

比壓器絕緣特性診斷方法差異之研究 The Study on Diagnostics of Insulating Property of Voltage Transformer

李長興

邱敏彥

黃智賢

吳明學

顏世雄

Chang-Hsing Lee Min-Yen Chiu Chih-Hsien Huang

Ming-Xuei Wu

Shih-Hsiung Yen

工程師

經理

工程師

顧問

維護技術部

震江機電技術顧問(股)公司

Chan-Ching Electric Consulting CO. LTD.

Chan-Ching@msa.hinet.net

電力課

台灣電力公司綜合研究所

Taiwan Power Research Institute

wumx200e@yahoo.com.tw

工業材料研究所

工業技術研究院

Materials Research Laboratories
Industrial Technology Research Institute

摘要

傳統常用於變壓器絕緣特性之診斷方法有絕緣電阻量測、介質功率因數量測兩種，較新的做法為局部放電量測。本文藉由理論及實驗比較此三種診斷方法的適用時機。絕緣電阻量測與待測物之表面洩漏的關連性較大，對絕緣材料之好壞較無辨別能力，即絕緣電阻高並不意味絕緣特性良好。介質功率因數量測對於絕緣材料整體劣化程度有較高辨識度，但對於內部瑕疵則無鑑別力。局部放電量測對於絕緣材料內部之瑕疵有較佳之辨識能力，但對於絕緣材料之整體劣化程度則無法判別。

此外，本文另比較不同線上局部放電量測方法的優劣。

關鍵詞：變壓器、絕緣電阻、介質功率因數、局部放電。

Abstract

The traditional diagnostics of insulating properties of transformers are insulation resistance and dielectric power factor, and the modern approach is partial discharge test. This paper discusses the difference among these methods through theoretical analyses and experiments. The results show that there is more correlativity between insulation resistance and surface leakage, and less correlativity between insulation resistance and insulating properties. In other words, high insulation resistance doesn't mean good insulating property, and vice versa. Dielectric power factor can help to identify the degrade degree of whole insulation materials, but can't help to discriminate whether a weak point inside insulation materials or not. The partial discharge test has better performance distinguishing weak points among materials, but has no idea about degrade degree of whole insulation materials.

Besides, this paper also discusses the performances of different on-line partial discharge tests.

Keywords: Transformers, Insulation Resistance, Dielectric Power Factor, Partial Discharge.

I. 前言

變壓器因具有轉換電壓高低的能力，被廣泛用於電力系統中的每一個角落。由於變壓器的功能常位於電力系統的樞紐位置，其發生事故時，所影響的範圍非常的

大。國內外歷年來統計資料[1,2]顯示，變壓器事故多肇因於絕緣劣化。而且，從其劣化過程[3,4]來看，絕緣劣化是各種弱點的最終表現。基此，變壓器的日常點檢重點亦著重於瞭解變壓器絕緣材料的良窳。

根據絕緣材料特性，常用的測試方法[5,6]利用絕緣電阻、介質功率因數、絕緣耐壓等方式來檢測絕緣材料的好壞。然而，此類方法多需要停電，在每年僅停電檢測一次的大環境下，其時效性常顯得不足。這也是為何廠務人員每年定期檢測變壓器之絕緣特性，但因絕緣劣化所導致之變壓器事故卻未曾少過的原因之一。

隨著科技進步，陸續發展出不需停電的紅外線熱影像、油中氣體分析（速度較慢）、局部放電檢測（速度較快）等方法[7]，其中油中氣體分析僅適用於使用液體絕緣之設備，而紅外線熱影像則著重於整體溫升與表面洩漏，故此兩者皆不在本文探討的範圍。

如前所述，變壓器在每年皆有做歲修保養的情形下，仍有部份變壓器發生因絕緣劣化所導致的事故。本文的目的即在於比較目前使用的檢測方法，及探討其判定值，以期能有效辨別變壓器絕緣材料狀況之優劣。

由於電力變壓器體積大，加壓設備亦大，故本文利用一組VV接線之乾式比壓器（額定6.6 kV，耐壓11.4 kV）進行試驗，其中一台比壓器已發生故障（送電時前端之電力熔絲熔斷），而同組之另一台比壓器仍然正常。本文選用之試驗項目為目前最常用於檢測比壓器之絕緣電阻、介質功率因數及局部放電測試，結果顯示使用部分放電之檢測手法有較高的準確度，而絕緣電阻之準確度最差。基此，變壓器絕緣特性之量測不能僅依賴一種檢測手法，而是多方診斷比較。

II. 檢測原理

變壓器絕緣劣化程度的診斷方法可根據是否需要停電，分為在線式及離線式。離線式又可根據其輸入電壓之型態略分為交流及直流兩種。本節主要介紹常用的比壓器現場測試方法：絕緣電阻量測（離線式、直流）、介質功率因數量測（離線式、交流）及局部放電量測（離線式、交流），其特性示於表1，相關的測試結果示於第3節，第4節並比較離線式與在線式之局部放電量測的差異。

表 1 常見變壓器絕緣劣化檢測手法

	絕緣電阻	介質功率因數	局部放電
施加電壓	直流電 ANSI C57.12.01 Table 5[8]	交流電 (小於或等於 額定相電壓)	交流電 (1.3 倍額定 線電壓)
量測目標	洩漏電流	介質損失	放電量
參考值	歷史值	歷史值	歷史值

2-1 絕緣電阻量測[9]

絕緣材料加電壓時，其同時具有充電特性 (electric charge) 和傳導特性。絕緣材料中的偶極子 (dipole) 會受到外加電場影響而改變其排列，此現象稱之為極化，即介質的充電特性。此外，部份不受界面阻隔可以在介質內移動之帶電粒子 (charged particles)，會在兩個電極間形成洩漏電流，此為傳導特性。

絕緣電阻為施加電壓與洩漏電流間之比值，即利用絕緣材料之傳導特性來評估絕緣材料特性之好壞。絕緣介質劣化時，介質內可移動的帶電粒子會增加，故洩漏電流增加。基此，絕緣電阻愈小 (洩漏電流愈大)，則該絕緣材料的劣化程度愈高。

一般而言，空氣的絕緣能力較絕緣材料低，故絕緣材料加壓時，除了絕緣材料之內部洩漏電流外，其沿面亦可能出現洩漏電流。為避免此情形發生，可在待測物上加集電環 (guard) 以抵消沿面洩漏的影響，如圖 1。

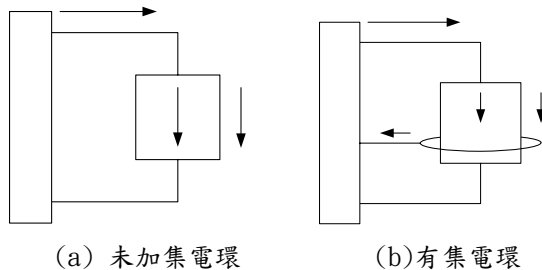


圖 1 絕緣電阻量測示意圖

然而，當絕緣材料出現瑕疵時，該瑕疵往往只佔全系統的一小部份，故不論瑕疵之劣化程度如何，其洩漏電流仍受限於其它健全部份之洩漏電流，如圖 2 所示。即如同電阻之串聯，瑕疵部位之電阻極小，但其它串接路徑上之阻值仍維持原狀，則該等效阻值仍為健全材料之阻值。因此，絕緣電阻對於內部瑕疵而言，並無法有效檢測。

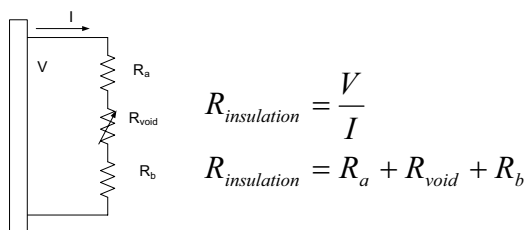


圖 2 絕緣材料瑕疵與絕緣電阻之關係

此外，以直流電源來測試交流設備，在方法上仍有爭議。基此，絕緣電阻亦常被用來判定待試物是否需要清潔表面，以進行其它絕緣試驗。此外，絕緣電阻亦會受到施加電壓大小的影響，故每次測試時須使用相同電壓。

2-2 介質功率因數[9]

如圖 3 所示，絕緣材料加壓時，充電電流領先電壓 90 度，而其極化傳導特性較如同電阻，此電阻電流則與電壓同向。充電電流的改變代表絕緣材料受潮、絕緣層短接或絕緣物形變。電阻電流的改變意味者絕緣材料碳化、表面洩漏和電暈。

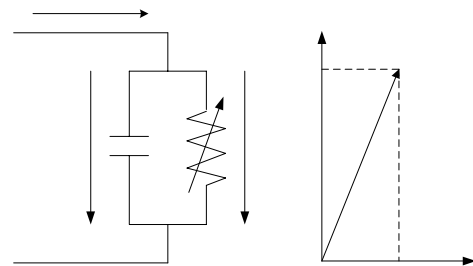


圖 3 介質功率因數量測原理

介質功率因數為絕緣材料之介質損失及視在功率之比值，所表達為絕緣系統的全部狀態。介質功率因數會受到原始設計、測試電壓高低和絕緣材料所處狀態所影響，無法反應絕緣材料實際狀態及測試時的狀況，故沒有標準值可供比對，且亦沒有實驗數據顯示介質功率因數之大小與絕緣材料之好壞有直接關連性。基此，介質功率因數量測應藉由與歷史值或相同類型設備之比較，來判斷絕緣狀態。

同 2-1 節，絕緣材料之瑕疵通常只佔全系統的極小部份，故其介質損失相對於全系統之介質損失仍屬小比例，對於介質功率因數之影響不大。基此，介質功率因數對於絕緣材料內之瑕疵的檢測效果亦不佳，但可藉由比對歷史值瞭解全系統的劣化程度。

2-3 局部放電[10, 11]

絕緣材料因劣化產生不同介質 (碳化、空洞、裂縫等) 時，其電場分佈會因為介質之特性不同而有不均勻的情形發生。此不均勻之電場有可能導致部份介質之跨壓超過自身的崩潰電壓，進而發生放電現象，如圖 4 所示。由於此放電現象僅發生在局部範圍而非全部絕緣材料，故一般稱之為局部放電。此放電現象會加速週遭之絕緣材料劣化，並會在固體絕緣材料中產生電樹 (electric tree)。一旦電樹跨接兩端導體時，則設備發生短路故障。基此，空洞或其它瑕疵所造成的局部放電，影響將來電樹破壞的進展，故局部放電量測有助於預防保養。

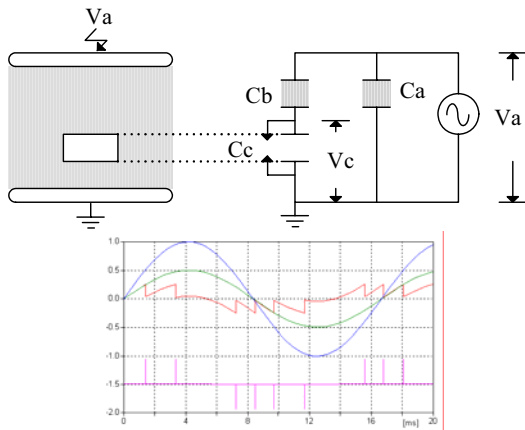


圖 4 局部放電原理示意圖

由於絕緣材料內之瑕疵會發生局部放電現象，故局部放電量測可以有效檢測絕緣材料之瑕疵劣化程度。但若絕緣材料並無瑕疵存在時，即無放電訊號產生，則局部放電量測無法辨識絕緣材料之劣化程度，即局部放電量測無法測定全系統之劣化程度。

由於局部放電現象會伴隨著不同的物理現象，如電磁場變化、電壓變化、電流變化等，所以除了離線測試外，亦可利用這些特性進行在線量測（表 2）。

表 2 局部放電之不同量測手法比較

	內部放電	外部放電
標準測試法	可	可
磁場感測器	可	可
電場感測器	可	可
音源感測器 (Acoustic Emitter)	可	可
超音波	否	可
紫外光	否	可

III. 離線試驗結果

本文節使用常見的離線試驗方法來判別待測物的絕緣劣化程度。試驗結果示於表 3，相對應之加壓程序及接線圖描述於各小節。由表 3 可觀察到絕緣電阻、介質功率因數及局部放電三種測試法中，若僅與標準值相比較的話，則局部放電量的辨別效果最好。

表 3 待測比壓器之絕緣劣化檢測結果

	測試值		標準值
	健全的比壓器	故障比壓器	
匝比	99.74	99.74	
絕緣電阻	1000 MΩ (1.8 uA, 18 kV)	5000 MΩ (0.35 uA, 18 kV)	
激磁電流	2.9 mA@2.5 kV 6.2 mA@12 kV	3.1 mA@2.5 kV 5.1 mA@12 kV	
介質功率因數	1.59 % @ 2.5 kV (1.69 mA, 0.27 W) 1.73 % @ 12 kV (1.68 mA, 0.29 W)	3.12 % @ 2.5 kV (1.79 mA, 0.56 W) 3.44 % @ 12 kV (1.80 mA, 0.62 W)	
局部放電	無放電訊號	有放電訊號 (947 pC@ 8.6 kV)	—

3-1 絕緣電阻

試驗接線圖如圖 5，根據 ANSI C57.12.01-1998，額定電壓 6.6 kV，絕緣耐壓 45 kV 之低頻絕緣耐壓等級

為 18 kV。基此，加壓時以 3 kV 為一個階段，每階段停留 1 分鐘，共分 6 個階段加至 18 kV，記錄此時之電流穩定值，試驗結果示於表 3。

因為試驗時已經擦拭比壓器表面及清潔接點，故並未使用集電環 (guard) 量測。在未使用集電環的情況下，測得之絕緣電阻會偏低。由表 3 中可觀察到，絕緣電阻量測並無法有效顯示出待測設備之絕緣良窳。



(a) 未加集電環 (b) 有集電環

圖 5 絕緣電阻量測

3-2 介質功率因數

試驗接線圖如圖 6，因為 ANSI C57.91-1995，建議之介質功率因數的試驗電壓不超過對地電壓，故以現場設備最易取得之 2.5 kV 為試驗電壓，試驗結果示於表 3。試驗時未使用集電環 (guard)，理由同前。



圖 6 介質功率因數量測

由表 3 可觀察到，已發生故障變壓器之介質功率因數雖然較差，但仍在堪用的範圍 (< 3.5 %) 內。故介質功率因數並無法單由比較標準值來有效判別待測設備之絕緣好壞，若能輔以歷史值，則可能有較好的鑑別率。

3-3 局部放電

實際接線狀況圖示於圖 7。根據 2004 年版本的 IEC60076-11，局部放電之加壓程序為 1.8 倍額定電壓 30 秒，後降為 1.3 倍額定電壓 3 分鐘，並記錄此時之局部放電量。試驗結果示於表 3。



圖 7 局部放電之標準量測

由表 3 可觀察到，故障比壓器已有放電訊號產生，且其值不小。故局部放電訊號較前述兩種試驗對於絕緣劣化程度判別更為有效。

IV. 在線試驗結果

第三節的試驗結果顯示局部放電訊號對於判斷比壓器絕緣材料的好壞有較好之辨別率。基此，本節以局部放電量測之標準測試法為基準，並同時使用常見之線上局部放電量測方法進行量測比較。

本文使用 LDIC 公司用於線上檢測之 LDP-5 (頻寬 50 MHz) 及 LDS-5，搭配電場、磁場及聲源感測器，以及超音波和紫外光偵測設備進行檢測，接線示意圖表於圖 8。量測時以 IEC60076-11 之方法為主，除記錄 1.3 倍額定電壓之局部放電量，亦同時於加壓過程中，記錄啟始放電電壓 (放電量大於 10 pC) 及熄滅放電電壓 (10 pC)。

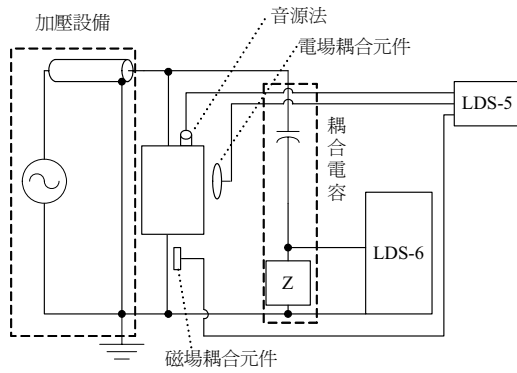
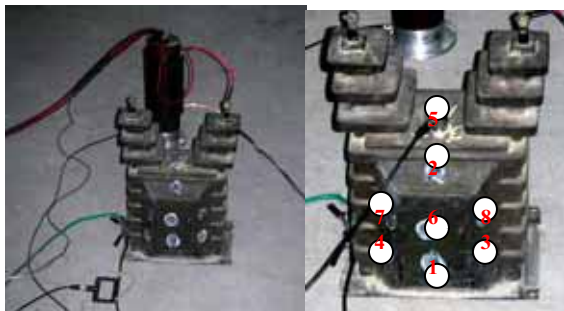


圖 8 接線示意圖

因為健全的比壓器於標準測試法時，加壓至 12 kV 皆未出現放電現象，故本節的待試物為故障變壓器。接線圖示為圖 9，試驗結果示於表 4，相對應之放電圖譜示於圖 10~圖 14。



(a) (b)使用矽膠與被試物接合
(c) 外層之 PVC 套管為自行加裝之設備，不影響感測器精準度

圖 9 感測器之形狀及擺放位置

表 4

	啟始放電電壓 ^{註 1}	熄滅放電電壓 ^{註 2}	局放值
標準測試法	7.1 kV	6.8 kV	970 pC @ 8.6 kV
L Sensor	7.1 kV	6.8 kV	1050 pC @ 8.6 kV
C Sensor	8.6 kV	7.5 kV	510 pC @ 8.7 kV
AE Sensor	9.0 kV	8.8 kV	---
超音波			---
紫外光			---

註 1：啟始放電電壓：昇壓時，所測得放電量超過 10 pC 時之電壓
註 2：熄滅放電電壓：降壓時，所測得放電量小於 10 pC 時之電壓

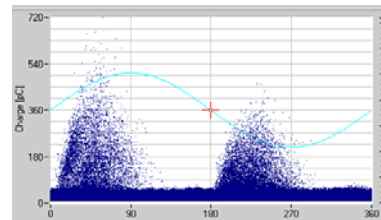


圖 10 2 號被試物的放電圖譜

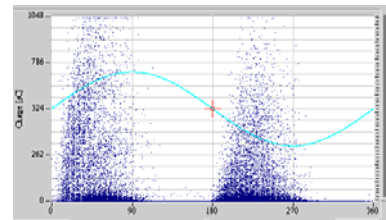


圖 11 L sensor 於不同位置所量得之被試物放電圖譜

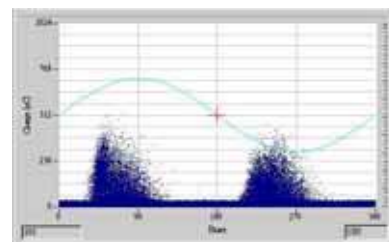


圖 12 C sensor 於不同位置所量得之被試物放電圖譜

表 5 電場耦合試驗結果

	位置 1	位置 2	位置 3
放電量	510 pC	20 pC	10 pC
放電起始電壓	9 kV	10 kV	10 kV

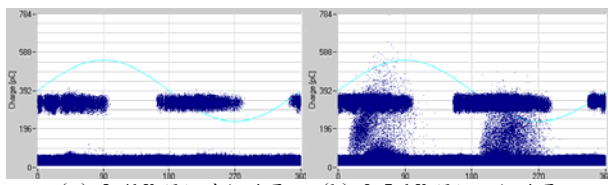
比較圖 9 (標準測試法) 及圖 10 (磁場感應) 之圖譜，以及表 3 之放電電壓及放電量，可以觀察到兩者的數據十分相似，這主要是因為標準測試法是將放電電流訊號藉由阻抗分配器轉為電壓訊號，與磁場感應方式感應放電電流大小的目的相同，故兩者結果最為相似。

比較圖 9 及圖 11 (電場感應)，則兩者之圖譜存有相角差，且電場感應方式之放電量較小，這主要是導因於電場感測器與待測物有一定距離，其電場強度衰減較大，故感測到之放電量會較小。表 5 為電場感應元件置於圖 8(c) 中不同位置的量測結果。表 5 顯示電場感測元件具有較佳之指向性。

圖 12 為待測物表面位置 6 貼有音源感測器時，由標準測試法所觀察到的放電圖譜。由圖 12 中可觀察到感測器於 3.1 kV 時造成電暈放電現象，並於 9.5 kV 時

始出現內部放電現象。主要原因為音源感測器前端為一金屬材質，在加壓過程中，其金屬尖端對待測物表面放電所導致。此外，音源感測器的金屬材質亦改變待測物的內部電場分佈，導致啟始放電電壓增加。

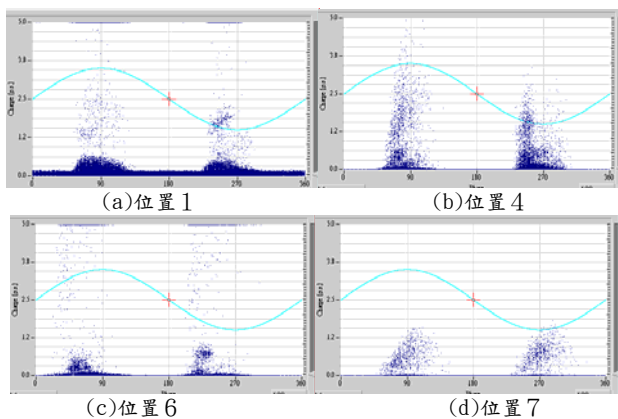
因為音源感測器並無法量化放電量，僅能以相對之大小值來表示，故無相對應之局放值，如表 6 所示。圖 13 為音源感測器貼於待測物不同位置時，由 LDS-5 所觀察到的放電圖譜。



(a) 3.1kV 開始外部放電 (b) 9.5 kV 開始內部放電
圖 13 由 LDS-6 所量測 AE Sensor 位於位置 6 時之放電圖譜

表 6 音源感測器試驗結果

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
放電量	5 pu	- pu	- pu	5 pu	- pu	5 pu	2 pu	- pu
放電起始電壓	10.5 kV	- kV	- kV	9.5 kV	- kV	9.5 kV	10.5 kV	- kV



(a)位置 1 (b)位置 4
(c)位置 6 (d)位置 7
圖 14 AE sensor 於不同位置所量得之被試物放電圖譜

比較表 5 及表 6 可觀察到，音源感測器所量得放電訊號強的部份與電場感測器所得到之結論相符合，即音源感測器具有良好的指向性

由試驗過程可知，磁場感測器之靈敏度最近於標準測試法，音源感測器則具有較佳指向性，但音源感測器亦是最可能改變放電特性的感測器。

除前述之磁場感測器、電場感測器及音源感測器外，本文另使用紫外光及超音波設備進行量測。量測結果顯示，紫外光及超音波設備並無法檢測出待測物之放電情形。

V. 結論

本研究係對已發生故障之器材經實際試驗及由理論上獲得如下結論：

- (1) 絕緣電阻對於判定絕緣材料好壞之檢測能力最差，但可用於確認待測物表面之清潔與否。

- (2) 介質電力因數對於絕緣材料整體劣化程度之辨別最為有效(需比較歷史值)，但其無法判別絕緣材料有無瑕疵存在。
- (3) 局部放電則與介質電力因數相反，其對於絕緣材料瑕疵之檢則最具效果，但是對於絕緣材料整體之劣化程度則無法辨別。

此外，在現行的線上局部放電量測方法中，磁場感應式的效果最為靈敏，音源感測器的指向性最佳，但易造成設備的外面放電，改變放電特性，且量測範圍小，需重覆多次方能找到，故容易造成誤判斷。此外，紫外光及超音波設備則不適用於內部放電的量測。

綜合前述試驗，比壓器絕緣特性之診斷使用介質功率因數及局部放電量測可兼顧絕緣材料全體之劣化程度及部份瑕疵之劣化程度。

參考文獻

- [1] 蔡世育, 張文曜 “近十年電力變壓器故障數量統計及原因分析”, 2003 電力研討會, pp. 947-952。
- [2] HV testing, Monitoring and Diagnostics Seminar, Taiwan, June 2004
- [3] 林育勳, “數位局部放電量測應用於模鑄式比流器絕緣狀態之評估”, 國立台灣科技大學博士論文, 民國 93
- [4] 林朝宏, “樹脂式變壓器加速壽命研究”, 國立清華大學碩士論文, 民國 90
- [5] IEEE STD. C57.12.91-2001, IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers.
- [6] IEEE STD 4-1995, IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing
- [7] IEEE Std 62-1995, IEEE guide for diagnostic filed testing of electric power apparatus.
- [8] H. M. Ryan, “High Voltage Testing and Engineer”, IEE POWER AND ENERGY SERIES 32.
- [9] IEC 60076-11, Power transformers – Dry-type transformers
- [10] IEEE Std C57.124-1991, IEEE Recommended Practice for the Detection of Partial Discharge and the Measurement of Apparent Charge in Dry-Type Transformers.