

การออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

Design and Development of a Residual Current Device Tester Using a Microcontroller

ธีรพงษ์ นิเมพร¹ พิมพ์ชนก นนทะพุทธ¹ วชิรวิทย์ แก้วควรชุม¹ และ ฐาปนิก ตีระพันธ์^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย teerapong.c@rmutsv.ac.th

²สาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเลียม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย thapanic.t@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่ว (Residual Current Device: RCD) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหน่วยควบคุมหลัก เพื่อใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ตัดไฟรั่วที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าภายในอาคาร โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำการทดสอบได้สองโหมด ได้แก่ โหมดวัดเวลาดังจร (Tripping Time Mode) และโหมดวัดค่ากระแสรั่วสูงสุดที่ทำให้ตัดวงจร (Tripping Current Mode) รองรับการทำงานของอุปกรณ์ตัดไฟรั่วประเภท Type A และ Type AC โดยใช้ Arduino Uno R3 ทำหน้าที่ควบคุมวงจรทดสอบ และใช้โมดูล PZEM-004T สำหรับวัดค่ากระแสรั่วขณะทำการทดสอบ จากการทดลองเปรียบเทียบผลการทำงานกับเครื่องมือมาตรฐาน Fluke 1653B พบว่าเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดค่าได้ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3.3% ทั้งในด้านกระแสรั่วและเวลาดังจร นอกจากนี้เครื่องทดสอบยังมีขนาดกะทัดรัด ต้นทุนต่ำ และสามารถใช้งานได้สะดวก จึงเหมาะสำหรับการตรวจสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง ช่วยสนับสนุนการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน และเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องตัดไฟรั่ว ไมโครคอนโทรลเลอร์ การทดสอบกระแสรั่ว

Abstract

This research presents the design and development of a tester for residual current devices (RCDs) using a microcontroller to evaluate their performance in building electrical systems. The developed system supports two testing modes: Tripping Time Mode and Tripping Current Mode, and is compatible with Type A and Type AC RCDs. An Arduino Uno R3 serves as the core controller for test circuit operations, while a PZEM-004T module is employed to measure leakage current during testing. Performance comparison with the standard Fluke 1653B instrument revealed that the developed tester achieved measurements closely aligned with the reference values, with a maximum error margin of 3.3% for both leakage current and tripping time. The tester is designed to be compact, cost-effective, and user-friendly, making it well-suited for real-world applications. This device supports

preventive maintenance practices and enhances electrical safety assurance for users in residential and commercial environments.

Keywords: Residual Current Device, Microcontroller, Leakage Current Testing

1. บทนำ

เครื่องตัดไฟรั่ว (Residual Current Device: RCD) คือ เครื่องตัดไฟฟ้าอัตโนมัติที่จะตัดกระแสไฟฟ้าภายในระยะเวลาที่กำหนดเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลไปและไหลกลับ [1] นั่นคือมีกระแสไฟฟ้าบางส่วนที่รั่วหายไป เช่น รั่วไหลจากเครื่องใช้ไฟฟ้าลงดินหรือกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านร่างกายมนุษย์ที่ไปสัมผัสอุปกรณ์ที่มีไฟรั่วอยู่ เครื่องตัดไฟรั่วส่วนมากจะติดตั้งในตู้คอนซูมเมอร์ยูนิต ในบ้านพักอาศัยทำงานโดยการเปรียบเทียบกับระดับกระแสไฟฟ้าของสายไลน์และสายนิวทรัล ซึ่งปกติแล้วจะต้องมีค่าเท่ากัน หากว่าระดับของกระแสไฟฟ้านั้นต่างกันเกินกว่า 30mA นั้นหมายถึงมีกระแสไฟฟ้ารั่วเกิดขึ้นและอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายต่อชีวิต เครื่องตัดไฟรั่วจะตัดวงจรโดยใช้เวลาเพียงไม่กี่มิลลิวินาทีซึ่งจะช่วยป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูดหรืออันตรายแก่ชีวิต ป้องกันอัคคีภัยจากการเกิดไฟฟ้ารั่วในวงจรไฟฟ้าหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเครื่องตัดไฟรั่วจะเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญในการป้องกันอันตรายจากไฟฟ้ารั่ว แต่ในบางกรณีอุปกรณ์ดังกล่าวอาจเกิดการทำงานผิดพลาดได้ เช่น ไม่สามารถตัดวงจรได้ภายในระยะเวลาที่กำหนดหรือไม่สามารถตรวจจับกระแสรั่วได้อย่างถูกต้อง ซึ่งอาจเกิดจากความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ภายใน การติดตั้งที่ไม่ถูกต้องหรือความผิดปกติของระบบไฟฟ้าโดยรวม ปัญหาดังกล่าวอาจนำไปสู่ความเสี่ยงในการเกิดอันตรายจากไฟฟ้าดูด หรืออัคคีภัยที่เกิดจากกระแสไฟฟ้ารั่วโดยที่ระบบป้องกันไม่สามารถตัดวงจรได้ทันเวลา นอกจากนี้การตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตัดไฟรั่วในสถานที่ติดตั้งจริงยังมักถูกมองข้าม เนื่องจากไม่มีเครื่องมือหรือระบบที่สะดวกและมีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการทดสอบเป็นประจำ ส่งผลให้การรับรองความปลอดภัยของระบบไฟฟ้าอาจไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาเครื่องทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องตัดไฟรั่วจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ตัดไฟรั่วอย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานะแวดล้อมที่มีการใช้งานจริงในบ้านพักอาศัยหรืออาคารต่าง ๆ

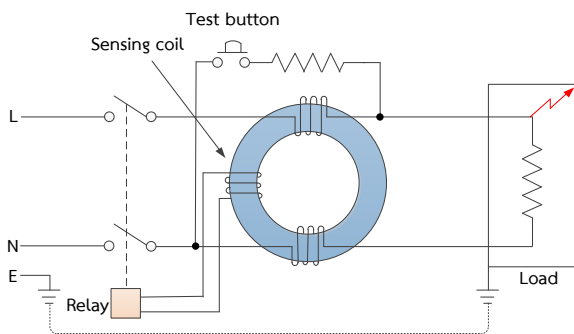
*ผู้ประสานงาน

การออกแบบระบบทดสอบที่สามารถสร้างสถานการณ์จำลองกระแสรั่วได้อย่างปลอดภัยและวัดผลการตอบสนองของเครื่องตัดไฟรั่วได้อย่างชัดเจน จะช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้เป็นแกนหลักในการควบคุมและประมวลผล ยังช่วยให้ระบบทดสอบมีขนาดเล็ก ต้นทุนต่ำ และสามารถพัฒนาให้ใช้งานได้สะดวก ซึ่งจะขึ้นประโยชน์ทั้งในด้านการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน การรับรองความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า และการส่งเสริมความตระหนักรู้ด้านความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้งาน

2. ทฤษฎี

2.1 การทำงานของเครื่องตัดไฟรั่ว [1],[2]

เครื่องตัดไฟรั่วมีการทำงานโดยอาศัยการตรวจจับความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าระหว่างสายไลน์ (Line) และสายนิวทรัล (Neutral) ที่ไหลเข้าสู่โหลด โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อโหลดเชื่อมต่อผ่านเครื่องตัดไฟรั่ว กระแสไฟฟ้จากสายไลน์และนิวทรัลจะไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิที่พันอยู่รอบแกนหม้อแปลงแบบวงแหวน (toroid core) ซึ่งในสภาวะปกติ กระแสทั้งสองควรมีค่าเท่ากันและไหลในทิศทางตรงข้ามกัน ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากทั้งสองกระแสหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ทำให้ไม่มีแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิ วงจรพื้นฐานของเครื่องตัดไฟรั่วแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานของเครื่องตัดไฟรั่ว [3]

อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดกระแสไฟรั่ว เช่น ไหลลงดินหรือผ่านร่างกายมนุษย์จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแส ส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แกนหม้อแปลงไม่สมดุล และทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิ แรงดันนี้จะถูกส่งต่อไปยังวงจรตรวจจับ ซึ่งอาจเป็นรีเลย์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสั่งการให้กลไกตัดวงจรทำงานโดยอัตโนมัติภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว

เครื่องตัดไฟรั่วสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท เช่น RCCB (Residual Current Circuit Breaker) ซึ่งจะไม่วงจรป้องกันกระแสเกิน และ RCBO (Residual Current Breaker with Overcurrent Protection) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่รวมการป้องกันกระแสเกินไว้ในตัว นอกจากนี้เครื่องตัดไฟรั่วถูกพัฒนาให้สามารถตรวจจับกระแสไฟรั่วหลายลักษณะทั้งกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) และไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

โดยเครื่องตัดไฟรั่วที่นิยมติดตั้งในครัวเรือนคือ Type A เนื่องจากสามารถรองรับทั้งโหลดธรรมดาและโหลดที่มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในระดับหนึ่งได้อย่างปลอดภัย และมีราคาที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับความสามารถ และในปัจจุบันเครื่องตัดไฟรั่ว Type B ก็เริ่มนิยมนำมาติดตั้งกันมากขึ้นเพราะสามารถตรวจจับกระแสรั่วได้ทุกชนิด ได้แก่ AC, DC พัลส์, DC คงที่ (smooth DC) และกระแสรั่วความถี่สูง เหมาะสำหรับระบบที่มีการใช้งานไฟฟ้ากระแสตรงร่วมด้วย เช่น สถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า (EV Charger), ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV), หรือระบบควบคุมไฟฟ้าระดับอุตสาหกรรม [4]

2.2 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องตัดไฟรั่ว

ค่ากระแสทริป (tripping current) หรือค่ากระแสใช้งานรั่วไหล (residual operating current) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ระบุสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์ตัดกระแสไฟรั่ว โดยมีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องคือ IEC 61008-1 [2],[5] ซึ่งได้กำหนดค่ากระแสใช้งานรั่วไหลที่พบบ่อย $I_{\Delta n}$ ได้แก่ 6, 10, 30, 100, 300 และ 500 มิลลิแอมแปร์ โดยกำหนดให้อุปกรณ์ตัดไฟรั่วต้องตัดวงจรเมื่อมีกระแสรั่วไหลเกินค่า $I_{\Delta n}$ และต้องไม่ตัดวงจรเมื่อมีกระแสรั่วไหลต่ำกว่า $0.5I_{\Delta n}$ ที่ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับมาตรฐาน และตามมาตรฐาน IEC 61008-1 ได้กำหนดข้อกําหนดเกี่ยวกับเวลาในการทำงานสูงสุดภายใต้กระแสรั่วไหลที่ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระยะเวลาในการตัดวงจรของเครื่องตัดไฟรั่ว

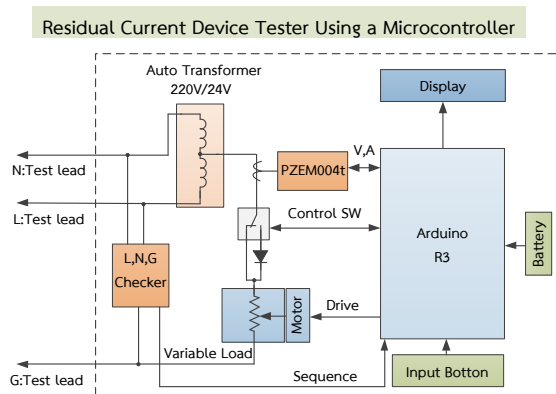
Type				
G	Rated Residual Current	$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$
	Operating time[s]	0.3	0.15	0.04
S	Rated Residual Current	$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$
	Operating time[s]	0.5	0.3	0.15

จากตารางที่ 1 แสดงถึงระยะเวลาในการตัดวงจรสูงสุดของอุปกรณ์ตัดกระแสไฟรั่ว โดยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องตัดไฟรั่วประเภท General type คืออุปกรณ์ตัดไฟรั่วแบบทั่วไปที่ไม่มีหน่วยหน่วงเวลา กับ ประเภท Selective type คืออุปกรณ์ตัดไฟรั่วที่ออกแบบให้มีหน่วยหน่วงเวลาในการตัดวงจร โดยตามมาตรฐานแล้วเครื่องตัดไฟรั่วทั่วไป Type A, Type AC, Type B จะต้องตัดวงจรภายในเวลา 0.3 วินาทีเมื่อกระแสรั่วไหลมีค่าเท่ากับ $I_{\Delta n}$ [6-7] ซึ่งเวลาในการตัดวงจรของอุปกรณ์ตัดไฟรั่วข้างต้นนี้ จะช่วยให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบได้อย่างเป็นระบบ โดยการอ้างอิงค่ากระแสและเวลาทริปในแต่ละระดับ

3. เครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ผู้วิจัยทำการออกแบบการทำงานของเครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้สามารถทดสอบได้ 2 โหมดได้แก่ Tripping Time Mode : ΔT คือเวลาที่ใช้ในการตัดวงจรหลังจากตรวจพบกระแสรั่วซึ่งจะมีย่านกระแสรั่วในการใช้ทดสอบคือ 10 mA, 20 mA, 30 mA

และ Tripping Current Mode : $I_{\Delta n}$ คือค่ากระแสรั่วสูงสุดที่อุปกรณ์ตัดกระแสรั่วตรวจจับและตัดวงจรได้ โดยตัวอุปกรณ์ออกแบบให้สามารถทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วได้ 2 ชนิดคือ Type A และ Type AC องค์ประกอบการทำงานของเครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปภาพที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

หลักการที่สำคัญของเครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ คือการปล่อยกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายผ่านโหลดแบบปรับค่าได้ให้ไหลกลับผ่านสายกราวด์ไปยังบัสบาร์เพื่อให้ครบวงจรของตู้คอนซูเมอร์ที่มีอุปกรณ์ตัดไฟรั่วติดตั้งอยู่ (ตามระบบการต่อลงดินแบบ TN-C) เมื่ออุปกรณ์ตัดไฟรั่วมองเห็นกระแสในสายไลน์และสายนิวทรัลมีค่าแตกต่างกันก็จะส่งผลให้เกิดการตัดวงจร ผู้วิจัยอาศัย Autotransformer ในการลดแรงดันไฟฟ้าจากระบบที่ต้องการทดสอบเพื่อให้สามารถควบคุมกระแสรั่วได้ง่ายและหลีกเลี่ยงการแยกวงจร ในส่วนการทดสอบแบบ Type A หรือใช้รูปคลื่นทดสอบกระแสตรงจะอาศัย วงจรไดโอดเพื่อให้ได้รูปคลื่นกระแสทดสอบตามที่ต้องการ ในส่วนการเพิ่ม-ลดค่ากระแสรั่วไหลจะอาศัยค่าความต้านทานปรับค่าได้ขนาด 2 วัตต์ มาเป็นโหลดให้กับวงจรโดยจะใช้มอเตอร์แบบสเต็ปในการหมุนขั้วเพลาให้ได้ค่ากระแสรั่วไหลตามที่ต้องการ ในส่วนการวัดค่ากระแสรั่วไหลจะอาศัย โมดูล PZEM-004T แล้วส่งค่าที่วัดได้ไปยังส่วนประมวลผล



รูปที่ 3 เครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

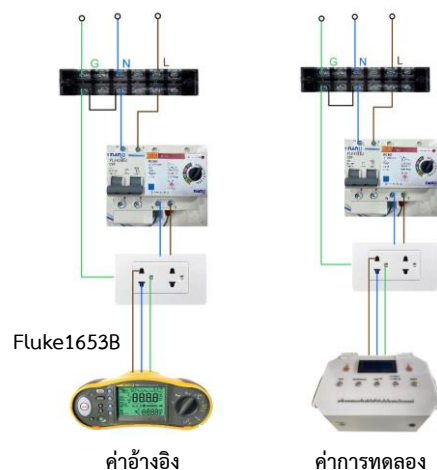
ซึ่งในส่วนภาคการประมวลผลจะอาศัย Arduino Uno R3 ทำหน้าที่ในการควบคุมกระแสรั่วไหล คำนวณค่าเวลาตัดวงจรและส่งข้อมูลแสดงผลลัพธ์ โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกการทำงานจากปุ่มกดและตัวอุปกรณ์มีแหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ภายใน ลักษณะเครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ดังรูปภาพที่ 3 คุณลักษณะของเครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมาแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของเครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

Specification	Characteristic
RCD Test Current	6,10,20,30 mA
RCD Type	Type A, Type AC
Power Supply	4 x 3.7V Battery
Microcontroller	Arduino Uno R3
Display	LCD 2x16
Dimensions	200mm x 160mm x 100mm

4. วิธีการทดลองและผลลัพธ์

ผู้วิจัยทำการทดลองเครื่องทดสอบฯ ที่ได้พัฒนาขึ้นกับเบรกเกอร์กันดูด RCBO ประเภท Type A และ Type AC ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 4 และอาศัยเครื่องมือมาตรฐาน Fluke 1653B ซึ่งมีฟังก์ชันทดสอบ RCD เป็นตัวเปรียบเทียบหาค่าความแม่นยำ

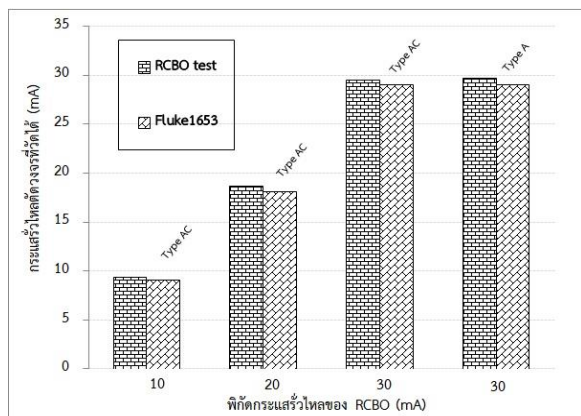


รูปที่ 4 การหาค่าความแม่นยำในการทำงานอ้างอิงกับ Fluke 1653B

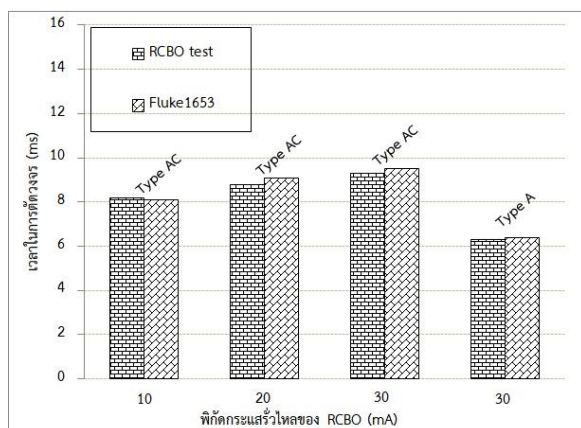
ทำการทดลองในโหมด $I_{\Delta n}$ ตามพิกัดกระแสรั่วไหล 10mA, 20mA, 30mA และทำการทดลองในโหมด ΔT เพื่อหาค่าเวลาในการตัดวงจร การต่อวงจรของเครื่องทดสอบฯ จะต่อร่วมกับด้านออกของเบรกเกอร์กันดูดโดยจะต้องมีแหล่งจ่ายและสายกราวด์

ทดลองหาค่ากระแสรั่วไหลในการตัดวงจรของ RCBO Type AC พิกัด 10mA, 20mA, 30mA และ Type A ที่มีพิกัด 30mA เป็นตัวอย่างในการทดสอบ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งเห็นได้ว่าเครื่องทดสอบฯ

ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นสามารถแสดงค่ากระแสตัดวงจรได้ใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน โดยที่พิกัดทดสอบ 10mA ค่าที่วัดได้มีผลต่างกับค่าอ้างอิงอยู่ที่ 0.3 mA และที่พิกัดทดสอบ 30mA ค่าที่วัดได้มีผลต่างกับค่าอ้างอิงอยู่ที่ 0.6 mA โดยการวัดทั้ง 2 Type มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 3.3 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5 ผลการทดลองหาค่ากระแสรั่วไหลในการตัดวงจร



รูปที่ 6 ผลการทดลองหาค่ากระแสรั่วไหลในการตัดวงจร

ทดลองหาค่าเวลาในการตัดวงจรของ RCBO Type AC พิกัด 10mA, 20mA, 30mA และ Type A ที่มีพิกัด 30mA เป็นอุปกรณ์ตัวอย่างในการทดสอบ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องทดสอบฯ ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นสามารถแสดงค่าเวลาในการตัดวงจรได้ใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน โดยที่ RCBO Type A พิกัด 30 mA มีเวลาในการตัดวงจรเมื่อวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานอยู่ที่ 6.4 ms และเครื่องมือทดสอบฯ ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นสามารถวัดได้เท่ากับ 6.3 ms ซึ่งการทดลองนี้พบว่าการวัดทั้ง 2 Type มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 3.29 เปอร์เซ็นต์

5. สรุป

จากการออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ พบว่าเครื่องทดสอบสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ ทั้งในโหมดทดสอบเวลาตัดวงจร (Tripping Time Mode)

และโหมดทดสอบค่ากระแสรั่วสูงสุด (Tripping Current Mode) โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานไม่เกิน 3.3 เปอร์เซ็นต์ การเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ร่วมกับโมดูล PZEM-004T และวงจรควบคุมกระแสรั่วที่ออกแบบขึ้น ทำให้ระบบมีต้นทุนต่ำ ขนาดกะทัดรัดและใช้งานสะดวก เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานตรวจสอบอุปกรณ์ตัดไฟรั่วในสถานที่จริง เช่น บ้านพักอาศัย อาคารสำนักงาน หรือสถานประกอบการต่าง ๆ เครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้จึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการสนับสนุนการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน การรับรองความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า และช่วยสร้างความตระหนักรู้แก่ผู้ใช้งานเกี่ยวกับความปลอดภัยจากไฟรั่วได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนาเชิงพาณิชย์หรือการประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ที่ต้องการมาตรฐานความปลอดภัยสูง เช่น สถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า และระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในขนาดได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Erdei, M. Horgos, C. Lung, A. Pop-Vadean, and R. Muresan, "Frequency behavior of the residual current devices," *International Conference on Applied Sciences (ICAS2016)*, Hunedoara, Romania, 2016, pp. 1-7.
- [2] P. Czaja, "Influence of the Design of a Residual Current Device on Its Break Time," *Energies*, vol. 15, pp. 1-17, 2022.
- [3] Z. Erdei, C. Barz, A. Grib, and M. Grib, "Study of a Residual Current Device behavior for half-waves and break times correlated with the phase angle of tripping currents," *International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-6.
- [4] J. Satansup, N. Roongmuanpha, T. Pukkalanun, and W. Tangsirat, "Realization of lossy parallel inductance simulator using single VDGA and a grounded capacitor," *2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Khon Kaen, Thailand, 2022, pp. 1-4.
- [5] X. Luo, Y. Du, X. H. Wang, and M. L. Chen, "Tripping Characteristics of Residual Current Devices Under Nonsinusoidal Currents," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 47, No. 3, pp.1515-1521.
- [6] S. Czapp, "Testing Sensitivity of A-Type Residual Current Devices to Earth Fault Currents with Harmonics," *Sensors*, vol. 20, No. 7, pp.1-20, 2020.
- [7] T. Gruhn, J. Glenney, and M. Savostianik, "Type B Ground-Fault Protection on Adjustable Frequency Drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, pp. 934 – 939, 2020.