

出國報告（出國類別：實習）

興達計畫
發電機及其勵磁機系統研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：張烜華

派赴國家：美國

出國期間：113年8月18日至113年9月1日

報告日期：113年10月30日

QP - 08 - 00 F04

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

興達計畫 發電機及其勵磁機系統研習

頁數 27 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司 / 翁玉靜 / (02) 2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

姓名	服務機關	單位	職稱	電話
張烜華	台灣電力公司	核能火力發電工程處	電控設計專員	(02)2322-9556

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：113/8/18-113/9/1

派赴國家/地區：美國

報告日期：113/10/30

關鍵詞：

內容摘要：(二百至三百字)

興達電廠燃氣機組更新改建計畫旨在建置具高發電效率且兼顧環保效益的新機組。此計畫在現有四部燃煤機組和五部燃氣複循環機組的基礎上，新增三部燃氣複循環機組，並將新機組設置於舊址東南側。

此次實習為該計畫的培訓一環，目的是深入學習與研究由 GE 公司提供的發電機組系統及其相關附屬設備架構。此次實習地點為美國 GE 公司休士頓學習中

心 (Houston Learning Center, HLC)，為期兩週，課程內容涵蓋發電機勵磁系統、靜態啟動系統的基礎原理、硬體設計、軟體應用與模擬操作演練。此學習規劃能有效提升對系統的深入理解，為未來實務應用奠定穩固基礎。

透過此次實習，參與者將能掌握最新技術與操作流程，並能在實際工作中靈活運用所學知識。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.ndc.gov.tw/reportwork/>)

目錄

一、	研習目的與過程：	- 3 -
(一)	國外公務之目的	- 3 -
(二)	國外公務之內容與過程	- 3 -
二、	基本資料介紹	- 5 -
(一)	興達計畫發電機簡介	- 5 -
(二)	發電機轉子及定子	- 5 -
三、	勵磁系統	- 9 -
(一)	系統概述	- 9 -
(二)	勵磁系統的組成與結構	- 9 -
(三)	勵磁系統的控制與保護	- 10 -
(四)	硬體架構	- 13 -
(五)	模擬器功能	- 18 -
四、	靜態啟動系統	- 20 -
(一)	系統概述	- 20 -
(二)	靜態啟動系統的組成與結構	- 20 -
(三)	氣渦輪燃氣機組啟動順序說明	- 22 -
(四)	硬體架構	- 24 -
五、	出國期間所遭遇之困難與特殊事項	- 27 -
六、	對本公司之具體建議	- 27 -
七、	心得與建議事項	- 27 -

一、 研習目的與過程：

(一) 國外公務之目的

此次學習內容涵蓋發電機組勵磁系統和靜態啟動系統的基礎原理、硬體設計、軟體應用以及模擬操作。課程目標在於全面掌握系統的規劃設計、功能特性、系統架構、組成元件、網路通訊和人機介面等相關知識，並強調實際操作能力的培養，包括硬體維護技能等。

通過此次在 HLC 的學習，不僅能獲得最新的技術知識和操作流程，更能在未來工作中靈活運用所學，以提升工作效率。豐富的理論知識和實踐經驗將帶回工作崗位，進一步推動興達電廠的持續發展。

(二) 國外公務之內容與過程

此次訓練課程安排於美國休士頓的 GE 學習中心 (Houston Learning Center, HLC)，課程安排如下：

日期	講課內容	實習內容
Day 1	Introduction	Read System One-Line Drawing
Day 2	Generator Fundamentals and Sync	Read Generator Data and Documents
Day 3	Excitation Fundamentals	Read EX2100e Elementary Drawing EX2100e HLC area Walking Down
Day 4	Exciter Hardware	EX2100e Download Read EX2100e documentation
Day 5	Toolbox ST basic Overview on Exciter Software	Exciter Online Diagram Review
Day 6	Continuation Toolbox ST basic Overview on Exciter Software	EX2100e Simulator and Trender Data Navigating diagrams
Day 7	Static Starter Overview Static Starter Hardware	Discussion about Generator Nameplate & Curves
Day 8	Static Starter Software	LS2100e Documentation and elementary LS2100e HLC Walking down
Day 9	Generator Protection Panel GPP Hardware	Software Download & Offline Practical Lab
Day 10	GPP Software GPP Software & Offline Practical Lab	Training Survey

第一週進行發電機及勵磁系統的講解，並針對勵磁系統進行基礎原理說明，涵蓋 GE 系統架構、基礎電路圖 (elementary diagram) 解說及硬體實作。此外，還進行了 GE Toolbox 操作訓練，內容包括連接並控制勵磁系統、模擬設定與軟體設定值下載，並進行小型發電機進行同步並聯。

第二週則著重於靜態啟動控制系統與發電機保護電驛的概念解說，除了進行硬體操作，還包括 GPP 軟體的應用、軟體設定值下載。

二、基本資料介紹

(一) 興達計畫發電機簡介

本計畫的發電機為 GE 公司製造的 H65 型號，氣渦輪發電機的容量為 537 MVA，電壓 26 kV，額定電流 11,925 A，具備 0.85 滯後功因和 0.95 超前功因的運轉能力，並採用氫氣冷卻系統，詳細規格如表 1 興達計畫發電機規格。

3. Unit information

3.1. Technical data

Unit		Taiwan Power Company - Hsinta		
Type of data		Technical Information Generator		
No.	Description	Unit	Reading / Value	Remarks
1	Model	-	H65	
2	Generator / Stator Serial No.	-	715X152	
3	Manufacturer (OEM) / Supplier	-	General Electric	
4	Rated Speed	rpm	3600	
5	Rated Frequency	Hz	60	
6	Rated Stator Voltage	kV	26	
7	Cooling System (medium)	(rotor/stator)	Hydrogen	
8	Rated Output	MVA	537	
9	Power Factor	-	0.85	

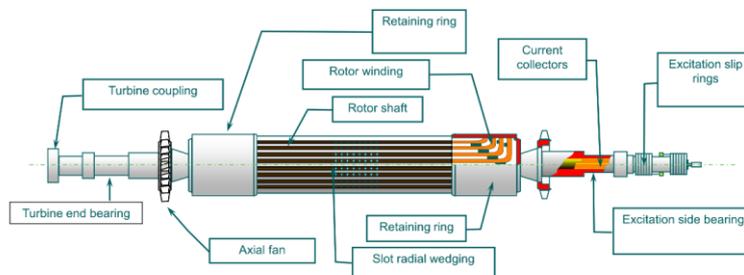
表 1 興達計畫發電機規格

(二) 發電機轉子及定子

同步發電機的轉子與定子構成其運行的核心。轉子由高強度材料製成並搭配轉子繞組組成，轉子繞組通過直流電源供電產生穩定磁場。當直流電通過轉子的繞組時，生成的旋轉磁場與定子繞組互作用，產生感應電動勢完成發電。以下對轉子及定子做詳細說明：

1. 轉子

轉子的結構包括轉子軸、轉子繞組、集電環和固定環等部分，示意圖詳見圖 1，轉子半成品詳見圖 2。轉子設計必須考慮到離心力、絕緣性和平衡性等因素，以確保發電機在運行過程中的高效與穩定。



Example of Collector / Brush Field Rotor

圖 1 轉子結構圖

轉子結構組成：

- (1) 轉子軸 (Rotor Shaft)：轉子軸為中空設計，用以支撐整個轉子結構，由高強度鋼材製成，以承受高速旋轉時的離心力。
- (2) 轉子繞組 (Rotor Windings)：轉子繞組採用條狀設計，並塗覆多層絕緣材料，如環氧樹脂或雲母帶，並設有冷卻氣體（氫氣）流動的小孔（詳見圖 2）。
- (3) 集電環 (Collector Rings)：集電環負責將勵磁電流從外部引入轉子內部，安裝在轉子軸的兩端，負極 (-) 環位於內側靠近發電機，正極 (+) 環則位於外側。
- (4) 固定環 (Retaining Rings)：固定環用於在轉子旋轉時穩定繞組，防止繞組在高速運轉時鬆動。

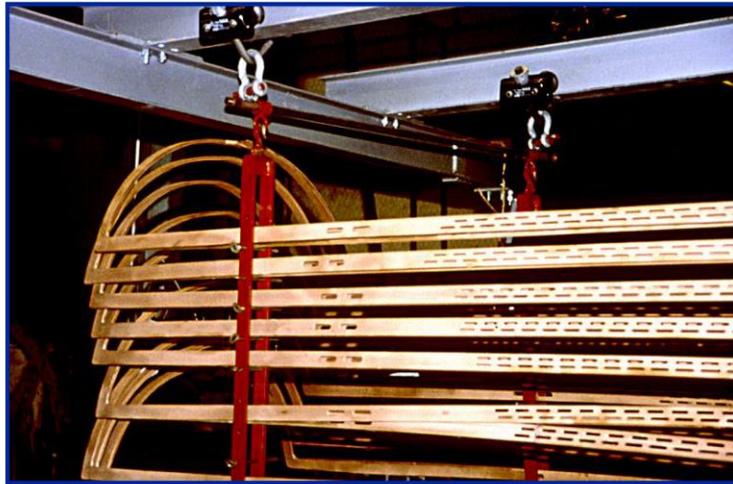


圖 2 轉子繞組



圖 3 轉子半成品

2. 定子：

定子為發電機的靜止部分，由三相繞組構成，均勻分佈於發電機的周圍。當轉子旋轉時，其磁場切割定子繞組，根據法拉第電磁感應定律，在定子繞組中感應出交流電壓。構成定子各部分元件詳見圖 4，繞組分布情形可詳見圖 5。

- (1) 機殼 (Frame)：定子機殼採用鋼板滾壓並焊接成密封圓筒狀結構。內部設有徑向和軸向支柱，以增強整體結構強度，主要功能為支撐發電機重量，並在短路時保護定子鐵芯。
- (2) 定子鐵芯 (Stator Core)：定子鐵芯由高導磁性、低損耗的矽鋼片堆疊組成，每片矽鋼片兩面均塗有絕緣漆以降低渦流損耗。
- (3) 定子繞組 (Stator Windings)：定子繞組安裝於定子鐵芯的槽 (slot) 內，槽中配置上下兩條銅排，採羅貝爾轉位法排列並包覆絕緣材料 (參見圖 6)，結構布置參考圖 6 定子繞組細部結構。RTD 安裝在銅排間隙中，並使用非導磁材料木楔固定繞組。
- (4) 冷卻系統 (Cooling System)：發電機採用氫氣冷卻系統，該機型配備四台熱交換器進行氫氣與水的熱交換。若其中一台故障，則需降載以應對散熱需求。

Stator Core Frame
Note Key bars



Assembling stator
core



Stator core
lamination



Sliding Core
Lamination on Key
Bars

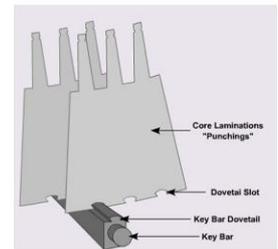


圖 4 定子外殼與定子鐵心結構詳圖

Three Phase Stator Windings

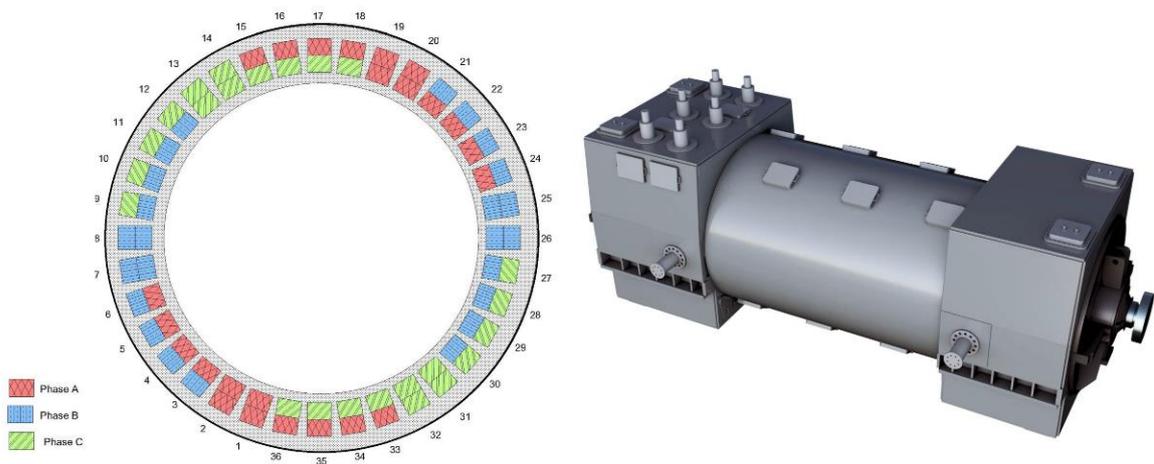


圖 5 定子繞組分布圖

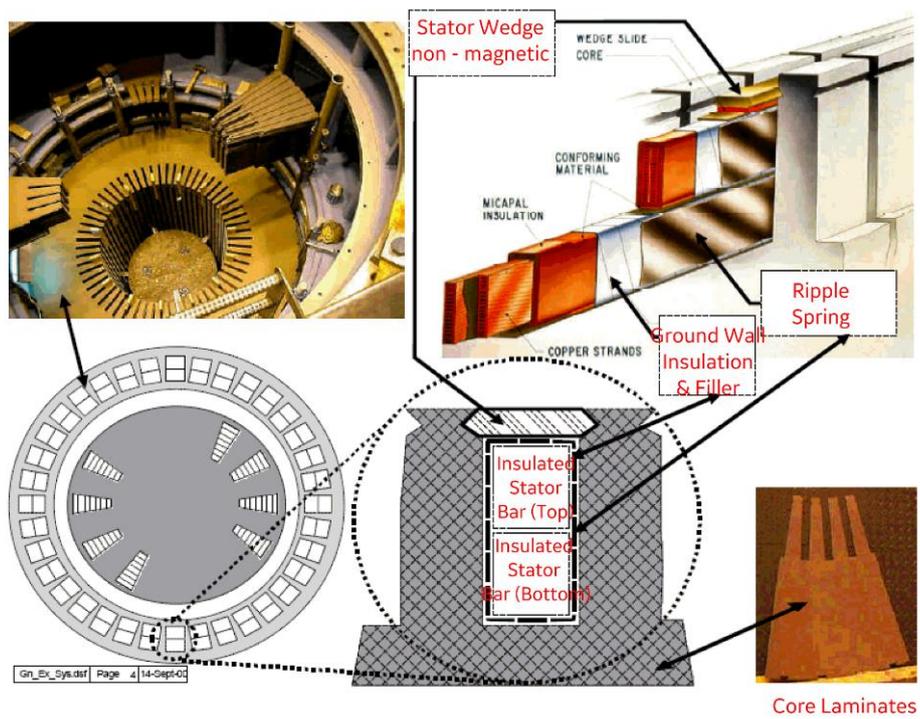


圖 6 定子繞組細部結構

三、勵磁系統

(一)系統概述

勵磁系統的主要功能是通過調節同步發電機轉子的磁場，以穩定發電機的輸出電壓。當負載變動或系統內部發生電壓波動時，勵磁系統會自動調整轉子電流，確保輸出電壓在允許範圍內，保持電力系統的穩定運行。此外，勵磁系統有助於維持同步發電機的功率因數，並在短路等突發情況下提供穩定性支援。因此，勵磁系統對電力網路的穩定運行至關重要。

(二)勵磁系統的組成與結構

勵磁系統的核心為轉子繞組（勵磁繞組），位於同步發電機轉子上，勵磁系統向其提供直流電流，生成磁場。在運行過程中，轉子磁場與定子繞組相互作用，在定子上產生交流電，詳見圖 7 勵磁系統架構。

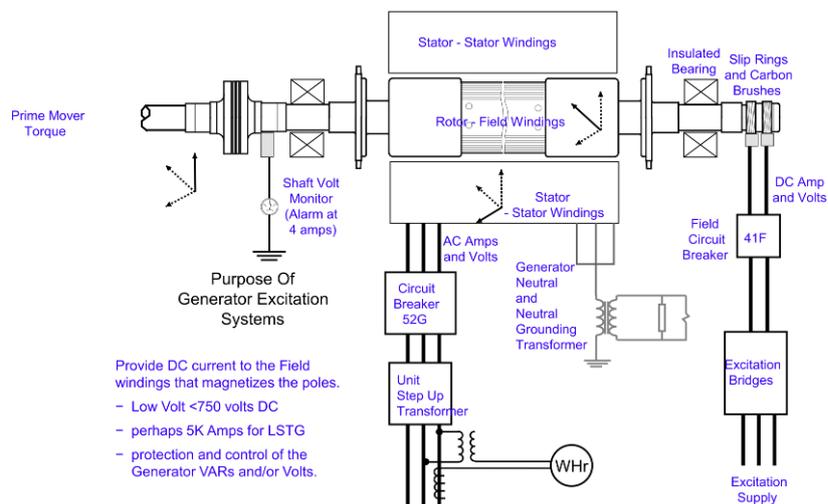


圖 7 勵磁系統架構說明圖

勵磁系統其他關鍵元件如下：

- 勵磁變壓器（Excitation Transformer）：將 GCB 二次側電壓 26kV 轉換至 1400V，供給電源給 SCR（thyristor）整流成直流電
- 整流器：將勵磁變壓器提供的交流電轉換為直流電，通過碳刷和集電環傳（Collector）送至轉子繞組。
- 比壓器：監測勵磁系統電壓變化，並將其轉換為低電壓信號傳輸至控制系統，以便進行精確的電壓調整。
- 比流器：測量並傳輸系統電流至控制系統，確保勵磁電流的精確控制並觸發保護功能。

