

行政院及所屬各機關出國報告

(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

出國人職 稱：電機工程監

姓 名：徐 宜 文

出國地區：美國

出國期間：91.9.3~92.4.20

報告日期：92.6.3

43 / 109104702

## 行政院及所屬各機關出國報告提要 C09104702

出國報告名稱：赴美國參加美國奇異公司電力系統工程班

頁數 71 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：

徐宜文/台灣電力公司/系統規劃處/電機工程監/2366-7743

出國類別：1.考察 2.進修 3.研究 4.實習 5.其他

出國期間：91年9月3日~92年4月20日 出國地區：美國

報告日期：92年6月3日

分類號/目

關鍵詞：電力系統工程班(PSEC)、發電 (GENERATION)、運轉 (OPERATION)、控制(CONTROL)、穩定度(STABILITY)、保護電驛(PROTECTION RELAY)、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課程分成四大部分：一、輸電分析和規劃，二、進階電力系統主題，三、規劃和運轉策略，四、工業和配電系統應用。

其中與系統規劃和運轉有關之一些重要觀念，如發電機在不同功因下出力限制、輸電線路載流量與電壓分佈情形、負載特性模型與電壓與頻率關係、斷路器非對稱遮斷能力、汽輪機、氣渦輪機、複循環機組、汽電共生系統、系統運轉之有效及無效功率控制、自動發電控制、火力機組之經濟調度、最佳電力潮流、暫態及小信號穩定度及改善方法、保護電驛系統之動作原理、及電力公用事業工程經濟。

由電力系統元件之特性擴展至系統運轉與控制，並導入保護電驛系統之觀念及穩定度等主題，構成整體電力系統之概念。

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

## 報告內容

一、出國緣由與目的 .....	1
二、出返國行程 .....	2
三、心得與建議 .....	3
四、電力系統元件特性 .....	7
4-1 發電機容量曲線特性 .....	7
4-2 輸電線路特性 .....	8
4-3 負載特性 .....	9
4-4 斷路器 .....	10
五、渦輪機 .....	12
5-1 熱力學基本原理 .....	12
5-2 汽輪機 .....	13
5-3 氣渦輪機 .....	16
5-4 複循環系統 .....	19
5-5 汽電共生 .....	20
六、系統運轉控制 .....	26
6-1 負載和轉速控制調速特性 .....	27
6-2 自動發電控制 .....	31

6-3 火力機組經濟調度 .....	37
6-4 最佳化電力潮流 .....	38
七、穩定度 .....	42
7-1 暫態穩定度 .....	42
7-2 小信號穩定度 .....	45
7-3 穩定度改善對策 .....	47
八、保護電驛 .....	49
8-1 保護電驛基本原則 .....	49
8-2 過電流電驛 .....	50
8-3 測距電驛 .....	51
8-4 差電流電驛 .....	52
8-5 載波電驛系統 .....	53
8-6 方向比較閉鎖電驛系統 .....	54
8-7 允許越區轉移跳脫電驛系統 .....	55
九、電力公用事業工程經濟 .....	56
9-1 財務數學工具 .....	56
9-2 折舊和資本回收 .....	58
9-3 多重交替方案之比較 .....	60
十、參考文獻(攜回資料) .....	63

## 圖目錄

圖 4-1 發電機容量特性曲線圖 .....	7
圖 4-2 輸電線路電壓與 SIL 關係圖 .....	8
圖 4-3 輸電線路載流能力曲線圖 .....	9
圖 5-1 蒸汽和電力循環之四個基本部分 .....	14
圖 5-2 蘭金循環(Rankin Cycle) .....	15
圖 5-3 氣渦輪機循環 .....	17
圖 5-4 勃朗登循環(Brayton Cycle) .....	17
圖 5-5 複循環系統 .....	19
圖 5-6 頂端循環 .....	20
圖 5-7 底部循環 .....	21
圖 5-8 汽輪機循環之汽電共生系統 .....	24
圖 5-9 氣渦輪機循環之汽電共生系統 .....	25
圖 6-1 電力系統和控制概要圖 .....	26
圖 6-2 發電機慣量效應 .....	28
圖 6-3 負載之頻率響應圖 .....	29
圖 6-4 慣量和負載合成阻尼效應 .....	29
圖 6-5 恒速調速機之頻率(轉速)與有效功率特性 .....	30

圖 6-6 下垂式調速機之特性曲線.....	31
圖 6-7 發電機基本迴路控制.....	32
圖 6-8 兩個互聯控制區域.....	34
圖 8-1 階段時限動作協調關係圖.....	51
圖 8-2 發電機繞組之差電流保護接線圖.....	52
圖 8-3 方向比較閉鎖式載波電驛系統圖.....	54
圖 8-4 允許越區轉移跳脫電驛圖.....	55
圖 9-1 會計觀點之資本回收.....	59
圖 9-2 工程經濟觀點之資本回收.....	60

## 一、出國緣由與目的

發輸變電工程因遭抗爭大多無法如期加入系統，如何強化既有電力系統以滿足自然成長之負載需求，順應電業自由化及公司民營化，均造成電力系統規劃、設計、運轉之重大轉變。

赴美國參加奇異公司電力系統工程班，接受美國奇異公司專家們指導，並與其他國家受訓學員交換經驗及技術，吸收最新電力系統技術與經驗，提昇電力系統規劃技術，以強化本公司電力系統運轉能力，乃是此次出國目的。

## 二、出返國行程

### (一) 去程：

- 91/9/3 台北 TAIPEI(18:20) → 紐華克 NEWARK(22:50)
- 91/9/4 紐華克 NEWARK (12:05) → 奧爾巴尼  
ALBANY(13:05) → 斯堪那特提 SCHENECTADY(GE 公司)

### (二) 受訓：

- 91/9/5 ~ 92/4/17 參加美國奇異公司電力系統工程班

### (三) 返程：

- 92/4/18 斯堪那特提 SCHENECTADY(GE 公司) → 奧爾巴尼  
ALBANY(17:20) → 紐華克 NEWARK (18:20)
- 92/4/18 紐華克 NEWARK (23:59) → 92/4/20 台北 TAIPEI  
(07:30)



### 三、心得與建議

- (一) 借鏡日、韓員工跨處間輪調工作：此次受訓與日、韓公司學員交換工作經驗，深深體會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，要達到此目的員工之輪調工作是最有效方法。輪調工作不僅是自己單位各課間輪調，更要跨處間輪調，使員工接觸相關工作性質或甚至完全不同領域工作，將不致產生職業倦怠感，如規劃人員若能具備調度運轉或供電維護工作經驗，或財務會計觀念，將更能激發員工終生學習之意願，提昇公司整體營運績效，特別是當有特殊緊急突發事故發生，員工間工作替代性較高，不致仰賴少數專業性較高員工，如 SARS 風暴之隔離措施，將不致造成人員調度發生困難，可增加公司之應變能力。最近公司單位副主管之間已有跨處間調動，至於基層、中階員工輪調尚有待規劃。
- (二) 同仁結伴受訓，學習效果加倍：此次受訓學員中，日本有七人、韓國及委內瑞拉各有四人，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，食衣住行生活起居需自行料理，若有同仁結伴受訓相互幫忙和諮商，除專業知識上切磋，精神上較

不感寂寞而思鄉，將可得到更佳學習效果。

(三) 發電機功因 0.95 進相運轉能力：六輸計畫中新建大量之 345kV 與 161kV 地下電纜，為吸收其所產生系統中過多無效電力以防止系統電壓偏高，除藉由裝設固定容量之電抗器吸收外，當系統輕載時，為避免藉停用輸電線路而影響供電可靠度，或系統發生重大事故時，發電機可提供調節無效電力之最後一道防線，可考慮發電機採進相運轉方式，目前本公司尚無此運轉經驗。因發電機有反應快速、成本低且彈性吸收系統無效電力之優點，是否於採購規範及輸電系統規劃準則中增訂發電機功因 0.95 進相運轉，另電廠運轉人員亦需累積或與國外公司交換發電機採進相運轉技術及經驗，以及既設機組先行測試進相運轉能力...等，均值得進一步深入探討。

(四) 定期及不定期方式檢驗汽電共生用戶之熱效率：一般而言，複循環系統效率為 40%~50%，汽電共生系統效率高達約 80%，其間差異在於汽電共生系統將複循環系統消耗在冷凝器之熱量損失轉換成工業製程所需蒸氣之形式以達到冷凝器之效果。若汽電共生用戶未對該蒸氣充分利用於工業製程中而排放掉或改變汽電共生系統製程，其熱效率計

算將不得將產出蒸氣納入熱效率計算中，該熱效率將無法達規定值，不可視為合格汽電共生系統，即不可享受獎勵辦法之優惠躉受電價。所以應建請主管機關會同本公司人員，以定期及不定期方式檢驗汽電共生用戶之熱效率。

(五) 有效抑制故障電流對策：隨著負載自然成長，電廠和輸電線路不斷擴增，電力系統中之故障電流亦隨之變大，目前本公司已採用世界上所能購得最大遮斷容量之斷路器，當三相故障電流計算值接近此值時，必須設法抑制。傳統方法不外乎改接、旁通線路、匯流排分開運轉，或停用線路方式，近年來更改採較高阻抗值 17%自耦變壓器及 19%昇壓變壓器。當抑制故障電流效果漸趨飽和時，或許採用背對背高壓直流(Back-to-Back HVDC)設備裝置於北部地區新建大型電廠內是一個值得思考的方向。雖該設備昂貴，但其優點有穩定電力網路、隔絕擾動使其不影響其他區域、可控制線路潮流、抑制系統之故障電流，使輸電線路規劃不受到故障電流限制而更佳化。

(六) 動態穩定度(Dynamic Stability)問題：一般而言，穩定度檢討以系統分別受到大擾動和小擾動後之響應，分類成暫態穩定度(Transient Stability)和小信號穩定度(Small Signal

Stability), 但將大擾動後之小擾動所引起系統低頻振盪響應特性一併考量, 稱為動態穩定度。受到大擾動(如三相故障)之第一擺動之暫態穩定度雖然穩定(Stable), 但過渡轉移至新的運轉點上(如線路跳脫以清除故障), 由於系統阻尼不足所引發小信號穩定度問題亦需注意。

- (七) 電力系統穩定器(PSS)參數調整：當系統網路結構有重大改變或大型新電廠加入, 為使電力系統穩定器發揮正常功能以確保小信號穩定度, 應重新檢視既設電力系統穩定器安裝地點是否恰當, 汰換或增加電力系統穩定器, 且必須調整既設電力系統穩定器之參數。

## 四、電力系統元件特性

電力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，其間電力系統元件重要的特性分述如下：

### 4-1 發電機容量曲線特性

於電壓穩定度和長時間(Long Term)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(通常為 0.85 或 0.9)，同步機之額定輸出為在 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 4-1 受到下列三個因素限制：

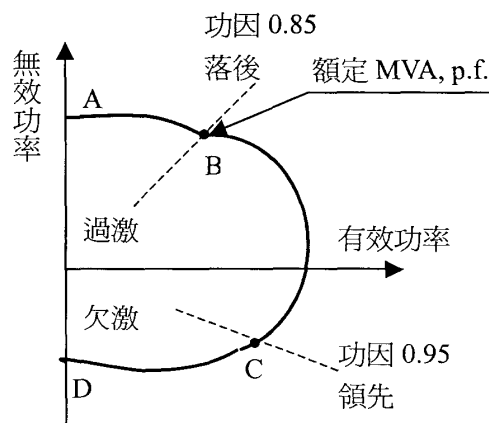


圖 4-1 發電機容量特性曲線圖

1. 電樞電流限制：電樞電流之損失  $I^2R$  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 4-1 之 BC 段曲線。
2. 磁場電流限制：對一特定之場電流，有效和無效功率關係為一圓，其圓心為  $-Et^2/X_s$  及半徑徑為  $(X_{ad}/X_s)Et i_{fd}$ ，如圖 4-1

之 AB 段曲線。

3. 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。

#### 4-2 輸電線路特性

當輸電線路之充電電流產生之無效功率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功率，亦不提供系統無效功率，為一平直之電壓趨勢，全線上之電壓和電流同相且維持定值，不同 SIL 值對應之電壓趨勢如圖 4-2

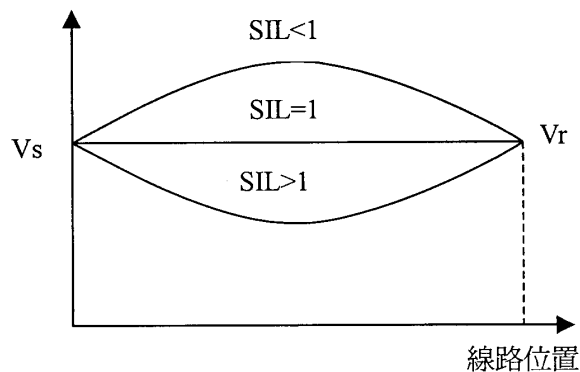


圖 4-2 輸電線路電壓與 SIL 關係圖

輸電線路傳送電力之載流能力與線路長度與電壓等級有關，如圖 4-3，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。

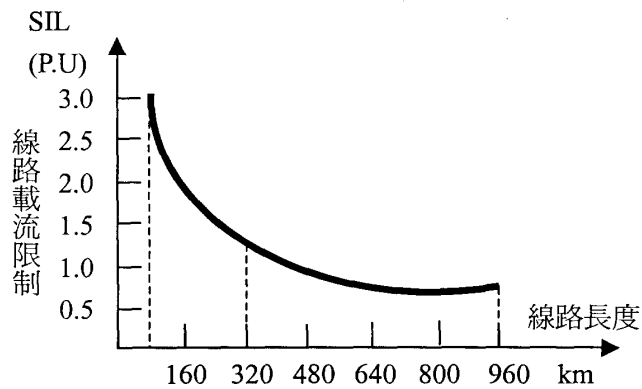


圖 4-3 輸電線路載流能力曲線圖

#### 4-3 負載特性

電力系統中消耗電力的元件種類及數量繁多，故將其簡化為等效負載，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：

$$P = P_0 (a_1 + a_2 V + a_3 V^2)$$
$$Q = Q_0 (a_4 + a_5 V + a_6 V^2)$$

$a_1 \cdot a_4$ ：定功率負載比例

$a_2 \cdot a_5$  : 定電流負載比例

$a_3 \cdot a_6$  : 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，電力系統中全部電能之 60%~70% 為電動機所消耗，所以系統動態特性受負載特性之影響部份主要為電動機之動態特性，故常將負載之動態模型以感應電動機模型來表示。

#### 4-4 斷路器

電力系統發生故障時，必需藉由斷路器打開以隔離故障，使系統受到最小衝擊，保護設備及人員安全，故斷路器遮斷容量之大小關係其啟斷故障之能力。

斷路器之遮斷能力可分為對稱遮斷電流能力與非對稱遮斷電流能力，其銘牌上之 40kA (69kV 斷路器)、50kA (161kV 斷路器)、63kA (345kV 斷路器) 分別表示斷路器之對稱遮斷電流能力。

斷路器非對稱遮斷電流能力 = 對稱遮斷電流能力 \* 非對稱遮斷能力乘數

非對稱遮斷能力乘數分別等於 1.1 (69kV 斷路器)、



1.2(161kV 斷路器)、1.3(345kV 斷路器)。

計算所得之系統三相短路故障電流為對稱值，若由故障點看入系統之等效  $X_e/R_e > 17$ ，依據 ANSI/IEEE C37.010-1999 規定其非對稱三相短路故障電流 = 計算之對稱短路電流值 \* 直流效應乘數，用以核對斷路器之非對稱遮斷能力是否足夠，即

1. 斷路器對稱遮斷電流能力 \* 斷路器非對稱遮斷能力乘數

> 計算之對稱短路電流值 \* 直流效應乘數。

2. 斷路器對稱遮斷電流能力

> 計算之對稱短路電流值 \* (直流效應乘數 / 斷路器非對稱遮斷能力乘數)。

3. 斷路器對稱遮斷電流能力

> 計算之對稱短路電流值 \* 乘數因數。

4. 乘數因數 = 直流效應乘數 / 斷路器非對稱遮斷能力乘數，乘數因數為大於或等於 1.0。

由上述計算式得知，當利用計算之對稱短路電流值乘以乘數因數須小於斷對稱遮斷電流能力時，其效果實際上已核對了斷路器對稱和非對稱遮斷電流能力。

## 五、渦輪機

過去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快速變遷，面臨一些獨立發電業者(IPP)及汽電共生業者競爭，如美國於1991年獨立發電業者首次超出電力公司提供較多新增發電量加入系統，1994年IPP提供61%當年新增發電量且於1990年至1994年期間提供58%新增總發電量加入電力系統。

故需進一步去了解獨立發電業者及汽電共生業者電力生產原動機之原理及各種組態，典型例子如製紙工廠之無冷卻器汽輪機循環，化工廠之氣渦輪機廢熱回收之汽電共生系統及獨立發電業者複循環系統。亦可應用於改進對本公司機組運轉效能，或評估選用新增機組原動機多樣選擇。

### 5-1 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)。

## 5-2 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 5-1，圖中狀態(1)為低壓之水經給水幫浦加壓至狀態(2)，功( $W_a$ )被加入循環，狀態(2)至狀態(3)中熱( $Q_a$ )被加至鍋爐以形成超熱蒸汽，狀態(3)至狀態(4)中蒸汽在汽輪機中膨脹，產生有用之功( $W_r$ )，狀態(4)至狀態(1)蒸汽在冷卻器中冷凝釋出熱( $Q_r$ )後送回給水幫浦。

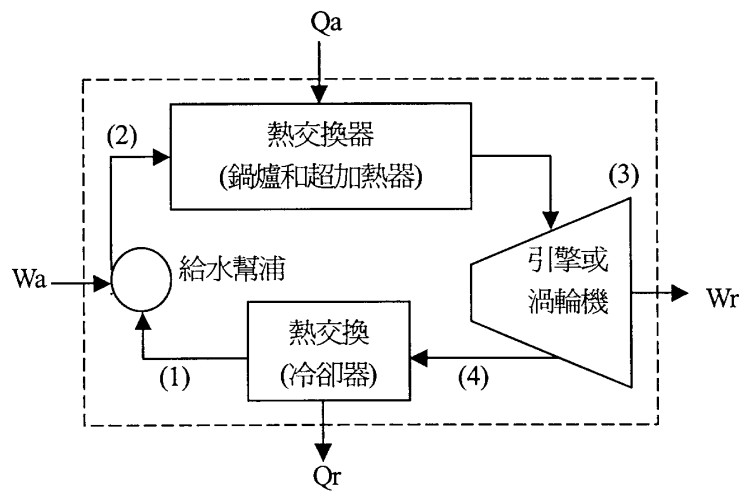


圖 5-1 蒸汽和電力循環之四個基本部分

汽輪機之蘭金循環(Rankin cycle) 如附圖 5-2，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 4-1 所組成的可逆循環。

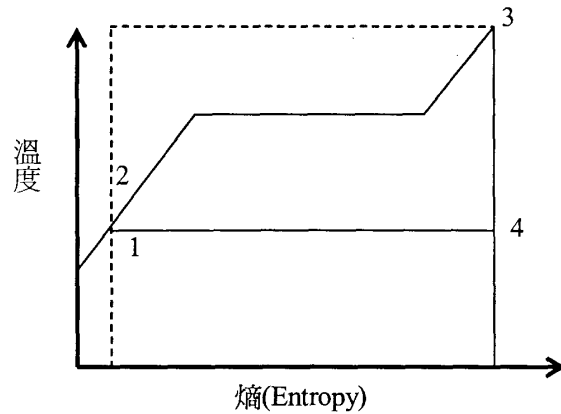


圖 5-2 蘭金循環(Rankin cycle)

蘭金循環的效率為

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

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  $EFF = 619/1400.4 = 44.2\%$ 。

改善汽輪機效率可由下述方式：

1. 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。

2. 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。
3. 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。
4. 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%。

### 5-3 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  $400\sim 550^{\circ}\text{C}$ )，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 5-3。

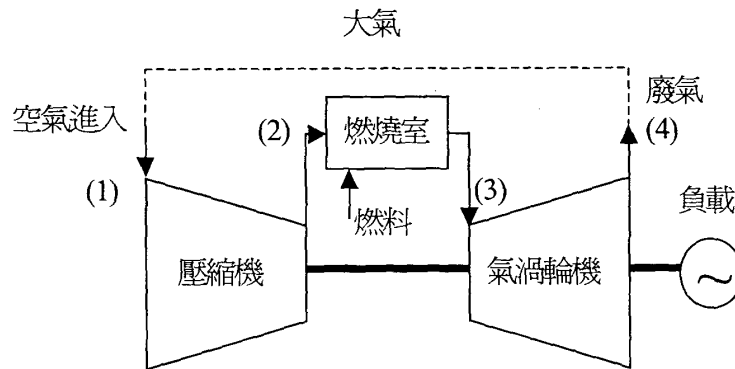


圖 5-3 氣渦輪機循環

氣渦輪機之勃朗登循環(Brayton Cycle)在壓力-體積( $P-V$ )圖  
 和溫度-熵( $T-S$ )圖表示如圖 5-4，其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。

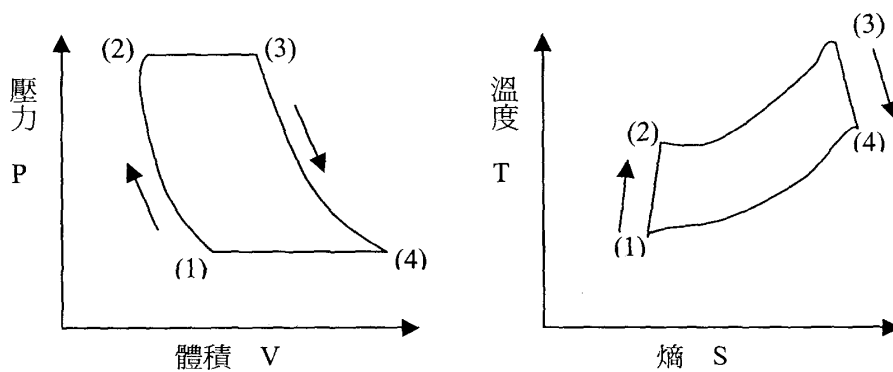


圖 5-4 勃朗登循環(Brayton Cycle)

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：

1. 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 氣渦輪機膨脹作功，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。
2. 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。
3. 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。

#### 5-4 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 5-5，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。

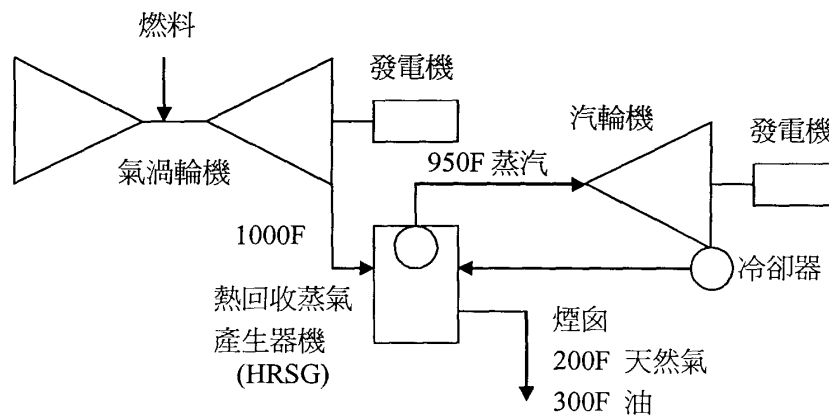


圖 5-5 複循環系統

全球能夠建造天然氣複循環發電機的主要廠商，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。

## 5-5 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 5-6。

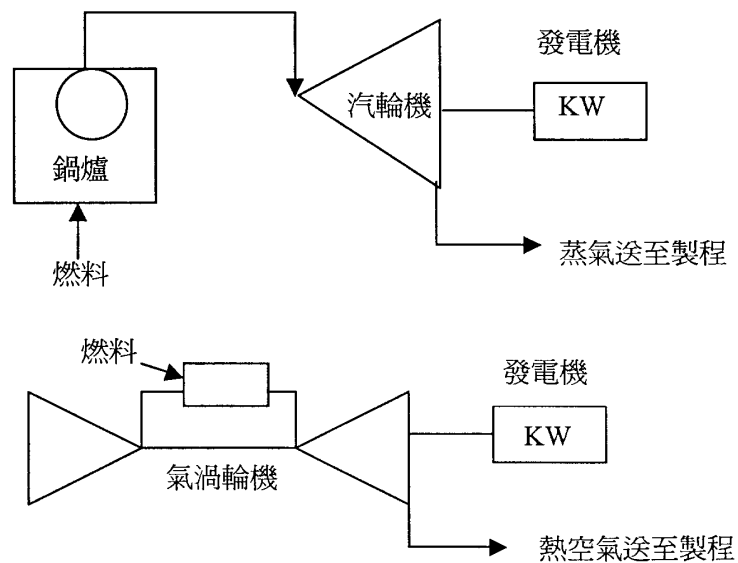


圖5-6 頂端循環

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 5-7。

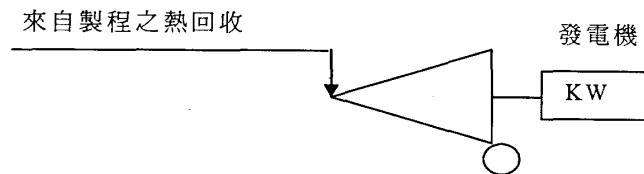


圖 5-7 底部循環

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

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。

$$FCP=(\text{Fuel2}-\text{Fuel1})/[(\text{KW2}-\text{AUX POWER2})-(\text{KW1}-\text{AUX POWER1})]$$

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：

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 5-8 和圖 5-9。

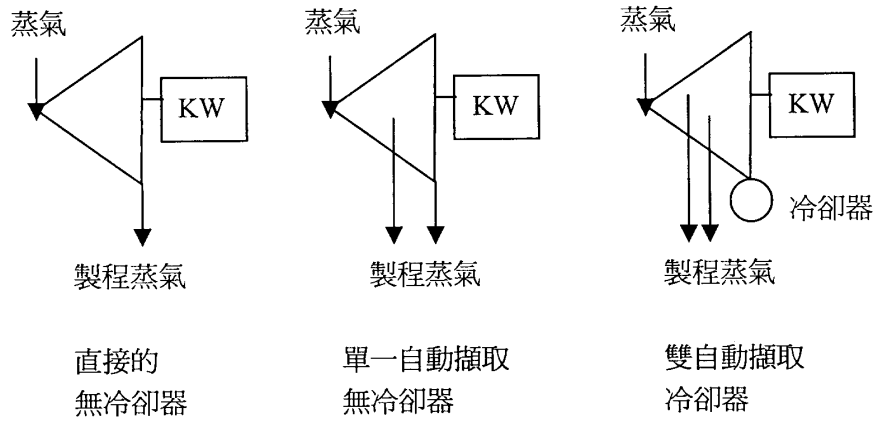


圖 5-8 汽輪機循環之汽電共生系統

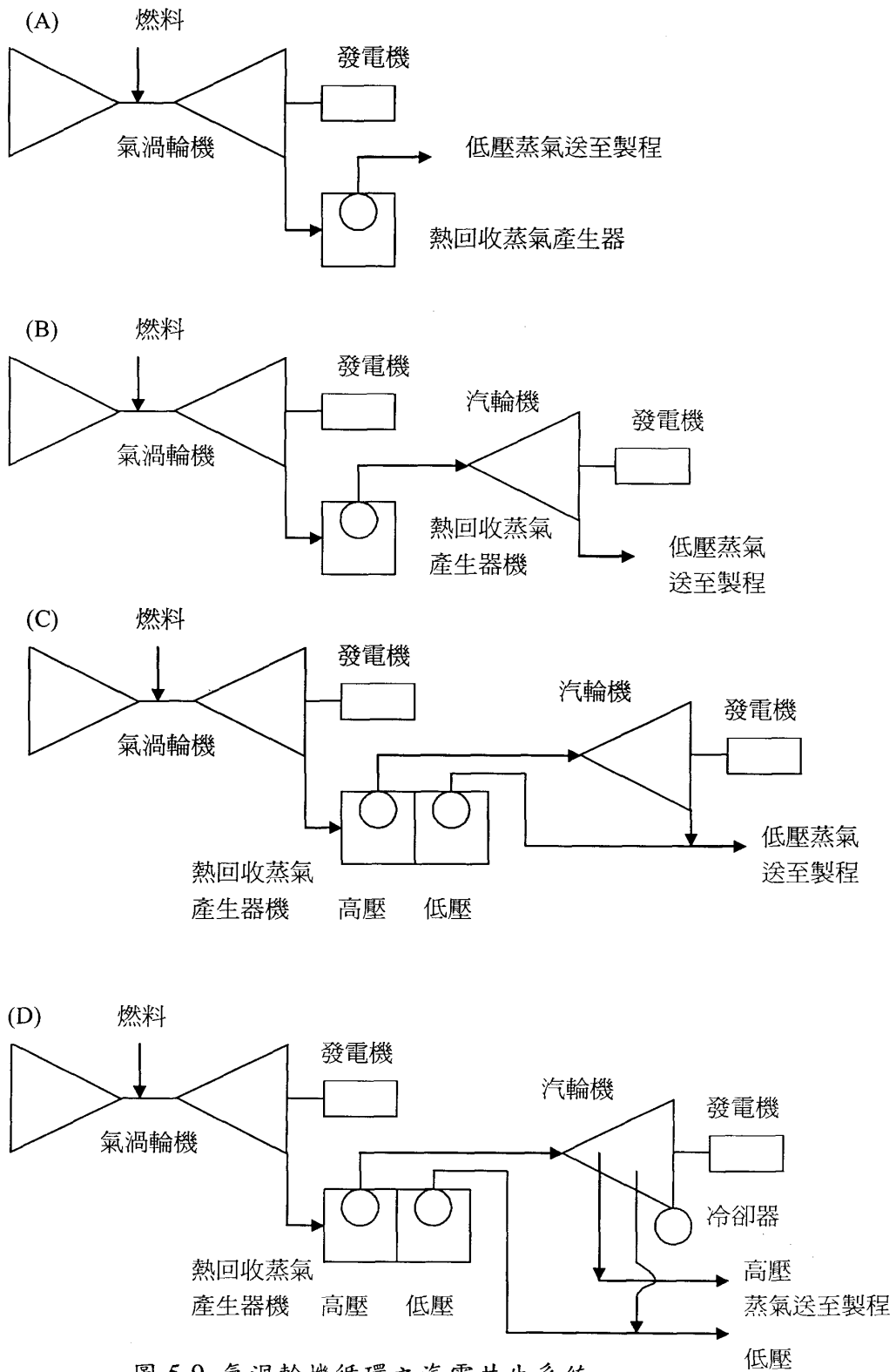


圖 5-9 氣渦輪機循環之汽電共生系統

## 六、系統運轉控制

電力系統控制的目的是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 6-1。

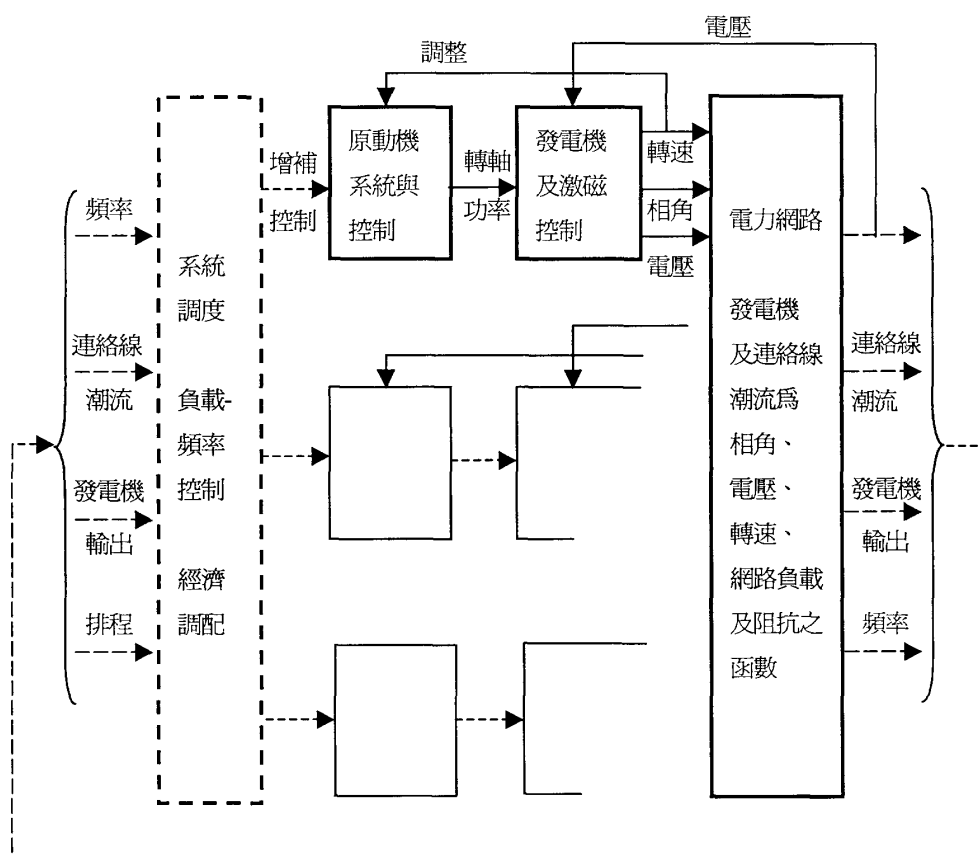


圖 6-1 電力系統和控制概要圖

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 有載變壓器分接頭，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。

### 6-1 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：

1. 發電機及渦輪機之慣量效應，限制系統頻率變化率。
2. 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。
3. 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 6-2。

若  $\underline{P}_m = \text{Constant}$

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

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

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

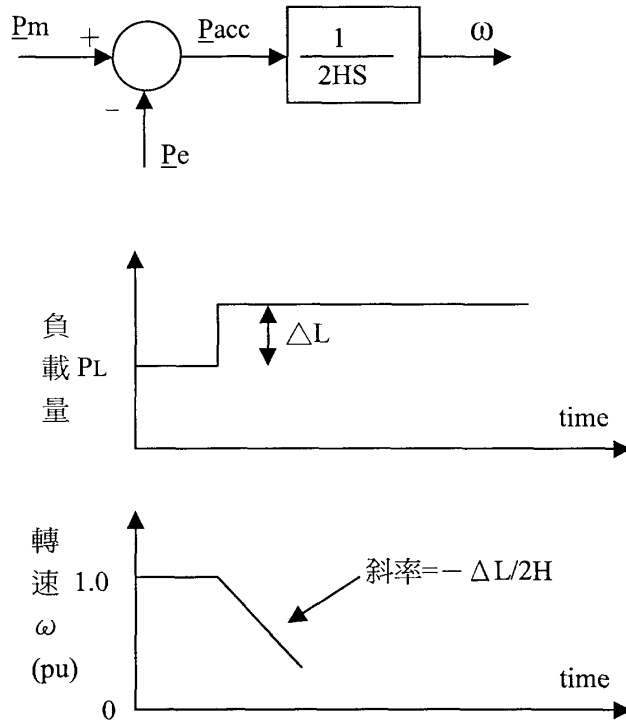


圖 6-2 發電機慣量效應

隨著系統頻率變化，系統連接負載 L 所吸收負載量變為  $P_L$

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

此處  $f_{BASE} = f_0$  (Hz)

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 6-3。

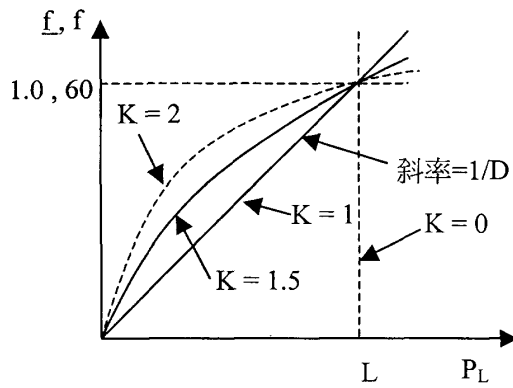


圖 6-3 負載之頻率響應圖

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 6-4，其轉速為

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

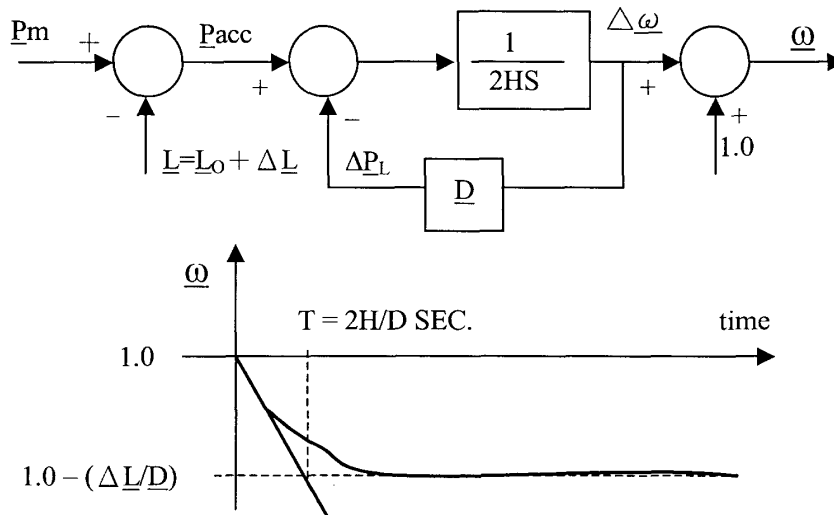


圖 6-4 慣量和負載合成阻尼效應

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  $\Delta f_{ss}$  為零，如圖 6-5，除非受到其閘門極限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。

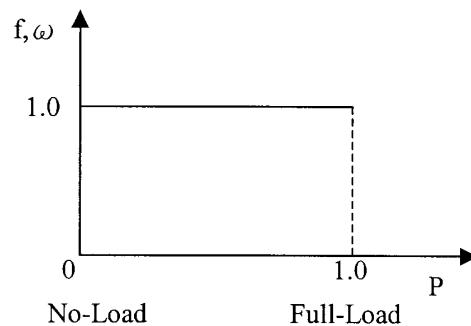


圖 6-5 恒速調速機之頻率(轉速)與有效功率特性

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  $P-\omega$  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  $\Delta f_{ss}$ ，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 6-6。

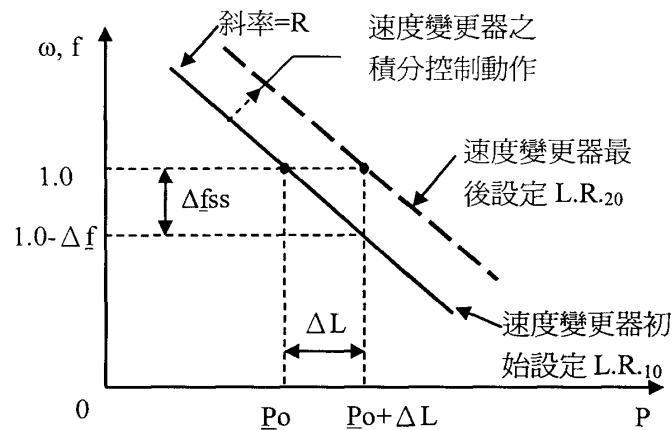


圖 6-6 下垂式調速機之特性曲線

若電力系統有”N”部發電機裝置調速機，系統合成調速率為

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

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

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

## 6-2 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：

1. 保持系統頻率在或非常接近特定額定值如 60Hz。
2. 維持控制區域間交換電力之正確值。
3. 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，此乃藉由主迴路控制(Primary Loop Control)之自然系統調整，以及 AGC 或次迴路控制(Secondary Loop Control)或輔助控制(Supplementary Control)；主迴路控制即調速機和負載調整效應，控制動作所需時間約 8~10 秒；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 6-7。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。

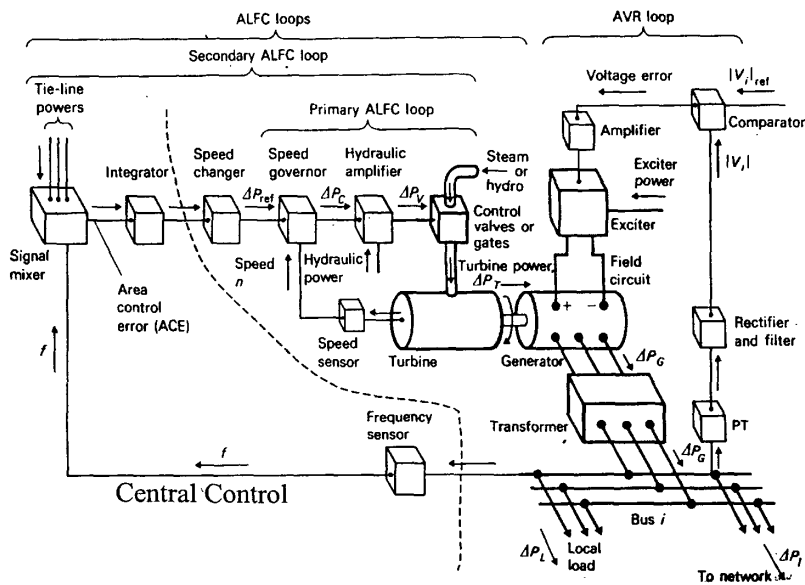


圖 6-7 發電機基本迴路控制

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  $\beta_{\text{sys}}$ ，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：

1. 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)， $\Delta L$  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。
2. 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 6-8，連絡線上電力潮流為  $T_1$ 、 $T_2$ ，

當區域二之負載增加  $\Delta L$  或發電量跳脫時，其區域控制誤差為：

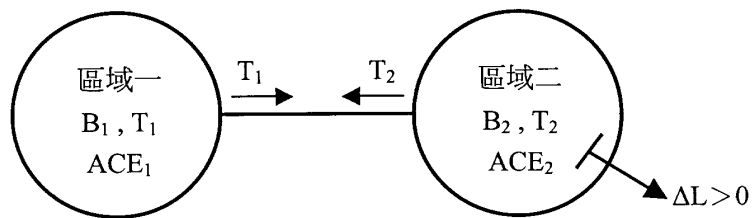


圖 6-8 兩個互聯控制區域



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

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

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  $\Delta f$  和  $\Delta T_1$  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  $\Delta L$ )之連絡線潮流。

### 6-3 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  $F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_n$  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

$\lambda$ ：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

$$(dF_1/dP_1) [1/1-(\alpha P_{LOAD}/\alpha P_1)] = (dF_2/dP_2) [1/1-(\alpha P_{LOAD}/\alpha P_2)]$$

$$= \dots = (dF_n/dP_n) [1/1-(\alpha P_{LOAD}/\alpha P_n)] = \lambda$$

$L_n = 1/1-(\alpha P_{LOAD}/\alpha P_n)$  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。

#### 6-4 最佳化電力潮流

最佳化電力潮流(Optimal Power Flow, OPF) 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，均有其特殊數學上的和計算上的特性。但對新的控制中心其規範極為普通，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：

$$\text{Min } f(x, u)$$

$$\text{s. t. } g(x, u) = 0$$

$$h(x, u) \leq 0$$

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：

1. 目標函數：

-發電成本極小化

-發電成本和融通電力交易極小化

-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

2. 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

### 3. 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功率交換
- 任何發電機群之有效和無效功率備轉量
- 任何群的幹線上有效和無效功率潮流之和
- 發電機無效功率輸出
- 控制調整之容許時間

### 4. 等式限制式向量

- Kirchhoff's 電路定律

-固定變數

## 5. 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)

註：NLP 為非線性規劃法(Nonlinear Programming)

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。

## 七、穩定度

電力系統遭受到干擾(Disturbance)後，仍能維持其同步運轉，則稱此系統是穩定的(Stable)。探討電力系統穩定度之目的係為提高系統可靠度，作為系統規劃、運轉、控制設計之依據，可藉由暫態事故分析或新設備加入系統之系統衝擊檢討，而掌握系統特性，進一步強化系統。影響電力系統穩定度因素如下：

1. 運轉情況：電力融通、發電機調度、可用設備、系統負載、電驛設定。
2. 電力系統特性：快速/慢速激磁系統、負載模型、遠端發電量、電力融通限制、抽蓄/水力。
3. 控制系統：激磁系統、電力系統穩定器、調速機、SVC 阻尼控制、HVDC 控制系統、FACTS 控制器。
4. 干擾：位置、期間、類型。

### 7-1 暫態穩定度

暫態穩定度(Transient Stability)主要在探討發生嚴重干擾後，電力系統之動態表現，所謂嚴重干擾如系統發生三相故障、發電機組跳脫或負載跳脫，造成系統重大衝擊。

暫態穩定度是在時域內利用數值法分析描述電力系統之非線性微分及代數方程式，已包括一些非線性如限制器、比率限



制器、飽和等，其檢討可分成下述步驟：

1. 定義檢討目的：如求得發生線路故障或負載跳脫後之系統穩定度及暫態電壓。
2. 發展系統模型：如每一發電機是否採用快速激磁系統及裝設電力系統穩定器，負載模型採用定阻抗、定電流、定功率之組成，及採用同步機模型、激磁系統模型、電力系統穩定器模型，以及輸電線路及變壓器阻抗模型。
3. 定義運轉情況：發電機出力分配、負載大小、電力融通。
4. 定義事故：事故發生後，電驛動作跳脫線路清除故障之時間。
5. 執行模擬：先對特定系統運轉情況下求解電力潮流，並執行暫態穩定度模擬。
6. 分析模擬結果：系統是否穩定或不穩定，評估選定變數之表現，確認穩定度準則如暫態電壓降之大小和期間，最小暫態頻率。

穩態下由原動機產生之機械轉矩  $T_m$  與由發電機產生之電功率  $T_e$ ，大小相等  $T_m = T_e$  方向相反，此時發電機轉子以同步

速旋轉及加速度為零，可由搖擺方程式(Swing Equation)  $J(d\omega/dt) = T_a = T_m - T_e$  描述，或以不同單位改寫成  $d\omega/dt = T_a = (T_m - T_e) / 2H$ ，其中  $H = J(\omega_{om})^2 / 2VA_{base} = \text{儲存於轉子之動能} / VA_{base}$ ， $H$  值範圍約為 2sec~10sec，如下表所示：

機組類型	H [sec]
火力機組 2 極,3600rpm	2.5 ~6.0
火力機組 4 極,1800rpm	4.0 ~ 10.0
水力機組	2.0 ~ 4.0

利用  $d^2 \delta / dt^2 = \omega_o \cdot d\omega / dt$ ，將  $d\omega / dt$  替換為  $(T_m - T_e) / 2H$ ，得到  $d^2 \delta / dt^2 = \omega_o(T_m - T_e) / 2H$ ，考慮阻尼轉矩(Damping Torque)效應  $D \Delta \omega$ ，則描述轉子震盪之搖擺方程式為

$$d^2 \delta / dt^2 = \omega_o(T_m - T_e - D \Delta \omega) / 2H$$

其狀態空間形式(State Space Form)為

$$d \delta / dt = \omega_o \Delta \omega$$

$$d \Delta \omega / dt = (T_m - T_e - D \Delta \omega) / 2H$$

由於搖擺方程式是非線性方程式，無法直接求得確切解析解，在實際電力系統中此類型方程式使用數值積分方法求解。然而如果一個系統僅由一台發電機連接至無限匯流排(Infinite Bus)所組成，且僅考慮發生故障後緊接之時間，如此傳統發電

機模型為正確，則等面積準則 EAC(Equal Area Criterion)方法能被使用於研討系統暫態穩定度。

## 7-2 小信號穩定度

小信號穩定度(Small-signal Stability)係電力系統於無事故正常運轉下遭到小擾動後，仍能繼續維持同步運轉之能力，即小擾動所引起的系統低頻振盪(Low Frequency Oscillation)響應特性，主要視系統是否有足夠的阻尼能力，以使小擾動所引發之振盪現象呈現衰減趨勢，藉此研判系統是否趨於穩定。其系統低頻振盪現象可分類如下：

1. 局部振盪模式(Local Mode):振盪現象發生在同一電廠之發電機組者。
2. 區域間振盪模式(Inter-area Mode):振盪現象發生在不同區域間之發電機群組者。
3. 全區振盪模式(Global Mode):振盪現象發生在全系統發電機組者。

電力系統小信號穩定度之分析方法，一般可分成時域模擬(Time Domain Simulation)與頻域分析(Frequency Domain Analysis)兩種：

1. 時域模擬法：於系統中加入一小擾動信號，求解狀

態方程式，觀察系統振盪現象，以判斷系統是否穩定，為最直接、最易瞭解及方便實施的方法。採用此法須進行多項測試，以確定各種不同擾動下所產生之響應是否都趨於穩定。因為所求得系統響應常為多種振盪模式之總和響應，不易判定出個別單獨振盪模式之阻尼情形。目前用於時域模擬之商用軟體程式已相當成熟，如 PSS/E。

2. 頻域分析法：於系統運轉工作點上，將非線性之系統狀態方程式加以線性化而求得系統線性模型，再求解各個振盪模式之特徵值(Eigenvalue)、頻率及阻尼，藉此能很清楚描述各個振盪模式為其優點，故又稱為特徵分析法。目前應用於電力系統特徵值計算之軟體程式較不普遍，由 EPRI 開發之 SSSP 較受歡迎。若一振盪模式之特徵值為  $\lambda_1, \lambda_2 = \sigma + j\omega$ ，其中虛部  $\omega$  為該振盪模式之頻率(rad/sec)，而實部  $\sigma$  則可用於判斷該振盪模式是否穩定。

對該模式阻尼的相對大小程度加以分析，則定義「阻尼比」

$\zeta$  (Damping Ratio)或稱阻尼係數如下：

$$\zeta = -\sigma / \sqrt{(\sigma^2 + \omega^2)}$$

若  $\zeta > 0$  表示該振盪模式為穩定模式，若  $\zeta < 0$  表示該振盪模式為不穩定模式。當  $0 < \zeta < 1$  時，稱為欠阻尼(Under-damped)，當  $\zeta = 1$  時，稱為臨界阻尼(Critically-damped)，當  $\zeta > 1$  時，稱為過阻尼(Over-damped)。

### 7-3 穩定度改善對策

暫態穩定度之改善方法，係朝著儘量縮短故障時間和嚴重程度而達到降低故障對系統衝擊程度，增加回復同步運轉之力量，藉由控制原動機之機械功率或利用人工負載以減少加速轉矩，可分成下述方法：

1. 高速故障清除(High-Speed Fault Clearing)。
2. 降低輸電系統阻抗。
3. 調整並聯補償(Regulated Shunt Compensation)。
4. 動態制動電阻(Dynamic Breaking Resistor)
5. 電抗器切換。
6. 斷路器之獨立極操作。
7. 單極切換。
8. 汽輪機快速閘門。
9. 發電機跳脫。
10. 系統分離及卸載。

11. 高速激磁系統。

12. 非連續激磁系統。

小信號穩定度不佳原因是由於系統阻尼太差，故欲改善穩定度，一般可從減少負阻尼及增加正阻尼兩方面進行；對系統有負阻尼效果者有：

1. 負載特性不佳。
2. 負載潮流狀況不佳。
3. 輸電線傳輸容量過大。
4. 調速機使用。

對系統有正阻尼效果者有：

1. 電力系統穩定器(PSS)。
2. 靜態乏功率補償器(SVC)。
3. 串聯電容器補償。
4. 高壓直流輸電線(HVDC)。
5. 同步電容器。
6. 發電機阻尼繞阻。
7. 發電機激磁繞阻。

## 八、保護電驛

電力系統之保護系統係由三個部分所組成，即變比器、保護電驛及斷路器。其中變比器包含比流器(C. T.)及比壓器(P. T.)其主要功能為將電力系統之高電壓及大電流實際值，轉變成適當之低電壓及小電流信號，以供保護電驛判斷系統是否發生故障；若保護電驛判定系統發生故障，則將導通跳脫線圈送出一個跳脫信號給斷路器，將使斷路器打開，在最短時間內隔離故障，以保護設備及人員安全，使系統受到衝擊最小。

比流器及比壓器就如同人們之眼耳感覺器官，隨時將系統之狀況傳送給保護電驛，負責判斷系統狀況為正常或異常情況之保護電驛就好比人們之頭腦，最後需藉由斷路器執行其命令就如同人們之手腳，以達成隔離故障完成保護系統之任務。

### 8-1 保護電驛基本原則

規劃保護電驛系統則依據下述基本原則：

1. 可靠性(reliability)：若故障發生在保護電驛之保護區間內，則其必須正確且快速動作，若故障發生在保護電驛之保護區間外，則絕對不可動作。
2. 選擇性(selectivity)：當故障發生時，僅允許適當之保護電驛動作隔離故障，使跳脫最少設備，縮小停

電範圍。

3. 快速性(speed)：為維護系統及設備安全，應在最短時間內將故障清除，故需保護電驛快速動作。
4. 簡單性(simplicity)：簡單的保護電驛如可滿足系統需求即可，複雜保護電驛系統將造成日後維護困難，擴充不易，且投資高易產生誤動作。

## 8-2 過電流電驛

過電流電驛其優點為只需比流器而不需比壓器、電驛成本低且設計簡單易於維護；缺點為因受限其延時特性，需較長隔離故障時間，較易受到故障電流及負載電流變化而影響其動作，故在一些較重要的線路不採過電流電驛，而採測距或副線電驛保護。

系統發生故障時，如圖 8-1，相關的系統均會提供故障電流流向故障點，可能有數個電驛同時偵測到故障，當流入電驛分接頭(Tap)的電流大於所設定的始動電流值(Pick-up Current)時，離故障點最近之主保護應優先動作，後衛保護於主保護失靈後延時一般約 0.3 秒才動作，可選擇適當時間標置值(Time Dial)來控制電驛動作快慢，以達到主保護與後衛保護之協調時間間隔。



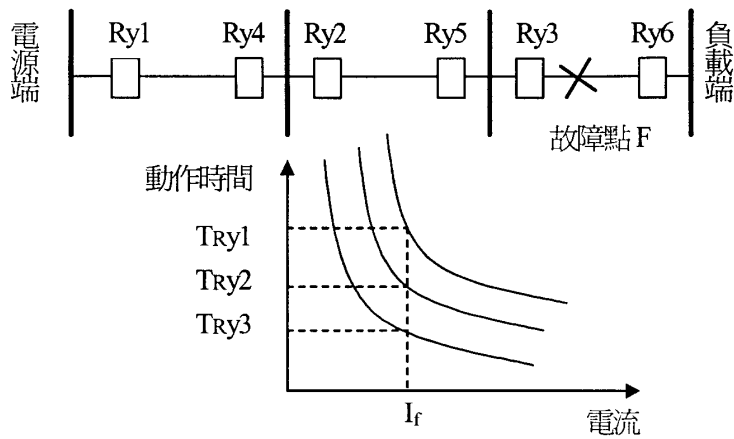


圖 8-1 階段時限動作協調關係圖

### 8-3 測距電驛

測距電驛或稱阻抗電驛是分別利用比壓器及比流器二次側電壓及電流之比值  $V/I=Z$ ，即為一阻抗值來偵測系統狀態。

採用測距電驛的優點如下：

1. 全線段之 80% 的主保護區間可獲得快速跳脫隔離故障，無時間上延遲。
2. 測距電驛的靈敏度高於過電流電驛。
3. 協調工作較過電流電驛保護容易。
4. 測距電驛之動作特性受電源阻抗及系統構造改變的影響較小。

測距電驛的三個區間(Zone)保護範圍如下：

1. 第一區間(Zone 1)設定為保護線路全長之 80%~90%長

度，無時間延遲而為快速跳脫。

2. 第二區間(Zone 2)設定為本段線路阻抗值加上最短鄰接線路阻抗值之 50%，延時動作時間為 20 週波。
3. 第三區間(Zone 3)設定為本段線路阻抗值加上最長鄰接線路阻抗值，及再加上第二個最遠的遠端匯流排上最短線路阻抗值之 25%，延時動作時間為 30 週波。

#### 8-4 差電流電驛

當整個保護區間為一相對小的範圍且靠近電驛時，則可應用電流連續性原理裝置一種非常簡單且有效的電驛系統，如圖 8-2 發電機繞組之差電流保護。

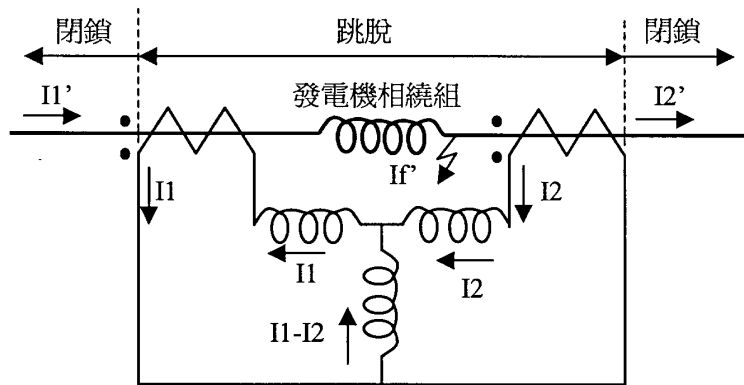


圖 8-2 發電機繞組之差電流保護接線圖

因比流器之誤差會隨著  $I_1$  和  $I_2$  增加而變大，故電驛之動作

原理將由

$$| I_1 - I_2 | > | I_P | \quad \text{跳脫}$$

$$| I_1 - I_2 | < | I_P | \quad \text{閉鎖}$$

變更為

$$| I_1 - I_2 | > k | I_1 + I_2 | / 2 \quad \text{跳脫}$$

$$| I_1 - I_2 | < k | I_1 + I_2 | / 2 \quad \text{閉鎖}$$

電流 $(I_1 - I_2)$ 為電驛之跳脫電流， $(I_1 + I_2)/2$ 稱為限制電流，

差電流電驛常用來保護變壓器、發電機、匯流排及馬達。

### 8-5 載波電驛系統

載波電驛系統(Pilot Relay System)是利用通信媒介如電力線載波(Power Line Carrier)、微波(Microwave Channel)、音頻(Audio Tone Channel)或光纖(Fiber Optical Channel)來傳遞允許跳脫信號或閉鎖信號，配合本端電驛之動作，來達到保護線路之全區間快速跳脫。載波電驛系統大致可分為：

1. 方向比較閉鎖系統(Directional Comparison Blocking System, DCB)
2. 方向比較非閉鎖系統(Directional Comparison Unblocking System, DCU)
3. 允許越區轉移跳脫系統(Permissive Overreach)

Transfer Trip System, POTT)

4. 允許欠區轉移跳脫系統 (Permissive Underreach

Transfer Trip System, PUTT)

8-6 方向比較閉鎖電驛系統

將第二區間保護電驛額外增加為在未收到對方端閉鎖信號時即快速跳脫之越區 150%載波跳脫電驛  $Z_p$ ，尚需要一個反向 (Reverse Direction) 載波起動電驛  $Z_s$ ，其設定為反向區間的 200%，需要載波機組且一般利用電力線載波，作為傳送閉鎖信號之媒體，如圖 8-3 所示。

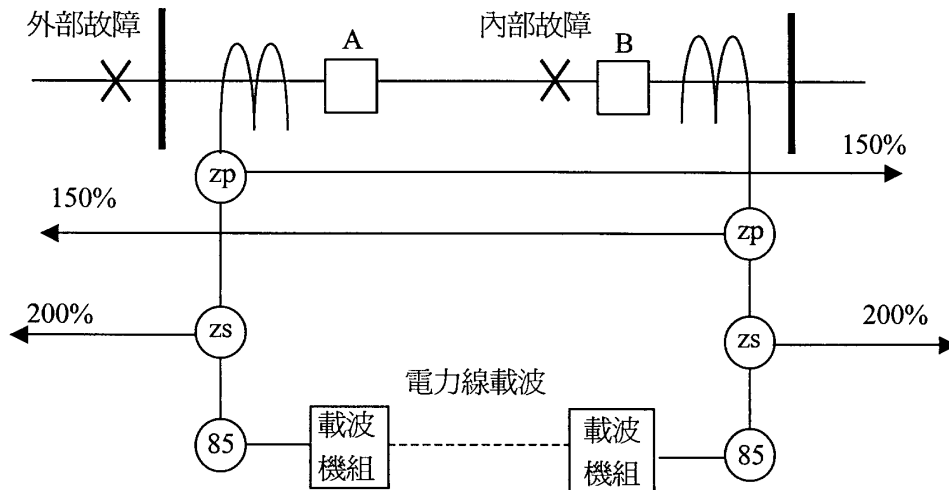


圖 8-3 方向比較閉鎖式載波電驛系統圖

### 8-7 允許越區轉移跳脫電驛系統

允許越區轉移跳脫電驛系統(POTT)之通信媒介為微波、音頻或光纖，且一般採用頻率偏移的方式來傳送監視頻率或允許對方跳脫的跳脫頻率，不需要裝設反向(Reverse Direction)載波起動電驛。

$Z_p$  之設定同第二區間保護電驛為 150%，若  $Z_p$  動作則會同時起動音頻機組將監視頻率偏移為允許對方跳脫的跳脫頻率，當  $Z_p$  看見故障起動且收到對方傳送過來之允許對方跳脫的跳脫頻率時，方可完成導通斷路器跳脫線圈，開啟斷路器隔離故障，如圖 8-4 所示。

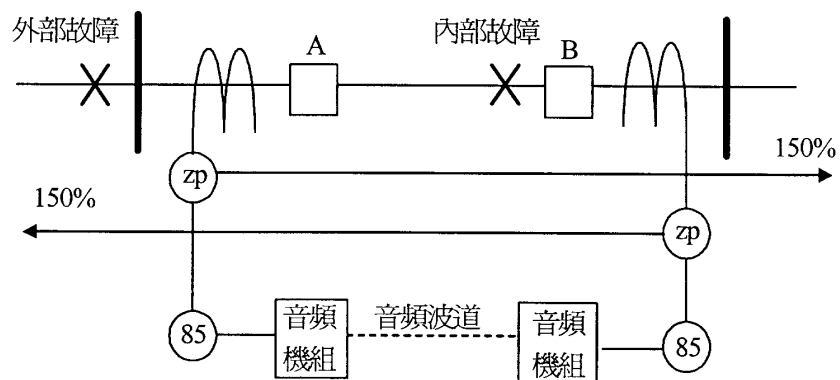


圖 8-4 允許越區轉移跳脫電驛圖

## 九、電力公用事業工程經濟

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。

### 9-1 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：

1. 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  $F=P(1+i)^n=P(F/P, i, n)$ 。

2. 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  $P=F/(1+i)^n=F(P/F i,n)$ 。
3. 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  $F=A[(1+i)^n-1]/i=A(F/A i,n)$ 。
4. 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  $A=F i/[(1+i)^n-1]=F(A/F i,n)$ 。
5. 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  $P=A[(1+i)^n-1]/i(1+i)^n=A(P/A i,n)$ 。
6. 現值之等效年金(Annuity Equivalent to Present Value)：現值之等效未來年金  $A=P i(1+i)^n/[(1+i)^n-1]=P(A/P i,n)$ 。
7. 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  $P''=[1/(1+i)^n][G/i]\{[(1+i)^n-1]/i-n\}$ 。
8. 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  $P=A1\{1-[(1+j)/(1+i)]^n\}/(i-j)$ ，其

$n$  年後資金  $F=P(1+i)^n$ ，亦可求等效未來年金  $A$ 。

## 9-2 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

Depreciation = 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：

1. 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。
2. 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。
3. 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 $(A/P, i, n) = i + (A/F, i, n)$  = return on investment + 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：

1. 會計觀點：其資本回收之現值(P.W.)稱為 X 型( Form

X )如圖 9-1。

Capital Recovery (P.W.)

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

其中 X = 典型期間

$P_X$  = 期間 X 內之殘值

$D_X$  = 折舊保留金(期間 X 之開始)

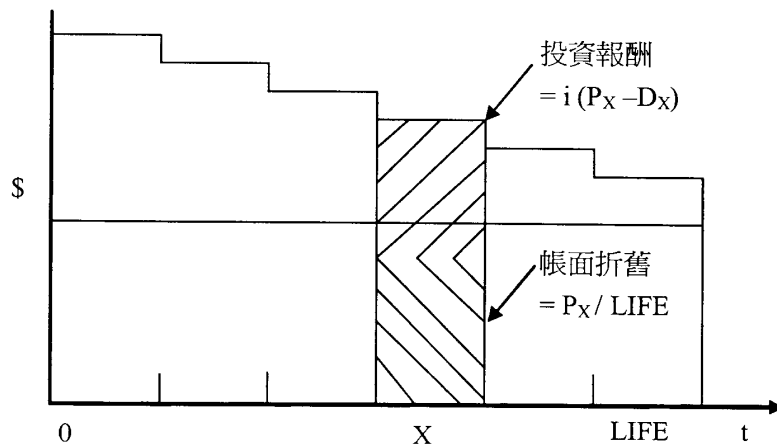


圖 9-1 會計觀點之資本回收

2. 工程經濟觀點：其資本回收之現值稱為 Y 型(Form Y)

如圖 9-2。

Capital Recovery (P.W.)

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

其中  $X =$  典型期間

$P_X =$  期間  $X$  內之殘值

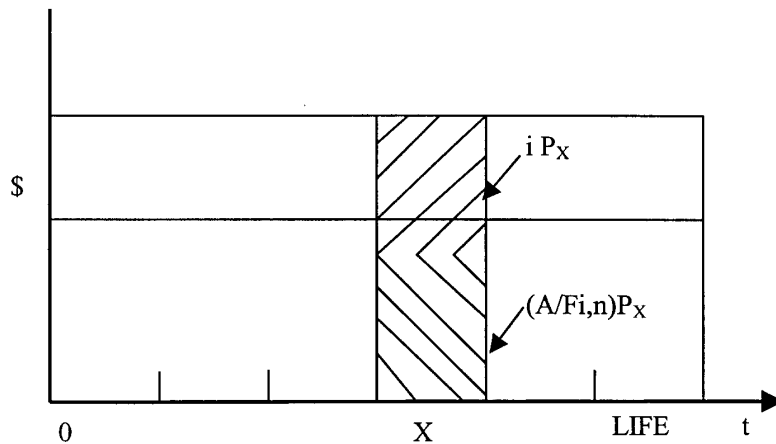


圖 9-2 工程經濟觀點之資本回收

### 9-3 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：

1. 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。
2. 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  $R = O\&M + D + T_p + T_i + I + E$ ，其中 R 表示收益(Revenue)，O&M 表示維修費用，D 表示賬面折舊， $T_p$  表示資產稅， $T_i$  表示收入稅，I 表示借貸利率，運作收入(Operating Income)等於  $R - (O\&M + D + T_p + T_i)$ ，淨收入(Net Income)等於  $R - (O\&M + D + T_p + T_i + I)$ ，純資產值收益(Equity Return)  $E = R - (O\&M + D + T_p + T_i + I)$ ，利用收益方程式計算對投資上或投資的回收，可利用  $E + I + D = R - (O\&M + T_p + T_i)$ 。

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  $E = R - (O\&M + D + T_p + T_i + I)$ ，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  $R = O\&M + D + T_p + T_i + I + E$ ，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)：

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

$$\text{或 } R = O\&M + (F_E + F_I + F_D + F_{TP} + F_{Ti}) P$$

其中 P = 首次成本投資

$F_E + F_I = \text{收益(MAR)}$

$F_D = \text{Sinking Fund Factor}$

$F_{TP} = \text{資產稅率}$

$F_{Ti} = \text{收入稅率為成本費用的百分率}$

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。

## 十、參考文獻(攜回資料):

1. Ekram Hassib, "Circuit Analysis Review"
2. Joe Plewinski, "Power System Analysis"
3. Ron Hauth, "PSLF Seminar"
4. Ron Hauth, "Transmission Analysis and Pricing"
5. Liz Pratico and John Skliutas, "Surge Phenomena"
6. Shep Salon, "Synchronous Machines"
7. Wenchun Zhu and Juan Sanchez-Gasca, "Stability"
8. Ron Hauth, "Voltage Compensation & FACTS"
9. Dick Sigley, "Utility Economics"
10. Bill Price, "System Operation - Control"
11. Kim Wirgau, "System Operation - Economics"
12. Gary Jordan and Rit Szczepanski, "Strategic Transmission & Generation Planning"
13. John Kovacik and Bill Palmer, "Competitive Power Generation"
14. Shep Salon, "Rotating Machines"
15. Carl Wegner, "Power Electronics Seminar"
16. Murray Eitzmann, "HVDC Seminar"
17. Sundar Venkataraman, "Power Plant Control Interaction"
18. Paul Steciuk, "Distribution Equipment & Applications"
19. John Undrill, "Lectures on Power System"
20. Louie Powell and Mike Reichard, "Protective Relaying"
21. Hadi Saadat, "Power System Analysis", Second Edition, McGraw-Hill Primis Custom Publishing, 2002.
22. Joseph Edminister and Mahmood Nahvi, "Theory and Problems of Electric Circuits", Third Edition, McGraw-Hill Company, 1997.

23. Andrew R. Hileman, "Insulation Coordination for Power Systems", Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, 1999
- 24.. P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., 1994
25. Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York, Basel, 1996
26. Harry G. Stoll, "Least-Cost Electric Utility Planning", John Wiley & Sons, Inc. New York, 1989