



การศึกษาผลกระทบของสายโคแอกเซียลในระบบการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง
ความถี่ 100 Hz – 10 kHz ด้วยเครื่องวัด LCR



โดย
นางสาวธมลวรรณ นันทาทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาผลกระทบของสายโคแอกเซียลในระบบการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า
กระแสสลับในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz ด้วยเครื่องวัด LCR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผน ก แบบ ก 2
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

INVESTIGATION OF THE COAXIAL CABLES EFFECTS ON AC RESISTANCE
MEASUREMENT WITHIN THE FREQUENCY RANGE OF 100 HZ – 10 KHZ USING
AN LCR METER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
Department of ELECTRICAL ENGINEERING
Academic Year 2025
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การศึกษาผลกระทบของสายโคแอกเซียลในระบบการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz ด้วยเครื่องวัด LCR
โดย	นางสาวธมลวรรณ นันทาทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผนก ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร. พลอยบุศรา โกมาสังข์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. จุฑารัตน์ ทานะรมณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจรรย์เนียร) เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ระพีพันธ์ แก้วอ่อน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร. พลอยบุศรา โกมาสังข์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. จุฑารัตน์ ทานะรมณ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(อาจารย์ ดร. อรทัย วัชรฤชกรณ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรพล จิรจรีต)

660920032 : วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : LCR Meter, อิมพีแดนซ์ปรสิต, สายโคแอกเชียล, การชดเชยค่าสาย, ตัวต้านทานไฟฟ้า กระแสสลับ

นางสาว ชมลวรรณ นันทิทอง: การศึกษาผลกระทบของสายโคแอกเชียลในระบบการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz ด้วยเครื่องวัด LCR อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร. พลอยบุศรา โกมาสังข์

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของอิมพีแดนซ์ปรสิตในสายโคแอกเชียลชนิด RG-58/U ต่อความถูกต้องของการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz โดยใช้เครื่องวัด LCR รุ่น Agilent E4980A ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ $(23.0 \pm 5.0) ^\circ\text{C}$ การวัดดำเนินการกับตัวต้านทานจำนวน 5 ค่า ได้แก่ 1 โอห์ม 10 โอห์ม 100 โอห์ม 10 กิโลโอห์ม และ 12 กิโลโอห์ม โดยใช้ระบบการวัดแบบสี่สายโคแอกเชียล ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบผลการวัดระหว่างกรณีที่ทำให้การชดเชยค่าสายวัดก่อนการวัด (Cable Corr.) และกรณีไม่ชดเชยค่าสาย (Cable Effect) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอิมพีแดนซ์ปรสิตในสายโคแอกเชียลมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อโหลดที่มีค่าความต้านทานต่ำ (1 โอห์ม – 100 โอห์ม) โดยที่ความถี่สูงพฤติกรรมรวมของสายและโหลดมีลักษณะคล้ายตัวเหนี่ยวนำ ในขณะที่สำหรับโหลดที่มีค่าความต้านทานสูงกว่า (10 กิโลโอห์ม – 12 กิโลโอห์ม) ผลกระทบมีน้อยแต่แสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุอย่างชัดเจนเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการพิจารณาอิมพีแดนซ์ปรสิตในสายโคแอกเชียลต่อความแม่นยำของการวัด โดยเฉพาะในการใช้งานโหมดการชดเชยค่าสายอัตโนมัติของเครื่องวัด LCR อีกทั้งยังให้ข้อมูลเชิงปริมาณที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงกระบวนการชดเชยและการพัฒนาระบบการวัดมาตรฐานวิทยาในอนาคต

660920032 : Major ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Keyword : LCR Meter, Parasitic Impedance, Coaxial Cable, Cable Compensation, AC Resistor

Miss Thamonwan NATTEETONG : Investigation of the Coaxial Cables Effects on AC Resistance Measurement within the Frequency Range of 100 Hz – 10 kHz Using an LCR Meter Thesis advisor : Dr. Ploybussara Gomasang

This research investigates the effects of parasitic impedance in RG-58/U coaxial cables on the accuracy of AC resistance measurements within the frequency range of 100 Hz to 10 kHz using an Agilent E4980A LCR meter under a controlled temperature room (23.0 ± 5.0) °C. The measurements were performed on five resistors with nominal values of 1 ohm, 10 ohm, 100 ohm, 10 kilohm, and 12 kilohm using a four-terminal coaxial configuration. The study compares measurement results between two conditions: with cable compensation (Cable Corr.) and without cable compensation (Cable Effect). Experimental results reveal that the parasitic impedance of the coaxial cable significantly affects low-resistance loads (1 ohm – 100 ohm), where the combined behavior of the cable and load exhibits inductive characteristics at higher frequencies. In contrast, for higher resistance loads (10 kilohm – 12 kilohm), the influence is minimal but exhibits a distinct capacitive behavior as the frequency increases. These findings highlight the importance of considering the parasitic impedance of coaxial cables in ensuring measurement accuracy, particularly when using the automatic cable compensation mode of LCR meters. Moreover, the results provide quantitative insights useful for improving impedance compensation methods and for developing precise metrological measurement systems in future studies.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับปรึกษาจากอาจารย์ ดร.พลอยบุศรา โกมาสังข์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และดร.จุฑารัตน์ ทานะรมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และครธอาจารย์กรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ แก้วอ่อน ประธานสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.อรทัย วิชกรฤชกรณ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจ ริต กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้คำปรึกษา ปรับปรุง และแนวทางการแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์ รวมถึงการนำเสนอผลงาน และกระบวนการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และเจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านการให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกต่าง ๆ ต่อการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ธมลวรรณ นันทาทอง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ค่าความต้านทานจากปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ (Quantum Hall Effect, QHE).....	4
2.2 สายวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ.....	6
2.3 เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุ และค่าความต้านทานที่แม่นยำ (Precision LCR Meter).....	12
2.3.1 หลักการวัดค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุ และค่าความต้านทานของเครื่องวัด LCR ...	12
2.3.2 ฟังก์ชันการชดเชย (Compensation function).....	13
2.3.4 ระบบการวัด.....	18
2.4 ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Resistor).....	20
2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	22

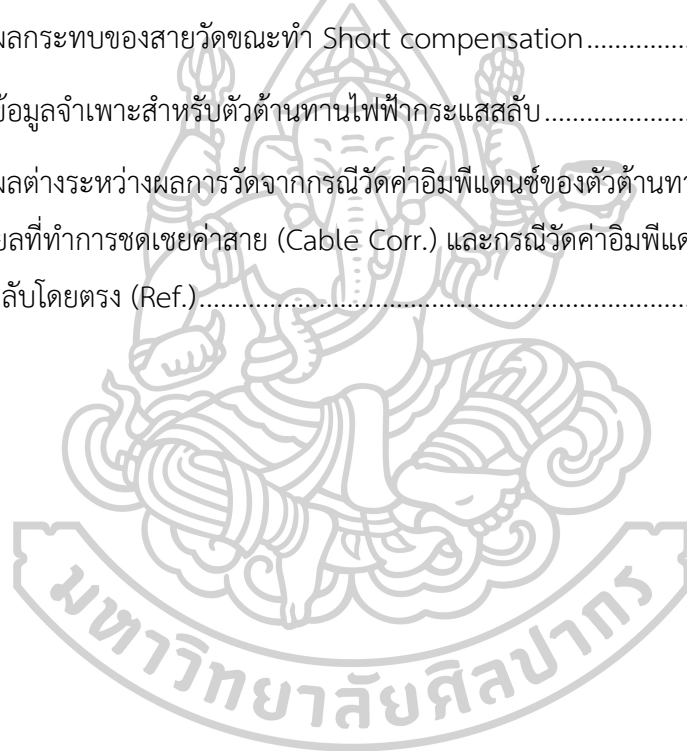
บทที่ 3	การศึกษาคุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเชียล RG-58/U	24
3.1	การศึกษาคุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเชียล โดยการวัดสายตัวนำด้านในและด้านนอก ขณะไม่มีการต่อโหลดสำหรับกรณีพิจารณาที่มีการสูญเสียในสายส่ง	27
3.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้.....	27
3.1.2	การตั้งค่า และการติดตั้งเครื่องมือ.....	27
3.1.3	ผลการวัดและวิเคราะห์.....	30
บทที่ 4	การศึกษาการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U.....	31
4.1	การศึกษาการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U โดยเชื่อมต่อโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω 10Ω 100Ω $10 \text{ k}\Omega$ และ $12 \text{ k}\Omega$	31
4.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้.....	31
4.1.2	การตั้งค่า และการติดตั้งเครื่องมือ.....	31
4.1.3	ผลการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U	35
บทที่ 5	การศึกษาผลการชดเชยค่าในสายวัดโคแอกเชียล RG-58/U ของเครื่องวัด LCR (Cable Compensation).....	39
5.1	การศึกษาการชดเชยค่าในสายวัด (Cable Compensation) ของเครื่องวัด LCR โดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ขณะเชื่อมต่อโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω 10Ω 100Ω $10 \text{ k}\Omega$ และ $12 \text{ k}\Omega$ ที่ช่วงความถี่ $100 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$	40
5.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้.....	40
5.1.2	การตั้งค่า และการติดตั้งเครื่องมือ.....	40
5.1.3	ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ โดยปราศจากสายโคแอกเชียล และการวัดผ่านสายโคแอกเชียล	42
บทที่ 6	การศึกษาผลกระทบของสายโคแอกเชียล RG-58/U ต่อผลจากระบบวัดจากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยใช้เครื่องวัด LCR.....	51
6.1	การศึกษาอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเชียล RG-58/U โดยใช้ เครื่องวัด LCR วัดค่าอิมพีแดนซ์ขณะเชื่อมต่อโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω 10Ω 100Ω $10 \text{ k}\Omega$ และ $12 \text{ k}\Omega$	51

6.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้.....	51
6.1.2 การตั้งค่า และการติดตั้งเครื่องมือ.....	51
6.1.3 ผลลัพธ์การศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเชียล RG-58/U	52
บทที่ 7 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	59
7.1 บทสรุป	59
รายการอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	73
ภาคผนวก ค.....	78
ประวัติผู้เขียน	80



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้า.....	11
ตารางที่ 2.2 การทำ Open compensation (Y_o).....	15
ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของสายวัดขณะทำ Open compensation.....	16
ตารางที่ 2.4 การทำ Short compensation (Z_s).....	16
ตารางที่ 2.5 ผลกระทบของสายวัดขณะทำ Short compensation.....	16
ตารางที่ 2.6 ข้อมูลจำเพาะสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ.....	22
ตารางที่ 5.1 ผลต่างระหว่างผลการวัดจากกรณีวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับผ่านสายโคแอกเซียลที่ทำการชดเชยค่าสาย (Cable Corr.) และกรณีวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรง (Ref.).....	50



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรทั่วไปของสายวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ [9].....	6
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของสายวัดโคแอกเชียล	10
รูปที่ 2.3 เครื่องวัด LCR [30]	12
รูปที่ 2.4 หลักการวัดสำหรับ LCR meter.....	13
รูปที่ 2.5 วงจรอย่างง่ายแสดงค่าตักค้างของอุปกรณ์ทดสอบ	14
รูปที่ 2.6 ระบบการวัดแบบ 2 สาย.....	19
รูปที่ 2.7 ระบบการวัดแบบ 4-Wire	19
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ	20
รูปที่ 2.9 ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับชนิด ก.) ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะและ ข.) ตัวต้านทาน แบบฟิล์มคาร์บอน	21
รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์จำเพาะสำหรับส่งข้อมูลในอุดมคติ	24
รูปที่ 3.2 ผลการวัดค่าลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะเทียบกับความถี่ [41]	26
รูปที่ 3.3 การชดเชยค่าเครื่องวัด LCR แบบ ก.) เปิดวงจรและ ข.) ปิดวงจร	28
รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ ก.) ปลายสายเปิดวงจร และ ข.) ปลายสายปิดวงจร	29
รูปที่ 3.5 ผลการวัดค่าลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเชียลกรณีมีการสูญเสียของสาย	30
รูปที่ 4.1 ระบบการวัดค่าความต้านผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U แบบ 4-Wire.....	32
รูปที่ 4.2 ระยะห่างในการติดตั้งสายโคแอกเชียล	33
รูปที่ 4.3 การชดเชยค่าสาย ก.) แบบเปิดวงจรและ ข.) แบบปิดวงจร	34
รูปที่ 4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 Ω	36
รูปที่ 4.5 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 Ω	36
รูปที่ 4.6 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 100 Ω	37

รูปที่ 4.7 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 kΩ..... 37

รูปที่ 4.8 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 12 kΩ..... 38

รูปที่ 5.1 ภาพรวมการวัดค่าความต้านโดยปราศจากสายโคแอกเซียล ก.) ด้านหน้า และ ข.) ด้านข้าง
..... 41

รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์ 45

รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์
..... 46

รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 100 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์
..... 47

รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 kΩ โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์
..... 48

รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 12 kΩ โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์
..... 49

รูปที่ 6.1 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์ 54

รูปที่ 6.2 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์
..... 55

รูปที่ 6.3 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 100 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์
..... 56

- รูปที่ 6.4 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $10\text{ k}\Omega$ โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์
..... 57
- รูปที่ 6.5 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัว
ต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $12\text{ k}\Omega$ โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์
..... 58



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบการวัดค่าความต้านทานควอนตัมฮอลล์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating-Current Quantum Hall Resistance: AC QHR) เป็นมาตรฐานปฐมภูมิที่ได้รับการยอมรับในงานมาตรวิทยาต้านอิมพีแดนซ์ ซึ่งสามารถสร้างค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เชื่อมโยงโดยตรงกับค่าคงที่พื้นฐานของธรรมชาติ ได้แก่ ค่าคงที่ของพลังค์ h และประจุอิเล็กตรอน e ตามความสัมพันธ์เชิงควอนตัม $R_k = h/e^2$ [1] ระบบ AC QHR ให้ค่าความต้านทานอ้างอิงที่มีความเสถียรและความถูกต้องสูงภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำมาก (Cryogenic Temperature) และสนามแม่เหล็กแรงสูง ซึ่งระบบก๊าซอิเล็กตรอนสองมิติ (Two-Dimensional Electron Gas: 2DEG) จะแสดงลักษณะค่าความต้านทานฮอลล์เชิงปริมาณอย่างชัดเจน [2] ด้วยคุณลักษณะด้านความเที่ยงตรงและความสามารถในการทำซ้ำได้สูง ระบบ AC QHR จึงได้รับการยอมรับให้เป็นรากฐานสำคัญในการสร้างและถ่ายทอดค่ามาตรฐานความต้านทานในห้องปฏิบัติการมาตรวิทยาทางไฟฟ้าทั่วโลก ในทางปฏิบัติของงานมาตรวิทยา การถ่ายทอดค่าความต้านทานมาตรฐานจากระบบ AC QHR ไปยังค่ามาตรฐานใช้งาน (Working Standards) จำเป็นต้องอาศัยความถูกต้องและเสถียรภาพของเฟสในระดับสูงมาก ความแม่นยำของการถ่ายทอดอิมพีแดนซ์นี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของระบบ QHR เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับเส้นทางการส่งสัญญาณ โดยเฉพาะสายวัดและขั้วต่อที่ใช้ในระบบ [3, 4] ความไม่สมบูรณ์หรืออิมพีแดนซ์ปรสิต (Parasitic Impedance) ที่เกิดขึ้นตามเส้นทางการวัดอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Deviation) โดยเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำ 100 เฮิร์ตซ์ (Hertz, Hz) ถึงระดับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ (Kilohertz, kHz) ซึ่งเป็นช่วงที่พบในงานด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความแม่นยำสูง [5-8] และยังเป็นช่วงความถี่ที่มักใช้ในการสอบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Resistance) และอาจได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ผลกระทบที่ผิว (Skin Effect) ผลกระทบจากความใกล้ชิด (Proximity Effect) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า [9]

สายโคแอกเซียลมีบทบาทสำคัญในระบบการวัดทางไฟฟ้า มักถูกใช้อย่างแพร่หลายในระบบการวัด AC QHR ซึ่งสามารถส่งสัญญาณในระยะทางไกลโดยไม่สูญเสียคุณภาพด้วยโครงสร้างของโคแอกเซียลที่มีตัวนำไฟฟ้าอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยฉนวนไดอิเล็กทริกและแผ่นป้องกันตัวนำด้านนอก [10] เนื่องจากมีคุณสมบัติในการป้องกันสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference, EMI) และคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Interference, RFI) ได้

อย่างมีประสิทธิภาพ [11] [12] ทั้งยังมีค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic Impedance) ที่ถูกควบคุมไว้อย่างแม่นยำ ทำให้ลดสัญญาณสะท้อนและการรบกวนจากภายนอกได้

อย่างไรก็ตาม แม้สายโคแอกเซียลจะมีข้อดีด้านการออกแบบ แต่ก็ยังคงมีอิมพีแดนซ์ปรสิตในตัวเองซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของวัสดุ รูปทรงของวงจร หรือลักษณะของสายสัญญาณ ได้แก่ ความต้านทานอนุกรม (Series Resistance) ค่าความเหนี่ยวนำแบบกระจาย (Distributed Inductance) และค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำ (Inter-Conductor Capacitance) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงการกระจายของแรงดันและกระแสตามความยาวสายได้ เนื่องจากความจุระหว่างตัวนำ แกนกลางและแผ่นป้องกันด้านนอก รวมกับความเหนี่ยวนำแบบกระจายตลอดความยาวของสาย ก่อให้เกิดอิมพีแดนซ์ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ โดยเฉพาะในย่านความถี่ต่ำซึ่งรีแอกแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำและเชิงความจุมีค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างมาก [13] อิมพีแดนซ์ปรสิตเหล่านี้ทำให้อิมพีแดนซ์รวมเบี่ยงเบนไปจากค่าที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดการบิดเบือนของสัญญาณอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้และกระแสรั่วไหลที่อาจเกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดอ่อน [14, 15] และทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้ของอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ (Device Under Test: DUT) แตกต่างจากค่าจริง และก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัด [16] หากไม่มีการชดเชยอย่างเหมาะสม สายโคแอกเซียลชนิด RG-58/U เป็นสายที่นิยมใช้ในการวัดความแม่นยำสูงและในการถ่ายโอนอิมพีแดนซ์ในงานมาตรฐานวิทยา เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ 50 Ω ความยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมของอิมพีแดนซ์ปรสิตในสาย RG-58/U ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ โดยเฉพาะเมื่อใช้ในการวัดตัวต้านทานกระแสสลับในช่วง 100 Hz – 10 kHz อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากค่าความต้านทานจริงได้ ดังนั้น ควรพิจารณาผลกระทบของอิมพีแดนซ์ปรสิตทำความเข้าใจผลกระทบเหล่านี้ ซึ่งมีความสำคัญต่อการเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวัด และต่อการพัฒนาเทคนิคการชดเชย (Compensation Technique) ที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในระบบ AC QHR [3]

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอิมพีแดนซ์ปรสิตในสายโคแอกเซียลผ่านการวัดค่าอิมพีแดนซ์อย่างเป็นระบบของโหลดต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Resistor) 1 โอห์ม (Ohm, Ω) 10 Ω 100 Ω 10 k Ω และ 12 k Ω เชื่อมต่อการวัดผ่านสายโคแอกเซียลแบบ 4-Wire การวัดจะดำเนินการโดยใช้เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุ และค่าความต้านทานที่แม่นยำ (Precision LCR Meter) ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz เพื่อประเมินอิทธิพลของอิมพีแดนซ์ของสายที่มีต่อค่าความต้านทานที่วัดได้ และเพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างระบบที่มีการชดเชยกับระบบที่ไม่มีการชดเชย ผลลัพธ์ที่ได้คาดว่าจะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของผลการวัดที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนจากอิมพีแดนซ์ปรสิตและเพื่อเป็นแนวทางสำคัญสำหรับการชดเชยอิมพีแดนซ์ปรสิตในการใช้งานที่สามารถชดเชยได้ ซึ่งเป็นการวางรากฐานสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสูญเสียของสายเคเบิลที่ส่งผลกระทบต่อระบบการวัด AC

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาระบบการวัดค่าความต้านทานควอนตัมฮอลล์กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ AC QHR และสายวัด โดยสอดคล้องกับความถี่ที่ช่วง 100 Hz – 10 kHz และกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในระดับ μA ถึง mA

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับผ่านสายวัดที่ช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz โดยใช้เครื่องวัด LCR

1.2.3 เพื่อศึกษาผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับผ่านสายวัดที่ช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz โดยใช้เครื่องวัด LCR

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 โหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ 1 Ω 10 Ω 100 Ω 10 k Ω และ 12 k Ω

1.3.2 อุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการ (23.0 \pm 5.0) $^{\circ}\text{C}$

1.3.2 ช่วงความถี่ใช้งาน 100 Hz – 10 kHz

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แสดงถึงปัจจัยเนื่องจากสายวัดโคแอกเซียลที่ส่งผลกระทบต่อผลการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่ช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz

1.4.2 นำไปสู่การชดเชยค่าเนื่องจากค่าของผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ผ่านสายโคแอกเซียล

1.4.3 ทราบถึงคุณลักษณะของการค่าอิมพีแดนซ์แฝงในสายวัดจากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ผ่านสายโคแอกเซียลที่ช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz

บทที่ 2

ทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาที่สำคัญ 4 ส่วน คือ ค่าความต้านทานจากปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ (Quantum Hall Effect, QHE) สายวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุ และค่าความต้านทานที่แม่นยำ (Precision LCR Meter) และตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งถูกนำเสนออย่างเป็นลำดับ ดังนี้

2.1 ค่าความต้านทานจากปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ (Quantum Hall Effect, QHE)

ความต้านทานควอนตัมฮอลล์ (Quantum Hall Resistance, QHR) ได้รับการยอมรับว่าเป็นรากฐานของการอ้างอิงมาตรฐานความต้านทาน เนื่องจากค่าที่ได้มีความแม่นยำสูงและสอดคล้องกับค่าคงที่พื้นฐานของธรรมชาติ [1] โดยเริ่มแรก QHR ถูกนำมาใช้สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้ได้มาซึ่งค่าความต้านทานควอนตัมฮอลล์กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Quantum Hall Resistance, DC QHR) [1, 17] แต่ต่อมาได้มีการขยายสู่การวัดในระบบกระแสสลับเพื่อสร้างการรับรู้ถึงค่าความต้านทานควอนตัมฮอลล์กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current Quantum Hall Resistance, AC QHR) เพื่อรองรับการถ่ายโอนค่ามาตรฐานอิมพีแดนซ์ [18] ซึ่งครอบคลุมทั้งความต้านทานไฟฟ้า ความจุไฟฟ้า และความเหนี่ยวนำไฟฟ้า [19] การวัด AC QHR มีพื้นฐานจากทฤษฎีอิมพีแดนซ์ที่ขยายจาก QHR เดิม โดยค่าความต้านทานที่วัดได้จะถูกนิยามจากสมการ (2.1)

$$R_H = \frac{h}{ie^2} \quad (2.1)$$

ซึ่ง R_H คือความต้านทานควอนตัมฮอลล์ หรือ QHR

h คือค่าคงที่พลังค์

e คือประจุอิเล็กตรอน

i คือเลขควอนตัมลำดับชั้นฮอลล์

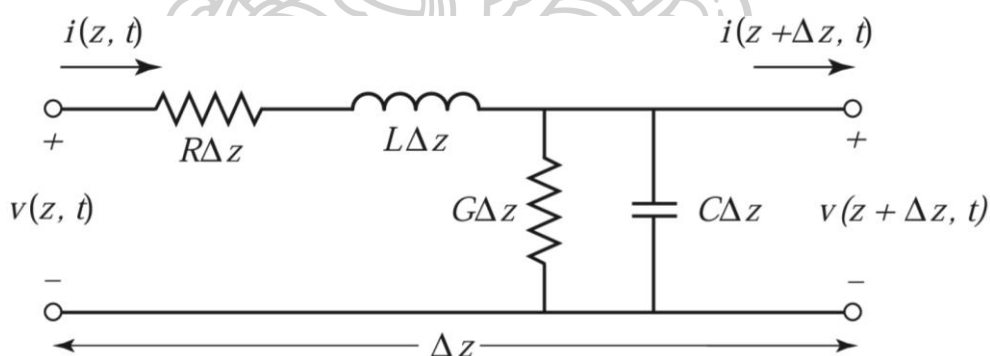
โดยถูกจำลองขึ้นในสภาวะการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงทั้งความต้านทานและรีแอกแตนซ์จากความเหนี่ยวนำและความจุแฝงของอุปกรณ์เชื่อมต่อ [19, 20] ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของค่า AC QHR

ระบบการถ่ายโอนค่าจาก AC QHR ไปยังตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับมาตรฐานถูกทำในย่านความถี่ 100 Hz – 10 kHz ประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ ได้แก่ อุปกรณ์ QHR ซึ่งมักสร้างจาก กราฟีน (Graphene) [21] และทำงานในสภาพที่ควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กต่ำกว่าการใช้ GaAs/AlGaAs [17] และอุณหภูมิที่ระดับ 4.2 K เพื่อให้เกิดบริเวณแนวราบ (Plateau) ของค่าความต้านทานที่เสถียร [21] การเปรียบเทียบค่าระหว่าง AC QHR และตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับมาตรฐานมักดำเนินการผ่านสะพานอิมพีแดนซ์ (impedance bridge) ซึ่งอาจเป็นวงจรสะพานโคแอกเซียลแบบดิจิทัล (Digital Coaxial Bridge) หรือวงจรสะพานควอดราเจอร์ (Quadrature Bridge) ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ [22] การเชื่อมต่อวงจรใช้มาตรฐานแบบสี่ขั้ว (4-terminal pair) เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากความต้านทานของสายและจุดเชื่อมต่อ การเลือกใช้สายโคแอกเซียลคุณภาพสูงช่วยลดการสูญเสียและการเหนี่ยวนำปรสิตที่อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการวัด [23] ในทางปฏิบัติ การถ่ายโอนค่ามาตรฐานจาก AC QHR ไม่ได้จำกัดเพียงการเปรียบเทียบกับตัวต้านทานมาตรฐานค่าเดียว แต่ยังสามารถขยายสู่ตัวต้านทานมาตรฐานหลายค่า เช่น 1 k Ω 10 k Ω และ 100 k Ω เพื่อรองรับการใช้งานที่หลากหลาย [24] อย่างไรก็ตาม เพื่อความถูกต้อง การถ่ายโอนค่ามาตรฐานต่าง ๆ จำเป็นต้องพิจารณาผลของความถี่ เนื่องจากตัวต้านทานแต่ละค่าอาจมีคุณลักษณะปรสิต (Parasitic Characteristic) ที่แตกต่างกัน เช่น ความเหนี่ยวนำในตัวนำหรือความจุแฝงในโครงสร้าง สำหรับตัวต้านทานค่าต่ำ มักไวต่อการเหนี่ยวนำของสาย ขณะที่ตัวต้านทานค่าสูงในระดับ k Ω มักมีผลของความจุแฝงเด่นชัด [25] นอกจากนี้ สายโคแอกเซียลที่ใช้จะมีผลต่อค่าที่วัดเช่นกัน เนื่องจากค่าความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุปรสิตของสายจะส่งผลชัดเจนขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น [3] เพื่อแก้ไขปัญหาจึงต้องใช้สายที่ออกแบบพิเศษที่เหมาะสมกับระบบการวัด และอาจใช้การประเมินค่าพารามิเตอร์ของสายเพื่อนำไปคำนวณชดเชยในการวัด

2.2 สายวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

ในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่ครอบคลุมตั้งแต่ย่านความถี่ต่ำ 0 Hz จนถึงความถี่สูง 1 GHz เช่น การวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า หรืออิมพีแดนซ์ การเลือกใช้สายวัด (Measurement Cable) มีบทบาทสำคัญต่อความถูกต้องของผลการวัด ความผิดพลาดที่เกิดจากสายวัดอาจมาจากการสูญเสีย (Loss) การสะท้อนสัญญาณ (Reflection) และการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก (EMI) [9] ดังนั้น การออกแบบและการเลือกใช้สายวัดที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อความน่าเชื่อถือผลที่ได้จากการวัด

โดยปกติ โครงสร้างของสายวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับถูกออกแบบ โดยมีตัวนำไฟฟ้าอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยฉนวนไดอิเล็กทริกและแผ่นป้องกันตัวนำด้านนอก และวงจรทั่วไปของสายวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานอนุกรมต่อหน่วยความยาว (R) หน่วย Ω/m แสดงถึงความต้านทานเนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าจำกัดของตัวนำแต่ละตัว ความเหนี่ยวนำอนุกรมต่อหน่วยความยาว (L) หน่วย H/m แสดงถึงค่าความเหนี่ยวนำตนเอง (Self-Inductance) ของตัวนำทั้ง 2 ตัวนำ ได้แก่ ตัวนำกระแสไฟฟ้าอยู่ตรงกลาง และตัวนำด้านนอก ค่าการนำไฟฟ้าชั้นต่อหน่วยความยาว (G) หน่วย S/m และค่าความจุชั้นต่อหน่วยความยาว (C) หน่วย F/m



รูปที่ 2.1 วงจรทั่วไปของสายวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ [9]

จากรูปที่ 2.1 การวิเคราะห์ตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law) จะได้สมการ (2.1) และ (2.2)

$$v(z, t) - R\Delta z i(z, t) - L\Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} - v(z + \Delta z, t) = 0 \quad (2.1)$$

$$i(z, t) - G\Delta z v(z - \Delta z, t) - C\Delta z \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} - i(z + \Delta z, t) = 0 \quad (2.2)$$

โดยที่ $v(z, t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า $v(z + \Delta z, t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก
 $i(z, t)$ คือ กระแสไฟฟ้าขาเข้า $i(z + \Delta z, t)$ คือ กระแสไฟฟ้าขาออก
 $R\Delta z$ คือ ความต้านทานต่อหน่วยความยาว Δz คือ ความยาวของสายวัด
 $L\Delta z$ คือ ความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาว $C\Delta z$ คือ ความจุต่อหน่วยความยาว
 $G\Delta z$ คือ การนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว

สมการ (2.1) และ (2.2) ทหารด้วย Δz และกำหนดให้ลิมิตเป็น $\Delta z \rightarrow 0$ จะให้สมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงใน (2.3) และ (2.4)

$$\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = -Ri(z, t) - L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = -Gv(z, t) - C \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \quad (2.4)$$

สมการ (2.3) และ (2.4) คือรูปแบบโดเมนเวลาของสมการสายส่ง หรือที่เรียกว่า สมการเทเลกราฟ (Telegrapher Equation)

สำหรับสภาวะคงตัวแบบไซน์ (Sinusoidal Steady-State) โดยใช้เฟสเซอร์แบบโคไซน์ (Cosine-Base Phasors) ดังนั้น จากสมการ (2.3) และ (2.4) สามารถลดรูป ดังนี้

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \quad (2.5)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \quad (2.6)$$

โดยที่ $V(z)$ คือ แรงดันไฟฟ้า

$I(z)$ คือ กระแสไฟฟ้า

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity)

ซึ่งสามารถแก้สมการ (2.5) และ (2.6) เพื่อให้ได้สมการคลื่นสำหรับ $V(z)$ และ $I(z)$ แสดงใน (2.7) และ (2.8)

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} - \gamma^2V(z) = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} - \gamma^2I(z) = 0 \quad (2.8)$$

γ คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายเชิงซ้อน ดังสมการ (2.9) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.9)$$

โดยที่ α คือ ค่าการลดทอนของสาย และ β คือ ค่าการเลื่อนเฟสของสัญญาณ

สมการคลื่นสัญจร (Traveling Wave) จากสมการ (2.7) และ (2.8) สามารถหาได้ดังนี้

$$V(z) = V_o^+ e^{-\gamma z} + V_o^- e^{\gamma z} \quad (2.10)$$

$$I(z) = I_o^+ e^{-\gamma z} + I_o^- e^{\gamma z} \quad (2.11)$$

โดยที่พจน์ $e^{-\gamma z}$ แทนการแพร่กระจายคลื่นในทิศทาง $+z$ และพจน์ $e^{\gamma z}$ แทนการแพร่กระจายคลื่นในทิศทาง $-z$ เมื่อนำ (2.5) แทนในสมการ (2.10) จะได้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายวัด ดังนี้

$$I(z) = \frac{\gamma}{R + j\omega L} (V_o^+ e^{-\gamma z} - V_o^- e^{\gamma z}) \quad (2.12)$$

การเปรียบเทียบสมการ (2.12) กับ (2.11) แสดงให้เห็นว่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ Z_0 สามารถนิยามได้ ดังนี้

$$Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.13)$$

สมการข้างต้นใช้สำหรับสายส่งทั่วไป รวมถึงผลกระทบจากการสูญเสียสัญญาณ และพบว่าค่าคงที่การแพร่กระจาย และลักษณะเฉพาะอิมพีแดนซ์มีความซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติหลายกรณี การสูญเสียสัญญาณของสายส่งมีน้อยมาก จึงสามารถละเลยค่า R และ G ($R = G = 0$) ได้ ทำให้ผลลัพธ์ง่ายขึ้นกว่าสมการ (2.9) จะให้ค่าคงที่การแพร่กระจายดังสมการ (2.14)

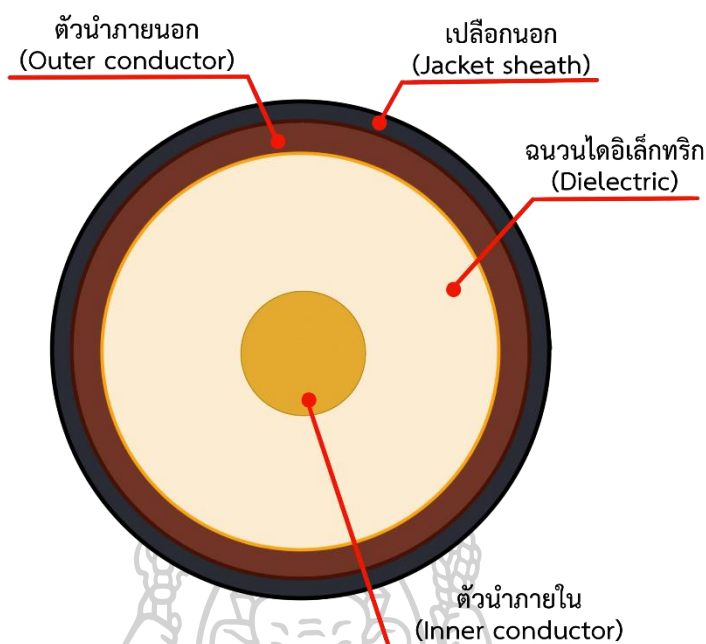
$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{LC} \quad (2.14)$$

ซึ่ง $\beta = \omega\sqrt{LC}$ และสำหรับสายวัดที่ไม่มีการสูญเสียค่าคงที่การลดทอน α จะเป็นศูนย์ ($\alpha = 0$) ดังนั้น คุณลักษณะอิมพีแดนซ์เฉพาะของ (2.13) สามารถลดรูป ได้ดังสมการ (2.15)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.15)$$

สายวัดโคแอกเชียล

ส่วนประกอบของสายโคแอกเชียล [10] แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวนำภายใน (Inner Conductor) ฉนวนไดอิเล็กทริก (Dielectric) ตัวนำภายนอก (Outer Conductor) และ เปลือกนอกสายไฟฟ้า (Jacket Sheath) ซึ่งการส่งกระแสไฟฟ้าต้องใช้ตัวนำสองตัว ตัวนำเส้นหนึ่ง เรียกว่า “ขาไป (Go)” และอีกเส้นหนึ่งเรียกว่า “ขากลับ (Return)” โดยพื้นฐานแล้วสายโคแอกเชียล หรือสายเคเบิลเป็นระบบส่งสัญญาณที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งผ่านฉนวนไดอิเล็กทริกที่ถูกผูกไว้ด้วย ครอบงอมโคแอกเชียลที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าสองอัน โดยการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetic, TEM) ภายในสายโคแอกเชียล ด้วยวิธีนี้พลังงานไฟฟ้า หรือ สัญญาณจึงสามารถส่งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยสายโคแอกเชียลได้รับการออกแบบมาเพื่อลดการ สูญเสียสัญญาณและการรบกวนให้เหลือน้อยที่สุด จึงเหมาะสำหรับการส่งสัญญาณในระยะทางไกล และสามารถส่งสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณพร้อมกันได้ ซึ่งช่วยให้สามารถใช้ในสถานการณ์ที่ต้องส่ง สัญญาณหลายรายการผ่านสายเคเบิลเส้นเดียวกัน นอกจากนี้สายโคแอกเชียลยังมีอายุการใช้งานได้นาน และมีความทนทานต่อสภาพอากาศที่รุนแรง



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของสายวัดโคแอกเซียล

สำหรับสายโคแอกเซียลที่มีความยาวเป็นอนันต์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำด้านนอกจะมีปริมาณที่เท่ากัน และตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าในตัวนำด้านใน ซึ่งส่งผลให้ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะถูกหักล้างจนหมด อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในทางปฏิบัติสายโคแอกเซียลที่มีความยาวจำกัด และความเท่าเทียมกันของกระแสไฟฟ้าตรงข้ามในตัวนำด้านในและด้านนอกของสายโคแอกเซียล โดยที่ความถี่สูงกว่า 1 เมกะเฮิรตซ์ (Megahertz, MHz) ตัวนำด้านนอกจะมีค่าอิมพีแดนซ์เกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ภายในของสายโคแอกเซียลทั้งขาไปและขากลับ ซึ่งประกอบด้วย ความต้านทานไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าความต้านทานของวงจรที่ตัวนำด้านนอก

วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการทดลองศึกษาอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล โดยการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ในสายเคเบิลที่มีความยาวสาย 1 เมตร เนื่องจากเป็นความยาวมาตรฐานที่นิยมใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณในงานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายที่มีความเที่ยงตรงและสามารถเปรียบเทียบได้กับข้อมูลจำเพาะของผู้ผลิต [26] นอกจากนี้ ความยาว 1 เมตร สามารถช่วยลดผลกระทบจากการสูญเสียสัญญาณ (Signal Attenuation) และการสะท้อนภายในสาย (Signal Reflection) ให้อยู่ในระดับต่ำ ทำให้สามารถวิเคราะห์อิมพีแดนซ์จำเพาะและอิมพีแดนซ์ประสิทธิของสายได้อย่างแม่นยำโดยไม่ถูกรบกวนจากผลของความยาวสายที่มากเกินไป [27] อีกทั้งยังสะดวกต่อการเปรียบเทียบเชิงสัดส่วนเมื่อจำเป็นต้อง

ประเมินผลของสายที่มีความยาวมากกว่า โดยสามารถพิจารณาในลักษณะการต่ออนุกรมของ อิมพีแดนซ์ตามความยาวสายที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งสายเคเบิลที่นำมาศึกษาคือ สายโคแอกเซียล RG-58/U [28] ผลิตตามมาตรฐาน American MIL-C-17 ซึ่งเป็นสายโคแอกเซียลอเนกประสงค์ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะคงที่ $50 \pm 2 \Omega$ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.95 มิลลิเมตร (Milli-Meter, mm) สายโคแอกเซียล RG-58/U มีชีลด์ (Shield) ชั้นเดียว และมีแจ็คเก็ตด้านนอกเป็นโพลีไวนิลคลอไรด์สีดำ (Polyvinyl Chloride, PVC) โดยมีข้อมูลจำเพาะ (Specification) ของคุณลักษณะทางไฟฟ้า (Electrical characteristics) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้า

Impedance	$50 \pm 2 \Omega$
Max. operating frequency	1 GHz
Capacitance	< 100 pF/m
Velocity factor	0,66
Electrical resistance of inner conductor	< 41Ω /km
Spark Tester voltage	5000 Vrms
Typ. attenuation	50 MHz: < 13,1 dB/100 m 100 MHz: < 21,4 dB/100 m 400 MHz: < 55,8 dB/100 m 1000MHz: < 92 dB/100 m

2.3 เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุ และค่าความต้านทานที่แม่นยำ (Precision LCR Meter)

เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุ และค่าความต้านทานที่แม่นยำหรือเครื่องวัด LCR รุ่น Agilent E4980A [29] แสดงดังรูปที่ 2.3 คืออุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อวัดค่า ความต้านทาน ความจุไฟฟ้า และความเหนี่ยวนำโดยเฉพาะ เครื่องวัด LCR อเนกประสงค์สำหรับการตรวจสอบ ส่วนประกอบขาเข้า การควบคุมคุณภาพ และการใช้งานในห้องปฏิบัติการ เครื่องวัด LCR ใช้สำหรับ วัดส่วนประกอบ วัสดุ และอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ LCR ในช่วงความถี่กว้าง 20 Hz ถึง 2 MHz โดย ข้อมูลจำเพาะสำหรับเครื่อง LCR ระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทดสอบ ความแม่นยำ การตรวจสอบระดับสัญญาณทดสอบ แสดงดังภาคผนวก ก ซึ่งเหมาะกับงานอิเล็กทรอนิกส์หรืองาน สำหรับห้องปฏิบัติการที่ต้องการวัดด้วยความละเอียดและความถูกต้องสูง



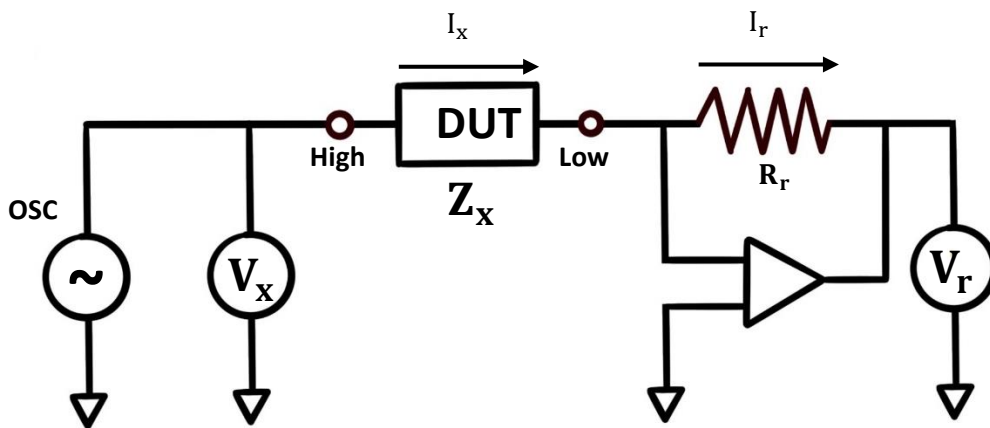
รูปที่ 2.3 เครื่องวัด LCR [30]

2.3.1 หลักการวัดค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุ และค่าความต้านทานของเครื่องวัด LCR

เครื่องวัด LCR เป็นเครื่องมือวัดที่วัดสมบัติทางกายภาพที่เรียกว่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งหลักการวัด แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยใช้ตัววัดปริมาณค่าอิมพีแดนซ์ (Z) แสดงถึงความต้านทานต่อการไหลของ กระแสไฟฟ้าสลับ สามารถคำนวณได้จากกระแสไฟฟ้า (I) ที่ไหลไปยังเป้าหมายการวัดและ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ขั้วของเป้าหมาย เนื่องจากอิมพีแดนซ์แสดงเป็นเวกเตอร์บนระนาบเชิงซ้อน เครื่องวัด LCR จึงไม่เพียงแต่วัดอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าและค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ของแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังวัดความต่างเฟสระหว่างรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและ แรงดันไฟฟ้าด้วย โดยใช้วิธีสะพานสมดุลอัตโนมัติเป็นวงจรที่ใช้ในเครื่องวัด LCR ซึ่งวงจรนี้มี 4 ขั้ว ได้แก่ H_c H_p L_p และ L_c ซึ่งทั้งหมดเชื่อมต่อกับเป้าหมายการวัด (Device Under Test, DUT) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน DUT (I_x) สมดุลกับกระแสไฟฟ้า I_r คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานชั้นที่ (R_r) โดยการทำงานของตัวแปลง I-V ศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่ำสุดจะคงอยู่ที่ศูนย์โวลต์ (จึงเรียกว่ากราวด์

เสมือน) อิมพีแดนซ์ของ DUT คำนวณโดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่ขั้วสูง (V_x) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานชั้นท์ (V_r) ดังสมการ (2.16)

$$Z_x = R_r \left(\frac{V_x}{V_r} \right) \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.4 หลักการวัดสำหรับ LCR meter

โดยสามารถคำนวณค่าความแม่นยำในการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสูงดังภาคผนวก ก ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการวัดปกติของเครื่องวัด LCR

2.3.2 ฟังก์ชันการชดเชย (Compensation function)

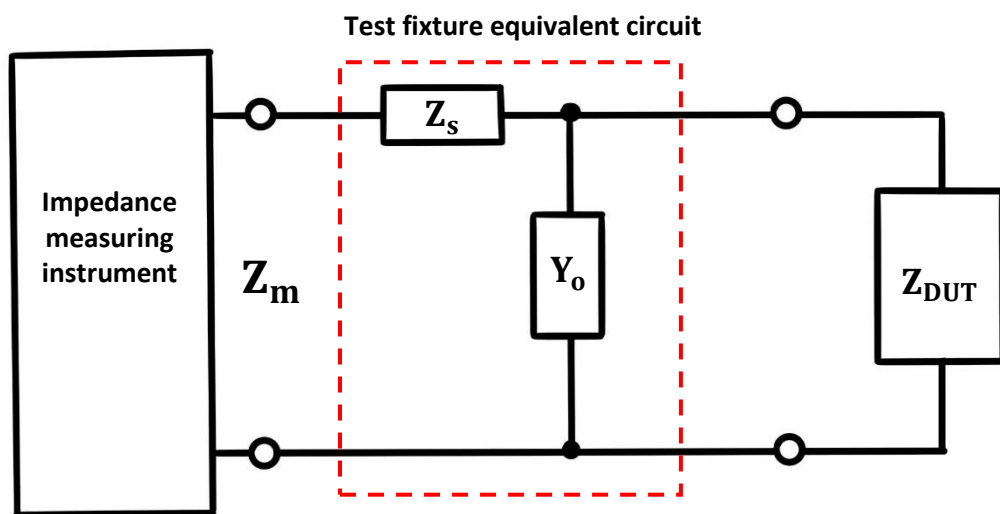
ความแม่นยำในการวัดของเครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์ถูกกำหนดไว้ที่ปลายของขั้วต่อโคแอกเซียล อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก DUT ที่มีรูปร่างหลากหลายไม่สามารถเชื่อมต่อโดยตรงกับขั้วต่อโคแอกเซียลได้ โดยทั่วไป DUT จะถูกเชื่อมต่อผ่านอุปกรณ์ทดสอบ หรือสายเคเบิล เพื่อให้สามารถวัดอิมพีแดนซ์ของ DUT ได้อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องกำจัดผลกระทบของอิมพีแดนซ์ตกค้างของอุปกรณ์เชื่อมต่อและสายเคเบิล ดังนั้นเครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์จึงมาพร้อมกับฟังก์ชันการชดเชยดังต่อไปนี้

- การชดเชยแบบเปิดและแบบปิด (Open and short compensation)

การชดเชยแบบเปิดและแบบปิดเป็นเทคนิคที่นิยมใช้มากที่สุดในเครื่องมือวัด LCR วิธีนี้สมมติว่าค่าตกค้างของอุปกรณ์ทดสอบสามารถแสดงด้วยวงจรอย่างง่ายดังรูปที่ 2.5 ซึ่ง Z_s คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมกับ DUT และ Y_o คือค่าแอดมิตแตนซ์ (admittance) ที่ต่อขนานกับ DUT ช่วยกำจัดข้อผิดพลาดที่เกิดจากส่วนประกอบที่เหลือของอุปกรณ์ทดสอบทำให้สามารถ

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของ DUT (Z_{dut}) ได้จากสมการ (2.17) โดยที่ Z_m คือค่าอิมพีแดนซ์ของ DUT ที่คำนวณได้โดยยังไม่ได้กำจัดข้อผิดพลาดที่เกิดจากส่วนประกอบของอุปกรณ์ทดสอบ

$$Z_{dut} = \frac{Z_m - Z_s}{1 - (Z_m - Z_s)Y_o} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.5 วงจรอย่างง่ายแสดงค่าตกค้างของอุปกรณ์ทดสอบ

ข้อจำกัดของการชดเชยแบบเปิดและแบบปิด

หากวงจรสมมูลของอุปกรณ์ทดสอบ (Text fixture equivalent circuit) ระหว่างเครื่องมือวัดอิมพีแดนซ์ และ DUT มีความซับซ้อนมากกว่าวงจรที่แสดงดังรูปที่ 2.5 เช่น สายส่งหรือวงจรที่รวมองค์ประกอบหลายส่วนเข้าด้วยกัน การชดเชยแบบเปิดและแบบปิดอาจไม่สามารถจัดผลกระทบของอุปกรณ์ทดสอบ และสายเคเบิลได้ ซึ่งความแม่นยำจากการชดเชยแบบเปิดและแบบปิดดังตารางที่ 2.2 – 2.5

ตารางที่ 2.2 การทำ Open compensation (Y_o)

Test signal voltage ≤ 2.0 Vrms	
Test freq. (Hz)	Measurement time mode : SHORT
$20 \leq - \leq 100$ k	$2 \text{ nS} \times (1 + 0.100/V_s) \times (1 + \sqrt{(100/F_m)})$
	Measurement time mode : MED, LONG
	$0.5 \text{ nS} \times (1 + 0.100/V_s) \times (1 + \sqrt{(100/F_m)})$
$100 \text{ k} < - \leq 1 \text{ M}$	Measurement time mode : SHORT
	$20 \text{ nS} \times (1 + 0.100/V_s)$
	Measurement time mode : MED, LONG
	$5 \text{ nS} \times (1 + 0.100/V_s)$
$1 \text{ M} < - \leq 2 \text{ M}$	Measurement time mode : SHORT
	$40 \text{ nS} \times (1 + 0.100/V_s)$
	Measurement time mode : MED, LONG
	$10 \text{ nS} \times (1 + 0.100/V_s)$

V_s (Vrms) คือ แรงดันไฟฟ้าทดสอบ

F_m (Hz) คือ ความถี่ทดสอบ



ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของสายวัดขณะทำ Open compensation

Test freq. (Hz)	Cable length			
	0 m	1 m	2 m	4 m
$100 \leq f < 100 \text{ k}$	1	$1+5 \times F_m / 1 \text{ MHz}$	$1+10 \times F_m / 1 \text{ MHz}$	$1+20 \times F_m / 1 \text{ MHz}$
$100 \text{ k} \leq f \leq 1 \text{ M}$	1	$1+0.5 \times F_m / 1 \text{ MHz}$	$1+1 \times F_m / 1 \text{ MHz}$	$1+2 \times F_m / 1 \text{ MHz}$
$1 \text{ M} < f \leq 2 \text{ M}$	1	$1+1 \times F_m / 1 \text{ MHz}$	$1+2 \times F_m / 1 \text{ MHz}$	$1+4 \times F_m / 1 \text{ MHz}$

F_m (Hz) คือ ความถี่ทดสอบ

ตารางที่ 2.4 การทำ Short compensation (Z_s)

Impedance of DUT > 1.08 Ω	
Test freq. (Hz)	Measurement time mode : SHORT
20 – 2 M	$2.5 \text{ m}\Omega \times (1+0.400/V_s) \times (1+\sqrt{(1000/F_m)})$
	Measurement time mode : MED, LONG
	$0.6 \text{ m}\Omega \times (1+0.400/V_s) \times (1+\sqrt{(1000/F_m)})$
Impedance of DUT $\leq 1.08 \Omega$	
Test freq. (Hz)	Measurement time mode : SHORT
20 – 2 M	$1 \text{ m}\Omega \times (1+1/V_s) \times (1+\sqrt{(1000/F_m)})$
	Measurement time mode : MED, LONG
	$0.2 \text{ m}\Omega \times (1+1/V_s) \times (1+\sqrt{(1000/F_m)})$

V_s (Vrms) คือ แรงดันไฟฟ้าทดสอบ

F_m (Hz) คือ ความถี่ทดสอบ

ตารางที่ 2.5 ผลกระทบของสายวัดขณะทำ Short compensation

Test freq. (Hz)	Cable length			
	0 m	1 m	2 m	4 m
$20 \leq f \leq 1 \text{ M}$	0	0.25 $\text{m}\Omega$	0.5 $\text{m}\Omega$	1 $\text{m}\Omega$
$1 \text{ M} \leq f \leq 2 \text{ M}$	0	1 $\text{m}\Omega$	2 $\text{m}\Omega$	4 $\text{m}\Omega$

ยกตัวอย่าง

การทำวัดค่าความต้านทานขนาด 10Ω ซึ่งก่อนทำการวัดค่าความต้านทาน ได้มีการชดเชยแบบเปิดและแบบปิดผ่านสายโคแอกเซียลยาว 1 เมตร โหมดระยะเวลาการวัดแบบ MED ที่ความถี่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการทำชดเชยค่าเครื่อง หรือ Open and short compensation (Uncertainty of Open and Short Compensation, u_{y_o} and u_{z_s}) ดังนี้

คำนวณค่าความไม่แน่นอนของการทำ Open compensation (Y_o)

$$\begin{aligned} u_{y_o} &= 0.5 \text{ nS} \times (1 + 0.100/V_s) \times (1 + \sqrt{(100/F_m)}) \\ &= 0.5 \text{ nS} \times (1 + 0.100/1) \times (1 + \sqrt{(100/1\text{kHz})}) \\ &= 0.72393 \text{ nS} \end{aligned}$$

คำนวณค่าความไม่แน่นอนของการทำ Short compensation (Z_s)

$$\begin{aligned} u_{z_s} &= 0.6 \text{ m}\Omega \times (1 + 0.400/V_s) \times (1 + \sqrt{(1000/F_m)}) \\ &= 0.6 \text{ m}\Omega \times (1 + 0.400/1) \times (1 + \sqrt{(1000/1\text{kHz})}) \\ &= 0.00168 \Omega \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่า หากทำการชดเชยแบบเปิดและแบบปิดโดยตรงโดยปราศจากสายโคแอกเซียล u_{y_o} มีค่าเท่ากับ 0.72393 nS และ $u_{z_s} = 0.00168 \Omega$ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากตัวอย่างเป็นการชดเชยค่าเครื่องผ่านสายโคแอกเซียลยาว 1 เมตร จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบของสายวัดโคแอกเซียล ดังนี้

ผลกระทบของสายวัดขณะทำการชดเชยแบบเปิด

$$\begin{aligned} 1 + 5 \times F_m / 1 \text{ MHz} &= 1 + 5 \times 1 \text{ kHz} / 1 \text{ MHz} \\ &= 1.005 \text{ S} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } u_{y_o} = 0.72393 \text{ nS} + 1.005 \text{ S} = 1.00500 \text{ S}$$

ผลกระทบของสายวัดขณะทำการชดเชยแบบปิด : $0.25 \text{ m}\Omega$ (จากตารางที่ 2.5)

$$\text{ดังนั้น } u_{z_s} = 0.00168 + 0.00025 = 0.00193 \Omega$$

สรุปได้ว่า การชดเชยแบบเปิดและแบบปิดผ่านสายโคแอกเซียลยาว 1 เมตร ที่โหมดระยะเวลาการวัดแบบ MED ที่ความถี่ 1 kHz แรงดันไฟฟ้า 1 V มีค่า u_{y_o} เท่ากับ 1.00100

S และ $u_{z_s} = 0.00193 \Omega$ ซึ่งนำค่าความไม่แน่นอน u_{y_o} และ u_{z_s} มาคำนวณร่วมกับสมการ (2.17) จะได้สมการดังแสดง (2.18)

$$Z_{dut} = \frac{Z_m - (Z_s \pm u_{z_s})}{1 - [Z_m - (Z_s \pm u_{z_s})](Y_o \pm u_{y_o})} \quad (2.18)$$

- **การชดเชยโหลด (Load compensation)**

เมื่อเชื่อมต่อวงจรที่ซับซ้อนระหว่าง DUT และเครื่องมือวัด ทำให้ไม่สามารถจัดผลกระทบของวงจรได้ แม้ว่าจะมีการชดเชยแบบเปิดและแบบปิด การชดเชยโหลด เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับค่าที่วัดได้ และค่าอ้างอิงให้ตรงกัน ขั้นตอนการชดเชยโหลด ประกอบด้วยการวัดส่วนประกอบที่ทราบค่าจริงอย่างถูกต้อง จากนั้นคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การชดเชย ซึ่งสามารถคำนวณค่าที่วัดได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การชดเชยกับค่าที่สังเกตได้

- **การชดเชยสายวัด (Cable compensation)**

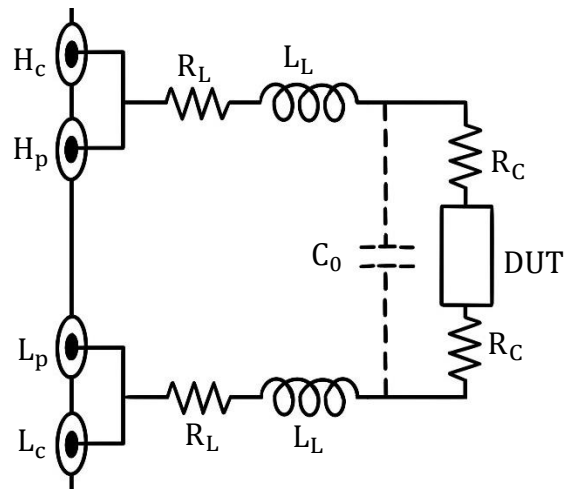
การชดเชยความยาวสายเคเบิลประกอบด้วยฟังก์ชันสำหรับแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดจากคุณลักษณะการส่งสัญญาณของสายโคแอกเชียล

การขยายความยาวของสายเคเบิลระหว่างเครื่องมือวัดและ DUT ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในแอมพลิจูด และเฟสของสัญญาณที่ส่งไปยัง DUT ผลกระทบนี้จะยิ่งเด่นชัดขึ้น และยังสามารถนำองค์ประกอบความผิดพลาดมาสู่ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้

2.3.4 ระบบการวัด

การวัดแบบ 2 สาย (2-Wire Measurement)

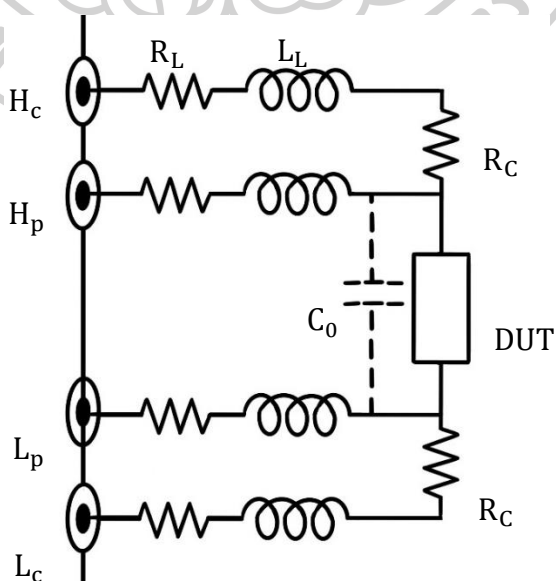
ระบบการวัดแบบ 2 สายเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการเชื่อมต่อ DUT ดังรูปที่ 2.6 อย่างไรก็ตาม ความเหนี่ยวนำ ความต้านทานที่เกิดจากสายวัด และความจุระหว่างสายวัดถือเป็นแหล่งกำเนิดความคลาดเคลื่อน ซึ่งส่งผลกระทบต่อผลการวัดเกิดการเบี่ยงเบนไป



รูปที่ 2.6 ระบบการวัดแบบ 2 สาย

การวัดแบบ 4 สาย (4-Wire Measurement)

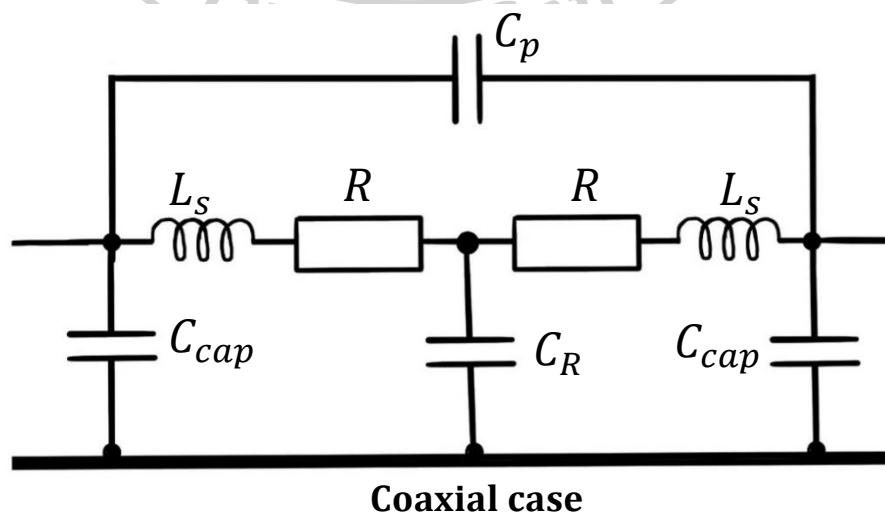
ระบบ 4-Wire Measurement หรือระบบการวัดแบบ 4-Wire ดังรูปที่ 2.7 เป็นระบบการวัดที่สามารถลดผลกระทบของอิมพีแดนซ์ของสายวัดได้ เนื่องจากสายสำหรับกระแสไฟฟ้า และสายสำหรับตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเป็นอิสระต่อกัน ความคลาดเคลื่อนของผลการวัดที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ในสายวัดจึงถูกกำจัดออกไป ดังนั้น การวัดแบบ 4-Wire จึงเหมาะสำหรับช่วงการวัดอิมพีแดนซ์ค่าต่ำถึง $10 \text{ m}\Omega$



รูปที่ 2.7 ระบบการวัดแบบ 4-Wire

2.4 ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Resistor)

ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ หรือตัวต้านทาน AC เป็นองค์ประกอบพื้นฐานในวงจรไฟฟ้าที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทำหน้าที่ต้านทาน หรือจำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้าสลับ เพื่อควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรเช่นเดียวกับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง แต่ความแตกต่างสำคัญอยู่ที่เมื่อกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความถี่ ตัวต้านทานชนิดนี้จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณลักษณะเพิ่มเติม เช่น ความเหนี่ยวนำแฝง (Parasitic Inductance) และความจุไฟฟ้าแฝง (Parasitic Capacitance) มีวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.8 ประกอบไปด้วย ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับรวม (R) ค่าเหนี่ยวนำอนุกรม (L_s) ค่าความจุขนาน (C_p) ค่าความจุระหว่างปลายแต่ละด้านและปลอกโคแอกเซียล (C_{cap}) และค่าความจุระหว่างฟิล์มโลหะและปลอกโคแอกเซียล (C_R) [31] ส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงซ้อน หรืออิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ [32] โครงสร้างของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ มักออกแบบโดยใช้วัสดุที่มีเสถียรภาพสูง เช่น ฟิล์มโลหะ หรือวัสดุคาร์บอน เพื่อให้สามารถคงค่าความต้านทานได้แม่นยำในย่านความถี่ที่กว้าง นอกจากนี้ยังต้องมีการออกแบบทางกายภาพเพื่อลดการเหนี่ยวนำและความจุที่ไม่ต้องการ เช่น การจัดวางขดลวดหรือแผ่นฟิล์มให้สมมาตร เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการเบี่ยงเบนที่ความถี่สูง [2] ในทางปฏิบัติ ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการสอบเทียบและสร้างมาตรฐานทางไฟฟ้า โดยเฉพาะในงานวัดค่าความต้านทานด้วยระบบควอนตัมฮอลล์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC QHE) ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงที่มีความแม่นยำสูง ตัวต้านทานชนิดนี้จะต้องมีค่าความผิดพลาดต่ำมาก รวมถึงมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิและความถี่ เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวัด [19]



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

หากเปรียบเทียบตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟิล์มโลหะ (AC Metal Film Resistor) รูปที่ 2.9 ก.) และตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟิล์มคาร์บอน (AC Carbon Film Resistor) รูปที่ 2.9 ข.) ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟิล์มโลหะได้รับการออกแบบให้มีสัญญาณรบกวนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟิล์มคาร์บอน โดยจะรักษากระแสไฟฟ้าให้อยู่ในระดับต่ำสุด จึงทำให้มีสัญญาณรบกวนน้อยกว่า นอกจากนี้ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะยังมีอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า และอุณหภูมิ หรือสัมประสิทธิ์แรงดันไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่ดีกว่า ทั้งยังสามารถใช้งานในช่วงความต้านทานที่กว้างและสามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงกว่าตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟิล์มคาร์บอน

ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟิล์มโลหะ Vishay Ultra High-Precision Z Foil Through-Hole Resistor ที่มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิความต้านทาน (Temperature Coefficient of Resistance, TCR) $\pm 0.2 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ และค่าความคลาดเคลื่อน (Tolerance) $\pm 0.005\%$ (50 ppm) [33] ขนาด $1 \ \Omega$ $10 \ \Omega$ $100 \ \Omega$ $10 \ \text{k}\Omega$ และ $12 \ \text{k}\Omega$ ถูกนำมาใช้เป็นตัวอย่างไหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ในสายโคแอกเซียล เนื่องจากมีขนาดความต้านทานที่ตรงกับขนาดความต้านทานที่ถูกถ่ายทอดค่ามาตรฐานจาก AC QHR ซึ่งตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟิล์มโลหะโดยมีข้อมูลจำเพาะสำหรับตัวต้านทานดังตารางที่ 2.6



ก.)



ข.)

รูปที่ 2.9 ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับชนิด ก.) ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะและ
ข.) ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลจำเพาะสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

Temperature coefficient of resistance (TCR)	± 0.2 ppm/°C typical (-55 °C to +125 °C, +25 °C ref.)
Rated power	to 1 W at +125 °C
Resistance tolerance	$\pm 0.005\%$ (50 ppm)
Load life stability	$\pm 0.005\%$ at 70 °C, 2000 h or $\pm 0.015\%$ at 70 °C, 10000 h
Resistance range	5 Ω to 600 k Ω
Electrostatic Discharge (ESD)	Up to 25 kV

2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาระบบของการทำปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ที่กระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนี้

- Franco Cabiati และคณะ[34] ได้ทำการวัดค่าความต้านทานตามยาว ณ ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งในระบบการวัดความต้านทานตามยาวประกอบไปด้วย 4 ส่วนที่มีความสำคัญต่อระบบการวัดค่าความต้านทานตามยาว ได้แก่ 1. ส่วนจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่แท่งฮอลล์ 2. ส่วนที่ประกอบด้วยตัวต้านทานชั้นที่กระแสสลับ 10 Ω เครื่องขยายสัญญาณ และดิจิทัลโวลต์มิเตอร์กระแสสลับ (Digital Voltmeter, DVM) 3. ส่วนของระบบควบคุมการป้อนกลับ ซึ่งมีตัวกรองซิงโครนัส และ 4. ส่วนขยายสัญญาณสอง Channel ซึ่งผลลัพธ์พบว่าความต้านทานตามยาวแสดงการขึ้นอยู่กับความถี่ของ R_{xx} ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณศูนย์กลางของกราฟที่ค่าต่ำสุดของ $i = 2$
- J Schurr และคณะ [35] ได้ทำการวัดค่าความต้านทานตามยาวทั้งสองด้านของแท่งฮอลล์ นั่นคือด้านศักย์สูง (High Side) และด้านศักย์ต่ำ (Low Side) ของแท่งฮอลล์ GaAs/AlGaAs heterostructures ณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี โดยใช้วงจ Coaxial Bridge
ผลลัพธ์จากการวัดค่าความต้านทานตามยาวทั้งด้าน High Side และ Low Side แสดงให้เห็นถึงการขึ้นอยู่กับความถี่และกระแสส่งผลต่อความกว้างของบริเวณแนวราบ $i = 2$ ทั้งยังส่งผลต่อค่าความต้านทานตามยาว ณ บริเวณจุดต่ำสุดของของบริเวณแนวราบเช่นกัน

- Jan Kucera และคณะ [36] ได้ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด $1 \mu\text{A}$ และทำการวัดค่าความต้านทานตามยาวที่ Low side ซึ่งวิธีการวัดที่คล้ายกันกับ J Schurr และคณะ [35] โดยใช้ฮาร์ดแวร์ (Hardware) ของ Digit Bridge พบว่าค่าความต้านทานตามยาวมีขนาดเล็กน้อยกว่า $1 \text{ m}\Omega$ ที่ความถี่ 1 kHz และประมาณ $5 \text{ m}\Omega$ ที่ความถี่ 4 kHz ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อค่าความต้านทานตามยาวเช่นกัน นอกจากนี้ ความกว้างของบริเวณแนวราบ $i = 2$ ของความต้านทานตามยาวยังขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณแนวราบมีความกว้างน้อยกว่า 0.5 T

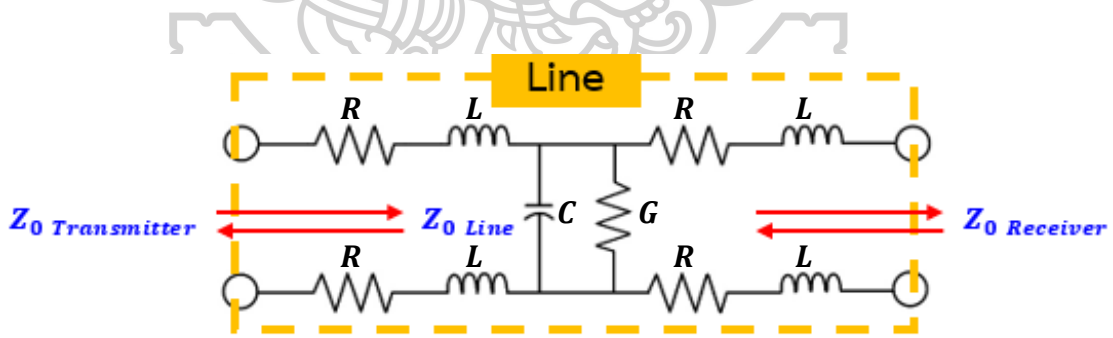
จากงานวิจัยข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าปริมาณกระแส และความถี่ที่เปลี่ยนไปส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานตามยาว และความกว้างของบริเวณแนวราบ $i = 2$ ของความต้านทานตามยาวอีกด้วย สิ่งนี้แสดงถึงความไวต่อปัจจัยที่ละเอียดอ่อนของปรากฏการณ์ AC QHE ซึ่งปัจจัยอื่น ๆ เช่นผลกระทบของอิมพีแดนซ์ในระบบ และสายวัดที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าที่วัดจากการจำลองปรากฏการณ์ AC QHR ควรได้รับการพิจารณา ซึ่งงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบสายโคแอกเซียล ดังนี้

- Mariam Ait Ou Kharraz และคณะ [37] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิมพีแดนซ์ในสาย Coaxial ซึ่งระบุอิมพีแดนซ์ในสายเท่ากับ 50Ω ที่ความยาวสายตั้งแต่ $0.5 - 40 \text{ m}$ ณ ช่วงความถี่ $9 \text{ kHz} - 500 \text{ kHz}$ โดยใช้วิธีการวัด 3 วิธี ได้แก่ ทำการวัดอิมพีแดนซ์โดยใช้ LCR Meter ทำการวัดอิมพีแดนซ์โดยใช้ (Vector Network Analyzer, VNA) และทำการวัดอิมพีแดนซ์โดยใช้ (Scattering matrix, S-matrix) ร่วมกับ Network Analyzer ซึ่งพบว่าวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ทั้ง 3 วิธีให้ผลลัพธ์ที่ตรงกันสำหรับสาย Coaxial ที่มีความยาวสายมากกว่า 10 เมตร ขึ้นไป อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดทั้ง 3 วิธีพบว่าอิมพีแดนซ์มากกว่าที่ผู้ผลิตระบุ 50Ω
- Boris Chenaud และคณะ [3] ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของสายโคแอกเซียลที่มีความต้านทานต่อการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 1 MHz) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่ต้องใช้สายเคเบิลที่มีความต้านทานสูง เช่น ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำหรือสภาวะไครโอเจนิค (Cryogenic) เพื่อแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากความต้านทานของสายเคเบิล โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบต่อส่วนจินตภาพของสัญญาณหรือการเลื่อนเฟส ซึ่งการทดลองแสดงให้เห็นว่าสายเคเบิลที่มีความต้านทานสูง ($R \geq 1 \Omega$) จะทำให้เกิดการเลื่อนเฟสในการวัดค่าอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแทนซ์ ซึ่งทำให้การวัดค่าที่แม่นยำทำได้ยากขึ้น

บทที่ 3

การศึกษาคุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเซียล RG-58/U

คุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเซียล (Z_0) มีความสำคัญสำหรับการพิจารณาความสามารถในการส่งสัญญาณของสายโคแอกเซียล การส่งพลังงานสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อแหล่งส่งสัญญาณมีอิมพีแดนซ์เท่ากับโหลด (Impedance Matching) ดังนั้น สายโคแอกเซียลควรมีคุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะเท่ากับอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [38] คุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของอุปกรณ์ส่งสัญญาณจะเป็นตัวกำหนดระดับสัญญาณสูงสุดที่เข้าสู่สาย และในทางกลับกัน ลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของอุปกรณ์รับสัญญาณจะเป็นตัวกำหนดระดับสัญญาณสูงสุดที่ออกจากสาย ดังวงจรสมมูลรูปที่ 3.1 ซึ่งในอุดมคติอิมพีแดนซ์จำเพาะของเครื่องส่ง ($Z_{0\text{ Transmitter}}$) ควรมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์จำเพาะของสาย ($Z_{0\text{ Line}}$) ซึ่งระบุในข้อมูลจำเพาะของสายโคแอกเซียล 50Ω และควรเท่ากับอิมพีแดนซ์จำเพาะตัวรับ ($Z_{0\text{ Receiver}}$) หากอิมพีแดนซ์จำเพาะไม่ตรงกัน บางส่วนของสัญญาณจะสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิด ทำให้การส่งสัญญาณไม่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในการนำไปใช้งานจริงในระบบการวัดไม่สามารถกำหนดอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ต้องการวัดได้อย่างแน่นอน ทำให้ไม่สามารถเกิด Impedance Matching ระหว่างแหล่งส่งสัญญาณ สายส่ง และอุปกรณ์โหลด เพื่อลดการสะท้อนและเพิ่มความเสถียรของสัญญาณในระบบวัด จึงควรใช้วิธีการวัดแบบ 4-Wire [39]



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์จำเพาะสำหรับส่งข้อมูลในอุดมคติ

วงจรสมมูลของสายถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของวงจรอย่างง่าย ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L) ตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) และมีค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายเป็นจำนวนเชิงซ้อนเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่ถูกจ่ายออกมา ซึ่ง ณ ช่วงความถี่ต่าง ๆ สายก็จะแสดงพฤติกรรมที่ต่างกันออกไป ดังนี้

- ช่วงความถี่ต่ำระดับ DC – 100 Hz : ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะจะได้รับอิทธิพลจากการนำไฟฟ้า (Conductance, G)
- ช่วงความถี่ระดับกลาง (1 kHz) : ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายได้รับอิทธิพลจากค่าความจุไฟฟ้า
- ที่ความถี่สูง (>100 kHz) อิมพีแดนซ์จำเพาะของสายจะเกือบเป็นความต้านทาน (Resistance)

ในกรณีสายส่งที่ถือว่าไม่มีการสูญเสียภายใน (Lossless Line) ซึ่งค่าความต้านทานเชิงกระจาย (R) และค่าความนำเชิงกระจาย (G) มีค่าใกล้ศูนย์ ดังนั้น $Z_0 = \sqrt{L/C}$ ดังที่กล่าวไว้ใน (2.15) ซึ่งมักเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่า 100 kHz [40] อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงสายส่งมักมีการสูญเสีย ทำให้สมการเชิงอนุกรมมิติไม่สามารถอธิบายได้ครบถ้วน ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีวัดจากอิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance) โดยกำหนดเงื่อนไขที่ปลายสายเป็นวงจรเปิด (open circuit) และวงจรลัด (short circuit) และใช้สมการ (3.1)

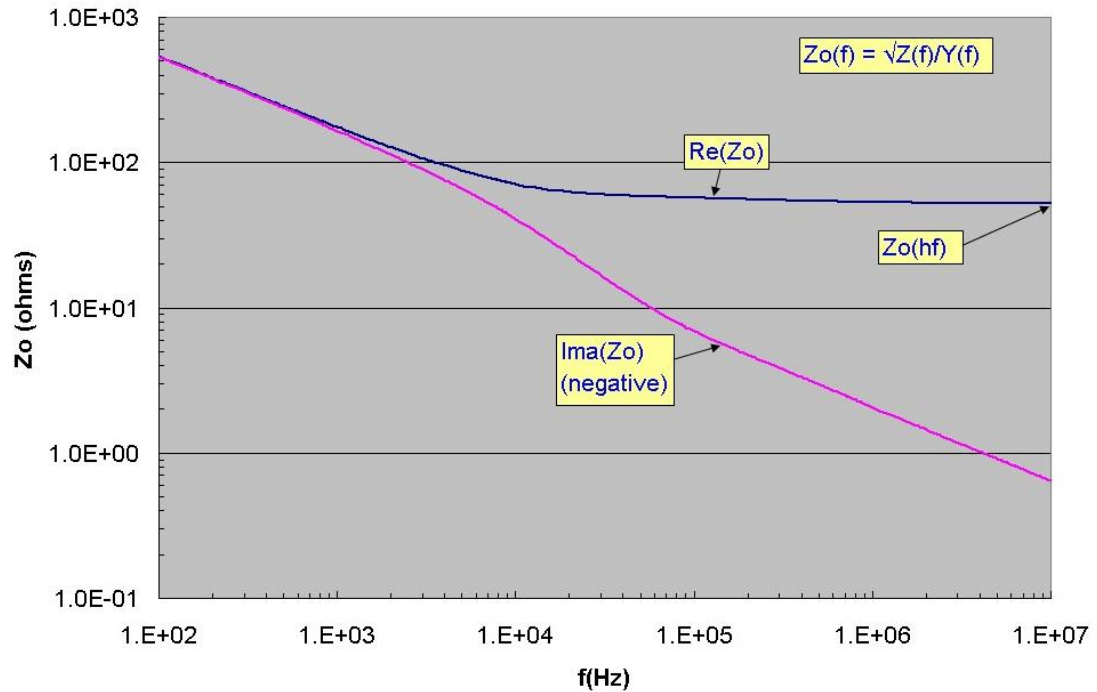
$$Z_0 = \sqrt{Z_{oc} \cdot Z_{sc}} \quad (3.1)$$

โดยที่ Z_{oc} คือ อิมพีแดนซ์ขาเข้าเมื่อปลายสายเปิดวงจร

Z_{sc} คือ อิมพีแดนซ์ขาเข้าเมื่อปลายสายลัดวงจร

คุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเซียล RG-58/U แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงอิมพีแดนซ์ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ Z_0 โดยส่วนจินตภาพเป็นค่าลบ ที่ความถี่ต่ำ Z_0 จะกลายเป็นเชิงซ้อนอย่างมากโดยมีส่วนของความต้านทานและรีแอกแตนซ์ ซึ่งมีมุมเฟสประมาณ -45 องศา และมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่า 500 Ω และลดลงอย่างรวดเร็ว โดยช่วงความถี่ที่ 10 kHz – 100 kHz ค่าอิมพีแดนซ์เริ่มเข้าสู่สถานะเสถียรเป็นผลจาก Skin Effect ทำให้ตัวนำภายในสาย ซึ่งเป็นส่วนรีแอกแตนซ์ถูกใช้งานน้อยลงและเสถียรที่ความถี่สูงกว่า 100 kHz Z_0 จะกลายเป็นตัวต้านทานเกือบสมบูรณ์โดยมีค่าประมาณ 51.3 Ω [40, 41] ซึ่งตรงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ระบุไว้ในข้อมูลจำเพาะของสายโคแอกเซียล ทั้งนี้ ผลที่ได้ยังขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดของสายวัดแต่ละชนิด ซึ่งมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า อันส่งผลต่อพฤติกรรมของอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบการวัด ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของผลการวัดได้อย่างมีนัยสำคัญ

Characteristic Impedance $Z_o(f)$ for typical RG58U Coax Cable



รูปที่ 3.2 ผลการวัดค่าลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะเทียบกับความถี่ [41]

ในการศึกษานี้จะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าเมื่อปลายสายเปิดวงจร และอิมพีแดนซ์ขาเข้าเมื่อปลายสายลัดวงจร เพื่อศึกษาอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเซียล RG-58/U ขณะไม่มีโหลดเชื่อมต่อที่ปลายสาย โดยคำนวณตามสมการ (3.1) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สายโคแอกเซียลชนิด RG-58/U ซึ่งมีความยาวสายเท่ากับ 1 เมตร โดยมีรัศมีของสายภายนอก 2.48 มิลลิเมตร และ รัศมีของตัวนำแกนกลาง 0.5 มิลลิเมตร

3.1 การศึกษาคุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเชียล โดยการวัดสายตัวนำด้านในและด้านนอก ขณะไม่มีการต่อโหลดสำหรับกรณีพิจารณาการสูญเสียในสายส่ง

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

- Agilent E4980A Precision LCR Meter
- สายโคแอกเชียล RG-58/U

3.1.2 การตั้งค่า และการติดตั้งเครื่องมือ

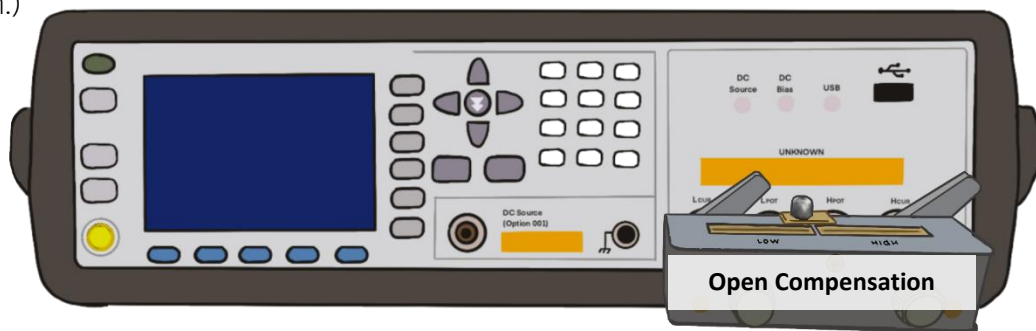
Agilent E4980A Precision LCR Meter หรือเครื่องวัด LCR ใช้วัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้ฟังก์ชัน Sweep ที่ช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ $(23.0 \pm 5.0) ^\circ\text{C}$ ซึ่งก่อนทำการวัดนั้นจะต้องทำการอุ่นเครื่องมืออย่างน้อย 30 นาที และทำการชดเชยค่าเครื่องวัด LCR แบบเปิดวงจรและแบบปิดวงจรแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยมีขั้นตอน ดังนี้

- การชดเชยค่าเครื่องแบบเปิดวงจร ตั้งค่า Meas setup > Correction > **Open: on**
- การชดเชยค่าเครื่องแบบปิดวงจร ตั้งค่า Meas setup > Correction > **Short : on**

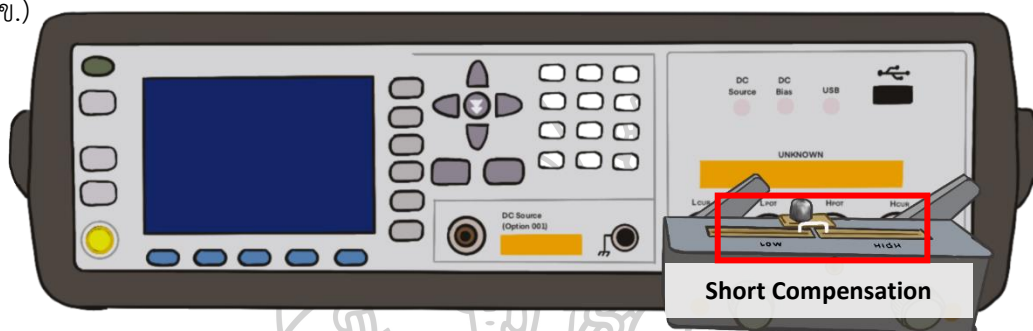
จากนั้นทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.4 โดยนำขั้ว Low ของเครื่องวัด LCR เชื่อมต่อกับตัวนำด้านในของสายโคแอกเชียล และนำขั้ว High ของเครื่องวัด LCR เชื่อมต่อกับตัวนำภายนอกที่ด้านเดียวกัน ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จะถูกบันทึกค่า ซึ่งในการศึกษานี้ทำการวัดอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเชียล 2 กรณี ดังนี้

1. กรณีตัวนำด้านในของสายโคแอกเชียลที่ปลายอีกด้านหนึ่งไม่เชื่อมต่อกับตัวนำภายนอกเพื่อวัดค่า Z_{oc}
2. กรณีตัวนำด้านในของสายโคแอกเชียลที่ปลายอีกด้านหนึ่งเชื่อมต่อกับตัวนำภายนอกเพื่อวัดค่า Z_{sc}

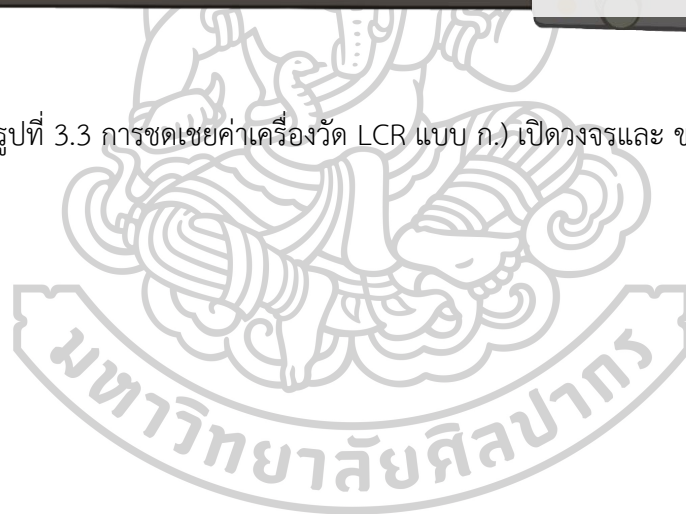
ก.)



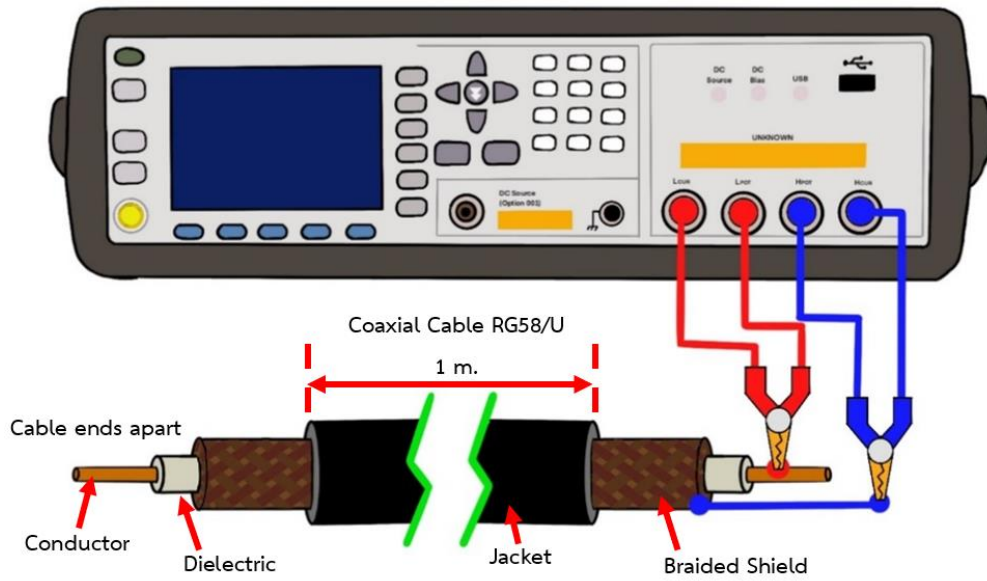
ข.)



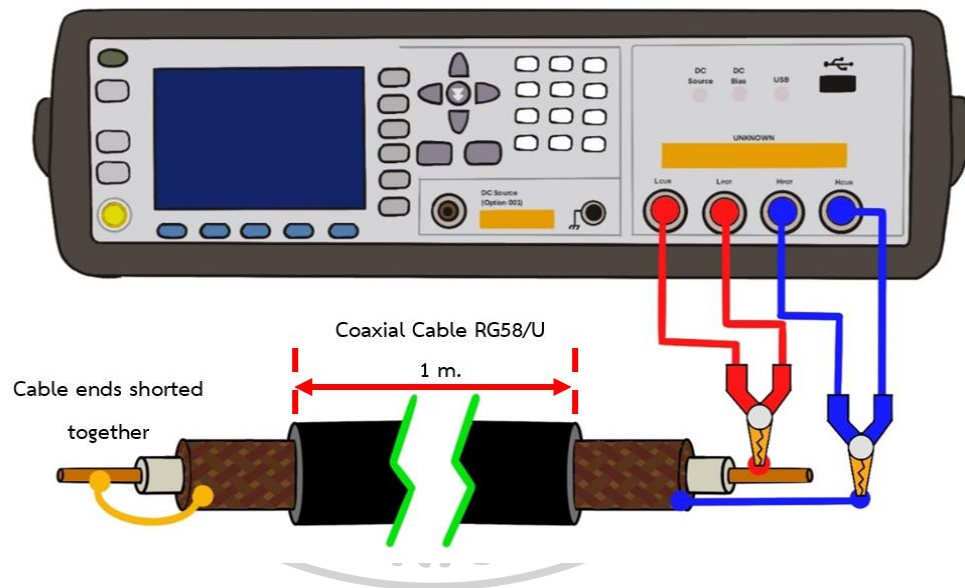
รูปที่ 3.3 การชดเชยค่าเครื่องวัด LCR แบบ ก.) เปิดวงจรและ ข.) ปิดวงจร



ก.)



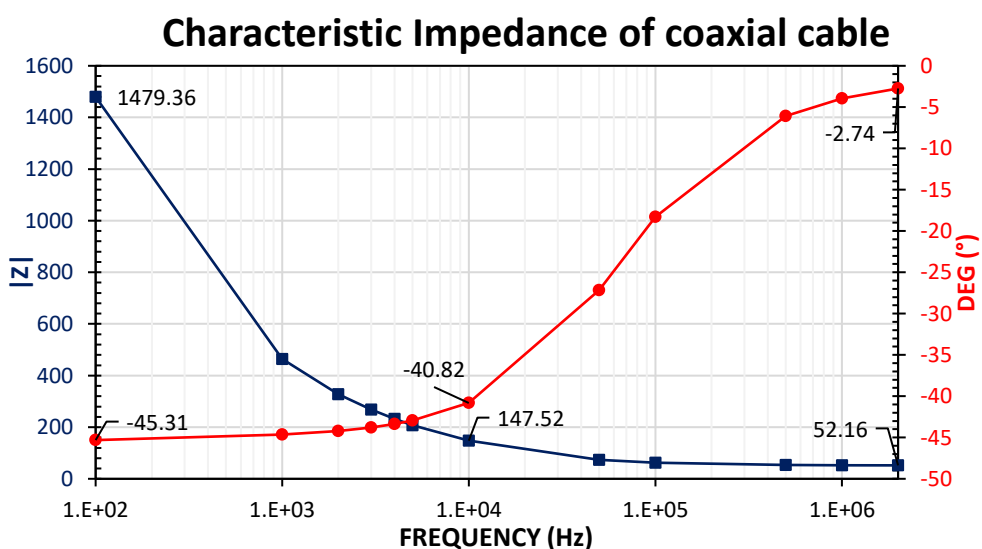
ข.)



รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ ก.) ปลายสายเปิดวงจร และ ข.) ปลายสายปิดวงจร

3.1.3 ผลการวัดและวิเคราะห์

ผลลัพธ์จากการศึกษาคุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเชียล RG-58/U ที่ความถี่ 100 Hz – 10 kHz ในกรณีพิจารณามีการสูญเสียในสายส่งแสดงดังรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมตามปกติของสายโคแอกเชียลขณะยังไม่มี การเชื่อมต่อโหลด โดยที่ความถี่ต่ำ 100 Hz สายโคแอกเชียลมีพฤติกรรมของตัวเก็บประจุ และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นถึง 10 kHz พฤติกรรมของตัวเก็บประจุของสายโคแอกเชียลลดลงเล็กน้อย ในขณะที่เดียวกันพฤติกรรมของตัวต้านทานของสายโคแอกเชียลลดลงอย่างเห็นได้ชัดตลอดทุกช่วงความถี่ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า โดยปกติสายโคแอกเชียลมีค่าอิมพีแดนซ์ภายในสายสูงมากถึง 1,480 Ω ที่ความถี่ 100 Hz และเนื่องจาก Skin Effect ในช่วงความถี่ 1 kHz – 100 kHz ทำให้ความต้านทานภายในสายเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันผลของความเหนี่ยวนำและความจุต่ออิมพีแดนซ์ของสายลดลง จึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายลดลงและเริ่มเข้าสู่สถานะเสถียรที่ความถี่มากกว่า 100 kHz มีค่าประมาณ 53 Ω ซึ่งเป็นไปตามที่ระบุในข้อมูลจำเพาะ อย่างไรก็ตามความถี่ที่ครอบคลุมระบบการวัดค่า AC QHR ไปสู่การถ่ายทอดค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับคือความถี่ในช่วง 100 Hz – 10 kHz ซึ่งที่ความถี่ 10 kHz ยังมีค่าความต้านทานภายในสายที่สูงถึง 148 Ω ค่าเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อระบบการวัด หากระบบการวัดนั้นเป็นระบบการวัดแบบ 2 สาย เพื่อกำจัดค่าเหล่านี้ การใช้ระบบการวัดแบบ 4-Wire [39] ถือเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากสายสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าและสายสำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าแยกกันอย่างอิสระทำให้แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ไม่รวมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมค่าความต้านทานของสายวัดและยังช่วยลดความผิดพลาดของผลการวัดที่เนื่องจากสนามแม่เหล็กรอบสายวัด



รูปที่ 3.5 ผลการวัดลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเชียลกรณีมีการสูญเสียของสาย

บทที่ 4

การศึกษาการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U

ในการศึกษานี้จะทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 100 Hz – 10 kHz ผ่านสายโคแอกเชียลโดยเชื่อมต่อโหนดตัวต้านทานขนาด 1 Ω 10 Ω 100 Ω 10 k Ω และ 12 k Ω ซึ่งมีขนาดความต้านทานที่อยู่ในช่วงย่านของค่าความต้านทานมาตรฐานที่ถูกถ่ายทอดจาก AC QHR เพื่อสังเกตผลการวัดค่าความต้านทาน ณ ความถี่ที่ใช้งาน และเพื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่อาจส่งผลให้ค่าความต้านทานเกิดความคลาดเคลื่อน โดยสามารถทำการศึกษาดังนี้

4.1 การศึกษาการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U โดยเชื่อมต่อโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 Ω 10 Ω 100 Ω 10 k Ω และ 12 k Ω

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

- Agilent E4980A Precision LCR Meter
- สายโคแอกเชียล RG-58/U
- โหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 Ω 10 Ω 100 Ω 10 k Ω และ 12 k Ω

4.1.2 การตั้งค่า และการติดตั้งเครื่องมือ

Agilent E4980A Precision LCR Meter เครื่องวัด LCR ถูกใช้สำหรับวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทาน 1 Ω 10 Ω 100 Ω 10 k Ω และ 12 k Ω ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 mA 9 mA 5 mA 9.9 μ A และ 8.5 μ A ตามลำดับ ที่ช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz โดยใช้ฟังก์ชัน Sweep และเลือกโหมดการวัดเป็นการวัดค่าอิมพีแดนซ์ $Z - \theta$ ก่อนทำการวัดจะต้องทำการอุ่นเครื่องมืออย่างน้อย 30 นาที เชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านสายโคแอกเชียลเพื่อวัดค่าความต้านทานและบันทึกค่า ภาพรวมของการเชื่อมต่อของระบบการวัดค่าความต้านทานแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยทำการเชื่อมต่อแบบ 4-Wire ผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U ความยาว 1 เมตร ซึ่งถูกติดตั้งให้ระยะห่างระหว่างสายประมาณ 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.2 ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ (23.0 \pm 5.0) $^{\circ}$ C ก่อนทำการวัดค่าความต้านทานจะต้องทำการชดเชยค่าของเครื่องวัด LCR ดังรูปที่ 3.3 และทำการชดเชยค่าในสายวัดก่อนทำการวัดค่าความต้านทานดังรูปที่ 4.3 ดังนี้

การชดเชยของค่าเครื่องวัด LCR

แบบเปิดวงจร : ตั้งค่า Meas setup > Correction > **Open: on**

แบบปิดวงจร : ตั้งค่า Meas setup > Correction > **Short : on**

การชดเชยค่าสายวัด

แบบเปิดวงจร : ตั้งค่า Meas setup > Correction > Length : 1 m > **Open: on**

แบบปิดวงจร : ตั้งค่า Meas setup > Correction > Length : 1 m > **Short : on**



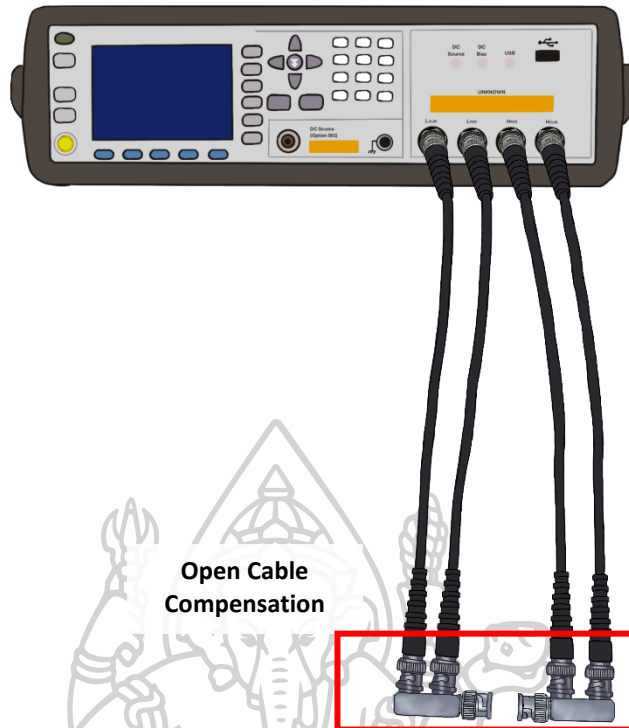
รูปที่ 4.1 ระบบการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเซียล RG-58/U แบบ 4-Wire



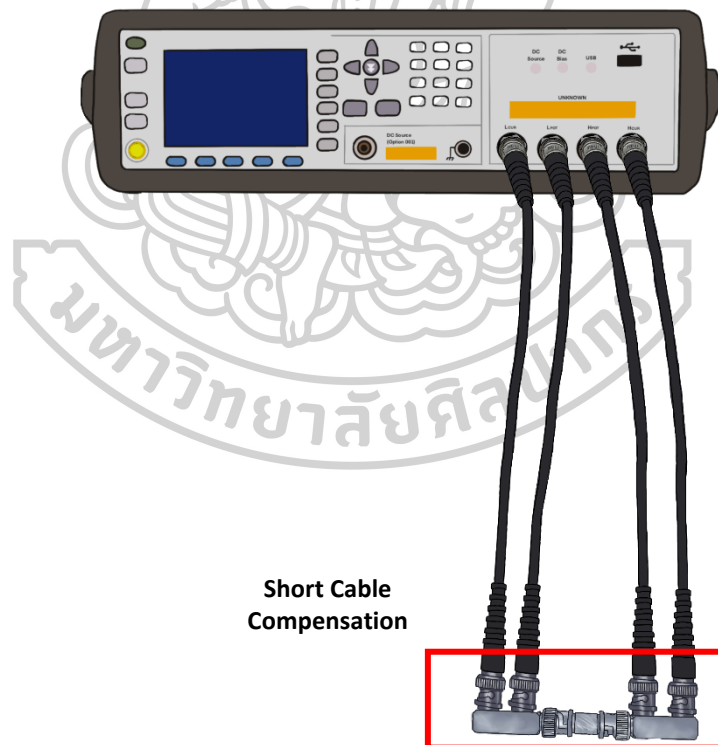
รูปที่ 4.2 ระยะห่างในการติดตั้งสายโคแอกเชียล



ก.)



ข.)



รูปที่ 4.3 การชดเชยค่าสาย ก.) แบบเปิดวงจรและ ข.) แบบปิดวงจร

4.1.3 ผลการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U

จากการศึกษาการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U โดยเชื่อมต่อโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ k\Omega$ และ $12\ k\Omega$ ได้ทำการวัดค่าความต้านทาน ซึ่งผลลัพธ์ของการวัดค่าความต้านทานแสดงดังรูปที่ 4.4 – 4.8 ตามลำดับ

สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $1\ \Omega$

จากรูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานที่วัดได้ค่อนข้างคงที่ที่ความถี่ $100\ \text{Hz} - 1\ \text{kHz}$ และแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความถี่ที่สูงขึ้นที่ความถี่สูงขึ้นไปกว่า $1\ \text{kHz}$

สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $10\ \Omega$

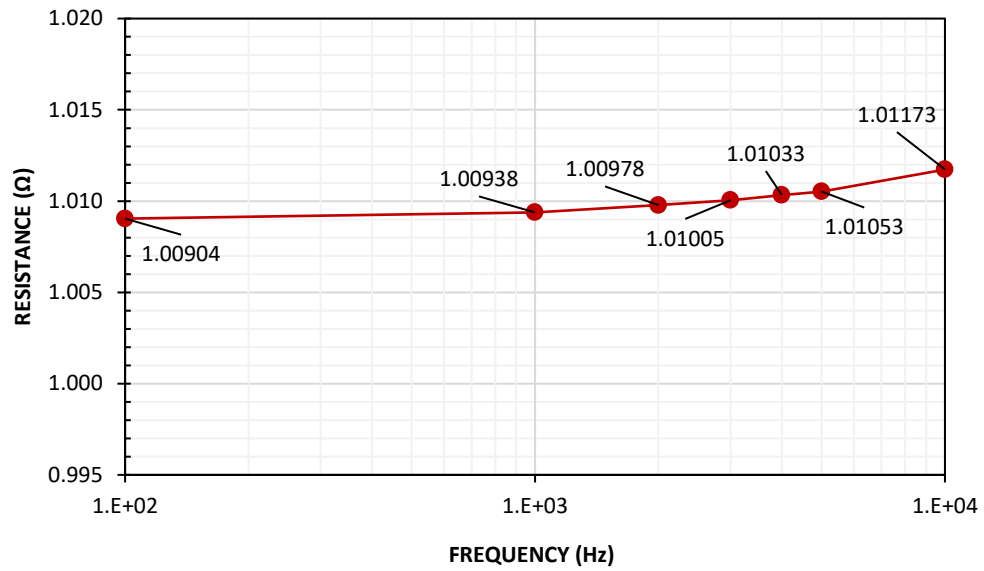
จากรูปที่ 4.5 ค่าความต้านทานที่วัดได้ค่อนข้างคงที่ที่ความถี่ $100\ \text{Hz} - 1\ \text{kHz}$ และเมื่อความถี่สูงขึ้นไปกว่า $1\ \text{kHz}$ ค่าความต้านทานลดลงเล็กน้อย

สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $100\ \Omega$ $10\ k\Omega$ และ $12\ k\Omega$

จากรูปที่ 4.6 – 4.8 สามารถสังเกตได้ว่า ค่าความต้านทานที่วัดได้ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเกิน $100\ \text{Hz}$

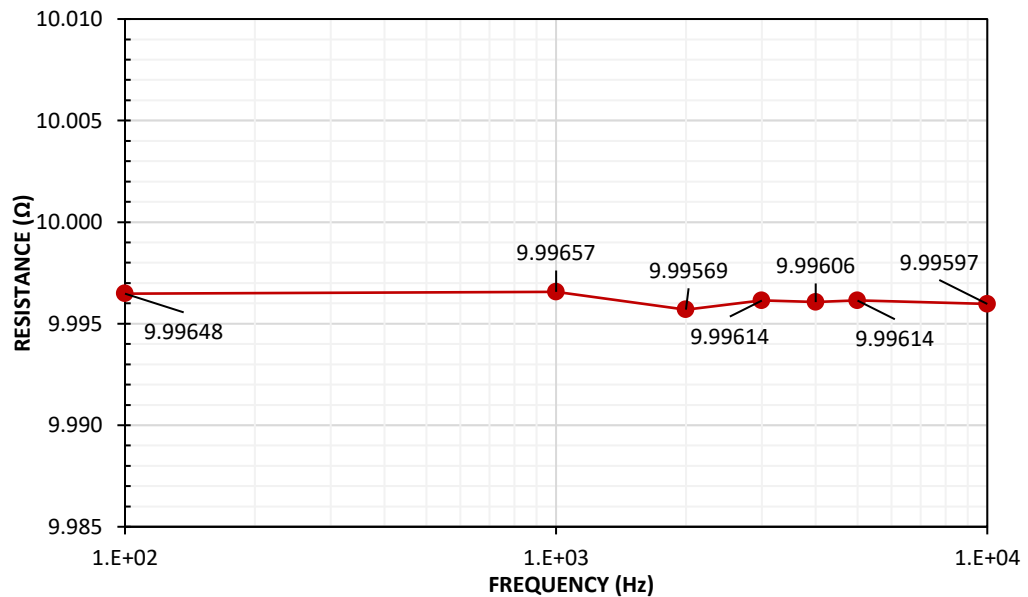
เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่อาจส่งผลให้ผลลัพธ์ของการวัดที่ได้คลาดเคลื่อนส่วนหนึ่งอาจเกิดจากคุณลักษณะเฉพาะของตัวต้านทานที่เกิดจากผู้ผลิตเองที่ทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน สามารถสังเกตได้ที่ความถี่ $4\ \text{kHz}$ ค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่มากกว่า $4\ \text{kHz}$ สำหรับโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $100\ \Omega$ $10\ k\Omega$ และ $12\ k\Omega$ โดยพฤติกรรมนี้เป็นเหตุมาจากผลของเรโซแนนซ์ (Resonance) ภายในตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับเอง [31] เนื่องจากจากโหลดตัวต้านทานเป็นตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งได้อธิบายโครงสร้างของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟิล์มโลหะไว้แล้วในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.4 ดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ การทำการชดเชยของเครื่องวัด LCR เองและการวัดผ่านสายโคแอกเชียลควรถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากค่าความต้านทาน ความเหนี่ยวนำและความจุประจุของสายอาจเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลให้ผลการวัดคลาดเคลื่อนด้วยเช่นกัน

R 1 Ω

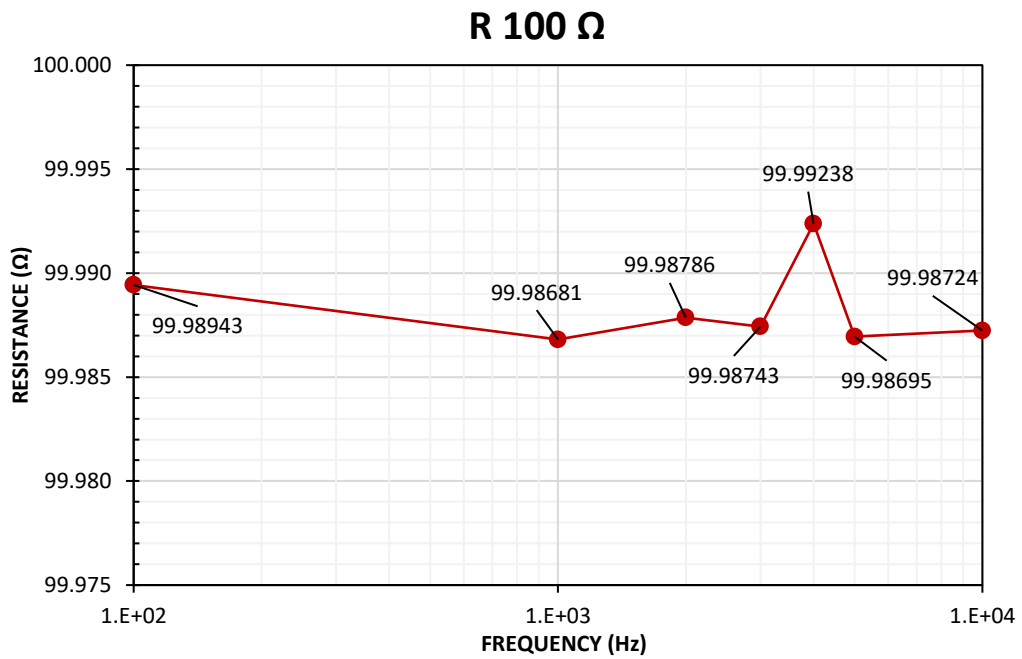


รูปที่ 4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 Ω

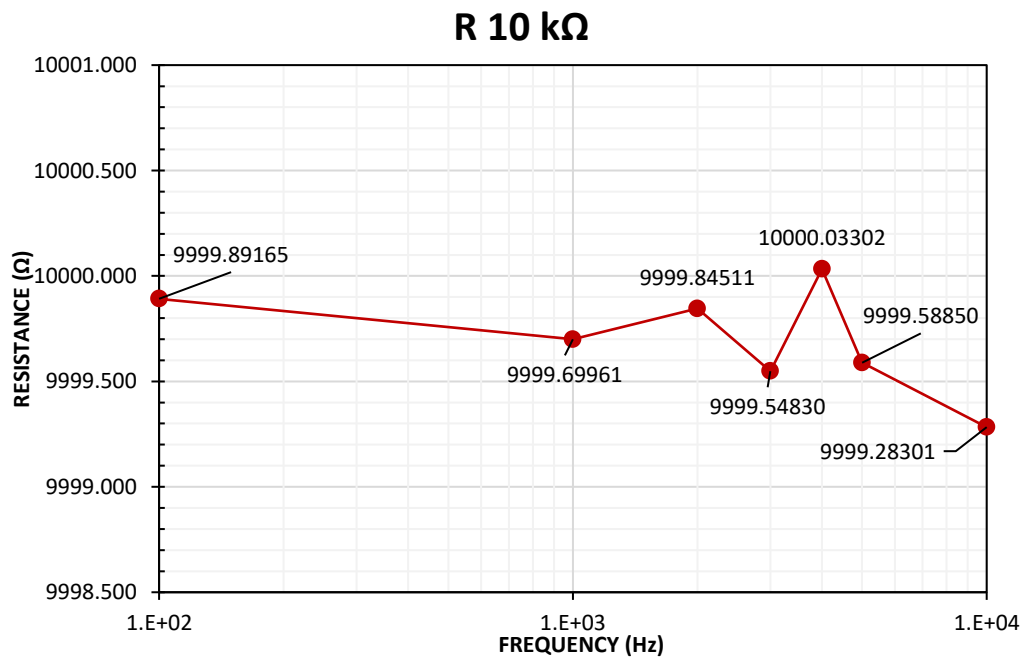
R 10 Ω



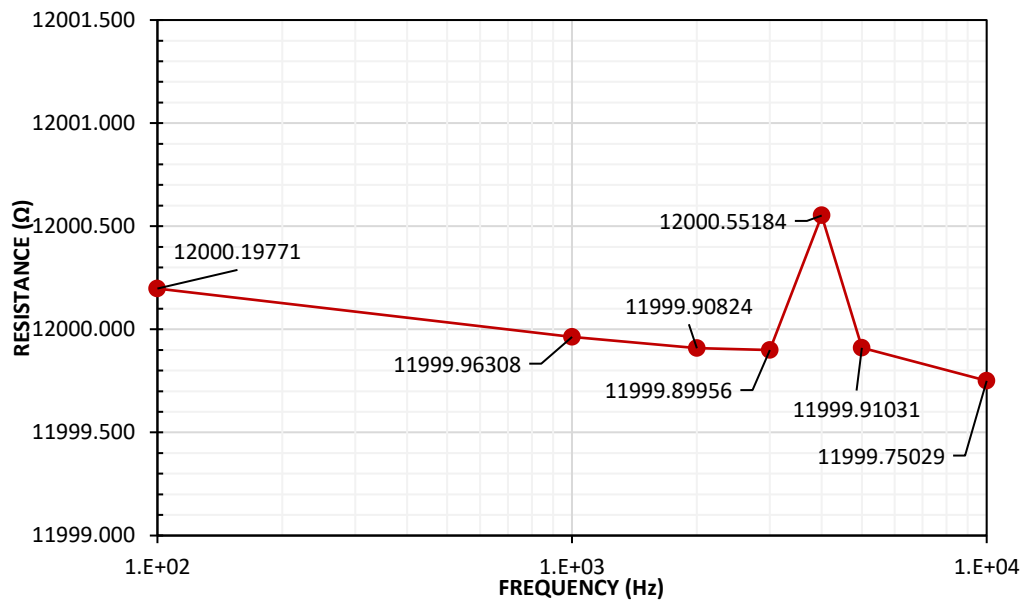
รูปที่ 4.5 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 Ω



รูปที่ 4.6 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 100 Ω



รูปที่ 4.7 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 k Ω

R 12 k Ω 

รูปที่ 4.8 ผลการวัดค่าความต้านทานสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 12 k Ω



บทที่ 5

การศึกษาผลการชดเชยค่าในสายวัดโคแอกเชียล RG-58/U ของเครื่องวัด LCR (Cable Compensation)

ในการวัดค่าความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องวัด LCR เชื่อมต่อการวัดแบบ 4-Wire ผ่านสายโคแอกเชียล การชดเชยค่าของเครื่องมือวัด คือกระบวนการแก้ไข หรือลดผลกระทบจากคุณสมบัติที่ไม่ต้องการของระบบการวัด เช่น สายวัด อุปกรณ์เชื่อมต่อ หรือจุดเชื่อมต่อก่อนทำการวัดค่าอุปกรณ์จริง ซึ่งปกติเครื่องวัด LCR จะมีฟังก์ชันการทำชดเชย ได้แก่ การวัดแบบปลายเปิดเพื่อชดเชยค่าความจุที่กระจายในระบบการวัด การวัดแบบปลายปิดเพื่อชดเชยค่าความเหนี่ยวนำ และความต้านทานที่ตกค้างอยู่ในระบบวัด และการวัดโดยมีโหลดมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน (Load Compensation) เช่น ตัวต้านทานมาตรฐานเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนจากโหลดจริง

ในการศึกษานี้จะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อศึกษาผลการชดเชยค่าในสายวัดโคแอกเชียล ทั้งในส่วนของคุณค่าความต้านทาน และรีแอกแตนซ์ของโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$ เชื่อมต่อแบบ 4-Wire โดยเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างการต่อวัดโหลดโดยตรง โดยปราศจากสายโคแอกเชียล และการวัดแบบต่อสายโคแอกเชียลที่ทำการชดเชยค่าในสายวัดก่อนทำการวัด แต่เนื่องจากเงื่อนไขในการทำการวัดที่แตกต่างกัน ดังนั้น ผลการวัดระหว่างการวัดโดยตรงที่ปราศจากสายโคแอกเชียล และการวัดแบบมีสายโคแอกเชียลจึงมีค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดแตกต่างกัน จึงไม่ควรนำมาเปรียบเทียบค่าโดยตรง และไม่ควรมานำมาหาข้อสรุปถึงประสิทธิภาพของผลการวัดทั้ง 2 กรณีว่าแบบใดดีกว่าผ่านผลการทดลองนี้ แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าผลการวัดค่าความต้านทานโดยตรงโดยปราศจากการเชื่อมต่อของสายวัดย่อมได้ผลการวัดที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่าการวัดผ่านสายวัดและอุปกรณ์เชื่อมต่อ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติสำหรับงานที่จำเป็นต้องใช้สายวัดอย่างเลี่ยงไม่ได้ สายวัดจะต้องทำการชดเชยแบบอัตโนมัติ (Auto Correction) ที่เครื่องและผลการวัดที่ได้จากวิธีนี้จะถูกนำไปประเมินค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ดังนั้น ในการศึกษานี้ จึงทำการเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากทั้ง 2 กรณี เพื่อนำไปพิจารณาแนวโน้มของผลการวัดทั้ง 2 กรณีที่ช่วงความถี่ $100\ \text{Hz} - 10\ \text{kHz}$ เท่านั้น ซึ่งผลการวัดที่ได้ควรมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

5.1 การศึกษาการชดเชยค่าในสายวัด (Cable Compensation) ของเครื่องวัด LCR โดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ขณะเชื่อมต่อโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ k\Omega$ และ $12\ k\Omega$ ที่ช่วงความถี่ $100\ \text{Hz} - 10\ \text{kHz}$

5.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

- Agilent E4980A Precision LCR Meter
- สายโคแอกเชียล RG-58/U
- โหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ k\Omega$ และ $12\ k\Omega$

5.1.2 การตั้งค่า และการติดตั้งเครื่องมือ

Agilent E4980A Precision LCR Meter หรือ เครื่องวัด LCR ถูกใช้สำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ k\Omega$ และ $12\ k\Omega$ ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ $10\ \text{mA}$ $9\ \text{mA}$ $5\ \text{mA}$ $9.9\ \mu\text{A}$ และ $8.5\ \mu\text{A}$ ตามลำดับ ทำการวัดภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ $(23.0 \pm 5.0)\ ^\circ\text{C}$ ที่ช่วงความถี่ $100\ \text{Hz} - 10\ \text{kHz}$ โดยใช้ฟังก์ชัน Sweep และเลือกโหมดการวัดเป็นการวัดค่าอิมพีแดนซ์ $Z - \theta$ ก่อนทำการวัดจะต้องทำการอุ่นเครื่องมืออย่างน้อย 30 นาที และบันทึกค่า ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ 2 กรณี ดังนี้

1. กรณีวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยตรง โดยปราศจากสายโคแอกเชียล เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง (Reference, Ref.) ซึ่งภาพรวมของการเชื่อมต่อของระบบการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Ref. แสดงดังรูปที่ 5.1
2. กรณีวัดค่าอิมพีแดนซ์ผ่านสายโคแอกเชียล 1 เมตร ซึ่งเรียกกรณีนี้ว่า Cable Correction (Cable Corr.) ในกรณีนี้จะทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์คล้ายกับการวัดค่าความต้านทานดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการวัดแบบ 4-Wire และถูกติดตั้งให้ระยะห่างระหว่างสายประมาณ 2 เซนติเมตร

เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการชดเชยค่าสายของเครื่องวัด LCR ก่อนทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์จะต้องทำการชดเชยค่าเครื่องวัด LCR ดังรูปที่ 3.3 สำหรับกรณี Ref. และก่อนทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Cable Corr. ต้องทำการชดเชยค่าเครื่องวัด LCR ดังรูปที่ 3.3 และทำการชดเชยค่าในสายดังรูปที่ 4.3 ก่อนทุกครั้ง ซึ่งสามารถทำได้ ดังนี้

การชดเชยค่าของเครื่องวัด LCR

แบบเปิดวงจร : ตั้งค่า Meas setup > Correction > **Open: on**

แบบปิดวงจร : ตั้งค่า Meas setup > Correction > **Short : on**

การชดเชยค่าในสายวัด

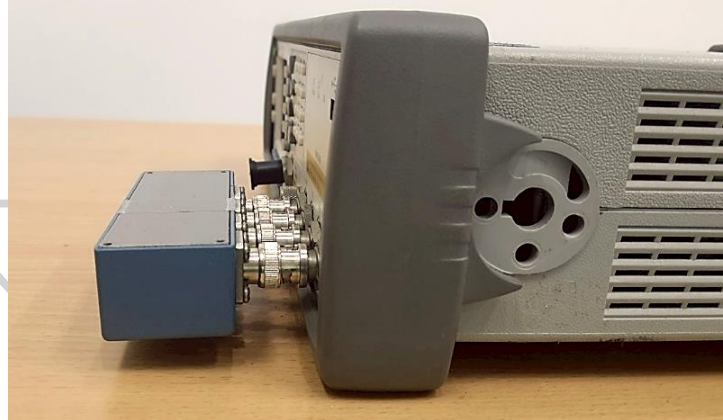
แบบเปิดวงจร : ตั้งค่า Meas setup > Correction > Length : 1 m > **Open: on**

แบบปิดวงจร : ตั้งค่า Meas setup > Correction > Length : 1 m > **Short : on**

ก.)





ข.)



รูปที่ 5.1 ภาพรวมการวัดค่าความต้านโดยปราศจากสายโคแอกเซียล ก.) ด้านหน้า และ ข.) ด้านข้าง

5.1.3 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ โดยปราศจากสายโคแอกเซียล และการวัดผ่านสายโคแอกเซียล

การเปรียบเทียบผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$ ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. โดยแสดงผลทั้งขนาดอิมพีแดนซ์ และมุมอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 5.2 – 5.6 ตามลำดับ โดยมีสัญลักษณ์ ดังนี้

-  สีน้ำเงิน คือ ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Ref.
-  สีแดง คือ ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Cable Corr.

จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้ในกรณี Ref. สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$ เกิดความคลาดเคลื่อนจากค่าปกติ (Nominal Value) เนื่องจากตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.005\%$ (50 ppm) ดังที่ระบุไว้ในข้อมูลจำเพาะ ซึ่งถูกกล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.4

สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $1\ \Omega$

จากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.2 พบว่าค่าขนาดอิมพีแดนซ์ของกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. มีค่าค่อนข้างคงที่ที่ความถี่ $100\ \text{Hz} - 1\ \text{kHz}$ และค่าขนาดอิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงตามความถี่เมื่อความถี่สูงกว่า $1\ \text{kHz}$ ตลอดทุกช่วงความถี่ ขนาดอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Cable Corr. มีค่ามากกว่าค่าขนาดอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Ref.

ในขณะที่มุมของอิมพีแดนซ์ของกรณี Cable Corr. และกรณี Ref. มีขนาดมุมของอิมพีแดนซ์เท่ากัน ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ที่ความถี่ $100\ \text{Hz}$ และมีขนาดมุมเพิ่มขึ้นเป็นค่าบวกเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อความถี่สูงมากกว่า $100\ \text{Hz}$ พบว่าขนาดมุมทั้ง 2 กรณี เริ่มมีความแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน โดยที่ขนาดมุมของกรณี Ref. มีค่ามากกว่าขนาดมุมของกรณี Cable Corr. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการวัดโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงและการวัดผ่านสายโคแอกเซียลที่ทำการชดเชยค่าสายผ่านเครื่องวัด LCR แสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งการชดเชยค่าสายทำให้ผลที่วัดได้แสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเหนี่ยวนำน้อยลง

สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $10\ \Omega$

จากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $10\ \Omega$ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.3 พบว่าค่าขนาดอิมพีแดนซ์ของกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดทุกช่วงความถี่ ซึ่งขนาดอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Ref. มีค่ามากกว่าค่าขนาดอิมพีแดนซ์ของกรณี Cable Corr. ตลอดทุกช่วงความถี่

ในขณะที่มุมของอิมพีแดนซ์กรณี Cable Corr. และกรณี Ref. มีขนาดมุมของอิมพีแดนซ์เท่ากัน ซึ่งมีค่าเป็นลบที่ความถี่ 100 Hz และมีขนาดมุมเพิ่มขึ้นเป็นค่าบวกเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อความถี่สูงมากกว่า 100 Hz พบว่าขนาดมุมทั้ง 2 กรณี เริ่มมีความแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน โดยที่ขนาดมุมของกรณี Ref. มีค่ามากกว่าขนาดมุมของกรณี Cable Corr. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการวัดโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงและการวัดผ่านสายโคแอกเซียลที่ทำการชดเชยค่าสายผ่านเครื่องวัด LCR แล้ว แสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเหนี่ยวนำ และการชดเชยค่าสายทำให้ผลที่วัดได้แสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเหนี่ยวนำน้อยลง

สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ 100 Ω

จากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 100 Ω ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.4 พบว่า กรณี Ref. และกรณี Cable Corr. แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ตลอดทุกช่วงความถี่ที่ 100 Hz – 10 kHz โดยขนาดอิมพีแดนซ์มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ขนาดอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Ref. มีค่ามากกว่าค่าขนาดอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Cable Corr.

ในขณะที่กรณี Cable Corr. และกรณี Ref. มีขนาดมุมของอิมพีแดนซ์เท่ากัน ซึ่งมีค่าเป็นลบที่ความถี่ 100 Hz แสดงให้เห็นว่าผลการวัดของโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงและการวัดผ่านสายโคแอกเซียลที่ทำการชดเชยค่าสายผ่านเครื่องวัด LCR แล้ว มีพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุ และเมื่อความถี่สูงมากกว่า 100 Hz ขนาดของมุมทั้ง 2 กรณี มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงพฤติกรรมคล้ายตัวต้านทาน โดยขนาดมุมของกรณี Ref. มีค่ามากกว่าขนาดมุมของกรณี Cable Corr. เล็กน้อย ซึ่งยังคงแสดงให้เห็นว่าการชดเชยค่าสายทำให้มุมของผลการวัดอิมพีแดนซ์ให้ผลที่วัดได้แสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเหนี่ยวนำน้อยลง

สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ 10 k Ω และ 12 k Ω

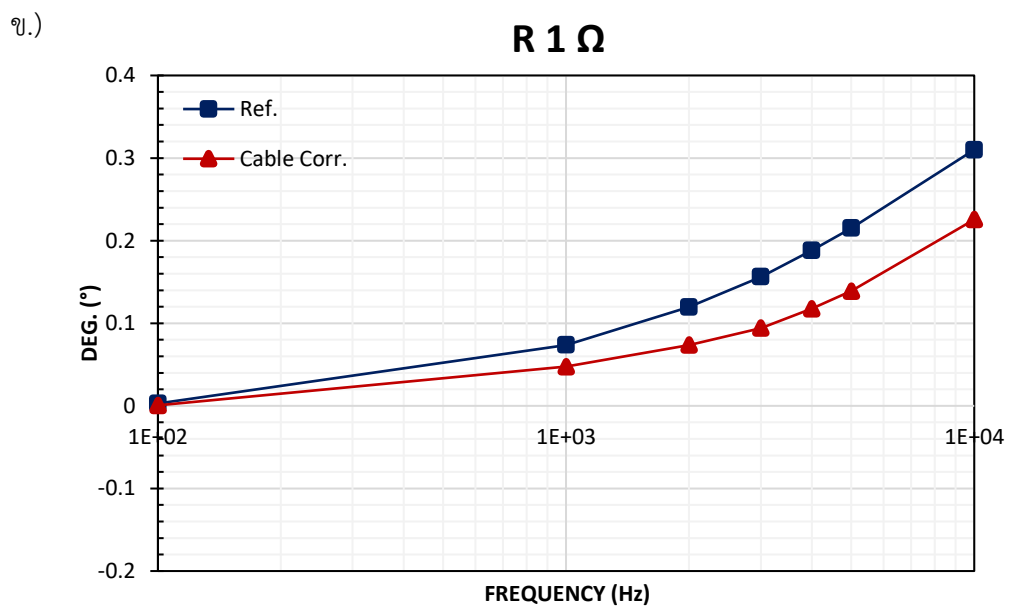
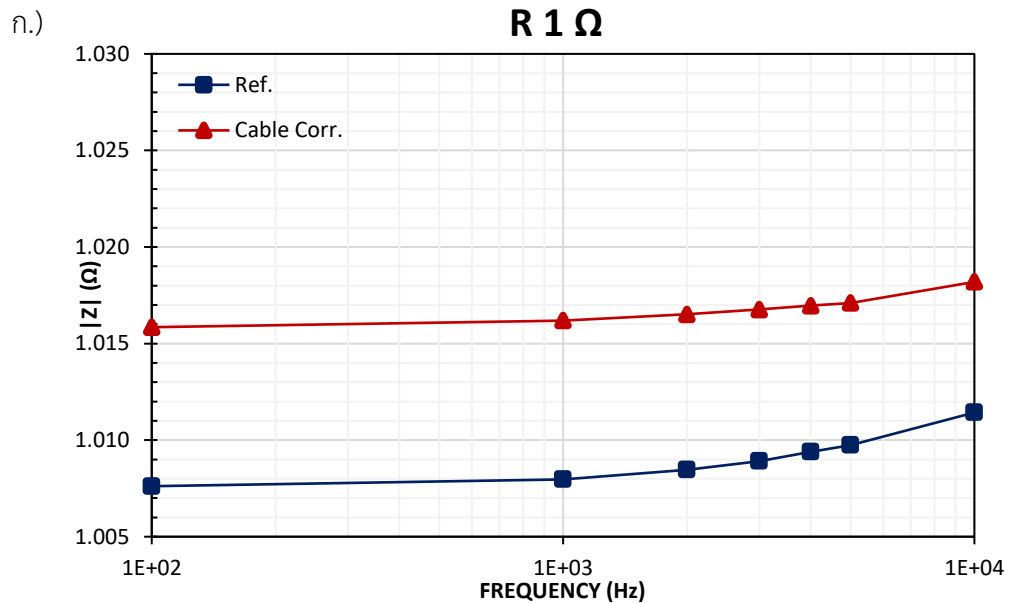
จากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 k Ω และ 12 k Ω ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ พบว่าขนาดอิมพีแดนซ์ และมุมของอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 k Ω และ 12 k Ω ของกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. มีค่าใกล้เคียงกันตลอดทุกช่วงความถี่ และแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงตามความถี่อย่างชัดเจน ซึ่งค่าขนาดอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 กรณีมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้นมากกว่า 100 Hz และมุมของอิมพีแดนซ์สำหรับโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 2 ขนาด มีค่าเป็นลบและมีแนวโน้มเป็นลบมากขึ้นเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าผลการวัดโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงและการวัดผ่านสายโคแอกเซียลที่ทำการชดเชยค่าสายผ่านเครื่องวัด LCR แล้ว มีพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุ

เมื่อพิจารณาภาพรวมขนาดมุมของอิมพีแดนซ์จากรูปที่ 5.2 – 5.6 แสดงผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω 10Ω 100Ω $10 \text{ k}\Omega$ และ $12 \text{ k}\Omega$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า

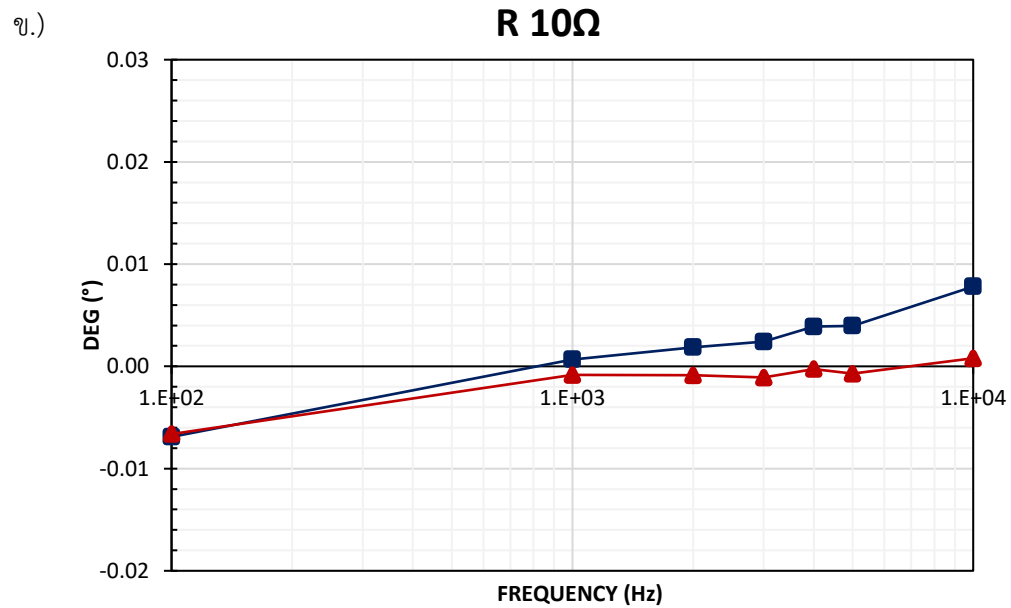
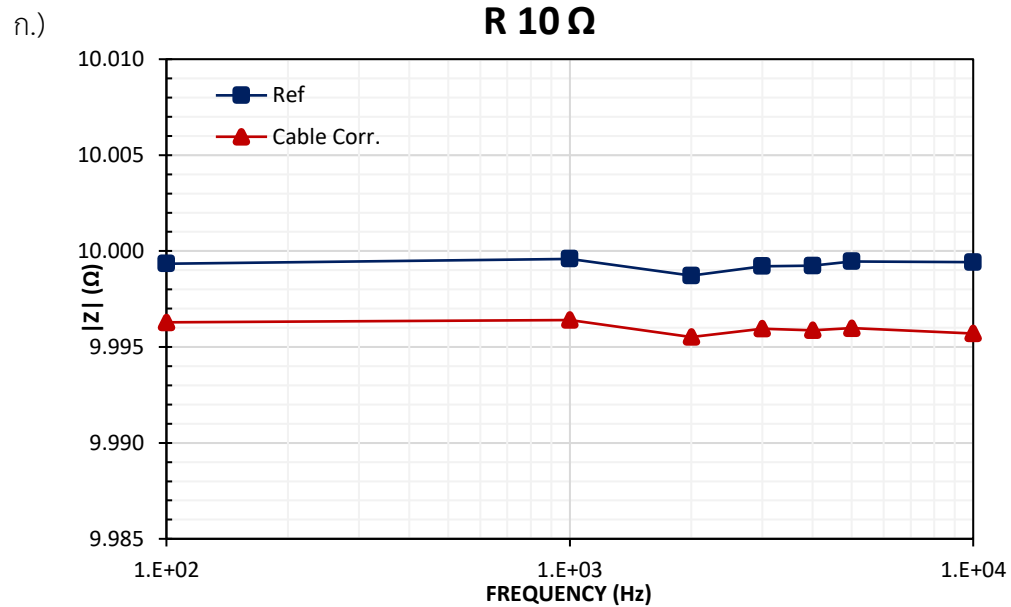
- ขนาดมุมของอิมพีแดนซ์สำหรับโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ 1Ω และ 10Ω มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงผลการวัดโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงและการวัดผ่านสายโคแอกเซียลที่ทำการชดเชยค่าสายผ่านเครื่องวัด LCR แล้ว มีพฤติกรรมคล้ายตัวเหนี่ยวนำอย่างชัดเจน
- ขนาดมุมของอิมพีแดนซ์สำหรับโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ 100Ω มีค่าใกล้เคียงศูนย์มาก แสดงให้เห็นถึงผลการวัดโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงและการวัดผ่านสายโคแอกเซียลที่ทำการชดเชยค่าสายผ่านเครื่องวัด LCR มีพฤติกรรมคล้ายตัวต้านทาน
- ขนาดมุมของอิมพีแดนซ์สำหรับโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $10 \text{ k}\Omega$ และ $12 \text{ k}\Omega$ มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นมากกว่า 1 kHz แสดงให้เห็นถึงผลการวัดโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงและสายโคแอกเซียลที่ทำการชดเชยค่าสายผ่านเครื่องวัด LCR มีพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุอย่างชัดเจน

ในการทดลองนี้พบว่าเมื่อโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่นำมาวัดค่ามีขนาดมากขึ้น ผลการวัดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับผ่านสายโคแอกเซียลแสดงถึงพฤติกรรมของตัวเหนี่ยวนำลดลง และแสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุมากขึ้นอย่างชัดเจน

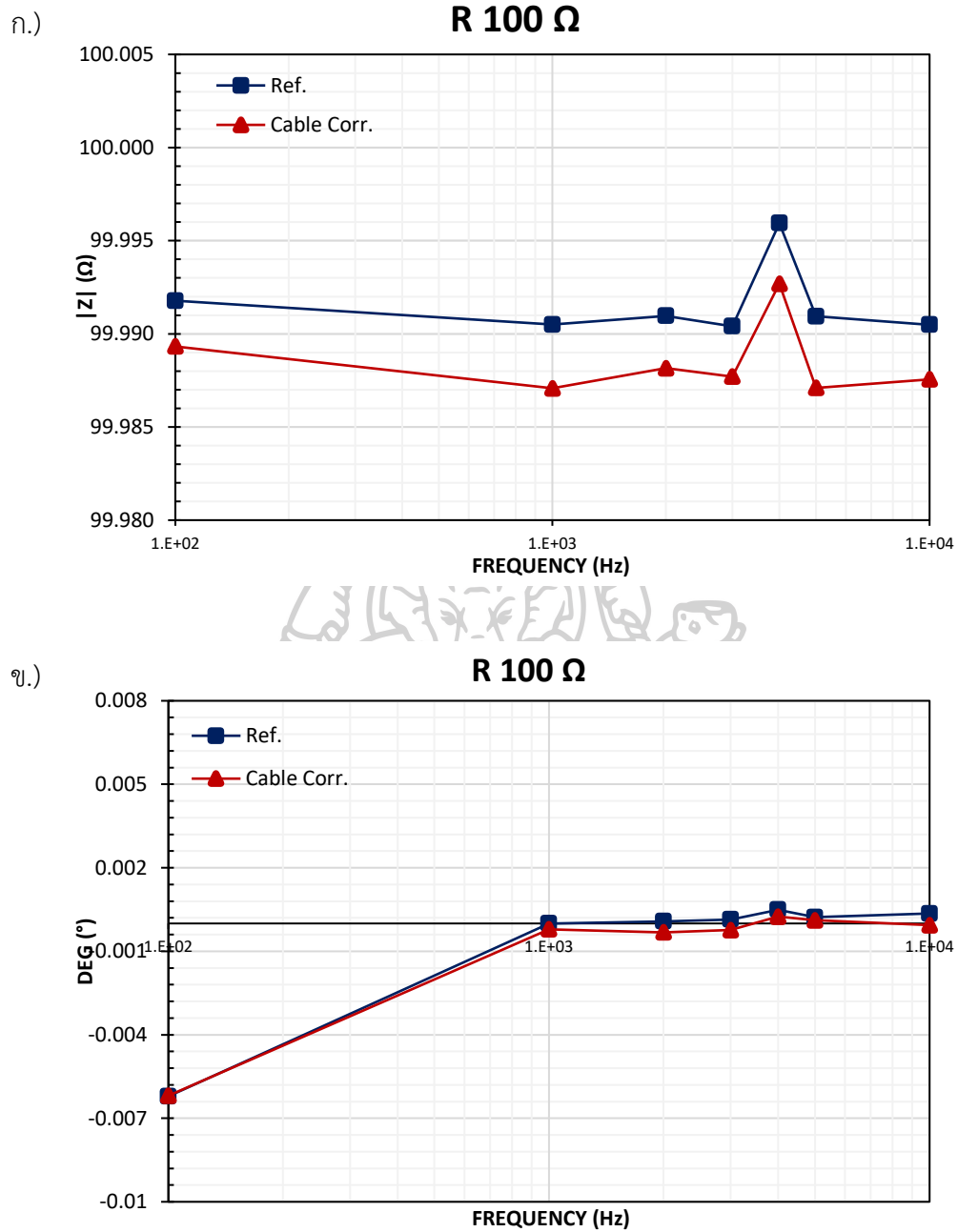




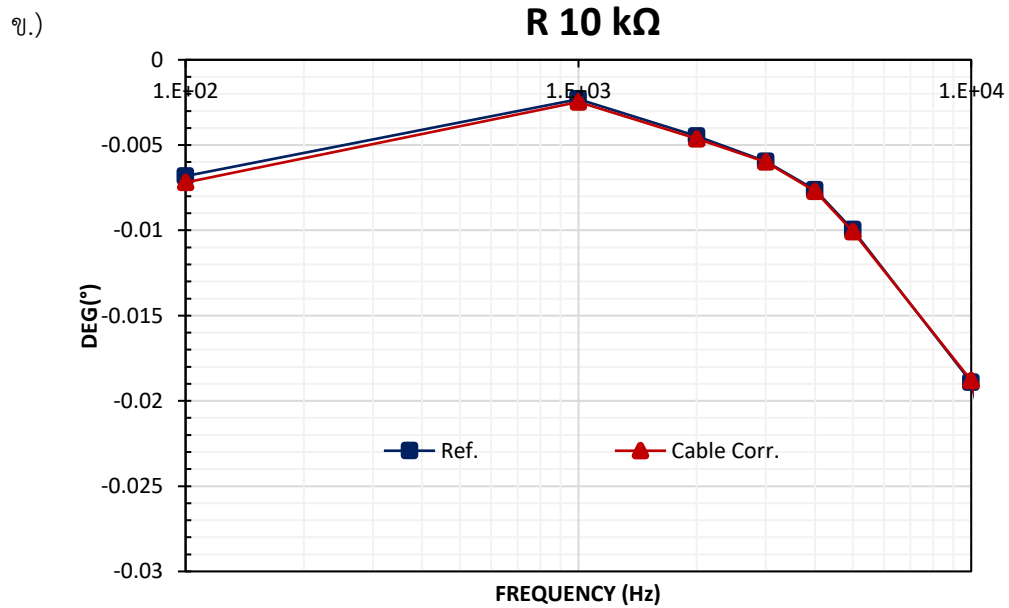
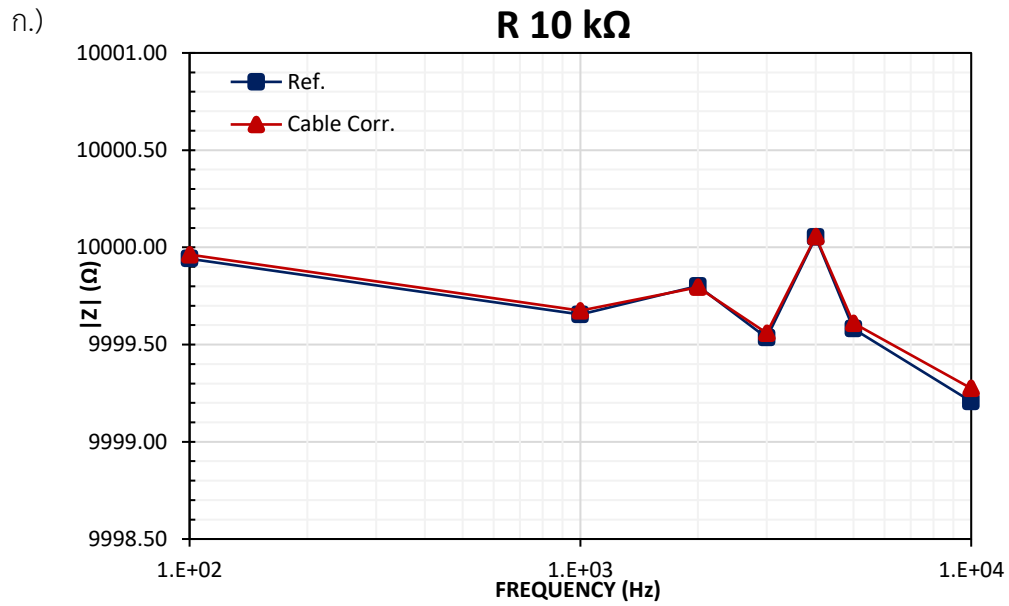
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์

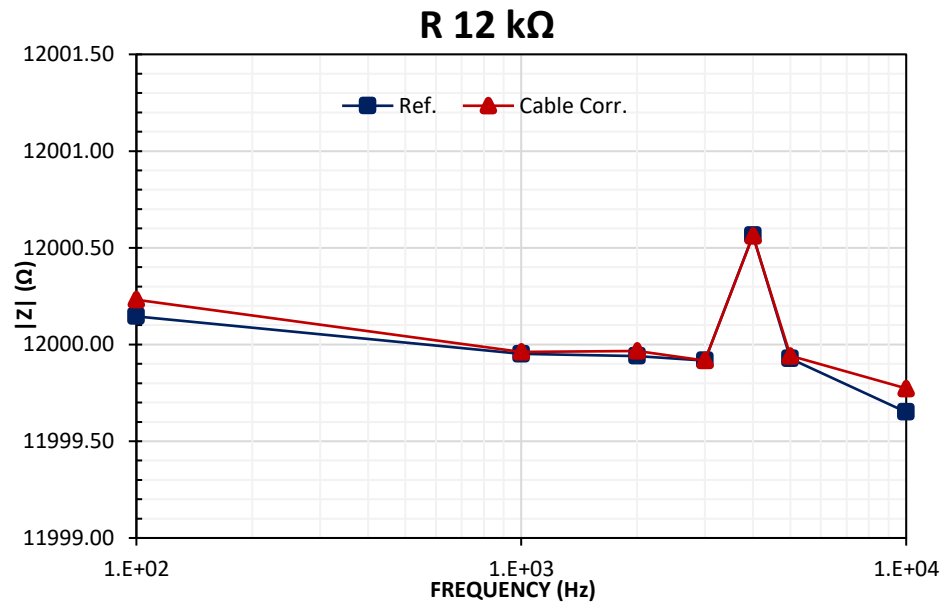


รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 100 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์

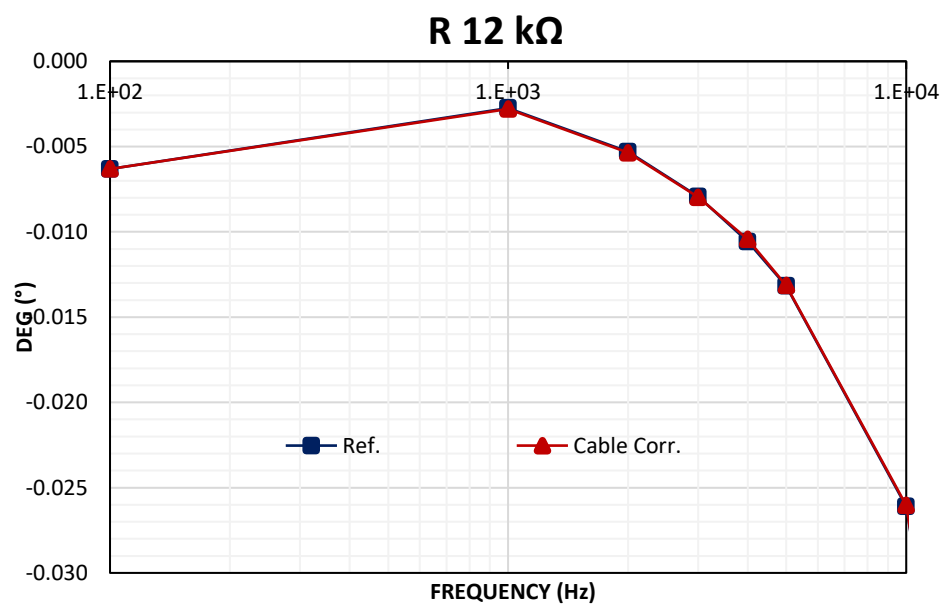


รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 k Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์

ก.)



ข.)



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Ref. และกรณี Cable Corr. สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 12 k Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์

ดังที่กล่าวไปข้างต้น เนื่องจากผลการวัดที่ได้จากกรณี Ref. มีค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดต่างจากผลการวัดที่ได้จากกรณี Cable Corr. ดังนั้นการเปรียบเทียบผลที่วัดได้จากทั้ง 2 กรณี จึงพิจารณาที่แนวโน้มของผลการวัดเท่านั้น ซึ่งผลการวัดที่ได้จากทั้ง 2 กรณีควรมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน โดยผลการวัดที่ได้จากกรณี Cable Corr. จะเป็นผลการวัดที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติมากกว่า อย่างไรก็ตาม สำหรับการวัดที่ต้องการความแม่นยำสูง สามารถนำค่าผลต่างระหว่างกรณี Cable Corr. และ กรณี Ref. ดังตารางที่ 5.1 ไปใช้เป็นค่าชดเชยสำหรับผลการวัดผ่านสายโคแอกเซียลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียง Ref. มากที่สุด โดยคำนึงถึงค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดทั้ง 2 กรณีร่วมด้วย

ตารางที่ 5.1 ผลต่างระหว่างผลการวัดจากกรณีวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับผ่านสายโคแอกเซียลที่ทำการชดเชยค่าสาย (Cable Corr.) และกรณีวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรง (Ref.)

Frequency (Hz)	$\Delta(\text{Cable Corr.} - \text{Ref.}) (\Omega)$				
	R 1	R 10	R 100	R 10k	R 12k
100	0.008233	-0.00307	-0.00245	0.020672	0.086029
1k	0.008226	-0.00319	-0.00342	0.020271	0.010871
2k	0.00805	-0.00320	-0.00281	-0.00572	0.026203
3k	0.007846	-0.00326	-0.0027	0.023922	-0.00011
4k	0.007569	-0.00336	-0.00325	0.003643	-0.00281
5k	0.007366	-0.00348	-0.00384	0.028967	0.014168
10k	0.006762	-0.00371	-0.00293	0.067917	0.121725

บทที่ 6

การศึกษาผลกระทบของสายโคแอกเซียล RG-58/U ต่อผลจากระบบวัดจากผลการวัดค่า อิมพีแดนซ์ โดยใช้เครื่องวัด LCR

การศึกษาผลกระทบของอิมพีแดนซ์ปรสิตในสายโคแอกเซียลผ่านการวัดค่าอิมพีแดนซ์อย่างเป็นระบบของโหลดต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$ เชื่อมต่อการวัดผ่านสายโคแอกเซียลแบบ 4-Wire โดยใช้เครื่องวัด LCR ทำการวัดในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz ซึ่งผลการวัดที่ได้จะถูกนำมาพิจารณาถึงพฤติกรรมของสายโคแอกเซียลขณะทำการวัดโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

6.1 การศึกษาอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเซียล RG-58/U โดยใช้ เครื่องวัด LCR วัดค่าอิมพีแดนซ์ ขณะเชื่อมต่อโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$

6.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

- Agilent E4980A Precision LCR Meter
- สายโคแอกเซียล RG-58/U
- โหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$

6.1.2 การตั้งค่า และการติดตั้งเครื่องมือ

Agilent E4980A Precision LCR Meter หรือเครื่องวัด LCR ถูกใช้สำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$ ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 10 mA 9 mA 5 mA 9.9 μA และ 8.5 μA ตามลำดับ ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ $(23.0 \pm 5.0)\ \text{C}$ ที่ช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz โดยใช้ฟังก์ชัน Sweep ก่อนทำการวัดจะต้องทำการอุ่นเครื่องมืออย่างน้อย 30 นาที และบันทึกค่า เพื่อศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเซียล RG-58/U ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ผ่านสายโคแอกเซียล 2 กรณี ซึ่งทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์คล้ายกับการวัดค่าความต้านทานดัง รูปที่ 4.1 โดยก่อนทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ต้องทำการชดเชยค่าเครื่องวัด LCR ดังรูปที่ 3.3 และทำการชดเชยค่าในสายดังรูปที่ 4.3 ก่อนทุกครั้ง ซึ่งสามารถทำได้ ดังนี้

1. กรณีทำการชดเชยค่าสายโคแอกเซียลก่อนทำการวัดซึ่งเรียกกรณีนี้ว่า Cable Correction (Cable Corr.)
2. กรณีไม่ทำการชดเชยค่าสายโคแอกเซียลก่อนทำการวัด ซึ่งเรียกกรณีนี้ว่า Cable Effect

6.1.3 ผลลัพธ์การศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเชียล RG-58/U

ผลการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเชียล RG-58/U จากการเปรียบเทียบผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω 10Ω 100Ω $10 \text{ k}\Omega$ และ $12 \text{ k}\Omega$ ระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect โดยแสดงผลทั้งขนาดอิมพีแดนซ์และมุมอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 6.1 – 6.5 ตามลำดับ โดยมีสัญลักษณ์ ดังนี้

 สีแดง คือ ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Cable Corr.

 สีเทา คือ ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Cable Effect

สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ 1Ω 10Ω และ 100Ω

จากรูปที่ 6.1 – 6.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω 10Ω และ 100Ω ระหว่างกรณี Cable Effect และ Cable Corr. ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 กรณี มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงความถี่ $100 \text{ Hz} - 1 \text{ kHz}$ จากนั้นค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่ความถี่มากกว่า 1 kHz โดยกรณี Cable Effect มีขนาดอิมพีแดนซ์มากกว่ากรณี Cable Corr. ตลอดทุกช่วงความถี่สำหรับโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 3 ขนาด

ที่ความถี่ 100 Hz มุมของอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากันทั้ง 2 กรณี โดยมีค่าใกล้ศูนย์ สำหรับโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω และมีค่าเป็นลบ สำหรับโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10Ω และ 100Ω แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นมากกว่า 100 Hz มุมของอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 กรณีสำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 3 ขนาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความถี่ และเริ่มมีค่าที่แตกต่างกันโดยที่ขนาดมุมของอิมพีแดนซ์สำหรับกรณี Cable Effect มีค่ามากกว่ากรณี Cable Corr. ซึ่งมุมของอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 กรณีเพิ่มขึ้นเป็นค่าบวก สำหรับโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω สามารถสังเกตได้ตลอดทุกช่วงความถี่ และสำหรับโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10Ω สามารถสังเกตได้ที่ช่วงความถี่ $1 \text{ kHz} - 10 \text{ kHz}$ และสำหรับโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 100Ω มุมของอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นมีค่าใกล้ศูนย์ในช่วงความถี่ $1 \text{ kHz} - 10 \text{ kHz}$

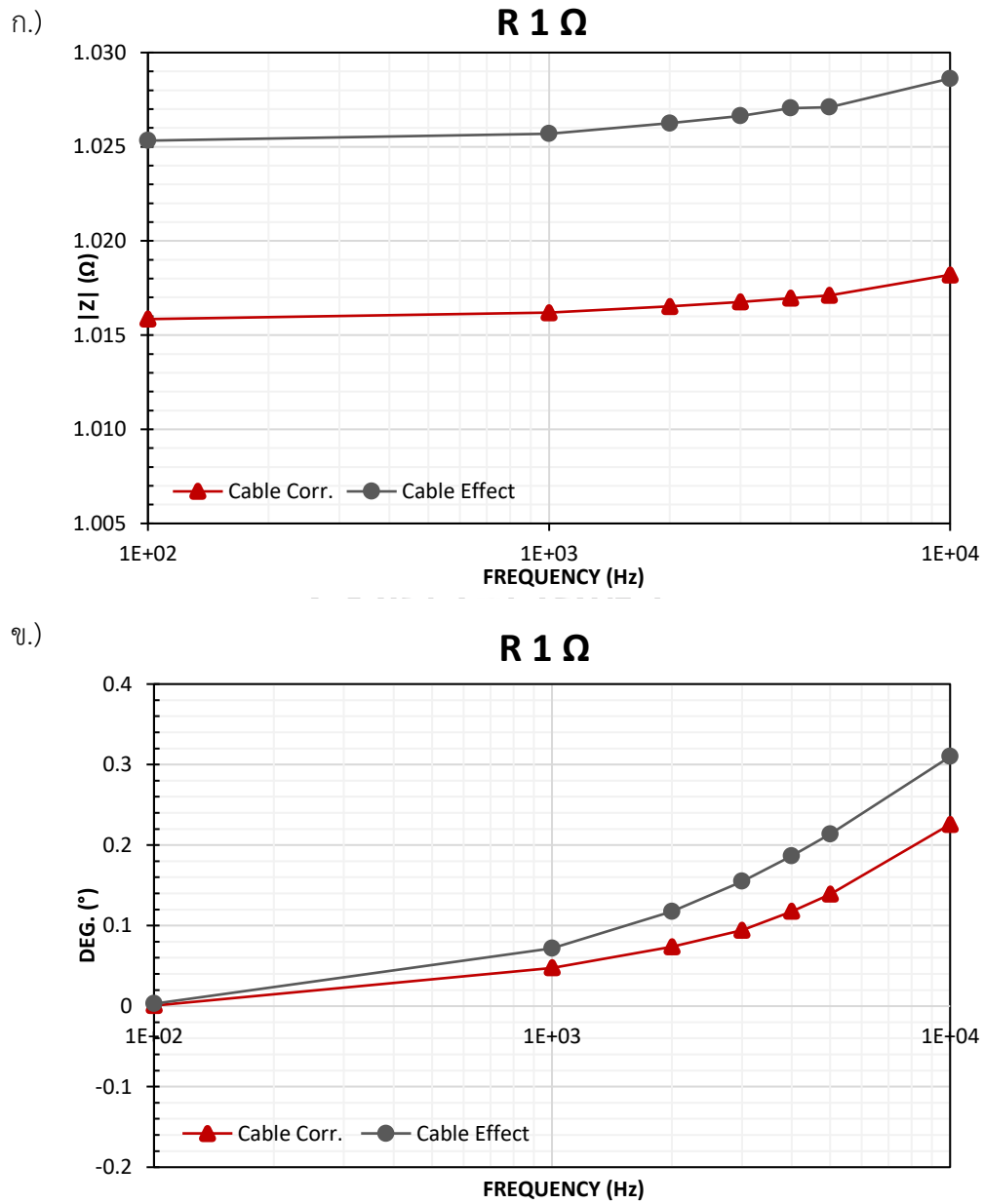
แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ 100 Hz สำหรับโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω ผลการวัดโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect แสดงพฤติกรรมคล้ายตัวต้านทาน และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นมากกว่า 100 Hz ถึง 10 kHz ผลการวัดโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 2 กรณีแสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเหนี่ยวนำ สำหรับโหนดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10Ω และ 100Ω ที่ความถี่ 100 Hz ผลการวัดโหนดตัวต้านทานไฟฟ้า

กระแสสลับทั้ง 2 กรณีแสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุ และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นในช่วง 1 kHz – 10 kHz พบว่าผลการวัดโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 2 กรณีแสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทาน นอกจากนี้ จากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 3 ขนาด พบว่าการชดเชยค่าสายทำให้ผลที่วัดได้แสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเหนี่ยวนำน้อยลง

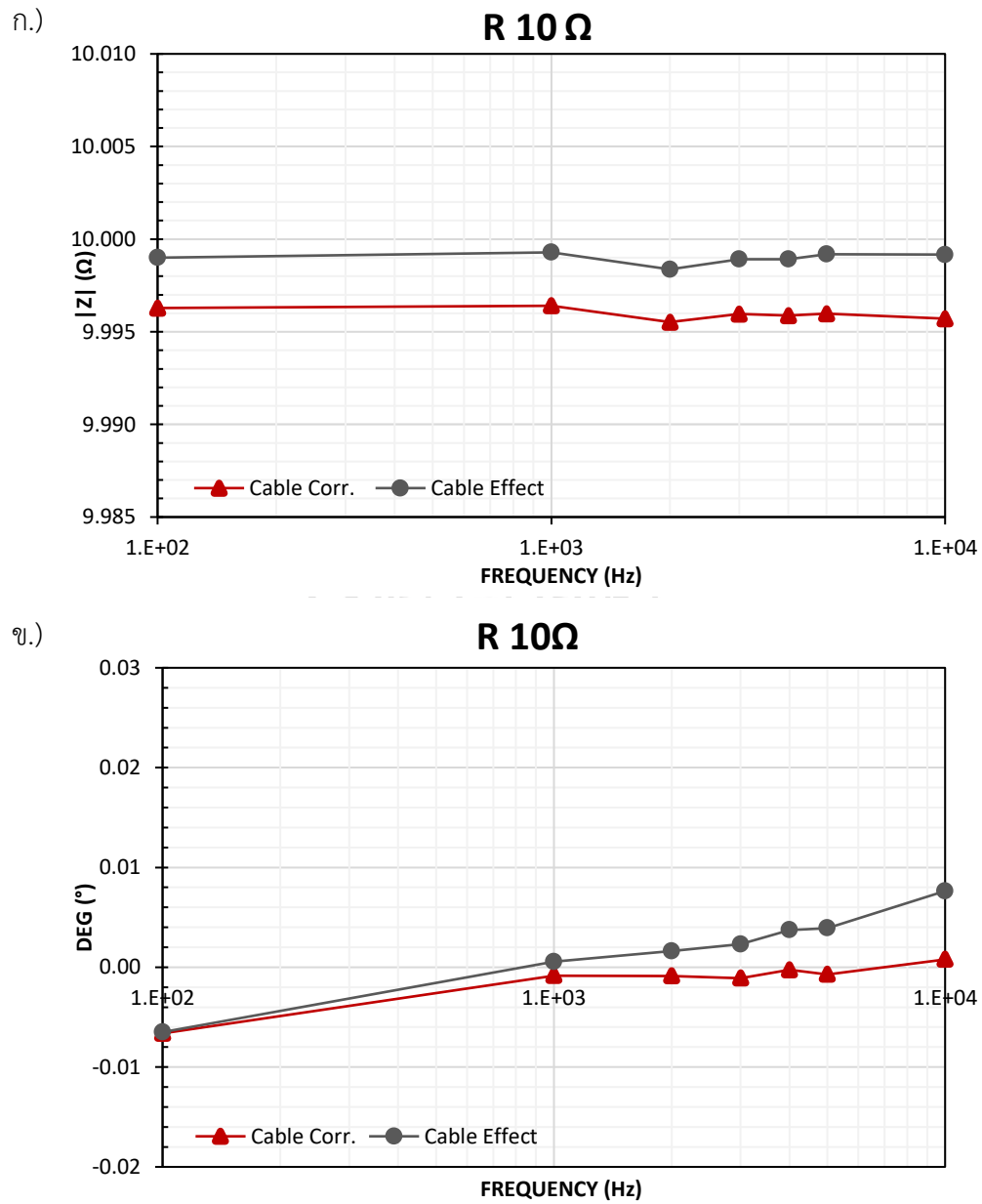
สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ 10 k Ω และ 12 k Ω

จากรูปที่ 6.4 – 6.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 k Ω และ 12 k Ω ระหว่างกรณี Cable Effect และ Cable Corr. ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดอิมพีแดนซ์ และมุมของอิมพีแดนซ์สำหรับทั้ง 2 กรณี มีค่าใกล้เคียงกันตลอดทุกช่วงความถี่ โดยขนาดอิมพีแดนซ์สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น มุมของอิมพีแดนซ์มีค่าเป็นลบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความถี่ 100 Hz – 1 kHz จากนั้นเมื่อความถี่ช่วง 1 kHz – 10 kHz มุมของอิมพีแดนซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนสำหรับโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 2 ขนาด แสดงให้เห็นว่าผลการวัดโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 2 กรณีแสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุอย่างชัดเจนที่ความถี่ 100 Hz แม้ว่าที่ความถี่ 1 kHz พฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุจะมีแนวโน้มน้อยลง แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นมากกว่า 1 kHz พฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุกลับแสดงออกอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการชดเชยค่าสายไม่สามารถลดพฤติกรรมที่คล้ายตัวเก็บประจุของผลที่วัดได้

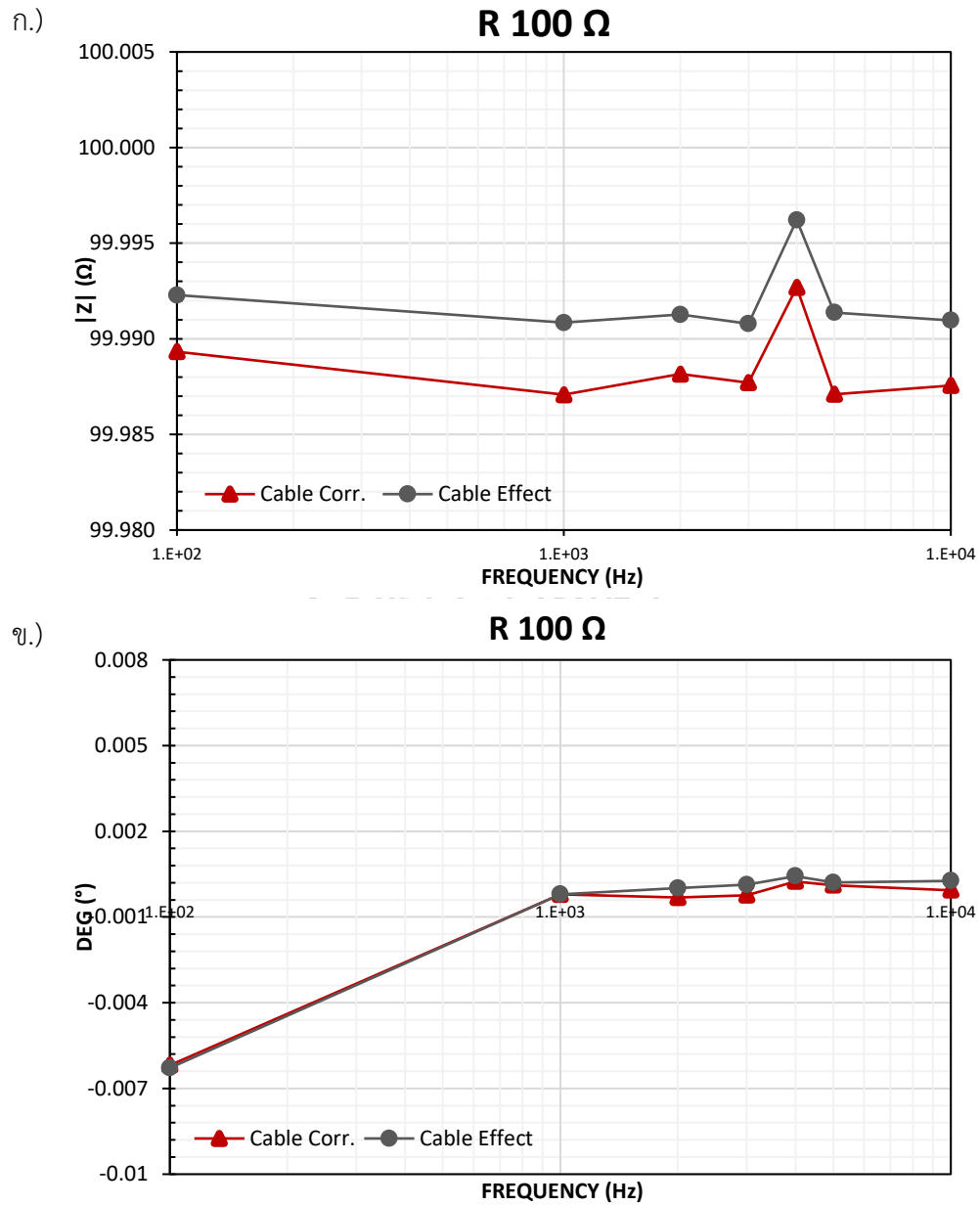
ผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า เนื่องจากโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าต่ำขนาด 1 Ω 10 Ω และ 100 Ω ทำให้สามารถสังเกตส่งผลกระทบของสายโคแอกเซียลได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับค่าสูงขนาด 10 k Ω และ 12 k Ω จะเห็นได้ว่าอิมพีแดนซ์ของกรณี Cable Effect จะมีค่าใกล้เคียงกับกรณี Cable Corr. ตลอดทุกช่วงความถี่สามารถอธิบายได้ว่าสายวัดโคแอกเซียลมีผลกระทบต่อระบบการวัดน้อยมากเมื่อเชื่อมต่อกับโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับค่าสูง 10 k Ω และ 12 k Ω นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาขนาดมุมของอิมพีแดนซ์ พบว่าเมื่อโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับมีขนาดมากขึ้น ขนาดมุมของอิมพีแดนซ์กลับยิ่งลดลง ทำให้พฤติกรรมของโพลต์ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับและสายโคแอกเซียลแสดงถึงพฤติกรรมการเหนี่ยวนำลดลง และแสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุมากขึ้น



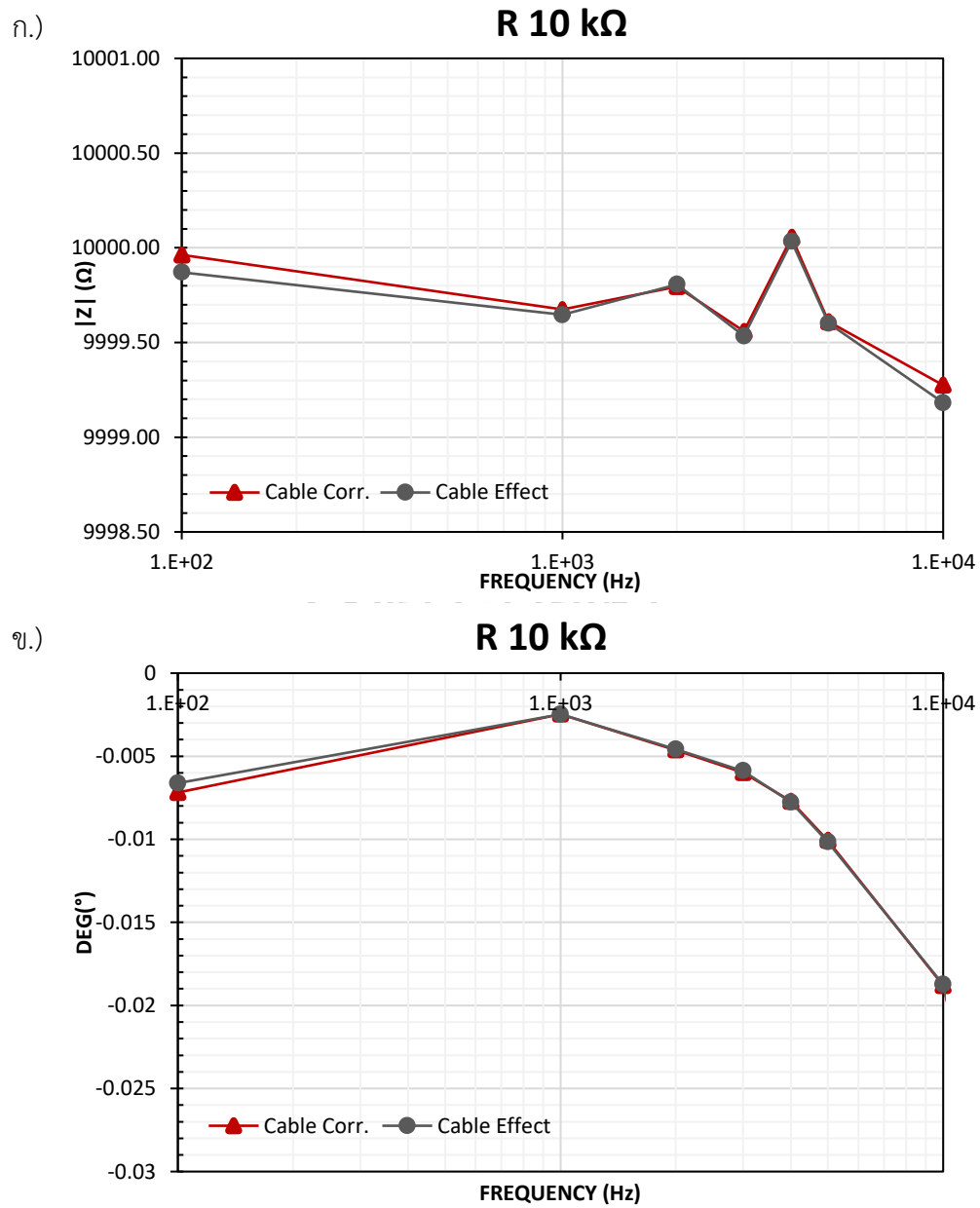
รูปที่ 6.1 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์



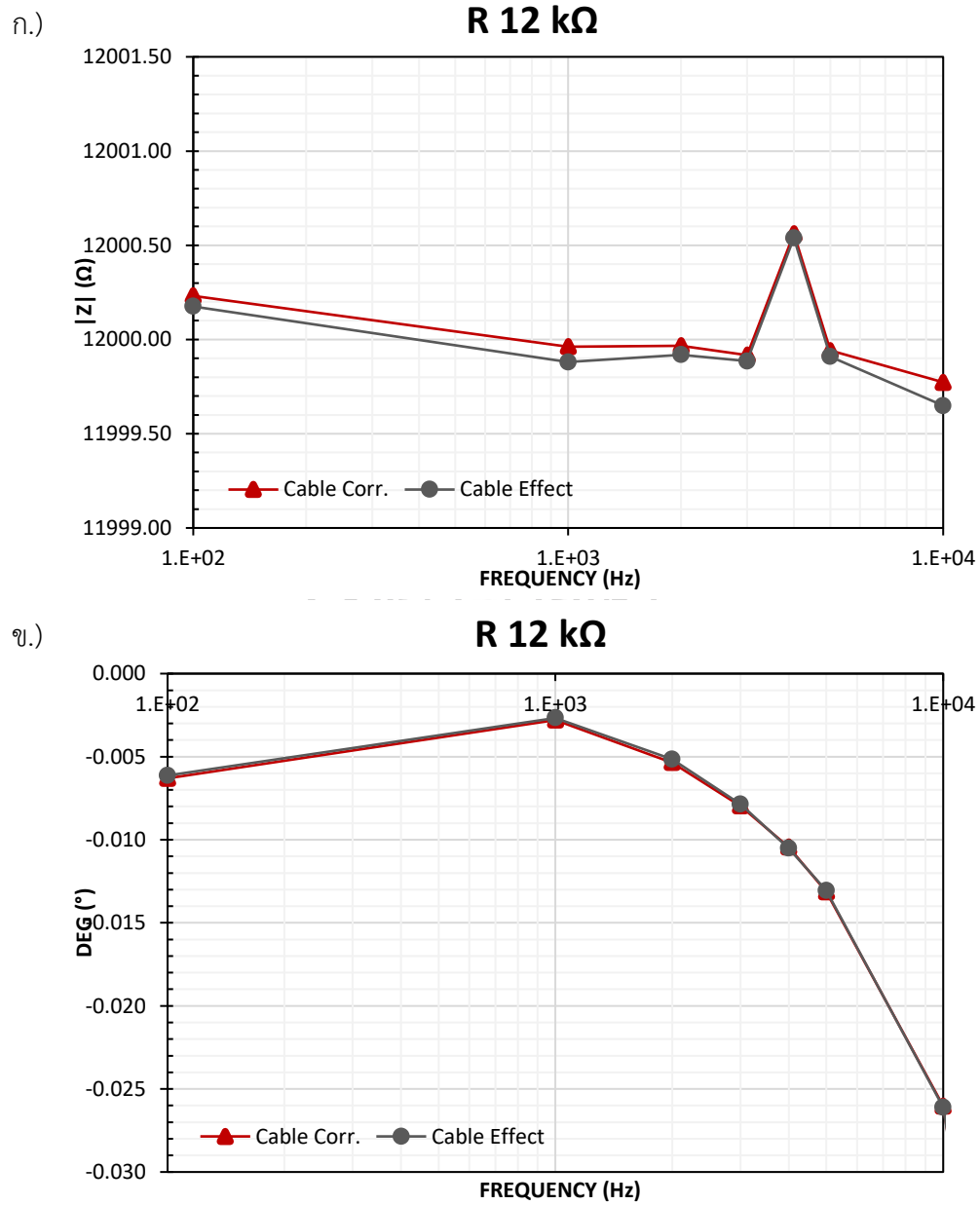
รูปที่ 6.2 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์



รูปที่ 6.3 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 100 Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์



รูปที่ 6.4 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 10 k Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์



รูปที่ 6.5 ผลการวัดเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และกรณี Cable Effect สำหรับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 12 k Ω โดยแสดง ก.) ขนาดอิมพีแดนซ์ และ ข.) มุมของอิมพีแดนซ์

บทที่ 7

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

สายโคแอกเชียลถูกออกแบบมาเพื่อรักษาความสมบูรณ์ของการวัดและความเที่ยงตรงของสัญญาณด้วยโครงสร้างเฉพาะของสายโคแอกเชียลมีตัวนำไฟฟ้าอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยฉนวนไดอิเล็กทริกและแผ่นป้องกันตัวนำด้านนอก ช่วยลดสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นวิทยุ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าสายโคแอกเชียลจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นประโยชน์เหล่านี้ในแง่ของการป้องกันและความสม่ำเสมอของอิมพีแดนซ์ แต่สายโคแอกเชียลก็มีข้อจำกัดบางประการในการใช้งานการวัดเฉพาะทาง และต้องการความเที่ยงตรงสูง ในงานด้านมาตรวิทยาสำหรับระบบการวัดค่า AC QHR จากปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์และการถ่ายทอดค่าความต้านทานมาตรฐานในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz ความแม่นยำในการวัดอาจลดลงเนื่องจากผลกระทบของอิมพีแดนซ์ที่มากเกินไปเนื่องจากอิมพีแดนซ์ปรสิต ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของวัสดุ รูปทรงของวงจร หรือลักษณะของสายสัญญาณ ยิ่งไปกว่านั้น ความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับพารามิเตอร์ปรสิตของสายเคเบิลมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานที่ไม่สามารถนำการชดเชยสายเคเบิลไปใช้งานได้ เช่น ในระบบการวัดมาตรฐานควอนตัม ซึ่งการสูญเสียของสายเคเบิลส่งผลกระทบต่อความไม่แน่นอนในการวัด

ในวิทยานิพนธ์ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอิมพีแดนซ์ปรสิตในสายโคแอกเชียล RG58/U ผ่านการวัดค่าอิมพีแดนซ์อย่างเป็นระบบของโหลดต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1Ω 10Ω 100Ω $10 \text{ k}\Omega$ และ $12 \text{ k}\Omega$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความต้านทานมาตรฐานที่ถูกถ่ายทอดค่าจาก AC QHR เชื่อมต่อการวัดผ่านสายโคแอกเชียลแบบ 4-Wire การวัดจะดำเนินการโดยใช้เครื่องวัด LCR ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 kHz โดยแบ่งหัวข้อการศึกษาออกเป็น 1.) การศึกษาลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเชียล RG-58/U 2.) การศึกษาการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U 3.) ศึกษาผลการชดเชยค่าในสายวัดโคแอกเชียล RG-58/U ของเครื่องวัด LCR และ 4.) การศึกษาผลกระทบของสายโคแอกเชียล RG-58/U ต่อผลจากระบบวัดจากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้เครื่องวัด LCR

1.) ผลการศึกษาคุณลักษณะอิมพีแดนซ์จำเพาะของสายโคแอกเชียล RG-58/U

การศึกษาอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเชียล RG-58/U ขณะไม่มีโหลดเชื่อมต่อที่ปลายสายโดยพิจารณาสายส่งมีการสูญเสียในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 kHz พบว่าตลอดทุกช่วงความถี่สายโคแอกเชียลแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุอย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มการแสดงผลพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุลดลงเล็กน้อยและยังแสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานภายในสูงมากและลดลงอย่างเฉียบพลัน ซึ่งผลเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อระบบการวัดแบบ 2 สาย ดังนั้นระบบการวัดจึงควรเลือกใช้ระบบการวัดแบบ 4 เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. การศึกษาการวัดค่าความต้านทานผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าความต้านทาน ณ ความถี่ที่ใช้งานและพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลให้ผลการวัดเกิดความคลาดเคลื่อนโดยวัดค่าความต้านทานที่อยู่ในช่วงย่านของค่าความต้านทานมาตรฐานที่ถูกถ่ายทอดจาก AC QHR ได้แก่ $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$ ผ่านสายโคแอกเชียล RG-58/U โดยเชื่อมต่อการวัดแบบ 4-Wire ที่ความถี่ 100 Hz – 10 kHz พบว่า โหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับค่าต่ำ $1\ \Omega$ และ $10\ \Omega$ มีค่าความต้านทานค่อนข้างคงที่ที่ความถี่ 100 Hz – 1 kHz จากนั้นแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและลดลงเล็กน้อยเมื่อความถี่สูงขึ้นมากกว่า 1 kHz ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สำหรับโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับค่าสูง $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$ พบว่าค่าความต้านทานแสดงการเปลี่ยนแปลงลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นตลอดทุกช่วงความถี่อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลให้ผลการวัดเกิดความคลาดเคลื่อนพบว่าสาเหตุหลักอาจเกิดได้จากหลายองค์ประกอบ ได้แก่ คุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ต่าง ๆ รวมถึงความแตกต่างทางคุณสมบัติของวัสดุและกระบวนการผลิตที่แต่ละผู้ผลิตใช้ นอกจากนี้ ความคลาดเคลื่อนจากระบบการวัดเองก็มีส่วนสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการชดเชยของเครื่องวัด LCR ที่มีบทบาทในการลดผลกระทบจากค่าความต้านทานภายในสายและจุดเชื่อมต่อ และควรคำนึงถึงผลกระทบของอิมพีแดนซ์ปรสิทที่เกิดขึ้นในสายวัดโคแอกเชียล ซึ่งอาจมีอิทธิพลต่อค่าที่วัดได้ การเข้าใจและควบคุมปัจจัยเหล่านี้ได้อย่างรอบด้านจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ได้ค่าการวัดที่มีความถูกต้องและเชื่อถือได้สูงสุด

3. ศึกษาผลการชดเชยค่าในสายวัดโคแอกเชียล RG-58/U ของเครื่องวัด LCR

การศึกษาผลการชดเชยค่าในสายวัดโคแอกเชียลในส่วนของค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ โดยเปรียบเทียบผลการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่าง 2 กรณี ได้แก่ การวัดโดยตรงแบบ 4 ขั้ว โดยไม่ใช้สายโคแอกเชียล (Ref.) และการวัดโดยใช้สายโคแอกเชียลที่ทำการชดเชยค่าสายด้วยเครื่องวัด LCR (Cable Corr.) ของโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเงื่อนไขในการทำการวัดทั้ง 2 กรณีมีความแตกต่างกัน ดังนั้นการเปรียบเทียบผลอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากทั้ง 2 กรณี เพื่อพิจารณาแนวโน้มของผลการวัดเท่านั้น ซึ่งผลการวัดที่ได้ควรมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่าสำหรับตัวต้านทานค่าต่ำ ได้แก่ $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ และ $100\ \Omega$ มีความแตกต่างของค่าขนาดอิมพีแดนซ์ระหว่างกรณี Cable Corr. และ Ref. อย่างชัดเจน และมุมอิมพีแดนซ์สำหรับทั้งโหลดตัวต้านทานทั้ง 3 ขนาด แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตลอดทุกช่วงความถี่ แต่ยังคงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $1\ \Omega$ ขนาดอิมพีแดนซ์ในทั้ง 2 กรณีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความถี่สูงกว่า $1\ \text{kHz}$
- ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $10\ \Omega$ ในช่วงความถี่ $100\ \text{Hz} - 1\ \text{kHz}$ ขนาดอิมพีแดนซ์คงที่และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยที่ความถี่สูงกว่า $1\ \text{kHz}$
- ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $100\ \Omega$ ขนาดอิมพีแดนซ์ลดลงอย่างชัดเจนตลอดทุกช่วงความถี่

จากผลการวิเคราะห์ในกลุ่มตัวต้านทานค่าต่ำพบว่า การชดเชยค่าสายมีผลทำให้มุมอิมพีแดนซ์ในกรณี Cable Corr. มีค่ามุนน้อยกว่ากรณี Ref. ซึ่งสะท้อนว่าการชดเชยค่าสายช่วยลดพฤติกรรมการเหนี่ยวนำของระบบวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้าม สำหรับตัวต้านทานค่ามาก ได้แก่ $10\ \text{k}\Omega$ และ $12\ \text{k}\Omega$ พบว่าขนาดและมุมของอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 กรณีมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทุกช่วงความถี่ โดยขนาดอิมพีแดนซ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงกว่า $100\ \text{Hz}$ และมุมอิมพีแดนซ์มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นตามความถี่ ซึ่งบ่งชี้ว่าทั้ง 2 กรณีแสดงพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ การชดเชยค่าสายในกรณีนี้ไม่สามารถลดพฤติกรรมเชิงตัวเก็บประจุได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าการชดเชยค่าสายวัดโคแอกเชียลมีผลอย่างชัดเจนต่อการวัดอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับค่าต่ำ ทำให้ผลการวัดมีความแม่นยำมากขึ้น ส่วนในกรณีของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับค่ามาก ผลของการชดเชยมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ค่าชดเชยที่คำนวณได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกรณี Cable Corr. และ Ref. ซึ่งแสดงในตารางที่

5.1 สามารถนำมาใช้เป็นค่าชดเชยอ้างอิงในการวัดผ่านสายโคแอกเชียล เพื่อให้ผลการวัดมีค่าใกล้เคียงกับกรณีอ้างอิงมากที่สุด และเหมาะสมสำหรับงานวัดที่ต้องการความแม่นยำสูง

4. การศึกษาผลกระทบของสายโคแอกเชียล RG-58/U ต่อผลการระบบวัดจากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยใช้เครื่องวัด LCR

การศึกษามูลกระทบของอิมพีแดนซ์ปรสิตในสายโคแอกเชียลต่อการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดต้านทาน $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ $100\ \Omega$ $10\ k\Omega$ และ $12\ k\Omega$ โดยวิธีการวัดแบบ 4-Wire 2 กรณี ได้แก่ กรณีทำการชดเชยค่าสายโคแอกเชียลก่อนทำการวัด (Cable Corr.) และกรณีไม่ทำการชดเชยค่าสายโคแอกเชียลก่อนทำการวัด (Cable Effect) โดยใช้เครื่องวัด LCR ในช่วงความถี่ $100\ \text{Hz} - 10\ \text{kHz}$ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสายโคแอกเชียลที่ส่งผลต่อการวัดโหลดตัวต้านทานในแต่ละกรณี ผลการศึกษาพบว่าสำหรับโหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับค่าต่ำ $1\ \Omega$ $10\ \Omega$ และ $100\ \Omega$ ขนาดอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ในกรณี Cable Effect มีค่ามากกว่ากรณี Cable Corr. ตลอดทุกช่วงความถี่ และมุมอิมพีแดนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความถี่ เมื่อความถี่มากกว่า $100\ \text{Hz}$ จะเริ่มเห็นความแตกต่างระหว่างทั้ง 2 กรณีอย่างเด่นชัด โดยสามารถสรุปพฤติกรรมของโหลดแต่ละค่าได้ดังนี้

- โหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $1\ \Omega$ ขนาดอิมพีแดนซ์ค่อนข้างคงที่ในช่วงความถี่ $100\ \text{Hz} - 1\ \text{kHz}$ และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความถี่สูงกว่า $1\ \text{kHz}$ มุมอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นตามความถี่อย่างต่อเนื่อง แสดงถึงการเปลี่ยนพฤติกรรมจากตัวต้านทานเป็นตัวเหนี่ยวนำ
- โหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $10\ \Omega$ ขนาดอิมพีแดนซ์ค่อนข้างคงที่ตลอดทุกช่วงความถี่ ขณะที่มุมอิมพีแดนซ์แสดงพฤติกรรมเปลี่ยนจากคล้ายตัวเก็บประจุเป็นตัวเหนี่ยวนำ
- โหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ $100\ \Omega$ ทั้ง 2 กรณี ขนาดอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงลดลงต่อเนื่องตลอดทุกช่วงความถี่ ขณะที่มุมอิมพีแดนซ์แสดงการเปลี่ยนพฤติกรรมจากคล้ายตัวเก็บประจุเป็นตัวต้านทาน
- โหลดตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับค่ามาก $10\ k\Omega$ และ $12\ k\Omega$ พบว่าขนาดและมุมของอิมพีแดนซ์ในทั้ง 2 กรณีมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทุกช่วงความถี่ โดยขนาดอิมพีแดนซ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงกว่า $100\ \text{Hz}$ และมุมอิมพีแดนซ์มีค่าเป็นลบมากขึ้นตามความถี่ ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุของระบบ โดยการชดเชยค่าสายโคแอกเชียลไม่ส่งผลให้พฤติกรรมดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการศึกษาพบว่าผลกระทบของอิมพีแดนซ์ปรสิตในสายโคแอกเซียลมีความสัมพันธ์กับขนาดของโหลดตัวต้านทาน กล่าวคือ สำหรับโหลดค่าต่ำ สายโคแอกเซียลส่งผลต่อค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์อย่างชัดเจน ทำให้ค่าที่วัดได้มีความเบี่ยงเบนสูง ขณะที่สำหรับโหลดค่ามาก ผลกระทบดังกล่าวมีค่าน้อยมาก นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อค่าตัวต้านทานเพิ่มขึ้น ขนาดของมูมอิมพีแดนซ์จะลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่าพฤติกรรมของระบบเปลี่ยนจากลักษณะเหนี่ยวนำไปสู่ลักษณะคล้ายตัวเก็บประจุมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของสายโคแอกเซียลที่มีความยาว 1 เมตร โดยในการใช้งานจริงอาจมีการใช้สายที่มีความยาวมากกว่า ซึ่งสามารถประมาณผลของสายเพิ่มเติมได้โดยพิจารณาในลักษณะการต่ออนุกรมของโหลดตามความยาวสายที่เพิ่มขึ้น เช่น หากใช้สายที่มีความยาว 2 เมตร อิมพีแดนซ์รวมอาจเพิ่มขึ้นเป็นประมาณสองเท่าของสายที่มีความยาว 1 เมตร อย่างไรก็ตาม การประมาณดังกล่าวจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของค่าความเก็บประจุระหว่างตัวนำภายในสาย ซึ่งอาจส่งผลให้ลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายเปลี่ยนแปลงไปจากการเพิ่มความยาวของสายด้วย

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสายโคแอกเซียลมีอิทธิพลต่อผลการวัดอิมพีแดนซ์ของโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเฉพาะในกรณีของโหลดค่าต่ำ การทำการชดเชยค่าสายก่อนการวัดสามารถช่วยลดผลกระทบของอิมพีแดนซ์ปรสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการชดเชยอิมพีแดนซ์ปรสิต เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดทางไฟฟ้ากระแสสลับ และยังเป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับการสูญเสียของสายโคแอกเซียลที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของระบบการวัดในอนาคต

รายการอ้างอิง

- [1] B. Jeckelmann and B. Jeanneret, "The quantum Hall effect as an electrical resistance standard," 2004, doi: 10.1088/0034-4885/64/12/201.
- [2] F. Delahaye and B. Jeckelmann, "Revised technical guidelines for reliable dc measurements of the quantized Hall resistance," vol. 4, p. 8, 2003, doi: 10.1088/0026-1394/40/5/302.
- [3] B. Chenaud, C. Hernandez, A. Delgard, and C. Chaubet, "Influence of coaxial cable resistance on impedance measurements at low frequency and guidelines for phase determination of ac electrical signals," *Rev Sci Instrum*, vol. 94, no. 11, Nov 1 2023, doi: 10.1063/5.0172200.
- [4] R. Ji, J. Gao, G. T. Flowers, G. Xie, Z. Cheng, and Q. Jin, "The Effect of Electrical Connector Degradation on High-Frequency Signal Transmission," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 7, no. 7, pp. 1163-1172, 2017, doi: 10.1109/tcpmt.2017.2688023.
- [5] L. Callegaro, "The metrology of electrical impedance at high frequency: a review," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, no. 2, 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/2/022002.
- [6] I. R. E. G. Prazeres, V. Prasanth, and P. Bauer, "Multi-Coil Multi-Frequency Inductive Power Transfer " 2015, vol. 8, 14-17 June 2015 2011, doi: 10.1109/ITEC.2015.7165752.
- [7] T. Rudnicki, A. Sikora, R. Czerwinski, and T. Glinka, "Impact of PWM control frequency on efficiency of drive with 1 kW permanent magnet synchronous motor," *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 37, no. 1, pp. 307-318, 2018, doi: 10.1108/compel-01-2017-0031.
- [8] M. Asefi and J. Nazarzadeh, "Survey on high-frequency models of PWM electric drives for shaft voltage and bearing current analysis," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 7, no. 3, pp. 179-189, 2017, doi: 10.1049/iet-est.2016.0051.
- [9] D. M. Pozar, "Microwave Engineering," 2011.

- [10] G. Beyer, *The Global Cable Industry*, 1 ed. (Coaxial Cables). Wiley-VCH, 2021.
- [11] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. 2009.
- [12] M. E. Cage and A. Jeffery, "Intrinsic Capacitances and Inductances of QHE Devices," vol. 101, 1996.
- [13] C.-I. Su, H.-S. Wu, and K. B. Cheng, "Effect of the Structure of Coaxial Cables on Their Electrical Properties," October 2004, doi: 10.1177/004051750407401004.
- [14] A. Wadsworth, *The Parametric Measurement Handbook*, 2024.
- [15] A. Abdelwahab, O. R. Shishvan, and G. J. Saulnier, "Performance of an Adaptive Current Source for EIT Driving Loads through a Shielded Coaxial Cable," presented at the 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), Montreal, QC, Canada, 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9175910/authors#authors>.
- [16] F. A. Silveira, "2-Terminal Coaxial Capacitance Measurements and Cable Corrections," 2024.
- [17] W. Nawrocki, *Introduction to Quantum Metrology*, 2 ed. (The Revised SI System and Quantum Standards). Springer Cham, 2019, pp. XIV, 326.
- [18] J. Schurr and J. Lee, "Realization of the Farad From the AC Quantum Hall Resistance at PTB—14 Years of Experience," presented at the IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 13 May 2022, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9774325/keywords#keywords>.
- [19] F. Ahlers, B. Jeanneret, J. Melcher, F. Overney, J. Schurr, and B. M. Wood, "Compendium for precise ac measurements of the quantized Hall resistance," presented at the 2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, Broomfield, CO, USA, 26 June 2009, 2008. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4574868>.
- [20] M. Cage, S. H. Shields, and A. Jeffery, "Initial NIST AC QHR Measurements," *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 109, 2004, doi: 10.6028/jres.109.028.
- [21] L. Callegaro *et al.*, *Good Practice Guide Graphene-based AC-QHE realization of the farad*. INRIM, 2022.

- [22] D. B. Kim, S. S. Shin, W.-S. Kim, and J. Kucera, "A Digital Bridge Evaluation up to 100 kHz for Precision Impedance Measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-5, 2023, doi: 10.1109/tim.2023.3273649.
- [23] K. Technologies, *Impedance Measurement Handbook*, USA, 2016.
- [24] M. Lisowski and K. Krawczyk, "The resistance unit transfer from the quantum Hall effect standard to high value resistance standards," 2007. [Online]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/237090922_The_resistance_unit_transfer_from_the_quantum_Hall_effect_standard_to_high_value_resistance_standards/citations.
- [25] K. Coporation, "High frequency characteristic of resistors." [Online]. Available:
https://www.koaspeer.com/pdfs/technical_notes/High-frequency_characteristics_EN.pdf
- [26] I. S. 142-2007, *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. The Institute of Electrical and Electronics Engineer, 7 June 2007.
- [27] *IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology—Random Instabilities*. IEEE Std Std 1139-2008 27 February 2009.
- [28] S.-E. GmbH, "DATA SHEET RG-58/U MIL C17," ed, 2024.
- [29] *E4980A Precision LCR Meter 20 Hz to 2 MHz, Data Sheet*, 2018.
- [30] C. Microsystem. "Agilent E4980A Precision LCR Meter."
<https://www.cmc.ca/agilent-e4980a-precision-lcr-meter/> (accessed).
- [31] J. Schurr, R. H. Judaschke, and S. A. Awan, "Resistance standards with very small calculable AC-DC difference at frequencies up to 2 MHz for the calibration of precision LCR meters," *Measurement Science and Technology*, vol. 36, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1361-6501/ad9169.
- [32] A. P. Gregory and R. N. Clarke, "A review of RF and microwave techniques for dielectric measurements on polar liquids," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, Aug. 2006, doi: 10.1109/TDEI.2006.1667730.

- [33] *Ultra High-Precision Z Foil Through-Hole Resistor*, 2024.
- [34] F. Cabiati, L. Callegaro, C. Cassiogo, V. D'Elia, and G. M. Reedtz, "Measurements of the ac longitudinal resistance of a GaAs-AlGaAs quantum Hall device," presented at the IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement April 1999, 1999. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/769591/keywords#keywords>.
- [35] S. J *et al.*, "AC longitudinal and contact resistance measurements of quantum Hall devices," presented at the Metrologia, February 2006, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1/021>.
- [36] J. Kučera, P. Svoboda, and K. Pierz, "AC and DC Quantum Hall Measurements in GaAs-Based Devices at Temperatures Up To 4.2 K," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* vol. 68, no. 6, pp. 2106-2112, 13 December 2018 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2882216.
- [37] M. A. O. Kharraz, D. Picard, M. Serhir, C. Lavenu, and P. Jensen, "Measurement Methods of Outdoor Low-Voltage Cable Characteristics for Narrowband Power Line Communication," presented at the IEEE Transactions on Power Delivery, 14 October 2018, 2019.
- [38] I. LABS, "Characteristic Cable Impedance," p. 2.
- [39] A. T. C. KEITHLEY, "two-Wire vs. Four-Wire Resistance Measurements: Which Configuration Makes sense for Your Application? ."
- [40] S. Lampen. "Understanding Skin Effect and Frequency." <https://www.belden.com/blog/broadcast/understanding-skin-effect-and-frequency> (accessed.
- [41] M. I. Gallant, "Coaxial Cable Characteristic Impedance vs Frequency," April 18, 2014.



ข้อมูลจำเพาะสำหรับเครื่องวัด LCR ระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทดสอบ ระดับความแม่นยำการตรวจสอบระดับสัญญาณทดสอบ ความแม่นยำในการวัดสำหรับ เครื่องวัด LCR และผลกระทบจากโหลด แสดงดังตารางที่ 1-5

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะทั่วไป

Power source	
Voltage	9 VAC – 264 VAC
Frequency	47 Hz – 63 Hz
Power consumption	Max. 150 VA
Operating environment	
Temperature	0 – 55 °C
Humidity (≤ 60 °C, nocondensation)	15% - 85% RH
Altitude	0 m – 2000 m
Storage environment	
Temperature	-20 – 70 °C
Humidity (≤ 60 °C, nocondensation)	0% - 90% RH
Altitude	0 m – 4572 m
Outer dimensions: 375 (width) x 105 (height) x 390 (depth) mm (nominal)	

ตารางที่ 2 ระดับสัญญาณทดสอบ

Test signal voltage			
Range		0 Vrms – 2.0 Vrms	
Resolution		100 μ Vrms (0 Vrms \leq - \leq 0.2 Vrms) 200 μ Vrms (0.2 Vrms \leq - \leq 0.5 Vrms) 500 μ Vrms (0.5 Vrms \leq - \leq 1 Vrms) 1 mVrms (1 Vrms \leq - \leq 2 Vrms)	
Accuracy	Normal	$\pm(10\% + 1 \text{ mVrms})$	Test frequency \leq 1 MHz: spec. Test frequency $>$ 1 MHz: typ
	Constant ¹	$\pm(6\% + 1 \text{ mVrms})$	Test frequency \leq 1 MHz: spec. Test frequency $>$ 1 MHz: typ
Test signal current			
Range		0 Arms – 20 mArms	
Resolution		1 μ Vrms (0 Arms \leq - \leq 2 mArms) 2 μ Vrms (2 mArms \leq - \leq 5 mArms) 5 μ Vrms (5 mArms \leq - \leq 10 mArms) 10 μ Vrms (10 mArms \leq - \leq 20 mArms)	
Accuracy	Normal	$\pm(10\% + 1 \text{ mVrms})$	Test frequency \leq 1 MHz: spec. Test frequency $>$ 1 MHz: typ
	Constant ¹	$\pm(6\% + 1 \text{ mVrms})$	Test frequency \leq 1 MHz: spec. Test frequency $>$ 1 MHz: typ

¹ when auto level control function is on.

ตารางที่ 3 ความแม่นยำของการตรวจสอบระดับสัญญาณทดสอบ

Test signal voltage monitor accuracy (Vac)		
Test signal voltage ¹	Test frequency	Specification
5 mV _{rms} - 2 V _{rms}	≤ 1 MHz	±(3% of reading value + 0.5 mV _{rms})
	> 1 MHz	±(6% of reading value + 1 mV _{rms})
Test signal current monitor accuracy (Iac)		
Test signal voltage ¹	Test frequency	Specification
50 μV _{rms} – 20 mA _{rms}	≤ 1 MHz	±(3% of reading value + 5 μA _{rms})
	> 1 MHz	±(6% of reading value + 10 μA _{rms})

¹ This is not an output value but rather a displayed test signal level.

ตารางที่ 4 ความแม่นยำในการวัดสำหรับ เครื่องวัด LCR

Test freq. (Hz)	Test signal voltage				
	5 mV _{rms} ≤ - ≤ 30 mV _{rms}	30 mV _{rms} ≤ - ≤ 0.3 V _{rms}	0.3 V _{rms} ≤ - ≤ 1 V _{rms}	1 V _{rms} ≤ - ≤ 10 V _{rms}	10 V _{rms} ≤ - ≤ 20 V _{rms}
20 ≤ - ≤ 100	(0.25%) x (30 mV _{rms} /V _s)	0.25%	0.10%	0.15%	0.15%
100 ≤ - ≤ 1 M	(0.1%) x (30 mV _{rms} /V _s)	0.10%	0.05%	0.10%	0.15%
1 M ≤ - ≤ 2 M	(0.2%) x (30 mV _{rms} /V _s)	0.20%	0.10%	0.20%	0.30%

V_s (V_{rms}) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าทดสอบ

ตารางที่ 5 ผลกระทบจากโหลด

For impedance of DUT below 30 Ω , the following value is added.		
Test frequency (Hz)	Impedance of DUT	
	$1.8 \Omega \leq Z_x \leq 30 \Omega$	$ Z_x < 1.08 \Omega$
$20 \leq - \leq 1 \text{ M}$	0.05%	0.10%
$1 \text{ M} \leq - \leq 2 \text{ M}$	0.10%	0.20%
Test frequency (Hz)	Impedance of DUT	
	$92 \text{ k} \Omega \leq Z_x \leq 92 \text{ k} \Omega$	$92 \text{ k} \Omega < Z_x $
$10 \text{ k} \leq - \leq 100 \text{ k}$	0%	0.05%
$100 \text{ k} \leq - \leq 1 \text{ M}$	0.05%	0.05%
$1 \text{ M} \leq - \leq 2 \text{ M}$	0.10%	0.10%

นอกจากนี้ หากขณะทำการวัดมีการใช้สายวัดเพิ่มเติม ผลกระทบจากสายวัดอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัด ดังนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบจากสายวัดด้วยเช่นกัน โดยผลกระทบจากสายวัดแสดงดังสมการ 2.16

$$0.015 \% \times (F_m / 1 \text{ MHz})^2 \times (L_{\text{cable}})^2 \quad (2.16)$$

โดยที่ F_m (Hz) ความถี่
 L_{cable} (m) ความยาวของสายวัด



ภาคผนวก ข

การศึกษาการอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเซียล RG-58/U เพิ่มเติม

การศึกษาการอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเซียล RG-58/U โดยเชื่อมต่อโหนดตัวเก็บประจุขนาด 10 นาโนฟารัด (nano-Farad, nF)

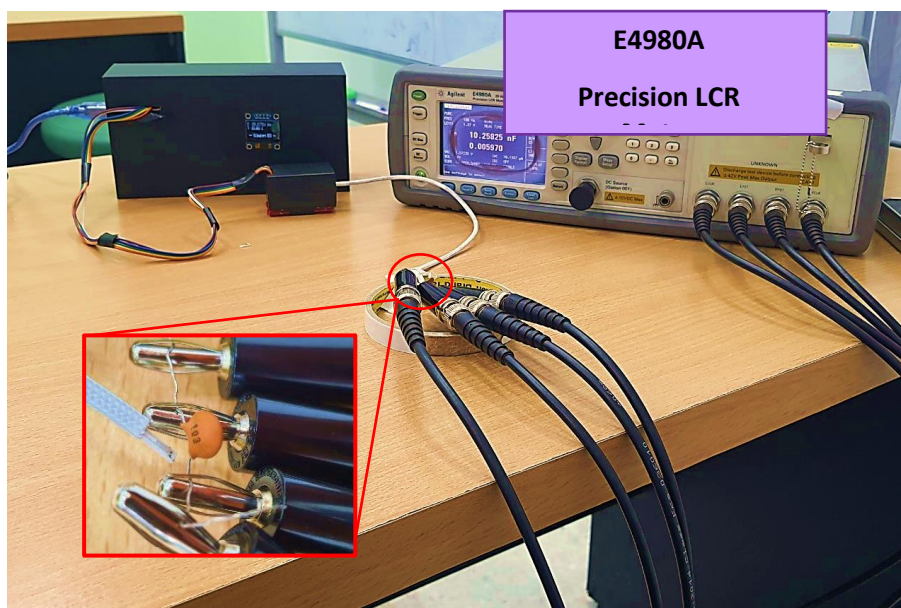
อุปกรณ์ที่ใช้

- Agilent E4980A Precision LCR Meter
- เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD PT100 และโปรแกรม LabVIEW สำหรับบันทึกค่าอุณหภูมิ
- สายโคแอกเซียล RG-58/U
- โหนดตัวเก็บประจุขนาด 10 นาโนฟารัด (nano-Farad, nF)
- แฟลชไดรฟ์ (Flash Drive) สำหรับบันทึกผลการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance)

การตั้งค่า และการติดตั้งเครื่องมือ

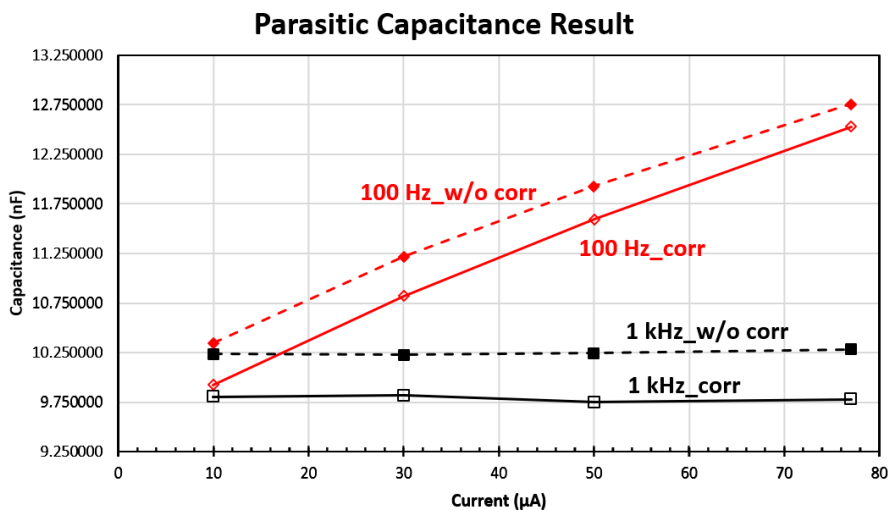
Agilent E4980A Precision LCR Meter หรือ เครื่องวัด LCR เป็นเครื่องมือที่สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งก่อนทำการวัดนั้นจะต้องทำการอุ่นเครื่องมืออย่างน้อย 30 นาที และทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ โดยวัดค่าความจุไฟฟ้า และบันทึกค่าโดยใช้ Flash Drive ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD PT100 และบันทึกค่าอุณหภูมิขณะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยโปรแกรม LabVIEW แบบเรียลไทม์ (Real-Time) ดังรูปที่ 1 โดยการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD PT100 สำหรับระบบการวัดค่าความจุไฟฟ้าซึ่งติดตั้งใกล้ตัวเก็บประจุไฟฟ้า แต่ไม่ติดกับลวดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนของค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากขดลวดของเซ็นเซอร์ขณะทำการวัด





รูปที่ 1 ภาพรวมของการเชื่อมต่อของระบบการวัดค่าความจุไฟฟ้า

ในการศึกษาการสูญเสียของสายโคแอกเซียล RG-58/U เชื่อมต่อกับโหนดตัวเก็บประจุขนาด 10 นาโนฟารัด โดยทำการวัด และบันทึกค่าความจุไฟฟ้า 2 กรณี คือกรณี 1 ชดเชยค่าสายก่อนทำการวัด (Correction Cable) และ กรณี 2 ไม่ชดเชยค่าสายก่อนทำการวัด (No Correction Cable) ขณะจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับในระดับไมโครแอมแปร์ (Micro-Ampere, μA) ตั้งแต่ 10 μA 30 μA 50 μA และ 77 μA ที่ความถี่ 100 Hz และ 1 kHz ทำการวัดซ้ำ 5 ครั้ง ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากผลการวัด 5 ครั้งทั้ง 2 กรณีแสดงดังรูปที่ 2 หากสังเกตที่ความถี่ 100 Hz สำหรับทั้ง 2 กรณีจะเห็นได้ว่ามีค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยสำหรับกรณีชดเชยค่าสายก่อนทำการวัดมีค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย ขณะจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 10 μA เท่ากับ 9.922 811 nF และเพิ่มสูงขึ้น 12.529 027 nF ขณะจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 77 μA ซึ่งสำหรับกรณีไม่ชดเชยค่าสายก่อนทำการวัดมีค่าความจุไฟฟ้า 10.340 566 nF ขณะจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 10 μA และขณะจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 77 μA ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นถึง 12.755 444 nF และที่ความถี่ 1 kHz จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าสำหรับทั้ง 2 กรณีมีค่าที่ค่อนข้างเสถียร เมื่อพิจารณาทั้ง 2 ความถี่ จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับกรณีไม่ชดเชยค่าสายก่อนทำการวัดมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยสำหรับกรณีชดเชยค่าสายก่อนทำการวัดอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลมาจากความจุปรสิต (Parasitic Capacitance) ที่รวมอยู่ในสายโคแอกเซียล



รูปที่ 2 เปรียบเทียบผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าระหว่างกรณีชดเชยค่าสายก่อนทำการวัด และกรณีไม่ชดเชยค่าสายก่อนทำการวัด

ความจุปรสิติมีผลกระทบต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ที่ต้องการใช้งานในความถี่สูงและกระแสไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากระบบเหล่านี้ไวต่อสัญญาณรบกวนและการสูญเสียพลังงาน ตัวอย่างของผลกระทบในทางปฏิบัติ ได้แก่ ความแม่นยำในการวัดที่ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัดสัญญาณไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าต่ำ และผลการวัดที่อาจไม่เสถียร ซึ่งทำให้การออกแบบวงจรมีความซับซ้อน ดังนั้น เพื่อศึกษาความจุปรสิติในสายโคแอกเซียล จึงเปรียบเทียบความแตกต่างของความจุไฟฟ้าระหว่างกรณีไม่ชดเชยค่าสายสายก่อนทำการที่วัดและกรณีชดเชยค่าสายก่อนทำการวัด โดยนำความจุเฉลี่ยสำหรับทั้ง 2 กรณีมาหักล้างกันเพื่อหาปริมาณความจุปรสิติภายในสายโคแอกเซียล ผลลัพธ์เป็นดังตารางที่ 1 พบว่าผลลัพธ์ค่าผลต่างความจุไฟฟ้าระหว่างกรณีชดเชยค่าสายและกรณีไม่ชดเชยค่าสายก่อนทำการวัดที่ความถี่ 100 Hz เผยให้เห็นแนวโน้มลดลงของความแตกต่างของความจุระหว่าง 2 กรณีเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นผลของความต้านทานอนุกรมที่เทียบเท่า (Equivalent Series Resistance, ESR) ความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน ESR ในขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าค่าสูงส่งผลต่อการลดลงของค่าความจุไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ควรทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อให้มีการอธิบายที่ละเอียดมากขึ้น ในทางกลับกัน ที่ความถี่ที่ทดสอบที่ 1 kHz ซึ่งเป็นความถี่จำกัดสูงสุดสำหรับโหนดตัวเก็บประจุประเภทนี้ พบว่าค่าความแตกต่างของความจุสูงสุดที่มีค่าความจุปรสิติเกือบเท่ากัน และยังเป็นค่าความแตกต่างที่เป็นไปได้สูงสุดสำหรับตัวเก็บประจุอีกด้วย

ตารางที่ 1 ค่าผลต่างความจุไฟฟ้าระหว่างกรณีชดเชยค่าสายและกรณีไม่ชดเชยค่าสาย

Capacitance values between No Correction Cable – Correction Cable (pF)		
Frequency Current (μA)	100 Hz	1 kHz
10	421	426
30	397	405
50	331	490
77	227	500





ภาคผนวก ค
ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

1. **Thamonwan Natteetong**, Jutarat Tanarom, and Ploybussara Gomasang., “Characteristics of Parasitic Impedance in Coaxial Cables on Low-Frequency AC Measurement,” 2025 International Conference on Power Engineering and Electrical Technology (PEET), Japan, October 22-24, 2025.
2. อรสา พุทธศรี ชีวราพร เทพสุวรรณ ดารารัตน์ มั่งคั่ง **ธมลวรรณ นัททีทอง** จุฑารัตน์ ทานะรมณ์ และพลอยบุศรา โกมาสังข์, “ระบบติดตามอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการผ่านโปรแกรม LabVIEW และแอปพลิเคชัน LINE,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025), ระนอง, ประเทศไทย, 28-30 พฤษภาคม, 2025.
3. **Thamonwan Natteetong**, Jutarat Tanarom, and Ploybussara Gomasang, “ Investigation of the internal parasitic capacitance cable in low AC measurement,” 2025 14th International Conference on Information and Electronics Engineering (ICIEE 2025); Singapore, February 14-16, 2025.
4. **ธมลวรรณ นัททีทอง** จุฑารัตน์ ทานะรมณ์ พรรณวษา เหล่าสิม อภิสรา อรุณสันติโรจน์ ชลธิชา อินรินและพลอยบุศรา โกมาสังข์, “ผลกระทบของการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงค่าสูงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและความต้านทานของตัวต้านทานมาตรฐานในกระบวนการสอบเทียบแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47 (EECON-47), อุตรธานี, ประเทศไทย, 13-15 พฤศจิกายน, 2024.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ฉมลวรรณ นัททีทอง

วุฒิการศึกษา

วศ.บ.วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบคอมพิวเตอร์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลงานตีพิมพ์

1.Thamonwan Natteetong, Jutarat Tanarom, and Ploybussara Gomasang., “Characteristics of Parasitic Impedance in Coaxial Cables on Low-Frequency AC Measurement,” 2025 International Conference on Power Engineering and Electrical Technology (PEET), Japan, October 22-24, 2025.

2.อรสา พุทธศรี อีวราพร เทพสุวรรณ ดารารัตน์ มั่งคั่ง ฉมลวรรณ นัททีทอง จุฑารัตน์ ทานะรมณ์และพลอยบุศรา โกมาสังข์, “ระบบติดตามอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการผ่านโปรแกรม LabVIEW และแอปพลิเคชัน LINE,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025), ระนอง, ประเทศไทย, 28-30 พฤษภาคม, 2025.

3.Thamonwan Natteetong, Jutarat Tanarom, and Ploybussara Gomasang, “Investigation of the internal parasitic capacitance cable in low AC measurement,” 2025 14th International Conference on Information and Electronics Engineering (ICIEE 2025), Singapore, February 14-16, 2025.

4.ฉมลวรรณ นัททีทอง จุฑารัตน์ ทานะรมณ์ พรรณวษา เหล่าสิม อภิสรา อรุณสันติโรจน์ ชลธิชา อินรินและพลอยบุศรา โกมาสังข์, “ผลกระทบของการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงค่าสูงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและความต้านทานของตัวต้านทานมาตรฐานในกระบวนการสอบเทียบแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง,” การประชุมวิชาการทาง

วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47 (EECON-47), อุตรธานี, ประเทศไทย, 13-15
พฤศจิกายน, 2024.

