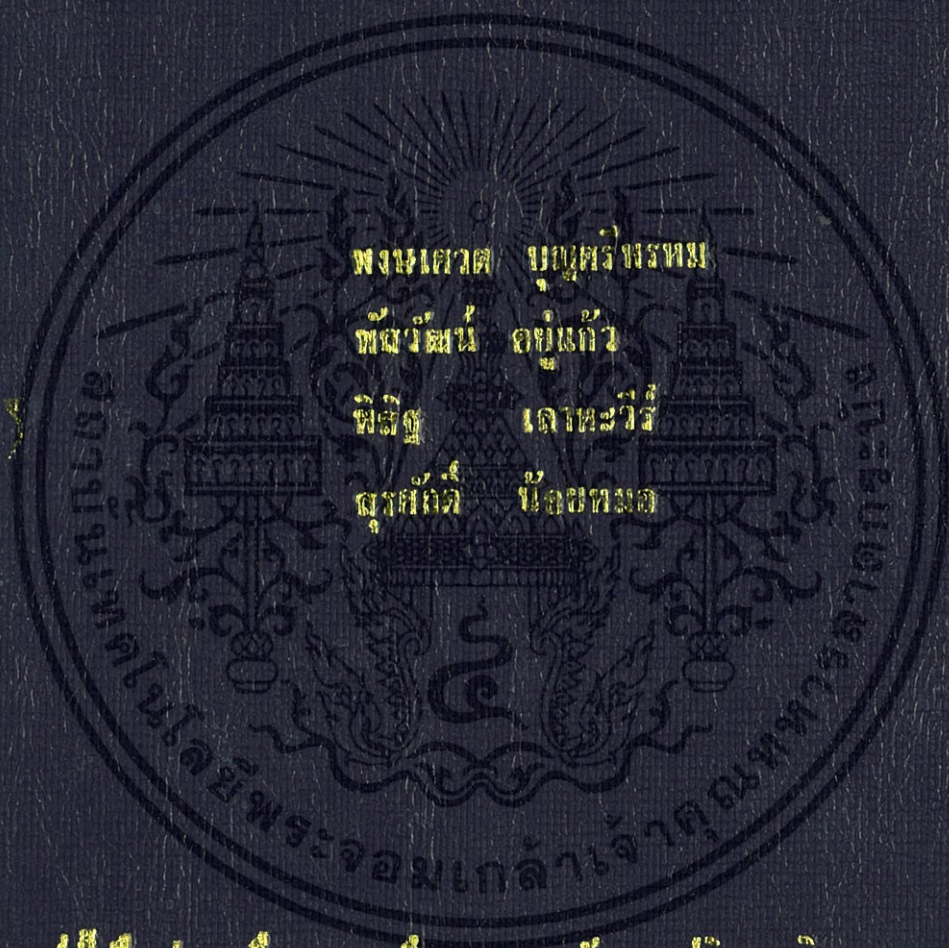


การออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
DESIGN AND CONTRUCTION OF A TESLA TRANSFORMER



ปริญญาโทขั้นต้นเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
DESIGN AND CONTRUCTION OF A TESLA TRANSFORMER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONTRUCTION OF A TESLA TRANSFORMER



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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

การออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
DESIGN AND CONTRUCTION OF A TESLA TRANSFORMER



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

ผู้จัดทำ

1. นาย พงษ์เศวต บุญศรีพรหม
2. นาย พัสวัฒน์ อยู่แก้ว
3. นาย พิสิฐ เลาะห์วีร์
4. นาย สุรศักดิ์ น้อยหอม



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรฤตติ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

นาย พงษ์เศวต บุญศรีพรหม

นาย พัสวัฒน์ อยู่แก้ว

นาย พิสิฐ เลาะห์วีร์

นาย สุรศักดิ์ น้อยหมอ

ผศ.ดร. พีรุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง พิกัด 750 kV 35 kHz โดย วงจรสร้างแรงดันสูงความถี่สูงใช้การเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดด้านแรงดันต่ำมีค่า 0.21 mH และตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำมีค่า 109.4 nF กับขดลวดด้านแรงดันสูงมีค่า 360.01 mH และตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูงที่ได้จากวงแหวนทอรอยด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 41 นิ้ว ทำจากท่ออะลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว จากการทดสอบพบว่าหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบสร้าง สามารถสร้างแรงดันสูงความถี่สูง ได้พิกัดแรงดันสูงสุด 750 kV และได้ความถี่สูงสุด 35.7 kHz ระยะลำอาร์กในอากาศสูงสุด 2 เมตร สามารถนำไปใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดเบรกดาวนในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มศักยภาพให้กับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้อีกด้วย

Design and Construction of a Tesla Transformer

Mr.Pongsawet Boonsriprom

Mr.Patsavat Youkaew

Mr.Phisit Laohawee

Mr.Surasak Noimor

Assistant.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith Advisor

ABSTRACT

This project presents construction of Tesla transformer 750 kV 35 kHz. The Tesla transformer circuit uses inductive coupling of a low voltage inductor of 0.21 mH, low voltage capacitor of 109.4 nF, high voltage inductor of 360.01 mH, and high voltage capacitor in the form of toroid of 41-inch diameter. The toroid was produced by an aluminum tube with diameter of 3-inch. The developed Tesla transformer can generate maximum voltage 750 kV, maximum frequency 35.7 kHz and maximum breakdown length in air of 2 m. Tesla transformer can be used as a model for studying of air breakdown. Furthermore, the developed Tesla transformer can increase testing performance of KMITL's high voltage laboratory.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์คำแนะนำและคำปรึกษาที่มีคุณค่าจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณบุญวีร์ ฉายศิริ วิศวกรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และ คุณวัชรา พงศ์สถิต นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และดูแลเอาใจใส่ตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง และทดสอบมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บุคคลที่มีความสำคัญยิ่ง ได้แก่ บิดาและมารดาที่ได้มอบการอบรมสั่งสอนและสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนตั้งแต่อดีตจวบจนถึงปัจจุบัน รวมถึงทุกคนในครอบครัว สำหรับกำลังใจที่มีให้กับผู้จัดทำเสมอมา ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นาย พงษ์เศวต	บุญศรีพรหม
นาย พั้ววัฒน์	อยู่แก้ว
นาย พิสิฐ	เลาะห์วีร์
นาย สุรศักดิ์	น้อยหมอ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	1
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ทฤษฎีทั่วไป	4
2.3 หลักการทำงานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	4
2.4 รายละเอียดส่วนประกอบของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	7
2.4.1 กราวด์อ้างอิง (Reference Ground)	7
2.4.2 สปาร์กแกป (Spark Gap)	7
2.4.3 ทอรอยด์ (Toroid)	8
2.5 คุณสมบัติของตัวนำ (Properties of Conductor)	9
2.5.1 อุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน	9
2.5.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในตัวนำไฟฟ้า	9
2.5.3 ผลของความถี่ต่อความต้านทาน (Frequency Effect)	10
2.5.4 สกินเอฟเฟค (Skin Effect)	10
2.5.5 ปรากฏการณ์โคโรนา (Corona Effect)	11
2.6 ความสำคัญของไดอิเล็กทริก	11
2.7 สภาวะการเกิดสปาร์คโอเวอร์กับการเกิดโคโรนา	12
2.8 ผลของความหนาแน่นและความชื้นของอากาศต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์	13
2.9 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ความถี่สูง	14
2.10 ฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กทริก (Insulator or Dielectric Materials)	15
2.10.1 วัสดุฉนวนในอุดมคติ (Ideal Insulation Material)	15
2.10.2 ชนิดของวัสดุฉนวน (Type of Insulation Materials)	16

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.11 คุณสมบัติของฉนวน (Properties of Insulation)	16
2.11.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties)	16
2.11.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)	16
2.12 สนามไฟฟ้าและเทคนิคการฉนวน	17
2.12.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า	17
2.12.2 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)	18
2.12.3 สนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-Uniform Field)	19
2.12.4 สนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-Uniform Field)	19
2.13 การเกิดการเบรกดาวน์ในก๊าซ	19
2.13.1 ทฤษฎีของทาวน์เซนต์ (Townsend's theory)	20
2.13.2 ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory)	23
2.14 ตัวเก็บประจุ	25
2.14.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	25
2.14.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า	25
2.14.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิค	26
2.14.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม	26
2.14.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์	27
2.14.6 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม	27
2.14.7 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	28
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	29
3.1 เงื่อนไขการออกแบบ	29
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง (C_2)	29
3.3 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดทางด้านแรงสูง (L_2)	31
3.3.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดแรงสูง	32
3.3.2 จำนวนรอบขดลวดแรงสูง	34
3.4 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ (C_1)	36
3.5 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดทางด้านแรงต่ำ (L_1)	37
3.5.1 การออกแบบฐานของขดลวดทางด้านแรงต่ำ	41
3.6 การออกแบบและประกอบสร้าง Line Reactor (Choke Coil)	43
3.7 การเลือกพิกัดหม้อแปลงจ่ายกำลัง	45
3.8 การออกแบบและประกอบสร้างสร้างโรตารีแกป	45
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	49
4.1 บทนำ	49
4.2 การทดสอบหาค่าลักษณะของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	49
4.2.1 การทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำจากการวัด	50

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.2 การทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงสูงจากการวัด	51
4.2.3 การทดสอบค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำ	51
4.2.4 ค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงสูงจากการคำนวณ	52
4.3 การทดสอบหาระยะการเบรกดาวนในอากาศของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	52
4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาความถี่ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	53
4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาระยะการเกิดเบรกดาวนในอากาศของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	54
4.6 สรุปผลการทดสอบ	56
บทที่ 5 สรุปผลของโครงการและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	60
ภาคผนวก ข สูตรการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ	65
ภาคผนวก ค สมการคำนวณขดลวดแรงสูง	68
ภาคผนวก ง Data for Standard Round Copper Wires	70
ภาคผนวก จ คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของท่อ PVC	72
ภาคผนวก ฉ ท่อทองแดงชนิดเส้น มาตรฐาน ASTM-B88 ความยาว 6 เมตร	74
ภาคผนวก ช เปรียบเทียบค่า f และ f_0 ที่ค่า X/R ต่างๆกัน	76
ภาคผนวก ซ Datasheet ตัวเก็บประจุ WIMA MKP10 0.22uF 650Vac	78
ประวัติผู้เขียน	91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	5
2.2 ตัวอย่างของทอรอยด์ที่ใช้กับหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	9
2.3 การไหลของกระแสในลวดตัวนำเนื่องมาจาก Skin Effect	11
2.4 กราฟความสัมพันธ์เกรเดียนสูงสุดกับ r/R	13
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนและความถี่	14
2.6 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน	17
2.7 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ	18
2.8 ความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ	18
2.9 การกระจายของเส้นสนามไฟฟ้าและศักย์เท่า	19
2.10 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ α	21
2.11 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ γ	23
2.12 การเกิดโฟโตไอออนไนเซชัน	24
2.13 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ	25
2.14 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า	25
2.15 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก	26
2.16 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม	27
2.17 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์	27
2.18 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้	28
3.1 พารามิเตอร์ทอรอยด์	29
3.2 พารามิเตอร์ของความจุไฟฟ้าแฝง	30
3.3 ทอรอยด์ที่ประกอบสร้างจริง	31
3.4 บริเวณที่มีกระแสไหลเนื่องจากผลของสภาพนำเชิงผิวของลวดทองแดง	34
3.5 มิติในการพันขดลวดแรงสูงที่ใช้ในสมการ	35
3.6 ขดลวดทางด้านแรงสูง (L_2) ที่ประกอบสร้างจริง	35
3.7 แสดงการต่อตัวเก็บประจุนานกัน 9 ชุด และอนุกรมชุดละ 9 ตัว	36
3.8 แสดงการต่อตัวเก็บประจุตามที่ได้ออกแบบไว้	36
3.9 ตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ (C_1) ที่ประกอบสร้างจริง	37
3.10 Inverse Conical Coil Inductance ของขดลวดแรงต่ำ	38
3.11 มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	39
3.12 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการพันขดลวดแรงต่ำ	40
3.13 ฐานแปดเหลี่ยม ถูกตั้งบนแท่งซูปเปอร์ลีน	41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ส่วนรองรับขดลวดแรงต่ำ	42
3.15 ส่วนรองรับขดลวดแรงต่ำประกอบกับฐานแปดเหลี่ยมที่ทำการออกแบบ	42
3.16 ขดลวดทางด้านแรงต่ำ (L_1) ที่ประกอบสร้างจริง	42
3.17 วงจรเมื่อมีการใส่ Choke Coil	43
3.18 วงจรสมมูลย์เมื่อมีการใส่ Choke Coil	43
3.19 Line Reactor (Choke)	44
3.20 หม้อแปลงส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Transformer)	45
3.21 โรตารีสปาร์คแกป	48
4.1 ตัวอย่างการวัดค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำรอบที่ 16	50
4.2 การวัดค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงสูง	51
4.3 วัดค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำ	51
4.4 วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	52
4.5 วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	53
4.6 รูปกราฟกระแสและค่าความถี่ที่วัดได้ทางด้านขาออกของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบสร้าง	54
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการเบรกดาวนในอากาศกับค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำ	55
4.8 การทดสอบเพื่อหาระยะทางเบรกดาวนในอากาศที่ไกลที่สุด	55
4.9 ลำอาร์กในอากาศจากการทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบสร้าง	56
ข.1 ลักษณะการพันขดลวด Archimedes Spiral	66
ข.2 ลักษณะการพันขดลวดแบบ Helical Coil	66
ข.3 ลักษณะการพันขดลวดแบบ Inverse Conical Coil	67
ค.1 ลักษณะการพันของขดลวดทางด้านแรงสูง	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินงาน	2
2.1 จำนวนตัวนำของแกปต่อขนาดของหม้อแปลง	8
3.1 เปรียบเทียบค่าต่างๆ ของท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว	31
4.1 ผลการทดสอบค่าความเหนียวนำด้านแรงต่ำจากการวัด	50
4.2 ผลการทดสอบค่าความเหนียวนำด้านแรงสูงจากการวัด	51
4.3 ค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำจากการวัด	51
4.4 ค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงสูงจากการคำนวณ	52
4.5 ระยะเวลาทดสอบการเบรกดาวนในอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ	54
ง.1 Data for Standard Round Copper Wires	71
จ.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของท่อ PVC	73
ฉ.1 ท่อทองแดงชนิดเส้น มาตรฐาน ASTM-B88 ความยาว 6 เมตร	75
ช.1 เปรียบเทียบค่า f และ f_0 ที่ค่า X/R ต่างๆกัน	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงพิกัดความถี่ 150 kHz เพื่อใช้ในการทดสอบการwabไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งเมื่อนำมาใช้ในการศึกษาเรื่องการเบรกดาวนในอากาศทำให้ไม่เห็นภาพที่ชัดเจน และหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่สั่งซื้อจากต่างประเทศนั้นมีราคาค่อนข้างสูง ในโครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาและออกแบบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง โดยคำนึงถึงระยะทางการเกิดเบรกดาวนในอากาศเป็นหลักเพื่อใช้ในการศึกษา การวิจัย รวมไปถึงใช้เป็นสื่อในการประชาสัมพันธ์ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาหลักการและวิธีสร้างของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
- 2) เพื่อนำไปใช้ในการเรียนการสอน ให้นักศึกษาสามารถเห็นภาพจริงของการเบรกดาวนในอากาศได้
- 3) เพื่อส่งเสริมให้เกิดงานวิจัยภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.
- 4) เพื่อเพิ่มศักยภาพในการทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง พิกัด 750 kVA ความถี่ 1-35 kHz และสามารถเบรกดาวนในอากาศได้ระยะทางสูงสุด 200 cm.

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีและรายละเอียดมาตรฐานที่เกี่ยวกับการสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
- 2) ศึกษาการใช้งานโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง
 - โปรแกรม MATLAB
 - โปรแกรม Visio
 - โปรแกรม Solid Work
- 3) ทำการออกแบบส่วนประกอบและโครงสร้างส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
- 4) ทำการประกอบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
- 5) ทำการทดสอบหาคุณลักษณะการทำงานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง และทำการแก้ไขในส่วนที่บกพร่องบางประการ

- 6) สรุปผลการดำเนินงาน
- 7) จัดทำปฏิญานินพนธ์

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	ปี 2556					ปี 2557				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและรายละเอียดมาตรฐานที่เกี่ยวกับการสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง	←-----→									
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง	←-----→									
3. ทำการออกแบบส่วนประกอบและโครงสร้างส่วนต่างๆ ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง			←-----→							
4. ทำการประกอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง					←-----→					
5. ทำการทดสอบหาคุณลักษณะการทำงานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง และทำการแก้ไขในส่วนที่บกพร่องบางประการ								←-----→		
6. สรุปผลการดำเนินงาน									←-----→	←-----→
7. จัดทำปฏิญานินพนธ์										←-----→

วางแผน ←-----→

ปฏิบัติจริง ←-----→

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง พิกัด 750 kVA ความถี่สูงสุด 35 kHz
- 2) หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงสามารถเบรกดาวนในอากาศได้ระยะทางสูงสุด 200 cm
- 3) สามารถนำไปใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) และโคโรนา (Corona) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับประกอบการเรียนการสอน และการทดสอบเกี่ยวกับการเบรกตาวนในอากาศได้
- 5) เพิ่มศักยภาพห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

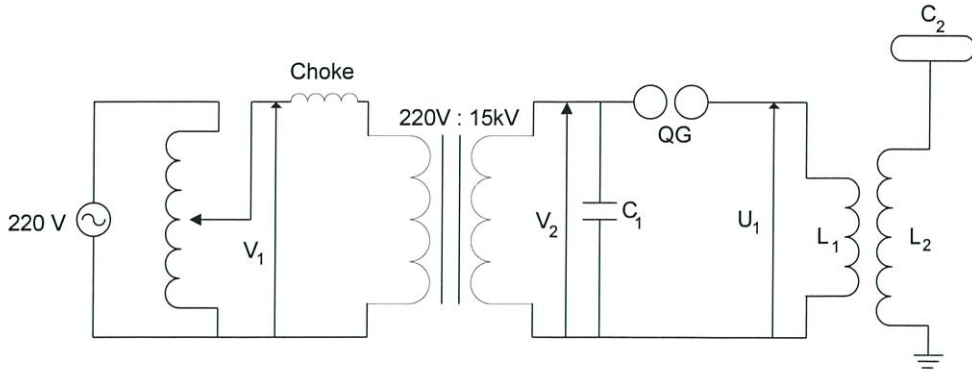
ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ก่อนอื่นต้องทราบทฤษฎี และทั้งหลักการทำงาน รวมถึงองค์ประกอบพื้นฐานเกี่ยวกับส่วนประกอบต่างๆ ของหม้อแปลง เช่น คุณสมบัติของตัวนำ สมบัติของวัสดุฉนวน สภาพการเหนี่ยวนำ ลักษณะการเกิดการคาบเกี่ยวระหว่างขดลวดทั้งสอง เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ และสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

2.2 ทฤษฎีทั่วไป

หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง จัดว่าเป็นหม้อแปลงชนิดพิเศษที่ใช้แกนของหม้อแปลงเป็นแกนอากาศขดลวดทั้งสองคือ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) จะติดตั้งอยู่ในแกนร่วมกัน การสร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงและความถี่สูงของหม้อแปลงจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนรอบของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง (Turn Ratio) แต่จะอาศัยหลักการออสซิลเลท (Oscillate) ในวงจร LC เมื่อ L คือ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) และ C คือความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของวงจรสร้างแรงดันสูงความถี่สูงหรือที่เรียกว่า หม้อแปลงเทสลา (Tesla Transformer) โดยขดลวดทั้งสองจะเกิดการคาบเกี่ยว (Coupling) กันด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางผ่านอากาศ (Air Core) เพราะฉะนั้นค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) จะมีค่าต่ำ ขดลวดด้านทุติยภูมิจะเป็นตัวรับพลังงานจากขดลวดปฐมภูมิด้วยความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) จะเป็นผลทำให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าระหว่าง 50 Hz ถึง 500 Hz แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกจะมีค่าเริ่มตั้งแต่ 100 kV ขึ้นไป ถ้าแรงดันที่ป้อนให้มีค่าเพียงพอ แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเมกกะโวลต์ และถ้ามีแรงดันเพิ่มสูงขึ้นถึงช่วงที่มีระดับแรงดันที่แน่นอนจะทำให้เกิดการสปาร์ค (Spark) และจะเปลี่ยนเป็นลำฟ้าผ่า (Lighting) ซึ่งจะสังเกตเห็นลำแสงได้ชัดเจน

2.3 หลักการทำงานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

จากรูปที่ 2.1 เป็นวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง และส่วนประกอบอื่นๆ ของวงจร ดังนี้ C_1 เป็นตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิ ส่วน C_2 เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ โดยรวมไปถึงค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Stray Capacitance) และมีแกปดับอาร์ค (Quenching Gap) ซึ่งเป็นสวิตช์เปิด-ปิดวงจรและยังทำหน้าที่ตัดลอาร์คหรือสปาร์คอีกด้วย



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

- เมื่อ
- C_1 = ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ (F)
 - C_2 = ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านทุติยภูมิ (F)
 - L_1 = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (H)
 - L_2 = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิ (H)
 - QG = แกปดับอาร์ค

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และเมื่อ C_1 ถูกอัดประจุจนได้รับแรงดันไฟฟ้าจนถึงระดับที่ทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างช่องอากาศ (Air Gap) สูญเสียค่าความเป็นฉนวนจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ระหว่างช่องอากาศที่ตัวแกปดับอาร์ค (Quenching Gap) ทำให้วงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง (หม้อแปลงเทสลา) ครบวงจร เป็นผลให้ C_1 คายประจุที่เก็บไว้ในรูปของสนามไฟฟ้าไปสู่ขดลวดปฐมภูมิ L_1 และขดลวด L_1 จะเก็บพลังงานในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อขดลวด L_1 เก็บพลังงานเต็มที่แล้วก็จะถ่ายทอดพลังงานที่เก็บไว้ไปให้ C_1 อีกครั้ง การถ่ายทอดพลังงานกลับไปกลับมาจะระหว่าง C_1 กับ L_1 จะทำให้เกิดการ ออสซิลเลท (Oscillate) ต่อเนื่องแบบ Damped Oscillation ที่ความถี่สูง สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz หรือ 1/50 วินาที ใน 1 Cycle ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ C_1 ใน 1 Cycle ทำให้เกิดการอัดประจุและคายประจุในช่วงครึ่งไซเคิลบวกและไซเคิลลบ ดังนั้นจะทำให้เกิดการออสซิลเลทแบบ Damped Oscillation อย่างต่อเนื่อง 100 ครั้งใน 1 วินาที ความถี่ออสซิลเลทที่ใช้จะสูงประมาณ 100 – 300kHz [1]

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) และค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของตัวออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) ค่าโดยประมาณของความถี่ที่ทำให้เกิดการออสซิลเลทนั้นสามารถหาได้จากสมการ

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- L_1 = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (H)
 - C_1 = ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ (F)
 - f_1 = ความถี่ออสซิลเลท (Hz)

การเกิดออสซิลเลท (Oscillation) ในวงจรทางด้านปฐมภูมิ (Primary) ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดด้านทุติยภูมิ (Secondary) ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ซึ่งมีความถี่เช่นเดียวกันกับทางด้านปฐมภูมิ ดังนั้นจะได้รับความสัมพันธ์ คือ

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$$

จะได้ $L_1C_1 = L_2C_2$ (2.2)

จากสมการที่ 2.2 วงจรทางด้านปฐมภูมิ (L_1, C_1) จะส่งพลังงานไปยังวงจรทางด้านทุติยภูมิ (L_2, C_2) ในลักษณะแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเริ่มลดลงและในขณะที่แรงดันด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น หากผลคูณระหว่างค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าในด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าในด้านทุติยภูมิแล้วจะทำให้เกิดการออสซิลเลทแบบหน่วง (Damped Oscillation) อย่างต่อเนื่องและจะเกิดพลังงานขึ้น ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.3

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$
 (2.3)

เมื่อ W = พลังงานที่เกิดขึ้น (J)
 C = ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (F)
 V = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุ (V)

และในกรณีพิจารณาค่าแรงดันด้านขาออกของวงจรสร้างแรงดันสูงและความถี่สูงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 หรือสมการที่ 2.5

$$U_2 = \sqrt{\eta \frac{C_1}{C_2} * U_1}$$
 (2.4)

เมื่อ U_2 = แรงดันไฟฟ้าด้านขาออก (V)
 U_1 = แรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า (V)
 η = ประสิทธิภาพการถ่ายทอดพลังงานของวงจร

$$U_2 = \rho \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} * U_1$$
 (2.5)

จากสมการที่ 2.5 เมื่อ ρ = สัมประสิทธิ์แรงดันซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.6

$$\rho = \frac{2\sqrt{1-\sigma}}{\sqrt{(1+a)^2 - 4\sigma a}}$$
 (2.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ a คืออัตราส่วนการจูน ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.7

$$a = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} \quad (2.7)$$

และอัตราส่วนการจูนจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีค่าเท่ากับ $a = 1-2K^2$
และค่า K คือ สัมประสิทธิ์การคัปปลิงซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.8

$$\sigma = 1-M^2(L_1 L_2) = 1-K^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดทั้งสอง

เมื่อแรงดันจ่ายออกทางด้านแรงสูงมีค่ามากพอจะทำให้เกิดการเบรกดาวนหรือมีล้าอาร์ค ซึ่งการเกิดล้าอาร์คนี้จะเกิดการได้ก็ต่อเมื่อมีการสปาร์คอย่างต่อเนื่อง

2.4 รายละเอียดส่วนประกอบของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง [1]

2.4.1 กราวด์อ้างอิง (Reference Ground)

กราวด์อ้างอิงถือเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อต้องการจะให้เกิดการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องการมีกราวด์ที่ดี ในส่วนที่อยู่ล่างสุดของทางด้านทุติยภูมิจะมีกระแสไหลในปริมาณมาก โดยจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงาน (Power) ของหม้อแปลง กราวด์ที่ดีจะนำมาใช้งานจำเป็นต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ที่ต่ำมากๆ ถึงจะเหมาะสมสำหรับนำมาใช้งาน

2.4.2 สปาร์คแกป (Spark Gap)

สปาร์คแกปจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ความเร็วสูง ตัวสปาร์คแกปจะต้องครอบคลุมระดับแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ไม่ต่างไปจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) หรือสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) การออกแบบต้องสามารถเป็นสวิตช์ (Switch) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงๆ อย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่า สปาร์คแกป เมื่อแรงดันตกคร่อมสปาร์คแกปมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างตัวของแกปเริ่มเกิดการไอออไนซ์ (Ionize) หากว่าเกิดการไอออไนซ์ที่เพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะทำให้เป็นสื่อที่แกปกระโดดไปยังอีกแกปหนึ่งได้ เมื่อแรงดันที่ตกคร่อมจะมีค่าลดลงจะทำให้การไอออไนซ์ลดลงด้วย และแกปก็จะกลับสภาพเดิม คือเปิดวงจร (Open Circuit) การดับของอาร์คจะเป็นไปตามเวลาที่กำหนดให้ดับ แกปจะมีความแข็งแรงที่จะทำการหยุดเป็นตัวนำที่รวดเร็ว ได้โดยจำนวนของแกปที่ต่ออนุกรมอยู่ ความร้อนและไอออน (Ion) จะเกิดขึ้นและแผ่ขยายไปเต็มที่ ถ้ามีอากาศเป่าที่แกปจะทำให้การดับอาร์คได้ดียิ่งขึ้น โดยอาศัยอากาศเป็นตัวช่วย ทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนร้อนที่เป็นสื่อในแกปเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น การต่อแบบอนุกรมของแกปที่เรียกว่า สเตตติกแกป (Static Gap) และยังมีอีกชนิดหนึ่งคือโรตารีแกป (Rotary Gap) จะมีส่วนประกอบ คือหนึ่งคู่ตัวนำที่อยู่กับที่และหลายคู่ตัวนำเคลื่อนที่ด้วยการหมุน โดยมีข้อแม้ว่าระหว่างแกปหนึ่งคู่ตัวนำที่หมุนจะต้องตรงกัน หรือเป็นแนวเดียวกันกับตัวนำที่หยุดนิ่ง จะทำการดับอาร์คโดยการทำงานของตัวนำที่เคลื่อนที่สำหรับแกปของสเตตติกแกปที่นำมาต่ออนุกรมกัน ที่ใช้หม้อแปลงเป็นแหล่งจ่าย

นั่นจะมีจำนวนและขนาดตัวนำขึ้นอยู่กับระดับกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง สามารถดูได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำนวนตัวนำของแกนต่อขนาดของหม้อแปลง

แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง	จำนวนของตัวนำ	จำนวนของสปาร์กแกป
9 kV	7	6
12 kV	9	8
15 kV	11	10

ตัวนำที่ใช้ทำแกปจะทำมาจากท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว และมีขนาดความยาว 3 ถึง 4 นิ้ว ระยะระหว่างแกปตัวนำจะอยู่ระหว่าง 0.025 ถึง 0.03 นิ้ว แกปจะสามารถใช้ได้กับขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 1.5 kW ขึ้นไป

2.4.3 ทอรอยด์ (Toroid)

ทอรอยด์ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงมีหน้าที่ต่างๆดังนี้

1. ทอรอยด์ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุของด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงเป็นส่วนช่วยทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ ถ้าทอรอยด์มีขนาดใหญ่ก็จะทำให้ได้ค่าของตัวเก็บประจุที่มากเมื่อขดลวดทำงานก็จะทำให้เกิดหมอกอากาศของการไอออไนซ์ขึ้นรอบๆจุดต่อของทอรอยด์ แต่ถ้าทำการต่อของทอรอยด์ที่จุดต่อจะทำให้การเกิดไอออไนซ์มีความราบเรียบและสมบูรณ์มากขึ้น

2. ทอรอยด์จะทำให้มีเสถียรภาพขึ้นรอบๆส่วนบนสุดของทุติยภูมิของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง คือ พยายามทำให้แรงดันลาดเอียง (Voltage Gradient) ลดลงอย่างมาก ในส่วนของระดับแรงดันที่เกิดขึ้นบนจุดต่อของทอรอยด์จะกลายเป็นแรงดันที่มีค่าสูงมาก

3. ทอรอยด์ทำหน้าที่ช่วยในการสร้างสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆ ส่วนบนสุดของขดลวดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

จากที่กล่าวมาแล้วทอรอยด์จะมีสนามไฟฟ้ารอบๆส่วนบนสุดของขดทุติยภูมิที่ตีมาก จึงเป็นเหตุผลทำให้เราเลือกใช้ทอรอยด์ในหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงนี้ และที่ทอรอยด์จะมีค่าของตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถหาค่าของตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ 2.9

$$C = 1.4(1.2781 - \frac{d_2}{d_1}) \sqrt{\pi d_2(d_1 - d_2)} \quad (2.9)$$

เมื่อ C = ค่าความจุไฟฟ้าของทอรอยด์ (pF)

d_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (นิ้ว)

d_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางของทอรอยด์ (นิ้ว)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของทอรอยด์ที่ใช้กับหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

2.5 คุณสมบัติของตัวนำ (Properties of Conductor) [1]

คุณลักษณะต่างๆ ของวัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการออกแบบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง มีข้อกำหนดหลายอย่างที่สำคัญเข้ามาเกี่ยวข้องเป็นพื้นฐาน หรือเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาและการตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุต่างๆ เช่น คุณสมบัติของฉนวนนี้เป็นตัวประกอบที่สำคัญที่สุด ในการออกแบบและการตัดสินใจเลือกใช้คุณสมบัติของวัสดุต่างๆ อย่างเหมาะสมจะเป็นผลทำให้การออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.5.1 อุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Temperature Effects)

โดยส่วนมากวัสดุที่เป็นโลหะนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทาน มักจะมีค่าสูงขึ้นไปตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ในสมการที่ 2.10

$$R_t = R_{20} + \alpha_{20}(T - 20) \quad (2.10)$$

เมื่อ R = ค่าความต้านทานที่ 20 องศาเซลเซียส

T = อุณหภูมิที่ใช้งาน

α = ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะที่ 20 องศาเซลเซียส

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบขดลวด คือ การเลือกขนาดที่ถูกต้องของขดลวด ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาผลของอุณหภูมิของขดลวดที่สูงขึ้นภายใต้สภาวะที่มีกระแสไหลอยู่ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นด้วย

2.5.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในตัวนำไฟฟ้า

ไม่มีวัสดุตัวนำทางไฟฟ้าใดที่จะเป็นตัวนำที่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิใดๆไป อย่างน้อยย่อมจะมีค่าความต้านทานอยู่บ้าง ค่าความต้านทานชนิดเอกพันธ์ (Homogenous Material) ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวขนาดของพื้นที่หน้าตัดและค่าความต้านทานจำเพาะ สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 2.11

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.11)$$

เมื่อ R = ค่าความต้านทานจำเพาะ ($\Omega \cdot m$)
 l = ความยาวของตัวนำ (m)
 A = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (m^2)

2.5.3 ผลของความถี่ต่อความต้านทาน (Frequency Effect)

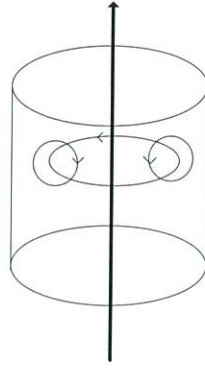
ค่าความต้านทานของวัสดุตัวนำจะเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากค่าความถี่ของกระแสที่ไหลในตัวนำ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ คือ ลวดเส้นหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในตัวนำเส้นลวดตรงกลางจะมีค่ามากกว่าบริเวณผิว เนื่องจากจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ในส่วนตรงกลางมีค่ามากกว่า จึงทำให้กระแสส่วนมากจะไหลบริเวณผิวของตัวนำ ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำที่นำกระแสนั้นเล็กกว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำจริง

2.5.4 สกินเอฟเฟค (Skin Effect)

ในการใช้งานของลวดตัวนำที่แรงดันกระแสตรงและกระแสสลับที่มีความถี่ต่ำ กระแสไฟฟ้าจะไหลในตัวนำได้เต็มพื้นที่หน้าตัด แต่เมื่อใช้งานที่กระแสสลับความถี่สูงจะไม่เป็นเช่นนั้น คือ จะเกิดสกินเอฟเฟค (Skin Effect) เป็นปรากฏการณ์จริงที่เกิดขึ้นในลวดตัวนำ เมื่อมีกระแสไหลก็จะเกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางถึงส่วนนอกสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย เมื่อมีความถี่สูงสนามไฟฟ้าจะทำการชาร์จอย่างรวดเร็วจะทำให้สนามแม่เหล็กชาร์จด้วย และเกิดเป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำหรือสนามแม่เหล็กชาร์จอย่างรวดเร็วด้วยตัวมันเอง จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด เป็นผลทำให้เกิดกระแสที่สูงมากที่สุดที่ด้านนอกของเส้นผ่านศูนย์กลาง และจะให้กระแสที่จุดศูนย์กลางจะลดลงมาก ซึ่งส่วนใหญ่ที่ความถี่สูงกระแสจะไหลในลวดเพียงบริเวณรอบๆ ผิวของสายตัวนำเท่านั้น ซึ่งด้านในสายทั้งหมดจะไม่มีกระแสไหลเลย เป็นผลมาจากความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาทำเป็นลวดตัวนำ ตามรูปที่ 2.3 เป็นการอธิบายผลที่เกิดจากสกินเอฟเฟค ที่ลูกศร (ชี้ขึ้น) แสดงถึงกระแสหลักที่ไหลในขดลวดตัวนำกระแสจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ดูได้จากวงรีสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำกระแสด้วยตัวมันเองโดยการชาร์จ ส่วนกระแสสามารถดูได้ที่วงกลมเพราะโดยทิศทางของกระแสจะตรงข้ามกับทิศทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งที่จุดศูนย์กลางกระแสจะลดลงและที่ผิวของลวดตัวนำจะมีกระแสเพิ่มขึ้น ความลึกของกระแสซึมซาบที่ผิวของลวดตัวนำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.12)$$

เมื่อ δ = ความลึกของกระแสซึมซาบที่ผิวลวดตัวนำ
 f = ความถี่ของกระแส (Hz)
 μ = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาทำลวดตัวนำ
 σ = สภาพนำไฟฟ้าของลวดตัวนำ



รูปที่ 2.3 การไหลของกระแสในลวดตัวนำเนื่องมาจาก Skin Effect

ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากสกินเอฟเฟกต์ (Skin Effect) คือ ใช้ลวดตัวนำที่มีขนาดเล็กมัดรวมกันเป็นขนาดใหญ่หรือจากการออกแบบจะใช้ลวดตัวนำแบบกลวง

2.5.5 ปรากฏการณ์โคโรนา (Corona Effect)

ปรากฏการณ์โคโรนาจะเกิดขึ้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนลวดตัวนำใกล้เคียงจะเป็นแรงดันเบรกดาวน และปรากฏการณ์โคโรนาจะขึ้นอยู่กับลวดตัวนำนั้นๆ โดยทั่วไปที่ลวดตัวนำที่มีรัศมีเล็กมากๆ จะเป็นเรื่องง่ายสำหรับการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) ปรากฏการณ์โคโรนาสามารถมองเห็นเป็นแสงสว่างสีฟ้าขึ้นรอบๆลวดตัวนำ การเกิดปรากฏการณ์โคโรนานี้จะทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานไฟฟ้า เราสามารถลดปรากฏการณ์โคโรนาลงได้ด้วยการนำส่วนที่ความสม่ำเสมอไปแทนที่จุดที่มีความแหลมคม เพื่อทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอหรือมีความเข้มของสนามไฟฟ้าลดลง เป็นการทำให้การเกิดปรากฏการณ์โคโรนานั้นลดลง ผลของการเกิดโคโรนาดิสชาร์จจะเป็นเหตุให้ผิวของลวดตัวนำหรือฉนวนเสื่อมคุณภาพและทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปโดยเปล่าประโยชน์

2.6 ความสำคัญของไดอิเล็กทริก [1]

แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก (NI) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) ทำให้เกิดสนามไดอิเล็กทริกขึ้น ถ้าในวงจรสนามแม่เหล็กมีฟลักซ์ที่มีค่าเท่ากันไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่ไม่เท่ากัน พิจารณาที่ความยาวของวงจรสนามแม่เหล็กที่เท่ากัน บริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กหนาแน่นมาก แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวก็มีค่ามาก แรงเคลื่อนแม่เหล็กต่อหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็กเรียกว่า Magnetizing Force ทำนองเดียวกันสำหรับสนามไดอิเล็กทริก บริเวณใดที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงไดอิเล็กทริกสูงก็จะมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของวงจรแม่เหล็กมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของวงจร ไดอิเล็กทริก เรียกว่า เกรเดียน (Gradient) ในวงจรแม่เหล็กที่มีค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กคงที่ วัสดุที่มีความซึมซาบสูงวางไว้ในสนามแม่เหล็ก จะมีฟลักซ์แม่เหล็กมาก ในทำนองเดียวกันในวงจรไดอิเล็กทริก วัสดุใดที่มีค่าความซึมซาบสูงวางไว้ในสนามไดอิเล็กทริกจะเกิดฟลักซ์ไดอิเล็กทริกมาก ฉนวนจะเกิดการเบรกดาวน (Breakdown) ที่จุดใด ๆ ก็ต่อเมื่อความหนาแน่นฟลักซ์ไดอิเล็กทริกที่จุดนั้นจะมีค่าสูง ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความหนาแน่นฟลักซ์ไดอิเล็กทริกวิกฤตค่าหนึ่ง ซึ่งค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเกินค่าวิกฤตนี้ จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนคุณสมบัติเป็นตัวนำ นั่นคือ เบรกดาวน (Breakdown) ดังนั้นเรื่องของวิชาไฟฟ้าแรงสูง

การพิจารณาเกี่ยวกับการเบรกดาวนของฉนวนจึงมีความสำคัญมาก ฟลักซ์ไดอิเล็กทริก (ψ) ในฉนวนขึ้นอยู่กับศักดาไฟฟ้า ความซึมซาบ (Permittivity) ของฉนวน ระยะห่าง และรูปร่างของอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการของฟลักซ์ดังนี้

$$\psi = CV \quad (2.13)$$

ความหนาแน่นฟลักซ์ที่จุดใดๆ ขึ้นอยู่กับเกรเดียน (Gradient) E , Volt/cm และขึ้นอยู่กับความซึมซาบ (Permittivity) ของฉนวนด้วย

$$D = \left(\frac{dv}{dx}\right)\epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.14)$$

$$D = E\epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.15)$$

$$D = \psi/A \quad (2.16)$$

เมื่อ ϵ_0 = ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก(Dielectric Constant)

ϵ_r = ค่า Relative Permittivity ของไดอิเล็กทริก

A = พื้นที่หน้าตัดของฉนวนไดอิเล็กทริก

1. ความหนาแน่นฟลักซ์ขึ้นอยู่กับเกรเดียน (Gradient = dv/dx) ดังนั้นฉนวนจะเบรกดาวนเมื่อเกรเดียนมีค่ามากเกินไป ความแข็งแรงของฉนวนอาจบอกมาในเทอมของเกรเดียน แทนที่จะเป็นความหนาแน่นฟลักซ์ไดอิเล็กทริก (Dielectric Flux Density)

2. ความเค้น (Stress) ที่บนฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิเล็กโทรดด้วย กรณีรูปร่างของอิเล็กโทรดแหลมเหมือนเข็ม ความหนาแน่นฟลักซ์หรือเกรเดียนที่ปลายมีค่าสูงมาก แม้ว่าแรงดันไฟฟ้ามีน้อย จากที่ได้ศึกษาสรุปได้ว่าจุดใดมีความหนาแน่นฟลักซ์มากในวงจรแม่เหล็กทำให้เกิดความสูญเสียมาก แต่วงจรไดอิเล็กทริกความหนาแน่นฟลักซ์มากทำให้ฉนวนเสียหายได้

3. ค่าเกรเดียนที่ผิวตัวนำนั้นจะขึ้นกับรูปร่าง และลักษณะการวางตัวนำมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถแยกตามลักษณะทางเรขาคณิต เช่น ทรงกลม แผ่นระนาบขนานกัน ทรงกลมกระบอกแกนร่วม และลวดตัวนำขนานกัน

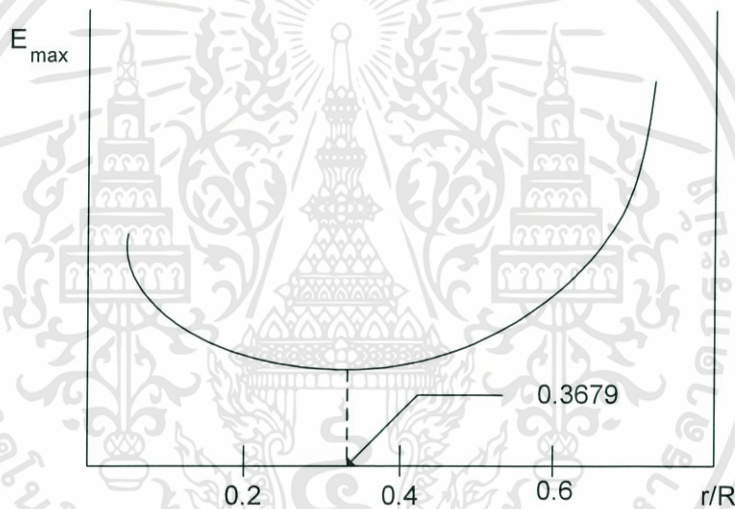
2.7 สภาวะการเกิดสปาร์คโอเวอร์กับการเกิดโคโรนา (Sparkover and Corona Chenonens)

สำหรับลวดตัวนำในทรงกระบอกเกรเดียนสูงสุด ซึ่งการเกิดเบรกดาวนจะเกิดขึ้นที่จุดใดก่อนนั้นก็คือ ผิวของลวดตัวนำ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$E = \frac{V}{r \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (\text{Kv/cm}) \quad (2.17)$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างลวดตัวนำและทรงกระบอกที่ทำให้เกรเดียนของผิวตัวนำเปลี่ยนสภาพจากที่คุณสมบัติเป็นฉนวนกลายเป็นตัวนำ ทำให้เกิดโคโรนา (อากาศนั้นมีค่าเบรกดาวนที่ 30 kV/cm ที่ความดัน 760 mm.Hg ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้มีผลทำให้เสมือนลวดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำมีขนาดใหญ่ขึ้นนี้ทำให้เกรเดียนที่ถัดออกไปจากบริเวณที่เกิดโคโรนาค่าลดลง การเบรกดาวน์ก็
จะไม่ลุกลามต่อไป คือ ไม่เกิดการเบรกดาวน์แบบต่อเนื่องที่เรียกว่าเกิดโคโรนาที่ผิวของลวดตัวนำ แต่
ถ้าการเบรกดาวน์ของอากาศที่ผิวลวดตัวนำทำให้อากาศเป็นตัวนำและลวดตัวนำเสมือนมีขนาดใหญ่
ขึ้นแล้ว เกรเดียนที่ถัดออกไปจากบริเวณที่อากาศเป็นตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้การเบรกดาวน์
ลุกลามต่อเนื่องออกไปและในที่สุดก็จะเกิดสปาร์คโอเวอร์ ดังนั้นสภาวะการเกิดโคโรนาหรือสปาร์ค
โอเวอร์ (Sparkover) จึงพิจารณาจากเกรเดียนว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่ออากาศเบรกดาวน์ ดังนั้นเราจึง
ได้ความสัมพันธ์ว่า $1/E$ มีค่ามากที่สุดเมื่อ $r/R = e$ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนสูงสุด
และ r/R ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ที่ r/R มีค่าน้อยกว่า $1/e$ หรือ 0.3679 เมื่ออากาศที่ผิวลวดตัวนำ
เบรกดาวน์ทำให้เสมือนลวดตัวนำใหญ่ขึ้นนั้น คือ r เพิ่มขึ้น แต่ E_{max} กลับมีค่าลดลง ดังนั้น ที่
 $r/R < 1/e$ จะเกิดโคโรนาก่อน นอกจากว่าจะต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นไปเรื่อยๆจนเกิดสปาร์ค
โอเวอร์ แต่ที่ $r/R > 0.3679E_{max}$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ r เพิ่มขึ้น ดังนั้นในกรณีไม่มีการพอร์มตัวของ
โคโรนาเกิดขึ้น เมื่อเกรเดียนที่ผิวของลวดตัวนำสูงพอที่จะทำให้ให้อากาศที่ผิวลวดตัวนำเบรกดาวน์ก็จะ
เกิดสปาร์คโอเวอร์ทันที



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์เกรเดียนสูงสุดกับ r/R

2.8 ผลของความหนาแน่นและความชื้นของอากาศต่อแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ (Effect of Relative Air Density and Humidity) [1]

ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสปาร์คโอเวอร์ข้ามระยะแกปนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของอากาศ
ในบริเวณนั้น การเพิ่มของแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ เมื่อปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นอาจอธิบายได้ว่าเกิดจาก
ความสามารถของการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโมเลกุลหรืออะตอมในอากาศมีค่าสูงขึ้น ผลของ
ความหนาแน่นของอากาศสูงจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์สูงตามไปด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น
เมื่อความดันอากาศสูงขึ้นและค่าอุณหภูมิลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์จะแปรตาม
ค่าความหนาแน่นของอากาศ โดยที่ความหนาแน่นของอากาศจะเป็นฟังก์ชันความดันและอุณหภูมิ
ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ (σ) ที่ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 760 mm.Hg หาได้จาก
สมการ

$$\sigma = 0.386 \left(\frac{p}{273+t} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ p = ค่าความดันของอากาศ (mm.Hg)
 t = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
 σ = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ

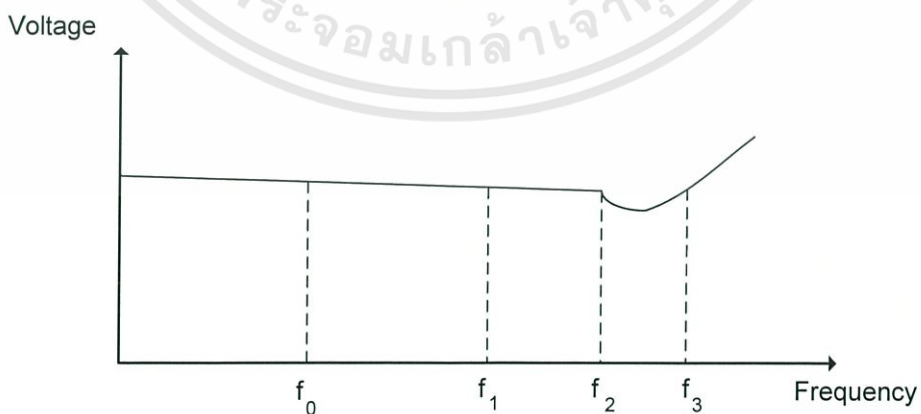
ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ภายใต้บรรยากาศที่แตกต่างกับบรรยากาศมาตรฐาน คือที่ 20 องศาเซลเซียส 760 mm.Hg จำเป็นต้องหาค่าความชื้นของอากาศเพื่อนำไปคูณกับค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์มาตรฐาน เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นจริงในทางปฏิบัติภายใต้สภาวะบรรยากาศในขณะนั้น ซึ่งมาตรฐานของ IEC ค่า σ จะอยู่ระหว่าง 0.95 – 1.05 ดังสมการ

$$V = \sigma V_n; 0.95 \leq \sigma \leq 1.05 \quad (2.19)$$

เมื่อ V = ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ความหนาแน่นของอากาศ
 V_n = ค่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของ IEC

2.9 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ความถี่สูง (Breakdown Voltage at High Frequency) [1]

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่แยกได้เป็น 5 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ในแต่ละช่วงนั้นมีขบวนการทางฟิสิกส์ต่างๆ ดังนี้ ที่ความถี่ต่ำกว่า f_0 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ทั้งนี้เป็นเพราะไอออนบวกหรือประจุอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างไอออนไนซ์เซชันในช่วงครึ่งไซเคิลแรก มีเวลามากพอที่จะเคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโทรดและครึ่งไซเคิลต่อไป จึงไม่มีประจุอากาศเหลือจากครึ่งไซเคิลแรก และกระบวนการก็เริ่มใหม่เหมือนเดิม เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าความถี่ f_0 ส่วนหนึ่งของไอออนบวกของครึ่งไซเคิลแรกยังเหลืออยู่ทำให้เกิดประจุอากาศสะสมไปเรื่อยๆ ทำให้แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์มีค่าต่ำลง



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์และความถี่

สำหรับความถี่วิกฤตนั้นขึ้นอยู่กับความดันของแก๊ส และระยะระหว่างอิเล็กโทรด เช่น ในช่องว่างอากาศในสนามสมมาตรที่ความดันบรรยากาศ ความถี่วิกฤตมีค่า 1 MHz ระยะช่องว่าง 0.09 cm ความถี่วิกฤตมีค่า 110 kHz ที่ระยะช่องว่างอากาศ 0.45 cm และความถี่วิกฤตมีค่า 20 kHz ที่ช่องว่างอากาศ 2.5 cm จะเห็นได้ว่าความถี่เปลี่ยนแปลงผกผันกับระยะช่องว่างอากาศโดยประมาณ ถ้าความดันแก๊สเพิ่มมากขึ้น ค่าความถี่วิกฤตต้องมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความถี่จนถึง f_1 แล้วหลังจากนั้นแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนมีค่าเกือบคงที่เมื่อความถี่เพิ่มต่อไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะประจุอากาศที่เกิดขึ้นในช่องว่างไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไป เนื่องจากสภาวะสมดุลระหว่างการเกิดไอออนและการกระจายของประจุของอากาศไปยังอิเล็กโทรด เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจนถึง f_2 ต่อจากนั้นแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนที่ลดลงที่ความถี่ในช่วงระยะเวลานี้ ในครึ่งไซเคิลสั้นเกินไปสำหรับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรด ดังนั้นอิเล็กตรอนบางส่วนไม่สามารถข้ามอิเล็กโทรดได้ในช่วงครึ่งไซเคิล และเหลืออยู่ภายในช่องว่าง ทำให้การไอออนในเซชันในช่วงครึ่งไซเคิลหลังดีขึ้น ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนจึงมีค่าลดลง ที่ความถี่สูงกว่า f_2 แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนจะเริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่กำลัง (Power Frequency) ที่เป็นเช่นนี้ เพราะเวลาในครึ่งไซเคิลนั้นสั้นมากจนอิเล็กตรอนไม่สามารถทำให้เกิดการไอออนในเซชันชุดแรกสมบูรณ์ได้ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น เพื่อเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วเพิ่มขึ้น

2.10 ฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กทริก (Insulator or Dielectric Materials) [1]

โครงสร้างทางกายภาพและคุณสมบัติของวัสดุที่เป็นฉนวนที่ใช้กับความถี่สูง จะแตกต่างกันไปจากวัสดุฉนวนที่ใช้กับความถี่ต่ำ สิ่งที่สำคัญคือค่ากำลังสูญเสียในไดอิเล็กทริกจะมีค่ามากในกรณีความถี่สูง กำลังสูญเสียนี้จะทำให้เกิดความร้อน เป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนที่ความถี่ต่ำของวัสดุฉนวน ฉะนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพของวัสดุฉนวนหรือไดอิเล็กทริกที่นำมาใช้

2.10.1 วัสดุฉนวนในอุดมคติ (Ideal Insulation Material)

วัสดุฉนวนมีองค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic) สารอนินทรีย์ (Inorganic) และแร่ (Mineral) วัสดุฉนวนมีทั้งที่ได้จากธรรมชาติและสังเคราะห์ วัสดุฉนวนในอุดมคติควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ค่า Dielectric Strength สูงที่อุณหภูมิสูง
2. เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
3. มีความคงทนที่อุณหภูมิสูง
4. มีคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น ง่ายต่อการใช้งานและการนำไปใช้ค่าความต้านทาน

จะไม่มีล้มเหลว (Failure) เมื่อการสั่น (Vibration)

ราคาวัสดุฉนวนจะแปรตามจำนวนหรือประมาณโดยตรง ฉะนั้นในการเลือกใช้วัสดุจึงต้องคำนึงราคาทางสถานะเศรษฐกิจ พร้อมทั้งมีคุณสมบัติความเข้มแข็งทางไฟฟ้าและทางกลที่สูงด้วย มีความคงทนต่อการติดตาม (Tracking) คือ การฟอร์มตัวเป็นทางเดินตัวนำถาวร (Permanent Conducting Path) บนผิวของฉนวนและส่วนมากการนำไฟฟ้า (Conduction) เกิดเนื่องจากการเสื่อมคุณสมบัติ (Degradation) ของฉนวนและมีการนำความร้อนที่ดีที่แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวนสูง

2.10.2 ชนิดของวัสดุฉนวน (Type of Insulation Materials)

วัสดุฉนวนมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดคือ

1. แก๊ส (Gases)
2. ของเหลว (Liquid)
3. ของแข็ง (Solids)

2.11 คุณสมบัติของฉนวน (Properties of Insulation) [2]

2.11.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties)

1. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของเหลวจำพวกน้ำมันวานิช , Epoxy และฉนวนอื่นๆ ค่าความถ่วงจำเพาะเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพื่อป้องกันถึงคุณสมบัติของของเหลวแต่ละชนิด ส่วนของแข็งสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือค่าความหนาแน่น

2. การดูดกลืนความชื้น (Moisture Absorbtion) เป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นเหตุให้จุดเบรกดาวน์ต่ำลงได้ในวัสดุฉนวนต่างๆ โดยเฉพาะฉนวนน้ำมัน

3. ผลของความร้อน (Thermal Effect) เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการพิจารณาเลือกวัสดุฉนวนมาใช้ หลักการที่จะพูดถึงคือจุดหลอมเหลว อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการอ่อนตัวของพลาสติกอย่างเช่น PVC ที่นำมาเป็นแกนของขดลวดแรงสูง ซึ่งอายุการใช้งานของวัสดุฉนวนย่อมจะขึ้นอยู่กับผลของความร้อนด้วย

2.11.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)

1. ความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) กระแสที่สามารถไหลผ่านในวัสดุฉนวนใด ย่อมขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของฉนวน และผลของความชื้นที่จะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะเปลี่ยนแปลง หรืออาจเป็นทางเดินของตัวนำบนผิวของวัสดุฉนวนที่เรียกว่า Film on The Surface

2. ค่า Dielectric Strength เป็นคุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่สามารถทนความเค้นของสนามไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่อไดอิเล็กทริก

3. การเกิดประกายไฟวาบตามผิวฉนวน (Flash Over) วัสดุที่เป็นของแข็งอย่างเช่น ลูกถ้วยฉนวนผิวเรียบขัดมัน เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนจะทำให้ค่า Dielectric Strength ของลูกถ้วยฉนวนนั้นสูงกว่าค่า Dielectric Strength ของอากาศ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมลูกถ้วยเพิ่มขึ้นจะทำให้อากาศรอบๆ ลูกถ้วยเกิดการเบรกดาวน์เป็นประกายวาบไฟขึ้นรอบๆ ลูกถ้วย ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Flash Over

4. ค่า Permittivity ปริมาณของประจุของตัวเก็บประจุที่ประกอบแผ่นตัวนำ 2 แผ่น หรือมากกว่าจะหาได้จาก Permittivity ที่มีความสัมพันธ์กับค่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างตัวนำ คือ คุณสมบัติของไดอิเล็กทริก

5. พาวเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) และค่าสูญเสียของไดอิเล็กทริก (Dielectric Losses) ค่า Power Factor จะแปรตามค่าความถี่และอุณหภูมิ ส่วนค่าสูญเสียของไดอิเล็กทริกจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

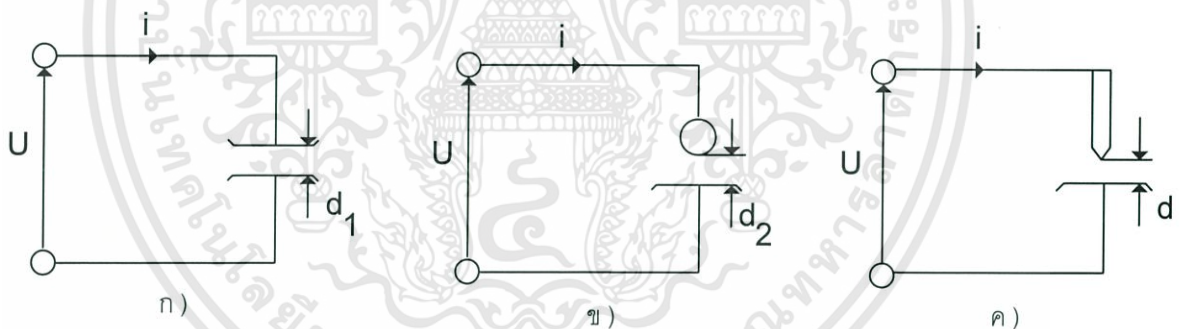
2.12 สนามไฟฟ้าและเทคนิคการฉนวน [3]

การฉนวนเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างและใช้ประโยชน์ทางไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานทางด้านแรงสูง ที่ได้มีสนามไฟฟ้าที่นั่นต้องมีการฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เข้ามาใกล้หรือสัมผัส หรือป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างสายไฟฟ้ากับสายไฟฟ้า หรือระหว่างสายไฟฟ้ากับดิน การฉนวนแก่ส่วนที่มีไฟฟ้าก็ยอมทำได้ง่ายถ้ามีที่ว่างมากพอหรือแรงดันนั้นต่ำกว่า 100 V แต่ในกรณีแรงดันไฟฟ้าสูงและมีที่ว่างจำกัด การออกแบบฉนวนให้ดีและประหยัดจำเป็นต้องใช้ความรู้ เทคนิคการฉนวนซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้าและลักษณะสมบัติของฉนวน

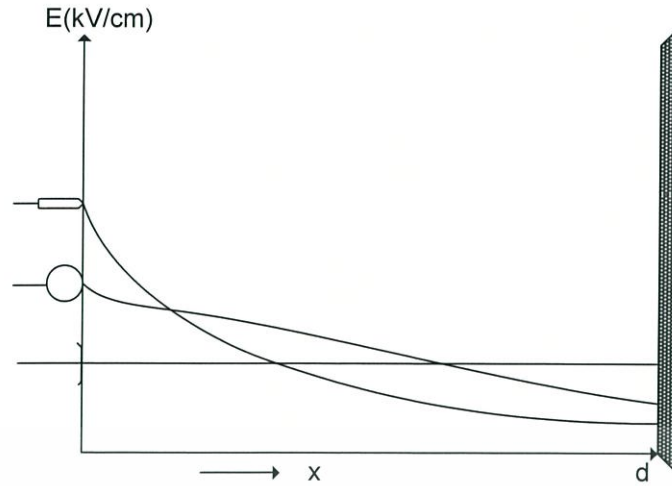
2.12.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า

ความคงทนฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าหมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทำได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน์หรือทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็น kV/cm คือมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโทรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform Field) คือเป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นราบ (plate to plate) ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆหลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

$$E_b = f(\text{ลักษณะแห่งเรขาคณิตอิเล็กโทรด, ลักษณะคุณสมบัติของไอไดอิเล็กทริกและเวลา})$$



รูปที่ 2.6 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน



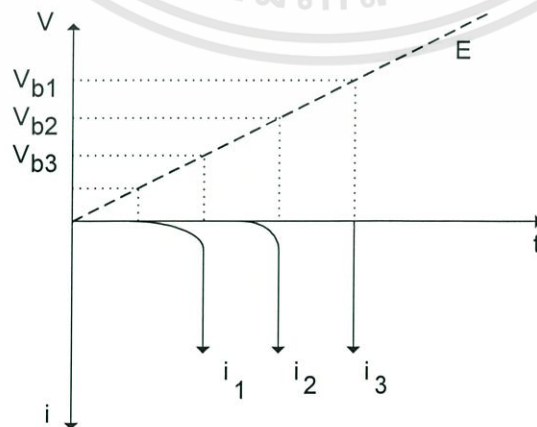
รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

ถ้าป้อนแรงดันที่อิเล็กโทรดลักษณะต่างๆที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.6 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะห่างให้ $d_1 = d_2 = d_3 = d$ ก็ตาม ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 และฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าไม่ตายตัวที่ค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆ เช่น แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Efficiency Factor) ทำให้มีลักษณะของสนามไฟฟ้าเป็นแบบต่างๆ ได้แก่

- ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
- ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-Uniform Field)
- ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-Uniform Field)

2.12.2 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)

$$E_{max} = E_{ave} = \frac{V}{d} \quad \text{kV/cm} \quad (2.20)$$



กรณี 1 , 2

$$V_i = V_b ; E_i = E_b$$

กรณี 3

$$V_i < V_b$$

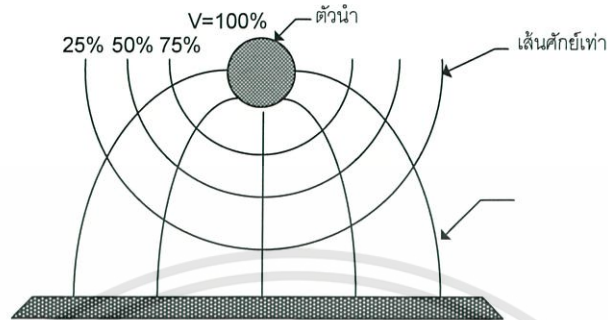
รูปที่ 2.8 ความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นค่าความคงทนของฉนวนไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

$$E_b = \frac{V_b}{d} \quad \text{kV/cm} \quad (2.21)$$

2.12.3 สนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Non-Uniform Field)



รูปที่ 2.9 การกระจายของเส้นสนามไฟฟ้าและศักย์เท่า

$$E_{\max} = \frac{V}{d \times \eta^*} \quad (2.22)$$

โดยที่ $\eta^* = \frac{E_{\text{ave}}}{E_{\max}} \leq 1$

เมื่อ $\eta^* =$ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Efficiency Factor or Field Utilization Factor)

$$E_{\text{ave}} \cong \frac{V}{d}$$

$$E_b = \frac{V_b}{d \times \eta^*}$$

2.12.4 สนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non-Uniform Field)

ค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) สามารถหาได้จากสมการเดียวกันกับในสนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอเล็กน้อย คือ

$$E_b = \frac{V_b}{d \times \eta^*} \quad (2.23)$$

2.13 การเกิดการเบรกดาวนในก๊าซ [2]

การเกิดเบรกดาวนในก๊าซ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสภาพการฉนวนของก๊าซไปสู่สภาพนำไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในแก๊สระหว่างอิเล็กโตรดมากพอ จนทำให้แก๊สมีสภาพนำไฟฟ้าสูงพอ ปัจจุบันทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับในการอธิบายการเกิดเบรกดาวนในก๊าซมีอยู่ 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีของทาวนด์เซนต์ (Townsend's theory) และทฤษฎีของสตรีมเมอร์ (Streamer theory)

2.13.1 ทฤษฎีของทาวนด์เซนต์ (Townsend's theory)

ทฤษฎีนี้อธิบายการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซว่าเกิดจากการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากการชนไอออนเซชัน (Collision Ionization) ซึ่งประกอบด้วยขบวนการขั้นต้น (Primary or α - process) หมายถึงการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าและได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่วิ่งเข้าหาแอโนดพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าว (กำหนดให้เป็น e_1) เคลื่อนที่เข้าชนโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มอิเล็กตรอน (กำหนดให้เป็น e_2) โคจรอยู่รอบๆ นิวเคลียสหลังจากที่ e_1 ชนอิเล็กตรอนดังกล่าวแล้ว ถ้าพลังงานที่ e_2 ได้รับจากการชนมีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่าง e_2 กับนิวเคลียสของอะตอม หรือโมเลกุลของมัน e_2 จะหลุดออกมาเป็นอิสระจากอะตอมเดิมของมัน ซึ่งทำให้ขณะนี้มียอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นรวมเป็น 2 ตัวคือ e_1 และ e_2 เรียกว่า การเกิดไอออนเซชัน โดยอะตอมเดิมที่เป็นกลางจะกลายเป็นไอออนบวก การเกิดไอออนเซชันโดยทั่วไปจะหมายถึง การสร้างไอออนบวกโดยเอาอิเล็กตรอนออกมาจากอะตอมที่เป็นกลาง สำหรับกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแคโทด ซึ่งโดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจะยึดติดกับผิวอิเล็กโทรดด้วยแรงเนื่องจากไฟฟ้าสถิต ดังนั้นการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแคโทดหรืออิเล็กตรอนจะต้องให้พลังงานจำนวนหนึ่งไม่น้อยกว่าพลังงานเนื่องจากไฟฟ้าสถิตดังกล่าว ซึ่งอาจทำได้โดยการฉายแสง ฉายรังสี ให้ความร้อน หรือสนามไฟฟ้าไปแคโทด หรืออาจจะใช้การชนของไอออนบวกไปที่แคโทด ส่วนกระบวนการขั้นสอง (γ -process) อันเป็นกระบวนการที่เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นโดยการชนของไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการขั้นต้นซึ่งมีทิศทางในการเคลื่อนที่วิ่งเข้าชนแคโทด และเนื่องจากไอออนบวกมีน้ำหนักมากกว่าอิเล็กตรอน 1,840 เท่า เมื่อไอออนบวกนี้วิ่งเข้าชนแคโทดจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแคโทดทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระในแก๊สจะเพิ่มทวีคูณเพิ่มขึ้น ส่วนกระบวนการขั้นสองอีกกระบวนการหนึ่งคือกระบวนการที่ไอออนบวกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขั้นต้นวิ่งไปชนโมเลกุลของก๊าซ ถ้าไอออนบวกนี้มีพลังงานสูงพอก็จะทำให้เกิดไอออนเซชันในก๊าซ เรียกว่า กระบวนการ β (β - process) อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ไม่อาจนำมาอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซได้ ด้วยเหตุผลพอสรุปได้คือ

- ไอออนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออนเซชันในก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ เพราะจะเกิดได้ต้องใช้พลังงานตามทฤษฎีถึงสองเท่าแต่โอกาสเช่นนั้นน้อยมาก
- ถ้ากลไกการเกิดไอออนเซชันตามกระบวนการ (β) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ โลหะผิวของแคโทดจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรกดาวน์ แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโลหะที่ทำแคโทดมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์
- กลไกการเบรกดาวน์ตามกระบวนการ (β) ต้องใช้เวลาการเคลื่อนที่ของไอออนข้ามแก๊สมากกว่าเวลาการเกิดเบรกดาวน์ที่วัดได้

กระบวนการที่สองที่เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนแคโทด หรือที่เรียกว่ากระบวนการ (γ)

การเพิ่มทวีคูณของจำนวนอิเล็กตรอนโดยอาศัยกระบวนการขั้นต้นและกระบวนการขั้นสองสามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้ ใช้รูปที่ 2.10 ประกอบคำอธิบาย กำหนดให้แคโทดได้รับการกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจำนวน N_0 ตัวต่อวินาที

กระบวนการขั้นต้น จำนวนอิเล็กตรอนในระยะเวลา x ในแก๊ปที่ระยะ x จากแคโทดคือ

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \quad (2.24)$$

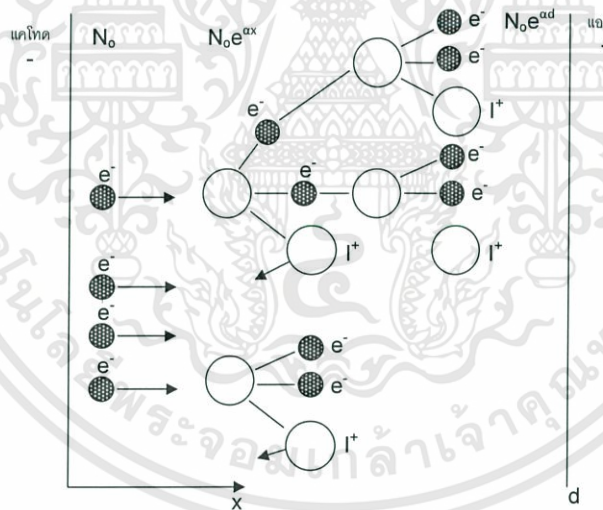
เมื่อ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาที

N_x = จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ x จากแคโทด

ดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าหาแอโนด ($x=d$) ต่อวินาที จะเป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha d}$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha d} - 1$ ตัว จะเห็นได้ว่าจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล แต่ตามลำพังกระบวนการขั้นต้นนี้ไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ เพราะถ้าเอาต้นกำเนิดที่สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ออกแล้ว กระบวนการไอออนไนเซชันจะหยุดลง ดังนั้นจึงต้องอาศัยกระบวนการที่สองจึงทำให้เกิดเบรกดาวน์



รูปที่ 2.10 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ α

เมื่อนำจำนวนอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากกระบวนการขั้นที่สองมาพิจารณาร่วมกับจำนวนอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากกระบวนการขั้นที่ 1 จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ปลดปล่อยจากแคโทดสามารถแสดงเป็นสมการได้

$$N_o'' = N_o + N_o' \quad (2.25)$$

เมื่อ $N_o =$ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาทีโดยการบวมการขึ้นต้น

$N_o' =$ จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากกระบวนการขึ้นที่สองต่อวินาทีที่แคโทด

$N_o'' =$ จำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากแคโทดต่อวินาที

แต่อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะชนโมเลกุลอิสระ หรืออะตอมตัวอื่นๆ แล้วเกิดไอออนในเซชันขึ้น มีโอกาสเกิดขึ้นเท่ากับ $e^{\alpha d} - 1$ ครั้ง จำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนบวกที่เกิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการชนจากกระบวนการข้างต้น โดยพิจารณาจากจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ปลดปล่อยจากแคโทด เป็นดังสมการที่ 2.26

$$N_o' = N_o'' (e^{\alpha d} - 1) \quad (2.26)$$

ไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการขึ้นต้นนั้น เมื่อเคลื่อนที่ไปชนแคโทด เป็นผลให้แคโทดปลดปล่อยอิเล็กตรอนมา เนื่องจากกระบวนการขึ้นที่ 2 เป็นไปจามสมการที่ 2.27

$$N_o' = \gamma N_o'' (e^{\alpha d} - 1) \quad (2.27)$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ไอออนในเซชันที่สองของทาว์นเซนต์
ดังนั้น จากสมการที่ 2.26 สามารถเขียนใหม่เป็น

$$N_o'' = N_o + \gamma N_o'' (e^{\alpha d} - 1) \quad (2.28)$$

หรือ

$$N_o'' = \frac{N_o}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.29)$$

พิจารณา สมการที่ 2.26 พบว่า จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงแอโนดมีค่าเท่ากับ

$$N_d = N_o'' e^{\alpha d} \quad (2.30)$$

$$N_d = \frac{N_o e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.31)$$

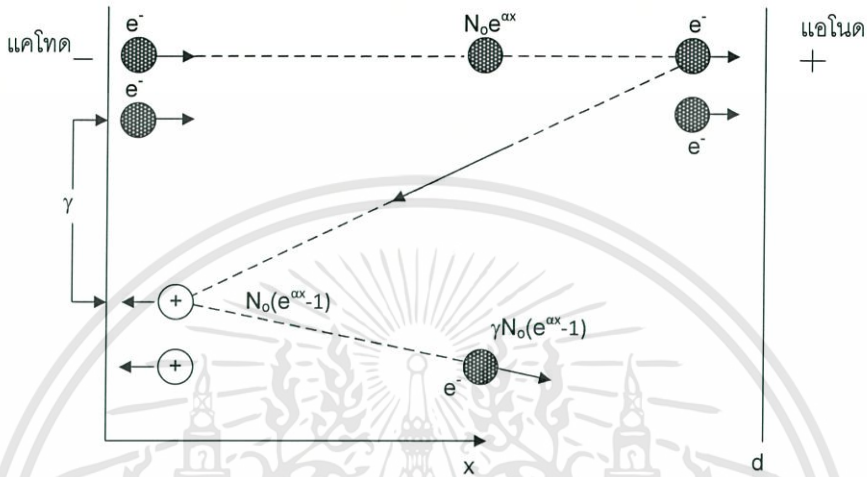
เพราะว่าการเคลื่อนที่ของประจุต่อเวลาคือกระแสไฟฟ้า จะได้สมการของกระแสเป็น

$$\frac{N_d}{N_o} = \frac{I}{I_o} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.32)$$

$$I = \frac{I_o e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.33 สามารถกล่าวได้ว่า ในขณะที่สนามไฟฟ้ามีค่าไม่สูงนัก $\gamma(e^{\alpha d}-1) \ll 1$ ซึ่งจะมีผลตรงกับ $I = I_0 e^{\alpha d}$ เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น $\gamma(e^{\alpha d}-1)$ มีค่าเข้าใกล้ 1 กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อ $\gamma(e^{\alpha d}-1) = 1$ กระแสจะมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) เราเรียกเงื่อนไขนี้ว่า การเบรกดาวนของทาว์นเซนต์ การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการขั้นที่ 2 แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยที่เงื่อนไขของการเบรกดาวน คือ



รูปที่ 2.11 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ γ

2.13.2 ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory)

เนื่องจากกลไกเบรกดาวนตามทฤษฎีของทาว์นเซนต์ไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวนได้ทุกกรณี เช่น การเกิดเบรกดาวนในช่องแคบกว้างๆ ในบรรยากาศของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวนในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด (Chopped Time, T_c) น้อยกว่า 0.1 ไมโครวินาที เป็นเวลานั้นน้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ เมื่อคำนวณเวลาตามกระบวนการของทาว์นเซนต์ที่ใช้สร้างอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนโดยการชน แตกตัว แล้วปล่อยอิเล็กตรอนจะพบว่า มากกว่าเวลาคลื่นตัดที่วัดได้จากการทดลองหรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยตรงจากแคโทดข้ามช่องแคบไปยังแอโนดโดยไม่ชนกับโมเลกุลเลยก็ใช้เวลา นานกว่าเวลาคลื่นตัดที่ทดลองได้ อีกประการหนึ่งคือทฤษฎีของทาว์นเซนต์ไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้าง ที่อยู่เบื้องหลังของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ก่อนๆ กลุ่มไอออนเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าเดิมบิดเป็นไปในทางที่มีความเครียดสูงขึ้นและอาจทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเกิดไอออนไนเซชันซ้ำได้ เช่น ในสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูง

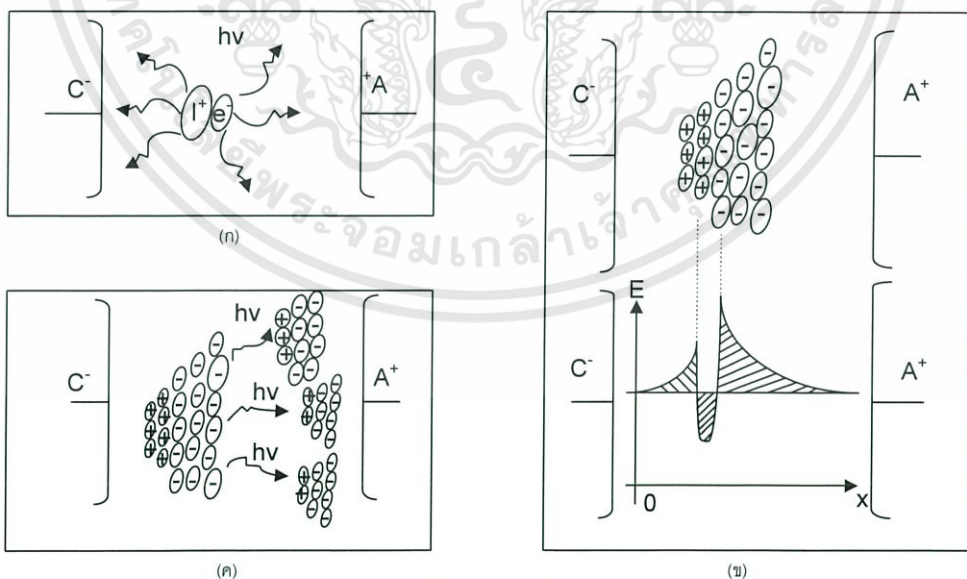
Meek และ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก ในปี 1940 และในเวลาเดียวกัน Rather ก็เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ซึ่งทฤษฎีของทาว์นเซนต์อธิบายไม่ได้ หลักการของการเกิดเบรกดาวนตามทฤษฎีสตรีมเมอร์เป็นผลสืบเนื่องจากการวิ่งชนไอออนไนเซชัน (กระบวนการ α) ของทาว์นเซนต์ กล่าวคือจะมีการไอออนไนเซชันเป็นจำนวนมากจากหลังโฟตอน ซึ่ง

เกิดจากการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ระหว่างไอออนบวกกับอิเล็กตรอนแล้วจะปลดปล่อยพลังงานออกมา การเกิดไอออนในเซชันแบบนี้เรียกว่า โฟโตไอออนเซชัน (Photo-Ionization) ของก๊าซ ดังรูป 2.12 โมเลกุลที่ส่วนหน้าของอะวาลานซ์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของอะวาลานซ์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไอออนในเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ไอออนบวกจึงรวมตัวกันอยู่เบื้องหลังเป็นหมอกประจุค้างความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวและหลังอะวาลานซ์เพิ่มสูงขึ้น แต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับประจุค้าง ความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ทำให้เกิดโฟโตไอออนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้น เกิดอะวาลานซ์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หมอกประจุค้างเพิ่มขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตริมเมอร์ระหว่างแอโนดกับแคโทด และเกิดเบรกดาวน์ตามแนวนี้ จึงเรียกกลไกเบรกดาวน์ลักษณะนี้ว่าสตริมเมอร์เบรกดาวน์

เงื่อนไขการเกิดสตริมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยช่วงต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ไปสู่สตริมเมอร์ ซึ่งแบ่งอธิบายออกเป็นสองทางตามทฤษฎี คือ

1. Meek และ Loeb ได้เสนอเงื่อนไขการเปลี่ยนจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์เดียวไปสู่สตริมเมอร์ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์มีค่าประมาณเท่ากับ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก

2. Rather เสนอเงื่อนไขสตริมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างเช่นกัน และกำหนดว่าสตริมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออนในเซชัน ประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซหรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.12 การเกิดโฟโตไอออนเซชัน

(ก) พลังงานโฟตรอน เป็นผลจากการรวมตัวกันใหม่

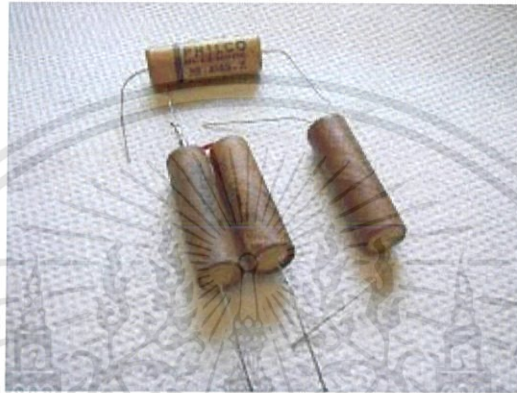
(ข) รูปแบบความเข้มสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป (ค) พัฒนาการของการเกิดสตริมเมอร์

2.14 ตัวเก็บประจุ [4]

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานในรูปแบบไฟฟ้า ในวงจรกำลังมักจะใช้ตัวเก็บประจุต่อเข้าไปในวงจรเพื่อแก้เพาเวอร์แฟลคเตอร์ ตัวเก็บประจุที่ใช้งานมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป จึงแบ่งชนิดของตัวเก็บประจุออกเป็น 7 ชนิดดังนี้

2.14.1 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

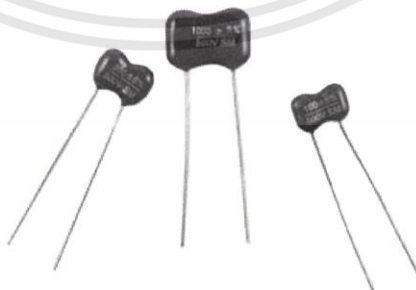
ใช้กระดาษชุบซีมีงเป็นไดอิเล็กทริก มีค่าความจุตั้งแต่ 0.001 ไมโครฟารัด ถึง 1 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดัน 200 ถึง 1600 โวลท์



รูปที่ 2.13 ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ

2.14.2 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

ใช้งานที่ความถี่สูงได้ดี (มากกว่า 200 เมกะเฮิรตซ์) มีค่าความจุต่ำ สัมประสิทธิ์ค่าเก็บประจุต่ออุณหภูมิสามารถควบคุมให้เป็นบวกหรือลบก็ได้ ค่าความสูญเสีย้น้อยมากถึงแม้ว่าจะใช้ในย่านความถี่สูง ตัวเก็บประจุแบบไมก้าอาจจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบโลหะฟอยล์ (Metal foil) โครงสร้างจะเป็นแผ่นไมก้าเรียงสลับกับแผ่นโลหะฟอยล์ และแบบซิลเวอร์ไมก้า (Silvered mica) โครงสร้างจะเป็นแผ่นไมก้าสลับกับแผ่นไมก้าฉาบด้วยเงิน ซึ่งจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ในการเปลี่ยนแปลงค่าเก็บประจุต่ออุณหภูมิต่ำ

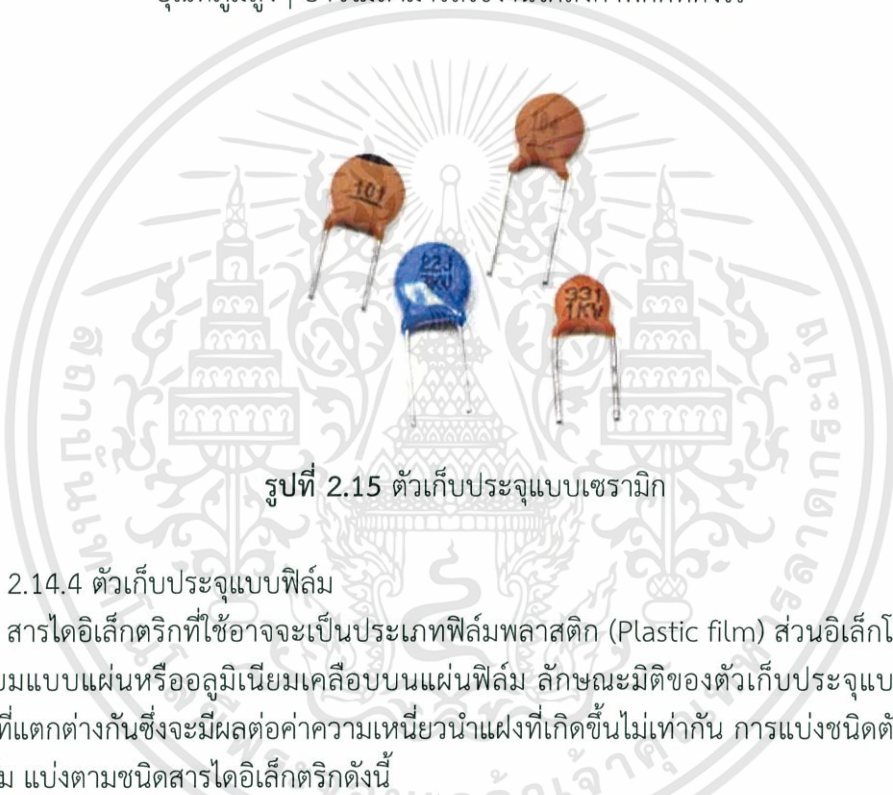


รูปที่ 2.14 ตัวเก็บประจุแบบไมก้า

2.14.3 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

มีการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามค่าไดอิเล็กตริก

- ไดอิเล็กตริกต่ำ (Low Dielectric) ขนาดโต พิกัดสูงสุดประมาณ 5000 พิโกฟารัด มีทั้งที่ชนิดที่สัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิเป็น 0 และเป็นลบ มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมเมื่อใช้ในย่านความถี่วิทยุและวงจรที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง ที่ต้องการค่าตัวเก็บประจุน้อยๆ
- ไดอิเล็กตริกปานกลาง (Medium Dielectric) มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิสูง คุณสมบัติดีด้อยกว่าแบบ Low Dielectric แต่ให้ค่าตัวเก็บประจุสูงกว่า
- ไดอิเล็กตริกสูง (High Dielectric) นำไปใช้ในวงจรทั่วไปได้ดีตัวเก็บประจุมีขนาดเล็ก มีค่าตัวเก็บประจุสูง แต่มีค่าควมพิงระวางคือที่แรงดันพิกัดหรืออุณหภูมิสูงๆ อาจไม่สามารถใช้งานได้ถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้



รูปที่ 2.15 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิก

2.14.4 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

สารไดอิเล็กตริกที่ใช้ อาจจะเป็นประเภทฟิล์มพลาสติก (Plastic film) ส่วนอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นอลูมิเนียมแบบแผ่นหรืออลูมิเนียมเคลือบบนแผ่นฟิล์ม ลักษณะมิติของตัวเก็บประจุแบบนี้มีหลายรูปแบบที่แตกต่างกันซึ่งจะมีผลต่อค่าความเหนียวหนาแน่นที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน การแบ่งชนิดตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม แบ่งตามชนิดสารไดอิเล็กตริกดังนี้

- ตัวเก็บประจุแบบโพลีเอสเตอร์ ออกแบบมาใช้งานในย่านอุณหภูมิก่อนข้างกว้าง แต่มีข้อจำกัดตรงที่จะต้องใช้ขนาด จุดอุณหภูมิที่ระบุไว้เท่านั้น คุณสมบัติของตัวเก็บประจุจะยังคงเดิมตามพิกัดที่ระบุ
- ตัวเก็บประจุแบบโพลีสไตรีน ออกแบบมาใช้งานกับแรงดันต่ำ ที่อุณหภูมิน้อยกว่า 100 องศาเซลเซียส โพลีสไตรีนมีคุณสมบัติความเป็นไดอิเล็กตริกที่ดีเยี่ยม แต่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ ดังนั้นตัวเก็บประจุชนิดนี้จึงมีขนาดโตกว่าตัวเก็บประจุชนิดอื่นที่พิกัดความจุไฟฟ้าเดียวกัน
- ตัวเก็บประจุแบบโพลีคาบอนเนต ออกแบบมาให้ใช้งานทั่วไป มีคุณสมบัติดี ใช้งานในย่านอุณหภูมิกว้าง
- ตัวเก็บประจุแบบโพลีโพรพิลีน ขนาดมิติของตัวเก็บประจุชนิดนี้ ค่อนข้างเล็กกะทัดรัดมีค่าเสถียรภาพทางอุณหภูมิปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวเก็บประจุแบบเทปลอน ออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นฉนวนสูงมาก



รูปที่ 2.16 ตัวเก็บประจุแบบฟิล์ม

2.14.5 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

มีค่าเก็บประจุสูง โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 1 ไมโครฟารัด ถึง 0.1 ฟารัด พิกัดแรงดันใช้งานสูงถึง 500 โวลต์ ข้อดีของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือ มีความคลาดเคลื่อนสูงอยู่ในช่วง -20 ถึง +100 เปอร์เซ็นต์ และมีกระแสรั่วไหลสูง ตัวเก็บประจุชนิดนี้อาจจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดย่อยด้วยกันตามชนิดของอิเล็กโทรด ได้แก่ อะลูมิเนียมหรือแทนทาลัม ซึ่งมีทั้งแบบที่มีขั้วหรือไม่มีขั้วก็ได้ โดยทั่วไปจะเป็นแบบมีขั้ว สารไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุชนิดนี้จะเป็นออกไซด์ที่เกิดขึ้นรอบแผ่นอิเล็กโทรดโดยวิธี แอโนไดเซชัน (Anodization)



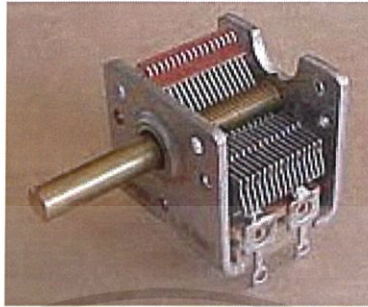
รูปที่ 2.17 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์

2.14.6 ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัม

ตัวเก็บประจุแบบแทนทาลัมเป็นชนิดหนึ่งของตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ บรรจุอยู่ในอิพอกซี ความจุไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ หลายร้อยนาโนฟารัดไปจนถึงหลายร้อยไมโครฟารัด

2.14.7 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

พิกัดค่าเก็บประจุอยู่ในช่วงพิโกฟารัดไปจนถึงหลายร้อยพิโกฟารัด พิกัดแรงดันในช่วงประมาณสองสามร้อยโวลต์จนถึงสองสามพันโวลต์ มีค่าความสูญเสียน้อยมากประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 2.18 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้



บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

จากทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง (Tesla Transformer) จะนำมาใช้ในการออกแบบหม้อแปลง ซึ่งในการสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงส่วนประกอบหลายส่วนดังนี้ แหล่งจ่ายหม้อแปลงแรงดันต่ำ ตัวเก็บประจุต้านแรงดันต่ำ ขดลวดทางด้านแรงต่ำ ขดลวดทางด้านแรงสูง ทอรอยด์ (ตัวเก็บประจุต้านแรงสูง) ชุดสปาร์กแก๊ป ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกประกอบรวมอยู่บนฐานที่สามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก

3.1 เงื่อนไขการออกแบบ

ในการออกแบบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในส่วนแรก คือ ตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง (C_2) ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด เนื่องจากแรงดันและความถี่ด้านขาออกจะมีการเปลี่ยนแปลง ในการสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงได้กำหนดพิกัดดังต่อไปนี้

- 1) พิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า 15 kV
- 2) พิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก 750 kV
- 3) พิกัดความถี่ 35 kHz

3.2 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง (C_2)

ในส่วนแรกของการออกแบบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ต้องคำนึงถึงทอรอยด์หรือตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูงก่อน การสร้างจะเริ่มจากการออกแบบทอรอยด์เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (C_2) โดยค่าความจุไฟฟ้าจากทอรอยด์สามารถหาได้จากสมการ 3.1



รูปที่ 3.1 พารามิเตอร์ทอรอยด์

$$C = 1.4(1.2781 - \frac{d_2}{d_1}) \sqrt{\pi d_2 (d_1 - d_2)} \quad (3.1)$$

- เมื่อ C = ค่าความจุไฟฟ้าของทอรอยด์ (pF)
 d_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางของทอ (นิ้ว)
 d_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางของทอรอยด์ (นิ้ว)

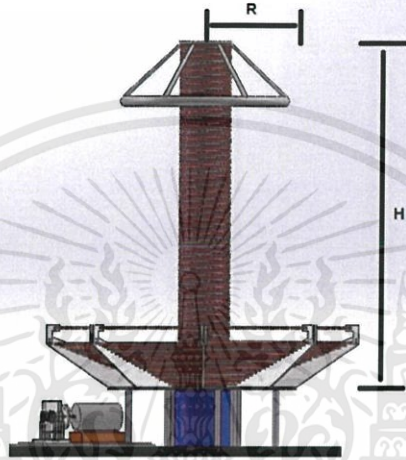
ในการออกแบบกำหนดให้ค่า $d_1 = 41$ นิ้ว , $d_2 = 2.5$ นิ้ว จะได้ดังนี้

จะได้

$$C = 1.4 \left(1.2781 - \frac{2.5}{41} \right) \sqrt{\pi(2.5)(41-2.5)}$$

$$C = 29.63 \text{ pF}$$

ค่าความจุไฟฟ้าแฝง (Stay Capacitance) ของขดลวดแรงสูงหาได้ดังสมการ 3.2



รูปที่ 3.2 พารามิเตอร์ของความจุไฟฟ้าแฝง

$$C_s = 0.29H + 0.41R + 1.94R \sqrt{\frac{R}{H}} \quad (3.2)$$

- เมื่อ C_s = ค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ (pF)
 R = รัศมีของแกนถึงศูนย์กลางขดลวด (นิ้ว)
 H = ความสูงของระยะพันขดลวด (นิ้ว)

ในการออกแบบกำหนดให้ ความสูงของระยะพันขดลวดแรงสูง เท่ากับ 1.8 เมตร (71 นิ้ว) และรัศมีของแกนถึงศูนย์กลางขดลวดแรงสูง เท่ากับ 20.5 นิ้ว

หาค่าความจุไฟฟ้าแฝงดังสมการ 3.2

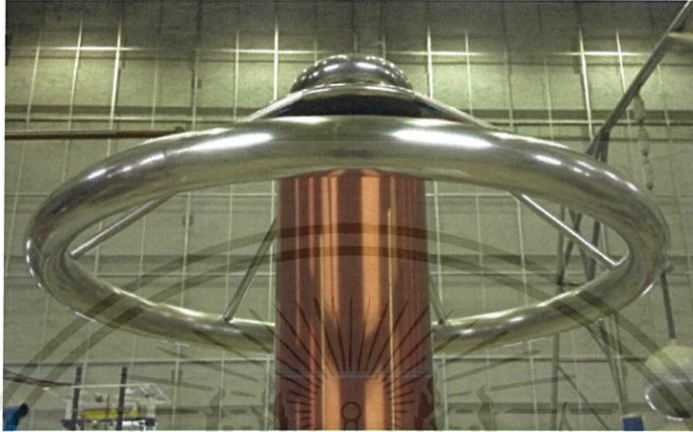
จะได้

$$C_s = 0.29(71) + 0.41(20.5) + 1.94(5) \sqrt{\frac{20.5}{71}}$$

$$C_s = 34.21 \text{ pF}$$

จากการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าแฝงมีค่าประมาณ 34.21 pF โดยเมื่อคิดความจุไฟฟ้าของ ทอรรอยด์รวมกับค่าความจุไฟฟ้าแฝง จะได้ค่าความจุไฟฟ้าตัวเก็บประจุด้านแรงสูง (C_2) เท่ากับ 63.84 pF

โดยทอรรอยด์ที่ทำการสร้าง สร้างโดยใช้ท่ออะลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว และตัดโค้ง เชื่อมเป็นวงได้วงแหวนทอรรอยด์เส้นผ่านศูนย์กลาง 41 นิ้ว



รูปที่ 3.3 ทอรรอยด์ที่ประกอบสร้างจริง

3.3 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดทางด้านแรงสูง (L_2)

หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ที่จะสร้างขึ้นมีแกนเป็นอากาศ ในโรงงานขึ้นนี้จะใช้ท่อพีวีซี สำหรับพันขดลวดทางด้านแรงสูง เนื่องจากฉนวนดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่ดูดความชื้น มีความแข็งแรงทางกลพอดี ราคาไม่แพง และสามารถหาได้ง่าย ท่อพีวีซีที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปขอเขตที่จะนำมาใช้งานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 , 8 , 10 , 12 , 14 และ 16 นิ้ว กำหนดให้ เลือกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10 นิ้ว

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบค่าต่างๆ ของท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว

	ลวดที่ใช้พัน ท่อ (SWG)	Ø ของลวด (mm)	L_2 (mH)	C_2 ที่ต้องการ (pF)		
				30 kHz	35 kHz	40 kHz
ความสูง ของท่อ (1.5 เมตร)	18	1.22	72.45	393.91	289.40	221.57
	20	0.92	128.80	218.52	160.54	122.91
	22	0.71	212.91	132.19	97.12	74.36
	24	0.56	315.54	89.20	65.53	50.17
	26	0.46	515.19	54.63	40.14	30.73
	28	0.38	851.64	33.05	24.28	18.59
	30	0.305	1159.17	24.28	17.84	13.66

จากสมการ $C = \frac{1}{(2\pi f)^2 \times L}$ เมื่อค่าความเหนี่ยวนำ (L_2) มีค่าดังตาราง 3.1 จะพบว่าได้ค่าความจุไฟฟ้าทางด้านแรงสูง (C_2) มีค่าต่างๆ กันออกไป

ดังนั้นจากตารางที่ 3.1 จึงเลือกใช้ ลวดที่ใช้พันท่อ คือ SWG เบอร์ 24 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.56 mm , ค่าความเหนี่ยวนำ เท่ากับ 315.54 mH, ความถี่ 35 kHz และ C_2 เท่ากับ 65.53 pF

สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงสูงดังสมการ 3.3

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_2} \quad (3.3)$$

ในการพันขดลวดทางด้านแรงสูง ค่าความเหนี่ยวนำมีโอกาสผิดพลาดได้เพื่อให้แน่ใจว่าจะได้ค่าความถี่อยู่ในย่านที่กำหนดจึงเลือกความถี่ในการคำนวณขั้นแรกเป็น 35 kHz เมื่อพิจารณาจากสมการข้างต้นจะเห็นว่า ถ้าพันขดลวดแล้วได้ค่าความเหนี่ยวนำที่มากไป ความถี่จะต่ำลง แต่ถ้าพันขดลวดแล้วได้ค่าความเหนี่ยวนำน้อยเกินไปจะทำให้ค่าความถี่สูงขึ้นซึ่งไม่ทำให้เกิดปัญหาแต่อย่างใด ดังนั้นเมื่อแทนค่าความถี่ (f) = 35 kHz และผลรวมของตัวเก็บประจุด้านแรงสูง (C_2) = 63.84 pF

จะได้

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 (35 \times 10^3)^2 \times (63.84 \times 10^{-12})}$$

$$L_2 = 323.90 \text{ mH}$$

3.3.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดแรงสูง

ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าทางด้านแรงดันสูงนี้ จะเป็นตัวกำหนดในการออกแบบขดลวดแรงสูง เพื่อหาขนาดขดลวดที่ต้องนำมาพันขดลวดแรงสูง ซึ่งถูกกำหนดด้วยความหนาแน่นของกระแส โดยการคำนวณจากกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ดังนั้นการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดแรงสูงจะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด สามารถคำนวณหากระแสลัดวงจรดังสมการ 3.4

กำหนดให้เกิดกระแสลัดวงจรที่ 750 kV_{peak} 35 kHz

$$I_{sc} = \frac{V_{peak}}{Z} = \frac{V_{peak}}{2\pi f L_2} \quad (3.4)$$

แทนค่าสมการได้ดังนี้

$$I_{sc} = \frac{750 \times 10^3}{2\pi \times 35 \times 10^3 \times 323.90 \times 10^{-3}} = 10.53 \text{ A}$$

กระแสประสิทธิผลที่ผ่านขดลวดแรงสูงจึงสามารถหาได้ดังสมการ 3.5

$$I_{\text{eff}} = I_{\text{sc}} \times \sqrt{\frac{\text{ช่วงเวลาที่มิกระแส 1 คาบ}}{\text{ช่วงเวลา 1 คาบ}}} \quad (3.5)$$

แทนค่าสมการได้ดังนี้

$$I_{\text{eff}} = 10.53 \times \sqrt{\frac{2.86 \times 10^{-5}}{10 \times 10^{-3}}}$$

$$I_{\text{eff}} = 563.13 \text{ mA}$$

จากความหนาแน่นของกระแส (J) ที่ไหลผ่านขดลวดซึ่งขึ้นอยู่กับค่าประสิทธิภาพและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและยอมรับได้ โดยอาศัยการระบายความร้อนด้วยอากาศหมุนเวียนตามธรรมชาติ โดยทั่วไปทองแดงจะมีค่าเท่ากับ 2.5 A/mm^2 พื้นที่หน้าตัดของขดลวดทองแดงหาได้ดังสมการ 3.6

$$A_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{eff}}}{J} \quad (3.6)$$

เมื่อ J = ค่าความหนาแน่นของกระแส (A/mm^2)
 I_{eff} = กระแสประสิทธิผล (A)
 A_{eff} = พื้นที่หน้าตัด (mm^2)

แทนค่าในสมการ 3.6 ได้ดังนี้

$$A_{\text{eff}} = \frac{563.13 \times 10^{-3} \text{ A}}{2.5 \text{ A/mm}^2} = 0.2253 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{eff}} = 0.02 \text{ cm}^2$$

เมื่อคิดผลของสภาพนำเชิงผิว (Skin Effect) ที่ความลึกของสภาพนำเชิงผิวซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความลึกของสภาพนำเชิงผิวดังสมการ 3.7

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi f \mu \sigma}} \quad (3.7)$$

เมื่อ δ = ค่าความลึกของสภาพนำเชิงผิว
 σ = สภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ (Ω/m)
 μ = Permittivity of Conductor
 f = ความถี่ (Hz)

ในกรณีของทองแดง $\sigma = 5.8 \times 10^9 \text{ } \Omega/\text{cm}$ ดังนั้นจะได้ค่าความลึกของสภาพนำเชิงผิวดังสมการ 3.8

$$\delta_{\text{Cu}} = \frac{6.62}{\sqrt{f}} \text{ cm} \quad (3.8)$$

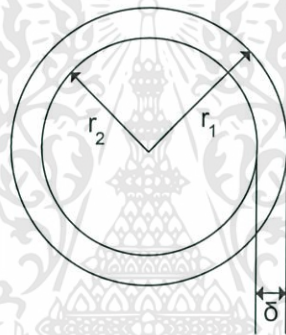
แทนค่าความถี่ที่ต้องการคือ 35 kHz ในสมการ 3.8 ได้ดังนี้

$$\delta_{\text{CU}} = \frac{6.62}{\sqrt{35 \times 10^3}} = 0.04 \text{ cm}$$

ถ้าใช้ลวดวงกลมในการพันขดลวดแรงสูง กระแสจะไหลผ่านเฉพาะที่ผิวรัศมี r_1 ซึ่งสามารถคำนวณหารัศมี r_1 ดังสมการ 3.9

$$\begin{aligned} (\pi r_1^2 - \pi r_2^2) &= A_{\text{eff}} & (3.9) \\ [\pi r_1^2 - (r_1 - \delta)^2] &= 0.02 \times 10^{-4} \\ r_1 &= 14.44 \times 10^{-3} \text{ cm} \end{aligned}$$

จากข้อมูลบริษัทผู้ผลิตเส้นลวด และสามารถเลือกขดลวดเพื่อนำมาพันขดลวดแรงสูงให้ได้ค่าความเหนียวนำที่มากกว่า คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.56 mm หรือเบอร์ 24 SWG

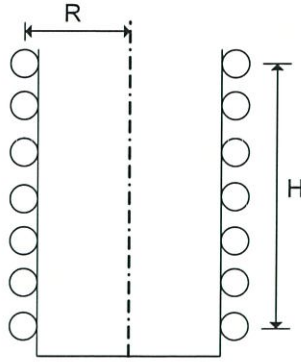


รูปที่ 3.4 บริเวณที่มีกระแสไหลเนื่องจากผลของสภาพนำเชิงผิวของลวดทองแดง

3.3.2 จำนวนรอบขดลวดแรงสูง

การพันขดลวดแรงสูง ใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10 นิ้ว กำหนดให้ความสูงของการพันขดลวดแรงสูงมีค่าเท่ากับ 1.8 เมตร หรือ 71 นิ้ว โดยสามารถหาจำนวนรอบของการพันขดลวดแรงสูงได้จากสมการ 3.10

$$L = \frac{(NR)^2}{9R+10H} \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.5 มิติในการพันขดลวดแรงสูงที่ใช้ในสมการ

- เมื่อ
- L = ค่าความเหนี่ยวนำ (μH)
 - R = รัศมีของแกนถึงศูนย์กลางของลวด (นิ้ว)
 - N = จำนวนรอบของการพันขดลวดแรงสูง
 - H = ความสูงของระยะที่พันขดลวด (นิ้ว)

คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดแรงสูงได้ ดังสมการ 3.11

$$N = \sqrt{\frac{L(9R+10H)}{R^2}} \quad (3.11)$$

$$N = \sqrt{\frac{323900 \times ((9 \times 5) + (10 \times 71))}{(5)^2}}$$

$$N = 3128 \text{ รอบ}$$



รูปที่ 3.6 ขดลวดทางด้านแรงสูง (L_2) ที่ประกอบสร้างจริง

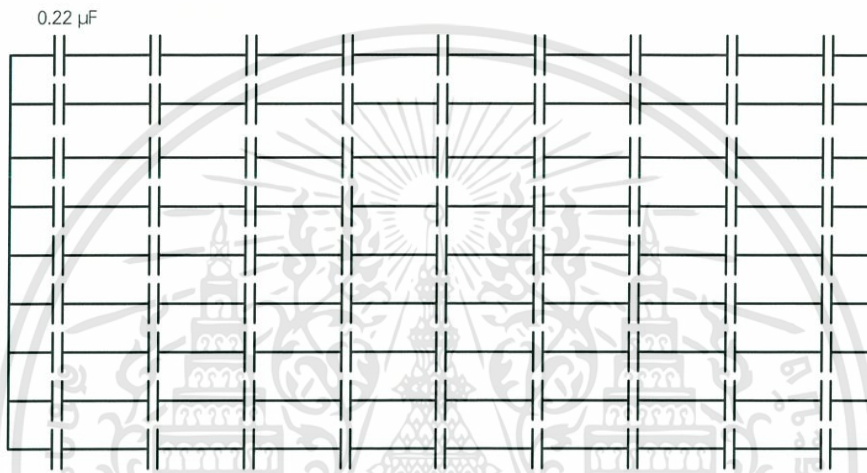
ทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแรงสูง (L_2) มีค่าเท่ากับ 360.01 mH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ (C_1)

จากพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า คือ 15 kV_{ac} ในการออกแบบตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึง คือ ความคงทนต่อแรงดันของตัวเก็บประจุที่สามารถคงทนต่อแรงดันของหม้อแปลง จึงทำการออกแบบได้ค่าความคงทนแรงดันของตัวเก็บประจุต่อชุดคือ 5.85 kV_{ac} ออกแบบไว้เป็นจำนวนทั้งสิ้น 2 ชุด จะได้ว่าตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำสามารถคงทนแรงดันได้ 11.7 kV_{ac}

จากการคำนวณความคงทนต่อแรงดันหม้อแปลงสามารถทำการออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำจึง เลือกใช้ตัวเก็บประจุยี่ห้อ WIMA ชนิด Poly propylene มีค่าความจุ $0.22 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดันกระแสสลับ 650 V โดยออกแบบให้ต่อตัวเก็บประจุนุกรมกัน 9 ตัว และนำมาขนานกัน 9 ชุด ได้ค่าเก็บประจรวมเท่ากับ 216 nF

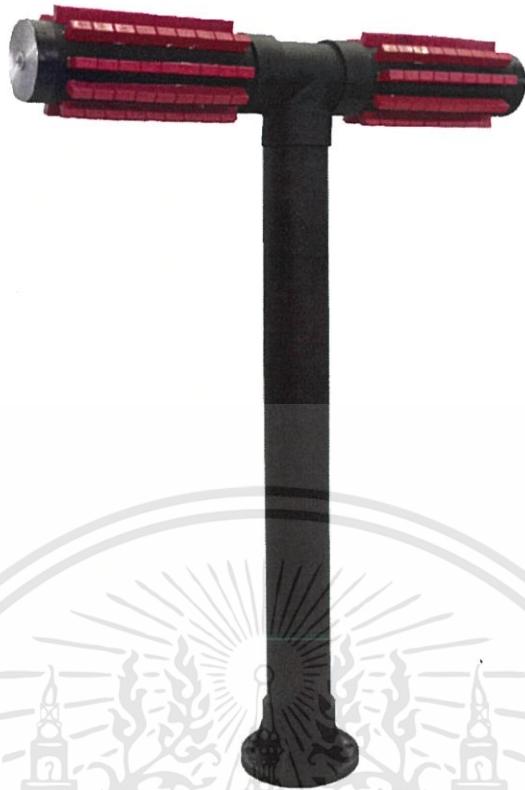


รูปที่ 3.7 แสดงการต่อตัวเก็บประจุนานกัน 9 ชุด และอนุกรมชุดละ 9 ตัว

เนื่องจากในการใช้งาน ชุดหม้อแปลงแหล่งจ่ายแรงดันต่ำที่เลือกใช้เป็นแบบ 2 ขั้ว กล่าวคือ พิกัดใช้งานสูงสุด 15 kV โดยแบ่งเป็น $+7.5 \text{ kV}$ และ -7.5 kV ในการออกแบบตัวเก็บประจุภาคแรงสูง จึงต้องออกแบบให้มีลักษณะการใช้งานแบบ 2 ด้าน โดยได้ค่าเก็บประจุภาคแรงต่ำ (C_1) รวมเท่ากับ 108 nF



รูปที่ 3.8 แสดงการต่อตัวเก็บประจุตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 3.9 ตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ (C_1) ที่ประกอบสร้างจริง

จากการสร้างตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ เมื่อทำการวัดค่าตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ (C_1) มีค่าเท่ากับ 109.40 nF

3.5 การออกแบบและประกอบสร้างขดลวดทางด้านแรงต่ำ (L_1)

ในทางทฤษฎีความถี่ในการออสซิลเลทระหว่างขดลวดทางด้านแรงต่ำต้องมีค่าเท่ากับทางด้านแรงสูง จึงได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ 3.12

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (3.12)$$

จากสมการ 3.12 จะได้

$$L_1C_1 = L_2C_2$$

$$L_1 \times 109.4 \times 10^{-9} = 360.01 \times 10^{-3} \times 63.84 \times 10^{-12}$$

$$L_1 = 0.21 \text{ mH}$$

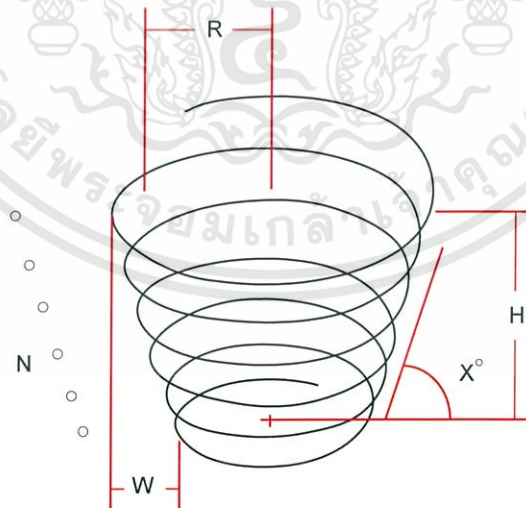
ดังนั้นที่ความถี่ออสซิลเลทจะได้ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงต่ำ มีค่าเท่ากับ 0.21 mH

จากทฤษฎีการพันขดลวดแรงต่ำ ในการพันขดลวดแบบ Flat Pancake Coil หรือพันแบบแนวราบ ซึ่งมีข้อดีคือ มีความปลอดภัยจากการเบรกดาวน์ที่ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ เนื่องจากระยะการเบรกดาวน์จากขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำมีระยะค่อนข้างมาก ส่วนการพันแบบ Helical Coil หรือพันแบบทรงกระบอก จะมีข้อดีคือ การพันแบบทรงกระบอกจะมีการเหนี่ยวนำของขดลวดดีกว่าการพันแบบแนวราบ ในโครงการนี้เลือกใช้การพันแบบ Inverse Conical Coil Inductance หรือพันแบบก้นหอย ข้อดีของการพันแบบก้นหอย คือ การเอาข้อดีของการพันแบบแนวราบและการพันแบบทรงกระบอกมารวมกัน ซึ่งการพันขดลวดแรงต่ำแบบ Inverse Conical Coil Inductance สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.13

$$L = \sqrt{(L_1 \sin(x))^2 + (L_2 \cos(x))^2} \quad (3.13)$$

$$L_1 = \frac{(NR)^2}{9R+10H} \quad L_2 = \frac{(NR)^2}{8R+11W}$$

- เมื่อ
- L = Inductance ของขดลวด (μH)
 - L_1 = Helix Factor
 - L_2 = Spiral Factor
 - N = จำนวนรอบ
 - R = รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (นิ้ว)
 - W = ความกว้างของขดลวด (นิ้ว)
 - H = ความสูงของขดลวด (นิ้ว)
 - X = มุมระหว่างขดลวดกับระนาบ



รูปที่ 3.10 Inverse Conical Coil Inductance ของขดลวดแรงต่ำ

ในการเลือกขนาดของท่อทองแดงเราจะคำนึงถึงความหนาว่าใช้ได้หรือไม่ โดยในการคำนวณจะคิดความหนา (δ) ในหน่วยนิ้ว โดยใช้สมการที่ 3.8

$$\delta = \frac{6.62}{\sqrt{f}}$$

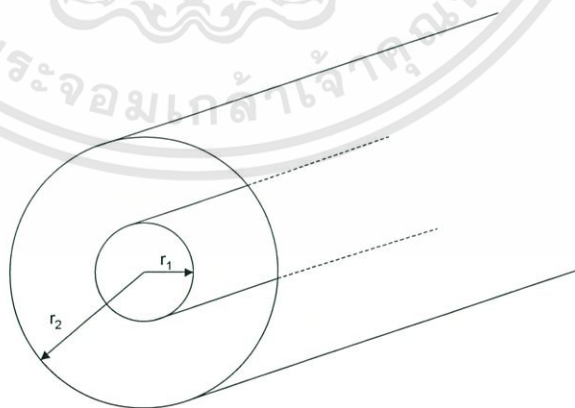
แทนค่าความถี่ 35 kHz ในสมการที่ 3.8

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{6.62}{\sqrt{35 \times 10^3}} \\ &= 0.04 \text{ cm} \\ &= 0.0157 \text{ in}\end{aligned}$$

ในการออกแบบในโครงการนี้ได้ใช้ท่อทองแดงขนาด 0.375 นิ้ว (0.9525 เซนติเมตร) ที่มีความหนา 0.71 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับความหนาของทองแดงที่ใช้พัน จะเห็นว่าที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าท่อทองแดงที่เลือกใช้ แสดงว่าท่อทองแดงสามารถใช้ในการพันขดลวดแรงต่ำได้

กำหนดให้

- มุมระหว่างขดลวดกับระนาบ (X) เท่ากับ 30°
 - ขดลวดทองแดงแต่ละชั้นห่างกัน 0.5 นิ้ว
 - พันขดลวดแรงต่ำ 19 รอบ เป็นการพันเพื่อค่าความเหนียวนำ เนื่องจากเราสามารถเลือกใช้ค่าการจูนที่เหมาะสมได้ในแต่ละชั้น
 - ค่ารัศมีจัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (R)
- สิ่งแรกต้องหาระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำชั้นแรก ซึ่งสามารถหาได้จาก มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ดังสมการ 3.14

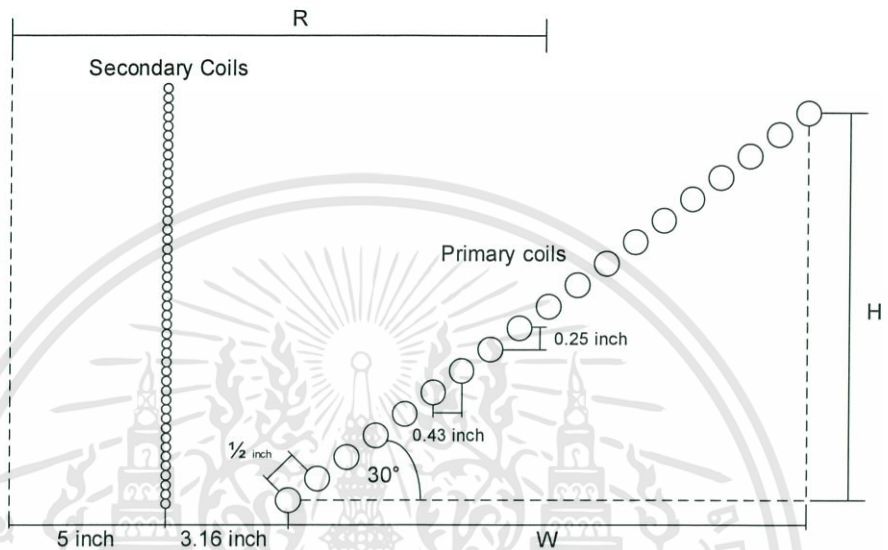


รูปที่ 3.11 มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

$$\frac{r_2}{r_1} = e \quad (3.14)$$

โดย r_2 คือรัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงขดลวดแรงต่ำชั้นแรก มีค่าเท่ากับ 5 นิ้ว จากสมการ 3.14 จะได้ $r_1 = 1.84$ นิ้ว

ดังนั้นระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำชั้นแรก เท่ากับ 3.16 นิ้ว



รูปที่ 3.12 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการพันขดลวดแรงต่ำ

จากรูปที่ 3.12 จะได้

$$R = 0.375(10) + 0.43(9) + 3.16 + 5$$

$$= 15.78$$

$$\approx 16$$

ดังนั้น รัศมีจัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (R) มีค่าเท่ากับ 16 นิ้ว

- ค่าความสูงของขดลวด (H)

จากรูปที่ 3.12 จะได้

$$H = 0.375(19) + 0.25(18)$$

$$= 11.63$$

$$\approx 12$$

ดังนั้น ความสูงของขดลวด (H) มีค่าเท่ากับ 12 นิ้ว

- ความกว้างของขดลวด (W)

จากรูปที่ 3.12 จะได้

$$W = 0.375(19) + 0.43(18)$$

$$= 14.87$$

$$\approx 15$$

ดังนั้น ความกว้างของขดลวด (W) มีค่าเท่ากับ 15 นิ้ว

หาค่าพารามิเตอร์ L_1 , L_2 เพื่อแทนในสมการ 3.13

$$L_1 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H}$$

$$L_1 = \frac{(19 \times 16)^2}{9(16) + 10(12)}$$

$$L_1 = 350.06 \mu\text{H}$$

$$L_2 = \frac{(NR)^2}{8R + 11W}$$

$$L_2 = \frac{(19 \times 16)^2}{8(16) + 11(15)}$$

$$L_2 = 315.41 \mu\text{H}$$

จะได้

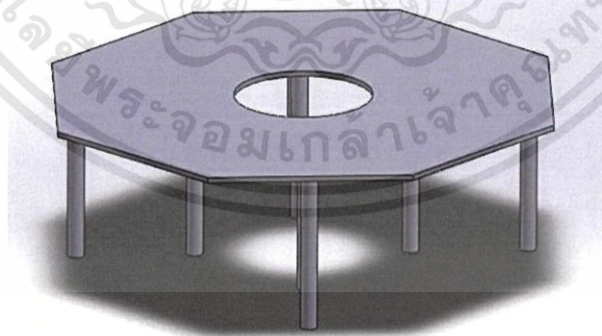
$$L = \sqrt{(L_1 \sin(x))^2 + (L_2 \cos(x))^2}$$

$$L = \sqrt{(350.06 \sin(30))^2 + (315.41 \cos(30))^2}$$

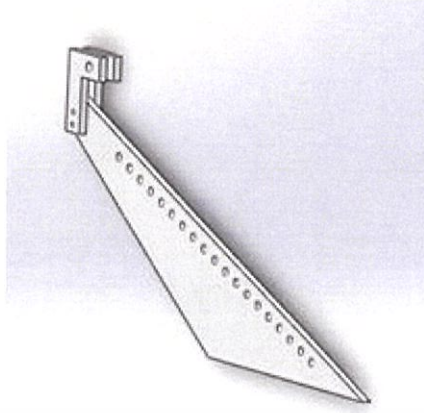
$$L = 324.42 \mu\text{H}$$

$$L = 0.32 \text{ mH}$$

3.5.1 การออกแบบฐานของขดลวดทางด้านแรงต่ำ



รูปที่ 3.13 ฐานแปดเหลี่ยม ถูกตั้งบนแท่งซูเปอร์สีน



รูปที่ 3.14 ส่วนรองรับขดลวดแรงต่ำ



รูปที่ 3.15 ส่วนรองรับขดลวดแรงต่ำประกอบกับฐานแปดเหลี่ยมที่ทำการออกแบบ

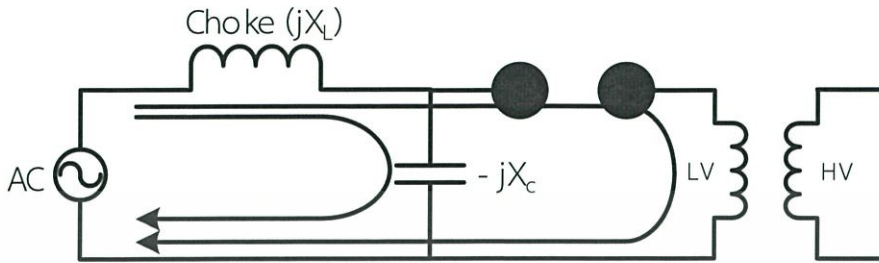
รูปที่ 3.16 ขดลวดทางด้านแรงต่ำ (L_1) ที่ประกอบสร้างจริง

เมื่อทำการประกอบสร้างขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ (L_1) เสร็จสิ้น จึงทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงต่ำ (L_1) มีค่าเท่ากับ 0.298 mH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การออกแบบและประกอบสร้าง Line Reactor (Choke Coil)

Line Reactor (Choke Coil) ลักษณะเป็นขดลวดทองแดงอบน้ำยาเป็นรอบ ๆ ใช้ทำหน้าที่กรองกระแส และถ่ายทอดสัญญาณต่างๆ



รูปที่ 3.17 วงจรเมื่อมีการใส่ Choke Coil

จากรูปที่ 3.17 จะได้ว่า

กำหนดให้ $X_L = 0.5X_C$ เนื่องจากขณะที่แกปเกิดการสปาร์คและในขณะที่แกปไม่เกิดการสปาร์คจะจำกัดกระแสให้ไหลผ่านอย่างละ 50 %

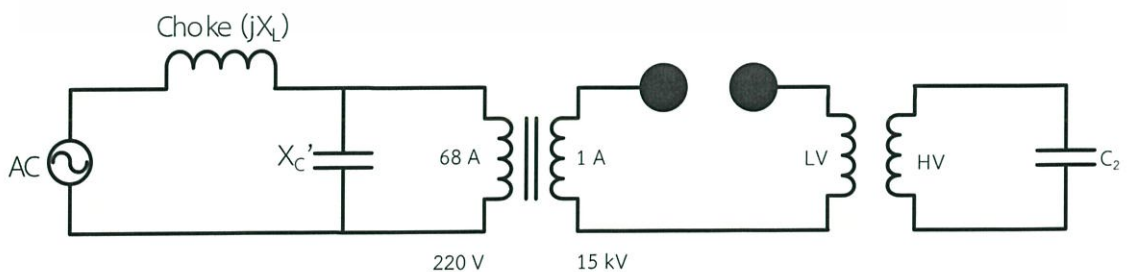
กรณีที่ 1 แกปไม่เกิดการสปาร์ค

$$\begin{aligned} V_s &= jX_L + jX_C \\ &= j0.5X_C - jX_C \\ &= -j0.5X_C \end{aligned}$$

กรณีที่ 2 แกปเกิดการสปาร์ค

$$\begin{aligned} V_s &= jX_L \\ &= j0.5X_C \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ว่า $X_L = 0.5X_C$



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลย์เมื่อมีการใส่ Choke Coil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.18 คำนวณ Choke Coil ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} C' &= C \times a^2 \\ &= 108 \text{ nF} \times \left(\frac{15000}{220}\right)^2 \\ &= 0.5 \text{ mF} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_C' &= \frac{1}{2\pi f C} \\ &= \frac{1}{2\pi \times 50 \times 0.5 \times 10^{-3}} \\ &= 6.37 \ \Omega \end{aligned}$$

จาก $X_L = 0.5X_C$

$$\begin{aligned} X_L &= 0.5 \times 6.37 \\ &= 3.19 \ \Omega \end{aligned}$$

จะได้ $L = \frac{X_L}{2\pi f}$

$$\begin{aligned} &= \frac{3.19}{2\pi \times 50} \\ &= 10.15 \text{ mH} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะสรุปได้ว่า Line Reactor (Choke) ต้องใช้ขนาดประมาณ 10 mH



รูปที่ 3.19 Line Reactor (Choke)

3.7 การเลือกพิกัดหม้อแปลงจ่ายกำลัง

ในการเลือกแหล่งจ่ายหม้อแปลงจ่ายกำลังมีความสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวกำหนดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ (C_1) ในโครงการนี้เลือกใช้หม้อแปลงส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Transformer) โดยมีพิกัดดังนี้

- 1) พิกัดกำลังไฟฟ้า 15 kVA 50 Hz
- 2) พิกัดด้านปฐมภูมิ 220 V 63.18 A
- 3) พิกัดด้านทุติยภูมิ 15 kV 1 A



รูปที่ 3.20 หม้อแปลงส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Distribution Transformer)

3.8 การออกแบบและประกอบสร้างสร้างโรตารีแกป

ชุดสปาร์กแกปดับอาร์คของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงทำหน้าที่หลัก 2 ประการ คือ ประการแรกกำหนดแรงดันอัดประจุทางด้านแรงต่ำ (C_1) โดยการปรับระยะแกปให้ห่างมากขึ้นก็จะทำให้ได้แรงดันอัดประจุที่สูงขึ้น ประการที่สอง ทำหน้าที่ตัดอาร์คเมื่อเกิดการสปาร์คที่สปาร์กแกปดับอาร์ค เมื่อแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำสูงพอและดีจชาร์จผ่านสปาร์กแกป ส่งพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำในรูปสนามไฟฟ้าไปสู่ขดลวดด้านแรงดันต่ำ (L_1) ในรูปของสนามแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดการออสมิเลชันขึ้น เหตุที่ต้องการตัดอาร์คเพื่อให้การอัดประจุจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแหล่งจ่ายตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำใหม่ แล้วเกิดดีสชาร์จช่วงใหม่ต่อไป เพราะฉะนั้นในการออกแบบสปาร์กแกปนั้นลัมบ์อาร์คจะดับได้เมื่อยึดออกจนมีระยะเป็น 20 เท่าของระยะแกป ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.15

$$I_a \geq 20g \quad (3.15)$$

เมื่อ I_a = ความยาวของการยึดลัมบ์อาร์ค
 g = ระยะห่างแกป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อช่วงเวลาในการดับอาร์คเป็น $1/4$ ของรูปสัญญาณอินพุต 50 Hz ($T/4$) โดยการออกแบบ จะหาระยะ $2g$ ได้เมื่อ C_1 ทนแรงดันได้ 15 kV และเมื่อ ค่าความคงทนต่อการเบรกดาวนของอากาศมี ค่าเท่ากับ 20 kV/cm จะได้

$$\text{ระยะแกป} = 2g = \frac{15 \text{ kV}}{20 \text{ kV/cm}}$$

$$g = 0.375 \text{ cm}$$

$$\text{ความเร็วของอิเล็กโตรดหมุนตามเส้นรอบวง} = \frac{\pi dn}{60 \text{ cm/s}}$$

ดังนั้นถ้าเวลาในการดับอาร์คเป็น $T/4$ ของสัญญาณอินพุต จะได้ระยะเท่ากับ $[(\pi dn/60) \times (T/4)]$ จากข้อกำหนดเพื่อให้สามารถดับอาร์คได้ สามารถหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง อิเล็กโตรดได้จากสมการ 3.16

$$[(\pi dn/60) \times (T/4)] \geq 20g \quad (3.16)$$

$$d \geq 20g \times [(60 \times 4) / n \pi T]$$

$$d \geq 20 \times 0.375 \times [(60 \times 4) / (1450 \pi \times 0.005)]$$

$$d \geq 19.75 \text{ cm}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโตรดหมุนเท่ากับ 20 cm เพื่อให้การตัดล้าอาร์ค ทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเลือกใช้มอเตอร์ 1 เฟส ความเร็วรอบ 1450 rpm เป็น ตัวหมุนจานอิเล็กโตรด เพราะฉะนั้นหาจำนวนตัวนำของอิเล็กโตรดจากสมการ 3.17

$$p = \frac{120f}{n} \quad (3.17)$$

$$p = \frac{120 \times 50}{1450}$$

$$p = 4 \text{ ตัวนำ}$$

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้อิเล็กโตรดประมาณ 4 ตัวนำ ในการอัดประจุแต่ละรอบ โดยในแต่ละ ตำแหน่งของการอัดประจุต้องใช้อิเล็กโตรด 2 ตัวนำ ในการส่งผ่านพลังงาน เพราะฉะนั้นจะต้องใช้อิเล็กโตรดทั้งสิ้น 8 ตัวนำ

หาเส้นรอบวงจานหมุนจากสมการ 3.18

$$C = \pi d \quad (3.18)$$

เมื่อ $d =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน

เมื่อ กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กทรอนิกส์ทรอดหมุน เท่ากับ 20 cm จะได้

$$C = \pi(20)$$

$$C = 62.83 \text{ cm}$$

หาความเร็วของจานหมุน จากสมการ 3.19

$$V_r = C \frac{\text{RPM}}{60} \quad (3.19)$$

เมื่อ $V_r =$ ความเร็วในการหมุนของจานหมุน (เมตรต่อวินาที)

RPM = ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ (รอบต่อนาที)

$C =$ เส้นรอบวงของจานหมุนที่ติดตั้งอยู่กับแกนของโรเตอร์ของมอเตอร์ (เมตร)

จะได้ ความเร็วในการหมุนของจานหมุน

$$V_r = (0.20) \frac{1450}{60}$$

$$V_r = 4.83 \text{ m/s}^2$$

หาค่าเวลาที่อิเล็กทรอนิกส์ทรอดบนจานเกิดการสปาร์คกับอิเล็กทรอนิกส์ทรอดที่อยู่นิ่ง จากสมการที่ 3.20

$$T_{ON} = \frac{D_e}{V_r N_e} \quad (3.20)$$

เมื่อ $T_{ON} =$ เวลาที่อิเล็กทรอนิกส์ทรอดบนจานเกิดการสปาร์คกับอิเล็กทรอนิกส์ทรอดที่อยู่นิ่ง (วินาที)

$d_e =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กทรอนิกส์ทรอดที่อยู่บนจานหมุน (เมตร)

$N_e =$ จำนวนของอิเล็กทรอนิกส์ทรอดที่อยู่บนจานหมุน

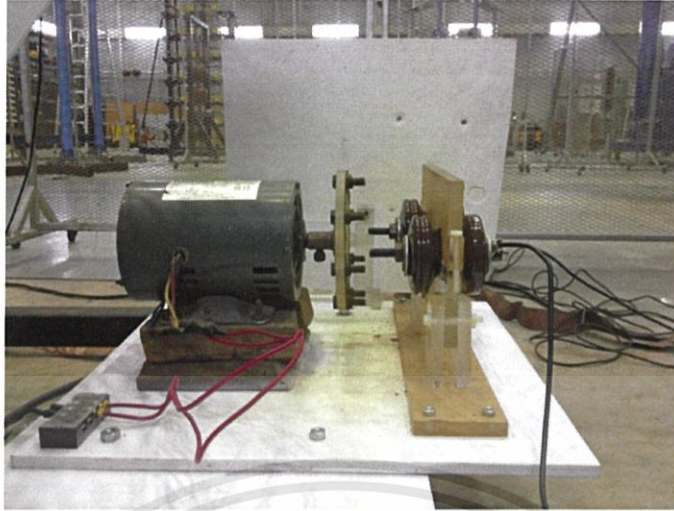
$V_r =$ ความเร็วในการหมุนของจานหมุน (เมตรต่อวินาที)

จะได้

$$T_{ON} = \frac{0.20}{4.83 \times 8}$$

$$T_{ON} = 5.176 \text{ ms}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 โรตารีสปาร์กแกป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

หลังจากทำการประกอบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงแล้ว นำหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงมาทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบว่าหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ได้ทำการออกแบบสร้างให้มีค่าตรงกับที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ โดยมีการทดสอบจากระยะการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศระหว่างแท่งอิเล็กโตรดปลายแหลมที่ต่อกับตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูงกับกราวด์ ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกัน

4.2 การทดสอบหาคุณลักษณะของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- | | |
|---|-----------|
| 1. หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-250 V _{ac} 50 Hz 64 A | 1 เครื่อง |
| 2. อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน (Choke) ขนาด 0-20 mH | 1 เครื่อง |
| 3. หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง | 1 ชุด |
| 4. ขดลวดโรกอฟสกี | 1 ชุด |
| 5. ออสซิลโลสโคป | 1 เครื่อง |
| 6. Volt meter | 1 เครื่อง |
| 7. Camp on Power meter | 1 เครื่อง |

4.2.1 การทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำจากการวัด

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำจากการวัด

จำนวนรอบขดลวด แรงดันต่ำ	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)	
	ที่ความถี่ต่ำ (120 Hz)	ที่ความถี่สูง (1 kHz)
1	0.001	0.0014
2	0.005	0.0043
3	0.009	0.0088
4	0.014	0.0146
5	0.022	0.0217
6	0.031	0.0304
7	0.041	0.0405
8	0.053	0.0521
9	0.066	0.0652
10	0.081	0.0797
11	0.098	0.0958
12	0.113	0.1135
13	0.139	0.1326
14	0.160	0.1531
15	0.184	0.1748
16	0.209	0.1970
17	0.238	0.2226
18	0.268	0.2469
19	0.298	0.2725



ก)



ข)

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการวัดค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำรอบที่ 16

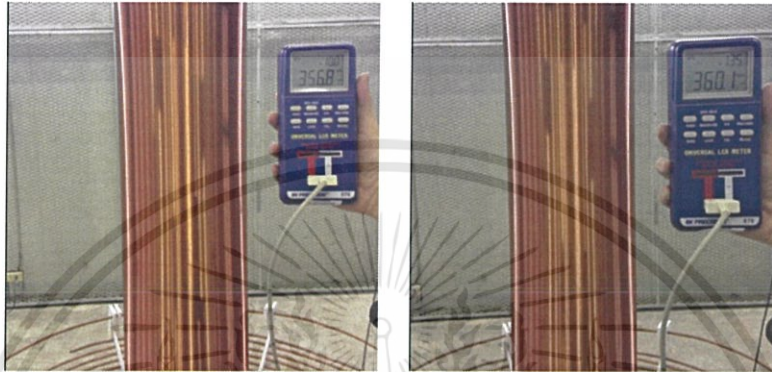
เมื่อ ก) วัดที่ความถี่ 120 Hz ข) วัดที่ความถี่ 1000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงสูงจากการวัด

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงสูงจากการวัด

ความถี่ (Hz)	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)
120	360.1
1000	356.8



ก)

ข)

รูปที่ 4.2 การวัดค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงสูง

เมื่อ ก) วัดที่ความถี่ 120 Hz ข) วัดที่ความถี่ 1000 Hz

4.2.3 การทดสอบค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำ

ตารางที่ 4.3 ค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำจากการวัด

ความถี่ (Hz)	ค่าความจุไฟฟ้า (nF)
120	109.4
1000	109.3



ก)

ข)

รูปที่ 4.3 วัดค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำ

เมื่อ ก) วัดที่ความถี่ 120 Hz ข) วัดที่ความถี่ 1000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

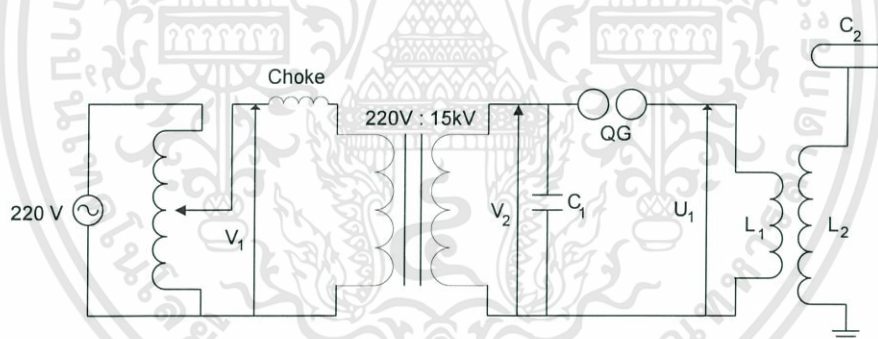
4.2.4 ค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงสูงจากการคำนวณ

ตารางที่ 4.4 ค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงสูงจากการคำนวณ

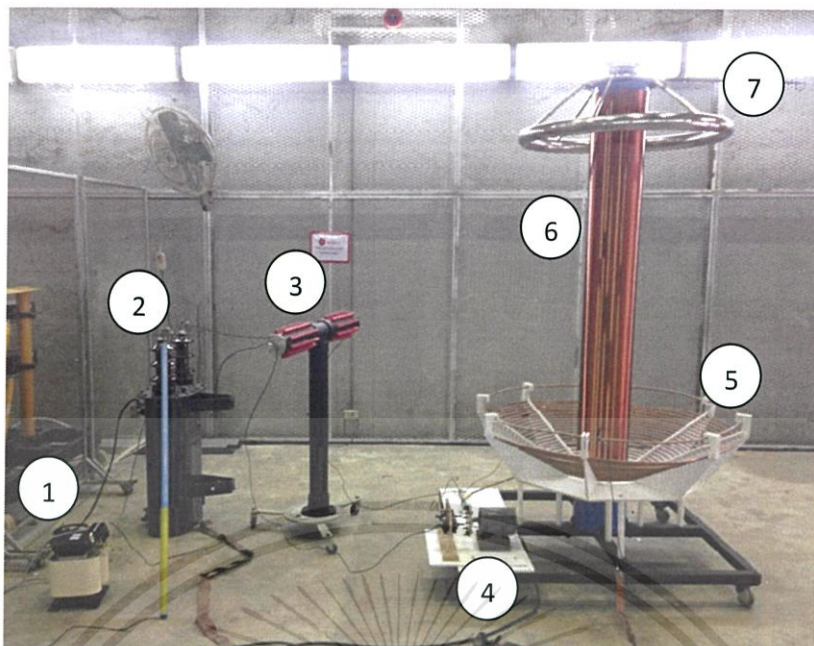
ความถี่ (Hz)	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)
120	63.84
1000	63.84

4.3 การทดสอบหาระยะการเบรกดาวนในอากาศของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

1. ต่อวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.1 พร้อมทั้งต่ออุปกรณ์ทดสอบด้วย
2. เริ่มต้นปรับระยะห่างระหว่างตัวนำของ Quenching Gap 3 มิลลิเมตร และทำการปรับจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ โดยเริ่มต้นรอบที่ 13 ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำ 0.14 mH แล้วทำการปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น จนเกิดการสปาร์ค ที่ Quenching Gap และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป และระยะการเบรกดาวน ซึ่งมีการทดสอบที่ระยะ 100 ถึง 200 เซนติเมตร
3. ทำการทดสอบอีกครั้งตั้งแต่ข้อที่ 2 โดยปรับจำนวนรอบเพิ่มขึ้นทีละ 1 รอบ จนถึงจำนวนรอบสูงสุดของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง



รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

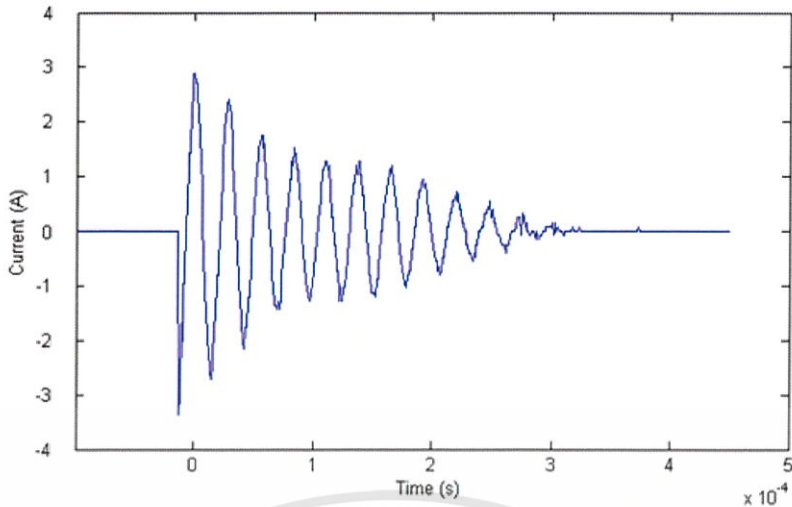


รูปที่ 4.5 วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

- เมื่อ
- 1 คือ Line Reactor (Choke)
 - 2 คือ หม้อแปลงเพิ่มระดับแรงดัน 2 ทวี
 - 3 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ (C_1)
 - 4 คือ แกบดับอาร์ค (Quenching Gap)
 - 5 คือ ขดลวดเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำ (L_1)
 - 6 คือ ขดลวดเหนี่ยวนำด้านแรงสูง (L_2)
 - 7 คือ ตัวเก็บประจุด้านแรงสูง (C_2)

4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาความถี่ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

การวัดค่าความถี่ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงจะใช้ Current Probe ต่อวัดรูปคลื่นทางด้านขาออกของหม้อแปลง ซึ่งแสดงผลออกทางออสซิลโลสโคป ทำการวัดรูปคลื่นขณะทดสอบการเบรกดาว์นของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่อัตราส่วนการจูน ซึ่งสามารถปรับค่าที่จำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ จากออสซิลโลสโคปสามารถหาค่าความถี่ได้ และสามารถเปรียบเทียบค่ากับในทางทฤษฎีดังนี้



รูปที่ 4.6 รูปกราฟกระแสและค่าความถี่ที่วัดได้ทางด้านขาออกของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
ที่ออกแบบสร้าง

จาก
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ความถี่ที่ได้จากการคำนวณ 35 kHz

ความถี่ที่วัดจากการทดสอบ 35.7 kHz

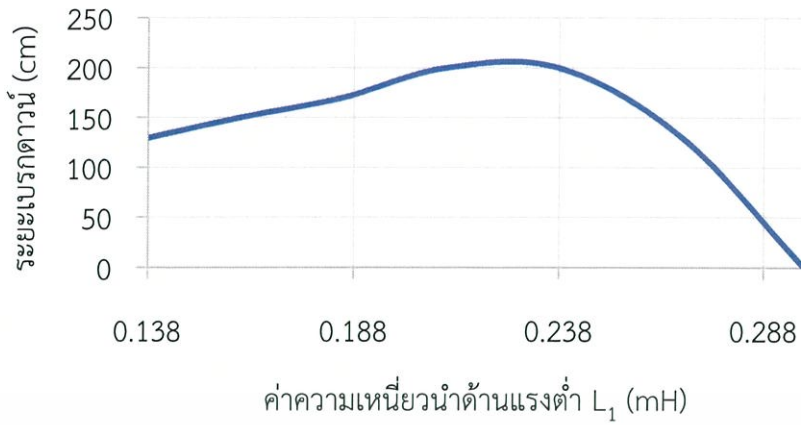
จะเห็นได้ว่าความถี่ที่วัดได้มีค่าแตกต่างกับการทดสอบเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นกับค่าตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำหรือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแรงสูง ที่มีค่าแตกต่างจากการออกแบบที่สมภาวะการจูน

4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาระยะการเกิดเบรกดาวนในอากาศของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

ตารางที่ 4.5 ระยะทดสอบการเบรกดาวนในอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ

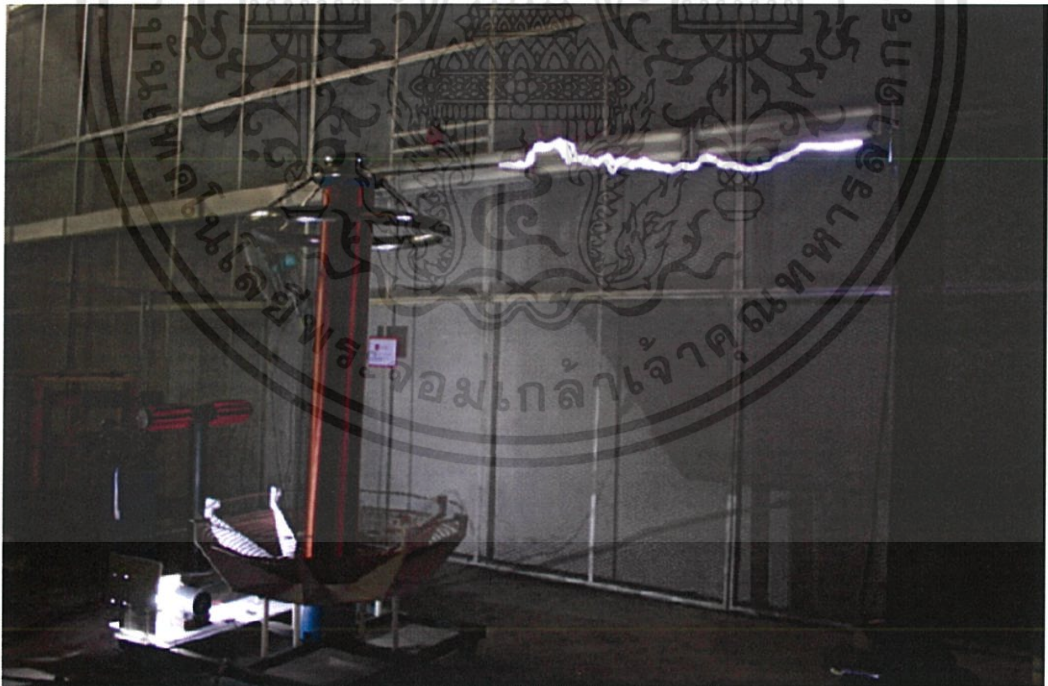
จำนวนรอบ (N_1)	ความเหนี่ยวนำ L_1 จากการวัด (mH)	ระยะเบรกดาวนในอากาศ (cm)										
		<100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
13	0.138	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
14	0.160	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×
15	0.185	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×
16	0.210	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17	0.238	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
18	0.268	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
19	0.298	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○ สามารถเบรกดาวนในอากาศได้ × ไม่สามารถเบรกดาวนในอากาศได้



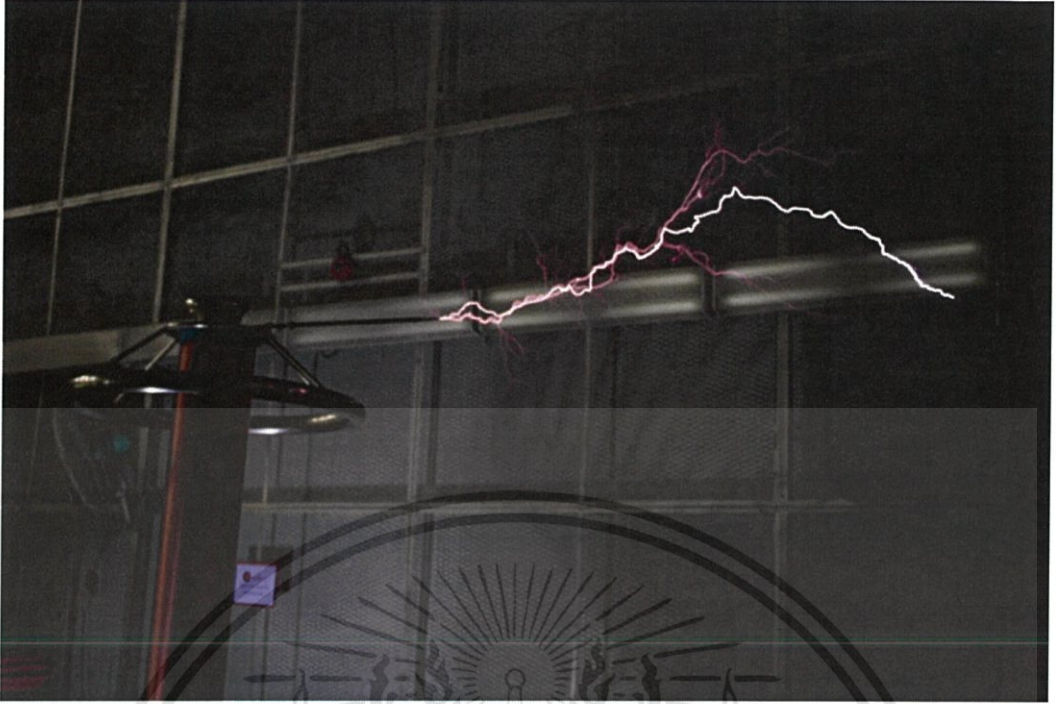
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการเบรกดาวนัในอากาศกับ
ค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำ

หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ทำการทดสอบนั้นต้องทดสอบให้วงจรอยู่ในสภาวะการจูน
เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่ามากที่สุด ซึ่งทำให้ระยะการทดสอบการเบรก
ดาวนัในอากาศมีระยะการทดสอบตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ หรือไกลที่สุดของการทดสอบ



รูปที่ 4.8 การทดสอบเพื่อหาระยะทางเบรกดาวนัในอากาศที่ไกลที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ล้ออาร์กในอากาศจากการทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบสร้าง

4.6 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบระยะการเบรกดาวนในอากาศของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง พบว่ามีระยะการเกิดเบรกดาวนที่ไกลมากที่สุดที่หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงสามารถเบรกดาวนได้ คือที่ระยะ 200 เซนติเมตร ซึ่งปริญญาณิพนธ์นี้เป็นการประกอบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงเพื่อเป็นการศึกษา เป็นสื่อการเรียนการสอน เป็นเครื่องมือในการแสดงการทดสอบโดยใช้หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง เพื่อเพิ่มศักยภาพห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งเพื่อพัฒนาและวิจัยต่อไป ซึ่งหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงนี้สามารถทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าพอร์ซเลนได้ แต่ความถี่ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงนี้มีค่าไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

บทที่ 5

สรุปผลของโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบและสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง โดยการเกิดออสซิลเลทผ่านวงจร R-C และเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดด้านแรงดันต่ำและขดลวดด้านแรงดันสูง โดยขดลวดด้านแรงดันต่ำมีค่า 0.21 mH และตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำมีค่า 109.4 nF ขดลวดด้านแรงดันสูงมีค่า 360.01 mH และตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง ซึ่งได้จากการสร้างวงแหวนทอรอยด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 41 นิ้ว ทำจากท่ออะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว จากการทดสอบพบว่า หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ทำการออกแบบสร้างสามารถสร้างแรงดันได้สูงสุด 750 kV และได้ความถี่สูงสุด 35.7 kHz มีความยาวล่ออาร์กในอากาศไกลสุด 2 เมตร ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1) ไม่สามารถทำการทดสอบได้ติดต่อกันเป็นระยะเวลานานๆ เพราะวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์บริเวณ สปาร์กแกป ยังไม่สามารถทนความร้อนได้มากเพียงพอ ซึ่งหากทำการทดสอบติดต่อกันเป็นระยะเวลานานๆ อาจทำให้อิเล็กทรอนิกส์ละลายได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสเปกของสปาร์กแกปเปลี่ยนแปลงไป รวมถึงประสิทธิภาพในการทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

2) การเคลื่อนย้ายที่ลำบาก เนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาต่อกันตามวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงแยกกันอยู่ เมื่อต้องการทำการเคลื่อนย้ายไม่สามารถทำการเคลื่อนย้ายไปพร้อมๆ กันได้ สามารถดำเนินการแก้ปัญหาได้บางส่วน โดยการนำโรตารีแกปมาติดตั้งบริเวณฐานของขดลวด แต่อุปกรณ์บางส่วนไม่สามารถนำมาติดตั้งบนฐานของขดลวดได้ทั้งหมด เนื่องจากข้อจำกัดของขดลวด

3) การขึ้นแรงดันของหม้อแปลงจ่ายกำลังไฟฟ้า มีพิกัดแรงดัน 15 kV แต่เนื่องจากข้อจำกัดของตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ (C_1) มีค่าความคงทนต่อแรงดัน 11.7 kV เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ จึงไม่สามารถขึ้นแรงดันไฟฟ้าได้เต็มพิกัดของหม้อแปลง

4) ค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำ (C_1) อาจมีค่าความเหนี่ยวนำที่คลาดเคลื่อนเนื่องท่อทองแดงที่ใช้ในการพันเป็นท่อทองแดงชนิดแข็งทำให้ยากต่อการตัดโค้ง ทำให้ระยะห่างระหว่างขดลวดในแต่ละรอบมีค่าไม่เท่ากัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] นายพุทธิรักษ์ มธุรส และคณะ, หม้อแปลงเทสลา 400 kV 200 kHz, ปรินท์ยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
- [2] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1, ฉนวนและวัสดุฉนวน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [4] นรเศรษฐ พัฒนเดช, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 2, ตัวนำ แม่เหล็ก สารกึ่งตัวนำ ตัวนำยิ่งยวด วัสดุฉนวน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] Mitch Tilbury, The Ultimate Tesla Coil Design And Construction Guide, McGraw-Hill Companies, 2008





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง Design and Construction of a Tesla Transformer

พยงเสวต บุญศิริพรหม พัสดวัฒน์ อยู่แก้ว พิธิฐ เลหาะวีร์ สุรศักดิ์ น้อยหอม

1 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย นลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: poronlines@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง พิกัด 750 kV 35 kHz ซึ่งวงจรสร้างแรงดันสูงความถี่สูงใช้การเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดด้านแรงดันต่ำมีค่า 0.21 mH และตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำมีค่า 109.4 nF กับขดลวดด้านแรงดันสูงมีค่า 360.01 mH และตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูงที่ได้จากวงแหวนทอรอยด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 41 นิ้ว ทำจากท่ออะลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว จากการทดสอบพบว่าหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบสร้าง สามารถสร้างแรงดันสูงความถี่สูง ได้พิกัดแรงดันสูงสุด 750 kV และได้ความถี่สูงสุด 35.7 kHz ระยะล่ออาร์กในอากาศไกลสุด 2 เมตร สามารถนำไปใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดเบรกดาวนในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มศักยภาพให้กับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้อีกด้วย

คำสำคัญ: หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง, หม้อแปลงเตสลา

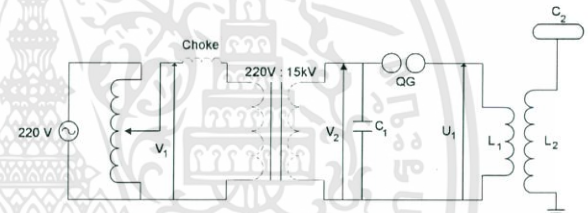
ABSTRACT

This project presents construction of Tesla transformer 750 kV 35 kHz. The Tesla transformer circuit uses inductive coupling of a low voltage inductor of 0.21 mH, low voltage capacitor of 109.4 nF, high voltage inductor of 360.01 mH, and high voltage capacitor in the form of toroid of 41-inch diameter. The toroid was produced by an aluminum tube with diameter of 3 inch. The developed Tesla transformer can generate maximum voltage 750 kV, maximum frequency 35.7 kHz and maximum breakdown length in air of 2 m. Tesla transformer can be used as a model for studying of air breakdown. Furthermore, the developed Tesla transformer can increase testing performance of KMITL's high voltage laboratory.

Keywords: Tesla Transformer, High-voltage High-frequency Transformer

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แรงดันสูงความถี่สูงสามารถสร้างได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ (C_1) ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านทุติยภูมิ (C_2) โดยรวมไปถึงค่าความจุไฟฟ้าแฝง ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (L_1) ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิ (L_2) แกปดับอาร์ก (Quenching Gap) ซึ่งเป็นเหมือนสวิตช์ความเร็วสูง โดยทำการเปิดปิดวงจรจากการแตกตัวของอากาศ และอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน (Choke)



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ถูกอัดประจุจนถึงระดับที่ทำให้เกิดอากาศที่อยู่ระหว่างช่องอากาศ (Air Gap) สูญเสียค่าความเป็นฉนวนจะทำให้เกิดการเบรกดาวนระหว่างช่องว่างอากาศที่ตัวแกป (Quenching Gap) ทำให้วงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงครบวงจร เป็นผลให้ C_1 คายประจุที่เก็บไว้ในรูปของสนามไฟฟ้าไปสู่ขดลวดปฐมภูมิ L_1 และขดลวด L_2 จะเก็บพลังงานในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อขดลวด L_1 เก็บพลังงานเต็มที่แล้วก็ถ่ายทอดพลังงานที่เก็บไว้ไปให้ C_2 อีกครั้ง การถ่ายทอดพลังงานกลับไปกลับมา ระหว่าง C_1 กับ L_1 จะทำให้เกิดการออสซิลเลท (Oscillate) ต่อเนื่องแบบ Damped Oscillation ที่ความถี่สูง ค่าโดยประมาณของความถี่ที่ทำให้เกิดการออสซิลเลทนั้นสามารถหาได้จากสมการ [1]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

เมื่อ L = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (H)

C = ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรทางด้านปฐมภูมิ (F)

f = ความถี่ออสซิลเลท (Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดออสซิลเลท (Oscillation) ในวงจรทางด้านปฐมภูมิ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ซึ่งมีความถี่เช่นเดียวกันกับทางด้านปฐมภูมิ ดังนั้นจะได้รับความสัมพันธ์ คือ

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (2)$$

$$\text{จะได้} \quad L_1C_1 = L_2C_2 \quad (3)$$

2. การออกแบบและประกอบสร้าง [2]

2.1 การออกแบบตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง (C_2)

2.1.1 ทอรอยต์

$$C = 1.4(1.2781 - \frac{d_2}{d_1})\sqrt{\pi d_2(d_1 - d_2)} \quad (4)$$

กำหนดให้ค่า $d_1 = 41$ นิ้ว, $d_2 = 2.5$ นิ้ว จะได้ค่าความจุไฟฟ้าของทอรอยต์มีค่าเท่ากับ 29.63 pF

2.1.2 ความจุไฟฟ้าแฝง

$$C_s = 0.29H + 0.41R + 1.94R\sqrt{\frac{R}{H}} \quad (5)$$

เมื่อ C_s = ค่าความจุไฟฟ้าแฝง (pF)

กำหนดให้ ความสูงของระยะพันขดลวดแรงสูง (H) เท่ากับ 71 นิ้ว และรัศมีของแกนถึงศูนย์กลางขดลวดแรงสูง (R) เท่ากับ 20.5 นิ้ว จะได้ค่าความจุไฟฟ้าแฝงเท่ากับ 34.21 pF ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าทางด้านแรงสูงมีค่าเท่ากับ 63.84 pF

2.2 การออกแบบขดลวดทางด้านแรงสูง (L_2)

2.2.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงสูง

เลือกใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10 นิ้ว เป็นแกนกลางในการพันขดลวดแรงสูง

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าต่างๆ ของท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว

ความสูงของท่อ (1.5 เมตร)	ลวดที่ใช้พันท่อ (SWG)	Ø ของลวด (mm)	L_2 (mH)	C_2 ที่ต้องการ (pF)		
				30 kHz	35 kHz	40 kHz
				18	1.22	72.45
20	0.92	128.80	218.52	160.54	122.91	
22	0.71	212.91	132.19	97.12	74.36	
24	0.56	315.54	89.20	65.53	50.17	
26	0.46	515.19	54.63	40.14	30.73	
28	0.38	851.64	33.05	24.28	18.59	

สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงสูงดังสมการ (6)

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_2} \quad (6)$$

จะได้ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงสูงเท่ากับ 323.90 mH

2.2.2 การพันขดลวดด้านแรงสูง

การพันขดลวดแรงสูง ใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 10 นิ้ว กำหนดให้ความสูงของการพันขดลวดแรงสูงมีค่าเท่ากับ 1.8 เมตร หรือ 71 นิ้ว โดยสามารถหาจำนวนรอบของการพันขดลวดแรงสูงได้จากสมการ (7)

$$L = \frac{(NR)^2}{9R+10H} \quad (7)$$

จะได้จำนวนรอบของการพันขดลวดแรงสูงเท่ากับ 3128 รอบ

2.3 การออกแบบตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ (C_1)

เนื่องจากการใช้งาน ชุดหม้อแปลงแหล่งจ่ายแรงดันต่ำที่เลือกใช้ เป็นแบบ 2 ขั้ว กล่าวคือ พิกัดใช้งานสูงสุด 15 kV โดยแบ่งเป็น +7.5 kV และ -7.5 kV จึงทำการออกแบบค่าความกทนแรงดันของตัวเก็บประจุต่อชุดคือ 5.85 kV จำนวน 2 ชุด จะได้ว่าตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำสามารถกทนแรงดันได้ 11.7 kV โดยในแต่ละชุดเลือกใช้ตัวเก็บประจุยี่ห้อ WIMA ชนิด Poly propylene มีค่าความจุ 0.22 μ F พิกัดแรงดันกระแสสลับ 650 V โดยออกแบบให้ต่อตัวเก็บประจุนุกรมกัน 9 ตัว และนำมาขนานกัน 9 ชุด ได้ค่าเก็บประจุมรวมเท่ากับ 216 nF จากนั้นนำมาต่ออนุกรมกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุในด้านแรงต่ำเท่ากับ 108 nF

2.4 การออกแบบขดลวดทางด้านแรงต่ำ (L_1)

2.4.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงต่ำ

เนื่องจากความถี่ในการออสซิลเลทระหว่างขดลวดทางด้านแรงต่ำ ต้องมีค่าเท่ากับทางด้านแรงสูง จึงได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ (2) และ (3) ดังนั้นจะได้ค่าดังนั้นที่ความถี่ออสซิลเลทจะได้ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงต่ำ มีค่าเท่ากับ 0.21 mH

2.4.2 การพันขดลวดด้านแรงต่ำ

ใช้การพันแบบ Inverse Conical Coil Inductance ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (8)

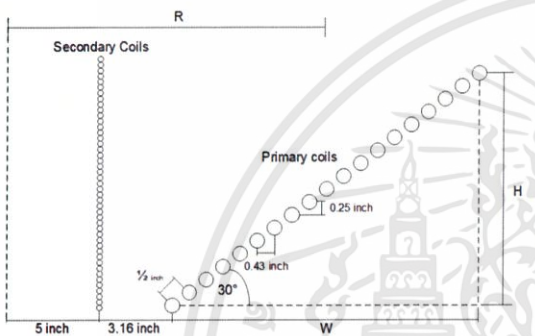
$$L = \sqrt{(L_1 \sin(x))^2 + (L_2 \cos(x))^2} \quad (8)$$

$$L_1 = \frac{(NR)^2}{9R+10H} \quad (9)$$

$$L_2 = \frac{(NR)^2}{8R+11W} \quad (10)$$

- เมื่อ $L =$ Inductance ของขดลวด (μH)
- $L_1 =$ Helix Factor $L_2 =$ Spiral Factor
 - $N =$ จำนวนรอบ $H =$ ความสูงของขดลวด (นิ้ว)
 - $R =$ รัศมีจี้ดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (นิ้ว)
 - $W =$ ความกว้างของขดลวด (นิ้ว)
 - $X =$ มุมระหว่างขดลวดกับระนาบ

กำหนดให้ใช้ท่อทองแดงขนาด 0.375 นิ้ว (0.9525 เซนติเมตร) ที่มีความหนา 0.71 มิลลิเมตร โดยมุมระหว่างขดลวดกับระนาบ (X) เท่ากับ 30° ขดลวดทองแดงแต่ละชั้นห่างกัน 0.5 นิ้ว และพันขดลวดด้านแรงต่ำ 19 รอบ

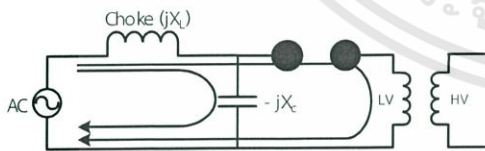


รูปที่ 2 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการพันขดลวดแรงต่ำ

จากการคำนวณจะได้ค่ารัศมีจี้ดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (R) เท่ากับ 16 นิ้ว ความสูงของขดลวด (H) เท่ากับ 12 นิ้ว และความกว้างของขดลวด (W) เท่ากับ 15 นิ้ว เมื่อนำมาแทนค่าในสมการ (9) และ (10) จะได้ค่าของ L_1 มีค่าเท่ากับ 350.06 μH และ L_2 เท่ากับ 315.41 μH เมื่อนำค่าที่ได้มาแทนในสมการ (8) ดังนั้น จะได้ค่าความเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำเท่ากับ 0.32 mH

2.5 การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน (Choke)

กำหนดให้ $X_L = 0.5X_C$ เนื่องจากขณะที่เกิดการสปาร์กและในขณะที่ไม่เกิดการสปาร์กจะจำกัดกระแสให้ไหลผ่านอย่างละ 50% ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรเมื่อมีการใส่ Choke Coil

โดยกรณีที่ 1 แกปไม่เกิดการสปาร์ก $V_s = -j0.5X_C$ และกรณีที่ 2 แกปเกิดการสปาร์ก $V_s = j0.5X_C$ จะได้ว่า $X_L = 0.5X_C$ โดยคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินได้จากสมการ

$$X_L = 0.5X_C \tag{11}$$

เมื่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าในด้านแรงต่ำมีค่าเท่ากับ 108 nF จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินเท่ากับ 10 mH

2.6 การเลือกพิกัดหม้อแปลงจ่ายกำลัง

เลือกใช้หม้อแปลงส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยมีพิกัดดังนี้

- 1) พิกัดกำลังไฟฟ้า 15 kVA 50 Hz
- 2) พิกัดด้านปฐมภูมิ 220 V 63.18 A
- 3) พิกัดด้านทุติยภูมิ 15 kV 1 A

2.7 การออกแบบโรตารีแกป

2.7.1 หาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอเล็กโตรด

$$[(\pi d n / 60) \cdot (T/4)] \geq 20g \tag{12}$$

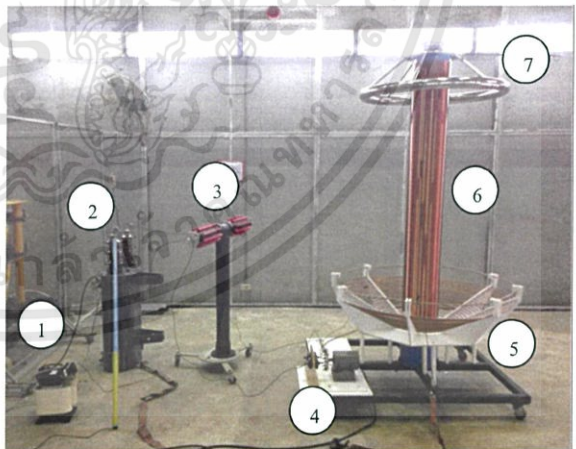
$$d \geq 19.10 \text{ cm}$$

เลือกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของอเล็กโตรดหมุนเท่ากับ 20 cm และเลือกใช้มอเตอร์ 1 เฟส ความเร็วรอบ 1500 rpm เป็นตัวหมุนจานอเล็กโตรด

$$p = \frac{120f}{n} \tag{13}$$

จะได้จำนวนของขั้วเท่ากับ 4 ขั้วนำ แต่ตำแหน่งของการอัดประจุต้องใช้ อเล็กโตรด 2 ขั้วนำในการส่งผ่านพลังงาน เพราะฉะนั้นจะต้องใช้อเล็กโตรดทั้งสิ้น 8 ขั้วนำ

ดังนั้น การออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูงจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4



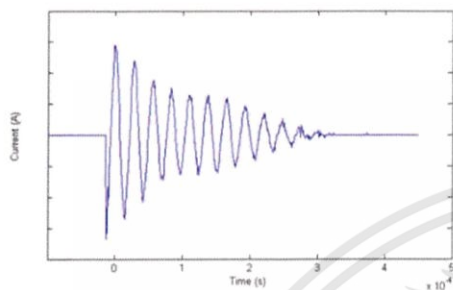
รูปที่ 4 หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

- เมื่อ (1) Line Reactor (Choke) (2) หม้อแปลงเพิ่มระดับแรงดัน (3) ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ (4) โรตารีแกป (5) ขดลวดด้านแรงต่ำ (6) ขดลวดด้านแรงสูง (7) ตัวเก็บประจุด้านแรงสูง

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดสอบเพื่อหาความถี่

จากการทดสอบหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงเพื่อหาค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในขดลวดด้านแรงสูงกับเวลา

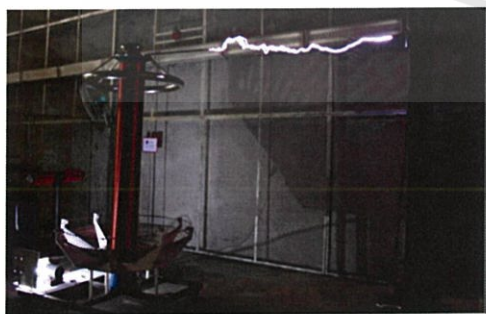
ความถี่ที่คำนวณได้จากสมการ (1) มีค่าเท่ากับ 35 kHz จากการทดลองแล้วพบว่าความถี่ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 35.7 kHz มีความผิดพลาดจากการคำนวณ 2 % ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการผันขดลวดที่อาจคลาดเคลื่อนได้

3.2 ผลการทดสอบเพื่อหาระยะการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศ

ตารางที่ 2 ระบุทดสอบการเบรกดาวน์ในอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดแรงต่ำ

N_1	L_1 (mH)	ระยะเบรกดาวน์ในอากาศ (cm)								
		120	130	140	150	160	170	180	190	200
13	0.138	O	O	X	X	X	X	X	X	X
14	0.160	O	O	O	O	X	X	X	X	X
15	0.185	O	O	O	O	O	O	X	X	X
16	0.210	O	O	O	O	O	O	O	O	O
17	0.238	O	O	O	O	O	O	O	O	O
18	0.268	O	O	X	X	X	X	X	X	X
19	0.298	X	X	X	X	X	X	X	X	X

O สามารถเบรกดาวน์ในอากาศได้ X ไม่สามารถเบรกดาวน์ในอากาศได้



รูปที่ 6 การเกิดเบรกดาวน์ในอากาศระหว่างการทดสอบ

4. สรุป

จากการออกแบบและสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง โดยการเกิดออสซิลเลชันผ่านวงจร R-C และเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดด้านแรงต่ำและขดลวดด้านแรงสูง โดยขดลวดด้านแรงต่ำมีค่า 0.21 mH และตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำมีค่า 109.4 nF ขดลวดด้านแรงดันสูงมีค่า 360.01 mH และตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง ซึ่งได้จากการสร้างวงแหวนทอรอยด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 41 นิ้ว ทำจากท่ออะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว จากการทดสอบพบว่า หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ทำการออกแบบสร้าง สามารถสร้างแรงดันได้สูงสุด 750 kV และได้ความถี่สูงสุด 35.7 kHz มีความยาวลวดอาร์กในอากาศไกลสุด 2 เมตร ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ด้วยความอนุเคราะห์ที่คำแนะนำ และคำปรึกษาที่มีคุณค่าจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิรุณ ภูธรโกวิท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบคุณ คุณปณณวีร์ ฉายศิริ วิศวกรภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และ คุณวัชรนา พงศ์สถิต นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และดูแลเอาใจใส่ตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง และทดสอบมาโดยตลอด

6. เอกสารอ้างอิง

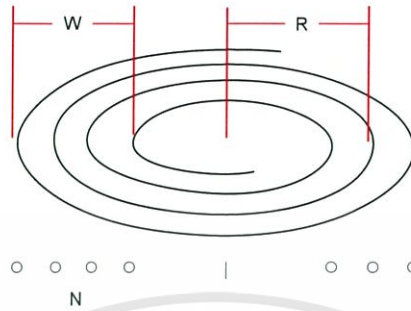
- [1] สำราญ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2549.
- [2] นายพุทธิภักดิ์ มธุรส และคณะ, หม้อแปลงเทสลา 400 kV 200 kHz, ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 Archimedes Spiral or Flat Pancake Coil



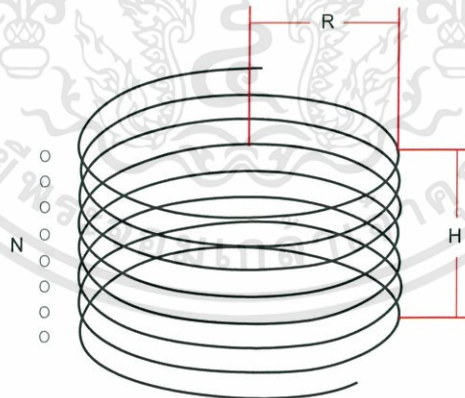
รูปที่ ข.1 ลักษณะการพันขดลวด Archimedes Spiral

$$L = \frac{(NR)^2}{8R+11W}$$

(ข.1)

โดยที่ L = Inductance ของขดลวด (uH)
 N = จำนวนรอบ
 R = รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (inch)
 W = ความกว้างของขดลวด (inch)

ข.2 Helical Coil



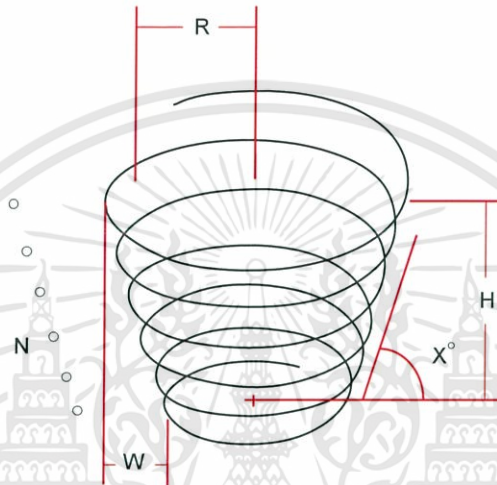
รูปที่ ข.2 ลักษณะการพันขดลวดแบบ Helical Coil

$$L = \frac{(NR)^2}{9R+10H}$$

(ข.2)

โดยที่ L = Inductance ของขดลวด (uH)
 N = จำนวนรอบ
 R = รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (inch)
 H = ความสูงของขดลวด (inch)

ข.3 Inverse Conical Coil



รูปที่ ข.3 ลักษณะการพันขดลวดแบบ Inverse Conical Coil

$$L_1 = \frac{(NR)^2}{9R+10H}, \quad L_2 = \frac{(NR)^2}{8R+10W}$$

$$L = \sqrt{(L_1 \sin(X))^2 + (L_2 \cos(X))^2}$$

(ข.3)

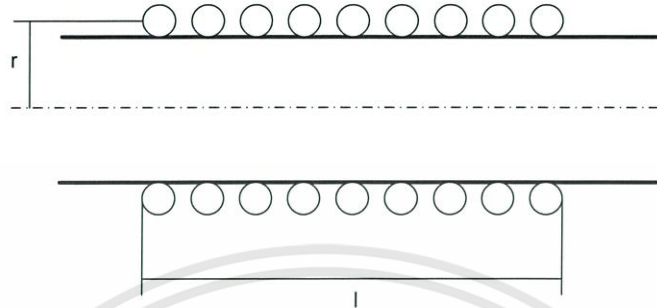
โดยที่ L = Inductance ของขดลวด (uH)
 L_1 = Helix Factor
 L_2 = Spiral Factor
 N = จำนวนรอบ
 R = รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางของขดลวด (inch)
 W = ความกว้างของขดลวด (inch)
 H = ความสูงของขดลวด (inch)
 X = มุมระหว่างขดลวดกับระนาบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการจำนวนรอบของการพันขดลวดแรงสูง

การคำนวณจำนวนรอบของขดลวดด้านแรงดันสูง เพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำตามที่ต้องการนั้น สามารถดูลักษณะการพันขดลวดได้จากรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 ลักษณะการพันของขดลวดทางด้านแรงสูง

ค่าความเหนี่ยวนำคำนวณได้จากสมการ

$$L = \frac{0.39r^2n^2}{9r+10l} \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ
 L = ค่าความเหนี่ยวนำ (uH)
 R = รัศมีของลวดตัวนำ (cm)
 N = จำนวนรอบของขดลวด
 L = ความยาวของขดลวด (cm)

จากสมการที่ ค.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากหน่วยเซนติเมตรเป็นนิ้วจะได้สมการที่ ค.2

$$L = \frac{1.00076r^2n^2}{9r+10l} \quad (\text{ค.2})$$

ดังนั้นสมการที่ ค.2 จะมีลักษณะคล้ายสมการที่ ค.1 ที่ได้มาจากสื่อสารสนเทศจึงสามารถแทนกัน

ได้



ตารางที่ ง.1 Data for Standard Round Copper Wires

S.W.G	Diameter (mm.)	Ohm/100
10	3.251	0.1866
11	2.946	0.2276
12	2.642	0.2826
13	2.337	0.3612
14	2.032	0.4776
15	1.829	0.5897
16	1.626	0.6611
17	1.422	0.9747
18	1.219	1.3267
19	1.016	1.9105
20	0.914	2.3267
21	0.813	2.9850
22	0.711	3.8990
23	0.610	5.3070
24	0.559	6.3160
25	0.508	7.6420
26	0.457	9.4350

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของท่อ PVC

Item properties	Unit	Test method	Value
Specific gravity	-	A.S.T.M D792	1.43
Hardness	Rockwell R	A.S.T.M D785	120
Water absorption	Mg/cm ²	A.S.T.M D570	0.04 ~ 0.06
Tensile strength	Kgf/cm ²	A.S.T.M D638-60T	500 ~ 550
Elongation at breaking	%	A.S.T.M D638	100 ~ 170
Bending strength	Kgf/cm ²	A.S.T.M D790-59T	800 ~ 1000
Compressive strength	Kgf/cm ²	A.S.T.M D695	700
Modulus of elasticity	Kgf/cm ²	A.S.T.M D747	2.8 ~ 3.0*10 ⁴
Poisson's ratio	-	-	0.35 ~ 0.40
Impact strength	Kgf-cm/cm ²	A.S.T.M D256-56	5.0
Coefficient of linear expansion	°C ⁻¹	A.S.T.M D696	6 ~ 7*10 ⁵
Specific heat	Calg.°C	-	0.20 ~ 0.28
Thermal conductivity	Kcal/m.h.°C	-	0.12 ~ 0.14
Softening temperature	°C	A.S.T.M D648-56	75 ~ 82
Flame resistance	-	A.S.T.M D635-56T	Self-extinguishing
Volume resistivity	Ωcm	A.S.T.M D257-54T	3 ~ 5*10 ¹⁵
Dielectric strength	kV/mm	-	More than 40
Dielectric power factor	-	A.S.T.M D150-54T	0.02
Dielectric constant	-	A.S.T.M D150-54T	3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ ฉ.1 ท่อทองแดงชนิดเส้น มาตรฐาน ASTM-B88 ความยาว 6 เมตร

Size (OD) (inch)	Wall thickness (inch)		
	Type M	Type L	Type K
3/8	0.022	0.030	0.035
1/2	0.025	0.035	0.049
5/8	0.028	0.040	0.049
3/4	0.030	0.042	0.049
7/8	0.032	0.045	0.065
1-1/8	0.035	0.050	0.065
1-3/8	0.042	0.055	0.065
1-5/8	0.050	0.060	0.072
2-1/8	0.060	0.070	0.083
2-5/8	0.070	0.080	0.095
3-1/8	0.080	0.090	0.109
4-1/8	-	0.110	0.134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ช
เปรียบเทียบค่า f และ f_0 ที่ค่า X/R ต่างๆกัน

ตารางที่ ข.1 เปรียบเทียบค่า f และ f_0 ที่ค่า X/R ต่างๆกัน

X/R	f (not eaethed)	f_0 by measurement
0.1	1.03	1.03
0.2	1.06	1.06
0.4	1.14	1.14
0.6	1.215	1.22
0.8	1.21	1.31
1.0	1.366	1.41
1.2	1.44	1.51
1.4	1.52	1.62
1.6	1.61	1.73
1.8	1.69	1.85
2.0	1.78	1.97
3.0	2.23	2.59
4.0	2.69	3.21
6.0	3.64	
10.0	5.60	
15.0	8.08	
20.0	10.58	



ภาคผนวก ซ

Datasheet ตัวเก็บประจุ WIMA MKP10 0.22uF 650Vac

Polypropylene (PP) Capacitors for Pulse Applications with Double-Sided Metallized Electrodes and Schoopage Contacts PCM 7.5 mm to 52.5 mm

Special Features

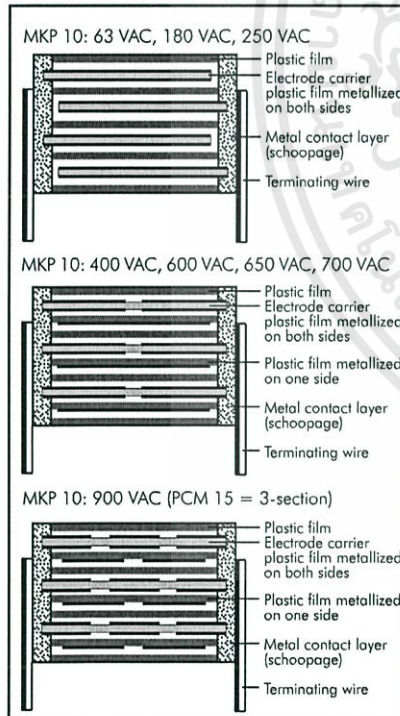
- Pulse duty construction
- Self-healing
- Very low dissipation factor
- Negative capacitance change versus temperature
- According to RoHS 2011/65/EU

Typical Applications

- For pulse applications e.g.
- Switch mode power supplies
 - TV and monitor sets
 - Lighting
 - Audio/video equipment

Construction

- Dielectric:** Polypropylene (PP) film
Capacitor electrodes:
 Double-sided metallized plastic film
Internal construction:



Encapsulation:

Solvent-resistant, flame-retardant plastic case with epoxy resin seal, UL 94 V-0

Terminations: Tinned wire.

Marking: Colour: Red.

Marking: Black. Epoxy resin seal: Red

Electrical Data

Capacitance range:

1000 pF to 47 μ F (E12-values on request)

Rated voltages: 100 VDC, 250 VDC, 400 VDC, 630 VDC, 1000 VDC, 1600 VDC, 2000 VDC, 2500 VDC, 3000 VDC

Capacitance tolerances:

$\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$

Operating temperature range:

-55°C to $+100^\circ\text{C}$

Insulation resistance at $+20^\circ\text{C}$:

$C \leq 0.33 \mu\text{F}$: $\geq 1 \times 10^5 \text{ M}\Omega$

(mean value: $5 \times 10^5 \text{ M}\Omega$)

$C > 0.33 \mu\text{F}$: $\geq 30\,000 \text{ sec} (\text{M}\Omega \times \mu\text{F})$

(mean value: 100 000 sec)

Measuring voltage: 100 V/1 min.

Test voltage: 2 sec.

L	$\leq 2000 \text{ VDC}$	2500 VDC	$\geq 3000 \text{ VDC}$
< 41.5	$1.6 U_r$	$1.4 U_r$	$1.2 U_r$
41.5	$1.4 U_r$	$1.4 U_r$	$1.2 U_r$
57	$1.2 U_r$	$1.2 U_r$	$1.2 U_r$

Dissipation factors at $+20^\circ\text{C}$: $\tan \delta$

at f	$C \leq 0.1 \mu\text{F}$	$0.1 \mu\text{F} < C \leq 1.0 \mu\text{F}$	$C > 1.0 \mu\text{F}$
1 kHz	$\leq 3 \times 10^{-4}$	$\leq 3 \times 10^{-4}$	$\leq 3 \times 10^{-4}$
10 kHz	$\leq 4 \times 10^{-4}$	$\leq 6 \times 10^{-4}$	-
100 kHz	$\leq 15 \times 10^{-4}$	-	-

Maximum pulse rise time for pulses equal to the rated voltage

Capacitance pF/ μF	max. pulse rise time V/ μsec at $T_A < 40^\circ\text{C}$								
	100 VDC	250 VDC	400 VDC	630 VDC	1000 VDC	1600 VDC	2000 VDC	2500 VDC	3000 VDC
1000 ... 2200	1000	1800	1800	1800	2800	5400	9000	11000	-
3300 ... 6800	900	1200	1200	1200	2800	5400	9000	11000	-
0.01 ... 0.022	700	1100	1200	1800	2100	3000	3400	11000	3400
0.033 ... 0.068	400	800	900	1800	2100	2100	2100	-	2100
0.1 ... 0.22	200	500	500	900	1400	1400	1400	-	1400
0.33 ... 0.68	100	300	400	700	900	900	900	-	900
1.0 ... 2.2	70	200	200	400	400	500	320	-	400
3.3 ... 4.7	50	80	100	150	180	250	-	-	-
6.8 ... 15	35	50	70	130	-	-	-	-	-
22 ... 47	25	35	35	-	-	-	-	-	-

Mechanical Tests

Pull test on pins:

$d \leq 0.8 \phi$: 10 N in direction of pins

$d > 0.8 \phi$: 20 N in direction of pins

according to IEC 60068-2-21

Vibration:

6 hours at 10...2000 Hz and

0.75 mm displacement amplitude or 10 g

in accordance with IEC 60068-2-6

Low air density:

1 kPa = 10 mbar in

accordance with IEC 60068-2-13

Bump test:

4000 bumps at 390 m/sec²

in accordance with IEC 60068-2-29

Climatic test category:

55/100/56 in accordance with IEC

Dielectric absorption: 0.05%

Voltage derating:

A voltage derating factor of 1.35 % per K

must be applied from $+85^\circ\text{C}$ for DC

voltages and from $+75^\circ\text{C}$ for AC

voltages.

Reliability:

Operational life > 300 000 hours

Failure rate < 1 fit (0.5 x U_r and 40°C)

Specific dissipation:

Box size* W x H x L in mm	Specific dissipation in Watts per K above the ambient temperature
35 x 50 x 57	0.132
45 x 55 x 57	0.164
45 x 65 x 57	0.184

* other box sizes see page 10.

Packing

Available taped and reeled up to and including case size 15 x 26 x 31.5 / PCM 27.5 mm.

Detailed taping information and graphs at the end of the catalogue.

For further details and graphs please refer to Technical Information.



Continuation

General Data

Capacitance	100 VDC/63 VAC*					250 VDC/180 VAC*				
	W	H	L	PCM**	Part number	W	H	L	PCM**	Part number
1000 pF	4	9	10	7.5	MKP1D011002C	4	9	10	7.5	MKP1F011002C
1500 "	4	9	10	7.5	MKP1D011502C	4	9	10	7.5	MKP1F011502C
2200 "	4	9	10	7.5	MKP1D012202C	4	9	10	7.5	MKP1F012202C
3300 "	4	9	10	7.5	MKP1D013302C	4	9	10	7.5	MKP1F013302C
4700 "	4	9	10	7.5	MKP1D014702C	4	9	10	7.5	MKP1F014702C
6800 "	4	9	10	7.5	MKP1D016802C	4	9	10	7.5	MKP1F016802C
0.01 µF	4	9	10	7.5	MKP1D021002C	4	9	10	7.5	MKP1F021002C
0.015 "	4	9	10	7.5	MKP1D021502C	4	9	13	10	MKP1F021003C
						4	9	10	7.5	MKP1F021502C
						4	9	13	10	MKP1F021503C
0.022 "	4	9	10	7.5	MKP1D022202C	4	9	10	7.5	MKP1F022202C
						4	9	13	10	MKP1F022203C
0.033 "	5	10.5	10.3	7.5	MKP1D023302E	5	10.5	10.3	7.5	MKP1F023302E
	4	9	13	10	MKP1D023303C	4	9	13	10	MKP1F023303C
0.047 "	5	10.5	10.3	7.5	MKP1D024702E	5	10.5	10.3	7.5	MKP1F024702E
	4	9	13	10	MKP1D024703C	4	9	13	10	MKP1F024703C
0.068 "	5	11	13	10	MKP1D026803F	5	11	13	10	MKP1F026803F
						5	11	18	15	MKP1F026804B
0.1 µF	6	12	13	10	MKP1D031003G	6	12	13	10	MKP1F031003G
0.15 "	6	12.5	18	15	MKP1D031504C	5	11	18	15	MKP1F031004B
						6	12.5	18	15	MKP1F031504C
0.22 "	7	14	18	15	MKP1D032204D	6	15	26.5	22.5	MKP1F031505B
						7	14	18	15	MKP1F032204D
						6	15	26.5	22.5	MKP1F032205B
0.33 "	8	15	18	15	MKP1D033304F	8	15	18	15	MKP1F033304F
						6	15	26.5	22.5	MKP1F033305B
0.47 "	9	16	18	15	MKP1D034704J	9	16	18	15	MKP1F034704J
	7	16.5	26.5	22.5	MKP1D034705D	7	16.5	26.5	22.5	MKP1F034705D
0.68 "	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1D036805F	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1F036805F
						9	19	31.5	27.5	MKP1F036806A
1.0 µF	10.5	19	26.5	22.5	MKP1D041005G	11	21	26.5	22.5	MKP1F041005I
1.5 "	11	21	31.5	27.5	MKP1D041506B	11	21	31.5	27.5	MKP1F041006B
						13	24	31.5	27.5	MKP1F041506D
2.2 "	13	24	31.5	27.5	MKP1D042206D	13	24	41.5	37.5	MKP1F041507C
						15	26	31.5	27.5	MKP1F042206F
3.3 "	17	29	31.5	27.5	MKP1D043306G	13	24	41.5	37.5	MKP1F042207C
						17	34.5	31.5	27.5	MKP1F043306I
						17	29	41.5	37.5	MKP1F043307E
4.7 "	20	39.5	31.5	27.5	MKP1D044706J	20	39.5	31.5	27.5	MKP1F044706J
	17	29	41.5	37.5	MKP1D044707E	19	32	41.5	37.5	MKP1F044707F
6.8 "	19	32	41.5	37.5	MKP1D046807F	20	39.5	41.5	37.5	MKP1F046807G
10 µF	20	39.5	41.5	37.5	MKP1D051007G	24	45.5	41.5	37.5	MKP1F051007H
15 "	24	45.5	41.5	37.5	MKP1D051507H	35	50	41.5	37.5	MKP1F051507J
	31	46	41.5	37.5	MKP1D051507I	35	50	57	52.5	MKP1F051509F
22 "	35	50	41.5	37.5	MKP1D052207J	35	50	57	52.5	MKP1F052209F
33 "	40	55	41.5	37.5	MKP1D053307K	45	65	57	52.5	MKP1F053309J
	35	50	57	52.5	MKP1D053309F					
47 "	45	65	57	52.5	MKP1D054709J					

* AC voltage: $f \leq 1000 \text{ Hz}$; $1.4 \times U_{\text{rms}} + \text{UDC} \leq U_r$

New values

** PCM = Printed circuit module = pin spacing

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Rights reserved to amend design data without prior notification.

Part number completion:

Version code: 2-pin = 00

4-pin = D4

Tolerance: 20 % = M

10 % = K

5 % = J

Packing: bulk = S

Pin length: 6-2 = SD

Taped version see page 128.



Continuation

General Data

Capacitance	400 VDC/250 VAC*					630 VDC/400 VAC*				
	W	H	L	PCM**	Part number	W	H	L	PCM**	Part number
1000 pF	4	9	10	7.5	MKP1G011002C	4	9	10	7.5*	MKP1J011002C
1500 "	4	9	10	7.5	MKP1G011502C	4	9	10	7.5*	MKP1J011502C
2200 "	4	9	10	7.5	MKP1G012202C	4	9	10	7.5*	MKP1J012202C
3300 "	4	9	10	7.5	MKP1G013302C	4	9	10	7.5*	MKP1J013302C
4700 "	4	9	10	7.5	MKP1G014702C	4	9	10	7.5*	MKP1J014702C
6800 "	4	9	10	7.5	MKP1G016802C	4	9	10	7.5*	MKP1J016802C
						4	9	13	10	MKP1J016803C
0.01 µF	4	9	10	7.5	MKP1G021002C	5	10.5	10.3	7.5*	MKP1J021002E
	4	9	13	10	MKP1G021003C	4	9	13	10	MKP1J021003C
0.015 "	5	10.5	10.3	7.5	MKP1G021502E	5	11	13	10	MKP1J021503F
	4	9	13	10	MKP1G021503C	5	11	18	15	MKP1J021504B
0.022 "	5	10.5	10.3	7.5	MKP1G022202E	5	11	13	10	MKP1J022203F
	4	9	13	10	MKP1G022203C	5	11	18	15	MKP1J022204B
0.033 "	5.7	12.5	10.3	7.5	MKP1G023302F	6	12	13	10	MKP1J023303G
	5	11	13	10	MKP1G023303F	5	11	18	15	MKP1J023304B
0.047 "	6	12	13	10	MKP1G024703G	6	12.5	18	15	MKP1J024704C
	5	11	18	15	MKP1G024704B	6	15	26.5	22.5	MKP1J024705B
0.068 "	6	12.5	18	15	MKP1G026804C	7	14	18	15	MKP1J026804D
	6	15	26.5	22.5	MKP1G026805B	6	15	26.5	22.5	MKP1J026805B
0.1 µF	7	14	18	15	MKP1G031004D	9	16	18	15	MKP1J031004J
	6	15	26.5	22.5	MKP1G031005B	7	16.5	26.5	22.5	MKP1J031005D
0.15 "	8	15	18	15	MKP1G031504F	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1J031505F
	6	15	26.5	22.5	MKP1G031505B	9	19	31.5	27.5	MKP1J031506A
0.22 "	9	16	18	15	MKP1G032204J	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1J032205F
	7	16.5	26.5	22.5	MKP1G032205D	9	19	31.5	27.5	MKP1J032206A
0.33 "	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1G033305F	11	21	26.5	22.5	MKP1J033305I
	9	19	31.5	27.5	MKP1G033306A	11	21	31.5	27.5	MKP1J033306B
0.47 "	10.5	19	26.5	22.5	MKP1G034705G	11	21	31.5	27.5	MKP1J034706B
	9	19	31.5	27.5	MKP1G034706A					
0.68 "	11	21	26.5	22.5	MKP1G036805I	15	26	31.5	27.5	MKP1J036806F
	11	21	31.5	27.5	MKP1G036806B	13	24	41.5	37.5	MKP1J036807C
1.0 µF	13	24	31.5	27.5	MKP1G041006D	17	29	31.5	27.5	MKP1J041006G
	13	24	41.5	37.5	MKP1G041007C	15	26	41.5	37.5	MKP1J041007D
1.5 "	17	29	31.5	27.5	MKP1G041506G	20	39.5	31.5	27.5	MKP1J041506J
	13	24	41.5	37.5	MKP1G041507C	19	32	41.5	37.5	MKP1J041507F
2.2 "	20	39.5	31.5	27.5	MKP1G042206J	20	39.5	41.5	37.5	MKP1J042207G
	17	29	41.5	37.5	MKP1G042207E					
3.3 "	20	39.5	41.5	37.5	MKP1G043307G	24	45.5	41.5	37.5	MKP1J043307H
4.7 "	20	39.5	41.5	37.5	MKP1G044707G	35	50	41.5	37.5	MKP1J044707J
6.8 "	24	45.5	41.5	37.5	MKP1G046807H	40	55	41.5	37.5	MKP1J046807K
						35	50	57	52.5	MKP1J046809F
10 µF	35	50	41.5	37.5	MKP1G051007J	45	55	57	52.5	MKP1J051009H
	35	50	57	52.5	MKP1G051009F					
15 "	40	55	41.5	37.5	MKP1G051507K					
	35	50	57	52.5	MKP1G051509F					
22 "	45	65	57	52.5	MKP1G052209J					

* AC voltage: $f \leq 1000 \text{ Hz}$; $1.4 \times U_{\text{rms}} + \text{UDC} \leq U_r$

New values

** PCM = Printed circuit module = pin spacing

* Admissible AC voltage 280 VAC max..

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Rights reserved to amend design data without prior notification.

Part number completion:

Version code: 2-pin = 00
4-pin = D4

Tolerance: 20 % = M
10 % = K
5 % = J

Packing: bulk = S
Pin length: 6-2 = SD

Taped version see page 128.



Continuation

General Data

Capacitance	1000 VDC/600 VAC*					1600 VDC/650 VAC*				
	W	H	L	PCM**	Part number	W	H	L	PCM**	Part number
1000 pF	4	9	10	7.5	MKP1O111002C	4	9	13	10	MKP1T011003C
	4	9	13	10	MKP1O111003C					
1500 "	4	9	10	7.5	MKP1O111502C	4	9	13	10	MKP1T011503C
	4	9	13	10	MKP1O111503C					
2200 "	4	9	10	7.5	MKP1O112202C	4	9	13	10	MKP1T012203C
	4	9	13	10	MKP1O112203C					
3300 "	4	9	10	7.5	MKP1O113302C	4	9	13	10	MKP1T013303C
	4	9	13	10	MKP1O113303C					
4700 "	4.5	9.5	10.3	7.5	MKP1O114702D	5	11	13	10	MKP1T014703F
	4	9	13	10	MKP1O114703C					
6800 "	5.7	12.5	10.3	7.5	MKP1O116802F	6	12	13	10	MKP1T016803G
	5	11	13	10	MKP1O116803F	5	11	18	15	MKP1T016804B
0.01 µF	5	11	13	10	MKP1O121003F	5	11	18	15	MKP1T021004B
	5	11	18	15	MKP1O121004B					
0.015 "	6	12	13	10	MKP1O121503G	6	12.5	18	15	MKP1T021504C
	5	11	18	15	MKP1O121504B	6	15	26.5	22.5	MKP1T021505B
0.022 "	6	12.5	18	15	MKP1O122204C	7	14	18	15	MKP1T022204D
	6	15	26.5	22.5	MKP1O122205B	6	15	26.5	22.5	MKP1T022205B
0.033 "	7	14	18	15	MKP1O123304D	8	15	18	15	MKP1T023304F
	6	15	26.5	22.5	MKP1O123305B	6	15	26.5	22.5	MKP1T023305B
0.047 "	8	15	18	15	MKP1O124704F	7	16.5	26.5	22.5	MKP1T024705D
	6	15	26.5	22.5	MKP1O124705B	9	19	31.5	27.5	MKP1T024706A
0.068 "	7	16.5	26.5	22.5	MKP1O126805D	10.5	19	26.5	22.5	MKP1T026805G
						9	19	31.5	27.5	MKP1T026806A
0.1 µF	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1O131005F	11	21	26.5	22.5	MKP1T031005I
	11	21	31.5	27.5	MKP1O131006B	11	21	31.5	27.5	MKP1T031006B
0.15 "	11	21	26.5	22.5	MKP1O131505I	13	24	31.5	27.5	MKP1T031506D
	11	21	31.5	27.5	MKP1O131506B					
0.22 "	11	21	31.5	27.5	MKP1O132206B	15	26	31.5	27.5	MKP1T032206F
						13	24	41.5	37.5	MKP1T032207C
0.33 "	15	26	31.5	27.5	MKP1O133306F	17	34.5	31.5	27.5	MKP1T033306I
	13	24	41.5	37.5	MKP1O133307C	17	29	41.5	37.5	MKP1T033307E
0.47 "	17	29	31.5	27.5	MKP1O134706G	20	39.5	31.5	27.5	MKP1T034706J
	13	24	41.5	37.5	MKP1O134707C	19	32	41.5	37.5	MKP1T034707F
0.68 "	20	39.5	31.5	27.5	MKP1O136806J	20	39.5	41.5	37.5	MKP1T036807G
	17	29	41.5	37.5	MKP1O136807E					
1.0 µF	20	39.5	41.5	37.5	MKP1O141007G	24	45.5	41.5	37.5	MKP1T041007H
1.5 "	24	45.5	41.5	37.5	MKP1O141507H	31	46	41.5	37.5	MKP1T041507I
2.2 "	31	46	41.5	37.5	MKP1O142207I	40	55	41.5	37.5	MKP1T042207K
						35	50	57	52.5	MKP1T042209F
3.3 "	40	55	41.5	37.5	MKP1O143307K	45	65	57	52.5	MKP1T043309J
	35	50	57	52.5	MKP1O143309F					
4.7 "	45	55	57	52.5	MKP1O144709H					

* AC voltage: $f \leq 1000 \text{ Hz}$; $1.4 \times U_{\text{rms}} + U_{\text{DC}} \leq U_r$

New values

** PCM = Printed circuit module = pin spacing

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Rights reserved to amend design data without prior notification.

Part number completion:

Version code: 2-pin = 00
 4-pin = D4
 Tolerance: 20 % = M
 10 % = K
 5 % = J
 Packing: bulk = S
 Pin length: 6-2 = SD

Taped version see page 128.

Continuation page 60



Continuation

General Data

Capacitance	2000 VDC/700 VAC*					2500 VDC/900 VAC*				
	W	H	L	PCM**	Part number	W	H	L	PCM**	Part number
1000 pF	4	9	13	10	MKP1U011003C	5	11	18	15	MKP1V011004B
1500 "	4	9	13	10	MKP1U011503C	6	15	26.5	22.5	MKP1V011005B
2200 "	5	11	13	10	MKP1U012203F	5	11	18	15	MKP1V011504B
3300 "	5	11	18	15	MKP1U012204B	6	15	26.5	22.5	MKP1V011505B
4700 "	5	11	18	15	MKP1U013304B	5	11	18	15	MKP1V012204B
6800 "	6	15	26.5	22.5	MKP1U014704B	6	15	26.5	22.5	MKP1V012205B
	6	15	26.5	22.5	MKP1U014705B	6	15	26.5	22.5	MKP1V013304B
	6	15	26.5	22.5	MKP1U016804C	5	11	18	15	MKP1V013305B
	6	15	26.5	22.5	MKP1U016805B	6	12.5	18	15	MKP1V014704C
0.01 µF	7	14	18	15	MKP1U021004D	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1V014705B
0.015 "	6	15	26.5	22.5	MKP1U021504F	10.5	19	26.5	22.5	MKP1V016804D
0.022 "	8	15	18	15	MKP1U022204J	11	21	26.5	22.5	MKP1V016805D
0.033 "	6	15	26.5	22.5	MKP1U022205D					
0.047 "	9	16	18	15	MKP1U023305F					
0.068 "	7	16.5	26.5	22.5	MKP1U023306A					
	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1U024705G					
	9	19	31.5	27.5	MKP1U024706B					
	10.5	19	26.5	22.5	MKP1U026805I					
	11	21	31.5	27.5	MKP1U026806B					
0.1 µF	13	24	31.5	27.5	MKP1U031006D					
0.15 "	15	26	31.5	27.5	MKP1U031506F					
0.22 "	13	24	41.5	37.5	MKP1U032206I					
	17	34.5	31.5	27.5	MKP1U032207E					
	17	29	41.5	37.5	MKP1U033307F					
	19	32	41.5	37.5	MKP1U034707G					
	20	39.5	41.5	37.5	MKP1U036807H					
1.0 µF	24	45.5	41.5	37.5	MKP1U041007J					
1.5 "	35	50	41.5	37.5	MKP1U041507K					
2.2 "	35	50	57	52.5	MKP1U041509F					
	45	55	57	52.5	MKP1U042209H					

* AC voltage: $f \leq 1000 \text{ Hz}$; $1.4 \times U_{\text{rms}} + \text{UDC} \leq U_r$

New values

** PCM = Printed circuit module = pin spacing

Dims. in mm.

Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Part number completion:

Version code:	2-pin = 00
	4-pin = D4
Tolerance:	20 % = M
	10 % = K
	5 % = J
Packing:	bulk = S
Pin length:	6-2 = SD

Taped version see page 128.

Rights reserved to amend design data without prior notification.

Continuation page 61



Continuation

General Data

Capacitance	3000 VDC/700 VAC*				Part number
	W	H	L	PCM**	
0.01 µF	6	15	26.5	22.5	MKP1W021005B
0.015 "	7	16.5	26.5	22.5	MKP1W021505D
0.022 "	8.5	18.5	26.5	22.5	MKP1W02205F
0.033 "	11	21	26.5	22.5	MKP1W023305I
	9	19	31.5	27.5	MKP1W023306A
0.047 "	11	21	31.5	27.5	MKP1W024706B
0.068 "	13	24	31.5	27.5	MKP1W026806D
0.1 µF	15	26	31.5	27.5	MKP1W031006F
	13	24	41.5	37.5	MKP1W031007C
0.15 "	17	34.5	31.5	27.5	MKP1W031506I
	15	26	41.5	37.5	MKP1W031507D
0.22 "	19	32	41.5	37.5	MKP1W032207F
0.33 "	24	45.5	41.5	37.5	MKP1W033307H
0.47 "	31	46	41.5	37.5	MKP1W034707I
0.68 "	35	50	41.5	37.5	MKP1W036807J
1.0 µF	40	55	41.5	37.5	MKP1W041007K
	35	50	57	52.5	MKP1W041009F
1.5 "	45	55	57	52.5	MKP1W041509H

* AC voltage: $f \leq 1000 \text{ Hz}; 1.4 \times U_{\text{rms}} + \text{UDC} \leq U_r$

New range

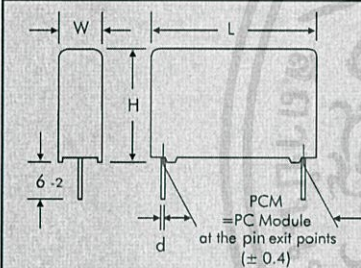
** PCM = Printed circuit module = pin spacing

Dims. in mm.

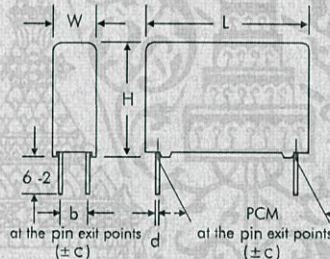
Ionisation inception level in isolated cases may be lower than admissible rated AC voltage.

Part number completion:

Version code:	2-pin = 00
	4-pin = D4
Tolerance:	20 % = M
	10 % = K
	5 % = J
Packing:	bulk = S
Pin length:	6-2 = SD
Taped version see page 128.	



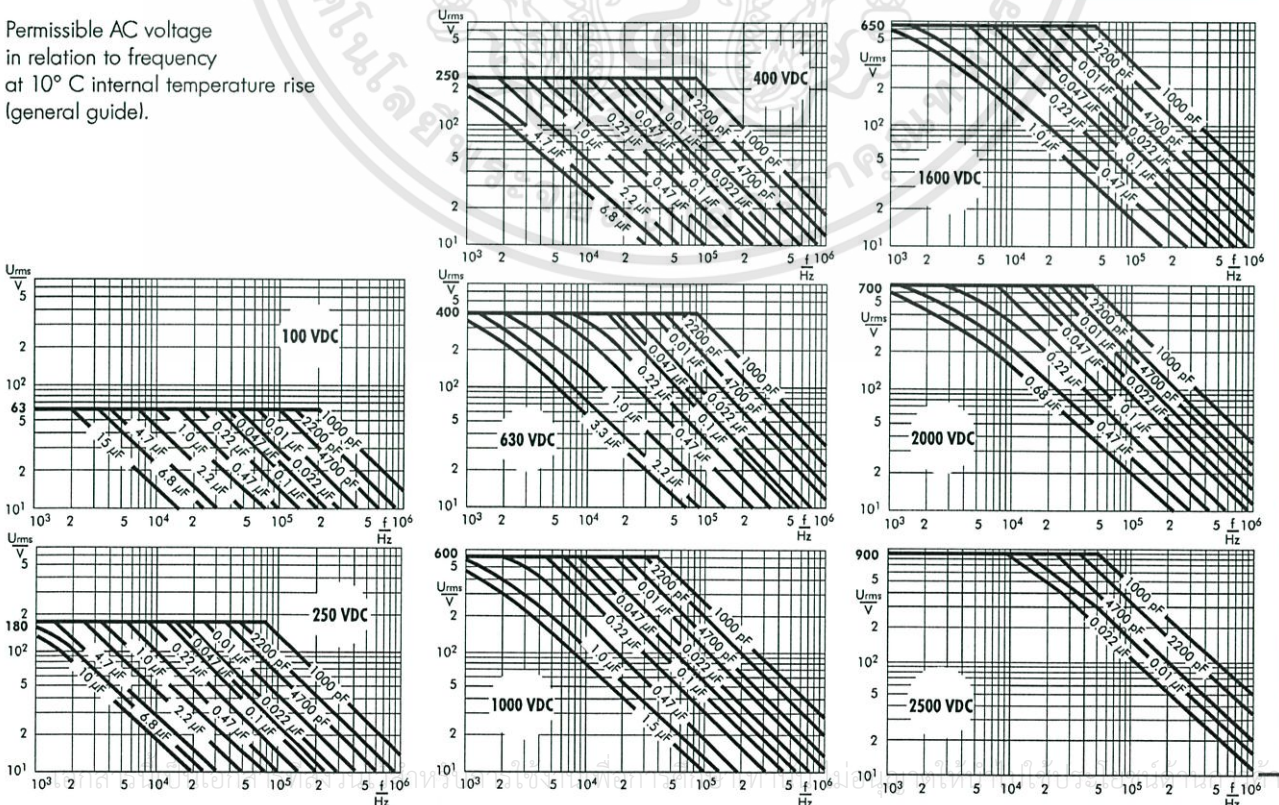
∅ d	PCM
0.6	7.5 - 10
0.8	15 - 27.5
1.0	37.5



W	PCM	b	∅ d	c
17	37.5	10	1.0	0.4
19	37.5	10	1.0	0.4
20	37.5	12.5	1.0	0.4
24	37.5	12.5	1.0	0.4
31	37.5	20	1.0	0.4
35	37.5	20	1.0	0.4
40	37.5	20	1.0	0.4
35	52.5	20	1.2	0.8
45	52.5	20	1.2	0.8

Rights reserved to amend design data without prior notification.

Permissible AC voltage in relation to frequency at 10° C internal temperature rise (general guide).





Recommendation for Processing and Application of Through-Hole Capacitors

Soldering Process

Internal temperature of the capacitor must be kept as follows:

Polyester: preheating: $T_{max.} \leq 125^{\circ}C$
soldering: $T_{max.} \leq 135^{\circ}C$

Polypropylene: preheating: $T_{max.} \leq 100^{\circ}C$
soldering: $T_{max.} \leq 110^{\circ}C$

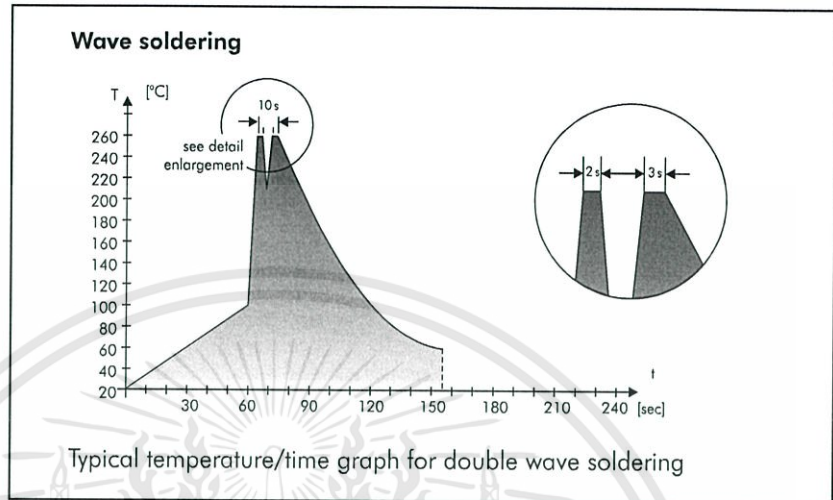
Single wave soldering

Soldering bath temperature: $T < 260^{\circ}C$
Dwell time: $t < 5$ sec

Double wave soldering

Soldering bath temperature: $T < 260^{\circ}C$
Dwell time: $\Sigma t < 5$ sec

Due to different soldering processes and heat requirements the graphs are to be regarded as a recommendation only.



WIMA Quality and Environmental Philosophy

ISO 9001:2008 Certification

ISO 9001:2008 is an international basic standard of quality assurance systems for all branches of industry. The approval according to ISO 9001:2008 of our factories by the VDE inspectorate certifies that organisation, equipment and monitoring of quality assurance in our factories correspond to internationally recognized standards.

WIMA WPCS

The WIMA Process Control System (WPCS) is a quality surveillance and optimization system developed by WIMA. WPCS is a major part of the quality-oriented WIMA production. Points of application of WPCS during production process:

- incoming material inspection
- metallization
- film inspection
- schoopage
- pre-healing
- pin attachment
- cast resin preparation/encapsulation
- 100% final inspection
- AQL check

WIMA Environmental Policy

All WIMA capacitors, irrespective of whether through-hole devices or SMD, are made of environmentally friendly materials. Neither during manufacture nor in the product itself any toxic substances are used, e.g.

- Lead
- PCB
- CFC
- Hydrocarbon chloride
- Chromium 6+
- PBB/PBDE
- Arsenic
- Cadmium
- Mercury
- etc.

We merely use pure, recyclable materials for packing our components, such as:

- carton
- cardboard
- adhesive tape made of paper
- polystyrene

We almost completely refrain from using packing materials such as:

- foamed polystyrene (Styropor®)
- adhesive tapes made of plastic
- metal clips

RoHS Compliance

According to the RoHS Directive 2011/65/EU certain hazardous substances like e.g. lead, cadmium, mercury must not be used any longer in electronic equipment as of July 1st, 2006. For the sake of the environment WIMA has refrained from using such substances since years already.



WIMA Kondensatoren sind bleifrei konform RoHS 2011/65/EU

WIMA capacitors are lead free in accordance with RoHS 2011/65/EU

Tape for lead-free WIMA capacitors

DIN EN ISO 14001:2004

WIMA's environmental management has been established in accordance with the guidelines of DIN EN ISO 14001:2004 to optimize the production processes with regard to energy and resources.



Typical Dimensions for Taping Configuration

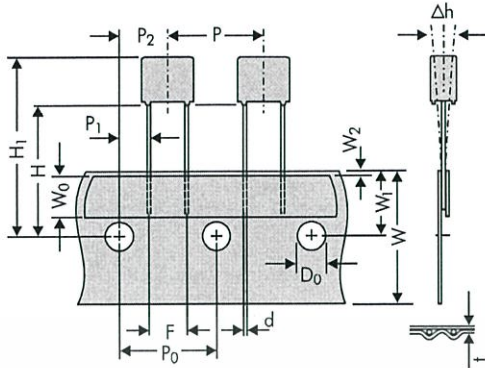


Diagram 1:
PCM 2.5/5/7.5mm

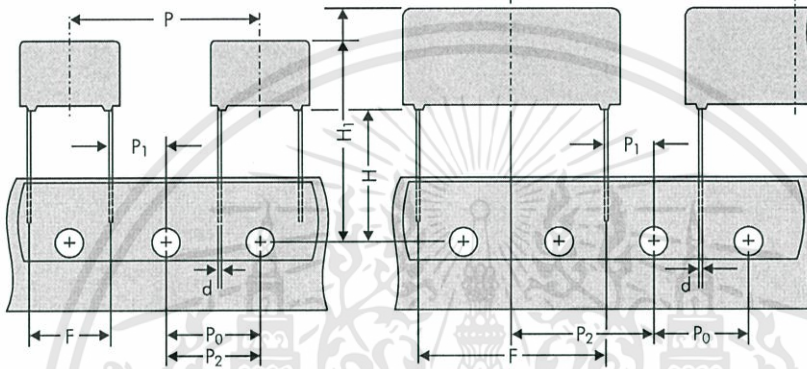


Diagram 2: PCM 10/15 mm

Diagram 3: PCM 22.5 and 27.5*mm
*PCM 27.5 taping possible with two feed holes between components

Dimensions for Radial Taping								
Designation	Symbol	PCM 2.5 taping	PCM 5 taping	PCM 7.5 taping	PCM 10 taping*	PCM 15 taping*	PCM 22.5 taping	PCM 27.5 taping
Carrier tape width	W	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5	18.0 ±0.5
Hold-down tape width	W ₀	6.0 for hot-sealing adhesive tape	6.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape	12.0 for hot-sealing adhesive tape
Feed hole position	W ₁	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5	9.0 ±0.5
Hold-down tape position	W ₂	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.	0.5 to 3.0 max.
Feed hole diameter	D ₀	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2	4.0 ±0.2
Pitch of component	P	12.7 ±1.0	12.7 ±1.0	12.7 ±1.0	25.4 ±1.0	25.4 ±1.0	38.1 ±1.5	38.1 ±1.5 or 50.8 ±1.5
Feed hole pitch	P ₀	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch	12.7 ±0.3 cumulative pitch error max. 1.0 mm/20 pitch
Feed hole centre to pin	P ₁	5.1 ±0.5	3.85 ±0.7	2.6 ±0.7	7.7 ±0.7	5.2 ±0.7	7.8 ±0.7	5.3 ±0.7
Feed hole centre to component centre	P ₂	6.35 ±1.3	6.35 ±1.3	6.35 ±1.3	12.7 ±1.3	12.7 ±1.3	19.05 ±1.3	19.05 ±1.3
Feed hole centre to bottom edge of the component	H	16.5 ±0.3 18.5 ±0.5	16.5 ±0.3 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5	16.5 ±0.5 18.5 ±0.5
Feed hole centre to top edge of the component	H ₁	H+H _{component} < H ₁ 32.25 max.	H+H _{component} < H ₁ 32.25 max.	H+H _{component} < H ₁ 24.5 to 31.5	H+H _{component} < H ₁ 25.0 to 31.5	H+H _{component} < H ₁ 26.0 to 37.0	H+H _{component} < H ₁ 30.0 to 43.0	H+H _{component} < H ₁ 35.0 to 45.0
Pin spacing at top edge of carrier tape	F	2.5 ±0.5	5.0 ^{+0.8} _{-0.2}	7.5 ±0.8	10.0 ±0.8	15 ±0.8	22.5 ±0.8	27.5 ±0.8
Pin diameter	d	0.4 ±0.05	0.5 ±0.05	*0.5 ±0.05 or 0.6 ^{+0.05} _{-0.05}	*0.5 ±0.05 or 0.6 ^{+0.05} _{-0.05}	0.8 ^{+0.08} _{-0.05}	0.8 ^{+0.08} _{-0.05}	0.8 ^{+0.08} _{-0.05}
Component alignment	Δh	± 2.0 max.	± 2.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.	± 3.0 max.
Carrier tape thickness	t	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2	0.7 ±0.2
Package designation (see also page 129)	ROLL/AMMO			AMMO				
	REEL	φ 360 max. φ 30 ±1	B 52 ±2 58 ±2 } depending on comp. dimensions	REEL	φ 360 max. φ 30 ±1	52 ±2 58 ±2 or 66 ±2	REEL	φ 500 max. φ 25 ±1
Pin pitch	see details page 130.							

Dimensions in mm.

Diameter of pins see General Data.

Please clarify customer-specific deviations with the manufacturer.

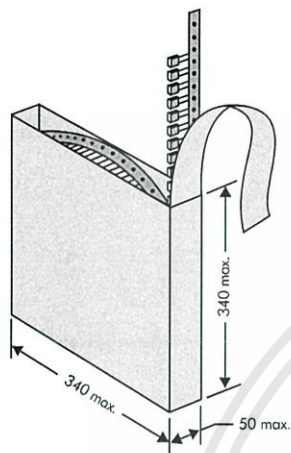
PCM 10 and PCM 15 can be crimped to PCM 7.5.

Position of components according to PCM 7.5 (sketch 1). P₀ = 12.7 or 15.0 is possible

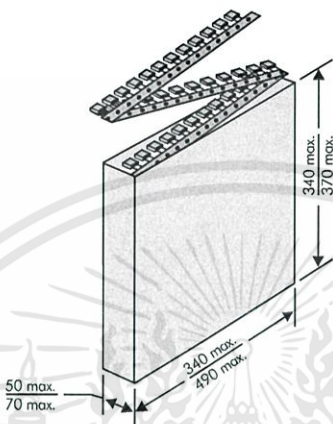


Types of Tape Packaging of Capacitors for Automatic Radial Insertion

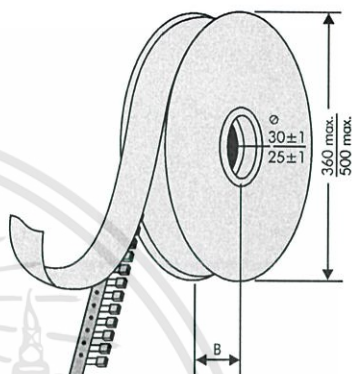
■ ROLL Packaging



■ AMMO Packaging



■ REEL Packaging



BAR CODE (Labelling)

Labelling of package units in plain text and with alphanumerical Bar Code

Scanner decoding of

- WIMA supplier number
- Customer's P/O number
- Customer's part number
- WIMA confirmation number
- WIMA part number
- Lot number
- Date code
- Quantity

In addition part description of

- article
- capacitance value
- rated voltage
- dimensions
- capacitance tolerance
- packing

as well as gross weight and customer's name are indicated in plain text.

BARCODE „Code 39“

WIMA Best Capacitors Made in Germany		Werk Unna	
Supplier-ID: 123456789	RoHS	Date Code: 08.10.10	
	2011/65/EC		
Purchase Order No. (P/O): Bestellung xyz		Quantity: 5.000	
Customer Part No.: KUNDETEILENUMMER		Customer No.: 0000100002	
		Gross Weight [g]: 1870	
WIMA Confirmation No.: 0001004083000100		WIMA Part No.: MK920034701006K9SD	
Handling Unit:	MKS 2	QTY: 5.000	COO: DE
	MKS 2 0.47 µF 63 VDC 3.5x8.5x7.2 RM5		
1000067326	Standard 10% Loss - Standard	Drinks 6-2	Week 03/2011
	Vorlage Debitur Inland		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นนอกเหนือจากนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Packing Quantities for Capacitors with Radial Pins in PCM 2.5 mm to 22.5 mm

PCM	Size				bulk	pcs. per packing unit										
						ROLL		REEL				AMMO				
	W	H	L	Codes		S	N	O	ø 360		ø 500		340 × 340		490 × 370	
					H16.5	H18.5	H16.5	H18.5	H16.5	H18.5	H16.5	H18.5	A	C	B	D
2.5 mm	2.5	7	4.6	0B	5000	2200		2500					2800			
	3	7.5	4.6	0C	5000	2000		2300					2300			
	3.8	8.5	4.6	0D	5000	1500		1800					1800			
	4.6	9	4.6	0E	5000	1200		1500					1500			
	5.5	10	4.6	0F	5000	900		1200					1200			
5 mm	2.5	6.5	7.2	1A	5000	2200		2500					2800			
	3	7.5	7.2	1B	5000	2000		2300					2300			
	3.5	8.5	7.2	1C	5000	1600		2000					2000			
	4.5	6	7.2	1D	6000	1300		1500					1500			
	4.5	9.5	7.2	1E	4000	1300		1500					1500			
	5	10	7.2	1F	3500	1100		1400					1400			
	5.5	7	7.2	1G	4000	1000		1200					1200			
	5.5	11.5	7.2	1H	2500	1000		1200					1200			
	6.5	8	7.2	1I	2500	800		1000					1000			
	7.2	8.5	7.2	1J	2500	700		1000					1000			
	7.2	13	7.2	1K	2000	700		950					1000			
	8.5	10	7.2	1L	2000	600		800					800			
	8.5	14	7.2	1M	1500	600		800					800			
	11	16	7.2	1N	1000	500		600				400				
7.5 mm	2.5	7	10	2A	5000			2500		4400		2500				
	3	8.5	10	2B	5000			2200		4300		2300			4150	
	4	9	10	2C	4000			1700		3200		1700			3100	
	4.5	9.5	10.3	2D	3500			1500		2900		1400			2800	
	5	10.5	10.3	2E	3000			1300		2500		1300				
	5.7	12.5	10.3	2F	2000			1000		2200		1100				
	7.2	12.5	10.3	2G	1500			900		1800		1000				
10 mm	3	9	13	3A	3000			1100		2200					1900	
	4	8.5	13.5	3A	3000			900		1600					1450	
	4	9	13	3C	3000			900		1600					1450	
	4	9.5	13	3D	3000			900		1600					1400	
	5	10	13.5	3B	2000			700		1300					1200	
	5	11	13	3F	3000			700		1300					1200	
	6	12	13	3G	2400			550		1100					1000	
	6	12.5	13	3H	2400			550		1100					1000	
8	12	13	3I	2000			400		800					740		
15 mm	5	11	18	4B	2400			600		1200					1150	
	5	13	19	4B	1000			600		1200					1200	
	6	12.5	18	4C	2000			500		1000					1000	
	6	14	19	4C	1000			500		1000					1000	
	7	14	18	4D	1600			450		900					850	
	7	15	19	4D	1000			450		900					850	
	8	15	18	4E	1200			400		800					740	
	8	17	19	4E	500			400		800					740	
	9	14	18	4H	1200			350		700					650	
	9	16	18	4H	900			350		700					650	
	10	18	19	4G	500			300		650					590	
11	14	18	4M	1000			300		600					540		
22.5 mm	5	14	26.5	5A	1200					800					770	
	6	15	26.5	5B	1000					700					640	
	7	16.5	26.5	5D	760					600					550	
	8	20	28	5H	500					500					480	
	8.5	18.5	26.5	5F	500					480					450	
	10	22	28	5I	540*					420					380	
	10.5	19	26.5	5G	680*					400					360	
	10.5	20.5	26.5	5H	680*					400					360	
	11	21	26.5	5I	680*					380					350	
	12	24	28	5J	450*					350					310	

* TPS (Tray-Packing-System). Plate versions may have different packing units. Moulded versions. Rights reserved to amend design data without prior notification. Samples and pre-production needs on request.



Packing Quantities for Capacitors with Radial Pins in PCM 27.5 mm to 52.5 mm

PCM	Size				bulk	pcs. per packing unit								
						ROLL		REEL				AMMO		
	W	H	L	Codes		S	H16.5	H18.5	ø 360		ø 500		340 × 340	
					N	O	F	I	H	J	A	C	B	D
27.5 mm	9	19	31.5	6A	640*	-	-	460/340*		-		420		
	11	21	31.5	6B	544*	-	-	380/280*		-		350		
	13	24	31.5	6D	448*	-	-	300		-		290		
	13	25	33	6F	336*	-	-	-		-		-		
	15	26	31.5	6F	384*	-	-	270		-		250		
	15	26	33	6L	288*	-	-	-		-		-		
	17	29	31.5	6G	176*	-	-	-		-		-		
	17	34.5	31.5	6I	176*	-	-	-		-		-		
	20	32	33	6M	216*	-	-	-		-		-		
	20	39.5	31.5	6J	144*	-	-	-		-		-		
37.5 mm	9	19	41.5	7A	480*	-	-	-		-		-		
	11	22	41.5	7B	408*	-	-	-		-		-		
	13	24	41.5	7C	252*	-	-	-		-		-		
	15	26	41.5	7D	144*	-	-	-		-		-		
	17	29	41.5	7E	132*	-	-	-		-		-		
	19	32	41.5	7F	108*	-	-	-		-		-		
	20	39.5	41.5	7G	108*	-	-	-		-		-		
	24	45.5	41.5	7H	84*	-	-	-		-		-		
	31	46	41.5	7I	72*	-	-	-		-		-		
	35	50	41.5	7J	35*	-	-	-		-		-		
48.5 mm	19	31	56	8D	50*	-	-	-		-		-		
	23	34	56	8E	72*	-	-	-		-		-		
	27	37.5	56	8H	60*	-	-	-		-		-		
	33	48	56	8J	48*	-	-	-		-		-		
	37	54	56	8L	25*	-	-	-		-		-		
52.5 mm	35	50	57	9F	25*	-	-	-		-		-		
	45	55	57	9H	20*	-	-	-		-		-		
	45	65	57	9J	20*	-	-	-		-		-		

* for 2-inch transport pitches.

* TPS (Tray-Packing-System). Plate versions may have different packing units. Samples and pre-production needs on request.

■ Moulded versions. Rights reserved to amend design data without prior notification.



WIMA Part Number System

A WIMA part number consists of 18 digits and is composed as follows:

- Field 1 - 4: Type description
- Field 5 - 6: Rated voltage
- Field 7 - 10: Capacitance
- Field 11 - 12: Size and PCM
- Field 13 - 14: Version code (e.g. Snubber versions)
- Field 15: Capacitance tolerance
- Field 16: Packing
- Field 17 - 18: Pin length (untaped)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
M	K	S	2	C	0	2	1	0	0	1	A	0	0	M	S	S	D
MKS 2				63 VDC		0.01 µF			2.5x6.5x7.2		-		20%	bulk	6-2		

Type description:	Rated voltage:	Capacitance:	Size:	Tolerance:	Packing:
SMD-PET = SMDT	50 VDC = B0	22 pF = 0022	4.8x3.3x3 Size 1812 = KA	±20% = M	AMMO H16.5 340x340 = A
SMD-PPS = SMDI	63 VDC = C0	47 pF = 0047	4.8x3.3x4 Size 1812 = KB	±10% = K	AMMO H16.5 490x370 = B
FKP 02 = FKPO	100 VDC = D0	100 pF = 0100	5.7x5.1x3.5 Size 2220 = QA	±5% = J	AMMO H18.5 340x340 = C
MKS 02 = MKS0	250 VDC = F0	150 pF = 0150	5.7x5.1x4.5 Size 2220 = QB	±2.5% = H	AMMO H18.5 490x370 = D
FKS 2 = FKS2	400 VDC = G0	220 pF = 0220	7.2x6.1x3 Size 2824 = TA	±1% = E	REEL H16.5 360 = F
FKP 2 = FKP2	450 VDC = H0	330 pF = 0330	7.2x6.1x5 Size 2824 = TB	...	REEL H16.5 500 = H
MKS 2 = MKS2	600 VDC = I0	470 pF = 0470	10.2x7.6x5 Size 4030 = VA		REEL H18.5 360 = I
MKP 2 = MKP2	630 VDC = J0	680 pF = 0680	12.7x10.2x6 Size 5040 = XA		REEL H18.5 500 = J
FKS 3 = FKS3	700 VDC = K0	1000 pF = 1100	15.3x13.7x7 Size 6054 = YA		ROLL H16.5 = N
FKP 3 = FKP3	800 VDC = L0	1500 pF = 1150	2.5x7x4.6 PCM2.5 = 0B		ROLL H18.5 = O
MKS 4 = MKS4	850 VDC = M0	2200 pF = 1220	3x7.5x4.6 PCM2.5 = 0C		BLISTER W12 180 = P
MKP 4 = MKP4	900 VDC = N0	3300 pF = 1330	2.5x6.5x7.2 PCM5 = 1A		BLISTER W12 330 = Q
MKP 10 = MKP1	1000 VDC = O1	4700 pF = 1470	3x7.5x7.2 PCM5 = 1B		BLISTER W16 330 = R
FKP 4 = FKP4	1100 VDC = P0	6800 pF = 1680	2.5x7x10 PCM7.5 = 2A		BLISTER W24 330 = T
FKP 1 = FKP1	1200 VDC = Q0	0.01 µF = 2100	3x8.5x10 PCM7.5 = 2B		Bulk/TPS Standard = S
MKP-X2 = MKX2	1250 VDC = R0	0.022 µF = 2220	3x9x13 PCM10 = 3A		...
MKP-X2 R = MKXR	1500 VDC = S0	0.047 µF = 2470	4x9x13 PCM10 = 3C		
MKP-Y2 = MKY2	1600 VDC = T0	0.1 µF = 3100	5x11x18 PCM15 = 4B		
MP 3-X2 = MPX2	2000 VDC = U0	0.22 µF = 3220	6x12.5x18 PCM15 = 4C		
MP 3-X1 = MPX1	2500 VDC = V0	0.47 µF = 3470	5x14x26.5 PCM22.5 = 5A		
MP 3-Y2 = MPY2	3000 VDC = W0	1 µF = 4100	6x15x26.5 PCM22.5 = 5B		
MP 3R-Y2 = MPRY	4000 VDC = X0	2.2 µF = 4220	9x19x31.5 PCM27.5 = 6A		
Snubber MKP = SNMP	6000 VDC = Y0	4.7 µF = 4470	11x21x31.5 PCM27.5 = 6B		
Snubber FKP = SNFP	250 VAC = OV	10 µF = 5100	9x19x41.5 PCM37.5 = 7A		
GTO MKP = GTOM	275 VAC = 1V	22 µF = 5220	11x22x41.5 PCM37.5 = 7B		
DC-LINK MKP 3 = DCP3	300 VAC = 2W	47 µF = 5470	94x49x182 DCH_ = H0		
DC-LINK MKP 4 = DCP4	400 VAC = 3W	100 µF = 6100	94x77x182 DCH_ = H1		
DC-LINK MKP 4S = DCP4S	440 VAC = 4W	220 µF = 6220	...		
DC-LINK MKP 5 = DCP5	500 VAC = 5W	1000 µF = 7100			
DC-LINK MKP 6 = DCP6			
DC-LINK HC = DCH_					
DC-LINK HY = DCHY					
			Version code:		Pin length (untaped)
			Standard = 00		3.5 ±0.5 = C9
			Version A1 = 1A		6-2 = SD
			Version A1.1.1 = 1B		16 ±1 = P1
			Version A2 = 2A		...
			...		

The data on this page is not complete and serves only to explain the part number system. Part number information is listed on the pages of the respective WIMA range.

ประวัติผู้เขียน



นายพงษ์เศวต บุญศรีพรหม เกิดเมื่อวันที่ 3 มีนาคม 2535 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบางบัวทอง และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: p_nutkung@live.com

สถานที่ฝึกงาน: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สำนักงานใหญ่ บางกรวย



นายพัสวัฒน์ อยู่แก้ว เกิดเมื่อวันที่ 20 เมษายน พ.ศ.2535 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียน บดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: Chosicon@hotmail.com

สถานที่ฝึกงาน: Best Direction System Co. Ltd.



นายพิสิฐ เลาะห์วีร์ เกิดเมื่อวันที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัด เชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสามัคคีวิทยาคม และสำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: poronlines@hotmail.com

สถานที่ฝึกงาน: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ)



นายสุรศักดิ์ น้อยหอม เกิดเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัด เชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนแม่จันวิทยาคม และ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: benz_surasak@hotmail.com

สถานที่ฝึกงาน: บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) Bangkok Mass Transit System Public Company Limited (BTS)