

การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีผลต่อปัจจัยในการเลือกใช้อุปกรณ์การออกแบบสร้างหม้อแปลง The Analysis Electric Field Stress have an effect on necessary for Tesla Transformer equipment design

สมเกียรติ ทองแก้ว และ ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
1381 ด.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์ : 0-2913-2424 ต่อ 150

E-mail: Supawudn_p_g@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้สืบเนื่องจากการออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง หรือ หม้อแปลงเทส่านั้น ในอดีตไม่สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ค่าทางสนามไฟฟ้าเริ่มต้น หรือสนามไฟฟ้าสูงสุดได้ ทำเพียงแค่สุ่มวิธีการและเลือกอุปกรณ์จากการที่มีวัสดุจำหน่ายตามท้องตลาดเท่านั้นมาประกอบกันเป็นวงจร แต่ยังคงขาดตรงที่ไม่ได้มีการเลือกใช้อุปกรณ์การออกแบบโดยอาศัยหลักการเชิงวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่อปัจจัยของการสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ซึ่งต่อไปในอนาคตจากการออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงหรือหม้อแปลงเทส่าจากการศึกษาในเชิงการวิจัยทำให้ไปสู่เชิงพาณิชย์ได้ และบทความวิชาการนี้จะได้บ่งบอกถึงหลักการต่างๆ ที่จำเป็นต่อปัจจัยในการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง โดยเริ่มต้นจากการที่ต้องศึกษาปัญหาของหม้อแปลงเทส่า โดยปัญหาหลักๆที่เกิดขึ้นจากการวิจัยมาหลายๆ ครั้ง และเมื่อนำมาผนวกรวมกันในแต่ละครั้ง จะพบว่าปัญหาของหม้อแปลงเทส่า คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เกิดขึ้นก่อให้เกิดปัญหาที่ทำให้หม้อแปลงเทส่าไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มพิกัดและไม่ปลอดภัยกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่เลือกนำมาใช้ในการสร้าง บทความวิชาการนี้จึงสรุปแนวทางได้ว่าควรจะได้เริ่มต้นการวิเคราะห์ของปัญหาทั้งนี้เริ่มจากการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงจากการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์คำนวณและพล็อตรูปลักษณะที่เกิดการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงในหม้อแปลงเทส่า โดยทดลองเปลี่ยนทิศทางการคำนวณและจำลองรูปลักษณะของสนามไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ แบบหลากหลาย รวมถึงศึกษาการเกิดสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับวัสดุต่างๆ ที่เลือกและนำมาใช้งานเพื่อศึกษาปัจจัยที่นำจะมีผลกระทบต่อการออกแบบสร้างหม้อแปลงเทส่า ทั้งนี้เพื่อโยงปัญหาในอดีตและปัจจุบันที่ทดสอบแล้วมาสู่การแก้ปัญหาในการสร้างหม้อแปลงเทส่าที่เป็นรูปธรรมได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้จัดว่าเป็นการวางเป้าหมายที่จะผลิตหม้อแปลง เทส่าแบบมีมาตรฐานที่สำคัญรองรับในการแนวทางการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ได้ ต่อไป

คำสำคัญ: สนามไฟฟ้าแรงสูง, หม้อแปลงเทส่า

Abstract

This academic article is process from the model of High Voltage Transformer or Tesla Transformer. In the pass, it could not analyze the beginning value of Electric Field or the highest Electric Field. They could do just only random the method and choose the material that could find in the market to assemble the circuit. There are lacks of in choosing the material that create from the design by using the parameter analyze principle that relate to the factor in create the high voltage transformer, which in the future it would use to design the model of high voltage transformer or tesla transformer. From the survey that lead to commercial and this academic article has identify the several principle that important to the factor in choosing the material that assemble to be high voltage transformer. Start from the study of the problem of the tesla

transformer. The main problem that found from many research and while we combine all the research, it would find the problem of tesla that is the high voltage electric field stress between the primary winding coil and the secondary winding coil. This is the problem that make tesla transformer could not work utmost and it would not save for other material that would use for creation. This academic article has the conclusion, it should start from the analyzing the cause of problem by beginning with analyze the high voltage electric field stress in the tesla transformer. By testing in many directions in calculation and do the model of electric field in difference style. Include the study of beginning of electric field compare with other material. The material that has been chooses and brings to use for the study about the factor that should have the effect of the tesla transformer design. In order that, to connect the pass and present problem which has been test to be solved and it would created the tesla transformer in concrete. This is the goal setting to produce the standard tesla transformer and the important point is to lead into the commercial in the future.

Keywords: Electric Field, Tesla transformer

1. คำนำ

เนื่องจากการออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง(หม้อแปลงเทสลา) ในอดีตไม่สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิได้ ก่อให้เกิดปัญหาที่ทำให้หม้อแปลงเทสลาไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มพิกัดและไม่ปลอดภัยกับอุปกรณ์ต่างๆ ดังนั้นบทความวิชาการนี้จะได้เริ่มต้นจากการวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงในหม้อแปลงเทสลาโดยใช้หลักการทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์เข้ากับการใช้โปรแกรม Comsol กำหนดค่าและพล็อตรูปลักษณะการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงแบบต่างๆก่อนเพื่อนำไปสู่การออกแบบสร้างหม้อแปลงเทสลา

2. อุปกรณ์และวิธีการ

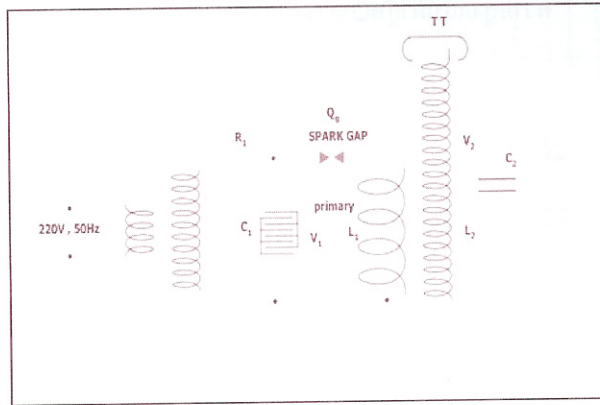
1. โปรแกรม Femlab ใช้จำลองค่าการกระจายสนามไฟฟ้า ของหม้อแปลงเทสลา
2. ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ใช้เป็นแกนพันขดลวดทุติยภูมิ Ls
3. ลวดทองแดงอบน้ำยาเบอร์ 31 SWG ใช้พันเป็นขดลวดทุติยภูมิ Ls
4. ท่อทองแดง แบบหนา 0.03 นิ้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว และ 0.5 นิ้ว ใช้ทำเป็นขดลวดปฐมภูมิ Lp และวงแหวนป้องกันหม้อแปลงจ่ายกำลัง (Transformer Protection Ring)
5. มอเตอร์ 1 เฟส ความเร็วรอบ 1,450 รอบต่อนาที ใช้เป็นตัวขับโรตารีสปราร์คแกป
6. ตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ ชนิดโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ขนาด 15 nF 1600 V
7. หม้อแปลงนีออน (Neon Sign Transformer) 230 V/15 kV ใช้เป็นหม้อแปลงจ่ายกำลังด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง

เทสลา

2.1 วิธีการและขั้นตอนการทดสอบ

1. จำลองวงจรหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูง ที่แรงดัน 120 KV ความถี่สูงสุด 120 KHZ ด้วยโปรแกรม Femlab
2. ทำการออกแบบส่วนประกอบและโครงสร้างต่างๆ ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
3. ทำการสร้างส่วนประกอบโครงสร้างต่างๆ ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง
4. ทำการทดสอบหาคุณลักษณะการทำงานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงและการแก้ไขส่วนที่บกพร่อง
5. เก็บผลที่ได้จากการคำนวณร่วมกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม Femlab และผลการทดลองหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงที่ สร้างขึ้นมาเปรียบเทียบกัน
6. สรุปผลการวิจัยและการทดลอง

2.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของ Tesla Transformer



รูปที่ 1 แสดงวงจรการทำงานของ Tesla Transformer

- แรงดันพิกัดด้านแรงดันสูง 120 kVrms
- ความถี่พิกัด 120 kHz
- แรงดันป้อนเข้า 0 - 15 kVrms
- ค่าความจุ C2 มีค่าประมาณ 40 pF

2.3 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์

- กรณีที่เกิดออสซิลเลชัน ระหว่าง L_1 กับ C_1 ความถี่ที่เกิดขึ้นจะได้ $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$
- สภาวะจากการเกิดออสซิลเลชัน ด้านแรงต่ำ เหนี่ยวนำกับด้านแรงสูงในสภาวะการจูน

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

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากสมการพื้นฐาน

| มุมของ ขดลวด L_1 | Primary | | Secondary | |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------|
| | L_1 (μ H) | C_1 (μ F) | L_2 (mH) | C_2 (PF) |
| 90° | 28.45 | 6.366 | 43.97 | 40 |
| $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ | 72.09 | | | |
| 0° | 64.70 | | | |

2.4 การออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูง

จำเป็นต้องมีการพิจารณาเลือก

- D = ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนที่พันขดลวด L_2
- H = ขนาดความสูงของลวดที่จะพัน
- G = ขนาดขดลวดที่จะใช้พัน

ตารางที่ 2 แสดงขนาดของท่อและความสูงที่เหมาะสมในการพันลวดแรงสูง

| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (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 |
| 8 | 3.0:1 | 24.0 |
| มากกว่า 8 | 3.0:1 | 24.0 |



รูปที่ 2 ขดลวดแรงสูงพันบนท่อPVC ขนาด 4 นิ้ว

2.5 การออกแบบระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ

$$\frac{R_1}{R_2} = e = 2.718$$

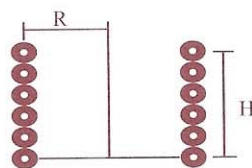
โดยที่ R_1 คือ รัศมีของขดลวดแรงต่ำ

R_2 คือ รัศมีของขดลวดแรงสูง

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad R_1 &= (2.718)(5.7) \\ &= 15.49 \approx 15.5 \text{ cm} \end{aligned}$$

2.6 การออกแบบสร้างขดลวดแรงต่ำ

2.6.1. ทำมุมกับพื้น 90° ใช้ท่อทองแดงขนาด 5/16 นิ้ว หนา 0.03 นิ้ว เป็นขดลวดแรงดันต่ำ



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

รูปที่ 3 แสดงมิติในการพันขดลวดแรงสูง

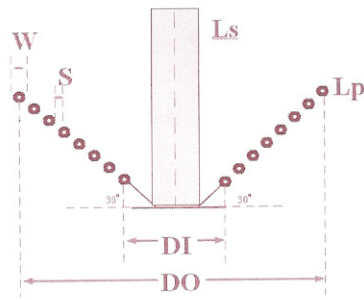
เมื่อ L = ความเหนี่ยวนำ, μH

R = รัศมีของแกนถึงศูนย์กลางลวด, นิ้ว

N = จำนวนรอบ

H = ความสูงของระยะที่พันลวด, นิ้ว

2.6.2 ทำมุมกับพื้น $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ใช้ท่อทองแดงขนาด 5/16 นิ้ว หนา 0.03 นิ้ว เป็นขดลวดแรงดันต่ำ



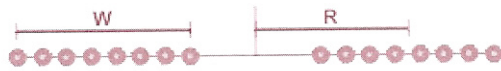
$$L = \frac{(NA)^2}{30A - 11DI}$$

$$A = \frac{DI + N(W + S)}{2}$$

รูปที่ 4 แสดงขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลา ที่มุม 30°, 45°, 60°

- W = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทองแดง = 5/16 นิ้ว
- S = ระยะห่างระหว่างรอบ = 1/2 นิ้ว
- DI = เส้นผ่าศูนย์กลางวงในสุด ของ Lp = 14 นิ้ว
- DO = เส้นผ่าศูนย์กลางวงนอกสุด ของ Lp = 34 นิ้ว
- N = จำนวนรอบของ Lp = 10 รอบ

2.6.3. ทำมุมกับพื้น 0° ใช้ท่อทองแดงขนาด 5/16 นิ้ว หนา 0.03 นิ้ว เป็นขดลวดแรงดันต่ำ

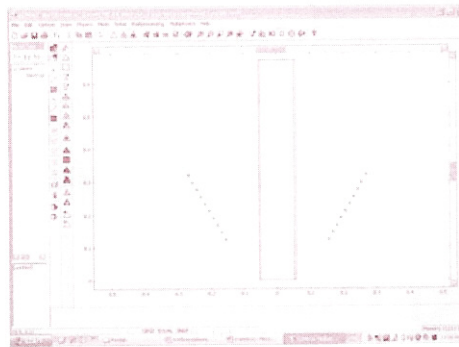


$$L = \frac{(NR)^2}{8R + 11W}$$

รูปที่ 5 แสดงขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาที่มุม 0°

3. ขั้นตอนการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าของหม้อแปลงเตสลา

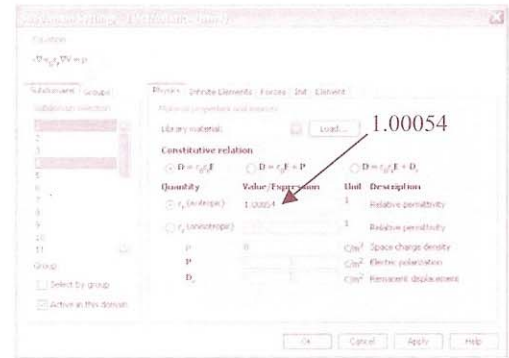
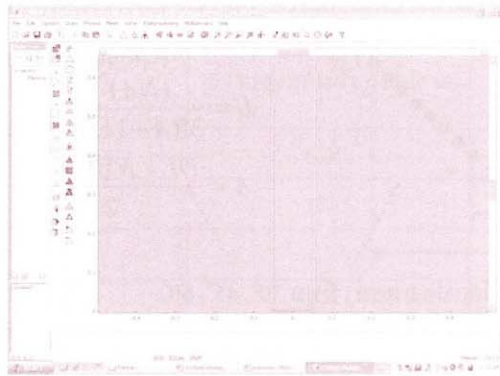
3.1. ทำการเขียนแบบหม้อแปลงเตสลาดังรูป



รูปที่ 6 แบบหม้อแปลงเตสลา

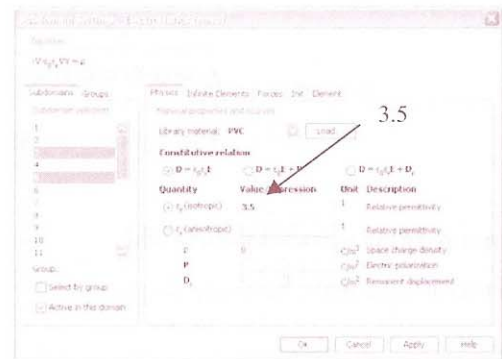
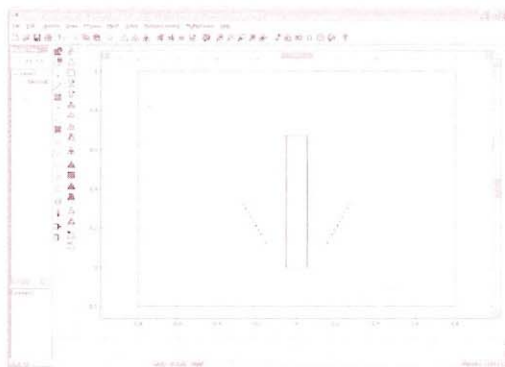
3.2. คลิกปุ่ม Subdomains Settings(F8) แล้วกำหนดค่าของวัสดุแต่ละชั้นดังนี้

3.3. กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 1 คือ อากาศ โดยให้ค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 1.00054



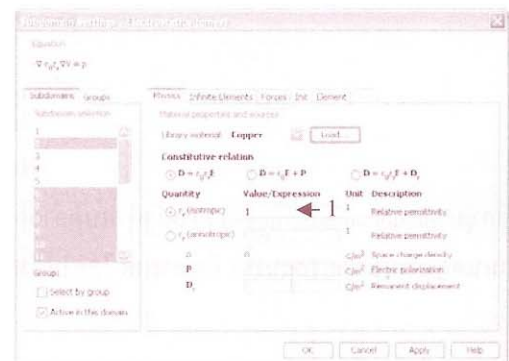
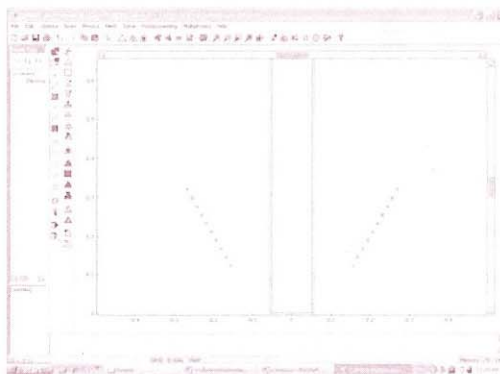
รูปที่ 7 กำหนดคุณสมบัติของอากาศ

3.4. กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 2 คือ ท่อ PVC โดยให้ค่าเปอร์ริมิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 3.5



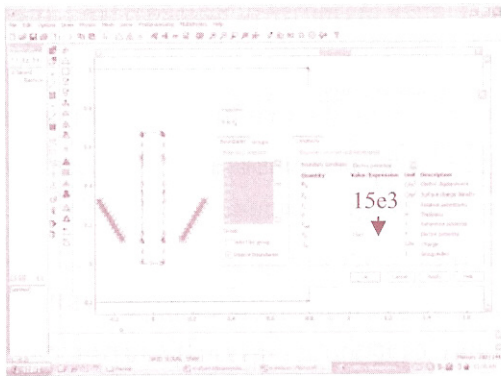
รูปที่ 8 กำหนดคุณสมบัติของท่อ PVC

3.5. กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 3 คือ ทองแดง โดยให้ค่าเปอร์ริมิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 9 กำหนดคุณสมบัติของทองแดง

3.6. คลิกปุ่ม Boundary Settings(F7) แล้วกำหนดแรงดัน



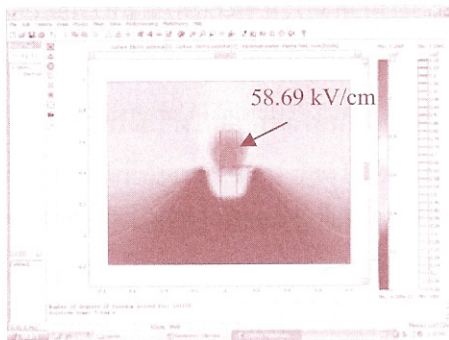
รูปที่ 10 กำหนดค่าแรงดันขาเข้า 15 kV



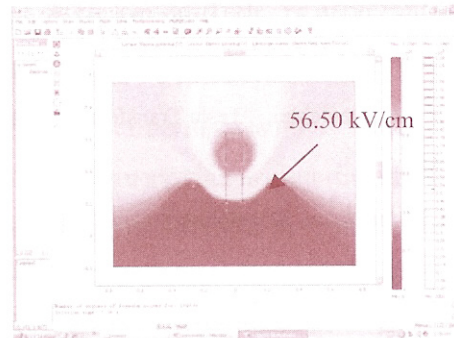
รูปที่ 11 กำหนดค่าแรงดันขาออก 120 kV

3.7. คลิกปุ่ม Solve Problem เพื่อ Run Program

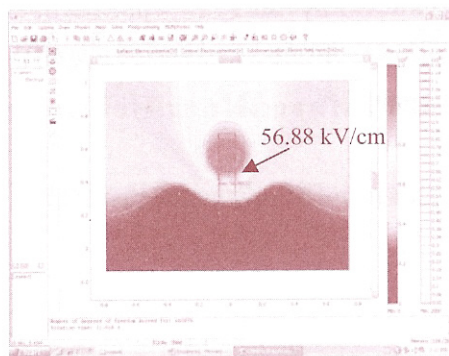
4. ผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ



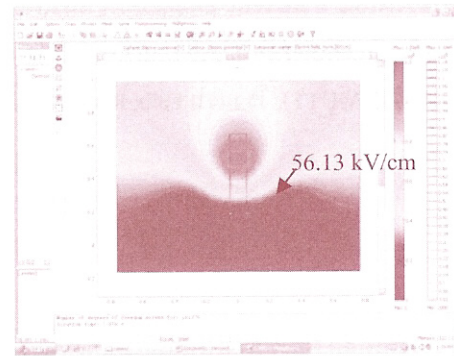
รูปที่ 12 การกระจายสนามไฟฟ้ามุม 90 องศา



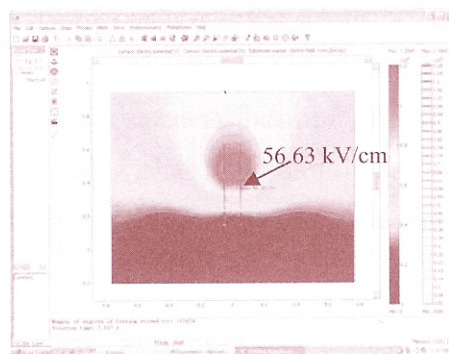
รูปที่ 13 การกระจายสนามไฟฟ้ามุม 60 องศา



รูปที่ 14 การกระจายสนามไฟฟ้ามุม 45 องศา



รูปที่ 15 การกระจายสนามไฟฟ้ามุม 30 องศา



รูปที่ 16 การกระจายสนามไฟฟ้ามุม 0 องศา



รูปที่ 17 การกระจายสนามไฟฟ้ามุม 90 องศา

5. สรุปผลการจำลองสนามไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณและตารางที่ 1 ไปจำลองโดยใช้โปรแกรม Comsol ค่าที่ได้จากการ Simulation สามารถสรุปได้ว่าลักษณะการวางมุมของขดลวด Lp ในแบบต่างๆ นั้นส่งผลต่อค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ต่างกันและระยะห่างระหว่างขดลวด Lp และขดลวด Ls ก็มีผลเช่นกัน จากผลดังกล่าวนำไปสู่การสร้างชุดขดลวด Lp ที่เหมาะสมกับหม้อแปลงเตสลาต่อไป และระยะห่างระหว่างขดลวด Lp และขดลวด Ls ที่เหมาะสมคือ 14 cm

6. วิจารณ์การเปรียบเทียบผล

หม้อแปลงเตสลาที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทดลอง ที่ได้จากการจำลองวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าแรงสูงในบทความวิชาการนี้ สามารถใช้งานได้ดีตามเกณฑ์กำหนด แต่ในการทดลองก็ยังมีข้อบกพร่องอยู่เช่นกัน เนื่องจากไม่สามารถควบคุมบรรยากาศโดยรอบให้เท่ากับค่าในโปรแกรมได้ จึงทำให้อุปกรณ์ที่ออกแบบบางอย่างใช้งานไม่ได้เต็มประสิทธิภาพ

7. เอกสารอ้างอิง

1. รศ.ดร.สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
2. ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ .ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม,จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2546
3. www.Ee.mut.ac.th/materials/eccc0310/chapter_15.pdf (ทฤษฎีความเหนี่ยวนำร่วม)
4. Marco Denicolai. "Tesla Transformer for Experimentation and Research." Helsinki University of Technology, May 2001
5. S.Thongkeraw, S.Nedphograw and B.Planklang, "The Analysis of high-Voltage Electric Field Stress in Lp and Ls coils of Tesla Transformer for studying the Efficiency design" , The International Conference on Electrical Engineering 2008 (ICEE2008), Okinawa Convention Center, Okinawa, Japan, on July 6 to10, 2008
6. สมเกียรติ ทองแก้ว,ศุภวดี เนตรโพธิ์แก้ว,บุญยัง ปลั่งกลาง,ธนกร น้ำหอมจันทร์ "การวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงในขดลวด LP และ Ls ของหม้อแปลงเตสลา เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพของการออกแบบสร้าง",การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON 30), วันที่25-26 ตุลาคม 2550,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT), โรงแรม Felix River Kwai Resort Hotel จ.กาญจนบุรี, ."