รายการอ้างอิง

1. จรวย บุญยุบล. การวางแผนและความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง. คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
2. ธวัชชัย ทางรัตนสุวรรณ. การหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมที่พิจารณาถึงการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
3. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์. การศึกษาผลกระทบทางเศรษฐกิจเนื่องจากไฟฟ้าดับ. สถาบันวิจัยพลังงาน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
4. Billinton, R., and Goel, L. A procedure for evaluating Interrupted Energy Assessment Rates in an overall electric power systems. IEEE Transactions on Power Systems 6 (November 1991): 1396-1403.
5. Billinton, R., and Goel, L. Utilization of Interrupted Energy Assessment Rates to evaluate reliability worth in electric power systems. IEEE Transactions on Power Systems 8 (August 1993): 929-936.
6. Billinton, R., and Medicherla, T.K.P. Overall approach to the reliability evaluation of composite generation and transmission system. IEE Proceeding 127 (March 1980): 72-81.
7. Billinton, R., and Oteng-Adjei, J. Evaluation of Interrupted Energy Assessment Rates in composite system. IEEE Transaction on Power System 5 (November 1990): 1317-1323.
8. Billinton, R., and Oteng-Adjei, J. Utilization of Interrupted Energy Assessment Rates in generation and transmission system planning. IEEE Transactions on Power Systems 6 (August 1991): 1245-1253.
9. Billinton, R., and Allan, R.N. Reliability Evaluation of Power System. London : Pitman Advanced Publishing Program, 1984.
10. Billinton, R., and Allan, R.N. Reliability Assessment of Large Electric Power Systems. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1988.
11. Billinton, R., and others. Contingency cut-off criteria in transmission system adequacy assessment. IEE Proceeding 136 (July 1989): 215-221.

12. Billinton, R., and Allan, R.N. Tutorial of power system reliability and its assessment Part2 composite generation and transmission systems. Power engineering journal (November 1992): 291-297.

13. Medicherla, T.K.P., Billinton, R., and Sachdev, M.S. Generation rescheduling and load shedding to alleviate line overloads - Analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-98 (November/December 1979): 1876 -1884.

14. Medicherla, T.K.P., Billinton, R., and Sachdev, M.S. Generation rescheduling and load shedding to alleviate line overloads - System studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-100 (January 1981): 36-42.

15. Billinton, R., and Allan, R.N. Reliability Evaluation of Engineering System : Concept and Techniques. London : Pitman Advanced Publishing Program, 1985.

16. Billinton, R., and Kumer, S.A. Comparative study of system versus load point indices for bulk power system. IEEE Transactions on Power Systems PWRS-1 (August 1986): 148-156.

17. Stagg, B., and El-Abiad, A.H. Computer Methods in Power System Analysis. New York : McGraw-Hill, 1982.

18. Wood, A. J., and Wollenberg, B.F. Power Generation Operation and Control. New York :John Wiley, 1984.

19. Stott,B., and Alsac,O. Fast decoupled load flow. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 93 (May/June 1974): 859-869.

20. Sherman,J., and Morrison, W.J. Adjustment of an inverse matrix corresponding to a change in one element of a given matrix, Annual Math. Stat. 21 (1950): 124-127.

21. Billinton, R., and others. A reliability test system for educational purposes-Basic data. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 4 (August 1989): 1238 -1244.

22. IEEE Committee Report. IEEE Reliability Test System. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-98 (November/December 1979): 2047-2054.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานโปรแกรม BULKREL

โปรแกรม BULKREL ได้ถูกพัฒนาขึ้นบนระบบไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 32 บิตด้วยภาษาซี พลัส พลัส เวอร์ชั่น 3.1 ของบริษัทบอร์แลนด์

ก.1 คุณลักษณะของโปรแกรม BULKREL

1. เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 32 บิตภายใต้ระบบปฏิบัติการดอส (Disk Operating System)

2. สามารถอ่านข้อมูลของระบบไฟฟ้าได้โดยการรับข้อมูลผ่านคีย์บอร์ด หรืออ่านจากไฟล์ที่เก็บไว้ในแผ่นดิสก์ (Diskette)

3.ใช้เทคนิคการระบุเหตุขัดข้องและการตรวจสอบเหตุขัดข้องเพื่อเลือกเหตุขัดข้องไปทดสอบ

4. จำนวนบัส สายส่งหรือหม้อแปลง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถคำนวณได้จะขึ้นอยู่กับขนาดหน่วยความจำของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้งาน เนื่องจากโปรแกรมมีการจองหน่วยความจำแบบพลวัต (Dynamic allocation)

5. ใช้กฎเกณฑ์การตัดออก (Cut-off criteria) ที่ความน่าจะเป็นต่ำกว่า 10^{-8} และความถี่ต่ำกว่า 10^{-6}

6. สามารถพิจารณาการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถึงระดับ 4 พิจารณาการขัดข้องของสายส่งหรือหม้อแปลงถึงระดับ 2 และการขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับสายส่งถึงระดับ 4 และสามารถพิจารณาการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันได้ด้วย

7. ใช้เทคนิคการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสดีคัปเปิล ที่ไม่ได้คำนึงถึงขีดจำกัดของกำลังรีแอคทีฟ และการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบ ดี.ซี.

8. ใช้วิธีการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ และการตัดโหลดเพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน หรือกำลังการผลิตมีไม่เพียงพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้า

9. สามารถจัดแบ่งระดับความสำคัญของโหลดที่บัสต่าง ๆ ได้เป็น 3 ระดับได้แก่ โหลดที่สามารถตัดได้ โหลดหลัก และโหลดวิกฤติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

10. ใช้แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดระดับเดียว โดยไม่ได้คำนึงถึงความไม่แน่นอนของการเติบโตของความต้องการใช้ไฟฟ้า

11. สามารถคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ทั้งค่าบัส และค่าของระบบ ซึ่งประกอบด้วยค่าดัชนีดังต่อไปนี้

ค่าดัชนีบัส

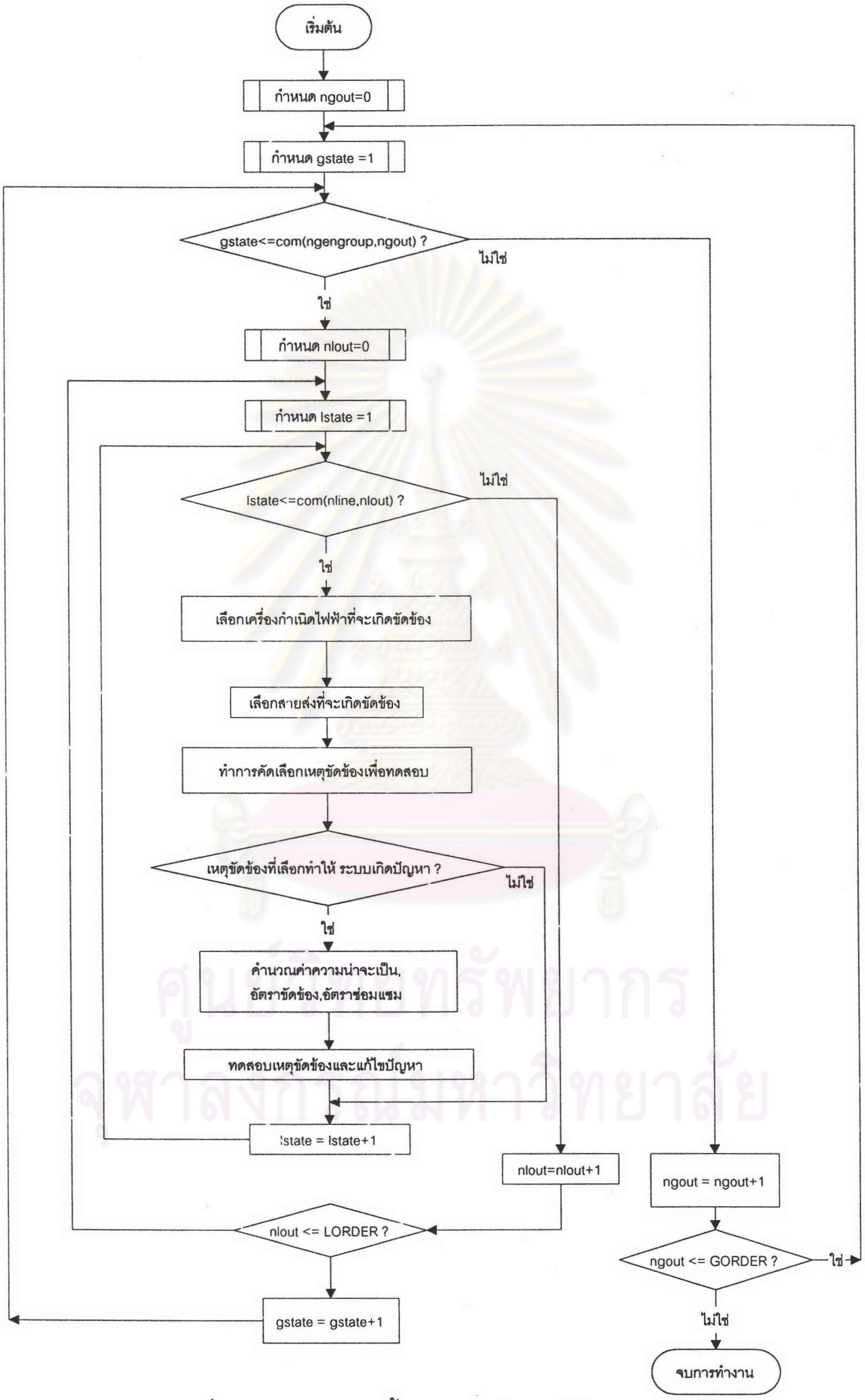
- Probability of failure
- Expected frequency of failure
- Expected number of voltage violations
- Expected number of load curtailments
- Expected load curtailed
- Expected energy not supplied
- Expected duration of load curtailment
- Maximum load curtailed
- Maximum energy curtailed
- Maximum duration of load curtailment
- Average load curtailed
- Average energy not supplied
- Average duration of curtailment

ค่าดัชนีระบบ

- Bulk power interruption index
- Bulk power supply average MW curtailment/disturbance
- Bulk power energy curtailment index
- Modified bulk power energy curtailment index
- Average number of curtailments/load point
- Average load curtailed/load point
- Average energy curtailed/load point
- Average duration of load curtailment/load point
- Average number of voltage violations/load point

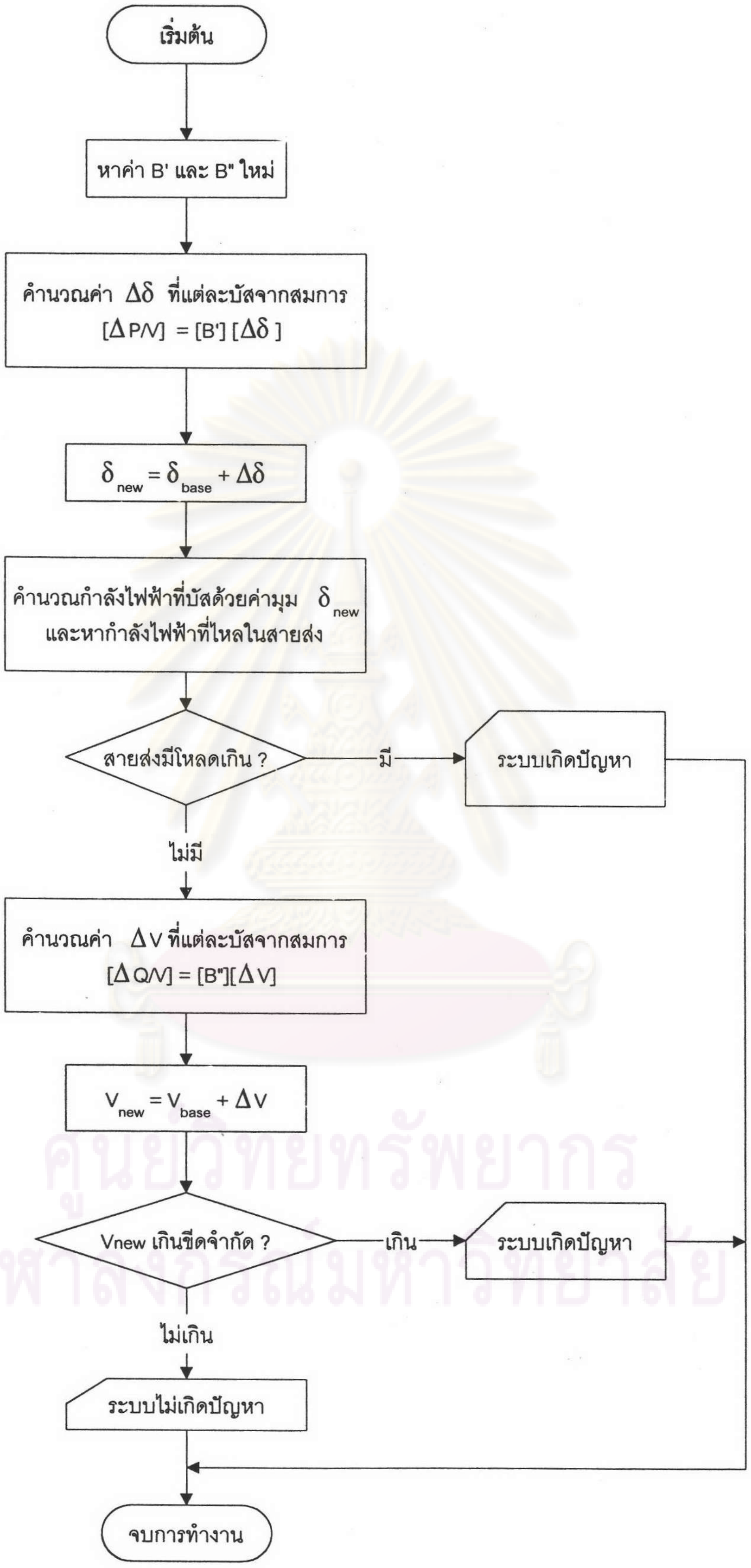
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานต่าง ๆ

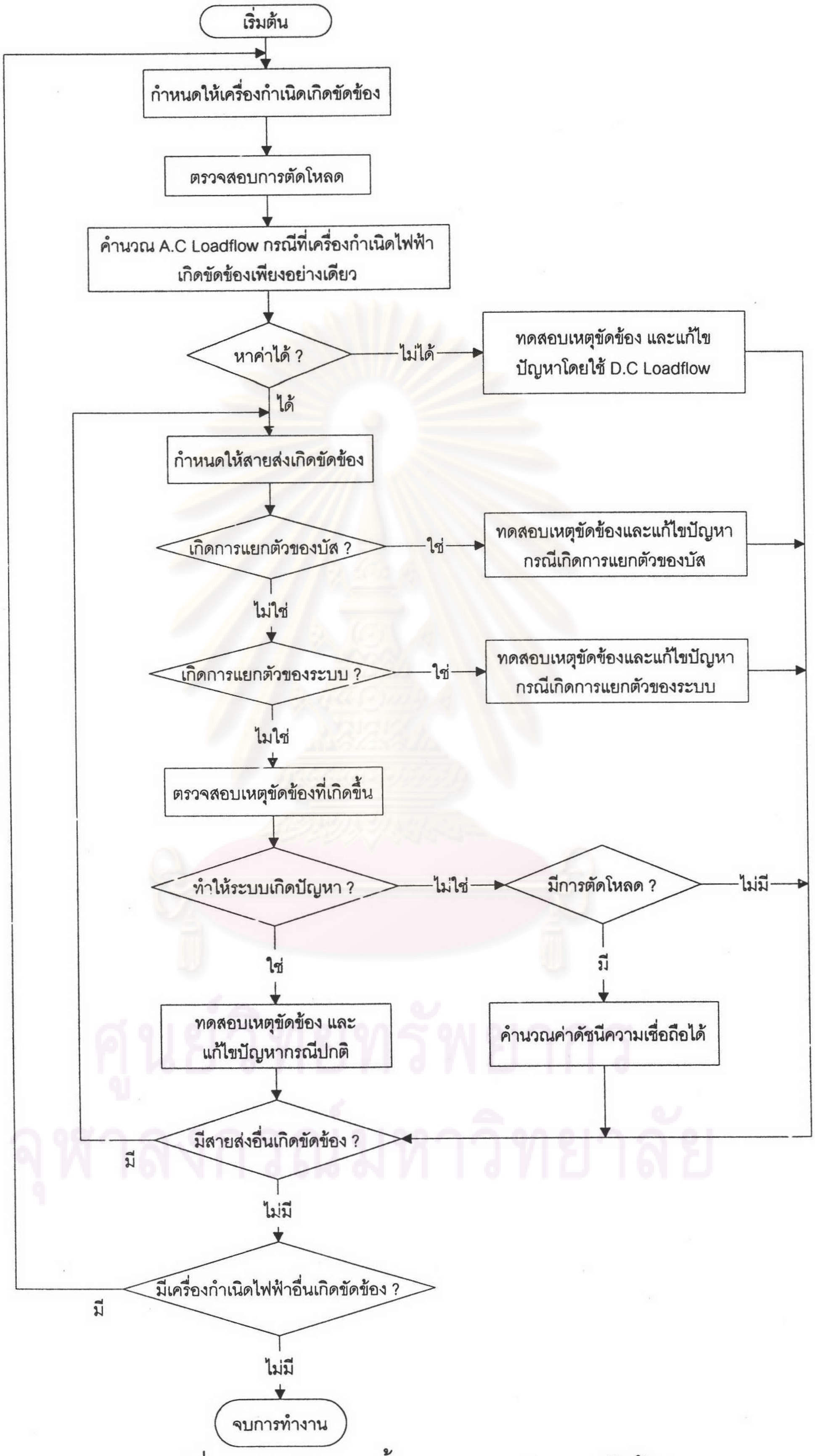


รูปที่ ก.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการกำหนดให้อุปกรณ์เกิดขัดข้อง

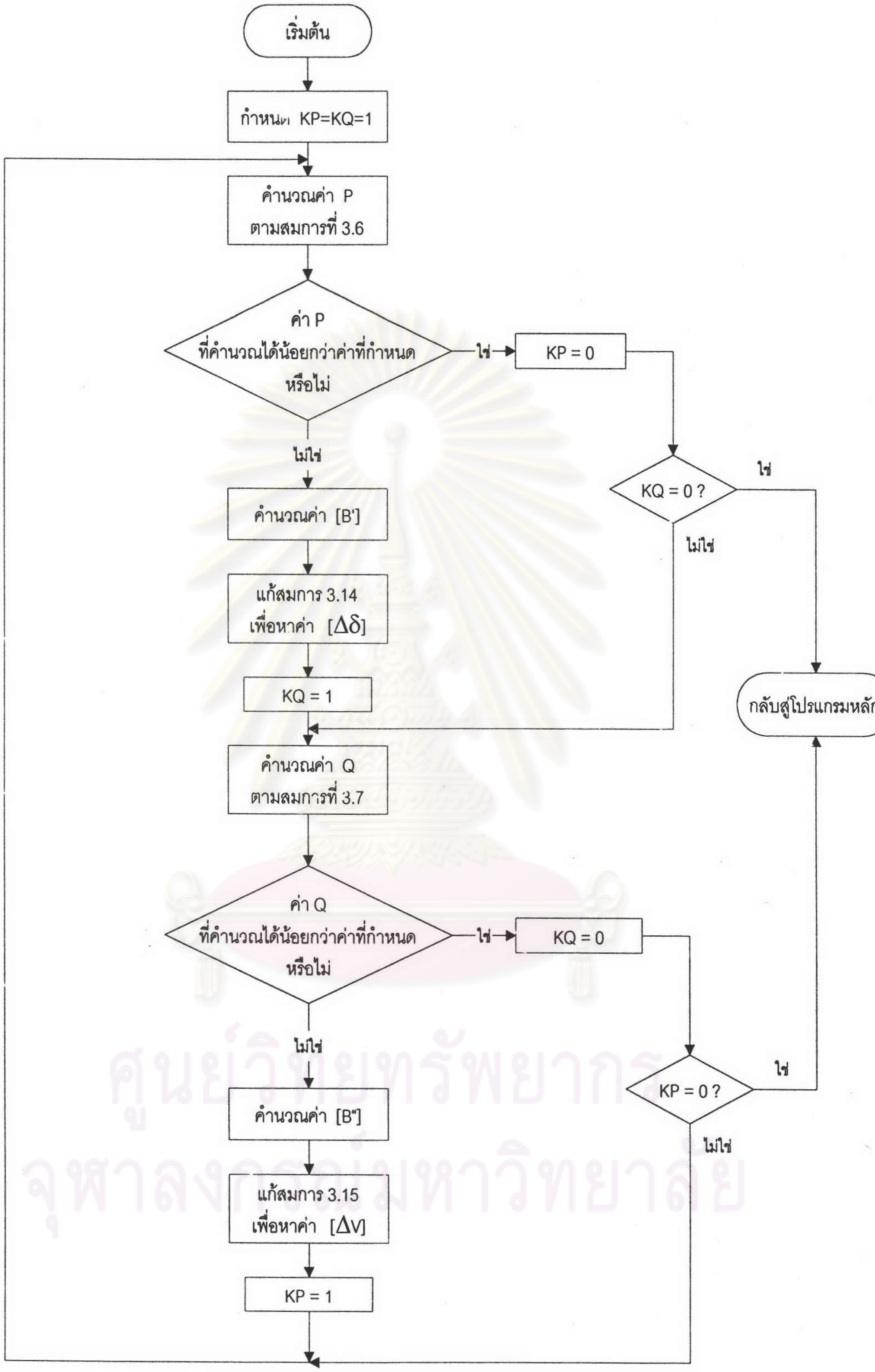
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการตรวจสอบเหตุขัดข้อง

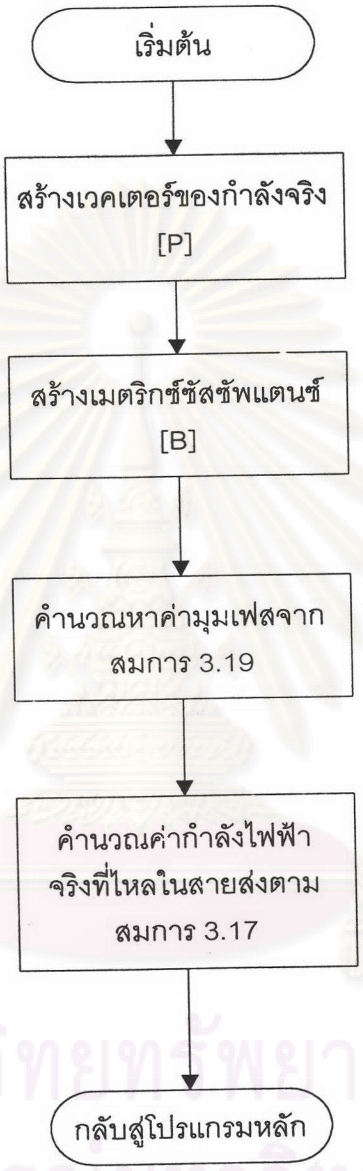


รูปที่ ก.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบเหตุขัดข้อง



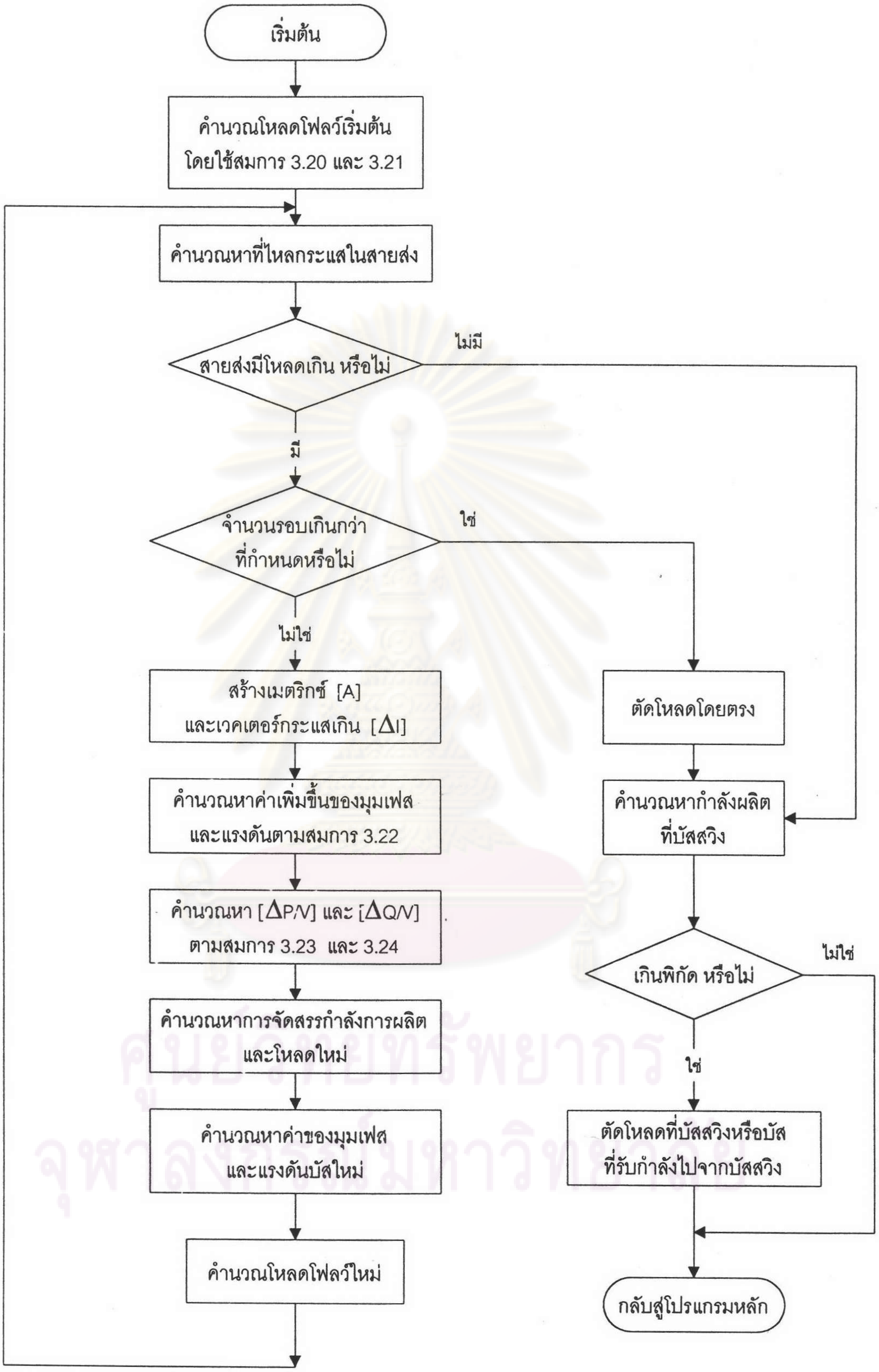
รูปที่ ก.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดโฟลว์โดยวิธีฟาสดีคัปเปิล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

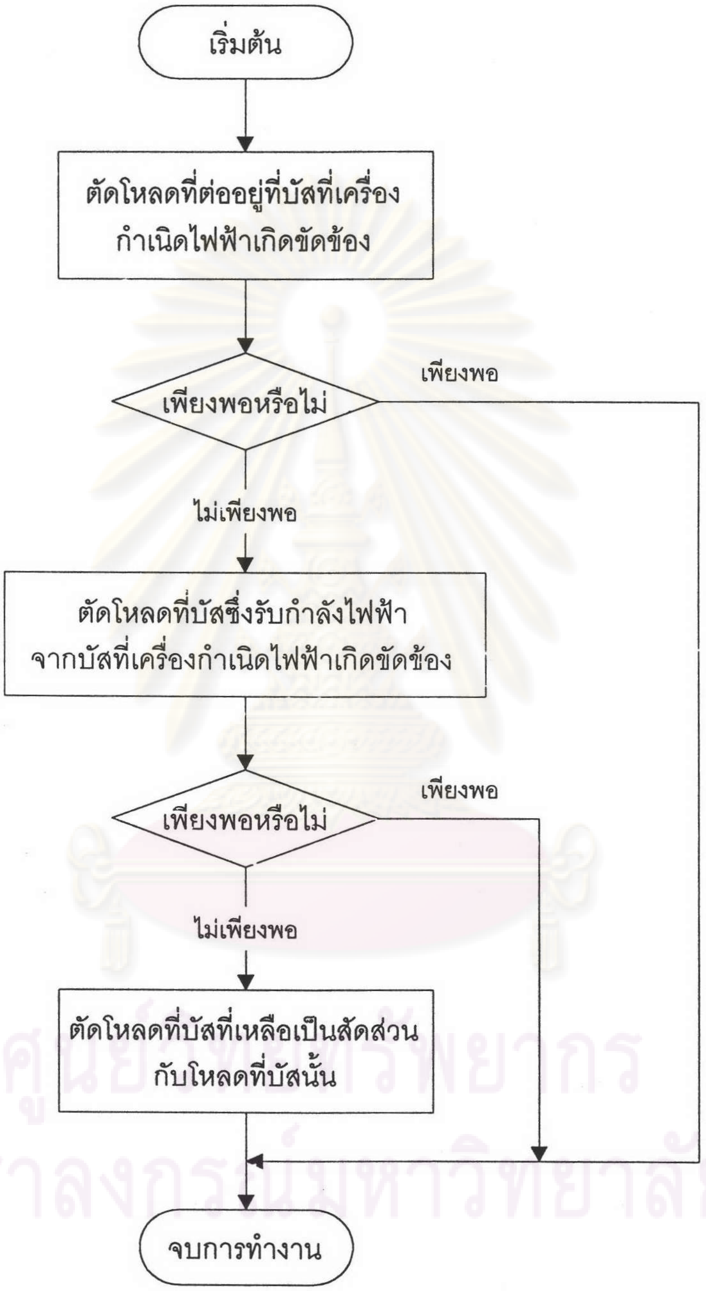


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

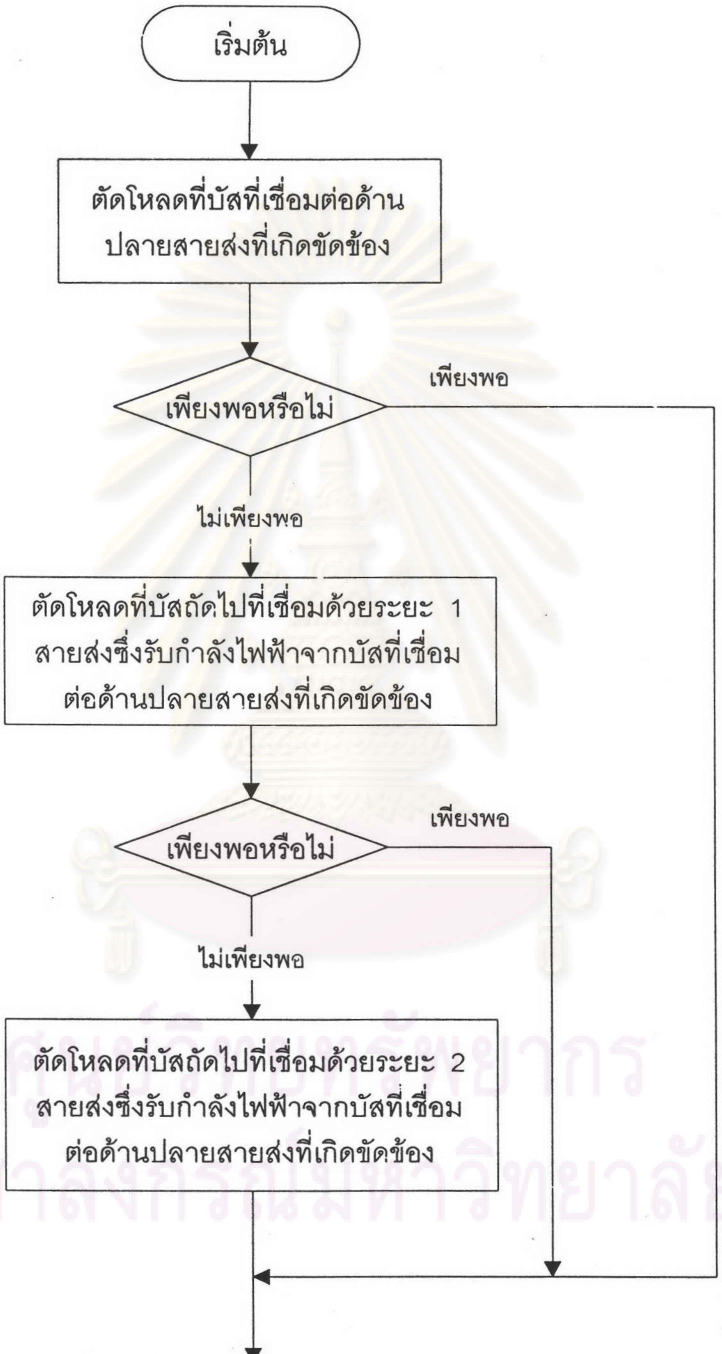
รูปที่ ก.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบ ดี.ซี.



รูปที่ ก.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ และการตัดโหลด

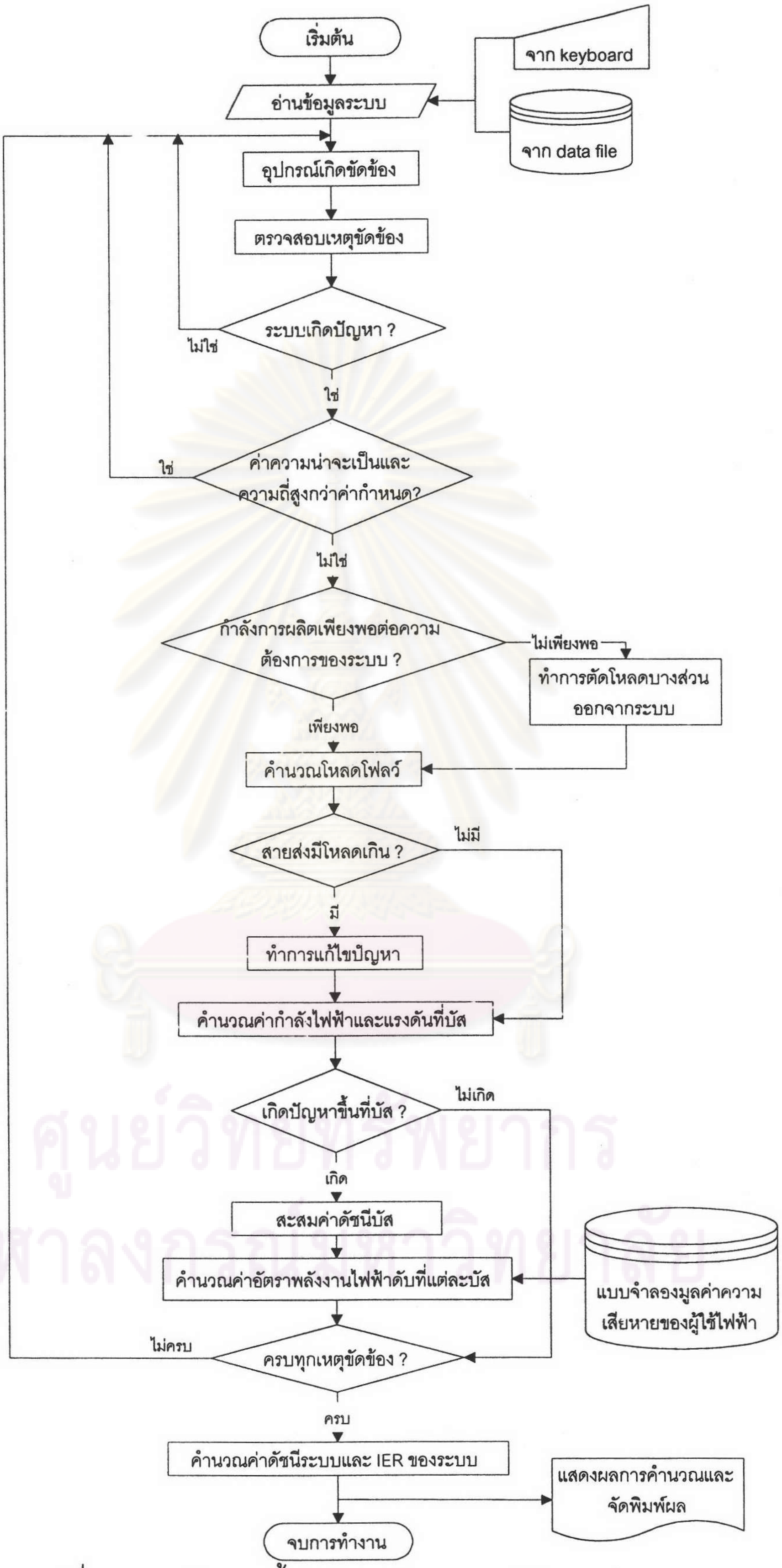


รูปที่ ก.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการตัดโหลดกรณีกำลังผลิตมีไม่เพียงพอกับความต้องการโหลด



รูปที่ ก.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการตัดโหลดกรณีเกิดเหตุขัดข้องในสายส่งไฟฟ้าและจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดใหม่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม BULKREL

ก.3 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม BULKREL

1. ภายหลังจากทำการบูท (Boot) เครื่องเรียบร้อยแล้วจะปรากฏเครื่องหมายพร้อมรับคำสั่งดังรูปข้างล่าง

```
C :> _
```

2. เรียกใช้โปรแกรมโดยการพิมพ์คำว่า BULKREL ดังรูปข้างล่าง โดยที่ในไดร์ฟ C:

```
C :> BULKREL
```

จะต้องมีไฟล์ BULKREL.EXE อยู่ด้วย หลังจากนั้นกดปุ่ม ENTER

3. หลังจากที่กดปุ่ม ENTER แล้วจะปรากฏข้อความแสดงถึงผู้พัฒนาโปรแกรม ให้กดปุ่มใด ๆ บนคีย์บอร์ด

4. จากนั้นจะปรากฏข้อความให้ผู้ใช้ป้อนชื่อระบบไฟฟ้าที่ต้องการทำการวิเคราะห์ดังรูป

```
Enter  system name

_
```

5. เมื่อผู้ใช้ป้อนชื่อระบบที่ต้องการแล้วจะปรากฏข้อความ ข้างล่าง

```
[1]  Read data from disk
[2]  Read data from keyboard
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ให้ผู้ใช้เลือกโดยการกดหมายเลข 1 หรือ 2 อย่างใดอย่างหนึ่งโดยที่

[1] หมายถึง ต้องการอ่านข้อมูลระบบไฟฟ้าจากแผ่นดิสก์ โดยข้อมูลของระบบไฟฟ้าจะเก็บอยู่ในไฟล์ต่าง ๆ ซึ่งมีนามสกุล ดังนี้

-ไฟล์นามสกุล .STM เก็บข้อมูลเกี่ยวกับระบบ

-ไฟล์นามสกุล .BUS เก็บข้อมูลเกี่ยวกับบัส

-ไฟล์นามสกุล .LIN เก็บข้อมูลเกี่ยวกับสายส่ง หรือหม้อแปลง

-ไฟล์นามสกุล .GEN เก็บข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

-ไฟล์นามสกุล .SHN เก็บข้อมูลเกี่ยวกับค่าชันท์แอดมิตแตนซ์

-ไฟล์นามสกุล .CMM เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดเหตุขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน

-ไฟล์นามสกุล .CST เก็บข้อมูลแบบจำลองมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้แต่ละประเภท

[2] หมายถึง ต้องการอ่านข้อมูลระบบไฟฟ้าโดยการป้อนผ่านทางคีย์บอร์ด

6. เมื่อผู้ใช้กดหมายเลข [1] คอมพิวเตอร์จะทำการอ่านข้อมูลตามชื่อที่ผู้ใช้ป้อนถ้าไม่มีไฟล์ข้อมูลระบบจะปรากฏข้อความ

```
File Not Exist !
Enter New System Name :
```

ให้ผู้ใช้ป้อนชื่อระบบไฟฟ้าที่ต้องการวิเคราะห์ใหม่

7.ถ้าหากมีไฟล์ข้อมูลระบบไฟฟ้าที่ต้องการวิเคราะห์อยู่ก็จะปรากฏเมนูดังรูปที่ ก.10 โดยที่แต่ละข้อมีความหมายดังนี้

Show System Data

- ใช้แสดงข้อมูลของระบบไฟฟ้า

Show Bus Data

- ใช้แสดงข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้า

Show Transmission Line Data

- ใช้แสดงข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้า

Show Genrating Unit Data

- ใช้แสดงข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า

Show Shunt Data

- ใช้แสดงข้อมูลชันท์แอตมิตแตนซ์ของระบบไฟฟ้า

Show Common Mode Outage Data

- ใช้แสดงข้อมูลการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันของระบบไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Main Menu

[A] Show System Data

[B] Show Bus Data

[C] Show Transmission Line Data

[D] Show Generating Unit Data

[E] Show Shunt Data

[F] Show Common Mode Outage Data

[O] Show Customer Damage Function Data

[S] Show Load Profile Data

[U] Show Sector Customer Load Data

[G] Correct System Data

[H] Correct Bus Data

[I] Correct Transmission Line Data

[J] Correct Generating Unit Data

[K] Correct Shunt Data

[L] Correct Common Mode Outage Data

[P] Correct Customer Damage Function Data

[V] Correct Load Profile Data

[T] Correct Sector Customer Load Data

[M] Calcutate Reliability Indices

[N] Exit Program

Select Options :> _

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.10 เมนูของโปรแกรม BULKREL

Show Customer Damage Function Data

- ใช้แสดงข้อมูลมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ ไฟฟ้าแต่ละประเภท

Show Load Profile Data

- ใช้แสดงข้อมูลการแบ่งระดับความสำคัญของโหลดในระบบ ไฟฟ้า

Show Sector Customer Load Data

- ใช้แสดงข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าที่แต่ละบัสในระบบไฟฟ้า

Correct System Data

-ใช้แก้ไขข้อมูลของระบบไฟฟ้า

Correct Bus Data

- ใช้แก้ไขข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้า

Correct Transmission Line Data

- ใช้แก้ไขข้อมูลสายส่งของระบบไฟฟ้า

Correct Genrating Unit Data

- ใช้แก้ไขข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ ไฟฟ้า

Correct Shunt Data

- ใช้แก้ไขข้อมูลชันท์แอดมิตแตนซ์ของระบบไฟฟ้า

Correct Common Mode Outage Data

- ใช้แก้ไขข้อมูลการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน ของระบบไฟฟ้า

Correct Customer Damage Function Data

- ใช้แก้ไขมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ ไฟฟ้าแต่ละประเภท

Correct Load Profile Data

- แสดงข้อมูลการแบ่งระดับความสำคัญของโหลดในระบบไฟฟ้า

Correct Sector Customer Load Data

- แสดงข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าที่แต่ละบัสในระบบไฟฟ้า

Calculate Reliability Indices

- ใช้คำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้และอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าดับของระบบไฟฟ้า

Exit Program

- ออกจากโปรแกรม

8. เมื่อต้องการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้และอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าดับให้กดอักษร M โดยขณะที่โปรแกรมกำลังทำงานจะปรากฏข้อความดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Contingency No.              :
Probability of Failure       :
Frequency of Failure         :
Generating Unit  Outage      :
Line Outage                  :
```

โดยที่

Contingency จะแสดงหมายเลขของเหตุขัดข้อง

Probability of Faiiure จะแสดงค่าความน่าจะเป็นของเหตุขัดข้องในแต่ละสถานะ

Frequency of Failure จะแสดงค่าความถี่ของเหตุขัดข้องในแต่ละสถานะ

Generating Unit Outage จะแสดงหมายเลขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดขัดข้อง

Line Outage จะแสดงหมายเลขของสายส่งไฟฟ้าที่เกิดขัดข้อง

9. หลังจากโปรแกรมทำงานเสร็จแล้ว โปรแกรมจะสรุปจำนวนเหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งหมด และจำนวนเหตุขัดข้องที่ผ่านการทดสอบ รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้

```
Number of  contingencies            :
Number of contingencies tested      :
Total computation time              :
```

10. จากนั้นให้กดปุ่มใด ๆ ก็จะปรากฏเมนูหลักข้างล่างนี้

```
              Reliability  Indices
        [1] Show Annualized Bus Indices
        [2] Show Annualized System Indices
        [3] Exit Program
             Select option :> _
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กด 1 เพื่อดูค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของบัส

กด 2 เพื่อดูค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบ

กด 3 เพื่อออกจากโปรแกรม

11. เมื่อกดหมายเลข 1 ก็จะปรากฏเมนูย่อยดังนี้

```
Bus Indices

[0] Go back
[1] Show Annualized Bus Indices
[2] Show Maximum Load Curtailed
[3] Show Maximum Energy Curtailed
[4] Show Maximum Duration of Load Curtailment
[5] Show Average Value of Bus Indices
[6] Show Load Points IER.
Select option :> _
```

Go back - กลับสู่เมนูหลัก

Show Annualized Bus Indices - แสดงค่าดัชนีบัส

Show Maximum Load Curtailed - แสดงค่าโหลดสูงสุดที่ถูกตัด

Show Maximum Energy Curtailed - แสดงค่าพลังงานสูงสุดที่ถูกตัด

Show Maximum Duration of Load Curtailment - แสดงช่วงเวลาที่ตัดโหลดสูงสุด

Show Average Value of Bus Indices - แสดงค่าดัชนีบัสเฉลี่ย

Show Load Points IER. - แสดงอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าดับของบัส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

12. เมื่อกดหมายเลข 2 จะปรากฏเมนูย่อยดังนี้

```
                    System  Indices

    [0] Go back
    [1] Show Annualized System Indices
    [2] Show Average System Indices

               Select option :> _
```

โดยที่

Go back - กลับสู่เมนูหลัก

Show Annualized System Indices - แสดงค่าดัชนีของระบบ

Show Average System Indices - แสดงค่าดัชนีเฉลี่ยของระบบ

13. นอกจากนี้ค่าดัชนีต่าง ๆ ยังเก็บไว้ในไฟล์ที่มีนามสกุล .DAT ด้วย เช่น RBTS.DAT จะเก็บผลของค่าดัชนีในระบบ RBTS เป็นต้น การเรียกเพื่อดูไฟล์นี้สามารถใช้ เอดิเตอร์ (Editor) ต่าง ๆ เปิดดูได้ เช่น Notepad ,Microsoft Word เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การจัดสรรกำลังการผลิตใหม่และการตัดโหลดโดยอาศัยเทคนิคของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสดีคัปเปิล

(Generation Rescheduling and Load Shedding by Fast Decoupled Load Flow Technique)

ปัญหาหนึ่งที่สำคัญซึ่งเกิดขึ้นในการหาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ คือการที่สายส่งมีโหลดเกิน โดยอาจจะเกิดจากการที่สายส่งสายหนึ่งหลุดออกไปจากระบบ ทำให้กำลังไฟฟ้าไหลผ่านสายส่งที่เหลือแทน จึงอาจทำให้สายส่งที่รับกำลังไฟฟ้าแทนนั้นเกิดโหลดเกินได้ ในทางปฏิบัติจะทำการแก้ไขได้โดยยอมให้สายส่งที่มีโหลดเกินนั้นทำงานต่อไปในสภาวะโหลดเกินได้ จึงทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่ดีกว่าความเป็นจริง ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง (Optimistic indices) โดยเฉพาะกรณีที่โหลดเกินมากและเกินอยู่เป็นเวลานาน แต่ถ้าหากให้ทำการปลดสายส่งที่มีโหลดเกินนั้นออกไปจากระบบ แล้วจึงทำการวิเคราะห์ระบบที่เหลือจนกว่าจะไม่มีอุปกรณ์ใดมีโหลดเกินหรือจนกว่าระบบล้มเหลว จะทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่แย่กว่าความเป็นจริง ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง (Pessimistic indices) อาจจะทำให้ต้องตัดสินใจที่จะปรับปรุงระบบให้มีความเชื่อถือได้สูงขึ้น โดยเพิ่มค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้มากขึ้น ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำวิธีการดังกล่าวมาใช้สำหรับการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่

สำหรับวิธีการแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ได้แก่ การจัดสรรกำลังผลิตใหม่ และ/หรือ การตัดโหลด

วิธีการกำหนดรูปแบบของการจัดสรรกำลังผลิตใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีการเหล่านี้ส่วนใหญ่จะใช้ออปติไมเซชั่นอัลกอริธึมต่ำที่สุด ในขณะที่ลดค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่มีโหลดเกินลง ซึ่งวิธีการเหล่านี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการหาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่เนื่องจากเหตุผลหลายประการ ได้แก่ [13,14]

1. ในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ โดยการจำลองการขัดข้องของอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้น จะพิจารณาถึงระดับแรงดันที่บัสต่าง ๆ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และอื่น ๆ แต่ไม่ได้คำนึงถึงต้นทุนการปฏิบัติการ การใช้ ออปติไมเซชั่นอัลกอริธึม จึงไม่มีความเหมาะสมและไม่มีความจำเป็น เนื่องจากต้องใช้เวลาในการคำนวณมากเกินความจำเป็น

2. ในบางกรณีไม่สามารถที่จะแก้ไขปัญหาโหลดเกินในสายส่งได้โดยการจัดสรรกำลังผลิตใหม่เพียงอย่างเดียว แต่จะต้องใช้ร่วมกับวิธีการตัดโหลดอย่างเหมาะสม จึงจะสามารถแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินนี้ได้

สำหรับรูปแบบการตัดโหลดในทางปฏิบัตินั้นจะขึ้นอยู่กับสัญชาติญาณ, ประสบการณ์และความคุ้นเคยที่มีต่อระบบของผู้ปฏิบัติงานเป็นสำคัญ ซึ่งวิธีการเหล่านี้ไม่ได้มีการใช้พื้นฐานการคำนวณทางด้านคณิตศาสตร์ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการตัดโหลดจำนวนมากโดยไม่จำเป็นได้เมื่อนำมาใช้ในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ จะทำให้ได้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่สูงกว่าความเป็นจริง (Pessimistic indices)

สำหรับวิธีการหารูปแบบการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลด เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินนั้นจะนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน และเทคนิคการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสดีคัปเปิล [13,14] แต่ที่จะนำเสนอในที่นี้นั้นจะใช้ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีฟาสดีคัปเปิล (Fast decoupled load flow technique) โดยจะใช้หลักการที่ว่า การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ส่วนการที่จะเปลี่ยนแปลงขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ก็สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่ากำลังผลิตและโหลดที่บัสนั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตและโหลดที่บัสอย่างเหมาะสม ก็จะทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งได้

สำหรับขั้นตอนของวิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลดเพื่อระงับปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น 2 ชุด [13,14] ได้แก่

1.ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกระแสในสายส่งกับตัวแปรสถานะ (Linear relationships between line current and state variables)

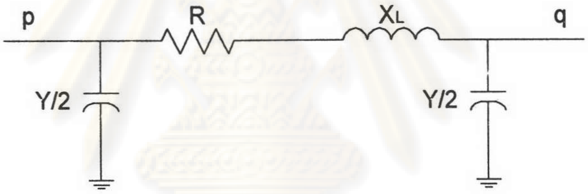
2.ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการเพิ่มของกำลังผลิตและโหลดกับตัวแปรสถานะ (Linear relationships between generated power,loads and state variables)

โดยในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสเป็นตัวแปรสถานะ (State variables)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกระแสในสายส่งกับตัวแปรสถานะ

โดยทั่วไป การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง จะแทนสายส่งด้วยค่าพารามิเตอร์ 4 ค่า ได้แก่ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) ค่าความจุไฟฟ้า(Capacitance) และค่าความนำไฟฟ้า (Conductance) โดยที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะรวมกันเป็นค่าอิมพีแดนซ์อนุกรม (Series impedance) ของสายส่ง ส่วนค่าความจุไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้า ก็จะรวมกันเป็นค่าแอดมิตแตนซ์ขนาน (Shunt admittance) ของสายส่งไปยังนิวทรัล โดยปกติค่าความนำไฟฟ้าของสายส่งจะมีค่าน้อย จึงไม่นำมาคิดเมื่อคำนวณหากระแสและแรงดัน และจะแทนสายส่งด้วยวงจรสมมูลย์แบบพาย (π) ดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 วงจรสมมูลย์แบบพาย (π)

กระแสที่ไหลในสายส่งจากบัส p ไปยังบัล q จะเป็นฟังก์ชั่นของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ที่บัส p และบัส q ดังสมการที่ ข-1

$$\begin{aligned} I_{pq} &= \left[\left(V_p \text{Cos}\delta_p - V_q \text{Cos}\delta_q\right)G_{pq} - \left(V_p \text{Sin}\delta_p - V_q \text{Sin}\delta_q\right)B_{pq} - B_c V_p \text{Sin}\delta_p\right] \\ &\quad + j\left[\left(V_p \text{Sin}\delta_p - V_q \text{Sin}\delta_q\right)G_{pq} + \left(V_p \text{Cos}\delta_p - V_q \text{Cos}\delta_q\right)B_{pq} + B_c V_p \text{Cos}\delta_p\right] \\ &= I_r + jI_j \end{aligned} \qquad \text{(ข-1)}$$

โดยที่ I_{pq} = กระแสที่ไหลในสายส่งจากบัส p ไปยังบัส q

$G_{pq}+jB_{pq}$ = ค่าแอดมิตแตนซ์อนุกรม (Series admittance) ของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส p กับบัส q

B_c = ครึ่งหนึ่งของไลน์ชาร์จจิ้งแอดมิตแตนซ์ (Half line charging admittance)

I_r, I_j = ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ให้กระแสที่ไหลในสายส่งจากบัส p ไปยังบัส q มีค่าเป็น I_{pq}^{0} ซึ่งมีตัวแปรสถานะเป็น $\delta_p^0, \delta_q^0, V_p^0$ และ V_q^0 กำหนดให้ค่าพิกัดกระแสของสายส่งคือ $I_{pq\,max}$ สมมติว่า I_{pq}^{0} มีค่ามากกว่า $I_{pq\,max}$

ดังนั้นจะต้องหาค่าตัวแปรสถานะใหม่เป็น δ_p, δ_q, V_p และ V_q เพื่อลดค่ากระแสที่ไหลในสายส่งลงจาก I_{pq}^{0} เป็น $I_{pq\,max}$ เมื่อใช้การกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) เพื่อกระจายฟังก์ชั่น I_{pq} รอบ ๆ $\left(\delta_p^0, \delta_q^0, V_p^0, V_q^0\right)$ และไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไป และกำหนดให้

$\Delta I_{pq} = I_{pq\,max} - I_{pq}^{0}$ เป็นกระแสเกิน จะได้ว่า ΔI_{pq} มีค่าดังสมการที่ ข-2

$$\Delta I_{pq} = \left(\frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_p}\right)\Delta\delta_p + \left(\frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_q}\right)\Delta\delta_q + \left(\frac{\partial I_{pq}}{\partial V_p}\right)\Delta V_p + \left(\frac{\partial I_{pq}}{\partial V_q}\right)\Delta V_q \qquad (ข\text{-}2)$$

โดยที่ $\Delta\delta_p = \delta_p - \delta_p^0, \Delta\delta_q = \delta_q - \delta_q^0$

และ $\Delta V_p = V_p - V_p^0, \Delta V_q = V_q - V_q^0$

จาก $I_{pq} = \sqrt{I_r^2 + I_j^2}$ ดังนั้นจึงสามารถหา Partial derivative ของ I_{pq} ได้ จากสมการที่ ข-3 ถึง ข-6

$$\frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_p} = \frac{I_r}{I_{pq}^0}\left(-G_{pq}V_p^0 \mathrm{Sin}\delta_p^0 - B_{pq}V_p^0 \mathrm{Cos}\delta_p^0 - B_c V_p^0 \mathrm{Cos}\delta_p^0\right)$$
$$+\frac{I_j}{I_{pq}^0}\left(G_{pq}V_p^0 \mathrm{Cos}\delta_p^0 - B_{pq}V_p^0 \mathrm{Sin}\delta_p^0 - B_c V_p^0 \mathrm{Sin}\delta_p^0\right) \qquad (ข\text{-}3)$$

$$\frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_q} = \frac{I_r}{I_{pq}^0}\left(G_{pq}V_q^0 \mathrm{Sin}\delta_q^0 + B_{pq}V_q^0 \mathrm{Cos}\delta_q^0\right)$$
$$+\frac{I_j}{I_{pq}^0}\left(-G_{pq}V_q^0 \mathrm{Cos}\delta_q^0 + B_{pq}V_q^0 \mathrm{Sin}\delta_q^0\right) \qquad (ข\text{-}4)$$

$$\frac{\partial I_{pq}}{\partial V_p} = \frac{I_r}{I_{pq}^0}\left(G_{pq}\mathrm{Cos}\delta_p^0 - B_{pq}\mathrm{Sin}\delta_p^0 - B_c \mathrm{Sin}\delta_p^0\right)$$
$$+\frac{I_j}{I_{pq}^0}\left(G_{pq}\mathrm{Sin}\delta_p^0 + B_{pq}\mathrm{Cos}\delta_p^0 + B_c \mathrm{Cos}\delta_p^0\right) \qquad (ข\text{-}5)$$

$$\frac{\partial I_{pq}}{\partial V_p} = \frac{I_r}{I_{pq}^0}\left(-G_{pq}\mathrm{Cos}\delta_p^0 + B_{pq}\mathrm{Sin}\delta_p^0\right)$$
$$+\frac{I_j}{I_{pq}^0}\left(-G_{pq}\mathrm{Sin}\delta_p^0 - B_{pq}\mathrm{Cos}\delta_p^0\right) \qquad (ข\text{-}6)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบไปด้วยบัสจำนวน *n* บัส สายส่งจำนวน *l* สายส่ง โดยมีสายส่งที่มีโหลดเกินเป็นจำนวน *j* สายส่ง เมื่อเขียนสมการสำหรับสายส่งที่มีโหลดเกินทุกสายส่งทำนองเดียวกับสมการที่ ข-2 จะได้ชุดของสมการซึ่งเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ ข-7

