



คาปาซิเตอร์แรงดันสูง
(HIGH VOLTAGE CAPACITOR)



ภักพงษ์ ภาคภูมิ 301204
(PAKAPONG PAKPOOM)

วิรัตน์ พันธุ์ไม้ม 301254
(WIRAT PUNTHUMO)

อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์นิตศน์ กฤษณจินดา

ADVISOR

Mr.NITHAD KRISNACHINDA (B.Eng KMITL; E.E. Ohio State)

ปริญญาโท สำหรับปริญญาตรี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **การศึกษา 2533** นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

028766



คำปาซีเตอร์แรงดันสูง

| | | | |
|----------|------------|---------|--------|
| ผู้จัดทำ | นายภัคพงษ์ | ภาคภูมิ | 301204 |
| | นายวิรัตน์ | พันธุ์ม | 301254 |

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์นิทัศน์ กฤษณจินดา)

บทคัดย่อ

ในโครงการนี้แสดงถึง การออกแบบ, โครงสร้าง และการทดสอบคาปาซิเตอร์แรงดันสูง ที่มีพิกัด 12 kV, 50Hz , 0.663 microfarad , 30kvar โครงสร้างของคาปาซิเตอร์ประกอบด้วย แผ่นอลูมิเนียมพอลิเอทิลีน 2 แผ่น, แผ่น OPP พิล์ม, แฉกในน้ำมัน PXE, บุชชิ่งแบบเซรามิก และตัวถังสแตนเลส คาปาซิเตอร์ที่เป็นแบบ UNIT นี้เหมาะที่จะใช้เป็นอุปกรณ์ปรับค่าเพาเวอร์ แฟคเตอร์ในระบบส่งกำลังแรงสูง และได้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ IEC 70:1967 แล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

This project presents the design , construction and test of a 12 kV, 50 Hz , 0.663 microfarad , 30 kvar high voltage capacitor. The capacitor's construction consists of two-layer aluminium foils, OPP films impregnated by PXE capacitor oil , one ceramic bushing , 27 megaohm resistor and a stainless steel case. It is shown that this compact unit-type capacitor is suitable for the HV distribution system as a power factor improvement device since it has passed the IEC 70 : 1967 standard test.

สารบัญ

| | | |
|---------|---|----|
| | บทคัดย่อ | ก |
| บทที่ 1 | บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 | กฎพื้นฐานของคาปาซิเตอร์ | 2 |
| | คุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริก | 2 |
| | ฉนวนเหลว | 7 |
| | คาปาซิแตนซ์ | 7 |
| | CAPACITOR LOSS | 8 |
| | สูตรที่ใช้สำหรับเพาเวอร์คาปาซิเตอร์ | 9 |
| บทที่ 3 | โครงสร้างและกรรมวิธีการผลิตคาปาซิเตอร์ | 11 |
| | โครงสร้างพื้นฐานของคาปาซิเตอร์ | 11 |
| | กรรมวิธีการผลิต | 11 |
| | คาปาซิเตอร์แรงดันสูงแบบ UNIT | 12 |
| บทที่ 4 | การออกแบบคาปาซิเตอร์ | 15 |
| บทที่ 5 | การทดสอบก่อนนำมาใช้ ; มาตรฐาน IEC 70:1967 | 20 |
| | คาปาซิแตนซ์และ เอพท์พ | 21 |
| | การทดสอบวัดค่า loss ของคาปาซิเตอร์ | 21 |
| | การทดสอบด้วยแรงดันระหว่าง เทอร์มินัล | 22 |
| | การทดสอบด้วยแรงดันระหว่าง เทอร์มินัลกับตัวถัง | 22 |
| | การทดสอบด้วยแรงดันระหว่าง เทอร์มินัลกับดิน | 22 |
| บทที่ 6 | การสร้าง, ทดสอบและประเมินผล | 24 |
| | ผลการสร้าง | 24 |
| | การทดสอบ | 25 |
| | การประเมินผล | 26 |

| | | |
|---------|-----------------------------|----|
| บทที่ 7 | สรุป, วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ | 27 |
| | สรุปและวิจารณ์ | 27 |
| | ข้อเสนอแนะ | 27 |

ภาคผนวก

| | | |
|----|---|----|
| ก. | IEC 70:1967 | 30 |
| ข. | สมบัติของ วัสดุที่ใช้ทำคาปาซิเตอร์แรงดันสูง ของ บริษัท นิซชิน อิเล็กทริก จำกัด | 51 |

กิตติกรรมประกาศ

54

เอกสารอ้างอิง

55



บทที่ 1

บทนำ

ในการศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าทำให้ทราบว่า ในการพัฒนาชีวิตความเป็นอยู่ของทุกคนในสังคมให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น จะต้องพัฒนาพลังงานไฟฟ้าให้ก้าวหน้า และ เพาเวอร์คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่จำเป็น และมีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้า อย่างสูงยิ่ง

ปริญญาโทฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักที่จะศึกษาลักษณะสมบัติของคาปาซิเตอร์แรงดันสูงโดยละเอียด และออกแบบสร้างให้ใช้งานได้จริงภายใต้มาตรฐาน IEC 70:1967 โดยคาดหวังว่าความรู้และประสบการณ์ที่ได้จากการลงมือสร้างคาปาซิเตอร์แรงสูง จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจทุกท่าน

เนื้อหาของปริญญาโทฉบับนี้แบ่งเป็น 7 บท ซึ่งได้รวบรวมเนื้อหาสาระไว้ในบทต่าง ๆ ดังนี้คือ

บทที่ 2 กล่าวถึง กฎพื้นฐานของคาปาซิเตอร์

บทที่ 3 กล่าวถึง โครงสร้างและกรรมวิธีการผลิตคาปาซิเตอร์

บทที่ 4 กล่าวถึง การออกแบบสร้างคาปาซิเตอร์

บทที่ 5 กล่าวถึง การทดสอบก่อนนำมาใช้; มาตรฐาน IEC70:1967

บทที่ 6 กล่าวถึง การสร้าง,ทดสอบและประเมินผล

บทที่ 7 กล่าวถึง ข้อสรุป และวิจารณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

กฎพื้นฐานของคาปาซิเตอร์คุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริก

ไดอิเล็กตริกคือฉนวนไฟฟ้า ที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างอิเล็กโทรด เพื่อให้
ทนแรงดันได้สูงขึ้นกว่าอากาศ

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติและคุณภาพของสารไดอิเล็กตริกมี 4
ประการคือ

- ความต้านทาน
- เบอร์มิคตีวิตี้ หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
- แฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก
- ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

1) ความต้านทาน

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์ จะต้องไม่นำกระแสเลยเมื่อได้
รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือไม่มีสภาพนำไฟฟ้าเลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สาร
ฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติ ฉนวนที่ใช้งานจะนำกระแส
ซึ่งมีค่าน้อยมาก แสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้านั้นมีค่าความต้านทานสูงมาก แต่ไม่เป็น
อนันต์เลย ที่เดียว ถ้าค่าความต้านทานยิ่งสูง ฉนวนนั้นยิ่งมีคุณภาพดี

เมื่อฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโทรดแล้วบ่อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลา
นานจนกระทั่งอยู่ตัว จะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นในปริมาณน้อย เรียกว่ากระแสรั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือกระแสต่าง กระแสจะร่วผ่านฉนวน 2 ทาง ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวน อีกส่วน
ไหลผ่านตามผิวของฉนวน เพราะผิวมีสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากความชื้นและสิ่งเปราะ
เปื้อน การวัดความต้านทานของฉนวนจึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร และ
ความต้านทานเชิงผิว

2) เปอร์มิตติวิตี หรือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

เมื่อขั้วแรงดันให้แผ่นไดอิเล็กตริกทั้งสอง ฉนวนที่เป็นไดอิเล็กตริกจะ
เก็บกักพลังงาน การนำฉนวนก็เพื่อไม่ให้กระแสไหลระหว่างไดอิเล็กตริก

ความสามารถในการเก็บกักพลังงาน เรียกว่า เปอร์มิตติวิตี หรือค่าคง
ตัวไดอิเล็กตริก เปอร์มิตติวิตี เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ไดอิเล็กตริกนั้นเก็บกัก
ได้ เปรียบเทียบกับเปอร์มิตติวิตีของอากาศ

- เปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ ϵ_0

เปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ มีค่า $10^{-9}/36 \pi \text{ (F/m)}$

- เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ϵ_r

ถูกกำหนดด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ของไดอิเล็กตริก โดยพิจารณาเปรียบ

เทียบกับการแทนที่อากาศด้วยไดอิเล็กตริก ตาราง 2.1 แสดงค่าเปอร์มิตติวิตีของ
ไดอิเล็กตริกต่างๆ

ค่าเปอร์มิตติวิตีเป็นอัตราส่วนของ

ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก

ความเข้มสนามไฟฟ้า

เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

เมื่อ ϵ คือ เปอร์มิตติวิตีสัมบูรณ์

ϵ_0 เปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ

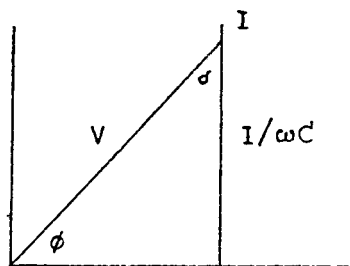
ϵ_r เปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

ตาราง 2.1 ค่าเปอร์มิตติวิตีและสูญเสียของสารไดอิเล็กตริกที่ใช้ทำคาปาซิเตอร์

| สารไดอิเล็กตริก | ϵ_r |
|--|--------------|
| อากาศ | 1.00 |
| Barium titanate (ceramic) | 3000.00 |
| Cellulose (paper impregnated with PCB) | 6.50 |
| แก้ว | 7.00 |
| น้ำมันแร่ | 2.13 |
| ไนท์ | 5.60 |
| Polypropylene | 2.20 |
| Polyester | 2.90 |

3) แพคเตอร์พลังงานสูญเสียในคาปาซิเตอร์

เมื่อไดอิเล็กตริกอยู่ในสุญญากาศ จะไม่เกิด loss กระแสที่ไหลวน คาปาซิเตอร์จะมีเฟสหน้าแรงดัน 90° พอดี dielectric loss จะเป็นผลมาจาก กระแสหน้าแรงดันไม่ถึง 90° มุมหน้าที่หายไปเรียกว่า loss angle ถ้ามุมนี้คือ σ ดังนั้น phase angle คือ $90^\circ - \sigma$ และเพาเวอร์แฟคเตอร์ มีค่าเท่ากับ $\cos(90^\circ - \sigma)$ ซึ่งใกล้เคียงกับ $\tan \sigma$ เพราะจะเป็นมุมเล็กมาก บกตี loss factor จะหมายถึง $\tan \sigma$ กระแสในคาปาซิเตอร์ $I = \omega CV$ และกำลังที่คาปาซิเตอร์รับไว้ $p = VI \cos \phi$ ซึ่งเท่ากับ $V I \tan \sigma$ (เมื่อ σ มีค่าต่ำกว่า 0.1).

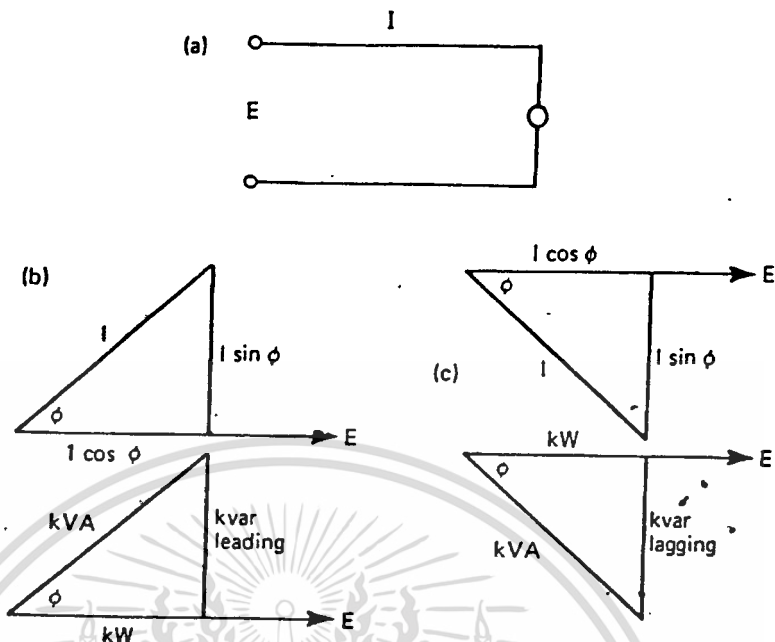


$$\tan \sigma = r \omega C$$

$$\phi = 90^\circ - \sigma$$

rI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งรูป 2.1 กำลังไฟฟ้าของวงจรคาปาซิทีฟ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.2 Power phasor และ complexors ในวงจรกระแสสลับ

- a) อินดัคทีฟหรือคาปาซิทีฟโหลด
- b) คาปาซิทีฟ
- c) อินดัคทีฟ

ตาราง 2.2 เปรียบเทียบ loss เมื่อใช้สารไดอิเล็กตริกต่างกัน

| Dielectric | Loss (W/kvar) |
|--------------------------------------|------------------|
| Paper, oil-impregnated | 2.0-2.5 |
| Paper, PCB-impregnated | 3.0-3.5 |
| Plastic film/paper, PCB-impregnated | 0.5-1.0 |
| Plastic film/paper, oil-impregnated | 0.5-1.0 |
| Metallised film | under 0.5 |
| Plastic film (OPP), MIPE-impregnated | under 0.2 |

4) ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก (ความเครียดสนามไฟฟ้า)

เนื่องจากค่าแรงดันสูงสุดที่จ่ายक्रमฉนวน กำหนดจากความหนาและชนิดของฉนวนนั้น ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนทนได้นี้ จึงจำเป็นมากในการออกแบบคาปาซิเตอร์ เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าจะเป็นตัวบ่งชี้จุดเบรคดาว์นของฉนวนนั้น ๆ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดคือค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดที่क्रमไดอิเล็กตริกต่อความหนา

$$\text{ความเครียดสนามไฟฟ้า} = \frac{\text{แรงดันที่क्रमไดอิเล็กตริก}}{\text{ความหนาของไดอิเล็กตริก}}$$

มีหน่วยในระบบ SI คือ MV/m ซึ่งเท่ากับ volt/micrometer

ตาราง 2.3 ค่าเฉลี่ยของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกต่าง ๆ

| สารไดอิเล็กตริก | ค่าความคงทนเมื่อใช้งาน (MV/m) |
|--|-------------------------------|
| อากาศ | 2-3 |
| Barium titanate (ceramic) | 0.35 |
| Cellulose (paper impregnated with PCB) | 16-18 |
| น้ำมันแร่ | 16-18 |
| ไมก้า | 80-100 |
| Polypropylene (ในไดอิเล็กตริกผสม) | 48-52 |

หมายเหตุ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขณะใช้งาน จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและอุณหภูมิแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนเหลว

ของเหลวใด ๆ ที่มีความต้านทานสูงมากพอ และไม่เปลี่ยนแปลงสภาพทางฟิสิกส์ ในช่วงเวลาที่นานพอสมควร จะนำมาใช้เป็นฉนวนได้ทั้งนั้น แต่การนำมาใช้ในระบบ แรงดันสูงให้ปลอดภัย, ไม่ผิดพลาด มีอายุการใช้งานยาวนานและประหยัด จะต้องรู้ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหลวนั้นก่อนนำไปใช้งาน

ฉนวนเหลวที่ใช้ในระบบแรงดันสูง ส่วนใหญ่จะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเช่น น้ำมันหม้อแปลง ซึ่งรู้จักและใช้มาเป็นเวลานาน นอกจากนั้นยังมีฉนวนสังเคราะห์ เช่น อีเทอร์ทิน, ซิลิโคน และคลอรีเนต

ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวนเหลว ที่ใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้ามี 3 กลุ่มคือ

- 1) คุณสมบัติทางฟิสิกส์
- 2) คุณสมบัติทางเคมี
- 3) คุณสมบัติทางไฟฟ้า

โดยหลักการแล้ว ของเหลวควรเป็นฉนวนได้ดีกว่าก๊าซและฉนวนแข็ง เนื่องจากของเหลวมีความหนาแน่นมากกว่าก๊าซจึงมีความคงทนแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า และของเหลวจะกลับคืนสู่สภาพฉนวนได้หลัง discharge และยังมีข้อดีที่ถ่ายเท ความร้อนได้ดี

อย่างไรก็ตาม พบว่ามีการใช้ฉนวนเหลวเป็นสารฉนวนน้อยกว่าก๊าซและ ฉนวนแข็ง เพราะฉนวนเหลวที่ใช้ในเชิงการค้า มักไม่บริสุทธิ์แท้ ทำให้ค่าแรงดัน เบรคดาวน์ต่ำ

คาปาซิแตนซ์

คาปาซิแตนซ์ คือแพคเกจที่กำหนดปริมาณประจุที่สะสมในคาปาซิเตอร์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารใช้งานพบว่าประจุ (Q) ที่สะสมในคาปาซิเตอร์ จะแปรผันตาม charging voltage ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q \propto V$$

ค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์นิยามด้วยสมการ

$$C = Q/V$$

เมื่อ C คือ คาปาซิแตนซ์ (Farads, F)

Q ปริมาณประจุ (คูลอมน์, C)

V ความต่างศักย์ (volt)

ในการใช้งานหน่วยฟาร์ัดจะใหญ่เกินไป ปกติสาขาอิเล็กทรอนิกส์จะใช้
หน่วย picofarad ($pF=10^{-12}F$) ส่วนเพาเวอร์คาปาซิเตอร์ใช้หน่วย
microfarad ($\mu F=10^{-6}F$)

ค่าคาปาซิแตนซ์ของ plate ที่ขนานกันขึ้นอยู่กับ

- 1) พื้นที่ประสิทธิผลของสนามไฟฟ้า
- 2) ระยะระหว่าง plate
- 3) วัสดุที่ใช้ทำไดอิเล็กตริก

คาปาซิเตอร์แบบ plate ขนานกัน มีค่าคาปาซิแตนซ์

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{D} = \epsilon \frac{A}{D} \quad F$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ของสนามไฟฟ้า (m^2)

d ระยะระหว่าง plate (m)

ϵ เพอร์มิตติวิตีสัมบูรณ์

CAPACITOR LOSS

ค่า loss ที่เกิดขึ้นในตัวคาปาซิเตอร์จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับแรงดันและ

อุณหภูมิถึงแม้ว่า loss ที่เกิดขึ้นจะเป็นวัตต์จะมีค่าน้อยมากแต่จะมีผลถึงอายุการบริการ
ไม่ว่ากรณีใดๆการใช้งานของคาปาซิเตอร์ด้วยเหตุผล 3 ข้อ คือ อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. ในการใช้งานที่แรงดันสูง ๆ จะเกิดความเครียดทางไฟฟ้าต่อวัสดุที่ใช้เป็นสารไดอิเล็กตริก ทำให้เกิดความร้อนขึ้นเป็นผลเสียต่อวัสดุไดอิเล็กตริก
2. ปกติคาปาซิเตอร์จะทำงานโดยรับภาระเต็มที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิด loss ตลอดเวลาเช่นกัน
3. ตัวถังของคาปาซิเตอร์จะบิดมิด ทำให้ระบายนความร้อนได้ยาก

สูตรที่ใช้สำหรับเพาเวอร์คาปาซิเตอร์

- คาปาซิแตนซ์รวม C

สำหรับคาปาซิเตอร์ที่ขนานกัน

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

สำหรับคาปาซิเตอร์ที่ต่ออนุกรม

$$1/C = (1/C_1) + (1/C_2) + \dots + (1/C_n)$$

- คาปาซิทีฟ รีแอกแตนซ์ X_C

$$X_C = 10^6 / 2\pi f c \quad \text{ohms}$$

เมื่อ C คือค่าคาปาซิแตนซ์ต่อเฟส (microfarad)

f ความถี่ไฟฟ้าที่ supply (Hz)

- กระแสของคาปาซิเตอร์ I_C

$$I_C = E / X_C$$

เมื่อ E คือแรงดันคร่อมคาปาซิเตอร์ (V)

X_C คาปาซิทีฟ รีแอกแตนซ์ (ohms)

- kvar ของ คาปาซิเตอร์

$$\begin{aligned} \text{kvar} &= VI_c \times 10^{-3} \\ &= 2\pi fCV^2 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

เมื่อ C คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ (microfarad)

f ความถี่ไฟฟ้าที่ supply (Hz)

V line voltage (V)



บทที่ 3

โครงสร้างและกรรมวิธีการผลิตคาปาซิเตอร์โครงสร้างพื้นฐานของคาปาซิเตอร์

เพาเวอร์คาปาซิเตอร์ จะประกอบด้วย element พื้นฐานหลายๆ ตัว ต่อรวมกัน โดยโครงสร้างของแต่ละ element จะเป็นผิวของอลูมิเนียมพอลี่ 2 ชั้น ที่คั่นด้วยสารไดอิเล็กตริก (อาจเป็นกระดาษ หรือฟิล์มพลาสติกบาง ๆ หลายๆ ชั้นซ้อนกัน)

ในกระบวนการพัน element จะคั่นระหว่างอลูมิเนียมพอลี่ซึ่งเป็นอิเล็กโตรดด้วยไดอิเล็กตริก และทาบบนไดอิเล็กตริกกับอีกด้านของอลูมิเนียมพอลี่แล้วม้วนบนแกนหมุนให้อลูมิเนียมพอลี่ และไดอิเล็กตริกแนบชิดกันสนิท

element ของเพาเวอร์คาปาซิเตอร์มี 2 แบบ คือ

1. Buried Foils โครงสร้างแบบนี้ จะมีแถบขั้วอิเล็กโตรดยื่นออกมาจากขอบของไดอิเล็กตริก เพื่อทำหน้าที่เชื่อมเข้ากับเทอร์มินัล โดยขั้วจะเป็นแผ่นโลหะหนาไฟฟ้าเล็ก ๆ สอดอยู่ระหว่างไดอิเล็กตริกกับพอลี่ในขณะที่ทำการม้วน
2. Extended Foils จะเป็นการวางอลูมิเนียมพอลี่ให้เหลื่อมกันใน 2 ด้านของ element แล้วเชื่อมพอลี่ที่เหลื่อมออกมาจากไดอิเล็กตริก (อาจโดยการพัน zinc) เข้าด้วยกัน ทำให้แต่ละด้านเป็นตัวเชื่อมกับเทอร์มินัลได้

กรรมวิธีการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนการเผยแพร่ ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม กรุณาอย่าเผยแพร่เอกสารนี้ และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขจัดความชื้นและใส่ฉนวนเหลวเข้าไปแทนที่อากาศและความชื้นที่ดูออกมา แล้วจึง นำเข้าสู่กระบวนการทดสอบ

สำหรับคาปาซิเตอร์แรงดันสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างชั้นฟิล์ม จะอยู่ในช่วงประมาณ 50 MV/m (กระดาษจะทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ประมาณ 17 MV/m) พื้นที่ของ element จะอยู่ในช่วง 10 m²

ในการผลิตคาปาซิเตอร์จะต้องระมัดระวังในเรื่องของความสะอาดในทุก ขั้นตอน รวมถึงในการทำสุญญากาศด้วย เพราะแม้ปริมาณ ionic ที่ไม่บริสุทธิ์ เพียงเล็กน้อย เช่นความชื้น อนุภาคฝุ่นละออง ก็สามารถเป็นจุดเริ่มต้นทำให้เกิด การ discharge ระหว่างอลูมิเนียมพอลิเมอร์ที่เป็นอิเล็กโทรดได้ จึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงแหล่งที่มีฝุ่นละอองและความชื้นสูง

คาปาซิเตอร์แรงดันสูงแบบ UNIT

โดยทั่วไป element ของคาปาซิเตอร์แรงดันสูง จะเป็นแบบ extended foils ซึ่งไดอิเล็กทริกอาจเป็นกระดาษคราฟท์หรือ polypropylene film และกระดาษพันบนแกน ขนาดของแกนจะใหญ่กว่า element ของแรงดันต่ำ ในแต่ละ element จะต่อพิวส์เข้าไปด้วยหรือไม่ก็ได้ โดยอาจให้ทุก element ในตัวถึงมีพิวส์ ต่ออยู่หรืออาจประกอบ element เข้าด้วยกันแล้วต่อพิวส์ภายนอกก็ได้

แต่ละ element ของคาปาซิเตอร์แรงดันสูง จะทนแรงดันได้ในฟิล์ม 800-2,000 v และในการประกอบเป็น unit ก็จะมีฟิล์ม 1-16kV ระหว่างขั้ว

ถ้าในการใช้งานต้องการฟิล์มสูงกว่านี้ ก็ต้องนำแต่ละ unit มาต่อ series หรือ parallel กัน

หลังจากม้วน element แล้วก็จะประกอบลงตัวถัง และต่ออุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสาร discharge ด้วยกับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการพัฒนาสารไดอิเล็กตริกเพื่อให้ได้ค่า kvar ต่อหน่วยปริมาตรสูงขึ้น ปัจจุบันสาร orientated polypropylene film (OPP) เป็นสารไดอิเล็กตริกที่มีคุณภาพสูง ทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ 50 MV/m ซึ่งสูงกว่ากระดาษคราฟท์ 2.5 เท่า แต่มีข้อด้อยคือเปอร์มิตติวิตีต่ำประมาณ 2.2 แต่กระดาษคราฟท์มีเปอร์มิตติวิตี 5.5-5.9

สารไดอิเล็กตริกอีกประเภท คือ thermoplastic เช่น polycarbonate, polyethylene terephthalate โดยจะใช้ร่วมกับกระดาษคราฟท์ เพื่อให้กระดาษช่วยดูดซับน้ำมัน ในการผสมสารไดอิเล็กตริกเช่นนี้ ความเครียดไฟฟ้าที่ปรากฏคร่อมสารแต่ละตัวจะแปรผกผันกับค่าเปอร์มิตติวิตีของสารตัวนั้น ในกรณีของพลาสติกกับกระดาษคราฟท์ พลาสติกจะทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ 2.5 เท่าของกระดาษคราฟท์ แต่กระดาษคราฟท์จะมีค่าเปอร์มิตติวิตีประมาณ 2.5 เท่าของ polypropylene film.

การใช้สารไดอิเล็กตริก ที่ทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้สูงและ loss ต่ำจะทำให้เกิดเพิ่มขึ้นอีก 50 % ในปริมาตรที่เท่า ๆ กัน การลดอุณหภูมิภายในจะทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น OPP มี loss 0.6 W/kvar หรือประมาณ 1 ใน 4 เท่าของ polychlorinated byphylene (PCB) impregnated paper (2.5 W/kvar)

ในอุตสาหกรรมการผลิตโดยทั่วไปจะสร้างคาปาซิเตอร์ให้มีพิกัด 50, 10, 150, 200 และ 250 kvar

เมื่อมีวัน element ได้แล้วก็จะอัดให้ element มีรูปทรงแบน เพื่อลดขนาดของตัวถังให้เล็กลง โดยตัวถังจะปิดสนิทป้องกันน้ำ, ความชื้น อากาศ และสิ่งแปลกปลอมจากภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ตัวถังของคาปาซิเตอร์ที่เป็น unit จะทำด้วยเหล็กอ่อน หรือ stainless-steel ฝาปิดบนคือบุชชิง ซึ่งเป็น porcelain ที่ออกแบบมาให้

เหมาะสมกับแรงดันที่ใช้งาน และมีรูสำหรับการทำสุญญากาศ และเติมสาร impregnate ซึ่งต้องปิดสนิทเมื่อเสร็จกระบวนการสร้าง

งานการใช้งานทั่วไป บุขซึ่งจะทามาจากกระเบื้อง มีฐานเป็นโลหะเพื่อ ำให้บดกรีดติดกับตัวถังได้ ตัวบุขซึ่งที่เป็นกระเบื้องจะทาสีเคลือบไว้และทาสารละลาย ที่มีส่วนผสมของพลาสติกนิ่ม

ในทางการค้า คาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่จะใช้ประกันเป็นตัวกันรั่วที่รอยต่อ ของบุขซึ่งกับถัง แต่ก็ยังอาจรั่วเนื่องจากอุณหภูมิและการขนย้าย การบดกรีดให้ติด กับตัวถังเลยจะแก้ปัญหานี้ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบคาปาซิเตอร์

คาปาซิเตอร์ที่สร้างในการทำปฏิกิริยาอินทรีย์นี้ใช้ Harzy film (ซึ่งเป็น orientated polypropylene ชนิดหนึ่ง) แซ่น้ำมัน PXE เป็นสารไดอิเล็กตริก โดยเอาชื่อลูมิเนียมพอสส์เป็นไดอิเล็กโตรด ซึ่งจะใช้หลักในการคำนวณค่าคาปาซิแตนซ์ที่เป็นแผ่นระนาบ ตามปกติแผ่นระนาบนั้น ไดอิเล็กโตรดจะ active ข้างเดียวคือ ด้านที่ติดกับสารไดอิเล็กตริก แต่คาปาซิเตอร์ที่สร้างใช้เทคนิคการพันซ้อนทับกัน ทำให้ไดอิเล็กโตรดติดกับสารไดอิเล็กตริกทั้งสองด้าน มีผลให้ไดอิเล็กโตรด active ทั้งสองด้านด้วย ทำให้ได้คาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากแบบระนาบปกติ ลักษณะการวางซ้อนทับกันเพื่อที่จะทำการม้วน แสดงดังรูป 4.1

การคำนวณ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างคาปาซิเตอร์

$$C = 2 \epsilon_0 \epsilon_r A/d \quad (1)$$

เมื่อ C คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ (F)

ϵ_0 ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศมีค่า $10^{-9}/36\pi$ (F/m)

ϵ_r ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

A พื้นที่หน้าตัดของไดอิเล็กโตรด (m^2)

$$E = V/d \quad (2)$$

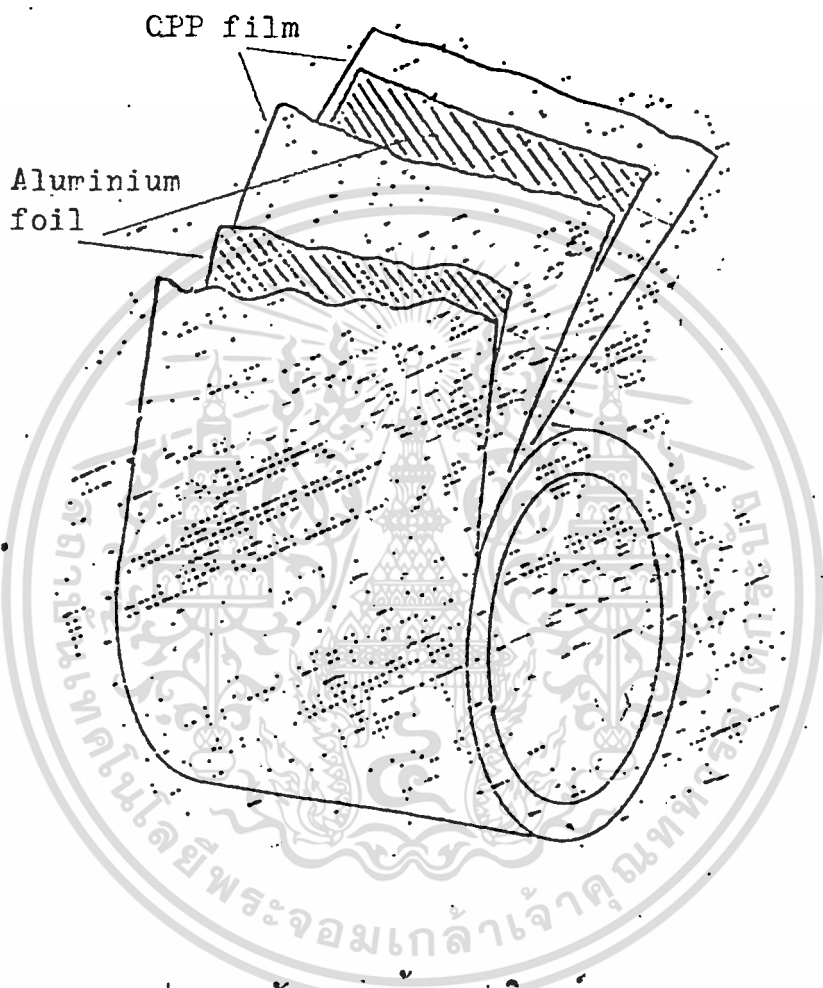
เมื่อ E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า (V/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

V ความต่างศักย์ (V)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d ความหนาของสารไดอิเล็กตริก (m)



รูป 4.1 ลักษณะการม้วนคาปาซีเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$kvar = 2\pi f C V^2 \times 10^{-9} \quad (3)$$

เมื่อ C คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ (microfarad)

f ความถี่ไฟฟ้าที่ supply (Hz)

V line voltage (V)

การออกแบบจะเลือกค่า kvar ว่าต้องการสร้างคาปาซิเตอร์ขนาด kvar เท่าไรเพื่อนำไปปรับเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้ได้ค่าตามที่ต้องการเมื่อกำหนด kvar แล้วก็คำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์จากสมการ (3) แล้วนำไปหาพื้นที่ของแผ่นอิเล็กทริก จากสมการ(1)โดยทราบค่าอื่นๆ คือ $\epsilon_{r,d}$ ของสารไดอิเล็กทริก V และ f ของ supply

ในการออกแบบชิ้นงานสำหรับรับปริมาณนี้เลือกสร้างคาปาซิเตอร์ พิกัด 30kvar ใช้งานที่ 12kv ได้ค่าคาปาซิแตนซ์จาก

$$C = (kvar \times 10^9) / (V^2 \cdot 2\pi f) = 0.663 \text{ microfarad}$$

หาค่าแรงดันในแต่ละ element จะทนได้จากสมการ (2) โดยจะ Harzy film เป็นไดอิเล็กทริก Harzy film จะทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ประมาณ 47.6 V/micrometer หน้า 20 micrometer และจะใช้ Harzy film สองชั้น เพื่อให้ทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้เป็น 2 เท่า ดังนั้น 1 element จะทนแรงดันไฟฟ้าได้

$$\begin{aligned} V_b &= E \times d \\ &= 47.6 \times (20 \times 2) = 1904 \text{ volt} \end{aligned}$$

เลือกเซฟตี้แฟคเตอร์ 1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก $V_{op} = V_b / \text{Safety factor}$ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1904/1.4 = 1360 \text{ volt}$$

เพื่อให้ทนแรงดันได้ 12kV จึงนำ element มาต่อ series กัน 9 ตัว
คาปาซิเตอร์ต่อ element มีค่า

$$\begin{aligned} C/\text{element} &= (\text{series/parallel}) \times \text{capacitor ของทั้ง unit} \\ &= (9/1) \times 0.663 = 6 \text{ microfarad} \end{aligned}$$

เนื่องจากการมีวน element แล้วอึดให้แบน จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ระหว่างอิเล็กโทรดไม่สม่ำเสมอ ทำให้ค่าคาปาซิเตอร์ลดลง โดยมีแพคเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนของ element ก่อนให้แบน สำหรับแกนที่ใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 mm. มีแพคเตอร์ 0.89 ดังนั้นค่าคาปาซิเตอร์ต่อ element ที่จะนำไปหาพื้นที่ของอิเล็กโทรดต้องมีค่า $6/0.89 = 6.74$ microfarad

หาพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดจากสมการ (1)

$$A = (C \times d) / (2 \epsilon_0 \epsilon_r)$$

ϵ_r ของ film ขุน้ำมัน PXE มีค่า 2.35 จึงหาพื้นที่ A ได้

$$A = (6.74 \times 40 \times 10^{-12}) / (2 \times (10^{-9}/36\pi) \times 2.35) = 6.49 \text{ m}^2$$

อลูมิเนียมฟอสส์กว้าง 36.5 cm จึงต้องใช้ฟอสส์ที่มีความยาว 17.78 เมตร

DISCHARGE RESISTOR

discharge resister จะต่อถาวรในคาปาซิเตอร์เพื่อถ่ายเทพลังงานออกจากคาปาซิเตอร์ ขณะที่ปลดออกจากวงจร ขนาดของ discharge resistor หาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t = 2.3 \times 10^{-6} CR (\log U_n - 1.5) \text{ วินาที}$$

เมื่อ t คือ เวลาที่แรงดันลดลงเหลือ 50 V

R ความต้านทานที่ต่อ (ohms)

C ค่าคาปาซิแตนซ์ที่ R ต่อคร่อม (microfarad)

U_n r.m.s. voltage ที่พิกัด

ตามข้อกำหนดของ IEC standard คาปาซิเตอร์ที่ใช้กับแรงดันสูงกว่า 660V เวลาที่แรงดันลดลงจากพิกัดจนมีค่า 50V ต้องไม่มากกว่า 5 นาที จากการแทนค่าได้ค่าความต้านทาน 64 เมกะโอห์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบก่อนนำมาใช้ ; มาตรฐาน IEC 70:1967

ในการกำหนดบรรทัดฐานต่อการผลิตคาปาซิเตอร์ มีมาตรฐานที่เป็นสากล ที่จะต้องทดสอบคาปาซิเตอร์ทุก unit ก่อนนำออกใช้งาน เพื่อให้คาปาซิเตอร์ใช้งานได้อย่างปลอดภัย ทั้งยังเป็นประโยชน์ในการติดตั้งและใช้งาน เนื้อหาในมาตรฐานนั้นมีความสำคัญต่อผู้ออกแบบ, ผู้ผลิตและผู้ใช้ ซึ่งต้องศึกษาให้เข้าใจโดยละเอียด

มาตรฐานที่สำคัญและเป็นสากลของเพาเวอร์คาปาซิเตอร์ คือ มาตรฐาน IEC 70:1967 โดยมาตรฐานของประเทศต่าง ๆ ก็มักกำหนดให้อยู่ภายใต้ขอบเขตของมาตรฐานนี้

การทดสอบคาปาซิเตอร์ มี 2 ชนิดคือ

- 1) Routine test
- 2) Type test

การนำคาปาซิเตอร์มาใช้ตามปกติทั่วไป เช่น ทา คาปาซิเตอร์แบบคู่ เพื่อแก้ เพาเวอร์แฟคเตอร์ หรือ ชั้ตต์ เข้ากับระบบจ่ายกำลัง เราจะทดสอบด้วย Routine test แต่ถ้าต้องการนำคาปาซิเตอร์ไปใช้งานพิเศษเฉพาะอย่าง ก็จะต้องเพิ่ม Type test เข้าไปด้วย เพื่อให้เหมาะกับงานนั้น ๆ ในที่นี้จะกล่าวถึง Routine test ของมาตรฐาน IEC70:1967 เท่านั้น

Routine test ตามมาตรฐาน IEC70:1967 กำหนดให้ทำการทดสอบและ วัดค่าต่าง ๆ คือ

- 1) ทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์
- 2) ทดสอบวัดค่า loss ของคาปาซิเตอร์
- 3) ทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า D.C หรือ A.C. ระหว่างเทอร์มินัล
- 4) ทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า A.C. ระหว่างเทอร์มินัลกับตัวถัง
- 5) ทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้า A.C. หรือ Impulse ระหว่างเทอร์มินัลกับดิน

คาปาซิแตนซ์และเอาทัพ

- จะต้องวัดค่าคาปาซิแตนซ์ในช่วงอุณหภูมิมาตรฐาน ($15^{\circ} - 35^{\circ}\text{C}$) ซึ่งไม่รวมค่าผิดพลาดเนื่องจาก harmonics และอุปกรณ์ประกอบเช่นตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำและ blocking circuit

- ทดสอบที่แรงดันและความถี่ตามพิกัด อย่างไรก็ตาม อาจยอมให้ทดสอบที่ค่าแรงดันและความถี่อื่นได้แต่ต้องคูณแฟกเตอร์อื่น ๆ ด้วย ตามข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตและผู้ซื้อ

- ค่าเอาทัพที่คำนวณได้จากคาปาซิแตนซ์ที่พิกัดแรงดันจะต้องไม่ต่างจากพิกัดของเอาทัพมากไปกว่า

- 5 ถึง + 10% สำหรับคาปาซิเตอร์แบบ unit

0 ถึง + 10% สำหรับคาปาซิเตอร์แบบค

- ใน 3 phase unit อัตราส่วนของคาปาซิแตนซ์มากที่สุดต่อน้อยที่สุดระหว่างคู่ขั้วใด ๆ จะต้องไม่สูงเกิน

1.06 สำหรับคาปาซิเตอร์ที่พิกัดสูงกว่า 660 volt

1.08 สำหรับคาปาซิเตอร์ที่พิกัดต่ำกว่า 660 volt

การทดสอบวัดค่า loss ของคาปาซิเตอร์

สำหรับ Routine test มีจุดประสงค์เพื่อที่จะเช็คผลิตภัณฑ์ให้เหมือนกัน โดยต้องวัด loss angle ในช่วงอุณหภูมิมาตรฐาน ($15^{\circ} - 35^{\circ}\text{C}$) ที่แรงดันและความถี่ตามพิกัด หรืออาจวัดที่แรงดันหรือความถี่อื่นตามความตกลงระหว่างผู้ผลิตและผู้ซื้อ

การทดสอบด้วยแรงดันระหว่างเทอร์มินัล

บ่อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 10 วินาทีโดยจะเป็นแรงดัน A.C หรือ D.C. ก็ได้

- D.C. test

$$U_t = 4.3 U_0$$

กระแส charge และ discharge ต้องไม่เกิน 10 เท่าของพิกัดกระแส

- A.C test

$$U_t = 2.15 U_0$$

เมื่อ U_0 คือ r.m.s. voltage ซึ่งกรณีทั่วไปเท่ากับพิกัดแรงดัน

U_t คือ แรงดันทดสอบ

การทดสอบด้วยแรงดันระหว่างเทอร์มินัลกับตัวถัง

unit ที่ถูกขั้วเป็นจำนวนเท่ากับตัวถังให้รวมทุกขั้วเข้าด้วยกันแล้วบ่อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วกับตัวถังนาน 10 วินาที โดยใช้ระดับแรงดันให้สอดคล้องกับระดับการฉนวนดังตาราง 5.1

การทดสอบด้วยแรงดันระหว่างเทอร์มินัลกับดิน

ใช้ทดสอบคาปาซิเตอร์แบงค์ มีวิธีเหมือนการทดสอบระหว่างเทอร์มินัลกับตัวถัง

ในกระบวนการทดสอบเมื่อผ่านการทดสอบด้วยแรงดันระหว่างเทอร์มินัลแล้ว ให้วัดค่าคาปาซิแตนซ์อีกครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่า element ภายในตัวถังและอุปกรณ์อื่น ๆ ไม่เสียหาย ค่าที่ได้ในการวัดครั้งหลังนี้ จะต้องยังอยู่ในช่วงที่หัวข้อที่ 1 อนุญาต

ตาราง 5.1 มาตรฐานระดับการฉนวนที่สอดคล้องกับระดับแรงดันใช้งาน

| ระบบแรงดันสูงสุด (line to line) U_m kV (r.m.s.) | ระดับการฉนวน | |
|---|-------------------------------------|----------------------------------|
| | ทดสอบด้วยแรงดัน A.C. kV (r.m.s.) | ทดสอบด้านแรงดัน impulse kV |
| 0.1 | 3 | 15 |
| 1.2 | 6 | 25 |
| 2.4 | 11 | 35 |
| 3.6 | 16 | 45 |
| 7.2 | 22 | 60 |
| 12 | 28 | 75 |
| 17.5 | 38 | 95 |
| 24 | 50 | 125 |
| 36 | 70 | 170 |
| 52 | 95 | 250 |
| 72.5 | 140 | 325 |

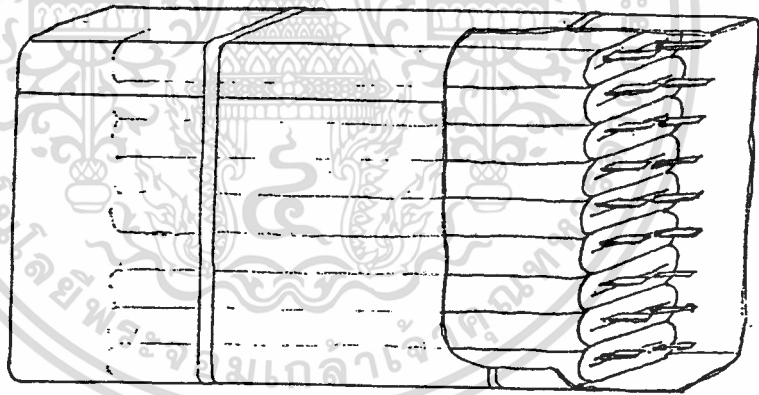
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การสร้าง, ทดสอบ และประเมินผล

ผลการสร้าง

ได้ทำการฉนวน element แต่ละ element ให้มีพิทกตามที่ได้คำนวณไว้ อัด element ให้แบน แล้วนำมาต่อ series กัน 9 element ใช้กระดาษไมลาห่อทั้ง 9 element ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.1 จะเหลือ 2 tap ที่เป็นเทอร์มินัล 12 kV และ 0 V



รูป 6.1 ท่อของ element ก่อนที่จะ series กัน

ต่อเพาเวอร์ริซิสเตอร์ ขนาด 27 megaohm ระหว่างขั้วทั้งสอง ทำ
ให้สามารถลดแรงดันลงจากพิทก 12 kV เหลือ 50 V ภายในเวลา 1 นาที
46.19 วินาที

ต่อขั้วด้านหนึ่งเข้ากับบushing ขนาด 15 kV เพื่อเป็นเทอร์มินัล รับ
แรงดันพิทก อีกขั้วต่อเข้ากับเทอร์มินัลที่ตัวถัง แล้วเชื่อมปิดฝาให้สนิทโดยที่ฝามีท่อ
2 ท่อ เพื่อใช้ในการไล่ความชื้น ทำสุญญากาศ และเติมน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจาก
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
อัดก๊าซไนโตรเจนเพื่อแทนที่อากาศ โดยใช้ความดัน 0.3 kg/cm³ หลังจากนั้น

เติมน้ำมัน PXE โดยดูดก๊าซไนโตรเจนออกทางท่อด้านหนึ่ง แล้วเติมน้ำมันทางท่ออีก
ด้านให้มีความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย เพื่อให้ไขมันแทรกซึมได้ดี บีบท่อทั้ง
2 ให้สนิท ใช้ฝาครอบแล้วเชื่อมอีกชั้นเพื่อความมั่นใจว่าจะไม่รั่ว

นำไปตรวจรั่ว โดยอบที่อุณหภูมิ 80 °c เป็นเวลา 30 ชั่วโมง เพื่อให้
ไขมันขยายตัวแล้วตรวจว่าการขยายตัวของน้ำมันทำให้ตัวถังรั่วหรือไม่

เสร็จขั้นตอนการสร้าง ได้คาปาซิเตอร์แบบ UNIT ที่มีพิกัดตามต้องการ

การทดสอบ

1) คาปาซิเตอร์

ทำการวัดที่อุณหภูมิ 32 °c 12 kV 50 Hz วัดคาปาซิเตอร์
ได้ 0.659 microfarad ผิดพลาดจากพิกัด -0.603 เปอร์เซ็นต์

2) ทดสอบด้วยแรงดันระหว่างเทอร์มินัล

ทดสอบก่อนวัด capacitor loss เพื่อป้องกันความเสียหาย
ของเครื่องวัด loss angle

ป้อนแรงดัน A.C. 25.8 kV นาน 10 วินาที

ป้อนแรงดัน D.C. 51.6 kV นาน 10 วินาที

คาปาซิเตอร์ทนแรงดันทดสอบได้

3) CAPACITOR LOSS

วัดที่ 32 °c 12 kV 50 Hz วัดค่า loss angle ได้
2.40 องศา

วัดค่าคาปาซิเตอร์ที่ 30 °c 12 kV 50 Hz อีกครั้ง มีค่า 0.664
microfarad ผิดพลาดจากพิกัด +0.15 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบคาปาซิเตอร์ที่สร้างนี้ถือว่าการทดสอบด้วยแรงดันระหว่าง
เทอร์มินัลกับตัวถัง เป็นการทดสอบเดียวกันกับการทดสอบด้วยแรงดันระหว่างเทอร์-
มินัล เพราะมีเทอร์มินัลหนึ่งต่ออยู่กับตัวถัง ซึ่งผลการทดสอบปรากฏว่าบushing สามารถ
ทนแรงดันทดสอบได้

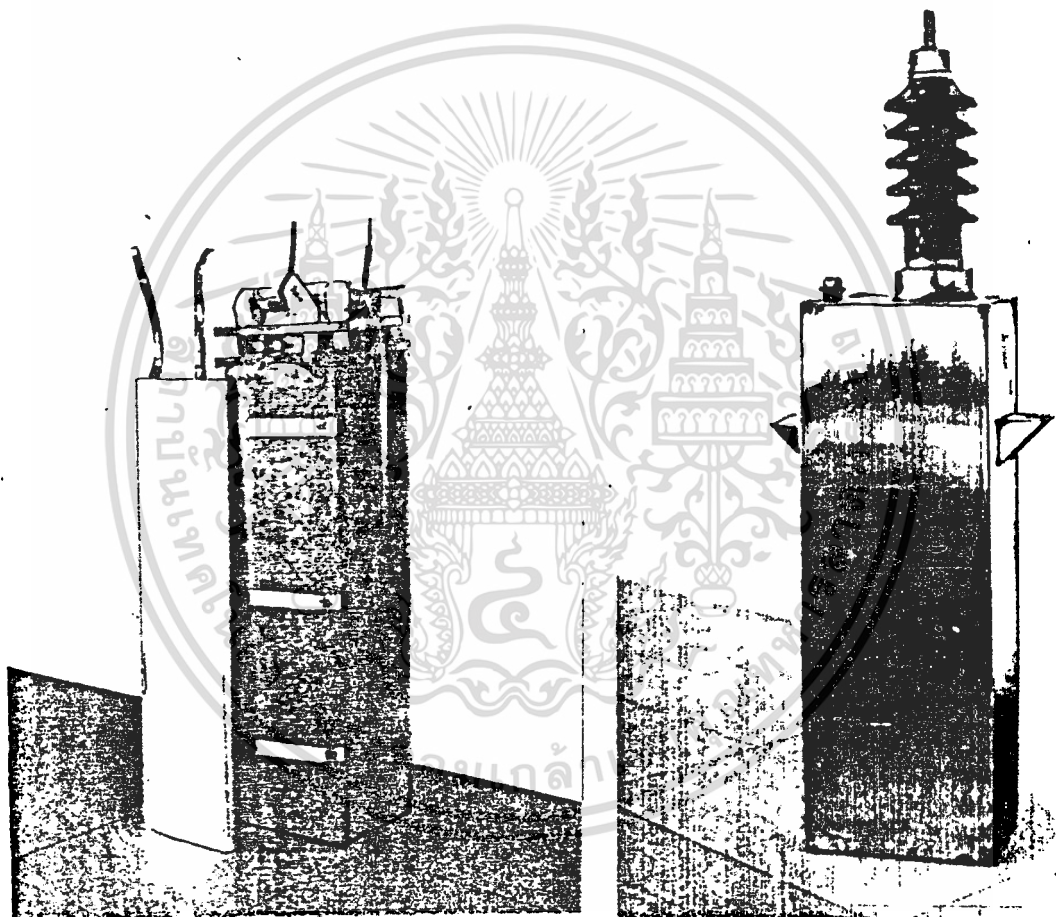
ส่วนการทดสอบระหว่างเทอร์มินัลกับดินนั้นไม่ได้ทำเพราะยังไม่ติดตั้ง

การประเมินผล

สร้างได้ตามพิกัดที่ตั้งไว้

และผ่านมาตรฐานการทดสอบ IEC

70:1967



รูป 6.2 element เปรียบเทียบกับห้องของ UNIT
ที่ต่อ discharge resistor แล้ว

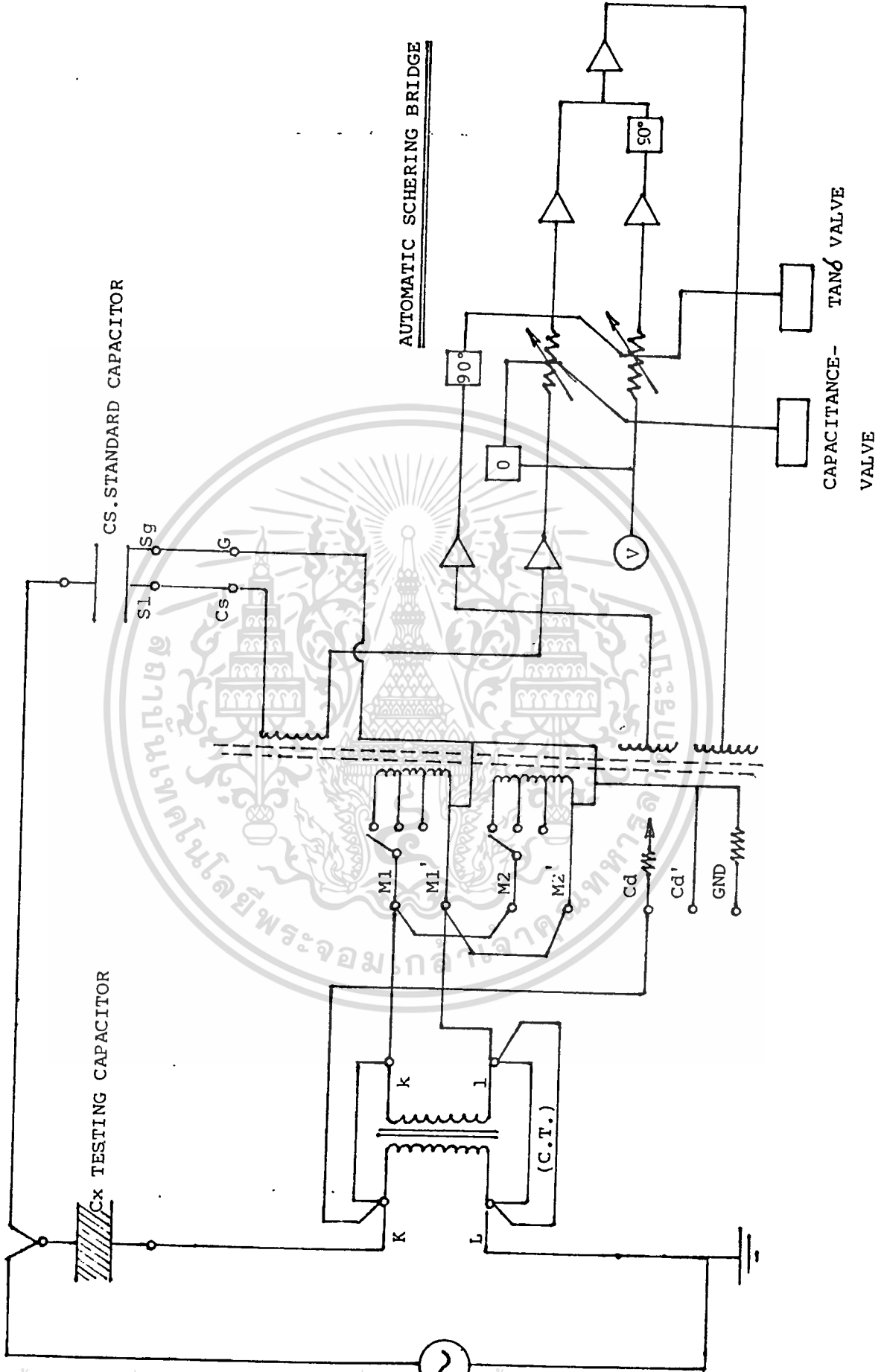
รูป 6.3 คาปาซิเตอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

| | |
|--|---------------|
| วัดค่าคาปาซิแตนซ์ ที่ 32°C | 0.659 μ F |
| ทดสอบแรงดัน A.C. 2.15 เท้า 50 HZ ที่ 32°C เป็นเวลา 10 วินาที | 25.7 KV |
| ทดสอบแรงดัน D.C. 4.3 เท้า ที่ 32°C เป็นเวลา 10 วินาที | 51.6 KV |
| วัดค่า $\tan \delta$ ที่ 32°C 50 HZ 12 KV | 0.042 |
| วัดค่าคาปาซิแตนซ์ที่ 32°C 50 HZ 12 KV | 0.664 μ F |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุป, วิจารณ์ และข้อเสนอแนะสรุปและวิจารณ์

คาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบส่งจ่ายกำลังแรงสูง โดยใช้เป็นอุปกรณ์ปรับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ผลการทำโครงการและปริศยานิพนธ์ครั้งนี้ ปรากฏว่าได้ผลดีตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยได้ศึกษาลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของคาปาซิเตอร์แรงดันสูง ศึกษากระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีมาตรฐาน และได้ออกแบบสร้างคาปาซิเตอร์ที่จะใช้งานได้จริง ที่พิกัด 12 kV , 50 Hz , 0.663 microfarad 30 kvar โดยผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 70:1967 แล้ว ค่าหลังจากการทดสอบ สามารถยอมรับได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนจากพิกัดน้อยมาก และมี loss angle เพียง 2.40 องศา

ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างคาปาซิเตอร์จำเป็นต้องพิจารณาและระมัดระวังในเรื่องต่าง ๆ คือ

1) ความสะอาด จะต้องไม่ให้มีฝุ่นละออง และความสกปรกแทรกตัวอยู่ในแผ่นฟิล์ม และส่วนต่าง ๆ ภายในตัวถัง เพราะจะเป็นจุดเริ่มต้นในการเบรค-ดาวน และ อาจละลายน้ำมัน ทำให้สมบัติของน้ำมันที่เป็นฉนวนเปลี่ยนไป

2) ในการออกแบบ ต้องพิจารณาระยะระหว่างขั้วต่าง ๆ ที่มีแรงดันไฟฟ้ากับตัวถัง รวมทั้งสายไฟฟ้าที่ต่อเข้าบุชชิ่ง โดยต้องพิจารณาถึงแรงดันทดสอบ ซึ่งจะมีค่า 2.15 เท่า และ 4.3 เท่าของแรงดันที่พิกัดเมื่อทดสอบด้วยแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอเชิญผู้คิดค้นผลงานวิจัย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ต้น A.C. และ D.C. ตามลำดับ

3) แพลคเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคาปาซิเตอร์ต่อ element ซึ่ง เป็นแพลคเตอร์ที่เกิดจากความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการม้วน element แล้วอัดให้เป็นแบน จะมีค่าขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางของ แกนที่ใช้พัน element ค่านี้จะได้จากการทดลอง

ค่าแพลคเตอร์ที่ใกล้ 1 จะทำให้ประหยัดวัสดุที่ใช้ม้วน element ขึ้น

4) การผลิตคาปาซิเตอร์แรงดันสูงเป็นอุตสาหกรรม มีกระบวนการที่ ไม่ซับซ้อนมากนัก อุปกรณ์ในกระบวนการผลิตส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์พื้นฐาน แต่จะมีความยุ่งยากในการหาวัสดุดิบ เช่น สารไดอิเล็กตริก, แผ่นอิเล็กโทรด, น้ำมันที่ใช้ เป็นฉนวน ซึ่งจะต้องมีลักษณะสมบัติที่ได้มาตรฐาน

การทำโครงการเกี่ยวกับ power capacitor นี้ สามารถเอกสาร อ้างอิงได้ที่ห้องสมุดการพลังงานแห่งชาติ และห้องสมุด สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER CAPACITORS

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the I E C on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote this international unification, the I E C expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the I E C recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This Recommendation has been prepared by IEC Technical Committee No. 33, Power Capacitors.

This second edition of IEC Publication 70 revises and supersedes IEC Publications 70-1 (Part 1), 70-2 (Part 2), 70-3 (Part 3), and is the result of work done at the meeting held in Interlaken in 1961.

The draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in August 1963. Amendments received were submitted to the National Committees for approval under the Two Months' Procedure in June 1965.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

| | |
|----------------|--------------------------|
| Australia | Japan |
| Austria | Korea (Republic of) |
| Belgium | Netherlands |
| Canada | Norway |
| Czechoslovakia | Romania |
| Denmark | South Africa |
| Finland | Sweden |
| France | Switzerland |
| Germany | Turkey |
| Hungary | United Kingdom |
| India | United States of America |
| Israel | Yugoslavia |
| Italy | |

POWER CAPACITORS

SECTION ONE — GENERAL

1. Scope

1.1 This Recommendation applies to both capacitor units and assemblies of capacitor units with accessories to form complete capacitor equipments, for connection to a low or high-voltage power system having a frequency up to and including 100 Hz (c/s), which are intended to be used particularly for power-factor correction.

Note. — The following are excluded from this Recommendation and may form the subject of separate recommendations:

- self healing capacitors;
- series capacitors;
- capacitors intended for control, protection and measurement purposes (e.g. coupling capacitors and the like);
- small a.c. capacitors as used for fluorescent and discharge lamps and for electric sign circuits;
- capacitors for motor starting applications, and the like;
- capacitors for radio interference suppression.

1.2 This Recommendation applies to capacitors intended for use within over-all temperature limits of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ and at altitudes not exceeding 1 000 m (3 300 ft).

For this purpose, capacitors are classified in temperature categories, each category being characterized by both the lowest ambient air temperature at which the capacitor may be energized, chosen from the three values $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the upper limit of ambient air temperature at which the capacitor may be operated, as defined below:

| Upper limit of temperature category $^{\circ}\text{C}$ | Maximum ambient temperature $^{\circ}\text{C}$ | | |
|--|--|--------------------|------------------|
| | Mean over 1 hour | Mean over 24 hours | Mean over 1 year |
| 40 | 40 | 30 | 20 |
| 45 | 45 | 40 | 30 |
| 50 | 50 | 45 | 35 |

Standard temperature categories are:

$$-40/+40\text{ }^{\circ}\text{C} \quad -25/+40\text{ }^{\circ}\text{C} \quad -10/+40\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{and} \quad -10/+45\text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Notes*
1. — For the definitions of ambient-air temperature and cooling-air temperature, see definitions in Sub-clauses 3.15 and 3.16 and in Sub-clause 18.1.
 2. — Capacitors may be in operation at temperatures below the minimum ambient-air temperature corresponding to their category, on condition that energizing of the capacitors at such temperatures is avoided.

- 1.3 This Recommendation does not apply to capacitors, the service conditions of which, in general, are incompatible with the requirements of the Recommendation, unless otherwise agreed between manufacturer and purchaser.

Note. — This applies especially to capacitors intended to be incorporated in various types of electrical equipment and which, therefore, have to be considered as components.

2. Object

The object of this Recommendation is:

- a) to formulate safety rules;
- b) to formulate uniform rules regarding performance, testing and rating;
- c) to give a guide for installation and operation.

3. Definitions

3.1 Capacitor element (or element)

An indivisible part of a capacitor consisting of electrodes separated by a dielectric.

3.2 Capacitor unit (or unit)

An assembly of one or more capacitor elements in a single container with terminals brought out.

3.3 Capacitor bank (or bank)

A group of units, connected electrically to each other, e.g. a three-phase bank may be composed of three single-phase units.

3.4 Capacitor

In this Recommendation, the word “capacitor” is used when it is not necessary to lay particular stress upon the different meanings of the words “capacitor unit” or “capacitor bank”.

3.5 Capacitor equipment

An assembly of capacitor units and accessories suitable for connection to a circuit.

3.6 Discharge device

A device connected across the terminals or bus-bars or built into the capacitor unit, capable of reducing the residual voltage effectively to zero after the capacitor has been disconnected from the supply.

3.7 *Line terminals*

Terminals intended to be connected to the lines. In polyphase capacitors, a terminal intended to be connected to a possible neutral line, however, is not considered as a line terminal.

3.8 *Rated voltage U_n*

The r.m.s. value of the voltage between terminals which the capacitor is intended to withstand continuously.

In the case of capacitors consisting of one or more separate circuits (e.g. single-phase units intended for use in polyphase connection, or polyphase units with separate circuits), U_n refers to the rated voltage of each circuit.

In the case of polyphase capacitors with internal electrical connections between the phases, U_n refers to the line terminals between which the highest voltage occurs.

3.9 *Insulation level U_i*

The insulation level of a capacitor unit is that combination of test voltage values (both power frequency and impulse) which characterizes the insulation between the line terminals and the container of the unit, with regard to its ability to withstand electric stress.

The insulation level of a capacitor bank is that combination of test voltage values (both power frequency and impulse) which characterizes the insulation between the line terminals (or terminal) of the bank and metal parts which are intended to be earthed, with regard to its ability to withstand electric stress.

3.10 *Rated output*

The reactive power at rated voltage and rated frequency for which the capacitor is designed.

3.11 *Rated current*

The r.m.s. current through one line terminal at the rated output, rated voltage and rated frequency.

3.12 *Capacitor losses*

The active power consumed by a capacitor.

Note. — Unless otherwise stated, the capacitor losses will be understood to include losses in fuses and discharge resistors forming an integral part of the capacitor.

3.13 *Tangent of the loss angle ($\tan \delta$)*

The capacitor losses divided by the reactive output of the capacitor.

3.14 *Highest voltage of a system U_m*

The highest r.m.s. line-to-line voltage which can be sustained under normal operating conditions at any time and at any point of the system. It excludes temporary variations due to fault conditions or the sudden disconnection of large loads.

3.15 *Ambient-air temperature*

The temperature of the air at the proposed location of the capacitor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.16 *Cooling-air temperature*

The temperature of the cooling air measured at the hottest position in the bank, midway between two units. If only one unit is involved, it is the temperature measured at a point approximately 30 cm away from the capacitor container and at two-thirds of the height from its base.

3.17 *Container temperature rise*

The difference between the temperature of the hottest point of the container and the temperature of the cooling air.

3.18 *Standard temperatures for testing*

The standard ambient temperature range for testing is from 15 °C to 35 °C and, if corrections have to be made, the reference temperature is 20 °C.

SECTION TWO — SAFETY REQUIREMENTS

4. **Discharge device**

4.1 Every capacitor equipment shall be provided with a directly connected discharge device, unless it is connected directly to other electrical equipment providing a discharge path without having a disconnecting switch, fuse cut-out, or series capacitor interposed.

4.2 The discharge device (or the electrical equipment mentioned in Sub-clause 4.1) shall reduce the residual voltage from the crest value of the rated voltage U_n to 50 V or less within a given time after the capacitor is disconnected from the source of supply. This time is 1 min for capacitors of rated voltage up to and including 660 V, and 5 min for capacitors of rated voltage above 660 V.

Note. — When capacitor units are connected in series, discharge devices fitted to each unit may not be adequate to ensure compliance with this clause, owing to the cumulative effect of the residual voltages. If the supply voltage is so high that this occurs, then an additional external discharge device will be necessary, and should be directly connected across the capacitor bank.

4.3 When capacitors may be switched off and on at very short intervals, arrangements shall be made so that, at the time of reapplication of the voltage, the voltage at the terminals of the capacitor shall be not more than 10% of the rated r.m.s. voltage.

4.4 A discharge device is not a substitute for short-circuiting the capacitor terminals together and to earth before handling.

Note. — A residual charge may sometimes be left on the inter-connections of series connected capacitors due to blown fuses, interrupted internal connections, or non-linear behaviour of the dielectric resulting from over-stressing.

These interconnections therefore shall be short-circuited to earth before handling.

5. **Container connection**

It must be possible to make a reliable connection to the metal container of a capacitor so as to enable the potential of the container to be fixed.

6. Other safety requirements

The purchaser should specify, at the time of ordering, any special requirements with regard to safety regulations which apply to the country in which the capacitor is to be installed.

SECTION THREE — QUALITY REQUIREMENTS AND TESTS

7. Nature of tests

7.1 The tests specified are of two kinds:

a) Routine tests, viz:

- capacitance (Clause 8);
- capacitor losses (Sub-clause 9.1);
- d.c. or a.c. voltage test between terminals (Sub-clause 11.1.1);
- a.c. voltage test between terminals and container, dry test (Sub-clause 11.1.2 a));
- tests between terminals and earth for capacitor banks (Sub-clause 11.2).

b) Type tests, viz:

- capacitor losses at elevated temperature (Sub-clause 9.2);
- thermal stability test (Clause 10);
- a.c. voltage test between terminals and container, dry test; for outdoor capacitors in addition, wet test (Sub-clause 11.1.2 b) and c));
- impulse voltage test between terminals and container for capacitors intended for exposed installations (Sub-clause 11.1.3);
- discharge test (Sub-clause 11.1.4);
- ionization test (Clause 12).

7.2 Routine tests are carried out on every capacitor on completion.

7.3 Type tests are intended to prove the soundness of the design of the capacitor and its suitability for operation under the conditions detailed in this Recommendation. The type tests shall have been carried out by the manufacturer before the delivery of the capacitors, and a certificate detailing the results of such tests shall be furnished to the purchaser at his request. These tests shall have been made upon a capacitor of a design identical with that of the capacitor offered, or on a capacitor of a design which does not differ from it in any way which might influence the properties to be checked by the type tests.

The type tests, or certain of them, shall be repeated by the manufacturer in connection with any particular contract only by agreement with the purchaser and when so requested on the contract for the supply of the capacitors. The number of capacitor samples that may be subjected to such repeat tests shall also be subject to agreement between manufacturer and purchaser, and shall be stated on the contract.

7.4 Every capacitor sample, to which it is intended to apply the type tests, shall first have withstood satisfactorily the application of all the routine tests. It is not essential that all type tests be carried out on the same capacitor sample, provided that samples of identical design and processing during manufacture are used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Capacitance and output (routine test)

8.1 The capacitance shall be measured within the standard temperature range (see Sub-clause 3.18) using a method which excludes errors due to harmonics and to accessories such as resistors, reactors and blocking circuits.

The standard test conditions are the rated voltage and the rated frequency. However, measurement at any other voltage and frequency is permitted, provided that appropriate correction factors are agreed upon between manufacturer and purchaser.

Note. — It is recommended that the capacitance be measured, using approximately rated voltage, both before and after the application of the voltage tests, in order to observe any capacitance change and check the behaviour of fuses (see Sub-clause 10.4).

8.2 The output computed from the measured capacitance, the rated voltage and the rated frequency, shall not differ from the rated output by more than:

- 5 or +10% for capacitor units
- 0 or +10% for capacitor banks.

Note. — A formula for the computation of the output of a three-phase capacitor from single-phase capacitance measurements is given in Appendix B.

8.3 In three-phase units, the ratio of maximum to minimum values of capacitance measured between any two line terminals shall not exceed 1.06 for capacitors with a rated voltage above 660 V and 1.08 for capacitors with a rated voltage equal to or lower than 660 V.

9. Capacitor losses

9.1 Routine test

For the routine test, the purpose of which is to check the uniformity of the production, the tangent of the loss angle shall be measured within the standard temperature range (Sub-clause 3.18). The standard test conditions are the rated voltage and the rated frequency of the capacitor. Measurements may be made at other voltages and frequencies provided that appropriate correction factors are agreed upon between manufacturer and purchaser.

Note. — In the case of testing large quantities of small capacitors, the manufacturer and purchaser may agree on carrying out tests on a representative number of samples.

9.2 Type test

In the type test, the tangent of the loss angle shall be measured both as in the routine test, and also at rated voltage and frequency with the capacitor at a uniform temperature of 75 ± 2 °C. In this second test, the capacitor shall be energized only during the measurement, and for as short a time as possible; the value of the tangent of the loss angle in this second test shall not exceed either the value specified by the manufacturer in his catalogues or the value agreed for the particular contract. Both measurements may be made at a voltage and frequency different from the rated values provided correction factors be agreed between manufacturer and purchaser.

If the test at 75 °C cannot be made, the parties may agree to substitute for it the measurement of the tangent of the loss angle made at the end of the thermal stability test (see Sub-clause 10.3).

Notes 1. — When dealing with a contract for capacitors of a type already approved (see Sub-clause 7.3) the loss angle test at 75 °C defined in this sub-clause may be used to check the constancy of characteristics of the production. If the results obtained do not differ significantly from those of the prototypes, repetition of the thermal stability test may be omitted unless it is specially specified by the purchaser.

2. — A measurement of the tangent of the loss angle at high temperature and at a low-voltage (such as 0.1 U_n) is under consideration as a means of determining the degree of contamination of the dielectric.

10. Thermal stability test (type test)

10.1 This test is intended to ensure the thermal stability of the capacitor under prolonged overload conditions within the limits permitted in Clause 15.

Note. — It is recommended that the capacitor chosen for this test should have an output as nearly as possible equal to the rated output.

10.2 The capacitor shall be placed under normal cooling conditions in an enclosure where the cooling-air temperature (see Sub-clause 3.16) is related to the upper limit of the temperature category in accordance with the following table:

| Upper limit of temperature category °C | Cooling-air temperature in the enclosure °C |
|---|---|
| 40 | 45 |
| 45 | 50 |
| 50 | 55 |

Throughout the test, the cooling-air temperature shall be checked by means of a thermometer lagged so as to have a thermal time constant of approximately 1 h. During the whole test, the difference between the measured cooling-air temperature and the specified test temperature shall not exceed 2 deg C.

10.3 After all parts of the capacitor have attained the temperature of the cooling air, the capacitor shall be subjected for a period of 48 h to a voltage of rated frequency and of substantially sinusoidal form; the magnitude of the voltage being such that the output of the capacitor is equal to 1.44 times its rated output (also see the note to Sub-clause 10.1).

During the last 10 h, the tangent of the loss angle or the temperature of the container near the top and below the level of the impregnant shall be measured every 2 h, and throughout this 10-hour period the tangent of the loss angle or the temperature rise of the container (see Sub-clause 3.17) shall not increase by more than the sensitivity of measurement, which shall not be worse than $\pm 10^{-4}$ for the $\tan \delta$ measurement and ± 0.5 °C for the temperature measurement. Should a greater change be observed, the test shall be continued until either stabilization or breakdown occurs.

Notes 1. — The voltage to be applied in order to obtain an output equal to 1.44 times rated output is:

$$U_{\text{test}} = 1.2 U_n \sqrt{\frac{C_n}{C_{\text{test}}}}$$

where:

C_n = capacitance corresponding to the rated output
 C_{test} = measured capacitance of the capacitor to be tested.

2. — When checking whether these conditions are satisfied, fluctuations of voltage, frequency and cooling-air temperature during the test shall be taken into account. For this reason it is advisable to plot these parameters and the tangent of the loss angle or the temperature rise as a function of time.
 3. — The final measurement of loss angle may be substituted for the type test of Sub-clause 9.2 (see last paragraph of Sub-clause 9.2).
 4. — Testing with other frequencies, not deviating by more than 20% from the rated frequency, is permitted after agreement between manufacturer and purchaser. Suitable compensation for deviating frequency by changing test voltage and/or temperature can also be agreed.
- 10.4 Before and after the test, the capacitance shall be measured within the standard temperature range, and the difference in capacitor temperature for the two measurements shall not exceed 5 deg C. The change of capacitance shall not exceed 2%.

11. Voltage tests

11.1 Capacitor units

11.1.1 Voltage test between terminals (routine test)

Every capacitor shall be subjected for 10 s to either test *a*) or test *b*) below; if no agreement has been made, the choice is left to the manufacturer:

a) A d.c. test, the test voltage being:

$$U_t = 4.3 U_o$$

Note. — The charging and discharging currents shall be limited to ten times the rated current. The 10 s shall be counted from the moment the full test voltage has been reached.

b) An a.c. test, the test voltage being:

$$U_t = 2.15 U_o$$

U_o is the r.m.s. value of the voltage between terminals which in the test connection gives the same dielectric stress in the capacitor elements as the rated voltage U_n gives in normal service.

The a.c. test shall be carried out with a substantially sinusoidal voltage at a frequency between 15 Hz (c/s) and 100 Hz (c/s) and preferably as near as possible to the rated frequency.

Note. — With polyphase capacitors, the test connection shall be such that U_o is at least equal to U_n , in order to obtain adequate testing of all insulation between connections.

11.1.2 A.C. tests between terminals and container

a) Dry test (routine test)

Units having all terminals insulated from the container shall be subjected for 10 s to a test voltage applied between line terminals (joined together) and the container.

The test voltage shall be an a.c. voltage of a frequency between 15 Hz and 100 Hz and of the value corresponding to the insulation level of the unit (see tables of Clause 13).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b) Dry test (type test)

The requirements of Sub-clause 11.1.2 a) apply for the type test, except that the duration is increased from 10 s to 1 min.

c) Wet test (type test)

Units for outdoor use with terminal bushings shall be subjected to a test as specified under b) above, but applied under artificial rain conditions. The artificial rain and the method of test shall be in accordance with IEC Publication 60, High-voltage Test Techniques.

11.1.3 Impulse voltage test between terminals and container (type test)

Units having all terminals insulated from the container shall be subjected to an impulse test before the alternating current test specified in Sub-clause 11.1.2.

The impulse test shall be made with a wave of $1.2/50 \mu\text{s}$ (as defined in IEC Publication 60) having a crest value corresponding to the insulation level of the unit (see table of Clause 13).

The absence of failure during the test shall be verified by the cathode-ray oscillograph which is used to record the voltage and to check the wave-shape.

Five impulses of each polarity shall be applied between terminals joined together and the container. In the case of breakdown or if flashover occurs at more than one impulse of a series of five impulses of the same polarity, the unit is considered as not having passed the test. If one flashover occurs in a series of five impulses, the test shall be extended by applying ten additional impulses of the same polarity. If no further flashovers occur, the unit is considered as having passed the test.

Units with one terminal permanently connected to the container, whether this container is intended to be earthed or to be externally insulated, and units not intended for exposed installations shall not be subjected to this test.

11.1.4 Discharge test (type test)

The unit shall be charged by means of d.c. to twice the r.m.s. value of the rated voltage and then discharged through a gap situated as close as possible to the capacitor. It shall be subjected to five such discharges within 10 min.

Five minutes after this test, the unit shall be subjected to a voltage test between terminals as specified in Sub-clause 11.1.1.

The capacitance shall be measured before the discharge test and after the voltage test. The change of capacitance shall not exceed 2%.

11.2 Capacitor banks – Test between terminals and earth (routine test)

If a bank contains units or insulating supports of an insulation level lower than that of the bank, additional tests shall be carried out to ascertain that the complete bank will withstand the tests with the voltage corresponding to the insulation level of the bank (see Clauses 13 and 22).

12. Ionization test (type test)

The test voltages applied during this test shall be substantially sinusoidal at approximately the rated frequency of the capacitor. The test circuit shall be suitably damped to reduce overvoltages due to transients as much as possible. Throughout the test, the ambient air temperature shall be $25 \pm 10^\circ\text{C}$.

The rated voltage shall be applied to the capacitor for sufficient time to ensure that it reaches thermal equilibrium. Then a test voltage, the value of which is to be agreed between manufacturer and purchaser, shall be applied once only to the capacitor for 1 s.

The voltage shall then be reduced to $1.2 U_n$ and maintained for a period of 10 min, after which the voltage shall be raised to $1.5 U_n$ and maintained for a period of 10 min. At no time during this latter 10-minute period shall an increase in ionization level be observed.

Before and after the test, the capacitance shall be measured in accordance with Sub-clause 8.1 under identical conditions for the two capacitance measurements. No significant capacitance change shall be apparent from these measurements.

When interpreting the results of these measurements two factors shall be taken into account:

- a) the reproducibility of the measurement;
- b) the fact that an internal change in the dielectric may cause a small change of capacitance without breakdown of any element of the capacitor.

Notes 1. — The value of the voltage applied during 1 s has not been specified; this value should be chosen taking into consideration the service conditions of the capacitor and especially the over-voltages, including switching surges, liable to occur in the network in which the capacitor will be installed.

2. — This test must be made in accordance with the above test cycle, without switching off the voltage.

3. — The measurement of ionization level may be insensitive if the capacitance of the unit to be tested is too large in relation to that for which the test apparatus has adequate sensitivity. In this case agreement should be reached between the manufacturer and purchaser to the test being carried out on a model unit of a smaller capacitance, but of the same design and construction as that being supplied.

4. — The term "ionization" as used herein refers to discharges generated in the dielectric and is equivalent to the term "partial discharge".

5. — Such test methods as the measurement of $\tan \delta$ are not considered adequate for the detection of ionization. General requirements concerning ionization measurements are given in Appendix A.

13. Insulation levels and test voltages between terminal(s) and earth

The tables below show the standard insulation levels with the corresponding highest system voltages U_m . The insulation levels are defined by the r.m.s. values of the power-frequency a.c. test voltage and the crest values of the impulse test voltage mentioned in each line of the tables. The insulation level of a capacitor shall be chosen from the standard levels (see Clause 23).

TABLE I

Range of voltages below $U_m = 100$ kV (based on current practice in Europe)

| Highest system voltage (line-to-line) U_m kV (r.m.s.) | Insulation level | |
|---|---|---|
| | Power-frequency a.c. test voltage kV (r.m.s.) | Impulse test voltage crest value kV |
| 0.6 | 3 | 15 |
| 1.2 | 6 | 25 |
| 2.4 | 11 | 35 |
| 3.6 | 16 | 45 |
| 7.2 | 22 | 60 |
| 12 | 28 | 75 |
| 17.5 | 38 | 95 |
| 24 | 50 | 125 |
| 36 | 70 | 170 |
| 52 | 95 | 250 |
| 72.5 | 140 | 325 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE II

Range of voltages from $U_m = 100$ kV upwards

| Highest system voltage (line-to-line) U_m kV (r.m.s.) | Insulation level | | | |
|---|--|--------------------|--|--------------------|
| | Power-frequency a.c. test voltage kV (r.m.s.) | | Impulse test voltage crest value kV | |
| | Full insulation | Reduced insulation | Full insulation | Reduced insulation |
| 100 | 185 | 150 | 450 | 380 |
| 123 | 230 | 185 | 550 | 450 |
| 145 | 275 | 230 | 650 | 550 |
| 170 | 325 | 275 | 750 | 650 |
| 245 | 460 | 395 | 1 050 | 900 |
| | | 360 | | 825 |
| 300 | | 510 | | 1 175 |
| | | 460 | | 1 050 |
| 362 | | 570 | | 1 300 |
| | | 510 | | 1 175 |
| 420 | | 680 | | 1 550 |
| | | 630 | | 1 425 |
| 525 | | 740 | | 1 675 |
| | | 680 | | 1 550 |

Note. — The full insulation values apply to apparatus used on isolated neutral or resonant earthed systems or non-effectively earthed systems. The reduced insulation values may only be used if the system is effectively earthed. See IEC Publication 71, Insulation Co-ordination.

SECTION FOUR — RATINGS

14. Nameplate

14.1 The following information shall be given on the nameplate of each capacitor unit (except as provided in the note):

1. Manufacturer.
2. Identification number.
3. Rated output, in kilovars (see Sub-clause 14.2).
4. Rated voltage U_n , in volts or kilovolts.
5. Rated frequency, in hertz.
6. Temperature category.
7. Connection symbol (only for polyphase units (see Sub-clause 14.2),
8. Insulation level (see Sub-clause 14.3).
9. Discharge device, if built in.

A place shall be reserved for the measured capacitance or the measured current at rated voltage and rated frequency. These measured values may be indicated as absolute values or as percentages of the values equivalent to the rated output.

Further information which is of importance for the safety of persons or equipment shall be stated either on the nameplate or in an instruction sheet. In the latter case, the nameplate shall bear a reference to this instruction sheet.

Note. — For small units where it is impracticable to indicate all the above items on the nameplate, the item numbers 7, 8 and 9 may be stated in an instruction sheet. The nameplate shall bear a reference to this sheet.

14.2 The type of connection shall be indicated by the following symbols:



= delta



= star



= star, neutral brought out



= three sections without internal interconnections.

For three-phase units, the total output shall be given.

14.3 The insulation level shall be marked by means of two numbers separated by a stroke, the first number giving the r.m.s. value of the power-frequency test voltage, in kilovolts, and the second number giving the crest value of the impulse test voltage, in kilovolts (for example 28/75).

For units which are not intended for exposed installations (see IEC Publication 71, Insulation Co-ordination), the second number is replaced by a line (for example 28/—).

15. Permissible overloads

15.1 *Maximum permissible voltage*

Capacitor units shall be suitable for prolonged operation at an r.m.s. voltage between terminals not exceeding 1.10 times the rated voltage, excluding transients (see, however, Clause 17).

15.2 *Maximum permissible current*

Capacitor units shall be suitable for continuous operation at an r.m.s. line current not exceeding 1.30 times the current which occurs at rated sinusoidal voltage and rated frequency excluding transients.

SECTION FIVE — GUIDE FOR INSTALLATION AND OPERATION

16. General

Unlike most electrical apparatus, shunt capacitors, whenever energized, operate continuously at full load or at loads which deviate from this value only as a result of voltage variations.

Overstressing and overheating shorten the life of a capacitor and therefore the operating conditions (i.e. temperature, voltage and current) should be strictly controlled.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

It should be noted that the introduction of concentrated capacitance in a system may produce unsatisfactory operating conditions (e.g. amplification of harmonics, self-excitation of machines, overvoltages due to switching, unsatisfactory working of audio-frequency remote-control apparatus).

Because of the different types of capacitors and the many factors involved, it is not possible to cover by simple rules the installation and operation in all possible cases. The following information is given relative to the most important points to be considered. In addition, the instructions of the manufacturer and the power supply authorities must be followed, especially those concerning the switching-off of capacitors under light load conditions.

17. Choice of the rated voltage

17.1 In principle, the rated voltage of the capacitor should be equal to the actual service voltage of the network to which the capacitor is to be connected, account being taken of the influence of the presence of the capacitor itself.

In certain networks, a considerable difference may exist between the actual and nominal voltages of the network, details of which should be furnished by the purchaser, so that due allowance therefore may be made by the manufacturer. This is a matter of considerable importance for capacitors since their performance and life may be adversely affected by an undue increase in the stress on the capacitor dielectric.

Where blocking circuits are inserted in series with the capacitor to reduce the effects of harmonics, etc. the resultant increase of the voltage at the capacitor terminals above the actual service voltage of the network will necessitate an equivalent increase in the rated voltage of the capacitor.

If no information to the contrary is available, the actual service voltage shall be assumed as equal to the nominal (or declared) voltage of the network.

Notes 1. — An excessive safety margin in the choice of the rated voltage U_n should be avoided because this would result in a decrease in the actual available output when compared with the rated output.

2. — See Sub-clause 15.1 concerning maximum permissible voltage.

17.2 When determining the voltage to be expected on the capacitor terminals according to Sub-clause 17.1 the following considerations shall be taken into account:

- a) Capacitors cause a voltage rise at the point where they are located; this voltage rise may be even greater for any harmonics that may be present. Capacitors are therefore liable to operate at a higher voltage than that measured before connecting the capacitors.
- b) The voltage on the capacitor terminals may be particularly high at times of light load; in such cases, part or all of the capacitors should be switched off (see also Sub-clause 20.3) in order to prevent overstressing of the capacitors and undue voltage increase in the network.

17.3 Only in case of emergency should capacitors be operated at maximum permissible voltage and maximum ambient temperature, simultaneously, and then only for short periods of time.

18. Operating temperature

18.1 Special attention should be paid to the operating temperature of the capacitor because this has a great influence on the life of the capacitor. In this respect the temperature of the hottest element is the determining factor, but it is impossible to measure this temperature directly in practical operation.

The mean value over 1 h of the cooling-air temperature (see Sub-clause 3.16) should not exceed by more than 5 deg C the ambient temperature shown for the appropriate category in the second column of the table in Sub-clause 1.2.

18.2 Capacitors shall be so placed that there is adequate dissipation by radiation and convection of the heat produced by the capacitor losses. In this respect, the following points are important:

- a) The ventilation of the operating room and the arrangement of the capacitor units shall provide good air circulation around each unit. This is of special importance for units mounted in rows above each other.
- b) The temperature of capacitors subjected to radiation from the sun or from any surface at a high temperature will be increased. Depending on the cooling-air temperature, the intensity of the cooling and the intensity and duration of the radiation, it may be necessary to choose one of the following remedies:
 - i) to protect the capacitors from the radiation;
 - ii) to choose a capacitor designed for a higher ambient temperature (e.g. category -10/+45 °C instead of -10/+40 °C) or which is otherwise suitably designed;
 - iii) to employ capacitors with a rated voltage higher than that resulting from Clause 17 (the reduction in reactive power should then be taken into account).

18.3 Capacitors for 45 °C are suitable for the majority of applications under tropical conditions. In some locations, however, the ambient temperature may be such that a capacitor for 50 °C is required. The latter may also be needed for those cases where the capacitors are frequently subjected to the radiation of the sun during several hours (e.g. in desert territories), even though the ambient temperature is not excessive (see Sub-clause 18.2 b)).

In exceptional cases, the ambient temperature may be higher than 50 °C maximum or 45 °C daily average. Where it is impossible to improve the cooling conditions, capacitors of a special design or having a higher rated voltage must be used.

19. Special conditions

Apart from high ambient temperature, other adverse conditions of use are liable to be met with in tropical countries. Where the purchaser knows that such conditions are present, the manufacturer should be informed when the capacitors are ordered. This information should also be given to the suppliers of all associated equipment for the capacitor installation.

The most important conditions are the following:

- a) Frequent occurrence of periods of high relative humidity. It may be necessary to choose equipment for a higher insulation level, or to use insulators of special design. Attention is drawn to the possibility of fuses being shunted by a deposit of moisture on their surfaces.

- b) Rapid mould growth. Metals, ceramic materials and some paints and lacquers do not support mould growth. When fungicidal materials are used, they do not retain their poisoning property for more than several months; in any case, mould may develop in an installation on places where dust, etc. can settle.
- c) Corrosive atmosphere, which is found in industrial and coastal areas. It should be noted that in climates of higher temperature the effects of such atmospheres may be more severe than in temperate climates.
- d) Attack by insects.

20. Overvoltages

- 20.1 High overvoltage transients may be encountered when capacitors are disconnected by switching devices which allow restriking. Caution is recommended to select switching devices which operate without causing excessive overvoltage due to restriking.
- 20.2 Capacitors which are liable to be subjected to high overvoltages by lightning should be adequately protected. If lightning arresters are used, they should be located as near as possible to the capacitors. Care should, however, be taken when applying arresters to large banks. Special arresters may be required to take care of the discharge current from the capacitor.
- 20.3 When a capacitor is permanently connected to a motor, difficulties may arise after disconnecting the motor from the supply. The motor, while still revolving, may act as a generator by self-excitation and may give rise to voltages considerably in excess of the system voltage.

This, however, can usually be prevented by ensuring that the capacitor current is less than the magnetizing current of the motor; a value of about 90% is suggested. As a precaution, live parts of a motor to which a capacitor is permanently connected should not be handled before the motor stops.

Notes 1. — The possible maintenance of voltage after the machine is switched off is particularly dangerous for induction generators and for motors with a braking system intended to be operated by loss of voltage.

2. — In the case where the motor stops immediately after having been disconnected from the supply, the compensation may exceed the value indicated above.

- 20.4 When a capacitor is connected to a motor associated with a star-delta starter, the arrangement should be such that no overvoltage can occur during the operation of the starter.
- 20.5 When building up a capacitor bank from a random selection of units, care should be taken to avoid overvoltages due to the difference in capacitance between the units. This difference may be as high as 15% (see Sub-clause 8.2). It should be considered in each case separately whether the best solution is to avoid voltage differences on the units or to choose the rated voltage of the units taking into account a certain voltage increase.

Also the consequence of the breakdown of a unit in connection with the method of fault protection (see Note to Sub-clause 22.4) should be studied.

When voltage difference should be avoided, the units (or group of units) to be connected in series shall be chosen so as to conform in capacitance to the greatest possible extent.

In the case of star connected banks with isolated neutral, capacitance difference between phases will lead to an increase of the voltage across the capacitors in the phase with the smallest capacitance. Where the capacitance difference is large (e.g. greater than 5%) this voltage increase should be checked.

21. Overload currents

21.1 Capacitors should never be operated with currents exceeding the maximum value specified in Sub-clause 15.2.

21.2 Overload currents may be caused either by excessive voltage at the fundamental frequency or by harmonics, or both. The chief sources of harmonics are rectifiers and saturated transformer cores.

21.3 If the voltage rise at times of light load is increased by capacitors, the saturation of transformer cores may be considerable. In this case, harmonics of abnormal magnitude are produced, one of which may be amplified by resonance between transformer and capacitor.

This is a further reason for recommending the disconnection of capacitors at times of light load, as referred to in Sub-clause 17.2 a) and b).

21.4 If the capacitor current exceeds the maximum value specified in Sub-clause 15.2, whilst the voltage is within the permissible limit of $1.10 U_n$, specified in Sub-clause 15.1, the predominating harmonic should be determined in order to find the best remedy.

The following remedies should be considered:

a) Moving some or all of the capacitors to other parts of the system.
b) Connection of a reactor in series with the capacitor to lower the resonant frequency of the circuit to a value below that of the disturbing harmonic (see Sub-clause 17.1).

c) Increase of the value of the capacitance where the capacitor is connected close to rectifiers.

21.5 The voltage wave form and the circuit characteristics should be determined before and after installing the capacitor; in the case where sources of harmonics such as large rectifiers are present, special care should be taken.

21.6 Transient over-currents of high amplitude and frequency may occur when capacitors are switched into circuit. Such transient effects are to be expected when a section of a capacitor bank is switched in parallel with other sections which are already energized.

It may be necessary to reduce these transient over-currents to acceptable values in relation to the capacitor and to the equipment by switching on the capacitors through a resistor (resistance switching) or by the insertion of reactors in the supply circuit to each section of the bank (see also Sub-clause 22.2).

22. Switching and protective devices and connections

22.1 The switching and protective devices and the connections shall be designed to carry continuously a current of 1.3 times the current which would be obtained with a sinusoidal voltage of r.m.s. value equal to the rated voltage at the rated frequency. As the capacitor may have a capacitance equal to 1.1 times the value corresponding to its rated output (see Sub-clause 8.2), this current may have a maximum value of 1.3×1.1 times the rated current.
Further, harmonic components, if present, may have a greater heating effect than the corresponding fundamental component, due to the skin effect.

22.2 The switching and protective devices and the connections shall be capable of withstanding the electro-dynamic and thermal stresses which are caused by transient over-currents of high amplitude and frequency which may occur at switching on.
Such transient effects are to be expected when a section of a capacitor bank is switched in parallel with other sections which are already energized.
When consideration of the electro-dynamic and thermal stresses would lead to excessive dimensions, special precautions, such as referred to in Sub-clause 21.6, for the purpose of protection against over-currents should be taken.

Notes 1. — Fuses in particular should be chosen with adequate thermal capacity.

2. — In certain cases, for example when the capacitors are automatically controlled, repeated switching operations may recur at relatively short intervals of time. Switchgear and fuses must be selected to withstand these conditions.

22.3 Switching devices specially suited for capacitor switching shall be used. For example, the device shall be such that restriking during breaking operations, which may result in high overvoltages, cannot occur (see also Sub-clause 20.1).

If the movement of the switch contacts during opening and/or closing can be influenced by the operator, he should follow the relevant instructions, e.g. to operate the switch as quickly as possible.

It is recommended that before deciding upon the type of control device to be used with any capacitor installation, either the capacitor manufacturer or the switchgear manufacturer should be consulted.

22.4 It is recommended that capacitors be protected against over-current by means of suitable over-current relays which are adjusted to operate the circuit-breakers when the current exceeds the permissible limit specified in Sub-clause 15.2. Fuses generally do not provide suitable over-current protection.

Note. — Over-current protection of a capacitor does not in itself give overvoltage protection, neither in general does it give protection against internal faults of a capacitor unit.

The protection against internal faults of a capacitor bank built up of a multiplicity of units is especially necessary. Suitable means should be provided to isolate automatically a faulted unit.

22.5 If iron cored reactors are used, attention should be paid to possible saturation and overheating of the core by harmonics.

22.6 Any bad contacts in capacitor circuits may give rise to small sparks causing high-frequency oscillations which may overheat and overstress the capacitors.

Regular inspection of all contacts of the capacitor equipment is therefore recommended.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23.

Choice of insulation level

The insulation level of a capacitor bank shall be chosen in accordance with that of the system to which the bank will be connected, from the tables of Clause 13.

A clear distinction should be drawn between the insulation level of the bank and that of the units.

The following possibilities should be considered:

- a) Where the insulation level of the units is equal to that of the bank. This may, for example, be the case when no series connection of units is used. Extra insulation external to the units need not be employed.
- b) Where the insulation level of the units is smaller than that of the bank. This is generally the case when series connection of units is used and then extra insulation external to the units is necessary. If the voltage distribution between the units and the external insulation is uncertain, the external insulation should conform to the full insulation level of the bank.

24.

Capacitors connected to systems with audio-frequency remote control

The impedance of capacitors at audio-frequencies is very low. When they are connected to systems having audio-frequency remote control, overloading of the remote control transmitter and unsatisfactory working may, therefore, result.

There are various methods of avoiding these deficiencies; the choice of the best method should be made by agreement between all parties concerned.

APPENDIX A

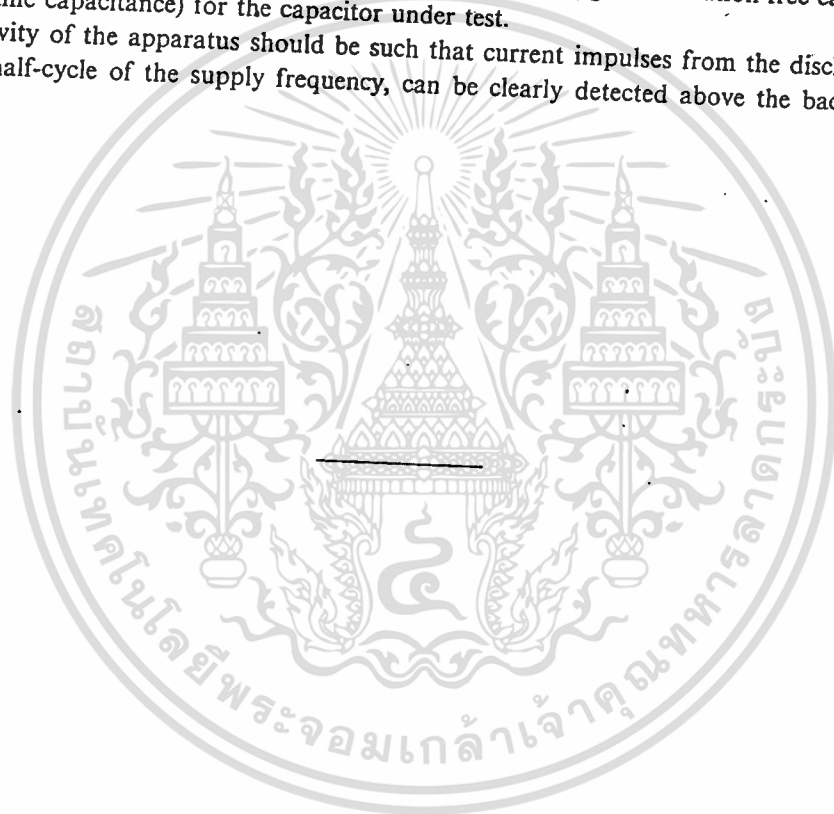
GENERAL REQUIREMENTS CONCERNING IONIZATION MEASUREMENTS

Ionization discharges in a dielectric give rise to current impulses when the capacitor under test is connected into a closed circuit. These current impulses produce voltage impulses across the terminals of an impedance forming part of the closed circuit. These should be applied to the input of a suitable measuring apparatus. This measuring apparatus must have the characteristics of a band-pass filter whose pass-band lies somewhere within the limits of 10 kHz (kc/s) and a frequency below the lowest natural frequency of the capacitor.

To obtain maximum sensitivity, it is desirable that the circuit of the test capacitor should be tuned to a frequency within the pass-band of the measuring apparatus. The output signal from this apparatus is taken as a measure of the ionization.

Calibration of the apparatus may be carried out by injecting repeated pulses of known magnitude into the circuit in any convenient manner, if necessary after substituting an ionization-free capacitor (of substantially the same capacitance) for the capacitor under test.

The sensitivity of the apparatus should be such that current impulses from the discharge of 50 pC, repeated each half-cycle of the supply frequency, can be clearly detected above the background noise.



APPENDIX B

COMPUTATION OF THE OUTPUT OF THREE-PHASE CAPACITORS FROM THREE SINGLE-PHASE CAPACITANCE MEASUREMENTS

The capacitances measured between any two line terminals of a three-phase capacitor of either delta or star connection are denoted as C_a , C_b and C_c .

If the requirements for symmetry laid down in Sub-clause 8.3 are fulfilled, the output P of the capacitor can be computed with sufficient accuracy from the formula:

$$P = \frac{2}{3} (C_a + C_b + C_c) \omega U_n^2 \times 10^{-3}$$

Where:

C_a , C_b and C_c are expressed in microfarads

U_n is expressed in kilovolts.

P is expressed in kilovars.



ของบริษัท นิชชิน อิเล็กทริก จำกัด.

INSULATING OILS FOR POWER CAPACITORS

NISSIN ELECTRIC CO., LTD.

As it is well known, PCB (poly chlorinated Biphenyl ... Askaral) is one of the best insulating liquids for oil impregnated or oil immersed electrical equipments. Especially this material is considered the best dielectrics available for power capacitors, because it is not only non-inflammable but also quite stable and superb in electrical characteristics.

However, PCB became the object of public attention as one of the environment polluting substances, and the use of PCB was legally prohibited in 1972 in Japan.

As substitutes for PCB, AHC oils such as AN, ADE, etc. have been developed by us in Japan first in the world and have now become the main stream.

New synthetic oils to substitute PCB are now specified in the Japanese Industrial Standard, JIS C 2320 revised in 1978, a first standard in the world to cover these oils.

Capacitor oils now being used in Japan are Aromatic hydrocarbon (AHC) oil such as AN (JIS C 2320-1978R, Type 4), and ADE (JIS C 2320-1978R, Type 5).

Characteristics of the insulating oil used by Nissin are summarized as shown in attached table for comparison with other type of capacitor dielectrics.

This impregnant is the aromatic hydrocarbon type oil of only carbon and hydrogen (not include chroline). Therefore, Nissin capacitor units have no severe disposal limitations other than normal good industrial practices for chemical materials as mineral oil for transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTIES OF PXE

1. Electrical properties

This oil has slightly higher dielectric constant than conventional mineral oils.

Dielectric strength resistivity and power factor are excellent.

2. Stability

Oxidation stability is good, especially thermal stability is superior to conventional synthetic insulating fluids.

3. Gas absorption

Hydrogen gas absorption ability is especially excellent in comparison with those of mineral insulating oils and this oil has an excellent performance under high stress and partial discharges.

4. Corrosiveness

Since no materials corrosive to metals, such as sulfur or acidic substances are contained, the test result for corrosive sulfur is indicated as noncorrosive.

5. Toxicity

It has been confirmed that this oil has non-toxicity, therefore the oil can be handled in the same manner as for ordinary mineral insulating oils.

6. Biodegradability

As this oil can be easily decomposed by microorganism, there is no environmental pollution problem such as caused by polychlorinated Biphenyls.

Note As regards detail information of Health and environmental assesment, please refer to Technical paper No. HB-10-76M (issued by NIPPON OIL CO., LTD.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERISTICS OF MATERIAL FOR CAPACITOR

NISSIN ELECTRIC CO., LTD.

1. Synthetic film (Polypropylene) [JIS C 2330-1978]

i) Physical and chemical properties

- . Density : 0.91 ± 0.01
- . Tensile strength : $15 \sim 25 \text{ kg/mm}^2$

ii) Electrical properties

- . Dielectric loss (20°C) : $0.002 \sim 0.05\%$
- . Volume resistivity : $10^{16} \sim 10^{20} \Omega\text{-cm}$
- . Dielectric constant (20°C) : $2.1 \sim 2.2$
- . Dielectric strength (AC) : $300 \sim 400 \text{ kV/mm}$

2. Insulation paper [JIS C 2302-1978]

i) Physical and chemical properties

- . Density : 0.78 g/cm^3
- . Impermeability : less than 10 cc/5 min
(by creiner porosity-meter)
- . Tensile strength : above 6.0 kg/mm^2 in winding direction

ii) Electrical properties (impregnated paper)

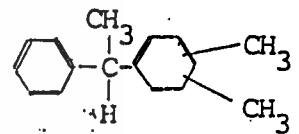
- . Dielectric loss (100°C) : 0.17%
- . Insulation resistance (100°C) : $100 \Omega\text{F}$
- . Dielectric constant (20°C) : 3.3 ± 0.25
- . Dielectric strength (DC) : 150 kV/mm

3. Insulation oil [JIS C 2320-1978]

i) Physical and chemical properties

- . Specific gravity (15/4°C) : 0.99 ± 0.01
- . Pour point : -47.5°C
- . Flash point : 150°C
- . Viscosity (30°C) : 7.7 Cst
- . Total acid value : 0.01 mg KOH/g

Phenylxylyl ethane
(PXE)



ii) Electrical properties

- . Dielectric loss (80°C) : 0.011
- . Dielectric constant (80°C) : 2.5
- . Volume resistivity (80°C) : 9.4×10^{14}
- . Dielectric strength (kV/2.5mm) : 80

4. Al foil [JIS H 4160-1974]

- . Class : IN 30 No. : A1N30H-O
- . Chemical component

Al above 99.30

Cu below 0.10

Si + Fe below 0.70

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ อาจารย์นิทัศน์ กฤษณจินดา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษา คุณอนวัชร สินสมุทร ในนามของบริษัท นิชชิน อีเลคทริก (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านวัสดุ อุปกรณ์ ต่าง ๆ รวมถึงการทดสอบ ให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกระบวนการผลิต คุณสุเบรร์ สุทธิคารา ในนามของบริษัท เอปียี ไทย คาปาซิเตอร์ จำกัด ที่แนะนำกระบวนการผลิตคาปาซิเตอร์



เอกสารอ้างอิง

- 1) Long , T. and Hunt, T.W. and Brecknell, W.A.,
"Power Capacitor Handbook", London, Butterworth
& Co (Publisher) Ltd., 1984
- 2) ดร.สารวย สິงษ์สะอาด "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2527
- 3) สุรัชย์ นิมละออ, สมเกียรติ วงศ์กุลเลิศ, "High
Voltage Capacitor", ปริทัศน์พนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟ
ฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2532
- 4) IEC. Recommendation Publication 70, "Power
Capacitors" , 1967