

行政院及所屬各機關出國報告

出國類別：實習

現代化發電機保護及監控設備

服務機關： 台灣電力公司
出國人職稱： 主管電機
姓 名： 陳建益
出國地區： 日本
出國日期： 90.9.10.至 90.9.25.
報告日期： 90.10.26.

93/
c090051-8

行政院及所屬各機關出國報告審核表

出國報告名稱：現代化發電機保護及監控設備實習	
出國計畫主辦機關名稱：台灣電力公司	
出國人姓名/職稱/服務單位：陳建益 主管電機 發電處電氣課	
出國計畫 主辦機關 審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1. 依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2. 格式完整 <input checked="" type="checkbox"/> 3. 內容充實完備。 <input checked="" type="checkbox"/> 4. 建議具參考價值 <input checked="" type="checkbox"/> 5. 送本機關參考或研辦 <input checked="" type="checkbox"/> 6. 送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7. 退回補正，原因： <input type="checkbox"/> (1) 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> (2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容以 <input type="checkbox"/> (3) 內容空洞簡略容 <input type="checkbox"/> (4) 未依行政院所屬各機關出國報告規格辦理 <input type="checkbox"/> (5) 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 8. 其他處理意見
層轉機關 審核意見	<input type="checkbox"/> 同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分 _____ (填寫審核意見編號) <input type="checkbox"/> 退回補正，原因： _____ (填寫審核意見編號) <input type="checkbox"/> 其他處理意見：

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

總經理

主管處

單位

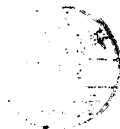
副總經理

主管

主管

報告人：

李坤



行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：現代化發電機保護及監控設備研習

頁數 43 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話 台灣電力公司 陳德隆 02/2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

陳建益 台灣電力公司 發電處 電氣課 主管電機 02-2366-6532

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：90.9.10 至 90年9月25日 出國地區：日本

報告日期：90年10月26日

分類號/目

關鍵詞：

內容摘要：(二百至三百字)

於研習過程除針對現代化電機之保護監控詳加研習外，尚要求廠家安排對發電機定子、轉子設計、構造上之特色及其整體之製造、組立過程作重點觀摩，以一窺發電機之全貌，並與廠家就發電機維護作業所必須執行之各項檢驗測試、運轉時之限制，乃至發電機絕緣壽命評估及本公司現有發電機運轉維護之問題...等，充份與廠家之相關專業人員作意見溝通交換；研習時間雖僅十餘天但深感獲益良多。

本報告即就研習內容分別章節，從現代化發電機之構造、設計、檢驗、運轉限制及至各項保護邏輯監控設備等，作實務性之介紹，期能提供從事大型發電機運轉、維護工作者供日後工作實務上之參考，並對進一步瞭解發電機整體之結構有所助益。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

目 錄

	<u>頁數</u>
壹、 出國事由	2
貳、 出國行程	2
參、 前言	3
肆、 實習內容	
第一章. 現代化發電機構造.....	4
第二章. 現代化發電機設計特點.....	9
第三章. 現代化發電機之檢驗測試.....	14
第四章. 現代化發電機運轉與監控設備.....	18
第五章. 現代化發電機保護邏輯.....	29
伍、 心得與建議	41

壹、出國事由：

現代化發電機保護及監控設備實習。

貳、出國行程：

90年9月10	往程	(台北→東京)
90年9月11日---17日	東京	訪問三菱 CORP. 現代化發電機構造及設計。 發電機保護及監控技術。
90年9月18	行程	(東京→神戶)
90年9月19日---24日		三菱神戶發電機製造廠實習。 發電機定子製造過程觀摩 發電機轉子製造過程觀摩 發電機保護設備實習 發電機監控設備實習
90年9月24日	行程	(神戶→東京)
90年9月25日	返程	(東京→台北)

參、前言：

近十年來，隨絕緣材料、矽鋼鐵心材料、冷卻技術及製造技術之進步，使發電機之容量愈趨大型化，在效率上亦因銅損、鐵損之減少而有所提昇；另在發電機保護及監控設備上，因微電腦技術蓬勃發展，而有長足之進步，諸如保護電驛由傳統式 EM-RY 跨入數位式電驛之領域，在發電機監控上如定子線圈部份放電 (Partial Discharge) 之線上偵測 (On-Line Diagnostic) ... 等，均提供發電機更適切之監控保護。

本次赴國外廠家研習觀摩，除針對現代化電機之保護監控詳加研習外，並與廠家就發電機維護作業所必須執行之各項檢驗測試、運轉時之限制，乃至發電機絕緣壽命評估及本公司現有發電機運轉維護之問題... 等，充份與廠家之相關專業人員作意見交換，該等資料均列入本報告之範疇。

又於研習過程，尚要求廠家安排對發電機定子、轉子設計、構造上之特色及其整體之製造、組立過程作重點觀摩，以一窺發電機之全貌，並能與各項保護監控設備結合，對進一步瞭解發電機整體之結構頗有助益，這是在國內發電機大修局部分解時所無法觸及者，深覺獲益匪淺；此等資料不敢專享，亦均整理分別章節列入本研習報告，俾供日後工作實務上之參考。

肆、實習內容：

第一章：現代化同步發電機構造

一、同步發電機之種類（依冷卻方式分）：

氣冷式：採用空氣冷卻，一般用於100MW以下之發電機。

普通氫冷式：利用氫氣通過定子線圈、轉子及鐵心表面以達冷卻效果，使用於100-250MW之發電機。

氫內冷式：氫氣不僅通過定子線圈、轉子、鐵心表面，且通過定子線圈之通氣孔、冷卻管以達冷卻效果，使用於250-600MW之發電機。

氫內冷及水冷式：以氫氣作為定子線圈、轉子及鐵心表面冷卻，再以純水通過定子線圈直接冷卻，使用於500-700MW之發電機。

二、同步發電機構造：

1、定子：

1.1. 機殼 (Frame)：

發電機機殼係以鋼板滾壓成圓筒狀焊接而成，其大小完全視發電機容量而定，機殼主要作用為：

- (1) 支持發電機之重量。
- (2) 承受故障電流所加諸於發電機之電氣及機械應力。
- (3) 封閉機內氫壓：在設計上應可承受兩倍最大之運轉氫壓。

1.2. 定子鐵心 (Stator Core)：

定子鐵心係由高導磁系數低鐵損之矽鋼片及放射形通風板疊置於組合螺栓 (Building Bolts) 上，再以完全絕緣之貫穿螺栓 (Through Bolts) 及非磁性之端板 (Finger Plate) 以油壓緊夾而

成。

矽鋼片間則以高溫無機絕緣物”Alkophos”蝕刻 (etching) 於表面，使矽鋼片與矽鋼片間形成絕緣，以避免疊片間短路造成循環電流使鐵心過熱。此種結構為轉子所產生之磁通提供一低磁阻之磁路，其槽溝 (slot) 則用以容納定子線圈。

1.3. 定子線圈 (Stator Coil) :

每匝之定子線圈係由許多小股銅導線所組成置於定子槽溝內，為減少熱損各銅股導線在槽內採羅貝爾换位法 (Roebel Transposition Method)，在端匝處則採端匝换位法 (End Turn Transposition Method) 分別交插每股銅導線所佔之空間，讓每一股導線之感應電壓均衡，不致有電位差造成環流；在每匝之定子線圈中央埋設合金製成高電阻之通風孔，供氫氣流通以增加冷卻效果。

線圈之絕緣材料各廠家各有其獨到之處，以三菱公司為例，係以該公司自行發展之”Thermalastic”為絕緣體，主要成份為雲母、Epoxy Resin 及布料等製成，不論在電氣、機械強度及耐化學、防濕氣入侵等特性上均甚良好，又因富有彈性，與線圈本體之膨脹系數接進，故能減低溫度變化所產生之應力。又為抑制電暈作用，在絕緣體表面均塗以半導體凡立水，使電位梯度較為均勻。

1.4. 主引線 (Main Lead) :

發電機定子線圈經主引線引出，主引線一般均位於靠近勵磁機側下方之發電機外殼內共有六支 (Line Side 三支連至相引線、Neutral Side 三支連至中性點)，主引線與外殼間係以套管 (Bushing) 作絕緣，每具套管並裝有三只套管比流器 (Bushing C.T, 分別供保護電驛、儀錶計器及 AVR 使用)。

在氫冷式發電機，主引線套管大多採乾式或充油式，引線箱之外殼必須由非磁性材料製成，以免因巨大之電流引起渦流造成過熱。

2、轉子 (Rotor) :

2.1.轉子鐵心 :

轉子鐵心係以整塊鎳珞鉬 (Ni-Mo-Cr) 鋼材鍛造而成，可承受高速回轉所產生之機械應力，軸心鑽有一小孔以鑑定鍛造成效，同時作為導入激磁電流之通路，鐵心上則設有梯形槽溝，用以放置轉子磁場線圈。

2.2.轉子磁場線圈 (Field Coil) :

轉子磁場線圈係以銀銅合金製成，置放於梯形槽內，並以槽楔 (wedge) 固定之，槽內墊有乙層 Teflon，以承受線圈熱漲冷縮之應力。如同定子線圈一樣，轉子線圈也是採內冷式，在線圈導體設有通風孔，以供氫氣流通冷卻，其形狀恰如兩相對 U 字，氫氣之進出口均利用徑向之鑽孔構成，進氣孔在轉子兩端內側，排氣孔則在轉子中央外面。

2.3.壓縮環 (Retaining Ring) :

轉子線圈兩端鐵心外側係以強力特殊鋼製成之壓縮環固定 (早期採用之鋼材係 18Mn-5Cr 者，其後發現受潮時會有應力腐蝕損及壓縮環，現均已改為 18 Mn -18Cr 者)，以承受高轉速下產生之離心力，壓縮環於安裝時先加熱至相當溫度，再套入轉子線圈端，於冷卻後即產生一強大之收縮力壓於線圈端上，當轉子轉動時，此壓力稍減，在超過同步轉速時 20% 此壓縮環仍能輕度壓力壓於線圈端上，使線圈不至鬆散。

又為避免壓縮環脫離正確位置，在壓縮環內側設有一 Locking Ring，使之嵌於轉子本體上；又為減少壓縮環與線圈端部因熱漲冷縮所造成之應力，另在壓縮環內面塗以 Teflon，以供線圈軸向熱膨漲。

2.4.集流環 (Collect Ring) :

集流環以工具鋼製成，其表面車成淺螺紋溝，以阻止接觸火花避免電流集中於碳刷之局部，可使積在碳刷與集流環間之空氣易於排出，使碳刷與集流環間能密切接觸，並可增進集流環表面

之散熱效果。

轉子線圈是以經過軸心孔之兩個軸向導體 (Axial Lead) 引出，再以兩只徑向導體 (Radial Lead) 連接至集流環之正、負端，軸向孔與徑向孔則均以封密，以防氫氣漏洩。

3. 氫氣循環 (發電機內部通風冷卻) :

發電機轉子汽機側靠近線圈之軸上，裝有乙具多級式、高差壓、高效率、低容量之鼓風機 (Blower)，此鼓風機之出口將已完成冷卻任務之熱氫直接送入氫氣冷卻器；氫器冷卻器出口之冷氫則分成若干冷卻通風路徑：

- 3.1. 由通風道通至高壓區，進入定子線圈導體內部通風孔，將導體熱量帶出形成熱氫，回到鼓風機入口重新循環。
- 3.2. 由定子鐵心周圍通過氣隙 (Air Gap，乃定子與轉子間之空隙)，形成熱氫再由鼓風機吸入重新循環。
- 3.3. 由轉子兩端進入轉子導體內部，再由轉子中央排至，回到鼓風機入口重新循環。(轉子兩端非直線部份之導體，乃具特殊設計之通風孔，使冷氫通過而由轉子中央處排至氣隙，至於轉子鐵心因鐵損甚小其熱量一併由導體內通過之氫氣帶走，不必再設通風孔)。

4. 軸承：

發電機轉子重量由軸承擔負，並與潤滑油系統有適當之管路連接，提供發電機運轉時軸頸與軸承間之潤滑；又為防止轉子鐵心之感應電壓經轉軸之任何部位構成回路，造成軸電流損及軸承之巴氏合金，故在軸承托架上墊以絕緣板，而其固定螺栓亦均襯以絕緣套管 (Insulation Tube)、絕緣墊襯 (Insulation Washer)，較新之發電機且設有軸電壓、軸電流檢出設備 (本公司舊機組各廠均自行加裝)，提供警報供維護人員作必要之處置。

5. 氫氣冷卻器 (H₂ Cooler) :

氫氣冷卻器係以銅管嵌以鋁合金鰭片之管排所組成之熱交換器，銅管內通以冷卻水，由鼓風機吸出之熱氫通過氫氣冷卻器之鰭片部份，使熱氫冷卻為冷氫，此冷氫再經由上述之循環路徑發揮冷卻功能。

冷卻器之下端固定於發電機機殼，冷卻器之上蓋內設有一膜片 (Diaphragm)，以承受熱漲冷縮之用，又備有一閘通至膜片上方，以平衡膜片雙面之壓力，冷卻器之上蓋緊閉於機殼，於需要清洗冷卻器管時可將此蓋打開。

第二章 現代化發電機設計特點

一、概述：

發電機製造之趨勢傾向於大型化，但體積並未成等比例增加，材料之日益進步固然為其原因之一，在事實上由於冷卻方法之改善使發電機效率大幅提升方是最主要原因；早期發電機之冷卻方式均採自然通風冷卻，其後演進至氫冷、氫內冷乃至水冷，氫氣壓力亦由 0.5psi 提高至 75psi，發電機容量由 1950 年代之 183MW 提高到目前之 1,500MW 1,800RPM 及 1,000MW 3,600 RPM。下表係氫氣與空氣之特性比較：

特性	空氣	氫氣
密度	1.0	0.07
導熱	1.0	7.0
熱轉換效率	1.0	1.35
比重	1.0	0.98
助燃	是	否
氧化	是	否

氫氣因具有低密度及優異之熱傳導特性，係一極佳之冷卻媒質，採氫氣取代空氣冷卻之優缺點如下：

1. 氫氣密度僅 0.07，可減少風損。
2. 高熱傳導效率，提升發電機每單位體積之發電量。
3. 氫氣在密閉之發電機內循環，可避免灰塵、濕氣污染發電機定子、轉子，可減少維護成本。

4. 因係純氫無氧又無濕氣，在異常運轉下電暈發生時，可減少對定子線圈之影響。
5. 氫氣與空氣混合比約在 5~70%時會造成爆炸，故在使用上必須特別小心，在實際運轉上，設有純度計以監視之，使其維持於 98% 以上。

伴隨發電機大型化，相對的亦帶來運轉上之諸多問題，諸如：雙倍頻震動（Double Frequency Vibration）、線圈內部渦流損、端匝之磁通效應、不平衡負載下之負相序電流及材料所需承受之巨大應力疲勞、、、等問題都原遠較傳統發電機來得嚴重，針對這些問題在設計上必要取之改善措施分述如次：

二、定子線圈换位：

為減少集膚效應，定子線圈係由許多小股銅線（Strand）組成，因每股銅線在線圈槽內所佔之徑向位置不同，其所切割之磁通亦有差異，故造成每一匝線圈每一股導線之感應電壓、阻抗均不相同，彼此間之電位差乃造成循環電流，使線圈發熱損耗加大。

為克服此問題，因此乃將槽內之線圈以羅貝爾换位法，使每股導線沿槽內之長度均等佔有線槽斷面位置，各股導線之感應電壓、阻抗藉此而趨於均衡；另在線圈端匝也接成端匝换位，以減少端匝磁通效應（End Turn Effect，在端匝處磁通呈徑向通過端匝）在端匝處所產生之循環電流。一般而言，羅貝爾换位法能消除循環電流，但端匝换位法則只能減少循環電流。

三、定子鐵心可撓性裝置：

發電機轉子可視為一巨大之旋轉磁鐵，於運轉時對定子之磁場如同蛋形（Egg-Shape）之橢圓形狀並非真圓，在此種狀態下，轉子與而定子間之磁力作用，即產生一雙倍頻率之震動，又因鐵心直接固定

於機殼上，此震動乃傳至發殿電機基座，故為使此種震動減至最小，乃採用一種由鋼板製成的葉狀彈簧之可撓性裝置，使定子鐵心傳至機殼之震動經此葉狀彈簧吸收，而獲致改善。

四、定子末端防護鐵心（End Shield）：

端匝處之磁通係由轉子磁通與定子磁通所合成，以軸向近入鐵心端部，磁通與鐵心疊片幾乎成垂直狀，原先為防止渦流之疊片完全失去效用，於是會在鐵心端部感生巨大渦流使鐵心發熱，尤其於發電機進相運轉時，定子與轉子所合成之磁通與鐵心垂直切割之情況更為嚴重。

為改善上述情形，大型發電機在定子鐵心兩邊之端部，即在端匝指狀壓板（Finger Plate）外側，裝設防護鐵心產生阻尼作用，阻止軸向磁通進入鐵心，而將其導入防護鐵心，使之只在防護鐵心處產生渦流發熱，並不影響定子線圈絕緣。傳統式發電機因容量小鐵心端末軸向磁通影響不大，故未裝設防護鐵心。

五、定子線圈與通風管間之跨接電阻：

氫內冷式發電機在定子線圈內埋設有方形通風管，管與管間及管與線圈導體間，彼此相互絕緣，在線圈兩側端匝處，這些通風孔利用導電性 Micarta 以及塗過導電性凡力立水之玻璃纖維帶綁在一起，作為電氣連接，形同一電容般，如通風管與線圈間電位差過大，絕緣容易受損，故一般之大型發電機會在端匝處每一線槽之線圈導體與通風管間跨接一 $5,000\ \Omega$ 電阻，使兩者間之電位經此電阻而趨於均衡。

六、轉子阻尼線圈：

同步發電機於負載不平衡或發生線對線故障時，因不平橫分量所引起之負相序電流，會在轉子極面（Pole Face）感應極大的渦流，例

如深二、三機均有類似情形，如時間過久可能造成嚴重受損，尤其在壓縮環與轉子接觸部位常可發線過熱變色之痕跡；而阻尼線圈之裝設正是為抵抗此不正常運轉，提供必要之阻尼以減少感應電流，該阻尼線圈係安裝於轉子每一線槽槽楔之正下方，利用轉子兩端壓縮環形成短路環，組成阻尼線圈。

七、固定環 (Bore Ring)：

定子鐵心疊片之外側係以組合螺栓貫穿固定，但由於鐵心本生身之重量及磁振，運轉日久，可能造成鐵心疊片鬆弛下墜，故在沿組合螺栓外側，每間隔一小段間距即裝設固定環，以增加組合螺栓與鐵心之固定，使其更為密接防止鐵心鬆弛下墜。

八、相引線之固定：

相引線與並連環 (Parallel Ring) 連接處，早期之發電機均採焊接之方式，然由於長期承受雙倍頻率震動之結果，易造成材料疲勞而導致連接處斷裂之事故，目前則均改為焊接後再以螺栓瑣緊，以增加其強度。

九、波狀彈片 (Ripple Spring)：

定子線圈槽楔下方加裝波狀彈片，使線圈與槽楔間受壓，槽內之元件更加強化結成一體，可防止線圈及槽楔鬆動。

十、定子端匝 (End Winding)：

為防止正常運轉下之機械應力及短路故障時，電樞電流所產生之電磁應力，線圈端匝被拉離原位，在大型發電機端匝處除以大量玻璃紮帶加強綁紮外，並利用支持環 (Support Ring)、固定塊 (Blocking) 等將整個端匝成環狀固定成一體，以抑制端匝作徑向

與切線向之移動。

整體之端匝結構再以非金屬之托架 (Support Bracket) 支持，此托架與端匝之整體結構間墊有乙層 Slip-Layer，以供線圈熱膨漲時，允許整個端匝結構之軸向移動。

第三章 現代化發電機之檢驗測試

一、定子槽楔緊度檢查：

1. 1971 年以前之發電機，在槽楔下並未裝設波狀彈片（例如深一、二、三機），此種發電機之定子槽楔之檢查，係以一小鐵鎚輕敲每只槽楔，由其所發出之聲音判斷槽楔是否鬆動。
2. 裝有波狀彈片之機組定子槽楔，在每個槽溝（Slot）上有五個測試用槽楔（Test Wedges），每個 Test Wedge 上有七孔，可用深度規測量 Test Wedge 上各孔之深度，求其最大及最小之差： $D_{\max} - D_{\min} = d$ ，於出廠時 $d < 0.020''$ ，機組運轉後 d 會略增，但一般約為 $0.030''$ ，如果 $d > 0.040''$ 即表示槽楔鬆動，當超過 30% 之槽楔鬆動，發電機即需 Rewedging。

二、定子線圈通風孔是否暢通檢查：

以廠內壓縮空氣經過濾器、壓力調整器、流量計，以適當之軟橡皮管在管頭裝測試頭及壓力錶，將測試壓力調至約 10psi，再將測試頭插入每一通風空孔，並記錄壓力變化，如通風孔壓力超過平均值 10%，即表示該通風孔有阻塞現象。

三、轉子引線洩漏試驗：

以高壓氮瓶經減壓閥及調閥組，接至發電機轉子靠礪磁機側轉軸孔，傳統式發電機以 80psi 氮壓測試，氫內冷式及水冷式發電機以 200psi 氮壓測試，洩漏量小於每小時 5psi 為合格。

四、定子線圈絕緣測試：

1. 發電機絕緣壽命會受下列因素所影響：

- 1.1. 時間與溫度效應累積所成之熱老化 (Thermal Aging) 以及因過載、通風孔阻塞、週溫過高散熱不良等因素造成過熱。
 - 1.2. 化學物質、濕氣、油污及導電物質之侵害。
 - 1.3. 開關、雷擊所造成之突波、電暈或槽溝內放電所造成之損害。
 - 1.4. 機械性之損傷，諸如系統短路所產生之巨大應力、震動或機組超速、、、等。
2. 定子低電壓之 D.C.Megger Test。
 3. 介質吸收比測試：

以 1,000V 或 2,500V 之 Megger 測量十分鐘，記錄每分鐘之絕緣值，再計算第一分鐘之絕緣電阻值 ($R_{10'}$) 與第十分鐘之電阻值 ($R_{1'}$) 之比：

$$(R_{10'}) / (R_{1'}) = \text{Polarization Index (P.I 值)}$$

P.I 值：1.5~5 良好

1~1.5 可疑

1 以下 不良

4. 直流高壓試驗 (DC Leakage Test)：

- 4.1. 以 $1/3 E_t$ 加壓十分鐘，記錄每分鐘之洩漏電流，計算 PI 值。

$$E_t = 1.3 * 1.7 * E_g$$

E_g ：發電機額定電壓 (Line- Line)

- 4.2. 如 PI 值合格，再以 1kv/1min 之速率提升至測試電壓 E_t ，記錄加壓過程每階段之洩漏電流，繪成電壓與洩漏電流之關係曲線。

- 4.3. 如絕緣體內部有濕氣，此曲線會呈連續向上彎曲；如絕緣體內部

有空洞 (void) ，則曲線會呈小曲折；但如曲折過大，則表示絕緣體異常。

5. 交流高壓試驗：

以 $E_t=1.3 \cdot E_g$ 加壓十分鐘無異常為合格。注：本項試驗因測試設備甚為龐大且具破壞性，在早期甚少採用，目前本公司試驗所已購置 MVRT (Movable Voltage Regulate Transformer) ，可提供本項測試。

6. 定子線圈通風孔對線圈導體間電阻測定：

標準：鄰近通風孔與導體間之電阻需在 4,500~5,500 Ω 。

其它通風孔與導體間之電阻需大於 5,500 Ω 。

註：此電阻係裝於定子線圈之礪磁機側 (Exciter End) 。

7. 通風孔與通風孔間電阻測定：

標準：25~100,000 Ω 。

8. 貫穿螺栓絕緣值測定：

以 1,000VDC Megger 測試，瞬間值應在 100M Ω 以上。

9. RTD 絕緣值測定：

以 500VDC Megger 測試。

10. RTD 絕緣值測定：

標準：10 \pm 0.02 Ω at 25 $^{\circ}$ C。

11. 相引線動態頻率反應 (Phase Lead Dynamic Frequency Response Test)：

本測試係在確定發電機之相引線之自然共振頻率 (Nature Frequency) ，務必在 115~135Hz 以外，以免在運轉中與電磁上之雙倍頻率 (Double Frequency) 產生諧振，而損及相引線。

測試方法輕敲相引線，再以 Fast Fourier Analyer 分析其共振頻

率，如落在 115~135Hz 範圍以內，則可增加相引線之固定物，改變整體結構，將共振頻率錯開。

12. 定子鐵心之 Loop Test：

此測試係用以找出鐵心疊片是否有短路現象。

測試方法係以導線繞穿整體鐵心 3~5 匝，再通以約 900A 之電流，並以紅外線檢視有無熱斑（Hot Spot）。

13. 轉子線圈絕緣測試：

以 500VDC 或 1,000VDC Megger 測試並核算吸收比。

14. 轉子阻抗測試：

以 110VAC 從集流環處加壓，以 $Z=V/I$ 計算其阻抗，此計算值於原出廠之數據比較，判斷有無層間短路。

15. 轉子平衡測試（Rotor Pole Balance Test）：

同轉子阻抗測試之方法，唯須將轉子線圈兩極間連接線之 Cross Over 找出（在壓縮環下可摸得到），再分別測集流環正端與 Cross Over 之電壓（ V_A ）及集流環負端與 Cross Over 之電壓（ V_B ），比較

V_A 、 V_B 必需在 5% 以內。

16. 轉子線圈直流電阻測試：

以 Kelwin 電橋測試直流電阻，換算至 75 °C 之值並與原始出廠值比較，以判斷線圈有無斷裂。

第四章 現代化發電機之運轉與監控設備

一、溫升及負載變動對發電機壽命之影響：

影響發電機絕緣壽命之兩個重要因素，其一為高溫運轉，任何電機設備安全之運轉溫度取決於絕緣材料之耐熱能力，而絕緣材料之耐熱能力則依其等級而異，一般發電機均採 B 級絕緣，其最高溫度限制為 130 °C，每高於溫度 10.5 °C 下運轉，絕緣壽命減半，因此發電機之運轉溫度絕不容許超過廠家所規定之溫升值，否則發電機之壽命將無法達到預期之使用年限。

另一重要因素為因溫度變化產生之機械應力所引起之損傷，因銅導體之膨脹係數大於鐵心矽鋼片，對溫度之變化較為敏感，除線圈在線槽內發生移動，造成線圈與線槽之刮銷，久之即可能使絕緣受損，又在線圈溫度升降亦會造成絕緣包紮物之裂損；據研究，發電機運轉溫度約隨負載平方變化，故為減少線圈絕緣之受損，應儘可能保持於固定負載下運轉，機組冷機起動除非緊急情況應儘可能避免，在升載時負載上升率應限制於每一分鐘不超過 10% 為宜，但對於機組降載或已連續運轉以有時日之熱機升載則不在此限。

二、運轉電壓對發電機之影響：

依據 ANSI C50.13 說明，發電機在額定 KVA、頻率及功率因數下，端電壓可在額定值之 $\pm 5\%$ 下運轉，不一定要照額定電壓，亦即在此條件下尚不致影響發電機壽命，但若超過此限制，發電機機將有過熱之虞；其主要影響之情形分析如下：

1. 定子線圈溫度：

在額定 KVA 下降低電壓運轉，將使發電機電流增加，線圈溫度升高，又因電機電流增加將產生較高之磁通密度，使定子鐵心及鐵心齒端之溫度升高，在線槽內之徑向磁通 (Radial Flux) 亦會

大增，而鐵心齒端之磁飽合亦將導致 Eddy Loss 使線圈產生額外之熱量，其結果將使線圈最上層股線（Uppermost Strands）實際溫度提高。

2. 轉子線圈溫度：

發電機在額定 KVA、頻率及功率因數下，提高電壓運轉，轉子磁場電流必須提高，轉子溫度勢必上升。

3. 定子鐵心溫度：

當過電壓運轉時，定子鐵心齒端及鐵心之磁通將比平常為高，磁滯及渦流損將增大，而降壓運轉則形同進相（Leading Power Factor）運轉，發電機定子電流增大使得定子電樞磁通與轉子磁通間不良之向量關係，將在定子鐵心之末端區域（End Regions）產生過熱。

4. 定子鐵心振動：

過電壓時因磁通密度增加，鐵心趨於飽合，振動、噪音將顯著增加。

三、發電機承受不正常運轉之能力：

發電機在設計上應能承受：

1. 發電機在額定輸出且溫度穩定狀態下，能承受額定電流 130%及額定磁場電壓 125%一分鐘，但以一年內不可超過兩次。
2. 只要發電機不超過其熱容量（Short Time Thermal Capability），可承受短時間之三相不平衡電流，及在發電機端附近之任何型式之短路事故。
3. 發電機能承受輕微之不同步併聯；但如係嚴重之不同步併聯不僅在線圈端匝處會有巨大之應力，在聯軸器處將有高達正常值 25 倍之扭力，甚至可能將聯軸器之定位梢（Key）剪斷或將轉軸扭曲，故在併聯時應至為小心謹慎，萬不可掉以輕心。

4. 又依據 AIEE 說明發電機在額定 KVA、功率因數及 5%過電壓之運轉條件下，有能力承受在發電機端 30 秒之三相短路故障而不致造成損壞。

四、發電機容量曲線：

同步發電機之有效電力及無效電力之輸出，受限於機組之設計及整理結構，故在運轉上必須維持於一定之範圍內方不致危及機組甚至影響全電力系統。至於影響同步發電機壽命及運轉特性之最重要因素，不外乎因溫度過高造成絕緣破壞及因穩定度過差造成失步兩項。

同步發電機在運轉中因電阻性之功率而產生熱損者，共有定子電樞線圈、磁場線圈、定子鐵心端部等三處，由此三部份所構成之運轉溫升限制曲線，即稱之為發電機之容量曲線（Capability Curve）。

1. 電樞電流之限制：

當發電機運轉於額定電流時，無論功率因數大小，只要負載不超過額定值，則其電樞電流亦不致過高而造成定子線圈之溫升高，因此只要以原點為中心，額定 MVA 為半徑，劃一圓弧即為發電機不考慮運轉限制下之原始容量曲線。

2. 定子電樞線圈之限制：

在電力系統中供給之無效電力，係來自發電機之磁場電流之激磁，亦即在額定 MVA 輸出下，激磁電流越大則輸出之無效電力越大，且功率因數越落後。而發電機之激磁能力則受限於轉子線圈溫度之溫升，故必須犧牲部份之發電機運轉容量。

3. 定子鐵心端部之熱限制：

發電機定部鐵心為防止磁力線切割造成嚴重之渦流損，故將鐵心作成與磁力線平行之疊片（Lamination），然因定子線圈負載電流所產生之磁通及在轉子磁場兩端所構成之磁力線回路，仍會在定子鐵心端部之疊片形成垂直切割，故而在磁力線增加時此部位

之渦流損將大增。

同步發電機之端電壓大小，乃依定子與轉子間氣隙（Air Gap）之磁通強弱而定，而氣隙磁通則為定子電樞電流所產生之磁通與轉子磁通之向量和，當發電機運轉於落後功因下，其向量和有減磁之作用，而運轉於超前功因時則有加磁作用。因此若負載不變超前功因運轉下雖然所需之激磁電流會較超前功因為小，但此時在定子鐵心端部之磁通反而會因加磁作用而提高，使得渦流損加速增加，在短時間內即可能使溫升達到危險值，為防範在上述超前功因下之異常運轉，發電機原始之容量曲線亦必須作部份犧牲。

以上對發電機運轉容量曲線之各項限制，只提供運轉人員作為運轉操作之參考依據，而在實際仍必須參照埋於發電機線圈中之RTD之溫度檢測，另自動電壓調整器中所設之過激磁限制（Over Excitation Limit）及過低激磁限制（Minimum Excitation Limit），亦正是為達到此一保護功能而設，攸關發電機定子鐵心端部之溫升限制，與系統穩定度亦有密不可分之關連。

五、運轉溫度監控：

1. 冷氫溫度：

1.1. 發電機轉軸之高度（Elevation）係其支持結構溫升之函數，軸承托架及機殼之溫升會隨冷氫溫度變化，所以發電機軸承高度亦會因冷氫溫度變化而改變，故若運轉中無法維持冷氫溫度之正常，則汽機與發電機間之中心線可能會欠準（Misalignment）。

1.2. 冷氫溫度變化可能使機殼變形，造成機器接合面及墊片（Gasket）鬆動，增加氫器洩漏量，並造成維護困擾，故在正常運轉下採手動或自動方式，維持冷氫溫度在允許範圍 2 °C 以內（以西屋發電機為例，規定之冷氫溫度最高不可超過 46°C）。

2. 定子線圈溫度：

同樣以西屋發電機為例，在冷氫溫度最高不超過 46°C 下，定子線圈

溫升不得超過 64°C，亦即運轉人員從發電機運轉溫度記錄器監測之溫度不可高於 46°C+64°C=110 °C，然者，由記錄器所測得之溫度並非發電機運轉之最熱點 (Hottest Spot)，實際之最熱點與實測值之溫差，隨氫壓、發電機負載、冷媒 (Type of Coolant) 以及通風系統不同而改變。

由 RTD 所測得之溫度雖非真正之最熱點，但仍可藉此偵測線圈內部不正常之徵兆，諸如換位接觸面電阻過高、Phase Group 內部不正常之循環電流等。

3. 溫差：

依據過去西屋發電機運轉之經驗，曾有兩部發電機在溫升並未超過線制值下，但因 RTD 測得最高與最低溫差超過 10 °C 而燒損，下表係西屋公司所提供之發電機負載與容許溫差之限制：

發電機負載	最大容許溫差值 (最高與最低溫差)
0	4 °C
25%	5 °C
50%	6 °C
75%	7 °C
100%	8 °C

如發現容許溫差超過上述標準，應鄉先至發電機側現場 RTD 接線箱處，直接核測 RTD 電阻值，換算成溫度與記錄器比較，如證實

確係溫差過高，必須立即採下列措施：

3.1.如疑係某 RTD 指示過高時：

將發電機出力降至最低負載（Minimum Load），發電機維持於同步運轉，重新查核定子線圈溫度，如果該可疑之 RTD 溫度仍較其它 RTD 為高時，表示該 RTD 有問題，但如所有 RTD 之值都相近時，機組即應停機檢查。

3.2.如疑係某 RTD 指示過低時：

可能由於機械原因使得通往 RTD 之線圈通風孔阻塞；此時亦將將發電機出力降至最低負載，重新查核定子線圈溫度，如所有 RTD 之指示相同則表 RTD 良好，應立即停機檢查；如果該 RTD 仍較其它者為低時，則可確認該 RTD 有問題。

冷氫離開氫冷卻器時之溫度應大致相同，否則將影響溫度探測器之指示，導致溫差過大，因此過冷卻器出口溫度相差不可超過 2℃。

六、運轉中之部份放電檢測設備（On-Line Partial Discharge Monitor）：

1. 部份放電檢測原理：

發電機在長時間運轉後，因熱應力、機械應力、電氣應力等之影響，定子線圈之絕緣能力迭有老化之趨勢，甚或在該等應力之影響下造成線圈絕緣體出現空洞（Void），因空洞內之電介質屬氫氣（氫冷式發電機為氫氣，空氣冷卻式則為空氣），迥異於原絕緣物，其相對電介強度相差甚為懸殊，導致發電機運轉時電場強度分佈嚴重不均，在空洞處之氣體因強大之電場使電離子游離乃產生放電現象。

絕緣內空洞之放電現象對絕緣能力具強大之破壞力，故在空洞形成後絕緣將迭次劣化，而絕緣劣化又將致使部份放電量之增大，如此輾轉累增之結果，終將引發絕緣崩潰。部份放電之檢測設備即在檢出此種異常之現象，預為處理以防範事故於未然。

因部份放電發生時其電流脈衝所發出之 Radio Frequency 沿線圈擴散，故在實際檢測技術應用上係以 RF-CT (Radio Frequency-CT) 裝於 RTD 回路上，作為感測器將訊號檢出處理 (如下圖所示)。

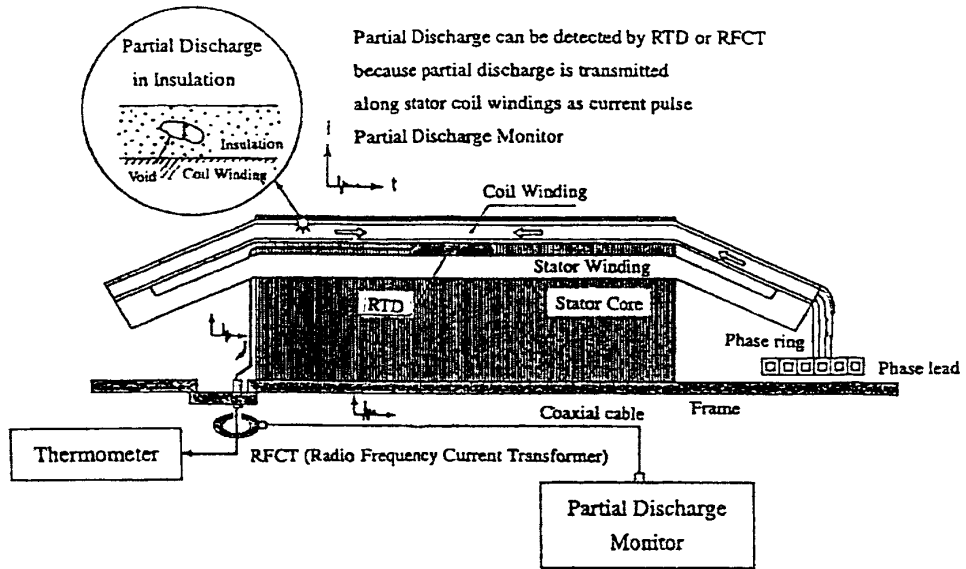


Fig. 1-1 Component of PDM

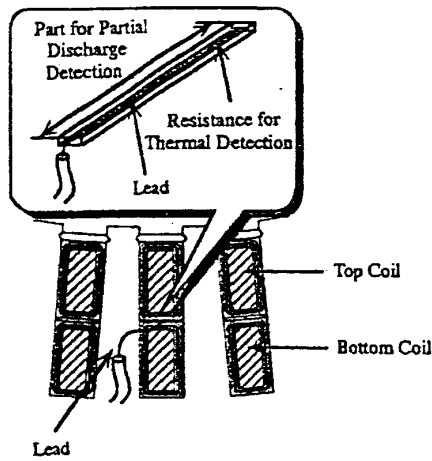


Fig. 1-2 Composition and arrangement of coil temperature detector (RTD or ETD)

2. 部份放電訊號之感測與雜訊干擾：

約言之，部份放電所產生之 Radio Frequency 訊號其強度至為微弱，易受外外界雜訊之干擾，例如行動電話即為檢測部份放電最大之干擾源。1-3 (a) 圖即在靜電場下之訊號波形，1-3 (b) 圖則為在運轉中以 RF-CT 測得具電磁場背景之波形，圖 1-4 則為發電機之部份放電感測器經 RF-CT 將訊號引出之實際結構。

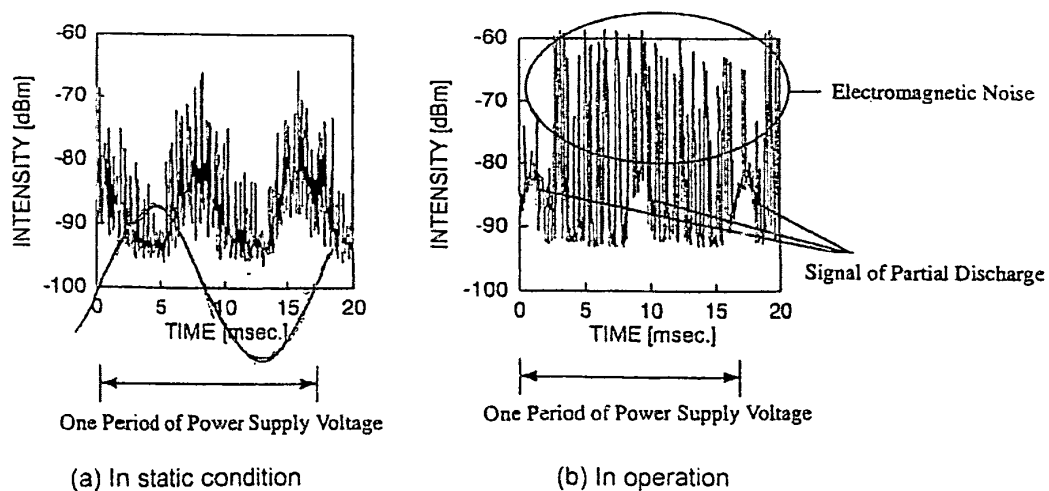


Fig. 1-3 Comparison of noise from outside (electromagnetic noise)

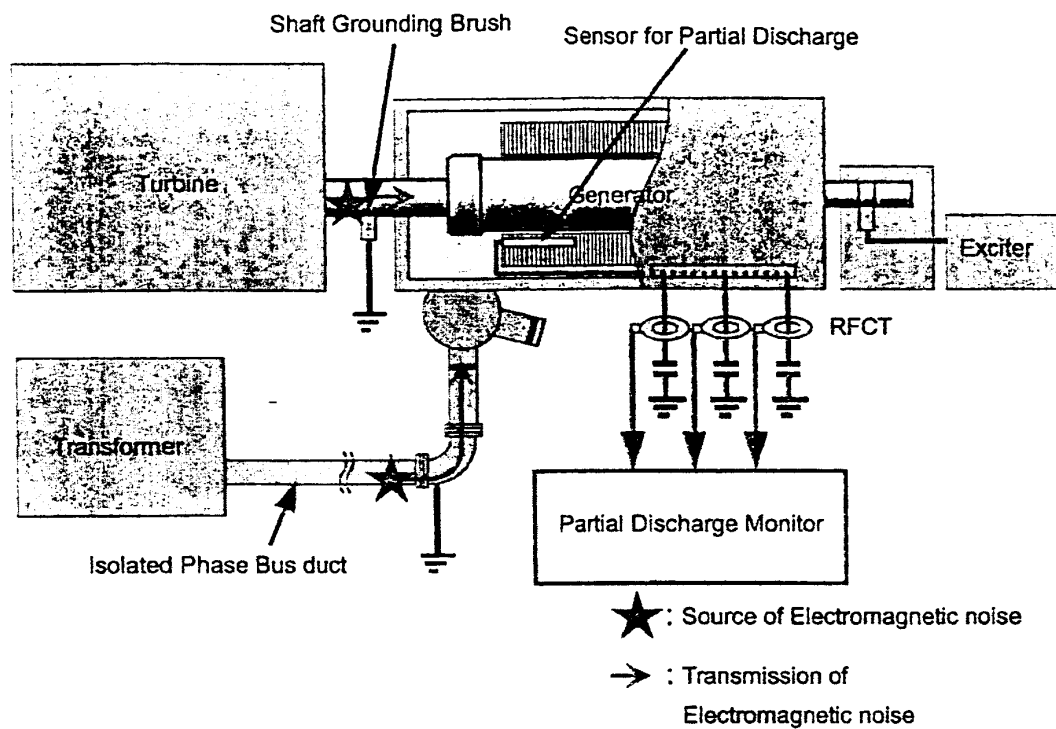


Fig. 1-4 Arrangement of sensor for radio frequency signal detection
 Source of noise from outside (electromagnetic noise)

3. 雜訊之排除 (Noise Rejection) :

如圖 1-5 之架構，在設計上採訊號比對法 (Comparison Method)，即以兩組感測器分別偵測部份放電訊號，例如在 1-5

(a) 部份放電發生於線圈之情形下，因放電位置較接近感測器 1 其測得之訊號較強，在感測器 2 所測得之訊號則經衰減及延持其之訊號，吾人即可依據兩種訊號之比對及核算其衰減即延持量而理出其真正之波形及放電量。

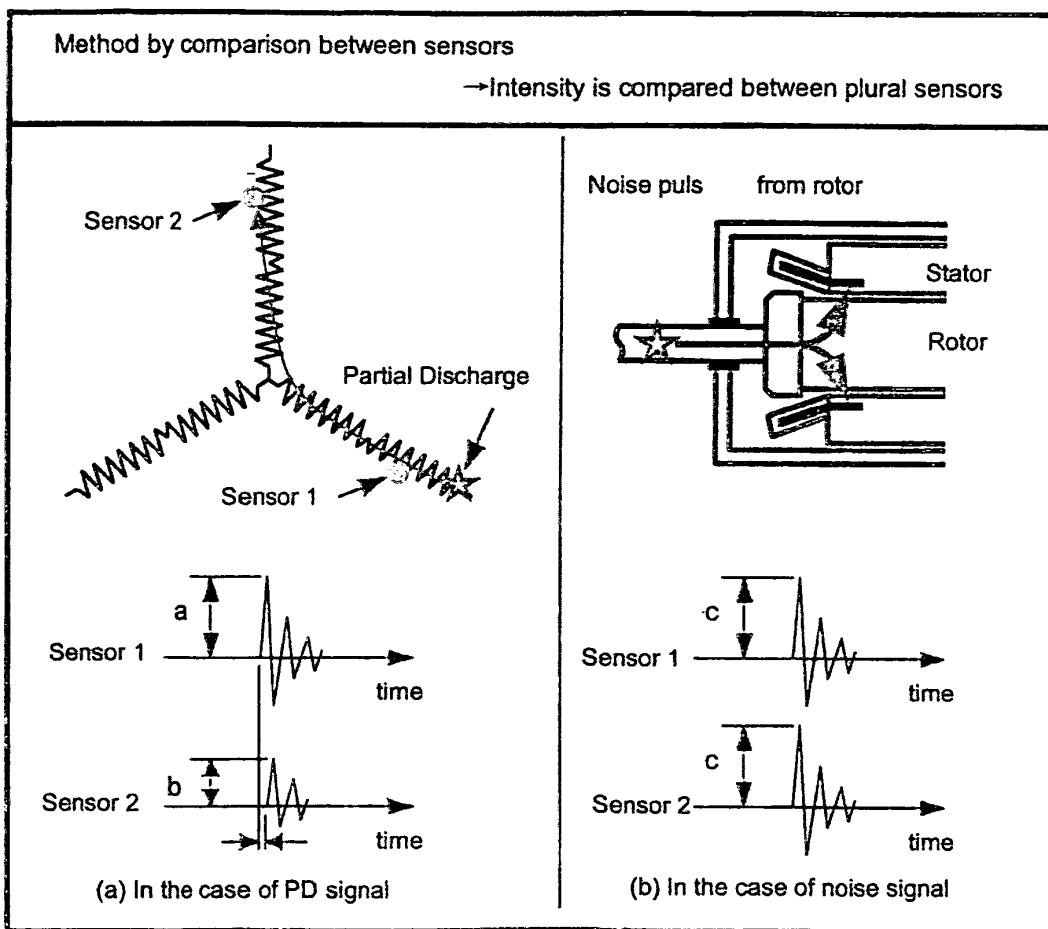


Fig. 1-5 The method of noise removal by PDM

在 1-5 (b) 當放電之部位處於集流環附近時，感測器 1、2 所測得之訊號幾近同步且相同，此時吾人可在兩感測器間引入一調校器，再以其間訊號傳輸特性之差異比對，將雜訊區分隔離。

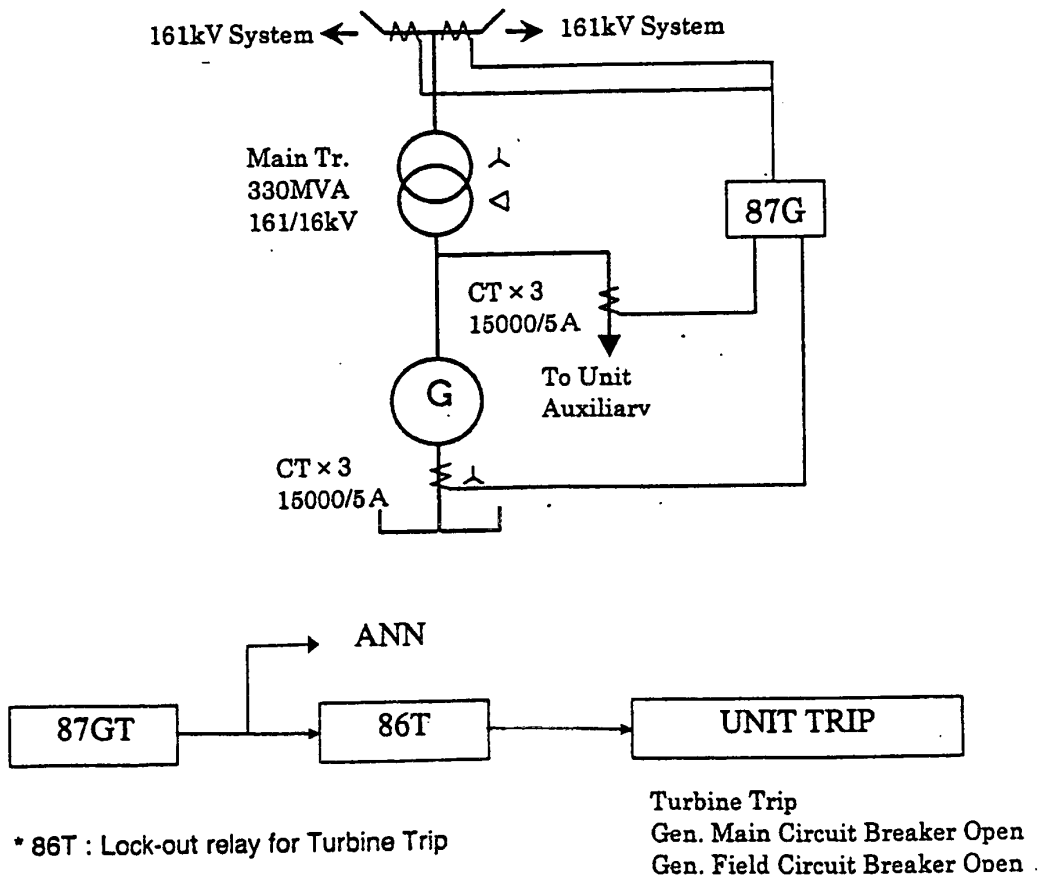
4.判斷標準:

依據日本三菱公司統計將近 200 部機組後之結果，不論大小機組其部份放電量不得超過 20,000pc。

第五章 現代化發電機之保護

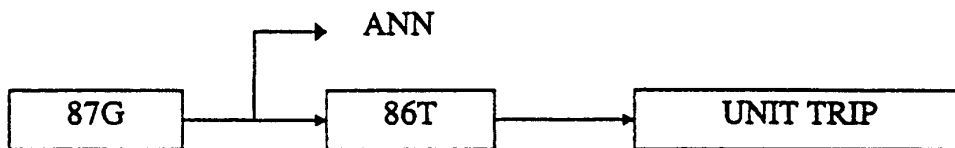
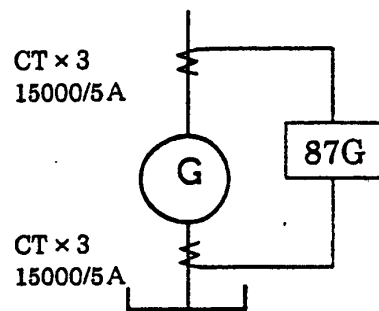
一、發電機含變壓器之整體保護 (Overall Differential Relay)

此項保護係針對發電機、主變壓器、輔助變壓器及相隔離廢匯流排等整體區間之保護，在此區間內有任何故障，例如相間短路、相間短路接地、發電機或變壓器線圈接地、 \dots 、87GT 均能予檢出，並提供必要而適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



二、發電機差動保護 (Generator Differential Relay) :

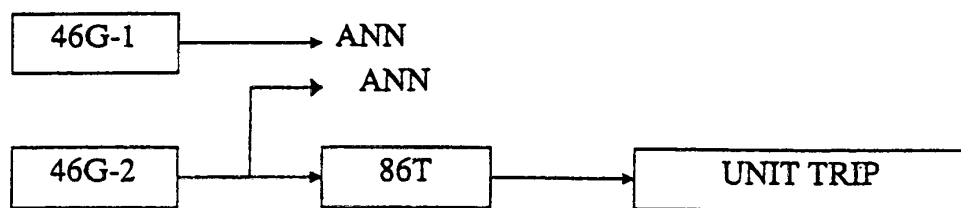
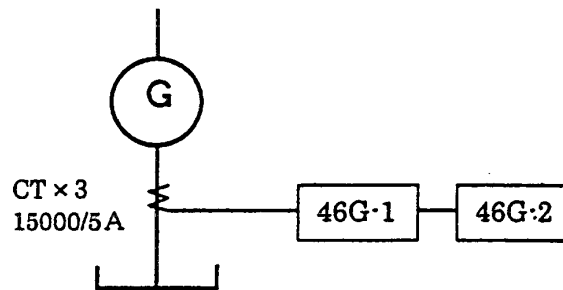
此項保護係針對發電機定子線圈之保護，例如線圈間相間短路、三相短路接地、單相接地、、、等 87G 均能予檢出，並提供必要而適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



* 86T : Lock-out relay for Turbine Trip

三、發電機負相序保護 (Generator Negative Sequence Relay) :

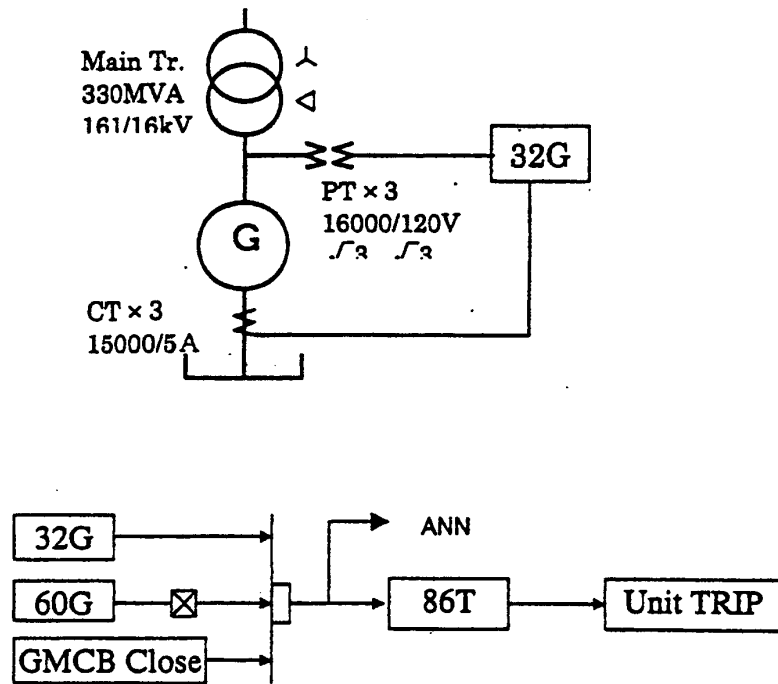
當發電機三相不平衡過高時，其負相序分量將導至發電機於瞬間過熱，而危及發電機，負相序保護電驛即檢出此負相序電流，以提供必要之警報及適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



* 86T : Lock-out relay for Turbine Trip

四、發電機逆電力保護 (Generator Reverse Power Relay) :

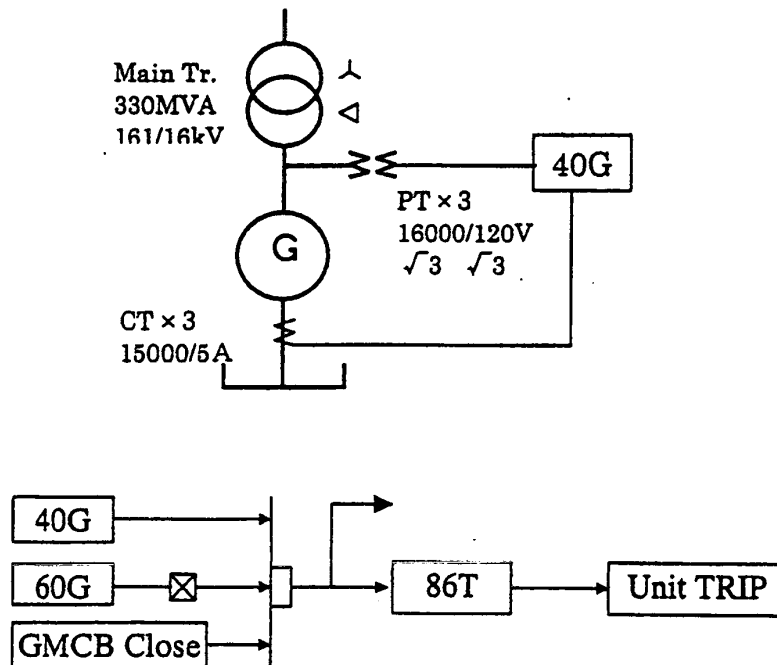
當發電機發生逆饋電力時，同步發電機變為同步馬達，在此情形下其負相序分量將導至發電機於瞬間過熱，而危及發電機，負相序保護電驛即檢出此負相序電流，以提供必要之警報及適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



* 86T : Lock-out relay for Turbine Trip

五、發電機失磁保護 (Generator Loss of Excitation Relay) :

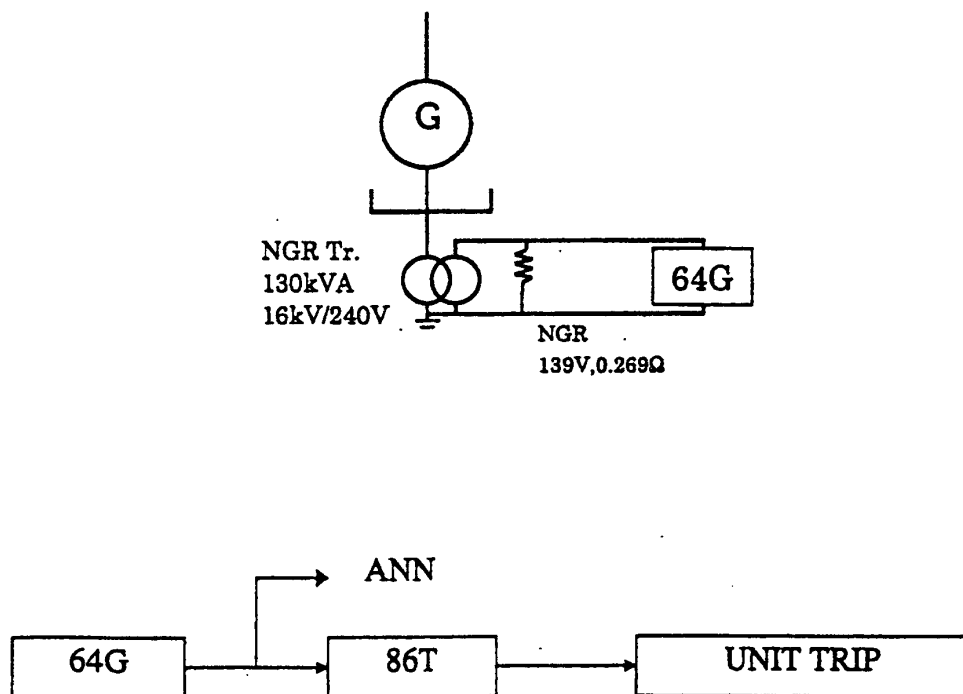
當發電機激磁回路跳脫、磁場開關故障、自動電壓調整器控制失靈或靜磁式激磁系統電源故障時，均將導致發電機於極端危險之運轉情形，如無適當之保護，不僅危及發電機本身之安全，對電力系統亦將造成擾動，發電機失磁保護電驛即檢出此類故障，提供必要而適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



* 86T : Lock-out relay for Turbine Trip

六、發電機定子接地保護 (Generator Stator Ground Fault Relay) :

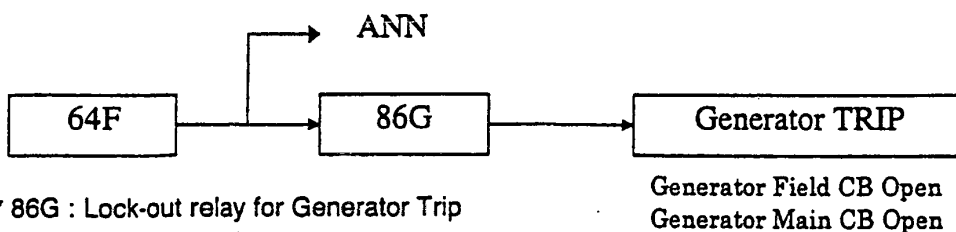
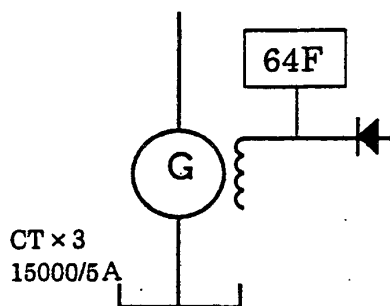
運轉溫度過高將導致發電機定子絕緣逐漸劣化已如前章所述，另在系統異常情形下所產生之過電壓，亦會造成絕緣之損傷劣化，當劣化達一定之層度，恐將引起絕緣崩潰，致使發電機激發生嚴重之接地事故，發電機定子接地保護電驛即利用發電機中性點變壓器檢出發電機定子絕緣之洩漏電流，提供必要而適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



* 86T : Lock-out relay for Turbine Trip

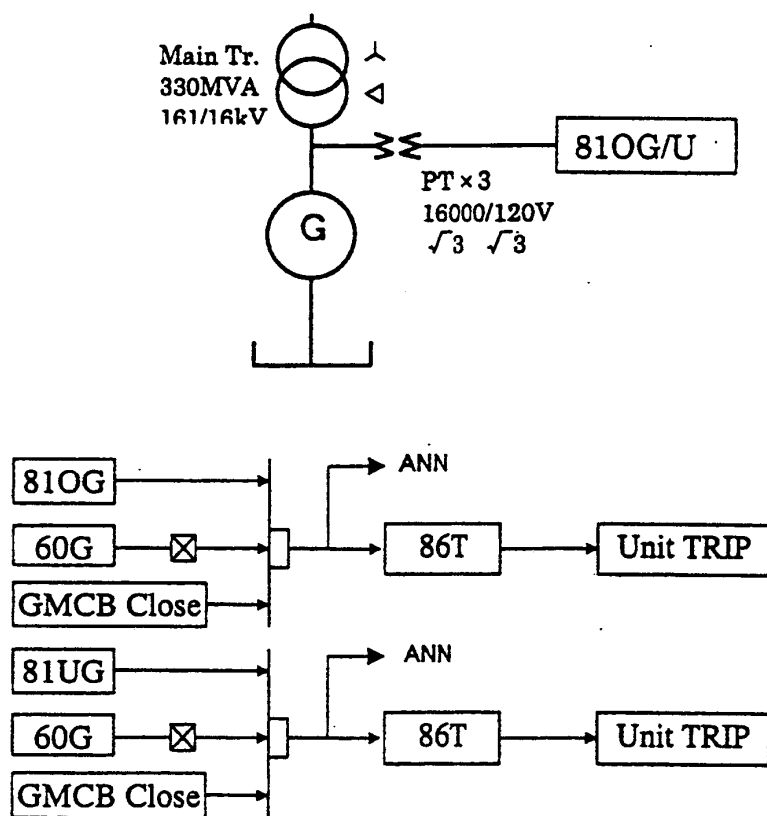
七、發電機磁場接地保護 (Generator Field Ground Fault Relay) :

發電機磁場發生接地時，造成場電壓不平衡，乃至發電機氣隙之磁通分布不均，嚴重時將導致機組之振動，危及發電機運轉；再者，在造成場電壓不平衡下，轉子線圈電流亦將不平衡，提供必要而適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



八、發電機頻率過高/低保護 (Generator Over/Under Frequency Relay) :

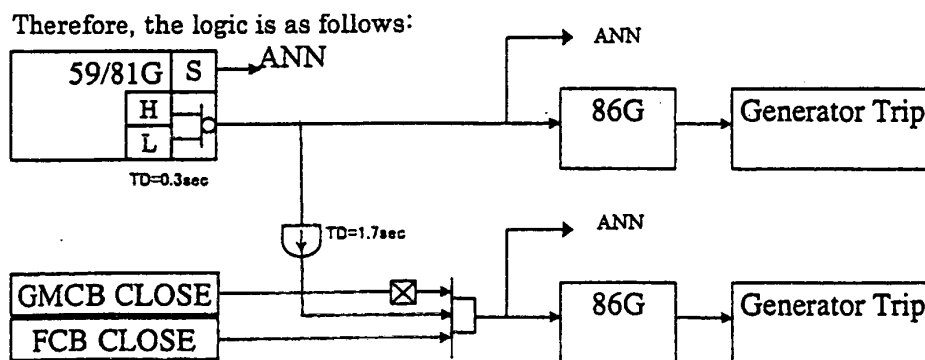
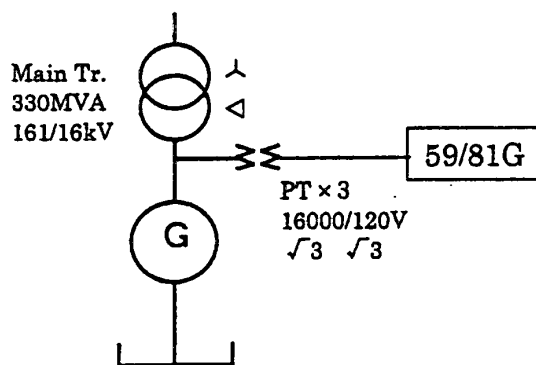
當系統異常必需執行卸載時，若卸載量不足將導致發電機過載，系統頻率過低，而卸載量過多又將導致發電機負載過剩，系統頻率過高；在頻率過高下將造成汽機之損傷，而不論過高/低均將造成發電機轉子過熱；本保護電驛即提供必要而適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



* 86T : Lock-out relay for Turbine Trip

九、發電機電壓/頻率比過高保護 (Generator Excessive V/F Relay) :

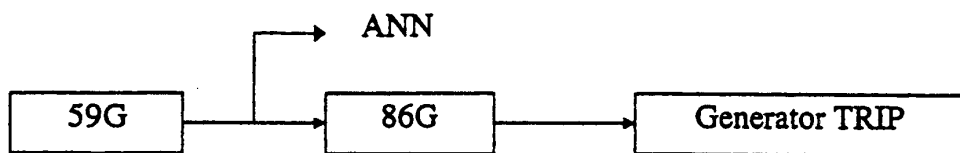
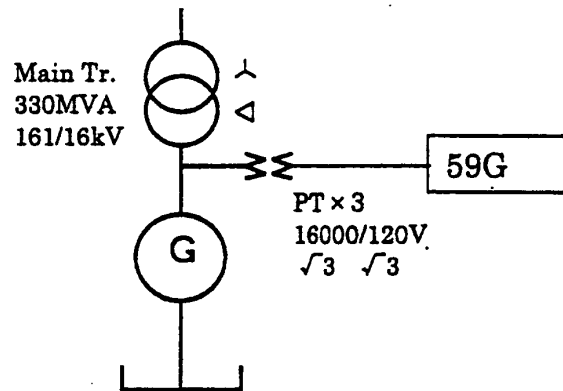
發電機電壓/頻率比過高將導致過激磁使鐵心過飽和，其過多之雜散磁通，在鐵心端部之疊片間形成感應電壓，使鐵心過熱，而過激磁則亦會造成轉子過熱；本保護電驛即提供必要而適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



* 86G : Lock-out relay for Generator Trip

十、發電機過電壓保護（Generator Over Voltage Relay）：

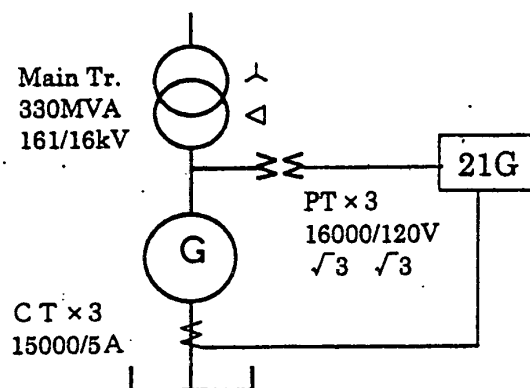
發電機過電壓大多由於電壓調整不當或自動電壓調整器動作不良所致，嚴重者將導致過激磁使鐵心過熱，本保護電驛即提供必要而適當之保護；其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



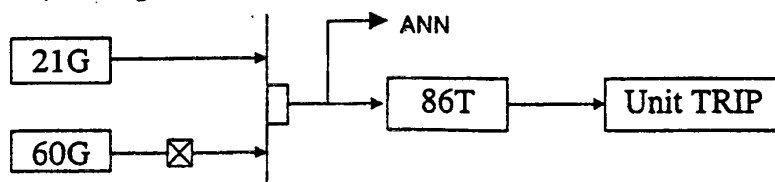
86G: Lock-out relay for Generator Trip

十一、發電機阻抗保護 (Generator Over Voltage Relay) :

本保護電驛係作為發電機之後衛保護，主要在偵測發電機之阻抗，以確認是否有接地或短路故障尚未清除，其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖：



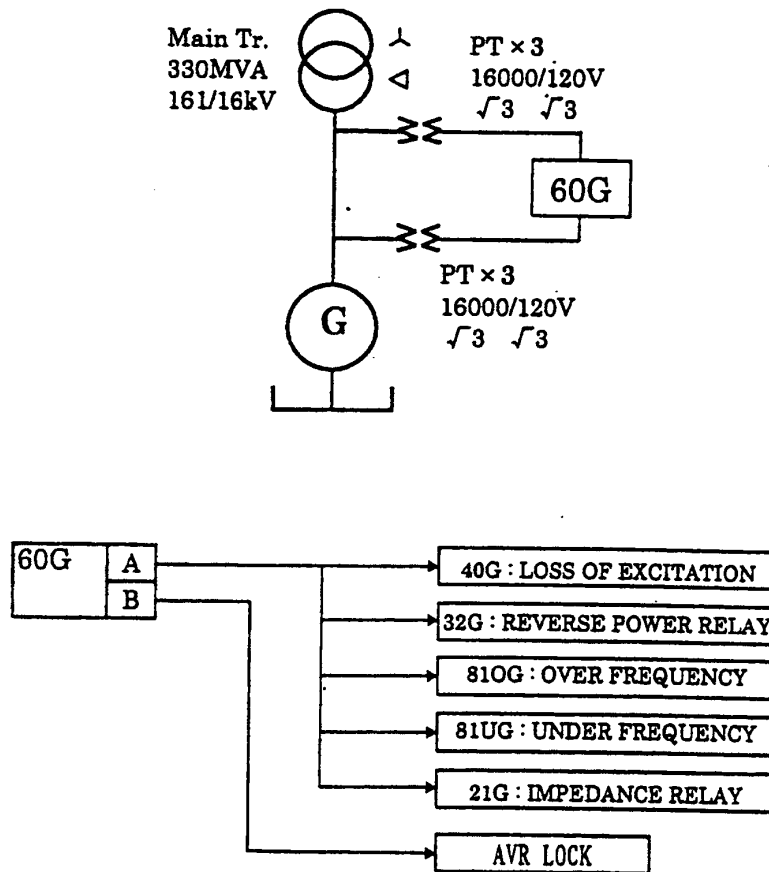
To cause Turbine trip, 60G no-operation, or voltage normal status. Therefore, the logic is as follows



86T: Lock-out relay for Turbine Trip

十二、壓平衡保護 (Voltage Balance Relay) :

當發電機比壓器回路故障 (諸如比壓器本身故障或保險絲斷路... 等), 會造成自動電壓調整器訊號異常而誤動作, 甚至引起發電機進相運轉或不必要之跳脫; 本保護電驛即在此種故障下, 能將自動電壓調整器切換至手動, 防止自動電壓調整器異常反應, 防止不必要之跳機。其實際之連接方式及跳脫邏輯詳如下圖:



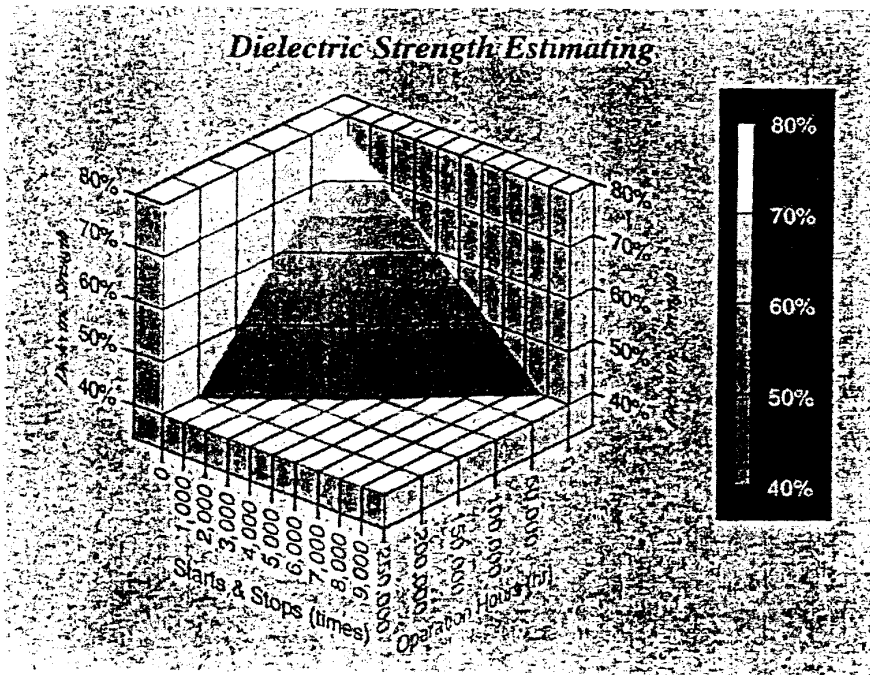
伍、心得與建議：

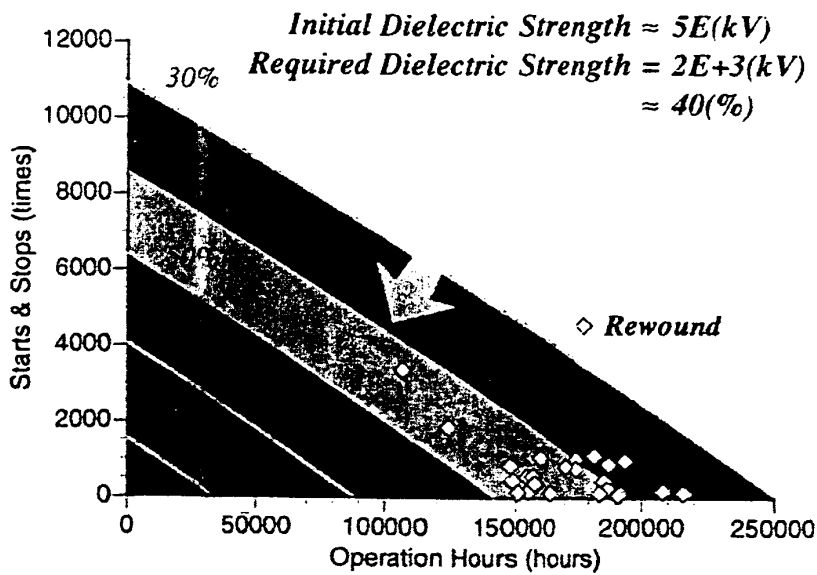
1. 本公司水、火力發電機多達 200 部，其中運轉達廿年已上者數甚多，在長時間運轉後，發電機絕緣壽命是否已老化？且由各電廠運轉條件差異甚大，例如協和發電廠曾實施二值制運轉起停頻繁，林口發電廠鹽害至為嚴重，明潭、大觀等抽蓄發電廠特殊之運轉模式，對發電機絕緣壽命是否有嚴重之影響？經三菱公司提供其研究後之經驗公式如下所示，本評估方式係三菱公司在日本取樣約達 100 部機組線圈後，統計之經驗，足堪作為本公司往後對發電機絕緣壽命評估之參考。

$$y = 100 - 3.80x_1 - 1.82x_2 - 23.9 / (1.00 + 3.70 \times 10^{-3}(x_1 - 0.748)^2 + 1.00 \times 10^{-4}(x_2 - 11.7)^2 - 2.14 \times 10^{-4}(x_1 - 0.748)(x_2 - 11.7))^{i/2} (\%)$$

where

- y: Dielectric Strength
- x₁: starts & stops (×1000 times)
- x₂: operation hours (×10000 hours)





2. 此次研習尚與日立公司發電機部門之相關人員取得連續，並有機會彼此交換對發電機發展之前景作意見交換，據其表示在日本政府之支持下，早已成立一研究超導發電機之機構（Super-GM Organization），該機構由下列十六個公司單位組成，目前已完成乙台 700MW 超導發電機之研製（採 NbTi, Nb₃Sn 合金超導體），由日立製造發電機之定子及轉子各乙台，而三菱、東芝亦各製造乙台轉子分別送至日立測試完成，其效率較現行銅導體發電機高 1% 以上，重量約為銅導體發電機之一半，體積則約為銅導體發電機之 60%，目前該機構已致力於超導同步進相機之研製，其發展

進程值得本公司注意。

Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd.

The Kansai Electric Power Co. Inc.

Kobe Steel Ltd. / Sumitomo Electric Industries, Ltd.

Showa Electric Wire and Cable Co. Ltd

Central Research Institute of Electric Power Industry.

Chubu Electric Power Co. Inc

The Tokyo Electric Power Co. Inc

Tosiba Corp. / Hitachi, Ltd. / Hitachi, Cable Ltd.

Japan Fine Ceramics. / Fujikura, Ltd.

The Furukawa Electric Power Co. Ltd.

Mayekawa Manufacturing Co, Ltd.

Mitsubishi Electric Power Corp.