

การศึกษาพฤติกรรมสัญญาณทรานเซียนต์จากชุดทดสอบสัญญาณทรานเซียนต์
ในระบบคาปาซิเตอร์แบงก์

Transient behavior study from transient test set in
Capacitor bank system



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาพฤติกรรมสัญญาณทรานเซียนต์จากชุดทดสอบสัญญาณทรานเซียนต์
ในระบบคาปาซิเตอร์แบงก์

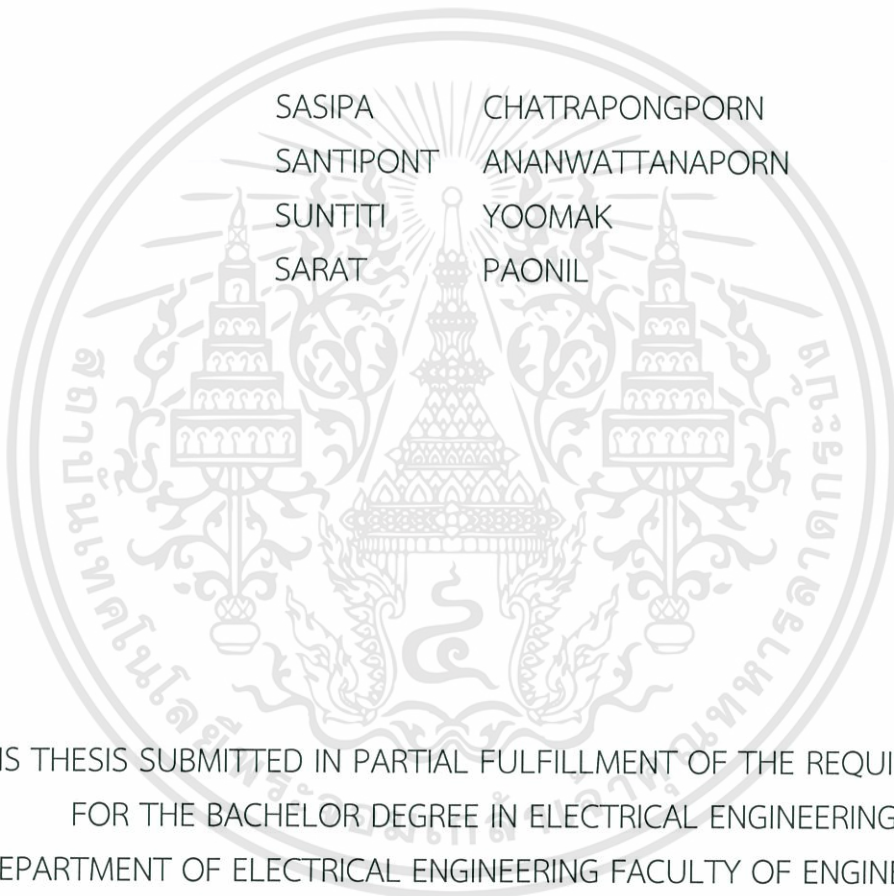
Transient behavior study from transient test set in
capacitor bank system



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transient behavior study from transient test set in
capacitor bank system



SASIPA CHATRAPONGPORN
SANTIPONT ANANWATTANAPORN
SUNTITI YOOMAK
SARAT PAONIL

THIS THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาพฤติกรรมสัญญาณทรานเซียนต์จากชุดทดสอบสัญญาณทรานเซียนต์
ในระบบคาปาซิเตอร์แบงก์

Transient behavior study from transient test set in capacitor bank system



นางสาวศศิภา
นายสันธิติ
นายสันติพนธ์
นายสารัช

ฉัตรพงศ์พร
อยู่มาก
อนันต์วัฒนาพร
เปานิล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.อรรถพล เจ้าพิทักษ์กุล
ผศ. ชายชาญ โภธิสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมสัญญาณทรานเซียนต์จากชุดทดสอบสัญญาณทรานเซียนต์
ในระบบคาปาซิเตอร์แบบค

ผู้จัดทำ

1. นางสาวศศิภา ฉัตรพงศ์พร
2. นายสันธิติ อยู่มาก
3. นายสันติพนธ์ อนันต์วัฒนาพร
4. นายสารัช เปานิล

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชายชาญ โภธิสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพฤติกรรมสัญญาณทรานเซียนต์จากชุดทดสอบสัญญาณทรานเซียนต์
ในระบบคาปาซิเตอร์แบงค์

นางสาว ศศิภา ฉัตรพงศ์พร
นาย สันฐิติ อยู่มาก
นาย สันติพันธ์ อนันต์วัฒนาพร
นาย สารัช เปานิล
ผศ.ดร. อรรถพล เก่งพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ. ชายชาญ โพธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในขณะสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานในแต่ละชั้น โดยการจัดสร้างชุดสาธิตระบบสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 415V ซึ่งเป็นระบบจำลองของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก เพื่อเก็บค่าและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในขณะสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์เข้าใช้งาน โดยจะศึกษาสัญญาณชั่วขณะที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเช่น กระแสอินรัช แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ และการแกว่งของความถี่ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการพฤติกรรมการสวิตชิ่งในกรณีที่เป็นคาปาซิเตอร์แบงค์อย่างเดียว กับกรณีที่เป็นคาปาซิเตอร์แบงค์ติดตั้งตัวรีแอคเตอร์เพื่อจำกัดกระแส แล้วนำผลการศึกษาทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบผล ซึ่งจะเกิดประโยชน์ในการวิเคราะห์สัญญาณชั่วขณะเพื่อออกแบบระบบป้องกันคาปาซิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Transient behavior study from transient test set in capacitor bank system

MISS SASIPA

CHATRAPONGPORN

MR. SANTIPONT

ANANWATTANAPORN

MR. SUNTITI

YOOMAK

MR. SARAT

PAONIL

Asst.Prof.Dr. ATTHAPOL

NGAOPITAKKUL

Supervisor

Asst.Prof. CHAICHAN

POTHISARN

Supervisor

Year 2013

ABSTRACT

This research present a study in transient signal that occur when switching capacitor in each step. The method is building a practice capacitor bank switching test set at voltage level 415V which, downscale from Nong Chok substation. This practice set aim to collect and study transient signal in capacitor bank switching that has Impact on the power system such as Inrush current, Voltage Transient, Frequency oscillating. This research study switching capacitor bank system in case of pure capacitor, capacitor connect with limiting current to compare between these results. These practice set can be benefit in analysis transient signal and design protection equipment for capacitor bank system.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการรู้สึกซาบซึ้งต่อความกรุณาที่ ผศ.ดร. อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล และ ผศ. ชายชาญ โพธิสาร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความรู้แก่ผู้จัดทำ ถ้าปราศจากท่าน โครงการนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณวิศวกรจากบริษัท ABB ที่ได้ให้คำปรึกษาและสนับสนุนเกี่ยวกับงานวิจัยในโครงการนี้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือทำให้การทำโครงการครั้งนี้ผ่านไปได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบคุณพระบิดา มารดา ที่คอยส่งเสียเงินทองให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการงาน	3
1.6 ขั้นตอนในการปฏิบัติงาน	5
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง	8
2.1.1 ระบบผลิตไฟฟ้า	8
2.1.2 ระบบส่งกำลังไฟฟ้า	8
2.1.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า	8
2.2 สถานีไฟฟ้าย่อย	9
2.2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า	9
2.2.2 ฟิวส์และสวิตช์	9
2.2.3 คาปาซิเตอร์	10
2.2.4 อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า	10
2.2.5 แบตเตอรี่และชาร์จเจอร์	10
2.2.6 ฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้า	10
2.3 คาปาซิเตอร์แรงค์	11
2.3.1 มาตรฐานพิกัดคาปาซิเตอร์แรงค์	11
2.3.2 การต่อคาปาซิเตอร์	11
2.4 การสวิตซ์ของคาปาซิเตอร์แรงค์	14
2.4.1 การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แรงค์เดี่ยว	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบบแคป-ทุ-แบ็ค	15
2.4.3 แรงดันเกินพลวัต	15
2.4.4 การขยายตัวของแรงดัน	15
2.4.5 แรงดันพื้นตัวชั่วคราว	16
2.5 แรงดันทรานเซียนต์	16
2.6 กระแสอินรัช	17
2.6.1 การคำนวณกระแสอินรัชกรณีมีเชื่อมต่อกาปาซิเตอร์หนึ่งสแต็ป	18
2.6.2 การคำนวณกระแสอินรัชกรณีสวิตชิงแบบแคปทุแบ็ค	19
2.7 ปริมาณเพอร์ยูนิต	20
บทที่ 3 การออกแบบชุดสาธิตคาปาซิเตอร์แบงค์	21
3.1 ค่าพารามิเตอร์ระบบเพอร์ยูนิต	22
3.2 วงจรของชุดสาธิต	23
3.2.1 วงจรกำลัง	23
3.2.2 วงจรควบคุม	24
3.3 อุปกรณ์ในชุดสาธิต	25
3.3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าของชุดสาธิต	25
3.3.2 คาปาซิเตอร์แบงค์	26
3.3.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์	27
3.3.4 ฟิวส์	28
3.3.5 ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	28
3.3.6 แมกเนติกคอนแทกเตอร์	29
3.3.7 สายไฟ	29
3.3.8 ตัวเหนี่ยวนำ	30
3.3.9 หม้อแปลงแรงดัน	30
3.3.10 หม้อแปลงกระแส	31
3.3.11 พัดลมระบายอากาศ	31
3.4 โครงสร้างภายนอกของชุดสาธิต	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง	35
4.1 การทดลองวงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์โดยไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ	35
4.2 วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 μH ต่ออนุกรม	41
4.3 วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 6 μH ต่ออนุกรม	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคัมเมียมิตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 μH ต่ออนุกรม	46
4.5 วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคัมเมียมิตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 μH ต่ออนุกรม	50
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการวิจัย	52
5.2 ปัญหาที่พบ	53
5.3 แนวทางการพัฒนา	54
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	57
ภาคผนวก ก แบบวันไลน์ไดอะแกรมของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก	58
ภาคผนวก ข รายละเอียดทางเทคนิคของคาปาซิเตอร์ CLMD43	59
ภาคผนวก ค รายละเอียดทางเทคนิคของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า BR6000-R6	62
ภาคผนวก ง รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องมือวัด Fluke 435 Series II	71
ภาคผนวก จ วิธีการคำนวณกระแสอินรัช	80
ภาคผนวก ฉ บทความวิชาการ	86
ประวัติผู้เขียน	91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	6
2.1 แผนภูมิระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง	9
2.2 การต่อคาปาซิเตอร์แบบเดลต้า	12
2.3 การต่อคาปาซิเตอร์แบบก	13
2.4 การต่อคาปาซิเตอร์แบบก	14
2.5 วงจรสมมูลของการกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบบเดี่ยว	15
2.6 วงจรสมมูลของการสวิตชิงแบบแบ็คทูแบ็ค	15
2.7 ลักษณะของสัญญาณพื้นตัวชั่วขณะ	16
2.8 สัญญาณแรงดันทรานเซียนต์ที่มีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบก	17
2.9 พฤติกรรมการเกิดกระแสอินรัช	18
2.10 การเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์จำนวนหนึ่งสเต็ป	19
2.11 การเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดจำนวนหลายสเต็ป	20
3.1 การต่อคาปาซิเตอร์แบบกบนเมนบัสของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก	22
3.2 วงจรกำลังของชุดสวิตชิงระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบก	24
3.3 วงจรควบคุมของชุดสวิตชิงระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบก	25
3.4 แหล่งจ่ายแรงดัน	26
3.5 หม้อแปลงปรับค่าได้	26
3.6 คาปาซิเตอร์แบบก CMD43	27
3.7 เซอร์กิตเบรกเกอร์	27
3.8 ฟิวส์	28
3.9 ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า BR6000-R6	29
3.10 แมคเนติกคอนแทกเตอร์ รุ่น UA30-30-10	29
3.11 การพันสายไฟเป็นตัวเหนี่ยวนำ	30
3.12 หม้อแปลงแรงดัน	31
3.13 หม้อแปลงกระแส	31
3.14 พัฒลมระบายอากาศรุ่น M4Q 045-CA01-A	32
3.15 โครงสร้างภายนอกของชุดสวิตชิงที่จัดสร้างจริง	33
3.16 แบบ AutoCAD ของโครงสร้างภายนอก	34
4.1 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิงกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสเต็ปที่หนึ่ง	36
4.2 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิงกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสเต็ปที่หนึ่ง	36
4.3 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิงกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสเต็ปที่สอง	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสแต็ปที่สอง	37
4.5 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสแต็ปที่สาม	37
4.6 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสแต็ปที่สาม	38
4.7 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 μ H สแต็ปที่หนึ่ง	41
4.8 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 4 μ H สแต็ปที่หนึ่ง	41
4.9 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 4 μ H สแต็ปที่สอง	42
4.10 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 4 μ H สแต็ปที่สอง	42
4.11 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 4 μ H	42
4.12 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 4 μ H สแต็ปที่สาม	43
4.13 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μ H สแต็ปที่หนึ่ง	44
4.14 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μ H สแต็ปที่หนึ่ง	44
4.15 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μ H สแต็ปที่สอง	45
4.16 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μ H สแต็ปที่สอง	45
4.17 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μ H	45
4.18 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μ H สแต็ปที่สาม	46
4.19 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 8 μ H สแต็ปที่หนึ่ง	47
4.20 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 8 μ H สแต็ปที่หนึ่ง	47
4.21 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 8 μ H สแต็ปที่สอง	47
4.22 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 8 μ H สแต็ปที่สอง	48
4.23 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 8 μ H สแต็ปที่สาม	48
4.24 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 8 μ H สแต็ปที่สาม	48
4.25 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 10 μ H สแต็ปที่หนึ่ง	50
4.26 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 10 μ H สแต็ปที่หนึ่ง	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 10 μ H สแต็ปที่สอง	51
4.28 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 8 μ H สแต็ปที่สอง	51
4.29 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 10 μ H สแต็ปที่สาม	51
4.30 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 10 μ H สแต็ปที่สาม	52
ก-1 แบบวินไลน์ไดอะแกรมของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก	59
ค-1 แบบการเชื่อมต่อของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	63
ค-2 แผนภาพโปรแกรมการทำงานของพาวเวอร์แฟคเตอร์คอนโทรลเลอร์ (BR-6000)	70
ง-1 วิธีการใช้งานฟังก์ชันอินรัช	74
ง-2 วิธีการจับสัญญาณอินรัช	75



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบครึ่งวงกลมที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ	35
4.2 ผลการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบครึ่งวงกลมที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 μH สเต็ปที่หนึ่ง	41
4.3 ผลการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบครึ่งวงกลมที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 6 μH สเต็ปที่หนึ่ง	44
4.4 ผลการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบครึ่งวงกลมที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 μH สเต็ปที่หนึ่ง	46
4.5 ผลการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบครึ่งวงกลมที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 μH สเต็ปที่หนึ่ง	50
5.1 ตารางสรุปค่ากระแสอินรัชในสเต็ปต่างๆเมื่อมีการมีขนาดความเหนี่ยวนำ	53
ข-1 รายละเอียดทางเทคนิคของคาปาซิเตอร์แบบ	59
ค-1 รายละเอียดทางเทคนิคของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า BR6000-R6	62
ค-2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	64
ง-1 รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องมือวัด Fluke 435 Series II	71
ง-2 วิธีการวัดของเครื่องมือวัด	72
ง-3 รายละเอียดปุ่มฟังก์ชัน	76



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยในปัจจุบันกำลังประสบกับปัญหาด้านความต้องการพลังงาน เนื่องมาจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ และประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มสูงมากขึ้น ในขณะที่ทรัพยากรธรรมชาติภายในประเทศมีอยู่อย่างจำกัด จึงจำเป็นต้องมีการพึ่งพิงพลังงานส่วนใหญ่จากต่างประเทศซึ่งจะเป็นผลเสียต่อความมั่นคงทางพลังงานของประเทศ และทำให้ประเทศนั้นต้องสูญเสียเม็ดเงินไปเป็นค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานมากขึ้น ดังนั้นการที่จะลดปัญหาด้านพลังงาน จึงทำให้มีการส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเป็นที่กว้างขวางขึ้น

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน ได้มีการติดตั้งระบบคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าไปที่สถานีไฟฟ้าย่อยเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยคาปาซิเตอร์หรือตัวเก็บประจุไฟฟ้านั้นจะมีหน้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบ ในกรณีที่มีโหลดอินดักแตนซ์จำนวนมาก ผลจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ระดับแรงสูงที่สถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะเป็นการช่วยรักษาเสถียรภาพทางไฟฟ้า เนื่องจากแรงดันที่ลดลงในช่วงโหลดสูงสุด อีกทั้งยังสามารถลดกำลังสูญเสีย และช่วยเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังของระบบ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดการลงทุนในการก่อสร้างระบบส่ง หรือสถานีไฟฟ้าย่อย [1]-[9]

ในการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานในระบบ จะก่อให้เกิดปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้าหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึง ในส่วนแรกคือ แรงดันเกินชั่วขณะ (Overvoltage transient) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของคาปาซิเตอร์ที่มีการสวิตชิ่งและคาปาซิเตอร์ตัวอื่นๆ เนื่องมาจากปรากฏการณ์ขยายตัวของแรงดัน (Voltage Magnification) ส่วนที่สองคือกระแสชั่วขณะ (Current transient) โดยหลักจะเป็นกระแสอินรัช (Inrush Current) ที่มีขนาดและความถี่สูง ส่วนสุดท้ายคือ ฮาร์โมนิก เนื่องจากการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์นั้นจะมีโอกาสที่จะไปขยายขนาดและความถี่ของสัญญาณฮาร์โมนิกที่มีอยู่เดิมให้มีค่าสูงขึ้นได้ [1][2][10]-[14]

ปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้าเหล่านี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวคาปาซิเตอร์ อุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ในสถานีไฟฟ้าย่อย หรือรวมถึงระบบไฟฟ้ากำลังในภาพรวม ซึ่งจะมีผลกระทบเป็นอย่างยิ่งต่อความน่าเชื่อถือของระบบ ขณะที่ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อผู้บริโภคคือ โหลดที่มีความอ่อนไหวสูงจะมีปัญหาหรืออาจถึงขั้นเกิดความเสียหายขึ้น [1][15]-[19] นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการเข้ามาของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ ซึ่งจะทำให้เกิดการซื้อขายไฟฟ้าระหว่างผู้ผลิตและผู้บริโภค โดยจะทำให้รูปแบบการใช้ไฟฟ้าในภาพรวมเปลี่ยนแปลงไป [20]-[21] สำหรับในระบบสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์นั้นจะมีวิธีการที่จะป้องกันปัญหาที่เกิดจากสัญญาณชั่วขณะ ได้แก่การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตซ์ (Pre-insert resistor) เป็นการนำตัวต้านทานมาต่อกับสวิตซ์ที่วางขนานกับวงจรก่อนเข้า

คาปาซิเตอร์แบบค้ เมื่อมีการสวิตชิงสวิตซ์จะต่อตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุในลักษณะอนุกรมเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อลดกระแสอินรัชที่เกิดขึ้น และจะตัดตัวต้านทานออกจากวงจรเพื่อลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวต้านทาน [22]-[25] เทคนิคการใช้รีแอคเตอร์จำกัดกระแส (Current limiting reactor) เป็นการนำตัวรีแอคเตอร์มาต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์แบบค้ เพื่อลดผลของทรานเซียนต์ในขณะที่สวิตชิง และควบคุมความถี่ธรรมชาติของคาปาซิเตอร์ไม่ให้เกิดเรโซแนนซ์หรือกระแสฮาร์โมนิก และสุดท้ายเป็นเทคนิคการใช้ 6% รีแอคเตอร์ (6% Detuning reactor) จะเป็นการนำตัวรีแอคเตอร์มาต่ออนุกรมเข้ากับระบบคาปาซิเตอร์แบบค้ โดยจะแตกต่างจากรีแอคเตอร์จำกัดกระแสตรงที่ จะต้องมีการคำนวณค่ารีแอคแตนซ์ให้ได้ 6% ของรีแอคแตนซ์ในระบบคาปาซิเตอร์แบบค้ เป็นผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่าฮาร์โมนิกตัวแรกในระบบ จึงไม่เกิดเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ [22][26]-[28]

จากที่กล่าวมาข้างต้นการศึกษาในการวิจัยที่ผ่านมาจะเป็นการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ในโครงการวิจัยนี้จะเป็นการจำลองระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้ในสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ลงมาอยู่ในชุดทดลองที่ระดับแรงดัน 415V โดยจะเป็นการออกแบบและสร้างทั้งในส่วนวงจรกำลังและวงจรควบคุม ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในขณะที่สวิตชิงคาปาซิเตอร์เข้าใช้งานในแต่ละสเต็ปทั้งในกรณีก่อนและหลังการใช้เทคนิคป้องกัน แล้วจะมีการเปรียบเทียบผลการศึกษาจากทั้งสองกรณี ซึ่งข้อมูลที่ได้จะมาจากชุดทดลองจริง โดยอาจจะมีผลลัพธ์ที่แตกต่างจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์จริงจะมีคุณลักษณะบางอย่างที่ไม่ได้ถูกคำนวณรวมเข้าไปในการจำลอง เพื่อที่จะเป็นข้อมูลในการประยุกต์การป้องกันที่เหมาะสม และสามารถนำไปพัฒนาระบบการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมแรงดันทรานเซียนต์และกระแสอินรัช ขณะสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้เข้าใช้งานในแต่ละสเต็ป
2. เพื่อศึกษาความถี่ของการแกว่งที่เกิดขึ้น
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้เข้ามาใช้งาน เช่น ขนาดของแหล่งจ่าย, อิมพีแดนซ์, พิกัดคาปาซิเตอร์แบบค้ และขนาดของตัวเหนี่ยวนำ
4. เพื่อศึกษาและออกแบบสร้างชุดสาธิตการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้ ทั้งภาควงจรควบคุมและวงจรกำลัง โดยชุดสาธิตมีขนาดย่อส่วนของระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้ขนาดแรงดัน 115 kV

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ทำการศึกษาและออกแบบชุดสาธิตของระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้ที่ระดับแรงดัน 415V ซึ่งเป็นขนาดย่อส่วนของระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้ขนาดแรงดัน 115 kV โดยมีการเก็บค่าและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานในแต่ละสเต็ป ได้แก่ กระแสอินรัช แรงดันทรานเซียนต์ และการแกว่งของความถี่ ในการศึกษามีกการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในการสวิตชิงสองแบบคือ ในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุอย่างเดี่ยว และในกรณีที่มีการต่อรีแอคเตอร์จำกัดกระแสกับตัวเก็บประจุ

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษากระบวนการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์
2. คำนวณอุปกรณ์ที่จะใช้งานและออกแบบในส่วนวงจรกำลังของชุดสาธิต
3. ออกแบบวงจรควบคุมการสวิตชิง
4. สร้างชุดสาธิต
5. ศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

1. การดำเนินงานในเดือนที่ 1 ถึงเดือนที่ 2
 - ศึกษาและคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบคาปาซิเตอร์แบงค์ในระบบ 115kV และในชุดสาธิตระบบ 415 V
2. การดำเนินงานในเดือนที่ 3 ถึงเดือนที่ 6
 - ออกแบบชุดสาธิตระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์ ในส่วนวงจรกำลัง พร้อมทั้งเตรียมอุปกรณ์หลักที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งหมดได้แก่ มาตรฐานกระแสไฟฟ้า มาตรฐานแรงดันไฟฟ้า มาตรฐานกำลังไฟฟ้า ออสซิลโลสโคป ส่วนประกอบของวงจร เป็นต้น
 - เริ่มทำการสร้างชุดสาธิตทั้งในส่วนวงจรกำลังและวงจรควบคุม ทำการวัดค่าและเปรียบเทียบพฤติกรรมของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์ เช่น แรงดัน กระแส ความถี่ เป็นต้น
3. การดำเนินงานในเดือนที่ 7 ถึงเดือนที่ 10
 - ทำการออกแบบและติดตั้งตัวเหนี่ยวนำในระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์ เพื่อรวบรวมข้อมูลที่เกิดขึ้นจริง และนำไปปรับปรุงแก้ไขชุดสาธิตหากมีจุดบกพร่องเกิดขึ้น
 - นำผลที่ได้จากการติดตั้งในแต่ละกรณีศึกษามาเปรียบเทียบพฤติกรรมของแรงดันทรานเซียนต์ กระแสอินรัช การแกว่งของความถี่ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสวิตชิงเช่น ขนาดอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย พิกัดคาปาซิเตอร์ และขนาดรีแอคเตอร์
 - จัดทำเล่มปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินงาน	ระยะเวลา																																หมายเหตุ								
	มี.ย.				ก.ค.				ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.				ธ.ค.				ม.ค.					ก.พ.				มี.ค.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		1	2	3	4				
1. ศึกษาแบบคาปาซิเตอร์แบบ	←————→				←-----→																																				
2. กำหนดพารามิเตอร์ในระบบ	←————→				←-----→																																				
3. ออกแบบชุดสวิตช์ในส่วนวงจรกำลัง					←————→				←-----→																																
4. สร้างชุดสวิตช์ในส่วนวงจรกำลัง													←————→				←-----→																								
5. ออกแบบและสร้างวงจรถูกคุม																	←————→				←-----→																				
6. ศึกษาพฤติกรรมของระบบคาปาซิเตอร์และรวบรวมข้อมูล																									←————→				←-----→												
7. ปรับปรุงชุดสวิตช์																					←————→				←-----→																
8. ทำรายงานสรุปผลการศึกษา																									←————→				←-----→												

←————→
แผนการดำเนินงาน

←-----→
การปฏิบัติงานจริง

1.6 ขั้นตอนในการปฏิบัติงาน

ขั้นตอนในการทำงานเพื่อที่จะศึกษาสัญญาณชั่วขณะที่จะเกิดขึ้นในการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบบค์เข้าใช้งานนั้นจะแสดงไว้ในโฟลว์ชาร์ตรูป 1.1 โดยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ การออกแบบและการจัดสร้างพร้อมทำการทดลอง

ในส่วนแรกจะต้องเลือกสถานีไฟฟ้าย่อยที่จะนำมาจำลองเป็นชุดสาธิต จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสถานีไฟฟ้าย่อยเช่น แรงดัน กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน เป็นต้น เพื่อให้ค่าดังกล่าวอยู่ในรูป เพอร์ยูนิต (Per unit) แล้วจึงมาแปลงฐานแรงดันให้มาอยู่ที่ระดับ 415 V เพื่อที่จะเลือกขนาดของคาปาซิเตอร์ที่จะใช้ในชุดสาธิต และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่ากระแสอินรัช โดยใช้สมการและทฤษฎีดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งกระแสอินรัชจะถูกใช้เป็นหลักในการเลือกอุปกรณ์ทุกอย่างในระบบ จากนั้นจะมีการตรวจสอบว่าที่ฐานแรงดันที่กำหนดอุปกรณ์ในห้องทดลองเช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ สายไฟฟ้า เป็นต้น สามารถทนกระแสตามที่คำนวณได้หรือไม่ ถ้าไม่ได้ก็จะมีการเลือกสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งใหม่ที่จะสามารถจำลองลงมาในระบบ 415 V ได้ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเลือกอุปกรณ์ที่จะใช้ในการสร้างชุดสาธิต โดยมีการพิจารณาคุณสมบัติของอุปกรณ์จากวัตถุประสงค์ในการทดลองและความปลอดภัยเมื่อมีการสวิตซ์ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนถัดไป จากนั้นจะมีการเขียนแบบของวงจรกำลังและวงจรควบคุมของชุดสาธิต เพื่อวางแบบในภาพรวมของลักษณะการเดินสายและตลอดจนถึงการติดตั้งอุปกรณ์ แล้วจึงนำค่ามิติของอุปกรณ์แต่ละชนิดมาเขียนแบบตู้ชุดสาธิต จากนั้นจึงจัดสร้างตามแบบที่กำหนดไว้ต่อไป

ในส่วนที่สองที่เป็นการจัดสร้างชุดสาธิตและทำการทดลองเก็บผลการศึกษา โดยจะเริ่มจากการสั่งซื้ออุปกรณ์ตามแบบที่ได้พิจารณาไว้ แล้วจึงจัดทำตู้พร้อมประกอบอุปกรณ์เข้าไปในตู้ เมื่อสมบูรณ์จึงมีการทดสอบจ่ายไฟจากแหล่งจ่ายของห้องทดลองเพื่อทดสอบดูการทำงาน โดยจะดูการทำงานของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังว่าสามารถควบคุมคอนแทคเตอร์ได้ตามจุดประสงค์ที่ต้องการหรือไม่ ถ้าเกิดความผิดพลาดหรือทำงานไม่ได้ก็จะมีการตรวจสอบหาสาเหตุและทำการแก้ไข ก่อนที่จะกลับไปทดสอบการทำงานอีกครั้ง เมื่อทุกอย่างสมบูรณ์แล้วก็จะมีการทดลองสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบบค์เข้าสู่ระบบ พร้อมเก็บค่าลักษณะกระแส และแรงดันที่เกิดขึ้นในขณะทดลอง เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ประโยชน์ในด้านการอนุรักษ์พลังงาน
 - 1.1. จะเป็นส่วนช่วยในการสนับสนุนและส่งเสริมให้มีการค้นคว้าและวิจัยทางการอนุรักษ์พลังงานอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
 - 1.2. ข้อมูลวิจัยสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาคาปาซิเตอร์แบบคัพที่มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น เพื่อประโยชน์ในการอนุรักษ์พลังงานที่มีประสิทธิภาพ
2. ประโยชน์ในด้านงานวิจัยทางวิศวกรรมไฟฟ้า
 - 2.1. เข้าใจหลักการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคัพเข้าใช้งาน
 - 2.2. เข้าใจผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคัพเข้าใช้งาน
 - 2.3. เข้าใจเทคนิคและวิธีการในการป้องกันระบบคาปาซิเตอร์แบบคัพ
 - 2.4. ข้อมูลวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดการออกแบบระบบป้องกันที่เหมาะสมได้
 - 2.5. ข้อมูลวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวคิดในการออกแบบระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคัพและระบบป้องกันอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
 - 2.6. ข้อมูลวิจัยสามารถนำไปออกแบบระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถลดความเสี่ยงในการทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง
 - 2.7. เป็นการเผยแพร่ข้อมูลวิจัยในด้านการตรวจวัดและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการสับคาปาซิเตอร์แบบคัพเข้าใช้งาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าและระบบจำหน่ายไฟฟ้าจนกระทั่งถึงผู้ใช้ไฟฟ้าย่อย ซึ่งแต่ละส่วนนั้นจะถูกแบ่งด้วยระดับแรงดันที่แตกต่างกันโดยหม้อแปลง

2.1.1 ระบบผลิตไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้า (Generating Systems) เป็นระบบที่มีกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานรูปแบบต่างๆให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น น้ำซึ่งเปลี่ยนพลังงานศักย์ของน้ำเป็นไฟฟ้า พลังงานความร้อนที่ได้จากน้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ หรือ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ไปเป็นไฟฟ้า หรือ ในปัจจุบัน ได้มีการนำพลังงานที่ได้จากลม คลื่น หรือแสงแดดมาเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า

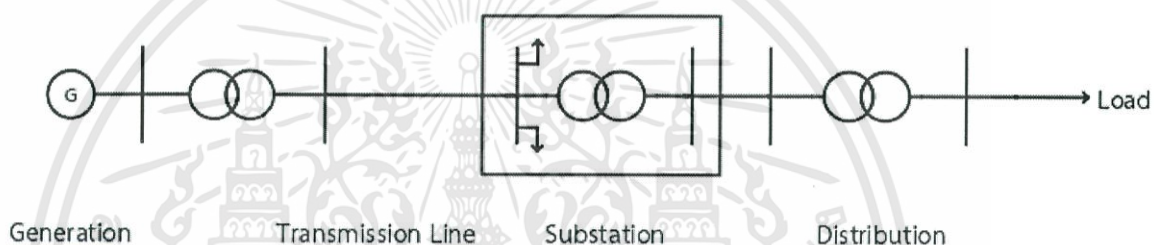
แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะมีค่าไม่เกิน 20 kV ซึ่งโดยปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ที่มีใช้ในปัจจุบันมีแรงดันที่จ่ายได้หลายระดับ เช่น 3.5 kV, 11 kV และ 13.8 kV ซึ่งถ้าหากแรงดันยิ่งสูงก็จะมีปัญหาในเรื่องฉนวนไฟฟ้าและผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ และเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตแรงดันไฟฟ้าออกมาแล้วก็จะแปลงให้มีระดับแรงดันสูงขึ้นที่ลานไกไฟฟ้า (Switch Yard) ซึ่งจะมีค่าตามระดับแรงดันมาตรฐานที่ใช้ส่ง คือ 69 kV, 115 kV, 230 kV และ 500 kV

