การลดค่ากำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังให้น้อยที่สุด ด้วยการควบคุมกำลังรีแอกทีฟของระบบให้เหมาะสม

นาย เทอดทรงชัย พุทธิศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2532

ISBN 974-576-016-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015780

I 10304090

OPTIMAL CONTROL OF REACTIVE POWER FOR POWER SYSTEM LOSS MINIMIZATION

Mr. Terdsongchai Putthisri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1989

ISBN 974-576-016-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การลดค่ากำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังให้น้อยที่สุด ด้วยการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ ของระบบให้เหมาะสม

โดย นาย เทอดทรงชัย พุทธิศรี

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. จรวย บุญยุบล)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

เทอดทรงชัย พุทธิศรี : การลดค่ากำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังให้น้อยที่สุด ด้วยการควบคุมกำลังรีแอกทีฟของระบบให้เหมาะสม (OPTIMAL CONTROL OF REACTIVE POWER - FOR POWER SYSTEM LOSS MINIMIZATION) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร จรวย บุญยุบล , 187 หน้า .

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการคำนวณการลดกำลังงานสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังให้มีค่าน้อยที่สุด ด้วยการควบคุมกำลังรีแอกทีฟอย่างเหมาะสม โดยอาศัยเทคนิคการออปติไมซ์ แบบการโปรแกรมเชิงเส้นตรง ทั้งนี้ได้ใช้วิธีการปรับตัวแปรควบคุมของระบบ ซึ่งประกอบด้วยเทปของหม้อแปลง ขนาดแรงดันของบัสที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกำลังรีแอกทีฟจากอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟที่ต่ออยู่กับโหลดบัสที่เหมาะสม เพื่อให้ระบบมีกำลังสูญเสียเกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยเป็นไปตามเงื่อนไขบังคับคือมีการรักษาระดับแรงดันที่โหลดบัส และการจ่ายกำลังรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในขีดจำกัด นอกจากนี้ยังได้แสดงถึงวิธีการเลือกติดตั้งอุปกรณ์ ผลิตกำลังรีแอกทีฟเข้าไปในโหลดบัสที่เหมาะสม โดยอาศัยดัชนีเป็นตัวบ่งชี้ ซึ่งพิจารณามาจากลักษณะเสถียรภาพแรงดัน และกำลังสูญเสียของระบบ

ในการศึกษาการลดกำลังสูญเสียของระบบให้น้อยที่สุดนี้ ได้มีการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นบนไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 16 บิท โดยใช้ภาษาโฟรแทรน และได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์กับตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน IEEE 3 ระบบ ได้แก่ ระบบขนาด 6 บัส, 14 บัส และ 30 บัส ตามลำดับ ผลของการศึกษาพบว่าโปรแกรมสามารถปรับตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ของระบบ จนกระทั่งได้ระบบที่มีกำลังสูญเสียเกิดขึ้นน้อยที่สุด โดยการเลือกติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟที่โหลดบัสตามลำดับความสำคัญของดัชนี นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขนาดและจำนวนของอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟมีผลต่อการลดกำลังสูญเสียเช่นกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

TERDSONGCHAI PUTTHISRI : OPTIMAL CONTROL OF REACTIVE POWER FOR POWER SYSTEM LOSS MINIMIZATION . THESIS ADVISOR : PROF.DR.CHARUAY - BOONYUBOL,Ph.D. 187 PP.

This thesis presents a method for a real power loss minimization by optimal reactive power system control . Optimization and - linear programming techniques are employed in finding solution to this problem . The problem constraints include limits on dependent variables, which are reactive power. of generators , load bus voltages , and con - trol variables , i.e , generator voltages , tap positions and switchable reactive power device . The selection of location for a reactive power device is based on a set of indices determined from a steady state stability , load bus voltage control and power loss in the power system

In this thesis a computer program is developed on a 16 bit microcomputer using FORTRAN programming language . The IEEE 6-, 14-, and 30-bus standard test systems are studied and analyzed respectively . The result of the study indicates that the program can automatically adjust the control variables until power system loss is minimized . Besides , the study shows that increasing the capacity and number of reactive power devices can further reduce power system losses .

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศาสตราจารย์ ดร.จรวย บุญยุบล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ไพบูลย์ ไชยนิล รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และ ขอขอบคุณทุกคนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จครั้งนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนทางด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... จ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ..... ช

สารบัญตาราง..... ฐ

สารบัญรูปภาพ..... ฑ

บทที่

1. บทนำทั่วไป..... 1
2. วงจรสมมูลขององค์ประกอบในระบบไฟฟ้ากำลัง..... 5
   - 2.1 คำนำ..... 5
   - 2.2 วงจรสมมูลของสายส่ง..... 5
   - 2.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลง..... 7
   - 2.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด และอุปกรณ์จ่ายกำลังรีแอกทีฟ..... 8
   - 2.5 บัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์..... 9
     - 2.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสบัสและแรงดันบัส..... 9
     - 2.5.2 การสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์โดยวิธีอิลิเมนต์สแตมป์..... 10
3. การศึกษาสมการโหลดโฟลว์..... 12
   - 3.1 คำนำ..... 12
   - 3.2 การกำหนดชนิดของบัส..... 12
   - 3.3 สมการโหลดโฟลว์..... 13
   - 3.4 วิธีของนิวตัน-ราฟสัน..... 14
     - 3.4.1 การวิเคราะห์นิวตันราฟสันโหลดโฟลว์..... 16
     - 3.4.2 อัลกอริทึมของโหลดโฟลว์โดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน..... 20

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.5 กำลังที่ไหลในสายส่งและหม้อแปลง..... 22

3.5.1 กำลังที่ไหลในสายส่ง..... 22

3.5.2 กำลังที่ไหลในหม้อแปลง..... 23

4. การโปรแกรมเชิงเส้นตรง..... 24

4.1 คำนำ..... 24

4.2 รูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง..... 25

4.3 ขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรมเชิงเส้นตรง..... 26

4.4 การหาผลลัพธ์ของรูปแบบแทนระบบของปัญหา..... 27

4.5 วิธีทางพีชคณิตทั่ว ๆ ไป..... 28

4.6 วิธี Simplex Method..... 29

4.6.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหา โดยวิธี Simplex Method..... 32

4.6.2 ขั้นตอนการแก้ปัญหา โดยวิธี Big-M Method..... 37

5. การลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง..... 39

5.1 คำนำ..... 39

5.2 รูปแบบแทนระบบปัญหาการออปติไมซ์กำลังงานสูญเสียในระบบ..... 39

5.3 รายละเอียดของรูปแบบแทนระบบปัญหาของการลดกำลัง
การสูญเสียให้มีค่าน้อยที่สุด..... 41

5.3.1 สมการเป้าหมาย..... 41

5.3.2 เงื่อนไขบังคับ..... 44

5.3.2.1 เงื่อนไขบังคับแบบอสมการของตัวแปร
ควบคุมของระบบ..... 44

5.3.2.2 เงื่อนไขบังคับแบบอสมการของตัวแปร
สถานะของระบบ..... 44

5.4 ค่าความไวของการสูญเสีย..... 46

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.5 การปรับปรุงสมการเป้าหมาย..... 50
5.5.1 ช่วงของตัวแปรควบคุมของระบบ..... 50
5.5.2 การทำให้ตัวแปรทุกตัวมีค่ามากกว่าศูนย์..... 51
5.6 การเลือกติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ..... 53
5.6.1 การพิจารณาค่าดัชนีเอส (S.index)..... 53
5.6.2 การพิจารณาค่าดัชนีวี (V.index)..... 55
5.6.3 การพิจารณาค่าดัชนีแอล (L.index)..... 56
5.6.4 การพิจารณาเลือกบัสที่เหมาะสมสำหรับการติดอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ..... 56
5.7 อัลกอริทึมของการออปติไมซ์กำลังสูญเสียของระบบ..... 57
6. ตัวอย่างและผล..... 61
6.1 คำนำ..... 61
6.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส 5 สายส่ง 2 หม้อแปลง..... 62
6.2.1 ข้อมูลต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส 5 สายส่ง 2 หม้อแปลง..... 63
6.2.2 การศึกษาสมการโหลดโฟลว์พื้นฐานของข้อมูลระบบ 6 บัส..... 65
6.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส 17 สายส่ง 3 หม้อแปลง..... 67
6.3.1 ข้อมูลต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส 17 สายส่ง 3 หม้อแปลง..... 67
6.3.2 การศึกษาสมการโหลดโฟลว์พื้นฐานของข้อมูลระบบ 14 บัส..... 70
6.4 ระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส 37 สายส่ง 4 หม้อแปลง..... 72

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.4.1 ข้อมูลต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส 37 สายส่ง 4 หม้อแปลง..... 72
6.4.2 การศึกษาสมการโหลดโฟลว์พื้นฐานของข้อมูลระบบ 30 บัส..... 76
6.5 ผลและการวิเคราะห์..... 78
6.5.1 ผลของการศึกษาตัวอย่างที่ 1..... 78
6.5.1.1 ขีดจำกัดของอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟมีค่าระหว่าง 0 - 5 MVARS..... 80
6.5.1.2 ขีดจำกัดของอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟมีค่าระหว่าง 0 - 30 MVARS..... 82
6.5.1.3 วิเคราะห์ผลตัวอย่างที่ 1..... 83
6.5.2 ผลของการศึกษาตัวอย่างที่ 2..... 85
6.5.2.1 วิเคราะห์ผลตัวอย่างที่ 2..... 85
6.5.3 ผลของการศึกษาตัวอย่างที่ 3..... 87
6.5.3.1 วิเคราะห์ผลตัวอย่างที่ 3..... 87
6.5.4 ผลของการศึกษาตัวอย่างที่ 4..... 89
6.5.4.1 วิเคราะห์ผลตัวอย่างที่ 4..... 89
6.5.5 ผลของการศึกษาตัวอย่างที่ 5..... 90
6.5.5.1 วิเคราะห์ผลตัวอย่างที่ 5..... 92
6.5.6 ผลของการศึกษาตัวอย่างที่ 6..... 93
6.5.6.1 วิเคราะห์ผลตัวอย่างที่ 6..... 94
6.5.7 ผลของการศึกษาตัวอย่างที่ 7..... 95
6.5.7.1 วิเคราะห์ผลตัวอย่างที่ 7..... 101
6.5.8 ผลของการศึกษาตัวอย่างที่ 8..... 101

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.5.8.1 วิเคราะห์ผลตัวอย่างที่ 8.....	110
7. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	111
เอกสารอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก ก. การแปลงแบบเมทริกซ์ที่แสดงค่าความไวของการสูญเสีย.....	118
ภาคผนวก ข. การหาค่าอนุพันธ์ของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟ เมื่อเทียบกับแทปของหม้อแปลง.....	121
ภาคผนวก ค. การจัดรูปปัญหาให้เป็นแบบ all positive value.....	124
ภาคผนวก ง. ผลของการศึกษาตัวอย่างต่าง ๆ.....	128
ประวัติผู้เขียน.....	187

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

6.5.1.1 แสดงถึงค่าของกำลังงานสูญเสียของระบบ 6 บัส โดยมีขีดจำกัดของอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟแตกต่างกัน..... 82

6.5.1.2 แสดงถึงการจ่ายกำลังรีแอกทีฟของอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ โดยมีขีดจำกัดของอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟแตกต่างกัน..... 83

6.5.1.3 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนเปอร์เซนต์ที่ลดลงของกำลังงานสูญเสียกับขนาดของอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ..... 84

6.5.2.1 แสดงค่าของกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ 1 ชุดเข้าไปในโหลดบัสที่แตกต่างกัน.... 85

6.5.2.2 แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานสูญเสียตามลำดับความสำคัญของค่าดัชนีเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ 1 ชุด..... 86

6.5.3.1 แสดงค่าของกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ 2 ชุดเข้าไปในโหลดบัสที่แตกต่างกัน.... 87

6.5.3.2 แสดงการเปรียบเทียบกำลังงานสูญเสียตามลำดับความสำคัญของค่าดัชนีเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ 2 ชุด..... 88

6.5.4.1 แสดงค่าของกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟจำนวนไม่เท่ากัน..... 89

6.5.4.2 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนเปอร์เซนต์ที่ลดลงของกำลังงานสูญเสียกับจำนวนของอุปกรณ์ผลิตกำลังรีแอกทีฟ..... 90

6.5.8.1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีขนาดไม่เท่ากัน..... 110

7.1 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรควบคุมที่มีต่อเงื่อนไขบังคับของระบบ..... 111

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่

2.2 ก. วงจรสมมูลสายส่งขนาดกลางแบบพายน์ (π)..... 6

2.2 ข. วงจรสมมูลสายส่งขนาดกลางแบบที (T)..... 6

2.2 ค. วงจรสมมูลสายส่งขนาดสั้น..... 6

2.3 วงจรสมมูลหม้อแปลง..... 7

2.4 วงจรสมมูลหม้อแปลงแบบพายน์ (π)..... 7

3.1 อัลกอริทึมของโหลดโฟลว์โดยนิวตัน-ราฟสัน..... 21

3.2 วงจรสมมูลสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส i และ บัส j..... 22

5.1 อัลกอริทึมของการออปติไมซ์กำลังสูญเสียของระบบ..... 58

6.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง 6 บัส 5 สายส่ง 2 หม้อแปลง..... 62

6.2 ระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส 17 สายส่ง 3 หม้อแปลง..... 67

6.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง 30 บัส 37 สายส่ง 4 หม้อแปลง..... 72

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย