



電機設備安全監測

三聯科技股份有限公司 / 洪德憲



一、前言

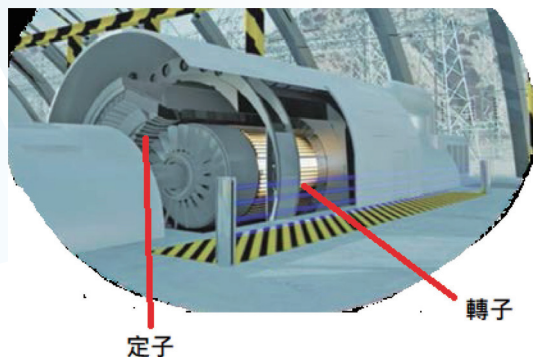
旋轉電機定子繞組的絕緣崩潰，並非一朝一夕所造成，但繞組的絕緣崩潰會引起立即性的破壞，藉由長期追蹤/監測繞組的絕緣，可掌握定子繞組絕緣劣化趨勢，實行預知維修策略，防止突發性故障及減少週期性停機維護次數，進而降低整體維護成本。

部份放電為旋轉電機定子繞組絕緣劣化的主要特徵之一，其為一高頻脈衝之電流信號，可藉由80pF電容器將此高頻信號耦合收集，經監測主機將放電訊號與雜訊進行分離，再由軟體對資料進行分析圖解，並可與IRIS統計資料庫比對或經由長期記錄之趨勢曲線，掌握旋轉電機定子繞組絕緣狀態。

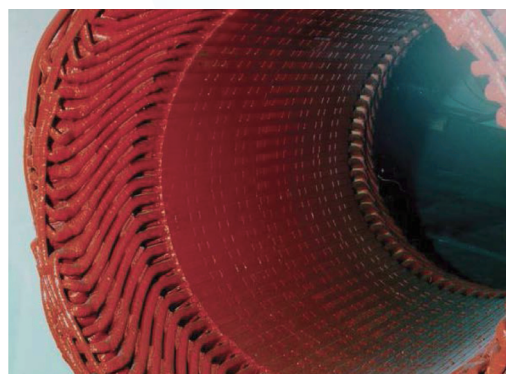
二、量測說明

1. 旋轉電機安全監測必要性

發電機與高壓電動馬達重要基本構造為定子與轉子，定子與轉子內佈滿線圈及矽鋼片(圖1,2)並封閉在安全外殼內，無法透視內部運轉情形，只能透過許多安全監測設備監視旋轉電機是否正常運轉，例如，振動、溫度、輸出頻率及絕緣強度等。平常運轉的時候，旋轉電機皆處於高速轉動與高電壓狀態下，矽鋼片及線圈絕緣強度承受強大壓力，若是旋轉電機在製造過程，因絕緣施工時稍有不甚或品管沒有檢出瑕疵點，當旋轉電機運轉時，便會造成產生電機局部放電的因素。



▲ 圖1



▲ 圖2

2. 旋轉電機發生故障比率可以歸納以下幾點

- (1) 50%來自軸承和振動問題－機械故障
解決辦法：在線振動監測，或旋轉電機運轉時發生機械故障時，工程師可以在一般保養及日常巡檢時，尚可感覺到旋轉電機因機械故障所造成振動及運轉時的發出異音，可以即時做必要防護。
- (2) 40%來自定子繞組的絕緣問題－電氣故障
解決辦法：在線局放監測，工程師無法以保養巡檢經驗得知故障

(3) 10%來自轉子繞組問題－電氣故障，在線局放監測

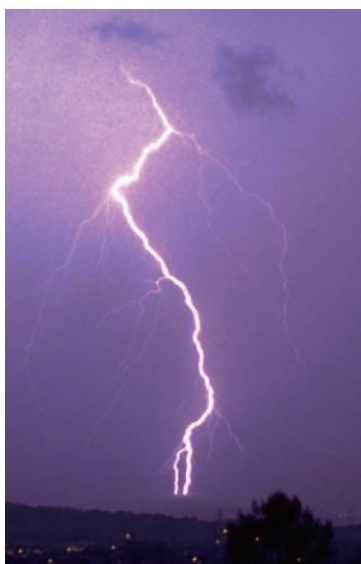
解決辦法：在線磁通監測，工程師無法以保養巡檢經驗得知故障

3. 甚麼是局部放電？

局部放電是發生在高壓絕緣空隙中或間隙中的小電火花，絕緣體隨著振動，在高溫條件下運作，或受到油、水分及其他化學物質的污染，其功能逐漸退化，局放活動將會遞增。當電壓應力超過了在這些空隙中存在的氣體的電擊穿強度時，局放就會發生。不同的材料具有不同的電擊穿強度：

空氣的電壓擊穿強度： $E_{air} = V_{air} / d_{air} = 3 \text{ kV/mm}$ (圖3)

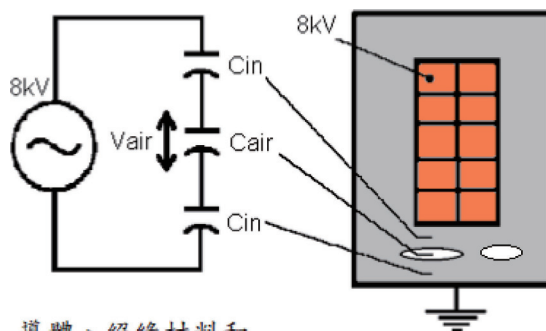
絕緣材料的電壓擊穿強度： $E_{ins} \approx 300 \text{ kV/mm}$



▲ 圖3

之前所述，旋轉電機在製造過程，因絕緣施工時稍有不甚或品管沒有檢出瑕疵點，當旋轉電機運轉時，便會造成產生電機局部放電的因素。由圖4顯示出導體、絕緣材料和空隙之

間的等效電路，空隙與絕緣材料同時存在時，由於兩者之間所承受電壓擊穿的絕緣強度相差將近100倍，電壓增加且超過空隙電壓擊穿強度後，造成短暫放電，當放電後，高能量電子會對絕緣物質產生不同物理及化學效應，每次放電對空隙外部邊緣位置會發生絕緣材料化學變化並裂解，造成空隙絕緣強度會慢慢降低及擴大，絕緣材料絕緣強度降低，更加速局部放電能量擴大。若是空隙不只有一個，更是容易因部分放電造成加速空隙增大及絕緣材料絕緣強度降低速度，最後造成旋轉電機故障。



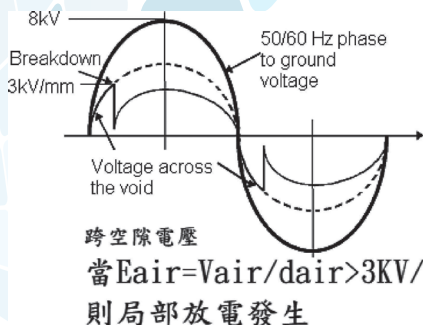
導體、絕緣材料和空隙之間的等效電路

▲ 圖4

由於局部放電只是發生在絕緣體部分位置短接而非形成導電的現象，且局部放電並非一夕之間便會造成旋轉電機故障，而是慢慢破壞絕緣強度，工程師不易由平常保養活動能夠察覺，若局部放電發生在老化了的定子繞組絕緣系統中，在定子繞組中產生小放電脈衝。此類小放電脈衝的幅值和數量大小取決於絕緣惡化的程度。局部放電脈衝的幅值越大，數量越多，則絕緣老化的程度越深。局部放電信號常常混雜於來自電量、輸出線路上的電弧等電氣雜訊信號中。因此可以利用在導體發生電流脈



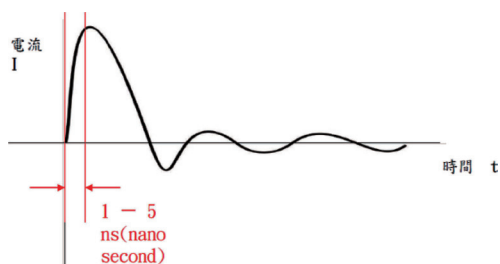
衡量監測局部放電狀況(圖5)，由放電能量趨勢，判斷是否需要停止設備運轉予以進一步檢修。



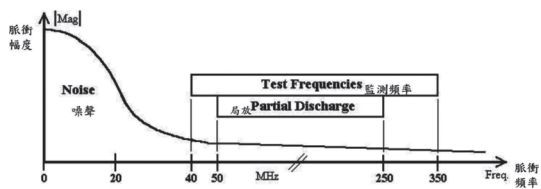
▲ 圖5

4. 局部放電脈衝的特性

局部放電是一短暫上升速度極快的超窄電流脈衝，脈衝的上升時間只有1到5ns，由應用公式計算公式 $f = 1/T = 1/(4 \times t)$ ，f—頻率，t—上升時間，得到局部放電脈衝發生在頻率約在50到250MHz之間(圖6、圖7)。



▲ 圖6



▲ 圖7

由於局部放電介於50至250MHz之間，旋轉電機運轉時，由於環境雜訊干擾，例如開關

設備動作、電動工具、點焊機、電機滑環或電器電源開關所造成電火花及通訊控制訊號等，皆會影響局部放電分析。如何將雜訊隔離，必須要搭配穩定持續性設備，避免局部放電分析誤判斷。以下為旋轉電機部分放電分析所作雜訊隔離方式及設備介紹。

電動機和發電機的耦合器(圖8)，80pF的環氧雲母電容器簡稱 EMC(Epoxy-Mica Capacitor)，直接連接到高壓母線出口端，此稱為母線耦合器。80pF電容器實際上相當於一個濾波器(HI-PASS FILTER)，容抗公式計算結果可以得到部分放電的40MHz以上高頻信號容易通過，並有效隔離低頻高能量的雜訊。

$$X_c = 1/2 \pi f c$$

$$f = 40 \text{ MHz} \times 80 \text{ Pf} \approx 50 \Omega$$

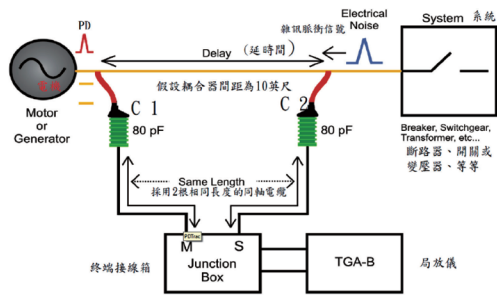
$$f = 60 \text{ Hz} \times 80 \text{ Pf} \approx 33 \text{ M}\Omega$$



▲ 圖8

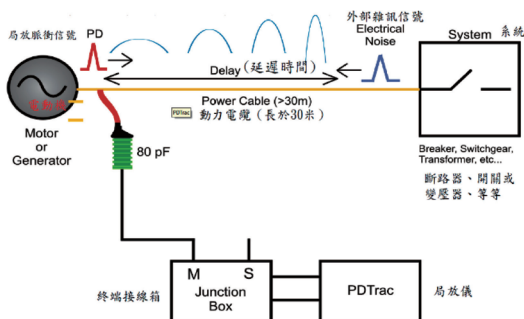
定向雜訊分離技術，應用於匯流排供電，在每相安裝兩只環氧雲母電容器(圖9)，兩只電容器安裝位置距離至少10英尺以上，當部分放電訊號由旋轉電機產生後傳導至系統端方向，部分放電訊號傳導並無方向，會由電容器C1進入Junction Box M端及電容器C2進入Junction

Box S端，S端與M端的部分放電訊號的延遲時間為正向與固定，系統會判斷Junction Box S端的訊號為有效的旋轉電機部分放電訊號予以紀錄。反之，由系統所產生部分放電訊號亦會從電容器C2進入Junction Box S端及電容器C1進入Junction Box M端，S端與M端的部分放電訊號的延遲時間為負向與固定，局放儀系統會判斷Junction Box S端的訊號為無效的旋轉電機部分放電訊號予以剔除。

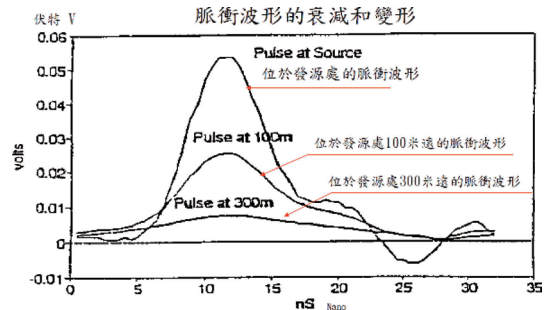


▲ 圖9

定形雜訊分離技術，應用在電力電纜線超過30公尺供電系統(圖10)，由於從系統端所產生的部分放電訊號或高頻雜訊經過長距離電纜傳導通過電容器進入Junction Box M端，但部分放電訊號會衰減(圖11)及高頻雜訊與旋轉電機的部分放電訊號不同，局放儀系統會判斷由系統端進入Junction Box M端的訊號為無效的部份放電訊號予以剔除。



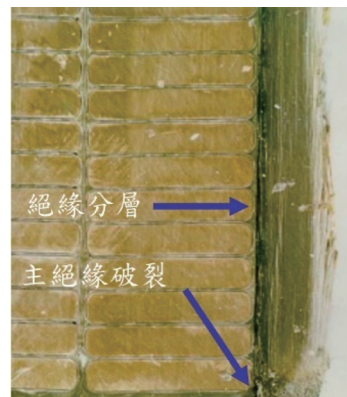
▲ 圖10



▲ 圖11

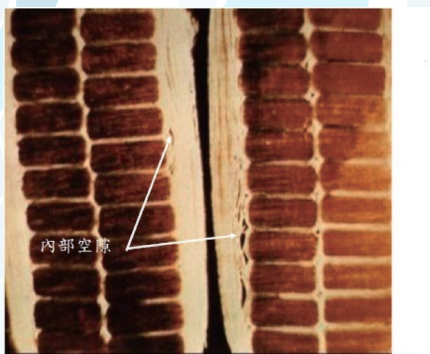
5. 旋轉電機絕緣材料劣化造成局部放電現象

- (1) 熱退化現象(圖12)，旋轉電機持續運轉、過載或者三相負載不平衡情況，冷卻系統未能及時排除熱氣，整個旋轉電機溫度提高，並造成繞組溫度過熱，合成樹脂失去粘著強度，絕緣層間逐漸鬆綁，導體在主絕緣中發生振動狀況，導致局部放電發生在絕緣層間或絕緣與導體之間。



▲ 圖12

- (2) 浸漬不良現象(圖13)，製造旋轉電機時，因製造不良及加工工藝不當，凡立水浸漬不平均，造成凡立水乾燥後，發生線圈部分位置機械結構力不足，造成絕緣材料中形成空隙，局部放電便會發生在空隙中並不斷侵蝕絕緣材料。



11,000馬力的電動機繞組

▲ 圖13

(3) 繞組鬆動-1(圖14)，因製造不良及加工工藝不當，材料使用不當，潤滑油洩漏，棒條之間或轉子和定子繞組之間的磁場所造成機械力的作用，由於繞組端部振動，線圈繞組鬆動並在槽間運動導致棒條表面絕緣磨損(圖15)(產生槽放電)，產生臭氧 O_3 + N_2 NO_3^- 生成硝酸根，局部放電發生在主絕緣表面和鐵芯之間



鬆動的棒條表面被磨蝕



由於繞組端部振動，導致棒條磨損(產生槽放電)

▲ 圖14



取自200MW的汽輪發電機

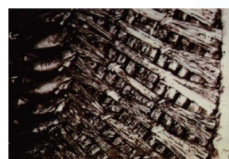
▲ 圖15

(4) 端部繞組間距不足，發生空冷機相間局部放電，產生臭氧造成白色粉末(圖16)。



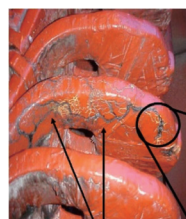
▲ 圖16

(5) 繞組端部污染(圖17、圖18)，當旋轉電機運轉時，由於保養問題，沒有清除塵埃和油污形成黑色污垢，繞組表面電阻因而減少，繞組表面被侵蝕，形成電跟蹤(Electrical Tracking)，產生局部放電痕跡。



放電痕跡橫跨繞組支架(清潔繞組端部後所見)

▲ 圖17



被侵蝕的繞組表面



電跟蹤形成的放電痕跡

▲ 圖18

6. 環氧雲母電容器安裝

(1) 安裝雲母電容器時，每台發電機與高壓馬

達的額定電壓皆不相同，需要提供符合額定電壓的電容器，可以依表一列不同電壓檔位電容器，選擇正確電容器，避免使用額定電壓過低或者是過高，造成電容器因額定電壓不足損壞電容器或投資過高成本經濟效益過低。

▼ 表1

EMC Voltage Rating	6.9 kV	16 kV	25 kV	28 kV
DEV @ 1pC	8.0 kV	18.6 kV	29.0 kV	32.3kV
AC Hipot	15 kVrms	33 kVrms	51 kVrms	57 kVrms
Mass	11 kg	1.6 kg	2.0 kg	2.0 kg
Height	95mm (3.75")	127mm (5.0")	206mm (8.1")	206mm (8.1")
Diameter	86mm (3-3/8")	86mm (3-3/8")	86mm (3-3/8")	86mm (3-3/8")

- (2) 電容器安裝的位置是在高壓環境及電纜接線箱侷促空間(圖19)，電容器安裝不能夠馬虎，不可以因電纜接線箱空間狹窄，不考慮電容器之間安全距離，電容器必須要避免碰觸。



▲ 圖19

- (3) 高壓馬達及電纜線接線箱有可能位於生產化學產品，接線箱皆是防爆型箱體，不可以為安裝電容器而破壞箱體，必須另外製作治具(圖20)，作為安裝電容器及訊號線的基座，牢牢固定不可發生鬆脫狀況(圖21)。



▲ 圖20



▲ 圖21

- (4) 電容器安裝完畢，為避免在安裝時，造成電容器表面灰塵汙染，需要將電容器表面再做一次清潔(圖22)。



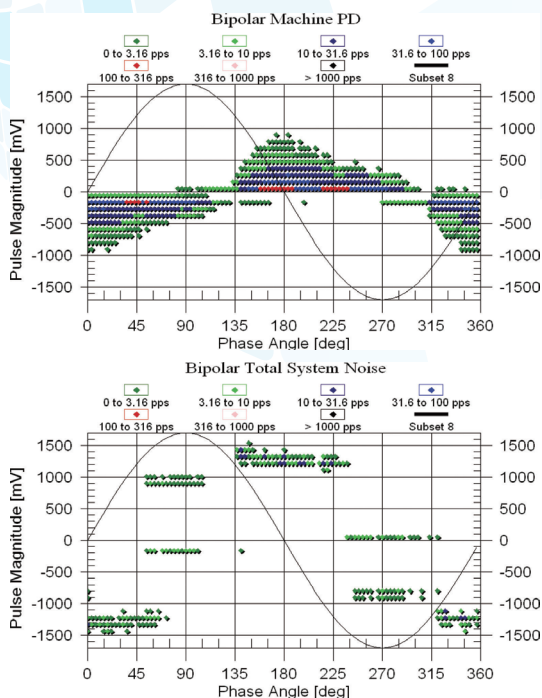
▲ 圖22



7. 數據量測與分析

放電圖譜說明：

所有測試結果皆以數位化儲存於電腦內，以各類圖譜來解析測試結果，包含2D紀錄圖形、放電脈衝相位圖及立體3D圖（脈衝數量、放電量、相角）。

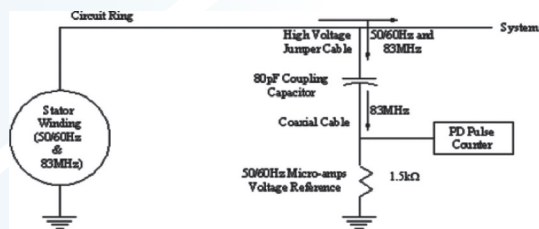


▲ 圖23 繞組局部放電圖譜雜訊圖譜

不同的放電型態會有不同的放電特性，以放電量與放電角度的關係及重複來辨別放電型態，並依此來辨別是雜訊或者是放電訊號（圖23）。

8. PD信號量測迴路圖示(圖24)

當83MHz局部放電訊號後由旋轉電機產生後，不會只有局部放電訊號亦會雜夾電力頻率或雜訊，環氧雲母電容器會將電力頻率或低頻雜訊隔離掉，量取正確局部放電值。

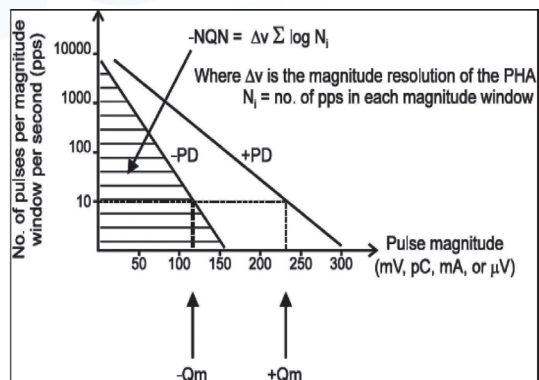


▲ 圖24

9. PD量測數據定義(Qm&NQN) (圖25)

Qm：放電幅值(單位mV，以10pps為基準)

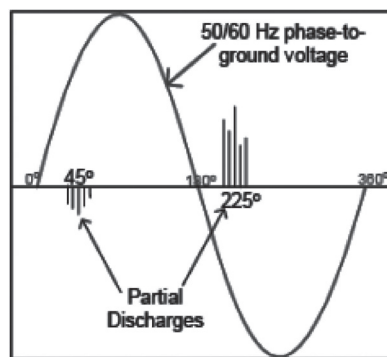
NQN：放電數量(PPS)



▲ 圖25

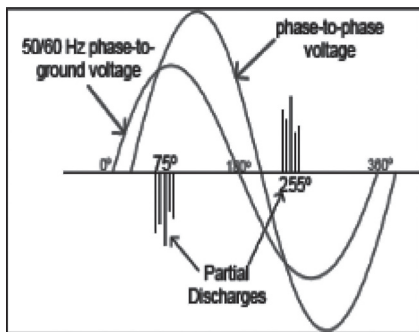
10. PD圖譜說明及分類(圖26)

(1) 典型PD 45°/225°---Phase Ground (相對地放電，槽內放電，電機絕緣系統劣化)



▲ 圖26

(2) 非典型PD(圖27)移位 +/-30°/15°/75°，195°/255°---Phase Phase(相對相放電，外部放電，電機端部繞組相間放電)



▲ 圖27

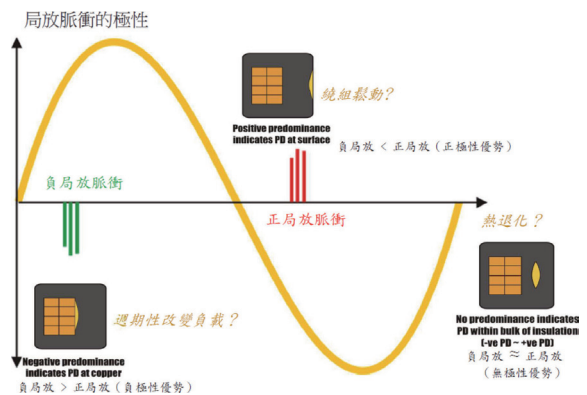
- (3) 移位 $\pm 120^\circ$, $345^\circ/105^\circ$, $165^\circ/285^\circ$ Cross coupling (相間耦合, 它相放電感應信號)
- (4) 其他
 $0^\circ/180^\circ$ ---來自轉機震動所引起, 發生於鬆動或氧化的聯接處中的電弧現象
 $90^\circ/270^\circ$ ---來自空氣中的電弧或電暈現象, 或絕緣塗層失效因發之電暈現象
 雜訊 $0^\circ\sim 360^\circ$ ---為寬帶訊號橫跨整個交流週波, 此類信號振幅小

11. 局部放電脈衝的極性(圖28)及故障原因判斷關係

- (1) 當無極性優勢時 (+PD ~ PD), 局部放電多半發生在繞組絕緣內部的空隙中, 產生的根源有:
- 熱退化問題
 - 浸漬不良問題
- (2) 當正極性優勢時 (+PD > PD), 局部放電多半發生在繞組絕緣表面的空隙中, 產生的根源有:
- 繞組鬆動問題
 - 電壓應力塗層惡化問題 (半導體塗層或分級塗層惡化)
- (3) 當負極性優勢時 (+PD < PD), 局部放電多半發生在繞組銅導體表面的空隙中, 產

生的根源有:

- 週期性變負荷問題
- 過熱問題 (由於過熱而導致的繞組銅導體表面的空隙)



▲ 圖28

12. 旋轉電機基本資料

▼ 表2 Machine:1X-401

Manufacturer	***	安裝年份	KV	11.4
Machine type	MOTOR	KW		500
RPM	1800	Frequency		60

▼ 表3 旋轉電機部分放電量測量數據表

Date/Time	Phase	Qm+	Qm-	電機現場條件	IRIS Database Level
8/2/2017 10:49:09	R	140	131	環境溫度:33°C	50%
8/2/2017 10:40:51	S	228	222		75%
8/2/2017 10:41:33	T	266	143	環境濕度:58%	75%

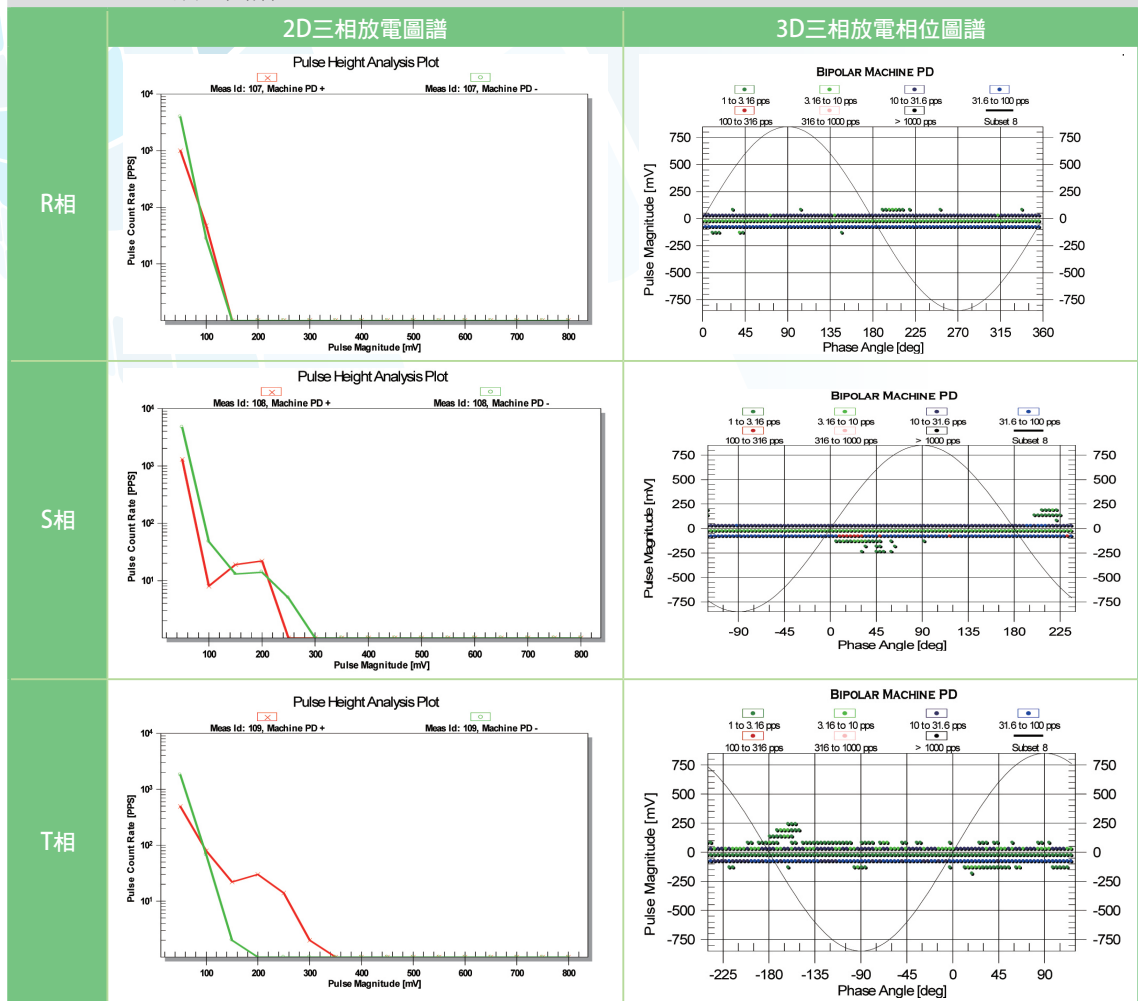
此量測數據表為電容器安裝後, 首次量測的數據, 若以2D放電圖譜分析, 三相皆有明顯的放電量 Q_{max} , 與IRIS公司部分放電統計資料庫比對放電量等級為 R相: 50%; S相: 75%; T相: 75%及以3D放電相位圖譜分析, R, S, T三相皆有少量的典型(相對地)之放電現象。但是無此馬達之前部分放電量測數據可以做趨勢



比對，判斷旋轉電機的部分放電是否在短時間造成或者是此現象已經存在很久？是否需要停機檢修？由於此次是安裝後第一次量測，建議

以此建立背景參考值並持續定期量測數據，建立長期趨勢圖譜以利持續追蹤觀察，由趨勢圖判斷是否停機維護。

▼表4 2D/3D放電圖譜



三、結語

旋轉電機製作從無到成型，每個組合需要很精密施工，但是旋轉電機的定子繞組、鐵心製作，多多少少會有缺陷，但是定子繞阻絕緣狀態可以在線監測，掌握有效性監測數據才能夠精準判斷檢修時程，設備稼動率達到最高獲得最大經濟效益。

☒ 參考資料

- www.irispower.com Iris Power LP
- IEEE 1434-2000, "IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharge in Rotating Machinery"
- V.Warren, "Partial Discharge Testing-A Progress Report" Proc. Iris Rotating Machine Conference, Toronto, Ontario, Canada, June 20