การออกแบบและสร้างหม้อแปลงเทสล่า 120 kV 120 kHz สำหรับทดสอบลูกถ้วยฉนวน

Design and construction tesla transformer 120 kV 120 kHz for Insulator Testing

ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว และ ทง ลานธารทอง
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
เลขที่ 1381 ถนนพิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800.
e-mail: Supawudn_p_g@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาออกแบบและสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูงหรือหม้อแปลงเทสล่า โดยมีขนาดพิกัดการออกแบบที่ 120 kV 120 kHz โดยใช้การคับปลิ้งผ่านแกนอากาศและใช้อากาศเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำด้วยกัน ซึ่งจะได้กล่าวถึงการคำนวณหาโครงสร้างและมิติที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เกิดสภาวะการคับปลิ้งและการจูนที่เหมาะสม ในเนื้อหาของงานวิจัยจะแสดงการออกแบบหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูง 120 kV 120 kHz เพื่อใช้งานในห้องปฏิบติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คำสำคัญ : หม้อแปลงเทสล่า

Abstract

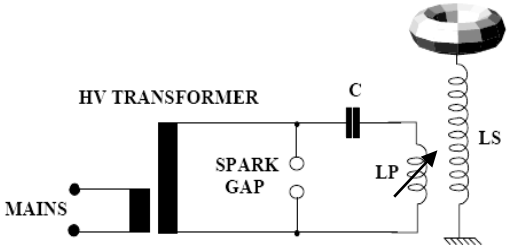
This research presented the details of design and constructions of tesla transformer for testing insulator. The out put of the tesla transformer has a rate of 120 kV and 120 kHz. Tesla transformer consisted of primary coil and secondary coil which is wound on a PVC insulating chamber and use air insulation in part of coaxial. The Rotary Gap is rotated electrode which use for increasing efficiency of voltage generation. This paper presented the details of design and constructions are explained. And compare the tesla Transformer reproduce which is created the voltage at 120 kV and frequency 120 kHz for used in HighVoltage Laboratory Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Phra Nakhon.

keyword : Tesla Transformer

1.บทนำ

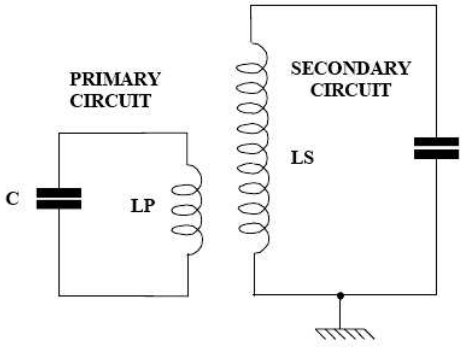
1.1 ลักษณะการเกิดการคับปลิ้งระหว่างขดลวดทั้งสองของหม้อแปลงเทสล่า

หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงจัดได้ว่าเป็นประเภทของหม้อแปลงที่เป็นชนิดพิเศษ โดยที่แกนของตัวหม้อแปลงจะใช้เป็นแกนอากาศ ขดปฐมภูมิ (Primary) และขดทุติยภูมิ (Secondary) จะติดตั้งอยู่ในแกนร่วมกัน แรงดันของหม้อแปลงจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของรอบในขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ แต่จะเพิ่มขึ้นโดยการใช้การเรโซแนนท์ (Resonance) ระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิ โดยที่ขดลวดทุติยภูมิจะกระทำเป็นตัวรับพลังงานจากขดปฐมภูมิ ที่ความถี่เรโซแนนท์ (Resonance Frequency) จะเป็นผลทำให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ความถี่เรโซแนนท์จะอยู่ระหว่าง 50 Hz ถึง 500 kHz ที่แรงดันด้านออกจะมีค่าเริ่มตั้งแต่ 100 kV ขึ้นไป ถ้าหากมีพลังงานที่ป้อนให้เพียงพอแรงดันด้านออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงช่วงเมกะโวลท์ (Mega Volt) และถ้าเกิดมีแรงดันขึ้นไปถึงช่วงระดับที่แน่นอนจะทำให้มีการเริ่มเกิดการสปาร์ค(Spark)และจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นประกายแสงที่แตกออกอย่างกว้างขวางเป็นอิสระ รูปที่ 1 คือวงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเทสล่า



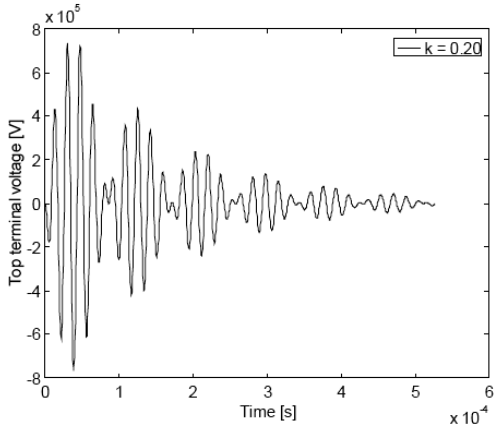
รูปที่ 1 แสดงวงจรพื้นฐานหม้อแปลงเทสล่า

การทำงานของขดลวดหม้อแปลงเทสล่า อธิบายได้โดยใช้กฎทางคณิตศาสตร์ไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์ 2 วงจรที่มีการ coupling โดยขดลวดเหนี่ยวนำผ่านแกนอากาศ วงจรแรกประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C และขดลวดทางด้านปฐมภูมิ LP ต่อกันแบบอนุกรมผ่าน Spark gap ในขณะที่วงจรที่สองประกอบด้วยขดลวดทุติยภูมิ LS ต่อแบบอนุกรมกับตัวนำทรงกลมหรือทรงโดนัสซึ่งทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวด์ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงเทสล่า

ในขณะที่ Spark gap นำกระแสไฟฟ้า พลังงานที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ C จะถูกจ่ายให้กับ LP ทำให้วงจรทางด้านปฐมภูมิออสซิลเลตใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งความถี่ขึ้นอยู่กับค่า C และ LP พลังงานส่วนนี้จะถูกส่งผ่านทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังขดลวดด้านทุติยภูมิ LS ซึ่งจะทำให้เกิดออสซิลเลตใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรด้านทุติยภูมิด้วยเช่นกัน ในลำดับถัดมา ขนาดสูงสุดของแรงดันจะมีค่าสูงสุดเมื่อแรงดันของวงจรเรโซแนนซ์ 2 วงจรนี้มีเฟสตรงกัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ Beat เช่นเดียวกับคลื่นน้ำหรือคลื่นเสียง ดูตัวอย่างตามรูปที่ 2.16 พลังงานนี้ถูกส่งกลับไปกลับมาจากวงจรด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งด้วยความถี่ Beat จนกระทั่งพลังงานเหล่านี้ทั้งหมดสูญเสียไปในรูปของความร้อนเนื่องจากความต้านทานของขดลวดและสูญเสียไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ช่วงเวลานี้ กระแสไฟฟ้าทางด้านวงจรปฐมภูมิจะมีค่าต่ำสุดและทำให้ Spark gap หยุดนำกระแส



รูปที่ 3 ลักษณะการเกิดของสัญญาณทางขาออกของหม้อแปลง

อัตราส่วนระหว่างแรงดันทางด้าน Lp และแรงดันที่เกิดขึ้นด้าน Ls ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แต่เป็นสัดส่วนตรงกับรากที่ 2 ของอัตราส่วนค่าความเหนี่ยวนำ Ls และ Lp สัมประสิทธิ์การคับปลิ้งระหว่างขดลวดทั้งสองค่อนข้างแตกต่างจากค่าปกติ ซึ่งมีค่า 0.9-1 สำหรับหม้อแปลงแกนเหล็กที่ใช้กันโดยทั่วไป ด้วยเหมือนกัน โดยทั่วไปค่าจะอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.6

1.2 รายละเอียดส่วนประกอบของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

1.2.1 กราวด์อ้างอิง (RF Ground)

กราวด์อ้างอิงถือว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ทำให้การทำงานของหม้อแปลงมีประสิทธิภาพสูงสุด กราวด์ที่จะนำมาใช้งานจำเป็นจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ที่มีค่าต่ำมากๆ ถึงจะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานกับหม้อแปลง และห้ามที่จะนำหม้อแปลงไปต่อรวมกับกราวด์ของบ้าน เพราะจะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งานอยู่ และยังรวมไปถึงเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ ที่ต่อกราวด์รวมกันอาจมีผลกระทบได้ และเมื่อทำการต่อกราวด์ที่มีคุณภาพดีให้กับหม้อแปลงก็จะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของหม้อแปลง

1.2.2 แกปป้องกัน (Safety Gap)

การทำงานของหม้อแปลงที่แรงดันของด้านทุติยภูมิบางครั้งมีแรงดันสูงมากกลับไปยังแหล่งจ่าย (Supply)ได้ ความผิดพลาดของแรงดันสูง ๆ ที่เกิดขึ้นบ่อย ๆ เรียกว่าคิกแบล็ค (Kickback) แกปป้องกันจึงเป็นสิ่งจำเป็น และทำการออกแบบขึ้นมาป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกลับแหล่งจ่าย (Power Supply) ได้ เนื่องจากการคิกแบล็คปกติติดตั้งกลับหม้อแปลงนี้ออนด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง แกปป้องกันมีความแตกต่างกับแกปหลัก (Main gap) เพราะแกปป้องกันจะเกิดความร้อนขึ้นบางครั้งบางคราวเท่านั้น การปรับแต่งแกปป้องกัน โดยปกติจะปรับแต่งให้เพียงพอกับการป้องกันแหล่งจ่าย การปรับตั้งระยะของแกปป้องกัน สำหรับหม้อแปลงนี้ออนมีขนาดตั้งแต่ 9, 12 หรือ 15 kV ปกติจะใช้ระยะแกป คือ 3/8 นิ้วก็เพียงพอ ถ้าปรับตั้งแล้วไม่เกิดการ สปาร์ค (Spark) เลย หรือเกิดขึ้นน้อยครั้ง ก็ให้ทำการปรับเข้ามาอีกเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเกิดการสปาร์คอย่างสม่ำเสมอ ก็ให้ทำการขยายออกอีกเพียงเล็กน้อย

1.2.3 สปาร์คแกป (Spark gap)

สปาร์คแกปจะทำหน้าที่เป็นสวิทช์ความเร็วสูงกำลังไฟฟ้าสูง ตัวสปาร์คต้องครอบคลุมระดับแรงดันพังทะลาย (Breakdown voltage) ไม่ต่างไปจากอุปกรณ์อิเล็คทรอนิค (Electronic) หรือสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) การออกแบบต้องสามารถเป็นสวิทช์ (Switch) ที่ระดับกำลังไฟฟ้าสูงๆ อย่างรวดเร็วซึ่งเรียกว่าสปาร์คแกป เมื่อแรงดันคร่อมสปาร์คแกปมีค่าสูงเพียงพอจะทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างตัวนำของแกป จะเริ่มเกิดการไอออไนซ์ (Ionize) หากว่าการเกิดไอออไนซ์ที่เพิ่มขึ้นเพียงพอ จะทำให้เกิดเป็นสื่อที่แกปกระโดดไปยังอีกแกปหนึ่ง เมื่อแรงดันที่คร่อมสปาร์คแกปตกลงจะทำให้การไอออไนซ์ลดลงด้วย และแกปก็จะกลับสภาพเดิม คือเปิดวงจร (Open circuit) การดับของอาร์ค (Arc) จะเป็นไปตามเวลาที่กำหนดให้ดับ แกปจะต้องมีความแข็งแรงที่จะทำการหยุดเป็นตัวนำที่รวดเร็วได้โดยจำนวนของแกปที่ต่ออนุกรมอยู่ ความร้อนและไอออน (Ion) จะเกิดขึ้นและแผ่ขยายออกไปเต็มพื้นที่ถ้ามีอากาศเป่าที่แกปก็จะทำให้การดับอาร์คทำได้ดีขึ้นโดยอากาศจะเป็นตัวช่วยทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนร้อน (Heat ion) ที่เป็นสื่อนำในแกปเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น การต่อแกปแบบอนุกรมจะเรียกว่าสแตตริกแกป (Static gap) และยังมีอีกชนิดคือโรตารี่แกป (Rotary gap) จะมีส่วนประกอบคือหนึ่งคู่ตัวนำที่อยู่กับที่และหลายคู่ตัวนำที่

เคลื่อนที่ด้วยการหมุน โดยมีข้อแม้ว่าระหว่างแกปหนึ่งคู่ของตัวนำที่หมุนจะต้องตรงกันหรือเป็นแนวเดียวกันกับตัวนำที่หยุดนิ่งจะทำการดับอาร์คโดยการทำงานของตัวนำที่เคลื่อนที่ สำหรับแกปของสแตตริกแกปที่นำมาต่ออนุกรมกันที่ใช้หม้อแปลงนีออนเป็นแหล่งจ่ายจะมีจำนวนและขนาดของตัวนำขึ้นอยู่กับระดับกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงนีออนสามารถดูได้จาก ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 1 จำนวนตัวนำของแกปต่อขนาดของหม้อแปลง

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

ตัวนำที่ใช้ทำแกปทำจากน็อตสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ¾ นิ้ว ระยะห่างระหว่างแกปตัวนำจะอยู่ระหว่าง 0.025 ถึง 0.03 นิ้ว แกปใช้ได้กับขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 1.5 kW ขึ้นไป

1.2.4. ทอรอยด์ (Toroid)

ทอรอยด์ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงมีหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

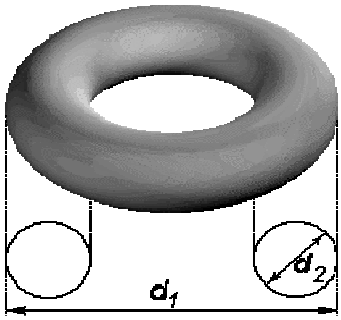
ก) ทอรอยด์ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุของขดทุติยภูมิของหม้อแปลง เป็นส่วนช่วยทำให้เกิดการเรโซแนนท์ ถ้าทอรอยด์มีขนาดใหญ่ก็จะได้ค่าของตัวเก็บประจุที่มากด้วย เมื่อขดลวดทำงานก็จะทำให้เกิดหมอกอากาศของการไอออไนซ์ขึ้นรอบๆ จุดต่อของทอรอยด์ แต่ถ้าทำการต่อทอรอยด์ที่จุดต่อจะทำให้การไอออไนซ์มีความราบเรียบและสมบูรณ์มากขึ้น

ข) ทอรอยด์จะทำให้มีเสถียรภาพขึ้นรอบๆ ส่วนบนสุดที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง คือพยายามทำให้แรงดันลาดเอียง (Voltage gradient) ลดลงมาอย่างมาก ในส่วนของระดับแรงดันที่เกิดบนจุดต่อทอรอยด์จะกลายเป็นแรงดันที่มีค่าสูงมาก

ค) ทอรอยด์ทำหน้าที่ช่วยในการสร้างสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆ ส่วนบนสุดที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

จากที่กล่าวมาเราสามารถหาค่าของตัวเก็บประจุได้จากสมการ (1) ดังรูป (1)

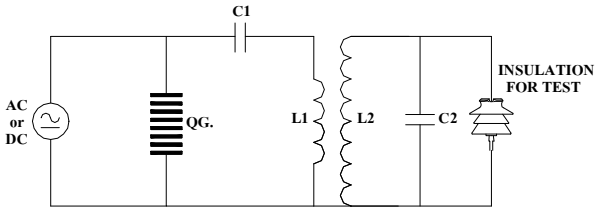
$$C = 1+\left(0.2781-\frac{d_2}{d_1}\right)\times 2.8\times\sqrt{\frac{2\pi\times\left(d_1-d_2\right)\times\left(\frac{d_2}{2}\right)}{4\pi}} \quad .....(1)$$



รูปที่ 4 รูปแบบของทอรอยด์ที่ใช้กับหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

เมื่อ d_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางของทอรอยด์
d_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ , นิ้ว
C = ค่าความจุไฟฟ้า , pF

1.3 การทำงานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

จากรูปที่ 5 เป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง และส่วนประกอบอื่นๆ โดยที่ C_1 เป็นตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิ ส่วน C_2 เป็นตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิของขดลวด เทสลา ซึ่งเป็นประจุแฝง (Stray capacitor) เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC.) ประมาณ 15 kV. ให้กับตัวเก็บประจุ C_1 เมื่ออัดประจุให้กับ C_1 จนได้แรงดันซึ่งทำให้เกิดการเบรคดาวน์ระหว่างช่องว่างของอากาศที่ตัวสปาร์คแกป QG. (Quenching gap) ซึ่งจะทำให้เกิดการปิดเปิด (switching on-off) และยังทำหน้าที่ตัดอาร์คหรือสปาร์คด้วย เมื่อเกิดการ spark over ที่สปาร์คแกปจะทำให้วงจรของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงครบวงจร พลังงานที่เก็บไว้ใน C_1 ในรูปสนามไฟฟ้าก็จะถ่ายเทประจุมายังขดลวดแรงต่ำ L_1 และ L_1ก็จะเก็บพลังงานไว้ในรูปสนามแม่เหล็กเมื่อเต็มที่แล้ว L_1 ก็จะถ่ายเทพลังงาน (transfer energy) กลับไปให้ C_1 ใหม่ จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานกลับไปกลับมาระหว่าง L_1 กับ C_1 ทำให้เกิด oscillate ต่อเนื่องแบบ damped oscillation ที่มีความถี่สูง สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีความถี่ 50 Hz หรือ 1/50 วินาทีใน 1 cycle ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ C_1 ใน 1 cycle จะทำให้เกิดการประจุและคายประจุของครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบ ดังนั้นจะทำให้เกิดการแกว่งแบบหน่วง (damped oscillation) ที่นิยมใช้จะสูงประมาณ 100-250 kHz ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับค่า inductance และ capacitance ของการ oscillation ค่าโดยประมาณของความถี่ที่ทำให้เกิดการ oscillate หาได้จาก

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \quad \text{.....(2)}$$

เมื่อ L_1 เป็นค่า inductance ของวงจรด้านปฐมภูมิ เกิดการ oscillation ในวงจรทางด้านปฐมภูมิของ tesla transformer จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดด้านทุติยภูมิของ tesla transformer ซึ่งมีความถี่เช่นเดียวกันกับทางด้านปฐมภูมิจะส่งถ่ายพลังงานไปยังวงจรทางด้านทุติยภูมิ (L_2C_2) ในลักษณะแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิเริ่มลดลงและในขณะที่แรงดันด้านปฐมภูมิเริ่มเพิ่มขึ้น ถ้าเผื่อค่า inductance ทางด้านปฐมภูมิ (L_2) และ stray capacitance(C_2) มีค่าเท่ากับวงจร ทางด้านปฐมภูมิ คือ $L_1C_1 = L_2C_2$ จะเกิดการ damped oscillation แบบต่อเนื่อง และพลังงานที่เกิดขึ้นหาได้จาก

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \quad \text{.....(3)}$$

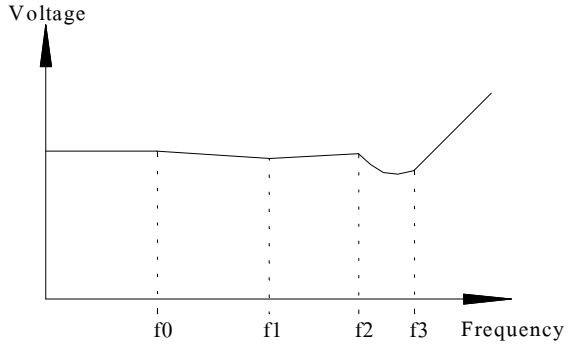
โดยที่ W = พลังงานที่เกิดขึ้น

C = ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

V = แรงดันที่ป้อนให้แก่ตัวเก็บประจุ

2.8.8 ศักย์ดาไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ความถี่สูง (Breakdown voltage at high frequency)

ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ดาไฟฟ้า และความถี่สามารถแยกออกได้เป็นห้าช่องดังแสดงในรูปที่ 6 และศักย์ดาไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ในแต่ละช่วงนั้นมีขบวนการทางด้านฟิสิกส์ต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ และความถี่

ที่ความถี่ต่ำกว่า f_0 ศักย์ดาไฟฟ้าเบรกดาวน์ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ทั้งนี้เป็นเพราะไอออนบวกหรือประจุอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างไอออไนเซชั่นในช่วงครึ่งไซเคิลแรก มีเวลามากพอที่จะเคลื่อนที่เข้า อิเล็คโทรดและครึ่งไซเคิลต่อไปจึงไม่ประจุอากาศเหลือจากครึ่งไซเคิลแรก และขบวนการก็เริ่มใหม่เหมือนเดิม เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นจนมากกว่า f_0 ส่วนหนึ่งของไอออนบวกในครึ่งไซเกิคแรกยังเหลืออยู่ ทำให้เกิดประจุอากาศสะสมไปเรื่อย ๆ ทำให้ศักย์ดาไฟฟ้าเบรกดาวน์ต่ำลง สำหรับความถี่วิกฤตินั้นขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซ และระยะระหว่างอิเล็กโทรดเช่น ในช่องว่างอากาศในสนามสม่ำเสมอที่ความดันบรรยากาศความถี่วิกฤติมีค่า1MHz ระยะช่องว่าง 0.09 cm ความถี่วิกฤติมีค่า110kHz ที่ระยะช่องว่าง 0.45 cm และความถี่วิกฤติมีค่า 20 kHz ที่ระยะช่องว่าง 2.5 cm จะเห็นได้ว่าความถี่เปลี่ยนแปลงแบบผกผันกับระยะช่องว่างโดยประมาณ ถ้าความดันก๊าซเพิ่มมากขึ้นความถี่วิกฤติ ต้องมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความถี่จนถึง f_1 แล้วหลังจากนั้นศักย์ดาไฟฟ้าเบรกดาวน์มีค่าเกือบคงที่ เมื่อความถี่เพิ่มต่อไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะประจุอากาศที่เกิดขึ้นในช่องว่างไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไปแล้ว เนื่องจากเกิดสภาวะสมดุลย์ระหว่างอัตราการเกิดของไอออน และการกระจายของประจุอากาศไปยังอิเล็กโทรดเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจนถึง f_2 ต่อจากนั้นศักย์ดาไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ลดลงที่ความถี่ในช่วงระยะเวลานี้ ในครึ่งไซเคิลสั้นเกินไปสำหรับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรด ดังนั้นอิเล็กตรอนบางส่วนไม่สามารถข้ามอิเล็กโทรดภายในช่วงครึ่งไซเคิล และหลงเหลืออยู่ภายในช่องว่าง ทำให้การไอออไนเซชั่นในช่วงครึ่งไซเคิลหลังดีขึ้น ดังนั้นศักย์ดาไฟฟ้าเบรกดาวน์จึงลดลงที่ความถี่สูงกว่า f_3 ศักย์ดาไฟฟ้าเบรกดาวน์เริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และสูงกว่าศักย์ดาไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ความถี่กำลัง (Power frequency) ที่เป็นเช่นนี้เพราะเวลาในครึ่งไซเคิลนั้นสั้นมากจนอิเล็คตรอนไม่สามารถทำให้เกิดการไอออไนเซชั่นชุดแรกสมบูรณ์ได้ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มศักย์ดาไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วเพิ่มขึ้น

2. การออกแบบและสร้าง

จากทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงจะนำไปใช้ในการออกแบบหม้อแปลงซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญหลายส่วนดังนี้ หม้อแปลงจ่ายแรงดันด้านแรงดันต่ำ ตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ ขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ ขดลวดทางด้านแรงดันสูง ชุดสปาร์คแกป ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดจะถูกประกอบรวมอยู่บนฐานรองที่สามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก

2.1 เงื่อนไขการออกแบบ

หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงนี้ ออกแบบสร้างโดยใช้มาตรฐาน ANSI C 29.1-1976 (Test methods for electrical power insulators)

2.1.1 ค่าแรงดันสูงที่กำหนด

โดยทั่วไปหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงใช้ทดสอบลูกถ้วยทุกลูกที่ผลิตขึ้นในโรงงานเพื่อตรวจสอบคุณภาพขั้นต้นว่าลูกถ้วยมีความบกพร่องภายในเนื้อปอร์ซเลน โดยการทำให้เกิดวาบไฟบนผิวลูกถ้วยตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งแรงดันสูงสุดที่หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงควรสร้างได้ต้องมีขนาดแรงดันสูงสุดถึง 400 กิโลโวลท์ (kVpeak) เพราะว่าแรงดันขนาดนี้สามารถทดสอบลูกถ้วยได้ทุกชนิด แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เพื่อการศึกษาชุดเหนี่ยวนำในหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงระหว่างขดลวดทั้ง 2 ชุด จึงกำหนดพิกัดแรงดันที่ 120 kV เพื่อให้สะดวกต่อการจัดหาอุปกรณ์ประกอบ เช่น หม้อแปลงนีออนที่ใช้เป็นต้นกำลังจะไม่ต้องใช้กระแสสูง

2.1.2 ค่าความถี่ที่กำหนด

ค่าความถี่สูงสุดที่ทำให้เกิดปัญหาต่อระบบส่งจ่ายพลังไฟฟ้ามีค่าประมาณ 80 กิโลเฮิรตซ์(kHz) ซึ่งในทางปฏิบัติเกิดจากสัญญาณความถี่แบบลดทอน (Damped) ในขณะที่เกิดการสวิตชิ่ง (Switching) หรือเกิดจาก Arcing ground ในระบบไฟฟ้า และจากข้อมูลที่ได้ศึกษาว่าค่าวาบไฟตามผิวที่ระดับความถี่ 600 กิโลเฮิรตซ์ และความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ มีค่าแตกต่างกันไม่มาก ฉะนั้นมาตรฐาน ANSI C 29.1-1976 กำหนดค่าความถี่ของแหล่งจ่ายแรงสูง สำหรับทดสอบลูกถ้วย ปอร์ซเลนไม่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิรตซ์ การเลือกความถี่ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบสร้างจึงเลือกให้มีความถี่ที่ 120 กิโลเฮิรตซ์

ในการออกแบบสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรก คือ ขนาดของตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง C_2 ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด เนื่องจากค่าแรงดันและค่าของความถี่ด้านจ่ายออกจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อขนาดของโหลด C_2 มีการเปลี่ยนแปลง หม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูงที่ต้องการออกแบบนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของชุดเหนี่ยวนำเพื่อหามิติที่เหมาะสม จึงกำหนดพิกัดแรงดันสูงและความถี่ดังนี้

- แรงดันพิกัดด้านแรงดันสูง 120 kVrms
- ความถี่พิกัด 120 kHz
- แรงดันป้อนเข้า 0-15 kVrms

2.1.3 ค่าความจุไฟฟ้าทางแรงสูง

จากทฤษฎีพบว่าความถี่และขนาดแรงดันที่เกิดขึ้น มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าทางแรงสูงของวงจรหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงประกอบไปด้วย

- ความจุไฟฟ้าของลูกถ้วยมีค่าอยู่ในช่วง 10 –50 pF
- ความจุไฟฟ้าสเตร์ (Stray Capacitance) ของขดลวดแรงสูงมีค่าประมาณ 10 pF
- ความจุไฟฟ้าของแกปทรงกลม (Sphere Gap) มีค่าประมาณ 5-10 pF
- ความจุไฟฟ้าของหัวลดความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 5-20 pF

การคำนวณได้ผลรวมค่าความจุต่างๆ แล้วจะได้ค่าความจุ C_2 มีค่าประมาณ 40 pF ที่เลือกค่าน้อยเพราะงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้ทดสอบลูกถ้วยจริง จากค่าแรงดันและความถี่ที่กำหนดและค่าความจุไฟฟ้าทางด้านแรงสูง สามารถคำนวณหามิติของส่วนประกอบโครงสร้างได้

2.2 การออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูง

หากวงจรอยู่ในสภาวะจูน คือ L_1C_1 หรือ L_2C_2 จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวงแรงสูงจากสมการ

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

จากสมการสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงสูงได้ คือ

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 f_2^{\,2} C_2} \qquad .....(4)$$

ในการพันขดลวดด้านแรงสูง ค่าความเหนี่ยวนำมีโอกาสผิดพลาดได้ เพื่อให้แน่ใจว่าจะได้ความถี่อยู่ในย่านที่กำหนดจึงเลือกความถี่ในการคำนวณขั้นแรกเป็น 120 kHz เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่า ถ้าพันลวดแล้วได้ความเหนี่ยวนำมากไป ความถี่จะต่ำลง ถ้าพันขดลวดแล้วได้ความเหนี่ยวนำน้อยไป จะไม่ทำให้เกิดปัญหาแต่อย่างใด จะได้ความถี่สูงขึ้นดังนั้นจากสมการที่ 3.1 เมื่อแทนค่า f_2 ที่ 120 kHz และผลรวมของโหลด C_2 เท่ากับ 40 pF จะได้

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 \times (120\text{kHz})^2 \times (40\text{pF})} \qquad .....(5)$$

$$\cong 43.97 \text{ mH}$$

หม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูงที่สร้างขึ้นมา มีแกนเป็นอากาศจึงจำเป็นต้องมีโครงฉนวน ในงานวิจัยนี้จะใช้ท่อพีวีซีสำหรับพันขดลวดทางด้านแรงดันสูงเนื่องจากฉนวนดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่ดูดความชื้น มีความแข็งแรงทางกลพอดี ราคาไม่แพง และสามารถผลิตได้เองในประเทศ

ในการเลือกขนาดท่อสามารถเลือกได้หลายขนาดตามความเหมาะสมในการออกแบบซึ่งขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อจะเป็นตัวกำหนดความสูงในการพันลวดเพราะจะทำให้เกิดมิติในการคับปลิ้งที่ดีที่สุดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 2 แสดงขนาดของท่อและความสูงที่เหมาะสมในการพันลวดแรงสูง

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ นิ้ว	ความสูง/เส้นผ่าศูนย์กลาง	ความยาวพื้นที่พันลวด นิ้ว
3	6.0:1	18.0
4	5.0:1	20.0
5	4.5:1	22.5
6	4.0:1	24.0
7	3.5:1	24.5
มากกว่า 8	3.0:1	24.0

ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านแรงดันสูง L_2 นี้จะเป็นเกณฑ์ประการหนึ่งในการออกแบบขดลวดแรงสูง โดยจะต้องหาขนาดของเส้นลวดที่จะนำมาพันขดลวดแรงสูง ซึ่งกำหนดด้วยความหนาแน่นของกระแส โดยคำนวณจากกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูง เมื่อใช้ทดสอบการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วย ซึ่งเปรียบเสมือนการลัดวงจรทางด้านแรงสูง ดังนั้นกระแสไหลในขดลวดแรงสูงจะถูกจำกัดด้วยอิมพีแดนซ์ของขดลวด สามารถคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรได้ดังนี้

$$I_{SC} = \frac{Vrms}{Z} = \frac{Vrms}{2\pi f_2 L_2} \quad .....(6)$$

.....(3.3

แทนค่าจะได้

$$= \frac{120\times10^{3}}{2\pi\times120\times10^{3}\times43.97\times10^{-3}}$$

= 3.61965 A

แต่เนื่องจากกระแสลัดวงจรที่เกิดเป็นลักษณะพัลส์ที่ไม่ต่อเนื่องตลอดคาบความถี่ของแรงดันที่ป้อนเข้าของหม้อแปลง (50Hz) สัญญาณพัลส์ที่เกิดจะเกิดความกว้างประมาณครึ่งคาบของความถี่ 120 kHz (8.333 μs) หลังจากครึ่งคาบเวลาผ่านไปแล้วกระแสที่ไหลผ่านขดลวดแรงสูงจะมีค่าเป็นศูนย์จนกว่าจะมีการสร้างแรงดันสูงขึ้นมาอีกครั้ง ถ้ามีพัลส์เกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อแรงดันที่ป้อนเข้าเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดความถี่ของพัลส์จะเป็น 100 Hz (10ms) กระแสประสิทธิผลที่ไหลผ่านขดลวดแรงสูงจึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_{eff} = I_{sc}\times\sqrt{\frac{\text{ช่วงเวลาที่มีกระแส1คาบ}}{\text{ช่วงเวลา1คาบ}}} \quad .....(7)$$

$$= 3.61965\times\sqrt{\frac{8.33\,\mu S}{10mS}}$$

= 3.015 mA

จากความหนาแน่นของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าประสิทธิภาพและอุณหภูมิที่เพิ่มและยอมรับได้ โดยทั่วไปทองแดงทั่วไปมีค่าเท่ากับ 2.5 A/mm^2 พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงจะหาได้จาก

$$A_{eff} = \frac{I_{eff}}{J} \quad .....(8)$$

เมื่อ J = ความหนาแน่นของกระแส , A/mm^2

I_{eff} = กระแสประสิทธิผล , A

A_{eff} = พื้นที่หน้าตัด , mm^2

แทนค่า

$$A_{eff} = \frac{3.015mA}{2.5A/mm^2}$$

$$= 0.001206 \quad mm^2$$

หรือ $= 0.01\times10^{-3}\ cm^2$

เมื่อคิดผลของสภาพนำเชิงผิว (Skin effect) ที่มีความลึกของสภาพนำเชิงผิว ซึ่งสามารถคำนวณความลึกของสภาพนำเชิงผิว ได้จาก

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} \quad .....(9)$$

เมื่อ δ = ค่าความลึกของสภาพนำเชิงผิว

σ = สภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ ,mho/cm

f = ความถี่ ,Hz

μ = ค่าเบอบิลิตี้ของตัวนำ

ในกรณีของทองแดง $\sigma = 5.8\times10^{9}$ mho/cm ฉะนั้น

$$\delta_{CU} = \frac{6.62}{\sqrt{f}}\,cm \quad .....(10)$$

และความถี่ที่ต้องการ คือ 120 kHz จะได้ค่า

$$\delta_{CU} = \frac{6.62}{\sqrt{120\times10^{3}}}$$

= 0.019 cm

ถ้าใช้ลวดกลมในการพันขดลวดแรงสูง กระแสจะไหลผ่านเฉพาะที่ผิวรัศมี r_1 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถคำนวณหารัศมี r_1 ได้ดังนี้

$$\left(\pi r_1^{2} - \pi r_2^{2}\right) = A_{eff} \quad .....(11)$$

$$\left(\pi r_1^{2} - \pi\left(r_1 - \delta\right)^{2}\right) = 0.01\times10^{-3}$$

$$r_1 = \frac{0.01\times10^{-3}}{2\pi\times0.019} + \frac{0.019}{2}$$

= 0.00958 cm

จากค่ารัศมีที่ 1 คำนวณเผื่อค่าความปลอดภัย 50 เปอร์เซ็นต์

r_1 = 0.00958+(0.00958×0.5)

= 0.01437 cm

ทำให้หาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด (d) ได้ดังนี้

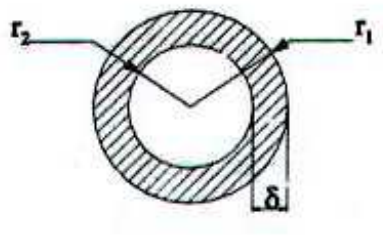
$d_1 = 2 \times r_1$

$= 2 \times (0.01437)$

$= 0.02874$ cm

$= 0.2874$ mm

จากข้อมูลเส้นลวดทองแดงที่มีการผลิตและจำหน่ายที่มีขนาดใกล้เคียงและสามารถนำมาพันขดลวดแรงสูงแล้วได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ใกล้เคียง คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.29 mm หรือเบอร์ 31 SWG คุณสมบัติของลวดทองแดง เบอร์ 31 SWG มีความต้านทาน 27.522 Ω/100m



รูปที่ 7 แสดงบริเวณที่มีกระแสไหลเนื่องจากผลสภาพนำเชิงผิวของขดลวดทองแดง

การพันขดลวดแรงสูง จะพันตามพิกัดจากตาราง 3.1 คือใช้ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจริงมีค่าเท่ากับ 4 นิ้ว ดังนั้นเมื่อเทียบอัตราส่วนจะได้ความสูงที่ 20 นิ้ว จะทำการพันขดลวดโดยไม่มีฉนวนขั้นกลางระหว่างรอบซึ่งค่าคำนวณหาความยาวของขดลวดได้จากสมการ

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \qquad .....(11)$$

เมื่อ L = ความเหนี่ยวนำ , μH

R = รัศมีของแกนถึงศูนย์กลางลวด , นิ้ว

N = จำนวนรอบ

H = ความสูงของระยะที่พันลวด , นิ้ว

จากสมการ 11 คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดแรงสูงได้

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

$$= \sqrt{\frac{43.97 \times 10^3 \times ((9 \times 2.25) + (10 \times 20))}{2.25^2}}$$

$= 1383$ รอบ

เมื่อทำการจัดสร้างจริง วัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านทุติยภูมิ(Ls) ได้ 43.02 mH ซึ่งค่าที่ได้ดังกล่าวจะมีค่าน้อยกว่าที่ทำการออกแบบไว้แต่จะไม่มีผลเสียแต่อย่างใดแต่กลับเป็นผลดีเพราะจะทำให้ได้ความถี่ที่จ่ายออกมีค่าเพิ่มขึ้นในขดลวดแรงสูงจะมีค่าความจุไฟฟ้าสเตร์ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.10 คือ

$$C_S = 0.29H + 0.41R + 1.94\sqrt{\frac{R^3}{H}} \qquad .....(12)$$

เมื่อ C_S = ความจุไฟฟ้า , pF

R = รัศมีของแกนถึงศูนย์กลางลวด , นิ้ว

H = ความสูงของระยะที่พันลวด , นิ้ว

แทนค่า

$$C_S = (0.29 \times 20) + (0.41 \times 2.25) + 1.94\sqrt{\frac{2.25^3}{20}}$$

$= 8.18$ pF

รูปที่ 8 ขดลวดแรงสูงที่พันอยู่กับท่อ PVC ขนาด 4 นิ้ว

2.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างรอบของขดลวดแรงสูง

ระยะห่างระหว่างรอบของขดลวดแรงสูง เมื่อใช้งานหม้อแปลงเทสล่าที่แรงดันกำหนดต้องไม่เกิดดิสชาร์จหรือเบรคดาวน์ตามผิว นั่นคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของขดลวดต้องต่ำกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศที่อยู่รอบขดลวด ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศกำหนดให้มีค่าสูงสุด 30 กิโลโวลท์ต่อเซนติเมตร ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดระหว่างรอบขดลวดคำนวณได้จากสมการ

$$E_{max} = \frac{V}{2} \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2r}\right)^2 - 1}}{r\left(\frac{d}{2r} - 1\right) ln\left(\frac{d}{2r} + \sqrt{\left(\frac{d}{2r}\right)^2 - 1}\right)} \qquad .....(13)$$

โดยที่ r คือ รัศมีของขดลวดที่ใช้งาน (เซนติเมตร)

d คือ ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของรอบเส้นลวด (เซนติเมตร)

v คือ ความต่างศักย์ระหว่างรอบเส้นลวด (โวลท์ต่อรอบ)

จากสมการ (13) แทนค่าได้ดังนี้

$$E_{max} = \frac{86}{2} \frac{\sqrt{\left(\frac{0.03}{2\times 0.0145}\right)^2 - 1}}{0.0145\left(\frac{0.03}{2\times 0.0145} - 1\right) ln\left(\frac{0.03}{2\times 0.0145} + \sqrt{\left(\frac{0.03}{2\times 0.0145}\right)^2 - 1}\right)}$$

= 88.28 kV/cm

ที่กำหนดแรงดันของหม้อแปลงเทสล่า 120 กิโลโวลท์ ได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างรอบประมาณ 88.28 กิโลโวลท์ต่อเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ ที่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นระยะห่างระหว่างรอบเส้นลวดแรงสูงที่ออกแบบไว้จึงมีโอกาศที่จะเกิดดิสชาร์จหรือเบรคดาวน์ได้

2.3 การเลือกหม้อแปลงจ่ายแรงดันด้านแรงดันต่ำ

ในการเลือกหม้อแปลงจ่ายแรงดันมีความสำคัญเนื่องจากจะเป็นตัวกำหนดค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ ในโครงงานนี้ได้เลือกใช้หม้อแปลงที่ใช้สำหรับจุดหลอดนีออน (Neon sign transformer) โดยมีขนาดพิกัดดังนี้

Primary : 230 V 2.0 A

Secondary : 15000 V 30 mA ; 450 VA 50Hz

รูปที่ 9 หม้อแปลงจ่ายกำลังด้านแรงดันต่ำ

ทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิจากสมการที่ 14

$$Z = \frac{Vrms}{Isc} \quad .....(14)$$

$$= \frac{15000\ Vrms}{30\ mA}$$

$$= 500\ k\Omega$$

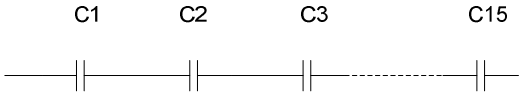
2.4 การออกแบบตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ

ในการออกแบบตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ สามารถหาได้โดยการนำเอาค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่คำนวณได้จากสมการ 15 มาทำการหาค่าความจุของตัวเก็บประจุสูงสุด จากสมการที่ 15 คือ

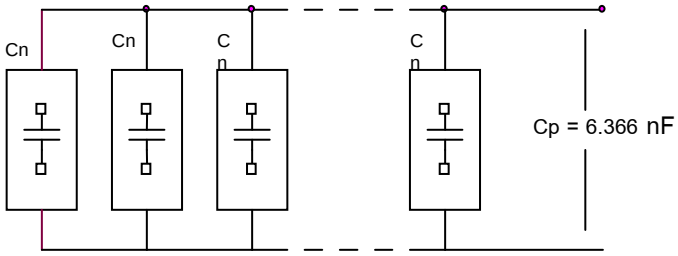
$$C_{1max} = \frac{1}{2\pi fZ} \quad .....(15)$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 50 \times 500{,}000}$$

= 6.366 nF

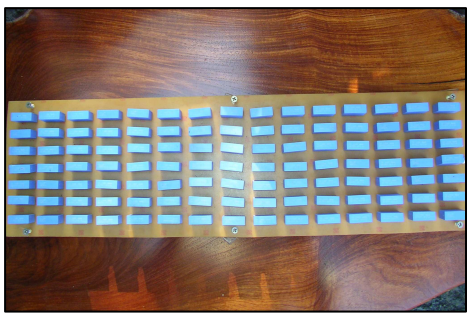


Cn = 24 kVp



รูปที่ 10 วงจรภายในของตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีโพพีลีน (Polypropylene) ค่าความจุ 15 nF +/- 5% 1600 V โดยนำมาต่ออนุกรมกันจำนวน 15 ตัว โดยใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 7 ชุด เพื่อให้ทนแรงดันค่ายอดได้ที่ประมาณ 24 kV_{peak} จะได้ค่าความจุประมาณ 7 nF ดังรูปที่ 10

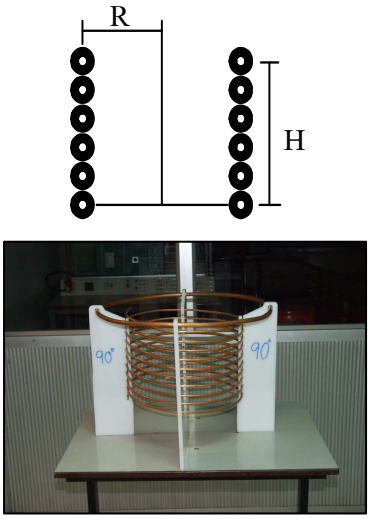


รูปที่ 11 ตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ

2.4 การออกแบบสร้างขดลวดแรงต่ำ

การสร้างขดลวดแรงต่ำแบบแนว 90 องศาจะนำเอาท่อทองแดงขนาด 0.25 นิ้ว ซึ่งมีความหนาของส่วนที่เป็นทองแดง 0.028 นิ้ว โดยทำการพันแบบแนวตั้ง(Verticad) ยกระดับตั้งฉากกับพื้นโดยมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของท่อแต่ละรอบ 1 นิ้ว ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงต่ำขดแรกกับขดลวดแรงสูงเท่ากับ 4 นิ้ว ระยะ R เท่ากับ 6.5 นิ้ว ระยะ H เท่ากับ 9 นิ้ว และพันจำนวนรอบทั้งหมด 10 รอบ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำหาได้จากสมการที่ (16)

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \qquad .....(16)$$



รูปที่ 12 แสดงการพันขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเทสล่าในแนว 90 องศา

เมื่อ L = ความเหนี่ยวนำ , μH
R = รัศมีของแกนถึงศูนย์กลางลวด , นิ้ว
N = จำนวนรอบ
H = ความสูงของระยะที่พันลวด , นิ้ว

แทนค่า

$$Lp = \frac{(10\times 6.5)^2}{(9\times 6.5)+(10\times 9)}$$

= 28.45 μH

2.5 ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำ

ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำสามารถพิจารณาด้วยวิธีการเดียวกับทางด้านแรงสูงซึ่งใช้ท่อทองแดงขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.2 ตารางมิลลิเมตร แรงดันป้อนเข้า 15 กิโลโวลท์ และเมื่อจำนวนรอบของแรงต่ำมีค่าต่ำสุดสำหรับใช้งานปกติ คือ 2 รอบ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดระหว่างรอบขดลวดคำนวณได้จากสมการ

$$E_{max} = \frac{V}{2}\frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2r}\right)^2 - 1}}{r\left(\frac{d}{2r}-1\right) ln\left(\frac{d}{2r}+\sqrt{\left(\frac{d}{2r}\right)^2-1}\right)} \qquad .....(17)$$

โดยที่ r คือ รัศมีของขดลวดที่ใช้งาน (เซนติเมตร)
d คือ ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของรอบเส้นลวด (เซนติเมตร)
v คือ ความต่างศักย์ระหว่างรอบเส้นลวด (โวลท์ต่อรอบ)

จากสมการ (17) แทนค่าได้ดังนี้

$$E_{max} = \frac{1875}{2}\frac{\sqrt{\left(\frac{2.5}{2\times 0.025}\right)^2 - 1}}{0.025\left(\frac{2.5}{2\times 0.025}-1\right) ln\left(\frac{2.5}{2\times 0.025}+\sqrt{\left(\frac{2.5}{2\times 0.025}\right)^2-1}\right)}$$

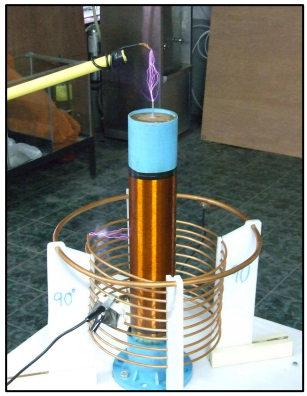
= 8.29 kV/cm

≈ 8 kV/cm

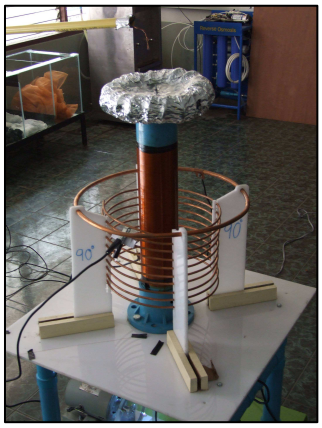
ที่กำหนดแรงดันของหม้อแปลงเทสล่า 15 กิโลโวลท์ ได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างรอบประมาณ 8 กิโลโวลท์ต่อเซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ ที่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นระยะห่างระหว่างรอบเส้นลวดแรงสูงที่ออกแบบไว้จึงปลอดภัยจากการเกิดดิสชาร์จหรือเบรคดาวน์ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างรอบของขดลวดแรงต่ำ

3. ผลการทดสอบค่าแรงดัน และความถี่หม้อแปลงเทสล่า

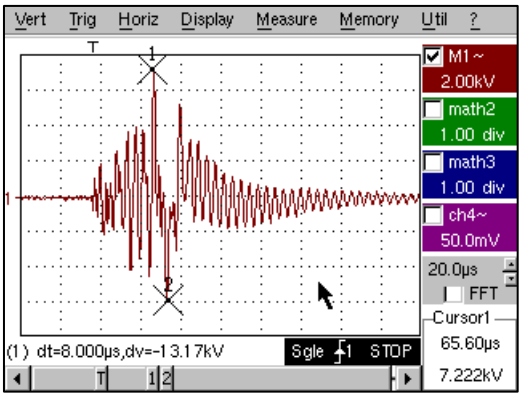
จากทฤษฎีที่ได้ศึกษามาทำการออกแบบ และทำการจัดสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูงขึ้นมา ได้ทำการทดลองหาคุณลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำของหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูง ความถี่ของหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูง ระยะขดลวดของการปรับแต่งค่าโดยการจูน และระยะแกปที่ตำแหน่งต่าง ๆที่มีผลต่อแรงดันขาออก



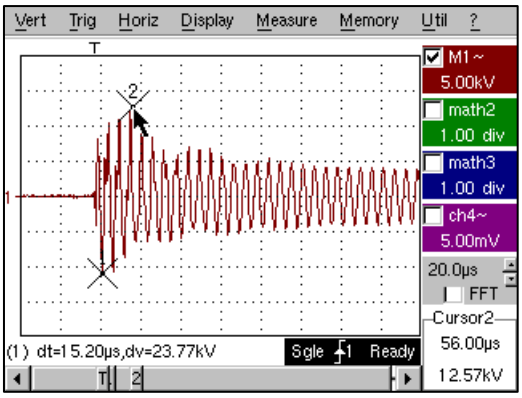
รูปที่ 13 การทดสอบทางกายภาพโดยใช้กราวด์ล่อที่แรงดันขาออกโดยไม่ใส่ทอรอยด์ (Toroid)



รูปที่ 14 การทดสอบทางกายภาพโดยใช้กราวด์ล่อที่แรงดันขาออกโดยใส่ทอรอยด์ (Toroid)



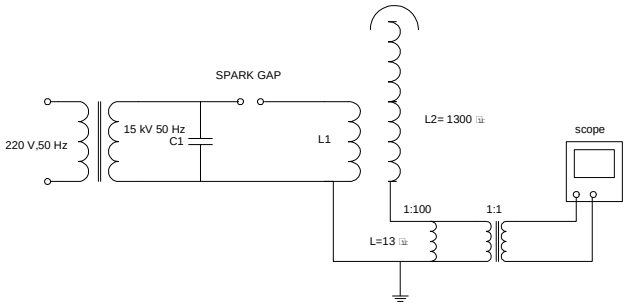
รูปที่ 15 รูปคลื่นออสซิลเลชั่นแบบหน่วงของแรงดันสูงด้านจ่ายออกของหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูงที่มุม 90 องศา ไม่ใส่ Toroid สภาวะการจูนที่ 10 รอบของขดลวดปฐมภูมิ



รูปที่ 16 รูปคลื่นออสซิลเลชั่นแบบหน่วงของแรงดันสูงด้านจ่ายออกของหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูงที่มุม 90 องศาใส่ Toroid สภาวะการจูนที่ 10 รอบของขดลวดปฐมภูมิ

3.1 การวัดความถี่ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

การวัดรูปคลื่นด้านจ่ายออกของหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูงโดยการต่อตามรูปที่ 17 ใช้ออสซิลโลสโคปดิจิตอลเป็นตัววัดรูปคลื่นสัญญาณความถี่ ในขณะที่มีจำนวนขดลวดแรงต่ำเท่ากับ 6,8,10 รอบ จากออสซิลโลแกรมสามารถหาความถี่ได้ดังรูป แล้วเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการสัมพันธ์



รูปที่ 17 วงจรการวัดออสซิลโลแกรมรูปคลื่นออสซิลเลชั่นแบบหน่วงของแรงดันสูงด้านจ่ายออกของหม้อแปลงแรงดันสูงและความถี่สูงที่ความถี่ 120 kHz

$$f = f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

โดยที่ L_2 = 44.02 mH

C_2 = 40 pF

ความถี่ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 120 kHz

ตัวอย่างคำนวณความถี่จากกราฟความถี่ที่ได้ของออสซิลโลสโคป

สูตร $f = \frac{1}{T}$

T (รูปที่ 16) = 41.6÷5.25

= 7.9 μs

f = 10^3÷7.9 = 93.80 kHz

4. เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด,วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549

[2] Kuffel,E.,&Abdullah, M., High-Voltage Engineering, Pergamon Press, 1977

[3] ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว,เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร , 2551

[4] Lantharthong,**S.Nedphograw** and S.Hiranvarodom, “Analysis of Electric field and Modeling Design of High Voltage Cable terminatorsfor Partial Discharge testing Using SF6 Insulator” The International Conference on Electrical Engineering 2008 (ICEE2008),Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan,on July 6 to10,2008