การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16

The 16th Electrical Engineering Network 2024

29 - 31 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรมอัศวรรณ อ.เมือง จ.หนองคาย

นวัตกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่สำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน

Innovation and Modern Technology for Sustainable Development

Conference Topic

- Electrical Power (PW) ไฟฟ้ากำลัง
- Electronics, Circuit and Communication (EC) อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร
- Power Electronics (PE) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- Computer and Information Technology (CP) คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- Control Systems and Instrumentation (CT) ระบบควบคุมและการวัด
- Digital Signal Processing (DS) ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
- Energy and Conservation of Energy (ES) พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

EENET 2024

- Innovation and Invention (IN) นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
- General Electrical Engineering (GN) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า
- Special Session on Electrical Engineering (SS) หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า
  - Innovation and invention for junior research in school and college
    นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สำหรับนักวิจัยรุ่นเยาว์ ระดับมัธยม ปวช. และ ปวส.
  - Other research related to engineering for junior research in school and college
    งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรม สำหรับนักวิจัยรุ่นเยาว์ ระดับมัธยม ปวช. และ ปวส.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16
16th Conference of Electrical Engineering Network 2024 (EENET 2024)

การออกแบบชุดทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงอย่างง่ายด้วยวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

Design of a Simple Transformer Oil Insulation Test Kit with a Voltage Divider Circuit

สลักจิตร แบลนชาร์ด[1] ไพศาล คงเรือง[2] และ กันตภณ มะหาหมัด[3]
[1,2,3]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
160 หมู่ที่ 4 ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 E-mail: salakjit.ni@skru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงอย่างง่ายด้วยวงจรโวลท์เตจดิไวเดอร์ชนิดตัวต้านทานสำหรับแรงดันสูง 15 kV ที่ส่งออกมาจากหม้อแปลงนีออนไลท์ วงจรออกแบบด้วยหลักการวงจรแบ่งแรงดัน โดยองค์ประกอบภาคแรงต่ำใช้ตัวต้านทานค่า 500 kΩ และองค์ประกอบภาคแรงสูงคือตัวต้านทานค่า 500 MΩ ซึ่งจะสามารถวัดแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสสลับโดยมีอัตราส่วนลดทอนแรงดันอัตรา 1000:1 เมื่อออกแบบและสร้างชุดทดสอบแล้วได้นำมาทดสอบจริงกับน้ำมัน 3 ประเภทด้วยกันคือ น้ำมันแบบ mineral oil น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์ม โดยได้จัดทำอิเล็กโทรดและกล่องบรรจุน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM เป็นหลัก จากผลการทดสอบได้ทดสอบคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันทั้ง 3 ประเภท โดยคุณสมบัติความคงทนแรงดันเบรคดาวน์จากวงจรที่ออกแบบไว้สามารถใช้เพื่อทดสอบน้ำมันหม้อแปลงได้ แต่ยังคงมีข้อผิดพลาดและขีดความสามารถของหม้อแปลงสเต็บอัพที่มีพิกัดกำลังไม่สูงมากนัก ค่าอัตราการเพิ่มแรงดัน (rise rate) และอุณหภูมิอากาศโดยรอบขณะทดสอบ

คำสำคัญ: ชุดทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลง, วงจรโวลท์เตจดิไวเดอร์, มาตรฐาน ASTM

Abstract

This research presents the design and construction of a simple oil-immersed transformer insulation test set using a voltage divider circuit, for high voltage of 15 kV output from the neon light transformer. The circuit is designed based on the voltage division circuit principle, with low voltage component using a 500 kΩ resistor and the high voltage component using a 500 MΩ resistor, capable of measuring high voltage AC electricity with a voltage ratio of 1000:1. After designing and constructing the test set, it was tested with three types of oils: mineral oil, coconut oil, and palm oil. Electrical tests and oil container was made according to ASTM standards. From the results, both the mechanical and electrical properties of three types of oils were tested. The withstand voltage characteristics obtained from the designed circuit can be used to test transformer oils. However, there are still errors and limitations in the capability of the supply voltage, particularly in its power rating not being very high. Many factors such as the rate of voltage increase (rise rate) and the uncontrolled ambient temperature during the test also need to be considered.

Keywords: a simple oil-immersed transformer insulation test set, the voltage division circuit, ASTM standards

1. บทนำ

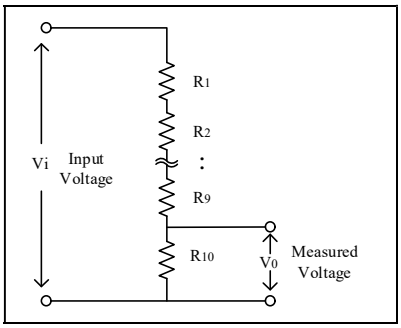
วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้ามักใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าเพื่อทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งน้ำมันหม้อแปลงก็เป็นฉนวนประเภทหนึ่งที่ต้องมีการทดสอบคุณสมบัติอยู่บ่อยครั้ง และการจัดหาเครื่องมือทดสอบเพื่อใช้ประกอบในการเรียนการสอนหรือสาธิตให้นักศึกษาได้ใช้เรียนมักมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้น การศึกษาและออกแบบชุดทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงอย่างง่ายนี้มีส่วนช่วยประเมินคุณภาพฉนวนและสภาพของน้ำมันหม้อแปลงได้ รวมไปถึงสามารถทำให้นักศึกษาเข้าใจหลักการออกแบบเครื่องมือวัดในงานทดสอบฉนวนทางไฟฟ้า เนื่องจากข้อจำกัดด้านฉนวนและความสามารถของเครื่องมือวัด [1] การวัดแรงดันสูงจึงต้องมีการออกแบบสร้างวงจรให้เหมาะสมและต้องคำนึงถึงมาตรฐานข้อกำหนดในการทดสอบ [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบวงจรโวลท์เตจดิไวเดอร์แบบรีซิสทีฟให้เหมาะสมเพื่อการทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพ

2. การออกแบบและสร้างโวลท์เตจดิไวเดอร์

2.1 โวท์เตจดิไวเดอร์แบบตัวต้านทาน

โวลท์เตจดิไวเดอร์แบบตัวต้านทานประกอบด้วย ตัวต้านทานต่ออันดับกันโดยตัวบนจะเป็นตัวต้านทานภาคแรงดันสูงต่ออยู่กับภาคแรงดันต่ำที่มีการคำนวณแบบเป็นสัดส่วน เพื่อลดทอนแรงดันสูงให้

สามารถต่อเข้าภาคเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าได้ หลักการเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรโวท์เตจดิไวเดอร์แบบตัวต้านทาน

โดยที่ Vi คือ แรงดันอินพุท

Vo คือ แรงดันเอาท์พุทที่ต้องการวัด

R_1-R_9 คือ ตัวต้านทานภาคแรงดันสูง

R_{10} คือ ตัวต้านทานภาคแรงดันต่ำ

โดยหลักการแล้วแรงดันด้านออก (V_o) สามารถคำนวณหาได้จาก [3]

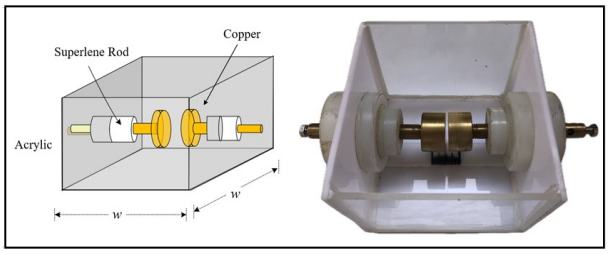
$$V_o = \frac{R_{10}}{\sum_{n=1}^{9} R_T + R_{10}} \cdot V_i \quad (1)$$

2.2 การออกแบบอิเล็กโทรด

กระบวนการออกแบบนี้อาศัยการทบทวนโครงสร้างของอิเล็กโทรดตามมาตรฐานการทดสอบน้ำมันหม้อแปลง [4] โดยได้เปรียบเทียบกันหลายมาตรฐานเพื่อให้เป็นไปตามวิธีการที่ถูกต้อง เพื่อให้การทดสอบอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลายและมีประสิทธิภาพ ดังตารางที่ 1 อิเล็กโทรดแบบทองเหลืองทรงกระบอกและกล่องใส่น้ำมันทำขึ้นมาจากแผ่นอะคริลิคใสและกลึงจากพลาสติกซุปเปอร์ลีนตามขนาดที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดขนาดอิเล็กโทรดและแรงดันทดสอบของแต่ละมาตรฐาน

มาตรฐาน		ASTM D1816	ASTM D877	IEC 60156
ประเทศ		USA	USA	Europe
อิเล็กโทรด	รูปร่าง			
	ระยะห่าง	2 หรือ 1 มม.	2.54 มม.	2.5 มม.
แรงดันทดสอบ	อัตราเพิ่ม	0.5 kV/s	3 kV/s	2 kV/s
	ความถี่	45-65	45-65	45-65



รูปที่ 2 อิเล็กโทรดที่ได้ออกแบบไว้

2.3 การทดสอบคุณสมบัติน้ำมันหม้อแปลง

การทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงเป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบและรักษาความสามารถในการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น การทดสอบสำคัญควรรวมถึง:

2.3.1 การทดสอบ Dielectric Strength: การทดสอบด้วยวิธี Dielectric Strength จะใช้การปรับแรงดันไฟฟ้าบนน้ำมันหม้อแปลงจนเกิดการอาร์คไฟฟ้า โดยค่าที่ได้จะแสดงถึงความสามารถในการทนแรงดันไฟฟ้าของน้ำมัน โดยใช้มาตรฐานการทดสอบตาม ASTM D877 [5]

2.3.2 การวัดค่า Acidity: การวัดค่า Acidity ของน้ำมันเป็นการตรวจสอบปริมาณสารกรดที่สามารถเกิดจากการย่อยสลายของน้ำมัน การเพิ่มขึ้นของค่า Acidity อาจส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของน้ำมัน โดยใช้วิธีการทดสอบตาม Titrimetric method

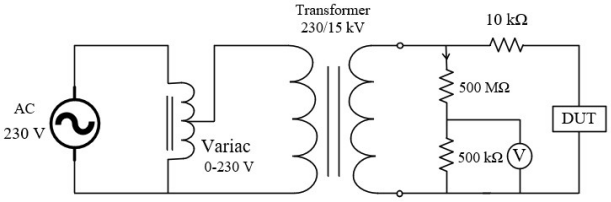
2.3.3 การตรวจสอบปริมาณน้ำในน้ำมัน: การตรวจสอบปริมาณน้ำในน้ำมันเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากน้ำสามารถก่อให้เกิดการสะสมของแก๊สในน้ำมัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของหม้อแปลง โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 12937

2.3.4 การวัดค่าความหนืด: การวัดค่าความหนืด (Viscosity) เป็นการวัดความหนืดของน้ำมัน ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการประเมินสภาพของน้ำมัน โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D445

การทดสอบเหล่านี้จะช่วยให้การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของน้ำมันหม้อแปลงเป็นไปอย่างเหมาะสมเพื่อรักษาประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ในระยะยาวซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบค่าคุณสมบัติเหล่านี้เอาไว้ด้วย

3. การออกแบบและสร้างโวท์เตจดิไวเดอร์

การออกแบบชุดแบ่งแรงดันอาศัยทฤษฎีโวลท์เตจดิไวเดอร์แบบตัวต้านทาน โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D877 วงจรการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรแบ่งแรงดันแบบตัวต้านทาน

จากรูปเมื่อป้อนแรงดันเข้าวาริแอค ทำให้สามารถปรับค่าแรงดันฝั่งขาเข้าหม้อแปลงได้ตั้งแต่ 0-230 V_{rms} ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันทดสอบที่ออกทางด้านแรงดันสูงสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-15 kV ตามสเปคของหม้อแปลงนีออนไลท์ โดยหลักการแล้วกระแสที่ไหลผ่านเครื่องมือวัดจะมีค่าน้อยมาก วงจรตัวต้านทานแบบอันดับจะพิจารณาจากอัตราส่วน 1000:1 ดังนั้นแรงดันขาออกจากการคำนวณจะอยู่ที่ประมาณ 15 V สำหรับวัสดุทดสอบ (DUT) ต่อขนานอยู่กับวงจรแบ่งแรงดันโดยให้มี R10 kΩ ต่อป้องกันกระแสลัดวงจร หลังจากนั้นจะเอาไปทดสอบกับน้ำมันหม้อแปลง PTT Hivolt 99 ที่มีการใช้งานมาแล้ว โดยได้ทดลองเพิ่มเติมเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์ม และน้ำมันมะพร้าวด้วยเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า

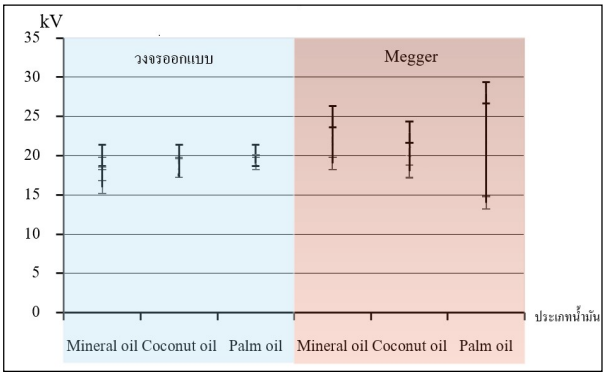
4. ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 นอกจากเป็นการทดสอบวงจรตรวจวัดค่าแรงกันเบรคดาวน์ของน้ำมันหม้อแปลงอย่างง่ายที่ได้ทำขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐานแล้ว ยังได้ทดสอบคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางไฟฟ้าไปด้วยพร้อมกัน โดยผลการทดลองลำดับที่ 1-3 เป็นผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลจากศูนย์ทดสอบมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ และผลการทดสอบลำดับที่ 4 คือผลที่ได้จากวงจรการออกแบบ ผลอันดับที่ 5 คือผลที่ได้จากเครื่องมือวัดยี่ห้อ Megger รุ่น OTS 100 AF เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์

ดังรูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวงจรออกแบบและเครื่องวัด Megger โดยเปรียบเทียบค่าสูงสุด ต่ำสุดและค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากข้อมูลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ จะเห็นได้ว่าค่าการกระจายแรงดันมีแนวโน้มกระจายแบบไม่แน่นอนและค่าที่ได้เกาะกลุ่มกันในระดับที่ใกล้เคียงกันจากน้ำมันทั้ง 3 ประเภทกับผลจากเครื่องวัดมาตรฐาน โดยค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์สำหรับน้ำมันหม้อแปลง mineral oil น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์ม จะมีค่าอยู่ที่ 21.5 kV/mm, 22.5 kV/mm และ 22.1 kV/mm ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากพิกัดแรงดันของหม้อแปลงสเต็ปอัพอยู่ที่ระดับ 20 kVmax ทำให้ไม่สูงเพียงพอถึงระดับเบรคดาวน์ของน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าวจึงทำให้การทดสอบมีการลดระยะแก็ปลงมาที่ 2 มม. นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ยังมีข้อจำกัดตามมาตรฐานในเรื่องของอุณหภูมิตอนทดสอบและอัตราการเพิ่มแรงดัน (rise rate) 3 kV/s ที่เป็นตัวแปรให้ผลการทดสอบเกิดค่าผิดพลาดได้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของน้ำมันหม้อแปลงทั้ง 3 ประเภท

องค์ประกอบ	น้ำมันใช้แล้ว Mineral oil	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันปาล์ม	มาตรฐาน
1. ค่ากรด (mg KOH/g)	0.04	0.09	0.44	Titrimetric method
2. ค่าปริมาณน้ำ (%wt)	0.0045	0.0910	0.0765	ISO 12937
3. ค่าความหนืด cSt	9.5458	28.8063	40.6132	ASTM D445
4. แรงดันเบรกดาวน์ ด้วยวงจรที่ออกแบบ	ระหว่าง 16-20 kV @2.54 mm gap	ระหว่าง 18-20 kV @2 mm gap	ระหว่าง 19-20 kV @2 mm gap	ASTM D877
5. แรงดันเบรกดาวน์ ทดสอบด้วย Megger OTS 100 AF	ระหว่าง 19-23 kV @2.54 mm gap	ระหว่าง 18-24 kV @2.54 mm gap	ระหว่าง 14-28 kV @2.54 mm gap	ASTM D877



รูปที่ 4 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันเบรคดาวน์ของน้ำมัน 3 ประเภทด้วยวงจรออกแบบและเครื่องมือมาตรฐาน

สำหรับค่าของกรดตามชนิดของน้ำมันนั้นถือได้ว่ามีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดมาก ค่าความชื้นหรือปริมาณน้ำสำหรับน้ำมัน Mineral oil ก็ถือว่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเมื่อเทียบกับน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณความชื้นสูง [6] สำหรับค่าความหนืดของน้ำมันหม้อแปลงตามสเปคของ PTT Hivolt 99 ที่มีค่า <7.6 cSt ที่อุณหภูมิ 40 °C เมื่อใช้การทดสอบที่ 100 °C ได้ 9.545 cSt ซึ่งก็ถือว่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากเมื่อเทียบกับน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์ม

5. สรุป

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบฉนวนน้ำมันหม้อแปลงอย่างง่ายด้วยวงจรโวลท์เตจดิไวเดอร์ชนิดตัวต้านทานนี้ จัดทำขึ้นโดยการซื้ออุปกรณ์ที่หาได้ง่ายในท้องตลาด โดยมีต้นทุนในการจัดทำต่ำเพื่อใช้ในการเรียนการสอนวิชาเครื่องมือวัดไฟฟ้าเพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจหลักการและสามารถคิด วิเคราะห์ และรวบรวมเอาหลักทฤษฎีทางไฟฟ้ามาใช้อย่างเช่นเรื่องของความปลอดภัย และหลักการต่อหลักดินเพื่อป้องกันระบบการทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ทั้งนี้วงจรที่ออกแบบสามารถใช้งานได้จริงโดยอาจจะยังมีข้อจำกัดอยู่บ้างที่ทำให้ผลการทดสอบมีความผิดพลาด

เอกสารอ้างอิง

[1] อานนท์ อิศรมงคลรักษ์, เกริกพล หอมทวนลม, วรวุฒิ เสือผู้ และนันทนี พรหมทัตย์ “การออกแบบและสร้างเครื่องวัดแรงดันสูงด้วยเทคนิคแบ่งแรงดันชนิดตัวเก็บประจุพิกัด 100 kV สำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,” การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14, หน้า. 931–940, ปี 2565.

[2] C. L. Wadhwa, High Voltage Engineering, 2 nd ed. New Age International Limited, 2007.

[3] JP Holtzhausen and W. Vosloo, High Voltage Engineering Practice and Theory, 1st ed, 2000.

[4] Megger, “The Megger guide to insulating oil dielectric breakdown testing,” www.megger.com, pp. 1–32.

[5] “ Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes.” Accessed: Apr. 0 5 , 2024. [Online]. Available: https://www.astm.org/d0877_d0877m-19.html

[6] “การหาความชื้นใน "น้ำมันไบโอดีเซล" Hanna Instrument Thailand.” Accessed: Apr. 0 5 , 2 0 2 4 . [Online]. Available: https://shorturl.at/CDPR8

ดร.สลักจิตร แบลนชาร์ด จบการศึกษาระดับปริญญาเอก จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ปี 2561 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำอยู่ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มีความเชี่ยวชาญด้านการวัดและเครื่องมือวัดในงานไฟฟ้าแรงสูง การทดสอบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง และการวิเคราะห์โมเดลทางคณิตศาสตร์ทางด้านไฟฟ้ากำลัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพศาล คงเรือง
ปัจจุบันทำงานอยู่ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เป็นอาจารย์ / ประธานหลักสูตร สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) มีความเชี่ยวชาญด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าและงานออกแบบติดตั้งไฟฟ้า

ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.กันตภณ มะหาหมัด
ปัจจุบันทำงานอยู่ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เป็นอาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม (ต่อเนื่อง) มีความเชี่ยวชาญด้านระบบควบคุมอัตโนมัติและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซล่าเซลล์