# การกำหนดขนาดและตำแหน่งของชันต์คะแปซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในทางปฏิบัติเพื่อลดความสูญเสียบนสายป้อนของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

นายปารเมศ ชุติมา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2534

ISBN 974-578-314-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

017840

# PRACTICAL REALIZATION OF OPTIMUM SIZE AND LOCATION OF SHUNT CAPACITORS FOR REDUCTION OF LOSSES ON DISTRIBUTION FEEDERS

Mr.Parames Chutima

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

ISBN 974-578-314-5

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การกำหนดขนาดและตำแหน่งของชันต์คะแปซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในทางปฏิบัติเพื่อลดความสูญเสียบนสายป้อนของระบบจำหน่ายไฟฟ้า |
| โดย | นายปารเมศ ชุติมา |
| ภาควิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ |

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.สาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.จรวย บุญยุบล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ไชยยะ แช่มช้อย)

..... กรรมการ
(นายสุกานต์ อินทรครรชิต)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ปารเมศ ชุติมา : การกำหนดขนาดและตำแหน่งของชันต์คะแปซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในทางปฏิบัติเพื่อลดความสูญเสียบนสายป้อนของระบบจำหน่ายไฟฟ้า (PRACTICAL REALIZATION OF OPTIMUM SIZE AND LOCATION OF SHUNT CAPACITORS FOR REDUCTION OF LOSSES ON DISTRIBUTION FEEDERS) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, 236 หน้า. ISBN 974-578-314-5

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีเนื้อหาแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันกล่าวคือ ในส่วนแรกจะเป็นเรื่องราวเกี่ยวกับการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของชันต์คะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่บนสายป้อนแบบปฐมภูมิ เพื่อที่จะลดค่ากำลังงานสูญเสียบนสายป้อน สำหรับในส่วนหลังจะเป็นเรื่องราวเกี่ยวกับแนวทางในการควบคุมคะแปซิเตอร์แบบหลายระดับบนสายป้อนแบบปฐมภูมิ เพื่อที่จะทำให้ค่าความสูญเสียทั้งกำลังงานและพลังงานไฟฟ้ามีค่าลดลง ซึ่งจะทำได้โดยการควบคุมการ ต่อเข้า/ปลดออกจากระบบของคะแปซิเตอร์แบบสวิตชิง ในการหาค่าคำตอบของทั้งสองส่วนที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะทำได้โดยการใช้กระบวนการทำซ้ำ (Iteration) และเพื่อความรวดเร็วในการวิเคราะห์ จึงได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับเป็นเครื่องมือช่วยในการแก้ปัญหาทั้งสองนี้ขึ้น ตลอดจนมีการดัดแปลงกระบวนการทำซ้ำเพื่อให้วิธีการนี้สามารถใช้ได้กับคะแปซิเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับมาตรฐานได้ด้วย ซึ่งวิธีการนี้สามารถใช้ได้กับปัญหาที่จะเกิดขึ้นจริง อีกทั้งทำให้วิศวกรผู้ออกแบบระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้ในทันที

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา พลังงานไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2533 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

PARAMES CHUTIMA : PRACTICAL REALIZATION OF OPTIMUM SIZE AND LOCATION OF SHUNT CAPACITORS FOR REDUCTION OF LOSSES ON DISTRIBUTION FEEDERS. THESIS ADVISOR : ASSI.PROF. PRASIT PITTAYAPAT, 236 pp.

This thesis is devided into two parts. The first part is dealing with the procedure for optimally sizing and placing of fixed shunt capacitors on a primary distribution feeder. The second partis concerning with the control scheme for multilevel control of capacitors on a primary distribution feeder, which is exercised through the control of swicthing on/off of the switching capacitors, in order to reduce energy and power losses. The solutions of these two parts are solved by iterative procedures and two computer programs are developed for the ease of solving these problems. The iterative procedures are modified in order that standard size capacitorscan be used. These procedures can be applied in practice to facilitate their immediate use by the electric utility distribution designer.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา พลังงานไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ อาจารย์ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้เป็นผู้ให้ความสนใจ คำแนะนำ ความเอาใจใส่และการสนับสนุนเป็นอย่างดี เกินกว่าที่ศิษย์ในที่ปรึกษาจะคาดหวังเอาไว้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ผู้เขียนยังขอขอบคุณ อาจารย์จรวย บุญธุบล ผู้ทำหน้าที่เป็นประธานกรรมการในการสอบ รวมทั้ง อาจารย์ไชยยะ แช่มช้อย และ คุณสุกานต์ อินทรครรชิต ผู้ทำหน้าที่เป็นกรรมการในการสอบ ซึ่งท่านทั้งหลายนี้เป็นผู้ให้ข้อเสนอแนะที่ดีหลายประการต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ บิดา มารดา ผู้ซึ่งเป็นผู้ให้ความสนับสนุนทั้งทางด้านกำลังใจและการเงิน ซึ่งทำให้ผู้เขียนสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ในการศึกษาเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทั้งหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณปัทมา ชำนาญช่าง ซึ่งเป็นผู้ช่วยในการจัดรูปเล่มของวิทยานิพนธ์ และเป็นผู้ตรวจทานคำผิด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงโดยสมบูรณ์

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฏ

คำอธิบายคำย่อและสัญญลักษณ์ ..... ฐ

บทที่

1. บทนำทั่วไป ..... 1

1.1 ประวัติความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย ..... 3

1.3 วิธีที่จะดำเนินการวิจัย ..... 4

2. หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับคะแปซิเตอร์ ..... 7

2.1 บทนำ ..... 7

2.2 ค่าเพอร์มิตติวิตี ..... 7

2.3 ค่าความเครียดไดอิเล็กตริก ..... 8

2.4 ค่าความจุไฟฟ้า ..... 9

2.5 คะแปซิเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ..... 10

2.6 ค่ากำลังสูญไดอิเล็กตริก ..... 12

2.7 ชนิดของคะแปซิเตอร์ ..... 13

2.8 กำลังไฟฟ้า ..... 14

2.9 ตัวประกอบกำลัง ..... 15

2.10 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ..... 16

2.11 ประโยชน์ที่ได้รับเมื่อทำการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ..... 18

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


3. แบบจำลองของสายป้อนแบบปฐมภูมิ ..... 22

3.1 บทนำ ..... 22

3.2 ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบัน ..... 22

3.3 แบบจำลองของสายป้อนแบบปฐมภูมิ ..... 24

3.4 การกระจายของกระแสรีแอกตีฟซึ่งถูกนอร์มัลไลซ์ ..... 33

3.5 ลักษณะของโหลด ..... 35

4. การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับชันต์คะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ ..... 40

4.1 บทนำ ..... 40

4.2 ฟังก์ชันการกระจายของกระแส ..... 41

4.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ..... 50

4.4 กรรมวิธีการหาคำตอบแบบซ้ำ ..... 52

4.5 การหาค่าคะแปซิเตอร์ในทางปฏิบัติ ..... 59

4.6 ตัวอย่างการคำนวน ..... 59

5. การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับชันต์คะแปซิเตอร์แบบผสม ..... 67

5.1 บทนำ ..... 67

5.2 แนวความคิดเกี่ยวกับกลยุทธ์ในการควบคุมแบบหลายระดับ ..... 69

5.3 แบบจำลองของกระแสโหลดแบบรีแอกตีฟและกระแสคะแปซิเตอร์ .. 71

5.4 การควบคุมคะแปซิเตอร์แบบหลายระดับในเวลาจริง ..... 73

5.5 ปัญหาการออกแบบ ..... 78

5.6 วิธีการหาคำตอบโดยการแยกการคำนวนออกเป็นส่วน ๆ ..... 83

5.7 การหาค่าคะแปซิเตอร์ในทางปฏิบัติ ..... 91

5.8 ตัวอย่างการคำนวน ..... 92

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


6. การวิเคราะห์ผลลัพธ์ ..... 99

6.1 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ ..... 99

6.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของคะแปซิเตอร์แบบผสม ..... 104

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ ..... 109

เอกสารอ้างอิง ..... 111

ภาคผนวก ก โปรแกรมคำนวนสำหรับคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ ..... 115

ภาคผนวก ข โปรแกรมคำนวนสำหรับคะแปซิเตอร์แบบผสม ..... 143

ภาคผนวก ค วิธีการใช้โปรแกรมสำหรับคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ ..... 166

ภาคผนวก ง วิธีการใช้โปรแกรมสำหรับคะแปซิเตอร์แบบผสม ..... 173

ภาคผนวก จ ระบบไฟฟ้า 13 kV ที่มีจำนวนบัส 12 บัส ติดตั้งคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่เพียงอย่างเดียว ..... 178

ภาคผนวก ฉ ระบบไฟฟ้า 12.5 kV ที่มีจำนวนบัส 14 บัส ติดตั้งคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่เพียงอย่างเดียว ..... 187

ภาคผนวก ช ระบบไฟฟ้า 13 kV ที่มีจำนวนบัส 12 บัส ติดตั้งคะแปซิเตอร์แบบผสม ..... 196

ภาคผนวก ซ ระบบไฟฟ้า 12.5 kV ที่มีจำนวนบัส 14 บัส ติดตั้งคะแปซิเตอร์แบบผสม ..... 204

ภาคผนวก ฌ การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ซึ่งใช้กับระบบ 9 บัส 23 kV ..... 215

ภาคผนวก ญ การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับคะแปซิเตอร์แบบผสมซึ่งใช้กับระบบ 9 บัส 23 kV..... 222

ประวัติผู้เขียน ..... 236

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่


3-1 ข้อมูลตัวอย่างของสายป้อนแบบปฐมภูมิ ..... 26

3-2 รีแอกตีฟโหลดที่ปลายสายป้อนในแต่ละส่วน ..... 27

4-1 ข้อมูลของสายป้อน ..... 60

4-2 โหลดที่บัสต่าง ๆ ..... 61

4-3 ค่าค่าตอบของโหลดโฟลว์ ..... 62

4-4 ผลลัพธ์ของกระบวนการทำซ้ำเมื่อ Kc = 0 ..... 65

4-5 ผลลัพธ์ของกระบวนการทำซ้ำเมื่อ Kc = 4.9 ..... 66

5-1 ผลลัพธ์ของกระบวนการทำซ้ำเมื่อ Kc = 0 ..... 97

5-2 ผลลัพธ์ของกระบวนการทำซ้ำเมื่อ Kcf = 3.5, Kcs = 6 ..... 98

6-1 ผลลัพธ์ของโหลดโฟลว์ก่อนติดตั้งคะแปซิเตอร์ ..... 102

6-2 ผลลัพธ์ของโหลดโฟลว์หลังติดตั้งคะแปซิเตอร์ ..... 102

6-3 ผลลัพธ์ของไลน์โฟลว์ก่อนติดตั้งคะแปซิเตอร์ ..... 102

6-4 ผลลัพธ์ของไลน์โฟลว์หลังติดตั้งคะแปซิเตอร์ ..... 102

6-5 ผลลัพธ์ของโหลดโฟลว์ก่อนติดตั้งคะแปซิเตอร์ ..... 107

6-6 ผลลัพธ์ของโหลดโฟลว์หลังติดตั้งคะแปซิเตอร์ ..... 107

6-7 ผลลัพธ์ของไลน์โฟลว์ก่อนติดตั้งคะแปซิเตอร์ ..... 107

6-8 ผลลัพธ์ของไลน์โฟลว์หลังติดตั้งคะแปซิเตอร์ ..... 107

# สารบัญรูปภาพ

หน้า


รูปที่

2-1 คะแปซิเตอร์ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ..... 10

2-2 รูปเฟสเซอร์ระหว่างกระแสและแรงดันของคะแปซิเตอร์ที่ขณะใด ๆ ..... 11

2-3 มุมกำลังสูญของคะแปซิเตอร์ ..... 12

2-4 รูปเฟสเซอร์ของกำลังไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ..... 14

2-5 ตัวประกอบกำลังแบบนำและแบบตาม ..... 16

2-6 การติดตั้งคะแปซิเตอร์เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ..... 17

3-1 รูปแสดงระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ..... 23

3-2 รูปสายป้อนปฐมภูมิสามเฟสซึ่งใช้ในระบบ 23 kV ..... 25

3-3 รูปแสดงสายป้อนจริง ..... 32

3-4 รูปแสดงสายป้อนสมมูลย์ที่มีความต้านทาน r=0.8622 โอห์ม/ไมล์ ..... 32

3-5 รูปแสดงสายป้อนแบบ Normalized Equivalent Uniform Feeder ซึ่งมีความยาวหนึ่งหน่วย และมีความต้านทาน r=16.8971 โอห์มต่อหนึ่งหน่วยความยาว ..... 32

3-6 ฟังก์ชันกระแสรีแอกตีฟซึ่งถูกนอร์มัลไลซ์ F(x) ..... 34

3-7 Daily Demand Variation Curve ..... 36

3-8 Load Duration Curve ..... 36

3-9 Time Varying Current ที่เกิดขึ้นบนสายป้อน ..... 38

4-1 จุดโหลดต่าง ๆ บนสายป้อน ..... 41

4-2 ค่ากระแสโหลดและกระแสคะแปซิเตอร์ในแกนตรงและแกนควอดเดรเจอร์. 43

4-3 ตำแหน่งติดตั้งและพิกัดของคะแปซิเตอร์ ..... 46

4-4 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันบนแกนควอดเดรเจอร์ของกระแสโหลดในสมการของการสูญเสีย $P'_{L_q}$ ..... 50

4-5 กระบวนการหาค่าตอบโดยการใช้คอมพิวเตอร์ ..... 53

4-6 วงจรไฟฟ้าตัวอย่างที่มีสามบัส ..... 54

4-7 ฟังก์ชันการกระจายของกระแสในแกนควอดเดรเจอร์ ..... 63

# สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่

5-1 Daily Reactive Load Profile กับเวลาในการสับเข้า/ปลดออกจากระบบ ..... 70

5-2 ฟังก์ชัน Normalized Reactive Current, F(x) ..... 72

5-3 ตำแหน่งติดตั้งและกระแสของคะแปซิเตอร์แต่ละตัว ..... 73

5-4 ลำดับการต่อเข้า/ปลดออกของคะแปซิเตอร์ทั้ง 5 ตัว ..... 74

5-5 Reactive Load Duration Curve ..... 79

5-6 กรรมวิธีหาค่าตอบแบบทำซ้ำโดยการแยกการคำนวนออกเป็นส่วน ๆ ..... 85

6-1 การเปรียบเทียบระดับแรงดันก่อนและหลังติดตั้งคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ .. 103

6-2 การเปรียบเทียบระดับแรงดันก่อนและหลังติดตั้งคะแปซิเตอร์แบบผสม .... 108

## คำย่อและสัญลักษณ์

x: ระยะทางวัดจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยบนสายป้อนแบบ Normalized Equivalent Uniform Feeder

Is(t): กระแสโหลดแบบรีแอกตีฟที่ถูกจ่ายให้แก่สายป้อนที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย

I(x): ฟังก์ชันความหนาแน่นของกระแสโหลดแบบรีแอกตีฟ

Is: ค่ายอดของกระแสรีแอกตีฟโหลดที่ถูกจ่ายให้แก่สายป้อนที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย

$t_j^c(t_j^f)$: เวลาที่คะแปซิเตอร์ชนิด j ถูกต่อเข้า/ปลดออกจากระบบ

F(x): ฟังก์ชันการกระจายของกระแสรีแอกตีฟโหลดแบบนอร์มัลไลซ์

Ici: กระแสรีแอกตีฟในค่าต่อหน่วย (พิกัดแบบกิโลวาร์) ของคะแปซิเตอร์ตัวที่ i

hi: ตำแหน่งติดตั้งของคะแปซิเตอร์ตัวที่ i

A(j): เซ็ตของคะแปซิเตอร์ชนิด j

AB(j): เซ็ตของคะแปซิเตอร์ชนิด j, j-1,..., 1, 0

LP: ค่ายอดกำลังสูญที่ลดลง

LP: ค่าพลังงานสูญที่ลดลง

S: ความประหยัดสุทธิที่เกิดจากทั้งจากการลดลงของค่ายอดกำลังสูญและค่าพลังงานสูญ

Kp: ราคาต่อปีต่อหน่วยของกำลังสูญในหน่วย $/kW/yr

Ke: ราคาต่อหน่วยของค่าการลดลงของพลังงานในหน่วย $/kWh

Kcf(Kcs): ราคาต่อปีต่อหน่วยของคะแปซิเตอร์แบบค่าคงที่ (แบบสวิตชิง) ที่ติดตั้ง ในหน่วย $/kVar สามเฟส

ai: ชนิดของคะแปซิเตอร์ตัวที่ i

Tj: ช่วงเวลาการบริการของคะแปซิเตอร์ชนิด j

Lfj: ค่ารีแอกตีฟโหลดแฟกเตอร์ในช่วงเวลา Tj

r: ค่าความต้านทานในหน่วยโอห์มต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายป้อนแบบสมมูลย์