

การวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงในขดลวด L_p และ L_s ของหม้อแปลงเทสลา เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพของการออกแบบสร้าง

The Analysis of high-Voltage Electric Field Stress in L_p and L_s coils of Tesla

Transformer for studying the efficiency design

สมเกียรติ ทองแก้ว¹ สุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว¹ บุญยัง ปลั่งกลาง² ธนากร น้าหอมจันทร์³
¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (พระนครเหนือ)
²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
e-mail: Supawudn_p_g@hotmail.com / Sup_EP37@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอถึงการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง (หม้อแปลงเทสลา) ขนาดพิกัดแรงดัน 350 kV ความถี่สูง 120 kHz สืบเนื่องจากปัญหาในการออกแบบสร้างหม้อแปลงเทสลา ในปัจจุบันพบว่าค่าแรงดันสูงที่สร้างขึ้นมีผลต่อค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ (L_p , L_s) เพราะหม้อแปลงชนิดนี้เป็นหม้อแปลงแกนอากาศจึงทำให้เกิดปัญหาในการจนวนขดลวดที่มีอากาศเป็นไดอิเล็กตริกโดยส่งผลให้เกิดการแฟลชโอเวอร์ลงบริเวณขดลวดทั้ง 2 ชุดโดยค่าระยะห่างของขดลวดที่เหมาะสมจึงจะสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้วิจัยเรื่องค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดทั้ง 2 ชุด เพื่อให้การออกแบบขดลวดของหม้อแปลงเทสลามีประสิทธิภาพ ต่อไป

คำสำคัญ: จนวน ,ความเครียดสนามไฟฟ้า ,หม้อแปลงเทสลา

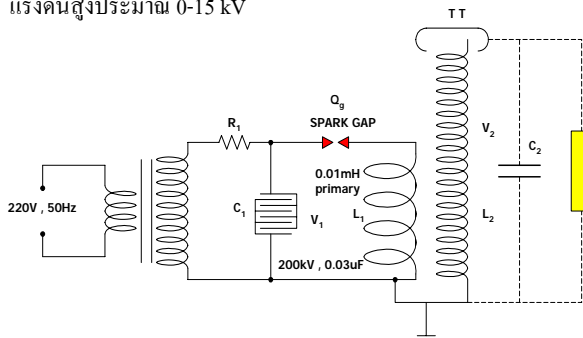
Abstract

This paper presents The Analysis for high-Voltage Electric Field Stress in L_p and L_s coils of Tesla Transformer for studying the efficiency design. The tesla transformer is designed at 350 kV rating Voltage and 120 kHz resonant frequency. The effect of high voltage when we designed the coil has impact to Electric Stress between primary and secondary coil because the tesla transformer uses air core. The insulator of coil also has problem on the reason as flashover on the 2 coils. The best dimension among coil has to present in this paper by using optimal mathematical solution. The simulation results show performance of the solution and ensure the methodology with positive way.

Keyword :Insulation, Electric Field Stress,Tesla Transformer

1. บทนำ

หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงเป็นหม้อแปลงที่สร้างแรงดันสูงความถี่สูง ประกอบไปด้วยขดลวด 2 ชุดวางแบบมีศูนย์กลางร่วมกันคือ ขดลวดด้านปฐมภูมิจะมีจำนวนรอบเพียงเล็กน้อยส่วนขดลวดด้านทุติยภูมิจะพันอยู่กับทอพีวีซี และมีจำนวนรอบมากกว่าด้านปฐมภูมิหลายร้อยเท่า องค์ประกอบของวงจรคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (HV) สามารถใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับปรับค่าได้จะมีแรงดันสูงประมาณ 0-15 kV



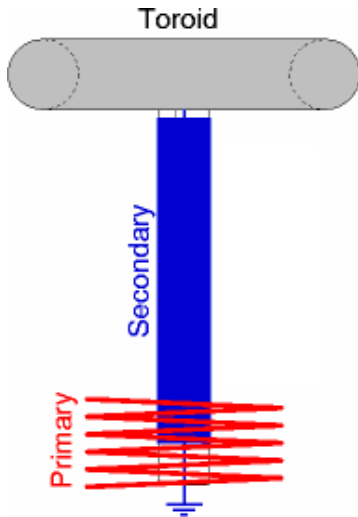
รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานการทำงานของหม้อแปลงเทสลา

ดังนั้นในการออกแบบสร้างหม้อแปลงเทสลาในแต่ละครั้งจึงไม่สามารถที่จะทราบค่าของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างค่าแรงดันสูงที่คลี่ปลั่งกันหรือเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยการออกแบบสร้างควรจะได้มีการวิเคราะห์หาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในขดลวดที่เหนี่ยวนำกันเพื่อให้ได้ค่าระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่เหมาะสมต่อการนำไปจัดสร้างเป็นหม้อแปลงเทสลา โดยในการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตัวอย่าง จากการออกแบบสร้างหม้อแปลงเทสลา ขนาดพิกัด 350 kV ความถี่ 120 kHz

2. การจำลองสร้างและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

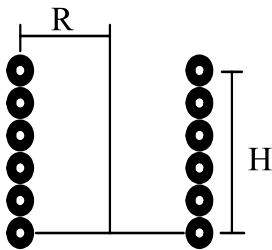
การวิเคราะห์หาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมวิเคราะห์ FEMLAB หรือทฤษฎี Finite Element เป็นการ

วิเคราะห์โดยจำลองค่าจากหม้อแปลงเตสลาที่ขนาดพิกัดแรงดันสูง 350 kV ความถี่ 120 kHz โดยจำลองการเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในขดลวดทั้ง 2 ชุดของหม้อแปลงเตสลาเพื่อนำไปสู่การจลวง หรือจุดที่เหมาะสมของการจัดสร้างขดลวด ทั้งนี้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการติดตั้งระบบป้องกัน และเรื่องความปลอดภัย



รูปที่ 2 การจลวงขดลวดทั้ง 2 ชุดของหม้อแปลงเตสลา

การพันขดลวดแรงสูง จะพันตามพิกัดจากตาราง คือ ใช้ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจริงมีค่าเท่ากับ 6 นิ้ว ดังนั้นเมื่อเทียบอัตราส่วนจะได้อัตราสูงที่ 24 นิ้ว โดยจะทำการพันลวดตลอดโดยไม่มีฉนวนชั้นกลางระหว่างรอบซึ่งค่าความเหนี่ยวนำสามารถหาโดยใช้สมการ (1)



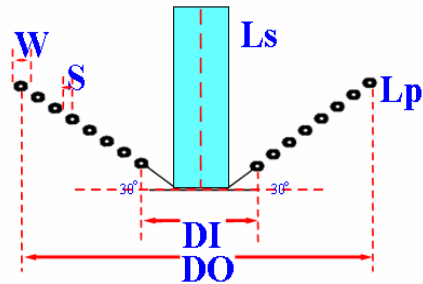
รูปที่ 3 แสดงขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงเตสลา



รูปที่ 4 ขดลวดแรงสูงที่พันอยู่กับท่อ PVC ขนาด 6 นิ้ว

การสร้างขดลวดแรงต่ำแบบแนว 90 องศาจะนำเอาท่อทองแดงขนาด 5/16 นิ้ว ซึ่งมีความหนาของส่วนที่เป็นทองแดง 0.03 นิ้ว โดยทำการพันแบบขยับระดับทำมุม 90 องศากับพื้น โดยมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของท่อแต่ละรอบ 1/2 นิ้ว ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงต่ำกับแรงสูงเท่ากับ 3 นิ้ว ระยะ H เท่ากับ 7.5 นิ้ว ระยะ R เท่ากับ 6 นิ้วและพันจำนวนรอบทั้งหมด 10 รอบ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำหาได้จาก

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (1)$$



รูปที่ 5 แสดงการพันขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาในแนว 30,45 องศา

การสร้างขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงเตสลาในแนว 30,45 องศาจะนำเอาท่อทองแดงขนาด 5/16 นิ้ว ซึ่งมีความหนาของส่วนที่เป็นทองแดง 0.03 นิ้ว โดยทำการพันแบบก้นหอยขยับระดับทำมุมกับพื้น 30,45 องศา โดยมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของท่อแต่ละรอบ 1/2 นิ้ว ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงต่ำกับแรงสูงเท่ากับ 3 นิ้ว ระยะ DI เท่ากับ 14 นิ้ว ระยะ W เท่ากับ 0.31 นิ้ว ระยะ S เท่ากับ 0.5 นิ้ว และพันจำนวนรอบทั้งหมด 10 รอบ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำหาได้จาก

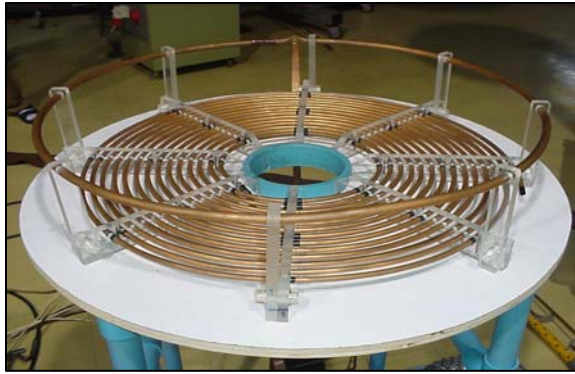
$$A = \frac{DI + N(W + S)}{2} \quad L = \frac{(NA)^2}{30A - 11DI} \quad (2)$$



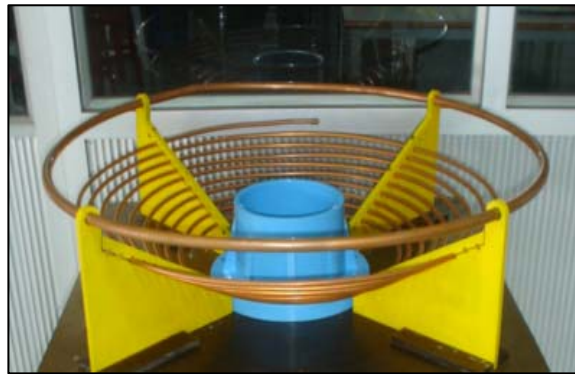
รูปที่ 6 แสดงการพันขดลวดปฐมภูมิในแนวระนาบมุม 0 องศา

การสร้างขดลวดแรงต่ำแบบแนวราบ จะนำเอาท่อทองแดงขนาด 5/16 นิ้ว ซึ่งมีความหนาของส่วนที่เป็นทองแดง 0.03 นิ้ว โดยทำการพันแบบแบนราบกับพื้น โดยมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของท่อแต่ละรอบ 1/2 นิ้ว ระยะห่างระหว่างขดลวดแรกของขดลวดแรงต่ำกับแรงสูงเท่ากับ 3 นิ้ว ระยะ R เท่ากับ 7.25 นิ้ว ระยะ W เท่ากับ 4.5 นิ้ว และพันจำนวนรอบทั้งหมด 14 รอบ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำหาได้จาก

$$L = \frac{(NR)^2}{8R + 11W} \quad (3)$$

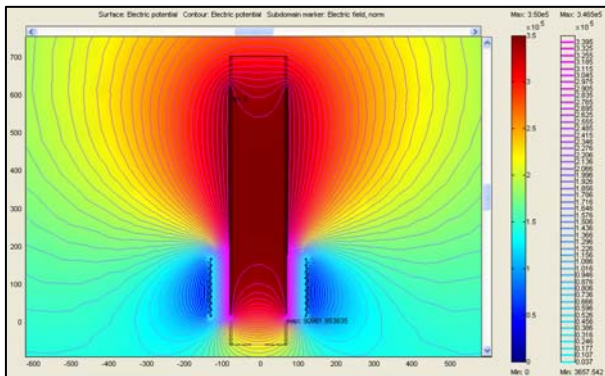


รูปที่ 7 รูปแสดงตัวอย่างการจัดวางขดลวดปฐมภูมิในแนว 0 องศา

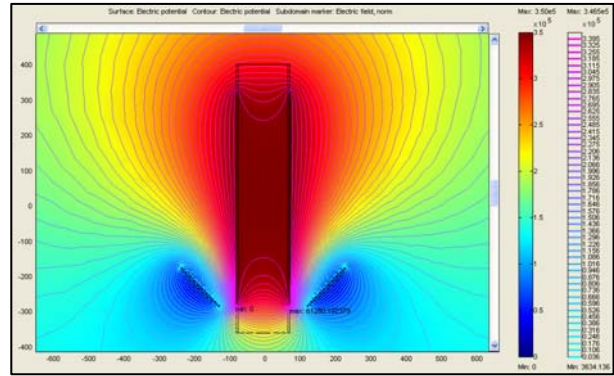


รูปที่ 8 รูปแสดงตัวอย่างการจัดวางขดลวดปฐมภูมิในแนว 30,45 องศา

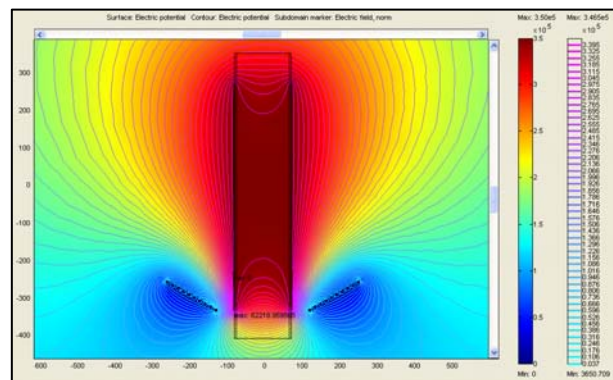
การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าที่ห่อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม FEMLAB โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดแรงต่ำมีแรงดันไฟฟ้า 15 kV และขดลวดแรงสูงมีแรงดันไฟฟ้า 350 kV และค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_r) ของท่อพีวีซีเท่ากับ 3.5 ทำการจำลองสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับขดลวดแรงต่ำ กับขดลวดแรงสูงที่ 90, 45, 30 และ 0 องศา ผลการจำลองสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 7-10



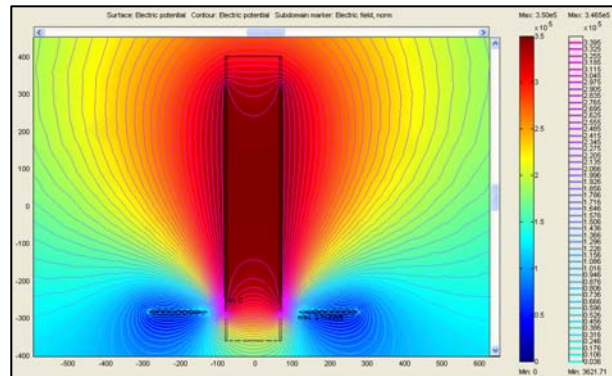
รูปที่ 9 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าโดยมุมที่ขดลวดแรงต่ำทำมุมกับพื้นราบ 90 องศา โดยมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 90.961 kV/cm. ที่ต้นขดลวดแรงสูง (มิติที่1)



รูปที่ 10 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าโดยมุมที่ขดลวดแรงต่ำทำมุมกับขดลวดแรงสูง 45 องศา โดยมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 61.280 kV/cm. ที่ต้นขดลวดแรงสูง (มิติที่2)



รูปที่ 11 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าโดยมุมที่ขดลวดแรงต่ำทำมุมกับขดลวดแรงสูง 30 องศา โดยมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 62.218 kV/cm. ที่ต้นขดลวดแรงสูง (มิติที่3)



รูปที่ 12 ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าโดยมุมที่ขดลวดแรงต่ำทำมุมกับขดลวดแรงสูง 0 องศา โดยมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 216.390 kV/cm.ที่ต้นขดลวดแรงสูง (มิติที่4)

3. ผลจากการจำลองสร้างห่อแปลงทดสอบ

จากที่ได้ทำการคำนวณจากสมการเมื่อแทนค่าแล้วจะได้ค่าความเหนี่ยวนำ มาค่าๆหนึ่งขณะทำการทดสอบห่อแปลงทดสอบในส่วนของขดลวดแรงต่ำจะต้องมีสภาวะการจูนปรับด้วย เพื่อให้ได้การเหนี่ยวนำที่

ที่สุดระหว่างขดลวดทั้ง 2 ชุดในขดลวดแรงสูงจะมีค่าความจุไฟฟ้า สเตร์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3) คือ

$$C_s = 0.29H + 0.41R + 1.94 \sqrt{\frac{R^3}{H}} \quad (4)$$

เมื่อ C_s = ความจุไฟฟ้า, pF
 R = รัศมีของแกนถึงศูนย์กลางลวด, นิ้ว
 H = ความสูงของระยะที่พันลวด, นิ้ว

แทนค่า

$$C_s = (0.29 \times 24) + (0.41 \times 3) + 1.94 \sqrt{\frac{3^3}{24}}$$

$$= 10.248 \text{ pF}$$

ส่วนแหล่งจ่ายไฟเข้าทางแรงดันต่ำออกแบบใช้หม้อแปลงไฟฟ้าจุดลวด นีออนขนาดพิกัด 220/15 kV เป็นแหล่งจ่ายไฟเข้าทางขดลวดปฐมภูมิโดย นำมาขนานกันเพื่อให้ได้กำลังงานไฟฟ้า (VA) สูงขึ้น



รูปที่ 13 หม้อแปลงทดสอบจากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเพื่อจำลองการ วางขดลวดปฐมภูมิ (L_p) ที่เหมาะสม ที่มุม 30 และ 45 องศา จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของทั้ง 4 มิติโดยจำลองสร้าง เป็นหม้อแปลงทดสอบขนาด 350 kV 120 kHz

4. บทสรุปจากผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าในการออกแบบลักษณะการจัด วางขดลวดทั้ง 2 ชุดของหม้อแปลงทดสอบสรุปได้ว่าการจัดวางขดลวด แบบที่มีโอกาสน้อยที่สุดที่จะเกิดการแฟลชโอเวอร์จากขดลวดแรงสูงลง ขดลวดแรงต่ำ คือ ขดลวดที่ทำมุมกับพื้น 0 องศาแต่ค่าความเครียด สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นสูงมากบริเวณต้นขดลวดโดย อาจส่งผลต่อการเกิดแฟลชโอเวอร์ในบริเวณฐานรองรับ หรือในจุด โครงสร้าง โดยขดลวดที่วางในลักษณะแนว 90 องศา จะมีโอกาสที่ทำให้ เกิดการแฟลชโอเวอร์จากขดลวดทางแรงสูงลงมาที่ขดลวดทางแรงต่ำ

ได้และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้ก็มีความสูงกว่าในลักษณะ 30,45 องศา จึงเป็นเหตุทำให้จุดเหมาะสมสำหรับการวางขดลวดควร จะ อยู่ในลักษณะแนวเอียงทำมุมกัน 30 กับ 45 องศา จึงจะเหมาะสม ปลอดภัย กับขดลวดทั้งสองชุด

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Boonseng, C.;Apiratikul, P., "A low cost approach to the design the Tesla Transformer for testing of insulating materials", Electrical Insulating Material, 2001.(ISEIM 2001). Proceeding of 2001 International Symposium on 19-22 Nov.2001 Pag (s) : 332-335

[2] Boonseng, C.;Apiratikul, P.; Phansomarnin, C., "A low cost approach to design the Tesla Transformer for testing of insulating materials and industrial application", Electrical Insulation,2002. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on 7-10 April 2002 Pag (s) : 248-251

6. ประวัติผู้เขียน



สมเกียรติ ทองแก้ว สำเร็จการศึกษา คอ.บ.(ไฟฟ้า) และ คอ.ม.(ไฟฟ้า) จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ นครเหนือ ปี 2529 และปี 2539 ตามลำดับ ปัจจุบันกำลัง ศึกษาต่อระดับ วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มทร.ธัญบุรี และ เป็น อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ม.เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (พระนครเหนือ) สนใจ งานวิจัยในด้าน เทคโนโลยีทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว สำเร็จการศึกษา ปวส.ไฟฟ้า วช.พระนครเหนือ รุ่น 37 / วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) ม.เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี 2541 รุ่น 09 /วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ม.เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (พระนครเหนือ) สนใจงานวิจัยในด้าน เทคโนโลยี ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง สำเร็จการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) ม.เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รุ่น 07 ปี 2538 และสำเร็จการศึกษาปริญญาเอก Dr.-Ing. (Elektrotechnik), Kassel University, Germany ปัจจุบันเป็น อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ธนากร นำหอมจันทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อ วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง