

การศึกษาและวิเคราะห์ออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง XLPE พิกัด 24 kV

สำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยประยุกต์ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นสารฉนวนStudy and Analysis Design Cable Terminator XLPE 24 kV for testing the Partial Discharge (PD) by the Application of SF₆ gas Insulation

ศุภวดี เนตรโพธิ์แก้ว และ สมเกียรติ ทองแก้ว

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ

e-mail: Supawudn_p_g@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง XLPE พิกัด 24 kV เพื่อทำการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยประยุกต์ใช้สารฉนวนก๊าซ SF₆ โดยมีการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและออกแบบโดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเพื่อจำลองการกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้า (E_{max}) ที่เกิดขึ้นในขั้วต่อสายเคเบิลในสภาวะที่ยังไม่มีสารฉนวน เพื่อให้ทราบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด และนำมาสู่การออกแบบรวมถึงประยุกต์ใช้สารฉนวนโดยสารฉนวนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือฉนวนก๊าซ SF₆ ซึ่งมีคุณลักษณะสมบัติเป็นฉนวนที่ดีในทางไฟฟ้า และเพื่อคำนวณหาชนิดที่เหมาะสมของขั้วต่อสายซึ่งใช้ฉนวนก๊าซเป็นตัวควบคุมสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล ขั้วต่อสายเคเบิลที่ได้จากการออกแบบสามารถใช้ในการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนได้ตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์และพัฒนาการออกแบบขั้วต่อสายชนิดใช้สารฉนวนประเภทฉนวนก๊าซ SF₆ ทั้งนี้เพื่อศึกษาวิจัยผลที่ได้จากการสร้างขั้วต่อสายชนิดใช้สารฉนวนประเภทก๊าซ รวมทั้งเป็นการพัฒนาแนวทางและวิธีการที่เหมาะสมในการทดสอบวัดหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูงต่อไปได้ในอนาคต

คำสำคัญ: ขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน, ดิสชาร์จบางส่วน, ความเครียดสนามไฟฟ้า, สารฉนวน, สนามไฟฟ้า, สายเคเบิล, สายเคเบิลแรงดันสูง

Abstract

This research aimed to design and construct the XLPE 24 kV high voltage cable terminator in order to find out the partial discharge with the application of SF₆ gas insulation. Then, it was calculated to find out the electric field parameter and designed to simulate the distribution of electric field stress at the cable terminator in non-insulation condition by the application of finite elements

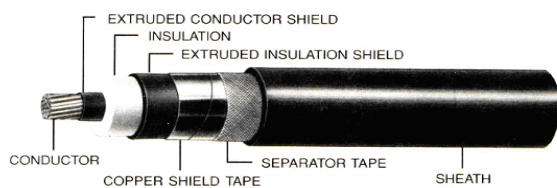
method. Moreover, the experiment after aimed to find out the optimum parameter of Electric field Stress and the application of insulation called SF₆ gas insulation which is a good insulator. In addition, the appropriate dimension of cable terminator with gas insulation to control the electric field at the end of underground cable was calculated. This designed cable terminator can be used to examine the partial discharge according to IEC 60270 Standard. In this research, the researcher applied the SF₆. The researcher also studied the output of the cable terminator with gas insulation for developing appropriate method to test the partial discharge of high voltage in the future.

Keyword : Cable Terminator, Partial Discharge, Electric Field Stress, Insulation, Electric Field Underground Cable, High Voltage Underground Cable

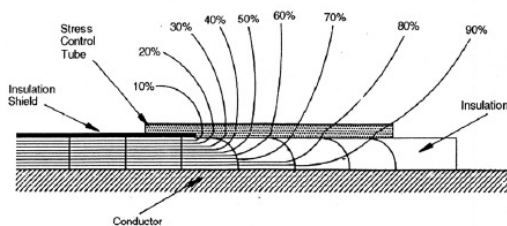
1. บทนำ

จากปัญหาอุปกรณ์การทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงมีราคาสูงเมื่อนำเข้ามาในประเทศ ประกอบกับในประเทศไทยสามารถผลิตสายเคเบิลแรงดันสูงใต้ดินแบบ XLPE หรือเดินสายใต้น้ำ ดังนั้นการตรวจสอบฉนวนที่หุ้มสายเคเบิลที่ผลิตออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมสายเคเบิลมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดสอบสาย ตามค่ามาตรฐานการทดสอบกำหนด สำหรับในงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอวิธีการและการออกแบบเพื่อทำการทดสอบการหาค่าดิสชาร์จบางส่วนตามค่ามาตรฐาน IEC 60270 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ออกแบบสร้างขั้วต่อสายเพื่อทำการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดพิกัด 24 กิโลโวลต์ ขนาดของสายที่ทำการทดสอบ 240 ตารางมิลลิเมตร เป็นชุดทดสอบการวัดหาค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) และเป็นการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกของฉนวนแข็ง (Solid Dielectric Insulation) ที่เป็นฉนวนประเภท XLPE ของสายเคเบิลแรงสูง โดยในชุดขั้วต่อสายจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าภายในชุดขั้วต่อสายเพื่อให้ค่า

ดิซาร์จบางส่วนในส่วนของขั้วต่อสายและในสายเคเบิลให้มีค่าที่น้อยที่สุดหรือไม่มีเลยเพื่อให้ได้ค่าดิซาร์จบางส่วนที่ทำการวัดภายในสายเป็นค่าดิซาร์จบางส่วนของสายอย่างแท้จริง โดยปัจจัยสำคัญในการตรวจสอบความผิดปกติและสิ่งบกพร่องเนื่องจากขบวนการผลิตจากโรงงานซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายและสามารถทำนายถึงอายุการใช้งานในลักษณะของการเสื่อมสภาพทางกายภาพของสายเคเบิล ทั้งนี้ในการออกแบบขั้วต่อสายในลักษณะที่ผ่านมานั้นจะออกแบบใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นสารฉนวนแต่ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบสร้างและพัฒนาสารฉนวนเพื่อศึกษาผลที่ได้จากการใช้ฉนวนกึ่งเป็นฉนวนที่ช่วยลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเพื่อให้ได้ค่าการวัดดิซาร์จบางส่วนเป็นค่าที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโดยใช้หลักการใช้ทฤษฎีของไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการวิเคราะห์หาค่าของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก่อน ทั้งนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) ของขั้วต่อสายในขณะที่ป้อนแรงดันสูงเข้าที่ขั้วอิเล็กโทรด เพื่อนำไปสู่การออกแบบขนาดและรูปแบบของขั้วต่อสาย รวมถึงการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 1 ภาพโครงสร้างภายในของสายเคเบิลแรงดันสูง



รูปที่ 2 การกระจายของสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิล แบบ Refractive Stress Control มีลักษณะที่มีค่าเส้นศักย์ไฟฟ้าที่สม่ำเสมอเป็นลำดับของฉนวน

2. ทฤษฎีการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า

ค่าความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเสื่อมสภาพการเป็นฉนวน โดยสามารถหาได้จากสมการหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละชั้นฉนวนในสายเคเบิล ได้จากสมการที่ 1

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (1)$$

โดยที่ E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/mm.)

U คือ แรงดันไฟฟ้า (kV)

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (mm.)

η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง การใช้ฉนวนที่มีค่า ϵ_r ต่างกัน เหมาะที่จะใช้กับสมการไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มีค่า ϵ_r ต่างกันให้มีค่าใกล้เคียงกัน ความเสียหายจากค่าสนามไฟฟ้าในฉนวนที่รัศมีใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 U}{r_x \epsilon_x \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2)$$

โดยที่ E_{r_x} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่รัศมี r_x (kV/mm.)

U คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (kV)

ϵ_1, ϵ_2 คือ เปรอริมิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 1 และ 2

r_1 คือ รัศมีของตัวนำ (mm.)

r_2, r_3 คือ รัศมีของฉนวนชั้นที่ 1 และ 2 (mm.)

เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูง จากรูปสามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล โดย r_1 คือ รัศมีของตัวนำมีค่าเท่ากับ 9.2 mm. และ r_2 คือ รัศมีของขั้วต่อสาย (หนังสือวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง คร.สำราญ สังข์สะอาด) ดังนี้

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 \times e \\ &= 9.2 \times e \\ &= 25.01 \text{ mm.} \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} E_{r_2} &= \frac{2.3 \times 1 \times 24000}{16 \times 1 \left(2.3 \ln \left(\frac{25.01}{16} \right) + 1 \ln \left(\frac{16}{9.2} \right) \right)} \\ &= 2.18 \text{ kV/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{r_3} &= \frac{2.3 \times 1.00191 \times 24000}{25.01 \times 1 \left(2.3 \ln \left(\frac{25.01}{16} \right) + 1 \ln \left(\frac{16}{9.2} \right) \right)} \\ &= 1.395 \text{ kV/mm} \end{aligned}$$

กำหนดให้ $r_3 = 50$ mm. เนื่องจากในที่นี้จะทำการสร้างขั้วต่อสายที่มีขนาดรัศมีเท่ากับ 50 mm. ดังนั้นจะได้

$$Er_3 = \frac{2.3 \times 1 \times 24000}{50 \times 1 \left(2.3 \ln\left(\frac{50}{16}\right) + 1 \ln\left(\frac{16}{9.2}\right) \right)}$$

$$= 348.69 \text{ kV/mm}$$

จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้า Er_2 และ Er_3 พบว่าสามารถใช้ในการทดสอบได้โดยไม่เกิดการเบรคความ งานวิจัยนี้เลือกจำลองขั้วต่อสายโดยใช้ท่ออะคริลิกใสเป็นวัสดุฉนวน และ ภาชนะใส่ฉนวนก๊าซสำหรับขั้วต่อสาย และเพื่อทนต่อสภาวะความดันอากาศรวมถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้ประมาณ 35 kV/mm. โดยเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 60 mm. และความหนา 5 mm. เนื่องขนาดอะคริลิกใสขนาดนี้มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป

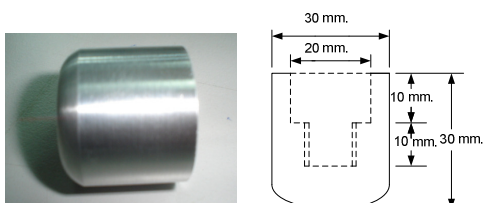
3. การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูง

จากทฤษฎีทรงกระบอกซ้อนกันแฉกซ้อนที่พอเหมาะนั้นจะคำนวณขนาดของกระบอกได้ $r_2 = 25.01 \text{ mm}$. หรือเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ 50.02 mm. ส่วนของฐานรองรับจะต้องมีการสัมผัสกับขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงจะต้องมีการสัมผัสที่พอดีไม่ก่อให้เกิดค่าคาปาซิแตนซ์ที่จุดต่อจะทำให้เกิดค่า Partial Discharge ถ้าจุดต่อสายสัมผัสไม่พอดีกัน และในอีกหน้าที่หนึ่งจะต้องเป็นจุดต่อสายเคเบิลในการทดสอบเพื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่าย ซึ่งใช้คู่มือนิยมกลึงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพฐานรองรับขั้วต่อคาน้ำสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

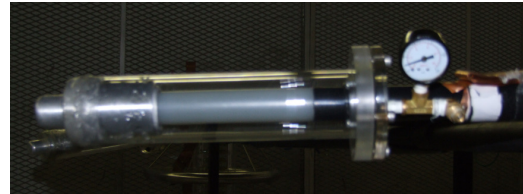
ชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่อสายเคเบิลแรงดันสูงมีหน้าที่ในการเพิ่มพื้นที่ของจุดสัมผัสแรงดันสูงที่ชุดทดสอบให้มีพื้นที่เพื่อค่าของความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงไม่ก่อให้เกิดค่าลิสซาร์จบางส่วนอันมาจากโคโรนาคิสซาร์จหรือลิสซาร์จตามผิว



รูปที่ 4 แบบภาพชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายขั้วต่อสาย



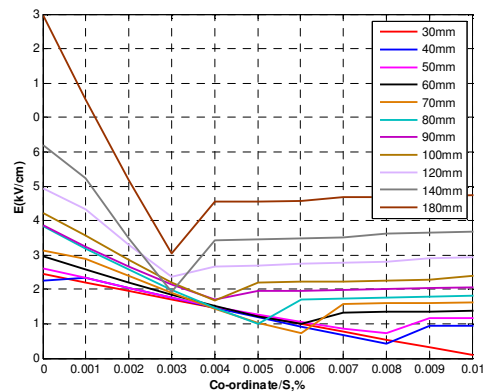
รูปที่ 5 ภาพของขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูงและเกจวัดความดัน



รูปที่ 6 ภาพขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูงที่ประกอบสำเร็จแล้ว

4. การหาระยะในการปกสายเคเบิลแรงดันสูง

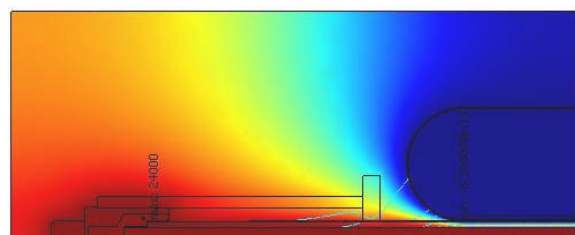
การหาระยะในการปกสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE แรงดันสูงที่กีด 24 kV ขนาดสาย 240 โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics ทำการคำนวณโดยเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึงชั้น Sami ห่างกัน 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm, 100 mm, 120 mm, 140 mm, 180 mm ตามลำดับ นำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบการเกิดการวางไฟตามผิว จะได้ดังรูป 7 ระยะที่ปกที่เหมาะสม คือที่ 90 mm



รูปที่ 7 กราฟวิเคราะห์ระยะในการปกสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

5. การกระจายสนามไฟฟ้าที่ขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน

จากการกระจายสนามไฟฟ้าที่ขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินโดยการจำลองใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics จะได้ดังภาพที่ 8

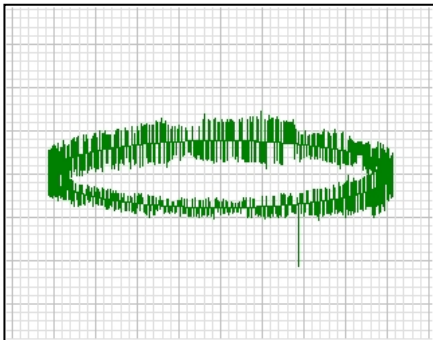


รูปที่ 8 ภาพสนามไฟฟ้าที่ขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินที่จำลองขึ้น

6. ผลการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

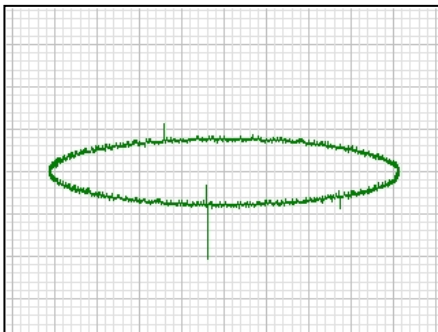
ในการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงด้วยหัวต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ออกแบบสร้างเลือกใช้ฉนวนในการทำหน้าที่ลดความเครียดสนามไฟฟ้า บริเวณปลายสายเคเบิลที่ปลอก หรือทำการควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้า เพื่อหาค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดภายในสายเคเบิลทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการ HV ส.พระจอมเกล้าลาดกระบัง โดยการทดสอบซึ่งมีผลของการทดสอบดังรูปรวมการตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (PD) ตามผลการตรวจจับสัญญาณ ดังนี้

ฉนวนก๊าซสถานะ อากาศ(Air) ที่ความดันภายในกระบอกหัว 1.8 bar



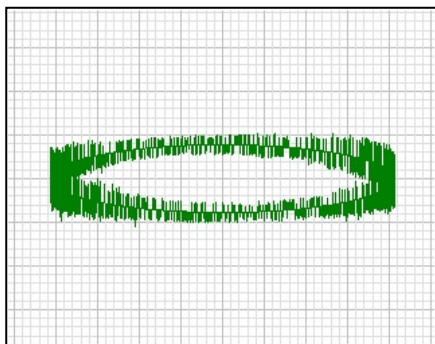
PD Detector 1 - 6/08/2008 01:24:02 PM
Discharge =29.94 pC, Voltage = 6.47 kV

ฉนวนก๊าซสถานะ สุกญญาท ที่ความดันภายในกระบอกหัว 1.8 bar



PD Detector 1 - 6/08/2008 02:54:22 PM
Discharge =4.13 pC, Voltage =2.87 kV

ฉนวนก๊าซ SF₆ ที่ความดันภายในกระบอกหัว 1.8 bar



PD Detector 1 - 6/08/2008 03:14:06 PM
Discharge = 4.92 pC, Voltage =24.00 kV

7. บทสรุปจากผลการวิเคราะห์

ดังนั้นจากผลการทดลองเมื่อเราเทียบผลการทดสอบด้วยฉนวน 3 ชนิดประกอบ จึงสรุปได้ว่าก๊าซ SF₆ สามารถลดการเกิดค่า PD ได้ดีกว่าอากาศ และสุญญาทในอัตราส่วนการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากัน จะพบได้ว่าเมื่อเราอัดแรงดันก๊าซให้มากขึ้นก็จะยิ่งลดค่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD) ได้ดีก็เพราะว่าเมื่อเราใส่ SF₆ เข้าไปจะเกิดความหนาแน่นของก๊าซบนผิวของสาย XLPE ทำให้เกิดสภาพความเป็นฉนวนที่ดี

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ อาจารย์นรเศรษฐ พัฒนเดช พร้อมทีมงานภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือวัดตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (PD) และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำราয় সংখ্যসহাড, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [2] Kuffel, E., & Abdullah, M., High-Voltage Engineering, Pergamon Press, 1977
- [3] C. Boonseng, P. Apiratikul and K. Nakaviwat, " A High Voltage Cables Terminator for Partial Discharge and Dielectric Loss Measurement", IEEE 2002 International Symposium on Electrical Insulation ISEI'2002, April 7-10 2002, Boston Massachusetts USA, pp62-65.

9. ประวัติผู้เขียน



สุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว สำเร็จการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) ม.เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี 2541 และสำเร็จการศึกษา วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปี 2548 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็น หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ RMUT-P สนใจงานวิจัยในด้านเทคโนโลยีทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง



สมเกียรติ ทองแก้ว สำเร็จการศึกษา คอ.บ.(ไฟฟ้า) และ คอ.ม. (ไฟฟ้า) จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี 2529 และปี 2539 ตามลำดับ ปัจจุบันเป็น อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ สนใจงานวิจัยในด้าน เทคโนโลยีทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง