http://journal.rmutp.ac.th/

การวิเคราะห์ค่าความเป็นฉนวนของบุชชิ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

เจนณรงค์ มีสมพงษ์ สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 7 ธันวาคม 2016; ตอบรับบทความ 29 มีนาคม 2017

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความเป็นฉนวนของบุชชิ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง โดยมีวัตถุประสงค์หาค่าความชื้นในตัวบุชชิ่งเพื่อประเมินแนวทางในการซ่อมบำรุง ในการวิเคราะห์จะอาศัยเทคนิคของกระแสโพลาไรซ์และดีโพลาไรซ์ซึ่งเป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมาใช้ทดสอบบุชชิ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงเพื่อเป็นกรณีศึกษา การทดสอบจะทำโดยการชาร์จไฟฟ้ากระแสตรงขนาดแรงดัน 1,000 โวลต์ เข้าสู่ตัวบุชชิ่งในระยะเวลาหนึ่งตามที่กำหนด จากนั้นหาค่าความชื้นจากการทดสอบเพื่อมาเปรียบเทียบกับค่าความชื้นตามมาตรฐาน โดยผลจากการวิเคราะห์สามารถนำมาใช้วางแผนซ่อมบำรุงบุชชิ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงเพื่อช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์และระบบจำหน่ายไฟฟ้า

คำสำคัญ : บุชชิ่ง; อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง; ความเป็นฉนวน; ความชื้น

* *ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9607 1641, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: nattachote.r@rmutp.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

An Insulation Analysis of High Voltage Transformer Bushing

Chennarong Meesomphong Sakhon Woothipatanapan
and Nattachote Rugthaicharoencheep*

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok, 10800

Received 7 December 2016; accepted 29 March 2017

Abstract

This article presents how the analysis an insulation of high voltage transformer bushing. The purpose is to analysis the moisture in the bushing to evaluate the approach for maintenance. The analysis rely on the principle of the Polarization and Depolarization Current (PDC) technique, which is a technique for analyzing the insulation of high voltage equipment to test high voltage transformer bushing for a case study. This method is performed by energize 1,000 Vdc into a bushing in period of time and then switch off the circuit for discharge current. Finally we calculate the moisture of main insulation of high volt bushing as well compare with standard moisture of criteria. The method is useful of preventive maintenance plane of high volt bushing and reduce the failure in the power system.

Keywords: Bushing; High Voltage Equipment; Insulation; Moisture

** Corresponding Author. Tel.: +668 9607 1641, E-mail address: nattachote.r@rmutp.ac.th*

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่ใช้ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง เพื่อจ่ายแรงดันเข้าสู่ระบบจำหน่ายต่อไป จากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอด 24 ชั่วโมงจึงทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงทำงานตลอดเวลาประกอบกับการใช้งานเป็นระยะเวลานานย่อมทำให้อุปกรณ์เกิดการเสื่อมสภาพหรือได้รับความเสียหายจากสภาพอากาศ จึงส่งผลกระทบต่อระบบส่งจำหน่ายเป็นผลให้ต้องหยุดจ่ายไฟบ่อยครั้งที่เกิดปัญหาจะมีสาเหตุเกิดจากอุปกรณ์ที่อยู่ในหม้อแปลง เช่น คอนเดนเซอร์ บุชชิ่ง บางครั้งสาเหตุเหล่านี้นำไปสู่ปัญหาในระยะยาวได้ บ่อยครั้งที่ความชื้นคือสาเหตุที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการระเบิดเนื่องจากสูญเสียความเป็นฉนวน ถึงแม้จะมีการบำรุงรักษาตามระยะเวลาแล้วก็ตาม อุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากหนึ่งในนั้นคือ บุชชิ่งหม้อแปลงเมื่อเกิดปัญหาเบื้องต้นจะทำการทดสอบความเป็นฉนวนด้วยการวิเคราะห์น้ำมันในอุปกรณ์ โดยการทดสอบ DGA, หาความชื้นในน้ำมัน, ความเป็นกรด-ด่าง, ความเป็นฉนวน, สีของน้ำมัน หรือหาค่าโลหะปนเปื้อนในน้ำมัน [1]

เมื่อผลการการวิเคราะห์น้ำมันแสดงให้เห็นถึงปัญหาเบื้องต้นแล้วจึงต้องทำวิเคราะห์เชิงลึกแบบ Off–line ด้วยวิธีการทดสอบกระแสโพลาไรซ์และดีโพลาไรซ์ (Polarization and Depolarization Current: PDC) เนื่องจากเป็นการทดสอบที่มีความแม่นยำสูงเพื่อนำผลที่ได้มาประกอบการวิเคราะห์ในการทดสอบจะสามารถทดสอบความผิดปกติของบุชชิ่งไฟฟ้า ซึ่งการทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการที่ไม่ต้องทำการเปิดหรือทำลายตัวอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบ [2], [3] ในส่วนของการทดสอบสามารถทำการทดสอบได้โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 500 โวลต์ได้

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนการทดสอบการวิเคราะห์หาค่าความเป็นฉนวน ความชื้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยเทคนิค PDC เพื่อนำค่าที่ได้ไปเป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจในการซ่อมบำรุงหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทำการทดลองด้วยเครื่อง PDC สามารถแสดงผลได้ดังนี้

- สภาพของน้ำมันฉนวน
- สภาพของกระดาษฉนวนน้ำมัน โดยประเมินความชื้นภายใน Pressboard
- ในกรณีที่อุปกรณ์มีปัญหา โปรแกรมจะแสดงค่าที่กราฟของด้านโพลาไรซ์ เช่น การกัดกร่อน หรือการนำไฟฟ้า (มีการปนเปื้อนจากน้ำหรือความชื้น)

2.2 หลักการวิเคราะห์ความชื้นสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคือ เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดและวิเคราะห์ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและระบบฉนวนป้องกัน โดยใช้รวมกับคอมพิวเตอร์ที่รองรับระบบปฏิบัติการ Windows ตัวโปรแกรมรองรับการวัดทางไฟฟ้าในย่านวัดที่หลากหลาย สามารถปรับย่านแรงดันไฟฟ้าที่ทำการวัดให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ทำการวัด การวิเคราะห์ และสามารถทำการทดสอบในสถานีไฟฟ้าแรงสูงหรือในห้องปฏิบัติการได้ [4]

รูปที่ 1 เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD

ในการวิเคราะห์ค่า PDC ตัวเครื่องจะมีโปรแกรมประมวลผลที่ได้กำหนดค่าไว้แล้ว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเส้นกราฟค่ากระแสในขณะนั้นซึ่งนำมาจากกระแสโพลาไรซ์: $I_p(t)$ และกระแสดีโพลาไรซ์: $I_d(t)$ รวมทั้งค่าแรงดันไฟฟ้า: U_c ที่กำลังเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาชาร์จ: t_c ซึ่งจะทำการวัดหลังจากต่อสายดินแล้ว รูปแบบเส้นกราฟของกระแสดีโพลาไรซ์จะมีลักษณะลดลงตามการคายประจุและต้องไม่ตัดกับเส้นกราฟของกระแสโพลาไรซ์ โดยกระแสโพลาไรซ์และกระแสดีโพลาไรซ์สามารถหาได้จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ตามลำดับดังนี้

$$I_p(t) = C_0 U_C \left[\frac{\sigma_O}{\varepsilon_O} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (1)$$

$$I_d(t) = C_0 U_C \left[f(t) - f(t + t_C) \right] \quad (2)$$

โดยที่

C_0 = ค่าการเก็บประจุของอุปกรณ์ที่ทดสอบ

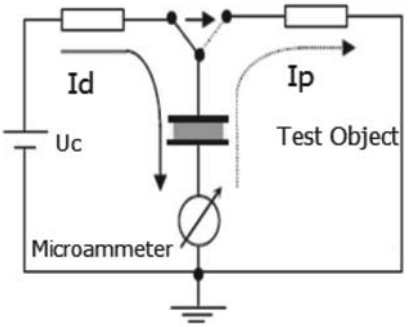
$\delta(t)$ = เดลต้าฟังก์ชันซึ่งมีที่มาจากแรงดันสเต็ปณ เวลาเริ่มต้น (t_0)

σ_O = ความนำไฟฟ้ากระแสตรงบริสุทธิ์

ε_O = ค่าสะสมพลังงานไฟฟ้าของสุญญากาศ

$f(t)$ = ฟังก์ชันการตอบสนองของอิเล็กทริก

การทดสอบด้วยวิธีการทดสอบ PDC ลักษณะการวัดค่าจะเป็นแบบต่อเนื่องโดยจะมี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ การวัดค่ากระแสโพลาไรซ์ และขั้นตอนที่สองคือ การวัดค่ากระแสดีโพลาไรซ์ ลักษณะการต่อวงจรเพื่อวัดค่าได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรการวัดค่ากระแสโพลาไรซ์และดีโพลาไรซ์

2.3 การต่อใช้งานเครื่องมือวัด PDC

การต่อใช้งานของเครื่องวัด PDC-ANALYSER-1MOD กับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบให้ถูกต้องนั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำและค่าไม่ผิดเพี้ยน สิ่งสำคัญจะต้องทำการตรวจเช็คจุดต่อสายที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องวัดกับอุปกรณ์ที่ทดสอบให้แน่นและถูกต้องโดยเฉพาะขั้วต่อและสายไฟที่ใช้ในการวัดค่าไม่ควรจะไขว้หรือพาดเพราะจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายซึ่งจะส่งผลต่อการทดสอบ เช่น เกิดการแฟลชหรือดิสชาร์จออกมาและจะทำให้ค่าที่วัดได้เกิดความเพี้ยน จุดเชื่อมต่อการใช้งานของตัวเครื่องในแต่ละจุดสามารถดูได้จากหมายเลขที่กำหนดไว้บนตัวเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 3 การต่อสายใช้งาน
เครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD

หมายเลข 1 จุดต่อสายเพื่อป้อนไฟฟ้าแรงสูง ให้กับอุปกรณ์ที่ทดสอบ (ใช้กับสาย SHV)

หมายเลข 2 จุดต่อสายเพื่อตรวจวัดกระแส จากอุปกรณ์ทดสอบ (ใช้กับสาย BNC)

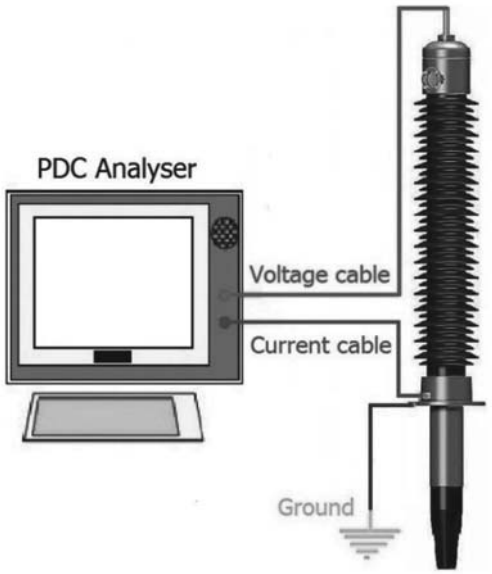
หมายเลข 3 จุดต่อสายจากแหล่งจ่ายแรงดันแบบ PDC-Phantom-1000XE

หมายเลข 4 สวิตช์เปิดเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD

หมายเลข 5 พอร์ตต่อสายแป้นพิมพ์

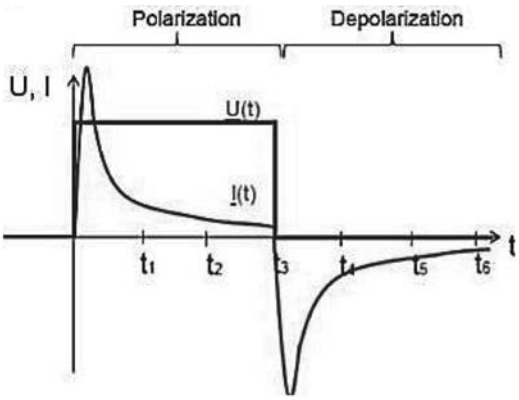
2.4 ขั้นตอนการทดสอบอุปกรณ์

การต่อใช้งานของเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD เข้ากับอุปกรณ์สามารถทำได้โดยต่อสายเพื่อป้อนไฟฟ้าแรงสูงเข้าที่ขั้วด้านบนของบุชชิ่ง (ด้านอินพุต) และต่อสายสายเพื่อตรวจวัดกระแสเข้าที่ด้านปลายของบุชชิ่ง (ด้านเอาท์พุต) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การต่อสายเข้ากับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ

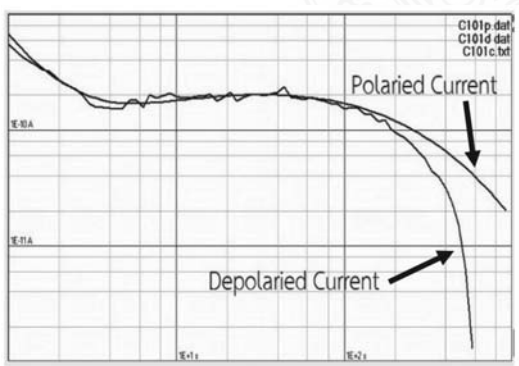
ค่ากระแสโพลาไรซ์ที่ได้จากการวัดจะมีจำนวนน้อยมาก หลังจากที่ชาร์จแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในอุปกรณ์ที่จะทำการทดสอบ ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดค่ากระแสนั้นบางครั้งอาจจะใช้ระยะเวลานานกว่าปกติ ในการวัดค่าแต่ละครั้งประกอบไปด้วยกราฟค่ากระแสที่มีในตัวอุปกรณ์และค่ากระแสโพลาไรซ์ขณะที่ชาร์จแรงดันไฟฟ้าเข้าไปและค่ากระแสดีโพลาไรซ์ในช่วงของคายประจุ ในช่วงของการวัดค่าของอุปกรณ์ที่ทดสอบเส้นกราฟของกระแสดีโพลาไรซ์จะตกลงมาเหลือที่ศูนย์โวลต์ ซึ่งหมายถึงค่ากระแสที่ชาร์จเข้าไปได้ปล่อยประจุออกมาจนหมดจึงจะจบขั้นตอนในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แรงดันและกระแสที่ชาร์จให้กับอุปกรณ์

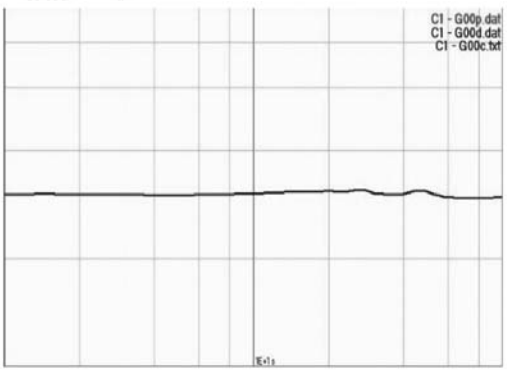
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการทดสอบจะได้ค่ากระแสโพลาไรซ์และกระแสดีโพลาไรซ์ในแต่ละช่วงเวลา จะนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่มีในเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD และจะสังเกตจากเส้นกราฟที่ได้ว่าค่ากระแสโพลาไรซ์นั้นจะมีค่าสูงที่สุดจะในช่วงเริ่มต้นและจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ แต่ไม่ถึงศูนย์โวลต์ เนื่องจากยังคงมีกระแสหลงเหลืออยู่ในตัวอุปกรณ์ที่ทำการสอบสาเหตุจากการใช้งาน และเมื่อทำการชาร์จแรงดันไฟฟ้าเข้าไปแล้วทดสอบหาค่ากระแสดีโพลาไรซ์ในแต่ละช่วงเวลาแล้วนำมาพล็อตกราฟ เส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะลดลงมาจนเกือบถึงศูนย์โวลต์ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการทดสอบบุชชิ่งด้วย PDC

จากการทดสอบเมื่อกราฟมีลักษณะที่ค่าช่วงต้นและค่าช่วงปลายเป็นแนวระนาบเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 7 แสดงได้ว่าอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบอยู่ในสภาวะที่ผิดปกติหรือชำรุดเสียหายเสื่อมสภาพโดยอาจมีสาเหตุจากกระดาษฉนวนที่พันอยู่ระหว่างขดลวดในตัวบุชชิ่งเกิดการ เช่น กระดาษฉนวนที่พันระหว่างลวดตัวนำขาดทะลุถึงกัน เกิดการรั่วซึมของตัวนำถึงกัน ทำให้สูญเสียค่าของการเก็บประจุ หรือขดลวดตัวนำสัมผัสกันทั้งทางตรงและทางอ้อม เนื่องด้วยจากกระดาษฉนวนที่พันอยู่รอบระหว่างกลางของขดลวดตัวนำจะเป็นช่องว่าง ซึ่งจะทำให้มีสถานะเป็นตัวเก็บประจุ ดังนั้นเมื่อทำการวัดค่าจะเปรียบเสมือนเชื่อมต่อตรงถึงกันจะไม่ส่งผลใดๆ ต่อการวัดค่า ทำให้มีส่งผลให้รูปกราฟอยู่ในแนวระนาบเดียวกันเปรียบเสมือนการนำสายวัดของเครื่องมือวัดมาสัมผัสกันโดยตรง [5]



รูปที่ 7 ผลการทดสอบที่เกิดการรั่วหรือเสียหายของกระดาษฉนวนที่พันอยู่ในขดลวดตัวนำ

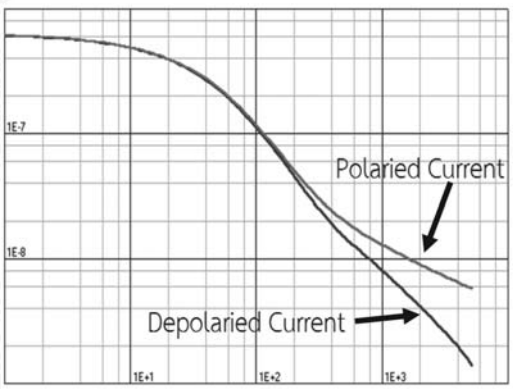
การทดสอบบุชชิ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงยี่ห้อ TRENCH 245kV หัวข้อการทดสอบเพื่อหาความชื้นของตัวบุชชิ่งในบทความนี้ ได้ทำการทดสอบด้วยเครื่อง PDC ภายในห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) โดยรายละเอียดของการทดสอบเป็นดังนี้

Description of test object	:	Bushing Trench SN 08B3125
Test voltage in V	:	1000.0
Noise current in uA eff	:	0.02 @ 50 Hz
Remaining currents in pA	:	-2.1
Polarisation duration in sec	:	0
Depolarisation duration in sec	:	34
Polarisation started at	:	9:00:05 AM on 11/7/2016
Depolarisation started at	:	9:00:05 AM on 11/7/2016
Depolarisation ended at	:	9:00:39 AM on 11/7/2016
Temperature in C°	:	29

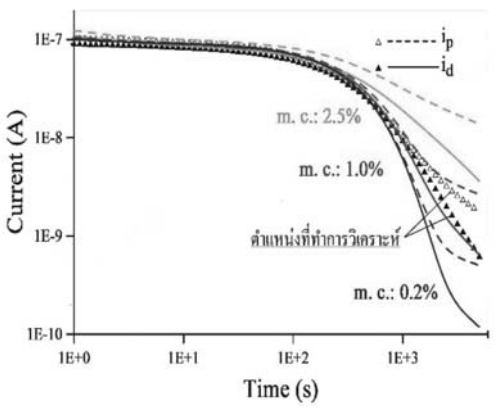
ตัวบุชชิ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการทดสอบในบทความนี้ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 8

รูปที่ 8 ตัวอย่างบุชชิ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

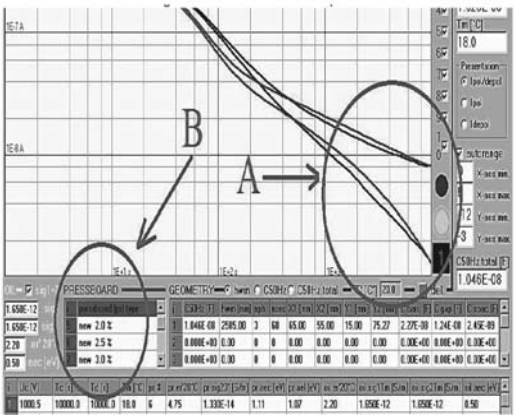
กระแสโพลาไรซ์และดีโพลาไรซ์จากการทดสอบด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9 นำกราฟจากรูปที่ 9 มาทำการเปรียบเทียบกับค่าความชื้นมาตรฐานซึ่งมีอยู่ในโปรแกรมประเมินผล โดยเริ่มจากค่าต่ำที่สุดและค่อยๆ เพิ่มค่าความชื้นขึ้นไปเรื่อยๆ จากนั้นนำมาแสดงผลดังในรูปที่ 10 ลักษณะของส่วนปลายเส้นกราฟที่ได้เมื่ออยู่ใกล้เคียงกันหรืออยู่ในตำแหน่งเดียวกันมากที่สุด (พื้นที่ A) นั่นแสดงว่าอุปกรณ์ที่ทดสอบมีค่าความชื้นใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานที่กำหนด (พื้นที่ B) ดังแสดงในรูปที่ 11[6], [7]



รูปที่ 9 กราฟกระแสโพลาไรซ์และดีโพลาไรซ์จากผลการทดสอบด้วยเครื่อง PDC-ANALYSER-1MOD



รูปที่ 10 ความชันของกราฟกระแสโพลาไรซ์และดีโพลาไรซ์ขึ้นอยู่กับความชื้นของอุปกรณ์ที่ทดสอบ



รูปที่ 11 ส่วนปลายของกราฟกระแสโพลาไรซ์และดีโพลาไรซ์เป็นตัวบ่งชี้ค่าความชื้นของอุปกรณ์ที่ทดสอบ

4. สรุป

ผลจากกรณีศึกษาที่ทำการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปกราฟกระแสโพลาไรซ์และกระแสดีโพลาไรซ์มีความชันที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและสภาพของความเป็นฉนวนหรือค่าความชื้นของตัวบุชชิ่ง ค่าความชื้นนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อค่าการเก็บประจุของบุชชิ่ง ซึ่งความชื้นจะลดลงในช่วงแรกที่ทำการชาร์จแรงดันเข้าไป โดยสังเกตจากกราฟกระแสโพลาไรซ์และกระแสดีโพลาไรซ์จะมีความลาดชันสูงในช่วงเริ่มต้น จากนั้นความลาดชันจะค่อยๆ ลดลงและมีระยะห่างของเส้นกราฟทั้งสองมากขึ้นในช่วงท้าย ซึ่งในช่วงท้ายของกราฟจะใช้เพื่อวิเคราะห์อุปกรณ์ที่ทดสอบว่ามีค่าความชื้นใกล้เคียงกับค่าความชื้นมาตรฐานหรือไม่ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่ออุปกรณ์และระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนทุนการทำงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณสุทัศน์ สุขสกุลปัญญา แผนกทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง กองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และคุณศรุดา เพ็งสุวรรณ ฝ่ายบำรุงรักษาระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนข้อมูล อุปกรณ์เครื่องมือ และคำปรึกษาในการทดสอบครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Kapinos, “Operating Damages of Bushings in Power Transformers,” *Transactions on Electrical Engineering*, vol. 1, no.3, pp. 89-93, 2012.

[2] W. S. Zaengl, “Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domains or HV Power Equipment (transformers, cables, etc.),” in *Proceeding of 12th International Symposium on High Voltage Engineering – ISH2001*, Bangalore, India, 2001, pp. 1-10.

[3] S. A. Bhumiwat, “Insulation Condition Assessment of Transformer Bushings by means of Polarisation Depolarisation Current Analysis,” in *Proceeding of 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis, USA, 2004, pp. 500-503.

[4] Electrical Insulation Diagnostic System PDC-analyser-1MOD, Alff Engineering, Gomweg 7 ch. 8915 Hausen am Albis, Switzerland, 2007, pp. 2-8.

[5] S. A. Bhumiwat, “Application of Polarisation Depolarisation Current (PDC) Technique on Fault and Trouble Analysis of Stator Insulation,” in *Proceeding of CIGRE SC A1 & D1 Joint Colloquium*, October, 2007, pp. 79-87.

[6] B. Danny, J. Benefield, and D. Caverly,

"Southern Company Trench Bushing Failure Investigation an Evolving Story 2006/2007," in *Proceeding of Doble Client Conference*, 2007, pp. 1-17.

[7] A. D. Rio and D. Hanson, "Copper Migration in Bushings: Update to Southern Co.-Trench Bushing Failure Investigation," in *Proceeding of Siemens "Transforming Know-how into Solutions" Conference*, 2008, pp. 1-18.

[8] S. A. Bhumiwat, "Insulation condition assessment of transformer bushings by means of polarisation / depolarisation current analysis," in *Proceeding of 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis, IN, USA, 2004, pp. 1-4.