

การออกแบบวงจรทดสอบเพื่อประเมินความเสื่อมสภาพฉนวนของเครื่องอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้ากระแสสลับ

Design of a Circuit for Insulation Integrity Testing in AC EV Charging Systems

พลอยพรรณ จุมพรม¹ นพดล ฉาบแก้ว¹ และ อธิธรรม บุญยะกุล^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

s6601011812049@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์อัดประจุรถยนต์มากขึ้น โดยฉนวนของเครื่องอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า AC เป็นองค์ประกอบสำคัญ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบสภาพฉนวนไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อรับประกันความปลอดภัยของผู้ใช้งานและเพิ่มความน่าเชื่อถือของเครื่องอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า AC งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบเทคนิคการวัดค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าจำนวน 3 วิธี โดยประเมินประสิทธิภาพผ่านค่าความแม่นยำและค่าความคลาดเคลื่อน ผลการศึกษาพบว่าเทคนิค Multiple Shunt Method แสดงประสิทธิภาพสูงสุดในการวัดความต้านทานฉนวนไฟฟ้า และสามารถครอบคลุมช่วงการวัดที่กว้างกว่าเทคนิคอื่น

คำสำคัญ: เครื่องทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า กระแสรั่วไหล กระแสเกิน แบ่งตัวต้านทาน

Abstract

At present, the development of electric vehicle supply equipment (EVSE) has been increasing. The insulation of AC electric vehicle chargers is a critical component that requires regular inspection to ensure user safety and enhance the reliability of the chargers. This research presents the design of three measurement techniques for evaluating insulation resistance, with performance assessed in terms of accuracy and error. The results show that the Multiple Shunt Method demonstrates the highest efficiency in measuring insulation resistance and can cover a wider measurement range compared to other techniques.

Keywords: Insulation Resistance Tester, Leakage Current, Current Shunt, Resistive Divider

1. บทนำ

การใช้ระบบขนส่งทางบกด้วยพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจัดเป็นพลังงานสะอาด มีส่วนสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม[1] การใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าแสดงข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์เครื่องยนต์สันดาป ได้แก่ ระดับเสียงการทำงานที่เงียบ แรงบิดที่สูงกว่า และต้นทุนการบำรุงรักษาที่ต่ำกว่า

ปัจจุบันมีการส่งเสริมการใช้รถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และมีการพัฒนาอุปกรณ์อัดประจุรถยนต์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง[2] โดยฉนวนของเครื่องอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า AC ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของ EVSE ที่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบสภาพการเสื่อมและการทดสอบความต้านทานฉนวนไฟฟ้าเป็นระยะๆ โดยทั่วไปการตรวจสอบจะใช้เครื่องทดสอบความต้านทานฉนวนไฟฟ้าแบบอนาล็อกหรือแบบเข็ม[3] ซึ่งมีข้อจำกัดทั้งด้านความชัดเจนของการแสดงผลและความสะดวกในการใช้งาน เมื่อทดสอบที่ค่าความต้านทานสูงขึ้น แรงดันทดสอบอาจลดลงเมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีการออกแบบให้สามารถจ่ายแรงดันทดสอบได้คงที่แม้ภายใต้สภาวะโหลดที่มากขึ้น และออกแบบการวัดฉนวนให้มีประสิทธิภาพ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า[4-5] ได้แก่ ความเครียดทางความร้อน คือ การทำงานในสภาวะอุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไปทำให้ฉนวนไฟฟ้าเกิดการขยายตัวและหดตัว ส่งผลให้เกิดรอยร้าวและความเสียหาย ความเครียดทางไฟฟ้า คือ การเกิดแรงดันเกินอย่างฉับพลันจากสาเหตุต่างๆ เช่น ไฟฟ้า อาจทำให้ฉนวนไฟฟ้าเกิดการแตกร้าวหรือลอกหลุด ความเครียดทางสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความชื้นสามารถลดค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า การปนเปื้อนจากฝุ่นละออง และรังสีอัลตราไวโอเลตล้วนส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า

2. หลักการและทฤษฎี

การทดสอบความต้านทานฉนวนไฟฟ้าเป็นวิธีการประเมินคุณสมบัติความเป็นฉนวนของเครื่องอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า AC ฉนวนไฟฟ้าที่มีคุณภาพดีจะแสดงค่าความต้านทานฉนวนในระดับสูง โดยผลลัพธ์อยู่ในช่วงเมกะโอห์ม (MΩ) หรือกิกะโอห์ม (GΩ) ในทางตรงกันข้าม ฉนวนที่เสื่อมสภาพจะแสดงค่าความต้านทานที่ต่ำกว่า 1 MΩ ส่งผลให้เกิดกระแสรั่วไหล ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสี่ยงด้านความปลอดภัย

2.1 มาตรฐานและข้อกำหนดของฉนวนไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนเครื่องอัดประจุรถยนต์ไฟฟ้า AC ได้มีมาตรฐานและข้อกำหนดเฉพาะเพื่อควบคุมกระบวนการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล [6] มาตรฐาน IEC 61851-1 มีวัตถุประสงค์หลักในการกำหนดข้อกำหนดด้านความปลอดภัย การทำงาน และประสิทธิภาพของอัดประจุและองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง มาตรฐานนี้ระบุค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้าขั้นต่ำที่ยอมรับได้ วิธีการทดสอบ และเงื่อนไขสิ่งแวดล้อมในการทดสอบ เพื่อรับประกันความปลอดภัยของผู้ใช้งานและความเชื่อถือของระบบ

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

2.2 การวัดกระแสรั่วไหล

การวัดกระแสรั่วไหลผ่านฉนวนไฟฟ้าโดยใช้ตัวต้านทานชั้นที่ต่ออนุกรมกับฉนวนไฟฟ้า[7] เมื่อมีการต่ออนุกรม กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานมีค่าเท่ากันทุกตัวหรือแบ่งกระแส ปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะคำนวณตามกฎของโอห์ม และกำหนดแรงดันทดสอบเป็น 500 V DC หากฉนวนมีค่าความต้านทานมีค่าสูง กระแสจะมีค่าต่ำ ในทางกลับกันหากความต้านทานมีค่าต่ำ กระแสจะมีค่าสูง ซึ่งบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพหรือความเสียหายของฉนวน เนื่องจากกระแสรั่วมีค่าแปรผกผันกับค่าความต้านทาน

การตรวจจับสนกระแสรั่วไหลผ่านฉนวนไฟฟ้า สามารถวัดจากแรงดันตกคร่อมของตัวต้านทานชั้นที่ ซึ่งแรงดันตกคร่อมจะแปรผันตรงกับค่ากระแสรั่วที่ไหลผ่าน กระแสที่ไหลผ่านจะอยู่ในระดับมิลลิแอมป์ (mA) หรือต่ำกว่านั้นในช่วงไมโครแอมป์ (μ A) ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรขยายสัญญาณที่มีความแม่นยำสูงและมีคุณสมบัติกรองสัญญาณรบกวนที่ดี เพื่อป้องกันผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่มีอิทธิพลต่อการวัดกระแสขนาดเล็ก

2.3 ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการวัดความต้านทานฉนวน

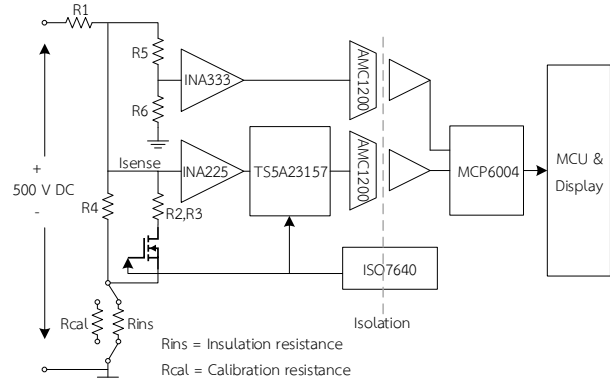
การวิเคราะห์ผลลัพธ์ ใช้ชุดข้อมูลการวัดจำนวน 10 ค่า ในการคำนวณ โดยประเมินด้วยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของผลต่างเชิงสัมบูรณ์ระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง พร้อมทั้งใช้ค่าความแม่นยำ (Accuracy) เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพในการวัด และใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เพื่อแสดงการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ย

3. การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ทดสอบฉนวนไฟฟ้า

การออกแบบประกอบด้วยบอร์ด 2 ส่วน ได้แก่ บอร์ดวัดค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า และบอร์ดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 500 V การหาค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าอาศัยหลักการวัดกระแสรั่วไหล โดยต่อตัวต้านทานชั้นที่อนุกรมกับฉนวนเพื่อตรวจจับสนกระแส จากนั้นหาค่ากระแสที่ไหลผ่านโดยการวัดแรงดันตกคร่อมบนตัวต้านทานชั้นที่ วิธีการวัดมี 3 รูปแบบ ได้แก่ Single Shunt Multiple Shunt และ Resistive Divider ดังแสดงในรูปที่ 1

บอร์ดวัดประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ การวัดกระแสรั่วและ การแบ่งแรงดัน การวัดกระแสรั่วมี 2 วิธี คือ Single Shunt และ Multiple Shunt โดยใช้ INA225 ตรวจจับสนแรงดันตกคร่อมของตัวต้านทานชั้นที่ ซึ่งสามารถเลือกอัตราขยายสัญญาณได้ผ่านขา GS0 และ GS1 หากไม่ต้องการขยายสัญญาณสามารถบายพาส INA225 ด้วยสวิตช์ขั้วล็อก TS5A23157 ที่ควบคุมด้วย DIP Switches วงจรถูกแยกกราวด์ด้วย ISO7640 (Digital Isolator) และสัญญาณวัดถูกส่งผ่าน AMC1200 (Isolation Amplifier) เพื่อแปลงสัญญาณผลต่างเป็นสัญญาณเดี่ยวด้วย MCP6004 จากนั้นส่งต่อไปยัง MCU เพื่อคำนวณและแสดงผลที่หน้าจอ OLED การแบ่งแรงดันใช้ INA333 ซึ่งเป็นแอมพลิฟายเออร์เครื่องมือนัดที่มีความแม่นยำสูง โดยลำดับการประมาณผลคล้ายกับวิธีวัดกระแสรั่ว สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนสัญญาณ INA225 และ INA333 ซึ่งการวัดกระแส (Current Shunt) ที่ตัว

ต้านทานชั้นที่ใช้ INA225 ส่วน INA333 ขยายสัญญาณผลต่างที่มีค่าต่ำและต้องการความแม่นยำสูง

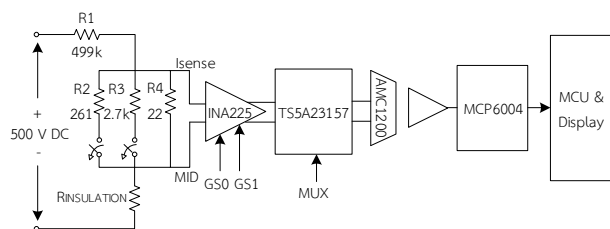


รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรวัดค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า

3.1 การวัดกระแสรั่วแบบตัวเดียว (Single Shunt)

วิธีวัดความต้านทานฉนวนไฟฟ้าแบบ Single Shunt อาศัยหลักการวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ตัวต้านทานชั้นที่เพียงตัวเดียวต่ออนุกรมกับฉนวนไฟฟ้า ดังรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่า R4 ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานชั้นที่ ขณะที่ R2 และ R3 ถูกเปิดวงจรด้วยมอสเฟตเพื่อป้องกันไม่ให้กระแสรั่วผ่าน

การวัดกระแสรั่วทำได้โดยการวัดแรงดันตกคร่อม R4 ซึ่งมีค่าสัญญาณค่อนข้างเล็ก จึงต้องใช้การขยายสัญญาณ โดยเลือกอัตราขยายได้หลายระดับ ได้แก่ 25V/V 50V/V 100V/V และ 200V/V ผ่านการตั้งค่าที่ขา GS0 และ GS1 ของ INA225 หลักจากนั้นสัญญาณที่ขยายแล้วจะถูกแยกกราวด์ด้วย AMC1200 ก่อนส่งไปประมวลผลที่ MCU และแสดงผลบนหน้าจอ OLED



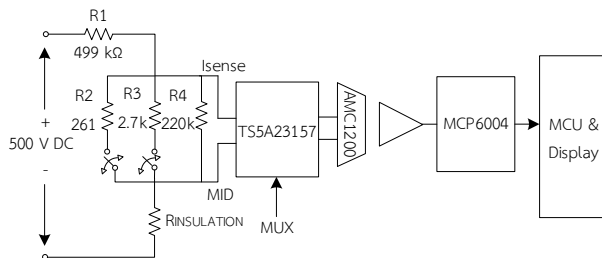
รูปที่ 2 การวัดกระแสรั่วแบบตัวเดียว

3.2 การวัดกระแสรั่วแบบหลายตัว

วิธีนี้ใช้หลักการวัดกระแสรั่วเช่นเดียวกับ Single Shunt ในรูปที่ 2 แต่มีความแตกต่างตรงที่ใช้ตัวต้านทานชั้นที่หลายตัวขนานกัน และสามารถเลือกใช้งานได้หลายค่าโดยการสลับผ่านมอสเฟตเพื่อรองรับการวัดค่าความต้านทานในช่วงที่กว้างขึ้นดังแสดงรูปที่ 3

การวัดทำได้โดยตรวจจับสนแรงดันตกคร่อมบนตัวต้านทานชั้นที่ โดยกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ใช้อัตราขยายสัญญาณของ INA225 เนื่องจาก

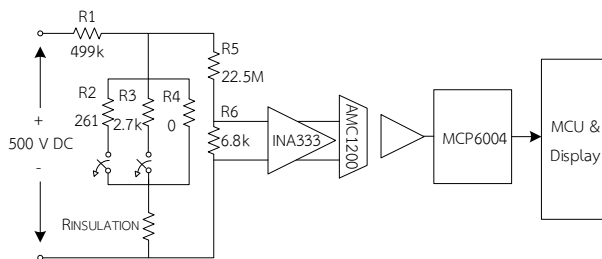
สลับค่าตัวต้านทานทำให้สัญญาณมีขนาดใหญ่มากพอ จึงสามารถขยายพาส INA225 และเลือกสัญญาณผ่าน MUX ที่ถูกกำหนดด้วย DIP Switches หลังจากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกแยกกราวด์ด้วย AMC1200 ก่อนส่งเข้าการคำนวณที่ MCU และแสดงผลบนจอ OLED



รูปที่ 3 การวัดกระแสชนิดแบบหลายตัว

3.3 การแบ่งแรงดัน

การวัดนี้อาศัยหลักการแบ่งแรงดันที่ตัวต้านทาน ซึ่งแตกต่างกับวิธีก่อนหน้านี้ที่ใช้หลักการวัดกระแสไหล โดยการแบ่งแรงดันจะช่วยลดระดับจากแรงดันสูงจาก 500 V DC ให้อยู่ในช่วงที่สามารถป้อนเข้าอินพุตของ INA333 ได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 4 การแบ่งแรงดัน

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าออสเฟตทั้งสองตัวถูกปิดการทำงานและเปลี่ยน R4 ให้เป็น 0 Ω ภายในวงจรมีชุดตัวต้านทานสำหรับการแบ่งแรงดันที่ต่อขนานกับขั้วไฟฟ้า โดยทำการวัดแรงดันตกคร่อมของตัวต้านทานและตรวจจับสัญญาณด้วย INA333 ที่มีความแม่นยำสูง หลังจากนั้นสัญญาณวัดจะถูกแยกกราวด์ด้วย AMC1200 ก่อนเข้าสู่กระบวนการคำนวณและแสดงผล โดยมีลำดับการทำงานคล้ายกับวิธีก่อนหน้านี้

4. ผลการทดสอบค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า

4.1 ผลการทดสอบด้วยวิธี Single Shunt

การทดสอบใช้อัตราขยายสัญญาณ 2 ค่า ได้แก่ Gain 25 และ Gain 200 โดยค่าความต้านทานต่ำกว่า 10 MΩ ใช้ Gain 25 เพื่อขยายแรงดันตกคร่อมที่อยู่ในระดับมิลลิโวลต์ ขณะที่ค่าความต้านทานสูงกว่า 10 MΩ ซึ่งให้แรงดันตกคร่อมต่ำกว่ามิลลิโวลต์ ต้องใช้อัตราขยายสูงขึ้น (Gain 200) เพื่อให้ INA225 ตรวจวัดได้อย่างแม่นยำ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงประสิทธิภาพของวิธี Single Shunt

Gain	X_t (MΩ)	MAE (Ω)	Accuracy (%)	SD
25	0.59	24881.255	95.783	218.010
	2.23	32951.778	98.522	27919.188
	3.01	34413.185	98.857	2774.808
	5.67	42681.042	99.247	4309.994
	6.67	62447.621	99.064	4164.781
	9.38	64616.420	99.311	21230.306
	14.8	417532.987	97.179	4730.433
	22.2	393184.020	98.229	152.000
	30.3	454883.321	98.499	18669.611
	40.9	558065.782	98.636	24921.268
200	52.0	278831.661	99.464	51696.839
	63.0	647381.494	98.972	58128.495
	73.0	136278.685	99.813	79661.461
	84.0	405906.349	99.517	92004.353
	93.0	1448890.489	98.442	146676.333
	105.0	326592.848	99.689	103920.382

จากตารางที่ 1 พบว่า ที่ Gain 25 ความแม่นยำอยู่ในช่วง 95.78–99.31% โดยค่า MAE แม้จะเพิ่มขึ้นตาม X_t แต่ยังคงต่ำเมื่อเทียบกับระดับเมกะโอมของ X_t ขณะที่ค่า SD แปรผันตามช่วงค่า X_t สำหรับ Gain 200 ความแม่นยำเกิน 97% และมากกว่า 99% ในช่วงค่าความต้านทานสูง โดยมีแนวโน้มที่ค่า MAE และ SD เพิ่มขึ้นตาม X_t

4.2 ผลการทดสอบด้วยวิธี Multiple Shunt

การแบ่งช่วงการวัดเพื่อวัดค่าความต้านทานฉนวนได้ครอบคลุมช่วงกว้าง โดยยังคงให้สัญญาณเอาต์พุตของ AMC1200 ไม่ต่ำกว่า 250 mV ได้แก่ ช่วงที่ 1 คือ 0 – 3MΩ ช่วงที่ 2 คือ 3.1MΩ - 39MΩ และช่วงที่ 3 คือ 40MΩ - 105MΩ

ตารางที่ 2 แสดงประสิทธิภาพของวิธี Multiple Shunt

Range	X_t (MΩ)	MAE (Ω)	Accuracy (%)	SD
1	0.59	6441.142	98.908	134.568
	2.23	47064.004	97.890	876.229
	3.01	36710.753	98.780	2073.468
	5.67	23925.964	99.578	1915.213
	6.67	6766.797	99.899	2971.898
	9.38	5117.603	99.945	4749.488
2	14.8	37827.206	99.744	8940.991
	22.2	12155.986	99.945	15980.813
	30.3	68771.298	99.773	38299.259
	40.9	866024.272	97.883	59134.279
	52.0	114589.494	99.780	66072.055
	63.0	222368.234	99.647	122758.015
3	73.0	195537.585	99.732	136508.971
	84.0	363742.921	99.567	150806.270
	93.0	1378227.013	98.518	229509.266
	105.0	172210.627	99.836	131004.261

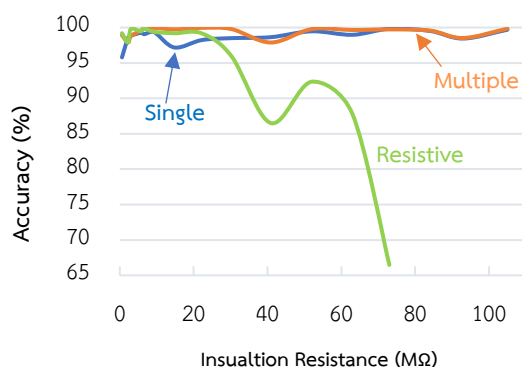
จากตารางที่ 2 พบว่าช่วงที่ 1 ความแม่นยำอยู่ที่ 97.89%-98.91% และค่า SD เพิ่มขึ้นตามค่า X_t ช่วงที่ 2 ความแม่นยำสูงกว่า 99.5% โดยมีค่า MAE และ SD อยู่ในระดับที่ต่ำ ส่วนช่วงที่ 3 ความแม่นยำยังสูงกว่า 97% แต่ค่า MAE และ SD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า X_t

4.3 ผลการทดสอบด้วยวิธี Resistive Divider

ในตารางที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่าไม่สามารถวัดค่าความต้านทานที่สูงมากได้ เนื่องจากความแม่นยำลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยช่วงการวัดที่มีประสิทธิภาพคือไม่เกิน 22 MΩ ซึ่งมีความแม่นยำเฉลี่ยประมาณ 99% ขณะที่ค่า MAE และ SD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า X_t

ตารางที่ 3 แสดงประสิทธิภาพของวิธี Resistive Divider

X_t (MΩ)	MAE (Ω)	Accuracy (%)	SD
0.59	4709.000	99.202	600.360
2.23	47052.000	97.890	989.532
3.01	6162.000	99.795	1707.817
5.67	30474.000	99.463	3490.703
6.67	11506.000	99.827	7192.577
9.38	58174.000	99.380	22238.586
14.8	119601.600	99.192	27836.536
22.2	183067.200	99.175	195384.854
30.3	1238864.000	95.911	1193644.426
40.9	5520365.500	86.503	417433.747
52.0	3980076.100	92.346	627547.972
63.0	7690569.200	87.793	664286.319
73.0	24475795.800	66.472	563843.008



รูปที่ 6 แสดงความแม่นยำของการวัดเปรียบเทียบกันทั้ง 3 วิธี

จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานฉนวนไฟฟ้ากับความแม่นยำ โดยวิธีการวัดแสดงตามกราฟเส้นทั้งสามสี พบว่าเส้นสีน้ำเงินและสีส้มมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยในช่วงแรกมีความแม่นยำอยู่ที่ประมาณ 95-100% และยังคงค่อนข้างคงที่ที่ระดับ 97-100% เมื่อค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น สำหรับกราฟสีเขียวช่วงต้นมีค่าความแม่นยำใกล้เคียงกับกราฟสีส้มและสีน้ำเงิน แต่เมื่อค่าความต้านทานสูงขึ้นประมาณ 30 MΩ ความแม่นยำจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าความต้านทานที่

40 MΩ จากนั้นความแม่นยำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ค่าความต้านทาน 50 MΩ และลดลงอย่างรวดเร็วต่ำกว่า 70% เนื่องจากค่าความต้านทานฉนวนสูงกว่าค่าความต้านทานของ R5 และ R6 ดังรูปที่ 4 แรงดันตกคร่อมที่ R6 จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ส่งผลให้อุปกรณ์ตรวจวัดไม่สามารถแยกความแตกต่างของค่าความต้านทานฉนวนได้อย่างแม่นยำ

5. สรุป

ผลการทดสอบความต้านทานของฉนวนไฟฟ้าทั้งสามวิธี แสดงให้เห็นว่าวิธี Single Shunt และ Multiple Shunt มีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการวัดที่สูงและคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Resistive Divider ซึ่งพบว่าที่ค่าความต้านทานสูง ความแม่นยำและประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ค่า SD เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมากกว่าวิธี Shunt โดยภาพรวมวิธี Multiple Shunt ให้ผลการวัดที่มีประสิทธิภาพและมีความคงที่ที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Yasko, A. Balint, et al., "Future workplace EV charging architectures; DC and AC charging choices," *2023 IEEE International Conference on Electrical System for Road Vehicle & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Venice, Italy, 2023, pp. 1–7.
- [2] T. Thanakam and Y. Kumsuwan, "A Novel On-Board Battery Charger Configuration Based on Nine-Switch Converter fed Open-End Winding AC Motor Drive for Plug-In Electric Vehicles," *2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Gyeongju, Korea, 2021, pp. 988-991.
- [3] X. Huang, Y. Wang, et al., "Intelligent design of insulation tester," *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, Yichang, China, 2011, pp. 2287-2290.
- [4] M. Choudhary, M. Shafiq, et al., "A Review of Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables" *Energies*, 2022, pp. 3408, doi : 10.3390/en15093408
- [5] M. Chafai, L. Refoufi and H. Bentarzi, "Medium Induction Motor Winding Insulation Protection System Reliability Evaluation and Improvement Using Predictive Analysis," *6th WSEAS Int. Conf. on Circuit System Electronics Control & Signal Processing*, Cairo, Egypt, 2007, pp.156-161.
- [6] IEC 61851-1 : Electric vehicle conductive charging system Part 1 : General requirements. 3rd ed, 2017.
- [7] S. Ziegler, R. C. Woodward, et al., "Current Sensing Techniques : A Review," *IEEE Sensors Journal*, 2009, vol. 9, no. 4, pp. 354-376.