2.1.2 ระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission System) เป็นระบบที่ทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อส่งให้กับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือ ระบบจำหน่ายที่เป็นศูนย์กลางการจ่ายโหลด (Load Center) ซึ่งจะมีขั้นตอนคือ ที่สถานีไฟฟ้าย่อยแปลงแรงดันให้สูงขึ้น (Step-up Substation) จะได้รับแรงดันที่มีค่าสูงระดับหนึ่ง (เช่น 3.5 kV, 11 kV หรือ 13.8 kV) จากระบบผลิตไฟฟ้าแล้วจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น เช่น แปลงให้อยู่ในระดับ 69 kV, 115 kV, 230 kV หรือ 500 kV แล้วส่งค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวผ่านทางสายส่งกำลังไฟฟ้ามายังสถานีไฟฟ้าย่อยต้นทาง (Primary Substation) เพื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันให้มีระดับที่ต่ำลง หลังจากนั้นจึงส่งไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่าย (Secondary Substation) โดยมีสายส่งย่อย (Substation Line) เป็นตัวกลาง

2.1.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) เป็นระบบที่ทำหน้าที่ลดแรงดันให้มีค่าต่ำลงจนมีค่าที่เหมาะสมที่จะส่งให้แก่ผู้บริโภค แรงดันที่ใช้ในระบบจำหน่ายมีหลายระดับ เช่น 11 kV, 22 kV และ 33 kV ซึ่งนั่นคือแรงดันที่ใช้กันในระบบจำหน่ายของไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ส่วน 12 kV กับ 24 kV เป็นระดับแรงดันที่ใช้ในการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) สายจำหน่ายนี้เรียกว่าสายจำหน่ายแรงสูงหรือสายป้อนปฐมภูมิ (Primary Feeder) ซึ่งระดับแรงดันนี้สามารถจำหน่ายให้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้ แล้วจะมีการแปลงแรงดันให้ต่ำลงไปอีกโดยใช้หม้อแปลงจำหน่าย ซึ่งสายจำหน่ายชนิดนี้เรียกว่า สายจำหน่ายแรงดันต่ำหรือ สายป้อนทุติยภูมิ (Secondary feeder) ในประเทศไทยได้กำหนดระดับแรงดันใช้งานขนาด 220 V สำหรับ 1 เฟส และ 380 V สำหรับ 3 เฟส



รูปที่ 2.1 แผนภูมิระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง

2.2 สถานีไฟฟ้าย่อย

สถานีไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบสำคัญส่วนหนึ่งของ ระบบส่ง-จ่ายกำลังไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าย่อยมีหน้าที่หลักในการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีหน้าที่ในการควบคุมและป้องกันระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มีความมั่นคงและปลอดภัยอีกด้วย

ด้วยเหตุที่โรงผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่จะสร้างไว้ในที่ห่างไกลชุมชน การส่งกระแสไฟฟ้าจากที่ไกลๆ จะประสบปัญหาแรงดันตก กำลังสูญเสียสูง และกำลังที่ส่งได้จะอยู่ในปริมาณจำกัด ในทางตรงกันข้าม หากมีการส่งจ่ายไฟฟ้าด้วยแรงดันยิ่งสูง การสูญเสียก็จะยิ่งต่ำ กำลังที่ส่งได้จะมีปริมาณที่สูงขึ้น ดังนั้นการมีสถานีไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนแรงดันจึงเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งในด้านการลดการสูญเสียด้วยการเพิ่มแรงดันให้สูงมากๆ จะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปได้ในระยะทางไกลๆ และได้ปริมาณมากๆ ขณะเดียวกัน เมื่อกระแสไฟฟ้าเข้ามาสู่ตัวเมืองก็ต้องมีสถานีไฟฟ้า เพื่อลดแรงดันกลับลงมาให้เกิดความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งาน

สถานีไฟฟ้าประกอบไปด้วยหม้อแปลงและกลุ่มของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรหรือสวิตช์เพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังเข้าด้วยกัน การจัดวางหรือการเรียงลำดับอุปกรณ์ตามตำแหน่งต่างๆ มีเหตุผลในเรื่องของการป้องกันระบบเป็นสำคัญ การจัดเรียงบัสที่สถานีไฟฟาก็ถือว่ามี

ความสำคัญเนื่องจากการลดความซับซ้อนของอุปกรณ์ประกอบที่ต่อรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกวงจรไฟฟ้าหนึ่ง ผ่านตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าหรือขดลวดหม้อแปลง การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดปฐมภูมิจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในแกนเหล็กของหม้อแปลงและจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิ การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิ และหากมีภาระไฟฟ้ามาต่อที่ขดลวดทุติยภูมินี้ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลออกจากขดลวด ทำให้เกิดการส่งผ่านพลังงานจากขดลวดปฐมภูมิผ่านหม้อแปลงแรงดันไปที่ภาระทางไฟฟ้า

2.2.2 ฟิวส์และสวิตช์

ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะมีการติดตั้งสวิตช์ตัดตอน (Disconnect) และสวิตช์ลงดิน (Earthing switch) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ให้ความปลอดภัยที่ถูกนำมาใช้เพื่อที่จะใช้ในการควบคุมการเปิดและปิดวงจรไฟฟ้าเพื่อไม่ให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นอกจากนี้สวิตช์ตัดตอนและ สวิตช์ลงดิน ยังถูกใช้ในการแบ่งแยกวงจรกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์สายบนดินและใต้ดิน ด้วยเหตุนี้ การบำรุงรักษาสามารถทำได้โดยปลอดภัย

ฟิวส์คัทเอาท์ที่ใช้ในการตัดกระแสไฟไม่ให้ไหลเข้ามาสู่ระบบมากเกินไปเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสูงหรือไฟไหม้ในอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งด้วยเหตุนี้เอง ฟิวส์คัทเอาท์จึงถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมอันตรายที่จะเกิดขึ้นต่อชีวิตคน

2.2.3 คาปาซิเตอร์

คาปาซิเตอร์ในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะถูกใช้สำหรับการปรับตัวประกอบกำลังให้เหมาะสม ซึ่งในที่นี้รวมถึง การลดผลกระทบจากโหลดเหนี่ยวนำ (Inductive Load) จากอุปกรณ์ประเภทหม้อแปลงไฟฟ้า, อุปกรณ์มอเตอร์ และ อุปกรณ์ในระบบส่ง โดยในระบบไฟฟ้าอาจจะมีการติดตั้งเฉพาะตัวคาปาซิเตอร์ที่บริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งจำเป็นต้องปรับค่าตัวประกอบกำลังให้เหมาะสมหรือในบางกรณีอาจจำเป็นต้องมีการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่พร้อมอุปกรณ์สับเปลี่ยน (switching) ไว้ที่ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าหรือสถานีย่อย

2.2.4 อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

อุปกรณ์ป้องกันกระแสกรรโชก (Surge) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าเพื่อใช้ป้องกันอุปกรณ์อื่นๆที่อยู่ในระบบเดียวกัน ในกรณีที่เกิดฟ้าผ่า ระบบทำงานผิดพลาดหรือระหว่างการตัด-ต่อวงจรไฟฟ้าบางประเภท อุปกรณ์ป้องกันกระแสกรรโชก ชนิดไม่มีช่องว่าง (Gapless) ใช้ตัวต้านทานที่แปรค่าตามแรงดันไฟฟ้าชนิดโลหะออกไซด์ (MOVs) เป็นตัวป้องกัน โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าก็คืออุปกรณ์ป้องกันกระแสกรรโชกประเภทหนึ่งที่มีปลายด้านหนึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าแรงดันสูงและอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านเป็นขั้วไฟฟ้าที่ต่อลงดิน เมื่อเกิดฟ้าผ่า (ทั้งโดยตรงหรือจากการเหนี่ยวนำของฟ้าผ่าบริเวณใกล้ๆ) หรือเกิดกระแสกรรโชกจากการตัด-ต่อวงจรไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะไหลลงสู่พื้นดินโดยไม่ทำความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

2.2.5 แบตเตอรี่และชาร์จเจอร์

ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะมีอุปกรณ์ไฟฟ้ามากมายหลายประเภทโดยมีหน้าที่แตกต่างกันไป เช่น การจ่ายกระแสไฟฟ้า การวัด และการควบคุมไฟฟ้า โดยอุปกรณ์แบตเตอรี่และแบตเตอรี่ชาร์จเจอร์จะทำหน้าที่ในการจ่ายพลังงานสำรองให้กับระบบควบคุมไฟฟ้าในกรณีที่ไฟฟ้าดับ นอกจากนี้แล้วแบตเตอรี่และชาร์จเจอร์ยังจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์และระบบไฟฉุกเฉินในสถานีย่อยด้วย

2.2.6 ฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้า

ฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้า (จากเซรามิก พอร์ซเลน) ถูกนำมาใช้มากในระบบส่งกระแสไฟฟ้า โดยสายไฟฟ้าที่ใช้ในระบบสายไฟฟ้าแรงดันสูงและระบบสายส่งเดินลอยในอากาศนั้นจะประกอบด้วยสายตัวนำที่โดยมากแล้วถูกผลิตจากทองแดง หรือ จากอลูมิเนียมชนิดที่เป็นเปลือยและแบบที่มีสายหุ้ม และใช้ลูกถ้วยไฟฟ้าเป็นตัวยึดแขวนสายไฟฟ้าออกจากเสาไฟฟ้า ลูกถ้วยไฟฟ้ามีทั้งแบบที่ทนแรงดึงได้สูงจนถึงระดับสูงมากๆซึ่งจะถูกนำไปใช้ตลอดระบบส่งกระแสไฟฟ้าตั้งแต่โรงไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าผ่านทางสายส่งแรงสูง นอกจากนี้ ลูกถ้วยไฟฟ้ายังมีชนิด ทนแรงดึงได้สูง กลาง และต่ำ โดยจะถูกนำไปใช้ส่งกระแสไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยเข้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า

2.3 คาปาซิเตอร์แบงค์

คาปาซิเตอร์แบงค์คือตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ภายในมีตัวเก็บประจุจำนวนหลายชุดเชื่อมต่อกันแบบขนานหรือแบบอนุกรม โดยจะมีการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ปรับตัวประกอบกำลังของระบบให้มีค่าสูงขึ้นจนอยู่ในระดับที่ต้องการ เพื่อที่จะลดกำลังงานสูญเสียในระบบและเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังของระบบ ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยปัจจุบันในสถานีไฟฟ้าย่อยได้มีการนำคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าไปประยุกต์ใช้งาน

2.3.1 มาตรฐานพิกัดคาปาซิเตอร์แบงค์ [22]

ตามมาตรฐาน IEEE C37.99-1990 (IEEE Guide for the protective of shunt capacitor banks) ได้ระบุมาตรฐานพิกัดของคาปาซิเตอร์แบงค์สำหรับการต่อแบบขนานกับระบบส่งและระบบจำหน่ายในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ดังต่อไปนี้

1. คาปาซิเตอร์ต้องสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องที่ 110 % ของพิกัดแรงดันเฉลี่ยกำลังสองและที่ 180 % ของพิกัดกระแสเฉลี่ยกำลังสองเมื่อรวมกระแสมูลฐานและกระแสฮาร์โมนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คาปาซิเตอร์จะต้องจ่ายกำลังเสมือนไม่น้อยไปกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน และต้องไม่มากกว่า 115% ที่ค่าพิกัดแรงดันและความถี่ของรูปคลื่นไซน์
3. คาปาซิเตอร์จะต้องสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้ที่ 135% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน เมื่อรวมผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่
 - a) แรงดันที่สูงเกินจากที่ระบุบนป้ายที่ความถี่มูลฐาน แต่ต้องไม่เกิน 110% ของพิกัดแรงดันเฉลี่ยกำลังสอง
 - b) แรงดันฮาร์โมนิกที่ความถี่มูลฐาน
 - c) กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ผู้ผลิตเมื่อไว้ถึง 115% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือน

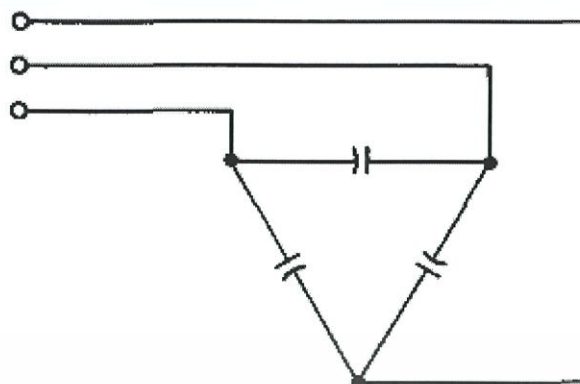
2.3.2 การต่อคาปาซิเตอร์

การต่อคาปาซิเตอร์แบบทั่วไปมีอยู่ 5 แบบ การเลือกในแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับการใช้ประโยชน์ของพิกัดแรงดันของคาปาซิเตอร์และการป้องกัน สถานีไฟฟ้าย่อยส่วนมากจะใช้คาปาซิเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อแบบวางในระบอบจำหน่าย แต่ก็จะมีเพียงบางแห่งที่ใช้การต่อแบบเดลต้า การต่อทั้ง 5 แบบได้แก่ [14]

1. แบบเดลต้า (Delta)
2. แบบกราวด์ด้วย (Grounded Y)
3. แบบกราวด์ดับเบิ้ลด้วย (Grounded Double Y)
4. แบบอันกราวด์ด้วย (Ungrounded Y)
5. แบบอันกราวด์ดับเบิ้ลด้วย (Ungrounded Double Y)

2.3.2.1 การต่อคาปาซิเตอร์แบบเดลต้า

การต่อคาปาซิเตอร์แบบเดลต้าจะประกอบมาจากกลุ่มอนุกรมเดี่ยวของคาปาซิเตอร์พิกัดแรงดันไลน์ แต่การต่อแบบเดลต้าจะซับซ้อนเนื่องจากคาปาซิเตอร์ต้องมีสองบุชชิ่ง (Bushing) วางบนแผงต่อลงกราวด์ (Grounded Rack) หรือหนึ่งบุชชิ่งวางบนแผงหุ้มฉนวน (Insulated Rack) แต่เนื่องจากมีกลุ่มอนุกรมเดี่ยวทำให้ไม่มีแรงดันเกินบนคาปาซิเตอร์ตัวที่เหลือจากคาปาซิเตอร์ที่ผิดพร่อง กระแสฮาร์โมนิกลำดับสามและกระแสลำดับศูนย์ไม่สามารถไหลเข้ามาในการต่อคาปาซิเตอร์แบบค้แบบเดลต้า ลักษณะการต่อแบบเดลต้าจะแสดงดังรูป 2.2

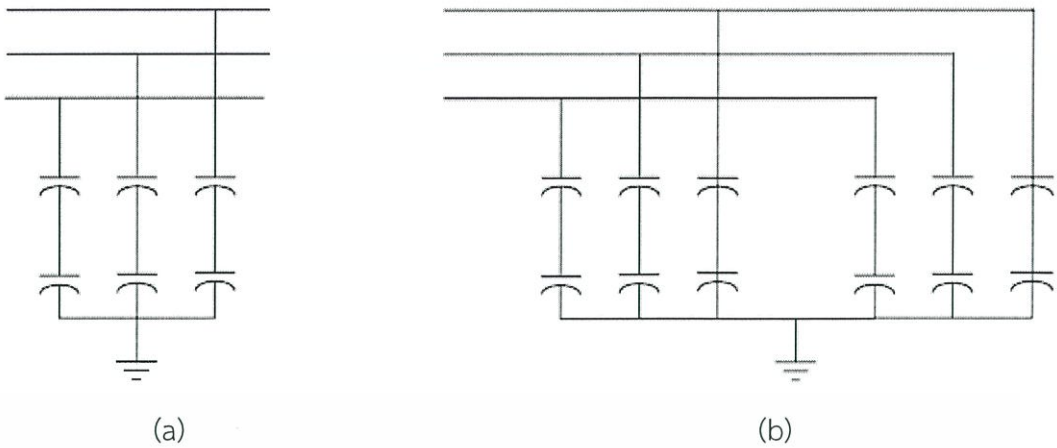


รูปที่ 2.2 การต่อคาปาซิเตอร์แบบเดลต้า

2.3.2.2 การต่อคาปาซิเตอร์แบบกราวด์-วาย

ลักษณะการต่อคาปาซิเตอร์แบบกราวด์-วายจะแสดงดังรูป 2.3 โดยจะประกอบไปด้วย การต่อขนานของชุดตัวเก็บประจุอนุกรมมากกว่าสองชุด โดยคาปาซิเตอร์ที่ต่อลงกราวด์จะสร้างเส้นทางเดินที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับกระแสและแรงดันเกินจากการเกิดฟ้าผ่า สำหรับกระแสที่เกิดจากฮาร์โมนิกจะสามารถผ่านกราวด์เข้าสู่ระบบ ซึ่งจะทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณสื่อสารได้ถ้าสายสื่อสารวางขนานกับสายไฟของระบบ นอกจากนั้นอาจจะเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ได้เมื่อนิวทรอลของระบบต่อเข้าสู่กราวด์เวลาพื้นตัวของแรงดันเมื่อมีการสวิตซ์จะลดลง แต่ก็ควรระวังกระแสอินรัชที่จะกระทบต่อการทำงานของรีเลย์ป้องกัน โดยลักษณะการต่อจะแบ่งย่อยออกเป็น 3 แบบดังนี้

1. การต่อหนึ่งชุดอนุกรมต่อเฟส (One Series Group per Phase) จะมีคุณสมบัติคล้ายการต่อแบบเดลต้า
2. การต่อหลายชุดอนุกรมต่อเฟส-วาย (Multiple Series Group per Phase Single Wye) จะมีคุณสมบัติคือจำนวนของชุดอนุกรมจะเป็นตัวจำกัดกระแสผิดพลาดสูงสุด ทำให้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งฟิวส์จำกัดกระแส
3. การต่อหลายชุดอนุกรมต่อเฟส-ดับเบิลวาย (Multiple Series Group per Phase Double Wye) เมื่อคาปาซิเตอร์แบงก์มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ต้องมีการแบ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ออกเป็น การต่อแบบวายสองชุด โดยจะมีลักษณะการต่อคล้ายกับวายเดียว โดยนิวทรอลทั้งสองจะเชื่อมต่อกันและต่อลงสู่กราวด์



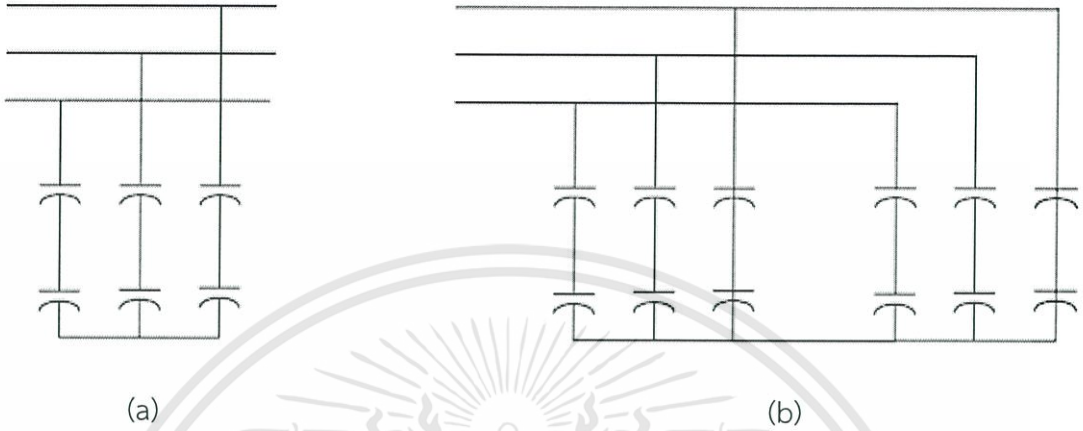
รูปที่ 2.3 การต่อคาปาซิเตอร์แบงค์ (a) แบบกราวด์-วาย (b) แบบกราวด์-ดับเบิลวาย

2.3.2.3 การต่อคาปาซิเตอร์แบงค์แบบอันกราวด์-วาย

ลักษณะการต่อคาปาซิเตอร์แบงค์แบบกราวด์-วายจะแสดงดังรูป 2.4 โดยคุณลักษณะจะไม่สร้างกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่สามหรือกระแสดิซซาร์จของคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เมื่อเกิดกระแสผิดพ่วงสู่กราวด์ขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตามสายนิวทรัลควรจะมีการหุ้มฉนวนที่ระดับพิกัดแรงดันไลน์เนื่องจากจะเกิดความต่างศักย์ชั่วขณะเมื่อคาปาซิเตอร์มีการสวิตชิงโดยลักษณะการต่อจะแบ่งย่อยออกเป็น 3 แบบดังนี้

1. การต่อหนึ่งชุดอนุกรมต่อเฟส (One Series Group per Phase) สำหรับระบบที่แรงดันเฟสมีค่าตามพิกัดมาตรฐานจะมีการต่อแบบหนึ่งชุดอนุกรมต่อเฟส นิวทรัลของคาปาซิเตอร์จะไม่ถูกต่อลงกราวด์เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการติดตั้งฟิวส์กำลังสำหรับการตัดวงจรเนื่องจากกระแสผิดพ่วง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้คาปาซิเตอร์ที่มีบุชชิงวางบนแผงหุ้มฉนวน ในกรณีที่ใช้คาปาซิเตอร์ที่มีสองบุชชิงวางบนแผงต่อลงกราวด์ จำเป็นที่จะต้องมีการต่อฟิวส์ที่จะตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดพ่วงแบบเฟส-ทุ-กราวด์ ถ้าฟิวส์ที่ใช้มีพิกัดต่ำจำเป็นที่จะต้องมีการใช้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินสำหรับจำกัดกระแสผิดพ่วง การต่อลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องมีฟิวส์จำกัดกระแส เนื่องจากกระแสที่ผ่านคาปาซิเตอร์ที่เกิดความผิดพ่วงจะถูกจำกัดไว้เหลือเพียงสามเท่าของกระแสเฟส แต่ควรระวังในการเปลี่ยนฟิวส์เนื่องจากความผิดพ่วงในคาปาซิเตอร์คนละเฟสสามารถทำให้เกิดความผิดพ่วงแบบเฟส-ทุ-เฟสได้
2. การต่อหลายชุดอนุกรมต่อเฟส-วาย (Multiple Series Group per Phase Single Wye) การต่อลักษณะนี้จะไม่สามารถป้องกันกระแสและแรงดันเกินจากการเกิดฟ้าผ่าได้ และจะไม่สร้างเส้นทางสำหรับฮาร์โมนิก ลำดับสาม เพราะฉะนั้นตัวคาปาซิเตอร์แบงค์รวมทั้งนิวทรัลต้องมีการติดตั้งฉนวนป้องกันแรงดันเกิน
3. การต่อหลายชุดอนุกรมต่อเฟส-ดับเบิลวาย (Multiple Series Group per Phase Double Wye) เมื่อคาปาซิเตอร์แบงค์มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ต้องมีการแบ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ออกเป็น

การต่อแบบสายสองชุด โดยจะมีลักษณะการต่อคล้ายกับสายเดี่ยว โดยนิวทรัลทั้งสองจะเชื่อมต่อกันหรือไม่ก็ได้ซึ่งคุณลักษณะการต่อแบบนี้จะเหมือนกับกรณีการต่ออินกราวด์-สายแบบหลายชุดอนุกรมต่อเฟส ส่วน นิวทรัลต้องมีการติดตั้งฉนวนสำหรับพิกัดแรงดันไลน์



รูปที่ 2.4 การต่อคาปาซิเตอร์แบงก์ (a) แบบอินกราวด์-สาย (b) แบบอินกราวด์-ดับเบิลสาย

2.4 การสวิตชิงของคาปาซิเตอร์แบงก์

คาปาซิเตอร์แบงก์ในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟหรือกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ลดความสูญเสีย และเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัดและไม่ยุ่งยากเหมือนวิธีการอื่น เช่น การใช้ซิงโครนสมอเตอร์และสแตติก วาร์ คอมเพนเซเตอร์ (static var compensators) ซึ่งระบบเหล่านี้มีราคาสูงและมีความยุ่งยากในการบำรุงรักษา ดังนั้นจึงมีการนำคาปาซิเตอร์แบงก์เข้ามาใช้งานอย่างแพร่หลาย [14]

ปัญหาอย่างหนึ่งของระบบคาปาซิเตอร์แบงก์ คือ เมื่อต้องการใช้งานจะต้องมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงก์เข้าสู่ระบบ การสวิตชิงนี้จะทำให้เกิดสัญญาณชั่วขณะขึ้นในระบบ ได้แก่ กระแสอินรัช แรงดันทรานเซียนต์ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อตัวคาปาซิเตอร์แบงก์และระบบที่ต่อร่วมด้วย

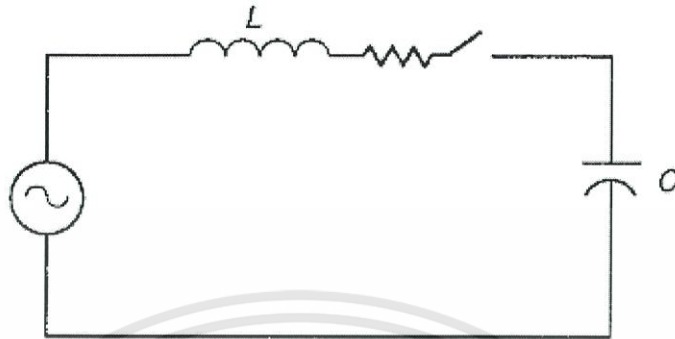
โดยปัจจัยที่มีผลต่อขนาดสัญญาณชั่วขณะสามารถพิจารณาได้จาก [31]

1. ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของสัญญาณที่ตำแหน่งการสวิตชิง
2. ค่าโวลต์และความสูญเสียในระบบ
3. ความเร็วในการกระตุ้น (Energization) ของคาปาซิเตอร์แบงก์

2.4.1 การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบงก์เดี่ยว

วงจรสมมูลของการกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบงก์เดี่ยว (Energizing an Isolated bank) จะแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยเมื่อสวิตช์ถูกปิดลงกระแสที่มีขนาดและความถี่สูงจะไหลเข้าสู่ตัวคาปาซิเตอร์เพื่อที่จะทำให้แรงดันที่คาปาซิเตอร์เท่ากับแรงดันของระบบ ถ้าสวิตช์ถูกปิดที่แรงดันยอด แรงดันภายในคาปาซิเตอร์จะพยายามที่จะเพิ่มจากระดับศูนย์ในสภาวะที่ยังไม่ถูกกระตุ้นไปยังแรงดันยอดอย่างเอกซารันเป็นเอกซารันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

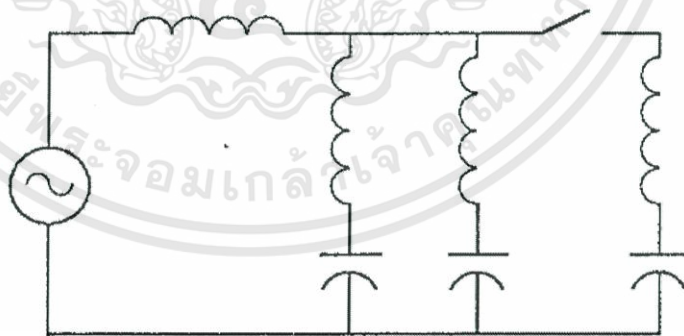
ทันทีทันใด ในกระบวนการที่จะทำให้ได้แรงดันในระดับนี้การพุ่งเกิน (Overshoot) จะเกิดขึ้นซึ่งจะมีขนาดเป็นเท่าตัวของแรงดันยอด แรงดันเซิร์จ (Voltage Surge) นี้จะมีความสูงเทียบเท่ากับกระแสอินรัช แล้วจะค่อยๆลดลงไปตามแรงดันของระบบ ค่าแรงดันเซิร์จจะมีโอกาสสูงสุดที่ 2.0 เพอร์ยูนิต



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของการกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบบคเดียว

2.4.2 การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบบแบ็ค-ทู-แบ็ค

การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบบแบ็ค-ทู-แบ็ค (Back-to-Back) การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบบคในขณะที่ยังมีคาปาซิเตอร์แบ็คที่ถูกกระตุ้นเชื่อมต่อก่อนแล้ว โดยในการสวิตชิงลักษณะนี้นั้นจะทำให้เกิดสัญญาณชั่วขณะความถี่สูงเนื่องจากผลรวมของค่าคาปาซิแตนซ์จากคาปาซิเตอร์ตัวก่อนหน้าที่เชื่อมกับระบบ กรณีที่เลวร้ายที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตชิงที่จุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุดของรูปสัญญาณแรงดัน ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงดันชั่วขณะบนบัสที่ขนาดและความถี่สูงมาก วงจรสมมูลของการสวิตชิงแบบแบ็คทูแบ็คจะแสดงดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของการสวิตชิงแบบแบ็คทูแบ็ค

2.4.3 แรงดันเกินพลวัต

แรงดันเกินพลวัต (Dynamic Overvoltage) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์พร้อม กับหม้อแปลง เนื่องจากกระแสอินรัชของหม้อแปลงนั้นมีส่วนประกอบของฮาร์โมนิกเป็นจำนวนมาก โดยระบบที่มีความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงความถี่ฮาร์โมนิก เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูงขึ้นระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันจะมีค่าสูงตามไปด้วย เมื่อมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์จะเกิดการสั้นพ้องแบบขนานกับระบบ ทำให้เกิดแรงดันเกินและส่วนประกอบฮาร์โมนิกเป็นช่วงเวลานานหลายรอบ

2.4.4 การขยายตัวของแรงดัน

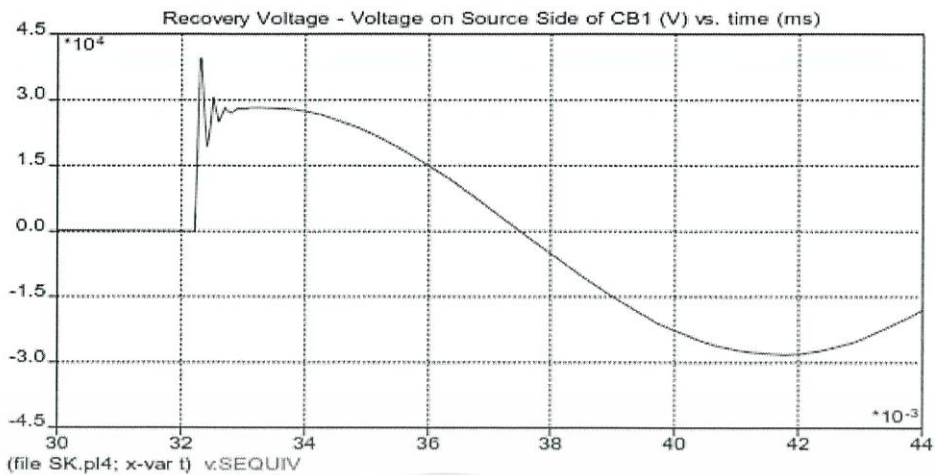
การขยายตัวของแรงดัน (Voltage Magnification) เกิดขึ้นเมื่อมีคาปาซิเตอร์แบงค์มากกว่าหนึ่งชุดเข้ามาเกี่ยวข้องในวงจรที่ระดับแรงดันที่ต่างกัน การขยายตัวของแรงดันแรงดันจะเกิดขึ้น การขยายตัวของแรงดันโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นเมื่อมีคาปาซิเตอร์แบงค์ที่สวิตชิงในระบบแรงดันสูง จะเกิดการเหนี่ยวนำให้แรงดันขยายตัวในระบบแรงดันต่ำ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์ในสถานีไฟฟ้าย่อยทุกวัน แรงดันเกินที่เกิดขึ้นจะมีขนาดสูงมาก โดยจะสามารถทำลายอุปกรณ์ และทำให้อาร์เรสเตอร์ทำงานผิดพลาดได้ การแก้ไขปัญหาดังกล่าวในขณะที่มีการสวิตชิงสามารถแก้ไขได้ดังต่อไปนี้

1. แก้ไขการคลาดเคลื่อนของวงจร โดยเปลี่ยนขนาดของคาปาซิเตอร์แบงค์ หรือ ย้ายสถานที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ให้เหมาะสม
2. ใช้ตัวต้านทานต่อกับเบรกเกอร์ เพื่อจำกัดขนาดของแรงดันเกิน
3. ใช้คาปาซิเตอร์แบงค์ที่ไม่ต่อกราวด์
4. คาปาซิเตอร์แบงค์ขนาดใหญ่ควรแยกสวิตชิงมากกว่า 1 ส่วน

2.4.5 แรงดันฟื้นตัวชั่วคราว

แรงดันฟื้นตัวชั่วคราว (Transient Recovery Voltage) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนขั้วของเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อมีการตัดวงจร เนื่องจากเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบแรงดันบนบัสจะลดลงต่ำมากหรืออาจมีค่าอยู่ที่ระดับศูนย์ เมื่อหน้าสัมผัสของเบรกเกอร์เปิดออกแรงดันด้านแหล่งจ่ายจะฟื้นตัวขึ้นมาที่ระดับปกติของระบบ อย่างไรก็ตามแรงดันในด้านแหล่งจ่ายของระบบจะเพิ่มขึ้นจากการชาร์จบนขั้วซึ่งคาปาซิแตนซ์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ค่าคาปาซิแตนซ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดการสั้นพ้องกับอินดักแตนซ์ในแหล่งจ่าย จนทำให้ความถี่ธรรมชาติของแหล่งจะมีค่าสูงขึ้น [6] โดยลักษณะสัญญาณแรงดันฟื้นตัวชั่วคราวแสดงได้ดังรูป 2.7



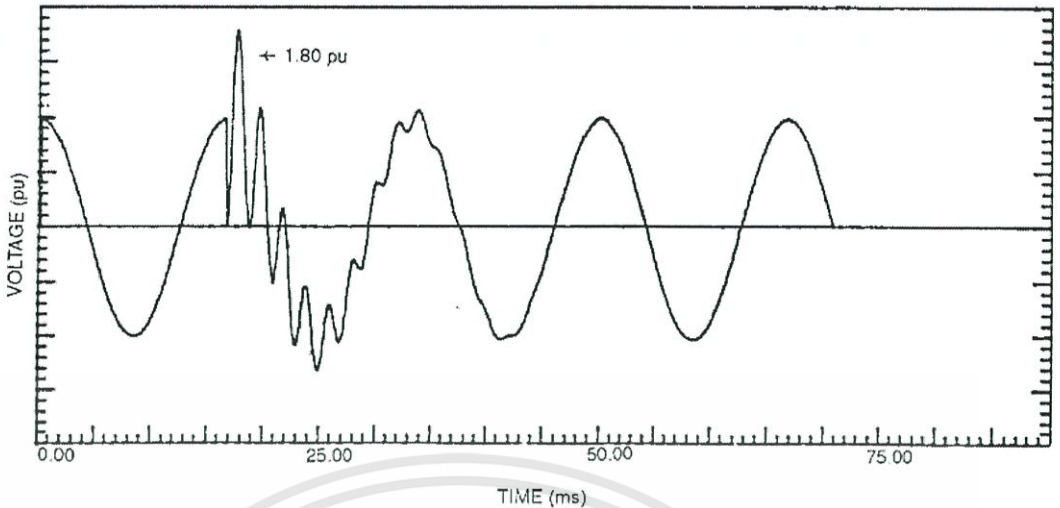
รูปที่ 2.7 ลักษณะของสัญญาณฟื้นตัวชั่วคราว

2.5 แรงดันทรานเซียนต์

แรงดันทรานเซียนต์คือแรงดันที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นในช่วงเวลาอันสั้น โดยแบ่งลักษณะการเกิดทรานเซียนต์จะแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. แรงดันเกินภายนอก เป็นผลเนื่องมาจากฟ้าผ่า รูปคลื่นมีลักษณะเป็นอิมพัลส์ มีช่วงหน้าคลื่นอยู่ในช่วง 1 - 2 μs และช่วงแรงดันหางคลื่นคือช่วงที่แรงดันลดลงมาเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด ซึ่งจะอยู่ในช่วงเวลา 40 - 60 μs โดยแหล่งจ่ายธรรมชาตินั้นสามารถไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ในลักษณะหลายทิศทาง
2. แรงดันเกินภายใน เกิดจากวัสดุที่ใช้เก็บพลังงานไฟฟ้าทั่วไป เช่น ตัวคาปาซิเตอร์ อินดักเตอร์ โดยแหล่งจ่ายที่เกิดจากวัสดุเก็บพลังงาน จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าหรือเกิดขึ้นภายในตัวระบบเอง ซึ่งเกิดจากการทำงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานแบบตัดต่อจากสวิตช์หรือ เซอกิตเบรกเกอร์ แรงดันที่เกิดขึ้นในส่วนนี้เรียกว่าแรงดันเสิร์จ สวิตจิง (Switching Surge) หรือ สวิตจิงอิมพัลส์ (Switching Impulse) วัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ได้แก่ ไดโอดกำลัง ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นต้น และการสวิตจิงที่รุนแรงมักจะเกิดขึ้นกับระบบที่มีการทำงานกับไฟฟ้าแรงสูง สำหรับสัญญาณช่วงหน้าคลื่นจะอยู่ในช่วง 100 - 300 μs และหางคลื่นจะอยู่ในช่วงเวลา 2000 - 3000 μs

สำหรับกรณีอื่นที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วคราวในระบบงาน ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบคือ การอาร์คระหว่างหน้าสัมผัสของวัสดุที่ทำงานในลักษณะการสวิตช์ ซึ่งได้แก่ ขดลวดรีเลย์ หรือ หน้าสัมผัสต่างๆ โดยปกติแล้ววัสดุเหล่านี้ จะมีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยขดลวดหรืออินดักเตอร์เสมอ และโดยปกติของอินดักเตอร์ก็จะมีค่าแอมแปงของค่าคาปาซิเตอร์อยู่เช่นกัน โดยลักษณะของสัญญาณชั่วคราวจะแสดงดังรูป 2.8

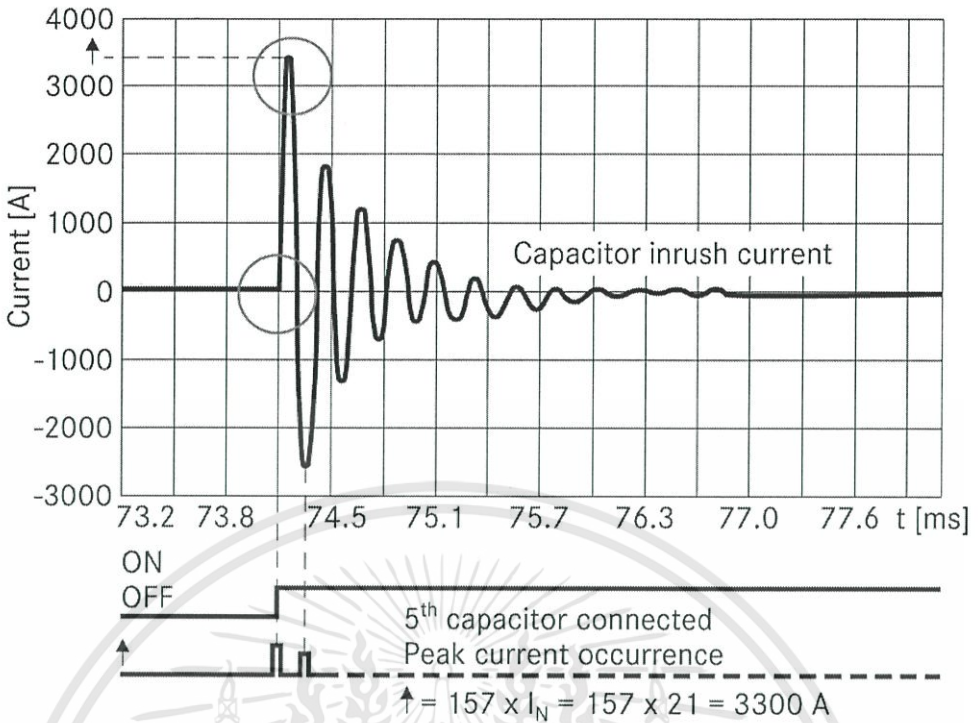


รูปที่ 2.8 สัญญาณแรงดันทรานเซียนต์ที่มีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์เบงค์

2.6 กระแสอินรัช

กระแสอินรัชเกิดขึ้นจากเมื่อ คาปาซิเตอร์เบงค์ถูกกระตุ้น จะทำให้มีกระแสไหลผ่านสูง อาจมีขนาดถึง 200 เท่าของกระแสพิกัด ขนาดของกระแสอินรัชจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดัน ที่ใช้ในการกระตุ้นคาปาซิเตอร์เบงค์ขณะนั้นและค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบกับค่าความต้านทานของคาปาซิเตอร์เบงค์ด้วย แต่ถ้ามีคาปาซิเตอร์เบงค์จำนวนหลายชุดบนบัสเดียวกัน คาปาซิเตอร์เบงค์ที่ถูกกระตุ้นไปแล้วจะเกิดการติสซาร์จกลับไปยังคาปาซิเตอร์เบงค์ที่กำลังจะถูกกระตุ้นทำให้กระแสอินรัชในขณะสวิตชิงมีค่าสูงเพิ่มขึ้นไปอีก

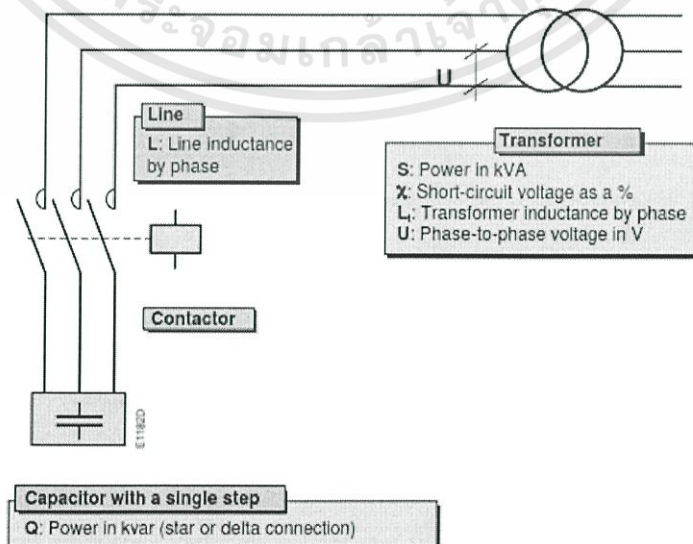
การที่มีกระแสอินรัชสูงๆ จะทำให้เกิดความเครียดกับคาปาซิเตอร์ส่งผลให้คาปาซิเตอร์มีอายุการใช้งานน้อยลง รวมไปถึงการทำงานของคอนแทคเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เกิดความผิดพลาด โดยลักษณะของสัญญาณกระแสอินรัชจะแสดงดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการเกิดกระแสอินรัช [30]

2.6.1 การคำนวณกระแสอินรัชกรณีมีเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์หนึ่งสเต็ป [33]

กรณีที่มีการเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์เบงค์อยู่เพียงสเต็ปเดียว (Isolated Bank) ในระบบ คือมีคาปาซิเตอร์เบงค์หนึ่งชุดสวิตซ์ซึ่งเข้าสู่ระบบ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการคำนวณได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำของระบบตั้งแต่แหล่งจ่ายหม้อแปลงมาจนถึงความเหนี่ยวนำในตัวสาย อีกค่าคือพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือนของคาปาซิเตอร์เบงค์ โดยตัวอย่างการเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์สามเฟสจำนวนหนึ่งสเต็ปจะแสดงดังรูป 2.9



รูปที่ 2.10 การเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์จำนวนหนึ่งสเต็ป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่ากระแสอินรัชเมื่อมีคาปาซิเตอร์เชื่อมต่ออยู่หนึ่งสแต็ปได้จากสมการที่ 2.1 สำหรับการคำนวณความถี่ของกระแสอินรัชจะคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

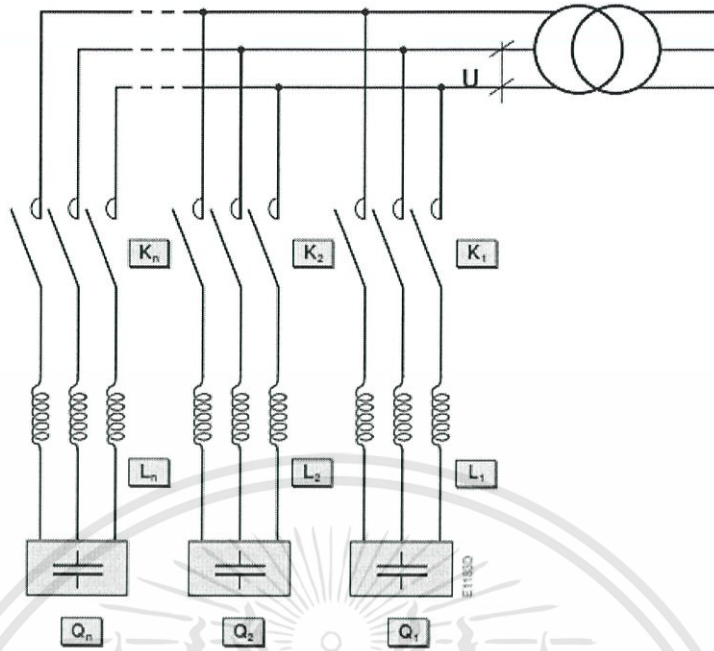
$$I = K_1 \sqrt{\frac{Q}{L+L_t}} \quad (2.1)$$

$$f_0 = K_2 U \sqrt{\frac{1}{Q(L+L_t)}} \quad (2.2)$$

เมื่อ	I	=	ค่ากระแสอินรัชสูงสุด (A)
	f_0	=	ความถี่ของกระแสอินรัช (Hz)
	Q	=	กำลังไฟฟ้าเสมือนของคาปาซิเตอร์ (kvar)
	U	=	แรงดันเฟส (V)
	L	=	ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส (μH)
	L_t	=	ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง (μH)
	K_1	=	ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1457 ที่ระบบ 50Hz
	K_2	=	ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 89.2 ที่ระบบ 50Hz

2.6.2 การคำนวณกระแสอินรัชกรณีสวิตชิงแบบแบ็คทูแบ็ค (back to back) [33]

การสวิตชิงแบบแบ็คทูแบ็ค คือ การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบงก์ในขณะที่บริเวณใกล้เคียงมีคาปาซิเตอร์แบงก์ที่ถูกกระตุ้นเชื่อมต่ออยู่ก่อนแล้ว กระแสอินรัชในการสวิตชิงลักษณะนี้จะมีขนาดและความถี่ที่สูงมากเมื่อเทียบกับการสวิตชิงกรณีคาปาซิเตอร์แบงก์เดียว โดยตัวอย่างการเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์สามเฟสที่ขนาดกำลังไฟฟ้าเสมือนของแต่ละสแต็ปมีค่าเท่ากันจะแสดงดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 การเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดจำนวนหลายสเต็ป

โดยจะสามารถคำนวณค่ากระแสในรีซเมื่อมีคาปาซิเตอร์เชื่อมต่ออยู่มากกว่าหนึ่งสเต็ป และในขณะสวิตช์มีคาปาซิเตอร์จำนวน $(n-1)$ แบนค์เชื่อมต่ออยู่ก่อนหน้าแล้ว ได้จากสมการที่ 2.3 สำหรับการคำนวณความถี่ของกระแสในรีซจะคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$I = K_1 \frac{n-1}{n} \times \sqrt{\frac{Q_n}{L_n}} \quad (2.3)$$

$$f_0 = K_2 U \sqrt{\frac{1}{L_n \times Q_n}} \quad (2.4)$$

เมื่อ	I	=	ค่ากระแสในรีซสูงสุด (A)
	f_0	=	ความถี่ของกระแสในรีซ (Hz)
	Q_n	=	กำลังไฟฟ้าเสมือนของคาปาซิเตอร์ในสเต็ป (kvar)
	Q_1	=	$Q_2 = Q_{\dots} = Q_n$
	U	=	แรงดันเฟส (V)
	L_n	=	ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสในสเต็ป (μH)
	L_1	=	$L_2 = L_{\dots} = L_n$
	K_1	=	ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1457 ที่ระบบ 50Hz
	K_2	=	ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 89.2 ที่ระบบ 50Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ปริมาณเพอร์ยูนิต

ค่าเพอร์ยูนิต (Per-unit Quantities) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าจริง (Actual value) ต่อค่าฐาน (Base value) โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.5 [32]

$$\text{Per unit value} = \frac{\text{Actual value}}{\text{Base value}} \quad (2.5)$$

แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์จะเกี่ยวข้องกับการเลือกค่าฐาน (Base value) และจะต้องใช้ 2 ค่าเพื่อนำมาคำนวณค่าฐานที่เหลืออยู่อีก 2 ค่า โดยปกติค่าฐาน (Base) ที่กำหนด คือ ค่าฐานกำลังไฟฟ้าและค่าฐานแรงดันไฟฟ้า และมาหาค่าฐานอิมพีแดนซ์และค่าฐานกระแสไฟฟ้า โดยการคำนวณจะทำได้ดังสมการ 2.6 และ 2.7

$$\text{Base I} = \frac{\text{Base VA}_{3\phi}}{\sqrt{3}\text{Base V}_{LL}} \quad (\text{A/ph}) \quad (2.6)$$

$$\text{Base Z} = \frac{(\text{Base V}_{LL})^2}{\text{Base VA}_{3\phi}} = \frac{(\sqrt{3}\text{Base V}_{LN})^2}{\text{Base VA}_{3\phi}} \quad (\Omega/\text{ph}) \quad (2.7)$$

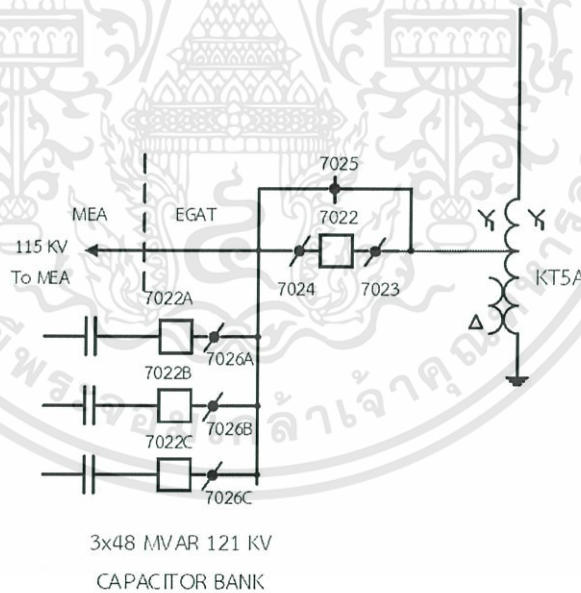
การเปลี่ยนค่าฐานของปริมาณเพอร์ยูนิต (Changing the base of per unit quantities) บางครั้งต้องการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เพอร์ยูนิต (Per-unit impedance) ของระบบหนึ่งไปอยู่อีกระบบหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ทั้งหมดให้อยู่ในค่าฐานอิมพีแดนซ์ใหม่ (Impedance Base) ตามสมการ 2.8

$$Z_{\text{pu,new}} = Z_{\text{pu,old}} \left(\frac{\text{base V}_{\text{old}}}{\text{base V}_{\text{new}}} \right)^2 \left(\frac{\text{Base VA}_{\text{new}}}{\text{Base VA}_{\text{old}}} \right) \quad (2.8)$$

บทที่ 3

การออกแบบชุดสวิตช์คาปาซิเตอร์แบงค์

ในโครงการวิจัยนี้ จะเป็นการสร้างชุดสวิตช์ระบบสวิตช์ซึ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ โดยจะมีการจำลองจากระบบสวิตช์ซึ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ ในสถานีไฟฟ้าย่อยนอกจอก ที่ระดับแรงดัน 115 kV ภายในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยจะจำลองลงมาอยู่ที่ระดับแรงดัน 415 V ซึ่งสถานีไฟฟ้าย่อยที่เลือกจะมีอุปกรณ์ คาปาซิเตอร์แบงค์จำนวน 3 สเต็ป มีขนาด 48 Mvar ลักษณะการต่อภายใน คาปาซิเตอร์แบงค์จะเป็นแบบสายไม่ลงกราวด์ (Ungrounded Wye) และมีการเชื่อมต่ออยู่กับเมนบัส ลักษณะการเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์แบงค์บนบัสจะถูกแสดงไว้ในแบบวันไลน์ ไดอะแกรมดังรูป 3.1 โดยระบบคาปาซิเตอร์แบงค์จะเชื่อมต่อกับสถานสวิตช์โดยมีหม้อแปลง KT5A เป็นอุปกรณ์รักษาระดับแรงดัน และมีเซอร์กิตเบรกเกอร์หมายเลข 7022 เป็นอุปกรณ์ป้องกัน บัสหลัก และมีสวิตช์ 7026 A, B และ C เป็นอุปกรณ์ป้องกันในการสวิตช์ซึ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบ สำหรับ คาปาซิเตอร์แบงค์นั้นจะเป็นอุปกรณ์ช่วยยกระดับแรงดันที่จะไปยังโหนดของการไฟฟ้านครหลวง สำหรับแบบวันไลน์ของสถานีไฟฟ้าย่อยนอกจอกทั้งระบบจะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.1 การต่อคาปาซิเตอร์แบงค์บนเมนบัสของสถานีไฟฟ้าย่อยนอกจอก

3.1 ค่าพารามิเตอร์ระบบเพอร์ยูนิต

สถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกมีข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณระบบเพอร์ยูนิตดังนี้ ฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA Base) มีค่าเท่ากับ 200 MVA ฐานแรงดัน (V Base) มีค่าเท่ากับ 115 kV สำหรับค่าฐานอิมพีแดนซ์ (Z Base) จะได้จากการคำนวณตามสมการ 2.8 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 66.125 Ω ค่ากำลังรีแอกทีฟของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกจะหาได้จากขนาดของคาปาซิเตอร์ที่อยู่อยู่ที่บัส ซึ่งมีขนาด 48 Mvar ดังนั้นเมื่อแปลงเป็นระบบเพอร์ยูนิตจะมีค่ากำลังรีแอกทีฟจะมีค่าเท่ากับ 0.24 p.u.

สำหรับห้องปฏิบัติการนั้นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณระบบเพอร์ยูนิตจะมีดังนี้ ฐานแรงดัน (V Base) มีค่าเท่ากับ 415 V และฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA Base) วิธีการคำนวณเพอร์ยูนิตนั้นจะใช้ทฤษฎีตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยค่ากระแสสื่อนั้นจะใช้ค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักของห้องปฏิบัติการซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 30A เพราะฉะนั้นฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA Base) จากการคำนวณจะมีค่าเท่ากับ 21.56 kVA สำหรับขนาดของคาปาซิเตอร์ที่จะใช้ในชุดสาธิตนั้นจะคำนวณได้จากกำลังรีแอกทีฟของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก โดยนำค่าเพอร์ยูนิตมาคูณกับฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏของห้องปฏิบัติการ ผลการคำนวณจะมีค่าเท่ากับ 5.17 kvar แต่ตามมาตรฐานการผลิตคาปาซิเตอร์นั้นจะไม่เหมาะสมที่จะผลิตค่าดังกล่าว ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดคาปาซิเตอร์ตามมาตรฐานคือขนาด 5 kvar ที่ระดับแรงดัน 415 V

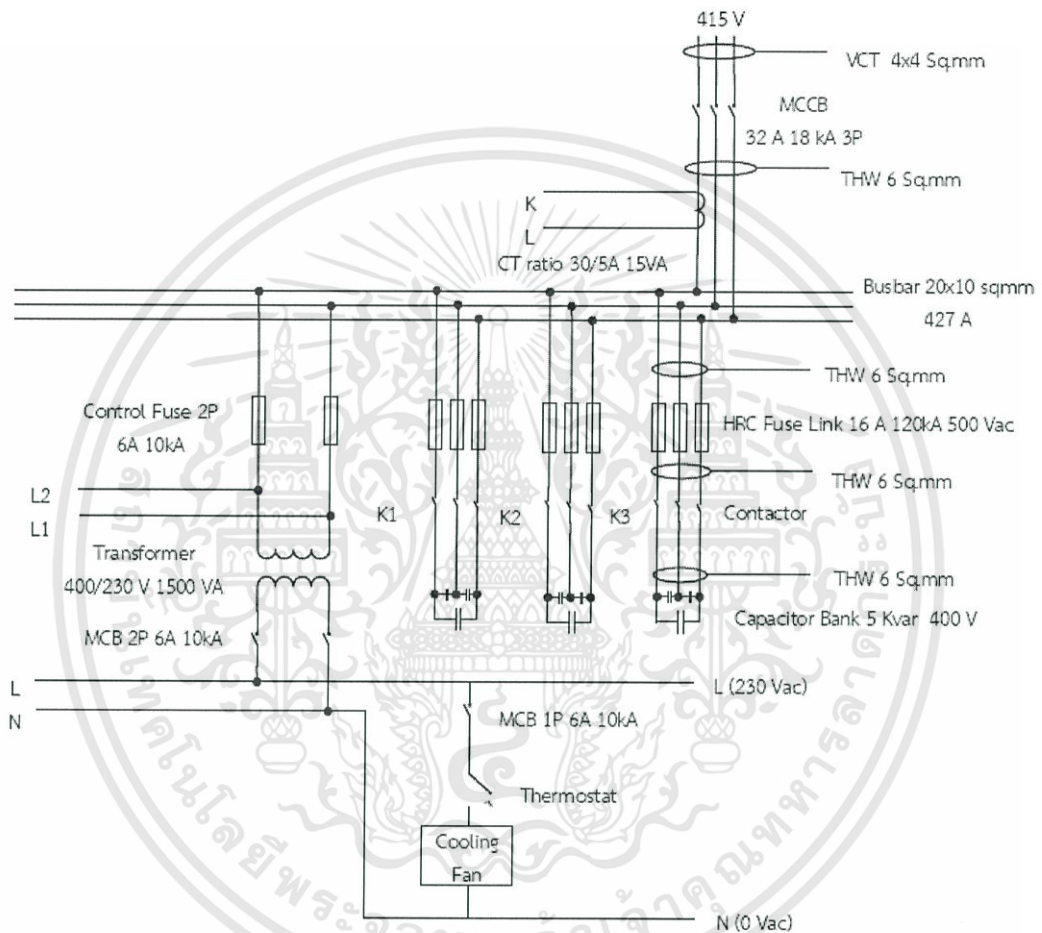
3.2 วงจรของชุดสาธิต

การทำงานของชุดสาธิตระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคี่ในโครงงานวิจัยนี้ จะทำงานโดยการรับแรงดันจากห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าเท่ากับ 380 V จากนั้นส่งผ่านไปยังหม้อแปลงปรับค่าได้ (Variable Voltage Transformer) โดยจะยกระดับแรงดันเป็น 415 V เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับชุดสาธิต โดยตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor Controller) จะทำหน้าที่วัดแรงดันและกระแสในชุดสาธิต เพื่อนำไปคำนวณค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า แล้วจึงประมวลผลกับค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้ จากนั้นจึงส่งสัญญาณควบคุมให้หน้าสัมผัส (Contactor) สั่งสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคี่เข้าทำงาน โดยจะมีการแบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ วงจรกำลังและวงจรควบคุม

3.2.1 วงจรกำลัง

วงจรกำลังของชุดสาธิตนั้นจะมีหน้าที่จ่ายไฟจากระบบของห้องปฏิบัติการเพื่อให้ชุดสาธิตสามารถทำงานได้ โดยตัววงจรนั้นได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนที่รับไฟที่ระดับแรงดัน 415 V จากห้องปฏิบัติการผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ของทั้งตัวห้องปฏิบัติการและของชุดสาธิต เพื่อจ่ายไฟให้กับคาปาซิเตอร์ เมื่อคอนแทคเตอร์ทำงาน โดยจะมีฟิวส์ไบเมทัลเป็นอุปกรณ์ป้องกันตัวคาปาซิเตอร์ และส่วนที่สองคือส่วนที่รับไฟมาแล้วผ่านหม้อแปลง 415/230 V เพื่อลดระดับแรงดันสำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายไฟให้อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ในตู้เช่น พัดลมระบายอากาศ ตัวควบคุมตัวประกอบกำลัง เป็นต้น สำหรับด้านปฐมภูมินั้นจะมีฟิวส์เป็นอุปกรณ์ป้องกัน และมีเชื่อมต่อกับฟังก์ชันวัตต์แรงดันของตัวควบคุมตัวประกอบกำลัง สำหรับด้านทุติยภูมินั้นจะมีการจ่ายไฟให้พัดลมระบายอากาศ ซึ่งจะมีการติดตั้งสวิตช์อุณหภูมิเพื่อให้พัดลมระบายอากาศทำงานตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ และอีกส่วนจะเป็นไฟเลี้ยงสำหรับตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยจะมีการนำหม้อแปลงกระแสมาเชื่อมต่อที่หลังเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เฟส A เพื่อวัดปริมาณ แบบของวงจรถูกำลังจะเป็นดังที่แสดงในวงจรรูป 3.2

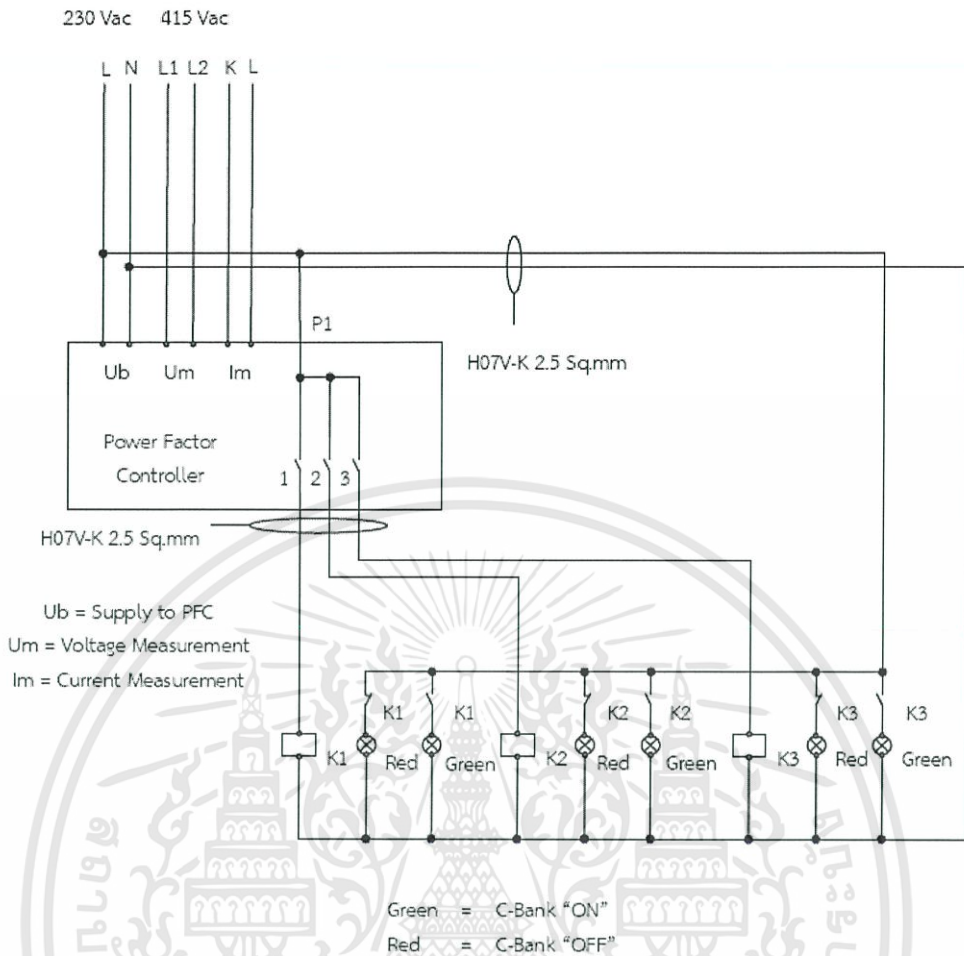


รูปที่ 3.2 วงจรกำลังของชุดสวิตช์ระบบสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบงค์

3.2.2 วงจรควบคุม

สำหรับวงจรควบคุมภายในชุดสวิตช์นั้นจะทำหน้าที่ควบคุมการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบ โดยใช้ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สั่งงานให้แมคเนติกคอนแทคเตอร์ทำการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบงค์เข้าไปในระบบตามค่าตัวประกอบกำลังที่ตั้งค่าไว้ โดยตัววงจรจะมีไฟบอกสถานะการทำงานของคาปาซิเตอร์ในแต่ละสเต็ป ไฟสีแดงหมายถึงคาปาซิเตอร์ยังไม่ได้ต่อเข้าสู่ระบบ และไฟสีเขียวหมายถึงคาปาซิเตอร์ได้ถูกต่อเข้าสู่ระบบแล้ว แบบของวงจรควบคุมจะเป็นดังที่แสดงในรูป 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วงจรควบคุมของชุดสวิตระบบสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค

โดยที่ Ub หมายถึง จุดต่อสำหรับแหล่งจ่ายไฟให้ตัวควบคุมตัวประกอบกำลัง
Um หมายถึง จุดต่อสำหรับการวัดแรงดัน
Im หมายถึง จุดต่อสำหรับการวัดกระแส

