

發電機絕緣診斷之案例探討

Case Study on Insulation Diagnosis for Generator

李長興 邱敏彥 黃智賢 顏世雄
台灣震江電力科技股份有限公司 工研院材化所
Lee Chang-Hsing, Chiu Min-Yen, Huang Chih-Hsien Yen Shih-Shong
Power Diagnostic Service Co., Ltd. ITRI

關鍵字：發電機、局部放電、介質損失因數、阻尼振盪波電源、極低頻電源

1、背景

一般發電機的非破壞性絕緣診斷包含絕緣電阻量測，介質損失因數量測，以及局部放電量測。絕緣電阻及介質損失因數代表著絕緣材料的整體絕緣狀態，其延伸資訊（極化指數及介質損失因數增加量）代表吸濕狀態。局部放電量測則是檢測絕緣材料之瑕疵的劣化狀態，可用來評估絕緣崩潰事故的風險。

由於發電機具有大的靜電容量，交流測試電源的容量一直是現場測試的重要考量之一。同樣的問題亦發生在電纜系統的現場交流電源測試，而且已有替代性的交流測試電源被開發出來：極低頻（Very Low Frequency, VLF）電源[1]，和阻尼交流（Damped AC, DAC）電源[2]。因此，本文利用這兩種替代電流做為發電機的現場測試電源：局部放電量測，及介質損失因數量測。

筆者以有瑕疵的發電機作為例子，用來比較使用不同測試電源的不同檢測手法效果：使用直流電源進行絕緣電阻量測；使用極低頻電源進行介質損失因數量測[3][4]，以及使用阻尼交流電源進行局部放電量測[5][6]。

測試結果顯示：絕緣電阻量測易受到環境因素影響，故在數據判讀時需注意小心。局部放電量測及介質損失因數量測，需要將套管和線圈被分開測試。試驗結果顯示：受測發電機中有兩種型式的瑕疵，一種位在套管中，一種位在線圈中。

因為現場恰有套管備料，故套管修復完成後，屬於套管的瑕疵已不再被檢測出。而發電機線圈的修繕較不易，受制於運轉壓力，僅能在確認有瑕疵後，重新上線運轉，並安裝局部放電監控儀器，監控瑕疵的劣化情形，並待下一次歲修時，進行修復。

2、量測方法

2.1 介質損失因數

圖1所示為絕緣材料的等效電路，RV和CV是絕緣材料的等效電阻及等效電容。當交流電壓施加到絕緣材料上時，洩漏電流（IT）可分為兩個部份：IR和IC。IR和IC的比值即為介質損失因數，或稱為 $\tan(\delta)$ ，如式(1)所示。同時可改寫成 $1/(2\pi fRC)$ ，式中f為測試電壓頻率。

$$\tan(\delta) = I_R / I_C = Z_C / Z_R = (V/R) / (2\pi fCV) = 1 / (2\pi fRC) \quad (1)$$

根據式(1)，介質損失因數會隨著頻率減少而變大，如圖2所示。換言之，絕緣材料之絕緣電阻的微弱變化，在較低的測試電壓頻率條件下，介質損失因數會有比較明顯的觀察結果。

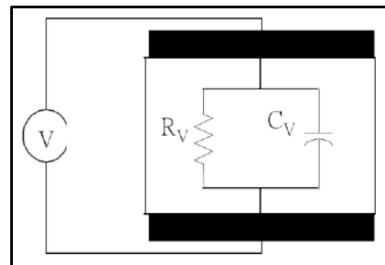


圖1 絕緣材料的等效電路

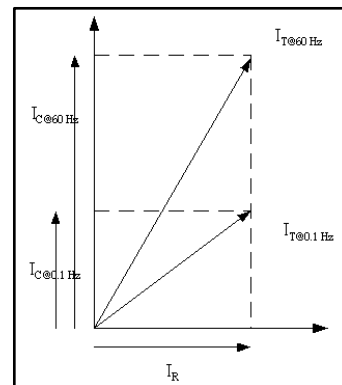
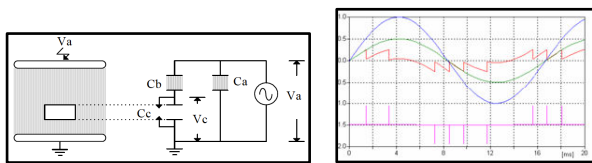


圖2 不同頻率下之絕緣材料的洩漏電流相量

2.2 局部放電量測[7]

圖 3 之等效電路係用來說明局部放電現象如何發生。絕緣材料中的瑕疵與健全的絕緣材料形成分壓電路 (C2:C1)，並在其中產生不同的電場強度。一旦瑕疵中的電場強度大於瑕疵的崩潰場強，則會在瑕疵點發生局部放電現象，如圖 3b 所示。

一旦發生放電現象時，其會伴隨著光、聲音、電磁暫態、熱等物理現象，局部放電量測即藉由偵測這些現象的存在，來判別是否有局部放電現象存在，如圖 4 所示。由於這類型的瑕疵都很小，故不容易影響到絕緣電阻及介質損失因數的量測結果，且僅有局部放電量測能有效地量測到這些瑕疵的存在。



(a) 等效電路 (b) 波形

圖 3 絕緣材料中有氣泡的案例

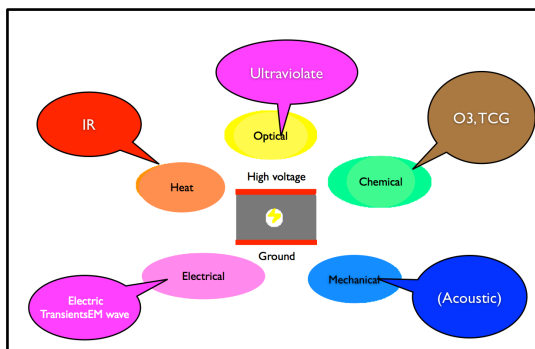


圖 4 伴隨局部放電的物理現象

3、電壓源

3.1 極低頻 (Very Low Frequency, VLF) 電壓源

極低頻電壓源為一個頻率低於 1 Hz 的交流電壓，常見的頻率為 0.1 Hz。式(2)所示為靜電容量為 C 的發電機，加頻率為 f 的電壓至 V 時所需要的容量 (Q)。在相同條件下，使用極低頻電壓源所需要的電能僅為 60 Hz 頻率的 1/600，這意味著極低頻電壓源的體積及重量將可以大幅縮小。

$$Q = 2\pi f C V^2 \quad (2)$$

目前有多種的極低頻電壓，如圖 5 所示。其中，僅有正弦波形的極低頻電壓可作為絕緣診斷用，其餘的型式僅能

用於耐電壓試驗。

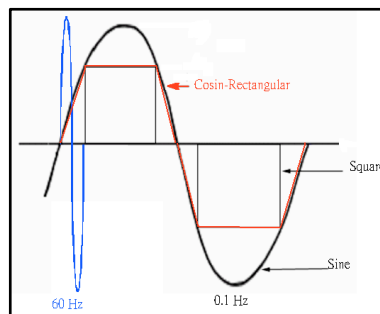


圖 5 不同型式之極低頻電壓波形

3.2 阻尼振盪波交流 (Damped AC, DAC) 電壓源

振盪波測試系統 (Oscillating Wave Test System, OWTS) [1] 即是使用阻尼振盪波電壓源的測試系統，其線路架構如圖 6 所示。直流電壓源用來對受測物充電，當受測物充電至測試電壓時，使用以 IGBT 組成之快速開關，快速將受測物與系統內之電感接地，使其產生線路自然共振 (受測物的電容與系統的電感)，如圖 7 所示。因為電壓源為直流電壓源，而共振機制為線路自然共振，故阻尼振盪波交流電壓源具有所需容量小，且量測效果與市頻交流電壓源相似的優點。每次的測試波形如圖 7 所示，稱為一次衝擊 (shot)。

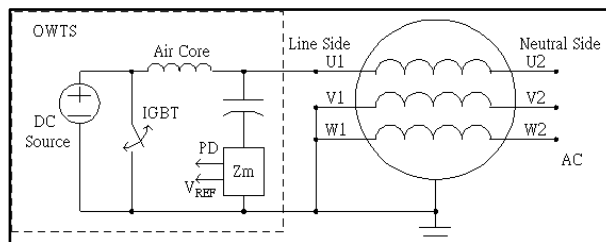


圖 6 振盪波測試系統架構

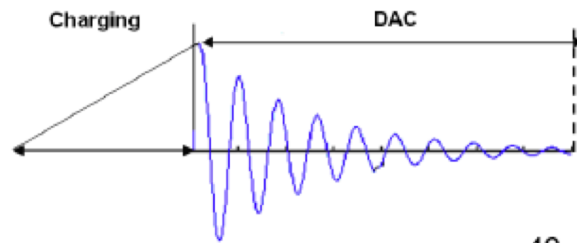


圖 7 阻尼振盪波電壓的波形

4、現場測試

一個有三台發電機組的發電廠被用來當作案例。在歲修期間，發電機之定子線圈的絕緣診斷項目為絕緣電阻量測、介質損失因數量測、以及局部放電量測。1 號及 2 號發電機

之定子的絕緣電阻皆為數十 GΩ，而 3 號發電機之定子的絕緣電阻約為數百 MΩ。其差異的原因為 3 號發電機在兩天測試，且定子沒有加熱乾燥。

局部放電量測結果顯示發電機定子線圈有異常放電訊號。介質損失因數量測被用來區分瑕疵位在發電機的那個部件中。

4.1 局部放電量測

圖 8 為局部放電量測之測試程序，測試的步階電壓為 2 kV_{RMS}。每個電壓等級皆執行 10 次衝擊 (shots)，最高電壓等級則執行 50 次測試 [5, 6]。在這些量測中，大部份的局部放電訊號皆立即出現，但少部份的異常局部放電現象則需要等到第 4 次衝擊後才開始出現。基此，在量測時，每個電壓等級的測試次數需大於 4 次，以避免沒量到局部放電訊號。

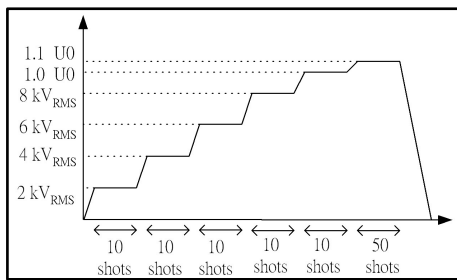


圖 8 電壓等級及測試次數

圖 9 及圖 10 為額定電壓時的相位圖譜 (phase-resolved partial discharge, PRPD)。圖 9 顯示線圈內的正常局部放電現象，圖 10 則為異常的局部放電現象。

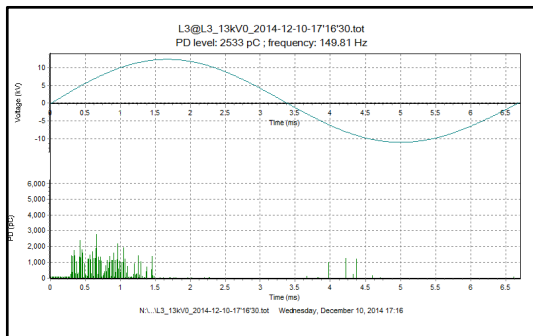


圖 9 阻尼振盪波測試系統量測到的正常相位圖譜

因為局部放電量測對象包含了線圈及套管，故線圈和套管被解聯以釐清異常局部放電訊號的源頭。線圈本體的局部放電現象顯示，在 1.1 倍對地額定電壓下，線圈並沒有局部放電現象的存在。基此，瑕疵點被推論位於套管內。

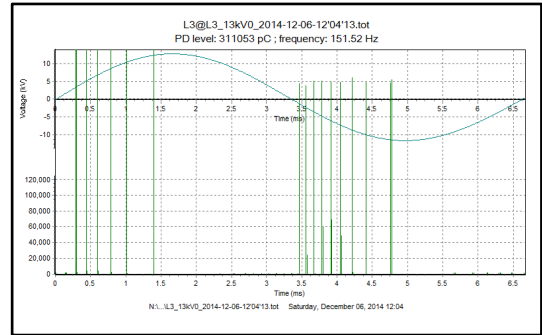


圖 10 阻尼振盪波測試系統量測到的異常相位圖譜

然而，仍然有一組線圈在移除套管後，仍存在異常局部放電訊號。因此，使用超聲波偵測器 (CTRL UL101) 進行訊號源的定位。因為阻尼振盪波電源的每次測試時間短，不利於使用超聲波偵測器定位，故改使用極低頻電源做測電壓源，進行訊號定位。定位結果顯示，線圈深層位置有異常聲響存在。

4.2 介質損失因數

因為套管的靜電容量小，故阻尼振盪波電源之振盪頻率過高，無法進行量測。故改使用極低頻電源之介質損失因數量測，用來協助確認前述異常局部放電現象的部件。#2 發電機之線路端的套管的量測結果如圖 12 所示，C 相之套管的介質損失因數明顯高於另外兩相。基此，建議更換 C 相之套管。在更換完成後，全線圈 (含套管) 的局部放電量測顯示，無局部放電現象。

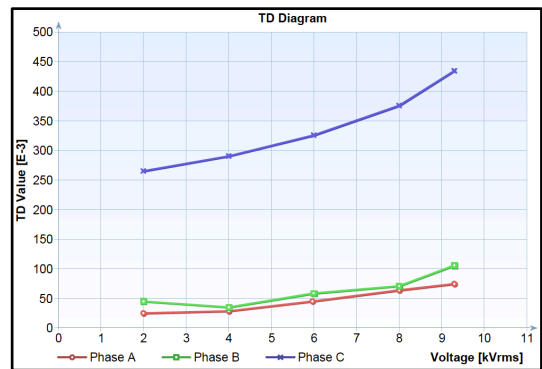


圖 12 套管之介質損失因數的增加率

因為套管和線圈本體的靜電容量差距很大，故筆者分別量測套管，線圈本體，及全線圈的介質損失因數，結果示於表 1。表 1 顯示，有瑕疵之線路端套管有較高之介質損失因數，但其值對於全線圈之介質損失因數則無甚影響。在此條件下，套管與線圈本體的介質損失因數建議應分別施作，以得到精準的判讀。

表 1 介質損失因數量測摘要

施加電壓	線路端套管			中性端套管			線圈本體			全線圈		
	I (uA)	C (nF)	TD (%)	I (uA)	C (nF)	TD (%)	I (uA)	C (nF)	TD (%)	I (uA)	C (nF)	TD (%)
2 kV	2	2	265	2	2	24.7	646	516	13.5	649	520	14.5
4 kV	4	2	290	3	2	28.6	1296	520	15.3	1304	521	16.4
6 kV	6	2	326	5	2	44.8	1950	518	17.2	1961	521	18.5
8 kV	8	2	376	7	2	63.9	2604	519	19.4	2618	522	20.9
9.3 kV	10	2	435	9	2	74.5	3031	520	20.9	3049	522	22.6

5、結論

在本文之絕緣診斷手法中，絕緣電阻量測最容易受到週遭環境影響，特別是濕度。因此，關於量測結果的判讀需要格外小心。

由阻尼振盪波電源所執行的局部放電量測，在本文中展示出良好的效果。然而，在使用阻尼振盪波電源進行局部放電量測時，需要注意其每一電壓等級的測試次數建議要多於 4 次，以確實激發局部放電現象。

因為套管和線圈的靜電容量差異很大，套管之瑕疵所增加的洩漏電流，很容易因為良好線圈本身的大洩漏電流影響而被忽略，導致偏低的介質損失因數，進而得到良好的絕緣狀態結論。基此，若受測物之各部件的靜電容量差異大時，建議將受測物之各部件解聯，個別量測其介質損失因數，以得到適切的絕緣診斷。

本文中的交流替代電源：阻尼振盪波電源及極低頻電源，皆顯示出良好的診斷效果，並且可以適用於發電機的絕緣診斷。

6、參考文獻

- [1] IEEE Std. 400.2, IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (Less than 1 Hz)
- [2] IEEE P400.4, Draft Guide for Field-Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current Voltage (DAC)
- [3] IEEE Std. 286, IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.
- [4] IEEE Std. 433, IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery with High Voltage at Very Low Frequency.
- [5] E. Gulski, H. J. van Breen, J. J. Smit, P. N. Seitz, P. Schikarski, "Partial Discharge Detection in Generator Stator

Insulation Using Oscillating Voltage Waves", Proceeding on Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 2001, p.p. 331-p.p. 334.

- [6] Come van Eeden, "Measurement of partial discharges and dielectric losses on rotating machines using damped AC voltages", Master's Thesis, 2010.
- [7] IEC 60034-27: Rotating electrical machines - part 27: off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines