

出國報告審核表

出國報告名稱：靜態頻率控制器(SFC)技術實習

出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
胡澄讚	第四工作隊第三分隊課長	台灣電力公司電力修護處
出國類別	☐ 考察 ☐ 進修 ☐ 研究 ☒ 實習 ☐ 其他_____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：103年11月16日至103年11月29日		報告繳交日期：104年01月19日

出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審核項目
☒	☒	1.依限繳交出國報告
☒	☒	2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」)
☒	☒	3.無抄襲相關資料
☒	☒	4.內容充實完備。
☒	☒	5.建議具參考價值
☒	☒	6.送本機關參考或研辦
☐	☐	7.送上級機關參考
☐	☐	8.退回補正，原因：
☐	☐	(1) 不符原核定出國計畫
☐	☐	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
☐	☐	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
☐	☐	(4) 抄襲相關資料之全部或部分内容
☐	☐	(5) 引用相關資料未註明資料來源
☐	☐	(6) 電子檔案未依格式辦理
☐	☐	9.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表：
☐	☐	(1) 辦理本機關出國報告座談會(說明會)，與同仁進行知識分享。
☐	☐	(2) 於本機關業務會報提出報告
☐	☐	(3) 其他_____
☐	☐	10.其他處理意見及方式：

報告人：



單位
主管



主管處
主管



總經理

副總經理：



說明：

- 一、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。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務出國報告資訊網」為原則。

出國報告（出國類別：實習）

靜態頻率控制器(SFC)技術實習

服務機關：台灣電力公司電力修護處

姓名職稱：胡澄讚 第四工作隊第三分隊課長

派赴國家：瑞士

出國期間：103 年 11 月 16 日至 103 年 11 月 29 日

報告日期：104 年 01 月 19 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：靜態頻率控制器(SFC)技術實習

頁數 28 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) 23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

胡澄讚/台灣電力公司/電力修護處/第四工作隊三分隊課長/(02) 27853199-281

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究☒4 實習☐5 其他

出國期間：103.11.1 至 103.11.29

出國地區：瑞士

報告日期：104.01.19

分類號/目：G3/電力工程

關鍵詞：靜態頻率控制器(Static Frequency Controller, SFC)、靜態勵磁設備(Static Excitation Equipment, SEE)

內容摘要：(二百至三百字)

本公司大部分氣渦輪機之起動設備皆以靜態頻率控制器(Static Frequency Controller, SFC)控制轉速，利用發電機在起動時由線路端輸入三相交流電源，經線路轉換器(Line Converter)整流為可調變直流電壓，通過直流電抗器(DC Reactor)，再由頻率控制器(Machine Converter)輸出可變頻率至發電機三相定子線圈，將同步發電機當成同步馬達起動，轉子磁場須勵磁系統激磁，達一定轉速後，氣渦輪機點火與頻率控制器同時出力升速到一定速度(2400~2520rpm)，然後切斷靜態頻率控制器，由氣渦輪機單獨出力升速到額定轉速，此時，同步馬達線路端電源則利用中壓開關切換回發電機運轉模式，準備發電並聯運轉。較小型機組則是以另一種靜態頻率控制器直接驅動感應馬達帶動發電機組啟動，因此研習靜態頻率控制器(SFC)技術，可做為複循環氣渦輪機組啟動設備之維護和研究發展之需求。

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

報告目次

壹、出國目地	1
貳、出國過程	2
Asea Brown Boveri(ABB) 靜態頻率控制器(起動裝置)研習過程	3
參、出國研習內容	8
一、GT 為什麼需要輔助設備起動?	8
二、靜態頻率控制器(起動裝置)的一般設計	8
三、氣渦輪機組(GT)的起動流程	9
四、靜態頻率控制器(起動裝置)的基礎架構	14
五、靜態頻率控制器(起動裝置)的關鍵組件	16
六、靜態頻率控制器(起動裝置)的基本原理	17
肆、出國心得與建議	26
一、出國心得(靜態頻率控制器之維護和研究發展之可行性)	26
二、出國建議	27
伍、參考文獻	28

壹、出國目的

出國緣由：本公司大部分氣渦輪機之起動設備皆以靜態頻率控制器(Static Frequency Converter, SFC)或稱靜態起動裝置(Static Starting Device)控制轉速，利用發電機在起動時由線路端輸入三相交流電源輸入，經變壓器降壓至適當電壓，線路轉換器(Line Converter)將三項交流電壓整流為可調變直流電壓，通過直流電抗器(DC Reactor)抑制突升電流及平波，再由頻率控制器(Machine Converter)輸出可變頻率至發電機三相定子線圈，將同步發電機當成同步馬達起動，機組轉軸與輸入可變頻率得以同步轉動。機組轉動的過程，轉子磁場須靜態勵磁設備(Static Excitation Equipment, SEE)或稱靜態勵磁系統(Static Excitation System, SES)同時激磁，達一定轉速後，氣渦輪機點火與頻率控制器同時出力升速到一定速度(2400~2520rpm)，然後切斷靜態頻率控制器的輸出電力，由氣渦輪機單獨出力升速到額定轉速，此時，同步馬達線路端電源則利用中壓開關切換回發電機運轉模式，準備發電並聯運轉。較小型機組則是以另一種靜態頻率控制器直接驅動感應馬達帶動發電機組啟動，因此研習靜態頻率控制器(SFC)技術，可做為複循環氣渦輪機組啟動設備之維護和研究發展之需求。

出國目標：研習靜態頻率控制器(SFC)技術，結合自行研製之數位式靜態勵磁系統，應用於氣渦輪機組啟動控制設備之維護與研發。

實施要領：1.研習靜態頻率控制器理論基礎。

2.研習靜態頻率控制器軟、硬體架構。

3.研習靜態頻率控制器維護技術。

預期成果：1.建立靜態頻率控制器基礎架構。

2.確認靜態頻率控制器的關鍵組件。

3.規劃靜態頻率控制器之維護和研究發展計畫與評估。

貳、出國過程

日期	地點	行程內容	天數
11/16 ~ 11/17	台灣 至 瑞士 Turgi	台灣 => 德國 法蘭克福機場 =>瑞士 Turgi	2 天
11/18 ~ 11/26	瑞士 Turgi	Asea Brown Boveri(ABB) Turgi Plant 靜態頻率控制器(起動裝置)技術實習 ● GT 為什麼需要輔助設備起動? ● 靜態頻率控制器 (起動裝置)的一般設計 ● 靜態頻率控制器(起動裝置)系統介紹 ● 氣渦輪機組(GT)的起動流程 ● 靜態勵磁系統介紹 ● 靜態頻率控制器與靜態勵磁系統之關係 ● 靜態頻率控制器(起動裝置)之保護	9 天
11/27 ~ 11/29	瑞士 Turgi 至 台灣	瑞士 Turgi => 德國法蘭克福(駐留一晚) =>法蘭克福機場 =>台灣	3 天

Asea Brown Boveri(ABB) 靜態頻率控制器(起動裝置)研習過程



圖 1-1 ABB Turgi 廠區大門



圖 1-2 Mr.Sperez 的 ABB 簡報介紹



圖 1-3 SFC(SSD)&SEE(SES) 實習會議



圖 1-4 SFC(SSD)&SEE(SES) 組裝廠區導覽

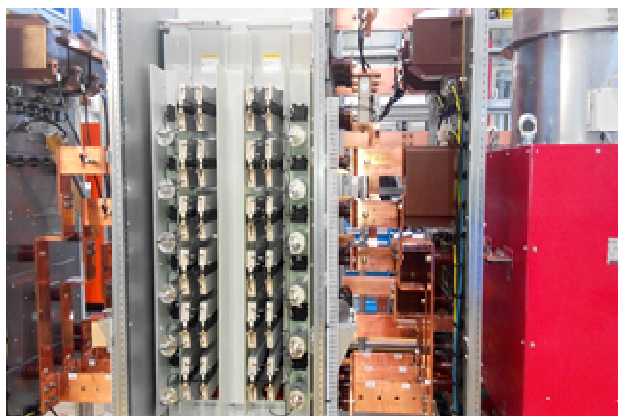


圖 1-5 SFC(SSD)&SEE(SES) 現場生產線

Asea Brown Boveri(ABB) 靜態頻率控制器(起動裝置)實習過程

1 靜態頻率控制器 (起動裝置)的一般設計：典型的複循環機組由兩部氣渦輪機組帶動一部蒸汽機組，每兩部氣渦輪機組配置一套靜態頻率控制器(SFC, 或稱起動裝置(SSD))，作為氣渦輪機組的起動器，汽渦輪機組則不需起動器，但各機組必須擁有自己的靜態勵磁系統(SES)，如圖 1-1。各機組起動器之間經由起動選擇面板(Starting Selection Board, SSB)之匯流排聯結選擇，可以交叉起動其他的氣渦輪機組，但一次只能起動一部機組，不能一次起動多部機組。

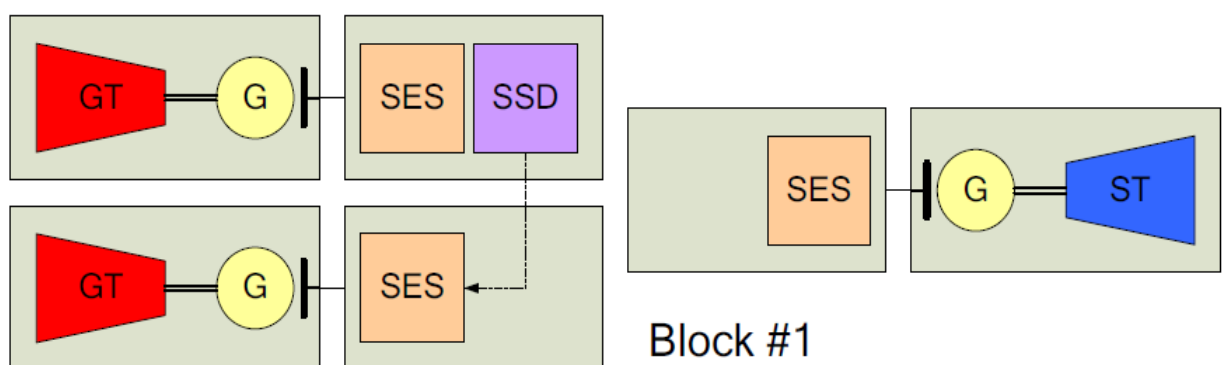


圖 2-1 典型的複循環機組(2+1)

2 靜態頻率控制器(起動裝置)系統介紹：

靜態頻率控制器(起動裝置)必須和靜態勵磁系統一起工作，因為起動勵磁不再配置於起動器本身，不同的起動器、靜態勵磁系統和起動選擇面板間的協調則透過 Megatrol 的控制系統來實現，Megatrol 不僅傳達設定點給起動器和靜態勵磁系統，同時還要檢查起動選擇面板(SSB)的連結狀態，才能使用在完全控制的交叉起動，如圖 2-2 所示。

電廠的複循環機組通常多於三部機組以上，各機組間佈建匯流排由中壓斷路器連結，可經起動選擇面板的選擇進行起動，亦允許各機組間交叉起動，如起動器#1 可起動氣渦輪機組(GT)#3。因此，Megatrol 可以控制每一組起動選擇面板之匯流排聯結、靜態頻率控制器(起動器)和靜態勵磁系統之間的協調動作，自動地起動被指定的各氣渦輪機組。

重要元件如下：中壓斷路器(Media Voltage Breaker, MVB)、轉換器單元(Line Converter; Machine Converter Units)、同步電抗器(DC Reactor)、起動選擇裝置(Starting Selection Device, SSB)和控制單元(Control Device)。

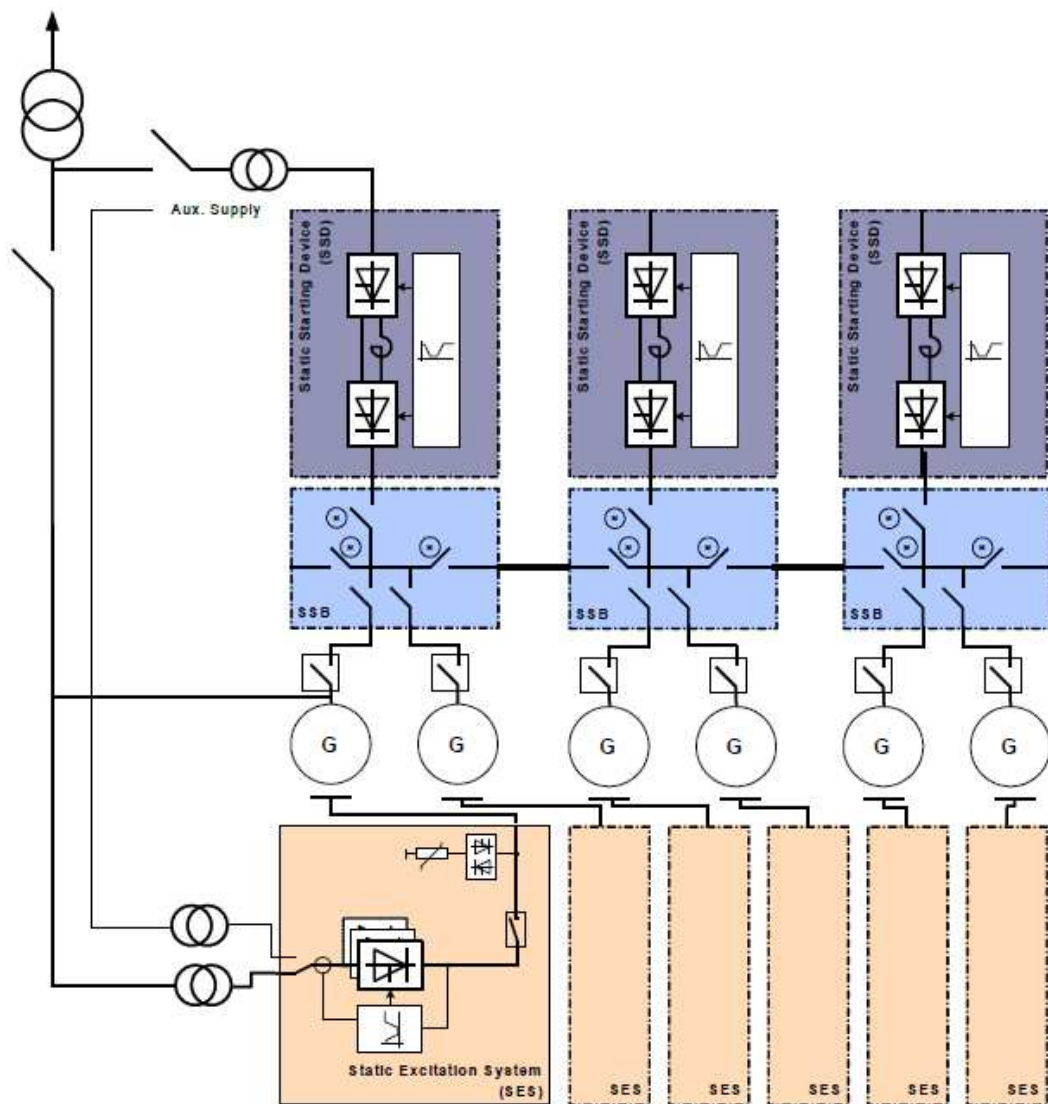


圖 2-2 Megatrol 控制系統

3 氣渦輪機組(GT)的起動流程

從 0 轉速到達 2400~2520RPM，即將氣渦輪機和發電機的轉子加速到自持速度，在低頻時採脈衝模式啟動，10%轉速已上再採六脈波法控制轉速，自持速度也就是氣渦輪機能夠產生足夠的動能帶動它繼續加速運行，達到機組要求的額定轉速。由於氣渦輪機組的特點，起動的方式可分為機械式和電氣式。機械式主要採用同軸外接一台起動馬達來拖動整個機組的起動，電氣式主要採用變頻方式將氣渦輪發電機作為同步電動機來啟動，如圖 2-3 為 SFC 起動過程的時序圖及其控制模式。

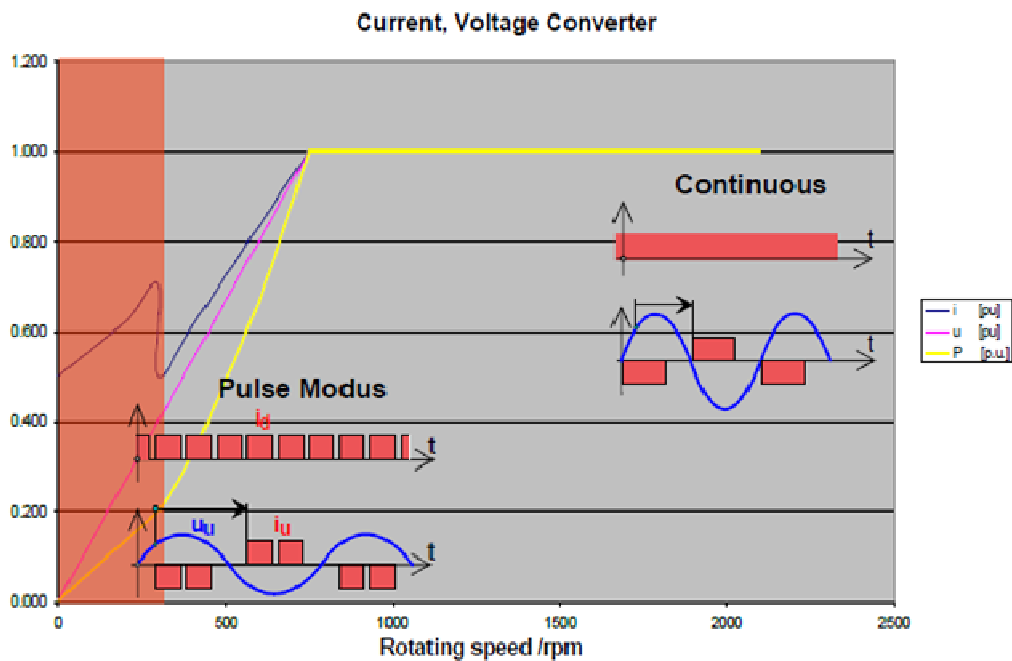


圖 2-3 為 SFC 起動過程的時序圖及其控制模式

4 靜態勵磁系統介紹：

提供機組同步馬達和發電機運轉時之激磁，並可調整功率因數。重要元件如下：勵磁變壓器(Excitation Transformer)、轉換器單元(Converter Units)、控制單元(Control Device)、軸電壓抑制裝置(Shaft Filter)、磁場突壓抑制器(Field Suppression Equipment)和接地偵測電驛(Ground Fault Relay)，如圖 2-4 靜態勵磁控制系統所示。

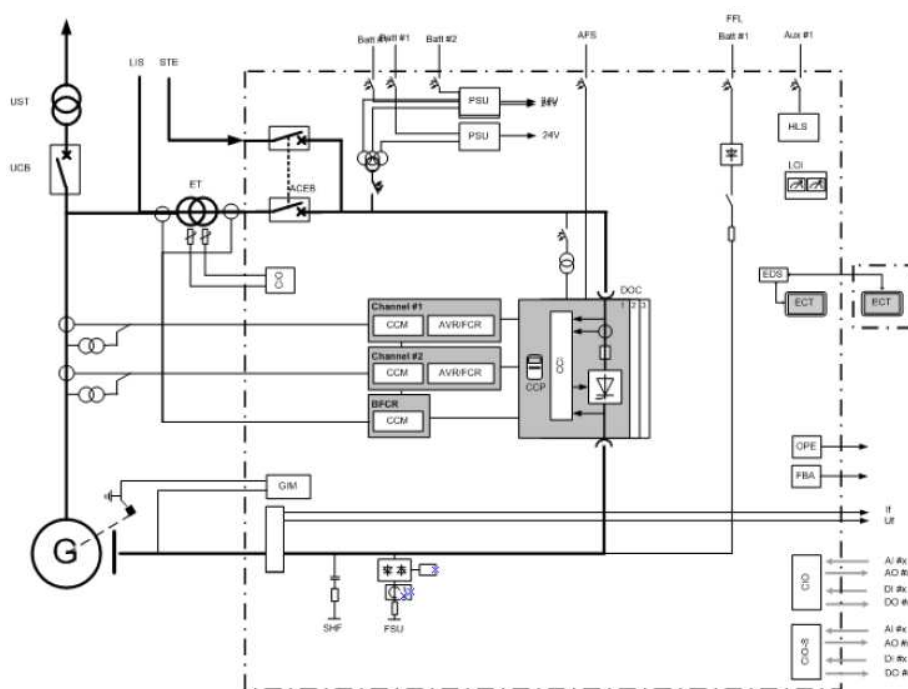


圖 2-4 靜態勵磁控制系統

5 靜態頻率控制器(起動裝置)之保護

靜態頻率控制器之系統保護包含如下，靜態頻率控制器輸入變壓器溫度監控、轉換器過電流及低電壓、溫度監控、接地偵測和發電機電氣保護監控，如圖 2-5 所示。

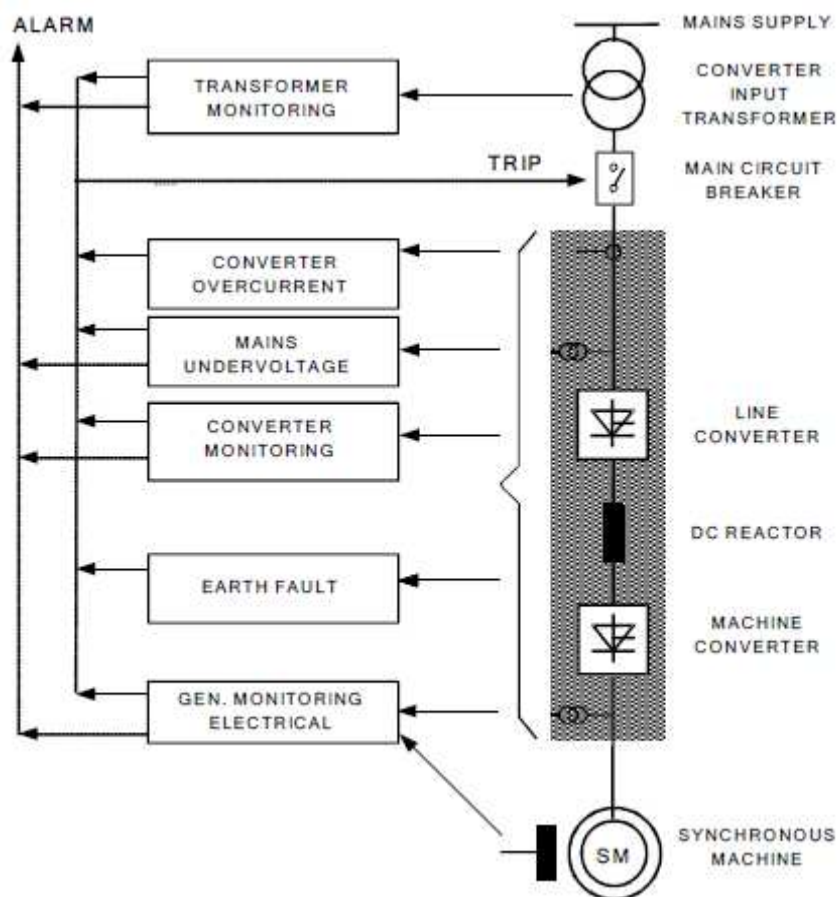


圖 2-5 靜態頻率控制器之系統保護

6 靜態頻率控制器與靜態勵磁系統之關係

靜態頻率控制器(SFC)作為起動裝置，SFC 將可調頻率的交流電加到發電機定子上，使發電機變成調頻調速之電動機方式轉動，帶動同軸之氣渦輪機旋轉，因為加到定子上的是經逆變換器變頻後的交流電，因此機組會依照預先設定的速率加速上升。整個起動過程發電機的轉子都由機組所配套的勵磁系統施加有一定的勵磁電流，其電流的大小與 SFC 裝置配合，其勵磁系統的工作方式是受 SFC 的頻率迴授控制，如圖 2-2 所示。

參、出國研習內容

一、GT 為什麼需要輔助設備起動？

1. 氣渦輪機組在起動時，由於供燃燒的氣體無法進行有效的劇烈壓縮及完全燃燒，故無法產生強大的起動力矩而自行起動。因此普遍採用由外部電力系統通過靜態頻率控制器（SFC）向發電機定子輸入可變電壓和頻率的電源，將發電機當作同步電動機使用，帶動整個氣渦輪機組之轉軸旋轉，小型機組則設計由感應馬達帶動傳動機構起動。

2. GT 起動設備的種類

(1). 感應馬達帶動傳動機構起動(較小容量)。

(2). 靜態頻率控制器(SFC 或稱靜態起動裝置(SSD))起動。

a. 無刷式旋轉勵磁系統機組起動(SFC+AVR)。

SFC 控制機組轉速和獨立 AVR 提供同步馬達激磁， $AVR(\text{motor}) > AVR(\text{generator})$ 。

b. 靜態勵磁系統機組起動 SFC(SSD)。

SFC 控制機組轉速，並用相同的 SEE 提供同步馬達與發電機轉子磁場激磁。

3. 起動馬達驅動 GT 的缺點？

(1). 起動馬達線圈因通過大電流產生熱應力(Thermal Stress)，經過一段時間將會導致起動馬達線圈絕緣劣化。

(2). 起動瞬間大幅度的電壓降會造成廠內用電的衝擊(Electrical Stress)，可能造成其他廠內輔機設備跳脫而影響機組運轉。

(3). 起動馬達之扭轉力矩對氣渦輪機組的轉軸造成機械應力的衝擊(Mechanical Stress)，長期累積下來也會對氣渦輪機組的轉軸造成損傷。

(4). 起動馬達會使主機軸承變長，需要較大的廠房，並增加對心的難度及振動的問題。

二、靜態頻率控制器(起動裝置)的一般設計

典型的複循環機組設計，通常多於三部機組以上，各機組設有起動選擇面板佈建匯流排及中壓斷路器連結，可由起動選擇面板的選擇進行起動，並允許各機組間交叉起動其他的機組，例如靜態頻率控制器(起動器)#1 之命令可起動氣渦機組(GT)#2 或 #3，如圖 3-1 所示。因此，藉由控制系統的整合，每一組靜態頻率控制器(起動器)經

由起動選擇面板之選擇，匯流排開關設備和靜態勵磁系統之間的協調動作，就能自動地起動被指定的氣渦輪機組。

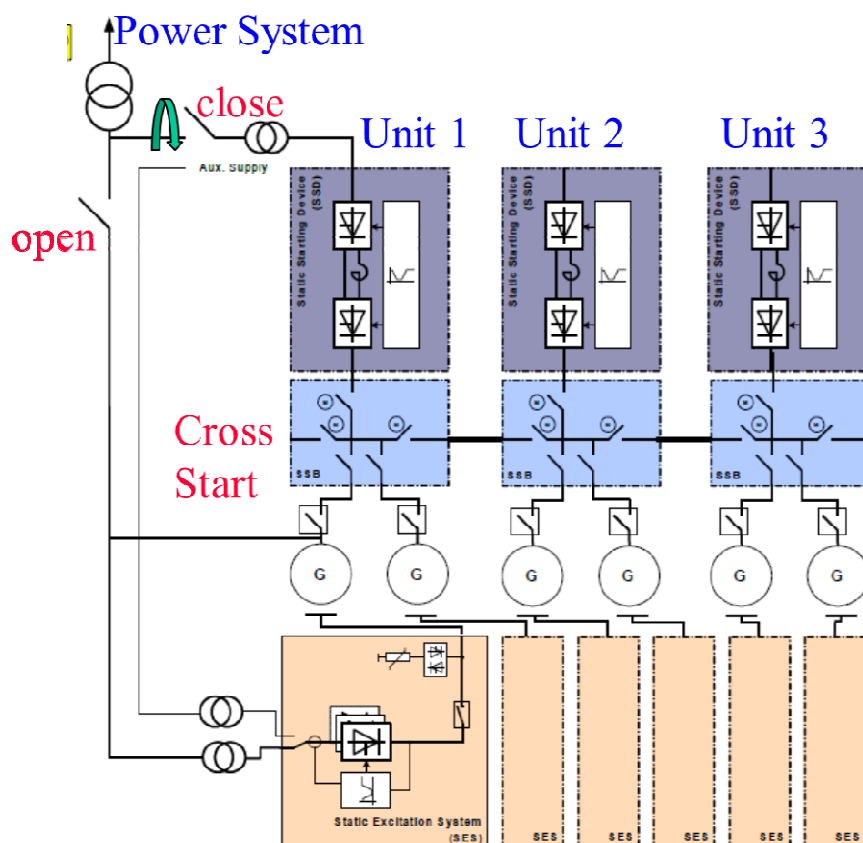


圖 3-1 靜態頻率控制器之設計

氣渦輪機組的起動是透過起動選擇面板之設定，中壓開關器將連結至匯流排，自動選擇至馬達運轉模式，由外部電力線路端輸入三相交流電源至線路轉換器(Line Converter)，整流為可調變直流電壓，通過直流電抗器(DC Reactor)，再由頻率控制器(Machine Converter)輸出可調變頻率至發電機三相定子線圈，將同步發電機當成同步馬達起動，即靜態頻率控制裝置之輸出是一個受轉子速度迴授的控制系統，使得定子旋轉磁場的轉速與轉子旋轉磁場的轉速，得以始終保持同步。達一定轉速後，氣渦輪機開始點火與靜態頻率控制器同時出力，升速達到一定速度(2400~2520rpm)，然後切斷靜態頻率控制器，由氣渦輪機單獨控制出力，將機組升速到額定轉速，此時，同步馬達線路端電源則再利用中壓開關切換回發電機運轉模式，準備並聯發電運轉，如圖 3-2 所示。

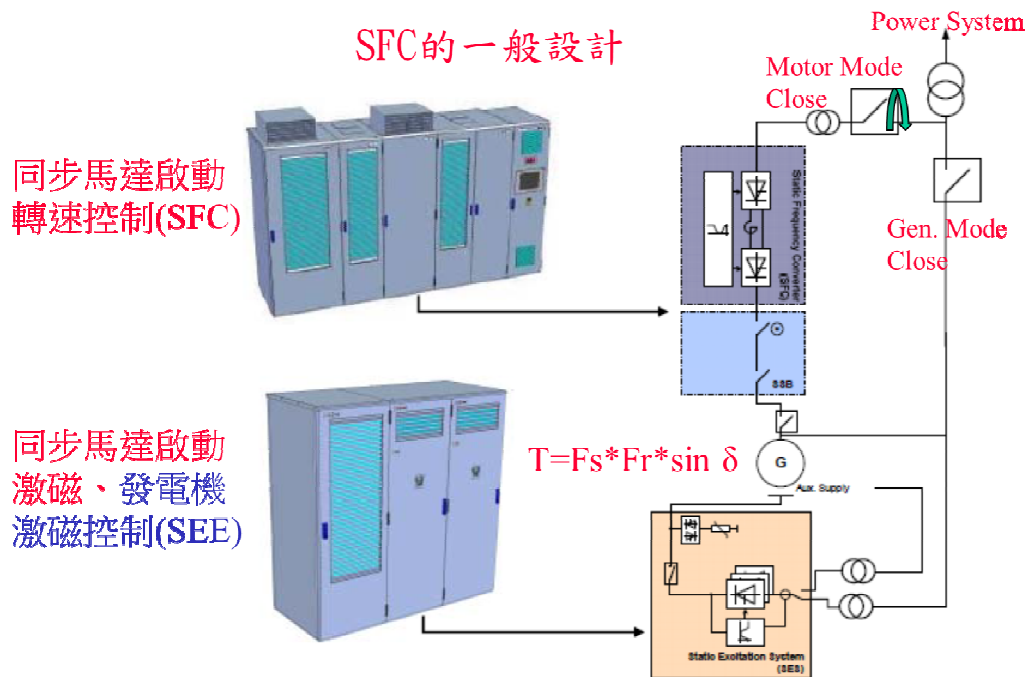


圖 3-2 靜態頻率控制器之起動模式

靜態頻率控制器帶動氣渦輪機組之設計，可避免感應馬達起動的缺點外，廠房使用的土地面積亦較小，並可減少對心的難度及振動的問題。因此，近年來複循環機組的起動設備設計，大都是朝向整合式設計，也就是將機組內之靜態頻率控制器、靜態勵磁設備、中壓開關設備和系統控制單元等設立於同一電氣貨櫃內，兼有容易維護和安裝時程短之優點。同時利用分散式控制系統(Distribution Control System, DCS)的控制架構，可以串聯控制每一組起動選擇面板之匯流排聯結、靜態頻率控制器(起動器)和靜態勵磁系統之間的協調動作，自動地起動被指定的氣渦輪機組，如圖 3-3 所示。

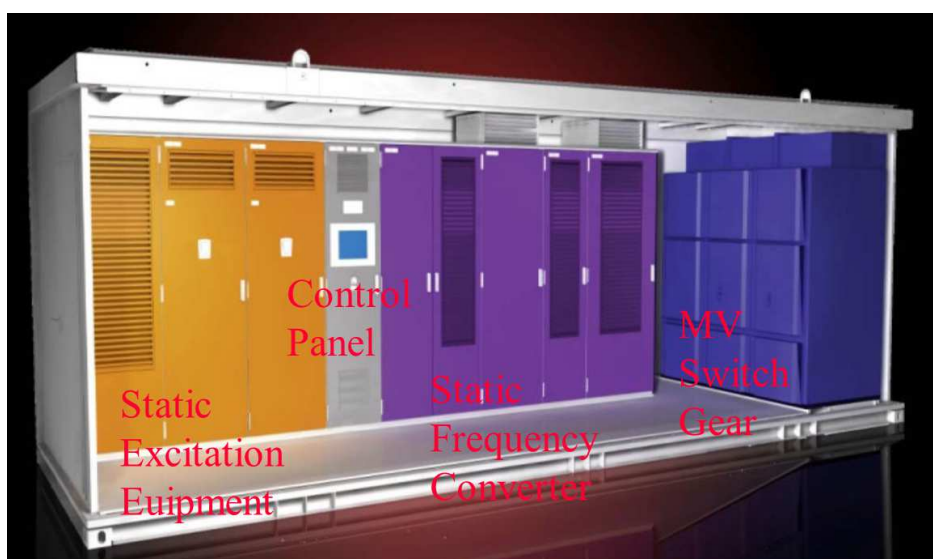


圖 3-3 複循環機組起動設備設計

三、氣渦輪機組的起動流程

1. 大潭電廠 Stage II 氣渦輪機組起動流程(三菱公司 GT)

- (1) 機組開始運轉，當轉速升到 360RPM 後，SFC 的工作模式由脈衝波模式(Pulse Mode)之導通強制換相，轉為負載換相模式(Load Commutated Mode)工作，當轉速升到 720 RPM 時，AVR 由 V/F Constant 控制模式轉為 Voltage Constant 控制模式。
- (2) 機組轉速上升，當轉速升到 800 RPM 時 GT 開始吹清(Purge)燃料管路，SFC 之控制模式由電流回授控制模式轉為速度回授控制模式。
- (3) 轉速降到 720RPM 時 GT 準備點火，程式控制啟動點火系統，SFC 之控制模式由速度回授控制模式轉為電流回授控制模式。。
- (4) 轉速達自持速度 2400RPM 時 SFC 停止運轉，調速器投入並開始對轉速進行調節，由 GT 熱燃氣之推力帶動發電機繼續升速，使機組平滑到達同步轉速 3600 RPM。

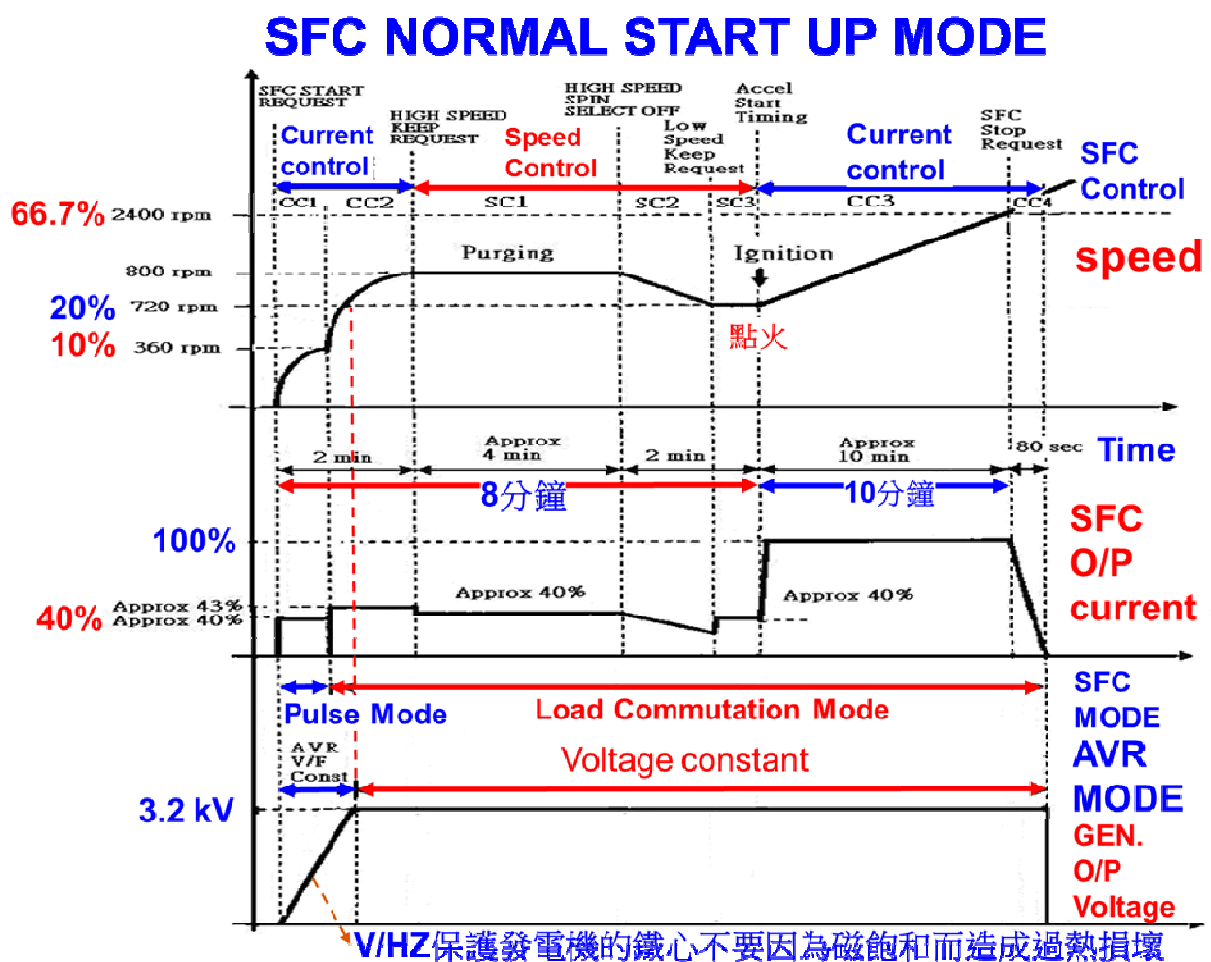


圖 3-4 大潭 Stage II 的起動流程

2. 南部和興達電廠氣渦輪機組起動流程(西門子公司 GT)

- (1) Turning Gear 驅動機組轉速在 0~144RPM，SFC 開始接手將轉速升到 210~360RPM，SFC 之逆變換器的工作模式，從脈衝波模式（Pulse Mode）之導通強制換相轉為負載換相模式（Load Commutated Mode）工作。
- (2) 當轉速升到 576RPM 時 GT 點火。
- (3) 機組轉速升到 720 RPM 時 GT 開始壓縮器清洗(Compressor Wash)。
- (4) 轉速到 1500RPM 時 SFC 與 GT 出力平衡。
- (5) 轉速達自持速度 2520RPM 時 SFC 停止運轉，氣鍋輪機調速器投入並開始對轉速進行調節，由 GT 熱燃氣之推力帶動發電機繼續升速，使機組平滑到達同步轉速 3600 RPM。

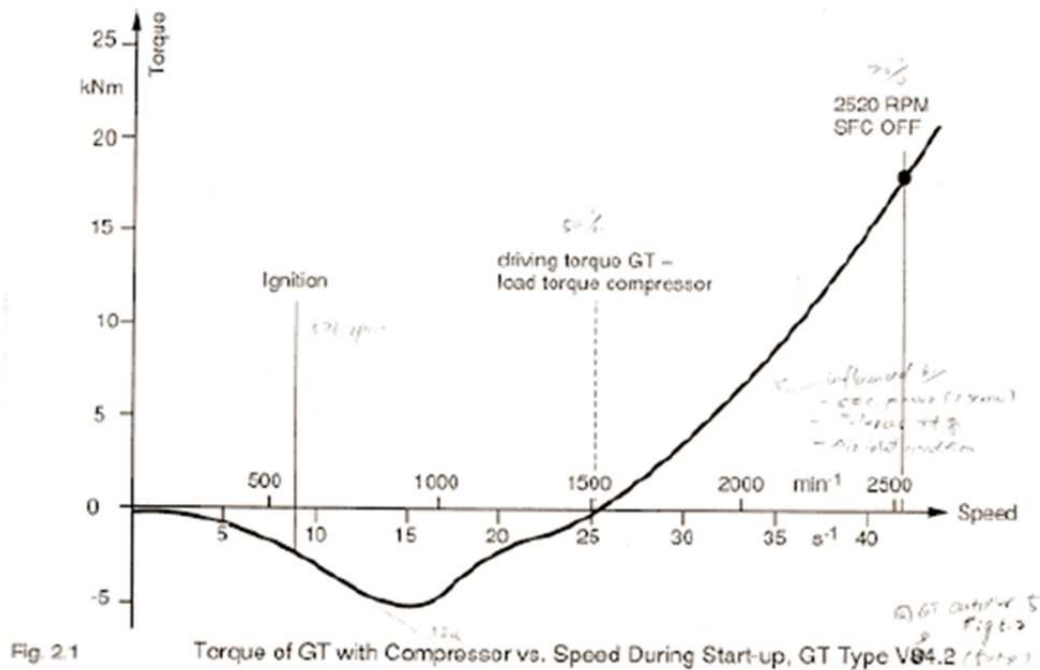


圖 3-5 南部和興達的起動流程

3. 氣渦輪機組起動時 SFC 控制模式

(1) 脈衝波模式(Pulse Mode)

當電機轉速在 0~10%額定轉速時，發電機出口端反電動勢較低，無法以電壓控制模式關閉閘流體進行換相，必須以磁通量控制模式，透過脈衝波方式控制來達成換相的目的。換相時，設定整流器運行于全逆變換狀態，截斷直流回路中的電流，進而使

逆變換器中導通的兩只閘流體關閉。一旦檢測到回路電流為零，即將脈衝波送到下一組欲觸發的閘流體，同時取消整流器的全逆變換以恢復回路電流，使新的一組閘流體導通，實現換相工作，此過程又稱為脈波模式運行階段，如圖 3.6 左所示。

(2)負載換向模式(Load Commutated Mode)

在發電機加速到轉速大於 10%額定轉速以上時，電子線圈繞組產生足夠的電壓才能使逆變換器進行換相，此時只需針對相對應的閘流體發送觸發脈波，SFC 即可依靠電機的端電壓進行換相，逆變換器控制在負載換相模式，其控制的模式如圖 3.6 右所示。

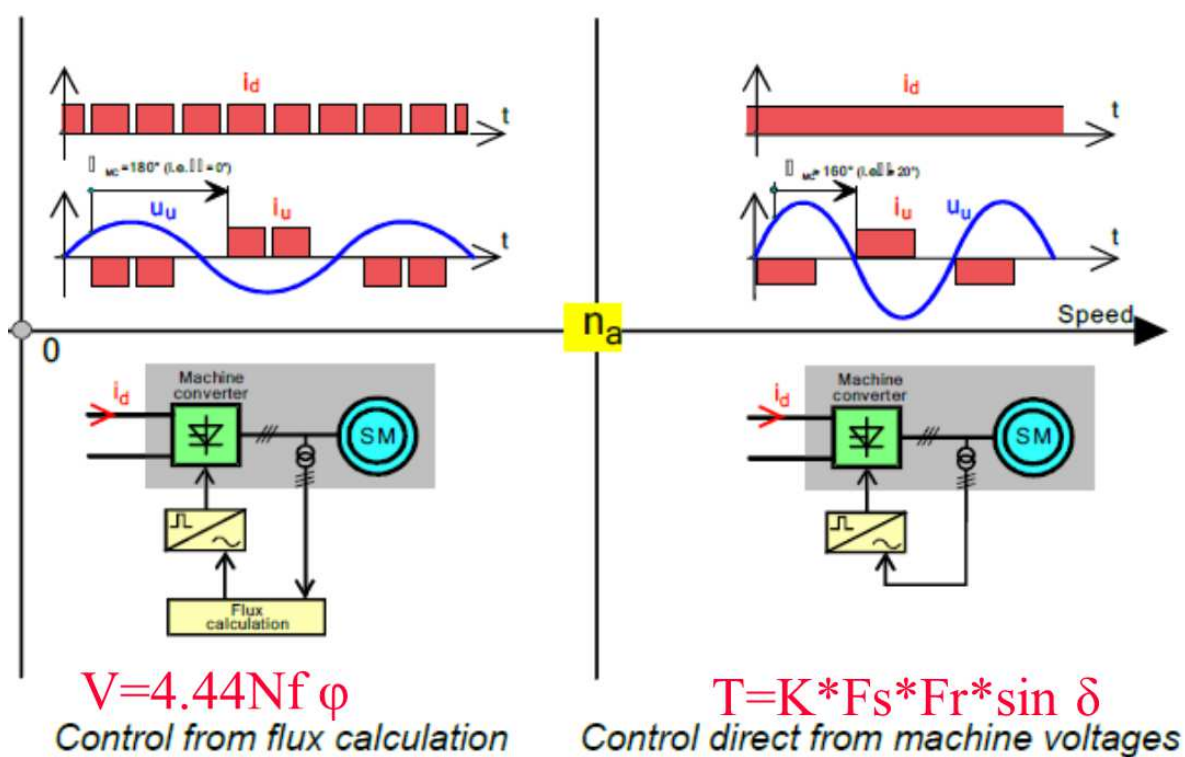
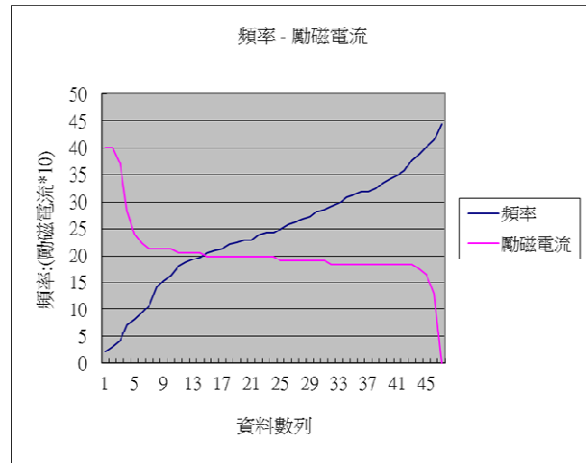
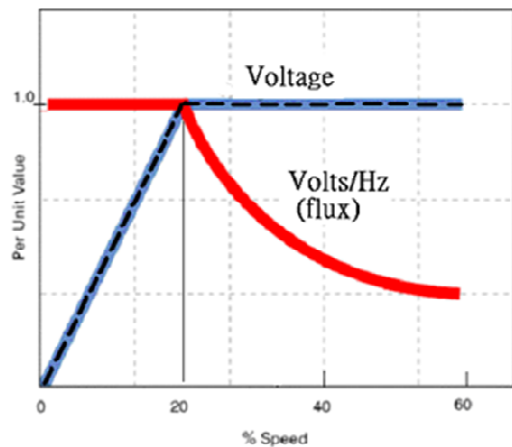


Figure 7-4 Commutation and Control Principle of Machine Converter

圖 3-6 SFC 控制模式

4. 氣渦輪機組起動時 SEE 的控制模式

同步電機轉矩的產生是由定子磁通與轉子的旋轉磁場之間相互作用而產生的，如果在低頻率時電壓維持一定，電磁回路的磁通量就會增大，定子鐵心的磁通量亦隨著增加，相對地容易造成磁飽和，嚴重時鐵心將過熱損壞。因此，在脈衝波模式控制階段，逆變換器輸出頻率與電壓要成比例地改變，即改變頻率的同時亦須控制逆變換器的輸出電壓，此時，轉子磁場激磁須採 V/F 控制，避免定子的磁通量過飽和，如圖 3-7 所示。



機組的端電壓及V/f（磁通）對轉速之關係曲線（防止鐵心因磁飽和而過熱）

圖 3-7 發電機的端電壓及 V/f（磁通）對轉速之關係曲線

四、靜態頻率控制器(起動裝置)的基礎架構

1. 靜態頻率控制器之設計架構

傳統的靜態頻率控制器組合，大都是由線路變壓器、線路轉換器（Line Converter）、同步電抗器(DC Reactor)、機組頻率轉換器(Machine Converter Units) 和控制單元(Control Device) 等主要元件組成。近年來則有複聯式靜態頻率控制器之設計，由上述之兩組元件組合而成，傳統頻率控制採六脈衝波電流控制法則，複聯式頻率控制設計可為十二脈衝波電流控制法則，除可提升機組起動的可靠度之外，還可減少對系統諧波之干擾。但複聯式頻率控制設計造價昂貴，又因機組啟動使用時間短，且有相互間之交叉起動支援，可告度已足夠，所以大部分還是採用傳統的機組架構，如圖 3-8 所示。

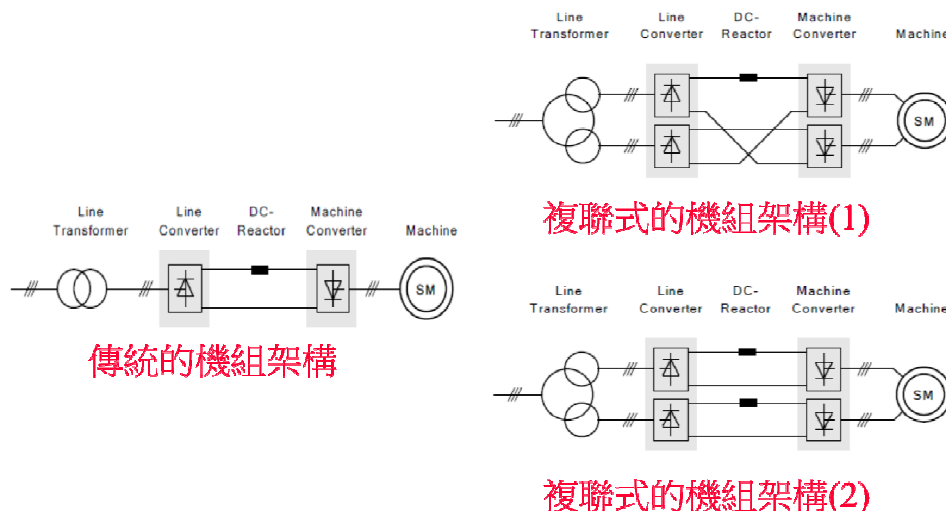


圖 3-8 靜態變頻器之設計架構

2. 靜態頻率控制器之控制系統設計

做為機組的起動裝置，靜態變頻器要能驅動氣渦輪機組，需有三個互相聯繫的控制系統組合，分別為線路電壓轉換控制(Line Voltage Control)、同步馬達頻率控制(Machine Converter Control)和靜態勵磁控制(Static Excitation Control System)等閉迴路控制系統，如圖 3-9 所示。線路電壓轉換控制主要是控制三相全波橋式矽控整流器的觸發延遲角，將三相交流電壓整流成可調變的直流電壓，當作頻率控制器的輸入直流電源，其直流電壓的控制是藉由轉速的迴授信號來調整。同步馬達頻率控制主要採用六脈波橋式矽控整流器，透過負載換向模式循序地控制逆變換器輸出，將直流電壓轉變成可調變頻率的六脈波三相交流電壓，加到發電機定子，藉由轉子速度迴授控制，使發電機可以加速到指定的轉速。同步馬達勵磁控制主要提供轉子磁場直流電力，在起動時藉由定子磁場與轉子磁場同步的原理，產生力矩帶動機組的轉子旋轉，勵磁控制同樣地藉由速度的迴授，在低速時採用 V/F 控制，轉速高時則採用定電壓控制。三個控制系統間通常有一個更上一層的控制器來協調和傳遞相互間的資訊，使靜態變頻器控制系統得以整合運作，在 ABB 稱為 MEGATROL，如圖 3-9 所示。

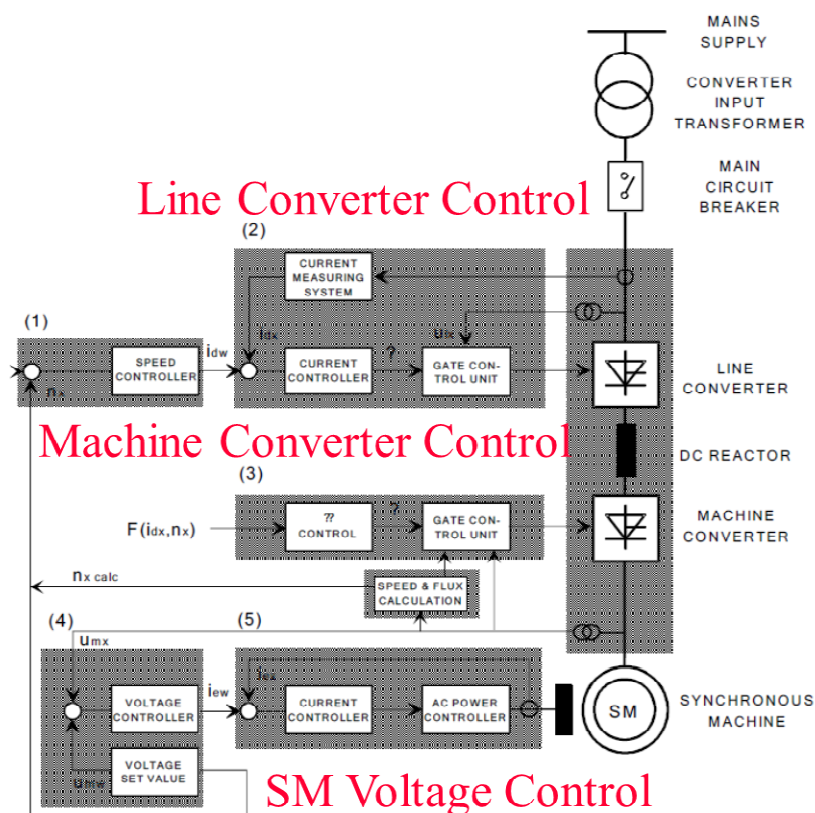


圖 3-9 靜態頻率器之控制系統(MEGATROL)

3. 靜態頻率控制器之控制介面(電子電路)設計

控制器的核心是一個完整的微處理機系統，主要由 DSP 數位處理器、記憶體單元、I/O 介面和感測器等硬體組成，也有以可程式控制器作為靜態頻率控制器，這些硬體的動作必須依賴軟體的控制演算指令，將理論基礎實現為實際的命令，傳達到脈衝波產生器和脈波放大器，才可在適當的時序觸發和關閉閘流體，產生所需的可控頻率脈衝波，達到啟動機組的目的，上述的功能就是須由硬體、軟體和電子電路的設計來達成，如圖 3-10 靜態頻率器控制介面所示。

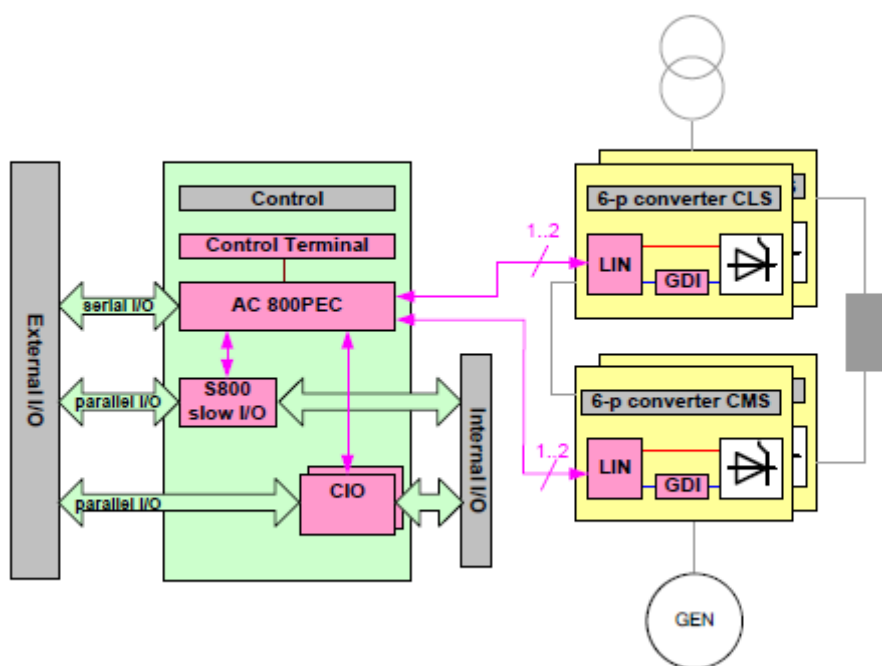


圖 3-10 靜態頻率器控制介面

五、靜態頻率控制器(起動裝置)的關鍵組件

SFC 系統的關鍵組件主要的組成有控制和保護單元 (SFC Controller)、整流器 (Line Converter)、直流電抗器 (DC Reactor)、逆變換器 (Machine Converter, Inverter) 和諧波濾波器 (Harmonic Filter) 等組成，另需輸入電源變壓器 (SFC & SEE Transformer)、中壓斷路器開關設備 (Media Voltage(4.16kV) Switch Gear) 等輔助設備組成，缺一不可。每個設備的功能簡述如下：

1. 控制和保護單元 (SFC Controller)

控制和保護單元主要由可程式控制器、DSP 數位處理器、脈波產生器、脈波放大器、感測器、I/O 介面與保護單元組成。

2.整流器（Line Converter）

採用三相全波橋式矽控整流器之設計架構，將三相交流電壓變成可調變的直流電壓，透過調整觸發延遲角，使整流器之輸出直流電壓為一個可調變的電壓值。

3.直流電抗器（DC Reactor）

直流電抗器其作用是限制直流回路的電流上升率，對直流電流進行波形之整形處理，同時也有利於減小逆變換器產生的諧波。

4.逆變換器（Machine Converter, Inverter）

亦是採用三相六脈波橋式矽控整流器之設計架構，將整流器輸出的直流電壓轉變成可調變頻率的三相交流電壓，這個可調變的交流電源其頻率與發電機的轉速一致，使發電機可以平順地加速到指定的轉速。採用六脈波的理由是設計較為廉價，其缺點是易產生諧波污染電源，但因機組啟動時間只有數分鐘，諧波量尚在可接受範圍。

5.諧波濾波器（Harmonic Filter）

SFC 裝置運行時，在從電力系統吸收基波的電流，同時也會對電力系統造成諧波干擾。由 SFC 產生的諧波電流將在電動機電壓側和輸入電壓側產生電壓諧波，從而影響廠內用電和其他系統用電設備的正常運行。

6.輸入變壓器（SFC&SEE Transformer）

輸入變壓器可為乾或油式，除供電力系統電壓轉換為整流器可承受的電壓，並可隔斷閘流體直流通路，所以有隔離的作用。一旦出現整流器的橋臂短路時，它的漏電抗也有限制短路電流的作用，故可保護輸入變壓器下游之整流器及逆變換器設備。

7.中壓斷路器開關設備(Media Voltage (4.16kV) Switch Gear)

開關與匯流排連結，提供機組間的交叉起動選擇，一次只能起動一機組，且多次起動需有時間間隔。

8.靜態勵磁設備(SEE)

提供機組同步馬達和發電機運轉時之轉子磁場激磁，可調整其功率因數。

六、靜態頻率控制器(起動裝置)的基本原理

1.整流器(Line Converter)

線路電壓轉換控制(Line Voltage Control)採用三相六脈波(Six pulse)橋式整流器，圖

5-1 為三相六脈波橋式整流器的全波控制，6 個 SCR 分別由 6 個觸發迴路控制，R+、S+、T+等 3 個 SCR 陰極相接稱為正匯流線；由 R-、S-、T-等 3 個陽極相接稱為負匯流線。此種交換器是將 ac 側功率轉移至 dc 側，亦可從主動負載移走 dc 側功率回到 ac 側。電流是單方向流動，但 dc 電壓卻是雙極性，為雙象限交換器。(A)若負載為電感性時，當觸發信號送至閘流體 R+與 S-使之導通，Vrs 正半波電壓由 R 電源線經 SCR 的 R+、負載、SCR 的 S-至 S 線，由於負載為電感性，Vrs 負半波時，因楞次定律的關係，R+電流仍導通；待 S+觸發時，Vst 正半波電壓由 S 電源線經 SCR 的 S-至正匯流線，同時將 SCR 的 R+遮斷不導通，電流經負載，SCR 的 T-至 T 電源線，同理 6 個 SCR 各導通 120°的載動電流。ac 漣波成份的頻率是 6f，f 為電源頻率，如忽略閘流體和二極體壓降，其輸出電壓為

$$V = 1.35 \times E \times \cos \alpha \quad \alpha \text{ 為延遲相角 } 0^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$$

輸出波形如圖 5-1(d)，當延遲角小於 90°時，輸出電壓為正電壓，電流由正匯流線至負匯流線；若延遲角大於 90°時，輸出電壓為負電壓，電流由正匯流線至負匯流線，亦即其將電感性負載之能量回送至電源。如延遲角為 90°時，輸出電壓為零。(B)若負載為電阻性，當觸發信號送至閘流體 R+與 S-使之導通，Vrs 正半波電壓由 R 電源線經 SCR 的 R+、負載、SCR 的 S-至 S 電源線；當電壓降低，使低於 SCR 的保持電流而自動遮斷不導通。同理，6 個 SCR 各自導通至逆向電壓而遮斷不導通。如忽略閘流體和二極體壓降，輸出電壓則為

$$V = 1.35 \times E \times \cos \alpha$$

$$\alpha \text{ 為延遲相角 } 0^\circ < \alpha < 60^\circ$$

$$V = 1.35 \times E \times [1 + \cos(\alpha + 60^\circ)]$$

$$\alpha \text{ 為延遲相角 } 60^\circ < \alpha < 150^\circ$$

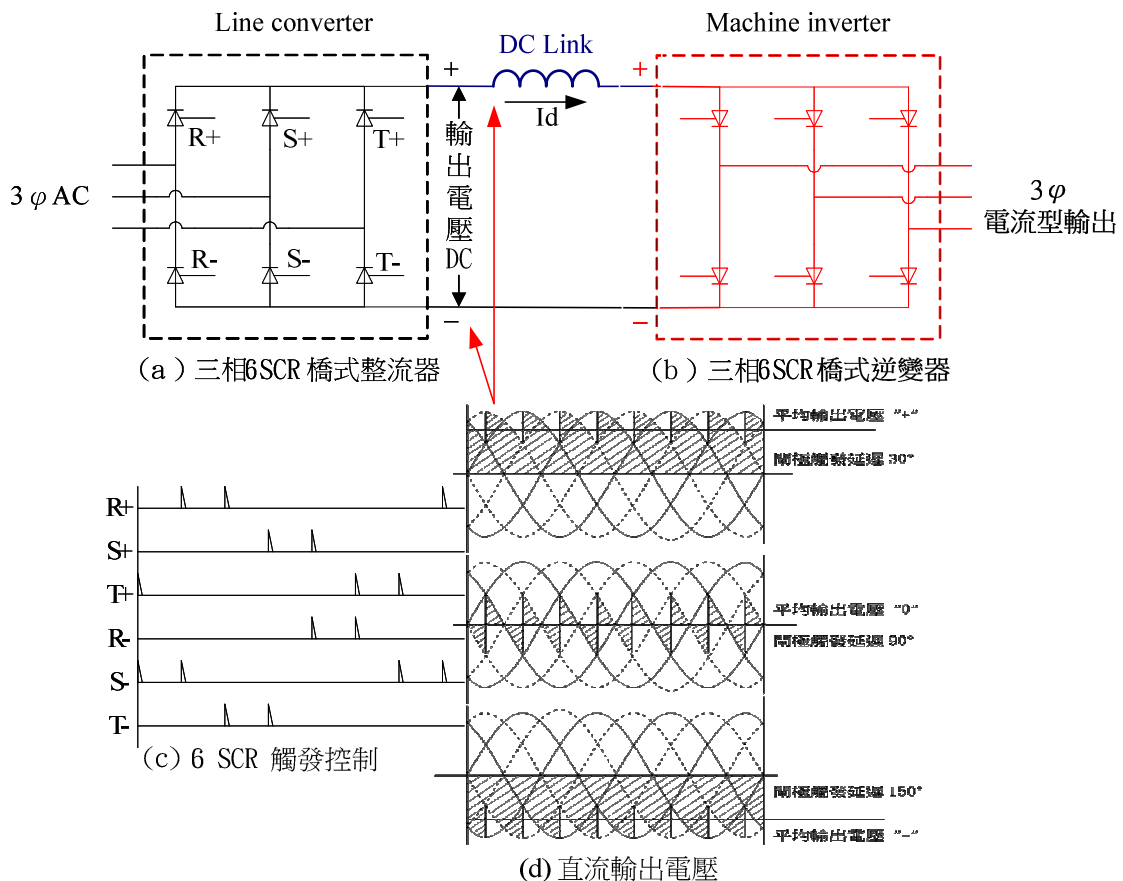


圖 5-1 線路電壓轉換控制

2. 逆變換器(馬達頻率轉換器(Machine Converter))

逆變換器以三相橋式閘流體為控制架構，將直流電壓轉變為可調變頻率的三相交流電源，通常分類為電壓源型和電流源型的逆變換器，GT 機組使用的 SFC 大多為電流源型的逆變換器，主要為設計簡單且價廉。。

(1) 電壓源型的逆變換器 Voltage Source Inverter(VSI)

電壓源型的逆變換器採用三相橋式閘流體的控制器架構，閘流體的設計分為：a 閘流體元件串聯二電位直接高壓逆變換器；b 採用 IGCT 或 HV-IGBT 的三電位逆變換器；c 採用 LV-IGBT 的單元串聯多電位逆變換器。逆變換器將直流電壓調變成可變頻率的近似正弦交流電壓波形，故稱電壓源型逆變換器，如圖 5-2 所示。這個可調變的正弦交流電源其頻率電動機的轉速一致，在調變的過程中產生較少的諧波，使電動機可以更平順地加速到預設的轉速，但相較於電流源型逆變換器，其設計製作費用較高。

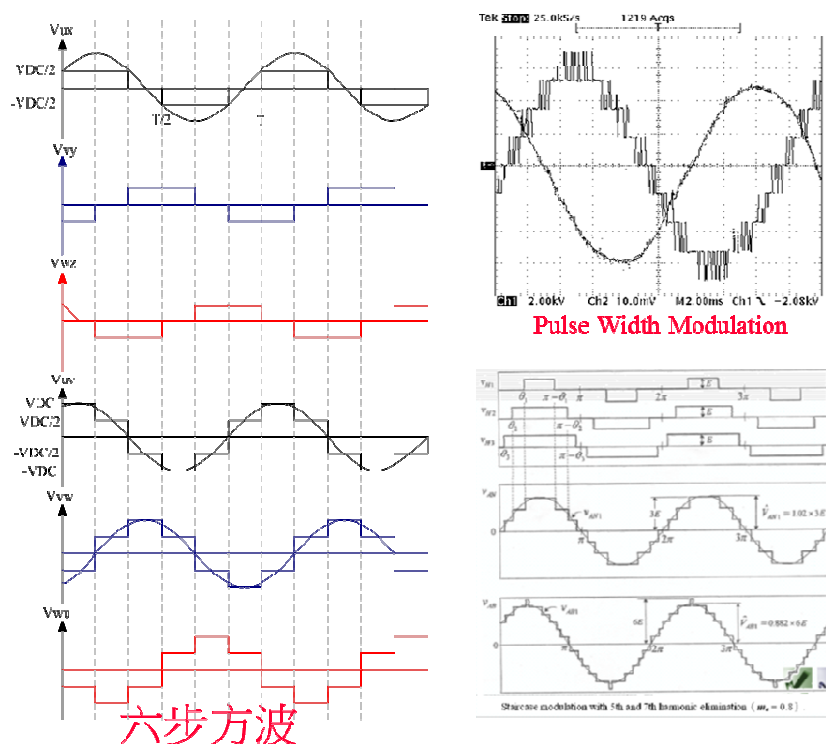


圖 5-2 電壓源型逆變換器的控制波形

(2) 電流源型的逆變換器 Current Source Inverter(CSI)

電流源型的逆變換器採用三相橋式閘流體的控制器架構，閘流體的設計分為：a 負載換相式逆變換器（LCI, 元件 SCR）；b 採用自關斷器件（GTO 或 SGCT）的逆

變換器。前者逆變換器將直流電壓調變成可變頻率的六次脈衝波，後者則將直流電壓調變成可變頻率的正弦波脈波寬度調變 (SPWM)，負載電流近似正弦交流電流波形，故稱電流源型逆變換器，如圖 5-3 所示。

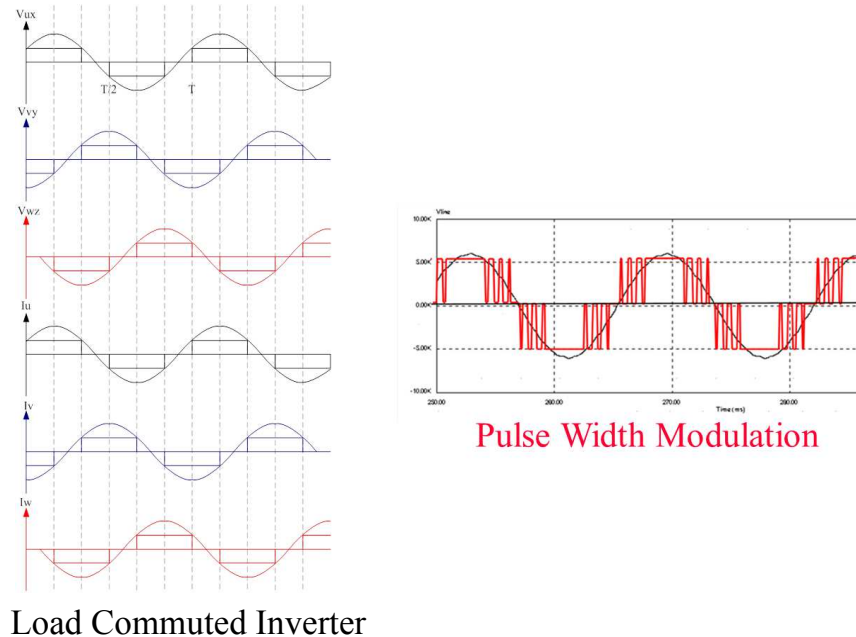


圖 5-3 電流源型逆變換器的控制波形

(3) 負載換向逆變換器 Load Commutated Inverter(LCI)

SFC 在低轉速時利用 Pulse Mode 運轉，當轉速加速到大於 10% 額定轉速以上時，同步機定子線圈產生足夠的電壓已能讓逆變換器進行換相，此時只需針對相應的 SCR 送出觸發脈波，SCR 即可依靠同步機的端電壓進行換相，逆變換器在負載換相模式時，觸發控制的原理如圖 5-4 和 5-5 所示。SFC 需要有順序的驅動 SCR，才能產生旋轉的力矩。舉例來說，LCC 橋式整流器排列為 SCR 1~6，MCC 橋式逆變換器排列為 SCR a~f，轉子磁場為 ΦF ，假設有一觸發脈衝波信號送出至 SCR 1,6 和 SCR a,f，過程中路徑將由 U 經 SCR 1→reactor→SCR a→U1→V1→SCR f→SCR 6 到達 V，產生一磁場稱為 $\Phi 1$ ， ΦF 和 $\Phi 1$ 間之夾角為 δ ，即旋轉力矩 $M1 = \Phi F * \Phi 1 * \sin \delta$ ，以此類推可得 $\Phi 1 \sim \Phi 6$ 和 $M1 \sim M6$ 之旋轉力矩。換向的作用乃 SCR a 因 SCR c 的導通而承受 U1 和 V1 相的感應反向電壓，在圖 5-4 的 U1、V1 相換相電路中，可見在兩個導通的 SCR a、SCR c 和 U1、V2 相繞組之間出現一短路電流，方向為 U1 相繞組→SCR a→SCR c→V1 相繞組，當短路電流與原通過 SCR a 的負載電流相等時，負載電流全部轉移到 SCR c，SCR a 關斷完成換相動作，以此類推可得一完整三相六脈波控制，圖 5-5 右所

示。

為了保證足夠的反向電壓和足夠反向電壓持續時間達到閉鎖能力，逆變換器的逆變角 γ 設置為 γ_0 ， γ_0 之數值隨著轉速而變動，在轉速低於10%的額定轉速時脈衝波模式運行階段 $\gamma = 0^\circ$ ，轉速漸高 γ_0 之數值隨著轉速作線性變化。在整個起動過程期間，同步機轉子上都施加有勵磁電流，轉子在空間旋轉，就會在定子繞組中感應反電動勢，逆變換器根據感測器的電壓信號依次實現換相。

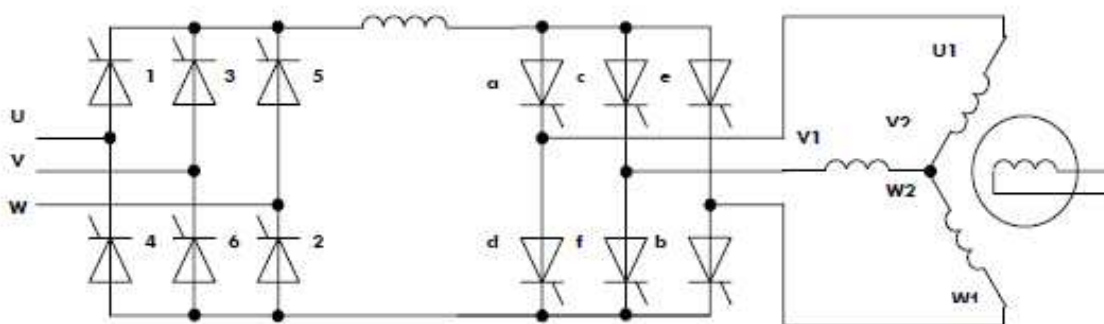


圖 5-4 整流器和逆變換器之控制排列

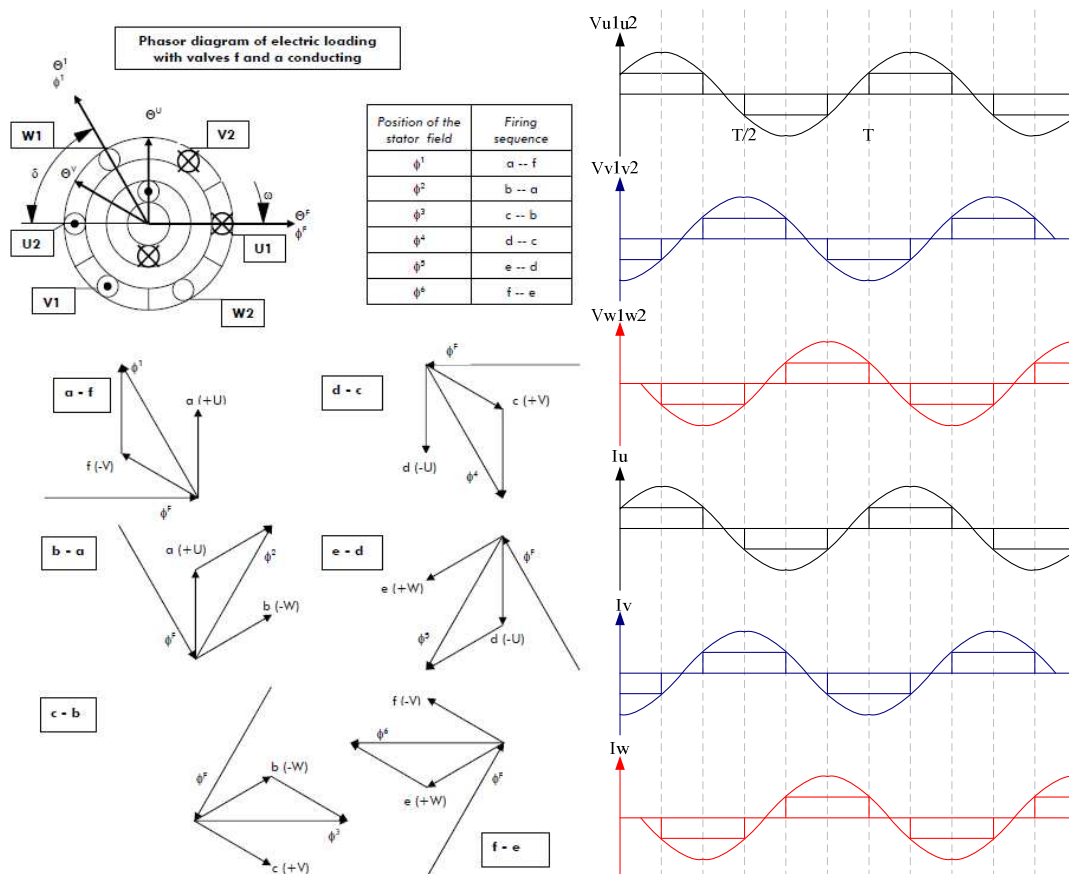


圖 5-5 負載換向逆變換器控制波形

(4) 電流源型逆變換器之正弦波脈波寬度調變(SPWM)

逆變換器控制信號的調變採用單極式正弦波脈波寬度調變(SPWM)控制技術，如圖 5-6(a)(b)(c)所示，控制信號為三組平衡之正弦參考信號，其振幅相同，相位差 120 度，與三角波作比較。以二個波形相交點，決定功率元件(IGBT module)切換狀態。當正弦波大於三角波，則該相上臂之開關導通，下臂開關截止，反之則該相下臂之開關導通，上臂開關截止。輸出電壓的大小和頻率由正弦波決定，開關的切換頻率由三角波控制。

另外，須加入導通延遲時間，防止同相上下臂開關同時導通，造成短路。導通延遲時間的取捨會影響低次諧波振幅的大小，為了使總諧波失真減少，縮短導通延遲時間為其必要，但導通延遲時間若太短會造成同臂功率元件在切換瞬間有短路現象。然而決定導通延遲時間，可由數位信號處理器軟體設定之。

綜合 2、3 所述，正弦波脈波寬度調變方式如圖 5-6(d)，在此定義振幅調變比

(Amplitude modulation ratio) m_a ，定義為：

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (5-1)$$

其中

$V_{control}$ ：控制信號之峰值

V_{tri} ：三角載波之峰值

而頻率調變比(Frequency modulation ratio) m_f ，定義為

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (5-2)$$

其中

f_s ：三角載波之頻率，稱為載波頻率

f_1 ：控制信號之頻率，稱為調變頻率

假設控制信號為

$$v_{control} = V_{control} \sin \omega t \quad (5-3)$$

換流器之單臂輸出電壓為

$$v_{UN} = m_a \frac{v_{dc}}{2} \sin \omega t + \text{Bessel functional harmonic} \quad (5-4)$$

當載波頻率夠高時，(5-4)中之貝索(Bessel)函數諧波項經過濾波器後，可忽略不計，三相換流器之各臂輸出電壓大小相同，相位各差 120 度，因此輸出相電壓峰值 V_{UN} 為

$$V_{UN} = m_a \frac{v_{dc}}{2} \quad (5-5)$$

而輸出線電壓之基本波均方根值為 $V_{L-L(rms)}$ 為

$$V_{L-L(rms)} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{UN} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a v_{dc} \cong 0.612 m_a v_{dc} \quad m_a \leq 1$$

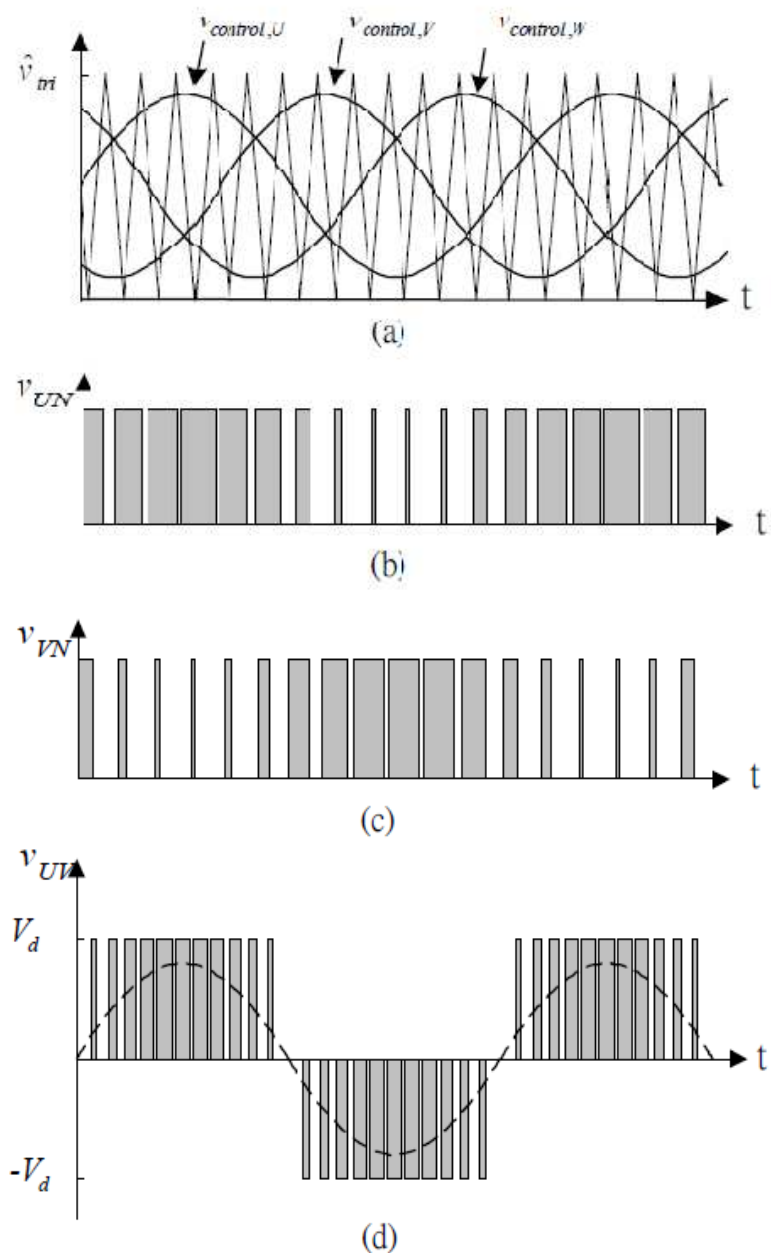


圖 5-6 正弦波脈波寬度調變(a)正弦參考信號及三角波(b)U 相對中性點 N 電壓
(c)V 相對中性點 N 電壓(d)UV 相之線電壓及基本波分量。

3.同步馬達和發電機之激磁控制(Excitation Control System)

同步馬達和發電機的磁場繞線組是由一直流產生裝置系統供給電力，此系統稱為激磁系統；其基本功能為：(1)供給發電機旋轉磁場之直流電力。(2)控制發電機的輸出電壓，功率因數及電力系統之無效電力。(3)對發電機及系統提供選擇性之保護和補償，以預防和指示發電機不正常之運轉。圖 5-7 表示一個自動控制系統之基本元件，以此為基準而設計於一般的激磁控制系統。

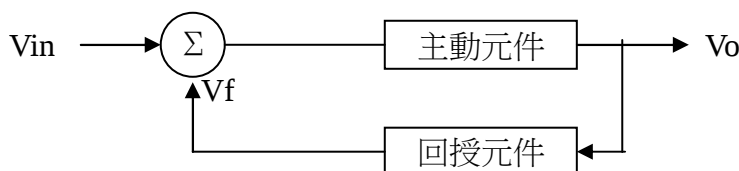


圖 5-7 自動回授控制系統之基本元件

圖 5-8 為一般基本激磁控制系統，其含有勵磁機(Exciter)、自動電壓調整器 (Automatic Voltage Regulator)、手動控制(Manual)和同步發電機，前參者稱為激磁系統，激磁系統和發電機合稱激磁控制系統。

手動控制是控制勵磁機輸出端電壓或電流，一般稱為手動電壓調整器，主要使勵磁機輸出至發電機磁場線圈的端電壓和電流維持定值；若要維持發電機端電壓需由工作人員手動操作此調整器，調整勵磁機輸出電壓。自動電壓調整器是控制發電機輸出電壓使端電壓維持穩定，當發電機端電壓有變化時，此調整器檢出誤差電壓，自行調整勵磁機輸出電壓來使發電機端電壓維持穩定。

靜態激磁系統設備，包含自動電壓調整器電源輸入、磁場開關器、順序控制器、警報器和一些限制器及保護器。激磁電源經激磁變壓器降壓至矽控整流器(SCR)，輸出至發電機磁場，電壓調整器、順序控制器和警報器皆採用於控制器內，限制器保護器為可選擇，有最小激磁限制器、最大激磁限制器、電壓/ 頻率限制器、最小激磁保護器、最大激磁保護器、電壓/ 頻率保護器，如圖 5-8 所示。

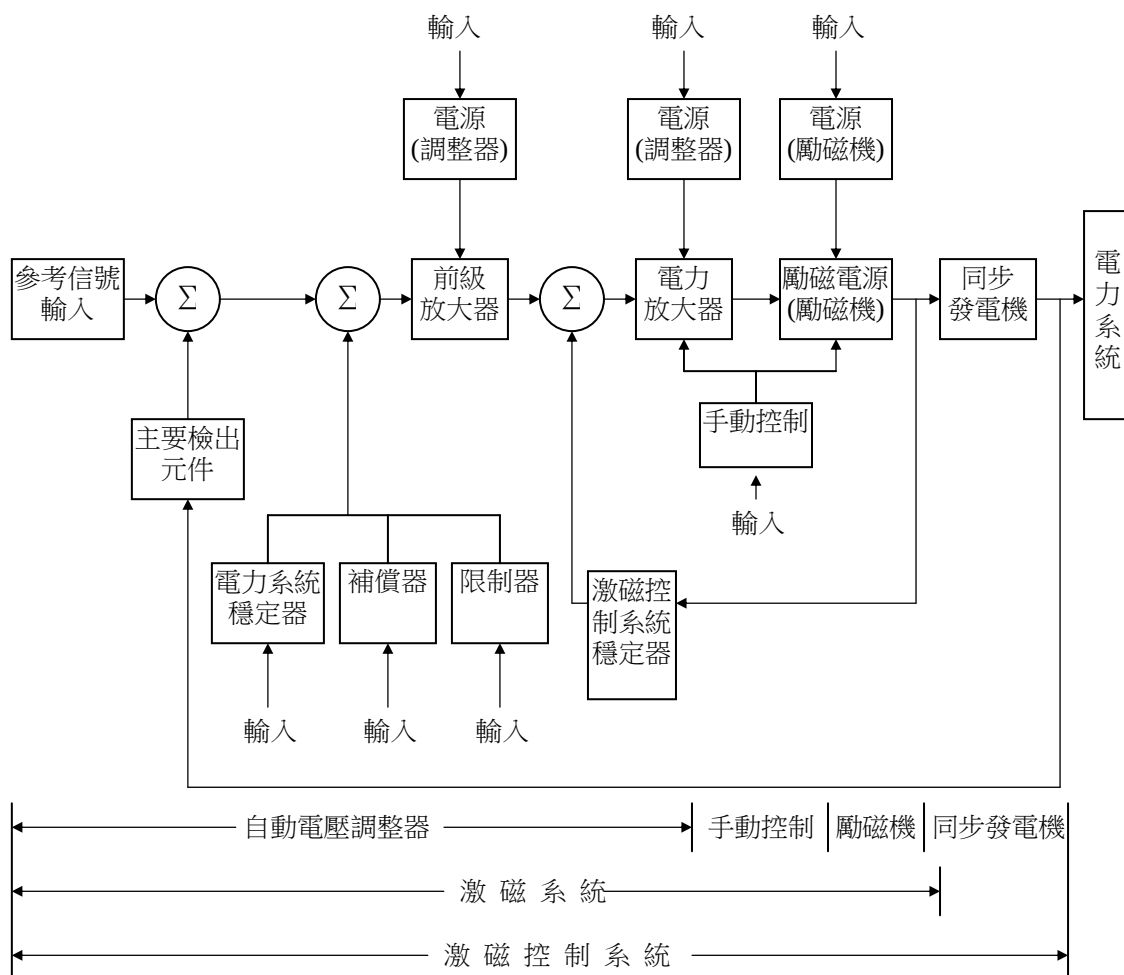


圖 5-8 一般基本激磁控制系統

肆、出國心得與建議

一、出國心得

1. 靜態頻率控制器維護之可行性

(1) Media Voltage SWGR 檢測

BUS 絕緣、阻抗量測、斷路器大修檢測和功能測試。(電力修護處有能力執行)

(2) LCC 和 SEE 變壓器檢測

變壓器絕緣測試(DAR ; PI)。(電力修護處有能力執行)

(3) 電力線路對地絕緣測試

斷路器至 SFC、SEE 變壓器之間電纜絕緣測試，SFC、SEE 變壓器至 SFC、SEE 開關箱之間電纜絕緣測試。(電力修護處有能力執行)

(4) S F C 檢測

工作電源檢查、LCC 控制模組角度控制檢測校調、LCC 觸發脈波迴路檢查、LCC 觸發脈波核對、LCC 觸發脈波監視、DC Link 電流量測校調、起動過電壓量測檢查、電壓偵測檢查、MCC 控制模組角度控制檢測校調、MCC 觸發脈波迴路檢查、MCC 觸發脈波監視、MCC 觸發脈波核對、SFC 起動流程檢測和交叉起動測試等。。(可參考原廠測試程序書執行)

LCC 和 MCC 檢測

SCR 觸發導通角度核對與教調，每相間相差 120°，如範例圖 6-1 所示。(電力修護處有能力執行)

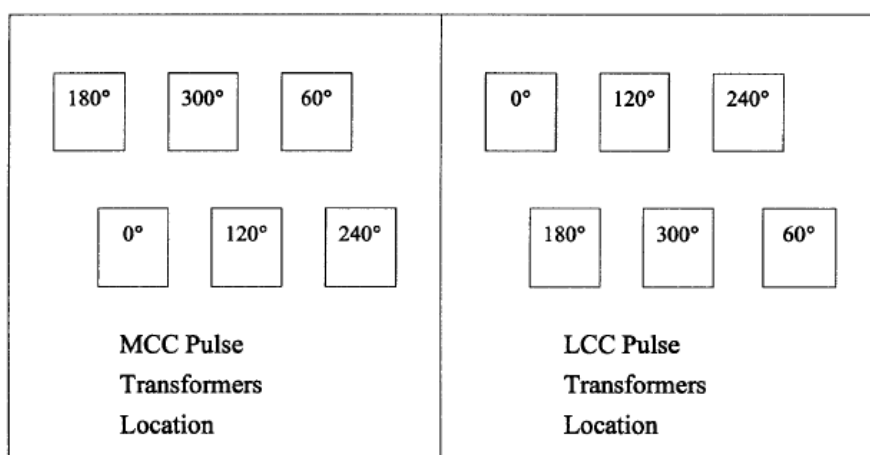


圖 6-1 LCC 和 MCC 之 SCR 觸發導通角度排列

(5) S E E (靜態+動態)檢測

靜態檢測：工作電源檢測、SCR 觸發導通角度排列核對、電壓電流感測器校調、介面輸入/輸出點檢查、磁場斷路器檢測和電阻性負載測試。

動態檢測：發電機模式手動電壓調整器電壓啟動測試、自動電壓調整器電壓啟動測試、手動電壓調整器電壓暫態測試、自動電壓調整器電壓暫態測試、過/欠激限制測試、V/Hz 限制測試、升載測試和電力系統穩定器(PSS)測試。(電力修護處有能力執行)

2.靜態頻率控制器研究發展之可行性

- (1) 同步馬達的控制複雜，尚無經驗，須投入相當的資源，建議可先從大修維護測試開始入門。
- (2) 感應馬達的控制相對單純，轉子無需激磁，且應用範圍廣如 480V 和 4.16kV 的馬達控制，可作為研發的起步，待技術成熟時再與同步馬達控制整合。
- (3) 變頻控制如能廣泛應用於電廠的馬達速度控制，將可達到節能效果，範例如圖 6-2 所示。

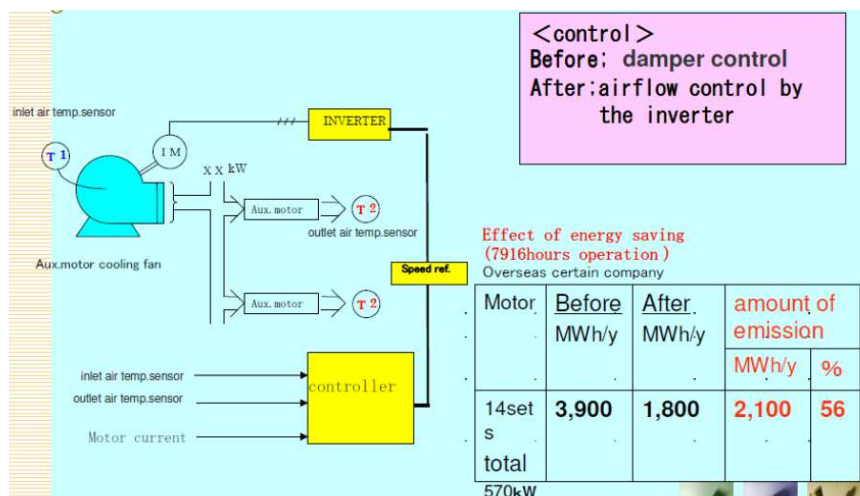


圖 6-2 變頻控制節能效益

二、出國建議

1. 台電公司將於 105 年成立事業部，核心技術如 S F C、S E E 等應成立專家小組，集中大修維護保養，藉以培養專業工程師，減少對原廠的仰賴。
2. 電廠內有很多高、低壓馬達設備，若改善為變頻控制，可以達到節能效果。因此，靜態變頻設備是值得研發的題材，可藉由綜研所或學術界的共同合作開發，縮短研發時程和降低設備改善成本。

伍、參考文獻

- [一] ABB MEGATROL Functional Description, Document No. 3BHS248183 E10, 2013年02月。
- [二] ABB, UNITROL 6800 & 6080 Excitation Systems。
- [三] ABB Group MEGATROL, 2014 年 11 月 18 日。
- [四] Siemens, Description of Static Frequency Converter, SFC, 2008。
- [五] 大潭發電廠 劉德順 徐三和, 靜態變頻器在氣渦輪機啟動中之應用, 96 年 8 月 31 日。
- [六] 電力修護處, 靜態勵磁控制系統說明書, 102 年。