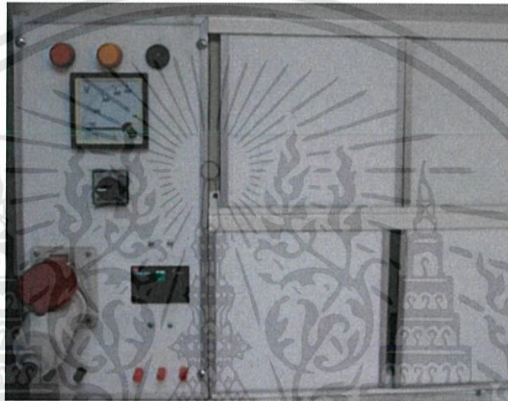
3.3 อุปกรณ์ในชุดสวิต

จากการออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมในข้างต้น ขั้นตอนต่อไปของการสร้างชุดสวิตคือ การเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งในระบบ โดยอุปกรณ์ที่จะติดตั้งนั้นจะต้องพิจารณาคุณสมบัติให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อให้การทดลองที่เกิดขึ้นสามารถเก็บข้อมูลได้ตามวัตถุประสงค์และมีความแม่นยำมากที่สุด อีกประการหนึ่งคืออุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งต้องมีความปลอดภัยสูงสุดด้วย เนื่องจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคจะทำให้เกิดกระแสที่มีขนาดสูงมากจนอาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ โดยรายละเอียดของชุดสวิต และหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิดจะอธิบายในหัวข้อย่อยดังนี้

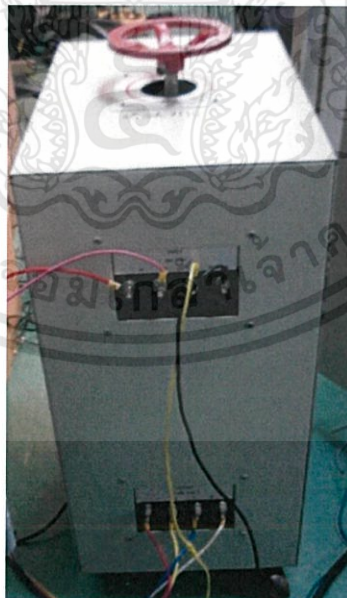
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าของชุดสาธิต

จากการคำนวณค่าในระบบเพอร์ยูนิตคาปาซิเตอร์แบบคี่ที่ใช้งานในชุดสาธิตจะมีพิกัด 5 kvar ที่ระดับแรงดัน 415 V แต่ในห้องปฏิบัติการสามารถจ่ายแรงดันได้สูงสุดที่ระดับ 380 V จึงต้องมีการนำหม้อแปลงปรับค่าได้ (Variable Voltage Transform) มาต่อเพิ่มกับแหล่งจ่ายจากห้องปฏิบัติการปกติ เพื่อเพิ่มระดับแรงดันให้ได้ตามที่กำหนด และรักษาระดับแรงดันให้คงที่อยู่เสมอเมื่อมีการสวิตซ์ซึ่งคาปาซิเตอร์แบบคี่ โดยคุณสมบัติของหม้อแปลงปรับค่าได้ จะมีช่วงที่จ่ายแรงดันได้ 0-420 V รับกระแสได้ 30 A และเป็นแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส โดยแหล่งจ่ายและหม้อแปลงปรับค่าได้จะแสดงดังรูป 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แหล่งจ่ายแรงดัน

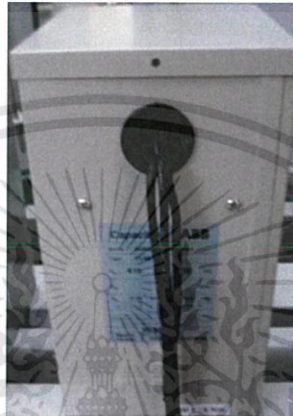


รูปที่ 3.5 หม้อแปลงปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 คาปาซิเตอร์แบงก์

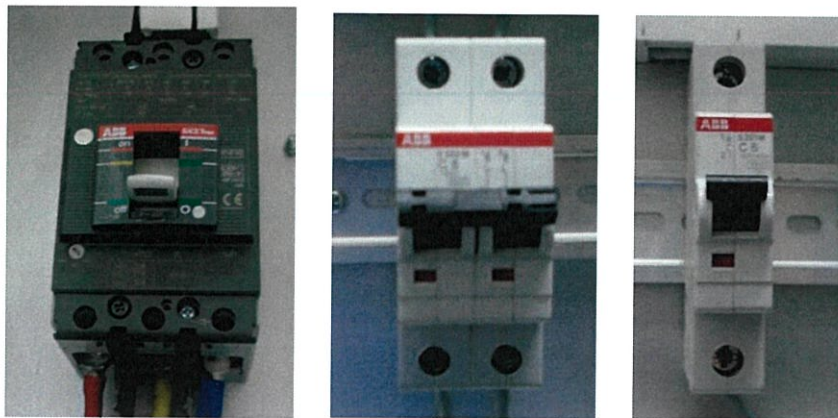
ในชุดสาธิตจะเป็นการทดลองสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงก์เข้าใช้งาน 3 สเต็ป โดยคาปาซิเตอร์แบงก์ที่ใช้จะเป็นรุ่น CLMD 43 จำนวน 3 ตัว ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ พิกัด 5 kvar ที่ระดับแรงดัน 415 V ความถี่ 50 Hz มีลักษณะการเชื่อมต่อภายในแบบวายไม่ลงกราวด์ (Ungrounded Wye capacitor bank) และมีการติดตั้งตัวต้านทานดิสซิปาชันที่ตัวคาปาซิเตอร์ สามารถดิสซิปาชันระดับแรงดันอยู่ที่ 50 V ภายในระยะเวลา 1 นาที โดยคาปาซิเตอร์แบงก์จะแสดงดังรูป 3.6



รูปที่ 3.6 คาปาซิเตอร์แบงก์ CMD43

3.3.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์

ในการป้องกันของชุดสาธิตนี้มีการใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ในการป้องกันอยู่ 3 ส่วน ซึ่งพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้มาจากการคำนวณตามค่ามาตรฐานคือ ควรเลือกใช้ขนาด 1.5 เท่าของกระแสพิกัด ซึ่งในส่วนแรกจะเป็นอุปกรณ์ป้องกันระหว่างระบบของห้องปฏิบัติการกับหม้อแปลงปรับค่าได้ โดยจะใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัด 30 AT/30 AF ชนิด 3 ขั้ว สามารถทนกระแสสูงสุดโดยที่โครงภายนอกไม่เสียหาย (I_{cu}) ที่ 10 kA ในส่วนที่สองจะเป็นอุปกรณ์ป้องกันระหว่างชุดสาธิตกับหม้อแปลงปรับค่าได้ ซึ่งจะใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดพิกัด 32 AT/ 32 AF ชนิด 3 ขั้ว สามารถทนกระแสสูงสุดโดยที่โครงภายนอกไม่เสียหาย (I_{cu}) ที่ระดับแรงดัน 415 V ได้ 18 kA และในส่วนสุดท้าย จะเป็นการป้องกันภายในวงจรควบคุม โดยจะมีเซอร์กิตเบรกเกอร์ 2 ตัว ตัวแรกจะป้องกันตัวควบคุมตัวประกอบกำลังและตัวที่สองจะป้องกันพัดลมระบายอากาศ โดยคุณสมบัติเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเป็นดังนี้ พิกัด 6 AT/10 AF ชนิด 2 ขั้ว สามารถทนกระแสสูงสุดโดยที่โครงภายนอกไม่เสียหาย (I_{cu}) ที่ 15 kA และพิกัด 6 AT 10 AF ชนิด 1 ขั้ว สามารถทนกระแสสูงสุดโดยที่โครงภายนอกไม่เสียหาย (I_{cu}) ที่ 15 kA โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้งสามชนิดแสดงในรูป 3.7



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 3.7 เซอร์กิตเบรกเกอร์

(a) เซอร์กิตเบรกเกอร์ พิกัด 32 AT 32 AF ชนิด 3 ขั้ว

(b) เซอร์กิตเบรกเกอร์ พิกัด 6 AT 10 AF ชนิด 2 ขั้ว

(c) เซอร์กิตเบรกเกอร์ พิกัด 6 AT 10 AF ชนิด 1 ขั้ว

3.3.4 ฟิวส์

ในการป้องกันชุดสาธิตจะมีการใช้ฟิวส์ในการป้องกันอยู่สองส่วน สำหรับพิกัดของฟิวส์นั้นได้มาจากการคำนวณตามมาตรฐานที่ 1.5 เท่าของกระแสพิกัด ในส่วนแรกจะเป็นการป้องกันกระแสจาก บัสบาร์ก่อนเข้าแมคเนติกคอนแทคเตอร์และคาปาซิเตอร์ โดยจะใช้ฟิวส์ไบเมทัล NH00C ขนาดพิกัดกระแส 16 A สามารถทนกระแสสูงสุดโดยที่โครงสร้างไม่เสียหายได้ 120 kA จำนวน 3 ตัวต่อคาปาซิเตอร์ 1 สเต็ป และส่วนที่สองจะเป็นการป้องกันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกับบัสบาร์ โดยจะใช้ฟิวส์ซึ่งจะมีขนาดพิกัดกระแส 6 A สามารถทนกระแสสูงสุดโดยที่โครงสร้างไม่เสียหายได้ 100 kA จำนวน 2 ตัว โดยฟิวส์จะแสดงในรูป 3.8



รูปที่ 3.8 ฟิวส์ (a) ฟิวส์ไบเมทัล NH00C (b) ฟิวส์ขนาดพิกัดกระแส 6 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดสำหรับชุดสาธิตการสวิตชิงในระบบคาปาซิเตอร์แบงค์นั้นคือ ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor Controller) ซึ่งจะมีหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ในการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบ โดยตัวอุปกรณ์จะทำงานโดยการวัดกระแสและแรงดันของระบบก่อนจะนำมาคำนวณเป็นค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า จากนั้นจึงประมวลผลเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์แล้วจึงทำงานตามโปรแกรมที่ผู้ใช้ตั้งค่าไว้ ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของชุดสาธิตนี้จะเลือกใช้รุ่น BR6000-R6 ซึ่งมีความสามารถสูงสุดในการควบคุมคาปาซิเตอร์ได้ถึง 6 ตัว ทำงานที่ระดับแรงดัน 230 V 50 Hz ขอบเขตการวัดระดับแรงดันของระบบสำหรับแรงดันเฟสอยู่ที่ 0-300 V และสำหรับแรงดันไลน์อยู่ที่ 0-500 V ส่วนขอบเขตการวัดกระแสสามารถตั้งค่าไว้ได้ที่ 1 A หรือ 5 A โดยลักษณะตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแสดงดังรูป 3.10

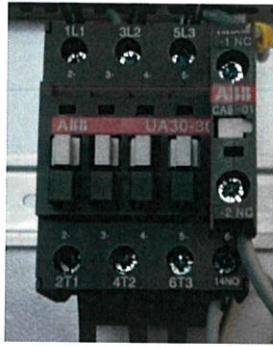


รูปที่ 3.9 ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า BR6000-R6

3.3.6 แมกเนติกคอนแทคเตอร์

แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยการทำงานโดยอำนาจแม่เหล็กในการเปิดและปิดหน้าสัมผัส โดยจะสวิตชิงตามการควบคุมของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการเลือก แมกเนติกคอนแทคเตอร์ในการใช้งานให้เหมาะสมนั้น จะพิจารณาที่กระแสและแรงดันพิกัดของอุปกรณ์ที่นำมาเชื่อมต่อด้วย ซึ่งในชุดสาธิตนี้ก็คือคาปาซิเตอร์ โดยจะต้องเลือกแมกเนติกคอนแทคเตอร์ที่มีพิกัดกระแสสูงกว่ากระแสที่ใช้งานจริงในระดับแรงดันที่เท่ากัน ดังนั้นในชุดสาธิตนี้จึงเลือกใช้แมกเนติกคอนแทคเตอร์รุ่น UA30-30-10 ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังนี้ มีหน้าสัมผัสแบบปกติเปิด 4 ชุด คุณสมบัติทนกระแสสูงสุด 65 A มีพิกัด 32 kvar ที่ระดับแรงดัน 480 V ในระบบ 3 เฟส และหน้าสัมผัสช่วยแบบปกติปิด 1 ชุด คุณสมบัติทนกระแสสูงสุด 16 A แรงดัน 690 V โดยลักษณะของอุปกรณ์จะแสดงดังรูป 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แมคเนติกคอนแทกเตอร์ รุ่น UA30-30-10

3.3.7 สายไฟ

สำหรับการเลือกสายไฟนั้น จำเป็นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของสายไฟให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในการสร้างชุดสาธิตครั้งนี้ จะพิจารณาคูสมบัติของสายจากค่ากระแสฟัดด์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีคาปาซิเตอร์แบงค์เชื่อมต่อ ระดับอุณหภูมิที่ฉนวนของสายสามารถทนได้ และความเหมาะสมในการใช้งาน จากค่ากระแสเมื่อมีคาปาซิเตอร์เชื่อมต่ออยู่ทั้ง 3 สเต็ปมีค่า 21 A จึงได้เลือกสาย THW type A ขนาด 6 mm^2 และ สาย VCT ขนาด $4 \times 4 \text{ mm}^2$ มาใช้ในวงจรกำลัง ซึ่งสามารถทนกระแสได้ 43 A และ 25 A ตามลำดับ ซึ่งสาย THW type A จะใช้เดินในวงจรกำลังทั้งหมด โดยจะมีคุณสมบัติของสายดังนี้ สายเป็นทองแดงแกนเดี่ยวที่มีขนาด 0.5 mm^2 ถึง 500 mm^2 และสามารถทนความร้อนได้ไม่เกิน $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และทนแรงดันได้ไม่เกิน 750 V ส่วนสาย VCT จะเชื่อมแหล่งจ่ายของห้องปฏิบัติการจนเข้าไปในชุดสาธิต โดยจะมีคุณสมบัติของสายดังนี้ สายเป็นทองแดง 4 แกน หุ้มด้วย PVC ทนความร้อนได้ไม่เกิน $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และแรงดันได้ไม่เกิน 750 V ในส่วนของวงจรควบคุมของชุดสาธิต ได้เลือกใช้สาย HO7V-K ขนาดสาย 2.5 mm^2 มีลักษณะสายทองแดงหุ้มด้วย PVC ทนความร้อนได้ไม่เกิน $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นสายสำหรับวงจรควบคุม

3.3.8 ตัวเหนี่ยวนำ

ในชุดสาธิตระบบสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบงค์นั้น เมื่อมีการสวิตซ์คาปาซิเตอร์ในแต่ละสเต็ป จะเกิดกระแสอินรัชที่มีขนาดและความถี่สูงมาก ในการที่จะลดกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นในขณะที่สวิตซ์คาปาซิเตอร์แบงค์นั้น จะทำได้โดยการต่อตัวเหนี่ยวนำเพิ่มอนุกรมกับคาปาซิเตอร์แบงค์ สำหรับชุดสาธิตจะใช้เป็นการพันตัวเหนี่ยวนำบน แกนอากาศโดยจะใช้สาย THW ขนาด 6 mm^2 เพื่อให้การทดลองนั้นสามารถทำได้ตามวัตถุประสงค์ซึ่งจะมีการพันตัวเหนี่ยวนำ 4 ขนาดดังนี้ ตัวเหนี่ยวนำขนาด $4 \mu\text{H}$ พันจำนวน 3 รอบ ตัวเหนี่ยวนำขนาด $6 \mu\text{H}$ พันจำนวน 5 รอบ ตัวเหนี่ยวนำขนาด $8 \mu\text{H}$ พันจำนวน 6 รอบ และตัวเหนี่ยวนำขนาด $10 \mu\text{H}$ พันจำนวน 7 รอบ โดยจะให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวเหนี่ยวนำแต่ละตัวเท่ากับ 9 เซนติเมตร โดยลักษณะการพันตัวเหนี่ยวนำจะแสดงดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 การพันสายไฟเป็นตัวเหนียววน่า

3.3.9 หม้อแปลงแรงดัน

หม้อแปลงแรงดันจะทำหน้าที่ลดระดับแรงดันจาก 415 V ด้านปฐมภูมิในเฟส A ของวงจรกำลังลงมาที่ระดับแรงดัน 230 V ด้านทุติยภูมิสำหรับจ่ายวงจรควบคุม โดยคุณสมบัติของหม้อแปลงแรงดันจะเป็นหม้อแปลง 1 เฟส ที่ระบบความถี่ 50 Hz พิกัดกำลังขาออกสูงสุด 1.5 kVA ระดับอุณหภูมิโดยรอบ (Ambient Temperature) อยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นประเภทฉนวน (Insulation Class) คลาส F สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 150 องศาเซลเซียส ลักษณะของหม้อแปลงที่ใช้ในชุดสาธิตจะแสดงดังรูป 3.12



รูปที่ 3.12 หม้อแปลงแรงดัน

3.3.10 หม้อแปลงกระแส

หม้อแปลงกระแสจะทำหน้าที่ลดระดับกระแสที่อยู่บนบัสบาร์ ให้มีค่าลดลงมาสำหรับจ่ายเข้าตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เพื่อนำไปประมวลผลสำหรับสวิตชิงแบบอัตโนมัติตามค่าตัวประกอบกำลังที่ตั้งค่าไว้ หม้อแปลงกระแสที่เลือกใช้ในชุดสาธิตคือ Mitsubishi CW-15LP โดยมีอัตราส่วนของการแปลงกระแสด้าน ปฐมภูมิเป็นกระแสด้านทุติยภูมิ 30:5 A กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงกระแส (CT burden) มีค่า 15 VA และค่าความแม่นยำของการวัด (Accuracy Class) ที่คลาส 1 โดยรูปของอุปกรณ์จะแสดงดังรูป 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 หม้อแปลงกระแส

3.3.11 พัดลมระบายอากาศ

พัดลมระบายอากาศที่เลือกใช้จะเป็นรุ่น M4Q 045-CA01-A เป็นพัดลมระบายอากาศ 1 เฟส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร มอเตอร์ชนิด 4 ขั้ว กำลัง 8 W ทำงานที่ระดับแรงดัน 230 V อัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 400 m³/h โดยทำหน้าที่ดูดลมร้อนออกจากตู้เพื่อเป็นการระบายอากาศและลดอุณหภูมิภายในตู้คาปาซิเตอร์แรงค์ การทำงานจะผ่านสวิทช์อุณหภูมิที่มีช่วงการทำงานที่ 0-60 องศาเซลเซียส และจะตั้งให้พัดลมระบายอากาศทำงานที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พัดลมระบายอากาศที่ใช้ในชุดสาธิตจะแสดงดังรูป 3.14



รูปที่ 3.14 พัดลมระบายอากาศ รุ่น M4Q 045-CA01-A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

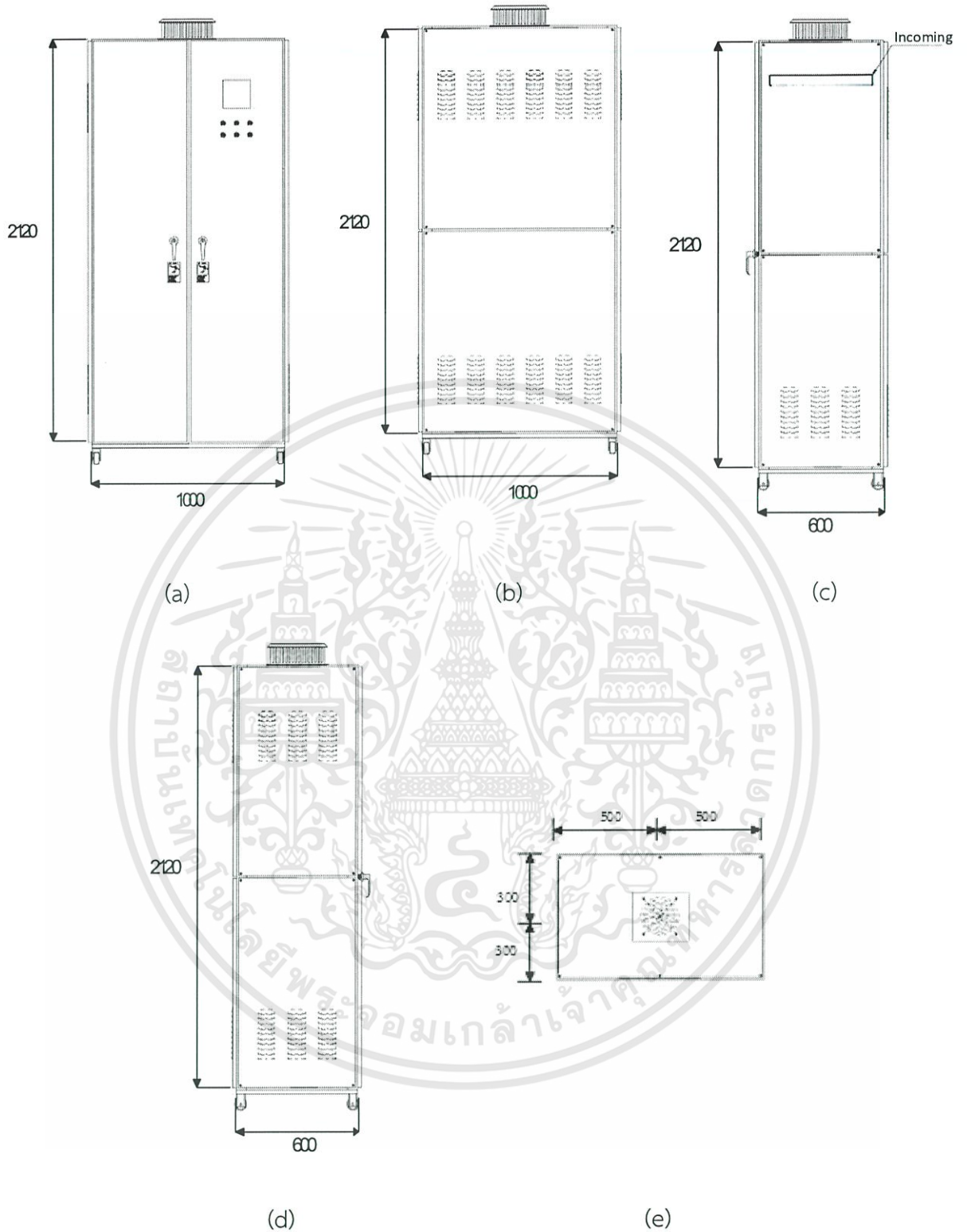
3.4 โครงสร้างภายนอกของชุดสาธิต

สำหรับการออกแบบโครงสร้างภายนอกของชุดสาธิตการสวิตซ์ระบบคาปาซิเตอร์แบบคั่นปัจจัยที่จำเป็นจะต้องนำมาพิจารณาคือ อุปกรณ์ที่จะติดตั้งในระบบ ลักษณะการติดตั้งตามรูปแบบวงจรที่เขียนขึ้น ระยะเวลาปลอดภัยของการติดตั้งอุปกรณ์ รวมถึงความปลอดภัยในขณะที่ทำการทดลองจากปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวในข้างต้น ทำให้สามารถคำนวณขนาดตู้ของชุดสาธิตออกมาได้ ซึ่งมีขนาดของตู้คือ ความสูง 2.12 เมตร ความกว้าง 1 เมตร และ ความลึก 0.6 เมตร โดยมีล้อติดอยู่ที่ข้างใต้ของตู้ 4 ล้อ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการเคลื่อนย้ายชุดสาธิต สำหรับตัวตู้ของชุดสาธิตนั้นจะออกแบบให้ตู้สามารถเปิดออกได้ทั้งหมด 4 ด้าน ซึ่งด้านข้างทั้งสองด้านและด้านหลังแบ่งออกเป็นด้านละสองส่วน คือ ส่วนบน และ ส่วนล่าง เพื่อสะดวกต่อการติดตั้งและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ ในส่วนของช่องระบายอากาศ ได้มีการออกแบบติดตั้งทางด้านข้างขวา ส่วนบน และส่วนล่าง ทางด้านหลังส่วนบน และส่วนล่าง และทางด้านข้างซ้ายส่วนล่าง โดยมีพัดลมระบายอากาศอยู่ที่ด้านบนของตู้ชุดสาธิตซึ่งจะเจาะเป็นรูเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.230 เมตร ในส่วนของการติดตั้งตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า จะมีติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของตู้ ซึ่งจะมีการเจาะตู้ขนาด 0.144×0.144 เมตร และไฟแสดงผลการทำงานของคาปาซิเตอร์ จำนวน 6 หลอด เป็นสีเขียว 3 หลอดติดตั้งไว้แถวบน และสีแดง 3 หลอดติดตั้งไว้แถวล่าง วัสดุที่ใช้ในการสร้างชุดสาธิตจะใช้เป็น เหล็กแผ่นรีดเย็น (Cold steel sheet) โดยมีระดับการป้องกัน IP 30 หมายความว่า สามารถป้องกันของแข็งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 2.5 มิลลิเมตร แต่ไม่สามารถป้องกันของเหลวได้ สำหรับความหนาของตู้ในแต่ละส่วนนั้นจะมีความหนาที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้คือ โครงตู้ (Frame) มีความหนาของเหล็ก 3 มม. ความหนาของแผ่นปิด (Cover) 2 มม. ความหนาของประตู (Door) 1.5 มม. และความหนาของแผ่นกั้น (Partition) 1.5 มม. สำหรับโครงสร้างภายนอกของชุดสาธิตที่จัดสร้างขึ้นจะแสดงดังรูป 3.15 และแบบของตู้ที่เขียนโดยโปรแกรม AUTOCAD จะแสดงไว้ดังรูป 3.16



รูปที่ 3.15 โครงสร้างภายนอกของชุดสาธิตที่จัดสร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แบบ AutoCAD ของโครงสร้างภายนอก (a) แบบด้านหน้าของตู้ (b) แบบด้านหลังของตู้ (c) แบบด้านซ้ายของตู้ (d) แบบด้านขวาของตู้ (e) แบบด้านบนของตู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในโครงการวิจัยนี้ จะทำการทดลองชุดสวิตระบบการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค โดยคาปาซิเตอร์ที่ใช้จะมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือนขนาด 5 kvar จำนวนสามสเต็ป ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 415 V โดยได้แบ่งการจำลองออกเป็น 5 แบบดังนี้

1. วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคโดยไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ
2. วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคเมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 μH ต่ออนุกรม
3. วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคเมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 6 μH ต่ออนุกรม
4. วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคเมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 μH ต่ออนุกรม
5. วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคเมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 μH ต่ออนุกรม

ในการศึกษาพฤติกรรมของแรงดันชั่วขณะ และกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบคเข้าสู่ระบบในแต่ละสเต็ป โดยให้ตัวคาปาซิเตอร์แบบคเป็นโหลดของระบบ การเก็บข้อมูลจะทำ โดยการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อมีการสวิตชิงในแต่ละสเต็ป เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้น ซึ่งจะถูกรวบรวมออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

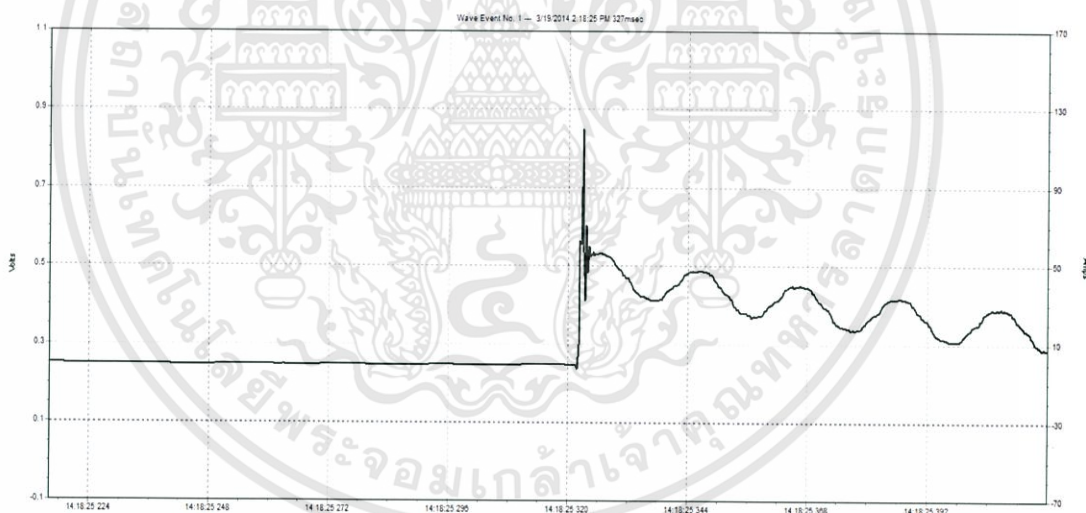
1. กระแสอินรัช
2. แรงดันชั่วขณะ
3. ค่ามุมเฟสที่มีการสวิตชิง
4. ค่าความถี่ของกระแส

4.1 การทดลองวงจรการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แรงค์โดยไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ

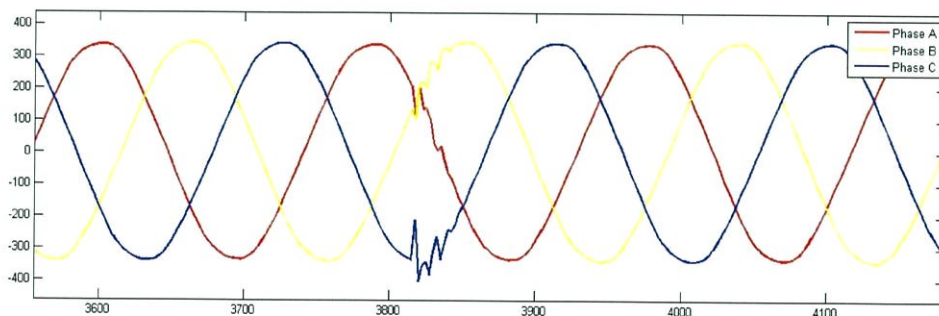
ในการทดลองที่ 1 จะทำการวัดแรงดันและกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แรงค์เข้าใช้งานในแต่ละสเต็ป โดยที่ไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ การวัดค่าจะวัดแรงดันของแต่ละเฟส และวัดกระแสอินรัชของแต่ละสเต็ป โดยนำโพรบกระแสจับที่สายก่อนเข้าฟิวส์ผลการทดลองจะเป็นไปดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แรงค์กรณีไม่มีตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ

	แรงดัน (V)			กระแส (A)		ค่ามุมเฟส	ค่าความถี่กระแส (Hz)
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	RMS	Inrush		
ก่อนการสวิตซ์	228.88	232.14	231.92	0.3	-	-	-
สเต็ป 1	229.64	232.42	232.20	6.9	120.2	270	1041.53
สเต็ป 2	229.92	232.66	232.42	13.9	163.7	90	3873.47
สเต็ป 3	229.94	232.72	232.44	13.9	185.6	90	4999.37

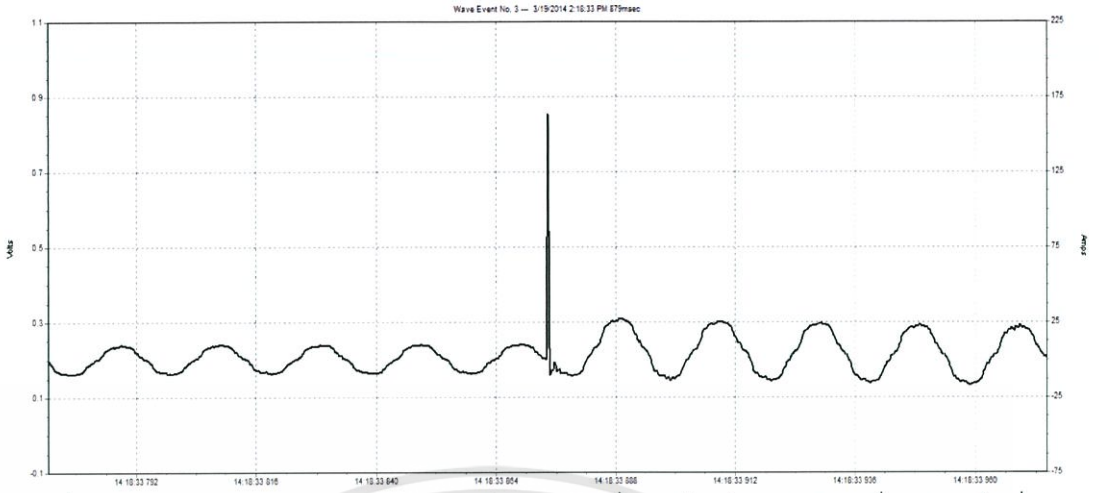


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตซ์กรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสเต็ปที่หนึ่ง

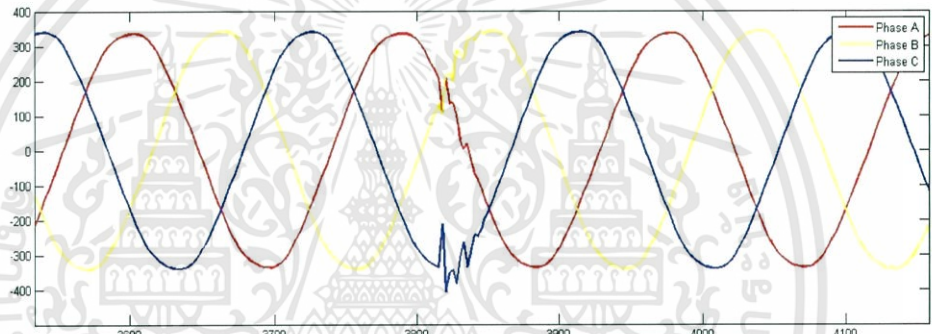


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตซ์กรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสเต็ปที่หนึ่ง

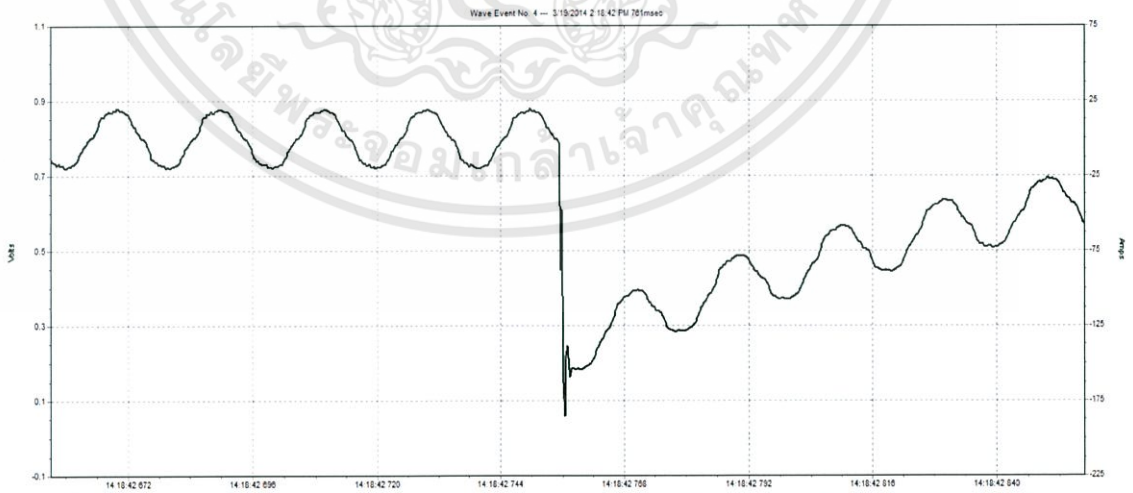
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิงกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสแต็ปที่สอง

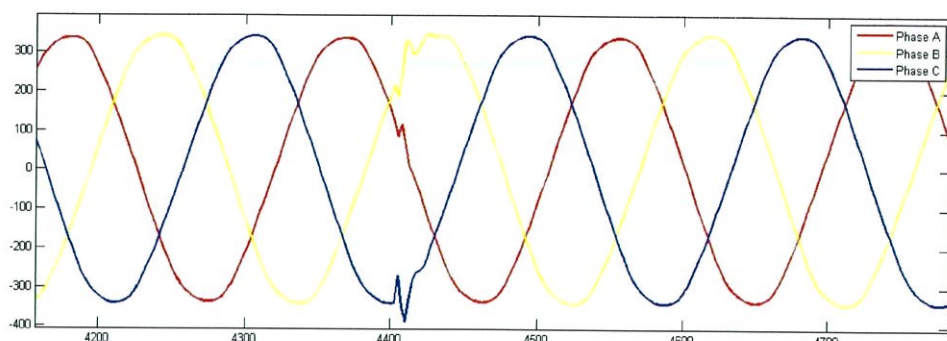


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิงกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสแต็ปที่สอง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิงกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสแต็ปที่สาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตซ์กรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำสแต็ปที่สาม

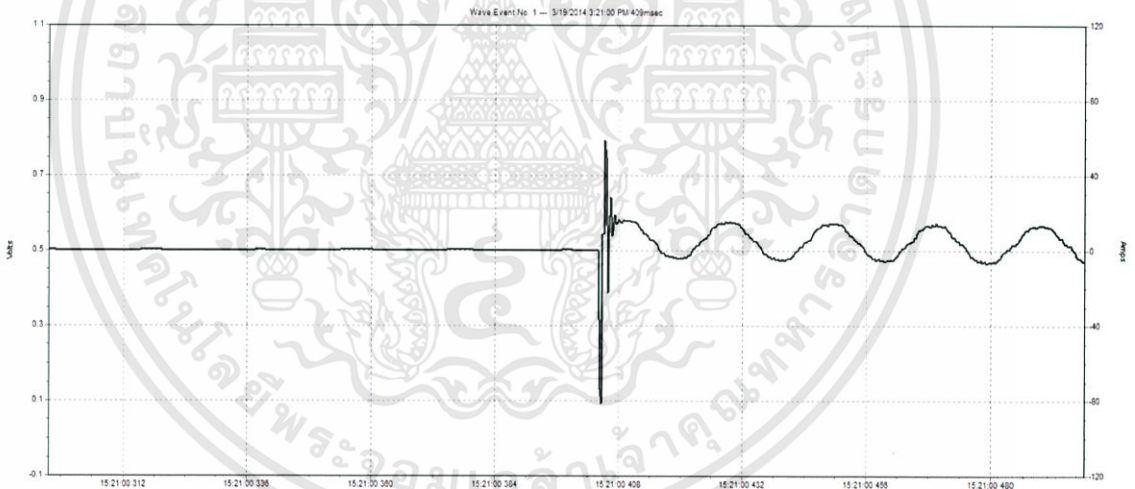
จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้ เมื่อสวิตซ์คาปาซิเตอร์สแต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบกระแสอินรัชที่จับได้จะมีค่า 120.2 A เมื่อมีการสวิตซ์ที่มุม 270 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 1041.53 Hz สแต็ปที่สองจะมีค่า 163.7 A เมื่อมีการสวิตซ์ที่มุม 90 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 3873.47 Hz และสแต็ปที่สามจะมีค่า 185.6 A เมื่อมีการสวิตซ์ที่มุม 90 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 4999.37 Hz ซึ่งจะเป็นไปตามแนวโน้มทางทฤษฎีคือ กระแสจะมีค่าสูงขึ้นในสแต็ปต่อมาเนื่องจากกระแสที่อยู่ในคาปาซิเตอร์สแต็ปก่อนหน้า สำหรับขนาดของกระแสอินรัชจะมีค่าขึ้นอยู่กับมุมที่มีการสวิตซ์ด้วย และระดับแรงดันของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการสวิตซ์คาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบ

4.2 วงจรการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แรงค์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 μH ต่ออนุกรม

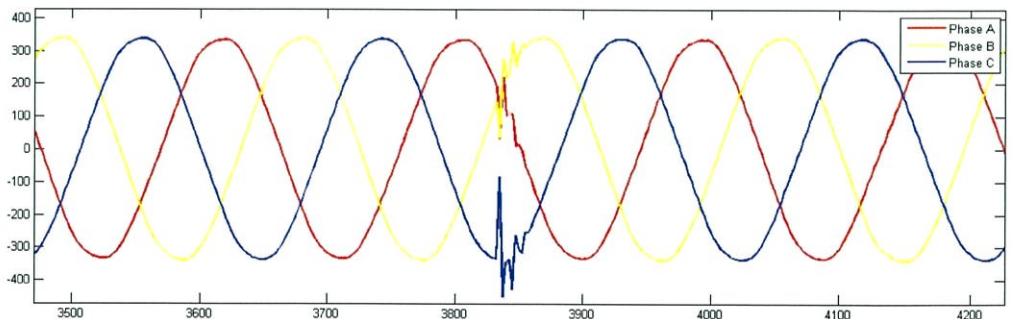
ในการทดลองที่ 2 จะทำการวัดแรงดันและกระแสในรัชที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แรงค์เข้าใช้งานในแต่ละสเต็ป โดยที่จะมีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด $4\mu\text{H}$ อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ การวัดค่าจะวัดแรงดันของแต่ละเฟส และวัดกระแสในรัชของแต่ละสเต็ป โดยนำโพรบกระแสจับที่สายก่อนเข้าฟิวส์ผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แรงค์กรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 μH สเต็ปที่หนึ่ง

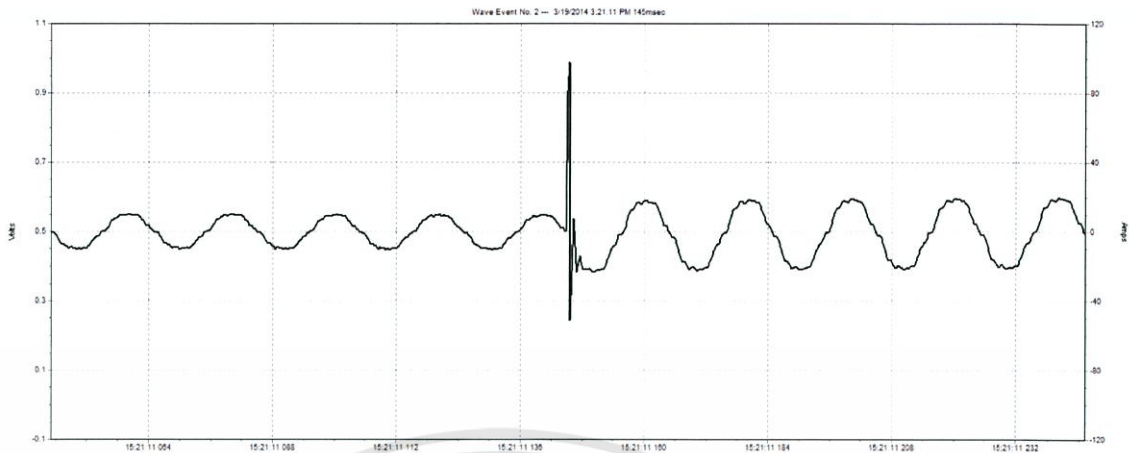
	แรงดัน (V)			กระแส (A)		ค่ามุมเฟส	ค่าความถี่กระแส (Hz)
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	RMS	Inrush		
ก่อนการสวิตซ์	239.74	242.36	241.62	0.2	-	-	-
สเต็ป 1	240.16	242.76	242.10	7.2	81.6	270	682.23
สเต็ป 2	240.64	243.22	242.50	14.6	97.7	90	937.38
สเต็ป 3	240.94	243.58	242.82	14.6	179.5	270	3120.62



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตซ์กรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 4 μH สเต็ปที่หนึ่ง



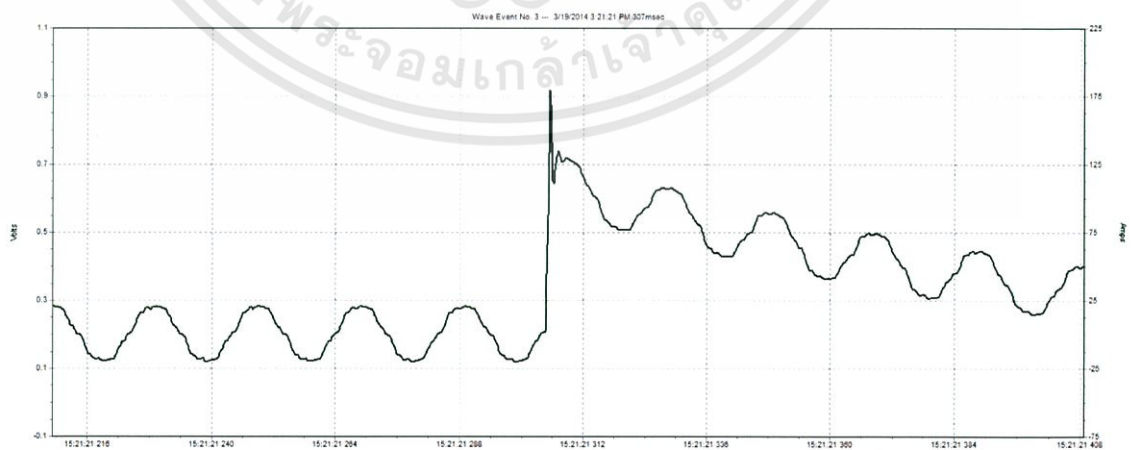
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตซ์กรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 4 μH สเต็ปที่หนึ่ง



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $4\ \mu\text{H}$ สเต็ปที่สอง

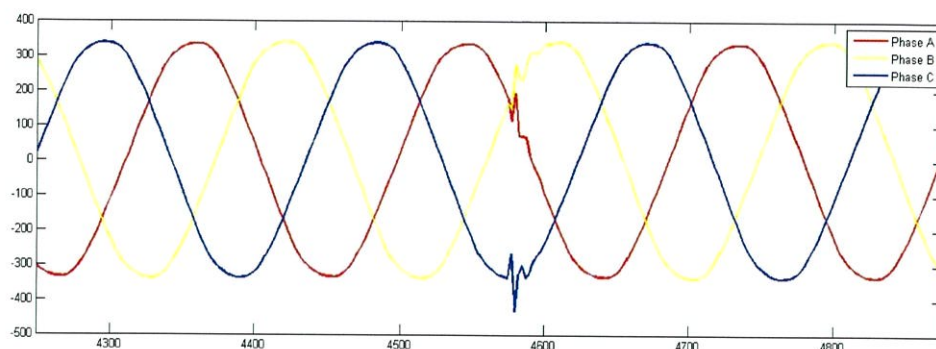


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $4\ \mu\text{H}$ สเต็ปที่สอง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $4\ \mu\text{H}$ สเต็ปที่สาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิชชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 4 μH สเต็ปที่สาม

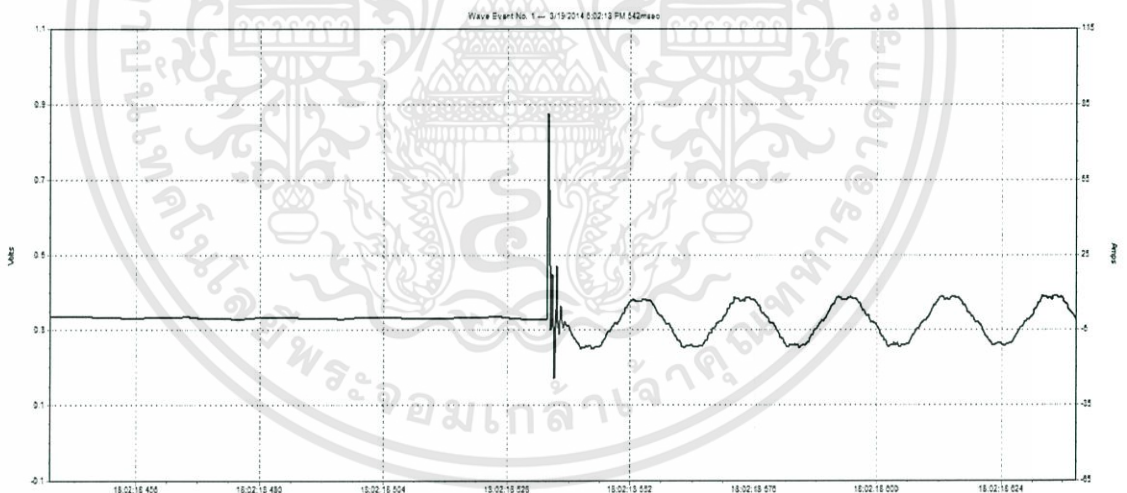
จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้ เมื่อสวิตชิงคาปาซิเตอร์สเต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบกระแสอินรัชที่จับได้จะมีค่า 81.6 A เมื่อมีการสวิตชิงที่มุม 270 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 682.23 Hz สเต็ปที่สองจะมีค่า 97.7 A เมื่อมีการสวิตชิงที่มุม 90 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 937.38 Hz และ สเต็ปที่สามจะมีค่า 179.5 A เมื่อมีการสวิตชิงที่มุม 270 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 3120.62 Hz ซึ่งจะเป็นไปตามแนวโน้มทางทฤษฎีคือ กระแสจะมีค่าสูงขึ้นในสเต็ปต่อมาเนื่องจากกระแสที่อยู่ในคาปาซิเตอร์สเต็ปก่อนหน้า สำหรับขนาดของกระแสอินรัชจะมีค่าขึ้นอยู่กับมุมที่มีการสวิตชิงด้วย และระดับแรงดันของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบ

4.3 วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 6 μH ต่ออนุกรม

ในการทดลองที่ 3 จะทำการวัดแรงดันและกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานในแต่ละสเต็ป โดยที่จะมีการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ การวัดค่าจะวัดแรงดันของแต่ละเฟส และวัดกระแสอินรัชของแต่ละสเต็ป โดยนำโพรบกระแสจับที่สายก่อนเข้าฟิวส์ ผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 4.3

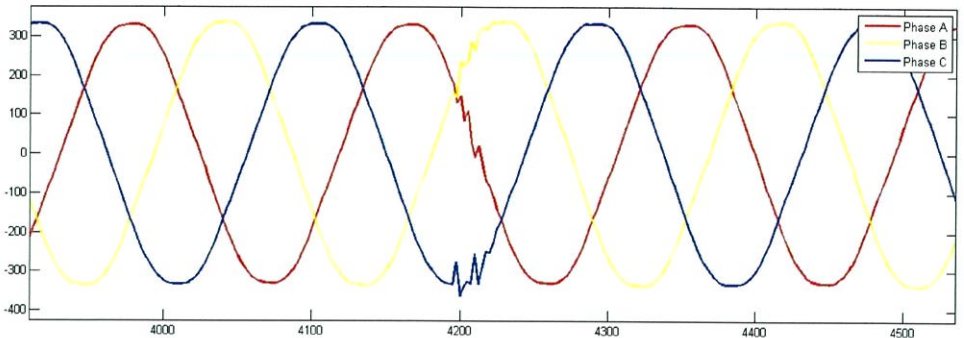
ตารางที่ 4.3 ผลการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์กรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 6 μH สเต็ปที่หนึ่ง

	แรงดัน (V)			กระแส (A)		ค่ามุมเฟส	ค่าความถี่กระแส (Hz)
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	RMS	Inrush		
ก่อนการสวิตชิง	241.16	244.08	242.92	0.4	-	-	-
สเต็ป 1	241.64	244.54	243.42	7.1	81.4	45	681.73
สเต็ป 2	242.24	244.96	243.84	14.6	124.7	270	1071.29
สเต็ป 3	242.64	245.36	244.20	14.7	149.3	90	1363.47

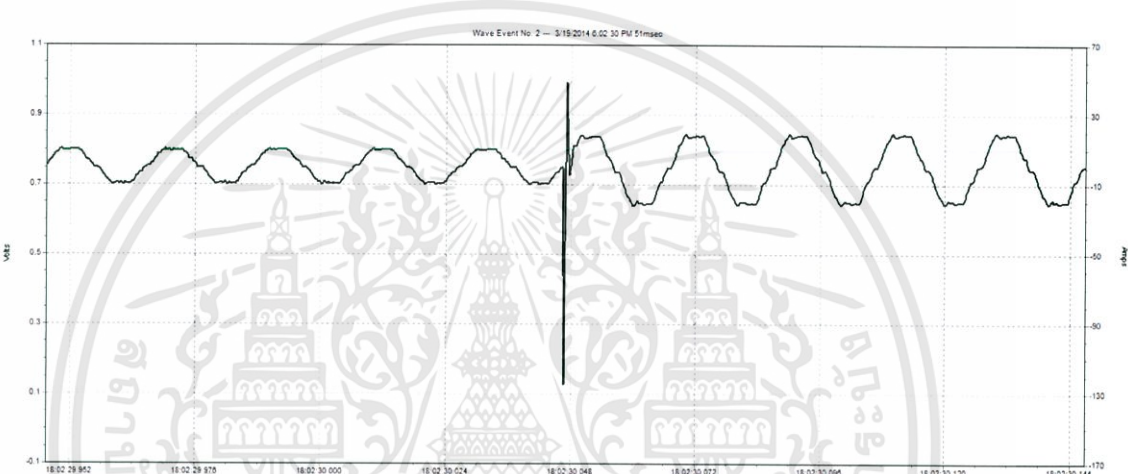


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μH สเต็ปที่หนึ่ง

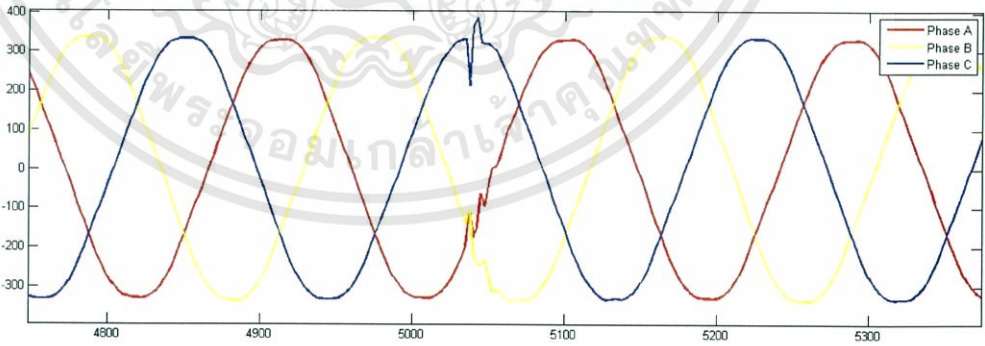
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตซ์ขั้วกรณที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μH สเต็ปที่หนึ่ง

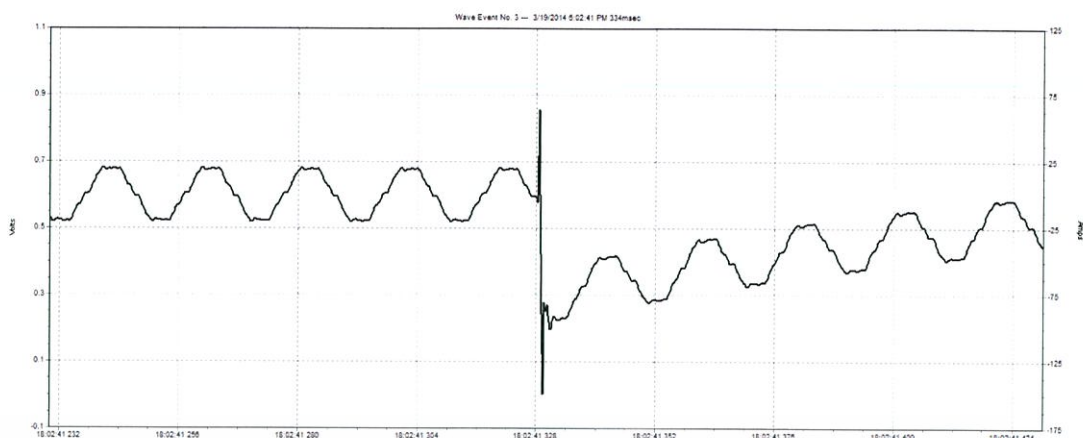


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตซ์ขั้วกรณที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μH สเต็ปที่สอง

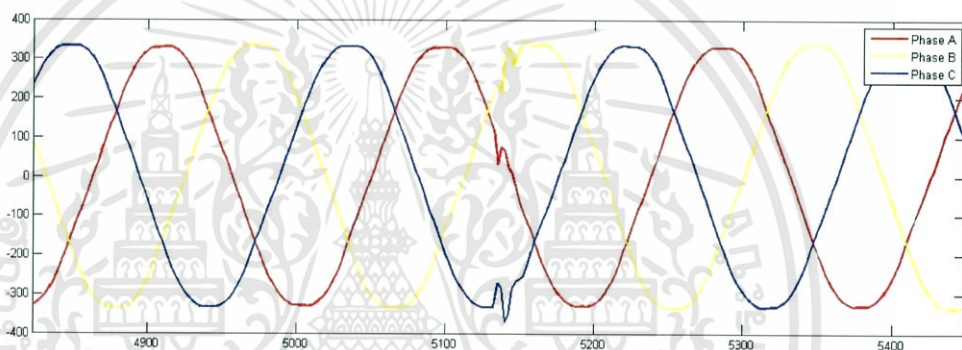


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตซ์ขั้วกรณที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 6 μH สเต็ปที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตช์กรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $6 \mu\text{H}$ สเต็ปที่สาม



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตช์กรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $6 \mu\text{H}$ สเต็ปที่สาม

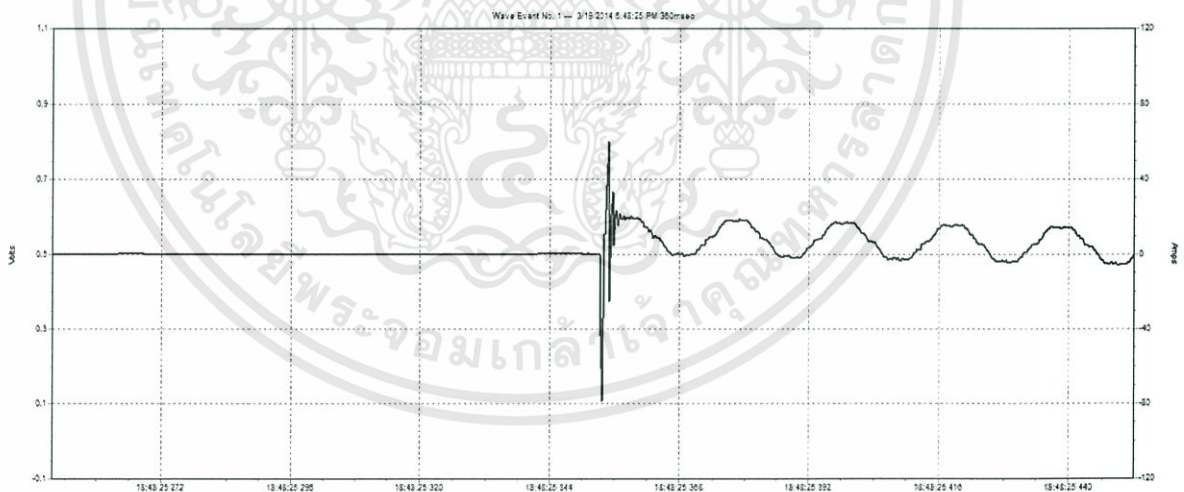
จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้ เมื่อสวิตช์คาปาซิเตอร์สเต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบกระแสอินรัชที่จับได้จะมีค่า 81.4 A เมื่อมีการสวิตช์ที่มุม 45 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 681.73 Hz สเต็ปที่สองจะมีค่า 124.7 A เมื่อมีการสวิตช์ที่มุม 270 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 1071.29 Hz และ สเต็ปที่สามจะมีค่า 149.3 A เมื่อมีการสวิตช์ที่มุม 90 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 1363.47 Hz ซึ่งจะเป็นไปตามแนวโน้มทางทฤษฎีคือ กระแสจะมีค่าสูงขึ้นในสเต็ปต่อมาเนื่องจากกระแสที่อยู่ในคาปาซิเตอร์สเต็ปก่อนหน้า สำหรับขนาดของกระแสอินรัชจะมีค่าขึ้นอยู่กับมุมที่มีการสวิตช์ด้วย และระดับแรงดันของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการสวิตช์ คาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบ

4.4 วงจรการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบบคัมเมอมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 μH ต่ออนุกรม

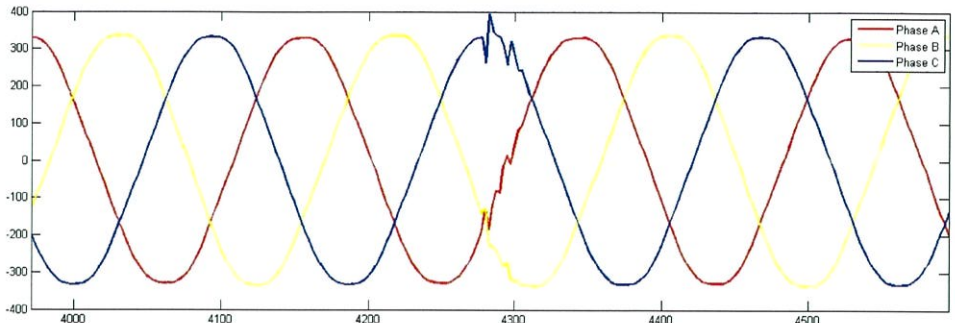
ในการทดลองที่ 4 จะทำการวัดแรงดันและกระแสในรีซที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบบคัมเมอใช้งานในแต่ละสเต็ป โดยที่จะมีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 6 μH อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ การวัดค่าจะวัดแรงดันของแต่ละเฟส และวัดกระแสในรีซของแต่ละสเต็ป โดยนำโพรบกระแสจับที่สายก่อนเข้าฟิวส์ ผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการสวิตซ์คาปาซิเตอร์แบบคัมเมอที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 μH สเต็ปที่หนึ่ง

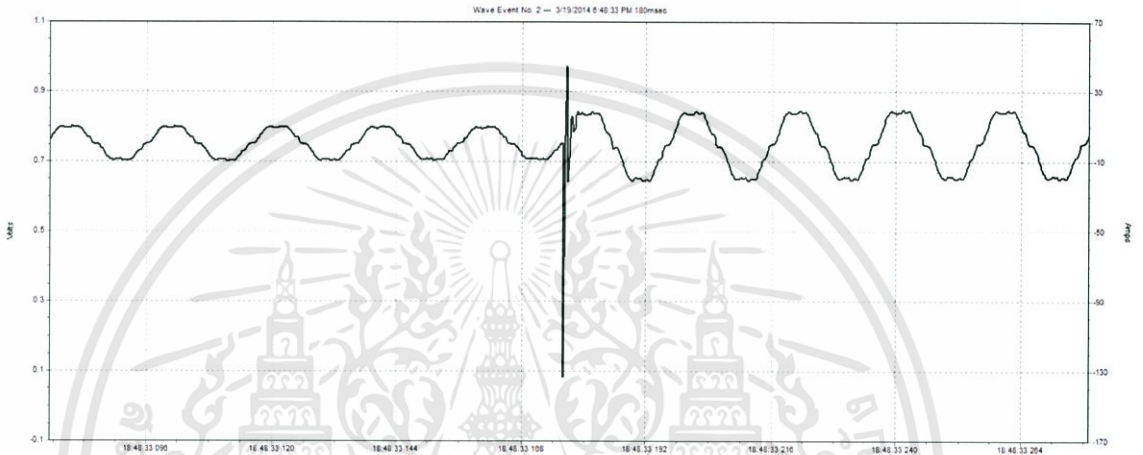
	แรงดัน (V)			กระแส (A)		ค่ามุมเฟส	ค่าความถี่กระแส (Hz)
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	RMS	Inrush		
ก่อนการสวิตซ์	237.34	241.84	239.90	0.4	-	-	-
สเต็ป 1	237.74	242.22	240.24	7.2	78.6	270	749.90
สเต็ป 2	238.30	242.74	240.74	24.5	133.3	270	1199.85
สเต็ป 3	238.64	242.96	240.98	14.5	149.3	90	1363.47



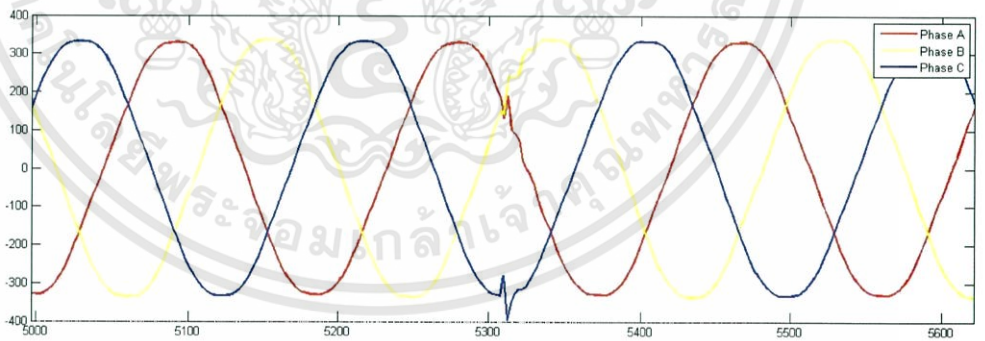
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตซ์ซึ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 8 μH สเต็ปที่หนึ่ง



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิชชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $8 \mu\text{H}$ สแต็ปที่หนึ่ง

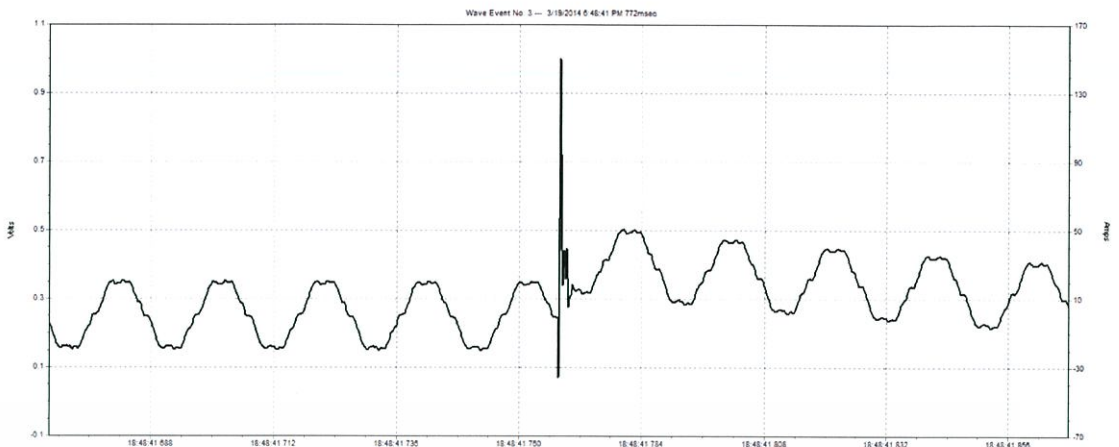


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิชชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $8 \mu\text{H}$ สแต็ปที่สอง

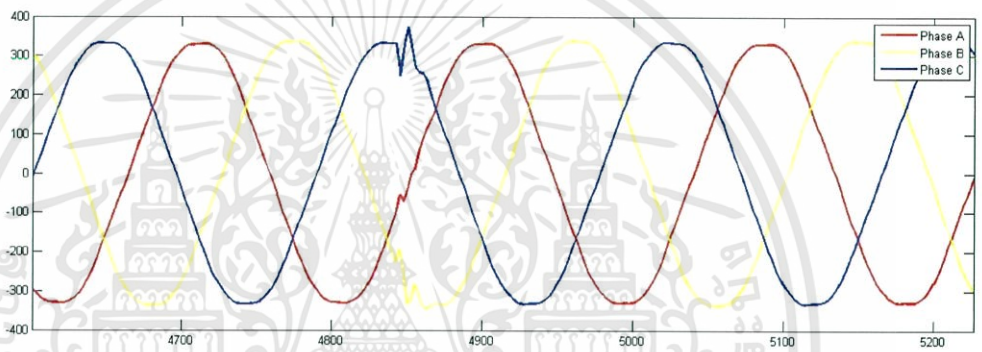


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิชชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $8 \mu\text{H}$ สแต็ปที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตซ์ซึ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $8 \mu\text{H}$ สเต็ปที่สาม



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตซ์ซึ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $8 \mu\text{H}$ สเต็ปที่สาม

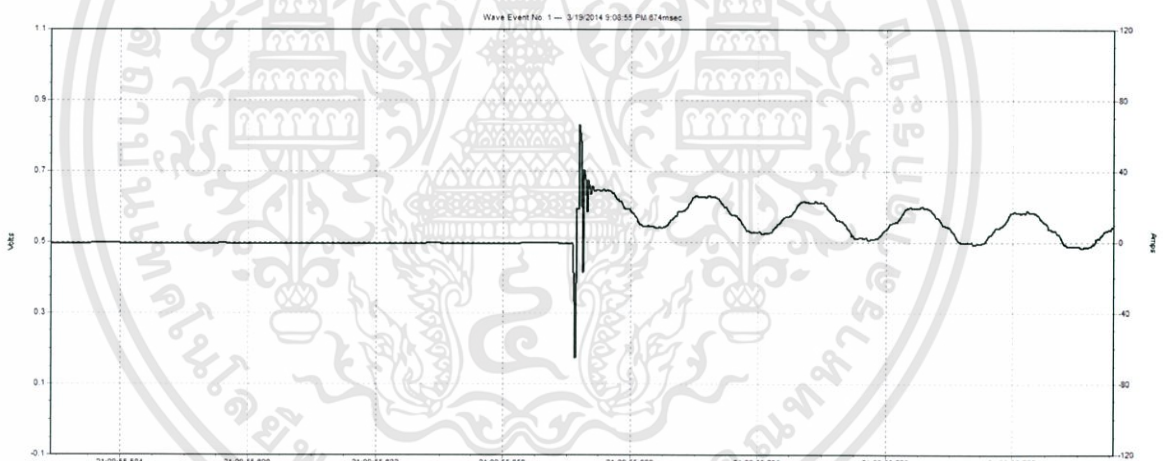
จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้ เมื่อสวิตซ์คาปาซิเตอร์สเต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบกระแสในรัชที่จับได้จะมีค่า 78.6 A เมื่อมีการสวิตซ์ที่มุม 270 องศา โดยความถี่ของกระแสในรัชมีค่า 749.9 Hz สเต็ปที่สองจะมีค่า 133.3 A เมื่อมีการสวิตซ์ที่มุม 270 องศา โดยความถี่ของกระแสในรัชมีค่า 1199.85 Hz และ สเต็ปที่สามจะมีค่า 149.3 A เมื่อมีการสวิตซ์ที่มุม 180 องศา โดยความถี่ของกระแสในรัชมีค่า 1363.47 Hz ซึ่งจะเป็นไปตามแนวโน้มทางทฤษฎีคือ กระแสจะมีค่าสูงขึ้นในสเต็ปต่อมาเนื่องจากกระแสที่อยู่ในคาปาซิเตอร์สเต็ปก่อนหน้า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ต่อตัวเหนี่ยวนำในระบบค่ากระแสในรัชจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนระดับแรงดันของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการสวิตซ์คาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบ

4.5 วงจรการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 μH ต่ออนุกรม

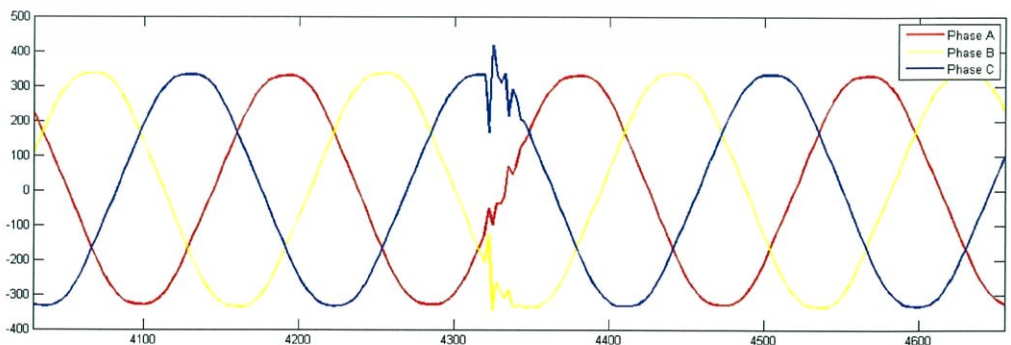
ในการทดลองที่ 5 จะทำการวัดแรงดันและกระแสในรัชที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้ใช้งานในแต่ละสเต็ป โดยที่จะมีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 μH อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ การวัดค่าจะวัดแรงดันของแต่ละเฟส และวัดกระแสในรัชของแต่ละสเต็ป โดยนำโพรบกระแสจับที่สายก่อนเข้าฟิวส์ผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบค้กรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 μH สเต็ปที่หนึ่ง

	แรงดัน (V)			กระแส (A)		ค่ามุมเฟส	ค่าความถี่กระแส (Hz)
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	RMS	Inrush		
ก่อนการสวิตชิง	236.5	240.94	239.24	0.2	-	-	-
สเต็ป 1	236.92	241.26	239.66	7.1	66.0	270	624.90
สเต็ป 2	237.22	241.62	239.84	14.4	123.8	0	937.38
สเต็ป 3	237.64	241.96	240.20	14.4	135.0	180	1249.84

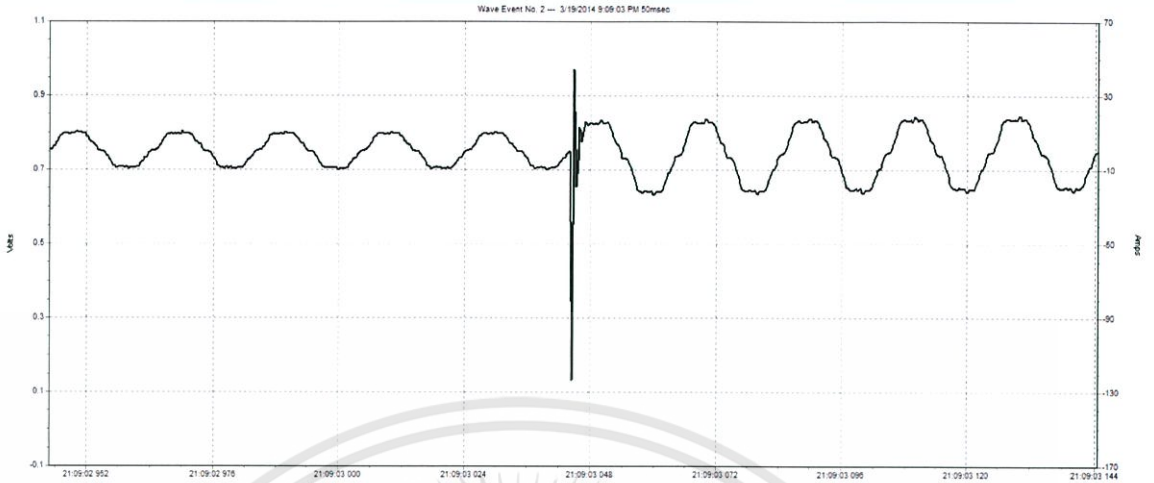


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 10 μH สเต็ปที่หนึ่ง

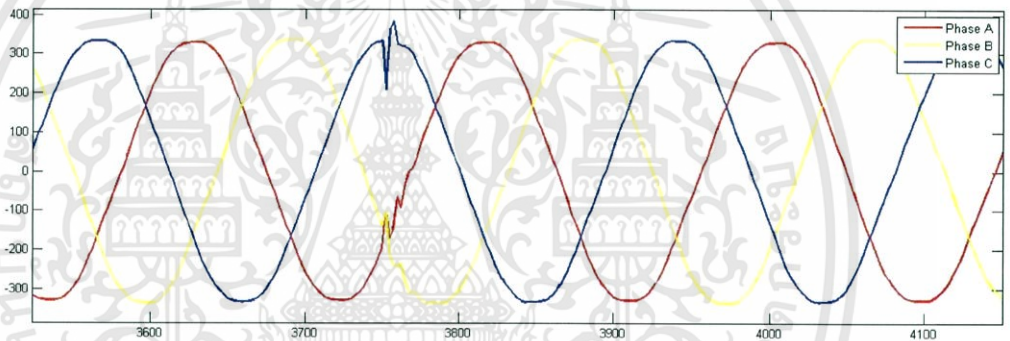


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 10 μH สเต็ปที่หนึ่ง

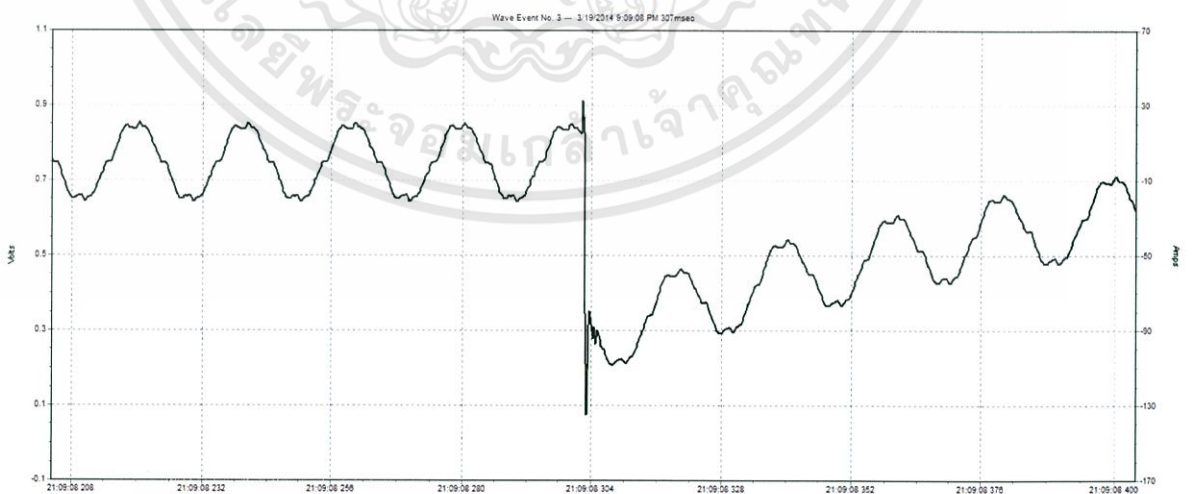
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $10\ \mu\text{H}$ สเต็ปที่สอง

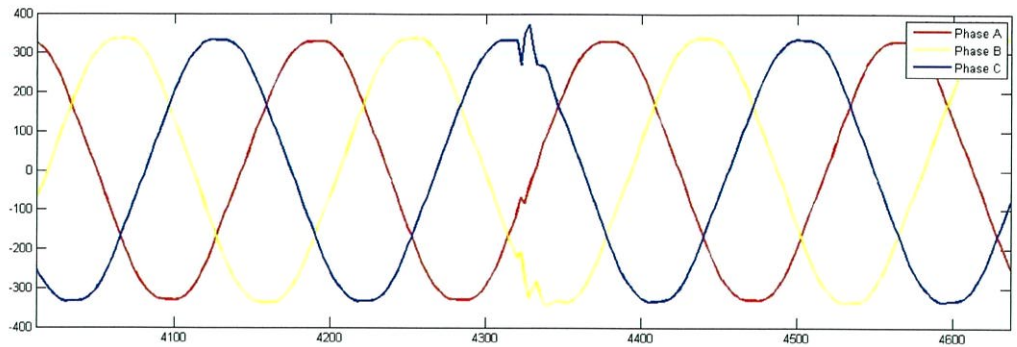


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $8\ \mu\text{H}$ สเต็ปที่สอง



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิตชิ่งกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $10\ \mu\text{H}$ สเต็ปที่สาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าแรงดันในการสวิตชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด $10 \mu\text{H}$ สเต็ปที่สาม

จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้ เมื่อสวิตชิงคาปาซิเตอร์สเต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบกระแสอินรัชที่จับได้จะมีค่า 66 A เมื่อมีการสวิตชิงที่มุม 270 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 624.9 Hz สเต็ปที่สองจะมีค่า 123.8 A เมื่อมีการสวิตชิงที่มุม 0 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 937.38 Hz และสเต็ปที่สามจะมีค่า 135 A เมื่อมีการสวิตชิงที่มุม 180 องศา โดยความถี่ของกระแสอินรัชมีค่า 1249.84 Hz ซึ่งจะเป็นไปตามแนวโน้มทางทฤษฎีคือกระแสจะมีค่าสูงขึ้นในสเต็ปต่อมาเนื่องจากกระแสที่อยู่ในคาปาซิเตอร์สเต็ปก่อนหน้า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ต่อตัวเหนี่ยวนำและการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด $4, 6$ และ $8 \mu\text{H}$ ในระบบค่ากระแสอินรัชจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนระดับแรงดันของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จึงได้จำลองระบบของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกให้มาอยู่ในชุดสาธิต โดยจะมีการคำนวณเปรียบเทียบขนาดของคาปาซิเตอร์แบงค์ พิกัดของอุปกรณ์ประกอบในระบบ และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกกับชุดสาธิตในรูปแบบเพอร์ยูนิต เพื่อนำมาออกแบบและจัดสร้างชุดสาธิต โดยในการทดลองนั้นจะทำให้มีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบผ่านตัวควบคุมตัวประกอบกำลัง เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการสวิตชิงของคาปาซิเตอร์

จากการศึกษาผลที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานนั้น ลักษณะของสัญญาณแรงดันและกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน โดยลักษณะของสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดและความถี่ที่สูงมากภายในระยะเวลาสั้นๆ และเมื่อมีการติดตั้งตัวเหนี่ยวนำเพิ่มเข้าไป ขนาดของกระแสอินรัชในขณะสวิตชิงนั้นจะมีขนาดลดลง เนื่องมาจากค่ารีแอคแตนซ์จากตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์แบงค์ ซึ่งผลจากการวัดสัญญาณได้แสดงให้เห็นว่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณตามทฤษฎี ทั้งในกรณีที่มิตัวคาปาซิเตอร์อย่างเดี่ยว และกรณีที่มิมีการติดตั้ง ตัวเหนี่ยวนำติดตั้งอนุกรมกับคาปาซิเตอร์แบงค์ โดยสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปค่ากระแสอินรัชในสแต็ปต่างๆเมื่อมีการมีขนาดความเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำ (μH)	กระแสอินรัช (ทฤษฎี)			กระแสอินรัช (ปฏิบัติ)		
	สแต็ปที่ 1	สแต็ปที่ 2	สแต็ปที่ 3	สแต็ปที่ 1	สแต็ปที่ 2	สแต็ปที่ 3
-	489.68	1,082.14	1,442.86	120.2	163.7	185.6
4.00	468.95	650.76	867.68	81.6	97.7	179.5
6.00	459.52	566.59	755.45	81.4	124.7	149.3
8.00	450.65	508.41	677.88	78.6	133.3	149.3
10.00	442.26	465.12	620.16	66.0	123.8	135.0

จากตารางสรุปข้างต้นจะเห็นได้ว่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเมื่อการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบนั้นจะมีค่าสูงมากเป็นหลายเท่าของกระแสพิกัด ส่วนการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงค์สแต็ปถัดมาเมื่อมีคาปาซิเตอร์แบงค์สแต็ปก่อนหน้านั้นเชื่อมต่ออยู่แล้วนั้นจะทำให้ค่ากระแสอินรัชของการสวิตชิงสแต็ปถัดมามีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิม และเมื่อมีการติดตั้งตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับคาปาซิเตอร์แบงค์นั้น

สามารถลดขนาดของกระแสอินรัลลงได้อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับข้อมูลของแรงดันจากผลการทดลองพบว่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบ ซึ่งข้อมูลที่วัดได้จากชุดสาธิตจริงก็เป็นไปตามทฤษฎี ที่ได้กล่าวก่อนหน้านี โดยการศึกษาทั้งหมดนี้สามารถนำมาใช้ในการเรียนรู้พฤติกรรมและผลกระทบของสัญญาณชั่วขณะที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งาน เพื่อประยุกต์ใช้ในการศึกษาและ ออกแบบระบบป้องกัน เพื่อแก้ปัญหาสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบคาปาซิเตอร์แบงค์ของสถานีไฟฟ้าย่อยต่อไป

5.2 ปัญหาที่พบ

1. ในการเลือกสถานีไฟฟ้าย่อยที่จะนำมาจำลองในชุดสาธิตนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากข้อจำกัดในด้านความปลอดภัย และแหล่งจ่ายไฟในระบบของห้องปฏิบัติการ
2. ในการจำลองระบบเพอร์ยูนิตเพื่อจัดสร้างชุดสาธิตนั้น ผลการคำนวณค่าขนาดพิกัดของอุปกรณ์และคาปาซิเตอร์นั้นได้ค่าที่ไม่สามารถผลิตได้ทั่วไป จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกอุปกรณ์และคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันที่สามารถผลิตได้ ทำให้ระบบที่จำลองมีความคลาดเคลื่อนจากระบบจริง
3. ในการวัดความเหนี่ยวนำของสายวงจรถูกำลังนั้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างเส้นไม่เท่ากันตลอด และแต่ละเฟสมีความยาวที่ไม่เท่ากัน ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง
4. ในการติดตั้งตัวเหนี่ยวนำเพื่อจำกัดกระแส นั้น การคำนวณเพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่แม่นยำสำหรับการต่อกับคาปาซิเตอร์แต่ละชุดทำได้ยาก ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีความคลาดเคลื่อน
5. ในการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบนั้น มุมที่เกิดการสวิตชิ่งจะกำหนดได้ยากมาก เนื่องจากข้อจำกัดของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ทำให้ค่ากระแสอินรัลที่เกิดขึ้นมีค่าคลาดเคลื่อนไป

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. ควรจะมีโหลดตัวเหนี่ยวนำต่อเพิ่มในระบบเพื่อที่จะได้สังเกตพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเมื่อมีการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น
2. การต่อรีแอคเตอร์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์แบงค์นั้น ถ้าเพิ่มขนาดค่าความเหนี่ยวนำ จะทำให้การเปรียบเทียบความแตกต่างของกระแสอินรัลที่เกิดขึ้นในระบบของทั้งกรณีมีคาปาซิเตอร์เพียงอย่างเดียวและกรณีมีการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมมีความชัดเจนยิ่งขึ้น
3. ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังควรกำหนดมุมการสวิตชิ่งได้ เนื่องจากการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ที่ค่ามุมของแรงดันต่างกัน จะให้ค่ากระแสอินรัลที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Govind Gopakumar, Huihua Yan, Dr. Bruce A. Mork “Shunt Capacitor Bank Switching Transients A Tutorial Aand Case Study”Michigan Technological University.
2. Shehab Abdulwadood Ali “Capacitor Banks Switching Transients in Power System” Energy Science and Technology Vol.2, No.2, Page 62-73, 2011
3. Surawut T., Surapong T., Seksak C., Dr. Jongrak Boonseang “Transient Capacitor Switching for H.V. Substation due to Voltage Magnification” King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bachelor's Theses 1999
4. M. Gerin. “Improving the power factor of an electrical installation” Available: http://www.engineering.schneider-electric.se/Attachments/ed/guide/my_partner_b61_improving_electrical_installation_power_factor.pdf, 2004
5. Tanuj Manglani, Y. S. Shishodia “A Survey of Optimal Capacitor Placement Techniques on Distribution Lines to Reduce Losses” International Journal of Recent Research and Review, Vol. 1, March 2012
6. Grunbaum, R. “765KV Series Capacitors For Increasing Power Transmission Capacity To The Cape Region” IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa (Power Africa), July 9-13, 2012
7. Oodo Ogidi Stephen, Liu Yanli and Sun Hui “Application of Switched Capacitor Banks For Power Factoor Improvement And Harmonis Reduction On The Nigerian Distribution Electric Network” International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS, Vol.11, No.6, December 2011
8. K. Tilakul, P. Buasri, A. Kaewrawang and J. Triyangkulsri “Capacitor Location and Size Determination to Reduce Power Losses of a Distribution Feeder in Lao PDR” International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol.4, No.1, February 2012
9. C. Rivera (PREPA), and R. Baretty (PREPA) “Energization Study Of 10.4MVAR Capacitor Bank in 38KV System” University of Kentucky Master's Theses 2011
10. Durga Bhavan iMupparty “Capacitor Switching Transient Modeling and Analysis on An Electrical Utility Distribution System Using SIMULINK Software” University of Kentucky Master's Theses 2011
11. A. Kalyuzhny “Switching Capacitor bank Back-to-Back to Underground Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery

12. E. h. Camm “Shunt Capacitor Overvoltages and a Reduction Technique”, presented at the Panel Session on “Overvoltages: Analysis and Protection” IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, LA April 14, 1999
13. Thomas M. Blooming “Capacitor Failure Analysis: A Troubleshooting Case Study” Eaton Electrical
14. "IEEE Std 1036", IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors
15. Anna Baby, Dr. Jaimol Thomas, Tibin Joseph “Analysis of Voltage Collapse in the Kerala Power Grids” 2013 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI -2013), Coimbatore, INDIA January 04-06, 2013
16. Myeong-Hee Lee and Cha-Soo Park “The Protection System Optimization of 154kV Shunt Capacitor Bank in Korea” Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 3 No. 2 Page 141-145, 2013
17. Working Group 3.4.17 “Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, October 1996
18. Grebe, T.E. “Application of distribution system capacitor banks and their impact on power quality” IEEE Transactions on Industry Applications, May/June 1996
19. Baloi, A. Kocewiak, L. ; Bak, C.L. ; Pana, A. “Experimental Determination of Harmonic Conditions Amplification in a Distribution Network by Capacitor Bank Switching” 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012
20. Ranjit Kumar, “Assuring Voltage Stability in the Smart Grid”, presented at the ISGT Conference, Anaheim, CA January 17-19, 2011.
21. Hidayatullah N.A., Paracha Z.J. and Kalam A., “Impact of distributed generation on smart grid transient stability”, Smart Grid and Renewable Energy Journal 2011
22. "IEEE Std C37", IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks
23. Edmund O. Schweitzer, Jolene Schafman “UNIFIED SHUNT CAPACITOR BANK CONTROL AND PROTECTION” Presented before the 45TH Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference Atlanta, Georgia May 1-3, 1991
24. Michael Beanland, Thomas Speas, Joe Rostron “Pre-insertion Resistors in High Voltage Capacitor Bank Switching” Prepared for Western Protective Relay Conference October 19-21, 2004 Spokane, WA

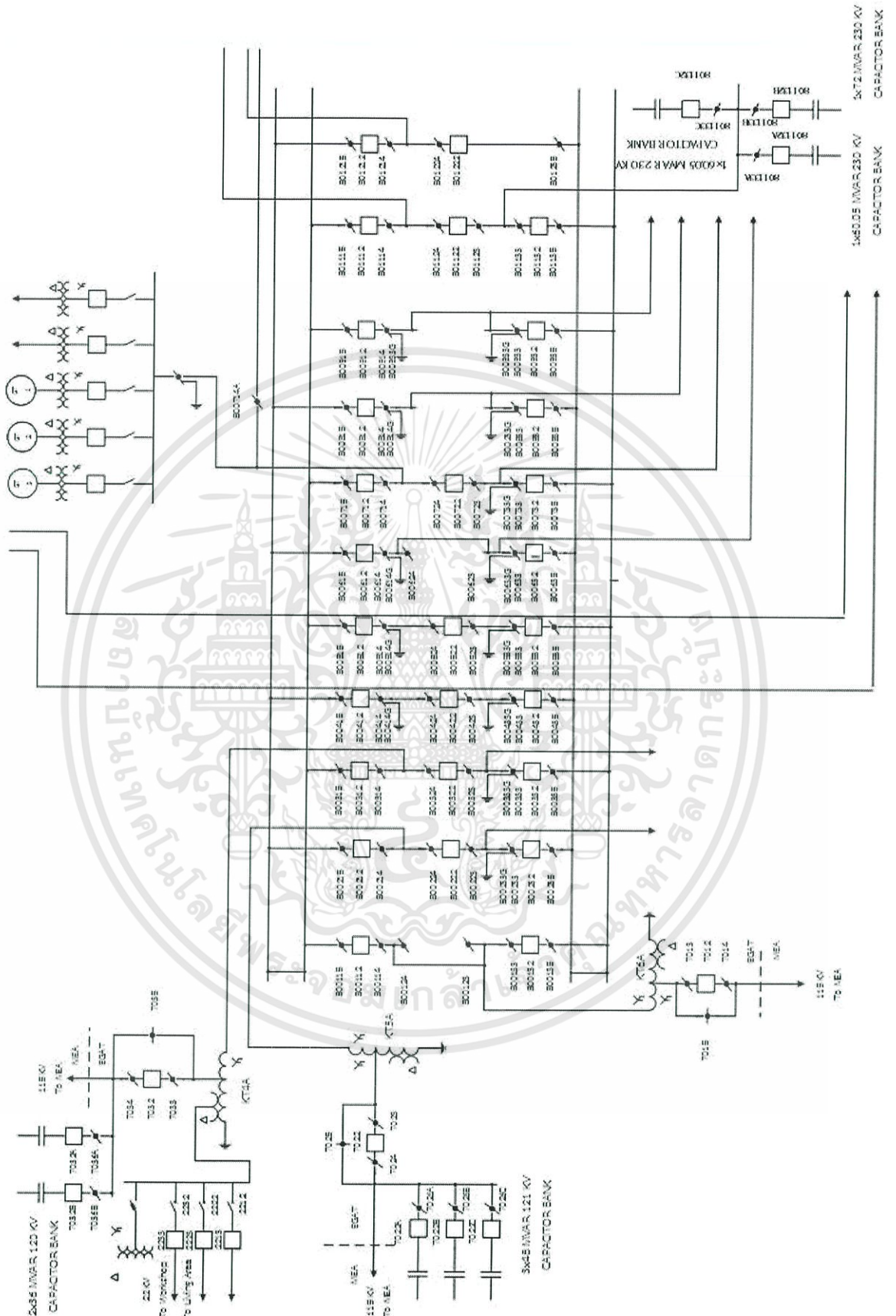
25. Tien-Ting Chang, Wei-Hsiang Chen “Pre-insertion Resistor of Switching Shunt Capacitor Banks” National Chin-Yi University of Technology
26. Robert Frye, Jay Hicks, Elmo Price “Achieving Optimum Capacitor Bank Protection and Control” 65th Annual Conference for Protective Relaying Engineer April 2-5, 2012
27. Kasztenny B., Brunello G., Wester C. “Capacitor Bank Fundamentals and Protection”, Proceedings of the 56th Annual Conference for Protective Relay Engineers College Station, TX April 8-11, 2003
28. BogdanKasztenny, Joe Schaefer, Ed Clark, “Fundamentals of Adaptive Protection of Large Capacitor Banks” 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers College Station, TX March 27-29, 2007
29. ทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้าเนื่องจากการต่อ-ปลด Capacitor Bank, ดร. อิชฎา บุญญาอรุณเนตร
30. Damping of Inrush Current in Low-Voltage PFC Equipment Application Note 2001, EPCOS
31. การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าใน substation เนื่องมาจากสวิตช์ของคาปาซิเตอร์แบงก์, สรวุฑตั้งสุริยานนท์ สุรพงษ์ ธรพร เสกศักดิ์ ซ้อปลอด ผ.ศ. จงรักษ์ บุญเสียง, 2542
32. ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล, ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 1 ปี 2552
33. Application Guide Contactors for Capacitor Switching, ABB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 แบบวันไลน์ไดอะแกรมของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 รายละเอียดทางเทคนิคของคาปาซิเตอร์แบบกึ่ง

Voltage range	From 220 to 1000 V
Frequency	50 and 60 Hz
Connection	Three-phase as standard construction (single-phase on request)
Discharge resistors	- Permanently connected built-in discharge resistors are sized to ensure safe discharge of the capacitor to less than 50V in 1 minute after a switch off. - Minimum time between disconnection and re-energization: 40 seconds.
Terminals	CLMD43-53-63-83: with threaded rods M6, 8, 10, or 12 according to the power of the capacitor.
Earth	CLMD43-53-63-83: a M8 terminal is included under the cover.
Cable input	CLMD43-53: 37 mm.
Case material	Zinc electroplated mild steel
Color	Beige RAL 7032.
Fixing	CLMD43-53-63-83: with two slots 26 x 12 mm.
Execution	Indoor (outdoor on request).
Protection	CLMD13-43-53-63-83: IP 42 (IP 54 on request).
Maximum ambient Temperature	Class „D” (+55 °C) according to IEC 60831.
Minimum ambient Temperature	- Indoor type: -25 °C - Outdoor type: -40 °C.
Minimum distance between units and wall	CLMD43-53-63-83: 50 mm.
Losses (discharge resistors included)	<0.5 Watt/kvar for 380V rated voltage and above.
Tolerance on Capacitance	0% + 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage test	Between terminals: 2.15 Un for 10 seconds. Between terminals and earth: 3kV for 10 seconds for UN < 500V and 4kV for 10 seconds for UN > 500V.
Lightning impulse Voltage test	CLMD13-43-53-63-83: 15 kV.
The acceptable overloads are those specified in IEC 831- 1&2	Overvoltage tolerance: 10% max. at intervals. Overcurrent tolerance: 30% permanently. Maximum overload: stable at 135% of the nominal rating (generated by Over voltages and harmonics).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



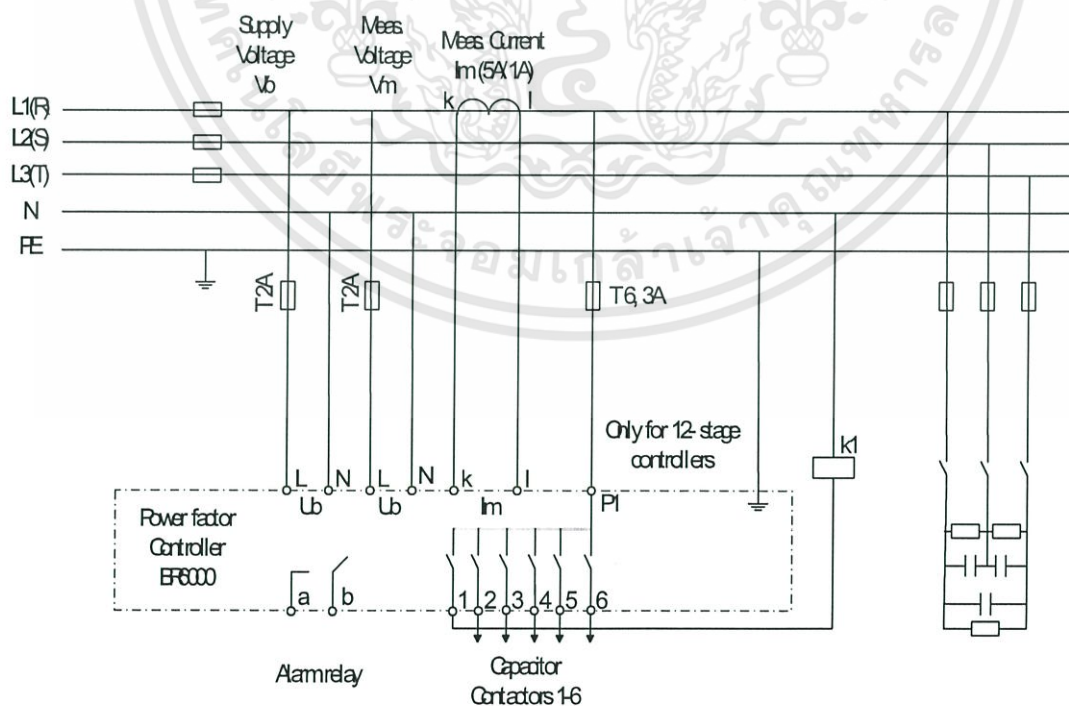
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 รายละเอียดทางเทคนิคของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า BR6000-R6

Type series outputs	BR6000 6 or 12 (13)
Languages	G / E / ES / RU / NL / CZ / PL / F
Switching power of relay outputs Number of active outputs	250 VAC, 2000 W Programmable
Number of control series User – defined control series	20 1
Control principle	Sequential connection, loop connection or self-optimized switching response Four-quadrant operation
Auto-Init	YES
Operating voltage Measuring voltage Measuring current	230 VAC, 50 / 60 Hz 30 ... 300 VAC (L-N), 50 / 60 Hz X: 5/1A selectable
Power drawn Sensitivity	< 5 VA 50 mA /10 mA
Target cos phi	0.8 inductive to 0.8 capacitive adjustable
Connecting time Disconnecting time Discharge time	Selectable from 1 sec ... 20 min. Selectable from 1 sec ... 20 min. Selectable from 1 sec ... 20 min.
Fixed stages / skipped stages Alarm relay	Programmable Standard
No-voltage triggering	Standard
Display of power-line parameters	Power factor, voltage, apparent current, frequency, reactive-, active-, apparent power, missing kvar, temperature, harmonics
Storage of maximum values	Voltage, reactive power, active power, apparent power, temperature, THD-V, THD-I
Storage of switching number Storage of operating time	Yes, each output, individual reset possible Yes, each capacitor, individual reset possible

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature measurement range	0-100 °C
Fault Memory	Last 8 fault states are stored
2 nd parameter set Accuracy	Available at version /F and /S Current, voltage : 1% Reactive-, active-, apparent power: 2%
Housing	Switchboard-integrated housing DIN 43 700, 144 x 144 x 53 mm
Weight	1 kg
Operating ambient temperature	-10 to +60 °C
Protection type to DIN 40 050	Front : IP 54, Rear :IP 20
Safety guidelines	IEC 61010-1 : 2001, EN 61010-1 : 2001
Sensitivity to interference (Industrial areas)	IEC 61000-4-2: 8kV IEC 61000-4-4 :4kV
Option /F	Additional external input
Option /S 232 (485)	Additional user programmable message relay As option /F additional interface



รูปที่ ค-1 แบบการเชื่อมต่อของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์ การศึกษา เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

I-Convertor Primary	30 A
I-Convertor Secondary	5 A
END STOPP	3
Control Series	[111]
Control Principle	Sequential Connection
Power 1 Stage	5 kVAR
Target Cos Phi	0.95 IND
Measuring Voltage	230 V
V-Convertor Ratio	No
Connecting Time	5 min
Disconnecting Time	60 sec
Discharge Time	5 min
Fan Temperature	55 °C
Harmonics	7 %

Manual programming

Language selection: เลือกภาษาของรายการการทำงาน (เยอรมัน, อังกฤษ, สเปน, ฝรั่งเศส, รัสเซีย, เช็ก, ดัทช์, โปริช)

1. I-CONVERTER PRI. : [5...13000]A

เลือกกระแสด้านปฐมภูมิของตัวแปลงกระแส การปรับเปลี่ยนค่าโดยปุ่ม ↑ / ↓
บันทึกและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

2. I-CONVERTER SEC. : [5 หรือ 1]A

ใช้ตั้งค่ากระแสด้านทุติยภูมิของตัวแปลงกระแส การเลือกทำผ่านปุ่ม ↑ / ↓ บันทึก
และทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

3. END STOPP : [6/7 resp. 12/13]

เพิ่มการสวิตซึ่งเป็น 7/13 ระดับในโหมดเชี่ยวชาญ 2 โดยตั้งค่าตัวหยุดสิ้นสุด
จำนวนคาปาซิเตอร์ที่เข้ามาใช้งานต้องเท่ากับจำนวนคาปาซิเตอร์แบงค์ ทำโดยปุ่ม ↑ / ↓
สัญลักษณ์ที่มองเห็นจะต้องสอดคล้องกับที่ต่ออยู่ที่เข้าพุดท์ ค่าที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ของการ
เชื่อมต่อคาปาซิเตอร์คือการเตรียมตั้งค่าที่หน้างาน (BR6000-R12:12 branches). บันทึกและ
ทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

4. CONTROL SERIES : [1...20 + E]

สัดส่วนของการเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์กำลังที่ระบุในลำดับการควบคุมกำลังของคาปาซิเตอร์ตัวแรก จะถูกกำหนดค่าเป็น 1 ตัวควบคุมวงจรถองการการชดเชยของระบบคือเลือกปุ่ม \uparrow / \downarrow อีกครั้ง ถ้าสิ่งที่ต้องการไม่แสดง (Annex 1), ผู้ใช้จะต้องนิยามลักษณะพิเศษ (ควบคุมวงจรถองการการชดเชย "E") มากกว่านี้การควบคุมวงจรถองการการชดเชยใน Annex 1. บันทึกและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

5. CONTROL PRINCIPLE : การควบคุมโดยเลือก :

SEQUENTIAL Connection

LOOP connection

INTELLIGENT loop connection (default setting)

COMBINED CHOKE

ดูในส่วนที่ 9 สำหรับการอธิบายของโหมดควบคุมแปรค่า เลือกปุ่ม \uparrow / \downarrow บันทึกและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

6. POWER 1 STAGE: [0.01 ...255.99] kvar

การกำหนดการตอบสนองของตัวควบคุม มิติของคาปาซิเตอร์ตัวเล็กที่สุดของระบบ (stage 1) จะต้องรู้ จะถูกเข้าในสองสแต็ปใน kvar ส่วนประกอบค่า kvar (ก่อนเครื่องหมายคอมมา) ถูกเลือกเริ่มต้นโดยปุ่ม \uparrow / \downarrow บันทึกและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER ตำแหน่งหลังคอมมาจะถูกเลือก อีกครั้งผ่านปุ่ม \uparrow / \downarrow ถ้าหากตอบสนองของ BR6000 ถูกตัดส่วนล่างออก ค่าเตือนจะเกิดขึ้น (โดยบอกด้วยสัญลักษณ์ "!") บันทึกและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

7. TARGET COS PHI : [0.08 ind ...0.08cap]

โดยตั้งค่าเป้าหมาย cos phi ค่าตัวประกอบกำลังจะทำให้ถูกต้อง โดยปุ่ม \uparrow / \downarrow บันทึกและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

8. MEASURING VOLTAGE [30 ... 50]V

โปรแกรมการวัดแรงดัน (L-N) ของระบบ (วัดโดยตรง) หรือ แรงดัน L-N บนด้านปฐมภูมิของตัวแปลงการวัดแรงดัน ค่าที่ถูกตั้งที่นี้จะหมายถึงแรงดัน L-N ของระบบ แรงดันสามารถเลือกได้โดยปุ่ม \uparrow / \downarrow บันทึกและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

9. V-CONVERTER RATIO [NO/1.1 ... 999]

เมื่อตัวแปลงการวัดแรงดัน (เช่น สำหรับการวัดแรงดันสูง) ถูกใช้งาน ค่าสัดส่วนการแปลงจะต้องถูกตั้งค่าที่นี้

ตัวอย่างเช่น การแปลงแรงดัน 20000V : 100V => สัดส่วนการแปลง : 200

เลือกปุ่ม \uparrow / \downarrow บันทึกและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

10. CONNECTION TIME

ฟังก์ชันนี้จะหมายถึงเวลาระหว่างการเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์เพื่อเพิ่มค่าคาปาซิแตนซ์รวมของระบบชั่วคราว ควรจะคำนึงไว้ว่าในการทำงาน เวลาในการเชื่อมต่อจริงจะมีผลมาจากเวลาติสซาร์จ (locking time).

Setting range: 1 sec ... 20 min. (ใช้เวลานานสำหรับ ระบบแรงดันสูง)

Default setting: 40 sec.

การเลือกทำโดยปุ่ม ↑ / ↓ บันทึกลงและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

11. DISCONNECTING TIME

เป็นเวลาระหว่างการปลดการเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์ เพื่อลดระบบคาปาซิแตนซ์ชั่วคราว

Setting range: 1 sec ... 20 min. (ใช้เวลานานสำหรับระบบแรงดันสูง)

Default setting: 40 sec.

การเลือกทำโดยปุ่ม ↑ / ↓ บันทึกลงและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

12. DISCHARGE TIME

เป็นเวลาสำหรับเอาท์พุตแต่ละตัวที่ถูกกั้นระหว่างการเชื่อมต่อและการปลดออก เวลาการกั้นนี้ถูกจำกัดความสัมพันธ์ของเวลาเชื่อมต่อและเวลาปลด ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการติสซาร์จของคาปาซิเตอร์ และ ดังที่ถูกระบุไว้ในระบบชดเชย เวลาการติสซาร์จของระบบทั่วไป โดยไม่มีการติสซาร์จตัวต้านทานอย่างรวดเร็วเพิ่มเติม หรือ โฉกที่ถูกตั้งค่าไว้ไม่น้อยไปกว่า 40 วินาที สำหรับการตั้งค่าการติสซาร์จครั้งที่ 2 จะเห็นได้จาก 'Expert Mode' point 10

Setting range: 1 sec ... 20 min. การตั้งค่าตั้งต้น : 60 sec.

การเลือกทำโดยปุ่ม ↑ / ↓ บันทึกลงและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

13. ALARM TEMP [50 ... 85] °C

การแจ้งเตือนอุณหภูมิถูกตั้งค่าไว้ที่นี้ อุณหภูมิของแต่ละระดับคาปาซิเตอร์ที่ถูกปลดออกในสเต็ป รีเลย์

แจ้งเตือนของตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองหลังจาก 10 นาที ในเวลาเดียวกัน จะแสดงผลจะแสดงสาเหตุของการแจ้งเตือน (over-temperature). ถ้าอุณหภูมิลดลงอีกครั้ง จะมีการเชื่อมต่ออีกครั้งโดยอัตโนมัติ การเลือกทำโดยปุ่ม ↑ / ↓ บันทึกลงและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

14. MESSAGE RELAY (Available not in each type)

The message relay ถูกโปรแกรมเพียงหนึ่งเดียวสำหรับตัวเลือกตัวต่อไปนี้

“Fan”: สวิตซ์รีเลย์ พัดลมของตู้ภายนอก (Default) การสวิตซ์เริ่มต้สามารถตั้ง

ค่าต่ำกว่า 15 แสดงผล : “F”

“Supply”: แสดงเมื่อ active power เป็นตัวถูกจ่าย แสดง “S”

“Undercurrent”: ข้อความนี้จะปรากฏขึ้น เมื่อการวัดกระแสมีค่าต่ำเกินไปจะแสดง “U” สัญญาณถูกสร้างเมื่อค่าตกลงกว่าค่าความอ่อนไหวการตอบสนองของตัวควบคุม

“External”: สวิตช์รีเลย์ ถ้าสัญญาณเข้าที่พุด (230 VAC) ถูกส่งไปยัง “External” อินพุต ฟังก์ชันอาจถูกใช้ในการชดเชยโดยตรงของโหลดใหญ่ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการ 40 วินาที ค่าความหน่วงของการเชื่อมต่ออีกครั้งจะถูกรวมแล้วแสดงผล : สัญลักษณ์คาปาซิเตอร์ที่บนมุมขวาของบรรทัดแรก เมื่อฟังก์ชันนี้ถูกเลือก อินพุตไม่สามารถใช้สำหรับสัญญาณ การตั้งค่าพารามิเตอร์ครั้งที่ 2 และ เข้าที่พุด ไม่สามารถใช้กับพัลลัมได้

“Harmonics”: ข้อความนี้จะปรากฏขึ้นเมื่อค่าการบิดเบี้ยวฮาร์โมนิครวมมากเกินไปกว่าขีดจำกัด ค่านี้สามารถตั้งค่าได้น้อยกว่า 27% ฮาร์โมนิค

“Remote control R1” การเชื่อมต่อของสองตัวควบคุมผ่านการรีโมทควบคุม อินพุต,

R1= ตัวควบคุมถูกกำหนดเป็น controller 1 (ตัวหลัก)

“Remote control R2” การเชื่อมต่อของสองตัวควบคุมผ่านการรีโมทควบคุม อินพุต,

R2= ตัวควบคุมถูกกำหนดเป็น controller 2 (ตัวรอง)

คำอธิบายสำหรับการรวมของตัวควบคุมสองตัว สามารถดูได้จากภาคผนวก เมื่อฟังก์ชันนี้ถูกเลือกใช้ อินพุตไม่สามารถใช้สำหรับสัญญาณ การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่สอง และ เข้าที่พุด ไม่สามารถใช้สำหรับพัลลัมได้

การเลือกทำโดยปุ่ม \uparrow / \downarrow บันทึกลงและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

15. FAN TEMP* [15 ... 70] °C

อินพุตของการสวิตซ์สำหรับพัลลัมตู้ จะทำงานถ้าเลือกปุ่ม ‘Fan’ เท่านั้น (อุณหภูมิอินพุตบรรยายในหัวข้อ 13)

16. Programming of 2nd parameter set* [NO] (YES/NO)

* สามารถใช้ได้สำหรับตัวควบคุมกับตัวเลือก /F หรือ /S เท่านั้น

* ใช้งานได้ถ้ารีเลย์ข้อความถูกตั้งค่า “FAN”, “SUPPLY” หรือ “UNDERCURRENT” เท่านั้น

จากมาตรฐาน ค่าของ การตั้งค่า 2 พารามิเตอร์ จะเท่ากับค่าของพารามิเตอร์ปกติ โดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์โดยเฉพาะ ตัวอย่างเช่น cos-phi สามารถสวิตซ์ การใช้งานอย่างอื่นที่เป็นไปได้ อาจเป็นการสวิตซ์ของหม้อแปลงกระแส หรือ สวิตซ์ของเวลาการสวิตซ์

การกระตุ้นของ สัญญาณ 230 V ที่อินพุตจากภายนอก การตั้งค่าพารามิเตอร์ครั้งที่ 2 จะทำงานตามค่าดังต่อไปนี้

17. I-converter prim
18. 18. I-converter sec.
19. END STOPP
20. Control series
21. Control principle
22. Power 1. Stage
23. Target cos-phi
24. Switching-n time
25. Switch-off time
26. Discharge time
27. HARMONICS (harmonic limit) [7]% (0.5 ... 25,5)%

ข้อจำกัดของความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิรวม THD-V (%) สามารถป้อนที่ตรงนี้ ถ้าค่ามากเกินไป จะมีข้อความขึ้นเตือน THD-V เป็นสัดส่วนของผลบวกทางเรขาคณิตของฮาร์โมนิ คลำดับคี่และลำดับมูลฐาน การแจ้งเตือนมักจะแสดงขึ้นในจอแสดงผล ; การแสดงผลที่ออกมาจะผ่านรีเลย์เตือนเมื่อถูกเลือกตามข้อ14

การเลือกทำโดยปุ่ม ↑ / ↓ บนทีกและทำงานต่อด้วยปุ่ม ENTER

CONTRAST [7] (5 ... 10)

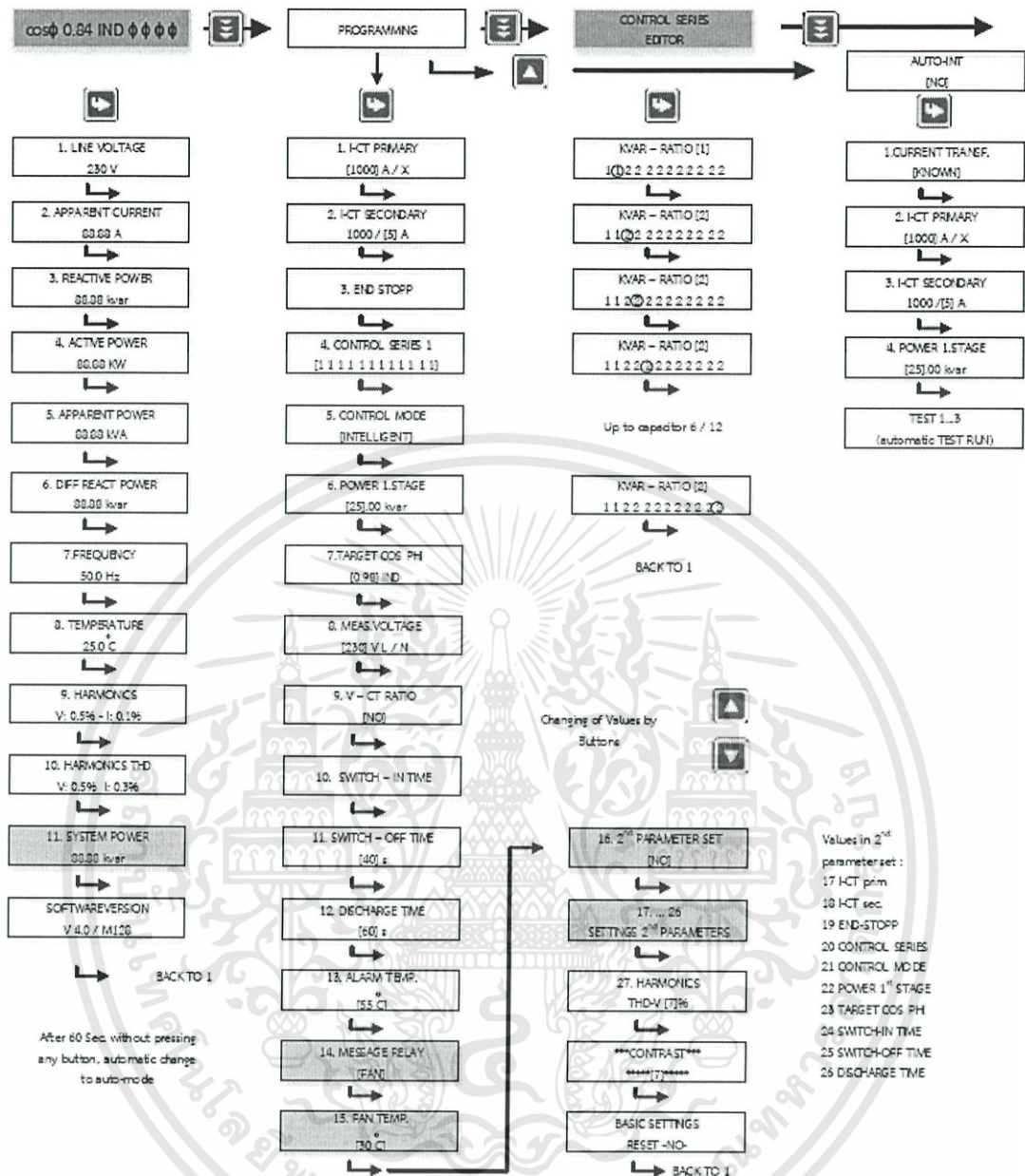
การแสดงผลความคมชัดสามารถเปลี่ยนได้โดยเมนูนี้ ค่าความคมชัดขึ้นอยู่กับองศาที่แน่นอนของ ผู้สังเกตการณ์ ตัวอย่าง ความสูงของการติดตั้งอุปกรณ์ ปุ่ม ↑ / ↓ สามารถใช้ในการตั้งค่าความคมชัดที่เหมาะสมที่สุด

BASIC SETTING: [NO] (YES/NO)

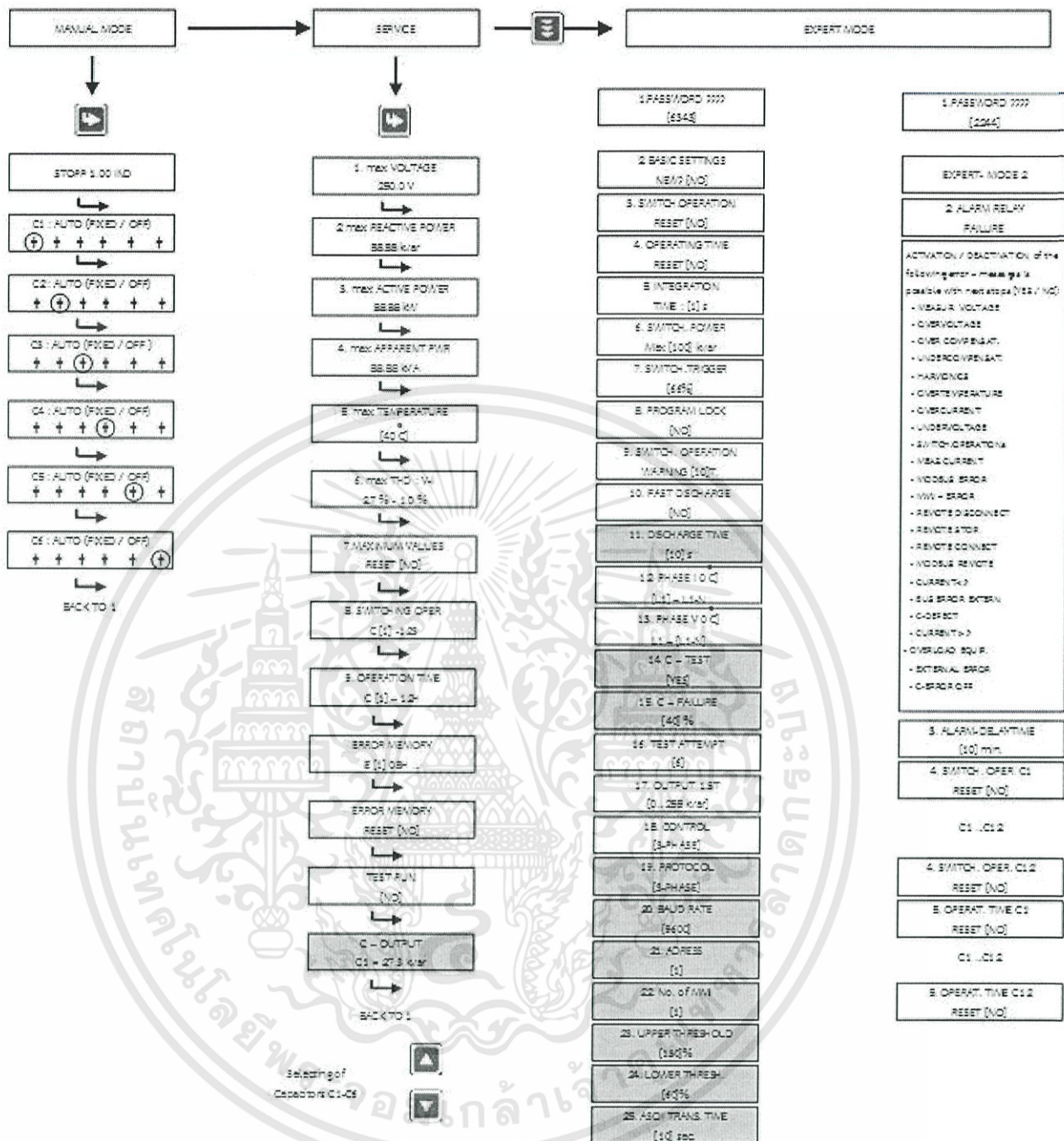
เมื่อมีการเลือกด้วย YES และ ยืนยันด้วย ENTER พารามิเตอร์ทั้งหมด ถูกตั้งค่าใหม่เป็นค่าพื้นฐาน โดย PFC- system จากโรงงาน (ค่าระบบที่เหมาะสมเมื่อตัวควบคุมถูกจ่ายด้วย PFC-system ที่สมบูรณ์) ถ้าตัวควบคุมถูกจ่ายจากการทำงาน จุดนี้จะมีผลเป็นการตั้งค่าเริ่มต้น

ข้อควรระวัง: การตั้งค่าทั้งหมดของผู้ใช้งานจะหาย!!

สิ้นสุดการตั้งค่าโปรแกรม ตัวควบคุมจะกลับไปข้อ1 ของเมนู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-2 แผนภาพโปรแกรมการทำงานของพาวเวอร์แฟคเตอร์คอนโทรลเลอร์ (BR-6000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.

รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องมือวัด Fluke 435 Series II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องมือวัด Fluke 435 Series II

Model	Fluke 435-II
Standard compliance	IEC 61000-4-30 Class A
Volt Amp Hz	YES
Dips and swells	YES
Harmonics	YES
Power and energy	YES
Energy loss calculator	YES
Unbalance	YES
Monitor	YES
Inrush	YES
Event waveform capture	YES
Flicker	YES
Transients	YES
Mains signaling	YES
Power wave	YES
Power inverter efficiency	YES
400 Hz	NO
C1740 Soft Case	YES
C437-II Hard Case with rollers	NO
SD card (Max 32 GB)	8 GB

ตารางที่ ง-2 วิธีการวัดของเครื่องมือวัด

Voltage inputs	
Number of inputs	4 (3 phase + neutral) dc-coupled
Maximum input voltage	1000 V _{rms}
Nominal voltage range	Selectable 1 V to 1000 V
Max. peak measurement voltage	6 kV (Transient mode only)
Input impedance	4M Ω / 5 pF
Bandwidth	>10 kHz , up to 100 kHz for transient mode
Scaling	1:1, 10:1, 100:1, 1000:1, 10000:1 and variable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Current inputs	
Number of inputs	4 (3 phase + neutral) dc- or ac-coupled
Type	Clamp or current transformer with mV output or i430flex-TF
Range	- 0.5 Arms to 600 Arms with included i430flex-TF (with sensitivity 10x) - 5 Arms to 6000 Arms with included i430flex-TF (with sensitivity 1x) - 0.1 mV/A to 1 V/A and custom for use with optional ac or dc clamps
Input impedance	1M Ω
Bandwidth	>10 kHz
Scaling	1:1, 10:1, 100:1, 1000:1, 10000:1 and variable

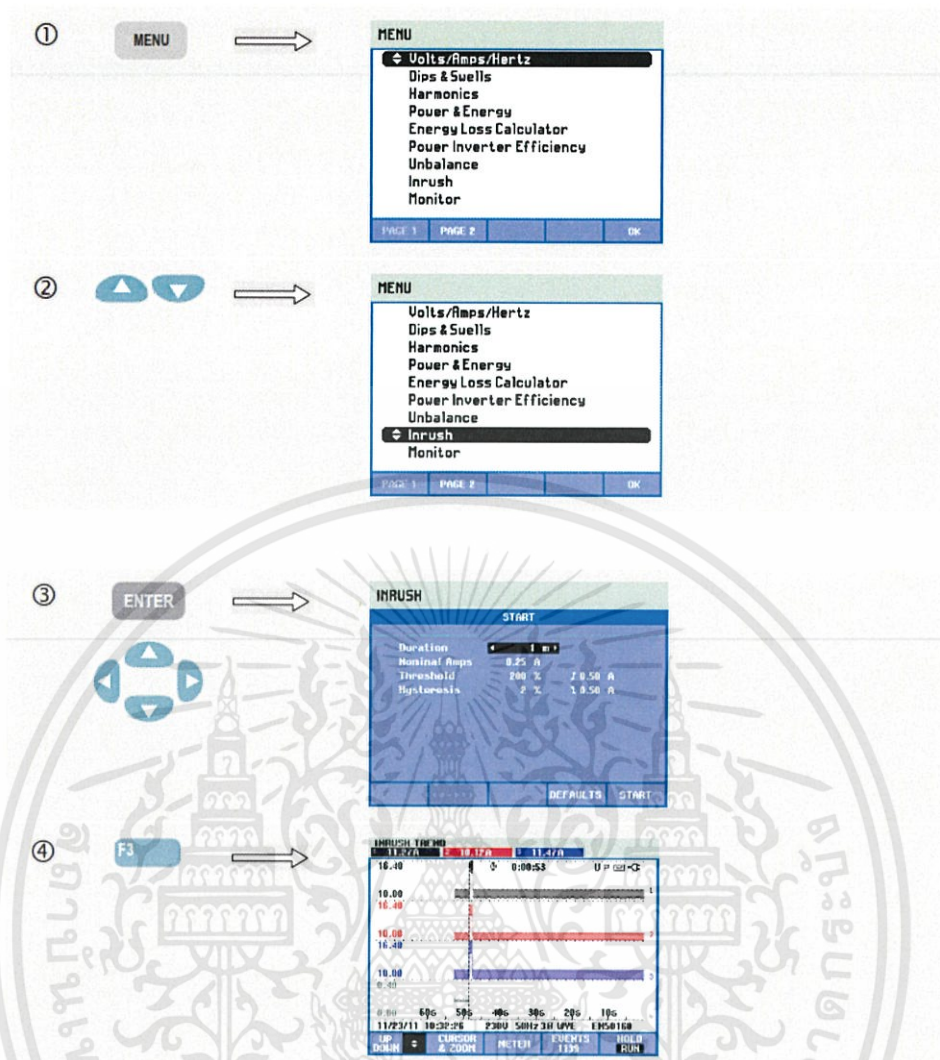
การใช้งานฟังก์ชัน Inrush

Introduction

Inrush currents can be captured by the Analyzer. Inrush Currents are surge currents that occur when a large or low-impedance load comes on line. Normally the current will stabilize after some time when the load has reached normal working condition. For example the start-up current in induction motors can be ten times the normal working current. Inrush is a 'single shot' mode that records current and voltage Trends after a current event (the trigger) has occurred. An event occurs when the current waveform exceeds adjustable limits. The display builds up from the right of the screen. Retrigger information allows you to see what occurred in advance of the inrush.

Inrush Trend display

To access the Inrush Trend screen:



รูปที่ ง-1 วิธีการใช้งานฟังก์ชันอินรัช

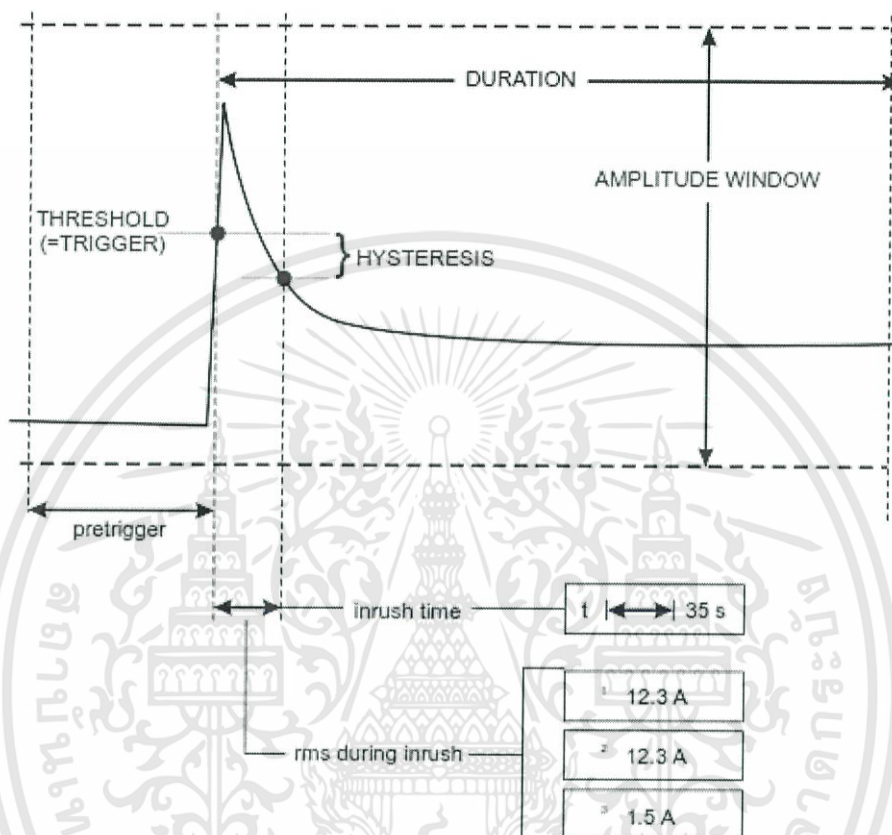
Use the arrow keys in the Start menu to adjust the trigger limits: expected inrush time, nominal current, threshold, and hysteresis. The maximum current determines the vertical height of the current display windows. Threshold is the current level that triggers the trend capture. The screen header displays the rms of all rms values during the inrush time. If the Cursor is on, the rms measuring values at the Cursor are displayed. A Meter screen shows half cycle rms for voltage ($V_{rms} 1/2$) and current ($A_{rms} 1/2$).

Set the duration to a value higher than expected inrush duration to assure that the event is completely captured. Duration is selectable from 1 to 45 minutes.

The inrush starts when the $A_{rms} 1/2$ of one of the phases is higher than threshold. The inrush ends when the $A_{rms} 1/2$ is lower than the threshold minus the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hysteresis. The inrush duration is indicated with markers on screen and shown as a duration reading in the Trend screen. The inrush value is the rms value between the markers and is measured on each phase simultaneously.



