

การศึกษามลของการลับและปลดสวิตซ์ชนิดสูญญากาศต่อชุดตัวเก็บประจุ  
ที่สถานีไฟฟ้าอัยยะระดับแรงดันปานกลาง



นายอรรถพันธ์ จันทสมิต

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

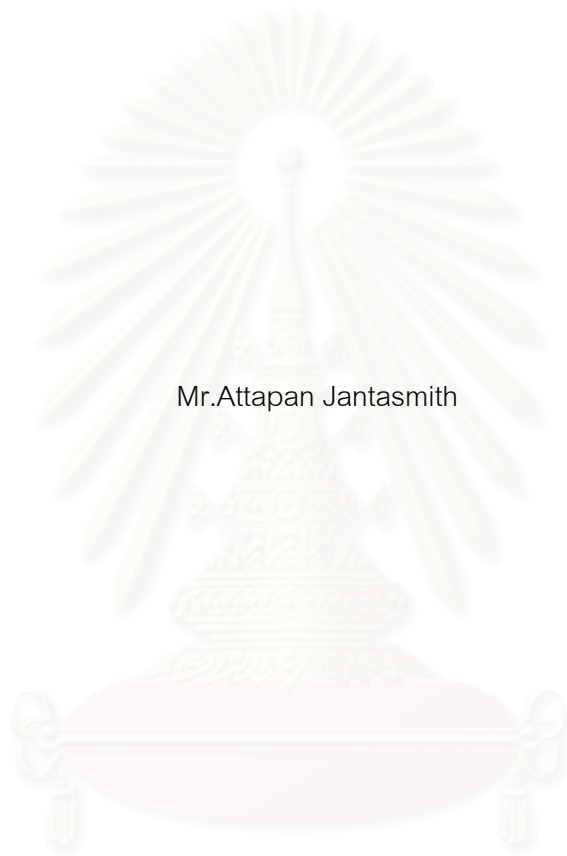
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2548-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON CAPACITOR-BANK SWITCHING BY VACUUM SWITCH  
IN MEDIUM VOLTAGE SUBSTATION



Mr.Attapan Jantasmith

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2548-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของการสับและปลดสวิตช์ชนิดสูญญากาศต่อชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าจ่ายระดับแรงดันปานกลาง
โดย	นายอรรถพันธ์ จันทสมิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาดมงคล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาดมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์)

..... กรรมการ  
(นายพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์)

อรรถพันธ์ จันทสมิต : การศึกษาผลของการสับและปลดสวิตช์ชนิดสูญญากาศต่อชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดันปานกลาง. (A STUDY ON CAPACITOR-BANK SWITCHING BY VACUUM SWITCH IN MEDIUM VOLTAGE SUBSTATION)  
 อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, จำนวนหน้า 118 หน้า. ISBN 974-17-2548-5.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุของสถานีไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดแรงดันและกระแสเกินในระบบไฟฟ้าและชุดตัวเก็บประจุ โดยใช้สถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคระดับแรงดัน 22 kV เป็นกรณีศึกษา ซึ่งมีการเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP/ATP พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อขนาดแรงดันและกระแสเกินจากการสับและปลดสวิตช์ เช่น ขนาดของตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำจำกัดกระแส เป็นต้น

พร้อมกันนี้ ยังวิเคราะห์วิธีการลดแรงดันและกระแสเกินจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ ได้แก่ การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์, การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์, การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ และการใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์ จากผลการจำลองพบว่าวิธีสุดท้ายสามารถลดแรงดันและกระแสเกินได้มากที่สุด

สำหรับวิธีการลดแรงดันและกระแสเกิน กรณีการเกิดอาร์กข้ามเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุจะเลือกใช้กับดักฟ้าผ่า โดยพิจารณาตำแหน่งการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่แตกต่างกัน พบว่าการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์สามารถลดแรงดันเกินที่บัสได้ดีที่สุด ส่วนการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัลหรือกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัลและนิวทรัล-กราวด์สามารถลดแรงดันเกินที่ชุดตัวเก็บประจุได้ดีที่สุด

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4270652021 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : CAPACITOR SWITCHING / TRANSIENTS OVERVOLTAGE / EMTP /

ATTAPAN JANTASMITH : A STUDY ON CAPACITOR-BANK SWITCHING BY

VACUUM SWITCH IN MEDIUM VOLTAGE SUBSTATION. THESIS ADVISOR :

CHANNARONG BALMONGKOL, Dr.Sc.Techn., THESIS COADVISOR : KOMSON

PETCHARAKS, Dr.Sc.Techn. 118 pp. ISBN 974-17-2548-5.

This thesis presents a study of capacitor bank switching in substation causing transient overvoltage and overcurrent on system and capacitor bank. The field test from 22 kV PEA system is compared with the simulation results from EMTP/ATP. In addition, the effects of parameters such as capacitor size, current limiting reactor size are investigated.

For closing capacitor banks , some techniques to reduce transient overvoltage and overcurrent, i.e. pre-insertion resistor, pre-insertion inductor, inductor series capacitor bank, and synchronous closing control are studied. The simulation results show that the synchronous closing control can reduce overcurrent and overvoltage better than other methods.

For opening capacitor banks in the case of two-phase restikes, protection with surge arresters in different installations are considered. The simulation results show that the installation of arresters between phase-ground gives the best protection for bus while the installation of arresters between phase-neutral or phase-neutral and neutral-ground gives the best protection for capacitor banks.

Department ..... Electrical Engineering .....

Field of study ..... Electrical Engineering .....

Academic year ..... 2002 .....

Student's signature .....

Advisor's signature .....

Co-advisor's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรวัชรีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ให้แนวทางศึกษาวิจัย, การแก้ปัญหาและแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.สุชุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร และ คุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณประดิษฐ์พงษ์ สุขศิริถาวรกุล จากบริษัท ABB ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลและคำแนะนำในการจำลอง

ขอขอบพระคุณ พนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลและการตรวจวัดที่สถานีไฟฟ้า

ขอขอบพระคุณ พนักงานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูล

ขอขอบพระคุณ คุณถาวร เอื้อดี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการไปตรวจวัดที่สถานีไฟฟ้า ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่น้องๆทุกท่านทั้งที่อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งบัณฑิตวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจ รวมทั้งสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆด้านตลอดมา จนประสบความสำเร็จในที่สุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป .....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์ .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ทฤษฎีแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงจากการลัดและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ .....	4
2.1 ทราบดีไซน์ต์ทางไฟฟ้า .....	4
2.2 พารามิเตอร์วงจรไฟฟ้า.....	4
2.3 แรงดันเกินสวิตชิง .....	6
2.3.1 การลัดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ.....	7
2.3.1.1 การลัดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว (Isolated bank).....	7
2.3.1.2 การลัดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบ Back-to-Back .....	10
2.3.2 การปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ.....	13
3. วิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงเนื่องจากการลัดและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ ..	16
3.1 การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ (Pre-insertion resistor) .....	16
3.2 การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ (Pre-insertion inductor).....	17
3.3 การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ.....	18
3.4 การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์ (Synchronous Closing Control) .....	18



## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4.1 ต่อแบบวายต่อลงดิน.....	19
3.4.2 ต่อแบบวายไม่ต่อลงดิน.....	19
3.5 การใช้กับดักฟ้าผ่าแบบ MOV.....	20
3.5.1 แรงดันใช้งานต่อเนื่อง (Continuous operating voltage, $U_c$ ).....	21
3.5.2 แรงดันพิกัด (Rated voltage, $U_r$ ).....	21
3.5.2.1 กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์.....	21
3.5.2.2 กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัล.....	22
3.5.2.3 กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัลและนิวทรัล-กราวด์.....	22
3.5.3 ความสามารถในการรับพลังงาน (Energy Absorbtion).....	22
4. อุปกรณ์และวิธีการตรวจวัดรูปคลื่นที่สถานีไฟฟ้าย่อย.....	23
4.1 การตรวจวัดรูปคลื่นแรงดัน.....	24
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดัน.....	26
5. กรณีศึกษาการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้าย่อย.....	27
5.1 ข้อมูลและแบบจำลองของสถานีไฟฟ้าย่อย.....	27
5.1.1 วงจรป้อนของระบบ.....	28
5.1.1.1 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short circuit impedance).....	28
5.1.1.2 สายส่งแบบพารามิเตอร์คงที่ (Constant parameter line).....	29
5.1.1.3 สายส่งแบบพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ (Frequency-dependent parameter line).....	30
5.1.2 หม้อแปลง.....	31
5.1.3 ชุดตัวเก็บประจุ.....	32
5.1.4 ตัวเหนี่ยวนำ.....	33
5.1.5 โหลดของสถานีไฟฟ้า.....	33
5.2 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการตรวจวัดกับการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP/ATP.....	33
5.3 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรเมื่อสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ.....	46
5.3.1 มุมที่สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ.....	46
5.3.2 ขนาดของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ.....	49
5.3.3 ขนาดของอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง.....	50

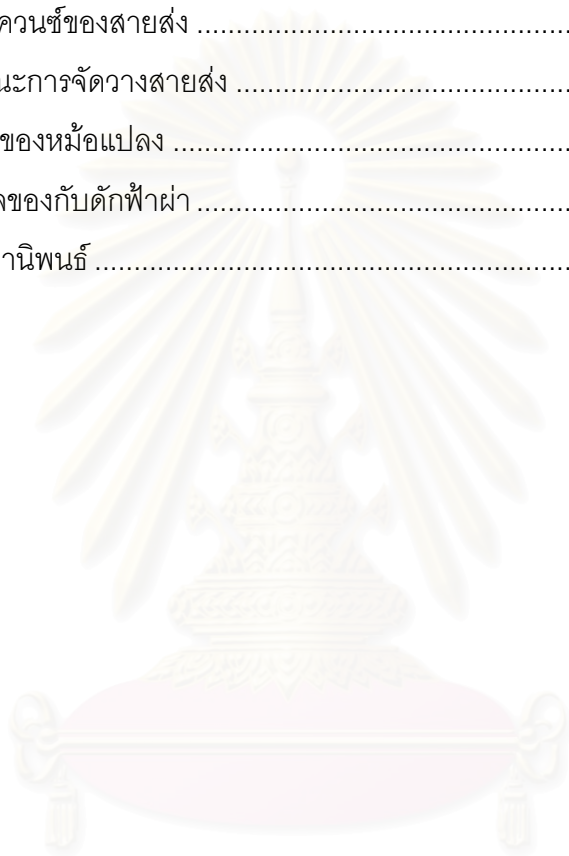


## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5.3.4 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ .....	51
5.3.5 ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ .....	53
5.3.6 ขนาดของโหลด .....	54
5.4 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรเมื่อปลดสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุ .....	57
5.4.1 ขนาดของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ.....	58
5.4.2 ขนาดของอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง.....	60
5.4.3 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ .....	62
5.4.4 ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ .....	64
5.4.5 ขนาดของโหลด .....	66
6. การศึกษาวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ซึ่งเนื่องจากการสับและปลดสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุของกรณีศึกษา.....	70
6.1 การควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ซึ่งเนื่องจากการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุ.....	70
6.1.1 การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตซ์ (Pre-insertion resistor) .....	70
6.1.2 การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตซ์ (Pre-insertion inductor) .....	72
6.1.3 การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ .....	73
6.1.4 การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตซ์ (Synchronous Closing Control).....	74
6.1.5 เปรียบเทียบผลการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ซึ่งด้วยวิธีการต่างๆ.....	76
6.2 การควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ซึ่งเนื่องจากการปลดสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุ.....	87
6.2.1 กัับดักฟ้าผ่าแบบ MOV.....	87
6.2.1.1 เปรียบเทียบการติดตั้งกัับดักฟ้าผ่าในรูปแบบต่าง ๆ .....	89
6.2.1.2 เปรียบเทียบขนาดแรงดันพิกัดของกัับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างนิวทรอล-กราวด์.....	91
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	93
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
7.2 ข้อเสนอแนะ .....	95
รายการอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก.....	99
ก. วิธีการหาสมการแรงดันเกินสวิตซ์และกระแสเกินสวิตซ์.....	100
ก.1 วิธีหาสมการแรงดันเกินสวิตซ์และกระแสเกินสวิตซ์จากรูปที่ 2.1.....	100

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ก.2 วิธีหาสมการแรงดันเกินสวิตชิงและกระแสเกินสวิตชิงจากรูปที่ 2.3.....	103
ข. ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง.....	109
ข.1 ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร.....	109
ข.2 ค่าซีแควนซ์ของสายส่ง .....	109
ข.3 ลักษณะการจัดวางสายส่ง .....	110
ข.4 ข้อมูลของหม้อแปลง .....	117
ข.5 ข้อมูลของกัับดักฟ้าผ่า .....	117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	118



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร .....	29
5.2 พารามิเตอร์ของสายส่ง .....	29
5.3 ค่าพารามิเตอร์โหลดที่ใช้ในการจำลอง.....	33
5.4 เปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตชิง (ลัดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1).....	34
5.5 เปรียบเทียบกระแสเกินสวิตชิง (ลัดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1).....	34
5.6 เปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตชิง (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1).....	37
5.7 เปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตชิง (ลัดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3).....	40
5.8 เปรียบเทียบกระแสเกินสวิตชิง (ลัดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3).....	40
5.9 เปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตชิง (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3).....	43

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว .....	7
2.2 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว(ไม่พิจารณาค่าความต้านทาน) .....	9
2.3 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบ Back to Back .....	10
2.4 วงจรสมมูลการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ .....	13
2.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อเกิดอาร์กที่แรงดันคายอด .....	14
2.6 รูปคลื่นแรงดันเมื่อเกิดอาร์กซ้ำหลายครั้ง .....	15
3.1 การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ .....	16
3.2 การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ .....	17
3.3 การต่อชุดตัวเก็บประจุ .....	18
3.4 ภาพแสดงเวลาในการสับสวิตช์ .....	20
4.1 แบบผังสถานีไฟฟ้าย่อย .....	23
4.2 ตำแหน่งติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์ .....	24
4.3 การติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์ .....	25
4.4 วงจรการตรวจวัดแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุ .....	25
4.5 อุปกรณ์ตรวจวัดและบันทึกรูปคลื่น .....	26
5.1 แบบจำลองสถานีไฟฟ้า .....	27
5.2 ผังวงจรป้อนของระบบ .....	28
5.3 วงจรป้อนแทนด้วยสายส่งแบบพารามิเตอร์คงที่ .....	30
5.4 วงจรป้อนแทนด้วยสายส่งแบบพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ .....	30
5.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลง .....	31
5.6 การต่อตัวเก็บประจุแบบดับเบิ้ลวายไม่ต่อลงดิน .....	32
5.7 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P1 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1) .....	35
5.8 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P2 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1) .....	35
5.9 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P34 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1) .....	36
5.10 รูปคลื่นกระแสที่จุด C34 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1) .....	36
5.11 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P2 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1) .....	38
5.12 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P34 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1) .....	38
5.13 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P4 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1) .....	39







## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 กระแสเกินสวิตซ์สูงสุดเมื่อใช้ตัวต้านทานขนาดต่างๆ.....	71
6.4 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่บัสเมื่อใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ.....	72
6.5 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ.....	72
6.6 กระแสเกินสวิตซ์สูงสุดเมื่อใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ.....	73
6.7 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่บัสเมื่อใช้ขนาดตัวเหนี่ยวนำต่างๆ.....	73
6.8 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อใช้ขนาดตัวเหนี่ยวนำต่างๆ.....	74
6.9 กระแสเกินสวิตซ์สูงสุดเมื่อใช้ขนาดตัวเหนี่ยวนำต่างๆ.....	74
6.10 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่บัสเมื่อเวลาคลัดเคลื่อนต่างๆ.....	75
6.11 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเวลาคลัดเคลื่อนต่างๆ.....	75
6.12 กระแสเกินสวิตซ์สูงสุดเมื่อเวลาคลัดเคลื่อนต่างๆ.....	76
6.13 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่บัส.....	76
6.14 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุ.....	77
6.15 กระแสเกินสวิตซ์สูงสุด.....	77
6.16 รูปคลื่นแรงดันที่บัสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ต่างๆ ของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1.....	78
6.17 รูปคลื่นแรงดันที่บัสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ต่างๆ ของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2.....	79
6.18 รูปคลื่นแรงดันที่บัสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ต่างๆ ของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3.....	80
6.19 รูปคลื่นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ต่างๆ ของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1.....	81
6.20 รูปคลื่นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ต่างๆ ของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2.....	82
6.21 รูปคลื่นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ต่างๆ ของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3.....	83
6.22 รูปคลื่นกระแสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ต่างๆ ของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1.....	84



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.23 รูปคลื่นกระแสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ต่างๆ ของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 .....	85
6.24 รูปคลื่นกระแสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ต่างๆ ของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 .....	86
6.25 วงจรในกรณีกับดักฟ้าผ่าต่อแบบเฟส-กราวด์ .....	88
6.26 วงจรในกรณีกับดักฟ้าผ่าต่อแบบเฟส-นิวทรอล .....	88
6.27 วงจรในกรณีกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรอลและนิวทรอล-กราวด์ .....	88
6.28 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่บัส .....	90
6.29 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุ .....	90
6.30 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่บัส .....	91
6.31 แรงดันเกินสวิตซ์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุ .....	92

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำทั่วไป

ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศนั้นนับวันจะยิ่งมีเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ผู้ผลิตและจัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าต้องหาวิธีการในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการ ซึ่งอุปกรณ์และโหลดส่วนใหญ่มักเป็นจำพวกตัวเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดค่าตัวประกอบกำลังล้าหลัง ส่งผลให้ระบบมีกำลังงานไฟฟ้าลดลง, พลังงานสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น, แรงดันของระบบลดลง เป็นต้น วิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้นคือ การใช้ชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) เนื่องจากชุดตัวเก็บประจุช่วยชดเชยกำลังรีแอกทีฟที่ระบบสูญเสียไปได้ นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังมีข้อดีหลายประการ เช่น ระบบจ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น, ควบคุมแรงดันในระบบจำหน่าย, ปรับปรุงความมั่นคงของแรงดัน เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วตัวเก็บประจุจะมีการติดตั้งที่สายส่งและสถานีไฟฟ้าย่อย สำหรับชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยส่วนใหญ่จะติดตั้งตัวเก็บประจุเล็กหลาย ๆ ชุดแทนที่จะเป็นชุดใหญ่เพียงชุดเดียว เนื่องจากสามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟและระดับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงตามระดับโหลดที่เปลี่ยนแปลงได้ดีกว่า

เนื่องจากความต้องการพลังงานไฟฟ้าในแต่ละวันมีความต้องการไม่คงที่ จึงเป็นเหตุให้มีการสับและปลดชุดตัวเก็บประจุด้วยสวิตช์หลายครั้งตามปริมาณความต้องการของโหลดในแต่ละช่วงเวลาของวัน โดยการสวิตช์ในแต่ละครั้งไม่ว่าจะเป็นการสับหรือปลดสวิตช์จะทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วครู่ (Transients Overvoltage) ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า อาจเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหา เช่น อุปกรณ์เกิดชำรุดหรือเสื่อมสภาพก่อนกำหนด, อุปกรณ์ควบคุมเสียหาย หรือเกิดความต่างศักย์กราวด์สูง เป็นต้น

### 1.2 ที่มาของปัญหา

การสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุทั้งการสับและปลดสวิตช์ที่ชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้าย่อยส่งผลกระทบต่อสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นอย่างมาก เนื่องจากเกิดทรานเซียนต์ (Transient) ในลักษณะต่างๆ โดยในกรณีของการสับสวิตช์จะเกิดแรงดันเกินหรือกระแสเกินที่เรียกว่า กระแสพุ่งเข้า (Inrush current) อาจเป็นเหตุให้ฟิวส์ของชุดตัวเก็บประจุขาดหรือทำให้ชุดตัวเก็บประจุเสียหายได้ ส่วนในกรณีของการปลดสวิตช์ จะเกิดเหตุการณ์แรงดันเกินเนื่องจากอาร์กซ้ำ (Restrike) ที่ชุดตัว

เก็บประจุเองทำให้ชุดตัวเก็บประจุได้รับความเสียหาย เป็นเหตุให้ชุดตัวเก็บประจุส่วนนั้นหรือทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยไม่สามารถทำงานต่อไปได้ จากเหตุการณ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าผลกระทบของการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุเป็นเหตุให้ผู้ผลิตและจัดจำหน่ายไฟฟ้าต้องสูญเสียทั้งเวลาและงบประมาณในการจัดหาฟิวส์และชุดตัวเก็บประจุมาเปลี่ยน รวมทั้งต้องสูญเสียพลังงานไปเนื่องจากไม่สามารถใช้งานชุดตัวเก็บประจุมาช่วยเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังได้

วิทยานิพนธ์นี้ จะทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ, ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ, ขนาดอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ซึ่งมีผลต่อชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้าที่เกิดจากการสับและปลดสวิตช์ โดยจะทำการสร้างแบบจำลองเพื่อนำมาใช้ในโปรแกรม Electromagnetic Transient Program (EMTP) ซึ่งจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้จริงที่สถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อที่จะได้แบบจำลองที่มีความเหมาะสม

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. หาค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อชุดตัวเก็บประจุจากการสับและปลดสวิตช์ชนิดสูญญากาศที่สถานีไฟฟ้าย่อย อันได้แก่ ขนาดความจุไฟฟ้าของชุดตัวเก็บประจุ, ขนาดตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น
2. สร้างแบบจำลองเพื่อนำมาใช้ในโปรแกรม EMTP
3. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสับและปลดสวิตช์ชนิดสูญญากาศต่อชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย เช่น ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ , ขนาดอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย เป็นต้น
4. ศึกษาแนวทางแก้ไขปัญหานี้เนื่องจากกระแสฟุ้งเข้าขณะสับสวิตช์ชนิดสูญญากาศและการเกิดอาร์กขณะปลดสวิตช์ชนิดสูญญากาศ

### 1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีและการใช้โปรแกรม EMTP และหาค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อชุดตัวเก็บประจุจากการสับและปลดสวิตช์ชนิดสูญญากาศที่สถานีไฟฟ้าย่อย อันได้แก่ ขนาดความจุไฟฟ้าของชุดตัวเก็บประจุ, ขนาดตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น
2. สร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อนำมาใช้ในโปรแกรม EMTP
3. ทำการวัดข้อมูลจริงที่สถานีไฟฟ้าย่อยและทำการเปรียบเทียบผลกับแบบจำลอง
4. ศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อชุดตัวเก็บประจุเช่น ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ , ขนาดอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย เป็นต้น

5. ศึกษาและเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหานี้เนื่องจากกระแสฟุ้งเข้าขณะสับสวิตซ์ชนิด  
สูญญากาศและการเกิดอาร์กซ์ขณะปลดสวิตซ์ชนิดสูญญากาศ
6. สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถอธิบายสาเหตุและผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟ  
ฟ้าย่อยได้และศึกษาหาแนวทางในการแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้น เช่น การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตซ์,  
การติดตั้งกับดักเสิร์จ เป็นต้น เพื่อนำแนวทางที่ได้ไปแก้ไขปัญหานี้เนื่องจากกระแสฟุ้งเข้าขณะสับ  
สวิตซ์ชนิดสูญญากาศและการเกิดอาร์กซ์ขณะปลดสวิตซ์ชนิดสูญญากาศ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีแรงดันและกระแสเกินสวิตช์จากการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

การศึกษาแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งนั้น เราจำเป็นต้องทราบถึงความหมายและหลักการพื้นฐานของการเกิดทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า (Electrical Transient) เสียก่อน เพื่อที่จะได้เข้าใจถึงปัญหาและที่มาของการเกิดทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า และหาแนวทางแก้ไขต่อไป

ในบทนี้อธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุและหาสมการพื้นฐานในการอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดจากการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

#### 2.1 ทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า

ทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า [1] คือ การเปลี่ยนแปลงค่าทางแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าอย่างกะทันหันและรวดเร็ว อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอย่างทันทีทันใดในวงจร เช่น การเปิดหรือปิดสวิตช์ หรือเกิดผิดพ่วง (fault) ขึ้นในระบบ ช่วงเวลาการเกิดทรานเซียนต์จะมีช่วงสั้นมาก ซึ่งช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เช่นนั้น ในสภาวะคงตัว (steady state) หรือสภาวะทำงานปกติจะไม่มี ความหมายหรือความสำคัญเลย แต่ในช่วงเวลาของการเกิดทรานเซียนต์จะมีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังกล่าวนั้นองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรจะได้รับความเครียด (stress) ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลสูงมาก อันเป็นผลจากแรงดันหรือกระแสที่มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันระบบใช้งานหรือเกินกว่าที่กำหนดไว้ เราเรียกแรงดันหรือกระแสที่ว่า แรงดันเกิน (overvoltage) หรือกระแสเกิน (overcurrent) โดยแรงดันเกินสามารถแบ่งตามลักษณะของต้นกำเนิดได้ 2 ประเภท ประเภทแรกมาจากในบรรยากาศ คือ ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ซึ่งเกิดจากภายนอกระบบจึงเรียกว่า แรงดันเกินภายนอก (external overvoltage) ประเภทที่สองเกิดจากภายในระบบเอง อันเนื่องจากการทำงานปิดหรือเปิดวงจร หรือเกิดจากการผิดพ่วงในระบบ ซึ่งเรียกว่า แรงดันเกินภายใน (internal overvoltage) แรงดันเกินภายในยังอาจแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแรงดันเกินสวิตช์ (switching overvoltage) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงระยะสั้นมีลักษณะเป็นทรานเซียนต์หนึ่งวง และอีกรูปแบบหนึ่งเป็นแรงดันเกินชั่วคราว (temporary overvoltage) ซึ่งมีลักษณะเป็นออสซิลเลชันที่มีความถี่พลังงานหรือเป็นฮาร์มอนิกส์

#### 2.2 พารามิเตอร์วงจรไฟฟ้า

อุปกรณ์ในระบบหรือโรงงานโดยทั่วไปจะสามารถแทนด้วยพารามิเตอร์วงจรไฟฟ้าได้ 3 รูปแบบ [1] ดังนี้

- ความต้านทาน  $R = \frac{\rho \ell}{A}$  ( $\Omega$ )
- ความเหนี่ยวนำ  $L = \frac{\Psi}{I}$  (H)
- ความจุไฟฟ้า  $C = \frac{\epsilon A}{d}$  (F)

เมื่อ

$\rho$  = ความต้านทานจำเพาะ ( $\Omega \cdot m$ )

$\epsilon$  = เปรอริมิตติวิตี ( $F/m$ )

$\ell$  = ความยาว (m)

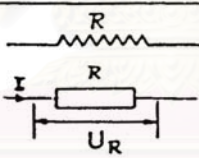
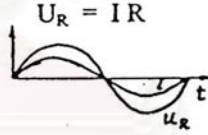
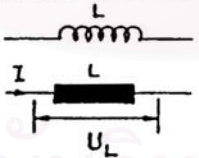
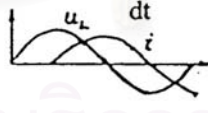

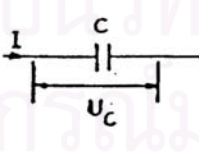
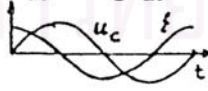
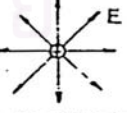
$A$  = พื้นที่ภาคตัดขวางหรือพื้นที่อิเล็กโทรด ( $m^2$ )

$d$  = ความหนาหรือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

$\Psi$  = เส้นฟลักซ์ค้ำต้องเกี่ยว

$I$  = กระแสไฟฟ้า (A,rms)

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของวงจร

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	แรงดันตกคร่อม	พลังงานในพารามิเตอร์
ความต้านทาน R ( $\Omega$ )		$U_R = IR$ 	$W_R = I^2 R$ สูญเสียกระจายไป
ความเหนี่ยวนำ L (H, mH, $\mu$ H)		$U_L = L \frac{di}{dt}$ 	$W_L = 1/2 LI^2$ เก็บในรูปแบบแม่เหล็ก 
ความจุไฟฟ้า C (ค่าเก็บประจุ) (F, $\mu$ F, pF)		$U_C = Q/C$ $= I / j\omega C$ $\frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} \frac{Q}{dt}$ 	$W_C = 1/2 CU^2$ เก็บอยู่ในรูปสนามไฟฟ้า 

การเปลี่ยนแปลงจากสภาพปกติไปสู่ทรานเซียนต์ทางไฟฟ้า จะทำให้วงจรต้องมีการกระจายพลังงานปรับไปอยู่ในสภาวะใหม่ แต่การกระจายพลังงานใหม่นี้จะเกิดขึ้นทันทีทันใดไม่ได้ เนื่องจาก



1. ความเหนี่ยวนำ (L) สามารถเก็บพลังงานไว้ได้ในรูปสนามแม่เหล็กคือ  $\frac{1}{2}LI^2$  แต่พลังงานเกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีไม่ได้ เพราะการเปลี่ยนแปลงพลังงานสนามแม่เหล็กต้องมีการเปลี่ยนแปลงของกระแส แต่ตามกฎ Lenz's law กระแสเปลี่ยนแปลงทันทีในความเหนี่ยวนำไม่ได้ เนื่องจากเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ  $L \frac{di}{dt}$  ด้านการเปลี่ยนแปลง นั่นคือกระแสจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดในความเหนี่ยวนำไม่ได้

2. ความจุไฟฟ้า (C) สามารถเก็บพลังงานได้ในรูปสนามไฟฟ้าคือ  $\frac{1}{2}CU^2$  แต่การเปลี่ยนแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าต้องมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ จาก  $U = \frac{Q}{C}$  นั่นคือ  $\frac{du}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} = \frac{i}{C}$

ฉะนั้นหากต้องการเปลี่ยนแปลงแรงดันทันทีทันใดได้ต้องมีกระแสค่าอนันต์ไหลในวงจร ซึ่งเป็นไปไม่ได้หรือกล่าวง่าย ๆ จากความสัมพันธ์  $U = \frac{Q}{C}$  จะเห็นได้ว่าจะมีแรงดันคร่อม C ก็ต่อเมื่อมีประจุก่อน นั่นคือ แรงดันคร่อมความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานเก็บในสนามไฟฟ้าทันทีทันใดไม่ได้

3. ความต้านทาน (R) เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดพลังงานสูญเสียคือ  $I^2R$  เนื่องจากพลังงานรวมต้องไม่สูญหาย เพียงแต่เปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานรูปอื่น

### 2.3 แรงดันเกินสวิตช์

แรงดันเกินสวิตช์ [1] จัดเป็นแรงดันเสิร์จหรือทรานเซียนต์ที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรตามที่ผู้ปฏิบัติงานเป็นผู้กระทำ หรือเกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดตอนโดยอัตโนมัติ เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์เพื่อจัดการผิดพ่วงที่เกิดขึ้นในระบบ เป็นต้น แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งมีขนาดต่ำกว่าแรงดันเกินฟ้าผ่า คือมีโอกาสเกิดสูงประมาณ 4 เท่าของค่ายอดแรงดันเฟสของระบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของระบบกำลังไฟฟ้าลัดวงจร, ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ และโหลดของวงจรที่สวิตช์หรือเซอร์คิตเบรกเกอร์ต้องตัดต่อ

แรงดันเสิร์จหรือทรานเซียนต์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าทางไฟฟ้าอย่างกะทันหันรวดเร็วและมีช่วงระยะเวลาการเกิดอยู่สั้นมากเมื่อเทียบกับสภาพเวลาทำงานปกติ ค่าไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวที่สำคัญก็คือ แรงดันและกระแส ซึ่งค่าทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นทั้งสองจะมีค่าสูงเกินกว่าค่าปกติหลายเท่าตัว เป็นแรงดันเกิน  $\Delta u$  หรือกระแสเกิน  $\Delta i$  เมื่อเกิดอย่างหนึ่ง ( $\Delta u$ ,  $\Delta i$ ) จะทำให้อีกอย่างหนึ่งเกิดตามมา ( $\Delta u$ ,  $\Delta i$ ) แม้ว่าช่วงการเกิดจะสั้นมาก แต่ก็มีความหมายและสำคัญมาก เพราะการฉนวนและองค์ประกอบในระบบจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า (E) และกระแสสูงมาก ซึ่งจะยังผลให้เกิดความเสียหายได้



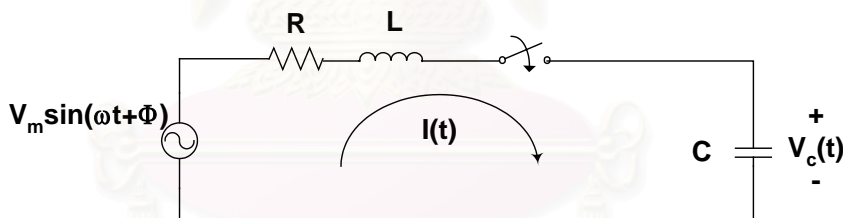
แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบเช่น แรงดันเกินจากการสับสวิตช์บนสายส่ง, แรงดันเกินจากสวิตช์ตัดวงจรที่เกิดการผิพรอง, แรงดันเกินจากสวิตช์ตัดวงจรกระแส(Current chopping) ,แรงดันเกินเนื่องจากการสับและปลดชุดตัวเก็บประจุ เป็นต้น ในการวิเคราะห์ผลจากแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งมีผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยนี้ จะกล่าวถึงแรงดันเกินเนื่องจากการสับและปลดชุดตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถเป็นออกเป็น 2 กรณีคือ

### 2.3.1 การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุจะพิจารณาตามจำนวนชุดตัวเก็บประจุที่จะทำการสับสวิตช์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

#### 2.3.1.1 การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว (Isolated bank)

เป็นการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุเพียงชุดเดียวหรือสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดแรก เมื่อทำการสับสวิตช์จะทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อให้เท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย การทำเช่นนี้ทำให้เกิดการพุ่งเกิน (overshoot) เทียบเท่ากับขนาดของแรงดันที่เปลี่ยนแปลง โดยแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดและความถี่สูง [2],[3] ซึ่งสามารถคำนวณหาสมการแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว

จากรูปที่ 2.1 สามารถหาสมการได้ดังนี้

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + V_c(0) = V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2.1)$$

และกำหนดให้สวิตช์สับวงจรที่เวลา  $t = 0$  จากนั้นทำการแก้สมการ (2.1) จะได้ผลเฉลยของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังนี้

$$i_c(t) = V_m \sin(\omega t + \phi + \theta) + e^{-\alpha t} \begin{bmatrix} -\frac{V_m}{Z} \sin(\phi + \theta) \cos \beta t \\ + \frac{\sin \beta t}{\beta} \begin{bmatrix} \frac{V_m \sin \phi - V_c(0)}{L} \\ -\frac{V_m \alpha}{Z} \sin(\phi + \theta) \\ -\frac{V_m \omega}{Z} \cos(\phi + \theta) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

$$S = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + S^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{S}{R}\right)$$

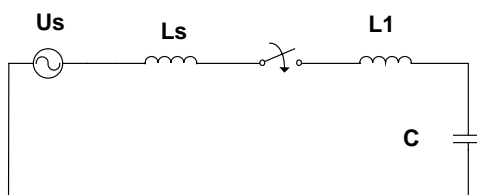
จากนั้นหาแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งได้จากสมการ

$$V_c = \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.3)$$

จะได้ผลคำตอบของแรงดันที่ตัวเก็บประจุดังนี้

$$V_c(t) = -\frac{V_m}{C\omega Z} \cos(\omega t + \phi + \theta) + \frac{V_m e^{-\alpha t}}{CZ(\alpha^2 + \beta^2)} \begin{bmatrix} \left[ \sin(\phi + \theta) [\alpha \cos(\beta t) - \beta \sin(\beta t)] \right] \\ + \frac{1}{\beta L} \begin{bmatrix} [\beta \cos(\beta t) + \alpha \sin(\beta t)] \\ L\omega \cos(\phi + \theta) - Z \sin(\phi) \\ + \frac{V_c(0)Z}{V_m} + \alpha L \sin(\phi + \theta) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

หรือสามารถหาค่ากระแสพุ่งเข้าและความถี่โดยไม่พิจารณาค่าความต้านทานในระบบได้จากมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.012-1979 [4] และ IEC 60871-1 [5] ดังสมการ (2.5) ถึง (2.7)



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว(ไม่พิจารณาค่าความต้านทาน)

จากรูปที่ 2.2 สามารถหากระแสพุ่งเข้าและความถี่ได้ดังนี้

จากมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.012-1979

$$I_{\max} = 1.41\sqrt{I_{sc} \times I_1} \text{ หรือ } \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} kV_{LL} \times 10^3 \sqrt{\frac{C}{L_T}} \quad (2.5)$$

$$f = f_s \sqrt{\frac{I_{sc}}{I_1}} \text{ หรือ } \frac{10^6}{2\pi\sqrt{L_T \times C}} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$I_{\max}$  = ค่ายอดของกระแสพุ่งเข้า (A)

$f$  = ความถี่ของกระแสพุ่งเข้า (Hz)

$f_s$  = ความถี่ของระบบ (Hz)

$I_1$  = กระแสของชุดตัวเก็บประจุที่จะสับสวิตช์ (A, rms)

$I_{sc}$  = กระแสลัดวงจร (A)

$kV_{LL}$  = แรงดันระหว่างสาย (kV)

$C$  = ความจุไฟฟ้าของชุดตัวเก็บประจุ ( $\mu F$ )

$L_s$  = ความเหนี่ยวนำของแหล่งกำเนิด ( $\mu H$ )

$L_1$  = ความเหนี่ยวนำจากบัสถึงชุดตัวเก็บประจุ ( $\mu H$ )

$L_T = L_s + L_1$  ( $\mu H$ )

จากมาตรฐาน IEC 60871-1

$$I_s \approx I_N \sqrt{2S/Q} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$I_s$  = ค่ายอดของกระแสพุ่งเข้า (A)

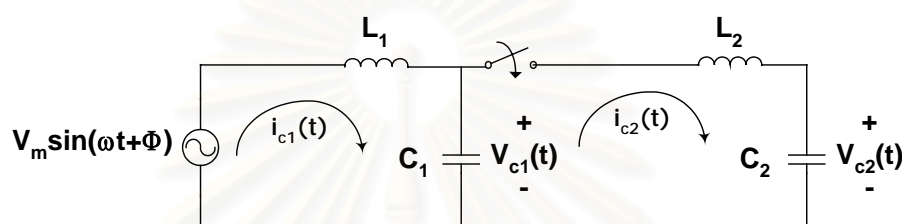
$I_N$  = กระแสของชุดตัวเก็บประจุที่จะสับสวิตช์ (A, rms)

$S$  = กำลังลัดวงจร (MVA)

$Q$  = กำลังรีแอกทีฟของชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)

### 2.3.1.2 การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบ Back-to-Back

การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบนี้เกิดเนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุในขณะที่มีชุดตัวเก็บประจุอื่นต่ออยู่ ซึ่งโดยปกติสถานะไฟฟ้ามักจะมีการแบ่งชุดตัวเก็บประจุออกเป็นหลาย ๆ ชุด เพื่อความสะดวกในการควบคุมแรงดันหรือแก้ไขตัวประกอบกำลัง(power factor) โดยการสับชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 หรือ 3 อาจทำให้เกิดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งมากกว่าในกรณีสับชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว [2],[3] โดยสามารถคำนวณหาค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  โดยไม่พิจารณาความต้านทานได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบ Back to Back

จากรูปที่ 2.3 สามารถหาสมการได้ดังนี้

$$L_1 \frac{di_{c1}}{dt} + V_{c1} = V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2.8)$$

$$L_2 \frac{di_{c2}}{dt} + V_{c2} = V_{c1} \quad (2.9)$$

ทำการแก้สมการ (2.8) และ (2.9) จะได้แรงดันที่  $C_1$  และ  $C_2$  ดังนี้

$$V_{c1}(t) = A \left[ D_1 \cos(\omega_{d1}t) + D_2 \sin(\omega_{d1}t) \right] + B \left[ D_3 \cos(\omega_{d2}t) + D_4 \sin(\omega_{d2}t) \right] + EK V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2.10)$$

$$V_{c2}(t) = D_1 \cos(\omega_{d1}t) + D_2 \sin(\omega_{d1}t) + D_3 \cos(\omega_{d2}t) + D_4 \sin(\omega_{d2}t) + KV_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

$$\omega_{d1} = \frac{\sqrt{(\omega_1 + \omega_2)^2 + \frac{1}{L_2 C_1}} + \sqrt{(\omega_1 - \omega_2)^2 + \frac{1}{L_2 C_1}}}{2}$$

$$\omega_{d2} = \frac{\sqrt{(\omega_1 + \omega_2)^2 + 1/L_2 C_1} - \sqrt{(\omega_1 - \omega_2)^2 + 1/L_2 C_1}}{2}$$

$$A = 1 - \frac{\omega_{d1}^2}{\omega_2^2}$$

$$B = 1 - \frac{\omega_{d2}^2}{\omega_2^2}$$

$$E = 1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}$$

$$K = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{\left[ (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2) - \omega^2 / L_2 C_1 \right]}$$

$$F = \frac{1}{(\omega^2 L_1 C_1 + 1)}$$

$$D_1 = \frac{V_m \sin \phi [F - (E - B)K]}{(A - B)}$$

$$D_2 = \frac{V_m \omega [F \sin \phi - (E - B)K \cos \phi]}{(A - B)\omega_{d1}}$$

$$D_3 = \frac{V_m \sin \phi [F - (E - A)K]}{(B - A)}$$

$$D_4 = \frac{V_m \omega [F \sin \phi - (E - A)K \cos \phi]}{(B - A)\omega_{d2}}$$

จากนั้นสามารถหากระแสเกินสวิตซ์ได้จากสมการ

$$i_c = C \frac{dv}{dt} \quad (2.12)$$

จะได้ผลคำตอบของกระแสเกินสวิตซ์ซึ่งดังนี้

$$i_{c1}(t) = C_1 A \omega_{d1} \left[ D_2 \cos(\omega_{d1} t) - D_1 \sin(\omega_{d1} t) \right] + C_1 B \omega_{d2} \left[ D_4 \cos(\omega_{d2} t) - D_3 \sin(\omega_{d2} t) \right] + C_1 E K \omega V_m \cos(\omega t + \phi) \quad (2.13)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \omega_{d1} \left[ D_2 \cos(\omega_{d1} t) - D_1 \sin(\omega_{d1} t) \right] + C_2 \omega_{d2} \left[ D_4 \cos(\omega_{d2} t) - D_3 \sin(\omega_{d2} t) \right] + C_2 K \omega V_m \cos(\omega t + \phi) \quad (2.14)$$

หรือสามารถหาค่ากระแสฟุ้งเข้าและความถี่โดยไม่พิจารณาค่าความต้านทานในระบบได้  
จากมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.012-1979 และ IEC 60871-1 ดังสมการ (2.15) ถึง (2.17)

จากมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.012-1979

$$I_{\max} = 1917 \sqrt{\frac{kV_{LL} (I_1)(I_2)}{L_{eq} (I_1 + I_2)}} \quad (2.15)$$

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{f_s \times kV_{LL} (I_1 + I_2)}{L_{eq} \times (I_1)(I_2)}} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$I_{\max}$  = ค่ายอดของกระแสฟุ้งเข้า (A)

$f$  = ความถี่ของกระแสฟุ้งเข้า (kHz)

$f_s$  = ความถี่ของระบบ (Hz)

$kV_{LL}$  = แรงดันระหว่างสาย (kV)

$I_1$  = กระแสของชุดตัวเก็บประจุที่จะสับสวิตช์ (A, rms)

$I_2$  = กระแสของชุดตัวเก็บประจุที่สับสวิตช์แล้ว (A, rms)

$L_{eq}$  = ความเหนี่ยวนำรวมระหว่างชุดตัวเก็บประจุ ( $\mu$ H)

จากมาตรฐาน IEC 60871-1

$$I_s = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{X_C X_L}} \quad \text{โดย } X_C = 3U^2 \left( \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right) \cdot 10^{-6} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$I_s$  = ค่ายอดของกระแสฟุ้งเข้า (A)

$U$  = แรงดันเฟส (V)

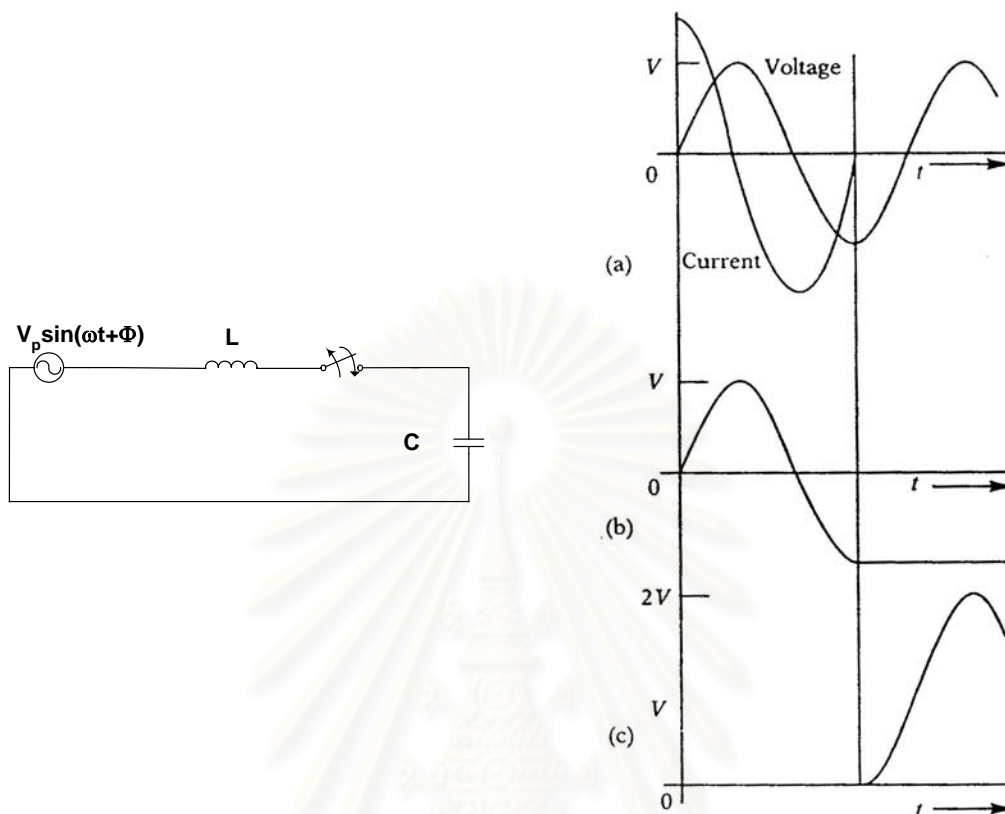
$X_C$  = อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุต่อเฟส ( $\Omega$ )

$X_L$  = อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำต่อเฟส ( $\Omega$ )

$Q_1$  = กำลังรีแอกทีฟของชุดตัวเก็บประจุที่จะสับสวิตช์ (Mvar)

$Q_2$  = ผลรวมของกำลังรีแอกทีฟของชุดตัวเก็บประจุที่สับสวิตช์แล้ว (Mvar)

2.3.2 การปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ



(a) แรงดันและกระแสของระบบ (b) แรงดันตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุ (c) แรงดันตกคร่อมสวิตช์

รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

โดยปกติแล้วการปลดสวิตช์ของชุดตัวเก็บประจุจะทำในขณะที่กระแสเป็นศูนย์ ซึ่งในขณะนั้นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเท่าแรงดันค่ายอด ( $V_p$ ) และเมื่อเวลาผ่านไปครึ่งรอบหลังการปลดสวิตช์ แรงดันของระบบจะเป็นค่ายอดแรงดันอีกครั้งแต่จะกลับขั้วกับแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่หน้าสัมผัสของสวิตช์มีค่าความต่างศักย์ถึง  $2V_p$  หากค่าแรงดันตกคร่อมหน้าสัมผัสที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้มีค่ามากกว่าค่าความคงทนได้ของไดอิเล็กตริก (dielectric strength) จะทำให้เกิดการเกิดเบรกดาวไนในก๊าซที่อยู่ระหว่างหน้าสัมผัสและนำไปสู่การเกิดการอาร์ก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า อาร์กซ้ำ เมื่อเกิดการอาร์กซ้ำจะเกิดการออสซิลเลชันระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ โดยมีสมการที่อธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ดังนี้ [6],[7]

$$V_p \sin(\omega t) = L \frac{di}{dt} + V_c \tag{2.18}$$



การออสซิลเลชันของวงจร LC ที่เกิดขึ้นจะเป็นความถี่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ของระบบ ดังนั้นค่า  $V_p \cos(\omega t)$  สามารถคิดเป็นค่าคงที่  $V_p$  ได้ จากนั้นทำการแก้สมการจะได้แรงดันเกินสวิตซ์ซึ่งเนื่องจากการเกิดอาร์กซ์่าดังนี้

$$V_c(t) = V_p - [V_p - V_c(0)] \cos(\omega_0 t) \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

จากนั้นสามารถหากระแสเกินสวิตซ์ได้จากสมการ

$$i_c = C \frac{dv}{dt} \quad (2.20)$$

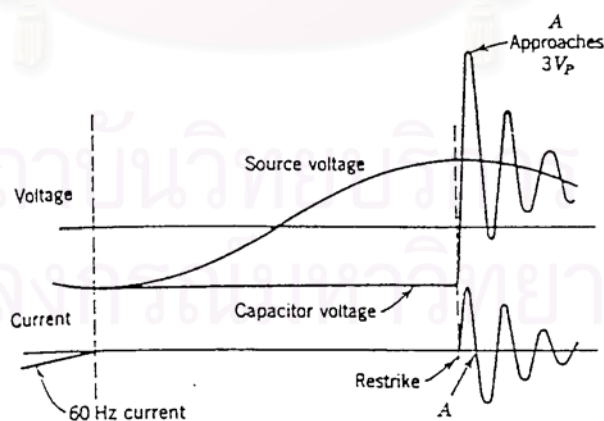
ได้กระแสเกินสวิตซ์ซึ่งเนื่องจากการเกิดอาร์กซ์่าดังนี้

$$i_c(t) = [V_p - V_c(0)] \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\omega_0 t) \quad (2.21)$$

และสามารถหาความถี่ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.19) พบว่าเมื่อเกิดการอาร์กซ์่าจะทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วขณะมีค่าประมาณ  $3 V_p$  (ที่จุด A ในรูปที่ 2.5)

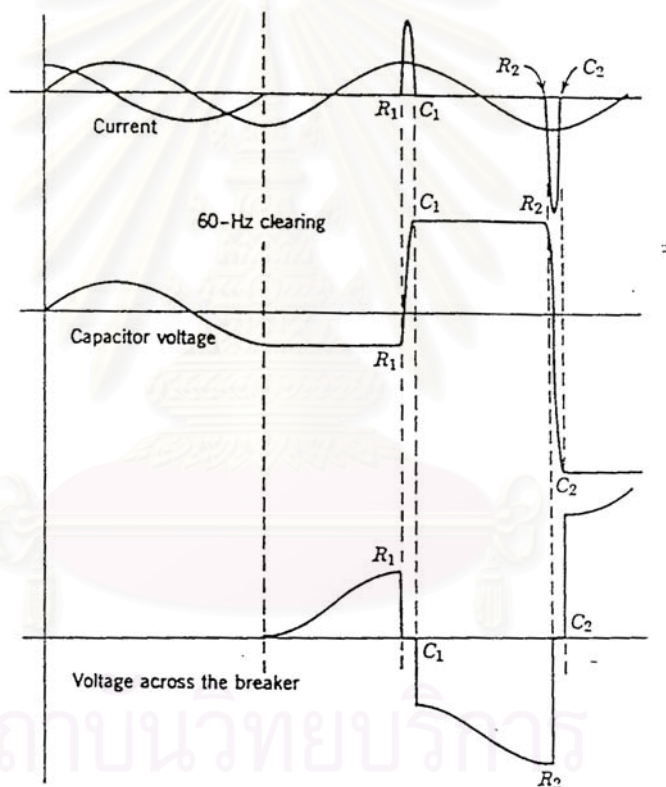


รูปที่ 2.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อเกิดอาร์กซ์่าที่แรงดันค่ายอด

หากสวิตซ์สามารถตัดอาร์กซ์่าเนื่องจากการเกิดอาร์กซ์่าเมื่อกระแสความถี่สูงผ่านศูนย์ได้ จะเกิดแรงดันค้างที่ตัวเก็บประจุมีขนาด  $3 V_p$  และเมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายเพิ่มจนมีแรงดันขนาด

4  $V_p$  ตกคร่อมสวิตช์ ซึ่งมีโอกาสเกิดอาร์กซ้ำได้สูงมาก หากมีการเกิดอาร์กซ้ำอีกครั้ง ค่ากระแสเกินสวิตช์ที่เกิดจะมีค่าเป็นสองเท่าของการเกิดอาร์กซ้ำครั้งแรกเพราะแรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่า  $2 \times 2V_p = 4V_p$  และแรงดันที่ตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนจาก  $+3 V_p$  เป็น  $-5 V_p$  และหากเหตุการณ์เช่นนี้เกิดซ้ำอีกก็จะทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นเป็น  $+7 V_p, -9 V_p$  จนกระทั่งเกิดการวับไฟตามผิวของตัวเก็บประจุหรือ ตัวเก็บประจุเสียหายเนื่องจากแรงดันหรือกระแสเกิน ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า อาร์กซ้ำหลายครั้ง (multiple restriking)

รูปที่ 2.6 แสดงรูปคลื่นแรงดันเนื่องจากการอาร์กซ้ำหลายครั้ง โดย  $R_s$  แทนการลัดับการเกิดอาร์กซ้ำ และ  $C_s$  แทนลัดับการดับอาร์กซ้ำ



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นแรงดันเมื่อเกิดอาร์กซ้ำหลายครั้ง

### บทที่ 3

## วิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

การสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุทำให้เกิดแรงดันหรือกระแสเกินสวิตช์ซึ่ง หากแรงดันหรือกระแสดังกล่าวมีค่าสูงเมื่อเทียบกับภาวะปกติ อาจมีผลกระทบต่อระบบได้เช่น ทำให้อุปกรณ์เสียหายหรือเสื่อมสภาพก่อนกำหนด

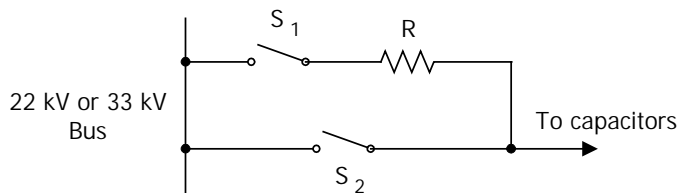
ในกรณีการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุเพียงชุดเดียวความรุนแรงของกระแสจะไม่มีผลกระทบต่อระบบมากนักเพราะขนาดของกระแสจะขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ แต่หากมีการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุในขณะที่มีชุดตัวเก็บประจุอื่นต่ออยู่ ค่ากระแสเกินสวิตช์ซึ่งจะขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างตัวเก็บประจุแทน ซึ่งโดยปกติจะมีค่าสูงกว่าการสับชุดตัวเก็บประจุเพียงชุดเดียว

ส่วนกรณีการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุจะเกิดปัญหาขึ้นหากมีการอาร์คซ้ำทำให้แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งที่ตัวเก็บประจุอาจมีค่าสูงถึง 3 p.u. อาจทำให้ตัวเก็บประจุเกิดความเสียหายได้

จากปัญหาข้างต้นจึงมีการแก้ปัญหาโดยการหาวิธีการลดทอนหรือควบคุมเพื่อช่วยในการจำกัดหรือลดผลของแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งให้มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุด ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการควบคุมการเกิดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุที่นิยมใช้โดยทั่วไป

#### 3.1 การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ (Pre-insertion resistor)

ตัวต้านทานขนานกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ [8]-[10] จะเป็นตัวช่วยลดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุโดยตัวต้านทานจะแบ่งแรงดันระหว่างตัวต้านทาน, ระบบไฟฟ้า และชุดตัวเก็บประจุ ทั้งยังช่วยหน่วงทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 3.1 การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์

หลักการทำงานคือ สับสวิตช์ S1 ก่อน แล้วสับสวิตช์ S2 ตาม โดยทั่วไปแล้วทำการสับสวิตช์ S2 หลังสับสวิตช์ S1 แล้ว ไม่เกิน 20 มิลลิวินาที ส่วนการปลดวงจรทำตรงกันข้ามกับสับวงจรคือปลดสวิตช์ S2 ก่อน

สำหรับขนาดของตัวต้านทานที่เหมาะสมเพื่อจำกัดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ควรมีค่าเท่ากับขนาดอิมพีแดนซ์เสิร์จ

$$R_{\text{optimum}} \approx \sqrt{L/C} \quad (3.1)$$

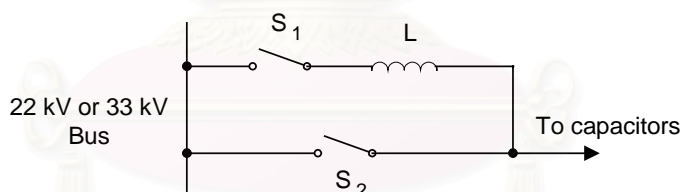
เมื่อ

L = ความเหนี่ยวนำของแหล่งกำเนิด

C = ความจุไฟฟ้าของชุดตัวเก็บประจุ

สำหรับวิธีนี้มีผลดีในการลดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งความถี่ต่ำ แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับการใช้ในกรณี Back to Back เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากขนาดของกระแสพุ่งเข้าที่สูงนั่นเอง และไม่สามารถลดความถี่ที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ข้อเสียอีกประการคือเมื่อค่าวงจรเปลี่ยนไปอาจต้องแก้ไขขนาดของตัวต้านทานด้วย

### 3.2 การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ (Pre-insertion inductor)



รูปที่ 3.2 การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์

สำหรับการใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ [8]-[10] จะเป็นตัวช่วยลดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ โดยมีหลักการใช้เหมือนการใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ แต่ระยะเวลาในการสับ S1 โดยทั่วไปประมาณ 7-12 รอบก่อนสับ S2 โดยตัวเหนี่ยวนำจะลดค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นขณะสับสวิตช์ S1 ซึ่งวิธีนี้จะได้ประสิทธิภาพเมื่อค่าความเหนี่ยวนำที่นำมาใช้มีค่าสูงกว่าค่าความเหนี่ยวนำของระบบไฟฟ้า โดยปรกติค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมจะมีค่าประมาณสองเท่าของค่าความเหนี่ยวนำของระบบ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของระบบเป็นส่วนกลับกับขนาดกระแสลัดวงจร ดังนั้นหากขนาดกระแสลัดวงจรมีค่าต่ำก็ต้องใช้ความเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ที่มีค่าสูงจึงเพียงพอกับการลดทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้น ทำให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่นำมาติดตั้งอาจมี

ขนาดใหญ่ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการติดตั้งได้ จึงมีการแก้ไขโดยเพิ่มความต้านทานเข้ามาในชุดตัวเหนี่ยวนำ ทำให้สามารถลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำลงได้

การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดานสวิตช์ช่วยในการจำกัด  $dv/dt$  ของแรงดันเปลี่ยนแปลงเริ่มต้น ซึ่งเหมาะสมกับการใช้ในกรณี Back to Back เพราะสามารถจำกัดทั้งขนาดและความถี่ของกระแสพุ่งเข้าได้ แต่มีข้อเสียคือแรงดันเกินที่ปลายสายส่งที่ระยะทางไกล อาจมีค่าสูงกว่าเมื่อไม่มีการควบคุมแรงดันหรือกระแสเกินสวิตช์ได้

### 3.3 การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ

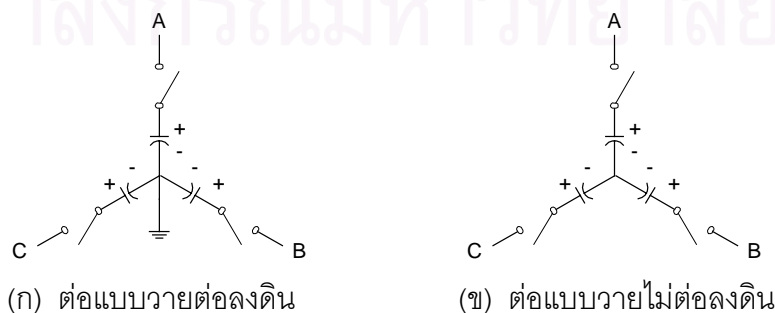
การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ [8],[11],[12] มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมกระแสเกินสวิตช์ซึ่งไหลเข้าอย่างรุนแรงเนื่องจากการสับชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back และกระแสเกินที่ไหลออกอย่างรุนแรงเนื่องจากความผิดพลาด(fault)บนบัสหรือจุดที่ใกล้กับตัวเก็บประจุ สำหรับขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งต่ำที่สุดควรมีขนาดประมาณ 6 % หรือ 7 % ของขนาดอิมพีแดนซ์ของชุดตัวเก็บประจุ

การใช้วิธีดังกล่าวต้องสูญเสียกำลังรีแอกทีฟจากชุดตัวเก็บประจุส่วนหนึ่งไปเนื่องจากการต่อตัวเหนี่ยวนำนี้

### 3.4 การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์ (Synchronous Closing Control)

เนื่องจากขนาดของแรงดันเกินสวิตช์ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับมุมของแรงดันที่ทำการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุด้วย โดยที่ขนาดของแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งจะมีขนาดสูงเมื่อทำการสับสวิตช์ขณะแรงดันที่บัสมีค่าใกล้ยอดคลื่น และจะมีขนาดต่ำเมื่อแรงดันที่บัสมีค่าใกล้ศูนย์ [8]-[11]

จากผลที่ได้ให้นำมาใช้เป็นหลักการทำงานของชุดควบคุมการปิดสวิตช์ขณะแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ เพื่อลดแรงดันเกินสวิตช์เนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ นั่นคือควบคุมให้สับสวิตช์ (หรือเซอริกิตเบรกเกอร์) ในแต่ละเฟสแยกเป็นอิสระต่อกัน โดยเวลาที่ใช้ในการสับสวิตช์ทั้งหมดคือ เวลาที่อุปกรณ์ทำงาน (y) บวกกับตัวแปรของเวลาในแต่ละ เฟส (a, b และ c) นอกจากนี้เวลาการสับสวิตช์จะขึ้นกับลักษณะการต่อของชุดตัวเก็บประจุด้วยดังนี้



รูปที่ 3.3 การต่อชุดตัวเก็บประจุ

### 3.4.1 ต่อแบบวายต่อลงดิน

ให้เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง และเลือกเวลาการสับสวิตช์แต่ละเฟสเมื่อแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ การกำหนดลำดับของเวลาของระบบไฟฟ้าสามเฟส จากกระแสจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ทุกๆ มุม 60 องศา หรือ ทุกๆ 3.33 มิลลิวินาที ฉะนั้นเวลาที่ใช้ในการสับสวิตช์จะเป็นดังนี้

$$\text{เฟส A : } a + y_1 = n \times 10 \quad \text{ms.}$$

$$\text{เฟส B : } b + y_2 = n \times 10 - 3.33 \quad \text{หรือ} \quad +3.33 \quad \text{ms.}$$

$$\text{เฟส C : } c + y_3 = n \times 10 - 3.33 \quad \text{หรือ} \quad +6.66 \quad \text{ms.}$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนเต็มที่  $n \times 10 > y$

$y_1, y_2, y_3$  คือ เวลาที่ใช้ในการสับสวิตช์ของอุปกรณ์ในแต่ละเฟส

$a, b, c$  คือ เวลาหน่วงของแต่ละเฟส

### 3.4.2 ต่อแบบวายไม่ต่อลงดิน

ในกรณีนี้ให้เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง แต่จะสับสวิตช์ของเฟส A และ B พร้อมกันเมื่อแรงดันระหว่างเฟส A และ B มีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นสับสวิตช์ของเฟส C เมื่อเวลาผ่านไป 5 ms (แรงดันที่เฟส C มีค่าเป็นศูนย์)

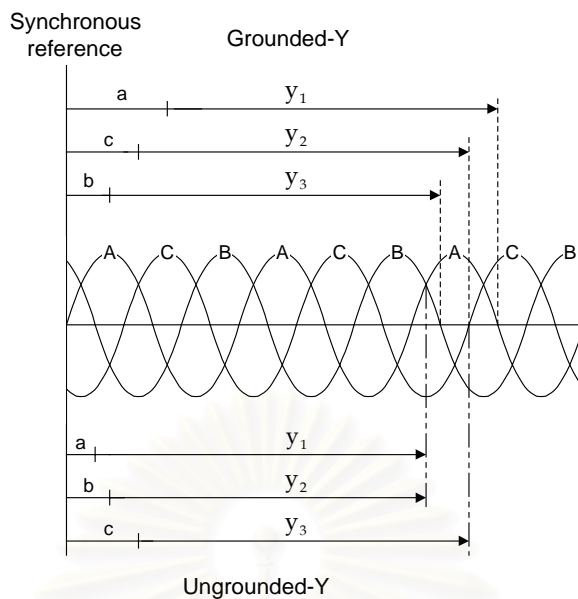
ที่ต้องสับสวิตช์ของเฟส A และ B พร้อมกันเพื่อป้องกันกระแสไหลในวงรอบปิด เมื่อพิจารณารูปที่ 3.3 (ข) พบว่าถ้าสับสวิตช์ที่เฟส A เพียงเฟสเดียว และปิดในขณะที่แรงดันของ เฟส A มีค่าเป็นศูนย์ เฟส A จะเสมือนว่าเป็นดิน เพราะฉะนั้นจะทำให้เกิดกระแสไหลจากเฟสที่เหลืออีก 2 เฟส ไปเฟส A ได้

$$\text{เฟส A : } a + y_1 = (n \times 10) - 3.33 - 5 \quad \text{ms.}$$

$$\text{เฟส B : } b + y_2 = (n \times 10) - 3.33 - 5 \quad \text{ms.}$$

$$\text{เฟส C : } c + y_3 = (n \times 10) - 3.33 \quad \text{ms.}$$





รูปที่ 3.4 ภาพแสดงเวลาในการสับสวิตช์

ข้อดีของวิธีการนี้คือ ชุดควบคุมนี้ไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์ของระบบ ดังนั้นไม่ว่าจะสับชุดตัวเก็บประจุในกรณีของสับชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว หรือแบบ Back to Back วิธีการนี้ยังสามารถใช้งานได้

ข้อเสียวิธีนี้คือ ต้องรักษาเวลาในการสับสวิตช์ดังที่กล่าวไปแล้วให้ได้ เพราะเวลาที่ผิดพลาดไปเพียงเล็กน้อยอาจทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งที่มีขนาดสูงได้

### 3.5 การใช้กับดักฟ้าผ่าแบบ MOV

การใช้กับดักฟ้าผ่าแบบ MOV (metal oxide varistor) สามารถใช้ป้องกันตัวเก็บประจุจากแรงดันเกินฟ้าผ่าและใช้ป้องกันลดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งจากการเกิดอาร์กข้ามขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ [13]-[16] ซึ่งมีข้อดีหลายประการดังนี้

- ป้องกันตัวเก็บประจุเสียหายเนื่องจากการเกิดอาร์กข้ามในสวิตช์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์
- ลดโอกาสในการเกิดอาร์กข้ามหลายครั้ง
- ยืดอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุโดยกำจัดแรงดันเกิน
- เป็นอุปกรณ์ในการป้องกันภาวะรีโซแนนซ์ที่เกิดอย่างไม่คาดคิดซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุเสียหาย
- จำกัดทรานเซียนต์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับสวิตช์ซึ่งตัวเก็บประจุซึ่งจะส่งผ่านไปยังระบบและเกิดการรบกวนอุปกรณ์ที่มีความไวสูง
- ใช้ป้องกันฟ้าผ่าสำหรับชุดตัวเก็บประจุที่ต่อกับสายส่ง

การเลือกกับดักฟ้าผ่าสำหรับป้องกันชุดตัวเก็บประจุต้องพิจารณาค่าดังต่อไปนี้

### 3.5.1 แรงดันใช้งานต่อเนื่อง (Continuous operating voltage, $U_c$ )

แรงดันใช้งานต่อเนื่องคือแรงดันต่อเนื่องสูงสุดที่ปรากฏระหว่างขั้วของกับดักฟ้าผ่าโดยการเลือกค่า  $U_c$  ต้องพิจารณาถึงค่าแรงดันใช้งานสูงสุดในภาวะปกติของตัวเก็บประจุซึ่งอนุญาตให้มีแรงดันเกินได้ 5%-10% และต้องพิจารณาลักษณะการต่อกับดักฟ้าผ่าด้วย เช่น กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์หรือระหว่างเฟส-นิวทรัล ค่า  $U_c$  จะต้องใช้ค่าแรงดันเฟส เป็นต้น

### 3.5.2 แรงดันพิกัด (Rated voltage, $U_r$ )

แรงดันพิกัดเป็นการวัดความสามารถในการรับแรงดันเกินของกับดักฟ้าผ่า ซึ่งมีหลักการคำนวณจากแรงดันเกินชั่วขณะ (TOV) โดยแบ่งเป็นกรณีได้ดังนี้

#### 3.5.2.1 กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์

กรณีที่ 1 ทราบขนาดและระยะเวลาของ TOV

- ระยะเวลา  $\leq 1$  s เลือก  $U_r \geq 0.88 \times \text{TOV}$
- ระยะเวลา  $\leq 10$  s เลือก  $U_r \geq 0.93 \times \text{TOV}$
- ระยะเวลา  $\leq 100$  s เลือก  $U_r \geq \text{TOV}$
- ระยะเวลา  $< 2$  h เลือก  $U_r \geq 1.1 \times \text{TOV}$
- ระยะเวลา  $\geq 2$  h พิจารณาค่า TOV เป็นค่าต่อเนื่องและเลือก  $U_c$  เท่ากับค่า TOV

กรณีที่ 2 ไม่ทราบค่า TOV แบ่งได้เป็น

- ระบบต่อลงกราวด์ สมมุติค่า  $\text{TOV} = 1.55 U_s$ 
  - ระยะเวลา  $\leq 1$  s เลือก  $U_r \geq 0.88 \times \text{TOV}$
- ระบบไม่ต่อลงกราวด์ สมมุติค่า  $\text{TOV} = 1.73 U_s$ 
  - ระยะเวลา  $\leq 10$  s เลือก  $U_r \geq 0.93 \times \text{TOV}$
  - ระยะเวลา  $\leq 100$  s เลือก  $U_r \geq \text{TOV}$
  - ระยะเวลา  $< 2$  h เลือก  $U_r \geq 1.1 \times \text{TOV}$
  - ระยะเวลา  $\geq 2$  h พิจารณาค่า TOV เป็นค่าต่อเนื่องและเลือก  $U_c$  เท่ากับค่าแรงดันระบบที่ใช้งาน

เมื่อ  $U_s$  เป็นค่าแรงดันเฟส

### 3.5.2.2 กั๊บดั๊กฟ้าผ่าต่อระหว่แงเฟส-นืวทรอล

นืวทรอนืนี้ค้ำนวนแบบเดืยวกับทรอนืต่อระหว่แงเฟส-กราวด์ แต่ส้ำนถลดระดับแรงดันพืกัลดงม้ได้เพระเมื่อเกดการล้ดวงจรวลงนืน กั๊บดั๊กฟ้าผ่าต่อระหว่แงเฟส-นืวทรอลจะร้บค้่า TOV นืยกว่ากั๊บดั๊กฟ้าผ่าต่อระหว่แงเฟส-กราวด์ แต่ห้ากห้ากการเลือกแรงดันพืกัดของกั๊บดั๊กฟ้าผ่าต่อระหว่แงเฟส-นืวทรอลเท้ากับแบบเฟส-กราวด์ ก้เพื่อห้มีส่วนเผื่อ(safety margin)

### 3.5.2.3 กั๊บดั๊กฟ้าผ่าต่อระหว่แงเฟส-นืวทรอลและนืวทรอล-กราวด์

นืวทรอนืนี้ค้ำนวนแบบเดืยวกับทรอนืต่อระหว่แงเฟส-นืวทรอลเพืยงแต่กั๊บดั๊กฟ้าผ่าที่ต่อระหว่แงนืวทรอล-กราวด์นื้่นส้ำนถเลือกใช้แรงดันพืกัดต้่าๆแทนที่จ้จะใช้กั๊บดั๊กฟ้าผ่าที่มีแรงดันพืกัดเท้ากับกั๊บดั๊กฟ้าผ่าที่ต่อระหว่แงเฟส-นืวทรอล

### 3.5.3 ความส้ำนถนืในการร้บพลังงน (Energy Absorbtion)

ความส้ำนถนืในการร้บพลังงนของกั๊บดั๊กฟ้าผ่าจะช้่นกับขนาดของกระแสดี้สชาร์จ้ ซึ่งส้ำนถแบ่งระดับพลังงนตามม้ตรฐน IEC 60099-4 โดยการเกดอาร์กช้่าจะมีค้่ากระแสดี้เกดช้่นสูง ดั่งนื้่นความส้ำนถนืในการร้บพลังงนของกั๊บดั๊กฟ้าผ่าจ้เป็นนื้่งนืตัวแปรที่ต้องน้ามาพืจารณ้าเพื่อห้ได้กั๊บดั๊กฟ้าผ่าที่เหม้าสมกับการบ้องกันชุดต้วเกบประจุ โดยพลังงนที่กั๊บดั๊กฟ้าผ่าจะร้บห้าได้จากสมการ

$$E_c = \left( V_o^2 - V_a^2 \right) \frac{C}{2} \quad (3.2)$$

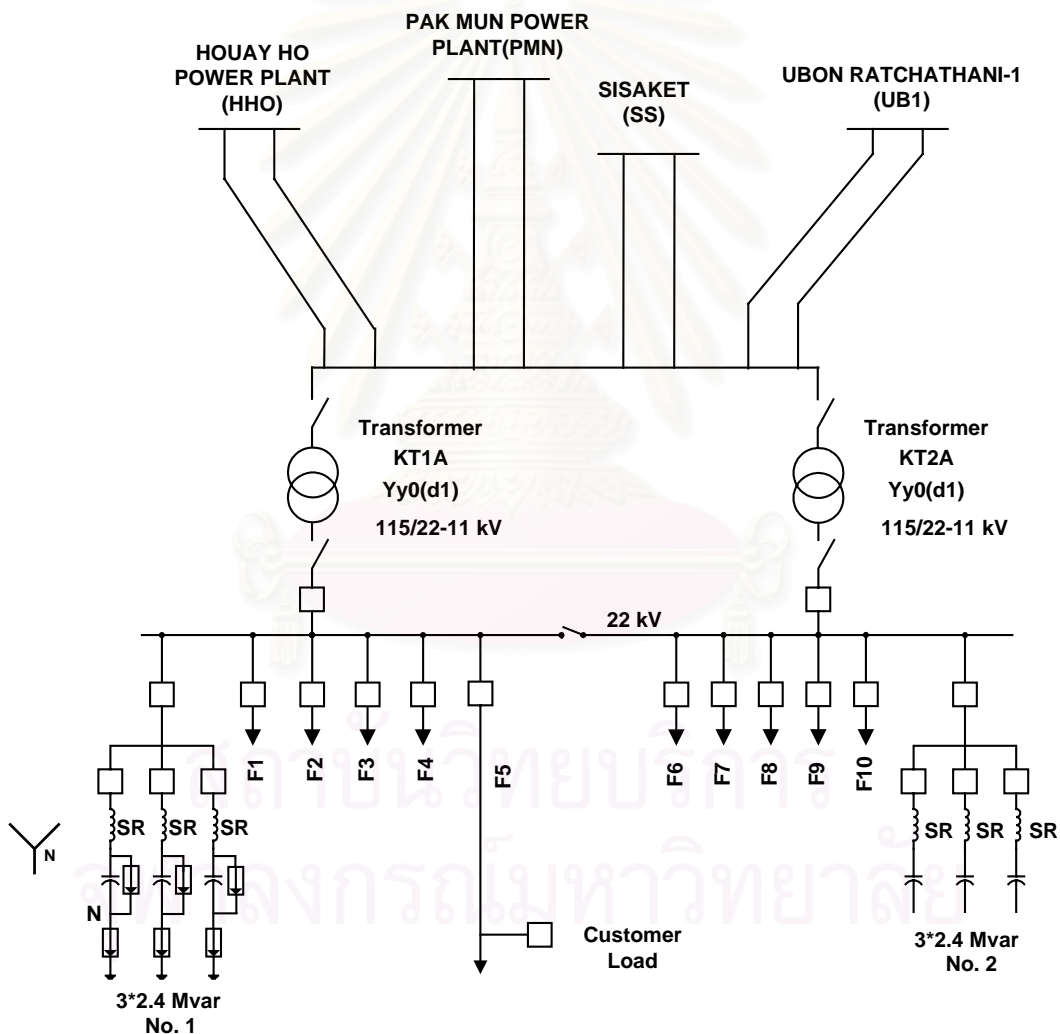
โดย

- $E_c$  ค้ือพลังงนที่กั๊บดั๊กฟ้าผ่าร้บ
- $C$  ค้ือความเกบประจุของชุดต้วเกบประจุ
- $V_o$  ค้ือแรงดันก้อนที่กั๊บดั๊กฟ้าผ่าจะท้างน
- $V_a$  ค้ือแรงดันหล้่งที่กั๊บดั๊กฟ้าผ่าท้างน

## บทที่ 4

### อุปกรณ์และวิธีการตรวจวัดรูปคลื่นที่สถานีไฟฟ้าย่อย

บทนี้แนะนำเสนออุปกรณ์และวิธีการตรวจวัดรูปคลื่นที่สถานีไฟฟ้าที่ใช้เป็นกรณีศึกษาสำหรับกรณีศึกษาที่ได้รับคำแนะนำจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในการใช้สถานที่เพื่อทำการตรวจวัดรูปคลื่น รวมทั้งการให้ข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการจำลอง โดยสถานีไฟฟ้าย่อยที่เป็นกรณีศึกษามีแบบผังของระบบดังนี้



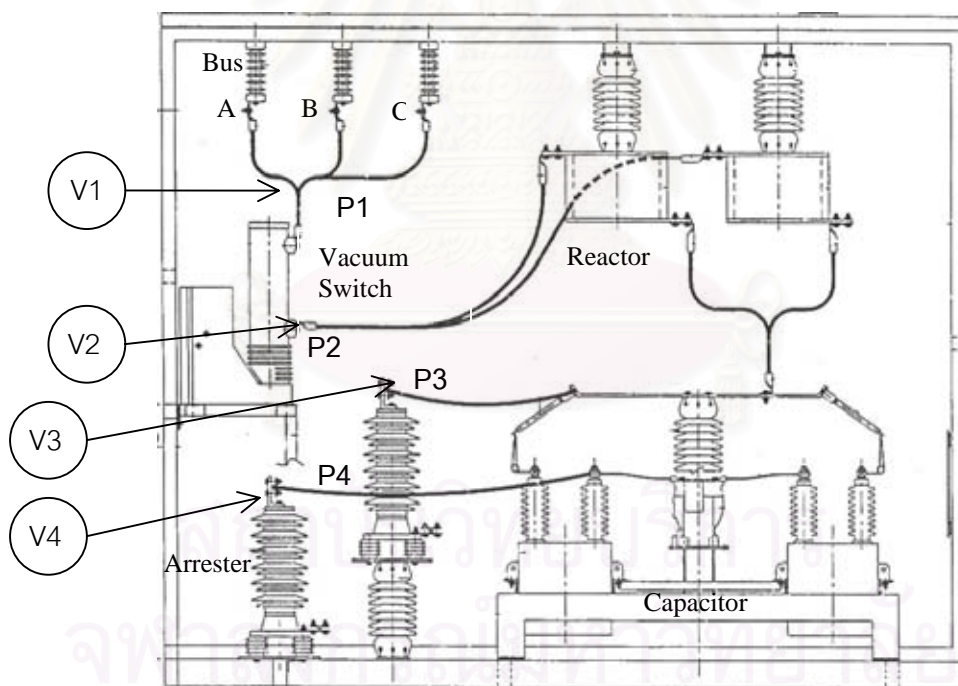
รูปที่ 4.1 แบบผังสถานีไฟฟ้าย่อย

การตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลจะวัดแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุชุด No.1 ซึ่งประกอบด้วยชุดตัวเก็บประจุจำนวน 3 ชุด ขนาดแต่ละชุด 2.4 Mvar โดยวัดแรงดันที่เฟส A ของชุดตัวเก็บประจุชุด

ที่ 1 สำหรับหม้อแปลงจะใช้งานด้านหม้อแปลง KT1A ส่วนหม้อแปลง KT2A และชุดตัวเก็บประจุ ชุด No. 2 จะปลดออก ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจวัดจะนำไปเปรียบเทียบกับผลของการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP/ATPต่อไป

#### 4.1 การตรวจวัดรูปคลื่นแรงดัน

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีความสามารถในการจับรูปคลื่นแรงดันได้โดยที่ไม่ทำให้รูปคลื่นที่ได้มีความผิดเพี้ยน จึงมีการทดสอบอุปกรณ์ในการตรวจวัดก่อนที่จะนำไปใช้งาน โดยป้อนแรงดันสวิตซ์ซึ่ง 250/2500  $\mu$ s เพื่อตรวจรูปคลื่นที่ได้ ในที่นี้มีอุปกรณ์ 2 ชนิดที่นำมาทดสอบได้แก่ หม้อแปลงแรงดัน(voltage transformer) และโวลเตจดีไวเดอร์ (voltage divider)พร้อมตัวลดทอนสัญญาณ (attenuator) หลังการทดสอบพบว่าโวลเตจดีไวเดอร์สามารถตรวจวัดแรงดันสวิตซ์ซึ่ง 250/ 2500  $\mu$ s ได้ดีกว่าหม้อแปลงแรงดัน ดังนั้นจึงใช้โวลเตจดีไวเดอร์เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดรูปคลื่น โดยทำการตรวจวัดที่เฟส A ทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือที่จุด P1 ถึง P4 สำหรับตำแหน่งที่ติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์ดังรูปที่ 4.2 และรูปในการติดตั้งจะแสดงดังรูปที่ 4.3



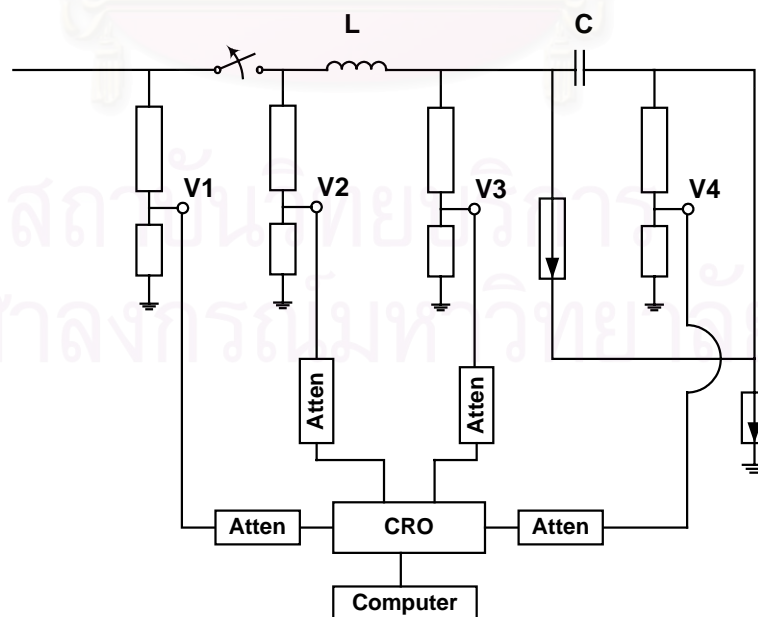
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งติดตั้งโวลเตจดีไวเดอร์

- เมื่อ
- V1 คือโวลเตจดีไวเดอร์ที่ตรวจวัดแรงดันระหว่างบัสกับกราวด์ที่จุด P1
  - V2 คือโวลเตจดีไวเดอร์ที่ตรวจวัดแรงดันระหว่างหน้าตัวเหนี่ยวนำกับกราวด์ที่จุด P2
  - V3 คือโวลเตจดีไวเดอร์ที่ตรวจวัดแรงดันระหว่างหน้าชุดตัวเก็บประจุกับกราวด์ที่จุด P3
  - V4 คือโวลเตจดีไวเดอร์ที่ตรวจวัดแรงดันระหว่างนิวทรอลกับกราวด์ที่จุด P4



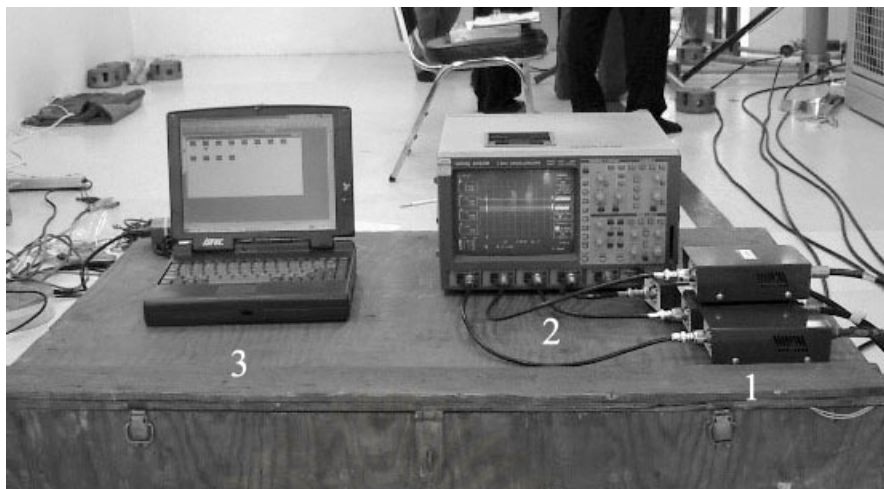
รูปที่ 4.3 การติดตั้งโวลต์จดีไวเดอร์

สำหรับส่วนการแสดงผลและจัดเก็บข้อมูลรูปคลื่นแรงดันนั้นจะใช้ออสซิลโคปเป็นอุปกรณ์ในการแสดงผลรูปคลื่นแรงดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยรับสัญญาณผ่านโวลต์จดีไวเดอร์และตัวลดทอนสัญญาณและส่งข้อมูลรูปคลื่นแรงดันจากออสซิลโคปไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อจัดเก็บข้อมูลดังรูปที่ 4.4 และแสดงรูปอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 วงจรการตรวจวัดแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุ





รูปที่ 4.5 อุปกรณ์ตรวจวัดและบันทึกรูปคลื่น

1) ตัวลดทอน 2) ออสซิลโลสโคป 3) โน้ตบุค

สำหรับรูปคลื่นกระแสจะนำรูปคลื่นแรงดันแทนในสมการ

$$I_c = C \frac{dV}{dt} \quad (4.1)$$

เนื่องจากมีคลื่นรบกวนเข้ามาขณะตรวจวัดจึงต้องกรองคลื่นรบกวนออกไปเสียก่อนโดยใช้ตัวกรองแบบดิจิทัล (digital filter) แล้วจึงแทนค่าแรงดันในสมการ (4.1)

#### 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดัน

จะระบุถึงพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดรูปคลื่นจากหัวข้อ 4.1 ซึ่งมีดังนี้

1. โวลเตจดีไวเดอร์ (V1) พิกัด 100 kV พร้อมตัวลดทอนสัญญาณ มีอัตราส่วนแรงดันรวม 1 : 4807
2. โวลเตจดีไวเดอร์ (V2) พิกัด 200 kV พร้อมตัวลดทอนสัญญาณ มีอัตราส่วนแรงดันรวม 1 : 6218.6
3. โวลเตจดีไวเดอร์ (V3) พิกัด 200 kV พร้อมตัวลดทอนสัญญาณ มีอัตราส่วนแรงดันรวม 1 : 5944.5
4. โวลเตจดีไวเดอร์ (V4) พิกัด 100 kV พร้อมตัวลดทอนสัญญาณ มีอัตราส่วนแรงดันรวม 1 : 4260.2
5. ออสซิลโลสโคป มีอัตราซ้กตัวอย่าง (sampling rate) 1 GS/s
6. คอมพิวเตอร์

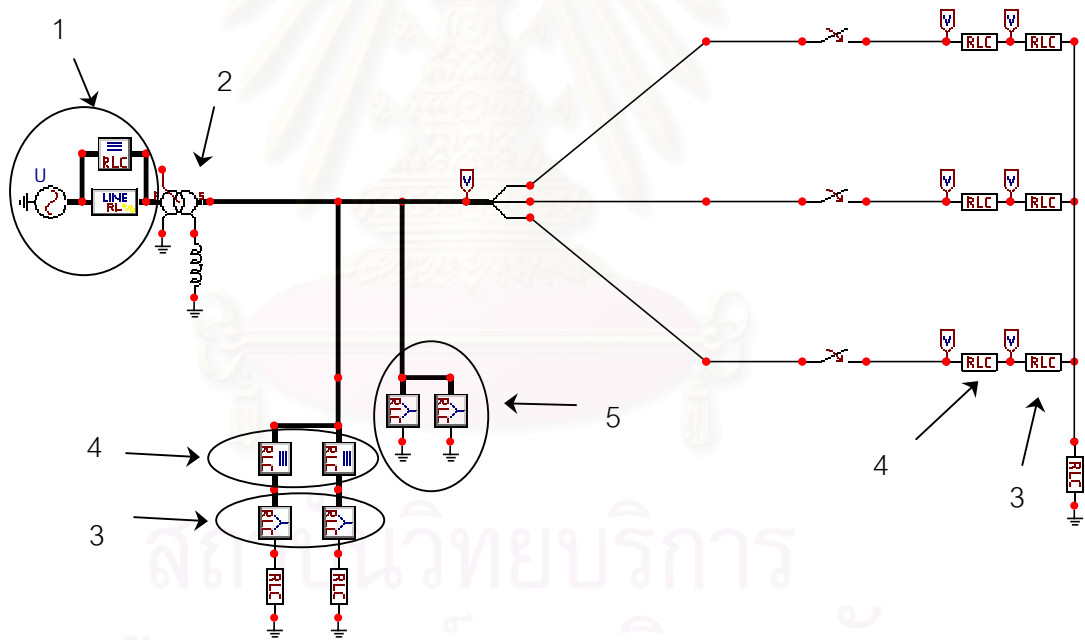
## บทที่ 5

### กรณีศึกษาการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้าย่อย

บทนี้นำเสนอแบบจำลองของสถานีไฟฟ้าย่อยและผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการตรวจวัดกับผลที่ได้จากการจำลอง พร้อมทั้งศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบเมื่อสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อดูผลที่เกิดขึ้น

#### 5.1 ข้อมูลและแบบจำลองของสถานีไฟฟ้าย่อย

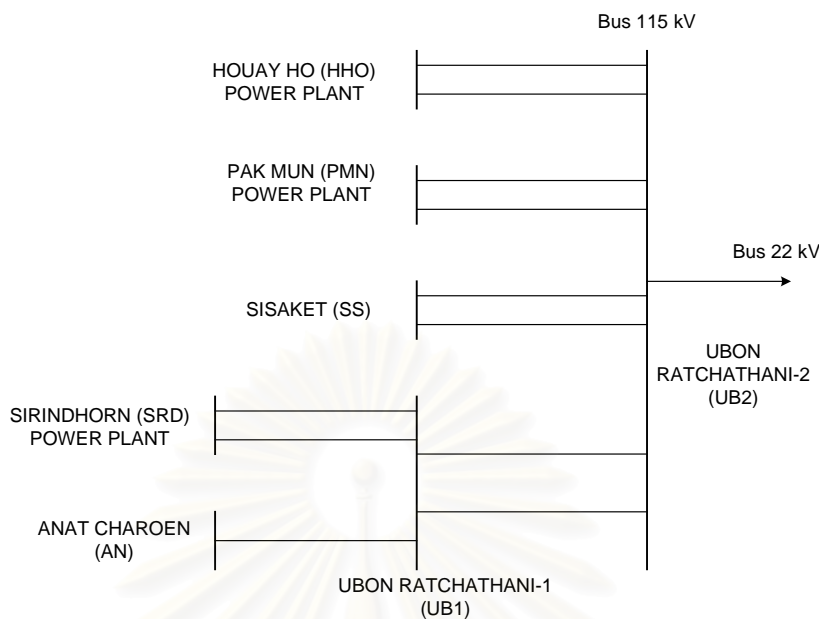
จะนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ใช้ในโปรแกรม EMTP/ ATP ซึ่งจะได้แบบจำลองดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แบบจำลองสถานีไฟฟ้า

ซึ่งวิธีการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองสถานีไฟฟ้ามี่ดังนี้

### 5.1.1 วงจรป้อนของระบบ



รูปที่ 5.2 ผังวงจรป้อนของระบบ

ส่วนวงจรป้อน (feeding network) ของระบบแสดงดังรูปที่ 5.2 และส่วนที่ 1 ของรูปที่ 5.1 โดยวงจรป้อนนี้เป็นส่วนที่ป้อนพลังงานเข้ามายังสถานีไฟฟ้า ในส่วนนี้สามารถสร้างแบบจำลองแทนวงจรป้อนได้ 3 ประเภทดังนี้

#### 5.1.1.1 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short circuit impedance)

เป็นแบบจำลองที่แทนวงจรป้อนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรต่อขนานกับค่าอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง ในกรณีศึกษาที่ใช้ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ระดับแรงดัน 115 kV หน้าหม้อแปลงลดแรงดัน 115 kV / 22 kV ซึ่งมีค่าดังนี้

$$Z_{1,2} = 0.021 + j0.06938 \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = 0.00381 + j0.04911 \text{ p.u.}$$

เมื่อดำเนินการมาอยู่ในค่าจริง โดย  $Z_{\text{base}} = 115^2/100 = 132.25 \Omega$  จะได้

$$R_{1,2} = 2.7773 \Omega \text{ และ } L_{1,2} = 29.1953 \text{ mH}$$

$$R_0 = 0.8504 \Omega \text{ และ } L_0 = 26.8388 \text{ mH}$$

ส่วนอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่งจากรูปที่ 5.2 พบว่ามีจำนวนสายส่ง 8 สายต่อขนานกันเข้ามายังกรณีศึกษา มีค่าเป็น  $46.056 \Omega$

### 5.1.1.2 สายส่งแบบพารามิเตอร์คงที่ (Constant parameter line)

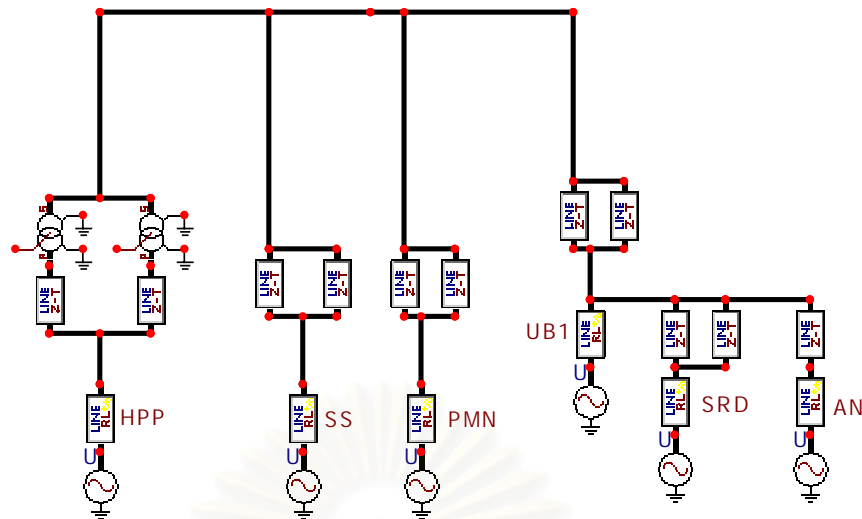
เป็นแบบจำลองที่แทนวงจรป้อนด้วยสายส่งแบบพารามิเตอร์คงที่ประกอบไปด้วย ค่าความต้านทานสูญเสีย  $R = R(f_i) =$  เสรีจิมพีแดนซ์  $Z_0 = Z_0(f_i) = \sqrt{\frac{L}{C}}$  และ ความเร็วเสรีจ  $v = v(f_i) = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  โดย  $f_i$  คือ ความถี่หลักที่สภาวะทรานเซียนต์ สำหรับส่วนถัดไปซึ่งนอกเหนือส่วนที่พิจารณาจะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร โดยข้อมูลจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ข. จากนั้นนำมาคำนวณให้อยู่ในค่าจริง ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2 และแสดงแบบจำลองดังรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร

BusName	Bus (kV)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$L_1$ (mH)	$R_0$ ( $\Omega$ )	$L_0$ (mH)
HHO	230	0	292.8958	0	139.4710
PMN	115	0	45.2995	0	35.0655
SS	115	11.4489	82.8056	0.9760	73.7836
UB1	115	21.7221	142.5639	1.0144	76.8723
SRD	115	6.3824	156.2021	0.0926	9.1230
AN	115	6.8730	50.3281	1.9811	56.0973

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของสายส่ง

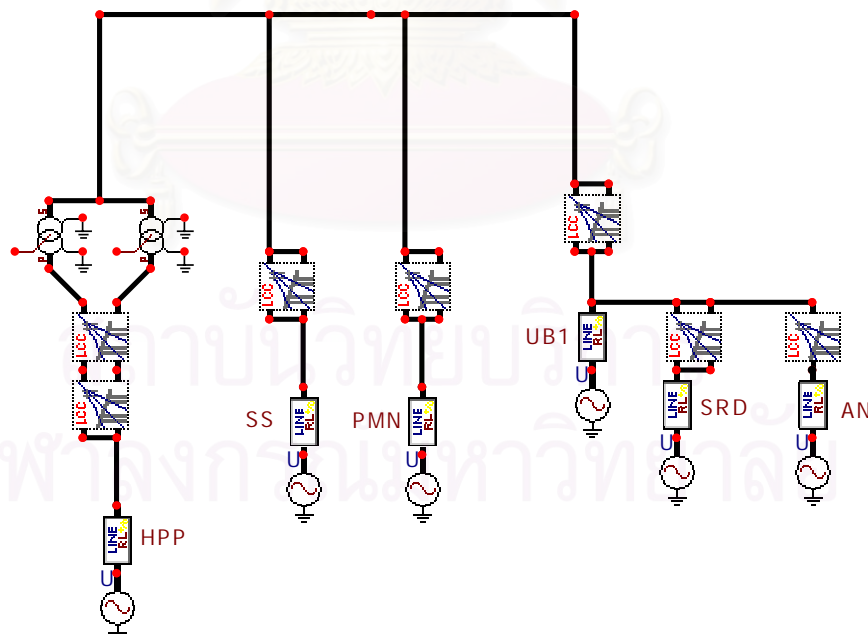
BusName	$R_1$ ( $\Omega$ /km)	$L_1$ (mH/km)	$R_0$ ( $\Omega$ /km)	$L_0$ (mH/km)	$C_1$ ( $\mu$ F/km)	$C_0$ ( $\mu$ F/km)	Length (km)
HHO-UB2	0.0519	1.2521	0.2880	3.9649	0.0088	0.0070	230.236
PMN- UB2	0.1341	1.2162	0.3434	4.3980	0.0091	0.0057	71
SS-UB2	0.1341	1.2162	0.3434	4.3980	0.0091	0.0057	60.2
UB1-UB2	0.1341	1.2162	0.3434	4.3980	0.0091	0.0057	29.9
UB1-SRD	0.3439	1.2854	0.5563	4.5407	0.0086	0.0054	63.31
UB1-AN	0.3411	1.3174	0.6017	4.0992	0.0082	0.0045	65



รูปที่ 5.3 วงจรป้อนแทนด้วยสายส่งแบบพารามิเตอร์คงที่

### 5.1.1.3 สายส่งแบบพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ (Frequency-dependent parameter line)

เป็นแบบจำลองที่แทนวงจรป้อนด้วยสายส่งแบบพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ โดยพิจารณา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นฟังก์ชันความถี่ ซึ่งในการใช้งานจะป้อนข้อมูลของการจัดวางสายส่ง สำหรับส่วนถัดไปซึ่งนอกเหนือส่วนที่พิจารณาจะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร โดยแสดงแบบจำลองดังรูปที่ 5.4 (สำหรับข้อมูลจะแสดงในภาคผนวก ข.)



รูปที่ 5.4 วงจรป้อนแทนด้วยสายส่งแบบพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่

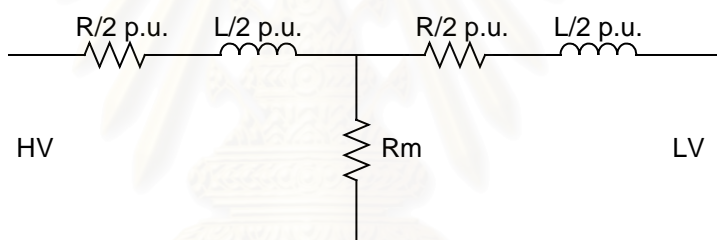
### 5.1.2 หม้อแปลง

แสดงในส่วนที่ 2 ของรูปที่ 5.1 ซึ่งหม้อแปลงที่ใช้เป็นหม้อแปลงลดแรงดัน 115 kV/ 22 kV/ 11 kV ต่อแบบ Yy0(d1) ขนาด 50 MVA มีค่า %Z เท่ากับ 12.28% เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีไม่เพียงพอและด้านตติยภูมิใช้เป็นตัวช่วยจำกัดกระแสผิดพลาดเมื่อเวลาเกิดการผิดพลาดมีได้นำไปใช้งาน จึงจำลองให้เป็นหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด และสมมุติ  $\frac{X}{R} = 10$  [20] ดังนั้นคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

$$R = \sqrt{\frac{\left(\frac{\%Z}{100}\right)^2}{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{12.28}{100}\right)^2}{101}} = 0.012219 \text{ p.u.}$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{0.1228^2 - 0.012219^2} = 0.12219 \text{ p.u.}$$

จาก [17] แนะนำให้แบ่งค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่ได้ข้างต้น ออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน เพื่อแทนค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

ฉะนั้นได้ค่าทางด้านแรงสูงดังนี้

$$\text{เมื่อ } Z_{\text{base}} = 115^2/50 = 264.5 \Omega$$

$$R_{\text{HV}} = \frac{0.012219}{2} \times 264.5 = 1.616 \Omega$$

$$L_{\text{HV}} = \frac{0.12219}{2} \times 264.5 \times 100\pi = 51.4182 \text{ mH}$$

$$V_{\text{HV}} = 115 \text{ kV} / \sqrt{3} = 66.395 \text{ kV}$$

และได้ค่าทางด้านแรงต่ำดังนี้

$$\text{เมื่อ } Z_{\text{base}} = 22^2/50 = 9.68 \Omega$$

$$R_{\text{LV}} = \frac{0.012219}{2} \times 9.68 = 0.0591 \Omega$$

$$L_{\text{LV}} = \frac{0.12219}{2} \times 9.68 \times 100\pi = 1.8818 \text{ mH}$$

$$V_{\text{LV}} = 22 \text{ kV} / \sqrt{3} = 12.701 \text{ kV}$$



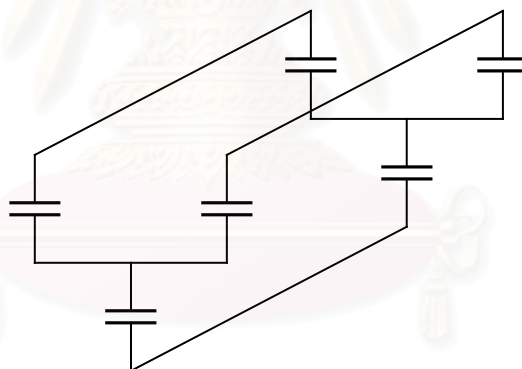
### 5.1.3 ชุดตัวเก็บประจุ

แสดงในส่วนที่ 3 ของรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นชุดตัวเก็บประจุระดับแรงดัน 12.7 kV ขนาด 2.4 Mvar จำนวน 3 ชุด ต่อแบบดับเบิ้ลวายไม่ต่อลงดิน (double unground-wye) เป็นการต่อตัวเก็บประจุย่อยต่อแบบวายไม่ต่อลงดิน 2 ชุดขนานกันเพื่อสะดวกในการตรวจจับความผิดปกติของรูปที่ 5.6 และมีกำลังสูญเสีย (Power loss) 0.2 W/kvar คำนวณหาค่าความเก็บประจุได้ดังนี้

$$C = \frac{Mvar_{1\phi}}{2\pi f \left( \frac{kV_{LL}}{\sqrt{3}} \right)^2} = \frac{2.4/3}{2\pi \times 50 \times \left( \frac{22}{\sqrt{3}} \right)^2} = 15.783 \mu F$$

ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุคำนวณได้จาก

$$R_{\text{phase}} = \frac{P_{\text{loss}_{\text{phase}}}}{I_{FL_{\phi}}^2} = \frac{800\text{kVar} \times 0.2}{\left( \frac{\text{kvar}_{\text{bank}}}{\sqrt{3} \times kV_{LL}} \right)^2} = \frac{160}{63^2} = 0.0403 \Omega$$



รูปที่ 5.6 การต่อตัวเก็บประจุแบบดับเบิ้ลวายไม่ต่อลงดิน

เนื่องจากการไปตรวจวัดรูปคลื่นได้มีการวัดค่าความเก็บประจุ ดังนั้นจึงใช้ค่าความเก็บประจุที่ได้จากการวัดเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง มีดังนี้

	เฟส A	เฟส B	เฟส C
ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1	16.115 $\mu F$	16.32 $\mu F$	15.94 $\mu F$
ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2	16.04 $\mu F$	15.99 $\mu F$	16.10 $\mu F$
ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3	15.94 $\mu F$	16.01 $\mu F$	16.13 $\mu F$

#### 5.1.4 ตัวเหนี่ยวนำ

แสดงในส่วนที่ 4 ของรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้าย่อยเท่ากับ 0.1 mH เนื่องจากข้อมูลมีไม่เพียงพอ จึงสมมุติ  $\frac{X}{R} = 15$  [20] ฉะนั้น ได้

$$R = \frac{0.1\text{mH} \times 2\pi \times 50}{15} = 0.0021\Omega$$

#### 5.1.5 โหลดของสถานีไฟฟ้า

แสดงในส่วนที่ 5 ของรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นขนาดของโหลดได้จากบันทึกของการไฟฟ้าในวันที่ไปตรวจวัดรูปคลื่น โดยจำลองโหลดด้วยพารามิเตอร์ความต้านทานกับความเหนี่ยวนำขนานกัน แต่ละชนิดจัดวางแบบวางต่อลงดิน (grounded – wye) เช่นในการตรวจวัดได้ค่าโหลด 13.5 MW และ 5.2 Mvar

ค่าความต้านทานหาได้จาก  $\frac{V^2}{P}$  นั่นคือ  $\frac{22^2}{13.5} = 35.85\Omega$  ในทำนองเดียวกันจะได้ค่าความเหนี่ยวนำจาก  $\frac{V^2}{Q}$  จะได้  $\frac{22^2}{5.2} = 93.07\Omega$  หรือ 296.27 mH

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์โหลดที่ใช้ในการจำลอง

ชุดตัวเก็บประจุ	MW	Mvar	R ( $\Omega$ )	L (mH)
สับสวิตช์ชุดที่ 1	13.5	5.2	35.85	296.27
ปลดสวิตช์ชุดที่ 1	13.2	4.3	36.67	358.28
สับสวิตช์ชุดที่ 3	13.1	3.7	36.95	416.38
ปลดสวิตช์ชุดที่ 3	13	2.7	37.23	570.60

ในส่วนของโหลดนั้นถือเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญเพราะเป็นตัวช่วยในการลดทอนแรงดันเกินสวิตช์จากการสับและปลดชุดตัวเก็บประจุ หากจำลองโดยละทิ้งโหลดก็จะทำให้แรงดันเกินที่เกิดขึ้นนั้นอาจมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด

#### 5.2 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการตรวจวัดกับการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP/ATP

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP/ATP เทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัด และในการจำลองจะใช้แบบจำลอง 3 แบบนำมาเปรียบเทียบ ซึ่งแบบจำลองทั้งสามจะมีแบบจำลองส่วนที่แทนวงจรมอเตอร์ที่แตกต่างกัน สำหรับแบบจำลองส่วนอื่นจะใช้เหมือนกัน เพื่อดูผลของคลื่นจร (travelling wave) ในสายส่งที่เกิดจากการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ โดย

- แบบจำลองที่ 1 (model 1) คือ แบบจำลองที่แทนวงจรถูกด้วยค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร
- แบบจำลองที่ 2 (model 2) คือ แบบจำลองที่แทนวงจรถูกด้วยสายส่งแบบพารามิเตอร์คงที่
- แบบจำลองที่ 3 (model 3) คือแบบจำลองที่แทนวงจรถูกด้วยสายส่งแบบพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่

### การสืบสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1

จะสืบสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 เพียงชุดเดียว เป็นกรณีการสืบชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว โดยจะเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการจำลอง ซึ่งการสืบสวิตช์นี้จะไม่แสดงรูปคลื่นที่จุดนิวทอล (P4) เนื่องจากมีค่าต่ำ สำหรับรูปคลื่นแรงดันและกระแสจากการตรวจวัดและการจำลองทั้งสามแบบจำลองจะแสดงดังรูปที่ 5.7 ถึง 5.10

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตช์ (สืบสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)

Point	Peak Voltage (V)						
	Measure	Model 1	% error	Model 2	% error	Model 3	% error
P1	26288.28	24902.18	-5.27	26037.94	-0.95	26061.32	-0.86
P2	26234.72	24902.18	-5.08	26037.94	-0.75	26061.32	-0.66
P34	26359.51	25094.46	-4.80	26250.37	-0.41	26273.94	-0.32

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบกระแสเกินสวิตช์ (สืบสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)

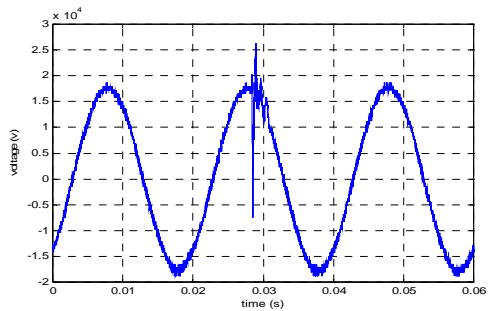
Point	Peak Current (A)						
	Measure	Model 1	% error	Model 2	% error	Model 3	% error
C34	1692.36	881.23	-47.93	923.38	-45.44	924.09	-45.40

หมายเหตุ P1 คือ แรงดันระหว่างบัสเทียบกับกราวด์

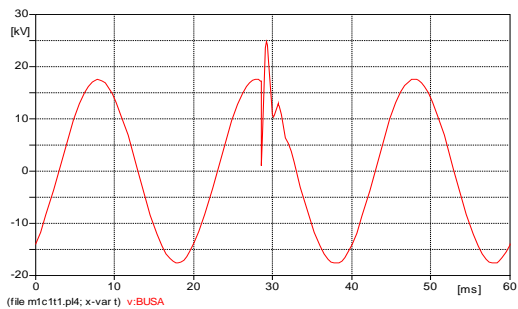
P2 คือ แรงดันระหว่างหน้าตัวเหนี่ยวนำกับกราวด์

P34 คือ แรงดันตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุ

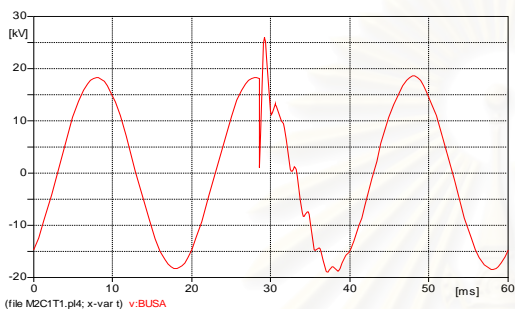
C34 คือ กระแสไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ



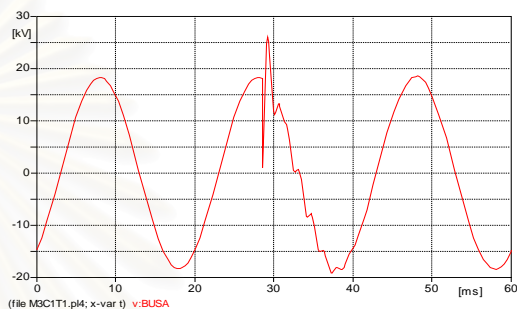
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

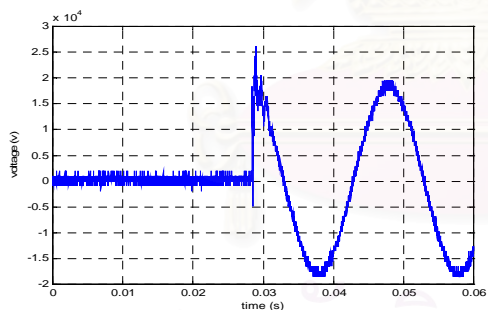


(ค) แบบจำลองที่ 2

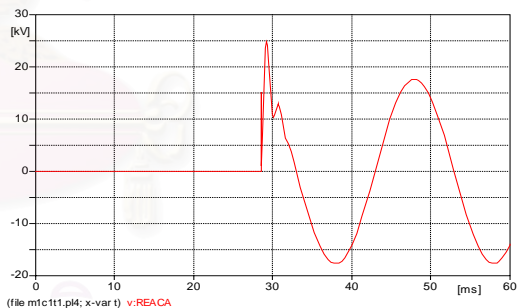


(ง) แบบจำลองที่ 3

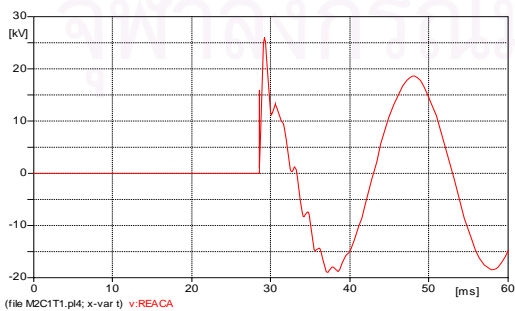
รูปที่ 5.7 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P1 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)



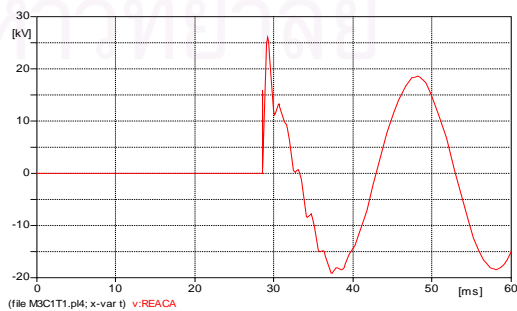
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

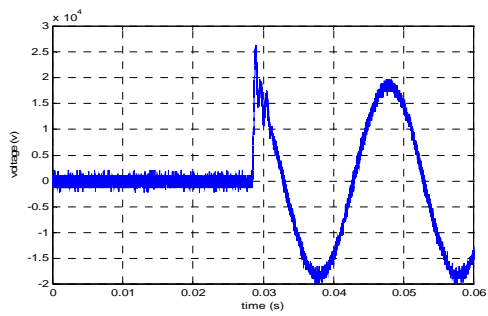


(ค) แบบจำลองที่ 2

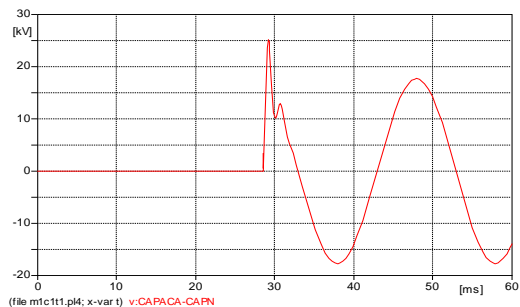


(ง) แบบจำลองที่ 3

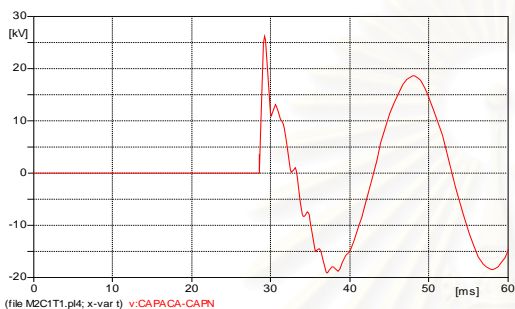
รูปที่ 5.8 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P2 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)



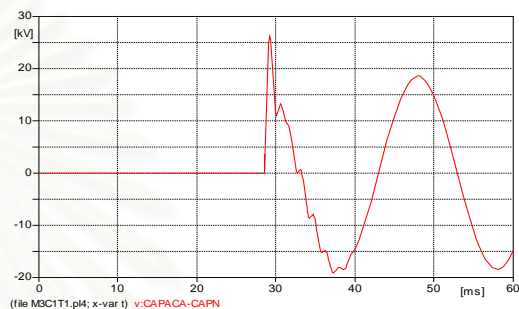
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

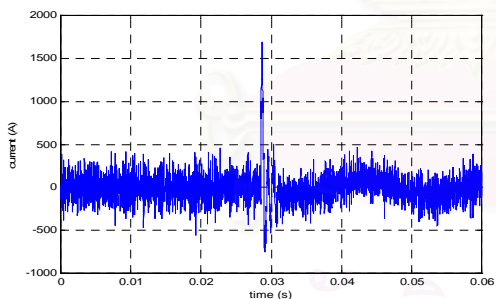


(ค) แบบจำลองที่ 2

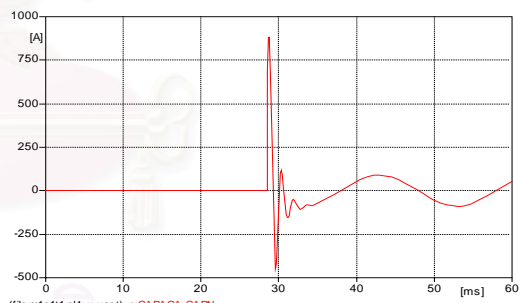


(ง) แบบจำลองที่ 3

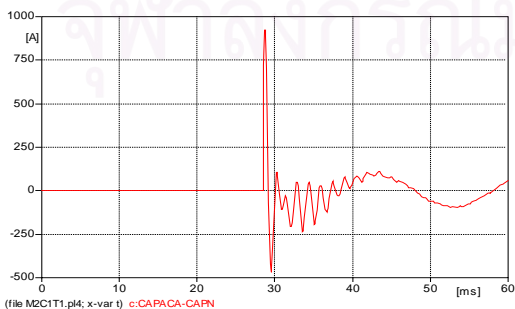
รูปที่ 5.9 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P34 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)



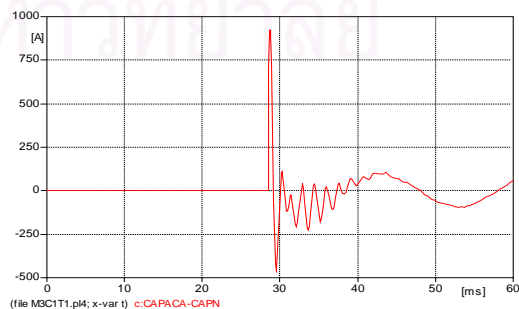
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1



(ค) แบบจำลองที่ 2



(ง) แบบจำลองที่ 3

รูปที่ 5.10 รูปคลื่นกระแสที่จุด C34 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)

### การปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1

สำหรับการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 จะไม่แสดงรูปคลื่นจุด P1 เพราะในการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุนั้น แรงดันที่ P1 ซึ่งเป็นแรงดันที่บัลไมเกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับรูปคลื่นแรงดันและกระแสจากการตรวจวัดและการจำลองทั้งสามแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5.11 ถึง 5.13

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตช์ (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)

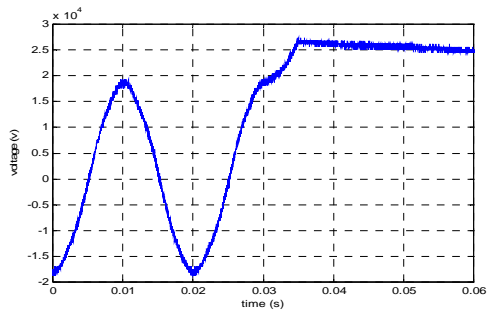
Point	Peak Voltage (V)						
	Measure	Model 1	% error	Model 2	% error	Model 3	% error
P2	27400.7	26780.7	-2.26	27920.8	1.90	27949.9	2.00
P34	19477.6	17728	-8.98	18490.8	-5.07	18510.3	-4.97
P4	8653.53	9053.15	4.62	9431.57	8.99	9441.13	9.10

หมายเหตุ P2 คือ แรงดันระหว่างหน้าตัวเหนี่ยวนำกับกราวด์

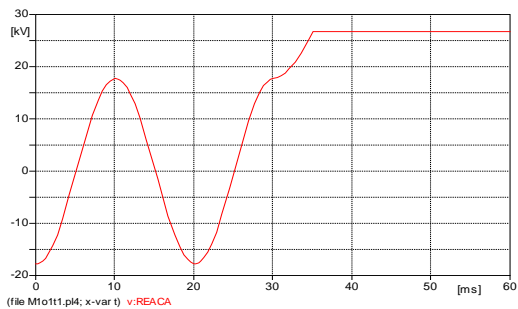
P34 คือ แรงดันคร่อมชุดตัวเก็บประจุ

P4 คือ แรงดันระหว่างนิวทรอลกับกราวด์

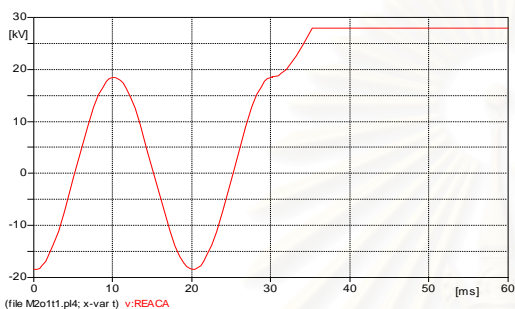




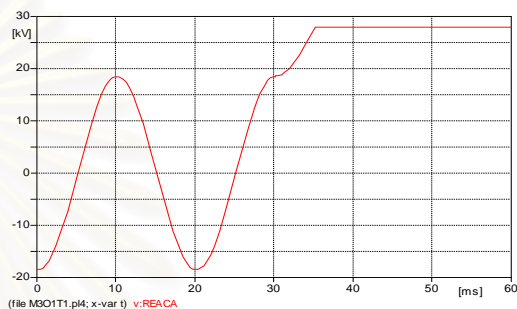
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

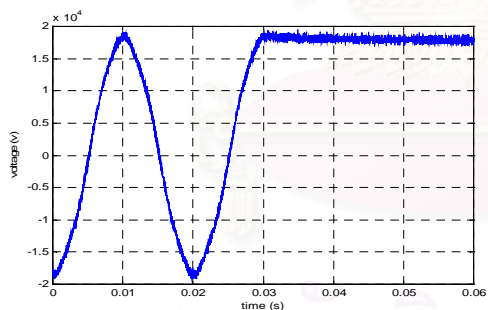


(ค) แบบจำลองที่ 2

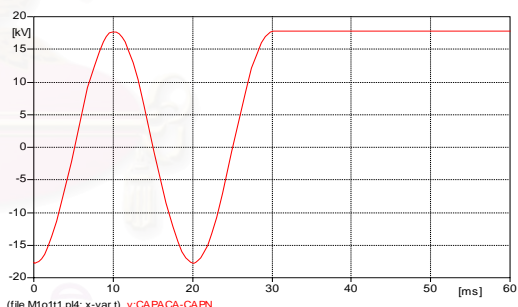


(ง) แบบจำลองที่ 3

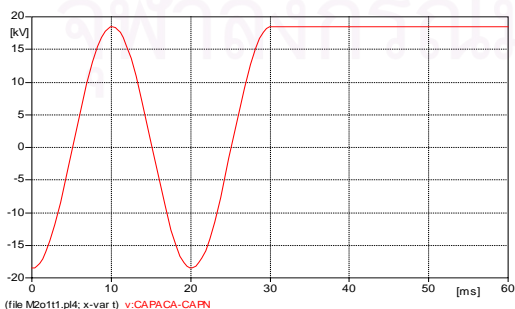
รูปที่ 5.11 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P2 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)



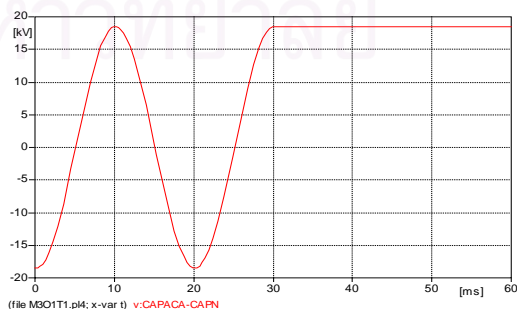
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

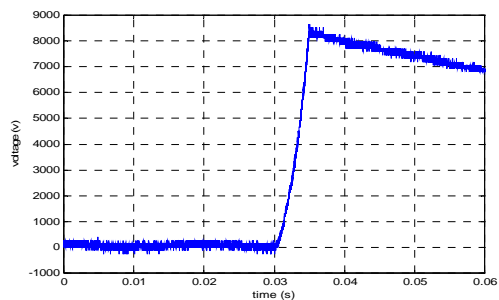


(ค) แบบจำลองที่ 2

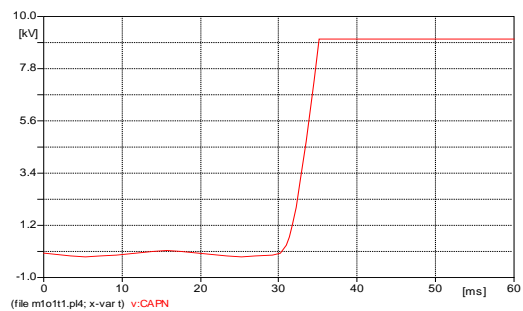


(ง) แบบจำลองที่ 3

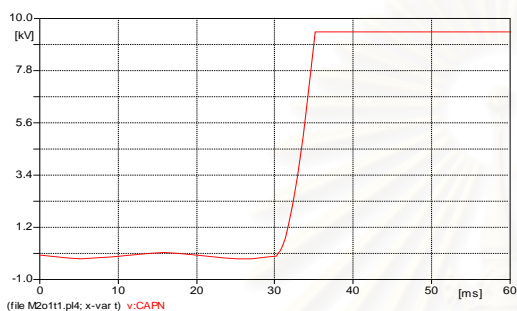
รูปที่ 5.12 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P34 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)



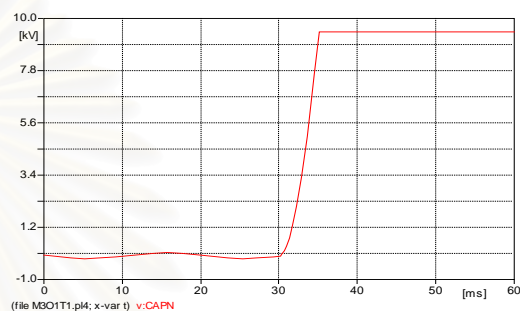
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1



(ค) แบบจำลองที่ 2



(ง) แบบจำลองที่ 3

รูปที่ 5.13 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P4 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)

จากการเปรียบเทียบรูปคลื่นพบว่ารูปคลื่นที่ตรวจวัดมีการคายประจุเร็วกว่ารูปคลื่นที่ได้จากการจำลอง เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ตรวจวัดเป็นชนิดตัวเก็บประจุจึงมีการคายประจุค้างผ่านความต้านทานของออสซิลโลสโคปจึงทำให้รูปคลื่นที่ตรวจวัดได้มีการคายประจุเร็วกว่าปรกติ

### การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3

เป็นกรณีการสับชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back โดยทำการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 และ 2 ก่อนแล้วจึงสับชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 เป็นชุดสุดท้าย เหตุที่ทำเช่นนี้เพื่อสะดวกในการติดตั้ง ซึ่งการสับสวิตช์นี้จะไม่แสดงรูปคลื่นที่จุดนิวทอลล์ (P4) เนื่องจากมีค่าต่ำ โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการตรวจวัดกับผลการจำลอง สำหรับรูปคลื่นแรงดันและกระแสจากการตรวจวัดและการจำลองทั้งสามแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5.14 ถึง 5.17

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตช์ (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)

Point	Peak Voltage (V)						
	Measure	Model 1	% error	Model 2	% error	Model 3	% error
P1	18476.91	18297.46	-0.97	19508.09	5.58	19539.81	5.75
P2	20404.78	18297.46	-10.33	19508.09	-4.39	19539.81	-4.24
P34	20058.98	19947.06	-0.56	21215.31	5.76	21240.67	5.89

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบกระแสเกินสวิตช์ (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)

Point	Peak Current (A)						
	Measure	Model 1	% error	Model 2	% error	Model 3	% error
C34	1456.17	1622.76	11.44	1650.55	13.35	1652.26	13.47

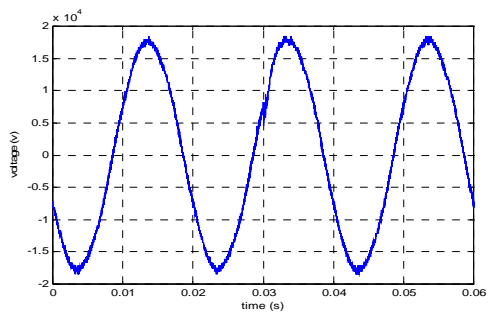
หมายเหตุ P1 คือ แรงดันระหว่างบัสเทียบกับกราวด์

P2 คือ แรงดันระหว่างหน้าตัวเหนี่ยวนำกับกราวด์

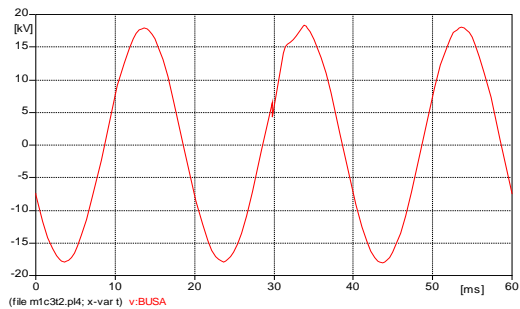
P34 คือ แรงดันตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุ

C34 คือ กระแสไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ

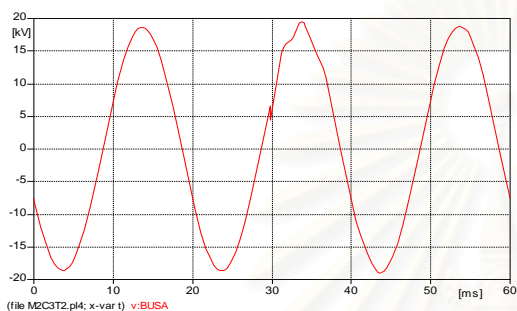
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



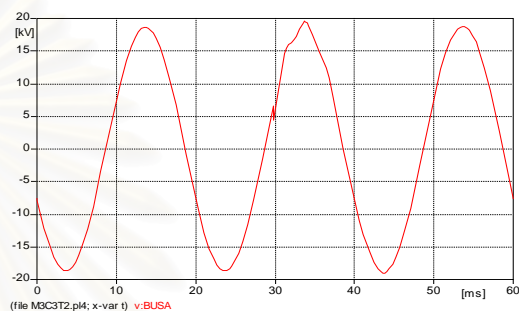
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

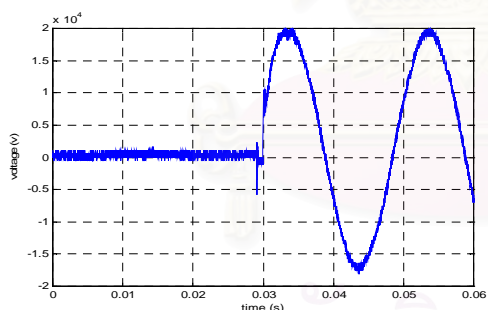


(ค) แบบจำลองที่ 2

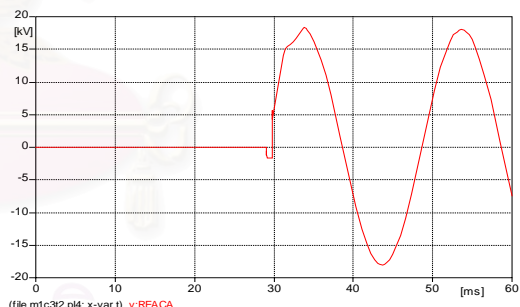


(ง) แบบจำลองที่ 3

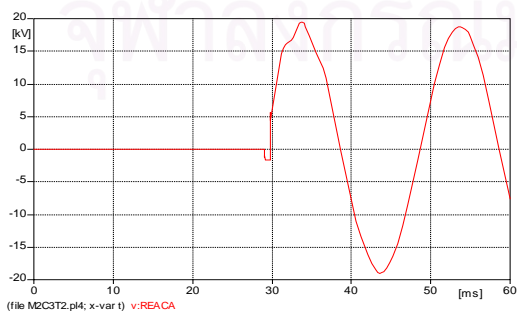
รูปที่ 5.14 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P1 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)



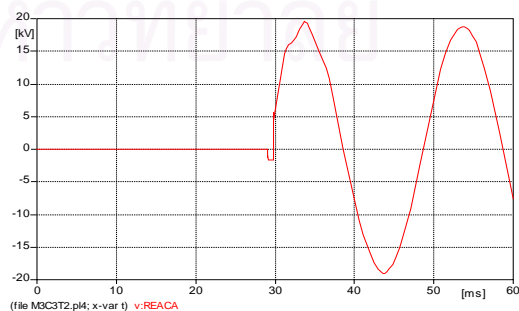
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

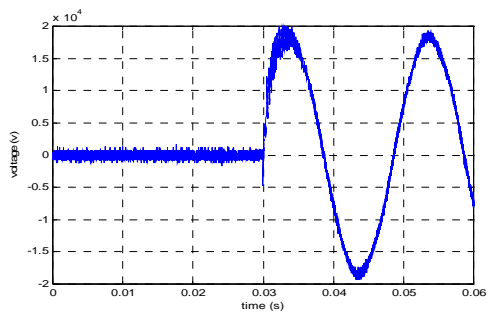


(ค) แบบจำลองที่ 2

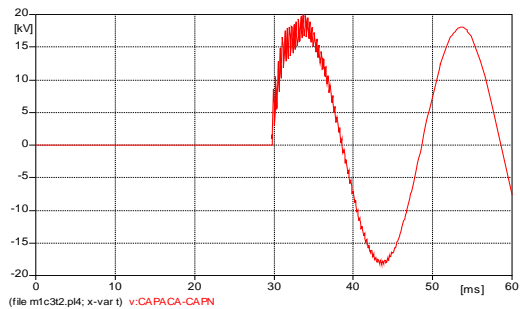


(ง) แบบจำลองที่ 3

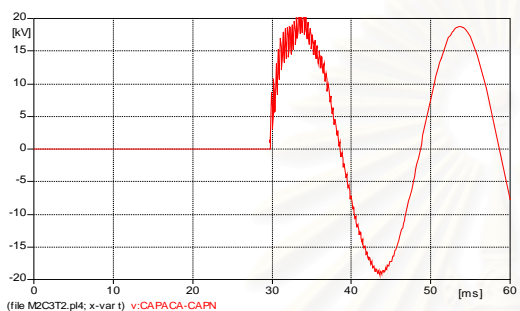
รูปที่ 5.15 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P2 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)



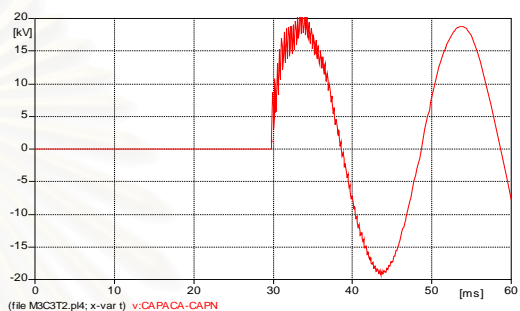
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

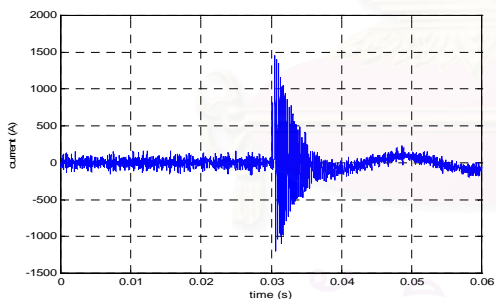


(ค) แบบจำลองที่ 2

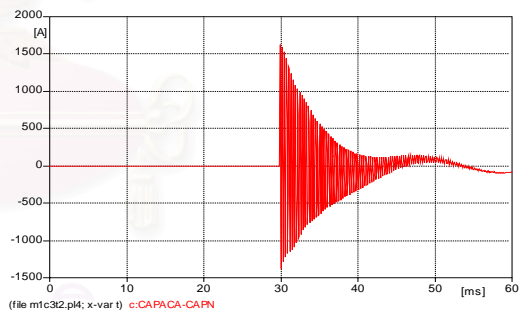


(ง) แบบจำลองที่ 3

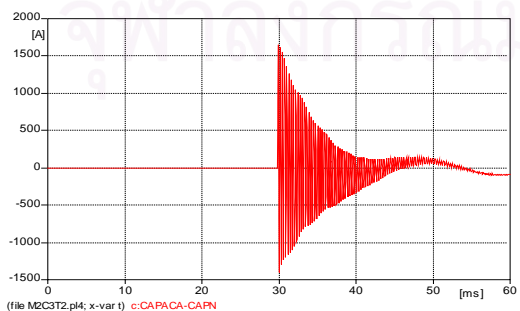
รูปที่ 5.16 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P34 (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)



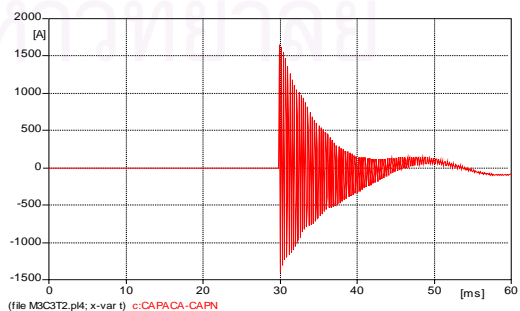
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1



(ค) แบบจำลองที่ 2



(ง) แบบจำลองที่ 3

รูปที่ 5.17 รูปคลื่นกระแส (สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)

### การปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3

สำหรับการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 นั้นจะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 โดยชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 และ 2 ยังคงต่ออยู่กับวงจร และจะไม่แสดงรูปคลื่นจุด P1 เพราะในการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 นั้น แรงดันที่ P1 ซึ่งเป็นแรงดันที่บัสไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง รูปคลื่นแรงดันและกระแสจากการตรวจวัดและการจำลองทั้งสามแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5.18 ถึง 5.20

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตช์ (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)

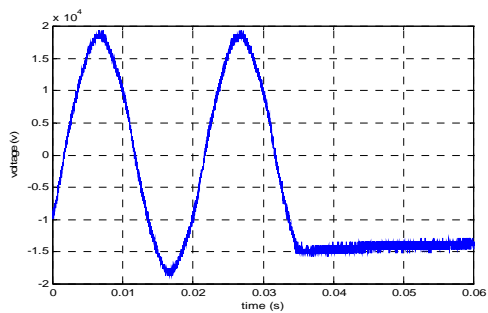
Point	Peak Voltage (V)						
	Measure	Model 1	% error	Model 2	% error	Model 3	% error
P2	19238.8	18065.9	-6.10	18844.1	-2.05	18865.8	-1.94
P34	19533.9	18074.8	-7.47	18853.4	-3.48	18875.1	-3.37
P4	8520.4	8848.77	3.85	9213.65	8.14	9223.23	8.25

หมายเหตุ P2 คือ แรงดันระหว่างหน้าตัวเหนี่ยวนำกับกราวด์

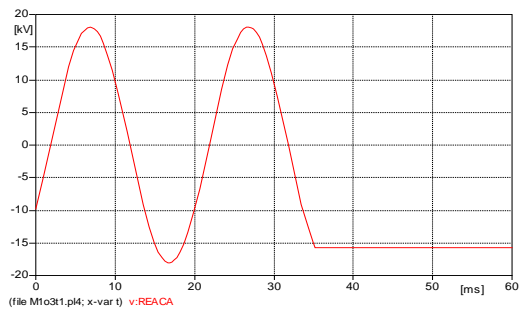
P34 คือ แรงดันคร่อมชุดตัวเก็บประจุ

P4 คือ แรงดันระหว่างนิวทรอลกับกราวด์

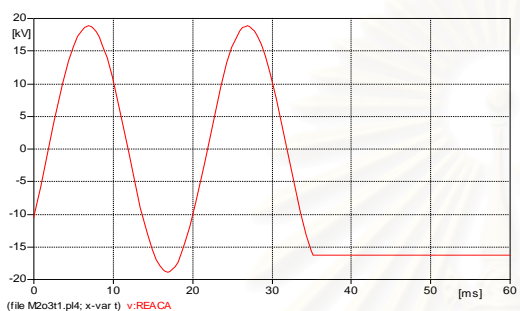




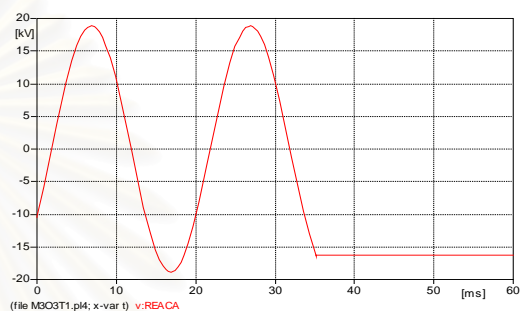
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

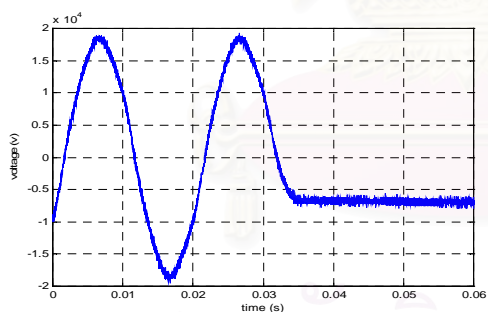


(ค) แบบจำลองที่ 2

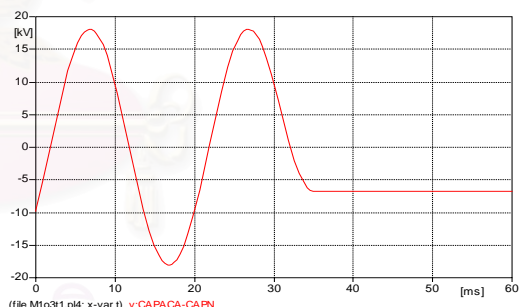


(ง) แบบจำลองที่ 3

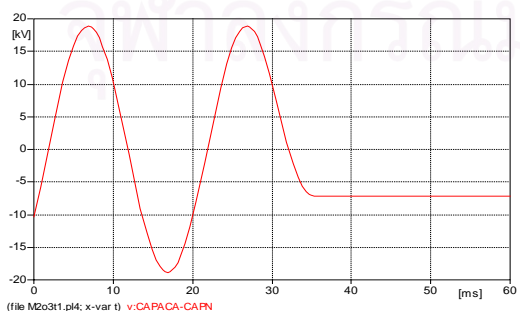
รูปที่ 5.18 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P2 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)



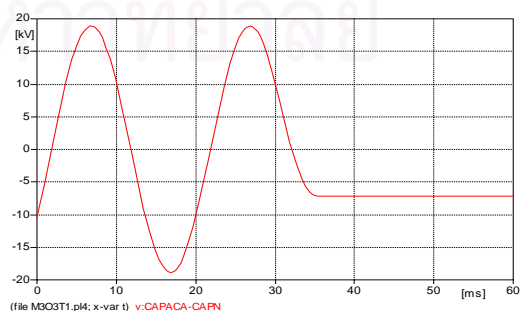
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1

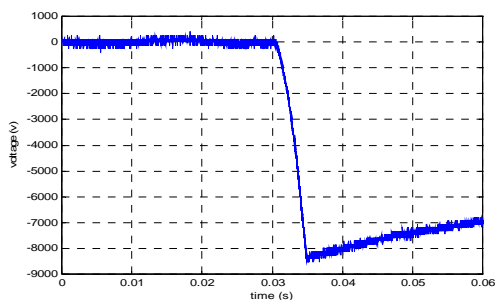


(ค) แบบจำลองที่ 2

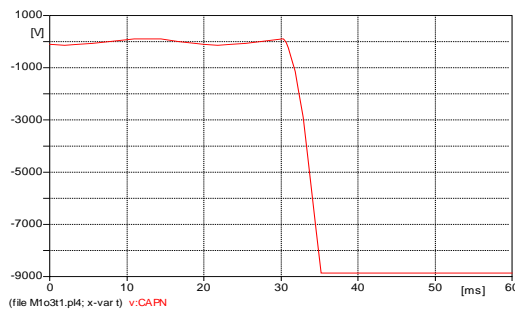


(ง) แบบจำลองที่ 3

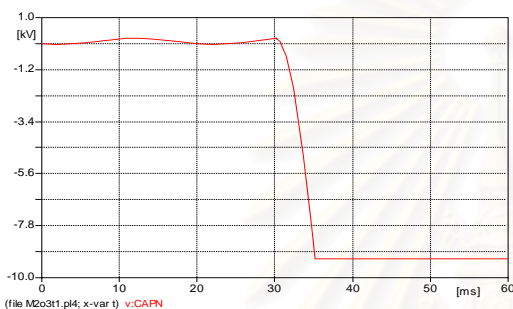
รูปที่ 5.19 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P34 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)



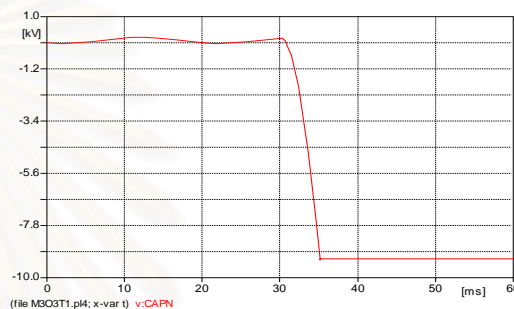
(ก) การตรวจวัด



(ข) แบบจำลองที่ 1



(ค) แบบจำลองที่ 2



(ง) แบบจำลองที่ 3

รูปที่ 5.20 รูปคลื่นแรงดันที่จุด P4 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)

จากการเปรียบเทียบรูปคลื่นพบว่ารูปคลื่นที่ตรวจวัดมีการคายประจุเร็วกว่ารูปคลื่นที่ได้จากการจำลอง เนื่องจากโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้ตรวจวัดเป็นชนิดตัวเก็บประจุจึงมีการคายประจุค่าผ่านความต้านทานของออสซิลโลสโคปจึงทำให้รูปคลื่นที่ตรวจวัดได้มีการคายประจุเร็วกว่าปกติ

**สรุปผลการเปรียบเทียบ**

จากตารางที่ 5.4 ถึง 5.9 พบว่าค่าแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการจำลองทั้งสามแบบไม่เกิน 11% สำหรับการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุและไม่เกิน 9% สำหรับการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ สำหรับค่ากระแสเกินสวิตช์ซึ่งนั้นค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการจำลองทั้งสามแบบไม่เกิน 48% สำหรับการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 และไม่เกิน 14% สำหรับการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 ซึ่งความผิดพลาดนี้อาจมีสาเหตุดังนี้

1. โหลดในระบบจริงเป็นโหลดไม่สมดุล
2. ขนาดของพารามิเตอร์และโหลดในระบบขณะทำการตรวจวัดอาจมีค่าเปลี่ยนไปจากค่าที่ใช้ในการจำลอง

3. ไม่ทราบเวลาในการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุของเฟสอื่นๆ
  4. มีคลื่นรบกวนเข้ามาพร้อมกับรูปคลื่นแรงดันขณะทำการตรวจวัด ทำให้เมื่อคำนวณหากระแสเกินสวิตช์จึงรวมคลื่นรบกวนเข้าไปด้วยเป็นเหตุให้เกิดความผิดพลาด
- และพบว่า การจำลองทั้ง 3 แบบให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ฉะนั้นเลือกแบบจำลองที่ 1 มาใช้ในการศึกษาต่อไป เพราะเป็นแบบจำลองที่สะดวกต่อการใช้งานและมีความยุ่งยากในการจำลองน้อยกว่าแบบอื่นๆ

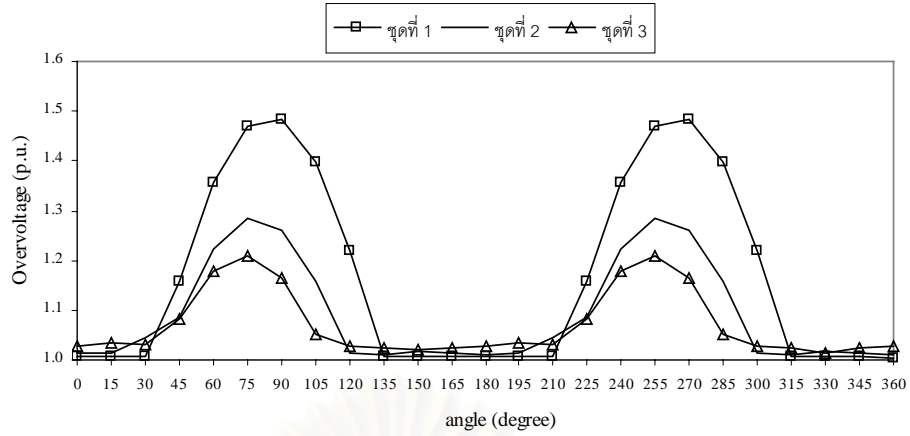
### 5.3 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรเมื่อสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลองว่ามีผลต่อขนาดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์เนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุน้อยเพียงใด โดยมีเงื่อนไขในการจำลองดังนี้

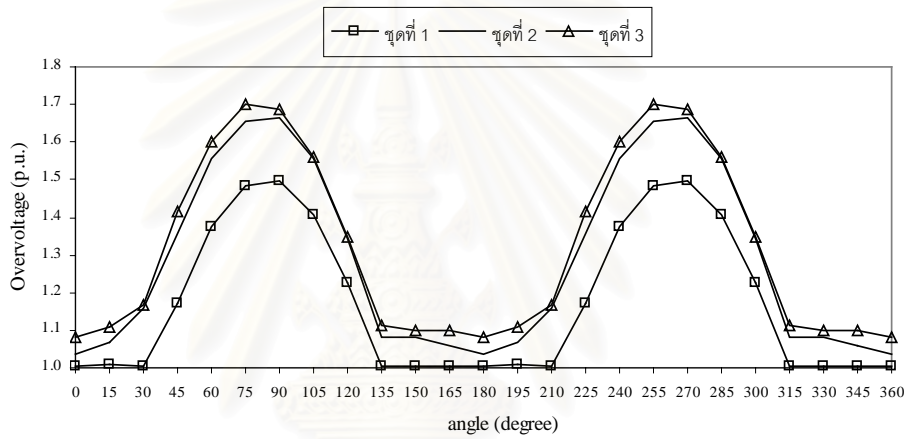
1. กำหนดให้มีโหลดขนาด 13.5 MW และ 5.2 Mvar ยกเว้นกรณีการศึกษาผลของโหลด
2. การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุใช้เวลาในการสับสวิตช์เข้าพร้อมกันทั้งสามเฟส
3. ทุกกรณีจะนำค่าแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ของเฟส A มาพิจารณา
4. สับสวิตช์ที่มุม 90 องศาของรูปคลื่นแรงดันเฟส A ยกเว้นกรณีการศึกษาผลของมุมที่สับสวิตช์
5. จะแสดงผล 3 จุด คือแรงดันที่บัสแสดงเป็นแรงดันบัสเทียบกับกราวด์ ส่วนแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุแสดงแรงดันคร่อมชุดตัวเก็บประจุของชุดที่สับสวิตช์ สำหรับกระแสจะแสดงกระแสไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุของชุดที่สับสวิตช์ โดยกำหนดให้ แรงดัน 1 p.u. = 17.963 kV และกระแส 1 p.u. = 90 A
6. ชุดที่ 1 หมายถึง การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1
  - ชุดที่ 2 หมายถึง การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 โดยชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 ต่อกับวงจรก่อนแล้ว
  - ชุดที่ 3 หมายถึง การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 โดยชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 และ 2 ต่อกับวงจรก่อนแล้ว

#### 5.3.1 มุมที่สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

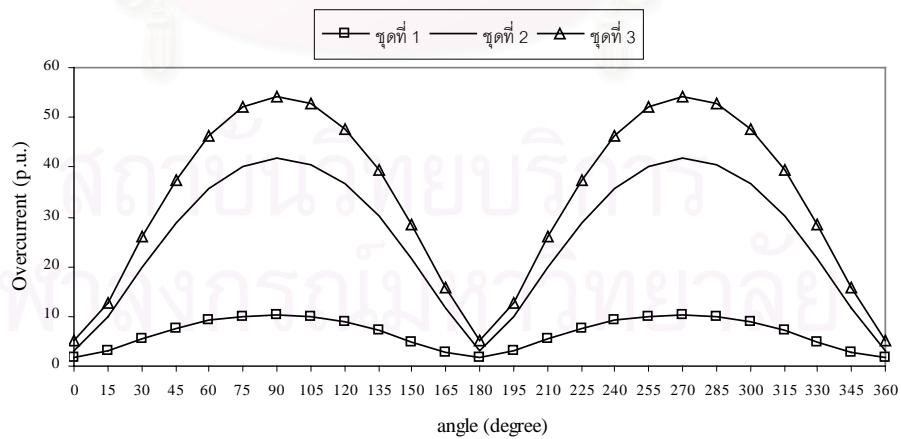
เพื่อศึกษาแรงดันและกระแสเกินสวิตช์เนื่องจากการเปลี่ยนมุมที่สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ โดยเปลี่ยนมุมในการสับสวิตช์ของแรงดันเฟส A ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา



รูปที่ 5.21 แรงแดันเกินสวิตซ์ซึ่งสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนมุมสับสวิตซ์



รูปที่ 5.22 แรงแดันเกินสวิตซ์ซึ่งสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนมุมสับสวิตซ์



รูปที่ 5.23 กระแสเกินสวิตซ์ซึ่งสูงสุดเมื่อเปลี่ยนมุมสับสวิตซ์

จากรูปที่ 5.21 ถึง 5.23 พบว่า

1. การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 จะเกิดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัลเมื่อสับสวิตช์ที่มุม 90 องศา แต่ในการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 และ 3 จะเกิดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัลเมื่อสับสวิตช์ที่มุม 75 องศาโดยมีขนาดแรงดัน 1.48, 1.28 และ 1.21 p.u. ตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 และ 3 หรือการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back นั้น ชุดตัวเก็บประจุที่ใช้งานอยู่นอกจากลดค่า  $\frac{dv}{dt}$  แล้วยังเพิ่มเวลาขาขึ้น (rise time) ของส่วนพุ่งเกิน (overshoot) ทำให้เมื่อสับสวิตช์ที่มุม 75 องศา แต่ส่วนพุ่งเกินซึ่งเป็นส่วนที่เกิดแรงดันเกินกลับเกิดที่ประมาณมุม 90 องศา ในขณะที่การสับชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 หรือการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวเวลาขาขึ้นของส่วนพุ่งเกินมีค่าน้อย ส่งผลให้เมื่อสับสวิตช์ที่มุมใด ส่วนพุ่งเกินก็เกิดขึ้นที่ใกล้กับมุมที่สับสวิตช์

2. การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 และ 2 จะเกิดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อสับสวิตช์ที่มุม 90 องศา โดยมีขนาดแรงดัน 1.5, 1.66 p.u. ตามลำดับ แต่ในการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 จะเกิดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อสับสวิตช์ที่มุม 75 องศาและมีขนาดแรงดัน 1.7 p.u. แต่ก็ใกล้เคียงกับแรงดันเกินสวิตช์เมื่อสับสวิตช์ที่มุม 90 องศาซึ่งมีค่า 1.69 p.u. และจากการจำลองการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุทั้งแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back นั้นแรงดันเกินที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อสับสวิตช์ที่มุม 75 และ 90 องศา มีค่าใกล้เคียงกันมาก

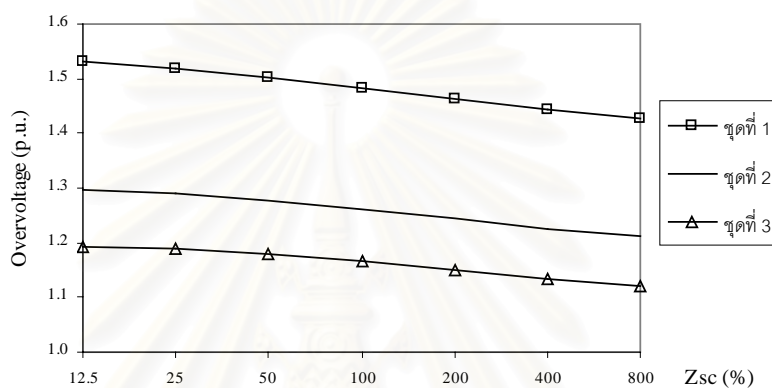
3. การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3 จะเกิดกระแสเกินสวิตช์สูงสุดเมื่อสับสวิตช์ที่มุม 90 องศาและมีขนาดกระแส 10.33, 41.74 และ 54.22 p.u. ตามลำดับ จะเห็นว่าการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back นั้นทำให้เกิดกระแสเกินสวิตช์หรือกระแสพุ่งเข้าสูงกว่าการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว

จากการผลการจำลองพบว่าการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 ทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตช์ที่บัลสูงสุดที่สุด รองลงมาเป็นการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 และ 3 หรือการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back นั้นจะมีการลดค่า  $\frac{dv}{dt}$  ที่เกิดขึ้นทำให้ส่วนพุ่งเกินมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 หรือการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว แต่การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 ทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตช์ที่ชุดตัวเก็บประจุและกระแสเกินสวิตช์สูงสุดที่สุด รองลงมาเป็นการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 และ 1 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back นั้นจะเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างชุดตัวเก็บประจุที่ต่อกับวงจรก่อนอยู่แล้วกับชุดตัวเก็บประจุที่จะสับสวิตช์เข้าใหม่ ทำให้เกิดออสซิลเลชันสูงที่สุดตัวเก็บประจุส่งผลให้เกิดแรงดันเกินที่ชุดตัวเก็บประจุและกระแสเกินสูงกว่าการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว

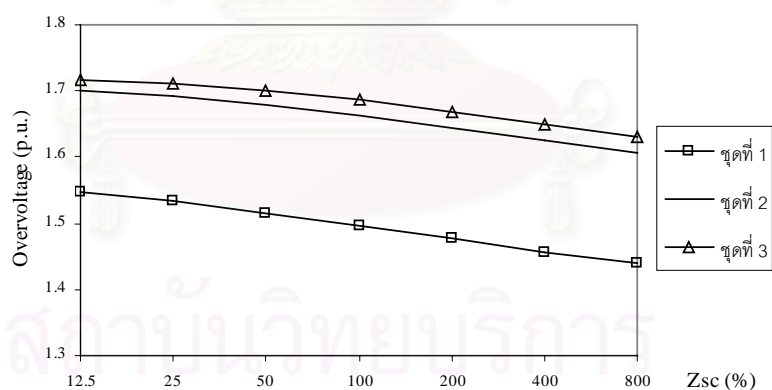
จึงสามารถสรุปได้ว่าแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งจะมีขนาดสูง เมื่อสับสวิตช์ในขณะที่แรงดันที่บัสมีค่าใกล้แรงดันค่ายอด ในทางกลับกันแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งจะมีขนาดต่ำ เมื่อสับสวิตช์ในขณะที่แรงดันที่บัสมีค่าใกล้ศูนย์

### 5.3.2 ขนาดของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ

เพื่อศึกษาแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ ( $Z_{sc}$ )

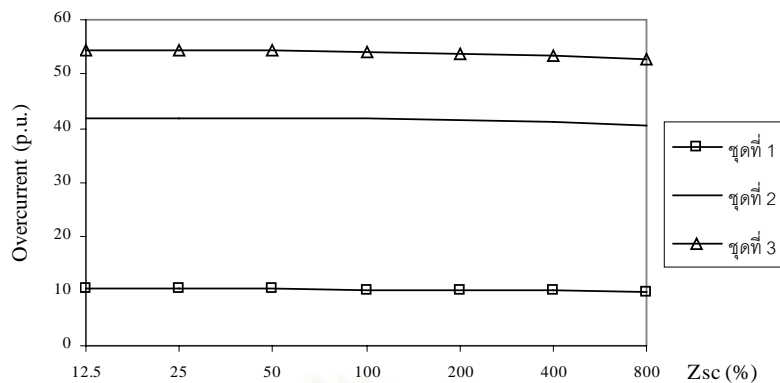


รูปที่ 5.24 แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์



รูปที่ 5.25 แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่จุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์





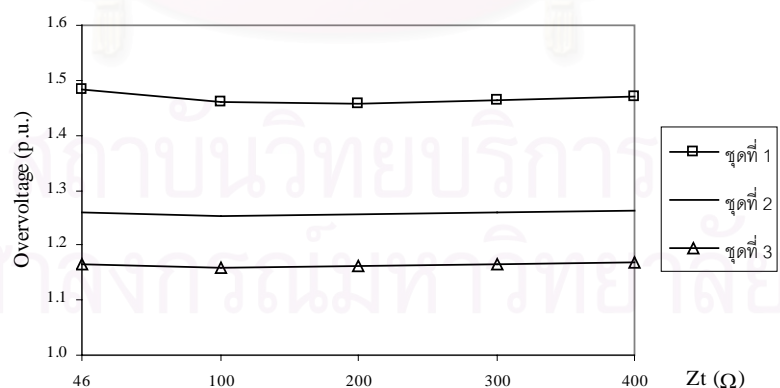
รูปที่ 5.26 กระแสเกินสวิตชิงสูงสุดเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 5.24 ถึง 5.26 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรเพิ่มขึ้นหรืออิกนัยหนึ่งระบบมีความแข็งแกร่งขึ้นจะส่งผลให้

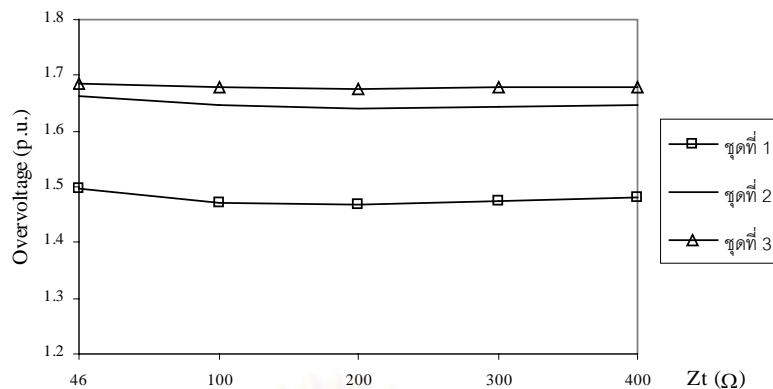
1. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสและชุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลง ทั้งการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back
2. ขนาดกระแสเกินสวิตชิงสูงสุดนั้นมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back

### 5.3.3 ขนาดของอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง

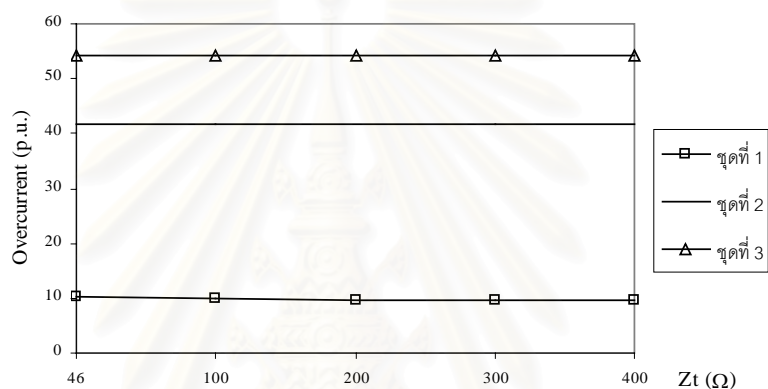
เพื่อศึกษาแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง ( $Z_t$ ) ซึ่งเป็นสายส่งที่ต่อเข้ามายังสถานีไฟฟ้าด้านวงจรบ่อน



รูปที่ 5.27 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์เสิร์จ



รูปที่ 5.28 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่จุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์เสิร์จ

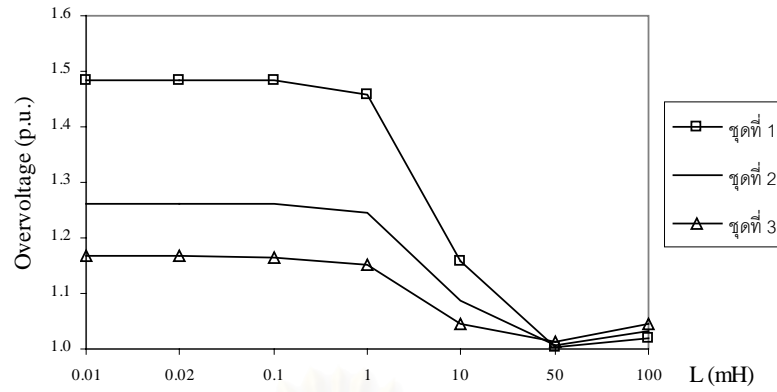


รูปที่ 5.29 กระแสเกินสวิตชิงสูงสุดเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์เสิร์จ

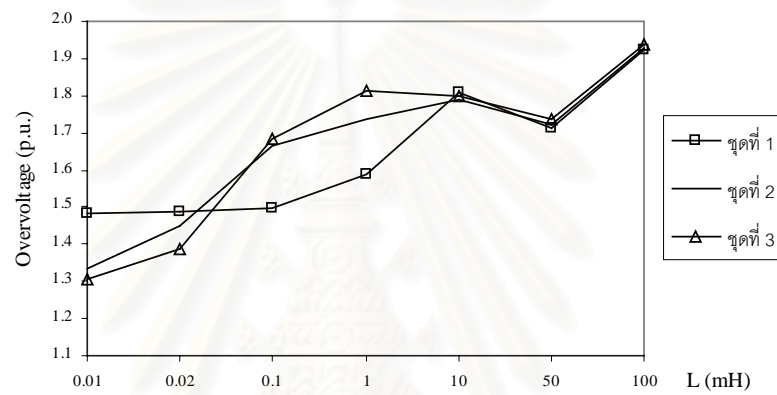
จากรูปที่ 5.27 ถึง 5.29 สรุปผลได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่งมีผลต่อขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสและจุดตัวเก็บประจุ รวมทั้งขนาดกระแสเกินสวิตชิงสูงสุดเล็กน้อยทั้งการสับสวิตซ์จุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back

#### 5.3.4 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ

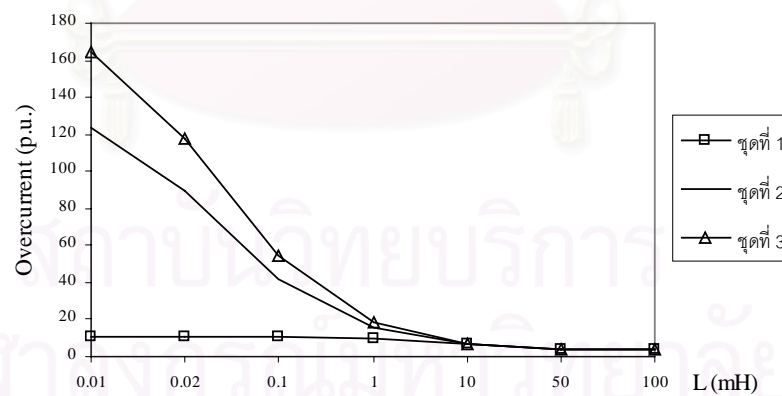
เพื่อศึกษาแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) ซึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ



รูปที่ 5.30 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.31 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.32 กระแสเกินสวิตช์สูงสุดเมื่อเปลี่ยนขนาดตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 5.30 ถึง 5.32 สรุปได้ว่าเมื่อค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

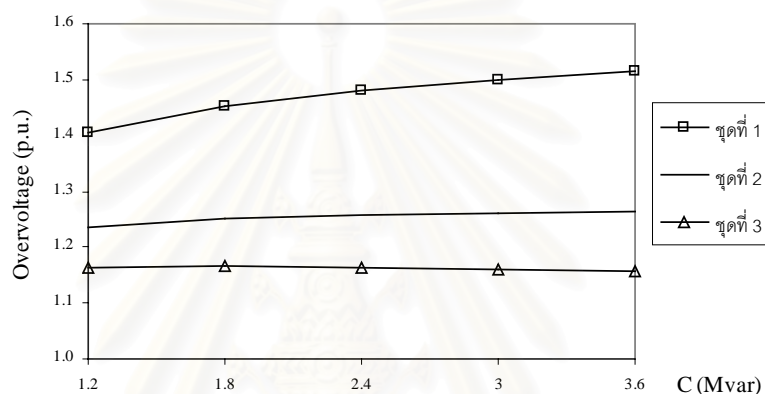
1. ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสมีค่าลดลง และยังช่วยลดค่า  $\frac{dv}{dt}$  ที่เกิดขึ้นอีกด้วย ทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back

2. ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้รูปคลื่นมีลักษณะผิดเพี้ยนไปอีกด้วย ทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back

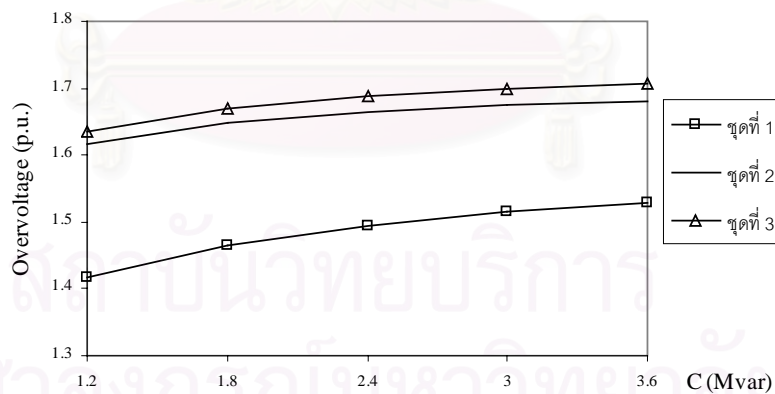
3. ขนาดกระแสเกินสวิตช์ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมากและรูปคลื่นมีลักษณะผิดเพี้ยนไป สำหรับการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back ในขณะที่ขนาดกระแสเกินสวิตช์ซึ่งมีค่าลดลงเล็กน้อยและรูปคลื่นมีลักษณะผิดเพี้ยนไป สำหรับการสับชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว

### 5.3.5 ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ

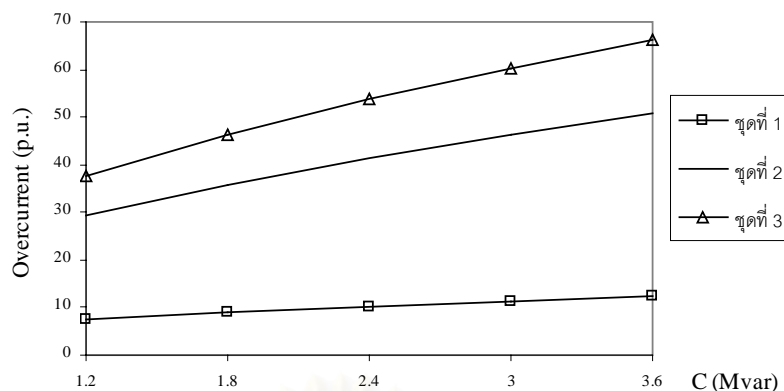
เพื่อศึกษาแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดชุดตัวเก็บประจุ (C)



รูปที่ 5.33 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดชุดตัวเก็บประจุ



รูปที่ 5.34 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดชุดตัวเก็บประจุ



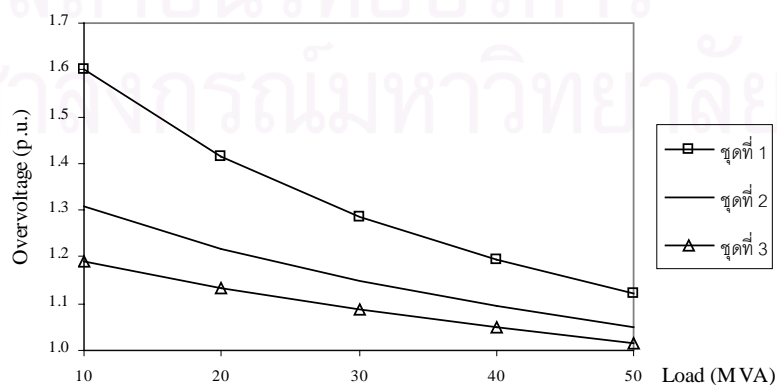
รูปที่ 5.35 กระแสเกินสวิตชิงสูงสุดเมื่อเปลี่ยนขนาดชุดตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 5.33 ถึง 5.35 สรุปผลได้ว่าเมื่อค่าชุดตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

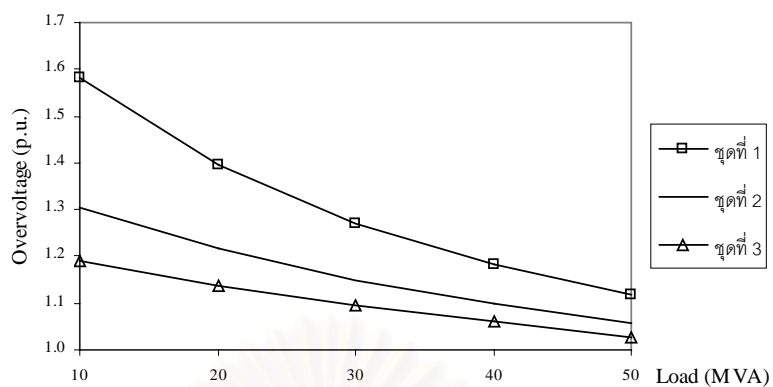
1. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว ส่วนการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
2. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back
3. ขนาดกระแสเกินสวิตชิงของการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ขนาดกระแสเกินสวิตชิงของการสับชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

### 5.3.6 ขนาดของโหลด

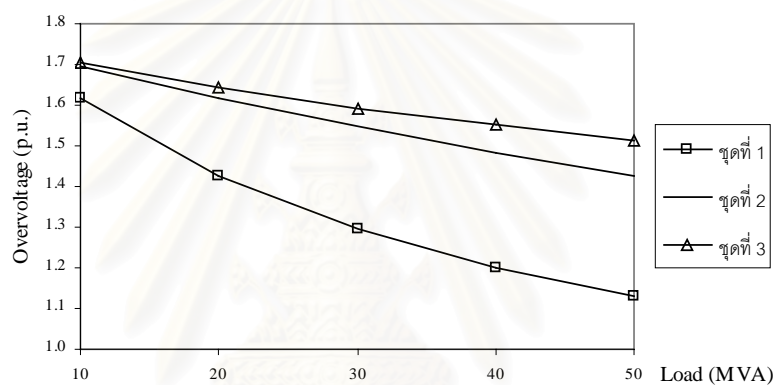
เพื่อศึกษาแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของโหลดและค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 และ 0.9



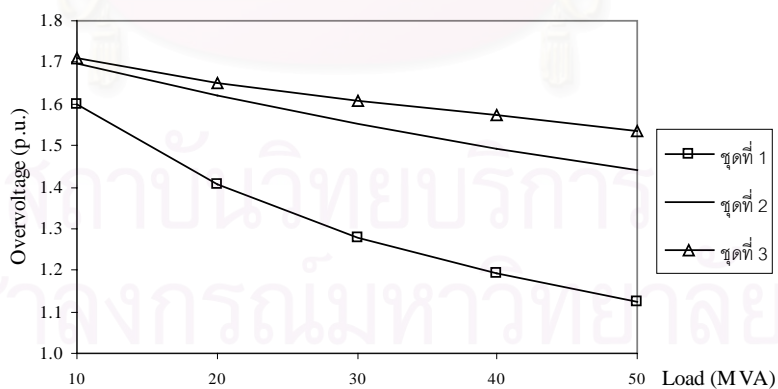
รูปที่ 5.36 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.8)



รูปที่ 5.37 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.9)

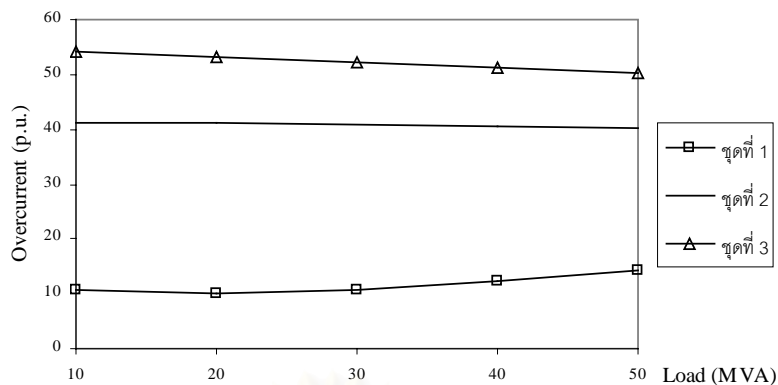


รูปที่ 5.38 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.8)

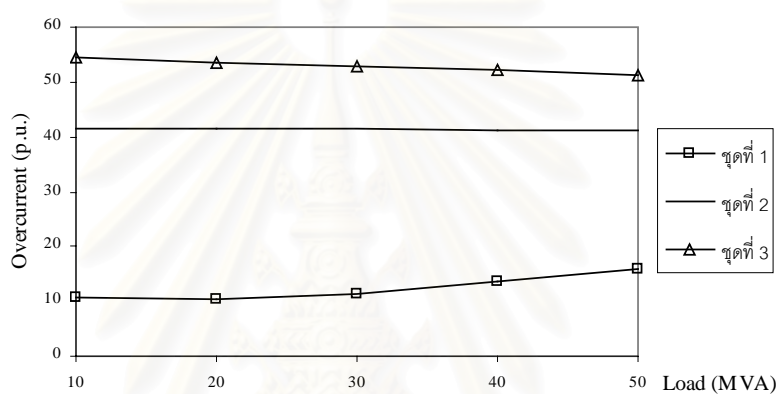


รูปที่ 5.39 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.9)





รูปที่ 5.40 กระแสเกินสวิตช์สูงสุดเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.8)



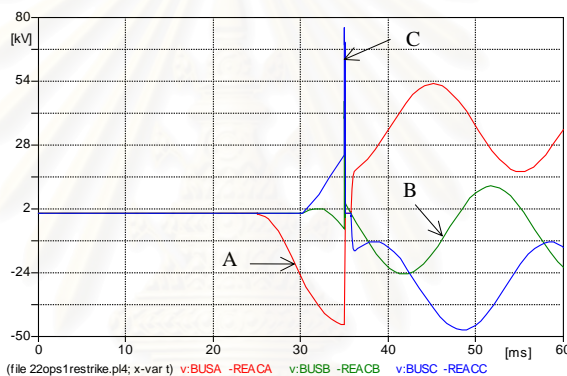
รูปที่ 5.41 กระแสเกินสวิตช์สูงสุดเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.9)

จากรูปที่ 5.36 ถึง 5.41 สรุปผลได้ว่าเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

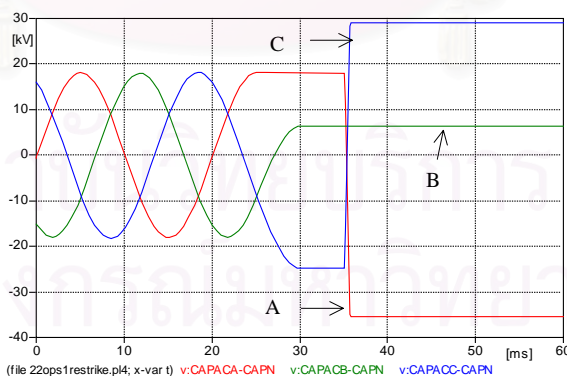
1. ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสและชุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลงอย่างมาก สำหรับการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว ส่วนการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสและชุดตัวเก็บประจุจะลดลงแต่ลดไม่มากเท่าในกรณีการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว
2. ขนาดกระแสเกินสวิตช์สูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back
3. ค่าตัวประกอบกำลังที่ 0.8 และ 0.9 มีผลต่อขนาดของแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งที่เกิดขึ้นน้อยมาก ทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back

#### 5.4 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรเมื่อปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลองว่ามีผลต่อขนาดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์เนื่องจากการปลดชุดตัวเก็บประจุมากน้อยเพียงใด โดยศึกษากรณีการเกิดอาร์กซ้ำสองเฟส เนื่องจากในการต่อชุดตัวเก็บประจุแบบวายไม่ต่อลงดินนั้น เมื่อให้เฟส A เป็นเฟสแรกที่ปลดสวิตช์ หากเฟส A เกิดอาร์กซ้ำก็จะทำให้แรงดันคร่อมสวิตช์ที่ เฟส C มีค่าสูงขึ้นประมาณ 4 p.u. ทำให้เฟส C มีโอกาสเกิดอาร์กซ้ำได้สูง ในขณะที่เฟส B จะมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ไม่สูงมากเท่ากับเฟส C ดังรูปที่ 5.42 และ 5.43 สำหรับการเกิดอาร์กซ้ำจะจำลองด้วยสวิตช์ 2 ชุดต่อเฟสที่เกิดอาร์กซ้ำ โดยเฟส A ให้สวิตช์ชุดแรกเปิดเมื่อแรงดันที่เฟส A มีค่าเท่ากับค่าแรงดันค้ำยอด และสวิตช์ชุดที่สองจะปิดเมื่อเวลาผ่านไปครึ่งรอบ สำหรับเฟส C สวิตช์ชุดแรกเปิดเมื่อกระแสผ่านศูนย์หลังเฟส A เปิด และสวิตช์ชุดที่สองจะปิดเมื่อเฟส A เกิดอาร์กซ้ำ



รูปที่ 5.42 แรงดันคร่อมสวิตช์เมื่อเฟส A และเฟส C เกิดอาร์กซ้ำ



รูปที่ 5.43 แรงดันคร่อมตัวชุดเก็บประจุเมื่อเฟส A และเฟส C เกิดอาร์กซ้ำ

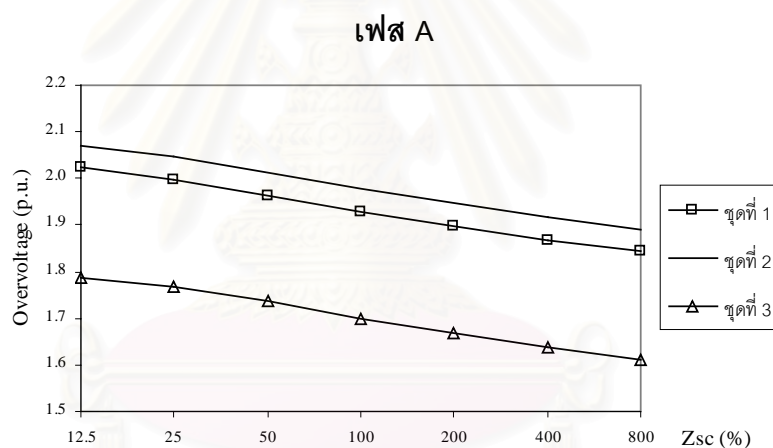
การศึกษผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ในกรณีการเกิดอาร์กซ้ำสองเฟสมีเงื่อนไขดังนี้

1. กำหนดให้มีโหลดขนาด 13.5 MW และ 5.2 Mvar ยกเว้นกรณีการศึกษผลของโหลด
2. เฟสที่เกิดอาร์กซ้ำจากการปลดสวิตช์ คือเกิดที่เฟส A และเฟส C

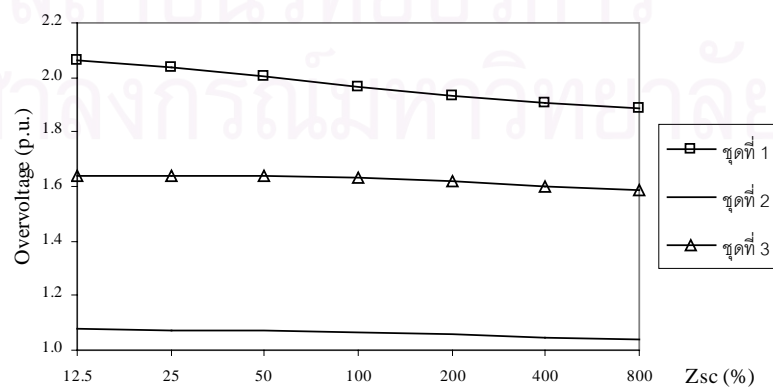
3. ทุกกรณีจะนำค่าแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งของเฟส A และ เฟส C มาพิจารณา
4. จะแสดงผล 2 จุด คือแรงดันที่บัสแสดงเป็นแรงดันบัสเทียบกับกราวด์ ส่วนแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุแสดงแรงดันคร่อมชุดตัวเก็บประจุของชุดที่ปลดสวิตช์  
โดยกำหนดให้ แรงดัน 1 p.u. = 17963 V
5. ชุดที่ 1 หมายถึง การปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1  
ชุดที่ 2 หมายถึง การปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 โดยชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 ยังคงต่ออยู่กับวงจร  
ชุดที่ 3 หมายถึง การปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 โดยชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 และ 2 ยังคงต่ออยู่กับวงจร

#### 5.4.1 ขนาดของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ

เพื่อศึกษาแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ ( $Z_{sc}$ )



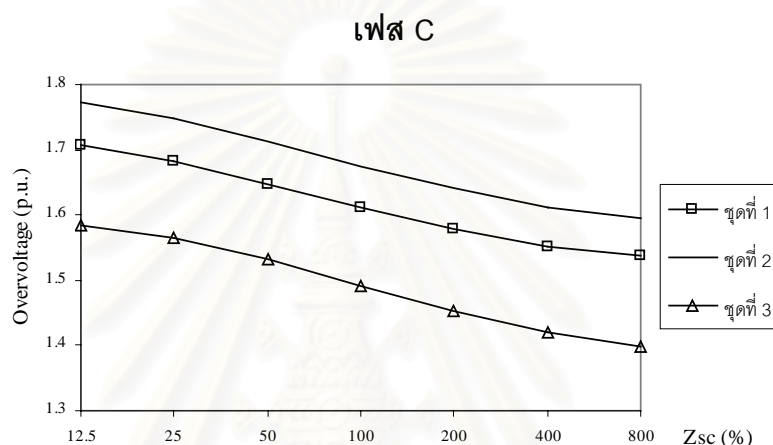
รูปที่ 5.44 แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์ (เฟส A)



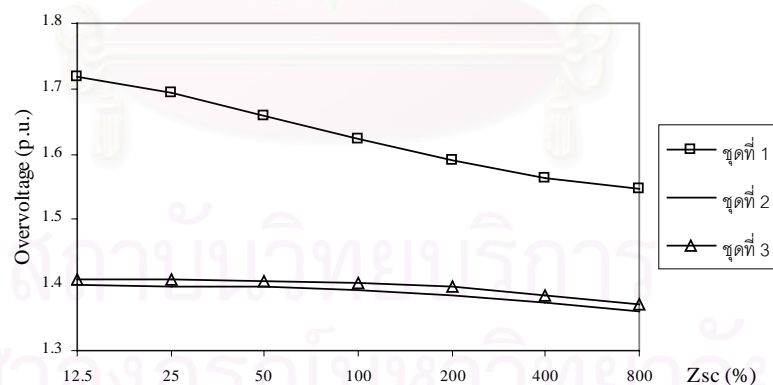
รูปที่ 5.45 แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์ (เฟส A)

จากรูปที่ 5.44 ถึง 5.45 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรเพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งระบบมีความแข็งแกร่งขึ้นจะส่งผลให้

1. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสมีค่าลดลง ทั้งการเกิดอาร์กข้ามเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3
2. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งการเกิดอาร์กข้ามเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3



รูปที่ 5.46 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์ (เฟส C)



รูปที่ 5.47 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์ (เฟส C)

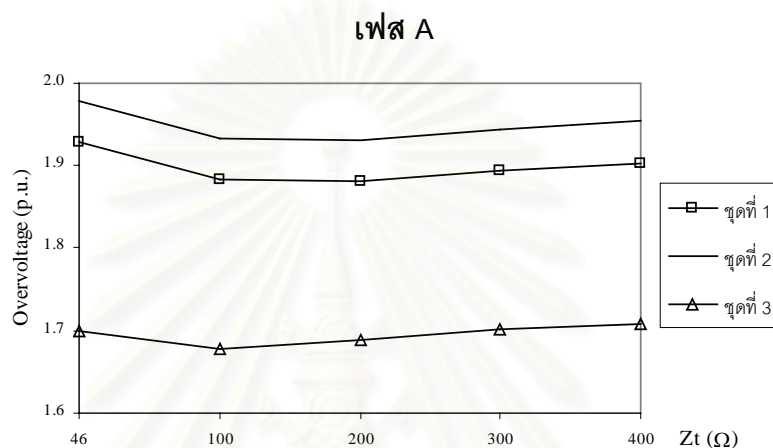
จากรูปที่ 5.46 ถึง 5.47 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรเพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งระบบมีความแข็งแกร่งขึ้นจะส่งผลให้

1. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสมีค่าลดลง ทั้งการเกิดอาร์กข้ามเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3

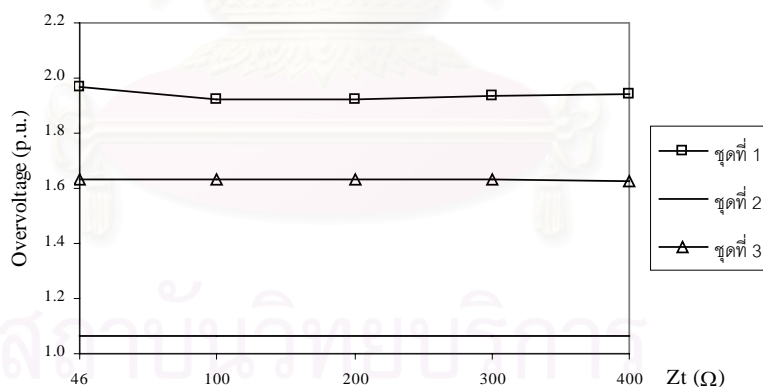
2. ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลง สำหรับการเกิดอาร์กข้ามสองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยสำหรับชุดที่ 2 และ 3

#### 5.4.2 ขนาดของอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง

เพื่อศึกษาแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง ( $Z_t$ ) ซึ่งเป็นสายส่งที่ต่อเข้ามายังสถานีไฟฟ้าด้านวงจรป้อน

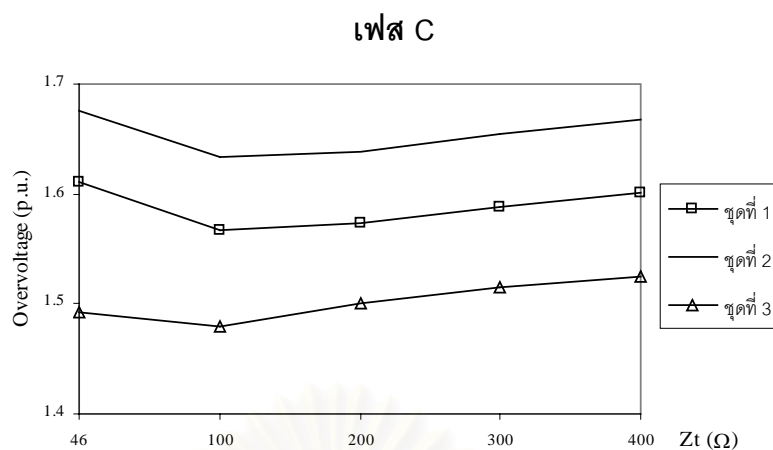


รูปที่ 5.48 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่巴士เมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์เสิร์จ (เฟส A)

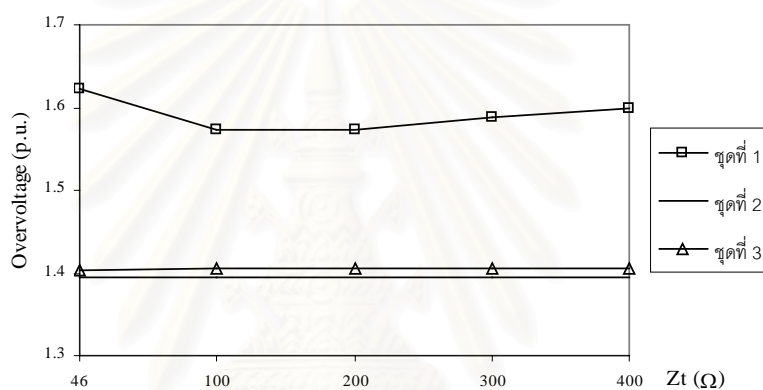


รูปที่ 5.49 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์เสิร์จ (เฟส A)

จากรูปที่ 5.48 ถึง 5.49 สรุปผลได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่งส่งผลต่อขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่巴士และชุดตัวเก็บประจุเล็กน้อยทั้งการเกิดอาร์กข้ามสองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3



รูปที่ 5.50 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์เสิร์จ (เฟส C)



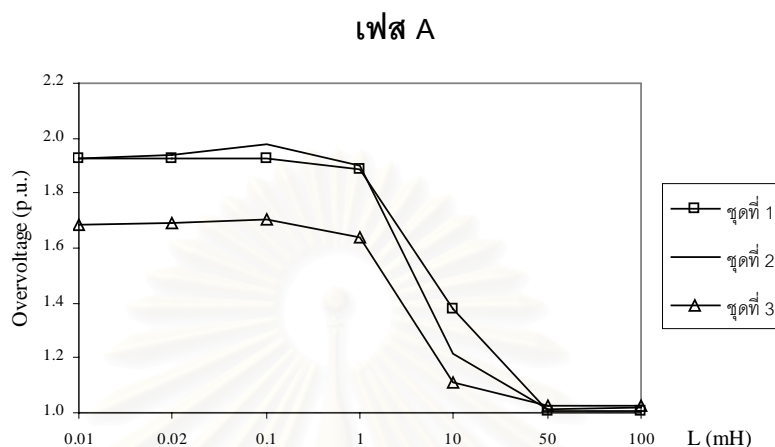
รูปที่ 5.51 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดอิมพีแดนซ์เสิร์จ (เฟส C)

จากรูปที่ 5.50 ถึง 5.51 สรุปผลได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่งส่งผลต่อขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสและชุดตัวเก็บประจุเล็กน้อยทั้งการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3

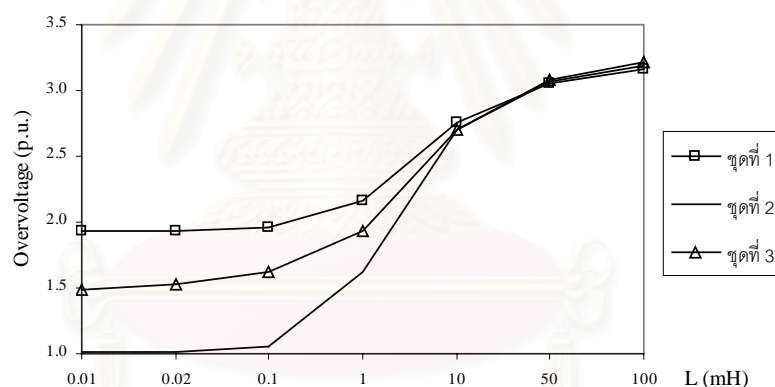


### 5.4.3 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ

เพื่อศึกษาแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) ซึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมชุดตัวเก็บประจุ



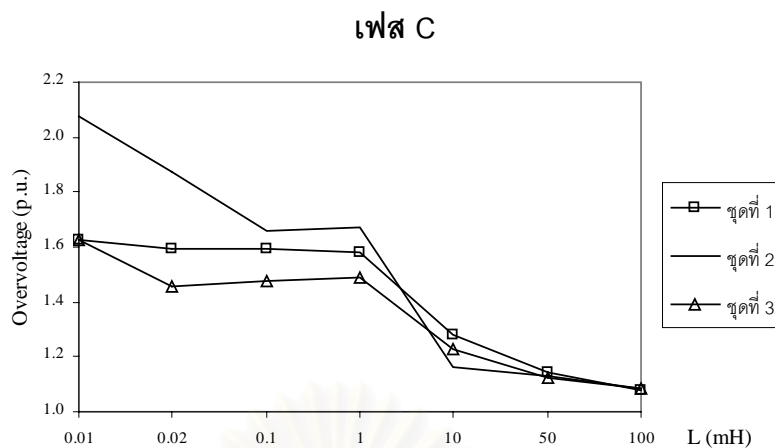
รูปที่ 5.52 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัลเมื่อเปลี่ยนขนาดตัวเหนี่ยวนำ (เฟส A)



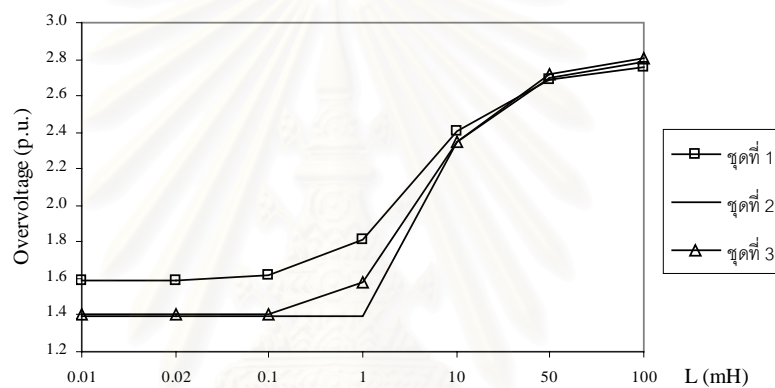
รูปที่ 5.53 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดตัวเหนี่ยวนำ (เฟส A)

จากรูปที่ 5.52 ถึง 5.53 สรุปได้ว่าเมื่อค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

1. ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัลมีค่าลดลง ทั้งการเกิดอาร์กข้ามเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3
2. ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งการเกิดอาร์กข้ามเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3



รูปที่ 5.54 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดตัวเหนี่ยวนำ (เฟส C)



รูปที่ 5.55 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดตัวเหนี่ยวนำ (เฟส C)

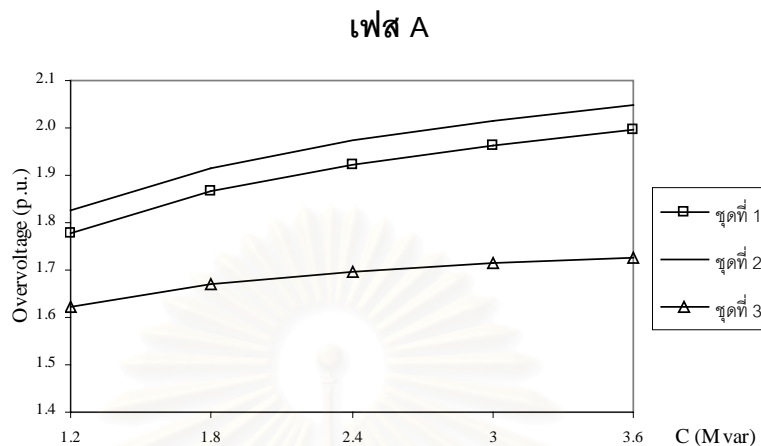
จากรูปที่ 5.54 ถึง 5.55 สรุปได้ว่าเมื่อค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

1. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสมีค่าลดลง ทั้งการเกิดอาร์กข้ามเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3
2. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งการเกิดอาร์กข้ามเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3

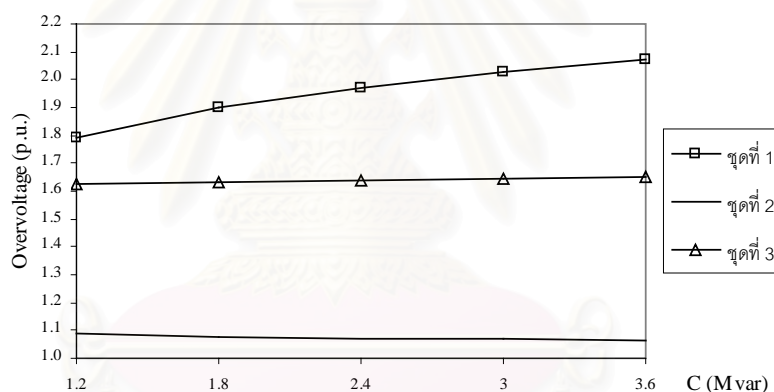
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 5.4.4 ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ

เพื่อศึกษาแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดชุดตัวเก็บประจุ (C)



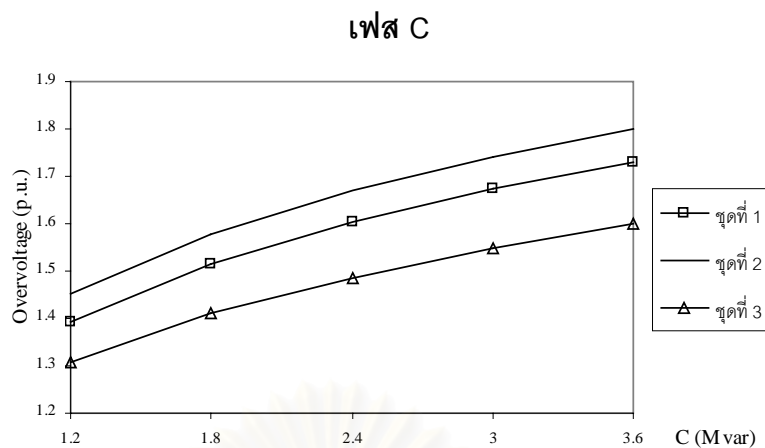
รูปที่ 5.56 แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดชุดตัวเก็บประจุ (เฟส A)



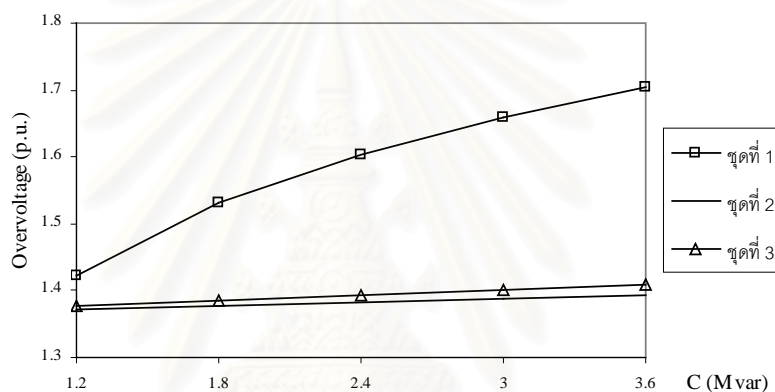
รูปที่ 5.57 แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดชุดตัวเก็บประจุ (เฟส A)

จากรูปที่ 5.56 ถึง 5.57 สรุปได้ว่าเมื่อค่าชุดตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

1. ขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัสมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งการเกิดอาร์คข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3
2. ขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการเกิดอาร์คข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับชุดที่ 2 และ 3



รูปที่ 5.58 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดชุดตัวเก็บประจุ (เฟส C)



รูปที่ 5.59 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดชุดตัวเก็บประจุ (เฟส C)

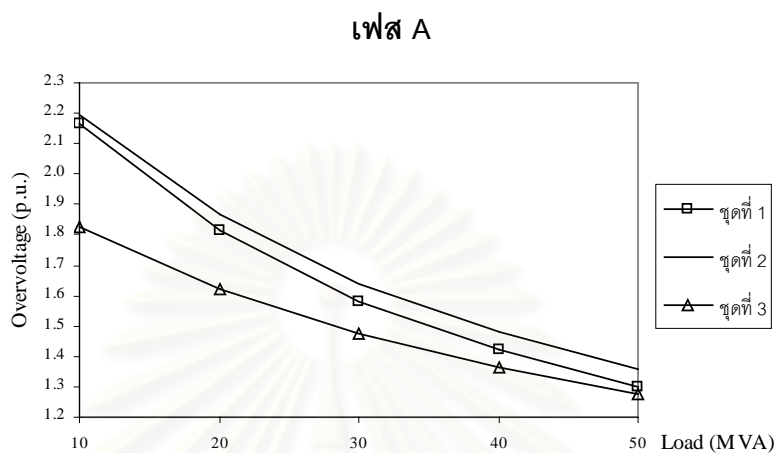
จากรูปที่ 5.58 ถึง 5.59 สรุปได้ว่าเมื่อค่าชุดตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

1. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุจุดที่ 1 , 2 และ 3
2. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุจุดที่ 1 แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับจุดที่ 2 และ 3

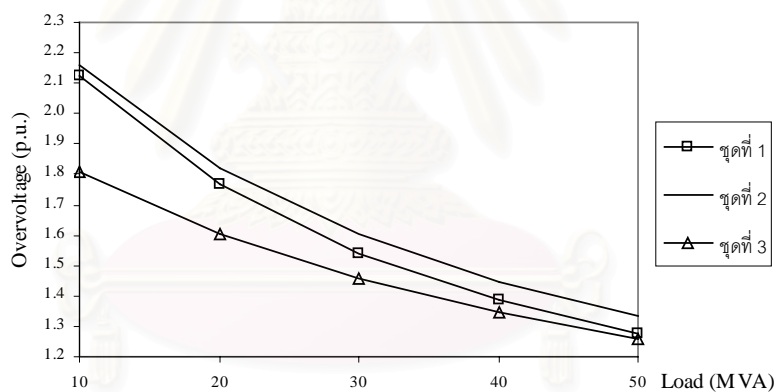
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.4.5 ขนาดของโหลด

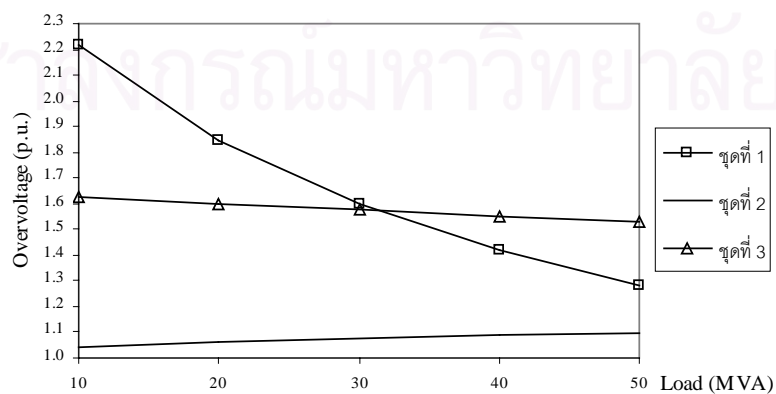
เพื่อศึกษาแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของโหลดและค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 และ 0.9



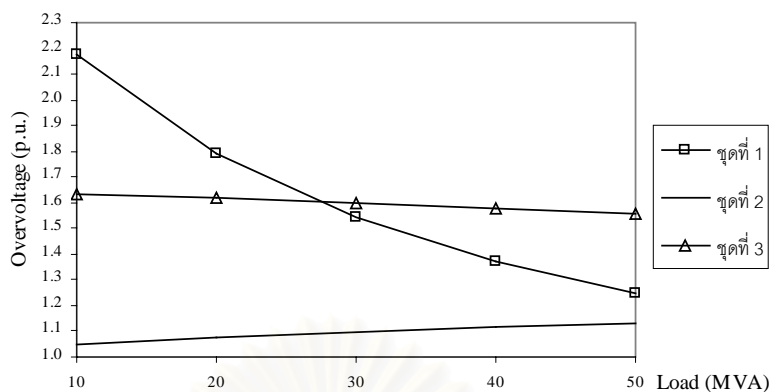
รูปที่ 5.60 แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.8) (เฟส A)



รูปที่ 5.61 แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.9)(เฟส A)



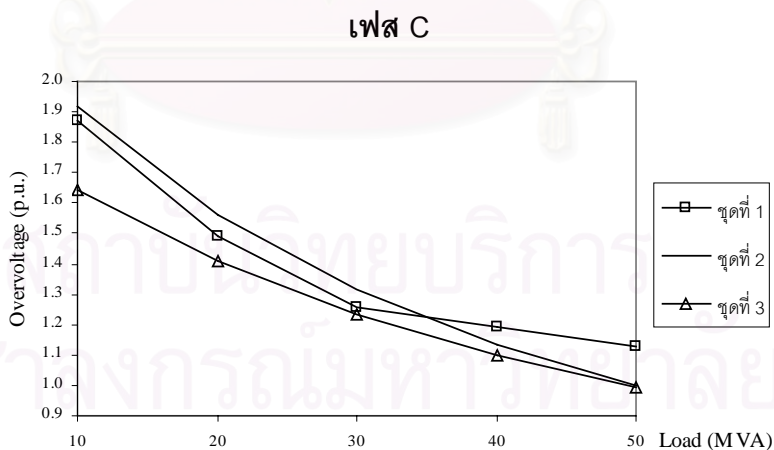
รูปที่ 5.62 แรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.8) (เฟส A)



รูปที่ 5.63 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่จุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (p.f. 0.9) (เฟส A)

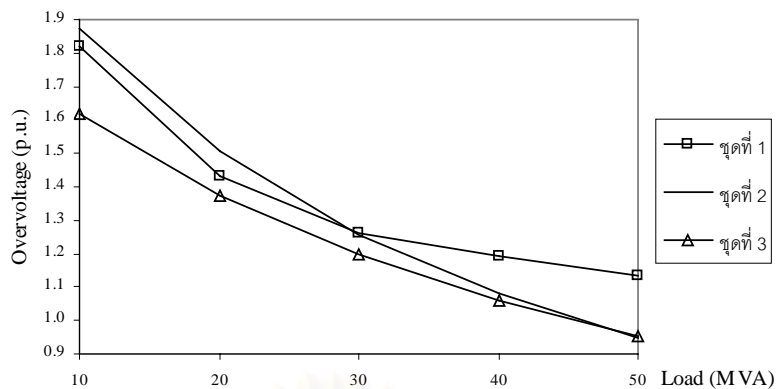
จากรูปที่ 5.60 ถึง 5.63 สรุปผลได้ว่าเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

1. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสมีค่าลดลง ทั้งการเกิดอาร์กข้ามสองเฟสขณะปลดสวิตซ์จุดตัวเก็บประจุจุดที่ 1 , 2 และ 3
2. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่จุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลง สำหรับการเกิดอาร์กข้ามสองเฟสขณะปลดสวิตซ์จุดตัวเก็บประจุจุดที่ 1 แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยสำหรับจุดที่ 2 และ 3
3. ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 และ 0.9 มีผลต่อขนาดของแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงที่เกิดขึ้นน้อยมาก ทั้งการเกิดอาร์กข้ามสองเฟสขณะปลดสวิตซ์จุดตัวเก็บประจุจุดที่ 1 , 2 และ 3

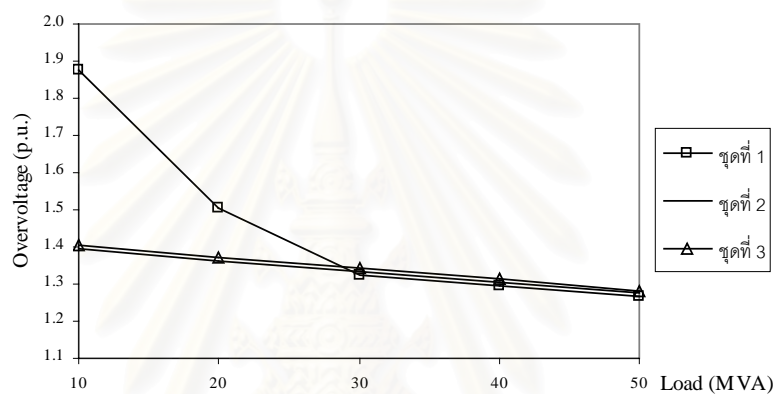


รูปที่ 5.64 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (เฟส C) 0.8

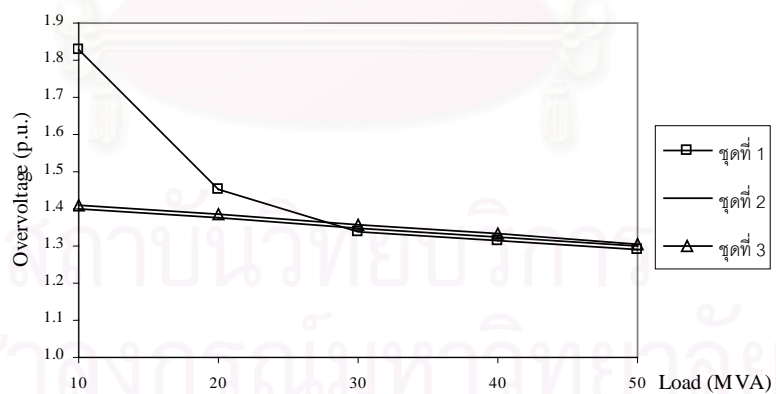




รูปที่ 5.65 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (เฟส C)0.9



รูปที่ 5.66 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (เฟส C)0.8



รูปที่ 5.67 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อเปลี่ยนขนาดโหลด (เฟส C)0.9

จากรูปที่ 5.64 ถึง 5.67 สรุปผลได้ว่าเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

1. ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสมีค่าลดลง ทั้งการเกิดอาร์กข้ามเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุจุดที่ 1 , 2 และ 3

2. ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลง สำหรับการเกิดอาร์กซ้ำเนื่องจากการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยสำหรับชุดที่ 2 และ 3
3. ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 และ 0.9 มีผลต่อขนาดของแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งที่เกิดขึ้นน้อยมาก ทั้งการเกิดอาร์กซ้ำสองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### การศึกษาวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุของกรณีศึกษา

บทนี้จะนำวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งจากที่ได้กล่าวในบทที่ 3 มาใช้กับกรณีศึกษา เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมกับการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

#### 6.1 การควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์เนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

##### 6.1.1 การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ (Pre-insertion resistor)

จากบทที่ 3 ขนาดของตัวต้านทานที่เหมาะสม

$$R_{\text{optimum}} \approx \sqrt{L/C}$$

สามารถประมาณค่าความเหนี่ยวนำของระบบ (L) ได้จากการรวมค่าความเหนี่ยวนำของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรกับค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง

$$29.1953 + 102.8363 = 132.0316 \text{ mH}$$

จากนั้นแปลงให้อยู่ในด้านแรงดัน 22 kV

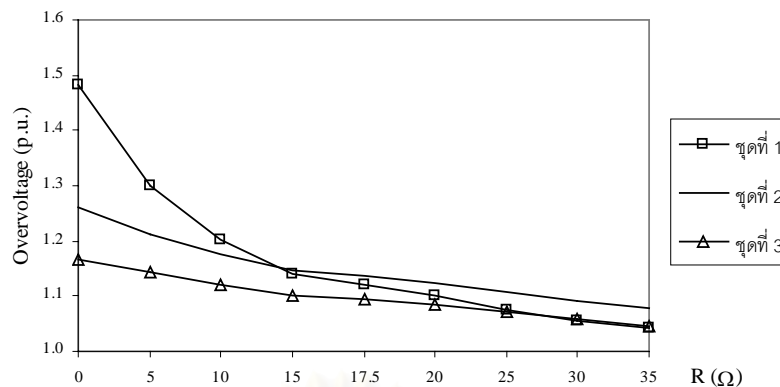
$$132.0316 \left( \frac{22}{115} \right)^2 = 4.832 \text{ mH}$$

ฉะนั้นจะได้

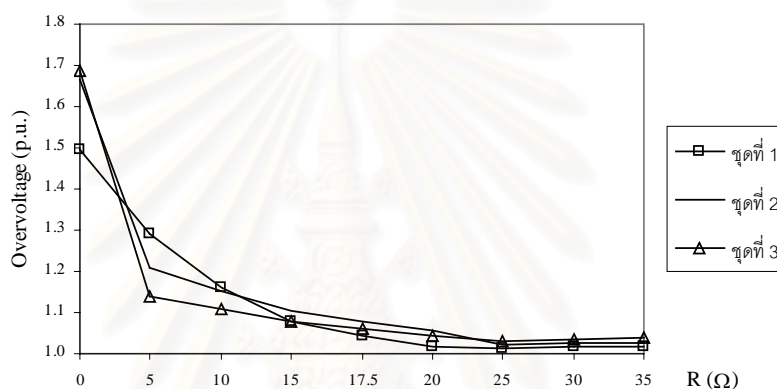
$$R_{\text{optimum}} \approx \sqrt{\frac{4.832 \text{ mH}}{15.783 \text{ } \mu\text{F}}} = 17.5 \Omega$$

รูปที่ 6.1 ถึง 6.3 แสดงผลของการใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ที่ขนาดต่างๆ

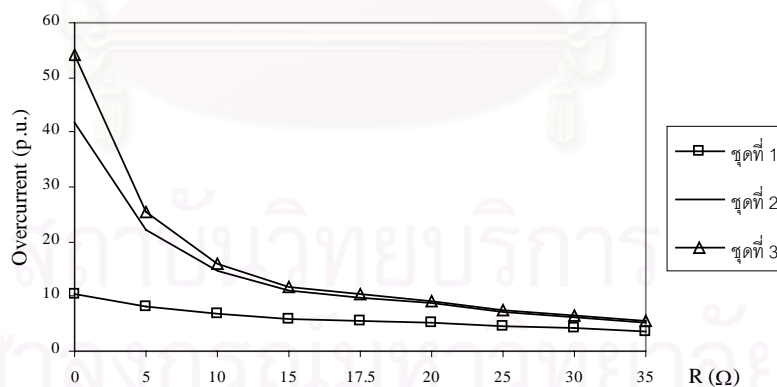
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.1 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อใช้ตัวต้านทานขนาดต่างๆ



รูปที่ 6.2 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อใช้ตัวต้านทานขนาดต่างๆ



รูปที่ 6.3 กระแสเกินสวิตชิงสูงสุดเมื่อใช้ตัวต้านทานขนาดต่างๆ

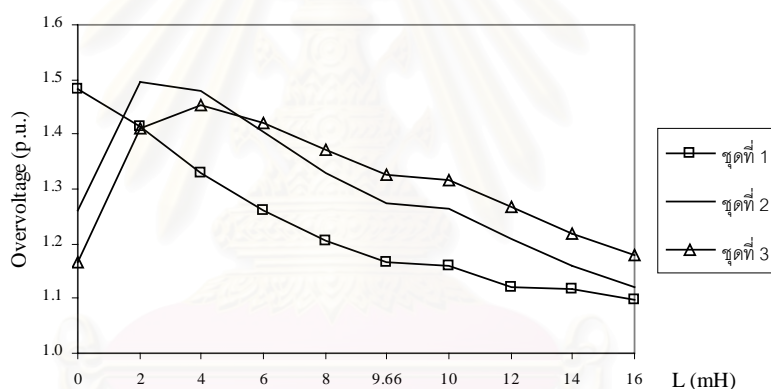
จากผลพบว่าเมื่อขนาดตัวต้านทานเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันเกินสวิตชิงที่บัสและที่ชุดตัวเก็บประจุรวมทั้งขนาดกระแสเกินสวิตชิงจะมีขนาดลดลง แต่เมื่อใช้ตัวต้านทานมากกว่า 17.5 Ω ขนาดแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงจะลดลงไม่มากนัก ซึ่งการใช้ตัวต้านทาน 17.5 Ω ช่วยลดแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงเนื่องจากการสับชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3 โดยส่งผลให้แรงดันที่

บัสมีค่า 1.12 ,1.14 และ 1.09 p.u. ตามลำดับ สำหรับแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่า 1.04, 1.08 และ 1.06 p.u. ตามลำดับ สำหรับกระแสมีค่า 5.48, 9.74 และ 10.3 p.u. ตามลำดับ และในกรณี การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back หรือการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 หรือ 3 นั้นการใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ช่วยลดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งได้ดีแม้จะใช้ตัวต้านทาน ขนาดเล็ก ส่วนการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว หรือการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์จะช่วยลดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งได้ดีแต่ลดกระแสเกินสวิตช์ซึ่งได้ไม่มากนัก

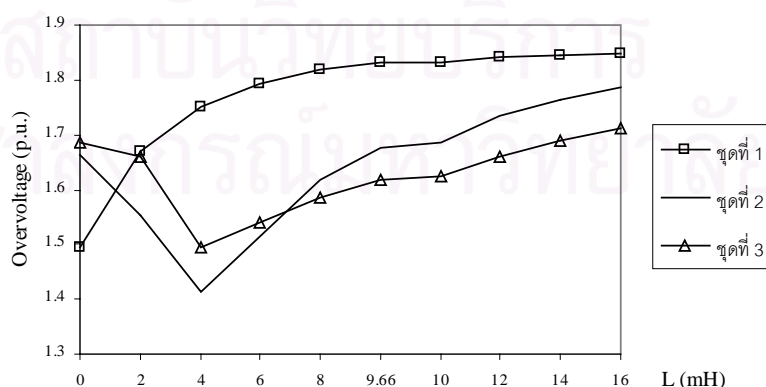
### 6.1.2 การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ (Pre-insertion inductor)

จากบทที่ 3 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมประมาณสองเท่าของตัวเหนี่ยวนำของระบบ ซึ่งได้ค่าประมาณ 9.66 mH

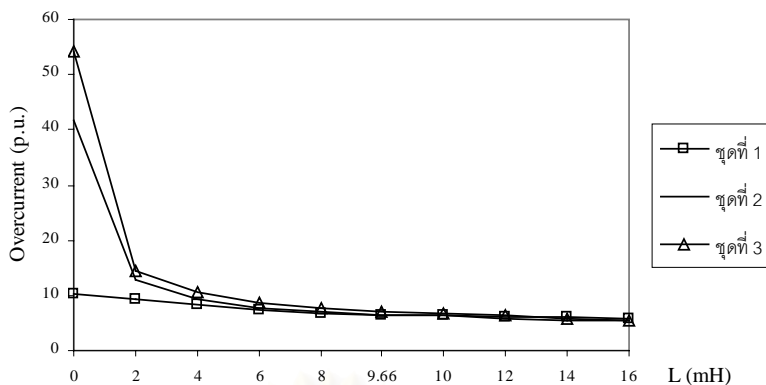
รูปที่ 6.4 ถึง 6.6 แสดงผลของการใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ที่ขนาดต่างๆ



รูปที่ 6.4 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสเมื่อใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ



รูปที่ 6.5 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ



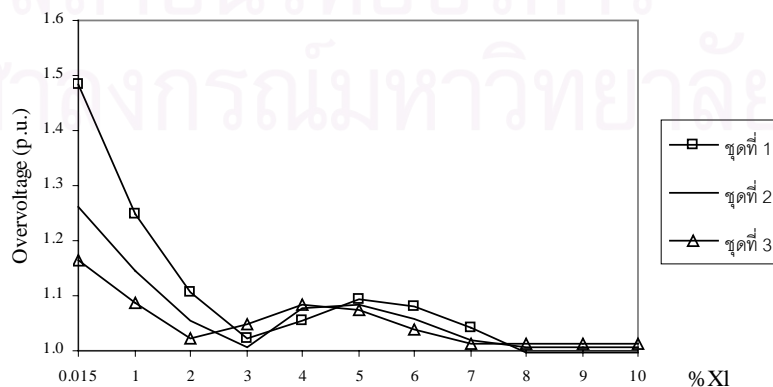
รูปที่ 6.6 กระแสเกินสวิตชิงสูงสุดเมื่อใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆ

จากผลพบว่าเมื่อใช้ขนาดความเหนี่ยวนำประมาณ 9.66 mH สามารถจะลดแรงดันเกินสวิตชิงที่บัสได้พอสมควรในการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว แต่กลับไปเพิ่มแรงดันเกินสวิตชิงที่บัสในการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุแบบ back to back สำหรับแรงดันเกินสวิตชิงที่ชุดตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นแต่กระแสเกินชั่วขณะจะลดลงทั้งการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back ซึ่งการใช้ตัวเหนี่ยวนำ 9.66 mH ช่วยลดแรงดันและกระแสสวิตชิงเนื่องจากการสับชุดตัวเก็บประจุจุดที่ 1, 2 และ 3 โดยส่งผลให้แรงดันที่บัสมีค่า 1.17, 1.27 และ 1.33 p.u. ตามลำดับ สำหรับแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่า 1.83, 1.68 และ 1.62 p.u. ตามลำดับ สำหรับกระแสมีค่า 6.5, 6.38 และ 6.95 p.u. ตามลำดับ

### 6.1.3 การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ

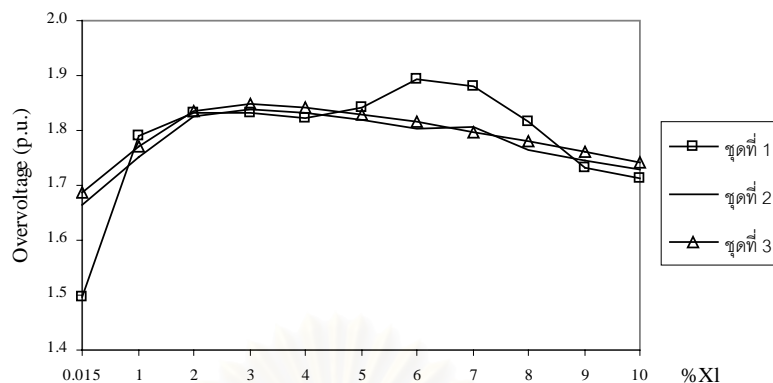
จากบทที่ 3 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสม ประมาณ 6 % หรือ 7 % ของชุดตัวเก็บประจุ

รูปที่ 6.7 ถึง 6.9 แสดงผลของการใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุที่ขนาดต่างๆ

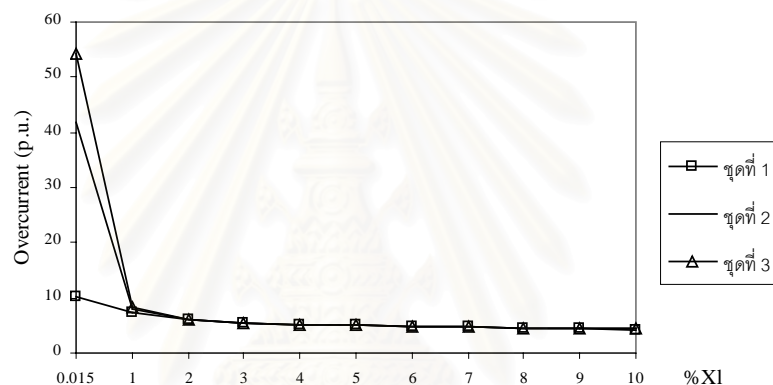


รูปที่ 6.7 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัสเมื่อใช้ขนาดตัวเหนี่ยวนำต่างๆ





รูปที่ 6.8 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุเมื่อใช้ขนาดตัวเหนี่ยวนำต่างๆ



รูปที่ 6.9 กระแสเกินสวิตชิงสูงสุดเมื่อใช้ขนาดตัวเหนี่ยวนำต่างๆ

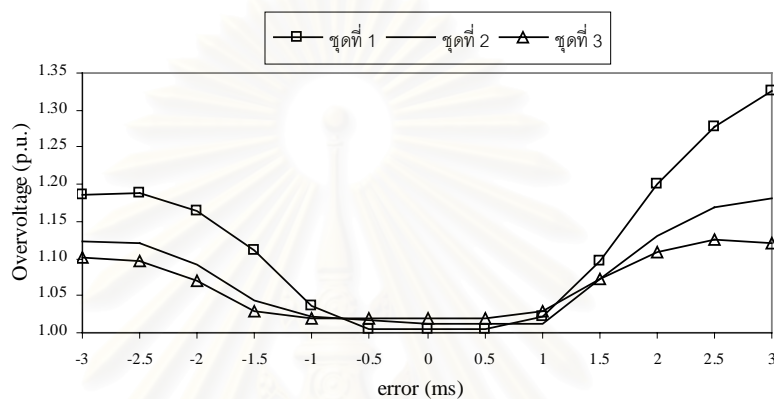
จากผลพบว่าการใช้ตัวเหนี่ยวนำ 7% สามารถลดแรงดันเกินสวิตชิงที่บัลได้ดี แต่จะทำให้แรงดันเกินสวิตชิงที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับกระแสเกินสวิตชิงมีค่าลดลง ทั้งการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back ซึ่งการใช้ตัวเหนี่ยวนำ 7 % ช่วยลดแรงดันและกระแสสวิตชิงเนื่องจากการสับชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3 โดยส่งผลให้แรงดันที่บัลมีค่า 1.04 , 1.02 และ 1.01 p.u. ตามลำดับ สำหรับแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่า 1.88, 1.81 และ 1.8 p.u. ตามลำดับ สำหรับกระแสมีค่า 4.64, 4.65 และ 4.67 p.u. ตามลำดับ

#### 6.1.4 การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตซ์ (Synchronous Closing Control)

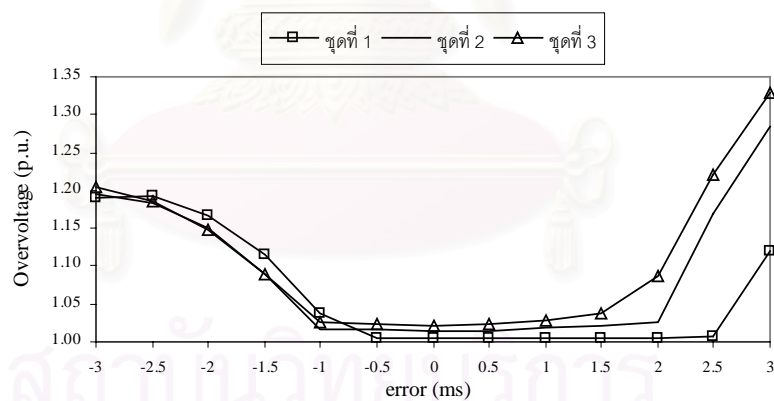
ผลของการใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตซ์สามารถลดแรงดันเกินสวิตชิงที่บัลและชุดตัวเก็บประจุรวมทั้งกระแสเกินสวิตชิงได้ดีทั้งการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back ซึ่งการใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตซ์ช่วยลดแรงดันและกระแสสวิตชิงเนื่องจากการสับชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3 โดยส่งผลให้แรงดันที่บัลมีค่า 1.01 , 1.01 และ 1.02 p.u. ตามลำดับ

สำหรับแรงดันที่ขุดตัวเก็บประจุมีค่า 1.01, 1.01 และ 1.02 p.u. ตามลำดับ สำหรับกระแสมีค่า 1.37, 2.16 และ 2.46 p.u. ตามลำดับแต่หากเกิดความคลาดเคลื่อนของเวลาในการสับสวิตช์ขุดตัวเก็บประจุอาจทำให้เกิดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งมีขนาดสูง

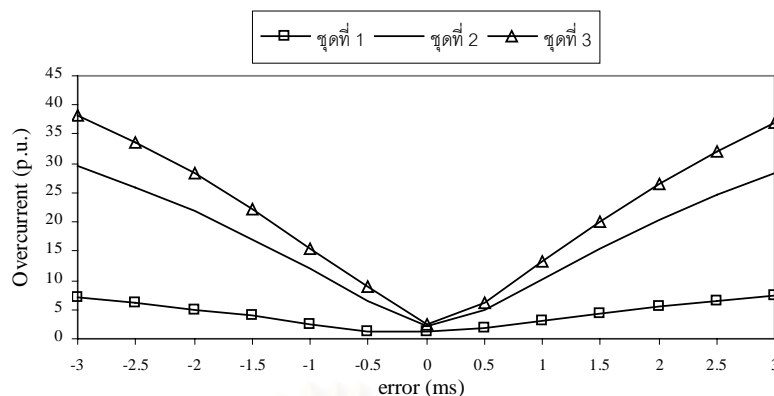
รูปที่ 6.10 ถึง 6.12 แสดงผลของเวลาคลาดเคลื่อนในการสับสวิตช์เมื่อการปิดสวิตช์ของเฟส A และเฟส B เกิดการคลาดเคลื่อน



รูปที่ 6.10 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสเมื่อเวลาคลาดเคลื่อนต่างๆ



รูปที่ 6.11 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ขุดตัวเก็บประจุเมื่อเวลาคลาดเคลื่อนต่างๆ



รูปที่ 6.12 กระแสเกินสวิตชิงสูงสุดเมื่อเวลาคลาดเคลื่อนต่างๆ

จากผลพบว่าหากความคลาดเคลื่อนของเวลาในการสับสวิตชิงชุดตัวเก็บประจุของเฟส A และ B อยู่ในช่วง  $\pm 1$  ms แรงดันและกระแสเกินสวิตชิงจะมีขนาดไม่มาก

### 6.1.5 เปรียบเทียบผลการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงด้วยวิธีการต่างๆ

จากวิธีการทั้งหมดจะนำมาผลมาเปรียบเทียบเพื่อหาวิธีการที่สามารถลดแรงดันและกระแสเกินสวิตชิงได้ดีที่สุด โดยกำหนดให้

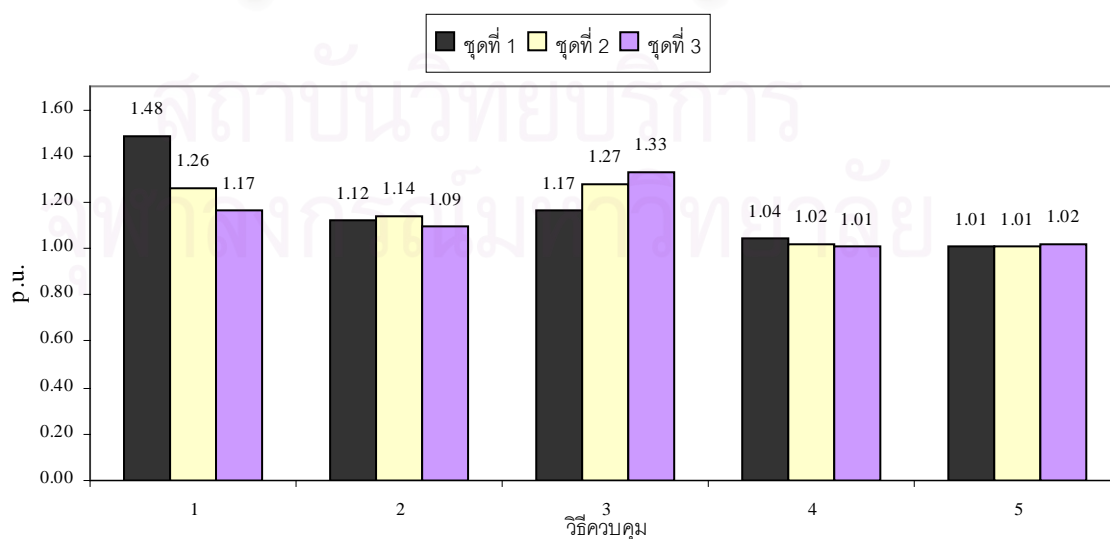
วิธีที่ 1 คือ ไม่มีการควบคุม

วิธีที่ 2 คือ การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตชิง (Pre-insertion resistor)

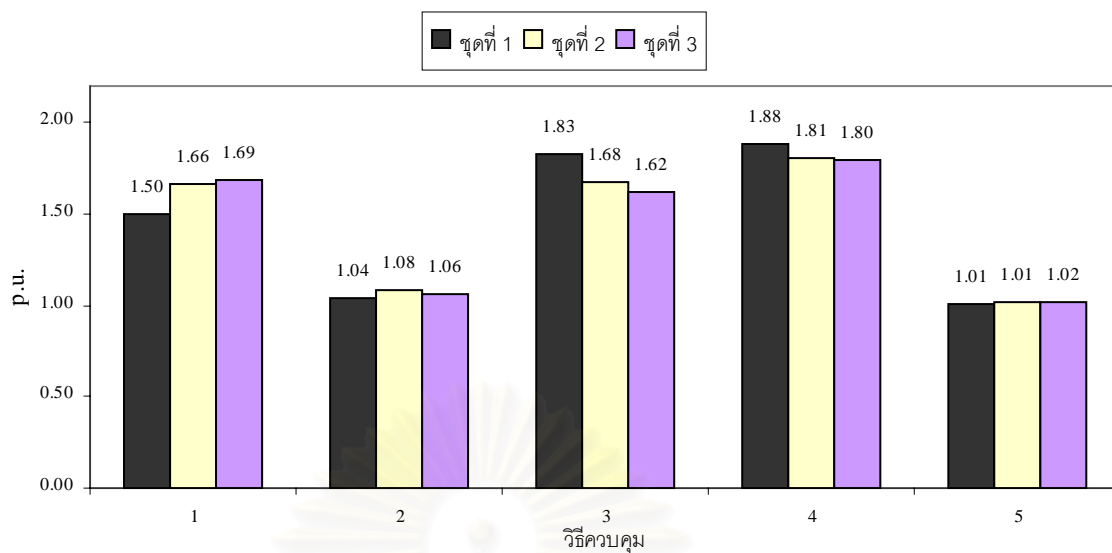
วิธีที่ 3 คือ การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตชิง (Pre-insertion inductor)

วิธีที่ 4 คือ การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ

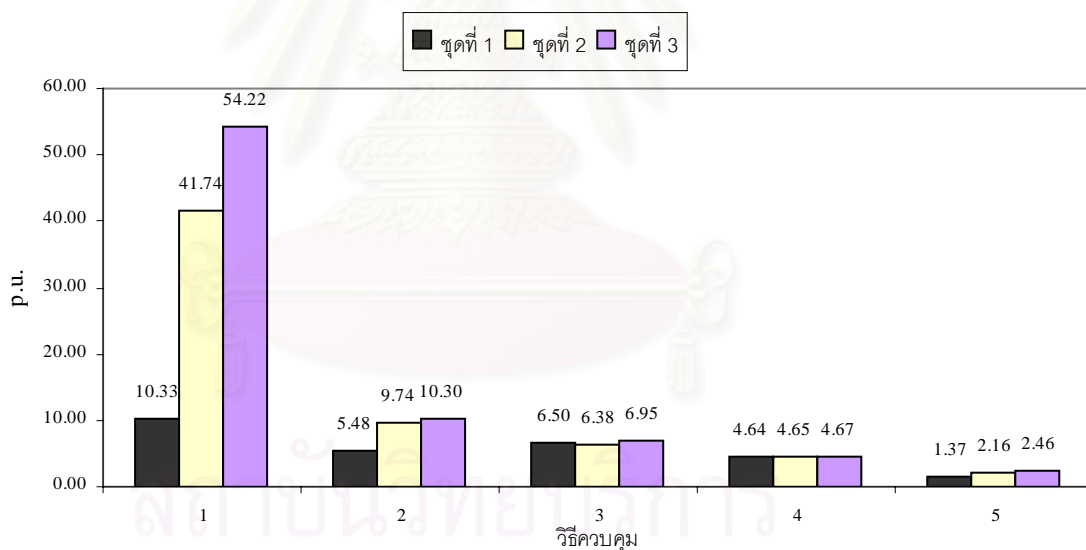
วิธีที่ 5 คือ การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตชิง (Synchronous Closing Control)



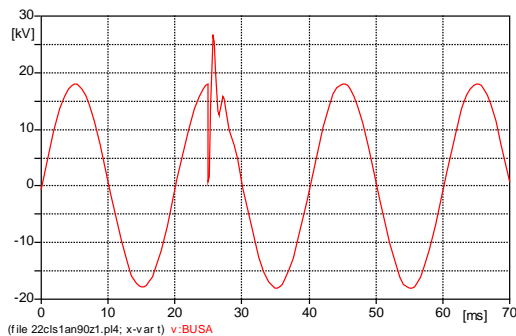
รูปที่ 6.13 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่บัล



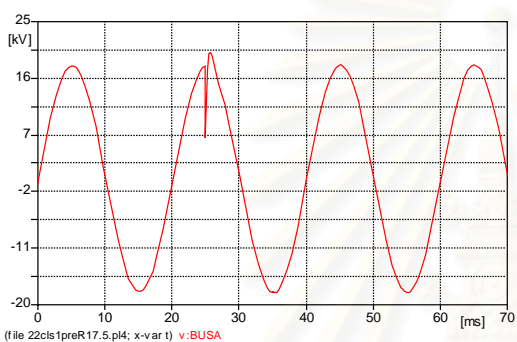
รูปที่ 6.14 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุ



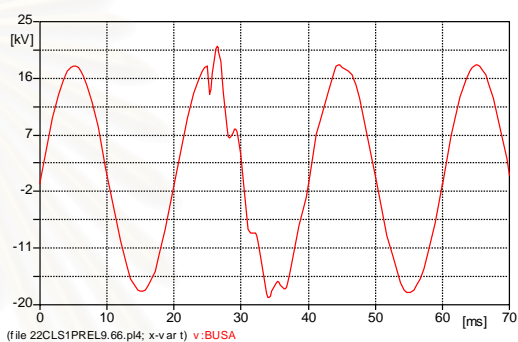
รูปที่ 6.15 กระแสเกินสวิตช์สูงสุด



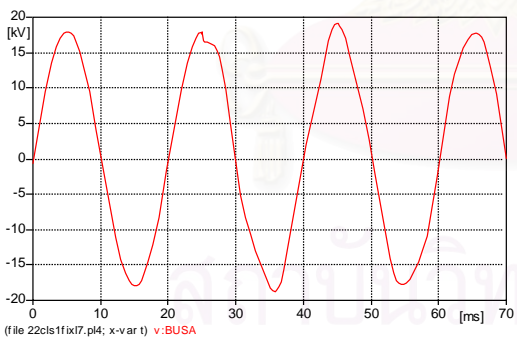
(ก) ไม่มีกรควบคุม



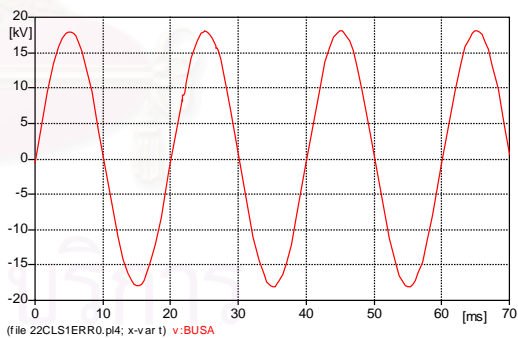
(ข) การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์



(ค) การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์

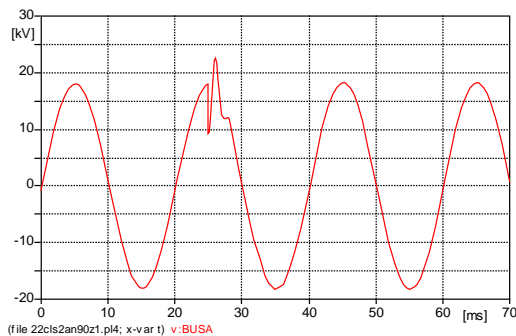


(ง) การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ

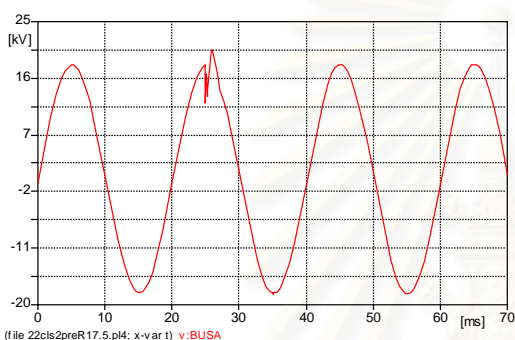


(จ) การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์

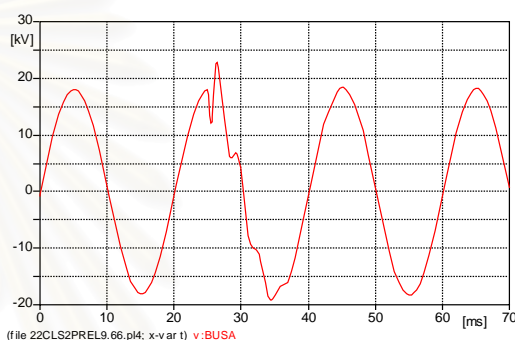
รูปที่ 6.16 รูปคลื่นแรงดันที่บัสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งต่างๆของการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1



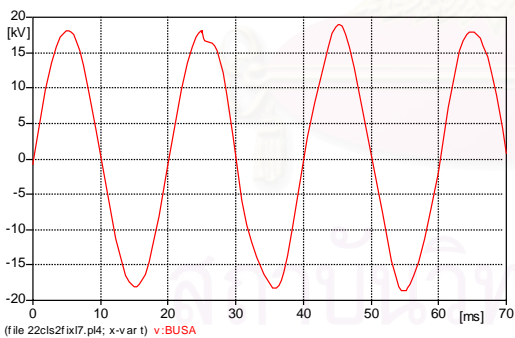
(ก) ไม่มีกรควบคุม



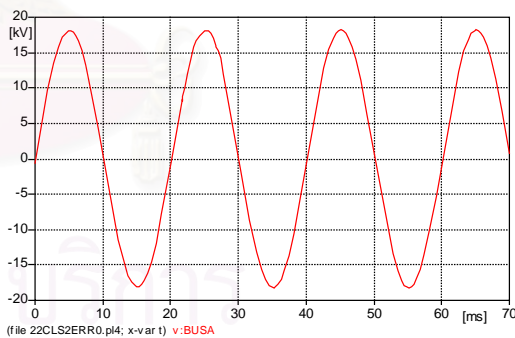
(ข) การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์



(ค) การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์



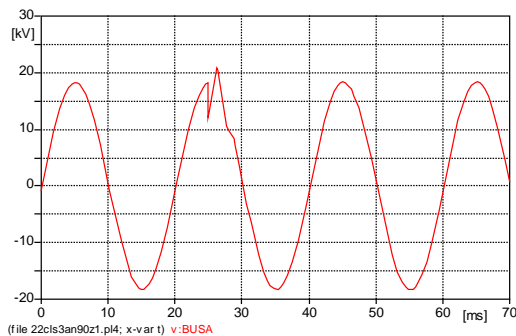
(ง) การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ



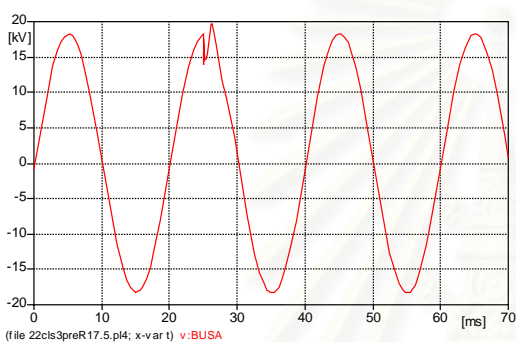
(จ) การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์

รูปที่ 6.17 รูปคลื่นแรงดันที่บัสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งต่างๆของการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2

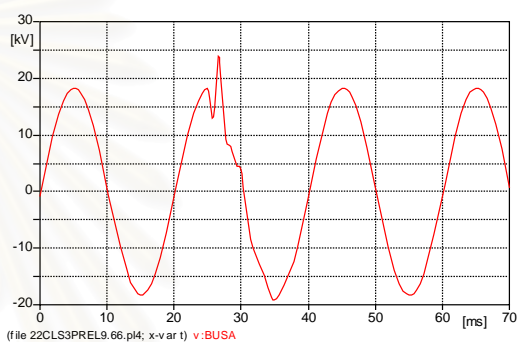




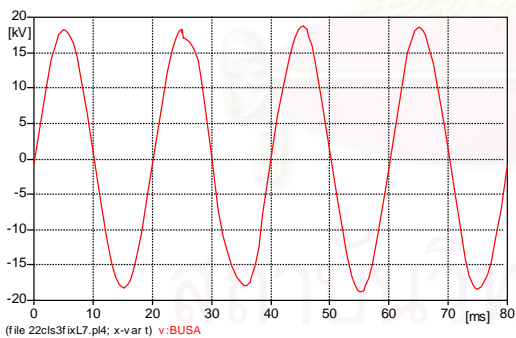
(ก) ไม่มีกรควบคุม



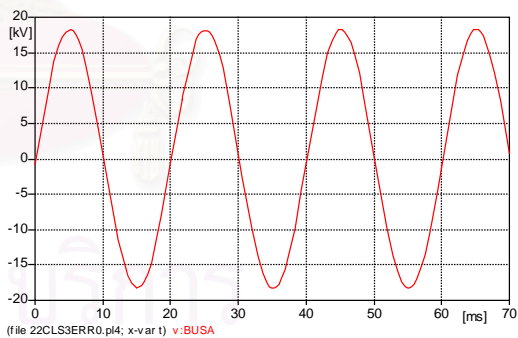
(ข) การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์



(ค) การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์

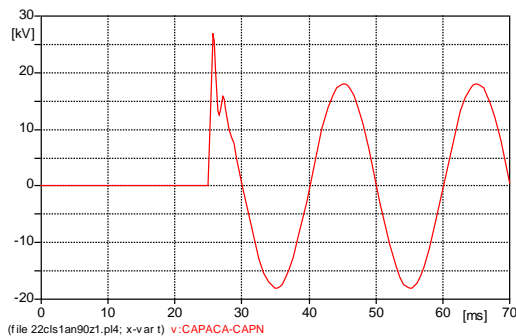


(ง) การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ

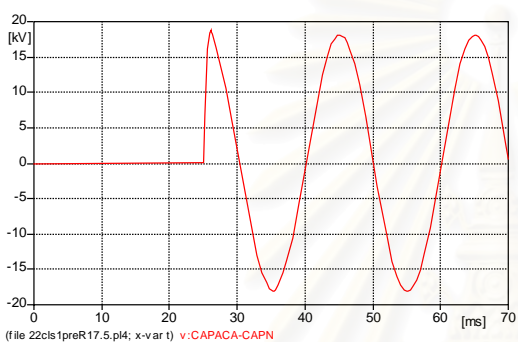


(จ) การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์

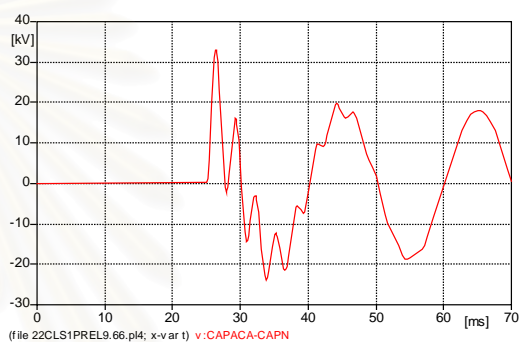
รูปที่ 6.18 รูปคลื่นแรงดันที่บัสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งต่างๆของการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3



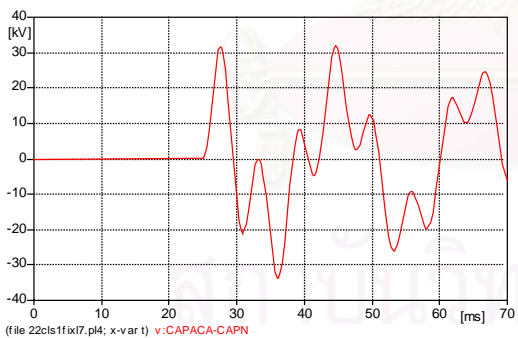
(ก) ไม่มีการควบคุม



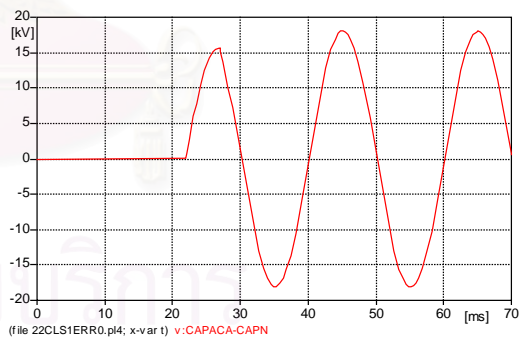
(ข) การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์



(ค) การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์

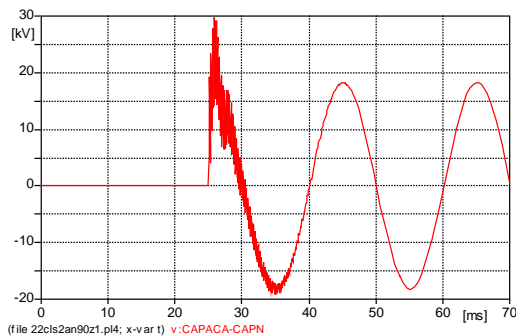


(ง) การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ

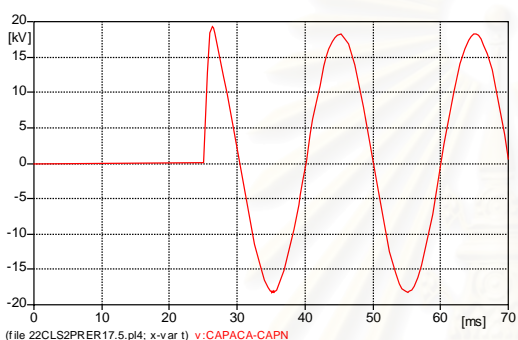


(จ) การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์

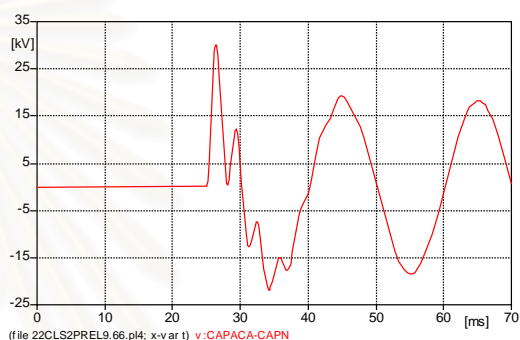
รูปที่ 6.19 รูปคลื่นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งต่างๆของการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1



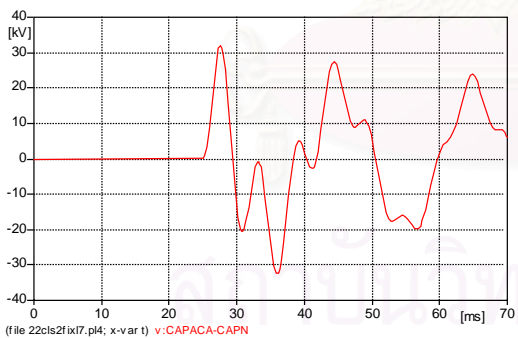
(ก) ไม่มีการควบคุม



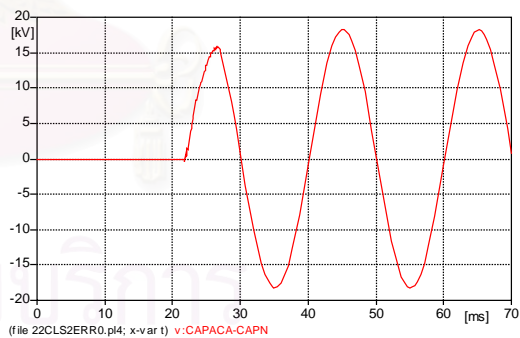
(ข) การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์



(ค) การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์

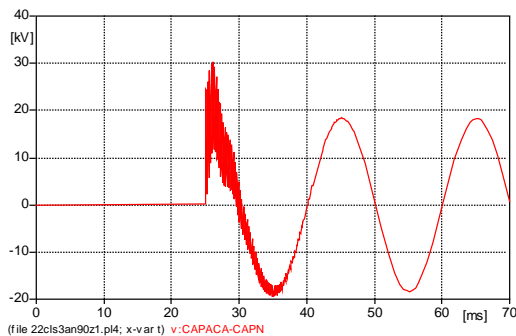


(ง) การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ

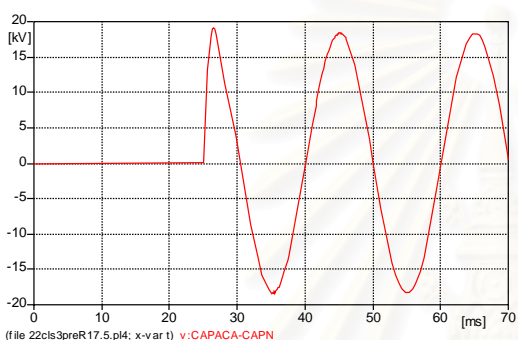


(จ) การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์

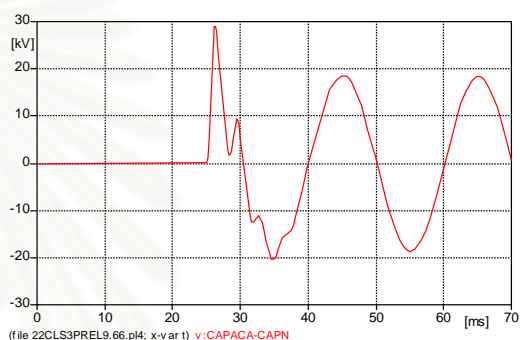
รูปที่ 6.20 รูปคลื่นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ซึ่งต่างๆของการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2



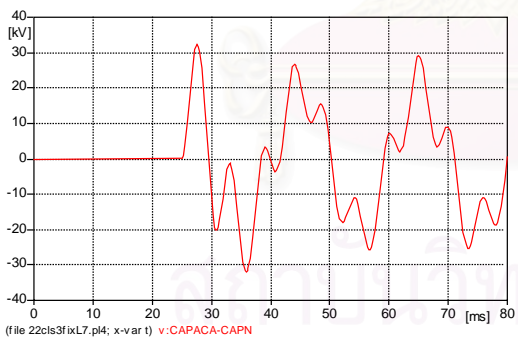
(ก) ไม่มีการควบคุม



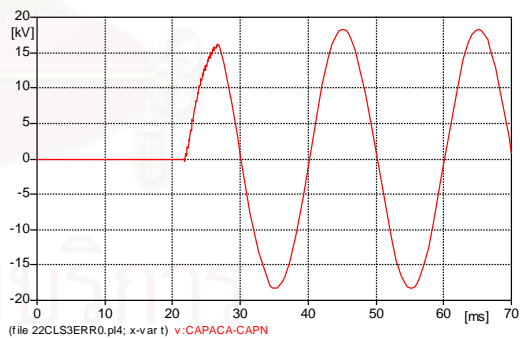
(ข) การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์



(ค) การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์

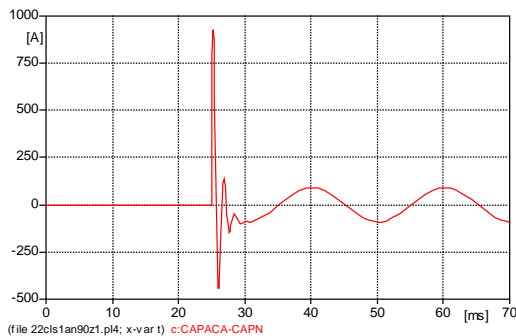


(ง) การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ

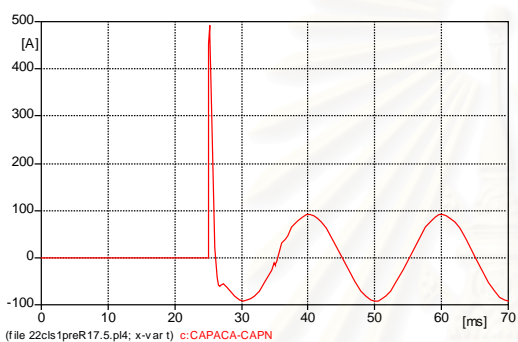


(จ) การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์

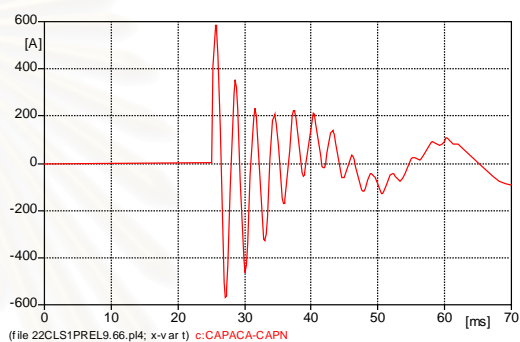
รูปที่ 6.21 รูปคลื่นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งต่างๆของการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3



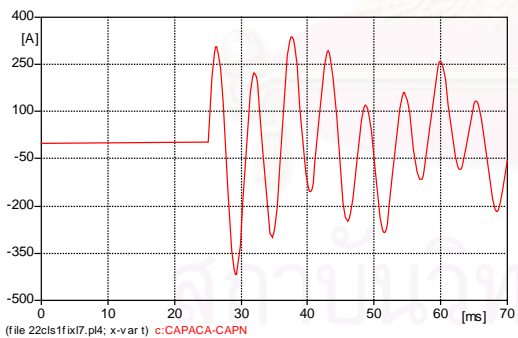
(ก) ไม่มีกรควบคุม



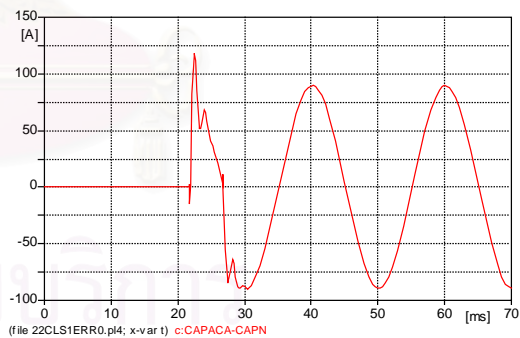
(ข) การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์



(ค) การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์

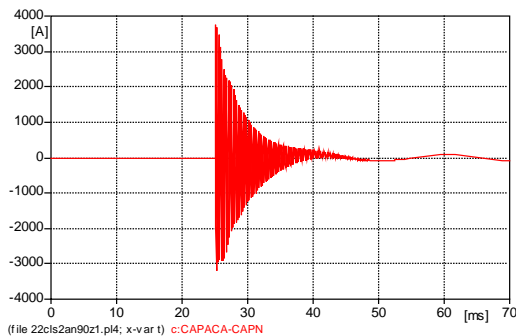


(ง) การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ

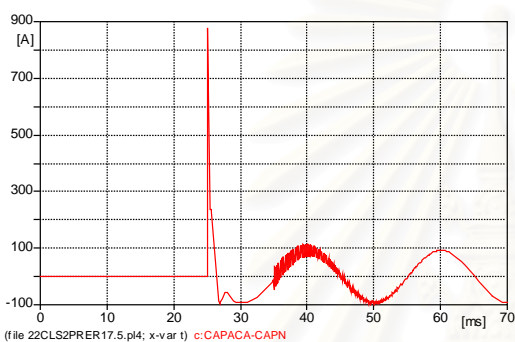


(จ) การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์

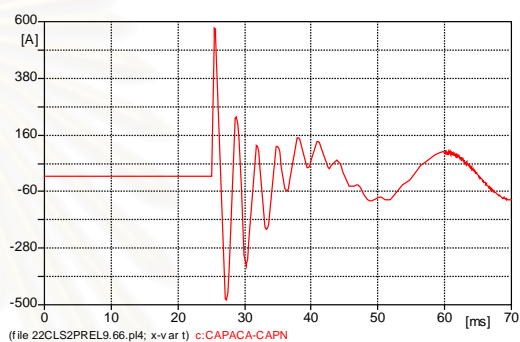
รูปที่ 6.22 รูปคลื่นกระแสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งต่างๆ  
ของการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1



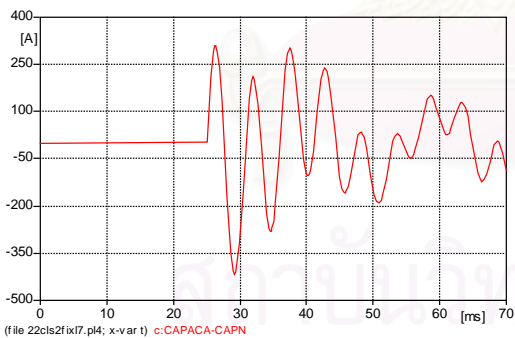
(ก) ไม่มี การควบคุม



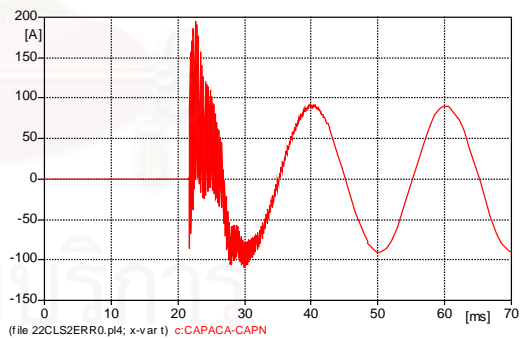
(ข) การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์



(ค) การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์



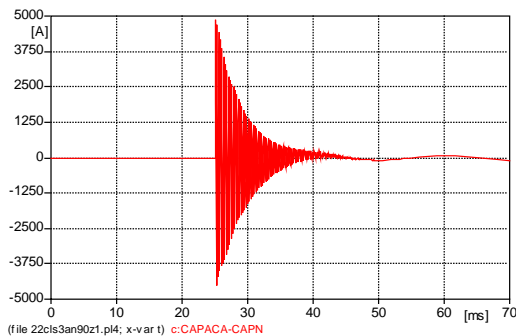
(ง) การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ



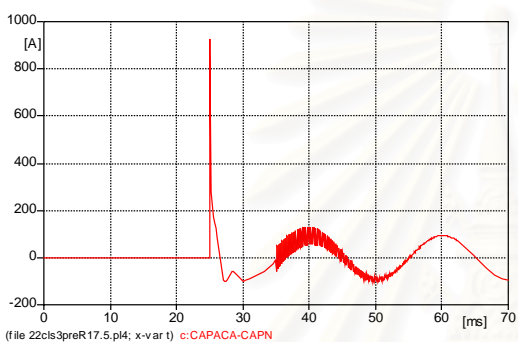
(จ) การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์

รูปที่ 6.23 รูปคลื่นกระแสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งต่างๆ ของการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2

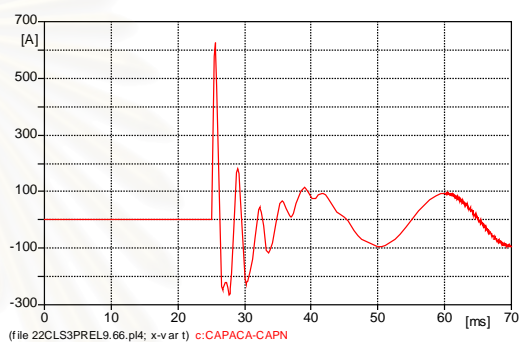




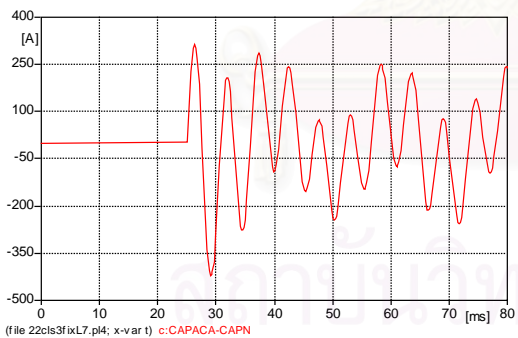
(ก) ไม่มีการควบคุม



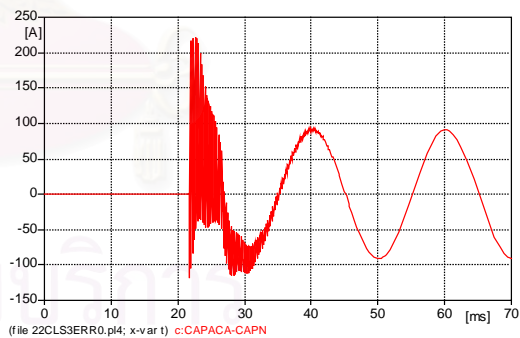
(ข) การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์



(ค) การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์



(ง) การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ



(จ) การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์

รูปที่ 6.24 รูปคลื่นกระแสจากวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งต่างๆ  
ของการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3

## สรุปผลการเปรียบเทียบ

จากรูปที่ 6.13 ถึง 6.24 พบว่าผลการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุทั้งแบบแยกเดี่ยวและแบบ back to back มีแนวโน้มเหมือนกันคือ

1. การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์และการใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุทำให้แรงดันเกินสวิตช์ที่บัสมีขนาดต่ำและรูปคลื่นแรงดันที่บัสมีออสซิลเลชันน้อยที่สุด รองลงมาเป็นการใช้ความต้านทานขนานสวิตช์และการใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ตามลำดับ

2. การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์และการใช้ความต้านทานขนานสวิตช์ทำให้แรงดันเกินสวิตช์ที่ชุดตัวเก็บประจุมีขนาดต่ำและรูปคลื่นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุมีการออสซิลเลชันน้อยที่สุด รองลงมาเป็นการใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ซึ่งจะมีขนาดแรงดันเกินสวิตช์และการออสซิลเลชันสูงกว่า สำหรับการใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุนอกจากทำให้แรงดันเกินสวิตช์มีขนาดสูงแล้วก็ทำให้รูปคลื่นแรงดันมีความผิดเพี้ยนด้วย

3. การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์ทำให้รูปคลื่นกระแสมีออสซิลเลชันมากในช่วงแรก แต่มีขนาดกระแสเกินสวิตช์ต่ำ ในขณะที่การใช้ความต้านทานขนานสวิตช์และการใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์จะมีขนาดกระแสเกินสวิตช์สูงกว่าแต่มีการออสซิลเลชันต่ำกว่า สำหรับการใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุแม้ว่าจะทำให้ขนาดกระแสเกินสวิตช์มีขนาดต่ำ แต่ก็ทำให้รูปคลื่นกระแสมีความผิดเพี้ยน

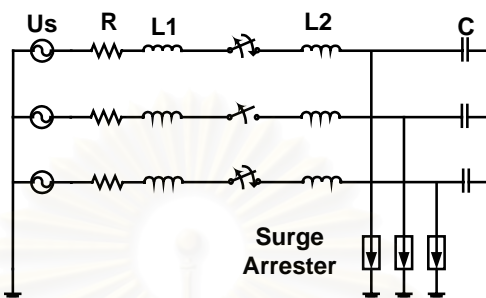
ดังนั้นสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าการใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์สามารถลดการเกิดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ได้ดีที่สุด รองมาคือการใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ ในขณะที่การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์และการใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุสามารถลดแรงดันเกินสวิตช์ที่บัสได้ แต่ส่งผลให้เกิดแรงดันเกินสวิตช์ที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าสูง

## 6.2 การควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์เนื่องจากการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

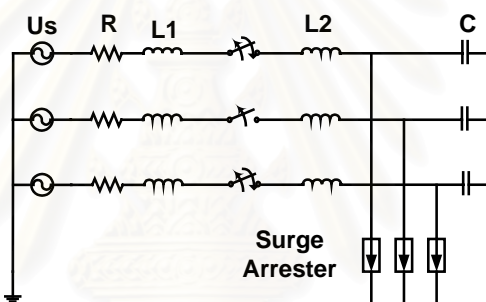
### 6.2.1 กัปเดตักฟ้าผ่าแบบ MOV

กัปเดตักฟ้าผ่าจะใช้ในการป้องกันการเกิดอาร์กซ้ำเนื่องจากการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ ซึ่งกัปเดตักฟ้าผ่าสามารถติดตั้งได้หลายรูปแบบ ในที่นี้จะทำการพิจารณา 3 รูปแบบได้แก่ กัปเดตักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์, เฟส-นิวทรอล, เฟส-นิวทรอลและนิวทรอล-กราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 6.25 ถึง 6.27 โดยจำลองให้เกิดอาร์กซ้ำสองเฟสเนื่องจากการเกิดอาร์กซ้ำที่มีความรุนแรง โดยให้เฟส A และเฟส C เป็นเฟสที่เกิดอาร์กซ้ำ และชุดตัวเก็บประจุมีประจุค้างเต็มก่อนที่จะเกิดอาร์กซ้ำ และพิจารณาเฉพาะกรณีการปลดชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 เมื่อไม่มีโหลดเพราะเกิดแรงดันเกินเนื่องจากอาร์กซ้ำสองเฟสรุนแรงที่สุด ในขณะที่การเกิดอาร์กซ้ำในการปลดชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 เมื่อไม่มีโหลด แรงดันเกินคร่อมชุดตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นมีค่า 1.01 สำหรับเฟส A และ 1.43 สำหรับ

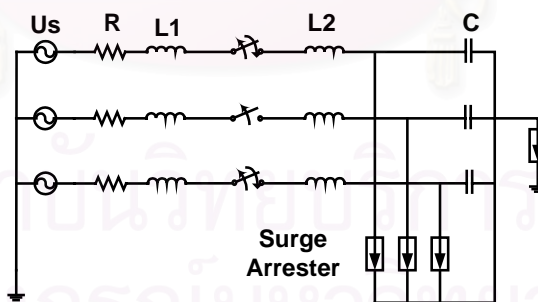
เฟส C ส่วนอาร์กเข้าในการปลดชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 เมื่อไม่มีโหลด แรงดันเกินคร่อมชุดตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นมีค่า 1.65 สำหรับเฟส A และ 1.43 สำหรับเฟส C จะเห็นได้ว่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากอาร์กเข้าในการปลดชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 และ 3 มีค่าไม่สูงพอที่กับดักฟ้าผ่าจะทำงาน ดังนั้นจึงไม่นำอาร์กเข้าจากการปลดชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 และ 3 มาศึกษา



รูปที่ 6.25 วงจรในกรณีกับดักฟ้าผ่าต่อแบบเฟส-กราวด์



รูปที่ 6.26 วงจรในกรณีกับดักฟ้าผ่าต่อแบบเฟส-นิวทรอล



รูปที่ 6.27 วงจรในกรณีกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรอลและนิวทรอล-กราวด์

ซึ่งสามารถคำนวณเพื่อเลือกขนาดพิคัดของกับดักฟ้าผ่าได้ดังนี้

**กรณีต้องการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์**

ค่า  $U_c$  ต้องมากกว่าหรือเท่ากับแรงดันเฟสและต้องพิจารณาแรงดันเกิน 10 % ด้วยดังนั้น  
จะได้ว่า

$$U_c \geq 1.1 \times \frac{22}{\sqrt{3}} = 13.97 \text{ kV}$$

ค่า  $U_r$  ของกับดักฟ้าผ่าสามารถคำนวณจากบทที่ 3 หัวข้อ 3.5.2.1 กรณีที่ 2

$$U_r \geq 0.88 \times 1.55 \times \frac{22}{\sqrt{3}} = 17.32 \text{ kV}$$

สามารถเลือก  $U_r$  เท่ากับ 21 kV

ต่อมาคิดค่าพลังงานที่กับดักฟ้าผ่าจะได้รับโดยพิจารณาค่า  $V_o$  และ  $V_a$  ซึ่ง

$V_o$  จะคิดในกรณีที่เกิดอาร์กซ้ำจะเกิดแรงดันเกิน 3 เท่าของค่ายอดแรงดัน

$$V_o = 3 \times \sqrt{2} \times \frac{22}{\sqrt{3}} = 53.89 \text{ kV}$$

$V_a$  เลือกค่ายอดแรงดัน  $U_c$

ค่าความเก็บประจุ = 15.783  $\mu\text{F}$

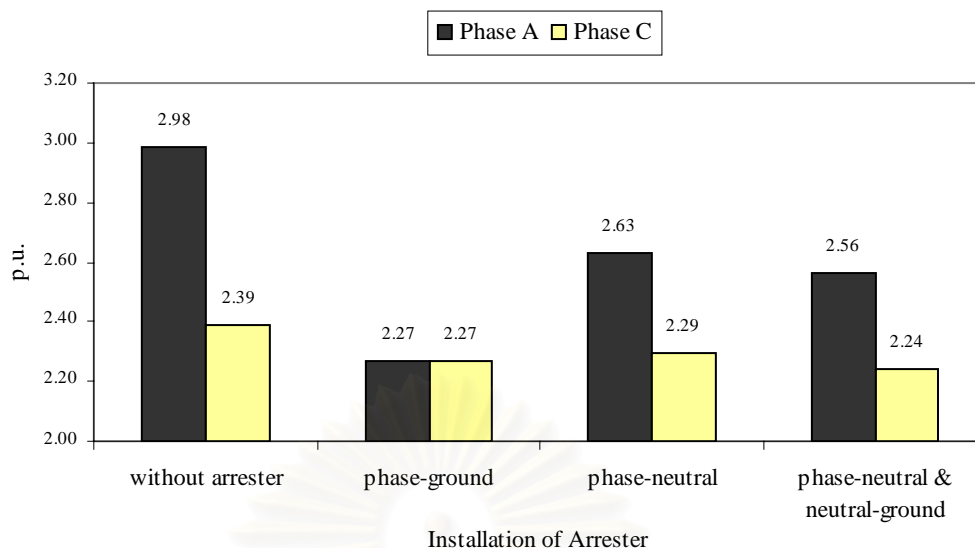
จากค่าที่หามาได้ข้างต้น จะสามารถคำนวณค่าพลังงานได้ดังนี้

$$E_c = 53.89^2 - (\sqrt{2} \times 13.97)^2 \times \frac{15.783}{2} = 19.84 \text{ kJ หรือ } 0.9 \text{ kJ/kV}$$

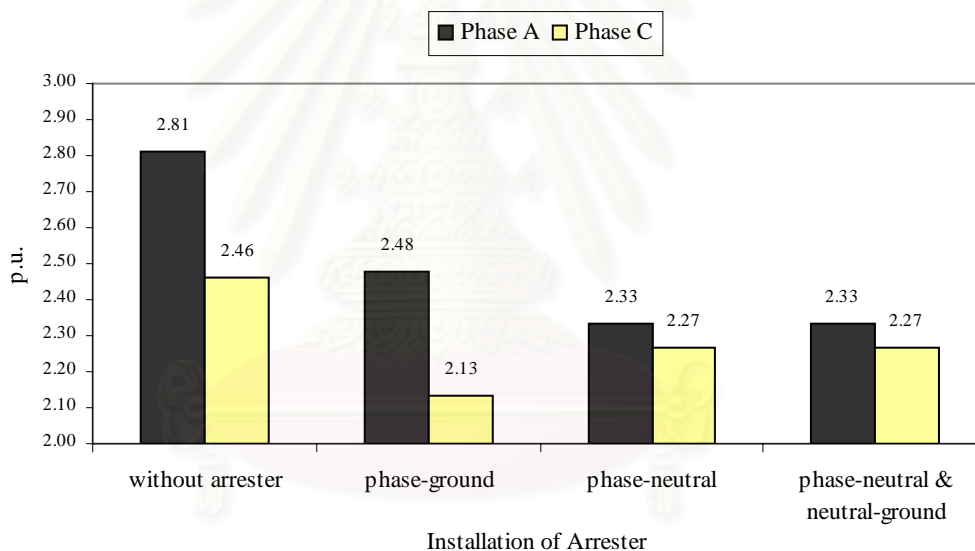
สำหรับกับดักฟ้าผ่าแบบเฟส-นิวทรอลหรือเฟส-นิวทรอลและนิวทรอล-กราวด์ใช้ค่าเดียวกับในกรณีกับดักฟ้าผ่าต่อแบบเฟส-กราวด์

#### 6.2.1.1 เปรียบเทียบการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในรูปแบบต่าง ๆ

เพื่อศึกษาผลของการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในรูปแบบต่างๆ อันได้แก่ กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์, เฟส-นิวทรอล, เฟส-นิวทรอลและนิวทรอล-กราวด์ เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า โดยใช้ขนาดแรงดันพิกัด 21 kV สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างเฟส-กราวด์และเฟส-นิวทรอล ส่วนกับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างนิวทรอล-กราวด์ใช้แรงดันพิกัด 9 kV ซึ่งวิธีเลือกแรงดันพิกัด 9 kV นี้จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 6.28 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัส



รูปที่ 6.29 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุ

รูปที่ 6.28 และ 6.29 จะเห็นได้ว่า

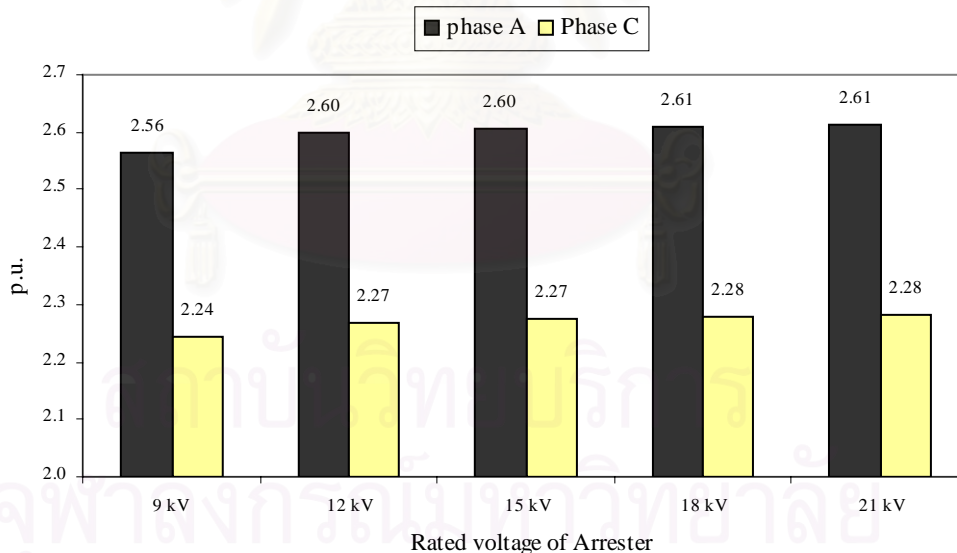
1. การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าระหว่างเฟส-กราวด์สามารถลดแรงดันเกินสวิตช์ที่บัสได้ดีที่สุด ทั้งสองเฟส รองลงมาเป็นกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัลและนิวทรัล-กราวด์ และกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัลตามลำดับ
2. การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าระหว่างเฟส-กราวด์สามารถลดแรงดันเกินสวิตช์ที่ชุดตัวเก็บประจุในเฟส C ได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัลและนิวทรัล-กราวด์ และกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัลซึ่งลดแรงดันเกินได้เท่ากัน สำหรับเฟส A นั้นกับดักฟ้าผ่า

ต่อระหว่างเฟส-นิวทรอลและนิวทรอล-กราวด์ และกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรอลลดแรงดันเกินได้ดีกว่ากับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์

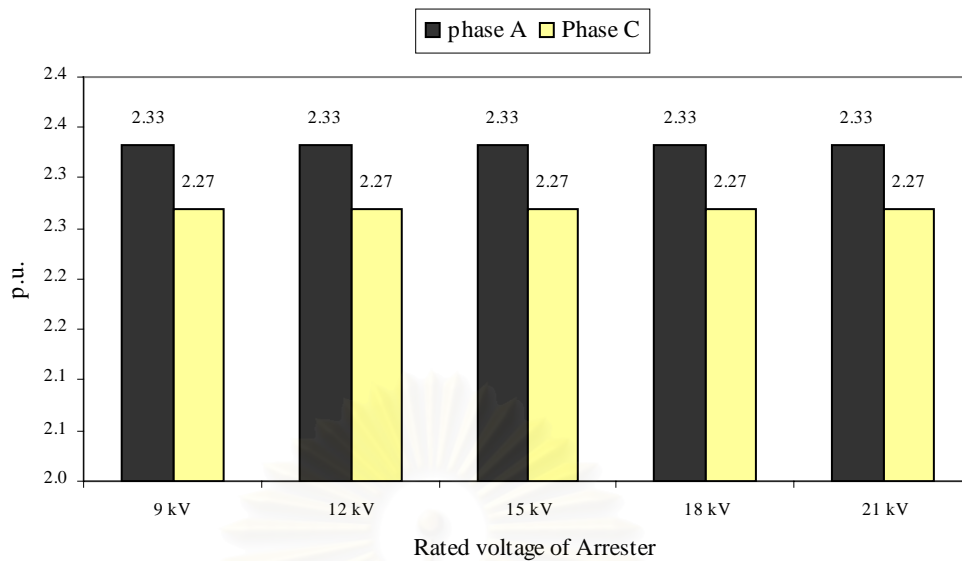
สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าหากต้องการลดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการเกิดอาร์กข้ามสองเฟสที่บัส การใช้กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์สามารถลดแรงดันเกินสวิตช์ที่บัสได้ดีที่สุด แต่หากต้องการลดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการเกิดอาร์กข้ามสองเฟสที่ชุดตัวเก็บประจุ การใช้กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรอลและนิวทรอล-กราวด์ หรือการใช้กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรอลสามารถลดแรงดันเกินสวิตช์ได้ดีที่สุด โดยพลังงานที่กับดักฟ้าผ่าได้รับมีค่าต่ำกว่าความสามารถในการรับพลังงานของกับดักฟ้าผ่าในทุกกรณี

#### 6.2.1.2 เปรียบเทียบขนาดแรงดันพิคก์ของกับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างนิวทรอล-กราวด์

กรณีกับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรอลและนิวทรอล-กราวด์นั้น สามารถเลือกค่าแรงดันพิคก์ของกับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างเฟส-นิวทรอลได้ตามที่กล่าวในบทที่ 3 ในกรณีนี้ใช้ 21 kV แต่ไม่มีการกำหนดค่าแรงดันพิคก์ของกับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างนิวทรอล-กราวด์ ดังนั้นหัวข้อนี้จึงทดสอบเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันพิคก์ของกับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างนิวทรอล-กราวด์ เพื่อหาขนาดแรงดันพิคก์ที่เหมาะสม



รูปที่ 6.30 แรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัส



รูปที่ 6.31 แรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 6.30 และ 6.31 พบว่าการต่อกับดักฟ้าผ่าระหว่างนิวทรอล-กราวด์ เมื่อใช้กับดักฟ้าผ่าขนาดแรงดันพิกัด 9 kV จะช่วยลดแรงดันเกินจากการเกิดอาร์กข้ามองเฟสทั้งที่บัสและตัวเก็บประจุได้ดีกว่าขนาดแรงดันพิกัดที่สูงขึ้นมา



## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาที่ได้จากการวิจัยการเกิดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 1. พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุคือ

1.1 ผลการจำลองพบว่า การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 ทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตช์ที่บัสสูงที่สุด โดยมีขนาดแรงดัน 1.48 p.u. รองลงมาเป็นการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 โดยมีขนาดแรงดัน 1.28 p.u. และการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 โดยมีขนาดแรงดัน 1.21 ตามลำดับ แต่การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 ทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตช์ที่ชุดตัวเก็บประจุและกระแสเกินสวิตช์สูงที่สุด โดยมีขนาดแรงดัน 1.70 p.u. และขนาดกระแส 54.22 p.u. รองลงมาเป็นการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 โดยมีขนาดแรงดัน 1.66 p.u. และขนาดกระแส 41.74 p.u. และการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 โดยมีขนาดแรงดัน 1.5 และขนาดกระแส 10.33 p.u. ตามลำดับ

1.2 มุมที่สับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ สรุปได้ว่าแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งจะมีขนาดสูง เมื่อสับสวิตช์ในขณะที่แรงดันที่บัสมีค่าใกล้เคียงแรงดันค่ายอด ในทางกลับกันแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งจะมีขนาดต่ำ เมื่อสับสวิตช์ในขณะที่แรงดันที่บัสมีค่าใกล้ศูนย์ ทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3

1.3 ขนาดของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ สรุปได้ว่าเมื่อขนาดอิมพีแดนซ์ลัดวงจรเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสและชุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลง สำหรับขนาดกระแสเกินสวิตช์สูงสุดนั้นมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3

1.4 ขนาดของอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่งมีผลต่อขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสและชุดตัวเก็บประจุ รวมทั้งขนาดกระแสเกินสวิตช์สูงสุดเล็กน้อยทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3

1.5 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ สรุปได้ว่าเมื่อขนาดตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่บัสมีค่าลดลง แต่ขนาดแรงดันเกินสวิตช์สูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับขนาดกระแสเกินสวิตช์สูงสุดมีค่าลดลง และรูปคลื่นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุและรูปคลื่นกระแสที่เกิดมีลักษณะผิดเพี้ยนไป ทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1, 2 และ 3

1.6 ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ สรุปผลได้ว่าเมื่อขนาดชุดตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัลและชุดตัวเก็บประจุ รวมทั้งขนาดกระแสเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3

1.7 ขนาดของโหลด สรุปผลได้ว่าเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัลและที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลง ในขณะที่ขนาดกระแสเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สำหรับค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 และ 0.9 มีผลต่อขนาดของแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งที่เกิดขึ้นน้อยมากทั้งการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3

## 2. พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุคือ

2.1 ขนาดของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบ สรุปได้ว่าเมื่อขนาดอิมพีแดนซ์ลัดวงจรเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัลมีค่าลดลง สำหรับขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3

2.2 ขนาดของอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่งมีผลต่อขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัลและชุดตัวเก็บประจุเล็กน้อยทั้งการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3

2.3 ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ สรุปได้ว่าเมื่อขนาดตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัลมีค่าลดลง แต่ขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3

2.4 ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ สรุปผลได้ว่าเมื่อขนาดชุดตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัลและชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3

2.5 ขนาดของโหลด สรุปผลได้ว่าเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งสูงสุดที่บัลและที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าลดลง สำหรับค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 และ 0.9 มีผลต่อขนาดของแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งที่เกิดขึ้นน้อยมากทั้งการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 , 2 และ 3

3. ผลการศึกษาวิธีการควบคุมแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุคือ

3.1 การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ (Pre-insertion resistor) ซึ่งใช้ตัวต้านทานขนาด  $17.5 \Omega$  สามารถลดขนาดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุได้ดีรองจากการใช้ชุดควบคุมการต่อวงจร

3.2 การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์ (Pre-insertion inductor) ซึ่งใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด  $9.66 \text{ mH}$  สามารถลดขนาดแรงดันเกินสวิตช์ที่บัลและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุได้ดีพอสมควร แต่ส่งผลให้แรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น

3.3 การใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ ซึ่งใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด  $7\%$  ของตัวเก็บประจุสามารถลดแรงดันเกินสวิตช์ที่บัลและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งได้ดี แต่ส่งผลให้แรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้รูปคลื่นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุและรูปคลื่นกระแสมีความผิดเพี้ยนด้วย

3.4 การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์ (Synchronous Closing Control) สามารถลดขนาดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุได้ดีที่สุด แต่ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุต้องไม่เกินช่วง  $\pm 1 \text{ ms}$

3.5 การใช้ชุดควบคุมการปิดสวิตช์สามารถลดแรงดันและกระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุได้ดีที่สุด รองมาคือการใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ ในขณะที่การใช้ตัวเหนี่ยวนำขนานสวิตช์และการใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุสามารถลดแรงดันเกินสวิตช์ที่บัลได้ แต่ส่งผลให้เกิดแรงดันเกินสวิตช์ที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าสูง

3.6 การใช้กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-กราวด์สามารถลดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งจากการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุที่บัลได้ดีที่สุด ในขณะที่กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัลและนิวทรัล-กราวด์ หรือการใช้กับดักฟ้าผ่าต่อระหว่างเฟส-นิวทรัลสามารถลดแรงดันเกินสวิตช์ที่ชุดตัวเก็บประจุได้ดีที่สุด

3.7 การต่อกับดักฟ้าผ่าระหว่างเฟส-นิวทรัลและนิวทรัล-กราวด์นั้น กับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างนิวทรัล-กราวด์ หากเลือกขนาดแรงดันพิกัดต่ำกว่าขนาดแรงดันพิกัดของกับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างเฟส-นิวทรัล จะช่วยลดแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งจากการเกิดอาร์กข้ามองเฟสขณะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุทั้งที่บัลและตัวเก็บประจุได้ดีกว่าการใช้ขนาดแรงดันพิกัดเท่ากับแรงดันพิกัดของกับดักฟ้าผ่าที่ต่อระหว่างเฟส-นิวทรัล

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาในกรณีศึกษาอื่น ๆ เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรม EMTP/ATP
2. ควรมีการเปรียบเทียบราคาของการใช้วิธีควบคุมแต่ละวิธี

## รายการอ้างอิง

- 1 สำรวย สังข์สะอาด. Electrical Transient Overvoltage in Power System. เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พฤษภาคม 2541.
- 2 IEEE Std 1036-1992 IEEE guide for application of shunt power capacitors, 1993.
- 3 สมโชค บุญชัยศรี. การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วขณะเนื่องจากการต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ระดับแรงดัน 115 กิโลโวลท์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
- 4 ANSI/IEEE C37.012-1979 IEE Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Bias, 1980.
- 5 IEC 60871-1 International Standard Shunt Capacitor for A.C. Power Systems Having a Rated Voltage above 1000 V, 2<sup>nd</sup> Edition, 1997.
- 6 Allan Greenwood. Electrical Transients in Power System. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons, 1991.
- 7 Ananthakroshnan, S., and Guruprasad, K.P. Transient Recovery Voltage and Circuit Breakers, Tata McGraw-Hill, 1999.
- 8 Skeans, D. W. Recent Developments in Capacitor Switching Transient Reduction. Joslyn Hi-Voltage, (n.d.).
- 9 Bellei, T. A., O'Leary, R. P., and Camm, E.H. Evaluating Capacitor Switching Devices for Preventing Nuisance Tripping of Adjustable Speed Drives Due to Voltage Magnification. IEEE Trans. on Power Delivery vol. 11, no. 3(July 1996): 1373-1378.
- 10 Peggs, J.F., Powell, P.W., and Grebe, T.E. Innovations for Protection and Control of High Voltage Capacitor Banks on the Virginia Power System. Transmission and Distribution Conference (April 1994):284- 290.
- 11 นครินทร์ วงศ์ศิริธร. ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าของผู้ใช้จากการสวิตช์ตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

- 12 Das, J.C., Sr. Effect of Medium Voltage Capacitor Bank Switching Surges in an Industrial Distribution System. IEEE Conference Record of the Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (May 1992): 57- 64.
- 13 Publication SESWG/A 2312E. Application Guidelines for Shunt Capacitor Overvoltage Control, 1991.
- 14 Reid, W. E., McGanaghan, M.F., Law, S. W., and Greshan, D. W. Overvoltage Protection of Shunt –Capacitor Banks using MOV Arrester. IEEE Trans. On Power Apparatus and System vol. PAS-103, No. 8(August 1984):2326- 2336.
- 15 Working Group 3.4.17 of the IEEE Surge Protection Devices Committee. Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, No. 4(October 1996):1798-1809.
- 16 Working Group 3.4.17 of the IEEE Surge Protection Devices Committee. Surge Protection of High Voltage Shunt Capacitor Banks on AC Power Systems Survey Results and Application Considerations. IEEE Trans. on Power Delivery vol. 6, No. 3(July 1991):1065- 1072.
- 17 Hermann W. Dommel, EMTP Theory Book, 2 nd, Microtan Power System Analysis Corporation, 1996.
- 18 สุรพล ดำรงกิตติกุล. หลักการออกแบบแทนระบบไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเกินสวิตชิง. Seminar on Electrical Power System IEEE Thailand Section (ตุลาคม 2529):120-131
- 19 IEEE PES Switching Transient Task Force 15.08.09.03. Task Force Report: Modeling Guidelines for Switching Transients, draft copy (WPM'97)
- 20 Electrotek Concepts. Evaluation of Distribution Capacitor Switching Concerns, Final Report, EPRI TR-107332, October 1997.
- 21 Bayless, R.S., Selman, J.D., Truax, D.E., and Reid, W.E. Capacitor Switching and Transformer Transients. IEEE Trans. on Power Delivery vol. 3, no.1(January 1988): 349- 357.
- 22 Cury, D.V., Dos Santos, C.J., and Tavares, M.C. Transient Analysis Resulting from Shunt Capacitor Switching in an Actual Electrical Distribution System. Harmonics And Quality of Power vol. 1(October 1998): 292- 297.



- 23 Fu, Y.H., Simulation Study on the Switching Transients During De-energisation of Filter and Capacitor Banks. Sixth International Conference on AC and DC Power Transmission no. 423(April-May 1996): 375- 380.
- 24 De Grijp, M.H.B., and Hopkins, R.A. Controlled Switching of Shunt Capacitors. IEEE AFRICON 4th vol. 2(September 1996): 874- 879.
- 25 McCoy, C.E., and Floryancic, B.L. Characteristics and Measurement of Capacitor Switching at Medium Voltage Distribution Level. Petroleum and Chemical Industry Conference (September 1993): 195- 204
- 26 Smith, L.M. A Practical Approach in Substation Capacitor Bank Applications to Calculating, Limiting, and Reducing the Effects of Transient Current. IEEE Trans. on Industry Applications vol. 31, no. 4(July-August 1995): 721- 724.
- 27 Shankland, L.A., Feltes, J.W., and Burke, J.J. The Effect of Switching Surges on 34.5 kV System Design and Equipment. IEEE Trans. on Power Delivery vol. 5, no. 2 (April 1990): 1106- 1112.
- 28 Adams, R.A., and Middlekauff S.W. Solving Customer Power Quality Problem Due to Voltage Magnification. IEEE Trans. on Power Delivery vol. 13, no. 4(October 1998):1515- 1520.
- 29 Zalucki, Z. Restrike and Reignition Voltages of a Short Contact Gap During Capacitance Switching Using Vacuum Circuit Breakers. XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum vol. 1(2000): 56 – 59.



ภาคผนวก

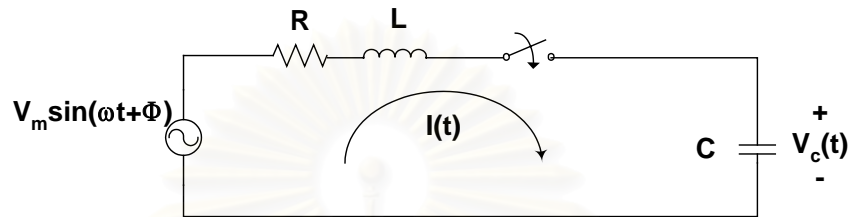
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก.

## วิธีการหาสมการแรงดันเกินสวิตซ์และกระแสเกินสวิตซ์

ก.1 วิธีการหาสมการแรงดันเกินสวิตซ์และกระแสเกินสวิตซ์จากรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 สามารถหาสมการได้

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + V_c(0) = V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (\text{ก.1})$$

$$R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{i}{C} = \omega V_m \cos(\omega t + \phi) \quad (\text{ก.2})$$

ใช้วิธีเทียบสัมประสิทธิ์ :  $LM^2 + RM + \frac{1}{C} = 0$

$$M = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad \text{โดยทั่วไป } \frac{1}{LC} > \left(\frac{R}{2L}\right)^2$$

ได้ผลคำตอบทั่วไปคือ  $i_c = e^{-\alpha t} (C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t)$  (ก.3)

เมื่อ

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

หาคำตอบเฉพาะได้จากนำ  $i_p = A \sin(\omega t + \phi) + B \cos(\omega t + \phi)$  แทนในสมการ (ก.2)

$$\begin{aligned} & \left[ \left(-L\omega^2 + \frac{1}{C}\right)A - R\omega B \right] \sin(\omega t + \phi) + \\ & \left[ R\omega A + \left(-L\omega^2 + \frac{1}{C}\right)B \right] \cos(\omega t + \phi) = \omega V_m \cos(\omega t + \phi) \end{aligned}$$

จะได้สมการ

$$\left(-L\omega^2 + \frac{1}{C}\right)A - R\omega B = 0 \quad (\text{ก.4})$$

$$R\omega A + \left(-L\omega^2 + \frac{1}{C}\right)B = \omega V_m \quad (\text{ก.5})$$

แก้สมการ (ก.4) และ (ก.5) จะได้

$$A = \frac{RV_m}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$B = \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)V_m}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

ให้  $S = \omega L - \frac{1}{\omega C}$

จะได้ผลคำตอบเฉพาะคือ  $i_p = \frac{RV_m}{R^2 + S^2} \sin(\omega t + \phi) + \frac{SV_m}{R^2 + S^2} \cos(\omega t + \phi)$

จาก  $A \cos x + B \sin x = \sqrt{A^2 + B^2} \sin(x \pm \delta)$ ,  $\tan \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \pm \frac{A}{B}$

จัดรูปแบบใหม่ได้ผลคำตอบเฉพาะดังนี้

$$i_p = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + S^2}} \sin\left(\omega t + \phi + \tan^{-1}\left(\frac{S}{R}\right)\right) \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ

$$Z = \sqrt{R^2 + S^2}, \theta = \tan^{-1}\left(\frac{S}{R}\right)$$

ได้ผลคำตอบของกระแสเกินสวิตซ์ดังนี้

$$i_c(t) = e^{-\alpha t} (C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t) + \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \phi + \theta) \quad (\text{ก.7})$$

หาค่าคงที่  $C_1$  จากเงื่อนไขที่เวลา  $t = 0$ :  $i(0) = 0$

$$C_1 + \frac{V_m}{Z} \sin(\phi + \theta) = 0$$

$$C_1 = -\frac{V_m}{Z} \sin(\phi + \theta)$$

หาค่าคงที่  $C_2$  จากเงื่อนไขที่เวลา  $t = 0$ :  $i(0) = 0$  และ  $Q(0) = 0$

จาก  $Q = \int i dt$  แทนในสมการ (ก.1)

$$L \frac{di}{dt} = V_m \sin(\omega t + \phi) - V_c(0) - iR - \frac{Q}{C}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_m \sin(\omega t + \phi) - V_c(0)}{L} \quad (\text{ก.8})$$

แทนสมการ (ก.7) ในสมการ (ก.8)

$$\frac{V_m \sin(\omega t + \phi) - V_c(0)}{L} = -\alpha C_1 + \beta C_2 + \frac{V_m \omega}{Z} \cos(\phi + \theta)$$

$$C_2 = \frac{1}{\beta} \left[ \frac{V_m \sin(\omega t + \phi) - V_c(0)}{L} - \frac{V_m}{Z} \sin(\phi + \theta) - \frac{V_m \omega}{Z} \cos(\phi + \theta) \right]$$

ได้ผลคำตอบของกระแสเกินสวิตซ์ดังนี้

$$i_c(t) = V_m \sin(\omega t + \phi + \theta) + e^{-\alpha t} \left[ \begin{array}{l} -\frac{V_m}{Z} \sin(\phi + \theta) \cos \beta t \\ + \frac{\sin \beta t}{\beta} \left[ \begin{array}{l} \frac{V_m \sin \phi - V_c(0)}{L} \\ -\frac{V_m \alpha}{Z} \sin(\phi + \theta) \\ -\frac{V_m \omega}{Z} \cos(\phi + \theta) \end{array} \right] \end{array} \right]$$

จากนั้นหาแรงดันเกินสวิตชิ่งได้จากสมการ

$$V_c = \frac{1}{C} \int i dt$$

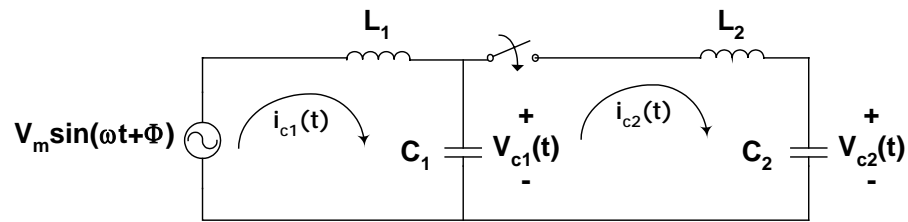
จะได้ผลคำตอบของแรงดันที่ตัวเก็บประจุดังนี้

$$V_c(t) = -\frac{V_m}{C\omega Z} \cos(\omega t + \phi + \theta)$$

$$+ \frac{V_m e^{-\alpha t}}{CZ(\alpha^2 + \beta^2)} \left[ \begin{array}{l} \left[ \sin(\phi + \theta) [\alpha \cos(\beta t) - \beta \sin(\beta t)] \right] \\ + \frac{1}{\beta L} \left[ \begin{array}{l} [\beta \cos(\beta t) + \alpha \sin(\beta t)] \\ L\omega \cos(\phi + \theta) - Z \sin(\phi) \\ + \frac{V_c(0)Z}{V_m} + \alpha L \sin(\phi + \theta) \end{array} \right] \end{array} \right]$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2 วิเคราะห์สมการแรงดันเกินสวิตชิ่งและกระแสเกินสวิตชิ่งจากรูปที่ 2.3



จากรูปที่ 2.3

จากรูปที่ 2.1 สามารถหาสมการได้

$$L_1 \frac{di_{c1}}{dt} + V_{c1} = V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (\text{ก.9})$$

$$L_2 \frac{di_{c2}}{dt} + V_{c2} = V_{c1} \quad (\text{ก.10})$$

$$i_{c2} = C_2 \frac{dV_{c2}}{dt} \quad (\text{ก.11})$$

$$i_{c1} - i_{c2} = C_1 \frac{dV_{c1}}{dt} \quad (\text{ก.12})$$

จัดรูปแบบจากสมการ (ก.9), (ก.10), (ก.11), (ก.12) ได้ดังนี้

$$\frac{d^4 V_{c2}}{dt^4} + \left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2} \right) \frac{d^2 V_{c2}}{dt^2} + \frac{V_{c2}}{L_1 C_1 L_2 C_2} = V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (\text{ก.13})$$

ใช้วิธีเทียบสัมประสิทธิ์ :  $M^4 + \left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2} \right) M^2 + \frac{1}{L_1 C_1 L_2 C_2} = 0$

$$M^2 = \frac{-\left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2} \right)^2 - \frac{4}{L_1 C_1 L_2 C_2}}}{2}$$

$$M^2 = \frac{-2\left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2} \right) \pm 2 \sqrt{\left[ \left( \frac{1}{L_1 C_1} - \frac{2}{\sqrt{L_1 C_1 L_2 C_2}} + \frac{1}{L_2 C_2} \right) + \frac{1}{L_2 C_1} \right] \times \left[ \left( \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{2}{\sqrt{L_1 C_1 L_2 C_2}} + \frac{1}{L_2 C_2} \right) + \frac{1}{L_2 C_1} \right]}}{4}$$

เมื่อ

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ได้

$$M^2 = \frac{-\left[\left(\omega_1^2 + 2\omega_1\omega_2 + \omega_2^2 + \frac{1}{L_2C_1}\right) + \left(\omega_1^2 - 2\omega_1\omega_2 + \omega_2^2 + \frac{1}{L_2C_1}\right)\right] \pm 2\sqrt{\left[\left(\omega_1^2 - 2\omega_1\omega_2 + \omega_2^2 + \frac{1}{L_2C_1}\right) \times \left(\omega_1^2 + 2\omega_1\omega_2 + \omega_2^2 + \frac{1}{L_2C_1}\right)\right]}}{4}$$

$$M^2 = \frac{-\left(\left(\omega_1 + \omega_2\right)^2 + \frac{1}{L_2C_1}\right) \pm 2\sqrt{\left(\left(\omega_1 + \omega_2\right)^2 + \frac{1}{L_2C_1}\right) \times \left(\left(\omega_1 - \omega_2\right)^2 + \frac{1}{L_2C_1}\right)}}{4}$$

กำหนดให้

$$A = \sqrt{\left(\left(\omega_1 + \omega_2\right)^2 + \frac{1}{L_2C_1}\right)}$$

$$B = \sqrt{\left(\left(\omega_1 - \omega_2\right)^2 + \frac{1}{L_2C_1}\right)}$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ได้

$$M^2 = \frac{-(A^2 + 2AB + B^2)}{4}, \frac{-(A^2 - 2AB + B^2)}{4}$$

$$M^2 = \frac{-(A+B)^2}{2^2}, \frac{-(A-B)^2}{2^2}$$

$$M = \pm \frac{j}{2}(A+B), \pm \frac{j}{2}(A-B)$$

$$M = \pm \frac{j}{2} \left[ \left( \left( \omega_1 + \omega_2 \right)^2 + \frac{1}{L_2C_1} \right)^{1/2} + \left( \left( \omega_1 - \omega_2 \right)^2 + \frac{1}{L_2C_1} \right)^{1/2} \right]$$

$$= \pm \frac{j}{2} \left[ \left( \left( \omega_1 + \omega_2 \right)^2 + \frac{1}{L_2C_1} \right)^{1/2} - \left( \left( \omega_1 - \omega_2 \right)^2 + \frac{1}{L_2C_1} \right)^{1/2} \right]$$

ได้ผลคำตอบทั่วไปดังนี้

$$V_c = D_1 \cos(\omega_{d1}t) + D_2 \sin(\omega_{d1}t) + D_3 \cos(\omega_{d2}t) + D_4 \sin(\omega_{d2}t) \quad (\text{ก.14})$$

เมื่อ

$$\omega_{d1} = \frac{\sqrt{\left(\omega_1 + \omega_2\right)^2 + \frac{1}{L_2C_1}} + \sqrt{\left(\omega_1 - \omega_2\right)^2 + \frac{1}{L_2C_1}}}{2}$$

$$\omega_{d2} = \frac{\sqrt{\left(\omega_1 + \omega_2\right)^2 + \frac{1}{L_2C_1}} - \sqrt{\left(\omega_1 - \omega_2\right)^2 + \frac{1}{L_2C_1}}}{2}$$

หาค่าคำตอบเฉพาะได้โดยนำ  $V_p = A \sin(\omega t + \phi) + B \cos(\omega t + \phi)$  แทนในสมการ (ก.13)

$$A\omega^4 \sin(\omega t + \phi) + B\omega^4 \cos(\omega t + \phi) +$$

$$\left(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \frac{1}{L_2 C_1}\right) \left[-A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) - B\omega^2 \cos(\omega t + \phi)\right]$$

$$+ \omega_1^2 \omega_2^2 [A \sin(\omega t + \phi) + B \cos(\omega t + \phi)] = \omega_1^2 \omega_2^2 V_m \sin(\omega t + \phi)$$

จะได้สมการ

$$B\omega^4 - \left(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \frac{1}{L_2 C_1}\right) B\omega^2 + \omega_1^2 \omega_2^2 B = 0 \quad (\text{ก.15})$$

$$A\omega^4 - \left(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \frac{1}{L_2 C_1}\right) A\omega^2 + \omega_1^2 \omega_2^2 A = \omega_1^2 \omega_2^2 V_m \quad (\text{ก.16})$$

แก้สมการ (ก.15) และ (ก.16) จะได้

$$B = 0$$

$$A = \frac{V_m \omega_1^2 \omega_2^2}{\left[ (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2) - \frac{\omega^2}{L_2 C_1} \right]}$$

ได้ผลคำตอบเฉพาะดังนี้

$$V_p = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{\left[ (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2) - \frac{\omega^2}{L_2 C_1} \right]} V_m \sin(\omega t + \phi)$$

ได้ผลคำตอบของแรงดันเกินสวิตซ์ที่  $C_2$  ดังนี้

$$V_{c_2}(t) = D_1 \cos(\omega_{d1} t) + D_2 \sin(\omega_{d1} t) + D_3 \cos(\omega_{d2} t) + D_4 \sin(\omega_{d2} t)$$

$$+ K V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (\text{ก.17})$$

เมื่อ

$$K = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{\left[ (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2) - \frac{\omega^2}{L_2 C_1} \right]}$$

หาผลคำตอบของแรงดันเกินสวิตซ์ที่  $C_1$  ดังนี้จากสมการ(ก.10) และ (ก.11)

$$V_{c_1}(t) = A \left[ D_1 \cos(\omega_{d1} t) + D_2 \sin(\omega_{d1} t) \right] +$$

$$B \left[ D_3 \cos(\omega_{d2} t) + D_4 \sin(\omega_{d2} t) \right] + E K V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (\text{ก.18})$$

เมื่อ

$$A = 1 - \frac{\omega_{d1}^2}{\omega_2^2}$$

$$B = 1 - \frac{\omega_{d2}^2}{\omega_2^2}$$

$$E = 1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}$$

หาค่าคงที่  $D_1$  และ  $D_3$

ที่เวลา  $t=0$  หา  $V_{c1}$  ได้ดังนี้

$$V_m \sin \phi = X_L i + V_{c1} \text{ และ } i = \frac{V_{c1}}{X_c}$$

$$V_m \sin \phi = \omega L_1 \omega C_1 V_{c1} + V_{c1}$$

$$V_{c1} = F V_m \sin \phi$$

เมื่อ

$$F = \frac{1}{(\omega^2 L_1 C_1 + 1)}$$

และ  $V_{c2} = 0$

แทนค่า  $V_{c1}$  และ  $V_{c2}$  ในสมการ(ก.17), (ก.18) จะได้สมการ

$$AD_1 + BD_3 + EK V_m \sin \phi = F V_m \sin \phi \quad (\text{ก.19})$$

$$D_1 + D_3 + K V_m \sin \phi = 0 \quad (\text{ก.20})$$

แก้สมการ (ก.19) และ (ก.20) จะได้

$$D_1 = \frac{V_m \sin \phi [F - (E - B)K]}{(A - B)}$$

$$D_3 = \frac{V_m \sin \phi [F - (E - A)K]}{(B - A)}$$

หาค่าคงที่  $D_2$  และ  $D_4$

ที่เวลา  $t=0$  :  $i_{c1} = C_1 \frac{dV_{c1}}{dt} = \omega C_1 F V_m \sin \phi$  และ  $i_{c2} = C_2 \frac{dV_{c2}}{dt} = 0$  แทนในสมการ(ก.17),

(ก.18) จะได้สมการ

$$C_1 (A \omega_{d1} D_2 + B \omega_{d2} D_4 + \omega E K V_m \cos \phi) = \omega C_1 F V_m \sin \phi \quad (\text{ก.21})$$

$$C_2 (\omega_{d1} D_2 + \omega_{d2} D_4 + \omega K V_m \cos \phi) = 0 \quad (\text{ก.22})$$

แก้สมการ (ก.21) และ (ก.22) จะได้



$$D_2 = \frac{V_m \omega [F \sin \phi - (E - B)K \cos \phi]}{(A - B)\omega_{d1}}$$

$$D_4 = \frac{V_m \omega [F \sin \phi - (E - A)K \cos \phi]}{(B - A)\omega_{d2}}$$

ได้ผลคำตอบของแรงดันเกินสวิตซ์ซึ่งดังนี้

$$V_{c1}(t) = A \left[ D_1 \cos(\omega_{d1}t) + D_2 \sin(\omega_{d1}t) \right] + B \left[ D_3 \cos(\omega_{d2}t) + D_4 \sin(\omega_{d2}t) \right] + EKV_m \sin(\omega t + \phi)$$

$$V_{c2}(t) = D_1 \cos(\omega_{d1}t) + D_2 \sin(\omega_{d1}t) + D_3 \cos(\omega_{d2}t) + D_4 \sin(\omega_{d2}t) + KV_m \sin(\omega t + \phi)$$

เมื่อ

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

$$\omega_{d1} = \frac{\sqrt{(\omega_1 + \omega_2)^2 + \frac{1}{L_2 C_1}} + \sqrt{(\omega_1 - \omega_2)^2 + \frac{1}{L_2 C_1}}}{2}$$

$$\omega_{d2} = \frac{\sqrt{(\omega_1 + \omega_2)^2 + \frac{1}{L_2 C_1}} - \sqrt{(\omega_1 - \omega_2)^2 + \frac{1}{L_2 C_1}}}{2}$$

$$K = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{\left[ (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2) - \omega^2 / L_2 C_1 \right]}$$

$$A = 1 - \frac{\omega_{d1}^2}{\omega_2^2}$$

$$B = 1 - \frac{\omega_{d2}^2}{\omega_2^2}$$

$$E = 1 - \frac{\omega^2}{\omega_2^2}$$

$$F = \frac{1}{(\omega^2 L_1 C_1 + 1)}$$

$$D_1 = \frac{V_m \sin \phi [F - (E - B)K]}{(A - B)}$$

$$D_2 = \frac{V_m \omega [F \sin \phi - (E - B)K \cos \phi]}{(A - B)\omega_{d1}}$$

$$D_3 = \frac{V_m \sin \phi [F - (E - A)K]}{(B - A)}$$

$$D_4 = \frac{V_m \omega [F \sin \phi - (E - A)K \cos \phi]}{(B - A)\omega_{d2}}$$

หากกระแสเกินสวิตซ์จึงจาก

$$i_c = C \frac{dv}{dt}$$

จะได้ผลคำตอบของกระแสเกินสวิตซ์ซึ่งดังนี้

$$i_{c1}(t) = C_1 A \omega_{d1} [D_2 \cos(\omega_{d1} t) - D_1 \sin(\omega_{d1} t)] + \\ C_1 B \omega_{d2} [D_4 \cos(\omega_{d2} t) - D_3 \sin(\omega_{d2} t)] + C_1 E K \omega V_m \cos(\omega t + \phi)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \omega_{d1} [D_2 \cos(\omega_{d1} t) - D_1 \sin(\omega_{d1} t)] + \\ C_2 \omega_{d2} [D_4 \cos(\omega_{d2} t) - D_3 \sin(\omega_{d2} t)] + C_2 K \omega V_m \cos(\omega t + \phi)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข.

## ข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง

## ข.1 ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับวงจร

BusName	Vbus (kV)	Positive sequence impedance (p.u.)		Zero sequence impedance (p.u.)	
		R1	X1	R0	X0
HHO	230	0	0.17401	0	0.08286
PMN	115	0	0.10765	0	0.08333
SS	115	0.08657	0.19678	0.00738	0.17534
UB1	115	0.16425	0.33879	0.00767	0.18268
SRD	115	0.04826	0.3712	0.0007	0.02168
AN	115	0.05197	0.1196	0.01498	0.13331

## ข.2 ค่าซีแควนซ์ของสายส่ง

BusName	Positive sequence impedance (p.u.)*		Zero sequence impedance (p.u.)*		Shunt susceptance (p.u.)*		Length (km)
	R1	X1	R0	X0	Y1	Y0	
UB2-HHO	0.022568	0.171270	0.125325	0.542327	0.338110	0.269076	230.236
UB2-PMN	0.071977	0.205209	0.184375	0.742058	0.026816	0.016694	71
UB2-SS	0.061029	0.173994	0.156329	0.629182	0.022737	0.014155	60.2
UB2-UB1	0.030312	0.086419	0.077645	0.312500	0.011293	0.007030	29.9
UB1-SRD	0.164635	0.193391	0.266288	0.683145	0.022636	0.014211	63.31
UB1-AN	0.167653	0.203495	0.295717	0.633190	0.022160	0.012206	65

\*ค่า p.u. เป็นค่าที่คูณระยะทางแล้ว

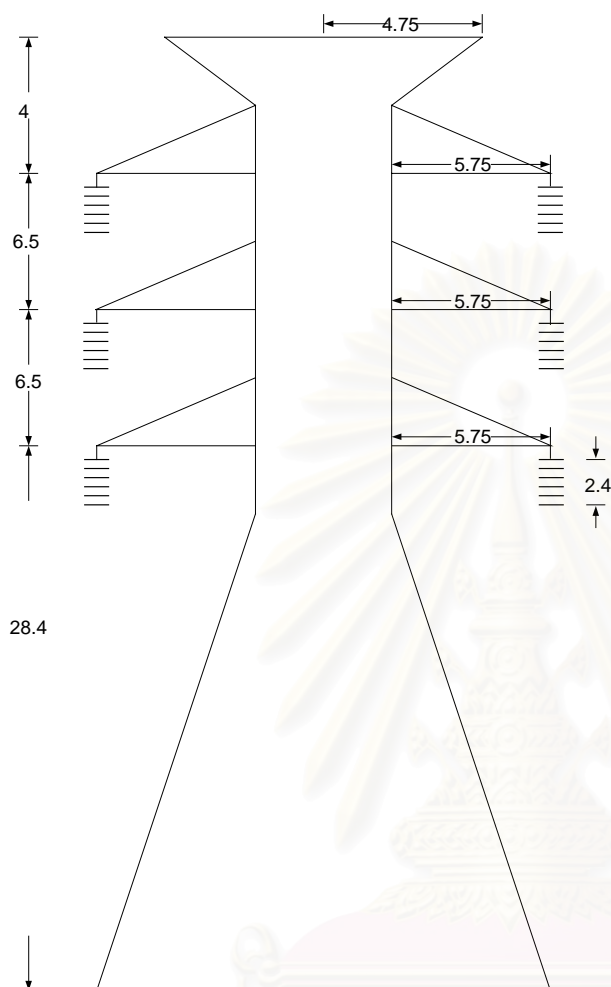
หมายเหตุ UB1 = UBON RATCHATHANI-1 , UB2 = UBON RATCHATHANI-2

SS = SISAKET , AN = ANAT CHAROEN , HHO = HOUAY HO POWER PLANT

PMN = PAKMUN POWER PLANT , SRD = SIRINDHORN POWER PLANT

### ข.3 ลักษณะการจัดวางสายส่ง

HHO-UB2



Number of circuit 2

Number of conductor per phase 1

#### Conductor

Size 1272 MCM ACSR

Rac 0.05165  $\Omega$ /km

Diameter 3.39 cm.

Sag 17.33 m.

#### Overhead ground wire

Rg 3.8453  $\Omega$ /km

Diameter 0.9144 cm.

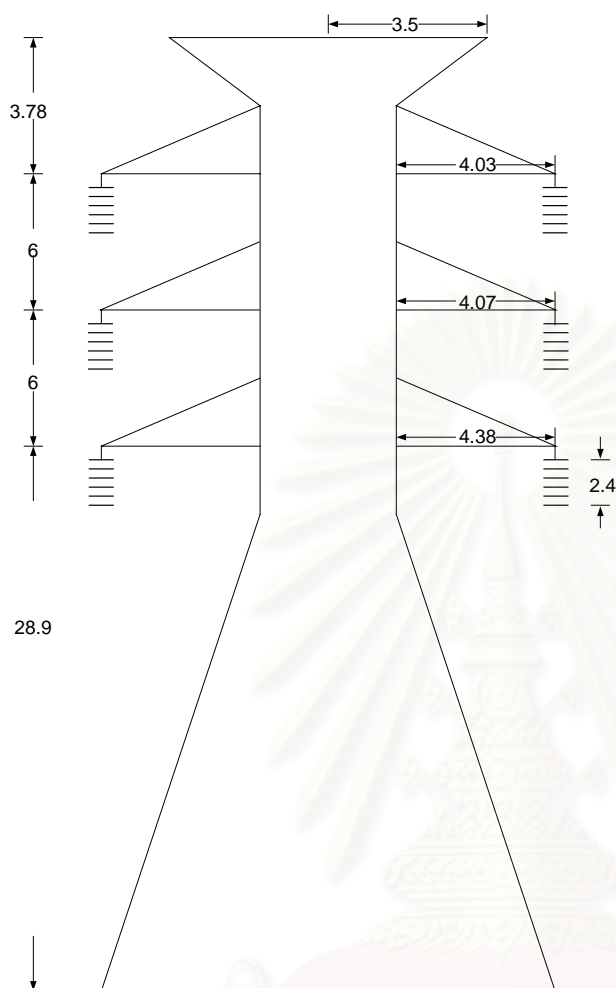
#### Skin effect

Skin = 1.032099

Length 161 km.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## HHO-UB2



Number of circuit 2

Number of conductor per phase 1

Conductor

Size 1272 MCM ACSR

Rac 0.05165  $\Omega$ /km

Diameter 3.39 cm.

Sag 17.29 m.

Overhead ground wire

Rg 3.8453  $\Omega$ /km

Diameter 0.9144 cm.

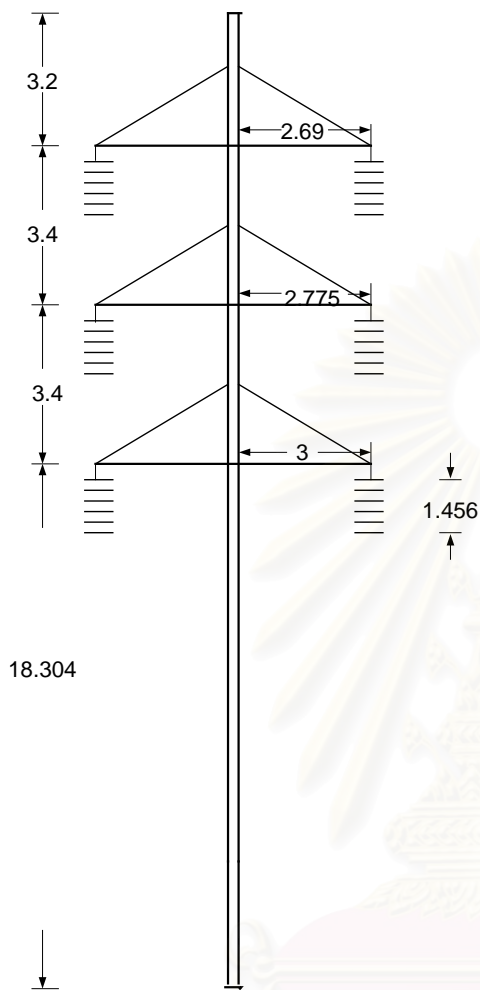
Skin effect

Skin = 1.032099

Length 68.24 km.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PMN-UB2



Number of circuit 2  
 Number of conductor per phase 1

Conductor

Size 477 MCM  
 Rac 0.13298  $\Omega$ /km  
 Diameter 2.18 cm.  
 Sag 10.66 m.

Overhead ground wire

Rg 3.8453  $\Omega$ /km  
 Diameter 0.9144 cm.

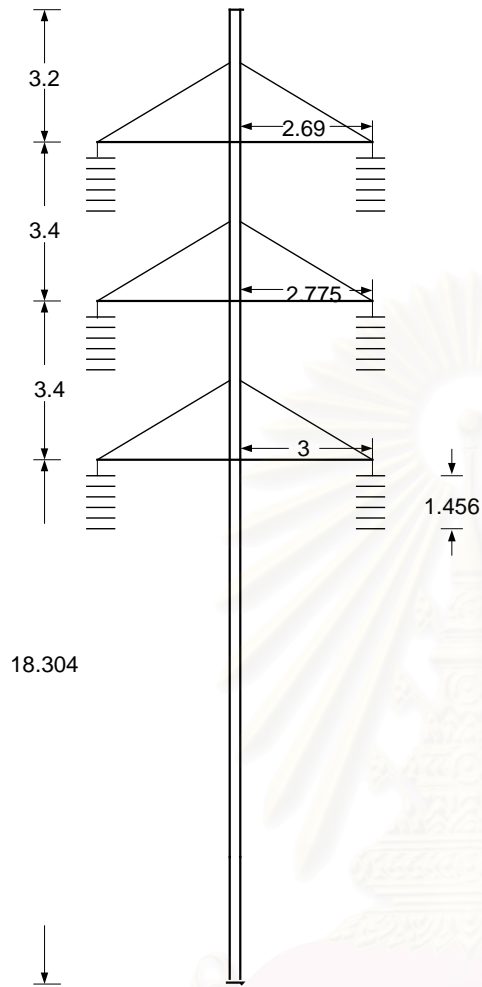
Skin effect

Skin = 1.004733

Length 71 km.

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## SS-UB2



Number of circuit 2

Number of conductor per phase 1

Conductor

Size 477 MCM ACSR

Rac 0.13298  $\Omega$ /km

Diameter 2.18 cm.

Sag 10.66 m.

Overhead ground wire

Rg 3.8453  $\Omega$ /km

Diameter 0.9144 cm.

Skin effect

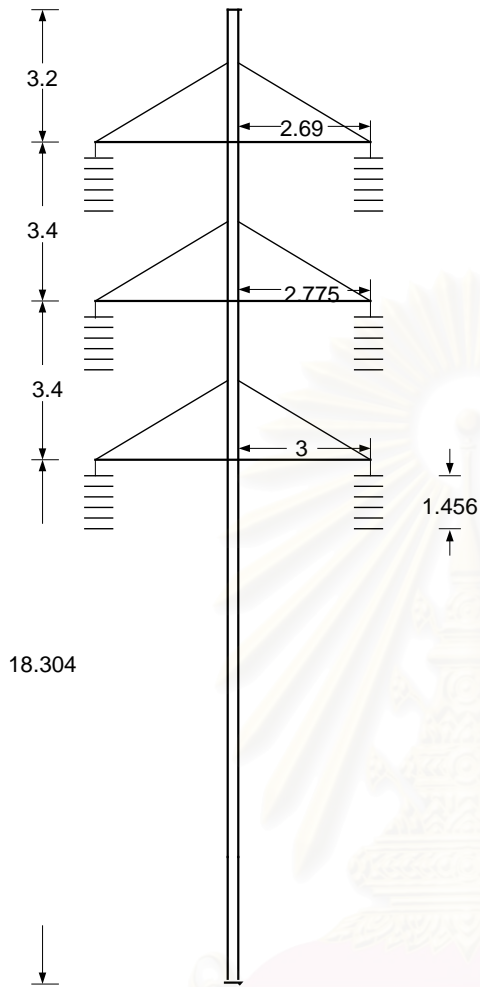
Skin = 1.004733

Length 60.2 km.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



UB1-UB2



Number of circuit 2  
 Number of conductor per phase 1

Conductor

Size 477 MCM  
 Rac 0.13298 Ω/km  
 Diameter 2.18 cm.  
 Sag 10.66 m.

Overhead ground wire

Rg 3.8453 Ω/km  
 Diameter 0.9144 cm.

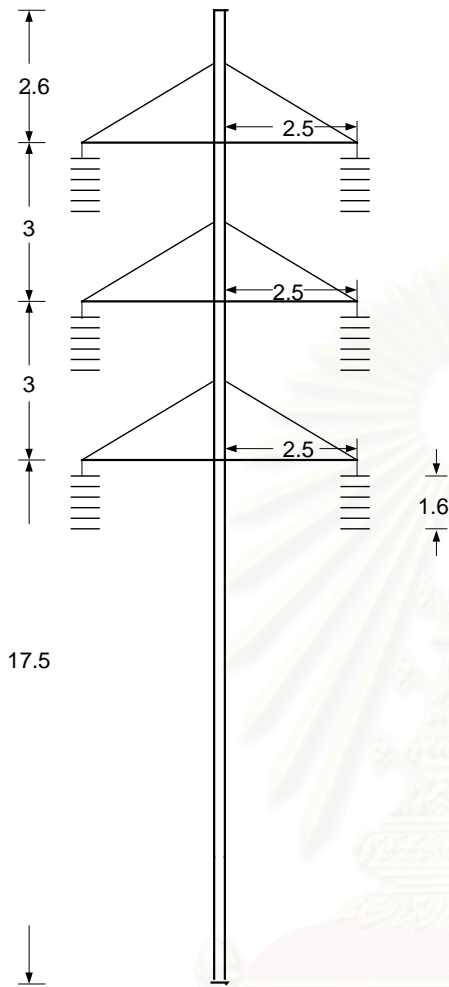
Skin effect

Skin = 1.004733

Length 29.9 km.

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UB1-SRD



Number of circuit 2  
 Number of conductor per phase 1

Conductor

Size 95 SQ. MM ACSR  
 Rac 0.3411  $\Omega$ /km  
 Diameter 1.36 cm.  
 Sag 10.32 m.

Overhead ground wire

Rg 3.8453  $\Omega$ /km  
 Diameter 0.9144 cm.

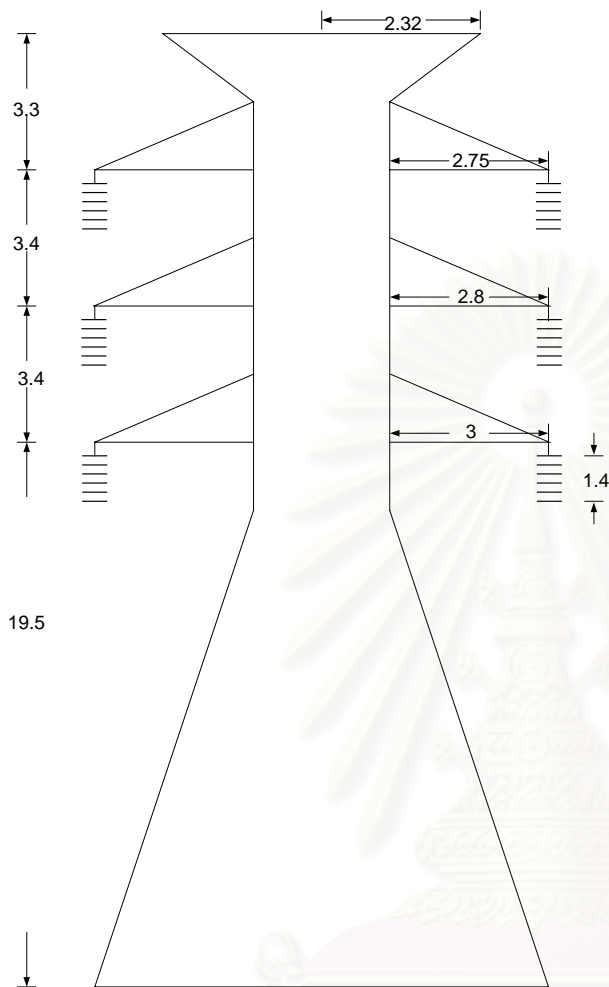
Skin effect

Skin = 1.000711

Length 63.31 km.

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN-UB1



Number of circuit 1  
 Number of conductor per phase 1

Conductor

Size 795 MCM ACSR  
 Rac 0.0812  $\Omega$ /km  
 Diameter 2.68 cm.  
 Sag 10.55 m.

Overhead ground wire

Rg 3.8453  $\Omega$ /km  
 Diameter 0.9144 cm.  
 Sag 7.64 m.

Skin effect

Skin = 1.000711

Length 65 km.

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### ข.4 ข้อมูลของหม้อแปลง

หม้อแปลง KT3A เป็นหม้อแปลงลดแรงดัน 230/115-22 kV ขนาด 200 MVA ต่อแบบ Yy0(d1) มีค่า %Z เท่ากับ 13.2% ติดตั้งที่บัส HHO-UB2

หม้อแปลง KT4A เป็นหม้อแปลงลดแรงดัน 230/115-22 kV ขนาด 200 MVA ต่อแบบ Yy0(d1) มีค่า %Z เท่ากับ 12.6% ติดตั้งที่บัส HHO-UB2

#### ข.5 ข้อมูลของกักดับฟ้าผ่า

Voltage rating kV-rms	MCOV Rating kV-rms	Max. Discharge Voltage kV		
		500 A	1000A	2000A
9	7.65	19.1	19.9	20.9
12	10.2	25.2	26.3	27.7
15	12.7	31.4	32.8	34.4
18	15.3	37.6	39.2	41.2
21	17	40.4	41.7	43.3

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอรรถพันธ์ จันทสมิต เกิดเมื่อวันที่ 25 กันยายน พ.ศ. 2520 จังหวัดกระบี่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 จนถึงปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย