Outage Line no. 10 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 1.5859380 | Line no. 17 (10 -> 11) |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 0.3942871 | Line no. 13 (6 -> 11) ; Line no. 14 (7 -> 8) |
| | | Line no. 17 (10 -> 11) ; Line no. 21 (15 -> 16) |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 0.4600830 | Line no. 17 (10 -> 11) |
| IEEE 57 Bus | Outage Line no. 58 | Outage Line no. 58 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 3.7968750 | Line no. 42 (37 -> 38) |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 1.0963130 | Line no. 8 (8 -> 9) ; Line no. 26 (14 -> 15) |
| | | Line no. 42 (37 -> 38) ; Line no. 49 (46 -> 47) |
| | | Line no. 50 (47 -> 48) ; Tr no. 8 (14 -> 46) |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 1.2968750 | Line no. 42 (37 -> 38) |

**ตารางที่ 7.2** สรุปผลของค่าเวลาและการเลือก switch line รวมกรณี outage generator

| | เวลา (s) | เลือก Switched Line |
|---|---|---|
| IEEE 30 B us | Outage Gen no. 2 | Outage Gen no. 2 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 0.8203125 | - |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 0.2003174 | - |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 0.2478027 | - |
| 39-Bus New England System | Outage Gen no. 8 | Outage Gen no. 8 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 1.503125 | - |
| วิธี Z-Matrix แบบเดิม | 0.3546875 | - |
| วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง | 0.3703125 | - |

จากตารางที่ 7.1 ทำการสร้างกราฟโดยเปรียบเทียบค่าเวลาและจำนวน bus ที่ใช้ในการทดสอบกรณีของ outage line แสดงได้ดังรูปที่ 7.1




**รูปที่ 7.1** กราฟเปรียบเทียบค่าเวลาและจำนวน bus ที่ใช้ในการทดสอบ กรณีของ outage line

จากรูปที่ 7.1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อทดสอบกับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus กรณี outage line no.58 นั้นวิธี Linear Sensitivity Factors มีค่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพื่อเลือกสวิทซ์ไลน์แตกต่างจากค่าเวลาของวิธี Z-Matrix แบบเดิมและวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง เป็นอย่างมาก คือมากกว่ามาก เนื่องจากว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดใหญ่มากขึ้นทำให้ส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นมากเช่นเดียวกัน ส่วนวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงนี้จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าวิธี Z-Matrix แบบเดิม ไม่มากนัก เนื่องจากว่าต้องคำนวณเพิ่มในส่วนของการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload ที่เกิดขึ้นที่ line อื่นๆอีก

จากตารางที่ 7.1 สามารถสรุปผลการเลือก switch line ได้ดังต่อไปนี้

- ระบบทดสอบ IEEE 30 Bus กรณี outage line no.5
  - ◉ วิธี Linear Sensitivity Factors จะทำการเลือก switch line no. 9 (6 -> 7)
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบเดิม สามารถทำการเลือก switch line no. 7 (4 -> 6) ; switch line no. 9 (6 -> 7) ได้เนื่องจากว่าสามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ แต่ถ้าเลือก switch line no. 7 (4 -> 6) แล้วนั้นสามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นที่ L2 (1 -> 3) , L3 (2 -> 4) , L7 (4 -> 6) ได้มากที่สุด
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง จะทำการเลือก switch line no. 9 (6 -> 7)
- ระบบทดสอบ 39-Bus New England System กรณี outage line no.10
  - ◉ วิธี Linear Sensitivity Factors จะทำการเลือก switch line no. 17 (10 -> 11)
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบเดิม สามารถทำการเลือก switch line no. 13 (6 -> 11) ; switch line no. 14 (7 -> 8) ; switch line no. 17 (10 -> 11) ; switch line no. 21 (15 -> 16) ได้เนื่องจากว่าสามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ แต่ถ้าเลือก switch line no. 14 (7 -> 8) แล้วนั้นสามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นที่ L12 (6 -> 7) ได้มากที่สุด
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง จะทำการเลือก switch line no. 17 (10 -> 11)
- ระบบทดสอบ IEEE 57 Bus กรณี outage line no.58
  - ◉ วิธี Linear Sensitivity Factors จะทำการเลือก switch line no. 42 (37 -> 38)
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบเดิม สามารถทำการเลือก switch line no. 8 (8 -> 9) ; switch line no. 26 (14 -> 15) ; switch line no. 42 (37 -> 38) ; switch line no. 49 (46 -> 47) ; switch line no. 50 (47 -> 48) ; switch tr no. 8 (14 -> 46) ได้เนื่องจากว่าสามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ แต่ถ้าเลือก switch line no. 49 (46 -> 47) แล้วนั้นสามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นที่ L63 (38 -> 48) ได้มากที่สุด
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง จะทำการเลือก switch line no. 42 (37 -> 38)

จากตารางที่ 7.2 สามารถสรุปผลการเลือก switch line ได้ดังต่อไปนี้

- ระบบทดสอบ IEEE 30 Bus กรณี outage gen no.2
  - ◉ วิธี Linear Sensitivity Factors ไม่สามารถทำการเลือก switch line
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบเดิม ไม่สามารถทำการเลือก switch line
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง ไม่สามารถทำการเลือก switch line
- ระบบทดสอบ 39-Bus New England System กรณี outage gen no.8
  - ◉ วิธี Linear Sensitivity Factors ไม่สามารถทำการเลือก switch line
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบเดิม ไม่สามารถทำการเลือก switch line
  - ◉ วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง ไม่สามารถทำการเลือก switch line

สรุปการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload ที่ line อื่นๆหลังจากเลือก switch line ตามวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง แสดงได้ดังตารางที่ 7.3

**ตารางที่ 7.3** สรุปผลการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload ที่ line อื่นๆหลังจากเลือก switch line ตามวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง

| System Test | Outage | Switch | Overload |
|---|---|---|---|
| IEEE 30 Bus | L5(2->6) | L7(4->6) | L1(1->2), L4(2->5), Tr1(4->12) |
| | | L9(6->7) | - |
| 39-Bus New England System | L10(5->6) | L13(6->11) | L19(13->14), L22(16->17) |
| | | L14(7->8) | L9(4->14), L18(10->13), L19(13->14) |
| | | | L22(16->17) |
| | | L17(10->11) | - |
| | | L21(15->16) | L6(3->4), L7(3->18), L20(14->15) |
| | | | L22(16->17), L26(17->18), L27(17->27) |
| IEEE 57 Bus | L58(44->45) | L8(8->9) | L5(4->6), L7(6->8), L10(9->11) |
| | | | L12(9->13), L13(13->14), L14(13->15) |
| | | | L16(1->16), L18(3->15), L19(5->6) |
| | | | L20(7->8), L21(10->12), L22(11->13) |
| | | | L25(12->17), L26(14->15), L32(26->27) |
| | | | L33(27->28), L50(47->48), L54(29->52) |
| | | | L55(52->53), Tr2(7->29), Tr12(24->26) |
| | | L26(14->15) | L13(13->14), L14(13->15) |
| | | L42(37->38) | - |
| | | L49(46->47) | L13(13->14), L33(27->28), L51(48->49) |
| | | | Tr2(7->29), Tr7(13->49) |
| | | L50(47->48) | L13(13->14) |
| | | Tr8(14->46) | L13(13->14), L33(27->28), L51(48->49) |
| | | | Tr2(7->29), Tr7(13->49) |

ดังนั้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า

- วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงนี้ มีประสิทธิภาพในการคำนวณมากกว่าวิธี Z-Matrix แบบเดิม เนื่องจากว่าเพิ่มเติมในส่วนของการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload ที่ line อื่นๆทำให้สามารถเลือกสวิทซ์ไลน์ที่ถูกต้องและเหมาะสมได้มากกว่าเก่า

- วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงนี้ให้ผลลัพธ์ในการเลือกสวิทซ์ไลน์ที่ตรงกันกับวิธี Linear Sensitivity Factors

- วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงและวิธี Z-Matrix แบบเดิมนี้ สามารถคำนวณเพื่อเลือกสวิทซ์ไลน์ได้รวดเร็วมากกว่าวิธี Linear Sensitivity Factors มาก

## 7.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

1. ควรทำการปรับปรุงวิธี Linear Sensitivity Factors ให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเก่า คือ ปรับปรุงในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการคำนวณให้สามารถคำนวณได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น เนื่องจากว่าวิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณเพื่อเลือกสวิทซ์ไลน์มากจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้คำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆ [13]

2. ในการเลือกสวิทซ์ไลน์ควรที่จะพิจารณาถึงผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าที่บัสเปลี่ยนแปลงไปหลังจากสวิทซ์ไลน์ประกอบในการพิจารณาด้วย เนื่องจากว่าในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาถึงค่า total power losses เพียงอย่างเดียว บางครั้งหลังจากเลือกสวิทซ์ไลน์ที่เหมาะสมที่สุดแล้วนั้นก็คือสามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ และมีค่า total power losses ต่ำที่สุดแล้วก็จริง แต่บางครั้งอาจจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นเกิน voltage limits หรือ ต่ำลงกว่า voltage limits ได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังในระบบที่ต่ออยู่ได้ [14]

3. ควรที่จะมีการศึกษากรณี muti outage เช่น ทดสอบ outage 2 line หรือมากกว่า 2 line ขึ้นไป หรือทดสอบ outage generator ร่วมกับ outage line เป็นต้น

4. ในกรณีที่เมื่อทำการเลือกสวิทซ์ไลน์ไปแล้วไม่สามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ แต่สามารถบรรเทา overload ได้นั้น ควรที่จะศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการป้องกันวิธีอื่นๆเพื่อที่จะขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ เช่น shift generation , shift generation ร่วมกับการเลือก switch line , phase shifter adjustments หรือ generation reschedule and /or load shedding เป็นต้น [15]

5. ควรที่จะศึกษาในกรณีของภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปเพราะว่าในทางปฏิบัติการเกิด overload อาจจะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างรวดเร็ว แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาที่ภาวะโหลดคงที่ overload จึงไม่เกิดขึ้นดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบการเกิด overload ด้วยการทดสอบ outage

# เอกสารอ้างอิง


[1] Makram E.B.,Thornton K.P. and Brown H.E. "Selection of Line to be Switched to Eliminate Overload Lines using a Z-matrix method." IEEE Trans. Power System., vol.4 , May. 1989. pp. 653-661.

[2] Allen J.Wood , Bruce F.Wollenberg. **Power Generation , Operation , And Control.** : John Wiley and Sons. 1984.

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

[4] Wunderlich S., Adibi M.M., Fischl R. and Nwankpa C.O.D. "An Approach to Standing Phase Angle Reduction." IEEE Trans.Power System., vol.9 , no.1 ,Feb.1994. pp.470-478.

[5] Brown H.E. "Interchange Capability and Contingency Evaluation by a Z-matrix Method." IEEE Transactions , PAS 91 , 1972. pp. 1827.

[6] Landgren G.L., Terhune H.L. and Angel R.K. "Transmission Interchange Capability-Analysis by Computer." IEEE Transactions , PAS 91 , 1972. pp. 2045.

[7] Brown H.E. **Solution of Large Networks by Matrix Method.** New York : John Wiley and Sons. 1985.

[8] Hadi S. **Power System Analysis.** : McGraw-Hill.Inc. 1999.

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

[10] พรสิน ชัยศิริพงศ์. "การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสต์ดีคัปเปิ้ลโดยใช้เทคนิคสปาซเมตริกซ์และการแยกส่วนย่อย." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

[11] Arya L.D., Choube S.C. and Mehta K.S. "Post Contingency Line Switching for Overload Alleviation or Rotation." Electric Machines and Power System , 1995. pp. 345-352

[12] Jung-Uk Lim., Seung-Il Moon. "The Line Flow Control of Multiple UPFCs for Enhancing Power System Security." Electric Power and System , 2002. pp. 933-945

[13] Mazi A.A., Wollenberg B.F. and Hesse M.H. "Corrective Control of Power System Flows by Line and Bus-Bar Switching." IEEE Trans. Power System., vol.PWRS-1 , no.3 , August. 1986. pp. 258-265.

[14] Singh S.N. and Srivastava S.C. "Improved Voltage and Reactive Power Distribution Factors for Outage Studies." IEEE PES summer meeting , Denver , Colorado , Paper No. 96SM 471-3 PWRS.

[15] Krogh Bruce. And Harold Javid S. "Multi-Stage Rescheduling of Generation , Load Shedding and Short-Term Transmission Capacity For Emergency State Control." IEEE Trans. Power System , vol. PAS-102 , No. 5 , May 1983. pp. 1466-1472.

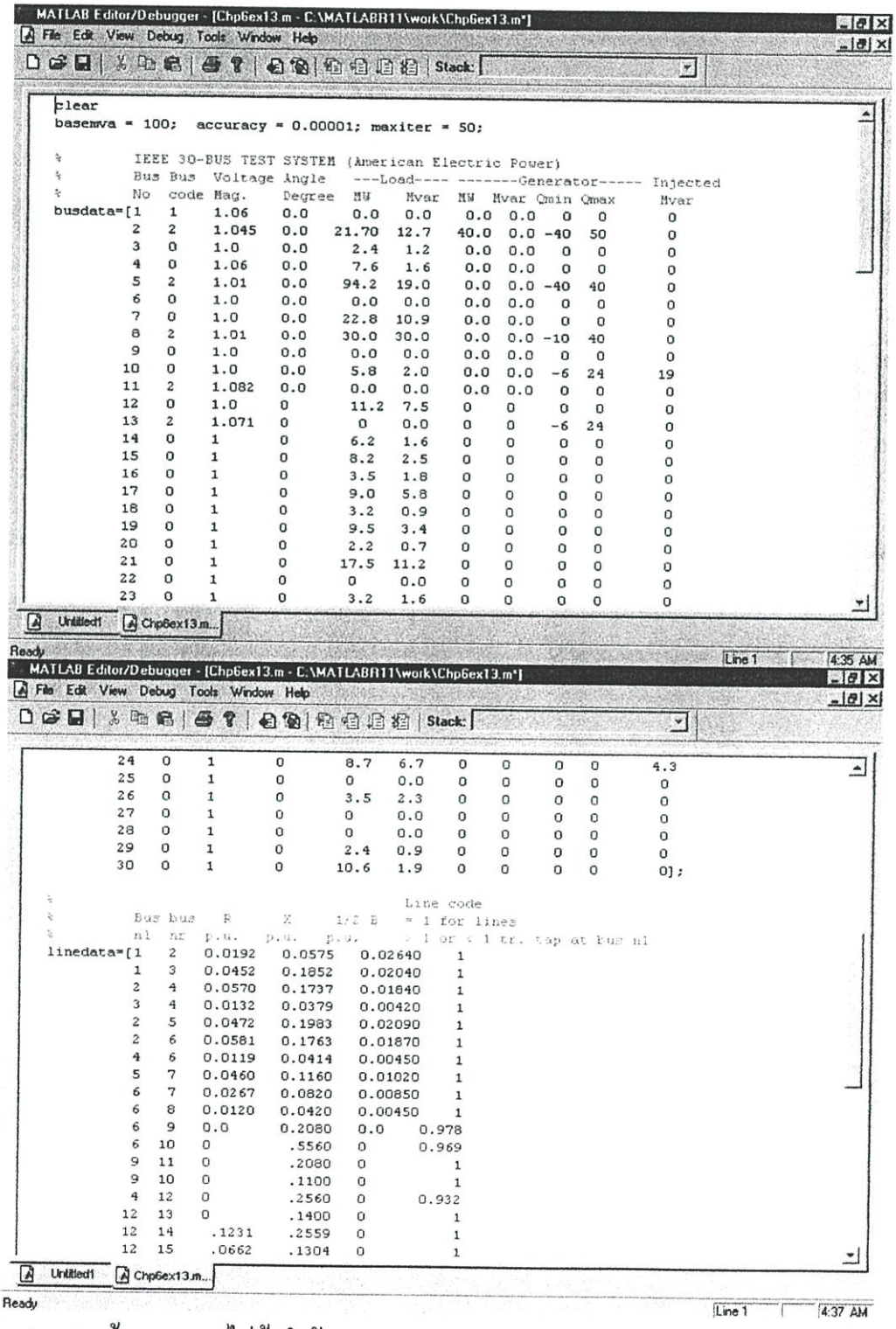
# ภาคผนวก ก.

# การเปรียบเทียบค่า line flow กับมาตรฐาน

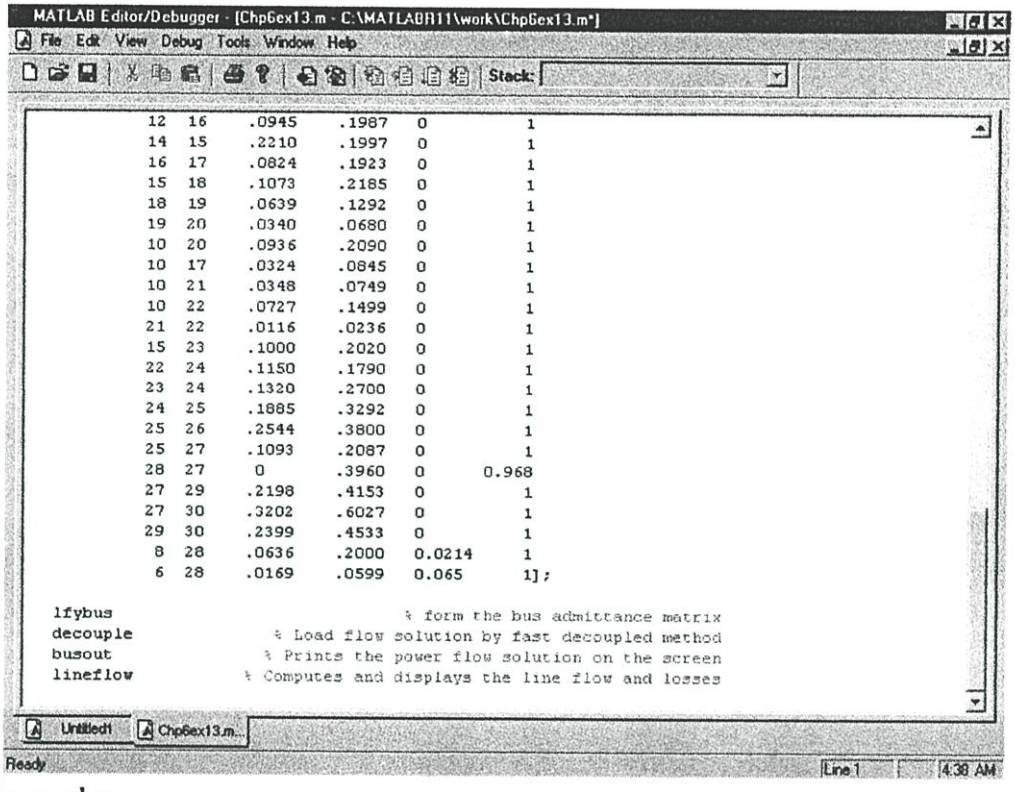
ทำการเปรียบเทียบ line flow กับมาตรฐาน [8] ได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus [3]

แสดงค่าการคำนวณ load flow ด้วยวิธี the fast decoupled method กับโปรแกรมมาตรฐาน matlab 5.3 [8] กรณี base case ได้ดังต่อไปนี้



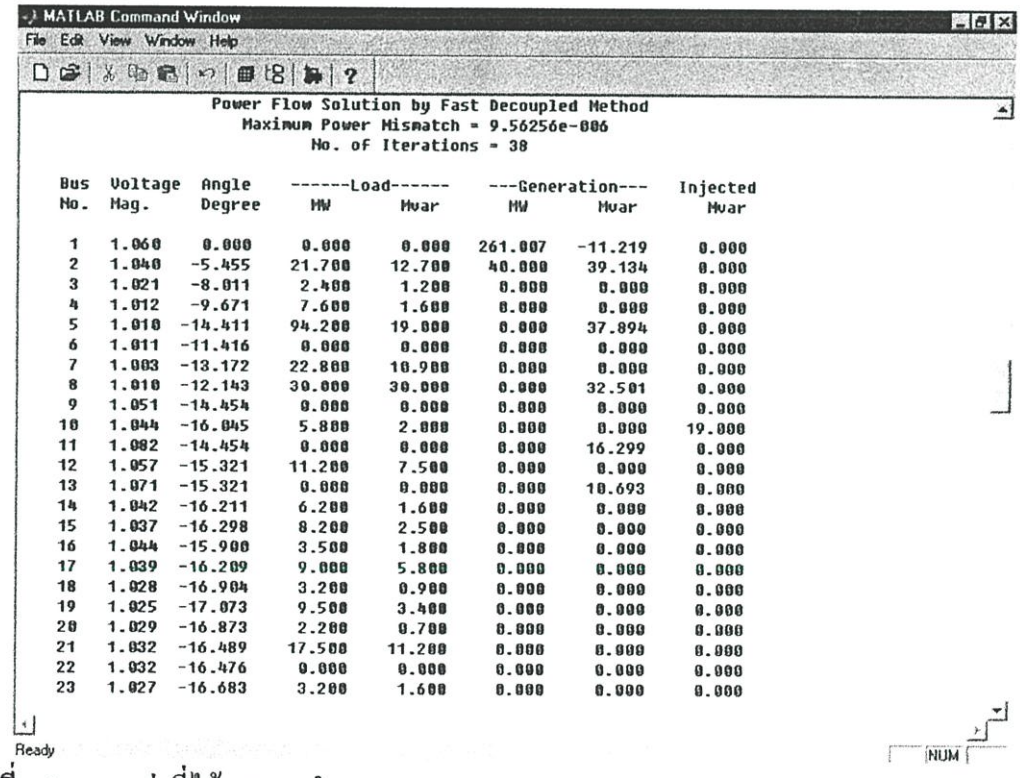

**รูปที่ ก.1** แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus



```
MATLAB Editor/Debugger - [Chp6ex13.m - C:\MATLABR11\work\Chp6ex13.m*]
File Edit View Debug Tools Window Help
Stack:

    12  16   .0945    .1987   0          1
    14  15   .2210    .1997   0          1
    16  17   .0824    .1923   0          1
    15  18   .1073    .2185   0          1
    18  19   .0639    .1292   0          1
    19  20   .0340    .0680   0          1
    10  20   .0936    .2090   0          1
    10  17   .0324    .0845   0          1
    10  21   .0348    .0749   0          1
    10  22   .0727    .1499   0          1
    21  22   .0116    .0236   0          1
    15  23   .1000    .2020   0          1
    22  24   .1150    .1790   0          1
    23  24   .1320    .2700   0          1
    24  25   .1885    .3292   0          1
    25  26   .2544    .3800   0          1
    25  27   .1093    .2087   0          1
    28  27   0        .3960   0      0.968
    27  29   .2198    .4153   0          1
    27  30   .3202    .6027   0          1
    29  30   .2399    .4533   0          1
     8  28   .0636    .2000   0.0214     1
     6  28   .0169    .0599   0.065      1];

lfybus                          % form the bus admittance matrix
decouple              % Load flow solution by fast decoupled method
busout              % Prints the power flow solution on the screen
lineflow          % Computes and displays the line flow and losses

Untitled1  Chp6ex13.m
Ready                                                  Line 1   4:38 AM
```

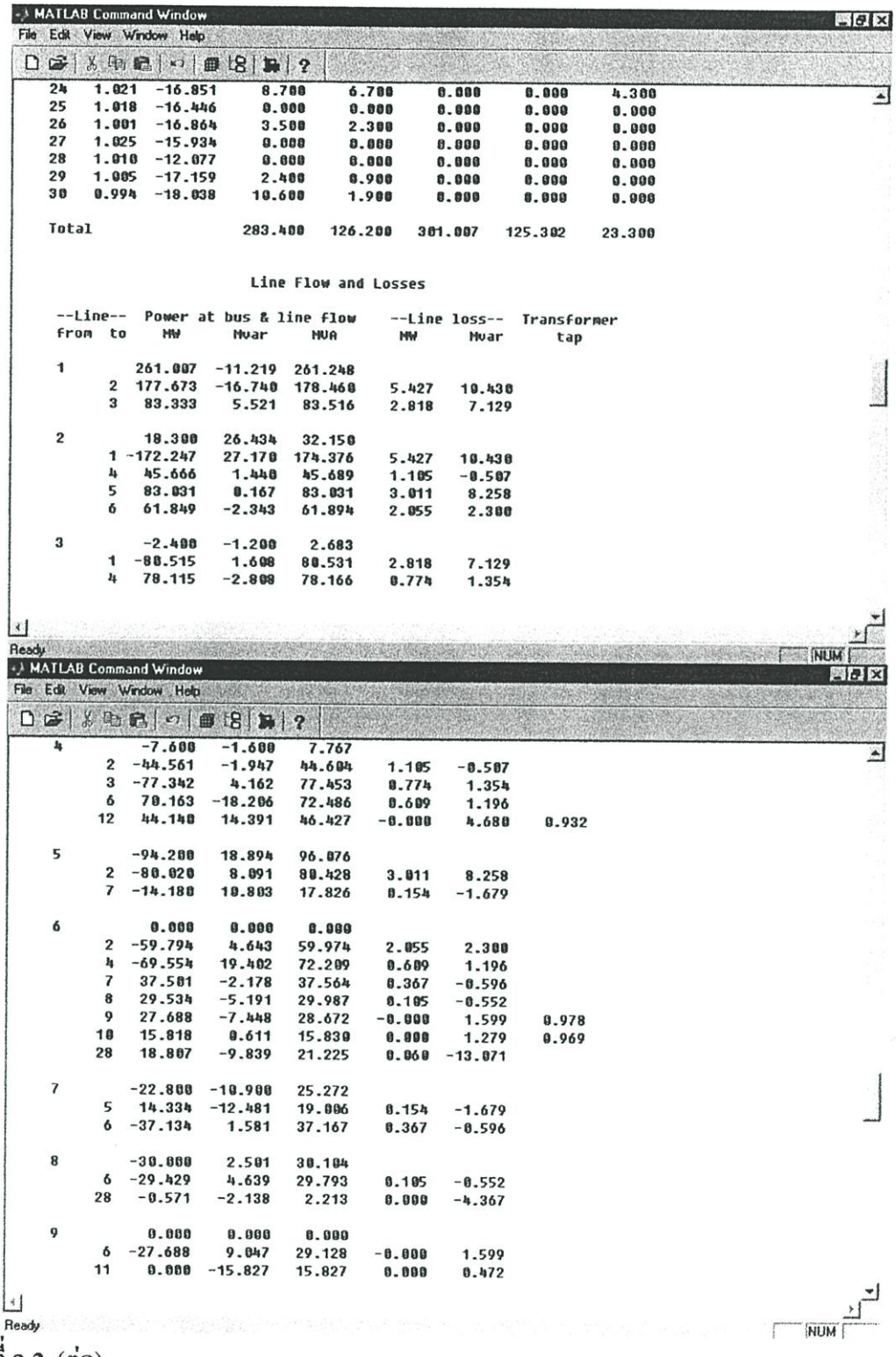
**รูปที่ ก.1** (ต่อ)

จากรูปที่ ก.1 คำนวณ load flow แสดงได้ดังต่อไปนี้



```
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help

                Power Flow Solution by Fast Decoupled Method
                   Maximum Power Mismatch = 9.56256e-006
                             No. of Iterations = 38

 Bus  Voltage  Angle     ------Load------     ---Generation---   Injected
 No.   Mag.    Degree      MW       Mvar       MW       Mvar       Mvar

   1   1.060     0.000     0.000     0.000   261.007   -11.219     0.000
   2   1.040    -5.455    21.700    12.700    40.000    39.134     0.000
   3   1.021    -8.011     2.400     1.200     0.000     0.000     0.000
   4   1.012    -9.671     7.600     1.600     0.000     0.000     0.000
   5   1.010   -14.411    94.200    19.000     0.000    37.894     0.000
   6   1.011   -11.416     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
   7   1.003   -13.172    22.800    10.900     0.000     0.000     0.000
   8   1.010   -12.143    30.000    30.000     0.000    32.501     0.000
   9   1.051   -14.454     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
  10   1.044   -16.045     5.800     2.000     0.000     0.000    19.000
  11   1.082   -14.454     0.000     0.000     0.000    16.299     0.000
  12   1.057   -15.321    11.200     7.500     0.000     0.000     0.000
  13   1.071   -15.321     0.000     0.000     0.000    10.693     0.000
  14   1.042   -16.211     6.200     1.600     0.000     0.000     0.000
  15   1.037   -16.298     8.200     2.500     0.000     0.000     0.000
  16   1.044   -15.900     3.500     1.800     0.000     0.000     0.000
  17   1.039   -16.209     9.000     5.800     0.000     0.000     0.000
  18   1.028   -16.904     3.200     0.900     0.000     0.000     0.000
  19   1.025   -17.073     9.500     3.400     0.000     0.000     0.000
  20   1.029   -16.873     2.200     0.700     0.000     0.000     0.000
  21   1.032   -16.489    17.500    11.200     0.000     0.000     0.000
  22   1.032   -16.476     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
  23   1.027   -16.683     3.200     1.600     0.000     0.000     0.000

Ready                                                          NUM
```

**รูปที่ ก.2** แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow



MATLAB Command Window

File Edit View Window Help

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24 | 1.021 | -16.851 | 8.700 | 6.700 | 0.000 | 0.000 | 4.300 |
| 25 | 1.018 | -16.446 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 26 | 1.001 | -16.864 | 3.500 | 2.300 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 27 | 1.025 | -15.934 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 28 | 1.010 | -12.077 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 29 | 1.005 | -17.159 | 2.400 | 0.900 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 30 | 0.994 | -18.038 | 10.600 | 1.900 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Total | | | 283.400 | 126.200 | 301.007 | 125.302 | 23.300 |

Line Flow and Losses

| --Line-- from | to | Power at bus & line flow MW | Mvar | MVA | --Line loss-- MW | Mvar | Transformer tap |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | 261.007 | -11.219 | 261.248 | | | |
| | 2 | 177.673 | -16.740 | 178.460 | 5.427 | 10.430 | |
| | 3 | 83.333 | 5.521 | 83.516 | 2.818 | 7.129 | |
| 2 | | 18.300 | 26.434 | 32.150 | | | |
| | 1 | -172.247 | 27.170 | 174.376 | 5.427 | 10.430 | |
| | 4 | 45.666 | 1.448 | 45.689 | 1.105 | -0.507 | |
| | 5 | 83.031 | 0.167 | 83.031 | 3.011 | 8.258 | |
| | 6 | 61.849 | -2.343 | 61.894 | 2.055 | 2.300 | |
| 3 | | -2.400 | -1.200 | 2.683 | | | |
| | 1 | -80.515 | 1.608 | 80.531 | 2.818 | 7.129 | |
| | 4 | 78.115 | -2.809 | 78.166 | 0.774 | 1.354 | |

Ready NUM

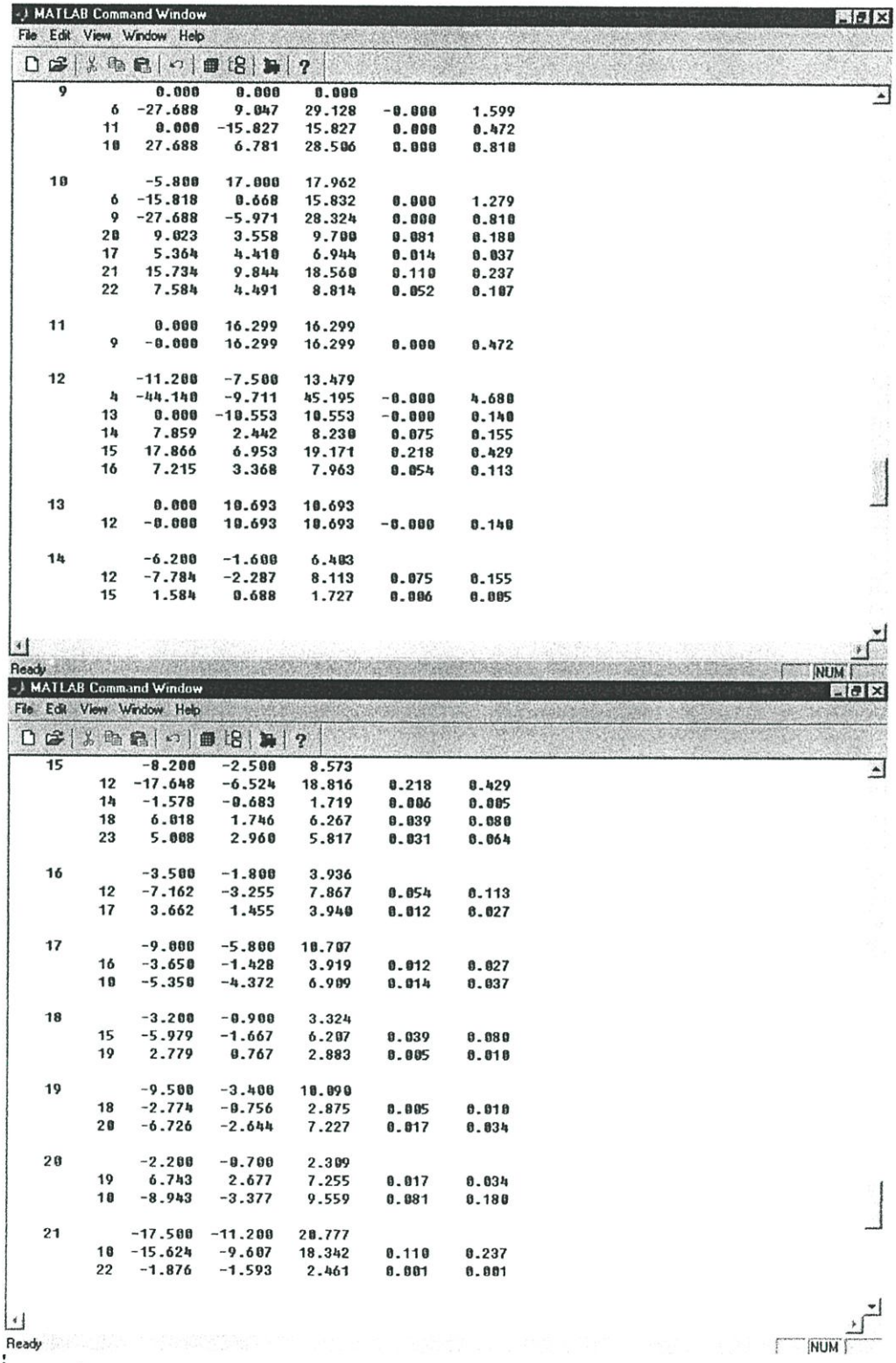
MATLAB Command Window

File Edit View Window Help

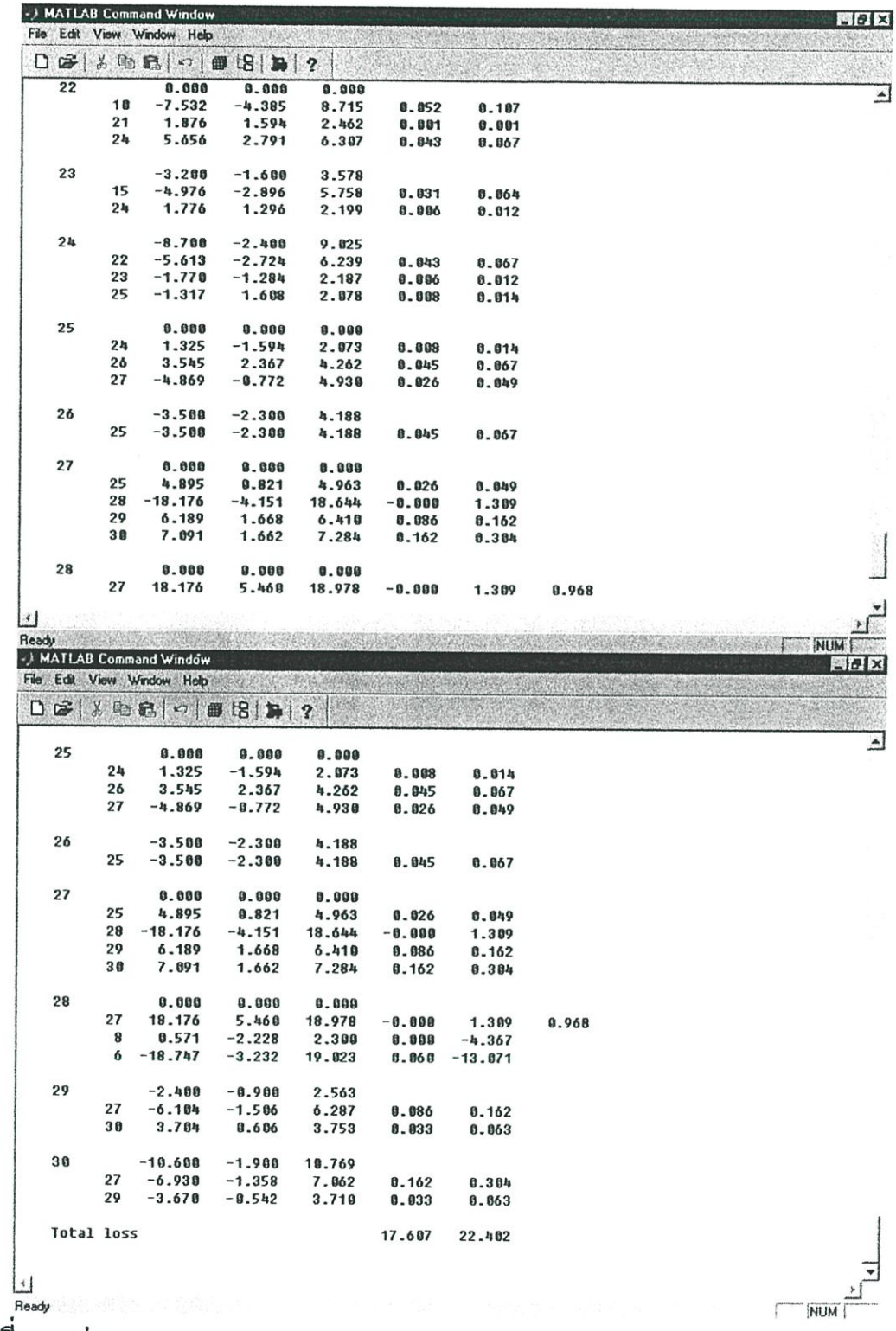
| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | | -7.600 | -1.600 | 7.767 | | | |
| | 2 | -44.561 | -1.947 | 44.604 | 1.105 | -0.507 | |
| | 3 | -77.342 | 4.162 | 77.453 | 0.774 | 1.354 | |
| | 6 | 70.163 | -18.206 | 72.486 | 0.609 | 1.196 | |
| | 12 | 44.140 | 14.391 | 46.427 | -0.000 | 4.680 | 0.932 |
| 5 | | -94.200 | 18.894 | 96.076 | | | |
| | 2 | -80.020 | 8.091 | 80.428 | 3.011 | 8.258 | |
| | 7 | -14.180 | 10.803 | 17.826 | 0.154 | -1.679 | |
| 6 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | |
| | 2 | -59.794 | 4.643 | 59.974 | 2.055 | 2.300 | |
| | 4 | -69.554 | 19.402 | 72.209 | 0.609 | 1.196 | |
| | 7 | 37.581 | -2.178 | 37.564 | 0.367 | -0.596 | |
| | 8 | 29.534 | -5.191 | 29.987 | 0.105 | -0.552 | |
| | 9 | 27.688 | -7.448 | 28.672 | -0.000 | 1.599 | 0.978 |
| | 10 | 15.818 | 0.611 | 15.830 | 0.000 | 1.279 | 0.969 |
| | 28 | 18.807 | -9.839 | 21.225 | 0.060 | -13.071 | |
| 7 | | -22.800 | -10.900 | 25.272 | | | |
| | 5 | 14.334 | -12.481 | 19.006 | 0.154 | -1.679 | |
| | 6 | -37.134 | 1.581 | 37.167 | 0.367 | -0.596 | |
| 8 | | -30.000 | 2.501 | 30.104 | | | |
| | 6 | -29.429 | 4.639 | 29.793 | 0.105 | -0.552 | |
| | 28 | -0.571 | -2.138 | 2.213 | 0.000 | -4.367 | |
| 9 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | |
| | 6 | -27.688 | 9.047 | 29.128 | -0.000 | 1.599 | |
| | 11 | 0.000 | -15.827 | 15.827 | 0.000 | 0.472 | |

Ready NUM

**รูปที่ ก.2** (ต่อ)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
9 0.000 0.000 0.000
6 -27.688 9.047 29.128 -0.000 1.599
11 0.000 -15.827 15.827 0.000 0.472
10 27.688 6.781 28.506 0.000 0.810
10 -5.800 17.000 17.962
6 -15.818 0.668 15.832 0.000 1.279
9 -27.688 -5.971 28.324 0.000 0.810
20 9.023 3.558 9.700 0.081 0.180
17 5.364 4.410 6.944 0.014 0.037
21 15.734 9.844 18.560 0.110 0.237
22 7.584 4.491 8.814 0.052 0.107
11 0.000 16.299 16.299
9 -0.000 16.299 16.299 0.000 0.472
12 -11.200 -7.500 13.479
4 -44.140 -9.711 45.195 -0.000 4.680
13 0.000 -10.553 10.553 -0.000 0.140
14 7.859 2.442 8.230 0.075 0.155
15 17.866 6.953 19.171 0.218 0.429
16 7.215 3.368 7.963 0.054 0.113
13 0.000 10.693 10.693
12 -0.000 10.693 10.693 -0.000 0.140
14 -6.200 -1.600 6.403
12 -7.784 -2.287 8.113 0.075 0.155
15 1.584 0.688 1.727 0.086 0.085
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
15 -8.200 -2.500 8.573
12 -17.648 -6.524 18.816 0.218 0.429
14 -1.578 -0.683 1.719 0.086 0.085
18 6.018 1.746 6.267 0.039 0.080
23 5.008 2.960 5.817 0.031 0.064
16 -3.500 -1.800 3.936
12 -7.162 -3.255 7.867 0.054 0.113
17 3.662 1.455 3.940 0.012 0.027
17 -9.000 -5.800 10.707
16 -3.650 -1.428 3.919 0.012 0.027
10 -5.350 -4.372 6.909 0.014 0.037
18 -3.200 -0.900 3.324
15 -5.979 -1.667 6.207 0.039 0.080
19 2.779 0.767 2.883 0.005 0.010
19 -9.500 -3.400 10.090
18 -2.774 -0.756 2.875 0.005 0.010
20 -6.726 -2.644 7.227 0.017 0.034
20 -2.200 -0.700 2.309
19 6.743 2.677 7.255 0.017 0.034
10 -8.943 -3.377 9.559 0.081 0.180
21 -17.500 -11.200 20.777
10 -15.624 -9.607 18.342 0.110 0.237
22 -1.876 -1.593 2.461 0.001 0.001
Ready
NUM

**รูปที่ ก.2** (ต่อ)




**รูปที่ ก.2** (ต่อ)

จากรูปที่ ก.2 ทำการสรุปผลเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0 แสดงได้ดังตารางที่ ก.1

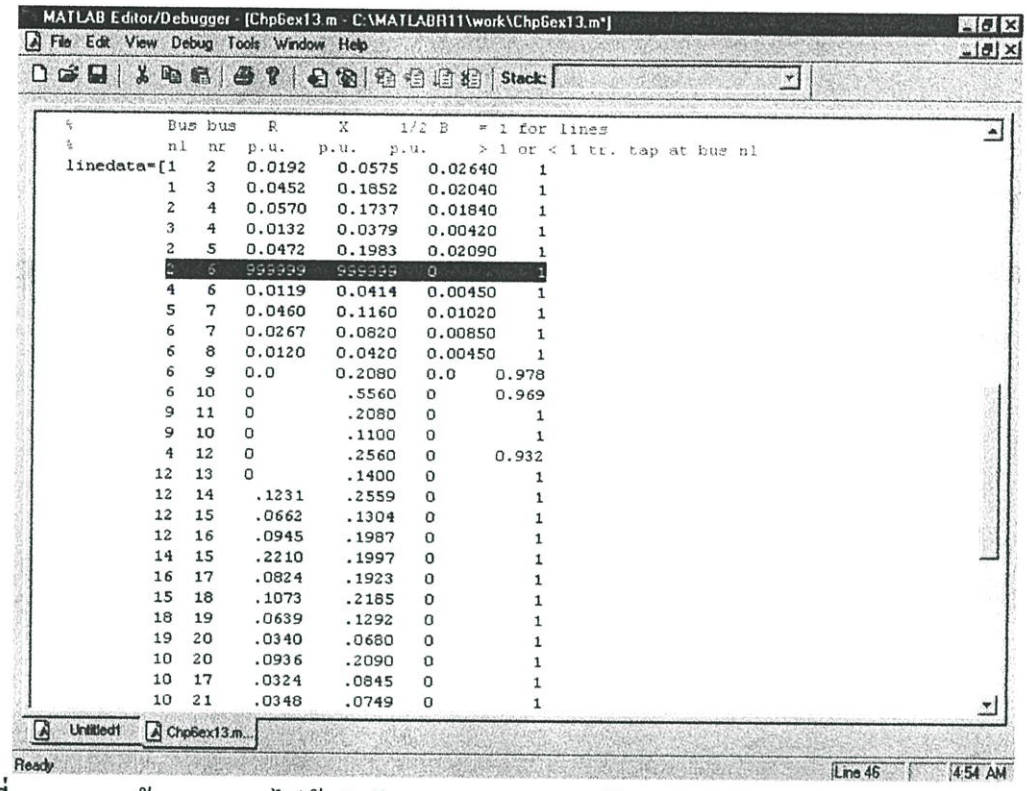
**ตารางที่ ก.1** การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0

กรณี base case

| | flow (MW) calculate from vb6.0 | flow (MW) calculate from [8] |
|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | 177.9556 | 177.673 |
| L2 : 1 -> 3 | 83.08211 | 83.333 |
| L3 : 2 -> 4 | 45.73911 | 45.666 |
| L4 : 2 -> 5 | 83.06548 | 83.031 |
| L5 : 2 -> 6 | 61.95076 | 61.849 |
| L6 : 3 -> 4 | 77.88135 | 78.115 |
| L7 : 4 -> 6 | 70.07401 | 70.163 |
| L8 : 5 -> 7 | -14.12754 | -14.18 |
| L9 : 6 -> 7 | 37.45328 | 37.501 |
| L10 : 6 -> 8 | 29.56904 | 29.534 |
| L11 : 6 -> 28 | 18.69453 | 18.807 |
| L12 : 8 -> 28 | -0.538973 | -0.571 |
| L13 : 9 -> 10 | 27.78761 | 27.688 |
| L14 : 9 -> 11 | 0.000000223 | 0.000 |
| L15 : 10 -> 17 | 5.400859 | 5.364 |
| L16 : 10 -> 20 | 9.053659 | 9.023 |
| L17 : 10 -> 21 | 15.78941 | 15.734 |
| L18 : 10 -> 22 | 7.620634 | 7.584 |
| L19 : 12 -> 13 | -0.0000000228 | 0.000 |
| L20 : 12 -> 14 | 7.847327 | 7.859 |
| L21 : 12 -> 15 | 17.84051 | 17.866 |
| L22 : 12 -> 16 | 7.17738 | 7.215 |
| L23 : 14 -> 15 | 1.573801 | 1.584 |
| L24 : 15 -> 18 | 5.988228 | 6.018 |
| L25 : 15 -> 23 | 5.003018 | 5.008 |
| L26 : 16 -> 17 | 3.625194 | 3.662 |
| L27 : 18 -> 19 | 2.749942 | 2.779 |
| L28 : 19 -> 20 | -6.754901 | -6.726 |
| L29 : 21 -> 22 | -1.822111 | -1.876 |
| L30 : 22 -> 24 | 5.745282 | 5.656 |
| L31 : 23 -> 24 | 1.77173 | 1.776 |
| L32 : 24 -> 25 | -1.234475 | -1.317 |
| L33 : 25 -> 26 | 3.544645 | 3.545 |
| L34 : 25 -> 27 | -4.78919 | -4.869 |
| L35 : 27 -> 29 | 6.189921 | 6.189 |
| L36 : 27 -> 30 | 7.092003 | 7.091 |
| L37 : 29 -> 30 | 3.703733 | 3.704 |
| Tr1 : 4 -> 12 | 44.06515 | 44.14 |
| Tr2 : 6 -> 9 | 27.78761 | 27.688 |
| Tr3 : 6 -> 10 | 15.87703 | 15.818 |
| Tr4 : 28 ->27 | 18.09552 | 18.176 |
| Total Losses | 17.63719 | 17.607 |
| No.of Overload | 0 | 0 |

1.1 กรณี outage L5 (2 -> 6)

แสดงค่าการคำนวณ load flow ด้วยวิธี the fast decoupled method กับโปรแกรมมาตรฐาน matlab 5.3 [8] กรณี outage L5 (2 -> 6) ได้ดังต่อไปนี้



MATLAB Editor/Debugger - [Chp6ex13.m - C:\MATLAB11\work\Chp6ex13.m*]

File Edit View Debug Tools Window Help

Stack:

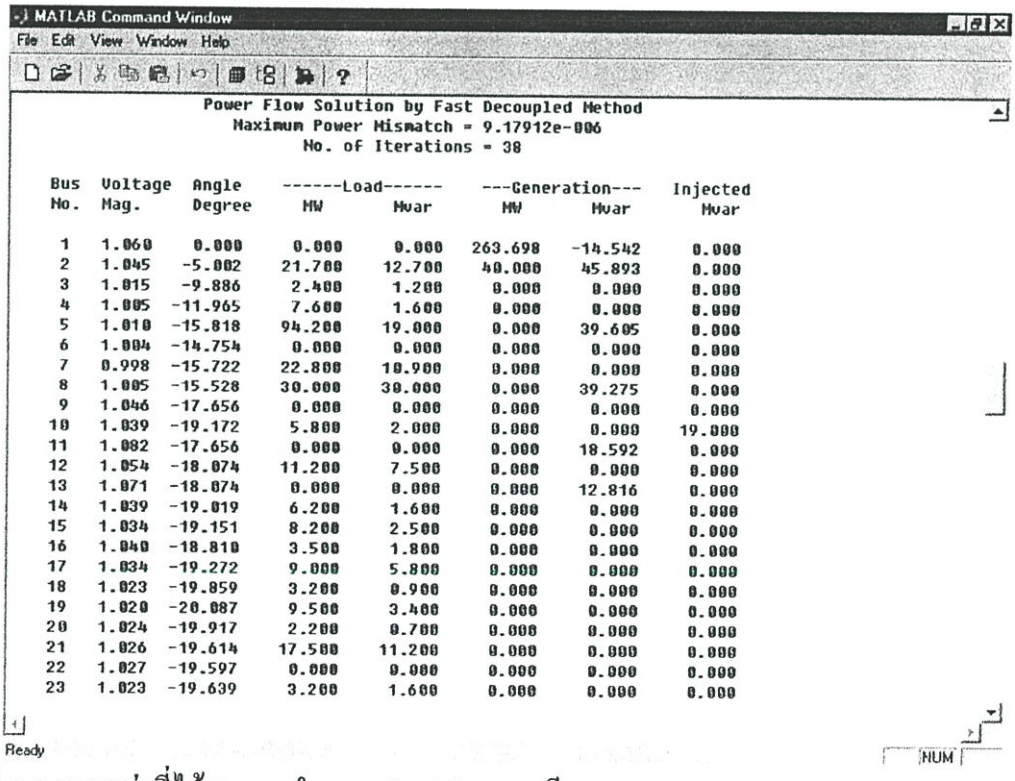
```
%         Bus bus    R       X      1/2 B   = 1 for lines
%         nl  nr   p.u.    p.u.    p.u.     > 1 or < 1 tr. tap at bus nl
linedata=[1   2    0.0192   0.0575   0.02640    1
          1   3    0.0452   0.1852   0.02040    1
          2   4    0.0570   0.1737   0.01840    1
          3   4    0.0132   0.0379   0.00420    1
          2   5    0.0472   0.1983   0.02090    1
          2   6    999999   999999   0          1
          4   6    0.0119   0.0414   0.00450    1
          5   7    0.0460   0.1160   0.01020    1
          6   7    0.0267   0.0820   0.00850    1
          6   8    0.0120   0.0420   0.00450    1
          6   9    0.0      0.2080   0.0      0.978
          6  10    0        .5560    0        0.969
          9  11    0        .2080    0          1
          9  10    0        .1100    0          1
          4  12    0        .2560    0        0.932
         12  13    0        .1400    0          1
         12  14     .1231   .2559    0          1
         12  15     .0662   .1304    0          1
         12  16     .0945   .1987    0          1
         14  15     .2210   .1997    0          1
         16  17     .0824   .1923    0          1
         15  18     .1073   .2185    0          1
         18  19     .0639   .1292    0          1
         19  20     .0340   .0680    0          1
         10  20     .0936   .2090    0          1
         10  17     .0324   .0845    0          1
         10  21     .0348   .0749    0          1
```

Untitled1 Chp6ex13.m...

Ready Line 46 4:54 AM

**รูปที่ ก.3** แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus กรณี outage L5 (2 -> 6)

จากรูปที่ ก.3 คำนวณ load flow กรณี outage L5 (2 -> 6) แสดงได้ดังต่อไปนี้



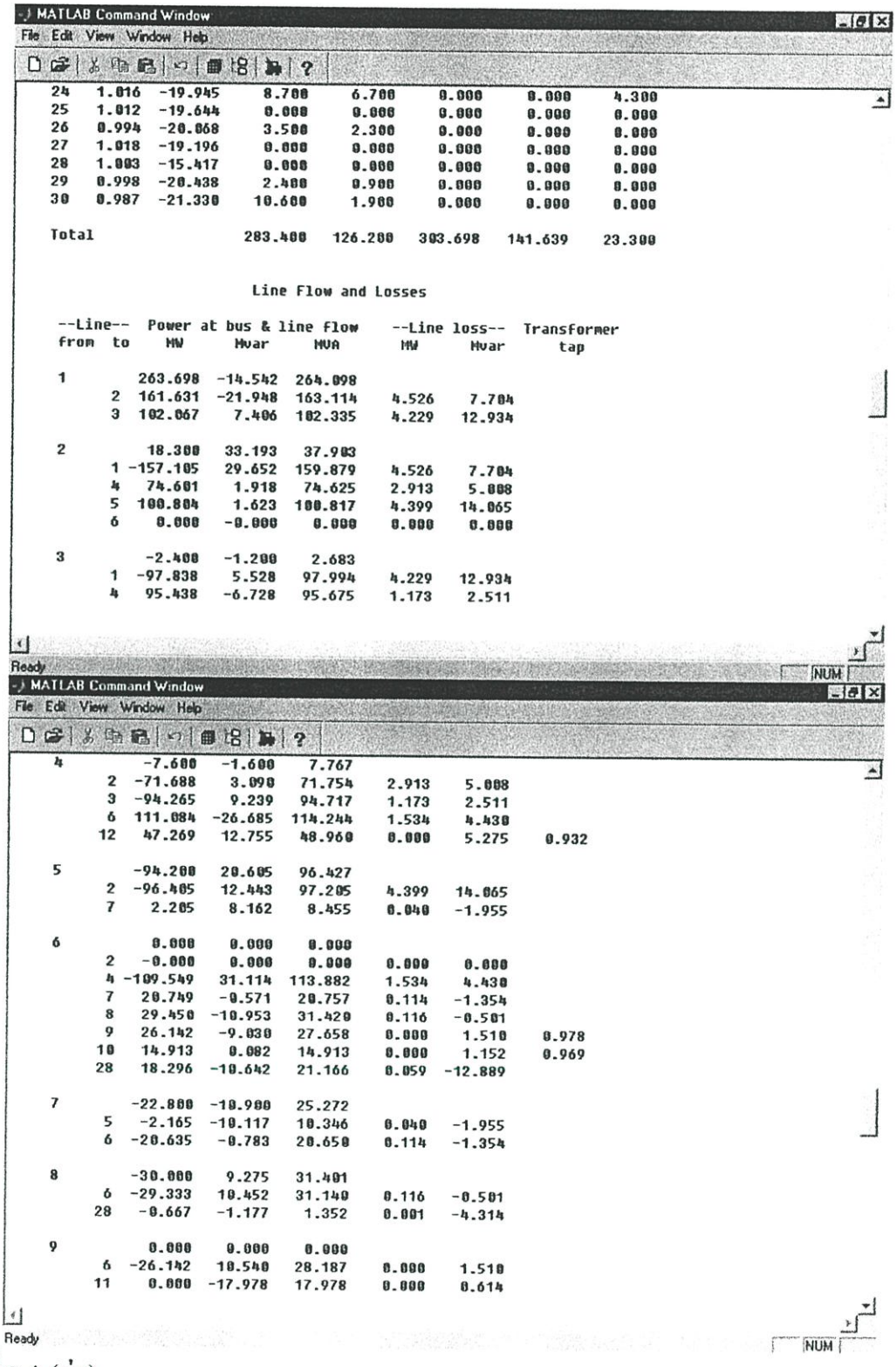
MATLAB Command Window

File Edit View Window Help

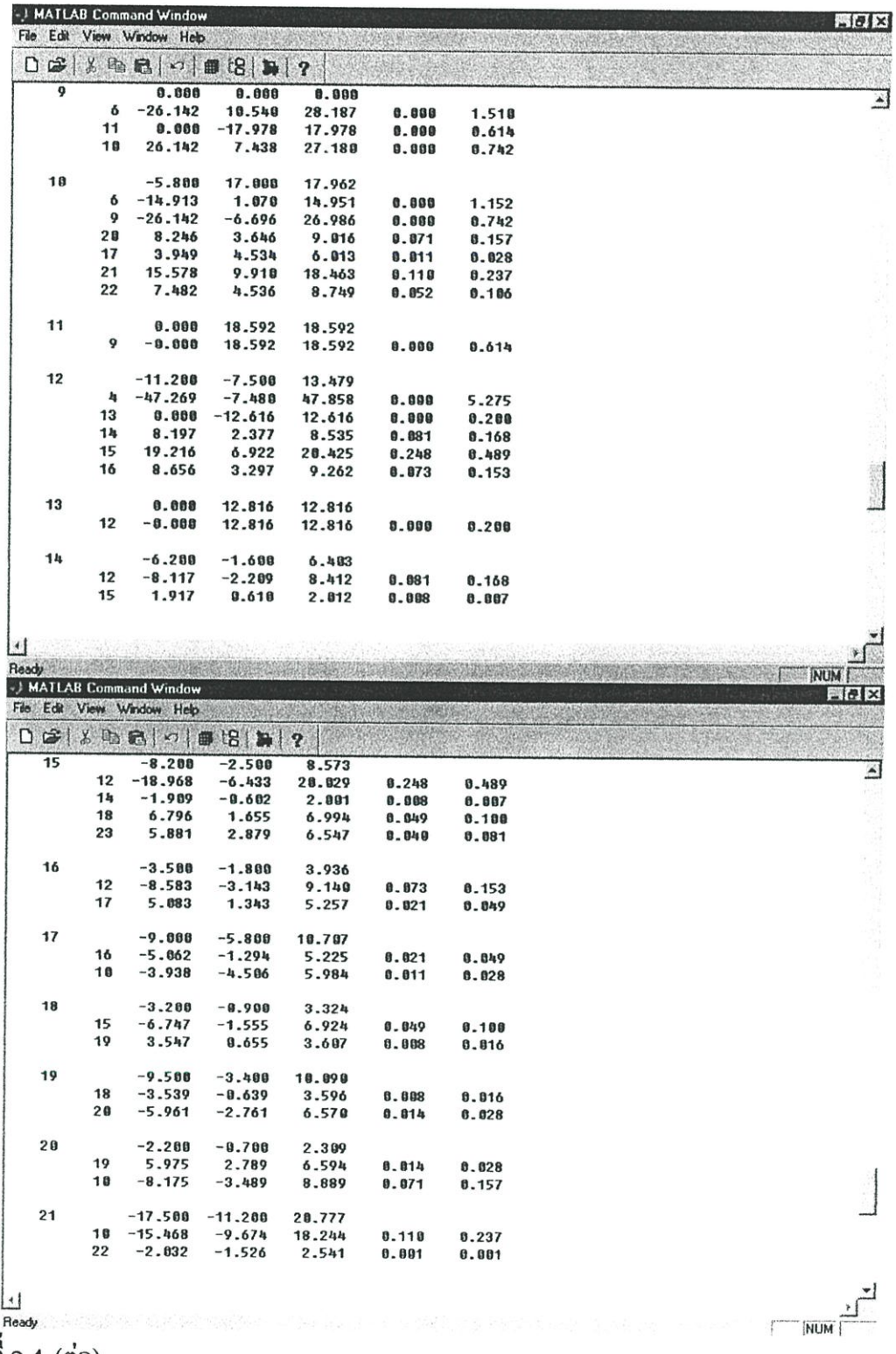
```
                Power Flow Solution by Fast Decoupled Method
                   Maximum Power Mismatch = 9.17912e-006
                             No. of Iterations = 38

 Bus  Voltage  Angle     ------Load------     ---Generation---   Injected
 No.   Mag.    Degree      MW       Mvar       MW       Mvar       Mvar

   1   1.060    0.000     0.000     0.000   263.698   -14.542     0.000
   2   1.045   -5.002    21.700    12.700    40.000    45.893     0.000
   3   1.015   -9.886     2.400     1.200     0.000     0.000     0.000
   4   1.005  -11.965     7.600     1.600     0.000     0.000     0.000
   5   1.010  -15.818    94.200    19.000     0.000    39.605     0.000
   6   1.004  -14.754     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
   7   0.998  -15.722    22.800    10.900     0.000     0.000     0.000
   8   1.005  -15.528    30.000    30.000     0.000    39.275     0.000
   9   1.046  -17.656     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
  10   1.039  -19.172     5.800     2.000     0.000     0.000    19.000
  11   1.082  -17.656     0.000     0.000     0.000    18.592     0.000
  12   1.054  -18.074    11.200     7.500     0.000     0.000     0.000
  13   1.071  -18.074     0.000     0.000     0.000    12.816     0.000
  14   1.039  -19.019     6.200     1.600     0.000     0.000     0.000
  15   1.034  -19.151     8.200     2.500     0.000     0.000     0.000
  16   1.040  -18.818     3.500     1.800     0.000     0.000     0.000
  17   1.034  -19.272     9.000     5.800     0.000     0.000     0.000
  18   1.023  -19.859     3.200     0.900     0.000     0.000     0.000
  19   1.020  -20.087     9.500     3.400     0.000     0.000     0.000
  20   1.024  -19.917     2.200     0.700     0.000     0.000     0.000
  21   1.026  -19.614    17.500    11.200     0.000     0.000     0.000
  22   1.027  -19.597     0.000     0.000     0.000     0.000     0.000
  23   1.023  -19.639     3.200     1.600     0.000     0.000     0.000
```

Ready NUM

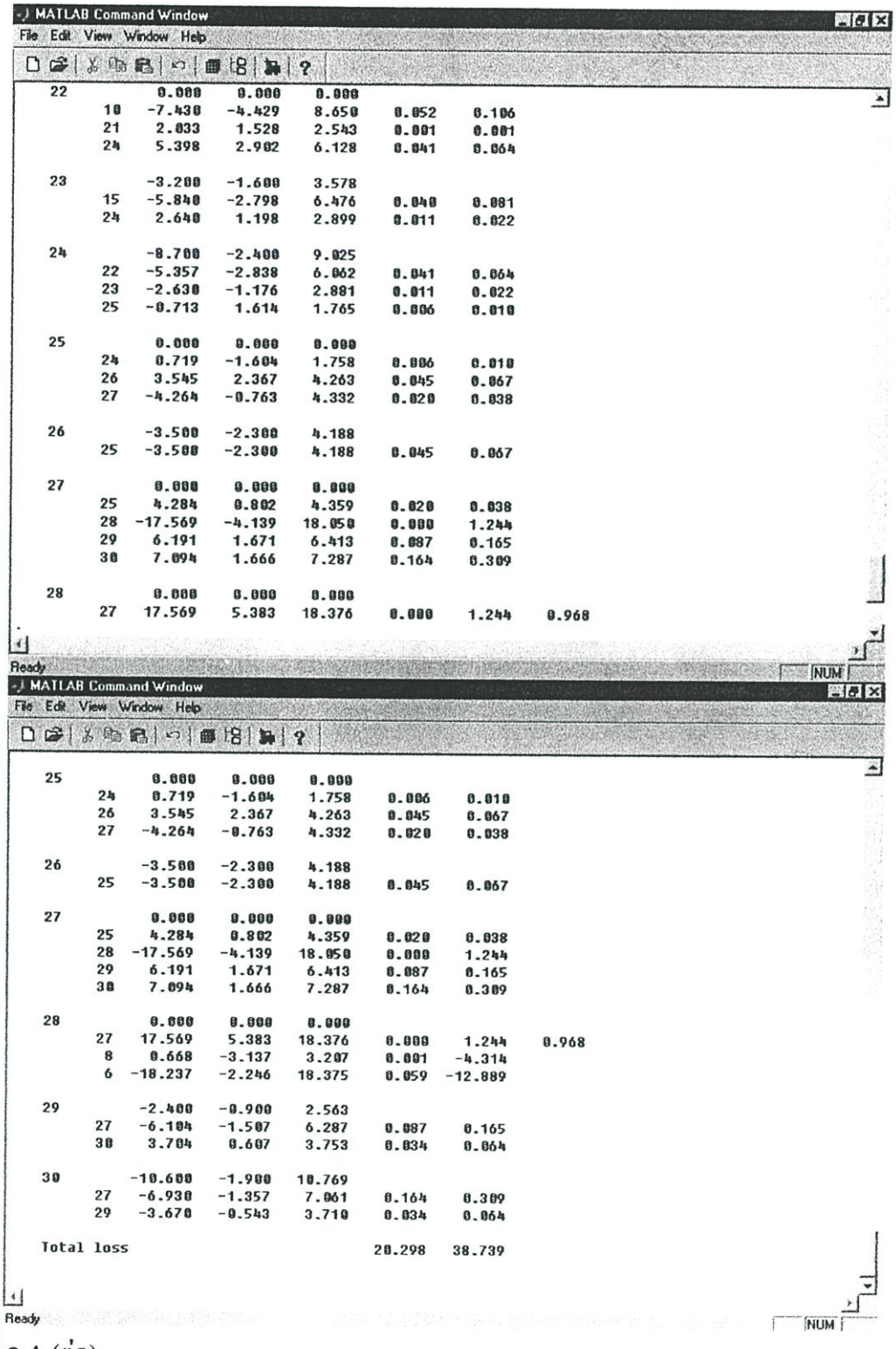
**รูปที่ ก.4** แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow กรณี outage L5 (2 -> 6)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
24 1.016 -19.945 8.700 6.700 0.000 0.000 4.300
25 1.012 -19.644 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
26 0.994 -20.868 3.500 2.300 0.000 0.000 0.000
27 1.018 -19.196 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
28 1.003 -15.417 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
29 0.998 -20.438 2.400 0.900 0.000 0.000 0.000
30 0.987 -21.330 10.600 1.900 0.000 0.000 0.000
Total 283.400 126.200 303.698 141.639 23.300
Line Flow and Losses
--Line-- Power at bus & line flow --Line loss-- Transformer
from to MW Mvar MVA MW Mvar tap
1 263.698 -14.542 264.098
2 161.631 -21.948 163.114 4.526 7.704
3 102.067 7.406 102.335 4.229 12.934
2 18.300 33.193 37.903
1 -157.105 29.652 159.879 4.526 7.704
4 74.601 1.918 74.625 2.913 5.008
5 100.804 1.623 100.817 4.399 14.065
6 0.000 -0.000 0.000 0.000 0.000
3 -2.400 -1.200 2.683
1 -97.838 5.528 97.994 4.229 12.934
4 95.438 -6.728 95.675 1.173 2.511
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
4 -7.600 -1.600 7.767
2 -71.688 3.090 71.754 2.913 5.008
3 -94.265 9.239 94.717 1.173 2.511
6 111.084 -26.685 114.244 1.534 4.430
12 47.269 12.755 48.960 0.000 5.275 0.932
5 -94.200 20.605 96.427
2 -96.405 12.443 97.205 4.399 14.065
7 2.205 8.162 8.455 0.040 -1.955
6 0.000 0.000 0.000
2 -0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
4 -109.549 31.114 113.882 1.534 4.430
7 20.749 -0.571 20.757 0.114 -1.354
8 29.450 -10.953 31.429 0.116 -0.501
9 26.142 -9.030 27.658 0.000 1.510 0.978
10 14.913 0.082 14.913 0.000 1.152 0.969
28 18.296 -10.642 21.166 0.059 -12.889
7 -22.800 -10.900 25.272
5 -2.165 -10.117 10.346 0.040 -1.955
6 -20.635 -0.783 20.650 0.114 -1.354
8 -30.000 9.275 31.401
6 -29.333 10.452 31.140 0.116 -0.501
28 -0.667 -1.177 1.352 0.001 -4.314
9 0.000 0.000 0.000
6 -26.142 10.540 28.187 0.000 1.510
11 0.000 -17.978 17.978 0.000 0.614
Ready
NUM

**รูปที่ ก.4** (ต่อ)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
9 0.000 0.000 0.000
6 -26.142 10.540 28.187 0.000 1.510
11 0.000 -17.978 17.978 0.000 0.614
10 26.142 7.438 27.180 0.000 0.742
10 -5.800 17.000 17.962
6 -14.913 1.070 14.951 0.000 1.152
9 -26.142 -6.696 26.986 0.000 0.742
20 8.246 3.646 9.016 0.071 0.157
17 3.949 4.534 6.013 0.011 0.028
21 15.578 9.910 18.463 0.110 0.237
22 7.482 4.536 8.749 0.052 0.106
11 0.000 18.592 18.592
9 -0.000 18.592 18.592 0.000 0.614
12 -11.200 -7.500 13.479
4 -47.269 -7.480 47.858 0.000 5.275
13 0.000 -12.616 12.616 0.000 0.200
14 8.197 2.377 8.535 0.081 0.168
15 19.216 6.922 20.425 0.248 0.489
16 8.656 3.297 9.262 0.073 0.153
13 0.000 12.816 12.816
12 -0.000 12.816 12.816 0.000 0.200
14 -6.200 -1.600 6.403
12 -8.117 -2.209 8.412 0.081 0.168
15 1.917 0.610 2.012 0.008 0.007
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
15 -8.200 -2.500 8.573
12 -18.968 -6.433 20.029 0.248 0.489
14 -1.909 -0.602 2.001 0.008 0.007
18 6.796 1.655 6.994 0.049 0.100
23 5.881 2.879 6.547 0.040 0.081
16 -3.500 -1.800 3.936
12 -8.583 -3.143 9.140 0.073 0.153
17 5.083 1.343 5.257 0.021 0.049
17 -9.000 -5.800 10.707
16 -5.062 -1.294 5.225 0.021 0.049
10 -3.938 -4.506 5.984 0.011 0.028
18 -3.200 -0.900 3.324
15 -6.747 -1.555 6.924 0.049 0.100
19 3.547 0.655 3.607 0.008 0.016
19 -9.500 -3.400 10.090
18 -3.539 -0.639 3.596 0.008 0.016
20 -5.961 -2.761 6.570 0.014 0.028
20 -2.200 -0.700 2.309
19 5.975 2.789 6.594 0.014 0.028
10 -8.175 -3.489 8.889 0.071 0.157
21 -17.500 -11.200 20.777
10 -15.468 -9.674 18.244 0.110 0.237
22 -2.032 -1.526 2.541 0.001 0.001
Ready
NUM

**รูปที่ ก.4** (ต่อ)




**รูปที่ ก.4** (ต่อ)

จากรูปที่ ก.4 ทำการสรุปผลเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0 แสดงได้ดังตารางที่ ก.2

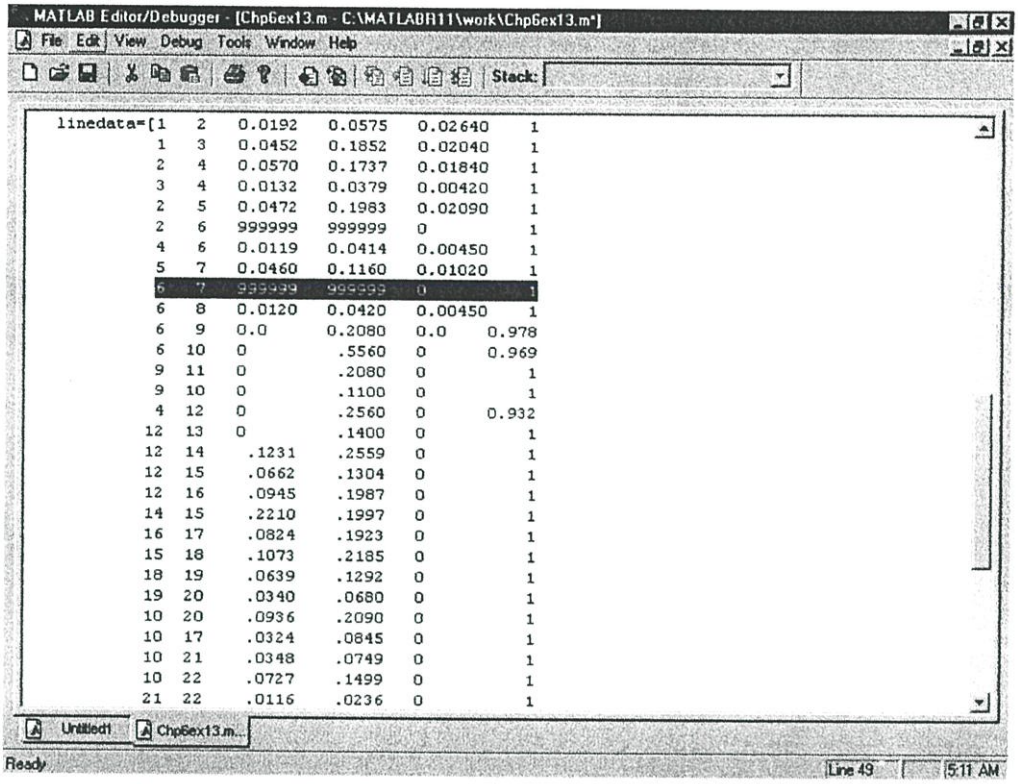
**ตารางที่ ก.2** การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0

กรณี outage L5 (2 -> 6)

| | flow (MW) calculate from vb6.0 | flow (MW) calculate from [8] |
|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | 161.6095 | 161.631 |
| L2 : 1 -> 3 | 102.1258 | 102.067 |
| L3 : 2 -> 4 | 74.62041 | 74.601 |
| L4 : 2 -> 5 | 100.7645 | 100.804 |
| L5 : 2 -> 6 | Outage | Outage |
| L6 : 3 -> 4 | 95.49487 | 95.438 |
| L7 : 4 -> 6 | 111.2324 | 111.084 |
| L8 : 5 -> 7 | 2.169286 | 2.205 |
| L9 : 6 -> 7 | 20.78139 | 20.749 |
| L10 : 6 -> 8 | 29.55811 | 29.45 |
| L11 : 6 -> 28 | 18.18956 | 18.296 |
| L12 : 8 -> 28 | -0.5939729 | -0.667 |
| L13 : 9 -> 10 | 26.20718 | 26.142 |
| L14 : 9 -> 11 | 0.000000223 | 0.000 |
| L15 : 10 -> 17 | 3.97422 | 3.949 |
| L16 : 10 -> 20 | 8.2717 | 8.246 |
| L17 : 10 -> 21 | 15.61202 | 15.578 |
| L18 : 10 -> 22 | 7.504774 | 7.482 |
| L19 : 12 -> 13 | 0.0000026241 | 0.000 |
| L20 : 12 -> 14 | 8.180237 | 8.197 |
| L21 : 12 -> 15 | 19.18745 | 19.216 |
| L22 : 12 -> 16 | 8.628519 | 8.656 |
| L23 : 14 -> 15 | 1.899251 | 1.917 |
| L24 : 15 -> 18 | 6.769948 | 6.796 |
| L25 : 15 -> 23 | 5.864068 | 5.881 |
| L26 : 16 -> 17 | 5.057593 | 5.083 |
| L27 : 18 -> 19 | 3.521952 | 3.547 |
| L28 : 19 -> 20 | -5.985821 | -5.961 |
| L29 : 21 -> 22 | -1.998241 | -2.032 |
| L30 : 22 -> 24 | 5.453972 | 5.398 |
| L31 : 23 -> 24 | 2.62482 | 2.64 |
| L32 : 24 -> 25 | -0.6741549 | -0.713 |
| L33 : 25 -> 26 | 3.545065 | 3.545 |
| L34 : 25 -> 27 | -4.22628 | -4.264 |
| L35 : 27 -> 29 | 6.191241 | 6.191 |
| L36 : 27 -> 30 | 7.093664 | 7.094 |
| L37 : 29 -> 30 | 3.704113 | 3.704 |
| Tr1 : 4 -> 12 | 47.19631 | 47.269 |
| Tr2 : 6 -> 9 | 26.20712 | 26.142 |
| Tr3 : 6 -> 10 | 14.956 | 14.913 |
| Tr4 : 28 ->27 | 17.53058 | 17.569 |
| Total Losses | 20.06194 | 20.298 |
| No.of Overload | 3 | 3 |

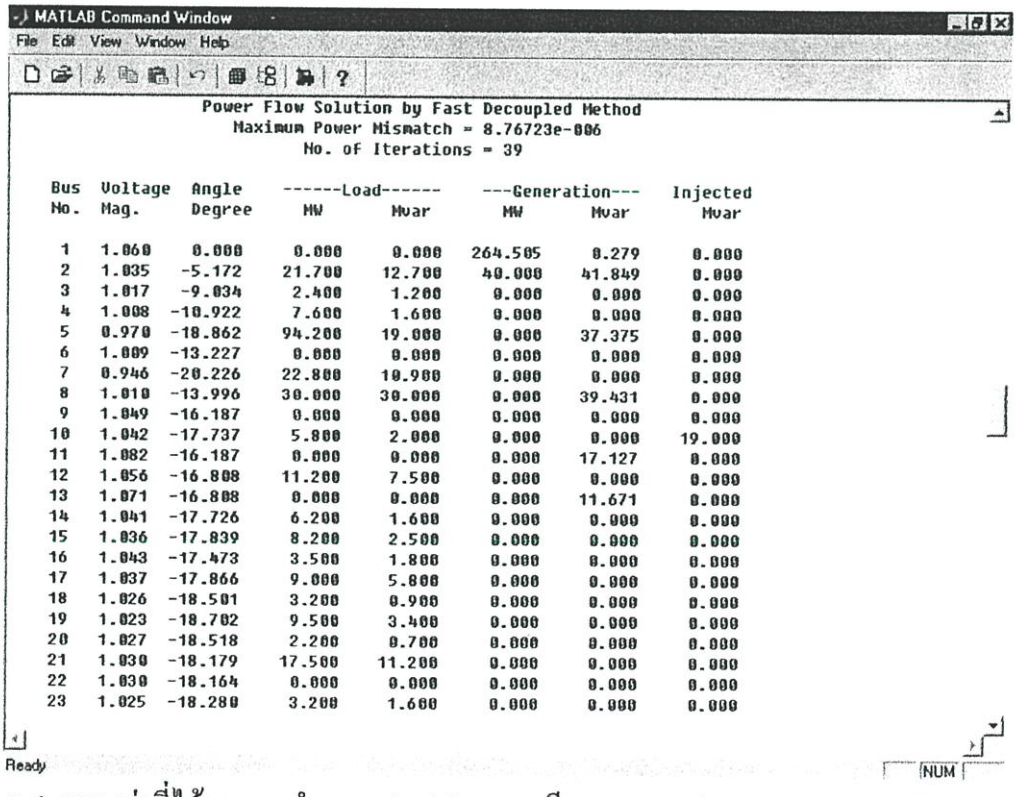
1.2 กรณี outage L5 (2 -> 6) + switch L9 (6 -> 7)

แสดงค่าการคำนวณ load flow ด้วยวิธี the fast decoupled method กับโปรแกรมมาตรฐาน matlab 5.3 [8] กรณี outage L5 (2 -> 6) + switch L9 (6 -> 7) ได้ดังต่อไปนี้

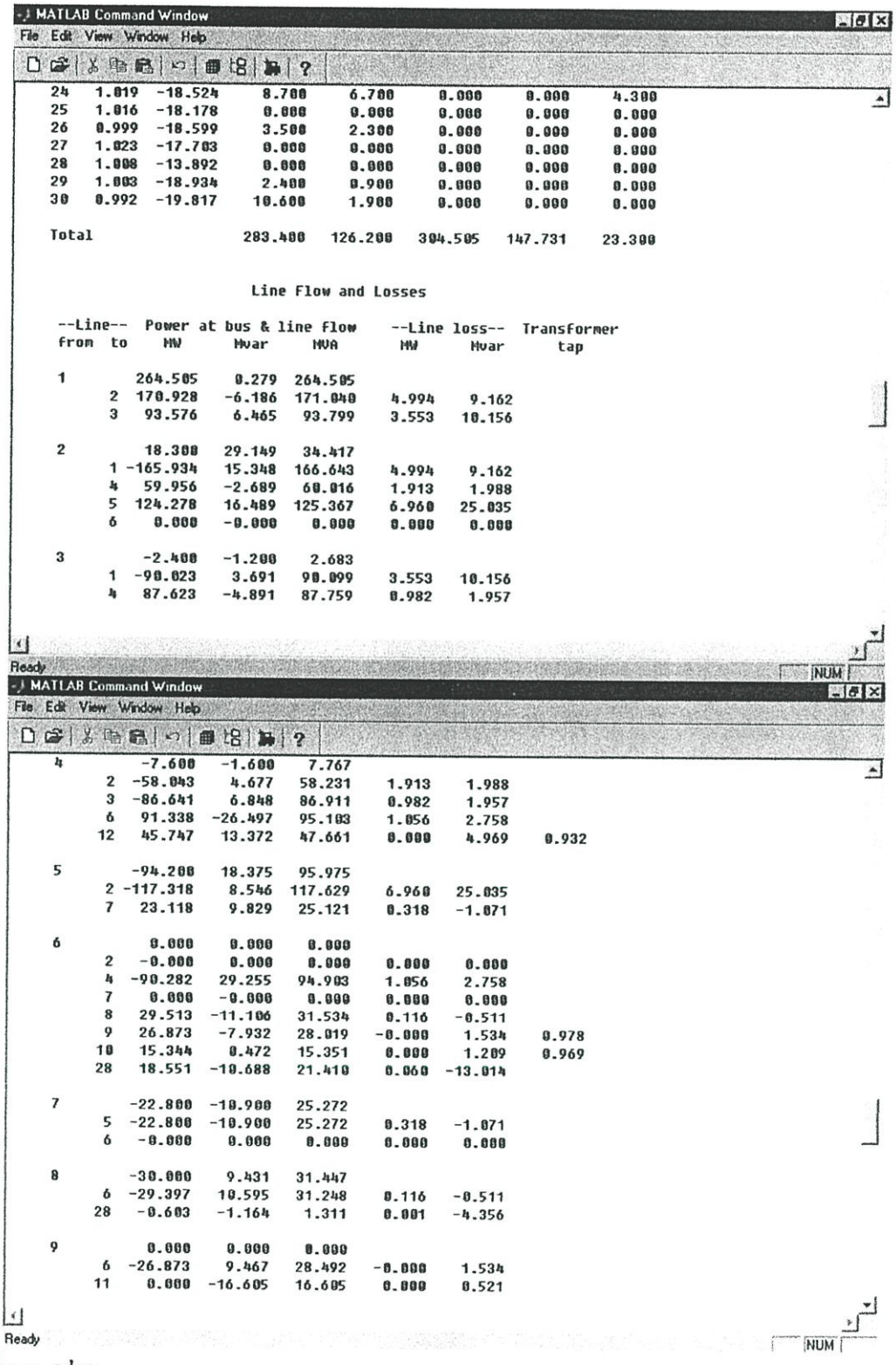



**รูปที่ ก.5** แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus กรณี outage L5 (2 -> 6) + switch L9 (6 -> 7)

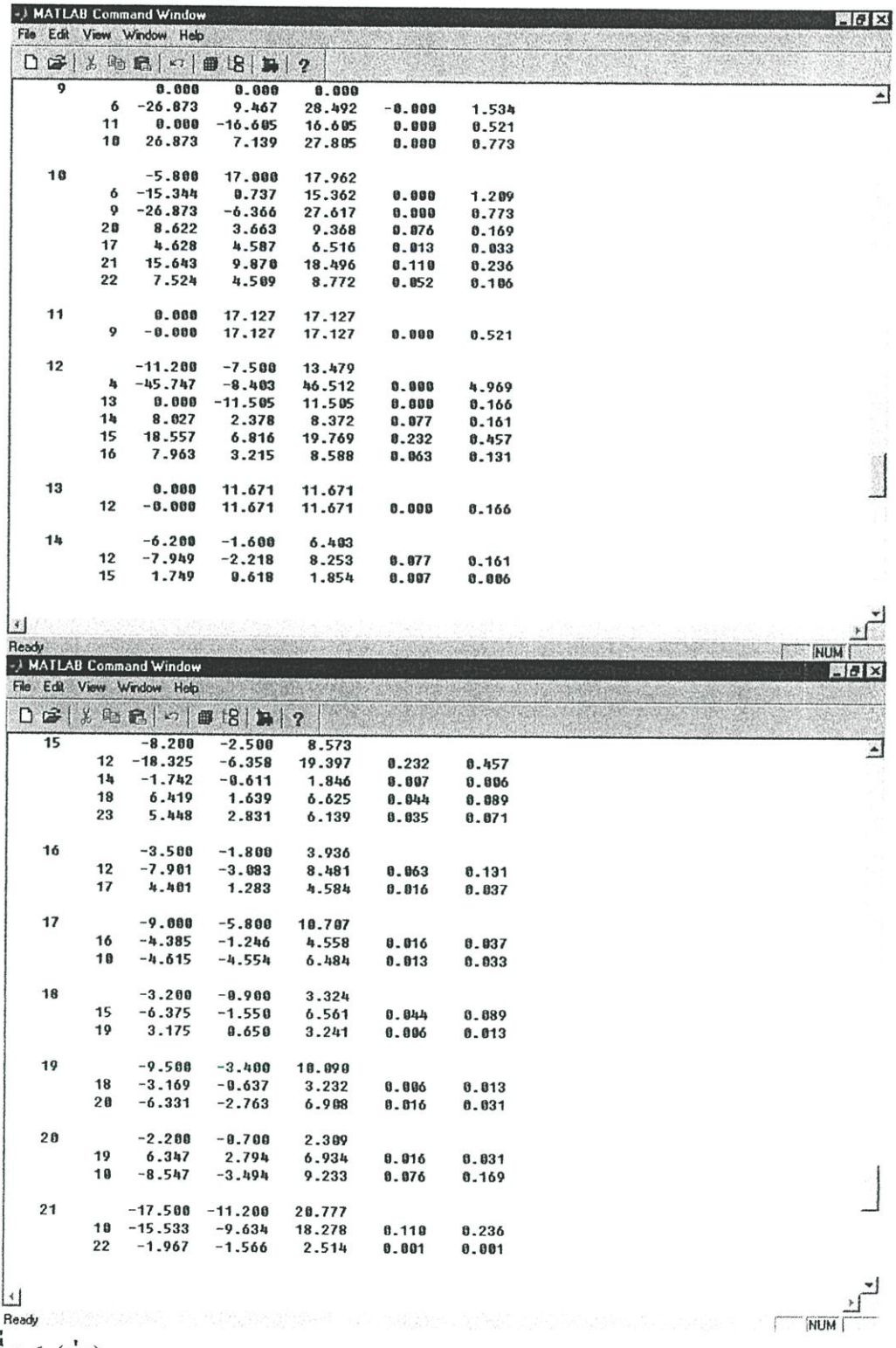
จากรูปที่ ก.5 คำนวณ load flow กรณี outage L5 (2 -> 6) + switch L9 (6 -> 7) แสดงได้ดังต่อไปนี้



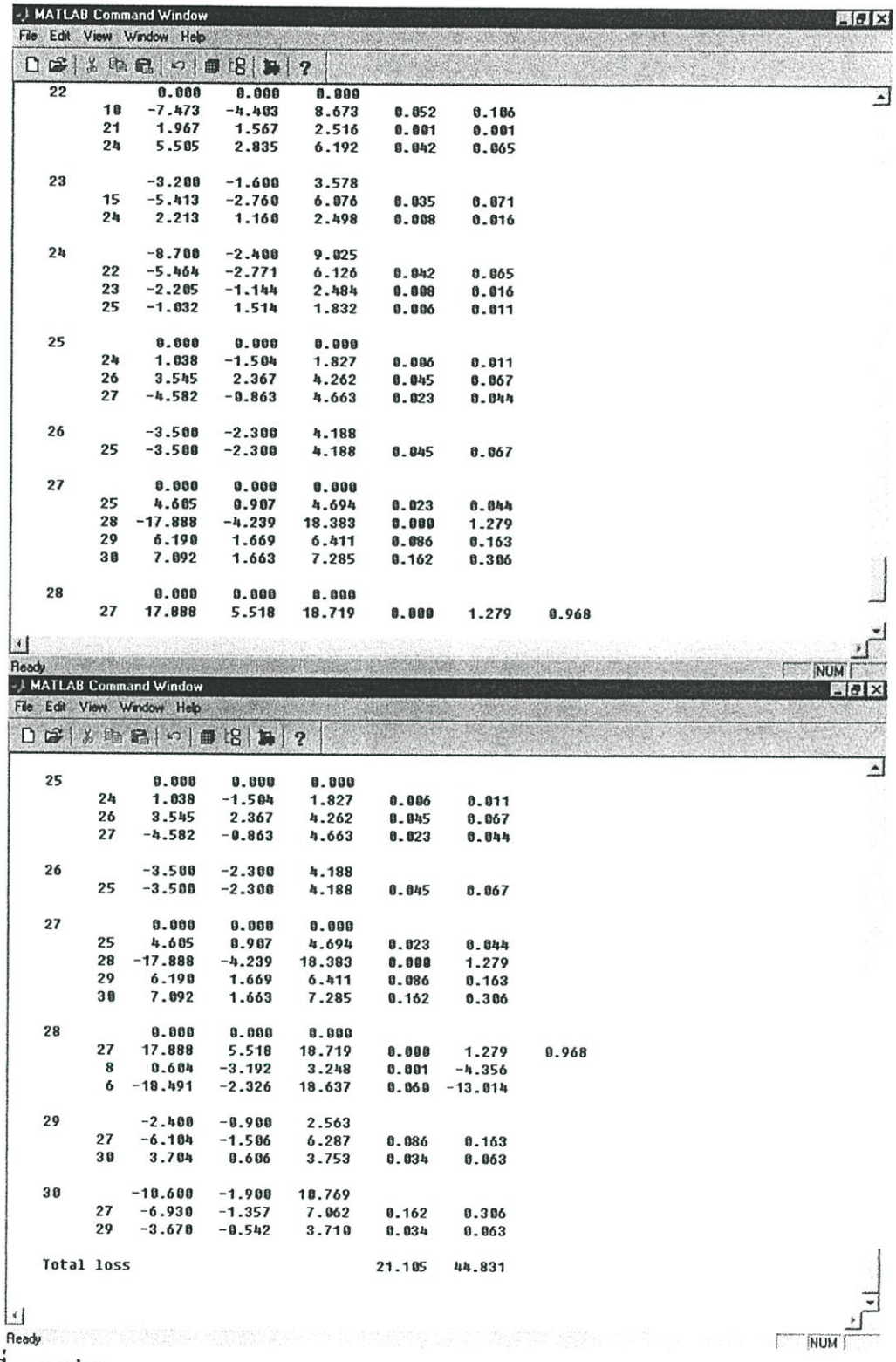

**รูปที่ ก.6** แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow กรณี outage L5 (2 -> 6) + switch L9 (6 -> 7)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
24 1.019 -18.524 8.700 6.700 0.000 0.000 4.300
25 1.016 -18.178 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
26 0.999 -18.599 3.500 2.300 0.000 0.000 0.000
27 1.023 -17.703 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
28 1.008 -13.892 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
29 1.003 -18.934 2.400 0.900 0.000 0.000 0.000
30 0.992 -19.817 10.600 1.900 0.000 0.000 0.000
Total 283.400 126.200 304.505 147.731 23.300
Line Flow and Losses
--Line-- Power at bus & line flow --Line loss-- Transformer
from to MW Mvar MVA MW Mvar tap
1 264.505 0.279 264.505
2 170.928 -6.186 171.040 4.994 9.162
3 93.576 6.465 93.799 3.553 10.156
2 18.300 29.149 34.417
1 -165.934 15.348 166.643 4.994 9.162
4 59.956 -2.689 60.016 1.913 1.988
5 124.278 16.489 125.367 6.960 25.035
6 0.000 -0.000 0.000 0.000 0.000
3 -2.400 -1.200 2.683
1 -90.023 3.691 90.099 3.553 10.156
4 87.623 -4.891 87.759 0.982 1.957
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
4 -7.600 -1.600 7.767
2 -58.043 4.677 58.231 1.913 1.988
3 -86.641 6.848 86.911 0.982 1.957
6 91.338 -26.497 95.103 1.056 2.758
12 45.747 13.372 47.661 0.000 4.969 0.932
5 -94.200 18.375 95.975
2 -117.318 8.546 117.629 6.960 25.035
7 23.118 9.829 25.121 0.318 -1.071
6 0.000 0.000 0.000
2 -0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
4 -90.282 29.255 94.903 1.056 2.758
7 0.000 -0.000 0.000 0.000 0.000
8 29.513 -11.106 31.534 0.116 -0.511
9 26.873 -7.932 28.019 -0.000 1.534 0.978
10 15.344 0.472 15.351 0.000 1.209 0.969
28 18.551 -10.688 21.410 0.060 -13.014
7 -22.800 -10.900 25.272
5 -22.800 -10.900 25.272 0.318 -1.071
6 -0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
8 -30.000 9.431 31.447
6 -29.397 10.595 31.248 0.116 -0.511
28 -0.603 -1.164 1.311 0.001 -4.356
9 0.000 0.000 0.000
6 -26.873 9.467 28.492 -0.000 1.534
11 0.000 -16.605 16.605 0.000 0.521
Ready
NUM

**รูปที่ ก.6** (ต่อ)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
9 0.000 0.000 0.000
6 -26.873 9.467 28.492 -0.000 1.534
11 0.000 -16.605 16.605 0.000 0.521
10 26.873 7.139 27.805 0.000 0.773
10 -5.800 17.000 17.962
6 -15.344 0.737 15.362 0.000 1.209
9 -26.873 -6.366 27.617 0.000 0.773
20 8.622 3.663 9.368 0.076 0.169
17 4.628 4.587 6.516 0.013 0.033
21 15.643 9.870 18.496 0.110 0.236
22 7.524 4.509 8.772 0.052 0.106
11 0.000 17.127 17.127
9 -0.000 17.127 17.127 0.000 0.521
12 -11.200 -7.500 13.479
4 -45.747 -8.403 46.512 0.000 4.969
13 0.000 -11.505 11.505 0.000 0.166
14 8.027 2.378 8.372 0.077 0.161
15 18.557 6.816 19.769 0.232 0.457
16 7.963 3.215 8.588 0.063 0.131
13 0.000 11.671 11.671
12 -0.000 11.671 11.671 0.000 0.166
14 -6.200 -1.600 6.403
12 -7.949 -2.218 8.253 0.077 0.161
15 1.749 0.618 1.854 0.007 0.006
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
15 -8.200 -2.500 8.573
12 -18.325 -6.358 19.397 0.232 0.457
14 -1.742 -0.611 1.846 0.007 0.006
18 6.419 1.639 6.625 0.044 0.089
23 5.448 2.831 6.139 0.035 0.071
16 -3.500 -1.800 3.936
12 -7.901 -3.083 8.481 0.063 0.131
17 4.401 1.283 4.584 0.016 0.037
17 -9.000 -5.800 10.707
16 -4.385 -1.246 4.558 0.016 0.037
10 -4.615 -4.554 6.484 0.013 0.033
18 -3.200 -0.900 3.324
15 -6.375 -1.550 6.561 0.044 0.089
19 3.175 0.650 3.241 0.006 0.013
19 -9.500 -3.400 10.090
18 -3.169 -0.637 3.232 0.006 0.013
20 -6.331 -2.763 6.908 0.016 0.031
20 -2.200 -0.700 2.309
19 6.347 2.794 6.934 0.016 0.031
10 -8.547 -3.494 9.233 0.076 0.169
21 -17.500 -11.200 20.777
10 -15.533 -9.634 18.278 0.110 0.236
22 -1.967 -1.566 2.514 0.001 0.001
Ready
NUM

**รูปที่ ก.6** (ต่อ)




**รูปที่ ก.6** (ต่อ)

จากรูปที่ ก.6 ทำการสรุปผลเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0 แสดงได้ดังตารางที่ ก.3

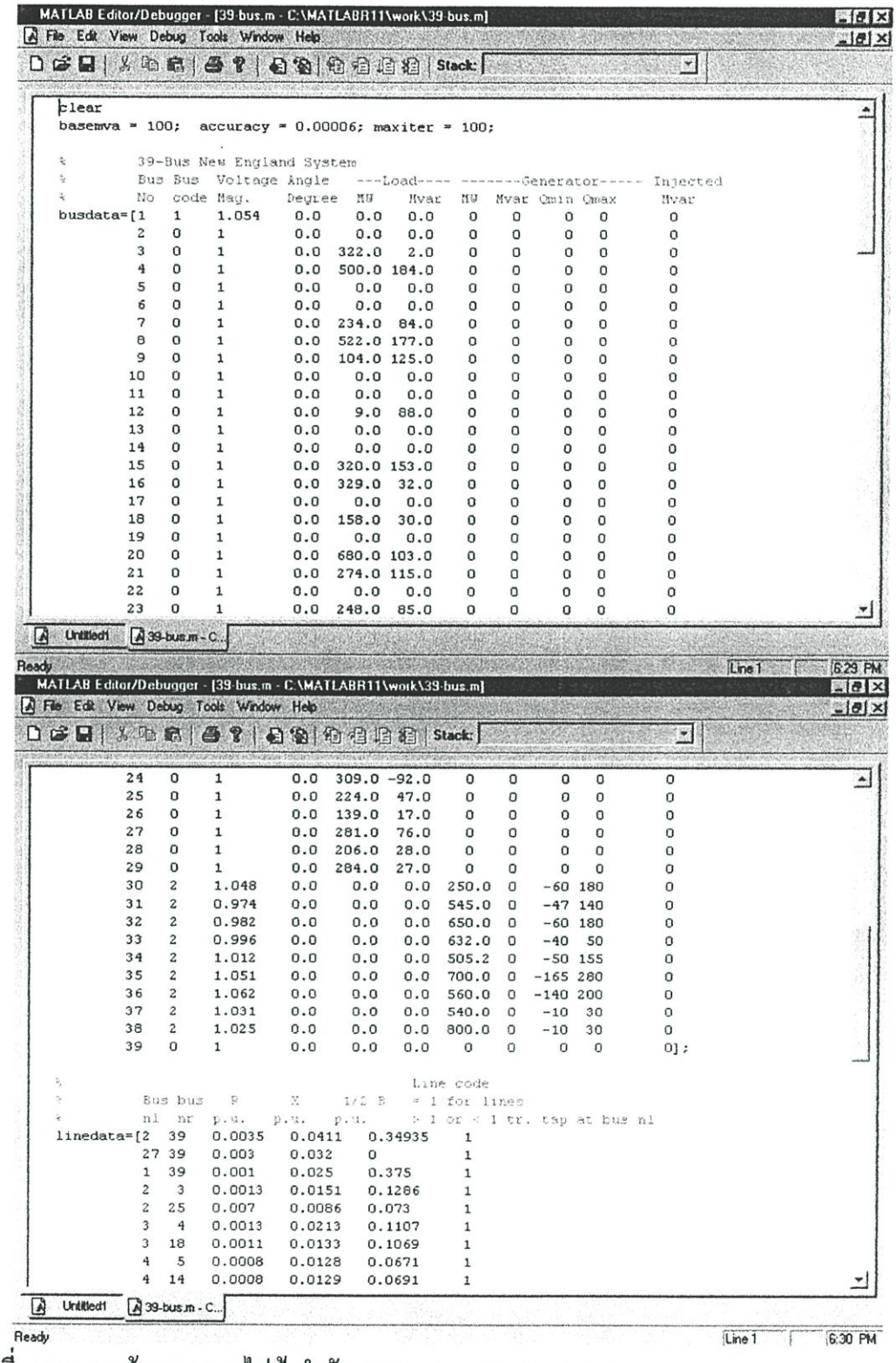
**ตารางที่ ก.3** การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0

กรณี outage L5 (2 -> 6) + switch L9 (6 -> 7)

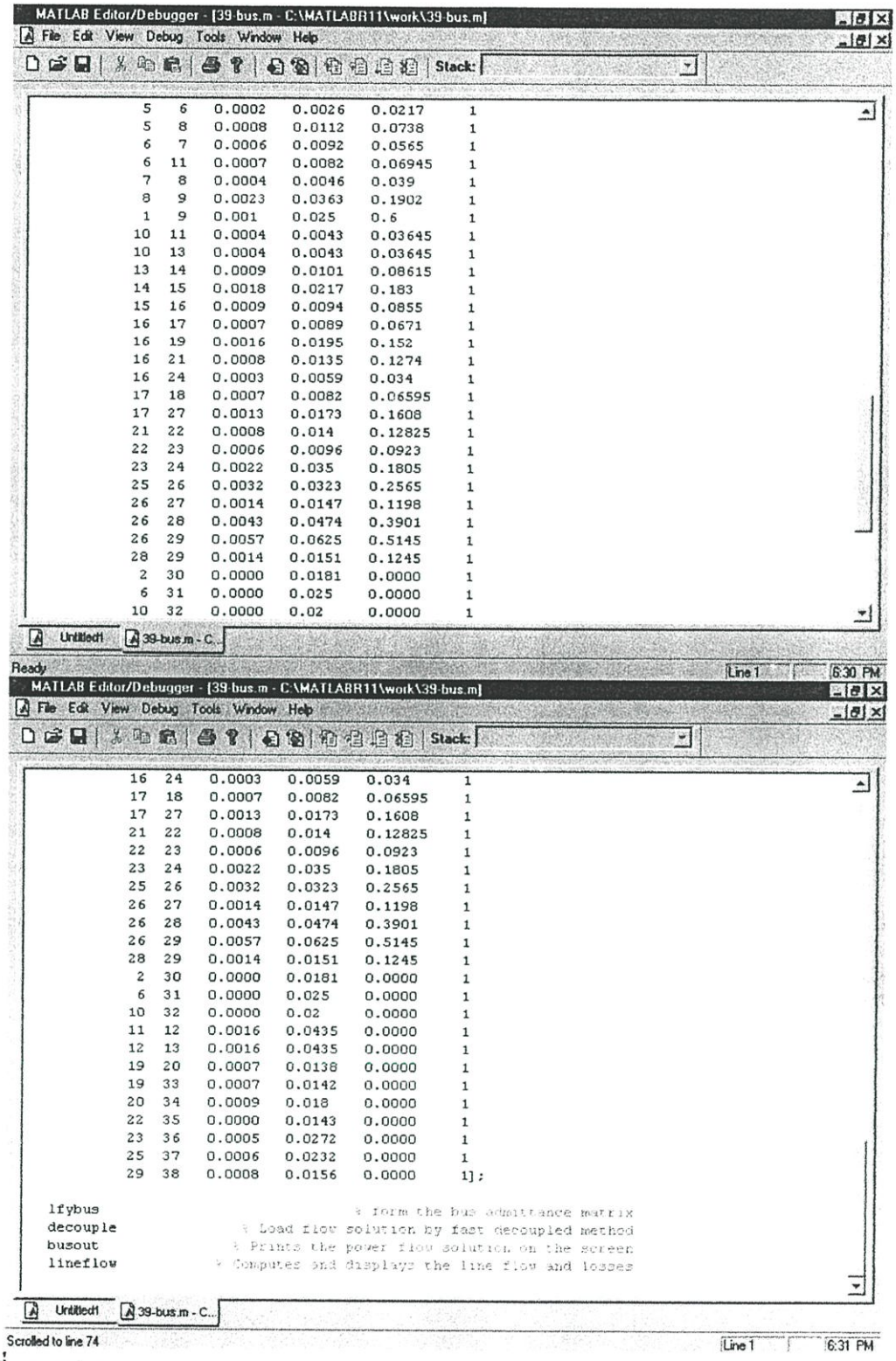
| | flow (MW) calculate from vb6.0 | flow (MW) calculate from [8] |
|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | 171.0515 | 170.928 |
| L2 : 1 -> 3 | 93.2272 | 93.576 |
| L3 : 2 -> 4 | 60.62229 | 59.956 |
| L4 : 2 -> 5 | 123.5334 | 124.278 |
| L5 : 2 -> 6 | Outage | Outage |
| L6 : 3 -> 4 | 87.2043 | 87.623 |
| L7 : 4 -> 6 | 91.30496 | 91.338 |
| L8 : 5 -> 7 | 23.06231 | 23.118 |
| L9 : 6 -> 7 | Switch | Switch |
| L10 : 6 -> 8 | 29.57106 | 29.513 |
| L11 : 6 -> 28 | 18.44024 | 18.551 |
| L12 : 8 -> 28 | -0.5691099 | -0.603 |
| L13 : 9 -> 10 | 26.97015 | 26.873 |
| L14 : 9 -> 11 | 0.000000223 | 0.000 |
| L15 : 10 -> 17 | 4.664048 | 4.628 |
| L16 : 10 -> 20 | 8.650366 | 8.622 |
| L17 : 10 -> 21 | 15.69676 | 15.643 |
| L18 : 10 -> 22 | 7.811883 | 7.524 |
| L19 : 12 -> 13 | 0.0000111875 | 0.000 |
| L20 : 12 -> 14 | 7.875375 | 8.027 |
| L21 : 12 -> 15 | 18.12044 | 18.557 |
| L22 : 12 -> 16 | 7.444864 | 7.963 |
| L23 : 14 -> 15 | 1.59365 | 1.749 |
| L24 : 15 -> 18 | 6.056365 | 6.419 |
| L25 : 15 -> 23 | 5.215755 | 5.448 |
| L26 : 16 -> 17 | 3.889923 | 4.401 |
| L27 : 18 -> 19 | 2.815414 | 3.175 |
| L28 : 19 -> 20 | -6.690086 | -6.331 |
| L29 : 21 -> 22 | -1.557201 | -1.967 |
| L30 : 22 -> 24 | 6.189208 | 5.505 |
| L31 : 23 -> 24 | 1.980127 | 2.213 |
| L32 : 24 -> 25 | -0.6121299 | -1.032 |
| L33 : 25 -> 26 | 3.549896 | 3.545 |
| L34 : 25 -> 27 | -4.184014 | -4.582 |
| L35 : 27 -> 29 | 6.205823 | 6.19 |
| L36 : 27 -> 30 | 7.092838 | 7.092 |
| L37 : 29 -> 30 | 3.703908 | 3.704 |
| Tr1 : 4 -> 12 | 45.68345 | 45.747 |
| Tr2 : 6 -> 9 | 26.97012 | 26.873 |
| Tr3 : 6 -> 10 | 15.40165 | 15.344 |
| Tr4 : 28 ->27 | 17.80709 | 17.888 |
| Total Losses | 19.93592 | 21.105 |
| No.of Overload | 0 | 0 |

2. ระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System [12]

แสดงค่าการคำนวณ load flow ด้วยวิธี the fast decoupled method กับโปรแกรมมาตรฐาน matlab 5.3 [8] กรณี base case ได้ดังต่อไปนี้

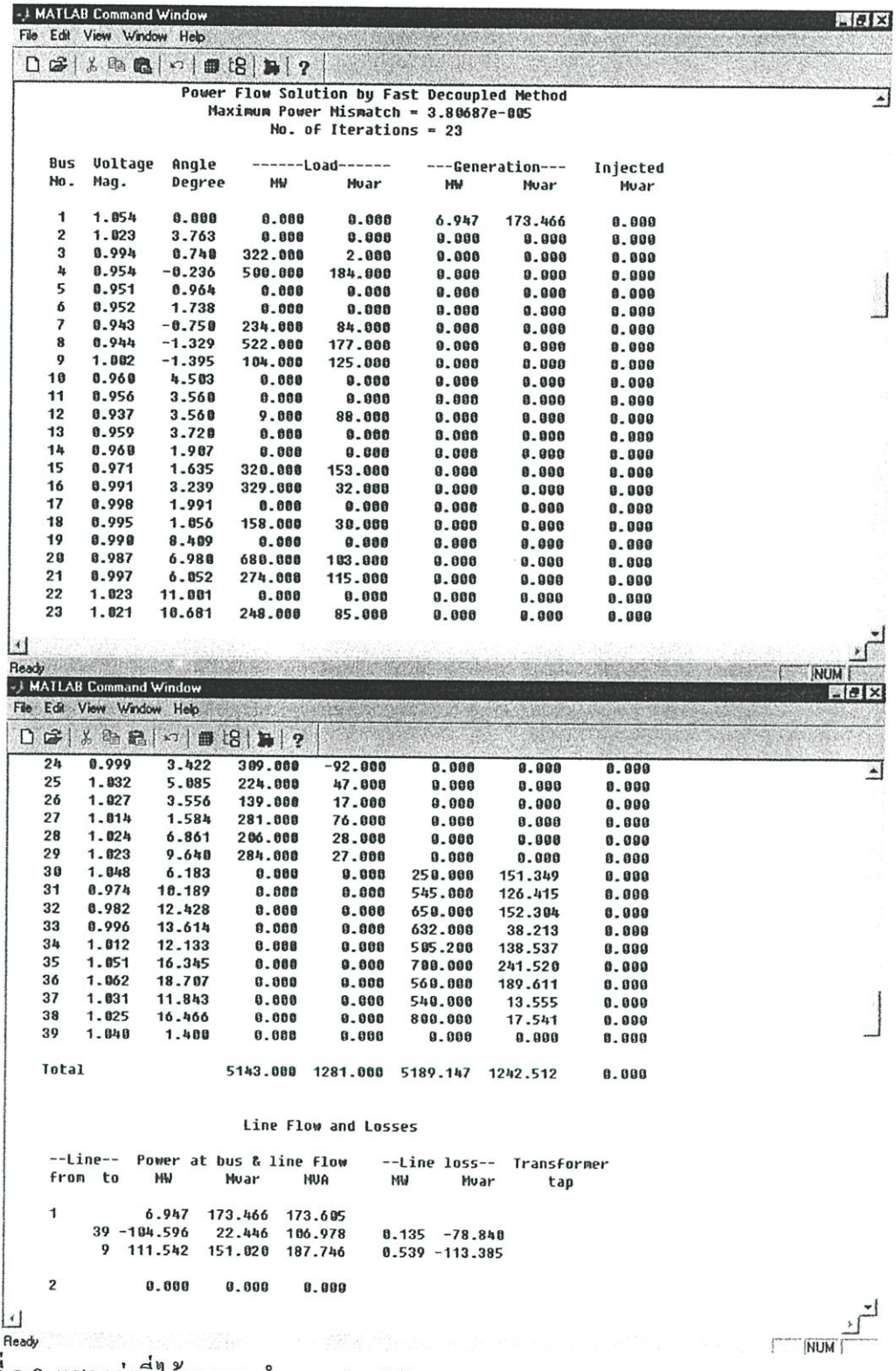



**รูปที่ ก.7** แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System

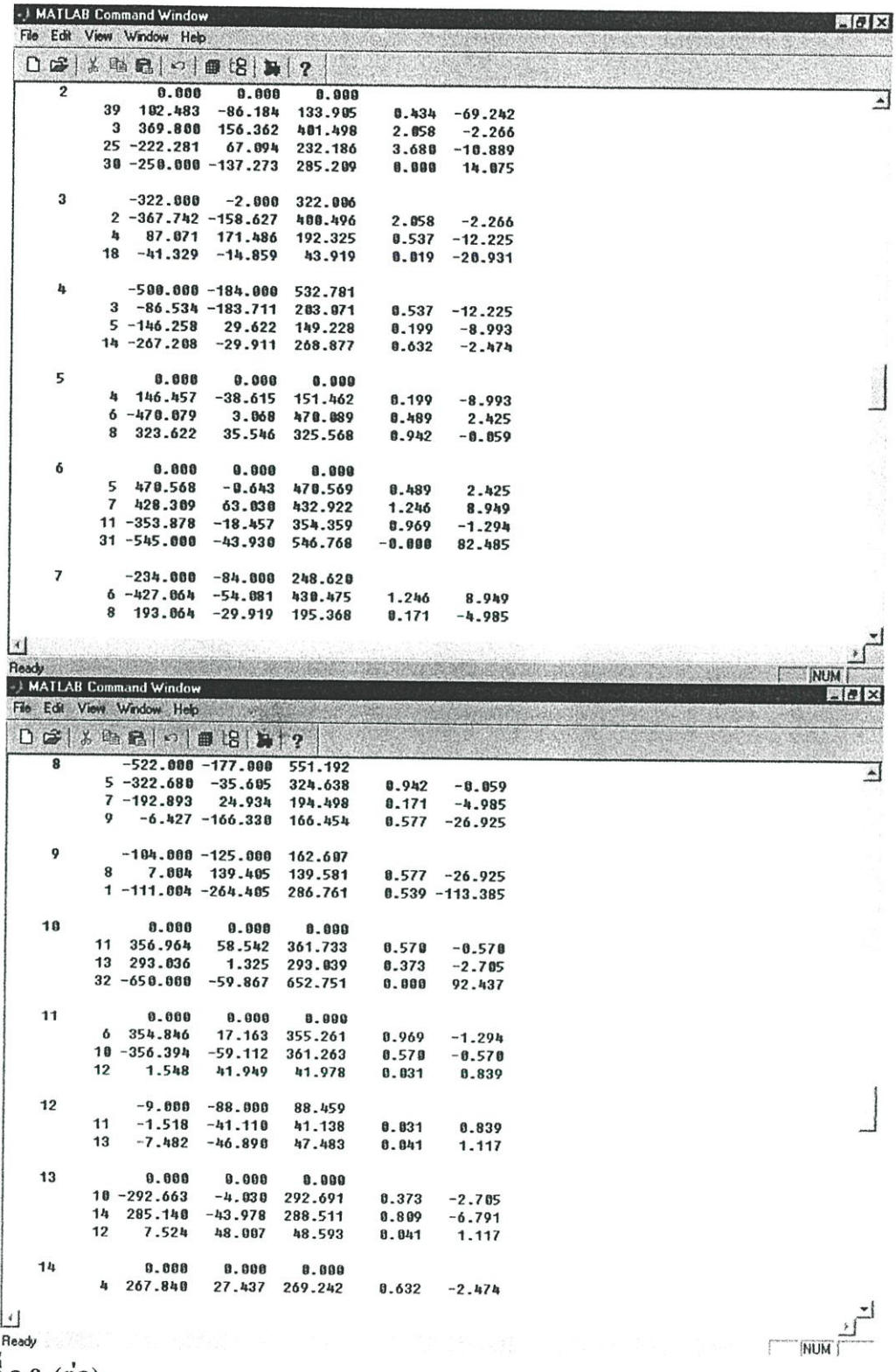



**รูปที่ ก.7** (ต่อ)

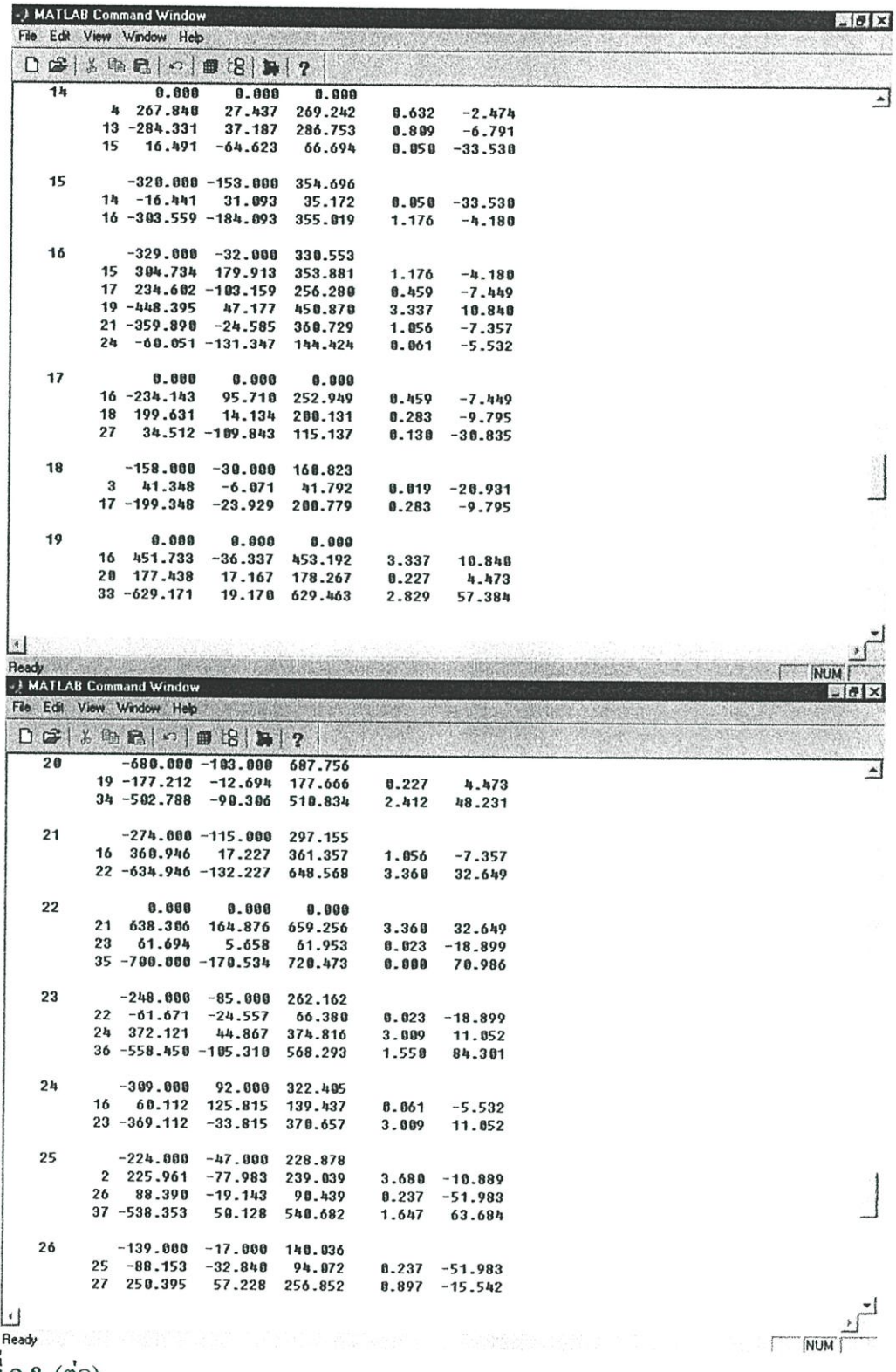
จากรูปที่ ก.7 คำนวณ load flow แสดงได้ดังต่อไปนี้



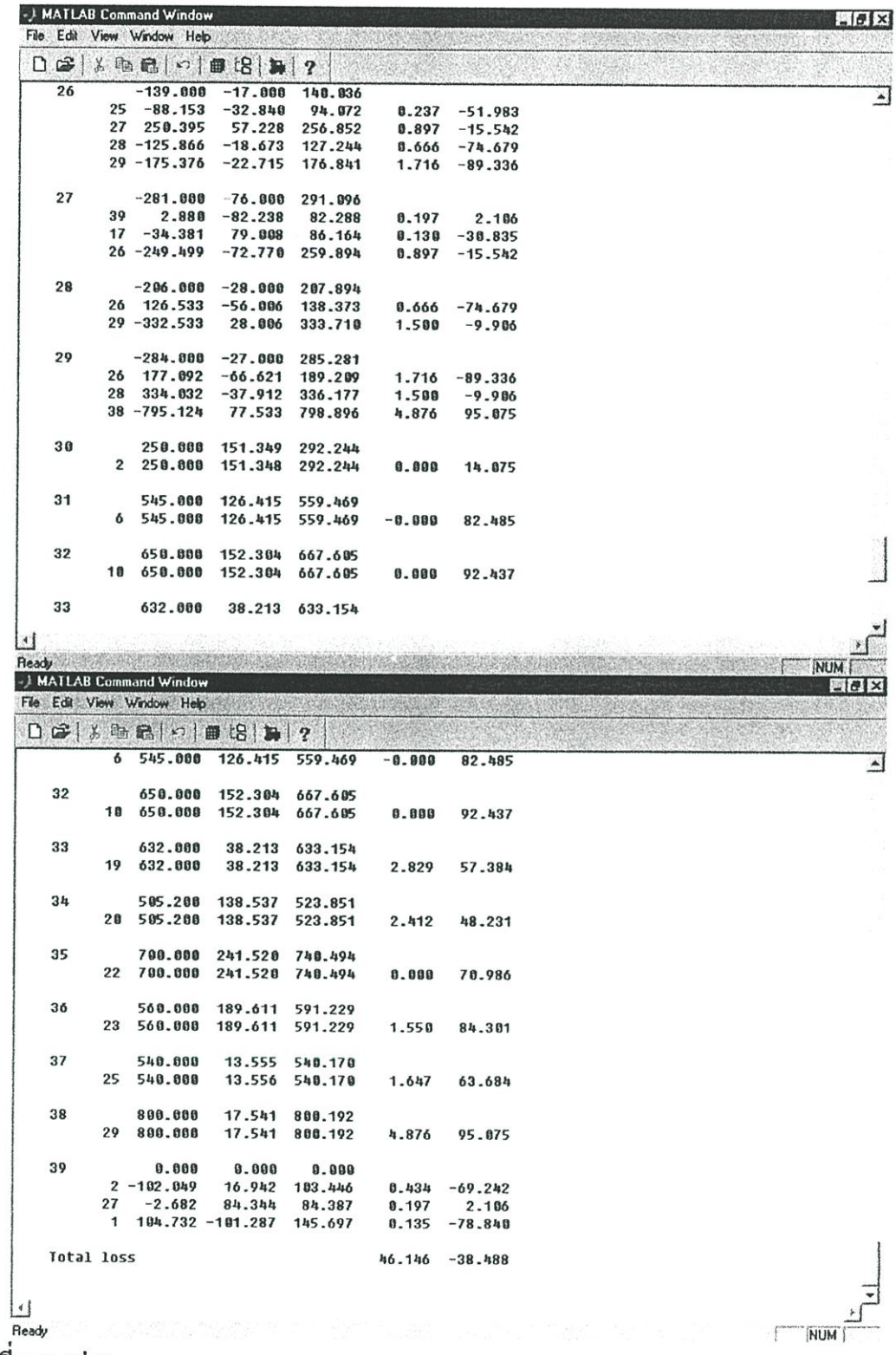

**รูปที่ ก.8** แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
2 0.000 0.000 0.000
39 102.483 -86.184 133.905 0.434 -69.242
3 369.800 156.362 401.498 2.058 -2.266
25 -222.281 67.094 232.186 3.680 -10.889
30 -250.000 -137.273 285.209 0.000 14.075
3 -322.000 -2.000 322.006
2 -367.742 -158.627 400.496 2.058 -2.266
4 87.071 171.486 192.325 0.537 -12.225
18 -41.329 -14.859 43.919 0.019 -20.931
4 -500.000 -184.000 532.781
3 -86.534 -183.711 203.071 0.537 -12.225
5 -146.258 29.622 149.228 0.199 -8.993
14 -267.208 -29.911 268.877 0.632 -2.474
5 0.000 0.000 0.000
4 146.457 -38.615 151.462 0.199 -8.993
6 -470.079 3.068 470.089 0.489 2.425
8 323.622 35.546 325.568 0.942 -0.059
6 0.000 0.000 0.000
5 470.568 -0.643 470.569 0.489 2.425
7 428.309 63.030 432.922 1.246 8.949
11 -353.878 -18.457 354.359 0.969 -1.294
31 -545.000 -43.930 546.768 -0.000 82.485
7 -234.000 -84.000 248.620
6 -427.064 -54.081 430.475 1.246 8.949
8 193.064 -29.919 195.368 0.171 -4.985
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
8 -522.000 -177.000 551.192
5 -322.680 -35.605 324.638 0.942 -0.059
7 -192.893 24.934 194.498 0.171 -4.985
9 -6.427 -166.330 166.454 0.577 -26.925
9 -104.000 -125.000 162.607
8 7.004 139.405 139.581 0.577 -26.925
1 -111.004 -264.405 286.761 0.539 -113.385
10 0.000 0.000 0.000
11 356.964 58.542 361.733 0.570 -0.570
13 293.036 1.325 293.039 0.373 -2.705
32 -650.000 -59.867 652.751 0.000 92.437
11 0.000 0.000 0.000
6 354.846 17.163 355.261 0.969 -1.294
10 -356.394 -59.112 361.263 0.570 -0.570
12 1.548 41.949 41.978 0.031 0.839
12 -9.000 -88.000 88.459
11 -1.518 -41.110 41.138 0.031 0.839
13 -7.482 -46.890 47.483 0.041 1.117
13 0.000 0.000 0.000
10 -292.663 -4.030 292.691 0.373 -2.705
14 285.140 -43.978 288.511 0.809 -6.791
12 7.524 48.007 48.593 0.041 1.117
14 0.000 0.000 0.000
4 267.840 27.437 269.242 0.632 -2.474
Ready
NUM

**รูปที่ ก.8** (ต่อ)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
14 0.000 0.000 0.000
4 267.848 27.437 269.242 0.632 -2.474
13 -284.331 37.187 286.753 0.809 -6.791
15 16.491 -64.623 66.694 0.050 -33.530
15 -320.000 -153.000 354.696
14 -16.441 31.093 35.172 0.050 -33.530
16 -303.559 -184.093 355.019 1.176 -4.180
16 -329.000 -32.000 330.553
15 304.734 179.913 353.881 1.176 -4.180
17 234.602 -103.159 256.280 0.459 -7.449
19 -448.395 47.177 450.870 3.337 10.848
21 -359.890 -24.585 360.729 1.056 -7.357
24 -60.051 -131.347 144.424 0.061 -5.532
17 0.000 0.000 0.000
16 -234.143 95.710 252.949 0.459 -7.449
18 199.631 14.134 200.131 0.283 -9.795
27 34.512 -109.843 115.137 0.130 -30.835
18 -158.000 -30.000 160.823
3 41.348 -6.071 41.792 0.019 -20.931
17 -199.348 -23.929 200.779 0.283 -9.795
19 0.000 0.000 0.000
16 451.733 -36.337 453.192 3.337 10.848
20 177.438 17.167 178.267 0.227 4.473
33 -629.171 19.170 629.463 2.829 57.384
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
20 -680.000 -103.000 687.756
19 -177.212 -12.694 177.666 0.227 4.473
34 -502.788 -90.306 510.834 2.412 48.231
21 -274.000 -115.000 297.155
16 360.946 17.227 361.357 1.056 -7.357
22 -634.946 -132.227 648.568 3.360 32.649
22 0.000 0.000 0.000
21 638.386 164.876 659.256 3.360 32.649
23 61.694 5.658 61.953 0.023 -18.899
35 -700.000 -170.534 720.473 0.000 70.986
23 -248.000 -85.000 262.162
22 -61.671 -24.557 66.380 0.023 -18.899
24 372.121 44.867 374.816 3.009 11.052
36 -558.450 -105.310 568.293 1.550 84.301
24 -309.000 92.000 322.405
16 60.112 125.815 139.437 0.061 -5.532
23 -369.112 -33.815 370.657 3.009 11.052
25 -224.000 -47.000 228.878
2 225.961 -77.983 239.039 3.680 -10.889
26 88.390 -19.143 90.439 0.237 -51.983
37 -538.353 50.128 540.682 1.647 63.684
26 -139.000 -17.000 140.036
25 -88.153 -32.840 94.072 0.237 -51.983
27 250.395 57.228 256.852 0.897 -15.542
Ready
NUM

**รูปที่ ก.8** (ต่อ)




**รูปที่ ก.8** (ต่อ)

จากรูปที่ ก.8 ทำการสรุปผลเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0 แสดงได้ดังตารางที่ ก.4

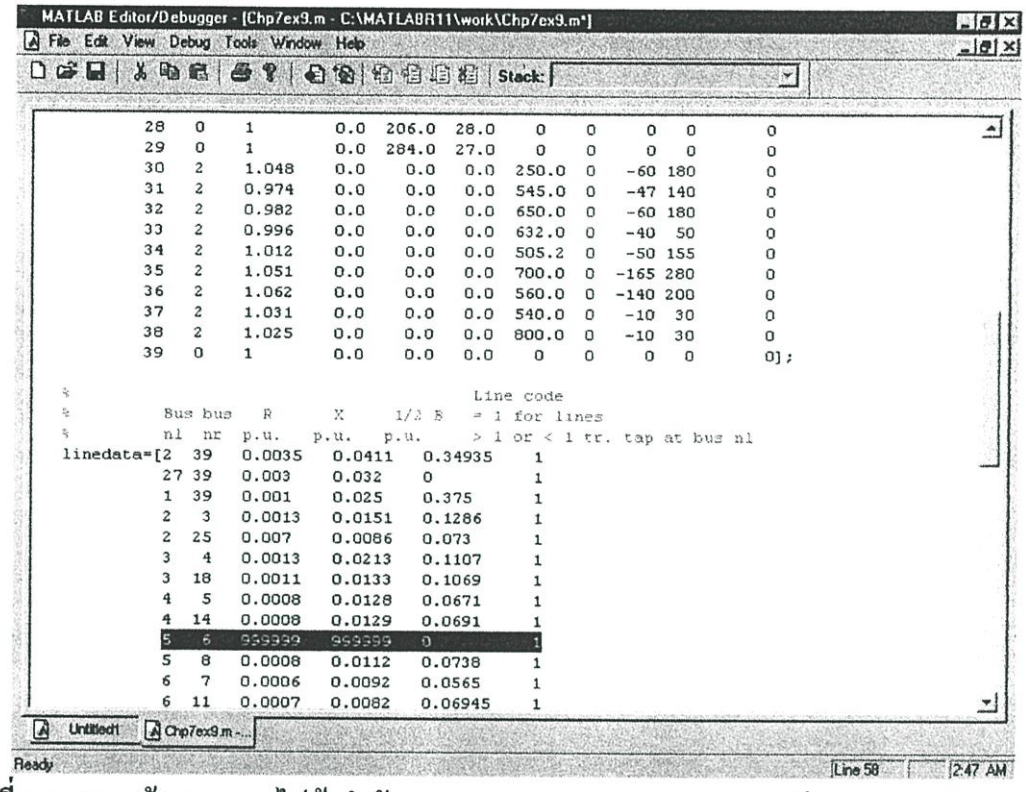
**ตารางที่ ก.4** การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0

กรณี base case

| | flow (MW) calculate from vb6.0 | flow (MW) calculate from [8] |
|---|---|---|
| L1 : 2 -> 39 | 102.489 | 102.483 |
| L2 : 27 -> 39 | 2.92 | 2.88 |
| L3 : 1 -> 39 | -104.591 | -104.596 |
| L4 : 2 -> 3 | 369.87 | 369.8 |
| L5 : 2 -> 25 | -222.29 | -222.281 |
| L6 : 3 -> 4 | 87.077 | 87.071 |
| L7 : 3 -> 18 | -41.34 | -41.329 |
| L8 : 4 -> 5 | -146.264 | -146.258 |
| L9 : 4 -> 14 | -267.225 | -267.208 |
| L10 : 5 -> 6 | -470.081 | -470.079 |
| L11 : 5 -> 8 | 323.627 | 323.622 |
| L12 : 6 -> 7 | 428.322 | 428.309 |
| L13 : 6 -> 11 | -353.882 | -353.878 |
| L14 : 7 -> 8 | 193.071 | 193.064 |
| L15 : 8 -> 9 | -6.434 | -6.427 |
| L16 : 1 -> 9 | 111.547 | 111.542 |
| L17 : 10 -> 11 | 356.97 | 356.964 |
| L18 : 10 -> 13 | 293.045 | 293.036 |
| L19 : 13 -> 14 | 285.19 | 285.14 |
| L20 : 14 -> 15 | 16.512 | 16.491 |
| L21 : 15 -> 16 | -303.5612 | -303.559 |
| L22 : 16 -> 17 | 234.614 | 234.602 |
| L23 : 16 -> 19 | -448.8785 | -448.395 |
| L24 : 16 -> 21 | -360.9236 | -359.89 |
| L25 : 16 -> 24 | -60.26601 | -60.051 |
| L26 : 17 -> 18 | 199.637 | 199.631 |
| L27 : 17 -> 27 | 34.5132 | 34.512 |
| L28 : 21 -> 22 | -636.4455 | -634.946 |
| L29 : 22 -> 23 | 61.9535 | 61.694 |
| L30 : 23 -> 24 | 373.0084 | 372.121 |
| L31 : 25 -> 26 | 90.15945 | 88.39 |
| L32 : 26 -> 27 | 253.4437 | 250.395 |
| L33 : 26 -> 28 | -126.4512 | -125.866 |
| L34 : 26 -> 29 | -175.823 | -175.376 |
| L35 : 28 -> 29 | -332.9576 | -332.533 |
| Tr1 : 2 -> 30 | -250.9227 | -250.000 |
| Tr2 : 6 -> 31 | -545.4158 | -545.000 |
| Tr3 : 10 -> 32 | -650.3744 | -650.000 |
| Tr4 : 11 -> 12 | 1.55 | 1.548 |
| Tr5 : 12 -> 13 | -7.485 | -7.482 |
| Tr6 : 19 -> 20 | 177.607 | 177.438 |
| Tr7 : 19 -> 33 | -629.3099 | -629.171 |
| Tr8 : 20 -> 34 | -502.9094 | -502.788 |
| Tr9 : 22 -> 35 | -700.7927 | -700.000 |
| Tr10 : 23 -> 36 | -558.9109 | -558.45 |
| Tr11 : 25 -> 37 | -539.5655 | -538.353 |
| Tr12 : 29 -> 38 | -795.6695 | -795.124 |
| Total Losses | 45.88752 | 46.146 |
| No.of Overload | 0 | 0 |

2.1 กรณี outage L10 (5 -> 6)

แสดงค่าการคำนวณ load flow ด้วยวิธี the fast decoupled method กับโปรแกรมมาตรฐาน matlab 5.3 [8] กรณี outage L10 (5 -> 6) ได้ดังต่อไปนี้



MATLAB Editor/Debugger - [Chp7ex9.m - C:\MATLABR11\work\Chp7ex9.m*]

File Edit View Debug Tools Window Help

Stack:

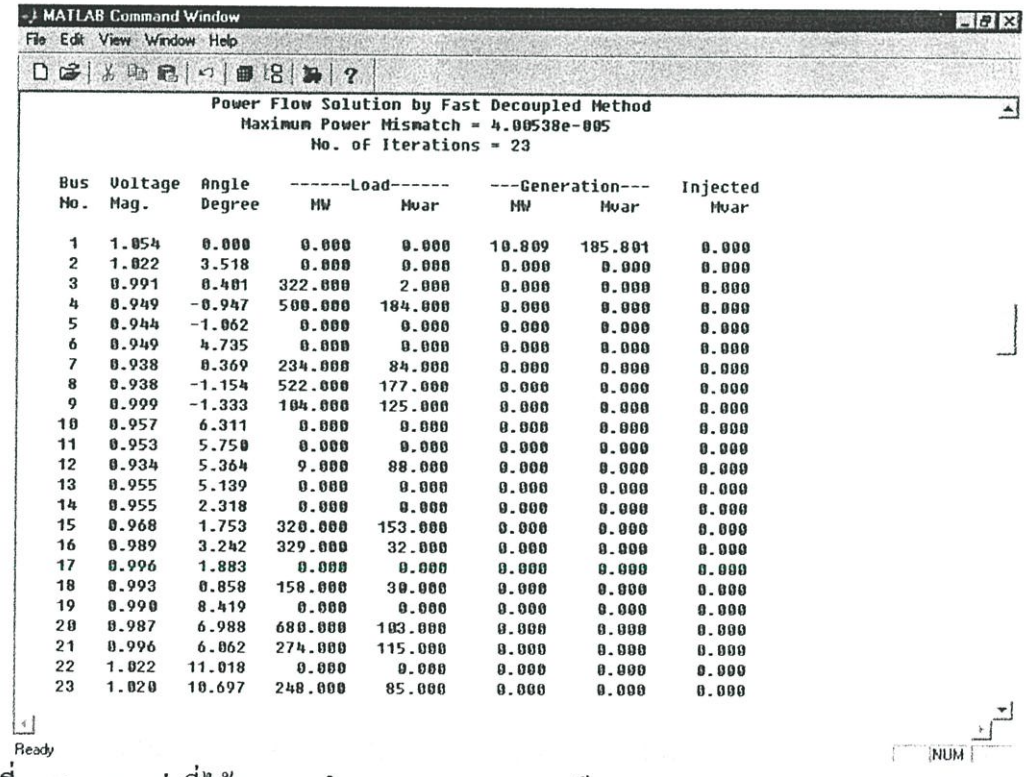
```
        28   0   1       0.0   206.0   28.0     0    0     0   0       0
        29   0   1       0.0   284.0   27.0     0    0     0   0       0
        30   2   1.048   0.0     0.0    0.0   250.0  0   -60 180       0
        31   2   0.974   0.0     0.0    0.0   545.0  0   -47 140       0
        32   2   0.982   0.0     0.0    0.0   650.0  0   -60 180       0
        33   2   0.996   0.0     0.0    0.0   632.0  0   -40  50       0
        34   2   1.012   0.0     0.0    0.0   505.2  0   -50 155       0
        35   2   1.051   0.0     0.0    0.0   700.0  0  -165 280       0
        36   2   1.062   0.0     0.0    0.0   560.0  0  -140 200       0
        37   2   1.031   0.0     0.0    0.0   540.0  0   -10  30       0
        38   2   1.025   0.0     0.0    0.0   800.0  0   -10  30       0
        39   0   1       0.0     0.0    0.0     0    0     0   0       0];

%                                                  Line code
%        Bus bus    R       X      1/2 B    = 1 for lines
%        nl  nr   p.u.    p.u.     p.u.      > 1 or < 1 tr. tap at bus nl
linedata=[2  39   0.0035   0.0411   0.34935    1
         27 39   0.003    0.032    0          1
         1  39   0.001    0.025    0.375      1
         2   3   0.0013   0.0151   0.1286     1
         2  25   0.007    0.0086   0.073      1
         3   4   0.0013   0.0213   0.1107     1
         3  18   0.0011   0.0133   0.1069     1
         4   5   0.0008   0.0128   0.0671     1
         4  14   0.0008   0.0129   0.0691     1
         5   6   999999   999999   0          1
         5   8   0.0008   0.0112   0.0738     1
         6   7   0.0006   0.0092   0.0565     1
         6  11   0.0007   0.0082   0.06945    1
```

Untitled1 | Chp7ex9.m

Ready | Line 58 | 2:47 AM

**รูปที่ ก.9** แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System กรณี outage L10 (5 -> 6)

จากรูปที่ ก.9 คำนวณ load flow กรณี outage L10 (5 -> 6) แสดงได้ดังต่อไปนี้



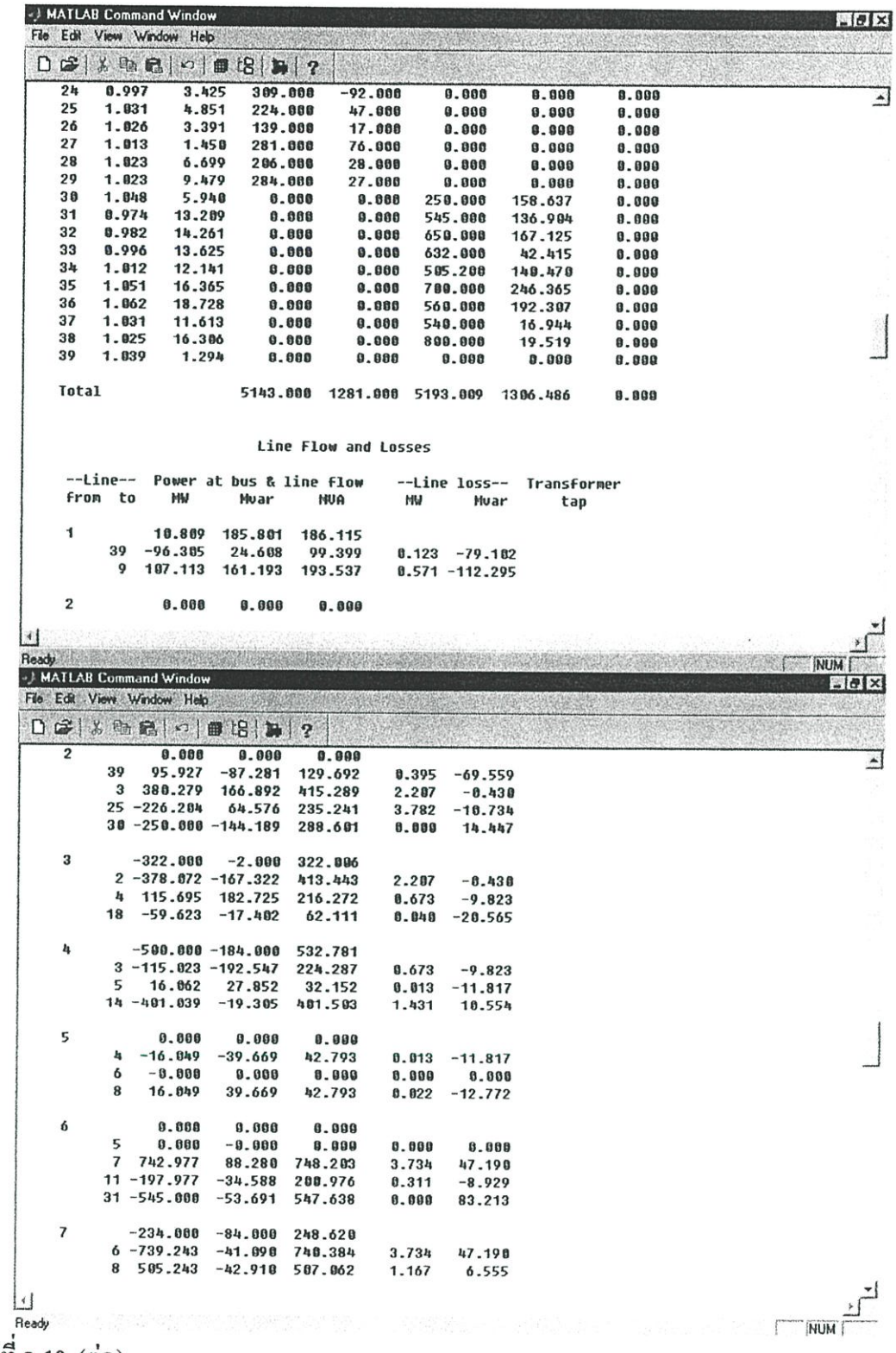
MATLAB Command Window

File Edit View Window Help

```
                Power Flow Solution by Fast Decoupled Method
                    Maximum Power Mismatch = 4.00538e-005
                              No. of Iterations = 23

 Bus  Voltage  Angle     ------Load------     ---Generation---   Injected
 No.   Mag.    Degree      MW       Mvar        MW       Mvar       Mvar

  1   1.054    0.000      0.000     0.000     10.809   185.801     0.000
  2   1.022    3.518      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
  3   0.991    0.481    322.000     2.000      0.000     0.000     0.000
  4   0.949   -0.947    500.000   184.000      0.000     0.000     0.000
  5   0.944   -1.062      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
  6   0.949    4.735      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
  7   0.938    0.369    234.000    84.000      0.000     0.000     0.000
  8   0.938   -1.154    522.000   177.000      0.000     0.000     0.000
  9   0.999   -1.333    104.000   125.000      0.000     0.000     0.000
 10   0.957    6.311      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
 11   0.953    5.750      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
 12   0.934    5.364      9.000    88.000      0.000     0.000     0.000
 13   0.955    5.139      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
 14   0.955    2.318      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
 15   0.968    1.753    320.000   153.000      0.000     0.000     0.000
 16   0.989    3.242    329.000    32.000      0.000     0.000     0.000
 17   0.996    1.883      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
 18   0.993    0.858    158.000    30.000      0.000     0.000     0.000
 19   0.990    8.419      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
 20   0.987    6.988    680.000   103.000      0.000     0.000     0.000
 21   0.996    6.062    274.000   115.000      0.000     0.000     0.000
 22   1.022   11.018      0.000     0.000      0.000     0.000     0.000
 23   1.020   10.697    248.000    85.000      0.000     0.000     0.000
```

Ready | NUM

**รูปที่ ก.10** แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow กรณี outage L10 (5 -> 6)



MATLAB Command Window

File Edit View Window Help

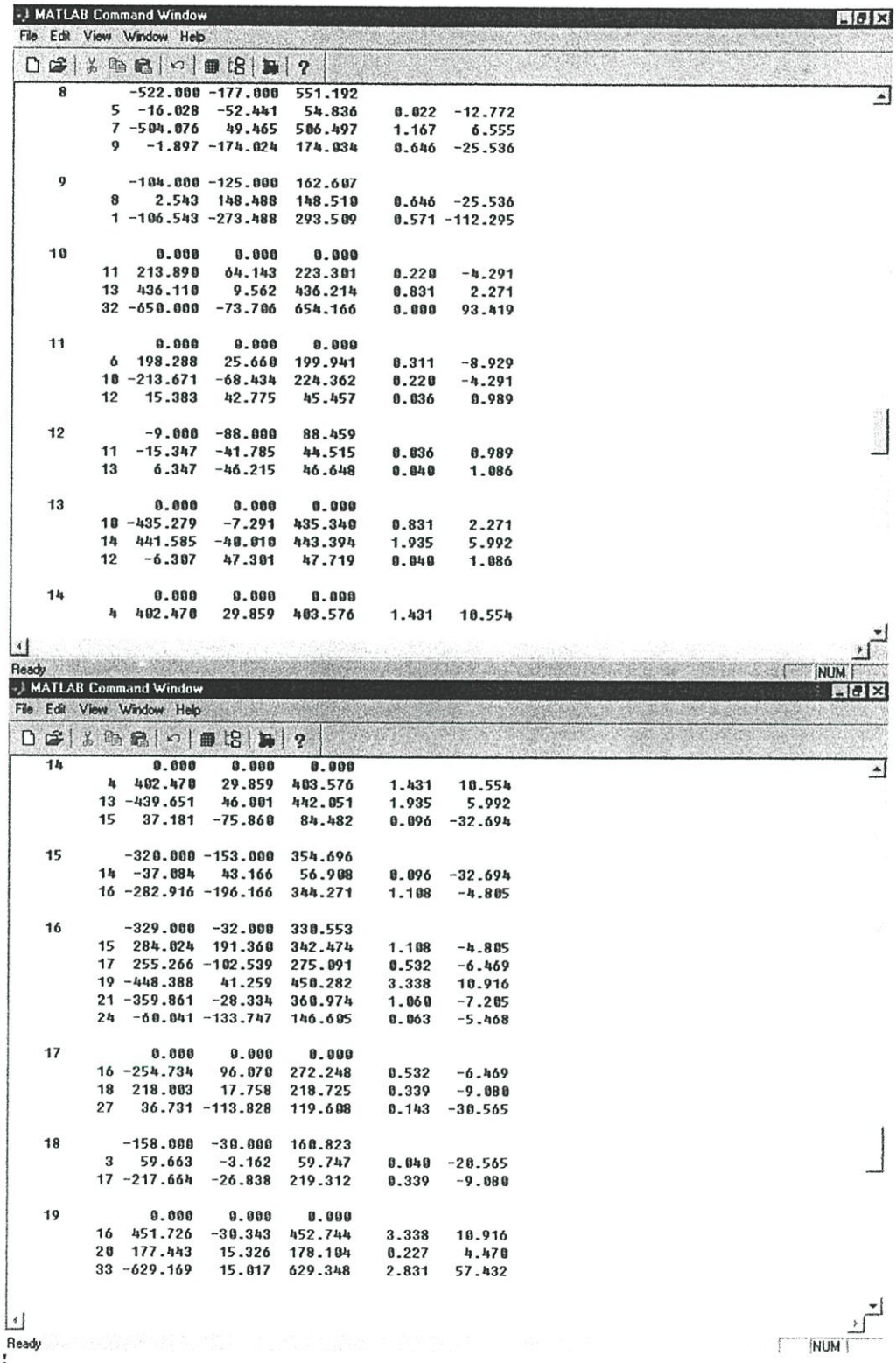
| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24 | 0.997 | 3.425 | 309.000 | -92.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 25 | 1.031 | 4.851 | 224.000 | 47.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 26 | 1.026 | 3.391 | 139.000 | 17.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 27 | 1.013 | 1.450 | 281.000 | 76.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 28 | 1.023 | 6.699 | 206.000 | 28.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 29 | 1.023 | 9.479 | 284.000 | 27.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 30 | 1.048 | 5.940 | 0.000 | 0.000 | 250.000 | 158.637 | 0.000 |
| 31 | 0.974 | 13.209 | 0.000 | 0.000 | 545.000 | 136.904 | 0.000 |
| 32 | 0.982 | 14.261 | 0.000 | 0.000 | 650.000 | 167.125 | 0.000 |
| 33 | 0.996 | 13.625 | 0.000 | 0.000 | 632.000 | 42.415 | 0.000 |
| 34 | 1.012 | 12.141 | 0.000 | 0.000 | 505.200 | 140.470 | 0.000 |
| 35 | 1.051 | 16.365 | 0.000 | 0.000 | 700.000 | 246.365 | 0.000 |
| 36 | 1.062 | 18.728 | 0.000 | 0.000 | 560.000 | 192.307 | 0.000 |
| 37 | 1.031 | 11.613 | 0.000 | 0.000 | 540.000 | 16.944 | 0.000 |
| 38 | 1.025 | 16.306 | 0.000 | 0.000 | 800.000 | 19.519 | 0.000 |
| 39 | 1.039 | 1.294 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Total | | | 5143.000 | 1281.000 | 5193.009 | 1306.486 | 0.000 |

Line Flow and Losses

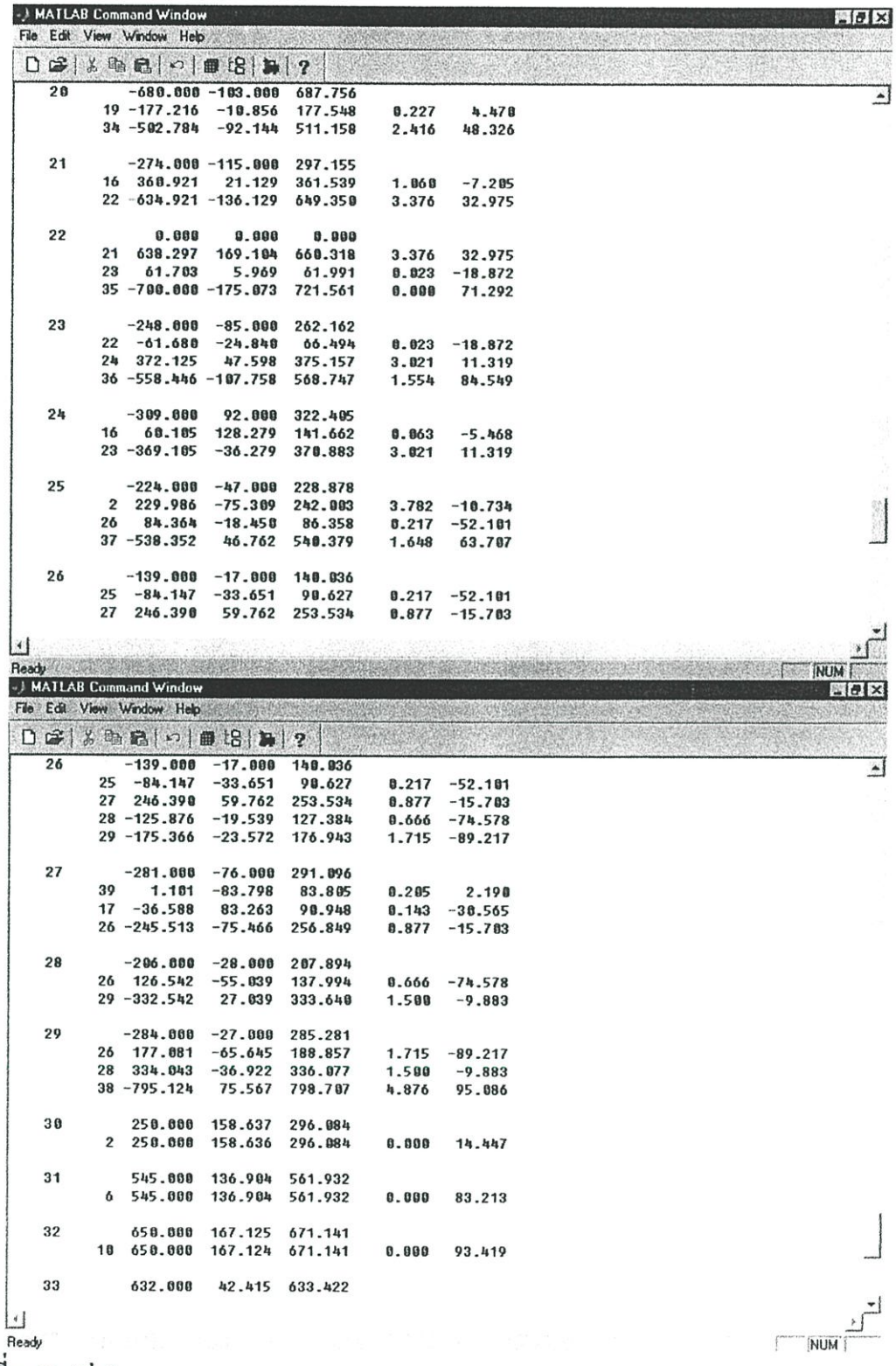
| --Line-- From | to | Power at bus & line flow MW | Mvar | MVA | --Line loss-- MW | Mvar | Transformer tap |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | 10.809 | 185.801 | 186.115 | | | |
| | 39 | -96.385 | 24.608 | 99.399 | 0.123 | -79.182 | |
| | 9 | 107.113 | 161.193 | 193.537 | 0.571 | -112.295 | |
| 2 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | |
| | 39 | 95.927 | -87.281 | 129.692 | 0.395 | -69.559 | |
| | 3 | 380.279 | 166.892 | 415.289 | 2.207 | -0.430 | |
| | 25 | -226.204 | 64.576 | 235.241 | 3.782 | -10.734 | |
| | 30 | -250.000 | -144.189 | 288.601 | 0.000 | 14.447 | |
| 3 | | -322.000 | -2.000 | 322.006 | | | |
| | 2 | -378.072 | -167.322 | 413.443 | 2.207 | -0.430 | |
| | 4 | 115.695 | 182.725 | 216.272 | 0.673 | -9.823 | |
| | 18 | -59.623 | -17.402 | 62.111 | 0.048 | -20.565 | |
| 4 | | -500.000 | -184.000 | 532.781 | | | |
| | 3 | -115.023 | -192.547 | 224.287 | 0.673 | -9.823 | |
| | 5 | 16.062 | 27.852 | 32.152 | 0.013 | -11.817 | |
| | 14 | -401.039 | -19.305 | 401.503 | 1.431 | 10.554 | |
| 5 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | |
| | 4 | -16.049 | -39.669 | 42.793 | 0.013 | -11.817 | |
| | 6 | -0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | |
| | 8 | 16.049 | 39.669 | 42.793 | 0.022 | -12.772 | |
| 6 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | |
| | 5 | 0.000 | -0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | |
| | 7 | 742.977 | 88.280 | 748.203 | 3.734 | 47.190 | |
| | 11 | -197.977 | -34.588 | 200.976 | 0.311 | -8.929 | |
| | 31 | -545.000 | -53.691 | 547.638 | 0.000 | 83.213 | |
| 7 | | -234.000 | -84.000 | 248.620 | | | |
| | 6 | -739.243 | -41.090 | 740.384 | 3.734 | 47.190 | |
| | 8 | 505.243 | -42.910 | 507.062 | 1.167 | 6.555 | |

Ready NUM

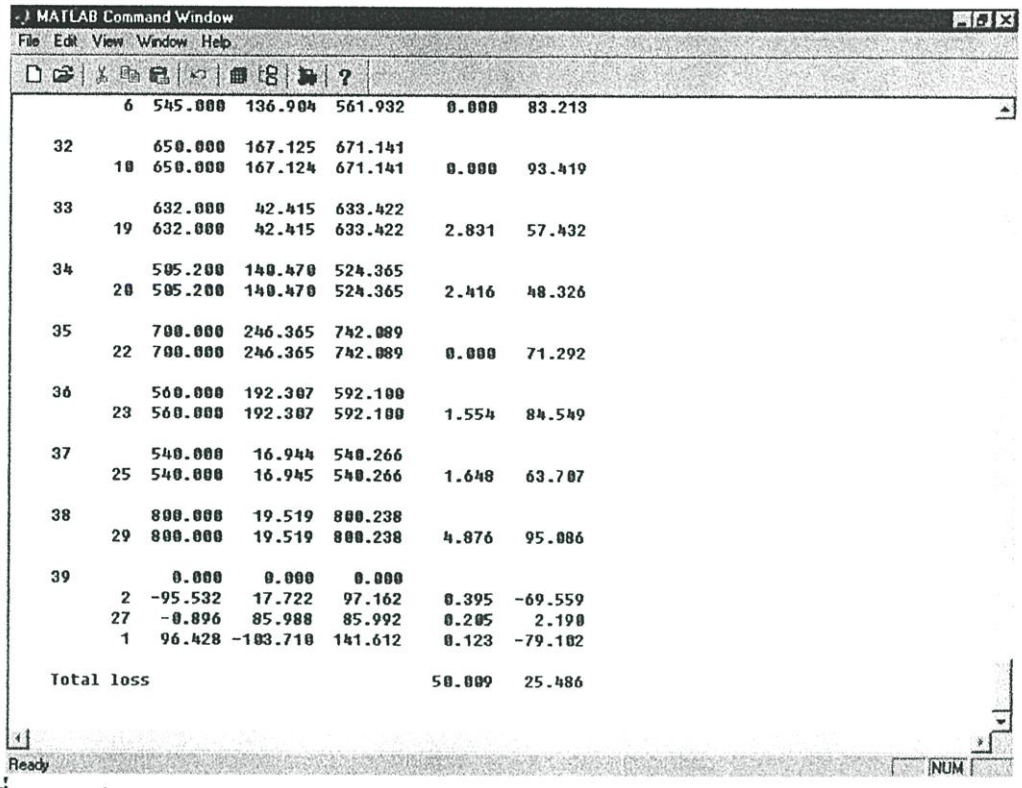
**รูปที่ ก.10** (ต่อ)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
8 -522.000 -177.000 551.192
5 -16.028 -52.441 54.836 0.022 -12.772
7 -504.076 49.465 506.497 1.167 6.555
9 -1.897 -174.024 174.034 0.646 -25.536
9 -104.000 -125.000 162.607
8 2.543 148.488 148.510 0.646 -25.536
1 -106.543 -273.488 293.509 0.571 -112.295
10 0.000 0.000 0.000
11 213.898 64.143 223.301 0.220 -4.291
13 436.110 9.562 436.214 0.831 2.271
32 -650.000 -73.706 654.166 0.000 93.419
11 0.000 0.000 0.000
6 198.288 25.660 199.941 0.311 -8.929
10 -213.671 -68.434 224.362 0.220 -4.291
12 15.383 42.775 45.457 0.036 0.989
12 -9.000 -88.000 88.459
11 -15.347 -41.785 44.515 0.036 0.989
13 6.347 -46.215 46.648 0.040 1.086
13 0.000 0.000 0.000
10 -435.279 -7.291 435.340 0.831 2.271
14 441.585 -40.010 443.394 1.935 5.992
12 -6.307 47.301 47.719 0.040 1.086
14 0.000 0.000 0.000
4 402.470 29.859 403.576 1.431 10.554
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
14 0.000 0.000 0.000
4 402.470 29.859 403.576 1.431 10.554
13 -439.651 46.001 442.051 1.935 5.992
15 37.181 -75.860 84.482 0.096 -32.694
15 -320.000 -153.000 354.696
14 -37.084 43.166 56.908 0.096 -32.694
16 -282.916 -196.166 344.271 1.108 -4.805
16 -329.000 -32.000 330.553
15 284.024 191.360 342.474 1.108 -4.805
17 255.266 -102.539 275.091 0.532 -6.469
19 -448.388 41.259 450.282 3.338 10.916
21 -359.861 -28.334 360.974 1.060 -7.205
24 -60.041 -133.747 146.695 0.063 -5.468
17 0.000 0.000 0.000
16 -254.734 96.070 272.248 0.532 -6.469
18 218.003 17.758 218.725 0.339 -9.080
27 36.731 -113.828 119.608 0.143 -30.565
18 -158.000 -30.000 160.823
3 59.663 -3.162 59.747 0.040 -20.565
17 -217.664 -26.838 219.312 0.339 -9.080
19 0.000 0.000 0.000
16 451.726 -30.343 452.744 3.338 10.916
20 177.443 15.326 178.104 0.227 4.470
33 -629.169 15.017 629.348 2.831 57.432
Ready
NUM

**รูปที่ ก.10** (ต่อ)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
20 -680.000 -103.000 687.756
19 -177.216 -10.856 177.548 0.227 4.478
34 -502.784 -92.144 511.158 2.416 48.326
21 -274.000 -115.000 297.155
16 360.921 21.129 361.539 1.060 -7.205
22 -634.921 -136.129 649.350 3.376 32.975
22 0.000 0.000 0.000
21 638.297 169.104 660.318 3.376 32.975
23 61.703 5.969 61.991 0.023 -18.872
35 -700.000 -175.073 721.561 0.000 71.292
23 -248.000 -85.000 262.162
22 -61.680 -24.840 66.494 0.023 -18.872
24 372.125 47.598 375.157 3.021 11.319
36 -558.446 -107.758 568.747 1.554 84.549
24 -309.000 92.000 322.405
16 60.105 128.279 141.662 0.063 -5.468
23 -369.105 -36.279 370.883 3.021 11.319
25 -224.000 -47.000 228.878
2 229.986 -75.309 242.003 3.782 -10.734
26 84.364 -18.450 86.358 0.217 -52.101
37 -538.352 46.762 540.379 1.648 63.707
26 -139.000 -17.000 140.036
25 -84.147 -33.651 90.627 0.217 -52.101
27 246.390 59.762 253.534 0.877 -15.703
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
26 -139.000 -17.000 140.036
25 -84.147 -33.651 90.627 0.217 -52.101
27 246.390 59.762 253.534 0.877 -15.703
28 -125.876 -19.539 127.384 0.666 -74.578
29 -175.366 -23.572 176.943 1.715 -89.217
27 -281.000 -76.000 291.096
39 1.101 -83.798 83.805 0.205 2.190
17 -36.588 83.263 90.948 0.143 -38.565
26 -245.513 -75.466 256.849 0.877 -15.703
28 -206.000 -28.000 207.894
26 126.542 -55.039 137.994 0.666 -74.578
29 -332.542 27.039 333.640 1.500 -9.883
29 -284.000 -27.000 285.281
26 177.081 -65.645 188.857 1.715 -89.217
28 334.043 -36.922 336.077 1.500 -9.883
38 -795.124 75.567 798.707 4.876 95.086
30 250.000 158.637 296.084
2 250.000 158.636 296.084 0.000 14.447
31 545.000 136.904 561.932
6 545.000 136.904 561.932 0.000 83.213
32 650.000 167.125 671.141
10 650.000 167.124 671.141 0.000 93.419
33 632.000 42.415 633.422
Ready
NUM

**รูปที่ ก.10** (ต่อ)




**รูปที่ ก.10** (ต่อ)

จากรูปที่ ก.10 ทำการสรุปผลเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0 แสดงได้ดังตารางที่ ก.5

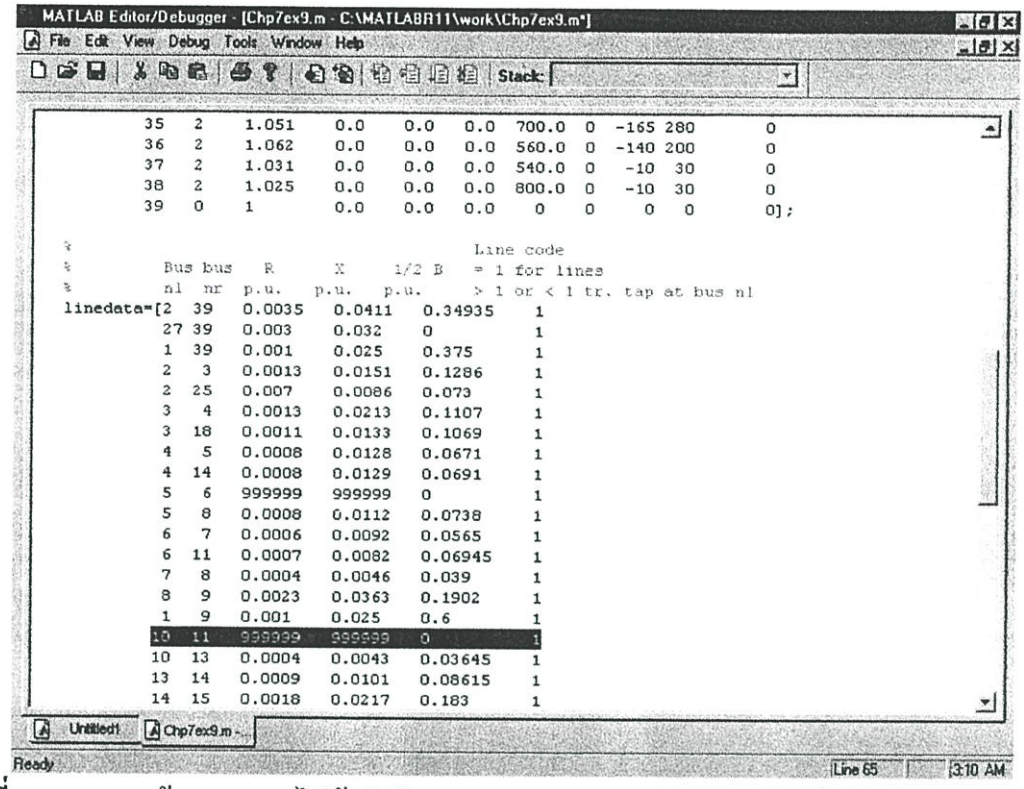
**ตารางที่ ก.5** การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0

กรณี outage L10 (5 -> 6)

| | flow (MW) calculate from vb6.0 | flow (MW) calculate from [8] |
|---|---|---|
| L1 : 2 -> 39 | 95.93298 | 95.927 |
| L2 : 27 -> 39 | 1.140996 | 1.101 |
| L3 : 1 -> 39 | -96.29998 | -96.305 |
| L4 : 2 -> 3 | 380.349 | 380.279 |
| L5 : 2 -> 25 | -226.213 | -226.204 |
| L6 : 3 -> 4 | 115.7011 | 115.695 |
| L7 : 3 -> 18 | -59.63404 | -59.623 |
| L8 : 4 -> 5 | 16.05634 | 16.062 |
| L9 : 4 -> 14 | -401.5882 | -401.039 |
| L10 : 5 -> 6 | Outage | Outage |
| L11 : 5 -> 8 | 16.05335 | 16.049 |
| L12 : 6 -> 7 | 742.9907 | 742.977 |
| L13 : 6 -> 11 | -197.9807 | -197.977 |
| L14 : 7 -> 8 | 505.2507 | 505.243 |
| L15 : 8 -> 9 | -1.903991 | -1.897 |
| L16 : 1 -> 9 | 107.118 | 107.113 |
| L17 : 10 -> 11 | 213.8957 | 213.89 |
| L18 : 10 -> 13 | 436.1193 | 436.11 |
| L19 : 13 -> 14 | 441.6353 | 441.585 |
| L20 : 14 -> 15 | 37.20205 | 37.181 |
| L21 : 15 -> 16 | -282.9182 | -282.916 |
| L22 : 16 -> 17 | 255.278 | 255.266 |
| L23 : 16 -> 19 | -448.8785 | -448.388 |
| L24 : 16 -> 21 | -360.9236 | -359.861 |
| L25 : 16 -> 24 | -60.26491 | -60.041 |
| L26 : 17 -> 18 | 218.009 | 218.003 |
| L27 : 17 -> 27 | 36.7322 | 36.731 |
| L28 : 21 -> 22 | -636.4205 | -634.921 |
| L29 : 22 -> 23 | 61.9535 | 61.703 |
| L30 : 23 -> 24 | 373.0124 | 372.125 |
| L31 : 25 -> 26 | 86.13344 | 84.364 |
| L32 : 26 -> 27 | 249.4387 | 246.39 |
| L33 : 26 -> 28 | -126.4612 | -125.876 |
| L34 : 26 -> 29 | -175.823 | -175.366 |
| L35 : 28 -> 29 | -332.9572 | -332.542 |
| Tr1 : 2 -> 30 | -250.9227 | -250.000 |
| Tr2 : 6 -> 31 | -545.4158 | -545.000 |
| Tr3 : 10 -> 32 | -650.3744 | -650.000 |
| Tr4 : 11 -> 12 | 15.38503 | 15.383 |
| Tr5 : 12 -> 13 | 6.344029 | 6.347 |
| Tr6 : 19 -> 20 | 177.612 | 177.443 |
| Tr7 : 19 -> 33 | -629.3079 | -629.169 |
| Tr8 : 20 -> 34 | -502.9054 | -502.784 |
| Tr9 : 22 -> 35 | -700.7927 | -700.000 |
| Tr10 : 23 -> 36 | -558.9069 | -558.446 |
| Tr11 : 25 -> 37 | -539.5645 | -538.352 |
| Tr12 : 29 -> 38 | -795.6695 | -795.124 |
| Total Losses | 49.94475 | 50.009 |
| No.of Overload | 1 | 1 |

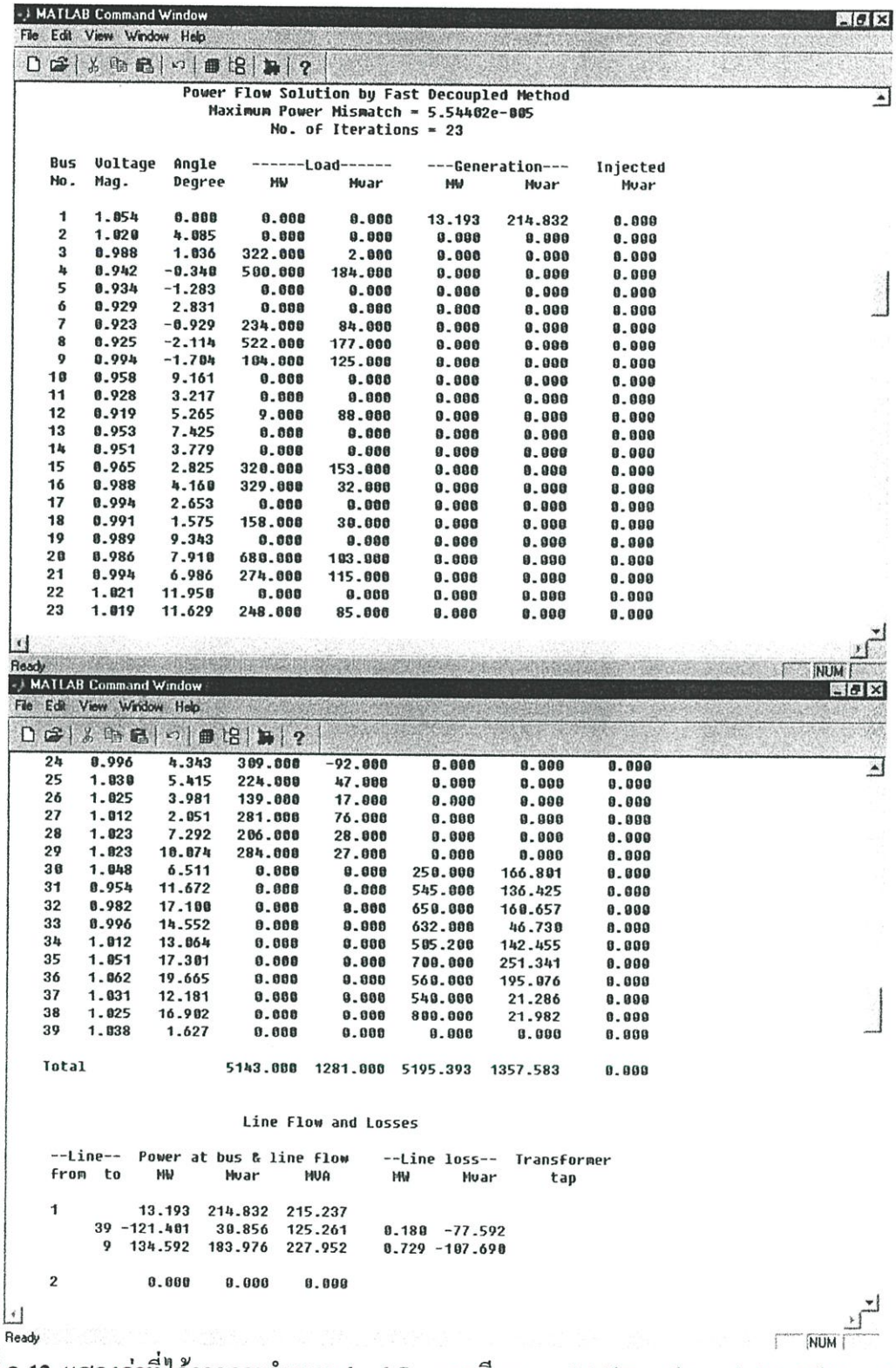
2.2 กรณี outage L10 (5 -> 6) + switch L17 (10 -> 11)

แสดงค่าการคำนวณ load flow ด้วยวิธี the fast decoupled method กับโปรแกรมมาตรฐาน matlab 5.3 [8] กรณี outage L10 (5 -> 6) + switch L17 (10 -> 11) ได้ดังต่อไปนี้




**รูปที่ ก.11** แสดงข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลัง 39-Bus New England System กรณี outage L10 (5 -> 6) + switch L17 (10 -> 11)

จากรูปที่ ก.11 คำนวณ load flow กรณี outage L10 (5 -> 6) + switch L17 (10 -> 11) แสดงได้ดังต่อไปนี้



MATLAB Command Window

File Edit View Window Help

Power Flow Solution by Fast Decoupled Method
Maximum Power Mismatch = 5.54402e-005
No. of Iterations = 23

| Bus No. | Voltage Mag. | Angle Degree | Load MW | Load Mvar | Generation MW | Generation Mvar | Injected Mvar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.054 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 13.193 | 214.832 | 0.000 |
| 2 | 1.020 | 4.085 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 3 | 0.988 | 1.036 | 322.000 | 2.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 4 | 0.942 | -0.348 | 500.000 | 184.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5 | 0.934 | -1.283 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 6 | 0.929 | 2.831 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 7 | 0.923 | -0.929 | 234.000 | 84.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 8 | 0.925 | -2.114 | 522.000 | 177.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 9 | 0.994 | -1.704 | 104.000 | 125.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10 | 0.958 | 9.161 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 11 | 0.928 | 3.217 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 12 | 0.919 | 5.265 | 9.000 | 88.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 13 | 0.953 | 7.425 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 14 | 0.951 | 3.779 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 15 | 0.965 | 2.825 | 320.000 | 153.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 16 | 0.988 | 4.160 | 329.000 | 32.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 17 | 0.994 | 2.653 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 18 | 0.991 | 1.575 | 158.000 | 30.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 19 | 0.989 | 9.343 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20 | 0.986 | 7.910 | 680.000 | 103.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 21 | 0.994 | 6.986 | 274.000 | 115.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 22 | 1.021 | 11.958 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 23 | 1.019 | 11.629 | 248.000 | 85.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Ready NUM

MATLAB Command Window

File Edit View Window Help

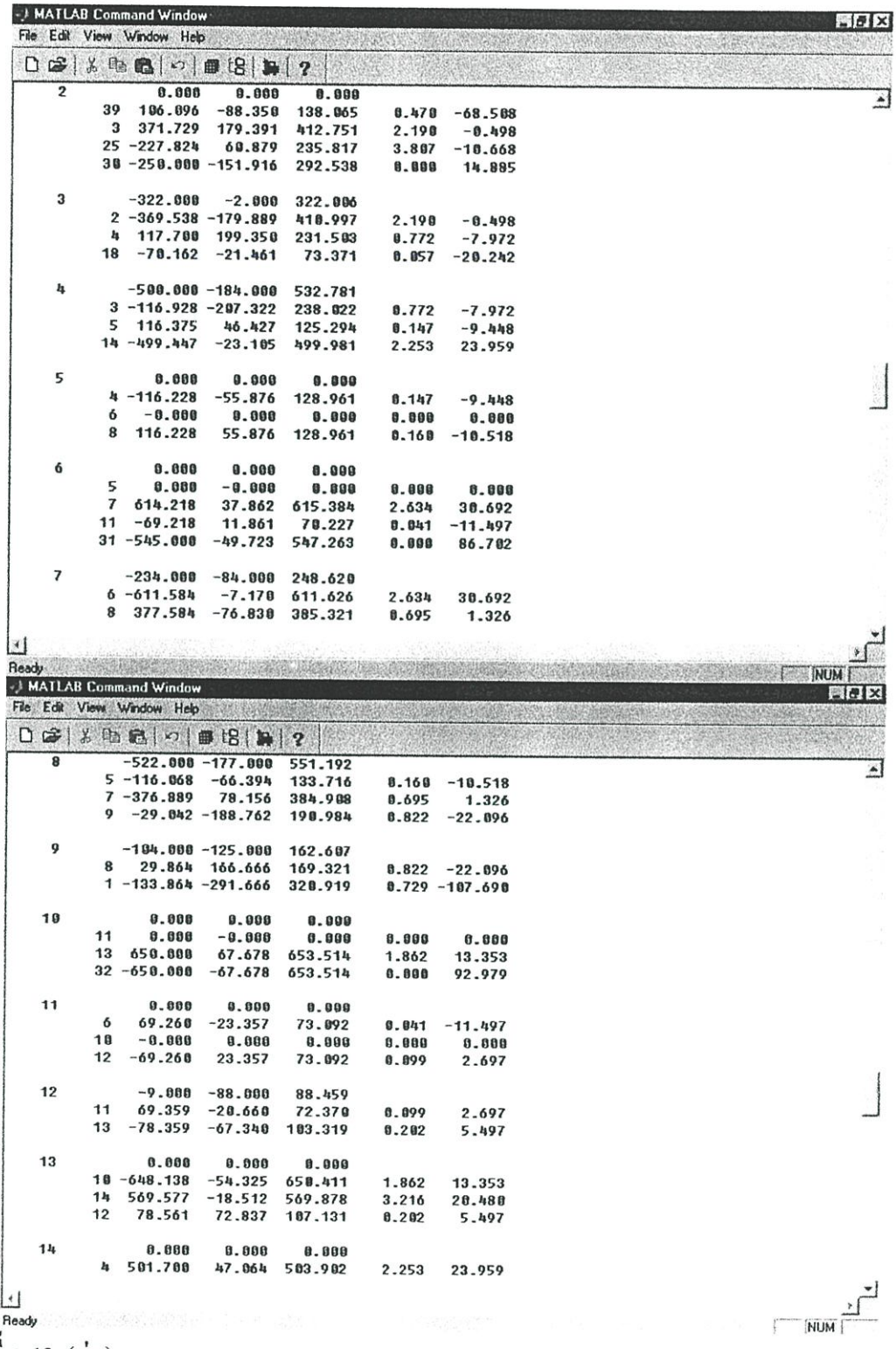
| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24 | 0.996 | 4.343 | 309.000 | -92.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 25 | 1.030 | 5.415 | 224.000 | 47.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 26 | 1.025 | 3.981 | 139.000 | 17.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 27 | 1.012 | 2.051 | 281.000 | 76.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 28 | 1.023 | 7.292 | 206.000 | 28.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 29 | 1.023 | 10.074 | 284.000 | 27.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 30 | 1.048 | 6.511 | 0.000 | 0.000 | 250.000 | 166.801 | 0.000 |
| 31 | 0.954 | 11.672 | 0.000 | 0.000 | 545.000 | 136.425 | 0.000 |
| 32 | 0.982 | 17.100 | 0.000 | 0.000 | 650.000 | 160.657 | 0.000 |
| 33 | 0.996 | 14.552 | 0.000 | 0.000 | 632.000 | 46.730 | 0.000 |
| 34 | 1.012 | 13.064 | 0.000 | 0.000 | 505.200 | 142.455 | 0.000 |
| 35 | 1.051 | 17.301 | 0.000 | 0.000 | 700.000 | 251.341 | 0.000 |
| 36 | 1.062 | 19.665 | 0.000 | 0.000 | 560.000 | 195.076 | 0.000 |
| 37 | 1.031 | 12.181 | 0.000 | 0.000 | 540.000 | 21.286 | 0.000 |
| 38 | 1.025 | 16.902 | 0.000 | 0.000 | 800.000 | 21.982 | 0.000 |
| 39 | 1.038 | 1.627 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Total | | | 5143.000 | 1281.000 | 5195.393 | 1357.583 | 0.000 |

Line Flow and Losses

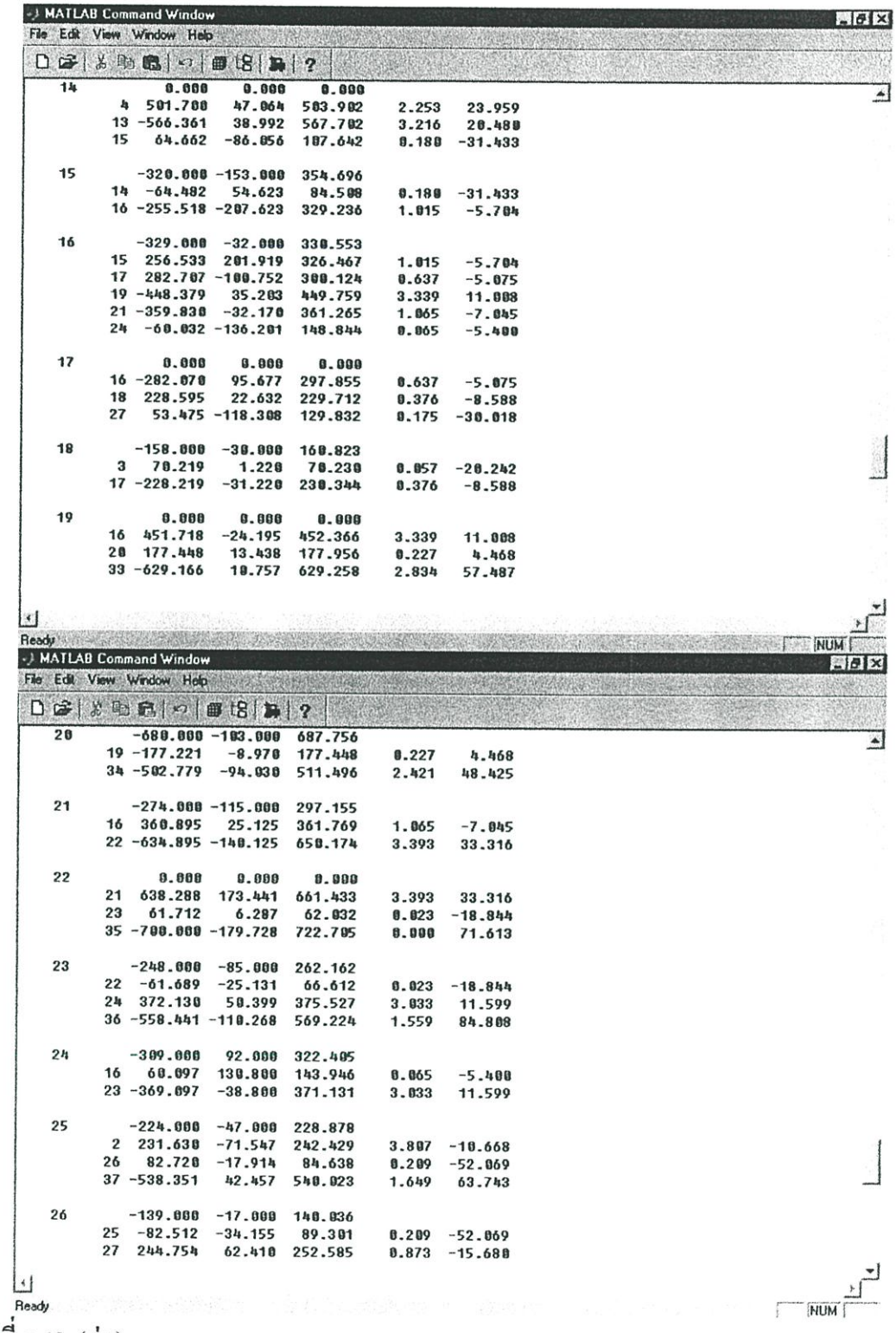
| --Line-- From | to | Power at bus & line flow MW | Mvar | MVA | --Line loss-- MW | Mvar | Transformer tap |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | 13.193 | 214.832 | 215.237 | | | |
| | 39 | -121.401 | 30.856 | 125.261 | 0.180 | -77.592 | |
| | 9 | 134.592 | 183.976 | 227.952 | 0.729 | -107.690 | |
| 2 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | |

Ready NUM

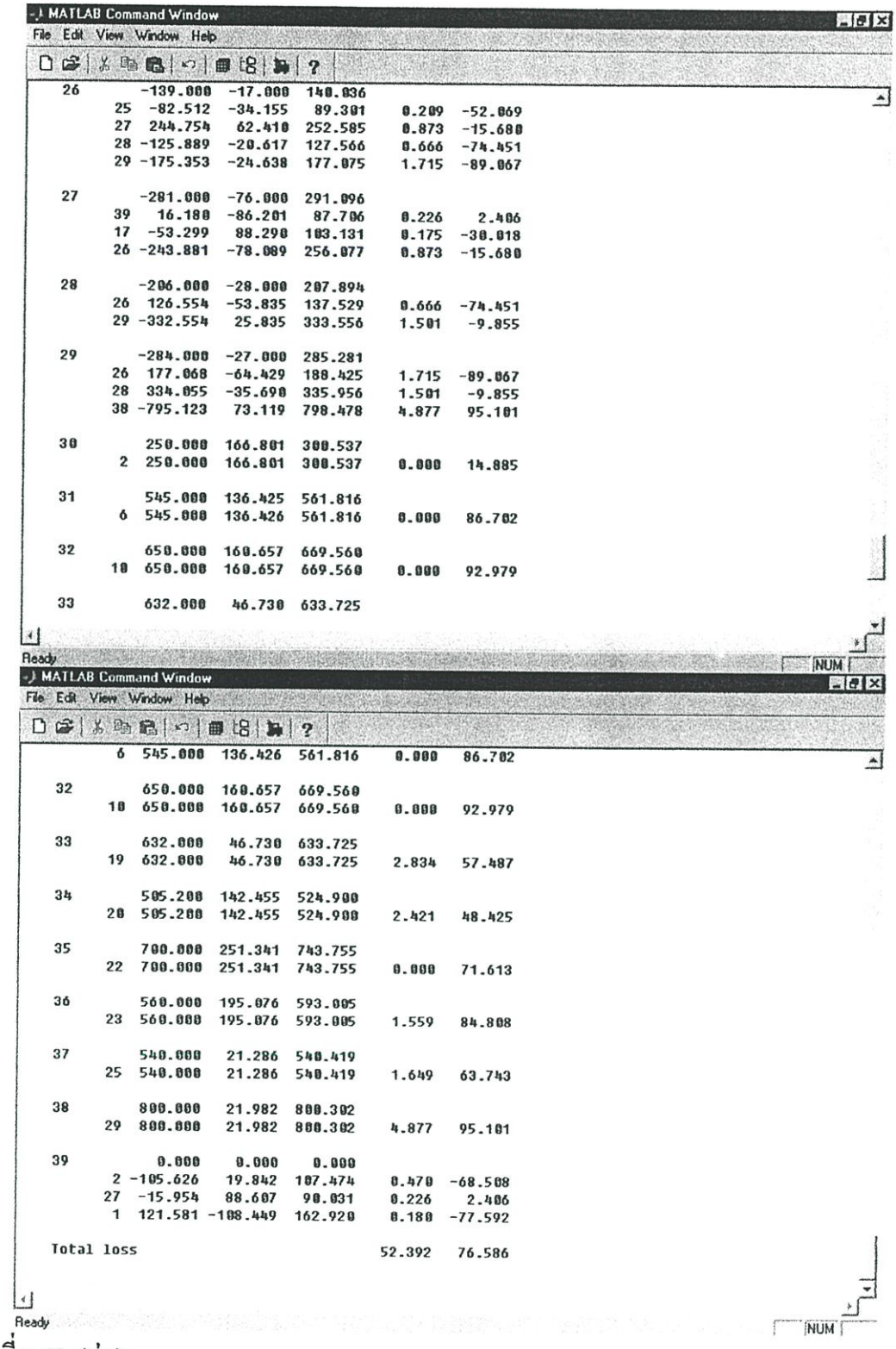
**รูปที่ ก.12** แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ load flow กรณี outage L10(5 -> 6)+ switch L17(10 -> 11)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
2 0.000 0.000 0.000
39 106.096 -88.350 138.065 0.470 -68.568
3 371.729 179.391 412.751 2.190 -0.498
25 -227.824 60.879 235.817 3.807 -10.668
30 -250.000 -151.916 292.538 0.000 14.885
3 -322.000 -2.000 322.006
2 -369.538 -179.889 410.997 2.190 -0.498
4 117.700 199.350 231.503 0.772 -7.972
18 -70.162 -21.461 73.371 0.057 -20.242
4 -500.000 -184.000 532.781
3 -116.928 -207.322 238.022 0.772 -7.972
5 116.375 46.427 125.294 0.147 -9.448
14 -499.447 -23.105 499.981 2.253 23.959
5 0.000 0.000 0.000
4 -116.228 -55.876 128.961 0.147 -9.448
6 -0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
8 116.228 55.876 128.961 0.160 -10.518
6 0.000 0.000 0.000
5 0.000 -0.000 0.000 0.000 0.000
7 614.218 37.862 615.384 2.634 30.692
11 -69.218 11.861 70.227 0.041 -11.497
31 -545.000 -49.723 547.263 0.000 86.702
7 -234.000 -84.000 248.620
6 -611.584 -7.170 611.626 2.634 30.692
8 377.584 -76.830 385.321 0.695 1.326
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
8 -522.000 -177.000 551.192
5 -116.068 -66.394 133.716 0.160 -10.518
7 -376.889 78.156 384.908 0.695 1.326
9 -29.042 -188.762 190.984 0.822 -22.096
9 -194.000 -125.000 162.607
8 29.864 166.666 169.321 0.822 -22.096
1 -133.864 -291.666 320.919 0.729 -107.690
10 0.000 0.000 0.000
11 0.000 -0.000 0.000 0.000 0.000
13 650.000 67.678 653.514 1.862 13.353
32 -650.000 -67.678 653.514 0.000 92.979
11 0.000 0.000 0.000
6 69.260 -23.357 73.092 0.041 -11.497
10 -0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
12 -69.260 23.357 73.092 0.099 2.697
12 -9.000 -88.000 88.459
11 69.359 -20.660 72.370 0.099 2.697
13 -78.359 -67.340 103.319 0.202 5.497
13 0.000 0.000 0.000
10 -648.138 -54.325 650.411 1.862 13.353
14 569.577 -18.512 569.878 3.216 20.480
12 78.561 72.837 107.131 0.202 5.497
14 0.000 0.000 0.000
4 501.700 47.064 503.902 2.253 23.959
Ready
NUM

**รูปที่ ก.12** (ต่อ)


MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
14 0.000 0.000 0.000
4 501.700 47.064 503.902 2.253 23.959
13 -566.361 38.992 567.702 3.216 20.480
15 64.662 -86.056 107.642 0.180 -31.433
15 -320.000 -153.000 354.696
14 -64.482 54.623 84.508 0.180 -31.433
16 -255.518 -207.623 329.236 1.015 -5.704
16 -329.000 -32.000 330.553
15 256.533 201.919 326.467 1.015 -5.704
17 282.707 -100.752 300.124 0.637 -5.075
19 -448.379 35.203 449.759 3.339 11.008
21 -359.830 -32.170 361.265 1.065 -7.045
24 -60.032 -136.201 148.844 0.065 -5.400
17 0.000 0.000 0.000
16 -282.070 95.677 297.855 0.637 -5.075
18 228.595 22.632 229.712 0.376 -8.588
27 53.475 -118.308 129.832 0.175 -30.018
18 -158.000 -30.000 160.823
3 70.219 1.220 70.230 0.057 -20.242
17 -228.219 -31.220 230.344 0.376 -8.588
19 0.000 0.000 0.000
16 451.718 -24.195 452.366 3.339 11.008
28 177.448 13.438 177.956 0.227 4.468
33 -629.166 10.757 629.258 2.834 57.487
Ready
NUM
MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
20 -680.000 -103.000 687.756
19 -177.221 -8.970 177.448 0.227 4.468
34 -502.779 -94.030 511.496 2.421 48.425
21 -274.000 -115.000 297.155
16 360.895 25.125 361.769 1.065 -7.045
22 -634.895 -140.125 650.174 3.393 33.316
22 0.000 0.000 0.000
21 638.288 173.441 661.433 3.393 33.316
23 61.712 6.287 62.032 0.023 -18.844
35 -700.000 -179.728 722.705 0.000 71.613
23 -248.000 -85.000 262.162
22 -61.689 -25.131 66.612 0.023 -18.844
24 372.130 50.399 375.527 3.033 11.599
36 -558.441 -110.268 569.224 1.559 84.808
24 -309.000 92.000 322.405
16 60.097 130.800 143.946 0.065 -5.400
23 -369.097 -38.800 371.131 3.033 11.599
25 -224.000 -47.000 228.878
2 231.630 -71.547 242.429 3.807 -10.668
26 82.720 -17.914 84.638 0.209 -52.069
37 -538.351 42.457 540.023 1.649 63.743
26 -139.000 -17.000 140.036
25 -82.512 -34.155 89.301 0.209 -52.069
27 244.754 62.410 252.585 0.873 -15.688
Ready
NUM

**รูปที่ ก.12** (ต่อ)




**รูปที่ ก.12** (ต่อ)

จากรูปที่ ก.12 ทำการสรุปผลเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0 แสดงได้ดังตารางที่ ก.6

**ตารางที่ ก.6** การเปรียบเทียบ line flow กับโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก visual basic 6.0

กรณี outage L10 (5 -> 6) + switch L17 (10 -> 11)

| | flow (MW) calculate from vb6.0 | flow (MW) calculate from [8] |
|---|---|---|
| L1 : 2 -> 39 | 106.0919 | 106.096 |
| L2 : 27 -> 39 | 16.22759 | 16.18 |
| L3 : 1 -> 39 | -121.3898 | -121.401 |
| L4 : 2 -> 3 | 371.6723 | 371.729 |
| L5 : 2 -> 25 | -227.6959 | -227.824 |
| L6 : 3 -> 4 | 117.3863 | 117.7 |
| L7 : 3 -> 18 | -69.95731 | -70.162 |
| L8 : 4 -> 5 | 115.4549 | 116.375 |
| L9 : 4 -> 14 | -499.194 | -499.447 |
| L10 : 5 -> 6 | Outage | Outage |
| L11 : 5 -> 8 | 115.4978 | 116.228 |
| L12 : 6 -> 7 | 615.9323 | 614.218 |
| L13 : 6 -> 11 | -70.83727 | -69.218 |
| L14 : 7 -> 8 | 379.1142 | 377.584 |
| L15 : 8 -> 9 | -28.55804 | -29.042 |
| L16 : 1 -> 9 | 133.9834 | 134.592 |
| L17 : 10 -> 11 | Switch | Switch |
| L18 : 10 -> 13 | 650.0146 | 650.000 |
| L19 : 13 -> 14 | 568.2031 | 569.577 |
| L20 : 14 -> 15 | 64.2763 | 64.662 |
| L21 : 15 -> 16 | -255.9082 | -255.518 |
| L22 : 16 -> 17 | 282.3627 | 282.707 |
| L23 : 16 -> 19 | -448.8705 | -448.379 |
| L24 : 16 -> 21 | -360.8931 | -359.83 |
| L25 : 16 -> 24 | -60.25508 | -60.032 |
| L26 : 17 -> 18 | 228.378 | 228.595 |
| L27 : 17 -> 27 | 53.34692 | 53.475 |
| L28 : 21 -> 22 | -636.403 | -634.895 |
| L29 : 22 -> 23 | 61.96294 | 61.712 |
| L30 : 23 -> 24 | 373.0154 | 372.13 |
| L31 : 25 -> 26 | 84.62222 | 82.72 |
| L32 : 26 -> 27 | 247.9353 | 244.754 |
| L33 : 26 -> 28 | -126.4703 | -125.889 |
| L34 : 26 -> 29 | -175.8107 | -175.353 |
| L35 : 28 -> 29 | -332.969 | -332.554 |
| Tr1 : 2 -> 30 | -250.9227 | -250.000 |
| Tr2 : 6 -> 31 | -545.4158 | -545.000 |
| Tr3 : 10 -> 32 | -650.3744 | -650.000 |
| Tr4 : 11 -> 12 | -70.64616 | -69.26 |
| Tr5 : 12 -> 13 | -79.84222 | -78.359 |
| Tr6 : 19 -> 20 | 177.6155 | 177.448 |
| Tr7 : 19 -> 33 | -629.3063 | -629.166 |
| Tr8 : 20 -> 34 | -502.9023 | -502.779 |
| Tr9 : 22 -> 35 | -700.7927 | -700.000 |
| Tr10 : 23 -> 36 | -558.9039 | -558.441 |
| Tr11 : 25 -> 37 | -539.5641 | -538.351 |
| Tr12 : 29 -> 38 | -795.6695 | -795.123 |
| Total Losses | 51.81273 | 52.392 |
| No.of Overload | 0 | 0 |

# ภาคผนวก ข.
# ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

# ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ผลงานวิจัยเรื่อง "การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์." ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 19 ฉบับที่ 3 , กันยายน 2545
2. ผลงานวิจัยเรื่อง "การป้องกันโหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีการปรับตารางการป้อนแหล่งจ่ายและไลน์สวิทซ์ชิ่ง." ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 , มีนาคม 2546
3. ผลงานวิจัยเรื่อง "การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุง." ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 3 , กันยายน 2546

ISSN 0125-1724

วิศวสาร ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 19 ฉบับที่ 3 กันยายน 2545

1. การพัฒนาหัวฉีดเพื่อนำมาใช้กับน้ำมันพืชผสมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลโดยการฉีดตรงเข้าห้องแกไหม้ 1
*อภิชิต เสมศรี จินดา เจริญพรพาณิชย์*

2. วิธีหนึ่งในการคำนวณเพื่อประหยัดพลังงานในการอบแห้งโลหะแผ่นแบบต่อเนื่อง 7
*ธีรโชติ สุชสิน มิ่ง โลกิจนสงทอง*

3. Effects of Central Inclusion on Copper Shaped-Wire Drawing by FEA 13
*Somchai Norasethasopon*

4. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่มีเดียนของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อแขนกับมุมในการงอแขน 18
*สาวิตร์ สุวรรณรัตน์ ชูศักดิ์ อิ่มสกุล บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา อลิสา สุวัณณปุระ*

5. วงจรเปรียบเทียบกระแสซีมอสโดยใช้แรงดันไฟเลี้ยงต่ำ 24
*ทรงพล บุญชูช่วย กอบชัย เดชหาญ สมยศ จุณณะปิยะ สุชาติ คุณทวีเทพ*

6. วงจรขยายความแตกต่างซีมอสดิฟเฟอเรนเชียลปฏิบัติงานแบบ Rail-to-Rail ใช้แหล่งจ่ายแรงดันต่ำ 30
*มนตรี คำเงิน พงศ์ยศ คีรีวนานนท์ กอบชัย เดชหาญ ชรรค์ชัย ตุลละสกุล*

7. การศึกษาอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อทำงานเป็นคาบเวลาในสภาวะโหลดเกินพิกัด 36
*ทรงกช ศรีประสาน สุคธิพร นันทพานิช สมโภชน์ ประไพ*

8. วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบพีคับเบิลยูเอ็มฟูลบริดจ์ซอฟสวิตชิ่งโดยการใช้ตัวเหนี่ยวนำอิ่มตัว 42
*จิรศักดิ์ ส่งบุญแก้ว เอกรงค์ จันทร์เจริญ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ*

9. เทคนิค Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point สำหรับการคิดราคาตลาดของไฟฟ้า 48
*สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์ ศุลี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา วิมลแข วงศ์ละสิน*

10. การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์ เทียบกับ วิธีไลเนียเซชันซิดิวิดี้แฟกเตอร์ 54
*สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์*

11. การทดสอบและประเมินสมรรถนะวงจรกรองแบบผสมแอกทีฟชนานและแพสซีฟ 1 เฟส สำหรับภาระไม่เป็นเชิงเส้น 60
*วิรัตน์ เกตุสวัสดิ์สมคร วิจิตร กิณเรศ*

12. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ 66
*ไพโรจน์ วนาอรามี วิจิตร กิณเรศ*

13. การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเฟสเซอร์โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการควบคุมการทำงาน 72
*จรัล คงวุฒิชูศักดิ์ ณัฐวุฒิ ทำยศวงษ์ วิจิตร กิณเรศ*

14. การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการควบคุมเวกเตอร์โดยง่ายด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เอ็มซีเอส 51 78
*ปรเมทธ์ พานกหลาบ วิทยา ทัพย์สุวรรณพร วิจิตร กิณเรศ*

15. การสร้างอัลกอริทึมของ Sobel Edge Detection ด้วย TMS320C31 โดยปราศจากไมโครคอมพิวเตอร์ 84
*อนุชิต ชุปเหลือง สุรพันธ์ ยิ้มนัย กอบชัย เดชหาญ*

# การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยวิธี แซท-เมตริกซ์ เทียบกับ วิธี ไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์

# Analysis of Overload in Electric Power System by Z-Matrix Compared with Linear Sensitivity Factors

สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**บทคัดย่อ**

บทความวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์ เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ โดยจะทำการวิเคราะห์โหลดเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง 16 บัส [3] ด้วยการทดสอบเอาท์เตจอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะพิจารณา 2 กรณี กรณีที่หนึ่ง ทดสอบการเอาท์เตจไลน์ กรณีที่สอง ทดสอบการเอาท์เตจเจนเนอเรเตอร์ และ ทำการป้องกันผลของโหลดเกินที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคการเลือกสวิทช์ไลน์ เพื่อที่จะแยก หรือ บรรเทาโหลดเกินที่เกิดขึ้นให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง

**Abstract**

This paper presents a method for the analysis of overload in an electric power system by Z-matrix compared with linear sensitivity factors. Test of overload in the electric power system are performed on a 16-bus system [3] by outage of equipment. Two cased are considered. The first case is for testing outage transmission line. The second case is for testing outage generator. The protection of the overload by selecting switched line to eliminate or to reduce the overload is presented.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องวางแผนเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคต โดยระบบจะต้องมีความน่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น การศึกษาทางด้าน Contingency Analysis จึงมีความสำคัญอย่างมากโดยเมื่อเกิดการ Outage ขึ้นที่อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังใดๆ ซึ่งจะส่งผลให้เกิด สภาวะ Overload ขึ้นได้ ซึ่งจะต้องมีการ ป้องกันโดยจะต้อง แยก หรือ บรรเทา Overload ที่เกิดขึ้นนี้ให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ในบทความวิจัยนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการเลือกสวิทช์ไลน์ 2 วิธี คือวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ [2] และ วิธีแซท-เมตริกซ์ โดยวิธีแซท-เมตริกซ์นี้ได้มีการปรับปรุงใหม่ให้ดีขึ้นกว่าของเดิม [1] เหตุผลเพราะว่า วิธีแซท-เมตริกซ์เดิมนี้ หลังจากที่ได้ทำการเลือกสวิทช์ไลน์ที่เหมาะสมแล้วนั้น จริงอยู่สามารถที่จะแยกหรือ บรรเทา Overload ที่เกิดขึ้นบนไลน์นั้นๆได้จริง แต่ไม่สามารถที่จะรู้ได้ว่าไลน์อื่นๆนอกเหนือจากไลน์ที่ได้ป้องกันไปแล้วนั้นจะเกิด Overload ขึ้นมาอีกหรือไม่ดังนั้นวิธีแซท-เมตริกซ์ปรับปรุงใหม่นี้จะเพิ่มในส่วนของการวิเคราะห์ผลข้างเคียงของ Overload ที่เกิดขึ้นบนไลน์อื่นๆ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบยืนยันว่าได้เลือกสวิทช์ไลน์ที่เหมาะสมที่สุดแล้วและทำการปรับปรุงโครงสร้างของ

เมตริกซ์ใหม่ โดยจะพิจารณาเฉพาะสมาชิกเมตริกซ์ที่จะใช้งานเท่านั้น ซึ่งจะช่วยลดหน่วยความจำ และ เวลาในการประมวลผล หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ และ วิธีแซท-เมตริกซ์ ว่าให้ผลลัพธ์ในการเลือกสวิทช์ไลน์ตรงกันหรือไม่ , เวลาที่ใช้ในการคำนวณต่างกันอย่างไร , วิธีไหนดีที่สุด และ วิธีไหนเหมาะสมที่จะใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังรูปแบบไหน

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 วิธี Linear Sensitivity Factors [2]

วิธี Linear Sensitivity Factors เป็นการคำนวณหาค่า factors เพื่อประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงไปของ Power Flow หลังจากเกิดการ outage ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะพิจารณาค่า factors จากการ outage ได้ 2 กรณี ดังนี้

2.1.1 The Generation Shift Factors

พิจารณาได้จากสมการที่ 1

$$a_{li} = \frac{X_{ni} - X_{mi}}{x_l} \qquad (1)$$

โดย $a_{li}$ = ค่า Generation Shift Factors

$x_l$ = ค่า Line Reactance ของ Line l

Line l = บัส n -> บัส m

i = บัส ที่ Generator ต่ออยู่

$X_{ni}$ , $X_{mi}$ = ค่า X Matrix ของ ระบบที่ทดสอบ

ส่วนการคำนวณค่า Power Flow บน Line l ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ Outage Generator ที่ Bus i นั้น พิจารณาได้จากสมการที่ 2

$$f_l = f_l^0 + a_{li}\Delta P_i \qquad (2)$$

โดย $f_l$ = ค่า Power Flow บน Line l หลังจาก Outage Generator ที่ บัส i

$f_l^0$ = ค่า Power Flow บน Line l ก่อน Outage Generator ที่ บัส i

$\Delta P_i$ = ค่าที่เปลี่ยนแปลงของ Generation ที่ บัส i

2.1.2 The Line Outage Distribution Factors

พิจารณาได้จากสมการที่ 3

$$d_{l,k} = \frac{x_k}{x_l}\left[\frac{X_{nn} - X_{jn} - X_{mn} + X_{jm}}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})}\right] \qquad (3)$$

โดย $d_{l,k}$ = ค่า Line Outage Distribution Factors เมื่อ Line k Outage

$x_l$ = ค่า Line Reactance ของ Line l

$x_k$ = ค่า Line Reactance ของ Line k

Line l = บัส i -> บัส j

Line k = บัส n -> บัส m

ส่วนการคำนวณค่า Power Flow บน Line l ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ Outage Line k พิจารณาได้จากสมการที่ 4

$$f_l = f_l^0 + d_{l,k} f_k^0 \qquad (4)$$

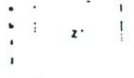
โดย $f_l^0$ , $f_k^0$ = ค่า Preoutage Power Flow บน Line l และ k ตามลำดับ

$f_l$ = ค่า Power Flow บน Line l เมื่อ Line k Outage

### 2.2 วิธี Z-Matrix [1]

ทำการหาค่า Z-Matrix โดยสร้าง Impedance Matrix ของระบบขึ้นมา ด้วยวิธี Add Branch – Add Link และ ในขณะเดียวกัน การสร้าง Z′-Matrix เมื่อ Line i - j outage นั้น ทำได้โดย adding Line i - j ที่มีค่าตรงกันข้ามกับค่าเดิม แล้วประยุกต์ใช้ The Loop Equation และ Kron Reduction คำนวณต่อไปใหม่ และ เช่นเดียวกัน การสร้าง Z′′-Matrix เมื่อมีการ Switched Line ก็ทำการหาเช่นเดียวกับการสร้าง Z′-Matrix [1]

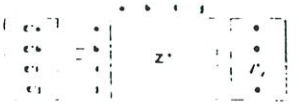
- การทดสอบเครื่องหมายที่เปลี่ยนแปลงไป (เพิ่มขึ้น หรือ ลดลง)ของOverload ใน Line a - b เมื่อ Line i - j switched



รูปที่ 1 Z′-Matrix elements

จากรูปที่ 1 ทำการเลือกสมาชิก Matrix จาก Z′-Matrix ทั้งหมดโดย a , b คือ Bus ของ Line ที่เกิด Overload , ส่วน i , j คือ Bus ของ Line ก่อน switched

ต่อไปพิจารณา ค่า Injecting Current ที่ Bus i , Voltages ที่ Bus a , b , i และ j หาได้จากรูปที่ 2

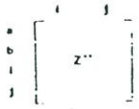


รูปที่ 2 ค่า Injecting Current ที่ Bus i , Voltages ที่ Bus a , b , i และ j

จากรูปที่ 2 ค่า $I'_{ab}$ สามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 5

$$I'_{ab} = (E'_a - E'_b) / Z_{ab} = (Z'_{ai} - Z'_{bi}) I'_i / Z_{ab} \qquad (5)$$

และ ในทำนองเดียวกันค่า $Z''$-Matrix เมื่อ Line i - j switched พิจารณาได้จากรูปที่ 3



รูปที่ 3 $Z''$-Matrix เมื่อ Line i - j switched

โดย ส่วน i , j คือ Bus ของ Line หลังเกิดการ switched ส่วน a , b คือ Bus ของ Line ที่เกิด Overload โดยค่า $Z''$-Matrix นั้นคำนวณได้จาก adding Line i - j ที่มีค่าตรงกันข้ามกับค่าเดิม แล้วประยุกต์ The Loop Equation และ Kron Reduction คำนวณค่าต่อไปใหม่ และในทำนองเดียวกันจากสมการที่ 5 สามารถพิจารณาค่า $I''_{ab}$ ได้จากสมการที่ 6 คือ

$$I''_{ab} = (E''_a - E''_b)/Z_{ab} = (Z''_{ai} - Z''_{bi}) I'_i / Z_{ab} \qquad (6)$$

โดย $I'_{ab}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของ Line a – b ก่อนเกิดการ switched Line i – j

$I''_{ab}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของ Line a – b ที่เปลี่ยนแปลงไป หลังswitched Line i – j

จากสมการที่ (5) , (6) ทำการเปรียบเทียบ $I'_{ab}$ และ $I''_{ab}$ ได้ดังนี้ ถ้า $I''_{ab} > I'_{ab}$ ดังนั้น $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| > |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ ซึ่งแสดงว่า ค่า Overload ของ Line a – b จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อ Line i - j switched และในทำนองเดียวกันถ้า $I''_{ab} < I'_{ab}$ ดังนั้น $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ แสดงว่า ค่า Overload ของ Line a – b ลดลงจากเดิม เมื่อ Line i - j switched

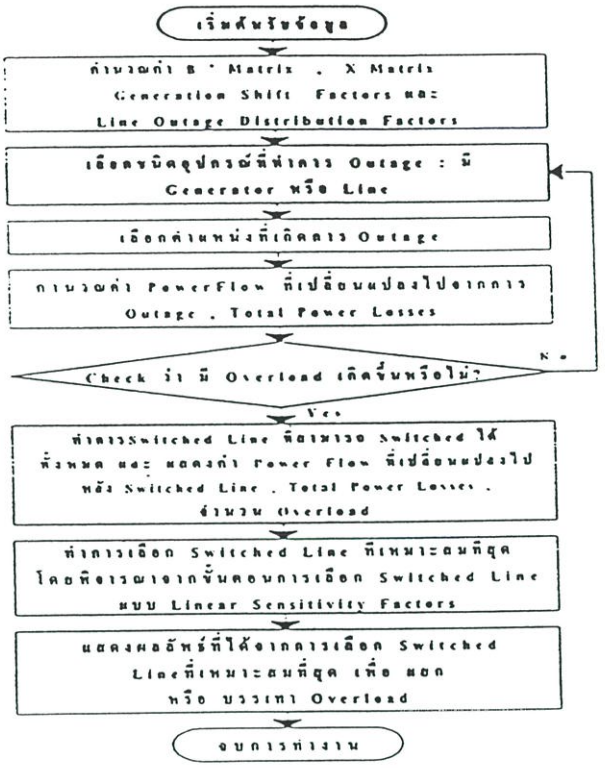
## 3. ขั้นตอนการเลือกสวิทช์ไลน์ และการคำนวณ

### 3.1 วิธี Linear Sensitivity Factors [2]

ทำการเลือก Switched Line โดยพิจารณาจาก

- กรณีที่สามารถแยก Overload ได้สมบูรณ์ มีหลาย Line จะทำการเลือก Switched Line ที่มีค่า Total Power Losses ต่ำที่สุด
- กรณีที่ไม่สามารถแยก Overload ได้ แต่สามารถบรรเทา Overload ได้ หลาย Line จะทำการเลือก Switched Line ที่สามารถบรรเทา Overload ได้มากที่สุด

โดยสามารถดูขั้นตอนคำนวณได้จากโฟล์วชาร์ตรูปที่4




รูปที่4 ขั้นตอนการคำนวณวิธี Linear Sensitivity Factors

### 3.2 วิธี Z-Matrix [1]

จากรูปที่ 1 คือ $Z'$-Matrix ที่ Line i – j ยังไม่ได้ Switched และ รูปที่ 3 คือ $Z''$-Matrix ที่ Line i – j ได้ Switched แล้ว ซึ่งจะเห็นได้ว่าขณะคำนวณจะพิจารณาเฉพาะสมาชิก Matrix a , i และ b, i เท่านั้น ดังนั้น สมาชิก Matrix ตัวอื่นจะไม่นำมาร่วมในการคำนวณ แต่จาก [1] จะคำนวณที่ Full Matrix แล้วเก็บไว้ในหน่วยความจำเลย เวลาจะใช้งานก็ค่อยนำออกมาใช้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเปลืองหน่วยความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างเมตริกซ์ใหม่ โดยจะพิจารณาเฉพาะสมาชิกเมตริกซ์ที่จะใช้งานเท่านั้น จะช่วยลดหน่วยความจำ และเวลาในการประมวลผล จากเงื่อนไขการทดสอบ Overload ที่กล่าวมาข้างต้น ทำการคำนวณ Power Flow ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ Switched Line ได้จากสมการที่ 7

$$P'_{ab} + jQ'_{ab} = \frac{(P_{ab} + jQ_{ab})(Z'_{ai} - Z'_{bi})^*}{(Z_{ai} - Z_{bi})^*} \qquad (7)$$

โดย $P'_{ab}$ , $Q'_{ab}$ = ค่า Power Flow ที่เปลี่ยนแปลงไปบน Line a-b หลังจากที่ได้ Switched Line i – j

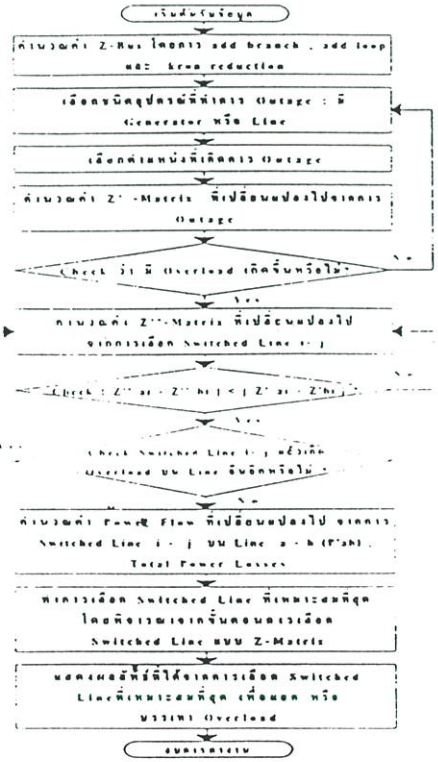
ทำการเลือก Switched Line โดยพิจารณาจาก

- ถ้าค่า $|Z''_{a-z}-Z''_{i-j}| < |Z'_{a-z}-Z'_{i-j}|$ แสดงว่าเมื่อ Switched Line i - j แล้วค่า Overload ของ Line a – b จะลดลงจากเดิม หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบผลข้างเคียงของ Overload นอกเหนือจาก Line a – b ทุก ๆ Line ว่าเมื่อได้ Switched Line i – j แล้วนั้นจะเกิด Overload ขึ้นบนบน Line อื่นๆ อีกหรือไม่ ถ้าเกิด Overload ขึ้นบนบน Line อื่นๆอีก จะไม่พิจารณาเลือก Switched Line i – j นั้นๆ ถึงแม้ว่าจะลดค่า Overload บน Line a – bได้จริง แต่ถ้าไม่เกิด Overload ขึ้นมาอีกจะเลือก Switched Line ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กรณีที่สามารถแยก Overload ได้สมบูรณ์ มีค่า $|Z''_{a-z}-Z''_{i-j}| < |Z'_{a-z}-Z'_{i-j}|$ หลายค่า จะพิจารณาเลือก Switched Line ที่มีค่า $P'_{a-b}$ ต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 กรณีที่ไม่สามารถแยก Overload ได้สมบูรณ์ แต่สามารถบรรเทา Overload ได้มีค่า $|Z''_{a-z}-Z''_{i-j}| < |Z'_{a-z}-Z'_{i-j}|$ หลายค่า จะทำการเลือก Switched Line ที่สามารถบรรเทา Overload ได้มากที่สุด

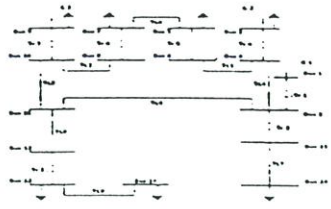
โดยสามารถดูขั้นตอนคำนวณได้จากโฟล์วชาร์ตรูปที่5




รูปที่5 ขั้นตอนการคำนวณ วิธี Z-Matrix

## 4. การทดสอบโปรแกรมการคำนวณ

ระบบไฟฟ้ากำลัง 16 Bus[3] แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ระบบไฟฟ้ากำลัง 16 Bus[3] ที่ใช้ในการทดสอบ

ทำการวิเคราะห์ Overload ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง 16 บัส โดยการทดสอบเอาหน่วยอุปกรณ์ได้ดังนี้

- กรณีที่ 1 ทดสอบการ Outage Line โดยสมมุติเลือกทดสอบ Outage L5 ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ทดสอบ Outage L5 (2->11)

| | Base Case (MW) | Limit (MW) | Outage Flow (MW) |
|---|---|---|---|
| L1 : 4 -> 6 | 63.8847 | 322.65 | 48.92602 |
| L2 : 8 -> 10 | -101.6407 | 322.65 | -116.7022 |
| L3 : 10 -> 11 | 102.1786 | 322.65 | 87.69437 |
| L4 : 2 -> 4 | -35.42562 | 322.65 | -50.35255 |
| L5 : 2 -> 11 | -14.66313 | 322.65 | Outage |
| L6 : 5 -> 7 | -11.45059 | 181.08 | -26.24322 |
| L7 : 15 -> 16 | 158.8944 | 181.08 | 158.8936 |
| L8 : 11 -> 12 | 86.35395 | 322.65 | 86.05807 |
| L9 : 13 -> 14 | 35.70772 | 78.48 | 35.69407 |
| Tr1 : 1 -> 2 | 110.1066 | 180 | 110.1302 |
| Tr2 : 15 -> 2 | -158.8955 | 180 | -158.8923 |
| Tr3 : 13 -> 12 | -85.70779 | 108 | -85.36785 |
| Tr4 : 3 -> 4 | 99.99998 | 117 | 99.99998 |
| Tr5 : 5 -> 6 | -63.54434 | 108 | -60.83269 |
| Tr6 : 7 -> 8 | -101.4628 | 108 | -116.7874 |
| Tr7 : 9 -> 10 | 205 | 225 | 205 |
| Total Losses | 15.10635 | | 15.88791 |

จะเห็นได้ว่า เมื่อทดสอบ Outage L5 แล้วนั้นจะเกิด Overload ขึ้นบน Tr6 (7->8) = -116.7874 MW (เกิด Overload ขึ้น8.136502 %) ดังนั้นจึงต้องทำการเลือก Switched Line เพื่อแยก หรือ บรรเทา Overload ด้วยวิธี Linear Sensitivity Factors ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 วิธี Linear Sensitivity Factors

| | Flow Limit | Sw L1 | Sw L2 | Sw L4 | Sw L6 | Sw Tr5 | Sw Tr6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 : 4->6 | 322.65 | Switched | -373.9606 | 292.1516 | 89.96674 | -18.2541 | 156.3543 |
| L2 : 8->10 | 322.65 | -159.1592 | Switched | -340.0271 | -70.20293 | -184.1716 | -9.209341 |
| L3 : 10->11 | 322.65 | 118.5792 | -395.9794 | 106.7489 | 118.6826 | 19.26875 | 196.7013 |
| L4 : 2->4 | 322.65 | -129.2008 | -339.2173 | Switched | -40.18668 | -118.3363 | 58.36261 |
| L5 : 2->11 | 322.65 | Outage | Outage | Outage | Outage | Outage | Outage |
| L6 : 5->7 | 181.08 | -81.30166 | 235.3042 | -40.49029 | Switched | -93.01819 | 89.34117 |
| L7 : 15->16 | 181.08 | 158.7163 | 158.4364 | 151.1241 | 159.0707 | 158.8935 | 158.8923 |
| L8 : 11->12 | 322.65 | 49.56921 | -39.79391 | 92.18887 | 126.9917 | 86.32121 | 85.63112 |
| L9 : 13->14 | 78.48 | 33.95655 | 29.59672 | -21.87736 | 37.59706 | 35.70629 | 35.67455 |
| Tr1 : 1->2 | 180 | 112.64 | 121.6119 | 111.3953 | 110.5013 | 111.9996 | 107.549 |
| Tr2 : 15->2 | 180 | -158.8972 | -158.8909 | -158.8878 | -158.8919 | -158.8941 | -158.8899 |
| Tr3 : 13->12 | 108 | -84.96932 | -85.62281 | -85.43793 | -85.00191 | -81.74796 | -91.12765 |
| Tr4 : 3->4 | 117 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 |
| Tr5 : 5->6 | 108 | 15.10143 | -350.3848 | -63.66902 | -60.055 | Switched | 23.52707 |
| Tr6 : 7->8 | 108 | -180.7478 | -15.30731 | -81.65864 | -105.3613 | -181.5792 | Switched |
| Tr7 : 9->10 | 225 | 205 | 205 | 205 | 205 | 205 | 205 |
| Total Losses | | 14.78967 | 21.42482 | 19.64194 | 14.62886 | 16.22943 | 14.68252 |

จากตารางที่ 2 L1,2,4,6 และ Tr5,6 สามารถ Switched ได้ จะเห็นได้ว่า เมื่อ Switched L1 จะเกิด Overload ที่ Tr6, เมื่อ Switched L2 จะเกิด Overload ที่ L1,3,4,6 และ Tr5 , เมื่อ Switched L4 จะเกิด Overload ที่

L2 , เมื่อ Switched Tr5 จะเกิด Overload ที่ Tr6 , เมื่อ Switched Tr6 จะเกิด Overload ที่ Tr5 แต่ เมื่อ Switched L6 จะไม่เกิด Overload ขึ้นมา ดังนั้น เมื่อเลือก Switched L6 สามารถที่จะแยก Overloadได้อย่างสมบรูณ์ (ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด = 1.0585938 s) แต่ถ้าใช้วิธี Z-Matrix คำนวณผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 วิธี Z-Matrix

| | Z2-Z1 (Tr no 6) | Power Flow (Tr no 6) | Comment (Tr no 6) |
|---|---|---|---|
| Outage L5 : 2 -> 11 | 0.003134247 | -117.5351 | Overload |
| Switch L1 : 4 -> 6 | 0.0008870323 | -182.6733 | Overload increases |
| Switch L2 : 8 -> 10 | -0.02322865 | -12.81375 | Overload decreases |
| Switch L4 : 2 -> 4 | -0.004347885 | -79.16507 | Overload decreases |
| Switch L6 : 5 -> 7 | -0.01563073 | -102.8677 | Overload decreases |
| Switch Tr5 : 5 -> 6 | 0.02603661 | -183.5047 | Overload increases |
| Switch Tr6 : 7 -> 8 | Tr removed | Tr removed | Tr removed |

จากตารางที่ 3 ค่า Z2 , Z1 คือ $Z2=|Z''_{ik}-Z''_{il}|$ , $Z1=|Z'_{ik}-Z'_{il}|$ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อ Switched L1 , Tr5 จะได้ค่า Z2-Z1 เป็นบวก แสดงว่า ค่า Overload บน Tr6 เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อ Switched L2,4,6 ได้ค่า Z2-Z1 เป็นลบ แสดงว่า ค่า Overload บน Tr6 ลดลง ดังนั้นวิธี Z-Matrix แบบเก่า [1] จะเลือก Switched L2 เพราะว่า มีค่า $P'_{ik}$ ต่ำที่สุด = -12.81375 MW (ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด = 0.5039063 s) แต่ถ้าใช้วิธี Z-Matrix ที่ปรับปรุงใหม่ จะทำการตรวจสอบผลข้างเคียงแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่4 แสดงการตรวจสอบผลข้างเคียงของ Overload

| | Z2-Z1 of L2 | Flow of L2 | Z2-Z1 of L4 | Flow of L4 | Z2-Z1 of L6 | Flow of L6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 : 4 -> 6 | [illegible] | [illegible] | 0.0037232307 | 244.3095 | 0.0034195* | 92.45449 |
| L2 : 8 -> 10 | Switched | Switched | [illegible] | [illegible] | [illegible] | -67.78956 |
| L3 : 10 -> 11 | [illegible] | [illegible] | 0.0032209*7 | 109.4369 | 0.0033049 | 121.3705 |
| L4 : 2 -> 4 | [illegible] | [illegible] | Switched | Switched | [illegible] | -37.69311 |
| L5 : 2 -> 11 | Outage | Outage | Outage | Outage | Outage | Outage |
| L6 : 5 -> 7 | [illegible] | [illegible] | 0.0019009706 | -32.41576 | Switched | Switched |
| L7 : 15 -> 16 | 0 | 159.0936 | [illegible] | 149.3415 | 0 | 159.0936 |
| L8 : 11 -> 12 | [illegible] | -36.30104 | 0.0032795*2 | 94.37662 | 0.0030*39 | 124.6796 |
| L9 : 13 -> 14 | 0 | 35.69407 | [illegible] | -94.36301 | 0 | 35.69407 |
| Tr1 : 1 -> 2 | [illegible] | 124.2999 | [illegible] | 114.0033 | [illegible] | 113.1093 |
| Tr2 : 15 -> 2 | 0 | -159.0923 | 0 | -159.0923 | 0 | -159.0923 |
| Tr3 : 13 -> 12 | 0 | -85.36705 | 0 | -85.36705 | 0 | -85.36705 |
| Tr4 : 3 -> 4 | [illegible] | 102.8479 | [illegible] | 98.21742 | [illegible] | 102.8479 |
| Tr5 : 5 -> 6 | 0.0232078* | -182.3103 | [illegible] | -85.50649 | [illegible] | -61.99007 |
| Tr6 : 7 -> 8 | [illegible] | -12.81375 | [illegible] | -79.16507 | [illegible] | -102.8677 |
| Tr7 : 9 -> 10 | [illegible] | 202.2174 | [illegible] | 204.2356 | [illegible] | 203.7063 |
| Total Losses | | 22.41195 | | 20.39257 | | 15.616 |

จากตารางที่ 4 เมื่อเลือก Switched L2 ค่า Z2-Z1 ของ Tr6 = -0.02322865 และ Power Flow Tr6 = -12.81375 MW สามารถแยก Overload ได้สมบรูณ์ แต่ถ้าตรวจสอบผลข้างเคียงของ Overload บน Line อื่นๆ แล้ว เช่น เมื่อเลือก Switched L2 แล้ว L1 มีค่า Z2-Z1 = 0.02001353 , Power Flow L1 = 376.6487 MW (ค่า Power Flow L1 จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 1 คือ Power Flow L1 = 48.92602 MW เมื่อ Outage L5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเกิด Overload ขึ้น เพราะว่า Power Flow Limit L1 = 322.65 MW) เป็นต้น แสดงว่าเมื่อเลือก Switched L2 จะเกิด Overload ขึ้นที่ L1,3,4,6 และ Tr5 , เมื่อ Switched L4 จะเกิด Overload ที่ L2 แต่ เมื่อ Switched L6 จะไม่เกิด Overload ขึ้นมา ดังนั้น ถ้าใช้วิธี Z-Matrix ที่ปรับปรุงใหม่แล้ว จะเลือก Switched L6 เพราะว่า สามารถที่จะแยก Overloadได้อย่างสมบรูณ์ และไม่เกิด Overload ขึ้นบน Line อื่นๆอีก (ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด = 0.4414063 s)

- กรณีที่ 2 ทดสอบการ Outage Generator no. 3 ซึ่งต่ออยู่ที่ Bus 9 ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ทดสอบ Outage Generator no. 3

| | Base Case (MW) | Limit (MW) | Outage Flow (MW) |
|---|---|---|---|
| L1 : 4 -> 6 | 63.8847 | 322.65 | 136.5103 |
| L2 : 8 -> 10 | -101.6407 | 322.65 | -30.93002 |
| L3 : 10 -> 11 | 102.1786 | 322.65 | -45.86575 |
| L4 : 2 -> 4 | -35.42562 | 322.65 | 37.73447 |
| L5 : 2 -> 11 | -14.66313 | 322.65 | 136.6628 |
| L6 : 5 -> 7 | -11.45059 | 181.08 | 59.9821 |
| L7 : 15 -> 16 | 158.8949 | 181.08 | 159.0109 |
| L8 : 11 -> 12 | 86.35305 | 322.65 | 87.29842 |
| L9 : 13 -> 14 | 35.70778 | 78.48 | 35.75172 |
| Tr1 : 1 -> 2 | 110.1066 | 180 | [illegible] |
| Tr2 : 15 -> 2 | -158.895 | 180 | -159.1207 |
| Tr3 : 13 -> 12 | -85.70779 | 108 | -85.90181 |
| Tr4 : 3 -> 4 | 99.99998 | 117 | 99.99998 |
| Tr5 : 5 -> 6 | -63.54939 | 108 | [illegible] |
| Tr6 : 7 -> 8 | -101.4628 | 108 | -30.07152 |
| Tr7 : 9 -> 10 | 205 | 225 | -14.45015 |
| Total Losses | 15.10635 | | 15.1064 |

จะเห็นได้ว่า เมื่อทดสอบ Outage Generator no. 3 ซึ่งต่ออยู่ที่ Bus 9 แล้วนั้นจะเกิด Overload ขึ้นบน Tr1 (1->2) = 340.5195 MW (เกิด Overload ขึ้น 89.17752 %) และ Tr5 (5->6) = -134.0273 MW (เกิด Overload ขึ้น 24.09934 %) ดังนั้นจึงต้องทำการเลือก Switched Line เพื่อแยก หรือ บรรเทา Overload แสดงได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 วิธี Linear Sensitivity Factors

| | Flow Limit | Sw L1 | Sw L2 | Sw L3 | Sw L4 | Sw L5 | Sw L6 | Sw Tr5 | Sw Tr6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 : 4 -> 6 | 322.65 | Switched | 168.6292 | 180.8959 | 98.54694 | 275.9276 | 76.46619 | -5.174279 | 168.3499 |
| L2 : 8 -> 10 | 322.65 | -169.1202 | Switched | 13.66645 | -68.86697 | 109.3955 | -91.30184 | -173.2747 | 0.8012924 |
| L3 : 10 -> 11 | 322.65 | -196.0831 | -14.89542 | Switched | -83.30576 | 89.17597 | -104.4165 | -191.1666 | -13.55693 |
| L4 : 2 -> 4 | 322.65 | -95.42986 | 70.19452 | 80.64227 | Switched | 176.3559 | -23.41239 | -105.6449 | 69.95544 |
| L5 : 2 -> 11 | 322.65 | 275.3719 | 107.2366 | 91.67126 | 173.6927 | Switched | 197.1886 | 264.0535 | 103.6629 |
| L6 : 5 -> 7 | 181.08 | -74.29056 | 91.35148 | 104.2921 | 22.62933 | 197.8518 | Switched | -81.84911 | 91.57176 |
| L7 : 15 -> 16 | 181.08 | 159.0161 | 159.0167 | 159.0121 | 159.0134 | 159.0235 | 159.012 | 159.0126 | 159.0105 |
| L8 : 11 -> 12 | 322.65 | 88.25336 | 87.89975 | 87.85349 | 87.49958 | 90.04724 | 87.63634 | 87.85339 | 87.17431 |
| L9 : 13 -> 14 | 78.48 | 35.7061 | 35.74295 | 35.74051 | 35.76089 | 35.87951 | 35.76753 | 35.7775 | 35.74593 |
| Tr1 : 1 -> 2 | 180 | 345.8812 | 344.0193 | 337.3936 | 339.1726 | 340.2941 | 338.5788 | [illegible] | [illegible] |
| Tr2 : 15 -> 2 | 180 | -159.1311 | -159.1203 | -159.123 | -159.1255 | -159.1454 | -159.1229 | -159.1245 | -159.12 |
| Tr3 : 13 -> 12 | 108 | -85.05022 | -85.97952 | -86.01051 | -85.92716 | -89.87011 | -87.81872 | -78.2674 | -87.61809 |
| Tr4 : 3 -> 4 | 117 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 | 99.99998 |
| Tr5 : 5 -> 6 | 108 | 2.161252 | -165.0412 | -178.6227 | -96.70747 | -278.8534 | -24.19329 | Switched | -169.5 |
| Tr6 : 7 -> 8 | 108 | -166.2436 | 83.99372 | 84.87794 | -67.40981 | 112.7565 | -89.92558 | [illegible] | Switched |
| Tr7 : 9 -> 10 | 225 | -14.45015 | -14.45015 | -14.45015 | -14.45015 | -14.45015 | -14.45015 | -14.45015 | -14.45015 |
| Total Losses | | 14.73594 | 16.32446 | 18.1345 | 14.78319 | 15.89797 | 15.05666 | 15.34911 | 14.72426 |

จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อ Switched L1,2,3,4,5,6 และ Tr 5,6 แล้วนั้น ค่า Power Flow Tr1 ไม่สามารถที่จะแยก Overload ได้ แต่เมื่อเลือก Switched L1,4,6 และ Tr5 สามารถแยก Overload บน Tr5 ได้(แต่เมื่อเลือก Switched

L1 จะเกิด Overload บน Tr6 ขึ้นมาแทนที่ Tr5 และ เมื่อเลือก Switched Tr5 จะเกิด Overload บน Tr6) แต่เมื่อเลือก Switched L4,6 จะไม่เกิด Overload เพิ่มขึ้นมาอีก ดังนั้นจึงเลือก Switched L4 เพราะว่ามีค่า Total Power Losses ต่ำที่สุด=14.78319 MW(ส่วน Switched L6 มีค่า Total Power Losses=15.05666MW)จึงจะสามารถบรรเทา Overloadได้มากที่สุด(ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด=1.4799807 s) แต่ถ้าใช้วิธี Z-Matrix ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 วิธี Z-Matrix

| | Z2-Z1 (Tr no.1) | Power Flow (Tr no.1) | Comment (Tr no.1) |
|---|---|---|---|
| Outage Gen no.3 | 0.01326897 | 341.2652 | Overload |
| Switch L1 : 4 -> 6 | 0.02119777 | 348.5691 | Overload increases |
| Switch L2 : 8 -> 10 | 0.02421251 | 346.7059 | Overload increases |
| Switch L3 : 10 -> 11 | -0.02486301 | 335.611 | Overload decreases |
| Switch L4 : 2 -> 4 | -0.02746708 | 337.3901 | Overload decreases |
| Switch L5 : 2 -> 11 | -0.02746708 | 338.5115 | Overload decreases |
| Switch L6 : 5 -> 7 | -0.02260954 | 336.7962 | Overload decreases |
| Switch Tr5 : 5 -> 6 | 0.02260954 | 347.1457 | Overload increases |
| Switch Tr6 : 7 -> 8 | -0.02345094 | 337.9718 | Overload decreases |
| | Z2-Z1 (Tr no.5) | Power Flow (Tr no.5) | Comment (Tr no.5) |
| Outage Gen no.3 | 0.00X671455 | -134.7749 | Overload |
| Switch L1 : 4 -> 6 | 0.0051813253 | -0.3786923 | Overload decreases |
| Switch L2 : X -> 10 | 0.019X3946 | -166.9667 | Overload increases |
| Switch L3 : 10 -> 11 | 0.01624X35 | -180.5482 | Overload increases |
| Switch L4 : 2 -> 4 | -0.001X6XX4X | -94.2139 | Overload decreases |
| Switch L5 : 2 -> 11 | 0.001X6XX4X | -274.9789 | Overload increases |
| Switch L6 : 5 -> 7 | -0.02X59905 | -71.69972 | Overload decreases |
| Switch Tr5 : 5 -> 6 | Tr removed | Tr removed | Tr removed |
| Switch Tr6 : 7 -> X | 0.02395799 | -166.597 | Overload increases |

จากตารางที่ 7 การ Switched L1,2,3,4,5,6 และ Tr5,6 ไม่สามารถที่จะแยก Overload บน Tr1 ได้ แต่การ Switched L1,4,6 สามารถที่จะแยก Overload บน Tr5ได้ ดังนั้นวิธี Z-Matrix แบบเก่า [1] จะเลือก Switched L1 เพราะว่า มีค่า $P'_{ab}$ ต่ำที่สุด = 0.3786923 MW (ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด=0.5410156 s)แต่ถ้าใช้วิธี Z-Matrix ที่ปรับปรุงใหม่ตรวจสอบผลข้างเคียงแสดงได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่8 แสดงการตรวจสอบผลข้างเคียงของ Overload

| | Z2Z1SwL1 | FlowSwL1 | Z2Z1SwL4 | FlowSwL4 | Z2Z1SwL6 | FlowSwL6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 4--6 | Switched | Switched | -0.00159531 | 95.3696 | -0.02463689 | 74.62363 |
| L2 8--10 | 0.0004467398 | -171.0456 | 0.0001596171 | -70.7154 | 0.00115184 | -93.22591 |
| L3 10--11 | 0.0005700769 | -188.0085 | 0.0002395384 | -85.23123 | 0.00167902 | -106.3419 |
| L4 2--4 | 0.0003913453 | -97.34635 | Switched | Switched | -0.02982322 | -20.91883 |
| L5 2--11 | 0.0011663631 | 278.0999 | 0.0003994346 | 176.3606 | 0.00276806 | 199.7965 |
| L6 5--7 | 0.0005776167 | -76.20983 | -0.0000645633 | 20.14577 | Switched | Switched |
| L7 15--16 | 0 | 1.590109 | 0.0074500581 | 1.617013 | 0 | 1.590109 |
| L8 11--12 | 0.0074500581 | 90.94131 | 0.0074500581 | 90.15375 | 0 | 87.29642 |
| L9 13--14 | 0.0074500581 | 38.48405 | 0.0074500581 | 38.4484 | 0.0074500581 | 38.45545 |
| Tr1 1--2 | 0.0021197774 | 549.8559156 | 0.0007457008 | 543.3739014 | 0.0022609541 | 535.6796246 |
| Tr2 15--2 | 0.0074500581 | -161.0466 | 0 | -159.1207 | 0.0074500581 | -161.0483 |
| Tr3 13--12 | -0.0074500581 | -82.55666 | -0.0074500581 | -83.33359 | 0 | -85.90181 |
| Tr4 3--4 | -0.0045331374 | -98.21742 | -0.0008380045 | 98.21742 | -0.0013757 | 98.21742 |
| Tr5 5--6 | -0.0005181253 | 0.3786923 | -0.0001868848 | -94.2139 | -0.0025699 | -71.69972 |
| Tr6 7--8 | 0.0005179405 | 166.9666868 | 0.0001868868 | -69.41528 | 0.0012884 | -91.85104 |
| Tr7 9--10 | 0 | -14.45015 | 0 | -14.45015 | 0 | -14.45015 |
| Total Loses | | 15.72308 | | 15.77032 | | 16.04379 |

จากตารางที่ 8 ถ้าตรวจสอบผลข้างเคียงของ Overload บน Line อื่นๆ เมื่อเลือก Switched L1 จะเกิด Overload ขึ้นที่ Tr1,6 เมื่อ Switched L4,6 จะเกิด Overload ที่ Tr1 ดังนั้น ถ้าใช้วิธี Z-Matrix ที่ปรับปรุงใหม่แล้ว จะเลือก Switched L4 จึงจะสามารถบรรเทา Overloadได้มากที่สุด เนื่องจากมีค่า Total Power Losses ต่ำที่สุด = 15.77032 MW(ส่วน Switched L6 มีค่า = 16.04379 MW)ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด =0.4902344 s) # สรุปผลการเลือกดูได้จากตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงค่าเวลา และ การเลือก Switched Line

| | เวลา(s) | เวลา(s) | เลือก Switched Line | เลือก Switched Line |
|---|---|---|---|---|
| | Outage Line no.5 | Outage Gen no.3 | Outage Line no.5 | Outage Gen no.3 |
| วิธี Linear Sensitivity Factors | 1.0585938 | 1.4799807 | Line no.6 (5 - 7) | Line no.4 (2 - 4) |
| วิธี Z-Matrix เดิม | 0.5019063 | 0.5410156 | Line no.2 (8 - 10) | Line no.1 (4 - 6) |
| วิธี Z-Matrix ปรับปรุงใหม่ | 0.4414063 | 0.4902344 | Line no.6 (5 - 7) | Line no.4 (2 - 4) |

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงจะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธี Z-Matrix แบบเดิม และให้ผลในการเลือก Switched Line ที่ตรงกับวิธี Linear Sensitivity Factors , ส่วนวิธี Linear Sensitivity Factorsใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุด จึงเหมาะสมที่จะคำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็กๆ ส่วนวิธี Z-Matrix เหมาะสมที่จะคำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆ

## 5. บทสรุป

จากการทดสอบ Outage Generator และ Line กับระบบไฟฟ้ากำลัง 16 Bus [3] นั้น สรุปได้ว่าวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุง ใช้เวลาในการคำนวณเพื่อเลือก Switched Line น้อยที่สุด โดยน้อยกว่าวิธี Z-Matrix แบบเดิม [1] และ วิธี Linear Sensitivity Factors [2] ดังนั้น วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงนี้ จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุด และเหมาะสมที่สุด ที่จะใช้คำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆ ส่วนวิธี Linear Sensitivity Factors นั้นเหมาะสมที่จะใช้คำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็กๆ

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] E.B.Makram , K.P.Thornton and H.E.Brown ," Selection of Line to be Switched to Eliminate Overload Lines using a Z-matrix method," IEEE Trans. Power System,Vol.4 , May 1989, pp653-661.

[2] Allen J.Wood , Bruce F.Wollenberg ,"Power Generation , Operation , And Control," John Wiley and Sons , 1984 .

[3] Charles A.Gross ,"Power System Analysis." John Wiley & Sons , Second Edition , 1986 .

ISSN 0125-1724

วิศวสาร ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2546

1. วงจรความต้านทานแบบลอยตัวที่ควบคุมด้วยกระแสใช้มอสทรานซิสเตอร์ 1
*สมนึก ห้าวหาญ วิทยชัย เลิศหาญ ไชโย ธรรมรัตน์*

2. วงจรอ้างอิงกำลังที่ใช้วงจรสายพานกระแสควบคุมด้วยกระแส 7
*วิจิศรา เพียรกิจ สิทธิพร เพียรกิจ วิวัฒน์ กิรานนท์*

3. วงจรบลเลอร์สี่ช่วงแบบลอยตัวโดยใช้วงจรทรานส์ลิเนียร์แบบมอสเฟทและการประยุกต์ 13
*ภัทรา เพียรชอบ อมร จิรเสรีอมรกุล วัลลภ สุระทำพลธร*

4. การศึกษาเปรียบเทียบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (CCM) และแบบไม่ต่อเนื่อง (DCM) 19
*ศุภชัย หอวิมานพร ชนินทร์ บุญลักษณานุสรณ์*

5. เอทีเอ็มสวิทช์ที่มีบัฟเฟอร์ทางด้านขาเข้าซึ่งมีนโยบายการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูลภายใต้ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง 25
*ปิติพงษ์ ประภามณฑล สุวิพล สิทธิชัมภาค เกรียงไกร วงศ์ไรจน์ภรณ์*

6. การจัดเส้นทางของโครงข่ายโทรศัพท์ให้ดีที่สุดโดยวิธีซอฟต์ลิมิต 31
*ฉัตรชัย วัฒนพันธุ์ มนูญ สุชเกษม ณวัล พึ่งมา*

7. การปรับปรุงคุณภาพของแต่ละคลาสที่ได้จากตัวจำแนกความเหมือนสูงสุด 37
*สมบัติ อิสระวาณิชย์ ฟูศักดิ์ ชีวสุวิทย์*

8. การแปลงภาพระดับสีเทาเป็นภาพสองระดับโดยใช้วิธีของเอ็นโทรปีด้วยบอร์ดสตาร์ทเตอร์คิท TMS 320C31 43
*เพชร ไจหาญ ฟูศักดิ์ ชีวสุวิทย์*

9. การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับแบ่งประเภทฟอลต์ในสายส่ง 49
*อรรถพล เจ่าพิทักษ์กุล ศุลี บรรจงจิตร สมชาติ จิรวิภากร สุธีวัฒน์ มงบุช*

10. การระบุตำแหน่งฟอลต์ในสายส่งโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียม 55
*อรรถพล เจ่าพิทักษ์กุล ศุลี บรรจงจิตร สมชาติ จิรวิภากร อัครัช บรรจงศิลป์*

11. การหาฟอลต์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม 61
*พุฒิชจร บุญมี มารุต ตั้นติเศชามงคล สมชาติ จิรวิภากร นิทัศน์ กฤษณจินดา*

12. การวิเคราะห์ฟอลต์ที่ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสโดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP 67
*จิตรี อินทร์พยุง มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ บุญเลิศ สื่อเฉย ปัญญา มาลีวัตร สิริวิช ทัดสวน*

13. การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเชิงเศรษฐศาสตร์ 73
*บุญเลิศ สื่อเฉย ปัญญา มาลีวัตร สมศักดิ์ สิริโปราณานนท์ ศุลี บรรจงจิตร*

14. การออกแบบราคาที่เหมาะสมของหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้จีเนติกอัลกอริธึม 79
*ชวรัตน์ เก่งธรรมกิจ ต่อพงศ์ ภูมิภาค ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย*

15. การออกแบบโปรแกรมวิเคราะห์การใช้ไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม 85
*มารุต ตันติเศชามงคล สมชาติ จิรวิภากร*

16. การป้องกันโหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีการปรับตารางการปลดแหล่งจ่ายและไลน์สวิทช์ชิ่ง 91
*สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์*

17. การวิเคราะห์และจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน 97
*นิติพงษ์ สมไชยวงค์ ประภาษ อุคคกิมาพันธุ์*

18. Semantic Query for Content-Based Image Retrieval Using Genetic Algorithm 10
*Cattleya Duanggate Orachat Chitsobhuk Suphamit Chittayasothorn*

19. Robust Inverse Response Compensator 10
*Pratch Tontirattiphol Mongkol Janchookiat Kiattisak Kumwachara*

20. อิทธิพลของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน 11
*นิยม ศรีศิริสิทธิกุล พงษ์เจต พรหมวงศ์ ภูรินทร์ อัศวกุลธร*

# การป้องกันโหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีการปรับตารางการป้อนแหล่งจ่ายและไลน์สวิทซ์ชิ่ง

# Overload Protection in Electric Power System by Generation Rescheduling and Line Switching

สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**บทคัดย่อ**

บทความวิจัยนี้ นำเสนอวิธีการป้องกันโหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีการปรับตารางการป้อนแหล่งจ่ายและไลน์สวิทซ์ชิ่ง โดยจะทำการวิเคราะห์โหลดเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 Bus [3] ด้วยการทดสอบ outage transmission line และ ทำการป้องกันผลของโหลดเกินที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์และเจนเนอเรชั่นชิพ เพื่อที่จะขจัดโหลดเกินที่เกิดขึ้นให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง

**Abstract**

This paper presents a method for the overload protection in an electric power system by generation rescheduling and line switching. Test of overload in the electric power system are performed on an IEEE 14-bus [3] system by testing outage transmission line. The protection of the overload by selecting switched line and shifted generator to eliminate the overload is presented.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องวางแผนเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคต โดยระบบจะต้องมีความน่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น การศึกษาทางด้าน contingency analysis จึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยเมื่อเกิดการ outage ขึ้นที่อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังใดๆ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดสภาวะ overload ขึ้นได้ ดังนั้นจะต้องมีการป้องกันโดยจะต้องขจัดหรือบรรเทา overload ที่เกิดขึ้นนี้ให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง โดยในบทความวิจัยนี้จะกล่าวถึงวิธีการในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เกิด overload ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังแล้ว เมื่อทำการเลือกสวิทซ์ไลน์เพียงอย่างเดียวนั้น ไม่สามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นได้หรือเมื่อทำการ shift generation เพียงอย่างเดียวนั้น ก็ไม่สามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน ดังนั้น ในบทความวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอวิธีการในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์ ร่วมกับการ shift generation โดยจะทำการเลือกสวิทซ์ไลน์ ที่สามารถบรรเทา overload ได้ มากที่สุดก่อน ด้วยวิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงใหม่ [1] ที่เพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์ผลข้างเคียงของ overload ที่เกิดขึ้นบนไลน์อื่นๆ และ ทำการปรับปรุงโครงสร้างของเมตริกซ์ใหม่ โดยจะพิจารณาเฉพาะสมาชิกเมตริกซ์ที่จะใช้งานเท่านั้น ซึ่งจะช่วยลด

หน่วยความจำ และ เวลาในการประมวลผล และ หลังจากนั้น จะทำการ shift generation ด้วยเทคนิคการหาค่าผลรวมของ generation shifts ที่ minimize ที่สุด โดยวิธี LP [2] และ เมื่อทำการ redistributed power flows ใหม่แล้วนั้น ก็สามารถ constraints ค่าให้อยู่ภายในค่า power flow limits ของ line นั้นๆได้ โดยสามารถขจัด overload ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งในบทความวิจัยนี้จะพิจารณาทำการทดสอบ outage transmission line กับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 Bus [3] โดยจะใช้โปรแกรม microsoft visual basic 6.0 มาช่วยในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ ส่วนการคำนวณ load flow ในบทความวิจัยนี้ จะใช้วิธี the fast decoupled method ในการคำนวณหาผลลัพธ์ หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการเลือกสวิทช์ไลน์เพียงอย่างเดียว , การ shift generation เพียงอย่างเดียว และการเลือกสวิทช์ไลน์ร่วมกับการ shift generation ว่าให้ผลลัพธ์ในการคำนวณแตกต่างกันอย่างไร , วิธีไหนสามารถขจัด Overload ได้สมบูรณ์ที่สุด , วิธีไหนเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

## 2. ทฤษฎี

ทำการวิเคราะห์ overload ที่เกิดขึ้น ด้วยการทดสอบเอาท์เตจอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

### 2.1 วิธี Linear Sensitivity Factors [2]

2.1.1 The generation shift factors

พิจารณาได้จากสมการที่ 1

$$a_l = \frac{X_{ni} - X_{mi}}{x_l} \qquad (1)$$

โดย $a_l$ = ค่า generation shift factors

$x_l$ = ค่า line reactance ของ line l

line l = บัส n -> บัส m

i = บัส ที่ generator ต่ออยู่

$X_{ni}$ , $X_{mi}$ = ค่า X-Matrix ของ ระบบที่ทดสอบ

2.1.2 The line outage distribution factors

พิจารณาได้จากสมการที่ 2

$$d_{l,k} = \frac{x_k}{x_l}\left[\frac{X_{in} - X_{jn} - X_{im} + X_{jm}}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})}\right] \qquad (2)$$

โดย $d_{lk}$ = ค่า line outage distribution factors เมื่อ line k outage

$x_l$ = ค่า line reactance ของ line l

$x_k$ = ค่า line reactance ของ line k

line l = บัส i -> บัส j

line k = บัส n -> บัส m

2.1.3 The compensated generation shift sensitivity factors

พิจารณาได้จากสมการที่ 3

$$a'_{il} = a_{il} + d_{l,k} a_{ik} \qquad (3)$$

โดย $a'_{il}$ = ค่า compensated generation shift sensitivity factors เมื่อ line k outage

ส่วนค่า $a_{il}$ , $d_{lk}$ นั้นคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2

ซึ่งค่า compensated generation shift sensitivity factors เมื่อ line k outage นี้ ในกรณีที่มีการ switched line m ร่วมด้วยนั้นจะพิจารณาใหม่ได้จากสมการที่ 4 [3]

$$a''_{il} = a_{il} + d'_{l,k} a_{ki} + d'_{l,m} a_{mi} \qquad (4)$$

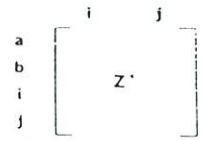
$$d'_{l,k} = \frac{d_{l,k} + d_{l,m} d_{m,k}}{1 - d_{m,k} d_{k,m}} \qquad d'_{l,m} = \frac{d_{l,m} + d_{l,k} d_{k,m}}{1 - d_{k,m} d_{m,k}}$$

โดย $a''_{il}$ = ค่า compensated generation shift sensitivity factors เมื่อ line k outage และ line m switched

### 2.2 วิธี Z-Matrix [1]

ทำการหาค่า Z-Matrix โดยสร้าง impedance matrix ของระบบขึ้นมา ด้วยวิธี add branch - add link และ ในขณะเดียวกันก็ การสร้าง $Z'$-Matrix เมื่อ line i - j outage นั้น ทำได้โดย adding line i - j เข้าไปขนานกับข้อมูลกับค่าเดิม แล้วประยุกต์ใช้ the loop equation และ kron reduction คำนวณต่อไปใหม่ และ เช่นเดียวกัน การสร้าง $Z''$-Matrix เมื่อมีการ switched line ก็ทำการหาเช่นเดียวกับการสร้าง $Z'$-Matrix

- การทดสอบเครื่องหมายที่เปลี่ยนแปลงไป(เพิ่มขึ้นหรือลดลง)ของ overload ใน line a - b เมื่อ line i - j switched




รูปที่ 1 $Z'$-Matrix elements

จากรูปที่ 1 ทำการเลือกสมาชิก matrix จาก Z′-Matrix ทั้งหมดโดย a , b คือ bus ของ line ที่เกิด overload , ส่วน i , j คือ bus ของ line ก่อนเกิดการ switched

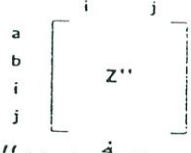
ต่อไปพิจารณา ค่า injecting current ที่ bus i , voltages ที่ bus a , b , i และ j หาได้จากรูปที่ 2

รูปที่ 2 ค่า injecting current ที่ bus i , voltages ที่ bus a , b , i และ j

จากรูปที่ 2 ค่า $I'_{i}$ สามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 5

$$I'_{ab} = (E'_{a}-E'_{b}) / Z_{ab} = (Z'_{ai} - Z'_{bi})\, I'_{i} / Z_{ab} \qquad (5)$$

และ ในทำนองเดียวกันค่า Z″-Matrix เมื่อ line i - j switched พิจารณาได้จากรูปที่ 3




รูปที่ 3 Z″-Matrix เมื่อ line i - j switched

โดย ส่วน i , j คือ bus ของ line หลังเกิดการ switched ส่วน a , b คือ bus ของ line ที่เกิด overload โดยค่า Z″-Matrix นั้นคำนวณได้จาก adding line i - j ที่มีค่าตรงกันข้ามกับค่าเดิม แล้วประยุกต์ the loop equation และ kron reduction คำนวณค่าต่อไปใหม่ และ ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ 5 สามารถพิจารณาค่า $I''_{ab}$ ได้จากสมการที่ 6 คือ

$$I''_{ab} = (E''_{a}-E''_{b})/Z_{ab} = (Z''_{ai}-Z''_{bi})I'_{i} / Z_{ab} \qquad (6)$$

โดย $I'_{ab}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของ line a – b ก่อนเกิดการ switched line i – j

$I''_{ab}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของ line a – b ที่เปลี่ยนแปลงไป หลัง switched line i – j

จาก สมการที่ (5) และ (6) ทำการเปรียบเทียบกระแส $I'_{ab}$ และ $I''_{ab}$ ได้ดังนี้ ถ้า $I''_{ab} > I'_{ab}$ ดังนั้น $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| > |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ ซึ่งแสดงว่า ค่า overload ของ line a – b จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อ line i - j switched และ ในทำนองเดียวกัน ถ้า $I''_{ab} < I'_{ab}$ ดังนั้น $|Z''_{ai}-Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ แสดงว่าค่า overload ของ line a – b ลดลงจากเดิม เมื่อ line i - j switched และ จากรูปที่ 1 คือ Z′-Matrix ที่ line i – j ยังไม่ได้ switched และ รูปที่ 3 คือ Z″-Matrix ที่ line i – j ได้ switched แล้ว ซึ่งจะเห็นได้ว่าขณะคำนวณจะพิจารณาเฉพาะสมาชิก matrix a , i และ b, i เท่านั้น ดังนั้น สมาชิก matrix ตัวอื่นจะไม่นำมาร่วมในการคำนวณ แต่จาก [1] จะคำนวณที่ full matrix แล้วเก็บไว้ในหน่วยความจำเลย เวลาจะใช้งานก็ค่อยนำออกมาใช้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเปลืองหน่วยความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างของเมตริกซ์ใหม่ โดยจะพิจารณาเฉพาะสมาชิกเมตริกซ์ที่จะใช้งานเท่านั้น ซึ่งจะช่วยลดหน่วยความจำ และเวลาในการประมวลผล และ จากเงื่อนไขการทดสอบ overload ที่กล่าวมาข้างต้นทำการคำนวณ power flow ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการ switched line ได้จากสมการที่ 7

$$P'_{ab} + jQ'_{ab} = \frac{(P_{ab} + jQ_{ab})(Z_{ai} - Z_{bi})^{*}}{(Z_{ai} - Z_{bi})^{*}} \qquad (7)$$

โดย $P'_{ab}$ , $Q'_{ab}$ = ค่า power flow ที่เปลี่ยนแปลงไปบน line a - b หลังจากที่ได้ switched line i – j

ทำการเลือก switched line โดยพิจารณาจาก

- ถ้าค่า $|Z''_{ai}-Z''_{bi}| < |Z'_{ai}-Z'_{bi}|$ แสดงว่าเมื่อ switched line i - j แล้ว ค่า overload ของ line a – b จะลดลงจากเดิม หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload นอกเหนือจาก line a – b ทุก ๆ line ว่าเมื่อได้ switched line i – j แล้วนั้นจะเกิด overload ขึ้นมาบน line อื่นๆ อีกหรือไม่ ถ้าเกิด overload ขึ้นมาบน line อื่นๆอีก จะไม่พิจารณาเลือก switched line i – j นั้นๆ ถึงแม้ว่าจะลดค่า overload บน line a – b ได้จริง แต่ถ้าไม่เกิด overload ขึ้นมาอีกจะทำการเลือก switched line ดังนี้

ขั้นตอนที่1 กรณีที่สามารถแยก overload ได้สมบรูณ์ มีค่า $|Z''_{ai} - Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ หลายค่า จะพิจารณาเลือก switched line ที่มีค่า $P'_{ab}$ ต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่2 กรณีที่ไม่สามารถแยก overload ได้สมบรูณ์ แต่สามารถบรรเทา overload ได้มีค่า $|Z''_{ai}-Z''_{bi}| < |Z'_{ai} - Z'_{bi}|$ หลายค่า จะทำการเลือก

switched line ที่สามารถบรรเทา overload ได้มากที่สุด โดยมีค่า total power losses ต่ำที่สุด

2.3 วิธี Linear programming (LP) [2]

ในการแก้ไขปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่า optimum ที่สุดของค่า objective function นั้น ค่าที่ได้จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดของค่า constraints และ limits โดยจะพิจารณาเงื่อนไขการคำนวณได้จากสมการที่ 8.1 - 8.6

$$\text{Minimize :} \quad \sum_{i=1}^{N}\left(K\Delta P_i^{+} + K\Delta P_i^{-}\right) \quad \text{(Objective)} \quad (8.1)$$

$$\text{Subject to :} \quad \sum_{i=1}^{N}\left(\Delta P_i^{+} - \Delta P_i^{-}\right) = 0 \quad (8.2)$$

(Gen Shift Equality Constraint)

$$\sum_{i=1}^{N} a_{li}^{''}\left(\Delta P_i^{+} - \Delta P_i^{-}\right) \le \left(f_l^{max} sf\right) - f_l^{0} \quad (8.3)$$

$$\sum_{i=1}^{N} a_{li}^{''}\left(\Delta P_i^{+} - \Delta P_i^{-}\right) \ge -\left(f_l^{max} sf\right) - f_l^{0} \quad (8.4)$$

(Line Flow Constraint)

$$0 \le \Delta P_i^{+} \le P_i^{max} - P_i^{0} \quad (8.5)$$

$$0 \le \Delta P_i^{-} \le P_i^{0} - P_i^{min} \quad (8.6)$$

(Gen Shift Limits) ; For i =1...N

โดย K = ค่า Large number (K=100)

$\Delta P_i^{+}$ = ค่า the net upward shift บน bus i (MW)

$\Delta P_i^{-}$ = ค่า the net downward shift บน bus i (MW)

$a''_{lk}$ = ค่า compensated generation shift sensitivity factors เมื่อ line k outage และ line m switched

$f_l^{0}$ = ค่า initial power flow ของ line l (MW)

$f_l^{max}$ = ค่า maximum power flow ของ line l (MW)

$P_i^{0}$ = ค่า initial generation บน bus i (MW)

$P_i^{min}$ = ค่า minimum generation บน bus i (MW)

$P_i^{max}$ = ค่า maximum generation บน bus i (MW)

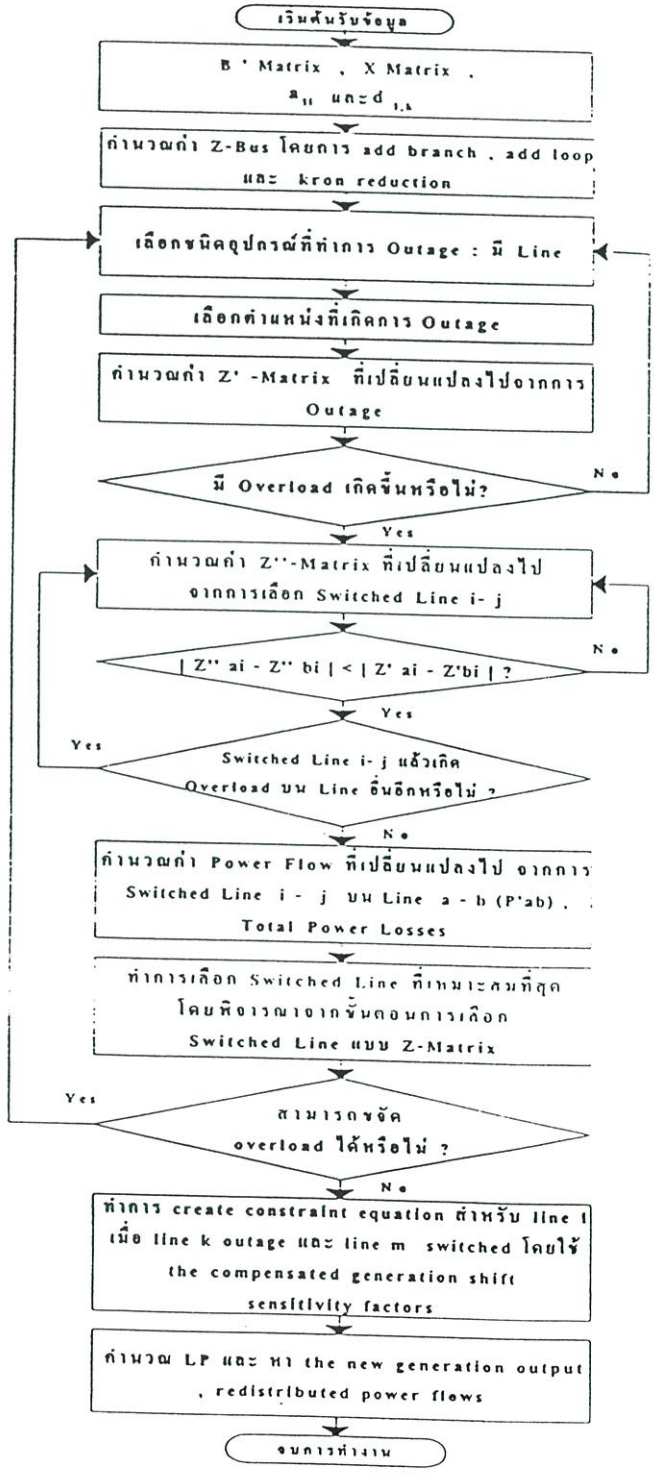
sf = ค่า safety factor (0.9 – 1.0)

จากสมการที่ 8.1 - 8.6 ค่าที่คำนวณได้นั้นจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตของส่วน subject to คือ ค่า gen shift equality constraints , ค่า gen shift limits และค่า line flow constraint แล้วทำการคำนวณค่า new generation output ตามสมการที่ 9

$$P_l^{new} = P_l^{0} + \Delta P_l^{+} - \Delta P_l^{-} \quad (9)$$

โดย $P_i^{new}$ = ค่า new generation output (MW)

3. ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม




รูปที่ 4 ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม

## 4. การทดสอบโปรแกรมการคำนวณ

รูปที่ 5 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 Bus [3] ที่ใช้ทดสอบ

จากรูปที่ 5 ทำการทดสอบ outage line โดยสมมุติเลือกทดสอบ outage L2 (1->5) ผลลัพธ์ดูได้จากตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ทดสอบ outage L2 (1->5)

| | Base Case Flow (MW) | Limit (MW) | Outage Flow |
|---|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | 155.1596 | 160 | 240.5432 |
| L2 : 1 -> 5 | 77.48122 | 80 | Outage |
| L3 : 2 -> 3 | 71.86658 | 75 | 85.39848 |
| L4 : 2 -> 4 | 55.74651 | 65 | 83.85162 |
| L5 : 2 -> 5 | 41.64404 | 50 | 79.4031 |
| L6 : 3 -> 4 | -24.5718 | 30 | -11.95005 |
| L7 : 4 -> 5 | -62.14273 | 80 | -25.32929 |
| L8 : 6 -> 11 | 7.793748 | 25 | 6.513563 |
| L9 : 6 -> 12 | 7.944498 | 20 | 7.502812 |
| L10 : 6 -> 13 | 18.03766 | 30 | 17.39242 |
| L11 : 7 -> 8 | 0.0000002998 | 60 | 0.0000002998 |
| L12 : 7 -> 9 | 27.45583 | 50 | 28.77517 |
| L13 : 9 -> 10 | 4.831129 | 20 | 6.109944 |
| L14 : 9 -> 14 | 9.020954 | 30 | 9.806918 |
| L15 : 10 -> 11 | -4.176109 | 20 | -2.900973 |
| L16 : 12 -> 13 | 1.76744 | 20 | 1.626413 |
| L17 : 13 -> 14 | 6.060826 | 20 | 5.284231 |
| Tr1 : 4 -> 7 | 27.4588 | 40 | 28.77511 |
| Tr2 : 4 -> 9 | 15.89323 | 20 | 16.6418 |
| Tr3 : 5 -> 6 | 44.97591 | 50 | 42.90867 |
| Total Losses | 13.64091 | | 18.99958 |

จากตารางที่ 1 เกิด overload ขึ้นที่ L1 , L3 , L4 และ L5 ดังนั้นใช้วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงใหม่ โดยค่า Z2 , Z1 คือ $Z2 = |Z''_{..} - Z''_{..}|$ , $Z1 = |Z'_{..} - Z'_{..}|$ คำนวณผลลัพธ์ดูได้จากตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อ switched line แล้วนั้นไม่สามารถขจัด overload ได้ แต่สามารถ reduce overload ได้เมื่อเลือก switched L4 , L5 คือ มีจำนวนของ overload = 3 (ลดลงจากของเดิม ซึ่งมีจำนวนของ overload = 4 ) ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์ผลข้างเคียงของ overload บน line อื่นๆ ของการเลือก switched L4 , L5 แสดงได้ดังตารางที่ 3 (ในกรณีที่มีการ switched line มากกว่า 1 line ขึ้นไปนั้น จากการวิเคราะห์ผลลัพธ์ ไม่สามารถแยก overload ได้ แต่สามารถบรรเทา overload ได้มากที่สุด คือมีจำนวนของ overload = 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าให้ผลในการบรรเทาเหมือนกับการ switched 1 line ดังนั้นจึงพิจารณาเลือก switched line 1 line เท่านั้น)

ตารางที่ 2 วิธี Z-Matrix แบบปรับปรุงใหม่

| | Z2-Z1(L1) | Z2-Z1(L3) | Z2-Z1(L4) | Z2-Z1(L5) |
|---|---|---|---|---|
| Outage L2 | 0.00436721700 | 0.00149738900 | 0.00282869300 | 0.00249030200 |
| L1 : 1 -> 2 | can't switched | can't switched | can't switched | can't switched |
| L2 : 1 -> 5 | outage | outage | outage | outage |
| L3 : 2 -> 3 | 0.00145815300 | switched | 0.00366601800 | 0.00177213500 |
| L4 : 2 -> 4 | 0.00090306720 | 0.00376231500 | switched | 0.00279023300 |
| L5 : 2 -> 5 | 0.00090221590 | 0.00314305000 | 0.00482044000 | switched |
| L6 : 3 -> 4 | -0.00127629200 | 0.04583357000 | -0.00750559200 | -0.00203020300 |
| L7 : 4 -> 5 | 0.00059833170 | 0.01168406000 | 0.01974192000 | -0.01746720000 |
| L8 : 6 -> 11 | 0.00050205680 | 0.00073073410 | 0.00153323800 | -0.00025458180 |
| L9 : 6 -> 12 | 0.00000787438 | 0.00001158785 | 0.00002428360 | 0.00000414998 |
| L10 : 6 -> 13 | 0.00006655285 | 0.00012289670 | 0.00025862090 | -0.00004020775 |
| L11 : 7 -> 8 | 0.00000000000 | 0.00000000000 | 0.00000000000 | 0.00000000000 |
| L12 : 7 -> 9 | 0.00046779020 | -0.00039375620 | -0.00041753110 | 0.00129717600 |
| L13 : 9 -> 10 | 0.00065819010 | -0.00095866940 | -0.00201270400 | 0.00032975800 |
| L14 : 9 -> 14 | 0.00036311379 | -0.00052978500 | -0.00111197800 | 0.00018346420 |
| L15 : 10 -> 11 | -0.00107157500 | 0.00154943000 | 0.00325640800 | -0.00051651810 |
| L16 : 12 -> 13 | 0.00018054480 | 0.00025924370 | 0.00054484540 | -0.00008717690 |
| L17 : 13 -> 14 | 0.00061505510 | 0.00087616650 | 0.00184332400 | -0.00028796930 |
| Tr1 : 4 -> 7 | -0.00165834200 | -0.00118341200 | -0.00295465600 | 0.00091959630 |
| Tr2 : 4 -> 9 | -0.00035119570 | -0.00028203420 | -0.00067971260 | 0.00015001530 |
| Tr3 : 5 -> 6 | -0.00275210900 | 0.00050862620 | 0.00240682900 | -0.00360100400 |
| | Flow L1 | Flow L3 | Flow L4 | Flow L5 |
| Outage L2 | 240.55560 | 85.41083 | 83.86397 | 79.41544 |
| L1 : 1 -> 2 | can't switched | can't switched | can't switched | can't switche |
| L2 : 1 -> 5 | outage | outage | outage | outage |
| L3 : 2 -> 3 | 255.96320 | switched | 138.00150 | 124.81080 |
| L4 : 2 -> 4 | 246.76830 | 117.82250 | switched | 136.18330 |
| L5 : 2 -> 5 | 246.72560 | 112.58180 | 141.17250 | switched |
| L6 : 3 -> 4 | 240.42790 | 98.29945 | 76.81961 | 73.49369 |
| L7 : 4 -> 5 | 240.90930 | 91.81291 | 96.46184 | 60.85784 |
| L8 : 6 -> 11 | 240.61470 | 85.65320 | 84.16947 | 78.92778 |
| L9 : 6 -> 12 | 252.99140 | 89.58246 | 85.63278 | 80.83307 |
| L10 : 6 -> 13 | 241.52430 | 85.76799 | 84.42706 | 79.40868 |
| L11 : 7 -> 8 | 240.55560 | 85.41083 | 83.86397 | 79.41544 |
| L12 : 7 -> 9 | 241.11150 | 84.92690 | 82.74159 | 81.52998 |
| L13 : 9 -> 10 | 240.72900 | 85.25004 | 83.61487 | 79.98406 |
| L14 : 9 -> 14 | 241.17120 | 85.26182 | 83.67521 | 80.32584 |
| L15 : 10 -> 11 | 240.53440 | 85.51684 | 83.97678 | 79.17886 |
| L16 : 12 -> 13 | 240.56110 | 85.41831 | 83.87325 | 79.40401 |
| L17 : 13 -> 14 | 240.62750 | 85.58062 | 84.08619 | 79.09412 |
| Tr1 : 4 -> 7 | 239.30440 | 84.63988 | 82.18655 | 80.63133 |
| Tr2 : 4 -> 9 | 240.32420 | 85.13329 | 83.25767 | 80.06503 |
| Tr3 : 5 -> 6 | 234.28750 | 85.80869 | 84.80643 | 72.10197 |

ตารางที่3 ผลข้างเคียงของ overload เมื่อ switched L4,L5

| | Z2-Z1 (L4) | Flow L4 | Z2-Z1 (L5) | Flow L5 |
|---|---|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | 0.00090306720 | 246.768300 | 0.00090221590 | 246.725600 |
| L2 : 1 -> 5 | outage | outage | outage | outage |
| L3 : 2 -> 3 | 0.00376231500 | 117.822500 | 0.00314305000 | 112.581800 |
| L4 : 2 -> 4 | switched | switched | 0.00482044000 | 141.172500 |
| L5 : 2 -> 5 | 0.00279023300 | 136.183300 | switched | switched |
| L6 : 3 -> 4 | 0.00208681800 | 18.260830 | 0.00287833100 | 13.449200 |
| L7 : 4 -> 5 | 0.00168342100 | -72.965180 | 0.00142733400 | 49.246210 |
| L8 : 6 -> 11 | 0.00045609100 | 8.558708 | -0.00010035750 | 3.727707 |
| L9 : 6 -> 12 | 0.00008179061 | 8.088758 | -0.00002091005 | 7.484183 |
| L10 : 6 -> 13 | 0.00015464240 | 18.460670 | -0.00003287196 | 15.980120 |
| L11 : 7 -> 8 | 0.00000000000 | 0.0000002998 | 0.00000000000 | 0.00000029 |
| L12 : 7 -> 9 | -0.00004880317 | 26.726060 | 0.00025543570 | 31.655030 |
| L13 : 9 -> 10 | -0.00019357170 | 4.135273 | 0.00004808791 | 8.901843 |
| L14 : 9 -> 14 | -0.00040968880 | 8.524506 | 0.00009864382 | 11.560300 |
| L15 : 10 -> 11 | 0.00044110600 | -4.895903 | -0.00010449440 | -0.141876 |
| L16 : 12 -> 13 | 0.00007285178 | 1.907218 | -0.00001196191 | 1.311432 |
| L17 : 13 -> 14 | 0.00052643750 | 6.595093 | -0.00012142400 | 3.569810 |
| Tr1 : 4 -> 7 | -0.00172061800 | 26.725980 | 0.00092569920 | 31.655080 |
| Tr2 : 4 -> 9 | -0.00176942200 | 15.433990 | 0.00067026350 | 18.307290 |
| Tr3 : 5 -> 6 | 0.00117676900 | 46.283450 | -0.00301259600 | 38.367200 |
| Total Losses | | 18.918110 | | 23.159310 |

จากตารางที่ 3 หลังจากตรวจสอบผลข้างเคียงของ overload เมื่อ switched L4 , L5 สรุปได้ว่าเมื่อเลือก switched L4 จะมีค่า total power losses ต่ำที่สุด = 18.91811 MW ดังนั้น switched L4 จึงเหมาะสมที่สุดซึ่ง

สามารถบรรเทา overload ได้มากที่สุด # หลังจากที่ได้ switched L4 แล้ว ก็ทำการคำนวณ LP โดย create constraint equation สำหรับ L1 , L3 , L5 เมื่อ outage L2 และ switched L4 โดยใช้ (4) แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่า $a''_{k\ell}$ เมื่อ outage L2 และ switched L4

| | | |
|---|---|---|
| $a_{11}$ = -1.072781 | $a_{12}$ = 1.072781 | $a_{13}$ = -1.174508 |
| $a_{14}$ = 1.174508 | $a_{15}$ = -1.142288 | $a_{16}$ = 1.142288 |
| $a_{17}$ = -1.182908 | $a_{18}$ = 1.182908 | $b_1$ = -86.7683 (L1) |
| $a_{21}$ = -0.006089164 | $a_{22}$ = 0.006089164 | $a_{23}$ = -0.7339389 |
| $a_{24}$ = 0.7339389 | $a_{25}$ = -0.3487603 | $a_{26}$ = 0.3487603 |
| $a_{27}$ = -0.4006588 | $a_{28}$ = 0.4006588 | $b_2$ = -42.8225 (L3) |
| $a_{31}$ = -0.006387316 | $a_{32}$ = 0.006387316 | $a_{33}$ = -0.3833848 |
| $a_{34}$ = 0.3833848 | $a_{35}$ = -0.7492636 | $a_{36}$ = 0.7492636 |
| $a_{37}$ = -0.7370766 | $a_{38}$ = 0.7370766 | $b_3$ = -86.1833 (L5) |

$c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = c_6 = c_7 = c_8 = 100$ , sf = 1 ; $P_2^{min} = 20$ MW , $P_2^{max} = 150$ MW ; $P_3^{min} = 0$ MW , $P_3^{max} = 150$ MW ; $P_4^{min} = 0$ MW , $P_4^{max} = 150$ MW ; $P_5^{min} = 0$ MW , $P_5^{max} = 150$ MW ; $P^0_2 = 40$ MW , $P^0_3 = 0$ MW , $P^0_4 = 0$ MW , $P^0_5 = 0$ MW :

ทำการคำนวณหาค่า minimize ที่สุดของค่าผลรวมของ generation shifts คือ $Z = 100\Delta P_2^+ + 100\Delta P_2^- + 100\Delta P_3^+ + 100\Delta P_3^- + 100\Delta P_4^+ + 100\Delta P_4^- + 100\Delta P_5^+ + 100\Delta P_5^-$ ได้เท่ากับ 11578.87 ซึ่ง ได้ค่า $\Delta P_2^+ = 0$ , $\Delta P_2^- = 0$ , $\Delta P_3^+ = 0$ , $\Delta P_3^- = 0$ , $\Delta P_4^+ = 68.774$ , $\Delta P_4^- = 0$ , $\Delta P_5^+ = 47.0147$ , $\Delta P_5^- = 0$ ดังนั้นจะได้ค่าใหม่ดังนี้

ค่า new generation output ของ gen 2 = 40 MW #

ค่า new generation output ของ gen 3 = 0 MW #

ค่า new generation output ของ gen 4 = 68.774 MW #

ค่า new generation output ของ gen 5 = 47.0147 MW #

ทำการคำนวณ redistributed power flows ตามค่า new generation output ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 5

จากตารางที่ 5 ถ้าทำการ shift generation เพียงอย่างเดียว (LP คำนวณได้ค่า new generation output : gen 2 = 40 MW , gen 3 = 0.19465 MW , gen 4 = 0 MW และ gen 5 = 69.9528 MW) นั้นไม่สามารถขจัด overload ได้สมบรูณ์ โดยจะเกิด overload ขึ้นที่ L5 , L11 และ L12 แต่ถ้า switched L4 ร่วมกับ shift generation แล้วนั้นก็จะสามารถขจัด overload ได้สมบรูณ์ (ค่า Power Flow L3 = =75.00921 ≅ 75 MW ; L5 = 50.042697 ≅ 50 MW) #

ตารางที่ 5 redistributed power flows

| | Outage Flow | Limit (MW) | OL2-Sw L4 | OL2-ShiftGen | OL2+Sw L4+ShiftGe |
|---|---|---|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | [illegible] | 160 | 246.7683 | 159.9505 | 111.3647 |
| L2 : 1 -> 5 | Outage | 80 | Outage | Outage | Outage |
| L3 : 2 -> 3 | [illegible] | 75 | [illegible] | 69.94282 | 75.00921 |
| L4 : 2 -> 4 | [illegible] | 65 | Switched | 52.81172 | Switched |
| L5 : 2 -> 5 | [illegible] | 50 | [illegible] | 51.04263 | 50.042697 |
| L6 : 3 -> 4 | -11.95005 | 30 | 18.26083 | -26.18458 | -21.54866 |
| L7 : 4 -> 5 | -25.32929 | 80 | -72.96518 | -11.96258 | -54.44335 |
| L8 : 6 -> 11 | 6.513563 | 25 | 8.558708 | -1.45435 | 15.20644 |
| L9 : 6 -> 12 | 7.802812 | 20 | 8.088756 | 6.80737 | 8.82346 |
| L10 : 6 -> 13 | 17.39242 | 30 | 18.46067 | 13.30149 | 21.80851 |
| L11 : 7 -> 8 | 0.0000000299 | 60 | 0.0000000299 | 69.9528 | -47.01471 |
| L12 : 7 -> 9 | 26.77517 | 50 | 26.72606 | 53.76134 | 31.18295 |
| L13 : 9 -> 10 | 6.109944 | 20 | 4.135273 | 14.14133 | -2.39545 |
| L14 : 9 -> 14 | 9.806918 | 30 | 8.524506 | 14.93258 | 4.50626 |
| L15 : 10 -> 11 | -2.900973 | 20 | -4.895903 | 5.08308 | -11.40331 |
| L16 : 12 -> 13 | 1.626413 | 20 | 1.907218 | 0.64495 | 2.63361 |
| L17 : 13 -> 14 | 5.284231 | 20 | 6.595093 | 0.27747 | 10.6197 |
| Tr1 : 4 -> 7 | 28.77511 | 40 | 26.72598 | -16.19145 | -15.83174 |
| Tr2 : 4 -> 9 | 16.6418 | 20 | 15.43399 | 4.81251 | 0.42785 |
| Tr3 : 5 -> 6 | 42.90867 | 50 | 46.28345 | 29.85458 | -11.73553 |
| Total Losses | 18.99958 | | 18.91811 | 11.09791 | 8.15349 |

## 5. บทสรุป

จากตารางที่ 5 เมื่อได้ทดสอบ outage L2 กับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 14 Bus แล้วนั้น จะเกิด overload ขึ้นที่ L1 , L3 , L4 และ L5 ดังนั้น จึงต้องทำการขจัด overload ให้ออกจากระบบ โดยเมื่อ switched L4 เพียงอย่างเดียวนั้น จะเกิด overload ขึ้นที่ L1 , L3 และ L5 ; เมื่อ shift generation เพียงอย่างเดียวนั้น จะเกิด overload ขึ้นที่ L5 , L11 และ L12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่สามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ แต่เมื่อ switched L4 ร่วมกับ shift generation แล้ว สามารถขจัด overload ได้อย่างสมบรูณ์ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าวิธีการปรับตารางการป้อนแหล่งจ่ายและไลน์สวิทช์ซึ่งนั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการขจัดโหลดเกินให้หมดไปจากระบบไฟฟ้ากำลังได้

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] E.B. Makram , K.P.Thornton and H.E.Brown ," Selection of Line to be Switched to Eliminate Overload Lines using a Z-matrix method," IEEE Trans. Power System , Vol.4 , May 1989 , pp653-661 .

[2] A.J. Wood , Bruce F.Wollenberg ," Power Generation , Operation , And Control," John Wiley and Sons , 1984 .

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

วิศวสารลาดกระบัง
Ladkrabang Engineering Journal
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,Bangkok 10520

วันที่ 11 กันยายน 2546

เลขที่อ้างอิง 893

เรื่อง การตอบรับบทความ

เรียน คุณสิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล ศิลป์ชัย พงษ์ประเสริฐ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุง (Analysis of Overload in Electric Power System by Improving Linear Sensitivity Factors) มาให้พิจารณาเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวสารลาดกระบัง บัดนี้ ผู้ทรงคุณวุฒิได้ทำการพิจารณาแล้วเห็นว่า ยอมรับตีพิมพ์ได้ โดยจะตีพิมพ์ในปีที่ 20 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2546

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

(รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ)
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

# การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุง

# Analysis of Overload in Electric Power System by Improving Linear Sensitivity Factors

สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล ศิลป์ชัย พงษ์ประเสริฐ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**บทคัดย่อ**

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุง (improved linear sensitivity factors) โดยจะทำการวิเคราะห์โหลดเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 บัส และ IEEE 57 บัส ด้วยการทดสอบเอาท์เตจไลน์ (outage transmission line) และ ทำการป้องกันผลของโหลดเกินที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์เพื่อที่จะขจัดหรือบรรเทาโหลดเกินที่เกิดขึ้นให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง

**Abstract**

This paper presents a method for the analysis of overload in an electric power system by improving linear sensitivity factors. Tests of overload in the electric power system are performed on IEEE 30 bus and IEEE 57 bus system by testing outage transmission line. The protection of the overload by selecting switched line to eliminate or to reduce the overload is presented.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องวางแผนเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคตโดยระบบจะต้องมีความน่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น การศึกษาทางด้านวิเคราะห์คอนทินเจนซี (contingency analysis) จึงมีความสำคัญอย่างมากโดยเมื่อเกิดการเอาท์เตจขึ้นที่อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังใดๆ จะส่งผลให้เกิดสภาวะโหลดเกินขึ้นได้ ดังนั้นจะต้องมีการป้องกันโดยจะต้องขจัดหรือบรรเทาโหลดเกินที่เกิดขึ้นนี้ให้ออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง จาก [2] วิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์นั้นใช้เวลาในการคำนวณเพื่อเลือกสวิทซ์ไลน์มากที่สุด จึงเหมาะสมที่จะคำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็กๆ ไม่เหมาะสมที่จะคำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆ ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม โดยทำการปรับปรุงเรื่องเวลาที่ใช้ในการคำนวณให้น้อยลงเพื่อที่จะสามารถคำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆได้ และทำการปรับปรุงเทคนิคการเลือกสวิทซ์ไลน์จาก [1] ใหม่ให้ดีขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากว่า [1] จะกล่าวถึงเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือกสวิทซ์ไลน์ที่พิจารณาเฉพาะค่า distribution factors จากการเอาท์เตจไลน์เท่านั้น ดังนั้นวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุงใหม่นี้ จะเพิ่มเติมเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือกสวิทซ์ไลน์ใหม่ โดยจะพิจารณาค่า distribution factors จากการเอาท์เตจไลน์และสวิทซ์ไลน์ร่วมกัน

ประกอบการพิจารณาในการตัดสินใจเลือกสวิทช์ไลน์ และหลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ [2] กับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุงใหม่นี้ว่าให้ผลลัพธ์ในการเลือกสวิทช์ไลน์ตรงกันหรือไม่ , เวลาที่ใช้ในการคำนวณต่างกันอย่างไร , และ วิธีไหนเหมาะสมที่จะใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังรูปแบบไหน โดยจะทำการทดสอบเอาท์เตจไลน์กับระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 bus และ IEEE 57 bus [3] ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก microsoft visual basic 6.0 ส่วนการคำนวณโหลดโฟลว์นั้นจะใช้วิธี the fast decoupled method มาใช้ในการคำนวณ และการเลือกสวิทช์ไลน์ในบทความวิจัยนี้จะไม่พิจารณาถึงผลกระทบของความถี่ , แรงดันไฟฟ้าที่บัส

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 วิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ [2]

วิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ เป็นการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์เพื่อประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงไปของเพาเวอร์โฟลว์หลังจากเกิดการเอาท์เตจขึ้น โดยจะพิจารณาค่าแฟกเตอร์จากการเอาท์เตจได้ดังนี้

2.1.1 The Line Outage Distribution Factors

พิจารณาได้จากสมการที่ 1

$$d_{l,k} = \frac{x_k}{x_l}\left[\frac{X_{in} - X_{jn} - X_{im} + X_{jm}}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})}\right] \qquad (1)$$

โดย $d_{l,k}$ = ค่า line outage distribution factors เมื่อไลน์ k เอาท์เตจ

$x_l$ = ค่าไลน์รีแอกแตนซ์ของไลน์ l

$x_k$ = ค่าไลน์รีแอกแตนซ์ของไลน์ k

line l = บัส i -> บัส j

line k = บัส n -> บัส m

$X_{in}$ , $X_{im}$ , $X_{jn}$ , $X_{jm}$ , $X_{nn}$ , $X_{mm}$ , $X_{nm}$ = ค่า X Matrix ของระบบ

ค่า $d_{l,k}$ นั้นเวลาคำนวณจะคำนวณค่าทั้งหมดเก็บไว้ในหน่วยความจำ , ส่วนการคำนวณค่าเพาเวอร์โฟลว์บนไลน์ l ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเอาท์เตจไลน์ k พิจารณาจากสมการที่ 2

$$f_l = f_l^0 + d_{l,k} f_k^0 \qquad (2)$$

โดย $f_l^0$ , $f_k^0$ = ค่าเพาเวอร์โฟลว์ก่อนเอาท์เตจบนไลน์ l , k

$f_l$ = ค่าเพาเวอร์โฟลว์บนไลน์ l เมื่อไลน์ k เอาท์เตจ

ส่วนการคำนวณค่าเพาเวอร์โฟลว์บนไลน์ l ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเอาท์เตจไลน์ k และสวิทช์ไลน์ s พิจารณาได้จากสมการที่ 3 , 4 และ 5

$$f_l = f_l^0 + d'_{l,k} f_k^0 + d'_{l,s} f_s^0 \qquad (3)$$

$$d'_{l,k} = \frac{d_{l,k} + (d_{l,s} d_{s,k})}{1 - (d_{s,k} d_{k,s})} \qquad (4)$$

$$d'_{l,s} = \frac{d_{l,s} + (d_{l,k} d_{k,s})}{1 - (d_{k,s} d_{s,k})} \qquad (5)$$

โดย $f_s^0$ = ค่าเพาเวอร์โฟลว์ก่อนเอาท์เตจบนไลน์ s

### 2.2 วิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุง [1]

จาก [1] กำหนดให้ flow limit ไลน์ l = $L_l$ เมื่อเกิดโหลดเกิน ขึ้น $f_l > L_l$ ดังนั้นทำการเลือกสวิทช์ไลน์ตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$d_{l,k} < 0$$

*and*

$$\left|d_{l,k} f_k^0\right| \geq f_l - L_l \qquad (6)$$

จากสมการที่ 6 เมื่อทำการเลือกสวิทช์ไลน์ตามเงื่อนไขดังกล่าวแล้ว ถ้าสามารถขจัดโหลดเกินได้แล้วจะต้องไม่ทำให้เกิดโหลดเกินที่ไลน์อื่นๆอีก ดังนั้นจะทำการตรวจสอบไลน์อื่นๆได้ตามเงื่อนไขจากสมการที่ 7

$$L_v - f_v^0 \geq d_{v,k} f_k^0 \qquad (7)$$

เมื่อ $L_v$ = ค่า flow limit ไลน์ v

จากสมการที่ 6 และ 7 จะเห็นได้ว่ากล่าวถึงเงื่อนไขที่ใช้ในเลือกสวิทช์ไลน์ ที่พิจารณาเฉพาะค่า distribution factors จากการเอาท์เตจไลน์เท่านั้น ดังนั้นวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุงใหม่นี้จะเพิ่มเติมเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือกสวิทช์ไลน์ใหม่ โดยจะพิจารณาค่า distribution factors จากการเอาท์เตจไลน์และสวิทช์ไลน์ร่วมกันประกอบการพิจารณาโดยดูได้จากสมการที่ 8

จากสมการที่ 8 เมื่อพิจารณาถึงเครื่องหมายที่

$$\left|(d'_{l,k} f_k^0) + (d'_{l,s} f_s^0)\right| \leq \left|L_l - \left|f_l^0\right|\right| \qquad (8)$$

ใช้ในการทดสอบค่าการเกิดโหลดเกินนั้นดูได้จากสมการที่ 9

$$\left|L_l - \left|f_l^0\right\| - \left|(d'_{l,k}\, f_k^0) + (d'_{l,s}\, f_s^0)\right| \geq 0 \quad (9)$$

จากสมการที่ 9 ถ้าทดสอบตามเงื่อนไขแล้ว ได้เครื่องหมายบวกแสดงว่าเมื่อเลือกสวิทซ์ไลน์ s แล้วนั้นสามารถขจัดโหลดเกินที่เกิดขึ้นที่ไลน์ l ได้ ในทางตรงกันข้ามถ้าได้เครื่องหมายลบแสดงว่าเมื่อเลือกสวิทซ์ไลน์ s แล้วนั้นไม่สามารถขจัดโหลดเกินที่เกิดขึ้นที่ไลน์ l ได้, เมื่อเลือกสวิทซ์ไลน์ s ได้แล้วนั้นจะต้องไม่ทำให้เกิด โหลดเกินขึ้นที่ไลน์อื่นๆอีกโดยจะพิจารณาเงื่อนไขเดียวกันจากสมการที่ 9 คือจะต้องมีเครื่องหมายบวกเท่านั้น

ส่วนค่า $d_{l,k}$ นั้นเวลาคำนวณจะคำนวณเฉพาะค่าที่จะใช้เท่านั้นโดยจะไม่คำนวณค่าทั้งหมดแล้วเก็บไว้ในหน่วยความจำ ซึ่งจะเปลืองเนื้อที่หน่วยความจำและเสียเวลาในการคำนวณเป็นอย่างมาก

## 3. ขั้นตอนการเลือกสวิทซ์ไลน์และการคำนวณ

### 3.1 วิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุง

3.1.1 กรณีที่มีโหลดเกินเกิดขึ้น 1 ไลน์

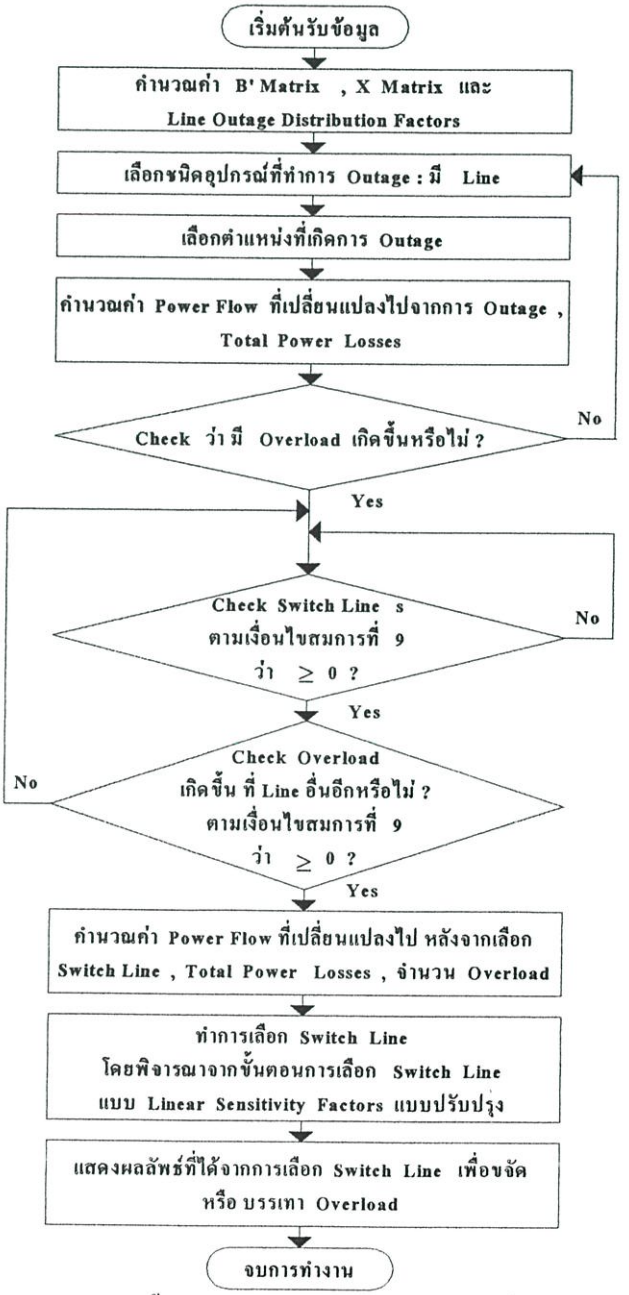
โดยจะพิจารณาเงื่อนไขตามสมการที่ 9 กับตำแหน่งของไลน์ที่เกิดโหลดเกินขึ้น โดยจะต้องมีเครื่องหมายบวกเท่านั้น ส่วนเครื่องหมายลบจะไม่พิจารณา เมื่อเลือกสวิทซ์ไลน์ได้ตามที่กล่าวมาแล้วนั้นจะทำตรวจสอบผลข้างเคียงของโหลดเกินที่ไลน์อื่นๆอีกว่าเกิด โหลดเกินขึ้นมาอีกหรือไม่ตามเงื่อนไขสมการที่ 9 อีกครั้งหนึ่ง

3.1.2 กรณีที่มีโหลดเกินเกิดขึ้นมากกว่า 1 ไลน์

โดยจะพิจารณาเงื่อนไขตามสมการที่ 9 กับตำแหน่งของไลน์ที่เกิดโหลดเกินขึ้น โดยจะต้องมีเครื่องหมายบวกเท่านั้น ส่วนเครื่องหมายลบจะไม่พิจารณา แล้วทำการเก็บข้อมูลของจำนวนโหลดเกิน ที่ได้หลังจากสวิทซ์ไลน์ไปแล้วทั้งหมด โดยจะทำการเลือก สวิทซ์ไลน์ที่มีจำนวนโหลดเกิน = 0 หรือเหลือน้อยที่สุด หลังจากนั้นจะทำตรวจสอบผลข้างเคียงของโหลดเกินที่ไลน์อื่นๆอีกว่าเกิดโหลดเกินขึ้นมาอีกหรือไม่ตามเงื่อนไขสมการ ที่ 9 อีกครั้งหนึ่ง

ทำการเลือกสวิทซ์ไลน์โดยพิจารณาจาก

- กรณีที่สามารถขจัดโหลดเกินได้สมบรูณ์ มีหลายไลน์ จะทำการเลือกสวิทซ์ไลน์ที่มีค่า total power losses ต่ำที่สุด
- กรณีที่ไม่สามารถขจัดโหลดเกินได้ แต่สามารถบรรเทาโหลดเกินได้หลายไลน์ จะทำการเลือกสวิทซ์ไลน์ที่สามารถบรรเทาโหลดเกินได้มากที่สุด

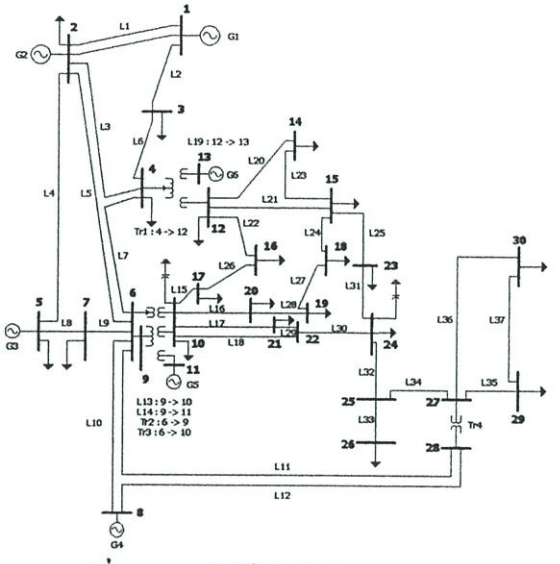



โดยสามารถดูขั้นตอนคำนวณได้จากโฟล์วชาร์ตรูปที่ 1

รูปที่ 1 วิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุง

## 4. การทดสอบโปรแกรมการคำนวณ

### 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 Bus [3]




รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 30 bus [3]

จากรูปที่ 2 ทดสอบเอาท์เตจไลน์ โดยสมมุติเลือกทดสอบเอาท์เตจ L5 (2 -> 6) ผลลัพธ์ดูได้จากตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ทดสอบเอาท์เตจ L5 (2 -> 6)

| | Base Case (MW) | Limit (MW) | Outage Flow (MW) |
|---|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | 177.9556 | 180 | 161.6095 |
| L2 : 1 -> 3 | 83.08211 | 100 | 102.1258 |
| L3 : 2 -> 4 | 45.73911 | 72 | 74.62041 |
| L4 : 2 -> 5 | 83.06548 | 130 | 100.7645 |
| L5 : 2 -> 6 | 61.95076 | 100 | Outage |
| L6 : 3 -> 4 | 77.88135 | 100 | 95.49487 |
| L7 : 4 -> 6 | 70.07401 | 105 | 111.2324 |
| L8 : 5 -> 7 | -14.12754 | 130 | 2.169286 |
| L9 : 6 -> 7 | 37.45328 | 130 | 20.78139 |
| L10 : 6 -> 8 | 29.56904 | 65 | 29.55811 |
| L11 : 6 -> 28 | 18.69453 | 72 | 18.18956 |
| L12 : 8 -> 28 | -0.538973 | 65 | -0.5939729 |
| L13 : 9 -> 10 | 27.7876 | 65 | 26.20718 |
| L14 : 9 -> 11 | 0.000000223 | 65 | 0.000000223 |
| L15 : 10 -> 17 | 5.400859 | 32 | 3.97422 |
| L16 : 10 -> 20 | 9.053659 | 32 | 8.2717 |
| L17 : 10 -> 21 | 15.78941 | 32 | 15.61202 |
| L18 : 10 -> 22 | 7.620634 | 32 | 7.504774 |
| L19 : 12 -> 13 | -0.0000000228 | 130 | 0.0000026241 |
| L20 : 12 -> 14 | 7.847327 | 65 | 8.180237 |
| L21 : 12 -> 15 | 17.84051 | 65 | 19.18745 |
| L22 : 12 -> 16 | 7.17738 | 65 | 8.628519 |
| L23 : 14 -> 15 | 1.573801 | 32 | 1.899251 |
| L24 : 15 -> 18 | 5.988228 | 32 | 6.769948 |
| L25 : 15 -> 23 | 5.003018 | 32 | 5.864068 |
| L26 : 16 -> 17 | 3.625194 | 65 | 5.057593 |
| L27 : 18 -> 19 | 2.749942 | 32 | 3.521952 |
| L28 : 19 -> 20 | -6.754901 | 32 | -5.985821 |
| L29 : 21 -> 22 | -1.822111 | 32 | -1.998241 |
| L30 : 22 -> 24 | 5.745282 | 32 | 5.453972 |
| L31 : 23 -> 24 | 1.77173 | 32 | 2.62482 |
| L32 : 24 -> 25 | -1.234475 | 32 | -0.6741549 |
| L33 : 25 -> 26 | 3.544645 | 32 | 3.545065 |
| L34 : 25 -> 27 | -4.78919 | 32 | -4.22628 |
| L35 : 27 -> 29 | 6.189921 | 32 | 6.191241 |
| L36 : 27 -> 30 | 7.092003 | 32 | 7.093664 |
| L37 : 29 -> 30 | 3.703733 | 32 | 3.704113 |
| Tr1 : 4 -> 12 | 44.06515 | 65 | 47.19631 |
| Tr2 : 6 -> 9 | 27.78761 | 65 | 26.20712 |
| Tr3 : 6 -> 10 | 15.87703 | 32 | 14.956 |
| Tr4 : 28 ->27 | 18.09552 | 65 | 17.53058 |
| Total Losses | 17.63719 | | 20.06194 |

จากตารางที่ 1 เกิดโหลดเกินขึ้นที่ L2 , L3 และ L7 ทำการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วยวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 2 จากตารางที่ 2 เมื่อเลือกสวิทซ์ L9 (6 -> 7) สามารถที่จะขจัดโหลดเกินได้อย่างสมบรูณ์ ดังนั้นจึงทำการเลือกสวิทซ์ L9 (6 -> 7) จึงเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด = 1.140625 s) #

ตารางที่ 2 ผลสรุปวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ [2]

| Switch | No.of Overload | Total Losses (MW) | Select Switch L & Tr |
|---|---|---|---|
| Outage L5 | 3 | 20.06194 | - |
| L1 : 1 -> 2 | 3 | 62.31998 | No |
| L2 : 1 -> 3 | 3 | 36.60136 | No |
| L3 : 2 -> 4 | 3 | 24.97483 | No |
| L4 : 2 -> 5 | 4 | 45.64961 | No |
| L5 : 2 -> 6 | Outage | Outage | Outage |
| L6 : 3 -> 4 | 3 | 35.68576 | No |
| L7 : 4 -> 6 | 3 | 31.58697 | No |
| L8 : 5 -> 7 | 3 | 20.71336 | No |
| L9 : 6 -> 7 | None | 19.93592 | Yes** |
| L10 : 6 -> 8 | 3 | 20.18488 | No |
| L11 : 6 -> 28 | 3 | 20.11688 | No |
| L12 : 8 -> 28 | 3 | 20.06186 | No |
| L13 : 9 -> 10 | 2 | 20.95445 | No |
| L14 : 9 -> 11 | 3 | 20.06194 | No |
| L15 : 10 -> 17 | 3 | 20.98366 | No |
| L16 : 10 -> 20 | 3 | 20.18936 | No |
| L17 : 10 -> 21 | 3 | 20.13700 | No |
| L18 : 10 -> 22 | 3 | 20.08390 | No |
| L19 : 12 -> 13 | 3 | 20.06193 | No |
| L20 : 12 -> 14 | 3 | 20.08191 | No |
| L21 : 12 -> 15 | 3 | 20.15627 | No |
| L22 : 12 -> 16 | 3 | 20.03795 | No |
| L23 : 14 -> 15 | 3 | 20.03901 | No |
| L24 : 15 -> 18 | 3 | 20.03916 | No |
| L25 : 15 -> 23 | 3 | 20.11157 | No |
| L26 : 16 -> 17 | 3 | 19.97246 | No |
| L27 : 18 -> 19 | 3 | 19.99879 | No |
| L28 : 19 -> 20 | 3 | 19.99781 | No |
| L29 : 21 -> 22 | 3 | 20.05821 | No |
| L30 : 22 -> 24 | 3 | 20.0294 | No |
| L31 : 23 -> 24 | 3 | 20.05661 | No |
| L32 : 24 -> 25 | 3 | 20.00118 | No |
| L33 : 25 -> 26 | Can't Switch | Can't Switch | Can't Switch |
| L34 : 25 -> 27 | 3 | 20.01812 | No |
| L35 : 27 -> 29 | 3 | 20.08111 | No |
| L36 : 27 -> 30 | 3 | 20.22418 | No |
| L37 : 29 -> 30 | 3 | 20.02838 | No |
| Tr1 : 4 -> 12 | 3 | 23.66466 | No |
| Tr2 : 6 -> 9 | 2 | 19.95446 | No |
| Tr3 : 6 -> 10 | 3 | 20.05188 | No |
| Tr4 : 28 ->27 | 3 | 22.00930 | No |

ค่าเพาเวอร์โฟลว์หลังจากเลือกสวิทซ์ L9 (6 -> 7) ไปแล้วนั้น แสดงได้ดังตารางที่ 5

ทำการเลือกสวิทซ์ไลน์ด้วยวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุง แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตรวจสอบเงื่อนไขตามสมการที่ 9

| | 1=2 ; k=5 | 1=3 ; k=5 | 1=7 ; k=5 | |
|---|---|---|---|---|
| s | Check Condition Eq.9 | Check Condition Eq.9 | Check Condition Eq.9 | No. of Overload |
| Switch L1 : 1->2 | -206.0111 | 56.63825 | -49.65804 | 2 |
| Switch L2 : 1->3 | Switch | -79.04126 | 21.09742 | 1 |
| Switch L3 : 2->4 | -51.61097 | Switch | 20.70269 | 1 |
| Switch L6 : 3->4 | 63.76067 | -77.07425 | 20.23997 | 1 |
| Switch L7 : 4->6 | 13.44127 | 18.05212 | Switch | 0 |
| Switch L9 : 6->7 | 6.772797 | 11.37771 | 13.69504 | 0 |
| Switch L13 : 9->10 | -2.410421 | -3.115503 | 3.83535 | 2 |
| Switch Tr 2 : 6->9 | -2.410412 | -3.115501 | 3.835373 | 2 |

จากตารางที่ 3 ตรวจสอบเงื่อนไขตามสมการที่ 9 เมื่อสวิทซ์ L1 , L2 , L3 , L6 , L13 และ Tr2 แล้วนั้น สามารถขจัดไลน์ที่เกิดโหลดเกินได้บางไลน์เท่านั้นไม่ทั้งหมด แต่เมื่อเลือกสวิทซ์ L7 , L9 แล้วนั้น สามารถขจัดไลน์ที่เกิดโหลดเกินได้ทุกไลน์ (เพราะว่ามีจำนวน

โหลดเกิน = 0) ดังนั้นจึงทำตรวจสอบผลข้างเคียงของโหลดเกินที่ไลน์อื่นๆอีกว่าเกิดโหลดเกินขึ้นมาอีกหรือไม่หลังจากที่ได้เลือกสวิทซ์ L7 , L9 ไปแล้วนั้น ตามเงื่อนไขสมการที่ 9 ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตรวจสอบผลข้างเคียงของโหลดเกิน

| | Switch L7 : 4 -> 6 | Switch L9 : 6 -> 7 |
|---|---|---|
| | Check Condition Eq.9 | Check Condition Eq.9 |
| L1 : 1 -> 2 | -15.39114 | 4.859781 |
| L2 : 1 -> 3 | 13.44127 | 6.772797 |
| L3 : 2 -> 4 | 18.05212 | 11.37771 |
| L4 : 2 -> 5 | -39.64334 | 6.466572 |
| L5 : 2 -> 6 | Outage | Outage |
| L6 : 3 -> 4 | 19.209 | 12.7957 |
| L7 : 4 -> 6 | Switch | 13.69504 |
| L8 : 5 -> 7 | 38.38462 | 78.6826 |
| L9 : 6 -> 7 | 17.37077 | Switch |
| L10 : 6 -> 8 | 33.8389 | 35.42894 |
| L11 : 6 -> 28 | 46.069 | 53.05118 |
| L12 : 8 -> 28 | 62.74915 | 64.43089 |
| L13 : 9 -> 10 | 8.521852 | 36.39493 |
| L14 : 9 -> 11 | 65 | 65 |
| L15 : 10 -> 17 | 0.2135086 | 25.86233 |
| L16 : 10 -> 20 | 8.905843 | 22.54305 |
| L17 : 10 -> 21 | 12.6449 | 16.11794 |
| L18 : 10 -> 22 | 22.05054 | 24.31895 |
| L19 : 12 -> 13 | 130 | 130 |
| L20 : 12 -> 14 | 51.06111 | 56.98086 |
| L21 : 12 -> 15 | 22.12909 | 46.46426 |
| L22 : 12 -> 16 | 30.61131 | 57.07151 |
| L23 : 14 -> 15 | 24.44998 | 30.25975 |
| L24 : 15 -> 18 | 11.44466 | 25.60788 |
| L25 : 15 -> 23 | 11.21953 | 26.55334 |
| L26 : 16 -> 17 | 34.67031 | 60.63409 |
| L27 : 18 -> 19 | 15.16102 | 28.8514 |
| L28 : 19 -> 20 | 10.9992 | 24.84808 |
| L29 : 21 -> 22 | 26.63925 | 30.08639 |
| L30 : 22 -> 24 | 20.51502 | 26.10293 |
| L31 : 23 -> 24 | 14.99449 | 29.78896 |
| L32 : 24 -> 25 | 21.64004 | 30.47915 |
| L33 : 25 -> 26 | 28.45291 | 28.45516 |
| L34 : 25 -> 27 | 17.58829 | 26.92333 |
| L35 : 27 -> 29 | 25.80246 | 25.8094 |
| L36 : 27 -> 30 | 24.8984 | 24.90716 |
| L37 : 29 -> 30 | 28.29404 | 28.29609 |
| Tr1 : 4 -> 12 | -37.64289 | 19.31655 |
| Tr2 : 6 -> 9 | 8.472786 | 36.3949 |
| Tr3 : 6 -> 10 | 0.2693405 | 15.6476 |
| Tr4 : 28 ->27 | 37.97507 | 46.61604 |
| No. of Overload | 3 | 0 |

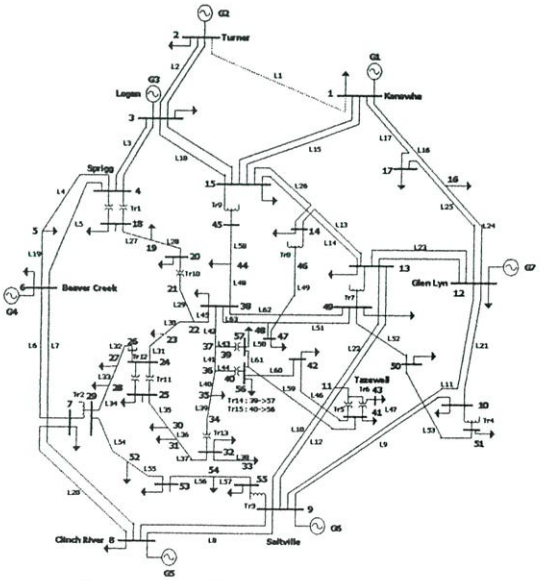
จากตารางที่ 4 เมื่อทำตรวจสอบผลข้างเคียงของโหลดเกินที่ไลน์อื่นๆ หลังจากที่ได้เลือกสวิทซ์ L7 , L9 โดยตรวจสอบเงื่อนไขตามสมการที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อสวิทซ์ L7 : ค่า L1 (1 -> 2) = -15.39114 ; ค่า L4 (2 -> 5) = -39.64334 ; ค่า Tr1 (4 -> 12) = -37.64289 มีค่าติดลบ แสดงว่าหลังจากที่ได้สวิทซ์ L7 ไปแล้วจะทำให้เกิดโหลดเกินขึ้นที่ L1 , L4 และ Tr1 ดังนั้นจะไม่เลือกสวิทซ์ L7 ที่ถึงแม้ว่าจะขจัดโหลดเกินที่ L2 , L3 และ L7 ได้ก็ตาม แต่เมื่อสวิทซ์ L9 : ค่า line & tr อื่นๆ มีค่าเป็นบวกทั้งหมด แสดงว่าเมื่อเลือกสวิทซ์ L9 ไปแล้ว สามารถที่จะขจัดโหลดเกินได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงทำการเลือกสวิทซ์ L9 (6 -> 7) จึงเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด = 0.1640625 s) #

ค่าเพาเวอร์โฟลว์หลังจากเลือกสวิทซ์ L9 (6 -> 7) ไปแล้วนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าเพาเวอร์โฟลว์หลังเลือกสวิทซ์ L9(6->7)

| | Outage Flow (MW) | Limit (MW) | OL5+SwL9 | OL5+SwL9 (Run Load flow) |
|---|---|---|---|---|
| L1 : 1 -> 2 | 161.6095 | 180 | 171.0515 | 171.0774 |
| L2 : 1 -> 3 | 102.1258 | 100 | 93.2272 | 93.10855 |
| L3 : 2 -> 4 | 74.62041 | 72 | 60.62229 | 60.36384 |
| L4 : 2 -> 5 | 100.7645 | 130 | 123.5334 | 123.9354 |
| L5 : 2 -> 6 | Outage | 100 | Outage | Outage |
| L6 : 3 -> 4 | 95.49487 | 100 | 87.2043 | 87.19252 |
| L7 : 4 -> 6 | 111.2324 | 105 | 91.30496 | 91.38759 |
| L8 : 5 -> 7 | 2.169286 | 130 | 23.06231 | 23.0915 |
| L9 : 6 -> 7 | 20.78139 | 130 | Switch | Switch |
| L10 : 6 -> 8 | 29.55811 | 65 | 29.57106 | 29.55922 |
| L11 : 6 -> 28 | 18.18956 | 72 | 18.44024 | 18.43018 |
| L12 : 8 -> 28 | -0.5939729 | 65 | -0.5691099 | -0.56677 |
| L13 : 9 -> 10 | 26.20718 | 65 | 26.97015 | 26.97027 |
| L14 : 9 -> 11 | 0.0000002230 | 65 | 0.0000002230 | 0.00000 |
| L15 : 10 -> 17 | 3.97422 | 32 | 4.664048 | 4.66275 |
| L16 : 10 -> 20 | 8.2717 | 32 | 8.650366 | 8.64895 |
| L17 : 10 -> 21 | 15.61202 | 32 | 15.69676 | 15.69808 |
| L18 : 10 -> 22 | 7.756946 | 32 | 7.811883 | 7.56104 |
| L19 : 12 -> 13 | -0.0000054592 | 130 | 0.0000111875 | 0.00000 |
| L20 : 12 -> 14 | 8.031364 | 65 | 7.875375 | 8.01955 |
| L21 : 12 -> 15 | 18.74588 | 65 | 18.12044 | 18.5376 |
| L22 : 12 -> 16 | 8.119305 | 65 | 7.444864 | 7.92727 |
| L23 : 14 -> 15 | 1.746991 | 32 | 1.59365 | 1.74303 |
| L24 : 15 -> 18 | 6.420617 | 32 | 6.056365 | 6.3926 |
| L25 : 15 -> 23 | 5.614565 | 32 | 5.215755 | 5.44889 |
| L26 : 16 -> 17 | 4.555853 | 65 | 3.889923 | 4.3658 |
| L27 : 18 -> 19 | 3.17515 | 32 | 2.815414 | 3.14937 |
| L28 : 19 -> 20 | -6.331605 | 32 | -6.690086 | -6.35674 |
| L29 : 21 -> 22 | -1.641013 | 32 | -1.557201 | -1.91239 |
| L30 : 22 -> 24 | 6.050776 | 32 | 6.189208 | 5.59505 |
| L31 : 23 -> 24 | 2.375245 | 32 | 1.980127 | 2.21367 |
| L32 : 24 -> 25 | -0.3555189 | 32 | -0.6121299 | -0.94327 |
| L33 : 25 -> 26 | 3.550169 | 32 | 3.549896 | 3.54483 |
| L34 : 25 -> 27 | -3.926008 | 32 | -4.184014 | -4.49653 |
| L35 : 27 -> 29 | 6.206653 | 32 | 6.205823 | 6.19061 |
| L36 : 27 -> 30 | 7.093664 | 32 | 7.092838 | 7.09287 |
| L37 : 29 -> 30 | 3.704113 | 32 | 3.703908 | 3.70394 |
| Tr1 : 4 -> 12 | 47.19631 | 65 | 45.68345 | 45.6843 |
| Tr2 : 6 -> 9 | 26.20712 | 65 | 26.97012 | 26.97028 |
| Tr3 : 6 -> 10 | 14.956 | 32 | 15.40165 | 15.40026 |
| Tr4 : 28 ->27 | 17.53058 | 65 | 17.80709 | 17.80168 |
| Total Losses | 20.06194 | | 19.93592 | 20.78559 |
| No. of Overload | 3 | | 0 | 0 |

## 4.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 Bus [3]




รูปที่ 3 ระบบไฟฟ้ากำลัง IEEE 57 bus [3]

จากรูปที่ 3 ทดสอบเอาท์เตจไลน์โดยสมมุติเลือกทดสอบเอาท์เตจ L58(44 -> 45) ผลลัพธ์ดูจากตารางที่6

ตารางที่ 6 ทดสอบเอาท์เตจ L58 (44 -> 45)

| | Base Case (MW) | Limit (MW) | Outage Flow (MW) |
|---|---|---|---|
| L58 : 44 -> 45 | -35.95238 | 65 | Outage |
| L63 : 38 -> 48 | -16.31788 | 32 | -36.75575 |
| Total Losses | 27.29115 | | 30.76357 |

จากตารางที่ 6 เกิดโหลดเกินขึ้นที่ L63 (38 -> 48) ดังนั้นทำการเลือกสวิทช์ไลน์ด้วยวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ [2] ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลสรุปวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์ [2]

| Switch | No.of Overload | Total Losses (MW) | Select Switch L & Tr |
|---|---|---|---|
| Outage L58 | 1 | 30.76357 | - |
| L42 : 37 -> 38 | None | 32.62350 | Yes** |

จากการทดสอบ L40(35->36), L48(38->44), Tr1 (4->18) , Tr11(24->25) ไม่สามารถสวิทช์ได้ จากตารางที่ 7 เมื่อสวิทช์ L42 (37 -> 38) สามารถขจัดโหลดเกินได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงเลือกสวิทช์ L42 (37 -> 38) จึงเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด = 3.796875 s) #

ทำการเลือกสวิทช์ไลน์ด้วยวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุงแสดงได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขตามสมการที่ 9

| | l = 63 : k = 58 | |
|---|---|---|
| s | Check Condition Eq.9 | No. of Overload |
| Switch L8 : 8 -> 9 | 4.591947 | 0 |
| Switch L26 : 14 -> 15 | 2.736587 | 0 |
| Switch L42 : 37 -> 38 | 2.410224 | 0 |
| Switch L49 : 46 -> 47 | 5.001966 | 0 |
| Switch L50 : 47 -> 48 | 11.39432 | 0 |
| Switch L63 : 38 -> 48 | Switch | 0 |
| Switch Tr8 : 14 -> 46 | 5.034105 | 0 |

จากตารางที่ 8 เมื่อสวิทช์ L8 , L26 , L42 , L49 , L50 และ Tr8 แล้วนั้นค่าที่ตรวจสอบตามเงื่อนไขสมการที่ 9 มีค่าเป็นบวกทั้งหมด ดังนั้นจึงตรวจสอบผลข้างเคียงของโหลดเกินที่ไลน์อื่นๆ แสดงได้ดังตารางที่ 9

จากตารางที่ 9 เมื่อสวิทช์ L8 จะทำให้เกิดโหลดเกินที่ line & tr อื่นๆ = 21 ; สวิทช์ L26 จะทำให้เกิดโหลดเกินที่ line อื่นๆ = 2 ; สวิทช์ L49 , Tr8 จะทำให้เกิดโหลดเกินที่ line & tr อื่นๆ = 5 ; สวิทช์ L50 , L63 จะทำให้เกิดโหลดเกินที่ line อื่นๆ = 1 แต่เมื่อสวิทช์ L42 จะไม่ทำให้เกิดโหลดเกินขึ้นที่ line & tr อื่นๆอีก ดังนั้นจึงทำการเลือกสวิทช์ L42 (37 -> 38) จึงเหมาะสมที่สุด (ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด = 0.703125 s) # สรุปผลการเลือกสวิทช์ไลน์และเวลาดูได้จากตารางที่ 10 จากตารางที่ 10 วิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุงให้ผลการเลือกสวิทช์ไลน์ที่ตรงกับวิธีเดิม [2] แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า เห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อทดสอบกับ IEEE57 Bus [3] ส่วนกรณีของไลน์ที่เกิดโหลดเกินนั้นจะพิจารณาครอบคลุมถึงการ open circuit ด้วย

ตารางที่ 9 ตรวจสอบผลข้างเคียงของโหลดเกิน

| Switch | Check Condition Eq.9 <0 | No. of Overload |
|---|---|---|
| L8 : 8 -> 9 | L5 (4->6) , L7 (6->8) , L10 (9->11) , L12 (9->13) , L13 (13->14) | 21 |
| | L14 (13->15) , L16 (1->16) , L18 (3->15) , L19 (5->6) , L20 (7->8) | |
| | L21 (10->12) , L22 (11->13) , L25 (12->17) , L26 (14->15) | |
| | L32 (26->27) , L33 (27->28) , L50 (47->48) , L54 (29->52) | |
| | L55 (52->53) , Tr2 (7->29) , Tr12 (24->26) | |
| L26 : 14 -> 15 | L13 (13->14) , L14 (13->15) | 2 |
| L42 : 37 -> 38 | – | 0 |
| L49 : 46 -> 47 | L13 (13->14) , L33 (27->28) , L51 (48->49) , Tr2 (7->29) , Tr7 (13->49) | 5 |
| L50 : 47 -> 48 | L13 (13->14) | 1 |
| L63 : 38 -> 48 | L62 (38->49) | 1 |
| Tr8 : 14 -> 46 | L13 (13->14) , L33 (27->28) , L51 (48->49) , Tr2 (7->29) , Tr7 (13->49) | 5 |

ตารางที่ 10 แสดงค่าเวลาและการเลือกสวิทช์ไลน์

| | IEEE30 Bus | IEEE57 Bus | IEEE30 Bus | IEEE57 Bus |
|---|---|---|---|---|
| | Outage L5 (2->6) | Outage L58 (44->45) | Outage L5 (2->6) | Outage L58 (44->45) |
| Method | Switch | Switch | Times (s) | Times (s) |
| linear sensitivity factors [2] | L9 (6->7) | L42 (37->38) | 1.140625 | 3.796875 |
| Improve linear sensitivity factors | L9 (6->7) | L42 (37->38) | 0.1640625 | 0.703125 |

## 5. บทสรุป

วิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุงนี้สามารถปรับปรุงเรื่องของเวลาที่ใช้ในการคำนวณให้น้อยลงกว่าเดิมได้ เพราะว่าจะทำการพิจารณาเลือกสวิทช์ไลน์ที่สามารถขจัดโหลดเกินที่ไลน์นั้นๆให้ได้ก่อน แล้วจึงค่อยทำการตรวจสอบผลข้างเคียงของโหลดเกินที่ไลน์อื่นๆอีกครั้งหนึ่ง แล้วจึงค่อยสรุปเลือกสวิทช์ไลน์ที่เหมาะสม , ส่วนค่า $d_{l,k}$ นั้น จะคำนวณเฉพาะค่าที่จะใช้เท่านั้นโดยจะไม่คำนวณค่าทั้งหมดแล้วเก็บไว้ในหน่วยความจำ แต่วิธีเดิม [2] นี้ ค่า $d_{l,k}$ จะคำนวณทั้งหมดแล้วเก็บไว้ในหน่วยความจำ หลังจากนั้นจึงทำการสวิทช์ไลน์ไปทั้งหมด แล้วจึงค่อยสรุปเลือกสวิทช์ไลน์ที่เหมาะสมอีกครั้งหนึ่ง ทำให้เสียเวลาในการคำนวณและเนื้อที่หน่วยความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์แบบปรับปรุงนี้สามารถที่จะใช้คำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆได้

## 6. เอกสารอ้างอิง


[1] A.A. Mazi, B.F. Wollenberg, M.H. Hesse ,"Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching," IEEE Trans. Power System, Vol.1, No.3, August.1986, pp. 258–265.

[2] สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล, มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์,"การวิเคราะห์โหลดเกินในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีแซท-เมตริกซ์เทียบกับวิธีไลเนียเซนซิติวิตี้แฟกเตอร์," วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 19 ฉบับที่ 3 กันยายน 2545 หน้า 54–59.

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

# ประวัติผู้เขียน

นาย สิทธิเดช วชิราศรีศิริกุล เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม ที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540

เข้าทำงานบริษัทแอมป์จำกัด ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า ทำหน้าที่ถอดแบบประเมินราคางาน ระบบไฟฟ้า ประปา แอร์ ระบบระบายอากาศ ที่สำนักงานใหญ่ และ ทำหน้าที่ Site Engineer ที่ โครงการก่อสร้าง โดยดูแลควบคุมงานระบบไฟฟ้า control ปรับอากาศ และ ระบายอากาศ เป็น ระยะเวลา 2 ปี 2 เดือน

ปัจจุบันศึกษาต่อระดับปริญญาโท ที่บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง