

การหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนานบนสายป้อนแบบเรเดียล  
ของระบบจำหน่าย

นาย วิชากร เสงศรีธวัช



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-639-636-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**OPTIMAL SHUNT CAPACITOR SIZING AND LOCATION ON THE RADIAL  
DISTRIBUTION SYSTEM**



**Mr. Vichchakorn Hengsitawat**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Department of Electrical Engineering**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1998**

**ISBN 974-639-636-6**

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนานบนสาย  
    ป้อนแบบเรเดียลของระบบจำหน่าย

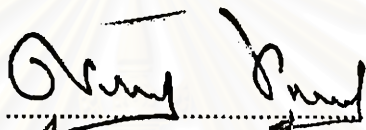
โดย                              นาย วิชากร เสงศรีรัช

ภาควิชา                          วิศวกรรมไฟฟ้า

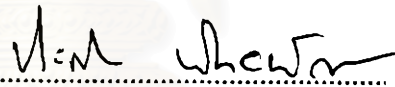
อาจารย์ที่ปรึกษา              อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย


---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ )

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย )

  
..... กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ )

วิชากร เสงศรีรัช : การหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนานบนสาย  
ป้อนแบบเรเดียลของระบบจำหน่าย (OPTIMAL SHUNT CAPACITOR SIZING AND  
LOCATION ON THE RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM) อ. ที่ปรึกษา : อ. ไชยะ แซ่มซ้อย,  
124 หน้า. ISBN 974-639-636-6

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันกล่าวคือ ในส่วนแรกเป็นการนำเสนอ  
วิธีการแก้ปัญหาการติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนานบนสายป้อนแบบเรเดียลของระบบจำหน่าย  
โดยพิจารณาเงื่อนไขในการรักษาระดับแรงดันของระบบให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด และลดกำลังงานสูญเสีย  
จริงในแต่ละระดับโหลด ทั้งนี้คำนึงถึงราคาของตัวเก็บประจุและราคาพลังงานสูญเสียของระบบให้มีค่าต่ำสุด  
วิธีการแก้ปัญหาใช้หลักการวิเคราะห์แบบเซ็นซิวิตี (Sensitivity Analysis) เพื่อเลือกตำแหน่งบัสที่ควรได้รับ  
การติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนาน โดยพิจารณาจากค่าเซ็นซิวิตีแฟกเตอร์ (Sensitivity Factor) ซึ่งเป็นการช่วยลด  
ขั้นตอนและเวลาในการคำนวณ

สำหรับส่วนที่สอง เป็นการศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิก จากการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นใน  
ระบบจำหน่าย ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกซึ่งอาจมีค่าสูงผิดปกติไหลผ่านเข้าสู่ตัวเก็บประจุ เป็นผลให้ตัวเก็บ  
ประจุเกิดความเสียหายได้ การประเมินความเสียหายทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าพิคคของตัวเก็บประจุที่คำนวณ  
ได้กับค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน ANSI/IEEE 18-1992 และ IEC 60871-1(1997-10) การวิเคราะห์ใช้แบบ  
จำลองของสายป้อนและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบตามแบบจำลองของ CIGRE

ระบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ยังสามารถใช้วิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรง  
ดัน (THD<sub>v</sub>) ที่มีค่าต่าง ๆ รวมถึงค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของกระแส (THD<sub>i</sub>) ของตัวเก็บประจุได้ด้วย  
ทำให้สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของระบบจำหน่ายในเรื่องของฮาร์มอนิก ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์ต่อการวาง  
แผนและปรับปรุงคุณภาพของระบบจำหน่ายให้ดีขึ้นได้

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา ..... พ.ศ. 2541

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 3971669221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTIMAL SHUNT CAPACITOR PLACEMENT / SENSITIVITY ANALYSIS  
VICHCHAKORN HENGSRITAWAT : OPTIMAL SHUNT CAPACITOR SIZING AND  
LOCATION ON THE RADIAL DISTRIBUTION SYSTEM. THESIS ADVISOR : CHAIYA  
CHAMCHOY 124 pp. ISBN 974-639-636-6

This thesis is divided into two parts. In the first part , the method to solve a problem of optimal shunt capacitor placement on the radial distribution system is presented by considering the upper and lower bound constraints of voltage and reducing real power loss at each load levels to minimize the investment cost of capacitors and system energy loss cost. The solution methodology is based on sensitivity analysis to select the candidate installation locations of shunt capacitors from the sensitivity factor to reduce the search space and computation time.

In the second part , the effects of harmonics due to the presence of nonlinear loads in distribution system is studied. Excessive harmonic currents can flow through capacitors which may result in capacitor damages. The effects of harmonics to capacitors can be evaluated by comparing the calculation results to the limit values given by ANSI/IEEE 18-1992 and IEC 60871-1 (1997-10) standards.

Furthermore, the developed software can evaluate total harmonic voltage distortions (THD<sub>v</sub>) at various busses and also total harmonic current distortions (THD<sub>i</sub>) of capacitors. This leads to an assessment of harmonic performance in distribution system for planning and power quality improvement.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา.....พ.ศ. 2541

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จรุด่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ไชยะ แชนซ์ชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จรุด่วงด้วยดี

อนึ่ง เนื่องจากทุนการศึกษาในระดับปริญญาโททั้งหมดนี้ ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย ที่ได้เล็งเห็นความสำคัญต่อการศึกษาในระดับสูงของนิสิตนักศึกษา ซึ่งจะเป็นการวางรากฐานที่สำคัญอันจะนำไปสู่การพัฒนาของประเทศไทย อย่างแท้จริง

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา - มารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุก ๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

วิชากร เสงศรีธวัช

กันยายน 2541

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ต
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ประวัติความเป็นมาและแนวเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	5
2. หลักพื้นฐานเกี่ยวกับตัวเก็บประจุและการประยุกต์ใช้งานในระบบจำหน่าย.....	6
2.1 ตัวเก็บประจุกำลัง.....	6
2.2 ผลกระทบจากการต่อตัวเก็บประจุเข้ากับสายป้อน.....	7
2.3 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม.....	7
2.3.1 การชดเชยเกิน.....	9
2.3.2 ตัวประกอบกำลังนำหน้า.....	10
2.4 การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน.....	11
2.5 ประเภทของการติดตั้งตัวเก็บประจุ.....	13
2.6 ตัวประกอบกำลัง.....	14
2.6.1 ผลเสียที่เกิดจากตัวประกอบกำลังต่ำ.....	15
2.6.2 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.....	16
2.6.3 อุปกรณ์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.....	16
2.6.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.....	18

3. การคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุต่อขนาน.....	22
3.1 แบบจำลองของระบบจำหน่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	22
3.1.1 รูปแบบของระบบจำหน่าย.....	22
3.1.2 ขนาดของตัวเก็บประจุ.....	23
3.1.3 โหลดของระบบ.....	23
3.1.4 สายป้อน.....	24
3.2 ลักษณะของปัญหา.....	25
3.2.1 ฟังก์ชันเป้าหมาย.....	25
3.2.2 การคิดราคาเงินลงทุนของตัวเก็บประจุ.....	26
3.3 วิธีการแก้ปัญหา.....	26
3.3.1 การวิเคราะห์แบบเชิงคณิตศาสตร์.....	27
3.3.2 การสร้างทางเลือก.....	28
3.3.3 การตรวจสอบเงื่อนไขของระดับแรงดัน.....	31
3.4 การคำนวณโหลดไฟลท์ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	31
3.4.1 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐานของระบบจำหน่าย.....	32
3.4.2 การวิเคราะห์แบบไปข้างหน้า / ย้อนกลับ.....	35
3.4.3 วิธีการคำนวณโหลดไฟลท์ของระบบจำหน่ายด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน....	35
3.4.4 ขั้นตอนการคำนวณโหลดไฟลท์ของระบบจำหน่าย ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	41
3.5 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม ของตัวเก็บประจุต่อขนาน.....	42
4. การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุต่อขนาน.....	46
4.1 แบบจำลองของระบบในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	47
4.1.1 โหลด.....	47
4.1.2 ตัวเก็บประจุ.....	48
4.1.3 สายป้อน.....	49
4.2 การคำนวณค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย.....	49
4.2.1 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสและค่าความผิดเพี้ยน ทางฮาร์มอนิกรวมของแรงดันที่บัส.....	51
4.2.2 ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านโหลดที่บัสต่างๆ และค่า ความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของกระแสของโหลด.....	52



4.3	การคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกและกระแส rms ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ.....	52
4.4	ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุ.....	54
4.4.1	การคำนวณปริมาณทางฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน.....	55
4.4.2	ขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณทางฮาร์มอนิก.....	55
4.5	ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์.....	56
5.	ตัวอย่าง ผลการคำนวณ และการวิเคราะห์โดยใช้ระบบจำลอง.....	58
5.1	โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	58
5.2	การป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบจำลอง.....	60
5.2.1	การสร้างระบบจำลองด้วยแผนภาพเส้นเดียว.....	60
5.2.2	การป้อนข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์หาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของตัวเก็บประจุ.....	63
5.2.3	การป้อนข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุ.....	65
5.3	ส่วนการแสดงผลของโปรแกรม.....	66
5.3.1	ผลการคำนวณโหลดโฟลว์.....	66
5.3.2	ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนาน.....	68
5.3.3	ส่วนแสดงการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก.....	68
5.4	ระบบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	70
5.4.1	ระบบทดสอบขนาด 19 บัต์.....	71
5.4.2	ระบบทดสอบขนาด 33 บัต์.....	82
5.4.3	การวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิก.....	90
5.4.4	การวิเคราะห์ผลเรโซแนนซ์.....	98
5.5	สรุป.....	99
6.	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	100
	รายการอ้างอิง.....	102
	ภาคผนวก	
ก.	ค่าแรงดันที่บั๊ตของระบบจำหน่าย 19 บัต์.....	104
ข.	ค่าแรงดันที่บั๊ตของระบบจำหน่าย 33 บัต์.....	110
	ประวัติผู้เขียน .....	124

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบดาวของระบบ โหลด 50%.....	29
3-2 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสลับเข้า-ปลดออกของระดับ โหลด 80%.....	30
3-3 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสลับเข้า-ปลดออกของระดับ โหลด 100%.....	31
4-1 พิกัดของตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยมาตรฐาน ANSI/IEEE 18-1992.....	54
4-2 พิกัดของตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 60871-1(1997-10).....	54
5-1 รูปภาพและความหมายของอุปกรณ์ต่างๆ.....	60
5-2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนและข้อมูล โหลดของระบบ 19 บัส.....	71
5-3 การกระจายของ โหลดของระบบ 19 บัส กรณี (ก).....	73
5-4 ราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุของระบบ 19 บัส กรณี (ก).....	73
5-5 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานของระบบ 19 บัส กรณี (ก).....	73
5-6 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงคืนและกำลังสูญเสียของระบบ 19 บัส กรณี (ก).....	74
5-7 ราคาเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุของระบบ 19 บัส กรณี (ข).....	78
5-8 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานของระบบ 19 บัส กรณี (ข).....	78
5-9 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงคืนและกำลังสูญเสียของระบบ 19 บัส กรณี (ข).....	78
5-10 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายป้อนและข้อมูล โหลดของระบบ 33 บัส.....	83
5-11 การกระจายของ โหลดของระบบ 33 บัส กรณี (ก).....	84
5-12 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานของระบบ 33 บัส กรณี (ก).....	84
5-13 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงคืนและกำลังสูญเสียของระบบ 33 บัส กรณี (ก).....	85
5-14 การกระจายของ โหลดของระบบ 33 บัส กรณี (ข).....	85
5-15 ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุต่อขนานของระบบ 33 บัส กรณี (ข).....	86
5-16 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงคืนและกำลังสูญเสียของระบบ 33 บัส กรณี (ข).....	86
5-17 กระแสฮาร์มอนิกที่แต่ละความถี่ของ โหลด ไม่เป็นเชิงเส้น.....	90
5-18 ระดับความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรงคืนที่ระดับ โหลด 100%.....	93
5-19 ตำแหน่งและค่าเปอร์เซ็นต์ของ โหลด ไม่เป็นเชิงเส้น.....	96
5-20 ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดของตัวเก็บประจุกับค่ามาตรฐาน ที่ระดับ โหลด 70%.....	97

5-21 ผลการเปรียบเทียบค่าพิสัยของตัวเก็บประจุกับค่ามาตรฐาน ที่ระดับโหลด 90%.....	97
5-22 ผลการเปรียบเทียบค่าพิสัยของตัวเก็บประจุกับค่ามาตรฐาน ที่ระดับโหลด 100%.....	97
ก-1 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 70%.....	104
ก-2 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 90%.....	105
ก-3 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 100%.....	106
ก-4 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 70%.....	107
ก-5 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 90%.....	108
ก-6 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 100%.....	109
ข-1 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 60%.....	110
ข-2 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 80%.....	112
ข-3 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 100%.....	114
ข-4 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 40%.....	116
ข-5 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 60%.....	118
ข-6 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 80%.....	120
ข-7 ค่าแรงดันที่บัสในภาวะก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุ ที่ระดับโหลด 100%.....	122

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2-1 ภาพตัดของตัวเก็บประจุกำลังที่ใช้ปรับค่าตัวประกอบกำลัง.....	7
2-2 เฟสเซอร์โคแอมแรงดันของวงจรสายป้อนที่มีตัวประกอบกำลังล้าหลัง.....	8
2-3 เฟสเซอร์โคแอมแรงดันของแรงดันที่จุดปลายในภาวะการชดเชยเกิน.....	10
2-4 เฟสเซอร์โคแอมแรงดันของแรงดันในภาวะโหลดมีตัวประกอบกำลังนำหน้า.....	11
2-5 เฟสเซอร์โคแอมแรงดันของวงจรสายป้อนที่มีตัวประกอบกำลังล้าหลัง.....	12
2-6 ผลของแรงดันจากการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบคงที่.....	14
2-7 สามเหลี่ยมกำลัง.....	14
2-8 สามเหลี่ยมกำลังที่มีตัวประกอบกำลัง 2 ค่า.....	15
2-9 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยตัวเก็บประจุต่อขนาน.....	17
3-1 แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล.....	23
3-2 ฟังก์ชันราคาต้นทุนของตัวเก็บประจุ.....	23
3-3 กราฟการกระจายของโหลด.....	24
3-4 วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้นหรือสายป้อนของระบบจำหน่าย.....	24
3-5 ตัวอย่างระบบจำหน่ายแบบเรเดียลขนาด 10 บัส.....	29
3-6 วงจรพื้นฐานของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล.....	33
3-7 การจัดลำดับระหว่างโหนดกับกิ่งของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล.....	39
3-8 ขั้นตอนการคำนวณโหลดไฟลว์ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	44
3-9 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของ ตัวเก็บประจุต่อขนาน.....	45
4-1 แบบจำลองของโหลดตามแบบ CIGRE และแบบ RL.....	47
4-2 วงจรสมมูลของสายป้อน โดยคิดผลของฮาร์มอนิก.....	49
4-3 ตัวอย่างระบบจำหน่ายในการวิเคราะห์ที่ความถี่มูลฐาน.....	49
4-4 วงจรสมมูลของระบบตัวอย่างในการวิเคราะห์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก.....	50
4-5 ระบบตัวอย่างในการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกผ่านตัวเก็บประจุ...	52
4-6 วงจรสมมูลของระบบตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก.....	53

4-7	ขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณทางฮาร์โมนิกที่กำหนดตามมาตรฐาน.....	57
5-1	โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	59
5-2	หน้าจอการสร้างแผนภาพเส้นเคี้ยว.....	61
5-3	หน้าจอการรับค่าพารามิเตอร์สายของระบบจำลอง.....	61
5-4	หน้าจอการรับค่าโหลดของระบบจำลอง.....	62
5-5	หน้าจอการรับข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อย.....	62
5-6	หน้าจอการรับค่าการกระจายของโหลด.....	63
5-7	หน้าจอการรับค่าเงินลงทุนต่อปีของตัวเก็บประจุและราคาพลังงานสูญเสีย.....	64
5-8	หน้าจอการรับค่าขอบเขตของแรงดัน.....	65
5-9	หน้าจอการรับข้อมูลการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์โมนิก.....	66
5-10	หน้าจอแสดงผลของขนาดแรงดันและมุมที่บิดต่างๆ .....	67
5-11	หน้าจอแสดงผลการไหลของกำลังงานในสายป้อนแต่ละส่วน.....	67
5-12	หน้าจอแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่บิดต่างๆ .....	68
5-13	หน้าจอแสดงผลการติดตั้งตัวเก็บประจุค่อนาน.....	69
5-14	หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์โมนิก.....	69
5-15	แผนภาพวงจรเส้นเคี้ยวของระบบทดสอบขนาด 19 บัต์.....	71
5-16	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 40% ของระบบ 19 บัต์ กรณี (ก).....	74
5-17	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 70% ของระบบ 19 บัต์ กรณี (ก).....	75
5-18	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 90% ของระบบ 19 บัต์ กรณี (ก).....	76
5-19	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 100% ของระบบ 19 บัต์ กรณี (ก).....	77
5-20	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 70% ของระบบ 19 บัต์ กรณี (ข).....	79
5-21	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 90% ของระบบ 19 บัต์ กรณี (ข).....	81
5-22	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 100% ของระบบ 19 บัต์ กรณี (ข).....	81

5-23	แผนภาพวงจรเส้นเดียวของระบบทดสอบขนาด 33 บัต์.....	82
5-24	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 40% ของระบบ 33 บัต์ กรณี (ข).....	87
5-25	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 60% ของระบบ 33 บัต์ กรณี (ข).....	88
5-26	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 80% ของระบบ 33 บัต์ กรณี (ข).....	89
5-27	ค่าใช้จ่ายรวมจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 100% ของระบบ 33 บัต์ กรณี (ข).....	89
5-28	ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 70%.....	91
5-29	ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 90%.....	91
5-30	ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด 100%.....	92
5-31	ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุหลังการปรับโหลด ที่ระดับโหลด 70%.....	94
5-32	ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุหลังการปรับโหลด ที่ระดับโหลด 90%.....	95
5-33	ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุหลังการปรับโหลด ที่ระดับโหลด 100%.....	95
5-34	ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุขนาด 1800 kVAr ของระบบ 19 บัต์.....	98