

การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการใช้งานคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง
RELIABILITY ANALYSIS OF CAPACITORS IN POWER SYSTEM



โดย
นายสิทธิโชค กิตติรักษตระกูล
นายสุนทร ฝ่ายหมื่นไวย

เลขที่.....
เลขทะเบียน... 34165
วัน, เดือน, ปี... 6 ต.ค. 2542

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทำงานของคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

(RELIABILITY ANALYSIS OF CAPACITORS IN POWER SYSTEM)

ผู้จัดทำ

1. นายสิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล

2. นายสุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สมโภชน์ ประไพ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทำงานของคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

สิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล
สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์
สมโภชน์ ประไพ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อธิบายการศึกษาความน่าเชื่อถือของคาปาซิเตอร์ยูนิต ที่ถูกติดตั้งและใช้งาน ในช่วงเวลาระหว่างปี 2536-2540 ความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ยูนิตในสถานีไฟฟ้าแรงสูงสามารถทำให้ต้นทุน ในการจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้บริโภคเพิ่มสูงขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเลือกคาปาซิเตอร์ยูนิตจากผู้ผลิตที่ต่างกัน การวิเคราะห์ความบกพร่องและอัตราการเกิดความผิดปกติ ถูกนำมาใช้กับคาปาซิเตอร์ยูนิต ซึ่งวิธีการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ทั้งรูปแบบความผิดปกติและระดับความน่าเชื่อถือ ผลการศึกษาจากกลุ่มที่แตกต่างกัน 2 กลุ่ม ซึ่งประกอบด้วยคาปาซิเตอร์จำนวน 3348 และ 1978 ยูนิต ที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขตกรุงเทพและปริมณฑล แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการเกิดความผิดปกติ สามารถแทนได้ด้วย การกระจายของเวลบัลล์ คาปาซิเตอร์ของผู้ผลิตแต่ละราย มีอัตราการเกิดความผิดปกติที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการศึกษาในปริญญาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่น ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ด้วย เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า, ฉนวน, สวิตช์น้ำมัน ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RELIABILITY ANALYSIS OF CAPACITORS IN POWER SYSTEMS

Sitthichoke Kittiruktrakoon
Soontorn Faimuenwai
Sompoch Prapai Advisor
1999

Abstract

This paper describes the study of reliability of capacitor units installed and operated in a distribution system of EGAT during the period 1993 through 1997. Failure of capacitor units in distribution substations can be very costly to the supply of reliable power to consumers and enhance the ability for choosing capacitor units from different manufacturers. Statistical approach was utilized in this study in failure mode, failure rates and reliability levels. The results of this study on two difference groups of capacitor bank including 3348 and 1978 capacitors installed and operated in substations of EGAT in metropolitan area showed that each capacitor manufacturer has different failure rate. The methodology used in this study also applies to other equipment in the distribution system such as transformers, insulators and oil switches.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญรูป	ข
สารบัญตาราง	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การชดเชยค่ารีแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลัง	2
บทที่ 3 การศึกษาข้อมูลความผิดปกติของคาปาซิเตอร์กำลัง	27
บทที่ 4 การวิเคราะห์ความผิดปกติของคาปาซิเตอร์	36
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	54
ภาคผนวก ก. แผนที่แสดงที่ตั้ง โรงไฟฟ้าสถานีไฟฟ้าแรงสูงและแนวสายส่ง	55
ภาคผนวก ข. Single line diagram ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง กฟผ. เขตนครหลวง	56
ภาคผนวก ค. รายละเอียดของคาปาซิเตอร์ในกลุ่มที่ศึกษา	64
ภาคผนวก ง. ตารางการกระจายแบบที่ (Distribution of T)	70
กิตติกรรมประกาศ	71
เอกสารอ้างอิง	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	แสดง แรงดัน ไฟฟ้าตกตามช่วงสายส่งกำลัง	2
2.2	แสดง ส่วนของ วงจร เมื่อสายส่งถูกแยกออกมา	4
2.3	แสดง ส่วนประกอบเบื้องต้นของ Capacitor Unit อย่างง่าย	6
2.4	แสดง ตัวอย่าง โครงสร้างของ Power Capacitor	7
2.5	แสดง ตัวอย่าง การต่อ Capacitor Bank ในระบบ 22 kV	10
2.6	แสดง ตัวอย่าง การต่อ Capacitor Bank ในระบบ 115 kV	11
2.7	แสดง โครงสร้าง โมเลกุลของ PCB	12
2.8	ตัวอย่าง การต่อ Capacitor Bank 22 kV. ขนาด 3150 kVAR. เข้าในระบบ	14
2.9	การต่อ Bank แบบ Double Ungrounded-Wye	15
2.10	แสดง รูป Inrush – Limiting Reactor	17
2.11	Current and Voltage curves of Switching Time	18
2.12	รูป วงจร แสดง การหาค่า Inrush Current ในกรณี Isolate Bank	19
2.13	วงจร แสดง การหาค่า Inrush Current ในกรณี Parallel	20
3.1	แสดง รูปแบบ การจัดเรียง คาปาซิเตอร์ สำหรับ C-bank ขนาด 43.2 MVAR	30
3.2	แสดง รูปแบบ การจัดเรียง คาปาซิเตอร์ สำหรับ C-bank ขนาด 36 MVAR	30
4.1	แสดง กราฟ รูปอ่างอาบน้ำ ที่เป็นตัวแทน ถึง ฟังก์ชัน อายุการใช้งาน	36
4.2 ก	ฮิสโทแกรม ของ อายุการใช้งาน t ของ ผู้ผลิต ก กลุ่มที่ 1	41
4.2 ข	ฮิสโทแกรม ของ อายุการใช้งาน t ของ ผู้ผลิต ข กลุ่มที่ 1	41
4.3 ก	ฮิสโทแกรม ของ อายุการใช้งาน t ของ ผู้ผลิต ก กลุ่มที่ 2	41
4.3 ข	ฮิสโทแกรม ของ อายุการใช้งาน t ของ ผู้ผลิต ข กลุ่มที่ 2	41
4.4 ก	อธิบาย เส้นโค้ง การกระจายเชิง ทฤษฎี ของ $F(t)$ ของ อายุการใช้งาน ของ คาปาซิเตอร์	46
4.4 ข	เส้นโค้ง การกระจายเชิง ทฤษฎี ของ $F(t)$ ของ อายุการใช้งาน ของ คาปาซิเตอร์ ในกลุ่มที่ 1	47
4.4 ค	เส้นโค้ง การกระจายเชิง ทฤษฎี ของ $F(t)$ ของ อายุการใช้งาน ของ คาปาซิเตอร์ ในกลุ่มที่ 2	47
4.5	แสดง เส้นโค้ง การกระจาย แบบที่	48
4.6	แสดง เส้นโค้ง การกระจาย แบบที่ ที่มีการ ท้าย เดียว (One Tail)	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดง Capacitor Unit Electrical Constants	23
2.2 แสดง Terminal-to-Terminal and Terminal to Case Test Voltage	25
2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Insulation Oil	26
3.1 แสดงจำนวนคาปาซิเตอร์และคาปาซิเตอร์ยูนิตของกลุ่มที่ 1	28
3.2 แสดงจำนวนคาปาซิเตอร์และคาปาซิเตอร์ยูนิตของกลุ่มที่ 2	28
3.3 แสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างปี 2536-2540 กลุ่มที่ 1	31
3.4 แสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างปี 2536-2540 กลุ่มที่ 2	34
4.1 แสดงการคำนวณเพื่อหาค่า m และ t_0 ของผู้ผลิต ก จากกลุ่มที่ 1	39
4.2 ก แสดงตารางการทดสอบ โคลโมโกรอฟ-สเมียนอฟ ของอายุการใช้งาน ในกลุ่มที่ 1 ของผู้ผลิต ก	42
4.2 ข แสดงตารางการทดสอบ โคลโมโกรอฟ-สเมียนอฟ ของอายุการใช้งาน ในกลุ่มที่ 1 ของผู้ผลิต ข	42
4.3 ก แสดงตารางการทดสอบ โคลโมโกรอฟ-สเมียนอฟ ของอายุการใช้งาน ในกลุ่มที่ 2 ของผู้ผลิต ก	42
4.3 ข แสดงตารางการทดสอบ โคลโมโกรอฟ-สเมียนอฟ ของอายุการใช้งาน ในกลุ่มที่ 2 ของผู้ผลิต ข	42
4.4 ก แสดงการกระจายของอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์ของกลุ่มที่ 1	44
4.4 ข แสดงการกระจายของอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์ของกลุ่มที่ 2	44
4.5 ก พิสูจน์ว่าการกระจายของเวลบบัลล์ของกลุ่มที่ 1	49
4.5 ข พิสูจน์ว่าการกระจายของเวลบบัลล์ของกลุ่มที่ 2	49
4.6 ก แสดงค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณอัตราการเกิดความผิดปกติ $H(t)$ ของกลุ่มที่ 1	51
4.6 ข แสดงค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณอัตราการเกิดความผิดปกติ $H(t)$ ของกลุ่มที่ 2	51
4.7 ก F_r และ $F_{r,av}$ ของกลุ่มที่ 1 สำหรับผู้ผลิต ก และ ข	51
4.7 ข F_r และ $F_{r,av}$ ของกลุ่มที่ 2 สำหรับผู้ผลิต ก และ ข	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

หน้าที่เบื้องต้นของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution system) คือการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับลูกค้าอย่างคุ้มค่าที่สุดที่สามารถทำได้ และมีระดับความน่าเชื่อถือพร้อมกับคุณภาพที่ยอมรับได้ ซึ่งความน่าเชื่อถือของระบบขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำงานร่วมกันด้วย สภาพของอุปกรณ์ต่างๆ จะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของระบบด้วย

ตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์มีบทบาทสำคัญในการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากการนำอุปกรณ์ชนิดนั้นมาใช้จำนวนมาก และนับว่าเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องวิเคราะห์ รูปแบบความบกพร่อง (failure mode), ระดับความน่าเชื่อถือ (reliability level), สาเหตุของความบกพร่อง (failure causes) และกลไกการเกิดความบกพร่อง (failure mechanism) ไม่เพียงแต่พิจารณาในแง่ของผู้ใช้งานแต่ยังมีการพิจารณาในแง่ของผู้ผลิตด้วย แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขอบเขตเพียงแค่วิจัยเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของคาปาซิเตอร์ที่ผลิตจากผู้ผลิตที่แตกต่างกัน 2 ราย โดยการพิจารณาจากอัตราการเกิดความผิดปกติเฉลี่ย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาสำคัญจำนวน 4 บท คือ บทที่ 2, 3, 4 และ 5 โดยที่แต่ละบทมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการชดเชยค่ารีแอกทีฟพาวเวอร์ การแก้ไขค่าตัวประกอบกำลัง การต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมและแบบขนาน

บทที่ 3 กล่าวถึงการเก็บรวบรวมข้อมูลความบกพร่องของคาปาซิเตอร์ที่นำมาศึกษาในช่วงเวลา 5 ปี ระหว่างปี 2536 ถึง 2540

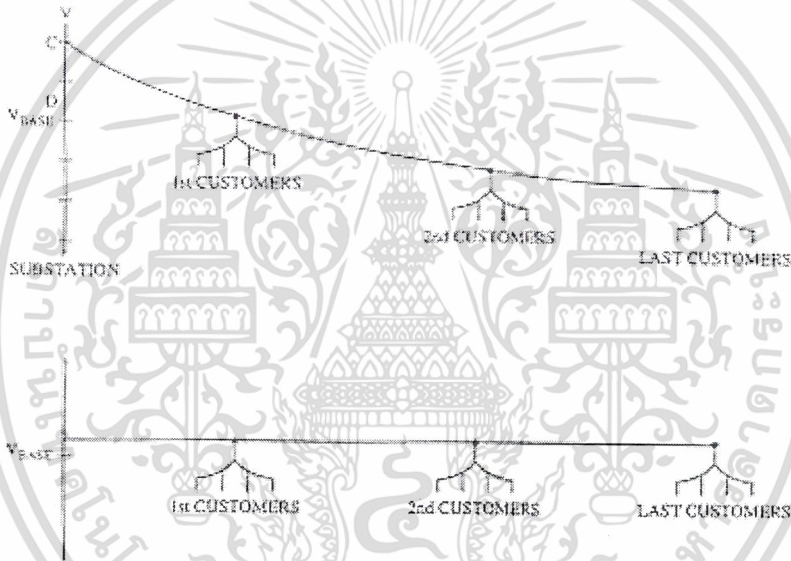
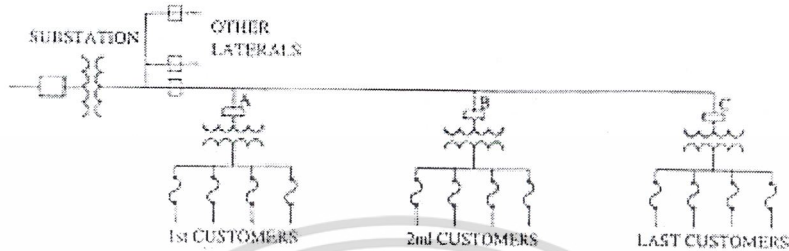
บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติซึ่งนำเอาการกระจายของเวลาล้มมาใช้เป็นตัวแทนของอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์ การวิเคราะห์เชิงสถิติที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ในเรื่องอัตราการเกิดความผิดปกติ (failure rate) และอัตราการเกิดความผิดปกติเฉลี่ย (average failure rate)

บทที่ 5 สรุปผลที่ได้จากการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีการกล่าวถึงปัญหาที่พบในการศึกษาและข้อเสนอแนะในตอนท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การชดเชยค่ารีแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.1 แสดง แรงดันไฟฟ้าตกตามช่วงสายส่งกำลัง รูปบนแสดงวงจรกระจายกำลังไฟฟ้า รูปกลางแสดงแรงดันไฟฟ้าตกตามช่วงสายส่งในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้ามาก รูปล่างแสดงแรงดันไฟฟ้าตกตามช่วงสายส่งในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า

ลูกค้าของการไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ของสายส่งจะได้รับแรงดันไฟฟ้าต่างกัน โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงจะถูกทำให้มีค่าที่ Nominal voltage ส่วนที่ตอนปลายสายส่ง ลูกค้าจะได้รับแรงดันที่ต่ำกว่าปกติ ทั้งที่ต้องรับภาระทางไฟฟ้าในปริมาณมาก แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายส่ง (Receiving-end) มีค่าที่ nominal voltage (ในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้ามาก) เป็นเหตุให้ลูกค้าที่อยู่ใกล้

สถานีไฟฟ้าได้รับแรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินไป และแรงดันไฟฟ้าเกินจะเกิดขึ้นกับลูกค้าทุกรายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าสถานะที่มีภาระทางไฟฟ้าในปริมาณน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับลูกค้าทุกราย โดยไม่คำนึงถึงภาระทางไฟฟ้า

เนื่องจากภาระทางไฟฟ้าส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในลักษณะมุมตาม (Lagging) รีแอกแตนซ์ของสายส่งกำลังมีค่ามากกว่าความต้านทานมาก ดังนั้นการสวิตช์ shunt capacitor ครอบสายส่งจะช่วยให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น โดยการลดค่า inductive VAR อย่างไรก็ตามหากมีการสวิตช์ shunt capacitor เข้าไปมากจนเกินไปจะทำให้กระแสมีมุมนำ(leading) ซึ่งมันจะทำให้ค่า VAR เพิ่มสูงขึ้นมากขึ้น และค่า inductive VAR เป็นต้นเหตุของการเกิดแรงดันตกคร่อมในสายส่ง (voltage drop) และค่านี้จะเป็นค่าเฟลคเตอร์ที่สำคัญมากที่สุดที่จะยินยอมให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุด (Maximum) ไหลผ่านระบบสายส่งนั้นๆไปได้ เพื่อความเข้าใจผลของค่าอิมพีแดนซ์ต่อการส่งผ่านค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากต้นสายส่ง (sending-end) ไปยังปลายสายส่ง (receiving-end) ได้เป็นอย่างดีโดยพิจารณาสมการที่ 2.1

$$P_{R,max} = \left\{ \frac{|V_s| \times |V_R|}{|R|} - \frac{|A| \times |V_R|^2}{|B|} \right\} \times \cos(\beta - \alpha) \quad (2.1)$$

จากสมการที่ (2.1) จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถส่งผ่านระบบสายส่งไฟฟ้านั้นๆไปได้จะขึ้นอยู่กับส่วนกลับของค่าคงที่วงจร (B) ซึ่งค่า B นี้จะเท่ากับค่า Z ถ้าหากวงจรสมมูลย์ของสายส่งนั้นเป็นแบบ Nominal π และในวงจรสมมูลย์แบบ π จะมีค่าเท่ากับ $Z \cdot (\sinh \gamma_1) / \gamma_1$ และเพราะสาเหตุที่ค่าคงที่ของวงจรตัวอื่นๆ นั่นคือ A, B และ C เป็นค่าคงที่ที่แปรผันไปตามค่า Z ถ้าหากว่า Z เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ B เหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่ B

ในการคำนวณคิดหาค่าขนาดของรีแอกแตนซ์ของตัวชดเชยปาซิเตอร์ (X_C) ที่จะมาใช้ในการต่ออนุกรมอยู่ในวงจรนี้ จะขึ้นอยู่กับค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (X_L) ทั้งหมดที่มีอยู่ในสายส่งไฟฟ้า (line) นั้น ๆ ซึ่งเราจะใช้คำว่า Compensation factor ซึ่งจะถูกนิยามไว้ว่า

$$\text{Compensation factor} = \frac{X_C}{X_L} \quad (2.2)$$

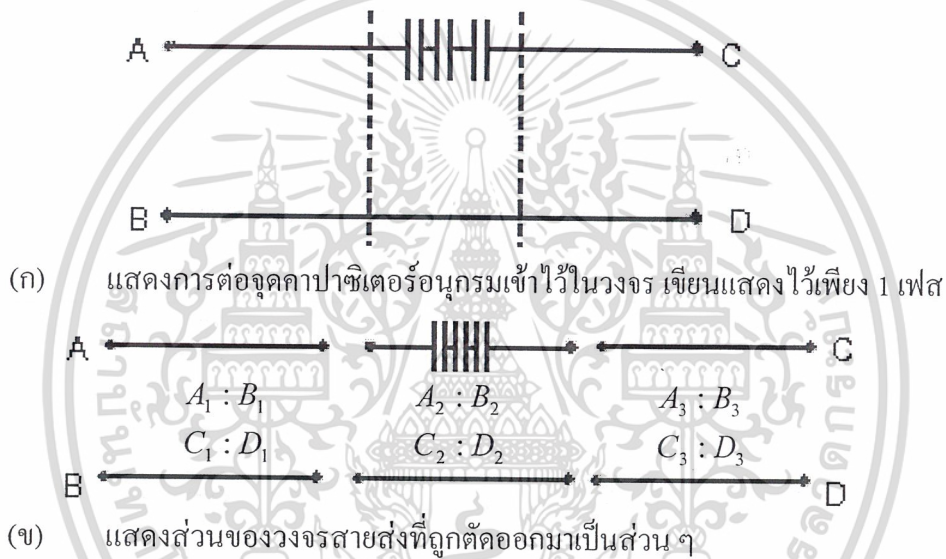
โดยที่ X_C = ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของชดเชยปาซิเตอร์ที่จะมาต่ออนุกรมต่อเฟส

X_L = ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ทั้งหมดของสายส่งไฟฟ้าต่อเฟส

ถ้าหากว่ามีการใช้วงจร Nominal เพื่อใช้ในการแทนสายส่งไฟฟ้าและตัวชดเชยปาซิเตอร์ (Capacitor bank) ลักษณะทางกายภาพของการวางชดเชยปาซิเตอร์ไปตามยาวของสายส่งนี้จะไม่มีความสำคัญ ถ้าหากว่าเราสนใจแต่เพียงเงื่อนไขของการทำงานของต้นสายส่ง (sending-end) และของปลายสายส่ง (receiving-end) เท่านั้น อย่างไรก็ตามถ้าหากว่าเราสนใจที่จะทราบลักษณะหรือเงื่อนไขของการทำงานของสายส่งในแต่ละจุดไปตามระยะทางความยาวของสายส่ง ก็จำเป็นต้องนำเอาลักษณะทางกายภาพของการวางชดเชยปาซิเตอร์ของพิจารณาในการคำนวณด้วย ซึ่งในการ

คำนวณนี้ก็สามารถทำได้ง่ายคาย โดยการคำนวณค่าคงที่ของวงจรคือ ค่า A ,B ,C และ D ในแต่ละส่วนของสายส่ง ในแต่ละด้านของชุดคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่ และในทำนองเดียวกันก็ให้แทนชุดคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่โดยการใช้ค่าคงที่ A ,B ,C และ D เข้าไปใช้ในการคำนวณร่วมด้วย

ตัวอย่างการใช้ชุดคาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมเช่นประเทศสหรัฐอเมริกาหรือรัสเซียที่มีอาณาเขตกว้างขวาง ได้มีการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบอนุกรม (Series compensation) โดยการใช้ Series capacitor เพราะว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นอยู่ห่างไกลผู้ใช้ไฟฟ้า (Load center) เป็นระยะทางที่ไกลมาก ดังนั้นจึงต้องยกระดับแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมอยู่ในสายส่งให้มีค่าแรงเคลื่อนที่สูงขึ้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ Series capacitor ยังถูกใช้เป็นประโยชน์ในการทำให้อำนาจแรงเคลื่อนตกคร่อมในสายส่งที่ขนานกันสองระบบให้มีความสมดุลหรือเท่ากันได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนของวงจรเมื่อสายส่งถูกแยกออกมา

การแก้ค่าตัวประกอบกำลัง

การแก้ค่าตัวประกอบกำลังทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. การต่อค่าคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม (Series capacitor)

Series capacitor คือ คาปาซิเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับสายส่งโดยมีจุดประสงค์เพื่อชดเชยค่า X_L ที่มีอยู่ในสายส่งนั้นๆ

โดยการต่อค่าคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมมีข้อดีดังต่อไปนี้

- (1) ในกรณีทีภาระทางไฟฟ้ามีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ และวงจรสายส่งมีค่า X_L สูง จะทำให้ค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมมีมาก ดังนั้นการลดแรงเคลื่อนตกคร่อมที่มีอยู่ในสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

ค่า X_L ของสายส่ง ดังนั้นสภาวะดังกล่าวการต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม (Series capacitor) จะให้ดีกว่าต่อแบบขนาน (Shunt capacitor) ที่มีค่า kVAR ของ C เดียวกัน

(2) คาปาซิเตอร์ที่ต่อแบบอนุกรม จะสามารถลดแรงดันตกคร่อมภายในสายได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลัง ที่ปลายสายส่ง (Receiving-end power factor) และวงจรอื่นๆ การต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมนี้ จะไม่มีผล I^2R losses แต่จะลดผลของค่า I^2R losses ในสายส่งเท่านั้น

(3) Component ของแรงเคลื่อนตกคร่อมจะถูกกำจัดโดยอัตโนมัติ เนื่องมาจากค่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมในตัวคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม

2. การต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน (Shunt capacitor) คือคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานกับสายส่งซึ่งมักใช้มากในระบบไฟฟ้าย่อย โดยการต่อคาปาซิเตอร์แบบขนานนี้จะจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Reactive power) ให้แก่พวภาระทางไฟฟ้าพวก L หรือ Inductive load ซึ่งทำงานคล้ายกับการทำงานของ Synchronous generator ที่ทำงานในโหมด Over-excited การต่อคาปาซิเตอร์แบบขนานมีข้อดีดังนี้

(1) สามารถมั่นใจได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้าอินคักทีฟ (kVAR) ไปยังภาระทางไฟฟ้าจะต้องมีค่าไม่เกินความสามารถของแหล่งกำเนิดที่จะจ่ายได้

(2) สามารถลดขนาดกำลังสำรอง (Spare MVA Capacity) ของระบบไฟฟ้าที่ต้องมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆ ที่เผื่อสำรองไว้ให้มีขนาดเล็กลงได้

(3) ลดขนาดกระแสที่จะจ่ายให้ภาระทางไฟฟ้าให้มีขนาดลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power losses) ที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งลดลง

(4) ทำให้ Voltage regulation ดีขึ้น

คาปาซิเตอร์กำลัง

เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยจ่าย Capacitive Current (Leading Current) หรือจ่าย Capacitive VAR ให้แก่ระบบ ลักษณะเป็นกระป๋องสี่เหลี่ยมหรือกลมภายในมีแผ่นอลูมิเนียมบาง (Aluminum Foil) 2 แผ่น ที่ถูกคั่นไว้ด้วยแผ่นฉนวนแล้วพันม้วนเอาไว้เป็นชุดๆ โดยต่อเรียงกันหลายๆชุด หรือหลายๆม้วนในตัวถังเดียวกันแล้วใส่ความชื้นออกเพื่อบรรจุของเหลวที่ป็นฉนวน (Liquid Insulation) เข้าไป

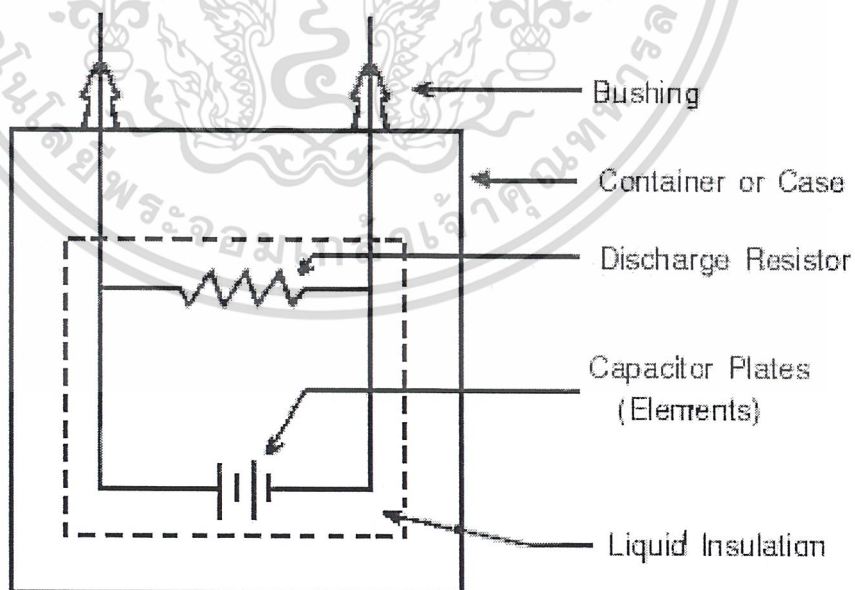
ส่วนประกอบของ คาปาซิเตอร์กำลัง โดยทั่วไปได้แก่

1. Capacitor Elements ประกอบด้วย Aluminum Foil (luminis Film) ซึ่งทำ

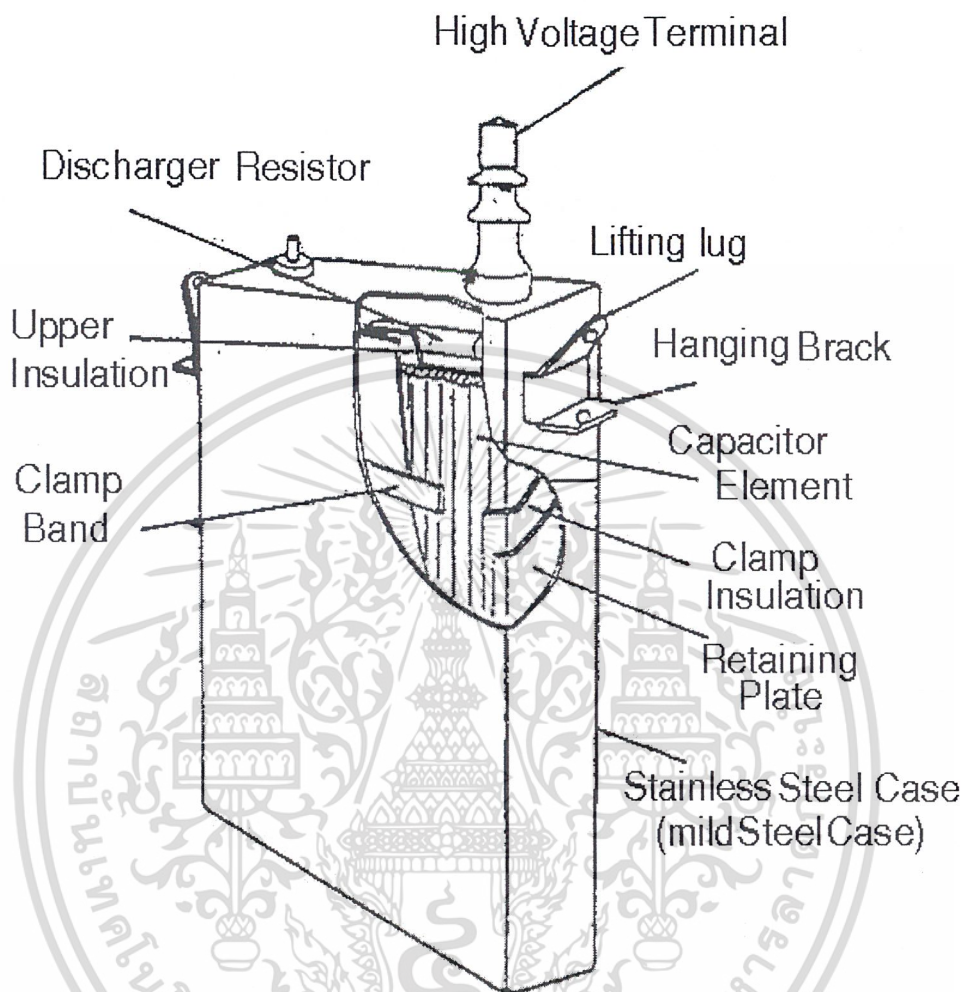
หน้าที่เป็น Electrodes และแผ่นสังเคราะห์ทางเคมีได้แก่ Polypropylene Film, Polyolefin Film หรือแผ่นกระดาษฉนวน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นฉนวนกั้น Electrode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Liquid Insulation เป็นสารจำพวก Hydrocarbon ที่ประกอบด้วย Carbon กับ Hydrogen เช่น น้ำมันฉนวน หรือเป็นสารของเหลวชนิดอื่นที่มีค่า Dielectric Strength สูง ได้แก่ Akarel ซึ่งมี PCB (Polychlorinated Biphenyl) เป็นส่วนประกอบเป็นต้น
3. Discharge Resistor ต่อคร่อมคาปาซิเตอร์ไว้ เพื่อให้มีการคายประจุผ่าน Resistor ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมคาปาซิเตอร์ ลดลงในขณะปลดออกจากระบบ ทั้งนี้เนื่องจากคาปาซิเตอร์มีคุณสมบัติแตกต่างจากอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างอื่น ก็จะมีแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวมันอยู่ชั่วขณะหนึ่งในเวลาที่ปลดออกเพราะมันมีการสะสมประจุไฟฟ้าเอาไว้
4. ตัวถัง (Container หรือ Case) เป็นกล่องที่ทำด้วย Stainless steel หรือ Mild Steel ซึ่งหนักไว้อย่างมีดัดเน้นหนา
5. Entrance Bushing มักเป็นพวก Porcelain ที่เชื่อมติดสนิทกับตัวถังส่วนบน โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้าน Terminal ที่เป็น High Voltage
6. ส่วนประกอบอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ
 รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบเบื้องต้นของ Capacitor Unit อย่างง่ายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างโครงสร้างของ คาปาซิเตอร์กำลัง

คาปาซิเตอร์กำลัง อาจใช้ในรูปของ Series Capacitor หรือ Shunt Capacitor ก็ได้ Series Capacitor ใช้สำหรับชดเชยแรงดันตกตามความยาวของสายส่ง มักใช้กับสายส่งช่วงยาวๆ ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์จะทำให้เกิดการเพิ่มแรงดันขึ้นมา เป็นการชดเชยแรงดันที่เปลี่ยนไปตาม Load โดยอัตโนมัติ และช่วยการเพิ่มพิกัดการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่ง ส่วน Shunt Capacitor มักใช้เพิ่มแรงดันที่ถดถอยจากสายส่ง เช่นติดตั้งไว้ที่สถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อปรับปรุงค่า Power Factor และเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ณ จุดสายจ่ายให้สูงขึ้นซึ่งเป็นการติดตั้งแบบ Group Correction หรืออาจติดตั้งในระบบจำหน่ายตามรายทางที่มีการจ่ายไฟให้แก่ Load ซึ่งเรียกว่าเป็นการติดตั้งแบบ Localized Correction ในระบบของ กฟผ. มีการใช้ คาปาซิเตอร์กำลัง เฉพาะที่เป็นแบบ Shunt Capacitor ทั้งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้าน Low Side และ High Side ของหม้อแปลง ตามสถานีไฟฟ้าย่อยบางแห่งซึ่งเป็นการติดตั้งแบบ Group Correction โดยต่อกันเป็น Capacitor Bank

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่าง Technical Data (Name Plate) ของตัว Capacitor

TOSHIBA CAPACITOR (NON-PCB)
 150 kVAR 50Hz 13,280 V 11.3 A 1 PH BIL-125 kV
 TYPE (FORM)-BRR (A 15 JIRG) 2.83 μF OIL QT-13.5 L
 TOTAL WT-46 KG SERAIL NUMBER 79511658 MFD IN 1980
 WITH INTERNAL DISCHARGE RESISTOR

Mc GRAW-EDISON CAPACITOR

WITH INTERNAL DISCHARGE RISISTOR NON-FLAMMABLE
 LOW TEMPERATURE ELEMEX PART NUMBER CUP 75017 B 001
 SERIAL NUMBER 76 C16110 13280 V 150 kVAR
 50 Hz 125 kV BIL 1PH FORM-TYPE S

NOKIA CAPACITOR
 TYPE MSLR NO 8407372 13,280 V 2.73 μF (+20°C)
 150 kVAR Ri 14,300 k Ω -40/+50⁰c 11.3 A
 IPB 50/- kV 50Hz

BICC CAPACITOR
 SER NO X 5592/282 TYPE HU 100 kVAR 13,280 V
 50 Hz 1 PH DISCHARGE RESISTOR

NISSIN OF-CAPACITOR
 TYPE PEU-CK 13.8 kV 1 PH 50Hz
 204 kVAR OIL 14 L 50 KG DATE 1980
 WITH INTERNAL DISCHARGE RESISTOR

จาก Name Plate ค่า kVAR ของคาปาซิเตอร์แต่ละตัวจะสัมพันธ์กับแรงดัน, กระแส และ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ค่าความจุของ คาปาซิเตอร์ ดังนี้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$kVAR = VI = 2\pi f C V^2 (10^{-9})$$

โดย V เป็นแรงดันที่คร่อม คาปาซิเตอร์ (V)

I เป็นกระแสของ คาปาซิเตอร์ (A)

f เป็นความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz)

C เป็นความจุของ คาปาซิเตอร์ (μF)

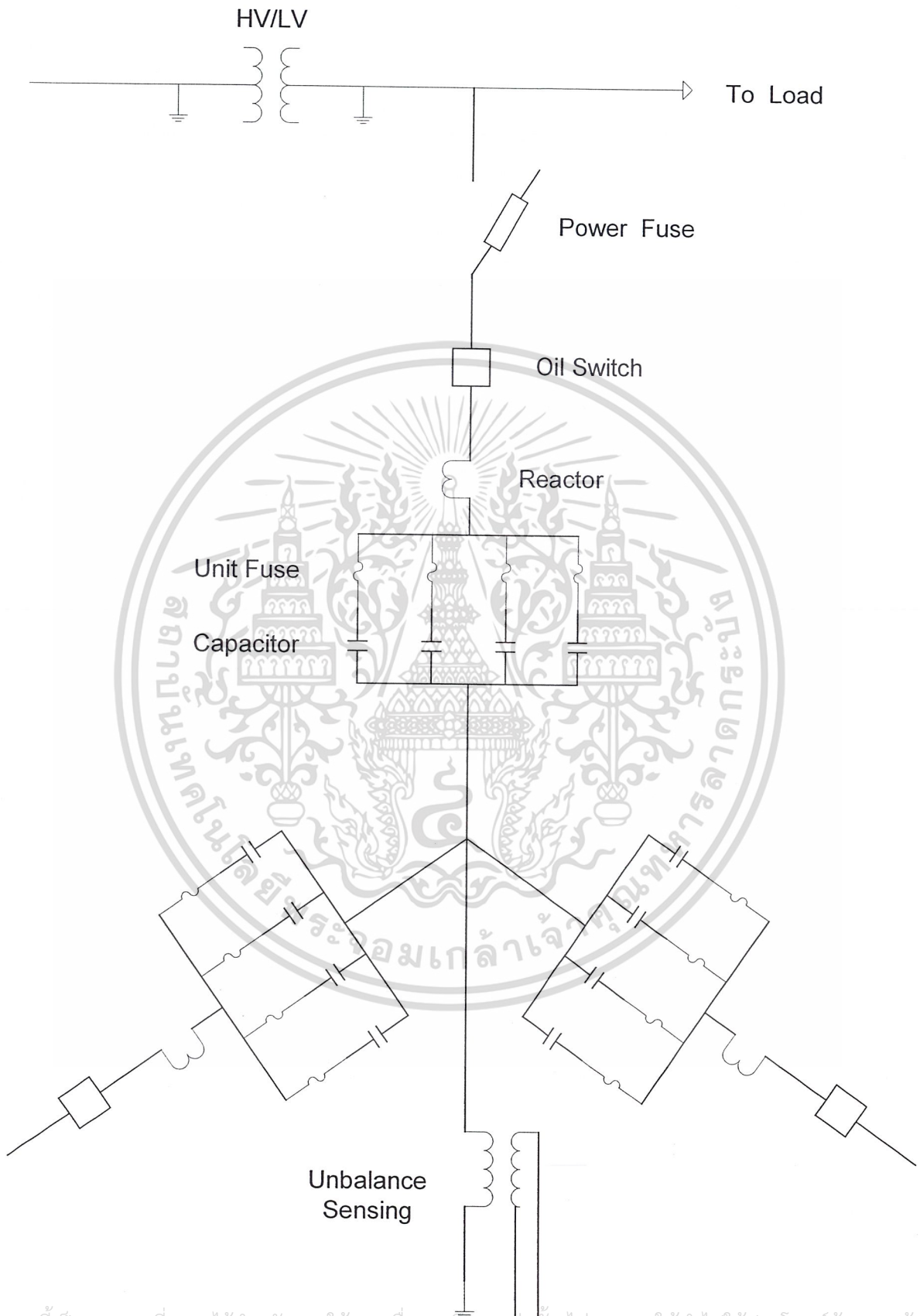
ในการใช้งานตามสถานีไฟฟ้าอ่อนนิยมใช้ คาปาซิเตอร์ ชนิด Single Phase หลายๆตัวต่อกันเป็นกลุ่ม โดยอาจต่อขนานกันแล้วนำมาต่ออนุกรมกันและจัดเรียงกันเป็น Bank แบบ Wye หรือ Delta ก็ได้ ในแต่ละ Bank มีหลักการพิจารณาด้าน Rating ดังนี้

1. การนำคาปาซิเตอร์แต่ละตัวมาต่อกันเป็น Bank จะทำให้ Rating Capacity เพิ่มขึ้นเป็น n เท่า ของ Rated kVAR ของแต่ละตัว โดย n เป็นจำนวน คาปาซิเตอร์ ทั้งหมดที่นำมาต่อ
2. การนำแต่ละกลุ่มที่ต่อขนานกันมาต่ออนุกรมกันช่วยทำให้ คาปาซิเตอร์ ทนแรงดันไฟฟ้าของ Nominal Voltage ได้ในกรณีที่มี Rated Voltage ของ คาปาซิเตอร์ต่ำกว่า Nominal Voltage

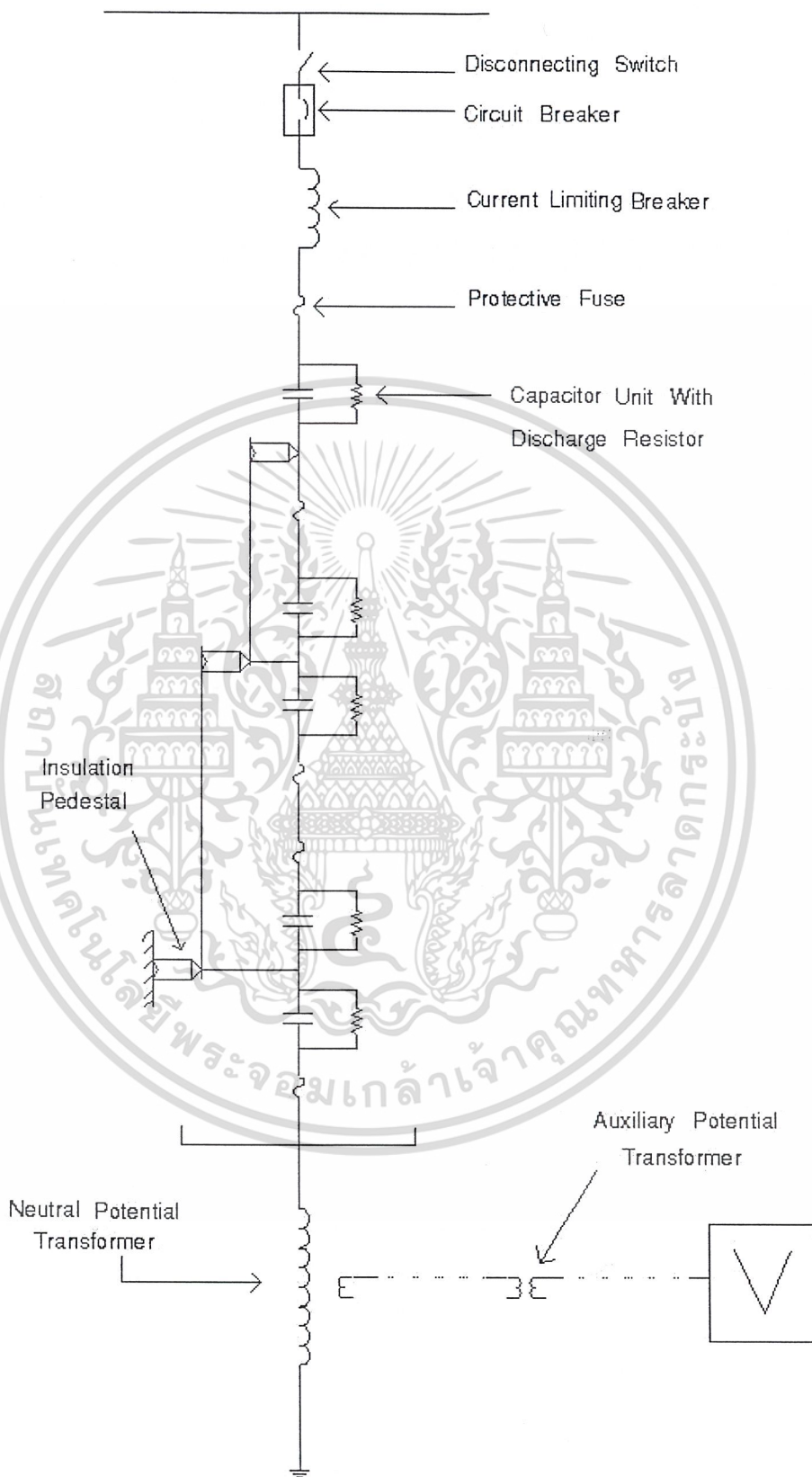
Capacitor Bank ที่ใช้งานจริงจะมีอุปกรณ์อื่นๆ ประกอบในการทำงานด้วย ซึ่งได้แก่

1. Current Limiting Reactor ใช้จำกัดกระแสที่เป็น Inrush Current ในขณะที่มีการ Switching ของชุด คาปาซิเตอร์
2. Unit Fuse ใช้ป้องกัน Shunt Circuit หรือความผิดปกติภายในตัว คาปาซิเตอร์
3. Power Fuse ใช้ป้องกัน Short Circuit ที่เกิดภายในกลุ่มหรือภายใน Bank
4. Oil Switch หรือ Circuit Breaker ใช้ป้องกันการเกิด Over Current, Short Circuit Current, Unbalance และ Over Voltage ของ Capacitor Bank โดยมี Relay เป็นตัวสั่ง Trip นอกจากนี้ยังใช้สำหรับสับหรือปลด เพื่อนำคาปาซิเตอร์เข้าหรือออกจากการใช้งานด้วย
5. Potential Transformer ใช้วัดแรงดันซึ่งโดยทั่วไปเป็นแรงดันที่จุด Neutral เพื่อที่จะ Detect การเกิด Unbalance Voltage ทำให้ Relay รับรู้และสั่ง Trip Oil Switch หรือ Circuit Breaker ได้
6. อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการต่อ Capacitor Bank ในระบบ 22 kV



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 2.6 ตัวอย่างการต่อ Capacitor Bank ในระบบ 115 kV ครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากคาปาซิเตอร์กำลังของผู้ผลิตบางบริษัทรวมทั้งหม้อแปลงบางชนิดบางยี่ห้อมีการบรรจุสารที่เป็น PCB (Polychlorinated Biphenyl) อยู่ด้วยซึ่งอาจเป็นพิษหรือก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ ดังที่ได้มีการกล่าวขวัญกันอยู่แม้กระทั่งในปัจจุบันนี้ ฉะนั้นในหัวข้อนี้จึงขอเพิ่มเติมเรื่องราวเกี่ยวกับ PCB เอาไว้ในที่นี้ด้วยพอสังเขป เพื่อให้ท่านได้ทราบถึงเรื่องต่างๆที่เกี่ยวข้องกับ PCB โดยย่อ

PCB (Polychlorinated Biphenyl) มีโมเลกุลที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลุ่ม Phenyl 2 ชุดรวมกันโดยมีอะตอมของคลอรีนเข้าแทนที่อะตอมของไฮโดรเจน จำนวนตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป Chlorine-Substituted Biphenyl ดังที่ได้นี้สามารถสร้างขึ้นมาจากการให้อะตอมของ Chlorine เข้าแทนที่อะตอมของไฮโดรเจน 209 แบบ แต่ที่นิยมใช้ในฉนวนของหม้อแปลง หรือคาปาซิเตอร์นั้นมีอยู่เพียงไม่กี่แบบ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของ PCB

PCB เป็นสารที่มีเสถียรภาพสูง ไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยา Oxidation กับ กรด, ด่าง หรือสารเคมีอื่นๆ ได้โดยง่าย โดยทั่วไป PCB จะประกอบอยู่ใน Askarel ซึ่งเป็นของเหลวฉนวนอย่างหนึ่งของหม้อแปลงหรือ คาปาซิเตอร์ โดย Askarel จะประกอบด้วย Chlorinated Biphenyl และ Chlorinated Benzene สาร PCB ที่ใช้ผสมเข้าไปจะทำให้ได้คุณสมบัติทางด้านความหนืด (Viscosity) ตามที่ต้องการ มีการถ่ายเทความร้อนดีและมีความต้านทานไฟ (Fire Resistance) สูง

Askarel (ซึ่งมี PCB) ใช้เป็นของเหลวฉนวนทางไฟฟ้า ในประเทศอเมริกาจะมีชื่อเรียกทางการค้าอยู่หลายชื่อ เช่น Aroclor ของบริษัท Monsanto, Asbestol ของบริษัท American Corporation, Elemex ของบริษัท Mc-Graw Edison, Inerteen ของบริษัท Westinghouse Electric และ Pyranol ของบริษัท General Electric เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แต่ก็มีขีดความสามารถในการค้าและการใช้งาน เพราะมันมีค่า Impulse Strength หรือ Lightning Strike Capability ก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบ

กับน้ำมัน และมักใช้กับแรงดันไม่เกิน 69 kV ซึ่งถ้าใช้กับหม้อแปลง ก็จะใช้กับหม้อแปลงขนาดไม่เกิน 15 MVA, 69 kV แต่ส่วนมาก Askarel จะใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 750-7500 kVA ในทำนองเดียวกันเมื่อใช้กับคาปาซิเตอร์กำลังจะใช้ในรูปของคาปาซิเตอร์หลายๆ Unit ต่อกันเป็น Bank จึงมักไม่มีปัญหาของขีดจำกัดทางด้านขนาด (Rated kVAR) ปกติใน Askarel จะไม่ให้มีน้ำมันปนอยู่เลย เพราะถ้ามีน้ำมันปนอยู่ด้วยแม้แต่น้อยแล้วจะทำให้คุณสมบัติในการต้านทานไฟลตต่ำลง

PCB เป็นสารที่มีพิษ (Toxic) ประเภท Bioaccumulative ซึ่งสามารถสะสมอยู่ในร่างกาย และก่อให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้อย่างช้าๆ จึงนับว่าเป็นสารมลพิษอย่างหนึ่ง ถ้าหากต้องทำงานโดยตรงกับสารชนิดนี้แล้ว ต้องระมัดระวังอันตรายจากสาร PCB โดยหลีกเลี่ยงข้อเหล่านี้

1. หลีกเลี่ยงการสัมผัสโดยตรงต่อผิวหนัง
2. หลีกเลี่ยงไม่ให้สารเข้าตาโดยใช้แว่นตาป้องกัน
3. หลีกเลี่ยงการหายใจเอาไอของ PCB เข้าไปในร่างกาย
4. หลีกเลี่ยงไอควันที่เกิดจากการ Arc ของหม้อแปลงหรือของ Capacitor ชนิดที่มีสาร PCB

ตามปกติแล้วบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงหรือ คาปาซิเตอร์ ชนิดที่มีสาร PCB บรรลุอยู่จะต้องปฏิบัติตามกฎขององค์กรที่ควบคุมสารมลพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่นในอเมริกาจะมีกฎ TSCA (Toxic Substances Control Act) ประกาศไว้เป็นกฎหมายบังคับผู้ผลิตเพื่อให้ปฏิบัติตาม โดยมี Public law 94-469 Oct. 11, 1976 ข้อ e ซึ่งว่าด้วยสาร PCB โดยได้ระบุไว้ว่าให้บริษัทผู้ผลิตแสดงคำเตือน หรือบ่งบอกถึงวิธีการและการจัดการต่างๆ เกี่ยวกับสาร PCB เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมต่อไป

การจัดเรียง คาปาซิเตอร์ เป็น BANK

คาปาซิเตอร์ ที่ใช้เป็น Unit คาปาซิเตอร์ มีขนาดตั้งแต่ 25, 50, 10, 150 kVAR. และ Rated Voltage ต่างๆกันเช่น 3.5, 11.5, 12, $23/\sqrt{3}$, 13.5 และ $39.5\sqrt{3}$ kV ในการใช้งานจะนำแต่ละตัวมาต่อกันเป็นกรุป โดยนำหลายๆหน่วยมาต่อขนานกัน แล้วนำมาต่ออนุกรมกัน จัดเรียงเป็น BANK โดยอาจต่อเป็น Wye หรือ Delta ก็ได้มีหลักการดังนี้

1. นำแต่ละตัวมาขนานกันเป็นกรุป จะทำให้ Rating คาปาซิเตอร์ มากขึ้นเท่ากับ n เท่าของค่า Rated kVAR ของแต่ละตัว โดย n คือจำนวนตัวที่นำมาต่อ
2. การนำแต่ละกรุปมาต่อกันแบบอนุกรม ช่วยให้ทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้น โดยหลังจากต่อแล้ว Nominal Voltage บนแต่ละกรุปต้องไม่เกินค่า Rating Voltage ของแต่ละตัวในกรุปนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผูกมัดให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

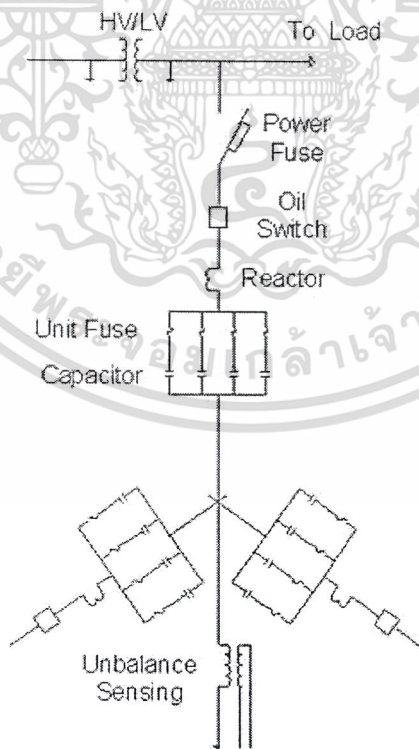
การต่อ Capacitor Banks อาจต่อแบบ Grounded-Wye, Ungrounded-Wye หรือ Delta แต่การต่อแบบ Ungrounded-Wye จะ Protect ได้ดีกว่า โดยแต่ละตัวจะ Protect ด้วย Fuse และนำแต่ละตัวต่อขนานกันเป็นกรุป กระแสที่ผ่าน Fuse แต่ละตัวตอน short circuit จะถูกจำกัดโดยคาปาซิเตอร์ ในอีก 2 เฟสที่เหลือ ไม่ให้เกิน 3 เท่าของกระแส Phase ขณะปกติ แต่ถ้าต่อแบบ Grounded-Wye หรือ Delta กระแส Fault จะสูงมาก ดังนั้นการต่อแบบ Ungrounded-Wye จึงสามารถใช้ Power Fuse ขนาดเล็กลง

ในการ Protection แบ่งลักษณะการ Protection ไว้ดังนี้คือ

-กรณี Unbalance ใน Bank ใดๆ จะใช้ Oil Switch หรือ Circuit Switcher เป็นตัว Protect Bank นั้นๆ ซึ่ง Oil Switch หรือ Circuit Switcher นี้ใช้สำหรับสับและปลดเพื่อนำคาปาซิเตอร์เข้าและออกจากการใช้งานด้วย

-ส่วนกรณี Short Circuit Fault นั้นสำหรับ Bank เล็กๆ จะใช้ Power Fuse เป็นตัว Protect ส่วน Bank ใหญ่จะใช้ Circuit Breaker เป็นตัว Protect โดยมี Relay เป็นตัวไปสั่ง Trip

ในทางปฏิบัติ Shunt Capacitors ขนาดไม่ใหญ่นักราวๆ 10 kVAR. จะติดตั้งไว้ทางด้าน 11, 22, 33 หรือ Tertiary Winding ของ Power Transformer แต่ถ้ามีขนาดใหญ่กว่า 10 kVAR. จะติดตั้งทางด้าน 69 หรือ 115 kV

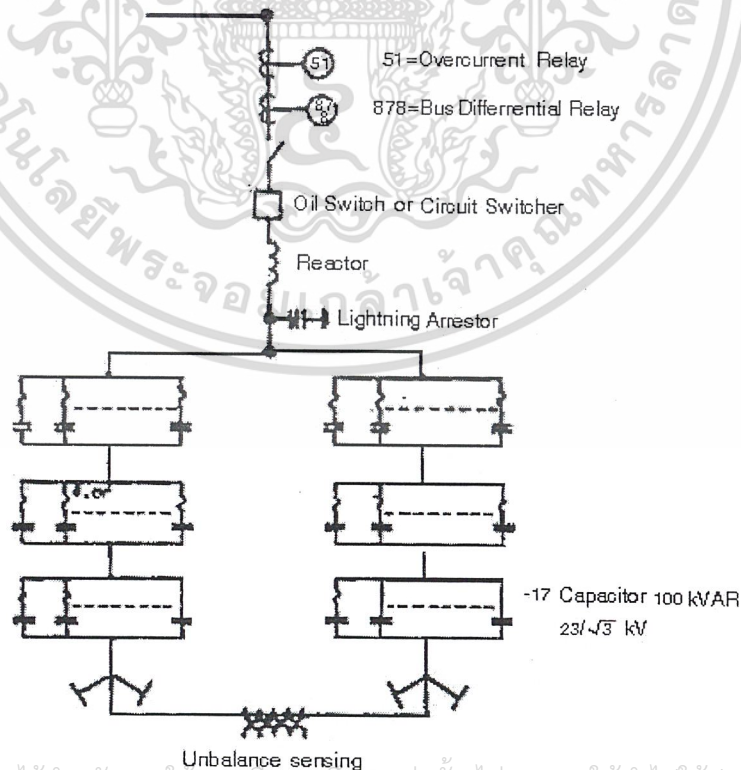


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.8 การต่อ Capacitor Bank แบบ Ungrounded-Wye
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการต่อ Capacitor Bank 22 kV ขนาด 3150 kVAR เข้าในระบบ เช่นที่ สถานีไฟฟ้า อุบล, สถานีไฟฟ้าโยธธ, มหาสารคาม ฯลฯ

คาปาซิเตอร์แต่ละ Unit มีค่า Rated Capacitor 150 kVAR, 13280V, 50Hz นำ 7 ตัวมาขนานกันเป็นกรุป แล้วจัดเรียงเป็น Bank แบบ Unground-Wye รวม 21 ตัวต่อ Bank มีขีดความสามารถ Bank ละ $150 \times 7 \times 3 = 3150$ kVAR แรงดัน $\sqrt{3} \times 13280 = 23$ kV, 50Hz สามเฟสในแต่ละเฟสจะมี Reactor ไว้สำหรับจำกัดกระแสขณะ Switching และมี Oil Switch ไว้เปิดปิดวงจรในการต่อแบบ Unground-Wye มี Potential Transformer ต่อระหว่าง Neutral กับ Ground เพื่อเป็นตัว Detect Unbalance ที่เกิดขึ้นกับ Bank อาจเนื่องจากตัวใดตัวหนึ่งใน Bank เสียหายทำให้เกิด Unbalance ซึ่งจะถูก Detect แล้ว Alarm เตือนให้ Operator รู้หรือ Trip ทิ้ง Bank ออกจากระบบการ Detect Unbalance ถ้าเป็นแบบ Double-Unground-Wye จะใช้ Current Transformer เป็นตัว Detect ก็ได้ ดังตัวอย่าง คาปาซิเตอร์กำลัง ที่สถานีไฟฟ้าย่อยบางพลี และพระนครศรีไ้ ซึ่งมี Rated Capacity 30.6 MVAR, 69 kV, 3 เฟส, 50 Hz.

Each Bank Consisting of the following 306 capacitor units, single phase, single bushing, 100 kVAR rated capacity, 13.5 kV minimum rated terminal voltage, with built-in discharge resistor and individual protection สำหรับป้องกันการต่อแต่ละตัวประกอบเป็น Bank ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 การต่อ Bank แบบ Double-Ungrounded-Wye

เนื่องจากขีดความสามารถของ Bank สูง ดังนั้นจึงต่อแบบ Double-Wye และ Unground 2 Bank แล้วใช้ Current Transformer ต่อระหว่าง Neutral ของทั้งสอง Bank เป็นตัว Detect Unbalance ที่จะเกิดขึ้น การจัดให้ คาปาซิเตอร์ ซึ่งแต่ละ Unit มี Rated Capacitor 100 kVAR, 13.5 kV, ให้ทนต่อแรงดันไฟฟ้า $69/\sqrt{3}$ kV (Line to Ground) และมีขีดความสามารถ 30.6 MVAR ทำได้โดย

- นำคาปาซิเตอร์ 17 ตัว มาต่อขนานกันเป็นกรุป จะได้ขีดความสามารถของแต่ละกรุป $17 \times 100 = 1,700$ kVAR
- นำแต่ละกรุปมาต่ออนุกรมกัน กรุปจะทนแรงดันได้ $3 \times 23/\sqrt{3} = 69/\sqrt{3}$ kV ซึ่งเป็น Nominal Voltage Line-to-Ground และแรงดันตกคร่อมบน คาปาซิเตอร์ แต่ละตัวจะเท่ากับ $23/\sqrt{3} = 13.27$ kV ตาม Specification ที่กำหนดให้ทั่วไปคาปาซิเตอร์ มีค่า Rated Voltage 13.5 kV ซึ่งสูงกว่าค่า Nominal Voltage เล็กน้อยเพื่อความปลอดภัยจาก Over Voltage ถ้าตัวใดตัวใดหนึ่งขาดออกไป แรงดันบนตัวที่ยังต่ออยู่จะไม่เกิน 110 % ของแรงดันที่ Rated ของแต่ละตัวเมื่อต่อเสร็จแล้ว ในแต่ละเฟส จะมี คาปาซิเตอร์ 3 กรุป ต่ออนุกรมกัน ซึ่งในแต่ละกรุปจะมีอยู่ 17 ตัว

ดังนั้นในแต่ละเฟสจะมี 17×3	= 51	ตัว
ทั้ง 3 Phase (1 Bank) จะเป็น 51×3	= 153	ตัว
รวม 2 Bank เป็น Double-Wye 153×2	= 306	ตัว
เพราะว่าในแต่ละกรุปมีขีดความสามารถ	= 1,700	kVAR
แต่ละ Phase มี 3 กรุป $3 \times 1,700$	= 5,100	kVAR
ใน 3 Phase $3 \times 5,100$	= 15,300	kVAR
Double-Wye $2 \times 15,300$	= 30,600	kVAR
	= 30.6	MVAR
ค่า Rated voltage ของแต่ละตัว	= 13.5	kV
ค่าที่ใช้งานในระบบ $\frac{69/\sqrt{3}}{3}$	= $23/\sqrt{3}$	kV
	= 13.3	kV

$$\text{Effective ของคาปาซิเตอร์ในระบบ} \left(\frac{23/\sqrt{3}}{13.5} \right)^2 \times 30.6 = 29.6 \text{ MVAR}$$

โดยปกติในการคำนวณ Load ต่างๆ ในระบบที่มีคาปาซิเตอร์อยู่ด้วย เช่นของหม้อแปลงจะเอาค่า Effective ซึ่งเป็นค่าที่แรงดันที่ใช้งานไปในการคำนวณ มิใช่ค่า Rated ของคาปาซิเตอร์

แต่ในทางปฏิบัติจะไม่สะดวกในการอ่านค่าแรงดันในขณะที่มี Load นั้นๆ มาใช้คำนวณค่า

Effective (VAR) ได้จึงอนุโลมเอาที่ Rated ของคาปาซิเตอร์ซึ่งผิดพลาดไปเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

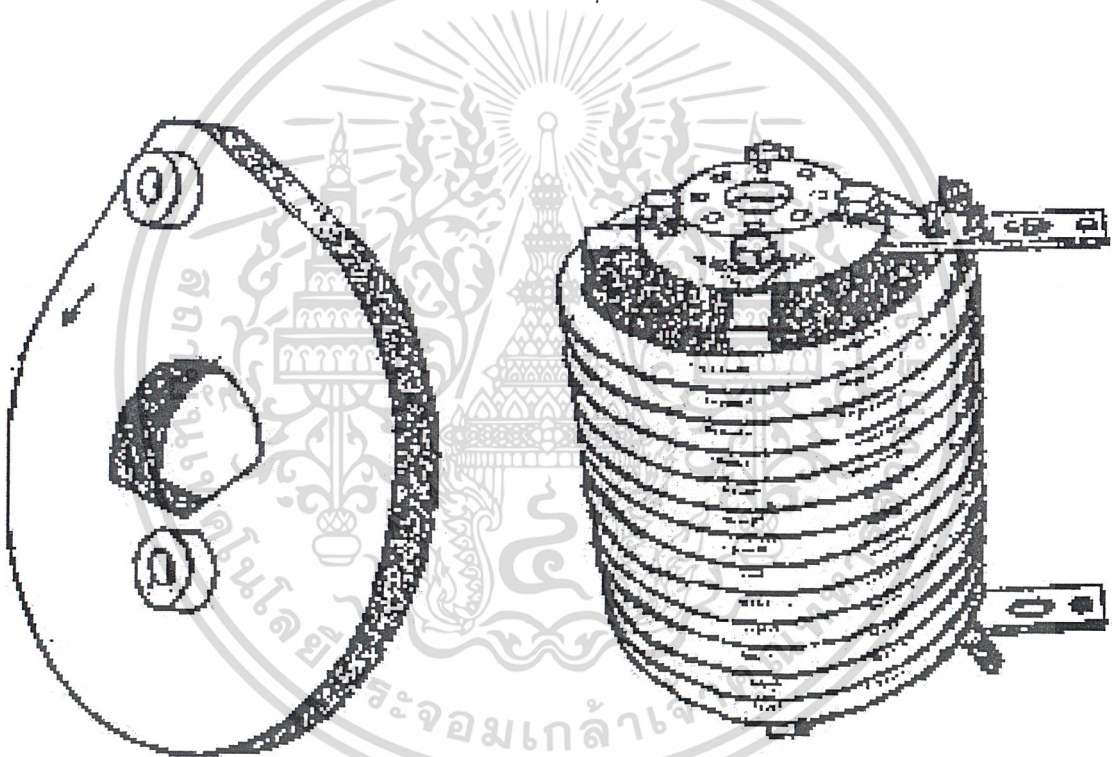
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Inrush Current

เมื่อ Capacitor Bank ถูก Energized จะมีกระแสไหลผ่านสูง กระแสนี้เรียกว่า Inrush Current ขนาดของ Inrush Current นี้ ขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน ขณะที่ Energized นั้น และค่า Impedance ของระบบด้วย ถ้ามีหลาย Bank บน Bus เดียวกัน Bank ที่ถูก Energized ไปแล้วจะ Discharge ไปยัง Bank ที่กำลัง Energized ทำให้ Inrush Current มีค่าสูงขึ้นอีก

Inrush Current มีความถี่สูงหลาย kHz แต่ใช้ระยะเวลาเพียง $1/2$ Cycle เท่านั้น

ในการลด Transient Inrush Current ขณะ Switching โดยใช้ Inrush Current Limiting Reactors ต่ออนุกรมกับ Oil Switch จะมีแบบต่างๆซึ่งมีขีดจำกัดของกระแสต่างกัน ซึ่งสามารถเพิ่มค่าขีดจำกัดของกระแสขึ้นได้โดยนำมาต่อขนานกัน แต่จะทำให้ค่า Inductance ลดลง



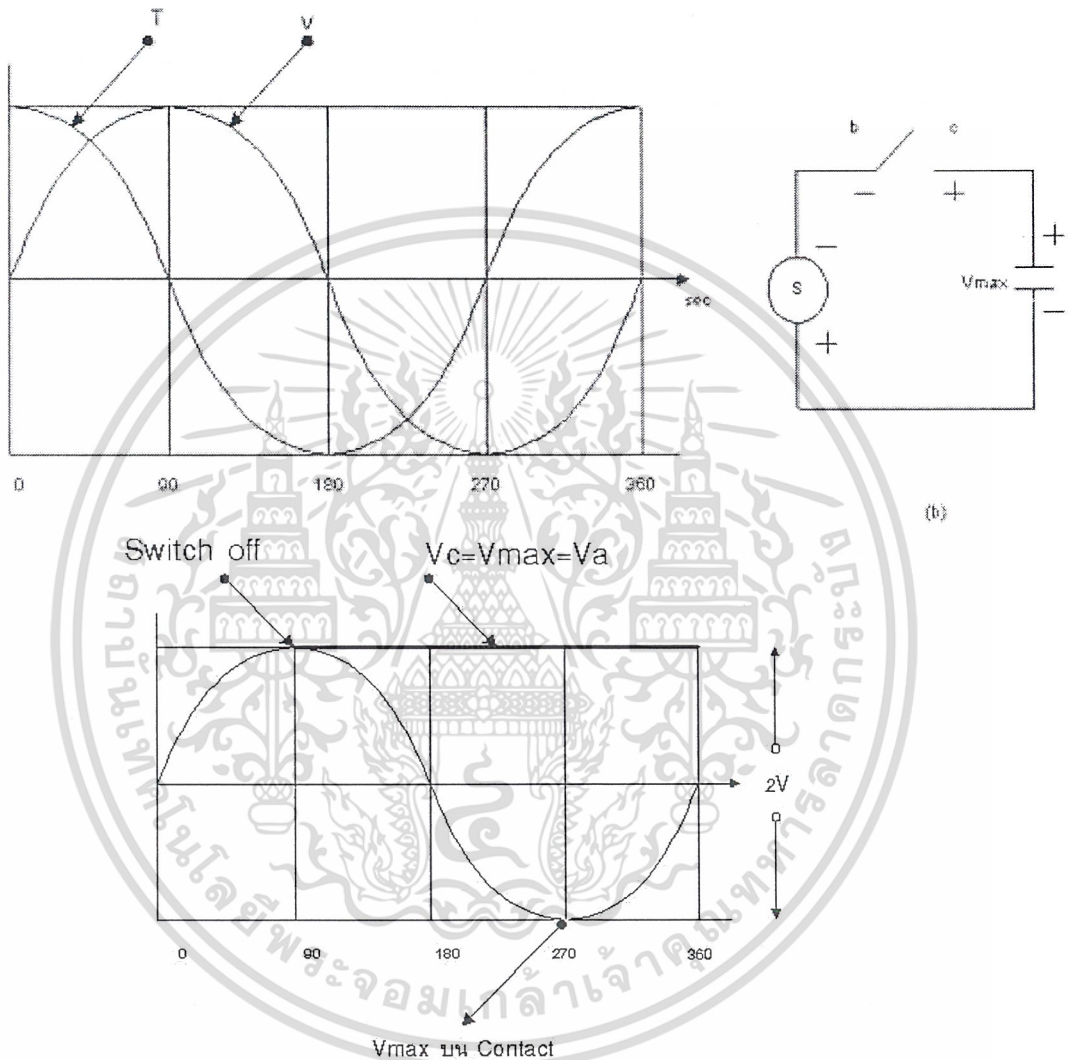
Inrush Current-Limiting Reactor

รูปที่ 2.10 Inrush – Limiting Reactor

สถานะการ Reignition หรือ Restrike

เนื่องจากกระแสและแรงดันของคาปาซิเตอร์จะมีมุมห่างกันอยู่ 90 องศาขณะที่ทำการปลด Capacitor Bank นั้น ในขณะที่กระแสในระบบเป็น 0 A แต่แรงดันจะถึงค่า Max เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าแรงดันบนคาปาซิเตอร์จะเป็นค่าสูงสุดเท่ากับ V_{Max} หลังจากนั้นอีก $1/2$ Cycle ค่าแรงดันจะถึงค่าสูงสุดในทางตรงกันข้าม ($-V_{Max}$) ทำให้แรงดันคร่อม Contact มีค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันสูงสุดของระบบ ทำให้เกิดการ Restrike ขึ้น อุปกรณ์ตัดตอนจึงต้องสามารถ Recover Insulation Strength ระหว่าง Contact ได้เร็วมาก เพื่อไม่ให้เกิดการ Reignition หรือ Restrike



รูปที่ 2.11 Current and Voltage curves of Switching Time

การกำหนดขนาดของ Current Limiting Reactor

เมื่อสับ Capacitor Bank เข้าระบบ จะมี Transient Charging Current ไหล โดยขนาดและความถี่ของ Charging Current จะขึ้นกับค่า Capacitance และ Inductance ทั้งหมดในวงจรนั้น ตลอดขนาดของแรงดันขณะนั้น ในการคำนวณเราใช้ค่าแรงดันโดยคิดที่ยอดคลื่น

ค่าความต้านทานในวงจรจะเป็นตัวบอกลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของ Transient แต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในตอนแรกของ Transient ค่าความต้านทานจะไม่มีผล จึงไม่น่ามาคิด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isolate Bank

การหาค่ากระแส Inrush Current ในกรณีที่ Isolated bank คือมี bank เดียวสับเข้าระบบ ค่า Line Impedance จะมีส่วนในการ Limit กระแส การสร้างสูตรมาใช้คำนวณจึงนำค่า Short Circuit kVA มาใช้ ซึ่งปกติค่า Short Circuit kVA ณ.สถานีไฟฟ้าย่อยใดๆจะสามารถทราบอยู่แล้วทางด้าน การวิเคราะห์ระบบ และในสูตรเรสมมุติว่าสับเบรกเกอร์ของ C-Bank เข้า ในขณะที่แรงดันอยู่ใน ตำแหน่งขอดคลื่นซึ่งจะทำให้เกิดค่ากระแสสูงสุด



โดยทั่วไปค่า Inrush Current สำหรับ Capacitor Bank โด่ดๆชุดเดียว จะมีค่าประมาณ 5-15 เท่าของกระแสปกติของ Capacitor Bank นั้น และจากมาตรฐานทั่วไป Capacitor Bank จะต้องทน กระแส Max Surge Current ได้ 100 เท่าของค่ากระแสปกติ ดังนั้นความจำเป็นของการใช้ Current Limiting Reactance จึงไม่มี

Parallel Banks

เมื่อต่อ Capacitor Bank หลาย Step ขนานกัน ค่า Inrush Current จะเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะ เป็นการ Discharge จาก Step ที่สับเข้าระบบก่อนแล้ว เข้าสู่ Step ที่เพิ่งสับเข้าไปใหม่ จากการสับ Step แรกเข้าระบบ ค่า Inrush Current จะถูกจำกัดด้วย Inductive Reactance ในระบบจาก Capacitor

Bank กับโรงจักร แต่ในกรณีของการสับ Banks ที่สองเข้าระบบ ค่ากระแส Inrush Current จะถูกจำกัดด้วย Inductive Reactance ระหว่าง Banks และแรงดันในช่วงที่เบรกเกอร์สับเข้าเท่านั้น

ในการสร้างสูตรมาใช้ในการคำนวณ เราสมมุติว่า เบรกเกอร์ของ Step ที่สอง ถูกสับเข้าในช่วงที่แรงดันสูงสุดตรงขยดคลื่น ซึ่งขณะนั้น Step แรกจะ Charge แรงดันไว้เต็มที ซึ่งจะทำให้กระแส Inrush มีค่าสูงที่สุด

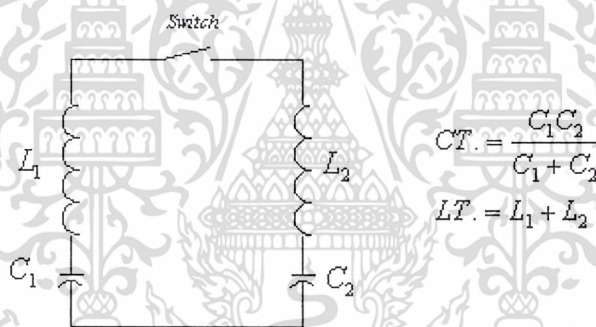
$$\text{สูตรการคำนวณ} \quad I_p = \sqrt{2}E \sqrt{\frac{CT}{LT}}$$

E = ค่าแรงดัน rms. Phase Voltage

CT = ค่า Capacitance รวมของ Bank ที่ Energized แล้วอนุกรมกับ Bank ที่กำลัง Energized เข้าใหม่คิดต่อเฟส (μF)

LT = ค่า Inductance รวมคิดต่อเฟส (μH)

เมื่อ คาปาซิเตอร์ สองชุดขนานกันใน Bus เดียวกัน



$$CT = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$LT = L_1 + L_2$$

รูปที่ 2.13 วงจรแสดงการหาค่า Inrush Current ในกรณี Parallel

โดยทั่วไปค่า Capacitor Bank ที่ขนานกันหลายๆ Step ค่า Inrush Current จะประมาณ 20-250 เท่า ของกระแสปกติของ Capacitor Bank นั้น ค่า Transient จะลดลงอย่างมากใน cycle แรก และจะลดเป็นค่าต่ำๆใน Cycle ถัดไป

ในการกำหนดค่า I_p ที่ยอมได้นั้น บางบริษัทก็ถือเอาค่า 100 เท่า ของกระแสใช้งานปกติของ Capacitor Bank เป็นเกณฑ์ ทั้งนี้เมื่อมองความสำคัญที่ตัวคาปาซิเตอร์แต่บางบริษัทก็ถือเอาค่า Making Current ของอุปกรณ์ตัดตอนเป็นเกณฑ์ โดยถือเอาค่า I_p ต้องอยู่ในวิสัยที่ไกตัดตอนจะทนได้

อย่างไรก็ตามจากตัวอย่างที่แสดงนี้ ตัว Oil Switch สามารถทนค่า I_p ได้เพราะ Rated Making Current ของ Oil Switch มีค่า 12000 Amp.peak

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำ คาปาซิเตอร์กำลัง เข้าใช้งานและการบำรุงดูแลรักษา

ก่อนนำ Capacitor Banks เข้าใช้งาน ครั้งแรกนั้นจะต้องตรวจสอบสภาพทั้งหมด อย่างถี่ถ้วนก่อน ซึ่งดำเนินการตามลำดับดังนี้คือ

1. ตรวจสอบตรงจุดต่อทุกจุดว่าเรียบร้อยดีหรือไม่
2. ทำความสะอาด Insulators, Bus Supports, Fuse และ Capacitor Bushing
3. พิจารณาตัวคาปาซิเตอร์ว่ามีอะไรผิดปกติเสียหายหรือเปล่าทั้ง Bushing และ Tanks เช่น แตก, บิ่น, บวม ฯลฯ
4. ตรวจสอบ Fuse ทุกตัวว่าอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องหรือไม่
5. ตรวจสอบการทำงานของกลไกตัดตอนต่างๆและอุปกรณ์ป้องกัน ก่อนนำเข้าใช้งานจริง

เมื่อติดตั้ง Unbalance Protection เสร็จจะต้องปรับและทดสอบอย่าละเอียดโดยทำการปลดคาปาซิเตอร์ออกทีละตัว ใน Phase หรือกรุปหนึ่งกรุปไปทำการ Energize ดู ถ้าหาก Unbalance สั่ง Trip ก็แสดงว่า Protection ทำงาน ได้ถูกต้อง ข้อควรระวังในการปลดคาปาซิเตอร์ออกเพื่อตรวจสอบหรือทดลอง Energize แต่ละครั้ง จะต้องทิ้งช่วงเวลาอย่างน้อย 5-10 นาที เพื่อให้คาปาซิเตอร์ Discharge ก่อน

Neutral Unbalance อาจเป็นผลจาก

1. การเดินสายไม่ถูกต้อง
 2. Fuse ตัวใดตัวหนึ่งขาด
 3. คาปาซิเตอร์เสีย
 4. ตัวคาปาซิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งมีค่า Capacitance เกินขีดกำหนดของการใช้งาน
- ถ้าเกิด Unbalance ขึ้น การเดินสายทั้งหมดถูกต้องแล้ว และ Fuse ไม่เสียลองตรวจสอบ Nameplates ของตัวคาปาซิเตอร์ใน Phase นั้น เพื่อดูว่าค่าแรงดันและ kVAR ถูกต้อง
 - ถ้าคาปาซิเตอร์ทุกตัวมีค่าแรงดันและ kVAR ถูกต้องให้วัดค่า Capacitance ของทุกตัว
 - ถ้าคาปาซิเตอร์ตัวหนึ่งตัวใดใน Bank มีค่า Capacitance สูงกว่ากำหนด 10% คาปาซิเตอร์ตัวนั้นอาจเสียหายได้ ทำการเปลี่ยนคาปาซิเตอร์ตัวนั้นเสีย

ในหนึ่งปีควรมีการตรวจสอบสภาพประจำปีอย่างน้อย 2 ครั้ง โดยเฉพาะ Fuse และทำความสะอาด Insulators ตลอดจนจุดต่อต่างๆ ให้แน่นเข้าถ้าเกิด Fuse ขาดแต่ไม่ทำให้สภาพของตัว Tank บวมผิดปกติ ให้เปลี่ยน Fuse และนำเข้าใช้งานใหม่ ให้เช็คนิวเคลียสและชนิดของ Fuse ว่าถูกต้องกับลักษณะ

งานหรือไม่ ซึ่ง Fuse อาจขาดได้เนื่องจากกรณีต่างๆ เช่น Over Voltage, เกิดกระแส Harmonic สูงเกินไป หรือเกิด Transient Current ขณะ Switching ถ้ามีปัญหาว่าจะเกิด Short Circuit ในตัว คาปาซิเตอร์ หรือไม่อย่าเปลี่ยน Fuse ให้ทดสอบดูว่าคาปาซิเตอร์ตัวนั้นเสียหรือไม่ก่อนเมื่อเปลี่ยน คาปาซิเตอร์ ใหม่จะต้องมีค่า kVAR และแรงดันบน Nameplate เหมือนกับตัวเก่าที่เสียไป การมองด้วยตาเปล่าบางครั้งไม่อาจทราบได้ว่าคาปาซิเตอร์ตัวนั้นเสียแต่ถ้าเห็นว่า Tank ใดโปรงออกเกิน $\frac{1}{4}$ นิ้ว ก่อนข้างเชื่อได้ว่าเสีย แต่ถ้าไม่มีลักษณะผิดปกติ ก็อาจตรวจสอบโดยการ Test

1. Capacitor Test

ปกติ Capacitance จะมีค่าผิดไปจากที่ระบุจากโรงงาน -0% ถึง $+15\%$ ค่า Capacitance สามารถคำนวณได้จาก ค่าของกระแส และแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ แรงดันที่ใช้ควรเป็น Sinusoidal Wave ที่ทราบค่าความถี่ ตารางที่ 2.1. แสดงค่ากระแสที่แรงดันและความถี่ที่ขีดกำหนด และค่า Microfarad ของแต่ละตัวการคำนวณค่า capacitance หาได้จากสมการ

$$C = 1/(2\pi f X_C)$$

$$X_C = V / I$$

1.1 Volt-Amp Method ใช้ Variac เป็นตัวจ่ายไฟ 120-240 Volt AC. ต่อผ่าน Fuse ซึ่งถ้ามีการ Short เกิดขึ้นในตัว Capacitor Fuse จะตัดขาดได้ทันที ค่า Test Current จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้า ถ้าใช้แรงดัน 2410 Volt กับคาปาซิเตอร์ขนาด 2,400 Volt กระแสจะต้องเป็น $1/10$ ของ Normal Rated Current ถ้ากระแสวัดได้สูงกว่า 15% ของค่า Normal Value แสดงว่าอาจมีการ Short ในคาปาซิเตอร์ตัวนั้น

1.2 Capacitance Meter วัดค่า Capacitance ของคาปาซิเตอร์ถ้าหากค่าสูงกว่า 10% ของ Normal Value ให้ทำการเปลี่ยนคาปาซิเตอร์นั้นเสีย

2. Resistance Measurement

ใช้ Megger วัดค่า Internal Resistance ของคาปาซิเตอร์แล้วเปรียบเทียบกับ ตารางที่ 2.1. ถ้าหากคาปาซิเตอร์เป็นแบบ Terminal to Terminal จะต้องวัดค่า Insulation Resistance ของ Bushing ด้วยโดยวัด Megger ระหว่าง Terminal กับ Case ค่าที่ได้ต้องมากกว่า $1,000 M\Omega$ ที่ $2.5 kV.DC$ ถ้าน้อยกว่าต้องเปลี่ยนใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 Capacitor Unit Electrical Constants

Capacitor (Volts)	KVAR	Amps -0+15% Nominal +4%	Capacitance Mfd-0+15% Nominal +4%	Term-to-Term Imped 60 Hz	Approx Discharge Resist (megohms)*
2400	100	41.7	46.0	57	1.4
	150	62.5	69.0	38	0.95
	200	63.4	92.1	28.5	0.72
2770	100	36.2	34.6	77	1.8
	150	54.3	51.8	51	1.2
	200	72.4	69.2	38.5	0.9
4160	100	24.0	15.3	173	3.0
	150	36.0	23.0	116	2.5
	200	48.0	30.6	86.5	1.9
4800	100	20.8	11.5	230	4.9
	150	31.2	17.3	154	3.3
	200	41.6	23.0	115	2.4
6640	100	15.1	6.0	441	8.8
	150	22.6	9.0	294	5.9
	200	30.2	12.0	220	4.4
7200	100	13.9	5.1	517	10.2
	150	20.8	7.7	346	6.8
	200	27.8	10.2	258.9	5.1
7620	100	13.1	4.0	580	11.3
	150	19.7	6.8	388	7.5
	200	39.4	9.1	290	5.7
7960	100	12.6	4.2	634	12.3
	150	18.9	6.3	423	8.2
	200	25.2	8.4	317	6.2
8320	100	12.0	3.8	693	12.9
	150	18.0	5.7	462	8.6
	200	24.0	7.7	347	6.5
9960	100	10.0	2.7	990	18.4
	150	15.0	4.0	662	12.3
	200	20.0	5.3	492	9.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 Capacitor Unit Electrical Constants (ต่อ)

Capacitor (Volts)	KVAR	Amps -0+15% Nominal +4%	Capacitance Mfd-0+15% Nominal +4%	Term-to-Term Imped 60 Hz	Approx Discharge Resist (megohms)*
12470	100	8.0	1.7	1560	27.8
	150	12.0	2.6	1040	18.5
	200	16.0	3.4	779	13.8
13280	100	7.5	1.5	1765	31.2
	150	11.3	2.3	1180	20.8
	200	15.1	3.0	879	15.6
13800	100	7.2	1.4	1905	33.5
	150	10.8	2.1	1270	22.3
	200	14.5	2.8	952	16.7
14400	100	6.9	1.3	2075	36.2
	150	10.4	1.9	1380	24.0
	200	13.9	2.6	1036	18.1
19920	100	5.0	0.67	3960	65.7
	150	7.5	1.0	2650	43.8
	200	10.1	1.3	1970	32.8
21600	100	4.6	0.57	4696	76.2
	150	6.9	0.85	3130	50.8
	200	9.3	1.1	2323	38.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. High-Voltage Insulation Strength Test

วัด Insulation Strength ระหว่าง Terminal to Terminal และ Terminal to Case ด้วย AC หรือ DC ด้วยค่าตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 Terminal-to-Terminal and Terminal to Case Test Voltage

Rated Capacitor Volts	AC-10 Seconds		DC-10 Seconds	
	Terminal to Terminal	Terminal to Case	Terminal to Terminal	Terminal to Case
2400	3600	19500	7740	28500
2770	4150	19500	8940	28500
4160	6240	19500	13400	28500
4800	7200	19500	15500	28500
6640	9960	25500	21400	39000
7200	10800	25500	23250	39000
7620	11420	25500	24600	39000
7960	11940	25500	25700	39000
9960	14950	25500	32150	39000
12470	18750	25500	40250	39000
13280	14400	25500	42600	39000
13800	20700	25500	44500	39000
14400	21600	25500	46500	39000
19900	29850	25500	64100	39000

4. Power Factor Measurements

ค่า Power Factor หรือค่า Dielectric loss ระหว่าง Terminal และ Case ช่วยทราบค่าสภาพของ Dielectric Bushing และ Case Insulation

5. Test For Tank Leaks

ทำความสะอาดภายนอกของ Case เพื่อขจัดผงฝุ่นและคราบน้ำมัน แล้วใส่ในเตาอบภายใต้

อุณหภูมิ $85^{\circ}C$ ในเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง แล้วทดสอบ Leak ในช่วงสุดท้ายของการอบความร้อน สำหรับการรั่วเล็กน้อยจะแก้ไขได้โดยทำความสะอาดผิวแล้วใช้ Rosin Alcohol Flux บัดกรี อย่าใช้สารที่เป็นกรดและอย่าให้ความร้อนตรงจุดนั้นสูงเกินไป

Dielectric Insulation แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

- 1.1 PCB (Polychlorinated Biphenyl = Askarel) เป็นของเหลวที่ใช้เป็น Insulation สำหรับคาปาซิเตอร์กำลัง เป็นสารที่ไม่ติดไฟและไม่ทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้า ในปัจจุบันพบว่าสาร PCB เป็นอันตรายต่อสุขภาพทำให้สภาพแวดล้อมเสียไป จนในบางประเทศออกกฎหมายห้ามใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าและห้ามนำเข้าประเทศ
- 1.2 NON PCB เป็น Synthetic Aromatic Hydrocarbon Oil เช่น Alkyl naphthalene (An Oil) เป็นสารที่ผลิตขึ้นใช้แทน PCB เพื่อใช้กับคาปาซิเตอร์กำลังเป็นสารที่ไม่เป็นพิษและมี Dielectric Strength สูง ต่อไปนี้เป็นตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Insulation Oil

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ Insulation Oil

	Aromatic Hydrocarbon Type Synthetic Oil	Mineral Oil	Polychlorinated Biphenyl (PCB)
Specific Gravity (15/4 ⁰)	0.955	0.880	1.40
Pour point (°C)	-50	-30	-17
Flash point (°C)	144	134	(170)
Dielectric Constant (80 ⁰ C)	2.48	2.18	5.20
Loss Factor (tan δ)(%)(80 ⁰ C)	0.01	0.02	0.04
Volume Relativity (δ)(Ω cm)(80 ⁰)	2×10^{15}	1×10^{15}	1×10^{14}
Breakdown Voltage (kV/2.5mm)	85	70	65
Viscosity (csi)(30 ⁰)	8.5	8.7	25

Capacitor Oil Switch

อุปกรณ์ที่ใช้ปลด-สับ Capacitor Bank ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ใช้สวิตช์ของ Mc. Graw-Edison type “TSC” ของสหรัฐอเมริกา อุปกรณ์ดังกล่าวทำหน้าที่ปลด-สับอย่างรวดเร็ว ไม่สามารถ Interrupt fault ได้ ดังนั้นจึงใช้ฟิวส์เป็นตัวป้องกันลัดวงจรต่างๆ โดยติดตั้งไว้หน้า Oil Switch อุปกรณ์สวิตช์ชนิดนี้เป็นชนิดสามเฟส จุ่มในน้ำมัน ใช้กับระบบแรงดันสูงสุด 35.5 kV และกระแสคาปาซิทีฟ 135 แอมป์ สวิตช์นี้สามารถปลด-สับคาปาซิเตอร์แรงค์สูงสุด 6000 กิโลวาร์

กลไกที่ทำให้การปลด-สับเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยใช้สปริงทั้ง 3 เฟสจะปลดสับพร้อมกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เพราะมีคอนแทคติดอยู่บนเพลารวม เมื่อกดปุ่มปลดหรือสับ ไฟกระแสลัด 220 โวลต์จะป้อนเข้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปที่มอเตอร์ชาร์จสปริงและขดลวดโซลินอยส์ ขดลวดดังกล่าวจะทำหน้าที่ควบคุมคลัทช์ เพื่อให้การชาร์จสปริงกระทำโดยมอเตอร์ไฟฟ้า หากไม่มีไฟเข้าขดโซลินอยส์ คลัทช์จะไม่ทำงานซึ่งจะทำให้เฟืองชาร์จสปริงไม่ขบกัน มอเตอร์ไฟฟ้าจะชาร์จสปริงไม่ได้ จะต้องทำโดย Red Manual Operating Lever เมื่อมอเตอร์หมุนจะส่งผ่านกำลังไปยังเพลลาชาร์จสปริงโดยผ่านเฟืองทครอบ เมื่อสปริงชาร์จเต็มที่แล้วจะหลุดทันที เพื่อไปหมุน Operating Shaft ไป 90 องศา บนเพลานี้จะมี Moving Contact ติดอยู่ 3 เฟส เป็นชนิด Double blade ส่วน Fixed Contact มี 2 ชุดติดอยู่กับแผ่นกั้นเฟสแล้วต่อโยง ไปยังบูชซึ่ง ดังนั้น 3 เฟสจะมีอยู่ 6 ชุด การปลดหรือสับเพลลาจะหมุนไปทางเดียวกัน 90 องศา ทุกครั้ง และต้องรอให้มอเตอร์ชาร์จสปริงเสร็จจึงเสียเวลานาน นับเวลาจากการกดปุ่มจนถึงปลดหรือสับเสร็จใช้เวลาประมาณ 15 วินาที แต่เวลาที่คอนแทคใช้ในการปลดหรือสับจริงเพียง 5-8 Cycle หรือ 100-160 มิลลิวินาทีเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การศึกษาข้อมูลความผิดปกติของคาปาซิเตอร์กำลัง

การหาค่าความน่าเชื่อถือของคาปาซิเตอร์กำลัง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รวบรวมข้อมูลความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับชุดคาปาซิเตอร์ (Capacitor bank) จำนวนไม่มากนักเป็นระยะเวลา 5 ปี ชุดคาปาซิเตอร์จำนวน 104 ชุด ได้เลือกศึกษาเฉพาะชุดคาปาซิเตอร์ที่ใช้กับแรงดันไฟฟ้า 69 kV ซึ่งมีชุดคาปาซิเตอร์จำนวน 59 ชุด และเลือกเฉพาะชุดคาปาซิเตอร์ที่ผลิตจากผู้ผลิตเพียงแค่ 2 ราย โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ลักษณะเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นภาพรวมได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

กลุ่มที่ 1 มีชุดคาปาซิเตอร์จำนวน 35 ชุด จากสถานีไฟฟ้าแรงสูง 12 แห่ง ซึ่งมีคาปาซิเตอร์ทั้งหมดจำนวน 2279 ยูนิท จากผู้ผลิต ก จำนวน 25 ชุด และผู้ผลิต ข จำนวน 10 ชุด ซึ่งมีคาปาซิเตอร์ที่เสียหายทั้งหมดจำนวน 312 ยูนิท คิดเป็นจากผู้ผลิต ก จำนวน 258 ยูนิทและผู้ผลิต ข จำนวน 54 ยูนิท ดังแสดงในตารางที่ 3.1

กลุ่มที่ 2 มีชุดคาปาซิเตอร์จำนวน 19 ชุด จาก สถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 แห่งของซึ่งมีคาปาซิเตอร์ทั้งหมดจำนวน 1978 ยูนิท จากผู้ผลิต ก จำนวน 9 ชุด และผู้ผลิต ข จำนวน 10 ชุด ซึ่งมีคาปาซิเตอร์ที่เสียหายทั้งหมดจำนวน 200 ยูนิท คิดเป็นจากผู้ผลิต ก จำนวน 146 ยูนิทและผู้ผลิต ข จำนวน 54 ยูนิท ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยได้ข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระหว่างปี 2536–2540

สำหรับคาปาซิเตอร์ที่พบความผิดปกติส่วนใหญ่ ต้นเหตุของความผิดปกติเกิดจากการเบรคดาวนซ์ของไดอิเล็กทริกแบบประสม (Composite dielectric)** ข้อมูลที่รวบรวมได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งความผิดปกติของคาปาซิเตอร์นั้นคือ ความผิดปกติของไดอิเล็กทริกแบบประสม (Composite dielectric) นั้นเอง สถิติการเกิดความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ที่ได้เก็บรวบรวมข้อมูลไว้ถูกนำมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้เป็นตัวแทนของอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์ซึ่งนำไปสู่การหาอัตราการเกิดความผิดปกติ (Failure rate) ที่เปลี่ยนไปตามผู้ผลิตแต่ละราย

** บทความทางวิชาการเรื่อง, “Failure Analysis of Composite Dielectric of Power Capacitor in Distribution Systems”, จากวารสาร IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation Volume 5, No. 4, August 1998. Page 583-588

ที่ตั้งของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ส่วนรายละเอียด Single line diagram สถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขต กรุงเทพฯและปริมณฑลแสดงอยู่ในภาคผนวก ข. ส่วนรายละเอียดของคาปาซิเตอร์จะแสดงไว้ในภาคผนวก ค. ซึ่งอธิบายขนาด แรงดัน ผู้ผลิต และค่า kVAR ของ คาปาซิเตอร์ยูนิต การติดตั้งคาปาซิเตอร์ในกลุ่มตัวอย่างที่ศึกษามี 2 ขนาดในการใช้งานคือ 36 MVAR และ 43.2 MVAR จากผู้ผลิตที่แตกต่างกัน 2 ราย คือ ผู้ผลิต ก และ ผู้ผลิต ข ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ส่วนการจัดเรียงคาปาซิเตอร์ยูนิตมีรูปแบบดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ดังนี้

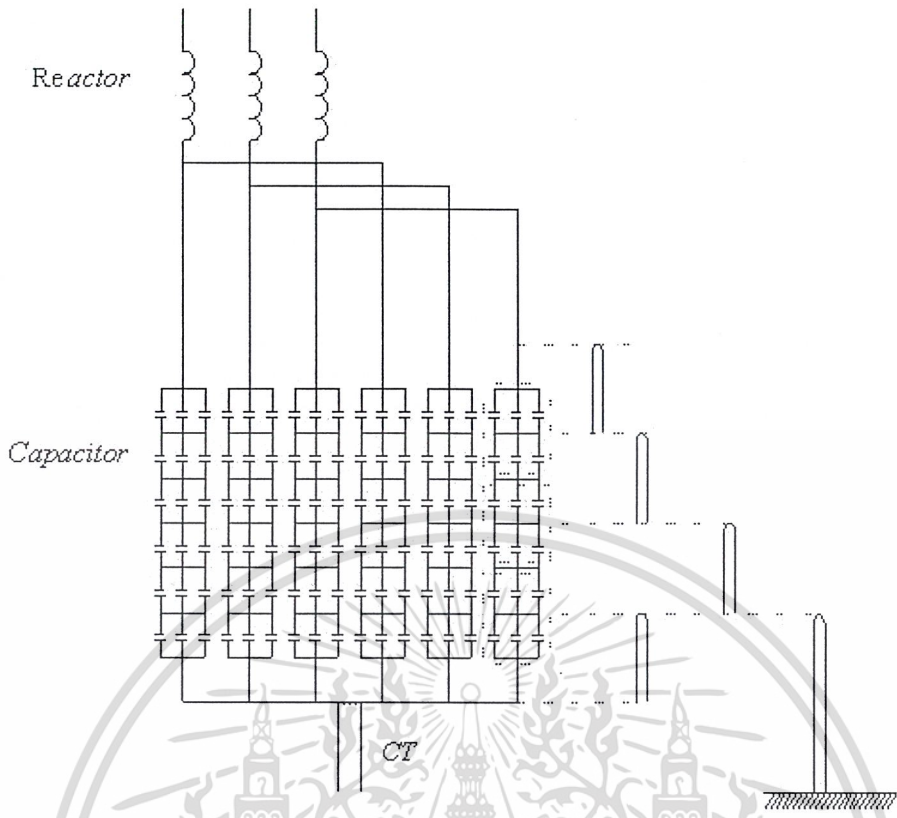
ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนคาปาซิเตอร์ (Cap-bank)และ คาปาซิเตอร์ (Capacitor-unit) ของกลุ่มที่ 1

ผู้ผลิต	จำนวนชุด คาปาซิเตอร์	จำนวนยูนิต คาปาซิเตอร์	ร้อยละ	คาปาซิเตอร์ยูนิต ที่ผลิตปกติ
ก	25	2448	73.12	258
ข	10	900	26.88	54
รวม	35	3348	100	312

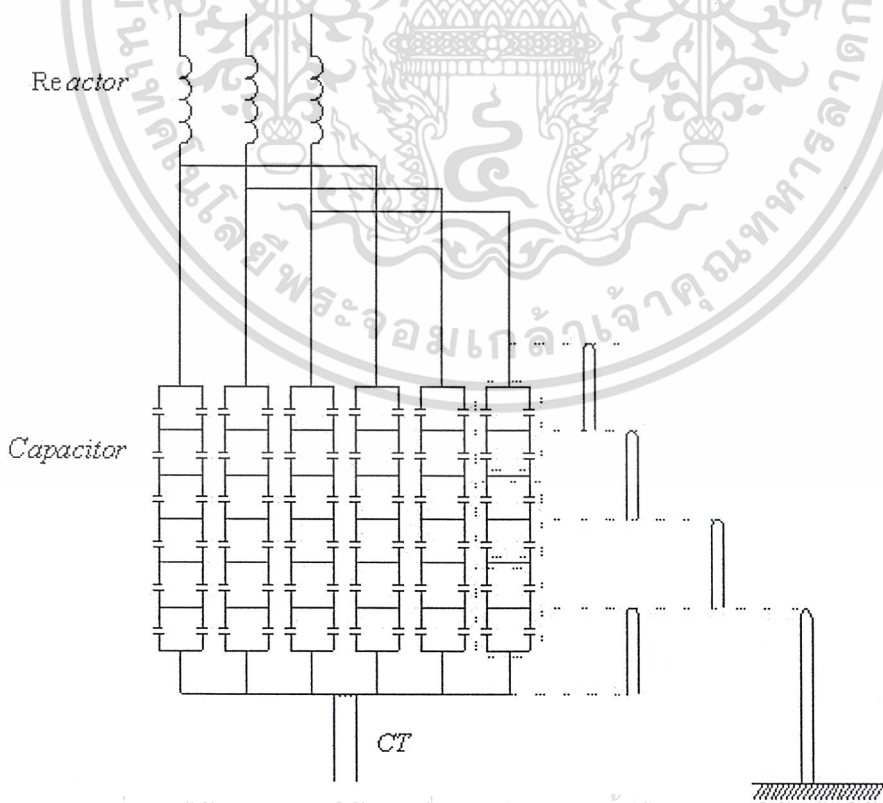
ตารางที่ 3.2 แสดงจำนวนคาปาซิเตอร์ (Cap-bank)และ คาปาซิเตอร์ (Capacitor-unit) ของกลุ่มที่ 2

ผู้ผลิต	จำนวนชุด คาปาซิเตอร์	จำนวนยูนิต คาปาซิเตอร์	ร้อยละ	คาปาซิเตอร์ยูนิต ที่ผลิตปกติ
ก	9	1078	55.5	146
ข	10	900	45.5	54
รวม	19	1978	100	200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบการจัดเรียงคาปาซิเตอร์สำหรับ C-bank ขนาด 43.2 MVAR



รูปที่ 3.2 แสดงรูปแบบการจัดเรียงคาปาซิเตอร์สำหรับ C-bank ขนาด 36 MVAR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างปี 2536 – 2540 กลุ่มที่ 1

วันที่	Substation	Step	ยี่ห้อ Cap-Bank	เหตุการณ์	จำนวน (Unit)
28/08/36	STB	3	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
23/09/36	RS	9	ก.	แก้ไข DC Close Trip	1
06/11/36	RS	2	ข.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	9
11/11/36	RS	9	ก.	Trip แก้ไข Breaker	1
22/12/36	NB	7	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	10
09/05/37	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Oil Leak	1
18/05/37	BK	8	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Oil Leak	1
18/05/37	BK	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Oil Leak	1
02/06/37	STB	3	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
04/06/37	BPL	8	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	8
06/08/37	BPL	8	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
20/08/37	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
22/08/37	STB	3	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
24/08/37	STB	4	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
25/08/37	STB	4	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
02/09/37	BK	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
05/09/37	BK	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
23/09/37	RS	12	ก.	แก้ไข C-Bank จาก Unbalance Trip	3
08/10/37	NB	7	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	2
15/10/37	STB	3	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
05/11/37	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
15/11/37	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
15/11/37	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
11/12/37	NB	7	ก.	เพิ่มกรุปจาก 6series เป็น 7 series	15
07/01/38	SB	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
07/01/38	SB	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	6
12/02/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	6

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างปี 2536 – 2540 กลุ่มที่ 1 (ต่อ)

วันที่	Substation	Step	ยี่ห้อ Cap-Bank	เหตุการณ์	จำนวน (Unit)
26/03/38	STB	5	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
26/03/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
27/03/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
03/04/38	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
20/04/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	3
27/04/38	STB	6	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
10/05/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	8
21/05/38	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	1
26/05/38	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	4
27/05/38	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
30/05/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
08/06/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
29/06/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
29/06/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
10/07/38	LPR	5	ข.	Oil Leak จาก Bushing	2
17/07/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
29/07/38	BK	8	ก.	เกิดระเบิด	11
16/08/38	STB	3	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
17/08/38	SB	6	ข.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	4
22/08/38	STB	3	ก.	Trip พบซากแมว	5
02/09/38	RS	2	ข.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	6
08/09/38	LPR	5	ข.	เกิดระเบิด	10
16/09/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
18/09/38	NB	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
20/09/38	BK	8	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
23/09/38	BK	9	ก.	Oil Leak จาก Bushing	2
07/10/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างปี 2536 – 2540 กลุ่มที่ 1 (ต่อ)

วันที่	Substation	Step	ยี่ห้อ Cap-Bank	เหตุการณ์	จำนวน (Unit)
14/10/38	STB	3	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	5
03/01/39	STB	6	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	1
04/01/39	STB	6	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance Trip	11
21/01/39	STB	3	ก.	Clean and Check Clamp C-Bank	2
21/01/39	STB	4	ก.	Clean and Check Clamp C-Bank	2
23/01/39	SB	12	ก.	Clean and Check Clamp C-Bank	1
20/08/39	RS	9	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	5
21/08/39	RS	11	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	2
20/09/39	NB	9	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	6
24/09/39	SB	11	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	8
28/09/39	STB	3	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	6
29/10/39	RS	11	ก.	แก้ไข Clamp ร้อน	2
22/11/39	SB	11	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance Trip	1
07/12/39	SB	11	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	2
08/02/40	RS	12	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	1
14/03/40	STB	6	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Oil Leak	2
11/04/40	STB	4	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	4
24/06/40	NB	9	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	6
25/06/40	LPR	6	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	5
04/08/40	SB	11	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	2
05/08/40	BPL	9	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	2
14/08/40	LPR	6	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	7
23/08/40	SB	6	ข.	ลูกถ้วย Bus Support แตก 1 ลูก	3
05/09/40	SB	11	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	3
11/09/40	RS	9	ก.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	5
13/09/40	BK	8	ก.	เกิดระเบิด	10
27/10/40	SB	11	ก.	Oil Leak จาก Bushing	2
29/10/40	BK	7	ข.	จัดกรู๊ปเนื่องจาก Unbalance	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการเปิดเผย ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแบบทั้งเนื้อหาและตัวอักษรไปเผยแพร่ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างปี 2536 – 2540 กลุ่มที่ 2

วันที่	Substation	Step	ยี่ห้อ Cap-Bank	เหตุการณ์	จำนวน (Unit)
23/09/36	RS	9	ก.	แก้ไข DC Close Trip	1
06/11/36	RS	2	ข.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	9
11/11/36	RS	9	ก.	Trip แก้ไข Breaker	1
18/05/37	BK	8	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Oil Leak	1
18/05/37	BK	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Oil Leak	1
20/08/37	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
02/09/37	BK	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
05/09/37	BK	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
23/09/37	RS	12	ก.	แก้ไข C-Bank จาก Unbalance Trip	3
05/11/37	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
15/11/37	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
15/11/37	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
07/01/38	SB	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
07/01/38	SB	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	6
12/02/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	6
26/03/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
27/03/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
03/04/38	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
20/04/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	3
10/05/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	8
21/05/38	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	1
26/05/38	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	4
27/05/38	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
30/05/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
08/06/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
29/06/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
29/06/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างปี 2536 – 2540 กลุ่มที่ 2 (ต่อ)

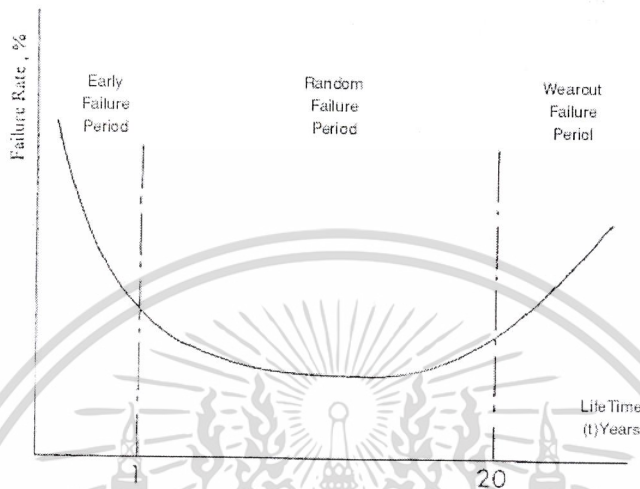
วันที่	Substation	Step	ยี่ห้อ Cap-Bank	เหตุการณ์	จำนวน (Unit)
10/07/38	LPR	5	ข.	Oil Leak จาก Bushing	2
17/07/38	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
29/07/38	BK	8	ก.	เกิดระเบิด	11
17/08/38	SB	6	ข.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	4
02/09/38	RS	2	ข.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	6
08/09/38	LPR	5	ข.	เกิดระเบิด	10
16/09/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
20/09/38	BK	8	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
23/09/38	BK	9	ก.	Oil Leak จาก Bushing	2
07/10/38	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
23/01/39	SB	12	ก.	Clean and Check Clamp C-Bank	1
20/08/39	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
21/08/39	RS	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
24/09/39	SB	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	8
29/10/39	RS	11	ก.	แก้ไข Clamp ร้อน	2
22/11/39	SB	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance Trip	1
07/12/39	SB	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
08/02/40	RS	12	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	1
25/06/40	LPR	6	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
04/08/40	SB	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	2
23/08/40	SB	6	ข.	ลูกถ้วย Bus Support แตก 1 ลูก	3
05/09/40	SB	11	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	3
11/09/40	RS	9	ก.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5
13/09/40	BK	8	ก.	เกิดระเบิด	10
27/10/40	SB	11	ก.	Oil Leak จาก Bushing	2
29/10/40	BK	7	ข.	จัดกรุปเนื่องจาก Unbalance	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทำงานของคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 4.1 กราฟรูปอ่างอาบน้ำแสดงถึงฟังก์ชันอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์กำลัง

โดยปกติกราฟรูปอ่างอาบน้ำ (Bathtub Curve) สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนของรูปแบบความผิดปกติ (failure mode) ของคาปาซิเตอร์กำลังได้ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งาน ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบความผิดปกติได้เป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Early failures

มันจะเกิดขึ้นระหว่างปีแรกในการใช้งานและปกติจะมีสาเหตุมาจากความผิดปกติที่มีตั้งแต่ตอนแรกของการผลิตอันเนื่องมาจากการใช้วัสดุที่มีคุณภาพต่ำ, ความเชี่ยวชาญ, ขั้นตอนกระบวนการผลิต หรือ การควบคุมคุณภาพของผู้ผลิตนอกเหนือจากปัญหาการติดตั้ง ตัวอย่างเช่น อัตราการเกิดความผิดปกติในปีแรกน้อยกว่า 0.5 % ต่อปี และช่วงถัดไปหลังจากนี้ อัตราการเกิดความผิดปกติจะเพิ่มมากขึ้น

2. Random failures

ช่วงนี้ไม่ได้มีสาเหตุเกี่ยวข้องกับช่วง Early failure แต่เกิดมาจากโอกาสหรือสภาพการทำงาน ตัวอย่างเช่น เสียหายเนื่องมาจาก switching surge หรือ ไฟฟ้า ความผิดปกติในรูปแบบนี้โดยปกติปรากฏออกมาในเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำมาก ตัวอย่างเช่น อัตราการเกิดความผิดปกติมีค่าประมาณ 0.2 % และแทบจะคงที่ตลอดช่วงนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

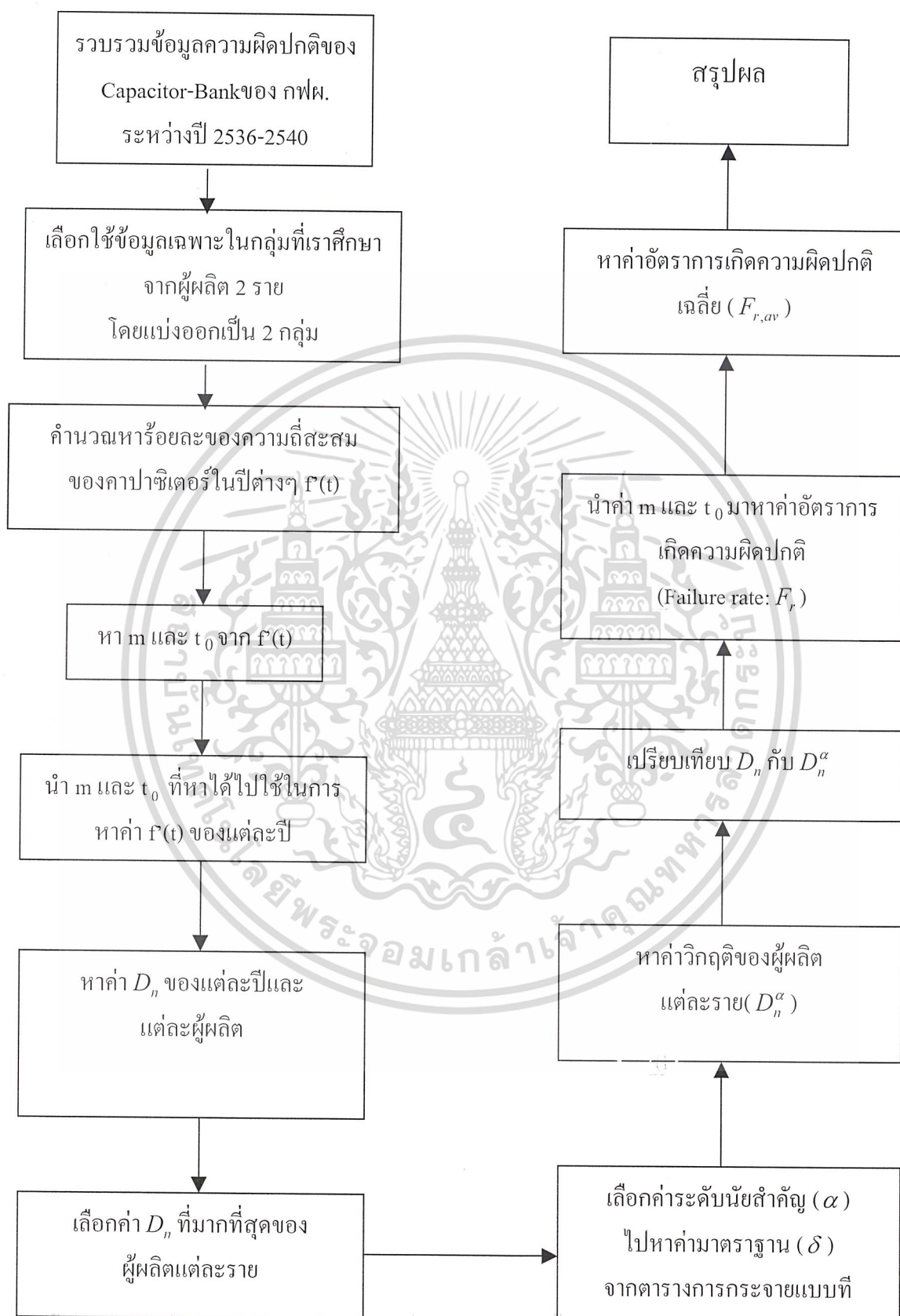
3. Wearout failures

ความผิดปกติในช่วงนี้เป็นผลมาจากการหมดกำลังของของวัสดุ Dielectric โดยปกติแล้ว wearout failure จะมีอิทธิพลหลังจากการใช้งานเพียง 20 ปี เท่านั้นช่วงแวลวี่เอาที่แบบธรรมดาจะมีอัตราการเกิดความผิดปกติที่เพิ่มขึ้นตามมา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน สามารถนำมาเป็นตัวแทนความผิดปกติที่แตกต่างกัน ปริญญาโทฉบับนี้ได้ศึกษาเฉพาะในช่วง Random failure เนื่องจากมันไม่ได้สัมพันธ์กับการควบคุมคุณภาพทางการผลิตเท่านั้น แต่มันยังสัมพันธ์กับสภาพการใช้งานของคาปาซิเตอร์ด้วย ดังนั้นการคำนวณและการวิเคราะห์จึงมุ่งเน้นไปที่ Random failure ซึ่งมีอยู่ในช่วง 1-20 ปี หลังจากจะเริ่มใช้งาน ระเบียบวิธีที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการหาฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นที่สามารถเป็นตัวแทนของอายุการใช้งาน (life time) t ในช่วง random failure มันเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าคาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ไม่สามารถซ่อมได้ ดังนั้นอายุการใช้งาน t ของคาปาซิเตอร์ที่เสียมีพื้นฐานมาจากข้อมูลความผิดปกติและวันติดตั้ง ได้ถูกนำมาคำนวณ อายุการใช้งานที่มากกว่า 1 ปี ถูกสรุปมาเฉพาะส่วนที่ต้องการวิเคราะห์ใน random failure เท่านั้น จำนวนคาปาซิเตอร์ที่ผิดปกติทั้งสิ้น 312 ยูนิตในกลุ่มที่ 1 และ 185 ยูนิตในกลุ่มที่ 2 ซึ่งผลิตโดยบริษัทที่แตกต่างกัน 2 บริษัท ตารางที่ 4.2 และ 4.3 สรุปอายุการใช้งาน (life time) t สำหรับคาปาซิเตอร์ที่ผิดปกติโดยอีล โทแกรมของอายุการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 4.2 ดังนั้นการเกิดความผิดปกติของบริษัทผู้ผลิต 2 ราย ซึ่งเกิดมาจากการเกิดประกายไฟของ oil switch ที่ขาดการบำรุงรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Block Diagram แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของคาปาซิเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น. ราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างในการคำนวณ

เนื่องจากความถี่สะสมเชิงเอมไพริคัล $F'(t)$ มีความสอดคล้องกับการกระจายของเวลาดั้งเดิม $F(t)$ จึงสามารถนำ $F'(t)$ มาใช้หาพารามิเตอร์ m และ t_0 ของการกระจายเวลาดั้งเดิมได้ดังนี้

$$F(t) = 1 - \text{Exp}\left[-\frac{t^m}{t_0}\right] \quad (4.1)$$

สามารถทำเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\text{Exp}\left[-\frac{t^m}{t_0}\right] = 1 - F(t)$$

$$\text{Exp}\left[\frac{t^m}{t_0}\right] = 1/[1 - F(t)]$$

$$\frac{t^m}{t_0} = \ln[1/[1 - F(t)]]$$

แทนได้ด้วยสมการเชิงเส้นดังนี้

โดยที่

$$Y = mX - A \quad (4.2)$$

$$Y = \ln\ln\{1/[1 - F(t)]\}$$

$$X = \ln t \quad \text{และ} \quad A = \ln t_0$$

แทนค่า $F(t)$ ด้วย $F'(t)$ และหาค่า พารามิเตอร์ m และ t_0 โดยพิจารณาจากตารางที่ 4.1

$$Y = mX - A$$

$$\sum Y = m \sum X - AN \quad (4.3)$$

$$\sum XY = m \sum X^2 - A \sum X \quad (4.4)$$

โดยแสดงการคำนวณเฉพาะผู้ผลิต ก จากกลุ่มที่ 1 เท่านั้น

ตารางที่ 4.1 แสดงการคำนวณเพื่อหาค่า m และ t_0 ของผู้ผลิต ก จากกลุ่มที่ 1

T	$F'(t)$	X	Y	XY	X^2
2	0.05814	0.69314	-2.81510	-1.95128	0.48045
3	0.29844	1.09861	-1.03719	-1.13947	1.20694
4	0.66667	1.38629	0.09405	0.13037	1.92181
5	0.83721	1.06094	0.59625	0.95424	2.59029
รวม	1.86046	4.78751	-3.16202	-1.99536	6.19950

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าในตารางที่ 4.1 นำไปแทนค่าในสมการที่ (4.3) และ (4.4) ทำให้สามารถคำนวณ m และ t_0 ได้ดังนี้

$$-3.16202 = 4.78751m - 4A \quad (4.5)$$

$$-1.99953 = 6.19950m - 4.78751A \quad (4.6)$$

นำ 0.83551 คูณตลอดสมการที่ (4.6) และกำหนดให้เป็นสมการที่ (4.7)

$$-1.66714 = 5.17975m - 4A \quad (4.7)$$

นำสมการที่ (4.7) ลบสมการที่ (4.5) จะได้

$$1.49485 = 0.39224m$$

$$m = 3.811$$

นำ m แทนค่าในสมการที่ (4.5) ได้ $A = 5.398470346$ ทำให้ ค่า $t_0 = 221.068$ ทำให้สมการการกระจายของเวลบัลล์สำหรับผู้ผลิต ก ในกลุ่มที่ 1 เท่ากับ $F(t) = 1 - \text{Exp}\left[-\frac{t^{3.81}}{221.068}\right]$

ต่อไปคือการหาอัตราการเกิดความผิดปกติ F_r ในปีต่าง ๆ จากสมการที่ (4.8)

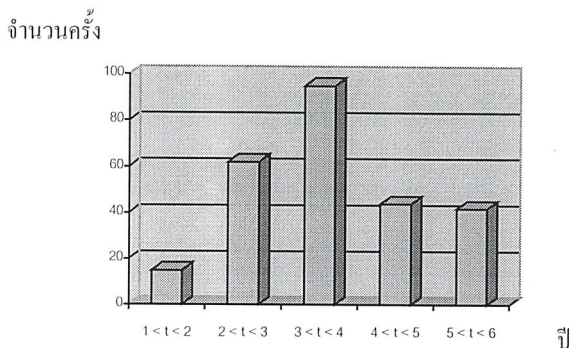
$$F_r = \left(\frac{m}{t_0}\right)t^{m-1} = 0.01724 t^{2.811} \quad (4.8)$$

ตัวอย่างเช่น ปีที่ 1 มีอัตราการเกิดความผิดปกติเท่ากับ 0.01724 ซึ่งหาได้โดยการแทน t เท่ากับ 1 ในสมการที่ (4.8) แล้วนำอัตราการเกิดความผิดปกติ F_r ไปหาค่าอัตราการเกิดความผิดปกติเฉลี่ย $F_{r,av}$ ตามสมการที่ (4.9)

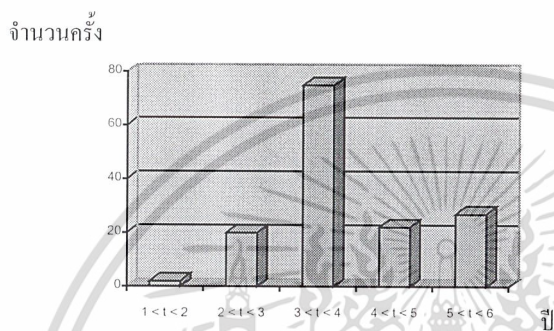
$$F_{r,av} = \frac{1}{T} \int_0^T F_r dt \quad (4.9)$$

นำ F_r จากสมการที่ (4.8) แทนค่าในสมการที่ (4.9) และแทนค่า T เท่ากับ 5 พบว่าอัตราการเกิดความผิดปกติเฉลี่ย $F_{r,av}$ ของผู้ผลิต ก ในกลุ่มที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.41716

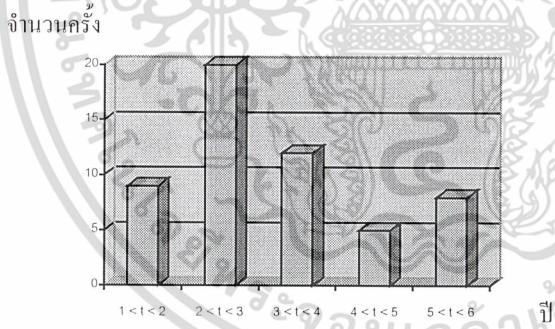
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



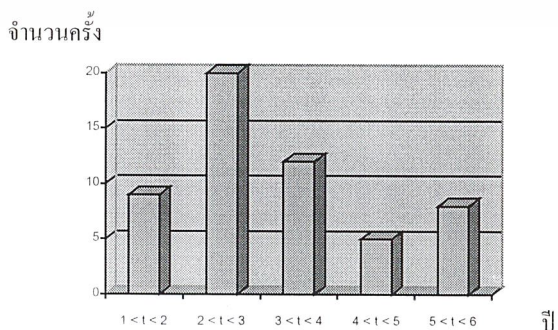
รูปที่ 4.2 ก ฮีสโทแกรมแสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ของผู้ผลิต ก กลุ่มที่ 1



รูปที่ 4.2 ข ฮีสโทแกรมแสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ของผู้ผลิต ข กลุ่มที่ 1



รูปที่ 4.3 ก ฮีสโทแกรมแสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ของผู้ผลิต ก กลุ่มที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.3 ข ฮีสโทแกรมแสดงความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ของผู้ผลิต ข กลุ่มที่ 2

ตารางที่ 4.2 ก การทดสอบโคลโมโกรอฟ-สเมียนอฟ ของอายุการใช้งานในกลุ่มที่ 1 ผู้ผลิต ก

t	m_i	N	F'	F	D_n
$1 < t \leq 2$	15	15	0.05814	0.06151	0.00337
$2 < t \leq 3$	62	77	0.29844	0.25747	0.04096
$3 < t \leq 4$	25	172	0.66667	0.58979	0.07687 *
$4 < t \leq 5$	44	216	0.83721	0.87577	0.03856
$5 < t \leq 6$	42	258	1.00000	0.98467	0.015232

ตารางที่ 4.2 ข การทดสอบโคลโมโกรอฟ-สเมียนอฟ ของอายุการใช้งานในกลุ่มที่ 1 ผู้ผลิต ข

t	m_i	N	F'	F	D_n
$1 < t \leq 2$	9	9	0.16667	0.19099	0.02432
$2 < t \leq 3$	20	29	0.53703	0.45595	0.08107 *
$3 < t \leq 4$	12	41	0.75926	0.72384	0.03541
$4 < t \leq 5$	5	46	0.85185	0.90626	0.05441
$5 < t \leq 6$	8	54	1.00000	0.97517	0.02481

ตารางที่ 4.3 ก การทดสอบโคลโมโกรอฟ-สเมียนอฟ ของอายุการใช้งานในกลุ่มที่ 2 ผู้ผลิต ก

t	m_i	N	F'	F	D_n
$1 < t \leq 2$	2	2	0.013698	0.018164	0.004465
$2 < t \leq 3$	20	22	0.150685	0.143242	0.007446
$3 < t \leq 4$	75	97	0.664383	0.554307	0.110076*
$4 < t \leq 5$	22	119	0.815068	0.896583	0.081515
$5 < t \leq 6$	24	146	1.000000	0.997311	0.002688

ตารางที่ 4.3 ข การทดสอบโคลโมโกรอฟ-สเมียนอฟ ของอายุการใช้งานในกลุ่มที่ 2 ผู้ผลิต ข

t	m_i	N	F'	F	D_n
$1 < t \leq 2$	9	9	0.16667	0.19099	0.02432
$2 < t \leq 3$	20	29	0.53703	0.45595	0.08107 *
$3 < t \leq 4$	12	41	0.75926	0.72384	0.03541
$4 < t \leq 5$	5	46	0.85185	0.90626	0.05441
$5 < t \leq 6$	8	54	1.00000	0.97517	0.02481

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

* หมายถึงความแตกต่างระหว่าง F และ F' (D_n) ที่มีค่าสูงสุดและถูกใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติ

ไม่มีการเปิดเผย พงษ์พันธ์ศักดิ์ หามหาพิทยะกุล

กราฟความน่าจะเป็นถูกนำมาใช้ สำหรับการปรับปรุงการกระจายความน่าจะเป็นของอายุการใช้งาน t เบื้องต้น เพื่อให้ได้พารามิเตอร์การกระจายอย่างหายากๆ อายุการใช้งาน t และความถี่สะสมที่สอดคล้องกับ $F(t)$ ถูกพล็อตลงบนกราฟความน่าจะเป็นของเวลบัลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ก และ ข จะสามารถสังเกตได้ ข้อมูลในตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็นถึงความ เป็นเส้นตรงซึ่งทำให้เราทราบว่า การกระจายของเวลบัลล์สามารถใช้เป็นตัวแทนของเหตุการณ์กลุ่มนี้ได้เป็นอย่างดี ฟังก์ชันการกระจายของเวลบัลล์ (Weibull distribution function) มีรูปแบบดังสมการที่ (4.10)

$$F(t) = 1 - \text{Exp}\left[-\frac{t^m}{t_0}\right] \quad (4.10)$$

หรืออาจแสดงในรูปเชิงเส้นได้โดย

$$\text{Exp}\left[-\frac{t^m}{t_0}\right] = 1 - F(t)$$

$$\text{Exp}\left[\frac{t^m}{t_0}\right] = 1/[1 - F(t)]$$

$$\frac{t^m}{t_0} = \ln[1/[1 - F(t)]]$$

สามารถแทนได้ด้วยสมการเชิงเส้นดังนี้

โดยที่

$$Y = mX - A \quad (4.11)$$

$$Y = \ln\ln\{1/[1 - F(t)]\}$$

$$X = \ln t \quad \text{และ} \quad A = \ln t_0$$

- m คือพารามิเตอร์การกระจายของเวลบัลล์
- t_0 คือพารามิเตอร์การกระจายของเวลบัลล์
- t คืออายุการใช้งาน (ปี)
- $F(t)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายของเวลบัลล์
- m_i คือจำนวนคาปาซิเตอร์ที่เกิดความผิดปกติในปีนั้น
- N คือจำนวนคาปาซิเตอร์ที่เกิดความผิดปกติสะสม
- F' คือค่าของความถี่สะสมเอมไพริคอล
- F คือค่าของฟังก์ชันการกระจายของเวลบัลล์
- D_n คือความแตกต่างระหว่าง F' และ F ในปีนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ก การกระจายของอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์ของกลุ่มที่ 1 N_i คือจำนวนคาปาซิเตอร์ทั้งหมด, N_f คือจำนวนของคาปาซิเตอร์ที่ผิดปกติทั้งหมด, $F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right)$

ผู้ผลิต	N_i	N_f	Parameters		F(t)	
			m	t_0	a	b
ก	2448	258	3.811	221.068	3.811	221.068
ข	900	54	2.602	28.645	2.602	28.645

ตารางที่ 4.4 ข การกระจายของอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์ของกลุ่มที่ 2 N_i คือจำนวนคาปาซิเตอร์ทั้งหมด, N_f คือจำนวนของคาปาซิเตอร์ที่ผิดปกติทั้งหมด, $F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right)$

ผู้ผลิต	N_i	N_f	Parameters		F(t)	
			m	t_0	a	b
ก	1078	146	5.2587	2088.53	5.2587	2088.53
ข	900	54	2.602	28.645	2.602	28.645

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบของโคลโมโกรอฟ-สเฟียโนฟ (Kolmogorov-Smirnov Test: KS Test) ถูกนำมาใช้ในการทดสอบสมมติฐานการกระจายเชิงทฤษฎี KS Test เกี่ยวข้องกับการลำดับจุดของข้อมูลจากต่ำไปสูงแล้วเปรียบเทียบการกระจายเชิงทฤษฎีกับเส้นโค้งความถี่สะสมที่วาดขึ้นมาจากพื้นฐานของมูลเชิงเอมไพริคอล ความถี่สะสมเชิงเอมไพริคอล มีนิยามดังนี้

$$F'(t) = \sum_{i=1}^M \frac{M_i}{n} \quad (4.12)$$

โดยที่ M คือจำนวนคาปาซิเตอร์ที่เกิดความผิดปกติทั้งหมด และ n คือ จำนวนคาปาซิเตอร์ทั้งหมดทั้งที่ผิดปกติและยังสภาพดี

ความถี่สะสม $F'(t)$ ของอายุการใช้งาน t ที่คำนวณตามสมการที่ (4.12) ถูกแสดงในตารางที่ 4.2 ถึง 4.3 และค่า $F(t)$ ที่สอดคล้องกันกันตามสมการการกระจายเชิงทฤษฎีของเวลบัลล์สำหรับค่าพารามิเตอร์ m และ t_0 ได้ถูกแสดงไว้ในตารางเดียวกันด้วย

ใน KS Test ความแตกต่างสูงสุดระหว่าง $F(t)$ และ $F'(t)$ เป็นการวัดว่าความสอดคล้องมีค่ามากเพียงไร กำหนดให้ความแตกต่างสูงสุดแทนด้วย

$$D_n = \text{Max} |F(t) - F'(t)| \quad (4.13)$$

ความแตกต่างนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติเพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองนำไปใช้ได้หรือไม่

$$P(D_n < D_n^\alpha) = 1 - \alpha \quad (4.14)$$

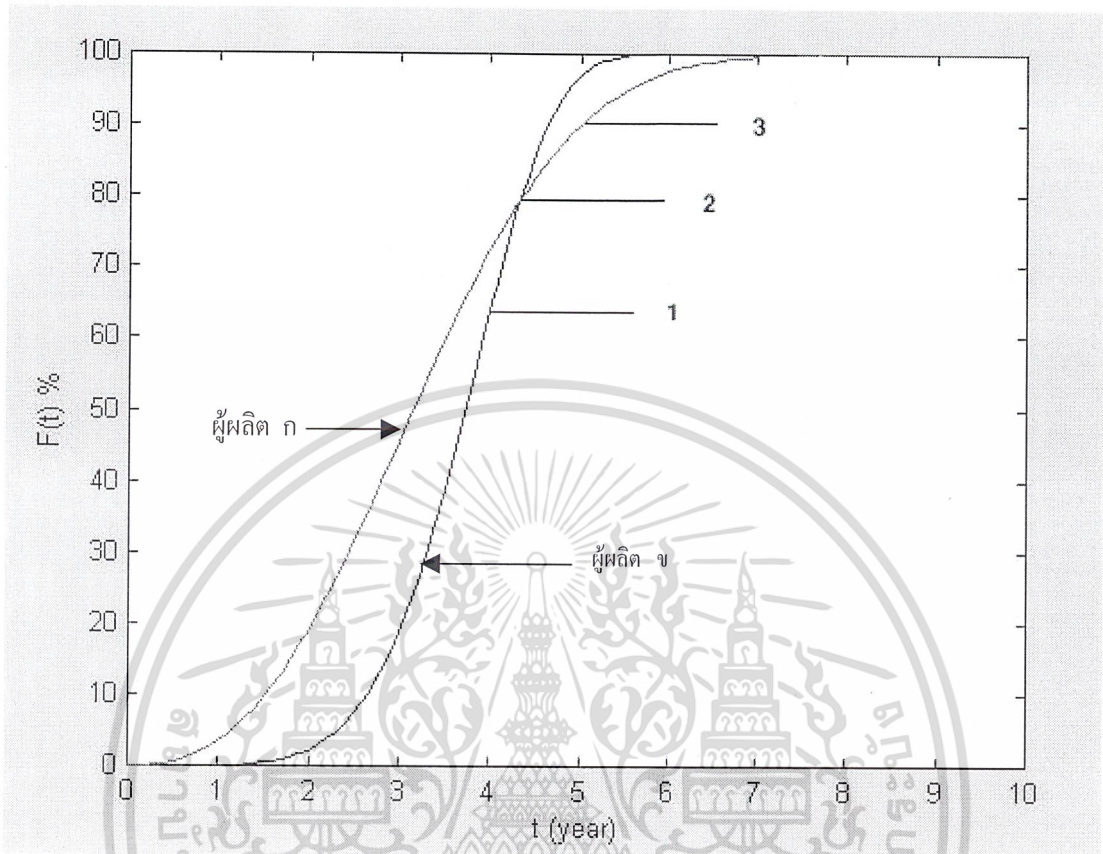
ค่าวิกฤติ D_n^α ที่ระดับต่าง ๆ ถูกจัดลงในตารางความน่าจะเป็น สำหรับค่า n ต่าง ๆ กัน ถ้าสังเกตว่า $D_n < D_n^\alpha$ แล้วการกระจายที่เสนอสามารถยอมรับได้ ที่ระดับความสำคัญ α ที่ถูกเลือก การพิสูจน์ว่าการกระจายของเวลบัลล์ใช้ได้ถูกแสดงในตารางที่ 4.5 สำหรับคาปาซิเตอร์ที่เกิดความผิดปกติ ของผู้ผลิตที่ต่างกันที่ระดับความสำคัญ $\alpha = 0.05$ อายุการใช้งาน t ของคาปาซิเตอร์ของผู้ผลิตที่ต่างกัน ได้ถูกพล็อตลงบนกราฟการกระจายของเวลบัลล์และทดสอบแบบ KS Test ด้วยฟังก์ชันการกระจายเชิงทฤษฎีเวลบัลล์สรุปในตารางที่ 4.4 ผลแสดงให้ทราบว่าคาปาซิเตอร์กำลังทั้งหมดที่ใช้ในงานในปัจจุบันมีความสอดคล้องและสามารถแทนได้ด้วยการกระจายของเวลบัลล์ สำหรับแบบจำลองความผิดปกติทางคณิตศาสตร์ และความแตกต่างของพารามิเตอร์การกระจายไม่มีผลสำหรับผู้ผลิตต่างกัน

การพิสูจน์ว่าการกระจายเชิงทฤษฎีของเวลบัลล์สามารถเป็นตัวแทนของความผิดปกติได้จริงหรือไม่ ทำได้โดยมีการนำเอาความรู้ทางสถิติมาพิจารณาเนื่องจากฟังก์ชันการกระจายเชิงทฤษฎีของเวลบัลล์มีลักษณะเป็นสมการ การถดถอยเชิงเส้น(Linear Regression) จากสมมติฐานของสมการการถดถอย

$$Y = AX + B + \varepsilon \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

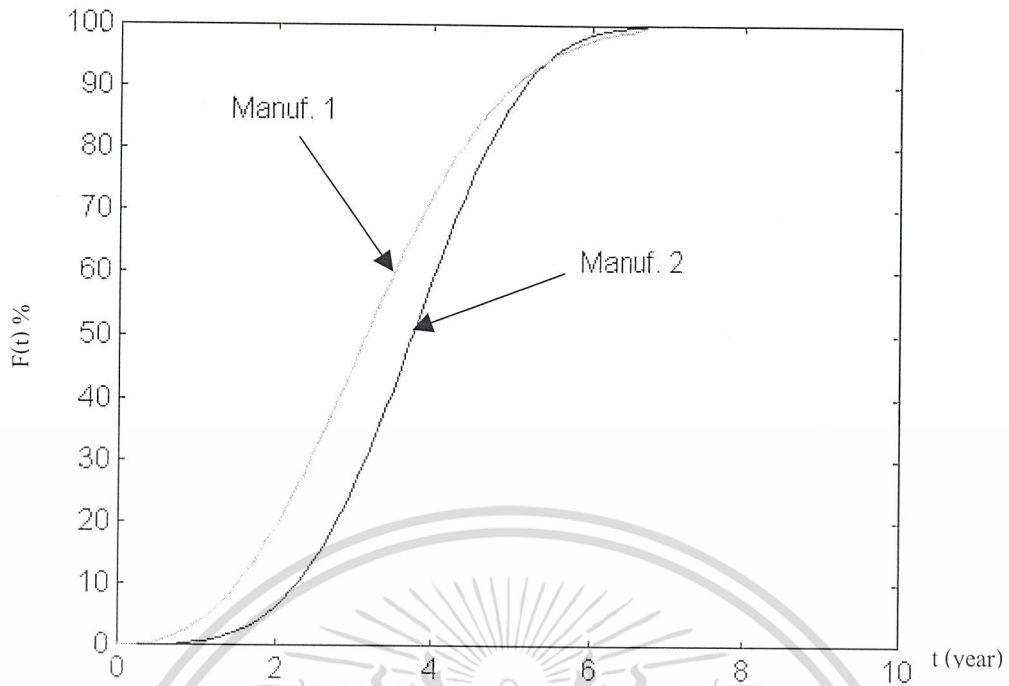
ตัวอย่างการวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายเชิงทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณ



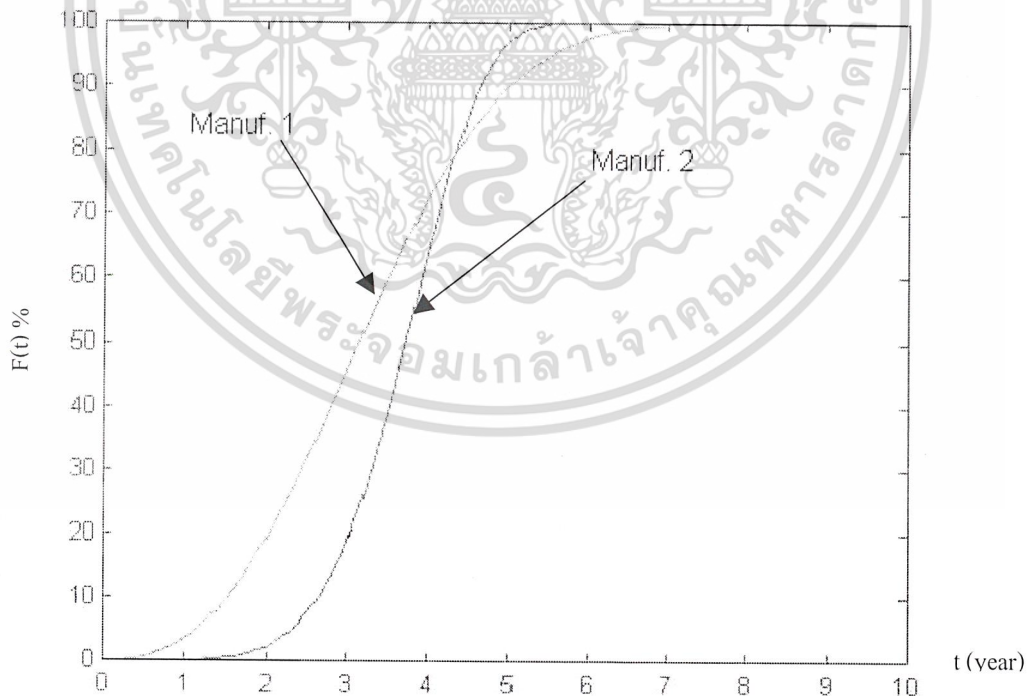
รูปที่ 4.4 ก เส้นโค้งการกระจายเชิงทฤษฎีของ $F(t)$ ของอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์

- 1 คือช่วงที่ค่าของ $F(t)$ ของผู้ผลิต ก มีค่ามากกว่าผู้ผลิต ข อธิบายได้ว่าอัตราการเกิดความผิดปกติ F_r ของผู้ผลิต ก มีค่าน้อยกว่าผู้ผลิต ข ในช่วงนี้
- 2 จุดที่ $F(t)$ ระหว่างผู้ผลิต 2 รายตัดกันอธิบายได้ว่าอัตราการเกิดความผิดปกติเท่ากัน
- 3 คือช่วงที่ค่าของ $F(t)$ ของผู้ผลิต ก มีค่าน้อยกว่าผู้ผลิต ข อธิบายได้ว่าอัตราการเกิดความผิดปกติ F_r ของผู้ผลิต ก มีค่ามากกว่าผู้ผลิต ข ในช่วงนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ข เส้นโค้งการกระจายเชิงทฤษฎีของ $F(t)$ ของอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์ในกลุ่มที่ 1



รูปที่ 4.4 ค เส้นโค้งการกระจายเชิงทฤษฎีของ $F(t)$ ของอายุการใช้งานของคาปาซิเตอร์ในกลุ่มที่ 2
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงและต้องมีคุณสมบัติที่ถูกต้องตามสมมุติฐานของ ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอย นักสถิติพบว่าค่า a และ b ของตัวอย่างมีการแจกแจงแบบปกติ แต่เนื่องจากข้อมูลที่นำมาใช้สร้างสมการถดถอยมักมีจำนวนไม่มาก ดังนั้นการแจกแจงแบบ t จึงถูกนำมาใช้ในการทดสอบสมมุติฐานเกี่ยวกับค่า A และ B นี้ จึงเป็นค่า t ที่ได้จากการเปิดตารางแบบ t จะมีค่าเท่าไรขึ้นอยู่กับระดับนัยสำคัญ (α)



รูปที่ 4.6 แสดงเส้นโค้งการกระจายแบบที่ ที่มีลักษณะท้ายเดียว (OneTail)

ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) หมายถึงระดับหรือความน่าจะเป็นของความเสียหายในการที่จะสรุปผลผิดพลาดบนพื้นฐานของข้อมูลที่มีอยู่แล้ว โดยสรุปว่าสมมุติฐาน (Null Hypothesis) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือฟังก์ชันการกระจายของเวลบัลล์ว่าถูกต้องใช้ได้จริงหรือไม่ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ α (Alpha) ค่า α โดยทั่วไปที่นักวิจัยใช้คือ 0.001, 0.01, 0.05 และ 0.20

ในการทดสอบสมมุติฐานโดยกำหนดค่า α เท่ากับ 0.05 หมายถึง มีความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่จะสรุปผลผิด ที่จะทำให้ต้องปฏิเสธสมมุติฐานอยู่ร้อยละ 5 และความน่าจะเป็นที่สมมุติฐานจะใช้ได้จริงเท่ากับ 95 % นั่นคือมีเพียง 5% เท่านั้นที่ความเชื่อมั่นไม่ครอบคลุมค่า Parameter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การกระจายของเวลบัลล์มีการทดสอบแบบท้ายเดียว (One Tail) ทำให้ค่าวิกฤติสามารถหาได้จากตาราง Standard Normal Curve ค่าพื้นที่ใต้โค้งปกติจะนำไปหาค่า δ คือ 0.95 ค่า δ จากตารางในภาคผนวก ง คือ 1.658 สาเหตุที่เลือกใช้ค่า α เท่ากับ 0.05 เพราะว่าการกระจายของเวลบัลล์เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการใช้แทนอายุการใช้งานของอุปกรณ์อยู่ก่อนแล้วและเป็นค่าที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง

ส่วนค่าวิกฤติ D_n^α (Critical Value) คือค่าสถิติที่เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธแบบจำลองโดยที่ $D_n^\alpha = \frac{\delta}{\sqrt{n}}$ โดยที่ δ คือค่ามาตรฐานที่ได้จากการเปิดตารางการกระจายแบบที่ ดังแสดงในภาคผนวก ง และ n คือ จำนวนข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง โดยได้มีการตรวจกับค่าวิกฤติที่ระดับ α ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ก พิสูจน์ว่าการกระจายของเวลบัลล์ของกลุ่มที่ 1 สามารถนำไปใช้ได้โดยเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติ D_n^α ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.025, 0.05, 0.10$

ผู้ผลิต	N	D_n	D_n^α ที่ $\alpha = 0.025$	D_n^α ที่ $\alpha = 0.05$	D_n^α ที่ $\alpha = 0.10$	พิสูจน์
ก	258	0.07687	$1.1980/\sqrt{n} = 0.12327$	$1.658/\sqrt{n} = 0.103222$	$1.289/\sqrt{n} = 0.08025$	ผ่าน
ข	54	0.080107	$1.1980/\sqrt{n} = 0.26944$	$1.658/\sqrt{n} = 0.225625$	$1.289/\sqrt{n} = 0.17541$	ผ่าน

ตารางที่ 4.5 ข พิสูจน์ว่าการกระจายของเวลบัลล์ของกลุ่มที่ 2 สามารถนำไปใช้ได้โดยเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติ D_n^α ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.025, 0.05, 0.10$

ผู้ผลิต	N	D_n	D_n^α ที่ $\alpha = 0.025$	D_n^α ที่ $\alpha = 0.05$	D_n^α ที่ $\alpha = 0.10$	พิสูจน์
ก	146	0.110076	$1.1980/\sqrt{n} = 0.16386$	$1.658/\sqrt{n} = 0.137217$	$1.289/\sqrt{n} = 0.11667$	ผ่าน
ข	54	0.080107	$1.1980/\sqrt{n} = 0.26944$	$1.658/\sqrt{n} = 0.225625$	$1.289/\sqrt{n} = 0.17541$	ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดความผิดปกติ

การทดสอบการใช้งานที่รู้จักกันดีในชื่อว่า “Definite time and tail cut test “ ถูกนำมาใช้ในการคำนวณอัตราการเกิดความผิดปกติ (failure rate: F_r) 5 ปี ของการรวบรวมข้อมูลที่นำมาศึกษา Definite time: T คาปาซิเตอร์กลุ่มนี้ติดตั้งระหว่างวันที่ 1 มกราคม 2536 ถึง 31 ธันวาคม 2537 ถูกเลือกสำหรับมา F_r ซึ่งนำไปสู่การทดสอบอายุการใช้งาน ฟังก์ชันการกระจายเชิงทฤษฎีของเวลบลัสส์สำหรับผู้ผลิตต่างกัน แสดงในตารางที่ ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$F_r = \left(\frac{m}{t_0}\right)t^{m-1} \quad (4.16)$$

สามารถหาค่ามาได้จากค่าพารามิเตอร์การกระจาย m และ t_0 ของ $F(t)$ และสรุปในตารางที่ 4.6

สำหรับการเปรียบเทียบและการคำนวณ มีการใช้วิธีการที่แตกต่างกัน 2 วิธี ในการคำนวณอัตราการเกิดความผิดปกติเฉลี่ย ($F_{r,av}$) แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้วิธีการที่ใช้ค่าเฉลี่ยดังนี้

$$F_{r,av} = \frac{1}{T} \int_0^T F_r dt \quad (4.17)$$

ผลลัพธ์ของวิธีการนี้ถูกนำมาเก็บในตารางที่ 4.7 และ $F_{r,av}$ มีค่าสูงกว่าค่า Random failure rate เล็กน้อย

F_r สำหรับผู้ผลิตที่แตกต่างกันได้ถูกคำนวณและสรุปลงในตารางที่ 4.7 ก และ ข ตารางนี้แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความผิดปกติของคาปาซิเตอร์ที่ต่างกันของผู้ผลิต 2 รายจากกลุ่มศึกษา 2 กลุ่มที่มีจำนวนคาปาซิเตอร์ไม่เท่ากัน ผู้ผลิตที่ต่างกันจะมีคุณภาพที่ต่างกันด้วย นั่นคือผู้ผลิต ก มีคุณภาพดีกว่าในช่วงแรกแต่ในช่วงท้ายผู้ผลิต ก มีคุณภาพต่ำกว่า แต่โดยภาพรวมซึ่งพิจารณาจากอัตราการเกิดความผิดปกติเฉลี่ย $F_{r,av}$ พบว่าผู้ผลิต ก มีคุณภาพดีกว่า ถึงแม้จะวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือจากกลุ่มศึกษาที่มีจำนวนคาปาซิเตอร์ไม่เท่ากัน ซึ่งความแตกต่างนี้อาจเกิดจากการออกแบบ , วัสดุ และสภาพของการผลิต ซึ่งสามารถวิเคราะห์ทางกายภาพได้ แต่อยู่นอกเหนือขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จากตารางที่ 4.6 ทำให้ทราบอัตราการเกิดความผิดปกติ F_r ดังนี้

สำหรับกลุ่มที่ 1	ผู้ผลิต ก	$F_r = 0.01724 t^{2.811}$
	และผู้ผลิต ข	$F_r = 0.09084 t^{1.602}$
สำหรับกลุ่มที่ 2	ผู้ผลิต ก	$F_r = 0.00252 t^{4.2587}$
	และผู้ผลิต ข	$F_r = 0.09084 t^{1.602}$

จากนี้สามารถคำนวณค่า F_r ในปีต่างๆ โดยการแทนค่า t และอินทิเกรตหาค่า $F_{r,av}$ ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตามสมการที่ (4.17) ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ก แสดงค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณอัตราการเกิดความผิดปกติ F_r ของกลุ่มที่ 1

ผู้ผลิต	N_i	N_f	Parameters		F(t)	
			m	t_0	a	b
ก	2448	258	3.811	221.068	3.811	221.068
ข	900	54	2.602	28.645	2.602	28.645

ตารางที่ 4.6 ข แสดงค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณอัตราการเกิดความผิดปกติ F_r ของกลุ่มที่ 2

ผู้ผลิต	N_i	N_f	Parameters		F(t)	
			m	t_0	a	b
ก	1078	146	5.2587	2088.53	5.2587	2088.53
ข	900	54	2.6020	28.645	2.6020	28.645

ตารางที่ 4.7 ก F_r และ $F_{r,av}$ ของกลุ่มที่ 1 สำหรับผู้ผลิต ก และ ข

ผู้ผลิต	F_r , % ปี					$F_{r,av}$ สมการ(4.9)
	t=1	t=2	T=3	t=4	t=5	
ก	0.01724	0.120985	0.378203	0.849039	1.58979	0.41716
ข	0.090836	0.275745	0.527966	0.83706	1.19676	0.45994

ตารางที่ 4.7 ข F_r และ $F_{r,av}$ ของกลุ่มที่ 2 สำหรับผู้ผลิต ก และ ข

ผู้ผลิต	F_r , % ปี					$F_{r,av}$ สมการ(4.9)
	t=1	t=2	T=3	t=4	t=5	
ก	0.002517	0.048181	0.270894	0.922308	2.38554	0.45379
ข	0.090836	0.275745	0.527966	0.837060	1.19676	0.45994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเกิดความผิดปกติ

โดยทั่วไปสาเหตุของความผิดปกติสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ คือ สาเหตุภายในซึ่งมีผลมาจากกระบวนการผลิต และสาเหตุภายนอก ซึ่งมีผลมาจากสภาวะในการทำงาน

1. สาเหตุภายใน (Internal causes)

ผู้ผลิตต่างกันจะมีอัตราการเกิดความผิดปกติที่ต่างกันด้วย ถึงแม้ว่าคาปาซิเตอร์ทั้งหมดถูกใช้งานในพื้นที่เดียวกันซึ่งมีสภาพการทำงานที่ค่อนข้างเหมือนกันแต่ก็ยังมี อัตราการเกิดความผิดปกติที่แตกต่างกัน สาเหตุสำคัญที่สุดที่ทำให้อัตราการเกิดความผิดปกติสูง เพราะว่าปัญหาบางอย่างของวัสดุ, กระบวนการผลิต หรือการทดสอบระหว่างการผลิต, และคุณสมบัติการดิสชาร์จบางส่วน

2. สาเหตุภายนอก (External causes)

(1) Switching over voltage

Oil switch ถูกใช้สำหรับควบคุมชุดคาปาซิเตอร์ ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมี Interrupting capacity และ breaking capacity ที่ไม่ดีและมักทำให้เกิดการ re-strike หลังจากทีหน้าสัมผัสได้เปิดแล้ว ซึ่งอาจเกิดมาจากสวิตช์ขาดการบำรุงรักษา คาปาซิเตอร์ก็จะได้รับการ Switching over voltage ค่าของ Switching over voltage สามารถมีค่าสูงได้ถึง 3 - 5 เท่าของแรงดันปกติ การเกิด Switching over voltage นี้จะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนและ PDIV จะถูกลดค่าลง คาปาซิเตอร์ส่วนใหญ่จะได้รับการกระทบจาก Switching surge วันละ 1 ครั้งทุกวัน เพราะว่า Oil switch จะปิดชุดคาปาซิเตอร์วันละ 1 ครั้ง ทุกวันสำหรับทุกๆ pole ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง เพอร์เซ็นต์ความผิดปกติของชุดคาปาซิเตอร์ที่ทำงาน 24 ชั่วโมงน้อยกว่าชุดคาปาซิเตอร์ ที่ทำงานน้อยกว่า 24 ชั่วโมงต่อวัน เหตุผลเนื่องมาจากชุดคาปาซิเตอร์เหล่านี้ส่วนใหญ่ได้รับ Switching surge ทุกวัน วันละ 1 ครั้ง ชุดคาปาซิเตอร์ที่พบความผิดปกติบ่อยครั้งจะพบว่ามีความเสียหาย 2 หรือ 3 ยูนิต เพราะว่าคาปาซิเตอร์ 3 ยูนิตของชุด(Bank)เดียวกันจะได้รับ Switching surge พร้อมๆกัน ความเสียหายหลายๆยูนิตแบบนี้จะพบในเวลาเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน

(2) การเชื่อมต่อกันระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังในระบบที่ศึกษาเป็นแบบ Delta connected คาปาซิเตอร์ต่อแบบ wye ไม่ต่อกราวด์ บนระบบ 69 kV เมื่อคาปาซิเตอร์ 1 ยูนิตเกิดเสียหายขึ้นมา คาปาซิเตอร์ยูนิตอื่นๆ ในแบงก์เดียวกันจะได้รับ over voltage ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{3}$ คูณกับแรงดันไฟฟ้า จนกระทั่ง ฟิวส์ขาดตัดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ นี่เป็นเหตุผลหนึ่งว่าทำไมคาปาซิเตอร์ 2 หรือ 3 ตัว ในแบงก์เดียวกันมักจะเสียหายพร้อมๆกัน การต่อคาปาซิเตอร์แบบนี้อาจทำให้อัตราการเกิดความผิดปกติเพิ่มมากขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Ambient temperature)

โดยปกติคาปาซิเตอร์ถูกติดตั้งไว้บน Pole ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิตอนกลางวันและกลางคืนมีค่าสูงในประเทศที่อยู่ในเขตร้อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอาจทำลายวัสดุที่ใช้ห่อหุ้ม (seal) คาปาซิเตอร์ได้ ถ้าการเปลี่ยนแปลงมีค่าสูงและวัสดุห่อหุ้มไม่แข็งแรงพอ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอาจส่งผลกระทบต่อ PDIV ของคาปาซิเตอร์ ซึ่งจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำพิคัดแรงดัน ทำให้คาปาซิเตอร์เกิดการดิสชาร์จบางส่วนหรือเกิดการเบรคดาวน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

โครงการหรือปริญญาณิพนธ์นี้ ใช้การวิเคราะห์เปรียบเทียบความน่าเชื่อถือระหว่างคาปาซิเตอร์ที่ผลิตจากผู้ผลิตที่แตกต่างกัน ซึ่งการกระจายของเวลบัลล์สามารถใช้เป็นตัวแทนของอายุการใช้งานคาปาซิเตอร์ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติที่ระดับความน่าเชื่อถือ $\alpha = 0.025, 0.050, 0.010$

โดยทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือจากคาปาซิเตอร์ 2 กลุ่ม ของผู้ผลิต 2 ราย โดยในกลุ่มที่ 1 มีจำนวนยูนิตเป็นร้อยละไม่เท่ากัน และกลุ่มที่ 2 มีจำนวนยูนิตเป็นร้อยละที่ใกล้เคียงกัน พบว่า อัตราการเกิดความผิดปกติมีค่าไม่ต่างกันมากนัก

โดยพบว่า

ช่วงแรก (ประมาณ 5 ปีแรก) คาปาซิเตอร์ที่ผลิตจากผู้ผลิต ข มีอัตราการเกิดความผิดปกติมากกว่า คาปาซิเตอร์ที่ผลิตจากผู้ผลิต ก

ช่วงที่สอง (หลังจากปีที่ 5) คาปาซิเตอร์ที่ผลิตจากผู้ผลิต ข มีอัตราการเกิดความผิดปกติมากกว่า คาปาซิเตอร์ที่ผลิตจากผู้ผลิต ก

ช่วงที่สรุปไม่ได้ (มากกว่าปีที่ 6) เนื่องจากเก็บข้อมูลไม่เพียงพอ

จึงสรุปได้ว่า

ในช่วงแรก ผู้ผลิต ก มีความน่าเชื่อถือกว่าผู้ผลิต ข

ในช่วงที่สอง ผู้ผลิต ข มีความน่าเชื่อถือกว่าผู้ผลิต ก

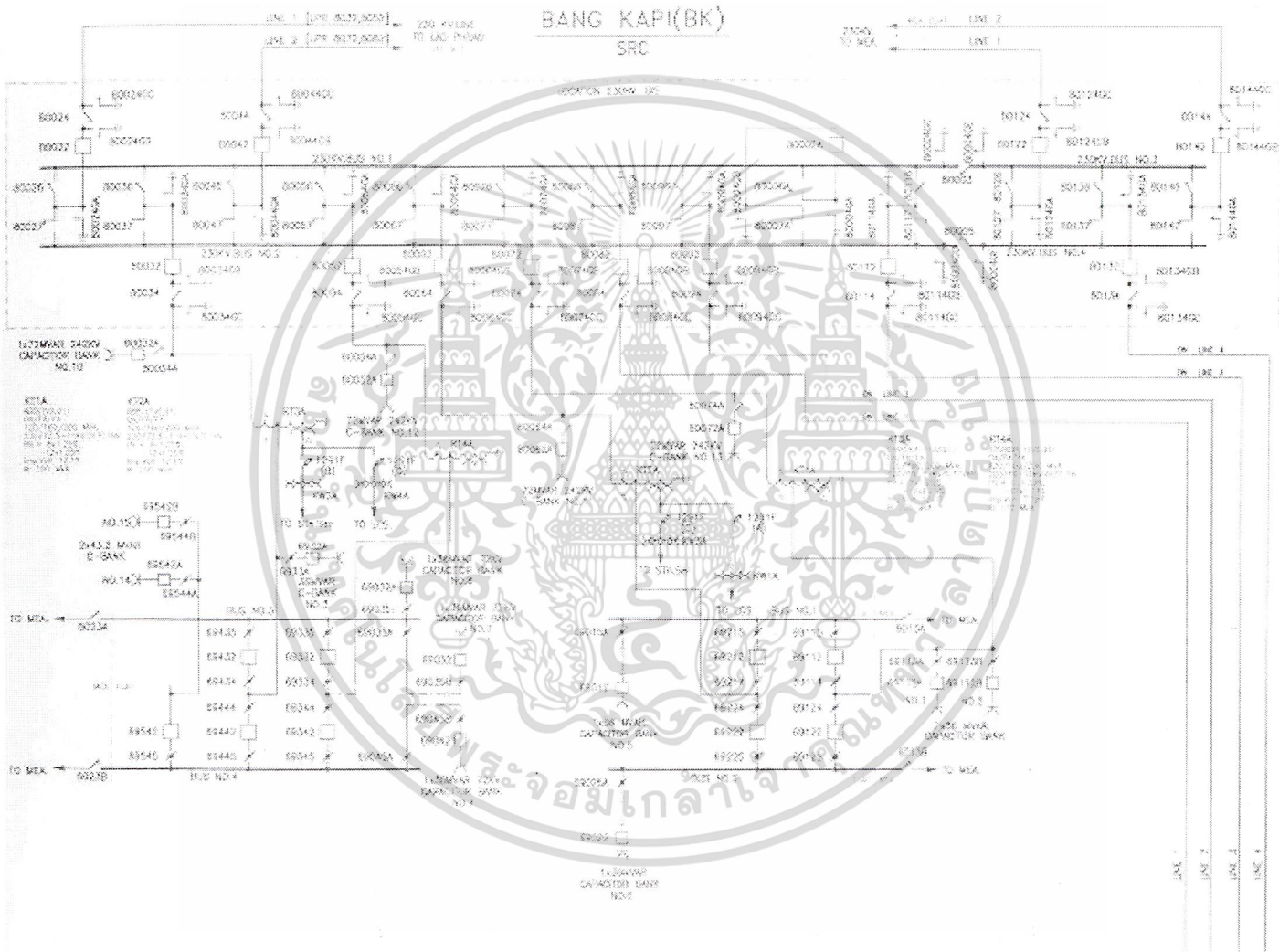
ซึ่งแล้วแต่จะเลือกใช้งานตามความเหมาะสมโดยพิจารณาจากระยะเวลา

ปัญหาที่พบคือการรวบรวมข้อมูล ซึ่งข้อมูลของการไฟฟ้าที่มีการเก็บรวบรวมไว้แล้วนั้น เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ไม่มีความเป็นระเบียบ ไม่เป็นระเบียบ โดยมีการจัดบันทึกประจำวันจากบุคคลหลายคน ซึ่งแต่ละคนเก็บรายละเอียดได้ไม่เท่ากัน ทำให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้บางส่วนขาดหายไป และมีระยะเวลาในการเก็บข้อมูลที่น้อยเกินไปซึ่งทำให้การวิเคราะห์ อาจมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีเท่ากับการที่มีระยะเวลาในการเก็บข้อมูลที่มากกว่า

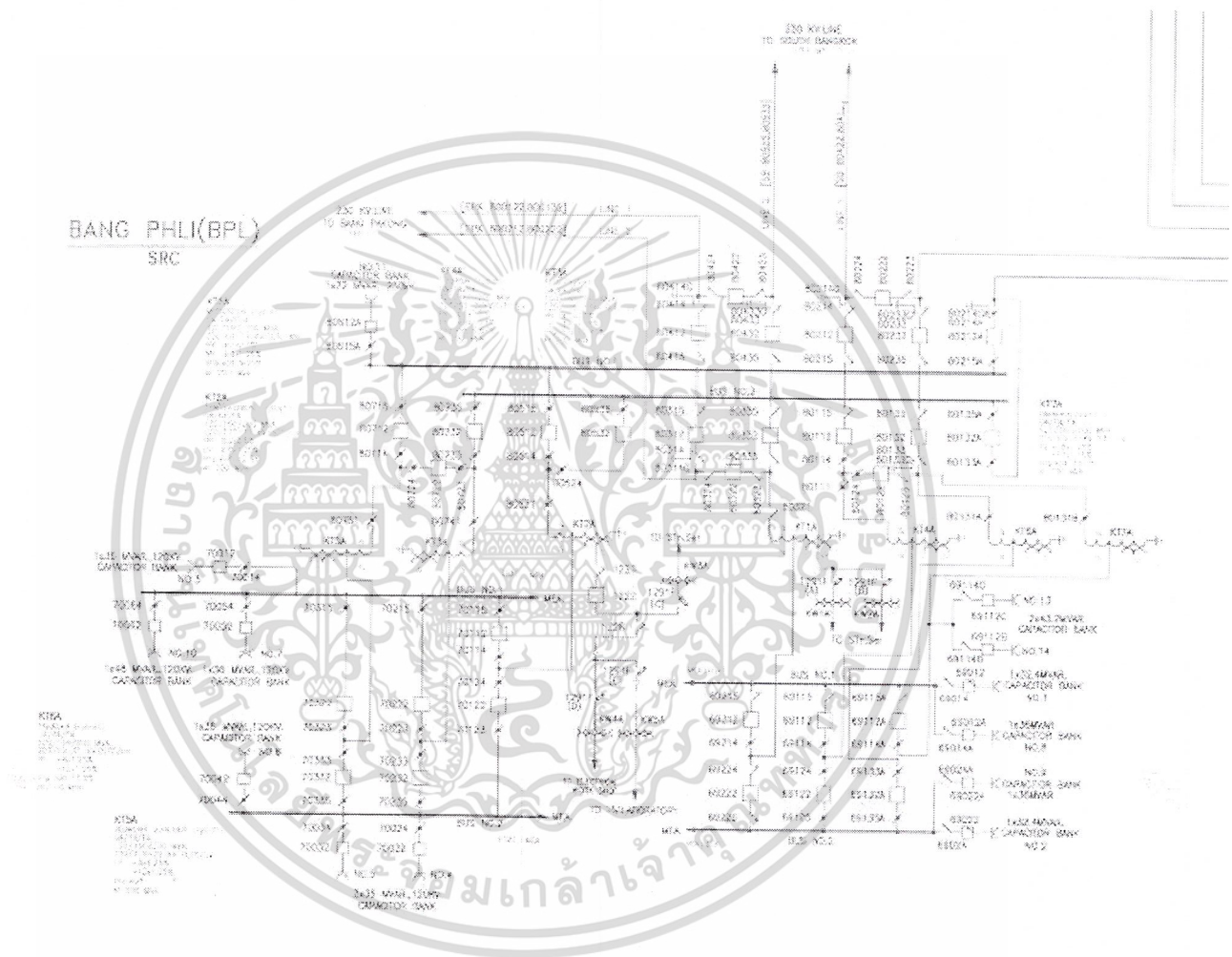
ข้อเสนอแนะ การเก็บรวบรวมข้อมูลควรร่วมมือกับการไฟฟ้าเพราะว่าเป็นการศึกษาที่ต้องอาศัยเวลาในการรวบรวมพอสมควร และควรมีการตกลงร่วมกันไว้ล่วงหน้าว่าต้องการข้อมูลเรื่องอะไรบ้างที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์ต่อตัวผู้ศึกษาเองและการไฟฟ้าด้วย เสนอแนวทางการคิด ทฤษฎี ตลอดจนวิธีการ เพื่อที่จะได้รายละเอียดที่ครอบคลุม การวิเคราะห์ที่ได้จะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ถูกต้องขึ้นและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

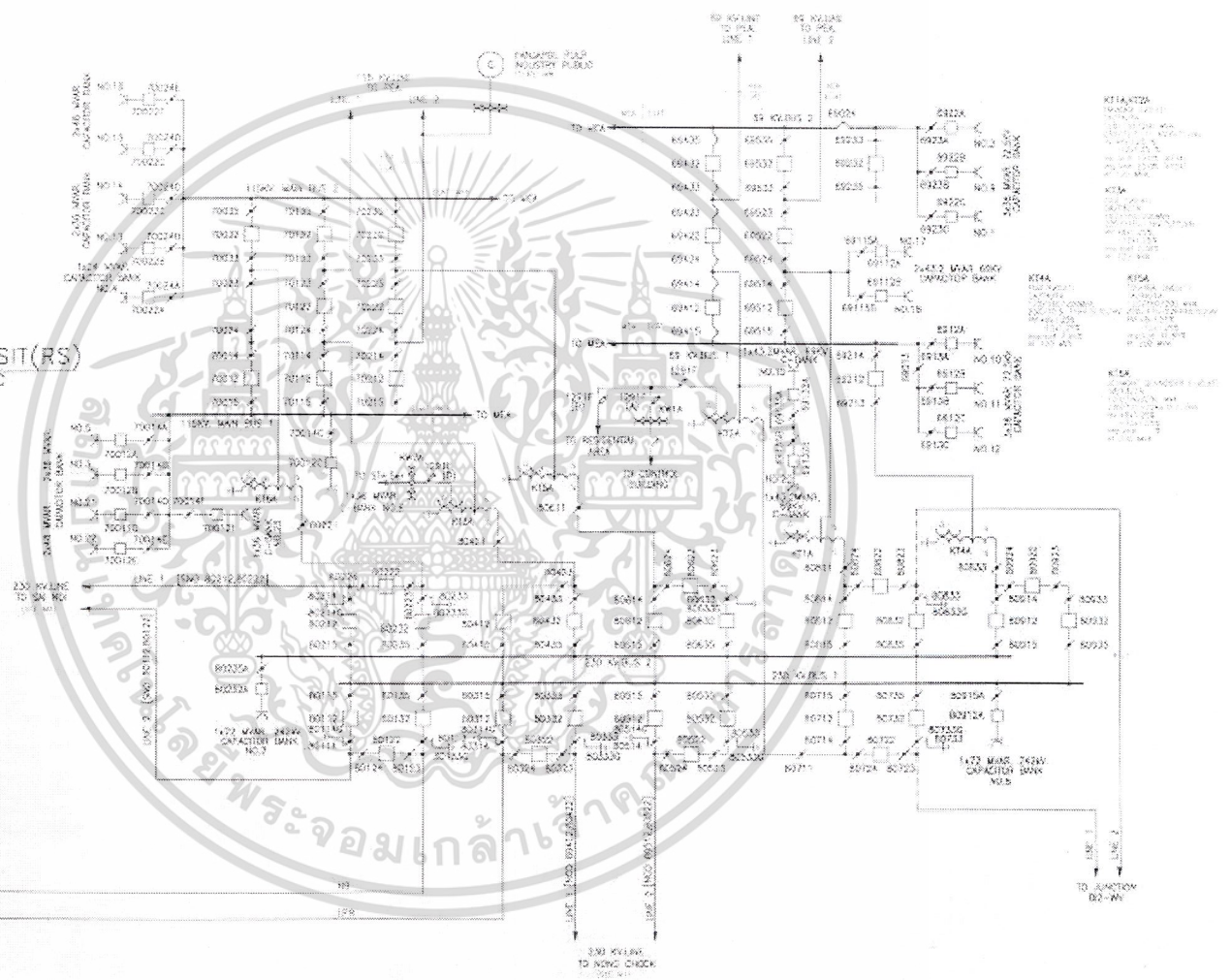
Single line diagram ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง กฟผ. เขตนครหลวง

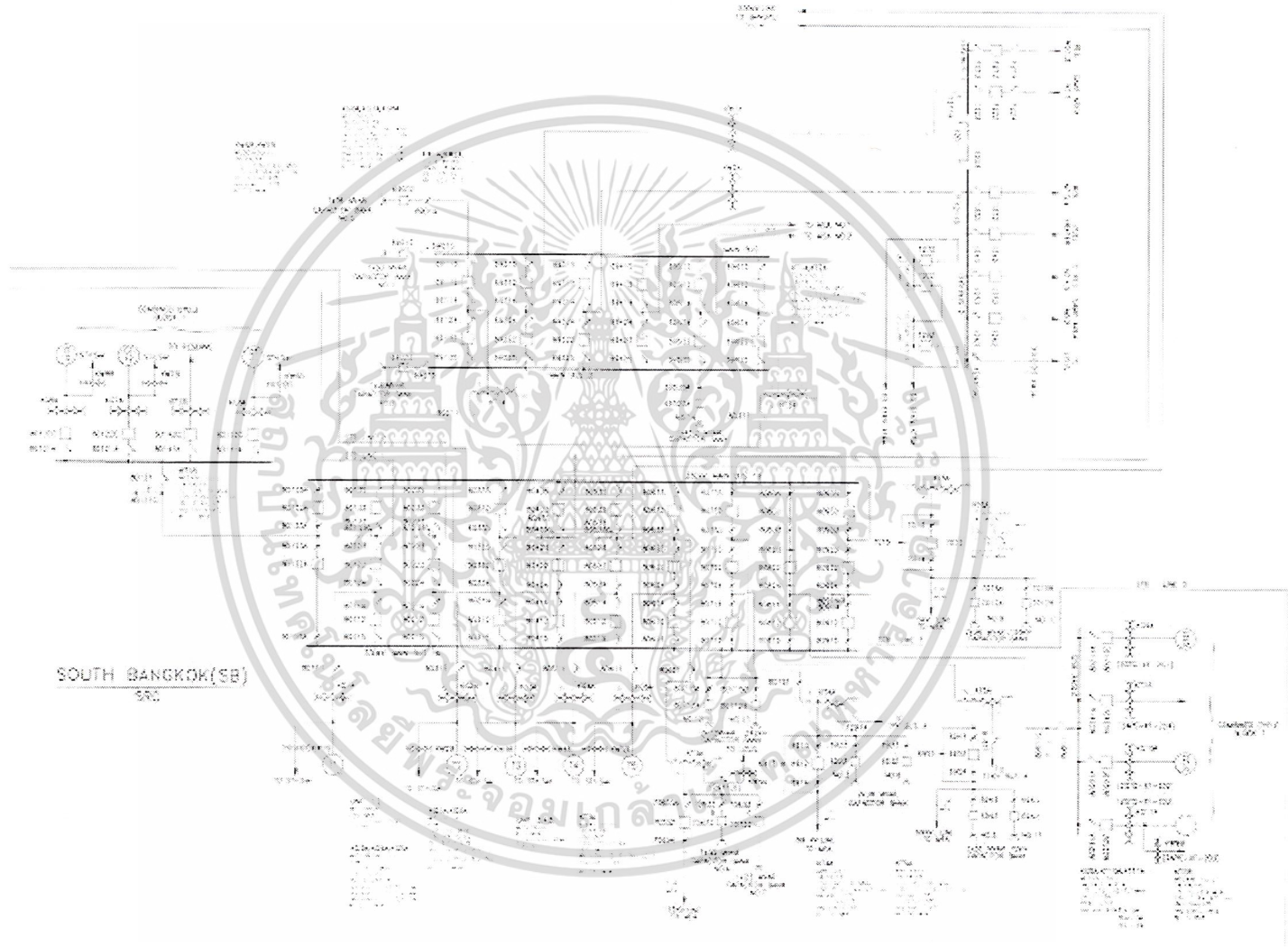


BANG PHLI(BPL)
SRC



RANG SIT(RS)
SRC





ภาคผนวก ค

รายละเอียดคาปาซิเตอร์ในกลุ่มที่ศึกษาจาก 12 สถานีไฟฟ้าแรงสูง
สถานีไฟฟ้าบางกะปิ

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	36	69	ABB	200
2	36	69	ABB	200
3	36	69	ABB	200
4	36	69	ABB	200
5	36	69	ABB	400
6	36	69	ABB	400
7	36	69	ABB	400
8	36	69	NOKIA	400
9	36	69	NOKIA	400
10	72	230	ABB	400
11	72	230	ABB	400
12	72	230	NOKIA	400
13	72	230	NOKIA	400
14	43.2	69	NOKIA	400
15	43.2	69	NOKIA	400

สถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	60	230	Roder Steine	417
2	60	230	NOKIA	400
3	60	230	Roder Steine	417
4	36	115	NOKIA	400
5	36	115	NOKIA	400
6	48	115	NOKIA	400
7	48	115	ABB	400
8	48	115	ABB	400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อเรื่องอ้างอิงถึงเอกสารทุกฉบับที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าแรงสูงบางพลี

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	32.4	69	ABB	200
2	32.4	69	ABB	200
3	36	115	ABB	400
4	36	115	ABB	400
5	36	115	NOKIA	400
6	36	115	NOKIA	400
7	36	115	NOKIA	400
8	36	69	NOKIA	400
9	36	69	NISSIN	400
10	48	115	ABB	400
11	72	230	NOKIA	400
12	-	-	-	-
13	43.2	69	NOKIA	400
14	43.2	69	NOKIA	400

สถานีไฟฟ้าแรงสูงลาดพร้าว

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	32.4	69	NOKIA	200
2	32.4	69	ASEA	225
3	30	69	ASEA	220
4	36	69	ABB	200
5	36	69	ABB	400
6	36	69	NOKIA	400
7	36	69	NOKIA	400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าแรงสูงไทรน้อย

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	-	-	-	-
2	48	115	ABB	400
3	48	115	ABB	400
4	48	115	NOKIA	400
5	48	115	NOKIA	400
6	72	230	NOKIA	400
7	72	230	NOKIA	400

สถานีไฟฟ้าแรงสูงพระนครใต้

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	30	69	NOKIA	200
2	30	69	NOKIA	200
3	36	69	ASEA	220
4	30	115	ASEA	210
5	36	69	INDUCOR	200
6	36	69	ABB	400
7	22	115	ABB	400
8	36	69	ABB	400
9	36	115	NOKIA	400
10	36	115	NOKIA	400
11	36	69	NOKIA	400
12	72	230	ABB	400
13	72	230	ABB	400
14	43.2	69	NOKIA	400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าแรงสูงพระนครเหนือ

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	30	69	NOKIA	200
2	30	69	NOKIA	200
3	30	69	ASEA	200
4	30	69	ASEA	200
5	72	230	ABB	400
6	-	-	-	-
7	36	69	NOKIA	400
8	36	69	NOKIA	400
9	36	69	NOKIA	400
10	36	69	NOKIA	400
11	72	230	NOKIA	400

สถานีไฟฟ้าแรงสูงธนบุรีใต้

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	36	69	Roder Steine	200
2	36	69	Roder Steine	200
3	36	69	NOKIA	400
4	36	69	NOKIA	400
5	43.2	69	NOKIA	400
6	43.2	69	NOKIA	400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าแรงสูงรังสิต

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	36	69	ASEA	200
2	36	69	ABB	400
3	36	115	ABB	400
4	24	115	ABB	400
5	36	115	ASEA	200
6	36	115	ABB	400
7	72	230	ABB	400
8	72	230	ABB	400
9	36	69	NOKIA	400
10	36	69	NOKIA	400
11	36	69	NOKIA	400
12	36	69	NOKIA	400
13	36	115	ABB	400
14	36	115	ABB	400
15	48	115	ABB	400
16	48	115	ABB	400
17	43.2	69	NOKIA	400
18	43.2	69	NOKIA	400
19	43.2	69	NOKIA	400
20	43.2	69	NOKIA	400
21	48	115	NOKIA	400
22	48	115	NOKIA	400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าแรงสูงบางกอกน้อย

Step	MVAR	แรงดัน (kV)	ผู้ผลิต	KVar ของ C-unit
1	36	69	AESA	200
2	36	69	ASEA	200
3	36	69	ABB	400
4	36	69	ABB	400
5	72	230	ABB	400
6	36	69	ABB	400
7	72	230	ABB	400
8	36	69	NISSIN	400

สถานีไฟฟ้าแรงสูงรัชดาภิเษก ไม่มีการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์

สถานีไฟฟ้าแรงสูงอ่อนนุช ไม่มีการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ตารางการกระจายแบบที (Distribution of T)

degrees of freedom (df)	Level of significance for one-tailed test					
	.10	.05	.025	.01	.005	.0005
	Level of significance for two-tailed test					
	.20	.10	.05	.02	.01	.001
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

Source: Table III of Fisher & Yates: *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*, published by Longman Group Ltd., London (1974), 6th edition (previously published by Oliver & Boyd Ltd., Edinburgh). By permission of the authors and publishers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกท่าน ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เพราะเป็นส่วนที่เป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้า มีความตั้งใจและมีความเพียรพยายามที่จะทำโครงการชิ้นนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

1. อาจารย์สมโภชน์ ประไพ อาจารย์ที่ปรึกษา,อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล.
2. คุณพุดิขจร บุญมี วิศวกรฝ่ายปฏิบัติการเขตนครหลวง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
3. คุณธีรศักดิ์ สุโขตินันท์ วิศวกรฝ่ายปฏิบัติการภาคกลาง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
4. คุณอักรพล เนาวภาค วิศวกรฝ่ายปฏิบัติการภาคกลาง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
5. อาจารย์อนุวัฒน์ จางวลีเลิศ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล.
6. อาจารย์ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล.
6. อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล.
7. อาจารย์จรงค์ บัญเส็ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล.
8. อาจารย์ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล.
9. ดร.วิไลพร วรจิตตานนท์ ผู้ช่วยคณะบดีฝ่ายบัณฑิตศึกษา คณะครุศาสตร์ ฯ สจล
10. คุณสมพงษ์ คล้ายบัณฑิต เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ คณะครุศาสตร์ ฯ สจล.

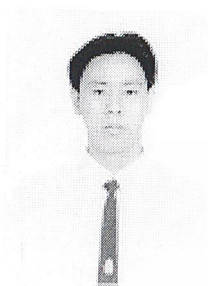
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. A.S. Farag . “Failure Analysis of Composite Dielectric of Power Capacitor in Distribution Systems”. IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation Volume 5 , No. 4 , August 1998. Page 583-588
2. Suchada Bowarnkittiwong. “Why α is 0.05?”. Journal of Research Methodology. Volume 11 , No. 2 , July-December 1998. Page 13-20
3. Luces M. Faulkenberry . Electrical Power Distribution and Transmission. Columbus Ohio , Prentice – Hall , 1996. 582 pages
4. Joseph F. Healey . Statistics: A Tool for Social Research. 3rd Edition. Belmont California, Wadsworth Publishing Company , 1993. 554 pages
5. สุรัตน์ นันตสุขคนธ์. ระบบไฟฟ้ากำลังเล่ม 2 . กรุงเทพฯ ฯ , บริษัทประชาชน จำกัด , 2537. 344 หน้า
6. System Control and Operation Division. Switching and Transmission Line Diagram. Bangkok , Printing Department Public Relation Division EAT , 2537. 27 pages
7. คำฟูย จีระระรินทร์ศักดิ์. Reactive Power. กรุงเทพฯ ฯ. กองบำรุงรักษาอุปกรณ์สถานีไฟฟ้า ฝ่ายปฏิบัติการเขตนครหลวง , 2536. 47 หน้า
8. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเรียง ขจรศิลป์. สถิติวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 6. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , หจก. พี.เอ็น. การพิมพ์ , 2539. 162 หน้า
9. นันทลักษณ์ ณ ป้อมเพชร. สถิติเพื่อการวางแผน. กรุงเทพฯ ฯ , โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ , 2540. 303 หน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายชื่อผู้จัดทำ



นายสิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล

เลขประจำตัว 38014560

151 ถนนเทศบาลสาย 1 ตำบลวัดกัลยาณ์

เขตธนบุรี กรุงเทพฯ 10600

โทรศัพท์ (02) 4655576



นายสุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์

เลขประจำตัว 38014575

1133/2 ถนนประจักษ์ ตำบลในเมือง

อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย 43000

โทรศัพท์ (042) 412900



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้