

ปัญหาในการใช้งานสายตัวนำหุ้มฉนวนแบบ Partially Insulated  
Problems On Overhead Partially Insulated Conductor



ปีการศึกษา 2532

027005

ปัญหาในการใช้งานสายตัวนำหุ้มฉนวนแบบ Partially Insulated  
Problems On Overhead Partially Insulated Conductor

ณัฐพล เกียรติวินัยสกุล

Nattapol KietWinaisakul

ศิริระ ลัตยไพศาล

Sira Satayapaisal

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ จงรักษ์ บุญเลี้ยง วศ.ม

Advisor

Jongruk Boonseng M.Eng.

ปริญญาโทสำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2532

ปริญญาโทบริหารการศึกษา 2532

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ปัญหาในการใช้งานสายตัวนำหุ้มฉนวนแบบ Partially Insulated

ผู้จัดทำ

1. นาย ณัฐพล เกียรติวินัยสกุล รหัส 29.1052
2. นาย ศิระ สัตยไพศาล รหัส 29.1218



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อเรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	
Abstract	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ผลกระทบของการใช้สายหุ้ม	2
1.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น	3
1.3 ลักษณะหรือปรากฏการณ์เมื่อเกิดฟ้าผ่า	4
1.4 การป้องกันและการแก้ไข	6
1.5 โครงการวิจัยทดลอง	10
บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไปของการเกิดและการวัดค่า Partial Discharge	11
2.1 บทนำ	11
2.2 ดิสรจาร์จบางส่วน	12
2.3 ระบบตรวจสอบ Partial Discharge	16
2.4 การหาค่า Partial Discharge	20
บทที่ 3 ความรู้เกี่ยวกับสายเคเบิลและการทดสอบสายเคเบิล	20
3.1 บทนำ	23
3.2 ฉนวนแข็ง	24
3.3 สายเคเบิล	35
3.4 การฉนวนเคเบิล	36
3.5 การทดสอบวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้า	38
บทที่ 4 ลุกก๊วยฉนวนและการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายบนลูกถ้วย	40
4.1 ลุกก๊วยฉนวน	40
4.2 ลักษณะของลูกถ้วย	42
4.3 อุปกรณ์สำหรับลูกถ้วย	46

	4.4 การวิเคราะห์ค่าสนามและแรงดันกระจาย	47
	บนลูกถ้วย	
บทที่ 5	อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง	51
	5.1 บทนำ	51
	5.2 อุปกรณ์การทดลอง	51
	5.3 วิธีการทดลอง	57
บทที่ 6	ผลการทดลอง	59
บทที่ 7	สรุปและวิจารณ์	79

เอกสารอ้างอิง

81

กิตติกรรมประกาศ

82

ภาคผนวก

- ก.) คุณสมบัติของสายเคเบิลหม้อฉนวนที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง
- ข.) คุณสมบัติของสายส่งกำลังแบบเปลือยที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง
- ค.) คุณสมบัติลูกถ้วยฉนวน

หัวข้อปริญญานิพนธ์

ปัญหาในการใช้งานสายตัวนำหุ้มฉนวนแบบ Partially

Insulated

โดย

นาย ศุภผล เกียรติวินัยสกุล

นาย ศิระ สัตยไพศาล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ จงรักษ์ บุญเลี้ยง

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา

2532

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงปัญหาที่เกิดจากการนำสายตัวนำชนิดที่มีการหุ้มฉนวนเพียงบางส่วน ( Partial Insulated Conductor ) มาใช้งานแทนสายตัวนำชนิดเปลือยในระบบการส่งกำลังระดับแรงดันไฟ 12 และ 24 KV พร้อมอธิบายถึงสาเหตุของปัญหา โดยโครงการนี้จะทำการวิจัยเกี่ยวกับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ( Partial Discharge ) ในสายตัวนำหุ้มฉนวน และผลที่เกิดขึ้นตามมา

Thesis Title        Problems On Overhead Partially Insulated  
                                 Conductor.

Name                    Nattapol Kiatwinaisakul

                                 Sira        Satayapaisal

Thesis Advisor        Jongruk    Boonseng

Level of Education    Bachelor of Engineering in  
                                 Electrical Engineering.

Department            Electrical Engineering

Academic                1989

Abstract

This thesis explaine causes and associated solutions at problems on using overhead partially insulated conductor for the substitution of bare conductor in 12 and 24 KV distribution system. And this is a research project at high voltage engineering about Partial Discharge on partially insulated conductor

## บทที่ 1

### บทนำ

ในระบบการจ่ายไฟฟ้าขนาดแรงดัน 12 และ 24 KV นั้นส่วนใหญ่จะใช้ระบบสายอากาศ ( Overhead ) และใช้สายอลูมิเนียมชนิดเปลือย ( All Aluminium Conductor ) รวม 4 ขนาด คือ 185 ตร.มม. , 120 ตร.มม. , 70 ตร.มม. , 35 ตร.มม. โดยการเลือกใช้ขนาดสายตัวนำจะขึ้นกับภาระทางไฟฟ้า

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วสายตัวนำขนาด 185 ตร.มม. จะใช้เป็นสายป้อนหลัก ( Main Feeders ) และสายตัวนำขนาดอื่นจะใช้เป็นสายย่อย ( Laterals ) การติดตั้งตัวนำไฟฟ้าทุกขนาดจะใช้ลูกถ้วยไฟฟ้าชนิด Pin Type ANSI Class 56-2 ระยะห่างระหว่างสายตัวนำและการออกแบบโครงสร้างรองรับได้ปฏิบัติตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา ( National Electrical Safety Code )

สภาพการขยายตัวทางธุรกิจ อุตสาหกรรม และภาคเอกชนในปัจจุบัน ทำให้เกิดการก่อสร้างอาคารขนาดต่างๆ ตั้งแต่อาคารพาณิชย์จนถึงอาคารขนาดใหญ่ เช่น คอนโดมิเนียมและศูนย์การค้า เป็นต้น การก่อสร้างอาคารนั้น กรณีที่ก่อสร้างใกล้กับแนวสายแรงสูง (12/24 เควี.) ผู้ปฏิบัติงานมักจะประสบอันตราย เนื่องจากรู้เท่าไม่ถึงการณ์ เช่น การล้มเลียงเหล็กเส้น ท่อน้ำประปา หรือการติดตั้งนั่งร้าน และเกิดการสัมผัสกับสายแรงสูง (12/24 เควี.) ทำให้ได้รับบาดเจ็บหรือตาย เป็นต้น

ส่วนทางด้านสิ่งแวดล้อมมักจะประสบปัญหา เช่นในเรื่องการปลูกต้นไม้ใต้นแนวสายไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้าได้ 2 ลักษณะคือ

1. ในสภาวะปรกติการเจริญเติบโตของต้นไม้จนสัมผัสกับสายไฟฟ้า ทำให้เกิดการลัดวงจรลงดิน และไฟฟ้าดับ
2. ในกรณีที่เกิดพายุฝน ส่วนของต้นไม้สัมผัสกับสายไฟฟ้าทำให้เกิดการลัดวงจรลงดินและไฟฟ้าดับ บางกรณีอาจเกิดการเสียดสี จนกระทั่งสายไฟฟ้าขาดได้ด้วย

ดังนั้นจึงได้มีการริเริ่มใช้สายตัวนำอลูมิเนียมหุ้มฉนวนชนิดที่เรียกว่า Partially Insulated Conductor ขึ้นมาใช้แทนสายตัวนำอลูมิเนียมเปลือย สำหรับป้องกันอันตราย

แก่ผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งแนวความคิดเริ่มต้นในเรื่องการใช้สายตัวนำอลูมิเนียมหุ้มฉนวนชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Partially Insulated Conductor มีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 2 ประการคือ

1. เพื่อเสริมสร้างความปลอดภัยให้แก่สาธารณะชน ในกรณีที่เกิดการสัมผัสโดยบังเอิญ (Accidental Contact)
2. เพื่อลดปัญหาการเกิดลัดวงจรลงดินในกรณีที่ต้นไม้สัมผัสกับสายไฟฟ้า หรือการลัดวงจรเนื่องจากสัตว์

### 1.1 ผลกระทบของการใช้สายหุ้ม

การใช้สายตัวนำอลูมิเนียมหุ้มฉนวนแม้จะมีข้อดี ด้านลดอุบัติเหตุจากการสัมผัสสายไฟฟ้าแรงสูงและลดสถิติด้านไฟฟ้าดับชั่วคราวให้มัน้อยลงก็ตาม การใช้สายหุ้มก็มีผลกระทบในส่วนที่เป็นผลเสียอยู่หลายประการดังนี้

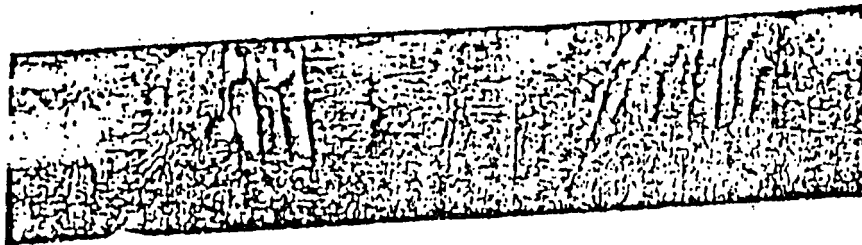
1. การทำให้เกิดปัญหาสายหุ้มขาดและตกลงบนพื้น ( Conductor Burndown ) ซึ่งเกิดได้หลายลักษณะคือ

- สายหุ้มขาด ที่มีสาเหตุมาจากฟ้าผ่าไม่ว่าจะเป็นในลักษณะใด
- สายหุ้มขาด ที่มีสาเหตุมาจากการเสียดสีกับต้นไม้
- สายหุ้มขาดเนื่องจากการสึกกร่อนที่เรียกว่า Stress Corrosion Cracking (SCC) ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะกับสายตัวนำที่ทำด้วยทองแดงเท่านั้น โดยน้ำฝนในอากาศเมื่อผสมกับสายเคมิในอากาศเป็นกรดไนตริก (  $\text{HNO}_3$  ) กลายเป็น Catalyzer ที่ทำให้เกิด Cracking ในเนื้อทองแดงและเกิดสายขาดในที่สุด สำหรับสาเหตุที่ไม่เกิดปัญหา SCC นี้ในสายอลูมิเนียมเนื่องจาก Oxide บนผิวของอลูมิเนียม จะช่วยป้องกันการสึกกร่อนได้เป็นอย่างดี

2. ทำให้เกิดปัญหาอุปกรณ์ป้องกัน (เช่น รีเลย์) ไม่สามารถทราบได้ว่าสายเกิดขาดขึ้นเนื่องจากสายมีฉนวนหุ้ม หากพื้นที่ที่มีสายหุ้มตกลงมามีผิวแห้งแล้ว จะเป็นการเกิด High Impedance Fault ซึ่งมีกระแสไหลลงดินต่ำมาก และจะเกิดอันตรายกับผู้ที่อยู่ใกล้ได้หากไม่มีการตรวจพบและตัดวงจรออกอย่างทันทั่วทั้ง

3. ทำให้เกิดปัญหา Partial Discharge ระหว่าง Tie Wire กับเนื้อของสาย

ตัวนำ จนทำให้ฉนวนของสายหุ้มชำรุดเป็นรอยตามแนวของ Tie Wire ที่มีดสายเข้ากับลูก



รูปที่ 1 ตัวอย่างของการเกิด Partial Discharge ตามแนว Tie Wire ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากแรงดันที่แตกต่างกันระหว่างสายตัวนำกับ Tie Wire ผลที่ตามมาก็คือมีการคายประจุผ่านอากาศ ( Air Gap Discharge ) ระหว่างสายตัวนำกับ Tie Wire ทำให้เกิดเสียงดัง และอาจมีการรบกวนคลื่นวิทยุหรือทีวีที่อยู่ใกล้เคียงหากมีช่วงความถี่ที่ตรงกัน แม้ว่า การเกิดฉนวนทะลุในลักษณะนี้ อาจทำให้เกิดสายหุ้มขาดในเวลาต่อมาได้ แต่จากหลักฐานที่พบยังไม่พบการเกิดสายขาดจากสาเหตุของ Partial Discharge นี้เลย

## 1.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

จากผลกระทบของการใช้สายตัวนำ Partially Insulated Conductor ข้างต้นจะพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ ปัญหาการเกิดสายไฟฟ้าขาด ซึ่งตำแหน่งของสายที่ขาดมักจะเกิดในบริเวณใกล้กับลูกถ้วยและ Tie Wire ที่ใช้มัดสายหุ้มเข้ากับลูกถ้วย ซึ่งลักษณะของฉนวนของสายหุ้มที่ขาดจะเป็นรูกลม ( Pin Hole )



รูปที่ 2 ลักษณะของสายที่ขาดฉนวนจะทะลุออกเป็นรูกลม

## ปัญหาการเกิดสายขาด

ปัญหาการเกิดสายขาดของสายหุ้มนั้น มิใช่เพียงจะเกิดขึ้นในต่างประเทศได้มีมานาน

แล้ว นับตั้งแต่มีการใช้สายหุ้มมาใช้งาน แต่ยังมีทราบสาเหตุที่แท้จริงเท่านั้น ซึ่งแต่เดิมมักเข้าใจว่ามีสาเหตุมาจาก " กระแสรั่ว (Surface Leakage Current) "

• ลักษณะการเกิดกระแสรั่ว ( Surface Leakage Current ) ไหลผ่านฉนวนของสายไปสู่ Tie Wire หรือฉนวนรองรับ ( Insulator ) ลงดิน

ค่า Leakage Current จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ประการคือ

- ความหนาแน่นของฉนวนไม่ Uniform ส่วนที่มีฉนวนบางจะมีค่าความต้านทานต่ำ จึงยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านในปริมาณสูง

- ความสกปรกบนผิวของฉนวนรองรับ ( Insulated ) ที่เกิดจากมลภาวะทำให้ฉนวนรองรับเสื่อมสภาพ และยอมให้กระแสรั่วผ่านตามผิวได้มากขึ้น

จะเห็นได้ว่าเมื่อติดตั้งสายหุ้มฉนวนไว้ใหม่ ๆ ฉนวนของสายจะจำกัดค่า Leakage Current ให้อยู่ในค่าต่ำมาก เช่นเป็น Microampere และจะไหลผ่านจุดที่บางหรือมีค่าความเป็นฉนวนต่ำที่สุดผ่านฉนวนรองรับลงดิน การที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนที่มีความต้านทานก็จะทำให้เกิดความร้อน ซึ่งจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ทำให้ฉนวนตรงจุดนี้ Breakdown กลายเป็น Current Path แล้ว ฉนวนของสายก็จะไม่เป็นตัวจำกัดกระแสอีกต่อไป ดังนั้น ฉนวนรองรับ ( Insulator ) ก็จะทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสรั่วต่อไป

โดยบริษัทผู้ผลิตฉนวนรองรับ ( Insulator ) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำการทดลองวัดค่ากระแสรั่วได้ 5 - 10 mA ซึ่งมากพอที่จะทำให้เสาไม้หรือคอนกรีตใหม่ กระทบที่มีความสกปรกมากก็จะมีกระแสรั่วมากยิ่งขึ้นจนอาจทำให้เกิด Flashover ได้ การเกิดกระแสรั่วผ่านฉนวนรองรับมากขึ้นนั้น เมื่อพิจารณาบริเวณฉนวนของสายที่ทะลุตามรายละเอียด อาจจะทำให้เกิด Arcing Current ทำให้สายอลูมิเนียมกร่อนในที่สุดอาจขาดได้

แต่ในปัจจุบันจากการวิเคราะห์เห็นว่า สาเหตุส่วนใหญ่ของการเกิดสายขาด เกิดจากผลของฟ้าผ่าหรือการเหนี่ยวนำของฟ้าผ่า

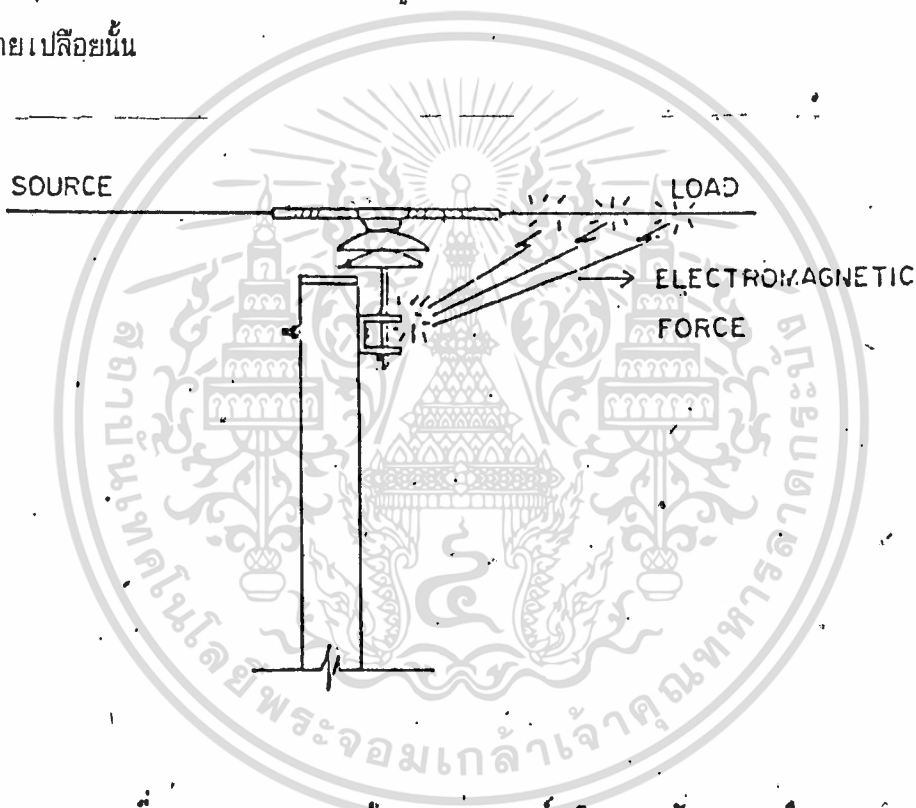
### 1.3 ลักษณะหรือปรากฏการณ์ เมื่อเกิดฟ้าผ่า

เมื่อมีฟ้าผ่าเกิดขึ้น ไม่ว่าจะ เป็นฟ้าผ่าลงบนสายหุ้มโดยตรง ( Direct Stroke ) หรือโดยการเหนี่ยวนำ ( Induced Lightning Stroke ) จะทำให้เกิดแรงดัน Lightning Overvoltage บนสายตัวนำ จนเกิดสภาพ Flashover to Ground ขึ้น

และจุดที่เกิด Flashover ได้ง่ายที่สุดจะอยู่ใกล้กับเสาไฟฟ้า บริเวณลูกถ้วย เนื่องจากมี Insulation Level ต่ำที่สุดนั่นเอง

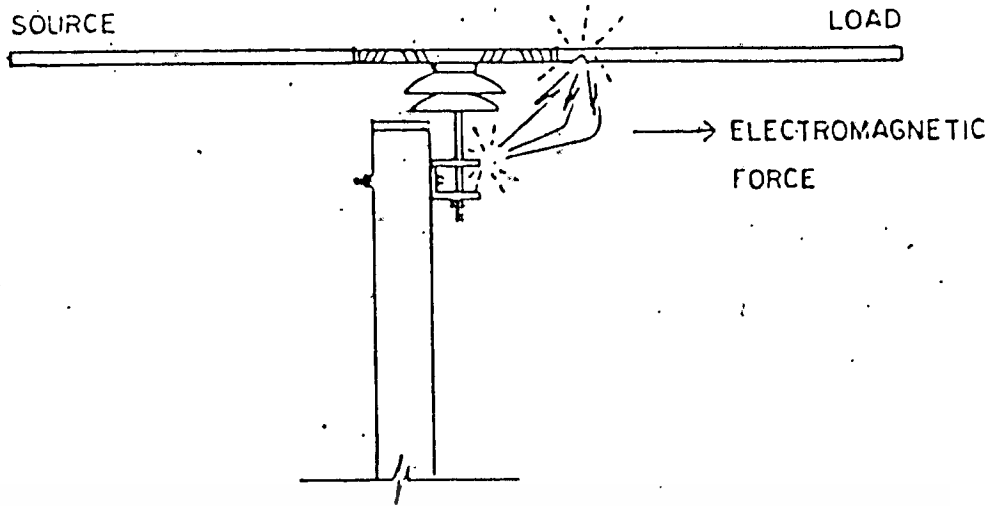
ซึ่งในระหว่างที่เกิด Flashover to Ground อากาศจะถูก Ionized จนทำให้เกิดกระแสลัดวงจรลงสู่ดินในลักษณะของ Arc ที่เรียกว่า Power Follow Current Arc ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันในสถานีย่อยจะมองเห็นกระแสส่วนนี้ โดย Circuit Breaker จะทำหน้าที่ตัดวงจร

ปรากฏการณ์เมื่อมีฟ้าผ่าจนมี Lightning Flashover นี้ จะมีลักษณะเหมือนกันทั้งในสายหุ้มและสายเปลือย ข้อแตกต่างอยู่ที่ว่ากระแสอาร์คของ Power Follow Current ในสายเปลือยนั้น



รูปที่ 3 แสดงการเกิดกระแสอาร์คในสายตัวนำเปลือย

ล้าของอาร์คสามารถเคลื่อนไหวได้โดยอิสระไปทางด้าน Load บนสายตัวนำ ด้วยแรง Electromagnetic Force ของกระแสอาร์ค ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงกระจายไปตามเนื้อของสายตัวนำอย่างทั่วถึง



รูปที่ 4 แสดงการเกิดกระแสอาร์คในสายตัวนำชนิดหุ้ม

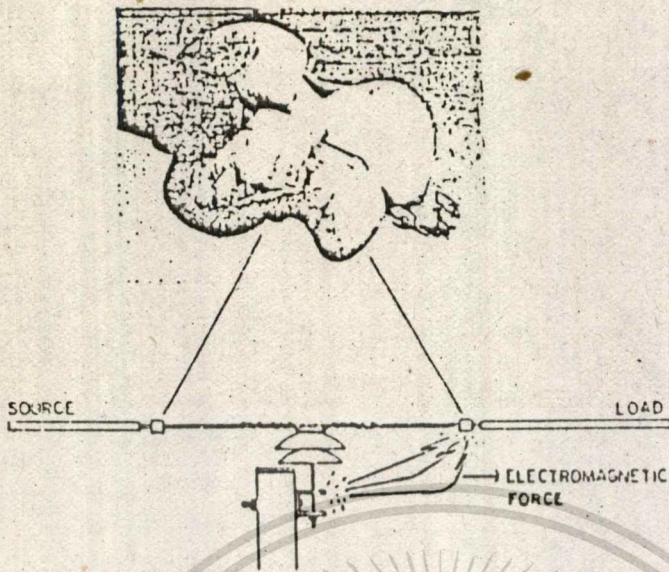
ในกรณีของสายหุ้มนั้น กระแส Arc จะไหลออกจากสายตัวนำผ่านรูที่ฉนวนทะเลเพียงรูเดียวและลำของอาร์คที่เกิดขึ้นแม้ว่าจะมีแรง Electromagnetic Force กระทำก็ตาม แต่จุดที่กระแสไหลออกจากสายตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากมีฉนวนคั่นอยู่ ความร้อนที่เกิดขึ้นในจุดเล็ก ๆ เช่นนี้จึงสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนสายตัวนำหลอมละลายและสายขาดตกลงมาในที่สุด โดยฉนวนหุ้มเป็นตัวจำกัดการระบายความร้อนและแรงดึงในสายจะเป็นตัวเร่งให้สายขาดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

#### 1.4 การป้องกันและการแก้ไข

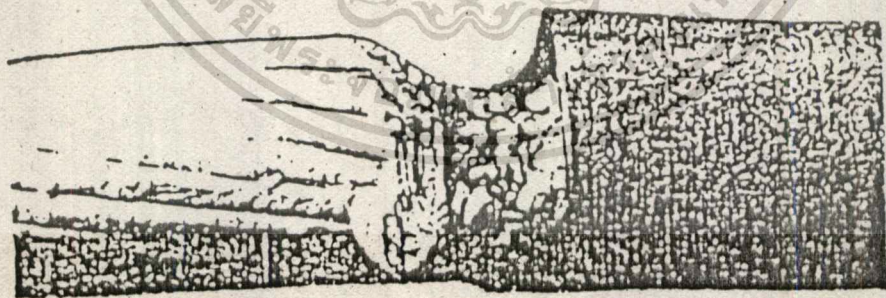
##### 1) ใช้ Arcing Protection Device

ลักษณะของ APD เป็น Clamp ชนิดหนึ่งที่ทำมาจาก Cast Aluminium เพื่อจะใช้สายตัวนำอลูมิเนียม โดยให้ปกคลุมของสายบริเวณที่จะยึดสายตัวนำติดกับลูกถ้วยออกและ APD จับตรงรอยต่อของตัวนำ ส่วนที่เปลี่ยนกับส่วนที่มีฉนวนหุ้ม (APD ต้องจับคร่อมส่วนที่หุ้มด้วย) ดังรูปที่ 5 (10)

การปกคลุมฉนวนของสายออก จะทำให้แรงดันที่ Tie Wire กับเนื้อของสายตัวนำมีค่าเท่ากันจึงไม่มีปัญหา Partial Discharge ที่ฉนวนสายอีก อย่งไรก็ตามหากไม่มี Clamp ใส่ไว้ตรงรอยต่อของฉนวนของสายเปลี่ยนกับสายหุ้มแล้วสายจะขาดบริเวณรอยต่อ ดังจะเห็นในรูปที่ 6 (๑)



รูปที่ 5 ตัวอย่างการใช้ Arcing Protection Device ของ PP&L

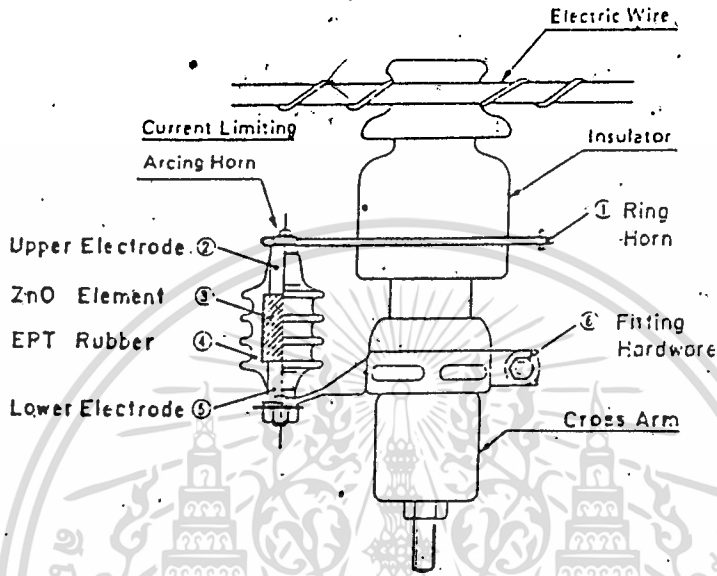


รูปที่ 6 ตัวอย่างการชำรุดของสายหุ้มที่บดกลายอย่างเฉียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกระแสอาร์คจะเคลื่อนที่ไปหยุดที่บริเวณรอยต่อและเคลื่อนที่ต่อไปไม่ได้อีก ทำให้มีความร้อนสะสมบริเวณรอยต่อมาก

## 2) ไข Current Limiting Arcing Horn



รูปที่ 7 ลูกถ้วยชนิด Pin Post และ Current Limiting Arcing Horn

หลักการการทำงานมีอยู่ว่า Arcing Horn จะทำหน้าที่ดักจับเมื่อมี Lightning Flashover ให้ผ่าน Ring Horn ไปสู่ ZnO Resister ลงดิน โดย ZnO นี้จะเป็นทางผ่านที่ดี ( Low Resistance ) สำหรับ Lightning Overvoltage แต่จะเป็นตัวต้านทานที่ดี ( High Resistance ) สำหรับ Power Frequency Voltage ผลคือ Power Follow Current จะถูกจำกัดไม่ให้ไหล ดังนั้นสายตัวนำก็จะไม่ชำรุดเสียหายและไม่มีการเกิดไฟฟ้าดับเนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินไม่ต้องทำงานตัดวงจรออก วิธีนี้จะต้องออกแบบ Arcing Horn ให้เหมาะสมกับลูกถ้วยที่ใช้งานปัจจุบันหรืออาจจะต้องเปลี่ยนลูกถ้วยใหม่พร้อมกันไปด้วย เพื่อให้ใช้ได้กับ Arcing Horn ของผู้ผลิต

## 3) ติดตั้ง Overhead Ground Wire และ Lightning Arrester

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีนี้จะช่วยลดปัญหาการเกิด Lightning Fault ได้ประมาณ 60 % การติดตั้ง Overhead Ground Wire จะลดปัญหาฟ้าผ่าลงบนสายตัวนำโดยตรงได้ สำหรับในกรณีของการเหนี่ยวนำเนื่องจากฟ้าผ่านั้น Overhead Ground Wire จะลดความรุนแรงได้บ้าง แต่จะต้องติดตั้งพิเศษกว่าปกติให้ใกล้เคียงกับสายตัวนำโดยอาจจะต้องใช้ Ground Wire หลายเส้น ซึ่งจะไม่เป็นการประหยัดนัก การติดตั้ง Overhead Ground Wire แม้ว่าจะป้องกันสายขาดไม่ได้เต็มที่ก็ตาม แต่ก็เหมาะกับพื้นที่ที่มีฟ้าผ่ามาก ๆ และยังให้ผลในการป้องกันอุปกรณ์อื่นด้วย



4) ใช้อุปกรณ์ตัดกระแสไฟฟ้าที่มีความไวสูง ( High Speed Interrupting Device )

วิธีนี้จะช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดกับสายตัวนำไม่ให้ขาดได้ อย่างไรก็ตามความไวของระบบป้องกันกระแสเกินมักจะถูกจำกัดด้วย Operating Time ของ Circuit Breaker ซึ่งถ้าหากจะป้องกันสายขาดอย่างได้ผลแล้ว Operating Time ของ Circuit Breaker ควรจะอยู่ในช่วง 1-2 Cycle แต่ในทางปฏิบัติแล้ว Circuit Breaker ที่ไวที่สุดจะเป็น Vacuum Circuit Breaker ซึ่งมี Operating Time ประมาณ 2.5 Cycle เท่านั้น

5) เพิ่ม Insulation Level

การเพิ่มระดับความเป็นฉนวน ( Insulation Level ) ของระบบให้สูงขึ้นเพื่อไม่ให้มี Insulation Breakdown จนเกิด Flashover ขึ้นนั้น ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่พอจะลดการเกิดสายขาดได้ อย่างไรก็ตามก็ขึ้นอยู่กับระดับความเป็นฉนวนที่เพิ่มขึ้นว่ามีมากน้อยเพียงใด และสภาพของพื้นที่ว่ามีปัญหาสภาวะแวดล้อมเกี่ยวกับ Pollution หรือไม่ เพราะหากมีปัญหา Pollution ด้วย จะต้องเพิ่มระดับระดับความเป็นฉนวนให้มากขึ้นไปอีก ในขณะที่เดียวกันก็ต้องคำนึงถึงความประหยัดด้วย อีกประการหนึ่ง เราไม่สามารถทำนายระดับของ Lightning Overvoltage ได้ทุกครั้ง ดังนั้นการเกิดสายขาดก็ยังมีโอกาสเกิดขึ้นได้

ตัวอย่างของการเพิ่มระดับความเป็นฉนวนให้สูงขึ้น เช่น ใช้สายหุ้มที่มีความหนาของ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้  
02700  
-9-  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนสูงชั้น ใช้ลู่ก๊วยที่มี BIL สูงชั้น เป็นต้น ใน กฟน. เองก็มีประสบการณ์ใช้งานที่ดีจากการใช้สายหุ้ม ชนิด Spaced Aerial Cable ซึ่งมีความหนาของฉนวนมากกว่า 2 เท่าของสายหุ้ม Covered Conductor ธรรมดา และยังประกอบด้วย Messenger Wire ที่ทำหน้าที่เป็น Overhead Ground Wire ไว้ป้องกันฟ้าผ่าในตัวด้วย

#### 6) ใช้ Tie Wire ชนิด Semi-Conductive

วิธีนี้เป็นการนำ Tie Wire ชนิดที่ไม่เป็นโลหะ เช่นพวก Plastic และมีการเคลือบด้วยสารกึ่งตัวนำมาใช้แทน Tie Wire ที่ทำด้วยโลหะด้วยวัตถุประสงค์ที่จะลด การเกิด Partial Discharge กับฉนวนหุ้ม ซึ่งอาจทำให้คุณสมบัติทางด้าน Impulse Voltage ดีขึ้น จากตัวอย่างที่พบใน กฟน. ก็ได้แสดงให้เห็นชัดเจนแล้วว่า Partial Discharge มิใช่สาเหตุที่ทำให้สายขาด นอกจากนี้ Lightning Overvoltage ที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ไม่แน่นอน และเมื่อแรงดันที่เกิดขึ้นสูงกว่าระดับความเป็นฉนวนของสายตัวนำเมื่อเทียบกับดินแล้ว ย่อมเกิด Breakdown และทำให้สายขาดได้เสมอ

สำหรับในปฏิญานฉบับนี้ เป็นโครงการวิจัยที่ทำการวิจัยเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ ถึงการดิสชาร์จบางส่วน ( Partial Discharge ) และผลที่เกิดขึ้นตามฉนวนสายตัวนำหุ้มฉนวนแบบ Partially Insulated Conductor

#### 1.5 โครงการวิจัยทดลอง

ในการทำการทดลอง จะกระทำในสภาพปกติ จำกัดตัวแปรเฉพาะในส่วนที่ต้องการศึกษา และสังเกตปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นดังนี้

1. ศึกษาการเกิด PD บนสายตัวนำหุ้มฉนวนที่ไม่มีการปกกลาย
2. ศึกษาการเกิด PD บนสายตัวนำหุ้มฉนวนที่มีการปกกลายบริเวณที่ทำการจับยึดสาย ( Tie Wire )
3. ศึกษาการเกิด PD บนสายตัวนำหุ้มฉนวน ณ จุดต่าง ๆ ของลู่ก๊วยรองรับ

สำหรับข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการศึกษาวิจัย จะสามารถช่วยวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นบนสายตัวนำ Partially Insulated Conductor และวิธีแก้ไขต่อไป

ทฤษฎีทั่วไปของการเกิดและการวัดค่า Partial Discharge

2.1 บทนำ

ในระบบไฟฟ้าจะพบว่าการฉนวนมีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นลักษณะคุณสมบัติของวัสดุฉนวนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการฉนวน โดยเฉพาะในช่วงต่อที่เปลี่ยนสภาพจากฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า ซึ่งเกณฑ์ของสภาพทั้งสองกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน หรือความหนาแน่นกระแสกับความเครียดสนามไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ พิจารณาถึงก๊าซซึ่งเป็นสารฉนวนชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการฉนวน สภาพการเป็นฉนวนของก๊าซจะเสียไปเมื่อมีดิสชาร์จในก๊าซเกิดขึ้น คำว่าดิสชาร์จเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ (อิเล็กตรอน , ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชันด้วยวิธีใด ๆ ไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีสนามไฟฟ้าทำให้อนุภาคประจุมีพลังและเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโทรดได้ และนั่นก็คือมีกระแสไหลในก๊าซเกิดขึ้น

การเกิดดิสชาร์จขึ้นในสารฉนวน จะก่อให้เกิดเบรคดาวน์ของฉนวนขึ้น ซึ่งเมื่อเกิดการเบรคดาวน์ขึ้นแล้วฉนวนจะสูญเสียสภาพความคงทนของการเป็นฉนวนไป ซึ่งดิสชาร์จเบรคดาวน์อาจแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. เบรคดาวน์สมบูรณ์ ( Complete Breakown )

เบรคดาวน์สมบูรณ์หมายถึง การเกิดเบรคดาวน์ตลอดแนวกว้าง เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวัสดุฉนวนเสียสภาพการฉนวนหมดสิ้น หลังจากเบรคดาวน์เกิดขึ้นในฉนวนแล้วแรงดันจะเหลือน้อยมาก มีกระแสไหลมากมายตามแนวที่เกิดเบรคดาวน์ กระแสเบรคดาวน์นี้จะจำกัดด้วยความต้านทานภายในของตัวจ่ายแรงดัน ช่วงเวลาที่เบรคดาวน์เกิดขึ้นจะเป็นเวลาเดียวกับอาร์คเริ่มเกิด

2. เบรคดาวน์เพียงบางส่วน ( Partial Breakdown )

เบรคดาวน์เพียงบางส่วน หรือ เบรคดาวน์ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นในระบบการฉนวนที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เบรคดาวน์เพียงบางส่วนอาจเกิดก่อนเบรคดาวน์สมบูรณ์ได้ เป็นการเกิดไอออนในเซชันในแก๊สเพียงบางส่วน บางทีก็เรียกว่าพาร์เซียมลดีสชาร์จ ( Partial discharge ) หรือพรีดีสชาร์จ เช่น ดีสชาร์จแบบโคโรนา เป็นต้น

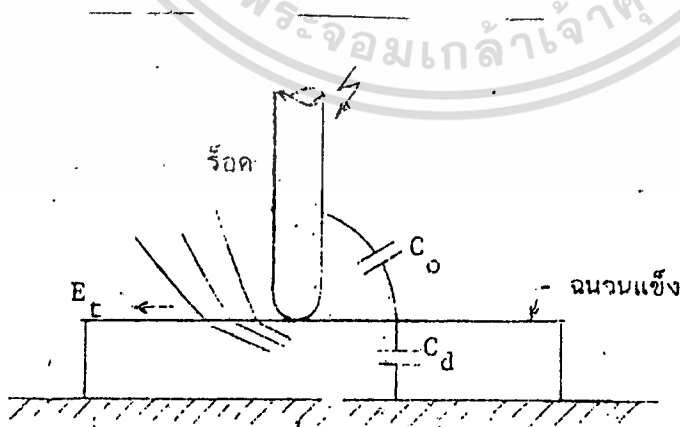
## 2.2 ดีสชาร์จบางส่วน ( Partial Discharge )

ดีสชาร์จบางส่วนหรือพาร์เซียมลดีสชาร์จ หมายถึงการดีสชาร์จเป็นเพียงบางส่วนใน แก๊สที่เป็นก๊าซเบรคดาวน์ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่ยังเชื่อมไม่กึ่งกัน อาจแบ่งออกได้

1. ดีสชาร์จตามผิว ( surface discharge )
2. โคโรนาดีสชาร์จ ( corona discharge )
3. ดีสชาร์จภายใน ( internal discharge )

### 2.2.1 ดีสชาร์จตามผิว ( surface discharge )

ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือแบบไม่สม่ำเสมอก็ตาม ฉนวนแข็งมีส่วนทำให้สนามไฟฟ้าในส่วนที่มีเปอร์มิตติวิตีต่ำ เช่น ก๊าซหรืออากาศมีความเครียดสูงขึ้น จนเป็นผลให้เกิด ดีสชาร์จขึ้นในส่วนที่เป็นอากาศ ดีสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิว ฉนวน (tangential field  $E_t$ ) มีค่าสูงสุดถึงค่าวิกฤต ( $E_c$ ) ตัวอย่างเช่น แผ่นฉนวน แข็งคั่นระหว่างรีดคิลีเลคโตรดกับแผ่นระแนบดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผ่นฉนวนแข็งคั่นระหว่างรีดคิลีเลคโตรดกับระแนบ



สมการ

$$U_1 = 21.2 r_1 \ln(2h/r_1) \text{ KV}$$

$r_1$  และ  $h$  มีหน่วยเป็น cm

ขนาดตัวนำที่โคโรนาเริ่มเกิดของทรงกระบอกแกนร่วมตาม Zaengl คำนวณได้จาก

สมการ

$$r_1 = \frac{K/C}{E_1^2 - E_c^2 - 2E_1 E_c * \ln(E_1/E_c)}$$

เมื่อ  $r_1$  = รัศมีตัวนำ cm

$E_1$  = ความเคียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด KV/cm

$K/C$  = 42 (KV)<sup>2</sup> / cm

$E_c$  = 24.4 KV/cm

$P_0$  = 760 Torr

=  $p/p_0$

สูตรความเคียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มต้นตาม peek มีดังนี้

$$E_1 = 30 \{1 + (0.301/r^{1/2})\}$$

เมื่อ  $r$  = รัศมีความนำเป็น cm

## 2. ผลจากโคโรนา

ผลเนื่องจากโคโรนาคือ

- 1) เมื่อเกิดโคโรนาในอากาศอาจสังเกตเห็นหรือสัมผัสได้ด้วยร่างกายคน คือจะได้ยินเสียงฮิสซึ มีกลิ่นโอโซน ในยามมืดสนิทจะเห็นแสงเรือง
- 2) โคโรนาดีสชาร์จเกิดในรูปพัลส์สั้น ๆ ซึ่งมีสเปคตัมความถี่สูงถึง 100 MHz คลื่นความถี่สูงนี้จะรบกวนเครื่องรับเครื่องส่งระบบสื่อสาร เรียกว่าคลื่นรบกวนวิทยุ
- 3) การเกิดโคโรนาย่อมหมายถึงมีพลังงานสูญเสียเกิดขึ้นตลอดเวลา จึงเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนา การออกแบบระบบสายส่งจึงหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดความเคียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าสนามวิกฤต

พลังงานสูญเสียเปล่านั้นเนื่องจากโคโรนา ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของผิวตัวนำ ด้วยเหตุนี้ในระบบสายส่งแรงสูงจึงใช้สายความ นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับสภาวะบรรยากาศฝน หมอก น้ำค้าง จะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่าย นั่นคือพลังงานสูญเสียเปล่านั้นจากโคโรนาจะเพิ่มขึ้น

พลังงานสูญเสียเปล่านั้นเนื่องจากโคโรนา (corona loss) อาจคำนวณได้จากสมการ

$$P_u = (kwr^2/18 \cdot 10^9) * E_m(E_m - E_1)(\ln(6E_m / wr) - 1)$$

เมื่อ  $P_u$  = พลังงานสูญเสียเปล่านั้นเนื่องจากโคโรนา (KW/Km)

$r$  = รัศมีของสายไฟ (cm)

$w$  =  $2 \cdot f$  โดยที่  $f$  = ความถี่ (Hz)

$k$  = 2 เมื่อสายไฟแห้ง  
= 1.4 เมื่อสายไฟเปียก

$E_m$  = ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดคำนวณจากมิติเรขาคณิต (V/cm)

$E_1$  = ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อโคโรนาเริ่มเกิด (V/cm)

เมื่อคำนวณถึงพื้นผิวสายไฟและสภาวะบรรยากาศ ใช้เงื่อนไขความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด ดังนี้

$$E_1 = 30 \cdot m_1 \cdot m_2 \text{ KV/cm}$$

เมื่อ  $m_1$  เป็นแฟกเตอร์คำนวณถึงลักษณะของผิวสายไฟเรียบมากน้อย และ เก่ามากน้อย

$$\text{มีค่า } m_1 = 0.98 \dots 0.83$$

$m_2$  เป็นแฟกเตอร์คำนวณถึงผลของสภาวะบรรยากาศ

$$m_2 = 1 \text{ เมื่ออากาศแห้งปกติ}$$

$$= 0.8 \text{ เมื่อมีฝนตก}$$

ถ้ากำหนดสายไฟให้พลังงานสูญเสียเปล่านั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันระบบกำลังสอง

### 2.2.3 ดิสชาร์จภายใน

เป็นดิสชาร์จที่เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ซึ่งมีฟองก๊าซอยู่ภายใน ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่ดิสชาร์จภายในเริ่มเกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซที่แฝงอยู่ภายใน ซึ่งสามารถคำนวณได้ในบางกรณี ฉนวนที่มีสิ่งเจือปนอื่นอยู่จะทำให้เกิดก๊าซขึ้นหลังจากเกิดเบรคดาวน์ครั้งแรก การมีฟองก๊าซอยู่ภายในฉนวนจะเป็นต้นเหตุนำไปสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเบรคดาวน์ในที่สุด จึงอาจกล่าวได้ว่าจำนวนไตที่มีดีสชาร์จภายในจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง ฉะนั้นการตรวจสอบคุณภาพของการฉนวนจึงมีเรื่องการตรวจดีสชาร์จภายในที่เรียกว่าพาร์เซียลดีสชาร์จเป็นเรื่องสำคัญประการหนึ่ง

## 2.3 ระบบตรวจสอบ Partial Discharge

### 2.3.1 ส่วนประกอบของเครื่องมือการวัด

องค์ประกอบพื้นฐานสำหรับวงจรวัดคือ

1. แหล่งจ่ายศักดาซึ่งปราศจาก Partial Discharge เท่าที่เป็นไปได้
2. สิ่งที่ต้องการทดสอบ ( $C_x$ )
3. ตัวเก็บประจุที่คัปปลิง ( $C_k$ )
4. โครงข่าย 4 ขั้วที่ปรับได้อินพุทกับตัวเก็บประจุ (อิมพีแดนซ์สำหรับการวัด  $Z_m$ )

ในการต่อขั้วตัวเก็บประจุคัปปลิง โครงข่าย 4 ขั้วที่ขั้วเข้าได้จากตำแหน่งศักดา ซึ่งจะลดศักดาที่วัดเพื่อให้ตัวตรวจสอบสามารถวัดได้ นอกจากนี้ยังทำงานร่วมกับ Low Pass Filter ที่ 50 cps เพื่อที่จะกำจัดคลื่นรบกวนความถี่สูงออกไป ตัวเก็บประจุที่ต่อคัปปลิงอยู่สามารถกะทึงได้ในบางครั้ง โครงข่าย 4 ขั้วจะถูกต่อโดยตรงกับความต่างศักย์ที่ต้องการวัด อย่างไรก็ตาม โครงข่าย 4 ขั้วอาจได้รับความเสียหายเนื่องจากเกิดศักดาเกินในกรณีที่เกิดการเบรคดาวน์ที่ฉนวน

ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ที่แหล่งจ่ายศักดา มีค่าน้อยมาก ๆ บุขซึ่งทดสอบจะต้องเพิ่มตัวกรองความถี่สูงเพื่อว่า PD Pulse จะไม่สามารถลัดวงจรโดยแหล่งจ่ายศักดา

ผลของการทดสอบเหมาะที่จะแสดงบนจอ CRT PD Pulse ถูกบันทึกบนความถี่เดียวกับความถี่ของแหล่งจ่าย จากการวัดถ้า PD มียอดสูงมาก จะแสดงถึงความเข้มในการคายประจุและรูปคลื่นที่ปรากฏบนจอ CRT จะแสดงว่า Pulse เกิดจากการแทรกสอดหรือจาก PD และยังแสดงถึงตำแหน่งที่มาอีกด้วย

### 2.3.2 The BIDDLE - Partial Discharge detector

## 1. การวัดโดยตรง

การต่อแบบ BUDDLE แสดงในรูปที่ 2 PD-free Transformer ซึ่งมี Voltage regulation ใช้สำหรับจ่าย เพื่อว่าค่าศักดาที่ใช้และศักดาชดเชยสำหรับ PD สามารถตรวจสอบได้ง่าย วัสดุที่ต้องการทดสอบจะถูกต่อขนานกับแหล่งจ่ายและตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง ตัวเก็บประจุที่ใช้คัปปลิ่งจะถูกรวมกับตัวกรองและตัวขยายสัญญาณ Pulse ที่ถูกลดสัญญาณลง จากภาคอินทรีเกต ถูกส่งไปยังตัวตรวจสอบซึ่งประกอบด้วยตัวขยาย CRT และตัวขยาย

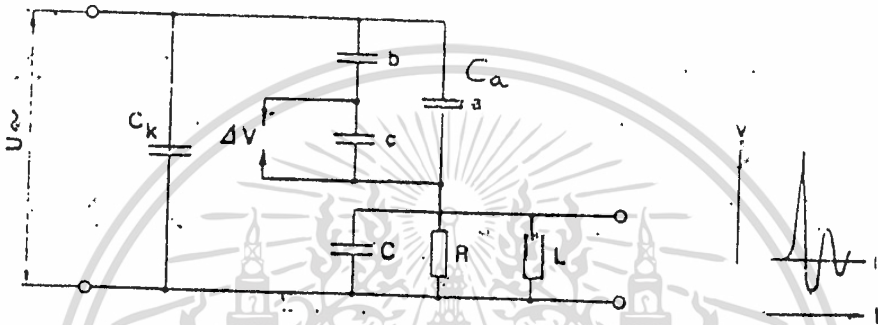


Fig. 2 RCL- measuring impedance and damped oscillation

## 2. การวัดด้วยวงจรบริดจ์

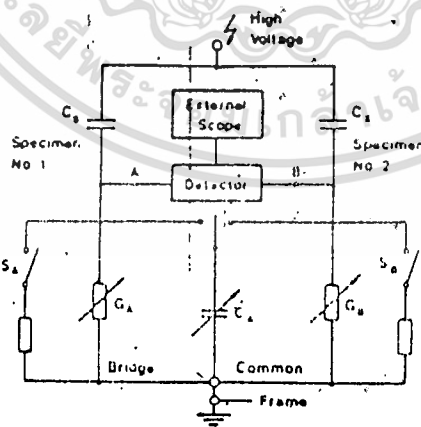


Fig. 3  
Detector with bridge type 66/5700

ในรูปที่ 3 แสดงถึงตัววัดแบบบริดจ์ 66/570 V คุณสมบัติที่สำคัญคือ สามารถกั้นสัญญาณแทรกสอดออกไปได้มาก ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ PD Bridge และ PD Detector โดย PD Bridge ประกอบด้วยสายตัวนำที่ปรับค่าได้และสายตัวเก็บประจุค่ากระแสสูงที่สุดที่ไหลผ่านในแต่ละสายคือ 5 A ถ้ามากกว่านี้จะไปทำให้เบรคเกอร์ ( $S_u$  และ  $S_p$ ) เปิดวงจรออก

สายด้านซ้าย ( $G_u$ ) ถูกทำให้สมดุลด้วยประจุกทดสอบตัวอย่าง ( $C_u$ ) เพื่อให้ได้ความไวมากที่สุด สายด้านขวา ( $G_p$ ) และสายตัวเก็บประจุ ( $C_p$ ) ถูกทำให้สมดุลเพื่อที่จะกำจัดสัญญาณแทรกสอดให้มากที่สุด จากนั้นสัญญาณที่บริดจ์ที่สมดุลจะถูกป้อนเข้าตัวตรวจสอบ

### 2-3.3 การทดสอบเทียบค่าและความไวในการวัด

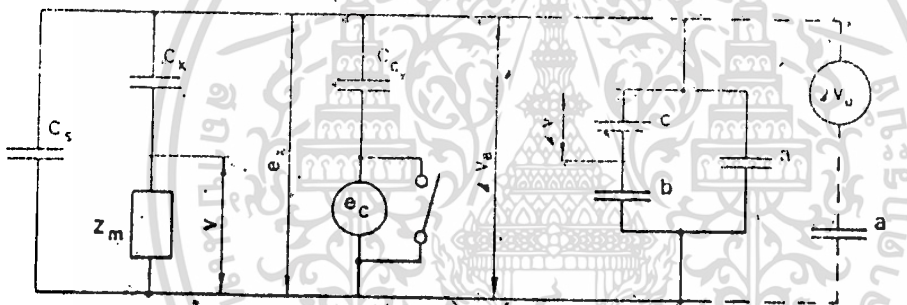


Fig. 4 PD-measuring system with calibration signal generator  $e_c$  and coupling capacitance  $C_c$

ความไวในการวัดและการทดสอบเทียบค่าที่ถูกต้องสำหรับระบบที่สมบูรณ์นั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก รูปที่ 4 แสดงรูปของระบบการวัดแบบง่าย ๆ ตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง ( $C_u$ ) และค่าอิมพีแดนซ์ของการวัด ( $Z_m$ ) ตลอดจนตัวเก็บประจุที่ใช้ทดสอบเทียบค่า ( $C_c$ ) จะเหมือนกันหมดสำหรับการวัดที่มีตัวตรวจสอบเดียวกัน ตัวเก็บประจุตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ( $C_u$ ) และค่าตัวเก็บประจุของวงจร abs ตลอดจน Stray Capacitor ( $C_u$ ) จากแหล่งจ่ายจะบรรจุทุก ๆ การวัด เนื่องจากตัวเก็บประจุเหล่านี้ทำงานเหมือนกับตัวแบ่งศักดา ตัวตรวจสอบจะให้ผลต่างกันสำหรับค่าตัวเก็บประจุที่ต่างกัน นั้นย่อมแสดงว่า จะต้องมีการสอบเทียบค่าใหม่

ทุก ๆ ครั้งที่มีส่วนประกอบแตกต่างกัน ดังนั้นตัวตรวจสอบจะต้องมีหน่วยสอบเทียบค่า ตัวผลิตสัญญาณสอบเทียบค่า จะให้ลักษณะสัญญาณที่มีลักษณะคล้าย PD คือ rise time จะสั้นมากคือ  $< 2 \cdot 10^{-7}$  Sec

ระบบนวนทั้งหมดจะถูกสอบเทียบค่าครั้งแรกจาก pulse ที่ทราบค่า ค่าประจุของ pulse ควรจะมีค่าใกล้เคียงกับของ PD ภายหลังการสอบเทียบค่าแล้ว การวัดจะดำเนินไปจนเสร็จสิ้นผลของการวัดจะนำมาเปรียบเทียบ

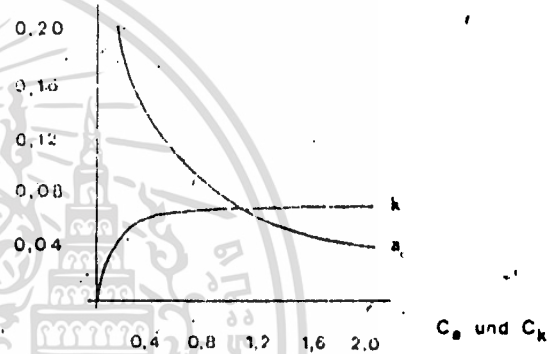
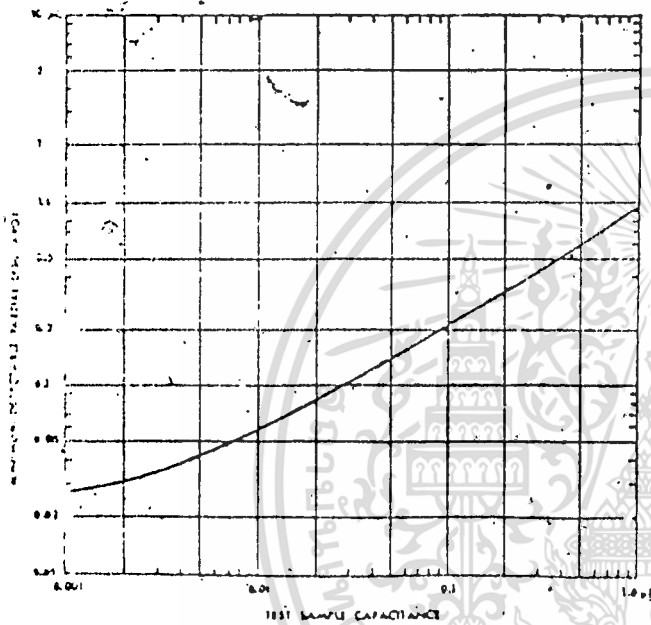


Fig. 5 b  
Sensitivity of a system in function of the test-object  $C_s$  and the coupling capacitance  $C_k$

Fig. 5 a  
Minimum detectable partial discharge signal with 2:1 signal-to noise, radio, plotted as a function of test sample capacitance, using matched samples.

ค่าตัวเก็บประจุคัปปลิงจะมีค่าเท่าใดจึงจะให้ผลการวัดที่ดีที่สุด และค่าตัวเก็บประจุมีผลอย่างไรต่อความไวในการวัด ความไวในการวัดและคุณสมบัติของวงจรวัด (รูปที่ 5) แสดงว่าการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุตัวอย่างจะทำให้ความไวในการวัดลดลง และการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุคัปปลิงจะเพิ่มความไวในการวัด แต่ถ้าเพิ่มจนถึงค่า ๆ หนึ่งแล้วความไวจะไม่เพิ่มขึ้น ซึ่งคุณสมบัติตรงนี้สำคัญมากเนื่องจากตัวเก็บประจุแรงดันสูงนั้นมีราคาแพง

Stray Capacitor ( $C_s$ ) ในรูปที่ 4 คารักรักษาให้อยู่ในระดับที่ต่ำที่สุด ซึ่งทำได้ โดยการวางตัวที่ตีของ แหล่งจ่ายและตัวอย่างที่นำมาทดสอบโดยให้มีระยะที่สั้นมากที่สุด

ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดสอบเทียบค่า ( $C_s$ ) ควรขนาดเล็กเพราะว่าเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดสำหรับการสอบเทียบค่าที่ต่ำกว่า เพราะตัวเก็บประจุที่ต่อคัปปลิ่งจะถูกนำออกไปก่อนหน้าที่จะเริ่มการวัดจริง ถ้าความแตกต่างระหว่าง  $C_s$ ,  $C_u$ ,  $C_d$  มีค่าน้อย ค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากขึ้นเมื่อนำ  $C_s$  ออกไป

## 2.4 การหาค่า Partial Discharge

### 2.4.1 การวัด PD ภายใต้ภาวะการแทรกสอด

ปัญหาที่พบเสมอ ๆ ในการวัดค่าคือปัญหาของการแทรกสอด เป็นที่ทราบอย่างชัดเจนว่า การวัด PD คือการแยก pulse ในช่วงไมโครโวลต์ จากสัญญาณทดสอบที่มีช่วงหลายร้อยกิโลโวลต์

ปัญหาพื้นฐานของการแทรกสอดทางไฟฟ้าคือความจริงที่ว่า สัญญาณแทรกสอดมักจะมี ความถี่เดียวกับ PD pulse นอกจากนั้นรูปร่างของสัญญาณ pulse มักจะคล้ายกับสัญญาณ PD มาก รูปที่ 6 แสดงถึงรูปร่างทั่วไปของแหล่งกำเนิดสัญญาณแทรกสอด

เป็นที่น่าสังเกตว่าจอภาพ CRT จะให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับสัญญาณแทรกสอด โดยค่า มุมเฟสจะมีความสามารถในการแยกสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณ PD เพราะว่สัญญาณ แทรกสอดมักจะปรากฏบนจุดที่แน่นอนของคลื่นรูป sine ตัวอย่างเช่น

1. หน้าสัมผัสที่เสื่อมสภาพจะมี pulse ที่ใกล้จุดศูนย์ (รูปที่ 6)
2. pulse ที่ปรากฏเฉพาะช่วงลบ โดยทั่วไปแล้วจะแสดงถึง Point to Plane PD ในแหล่งกำเนิดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นจาก PD site ที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรง สูง
3. pulse ขนาดเล็กที่มีขนาดเท่ากันตลอดทั้งไซเคิลแสดงถึง PD อื่น ๆ (รูป 6 c - d)

Fig. 6

Typical interference signals:

- a) Interference signals produced by poor contacts
- b) SDR or rectifier interference signals
- c) Harmonic distortion
- d) Fluorescent lamp interference signals

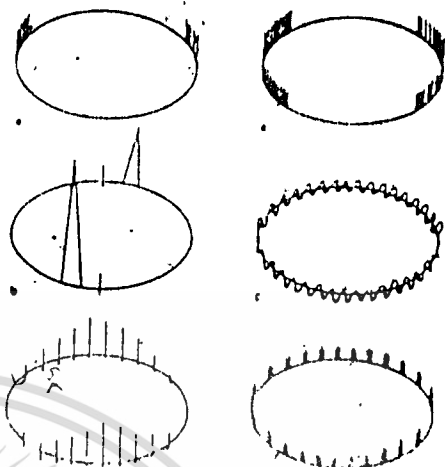


Fig. 8

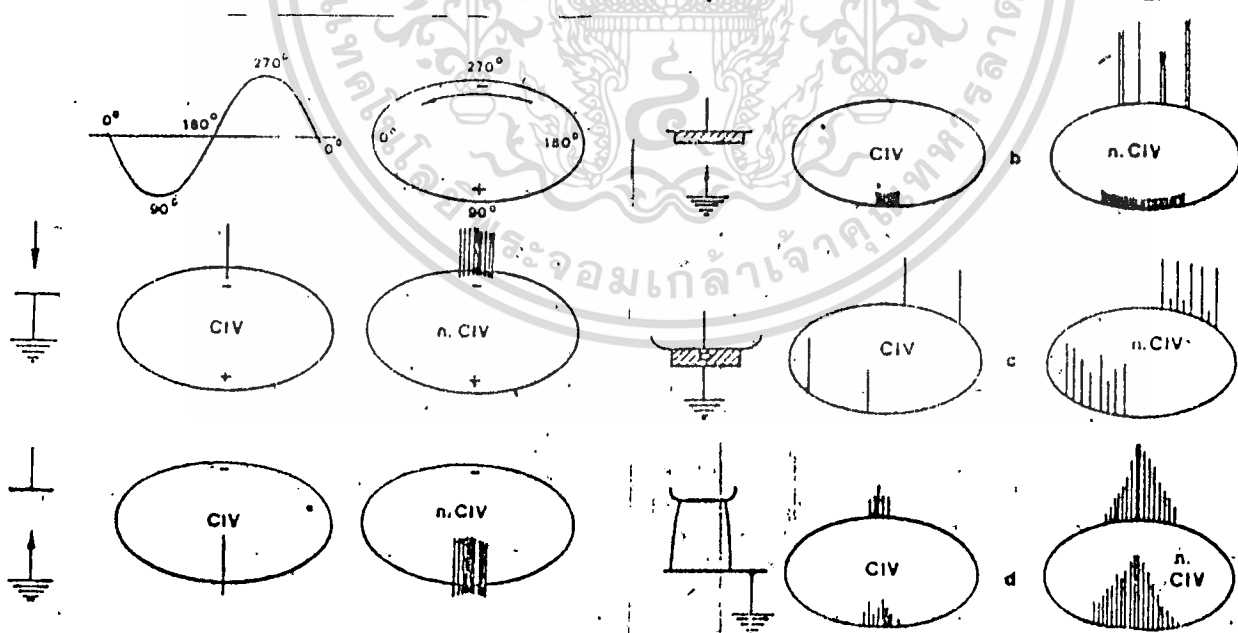
CRO pictures of corona effects

Fig. 7

CRO pictures of corona effects

CIV = corona inception voltage

n.CIV = n. corona inception voltage



#### 2.4.2 รูปแบบและความหมายโดยทั่วไปของสัญญาณ PD

ถ้าการวัดสัญญาณ PD มีค่าสูงกว่าแอมพลิจูดสูงสุดที่เป็นไปได้ ปัญหาก็คือการหาขนาดของการเกิดดีสชาร์จและความถูกต้อง จอภาพ CRT สามารถช่วยได้มาก เพราะจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของการคายประจุ เพื่อที่จะได้การวัดที่ถูกต้อง จอภาพจะถูกแสดงบนเส้นตรง แต่การเสนอ PD จะแสดงบนวงรี ซึ่งจะให้ภาพที่ชัดเจนกว่าสำหรับตัวตรวจสอบที่ทันสมัย คักดาที่วัดจะแสดงเป็นวงรี รูปที่ 7 และ 8 จะแสดงถึงรูปแบบบางรูปแบบของ PD สำหรับการตีความที่ถูกต้องจะต้องรู้ถึงจุดที่มีค่าเป็นศูนย์ และครึ่งคลื่นทั้งทางด้านบวกและด้านลบ รูปแบบของ Point to Plate PD แสดงบนรูป 7 b,c ช่องว่างระหว่างขั้วทั้งสองจะบรรจุก๊าซอยู่ในทางปฏิบัติอาจมีวัตถุหุ้มอยู่ที่ขั้วและวัสดุที่นำมาทดสอบ การคายประจุแบบนี้จะถูกตรวจสอบได้ง่ายเพราะว่า PD onset pulse ลุกแรกปรากฏที่ยอดทางลบหรือทางบวกนอกจากนี้ pulse ที่มีความเข้มเดียวกัน จะปรากฏเมื่อคักดาที่วัดสูงขึ้น pulse จะมีรูปสม่ำเสมอ และคักดา PD ที่เริ่มและยุติเท่ากัน

รูป 8 a และ 8 b แสดงรูปแบบของการสั่นทั่วไปของการคายประจุในทางปฏิบัติ สำหรับฉนวนระหว่างแท่งโลหะ และจุดของขั้วไฟฟ้า

จุดเริ่มคักดา PD แสดงในรูปคล้ายกับรูป 7 b และ c แต่มีบางที่ที่อ่อนกว่า ทันที่ที่คักดาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขอบของ pulse ที่มีความเข้มสูงกว่าจะปรากฏที่ด้านตรงข้ามของวงรี ซึ่งถูกสร้างจากประจุบนพื้นผิวบนวัสดุฉนวน จากครึ่งคลื่นก่อนจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดของคักดาโดยทั่วไป โดยทั่วไปแล้วจะเท่ากัน

ความรู้เกี่ยวกับสายเคเบิลและการทดสอบสายเคเบิล

3.1 บทนำ

การฉนวนเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างและใช้ประโยชน์ของไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแรงดันสูง เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่เข้าใกล้ หรือป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจรระหว่างสายไฟกับสายไฟหรือสายไฟกับกัน

สารฉนวนสามารถแบ่งตามสถานะภาพออกเป็น 5 ชนิด คือ

1. ฉนวนก๊าซ
2. ฉนวนเหลว
3. ฉนวนแข็ง

ซึ่งฉนวนแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางเคมี ทางฟิสิกส์ ทางกล ทางความร้อนต่าง ๆ กัน ฉะนั้น สารฉนวนชนิดหนึ่งอาจจะเหมาะสำหรับอุปกรณ์ชนิดหนึ่งหรือเหมาะสำหรับใช้งานเฉพาะหน้าที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้ สภาพแวดล้อม อุณหภูมิใช้งาน และวัตถุประสงค์ที่ใช้หน้าที่หลักของฉนวน คือการป้องกันมิให้เกิดไฟฟ้ารั่วหรือลัดวงจรกันดังนั้นในการเลือกใช้งานสารฉนวนจึงขึ้นกับอุปกรณ์ที่จะทำการฉนวนและคุณสมบัติของสารฉนวนนั้นๆ

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้ถึงคุณสมบัติและคุณภาพของสารฉนวนมี 4 ประการ คือ

1. ความต้านทานฉนวนไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้วจะต้องไม่นำกระแสเลย ทั้งสิ้นเมื่อได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือ จะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในทางปฏิบัติมีการนำกระแสแต่มิค่าน้อยมาก เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง นั้นแสดงว่าสารฉนวนมีค่าความต้านทานสูงไม่เป็นอนันต์ หากแต่มิค่าสูงที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนที่ดี ยิ่งค่าความต้านทานของฉนวนนี้มี 2 ลักษณะ คือ

ก. ความต้านทานเชิงปริมาตร ( Volume Resistance )

ข. ความต้านทานเชิงผิว ( Surface Resistance )

2. เปรอริมิตติวิตี้ หรือ ค่าคงตัวสารฉนวน ( Permittivity or Dielectric Constance ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติและเป็นตัวบอกลักษณะของไดอิเล็กตริก เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างคาปาซิเตอร์หรือกล่าวย่างๆ คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบค่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้น เป็นกี่เท่าของคา

ปาดัชนีสูญญากาศ เมื่อใส่สารฉนวนมีค่าเปอร์มิตทิวิตี  $\epsilon$  เข้าไป นั่นคือ

$$C = \epsilon C_0$$

ค่าเปอร์มิตทิวิตี  $\epsilon$  จะแสดงค่าสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  เทียบกับค่าคงตัวสารฉนวนของสูญญากาศ คือ

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

โดยที่

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$$

3. แพลตฟอร์มพลังงานสูญเสียสารฉนวน แบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. พลังงานสูญเสียเนื่องจากการนำไฟฟ้าของสารฉนวนที่มีค่ารวมต้านทานไม่ถึงอนันต์

2. พลังงานสูญเสียเนื่องจากการ Polarization ของสารฉนวน จัดเป็นพลังงานสูญเสียทางกลไฟฟ้า เพราะโมเลกุลของสารฉนวนจะขยับตัวไปมาตามเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า เช่น แฉงต้นไม้กระแฉงสลับ

4. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน ( $E_{50}$ ) หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ( Electric Field Stress ) สูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรคดาวน์ หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ KV/cm ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_{50}$  โดยทั่วไปหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ ( Uniform Field ) ความคงทนของการเป็นฉนวนนี้ขึ้นอยู่กับแพลตฟอร์มหลายประการ คือ ลักษณะของอีเล็กโทรด ลักษณะสมบัติของสารฉนวนและเวลา

### 3.2 ฉนวนแข็ง

ฉนวนไฟฟ้านอกจากจะทำหน้าที่กั้นหรือแยกส่วนที่มีไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ที่มีให้สัมผัสหรือลัดวงจรถึงกันแล้ว บางส่วนยังต้องทำหน้าที่ยึดให้มันคงหรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างหรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ดังนั้นสมบัติที่ดีของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญคือ

1. ค่าคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง
2. ค่าความต้านทานฉนวนสูงทุกระดับแรงดัน
3. ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าของสารฉนวนต่ำ
4. ค่าความคงทนต่อแรงดันสูง
5. ปลดจากฟองก๊าซและความชื้น
6. ทนต่อความร้อนสูง
7. ทนต่อปฏิกิริยาเคมี
8. ไม่เป็นพิษ เมื่อติดไฟ

จากคุณสมบัติของฉนวนแข็งที่กล่าวมาแล้ว จะพบว่าในระบบไฟฟ้าแรงดันสูงนิยม นำฉนวนแข็งมา เป็นฉนวนให้กับอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงหลายชนิด เช่นการฉนวนเคเบิล การฉนวนพุ่มซึ่ง เป็นต้น

สำหรับสารที่นิยมนำมาใช้ เป็นสารฉนวนแรงสูงมีอยู่หลายชนิด ซึ่งมีรายละเอียดและคุณสมบัติของฉนวนแข็ง ดังจะกล่าวต่อไปนี้

#### A) กระดาษ

กระดาษปกติใช้เพื่อวัตถุประสงค์การฉนวนรู้จักกันในลักษณะกระดาษบางๆหรือกระดาษเหนียว ความหนาแน่นและความหนาขึ้นอยู่กับการใช้งาน ความหนาแน่นต่ำ ( $0.8 \text{ g/cm}^3$ ) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์ความถี่สูงและเป็นฉนวนของเคเบิล ความหนาแน่นปานกลาง ( $1 \text{ g/cm}^3$ ) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์ไฟฟ้ากำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในคาปาซิเตอร์กระแสตรง เพื่อเก็บพลังงาน หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

เนื่องจากกระดาษมีคุณสมบัติดูดความชื้นได้ ฉะนั้นการใช้กระดาษเป็นฉนวนจำเป็นต้องทำให้แห้งแล้วชุบฉนวนเหลว เช่น น้ำมันฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตีของกระดาษชุบน้ำมันต่างกันแสดงในตาราง ที่ 1

ฉนวนเหนลาที่ใ้ช้ขบ	เปอร์มิตตีวี่ดีของกระดาขบฉนวนเหนลา ตามความหนาแน่นของกระดาขบ		
	0.8 g/cm <sup>3</sup>	1.0 g/cm <sup>3</sup>	1.2 g/cm <sup>3</sup>
Trichlorodiphenyl = 6.1	6.28	6.30	6.40
Pentachlorodiphenyl	5.27	5.88	6.06
Transformer oil	3.26	3.27	4.3

ตารางที่ 1 ค่าเปอร์มิตตีวี่ดีของกระดาขบน้ำมันที่ 20 °C

B) เซรามิกส์

เซรามิกส์เป็นสารอนินทรีย์ไ้จากส่วนผสมของดินเหนียว หินเบต ฟลีนท์ อะลูมีนาแล้วเผาด้วยอุณหภูมิสูง เซรามิกส์อาจแบ่งตามค่าเปอร์มิตตีวี่ดีออกได้เป็น 2- ประเภท คือ ประเภทที่มีค่าเปอร์มิตตีวี่ดีต่ำ ( $\epsilon_r < 12$ ) ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ส่วนอีกประเภทหนึ่งมีค่าเปอร์มิตตีวี่ดีสูง ( $\epsilon_r > 12$ ) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์ ดังตัวอย่างสมบัติของไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ที่ใช้ในทางปฏิบัติ แสดงในตารางที่ 2 และ 3 ( Naidu & Kamaraju )

คุณสมบัติ	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	สเตโตทที่หลัง งานสูญเปล่า	อะลูมินา	ฟอร์สเตรอท์
ส่วนผสม	ดินเหนียว 50 %	ดินเหนียว 50 %	3MgO	95.7	2MgO
	เฟลสปาร์ 25 %	เฟลสปาร์ 25 %	4SiO <sub>2</sub>		SiO
ดูดความชื้น (ppm)	ฟลินท์ 25 % 0	ฟลินท์ 25 % 0.5 - 2	H <sub>2</sub> O 0	0	0
ขีดจำกัด อุณหภูมิที่ปลอดภัย (°C)	1000	900	1050	1600	1050
ความคงทนต่อ แรงดันไฟฟ้า (KV/mm)	2.5	3	8 - 25	16	8 - 12
ε * 10 <sup>-4</sup>	5 - 7	5 - 7	6	9	6
	50 - 100	100 - 200	10	5	3 - 4

ตารางที่ 2 เซรามิกส์ค่าเบอรัมิตติที่ดีต่ำ

เซรามิกส์	ส่วนประกอบทางเคมี		tg *10 <sup>4</sup>
แมกนีเซียม เมคาติคาเนท	Mg Ti O <sub>3</sub>	16	2
สเตรนเทียม เซอโคเนท	Sr Zr O <sub>3</sub>	38	3
ติตาเทียมออกไซด์	Ti O <sub>2</sub>	90	5
แคลเซียม ติตาเนท	Ca Ti O <sub>3</sub>	150	3
แบเรียม ติตาเนท	Sr Ti O <sub>3</sub>	200	5
	Ba Ti O <sub>3</sub>	1500	150

ตารางที่ 3 เซรามิกส์ค่าเปอร์มิตติวิตีสูง

C) แก้ว

แก้วเป็นสารอนินทรีย์เทอร์โมพลาสติก ประกอบด้วย ออกไซด์ Si O<sub>2</sub> ที่ซับซ้อน ค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าอยู่ในช่วง 3.5 ถึง 8 ความหนาแน่นตั้งแต่ 2.2 ถึง 6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้องค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าตั้งแต่ 10<sup>12</sup> ถึง 10<sup>20</sup> โอห์ม-ซม. ค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก 0.005 ถึง 0.01 ค่าพลังงานสูญเสียเปล่านีจะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ต่ำ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 3000 ถึง 5000 KV/Cm และลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เหลือครึ่งหนึ่งที่ 100 °C

D) ไมก้า

ไมก้าเป็นชื่อเรียกรวมทั่วไปของแร่ฟลิกซิลิเคทของอลูมินาและโปแตช ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกัน คือ 1) muscovite 2) phlogopite 3) fibrolite 4) lipidolite โดยที่สองกลุ่มหลังนี้แข็งและเปราะจึงไม่ค่อยใช้ในงานการฉนวน ไมก้า

สามารถแยกเป็นแผ่นบางมาก ๆ ได้ ไม่กำ เป็นวัสดุฉนวนที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกน้อย ทนต่อความร้อนสูง คงทนแรงกลได้ดี ด้วยเหตุนี้เองไม่กำ จึงเหมาะที่จะใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้อย่างกว้างขวาง อุปกรณ์แรงดันต่ำใช้ไม่กำ เป็นตัวกั้นระหว่างขั้วของคอมมิวเตเตอร์ชุดลวดอาร์เมเจอร์ สวิตช์เกียร์ และอุปกรณ์ทำความร้อนและความเย็น ไม่กำที่บริสุทธิ์มาก ๆ เหมาะที่จะใช้กับความถี่สูง

คุณสมบัติ	Muscovite	Phlogopite
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ 30 °C KV/mm	1000	700
ค่าเปอร์มิตติวิตี ที่ 1 kHz-3000 MHz	6 - 7.5	6 - 7.5
tg	0.03 (50 Hz) 0.001 (1 MHz)	0.03 (50 Hz) 0.001 (1 MHz)
ความต้านทานจำเพาะเชิงผิว ความชื้น 60 % ( Ohm-Cm )	$10^{11} - 10^{12}$	$10^{10} - 10^{11}$
ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรมีค่าคงที่ ถึง 200 °C ( Ohm-Cm )	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{13} - 10^{14}$
ความทนแรงดึงหนา 0.02 - 0.03 mm Kgf/mm <sup>2</sup>	17 - 36	16 - 26

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของ Muscovite และ Phlogopite

E) ยาง

ยางเป็นสารที่มีทั้งตามธรรมชาติและสารสังเคราะห์ของโพลีเมอร์มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นได้ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของยางขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและวิธีการที่ทำให้ยืดหยุ่น

ได้ ( Vulcanizing ) และขึ้นกับสิ่งเจือปน การเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามเวลาที่ผ่านไป และความชื้นภายใน ตัวอย่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการใช้งานของยางบางชนิดดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

	คูตซีมนี้้า		tg		การใช้ประโยชน์ และขีดจำกัด
		(50Hz)	(50Hz)	KV/Cm	
ยางธรรมชาติ	0-4.8	2.9-6.6	0.02-0.1	100-390	ทนต่อโคโรนา ทนได้ถึง 60 °C
Polyser Kryflex	0-4.5	3.8-6.2	0.02-0.09	80-390	ใช้กับระบบแรง
Rubber and Dtyrene butadine rubber					ต้นทุนต่ำ ไม่เหมาะ กับอากาศชื้น
Butyl rubber and Polysar butyl rubber	0-2	2.2-3.2	0.033-0.03	80-200	ใช้กลางแจ้ง ทน ดินฟ้าอากาศดี เคเบิ้ลฝังดิน แต่ ทนความร้อนได้ต่ำ ทนต่อปฏิกิริยาเคมี ได้ดี และ เหนียว
ยางซิลิโคน	0-3	2.6-3.4	0.006-0.02	90-300	ใช้งานเกี่ยวกับ เรือ เครื่องบิน หม้อแปลง ไม่ทน ต่อกรด ด่างและ คลอรีเนท แต่ทน อุณหภูมิได้ 150 °C

ตารางที่ 5 คุณสมบัติและการใช้ประโยชน์ของยาง

## F) พลาสติก

พลาสติกเป็นฉนวนแข็งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะพลาสติกมีคุณสมบัติทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดีพิเศษ การพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลายในปัจจุบันต้องอาศัยพลาสติก พลาสติกประกอบด้วยจำนวนโมเลกุลเล็กมากมาายเป็นโมเลกุลใหญ่ ฉะนั้นโครงสร้างแตกต่างกัน เป็นผลให้มีชนิดของพลาสติกมากมาย สารสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกส่วนมากจะมรโครงสร้างของอะตอมเป็นพันธะ ๑ เชื่อมโยงเข้าด้วยกันไปในทิศทางหนึ่ง แต่สารสังเคราะห์เทอร์โมเซตติงประกอบด้วยโมเลกุลเป็นรูปทรงลูกบาศก์ (สามมิติ) เนื่องจากพลาสติกมีมากมายหลายชนิด จึงขอกล่าวแต่เฉพาะที่มีใช้งานเพื่อการฉนวนไฟฟ้าเท่านั้น

### F.1 โพลีเอทิลีน ( Polyethylene = PE )

PE เป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า ทนต่อความชื้นและปฏิกิริยาเคมีได้สูง มีความต้านทานจำเพาะและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง แม้แต่ที่ความถี่สูง กระบวนการทำง่าย ราคาไม่แพง ฉะนั้น PE จึงมีที่ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะใช้ในการฉนวนของสายเคเบิลแกนร่วม ( Coaxial Cable ) ทั้งในงานไฟฟ้ากำลังและงานสื่อสาร โดยเหตุที่กระบวนการผลิต PE มีแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์เพื่อเฉพาะกิจ จึงแบ่งออกเป็นประเภทตามความหนาแน่นมากน้อย แบบเบา ปานกลาง และแบบหนัก และยังอาจใช้กรรมวิธีผ่านรังสีแกมมาเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการ อย่างไรก็ตามทุกชนิดมีความต้านทานเฉพาะสูงกว่า  $10^{16}$  โอห์ม-เซนติเมตร ค่าเปอร์มิตติวิตี ( 50 Hz - 1 MHz ) เท่ากับ 2.3 และ  $\epsilon_g$  ๑ เท่ากับ  $2 * 10^{-4}$  มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 200 ถึง 400 KV/Cm ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 90 °C ถ้า PE ที่ผ่านรังสีแกมมาจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 700 - 1000 KV/Cm แต่จะมีค่า  $\epsilon_g$  ๑ เท่ากับ  $5 * 10^{-4}$

### F.2 โพลีเอสเตอ์ ( Polyesters )

โพลีเอสเตอ์เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง ประกอบด้วยกรด Dicarboxylic และ แอลกอฮอล์ dihydric มีคุณสมบัติคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงมาก ผิว

แข็งเป็นพิเศษ และทนต่อปฏิกิริยาเคมีทั้งหลายได้ดี อาจแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ ประเภทอิมิตัว และไม่อิมิตัว โพลีเอสเตอร์ไม่อิมิตัวใช้ในชั้นแผ่นแก้วบางหรือหล่อแก้วไฟเบอร์ ซึ่งใช้มากในรูปขององค์ประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนโพลีเอสเตอร์อิมิตัวใช้ทำไฟเบอร์และฟิล์ม โพลีเอสเตอร์ไฟเบอร์ใช้ทำกระดาษ ลีโธและใยผ้าเพื่อใช้ในงานไฟฟ้า ส่วนฟิล์มนั้นใช้หุ้มสายไฟและเคเบิลสำหรับมอเตอร์ คะแปซิเตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า คุณสมบัติของฉนวนของโพลีเอสเตอร์ขึ้นอยู่กับประเภทและความถี่ที่ใช้ งาน มีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_r$  3 - 7 ความต้านทานจำเพาะ  $10^{12} - 10^{16}$  ohm-Cm แฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 50 Hz เท่ากับ 0.003 - 0.03 และที่ 1 MHz เท่ากับ 0.006 - 0.04 และจะยังต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 25-45 KV/Cm.

### F.3 โพลีสทีรีน (Polysterene = PS)

โพลีสทีรีนเป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสติก มีคุณสมบัติต่าง ๆ กันตามสี ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าราว 20 - 35 KV/mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรราว  $10^{12}$  Ohm-Cm เปอร์มิตติวิตีที่ 20 °C ประมาณ 2.5 มีแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริกต่ำและไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ คือ  $\epsilon_r \delta = 0.002$  ที่ความถี่พลังงานถึงความถี่ 10,000 MHz ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้โพลีสทีรีนฟิล์มเป็นไดอิเล็กตริกของกะแปซิเตอร์กันมาก เพราะจะทำให้ค่ากะแปซิเตอร์คงตัวในช่วงความถี่กว้าง และมีความต้านทานสูง

### F.4 โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride = PVC)

โพลีไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซีใช้กันหลายรูปแบบในเชิงการค้า มีแบบที่ไม่เป็นพลาสติก แต่เหนียวทำเป็นรูปร่างต่าง ๆ ตามต้องการได้ง่าย ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรดและด่าง และไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ชัดจำกัดในด้านอุณหภูมิใช้ได้ไม่เกิน 60 °C มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ความต้านทานจำเพาะเชิงผิวและเชิงปริมาตรมีค่าสูง ประมาณ 3.8 - 4.3 ที่ 50 Hz และ  $\epsilon_r \delta = 0.012$  ถึง 0.15 ที่ 50 Hz และ 0.006 ถึง 0.1 ที่ 1 MHz

ส่วนพีวีซีที่อ่อนตัวเป็นพลาสติกได้ จะใช้สำหรับหุ้มสายไฟ ปลอกฉนวน และเปลือกนอกของเคเบิลนิยมนำฉนวนพีวีซีมากกว่ายางเพราะทนต่อแสงแดด ออกซิเจนและไม่ดูดซึม

น้ำหรือความชื้น

#### F.5 ไนลอน (Nylon)

ไนลอนเป็นสารประกอบเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีกระบวนการทำให้ทนการกระทบแรงดึงและทนต่อแรงบีบม้วนในช่วงอุณหภูมิกว้างตั้งแต่ 3 ถึง 300 °C มีความคงทนต่อแรงดันได้สูง ความต้านทานจำเพาะเชิงผิวและปริมาตรสูงถึงแม้ว่าจะอยู่ในสภาพความชื้นมาเป็นเวลานานแล้วก็ตาม ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี หล่อหรือตบแต่งด้วยเครื่องเป็นรูปต่างๆ ได้ง่าย เหมาะที่จะใช้กับงานความถี่สูงและต้องการพลังงานสูญเสียเล็กน้อย ในทางวิศวกรรมไฟฟ้ามักใช้ในลอนเป็นที่ผูกมัด ข้อต่อ แหวนรอง สายรัดเคเบิล สวิตช์ไฟบ้าน เป็นต้น ไนลอนมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 15 ถึง 20 KV/mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรประมาณ  $10^{12}$  ถึง  $10^{15}$  Ohm-Cm ค่าเปอร์มิตติวิตีประมาณ 4 - 14 ที่ 50 Hz และ 3.5 - 5 ที่ 1 MHz แพลตเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก 0.014 ถึง 0.10 ที่ 50 Hz และ 0.03 ถึง 0.13 ที่ 1 MHz

#### F.6 ฟลูออโรคาร์บอนพลาสติก (Fluorocarbon Plastics)

ฟลูออโรคาร์บอนพลาสติกแบ่งเป็น Polytetrafluoroethylene (PTFE) Polychlorotrifluoroethylene (PCTFE) Polyvinylidene ( $\text{PVF}_2$ ) ในบรรดาฟลูออโรคาร์บอนพลาสติกนี้ PTFE มีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีที่สุด และจัดเป็นพลาสติกที่มีคุณภาพดีที่สุดในการใช้เป็นฉนวน เพราะมีคุณสมบัติพิเศษทั้งทางไฟฟ้าและทางกล จะไม่มีการแตกตัวถึงแม้จะร้อนถึง 300 °C ส่วน PCTFE มีค่าเปอร์มิตติวิตีและพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงกว่าแบบ PTFE หลอมละลายที่ 190 °C  $\text{PVF}_2$  เหมาะที่จะใช้กับงานที่อุณหภูมิเปลี่ยนในช่วงกว้าง คือ ใช้งานได้ตั้งแต่ -30 °C ถึง 150 °C ใช้หุ้มสายควบคุม เป็นปลอกหุ้มอะแดปเตอร์ ตัวความต้านทาน กล้องช้าต่อสายไฟมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังตารางที่ 6

คุณสมบัติ	PIFE	PCTFE	PVF <sub>2</sub>
ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตร ( Ohm - Cm )	$> 10^{18}$	$1.2 * 10^{18}$	$2 * 10^{18}$
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า KV/mm	20	21	10 - 51
เปอร์มิตติวิตี 50 Hz - 1 MHz	2	2.3 - 2.8	7 - 8
แฟกเตอร์ 50 Hz - 1 MHz	$< 0.0002$	0.0012-0.0036	0.0491-0.15

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของฟลูออโรคาร์บอนพลาสติก

ก) อีพ็อกซี-เรซิน

อีพ็อกซี-เรซิน เป็นสารฉนวนประเภทเทอร์โมเซตติง มีคุณสมบัติเยี่ยมทางไดอิเล็กตริกและทางกล ง่ายต่อการหล่อขึ้นรูปตามที่ต้องการแม้แต่ที่อุณหภูมิห้อง ทำเป็นฉนวนรูปต่าง ๆ ที่ต้องการใช้งาน ส่วนมากจะใช้งานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เช่น ปลอกฉนวนสายนำ ลูกถ้วยหม้ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า สวิตช์เกียร์ แม้แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ใช้ประสานต่อเข้าด้วยกันได้อย่างกว้างขวาง เช่น ปอร์ซเลน ไม้ โลหะ พลาสติก เป็นต้น ใช้งานปิดผนึกรอยต่อ เพื่อทำสูญญากาศในห้องทดลอง หรือโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้า สามารถใช้อีพ็อกซี-เรซิน เพื่อเอนกประสงค์ ประหยัดเวลาและราคาไม่แพง

∴ อีพ็อกซี-เรซินสามารถยึดหยุ่นได้ดี ตัวอย่างทดสอบทนแรงอัดได้ถึง 180,000 PSI หรือ 12,000 บรรยากาศ แล้วกลับคืนสู่สภาพเดิมได้หลังจากเอาไหลตออกแล้ว ตัวอย่างจะไม่เสียรูป ทนต่อดินฟ้าอากาศและสารเคมี มีค่าเปอร์มิตติวิตี = 2.5 - 3.8 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียที่ความถี่พลังงาน  $\epsilon_g \delta = 0.003 - 0.03$  ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 75 KV/mm ที่ตัวอย่างหนา 0.025 mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรสูงถึง  $10^{18}$

Ohm-Cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สายเคเบิล

ในระบบารส่งกำลังไฟฟ้าระดับแรงดันไฟสูงนั้น โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ระบบสายส่งแบบสายอากาศ และใช้สายตัวนำอลูมิเนียมเปลือย แต่จากการวิเคราะห์ถึงความปลอดภัยต่าง ๆ แล้วจะพบว่าการทำสายตัวนำหุ้มฉนวนมาใช้จะให้ความปลอดภัยในด้านต่าง ๆ มากกว่าสายตัวนำแบบเปลือย

สำหรับในกรณีของสายตัวนำหุ้มฉนวนที่ใช้ในระบบแรงดันไฟ 12/24 KV นั้นสามารถแบ่งออกเป็น

#### 1. Fully Insulated Cable

หมายถึง สายตัวนำหุ้มฉนวนชนิดที่มี Shield และเปลือกนอกเช่น สายเคเบิลใต้ดิน หรือเคเบิลอากาศ สายประเภทนี้สามารถติดตั้งโดยไม่ต้องใช้ฉนวนรองรับ ( Insulator )

#### 2. Spaced Aerial Cable

หมายถึง สายตัวนำหุ้มฉนวน มีเปลือกนอกไม่มี Shield สายประเภทนี้ต้องใช้ฉนวนรองรับ ( Insulator ) ชนิดที่ออกแบบไว้เฉพาะ และใช้งานในระบบสายอากาศเท่านั้น

#### 3. Partially Insulated Conductor

หมายถึง สายตัวนำหุ้มฉนวนไม่มีเปลือกนอกและไม่มี Shield สายประเภทนี้ฉนวนจะบางกว่าสาย Spaced Aerial Cable สายประเภทนี้ต้องใช้ฉนวนรองรับชนิด Pin Type เช่นเดียวกับสายเปลือย และใช้งานระบบสายอากาศเท่านั้น

### วัสดุที่ใช้ทำฉนวน

#### 1. Polyethylene (PE)

เป็นฉนวนที่นิยมนำมาใช้กับสายเคเบิลอย่างแพร่หลายมานาน มีคุณสมบัติที่ดีเด่นหลาย ๆ ประการ Polyethylene เป็นวัสดุชนิดที่เรียกว่า Thermoplastic สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิ 80 °C และมีจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิ 110 °C

#### 2. Crosslinked Polyethylene (XLPE)

เป็นฉนวนที่พัฒนามาจาก Polyethylene โดยการเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็น

สารชนิดใหม่ประเภท Thermoset สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิ 90 °C และสามารถ Overload ได้ถึง 130 °C

### ความหนาของฉนวน

ในที่นี้จะพิจารณาถึงสายเคเบิลแบบ Partially Insulated Conductor โดยใช้มาตรฐาน Preformed Deadend Grip เป็นหลัก

1. สายขนาด 185 ตร.มม. ใช้ฉนวนหนา 2.70 มม.
2. สายขนาด 70 ตร.มม. ใช้ฉนวนหนา 2.45 มม.

โครงสร้างรองรับและฉนวนรองรับ ( Supporting Structure and Insulated )

สาย Partially Insulated Conductor จะมีน้ำหนักมากกว่าสายเปลือยเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถใช้คอนสาย (Crossarm) เดิมได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลง

ทางด้านฉนวนรองรับ ยังคงสามารถใช้ลูกถ้วย (Pin Type Insulator) ANSI Class 56-2 เนื่องจาก Top Groove และ Side Groove กว้างพอที่จะติดตั้งสายได้

### 3.4 การฉนวนเคเบิล

ลักษณะสมบัติที่ต้องการของการฉนวนเคเบิลขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ฉนวนควรจะมีคุณสมบัติ ทนต่อแรงดึงได้สูง เหนียว เพื่อให้ทนต่อสภาวะการใช้งาน ค่าไดอิเล็กตริกคงตัวควรมีค่าต่ำ เพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ แต่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงมีความต้านทานการฉนวนสูง ทนต่อความร้อนได้ดีเพื่อใช้งานในกรณีที่มีโหลดเกิน ทนต่อแสงแดดและปฏิกิริยาเคมี ดูดซึมความชื้นได้น้อยมากเมื่อนำไปใช้งานเคเบิลผ่านในน้ำ ถ้าใช้กับอุณหภูมิต่ำฉนวนไม่ควรมีสภาพแข็งเกร็งและเปราะ ควรปราศจากการดีสชาร์จบางส่วน

ฉนวนที่ใช้สำหรับการฉนวนเคเบิลอุตสาหกรรม คือ กระดาษ ยาง พลาสติก และ ก๊าซอัดเคเบิลชนิดฉนวนกระดาษยังคงนิยมใช้อยู่ เพราะเคเบิลชนิดนี้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าดี มีความเชื่อมั่นได้สูง มีพลังงานสูญเสียต่ำในไดอิเล็กตริกต่ำ อายุการใช้งานยาวนาน การฉนวนเคเบิลแรงต่ำและแรงดันสูงขึ้นต้น คือถึง 3300 โวลท์ มักใช้ฉนวนพีวีซี พีอี และ พีอีครอสลิง แต่ฉนวน พีวีซีไม่เหมาะสำหรับการฉนวนสายเคเบิลแรงสูง เพราะว่า มีค่าคง

ตัวไดอิเล็กทริกสูง และพลังงานสูญเสียในตัวไดอิเล็กทริกจะต้องมีค่าสูงด้วย ส่วนฉนวน พีอี มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำ พลังงานสูญเสียในตัวไดอิเล็กทริกต่ำ ทนต่อแรงดันได้สูง ฉะนั้นฉนวนพีอีจึงเหมาะสำหรับ ฉนวนสายเคเบิลแรงสูง สารฉนวนที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับแรงสูง และใช้กับอุณหภูมิสูง ได้แก่ เทฟลอน (PTFE) ซึ่งสามารถใช้กับอุณหภูมิสูงถึง 250 °C จึงนิยมใช้เพื่อการฉนวนสายเคเบิลสำหรับเครื่องบิน การฉนวนด้วยก๊าซอัดเหมาะสำหรับเคเบิลแรงสูงมาก ๆ ก๊าซอัดที่นิยมใช้ปัจจุบันสำหรับเคเบิลแรงสูง คือ ก๊าซ SF<sub>6</sub> ซึ่งใช้ความดันอัดประมาณ 2.5 บรรยากาศ ตัวอย่างสารฉนวนที่ใช้สำหรับเคเบิล ดังแสดงในตาราง

สารฉนวน	แรงดันใช้งานสูงสุด (KV <sub>rms</sub> )	อุณหภูมิใช้งาน (°C)
<u>กระดาษอบน้ำยา</u>		
ชนิดแข็ง	95	-10 ถึง 85
บรรจุน้ำมัน	400	-20 ถึง 70
อัดก๊าซ	400	20 ถึง 70
หุ้มผ้าฉนวน	28	-10 ถึง 80
<u>ยาง</u>		
ยางธรรมชาติ	3.0	-40 ถึง 70
สารสังเคราะห์ลาเทคซ์	0.6	-40 ถึง 75
สารสังเคราะห์เนโอพรีน	0.6	-30 ถึง 90
สารสังเคราะห์ซิลิโคน	5.0	-40 ถึง 150
สารสังเคราะห์บิวทิน	2800	-40 ถึง -80
<u>พลาสติก</u>		
พีวีซี	0.6	-30 ถึง 105
พีอี	15	-10 ถึง 80
เทฟลอน	5	-54 ถึง 250
ฟลูออโรเทน	5	-54 ถึง 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การทดสอบวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

การฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอาจจะเป็น ก๊าซ ของเหลว ของแข็ง ในกรณีที่มีที่ว่างมากพออาจใช้อากาศเป็นฉนวน เช่น ระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังแบบชิงอากาศ ถ้าต้องการให้มีปริมาตรน้อยหรือ มีที่ว่างจำกัดก็อาจเป็นการฉนวน ถ้าฉนวนแข็ง หรือ ฉนวนเหลวหรือ ก๊าซอัด หรือ ฉนวนผสมระหว่างฉนวนเหล่านี เช่น หม้อแปลง เคเบิล เป็นต้น

การฉนวนอุปกรณ์ ต้องไม่เป็นต้นเหตุให้เกิดความบกพร่อง ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหาย หรือทำให้การส่งจ่ายพลังงานต้องหยุดชะงัก ดังนั้น เพื่อให้เกิดความมั่นใจและแน่ใจว่า วัสดุฉนวนนั้นมีคุณสมบัติตามต้องการ จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบคุณสมบัติของฉนวนนั้นๆ ก่อนนำไปใช้งาน การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ ไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1. การทดสอบแบบไม่แตกสลายหรือการทดสอบความทนทาน (Endurance Test) เป็นการทดสอบอายุการใช้งานของการฉนวน อุปกรณ์ที่ต้องรับความเครียดสนามไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา ทดสอบโดยแรงดันกระแสสลับ ความถี่ต่ำ ขนาดแรงดันเท่ากับแรงดันสูงสุดของระบบใช้งาน วัดระดับแรงดันที่ใดที่ โดโรน่า เริ่มเกิด หรือเกิดดีสชาร์จ บางส่วน (Partial Discharge : PD)

2. การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดัน (Withstand Voltage Test) เป็นการทดสอบว่า วัสดุฉนวนจะสามารถคงทนต่อแรงดันเกินได้หรือไม่ ซึ่งแยกออกเป็น 2 ชนิดคือ

- การทดสอบความคงทนอยู่ได้ระยะสั้นความถี่ต่ำ โดยป้อนแรงดันกระแสสลับตามที่กำหนดในมาตรฐานเป็นเวลา 1 นาที ซึ่งจะสูงกว่าแรงดันใช้งาน
- การทดสอบความคงทนอยู่ได้ด้วยแรงดัน อิมพัลส์ เพื่อดูความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า หรือแรงดัน อิมพัลส์ แบบสวิตช์ซึ่ง

3. การทดสอบแบบแตกสลาย (Disruptive Test) เป็นการทดสอบดูการแตกสลายหรือเสียหายของฉนวนจากความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress)

#### การทดสอบสายเคเบิลแรงสูง

เคเบิล เป็นองค์ประกอบที่สำคัญประเภทหนึ่งในระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้แน่น

ใจว่า เคเบิลมีความคงทนหรือไม่ จึงมีการทดสอบทางไฟฟ้า คือ

การวัดดิสชาร์จบางส่วน (PD) ซึ่งประกอบด้วย ดิสชาร์จบางส่วนภายใน และดิสชาร์จบางส่วนภายนอก การวัดดิสชาร์จบางส่วนภายในเป็นการตรวจสอบความบกพร่องของฉนวนผสมภายในของเคเบิล



ลูกถ้วยฉนวน และการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้า และแรงดันกระจายบนลูกถ้วย

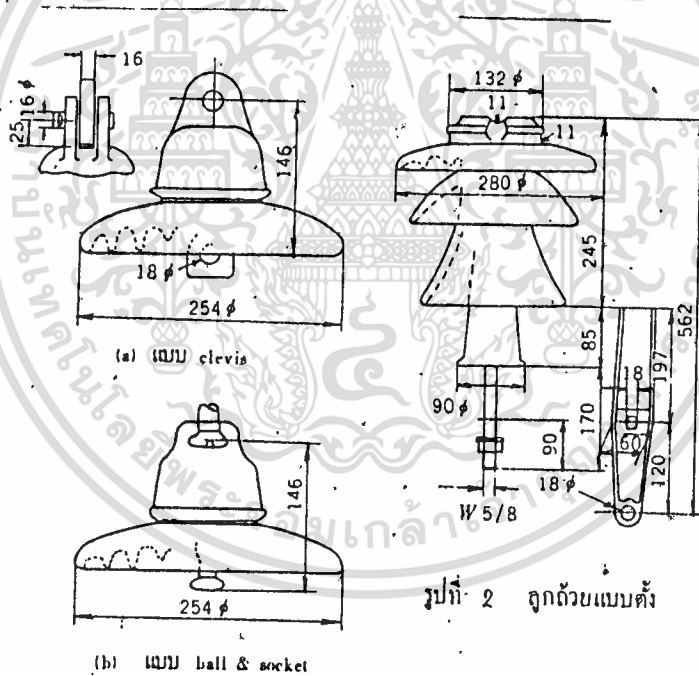
4.1 ลูกถ้วยฉนวน

การฉนวนสายส่งกำลังในระบบส่งจ่ายแรงสูง นิยมใช้ลูกถ้วยทำด้วยพอร์ซเลน หรือ แก้วเป็นฉนวน ชนิดของลูกถ้วยที่นิยมนำมาใช้งานแบ่งออกเป็น

1. ลูกถ้วยแบบแขวน (Suspension Insulator) ส่วนใหญ่นิยมใช้กับสายส่งไฟฟ้าทำาไปที่มีระดับสูง ลูกถ้วยแบบแขวนนี้สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1.1 แบบสลัก (Elevis Type)

1.2 แบบข้อต่อ (Ball & Socket Type) ทำด้วยกระเบื้องเคลือบมิดุมเหล็ก(Malleable Iron Cap) อยู่ด้านหนึ่ง และอีกด้านหนึ่งเป็นก้านเหล็กซึ่งปิดแน่นกับตัวลูกถ้วยโดยกาพิเศษ



รูปที่ 2 ลูกถ้วยแบบตั้ง

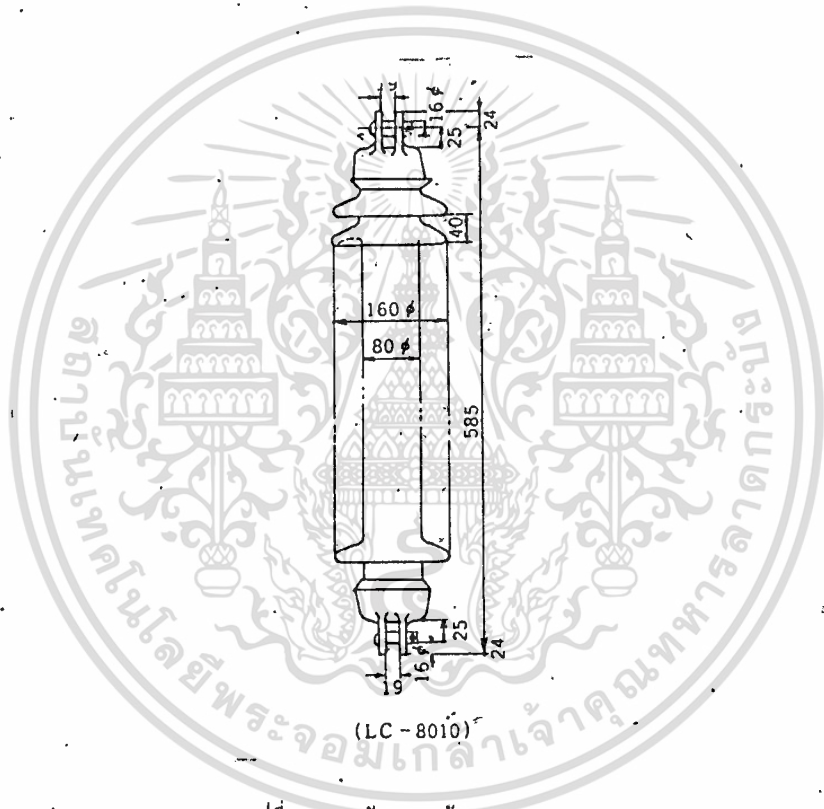
รูปที่ 1 ลูกถ้วยแบบแขวนขนาด 250 มม.

ข้อดีของการใช้ลูกถ้วยแบบแขวนก็คือ สามารถเพิ่มจำนวนได้มากขึ้นตามต้องการ เนื่องจากมีส่วนสำหรับเกี่ยวแขวนกันได้

เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกถ้วยมีหลายขนาด เช่นขนาด 240 มิลลิเมตร(ทนแรง

12000 กิโลกรัม และ 16500 กิโลกรัม) ขนาด 180 มิลลิเมตร(6000 กิโลกรัม) 280 มิลลิเมตร(21000 กิโลกรัม) และขนาด 320 มิลลิเมตร(30000 กิโลกรัม) เป็นต้น ซึ่งลูกถ้วยแบบแขวนจะใช้ต่อเชื่อมกันเป็นสายยาวได้ตามความเหมาะสมที่จะใช้กำลังไฟฟ้า ต่างกัน

2. ลูกถ้วยแบบตั้ง(Pin Type) นิยมใช้กับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ เช่น 22 KV ถึง 3 KV มีลักษณะเป็นกระเบื้องเคลือบ ด้านล่างฝังแป้นเกลียวที่ทำด้วยเหล็กหล่อ ติดด้วยกากันเหล็กจะมีเกลียวด้านหนึ่งซึ่งจะใส่แป้นเกลียวและเนื่องจากลูกถ้วยแบบนี้ไม่ใช่ต่อเชื่อมกัน ประกอบกับไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก จึงไม่นิยมทำขนาดใหญ่



รูปที่ ๘ ลูกถ้วยแบบก้านยาว

3. ลูกถ้วยแบบก้านยาว(Long Rod Insulator) มีส่วนประกอบที่เป็นโลหะอยู่น้อยจึงมีความทนทานมากกว่าอย่างอื่น และเนื่องจากโครงสร้างซึ่งมี กรันออกแบบง่ายๆ น้ำฝนจะช่วยชะล้างให้ลูกถ้วยสะอาดได้ดีกว่าแบบอื่น ฉะนั้นจึงเหมาะในการนำไปใช้ในที่ที่มีฝนและน้ำเต็ม

## 4.2 ลักษณะของลูกถ้วย

### 4.2.1) ลักษณะทางไฟฟ้า

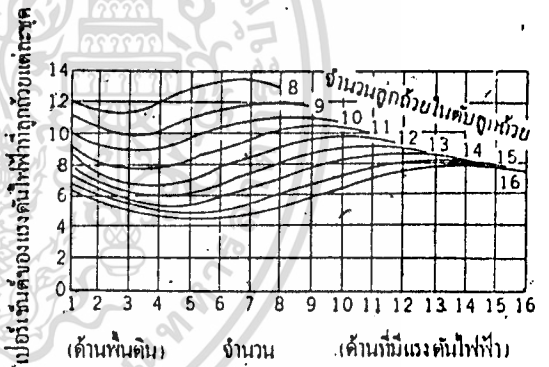
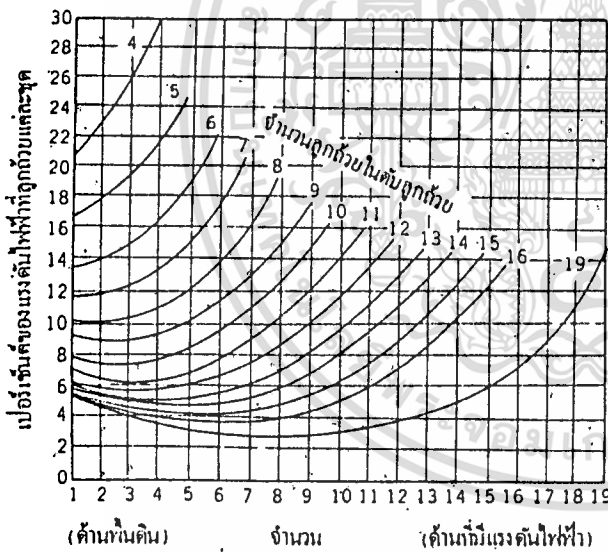
#### (ก) ความจุไฟฟ้าของลูกถ้วย

เนื่องจากลูกถ้วยมีลักษณะคล้ายขั้วไฟฟ้าสองขั้วคั่นด้วยกระเบื้องเคลือบตรงกลาง จึงทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และประกอบกับความชื้น ฝุ่น และวัตถุอื่นๆ ที่อยู่ผิวของกระเบื้องเคลือบเป็นตัวทำให้เกิดผิว ซึ่ง เป็นสื่อไฟฟ้าขึ้นจะทำให้ผิวซึ่งเป็นสื่อไฟฟ้าขึ้น จะทำให้ความจุไฟฟ้าสถิตของขั้วไฟฟ้าทั้งสองของลูกถ้วยเพิ่มขึ้น

แรงดันไฟฟ้าซึ่งเกิดที่ลูกถ้วยแต่ละตัว เมื่อใช้ลูกถ้วยต่อเชื่อมกันหลาย ๆ ตัวจะมีค่าคงกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและการแผ่กระจายของศักย์ทางไฟฟ้างที่แสดงไว้ในรูปที่ 4 และมีค่าเพิ่มมากขึ้น

การแผ่กระจายของศักย์ไฟฟ้าจะดีขึ้นหากใช้คั่นกันกระแสไฟฟ้า (arcing horn)

รูปที่ 5



รูปที่ 4 การแผ่ศักย์ไฟฟ้าที่ตลับลูกถ้วย เมื่อกันกันกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 5 การแผ่ศักย์ไฟฟ้าที่ตลับของลูกถ้วย เมื่อกันกันกระแสไฟฟ้า

(ข) แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นที่ลูกถ้วย (flashover voltage of insulator)

แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือที่ความถี่ต่ำ (low frequency puncture voltage in oil)

สำหรับระดับแรกที่มีความถี่ต่ำนั้น ใช้ความถี่ 50 หรือ 60 ไซเคิล/วินาที ซึ่งอาจจะ อยู่ในภาวะแห้ง (dry flashover voltage) และภาวะเปียก (wet flashover voltage)

แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นที่ลูกถ้วยในภาวะแห้ง หมายถึงแรงดันไฟฟ้า ระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วของลูกถ้วยที่สะอาด และมีผิวแห้ง ค่านี้จะคงที่สำหรับลูกถ้วยแบบ หนึ่งและ เป็นค่าที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของลูกถ้วย (โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 3-5 เท่าของแรง ดันที่ใช้งาน)

แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการลัดวงจรที่ลูกถ้วยในภาวะเปียก เป็นค่าที่คิดเมื่อลูกถ้วย เปียกน้ำ

โดยทั่วไปน้ำที่ราดบนลูกถ้วยจะต้องมีค่าความต้านจำเพาะ (specific resistance), 10,000 โอห์ม-เซนติเมตร และปริมาณน้ำเท่ากับ 3 มิลลิเมตร/วินาที

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นที่ลูกถ้วยเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้นนั้น แสดงให้เห็นความแข็งแรงของลูกถ้วย สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นมาตรฐานเท่ากับ  $1.5 \times 40$  ไมโครวินาทีและค่านี้ยังมีค่าแตกต่างกันในกรณีที่ใช้ขั้วบวก (positive polarity) และขั้วลบ (negative polarity) ด้วย แต่โดยทั่วไปใช้เป็นค่าบวก อนึ่งภายใต้ สภาวะเปียกค่านี้เกือบเท่ากับค่า ที่ได้ภายใต้ภาวะแห้งหากใช้ขั้วบวก แต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยหากใช้ขั้วลบ

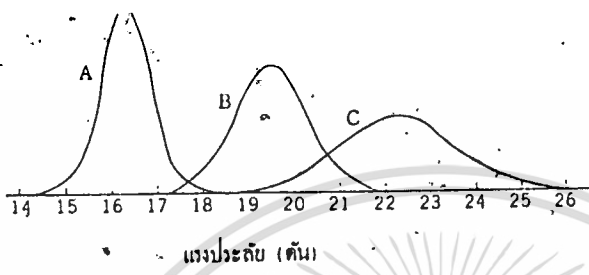
แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นอยู่ที่ลูกถ้วย เมื่อใช้ความถี่ต่ำและ ให้ลูกถ้วย อยู่ใน จะแสดงให้เห็นลักษณะ เป็นฉนวนไฟฟ้าของลูกถ้วย ค่านี้สูงกว่าค่าที่ใช้แต่ความถี่ต่ำ อย่างเดียว หากลูกถ้วยอยู่ในสภาพดี และโดยทั่วไปสำหรับลูกถ้วยแบบชวาน ขนาด 250 มิลลิเมตร จะมีค่าประมาณ 140 KV

#### 4.2.2) ลักษณะทางเครื่องกล

ลูกถ้วยที่ดีจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักได้และ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี กระเบื้องเคลือบซึ่งเป็นตัวลูกถ้วยมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงคล้ายกับเหล็กหล่อ และต้านแรงกดสูงๆ ได้ แต่ต้านแรงยึดได้ต่ำ โดยทั่วไปจะใช้กับแรงยึดได้ 400-900 กิโลกรัม/ตร.มม. และแรงกดประมาณ 10 เท่า ของแรงยึด

กระเบื้องเคลือบจะต้องไม่มีรูพรุนในเนื้อกระเบื้องและปราศจากรอยขีดข่วน รอยแตก ฯลฯ และควรมีความต้านทานการเปลี่ยนอุณหภูมิทันทีทันใด หรือต่อแรงกระแทกจากภายนอก

แรงดึงของลูกถ้วยที่ติดตั้งแล้วมีค่าสูง ส่วนที่เป็นกระเบื้องเคลือบ และซีเมนต์ของลูกถ้วยจะต้องออกแบบให้มีความแข็งแรงมากกว่าส่วนที่เป็นโลหะ เพราะโลหะพุกร่อนได้ ในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ของลูกถ้วย



เส้น	จุดปะทะ	ตัวอย่าง
A	แกนเหล็ก	ลูกถ้วยแบบ clevis ขนาด 250 มม.
B	กานบน (malleable cap)	เฉพาะกานบน
C	กระเบื้องเคลือบ	ลูกถ้วยที่ทดสอบประกอบด้วยแกนเหล็กและกานบนที่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ

รูปที่ 6 รูปเส้นของความแข็งแรงทางเครื่องกลของลูกถ้วยแบบแขวนขนาด 250 มม.

การทดสอบความแข็งแรงของลูกถ้วยแบบแขวน และแบบก้านยาวใช้วิธีทดสอบแรงดึง และสำหรับลูกถ้วยแบบตั้งและแบบติดเสาจะทดสอบความแข็งแรงของก้านโดย bending moment ที่เกิดจากสายไฟฟ้า ซึ่งกระทำได้โดยใช้น้ำหนักกดบนลูกถ้วย และเกิดแรงเบี่ยงที่ก้านของลูกถ้วย

ลักษณะทางไฟฟ้า และทางเครื่องกลของลูกถ้วยแบบต่าง ๆ ได้แสดงไว้ ในตารางที่ 1, 2, 3 และ 4

การออกแบบฉนวนไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าชนิดพาดเสาจะต้องคำนึงถึงค่าของแรงดันไฟฟ้าระดับที่เกินเกณฑ์ใช้งานปกติของระบบไฟฟ้านั้น ๆ เป็นสำคัญ

ในบริเวณที่บรรยากาศปกติไม่มีฝนละอองมาก ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาที่สับไกไฟฟ้า (switching surge) จะใช้ในการกำหนดจำนวนของลูกถ้วย และระยะห่างของฉนวนไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ลักษณะของลูกถ้วยแบบตั้ง (pin type)  
มาตรฐาน : JIS C 3816 (1962)

ชนิด	แรงดันไฟฟ้า สัมมูลฐาน (กิโลโวลท์)	จำนวนชั้นของ กระเบื้องเคลือบ	เส้นผ่าศูนย์กลาง กลางสูงสุด (มม.)	ความสูง		แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิด ลัดวงจรที่ความถี่ต่ำ		แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิด ลัดวงจร (50 % impulse flashover voltage) (กิโลโวลท์)	แรงกอน น้ำหนัก (กก.)	น้ำหนักรวมทั้ง ตัวประกอบ (กก.)
				ต่ำสุด มม.	สูงสุด มม.	แห้ง (กิโลโวลท์)	เปียก (กิโลโวลท์)			
10	11	2	200	190	210	85	55	120	700	3.4
20	22	3	240	245	265	110	75	160	700	6.4
30	33	3	300	310	330	135	95	200	700	11.5
40	-	3	350	375	400	160	115	240	850	17.0
50	-	4	400	435	465	185	135	280	850	26.0
60	66	4	430	490	515	210	155	320	1,000	38.5

ตารางที่ 2 ลักษณะของลูกถ้วยแบบก้านยาว  
มาตรฐาน : JIS C 3816 (1962)

ชนิด	แรงดันไฟฟ้า สัมมูลฐาน (กิโลโวลท์)	ความยาว (มม.)	จำนวนชั้น	เส้นผ่าศูนย์กลาง ของชั้น (มม.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง ของตัวลูกถ้วย (มม.)	แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิด ลัดวงจรที่ความถี่ต่ำ		แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิด ลัดวงจร (50 % impulse flashover voltage) (กิโลโวลท์)	แรงปะลัษ (breaking strength) (กก.)	น้ำหนัก (กก.)
						แห้ง (กิโลโวลท์)	เปียก (กิโลโวลท์)			
LC-6505	22	385	5	145	65	115	65	170	7,500	
LC-6507	33	485	7	145	65	150	95	230	7,500	9
LC-6510	66	585	10	145	65	185	125	290	7,500	10
LC-8005	22	385	5	160	80	115	65	170	12,000	10
LC-8007	33	485	7	160	80	150	95	230	12,000	12
LC-8010	66	585	10	160	80	185	125	290	12,000	14
LC-8013	77	725	13	160	80	235	160	380	12,000	18
LC-8017	77	875	17	160	80	285	200	470	12,000	22
LC-8021	110	1,025	21	160	80	335	240	560	12,000	26
LC-8024	110	1,175	24	160	80	385	280	650	12,000	29

หมายเหตุ: ลูกถ้วย LC (clevis-type connection) เหล่านี้มีสลักทั้งส่วนบนและส่วนล่าง

ยังมีแบบอื่น ๆ อีก เช่น LE (clevis-eye type) ซึ่งด้านหนึ่งเป็นสลัก และอีกด้านหนึ่งเป็นห่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ลักษณะการเกิดลัดวงจรของลูกถ้วยชนิดแขวนขนาด 250 มม.

มาตรฐาน JIS C 3810 (1962)

JIS C, 3817 (1964)

จำนวนลูกถ้วย	แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดลัดวงจร ที่ความถี่ต่ำ (เกิโวลท์)		แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดลัดวงจร (50 % impulse flashover voltage) (เกิโวลท์)	
	แห้ง	เปียก	บวก	ลบ
2	155	90	255	255
3	215	130	355	345
4	270	170	440	415
5	325	215	525	495
6	380	255	610	585
7	435	295	695	670
8	485	335	780	760
9	540	375	860	845
10	590	415	945	930
11	640	455	1,025	1,015
12	690	490	1,105	1,105
13	735	525	1,185	1,190
14	785	565	1,265	1,275
15	830	600	1,345	1,360
16	875	635	1,425	1,440
17	920	670	1,505	1,530
18	965	705	1,585	1,615
19	1,010	740	1,665	1,700
20	1,055	775	1,745	1,785
21	1,100	810	1,825	1,870
22	1,145	845	1,905	1,955
23	1,190	880	1,985	2,040
24	1,235	915	2,065	2,125
25	1,280	950	2,145	2,210

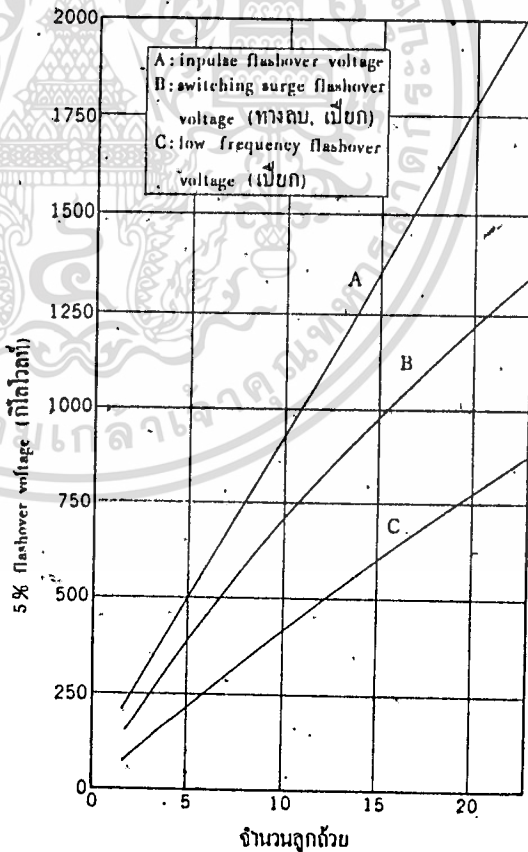
หมายเหตุ: ลูกถ้วยแบบสลัก (clevis type JIS C 3810) มี electro mechanical 12,000 กก.

ลูกถ้วยแบบข้อต่อ (ball & socket type JIS C 3817) electro mechanical 16,500 กก.

ตารางที่ 4 ลักษณะของลูกถ้วยแบบติดเสา

ชนิด	แรงดันไฟฟ้า สัณนิฐาน (กิโลโวลท์)	จำนวนชั้น	เส้นผ่าศูนย์กลางของชั้น (มม.)	เส้นผ่าศูนย์กลางของตัว ลูกถ้วย (มม.)	ความสูง (มม.)	แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิด ลัดวงจรที่ความถี่ต่ำ		แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดลัดวงจร 50% impulse (flashover voltage) (กิโลโวลท์)	แรงคอนแทก (กก.)	น้ำหนัก (กก.)
						แห้ง (กิโลโวลท์)	เปียก (กิโลโวลท์)			
LP-10	11	4	145	65	240	80	50	120	700	5.7
LP-20	22	6	150	70	325	105	75	165	700	7.7
LP-30	33	8	160	80	420	135	100	220	700	11.5
LP-40	-	10	165	85	515	170	125	275	700	16.1
LP-60	66	12	190	105	740	240	180	385	700	27.6
LP-70	77	14	190	105	610	280	210	440	700	31.3

ลักษณะการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของลูกถ้วยที่แรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาที่สับสวิตซ์  
แตกต่างกับลักษณะที่ใช้ความถี่ต่ำ และแรงดันกระตุ่น ในรูปที่ 7 จะแสดงให้เห็นลักษณะการ  
เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของลูกถ้วยแบบแขวนขนาด 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 7  
ลักษณะการเกิด Flashover ของลูกถ้วยขนาด 250 มม.

#### 4.3 อุปกรณ์สำหรับลูกถ้วย

อุปกรณ์สำหรับลูกถ้วย รวมถึงส่วนที่เป็นโลหะ และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ติดอยู่กับสายไฟฟ้า และโดยทั่วไปรวมถึงส่วนที่เป็นโลหะของสายต่อลงดินชนิดขนาดเล็กลง

##### 4.3.1) อุปกรณ์สำหรับลูกถ้วย

ส่วนที่เป็นโลหะทำด้วยเหล็กอ่อน (malleable iron) และ/หรือ เหล็กสตีล ส่วนที่เป็นโลหะมีหลายอย่างและการจะใช้อย่างใดนั้นต้องพิจารณาถึงแรงดันไฟฟ้า ชนิด และขนาดของสายไฟฟ้า ต้องการความแข็งแรงมากน้อยเพียงใด และลักษณะของที่ตั้งของเหล่านี้ เช่น สลักเกลียวรูปตัวยู (U bolt, clevis) ข้อต่อ (link) เหล็กห่าน และแป้น (ball eye and socket) ฯลฯ ได้ออกแบบให้ติดตั้งและถอดออกได้ง่าย กับการใช้สับเปลี่ยนทดแทนกันได้ ผิวของโลหะทุกชิ้นชุบสังกะสี

##### 4.3.2) คันกันกระแสไฟฟ้า (arcing horn) และห่วงกันโคโรนา (shield ring)

เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้ลัดวงจรที่ลูกถ้วย ส่วนที่เป็นกระเบื้องเคลือบอาจเสียหายจากประกายของกระแสไฟฟ้า (arc) จึงใช้คันกันกระแสไฟฟ้า (arcing horn) สำหรับลูกถ้วยแบบแขวนแต่ละดับ และแบบก้านยาว เพื่อป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้น โดยจะติดไว้ที่ลูกถ้วยด้านบนและด้านล่างในแนวนอน รูปร่างของคันกันกระแสไฟฟ้าจะช่วยนำกระแสไฟฟ้ลัดวงจรให้ผ่านตัวเองแทนที่จะผ่านลูกถ้วย

ระยะระหว่างปลายของคันกันกระแสไฟฟ้าทั้งสองอันประมาณ 75 - 85 % ของความยาวทั้งหมดของลูกถ้วยสำหรับลูกถ้วยในดับหนึ่ง ๆ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ลัดวงจร ขึ้นกับระยะห่างของคันกันกระแสไฟฟ้า

โดยทั่วไปจะใช้คันกันกระแสไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าขนาดแรงดันสูงกว่า 110 กิโลโวลต์ และสำหรับแรงดันไฟฟ้า 66 กิโลโวลต์ ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีจำนวนวันของฟ้าผ่าในปีหนึ่งเท่า

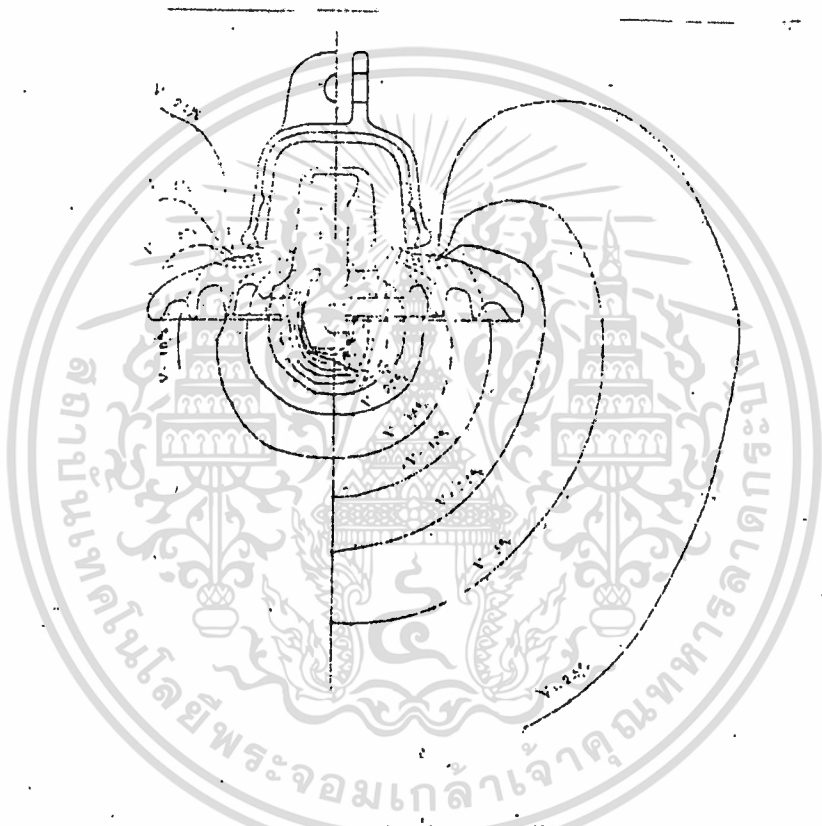
เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาที่สายไฟฟ้า จะติดห่วงกันโคโรนา (shield ring) ไว้ที่ปลายลูกถ้วย ส่วนที่ติดกับสายไฟฟ้า และคันกันกระแสไฟฟ้าก็ให้ผลทางด้าน การเกิดโคโร

นาได้เช่นกัน

### การวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายบนลูกถ้วย

(Electrical field and Voltage distribution on Insulator Analysis)

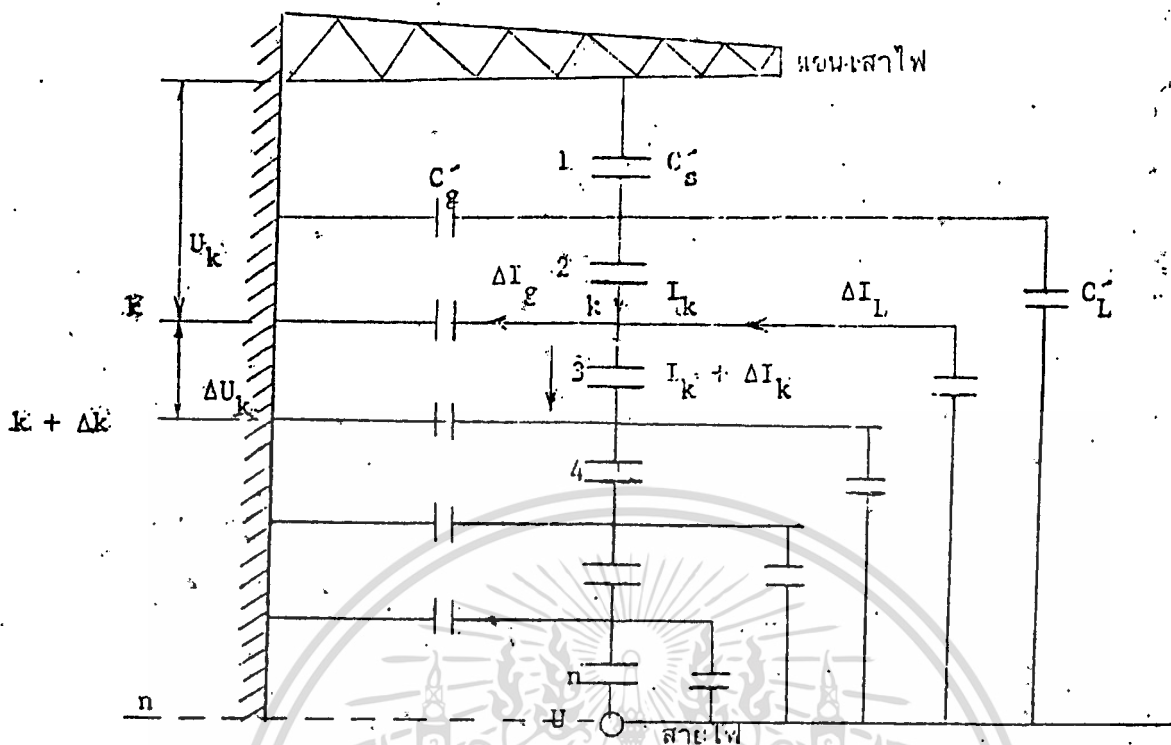
จากลักษณะและคุณสมบัติต่าง ๆ ของลูกถ้วยที่กล่าวมาแล้วจะพบว่าการทำลักษณะรูปร่างของลูกถ้วย จะทำให้ครีหรือชั้นลูกถ้วยมีผิวโค้งไปตามเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (Equipotential Line) เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยมีค่าน้อยที่สุด ดังรูปที่ 8.



รูปที่ 8 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวน

จากรูปแสดงถึงสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยแขวน ที่ผิวลูกถ้วยด้านบนที่ติดอยู่กับฝาครอบโลหะจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จะเป็นเหตุให้เกิดโคโรนาขึ้นในบริเวณนี้ได้ง่าย และนำไปสู่การเกิดวาบไฟตามผิว (Flashover) ฉะนั้นแรงดันใช้งานจึงต้องต่ำกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (Corona Inception voltage) ความกว้างของปีกชั้นลูกถ้วย และความหนาของเนื้อลูกถ้วย (ระหว่างฝาครอบบนก้านยึด.





รูปที่ 9 วงจรสมมูลของพ่วงลูกถ้วยแขวน

แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่ k

$$U_k = (I_k + I_k) / \omega l_k \quad I_k < I_k$$

$$- I_k = I_0 - I_L$$

$$I_0 = \omega C'_g \cdot U_k$$

$$I_L = \omega C'_L * (U - U_k)$$

โดยการแทนค่า  $I_0$  และ  $I_L$  และตีฟเพื่อเรนซิเอท  $U_k$  และหาผลตอบของสมการจะอยู่ในรูป

$$U_k = A_1 e^{\beta n} + A_2 e^{-\beta n}$$

เมื่อ  $U_k$  คือแรงดันที่ลูกถ้วย k เทียบกับดิน

นั่นคือ

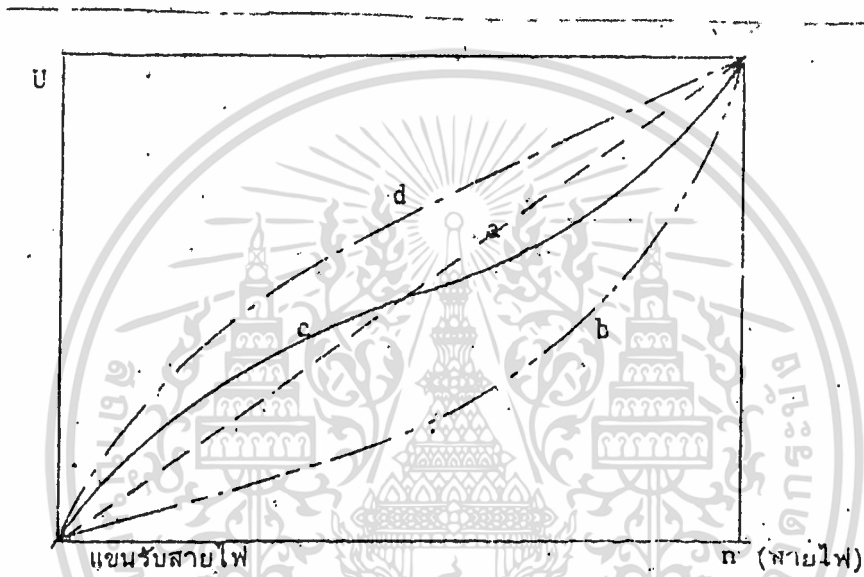
$$U_k = \frac{U}{C'_g + C'_L} \frac{C'_g \sinh k/n + C'_L (1 - \sinh(n - k/n))}{\sinh}$$

โดยที่  $\beta = (C'_g + C'_L) / C'_g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าค้บแปซิเตนซ์ของลูกถ้วย  $C'_L$  มีค่าสูงเมื่อเทียบกับค้บแปซิเตนซ์ของดิน  $C'_D$  และค้บแปซิเตนซ์ระหว่างลูกถ้วยกับสายไฟแรงดันกระจายบนลูกถ้วยสม่าเสมอ ดังเช่น เส้นกราฟ a ในรูป 10 ลูกถ้วยแขวนยึดสายขึงในอากาศ  $C'_L$  จะมีค้บน้อยกว่า  $C'_D$  เพราะพื้นที่ของสายไฟน้อยกว่าพื้นที่แขนรับพวงลูกถ้วยและเสาไฟ ฉะนั้นแรงดันที่กระจายบนพวงลูกถ้วยจะไม่สม่าเสมอดัง เส้นกราฟ b คือ แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่อยู่ใกล้สายไฟจะมีค่ามากที่สุด และแรงดันที่ลูกถ้วย k เทียบกับจุดที่ยึดแขนรับลงดิน จะคำนวณได้จากสมการ

$$U_k = (U \sinh k/n) / \sinh$$



รูปที่ 10. แรงดันกระจายบนพวงลูกถ้วย

- a:  $C'_L \gg C'_D$  หรือ  $C'_D = C'_L = 0$
- b:  $C'_D > C'_L$
- c:  $C'_D = C'_L < 0$
- d:  $C'_D < C'_L$

แรงดันกระจายบนพวงลูกถ้วย อาจปรับให้ค่อนข้างสม่าเสมอได้ โดยทำให้  $C'_L = C'_D$  แต่ถ้าทำให้  $C'_L > C'_D$  จะทำให้แรงดันกระจายไม่สม่าเสมอ ตรงกันข้ามดังเส้นกราฟ d คือ ลูกถ้วยใกล้ ๆ แขนรับพวงลูกถ้วยจะรับแรงดันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวิธีการทดลอง เพื่อศึกษาถึงปรากฏการณ์ การเกิดดิสชาร์จบางส่วน ( Partial Discharge ) โดยในการทดลองนี้จึงใช้วงจรการ ตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วนที่สะดวกที่สุด เนื่องจากอุปกรณ์ที่ให้ผลที่แน่นอนในการหาค่าดิส ชาร์จบางส่วนไม่สามารถที่จะจัดหาได้ ดังนั้นผลการทดลองและการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ จึง เป็นเพียงค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดเท่านั้น

5.2 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกรวยแฉก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกรวยแฉกเป็นลักษณะแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง โดยแบ่งเป็นส่วนของหน่วยควบคุมแรงดันไฟฟ้าทดสอบ รูปที่ 2 แยกออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันสูง รูปที่ 1 ทำให้ยกส่วนที่อันตรายให้อยู่คนละห้องกัน เพื่อความปลอดภัยระหว่าง ใช้งานของผู้ทดลอง

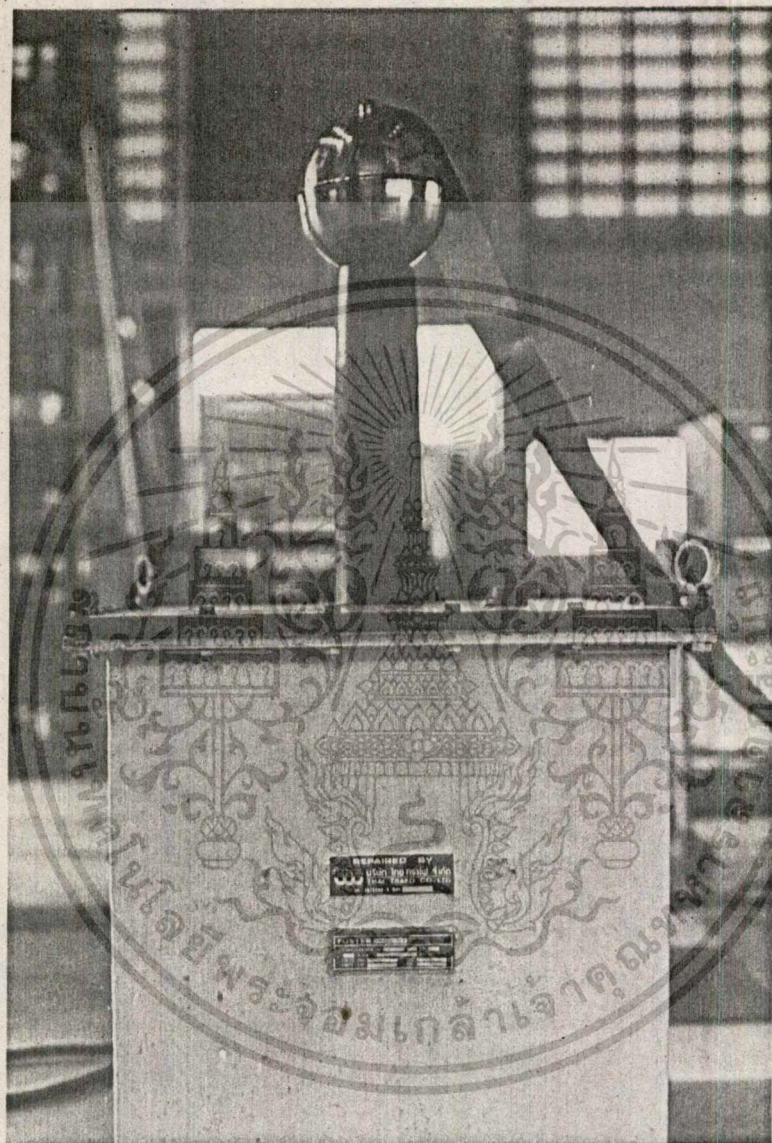
1.1 ส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงมีพิกัดใช้งานดังนี้

100 KV      1 เฟส      50 Hz      พิกัดกำลัง 5 KVA

Voltage Primary 235 V      Voltage Secondary 100 KV

Primary Current 22 A      Secondary Current 0.05 A

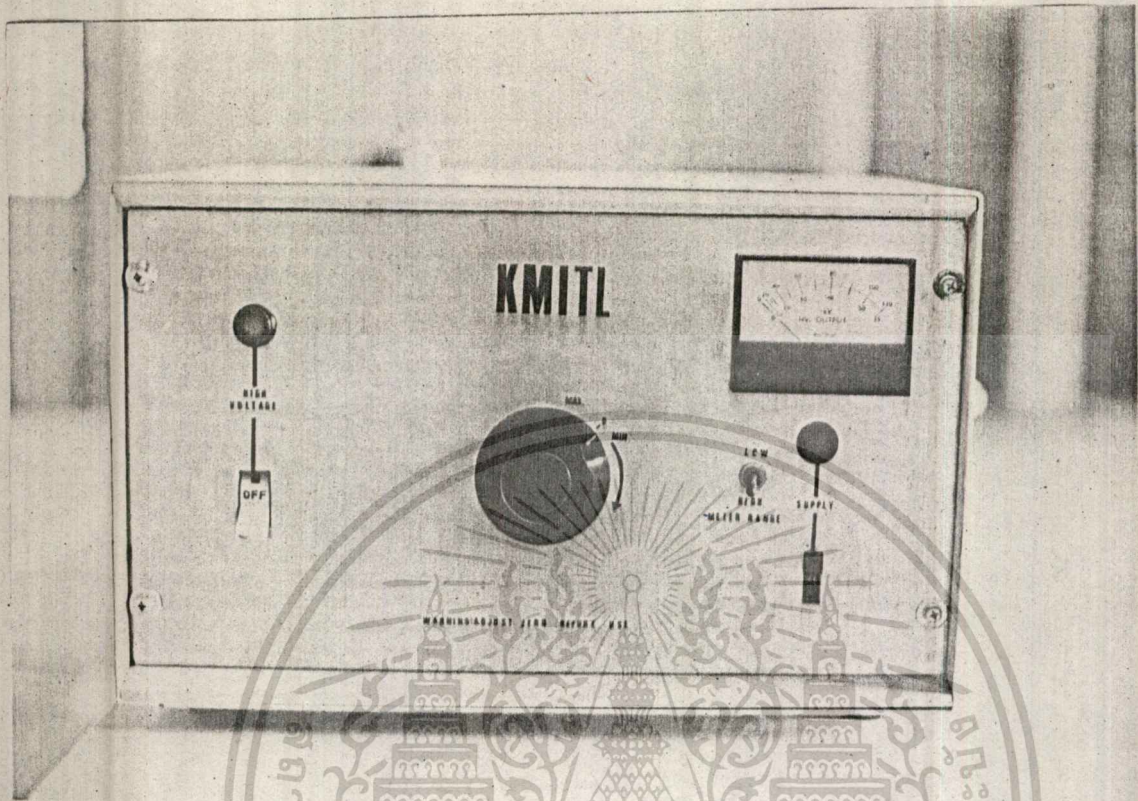
ขดลวดปฐมภูมิ ( primary winding ) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงจะได้รับการจ่าย ไฟจากหม้อแปลงอัตโนมัติ ( auto transformer ) ที่อยู่ในหน่วยควบคุมผ่านสายเคเบิล แรงดันต่ำ ทำให้แรงดันทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากศูนย์จนถึงค่าที่ต้องการปรับด้วย มือ และหลีกเลี่ยงผลของเซอร์จ ( surge ) อุปกรณ์ต่างกันได้รับการป้องกันโดยใช้เซอร์



รูปที่ 1 ส่วนผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

กิตเบรคเกอร์สายเดี่ยวชนิดอิลคโตรแมกเนติกตั้งเวลาตัดวงจรภายในเวลา 0.01 วินาที  
เมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 ส่วนควบคุมของเครื่องแรงดันสูงหระแลกลับ

1.2 ส่วนของหน่วยควบคุมแรงดันทดสอบมีพิกัดใช้งานดังนี้

50 Hz      220/240 V      1 เฟส      พิกัดกำลัง 5 KVA

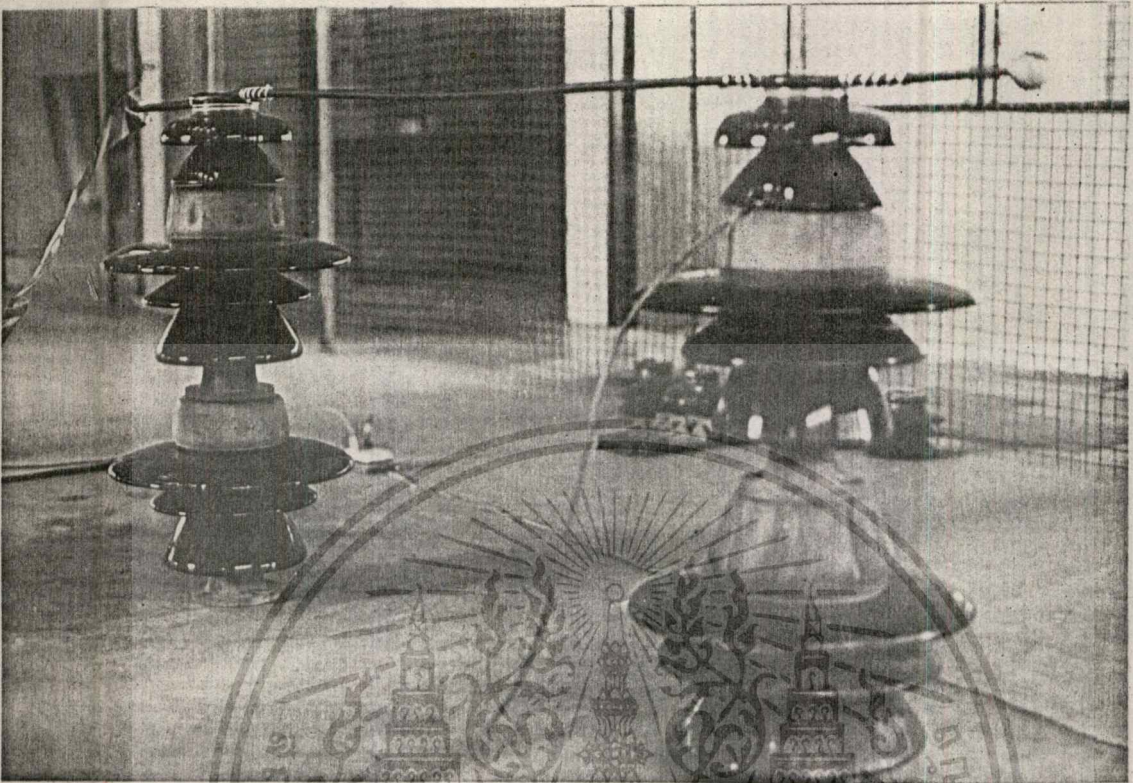
แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทจะอ่านได้จากมิเตอร์ส่วนนี้ ซึ่งมีสองสเกล โดยค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าของรูทมีนสแควร์ ( rms. ) โดยตรง สเกลแรกอ่านได้ถึง 55 KV สเกลที่สองอ่านได้ถึง 120 KV

2. สายตัวนำหุ้มฉนวน ( Partially Insulated Conductor )

ระบบพิกัดแรงดันสายสูงสุด      24 KV

พื้นที่หน้าตัดตัวนำ      30 ตร. มม.

ความหนาของฉนวน      2.45 มม.



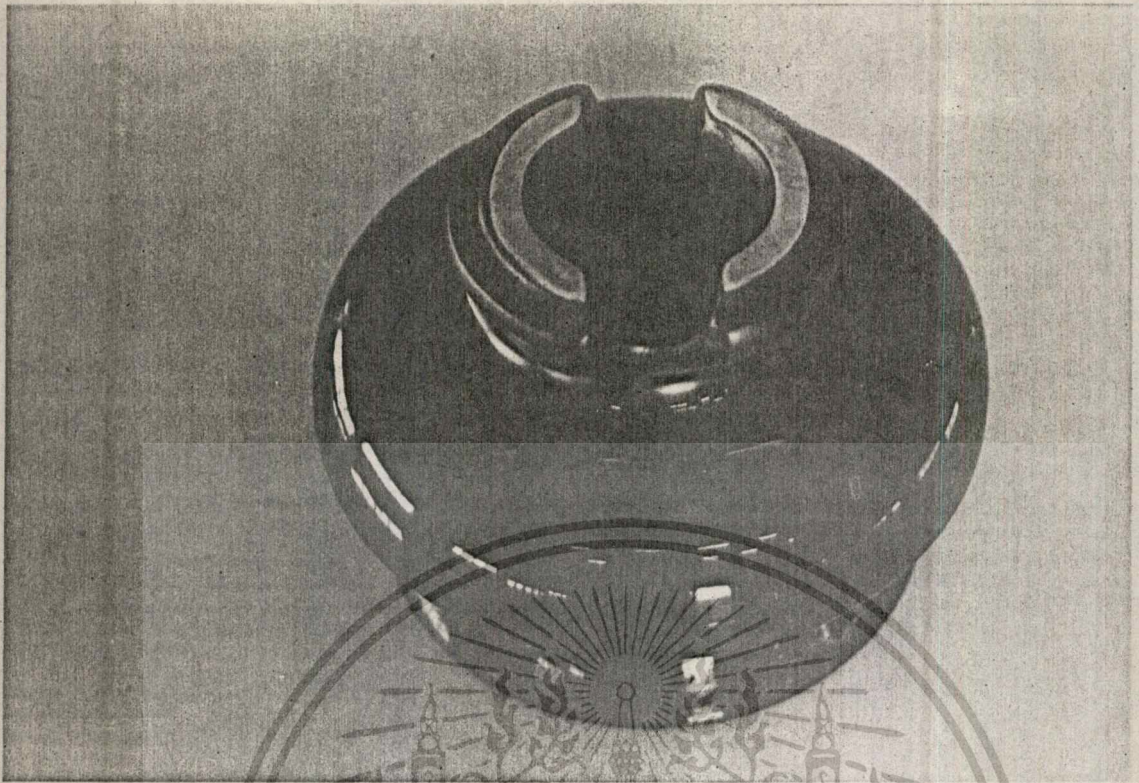
รูปที่ 3 แสดง สายตัวนำ, Tie Wire และ ชิดดีทองเหลือง

### 3. ลูกถ้วยฉนวน ( Insulator )

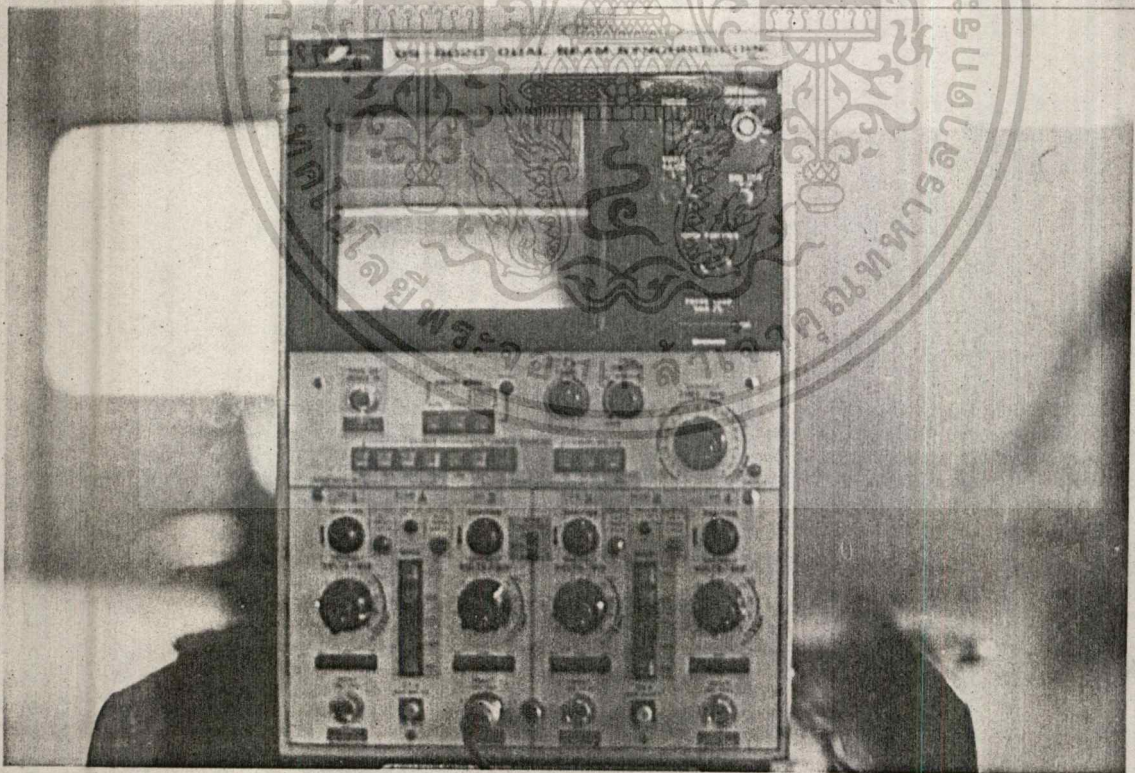
ลูกถ้วยฉนวนเป็นส่วนที่ใช้ในการรองรับสายตัวนำ ในระบบแรงดัน 24 KV จะใช้ลูกถ้วยฉนวนแบบก้านตรง ( Pin-Type Insulator ) ตามมาตรฐาน ANSI Class 56-2 ดังรูปที่ 4

### 4. Oscilloscope

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แสดงการเกิด Partial Discharge ในลักษณะของ Wave Form แบบ Sine - wave และ Ellipse ในการทดลองนี้จะใช้ Oscilloscope ขนาด 4 chanel พร้อมอุปกรณ์ถ่ายภาพ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ลูกถ้วยฉนวน



รูปที่ 5 Oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ลวดอลูมิเนียมพันสาย ( Tie Wire )

ลวดอลูมิเนียมพันสายหรือ Tie Wire เป็นลักษณะของอลูมิเนียมกลม ใช้สำหรับจับยึดสายตัวนำกับลูกถ้วยฉนวน

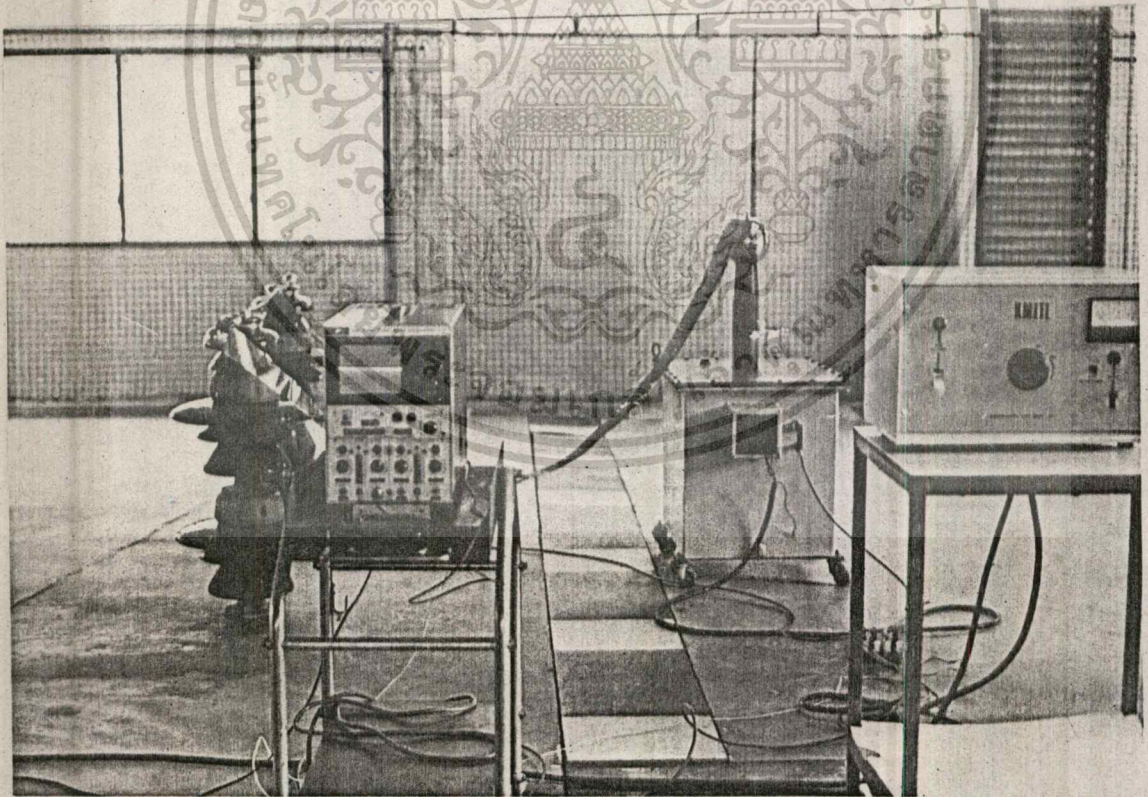
6. ซิลด์ทองเหลือง ( Shield )

ซิลด์ทองเหลืองนี้ จะใช้ส่วนหุ้มฉนวนปกสายทั้งสองด้าน เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาดีสชาร์จบริเวณปลายแหลมของสายตัวนำ

ซิลด์ทองเหลืองที่ใช้นี้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และเจาะรูสำหรับครอบสาย ลึก 1 1/2 เซนติเมตร ขนาดของรูเท่ากับขนาดของตัวนำ

7. สะพานไฟทองแดง

ใช้ทองแดงแผ่นกว้างทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง บ่อนให้กับสายตัวนำ สาเหตุที่ใช้ทองแดงแผ่นเป็นตัวนำก็เพื่อลดผลของโคโรนาดีสชาร์จ



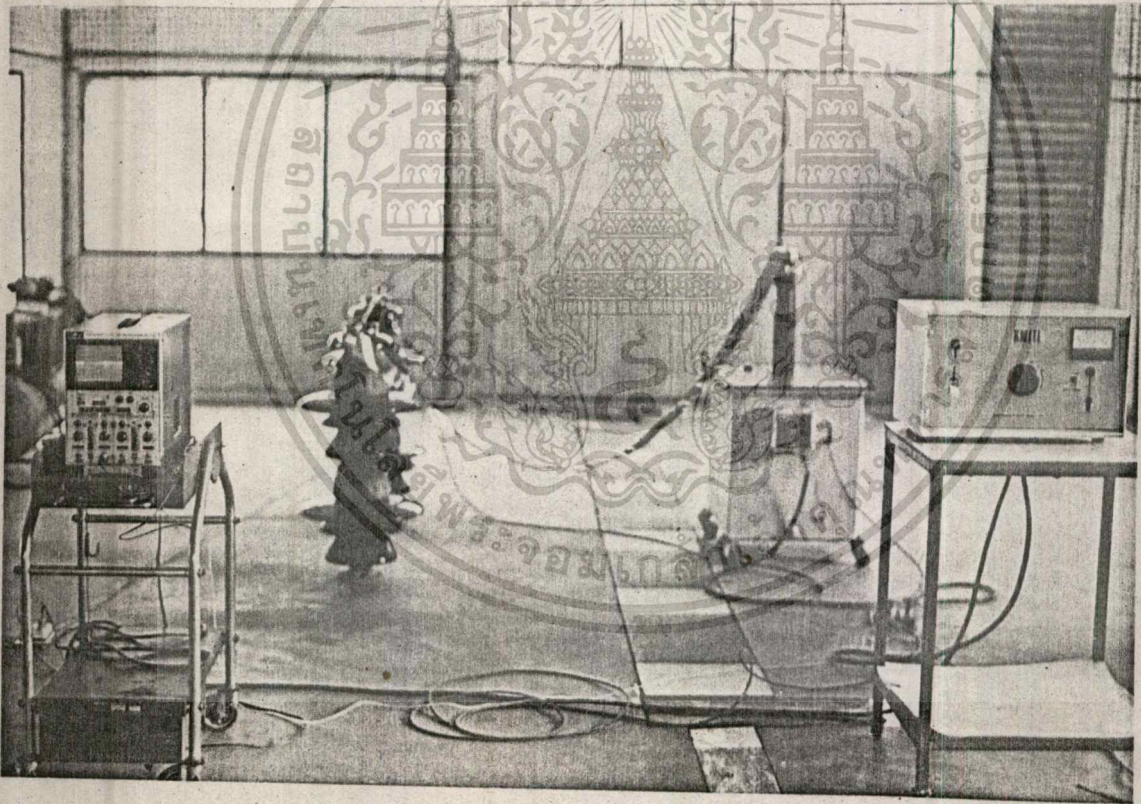
รูปที่ 6 อุปกรณ์การต่อทั้งหมดในกรรททดลอง

### 5.3 วิธีทดลอง

ในการทดลองศึกษา Partial Discharge บนสายตัวนำทั้งหมดงานนี้ จะศึกษาถึงผล  
การเกิด Partial Discharge บนสายตัวนำเมื่อไม่ทำการปลอกสายและ เมื่อทำการ  
ปลอกสายในบริเวณ Tie Wire ซึ่งแยกกั้นตอนการทดลองดังนี้

1. การทดลองวัด Partial Discharge บนสายตัวนำที่ไม่ปลอกกนวนของ  
สายบริเวณ Tie Wire

#### 1.1 ต่อวงจรทดลองดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การต่อวงจรทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 57 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ทำการป้อนแรงดันไฟกระแสสลับจากค่าต่ำๆ ไปหาค่าสูง โดยค่าแรงดัน

สูงสุดที่ทำกรป้อนแรงดัน จะมีค่าประมาณ 2 เท่า ของพิกัดแรงดันสาย

1.3 วัดค่าแรงดันที่ทำให้เกิด Partial Discharge พร้อมทั้งสังเกตลักษณะของรูปคลื่น ( Wave Form ) ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าไปโดยละเอียด

1.4 วิเคราะห์ผลและสรุป

1. การทดลองวัด Partial Discharge บนสายตัวนำที่ทำการปลอกฉนวน

ของสายบริเวณ Tie Wire

2.1 ต่อบางจรทดลองดังรูปที่ 7 แต่ให้ทำการปลอกฉนวนของสายบริเวณที่ถูก

Tie Wire พันยึดสายติดกับลูกถ้วย

2.2 ทำการทดลองดังการทดลองที่ 1.2 - 1.4 ตามลำดับ

3. การทดลองเพื่อศึกษาการเกิด Partial Discharge บนสายตัวนำหุ้ม

ฉนวน ณ จุดต่าง ๆ ของ กัวยรองรับ

3.1 ต่อบางจรทดลองดังรูปที่ 7

3.2 ทำการต่อกราวที่จุด A , B , C , D ของลูกถ้วยยังรูปที่และจุด พร้อมกับ

ป้อนแรงดันไฟ สังเกตค่าแรงดันสูงสุดที่จุดกราวต่าง ๆ ของลูกถ้วยที่ไม่ทำให้เกิด

Partial Discharge

3.3 วิเคราะห์ค่าแรงดันสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิด Partial Discharge ณ

จุดต่าง ๆ ของลูกถ้วย

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้ทำขึ้น โดยจะแบ่งการทดลองดังนี้

1. การทดลองวัด Partial Discharge บนสายตัวนำที่ไม่ปลอกฉนวนของ

สายบริเวณ Tie Wire

2. การทดลองวัด Partial Discharge บนสายตัวนำที่ทำการปลอกฉนวน

ของสายบริเวณ Tie Wire

3. ทำการทดลองหาค่าแรงดันสูงสุด ณ จุดต่าง ๆ บนลูกถ้วยทำให้เกิด

Partial Discharge บนสายตัวนำ

ผลการทดลองต่าง ๆ ที่ทดลองได้สามารถแสดงการเกิด Partial Discharge

โดยอาศัยลักษณะรูปคลื่นที่เกิดขึ้น ดังผลการทดลองต่อไปนี้

6.1 การทดลองวัด Partial Discharge บนสายตัวนำที่ไม่ปลอกฉนวนของสาย

บริเวณ Tie Wire

1. แรงดันไฟกระแสสลับ 10 KV

ผลการทดลอง



จากรูปคลื่นจะเห็นว่า ที่ค่าแรงดันไฟ 10 KV นั้น แรงดันที่วัดได้จะมีลักษณะ เป็น Sine-wave ที่ค่อนข้างสมบูรณ์แบบ ไม่มีผลของ Partial Discharge เกิดขึ้น

## 2. แรงดันไฟกระแสสลับ 24 KV

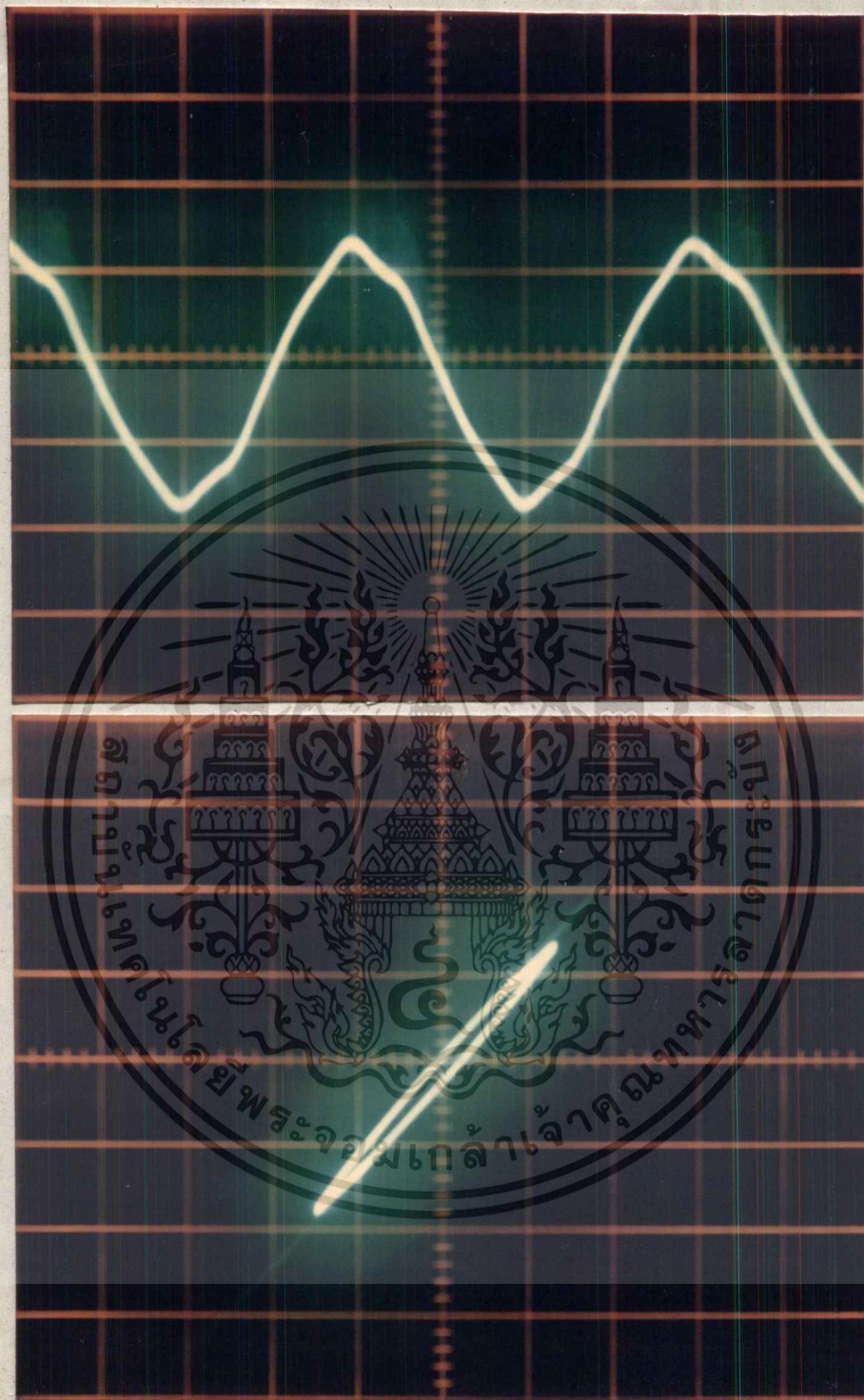
ผลการทดลอง



จากรูปคลื่นจะพบว่า ที่แรงดันไฟ 24 KV ซึ่งเป็นค่าแรงดันสูงสุดที่สายตัวนำ  
ทนได้ จะมีลักษณะเป็น Sine-wave ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ แต่มีผลของ Partial  
Discharge เกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจมีผลมาจากโคโรนาดีสชาร์จภายนอก

### 3. แรงดันไฟกระแสสลับ 30 KV

ผลการทดลอง



จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 30 KV ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดผิดที่ใด  
ของสายตัวนำแล้ว สายตัวนำจะเกิดปรากฏการณ์ Partial Discharge ขึ้น โดยสังเกต  
ได้จากบริเวณ Peak ของ Sine-wave จะเกิดมีลักษณะเป็นเส้นแตกออกมาจากรูปคลื่น  
หรืออาจสังเกตได้จากรูปคลื่น Ellipse ที่มีส่วน Spike บริเวณปลายคลื่น

#### 4. แรงดันไฟกระแสสลับ 35 KV

ผลการทดลอง



จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 35 KV ก็จะมีเส้นที่แตกที่ Peak ของรูปคลื่นมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

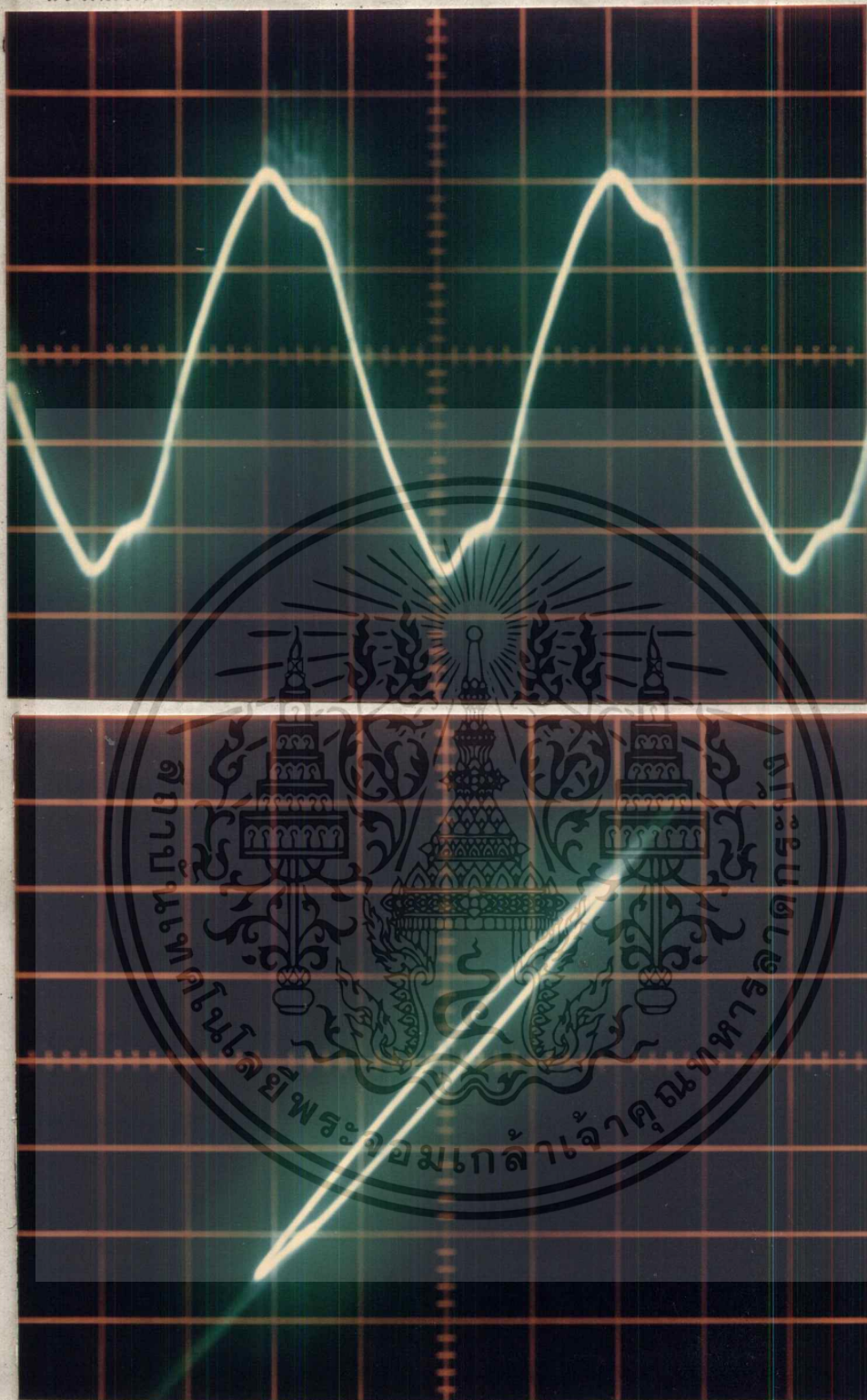
5. แรงดันไฟกระแสสลับ 40 KV

ผลการทดลอง



จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 40 KV จะเห็นว่าลักษณะลูกคลื่นที่ Peak นั้นจะเริ่มไม่เป็น Sine-wave และเส้นที่แตกออกมานั้นจะ เริ่มแผ่กว้าง เป็นแสง เรือง ซึ่งส่วนนี้จะ เป็นการสูญเสียที่ไม่พึงปรารถนา และในการทำการทดลองจะ เริ่มมีเสียงดังออกมาจากสาย

6. แรงดันไฟกระแสสลับ 45 KV



จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 45 KV ส่วนยอด Peak จะถูกตัดไปมากนั่นคือการสูญเสียมีค่ามากขึ้น โดยจะเห็นว่า เส้นที่แตกออกมานั้น เพิ่มขึ้นมากและจากคลื่น Ellipse จะมีเส้นพุ่งออกมาเป็นแสงและระหว่างที่ทำการทดลองจะได้ยินเสียงดังมากขึ้น

## 7. แรงดันไฟกระแสสลับ 50 KV



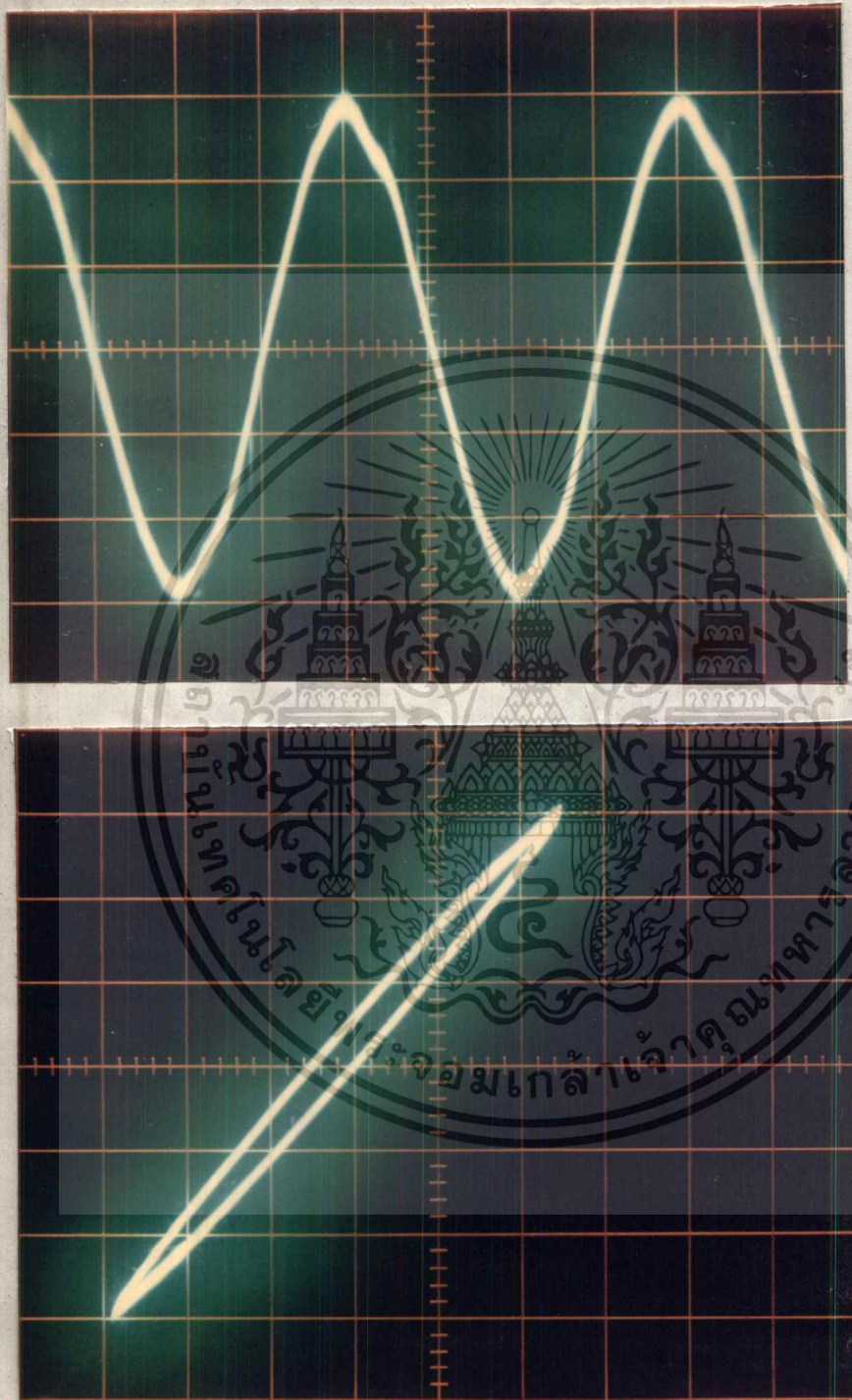
จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 50 KV ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่มีค่าสูง เป็น 2 เท่าของแรงดันสูงสุดของสายตัวนำ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณ Peak จะมีเส้นแตกออกมาจากรูปคลื่นมากจนดูเหมือนเป็นแผ่น และถ้าดูจากคลื่น Ellipse จะมีส่วน Spite พุ่งออกมาจากยอดคลื่นเป็นลำแสง และระหว่างทำการการทดลองจะได้ยินเสียงดังมาก

## 6.2 การทดลองวัด Partial Discharge บนสายตัวนำที่ทำกาบปลอกฉนวนของ

สายบริเวณ Tie Wire

### 1. แรงดันไฟกระแสสลับ 10 KV

ผลการทดลอง

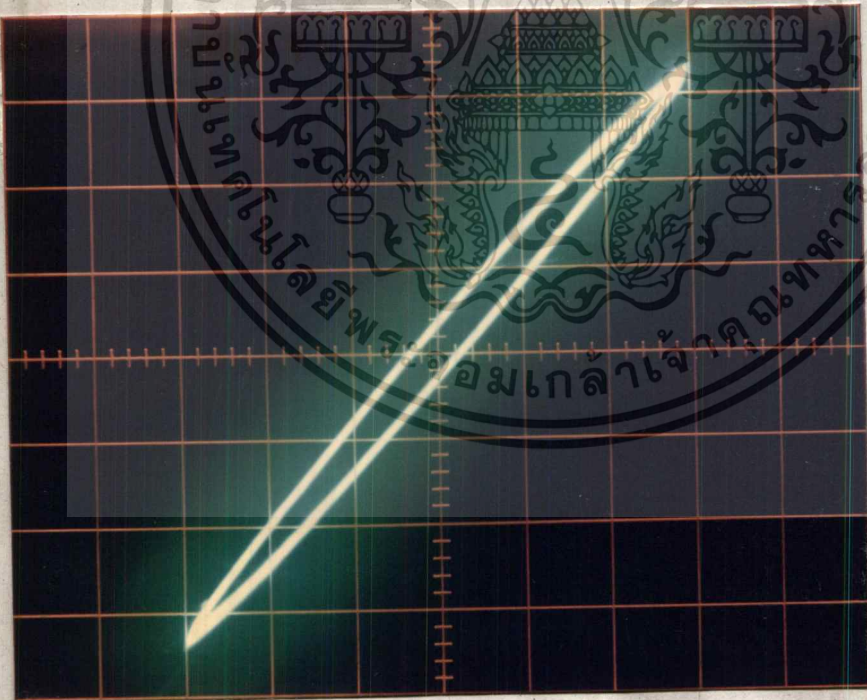
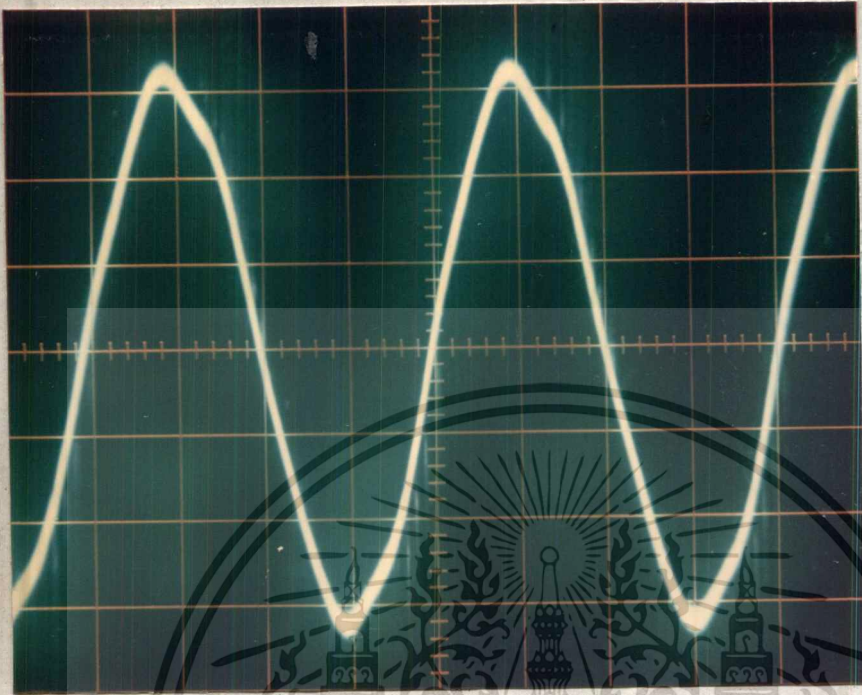


จากรูปคลื่นจะเห็นว่า ที่ค่าแรงดันไฟ 10 KV นั้น แรงดันที่วัดได้จะมีลักษณะเป็น Sine-wave ที่ค่อนข้างสมบูรณ์พอสมควรแต่มีผลของ Partial Discharge เกิดขึ้นเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ<sup>67</sup>งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แรงดันไฟกระแสสลับ 24 KV

ผลการทดลอง

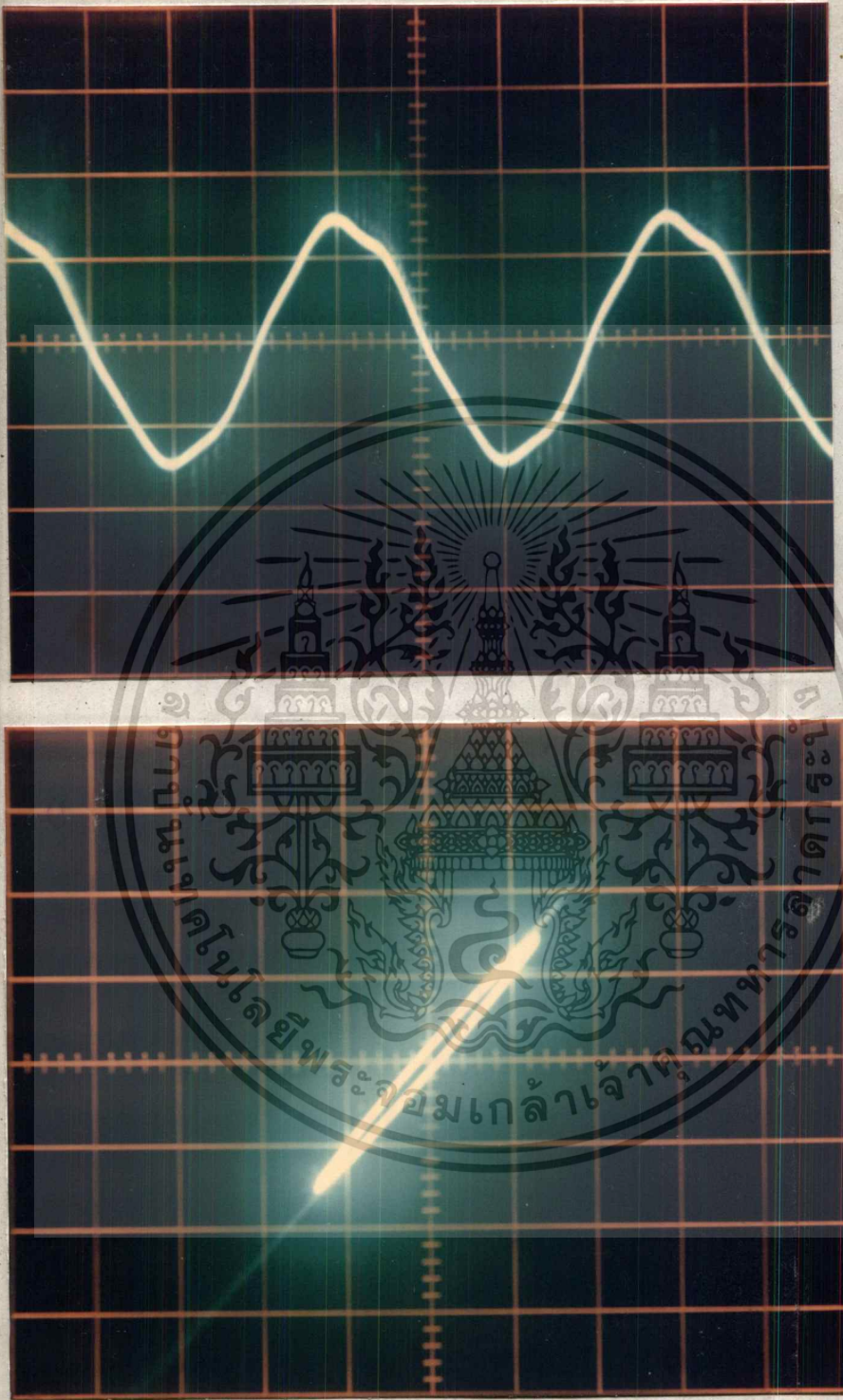


จากรูปคลื่นจะพบว่า ที่แรงดันไฟ 24 KV ซึ่งเป็นค่าแรงดันสูงสุดที่สายตัวนำ  
ทนได้ จะมีลักษณะเป็น Sine-wave ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ แต่มีผลของ Partial  
Discharge เกิดขึ้น ซึ่งอาจมีผลมาจากโคโรนาดีสชาร์จภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้<sup>68-</sup>เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น.อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

3. แรงดันไฟกระแสสลับ 30 KV

ผลการทดลอง

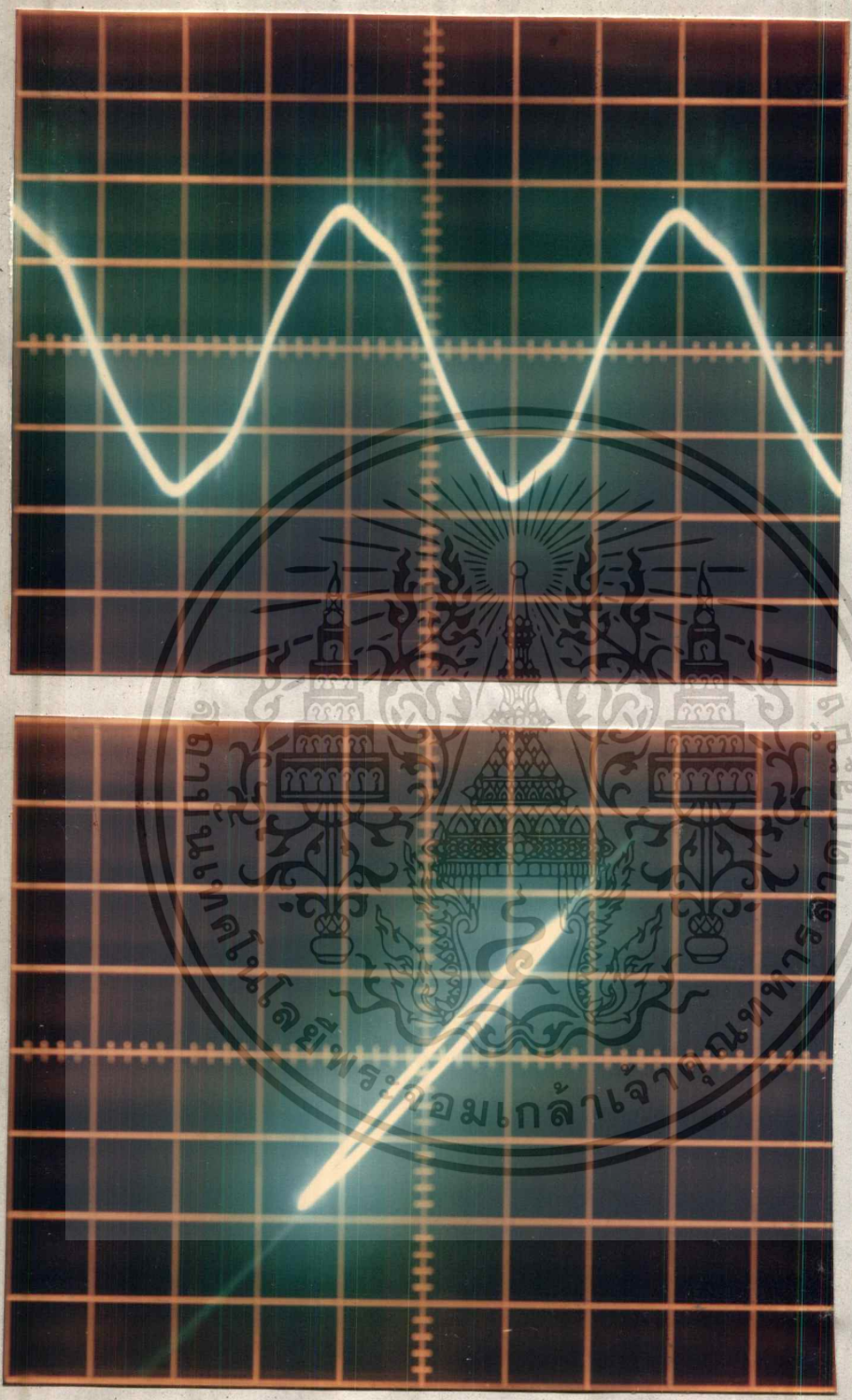


จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 30 KV ซึ่งเป็นแรงดันที่เกิดพิกัดของสายตัวนำแล้ว สิ่งที่ได้จากบริเวณ Peak ของ Sine-wave จะเกิดมีลักษณะเป็นเส้นแตกออกมาจากรูปคลื่นมากขึ้นและจากรูปคลื่น Ellipse ที่มีส่วน Spike บริเวณปลายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แรงดันไฟกระแสสลับ 35 KV

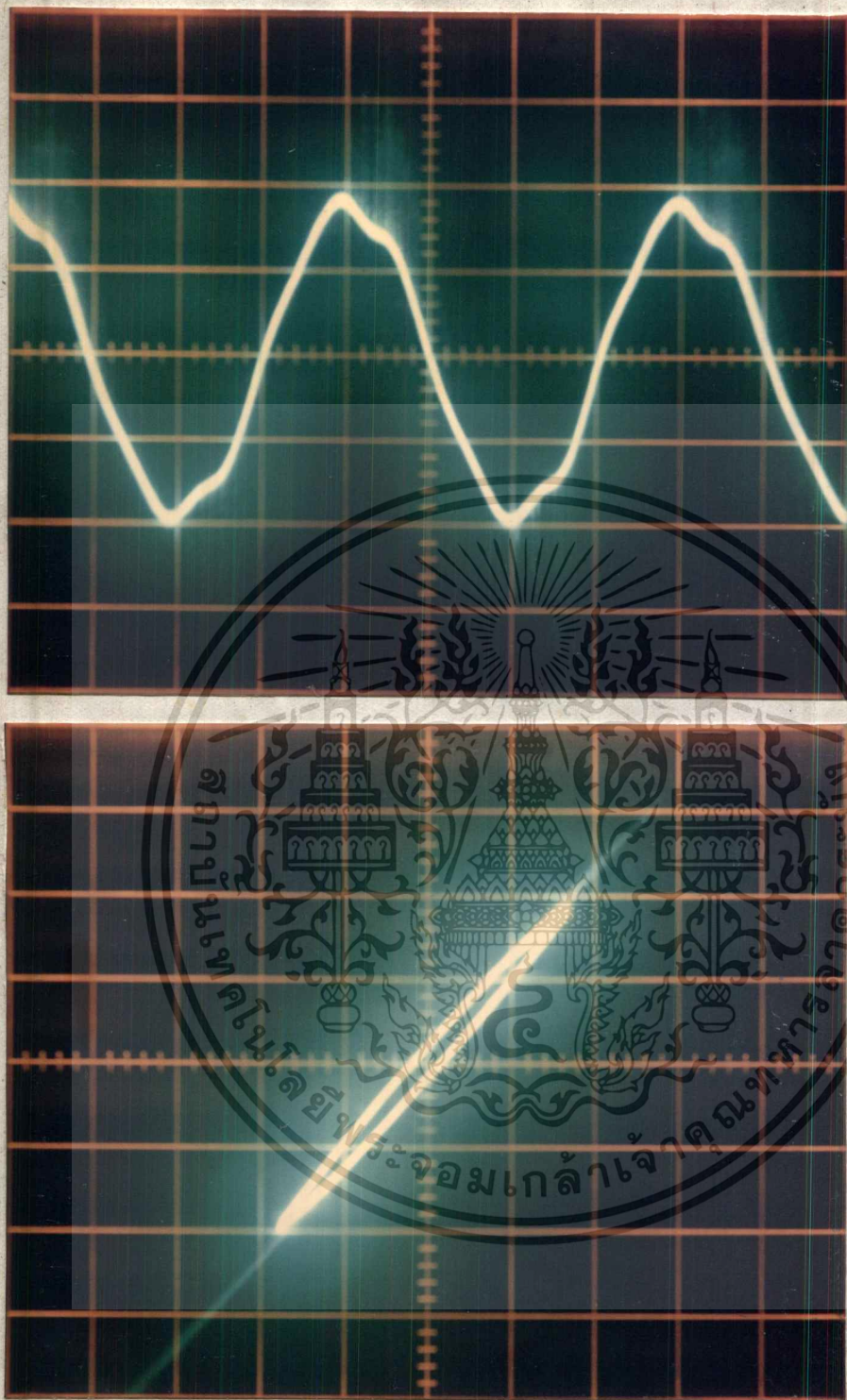
ผลการทดลอง



จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 35 KV ที่ Peak ของรูปคลื่นจะถูกตัดออกและเส้นที่แตกออกมาจะมีมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเริ่มเกิดปรากฏการณ์โคโรนามากขึ้น

5. แรงดันไฟกระแสสลับ 40 KV

ผลการทดลอง

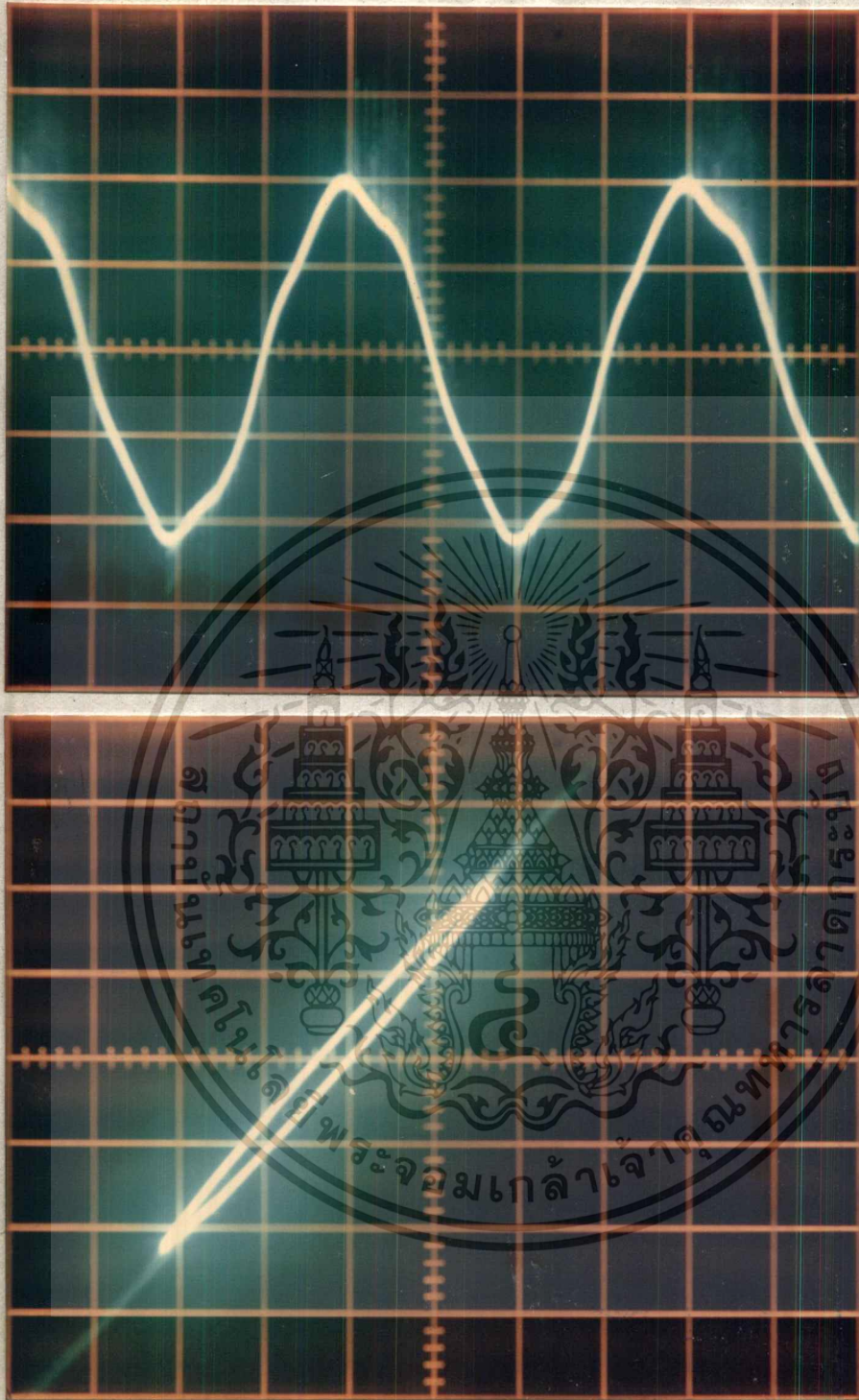


จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 40 KV จะเห็นว่าลักษณะลูกคลื่นที่ Peak นั้นจะเริ่มไม่เป็น Sine-wave และเส้นที่แตกออกมานั้นจะเริ่มแผ่กว้างเป็นแสงเรือง ซึ่งส่วนนี้จะ เป็นการสูญเสียที่ไม่พึงปรารถนา และในการทำการทดลองจะเริ่มมีเสียงดังออกมาจากสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แรงดันไฟกระแสสลับ 45 KV

ผลการทดลอง

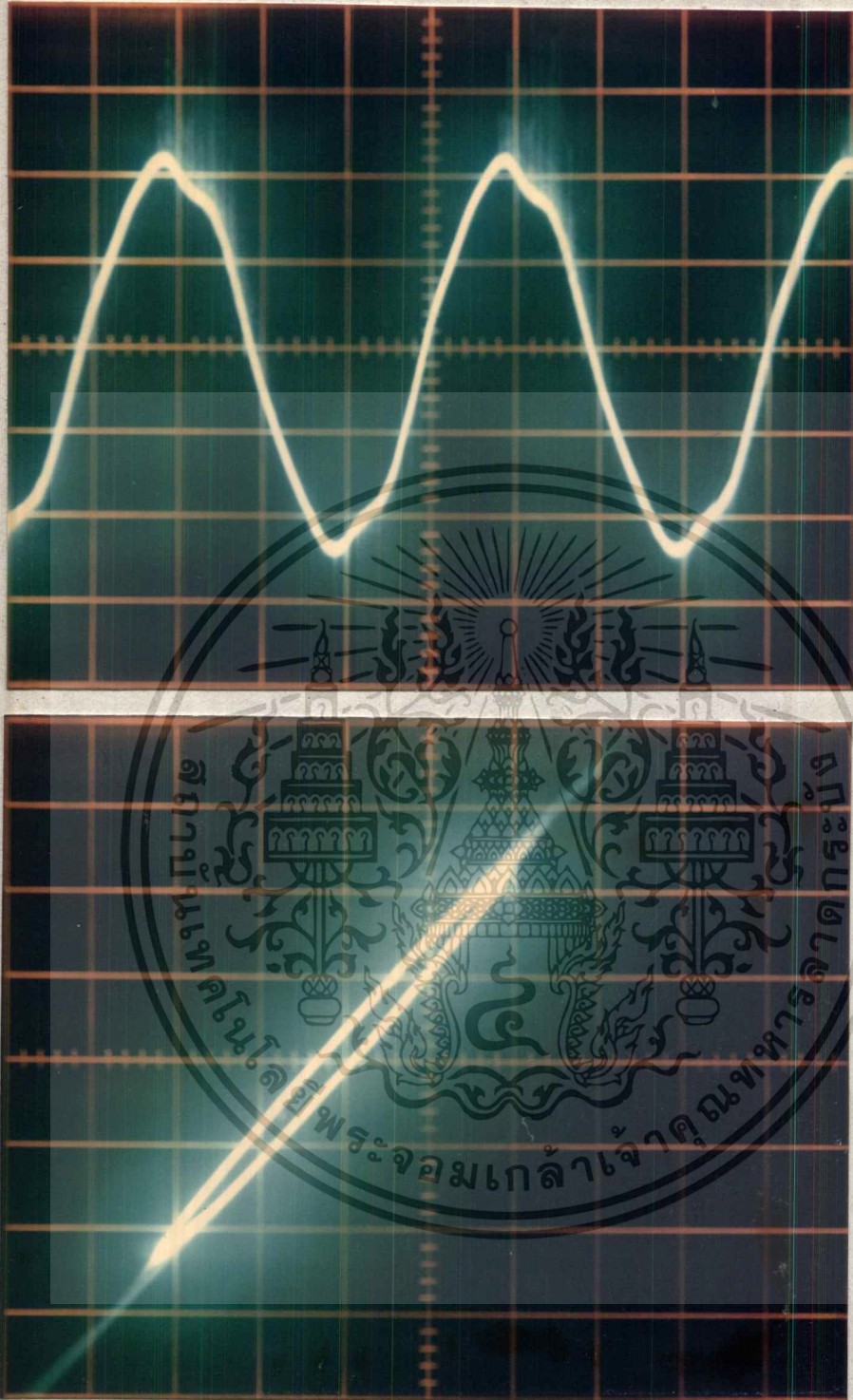


จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 45 KV ส่วนยอด Peak. จะถูกตัดไปมากนั่นคือการสูญเสียมีค่ามากขึ้น โดยจะเห็นว่าเส้นที่แตกออกมานั้นเพิ่มขึ้นมากและจากคลื่น Ellipse จะมีเส้นพุ่งออกมาเป็นแสงและระหว่างที่ทำการทดลองจะได้ยินเสียงดังมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

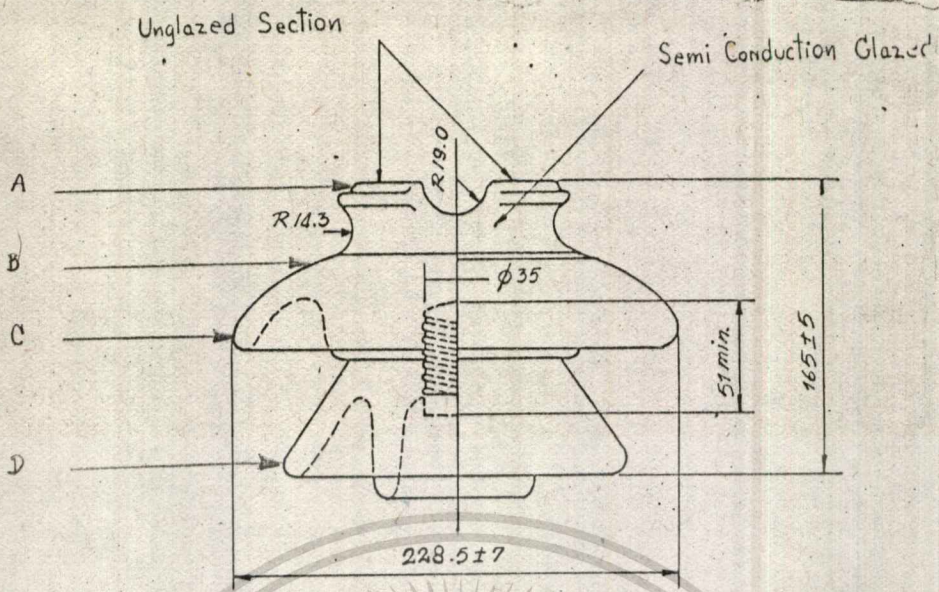
## 7. แรงดันไฟกระแสสลับ 50 KV

ผลการทดลอง



จากรูปคลื่นจะเห็นว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟ 50 KV ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่มีค่าสูง เป็น 2 เท่าของแรงดันสูงสุดของสายตัวนำ จะเห็นได้ว่าที่บริเวณ Peak จะมีเส้นแตกออกมาจากรูปคลื่นมากจนดูเหมือนเป็นแผ่น และถ้าดูจากคลื่น Ellipse จะมีส่วน Spite พุ่งออกมาจากยอดคลื่นเป็นลำแสง และระหว่างทำการทดลองจะได้ยินเสียงดังมาก

ถ้วยรองรับ



รูปแสดงจุด A , B , C และ D บนลูกถ้วยฉนวนรองรับ

6.3.1 ในกรณีที่ไม่ปลอกฉนวนของสายบริเวณที่พัน Tie Wire

จุด A (จุดที่ใกล้สายตัวนำมากที่สุด)

ค่าแรงดันวิกฤตที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Partial Discharge จะ

มีค่าต่ำสุด และเป็นระดับแรงดันที่น้อยมาก ๆ

จุด B

ค่าแรงดันวิกฤตที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Partial Discharge จะ

มีค่าสูงกว่าจุด A

จุด C

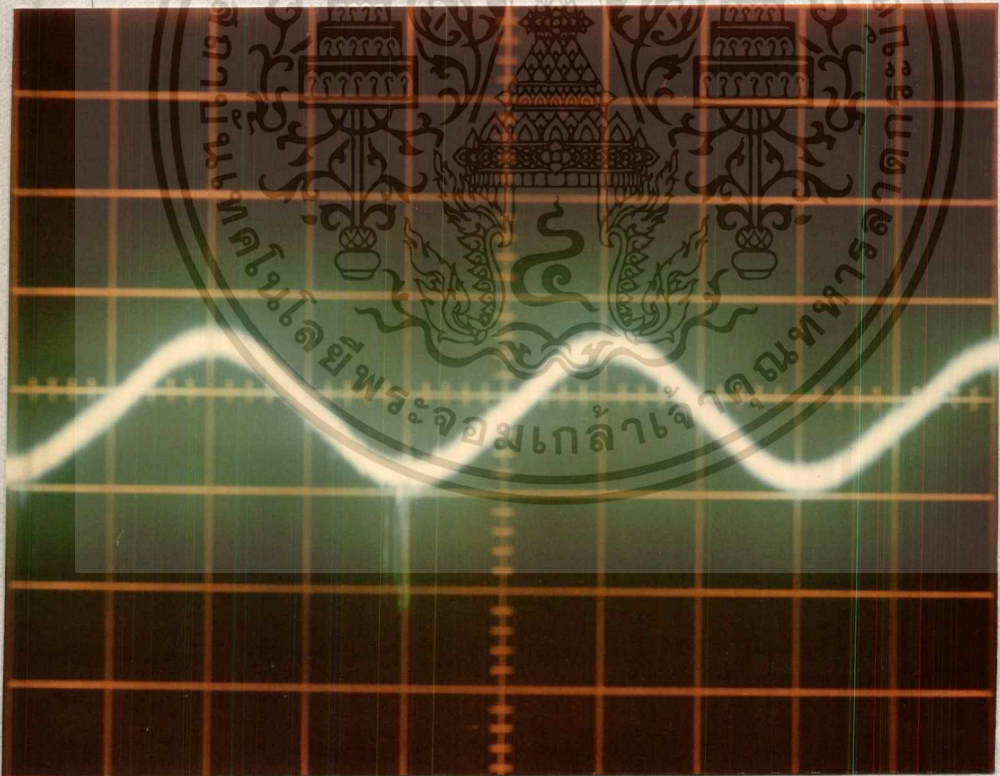
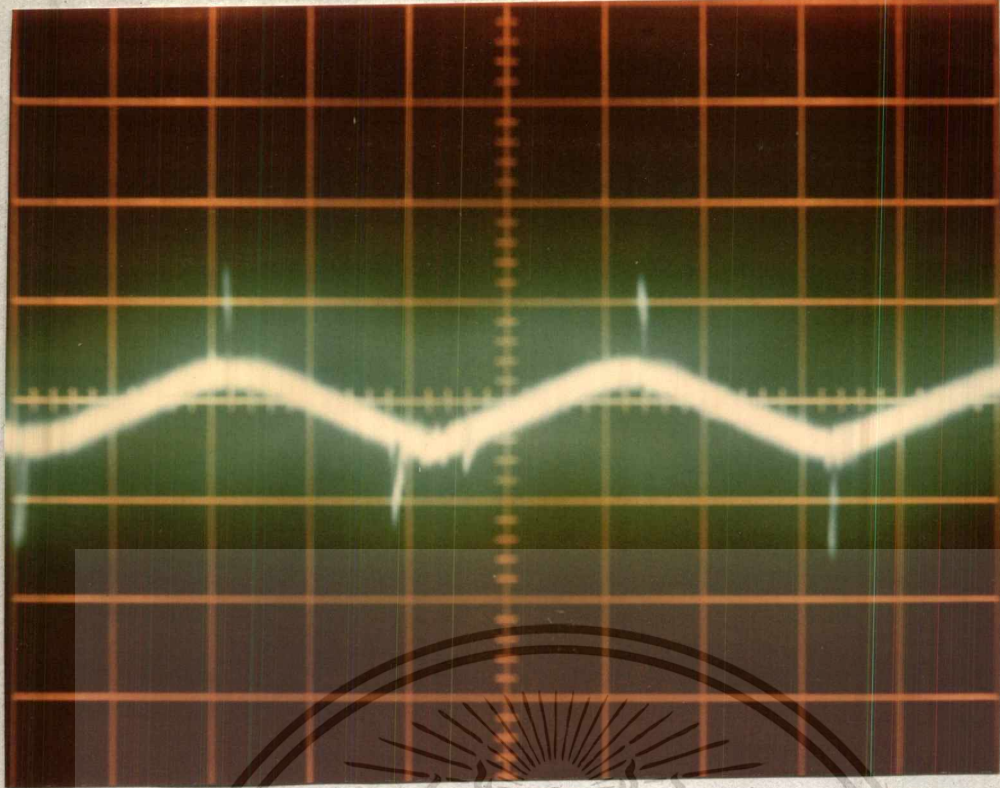
การเกิดปรากฏการณ์ Partial Discharge จะเกิดได้ยากขึ้น นั้น

คือค่าแรงดันวิกฤตที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้จะมีค่าสูงขึ้น

จุด D (จุดที่ใกล้สายตัวนำมากที่สุด)

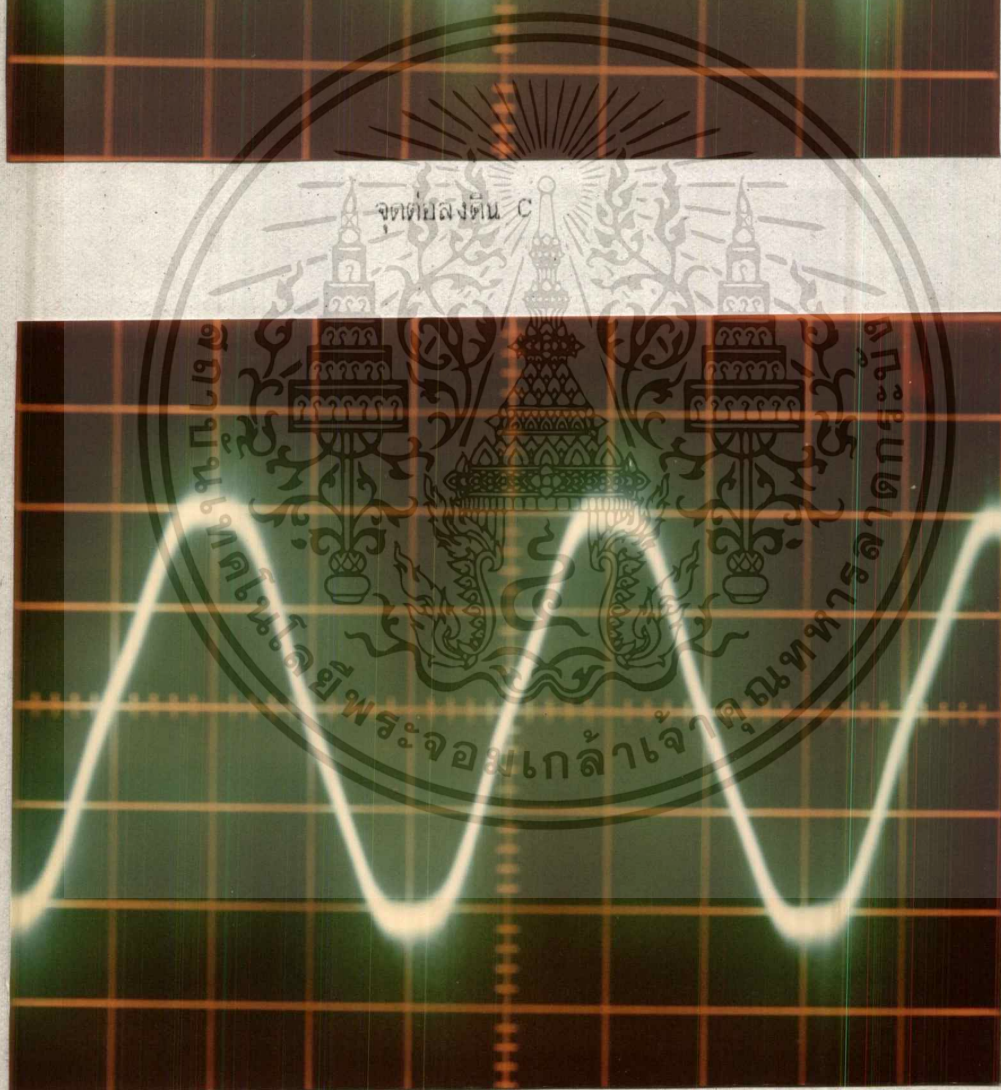
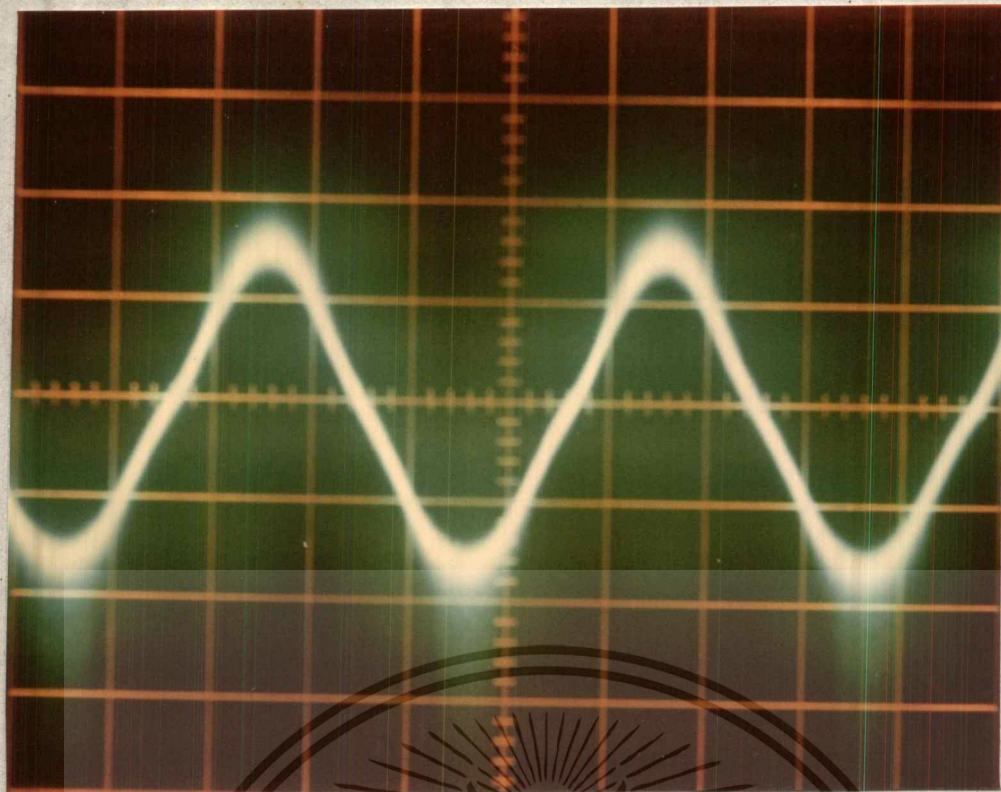
จุดนี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นจุดกราวด์ที่มีความสมบูรณ์ที่สุดของการเป็นฉนวนของลูกถ้วยรองรับ การเกิดปรากฏการณ์ Partial Discharge จะเกิดได้ยากที่สุด

นั่นคือค่าแรงดันวิกฤตที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้จะมีค่าสูงที่สุด



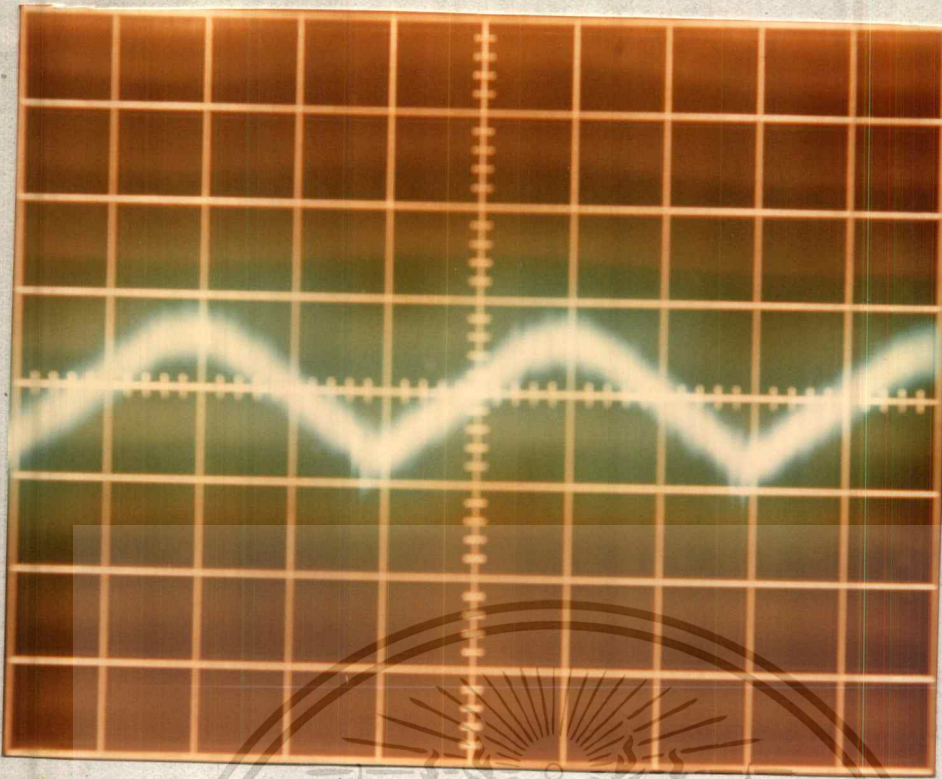
จุดต่อวงดิน B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

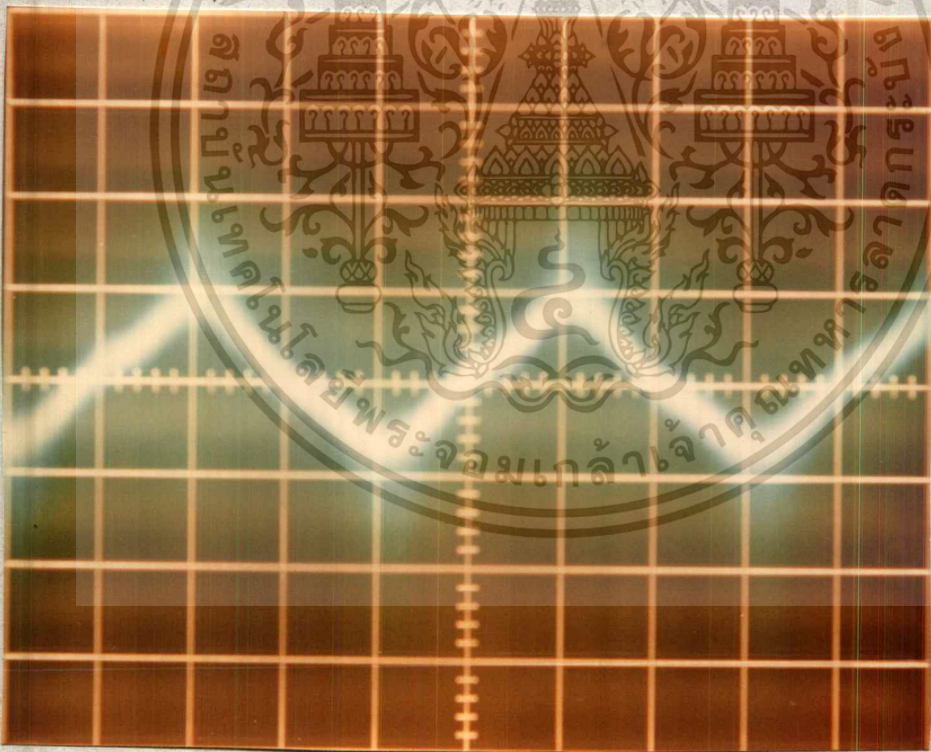


จุดต่อลงดิน D

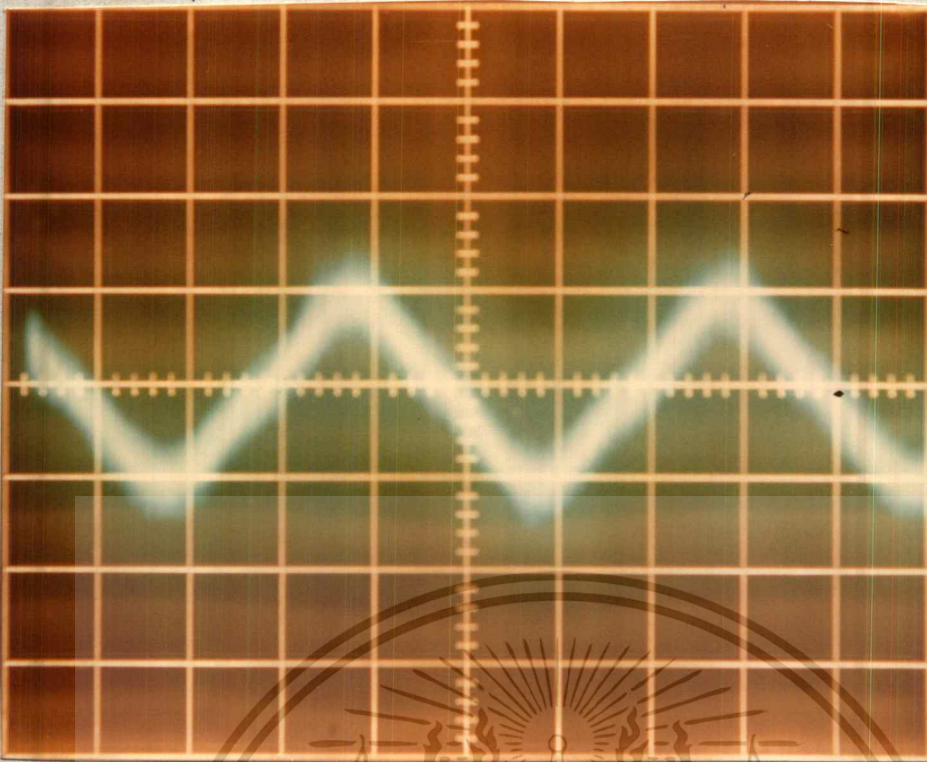
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



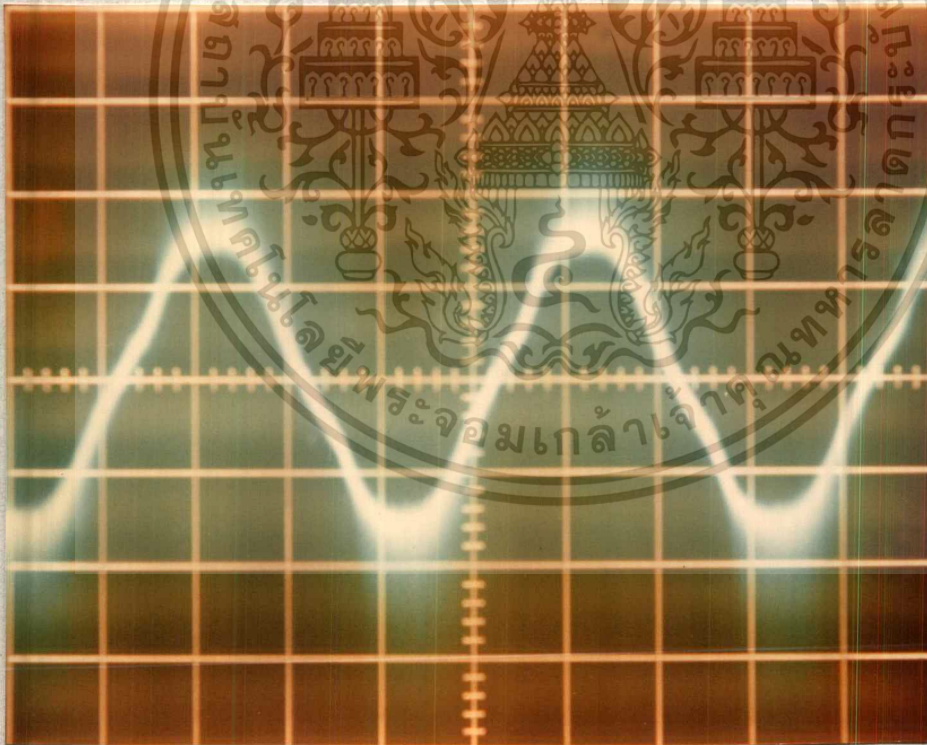
จุด A เป็นจุดที่มีความเป็นฉนวนต่ำที่สุดดังนั้นค่าแรงดันวิกฤติที่ทำให้เกิด Partial Discharge จะมีค่าต่ำสุด



จุด B ค่าความเป็นฉนวนจะสูงขึ้นดังนั้นค่าแรงดันวิกฤติที่ทำให้เกิด Partial Discharge จะมีค่าสูงกว่าจุด A



จุด C การเกิดปรากฏการณ์ Partial Discharge จะเกิดได้ยากขึ้น นั่นคือค่าความ  
เป็นลอนจะสูงขึ้น



จุด D จุดนี้จะเป็นจุดกราวนที่มีการเกิดปรากฏการณ์ Partial Discharge จะเกิดได้ยากที่สุด  
นั่นคือมีความสมบูรณ์ที่สุดของการ เป็นลอนของลูกถ้วยรองรับ

## สรุปและวิจารณ์

โครงการวิจัยการเกิด Partial Discharge บนสายตัวนำหุ้มฉนวนแบบ Partially Insulated Conductor ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงดัน 24 KV ดังที่ได้ทำการทดลองและเสนอผลการทดลองทั้งหมดดังที่กล่าวมาในบทข้างต้นแล้วนั้น สามารถที่จะวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองทั้งหมดได้ดังนี้

1. การเกิด Partial Discharge บนสายตัวนำหุ้มฉนวน จะพบว่าจุดแรงดันวิกฤติที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Partial Discharge ขึ้นนั้น จะเกิดที่ระดับแรงดันพิกัดของสายหุ้มคือที่ 24 KV การเริ่มเกิด Partial Discharge รูปคลื่นสัญญาณจะมีสัญญาณแทรกสอดในรูปคลื่นขึ้น

2. ปรากฏการณ์การเกิด Partial Discharge เมื่อเริ่มเกิดที่พิกัดแรงดันของสายตัวนำหุ้มฉนวนแล้ว เมื่อมีค่าของพิกัดแรงดันที่สูงกว่าระดับแรงดันพิกัดป้อนเข้ามาในระบบแล้ว การเกิด Partial Discharge จะเกิดมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งมีผลทำให้การสูญเสียในระบบมีค่ามากขึ้นตามด้วย

3. จากผลการทดลองศึกษาการเกิด Partial Discharge โดยการปลอกฉนวนของสายและไม่ปลอกฉนวนบริเวณที่สายตัวนำยึดติดอยู่กับลูกถ้วยฉนวนโดยใช้ Tie Wire นั้นจะพบว่าการเกิด Partial Discharge ในกรณีที่ไม่ปลอกฉนวนของสายจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าและมีความรุนแรงมากกว่าในกรณีที่ปลอกฉนวน เมื่อพิจารณาที่ระดับแรงดันเดียวกัน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้การเกิด Partial Discharge ในกรณีของการปลอกฉนวนของสายมีความรุนแรงน้อย ก็เนื่องมาจากเมื่อทำการปลอกฉนวนของสายแล้ว แรงดันที่ Tie Wire และเนื้อของตัวนำมีค่าเท่ากัน ทำให้ลดปัญหาการเกิด Partial Discharge ลงได้

4. การเกิด Partial Discharge นอกจากจะมีผลมาจากลักษณะของฉนวนของสายตัวนำแล้ว ลักษณะหรือความเป็นฉนวนของฉนวนรองรับ (ลูกถ้วย) ซึ่งเป็นจุดต่อลงดินของระบบก็ยังมีผลในการเกิด Partial Discharge ด้วย กล่าวคือ

ณ. จุดที่ต่อลงดินของลูกถ้วยฉนวนที่ใกล้สายตัวนำมากที่สุด (จุด A) การเกิดของ

Partial Discharge จะเกิดได้ง่ายที่สุด และปรากฏการณ์การเกิด Partial Discharge จะมีค่าแรงดันวิกฤติเพิ่มมากขึ้น เมื่อจุดต่อลงดินบนลูกถ้วยฉนวนอยู่ใกล้จากสายตัวนำมากขึ้น

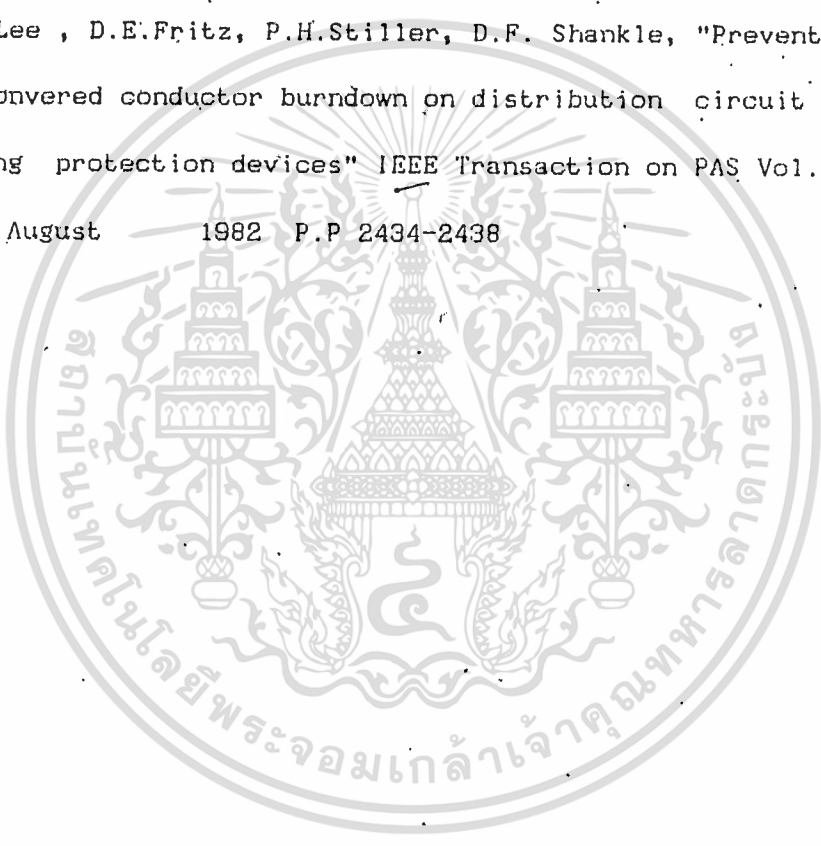
### สรุป

ปรากฏการณ์การเกิด Partial Discharge บนสายตัวนำทั้งหมดแบบ Partially Insulated Conductor จะเริ่มเกิดที่แรงดันวิกฤติที่มีค่าเท่ากับแรงดันพิกัดของสายตัวนำ และจะเกิดมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อแรงดันของระบบมีค่าสูงกว่าแรงดันพิกัดมาก เมื่อเกิดปรากฏการณ์ Partial Discharge นี้มาก ๆ ขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนสะสมและส่งผลให้เกิดการหลอมละลายของฉนวนหุ้มสาย จนอาจทำให้เกิดปัญหาช่องสายส่งกำลังไฟขาดลงได้ด้วย



## เอกสารอ้างอิง

1. สุกิจ เกียรติบุญศรี , " ปัญหาการใช้งานสายตัวนำหุ้มฉนวนแบบ Partially Insulated " , ากไฟฟ้านครหลวง
2. สุกานต์ อินทรครรชิต , "สายตตัวนำหุ้มฉนวนในระบบแรงดัน 12/24 KV" , การไฟฟ้านครหลวง
3. สำราญ สังข์สะอาด ดร. , "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527
4. Nain , M.S an Abdullah , " High - Voltage Engineering " Tata Mc - Graw - Hill Publshing , 1982
5. R.E.Lee , D.E.Fritz, P.H.Stiller, D.F. Shankle, "Prevention of Convered conductor burndown on distribution circuit - Arcing protection devices" IEEE Transaction on PAS Vol. 101 NO.8 August 1982 P.P 2434-2438



ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ อาจารย์จรงค์ บุญสิง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ในการทำการวิจัยโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ซึ่งให้ความอนุเคราะห์บางประการแก่ผู้จัดทำ

ขอขอบคุณ บริษัท เฟลท์คอตจ จำกัด ; บริษัท เอกรัฐวิศวกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทำการวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณการไฟฟ้านครหลวง ที่ให้คำแนะนำในด้านข้อมูล และรายละเอียดต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา



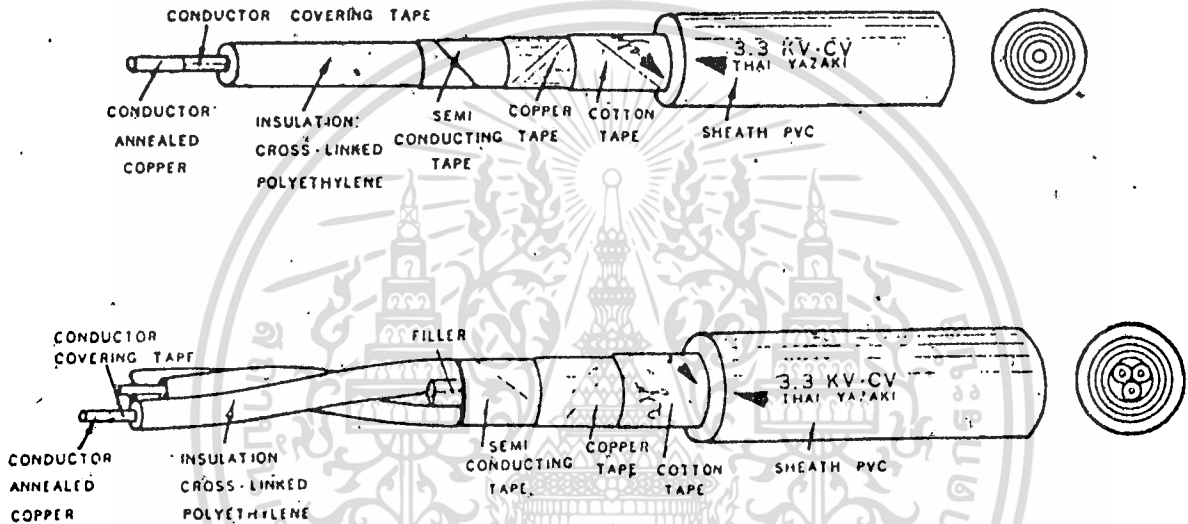


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### SECTION - 3 : HIGH VOLTAGE POWER CABLES.

#### 3-1 : 3.3KV-CV



### 3.3KV-CV : 3,300 V 90°C CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATED AND PVC SHEATHED POWER CABLE.

NUMBER OF CORE	:	Single and 3 cores.
CONDUCTOR	:	Concentric stranded annealed copper wires, sizes 6 mm <sup>2</sup> up to 300 mm <sup>2</sup> .
INSULATION	:	Cross-linked PE. Colour : Natural (Translucent). Core identification : Colour tape - White, Red, Blue.
SHEATH	:	PVC. Colour : Black.
SHIELD	:	Copper tape, thickness 0.1 mm.
CLASSIFICATION	:	Maximum conductor temperature 90°C. Circuit voltage not exceeding 3,300 volts.
TESTING VOLTAGE	:	9,000 volts.
REFERENCE STANDARD	:	JIS C-3606.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 3-1  
3.3 KV-CV

Nominal cross sectional area (mm <sup>2</sup> )	Number and diameter of wire (No/mm)	Mean value of insulation thickness (mm)	Mean value of sheath thickness (mm)	Approximate overall diameter (mm)	Maximum conductor resistance at 20°C (Ω/Km)	Minimum insulation resistance at 20°C (MΩ-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
6	7/1.04	2.5	1.7	13.0	3.020	3,000	65	200	300/D
10	7/1.35	2.5	1.7	13.5	1.790	3,000	90	250	300/D
16	7/1.70	2.5	1.8	15.0	1.130	2,500	115	330	300/D
25	7/2.14	2.5	1.8	16.5	0.712	2,500	155	440	300/D
35	7/2.52	2.5	1.9	17.5	0.514	2,000	190	560	300/D
50	19/1.83	3.0	2.0	20	0.379	2,000	230	760	300/D
70	19/2.14	3.0	2.0	22	0.262	2,000	285	960	300/D
95	19/2.52	3.0	2.1	24	0.189	1,500	350	1,250	300/D
120	37/2.03	3.0	2.2	26	0.150	1,500	405	1,530	300/D
150	37/2.25	3.0	2.2	27	0.122	1,500	460	1,810	300/D
185	37/2.52	3.5	2.3	30	0.0972	1,000	530	2,250	200/D
240	61/2.25	3.5	2.4	33	0.0740	1,000	630	2,860	200/D
300	61/2.52	3.5	2.5	36	0.0590	1,000	720	3,490	200/D
6	7/1.04	2.5	2.1	23	3.080	3,000	50	580	300/D
10	7/1.35	2.5	2.1	25	1.830	3,000	65	750	300/D
16	7/1.70	2.5	2.2	28	1.150	2,500	85	990	300/D
25	7/2.14	2.5	2.4	31	0.727	2,500	115	1,360	300/D
35	7/2.52	2.5	2.4	33	0.524	2,000	140	1,720	300/D
50	19/1.83	3.0	2.7	40	0.387	2,000	165	2,400	300/D
70	19/2.14	3.0	2.8	43	0.268	2,000	210	3,040	300/D
95	19/2.52	3.0	3.0	48	0.193	1,500	255	3,970	300/D
120	37/2.03	3.0	3.1	52	0.153	1,500	300	4,850	300/D
150	37/2.25	3.0	3.3	55	0.124	1,000	345	5,800	300/D
185	37/2.52	3.5	3.5	62	0.0991	1,000	400	7,250	200/D
240	61/2.25	3.5	3.7	68	0.0754	1,000	475	9,150	200/D
300	61/2.52	3.5	3.9	74	0.0601	1,000	545	11,170	200/D

D : Packing in drum.

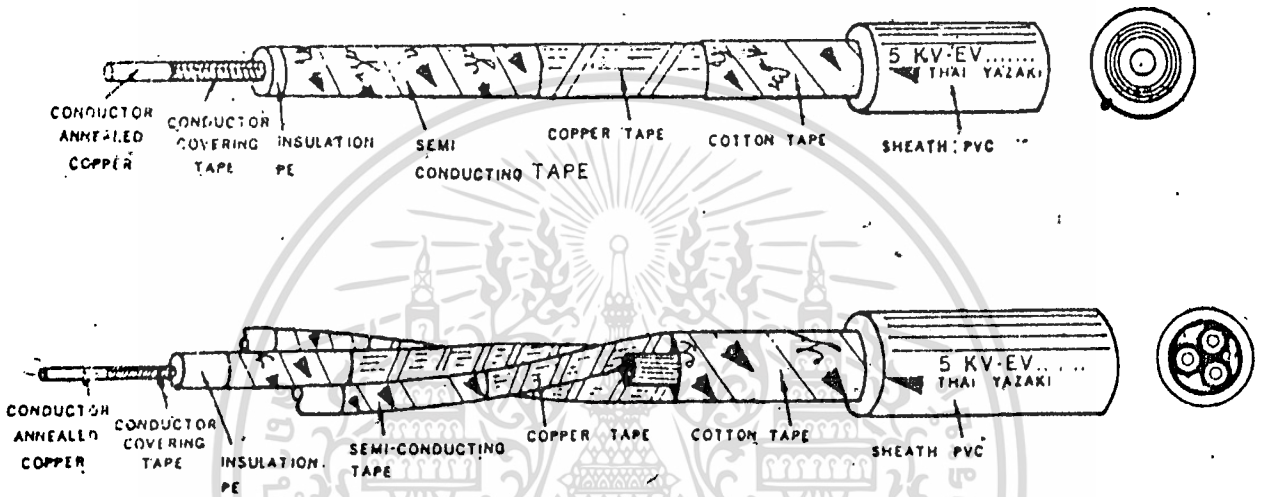
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

THAI YAZAKI ELECTRIC WIRE CO., LTD.



### SECTION - 3 : HIGH VOLTAGE POWER CABLES.

#### 3-2 : 5KV-EV



### 5 KV-EV : 5,000 V 75°C POLYETHYLENE INSULATED AND PVC SHEATHED POWER CABLE.

NUMBER OF CORE CONDUCTOR	:	Single and 3 cores.
	:	Concentric stranded annealed copper wires, sizes 10 mm <sup>2</sup> up to 500 mm <sup>2</sup> , for single core, and up to 300 mm <sup>2</sup> for 3 core.
INSULATION	:	PE.
	:	Colour : Natural (Translucent).
	:	Core identification : Coloured tape - White, Red, Blue.
SHEATH	:	PVC.
	:	Colour : Black.
SHIELD CLASSIFICATION	:	Copper tape, thickness 0.1 mm.
	:	Maximum conductor temperature 75°C.
	:	Circuit voltage not exceeding 5,000 volts.
TESTING VOLTAGE	:	13,000 volts.
REFERENCE STANDARD	:	IPCEA S 61-402.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TABLE 3-2**  
**5 KV-EV**

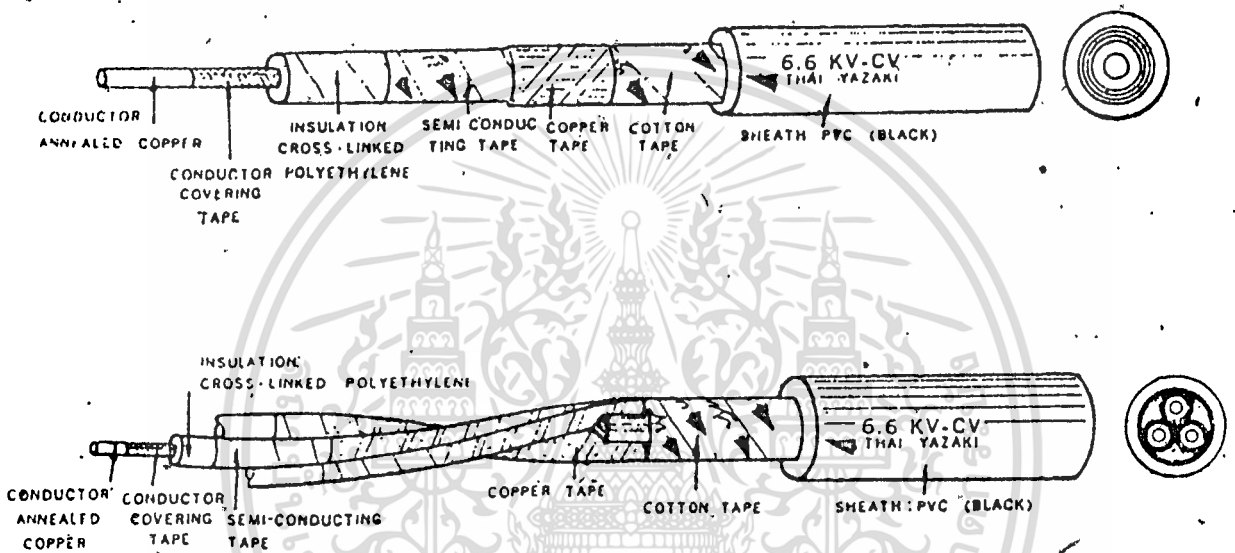
Nominal cross sectional area (mm <sup>2</sup> )	Number and diameter of wire (No./mm)	Mean value of insulation thickness (mm)	Mean value of sheath thickness (mm)	Approximate overall diameter (mm)	Maximum conductor resistance at 20°C (Ω/Km)	Minimum insulation resistance at 20°C (MΩ-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
10	7/1.35	2.29	1.14	13.0	1.790	5,000	75	230	300/D
16	7/1.70	2.29	1.52	15.0	1.130	4,000	100	330	300/D
25	7/2.14	2.29	1.52	16.0	0.712	3,500	130	440	300/D
35	7/2.52	2.29	1.52	17.5	0.514	3,000	160	550	300/D
50	19/1.83	2.29	1.52	19.0	0.379	2,500	195	720	300/D
70	19/2.14	2.29	1.52	20.0	0.262	2,000	245	910	300/D
95	19/2.52	2.29	2.03	23	0.189	2,000	300	1,240	300/D
120	37/2.03	2.29	2.03	25	0.150	1,500	345	1,500	300/D
150	37/2.25	2.29	2.03	26	0.122	1,500	395	1,780	200/D
185	37/2.52	2.29	2.03	28	0.0972	1,500	480	2,170	200/D
240	61/2.25	2.29	2.03	31	0.0740	1,000	570	2,730	200/D
300	61/2.52	2.29	2.03	33	0.0590	1,000	655	3,330	150/D
400	61/2.85	2.29	2.03	36	0.0448	1,000	755	4,200	150/D
500	61/3.25	2.29	2.03	40	0.0354	1,000	895	5,350	150/D
10	7/1.35	2.29	2.03	27	1.830	5,000	55	820	300/D
16	7/1.70	2.29	2.03	29	1.150	4,000	75	1,040	300/D
25	7/2.14	2.29	2.03	32	0.727	3,500	95	1,550	300/D
35	7/2.52	2.29	2.03	34	0.524	3,000	120	1,760	300/D
50	19/1.83	2.29	2.03	38	0.387	2,500	145	2,860	300/D
70	19/2.14	2.29	2.03	41	0.268	2,000	180	2,920	300/D
95	19/2.52	2.29	2.79	47	0.193	2,000	220	3,950	300/D
120	37/2.03	2.29	2.79	50	0.153	1,500	255	4,780	300/D
150	37/2.25	2.29	2.79	54	0.124	1,500	295	5,700	200/D
185	37/2.52	2.29	2.79	58	0.0991	1,500	340	6,920	200/D
240	61/2.25	2.29	2.79	63	0.0754	1,000	410	8,720	200/D
300	61/2.52	2.29	2.79	69	0.0601	1,000	470	10,650	150/D

D : Packing in drum.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## SECTION - 3 : HIGH VOLTAGE POWER CABLES.

### 3-3 : 6.6KV-CV



## 6.6KV-CV : CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATED AND PVC SHEATHED POWER CABLE.

NUMBER OF CORE	:	Single and 3 cores.
CONDUCTOR	:	Concentric stranded annealed copper wires, sizes 6 mm <sup>2</sup> up to 300 mm <sup>2</sup> .
INSULATION	:	Cross-linked PE. Colour : Natural (Translucent) Core identification : Colour tape - White, Red, Blue.
SHEATH	:	PVC. Colour : Black.
SHIELD	:	Copper tape, thickness 0.1 mm.
CLASSIFICATION	:	Maximum conductor temperature 90°C. Circuit voltage not exceeding 6,600 volts.
TESTING VOLTAGE	:	17,000 volts.
REFERENCE STANDARD	:	JIS C 3606.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TABLE 3 - 3**  
**6.6 KV-CV**

Nominal cross sectional area (mm <sup>2</sup> )	Number and diameter of wire (No/mm)	Mean value of insulation thickness (mm)	Mean value of sheath thickness (mm)	Approximate overall diameter (mm)	Maximum conductor resistance at 20°C (Ω/Km)	Minimum insulation resistance at 20°C (MΩ-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
6	7/1.04	4.0	1.7	16.0	3.020	5,000	65	270	300/D
10	7/1.35	4.0	1.7	16.5	1.790	4,000	91	330	300/D
16	7/1.70	4.0	1.8	18.0	1.130	3,000	120	410	300/D
25	7/2.14	4.0	1.8	19.5	0.712	3,000	155	530	300/D
35	7/2.52	4.0	1.9	20	0.514	3,000	190	650	300/D
50	19/1.83	4.0	2.0	22	0.379	2,000	230	830	300/D
70	19/2.14	4.0	2.0	24	0.262	2,000	285	1,030	300/D
95	19/2.52	4.0	2.1	26	0.189	2,000	350	1,330	200/D
120	37/2.03	4.0	2.2	28	0.150	1,500	405	1,610	200/D
150	37/2.25	4.0	2.2	29	0.122	1,500	460	1,900	200/D
185	37/2.52	4.5	2.3	32	0.0972	1,500	525	2,350	150/D
240	61/2.25	4.5	2.4	35	0.0740	1,000	625	2,970	150/D
300	61/2.52	4.5	2.5	38	0.0590	1,000	720	3,610	150/D
6	7/1.04	4.0	2.1	31	3.080	5,000	50	860	300/D
10	7/1.35	4.0	2.1	33	1.830	4,000	70	1,060	300/D
16	7/1.70	4.0	2.2	35	0.150	3,000	90	1,310	300/D
25	7/2.14	4.0	2.4	38	0.727	3,000	115	1,730	300/D
35	7/2.52	4.0	2.4	41	0.524	3,000	140	2,100	300/D
50	19/1.83	4.0	2.7	45	0.387	2,000	170	2,710	300/D
70	19/2.14	4.0	2.8	48	0.268	2,000	215	3,400	300/D
95	19/2.52	4.0	3.0	53	0.193	2,000	265	4,360	200/D
120	37/2.03	4.0	3.1	57	0.153	1,500	305	5,250	200/D
150	37/2.25	4.0	3.3	60	0.124	1,500	350	6,230	200/D
185	37/2.52	4.5	3.5	67	0.0991	1,500	400	7,690	150/D
240	61/2.25	4.5	3.7	73	0.0754	1,000	475	9,660	150/D
300	61/2.52	4.5	3.9	79	0.0601	1,000	550	11,710	150/D

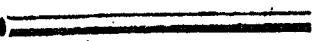



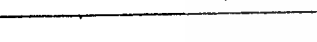





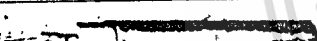
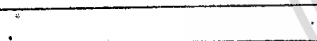
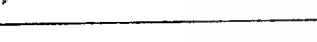




D : Packing in drum.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลึกทั้งห้าฉบับให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

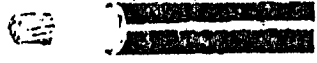











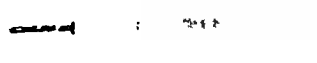


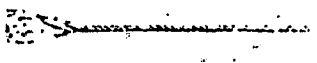
**THAI YAZAKI ELECTRIC WIRE CO., LTD**

## SUMMARY

	Type	Designation	Maximum Operating Temperature	Remarks
		Copper rod and wire Aluminum rod and wire		Redraw Rod and wire
	CSC ASC ACSR	Bare copper stranded conductor All aluminum strand and ACSR		Aerial power transmission & distribution
	WP	Line wire, weather-proof wire	75°C	Aerial power transmission and distribution
	PDW	PVC insulated Cable	60°C	Building wires & cables Dry and wet location
	PDHW	PVC insulated Cable	75°C	Building wires and cables Dry and wet location
	PD9F PD18F	PVC insulated Cable	60°C	General purpose
	MTW PDHW MTW	Machine tool wire	90°C 105°C	Machine tools, control and Switch-board wiring
	NM	Nonmetallic sheathed cable	60°C	For wiring houses, rural buildings, shop's, small stores
	UF	Underground feeder cable	60°C	Underground feeder and branch circuit cable for direct burial
	PDY	Single & Multi Core cable	60°C	Underground direct burial cable
	SEC	Service Entrance Cable.	90°C	Service Entrance for Metropolitan Electricity Authority (MEA)
	SPT	Flexible cords cable	60°C	Lamp cords, radio & electric Appliances
	GSW	Galvanized Steel strand		Messenger, Support and Guy wire applications
	MEA A	Service Wire Single Core Cable	75°C	For aerial installation in dry location
	MEA B	Service Wire Single & Two Core Cable	75°C	For fixed installation in damp location, direct laying in plaster
	MEA C	Service Wire Single & Multi Core Cable	75°C	For underground direct burial cable
	IN	Interior Telephone Cable		PP. or PE. Insulated, PVC. Jacketed, up to 300 pairs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Type	Designation	Maximum Operating Temperature	Remarks
	FAA	Airport lighting cable 3 KV 5 KV	75°C 90°C	Polyethylene Crosslinked polyethylene
	HPEP	Plastic Insulated power cable	75°C	Polyethylene cable up to 15KV
	HXLP	XLPE Insulated power cable	90°C	Crosslinked polyethylene up to 69 KV
	URD	Under ground residential distribution cable	75°C 90°C	Polyethylene Crosslinked polyethylene up to 35KV
	SAC	Spaced Aerial Cable	90°C	Aerial Power transmission and distribution
	CTC	Control cable	75°C 60°C	PVC or Polyethylene insulation PVC sheath
	FA	Figure 8 Exchange Area Telephone cable		Alpeth type, per REA Specification, aerial, up to 300 pairs.
	AP-FSE EA EB	Exchange Area Junction Telephone cable		Alpeth and FSF PER REA Specification, duct and direct burial up to 3000 pairs
	PCM	Exchange Area Telephone Cable		Alpeth and FSF PER REA Specification, duct
	LPEP LXLP	Low voltage Power cable copper & aluminum	75°C 90°C	Polyethylene Crosslinked polyethylene for low voltage application
	SDC-DU SDC-TR SDC-QU	Multiplex cable, aluminum	75°C	Low-voltage power distribution
	BTC	Battery cable		Automobile,—truck—, motor starter cable
	AMC	Automotive wires	105°C	Automotive light and hook up wires
	AF	Antenna Feeder		Antenna Feeder
	WDC	Welding cable		Extra flexible welding cable
	GDW	Copper grounding cable		For Grounding Application

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

สายไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าชนิดภาคเตา

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสายเปลือย

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสายไฟฟ้า	ความนำไฟฟ้า (%)	ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20° ซ.		สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่ 20° ซ.	ความหนาแน่นที่ 20° ซ. (กรัม/ลบ.ซม.)	แรงดึง (กก./มม. <sup>2</sup> )	จุดยึด (กก./มม. <sup>2</sup> )	สัมประสิทธิ์ยึด (กก./มม. <sup>2</sup> )	จุดหลอมเหลว (° ซ.)	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามยาว (/องศา)	ความร้อนจำเพาะ
		ทางปริมิต (ม.ค.ซ.ม.)	ทางมวล (กิโลกรัม)								
international standard annealed copper	100	1.7241	0.15328	0.00393	8.89	-	-	-	1.083	0.000017	0.094
annealed copper wire	101-97	1.7070 1.7774	0.15176 0.15802	0.00397 0.00381	8.89 8.89	25-29.5	4.2-11.2	5.000-12.000	-	0.000017	-
hard-drawn copper wire	98-96	1.7593 1.7958	0.15641 0.15967	0.00385 0.00377	8.89	34-48	17.5-31.5	9.000-12.500	-	0.000017	-
cadmium copper wire	85	2.0284	0.18033	0.00334	8.89	50-65	28-42	10.000-13.000	-	0.000017	-
silicon bronze wire	50	3.4482	0.30656	0.00197	8.89	50-70	28-45	10.000-13.000	-	0.000017	-
hard-drawn copper	45	3.8313	0.34062	0.00177	8.89	34-50	17.5-31.5	9.000-12.500	-	0.000017	-
silver alloy wire	96	1.7958	0.15967	0.00381	8.89	70-90	40-58	11.000-13.000	-	0.000017	-
copper nickel-silicon alloy wire	45	3.8313	0.34062	0.00177	8.84	-	-	-	-	-	-
aluminum wire	61	2.8265	0.76462	0.0040	2.70	15-17	abt 9.8	abt 6.300	658.7	0.000023	0.212
hard-drawn aluminum alloy wire	52	3.3156	0.89519	0.0036	2.70	31.5 min.	abt 20	abt 7.000	-	0.000023	-
thermal resistant aluminum alloy wire	58	2.9726	0.80415	0.0039	2.70	15-18	abt 9.8	abt 6.500	-	0.000023	-
iron wire	16	10.3-13	-	0.0063	-	35-45	-	15.500	-	0.000012	0.113
galvanized iron wire	13	13.262	10.3457	0.005	7.80	35-45	17.5-39.5	17.500-20.500	abt 1.400	0.000012	-
galvanized steel wire	12-8	-	-	0.005	7.80	35-100	27.5-65.0	-	-	-	-
galvanized steel wire for A.C.S.R.	-	-	-	-	7.80	125-140	70-95	abt 21.100	1.360	0.0000115	-
copper clad steel wire	40	4.971	0.36056	0.0038	8.20	80-110	-	abt 16.900	-	0.000013	-
aluminum clad steel wire	30	5.823	0.47778	-	8.15	100-130	-	abt 16.500	-	0.000013	-
aluminum clad steel wire	20	8.4931	0.55970	0.0036	6.59	100-140	-	abt 16.500	-	0.000013	-

ตารางที่ 2 สายทองแดงเปลือย

เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	tolerance ของเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	พื้นที่หน้าตัด (มม. <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (กก./ม.)	ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20° C. (โอห์ม/ม.)			ความยาวที่ตัด (%)			แรงดึง (กก.)			แรงดึงสูงสุด (กก./มม. <sup>2</sup> ) (โดยประมาณ)			การขยายตัวตามขนาดที่อุณหภูมิ 250 มม. (%)			โวลต์ได้เปรียบ	เลขจำนวน R.S. number	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)
				annealed copper wire	hard-drawn copper wire	annealed copper wire	hard-drawn copper wire	annealed copper wire	hard-drawn copper wire	annealed copper wire	hard-drawn copper wire	annealed copper wire	hard-drawn copper wire								
12.00	± 0.06	113.1	1.005	0.1524	0.1572	100.0	97.0	2.830	3.830	25.0	33.9	35.0	3.12	0000	12.00						
10.00	± 0.06	78.54	698.2	0.2195	0.2263	100.0	97.0	1.960	2.840	25.0	36.1	35.0	2.64	000	10.00						
9.00	± 0.06	63.62	565.6	0.2710	0.2794	100.0	97.0	1.590	2.370	25.0	37.2	35.0	2.40	00	9.00						
8.00	± 0.06	50.27	446.9	0.3430	0.3536	100.0	97.0	1.260	1.930	25.0	38.3	35.0	2.16	0	8.00						
7.00	± 0.06	38.48	342.1	0.4481	0.4619	100.0	97.0	1.000	1.520	26.0	39.4	30.0	1.92	1	7.00						
6.50	± 0.06	33.18	295.0	0.5196	0.5357	100.0	97.0	863	1.330	26.0	40.0	30.0	1.80	2	6.50						
6.00	± 0.06	28.27	251.3	0.6099	0.6287	100.0	97.0	735	1.140	26.0	40.5	30.0	1.68	3	6.00						
5.50	± 0.04	23.76	211.2	0.7256	0.7481	100.0	97.0	618	977	26.0	41.1	30.0	1.56	-	5.50						
5.00	± 0.04	19.64	174.6	0.8779	0.9050	100.0	97.0	511	817	26.0	41.6	30.0	1.44	4	5.00						
4.50	± 0.04	15.90	141.4	1.084	1.118	100.0	97.0	413	671	26.0	42.2	30.0	1.32	5	4.50						
4.00	± 0.04	12.57	111.7	1.372	1.414	100.0	97.0	327	537	26.0	42.7	30.0	1.20	6	4.00						
3.50	± 0.04	9.621	85.53	1.792	1.847	100.0	97.0	250	416	26.0	43.2	30.0	1.08	7	3.50						
3.20	± 0.04	8.042	71.49	2.144	2.210	100.0	97.0	209	351	26.0	43.6	30.0	1.01	8	3.20						
2.90	± 0.03	6.605	58.72	2.610	2.691	100.0	97.0	172	290	26.0	43.9	30.0	0.94	9	2.90						
2.60	± 0.03	5.309	47.20	3.248	3.338	100.0	97.0	143	235	27.0	44.2	30.0	0.86	10	2.60						
2.30	± 0.03	4.155	36.94	4.149	4.278	100.0	97.0	112	185	27.0	44.6	30.0	0.79	11	2.30						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดยกรมการช่างไฟฟ้า ไม่อนุญาตให้มีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าชนิดพิเศษ

2.00	± 0.03	3.142	27.93	5.487	5.657	100.0	97.0	84.8	141	27.0	41.9	30.0	0.72	12	2.00
1.80	± 0.03	2.545	22.63	6.774	7.057	100.0	96.0	68.7	115	27.0	45.1	25.0	0.67	13	1.80
1.60	± 0.03	2.011	17.88	8.573	8.930	100.0	96.0	54.3	91.1	27.0	45.3	25.0	0.62	14	1.60
1.40	± 0.03	1.539	13.68	11.20	11.67	100.0	96.0	41.6	70.2	27.0	45.6	25.0	0.58	15	1.40
1.20	± 0.03	1.131	10.05	15.24	15.89	100.0	96.0	31.7	51.8	28.0	45.8	25.0	0.53	16	1.20
1.00	± 0.03	0.7854	6.982	21.95	22.87	100.0	96.0	22.0	36.1	28.0	46.0	25.0	0.48	17	1.00
0.90	± 0.02	0.6362	5.656	27.10	28.23	100.0	96.0	17.8	29.3	28.0	46.1	25.0	0.46	18	0.90
0.80	± 0.02	0.5027	4.469	34.30	35.72	100.0	96.0	14.1	23.2	28.0	46.2	25.0	0.43	19	0.80
0.70	± 0.02	0.3838	3.421	44.81	46.67	100.0	96.0	10.8	17.8	28.0	46.3	20.0	0.41	20	0.70
0.65	± 0.02	0.3318	2.950	51.96	54.13	100.0	96.0	9.29	15.4	28.0	46.4	20.0	0.40	21	0.65
0.60	± 0.02	0.2827	2.513	60.99	63.53	100.0	96.0	7.92	13.1	28.0	46.4	20.0	0.38	22	0.60
0.55	± 0.02	0.2376	2.112	72.56	75.59	100.0	96.0	6.65	11.0	28.0	46.5	20.0	0.37	23	0.55
0.50	± 0.01	0.1964	1.746	87.79	91.44	100.0	96.0	5.50	9.15	28.0	46.6	20.0	0.36	24	0.50
0.45	± 0.01	0.1590	1.414	109.2	112.9	99.3	96.0	4.41	7.41	28.0	46.6	20.0	0.35	25	0.45
0.40	± 0.01	0.1257	1.117	138.1	142.9	99.3	96.0	3.47	5.87	28.0	46.7	20.0	0.34	26	0.40
0.35	± 0.01	0.09621	0.8553	180.5	180.5	99.3	96.0	2.66	4.41	28.0	46.7	20.0	0.34	27	0.35
0.32	± 0.01	0.08042	0.7149	215.9	215.9	99.3	96.0	2.00	3.34	28.0	46.7	20.0	0.33	28	0.32
0.29	± 0.01	0.06605	0.5872	266.4	266.4	98.0	96.0	1.50	2.66	28.0	46.7	20.0	0.32	29	0.29
0.26	± 0.01	0.05309	0.4720	331.4	331.4	98.0	96.0	1.10	2.00	28.0	46.7	20.0	0.31	30	0.26
0.23	± 0.008	0.04155	0.3694	423.4	423.4	98.0	96.0	0.80	1.50	28.0	46.7	20.0	0.30	31	0.23
0.20	± 0.008	0.03142	0.2793	559.9	559.9	98.0	96.0	0.60	1.10	28.0	46.7	20.0	0.29	32	0.20
0.18	± 0.008	0.02545	0.2263	691.3	691.3	98.0	96.0	0.45	0.80	28.0	46.7	20.0	0.28	33	0.18
0.16	± 0.008	0.02011	0.1788	874.9	874.9	98.0	96.0	0.35	0.60	28.0	46.7	20.0	0.27	34	0.16
0.14	± 0.008	0.01539	0.1368	1.143	1.143	98.0	96.0	0.28	0.45	28.0	46.7	20.0	0.26	35	0.14
0.12	± 0.008	0.01131	0.1005	1.556	1.556	98.0	96.0	0.22	0.35	28.0	46.7	20.0	0.25	36	0.12
0.10	± 0.008	0.007854	0.06982	2.240	2.240	98.0	96.0	0.18	0.28	28.0	46.7	20.0	0.24	37	0.10
														38	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งไฟฟ้า

สายทองแดงเปลือยหุ้มเกลียว

ขนาดเส้นนิยฐาน (มม.)	จำนวนเส้นและ เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	พื้นที่หน้าตัด จากการคำนวณ (มม. <sup>2</sup> )	น้ำหนัก (กก./กม.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง กลางนอก (มม.)	ความต้านทานไฟฟ้าที่ 20° ซ. (โอห์ม/กม.)		แรงดึงต่ำสุด (hard- drawn copper, stranded cable) (กก.) (โดยประมาณ)
					annealed copper stranded cable	hard-drawn copper stranded cable	
1,000	127/3.2	1,021	9,315	41.6	0.0173	0.0179	≈ 40,100
850	127/2.9	838.8	7,651	37.7	0.0211	0.0217	33,000
725	91/3.2	731.8	6,655	35.2	0.0241	0.0248	28,700
600	91/2.9	601.1	5,466	31.9	0.0293	0.0303	23,700
500	61/3.2	490.6	4,448	28.8	0.0359	0.0370	19,300
400	61/2.9	402.9	3,654	26.1	0.0436	0.0450	15,900
325	61/2.6	323.8	2,937	23.4	0.0543	0.0560	12,900
250	61/2.3	253.5	2,298	20.7	0.0694	0.0715	10,200
240	37/2.6	196.4	1,776	18.2	0.0893	0.0920	7,830
150	37/2.3	153.7	1,390	16.1	0.114	0.118	6,160
125	19/2.9	125.5	1,129	14.5	0.139	0.143	4,960
100	19/2.0	100.9	907.6	13.0	0.173	0.178	4,020
80	19/2.3	78.95	710.3	11.5	0.221	0.228	3,160
60	19/2.0	59.70	537.0	10.0	0.292	0.301	2,410
38	7/2.6	37.16	334.4	7.8	0.470	0.484	1,480
30	7/2.3	29.09	261.7	6.9	0.600	0.618	1,170
22	7/2.0	21.99	197.9	6.0	0.793	0.818	888
14	7/1.6	14.08	126.7	4.8	1.24	1.29	574
8	7/1.2	7.917	71.19	3.6	2.20	2.30	326
5.5	7/1.0	5.498	49.46	3.0	3.17	3.31	227
3.5	7/0.8	3.519	31.66	2.4	4.96	5.17	146
2.0	7/0.6	1.979	17.80	1.8	8.82	9.18	82
1.4	7/0.5	1.375	12.37	1.5	12.7	13.2	57
0.9	7/0.4	0.8799	7.913	1.2	20.0	20.7	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าชนิดพาดเสา

ตารางที่ 4 สายทองแดงเกลียวชนิด hard-drawn copper stranded สำหรับสายส่งไฟฟ้าพาดเสา

ขนาดต้นนิยฐาน (มม.)	จำนวนเส้นและ เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	พื้นที่หน้าตัด จากการคำนวณ (มม. <sup>2</sup> )	ความต้านทาน ไฟฟ้าที่ 20° ซ. (โอห์ม/กม.)	แรงดึง (กก.)	เส้นผ่าศูนย์กลางนอก (มม.)	น้ำหนัก (กก./กม.)	ความยาว มาตรฐาน (ม.)
240	19 / 4.0	238.8	0.07531	9,180	20.0	2,148	600
200	19 / 3.7	204.3	0.08804	7,910	18.5	1,838	700
180	19 / 3.5	182.8	0.09838	7,120	17.5	1,645	800
150	19 / 3.2	152.8	0.1177	5,990	16.0	1,375	1,000
125	19 / 2.9	125.5	0.1433	4,960	14.5	1,129	1,000
100	7 / 4.3	101.6	0.1770	3,880	12.9	914.5	600
75	7 / 3.7	75.25	0.2390	2,910	11.1	677.0	700
55	7 / 3.2	56.29	0.3195	2,210	9.6	506.4	1,000
45	7 / 2.9	46.24	0.3890	1,830	8.7	416.0	1,000
38	7 / 2.6	37.16	0.4840	1,480	7.8	334.4	1,000
30	7 / 2.3	29.09	0.6185	1,170	6.9	261.7	1,200
22	7 / 2.0	21.99	0.8178	890	6.0	197.9	1,200



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอลูมิเนียมเสริมเหล็กตัด

ขนาดสัมฤทธิ์ฐาน ( มม.)	ส่วนประกอบ (จำนวนเส้น/เส้นผ่าศูนย์กลาง มม.)		พื้นที่นำตัดจากการทำงาน ( มม <sup>2</sup> )		แรงดึงต่ำสุด ( กก.)	เส้นผ่าศูนย์กลางนอก ( มม.)		น้ำหนัก ( กก./กม.)	ความต้านทาน ไฟฟ้า ( โอห์ม/กม.)
	aluminium	steel	aluminium	steel		aluminium	steel		
680	54 / 4.0	19 / 2.4	678.8	85.96	20.310	36.0	12.0	2.556	0.0428
610	54 / 3.8	7 / 3.8	612.4	79.38	18.150	34.2	11.4	2.320	0.0474
590	30 / 5.0	19 / 3.0	589.0	134.3	24.250	35.0	15.0	2.688	0.0493
520	54 / 3.5	7 / 3.5	519.5	67.35	15.600	31.5	10.5	1.969	0.0559
480	30 / 4.5	19 / 2.7	477.0	108.8	20.160	31.5	13.5	2.176	0.0609
430	54 / 3.2	7 / 3.2	434.3	56.29	13.080	28.8	9.6	1.645	0.0669
420	30 / 4.2	19 / 2.5	415.5	93.27	17.390	29.3	12.5	1.883	0.0699
410	26 / 4.5	7 / 3.5	413.4	67.35	13.890	28.5	10.5	1.673	0.0702
410	54 / 3.1	7 / 3.1	407.6	52.84	12.260	27.9	9.3	1.544	0.0721
380	30 / 4.0	19 / 2.4	377.1	85.96	15.930	28.0	12.0	1.720	0.0770
360	54 / 2.9	7 / 2.9	356.7	46.24	11.010	26.1	8.7	1.351	0.0814
330	26 / 4.0	7 / 3.1	326.8	52.84	10.930	25.3	9.3	1.320	0.0888
330	54 / 2.8	7 / 2.8	332.5	43.11	10.290	25.2	8.4	1.260	0.0873
320	30 / 3.7	7 / 3.7	322.5	75.25	13.630	25.9	11.1	1.484	0.0900
290	30 / 3.5	7 / 3.5	288.6	67.35	12.170	24.5	10.5	1.328	0.101
290	54 / 2.6	7 / 2.6	286.7	37.16	8.964	23.4	7.8	1.086	0.101
250	26 / 3.5	7 / 2.72	250.1	40.68	8.670	22.16	8.16	1.013	0.116

สายไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าชนิดภาคเตา

240	30 / 3.2	7 / 3.2	241.3	56.29	10.210	22.4	9.6	1.110	0.120
210	26 / 3.2	7 / 2.49	209.1	34.09	7.260	20.27	7.47	847.0	0.139
200	30 / 2.9	7 / 2.9	198.2	46.24	8.620	20.3	8.7	911.7	0.147
170	26 / 2.9	7 / 2.26	171.7	28.08	6.010	18.38	6.78	696.2	0.169
160	30 / 2.6	7 / 2.6	159.3	37.16	6.990	18.2	7.8	732.8	0.182
140	26 / 2.6	7 / 2.02	138.0	22.44	4.860	16.46	6.06	558.1	0.210
120	30 / 2.3	7 / 2.3	124.7	29.09	5.550	16.1	6.0	573.7	0.233
120	12 / 3.5	7 / 3.5	115.5	67.35	9.590	17.5	10.5	848.1	0.251
110	26 / 2.3	7 / 1.79	108.0	17.61	3.960	14.57	5.37	437.0	0.269
97	12 / 3.2	7 / 3.2	96.50	56.29	8.050	16.0	9.6	708.9	0.301
95	6 / 4.5	1 / 4.5	95.40	15.90	3.180	13.5	4.5	385.2	0.304
90	6 / 4.3	1 / 4.3	87.12	14.52	2.910	12.9	4.3	351.8	0.329
80	6 / 4.2	1 / 4.2	83.10	13.85	2.770	12.6	4.2	335.5	0.345
79	12 / 2.9	7 / 2.9	79.26	46.24	6.820	14.5	8.7	582.1	0.366
75	6 / 4.0	1 / 4.0	75.42	12.57	2.510	12.0	4.0	304.6	0.380
64	12 / 2.6	7 / 2.6	63.71	37.16	5.510	13.0	7.8	468.0	0.456
58	6 / 3.5	1 / 3.5	57.73	9.621	1.980	10.5	3.5	233.1	0.497
50	12 / 2.3	7 / 2.3	49.86	29.09	4.340	11.5	6.9	366.3	0.589
48	6 / 3.2	1 / 3.2	48.25	8.042	1.660	9.6	3.2	194.8	0.594
40	6 / 2.9	1 / 2.9	39.63	6.605	1.400	8.7	2.9	160.0	0.723
32	6 / 2.6	1 / 2.6	31.85	5.309	1.140	7.8	2.6	128.6	0.900
25	6 / 2.3	1 / 2.3	24.93	4.155	907	6.9	2.3	100.7	1.15
19	6 / 2.0	1 / 2.0	18.85	3.142	698	6.0	2.0	76.12	1.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายไฟฟ้าสำหรับสายส่งไฟฟ้าชนิดพาดเสา

สายอลูมิเนียมผสมชนิด hard-drawn aluminum alloy stranded cable

ขนาดสัมพันธฐาน	ส่วนประกอบ (จำนวนเส้น/เส้นผ่าศูนย์กลาง มม.)	พื้นที่หน้าตัด จากกรากคำนวณ (มม. <sup>2</sup> )	แรงดึงต่ำสุด (tensile load) (กก.)	เส้นผ่าศูนย์กลางนอก (มม.)	น้ำหนัก (กก./กม.)	ความต้านทาน ไฟฟ้าที่ 25° ซ. (โอห์ม/กม.)
500	61/3.2	490.6	13,890	28.8	1,351	0.0689
400	61/2.9	402.9	11,420	26.1	1,109	0.0839
400	37/3.7	397.8	11,290	25.9	1,092	0.0847
360	37/3.5	356.0	10,090	24.5	977.6	0.0948
300	37/3.2	297.6	8,420	22.4	816.9	0.113
240	19/4.0	238.6	6,770	20.0	652.6	0.141
200	37/2.6	196.4	5,560	18.2	539.2	0.172
200	19/3.7	204.3	5,800	18.5	558.2	0.164
180	19/3.5	182.8	5,180	17.5	499.5	0.184
150	19/3.2	152.8	4,330	16.0	417.4	0.219
125	19/2.9	125.5	3,560	14.5	342.8	0.267
100	19/2.6	100.9	2,860	13.0	275.5	0.333
90	7/4.0	87.99	2,490	12.0	240.4	0.382
70	7/3.5	67.35	1,910	10.5	184.0	0.499
55	7/3.2	56.29	1,590	9.6	153.8	0.596
45	7/2.9	46.24	1,310	8.7	126.3	0.726
38	7/2.6	37.16	1,050	7.8	101.5	0.904
30	7/2.3	29.09	825	6.9	79.48	1.15
22	7/2.0	21.99	624	6.0	60.09	1.53
16	3/2.6	15.93	451	5.6	43.51	2.11
12	3/2.3	12.47	354	5.0	34.06	2.69
10	3/2.0	9.426	267	4.3	25.75	3.58

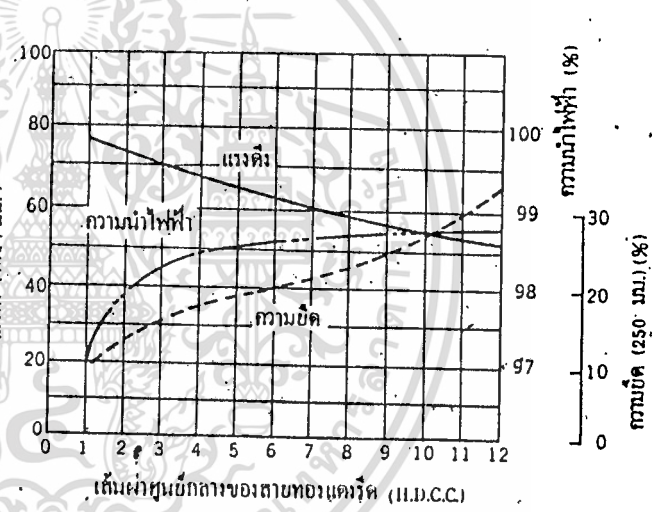
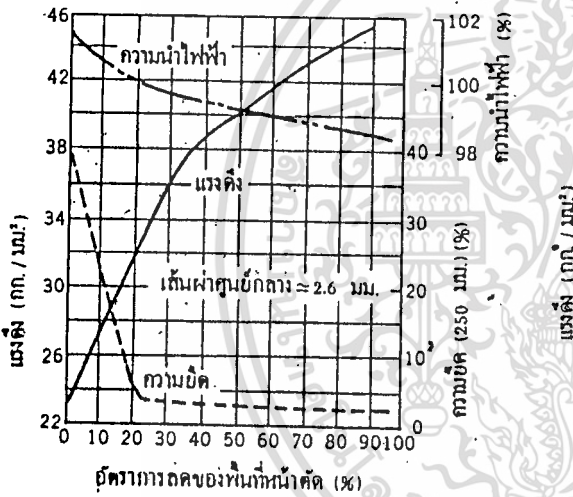
สายเหล็กสตีลหุ้มถึงกะตั้นชนิดเกลียวสำหรับสายส่งไฟฟ้าพาดเสา

ขนาดสัมพันธฐาน (มม.)	-ส่วนประกอบ (จำนวนเส้น/เส้นผ่าศูนย์กลาง มม.)	พื้นที่หน้าตัด จากกรากคำนวณ (มม. <sup>2</sup> )	เส้นผ่าศูนย์กลาง นอก (มม.)	น้ำหนัก (กก./กม.)	แรงดึง (ต่ำสุด) (กก.)	สายเคเบิล				
						เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	tolerance ของเส้นผ่าศูนย์กลาง กกท (± มม.)	แรงดึงต่ำสุด (กก.)	การขยายตัวตาม ยาวต่ำสุดใน 250 มม. (%)	แรงดึงต่ำสุด (กก./กม.)
135	7/5.0	137.4	15.0	1,092	15,400	5.0	0.13	2,450	4.0	
110	7/4.5	111.3	13.5	884.4	12,500	4.5	0.10	1,990	4.0	
90	7/4.0	87.99	12.0	692.7	9,890	4.0	0.10	1,570	4.0	
70	7/3.5	67.35	10.5	535.0	7,560	3.5	0.10	1,200	4.0	
55	7/3.2	56.30	9.6	447.3	6,300	3.2	0.08	1,000	4.0	≥ 125
45	7/2.9	46.24	8.7	367.3	5,200	2.9	0.08	826	3.0	
38	7/2.6	37.16	7.8	295.3	4,180	2.6	0.06	664	3.0	
30	7/2.3	29.09	6.9	231.0	3,270	2.3	0.06	519	3.0	
22	7/2.0	21.99	6.0	174.7	2,470	2.0	0.06	393	3.0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

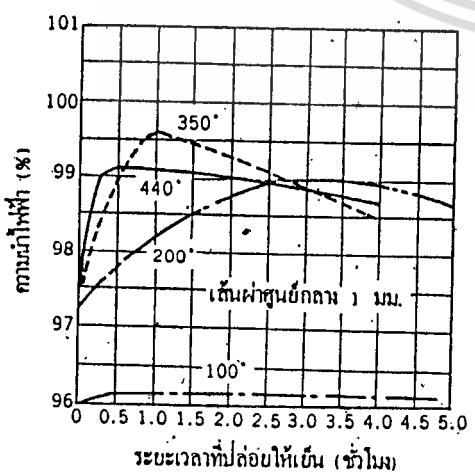
แรงดึงและการขยายตัวตามยาวของสายอลูมิเนียมชนิด hard-drawn aluminum wire และสายเหล็กตีลูปรับสังกะสี

hard-drawn aluminum wire			galvanized steel wire		
เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.) (โดยประมาณ)	แรงดึงต่ำสุด (กก./มม. <sup>2</sup> ) (โดยประมาณ)	การขยายตัวตามยาวต่ำสุด (%) (โดยประมาณ)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.) (โดยประมาณ)	แรงดึงต่ำสุด (กก./มม. <sup>2</sup> ) (โดยประมาณ)	การขยายตัวตามยาวต่ำสุด (%) (โดยประมาณ)
5.0-3.8	16.17	≥ 2.0-1.9	5.0-4.0	≥ 125	≥ 5.0
3.8-3.0	16.52	1.8-1.7	4.0-3.0	130	4.5
3.0-2.8	16.87	1.6	3.0-2.0	135	4.0
2.8-2.5	17.23	1.5			
2.5-2.3	17.93	1.5			

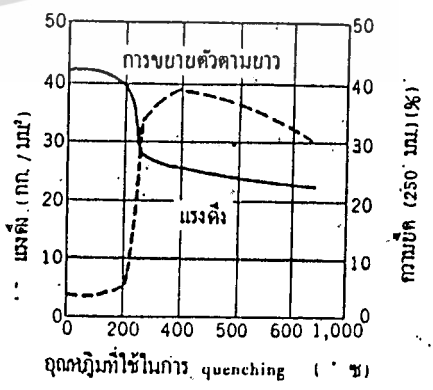


รูปที่ 3 ลักษณะทางเครื่องกลและไฟฟ้าของลวดทองแดงรีด

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางกับลักษณะทางเครื่องกลและไฟฟ้าของสายทองแดงรีด



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ปล่อยให้เย็นกับความนำไฟฟ้า



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ลดความร้อน (quenching temperature) กับลักษณะทางเครื่องกลของสายทองแดงรีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 ขีดความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าของสายไฟฟ้าต่าง ๆ สำหรับสายส่งไฟฟ้าภาคเตา

ชนิดของสายไฟฟ้า	ขนาดเส้นนิยฐาน (มม.)	ขีดความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้า (แอมป์) ที่อุณหภูมิภายนอก 40 องศาเซลเซียส	
		ที่อุณหภูมิสูงสุด และใช้งานตลอดเวลา 90' ช.	ที่อุณหภูมิสูงสุด ที่ยังใช้ได้ 100' ช.
hard-drawn copper stranded cable	200	660	740
	150	540	610
	100	420	470
	75	350	395
	55	290	320
	38	225	245
	22	160	175
aluminum cable steel reinforced	610	1,070	1,210
	520	960	1,090
	410	840	940
	330	720	810
	240	600	670
	160	460	510
	120	390	440
hard-drawn alumi- num alloy stranded cable	300	620	695
	240	535	600
	150	395	450
	100	310	345
	55	215	235
	38	165	185
hard-drawn alumi- num stranded cable	150	420	475
	100	330	365
	70	265	285
	55	230	550

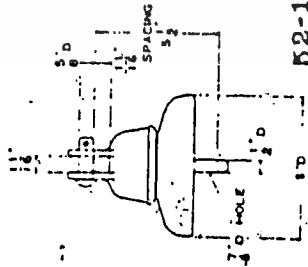
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



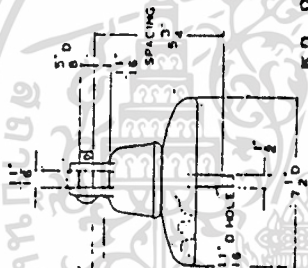
# CHINA INSULATORS

## 盘形悬式瓷绝缘子

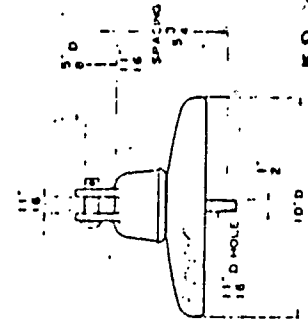
### DISK SUSPENSION INSULATORS



52-1



52-2



52-4

产品型号 Type	图号 Fig. No.	瓷等级 ANSI Class	盘直径 Porcelain Disc Diameter (D) in.	高度 Unit Spacing (H) in.	爬距 Leakage Distance in.	机械强度 Combined M & E Strength lb	抗冲击强度 Mechanical Impact Strength in.-lb	闪络电压 Flashover Voltage KV		低频率击穿电压 Low-frequency Puncture Voltage KV	无线电干扰 Radio-influence Voltage KV	产品型号 Type			
								干燥 Dry	潮湿 Wet						
XP-4.5C-M	1	52-1	6	5 1/2	7	10000	45	60	30	100	100	30	7.5	50	XP-4.5C-M
XP-7C-M	2	52-2	7 1/2	5 1/2	8 1/2	15000	50	65	35	115	115	90	7.5	50	XP-7C-M
XP-7-M	3	52-3	10	5 1/2	11 1/2	15000	55	80	50	125	130	110	10	50	XP-7-M
XP-7C-M	2	52-4	10	5 1/2	11 1/2	15000	55	80	50	125	130	110	10	50	XP-7C-M
XP-11-M	3	52-5	10	5 1/2	11	25000	60	80	50	125	130	110	10	50	XP-11-M
XP-12-M	3	52-6	10	5 1/2	11	25500	60	80	50	125	130	110	10	50	XP-12-M
XP-16-M	3	52-8	10	5 1/2	12 1/2	36000	90	80	50	125	130	110	10	50	XP-16-M
XP-16-M	3	52-8	10 1/2	5 1/2	13 1/2	36000	90	80	50	125	130	110	10	50	XP-16-M
XP-16-M	3	52-11	11	5 1/2	14	36000	90	80	50	125	130	110	10	50	XP-16-M

