

出國報告（出國類別：實習）

赴美國參加美國奇異公司
電力系統工程班

服務機關：台電系統規劃處

姓名職稱：黃子成 電機工程監

派赴國家：美國

出國期間：94年9月6日~95年4月16日

報告日期：95年6月13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：赴美國參加奇異公司電力系統工程班

頁數 62 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/2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

黃子成/台灣電力公司/系統規劃處/電機工程監/2366-6902

出國類別：1 考察2 進修3 研究 4 實習5 其他

出國期間：94年9月6日~95年4月16日 出國地區：美國

報告日期：95年6月13日

分類號/目

關鍵詞：電力系統工程班(PSEC)、電力產生(GENERATION)、運轉(OPERATION)、控制(CONTROL)、穩定度(STABILITY)、公用事業經濟(Utility Economics)

內容摘要：(二百至三百字)

美國奇異公司電力系統工程班係著重於下列技術之研習：(一)輸電分析與規劃技術研討、(二)先進電力系統課題研討、(三)系統運轉策略與規劃、(四)工業及配電系統應用課題研討。肇因於發輸變電工程因遭抗爭無法如期加入系統，如何強化既有電力系統以滿足自然成長之負載需求，並因應電業自由化及公司民營化造成電力系統規劃、設計、運轉之策略將有重大轉變。

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

目 錄

頁次

第一章 行程紀要及出國目的	1
一、 出國緣由與目的.....	1
二、 出返國行程.....	1
三、 心得與建議.....	2
第二章 電力系統元件特性	8
一、 電力系統簡介.....	8
二、 發電機容量曲線特性.....	9
三、 輸電線路特性.....	10
四、 負載特性.....	10
第三章 彈性交流輸電技術	12
一、 定義.....	12
二、 彈性交流輸電系統基本原理簡介.....	13
三、 強化電力潮流控制器之簡介.....	18
四、 結論.....	21
第四章 熱交換系統簡介	29
一、 熱力學基本原理.....	29
二、 汽輪機.....	30
三、 氣渦輪機.....	33

四、 複循環系統.....	36
五、 汽電共生.....	37
第五章 系統運轉控制.....	42
一、 目的.....	42
二、 負載和轉速控制調速特性.....	43
三、 自動發電控制.....	47
四、 火力機組經濟調度.....	52
五、 最佳化電力潮流.....	53
第六章 電力公用事業工程經濟.....	57
一、 概論.....	57
二、 財務數學工具.....	57
三、 折舊和資本回收.....	59
四、 多重交替方案之比較.....	61

表目錄

頁次

表 1-1：PSEC 課程內容綱要表	4
--------------------------	---

圖目錄

	頁次
圖 1-1：全期受訓學員年齡分佈圖.....	3
圖 1-2：課程分配比率.....	5
圖 1-3：J-Power 公司提供長期出國受訓員工生活補給品	6
圖 2-1：發電機容量曲線特性.....	9
圖 3-1：雙機系統.....	23
圖 3-2：併聯無效電力設備控制電壓.....	24
圖 3-3：串聯電容器補償.....	24
圖 3-4：移相器補償.....	25
圖 3-5：以等面積法則分析暫態穩定度.....	26
圖 3-6：強化電力潮流控制器(UPFC)架構.....	27
圖 3-7：UPFC 基本控制功能	27
圖 3-8：UPFC 模型說明	28
圖 4-1：汽輪機之蒸汽和電力循環.....	31
圖 4-2：汽輪機之蘭金循環(Rankin cycle).....	32
圖 4-3：氣渦輪機循環.....	34
圖 4- 4：勃朗登循環(Brayton Cycle).....	34
圖 4-5：複循環系統.....	36
圖 4-6：頂端循環(Topping Cycle).....	37
圖 4-7：底部循環(Bottoming Cycle).....	37
圖 4-8：汽輪機之組態圖.....	40
圖 4-9：氣渦輪機之組態圖.....	41
圖 5-1：電力系統控制概要圖.....	42
圖 5-2：發電機慣量效應.....	43

圖 5-3：負載之頻率響應圖.....	44
圖 5-4：負慣量和負載合成阻尼效應圖.....	45
圖 5-5：恒速調速機之頻率與有效功特性.....	46
圖 5-6：下垂式調速機之特性曲線.....	46
圖 5-7：自動發電控制迴路.....	48
圖 5-8：兩個互聯控制區域圖.....	50
圖 6-1：會計觀點之資本回收.....	60
圖 6-2：工程經濟之資本回收.....	61

第一章 行程紀要及出國目的

一、出國緣由與目的

由於臺灣本島地理特性及負載分佈情況，本公司部份輸變電網路因而密集，肇使電力系統故障電流較大，導致本公司輸電系統規劃工作難度更高、更複雜。由於本公司輸變電網路運轉條件已臨極限，規劃者應吸取國外專家之電網規劃策略及採納新輸電技術俾利克服困境。

肇因於發輸變電工程因遭抗爭無法如期加入系統，如何強化既有電力系統以滿足自然成長之負載需求，並因應電業自由化及公司民營化造成電力系統規劃、設計、運轉之策略將有重大轉變。

赴美國參加奇異公司電力系統工程班(Power Systems Engineering Course ,PSEC)，接受奇異公司專家們指導，並與其他國家受訓學員交流。此訓練課程除可提供本處派訓人員建構更完善之電力系統理論及實務經驗外，訓練期間亦可與國外各知名電力公司派訓人員交流規劃理念，俾強化既有規劃能力及技術，吸取國外之經驗及技術。

二、出返國行程

(一) 去程：

94/9/6 台北 TAIPEI(18:20) → 紐華克 NEWARK(23:10)

94/9/7 紐華克 NEWARK (08:55) → 奧爾巴尼 ALBANY(10:00) → 斯堪

那特提 SCHENECTADY

(二) 訓練課程期間：

94/9/8 ~ 95/4/13 參加美國奇異公司電力系統工程班

(三) 返程：

95/4/14 斯堪那特提 SCHENECTADY → 奧爾巴尼 ALBANY(17:05) → 紐華克 NEWARK (18:10)

95/4/15 紐華克 NEWARK (00:30) → 95/4/16 台北 TAIPEI (07:40)

三、心得與建議

(一) 心得

1. 本次 PSEC 課程，全期受訓學員共 12 員，其中有 8 位日本人及 3 位韓國人參加。另其他選擇性參加各短期課程學員共約 22 人。就全期受訓學員年齡分佈而言(詳圖 1-1)，職屬資深人員。其原因除本公司員工平均年齡較高外，每年國外訓練之預算及員額的限制亦肇致本人無法及早獲得本課程訓練之機會。
2. 公司最珍貴之資產是員工，員工需藉助不斷訓練和工作實務經驗累積方可提昇自我及公司整體營運績效。要達到此目標，適宜的培訓及員工之工作輪調是最有效的方法之一。目前本公司之組織係以“股”為基本單位畫分工作，在落實輪調制度之前，應須達到每股有兩員以上之人員配置，俾使工作技術得以傳承。

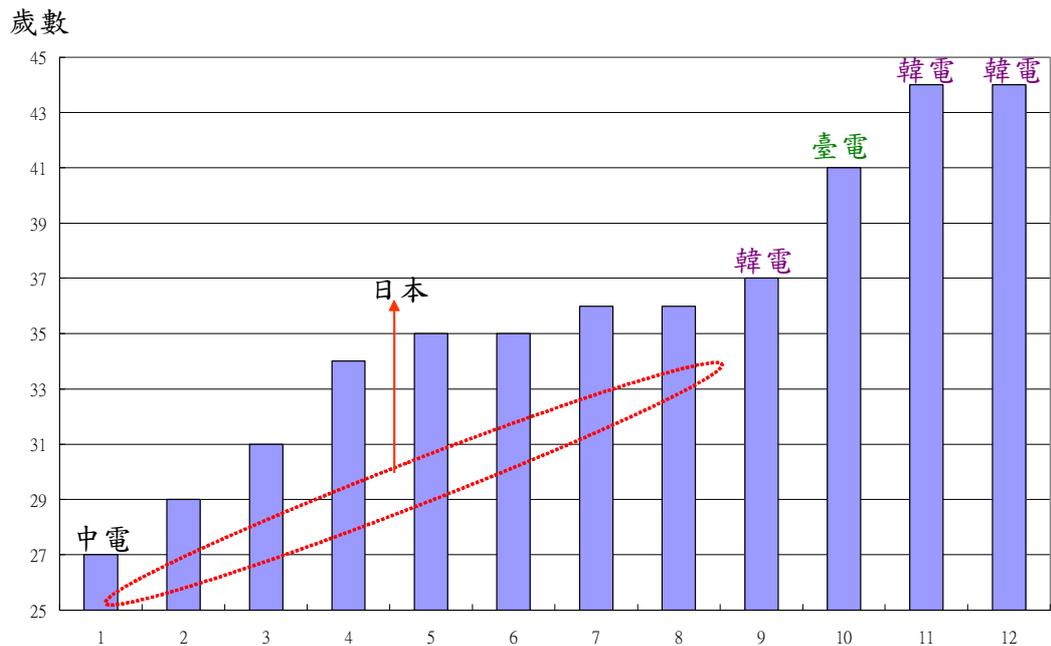


圖 1-1：全期受訓學員年齡分佈圖

3. 近來，公司單位正副主管之間已有跨處間調動，至於基層及中階員工則尚僅於單位內部間輪調。職深感基層員工倘若能跨處間輪調，接觸其他相關工作性質或甚至完全不同領域的工作，將有助於熟悉整體電力系統之業務。例如，規劃人員若能具備調度運轉或供電維護工作經驗，甚而財務會計觀念，將更能激發員工挑戰自我及學習之意願。而 PSEC 課程即提供本公司員工在前述制度未施行前的另一項選擇。PSEC 課程範圍含蓋整個電力系統(詳表 1-1 及圖 1-2)。因此，除本處所主管之業務外，亦可由授課方式學習其他領域之知識。本課程份量相當重，將來赴訓同仁事前即應加強各領域基本專業知識，俾得到更佳學習效果。

表 1-1 : PSEC 課程內容綱要表

- **1st Quarter - Transmission Analysis & Planning**
 - ❑ Circuit Analysis Review
 - ❑ Power System Analysis
 - ❑ PSLF Seminar
 - ❑ Transmission Analysis and Pricing
 - ❑ Surge Phenomena
- **2nd Quarter - Advanced Power Systems Topics**
 - ❑ Synchronous Machines
 - ❑ Stability
 - ❑ Voltage Compensation & FACTS
 - ❑ Utility Economics
- **3rd Quarter - Strategic Planning & Operations**
 - ❑ System Operation - Control
 - ❑ System Operation - Economics
 - ❑ Strategic Transmission & Generation Planning
 - ❑ Competitive Power Generation
- **4th Quarter - Industrial & Distribution System Applications**
 - ❑ Rotating Machines
 - ❑ HVDC
 - ❑ Power Electronics
 - ❑ Deregulated Power Markets
 - ❑ Distribution Equip & Applications
 - ❑ Lectures on Power Systems
 - ❑ Protective Relaying

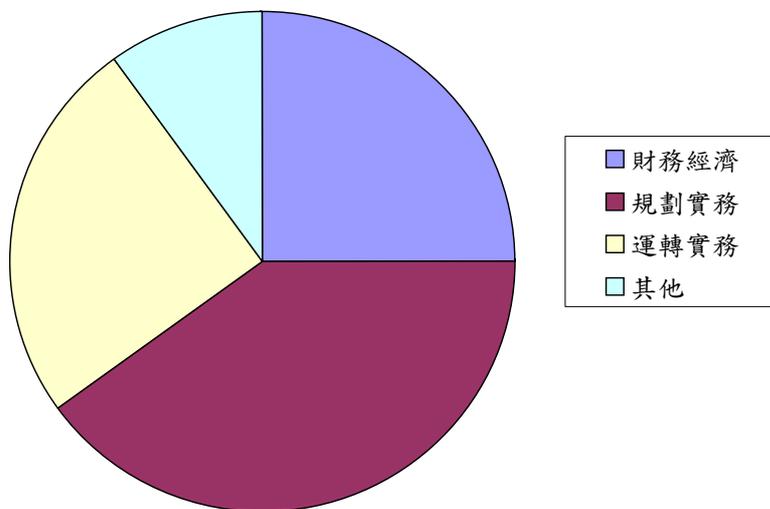


圖 1-2：課程分配比率

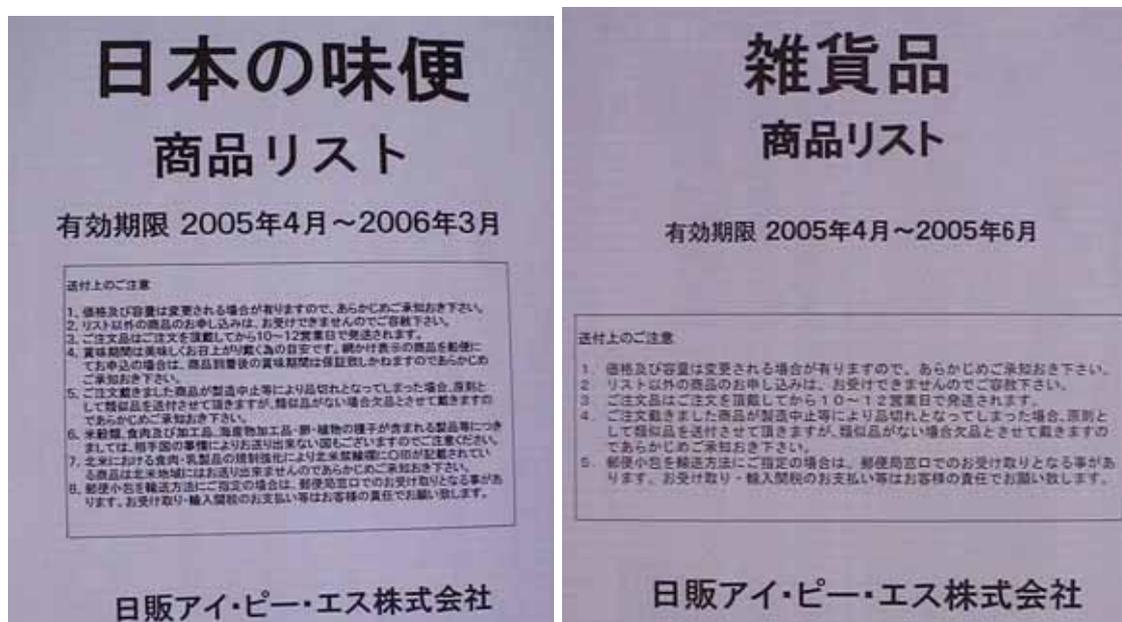
4. 日本全期受訓學員在 PSEC 課程結束後，均尚有 1~3 個月不等之訪問行程(拜訪美、加電力公司)。因此，在 PSEC 課程結束前 1 個月，日本同學均忙於擬訂及聯絡後續參訪計劃，並以 E-Mail 方式回報公司核定。而訓練費用與公務所需之生活支出，則在總旅費額度下，可實報實銷。經詢問日本同學，其公司旨在訓練員工獨立安排訪問行程及與同業交流之能力。由於本公司屬國營事業，各項行政程序均須依中央法規辦理。但日本公司培訓員工的用心及其信賴員工的作法，值得國人省思。
5. 從與 GE 人員、銀行、電信、超級市場及教育局等機構人員接觸過程中，感受到美國人敬業及樂於工作的態度實在值得敬佩。另亦瞭解到美國小學教育，並不著重課業教學，但強調生活習慣之培養。他們強調學生須尊重別人、遵守規定及發展獨立人格等事項。是以美國人作事情均養成以法規為準則，故例當交通號誌燈因停電失效時，十字路口每位駕駛人均可依序輪流通行，而交通不會打結。

(二) 建議

1. 此次全期受訓學員中，日本有八人、韓國有三人，而本公司僅派遣一人。因受訓學員身處他鄉異國，七個半月之受訓期間，除了學習專業知識外，尚有食衣住行等生活起居須自行料理。倘若有同仁結

伴受訓相互幫忙和咨商，除專業知識上切磋，精神上亦較不感落寞，將可得到更佳學習效果。

2. 本次全期受訓學員中，日本 J-Power 公司人員可經 E-mail 方式向日本雜貨品會社(該會社與 J-Power 簽訂供貨合約)訂購食品(PSEC 課程受訓地區東方食品相當少)，詳圖 1-3。日本 J-Power 公司提供長期出國受訓員工生活補給品之福利，值得本公司參考。



即席めん類(2)・乾物(1)

4115	4103	5003	5004	5006
明麦	白野	白子海苔	白子海苔	白子海苔
1,550g	150g	120g	50g	160g
¥1,550	¥200	¥400	¥430	¥250
6ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	9ヶ月	12ヶ月

圖 1-3：J-Power 公司提供長期出國受訓員工生活補給品

3. 當地發電(on-site generation)的概念已逐漸被接納，配合綠色電力(green power)如風力、太陽能等的利用，發電業者將可有多種選擇。緣起於環保意識及珍惜地球資源觀念的提倡，提高能源利用效率、輸變電設備須配合景觀規劃降低對環境之衝擊已是全球人士的共識。

4. 本公司的電力系統目前所面臨的主要困境為區域電源與負載供需無法配合，輸電系統相對的擔任著全系統的命脈。採用新型設備，提高既有設備運轉能力實為電力業者當務之急。彈性交流輸電設備中的靜態同步調相器(STATCOM)具有極佳的電壓控制的能力(可提供或吸收無效電力)。該設備已實際運轉中，本公司將來應可採用，俾加強系統運轉控制能力，並提高系統穩定度。

第二章 電力系統元件特性

一、電力系統簡介

簡言之，電力系統可概分為下列單元：

(一) 發電系統：

發電廠的主要功能為將各式能源(核能、煤、油、天然氣、水力、風力等)轉換為電能。

(二) 輸電系統：

輸電方式原則上可概分為交流系統及直流系統。而交流系統中以 3 相 60 赫茲最為普遍。基於經濟性考量，交流系統輸電電壓隨系統容量不同而各有選擇。

(三) 變電系統：

電能須經由輸電線將電力由發電廠送至用戶。一般而言，電能須利用較高輸送電壓傳輸以減少輸電損失，而一般用戶並不直接受電，而須經由變電設備，取用適當的電壓，以資利用。

由於負載隨時在變動，為達電力系統中供給(發電)與需求(負載、損失)間的平衡，電力系統內須於適當地點設置控制設備，以求得系統之穩定運轉。傳統上，電力系統內的主要控制元件為發電機及其附屬設備(原動機、勵磁機等)、併聯式無效電力補償設備、附負載分接頭變壓器等。

電力系統系統由發電機產生電力經昇壓變壓器將電壓提高，由輸電

線路將電力傳送至負載，各電力系統重要的元件特性分述如下節。

二、發電機容量曲線特性

於電壓穩定度和長期穩定度研討中，同步機之無效功率限制極為重要。在特定電壓和功因(經常為 0.85 或 0.9)，同步機之額定為在 MVA 極大值連續運轉而不致過熱。連續無效功率輸出能力如圖 2-1 受到下列三個因素限制：

電樞電流限制：電樞電流之損失 RI^2 產生熱，將限制電樞電流之最大

值，以避免電樞發生過熱，如圖 2-1 之 BC 段曲線。

磁場電流限制：對一特定之場電流，有效和無效功率關係為為一圓，

其圓心為 $-Et^2/Xs$ 及半徑徑為 $(Xad/Xs)Et i_{fd}$ ，如圖 2-1

之 AB 段曲線。

末端區域之熱限制：當同步機欠機運轉時，場電流甚小，造成電樞端

漏磁通之增加，其所產生之熱將限制其出力。

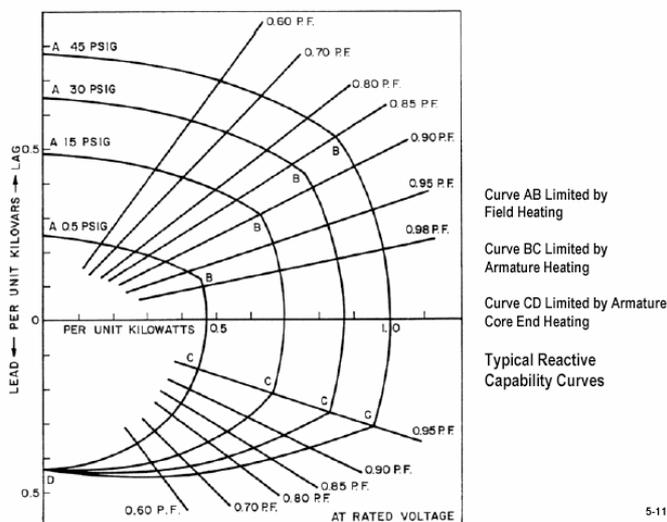


圖 2-1：發電機容量曲線特性

三、輸電線路特性

當輸電線路之充電電流產生之無效電力與負載電流消耗之線路損失相等時，表示此時可視為線路末端負載大小為輸電線路之特性阻抗 $Z_c = \sqrt{L/C}$ 歐姆，輸電線路上潮流為一個 $SIL = V_0^2 / Z_c$ ，即輸電線路不從系統吸收無效電力，亦不提供系統無效電力，全線上之電壓和電流同相且維持定值。

輸電線路傳送電力之能力與線路長度與電壓等級有關，及受到下述三種因素影響：

1. 線路熱容量極限：線路總長度 0~80km
2. 電壓降極限：線路總長度 80~320km
3. 小信號穩定度極限：線路總長度 320~960km

當輸電線路長度超過 480km 時，其載流能力低於 SIL，藉由補償輸電線路，可增加輸電線路傳送電力之載流能力。

四、負載特性

電力系統中消耗電力的元件種類及數量繁多，其負載模型及特性對穩定度之模擬影響甚大，通常分成兩大類即靜態模型及動態模型。

靜態模型或傳統式負載模型 ZIP，若負載僅考慮與電壓大小相關時，其關係式如下：

$$P = P_0 (a_1 + a_2 V + a_3 V^2)$$

$$Q = Q_0 (a_4 + a_5 V + a_6 V^2)$$

a_1 、 a_4 ：定電力負載比例

a_2 、 a_5 ：定電流負載比例

a_3 、 a_6 ：定阻抗負載比例

若考慮為頻率相關性之負載特性，將上述指數模型或多項式模型乘上一個因數 $(1+K_f \Delta f)$ ，其關係式改寫如下：

$$P = P_0 (a_1 + a_2 V + a_3 V^2) (1 + K_{pf} \Delta f)$$

$$Q = Q_0 (a_4 + a_5 V + a_6 V^2) (1 + K_{qf} \Delta f)$$

一般而言，電動機消耗電力系統中全部電能之 60%~70%，所以系統動態特性主要受到電動機之動態特性所影響，故常將負載之動態模型以感應電動機模型來表示。

第三章 彈性交流輸電技術

一、定義

彈性交流輸電系統(Flexible AC Transmission System, FACTS)定義為“交流輸電系統中加入電力電子元件和控制器，以強化系統控制能力和增加輸電能力。

經由輸電線傳送的交流電力是由輸電線阻抗及輸電線兩端的電壓及相角所決定。傳統的電網結構中，利用固定式或機械切換式串、併聯無效電力補償設備、電壓調整變壓器及相角移位變壓器等設備來達到輸電線阻抗最佳化，減少電壓變動及控制電力潮流。唯此類控制方式僅能控制穩態系統，動態控制只能由發電廠本身的控制系統來施行。上述設備除發電廠附屬設備具備即時及快速的反應特性外，其它設備大都為機械式元件，無法滿足系統瞬間需求。整個系統往往須預留相當的裕度，以應付突發的事故及系統不確定需求。

近年來，由於能源、環保、路權及成本等因素，導致許多發輸變電新興工程延宕，迫使電力業者須改變傳統運轉理念，而走向提昇既有設備利用率及加強控制電網能力的策略。由於高功率半導體、通訊系統及儲能設備的快速發展，電力業者已能利用上述先進的元件，而使電網控制更加靈活。

二、彈性交流輸電系統基本原理簡介

(一) 交流輸電系統基本原理

利用簡單的電網系統來說明基本的交流輸電系統原理，詳圖

3-1-(a)。輸電線中間點電壓為：

$$V_M = V \cos \frac{\delta}{2}$$

流經該輸電線電流為：

$$I = \frac{2V}{X} \sin \frac{\delta}{2}$$

假設該輸電線電阻非常小，(可忽略)，則流經該輸電線有效

電力潮流為：

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta$$

兩端的無效電力潮流為

$$Q_S = -Q_R = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta)$$

該輸電線所吸收的無效電力為

$$Q = 2Q_S = \frac{2V^2}{X} (1 - \cos \delta)$$

P, Q, δ 的關係詳圖 3-1-(c)

在下列各節中，將分述改變電壓，阻抗及相角三個變數對穩

態及動態輸電系統的影響。

(二) 併聯無效電力設備控制電壓

假設於圖 3-1-(a)系統，在輸電線中間點併聯一個理想的無效電力補償設備 SVC，它所提供的交流電壓值為 V_M 且與併入點同相詳如圖 3-2-(a)。

該 SVC 實質上將圖 3-1-(a)系統切割為兩個獨立系統， V_S 、 V_R 、

V_M 及線電流關係詳圖 3-2-(b)

$$P_P = 2 \frac{V^2}{x} \sin \frac{\delta}{2}$$

該 SVC 所提供的無效電力為

$$P_P = 2 \frac{V^2}{x} \sin \frac{\delta}{2}$$

PP、QP 及 δ 間的關係詳圖 3-2-(c)。由本例中可了解併聯補償可提昇輸電線所輸送的有效電力(於理想化的中間點補償可達 2 倍)，唯必須提供大量的無效電力(熱容量限制下)。

(三) 串聯電容器補償

於圖 3-1-(a)系統中，串聯兩段電容器，詳圖 3-3-(a)。相關電壓及電流的關係詳圖 3-3-(b)。

補償後的輸電線阻抗為

$$\begin{aligned} X &= X_L - X_C \\ &= X_L (1 - S) \end{aligned}$$

$$\text{where } S = \frac{X_C}{X_L} \quad 0 \leq S \leq 1$$

則線電流及輸送的有效電力分別為

$$\begin{aligned} I_S &= I \angle 0 \\ &= \frac{2V}{X_L(1-S)} \sin \frac{\delta}{2} \\ P_S &= \frac{V^2}{X_L(1-S)} \sin \delta \end{aligned}$$

由串聯電容器所提供的無效電力為

$$Q_{SC} = I^2 X_C = \frac{2V^2}{X_L} \frac{S}{(1-S)^2} (1 - \cos \delta)$$

P_S 、 Q_{SC} 及 δ 間的關係詳圖 3-3-(c)。可觀察得知串聯補償量愈大 ($S \uparrow$) 有效電力的輸送量亦相對增加。

(四) 相角控制

圖 3-4-(a) 的系統，說明於原系統中串聯一理想的相角移位補償設備。該補償設備可視為一交流電壓源，具有可控制的輸出電壓及相位。

則

$$V_G = V_S + V_{pg}$$

V_G 、 V_S 及 V_{pg} 的關係詳圖 3-4-(b)

移相器的基本運作模式為當 δ 超過 $\frac{\pi}{2}$ 時(最大功率角)，便適時補償相角 α ，使得該輸電線所輸送的有效功率維持在 P_{\max} 。補償後有效功率為

$$P_a = \frac{V^2}{X} \sin(\delta - \alpha)$$

where $\alpha \geq 0$ if $\delta \geq \frac{\pi}{2}$

P_a ， δ 及 α 的關係詳圖 3-4-(c)。可觀察得知移相器雖然不能提昇該輸電線的最大有效電力輸送量，但卻可使輸送電力量維持在最大值，不論發電機相角 δ 如何變化。移相器亦具有控制有效及無效電力的功能。

$$W = |V_{pq}| |I|$$

$$= \frac{4V^2}{X} \sin \frac{\delta - \alpha}{2} \sin \frac{\alpha}{2}$$

(五) 暫態補償功能

交流系統穩定與否，決定於系統內發電機是否能維持同步運轉。如圖 3-1-(a)中所示的雙機系統，最大輸送電力為 $P_M = V^2/X$ 。經由理想的中間點併聯補償可提高 $P_{MC} = 2 \times P_M$ 或經由串聯補償可提高 $P_{MC} = P_M/(1-S)$ ($0 \leq S \leq 1$)。但實際上，系統在運轉時，須預留適當的裕度，以保證暫態擾動(發電機或

線路故障等重大事故)後，系統仍能回復同步運轉的能力。因此定義另一暫態穩定極限值，表示在穩態系統中該線路所能輸送的最大電力潮流，而在該最大電力潮流系統又具有暫態擾動後，系統回復同步運轉的能力。有時候，電力系統中存在負阻尼振盪模式，這樣的系統很容易因小擾動發生後，便失去同步運轉能力。併聯及串聯補償具有提昇輸電線最大輸送電力的能力，因此配合適當的控制系統，亦可提高系統穩定度及增加系統阻尼。下述各節分別就這兩項功能討論。

(六) 暫態穩定度的改善

本節以基本的等面積法則來說明補償後的系統，暫態穩定度能力是否亦同時提昇？

如前文圖 3-1~圖 3-4 所示的 4 個系統，其暫態穩定度檢討詳示於圖 3-5(a)-(d)。

狀態 1：故障前穩態系統

事故前 4 個系統分別運轉於 δ_1 ， δ_{p1} ， δ_{s1} ，及 δ_{a1} (p, s, a 分別表示 parallel, series 及 angle)。 $P_M = P_e$ (m 及 e 分別表示發電機之機械能及電力能)。

狀態 2：故障中系統

$P_e = 0$ ，機械動能仍維持在 P_M ，則迫使發電機轉子加速，相

角增加為 δ_2 ， δ_{p2} δ_{s2} 及 δ_{a2} (此刻，故障清除)，轉子加速動能分別以 $A1$ ， $AP1$ ， $As1$ 及 $Aa1$ 所佔面積表示。

狀態 3：故障清除後系統

由於累積於轉子之慣性能量尚未完全消失，此刻相角仍繼續增加直到 δ_3 ， δ_{p3} ， δ_{s3} 及 δ_{a3} ，此刻轉子減速能量等於前述之加速能量， $A2$ ， $AP2$ ， $AS2$ 及 $Aa2$ 分別等於 $A1$ ， $AP1$ ， $AS1$ 及 $Aa1$ 。

圖 3-5 系統臨界清除角度分別以 $Scrit$ ， $Spcrit$ ， $Sscrit$ 及 $Sacrit$ 表示，當 δ_3 ， δ_{p3} δ_{s3} 及 δ_{a3} 分別小於上述臨界角度時，表示該系統是暫態穩定的。而 δ_3 及 $Scrit$ 間的差值表示該系統尚有的裕度。由圖 3-5 中 $Amargin$ ， $Apmargin$ ， $Asmargin$ 及 $Aamargin$ 面積大小可得知，併聯、串聯及相位移方式補償均可增加系統暫態穩定度的裕度。

三、強化電力潮流控制器之簡介

(一) 基本原理介紹

UPFC 的主要功能為即時潮流控制及動態特性補償。UPFC 的控制器由兩個換流器(Inverter)組合而成，每個換流器利用 GTO 閘流閥控制，詳圖 3-6。

圖 3-6 中的兩個換流器利用直流連接方式互通，圖中並利用

電容器當作儲能元件做為電源，以提供電壓控制的功能。一個理想的直流連接可使有效電力在兩個換流器之間相互流通，而兩個換流器也可以獨立的與系統做無效電力的互通。

Inverter 2 主要功能為提供系統串聯電壓源，該交流電壓源具有可控制的電壓大小及相角($0 \leq V_{pqmax}$, $0 \leq p \leq 360^\circ$)。當輸電線電流 I 流過該交流電壓源 V_{pq} 時，便產生系統與該串聯電壓源之間有 P 與 Q 互相流通的關係。經由 Inverter 2 閘流閥的觸發控制系統，該儲能電容可作為主動元件或被動元件以配合 Inverter 2 與交流系統之 P 與 Q 的互通。

換流器 1 的主要功能在提供換流器 2 所需的有效電力潮流(經由互連的直流鏈)及與交流系統作無效電力的互通。

Inverter 1 所產生的交流電壓經由一個併聯變壓器與輸電系統連接。

簡言之，UPFC 控制器不產生有效電力，它所控制的有效電力經由直流鏈在兩個換流器之間流通。而 UPFC 控制器的兩個換流器可獨立與輸電系統作無效電力的吸收與補償之互通。

(二) UPFC 基本控制功能

UPFC 具有下列四項主要控制功能，詳圖 8。

1. 電壓調整

本項功能如同附負載分接頭變壓器(OLTC)，可控制引接點的電壓大小，詳圖 3-7-(a)， $V_{pq} = \Delta V$ 。

2. 串聯補償

當該串聯電壓源 $V_{pq} = V_c$ 與輸電線電流相差 90° 相角時，UPFC 具有類似串聯電容器的補償功能，詳圖 3-7-(b)。

3. 相角移位器

當該串聯電壓源 $V_{pq} = V_\sigma$ 僅提供相角偏移功能而不改變引點電壓大小時，則 UPFC 相當於一個相角移位器，詳圖 3-7-(c)。

4. 多功能控制

當 UPFC 控制器同時具有上述三項功能補償時， V_{pq} 可控制在圖 3-7-(d) 中任一操作點， $V_{pq} = \Delta V + V_c + V_\sigma$ 。

(三) UPFC 模型說明

圖 3-8 說明 UPFC 的數學模型。UPFC 控制器各項控制參數限制 UPFC 元件的運轉條件：

1. 串聯電壓源大小
2. 串聯換流器所流過的電流
3. 併聯換流器所流過的電流
4. UPFC 引接點最低運轉電壓

5. UPFC 引接點最高運轉電壓
6. 串聯換流器及併聯換流器間流通的有效電力

由上述運轉條件決定 UPFC 元件的額定值：

1. 最大併聯電流
2. 最大併聯電壓
3. 最大串聯電流
4. 最大串聯電壓
5. 最大直流電力轉換

上述第 1 項及第 2 項相乘決定併聯換流器的 VA 額定，第 3 項及第 4 項相乘決定串聯換流器的 VA 額定，而第 5 項決定在最低 DC BUS 電壓下的最大 DC 電流限制。

四、結論

傳統的電力傳輸系統，由整個電網的電力潮流方程式中求解，各匯流排的電壓、相角及匯流排間的電力潮流量係不可控制。但倘若於電網中加入可改變輸電線阻抗的設備，則電壓、相角、電力潮流可隨之變化。

因此藉由：(1) 並聯電抗補償以控制電壓大小 V

(2) 串聯電抗補償以控制阻抗大小 X

(3) 相位移動以控制相角大小 δ

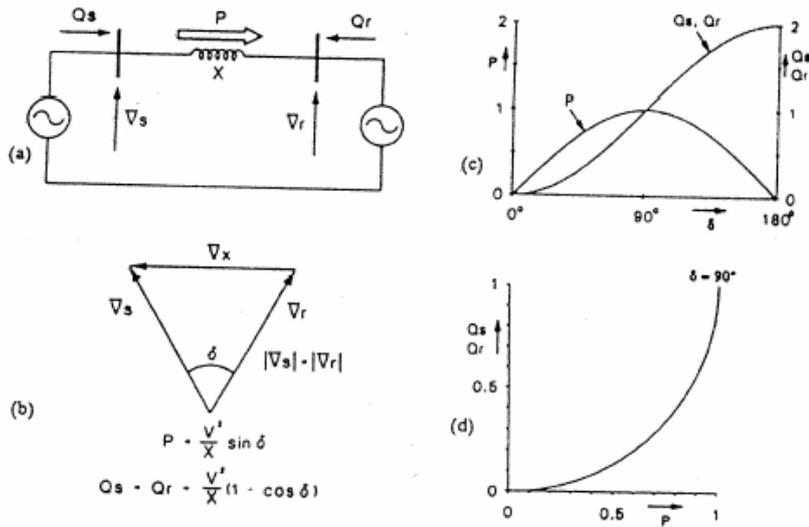
即可對負載潮流大小予以控制，而彈性交流輸電系統之基本概念即是由此延伸，利用電力電子元件對電抗元件作適時適地之切換，控制上

述基本量。使整個電網的潮流能適當的被控制，各輸電線路在熱極限 (thermal limit) 限制下，能提昇傳輸電力而未及於穩定度極限。

應用 FACT 設備，能控制同一輸電路徑下某一並聯線路之輸送電力，且整個系統之阻尼及電壓穩定度仍可維持在可接受水準。由 FACTS 之功能觀點可獲知，由於高電壓高電流電力電子設備之可控性、通訊網路和計算機系統之發展，改善了傳統交流輸電系統機電設備缺乏控制能力之運轉特性。因此，FACTS 所具有之特點包括取代傳統電路阻抗恒定使輸電網路阻抗和相角具有調節性、電力潮流為可控制狀態和快速控制功率流向和大小。以系統整體而言，FACTS 所帶來的好處有：

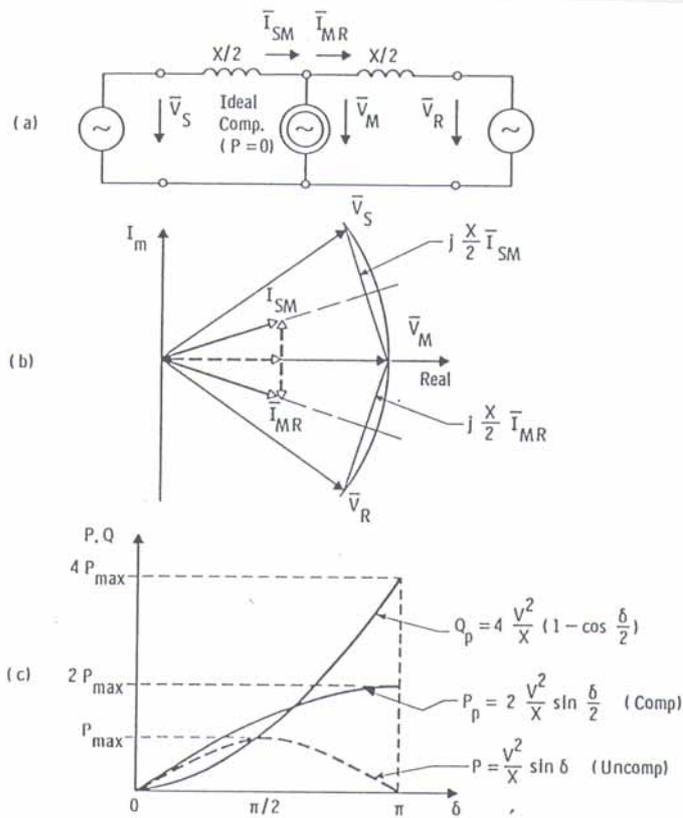
- (1) 電力潮流可彈性控制，並提高系統穩定度。
- (2) 送電能力可提升到接近線路熱容量極限。
- (3) 依系統需要提供快速靈活補償，以改善供電品質。
- (4) 前置工程作業時間短，可因應輸電線路工程之遲延。

惟設備利用率的提高雖降低初期的輸電投資成本但相對的增加設備負擔，設備使用年限可能下降。輸變電工程仍須進行，以提高系統安全性。



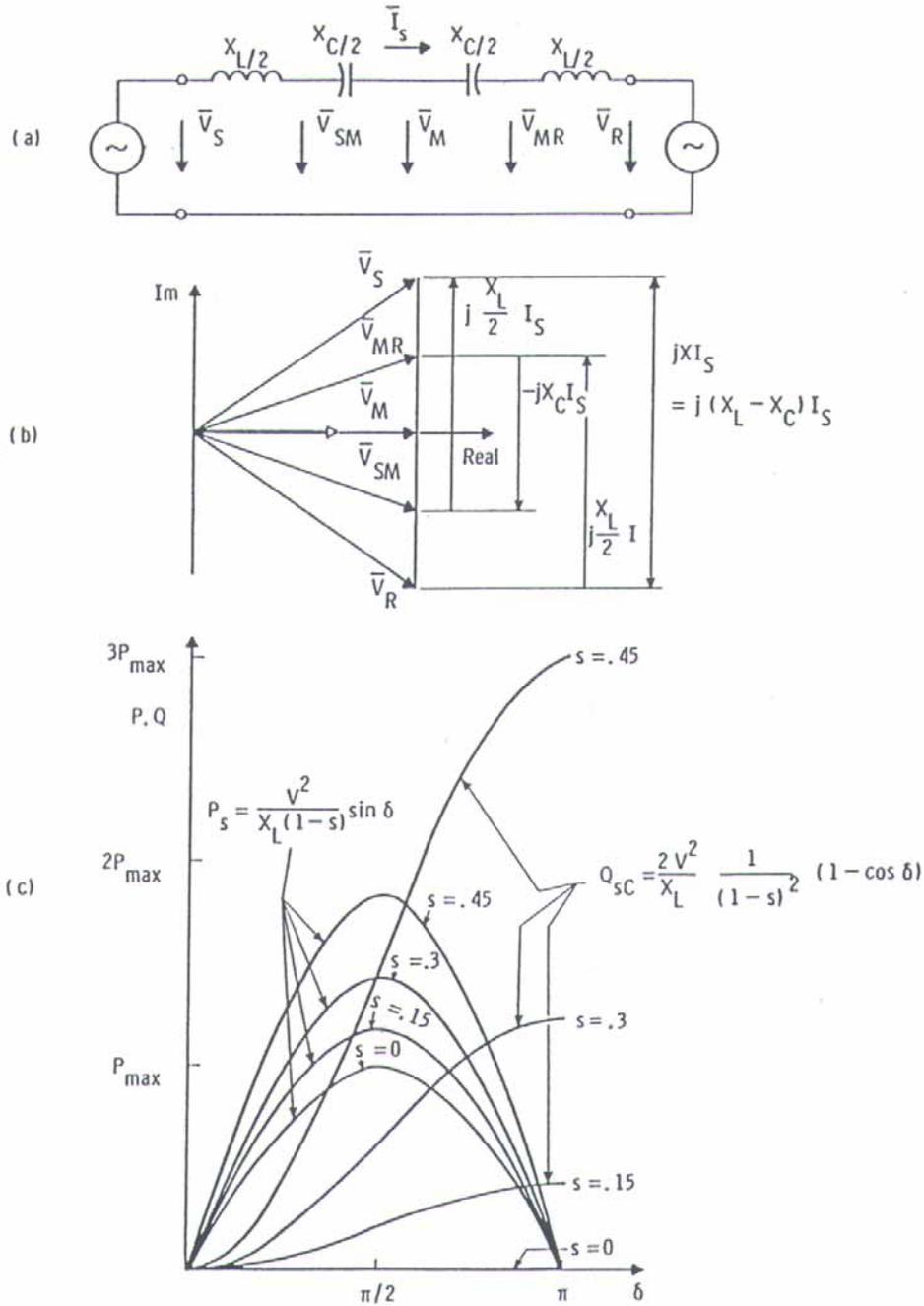
Simple two machine system (a), related voltage phasors (b), real and reactive power versus transmission angle (c), and sending-end/receiving-end reactive power versus transmitted real power (d).

圖 3-1：雙機系統



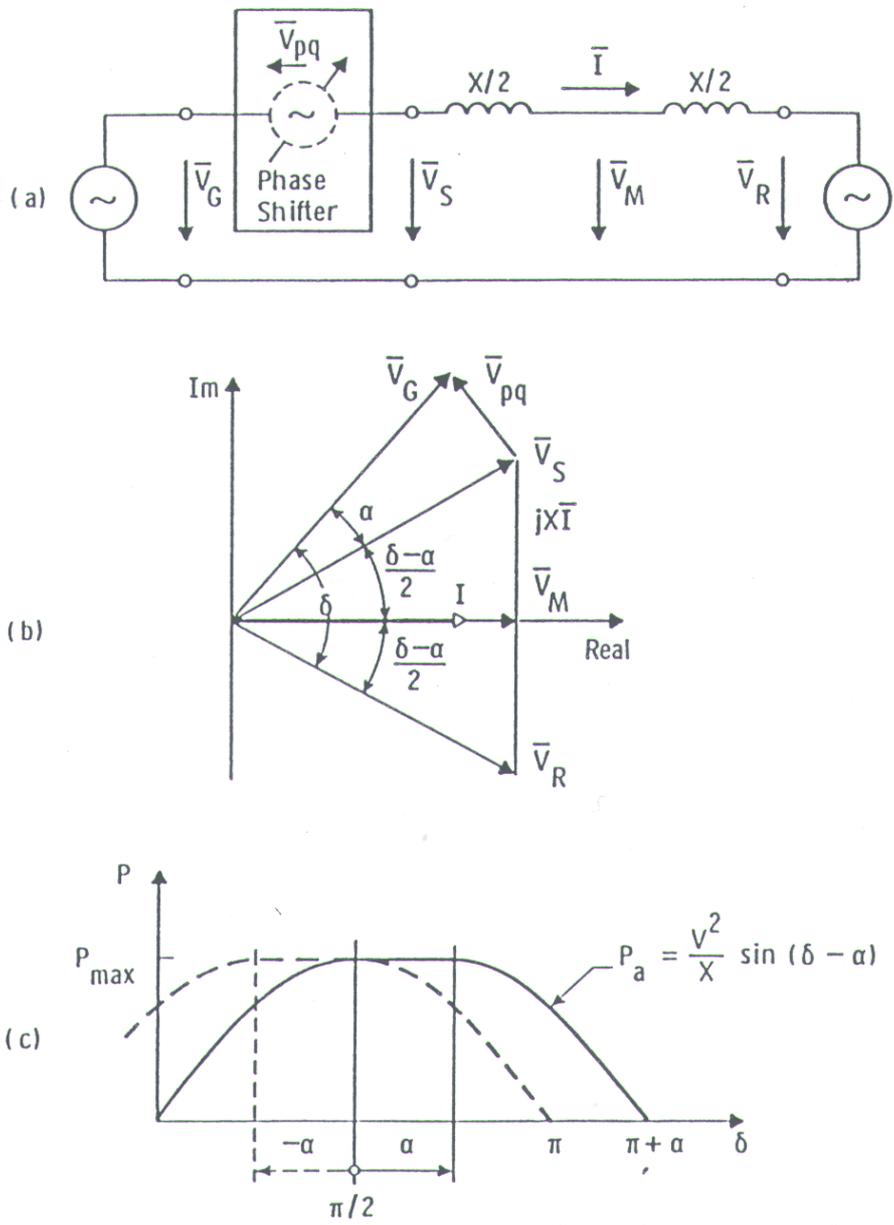
Simple two machine power system with an ideal mid-point compensator (a), corresponding phasor diagram (b), and power transmission characteristic (c)

圖 3-2：併聯無效電力設備控制電壓



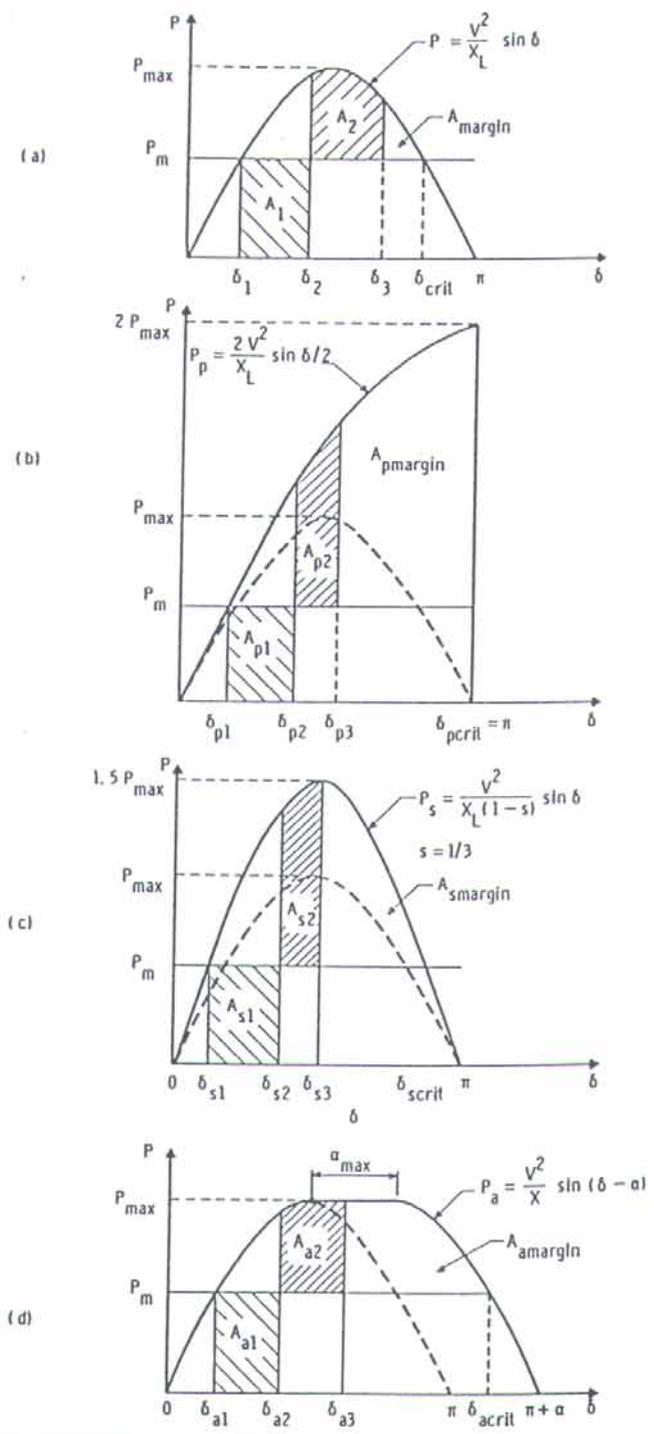
Simple two machine power system with series capacitive compensation (a), corresponding phasor diagram (b), and transmission characteristic as a function of degree of compensation s

圖 3-3：串聯電容器補償



Simple two machine power system with a phase-shifter (a), corresponding phasor diagram (b), and power transmission characteristic

圖 3-4：移相器補償



Equal area criterion to illustrate the transient stability margin for a simple two machine system, (a) without compensation, (b) with an Ideal mid-point compensator, (c) with series capacitive compensation, and (d) with a phase-shifter

圖 3-5：以等面積法則分析暫態穩定度

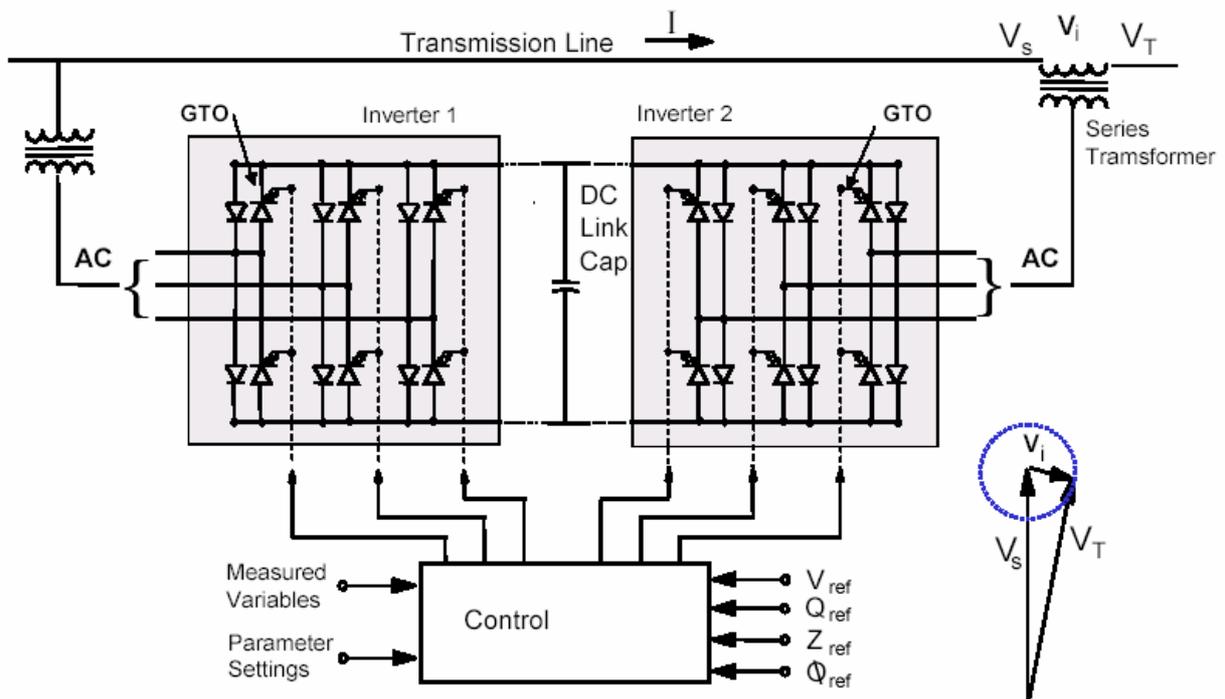


圖 3-6：強化電力潮流控制器(UPFC)架構

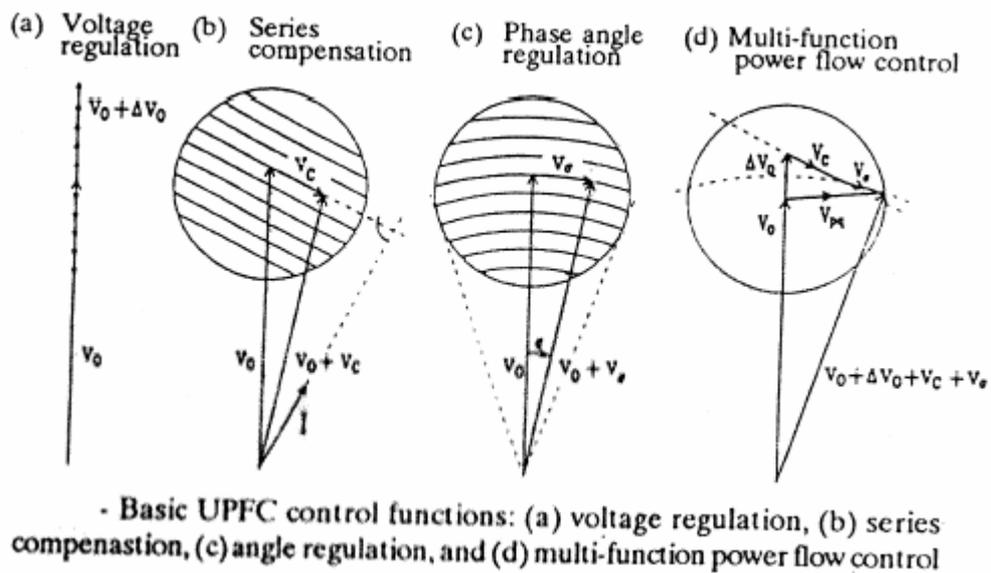
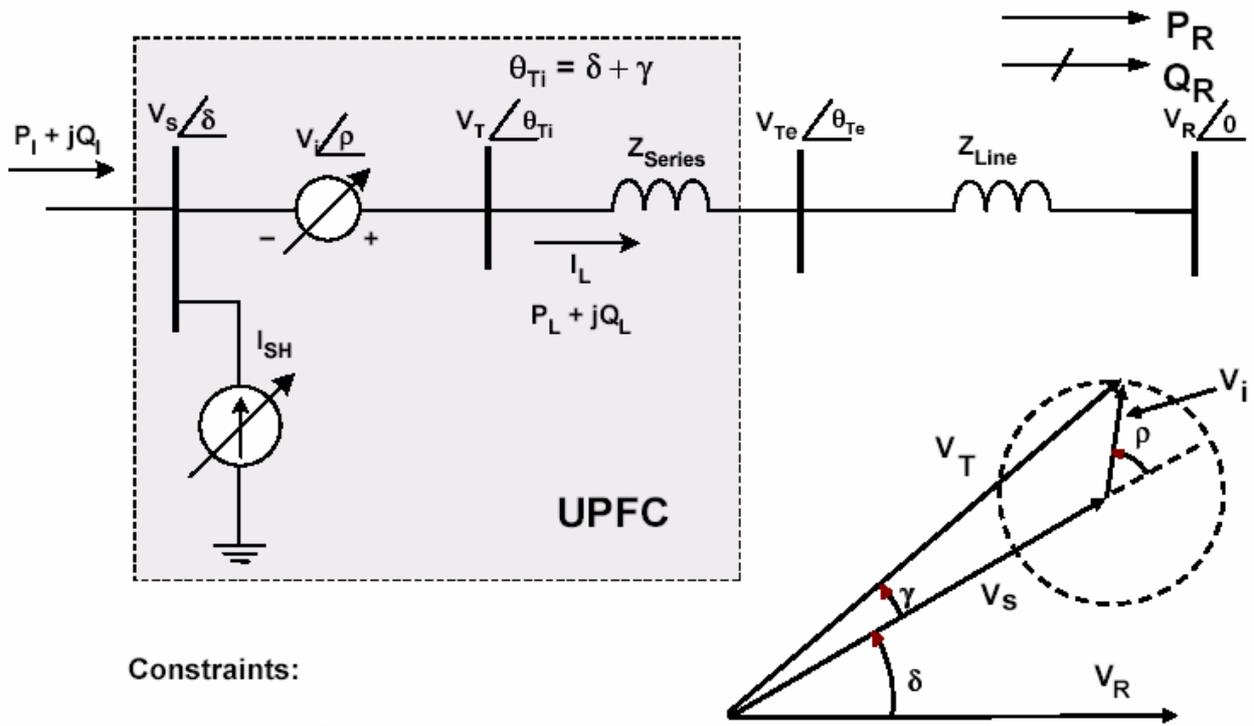


圖 3-7：UPFC 基本控制功能



Constraints:

$$\begin{aligned}
 V_T &\leq V_{Tmax} \\
 P_{dc} &\leq P_{dcmax} \\
 I_{SH} &\leq I_{SHmax}
 \end{aligned}$$

圖 3-8 : UPFC 模型說明

第四章 熱交換系統簡介

公用事業的電力公司(Utility)大部份電力之生產和銷售採垂直整合方式，投資並擁有發電、輸電和配電。在電業自由化之世界潮流趨勢下，電力生產結構及市場將快速變遷。本章將簡介將燃料轉變為電力的主要元件。

一、熱力學基本原理

火力機組係將石化燃料(煤、石油、天然氣)之化學能量經由燃燒藉由蒸氣或熱空氣流動而推動渦輪機帶動同軸之發電機，再將機械能經由發電機轉變成電能，利用輸配電線路送至用戶。

壓力、溫度、特定容積、內能(Internal Energy)、焓(Enthalpy)、熵(Entropy)等其中任兩個特性能被選用定義流體(液體或氣體)之特性，但在飽和狀態下溫度不是其中特性之一。

能量有許多形式，如動能、位能、化學能、電能、磁能等，而於熱力學中，除了考慮動能與位能外，將所有其它形式之能量視作單一性質，即稱之為內能。

「焓」(Enthalpy)表示「能的含量」(熱含量 heat content) 在定溫定壓下，一物質生成時所儲存於其中的能量稱之，與溫度、壓力及狀態有關。即 $H=U+PV$ 式中 H 表是焓； U 為系統的內能； P 為系統的壓力； V 為系統的體積。

熵(Entropy)含義是“變化”或“發展”，一種對物理系統之無秩序或亂度之量度。熵是一個狀態函數，一個系統從一種狀態變到另一種狀態時伴隨的熵的變化只與這種變化過程的始態和終態的性質有關，而與從始態到終態的途徑無關，如循環系統熵的變化為零。

壓力和溫度常被用來定義蒸汽之能階，增加蒸氣壓力將可減少產生蒸氣所需能量直到臨界壓力 3208psia(705°F)。

二、汽輪機

汽輪機將蒸汽的能量轉換為機械功的旋轉式動力機械，當高溫高壓蒸汽流過噴嘴時開始膨脹，壓力降低，流速增高，將所含能量轉換成動能。然後高速流動的蒸汽再流過，壓力有時還繼續再降低，並在動葉上產生作用力，推動輪盤轉動，將蒸汽的動能轉換成由主軸輸出的機械功，並經冷卻器熱交換後送回鍋爐。

汽輪機之蒸汽和電力循環之四個基本部分如附圖 4-1，圖中狀態一為低壓之水經給水幫浦加壓至狀態二，功(Wa)被加入循環，狀態二至狀態三中熱(Qa)被加至鍋爐以形成超熱蒸汽，狀態三至狀態四中蒸汽在汽輪機中膨脹，產生有用之功(Wr)，狀態四至狀態一蒸汽在冷卻器中冷凝釋出熱(Qr)後送回給水幫浦。

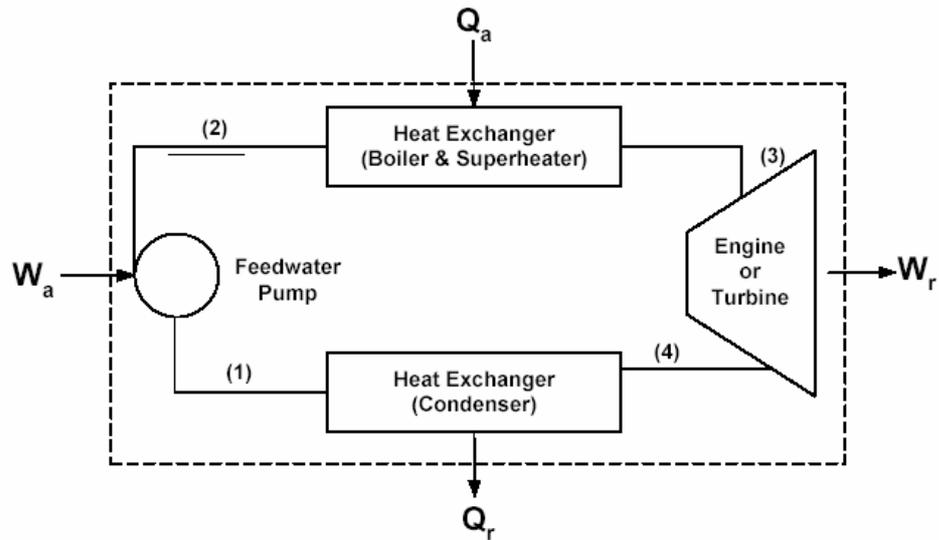


圖 4-1：汽輪機之蒸汽和電力循環

汽輪機之蘭金循環(Rankin cycle) 如附圖 4-2，給水幫浦的絕熱壓縮過程 1-2，鍋爐中水的定壓加熱、汽化和蒸汽的過熱過程 2-3，汽輪機中的絕熱膨脹過程 3-4，以及冷卻器中的定壓凝結放熱過程 2-3 所組成的可逆循環。蘭金循環的效率為

$$EFF = \text{輸出功(Work)} / \text{輸入熱(Heat)} = (H_3 - H_4) / (H_3 - H_1)$$

汽輪機進口的初始蒸汽為 2400psig/1000F 膨脹到出口廢汽壓力 1.5”HgA，其輸入外加熱為 619 BTU/lb，輸出功(Work) = 1460.4 - 60 = 1400.4 BTU/lb，效率為 $EFF = 619 / 1400.4 = 44.2\%$ 。

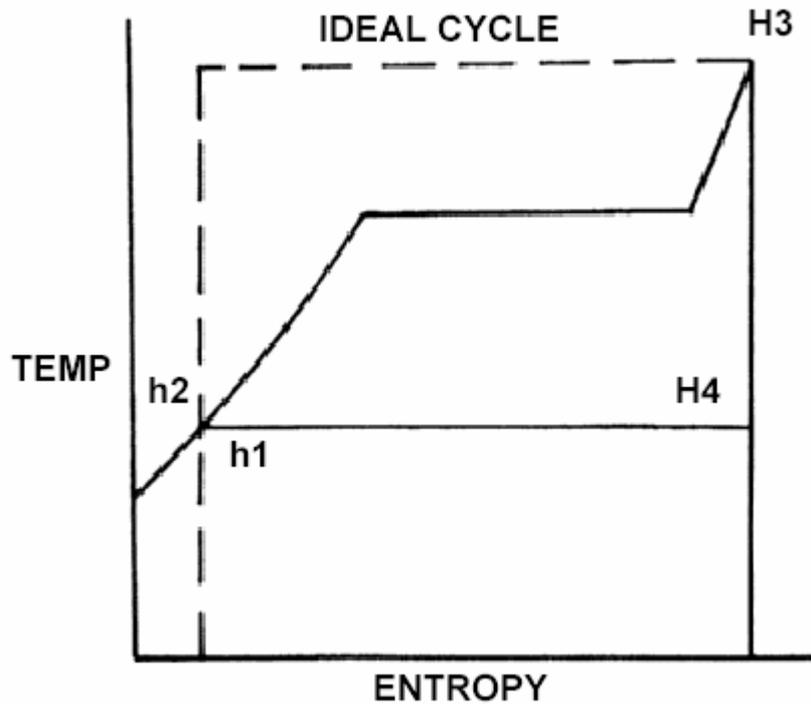


圖 4-2：汽輪機之蘭金循環(Rankin cycle)

改善汽輪機效率可由下述方式：

(一) 增加噴嘴壓力或噴嘴蒸汽溫度：

現代大型汽輪機通常採用新汽壓力為 24 兆帕、新汽溫度和再熱溫度為 535~565°C 的超臨界參數，或新汽壓力為 16.5 兆帕、新汽溫度和再熱溫度為 535°C 的亞臨界參數。

(二) 降低排氣壓力：

排汽壓力越低，循環的熱效率就越高。如果採用過低的排汽壓力，就需要增大冷卻水流量或增大凝汽器冷卻面積，同時末級葉片也較長。

(三) 使用再加熱(Reheat)系統：

即在蒸汽膨脹降壓到進汽壓力的 18~26%時將汽輪機的全部蒸汽用管道引出，送入鍋爐的再熱器中，再次加熱到接近新汽溫度，然後再送到以後的級中繼續膨脹作功。

(四) 結合給水迴熱循環：

現代大型發電廠汽輪機的迴熱抽汽點多達 8~9 個，抽汽量可達進汽量的 30~35%。採用迴熱循環後，依新蒸汽參數和給水加熱器數目的不同，循環熱耗率可降低 10~18%。

汽輪機被廣泛應用在世界各地，可使用各種燃料(固、液、氣)，其循環效率主要受到使用燃料及所選定蒸汽狀況，最佳蒸汽電廠(steam plant)可達到整體效率約為 35~40%。

三、氣渦輪機

氣渦輪機循環係自大氣吸入空氣，在壓縮機中壓縮，壓縮後的氣體進入燃燒室，在此加入燃料燃燒加熱，加熱後的高溫燃氣進入氣渦輪機膨脹作功，膨脹後的燃氣排向大氣，氣渦輪機排氣溫度還相當高(約 400~550°C)，而壓縮機吸入的空氣是大氣溫度，相當於在大氣中進行了冷卻，上述四個過程都是連續地進行的，氣渦輪機熱力循環如圖 4-3。

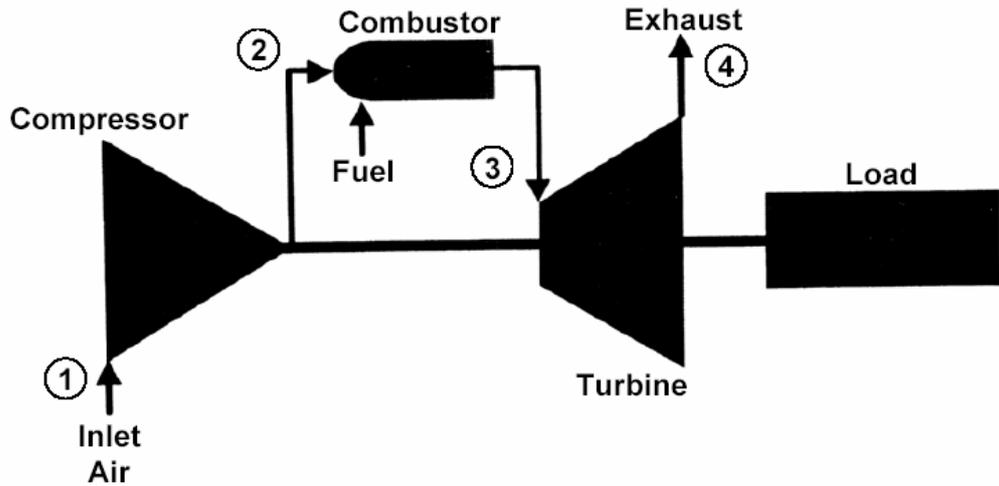


圖 4-3：氣渦輪機循環

氣渦輪機循環是由絕熱壓縮過程 1-2、定壓加熱過程 2-3、絕熱膨脹過程 3-4 和定壓放熱過程 4-1 所組成的可逆循環，其勃朗登循環(Brayton Cycle)在壓力-體積($p-V$)圖和溫度-熵($T-S$)圖表示如圖 4-4。

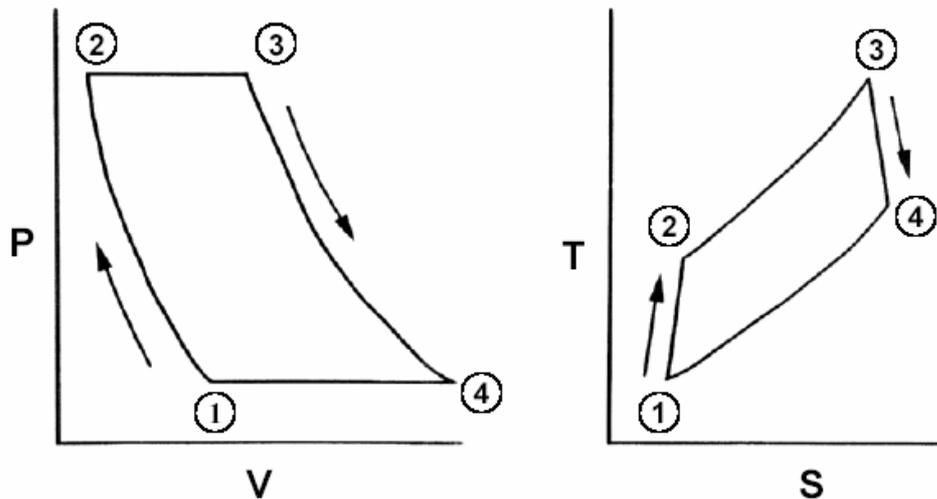


圖 4-4：勃朗登循環(Brayton Cycle)

氣渦輪機膨脹功扣去壓縮機消耗的壓縮功之後的淨功，作為氣渦輪機的輸出功。氣渦輪機膨脹作功與其由流入燃氣溫度及壓縮比成正比，

較高溫度表示較多電力輸出，較高壓縮比表示較高熱效率。

氣渦輪機之勃朗登循環(Brayton Cycle)可強化調整如下：

(一) 再加熱循環(Reheat Cycle)：

在膨脹過程中採用中間再熱的循環，如高壓 HP 氣渦輪機之排氣，送入燃燒室再加熱後，進入低壓 LP 氣渦輪機膨脹做功，將增加電力輸出，但要增多加熱量輸入、增加軸長、第二套燃燒室及高維修費用。

(二) 壓縮中間冷卻：

在壓縮過程中採用中間冷卻，中間冷卻可以減小壓縮功，但壓縮終了後的空氣溫度降低了，將使燃燒室加熱過程的熱量增加。上述兩種措施都可以顯著地增加電力輸出，但對效率的改善不明顯。

(三) 回熱循環：

氣渦輪機排氣溫度仍相當高，帶走大量熱量，讓氣渦輪機排氣通過換熱器先把壓縮機出口的空气加熱，然後空氣再送入燃燒室則可以節省燃燒室內加入的燃燒熱量從而提高循環效率。

氣渦輪機之性能直接受到空氣流量影響，即廠址因素如進氣空

氣密度、周溫、大氣壓力、濕度、海平面高度均扮演重要因素。

四、複循環系統

當今簡單的氣渦輪機之最高效率為 33%~40%，可見有相當量之熱能量被浪費掉，而複循環系統為一整合系統如圖 4-5，被設計來回收氣渦輪機廢氣排掉之大部分能量，並將其用於汽輪機之蘭金循環(Rankin cycle)，典型複循環系統效率可提昇至 40%~50%，對效率而言之最佳壓力比為 10~14。

全球能夠建造天然氣複循環發電機的廠商，只有西門子、奇異、ABB 及三菱等四家。新建複循環機組由製造、安裝、運轉需時約 30 個月，其中氣渦輪機需時約 24 個月。

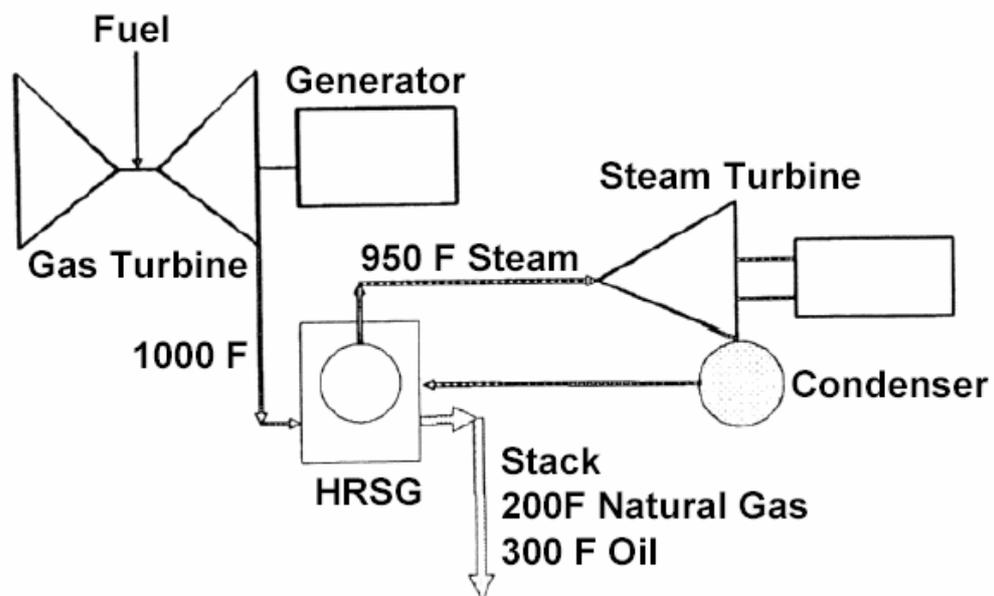


圖 4-5：複循環系統

五、汽電共生

汽電共生(COGENERATION)常被定義為由單一整合能源供應系統連續產生所需熱量和動力(電力的或機械的)，或回收低階能源產生動力。此連續的能源製程之汽電共生系統與其他分開生產能源設備相較可節省燃料使用。

汽電共生系統中電力可由下述兩種方式產生：

1. 頂端循環(Topping Cycle)-最常見之汽電共生系統，需消耗燃料產生電力為主，其次再將熱量輸送至製程，如圖 4-6。
2. 底部循環(Bottoming Cycle)-回收製程中將被浪費之廢熱產生電力，通常很難以經濟價值去評估，如圖 4-7。

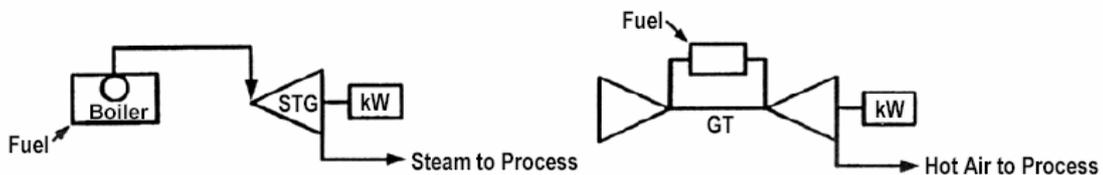


圖 4-6：頂端循環(Topping Cycle)

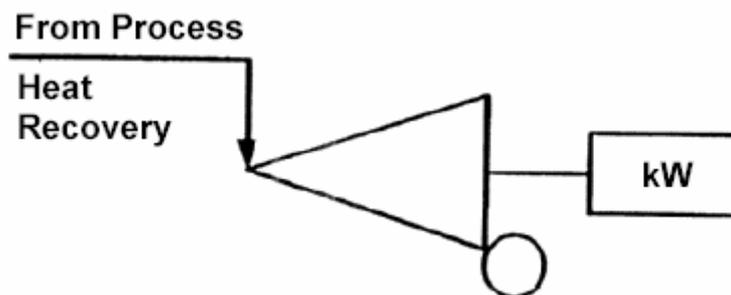


圖 4-7：底部循環(Bottoming Cycle)

一般而言，汽輪機依顧客需要訂製可採用不同之組態設計，以滿足特殊製程中熱量的需求，很少有百分之百完全相同之元件和容量，不似氣渦輪機僅出售以特定大小或結構大小。故在評估和比較各種可供選擇的汽電共生系統時，下述兩個重要的觀念是關鍵：

1. Net Heat to Process (NHP)-汽電共生系統供應製程負載之淨能源，即供應製程之全部熱能減去由製程回送之全部熱能，特別是在不同狀況下，各種氣渦輪機和汽輪機之組態，輸出能源至製程，必須維持定值之 NHP。
2. Fuel Chargeable to Power (FCP)-汽電共生系統相對僅供應熱量系統之燃料增量除以其電力增量，即熱比率增量 (incremental heat rate)，表示為 Btu/kWh。
3. $FCP = (Fuel_2 - Fuel_1) / [(KW_2 - AUX\ POWER_2) - (KW_1 - AUX\ POWER_1)]$

現代化燃煤電廠和工業用無冷卻器之汽電共生系統，汽輪機燃料使用效率比較如下：

1. 燃煤電廠-損失共佔燃料輸入之 65%，其中冷卻器損失佔 48%，鍋爐相關設備損失佔 15%，其他損失佔 2%，剩餘 35%輸出產生電力。
2. 汽電共生系統-損失共佔燃料輸入之 16%，鍋爐相關設備損失佔 15%，其他損失佔 1%，剩餘 84%輸出產生電力和熱能。

汽電共生系統產生電力循環中，汽輪機能量損失可由燃料輸入之 65%降至 16%，係由於製程變成了汽電共生系統之散熱器(Heat Sink)，故可使能量損失降至最低，若無蒸氣輸送至製程，整體效率將由 84%降至 35%。同樣評估無點火(Unfired)熱回收氣渦輪之汽電共生系統，若全部產生之熱能被送至製程，整體效率超過 70%，對天然氣點火 STAG 107FA 複循環系統，以高熱值(HHV)為基準之熱效率約為 50%。

汽電共生系統與傳統電廠比較，有節省能源需求 40%~60%之潛力，相關汽輪機汽電共生系統需考慮事項如下：

1. 製程之蒸氣需求(壓力、溫度、流量)
2. 原動機之大小(效率、蒸氣、電力)、和組態(有無冷卻器、製程壓力擷取)
3. 初始蒸氣狀況(壓力、溫度)
4. 饋入水之加熱
5. 冷卻用電力(經濟的考量)
6. 壓力層級需要
7. 平均需求量和預計變化量
8. 熱需求量-期間曲線
9. 製程回送和調整
10. 系統重複性需求(可靠度)

氣渦輪機汽電共生系統需考慮事項如下：

1. 電力對熱量比率(一般值約 210KW/Mbtu/hr)
2. 熱回收選擇(HRSG)
3. 循環效率對熱回收
4. 彈性設計

汽輪機和氣渦輪機汽電共生系統之組態分別如圖 4-8 和圖

4-9。

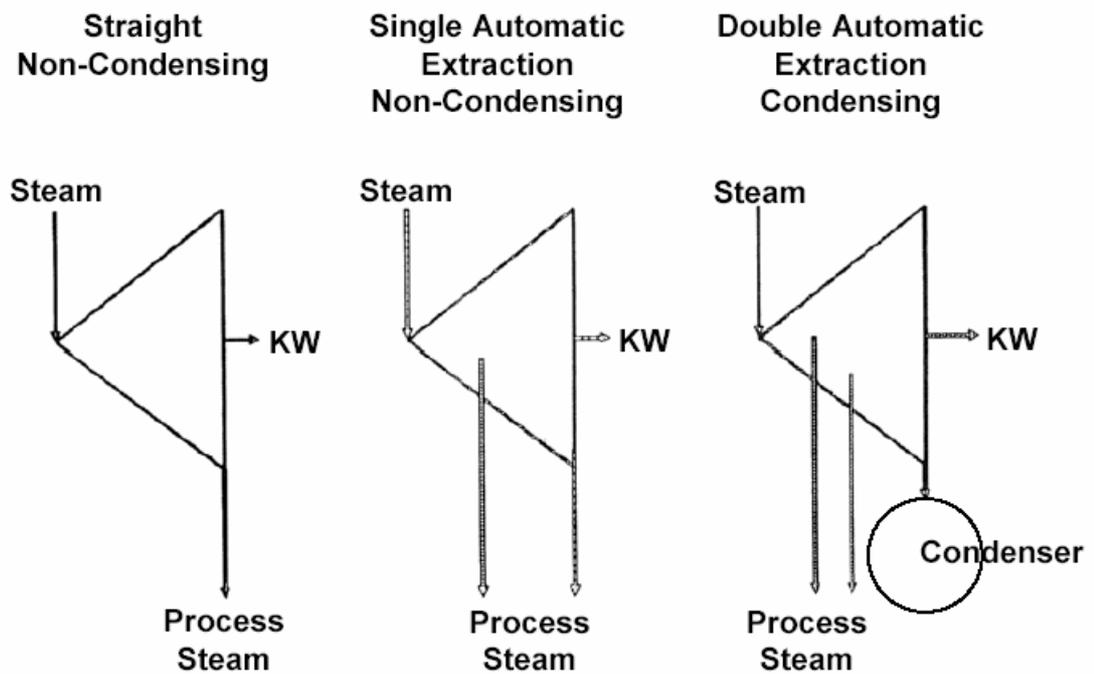


圖 4-8：汽輪機之組態圖

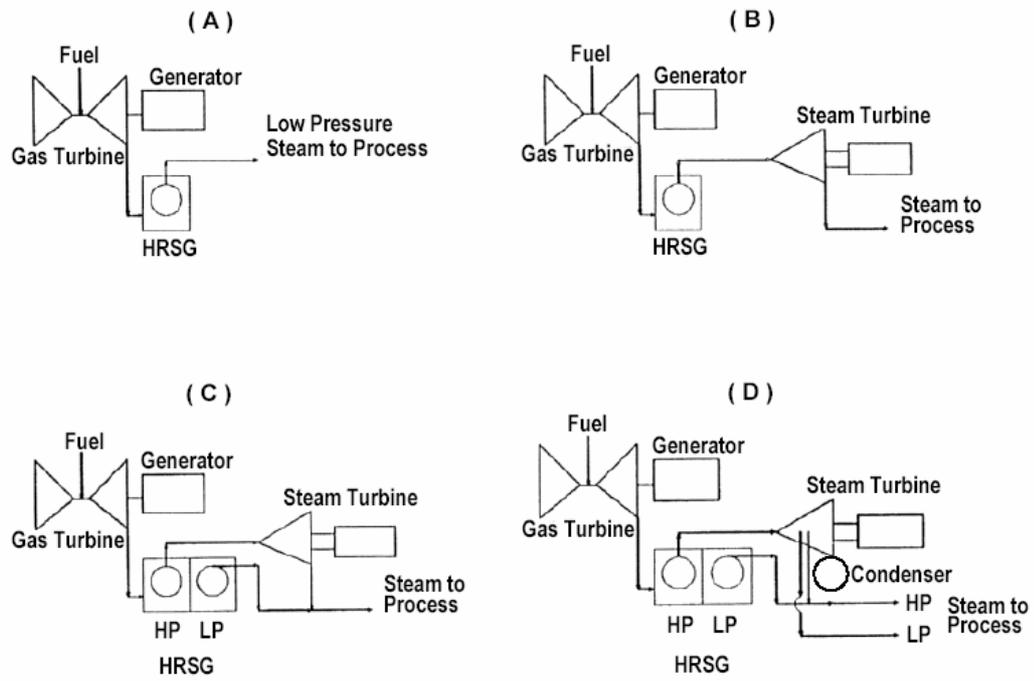


圖 4-9：氣渦輪機之組態圖

第五章 系統運轉控制

一、目的

電力系統控制的目的為維護系統運轉安全提供穩定電力，確保電壓和頻率品質，免除暫態和過量諧波影響，降低電力生產成本或強化配合市場機制，相關電力系統控制如圖 5-1。

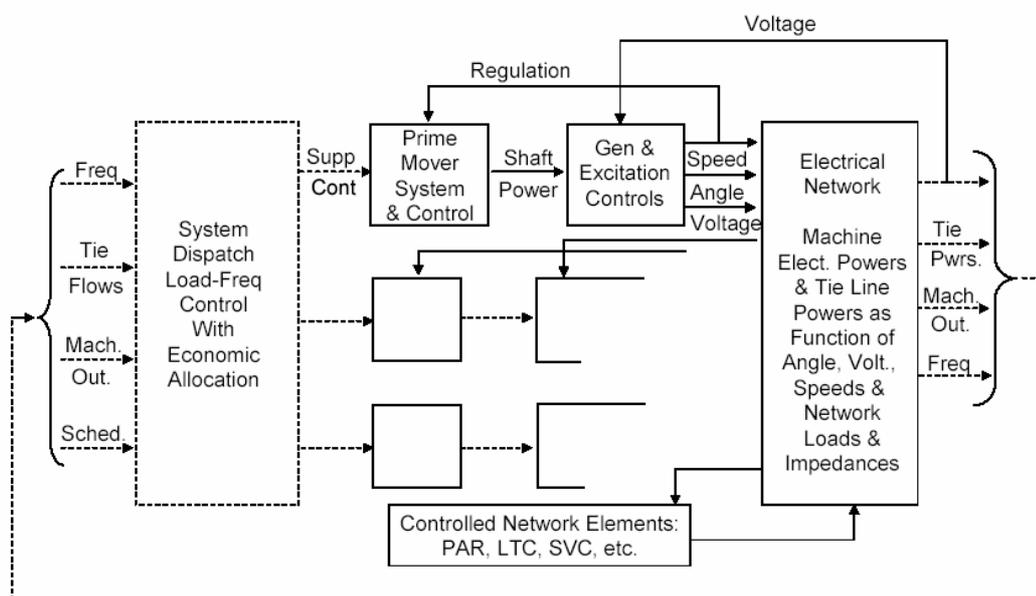


圖 5-1：電力系統控制概要圖

有效功率 MW 的控制機制，正常情況下運轉由調速機(Speed Governor)，自動發電控制 AGC(Automatic Generation Control)及經濟調度控制(Economic Dispatch Control)完成，異常或緊急運轉藉由負載卸載(Load Shedding)及發電機跳脫(Generation Tripping)來達成。

無效功率 MVAR 的控制機制，正常情況下運轉由調整 TCUL 變壓器分接頭，發電機匯流排電壓(激磁系統)，靜態或動態並聯補償(電容、電

抗器、SVC、同步電容器)，異常或緊急運轉藉由負載卸載(Load Shedding)、發電量減量或增加、使燈光暗淡(Brown-out)或降低系統電壓及動態並聯補償(Dynamic Shunt Compensation)來達成。

二、負載和轉速控制調速特性

當獨立系統中負載突變，下述三種效應將發生：

- (一) 發電機及渦輪機之慣量效應，限制系統頻率變化率。
- (二) 負載阻尼效應，當系統頻率降低時，減少消耗有效功率 P 之負載量。
- (三) 調速機效應，當系統頻率降低時，增加發電機有效功率 P 之輸出。

當負載變化時，假設發電機機械功率維持為定值(未接調速機)，發電機及渦輪機之慣量效應(初始系統響應)如圖 5-2。

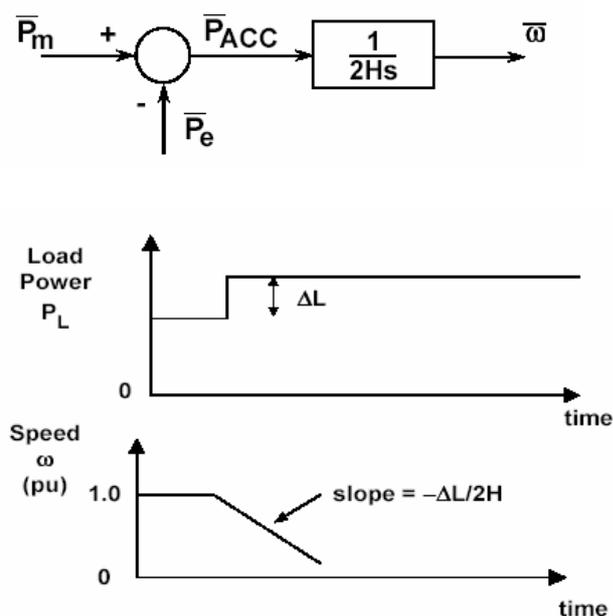


圖 5-2：發電機慣量效應

若 $\underline{P}_m = \text{Constant}$

$$\underline{P}_{acc} = -\Delta \underline{P}_e = -\Delta \underline{L}$$

$$\Delta \underline{\omega}(t) = (1/2H) \int (-\Delta \underline{L}) dt = (-\Delta \underline{L}/2H)t$$

$$\text{則 } \underline{\omega}(t) = 1.0 - (\Delta \underline{L}/2H)t$$

隨著系統頻率變化，系統連接負載 L 所吸收負載量變為 P_L

$$\text{即 } P_L(f) = L(f/f_0)^K = L(\omega/\omega_0)^K = Lf^K = L\omega^K,$$

此處 $f_B = f_0$ (Hz)

$$\text{且 } L = P_L(f_0)$$

$K = 0$ 表示電阻性負載，對馬達負載 K 值視其機械性負載而定，其範圍為 $1.0 \leq K \leq 3.0$ 如圖 5-3。

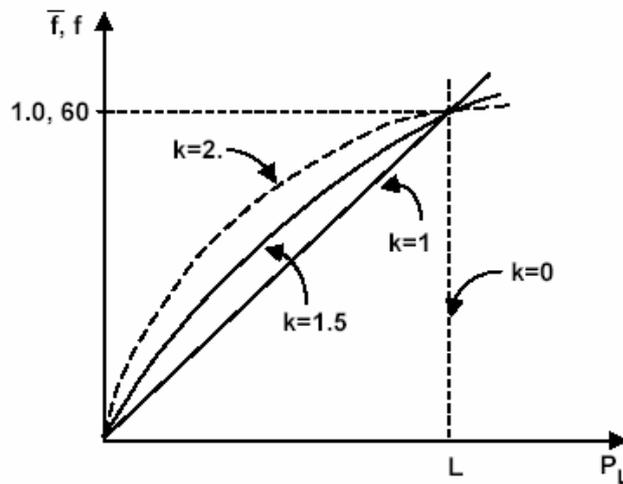


圖 5-3：負載之頻率響應圖

負載阻尼效應(負載調速效應)以負載阻尼係數 D (Load Damping Coefficient)表示，將 $P_L = L(f/f_0)^K$ 於 f_0 處線性化得到

$$D = \Delta P_L / \Delta f = (k / f_0) L \quad (\text{MW/HZ})$$

慣量和負載合成阻尼效應如圖 5-4，其轉速為

$$\underline{\omega}(t) = 1.0 + (\underline{\Delta L} / \underline{D}) [e^{(-Dt/2H)} - 1] \quad (\text{pu})$$

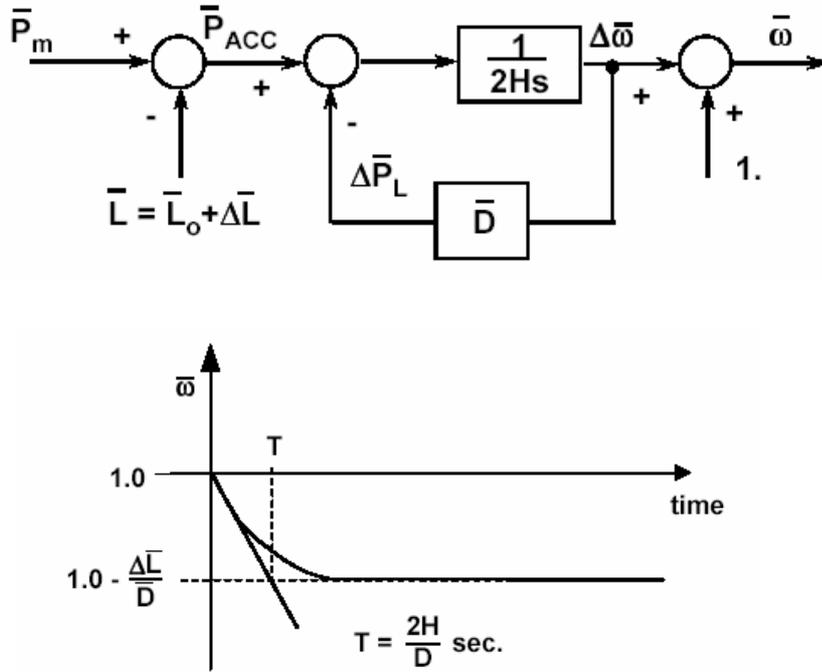


圖 5-4：負慣量和負載合成阻尼效應圖

調速機有兩種類型即恒速調速機(Isochronous Governor)及常態調速機(Normal Governor)或下垂式調速機(Droop Governor)。

恒速調速機於穩態下不斷動作使系統頻率(即轉速)回復為恰好 1p.u.，即穩態頻率誤差 Δf_{ss} 為零如圖 5-5，除非受到其閥門極限制或系統頻率已為額定頻率。若為獨立系統中，由單台恒速調速機(渦輪機)來調整其系統頻率將十分理想。但若系統中超過單台渦輪機，此恒速調速機將吸收全系統負載變化，限制其他渦輪機分擔負載變化之頻率調整。

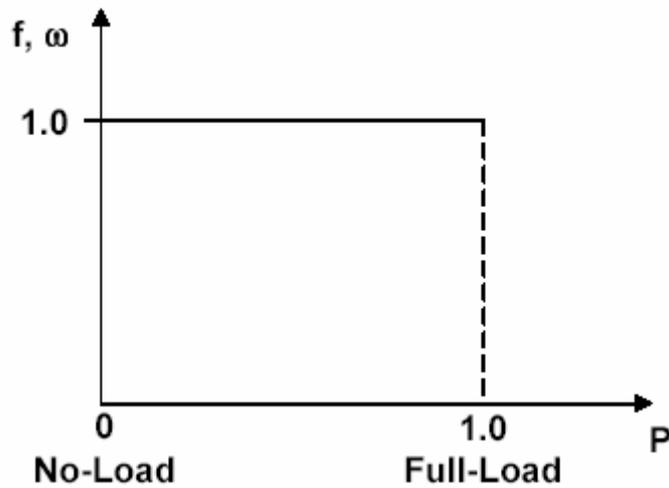


圖 5-5：恒速調速機之頻率與有效功特性

常態調速機(Normal Governor)或下垂式調速機(Droop Governor)之調整參數(Regulation Parameter) R 為

$$R = \Delta f / \Delta P \quad (\text{Hz/MW})$$

穩態 P - ω 之下垂(Droop)特性，由於比例(Proportional)控制動作產生有限的非零穩態頻率誤差 Δf_{ss} ，經由比例積分控制(PI-Control)藉由速度變更器(Speed Changer)改變其負載參考設定值(Load Reference Setting, L.R. Setting)之來消除如圖 5-6。

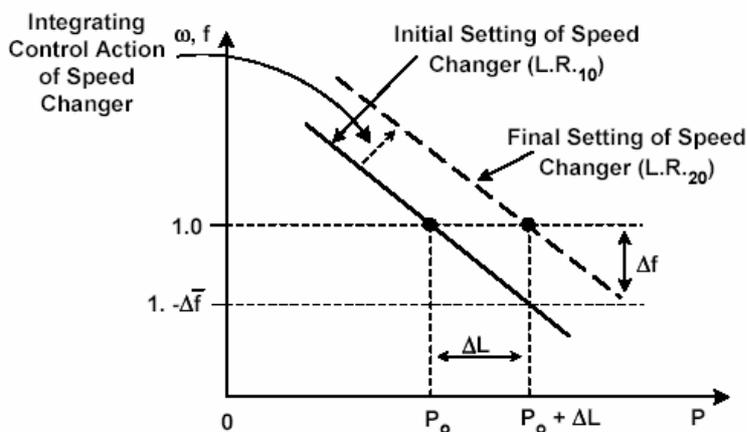


圖 5-6：下垂式調速機之特性曲線

電力系統有"N"部發電機裝置調速機，系統合成調速率為

$$1/R_{\text{sys}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_N \quad (\text{MW/Hz})$$

$$\text{系統頻率調整特性 } \beta = (1/R_{\text{sys}}) + D \quad (\text{MW/Hz})$$

$$\text{全系統之負載變化響應為 } \Delta f = -\Delta L / \beta$$

三、自動發電控制

自動發電控制 AGC(Automatic Generation Control)為一控制系統，其有下述三個主要目的：

- (一) 保持系統頻率在或非常接近特定額定值如 60Hz。
- (二) 維持控制區域間交換電力之正確值。
- (三) 維持每部發電機發電量於最經濟值。

獨立系統之自動發電控制之目標為全系統發電量滿足全系統負載量，以保持額定系統頻率，藉由主迴路控制(Primary Loop Control)之自然系統調整，即調速機和負載調整效應，控制動作所需時間約 8~10 秒，以及 AGC 或次迴路控制(Secondary Loop Control)或輔助控制(Supplementary Control)，次迴路控制總是追隨主迴路控制，控制動作所需時間約 1~2 分鐘，如圖 5-7。接著再執行系統經濟調度，分配各發電機組之出力，使其均在相等增量成本(Incremental Cost)下運轉。

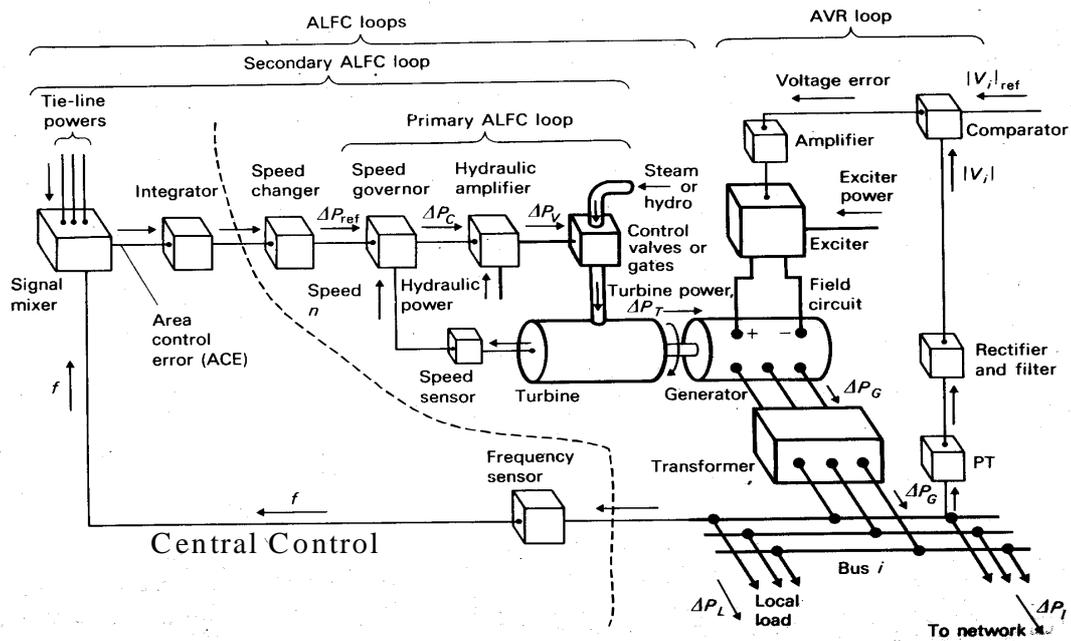


圖 5-7：自動發電控制迴路

區域控制誤差 ACE(Area Control Error)用以量度區域有效功率 MW

之需求，定義如下：

$$ACE = T - T_0 + \beta (f - f_0) \quad (\text{MW})$$

$$= \Delta T + \beta \Delta f$$

$$= \Delta G - \Delta L + \beta \Delta f$$

$$\beta = \beta_{\text{sys}} = (1/R_{\text{sys}}) + D \quad (\text{MW/Hz})$$

$\beta \equiv$ 控制區域之自然調整特性

$T_0 \equiv$ 排定連絡線淨交換電力

$T \equiv$ 實際連絡線淨交換電力

$f \equiv$ 實際系統頻率

$f_0 \equiv$ 排定系統頻率

實際上不可能知道區域自然調整特性之參數 β_{sys} ，故常採用其估

測參數 B，稱為頻率偏差係數(Frequency Bias Coefficient)。

$$B = B_{\text{sys}} \doteq \beta_{\text{sys}} = (1/R_{\text{sys}}) + D \quad (\text{MW/Hz})$$

$$\text{因此 } ACE = \Delta T + B\Delta f \quad (\text{MW})$$

一般而言,當 $ACE > 0$ 表是發電量過多, $ACE < 0$ 表是發電量不足, $ACE = 0$ 表是發電量符合負載, 隱含系統頻率等於排定系統頻率, 實際連絡線淨交換電力等於排定淨交換電力。

美國國家電力可靠度委員會 NERC(National Electric Reliability Council)之控制執行準則規定：

- (一) 系統正常狀態下,每十分鐘內 ACE 必須至少有一次回到零, ACE 十分鐘之平均值 da 應該小於或等於容許限制值 Ld , 即 $da \leq Ld$ (MW, 每年計算), 且 $Ld = 0.25 \Delta L + 5$ (MW), ΔL 為控制區域內當地最高夏季或冬季尖峰負載, 一天中最大負載時變量。
- (二) 當 ACE 信號超出 $3Ld$ 時, 表是一個干擾狀況發生, 系統處於異常狀態下, 控制區域之 ACE 於十分鐘內必須回到零, AGC 之矯正動作必須於干擾發生一分鐘內即將出現。

兩個互聯控制區域如圖 5-8, 連絡線上電力潮流為 T_1 、 T_2 , 當區域二之負載增加 ΔL 或發電量跳脫時, 其區域控制誤差為：

$$ACE_1 = \Delta T_1 + B_1 \Delta f \quad (\text{MW})$$

$$ACE_2 = \Delta T_2 + B_2 \Delta f \quad (\text{MW})$$

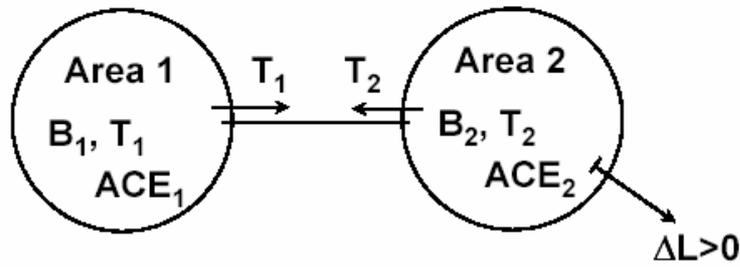


圖 5-8：兩個互聯控制區域圖

連絡線之淨交換為 $T_1 + T_2 = 0$ 即 $\Delta T_1 + \Delta T_2 = 0$

1. 當系統調速已動作，但於 AGC 動作前，則

$$\Delta f = -\Delta L / (\beta_1 + \beta_2)$$

$$\Delta P_{G1} = -(1/R_1) \Delta f \quad , \quad \Delta P_{G2} = -(1/R_2) \Delta f$$

$$\Delta P_{L1} = D_1 \Delta f \quad , \quad \Delta P_{L2} = D_2 \Delta f$$

$$\Delta T_1 = \Delta P_{G1} - \Delta P_{L1} = -\beta_1 \Delta f$$

$$\Delta T_2 = \Delta P_{G2} - \Delta L - \Delta P_{L2} = -\beta_2 \Delta f - \Delta L$$

$$\Delta T_1 = -\Delta T_2$$

2. 接著 AGC 矯正動作發生後：

(1). 若區域二中有足夠發電量(備轉容量)供應其負載增加

時：

$$ACE_1 = 0 \quad , \quad ACE_2 = 0$$

$$\Delta P_{G1} = 0 \quad , \quad \Delta P_{G2} = \Delta L$$

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = 0$$

$$f = f_0$$

- (2). 若區域二中無足夠發電量(備轉容量)供應其負載增加時：

$$ACE_1 = 0$$

$ACE_2 \neq 0$ (發電量將增至最大值，但 ACE_2 將無法回到零)

系統頻率將下降，造成 P_{L1} 、 P_{L2} 減少(由於負載阻尼效應 D)及增加 P_{G1} 以使 $ACE_1 = 0$ 。穩態狀態可由下兩式決定，

$$ACE_1 = \Delta T_1 + B_1 \Delta f = 0$$

$$\Delta L - \Delta P_{G2} = \Delta T_1 - D_2 \Delta f$$

求解上兩式得到 Δf 和 ΔT_1 如下：

$$\Delta f = -(\Delta L - \Delta P_{G2}) / (B_1 + D_2)$$

$$\Delta T_1 = -B_1 \Delta f$$

故系統頻率 f 、連絡線潮流 T_1 、新的負載及發電量計算如下：

$$f = f_0 + \Delta f$$

$$T_1 = T_{10} + \Delta T_1$$

$$P_{L2} = P_{L20} + D_2 \Delta f \quad (P_{L20} = L_0 + \Delta L)$$

$$P_{L1} = P_{L10} + D_1 \Delta f$$

$$P_{G1} = P_{L1} + T_1$$

增加區域一之頻率偏差係數 B (Frequency Bias Coefficient) 可增加由區域一流向區域二(負載增加 ΔL) 之連絡線潮流。

四、火力機組經濟調度

一般而言，「經濟調度」考慮在某一時刻負載，僅對已在「線上」(on-line) 或「委派」(committed) 的火力機組，使其 production cost 最小，並滿足總發電量等於總負載及線路損失 MW 之和，且使每部發電機之發電量在其運轉限制中，且不考量機組的 start-up 及 shut down 成本，亦不考量 spinning reserve。「經濟調度」並不含水力及核能機組，火力與水力機組合併時，稱「水火協調」。

不考慮輸電線路損失時，即 $P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_{LOAD}$ ，應用拉格朗日函數(Lagrange function)，將總燃料成本 $FT = F_1 + F_2 + \dots + F_n$ 極小化得到 $dF_1/dP_1 = dF_2/dP_2 = \dots = dF_n/dP_n = \lambda$ ，表示最佳值發生在每部機組之遞增成本相等時。

F_n ：第 n 部機組輸入之燃料成本，\$/hr

P_n ：第 n 部機組輸出，MW

λ ：拉格朗日乘數(Lagrange multiplier)，其意義為當全系統負載增加一個單位時，整個成本增加多少 \$/hr。考慮輸電線路損失時，即 $P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_{LOAD} + P_{LOSS}$ ，應用拉格朗日函數(Lagrange function)，將總燃料成本 $F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_n$ 極小化得到

$$\begin{aligned} (dF_1/dP_1) [1/1 - (\alpha P_{LOAD}/\alpha P_1)] &= (dF_2/dP_2) [1/1 - (\alpha P_{LOAD}/\alpha P_2)] = \dots \\ &= (dF_n/dP_n) [1/1 - (\alpha P_{LOAD}/\alpha P_n)] = \lambda \end{aligned}$$

$L_n = 1/1 - (\alpha P_{LOAD}/\alpha P_n)$ 表示第 n 部機組之罰懲因素 (penalty factor)。

上式表示最佳值發生在每部機組之遞增成本乘上其罰懲因素 (penalty factor) 相等時。

$\alpha P_{LOAD}/\alpha P_n$ 為一個很小的正數或很大的負載數稱為遞增輸電損失， $\alpha P_{LOAD}/\alpha P_n > 0$ ，即 $L_n > 1$ 表示當 P_n 增加時， P_{LOAD} 亦增加此 P_n 應離負載中心較遠， dF_n/dP_n 應減少， P_n 應少發電。

五、最佳化電力潮流

最佳化電力潮流定義為電力輸電系統中一些受到條件約束的靜態規劃計算之泛稱，易言之，一個決定電力系統最佳穩定運轉之狀況，並且滿足電力潮流方程式及其他運轉限制式之問題，已有許多求解方法存

在，均有其特殊數學的和計算的特性。但對新的控制中心其規範極其普通，有些要求一種以上方法，但缺乏適當的單一 OPF 方法。以數學模型描述如下：

$$\begin{aligned} \text{Min } & f(x, u) \\ \text{s. t. } & g(x, u) = 0 \\ & h(x, u) < 0 \end{aligned}$$

其中 u 為控制(獨立)變數向量

x 為狀態(相依)變數向量

$f(x, u)$ 為目標函數

$g(x, u)$ 為等式限制式向量

$h(x, u)$ 為不等式限制式向量基本 OPF 程式具備以下能力：

(一) 目標函數：

-發電成本極小化

-發電成本和融通交易極小化

-選定區域內輸電有效功率損失極小化

-選定區域內輸電無效功率損失極小化

-控制變數偏移極小化

-控制偏移數目極小化

-投入並聯無效電力裝置極小化

(二) 控制變數：

- 有效功率產生
- 變壓器分接點
- 有效功率融通交易
- 發電機端電壓大小
- 發電機無效功率
- 並聯電容器和電抗器
- 同步電容器
- 高壓直流互聯中有效功率
- 負載卸除

(三) 不等式限制式向量

- 匯流排電壓大小
- 輸電線路潮流(AMPS、MVA、MW、MVARs)
- 變壓器分接點
- 區域之群間有效和無效電力交換
- 任何發電機群之有效和無效電力備轉量
- 任何群的幹線上有效和無效電力潮流之和
- 發電機無效電力輸出
- 控制調整之容許時間

(四) 等式限制式向量

- Kirchhoff' s 電路定律

-固定變數

(五) 求解方式

-線性規劃法 (LP)

-假牛頓法 Quasi-Newton (NLP)

-牛頓法 Newton (NLP)

-內部點法 Interior Point (NLP)

-基因演算 Genetic Algorithm (NLP, IP)

最佳化電力潮流 OPF 比一般電力潮流 PF 多了 $f(x,u)$ 及 $h(x,u) \geq 0$ 之限制條件。一般而言，OPF 為一個非線性最佳化問題，但 OPF 可以被線性化，且嚴格來講，OPF 是不分控制及狀態變數。

第六章 電力公用事業工程經濟

一、概論

現代電力工程師完全依賴技術層面決策是不足夠的，尚需考量投資成本、投資報酬率、多少收益值得投資、投資回收期長短、對公司每股收益...等，可利用現金流動法(Cash Flow Approach)來分析，即藉由在每個時段內，資金收入和支出比較至少兩個以上替代方案，最重要是現金流動差異性，相同的成本或收益並不重要。

決策過程中選用經濟準則有回收時段法(Payback Period Method)、現值法(Present Worth Method)、年值法(Annual Worth Method)、未來值法(Future Worth Method)、投資報酬率法(Rate-of-Return Method)、利潤與成本比率(Benefit/Cost Ratio) ...等。視考量情況選用不同經濟準則，如有時採用回收時段法係考慮現金危機及需要滿意的短期效益，而忽略收入偏離回收期、資金時值、物價上升率等因素。

二、財務數學工具

如何將資金以利率 i 計算而在時間上移動，將可得到現值(Present Worth)、未來值(Future Worth)、等值年金(Levelized Annuity)，相關計

算方式如下：

- (一) 複利(Compound)表示當年利率為 i 時，現值 P 元等值於未來第 n 年金額 F ，即 $F=P(1+i)^n = P(F/P i, n)$ 。
- (二) 折現(Discount) 表示當年利率為 i 時，未來第 n 年金額 F 等值於現值 P 元，即 $P=F/(1+i)^n = F(P/F i, n)$ 。
- (三) 複利年金(Compounding an Annuity)相等期間內之期末如年、季、月、星期，均於有相等之付款 A 元，未來第 n 年總金額 F ，即 $F=A[(1+i)^n-1]/i=A(F/A i, n)$ 。
- (四) 年金複利(Annuity to be Compounded) 未來第 n 年總金額 F ，等值前 n 年每年之付款年金 $A=F i/[(1+i)^n-1] = F (A / F i, n)$ 。
- (五) 年金之現值(Present worth of Annuity) 共 n 年每年之付款年金 A ，等值於現年之現值 $P=A[(1+i)^n-1]/i(1+i)^n=A (P/A i, n)$ 。
- (六) 現值之等效年金(Annuity Equivalent to Present Value) 現值之等效未來年金 $A=P i(1+i)^n/[(1+i)^n-1] = P(A / P i, n)$ 。
- (七) 均勻變化量(Uniform Gradient)固定期間內對一已知固定資金 A 之每年增加或減少 G ，其等效現值 $P''=[1/(1+i)^n][G/i]\{[(1+i)^n-1]/i-n\}$ 。
- (八) 幾何數列(Geometric Series) $A_k=A_{k-1}(1+j)$ ，其中 A_1 表幾何數列中第一年資金流動之大小，其後續每年增加 $(1+j)$ 倍，則其現值 $P=A_1\{1-[(1+j)/(1+i)]^n\}/(i-j)$ ，其 n 年後資金 $F=P(1+i)^n$ ，

亦可求等效未來年金 A。

三、折舊和資本回收

折舊 (Depreciation) 是保留投資者資金之價值的方法，即 $\text{Depreciation} = \text{return of investment}$ ，原投資者資金已被折舊保留金所預留回本。折舊計算方式如下：

- (一) 帳面折舊(Book Depreciation)或稱為直線折舊，折舊率為該設備壽命年限之倒數，其每年折舊相等金額，淨設備價值逐年遞減至零，提列折舊保留金總額逐年遞增至原投資金額。
- (二) 再投資之帳面折舊(Book Depreciation with Reinvestment)每年將折舊保留金再投資，使淨設備價值每年均維持與原投資金額相等。當該設備退休時，將分別從原成本帳目及折舊保留金中移除該設備項目，當該設備已完全被折舊但尚未退休，保留其在帳面上價格，但不再提列折舊保留金。
- (三) 帳面折舊含殘值(Book Depreciation With Salvage) 殘值等於剩餘價值扣減移除設備成本，可能為正值如報廢銅線輸電線，亦可能為負值如退休核能電廠。折舊回收成本不回收或扣除殘值。

資本回收(Capital Recovery)表示於設備壽命年限內支付使用資本費用加上原投資回收之折舊，資本回收因數(Capital Recovery Factor)為 $(A/P)_{i,n} = i + (A/F)_{i,n} = \text{return on investment} + \text{return of}$

investment。資本回收可由會計觀點及工程經濟觀點分別計算如下：

(一) 會計觀點：

其資本回收之現值稱為 X 型 (Form X) 如圖 6-1。

Capital Recovery (P.W.)

$$= \sum \text{ALL } X [i (P_X - D_X) + (P_X / \text{LIFE})] (P/F i, X)$$

其中 X = 典型期間

PX = 期間 X 內之殘值

DX = 折舊保留金(期間 X 之開始)

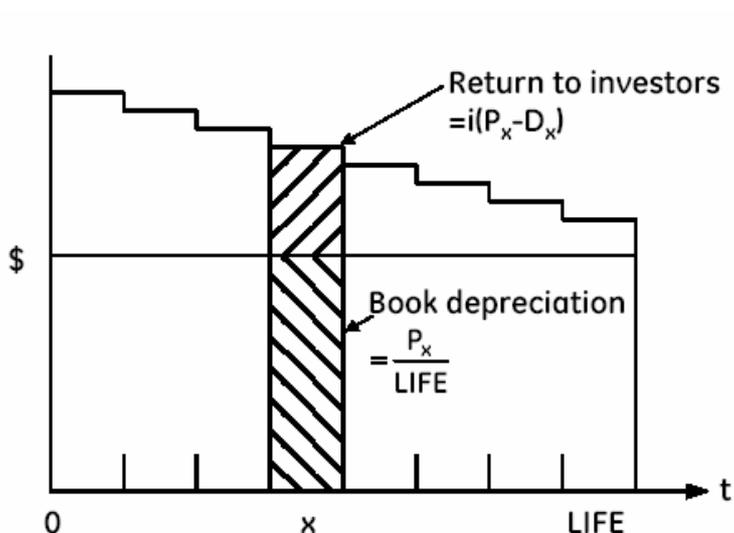


圖 6-1：會計觀點之資本回收

(二) 工程經濟觀點：

其資本回收之現值稱為 Y 型 (Form Y) 如圖 6-2。

Capital Recovery (P.W.)

$$= \sum \text{ALL } X [i + (A/F i, n)] P_X (P/F i, X)$$

其中 X = 典型期間

PX = 期間 X 內之殘值

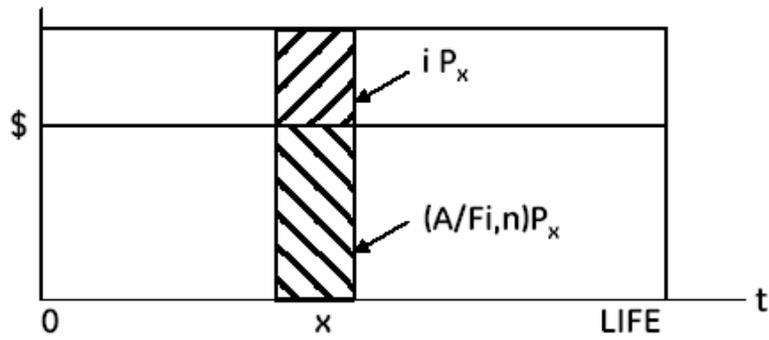


圖 6-2：工程經濟之資本回收

四、多重交替方案之比較

經濟分析係在一些假設條件下，求得未來運作之結果，有以下兩種經濟分析方式：

- (一) 推論分析法(Inferred Analysis)：假設一個報酬率(MAR)和計算收益需求，由歷史資料顯示公用事業較喜歡採用。
- (二) 真實分析法(Actual Analysis)：預估收益和計算報酬率，無管制工業較喜歡採用。

收益方程式為 $R = O\&M + D + TP + Ti + I + E$ ，其中 R 表示收益 (Revenue)，O&M 表示維修費用，D 表示賬面折舊，TP 表示資產稅，Ti 表示收入稅，I 表示借貸利率，運作收入(Operating Income)等於 $R - (O\&M + D + TP + Ti)$ ，淨收入(Net Income)等於 $R - (O\&M + D + TP + Ti + I)$ ，純資產值收益(Equity Return) $E = R - (O\&M + D + TP + Ti + I)$ ，利用收益方程式計算對投資上或投資的回收，可利用 $E + I + D = R -$

(O&M + TP + Ti)。

純資產值投資報酬率方法(Rate of Return on Equity Approach)係對收益方程式計算純資產值收益 $E = R - (O\&M + D + TP + Ti + I)$ ，依據投資報酬率來作決策，如其能產生更多利潤或報酬率高於其他投資案。

收益需求方法(Revenue Requirements Approach) 係對收益方程式計算收益 $R = O\&M + D + TP + Ti + I + E$ ，需先估計 I 及特別是 E，決策選定係採用最低收益需求且能達到相同功能。等號右邊除了 O&M 項外，若均能被表示成或轉為成本投資之函數，則收益需求方法轉變成固定費率方法(Fixed Charge Rate Method)，

$$R = O\&M + F \text{ (Capital Investment)}$$

$$\text{或 } R = O\&M + (FE + FI + FD + FTP + FTi) P$$

其中 P = 首次成本投資

$$FE + FI = \text{收益(MAR)}$$

$$FD = \text{Sinking Fund Factor}$$

$$FTP = \text{資產稅率}$$

$$FTi = \text{收入稅率為成本費用的百分率}$$

雖然上述兩種方法過去成對立，但均可被簡化成採用收益方程式來分析，每一方法應該提供相同之決策，在特定情況下採用適當方法。