隨著技術進步，現代數位式勵磁系統與傳統機電式勵磁系統相比具有顯著的技术優

勢。傳統系統依賴於機械元件進行調節，反應速度較慢，且維護成本高昂。而數位式勵磁系統藉由微處理器和先進控制算法，可實現更精確、快速的電壓和電流調節，並支援遠程監控與故障診斷，提供電力系統更高的穩定性與效率。

(三)勵磁系統的控制與保護

勵磁系統的主要功能是調整轉子的勵磁電壓，以控制轉子磁場的強度，從而影響發電機的輸出電壓和功率因數。這個過程通過自動電壓調節器（AVR）來實現，AVR 能夠自動監測並調整勵磁電流，確保輸出電壓穩定。勵磁系統的控制還需與發電機負載特性協同工作。

發電機的運行特性通常通過能力曲線和 V 曲線來描述：

1. 發電機能力曲線

能力曲線（參見圖 8）展示了發電機在不同運行條件下的功率範圍，具體反映了在特定電壓下，有效功率（P）和虛功（Q）的關係。這對於保護發電機在安全且高效的狀態下運行至關重要。

能力曲線的分析可以幫助操作人員了解系統在各種負載情況下的能力，並防止過載或損壞。

- (1) 有效功率（P）：有效功率是發電機產生的實際電能，單位為 W，顯示在能力曲線的橫軸上。過高的有效功率可能導致發電機過熱，進而損壞內部繞組。
- (2) 虛功率（Q）：虛功率用於調節系統電壓，單位為乏（Var）。虛功過多會增加定子電流，可能引發定子過載與過熱。
- (3) 定子電流限制：這條曲線反映了定子繞組的最大承受電流，超過此限度會造成定子過熱。
- (4) 轉子電流限制：轉子電流與虛功輸出密切相關，虛功過高會導致轉子電流增加，影響繞組的穩定性。

Reactive Capability Curve (D Curve)

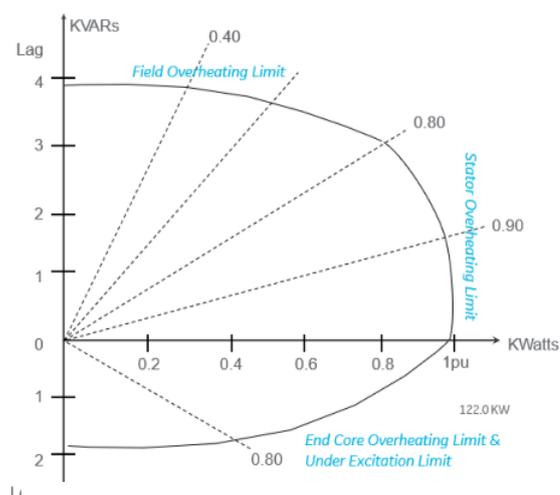


圖 8 發電機能力曲線

2. V 曲線：

V 曲線（參見圖 9）表示定子電流與勵磁電流之間的關係。當勵磁電流從欠激磁狀態（低值）逐漸增加至過激磁狀態（高值）時，定子電流呈現“V”字形變化。

Generator Vee Curve

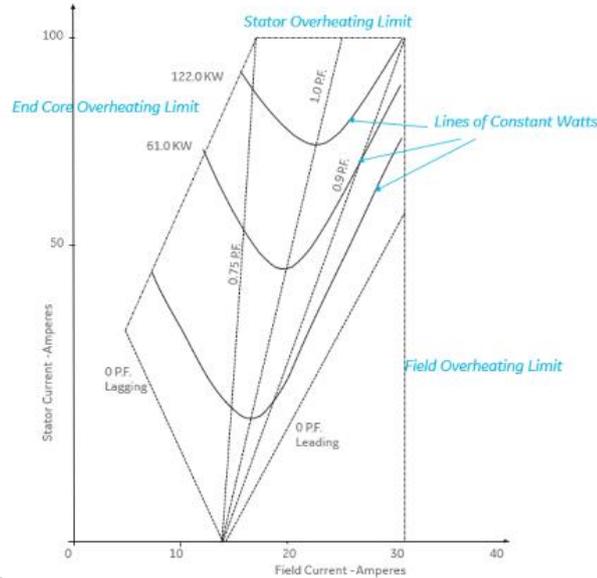


圖 9 V curve

3. 控制器訊號處理與保護機制

勵磁系統軟體方塊圖（參見圖 10）展示工作原理和各模組的功能及互動關係。例如，外部升降指令會影響 EXASP (Exciter AVR Setpoint) 的設定點，而 EXASP 則進一步影響 AVR 的調整。同時，PSS、UEL 和 VMAG 也會對 EXASP 的設定產生影響。

最終，FVR (Field Voltage Regulator) 和 FCR (Field Current Regulator) 會根據場電壓與場電流的反饋信號來調整系統輸出，確保整體系統在各種條件下穩定運行。

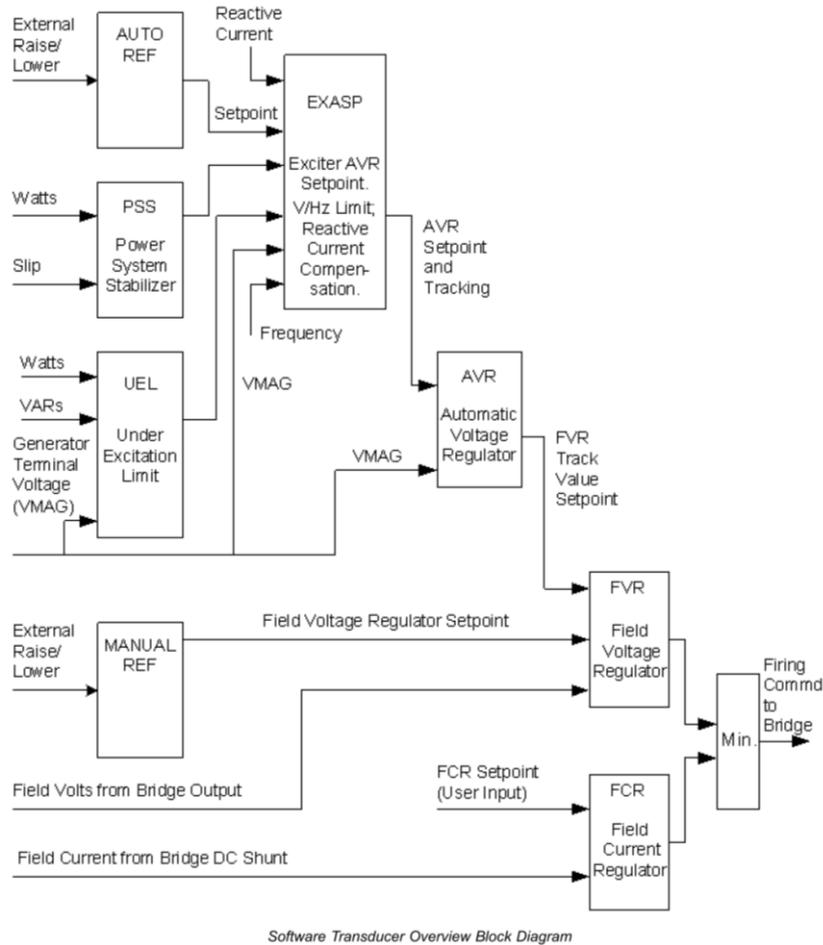


圖 10 勵磁系統軟體方塊圖

以下將針對每個模組進行更詳細的說明：

- (1) 自動模式 (AUTO Mode) / 手動模式 (Manual Mode)：一般情況下使用自動模式 (Automatic Mode)，當比壓器 (PT) 故障時切換至手動模式 (Manual Mode)。外部升降控制 (External Raise/Lower) 訊號來自於其他設備如 HMI 或渦輪控制器等，這些指令可以由操作人員手動輸入，也可以通過自動控制系統調整，用來微調勵磁器的輸出。
- (2) PSS (Power System Stabilizer)：PSS 為增強系統穩定性的控制模組。依據發電機的功率輸出 (瓦特) 和滑差 (Slip) 整勵磁器的設定點，透過改善發電機動態特性來提升電力系統穩定性，有效提升電力系統的穩定性具體方式如下：
 - A. 抑制低頻振盪：PSS 能迅速對低頻振盪做出反應，減少振盪幅度，幫助發電機與系統快速恢復穩定，這對於大型電網尤為關鍵。
 - B. 增強暫態穩定性：在系統遭遇擾動 (如故障或重啟) 時，PSS 能快速調整勵磁電流，保持發電機同步減少擾動。
 - C. 減少發電機之間的相互干擾：PSS 協調發電機間的響應，減少系統內部的干擾，提升電網整體穩定性。

- (3) **V/Hz Limit**：根據法拉第電磁感應定律 $E = B \cdot L \cdot v$ ，其中 E 為發電機感應電動勢， B 為磁通密度、 L 為導體的長度， v 為導體切割磁場的速度，可推導出 $B = E / (L \cdot v)$ ，其中 L 為定值，故將 E/v 穩定的控制，便能控制的定子鐵芯的磁通量，避免發生過熱變形。
- (4) **UEL (Under excitation Limit)**：用於防止發電機進入欠激磁狀態的安全機制，以避免設備可能因運行超出限制而受損。它根據發電機的有功功率和無功功率 (**VAR**) 來限制勵磁器的輸出，確保發電機在安全範圍內運行。
UEL 防止發電機超過鐵芯的熱限制以及系統穩定性限制。
- (5) **AVR (Automatic Voltage Regular)**：勵磁系統的核心控制模組之一，負責根據需求自動調節發電機的電壓。它會依據 **EXASP** 設定點來調整輸出。
- (6) **OEL (Overexcitation Limiter)**：用於防止發電機轉子繞組（亦稱勵磁繞組）因電流過高導致過熱而造成損壞。
- (7) **FVR (Field Voltage Regular)**：**FVR** 是用來調節場電壓，它根據外部升降指令和場電壓的反饋信號來設定自身的輸出，確保電壓調整準確。
- (8) **FCR (場電流調節器)**：**FCR** 用來調節場電流，它通過場電流的反饋信號來調整輸出，確保勵磁器的穩定運行。

(四) 硬體架構

前段已對勵磁系統的組成與結構有精簡解釋，而本節將詳細說明硬體組成以及內部元件介紹（詳見圖 11 勵磁系統單線圖），系統控制電源有來自 **AC** 以及 **DC** 雙系統供電，控制系統由 3 個 **Controller** 組成（**M1**、**M2**、**C**）**M1** 及 **M2** 交互備援，具備保護及穩定系統功能，而控制器 **C** 功能為協助判斷整體系統狀態，能有效增加系統穩定性，降低因設備故障造成誤動作的可能性。

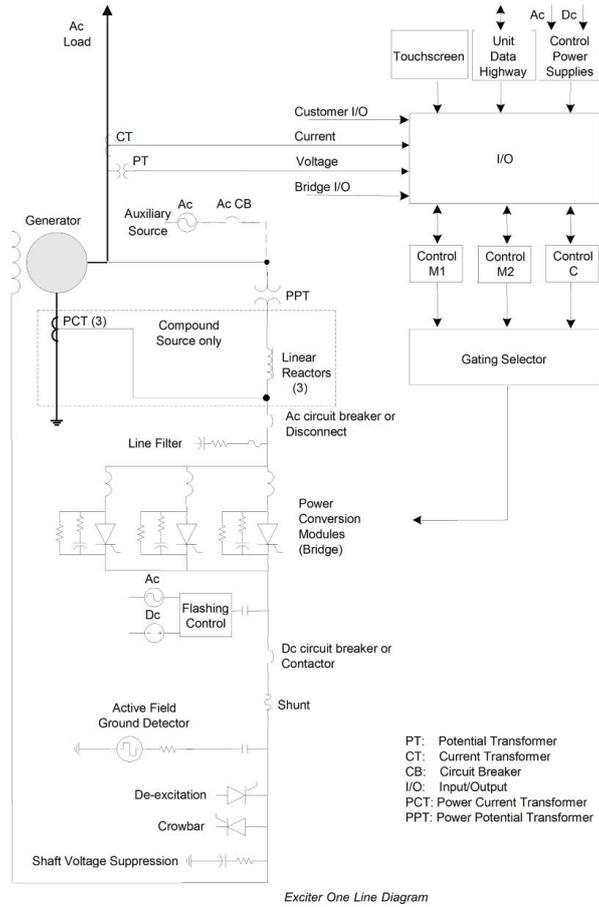


圖 11 勵磁系統單線圖

1. 系統規格

勵磁系統規格（詳見圖 12），其額定直流電流與 SCR 的規格與直徑大小成正比，本案採用 100mm SCR，3PCMs 設計，因為較大的直徑能承受更高的電流和電壓。增大的尺寸提供了更多的導電面積，降低電流密度，減少運行過程中的熱量產生，並提高散熱效率。

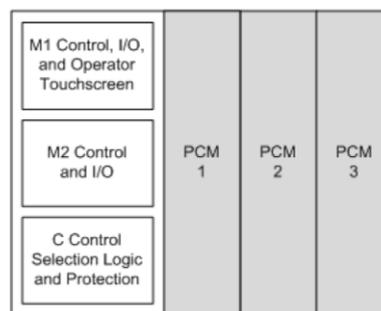
Ratings and Characteristics

EX2100e SCR	Approximate Exciter Current Capability	PCM Type	Number of PCMs	Number of Shipping Sections	Approximate Weight (lb)	Approximate Dimensions (l x w x h)
42 mm	165 A dc	Simplex or WBU, Convection	1 or 2	1	850.5 kg (1875 lb) (simplex) 1451.5 kg (3200 lb) (WBU)	1803.4 x 800 x 2654.3 mm (71 x 31.5 x 104.5 in) (simplex)
42 mm	500 A dc 200 A dc (PMG)	Simplex or WBU, Forced Air	1 or 2	1	850.5 kg (1875 lb) (simplex) 1451.5 kg (3200 lb) (WBU)	3009.9 x 800 x 2654.3 mm (118.5 x 31.5 x 104.5 in) (WBU)
53 mm	1000 A dc	Simplex or WBU	1 or 2	1	1814.4 kg (4000 lb) (simplex) 2540.1 kg (5600 lb) (WBU)	2844.8 x 800 x 2654.3 mm (112 x 31.5 x 104.5 in) (simplex, no auxiliary)
77 mm	2000 A dc	Simplex or WBU	1 or 2	1	1814.4 kg (4000 lb) (simplex) 2540.1 kg (5600 lb) (WBU)	3606.8 x 800 x 2654.3 mm (142 x 31.5 x 104.5 in) (WBU)
100 mm	2800 A dc	Simplex or WBU	1 or 2	2	7892.5 kg (17400 lb) (2 PCM)	5042 x 1231.9 x 2692.4 mm (198.5 x 48.5 x 106 in) (2 PCM)
100 mm	6000 A dc	N+1 or N+2	3 or 4	2	9491.4 kg (20925 lb) (3 PCM)	5994.4 x 1231.9 x 2692.4 mm (236 x 48.5 x 106 in) (3 PCM)
100 mm	8000 A dc	N	4	2	11090.3 kg (24450 lb) (4 PCM)	6997.7 x 1231.9 x 2692.4 mm (275.5 x 48.5 x 106 in) (4 PCM)

圖 12 勵磁系統規格表

2. PCM 配置

本案配備 3 組 PCM (詳見圖 13), 每組 PCM 皆具備獨立運轉的能力, 每個 Controller (M1 或 M2) 各控制一組 PCM 同時並連另一組 PCM, 當 Controller M1 發生故障時, 另一組 Controller M2 能接手處理, 此架構稱為「Redundant Control with Parallel PCMs」。



3. 硬體元件連接

圖 13 PCM 架構

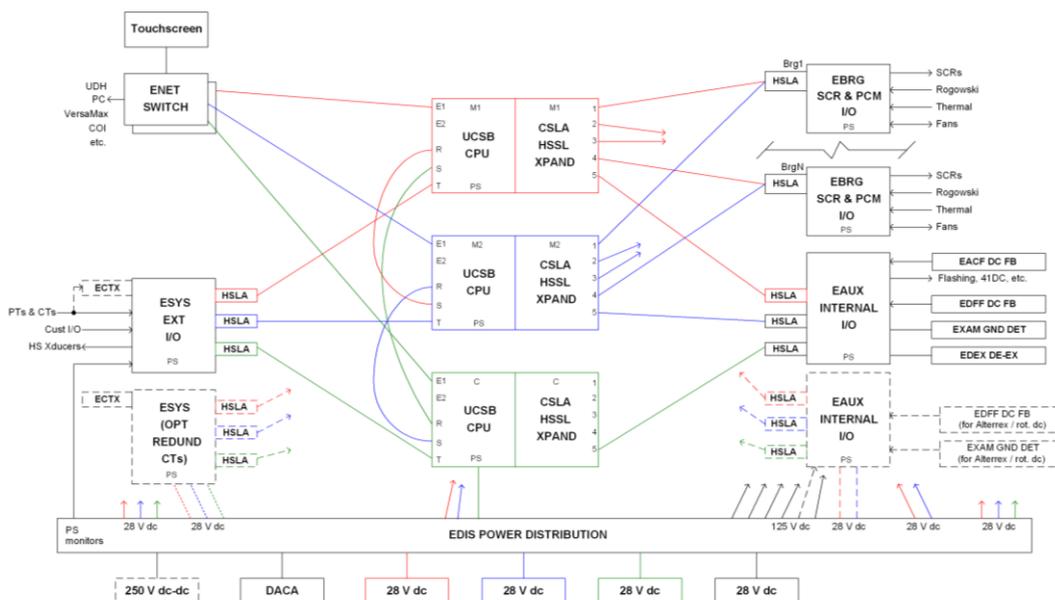


圖 14 勵磁系統元件連接圖

理解勵磁系統每個硬體設備的組成元件，熟悉各項元件功能，對於設備的運轉、維護、故障排除等有顯著的幫助，勵磁系統元件連接圖（詳見圖 14）。以下將對區塊細節做介紹：

(1) 通訊：

系統內部使用以太網路、光纖、傳輸線，對外通訊通過以太網連接至 Unit Data Highway (UDH) 與 GE 其他設備（如 ToolboxST、MarkVIe、汽輪機控制系統等）進行連接通訊。

(2) HSSL (High-Speed Serial Link)：

HSSL 高速資料通訊協議，這技術的核心功能是快速傳輸控制訊號，讓系統中的不同元件能即時互通，以保證數據的精確性。透過 HSSL，系統的控制器可以準確監控電壓與電流等關鍵參數，並對任何變化快速反應。

(3) HSLA (High-speed Serial Link Interface (HSLA) Board)：

HSLA 作為一種高速傳輸 (HSSL) 的介面板，提供單通訊埠或雙通訊埠的連接。它的主要功能是實現系統中各個元件之間的高速通訊，確保數據能夠即時傳遞。

(4) EBRG Board：

接收 M1/M2 發出的控制命令，對 6 個 SCR 生成閘極觸發信號 (Gate trigger signals)，並且提供電流反饋、冷卻風扇控制與溫度監控功能。

(5) EAUX Board：

處理 Exciter 內部信號，包括控制盤內部接點、直流電壓、直流電流等訊號，並與其他控制板協同作業達成功能：

A. EDEX board，與 EAUX 板通訊失效時，能自動啟動去勵磁功能。

B. EXAM board，檢測地漏電流，使用±50 V 方波信號加到感應電阻。當接地故障產生電流會在電阻上產生電壓，該訊號被送回 EAUX 板檢測勵磁接地漏電流。

(6) ESYS Board：

處理來自外部的發電機電壓和電流信號、數位訊號輸入、跳脫電驛訊號輸出等。

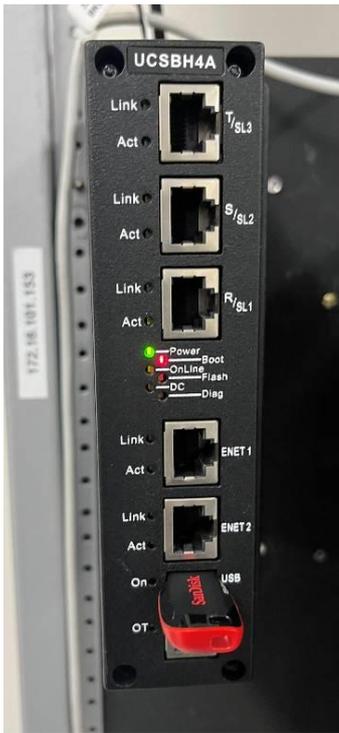
(7) Controller (M1、M2、C)：

控制系統由 3 個 Controller 組成 (M1、M2、C) M1 及 M2 交互備援，具備保護及穩定系統功能，而控制器 C 功能為協助判斷整體系統狀態，能有效增加系統穩定性，降低因設備故障造成誤動作的可能性

A. 功能：具備邏輯閘、積分器 (PI)、函數產生器、信號偵測等功能，依據 input 的各項資料（場電壓電流、定子電壓定子電流、直流電壓電流等）判斷並執行以下保護功能過勵磁、欠勵磁限制 (UEL)、電力系統穩定 (PSS)、V/Hz 限制等。

B. 硬體：M1、M2 和 C 的硬體完全相同，差異在於軟體及韌體的設定，故將系統每一個設備的設定值妥善下載管理好，對現場運轉維護至關重要，圖 15 表示 GE 所提供各代不同 Controller 照片，會因應系統規格及配置規畫不同的型號的 Controller，而本案採用 UCEC 型號。

UCSC



UCSB



UCEC



圖 15 各型式 Controller 圖片

(8) SCR (Thyristors) :

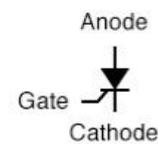
Silicon-Controlled Rectifier (SCR) 是一種半導體元件，廣泛應用於電力控制領域，具備以下特性，故廣泛用於整流電路，SCR 電路符號 (詳見圖 16)。

特性：

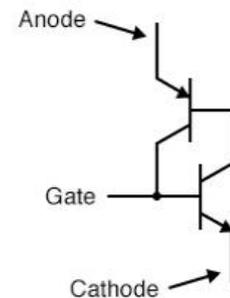
- A. 開關迅速，故適合用於交流電應用。
- B. 處理電壓等級高，SCR 具有以小電流 (電壓) 控制大電流 (電壓) 能力。

限制：

- A. 開關限制，SCR 一旦打開則會一直在進行操作，無法通過門信號關閉，直到電流降至一定閾值以下。故系統為了要精確控制關閉時間，需設計複雜的換向電路迫使 SCR 關閉。
- B. 散熱問題，SCR 在操作過程中會產生大量的熱，尤其是在處理高電流時，有必要進行足夠的冷卻和散熱機制，本案採用風冷來達成散熱效果。



Schematic symbol



Equivalent schematic

圖 16 SCR 電路符號

(9) 橋式整流器：

橋式整流器包含、保險絲、閘流體保護電路等，橋式整流器由 6 個 SCR 組成，並在 DC 輸出配置兩個 Fuse（成本節省考量），橋式整流器單線圖（詳見圖 17）。

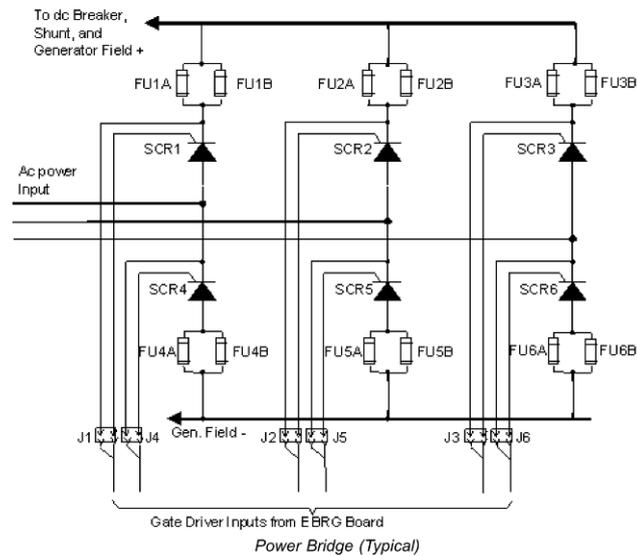


圖 17 橋式整流器單線圖

(10) Control Power Supply：

系統主要電源為 120VAC，並配有備用電源 125 VDC，其中主要電源經由內部電路轉換為 28VDC 供電給 CPU（M1、M2、C）、觸控面板、EDEX 板、DEFF 板等設備。

(五) 模擬器功能

EX2100e 控制系統內建了一個模擬器，能夠模擬發電機和靜態勵磁系統，可透 Tool box ST application 進入選擇模擬模式，使用內建模型模擬發電機和 Exciter 行為。

模擬器可用於培訓發電機啟動過程，透過選擇勵磁系統的多種功能、調整參數並記錄特定數值的變化曲線，使用者能更加熟悉發電機和勵磁系統在不同情況下的運行特性。搭配 D 曲線和 V 曲線對照表，操作員能更深入理解發電機運行時如何最佳化功能選擇與調整，以確保系統穩定且高效地運作，操作介面請參考（圖 18）。

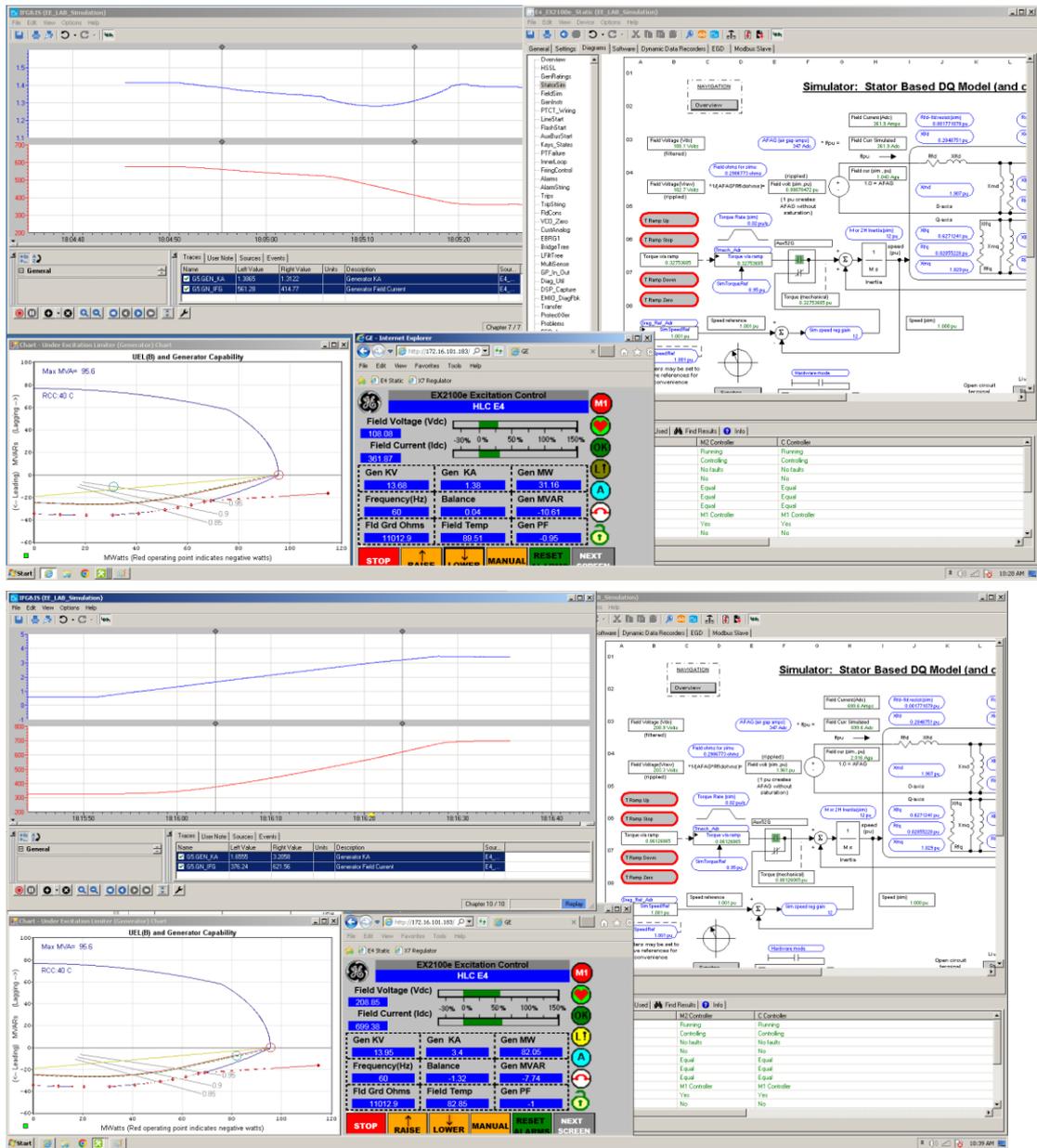


圖 18 模擬器操作介面

四、靜態啟動系統

(一) 系統概述

在同步發電機啟動過程中，通常會使用靜態啟動系統(Static Starter System)，也稱為靜態頻率控制器(Static Frequency Converter, SFC)或負載換向逆變器(Load Commutated Inverter, LCI)。該系統與勵磁系統協同運作，透過將發電機作為同步電動機運行來控制轉速，控制轉速，進而讓發電機產生足夠的扭矩克服初始摩擦力，當轉速達到自持轉速時，靜態啟動系統即完成啟動工作。

(二) 靜態啟動系統的組成與結構

靜態啟動系統架構說明圖(詳圖 19)，該系統的電源由 Auxiliary Bus 提供，並通過 26kV/3.3kV/3.3kV 的雙繞組變壓器進行供應，通過橋式整流器將交流電轉換為直流電。透過靜態啟動系統精確控制 SCR (Thyristor) 的開關角度和頻率，以將直流電轉換為交流電輸出至發電機定子。

操作原理步驟如下：

1. LS2100e 系統將電力輸入發電機定子，在定子內部產生旋轉磁場。
2. 定子的旋轉磁場與轉子磁場相互作用，驅動轉子開始旋轉。
3. 隨著定子旋轉磁場的穩定生成，進一步牽引轉子運動。
4. 根據啟動的不同階段，調整定子磁場的頻率以控制旋轉速度。

• A simplified one-line diagram for the Static Starter system

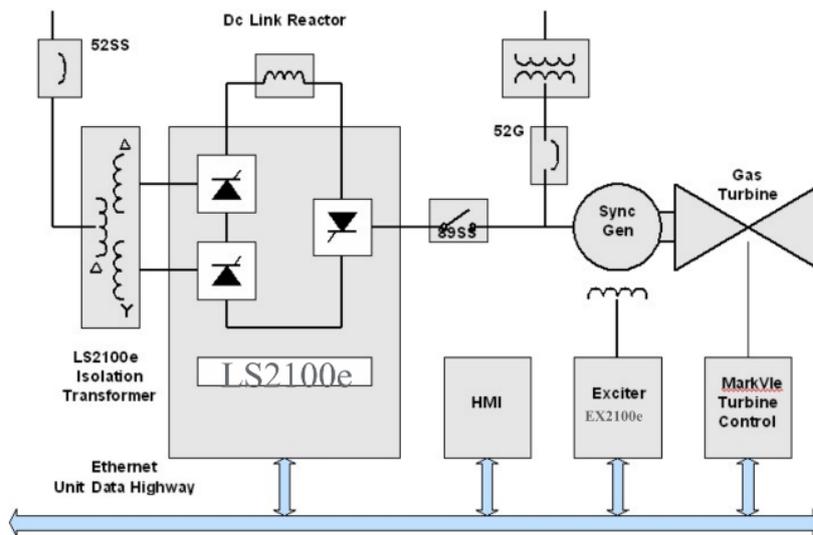
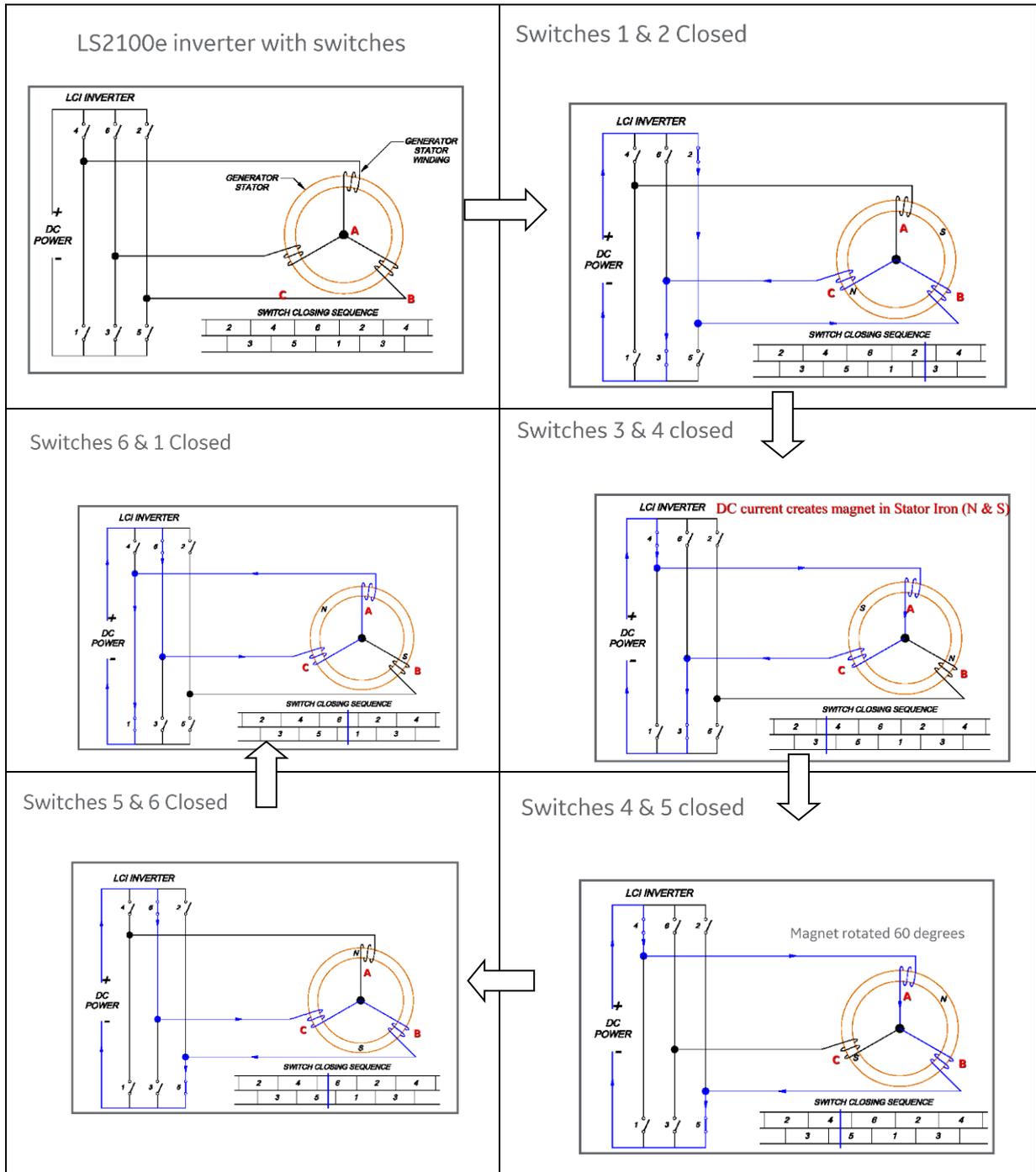


圖 19 靜態啟動系統架構說明圖

下表說明如何透過 6 個開關，來實現定子旋轉磁場。



其他元件功能說明：

- 變壓器：delta-ye 雙繞組配置可有效抑制系統中的第五及第七次諧波。
- AC Link/DC Link：大容量電感用於平滑電流曲線。

(三) 氣渦輪燃氣機組啟動順序說明

由於靜態啟動系統主要功能為控制同步發電機作為同步電動機將轉速從 3 rpm 至增加至 3240 rpm，此過程為涉及整個氣渦輪燃氣系統運作，故了解機組啟動順序對於了解發電流程至關重要，以下做簡單說明：

1. 啟動順序曲線

燃氣機組啟動順序曲線（詳見圖 20），橫軸為時間，縱軸為同步機轉子轉速度，依照轉子速度逐步說明如下：

- (1) 3 rpm ~ 6 rpm，使用小馬達帶動發電機轉速，並在啟動時 LS2100e 控制系統連接到發電機定子並接管勵磁場電壓參考。
- (2) 6 rpm ~ 900 rpm（同步速度 25%），LS2100e 控制系統將發電機渦輪加速
Purge 為燃燒室的清理過程，維持 900 rpm 以確保清理完全，維持該速度保持約六分鐘。
- (3) 900 rpm ~ 500 rpm，Purge 完成後關閉 LS2100e 控制輸出，發電機減速至額定速度約 14%，減速到 500 rpm 是為了過渡到下一階段的燃機預熱。
- (4) 500 rpm ~ 3240 rpm，在發電機減速至額定速度約 14%後，在點火後短暫保持穩定速度進行預熱；預熱完成後開始點火，靜態啟動系統控制輸出再次開啟並將渦輪加速機至自持速度至 3240 rpm（90%額定速度）後關閉靜態啟動系統。

LS2100e Startup Sequence

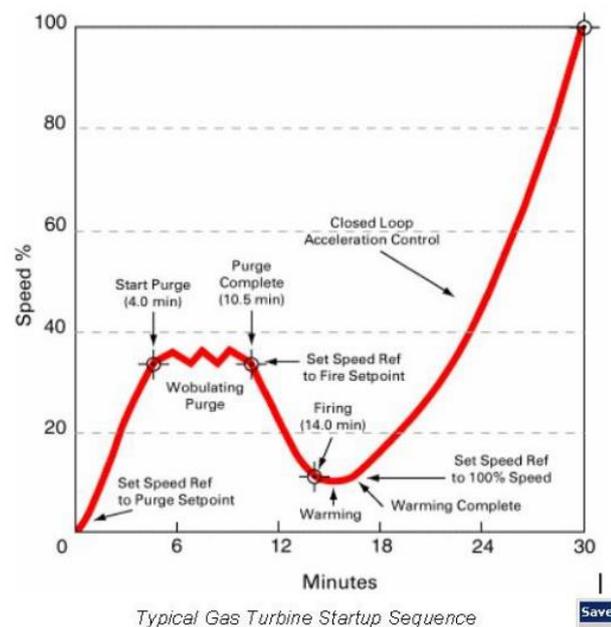


圖 20 啟動順序曲線

2. 轉矩曲線 (詳見圖 21)

加速扭矩是發電機輸出扭矩減去渦輪負載扭矩的差值，並與軸的慣性共同決定加速率。隨著加速扭矩的增加，渦輪的加速速度也相應提升。當達到 90% 額定速度時，渦輪扭矩已足以維持加速至最高速度，此時關閉靜態啟動系統。靜態啟動系統的關閉標誌著燃氣輪機進入穩定運行狀態。

LS2100e Torque Curve

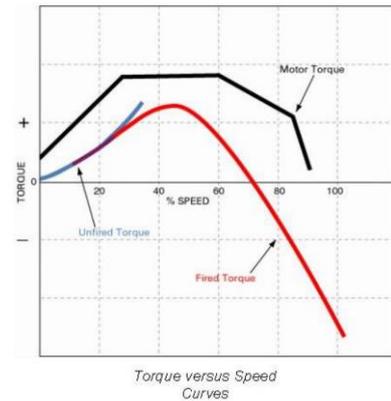


圖 21 轉矩曲線

3. Volt/Hz 曲線 (詳見圖 22)

根據法拉第電磁感應定律，當導體在磁場中運動，切割磁力線時會產生感應電動勢 (E)，表示如下： $E = B \cdot L \cdot v$

其中：

- E ：感應電壓
- B ：磁通密度 (磁通量的強度)
- L ：導體的有效長度
- v ：導體相對於磁場的移動速度

透過調整轉速 (頻率) 和端電壓，Volt/Hz 曲線能穩定控制定子繞組中的磁通量，避免磁通量過高或過低，對 啟動和變速過程至關重要，可確保發電機在不同速度下安全穩定地運行。

LS2100e Volt Vs Flux

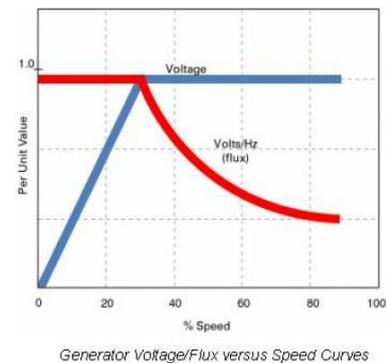


圖 22 Volt/Hz 曲線

(四)硬體架構

1. 靜態啟動系統單線圖

同步發電機的啟動方式多樣，包括柴油引擎啟動和輔機馬達啟動等。靜態啟動系統，相較於其他方法的優勢在於減少機械設備，節省空間。本計畫中使用的靜態啟動系統如（圖 23）所示，該系統的架構設計允許一組靜態啟動系統啟動多組發電機，本案為二對二設計，本案採用兩對二配置，當 LCI #1 或 LCI #2 發生故障時，可通過開關切換，利用另一套 LCI 啟動發電機。

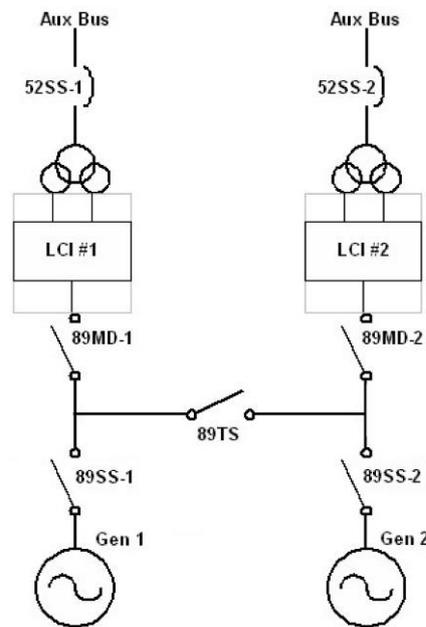


圖 23 靜態啟動系統單線圖

2. 靜態啟動系統系統硬體元件連接

靜態啟動系統硬體元件的連接結構包含各種協同工作的重要元件，靜態啟動系統硬體元件連接圖（詳見圖 24）。每組靜態啟動系統搭配一個控制器（Controller），該控制器將指令傳遞至 LSGI 板。LSGI 板可視為系統的主機板，負責協調所有介面的通訊，包括交流電和直流電的電壓與電流訊號、SCR 開關之控制以及各項開關狀態的傳遞。

而電力轉換部分 Aux Bus 為上游電源，經 Source Bridge 將交流電轉換為穩定的直流電，並進一步通過 Load Bridge 將直流電轉換為特定頻率的交流電再輸出至發電機的定子繞組產生旋轉磁場。

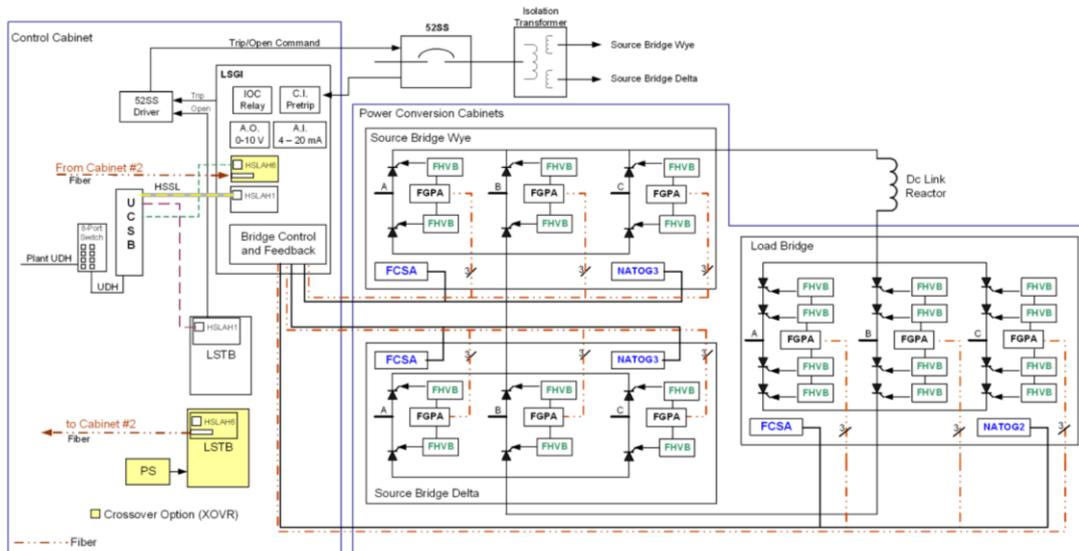


圖 24 靜態啟動系統硬體元件連接圖

以下為主要控制板功能：

- (1) UCSB - Controller
負責處理 LS2100e 系統的控制和保護。
- (2) LSGI - Gate Distribution and Status Board
協調 Controller、Power Bridge 和 Source Bridge 之介面。
- (3) LSTB - Static Starter I/O Terminal Board
處理 I/O 信號，包含 32 個 120V 接點輸入及 16 個乾接點輸出。

整流與逆變控制板：

- (1) FGPA - Gate Pulse Amplifier Board
驅動 SCR 並監測其狀態。
- (2) FHVB - High Voltage Gate Interface Board
提供 SCR 觸發信號，每個 FHVB 對應單一 SCR，具備電容故障檢測功能。
- (3) NATO - Voltage Feedback K Scaling Board
處理電壓信號，經衰減後傳送至控制器，以精準計算電壓。
- (4) FCSA - Current Sensor Interface Board
處理 Source Bridge 和 Load Bridge 的電流輸出信號。

3. 冷卻系統

靜態啟動系統在進行整流和逆變操作時產生大量熱能，因此冷卻系統是關鍵輔助設備，可確保系統穩定運行。由於靜態啟動系統需驅動同步馬達且啟動電流大，要求強效散熱，因此採用液體冷卻系統。

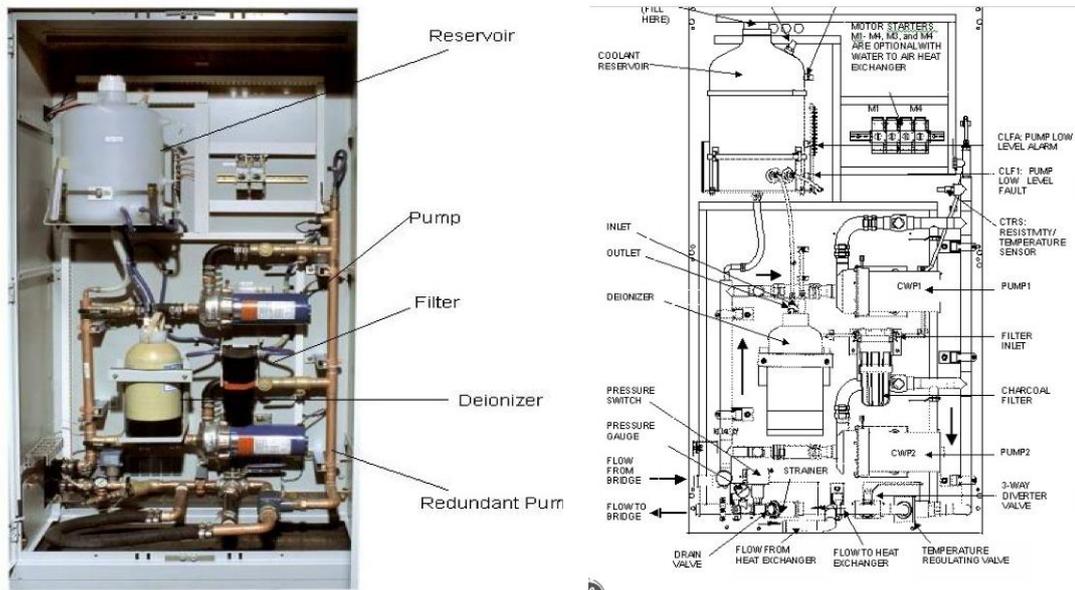
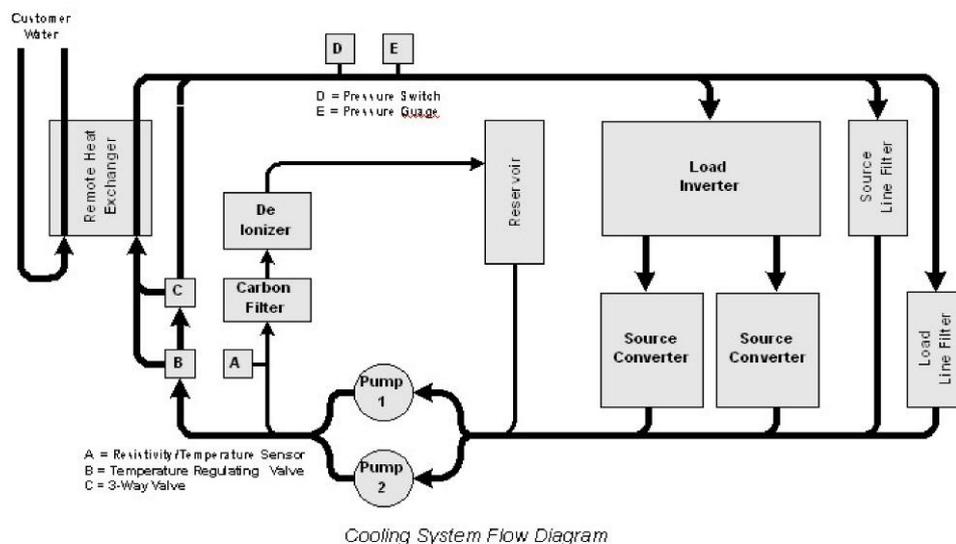


圖 25 冷卻系統控制盤

靜態啟動系統之冷卻系統位於主控制盤背面（詳見圖 25），採用封閉循環並配備冷卻液儲槽。冷卻液由泵出口流向熱交換器，再進入 Load Bridge 和 Source Bridge，最終回到泵完成循環（詳見圖 26）。為維持冷卻液的高電阻率 and 穩定冷卻效果，部分冷卻液會通過除離子系統（Deionizer）進行過濾。



Cooling System Flow Diagram

圖 26 冷卻液循環

五、 出國期間所遭遇之困難與特殊事項

本次出國實習期間未遭遇困難與特殊事項

六、 對本公司之具體建議

在此次赴美實習階段，我們的發電機已於海外完成工廠測試，並在運送至計畫組裝後進行現場測試。測試中發現，定子繞組中間的溫度監測元件出現問題。原本配置的兩個溫度監測元件中，一個為常用，另一個為備用。然而，使用者發現出廠時已有一個元件損壞，這種情況實在不應發生，應於工廠測試時就該發現並且修正。然而，統包商表示此情況符合合約規範且在其允收標準內。

由於計畫龐大且設備繁多，細節元件更加複雜，雙方認知的一致性尤為重要。統包商與使用者之間的認知偏差雖不可避免，但為了減少此類情況再度發生，我們需要深入思考其根本原因。

為此，我們可以從兩個方向著手：首先，在項目執行前，應與統包商進行更充分的協調，以消除認知差異。其次，對於公司重要設備，應考慮派員出國參與工廠驗收，確認每一細部測試內容，如有不滿意之處，應立即在現場反應，避免設備運至現場後因認知差異而產生問題。

七、 心得與建議事項

感謝公司提供參與海外實習計畫和興達電廠更新改建計畫的機會，讓我能赴美國休士頓的 GE 學習訓練中心進行研習，深入研習發電機的勵磁系統、靜態啟動系統。此次研習內容涵蓋從基礎理論、硬體架構、軟體操作到系統參數下載等多面向知識，應用層面更是遠超預期，使我受益良多。

在訓練過程中，系統設計、操作與維護工作所需的熟悉度讓我體悟良多。對設計部門而言，透徹理解系統設計理念、不同廠商的功能分配與硬體模組劃分，有助於進行深入的比較與分析，推敲出各家方案的優缺點。對運轉部門而言，需在發電廠的實際操作中迅速排查故障。由於系統故障常伴隨多個警訊與事件，唯有深入理解系統原理與硬體架構，方能準確判斷問題並迅速解決故障，進而縮短停機時間。

此次課程內容廣泛且深入，對未來設備設計具有極大助益，更有助於在計畫初期提出具體建議與需求。其中特別在勵磁系統的培訓中，透過 GE 軟體模擬勵磁機操作，更深入了解不同模式下系統保護功能的應用，並驗證 D 曲線和 V 曲線的變化特性，使我對系統有了更完整的理解。

最後，期望未來能有更多深入學習機會，尤其是參訪本計畫的定子及轉子製造工廠，透過實地觀摩，能有效結合理論知識與實務經驗，使技術應用更為精準，並進一步提升對系統整體運作的掌控。感謝公司提供這次寶貴的學習機會，未來將秉持所學，將知識與經驗應用於工作中，為公司與團隊創造更高價值。