

การศึกษาตีสาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบน้ำมันด้วยวิธีการแบบ
ดั้งเดิมและแบบไม่ดั้งเดิม

PARTIAL DISCHARGE ANALYSIS IN THREE-PHASE OIL-IMMERSED
TRANSFORMERS BY CONVENTIONAL AND NON-CONVENTIONAL METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

PARTIAL DISCHARGE ANALYSIS IN THREE-PHASE OIL-IMMERSED
TRANSFORMERS BY CONVENTIONAL AND NON-CONVENTIONAL METHOD



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

2020

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2563

การศึกษาดีสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบน้ำมันด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม
และแบบไม่ดั้งเดิม

PARTIAL DISCHARGE ANALYSIS IN THREE-PHASE OIL-IMMERSED
TRANSFORMERS BY CONVENTIONAL AND NON-CONVENTIONAL METHOD



นางสาวณิชา	โสอุบล	60010339
นางสาวธารไพลิน	บรรเทิงใจ	60010466
นายนพพล	ยอดระยัป	60010497

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาตีสถารัจบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบน้ำมันด้วยวิธีการแบบ
ดั้งเดิมและแบบไม่ดั้งเดิม

ผู้จัดทำ

1. นางสาวณิชา โสอุบล 60010339
2. นางสาวธารไพลิน บรรเท็งใจ 60010466
3. นายนพพล ยอดระยัย 60010497



ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดชอาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)

ส. พงษ์โพธิ์สุอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภพ จันทรเจริญสุข)

ดร. สถาพร พรหมวงศ์อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สถาพร พรหมวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบน้ำมันด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและแบบ

ไม่ดั้งเดิม

นางสาวณิชา	โสอุบล	
นางสาวธารไพลิน	บรรเทิงใจ	
นายนพพล	ยอดระยั๊บ	
รศ. ดร. นรเศรษฐ	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ. ดร. ภาพ	จันทร์เจริญสุข	
ผศ. ดร. สถาพร	พรหมวงศ์	
ปีการศึกษา 2563		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและแบบไม่ดั้งเดิมในหม้อแปลง ประกอบด้วย เซนเซอร์ HFCT และ TEV ตามลำดับ ที่ Distribution Transformer ที่อยู่ในอาคารที่ 1 2 และ 3 โดยนำ HFCT sensors คล้องกับตัวนำลงดิน ของแต่ละเฟส แล้วต่อสายนำสัญญาณ Coaxial Cable กับเครื่องมือวัด PD-Analyzer จากนั้นบันทึกรูปคลื่นที่ได้จาก HFCT และวิเคราะห์ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) เพื่อระบุชนิด PDและนำ TEV sensors ติดตั้งที่ผนังโลหะของหม้อแปลง แล้วต่อสายนำสัญญาณ Coaxial Cable กับเครื่องมือวัด PD-Analyzer จากนั้นบันทึกรูปคลื่นที่ได้จาก TEV sensors และวิเคราะห์ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) เพื่อระบุชนิด PD และศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่วัดด้วยสายอากาศ โดยทำการจำลองสัญญาณส่งและรับด้วยสายอากาศที่ย่านความถี่ UHF โดยเลือกย่าน 2.5 ถึง 3 GHz ซึ่งเกี่ยวกับการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นเพื่อศึกษาการกระจาย การสะท้อน และการลดทอนของสัญญาณในหม้อแปลงเปล่า หม้อแปลงมีแกนเหล็ก และหม้อแปลงมีขดลวด จากการทดสอบพบว่า เซนเซอร์ HFCT ตรวจพบ Floating discharge ในหม้อแปลง TR-2 อาคาร 1 ที่เฟส B และเฟส C, TR-B อาคาร 2 ที่เฟส A, TR-2 อาคาร 3 และ TR-3 อาคาร 3 ทั้ง 3 เฟส นอกจากนี้ยังตรวจพบ Corona discharge ในหม้อแปลง TR-2 อาคาร 1 ที่เฟส A และพบว่าเซนเซอร์ TEV ตรวจพบ Corona discharge ในหม้อแปลง TR-2 อาคาร 1 ที่เฟส A สำหรับหม้อแปลงตัวอื่นๆ TEV sensor ไม่สามารถตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนได้ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency) ในถังหม้อแปลงที่มีแกนเหล็กหรือขดลวด โดยใช้สายอากาศแบบไมโครสตริปทั้งภาคส่งและภาครับเป็นอุปกรณ์ในการรับและส่งสัญญาณ สัญญาณย่านความถี่สูงยิ่งถูกส่งมาจากเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์(Vector Network Analyzer) ที่ช่วงความถี่ 2.5 GHz ถึง 3 GHz โดยตำแหน่งของสายอากาศภาครับมีสองตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งเก็บค่าทั้งหมด 801 ค่า จากนั้นพิจารณาขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วิ่ง

ผ่านแกนเหล็กหรือขดลวดมาที่สายอากาศภาครับ ซึ่งจากการทดลองพบว่าขนาดของคลื่นลดลงเมื่อมีแกนเหล็กหรือขดลวดในถังหม้อแปลง และตำแหน่งการวางสายอากาศภาครับยังส่งผลต่อการลดทอนของขนาดฟังก์ชันถ่ายโอนอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Partial Discharge Analysis in Three-phase Oil-immersed Transformers by Conventional and Non-conventional Method

Miss Nichaya	Soubol
Miss Tanpilin	Banthoengjai
Mr. Noppol	Yodrayub
Assoc. Prof. Dr. Norasage	Pattanadech Advisor
Asst. Prof. Dr. Phop	Chancharoensook
Asst.Prof.Dr. Sathaporn	Promwong

ABSTRACT

This project presents the partial discharge detection by conventional methods with HFCT sensors and non-conventional methods with TEV sensors in distribution transformers located in mall 1, 2 and 3. The HFCT sensors were installed around the ground conductors of each phase, then the coaxial cable was connected to the PD-analyzer instrument, after that the waveform of the HFCT was recorded and the Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) was analyzed to indicate the PD type. The TEV sensors were installed to metal-enclosure of high voltage switchgear and the transformer, then the coaxial cable was connected to the PD-analyzer instrument, after that the waveform of the HFCT was recorded and the Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) was analyzed to indicate the PD type. Furthermore, the propagation of the antenna waves were studied. The simulation of the transmitting and receiving signals with antennas at the UHF band, 2.5-3 GHz was selected. Partial discharge source produces the propagation of electromagnetic waves. To study the propagation, reflection and attenuation of signals in the empty transformer tank, the Transformer with Iron Core and the Transformer with Coil. From the test, it was found that the HFCT sensor detected floating discharge in distribution transformer TR-2 mall 1 at Phase B and Phase C, TR-B mall 2 at Phase A, TR-2 mall 3 and TR-3 mall 3 on all Phases. Corona discharge was also detected in transformers TR-2 mall 1 at Phase A. The TEV sensor detected Corona discharge in transformers TR-2 mall 1 at Phase A. For other transformers, the TEV sensor was unable to detect partial discharge. Moreover,

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

the distortion of ultra-high frequency (UHF) signal in transformer tank with iron core and winding was studied. The vector network analyzer was used to be a UHF signal source, 2.5 GHz to 3 GHz, and microstrip antenna was used to send and receive the signal. The UHF channel corresponding transfer function magnitude was from two different receiving antenna positions. Then, the graphs of magnitude were plotted. In case of having core and coil in transformer tank, the signal magnitude was smaller than having iron core in the tank. For different position of receiving antenna, the magnitude of having core and coil were different.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาพ จันทรเจริญสุข และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สถาพร พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณปณณวีร์ ฉายศิริ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ได้ให้ความเอาใจใส่ ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท พีดี โซลูชั่นส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ความรู้ด้านการทดสอบ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ขอขอบคุณ บริษัท เทสลา เพาเวอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านวัสดุทดสอบ ความรู้ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ จนทดสอบได้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคุณกรยา จงวิไลเกษม, คุณกิตติพิศ จรรย์านูรัตน์, คุณญาณพล กิตติคุณ ธราดล รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาเอกและปริญญาโทที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำการวิจัย และช่วยแนะนำการแก้ปัญหาในการทดสอบมาโดยตลอดตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญรูปภาพ	X
สารบัญตาราง	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลง	4
2.1.1 ถังหม้อแปลง (Tank)	4
2.1.2 ขดลวดแรงสูง-แรงต่ำ (High voltage - Low Voltage Winding)	4
2.1.3 ระดับน้ำมัน (Oil Level Gauge)	4
2.1.4 อุปกรณ์ระบายความดันหรือท้อกันระเบิด (Pressure-Relief Device)	5
2.1.5 ขั้วต่อสายแรงสูง-แรงต่ำ (HV-LV Terminal)	5
2.1.6 ลูกถ้วยแรงสูง-แรงต่ำ (HV-LV Bushing)	5
2.1.7 ล้อฟ้าหรืออาร์คชิ่งฮอร์น (Arcing Horn)	5
2.1.8 แท็ปปรับแรงดัน (Tap Changer)	5
2.1.9 สายไฟและบัสบาร์ (Cable and Busbar)	5
2.1.10 ที่ต่อสายดิน (Earthing Terminal)	5
2.1.11 วาล์วถ่ายน้ำมัน (Oil Drain Valve)	5
2.2 ส่วนประกอบภายในของหม้อแปลง	5
2.2.1 แกนเหล็ก (Cores)	5
2.2.2 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก (Core Clamping)	6
2.2.3 ขดลวด (Windings)	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 น้ำมันหม้อแปลง	8
2.2.5 น้ำมันแร่ (Mineral Oil)	9
2.3 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)	10
2.3.1 โคโรนาดิสชาร์จ	10
2.3.2 ดิสชาร์จตามผิว	10
2.3.3 ดิสชาร์จบางส่วนภายใน	10
2.3.4 วงจรสมมูลการเกิดดิสชาร์จภายใน	10
2.3.5 หลักการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	11
2.3.5.1 Conventional	11
2.3.5.2 Non-Conventional	13
2.4 สายอากาศ (antenna)	13
2.4.1 ประเภทของสายอากาศ	14
2.4.1.1 สายอากาศแบบลวดตัวนำ (wire antenna)	14
2.4.1.2 สายอากาศแบบช่อง (aperture antenna)	14
2.4.1.3 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (array antenna)	15
2.4.1.4 สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น (reflector antenna)	15
2.4.1.5 สายอากาศแบบเลนส์ (lens antenna)	16
2.4.2 พารามิเตอร์มูลฐานของสายอากาศ	16
2.4.2.1 แบบรูปการแผ่กำลัง (Radiation Pattern)	16
2.4.2.2 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)	18
2.4.2.3 อัตราขยาย (Gain)	18
2.4.2.4 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth)	18
2.4.2.5 ความกว้างแถบ (Bandwidth)	18
2.4.2.6 การโพลาไรซ์/การแยกขั้วแค่คลื่น (Polarization)	19
2.4.2.7 อิมพีแดนซ์อินพุต (Input Impedance)	19
2.4.2.8 ความยาวประสิทธิผลเชิงเวกเตอร์และพื้นที่สมมูล ของสายอากาศ	19
2.5 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip antenna)	19
2.5.1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	19
2.5.2 แผ่นตัวนำ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ไปยังผู้อื่น และต้องยกย่องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 ชั้นวัสดุฐานรอง	21
2.5.4 ระบายกราวด์	21
2.5.5 ข้อดีของ Microstrip antenna	21
2.5.6 ข้อเสียของ Microstrip antenna	22
2.6 Transient Earth Voltage: TEV	22
2.6.1 Partial Discharge Pattern of TEV sensor	23
2.7 HFCT Sensor	24
2.7.1 Partial Discharge Pattern High Frequency Current Transformer (HFCT)	25
2.8 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave)	26
2.9 Ultrahigh frequency: UHF	27
2.10 การแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (radiation)	27
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	28
3.1 อุปกรณ์	28
3.2 การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่วัดด้วยสายอากาศ	32
3.2.1 วงจรทดสอบ	32
3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ	32
3.3 การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วย TEV sensor	33
3.3.1 วงจรทดสอบ	33
3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ	33
3.4 การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วย HFCT sensor	34
3.4.1 วงจรทดสอบ	34
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ	34
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	35
4.1 Distribution Transformer (TR-2 mall 1)	37
4.1.1 วิธีการตรวจจับ	37
4.1.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	37
4.1.2.1 การตรวจจับประจุไฟฟ้า	37
4.1.2.2 การตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	39
4.2 Distribution Transformer (TR-B mall 2)	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 วิธีการตรวจจับ	40
4.2.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	40
4.2.2.1 การตรวจจับประจุไฟฟ้า	40
4.3 Distribution Transformer (TR-2 mall 3)	41
4.3.1 วิธีการตรวจจับ	41
4.3.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	41
4.3.2.1 การตรวจจับประจุไฟฟ้า	41
4.4 Distribution Transformer (TR-3 mall 3)	43
4.4.1 วิธีการตรวจจับ	43
4.4.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์	43
4.4.2.1 การตรวจจับประจุไฟฟ้า	43
4.5 การจำลองสัญญาณส่งและรับด้วยสายอากาศ	45
4.5.1 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณตำแหน่ง T-R1	45
4.5.2 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณตำแหน่ง T-R2	46
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปทดสอบ On-Line Partial Discharge	47
5.1.1 Transient Earth Voltage Sensor (TEV Sensor)	47
5.1.2 High Frequency Current Transformer (HFCT)	47
5.1.3 UHF microstrip path antenna	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	51
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	52
ภาคผนวก ข ข้อมูลทางเทคนิคของ Microstrip trainer และ TEV Sensor	57
ประวัติผู้เขียน	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลง	4
2.2 แกนเหล็กตัดที่มุม 45 องศา	6
2.3 การประกอบแกนเหล็ก	6
2.4 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก (Core Clamping)	7
2.5 ลักษณะการพันขดลวด	8
2.6 พาราฟินแบบลูโก้	9
2.7 พาราฟินแบบกึ่ง	9
2.8 แนพทิน	9
2.9 อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	9
2.10 วงจรสมมุติของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	11
2.11 วงจรสมมุติของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน	11
2.12 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD	12
2.13 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศชนิดลวดตัวนำ	14
2.14 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแบบช่อง	14
2.15 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแบบอาร์เรย์	15
2.16 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศชนิดสะท้อนคลื่น	15
2.17 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศเลนส์	16
2.18 แบบรูปการแผ่แก้มกำลัง	16
2.19 แบบรูปการแผ่แก้มกำลังแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว	17
2.20 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริป	19
2.21 ตัวอย่างสายอากาศไมโครสตริปในรูปแบบต่าง ๆ	20
2.22 ไดอะแกรมของหลักการทดสอบ TEV	22
2.23 ตัวอย่าง PD Pattern ของ TEV sensor	23
2.24 HFCT sensors	24
2.25 หลักการทำงานของ HFCT	24
2.26 ตัวอย่าง PD Pattern ของ HFCT sensor	25
3.1 Vector Network Analyzer	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 Connector	29
3.5 Calibrator	29
3.6 TEV sensor	29
3.7 HFCT sensor	30
3.8 Switchgear room and Switchgear	30
3.9 Distribution Transformer 24 kV อาคารที่ 1	30
3.10 Distribution Transformer 24 kV อาคารที่ 2	31
3.11 Distribution Transformer 24 kV อาคารที่ 3	31
3.12 ขนาดของถังหม้อแปลงไฟฟ้าและจุดติดตั้งสายอากาศภาคส่งและภาครับ	32
3.13 วงจรการตรวจจับ Partial Discharge ด้วย TEV sensors	33
3.14 TEV sensors ที่ติดตั้งที่ผิวโลหะ	33
3.15 การติดตั้ง TEV sensors	33
3.16 วงจรการตรวจจับ Partial Discharge ด้วย HFCT sensors	34
3.17 การติดตั้ง HFCT sensors	34
4.1 การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1)	37
4.2 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1)	39
4.3 การตรวจจับด้วยเซนเซอร์ TEV ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1)	39
4.4 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1)	40
4.5 การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-B mall 2)	40
4.6 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-B mall 2)	41
4.7 การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 3)	41
4.8 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 3)	43
4.9 การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-3 mall 3)	43
4.10 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-3 mall 3)	45
4.11 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณตำแหน่ง T-R1	45
4.12 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณตำแหน่ง T-R2	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินการ	3
2.1 ชนิดของฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงและหม้อแปลงเครื่องมือวัด	9
4.1 ผลการทดสอบทั้งหมด	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้หม้อแปลงสามเฟสในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยปกติจะใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าแรงสูงและไฟฟ้าแรงต่ำที่สามารถเปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้าหรือขนาดของกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบและใช้งาน ดังนั้นหม้อแปลงจึงเป็นอุปกรณ์หลักในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีหลายชนิด แต่ส่วนใหญ่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบน้ำมัน (Oil-Immersed Transformer) หรือบางครั้งอาจจะเรียกว่า Oil-Type โดยหม้อแปลงแบบนี้จะนิยมติดตั้งภายนอกอาคาร (Outdoor used) ซึ่งระบบการฉนวนมักใช้กระดาษฉนวนเซลลูโลสร่วมกับน้ำมันแร่ (Mineral-based Oil) และระบบฉนวนยังเป็นจุดอ่อนของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะเป็นจุดที่เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย หนึ่งในอาการเสื่อมสภาพมาจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ซึ่งเป็นการเกิดดิสชาร์จหรือเบรกดาวนที่ไม่ได้เชื่อมระหว่างอิเล็กโทรดและสภาพการเป็นฉนวนยังไม่เสียหายอย่างสมบูรณ์ แต่ก็เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การเสื่อมสภาพการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนจากระบบการฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนี้การเกิดดิสชาร์จบางส่วนมีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ซึ่งดิสชาร์จบางส่วนนั้นส่งผลถึงความปลอดภัยและเสถียรภาพการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ การวินิจฉัยดิสชาร์จบางส่วน (PD) จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการฉนวนระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยมีวิธีการตรวจหาดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 (Conventional Method) สำหรับตรวจจับประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จ เช่น Coupling capacitor และ HFCT ซึ่งหากระแส PD pulse ที่ไหลผ่านกราวด์ และให้ผลเป็นแรงดันเหนี่ยวนำเมื่อติดตั้งที่สายกราวด์หรือรอบตัวนำหลักของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และแบบไม่ดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 62478 (Non-Conventional Method) สำหรับตรวจจับเมื่อเกิด PD ได้แก่ แสง กลิ่น เสียง และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการดิสชาร์จจะปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ Ultrahigh frequency (UHF) อยู่ในช่วง 0.3-3 GHz โดยปกติจะตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วย UHF sensor และ Transient Earth Voltage (TEV) ซึ่งมีหลักการทำงานโดยการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการใช้ sensor ประเภทนี้ได้แก่ GIS และหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถนำการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปประยุกต์กับการตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศได้ ซึ่งมีหลักการในการส่งและรับสัญญาณ และสามารถศึกษาผลกระทบและการลดทอนของอุปกรณ์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ ผู้ที่มีเหตุอันสมควรขอใช้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกแห่งที่มาในการใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บางส่วนโดย TEV Sensor และทำการจำลองสัญญาณส่งและรับด้วยสายอากาศที่ย่านความถี่ UHF โดยเลือกย่าน 2.5 ถึง 3 GHz ซึ่งเกี่ยวกับการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น เพื่อศึกษาการกระจาย การสะท้อน และการลดทอนของสัญญาณในหม้อแปลงเปล่า หม้อแปลงมีแกนเหล็ก และหม้อแปลงมีขดลวด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบรูปแบบของ Partial Discharge ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและแบบไม่ดั้งเดิม
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนกับการจำลองสัญญาณด้วยสายอากาศ
4. เพื่อวิเคราะห์ผลการกระจาย การสะท้อน และการลดทอนของสัญญาณที่มีการส่งและรับด้วยสายอากาศที่ย่านความถี่ 2.5-3 GHz ในแต่ละกรณี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการสะท้อนของคลื่นในถังหม้อแปลง
2. ศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป
3. ศึกษาการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการแบบไม่ดั้งเดิม
4. การแปลผลการทดสอบ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง
2. ศึกษาการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 60270 และแบบไม่ดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC 62478
3. ศึกษาการแปลผลการทดสอบ
4. ออกแบบการทดสอบและทำการทดสอบ
5. ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ
6. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.5 แผนการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินการ

ขั้นตอน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาโครงสร้างและส่วนประกอบของหม้อแปลง	↔									
2.ศึกษาคูณสมบัติของสายอากาศ		↔								
3.ศึกษาการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วน										
4.ศึกษาการแปลผลการทดสอบ			↔	↔						
5.ออกแบบการทดสอบ				↔	↔					
6.ทำการทดสอบ						↔	↔			
7.วิเคราะห์ผลการทดสอบ							↔			
8.รวบรวมข้อมูลเรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มปริยญาณิพนธ์								↔	↔	↔

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. เข้าใจโครงสร้างพื้นฐานของหม้อแปลง
2. ทราบและสามารถเปรียบเทียบรูปแบบของ Partial Discharge ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและแบบไม่ดั้งเดิม
3. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเกิดดิซชาร์จบางส่วนกับการจำลองสัญญาณด้วยสายอากาศได้

4. เพื่อวิเคราะห์ผลการกระจาย การสะท้อน และการลดทอนของสัญญาณที่มีการส่งและรับด้วยสายอากาศที่ย่านความถี่ 2.5-3 GHz ในแต่ละกรณี

5. เข้าใจการแปลผลผลการทดสอบของทุกวิธีการทดสอบที่ใช้ในโครงการนี้ และสามารถ

ใช้อุปกรณ์ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงให้ถูกต้องและมีความปลอดภัย

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส่วนประกอบภายนอกของหม้อแปลง

ส่วนประกอบของหม้อแปลงแสดงดังรูป 2.1

1. Magnetic (แกนเหล็ก)
2. Low Voltage Winding (ขดลวดแรงต่ำ)
3. High Voltage Winding (ขดลวดแรงสูง)
4. Corrugated Tank (ตัวถัง และครีบริบายความร้อน)
5. Transformer Base (ฐานหม้อแปลง)
6. Oil Level Gauge (เกจวัดระดับน้ำมัน)
7. Lifting Eye (หุยกหม้อแปลง)
8. Pressure Relief Device (ท่อกันระเบิด)
9. Low Voltage Terminal (ขั้วต่อสายแรงต่ำ)
10. High Voltage Terminal (ขั้วต่อสายแรงสูง)
11. Low Voltage Bushing (ลูกถ้วยแรงต่ำ)
12. High Voltage Bushing (ลูกถ้วยแรงสูง)
13. Arcing Horn (ล่อฟ้า)
14. Off-Load Tap Changer (แท็ปปรับแรงดัน)
15. Upper Steel Clamp (เหล็กหนีบแกนเหล็กด้านบน)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลง

ที่มา : <https://core.ac.uk/download/pdf/30045448.pdf>

2.1.1 ถังหม้อแปลง (Tank)

ถังหม้อแปลง หน้าที่หลัก คือ บรรจุน้ำมัน ท่อหุ้มส่วนประกอบหม้อแปลงภายใน เช่น ขดลวด แกนเหล็ก เป็นต้น และรองรับอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ เช่น บุชชิ่ง และตู้ควบคุม โดยจะต้องทนแรงดันที่จะเกิดขึ้นจากความผิดปกติขณะทำงานให้ได้ ซึ่งขนาด และความทนต่อแรงดันขึ้นกับการออกแบบ

2.1.2 ขดลวดแรงสูง-แรงต่ำ (High voltage - Low Voltage Winding)

เป็นลวดทองแดงกลม/แบน เคลือบน้ำยาหรือหุ้มกระดาษฉนวนพันรอบแกนเหล็ก ขดลวดรับแรงสูงสร้างเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ขดลวดแรงต่ำทำหน้าที่เป็นวงจรไฟฟ้า

2.1.3 ระดับน้ำมัน (Oil Level Gauge)

เป็นเกจี่แสดงระดับน้ำมันซึ่งอาจมีลักษณะเป็นร่อง เป็นท่อ หรือเข็มหน้าปัท หม้อแปลงชนิดปิดจะมีลูกกลอยชี้บอกการมีอยู่ของน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรือดัดแปลงในทางอื่นใดของเอกสารฉบับนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต

This material is for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.1.4 อุปกรณ์ระบายความดันหรือท้อกันระเบิด (Pressure-Relief Device)

เป็นกลไกสปริงเมื่อความดันในหม้อแปลงสูงจนขณะแรงสปริงความดันจะระบายออก

2.1.5 ขั้วต่อสายแรงสูง-แรงต่ำ (HV-LV Terminal)

เป็นที่ต่อสายระหว่างแกนลูกถ้วยหม้อแปลงกับสายแรงสูงเข้าและแรงต่ำออกไปใช้

2.1.6 ลูกถ้วยแรงสูง-แรงต่ำ (HV-LV Bushing)

ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างขั้วตัวนำกับตัวถัง ได้แก่ บุชชิ่งแรงสูง บุชชิ่งแรงต่ำ และบุชชิ่งนิวทรัล โครงสร้างของบุชชิ่งจะประกอบไปด้วยแผ่นพอยล์ และกระดาษ ซึ่งเรียงตัวเป็นชั้นตามระดับแรงดันไฟฟ้า โดยแต่ละชั้นจะรองรับแรงดันไฟฟ้าตามการออกแบบของโรงงาน

2.1.7 ล่อฟ้าหรืออาร์คชิ่งฮอร์น (Arcing Horn)

เป็นอุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงมิให้ชำรุดเสียหายจากแรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่า

2.1.8 แทปปรับแรงดัน (Tap Changer)

เป็นชุดสวิตช์เปลี่ยนเพิ่ม/ลด จำนวนขดลวดแรงสูงเพื่อปรับ แรงดันไฟฟ้าด้านจ่ายหรือแรงต่ำให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.1.9 สายไฟและบัสบาร์ (Cable and Busbar)

เป็นสายไฟและบัสบาร์ทองแดงเชื่อมต่อเข้ากับ ชุดแทปขดลวดแรงสูงเชื่อมต่อปลายขดลวดแรงสูง-ต่ำระหว่างเฟสและปลายขดลวดกับแกน ลูกถ้วย เพื่อเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าภายนอก

2.1.10 ที่ต่อสายดิน (Earthing Terminal)

เป็นจุดที่ต่อสายจากตัวถังลงสู่ดินเพื่อความปลอดภัยจากไฟรั่ว ลัดวงจร ฟ้าผ่า

2.1.11 วาล์วถ่ายน้ำมัน (Oil Drain Valve)

เป็นวาล์วเปลี่ยนถ่ายน้ำมันออกจากน้ำมันหรือแปลงหรือเป็นวาล์วเปิกเก็บตัวอย่างน้ำมันทดสอบ

2.2 ส่วนประกอบภายในของหม้อแปลง

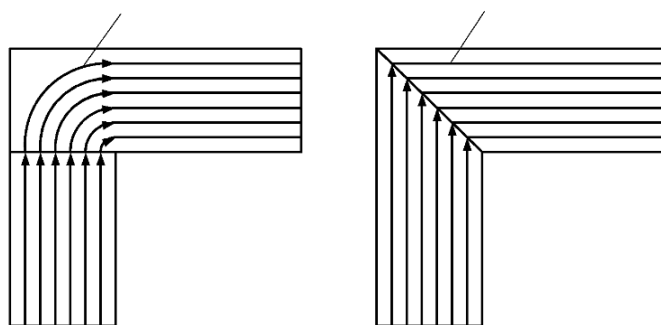
2.2.1 แกนเหล็ก (Cores)

แกนเหล็ก ผลิตจากแผ่นเหล็กผ่านการรีดเย็น เคลือบฉนวน เพื่อลดความสูญเสียทางไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) โดยแกนเหล็กต้องมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.1% หากมีปริมาณคาร์บอนมากจะส่งผลให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) และอายุการใช้งานสั้นลง แกนเหล็กที่ทำมาจากอัลลอยกับซิลิคอนโดยซิลิคอนช่วยเพิ่มความต้านทานในแกนเหล็กทำให้ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไหลวนลดลงแต่การเพิ่มปริมาณซิลิคอนมากเกินไป ส่งผลให้แกนเหล็กเปราะจึงถูกควบคุมไม่ให้เกิน 3%

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

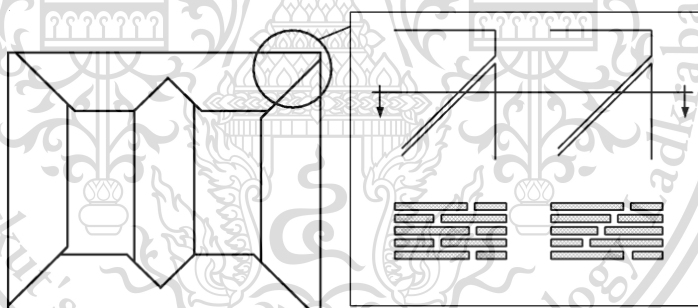
การตัดมุม 45 องศา เพื่อให้การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสะดวกขึ้น ลดการสูญเสียในแกนเหล็ก และลดค่ากระแสสร้างแม่เหล็ก



รูปที่ 2.2 แกนเหล็กตัดที่มุม 45 องศา

ที่มา : <https://core.ac.uk/download/pdf/30045448.pdf>

นำมาประกอบเป็นแกนเหล็กแบบ Conventional Joint หรือ Step-Lap Joint เพื่อให้เกิดช่องว่างอากาศระหว่างแผ่นเหล็กบริเวณรอยต่ออย่างน้อยที่สุดก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ไม่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กจนเกิดการอิ่มตัว เป็นการลดกระแสขณะไม่มีโหลด ลดการสูญเสียขณะไม่มีโหลด และลดระดับความดังของเสียงรบกวนของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 การประกอบแกนเหล็ก

ที่มา : <https://core.ac.uk/download/pdf/30045448.pdf>

แกนเหล็กหม้อแปลงมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม เมื่อเกิดกระแสไหลรุนแรงในขดลวด จะเกิดแรงกระทำที่ขดลวดเท่ากันทุกตำแหน่งโดยขดลวดไม่เสียหาย แต่ถ้าเป็นหม้อแปลงขนาดเล็กที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือหม้อแปลงขนาดเล็กที่มีการใช้ไฟฟ้าไม่มาก แกนเหล็กอาจมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม เนื่องจากแรงที่เกิดจากการลัดวงจรดังกล่าวตามที่กล่าวข้างต้นมีค่าไม่สูงมาก

2.2.2 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก (Core Clamping)

แคลมป์ยึดแกนเหล็ก มีหน้าที่ช่วยยึดแกนเหล็กเพื่อไม่ให้มีจุดที่ไม่สัมผัสกัน ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน และเกิดกรอาร์ค อีกทั้งยังช่วยป้องกันการเสียหายจากการได้รับแรงทางกล

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 แคลมป์ยึดแกนเหล็ก (Core Clamping)

ที่มา : <https://www.indiamart.com/proddetail/power-transformer-core-18121204197.html>

2.2.3 ขดลวด (Windings)

ขดลวดในห้องแปลง ที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ ขดลวดแรงต่ำ และขดลวดแรงสูง ในหม้อแปลงบางตัวมีการออกแบบให้มีขดลวดตติยภูมิ และขดลวดเปลี่ยนแท็ปด้วย โดยขดลวดแรงต่ำจะที่อยู่ด้านในสุด ถัดมาเป็นขดลวดแรงสูง ขดลวดตติยภูมิ และขดลวดเปลี่ยนแท็ป ตามลำดับ

ขดลวดตัวนำที่นิยมใช้ในหม้อแปลง คือ ตัวนำทรงเหลี่ยม เนื่องจากใช้พื้นที่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุด แม้ในหม้อแปลงจำหน่ายที่มีการใช้ตัวนำทรงกลมก็จะทำให้ทั้งสองด้านมีรัศมี ความโค้งน้อยกว่าปกติ และลักษณะการพันขดลวดจะใช้จำนวนรอบของขดลวดและกระแส เป็นตัวกำหนดลักษณะของการพันขดลวด ซึ่งมีหลัก ๆ 4 ชนิด ดังนี้

1. Layer Windings จำนวนรอบในการพันเรียงต่อเนื่องกันขึ้นจนถึงด้านบนนิยมใช้ในหม้อแปลงขนาดเล็ก กลาง และในหม้อแปลงขนาดใหญ่นิยมใช้พันขดลวดเปลี่ยนแท็ป

2. Helical Windings ในแต่ละรอบจะมี Spacer คั่น ช่วยระบายความร้อน และช่วยรับแรงทางกล นิยมใช้กับขดลวดที่มีกระแสไหลเยอะ และต้องการความแข็งแรงเชิงกล

3. Disc Windings การพันแต่ละรอบจะต่ออนุกรมกันไป นิยมใช้กับขดลวดที่มีความต้องการจำนวนรอบจำนวนมาก แต่กระแสต่ำ โดยความแข็งแรงเชิงกลมีความใกล้เคียงกับ Helical Windings โดย Disc Windings มีการพันแยกออกมาสองชนิด คือ Conventional และ Interleaved โดยแบบแรก Conventional คือ การพันขดลวดต่อกันเป็นอนุกรมกันไปแต่ละชั้น ส่วนแบบที่สอง Interleaved จะสลับรอบขดลวดไม่ให้ชิดติดกัน

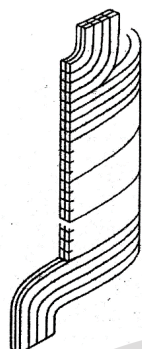
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

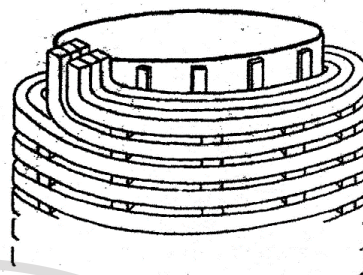
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

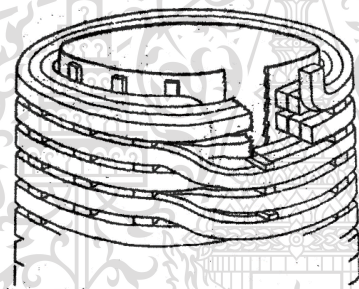
4. Foil Winding ใช้ทองแดง หรืออลูมิเนียมชนิดแผ่นในการพันเป็นขดลวด ซึ่งสามารถลดแรงทางกลแนวตั้งได้ และลดเวลาในการพันขดลวด นิยมใช้ในขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย



ก) Layer Winding



ข) Helical Winding



ค) Disc Winding



ง) Foil Winding

รูปที่ 2.5 ลักษณะการพันขดลวด

ที่มา : <https://core.ac.uk/download/pdf/30045448.pdf>

2.2.4 น้ำมันหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์สำหรับส่งกระแสไฟฟ้าจากวงจรกระแสสลับไปสู่อีกวงจรหนึ่ง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะทำให้เกิดความร้อนเกิดขึ้น หรืออาจเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าภายในหม้อแปลง ซึ่งจำเป็นต้องมีฉนวนไฟฟ้า และการระบายความร้อน ฉนวนเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญของหม้อแปลง ซึ่งต้องมีคุณสมบัติหลัก ๆ ดังนี้

- มีค่าความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้าสูง เพื่อทนความเครียดทางไฟฟ้าในระหว่างที่ใช้งานได้
- มีค่าความหนืดต่ำ สามารถหมุนเวียนภายในหม้อแปลงได้อย่างอิสระ ระบายความร้อนได้ดี

- มีคุณสมบัติอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้หม้อแปลงสามารถเริ่มทำงานในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ

- มีความคงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปัจจุบันมีการใช้ฉนวนอย่างกว้างขวางและหลากหลายชนิดในหม้อแปลงชนิดต่างไม่
ว่าจะเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformers) หม้อแปลงเรียงกระแสไฟฟ้า (Traction
Transformers) หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย (Distribution Transformers) และหม้อแปลง
เครื่องมือวัด (Instrument Transformers)

ตารางที่ 2.1 ชนิดของฉนวนเหลวที่ใช้ในหม้อแปลงและหม้อแปลงเครื่องมือวัด

	น้ำมัน แร่	น้ำมัน ซิลิโคน	น้ำมันเอสเทอร์ สังเคราะห์	น้ำมันพีช (เอสเทอร์ธรรมชาติ)
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	A	X	B	B
หม้อแปลงเรียง กระแสไฟฟ้า	A	A	A	X
หม้อแปลงไฟฟ้าระบบ จำหน่าย	A	A	A	A
หม้อแปลงเครื่องมือวัด	A	X	X	X

หมายเหตุ: A = มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย B = มีการใช้งาน แต่น้อย และ X = ไม่มีการใช้งาน

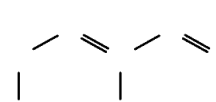
2.2.5 น้ำมันแร่ (Mineral Oil)

น้ำมันแร่ประกอบด้วยสารระกอบไฮโดรคาร์บอนที่ผลิตจากการกลั่นน้ำมันดิบ มีการ
ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ราคาไม่แพง ทำให้มีการใช้น้ำมันแร่มากที่สุดใน
อุตสาหกรรม หม้อแปลง น้ำมันแร่เป็นของเหลวโปร่งใส ไม่มีสี มีส่วนประกอบโครงสร้างโมเลกุลของ
ไฮโดรคาร์บอนได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 พาราฟินแบบลูกโซ่

รูปที่ 2.7 พาราฟินแบบกิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 2.8 แน้พทิน และต้องอ้างอิงรูปที่ 2.9 อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

This material is reserved for non-commercial use. ที่มา : <https://core.ac.uk/download/pdf/30045448.pdf>

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยอาจแยกประเภทของน้ำมันหม้อแปลงตามกระบวนการกลั่นได้ 2 ชนิด ดังนี้

1. น้ำมันพาราฟิน

เกิดจากน้ำมันดิบที่ประกอบด้วย n-paraffins ในปริมาณมาก โดยมีจุดไหลเทสูง และต้องการสารเติมแต่งเพื่อให้จุดไหลเทต่ำลง

2. น้ำมันแนพทิน

เกิดจากน้ำมันดิบที่ประกอบด้วย n-paraffins ในปริมาณน้อยมาก โดยมีจุดไหลเทต่ำ และ ไม่ต้องการสารเติมแต่งสำหรับจุดไหลเทมีคุณลักษณะของความหนืดที่ดีและมีอายุการใช้งานนานกว่าที่ได้คาดหวังไว้ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเชิงขั้วที่ต่ำกว่าน้ำมันพาราฟิน

2.3 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge ;PD) คือการเกิดการเสียหายความ เป็น ฉนวนเพียงบางส่วนของฉนวนนั้นๆ ไม่ได้เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรด การเกิด ดิสชาร์จ บางส่วนโดยมากจะเกิดในบริเวณสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ตัวอย่างเช่น ฉนวนที่ไม่เป็นเนื้อ เดียวกันหรือ มีสิ่งเจอปน ฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเมื่อสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นมีค่าสูงกว่า สนามไฟฟ้าวิกฤต จะเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ โครโนดิสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิว และ ดิสชาร์จบางส่วนภายใน

2.3.1 โครโนดิสชาร์จ

เกิดบริเวณอิเล็กโทรดขอบคมหรือปลายแหลมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โดย การทดลองการเกิดโครโนดิสชาร์จในอากาศใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมกับระนาบ สนามไฟฟ้าไม่ สม่ำเสมอที่เกิดจากอิเล็กโทรดปลายแหลม กรณีโครโนด้านแรงดันสูง เมื่อป้อนแรงดันถึงค่าหนึ่งจะ สังเกตเห็นพัลส์ที่มุม 270 องศา ก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันจะสังเกตเห็นพัลส์ที่มุม 90 องศา และกรณีโคร โนด้านแรงดันต่ำ เมื่อป้อนแรงดันถึงค่าหนึ่งจะสังเกตเห็นพัลส์ที่มุม 90 องศา ก่อน เมื่อเพิ่มแรงดันจะ สังเกตเห็นพัลส์ที่มุม 270 องศา

2.3.2 ดิสชาร์จตามผิว

เกิดขึ้นบนผิวฉนวนแข็งที่มีความเครียดสูง และเกิดตามแนวรอยต่อของฉนวนต่าง ชนิดกัน เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อของฉนวนมากกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า วิกฤต เช่น ปลอกฉนวนนำสายเคเบิล ทำให้เกิดร่องรอยเสียหายบนผิวฉนวน และนำไปสู่การเบรค ดาวน์ที่สมบูรณ์ได้

2.3.3 ดิสชาร์จบางส่วนภายใน

เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็ง หรือฉนวนเหลวที่มีโพรงหรือฟองอากาศหรือสิ่ง ปนเปื้อนหรือ Electrical tree ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก ทำให้ความเครียด

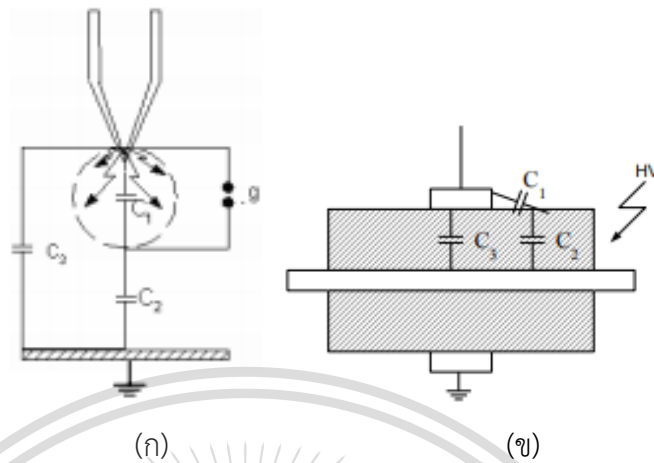
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ ฉนวนแข็ง หรือฉนวนเหลวที่มีโพรงหรือฟองอากาศหรือสิ่ง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use. ปนเปื้อนหรือ Electrical tree ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก ทำให้ความเครียด

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สนามไฟฟ้าในโพรงหรือฟองอากาศมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าฉนวนรอบ ๆ นำไปสู่การเบรกดาวนที่สมบูรณ์ได้

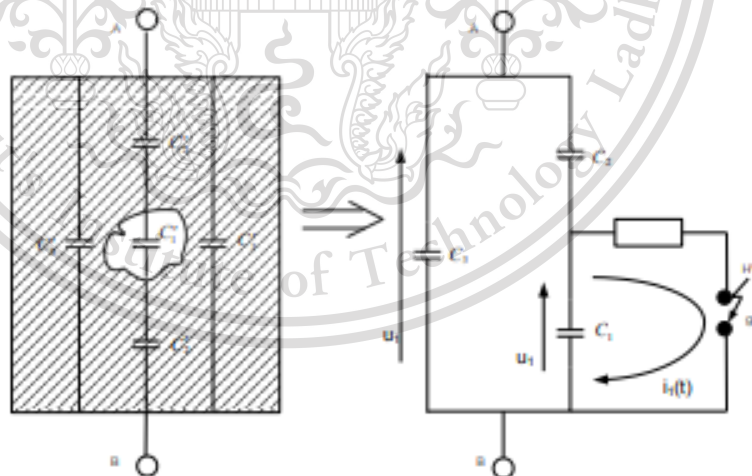


รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (ก) โคโรนาดิสชาร์จ (ข) ดิสชาร์จตามผิว

ที่มา : https://digital.lib.kmutt.ac.th/journal/loadfile.php?A_ID=632

2.3.4 วงจรสมมูลการเกิดดิสชาร์จภายใน

เมื่อมีความบกพร่องภายในเนื้อฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง อาจทำให้เกิดการดิสชาร์จภายในได้ ซึ่งการเกิดดิสชาร์จภายในเนื้อฉนวนสามารถใช้วงจรดังรูปที่ 2.11 อธิบายพฤติกรรมของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวนได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน

ที่มา : https://digital.lib.kmutt.ac.th/journal/loadfile.php?A_ID=632

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

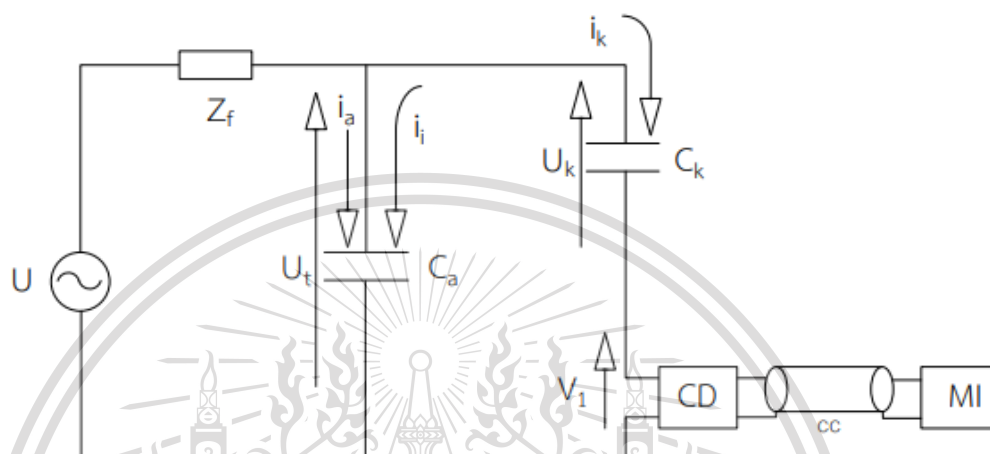
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.5 หลักการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

2.3.5.1 Conventional

การตรวจวัดแบบ Conventional จะเป็นการตรวจจับประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จ ภายในโพรงอากาศของฉนวนนั้น ๆ โดยมีวงจรพื้นฐานการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

ที่มา : https://digital.lib.kmutt.ac.th/journal/loadfile.php?A_ID=632

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD จะถูกกำหนดตามข้อกำหนดตามมาตรฐานสากล IEC 60270 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ตัวกรองสัญญาณจากแหล่งจ่ายวัสดุทดสอบ ตัวเก็บประจุคัปปลิงอุปกรณ์รับสัญญาณ สายเคเบิลนำสัญญาณและเครื่องมือวัด หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (U) ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ โดยหม้อแปลงทดสอบควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปลอด PD ไม่เช่นนั้นการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจะผิดพลาดได้

2. ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Z_f) ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เข้าไปยังวงจรและในอีกนัยหนึ่ง ก็ใช้ป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ที่อาจจะไหลลงกราวผ่านทาง แหล่งจ่ายแรงดันได้ โดยหากใช้หม้อแปลงที่ปราศจาก PD อาจไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน เพราะว่าหม้อแปลงเป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในตัวเองอยู่แล้ว

3. ตัวเก็บประจุคัปปลิง (C_k) ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบ วงจรระหว่างวัสดุทดสอบ ตัวเก็บประจุคัปปลิงและอุปกรณ์รับสัญญาณ โดยตัวเก็บประจุคัปปลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ความสำเร็จของงานวิจัยขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่ได้รับจากผู้เกี่ยวข้อง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. อุปกรณ์รับสัญญาณ (CD) และเครื่องมือวัด (MI) อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่รวมกระแสพัลส์ที่ไหลในวงจรทดสอบเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยมีสายนำสัญญาณเป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์รับสัญญาณกับเครื่องมือวัด อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือเป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ 50 ถึง 400 Hz และฮาร์มอนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบให้เข้าไปที่เครื่องมือวัด ส่วนเครื่องมือวัดจะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการคือเป็น วงจรขยายสัญญาณวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ (band pass filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุและอุปกรณ์แสดงผล การเกิดดิสชาร์จบางส่วน และที่สำคัญคืออุปกรณ์ภายในวงจรวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนทุกชิ้นจะต้องไม่ เกิด PD ที่แรงดันทดสอบ

หลักการการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเริ่มจากคอย ๆ ป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ วัสดุทดสอบนั้นเกิดดิสชาร์จบางส่วน ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ อุปกรณ์ทดสอบ ทำให้ตัวเก็บประจุคัปปลิงจะดิสชาร์จประจุไปที่อุปกรณ์ทดสอบเพื่อชดเชยแรงดันตกนั้น ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์ไหลวนครบวงจร ตัวอุปกรณ์รับสัญญาณและเครื่องมือวัดจะวัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่างอุปกรณ์ทดสอบและตัวเก็บประจุคัปปลิง โดยอินทิเกรตกระแสพัลส์และนำไป แสดงผลโดยการวัด PD แบบ Conventional อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น microvolt (μV) , pico-coulomb (pC) ได้ แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลวัด PD ในปัจจุบันคือ การแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวกยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบและอีกวิธีหนึ่งคือ การแสดงผลแบบ PRPD (phase resolve PD pattern) เป็นการแสดงผลการเกิด PD ที่เกิดขึ้นในแต่ละมุมซึ่งการที่เราจะรู้มุมจะช่วยวิเคราะห์ว่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นเป็นดิสชาร์จประเภทใด โดยข้อดีที่สำคัญอีกอย่างของ PRPD คือบอกจำนวนครั้งในการเกิด PD ซึ่งจะสามารถนำไปหาอัตราในการเกิด PD ได้ ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหา q_{iec} ต่อไป

2.3.5.2 Non-Conventional

การวัดแบบ Non-conventional จะเป็นการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนผ่านผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้เมื่อเกิด PD โดย by product ที่ได้เมื่อเกิด PD จะมี 3 ชนิด ได้แก่ แสง กลิ่น และ เสียง

2.4 สายอากาศ (antenna)

เนื่องจากกระแสที่เกิดจากการดิสชาร์จบางส่วนมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกมาจากบริเวณที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วน จึงได้เกิดแนวคิดในการนำสายอากาศมาเพื่อตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา และนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตรวจจับได้มาวิเคราะห์หลักขณะของคลื่นที่เกิดขึ้น เพื่อแยกชนิดของการดิสชาร์จบางส่วน

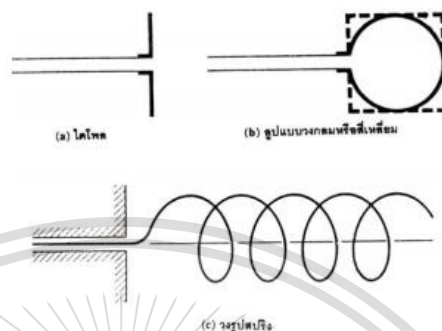
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สายอากาศ คือ สิ่งที่แผ่กระจายหรือรับคลื่นวิทยุ หรือ เป็นอุปกรณ์แปลง (transducer) ระหว่างท่อนำคลื่นหรือสายนำสัญญาณและอากาศ ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรได้ดังนี้

2.4.1 ประเภทของสายอากาศ

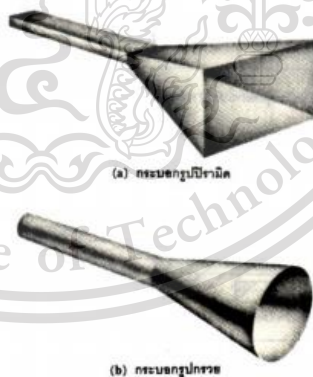
2.4.1.1 สายอากาศแบบลวดตัวนำ (wire antenna)



รูปที่ 2.13 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศชนิดลวดตัวนำ

ที่มา : รังสรรค์ วงศ์สรรค์, งานนำเสนอการประชุมเชิงปฏิบัติการของ PTEC, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. <http://www.nbtc.go.th/getattachment/News/Information>

2.4.1.2 สายอากาศแบบช่อง (aperture antenna)



รูปที่ 2.14 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแบบช่อง

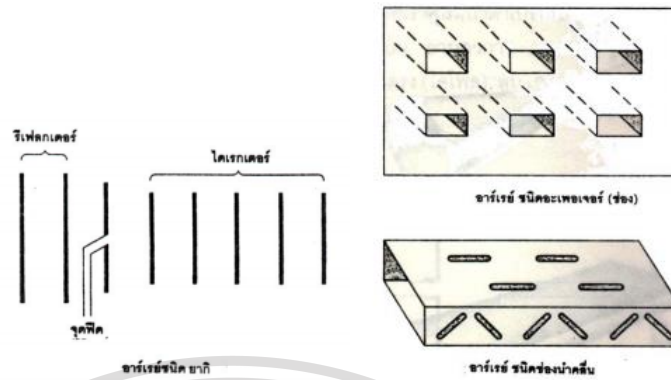
ที่มา : รังสรรค์ วงศ์สรรค์, งานนำเสนอการประชุมเชิงปฏิบัติการของ PTEC, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. <http://www.nbtc.go.th/getattachment/News/Information>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

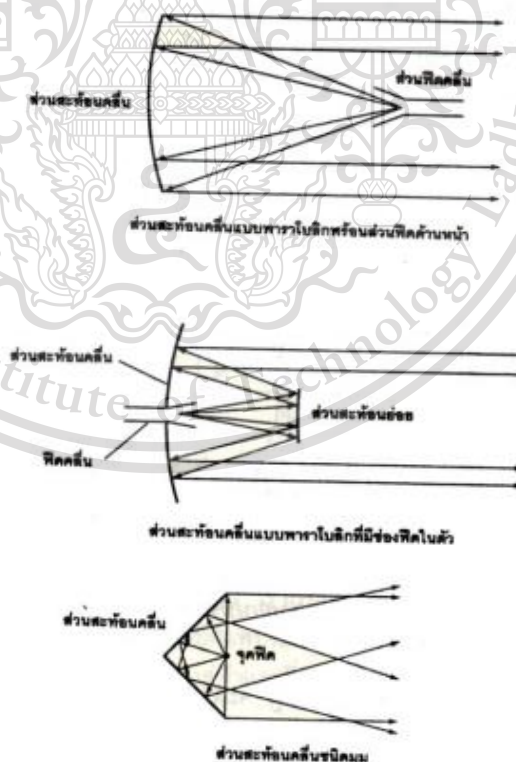
2.4.1.3 สายอากาศแบบอาร์เรย์ (array antenna)



รูปที่ 2.15 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศแบบอาร์เรย์

ที่มา : รังสรรค์ วงศ์สรรค์, งานนำเสนอการประชุมเชิงปฏิบัติการของ PTEC, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. <http://www.nbtc.go.th/getattachment/News/Information>

2.4.1.4 สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น (reflector antenna)



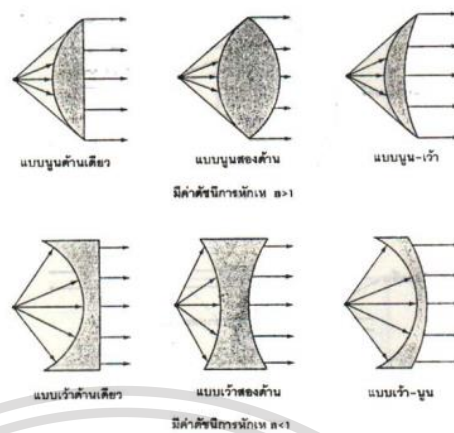
รูปที่ 2.16 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศชนิดสะท้อนคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอ้างอิงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.1.5 สายอากาศแบบเลนส์ (lens antenna)

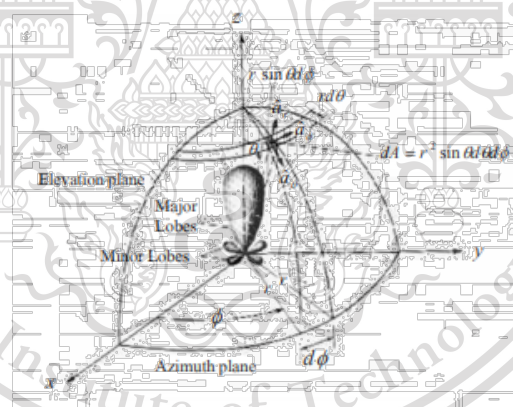


รูปที่ 2.17 รูปร่างหลายแบบของสายอากาศเลนส์

2.4.2 พารามิเตอร์มูลฐานของสายอากาศ

2.4.2.1 แบบรูปการแผ่กำลัง (Radiation Pattern/Antenna Pattern)

แบบรูปคลื่นจะถูกพิจารณาที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) และนำเสนอเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงทิศทาง (Directional Coordinates)



รูปที่ 2.18 แบบรูปการแผ่กำลัง

ที่มา : ดลวัฒน์ กะการดี และ วรวิทย์ จิตอารี, “การออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยี LoRa Antenna Design For LoRa Technology,” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2560. http://digital_collect.lib.buu.ac.th/project/b00254398.pdf

เส้นการกวาดของกำลังงานที่รับได้ที่ตำแหน่งรัศมีคงที่จะถูกเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน (Field Pattern) เราจะเรียกว่า แบบรูปแอมพลิจูดของสนาม (Amplitude Field Pattern) ในทางปฏิบัตินั้น แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบสามมิติ จะถูกวัดและบันทึกในรูปของแบบรูปสองมิติ โดยการพล็อตแบบรูปตามฟังก์ชันของมุม θ และ Φ ให้สัมพันธ์และต่อเนื่องกัน

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.) แบบรูปแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) แบบมีทิศทาง (Direction) และแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirection) ตัวแผ่กำลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือ “สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นมาว่าไม่การสูญเสียภายในตัวเองและมีการแผ่กำลังออกมาเท่ากันทุกทิศทาง” ถึงแม้ว่าตัวแผ่กำลังงานแบบนี้จะไม่มีจริงในทางปฏิบัติ แต่ก็มีประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อหาคุณสมบัติของสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่มีอยู่จริง สำหรับสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) คือ “สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานหรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ” ซึ่งค่านี้มักจะนำมาใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum Directivity) มากกว่าจะใช้กับสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น (Half-wave Dipole) ซึ่งตัวอย่างของสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบมีทิศทาง ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ในระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) นั้นแบบรูปการแผ่กำลังงานจะไม่มีทิศทาง แต่ส่วนที่มีทิศทางจะอยู่ในระนาบมุมยก (Elevation Plane) ซึ่งเราเรียกแบบรูปการแผ่กำลังงานชนิดนี้ว่าเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Pattern) โดยมีนิยามว่า “เป็นแบบรูปการแผ่กำลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ ในที่นี้คือมุมกวาด (Azimuth) และระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีรูปแบบการแผ่กำลังงานแบบมีทิศทางในกรณีนี้คือมุมยก (Elevation)”



รูปที่ 2.19 แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดี่ยว

ที่มา : ดลวัฒน์ กะการดี และ วรวิทย์ จิตอารี, “การออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยี LoRa Antenna Design For LoRa Technology,” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2560. http://digital_collect.lib.buu.ac.th/project/b00254398.pdf

2.) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายกำลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงจะเป็นรูปอันเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติ ก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ในทางปฏิบัติแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบหนึ่ง ๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้น ๆ ขณะระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ถูกต้องควรจะต้องจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใด ๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

2.4.2.2 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะบอกทิศทางที่เหมาะสมในการติดตั้งสายอากาศ โดยสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนของค่าความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางนั้น ๆ เทียบกับค่าความเข้มการแผ่พลังงานที่เฉลี่ยออกไปทุกทิศทาง โดยทั่วไปจะมีการกำหนดสภาพเจาะจงทิศทางในทิศทางที่มีการแผ่พลังงานสูงสุดเสมอ

2.4.2.3 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายสัมบูรณ์ (Absolute Gain) ของสายอากาศ คือ อัตราส่วนของค่าความเข้มการแผ่กำลัง $U(\theta, \varphi)$ ที่แผ่ออกไปในทิศทางที่กำหนดให้ เทียบกับค่าความเข้มของกำลัง P_{in} ที่ป้อนให้กับสายอากาศซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (2.1)$$

อัตรการขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้เทียบกับอัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเท่ากัน

2.4.2.4 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth)

ในระนาบหนึ่ง ๆ ที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุด และมีมุมซึ่งอยู่ระหว่างสองทิศทางในทิศทางที่ซึ่งความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานมีค่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุด ประสิทธิภาพของลำคลื่น (Beam Efficiency) ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาคุณภาพของสายอากาศ

2.4.2.5 ความกว้างแถบ (Bandwidth)

ความกว้างแถบมีนิยามว่า ย่านของความถี่ที่ยังอยู่ภายในสถานะที่สายอากาศที่ยัง

ทำงานได้ สภาวะดังกล่าวพิจารณาจากคุณลักษณะบางตัวของสายอากาศและให้เป็นไปตามมาตรฐานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าที่กำหนด ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. สายอากาศแถบกว้าง (Broadband Antenna) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่สายอากาศสามารถทำงานได้

2. สายอากาศแถบแคบ (Narrowband Antenna) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของ เปอร์เซ็นต์ของผลต่างความถี่ เมื่อเทียบกับความถี่กลางของความกว้างแถบ

2.4.2.6 การโพลาไรซ์/การแยกขั้วแคคส์ (Polarization)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นวิทยุที่ถูส่งออกจากแหล่งกำเนิดไม่ว่าจะเป็นระบบแอนะล็อกหรือดิจิทัล หากต้องการให้สายอากาศภาครับสามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด จะต้องให้โพลาไรซ์ของสายอากาศภาครับอยู่ในทิศทางเดียวกับโพลาไรซ์ของคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด

2.4.2.7 อิมพีแดนซ์อินพุต (Input Impedance)

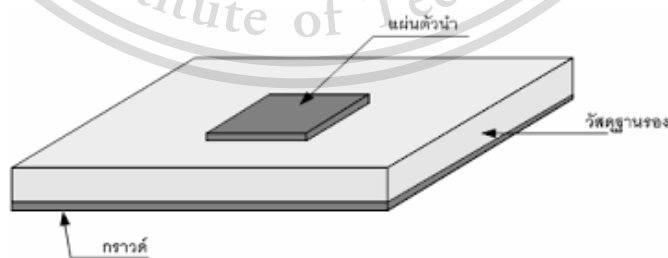
2.4.2.8 ความยาวประสิทธิผลเชิงเวกเตอร์และพื้นที่สมมูลของสายอากาศ (Antenna Vector Effective Length and Equivalent Areas)

2.5 สายอากาศไมโครสตริบ (Microstrip antenna)

สายอากาศไมโครสตริบเป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะย่านความถี่คลื่นวิทยุสามารถใช้งานได้หลายความถี่ขึ้นอยู่กับเทคนิคและการออกแบบสร้างในแต่ละชิ้นงาน

2.5.1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริบ

สายอากาศไมโครสตริบ (Microstrip antenna) ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือที่เรา เรียกว่าแพทช์ (Patch) ซึ่งเป็นแผ่นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ที่มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่า ซับสเตรท (Substrate) ของสารไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.20 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริบ

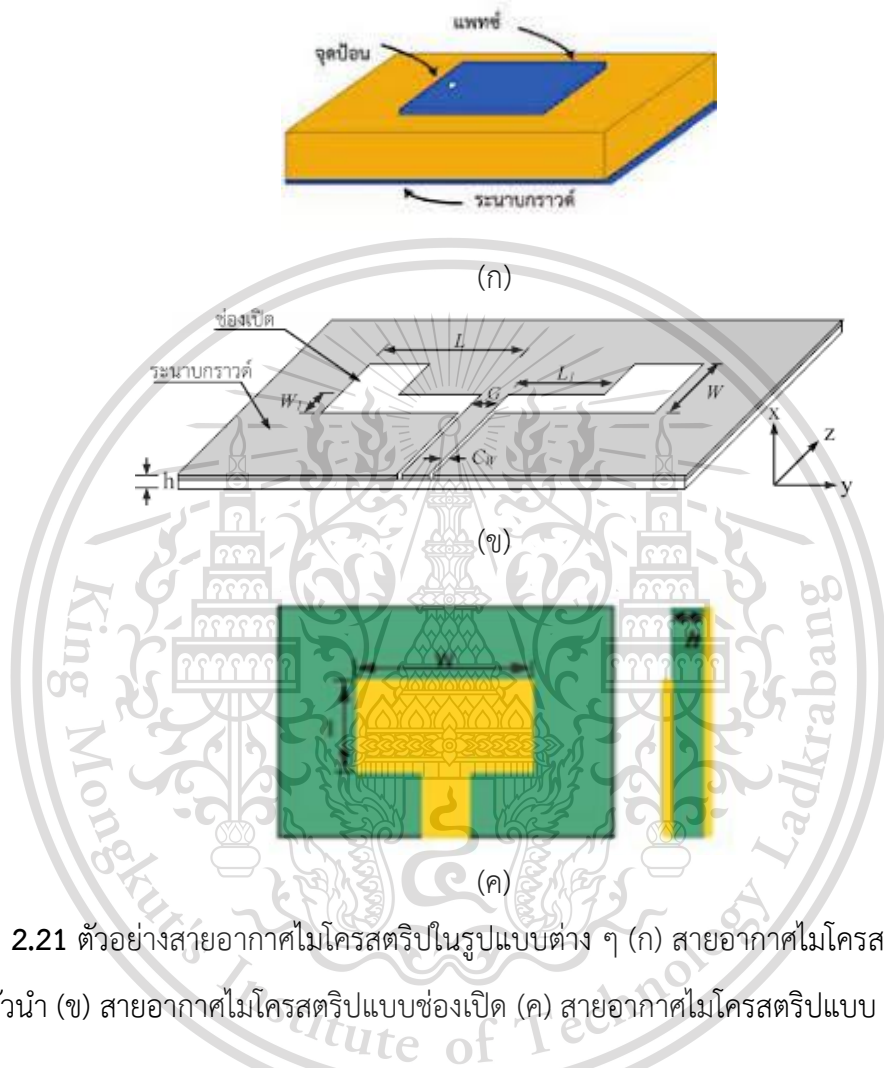
ที่มา : ดลวัฒน์ กะการดี และ วรวิทย์ จิตอารี, “การออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยี LoRa

Antenna Design For LoRa Technology,” ปรียญานันท์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชา การค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม, วิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2560. http://digital_collect.lib.buu.ac.th/project/b00254398.pdf

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้นมียู้อยู่ด้วยกันหลายชนิด ในแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ และคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการออกแบบหรือเลือกใช้สายอากาศชนิดใด จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ตัวอย่างสายอากาศไมโครสตริปในรูปแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างสายอากาศไมโครสตริปในรูปแบบต่าง ๆ (ก) สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นตัวนำ (ข) สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (ค) สายอากาศไมโครสตริปแบบ feed line

2.5.2 แผ่นตัวนำ

แผ่นตัวนำสายอากาศ เป็นแผ่นโลหะแบบบาง ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่พลังงาน และมีค่าความต้านทานต่ำ ทนต่อสภาวะแวดล้อม สามารถยึดติดกับผิวของชั้นวัสดุฐานรองได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปทำจากทองแดง ทองคำหรืออลูมิเนียม แผ่นตัวนำอาจมีรูปร่างต่าง ๆ เช่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส วงกลม วงรี ฯลฯ วัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นตัวนำสายอากาศนี้ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ และความซับซ้อนในการผลิตนอกจากนี้แล้วขนาดและรูปร่างของแผ่นตัวนำสายอากาศยังเป็นปัจจัยต่อการกำหนดความถี่ใช้งาน รูปแบบการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ขาเข้าปัจจุบันแผ่นตัวนำสายอากาศที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมและวงกลม เนื่องจากการออกแบบและการผลิตสามารถทำได้ง่าย

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.3 ชั้นวัสดุฐานรอง

ชนิดและขนาดของชั้นวัสดุฐานรองเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบสายอากาศและเป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริบ การแผ่พลังงานของสายอากาศจะลดลงเมื่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความหนาของชั้นวัสดุฐานรองมีค่าคงที่การแผ่พลังงานของสายอากาศจะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นและการแผ่พลังงานนี้จะมีปริมาณลดลง เมื่อความหนาต่อความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.05 mm การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุฐานรองนอกจากต้องคำนึงถึงสมบัติทางกล สมบัติทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดี ความเรียบของผิวซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดติดกับโลหะ และสามารถผลิตเป็นชั้นวัสดุฐานรองสำหรับสายอากาศได้นอกจากนี้สมบัติทางไฟฟ้ายังเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวัสดุ โดยมีค่าปัจจัยที่ต้องคำนึง ดังต่อไปนี้

- 1.) ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) คือ วัสดุที่ใช้ควรเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้ค่าสภาพยอมรับของไดอิเล็กตริกมีค่าคงที่ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกบ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริก โดยเทียบกับช่องว่างอิสระ (Free space) ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ควรมีค่าต่ำ เนื่องจากค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดีและทำให้การผลิตมีความผิดพลาดน้อย
- 2.) ค่า Loss tangent คือ ค่าการนำกระแสของสารไดอิเล็กตริก เมื่อนำสารไดอิเล็กตริก ไปคั่นกลางระหว่างแผ่นโลหะคู่หนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสมากน้อยเพียงใด โดยค่านี้ควรมีค่าที่ต่ำเพื่อลดพลังงานการสูญเสียเนื่องจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริกทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศสูงขึ้น
- 3.) ค่าคงตัวของการนำความร้อน (Thermal conductivity) แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่านี้ยิ่งสูงยิ่งดี

2.5.4 ระนาบกราวด์

ระนาบกราวด์ (Ground plane) เป็นแผ่นโลหะขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแผ่นตัวนำสายอากาศ ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากโลหะชนิดเดียวกันกับสายอากาศ โดยขนาดของระนาบกราวด์นี้จะส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เนื่องจากคลื่นเลี้ยวเบนที่บริเวณขอบของระนาบกราวด์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศอีกด้วย เนื่องจากการวิเคราะห์สายอากาศส่วนใหญ่มีข้อสมมุติว่าแผ่นระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำสายอากาศมากจนสามารถประมาณได้ว่าเป็นอนันต์ ขนาดที่จำกัดของระนาบกราวด์จะมีผลต่อลำคลื่นหลักน้อยมาก แต่จะทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

2.5.5 ข้อดีของ Microstrip antenna

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

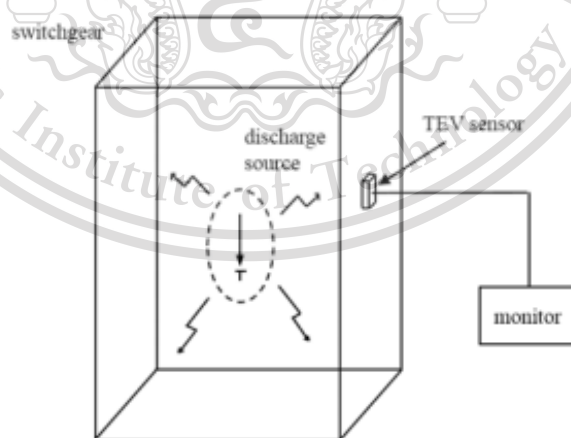
- ขนาดเล็ก
- สามารถนำมาดัดแปลงรูปร่างให้สมดุลได้
- ราคาถูก
- การผลิตง่าย
- สามารถทำให้บางได้
- แพร่กระจายคลื่นได้ทั้งแบบเส้นตรงและวงกลม
- สามารถรวมกับความถี่อื่นๆได้

2.5.6 ข้อเสียของ Microstrip antenna

- แบนด์วิดท์แคบ (Narrow bandwidth)
- มีการสูญเสียมากซึ่งส่งผลให้ได้อัตราขยาย (Gain) ต่ำ
- สายอากาศไมโครสตริปส่วนใหญ่จะมีการแผ่กระจายคลื่นเพียงครึ่งระนาบ
- มีอัตราขยายสูงสุด (maximum gain) ไม่เกิน 20 dB

2.6 Transient Earth Voltage: TEV

เมื่อเกิด PD ในฉนวนของสวิตช์เกียร์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายจากแหล่งจ่ายที่มีการดิสชาร์จผ่านช่องว่างบนผิวด้านนอก การเกิด PD โดยทั่วไปมีระยะเวลาเพียงไม่กี่นาโนวินาที เซนเซอร์ Capacitive Coupling บนผิวด้านนอกสามารถวัดพารามิเตอร์ส่วนที่ดิสชาร์จได้ โดยการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.22 ไดอะแกรมของหลักการทดสอบ TEV

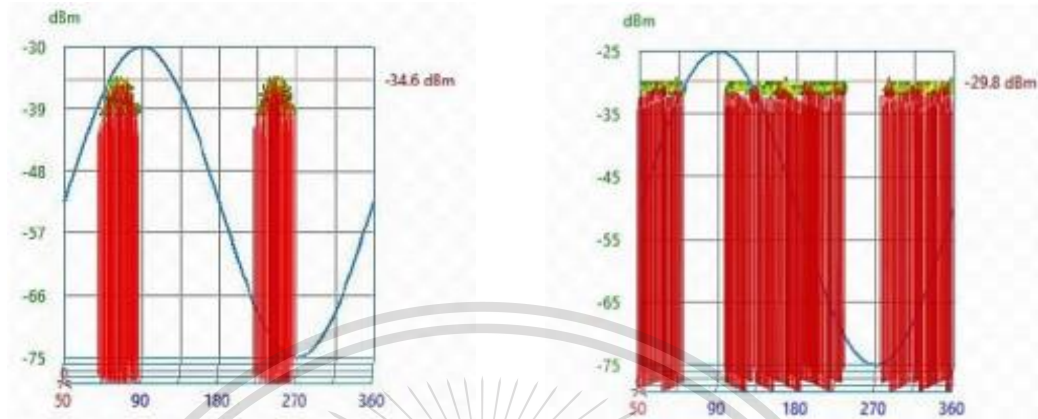
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่พิมพ์โดยมูลนิธิฯ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของมูลนิธิฯ ทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

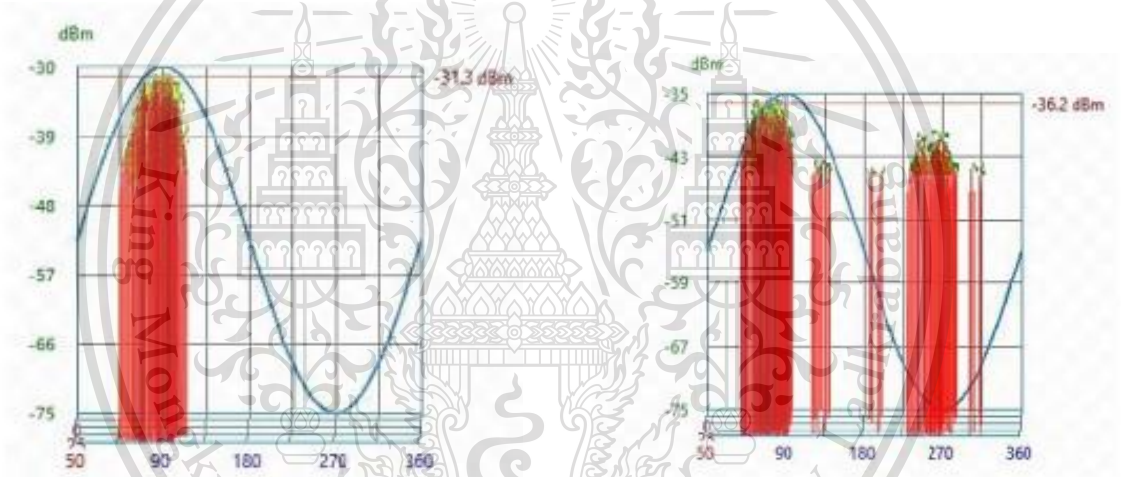
วงจรมหาตัวกรองในตัว และวงจรที่ได้มา ทำให้แปลง PD ไปเป็นสัญญาณพัลส์ขนาด TEV ในหน่วย mV

2.6.1 Partial Discharge Pattern of TEV sensor



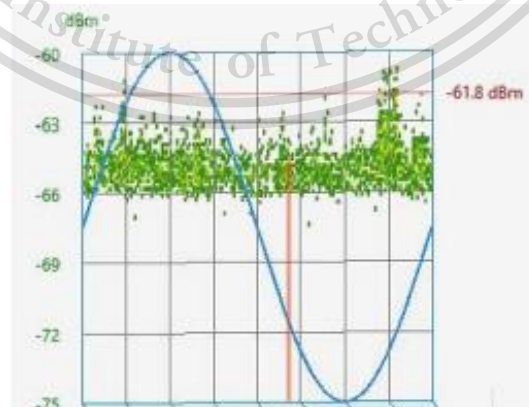
ก) Internal defect

ข) Floating defect



ค) Corona defect

ง) Surface discharge to high voltage electrode defect



จ) no Partial Discharge (noise)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูได้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.23 ตัวอย่าง PD Pattern ของ TEV sensor

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.7 HFCT Sensor

Sensor HFCT ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับวิธีการตรวจจับ PD แบบ non-conventional ใช้คล้องผ่านตัวนำต่อลงดิน เมื่อกระแส PD ไหลผ่านตัวนำจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันขึ้นที่ขดลวดของ HFCT ค่าแรงดันที่ได้นี้จะถูกส่งไปที่เครื่องมือวัด (โดยทั่วไปมีค่าความต้านทานภายใน 50 Ω) HFCT ประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำพันรอบแกนเหล็ก ชนิด Ferromagnetic Core เหมาะสำหรับการวัดสัญญาณ Transient signals ที่เกิดจาก PD หรือ สัญญาณรบกวน

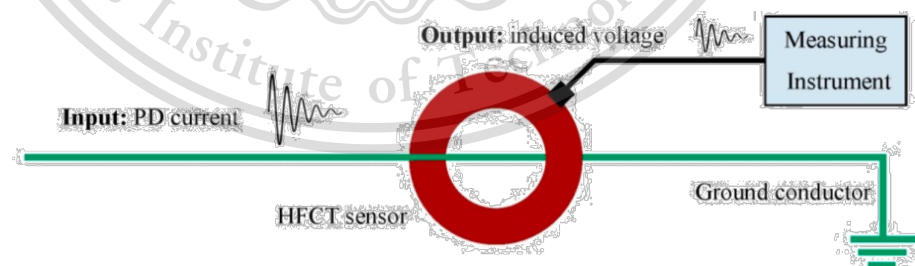


รูปที่ 2.24 HFCT sensors

ที่มา : <https://spectrumscientific.com.ph/product/high-frequency-current-transformer-hfct/>

ตัวอย่าง การนำ HFCT ไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเช่น

1. Transformers
2. Rotating machines
3. Switchgear
4. Underground cables



รูปที่ 2.25 หลักการทำงานของ HFCT

ที่มา : <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/4/7360>

เมื่อกระแส PD ไหลผ่านตัวนำลงดินจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันเป็นไปตามสมการดังนี้
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ออกแบบลงเนื้อหา โดยต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้

$$e = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -n \cdot A \cdot \frac{d\phi}{dt} = -\mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \frac{dH}{dt} \quad (2.2)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$e = -\mu_0 \cdot \mu_r \cdot n \cdot A \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

$$e = M \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

ตำแหน่งการคล้องสายมีผลอย่างมากต่อช่วง Band width ของสัญญาณ PD ที่วัดได้เนื่องจาก ตัวนำมีคุณสมบัติเป็น Filter ยิ่งคล้องสายใกล้แรงกำเนิด PD ช่วง Band width จะกว้าง หากของสายไกลจากแหล่งกำเนิด PD ช่วง Band width จะแคบ

การวัด PD ในย่านความถี่ HF โดยใช้ HFCT sensors มีข้อดีดังนี้

- ความไวไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปร่างพัลส์เช่นเดียวกับวิธี Conventional
- signal to noise ratio (SNR) สามารถพัฒนาปรับปรุงได้ โดยการวิเคราะห์ข้อมูล

ในย่านความถี่เฉพาะ

- มีความไวสูงเมื่อ sensors อยู่ใกล้กับแหล่ง PD source แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะติดตั้งไกลจากแหล่ง PD source เช่นในระบบสายส่ง ก็สามารถตรวจจับสัญญาณ PD ถึงแม้ความถี่บางส่วนจะถูกกรองและลดทอนเนื่องจากความยาวของตัวนำ สามารถตรวจจับได้ไกลถึง 1 km

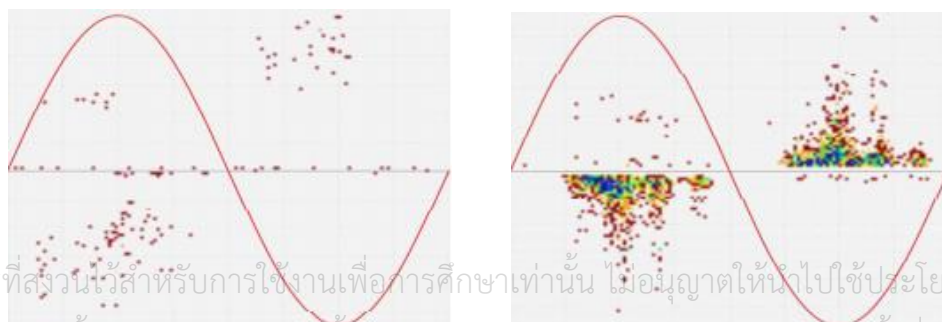
- สามารถหาตำแหน่งของ Defect ที่ทำให้เกิดสัญญาณ PD ได้โดยใช้ HFCT sensors 2 ตัวหรือมากกว่านำไปวิเคราะห์ Time-of-flight analysis

- สามารถบันทึกรูปคลื่นพัลส์ PD เพื่อวัตถุประสงค์ในการประมวลผลภายหลังสัญญาณ PD ที่บันทึกสามารถ

จำแนกได้ตามลักษณะของรูปร่างพัลส์โดยมีจุดประสงค์เพื่อแยกแยะ PD หรือสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกัน การจำแนกประเภทที่เหมาะสมของพัลส์ที่บันทึกไว้และการวิเคราะห์เฟส (PRPD) ที่เกี่ยวข้องช่วยเพิ่มความระมัดระวังในการตรวจจับข้อบกพร่องและอำนวยความสะดวกในการวินิจฉัยที่แม่นยำยิ่งขึ้น

2.7.1 Partial Discharge Pattern High Frequency Current

Transformer (HFCT)



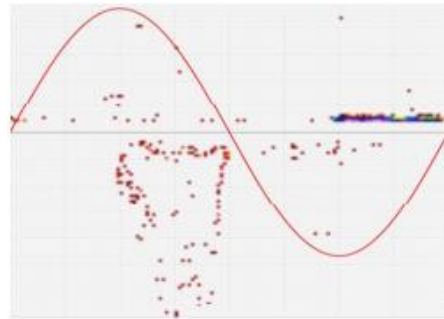
ก) Internal defect

ข) Floating defect

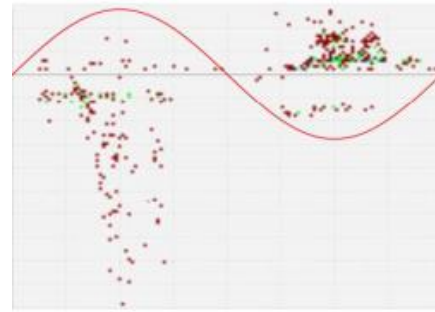
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

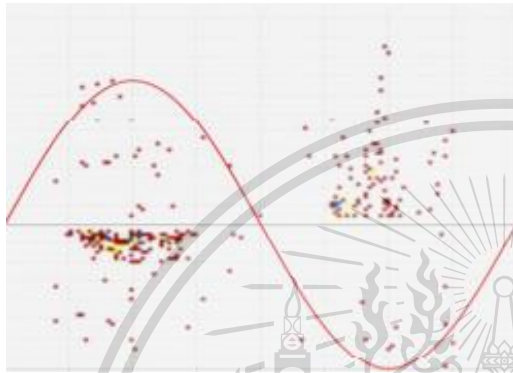
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



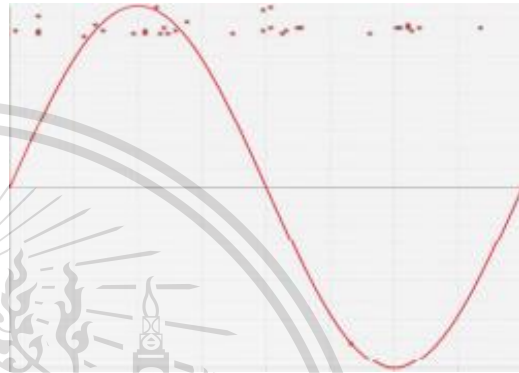
ค) Corona defect



ง) Surface discharge to high voltage electrode defect



จ) Surface discharge to grounding electrode defect



ฉ) no Partial Discharge (noise)

รูปที่ 2.26 ตัวอย่าง PD Pattern ของ HFCT sensor

2.8 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave)

เมื่อเกิด PD เนื่องจากความบกพร่องในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง พัลส์ PD จะสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่หลายร้อยเมกะเฮิร์ต พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายทุกทิศทางภายในสวิตช์เกียร์ เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของ shielding พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถกระจายไปด้านนอกผิวของสวิตช์เกียร์ และกระจายในอากาศได้ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำกระแสบนผิวด้านนอก ทำให้เกิดสัญญาณพัลส์แรงดันทรานเซียนท์ต่างกันที่ตำแหน่งต่าง ๆ

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EM) ถูกรายงานว่าสร้างจากโคโรนาหรือจาก short gap ดิสชาร์จในสายไฟฟ้าแรงสูง และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอาจมีการรบกวนการสื่อสารทางวิทยุ พบว่าความถี่สเปกตรัมค่อนข้างกว้างที่ขยายเกินกว่า GHz แนวคิดในการตรวจหา PD โดยใช้คลื่น EM เกิดขึ้นครั้งแรกในอุปกรณ์ที่หุ้มฉนวนก๊าซในรูปแบบของเซ็นเซอร์ที่เรียกว่า “UHF” เทคนิคได้พัฒนาไปสู่ระดับที่จะใช้ในการตรวจสอบออนไลน์ของอุปกรณ์ฉนวนแก๊ส การใช้คลื่น EM ในการตรวจจับ PD จากอุปกรณ์อื่น ๆ ยังได้รับการเสนอ ทั้งสายอากาศไดโพลและลูก ได้รับการทดสอบความถี่ในการตรวจจับต่ำกว่า 300 MHz (เช่น ช่วง VHF) มีปัญหาการรบกวนที่รุนแรงจาก Public broadcast และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แพลตฟอร์มอื่น ๆ ตั้งแต่ระดับเสียงกลองที่ความถี่สูงขึ้นไป ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีความไวสูง ซึ่งทำงานได้อย่างไม่จำกัดทุกทิศทาง อีกทั้งยังมีให้ทดแทนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้นำเชื่อถือในช่วง UHF (0.3–3 GHz) เป็นที่ต้องการ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.9 Ultrahigh frequency: UHF

การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PD ในช่วงความถี่สูงพิเศษ (UHF) กลายเป็นหนึ่งในเทคนิคการวัดที่ใช้ในโลกอย่างกว้างขวาง วิธีการตรวจจับ UHF PD เอาชนะข้อเสียของการวัด PD แบบคลาสสิกได้ โดย UHF ครอบคลุมการแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 0.1 ถึง 1 m สเปกตรัมวิทยุอยู่ช่วง 300 MHz-3 GHz เนื่องจากระดับเสียงที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับย่านความถี่ต่ำที่ใช้ก่อนหน้านี้ สายอากาศเป็นเซนเซอร์ UHF สำหรับตรวจจับ PD ออนไลน์และในระบบ

2.10 การแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (radiation)

เมื่อกระแสมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่คงที่ทำให้ประจุเกิดความเร่งหรือความหน่วง ทำให้เกิดการแผ่พลังงานจากแหล่งกำเนิด โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความถี่เดียวกับความถี่ของแหล่งกำเนิด

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วแสง เมื่อตกกระทบบนผิวของวัตถุ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจมีการหักเห สะท้อน หรือเป็ยงเบน ในขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังเดินทาง พลังงานบางส่วนอาจถูกส่งผ่านไป (transmission) บางส่วนถูกดูดกลืน (absorption) และบางส่วนอาจถูกสะท้อนกลับ (reflection) นอกจากนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจเคลื่อนที่ช้าลงเนื่องจากคุณสมบัติของวัตถุที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

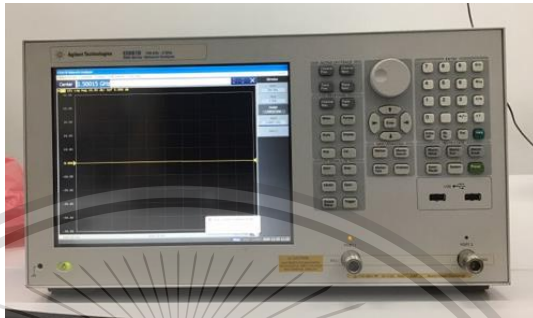
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

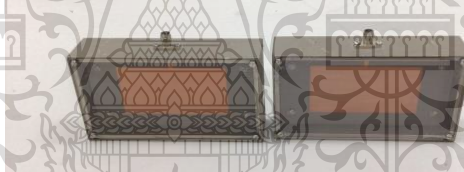
3.1 อุปกรณ์

1.) Vector Network Analyzer



รูปที่ 3.1 Vector Network Analyzer

2.) Micro strip Antenna



รูปที่ 3.2 Micro strip Antenna

3.) Cable



รูปที่ 3.3 Cable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.) Connector



รูปที่ 3.4 Connector

5.) Calibrator



รูปที่ 3.5 Calibrator

6.) TEV sensor



รูปที่ 3.6 TEV sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

7.) HFCT sensor



รูปที่ 3.7 HFCT sensor

8.) Switchgear 6.9 kV 1 Unit



รูปที่ 3.8 Switchgear room and Switchgear

9.) Distribution Transformer 24 kV อาคารที่ 1



รูปที่ 3.9 Distribution Transformer 24 kV อาคารที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในอาคารเพียงอย่างเดียว ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

10.) Distribution Transformer 24 kV อาคารที่ 2



รูปที่ 3.10 Distribution Transformer 24 kV อาคารที่ 2

11.) Distribution Transformer 24 kV อาคารที่ 3



รูปที่ 3.11 Distribution Transformer 24 kV อาคารที่ 3

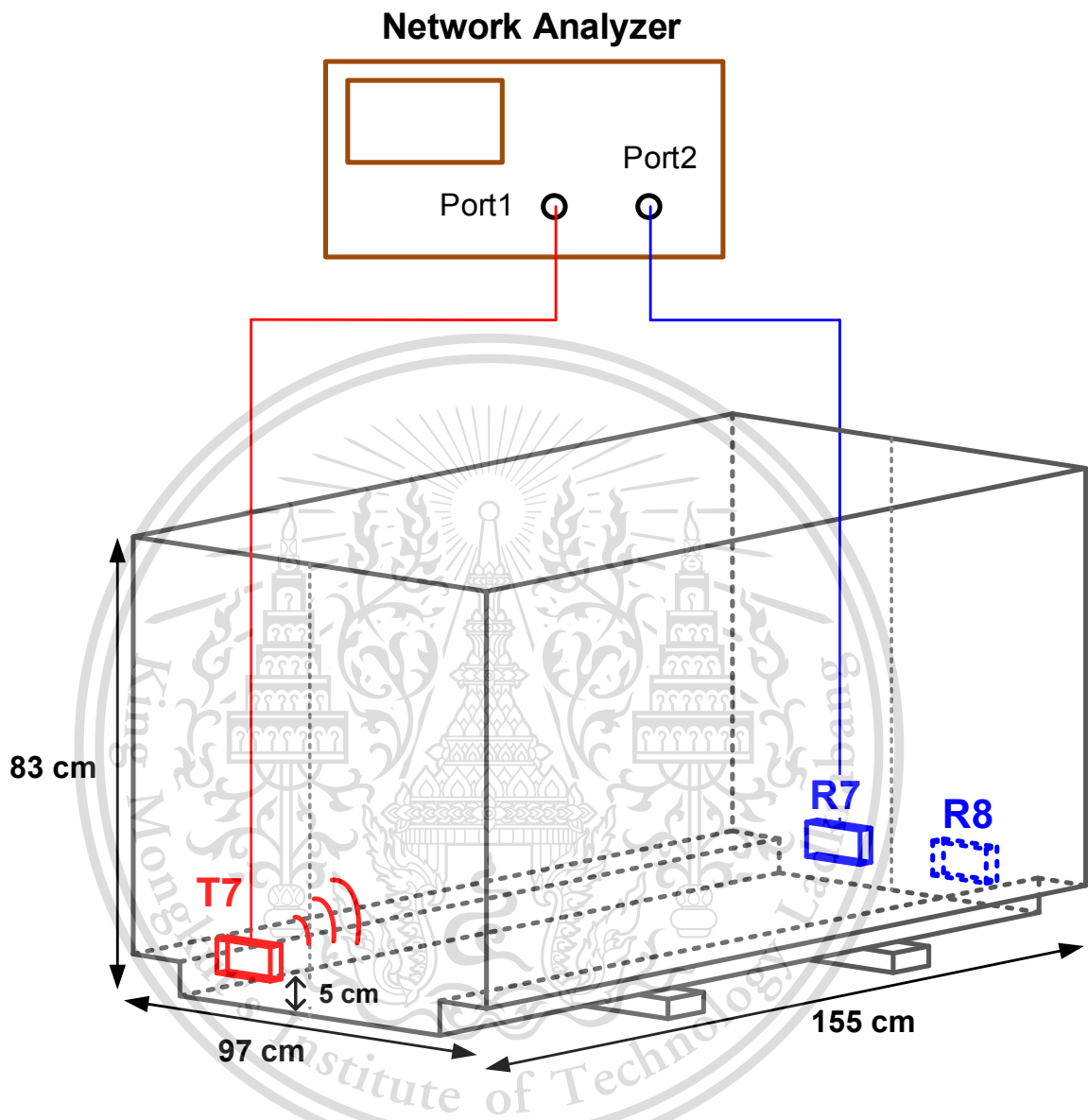
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2 การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นที่วัดด้วยสายอากาศ

3.2.1 วงจรทดสอบ



รูปที่ 3.12 ขนาดของถังหม้อแปลงไฟฟ้าและจุดติดตั้งสายอากาศภาคส่งและภาครับ

3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. เตรียมอุปกรณ์ตามภาพ
2. ต่อยังการทดลองตามภาพ
3. เปิดเครื่อง VNA ปรับตั้งค่าต่างๆ ตามต้องการ
4. ป้อนสัญญาณที่ปรับตั้งค่าไว้ และบันทึกผลการทดลอง
5. ทำการทดลองในกรณีที่มีแกนเหล็กและขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

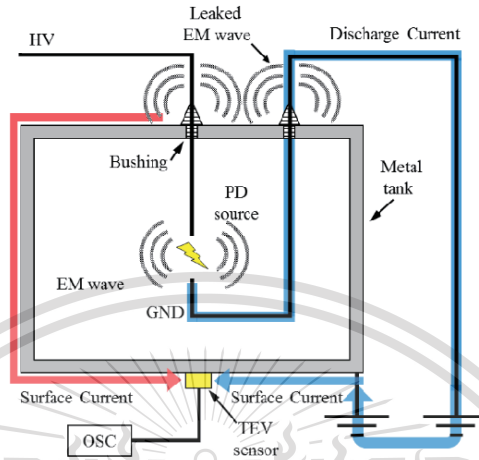
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 การตรวจจับตีสหาร์จบางส่วนด้วย TEV sensor

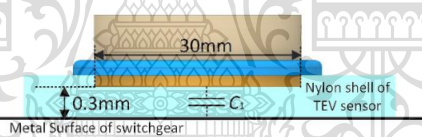
3.3.1 วงจรทดสอบ

TEV sensors จะติดตั้งที่ผนังโลหะของอุปกรณ์ที่จะทดสอบ



รูปที่ 3.13 วงจรการตรวจจับ Partial Discharge ด้วย TEV sensors

ที่มา : <https://www.semanticscholar.org/paper/Grounding-effect-on-transient-earth-voltage-signal-Yoshizumi-Koga/3e420aa243a9cf2b3f697657c1063c63ec7346e9>



รูปที่ 3.14 TEV sensors ที่ติดตั้งที่ผิวโลหะ

ที่มา : <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/2/551/htm>

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดและ **รูปที่ 3.15 การติดตั้ง TEV sensors** ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

- นำ TEV sensors ติดตั้งที่ผนังโลหะของหม้อแปลง

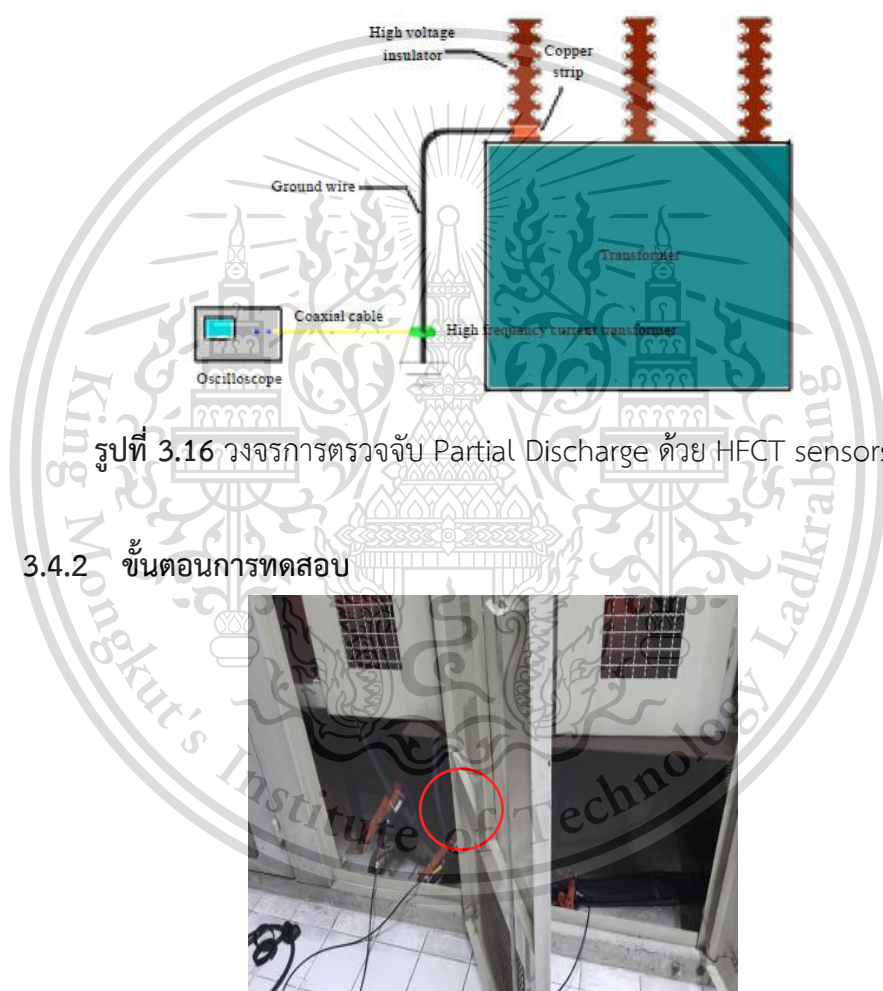
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. ต่อสายนำสัญญาณ Coaxial Cable กับเครื่องมือวัด PD -Analyzer
3. บันทึกรูปคลื่นที่ได้จาก TEV sensors
4. วิเคราะห์ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) เพื่อระบุชนิด PD
5. สรุปผลการทดสอบ

3.4 การตรวจจับตีสาร์จบางส่วนด้วย HFCT sensor

3.4.1 วงจรทดสอบ

การติดตั้ง HFCT จะทำการคล้องอุปกรณ์ที่ตัวนำลงดินแต่ละเฟส ของหม้อแปลง



รูปที่ 3.16 วงจรการตรวจจับ Partial Discharge ด้วย HFCT sensors

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 3.17 การติดตั้ง HFCT sensors

1. นำ HFCT sensors คล้องกับตัวนำลงดิน ของแต่ละเฟส
2. ต่อสายนำสัญญาณ Coaxial Cable กับเครื่องมือวัด PD -Analyzer
3. บันทึกรูปคลื่นที่ได้จาก HFCT
4. วิเคราะห์ Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) เพื่อระบุชนิด PD
5. สรุปผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการตรวจจับ PD โดยใช้เซนเซอร์ HFCT และ TEV ที่ Distribution Transformer ที่อยู่ในอาคารที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ (On-Line Partial Discharge Test Results) แสดงขนาดและชนิดของ PD ในแต่ละเฟส รวมทั้งระดับความรุนแรงในตารางที่ 4.1 และการจำลองสัญญาณส่งและรับด้วยสายอากาศที่ย่านความถี่ 2.5-3 GHz ในหม้อแปลงเปล่า หม้อแปลงมีแกนเหล็ก และหม้อแปลงมีขดลวด

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบทั้งหมด

No.	Equipment	Voltage (kV)	Electrical Charge Detection (HFCT sensor)	Electromagnetic Detection (TEV sensor)	Result
Mall 1					
Distribution Transformer					
1.	TR-2	24	Corona discharge Phase A Amplitude: 1.016 nC pulses 1195 pulses/sec Type: Floating discharge Phase B Amplitude: 0.107 nC pulses 818 pulses/sec Phase C Amplitude: 0.097 nC pulses 327 pulses/sec	PD signal Type: Corona discharge Amplitude: 29.9 mV	High level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบทั้งหมด (ต่อ)

No.	Equipment	Voltage (kV)	Electrical Charge Detection (HFCT sensor)	Electromagnetic Detection (TEV sensor)	Result
Mall 2					
Distribution Transformer					
1.	TR-B	24	PD signal Type: Floating discharge Phase A Amplitude: 2.015 nC pulses 1016 pulses/sec	No PD signal	High level
Ring Main Unit					
2.	Outgoing2 (TR-B)	24	N/A	No PD signal	Normal
Mall 3					
Distribution Transformer					
1.	TR-2	24	PD signal Type: Floating discharge Phase A Amplitude: 0.266 nC pulses 445 pulses/sec Phase B Amplitude: 0.504 nC pulses 898 pulses/sec Phase C Amplitude: 0.343 nC pulses 505 pulses/sec	No PD signal	Medium level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบทั้งหมด (ต่อ)

No.	Equipment	Voltage (kV)	Electrical Charge Detection (HFCT sensor)	Electromagnetic Detection (TEV sensor)	Result
2.	TR-3	24	PD signal Type: Floating discharge Phase A Amplitude: 0.161 nC pulses 456 pulses/sec Phase B Amplitude: 0.298 nC pulses 798 pulses/sec Phase C Amplitude: 0.246 nC pulses 558 pulses/sec	No PD signal	Low level

4.1 Distribution Transformer (TR-2 mall 1)

4.1.1 วิธีการตรวจจับ

Distribution transformer (TR-2 mall 1) ตรวจจับสัญญาณ PD โดยใช้เซนเซอร์ HFCT

4.1.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.1.2.1 การตรวจจับประจุไฟฟ้า

- การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1) แสดงในรูปที่ 4.1



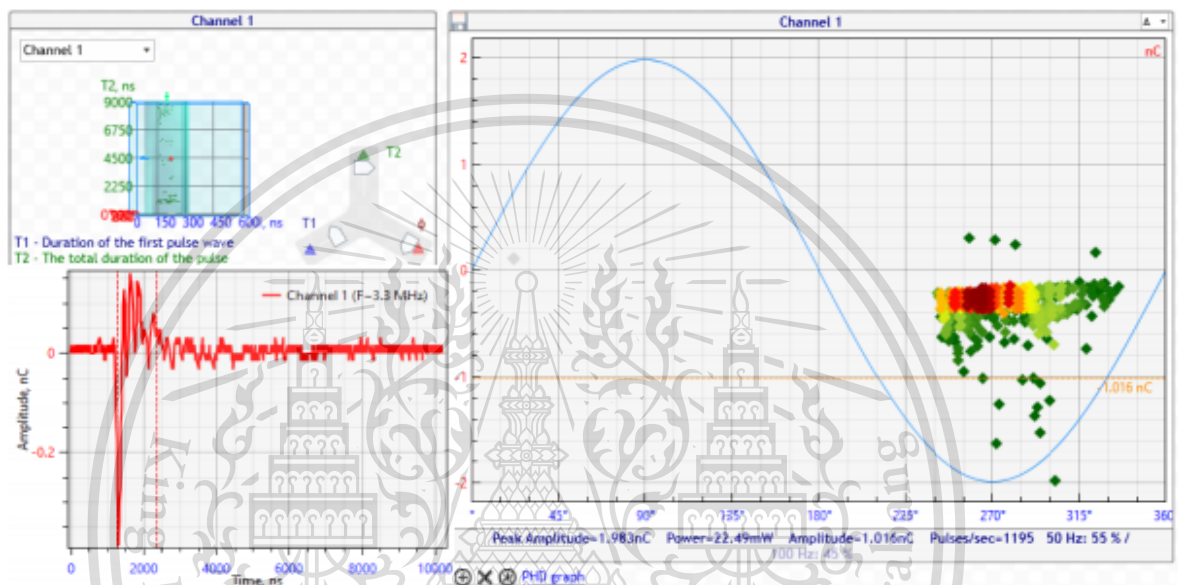
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only. It is not allowed for commercial use.

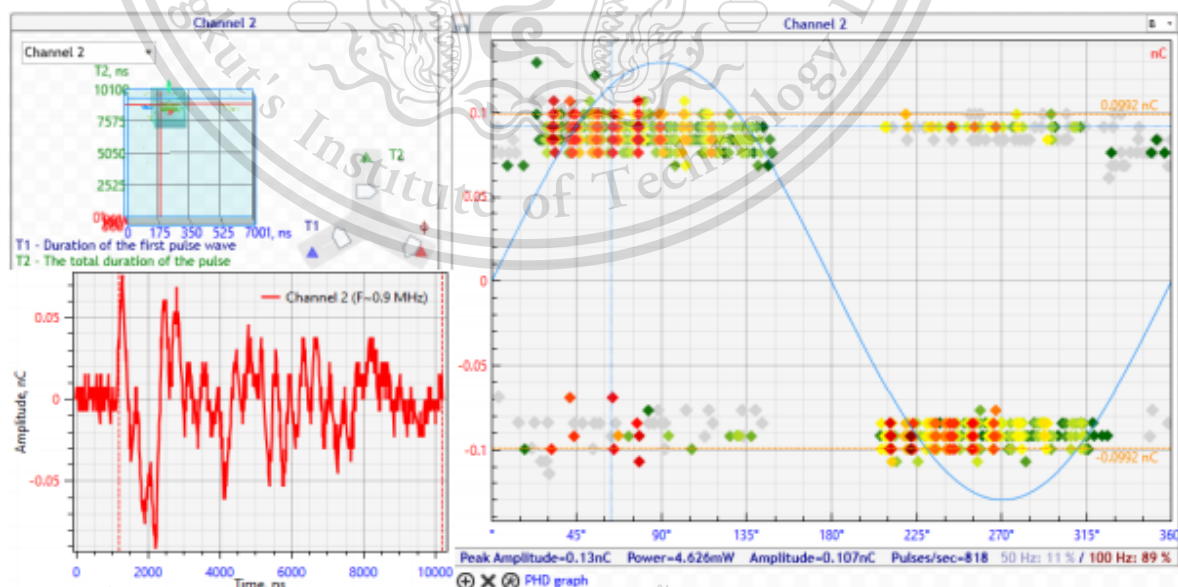
รูปที่ 4.1 การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1)

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- สัญญาณ PD ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1) ประกอบด้วย
 - ขนาดในเฟส A: 1.016 nC pulse 1195 pluses/sec.
 - ขนาดในเฟส B: 0.107 nC pulse 818 pluses/sec.
 - ขนาดในเฟส C: 0.097 nC pulse 327 pulse/sec.
- รูปแบบ PD เป็น floating discharge ที่เฟส B และเฟส C ส่วนเฟส A ตรวจพบรูปแบบของ corona discharge แสดงในรูปที่ 4.2



ก) เฟส A

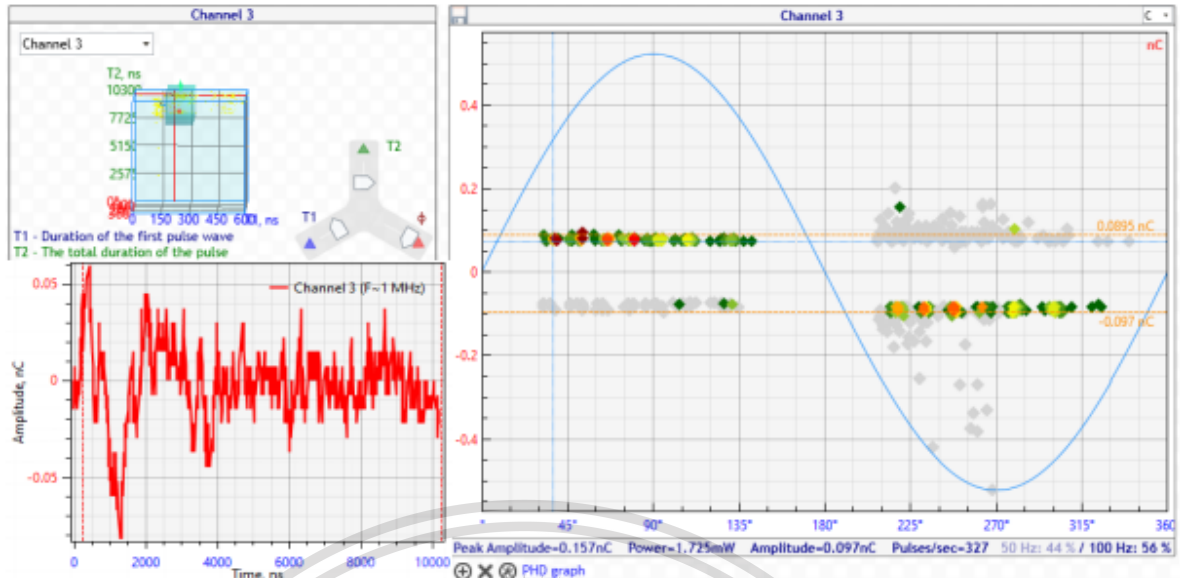


ข) เฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

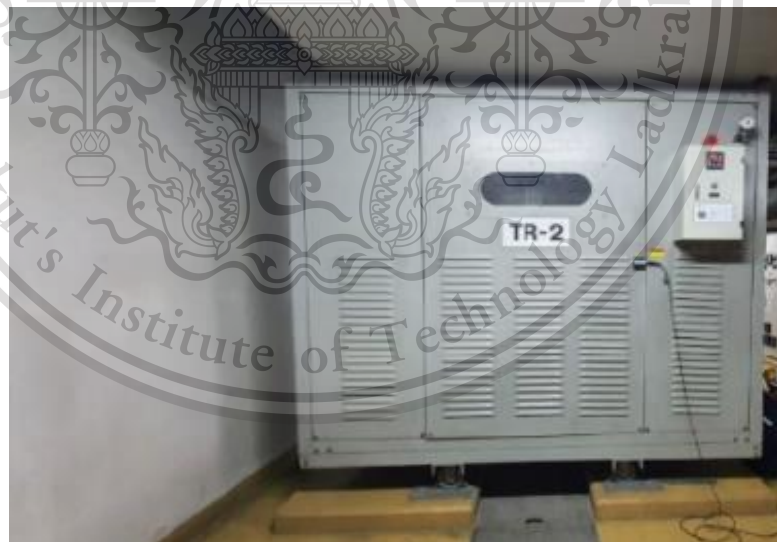


ค) เฟส C

รูปที่ 4.2 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1)

4.1.2.2 การตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ TEV ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1) แสดงในรูปที่ 4.3



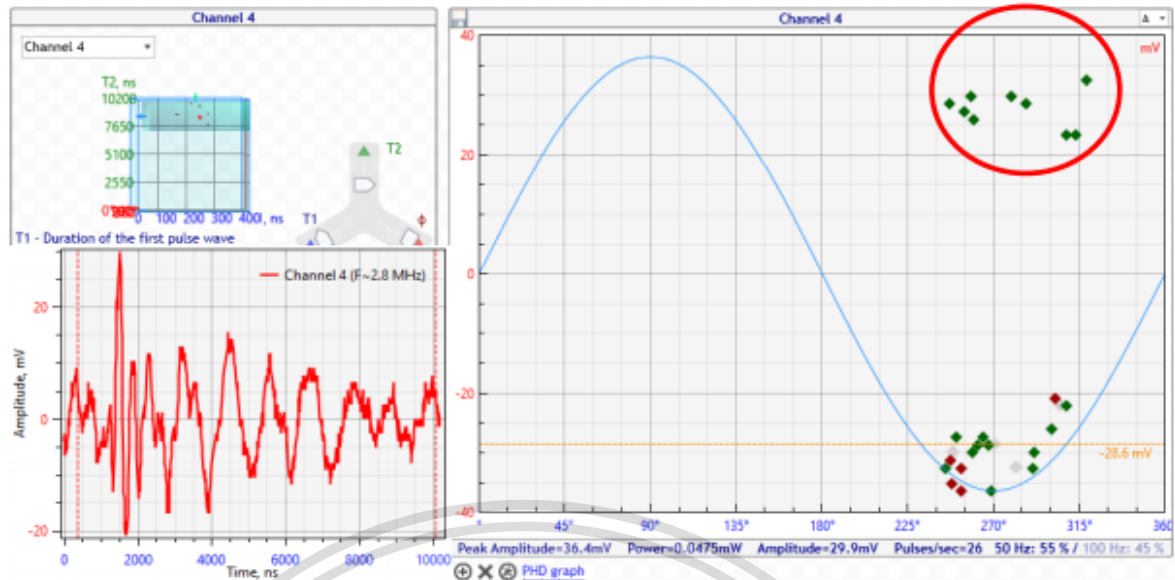
รูปที่ 4.3 การตรวจจับด้วยเซนเซอร์ TEV ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1)

- สัญญาณ PD ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1) มีขนาด 29.9 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารส่วนบุคคลที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ในรูปที่ 4.4

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.4 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 1)

4.2 Distribution Transformer (TR-B mall 2)

4.2.1 วิธีการตรวจจับ

Distribution transformer (TR-B mall 2) ตรวจจับสัญญาณ PD โดยใช้เซนเซอร์ HFCT

4.2.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.2.2.1 การตรวจจับประจุไฟฟ้า

- การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-B mall 2) แสดงในรูปที่ 4.5



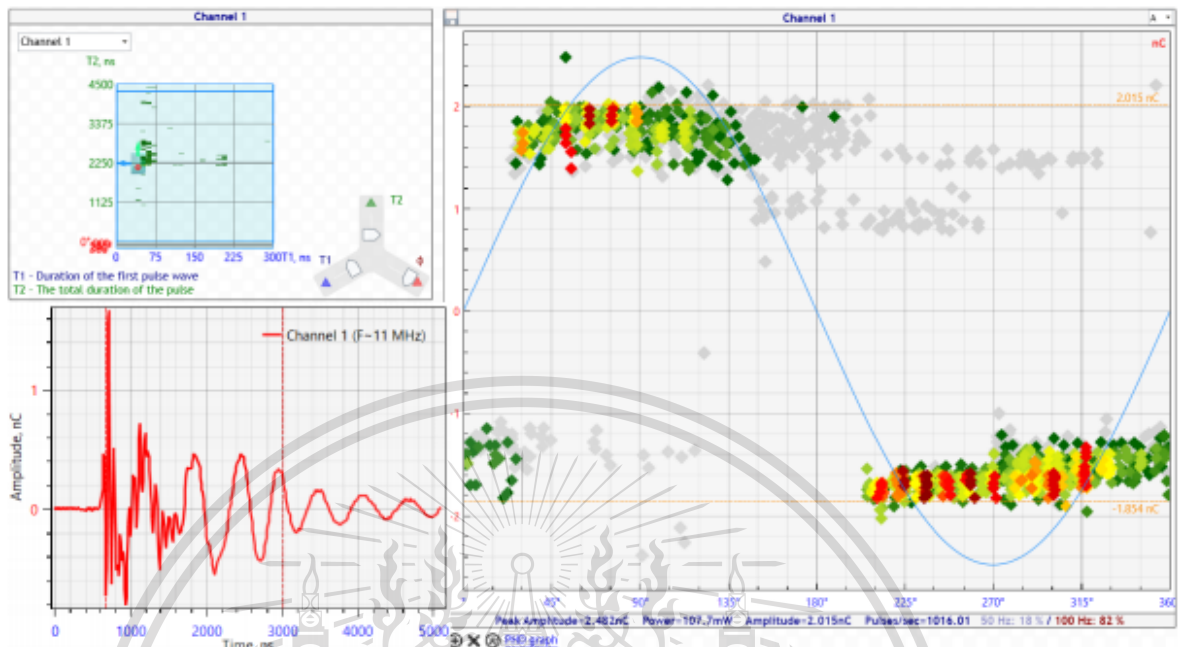
รูปที่ 4.5 การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-B mall 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ มีมติเห็นแต่เพียงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มากรณาไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- สัญญาณ PD ที่เฟส A มีขนาด 2.015 nC pulses 1016 pulses/sec
- รูปแบบ PD เป็น floating discharge แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-B mall 2)

4.3 Distribution Transformer (TR-2 mall 3)

4.3.1 วิธีการตรวจจับ

Distribution transformer (TR-2 mall 3) ตรวจจับสัญญาณ PD โดยใช้เซนเซอร์ HFCT

4.3.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.3.2.1 การตรวจจับประจุไฟฟ้า

- การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 3) แสดงในรูปที่ 4.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเพื่อการศึกษาด้านงาน ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

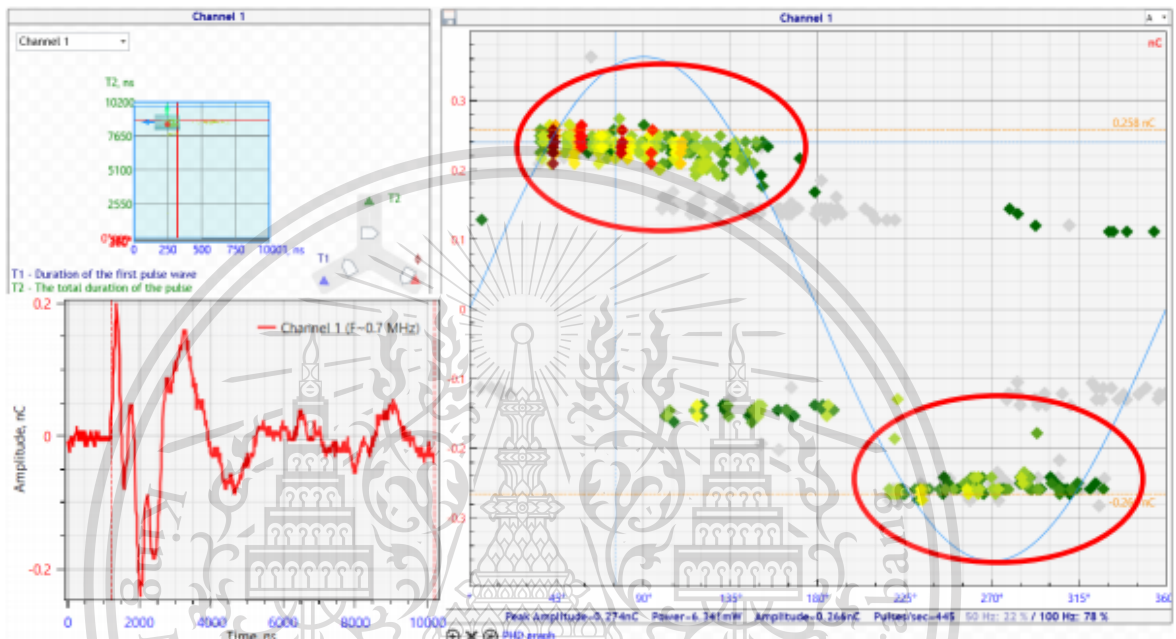
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำ ตัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังผู้เป็นเจ้าของเอกสารหากครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 3)

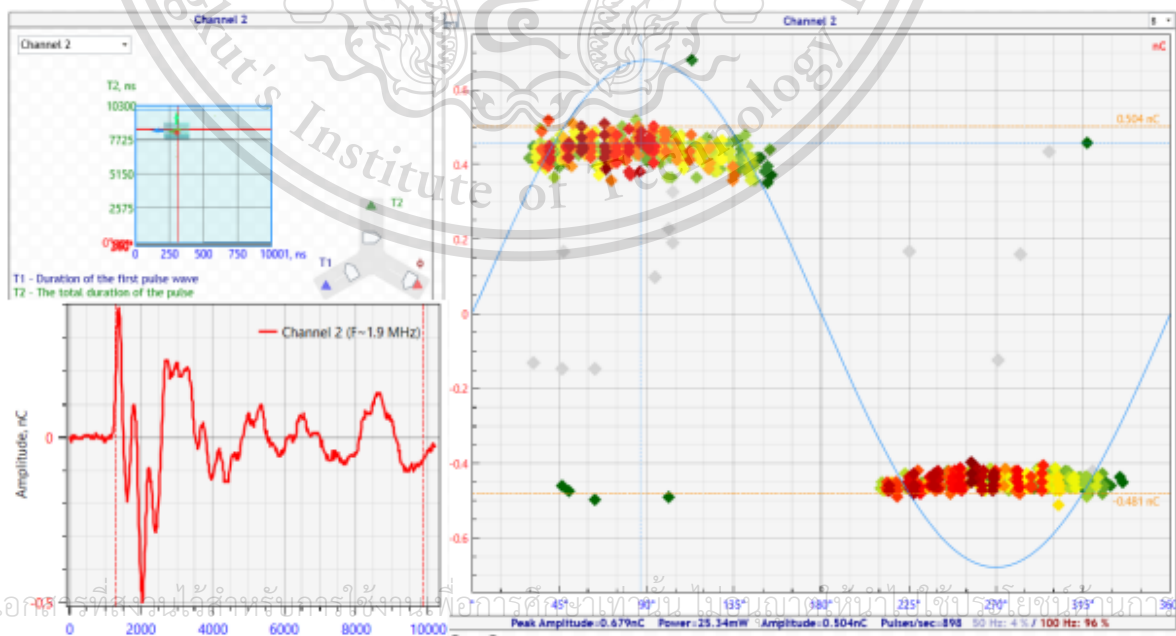
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- สัญญาณ PD ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 3) ประกอบด้วย
 - ขนาดในเฟส A: 0.266 nC pulse 445 pluses/sec.
 - ขนาดในเฟส B: 0.504 nC pulse 898 pluses/sec.
 - ขนาดในเฟส C: 0.343 nC pulse 505 pulse/sec.
- รูปแบบ PD เป็น floating discharge ที่เฟส A เฟส B และเฟส C แสดงในรูปที่ 4.8



ก) เฟส A

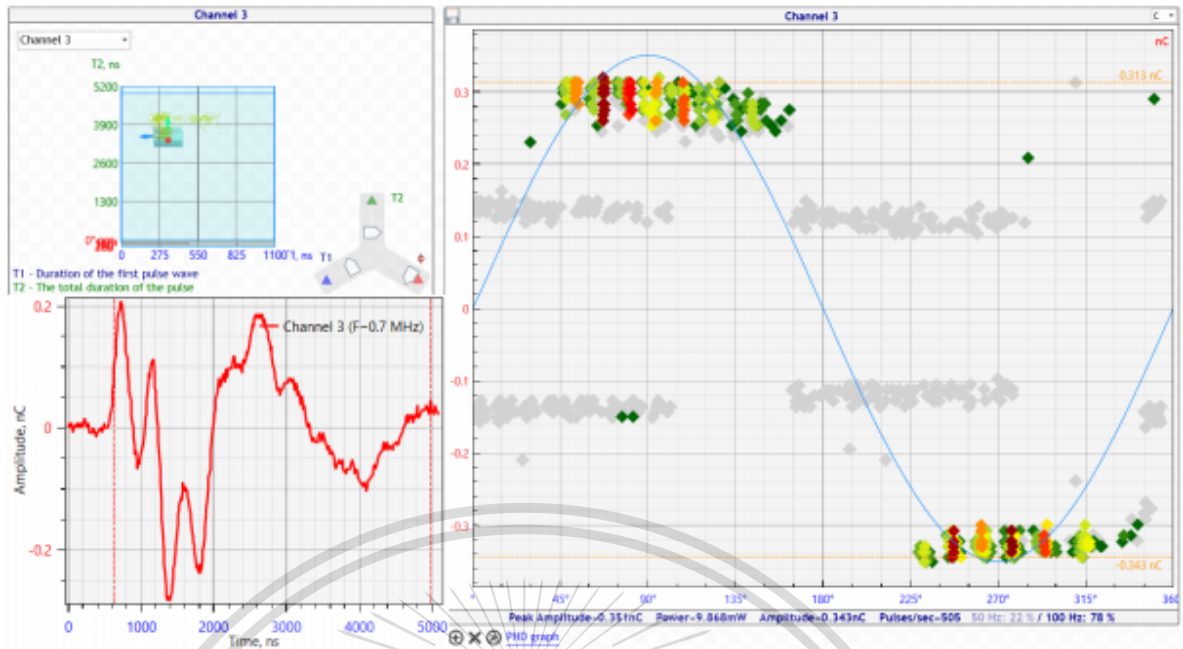


ข) เฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลที่ใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ค) เฟส C

รูปที่ 4.8 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-2 mall 3)

4.4 Distribution Transformer (TR-3 mall 3)

4.4.1 วิธีการตรวจจับ

Distribution transformer (TR-3 mall 3) ตรวจจับสัญญาณ PD โดยใช้เซนเซอร์ HFCT

4.4.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.4.2.1 การตรวจจับประจุไฟฟ้า

การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-3 mall 3) แสดงในรูปที่

4.9



รูปที่ 4.9 การตรวจจับ PD ด้วยเซนเซอร์ HFCT ที่ Distribution transformer (TR-3 mall 3)

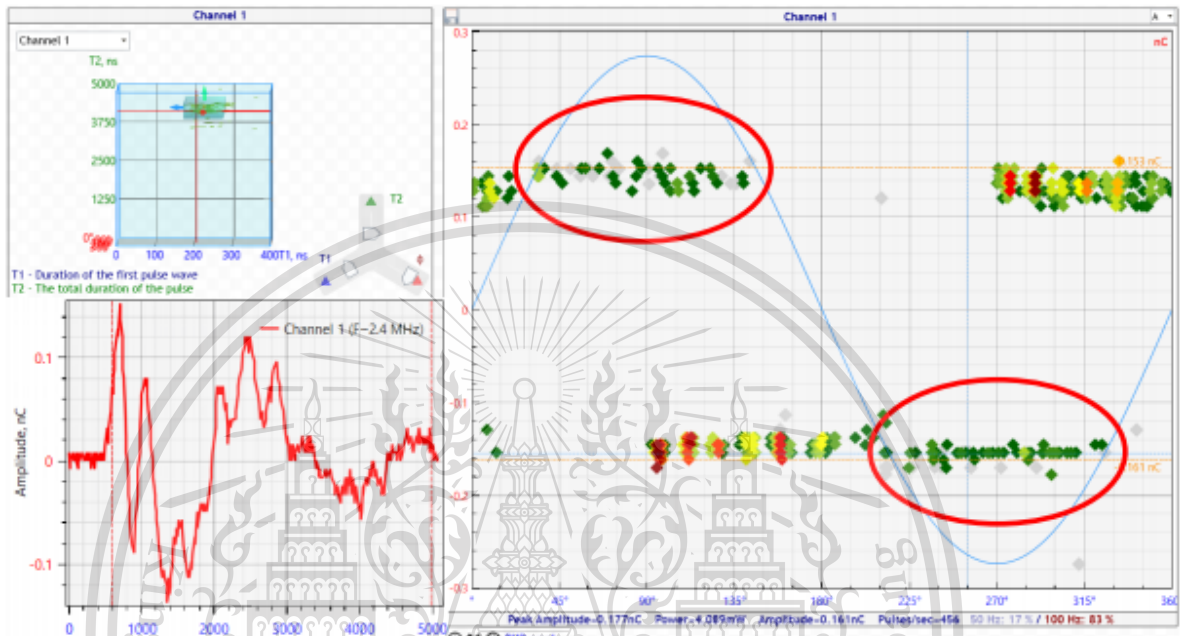
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลิขสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้สงวนไว้โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่สามารถนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้

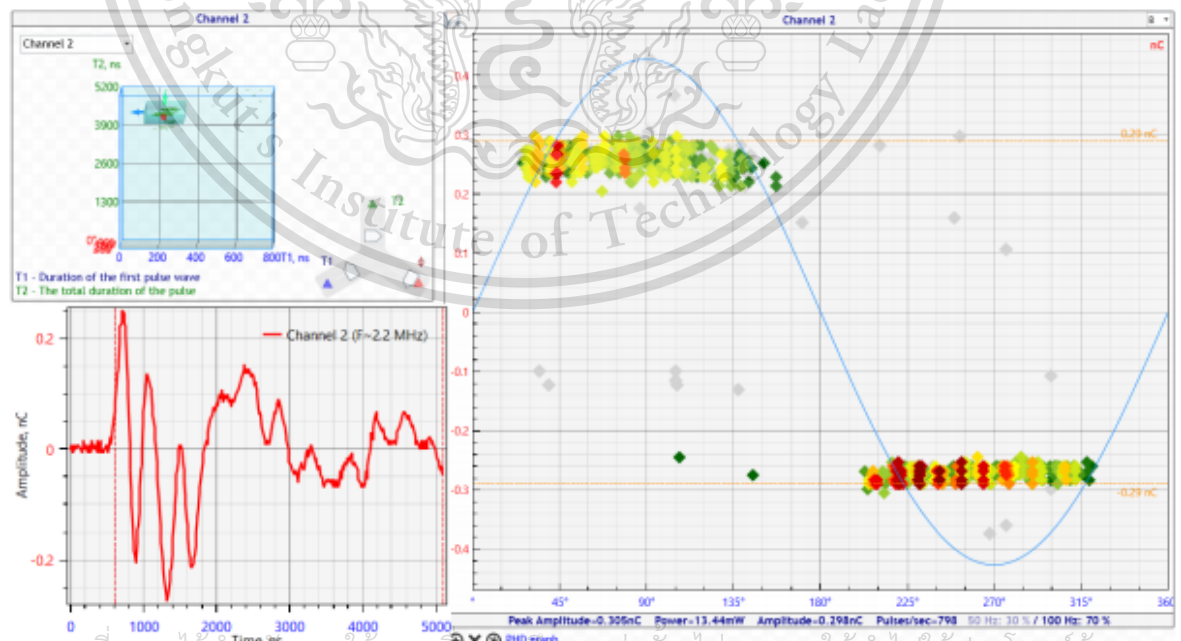
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- สัญญาณ PD ที่ Distribution transformer (TR-3 mall 3) ประกอบด้วย
 - ขนาดในเฟส A: 0.161 nC pulse 456 pluses/sec.
 - ขนาดในเฟส B: 0.298 nC pulse 798 pluses/sec.
 - ขนาดในเฟส C: 0.246 nC pulse 558 pulse/sec.
- รูปแบบ PD เป็น floating discharge ที่เฟส A เฟส B และเฟส C แสดงในรูปที่ 4.10



ก) เฟส A

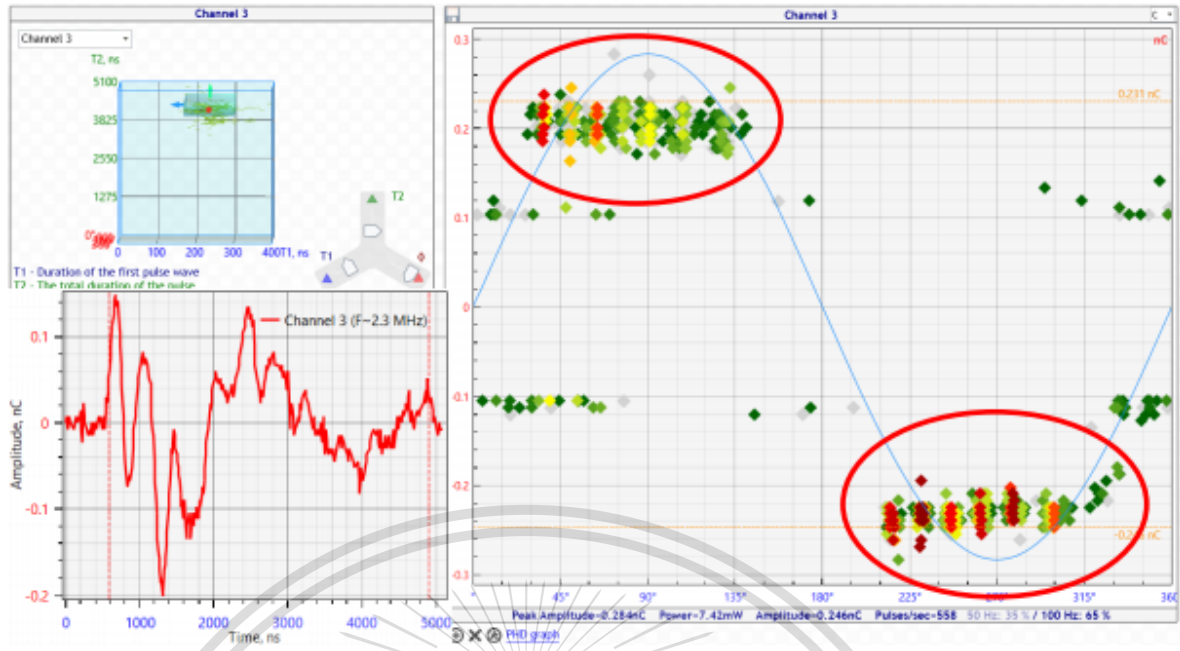


ข) เฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

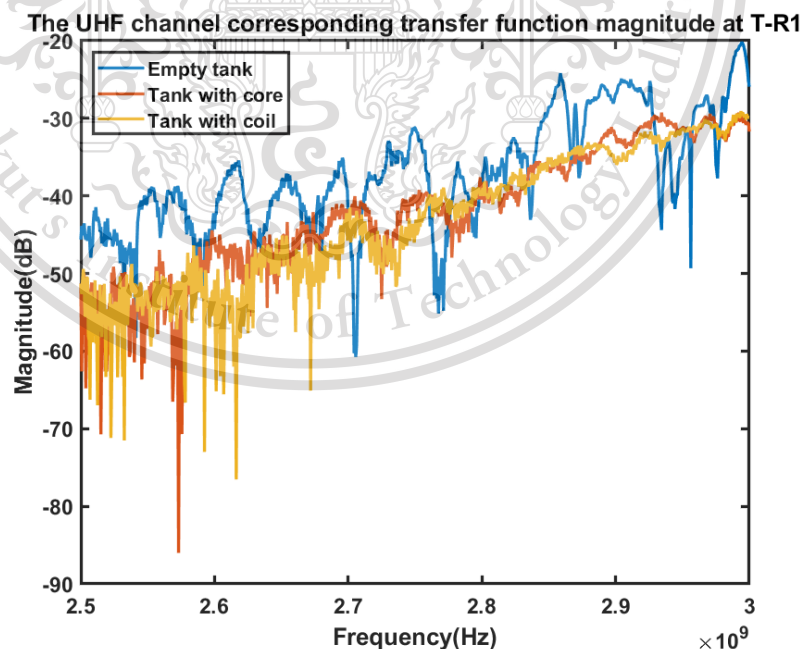


ค) เฟส C

รูปที่ 4.10 รูปแบบรูปคลื่น PD ที่ Distribution transformer (TR-3 mall 3)

4.5 การจำลองสัญญาณส่งและรับด้วยสายอากาศที่ย่านความถี่ 2.5-3 GHz ในหม้อแปลงที่มีแกนเหล็กและขดลวด

4.5.1 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณตำแหน่ง T-R1



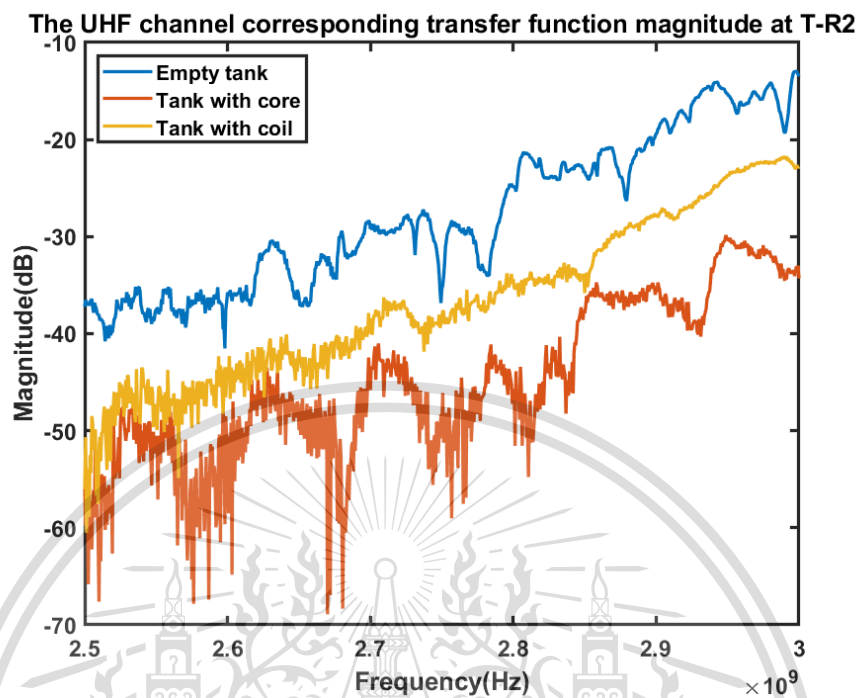
รูปที่ 4.11 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณตำแหน่ง T-R1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5.2 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณตำแหน่ง T-R2



รูปที่ 4.12 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณตำแหน่ง T-R2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปทดสอบ On-Line Partial Discharge

จากการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงโดยใช้วิธีแบบไม่ดั้งเดิม ได้แก่ การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนจากประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำกราวด์โดยใช้ High Frequency Current Transformer หรือ HFCT การตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากดิสชาร์จบางส่วนด้วย Transient Earth Voltage หรือ TEV และการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้สายอากาศไมโครสตริปที่มีความถี่ย่าน UHF สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 Transient Earth Voltage Sensor (TEV Sensor)

ตรวจพบ Corona discharge ในหม้อแปลง TR-2 อาคาร 1 ที่เฟส A เนื่องจากหม้อแปลง TR-2 อาคาร 1 มีสายไฟของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่เฟส A หลุดออกมาจาก terminal block ที่ห้อยอยู่ใกล้กับขดลวด จึงทำให้บริเวณนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง สำหรับหม้อแปลงตัวอื่นๆ TEV sensor ไม่สามารถตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนได้ อาจเป็นเพราะแหล่งกำเนิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนอยู่ไกลจาก TEV sensor ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาถึงผนังตู้ ไม่แรงพอที่จะทำให้ TEV sensor ตรวจจับสัญญาณได้ หรือ ย่านความถี่ที่ TEV sensor ทำงาน ไม่ตรงกับย่านความถี่ของแหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วน

5.1.2 High Frequency Current Transformer (HFCT)

ตรวจพบ Floating discharge ในหม้อแปลง TR-2 อาคาร 1, TR-B อาคาร 2, TR-2 อาคาร 3 และ TR-3 อาคาร 3 โดยในหม้อแปลง TR-2 อาคาร 1 ตรวจพบ Floating discharge ที่เฟส B และเฟส C หม้อแปลง TR-B อาคาร 2 ตรวจพบ Floating discharge ที่เฟส A หม้อแปลง TR-2 อาคาร 3 ตรวจพบ Floating discharge ที่เฟส A B และ C หม้อแปลง TR-3 อาคาร 3 ตรวจพบ Floating discharge ที่เฟส A B และ C นอกจากนี้ยังตรวจพบ Corona discharge ในหม้อแปลง TR-2 อาคาร 1 ที่เฟส A เนื่องจากหม้อแปลง TR-2 อาคาร 1 มีสายไฟของเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิที่เฟส A หลุดออกมาจาก terminal block

หมายเหตุ: การพิจารณาระดับความรุนแรงของการเกิด PD จะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ เงื่อนไข เช่น รูปแบบการเกิด, ตำแหน่งการเกิด, ขนาด และอื่น

5.1.3 UHF microstrip path antenna

ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าลดลงตลอดช่วงความถี่เมื่อมีแกนเหล็กหรือขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายานาน ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ภายในถึงหม้อแปลงและจากรูปที่ 6 จะเห็นได้ชัดว่าถึงหม้อแปลงเปล่ามีค่าฟังก์ชันถ่ายโอนมากที่สุด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งหม้อแปลงมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีวนรูปไปใช้ และมีค่าลดลงเมื่อมีขดลวดและมีค่าน้อยที่สุดเมื่อมีแกนเหล็กภายในถึงหม้อแปลง แต่ในกรณีนี้ที่จูดรับ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สัญญาณความถี่สูงยิ่งอยู่ที่ตำแหน่ง R1 ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนในกรณีที่มีแกนเหล็กและขดลวด ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันแต่มีค่าน้อยกว่าถึงหม้อแปลงเปล่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากแหล่งกำเนิดสัญญาณดิซาร์จบางส่วนอาจมีย่านความถี่ที่ TEV sensor ไม่สามารถตรวจจับได้ ควรใช้ TEV sensor ที่มีย่านความถี่ที่กว้างขึ้น แต่ยังคงต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Zhou, Y. Peng, Z. Zhuang and D. Zhang, "Study on Pattern Recognition of Partial Discharge Stage in Switchgear Using TEV Amplitude-Number Chart," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.*, Vol. 223. No. 1., 2019.
- [2] F. Álvarez, F. Garnacho, J. Ortego and M. Á. Sánchez-Urán, "Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment," *Sensors*, 2015. No. 4, 2015, pp. 7360-7387.
- [3] ไสว ฐานีพานิชสกุล, *หม้อแปลง*, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร :หจก.พีเอ็นพี พับบลิชซิง. 2525.
- [4] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, *วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1 :ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials*, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร :ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีน เซอร์วิส ซัพพลาย. 2557.
- [5] สำรวัย สังข์สะอาด, *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร :สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์. 2549.
- [6] รังสรรค์ วงศ์สรณ์, *งานนำเสนอการประชุมเชิงปฏิบัติการของ PTEC*, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [7] ดลวัฒน์ กะการดี และ วรวิทย์ จิตอารี, "การออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยี LoRa Antenna Design For LoRa Technology," *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยบูรพา*, 2560.
- [8] *Pressure Relief Device*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2563, จาก <https://www.qualitrolcorp.com/products/pressure-controls-gauges-and-relays/pressure-relief-devices/qualitrol-lprd>.
- [9] *Oil and Winding Temperature*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2563, จาก https://www.reinhausen.com/desktopdefault.aspx/tabid-1420/1739_read-4338.
- [10] *Buchholz Relay*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2563, จาก <https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/measurement-and-safety-devices/pressure-and-flow-devices/buchholz-relay>.

เอกสารนี้เป็น [11] *Radiators*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2563, จาก <http://www.reus> ารค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้ง [sis.com/demo/sapthagiri/radiator_transformer](http://www.reus.com/demo/sapthagiri/radiator_transformer) ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [12] *พัดลมหม้อแปลง*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2563, จาก <http://www.nicktransfor-mer.com/transformer-cooler>.
- [13] *Lightning Arresters*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2563, จาก <https://electrical-engineering-portal.com/complete-overview-of-lightning-arresters-part-3>.
- [14] *Core Clamping*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2563, จาก <https://www.indiamart.com/proddetail/transformer-core-frame-parts-7152570273>.
- [15] *Foil Winding*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2563, จาก <http://www.ardantrafo.com/t/1441-oil-transformers>.
- [16] *ส่วนประกอบของหม้อแปลง*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2563, จาก <https://www.facebook.com/ElectricalDesignEng/posts/2205946579679344>.
- [17] *HFCT*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 มกราคม 2564, จาก <https://spectrumscientific.com.ph>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณย่านความถี่สูงยิ่งในหม้อแปลงเมื่อมีแกนเหล็กหรือขดลวด

The Study of UHF Signal in Transformers with Core and Winding

ณิชา โสภณ อาริพันธ์ บรรเทหิโต และนพพล ยอดระยัน

รศ.ดร. นวเศรษฐ์ พิณนเดช

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-328-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency) ในหม้อแปลงที่มีแกนเหล็กหรือขดลวด โดยใช้สายอากาศแบบไมโครสริปที่ภาคส่งและภาครับเป็นอุปกรณ์ในการรับและส่งสัญญาณ สัญญาณย่านความถี่สูงยิ่งถูกส่งมาจากเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer) ที่มีความถี่ 2.5 GHz ถึง 3 GHz โดยตำแหน่งของสายอากาศภาครับมีสองตำแหน่งแต่ละตำแหน่งที่ต่างกัน 80 ซม. จากนั้นพิจารณาขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วิ่งผ่านแกนเหล็กหรือขดลวดมาที่สายอากาศภาครับ ซึ่งจากการทดลองพบว่าขนาดของคลื่นออกจากรีเลย์แกนเหล็กหรือขดลวดในหม้อแปลง และตำแหน่งการวางสายอากาศภาครับมีผลต่อการวัดของขนาดฟังก์ชันถ่ายโอนคลื่นด้วย

สำคัญ: สัญญาณย่านความถี่สูงยิ่ง หม้อแปลงไฟฟ้า

บทนำ

ปัจจุบันมีการตรวจวัดคลื่นรบกวนบางส่วนในหม้อแปลงทำได้หลายวิธี ทั้งแบบเชิงคณิตศาสตร์และแบบไม่เชิงคณิตศาสตร์ การตรวจวัดคลื่นรบกวนบางส่วนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอีกวิธีที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งการตรวจวัดคลื่นรบกวนบางส่วนโดยใช้คลื่นนี้ไม่ได้มีการศึกษาความแตกต่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากคลื่นรบกวนบางส่วนโดยใช้สายอากาศภาครับซึ่งพบว่ามีคลื่นที่ถูกปล่อยออกมาอยู่ในย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) อย่างความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency: UHF[1])

ภายในหม้อแปลงนั้นมีส่วนประกอบหลายอย่าง เช่น แกนเหล็ก ขดลวด คุระคาช และอื่นๆ ซึ่งส่วนประกอบภายในหม้อแปลงนั้นส่งผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีการสะท้อน หักเห และหรือถูกดูดซับได้ เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกันนี้ การศึกษามหาสารคามของอุปกรณ์ภายในหม้อแปลงจะส่งผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากคลื่นรบกวนบางส่วน นอกจากนี้การวางตำแหน่งของสายอากาศวัดถึงผลต่อคลื่นอีกด้วย[2]

Abstract

This paper represents the distortion of ultra-high frequency (UHF) signal in transformer tank with iron core and winding. The vector network analyzer was used to be a UHF signal source, 2.5 GHz to 3 GHz, and microstrip antenna was used to send and receive the signal. The UHF channel corresponding transfer function magnitude was from two different receiving antenna positions. Then, the graphs of magnitude were plotted. In case of having core and coil in transformer tank, the signal magnitude was smaller than having iron core in the tank. For different position of receiving antenna, the magnitude of having core and coil were different.

Keywords: ultra-high frequency, transformer

การทดลอง

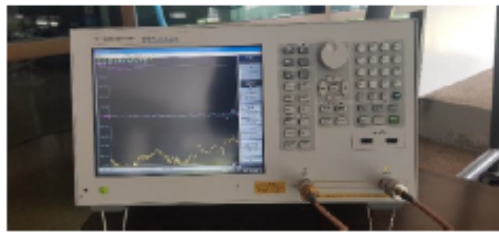
อุปกรณ์ในการทดลอง

เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer) ดังที่แสดงในรูปที่ 1 ถูกใช้เป็นเครื่องจ่ายสัญญาณย่านความถี่สูงยิ่งผ่านสายอากาศไมโครสริป และอ่านข้อมูลจากสายอากาศไมโครสริปภาครับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆกำหนดไว้ดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

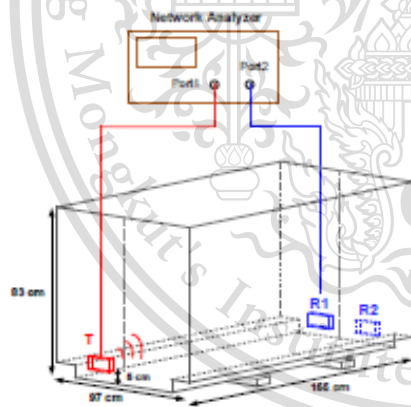


รูปที่ 1 เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer)

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ย่านความถี่ที่วัด	2.5 GHz ถึง 3 GHz
สายอากาศภาคส่งและภาครับ	สายอากาศไมโครสตริป
ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ	1 เมตร
ความสูงของตำแหน่งสายอากาศจากชั้นหรือเปลี่ยนชั้นล่าง	5 เซนติเมตร

ขบวนการทดลอง

การวัดสัญญาณย่านความถี่สูงที่ออกสู่และรับภายในห้องแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสูง 83 เซนติเมตร จำนวนยาว 155 เซนติเมตร และกว้าง 97 เซนติเมตร ซึ่งทำการติดตั้งสายอากาศภาคส่งและภาครับที่ความสูง 5 เซนติเมตร เนื่องจากคลื่นจะ ได้รับผลกระทบจากการสะท้อนภายในห้องแม่เหล็กเปลี่ยนน้อยที่สุด (FWD) ดังแสดงในรูปที่ 2



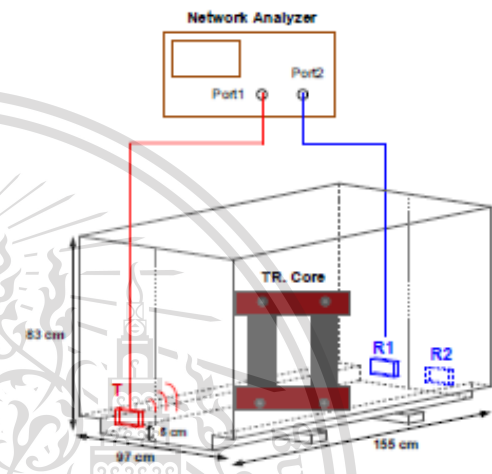
รูปที่ 2 ขนาดของห้องแม่เหล็กไฟฟ้าและจุดติดตั้งสายอากาศภาคส่งและภาครับ

ก่อนเริ่มการทดลองต้องมีการปรับเทียบสายอากาศไมโครสตริปทั้งภาคส่งและภาคส่ง จากนั้นทำการติดตั้งสายอากาศตามจุดที่กำหนด โดยในการทดลองจะสัญญาณย่านความถี่สูงอิงจากสายอากาศภาคส่งที่

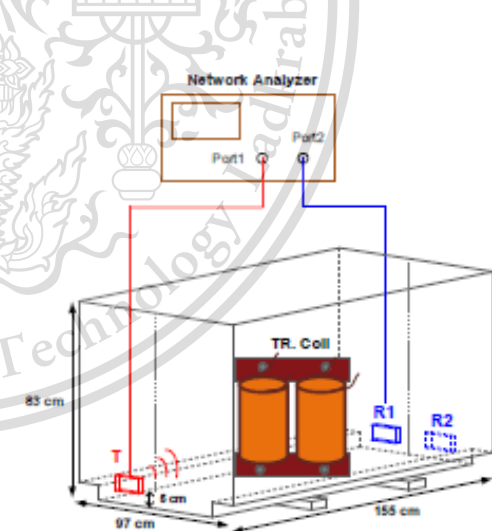
ตำแหน่ง T และเก็บผลของฟังก์ชันถ่ายโอนจากสายอากาศภาครับสองตำแหน่ง คือตำแหน่ง R1 และ R2 การเก็บผลการทดลองจะทำทั้งหมด 3 กรณี คือ

1. มีเพียงแค่ถังเปล่า
2. กรณีที่มีถังมีแกนเหล็ก
3. กรณีที่มีถังมีขดลวด

ดังแสดงในรูปที่ 2 รูปที่ 3 และรูปที่ 4 โดยในแต่ละกรณีจะเก็บผลทั้งสองจุดตั้งที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งเก็บค่าตำแหน่งละ 801 ค่า ตลอดช่วงความถี่ 2.5 GHz ถึง 3 GHz



รูปที่ 3 ถังหม้อแปลงที่มีแกนเหล็ก



รูปที่ 4 ถังหม้อแปลงที่มีขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการทดลอง

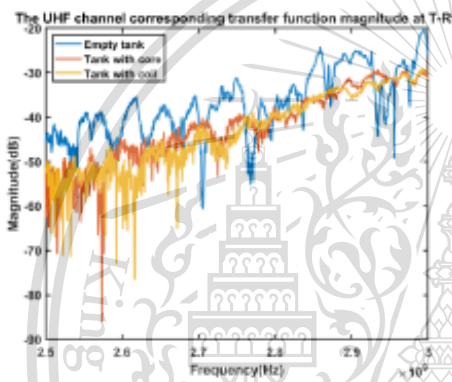
จากการทดลองจะได้ค่า ฟังก์ชันถ่ายโอน (channel corresponding transfer function) ของช่องสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งค่าฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถอธิบายโดยสมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis's transmission formula) เป็นไปตามสมการที่ (1)

$$H_{ch-corr}(f, R) = H_f(f, R)H_r(f, R)H_t(f, R) \quad (1)$$

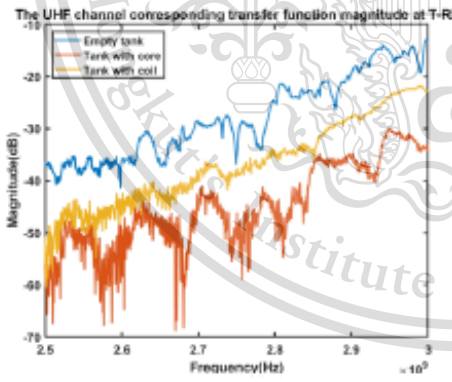
เมื่อ $H_{ch-corr}(f, R)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของ $H_f(f, R)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของอากาศว่าง $H_t(f, R)$ และ $H_r(f, R)$ คือฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่งและรับตามลำดับ ฟังก์ชันถ่ายโอนของอากาศว่างสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2)

$$H_f(f, R) = \frac{c}{4\pi f R} e^{-j\beta R} \quad (2)$$

เมื่อ C คือความเร็วของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า f คือความถี่ และ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ [2] จากนั้นนำค่าที่ได้มาแสดงเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบแต่ละกรณี ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6



รูปที่ 4 กราฟแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของจุด T1-R1



รูปที่ 5 กราฟแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของจุด T1-R2

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 จะเห็นว่าขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าลดลงตลอดช่วงความถี่เมื่อมีแกนเหล็กหรือขดลวดภายในถังหม้อแปลง และจากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าถังหม้อแปลงเปล่ามีค่าฟังก์ชันถ่ายโอนมากที่สุดและมีค่าลดลงเมื่อมีขดลวดและมีค่าน้อยที่สุดเมื่อมีแกนเหล็กภายในถังหม้อแปลง แต่ในกรณีที่จุดรับสัญญาณความถี่สูงยังอยู่ที่ตำแหน่ง R1 ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนในกรณีที่แกนเหล็กและขดลวด ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันแต่มีค่าน้อยกว่าถังหม้อแปลงเปล่า

สรุป

จากการทดลองพบว่าแกนเหล็กและขดลวดส่งผลกระทบต่อสัญญาณย่านความถี่สูงยิ่ง โดยในกรณีที่แกนเหล็กภายในถังหม้อแปลงจะทำให้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของสัญญาณย่านความถี่สูงยิ่งนั้นลดลงมากกว่าในกรณีที่ขดลวดอยู่ในถังหม้อแปลง เมื่อเส้นทางการส่งสัญญาณของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศภาควินั้นผ่านแกนเหล็กหรือขดลวด ในกรณีที่แกนเหล็กและขดลวดไม่ได้มีอยู่กลางทางเดินของคลื่นพบว่าอัตราการลดทอนของคลื่นอยู่บ้างแต่ไม่สามารถเปรียบเทียบขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างกรณีที่ไม่มีแกนเหล็กกับขดลวดได้

ลิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.สุภาพร พรหมวงศา ที่ให้คำปรึกษาด้านการใช้สายอากาศ
 ขอขอบพระคุณ บริษัท เทสตา เพาเวอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านวัสดุทดสอบ ความรู้และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจนทดสอบได้เสร็จสมบูรณ์
 ขอขอบพระคุณลิตติภพ จรรย์านันต์ วัฒนศึกษาศาสตร์ปริญญาเอก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำการวิจัย

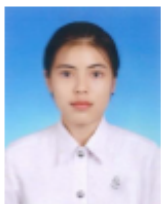
เอกสารอ้างอิง

[1] N. Pattanadech and P. Nimsuang (2014) *Partial Discharge Classification Using Learning Vector Quantization Network Model*. Proceedings of IENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference, November 19–22, 2014, Bangkok, Thailand, IEEE

[2] S. Prouwong and T. Tiengthong, "Evaluation of UHF transfer function in a power transformer for real-time partial discharge detection," *Journal of Mobile Multimedia*, Vol. 26, NO.1-2, 2020, pp. 67-84.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นางสาวนิชชา โลอบอล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
E-mail: 60010339@kmitl.ac.th



นางสาวธาร โทสิน บรรเทงใจ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
E-mail: 60010466@kmitl.ac.th



นายพนท ยอกระบัง
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
E-mail: 60010497@kmitl.ac.th



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ข

ข้อมูลทางเทคนิคของ Microstrip trainer และ TEV Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

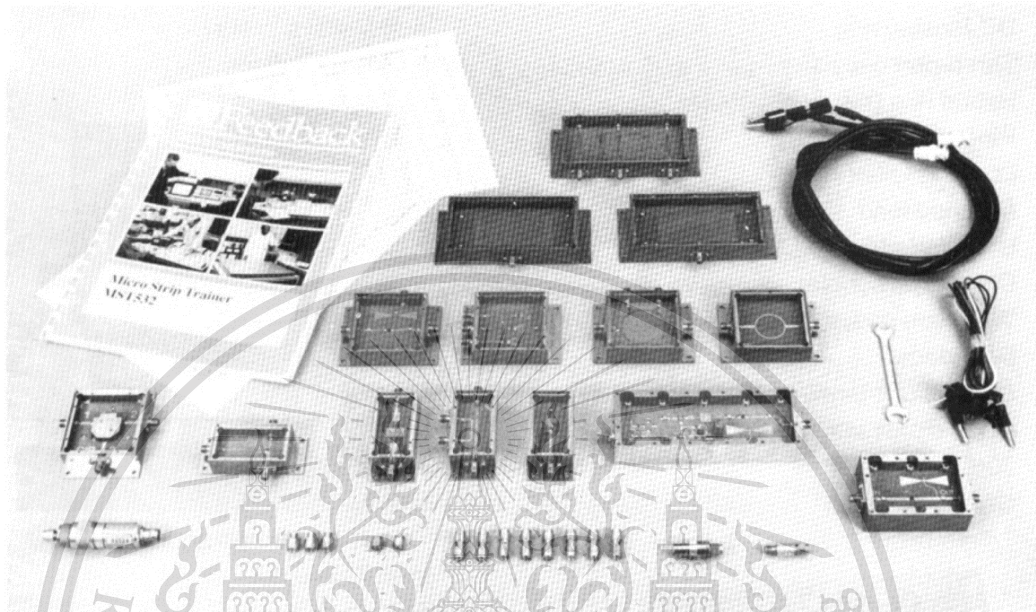
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Feedback

MICROSTRIP TRAINER

MST532



Description

The increasing use of microwaves, in applications ranging from satellite and terrestrial communications to high-speed computing and data transmission, has resulted in a short-fall of appropriately trained engineers and technicians.

Over three-quarters of all microwave circuits are now non-waveguide. The swing towards microstrip technology must be reflected in the courses provided at engineering education establishments.

Feedback Instruments, in conjunction with UNL Microwaves, recognising the urgent need for suitable training equipment, have developed a microstrip trainer which will provide the means to investigate the technology and techniques used in this important subject area.

MST532 Microstrip Trainer comprises 18 passive circuit components, 3 active circuits and all the leads and connectors required to construct a variety of commonly used configurations, many of which incorporate microwave integrated circuits (MICs).

The instruction manual supplied with MST532 provides a comprehensive introduction to the subject in a manner which avoids unnecessary mathematical analysis and provides a series of structured practical assignments.

The only items of test equipment required are a digital multimeter and a 0-30V d.c dual power supply.

MST532 is complementary to the Feedback MWT530 Microwave Trainer, which uses type WG16 Waveguide, and the two equipments together cover the teaching requirements for most courses in microwave engineering.

Features

- Latest microwave technology
- 2.4-3.7GHz VCO
- 2-4GHz PIN diode modulator
- No costly test equipment required
- Safe low power output
- Conveniently packed for inventory control

Printed in England by FI Ltd, Crowborough 1096

Telecommunications - D532



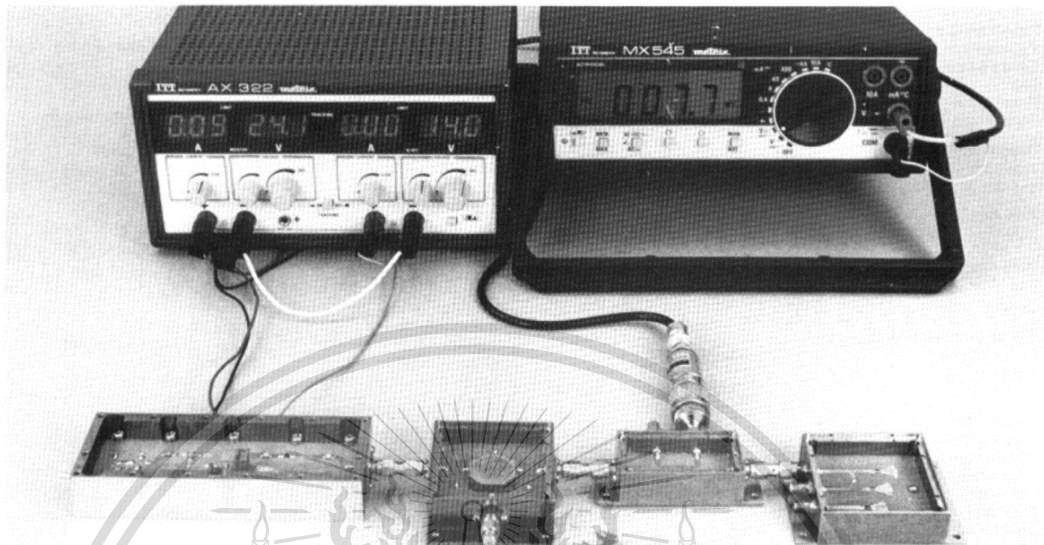
Technology Training for tomorrow's world



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



The Assignments

The manual provides a series of structured, stand-alone assignments; using mostly the passive components; which give an introduction to microstrip and microwave integrated circuit (MIC) technology and microwave measurement techniques. Further assignments encourage the student to build up complete systems incorporating the active circuits.

The only prerequisite information is a knowledge of basic electronics, which may be acquired by using the Feedback Electrical & Electronics Constructor EEC470.

The individual units of both active and passive components are designed for compatibility and easy interconnection, thus ensuring that circuits such as a Line-of-Sight Link or simple Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) can be built and tested with minimum fuss.

The basic principles and techniques of microwave signal processing using microstrip are simply and comprehensively presented, so that the trainer is ideal for use by engineers and technicians working in a variety of different areas of application, including:

- Satellite communication
- Radar
- Surveillance-Security systems
- Instrumentation
- Medical electronics
- Data transmission

The practical work is presented under the following general headings:

- Power Source and detector action
- Action of a 3-port circulator.
- Insertion loss measurement on a low-pass filter.
- Measurement of return loss, reflection coefficient and VSWR of a filter, microstrip and commercial matched loads.
- Matching investigations: reflection coefficient of unknown resistive load and its matching by $1/4\lambda$ transformer and shunt stub.
- Properties of a power divider and rat-race coupler.
- Measurement of effective dielectric constant and line loss using a ring resonator.
- DC biasing and MMIC amplifier investigations.
- PIN diode modulator investigations.
- Microwave radio link and antenna investigations.

MST532-1 Microstrip Trainer Complete Experimental Workstation

A complete workstation is also available comprising the Microstrip Trainer together with a dual d.c power supply and a digital multimeter.

D532 1096

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Specification

Patch antennas

Two microstrip patch antennas are supplied.
 Centre frequency: 3.0 ± 0.05GHz
 Gain: 8dBi (typical)
 Return loss: -17dB (typical at 3GHz)
 Impedance: 50Ω (typical at centre frequency)

Bias network

This component consists of three types of 50Ω bias lines, two a.c and one d.c, all utilising the quarter wavelength transformer:

Bias line type	Insertion loss (dB)	
	3GHz	Full band (2-4GHz)
Butterfly	0.02	0.12
Pad	0.02	0.11
Direct d.c short	0.02	0.08

Three-port circulator

Insertion loss: 0.4dB (max at 3GHz)
 Insertion loss: 0.5dB (max 2 - 4GHz)
 Isolation: 16-24dB (full band 2 - 4GHz)

Hybrid ring (rat-race) filter

This is a standard 10° hybrid-ring (or 'rat-race') coupler.
 Centre frequency: 3.0 ± 0.1GHz
 Insertion loss (at centre frequency): -3.2dB
 Bandwidth: 400MHz
 Isolation: 25dB (typical)
 Impedance: 50Ω

Ring resonator

A loose-coupled resonant ring designed to resonate at a fundamental frequency of approximately 3GHz in its n = 2 mode. This component is used to measure the dielectric constant of the printed circuit board.

Low-pass filter

A 5-section, L-C type microstrip low-pass filter.
 Pass band (nominal): dc - 3GHz
 Stop band: 3dB point at 3GHz (approx) rising to 20dB at 20% above cut-off.
 Impedance: 50Ω

Matched load

A quarter wavelength long stub terminated in a standard, 50Ω, thick film, chip resistance.
 Centre frequency: 3GHz
 Return loss: -30dB (minimum)
 Input impedance: 50Ω

Unmatched load

Three 50Ω input lines terminated in unknown resistive loads. One incorporates a 1/4λ transformer with a centre frequency - 3GHz, and one uses an open-circuited shunt stub element.

Wilkinson power divider

A standard Wilkinson power divider using a standard 100Ω chip resistance as the isolating element.
 Centre frequency: 3GHz
 Operating band: 2 - 4GHz
 Insertion loss: 3.5 ± 0.25dB
 Isolation: 20dB (typical)
 Tracking: 0.15dB (typical over full band)
 Impedance: 50Ω

Voltage controlled oscillator

The VCO is supplied with its own calibration curve and amplifier.
 Frequency range: 2.4 - 3.7GHz
 Power output: 12dBm (typical into 50Ω)
 Tuning voltage range: 2 - 30V
 Modulated output frequency: 1kHz (variable 900-1100Hz)
 Modulation waveform: Square wave
 Modulator indicator: 2Hz flashing LED
 DC supply voltage: 15 - 30V (fully protected)
 DC supply current: 50mA (maximum)
 Supply connectors: 4mm sockets

S-band MMIC amplifier

Gain: +15dB (typical)
 Compression point: +12dBm (typical)
 Frequency range: 1.5 - 4GHz
 Input impedance: 50Ω
 Output impedance: 50Ω
 Supply voltage: 15 - 30V (fully protected)
 Supply current: 30mA (typical)
 Supply connectors: 2mm sockets

PIN diode modulator

Frequency range: 2 - 4GHz
 Insertion loss (ON): -1dB (typical)
 Insertion loss (OFF): -6dB (typical)
 Bias current (ON): 28mA (typical)
 Impedance: 50Ω

Ancillary equipment

Power Supply: Dual output 30V dc
 0 - 30V dc variable
 2.5A
 Feedback Dual Power Supply 1810-00665 is recommended.
 Multimeter: Feedback Benchtop Digital Multimeter 1810-00985 is recommended.

Power requirements

Power supplies: 30V dc 2.5A
 VCO input: 0 - 30V dc 2.5A

Dimensions & Weight (in protective case)

Width: 520mm (20.5in) Height: 380mm (15in) Depth: 125mm (4.8in)
 Weight: 5kg (11 lb)

Tender Specification

A Microwave Integrated Circuit trainer using microstrip components and operating in the 2 - 4GHz band. To contain 18 passive components, 3 active components and all necessary connectors and leads. Complete with instruction manual providing at least 10 assignments.

Ordering information

Order: Microstrip Trainer MST532'
 Order: Microstrip Trainer Complete Experimental Workstation (532, 1810-00665, 1810-00985) MST532-1'

For further information on these & other equipments in the Telecommunications range contact.

 **Feedback**
 Feedback Instruments Limited

Park Road, Crowborough,
 East Sussex, TN6 2QR, England.
 Telephone: +44 (0) 1892 653322.
 Fax: +44 (0) 1892 663719.
 E mail: feedback@fdbk.demon.co.uk
 Homepage: http://www.fbk.com

Feedback reserves the right to change these specifications without notice.

Registered in England number 990620.

A subsidiary of Feedback plc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

HVPD Transient Earth Voltage (TEV) Sensor

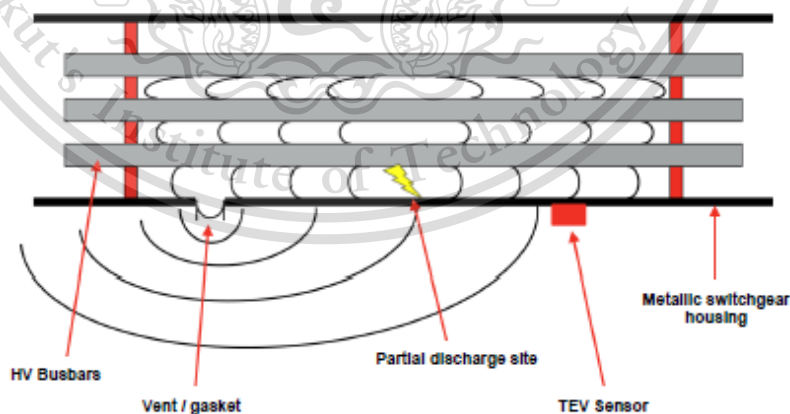


The HVPD TEV sensor is a small-size; electromagnetic sensor which can detect the high frequency radiation that is coupled onto earthed metal surfaces from 'local' partial discharge (PD) within switchgear, bushings and other plant.

The TEV sensor can be either magnetically attached or bolted to the outer surface of metal-clad switchgear, typically on cable boxes or next to cable terminations.

The sensor has a wideband frequency response to detect 'local' PD pulses in the range of 1 MHz to 100 MHz. When local PD occurs within plant, high frequency RF energy is emitted from the PD site. When the PD is within metal-clad switchgear or cable boxes the RF radiation is induced onto the inner metal surfaces of the switchgear housing, this energy will emerge onto the outer of the metal-clad housing where there are gaps (e.g. joints, seams, gaskets, vents etc.). These generally oscillatory signals are known as transient earth voltages and are a good indicator of 'local' PD.

Detection of these pulses can also be used for localisation of the PD site using Time-of-Flight (TOF) measurements when 2 or more sensors are used in conjunction. This principle is employed by the HVPD Kronos™ Monitor to generate long-term precedence measurements of 'local' PD signals, helping to locate PD within plant. The HVPD Longshot™ Diagnostic PD Spot Tester also uses this principle to identify the source of PD.



For more information contact HVPD : Tel: +44 161 8776142, email: info@hvpd.co.uk

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

HVPD Transient Earth Voltage (TEV) Sensor

Key Features

- Wideband frequency detection range from 1 MHz to 100 MHz.
- Suitable for PD detection in MV and HV switchgear, bushings and other plant.
- No outage required for installation, simply attach to the earthed surface of in-service plant.*
- For use with either portable PD test units or permanent PD monitoring systems.

* Permanent Installations Inside HV enclosures may require outages



TEV Sensor Technical Specification

Frequency Response	1 MHz – 100 MHz
Typical Risetime Response	> 5 ns
Equivalent Capacitance	~ 150 pF
Conductor Material	Brass
Material/Finish	HDPE Red Finish
Sensor Head Dimensions	60 x 64 x 30 mm
Output Connector	BNC Female
Mounting	Permanent Magnets and/or Bracket

Unit Dimensions

Dimensions

D: 64 mm
W: 60 mm
H: 30 mm

Weight

0.12 kg

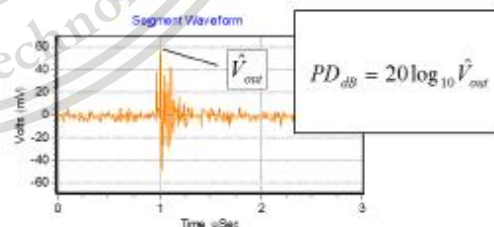


Each TEV sensor supplied by HVPD is tested and calibrated before delivery to the customer.

The plot opposite shows a typical local PD waveform. It can be noted that the sensor is required to be very responsive to detect the high frequency pulse. (1 MHz to 100 MHz). This is essential for the measurement of PD in a wide range of switchgear, bushings and other plant.

Calibrated TEV sensors can be used to make on-line measurements of PD in decibels (dB) with HVPD's range of PD test and monitoring systems including the HVPD Longshot™ PD Diagnostic Spot-Tester.

Local PD Magnitude Measurement



Typical TEV Waveform

HVPD, 128 Metroplex Business Park, Broadway, MediaCityUK, Manchester, M50 2UW, UK
 www.hvpd.co.uk info@hvpd.co.uk +44 (0)161 877 6142 +44 (0)161 877 6139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นางสาวณิชยา โสอุบล

เกิดวันที่ 12 กรกฎาคม 2541

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนแก่งคอย

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2560

ฝึกงานที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ.2563



ชื่อ-นามสกุล นางสาวธารไพลิน บรรเท็งใจ

เกิดวันที่ 28 กรกฎาคม 2540

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสวนกุหลาบ

วิทยาลัย รังสิต

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2560

ฝึกงานที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ.2563



ชื่อ-นามสกุล นายพนพล ยอดระยัย

เกิดวันที่ 22 มิถุนายน 2541

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนจุฬารัตนราช

วิทยาลัย ลพบุรี

เข้าศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2560

ฝึกงานที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง ระหว่างเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม พ.ศ.2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.