

出國報告（出國類別：實習）

研習發電機、勵磁機及廠房之設計、製造以瞭解安裝及測試流程，增加日後現場機組施工品質

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：李光閔 課長、蘇銘杰 課長

派赴國家：日本

出國期間：105 年 11 月 14 日至 105 年 12 月 10 日

報告日期：106 年 2 月 6 日

# 目錄

壹、摘要-----	2
一、課程名稱-----	2
二、課程緣由-----	2
三、課程目的-----	2
四、課程表-----	2
貳、課程內容說明-----	4
一、發電機-----	4
二、發電機特性及運轉曲線-----	19
三、發電機勵磁系統-----	22
四、發電機輔助設備-封油系統-----	30
五、發電機輔助設備-定子冷卻水系統-----	37
六、發電機輔助設備-氫氣系統-----	41
參、心得及建議-----	44

# 壹、摘要

## 一、課程名稱

發電機、勵磁系統及輔助設備之設計、製造、測試、及運轉維護。

## 二、課程緣由

林口更新擴建計畫單一機組達 800MW，並且擁有高發電效率，為了解大型發電機組及勵磁機等相關保護設備之規劃設計、製造、安裝及測試相關知識，並熟悉廠家規劃之設計理念，提昇設計規劃之瞭解度，以利後續機組規劃之參考及對於日後安裝設備之測試。

## 三、課程目的

研習林口電廠更新擴建計畫發電機、勵磁機及廠房之設計、製造以瞭解安裝及測試流程等相關知識，以確保建造工程品質符合電廠運轉需求。

## 四、課程表

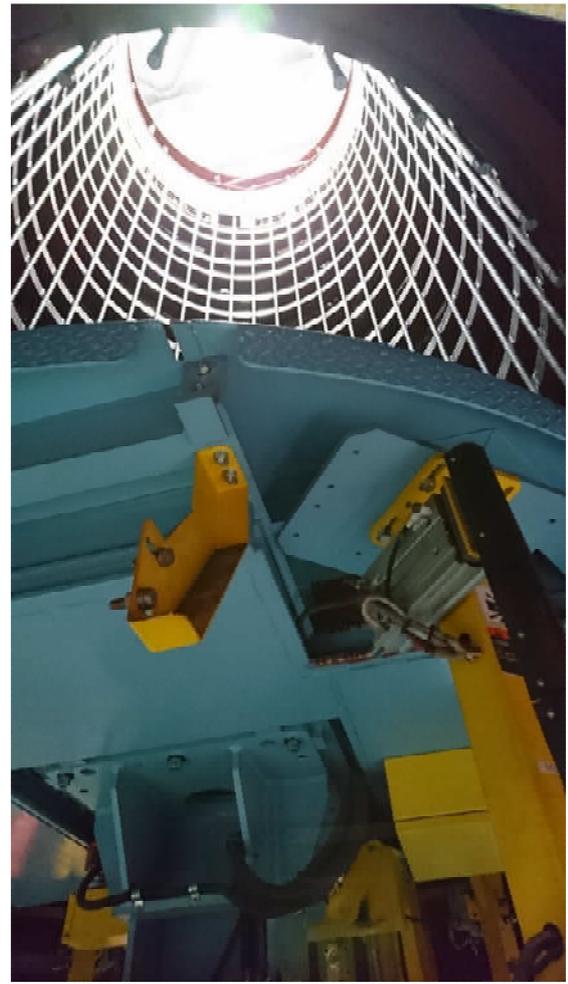
表 1-1 課程表

時間	課程	地點	
11/14~11/18	發電機製造、安裝、及運轉維護 (含工廠參觀製造流程)	兵庫神戶	
11/14~11/29	發電機輔助設備，封油系統(含 工廠參觀製造流程)、氫氣系 統、定子冷卻水系統、busduct 及 NGR cubicle	兵庫神戶/加古	
11/30	磁場斷路器工廠參觀製造流程	兵庫尼崎	
12/1	勵磁變壓器工廠參觀製造流程	兵庫赤穂	
12/2~12/10	發電機勵磁系統(含工廠參觀製 造流程)	兵庫神戶	

本次日本主要課程是在三菱電機神戶廠進行，其他如封油系統、磁場斷路器、變壓器之製造流程，三菱則安排至他區進行，課程表如表 1-1。期間，本計畫三號機正值轉子車修、定子矽鋼片堆疊作業，如照片 1-1、1-2，配合發電機課程的進行，再對照現場三號機之作業流程，對學習發電機的製造、設計、構造有事半功倍的效果。



照片 1-1 林口三號發電機轉子



照片 1-2 林口三號發電機定子外框及內部狀況

# 一、發電機

## 1. 發電機基本原理：

發電機是一種以磁為媒介將動能轉換為電能的能量轉換器，其主要運用法拉弟及楞次兩大電學定律，輔以佛萊銘右手定則，也就是當一交變的磁場通過線圈時，在線圈上就會出電流，定律中所需的交變磁場可用許多方法來呈現，如把一線圈通上交流電，或是將線圈通直流電後與轉動設備聯結，再將其與另一線圈搭配就是會生電力了，前者代表設備是變壓器，而後者則是發電機了，整個發電機系統概要如圖 2-1，圖 2-2 為發電機轉子磁場切割定子線圈示意圖。

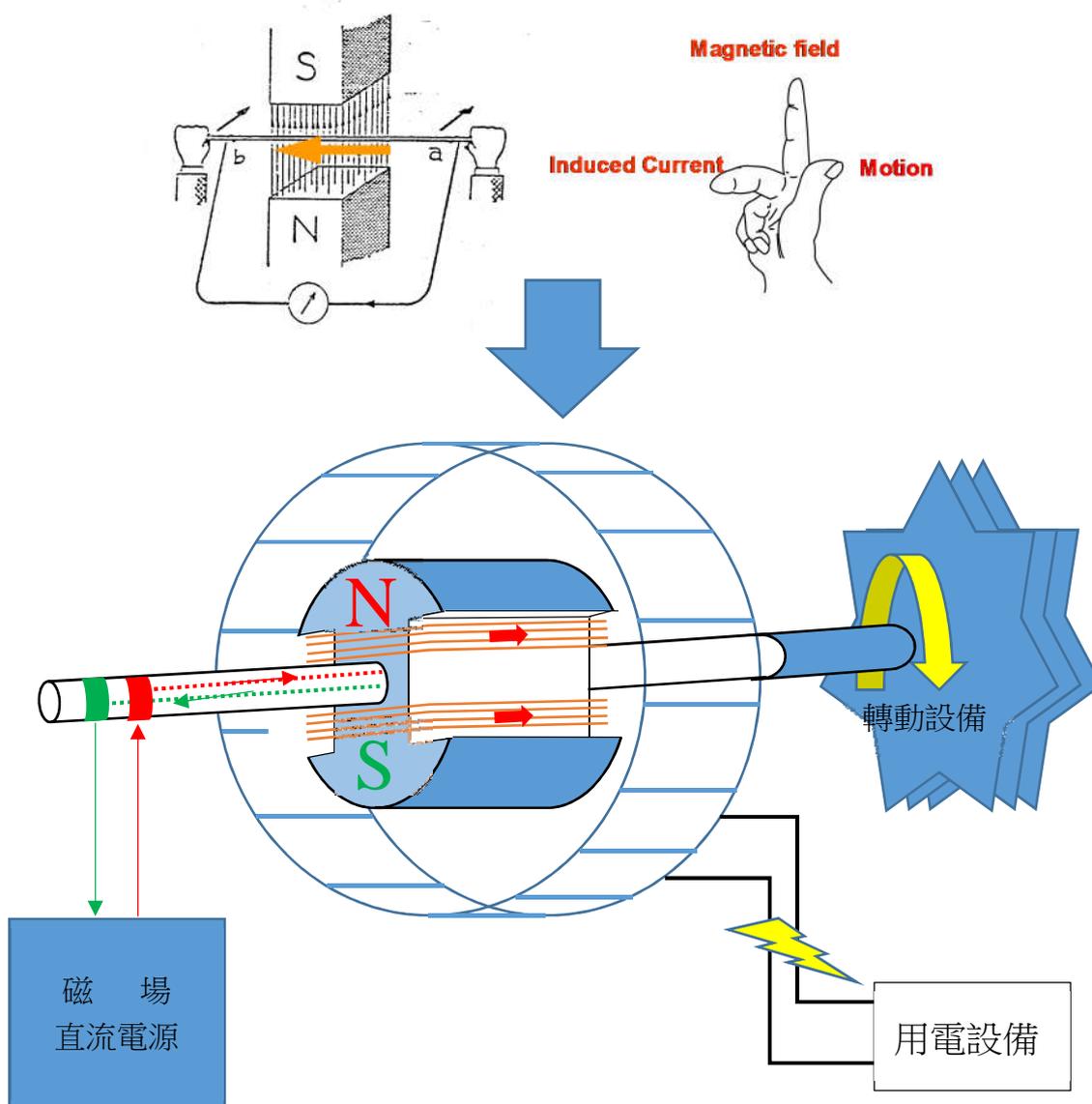


圖 2-1 發電機系統概要圖

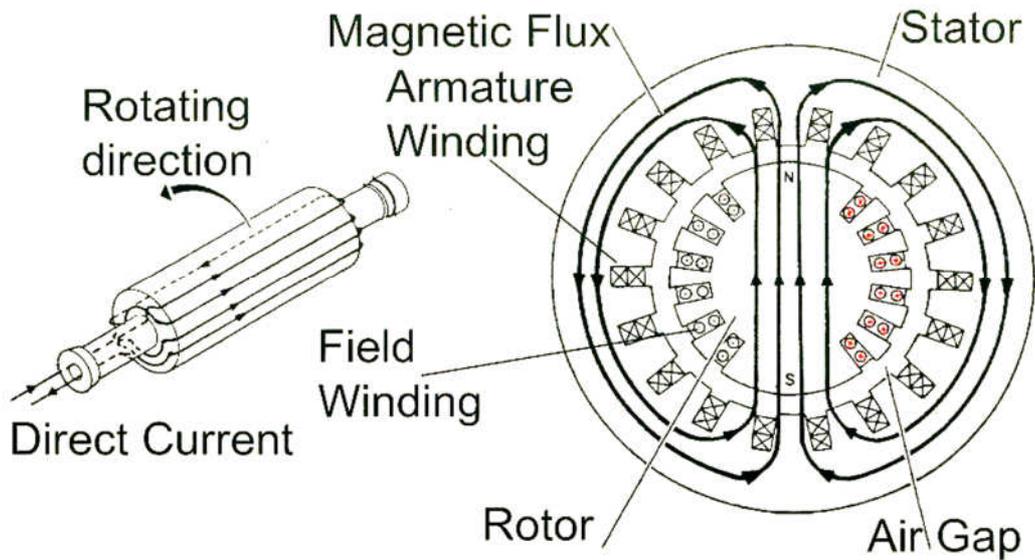


圖 2-2 發電機轉子磁場切割定子線圈示意圖

發電機輸出頻率 (f) 取決於轉速 (N) 及極數 (P)，公式如下：

$$N = 120 * f / P$$

一般來說，現世界電力系統頻率分兩大系統，一為 50HZ，另為 60 HZ，火力及核能發電廠之發電機多為 2 極及 4 極，故其相對應發電機組轉速則如表 2-1。台灣電力系統頻率為 60HZ，林口更新擴建計畫發電機極數為 2 極，從下表中可知，若要與電力系統併聯，則機組的轉速必須為 3600 r.p.m。

表 2-1 發電機頻率/轉速對照表

頻率 f	機組轉速 $N=120*f/P$	
	P=2 極 (火力系統)	P=4 極 (核能系統)
50HZ	3000 r.p.m	1500 r.p.m
60HZ	3600 r.p.m	1800 r.p.m

## 2.林口更新擴建計畫發電機規格

林口更新擴建計畫發電機為大型 800MW 氫冷式發電機，定子採水冷式，相關規格如表 2-2。

表 2-2 發電機規格表

項次	項目	規格
1	型式	Horizontally mounted Cylindrical Rotor Rotating Field Type
2	額定容量 (MW)	883.15
3	額定容量 (MVA)	1039
4	額定電壓 (kV)	25
5	額定電流 (kA)	23,995
6	頻率 (Hz)	60
7	極數	2
8	冷卻方式	轉子、定子鐵心：氫氣 定子線圈：水
9	氫氣壓力 (MPa)	0.5
10	短路比	$\geq 0.5$ at rated MVA
11	激磁電壓 (V)	550
12	絕緣等級/溫升等級	Class F / Class B

### 3.發電機構造

發電機主要構件分別為定子（Stator）及轉子（Rotor），如圖 2-3。

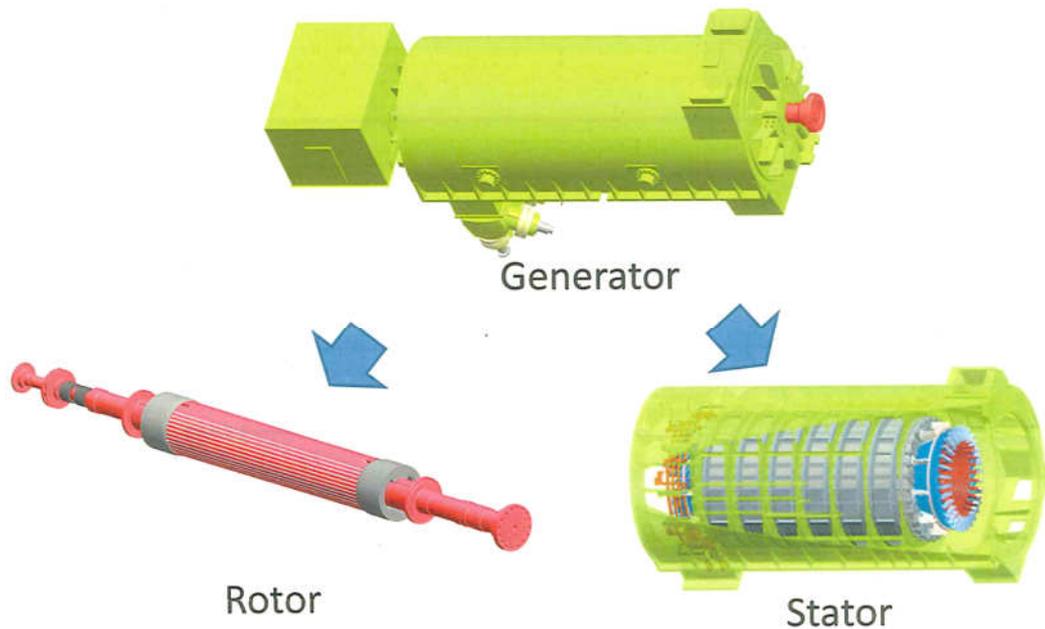


圖 2-3 發電機構造圖

#### 3.1 定子

##### 3.1.1 定子框架（Frame）

定子框架係用來固定子鐵心、發電機軸承、封油環、及相關輔助設備（如熱交換器）之用。在三菱電機公司為了能縮短製造時間，小容量發電機還將框架分為內部框架（inerframe）及外殼（outframe），兩者可同時製造，待內部框架銲接、鐵心堆疊、定子線圈安裝完成，外殼完成銲接、水壓試驗完成，再將內部框架套裝在外殼即可；至於大容發電機則因套裝設備容量關係而無法使用上述工法，需先完成外殼、框架銲接，進行後續水壓試驗，後再施作鐵心堆疊、線圈安裝，製造流程如圖 2-4。

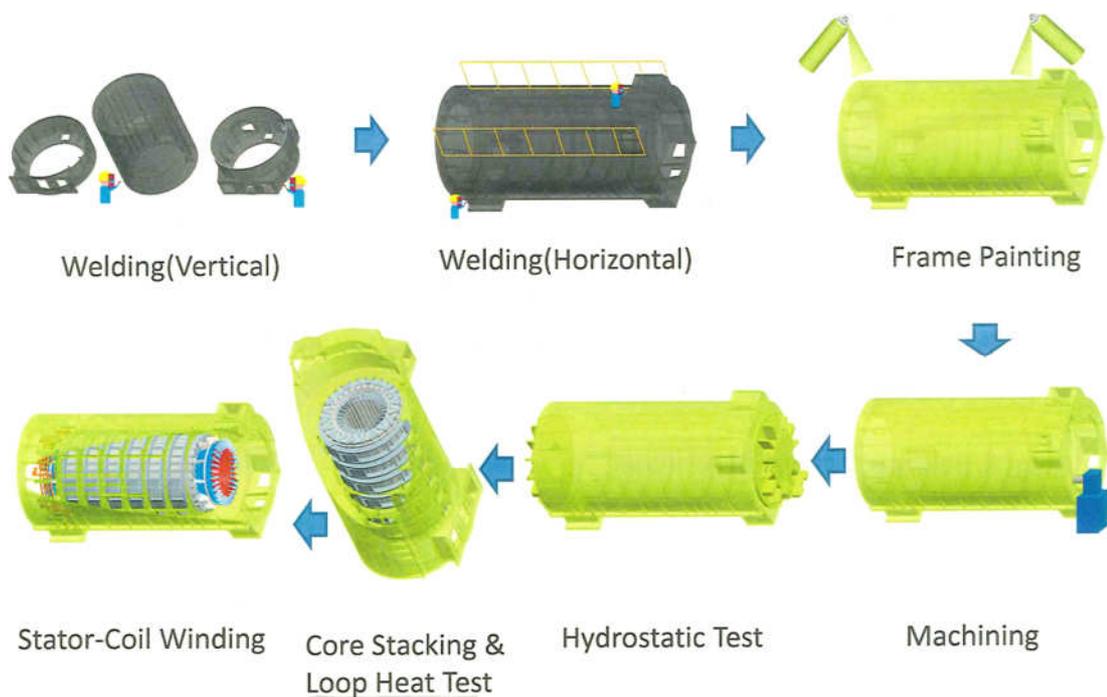


圖 2-4 大容量發電機定子框架製造流程圖

林口新機組為 800MW 大容量機組，為要有好的效率，故發電機內部採用氫氣冷卻，運用氫氣冷卻主要是因氫氣的熱交換效率是空氣的七倍，但因氫氣是可燃氣體，故發電機的外殼強度必須設計為耐壓防爆型式，耐壓強度則以氫氣最大爆炸強度 0.7MPag（約 7kg）乘 1.5 倍安全係數（等於 1.05MPa=10.5kg）為設計基準，故發電機內部氫氣爆炸時，其威力也不會波及周遭人員及設備。

### 3.1.2 定子鐵心

由高導磁性矽鋼片（最薄者厚度僅 0.35 mm）堆疊而成，矽鋼片上依設計會有定位孔、固定螺栓孔及氫氣冷卻通風孔等，小容量發電機定子鐵心可由機器手臂自動堆疊，中大型發電機定子鐵心仍需以人力一片一片堆疊，林口新機組發電機為大容量需將完成之外殼豎立起來，由人工在其內部堆疊鐵心（如圖 2-5），約需費時 2 個月，堆疊完成後以數支螺栓（Through Bolt）貫穿整個鐵心鎖緊固定，如圖 2-6。

定子鐵心堆疊鎖固完成後以彈性元件固定於外殼內，如圖 2-7，其係利用彈性元件吸收運轉時定子鐵心之振動，避免振動直接傳遞到基礎，連帶影響其它設備之運轉。



圖 2-5 鐵心堆疊作業

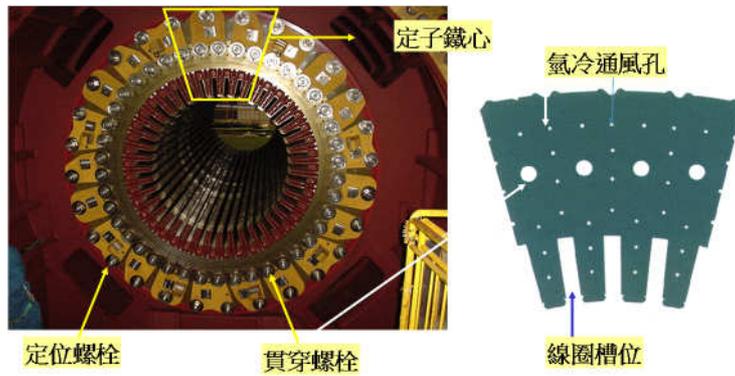


圖 2-6 鐵心貫穿螺栓鎖固位置

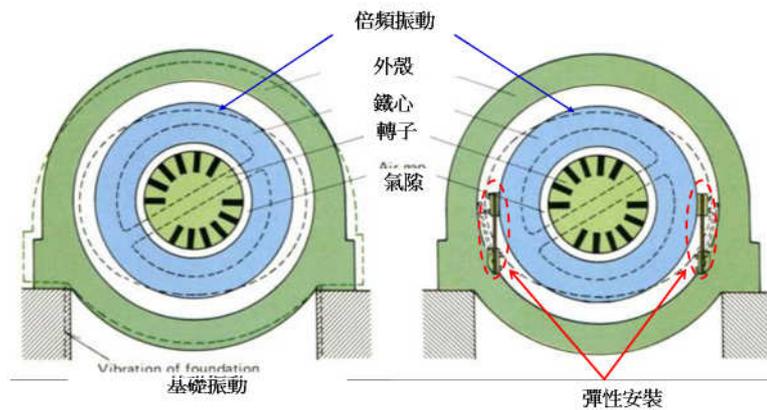


圖 2-7 定子鐵心有無安裝彈性原件比較圖

### 3.1.3 定子線圈

安裝於定子鐵心之線圈槽位（Coil Slot）中，林口新機組發電機共設計有 36 槽，每槽有上、下導體共 72 根導體，每根導體又由數條銅導線構成，其構造如圖 2-8，為了降低渦流損失，槽內銅導體採羅貝爾換位法（Roebel Transposition Method），如圖 2-9。線圈之絕緣材料，主要成份為雲母、環氧樹脂及布料等製成，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，與線圈本體之膨脹係數接近，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

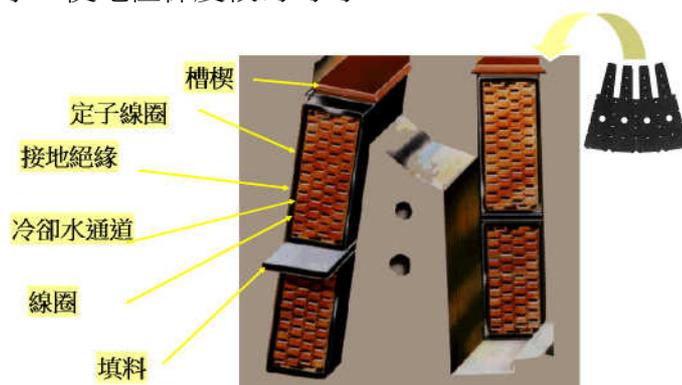


圖 2-8 定子線圈構造截面圖

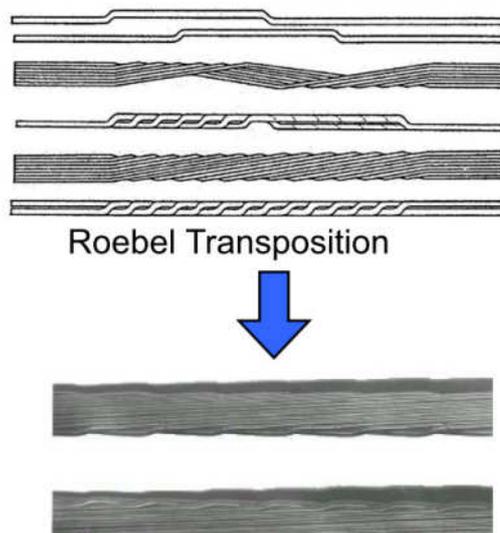


圖 2-9 羅貝爾換位

### 3.1.4 定子線圈引出固定方式

定子線圈最後將引出至結線引出箱（Lead Box）接上絕緣礙子（Insulation Bushing），再連接隔相匯流排（IPBD）至主變壓器（Step-up Transformer）一次側，但定子線圈引出至定子鐵心外時為懸空並沒有支

撐，另加設一樹脂環（Resin Cone）作為定子線圈引出之固定支撐，最後澆灌樹脂填滿定子線圈間與樹脂環空隙形成一體，如圖 2-10，最後以分相環（Phase Ring，即環型匯流排，如圖 2-11），區分定子線圈至各相（R、S、T 及中性點）後分別引接至 Lead Box。

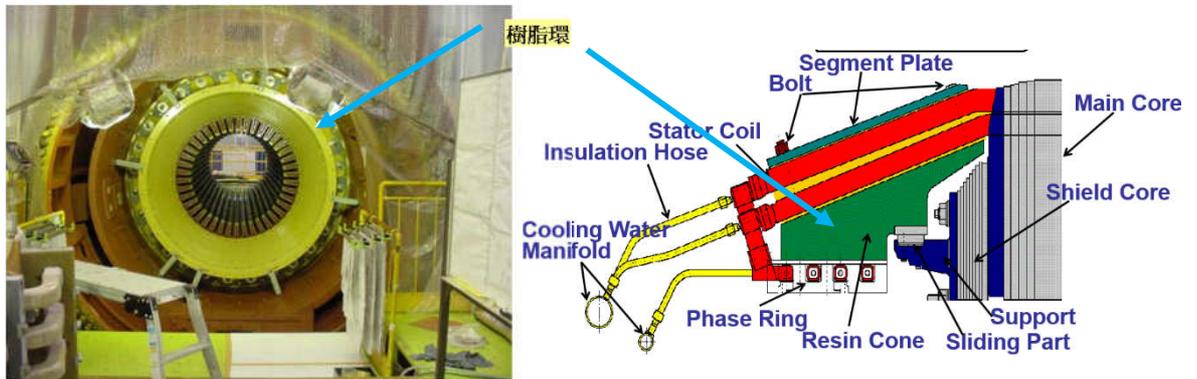


圖 2-10 樹脂環安裝圖

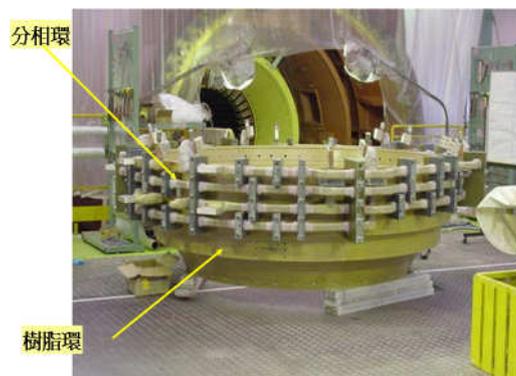


圖 2-11 分相環

因林口新機組發電機容量大，三菱電機公司設計定子線圈散熱採水冷方式，故分相環外側還有一環型水管（Manifold）與每一定子線圈以絕緣可撓式水管（Insulation Hose）連接，作為冷卻水循環之用，如圖 2-12、13。

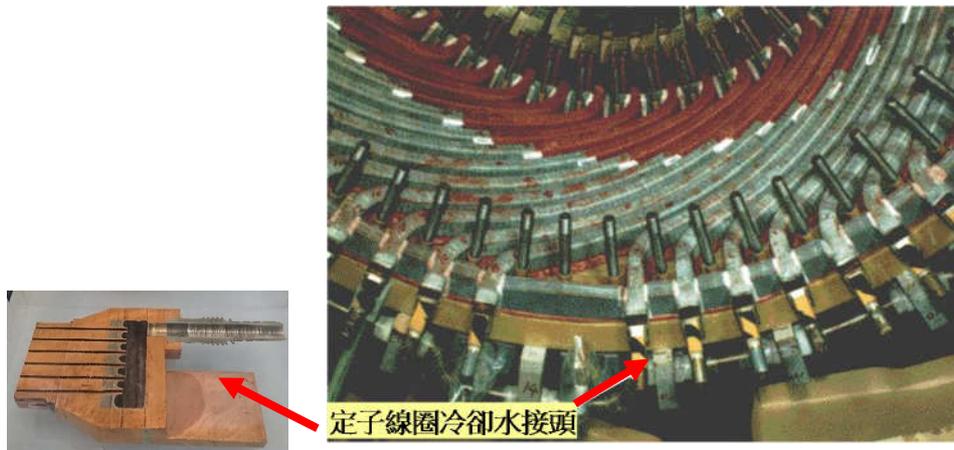


圖 2-12 定子線圈冷卻水接頭安裝位置及接頭構造圖

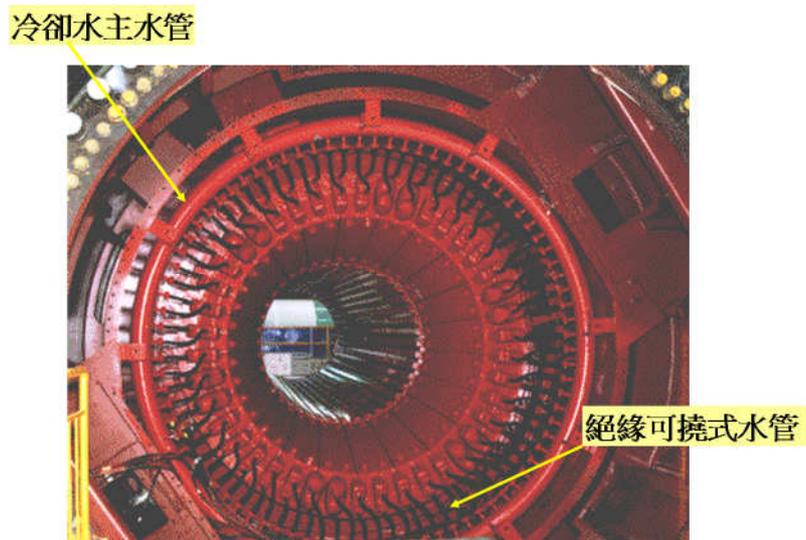
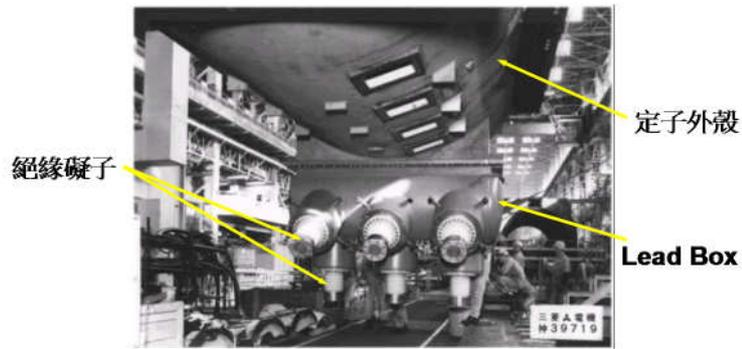


圖 2-13 定子冷卻水可撓式水管安裝圖

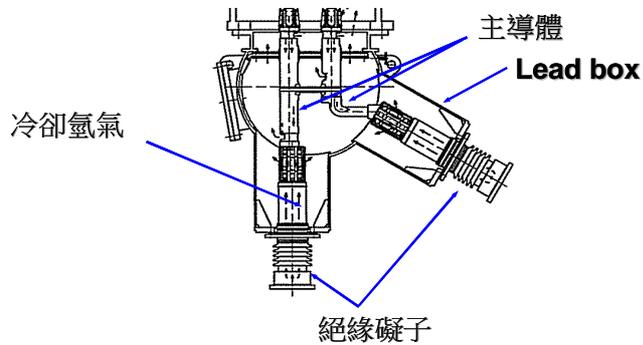
### 3.1.5 結線引出箱 (Lead Box)

分相環區分 3 相 (RST) 線路及 3 條中性線引接至結線引出箱內連接絕緣礙子，共有 6 個 (3 個為線路，3 個為中性點)，礙子頂部端子即與外部 IPBD 等連接處，如圖 2-14 (a)。

三菱電機公司針對林口計畫設計之發電機結線引出箱安裝在發電機下端，內主導體採氫氣冷卻，氫氣在導體內之流向如圖 2-14 (b)，因引出箱為現場組裝，故針對安裝完成後氫氣洩漏試驗是否合格尤其注重。



(a)



(b)

圖 2-14 結線引出箱配置圖

### 3.2轉子

#### 3.2.1 轉軸 (Rotor Shaft)

轉子為 Ni-Cr-Mo-V 合金鋼鍛造，使用車床車修出線圈佈放之槽 (Slot)，另因線圈槽區開了許多槽，以極端簡化狀況下相當類似於挖空，而在極面區是實心鋼材，其剛性並不均衡，高速旋轉時尤其在 2 倍頻率狀況下會產生較大之振動，故在極面 (Pole) 區域切出橫向溝槽 (Cross Slot) 與線圈槽垂直，作為均衡整個轉子剛性 (Uniform Rigid) 之用，如圖 2-15 切槽圖及圖 2-16 振動分析圖。

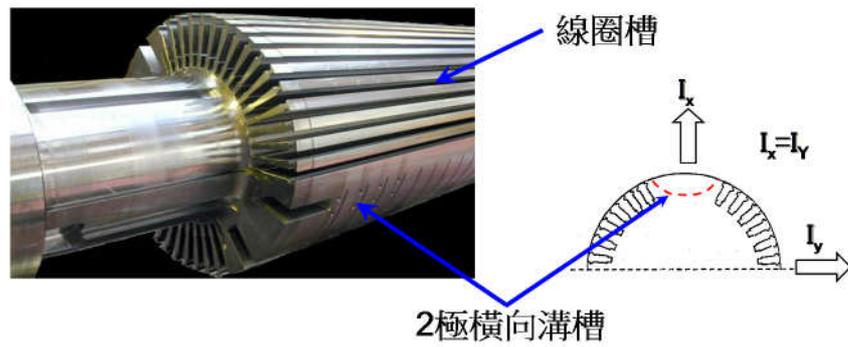


圖 2-15 轉子切槽圖

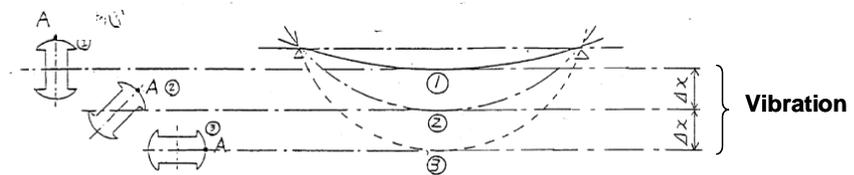


圖 2-16 振動圖

### 3.2.2 轉子線圈

線圈由上下 $\pi$ 字型銅導體組合而成如圖 2-17，林口發電機轉子每一槽安裝 6 匝線圈，每一匝線圈中間為冷氫 ( $H_2$ ) 之通道，至線圈槽軸向中段區域經由數個出風口將熱氫排出，此為三菱電機公司最新之設計，相較以往之設計（出風孔平均分布於整個線圈槽），此設計之冷卻效率更佳。

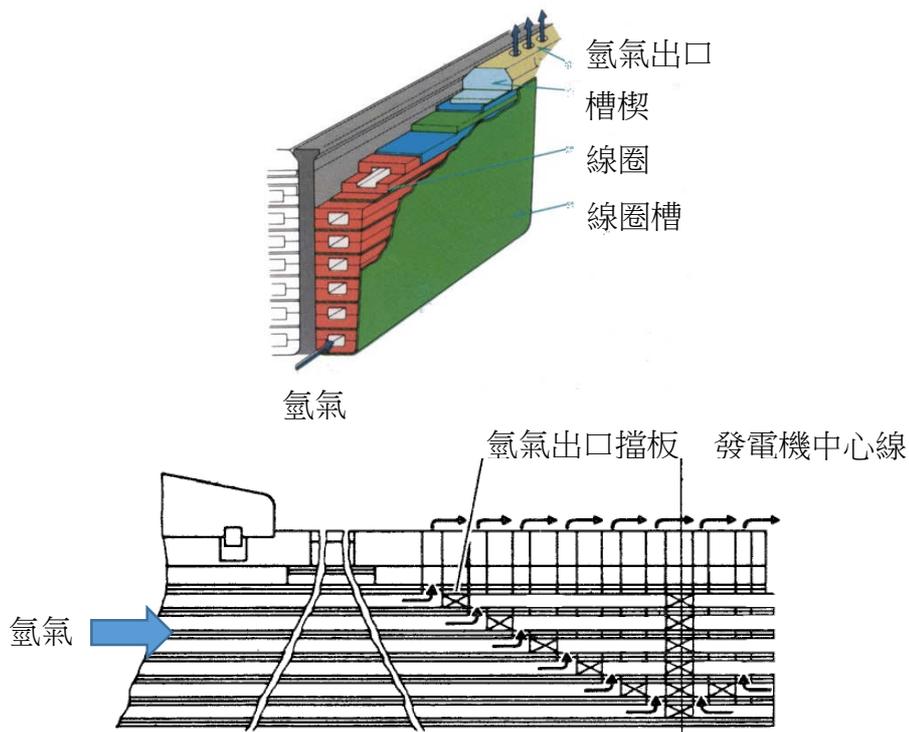


圖 2-17 轉子線圈截面圖

### 3.2.3 轉子線圈末端處理

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，採用之鋼材係 18 Mn -18Cr，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，如圖 2-18、19 所示，當轉子轉動時，此壓力稍減，在超過同步轉速 20%時 此壓縮環仍能以輕度壓力壓於線圈端上，使線圈不至鬆散。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，以供線圈軸向熱膨脹。

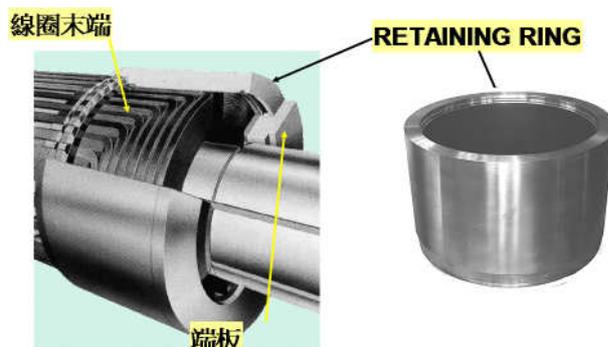


圖 2-18 壓縮環安裝位置



圖 2-19 壓縮環加熱、安裝方式

### 3.2.4 鼓風機 (Blower)

此為多級式軸流鼓風機 (Multi-Stage Axial Blower)，林口發電機之設計為靜葉片 6 級，動葉片 5 級，作用為使氫氣循環於定子、轉子中長而狹窄的風道，提高冷卻效率，配置位置如圖 2-20 所示。

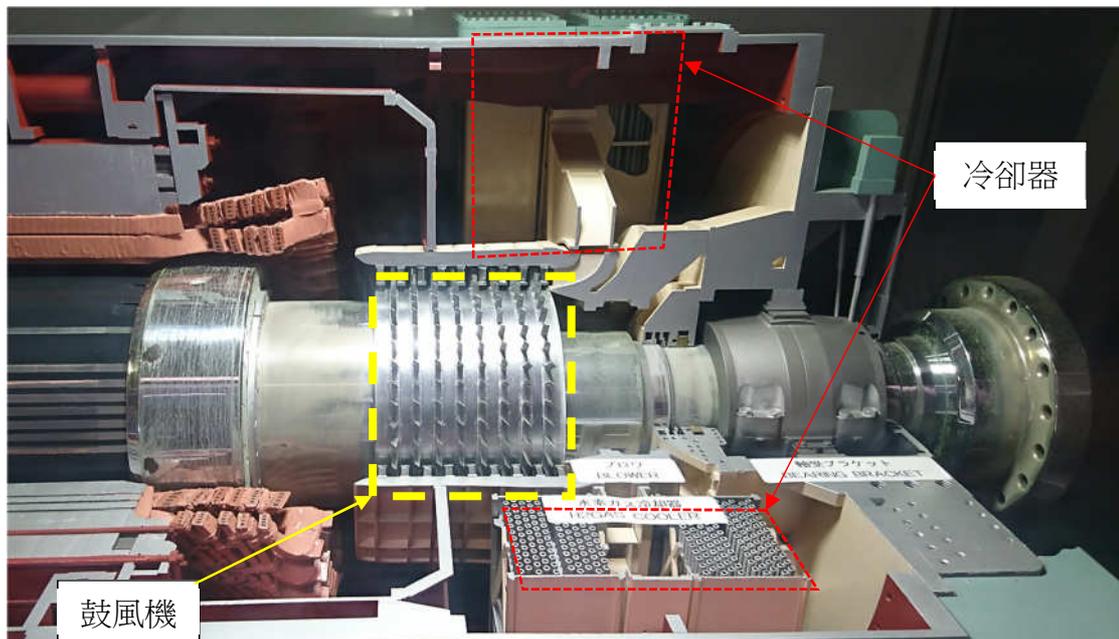


圖 2-20、發電機內部鼓風機及冷卻器安裝位置截面圖

### 3.2.5 氫氣冷卻器

在發電機滑環側配有 2 組氫氣冷卻器，位置如圖 2-20，其為直立螺旋鰭管式，每組均有兩段獨立水路，如圖 2-21；發電機發電容量與冷卻器水路運轉段數有關，其關係如表 2-3 所示。

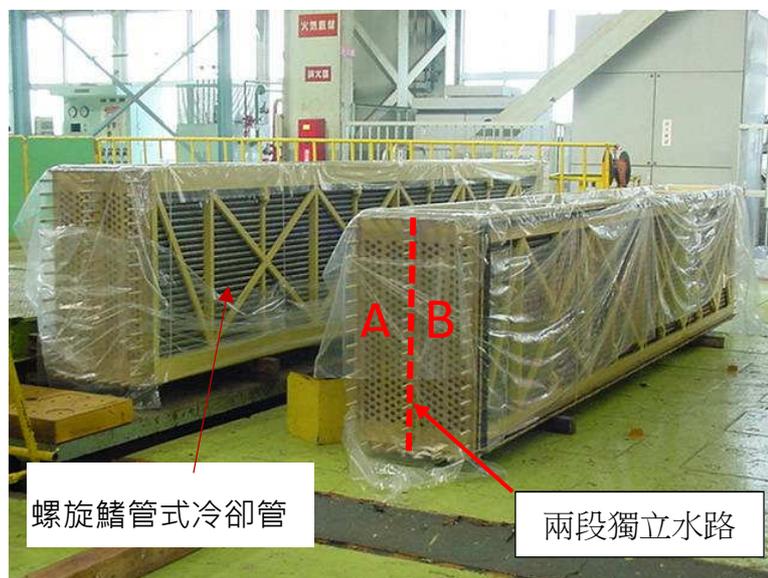


圖 2-21 氫氣冷卻器

表 2-3 發電機冷卻器段數與發電機容量比較表

情形	冷卻器停用數／總數	負載允許值(%) (100%額定氣壓之額定容量)
	1/4	90
	2/4	85
	2/4	65

: 使用中     
 : 停用中

### 3.3 滑環及碳刷

轉子線圈引接至滑環，分為正、負極，接受勵磁系統輸入的直流電經由碳刷、滑環（如圖 2-22）至轉子線圈。

滑環為螺旋溝槽，可使碳刷與滑環磨擦更平均，且溝槽有助於散熱及使摩擦後之碳粉可沿溝槽掉落下方，易於收集、清除。

勵磁機供應激磁電流經碳刷傳遞至滑環，再由滑環至轉子線圈產生旋轉磁場切割定子線圈輸出電能。

碳刷安裝於碳刷架上（Brush Holder），每一個碳刷架可配置 5 個碳刷設計有卡片式（Cartridge Type）及雜誌架式（Magazine Type）二種，林口發電機採用 Magazine Type（如圖 2-23），主要考量為碳刷數量較多（36 個碳刷架，共 180 個碳刷），此種探刷架較易維護，但每次只能更換總碳刷數的 10%，以林口發電機為例，每次最多只能換 18 個碳刷，即 3 個碳刷架（15 個），因新碳刷表面是平的，與滑環接觸面積小，需經一星期磨合後其表面形狀才會完全與滑環密接，也代表下一星期才能更換下一個 10%，若一次更換太多，因較多碳刷與滑環接觸面積小，所能傳遞之激磁電流變小，將影響發電機之運轉能力。

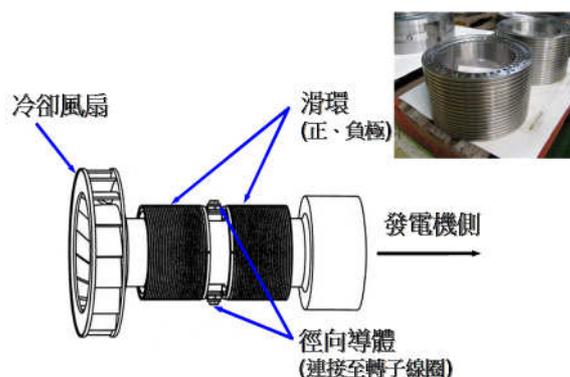


圖 2-22 發電機滑環

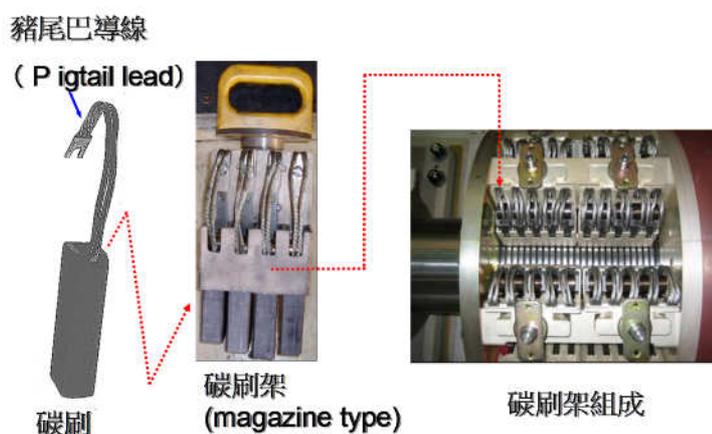


圖 2-23 碳刷架

## 二、發電機特性及運轉曲線

### 1. 特性曲線

$I_{fo}$ ：發電機開路（定子線圈 3 $\phi$  開路）試驗中將激磁電流增加，當定子線圈電壓達到額定電壓時之激磁電流值。

$I_{fs}$ ：發電機短路（定子線圈 3 $\phi$  短路）試驗中將激磁電流增加，當定子線圈電流達到額定電流時之激磁電流值。

$I_{fl}$ ：當定子線圈達到額定電壓/電流時之激磁電流值，因發電機容量大，如林口案 1039MVA，於工廠內無法實際供應如此容量之電力測試，故  $I_{fl}$  由開路及短路試驗數據推算得出。

無載飽和曲線：發電機未並聯取載時激磁電流與端電壓之關係  
 短路比 (SCR) =  $I_{fo} / I_{fs}$

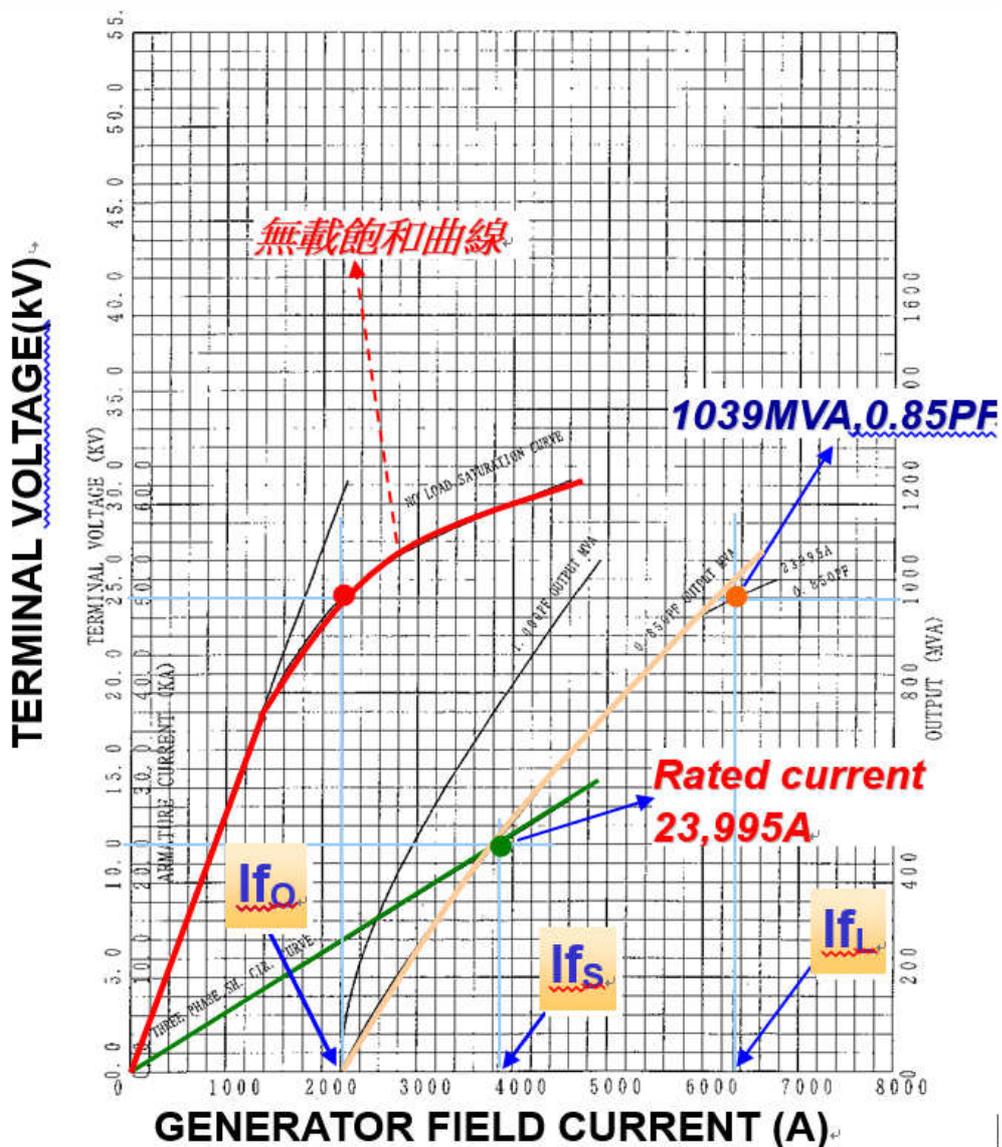


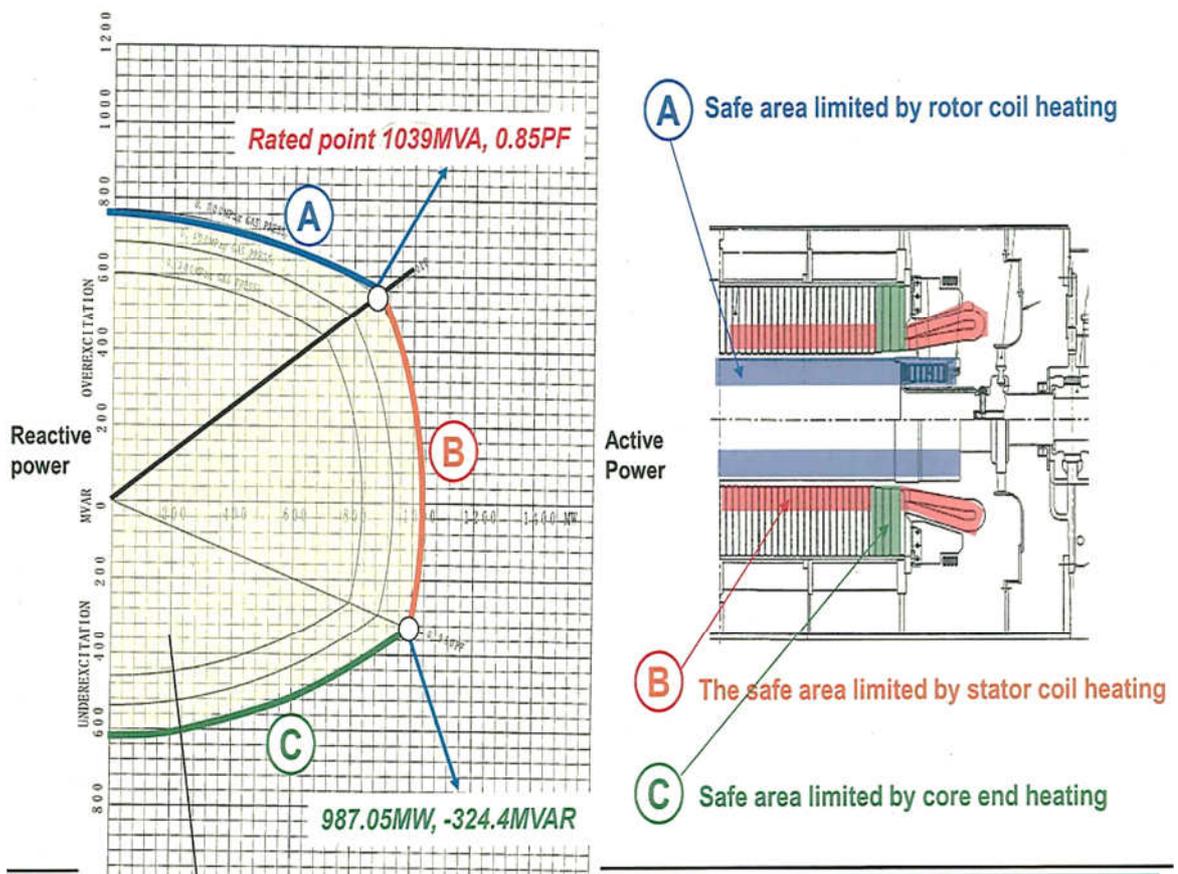
圖 2-24 發電機特性曲線

## 2. 運轉能力曲線 (Capability Curve)

因發電機之定子鐵心、定子線圈及轉子線都有其運轉溫度限制，相關溫度限制曲線如圖 2-25，各限制曲線說明如下：

- (1) 曲線 A 段內：轉子線圈過熱限制安全區
- (2) 曲線 B 段內：定子線圈過熱限制安全區
- (3) 曲線 C 段內：定子鐵心端部過熱限制安全區

綜上所述，為運轉安全，發電機必須運轉在 A、B、C 連成之曲線範圍內，實務上需配合 MEL (Minimum Excitation Limit)、OEL (Over Excitation Limit) 等設定以確保發電機運轉安全無虞。

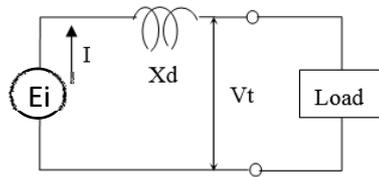


發電機運轉範圍

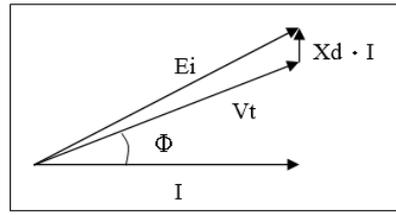
圖 2-25 運轉能力曲線

### 3. 電壓曲線 (V Curve)

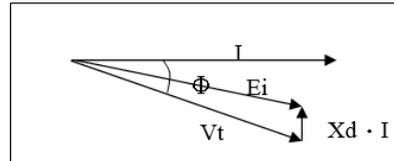
顯示激磁電流與發電機輸出之關係



I: Line current  
 Vt: Terminal voltage  
 Ei: Internal electromotive voltage  
 $\Phi$ : Power factor  
 Xd: Reactance



Lagging



Leading

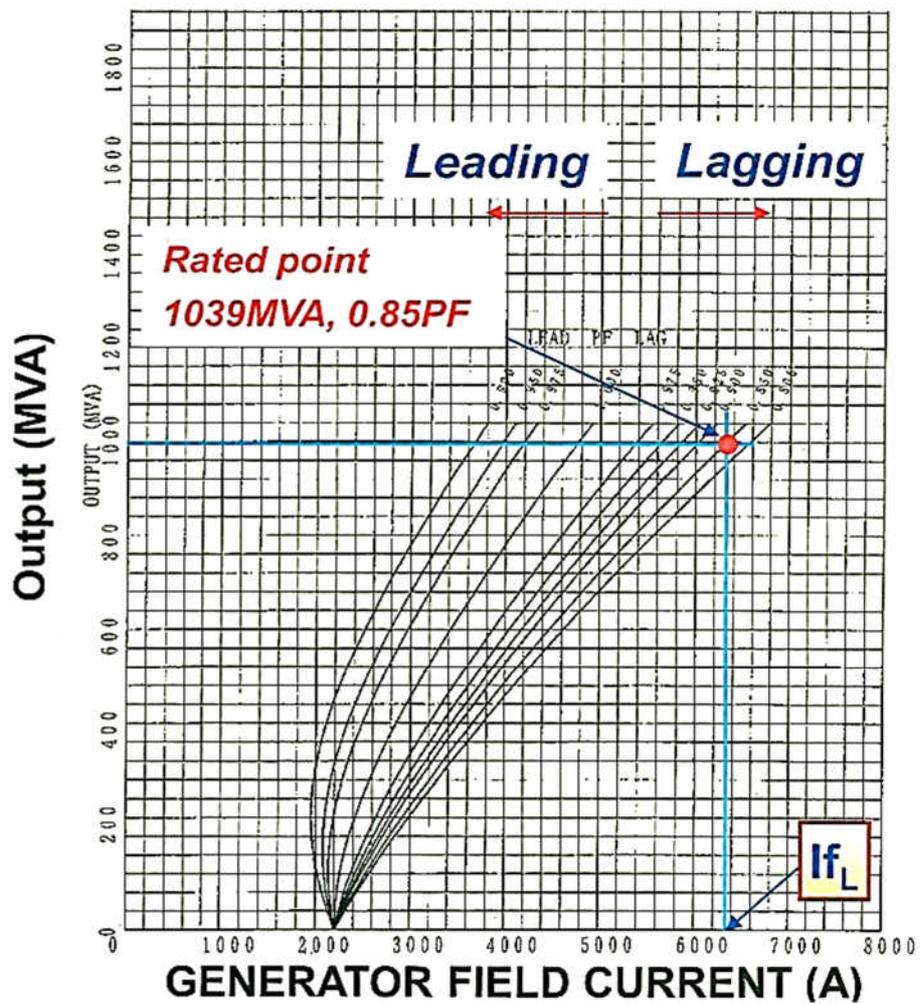


圖 2-26 發電機電壓曲線

### 三、發電機勵磁系統

發電機是以磁為媒介將動能轉換為電能的設備，故需由外部經由碳刷、滑環將電源導引至轉子線圈產生磁場，再由汽輪機帶動後，使磁場切割定子線圈後產生電力，前述的電源就是勵磁系統；一般，發電機勵磁系統型式分為有刷及無刷式，本計劃為大容量機組，故使用有刷式，設備包含勵磁變壓器（ETR）、斷路器、勵磁盤（Excitation Panel）、自動電壓調整器（AVR），架構如圖 2-27。

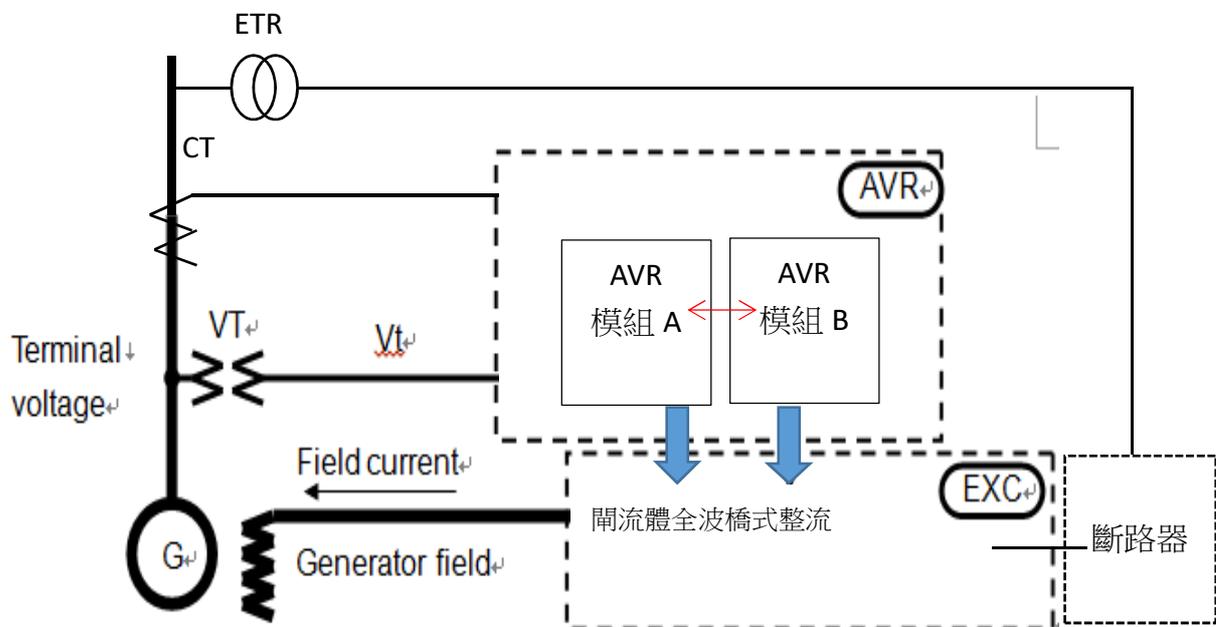


圖 2-27 勵磁系統架構圖

1.勵磁系統設備規格如表 2-4

表 2-4 勵磁系統規格表

設備	項目	規格
勵磁變壓器	額定容量	12250kVA
	一次側額定電壓	25kV
	二次側額定電壓	1230V
	阻抗電壓（%Z）	10.2
交流銅排	最大額定電壓	1230Vac
	額定電流	5760A ac
	Rated short-time withstand current	61kA ac for 2sec
	Rated momentary withstand current	158.6kA peak
	Rated insulation levels	19000 V for 1min
斷路器	額定電壓	12000V
	額定電流	8000A
	Interrupting current	85kA
勵磁盤	額定輸出	3850kW
	額定輸出電壓	550V
	額定輸出電流	7000A
	滿載磁場電壓	476V
	滿載磁場電流	6325A
	Ceiling voltage	1428V
	閘流體整流型式	三相全波橋式整流
	閘流體原件型號	N750CH30
	Peak Reverse voltage	4200V
	閘流體組數	6+1（Redundant）
直流銅排	最大額定電壓	550V dc
	額定電流	7000A dc
	Rated short-time withstand current	75kA dc for 250ms
	Rated momentary withstand current	1950kA peak
	Rated insulation levels	4200 V
自動電壓調整器	型式	MEC700 （Digital AVR）

## 2.自動電壓調整器（AVR）

AVR 模組有 2 套為線上備援（On Line Redundant）設計，模組 A、B 同時運作，模組 A 為預設主控制器，模組 B 為備援，當模組 A 異常會自動切換至模組 B；異常將況分為三級，分別為輕度、中度及重度，系統會依等級狀況切換模組，切換方式如表 2-5；在控制模式方面，當發生輕度異常時，模組仍能在自動模式下操作，中度時系統會自動切換至手動模式，重度時機組則會跳機。AVR 模組擷取發電機及勵磁系統電壓、電流等資料，比較電壓設定器（90R）及發電機端電壓，計算後發出點火觸發角度信號給閘流體，供應激磁電流給發電機轉子磁場線圈，如圖所示。

表 2-5 AVR 切換方式對照表

模組 A 狀況	模組 B 狀況	模組運轉切換
正常	正常	A 模組（預設）
輕度	正常	A→B
輕度	輕度	B
輕度	中度	B→A
中度	中度	A
重度	中度	A→B
重度	重度	機組跳機

### 2.1 AVR 主要功能

#### 2.1.1 調整發電機輸出電壓

如圖 2-28，AVR 量測發電機端電壓（ $V_t$ ）與電壓設定器（90R）比較。若  $V_t > V_{90R}$ ，AVR 指令勵磁機（Exciter）降低磁場電流，使  $V_t$  下降。若  $V_t < V_{90R}$ ，AVR 指令勵磁機（Exciter）增加磁場電流，使  $V_t$  上升。

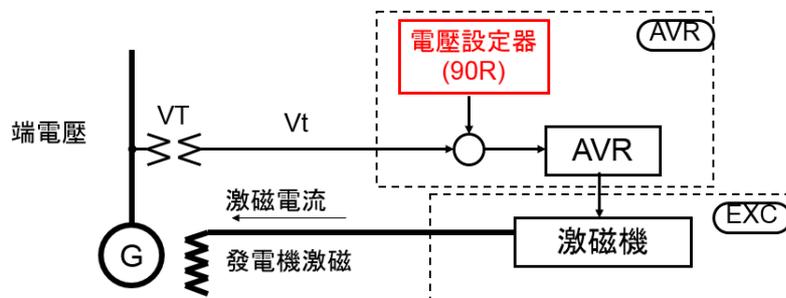


圖 2-28 AVR 控制圖

### 2.1.2 調整無效功率 Q

$$Q = (V_t - V_s) * |V_t - V_s| / X_e$$

由公式及等效電路（如圖 2-29）可知系統電壓（ $V_s$ ）、變壓器及線路阻抗（ $X_e$ ）幾乎為定值，依靠調整電機端電壓才可能得到較大之虛功調整範圍。

90R 調升， $V_t$  上升，Q 增加。

90R 調降， $V_t$  下降，Q 減少。

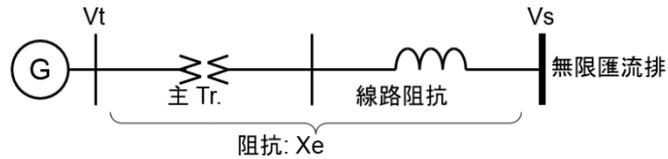
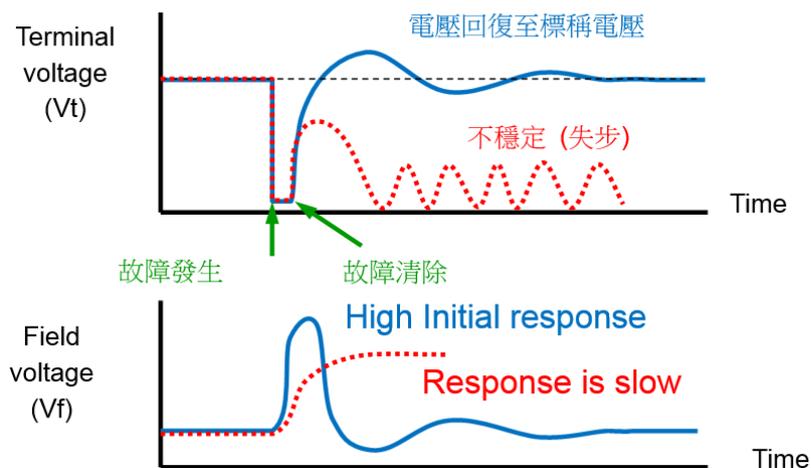


圖 2-29 等效圖

### 2.1.3 改善電力系統穩定度（Power System Stability）

當電力系統故障，發電機負載突然降低，如一條線路發生 3 相短路故障，發電機輸出功率驟降，故障清除後，負載回復過程中 PSS 會協助將變動幅度降低，變動時間縮短，可改善暫態及動態穩定度。

暫態穩定度改善，端賴勵磁系統快速反應（High Initial Response）之特性，當輸電線發生短路故障，系統電壓快速下降，AVR 指令勵磁機提高磁場電壓以維持發電機端電壓穩定，若無法維持電壓穩定，極易造成發電機無法與系統同步，如圖 2-30。



圖、2-30 改善電力系統穩定度曲線

動態穩定度改善，主要依靠 PSS（Power System Stabilizer），屬於 AVR 附屬軟體功能。PSS 快速反應系統運轉上的變動，調整勵

磁系統輸出減少系統擺盪（swing），如圖 2-31。

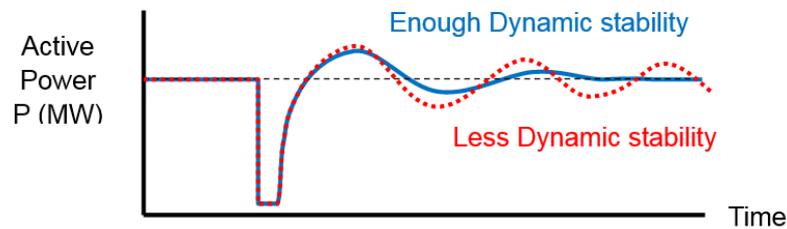


圖 2-31 AVR 減少系統擺盪波形

#### 2.1.4 抑制發電機卸載後之過電壓

在機組卸載時，特別是在滿載情況下發電機斷路器或開關場之 GIS 突然打開，此時發電機瞬間失去負載，對發電機氣隙而言，瞬間電樞電流(即定子電流)降為零，但機組之轉軸因機械慣性之因素，在此瞬間仍維持近同步轉速，故發電機產生電壓突升現象，為抑制該現象，AVR 透過調整閘流體點火角度瞬間調降勵磁電流，進使發電機端電壓下降至正常值並維持穩定，如圖 2-32。

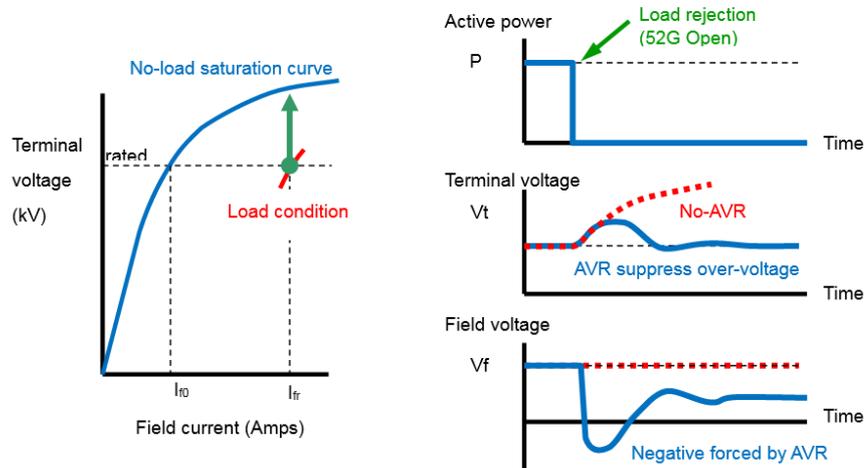


圖 2-32 抑制電壓曲線圖

### 2.2 AVR 控制模式

#### (1) 自動模式 (AUTO Mode)

調整使發電機端電壓為固定，亦稱定電壓模式 (Voltage Constant Mode)。

#### (2) 手動模式 (Manual Mode)

調整激磁電流使激磁電壓為固定，亦稱磁場電壓固定模式 (Field Constant Mode)，本模式僅限於 PT、Analog Input 故障或測試時才可使用。

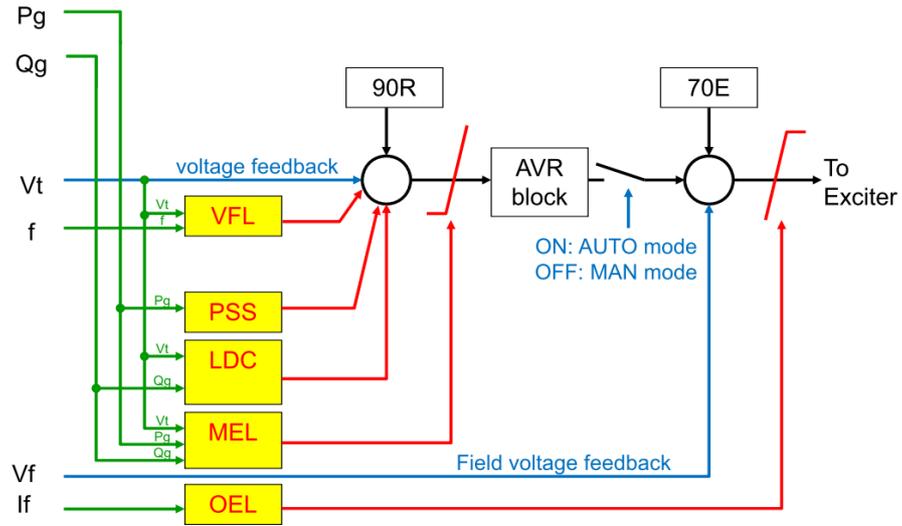


圖 2-33 AVR 控制方塊圖

## 2.3 AVR 限制保護功能

### 2.3.1 OEL 過激磁限制保護 (Over Excitation Limiter)

OEL 限制功能是限制磁場電流以避免轉子線圈過熱，如圖 2-34，AVR 監控磁場電流現況，如電流超過設定值，則 AVR 會依反時特性曲線（如圖 所示）在設定時間內將磁場電流降至額定值，如要復歸，則需將電流再降至 0.95%。

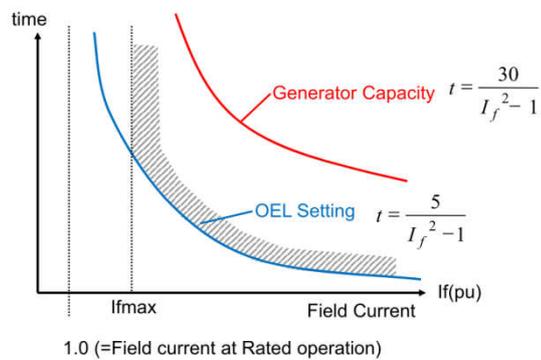
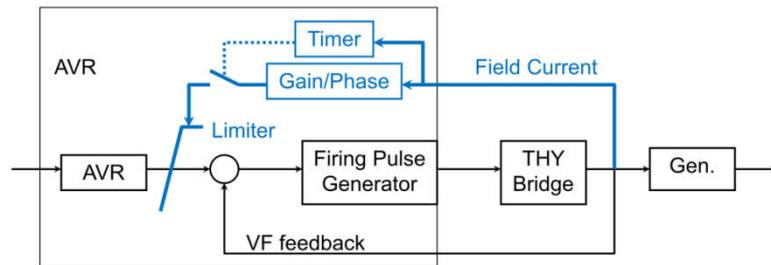


圖 2-34 OEL 控制方塊圖及曲線

### 2.3.2 MEL欠激磁限制保護（Minimum Excitation Limiter）

限制欠激磁程度，防止定子鐵心端部過熱；MEL主要是運用在機組功率因數為進相時，當進相程度超過MEL限制設定值時，也就是機組從電力系統接受過多的無效功率，AVR會透過增加勵磁電流使機組輸出端電壓上昇，限制機組運轉在MEL限制範圍內，以避免機組端電壓太低，致機組從電力網接受過多無效功率，定子鐵心端部過熱機組損壞，其控制方塊圖及限制如下圖所示。

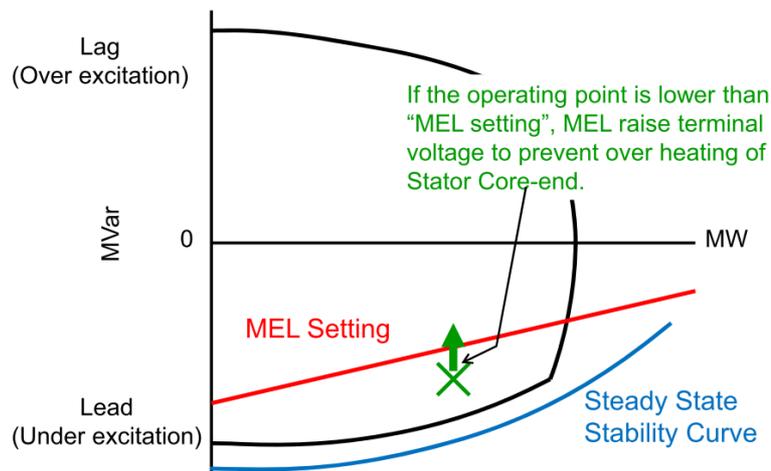
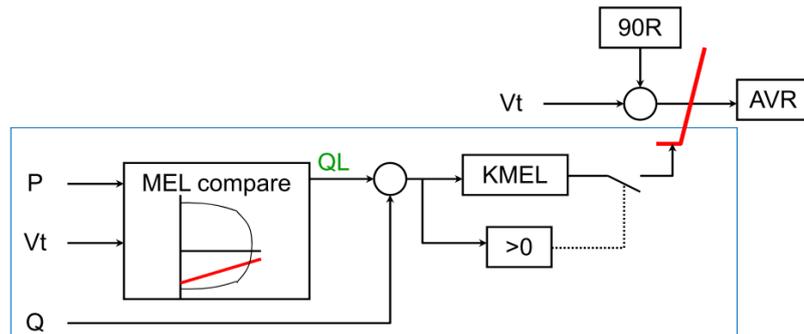


圖 2-35 MEL 控制方塊圖及曲線

### 2.3.3 VFL限制保護（Voltage/Frequency Limiter）

VFL主要是發電機定子的過激磁保護，因發電機的定子鐵心電磁容量與V/F有正相關，當其比值超過設定值（一般設定值為1.05PU），代表定子鐵心處在過多的磁場下，定子會有過熱現象，當發生此情形時，AVR會透過減少勵磁電流下降發電機端電壓，VFL設計值其不止考慮發電機部份，也會把主變的部份納入，其控制及限制如圖2-36。

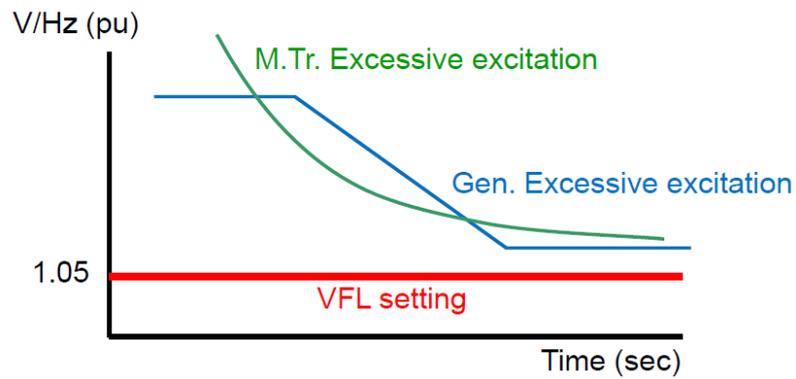
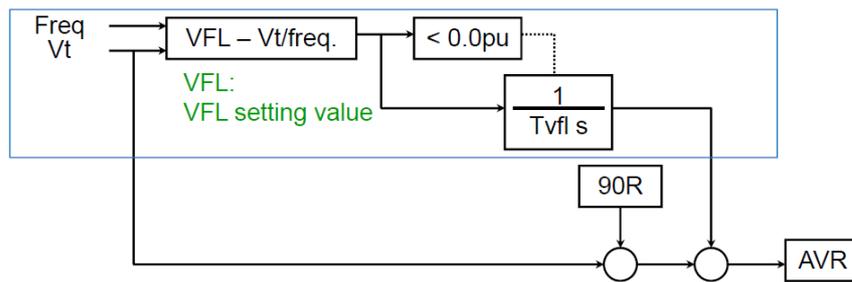


圖 2-36 VFL 控制方塊圖及曲線

## 2.4 AVR 其他功能

### 2.4.1 PSS (Power System Stabilizer)

改善電力系統穩定度，快速降低系統擺盪 (Swing)。

### 2.4.2 LDC (Line Drop Compensator)

當升壓變壓器產生電壓降，提供電壓補償。

## 四、發電機輔助設備-封油系統

### 1. 封油系統架構

大型發電機組轉子線圈係採氫氣進行冷卻，所以在轉子兩端軸封處必須藉由封油系統提供穩定的封油壓力，來防止氫氣沿著轉軸外洩，使氫氣和空氣混合產生爆炸危險。林口計畫機組所採用之封油系統為雙流式，其氫氣側及空氣側各由不同之封油泵供給封油，此封油系統，包括有除沫槽（De-foaming Tank），空氣側封油泵及氫氣側封油泵，DC後備封油泵等，圖2-37為封油系統及封油系統架構圖，以下針對封油系統各設備做簡介。

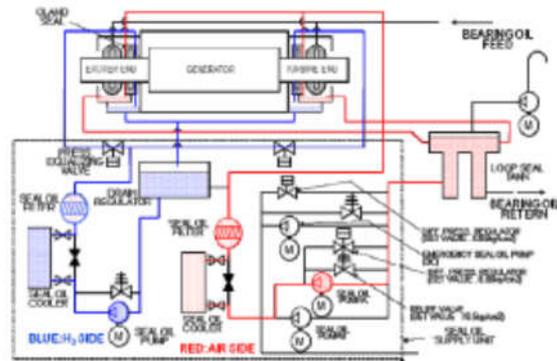


圖2-37 封油系統及封油系統架構圖

### 2. 發電機格蘭軸封

發電機兩側轉軸設有共兩組格蘭軸封(如圖2-38)，避免機內氫氣沿轉軸洩漏而達成密封功能，從封油環上有兩道環型溝槽分別供給氫氣側封油及空氣側封油獨自流動，靠近發電機內部為氫氣側，而靠近軸承為空氣側；這樣的設計是讓空氣側封油因接觸空氣與水分後不與氫氣側封油混合，減少汙染機內氫氣的機會，為了將空氣側與氫氣側兩路徑封油達到最少的混合，兩者封油壓力需相同。



圖2-38 格蘭軸封

### 3. 空氣側封油系統

發電機軸承和空氣側封油環的迴油流至迴封槽。迴封槽有兩組洩油管路，一組供給空氣側封油泵，另一組連通主汽機的潤滑油槽，另外設有抽氣扇移除從發電機封油來的空氣和氫氣。空氣側封油系統有兩台交流封油泵和一台緊急直流封油泵並聯運轉。交流或直流封油泵的功用是使迴封槽的油經由系統打入空氣側封油冷卻器，而冷卻後的封油經過濾器流到封油環。另空氣側封油壓力藉差壓調節器維持高於氫氣壓力85kPa，多餘的封油迴流至封油泵入口；若封油泵出口壓力超過1.05MPa，此時釋壓閥動作使油壓不再上升以保護油泵及儀表等。

### 4. 氫氣側封油系統

氫氣側封油泵從洩油調整槽將封油打入氫氣側封油冷卻器，再從冷卻器經過濾器，藉由均壓閥將油壓降至與空氣側封油壓力相等後送至封油環。氫氣側封油迴油流到除沫槽，使封油中的氫氣釋放分離，氫氣回到發電機內部，封油則流至氫氣側洩油調整槽。

### 5. 格蘭（Gland）軸封浮動封油

浮動封油泵提供封油環軸向推力約1.2倍空氣側封油壓力，來抵抗發電機氫氣壓力的向外推力。並使減小封油環與格蘭軸封托架間的摩擦力，使發電機軸承振動降低。

### 6. 封油備援系統

#### 6.1 後備空氣側交流封油泵：

正常情況下只需一台交流封油泵運轉，就可使封油壓力高於發電機內部氫氣壓力85kPa。當其中一台停機或油泵進出口壓力差低於35kPa時，另一台備用機就會自動運轉。

#### 6.2 直流緊急封油泵：

如果兩台交流封油泵都停止運轉或封油壓力和氫氣壓力的差壓降為35kPa 的時候，直流緊急封油泵就會自動運轉，如圖2-39。

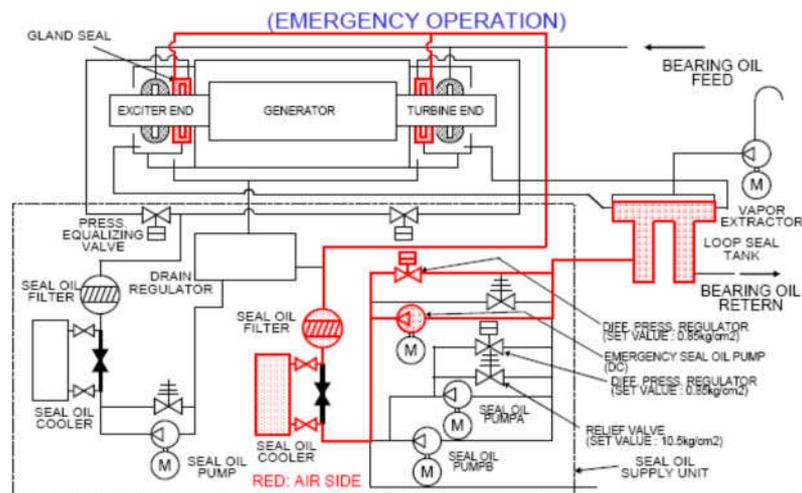


圖2-39 緊急封油泵啟動油路

### 6.3緊急後備補給：

直流緊急封油泵運轉時，兩台停止運轉的交流封油泵必須重新啟動或後備壓力調節器重新建立封油壓力，若以上兩種方法和直流封油泵都失去功用，為避免發電機內部氫氣洩漏，必須藉汽機軸承潤滑油系統建立低壓封油壓力，此時發電機內氫氣壓力必須降低到14kPa，如圖2-40，以確保滿足封油和發電機內部氫氣的差壓，當發電機氫氣壓力降低到14kPa，機組也必須跟著降載，以確保安全運轉。

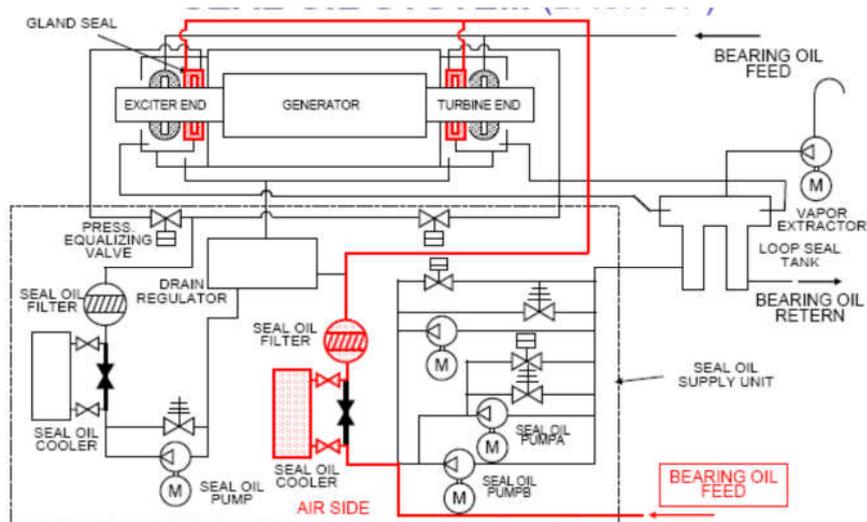
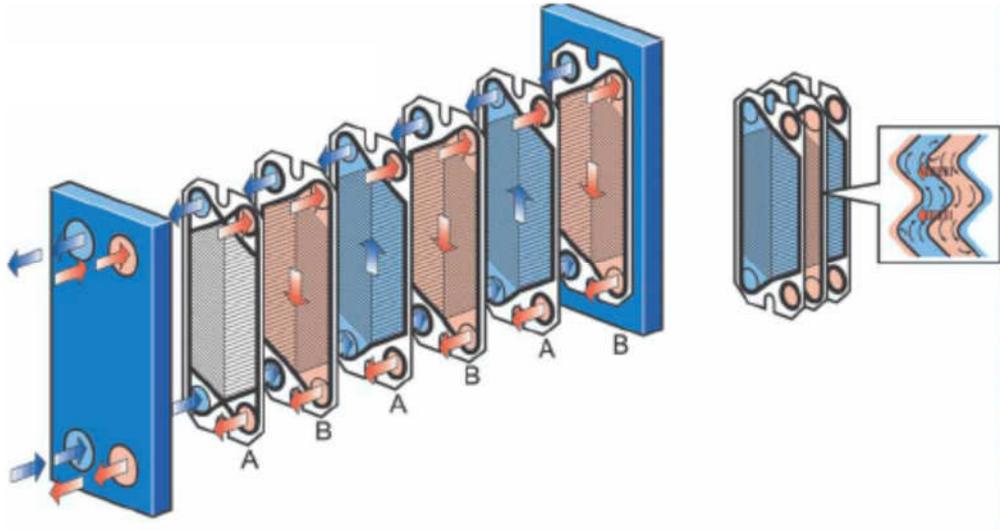


圖2-40緊急後備補給油路

### 7. 封油冷卻器

冷卻器可以降低運轉中的封油溫度，使的油溫維持在46°C~52°C之間，正常運轉時一組冷卻器運作，另一組為備用。冷卻器由不銹鋼隔板組成的板式熱交換器，冷卻水和封油在冷卻器隔板裡相反方向流動來進行熱交換，如圖2-41 (a) (b) 所示。每個冷卻器在冷卻水出口裝有溫度控制閥，而封油溫度是由調節冷卻水流量來控制，另裝有旁通的手動閥作為人工控制用，當封油溫度降至43°C時，系統會發出油溫過低警報，封油溫度到達53°C時，系統會發出油溫過高警報。



(a)



(b)

圖2-41 封油冷卻器

### 8. 封油過濾器

分別裝置於氫氣側及空氣側封油冷卻器出口的過濾器用來去除封油裡的固體雜質，以防格蘭軸封損壞。另過濾器內裝置了手動轉盤刮板，每天需轉動數次清潔濾網，一旦過濾器進出口壓力差達到50kPa時，系統會發出過濾器壓差過大警報，應檢查濾網是否堵塞並作更換，如圖2-42。

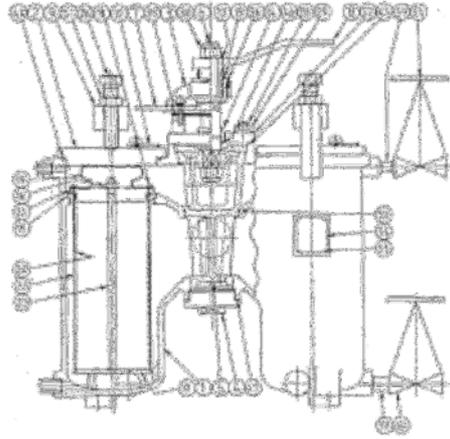


圖2-42 封油過濾器

### 9. 差壓調整閥

差壓調整器(如圖2-43)維持空氣側封油壓力大於氫氣壓力85kPa，若空氣側封油壓力過高推動上方油室往上移動，帶動閥桿上升而將閥打開，使封油泵出口封油迴流到封油泵的進口，使空氣側封油壓力隨之下降。

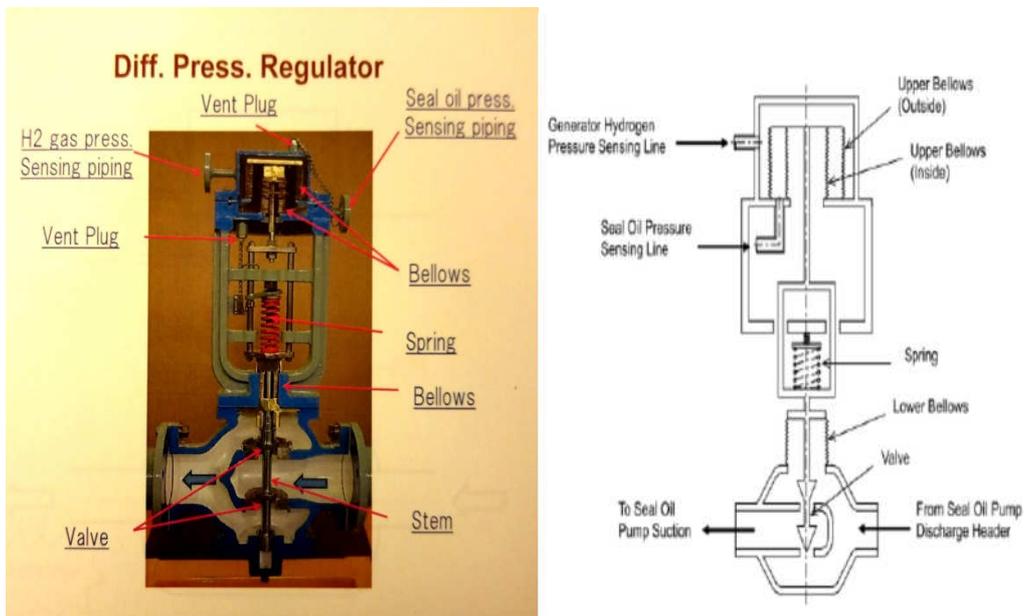


圖2-43 差壓調整閥構造圖

### 10. 均壓閥

氫氣側封油經過濾器出口，設定壓力高於空氣側封油壓力0.1到0.2MPa，但因均壓閥的運作，使壓力降為等於空氣側封油壓力；這樣封油環上氫氣側封油與空氣側封油在轉軸上就不易混流，如圖2-44。

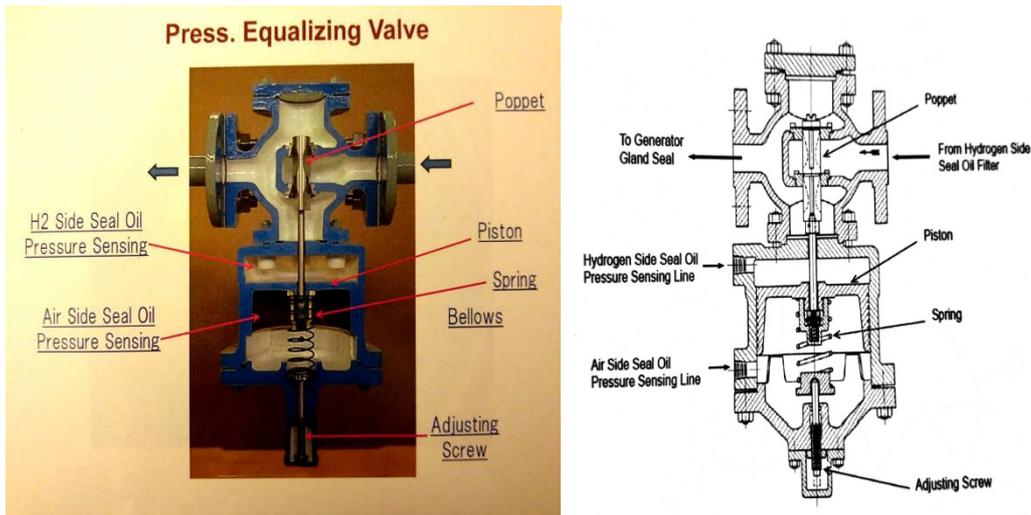


圖2-44 均壓閥構造圖

### 11. 氫氣側卸油調整槽

調整槽內有兩只浮球閥(如圖2-45)，當油位低時，進油口的浮球閥打開使空氣側封油進入補充；當油位高時，洩油口的浮球閥打開使氫氣側封油流出到空氣側封油，而氫氣側封油量固定所以調整槽油位也經常維持不變(NL±50mm)，並設置高低油位警報開關(NL±100mm)，但發電機內氫氣壓力小於0.15MPa時，高油位警報被隔離，因為此時調整槽將會滿油位。調整槽也提供氫氣側封油泵的進口油源。



圖2-45 氫氣側卸油調整槽

### 12. 迴封槽

軸承油及空氣側封油的迴油混合流到迴封槽，再分流至汽機潤滑油槽及空氣側封油泵。在洩油管路到主油槽之間增加了一段彎管設計(Trap)，其目的為避免軸封系統失效時氫氣洩漏到主油槽內；而迴封

槽上方設有抽氣扇，建立負壓(-25~-50mmAq)將槽內氣體抽出至大氣，並有旁通逆止閥，若瞬間大量氫氣出現則可經逆止閥快速通排氣至室外，如圖2-46。

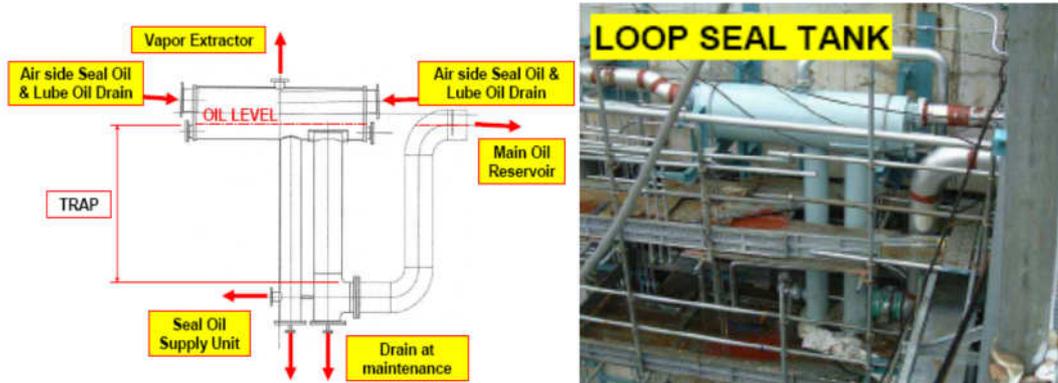


圖2-46 迴封槽

## 五、發電機輔助設備-定子冷卻水系統

### 1. 定子冷卻水系統架構

定子線圈冷卻水系統主要功用為提供高純度及低導電度之冷卻水，以冷卻發電機定子線圈運轉中所產生的熱量，使發電機定子線圈能在安全的溫度下運轉，故定子線圈冷卻水的品質、水量、水壓、水溫等皆是定子線圈冷卻水系統必須考量的因素。

### 2. 定子線圈冷卻水系統動作原理介紹

發電機定子線圈冷卻水系統通常使用於600MW以上的發電機組，其主要功能為提供冷卻發電機定子線圈內中空導體循環的高純度冷卻水，將定子線圈的熱量帶出發電機外，保持發電機在滿載運轉時正常溫升值，當出現供給水量不足、斷水故障、導電度不良時，能利用可靠的監測裝置以供連續監視並指示水的流量、壓力、水溫及導電度，並提供發電機定子線圈冷卻水之保護系統進行自動迅速降載之設施。

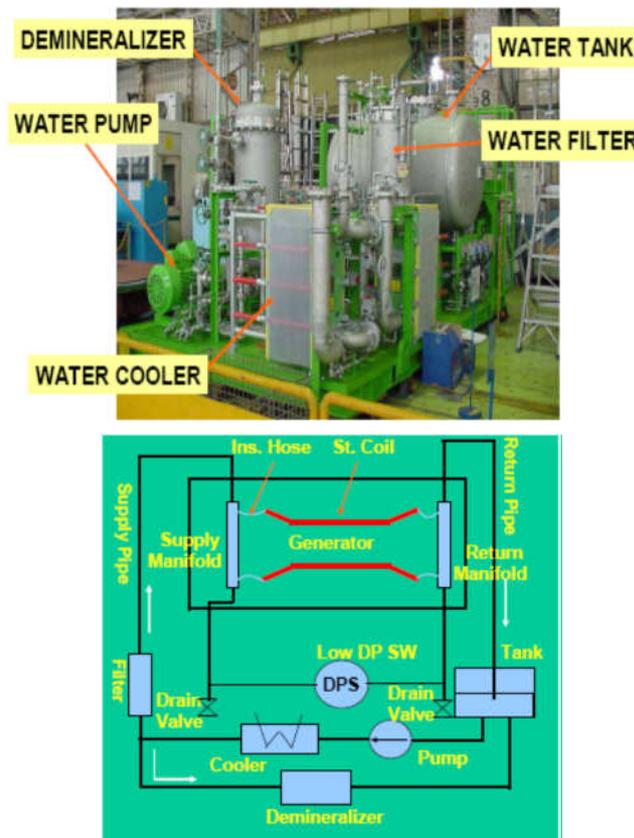


圖2-47 定子線圈冷卻水系統流程圖

圖2-47為林口新機組定子線圈冷卻水系統流程圖，水槽內的定子線圈冷卻水經由定子線圈冷卻水泵加壓傳送至定子線圈冷卻水 cooler，將其從定子線圈冷卻之熱量在此進行冷卻完成。冷卻後之定子線圈冷卻水進入定子線圈冷卻水過濾器，其中一部分在必要時進入除礦器進行水質的處理後回

到水槽，有效控制定子線圈冷卻水的導電度。而進入定子線圈冷卻水過濾器去除水中雜質後之定子線圈冷卻水由限流板(orifice plate)調節流入發電機汽機端定子機座內的環形進水集管後，其中一支為經由多根絕緣之特弗龍管流入定子線圈中的空心導體，另一分支為經絕緣可撓式水管流入定子線圈的三相引線及中性點引線(phase rings)進而帶走定子線圈之熱量，定子線圈冷卻水冷卻定子線圈後再經由鐵弗龍管匯集於勵磁機側出口集管組，此雙路冷卻水最後從勵磁側機座上部流出發電機回到水槽形成一封閉循環。

定子線圈冷卻水進出口歧管之間裝設三組差壓開關及一組流量計進行差壓及流量之監控，當冷卻水進出口低於0.1Mpa時，系統會發冷卻水差壓低警報，一旦有2組開關偵測到差壓過低警報時，將以差壓開關三取二的邏輯方式進行發電機的跳脫保護。

### 3. 定子線圈冷卻水系統元件介紹

發電機定子線圈冷卻水系統採用水內冷方式冷卻發電機定子線圈，其組成有水槽、定子線圈冷卻水泵，定子線圈冷卻水冷卻器、定子線圈冷卻水過濾器、除礦器、導電率表、氣體加壓系統、補水系統、管閥及定子線圈冷卻水控制盤，以下分別針對各元件之介紹。

#### 3.1 水槽

定子線圈冷卻水系統中水槽是封閉的，廠家會設計於水槽中以氫氣加壓，其中主要功用為使水槽內部為正壓，避免空氣進入對水質產生之不良影響，且使整個水系統與大氣隔離，故較不易被腐蝕，另一優點為避免空氣中之二氧化碳提高定子線圈冷卻水之導電度，維持冷卻水品質，當水槽內部氫氣壓力高達一定值時，可經由水槽上方的洩壓閥自動排氣，水槽的另一功能為可作為溫度變化時水體積之調節。水槽通常裝設有液位開關作為警報，高於正常水位200mm時，發出水槽水位高警報，低於正常水位100mm時，則發出過低警報高，另外裝設有液位計或檢視窗以提供運轉人員觀察水槽液位。

#### 3.2 定子線圈冷卻水泵

定子線圈冷卻水系統中通常裝設有兩台並聯的不銹鋼離心式水泵，兩台水泵互為備用。水泵的出口處裝設有單向止回閥以隔離兩台水泵。通常一台正常運轉時，另一台則為備用並做自動啟動，每一水泵之進出口裝設有差壓指示開關，以監視運轉狀況，若運轉中的水泵如有異狀會造成裝設於該水泵進出口管路的差壓低於0.35Mpa時，即提供警報警示及並使另一台備用水泵自動啟動。

#### 3.3 定子線圈冷卻水冷卻器

定子線圈冷卻水系統中通常裝設有兩組並聯的定子線圈冷卻水冷卻器，每組定子線圈冷卻水冷卻器可提供發電機100%所需的熱交換功率。主要為帶走冷卻過發電機定子線圈的水所產生的熱量，正常情況下，一組為

正常使用，另一組為備用。冷卻器的出口溫度控制在45°C~50°C，當定子線圈進口冷卻水溫度達55°C及出口冷卻水溫度達90°C，系統會發出冷卻水溫過高警報。

### 3.4 定子線圈冷卻水過濾器

定子線圈冷卻水系統通常裝設有兩組並聯的定子線圈冷卻水過濾器，如圖2-48，主要功能為去除冷卻水中的雜質，避免雜質造成發電機定子線圈內中空導體的阻塞。過濾器通常為過濾20~50 $\mu$  範圍的雜質，濾網的大小約採用3 $\mu$ m 或更大的範圍，林口未來新機組即採用此規格。正常情況下，一組為正常使用，另一組為備用，且由氣缸式外殼及更換過濾元件所組成。定子線圈冷卻水過濾器的兩端裝設有差壓開關，當過濾器兩端差壓到達0.08Mpa時，差壓開關動作會提供警報告之運轉人員，運轉人員應立即切換至備用過濾器，並清理或更換可能被阻塞的過濾器濾芯。過濾器可以連續使用兩年再更換，但如果過濾器前後差壓超過0.08MPa，則必須馬上更換濾心。

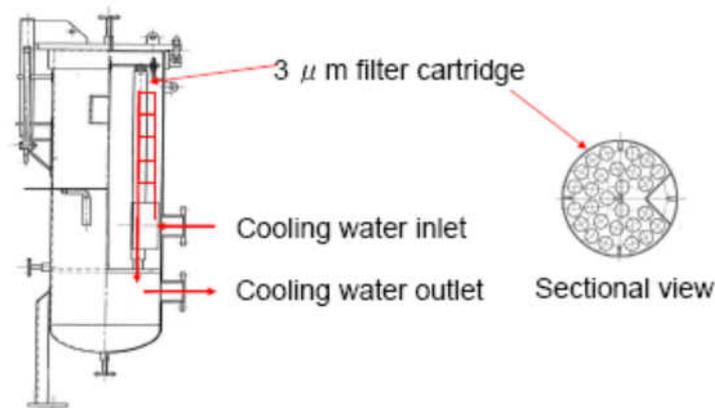


圖 2-48 定子線圈冷卻水過濾器

### 3.5 除礦器

除礦器共設有兩組，一組為運轉，一組為後備，如圖2-49。定子線圈冷卻水系統的功能之一為保持進入定子線圈冷卻水保持於低電導率，定子線圈冷卻水系統在運轉時，一部分的定子線圈冷卻水會旁路經由限流板(orifice plate)進入除礦器，水量約為(100L/min)，確保維持整個迴路的定子線圈冷卻水電導率符合運轉規範。流經除礦器的定子線圈冷卻水流量可進行調整，並由流量表以提供監視。正常時只需有少量的定子線圈冷卻水流經除礦器，即可達到定子線圈冷卻水系統所要求之標準，唯有在定子線圈冷卻水電導率過高時，才需增大流經除礦器的水量。

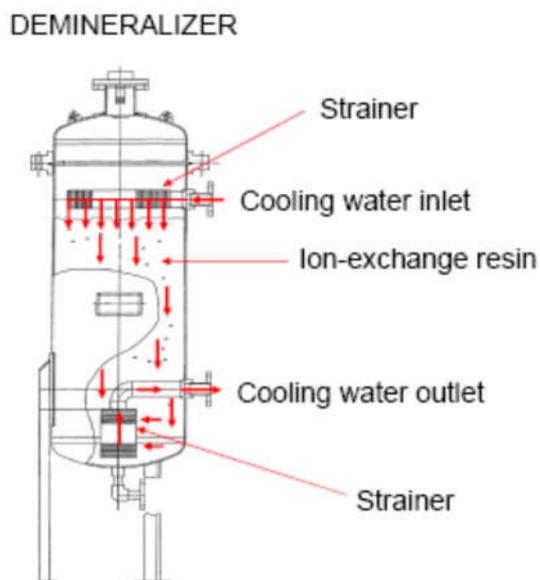


圖2-49 除礦器

一般而言在定子線圈進出口及除礦器出口共裝設有3個導電率表，以監測定子線圈冷卻水系統的電導率，一般定子線圈進出口的電導率正常值應為 $5 \mu s/cm$ 以下，當電導率高達 $5$ 和 $9.5 \mu s/cm$ 時，即會傳送"電導率高"及"電導率非常高"的警報，而過濾器的出口電導率正常值應為 $0.5 \mu s/cm$ 以下，超過此一設定值時，即會傳送"過濾器出口電導率高"警報。若此警報出現即代表過濾器的樹脂已出現飽和情況，須於發電機組停機或大修時更換。

## 六、發電機輔助設備-氫氣系統

### 1. 氫氣系統架構

大型發電機選擇氫氣冷卻系統主要因為它比空氣冷卻系統更據有以下優勢：

- (1) 高熱傳導特性：約為空氣傳熱率的7倍。
- (2) 氫氣壓力越高，熱傳導效果越好。
- (3) 氫氣密度比空氣低，所以風損及摩擦損較小。
- (4) 增加氫氣壓力可抑制部分放電現象。

林口更新計畫之發電機採用氫氣冷卻發電機，其冷卻路徑如圖2-50所示

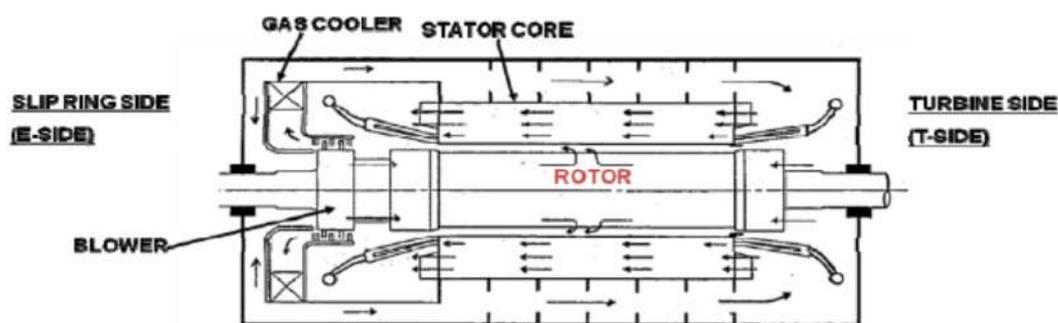


圖2-50 氫氣冷卻路徑

鼓風機向T-SIDE 抽氣，帶動氫氣經過氫氣冷卻器往T-SIDE 流動，分別通過定子鐵心、轉子線圈，從定子線圈的另一側(E-SIDE)及轉子的中間流回鼓風機，此循環可以有效的將發電機線損、風損所產生的熱量帶走，並經過熱交換器降溫後成為冷氫，再度進行冷卻過程循環。

氫氣與空氣混合時，如含有4% 到75% 的氫氣時，就可能有爆炸之危險，因此，發電機在安裝、維修時，絕不可讓氫氣與空氣混合在一起，不管從空氣換成氫氣或從氫氣換成空氣，都須用二氧化碳(CO<sub>2</sub>)為替換媒介，不論是停機時利用CO<sub>2</sub>置換H<sub>2</sub>或是機組啟動前利用H<sub>2</sub>置換CO<sub>2</sub>，CO<sub>2</sub>及H<sub>2</sub>純度均應達到95%以上，才能確保安全，氫氣系統主要由氫氣壓力及純度系統、氫氣乾燥器、檢水器及發電機狀態監測器等組成，以下將一一說明。

#### 1.1 氫氣壓力及純度系統

在正常運轉中，氫氣壓力調整器使發電機維持氫壓設定值，一般建議氫氣壓力在0.48Mpag 和0.535Mpag 間，壓力低於0.48Mpag或高於0.535Mpag時，將會產生警報，另系統平時運轉中要監視氫氣純度變化情形，並建議發電機維持在純度95%以上運轉，當純度低於90%時，系統亦會發出警報提醒。

## 1.2 氫氣乾燥器

主要功能為去除氫氣系統中的水氣，林口新機組的乾燥器為雙塔式，一組為乾燥模式，另一組為備用或還原模式，控制方式採用微處理自動控制系統，每兩周乾燥塔會自動變換運轉模式，其結構如圖2-51

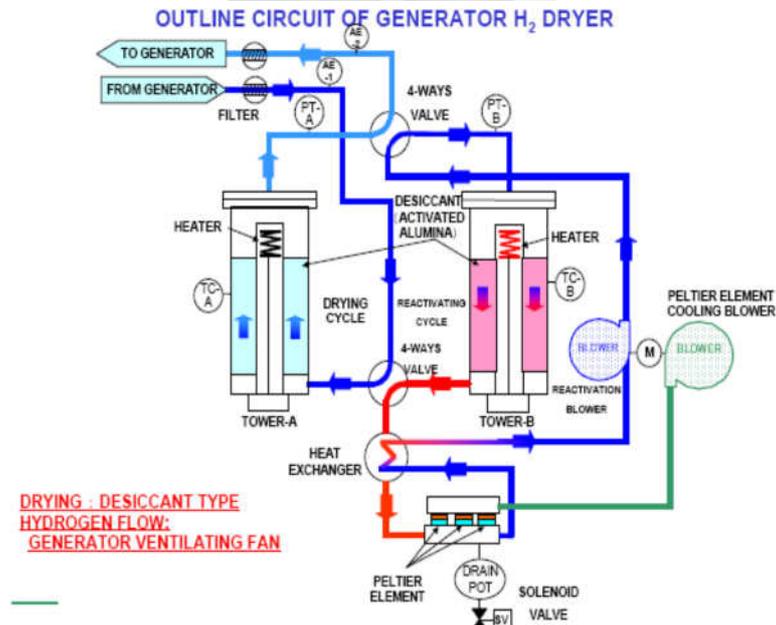


圖2-51 氫氣乾燥運轉切換模式

發電機氫氣主要經由乾燥塔 A 來吸收溼氣，而此時乾燥塔 B 則利用加熱器還原吸溼劑(ACTIVATED ALUMINA)，將乾燥塔內的水氣給排出，下方的露點溫度監視也能提供發電機內部濕氣的指標，乾燥塔中的吸溼劑約為7kg，可吸收1kg的濕氣。

### 1.3 檢水器

安裝於發電機本體兩端底部，如圖2-52，主要用來偵測發電機內部是否有水份或油殘留，當水分累積至 $450\text{cm}^3$ ，檢水器高水位警報出現，此時必須確認殘留是水或是油。水的來源主要有可能來自氫氣冷卻器的管路洩漏或是氫氣乾燥器失效造成冷凝水殘留；油則可能要確認檢查封油系統是否有異常。

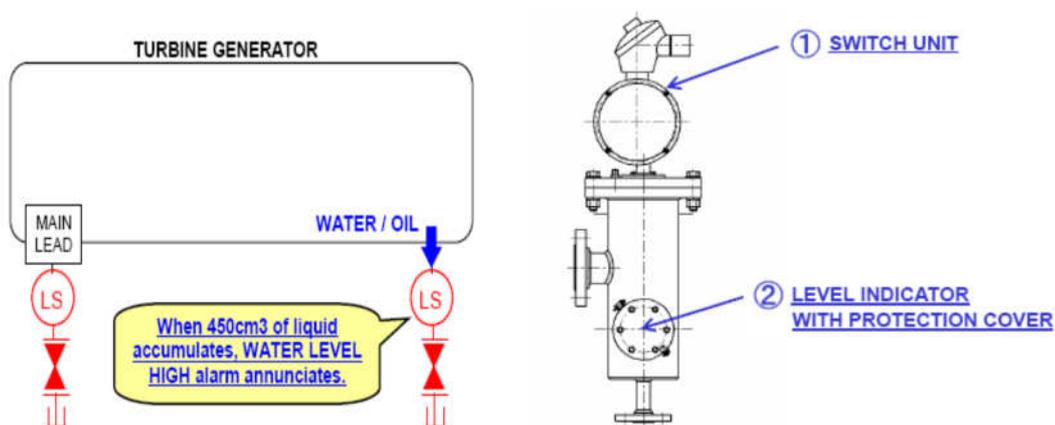


圖2-52 檢水器安裝位置圖

### 1.4 發電機狀態監測器

當發電機線圈開始處於過熱狀態時，線圈表面塗裝的絕緣漆等物質會因劣化而分解出有機物質粒子並隨著氫氣進入儀器離子腔偵測器中，腔室內原本存在之離子會附著於氫氣中之粒子上，使得離子被負電極吸引的數量減少，進而減少輸出的電流，監測器將會因此發出警報，如圖2-53所示。

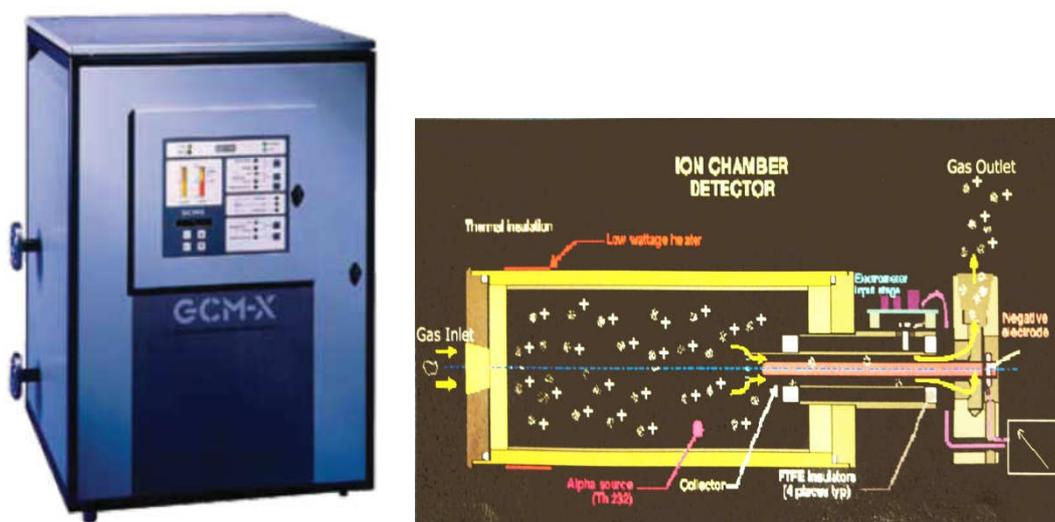


圖2-53 發電機狀態監測器

## 參、心得與建議

首先感謝各級長官給予我們這次出國至日本三菱電機公司接受為期四週『發電機及勵磁機相關訓練』的機會，在這段時間與原廠家討論相關邏輯及設計理念之後，不僅在專業知識上有更深的了解，更開拓了個人視野，對於日後工作，深感獲益良多。

此次到了三菱電機系統製作所或是其他設備生產部門，發現授課工程師對工作之專業領域了解皆可獨當一面，對於代表業主前來受訓人員的問題，基本上也相當熱心解答，但是受限該公司對於生產流程（包含細節及製造機具）的高度保護，因此對於受訓者許多問題或需求都無法滿足，部分工程師外文能力較弱，使得受訓人員與訓練者溝通上較為辛苦，對於問題的探討較無法深入，所幸這次受訓並非只有一人，遇到問題可互相討論，再同仁間的互相扶持下，一些專業上的問題也可得到一些解答。

至土山市參觀發電機封油系統設備製造時，該公司係屬三菱電機之協力廠商，雖然該公司僅有42位員工，但其對生產品質的專注及生產技術的專精，令人印象深刻，因此一直能受三菱電機公司之委託，生產發電機封油系統，據該公司員工表示，先前金融風暴時，因該公司係屬大型產業之技術協力廠商，因此日本政府特別融資協助該公司渡過全球經濟危機時期。

本次發電機受訓期間，本計畫部分設備生產流程已完成製造或尚未排入製程，因此僅能參觀類似較小容量之機組，另於受訓期間，與三菱電機公司授課工程師研討課程內容時，發現除了少數幾位年紀超過 40 歲外，多數工程師年紀皆介於 32~35 歲之間，部分工程師除林口計畫主要設計工作外，亦曾負責本公司其他發電計畫，已真正落實核心技術轉移至中生代，本單位屬於核能及火力電廠興建工程單位，未來面臨電業法及政府能源多元走向的挑戰，公司是否會推動現有火力機組更新或其他新建計畫或是比照工程顧問公司去承攬電廠興建之規劃與設計，均是現階段無法預知的，但是看見三菱電機公司的作法，更應積極推動技術向下扎根的工作，以因應未來大環境可能的改變。