รูปที่ ง-2 วิธีการจับสัญญาณอินรัช

Use Cursor and Zoom to investigate details of the recorded Trends. Selection of channels to be displayed is done with the up/down arrow keys. Press function key F1 to assign the arrow keys to this.

The adjustment menu is reached via the SETUP key, F4 – MANUAL SETUP, F3 – FUNCTION PREF., and F2 – INRUSH. You can set up the default values of the trigger limits (Expected inrush time, nominal current, threshold, hysteresis).

To set Offset and Span of the half cycle rms voltage and current Trend display press SETUP Offset and Span of the half cycle rms voltage and current Trend display press SETUP key, F4 – MANUAL SETUP, F1 – TREND SCALE.

Available function keys:

F1	Up/down arrow keys are assigned to scroll Meter screen.
F2	Access to cursor and zoom menu.
F3	Access to Meter screen showing half cycle rms for voltage and current.
F4	Access to Events menu. The number of events that occurred is shown.
F5	Switch between HOLD and RUN of screen update. Switching from HOLD to RUN invokes a menu to select immediate (NOW) or TIMED start time which allows you to define start and duration of the measurement.

Tips and Hints

Check the peak current and their duration. Use the Cursor for readout of momentary values. Check if fuses, circuit breakers, and conductors in the power distribution system can withstand the inrush current during this period. Check also if phase voltages stay stable enough.

High peak currents can cause circuit breakers to trip unexpectedly. Measuring Inrush Current can help in setting trip levels. Since the Analyzer simultaneously captures Inrush Current and Voltage Trends you can use this measurement to check voltage stability as large loads come on line.

Use event capture on Arms $1/2$ to capture high resolution voltage and current rms trends and to capture waveform signals. This feature is available in Fluke 435-II and 437-II and can display a 7.5 second trend and a 1 second waveform. To activate this press SETUP, F4 – MANUAL SETUP, F3 – FUNCTION PREF., F1 – WAVE CAPTURE. Then select AMPS \rightarrow 0.50 A with the up/down arrow keys and press ENTER to activate.

ตารางที่ ง-3 รายละเอียดอุปกรณ์ฟังก์ชัน

MEASUREMENT MODES

Scope	4 voltage waveforms, 4 current waveforms, Vrms, Vfund. Arms, Afund, V @ cursor, A @ cursor, phase angles
Volts/Amps/Hertz	Vrms phase to phase, Vrms phase to neutral, Vpeak, V Crest Factor, Arms, Apeak, A Crest Factor, Hz
Dips and Swells	Vrms ^{1/2} , Arms ^{1/2} , Pinst with programmable threshold levels for event detection
Harmonics DC, 1 ... 50	Harmonics volts, THD, Harmonic Amps, K factor Amps, Harmonic watts, THd Watts, K factor Watts, Interharmonic Volts, Interharmonic Amps, Vrms, Arms (relative to fundamental or to total rms) Fluke 437-II @ 400 Hz: DC, 1... 13
Power and energy	Vrms, Arms, Wfull, Wfund., Vfull, Vfund., Vharmonics, VAunbalance, var, PF, DPF, cosQ, Efficiency factor, kWh forward, kWh reverse
Energy loss calculator	Wfund, VAharmonics, VAunbalance, var, A, Loss Active, Loss Reactive, Loss Harmonics, Loss Unbalance, Loss Neutral, Loss Cost (based upon user defined cost/kWh)
Inverter Efficiency	Wfull, wfund, wdc, Efficiency, Vdc, Adc, Vrms, Arms, Hz Note: requires optional dc current clamp
Unbalance	Vneg%, Vzero%, Aneg%, Azero%, Vfund, Afund, V phase angles, A phase angles
Inrush	Inrush current, Inrush duration, Arms ^{1/2} , Vrms ^{1/2}
Monitor	Vrms, Arms, harmonic volts, THD volts, Plt, Arms ^{1/2} , Vrms ^{1/2} , Hz, dips, swells, interruptions, rapid voltage changes, unbalance and mains signaling. All parameters are measured simultaneously in accordance with EN50160. Flagging in applied according to IEC61000-4-30 to indicate unreliable readings due to dips or swells.
Flicker	Pst (1min), Pst, Plt, Pinst, Vrms ^{1/2} Arms ^{1/2} , Hz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transients	Transient waveforms 4x Voltage, 4x Amps, triggers: $V_{rms}^{1/2}$, $A_{rms}^{1/2}$, Pinst
Mains Signaling	Relative signaling voltage and absolute signaling voltage averaged over three seconds for up to two selectable signaling frequencies.
Power Wave	$V_{rms}^{1/2}$, $A_{rms}^{1/2}$, W, Hz and scope waveforms for Voltage, Amps and Watts.
Logger	Custom selection of up to 150 Power Quality parameters measured simultaneously on 4 phases.
Shipboard V/A/Hz	V_{rms} , V tol%, V imb%, V mod, A rms, A imb%, Hz, Hz 10s, Hz tol, Hz tol%, Hz mod, Hz mod% (all acc. To MIL-STD-1399-300B).

MEASUREMENT METHOD

V_{rms} , A_{rms}	10/12 ¹ contiguous non overlapping intervals using 500/416 ¹ samples per cycle in accordance with IEC 61000-4-30.
V_{peak} , A_{peak}	Absolute highest sample value within 10/12 ¹ cycle interval with 40 μ s sample resolution.
V Crest Factor	Measures ratio between the V_{peak} and V_{rms} .
A Crest Factor	Measures ratio between the A_{peak} and A_{rms} .
Hz	Measured every 10 sec in accordance with IEC61000-4-30.
$V_{rms}^{1/2}$, $A_{rms}^{1/2}$	Value is measured over 1 cycle, commencing at a fundamental zero crossing, and refreshed each half-cycle. This technique is independent for each channel in accordance with IEC61000-4-30.
Harmonics	Calculated from 10/12-cycle gapless harmonic group measurements on Voltage and Amps according to IEC 61000-4-7
Watt	Full and fundamental real power display. Calculates average value of instantaneous power over 10/12 cycle period for each phase. Total Active Power $P_T = P_1 + P_2 + P_3$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VA	Full and Fundamental real power display. Calculates apparent power using $V_{rms} \times I_{rms}$ value over 10/12 cycle period.
Var	Fundamental reactive power display. Calculated for each phase and for total system based upon total apparent power and total apparent power.
VA Harmonics	Total disturbance power due to harmonics. Calculated for each phase and for total system based upon total apparent power and fundamental real power.
VA Unbalance	Unbalance power for total system. Calculated using symmetrical components method for fundamental apparent power and total apparent power.
Power Factor	Calculated Watt/VA
Cos	Cosine of angle between fundamental voltage and current.
DPF	Calculated fundamental Watt/VA
Energy/Energy cost	Power values are accumulated over time for kWh values. Energy cost is calculated from user defined /kWh cost variable
Unbalance	The supply voltage unbalance is evaluated using the method of symmetrical components according to IEC61000-4-30
Flicker	According to IEC 61000-4-15 flickermeter—Functional and design specification. Includes 230 V/50 Hz lamp and 120V/60 Hz lamp models.
Transient capture	Captures waveform triggered on signal envelope. Additionally triggers on dips, swells, interruptions and Amps level as specified by IEC 61000-4-30.
Inrush current	The inrush current begins when the I_{rms} half cycle rises above the inrush threshold, and ends when the I_{rms} half cycle rms is equal to or below the inrush threshold minus a user-selected hysteresis value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>The measurement is the square root of the mean of the squared Arms half cycle values measured during the inrush duration.</p> <p>Each half-cycle interval is contiguous and non-overlapping as recommended by IEC 61000-4-30. Markers indicate inrush duration.</p> <p>Cursors allow measurement of peak arms half cycle.</p>
Mains Signaling	<p>Measurements are based on: either the corresponding 10/12-cycle rms value interharmonic bin or the rms of the four nearest 10/12-cycle rms value interharmonic bin per IEC 61000-4-30.</p> <p>Limit setup for Monitor mode follows EN50160 standard limits.</p>
Time Synchronisation	<p>Optional GPS430-II timesync module provides time uncertainty $\leq 20\text{ms}$ or $\leq 16.7\text{ ms}$ for time tagging of events and time aggregated measurements. When synchronization is not available, time tolerance is $\leq 1\text{s}/24\text{h}$.</p>



ภาคผนวก จ.
วิธีการคำนวณกระแสน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณกระแสอินรัชสตีปที่ 1

$$I = K_1 \sqrt{\frac{Q}{L+L_t}}$$

$$f_0 = K_2 U \sqrt{\frac{1}{Q(L+L_t)}}$$

เมื่อ

I = ค่ากระแสอินรัชสูงสุด (A)

f_0 = ความถี่ของกระแสอินรัช (Hz)

Q = กำลังไฟฟ้าเสมือนของคาปาซิเตอร์ (kvar)

U = แรงดันเฟส (V)

L = ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส (μH)

L_t = ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง (μH)

K_1 = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1457 ที่ระบบ 50Hz

K_2 = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 89.2 ที่ระบบ 50Hz

ค่ากระแสอินรัชที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำ

$$I = 1457 \sqrt{\frac{5}{44.266}} = 489.68 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2(415) \sqrt{\frac{1}{5(44.266)}} = 2,488.24 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรัชที่มีความเหนี่ยวนำขนาด $4 \mu\text{H}$

$$I = 1457 \sqrt{\frac{5}{48.266}} = 468.95 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2(415) \sqrt{\frac{1}{5(48.266)}} = 2,382.91 \text{ Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสอินรัชที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 6 μH

$$I = 1457 \sqrt{\frac{5}{50.266}} = 459.52 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2(415) \sqrt{\frac{1}{5(50.266)}} = 2,335.02 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรัชที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 8 μH

$$I = 1457 \sqrt{\frac{5}{52.266}} = 450.65 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2(415) \sqrt{\frac{1}{5(52.266)}} = 2,289.91 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรัชที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 10 μH

$$I = 1457 \sqrt{\frac{5}{54.266}} = 442.26 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2(415) \sqrt{\frac{1}{5(54.266)}} = 2,247.32 \text{ Hz}$$

การคำนวณกระแสอินรัชกรณีสวิตชิงแบบแบ็คทูแบ็ค (back to back)

$$I = K_1 \frac{n-1}{n} \times \sqrt{\frac{Q_n}{L_n}}$$

$$f_0 = K_2 U \sqrt{\frac{1}{L_n \times Q_n}}$$

เมื่อ I = ค่ากระแสอินรัชสูงสุด (A)

f_0 = ความถี่ของกระแสอินรัช (Hz)

Q_n = กำลังไฟฟ้าเสมือนของคาปาซิเตอร์ในสแต็ป (kvar)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_1 = Q_2 = Q_{\dots} = Q_n$$

$$U = \text{แรงดันเฟส (V)}$$

การคำนวณกระแสอินรีซเต็ปที่ 2

ค่ากระแสอินรีซที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำ

$$I = 1457 \times \frac{2-1}{2} \times \sqrt{\frac{5}{2.266}} = 1082.14 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{2.266 \times 5}} = 10,997.60 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรีซที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 4 μH

$$I = 1457 \times \frac{2-1}{2} \times \sqrt{\frac{5}{6.266}} = 650.76 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{6.266 \times 5}} = 6,613.52 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรีซที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 6 μH

$$I = 1457 \times \frac{2-1}{2} \times \sqrt{\frac{5}{8.266}} = 566.59 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{8.266 \times 5}} = 5,758.11 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรีซที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 8 μH

$$I = 1457 \times \frac{2-1}{2} \times \sqrt{\frac{5}{10.266}} = 508.41 \text{ A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{10.266 \times 5}} = 5,166.78 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรัชที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 10 μH

$$I = 1457 \times \frac{2-1}{2} \times \sqrt{\frac{5}{12.266}} = 465.12 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{12.266 \times 5}} = 4,726.90 \text{ Hz}$$

การคำนวณกระแสอินรัชสเต็ปที่ 3

ค่ากระแสอินรัชที่ไม่มีตัวเหนี่ยวนำ

$$I = 1457 \times \frac{3-1}{3} \times \sqrt{\frac{5}{2.266}} = 1442.86 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{2.266 \times 5}} = 10,997.60 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรัชที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 4 μH

$$I = 1457 \times \frac{3-1}{3} \times \sqrt{\frac{5}{6.266}} = 867.68 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{6.266 \times 5}} = 6,613.52 \text{ Hz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสอินรัชที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 6 μH

$$I = 1457 \times \frac{3-1}{3} \times \sqrt{\frac{5}{8.266}} = 755.45 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{8.266 \times 5}} = 5,758.11 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรัชที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 8 μH

$$I = 1457 \times \frac{3-1}{3} \times \sqrt{\frac{5}{10.266}} = 677.88 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{10.266 \times 5}} = 5,166.87 \text{ Hz}$$

ค่ากระแสอินรัชที่มีความเหนี่ยวนำขนาด 10 μH

$$I = 1457 \times \frac{3-1}{3} \times \sqrt{\frac{5}{12.266}} = 620.16 \text{ A}$$

$$f_0 = 89.2 \times 415 \sqrt{\frac{1}{12.266 \times 5}} = 4,726.90 \text{ Hz}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพฤติกรรมสัญญาณทรานเซียนต์จากชุดทดสอบสัญญาณทรานเซียนต์ ในระบบคาปาซิเตอร์แบงก์

Transient behavior study from transient test set in capacitor bank system

ศศิกา ฉัตรพงษ์พร สันฐิติ อยู่มาก สันติพันธ์ อนันต์วัฒนาพร และสารัช เปานิล
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนคลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร. 0-2739-2478

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในขณะที่สวิตช์คาปาซิเตอร์แบงก์เข้าใช้งานในแต่ละสเต็ป โดยจะมีการจัดสร้างชุดสาธิตระบบสวิตช์คาปาซิเตอร์แบงก์ ซึ่งเป็นระบบจำลองของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก เพื่อเก็บข้อมูลและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในขณะที่สวิตช์คาปาซิเตอร์เข้าใช้งาน โดยจะศึกษาสัญญาณชั่วขณะที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเช่น กระแสอินรัช แร่งดันไฟฟ้าชั่วขณะ และการแกว่งของความถี่ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการสวิตช์ใน 2 กรณี ในกรณีแรกเป็นการสวิตช์เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์อย่างเดียว และกรณีที่สองจะการสวิตช์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำค่าต่างจกติดตั้งอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ แล้วนำผลการศึกษาทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบป้องกันคาปาซิเตอร์และอุปกรณ์ประกอบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ: คาปาซิเตอร์แบงก์, กระแสอินรัช

Abstract

This research presents a study in transient signal that occur when switching capacitor in each step. The method is building a practice capacitor bank switching test set which, downscale from Nong Chok substation. This practice set aim to collect and study transient signal in capacitor bank switching that has impact on the power system such as Inrush current, Voltage Transient, Frequency oscillating. This research study switching capacitor bank system in case of pure capacitor and capacitor with series connect inductance to compare data between these two results. These practice set can be benefit in analysis transient signal and design protection equipment for capacitor bank system.

Keyword: Capacitor bank, Inrush current, Voltage sag

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบสวิตช์คาปาซิเตอร์แบงก์นั้นมีการนำมาใช้งานในสถานีไฟฟ้าอย่างกว้างขวางเนื่องจากข้อดีของคาปาซิเตอร์แบงก์ ที่ช่วยทำให้การใช้พลังงานนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการจ่ายกำลังรีแอกทีฟแทนแหล่งจ่ายไฟฟ้า ทำให้ลดปริมาณกำลังรีแอกทีฟที่จ่ายจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำได้ เป็นการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบ เพิ่มความสามารถในการส่งกำลังของระบบ และลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น [1]

ในการสวิตช์คาปาซิเตอร์แบงก์เข้าใช้งานในระบบแต่ละครั้งนั้น จะต้องคำนึงถึงสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ได้แก่ แร่งดันชั่วขณะ (Voltage Transient) กระแสอินรัช (Inrush Current) เป็นต้น โดยปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากจะเป็นสาเหตุให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันในระบบ และอุปกรณ์ประกอบภายในสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีความไวสูง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ [2][4]

การป้องกันปัญหาสัญญาณชั่วขณะในระบบสวิตช์คาปาซิเตอร์แบงก์นั้นจะมีวิธีการที่ใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์ การใช้รีแอกเตอร์จำกัดกระแส หรือการใช้ 6% รีแอกเตอร์ [3] สำหรับการศึกษาในปริณญาณินพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการจำลองระบบสวิตช์คาปาซิเตอร์แบงก์ในสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกของกรกรไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ระดับแรงดัน 115 kV ลงมาอยู่ในชุดทดลองที่ระดับแรงดัน 415V เป็นการออกแบบทั้งในส่วนวงจรกำลังและวงจรควบคุม การศึกษาสัญญาณชั่วขณะในขณะที่สวิตช์จะทำในกรณีที่ไม่มีคาปาซิเตอร์แบงก์อย่างเดียวและกรณีที่มีตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์แบงก์ เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณ โดยจะแตกต่างจากงานวิจัยอื่นที่ใช้การจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เช่น EMTP/ATP เนื่องจากปัจจัยของการติดตั้งและคุณสมบัติของอุปกรณ์ประกอบในระบบที่จะมีผลต่อลักษณะของสัญญาณชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

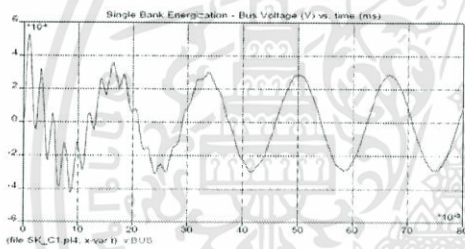
2. การสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบงก์

การสวิตชิงของคาปาซิเตอร์เป็นการสวิตชิงที่มักเกิดขึ้นเสมอในระบบไฟฟ้าในเวลาที่ต้องการเชื่อมต่อกาปาซิเตอร์แบงก์เข้าสู่ระบบ แต่ในการสวิตชิงจะทำให้เกิดสัญญาณที่ชั่วขณะนี้อาจจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า คาปาซิเตอร์แบงก์และระบบของอุปกรณ์ประกอบที่ต่อร่วมด้วย โดยสัญญาณชั่วขณะจะมีหลายประเภทได้แก่

2.1 แรงดันชั่วขณะ

แรงดันชั่วขณะ (Voltage Transient) คือ แรงดันที่มีขนาดและความถี่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาอันสั้น พฤติกรรมของแรงดันทรานเซียนท์จะมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า โดยลักษณะการเกิดทรานเซียนท์จะแบ่งได้ 2 ประเภท คือ [5]

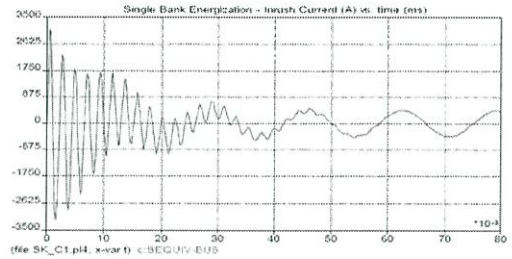
1. แรงดันเกินภายนอก
2. แรงดันภายใน



รูปที่ 1 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันชั่วขณะ

2.2 กระแสอินรัช

กระแสอินรัชเกิดขึ้นจากเมื่อ คาปาซิเตอร์แบงก์ถูกกระตุ้น จะทำให้มีกระแสไหลผ่านสูง อาจมีขนาดถึง 200 เท่าของกระแสพิคก ขนาดของกระแสอินรัชจะขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน ที่ใช้ในการกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบงก์ขณะนั้นและค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ รวมทั้งค่าความต้านทานของคาปาซิเตอร์แบงก์ด้วย แต่ถ้ามีคาปาซิเตอร์แบงก์หลายชุดบนบัสเดียวกันคาปาซิเตอร์แบงก์ที่ถูกกระตุ้นไปแล้วจะเกิดการดิซชาร์จกลับไปยังคาปาซิเตอร์แบงก์ที่กำลังจะถูกกระตุ้นทำให้กระแสอินรัชมีค่าสูงเพิ่มขึ้นไปอีก



รูปที่ 2 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอินรัช

การที่มีกระแสอินรัชสูงๆ จะทำให้เกิดความเครียดกับคาปาซิเตอร์ส่งผลให้คาปาซิเตอร์มีอายุการใช้งานน้อยลง รวมไปถึงการทำงานของหน้าสัมผัสและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อาจเกิดความผิดพลาด การคำนวณกระแสอินรัชจะต้องศึกษาว่าการเชื่อมต่อของคาปาซิเตอร์แบงก์เป็นลักษณะการสวิตชิงแบบใด เนื่องจากวิธีการคำนวณจะแตกต่างกัน โดยแบ่งได้เป็นสองกรณีคือ

2.3 คาปาซิเตอร์แบงก์เดี่ยว (Isolated Bank)

การสวิตชิงแบบคาปาซิเตอร์แบงก์เดี่ยว คือ กรณีที่มีคาปาซิเตอร์แบงก์หนึ่งชุดสวิตชิงเข้าสู่ระบบ โดยจะคำนวณได้จากสมการที่ 1 และความถี่คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$I = K_1 \sqrt{\frac{Q}{L+L_1}} \quad (1)$$

$$f_0 = K_2 U \sqrt{\frac{1}{Q(L+L_1)}} \quad (2)$$

- เมื่อ
- I = ค่ากระแสอินรัชสูงสุด (A)
 - f_0 = ความถี่ของกระแสอินรัช (Hz)
 - Q = กำลังไฟฟ้าเสมือนของคาปาซิเตอร์ (kvar)
 - U = แรงดันเฟส (V)
 - L = ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส (uH)
 - L_1 = ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง (uH)
 - K_1 = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1457 ที่ระบบ 50Hz
 - K_2 = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 89.2 ที่ระบบ 50Hz

2.4 สวิตชิงแบบเบ็คทูเบ็ค (back to back)

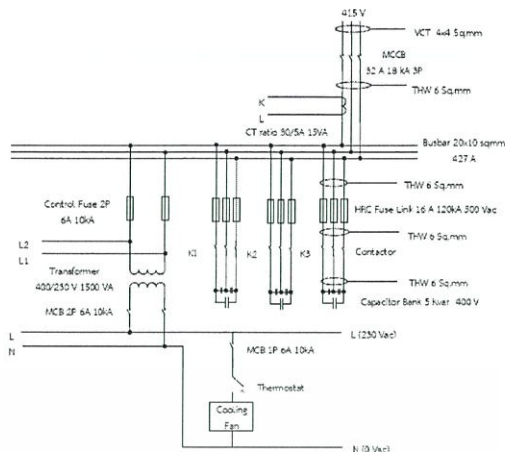
การสวิตชิงแบบเบ็คทูเบ็ค คือ การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบงก์ในขณะที่บริเวณใกล้เคียงมีคาปาซิเตอร์แบงก์ที่ถูกกระตุ้นเชื่อมต่อก่อนแล้ว โดยจะสามารถคำนวณค่ากระแสอินรัชเมื่อมีคาปาซิเตอร์เชื่อมต่อยู่มากกว่าหนึ่งสเต็ป และในขณะที่สวิตชิงมีคาปาซิเตอร์จำนวน (n-1) แบงก์เชื่อมต่อก่อนหน้าแล้ว ได้จากสมการที่ 3 และความถี่ของกระแสอินรัชคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$I = K_1 \frac{n-1}{n} \times \sqrt{\frac{Q_n}{L_n}} \quad (3)$$

$$f_0 = K_2 U \sqrt{\frac{1}{L_n \times Q_n}} \quad (4)$$

เมื่อ $I =$ ค่ากระแสอินรีซ์สูงสุด (A)
 $f_0 =$ ความถี่ของกระแสอินรีซ์ (Hz)
 $Q_n =$ กำลังไฟฟ้าเสมือนของคาปาซิเตอร์ (kvar)

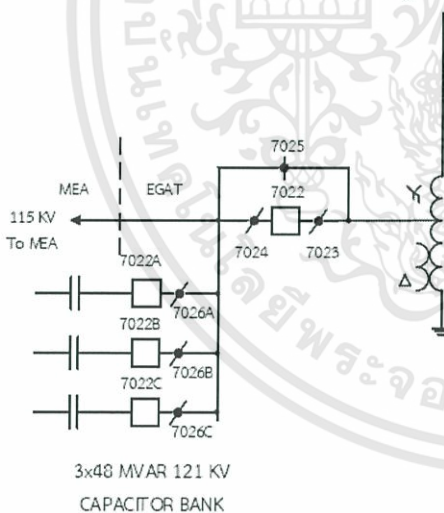
$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n$
 $U =$ แรงดันเฟส (V)
 $L_n =$ ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสในสเต็ป (uH)
 $L_1 = L_2 = \dots = L_n$
 $K_1 =$ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1457 ที่ระบบ 50Hz
 $K_2 =$ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 89.2 ที่ระบบ 50Hz



รูปที่ 4 วงจรกำลังของชุดสวิตระบบสวิตซึ่งคาปาซิเตอร์เบงค์

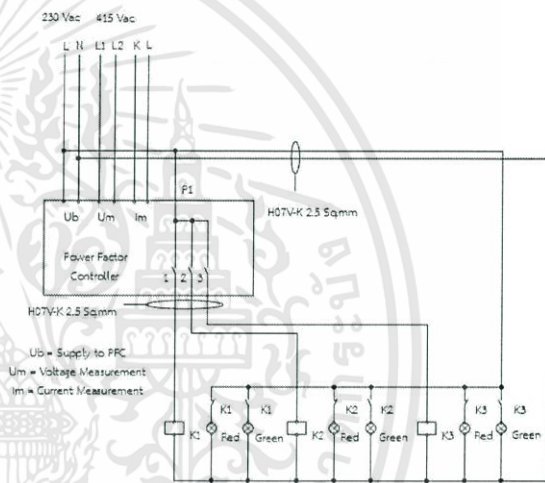
3. การออกแบบชุดสวิตคาปาซิเตอร์เบงค์

ชุดสวิตระบบสวิตซึ่งคาปาซิเตอร์เบงค์จะเป็นระบบจำลองของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก โดยแบบของการเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์เบงค์กับบัสหลักจะแสดงดังรูป 3



รูปที่ 3 แบบการเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก

การทำงานของชุดสวิตจะใช้ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor Controller) เป็นอุปกรณ์วัดกระแสและแรงดันจากระบบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่โปรแกรมไว้ เมื่อมีการสวิตซึ่งจะส่งสัญญาณควบคุมให้หน้าสัมผัส (Contactor) ต่อคาปาซิเตอร์เบงค์เข้าสู่ระบบ โดยแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมของชุดสวิตจะแสดงดังรูป 3 และรูป 4



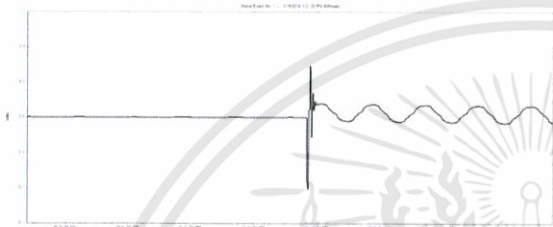
รูปที่ 5 วงจรควบคุมของชุดสวิตระบบสวิตซึ่งคาปาซิเตอร์เบงค์

4. ผลการวิจัย

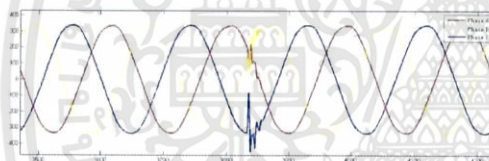
การวัดผลในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่ากระแสอินรีซ์และแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตซึ่งคาปาซิเตอร์เบงค์เข้าสู่ระบบ โดยตัวอย่างค่าระดับแรงดันชั่วขณะและกระแสอินรีซ์ที่เก็บได้จะแสดงไว้ดังรูป 5 และรูป 6 โดยค่ากระแสอินรีซ์ของแต่ละสเต็ปต่างๆ ที่วัดได้จากชุดสวิตในกรณีที่มีคาปาซิเตอร์เบงค์อย่างเดียว และกรณีที่มีตัวเหนี่ยวนำขนาด 4, 6, 8, 10 μ H ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์เบงค์จะสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 และจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำค่าขอดของกระแสอินรีซ์ในแต่ละสเต็ปจะมีค่าลดลงดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 8

ตารางที่ 1 ตารางสรุปค่ากระแสอินรัช

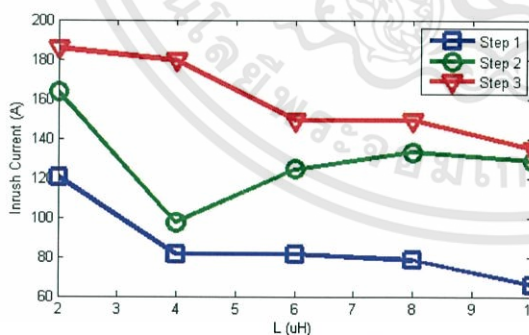
L	กระแสอินรัช (A)		
	Step 1	Step 2	Step 3
-	120.2	163.7	185.6
4 μ H	81.6	97.7	179.5
6 μ H	81.4	124.7	149.3
8 μ H	78.6	133.3	149.3
10 μ H	66.0	123.8	135.0



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่ากระแสของเฟส A ในการสวิชชิงกรณีที่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 4 μ H สแต็ปทีหนึ่ง



รูปที่ 7 กราฟแสดงแรงดันชั่วขณะกรณีที่มีตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 μ H ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์เบงค์ ในสแต็ปที่ 1



รูปที่ 8 กราฟแสดงผลของกระแสอินรัชกรณีที่มีตัวเหนี่ยวนำขนาดต่างๆต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์เบงค์

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการสวิชชิงคาปาซิเตอร์เบงค์เข้าใช้งานนั้น ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเมื่อการสวิชชิงคาปาซิเตอร์เบงค์เข้าสู่ระบบนั้นจะมีค่าสูงมากเป็นหลายเท่า

เมื่อมีคาปาซิเตอร์เบงค์สแต็ปก่อนหน้านั้นเชื่อมต่ออยู่แล้วนั้น จะทำให้ค่ากระแสอินรัชของการสวิชชิงสแต็ปถัดมามีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิม และเมื่อมีการติดตั้งตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับคาปาซิเตอร์เบงค์นั้นสามารถลดขนาดของกระแสอินรัชลงได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการศึกษาทั้งหมดนี้สามารถนำมาใช้ในการศึกษาและ ออกแบบระบบป้องกัน เพื่อแก้ปัญหาสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบคาปาซิเตอร์เบงค์ของสถานีไฟฟ้าย่อยต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- Govind Gopakumar, Huihua Yan, Dr. Bruce A. Mork "SHUNT CAPACITOR BANK SWITCHING TRANSIENTS: A TUTORIAL AND CASE STUDY" Michigan Technological University.
- Anna Baby, Dr. Jaimol Thomas, Tibin Joseph "Analysis of Voltage Collapse in the Kerala Power Grids" 2013 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI-2013), Coimbatore, INDIA January 04-06, 2013
- Edmund O. Schweitzer, Jolene Schafman "UNIFIED SHUNT CAPACITOR BANK CONTROL AND PROTECTION" Presented before the 45TH Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference Atlanta, Georgia May 1-3, 1991
- Shunt Capacitor Bank Fundamentals and Protection, 2003 Conference for Protective Relay Engineers - Texas A&M University
- ทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้าเนื่องจากการต่อ-ปลด Capacitor Bank, ดร. อธิญา บุญญาอรุณเน

ประวัติผู้เขียน



นางสาวศศิภา ฉัตรพงศ์พร (ฝ่าย)

เกิดวันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2534

ที่อยู่ 72/135 หมู่ 2 ถนนรามคำแหง ซอยรามคำแหง 178 มีนบุรี

กรุงเทพฯ 10510

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนนวมินทราชินูทิศเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า

เบอร์โทรศัพท์ 091-4364756

Email address: oct-ch.s@hotmail.com



นายสันฐิติ อยู่มาก (ไอติม)

เกิดวันที่ 3 เมษายน พ.ศ. 2535

ที่อยู่ 150 ถนนเทอดไทย 19 ซอยตรอกข้างรววัดโพธิ์นิมิต บางยี่เรือ

ธนบุรี กรุงเทพฯ 10600

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนราชวินิตมัธยม

เบอร์โทรศัพท์ 085-5537125

Email address: suntitiatim@hotmail.com



นายสันติพันธ์ อนันต์วัฒนาพร (ตัน)

เกิดวันที่ 6 มิถุนายน พ.ศ. 2535

ที่อยู่ 99/93 ถนนเสรีไทย คันนายาว คันนายาว กรุงเทพฯ 10230

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา

เบอร์โทรศัพท์ 086-900-6706

Email address: san_ti_ton@hotmail.com



นายสารัช เปานิล (โพร์)

เกิดวันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2534

ที่อยู่ 73 ซอยรามคำแหง 72 บางกะปิ หัวหมาก กรุงเทพฯ 10240

จบมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา

เบอร์โทรศัพท์ 090-9754217

Email address: fourarak_tu@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้