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \vdots \\ \Delta I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & A & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \cdots \\ \Delta V \end{bmatrix} \qquad (ข\text{-}7)$$

เมตริกซ์ *A* จะมีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนสายส่งที่มีโหลดเกิน ส่วนจำนวนหลัก (Column) ของเมตริกซ์ *A* คือ 2*n*-1 ค่าส่วนใหญ่ในเมตริกซ์ *A* จะเป็นศูนย์ โดยที่ในแต่ละแถวจะมีพจน์ที่มีค่าไม่เป็นศูนย์อยู่ไม่เกิน 4 พจน์ สำหรับเวกเตอร์ $[\Delta\delta, \Delta V]^T$ จะหมายถึงเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ และเนื่องจากในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลัง จะให้บัสสวิง (Swing bus) เป็นบัสอ้างอิง (Reference bus) ดังนั้นจะไม่นำค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสของบัสสวิงมารวมไว้ในเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ ส่วนค่าที่เพิ่มขึ้นของขนาดแรงดันของทุกบัสจะถูกรวมอยู่ในเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะในสมการที่ ข-7 ด้วย ดังนั้นเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะจึงมีขนาดเท่ากับ 2*n*-1 เขียนสมการที่ ข-7 ใหม่ เพื่อใช้หาค่าเพิ่มขึ้นของตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ ข-8

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \cdots \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & A & \\ & & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \\ \Delta I \\ \\ \end{bmatrix} \qquad (ข\text{-}8)$$

เนื่องจากเมตริกซ์ A ไม่ได้เป็นเมตริกซ์จตุรัส (Square matrix) แต่จะเป็นเมตริกซ์สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular matrix) โดยจะมีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนสายส่งที่มีโหลดเกิน และจำนวนหลักเท่ากับ 2*n*-1 จึงไม่สามารถหาอินเวอร์สของเมตริกซ์ *A* ได้โดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากเมตริกซ์ที่สามารถหาอินเวอร์สได้จะต้องเป็นเมตริกซ์จตุรัสเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องใช้แนวคิดของอินเวอร์สเทียม (Pseudoinverse) มาใช้ในการหาอินเวอร์สของเมตริกซ์ *A* โดยสามารถหาอินเวอร์สเทียมของเมตริกซ์ *A* ได้จากสมการที่ ข-9

$$A^{+} = A^{T}\left(AA^{T}\right)^{-1} \qquad (ข\text{-}9)$$

โดยที่ A^{+} = อินเวอร์สเทียมของเมตริกซ์ *A*

2. **ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการเพิ่มของกำลังผลิตและโหลดกับการเพิ่มขึ้นของตัวแปรสถานะ**

กำลังไฟฟ้าที่ถูกจ่ายเข้าสู่บัส จะเป็นฟังก์ชั่นของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส สมมติว่ามุมเฟสและขนาดของแรงดันบัส $\left[\delta^{0}, V^{0}\right]^{T}$ สอดคล้องกับสมการโหลดโฟลว์เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ถูกจ่ายเข้าสู่บัส j มีค่า P_j^0 และ Q_j^0 โดยใช้การกระจายอนุกรมเทเลอร์ กระจายฟังก์ชั่น P_j และ Q_j รอบ ๆ $\left[\delta^{0}, V^{0}\right]^{T}$ และไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไป จะได้ดังสมการที่ ข-10 และสมการที่ ข-11 ตามลำดับ

$$\Delta P_j = \frac{\partial P_j}{\partial \delta_1}\Delta\delta_1 + \ldots \frac{\partial P_j}{\partial V_1}\Delta V_1 + \ldots \qquad (ข\text{-}10)$$

$$\Delta Q_j = \frac{\partial Q_j}{\partial \delta_1}\Delta\delta_1 + \ldots \frac{\partial Q_j}{\partial V_1}\Delta V_1 + \ldots \qquad (ข\text{-}11)$$

โดยที่ ΔP_j = ค่าเพิ่มขึ้นของกำลังจริงที่จ่ายเข้าบัส j ที่ต้องการ

ΔQ_j = ค่าเพิ่มขึ้นของกำลังรีแอคทีฟที่จ่ายเข้าบัส j ที่ต้องการ

เมื่อเขียนสมการแบบเดียวกับสมการที่ ข-10 และสมการที่ ข-11 สำหรับทุกบัสยกเว้นบัสสวิง โดยแสดงให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ จะได้ดังสมการที่ ข-12 และสมการที่ ข-13 โดยในสมการที่ ข-13 จะใช้ $\Delta V/V$ แทน ΔV ในเวกเตอร์ตัวแปรสถานะ

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \cdots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P/\partial\delta & \vdots & \partial P/\partial V \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ \partial Q/\partial\delta & \vdots & \partial Q/\partial V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \cdots \\ \Delta V \end{bmatrix} \qquad (ข\text{-}12)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \cdots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & J' & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \cdots \\ \Delta V / V \end{bmatrix} \qquad (ข\text{-}13)$$

จากสมการที่ ข-13 จะเห็นว่าเหมือนกับสมการการวิเคราะห์โหลดโฟลว์โดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังนั้นเมื่อใช้หลักการของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสคีคัปเปิลมาประยุกต์ใช้จะทำให้สามารถแยกสมการที่ ข-13 ออกได้เป็นสมการ 2 ชุด คือ สมการที่ ข-14 และสมการที่ ข-15

$$[\Delta P/V] = [B'][\Delta\delta] \qquad (ข\text{-}14)$$

$$[\Delta Q/V] = [B'''][\Delta V] \qquad (ข\text{-}15)$$

โดยสมการที่ ข-14 จะมีลักษณะเหมือนกับสมการที่ 3.14 ส่วนสมการที่ ข-15 จะคล้ายกับสมการที่ 3.15 (ในบทที่ 3) แต่จะมีการเพิ่มเติมสมการเข้าไปในส่วนของบัสควบคุมแรงดัน (Voltage controlled bus) เท่ากับจำนวนของบัสควบคุมแรงดัน ทำให้เมตริกซ์ $[B''']$ มีจำนวนสมาชิกมากกว่าเมตริกซ์ $[B'']$ สำหรับ ΔP และ ΔQ ที่ใช้ในสมการที่ ข-14 และ ข-15 จะหมายถึงค่าเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายเข้าบัสที่ต้องการ เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน ไม่ได้หมายถึงค่าคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า (Power mismatch)

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บัสใด ๆ จะหมายถึงค่าแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัสนั้นกับ โหลดที่ต่ออยู่กับบัสนั้น ค่าเพิ่มขึ้นของกำลังจริงที่จ่ายเข้าสู่บัส P_j ที่บัส j สามารถเขียนได้ดังสมการที่ ข-16

$$\begin{aligned} \Delta P_j &= \Delta P_{Gj} + \Delta P_{Lj} \\ &= \left(P'_{Gj} - P^0_{Gj}\right) - \left(P'_{Lj} - P^0_{Lj}\right) \end{aligned} \qquad (ข\text{-}16)$$

เมื่อ $0 \le |\Delta P_{Gj}| \le |\Delta P_j|$ และ $0 \le |\Delta P_{Lj}| \le |\Delta P_j|$

โดยที่

P^0_{Gj} = กำลังผลิตตามที่กำหนด (Scheduled generation) ที่บัส j ก่อนจะแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

P^0_{Lj} = โหลดที่ติดอยู่กับบัส j ก่อนจะแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

P'_{Gj} = กำลังผลิตที่ต้องการที่บัส j เพื่อจะแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

P'_{Lj} = กำลังจริงซึ่งสามารถจ่ายให้แก่บัส j ได้ หลังจากที่ได้แก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินแล้ว

ΔP_{Gj} = ค่าเปลี่ยนแปลงของกำลังผลิตที่บัส j ที่ต้องการ เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

ΔP_{Lj} = ค่าเปลี่ยนแปลงของโหลดที่บัส j ที่ต้องการ เพื่อจะแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

นอกจากนี้สามารถแยกสมการที่ ข-16 ออกได้เป็นสมการที่ ข-17 และสมการที่ ข-18

$$P'_{Gj} = P^0_{Gj} + \Delta P_{Gj} \qquad \text{(ข-17)}$$

$$P'_{Lj} = P^0_{Lj} - \Delta P_{Lj} \qquad \text{(ข-18)}$$

ที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ จะเพิ่มกำลังผลิตขึ้นโดยใช้สมการที่ ข-17 ทั้งนี้กำลังผลิตจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เกินค่ากำลังผลิตสำรองเดินเครื่อง (Spinning reserve) สูงสุด จากนั้นจึงพิจารณาการตัดโหลดโดยใช้สมการที่ ข-18 ส่วนที่บัสโหลด ΔP_{Lj} จะมีค่าเท่ากับ ΔP_j และจะใช้สมการที่ ข-18 ในการคำนวณค่าโหลดที่จะถูกตัด ส่วนสมการที่ ข-17 จะไม่ถูกนำมาใช้ที่บัสโหลด สำหรับกรณีของกำลังรีแอคทีฟ สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ ข-19 และสมการที่ ข-20

$$Q'_{Gj} = Q^0_{Gj} + \Delta Q_{Gj} \qquad \text{(ข-19)}$$

$$Q'_{Lj} = Q^0_{Lj} - \Delta Q_{Lj} \qquad \text{(ข-20)}$$

เนื่องจากการผลิตกำลังรีแอคทีฟนั้น อาจจะไม่มีการผลิตที่บัสนั้นหรือหากผลิตได้ก็ไม่สามารถที่จะกำหนดกำลังผลิตได้ ดังนั้น ΔQ_{Lj} ที่ทุกบัส จึงมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้สมการที่ ข-19 ไม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีความจำเป็นในที่นี้ ส่วนสมการที่ ข-20 จะใช้ในการหาโหลดรีแอคทีฟที่จะต้องถูกตัด โดยให้ ΔQ_{Lj} เท่ากับ ΔQ_j

ขั้นตอนการคำนวณเพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

การแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินด้วยวิธีการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่และการตัดโหลด จะใช้สมการหลัก สมการที่ ข-21 ถึงสมการที่ ข-22 ตามลำดับ

$$\left[\Delta P/V\right] = [B'][\Delta\delta] \tag{ข-21}$$

$$\left[\Delta Q/V\right] = [B''][\Delta V] \tag{ข-22}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \cdots \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & A & \\ & & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \\ \Delta I \\ \\ \end{bmatrix} \tag{ข-23}$$

$$\left[\Delta P/V\right] = [B'][\Delta\delta] \tag{ข-24}$$

$$\left[\Delta Q/V\right] = [B'''][\Delta V] \tag{ข-25}$$

สำหรับขั้นตอนการแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินโดยใช้วิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลด จะมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

1. คำนวณโหลดโฟลว์เริ่มต้น โดยใช้สมการที่ ข-21 และสมการที่ ข-22
2. คำนวณหากระแสในสายส่ง ถ้าไม่มีสายส่งใดมีโหลดเกินให้ข้ามไปยังขั้นที่ 10 ถ้าจำนวนรอบในการคำนวณเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ให้ข้ามไปยังขั้นที่ 9 ส่วนกรณีอื่นให้ทำในขั้นที่ 3
3. สร้างเมตริกซ์ A , เมตริกซ์ A^{+} จากสมการที่ ข-9 และเวกเตอร์กระแสเกิน [I]
4. คำนวณหาค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสและขนาดของแรงดันบัส โดยใช้สมการที่ ข-23
5. คำนวณหา $\left[\Delta P/V\right]$ และ $\left[\Delta Q/V\right]$ โดยใช้สมการที่ ข-24 และ ข-25
6. คำนวณหาการจัดสรรกำลังผลิตและโหลดใหม่

7. คำนวณหาค่าของตัวแปรสถานะใหม่ โดยใช้ค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสและขนาดของแรงดันบัสที่ได้จากขั้นที่ 4

8. คำนวณโหลดโฟลว์โดยใช้ค่าแรงดันบัส, กำลังผลิตและโหลดค่าล่าสุด แล้วกลับไปยังขั้นที่ 2

9. ตัดโหลดที่บัสที่ต่ออยู่กับสายส่งที่มีโหลดเกินซึ่งกำลังไฟฟ้าไหลเข้าสู่บัสนั้น เป็นจำนวนเท่ากับ MVA ที่เกิน และลดกำลังผลิตที่บัสที่ต่อกับสายส่งนั้นซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสายส่งเป็นจำนวน MVA ที่เกิน

10. คำนวณหากำลังผลิตที่บัสสวิง ถ้าไม่เกินค่าพิกัดจะจบการคำนวณ แต่ถ้าเกินค่าพิกัด ให้ตัดโหลดที่บัสสวิง และ/หรือ บัสที่กำลังไฟฟ้าไหลไปจากบัสสวิง (บัสที่ต่อกับบัสสวิง)

การคำนวณจากขั้นที่ 2 ถึงขั้นที่ 8 จะถือว่าเป็นรอบของการแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดจำนวนรอบสูงสุดเอาไว้ค่าหนึ่ง เพื่อเป็นการจำกัดเวลาในการคำนวณ สำหรับการคำนวณหาการจัดสรรกำลังผลิตและโหลดใหม่ในขั้นที่ 6 นั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ ข-26 ถึง ข-29

- กรณีบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ i ($i \neq$ บัสสวิง)

$$P_{G_{i_{new}}} = P_{G_{i_{old}}} + \Delta P_i \qquad \text{(ข-26)}$$

$$P_{L_{i_{new}}} = P_{L_{i_{old}}} - \left[\Delta P_i - \left(P_{G_{i_{new}}} - P_{G_{i\,max}}\right)\right] \qquad \text{(ข-27)}$$

เมื่อ $P_{G_{i_{new}}} > P_{G_{i\,max}}$

โดยที่ $0 \le P_{G_{i\,new}} \le P_{G_{i_{max}}}$ และ $0 \le P_{L_{i\,new}} \le P_{L_{i_{max}}}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- กรณีที่โหลดบัส i

$$P_{L_{i_{new}}} = P_{L_{i_{old}}} - \Delta P_i \qquad \text{(ข-28)}$$

โดยที่ $0 \le P_{L_{i\,new}} \le P_{L_{i_{max}}}$

- ที่บัสใด ๆ (ยกเว้นบัสสวิง)

$$Q_{L_{i_{new}}} = Q_{L_{i_{old}}} - \Delta Q_i \quad \text{(ข-29)}$$

โดยที่ $0 \le Q_{L_{i\,new}} \le Q_{L_{i_{max}}}$ เมื่อโหลดกำหนดเริ่มต้นเป็นแบบอินดักทีฟ

$P_{L_{i\,min}} \le P_{L_{i_{new}}} \le 0$ เมื่อโหลดกำหนดเริ่มต้นเป็นแบบคะปาซิทีฟ

กำหนดให้ $P_{G_{i\,max}}$ คือ ผลรวมของกำลังผลิตและกำลังผลิตสำรองเดินเครื่อง ที่บัส i

$P_{L_{i\,max}}$ คือ โหลดกำลังจริงที่กำหนดเริ่มต้น ที่บัส i

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การปรับเมตริกซ์ผกผันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมาชิกหนึ่งตัวในเมตริกซ์ที่กำหนดให้
(Adjustment of an inverse matrix corresponding to a change in one element of a given matrix)

มีวิธีการอยู่หลายวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาเมตริกซ์ผกผัน (Inverse matrix) เช่น วิธี Co-factor วิธี Gauss elimination วิธี Gauss-Jordan เป็นต้น โดยที่เวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีการเหล่านี้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ อันดับ (Order) ของเมตริกซ์ หรือขนาดของเมตริกซ์ใหญ่ขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาเมตริกซ์ผกผันขนาด 5x5 จะมากกว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาเมตริกซ์ผกผันขนาด 3x3

ในกรณีที่ต้องการคำนวณหาอินเวอร์สของเมตริกซ์ใหม่จากเมตริกซ์เก่าที่มีการเปลี่ยนแปลงสมาชิกภายในบางตัวนั้นถ้าใช้วิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นจะทำให้เสียเวลา ดังนั้น Jack Sherman และ Winifred J. Morrison [20] นักคณิตศาสตร์ชาวสหรัฐอเมริกาจึงได้คิดวิธีการปรับปรุงเมตริกซ์ผกผันเก่า (Original matrix)ที่ได้จากการทำอินเวอร์สของเมตริกซ์ก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงในสมาชิกภายในเพื่อให้ได้เมตริกซ์ผกผันใหม่

ค.1 วิธีการคำนวณ

กำหนดให้

a_{ij} เป็นสมาชิกของเมตริกซ์ a ซึ่งมีขนาด nxn

b_{ij} เป็นสมาชิกของเมตริกซ์ b โดยที่ เมตริกซ์ b เป็นเมตริกซ์ผกผันของ a

A_{ij} เป็นสมาชิกของเมตริกซ์ A โดยที่ เมตริกซ์ A มีสมาชิกเหมือนกับเมตริกซ์ a ยกเว้นสมาชิกแถวที่ R และหลักที่ S (A_{RS})ในเมตริกซ์ A เท่านั้นที่มีค่าแตกต่างกัน

B_{ij} เป็นสมาชิกของเมตริกซ์ B โดยที่ เมตริกซ์ B เป็นเมตริกซ์ผกผันของ A

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ กำหนดให้

$$A_{RS} = a_{RS} + \Delta a_{RS}$$

ดังนั้นการหาสมาชิกในเมตริกซ์ B จากค่า Δa_{RS} และเมตริกซ์ b จะหาได้จากสมการ

$$B_{rj} = b_{rj} - \frac{b_{rR} b_{Sj} \Delta a_{RS}}{1 + b_{SR} \Delta a_{RS}} \quad (ค.1)$$

โดยที่ r =1,2,3,....,n และ j = 1,2,3,...,n และ $1 + b_{SR}\Delta a_{RS} \neq 0$

ความถูกต้องของสมการที่ ค.1 จะสามารถแสดงได้โดยการ คูณ สมการที่ ค.1 ด้วย A_{ir} (r = 1,2,3,.....n) ทั้งสองข้างจะได้ว่า

$$\sum_{r=1}^{n} A_{ir} B_{rj} = \sum_{r=1}^{n} A_{ir} b_{rj} - \frac{b_{Sj} \Delta a_{RS}}{1 + b_{SR} \Delta a_{RS}} \sum_{r=1}^{n} A_{ir} b_{rR} \quad (ค.2)$$

เมื่อ i = 1,2,3....,n และ j = 1,2,3,...,n

จากสมการที่ ค.2 แยกพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ $i \neq R$ และกรณีที่ $i = R$

กรณีที่ $i \neq R$ สมมติให้ $A_{ir} = a_{ir}$ ดังนั้นจากสมการ ค.2 จะได้ว่า

$$\sum_{r=1}^{n} A_{ir} B_{rj} = \sum_{r=1}^{n} a_{ir} b_{rj} - \frac{b_{Sj} \Delta a_{RS}}{1 + b_{SR} \Delta a_{RS}} \sum_{r=1}^{n} a_{ir} b_{rR} \quad (ค.3)$$

เมื่อ i = 1,2,3,....,R-1,R+1,...,n และ j = 1,2,3,...,n

และเนื่องจากเมตริกซ์ a และเมตริกซ์ b เป็นเมตริกซ์ผกผันซึ่งกันและกันจึงทำให้ผลบวกพจน์สุดท้าย เป็นศูนย์ จะได้ว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\sum_{r=1}^{n} A_{ir} B_{rj} = \sum_{r=1}^{n} a_{ir} b_{rj} \qquad (ค.4)$$

โดยที่ i = 1,2,3,....,R-1,R+1,...,n และ j = 1,2,3,...,n

กรณีที่ i = R จากสมการที่ ค.2 จะได้ว่า

$$\sum_{r=1}^{n} A_{Rr} B_{Rj} = \sum_{r=1}^{n} A_{Rr} b_{rj} - \frac{b_{Sj} \Delta a_{RS}}{1 + b_{SR} \Delta a_{RS}} \sum_{r=1}^{n} A_{Rr} b_{rR} \qquad (ค.5)$$

โดยที่ j = 1,2,3,....,n

และเนื่องจากในแต่ละนิพจน์ที่เป็นผลบวกจะมีกรณีหนึ่งคือ r = S แล้วทำให้ $A_{RS} = a_{RS} + \Delta a_{RS}$ ส่วนกรณีอื่น ๆ A_{RS} จะเท่ากับ a_{RS} ดังนั้นสมการที่ ค.5 สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\sum_{r=1}^{n} A_{Rr} B_{Rj} = \sum_{r=1}^{n} a_{Rr} b_{rj} + \Delta a_{RS} b_{Sj} - \left(\frac{b_{Sj} \Delta a_{RS}}{1 + b_{SR} \Delta a_{RS}} \right) \left(\sum_{r=1}^{n} a_{Rr} b_{rR} + \Delta a_{RS} b_{SR} \right) \qquad (ค.6)$$

โดยที่ j = 1,2,3,....,n

และเนื่องจากเมตริกซ์ a และเมตริกซ์ b เป็นเมตริกซ์ผกผันซึ่งกันและกันจึงทำให้ผลบวกของพจน์ที่สองทางขวามือของสมการที่ ค.6 มีค่าเป็น 1 (Unity) จึงทำให้สมการที่ ค.6 กลายเป็น

$$\sum_{r=1}^{n} A_{Rr} B_{rj} = \sum_{r=1}^{n} a_{Rr} b_{rj} \qquad (ค.7)$$

โดยที่ j = 1,2,3,....,n

ดังนั้นจากสมการ ค.4 และสมการ ค.7 สามารถเขียนรวมกันเป็นสมการเดียวได้ดังนี้

$$\sum_{r=1}^{n} A_{ir} B_{rj} = \sum_{r=1}^{n} a_{ir} b_{rj} \qquad (ค.8)$$

โดยที่ i = 1,2,3,....,n และ j = 1,2,3,...,n

นั่นแสดงว่าเมตริกซ์ B เป็นอินเวอร์สของเมตริกซ์ A จึงทำให้สมการที่ ค.1 ถูกต้อง

ค.2 ตัวอย่างการคำนวณ

เพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณจะจัดแบ่งสมการ ค.1 เป็นดังนี้

- กรณี r = S จะได้ว่า

$$B_{Sj} = \frac{b_{Sj}}{1 + b_{SR} \Delta a_{RS}} \qquad (ค.9)$$

เมื่อ j = 1,2,3,....,n

- กรณี j = R จะได้ว่า

$$B_{rR} = \frac{b_{rR}}{1 + b_{SR} \Delta a_{RS}} \qquad (ค.10)$$

เมื่อ r = 1,2,3,....,n

- กรณีอื่น ๆ

$$B_{rj} = b_{rj} - B_{rR} b_{Sj} \Delta a_{RS} \qquad (ค.11)$$

โดยที่ r = 1,2,3,....,S-1,S+1,...,n

และ j = 1,2,3,....,R-1,R+1,...,n

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการ ค.10 และสมการ ค.11 แสดงให้เห็นว่าสมาชิกในแถวที่ S และหลักที่ R ของเมตริกซ์ B จะเป็นสัดส่วนและสอดคล้องกับสมาชิกในเมตริกซ์ b

- พิจารณาเมตริกซ์ต่อไปนี้

$$a = \begin{bmatrix} 2.384 & 1.238 & 0.861 & 2.413 \\ 0.648 & 1.113 & 0.761 & 0.137 \\ 1.119 & 0.643 & 3.172 & 1.139 \\ 0.745 & 2.137 & 1.268 & 0.542 \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์ผกผันของ a คือ b จะมีค่า

$$b = \begin{bmatrix} 0.2220 & 2.5275 & -0.1012 & -1.4145 \\ -0.04806 & -0.2918 & -0.1999 & 0.7079 \\ -0.1692 & 0.01195 & 0.3656 & -0.01824 \\ 0.2801 & -2.3517 & 0.07209 & 1.0409 \end{bmatrix}$$

สมมติว่าสมาชิก a_{24} ของเมตริกซ์ a เพิ่มขึ้น 0.4 นั่นคือ

$$A = \begin{bmatrix} 2.384 & 1.238 & 0.861 & 2.413 \\ 0.648 & 1.113 & 0.761 & \mathbf{0.537} \\ 1.119 & 0.643 & 3.172 & 1.139 \\ 0.745 & 2.137 & 1.268 & 0.542 \end{bmatrix}$$

จะได้ว่า $\Delta a_{RS} = 0.4$ และ $R = 2$, $S = 4$

ดังนั้นจะหาสมาชิกของ B ได้จากสมการ ค.9 นั่นคือ

$$B_{4j} = \frac{b_{4j}}{1 - 2.3517 \text{x} 0.4} = 16.858 b_{4j} \qquad (j = 1,2,3,4)$$

จากสมการ ค.10 จะได้

$$B_{r2} = \frac{b_{r2}}{1-2.3517x0.4} = 16.858b_{r2} \qquad (r = 1,2,3,4)$$

และจากสมการ ค.11 จะได้

$$B_{rj} = b_{rj} - 0.4B_{r2}b_{4j} \qquad (r = 1,2,3) \text{ และ } (j = 1,3,4)$$

จะได้ว่า B_{41} = 16.858x0.2801 = 4.7218

B_{42} = 16.858x(-2.3517) = -39.644

B_{12} = 16.858x2.5275 = 42.608

B_{22} = 16.858x(-0.2918) = -4.919

B_{11} = 0.222-0.4x42.608x0.2801 = -4.5518

B_{21} = -0.04806-0.4x(-4.9191)x0.2801 = 0.5031

สมาชิกตัวอื่น ๆก็หาได้ในทำนองเดียวกันซึ่งจะได้เมตริกซ์ B คือ

$$B = \begin{bmatrix} -4.5518 & 42.608 & -1.3298 & -19.155 \\ 0.5031 & -4.9191 & -0.05805 & 2.7560 \\ -0.1919 & 0.2014 & 0.3598 & -0.1021 \\ 4.7218 & -39.644 & 1.2153 & 17.547 \end{bmatrix}$$

สำหรับกรณีที่สมาชิกในเมตริกซ์ a มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 1 ตัว การหาเมตริกซ์ผกผันของ a ทำได้โดยการคำนวณต่อเนื่อง (Successive) จากเมตริกซ์ผกผันที่ได้ใหม่นี้ต่อไป

ประวัติผู้เขียน

นายวิโรจน์ บัวคลี่ เกิดเมื่อวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2515 ที่ อำเภอเมือง จังหวัดตราด สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2537 จากนั้นเข้าทำงานตำแหน่งวิศวกรระดับ 4 ฝ่ายวิศวกรรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค บางเขน ต่อมาได้ลาเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง (Power System Simulation) ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2538

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย