

ดัชนีวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของการไฟฟ้านครหลวง

โดยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบตรรกะคลุมเครือ

Health Index of MEA Power Transformers for Preventive Maintenance by Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process

คมกฤษฎ์ จิตตวิระ¹ และ ปานจิต ดำรงกุลกำอว²

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: komkrit_jit@hotmail.com, fengpjd@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการประเมินค่าดัชนีวิเคราะห์ (Health Index) ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยเสี่ยง โดยค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงได้มาจากวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Analytic Hierarchy Process; FAHP) วิธีนี้เป็น การนำเอาแนวคิดของทฤษฎีความคลุมเครือ (Fuzzy Set Theory) มาเป็นเครื่องมือช่วยตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลซึ่งยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ โดยกระบวนการตัดสินใจนี้จะเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงเป็นคู่ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยเสี่ยง พร้อมทั้งพิจารณาความสอดคล้องของการกำหนดค่าความสำคัญของปัจจัยเสี่ยง จากนั้นนำค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยไปใช้คำนวณค่าดัชนีวิเคราะห์ เพื่อประเมินความเสี่ยงของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) พร้อมกับจัดทำแผนบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเชิงป้องกันประจำปี โดยการคำนวณค่าดัชนีวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ได้จากชุดเปลี่ยนแทปขณะจ่ายไฟ (On Load Tap Changer) และส่วนที่ได้จากถังน้ำมันหม้อแปลง (Main Tank) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำไปทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าทั้งหมด 15 ลูกของ กฟน. ผลของค่าดัชนีวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกับสภาพการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง วิธีการนี้จึงมีประโยชน์ในการนำไปใช้กับวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

คำสำคัญ:

หม้อแปลงไฟฟ้า ค่าดัชนีวิเคราะห์ กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่

Abstract

This paper presents an analytical method to evaluate the health index of power transformers by using weighted scores for transformer's risk factors. The weighted scores for risk factors are obtained from Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) which applies the Fuzzy Set theory for addressing the effects of risk factors considering the decision making uncertainty. The FAHP

compares the effects of risk factors in pairs in order for calculating their weighted scores as well as checking for the correlation of the assigned effects of risk factors. The weighted scores are then used to calculate the health index in order to evaluate the risk for power transformers in the substations of Metropolitan Electricity Authority (MEA) and plan for their annual preventive maintenance. In this study, the risk factors are categorized into two parts: (1) the risk factors for on load tap changer and (2) the risk factors for transformer main tank. The proposed method is tested on fifteen MEA's power transformers. The study results show that the obtained health indices correctly reflex the conditions of those power transformers. Therefore this method is a useful tool for the planning of preventive maintenance schedule for power transformers.

Keywords:

power transformer, health Index, fuzzy analytic hierarchy process

1. คำนำ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อยของ กฟน.ประจำปี 2557 จำนวน 11 ลูก ปี 2556 จำนวน 1 ลูก ปี 2555 จำนวน 1 ลูก และปี 2554 จำนวน 2 ลูก มาใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่ โดยวิธีการถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยซึ่งมีทั้งหมด 12 ปัจจัย และนำผลการคำนวณที่ได้ไปใช้ในการบำรุงรักษาเชิงป้องกันประจำปีให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อยของ กฟน. สาเหตุที่ใช้ข้อมูลผลการทดสอบหม้อแปลง 4 ลูก จากปี 2554 ถึงปี 2556 เนื่องจากเห็นว่าหม้อแปลงทั้ง 4 ลูก เคยมีการชำรุด

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ตระหนักถึงความสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อย เพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้นำวิธีการประเมินความเสี่ยงหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Analytic Hierarchy Process- FAHP) มาใช้ประเมินสภาพการทำงานได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อย กฟน. เพื่อจัดทำแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อย และป้องกันไม่ให้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อยชำรุดเสียหาย โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ได้จากชุดเปลี่ยนแทปขณะจ่ายไฟ (On Load Tap Changer) และส่วนที่ได้จากถังน้ำมันหม้อแปลง (Main Tank)

งานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อยของ กฟน.ประจำปี 2557 จำนวน 11 ลูก ปี 2556 จำนวน 1 ลูก ปี 2555 จำนวน 1 ลูก และปี 2554 จำนวน 2 ลูก มาใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่ โดยวิธีการถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยซึ่งมีทั้งหมด 12 ปัจจัย และนำผลการคำนวณที่ได้ไปใช้ในการบำรุงรักษาเชิงป้องกันประจำปีให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อยของ กฟน. สาเหตุที่ใช้ข้อมูลผลการทดสอบหม้อแปลง 4 ลูก จากปี 2554 ถึงปี 2556 เนื่องจากเห็นว่าหม้อแปลงทั้ง 4 ลูก เคยมีการชำรุด

2. วิธีการ

บทความนี้ได้นำค่าที่ใช้ทดสอบภายในองค์กรมากำหนดเป็นปัจจัยเสี่ยงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่มาใช้ในการถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยซึ่งวิธีนี้เป็น การนำเอาแนวคิดของทฤษฎีความคลุมเครือ (Fuzzy Set Theory) เข้ามาใช้ร่วมด้วยกับกระบวนการตัดสินใจ โดยจะเปรียบเทียบปัจจัยเป็นคู่และให้คะแนนประเมินเป็นชุดตัวเลขแบบฟัซซี่แทนการให้คะแนนประเมินเพียงตัวเลขตัวเดียวแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความสำคัญรายคู่แบบฟัซซี่ [1]

ระดับ ความสำคัญ	ความหมาย	ตัวเลขความ คลุมเครือเชิง สามเหลี่ยม
~1	มีความสำคัญเท่ากันในกรณีปัจจัยเดียวกัน	(1,1,1)
~1	มีความสำคัญเท่ากันในกรณีคนละปัจจัย	(1, 1, 1+δ)
~3	มีความสำคัญมากกว่าในระดับเล็กน้อย	(3-δ, 3, 3+δ)
~5	มีความสำคัญมากกว่าในระดับปานกลาง	(5-δ, 5, 5+δ)
~7	มีความสำคัญมากกว่าในระดับค่อนข้างมาก	(7-δ, 7, 7+δ)
~9	มีความสำคัญมากกว่าในระดับมากที่สุด	(9-δ, 9, 9)
~2, ~4, ~6, ~8	ค่าระหว่างเพื่อลดช่องว่างทางความรู้สึก	(x-1, x, x+1), x = 2, 4, 6, 8

ซึ่งฐานตัวเลขความคลุมเครือเชิงสามเหลี่ยมจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2 ดังนั้นการเลือกใช้ค่าฐานของตัวเลขความคลุมเครือเชิงสามเหลี่ยมขึ้นอยู่กับความสอดคล้องกันของปัจจัย ซึ่งในบทความนี้เลือกค่าฐานตัวเลขความคลุมเครือเชิงสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 1 เพื่อที่ต้องการจะแบ่งแยกปัจจัยโดยชัดเจน จากนั้นนำตัวเลขความคลุมเครือเชิงสามเหลี่ยม (l_i, m_i, u_i) มาใช้ในการถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยในตารางเมตริกซ์ แล้วนำค่าที่ได้มาสังเคราะห์เพื่อให้เกิดตัวเลขหลักเดียวที่แสดงถึงความสำคัญของแต่ละปัจจัย ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่าการหาลำดับความสำคัญ โดยมี 3 ขั้นตอนดังนี้

1. เปรียบเทียบปัจจัยรายคู่ใส่ลงในตารางเมตริกซ์ (Fuzzy Pairwise Comparison Matrix) ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2 โดยสมมุติให้ปัจจัย B มีความสำคัญมากกว่าปัจจัย A ในระดับมากที่สุด และปัจจัย B มีความสำคัญมากกว่าปัจจัย C ในระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง ส่วนปัจจัย C มีความสำคัญมากกว่าปัจจัย A ในระดับเล็กน้อย การเปรียบเทียบปัจจัยในทางกลับกัน เช่น ความสำคัญของปัจจัย C เทียบกับปัจจัย B คิดจากส่วนกลับของปัจจัย B เทียบกับปัจจัย C นั่นคือ ถ้าปัจจัย B เทียบกับ C เป็น (3,4,5) ปัจจัย C เทียบ

กับ B จะเป็น $(\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3})$ จากนั้นหาผลรวมของตัวเลขในคอลัมน์ของแต่ละแถวของตารางเมตริกซ์

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบรายคู่

ปัจจัย	A	B	C
A	(1,1,1)	(0.11,0.11,0.13)	(0.25,0.33,0.50)
B	(8,9,9)	(1,1,1)	(3,4,5)
C	(2,3,4)	(0.20,0.25,0.33)	(1,1,1)
ผลรวม	(11,13,14)	(1.31,1.36,1.46)	(4.25,5.33,6.50)

2. นำเอาตัวเลขแต่ละช่องของแต่ละแถวหารด้วยผลรวมของตัวเลขในคอลัมน์นั้นซึ่งคำนวณได้จากสูตรที่ (1) เพื่อให้ได้ตาราง Normalized Matrix แสดงใน ตารางที่ 3

$$N_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{\sum_{i=1}^n u_{ij}}, \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, \frac{u_{ij}}{\sum_{i=1}^n l_{ij}} \right) \quad (1)$$

ตารางที่ 3 ตาราง Normalized Matrix

ปัจจัย	A	B	C
A	(0.07,0.08,0.09)	(0.08,0.08,0.10)	(0.04,0.06,0.12)
B	(0.57,0.69,0.82)	(0.69,0.73,0.76)	(0.46,0.75,1.18)
C	(0.14,0.23,0.36)	(0.14,0.18,0.25)	(0.15,0.19,0.24)

3. จากตาราง Normalized Matrix หาค่าเฉลี่ยตัวเลขในแนวนอนแต่ละแถว ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย $\overline{w_i}$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร [2]

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n N_{ij}}{n} = (l_i, m_i, u_i) \quad (2)$$

และ

$$\overline{w_i} = \frac{l_i + 4m_i + u_i}{6} \quad (3)$$

ดังนั้นค่าลำดับความสำคัญของปัจจัย A, B และ C จากตัวอย่าง ได้แก่ =0.076, =0.732, =0.205 ตามลำดับ

จากนั้นนำค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณความสอดคล้องของปัจจัยโดยมี 5 ขั้นตอนดังนี้

1. คูณแต่ละค่าในคอลัมน์แรกของตารางเมทริกซ์ด้วยค่าลำดับความสำคัญตัวแรก คูณคอลัมน์ที่สองด้วยค่าลำดับความสำคัญตัวที่สองไปเรื่อยๆ จนครบ แล้วนำผลคูณดังกล่าวมาบวกกันในแต่ละแถวเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้เรียก Weighted Sum

$$\bar{B}_n = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \\ \bar{B}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.231 \\ 2.228 \\ 0.621 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2. ทหารสมาชิกแต่ละตัวในเวกเตอร์ Weighted Sum ด้วยค่าลำดับความสำคัญในตำแหน่งเดียวกัน

$$\lambda = \left(\frac{\bar{B}_1}{w_1} + \frac{\bar{B}_2}{w_2} + \frac{\bar{B}_n}{w_n} \right) \quad (5)$$

$$\lambda = 9.09$$

3. คำนวณค่าเฉลี่ยผลหารมาเป็นค่า Eigen Values สูงสุด ($\lambda_{\max}$)

$$\lambda_{\max} = \frac{\lambda}{n} \quad (6)$$

$$\lambda_{\max} = 3.03$$

4. คำนวณค่าดัชนีความสอดคล้องของปัจจัย [3] (Consistency Index : C.I.)

$$C.I. = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (7)$$

$$C.I. = 0.015$$

5. คำนวณอัตราส่วนความสอดคล้องของปัจจัย [3] (Consistency Ratio : C.R.)

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (8)$$

$$C.R. = 0.026$$

โดยที่ R.I. (Random Index) คือค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่มที่ได้จากการทดลองโดยการสุ่มตัวอย่างจากตารางเมทริกซ์จำนวน 64,000 ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4

ตาราง 4 ค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม [4]

จำนวนปัจจัย	1	2	3	4	5	6
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24
จำนวนปัจจัย	7	8	9	10	11	12
R.I.	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48
จำนวนปัจจัย	13	14	15	-	-	-
R.I.	1.56	1.57	1.59	-	-	-

ซึ่งค่า CR ที่คำนวณได้ต้องมีค่าไม่เกิน 10% สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีมากกว่า 5 ปัจจัย ไม่ควรเกิน 9% สำหรับ 4 ปัจจัย และไม่ควรเกิน 5% สำหรับ 3 ปัจจัย ถ้าค่า CR เกินกว่ามาตรฐานดังกล่าว หมายความว่า การวิเคราะห์ปัจจัยไม่มีความสอดคล้องกันของเหตุผล เป็นเพียงการเดาสุ่มของตัวเลข ในตัวอย่างที่แสดงข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการกำหนดความสำคัญของปัจจัย A, B และ C มีความสอดคล้องกัน และค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่ได้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้

ในบทความนี้ ปัจจัยเสี่ยงของหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีทั้งหมด 12 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 การวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Dissolved Gas Analysis) เป็นการตรวจสอบสุขภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยการเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงโดยไม่จำเป็นต้องปลดหม้อแปลงออกจากระบบความถี่ เพื่อวิเคราะห์หาความผิดปกติของก๊าซหลักที่เกิดขึ้น ซึ่งก๊าซที่เกิดขึ้นแต่ละชนิดสามารถบอกถึงความผิดปกติอันนำไปสู่การชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีได้ซึ่งก๊าซที่ใช้ในการพิจารณามีอยู่ทั้งหมด 7 ชนิดแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คะแนนความสำคัญของก๊าซที่ละลายในน้ำมัน [5]

ลำดับ	Gas	คะแนน (S_i)						น้ำหนัก (W_i)
		1	2	3	4	5	6	
1	H ₂	≤ 100	101-200	201-300	301-500	501-700	>700	2
2	CH ₄	≤ 75	76-125	126-200	201-400	401-600	>600	3
3	C ₂ H ₆	≤ 65	66-80	81-100	101-120	121-150	>150	3
4	C ₂ H ₄	≤ 50	51-80	81-100	101-150	151-200	>200	3
5	C ₂ H ₂	≤ 3	4-7	8-35	36-50	51-80	>80	5
6	CO	≤ 350	351-700	701-900	901-1100	1100-1400	>1400	1
7	CO ₂	≤ 2500	≤ 3000	≤ 4000	≤ 5000	≤ 7000	>7000	1

จากนั้นนำคะแนนและน้ำหนักของก๊าซแต่ละตัวมาคำนวณหาช่วงคะแนนก๊าซที่ละลายในน้ำมัน (%DGAF) ดังสมการ

$$\%DGAF = \frac{\sum_{i=1}^7 (S_i \times W_i)}{6 \times \sum_{i=1}^7 W_i} \times 100\% \quad (9)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของก๊าซที่ละลายในน้ำมัน

ตารางที่ 6 ระดับคะแนนของก๊าซที่ละลายในน้ำมัน

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	%DGAF < 20
3	ยอมรับได้	20 ≤ %DGAF < 25
2	เฝ้าระวัง	25 ≤ %DGAF < 33.33
1	แย่	33.33 ≤ %DGAF < 50
0	แย่มาก	%DGAF ≥ 50

ปัจจัยที่ 2 การทดสอบคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Main Oil Quality) ของ กฟน. ประกอบไปด้วย 2 หัวข้อย่อย ได้แก่ การทดสอบความคงทนของน้ำมันหม้อแปลงต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength of Oil) และการตรวจวัดหาปริมาณน้ำในน้ำมัน (Water Content Test) ซึ่งค่าน้ำหนักของการตรวจวัดหาปริมาณน้ำในน้ำมันมากกว่าการทดสอบความคงทน

ของน้ำมันหม้อแปลงต่อแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำอันตรายต่อฉนวนประเภทเซลลูโลสจึงทำให้ค่าความเป็นฉนวนลดลง ทำให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้นแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คะแนนคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงกำลัง [6]

ลำดับ	วิธีทดสอบ	คะแนน			น้ำหนัก (W_i)
		U ≤ 69 kV	69kV < U < 230 kV	U ≥ 230 kV	
1	Dielectric Strength	≥ 45	≥ 52	≥ 60	1
	kV	35-45	47-52	50-60	2
	(2 mm gap)	30-35	35-47	40-50	3
		≤ 30	≤ 35	≤ 40	4
2	Water Content	≤ 30	≤ 20	≤ 15	1
	(ppm)	30-35	20-25	15-20	2
		35-40	25-30	20-25	3
		≥ 40	≥ 30	≥ 25	4

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันแต่ละตัวมาคำนวณหาช่วงคะแนนคุณภาพน้ำมัน (%MOQF)

$$\%MOQF = \frac{\sum_{i=1}^2 (S_i \times W_i)}{4 \times \sum_{i=1}^2 W_i} \times 100\% \quad (10)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 8 ระดับคะแนนของคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	%MOQF < 30
3	ยอมรับได้	30 ≤ %MOQF < 37.5
2	เฝ้าระวัง	37.5 ≤ %MOQF < 50
1	แย่	50 ≤ %MOQF < 75
0	แย่มาก	%MOQF ≥ 75

ปัจจัยที่ 3 ตัวประกอบการสูญเสีย (Dissipation Factor) หรือ Tan Delta เป็นวิธีที่ใช้ทดสอบความเป็นฉนวนของหม้อแปลงโดยจะวัดด้วยค่าเก็บประจุ (Capacitance) และตัวประกอบการสูญเสียซึ่งค่าที่ตัวประกอบการ

สูญเสียที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะต้องเป็นค่าที่มากที่สุด จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของตัวประกอบกำลัง

ตารางที่ 9 ระดับคะแนนของตัวประกอบกำลัง [6]

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	$TD_{\max} < 0.5$
3	ยอมรับได้	$0.5 \leq TD_{\max} < 0.7$
2	เฝ้าระวัง	$0.7 \leq TD_{\max} < 1$
1	แย่	$1 \leq TD_{\max} < 2$
0	แย่มาก	$TD_{\max} \geq 2$

ปัจจัยที่ 4 อุณหภูมิ (Temperature) เป็นการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยเป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างจุดที่ต้องการวัดกับจุดอ้างอิง จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของกล้องถ่ายภาพความร้อน

ตารางที่ 10 ระดับคะแนนอุณหภูมิของกล้องถ่ายภาพความร้อน [7]

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน $^{\circ}\text{C}$
4	ดี	$0 \leq T \leq 10$
2	เฝ้าระวัง	$10 < T \leq 20$
1	แย่	$20 < T \leq 40$
0	แย่มาก	$T > 40$

ปัจจัยที่ 5 ประวัติการจ่ายโหลด (Load History) คือ พฤติกรรมการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า โดยจะพิจารณาจากการจ่ายโหลดสูงสุดของหม้อแปลง หรือการจ่ายโหลดเกินพิกัดในช่วงเวลาหนึ่ง โดยประวัติการจ่ายโหลดสามารถแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มดังนี้ N_0 = จำนวนของหม้อแปลงที่ค่าสัดส่วน N_k/N_r มีค่าต่ำกว่า 0.6 จะมีค่า i เท่ากับ 0

N_1 = จำนวนของหม้อแปลงที่ค่าสัดส่วน S_k/S_r มีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 1 จะมีค่า i เท่ากับ 1

N_2 = จำนวนของหม้อแปลงที่ค่าสัดส่วน S_k/S_r มีค่า

อยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.3 จะมีค่า i เท่ากับ 2

N_3 = จำนวนของหม้อแปลงที่ค่าสัดส่วน S_k/S_r มีค่าอยู่ระหว่าง 1.3 ถึง 1.5 จะมีค่า i เท่ากับ 3

N_4 = จำนวนของหม้อแปลงที่ค่าสัดส่วน S_k/S_r มีค่ามากกว่า 1.5 จะมีค่า i เท่ากับ 4

โดยที่ S_k = การจ่ายโหลดสูงสุดในแต่ละสัปดาห์

S_r = พิกัดโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ซึ่งประวัติการจ่ายโหลดสามารถคำนวณได้จาก [6]

$$LF = \frac{\sum_{i=0}^4 (4-i) \times N_i}{\sum_{i=0}^4 N_i} \quad (11)$$

ค่าที่ได้จากการคำนวณนำไปใช้ประเมินระดับคะแนนของประวัติการจ่ายโหลดของหม้อแปลง

ตารางที่ 11 ระดับคะแนนของประวัติการจ่ายโหลดของหม้อแปลง [6]

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	$LF \geq 3.5$
3	ยอมรับได้	$2.5 \leq LF < 3.5$
2	เฝ้าระวัง	$1.5 \leq LF < 2.5$
1	แย่	$0.5 \leq LF < 1.5$
0	แย่มาก	$LF \leq 0.5$

ปัจจัยที่ 6 ความต้านทานฉนวนหม้อแปลง (Insulation Resistance Test) เป็นการทดสอบค่าความต้านทานฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (PI) โดยจะวัดค่าความต้านทานระหว่างขดลวดของหม้อแปลงด้วยเครื่องมือวัดความต้านทาน (Megger) จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของความต้านทานฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 12 ระดับคะแนนของความต้านทานฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง [8]

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	$LF \geq 3.5$
3	ยอมรับได้	$2.5 \leq LF < 3.5$
2	เฝ้าระวัง	$1.5 \leq LF < 2.5$
1	แย่	$0.5 \leq LF < 1.5$
0	แย่มาก	$LF \leq 0.5$

ดัชนีวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของ การไฟฟ้านครหลวงโดยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบตรรกะคลุมเครือ

39

ปัจจัยที่ 7 อายุการใช้งาน (Age) ของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับอายุของฉนวนกระดาษที่ใช้พันลวดตัวนำ เพราะเป็นส่วนที่สัมผัสกับลวดโดยตรง ความร้อนจากลวดตัวนำทำให้กระดาษสูญเสียความแข็งแรงทางกล จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของอายุหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 13 ระดับคะแนนของอายุหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง [9]

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	$AGE < 20$
3	ยอมรับได้	$20 \leq AGE < 40$
2	เฝ้าระวัง	$40 \leq AGE < 60$
1	แย่	$60 \leq AGE \leq 70$
0	แย่มาก	$AGE > 70$

ปัจจัยที่ 8 ฐานตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานี (Foundation) ต้องไม่มีการแตกหรือรอยแตกชำรุด เพราะอาจทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดอยู่กับหม้อแปลงชำรุดตามไปด้วย จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของฐานหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 14 ระดับคะแนนของฐานหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	ปกติ
3	ยอมรับได้	ชำรุดเล็กน้อย
1	แย่	ชำรุดปานกลาง
0	แย่มาก	ชำรุดมาก

ปัจจัยที่ 9 ระบบระบายความเย็น (Cooling System) กปน. ใช้แบบ ONAF และการทำงานของพัดลมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงกำหนดอุณหภูมิการทำงานไว้ 2 ช่วง จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนระบบระบายความเย็น

ตารางที่ 15 ระดับคะแนนระบบระบายความเย็น

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	ปกติ
2	เฝ้าระวัง	ไม่ทำงาน 1 ตัว
0	แย่มาก	ไม่ทำงานตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป

ปัจจัยที่ 10 ระดับน้ำมันหม้อแปลง (Main Oil Level) มาตรฐานระดับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะถูกติดตั้งไว้ที่ถึง

สำรองน้ำมันด้านบนหม้อแปลงเพื่อป้องกันหม้อแปลงรั่วซึม จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของระดับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 16 ระดับคะแนนของระดับน้ำมันหม้อแปลงไฟ

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	$4 \leq MOLF \leq 5$
3	ยอมรับได้	$3 \leq MOLF < 4$ Or $5 < MOLF \leq 6$
2	เฝ้าระวัง	$2 \leq MOLF < 3$ Or $6 < MOLF \leq 7$
1	แย่	$1.5 \leq MOLF < 2$ Or $7 < MOLF \leq 7.5$
0	แย่มาก	$MOLF < 1.5$ Or $MOLF > 7.5$

ปัจจัยที่ 11 การทดสอบคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในห้องชุดเปลี่ยนแทปขณะจ่ายไฟ (On Load Tap Changer Oil Quality) จะทดสอบเหมือนกับปัจจัยที่ 2 และนำค่าที่ได้มาใช้คำนวณในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 คะแนนคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในห้องชุดเปลี่ยนแทปขณะจ่ายไฟ [6]

ลำดับ	วิธีทดสอบ	$U \leq 69$ kv	$69 \text{ kv} < U < 230$ kv	$U \geq 230$ kv	คะแนน (S_i)	น้ำหนัก (W_i)
1	Dielectric Strength	≥ 45	≥ 52	≥ 60	1	3
	kV	35-45	47-52	50-60	2	
	(2 mmgap)	30-35	35-47	40-50	3	
		≤ 30	≤ 35	≤ 40	4	
2	Water Content	≤ 30	≤ 20	≤ 15	1	4
	(ppm)	30-35	20-25	15-20	2	
		35-40	25-30	20-25	3	
		≥ 40	≥ 30	≥ 25	4	

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันแต่ละตัวมาคำนวณหาช่วงคะแนนคุณภาพน้ำมัน (%OQF)

$$\%OQF = \frac{\sum_{i=1}^2 (S_i \times W_i)}{4 \times \sum_{i=1}^2 W_i} \times 100\% \quad (12)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 18 ระดับคะแนนของคุณภาพน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	$\%OQF < 30$
3	ยอมรับได้	$30 \leq \%OQF < 37.5$
2	เฝ้าระวัง	$37.5 \leq \%OQF < 50$
1	แย่	$50 \leq \%OQF < 75$
0	แย่มาก	$\%OQF \geq 75$

ปัจจัยที่ 12 การทดสอบระดับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในห้องชุดเปลี่ยนแทปขณะจ่ายไฟ (On Load Tap Changer Oil Level) จากนั้นนำค่าที่ได้มาประเมินระดับคะแนนของระดับน้ำมันหม้อแปลงในห้องชุดเปลี่ยนแทปขณะจ่ายไฟ

ตารางที่ 19 ระดับคะแนนของระดับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในห้องชุดเปลี่ยนแทปขณะจ่ายไฟ

ระดับคะแนน	สภาพ	ช่วงคะแนน
4	ดี	$5 \leq OLF \leq 6$
3	ยอมรับได้	$4 \leq OLF < 5$ Or $6 < OLF \leq 7$
2	เฝ้าระวัง	$3.5 \leq OLF < 4$ Or $7 < OLF \leq 7.5$
1	แย่	$3 \leq OLF < 3.5$ Or $7.5 < OLF \leq 8$
0	แย่มาก	$OLF < 3$ Or $OLF > 8$

หลังจากได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยมาแล้วจะนำมาใช้ในการคำนวณดัชนีวิเคราะห์เพื่อประเมินสภาพการทำงานได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีพร้อมกับหาสาเหตุและแนวทางการแก้ไขและนำคะแนนที่ได้ไปใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันประจำปีให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อยของ กฟน. โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ได้จากชุดเปลี่ยนแทปขณะจ่ายไฟ (On Load Tap Changer) คิดเป็น 40 เปอร์เซนต์ และส่วนที่ได้จากถังน้ำมันหม้อแปลง (Main Tank) คิดเป็น 60 เปอร์เซนต์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร [6]

$$HI_{Total} = 60\% \times \frac{\sum_{j=1}^{10} K_j HIF_j}{HIF_{max} \sum_{j=1}^{10} K_j} + 40\% \times \frac{\sum_{j=11}^{12} K_j HIF_j}{HIF_{max} \sum_{j=11}^{12} K_j} \quad (13)$$

หลังจากนั้นนำค่าดัชนีชี้วิเคราะห์ที่จากการคำนวณมาดูความหมายโดยใช้ตารางที่ 20 เพื่อใช้ในการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

ตารางที่ 20 ตารางดัชนีวิเคราะห์สภาพการทำงานได้ของหม้อแปลง [6]

คะแนน HI_{total}	สถานะ	ความหมาย
$85 < HI \leq 100$	ดี	บำรุงรักษาตามปกติ
$70 < HI \leq 85$	ยอมรับได้	กลับมาดูอีกครั้งภายใน 6 เดือน
$50 < HI \leq 70$	เฝ้าระวัง	วางแผนดำเนินการแก้ไขภายใน 3 เดือน
$30 < HI \leq 50$	แย่	วางแผนดำเนินการแก้ไขภายใน 1 เดือน
$0 < HI \leq 30$	แย่มาก	ดำเนินการแก้ไขทันที

3. ผลการวิจัย

จากวิธีการถ่วงน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยเสี่ยงซึ่งมีทั้งหมด 12 ปัจจัย ด้วยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบฟuzzy ทำให้ทราบถึงค่าความสำคัญของแต่ละปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 21 แต่ก่อนจะนำค่าความสำคัญของปัจจัยไปใช้ได้ ต้องคำนวณค่าความสอดคล้องก่อน เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการเปรียบเทียบค่าความสำคัญรายคู่ และค่าที่ได้จากการคำนวณต้องมีค่าไม่เกิน 0.1 ซึ่งผลจากการคำนวณปรากฏว่าได้ค่าความสอดคล้องมีค่าเท่ากับ 0.078 แสดงว่าการกำหนดระดับความสำคัญของปัจจัยจากการเปรียบเทียบรายคู่มีความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 21 แสดงผลการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักและระดับคะแนนของแต่ละปัจจัย

ลำดับที่	เกณฑ์ในการตัดสินใจ	K	ระดับคะแนน
1	DGA	26.15%	4,3,2,1,0
2	Main Oil Quality	12.28%	4,3,2,1,0
3	Tan Delta	11.20%	4,3,2,1,0
4	Temperature	8.95%	4,3,2,1,0
5	Load History	7.00%	4,3,2,1,0
6	PI	4.38%	4,3,2,1,0
7	Age	4.06%	4,3,2,1,0
8	Foundation	2.00%	4,3,2,1,0
9	Cooling System	1.58%	4,3,2,1,0
10	Main Oil Level	1.49%	4,3,2,1,0
11	OLTC Oil Quality	21.24%	4,3,2,1,0
12	OLTC Oil Level	3.03%	4,3,2,1,0

ดัชนีวิเคราะห์สภาพของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของ การไฟฟ้านครหลวงโดยวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบตรรกะคลุมเครือ

41

จากนั้นนำค่าที่ได้จากตารางที่ 21 ไปใช้ในการคำนวณค่าดัชนีวิเคราะห์ และนำคะแนนที่ได้ไปใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังประจำปี โดยทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าทั้งหมด 15 ลูก ผลของค่าดัชนีวิเคราะห์ที่ได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมด 15 ลูก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 22 พบว่ามีหม้อแปลงอยู่ในสถานะแย่ 1 ลูก ได้แก่ หม้อแปลงลูกที่ 13 มีหม้อแปลงอยู่ในสถานะเฝ้าระวัง 8 ลูก ได้แก่ หม้อแปลงลูกที่ 12, 10, 4, 8, 1, 5, 2 และ 3 มีหม้อแปลงอยู่ในสถานะยอมรับได้ 4 ลูก ได้แก่ หม้อแปลงลูกที่ 7, 6, 11 และ 9 และมีหม้อแปลงอยู่ในสถานะดี 2 ลูก ได้แก่ หม้อแปลงลูกที่ 14 และ 15 แต่

ทั้งนี้หม้อแปลงบางลูกได้รับการดำเนินการแก้ไขภายในระยะเวลาที่กำหนดในตารางดัชนีวิเคราะห์ (หม้อแปลงลูกที่ 13, 12, 10 และ 8) จึงไม่เกิดการชำรุดก่อนถึงวาระการบำรุงรักษาตามปกติ แต่หม้อแปลงที่อยู่ในสภาพเฝ้าระวังลูกอื่นๆ ที่ไม่มีการดำเนินการแก้ไข เกิดการชำรุดก่อนถึงวาระการบำรุงรักษาซึ่งจะเห็นได้ว่าผลของค่าดัชนีวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณตามวิธีการถ่วงน้ำหนักที่นำเสนอในบทความนี้สอดคล้องกับตารางดัชนีวิเคราะห์สภาพการทำงานได้ของหม้อแปลงที่แสดงในตารางที่ 20 จริง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การคำนวณค่าดัชนีวิเคราะห์ดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้ตรวจสอบสภาพการทำงานได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าของ กฟน.

ตารางที่ 22 สรุปค่าดัชนีวิเคราะห์ (HI) ของหม้อแปลงทั้งหมด 15 ลูก

หม้อแปลงในสถานีย่อย	HI	ความหมาย	ชำรุด	ไม่ชำรุด	หมายเหตุ
หม้อแปลงลูกที่ 13	41.43%	ดำเนินการแก้ไขภายใน 1 เดือน		✓	ดำเนินการแก้ไขภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 12	51.49%	ดำเนินการแก้ไขภายใน 3 เดือน		✓	ดำเนินการแก้ไขภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 10	59.44%	ดำเนินการแก้ไขภายใน 3 เดือน		✓	ดำเนินการแก้ไขภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 4	62.67%	ดำเนินการแก้ไขภายใน 3 เดือน	✓		ไม่ได้ดำเนินการภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 8	62.68%	ดำเนินการแก้ไขภายใน 3 เดือน		✓	ดำเนินการแก้ไขภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 1	66.21%	ดำเนินการแก้ไขภายใน 3 เดือน	✓		ไม่ได้ดำเนินการภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 5	66.33%	ดำเนินการแก้ไขภายใน 3 เดือน	✓		ไม่ได้ดำเนินการภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 2	66.84%	ดำเนินการแก้ไขภายใน 3 เดือน	✓		ไม่ได้ดำเนินการภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 3	68.73%	ดำเนินการแก้ไขภายใน 3 เดือน	✓		ไม่ได้ดำเนินการภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 7	72.76%	กลับมาตรวจสอบภายใน 6 เดือน		✓	กลับมาตรวจสอบภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 6	75.09%	กลับมาตรวจสอบภายใน 6 เดือน		✓	กลับมาตรวจสอบภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 11	77.34%	กลับมาตรวจสอบภายใน 6 เดือน		✓	กลับมาตรวจสอบภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 9	77.42%	กลับมาตรวจสอบภายใน 6 เดือน		✓	กลับมาตรวจสอบภายในระยะเวลาที่กำหนด
หม้อแปลงลูกที่ 14	88.29%	บำรุงรักษาตามปกติ		✓	บำรุงรักษาตามรอบเวลา
หม้อแปลงลูกที่ 15	92.08%	บำรุงรักษาตามปกติ		✓	บำรุงรักษาตามรอบเวลา

4. สรุป

วิธีการประเมินค่าดัชนีวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าของ กฟน. ด้วยวิธีการถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยเสี่ยง เพื่อจัดทำแผนบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเชิงป้องกันประจำปี ซึ่งค่าดัชนีวิเคราะห์ที่คำนวณได้นั้นขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยเสี่ยง และระดับคะแนนของแต่ละปัจจัยเสี่ยง โดยค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงได้มาจากวิธีการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์แบบฟิชชี และค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญที่คำนวณได้นั้นต้องมีความสอดคล้องกันซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.1 สำหรับการวิเคราะห์ที่มีมากกว่า 5 ปัจจัยขึ้นไป โดยการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ได้จากชุดเปลี่ยนแทปขณะจ่ายไฟ (On Load Tap Changer) และส่วนที่ได้จากถังน้ำมันหม้อแปลง (Main Tank) จากนั้นนำไปทดสอบกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าของ กฟน. ทั้งหมด 15 ลูกซึ่งผลการคำนวณดัชนีวิเคราะห์ที่ได้สอดคล้องกับสภาพการทำงานได้ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าของ กฟน.

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bozbura F.T. and Beskese A. (2007), "Prioritization of Organizational Capital Measurement Indicators Using Fuzzy AHP," International Journal of Approximate Reasoning, 44(2), 124-147.
- [2] Kwong C.K. and Bai H. (2003), "Determining the Importance Weights for the Customer Requirements in QFD Using a Fuzzy AHP with an Extent Analysis Approach," IIE Transactions, 35, 616-626.
- [3] Saaty T. L and Kearns K.P. (1985), "Analytical Planning: The Organization of Systems," Pergamon Press, New York.
- [4] Saaty T.L. (1980), "The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill International," New York, NY, U.S.A.
- [5] Jahromi N.A., Cress S., Piercy Rand wang F. (2008), "An Approach to Determine the Health Index of Power Transformers," Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation.
- [6] Jahromi A. N., Piercy R., Cress S. and Wang. F. (2009), "An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index," IEEE Electrical Insulation Magazine 25, (2): 20-34.
- [7] Infraspction Institute. (1993), "Temperature Criteria for Electrical System," January.
- [8] IEEE Std 62., (1995), "IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus," IEEE Transformers Committee.
- [9] ABB Management Service Ltd., (2007), "Handbook of Transformers,". Zurich. 2nded.