

出國報告（出國類別：實習）

赴美國參加奇異公司電力系統研習班

服務機關：台灣電力股份有限公司電力調度處

姓名職稱：鄭壽福 電機工程監監

派赴國家：美國

出國期間：97.07.29~97.12.15

報告日期：98.2.10

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴美國奇異公司參加電力系統研習班

頁數 50 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/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

鄭壽福/台灣電力公司/電力調度處/十二等電機工程監/2366-6613

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究☒4 實習☐5 其他

出國期間：97.7.29～97.12.15 出國地區：美國

報告日期：98.2.10

分類號/目

關鍵詞：電力系統研習班（PSEC）

內容摘要：（二百至三百字）

美國奇異公司開辦電力系統研習班課程（PSEC），至今已有六十年歷史，主要目的在傳授電力相關新知，並培養世界各國電力產業經營人才。課程主要內容包括電力系統分析、調度運轉、最新電力技術、及全球電業趨勢之傳授，內容涵蓋發、輸、變、配電及控制、保護設備及電力系統模擬軟體等相關先進電力知識，授課講師皆已在 GE 公司服務多年或於大學中任職的教授，課程中融合各領域理論及其實際工作經驗授予學員，讓學員能夠在學理與實務上相互驗證學習。本課程亦安排實地參訪紐約獨立調度中心、發電機製造廠及電力研究中心，讓學員瞭解調度作業、設備製作流程等。參加此項訓練課程，除學習其先進電力系統技術及全球

電業趨勢外，且能與其他國家電力工程師交換經驗與心得，有助於提升電力調度技術與分析檢討系統的能力。

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

報 告 內 容

一、出國緣由與目的.....	6
二、出返國行程.....	7
三、誌 謝.....	8
四、心得與建議.....	9
五、課程摘要.....	13
(一)基本電路分析複習	13
(二)電力系統之基本分析	13
(三)GE電力系統分析軟體PSLF簡介	14
(四)發電機容量曲線特性	15
(五)輸電線路特性	16
(六)負載特性	17
(七)突波現象.....	18
(八)同步機.....	20
(九)電力系統穩定度	26
(十)彈性交流輸電系統.....	32
(十一)電力系統運轉控制.....	34
(十二)氣化複循環發電系統.....	37
(十三)公用事業經濟學	40

（十四）競爭性的發電事業.....	40
（十五）風力發電.....	41
六、實習期間參訪活動.....	45
（一）GE汽輪機與發電機製造工廠.....	45
（二）GE 全球研發中心SELKIRK COGEN汽電共生廠.....	45
（三）NYISO紐約獨立調度中心程.....	46
（四）Selkirk Cogen汽電共生廠.....	47
七、參考文獻(攜回資料).....	48

一、出國緣由與目的

近年來國際因燃料價格高漲、溫室效應氣體排放限制等議題，電力產業不論在發電技術、調度運轉等方面均遭遇極大變革壓力。因此國內電力產業發展，近幾年來除既有電力建設興建遭受嚴重阻力等問題外，因燃料價格高漲及溫室效應氣體排放限制問題衍生之經營及運轉困境亦逐漸浮現，如本公司出現嚴重虧損，再生能源發電系統佔比增加調度運轉因應等，面對產業環境不斷變遷、各類電力技術進步快速，本公司對於引進最新技術、培養優秀人才是刻不容緩的。

美國奇異公司之PSEC 課程自1949 年開課以來，已培養超過1500 名來自超過50 個國家電機工程師。甚至先進國家如日本，每年皆派遣約10名工程師參加此課程，其中電機界重量級公司TOSHIBA 亦在名列之中。故參加此課程對引進最新技術、研習電力系統分析工作及培養優秀人才有極大的助益。課程內容包含電源經濟調度、開發規劃流程、輸電網路分析、應用等理論課程，並融合該公司多年來在電力產業界的實際經驗技術，為一理論與實務兼顧的學程，此訓練課程除可提供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，強化既有規劃、運轉能力及技術，汲取國外之經驗及技術，對於電力專業技能及知識有相當大的助益。

二、出返國行程

(一) 去程：

97/7/28 台北TAIPEI(18:50) → 紐華克NEWARK(21:40)

97/7/29 紐華克NEWARK (11:30) → 奧爾巴尼ALBANY(12:34)

→ 斯堪那特提SCHENECTADY(GE公司)

(二) 受訓：

97/7/31 ~ 97/12/12 美國奇異公司電力系統工程班

(三) 返程：

97/12/13 斯堪那特提SCHENECTADY(GE公司) → 奧爾巴尼

ALBANY(14:05) → 紐華克NEWARK(15:37)

97/12/13 紐華克NEWARK(22:30) → 97/12/15 台北

TAIPEI(07:20)

三、誌 謝

本次出國計劃得以順利成行，特別感謝涂總經理正義、李副總經理肖宗、鄭前處長金龍、籃處長宏偉、劉調度監坤城及人資處劉副處長大力協助與支持，謹此致上最誠摯的謝意。

同時也感謝曾副調度監重富、方正、凡鈞等同仁，在出國前、後之鼎力幫忙。

最後，感謝本處全體同仁良好表現，獲得長官讚賞，得以持續支持本出國計劃。

四、心得與建議

(一) 本次PSEC課程共有15位學員參加全期4.5個月之課程(日本9位、韓國4位、台灣2位)，另有來自加拿大、多明尼加、卡達、愛沙尼亞及美國電力公司或奇異公司員工參加為期1~2星期之短期課程，參訓學員大多為具電機背景之各國電力公司員工，職務涵蓋規劃、運轉、發電、輸電及工程領域，學習期間除互相瞭解各公司電力系統架構、規模及發展方向，亦藉由分組討論及競賽機會，實際接觸到各項不同工作領域，面對問題之處理，可具更多面向之思考。就全期受訓學員年齡分布而言，職屬較資深人員，也因此獲得更多理論與實務驗證之機會，相關課程內容亦可更深入研習與探討，此行對職收穫良多，建議本公司遴選出國人員應優先考量實務經驗豐富之同仁。

(二) 隨著工商業的發展電力系統的架構日益龐大且複雜，系統分析及運轉人員需有更多的訓練、習得新的技能，除有溫故知新的效果，且能加強其分析技術能力，預防問題的發生，並可與世界各國來參加此課程的學員共同分享系統調度、分析經驗；如本期日本、韓國等電力公司即每年定期派有數名工程師接受課程訓練。另外，奇異公司電力部門人員亦在學員

中，可隨時與其交流最新電力設備的發展及電業自由化後的調度經驗，因此建議繼續派員前往奇異公司接受電力系統課程相關訓練。

(三) 奇異公司PSEC課程涵蓋發、輸、變電及保護設備技術，較為廣泛，派訓工程師在出國前若能先行與各領域專業人員討論或參與部份工作，瞭解本公司的系統分析業務現況，則於出國受訓期間，可與指導員、其他國家工程師共同討論比較分析方法是否不同，若有差異，則可研究其分析方法，提供公司內部參考，建議派訓人員於出國前可先瞭解公司內部分析技術，作為與各國比較的基礎。

(四) 奇異公司PSEC課程共分為4個學期，其中第3、4個學期課程內容著重電力經營管理之課程設計，建議除選派有潛力之年輕同仁外，亦可考慮選派組長級同仁參加。

(五) 推展再生能源為世界趨勢，其中風力發電之各項議題（風機性能、模型；系統運轉衝擊；Grid Code等），仍快速發展中。建議本公司相關部門持續加強關注與研習，以因應我國風力發電佔比逐漸提高後相關規劃、運轉工作。

(六) 目前全世界CO₂排放議題持續受關注，此將引入課徵碳稅、氣體排放量交易市場、電力技術創新（如IGCC、Smart Grid）

及能源結構變化（如再生能源、核能發電再度受重視）等議題，電力系統運轉亦將受影響，建議持續加強關注與研習相關議題。

（七）日本全期受訓學員在PSEC 課程結束後，均尚有1~5 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。

（八）此行和美國當地之GE 公司員工、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。總

之，美國人民之親切、有禮、快樂、守法等精神值得國人學習。

五、課程摘要

美國奇異公司所開設電力系統訓練課程，共分四部分，為期約四個半月密集課程，每年4月開課12月中旬結束，課程內容學習心得摘錄如下：

（一）基本電路分析複習

本課程在使學員重新複習電路學各種基本原理，作為未來各種學科的分析基礎，主題包括線性系統定義、重疊定理、向量表示、複數功率、傅立葉轉換、傅立葉級數、拉氏與反拉氏（Laplace & Inverse Laplace）、Z 及 Inverse Z 轉換特性等單元，本課程目的在於加強電機工程師基本電路分析觀念，並能應用於未來學科及實際工作中的電路計算。

（二）電力系統之基本分析

本課程使學員學習對輸電線模型，依短程、中程、長程輸電線分別定義不模型，平衡與不平衡故障電流分析，不平衡故障電流方面，使用對稱成分法求正序、負序與零序成分，再依線對地、線對線及兩線對地故障，組成對應之網路圖進而求解故障電流值。平衡三相系統可用單相等效電路及標么值的方法得到簡便

的計算。另外電力潮流亦屬於電力系統中重要課題，因其對系統特性分析扮演重要角色，電力潮流主要由網路中各發電機電壓、總電源供給量與總負載量決定後，利用電力潮流方程式求出負載匯流排電壓、相角及線路之實、虛功率。求解電力潮流問題，常用高斯塞德法（ Gauss- Seidal ） 或牛頓拉福森法（ Newton-Raphson ），通常牛頓拉福森法收斂快而效率較佳。本課程主要目的係加強電力工程師之電力系統分析觀念，以對整個課程產生最佳概念。

（三）GE電力系統分析軟體PSLF簡介

本課程習得奇異公司的電力系統分析軟體 Positive Sequence Load Flow (PSLF)的基本功能操作，學員在此課程中可以模擬一小型網路系統，以熟悉軟體的性能；如電力潮流分析、系統穩定度、輸電網路平衡與不平衡短路檢討。課堂中個人實際比較高斯塞德法（ Gauss- Seidal ）及牛頓拉福森法（ Newton-Raphson ）應用於電力潮流優缺點；高斯塞德法以疊代方法比較匯排電壓前後次計算的差值作為判斷是否收斂的依據，因前後次的差距不大，此解法計算時間較長，但收斂性較好，牛頓

拉福森法首先猜得初解，對電力潮流方程式偏微分求得 Jacobian 矩陣，作為尋找下一個解的方法，求解速度較快，但所猜得的初解可能因與系統的合理解差距過大，而無法收斂，因此系統分析人員在檢討一網路結構較脆弱的系統，遭遇到解空間太小，不易收斂的問題時，可先應用高斯塞德法求解，再由牛頓拉福森法將此解作為初解，以繼續逼近系統的最適解。

(四) 發電機容量曲線特性

本課程研習在電壓穩定度和長期穩定度考量下，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 1，期將受到下列三個因素限制：

電樞電流限制：電樞電流之損失將產生熱，因而限制電樞電流之最大值，以避免電樞發生過熱，如曲線 BC 段。

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，如曲線之 AB 段。

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。

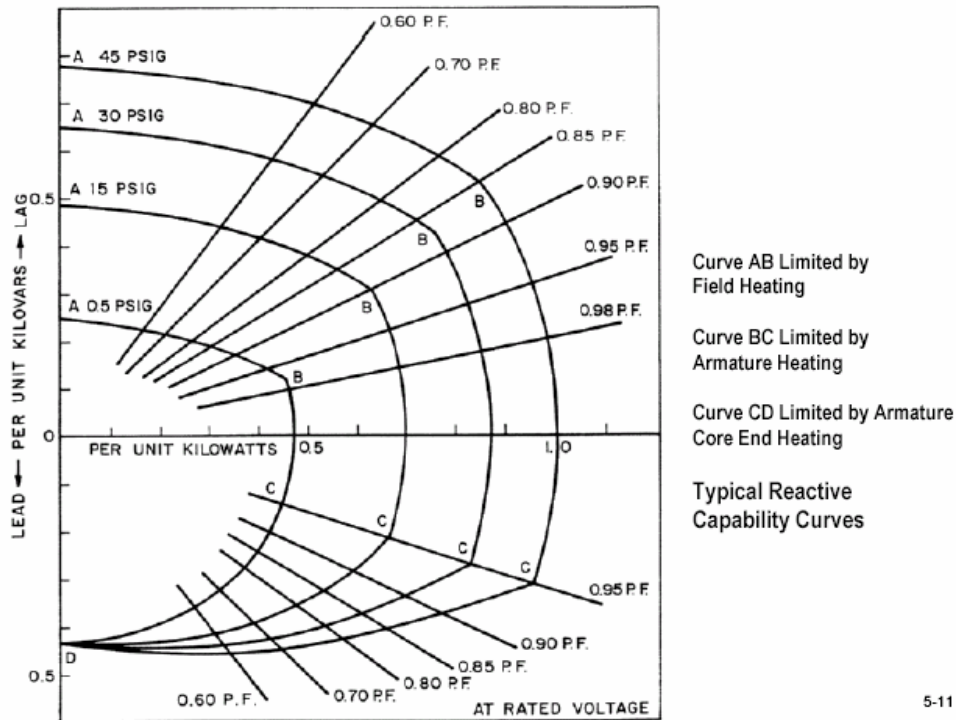


圖 1：發電機容量曲線特性

(五) 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 $SIL = V_0^2 / Z_c$ ，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 2。

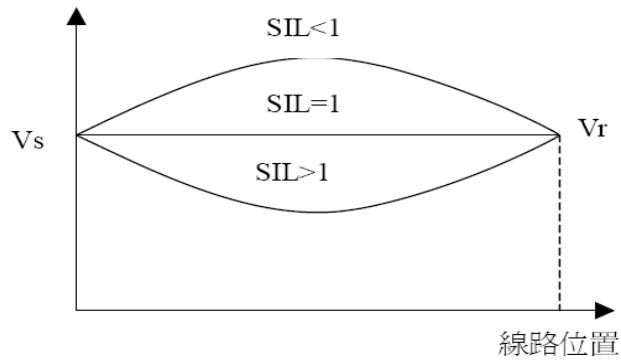


圖 2 輸電線路電壓與 SIL 關係圖

輸電線路傳送電力之能力與線路長度與電壓等級有關，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。

（六）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：

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

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

$a_1、a_4$ ：定功率負載比例

$a_2、a_5$ ：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。

(七) 突波現象

本課程主要目的在使學員了解輸電系統之絕緣協調能力，以

最低成本設計具可靠性之系統絕緣。內容包含：

1. 輸電線之進行波方程式 (Transmission Line Equations & Traveling Waves)
2. 進行波在線路接合點之行為特性 (Behavior of Traveling Waves at Junctions)
3. 進行波在線路多重端點與分歧點之行為特性 (Complex Terminals, Line Bifurcation)

- 4.晶格圖之應用 (Lattice Diagram)
- 5.進行波衰減與失真 (Attenuation and Distortion of Traveling Waves)
- 6.輸電線遭雷擊之概述 (Lightning Performance of Transmission lines – General Concepts)
- 7.避雷器基本原理及應用 (Surge Arresters – Fundamentals Application)
- 8.系統接地 (System Grounding)
- 9.鐵磁共振 (Ferroresonance)
- 10.回復電壓 (Recovery Voltage)
- 11.開關突波之控制 (Switching Surge Control)
- 12.絕緣協調 (Insulation Coordination)

以上內容將使工程師具備對突波現象的分析能力，以降低電力系統的過電壓至適當範圍，而減少損害。

本課程中系統設計人員在協調系統絕緣時，可使系統在遭受電壓突波襲擊時將過壓情況減至合理的程度。90 年 3 月 18 日本公司核三廠曾經發生事故，電廠內許多設備受損，引起國內相當大的注意，會審專家中曾提出可能是因鐵共振引起，因此特別對此過電壓現象學習心得說明如下：

1. 鐵共振現象說明：因電力系統設備的等效電容與電感共振，產生高電壓，可能造成設備受損現象。

2. 引發鐵共振的因素：

(1)配電變壓器無載或輕載時，因系統阻尼較小容易發生。

(2)斷路器、電力熔絲、線路單相或二相開路時，造成變壓器開路側引發高電壓，致系統設備絕緣受損。

(3)變壓器結構，因變壓器高低壓側線圈及絕緣即形成一等效電容，此電容與線圈電抗值，即有可能在系統阻尼較低時產生共振。

(4)長配電電纜，因電纜線有較大的等效電容值，故較易引起鐵共振現象。

3. 鐵共振的抑制方法

(1)使用三個單相變壓器組成三相變壓器，以減少各相耦合電容。

(2)變壓器二次側至少有 5-15%以上的電阻性負載，目的在增加系統阻尼，減少鐵共振現象，降低過壓情況。

(3)若輸電線路較長則需换位，以減少耦合電容。

(八) 同步機

同步機械是電力系統最重要元件之一，本課程主要目的係加

強電機工程師同步機運轉及分析的能力。同步機數學模式的推導包括:同步機的基本概念、d-q 軸轉換、標么化的各種方程式、以及同步機的等效電路、同步機在穩態運轉時的分析、平衡故障分析、不平衡故障分析。內容包含

1. 同步機的概念 (Introduction)
2. 三相系統同步機之等效電路方程式 (Equivalent Circuits)
3. 三相系統與dq 軸之轉換 (dq Transformation)
4. 以標么值表示之派克方程式 (Park's Equation in Per Unit)
5. 穩態運轉 (Steady State Operation)
6. 同步機設計與建造 (Design & Construction of Synchronous
7. Machines)
8. 飽和現象 (Saturation)
9. 應用於穩定度之模擬模型 (Simulation Models in Stability
10. Constants)

本課程重點主要在於推導同步機模型，因此以下摘要其流程說明同步機組數學方塊圖推導過程：

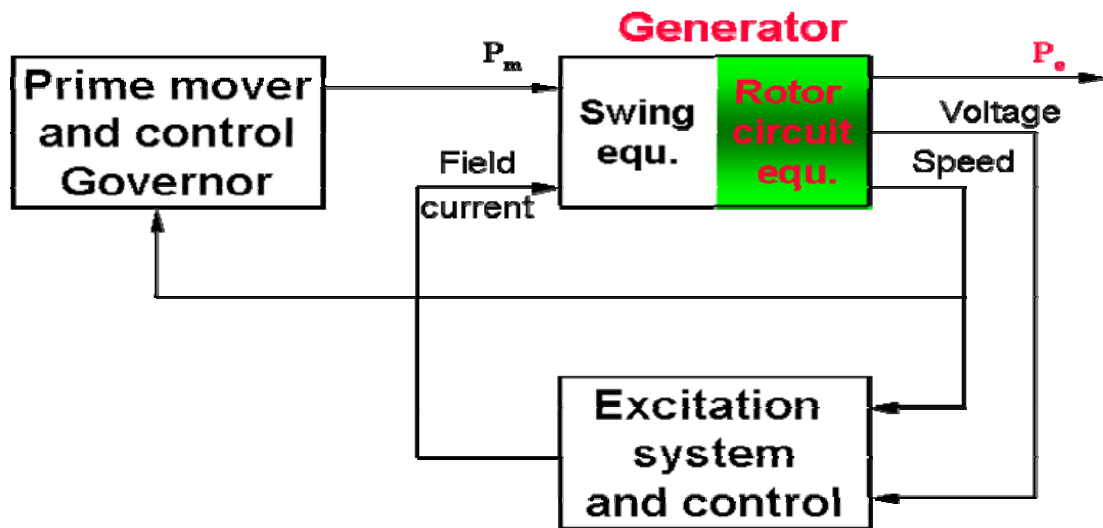


圖 3 同步發電機組控制方塊圖



圖 4 同步發電機電路圖

由同步發電機電路圖可推導出磁通與定子電流、激磁電流的矩陣方程式，如下：

$$\begin{bmatrix} -\psi_a \\ -\psi_b \\ -\psi_c \\ \psi_{fd} \\ \psi_{kd} \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & l_{afd} & l_{akd} & l_{akq} \\ l_{ba} & -l_{bb} & l_{bc} & l_{bfd} & l_{bkd} & l_{bkq} \\ l_{ca} & l_{cb} & -l_{cc} & l_{cfd} & l_{ckd} & l_{ckq} \\ -l_{fad} & -l_{fbd} & -l_{fcd} & l_{ffd} & l_{fkd} & 0 \\ -l_{akd} & -l_{kbd} & -l_{kcd} & l_{kfd} & l_{kkd} & 0 \\ -l_{kaq} & -l_{kbq} & -l_{kcq} & 0 & 0 & l_{kkq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix}$$

上述磁通方程式中的電感及互感矩陣為轉子與定子角度的函數，將隨時間變化，不適合於未來等效電路之推導，因此利用 **Park's Transformation** 將三相同步機轉換為二相的機組，即為 dq 軸轉換。

Park's Transformation

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_{fd} \\ \psi_{kd} \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & 0 & L_{qfd} & L_{kqd} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & 0 & L_{kqk} \\ 0 & 0 & -L_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{3}{2}L_{qfd} & 0 & 0 & L_{ffd} & L_{fkd} & 0 \\ -\frac{3}{2}L_{kqd} & 0 & 0 & L_{kfd} & L_{kkd} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}L_{kqk} & 0 & 0 & 0 & L_{kkq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix}$$

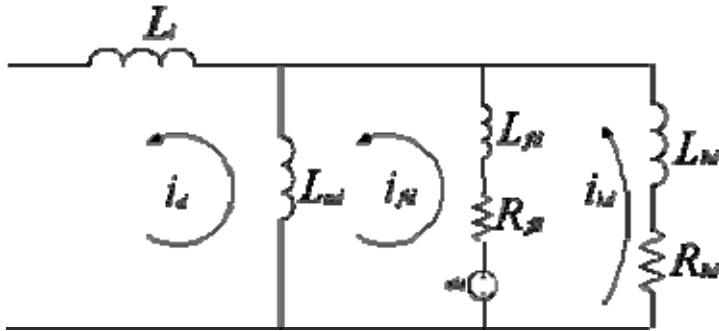
經上述 dq 軸轉換後可將電感矩陣轉換為常數值。且由該矩陣仍無法畫出等效電路圖（因其為非對稱矩陣），故需再做標么化運算，如下：

$$\begin{bmatrix} \bar{\psi}_d \\ \bar{\psi}_q \\ \bar{\psi}_0 \\ \bar{\psi}_{fd} \\ \bar{\psi}_{kd} \\ \bar{\psi}_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{L}_d & 0 & 0 & \bar{L}_{afd} & \bar{L}_{akd} & 0 \\ 0 & -\bar{L}_q & 0 & 0 & 0 & \bar{L}_{akq} \\ 0 & 0 & -\bar{L}_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\bar{L}_{afd} & 0 & 0 & \bar{L}_{ffd} & \bar{L}_{fk d} & 0 \\ -\bar{L}_{akd} & 0 & 0 & \bar{L}_{kfd} & \bar{L}_{kkd} & 0 \\ 0 & -\bar{L}_{akq} & 0 & 0 & 0 & \bar{L}_{kkq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\bar{i}}_d \\ \dot{\bar{i}}_q \\ \dot{\bar{i}}_0 \\ \dot{\bar{i}}_{fd} \\ \dot{\bar{i}}_{kd} \\ \dot{\bar{i}}_{kq} \end{bmatrix}$$

經由 Park 轉換及標么化後電感矩陣已成為常數值且為對稱

矩陣，即可由矩陣方程式畫出等效電路圖，如下：

d 軸等效電路圖



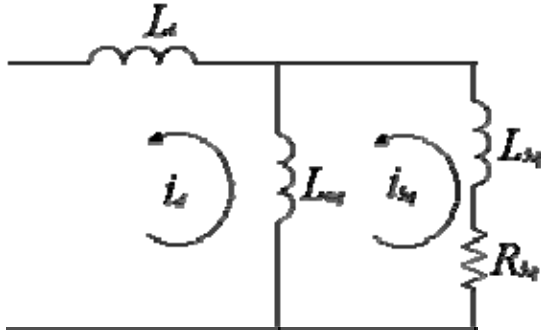
$$\psi_d'' = \psi_d' \frac{L_d'' - L_l}{L_d' - L_l} + \psi_{kd}' \frac{L_d' - L_d''}{L_d' - L_l}$$

$$\frac{d\psi_{kd}}{dt} = \frac{1}{T_{d0}''} \left[\psi_d' - \psi_{kd}' - i_d (L_d' - L_l) \right]$$

$$L_{ad} i_{fd} = \psi_d' + (L_d - L_d') \left[i_d + T_{d0}'' \frac{d\psi_{kd}}{dt} \frac{L_d' - L_d''}{(L_d' - L_l)^2} \right]$$

$$\frac{d\psi_d'}{dt} = \frac{1}{T_{d0}'} (E_{fd}' - L_{ad} i_{fd})$$

q 軸等效電路圖



$$\psi_q'' = \psi_q' \frac{L_q'' - L_l}{L_q' - L_l} + \psi_{kq} \frac{L_q' - L_q}{L_q' - L_l}$$

$$\frac{d\psi_{kq}}{dt} = \frac{1}{T_{q0}''} \left[\psi_q' - \psi_{kq} - i_q (L_q' - L_l) \right]$$

$$L_{aq} i_{kq} = \psi_q' + (L_q - L_q') i_q + T_{q0}'' \frac{d\psi_{kq}}{dt} \frac{L_q' - L_q}{(L_q' - L_l)^2}$$

$$\frac{d\psi_q'}{dt} = \frac{-L_{aq} i_{kq}}{T_{q0}'}$$

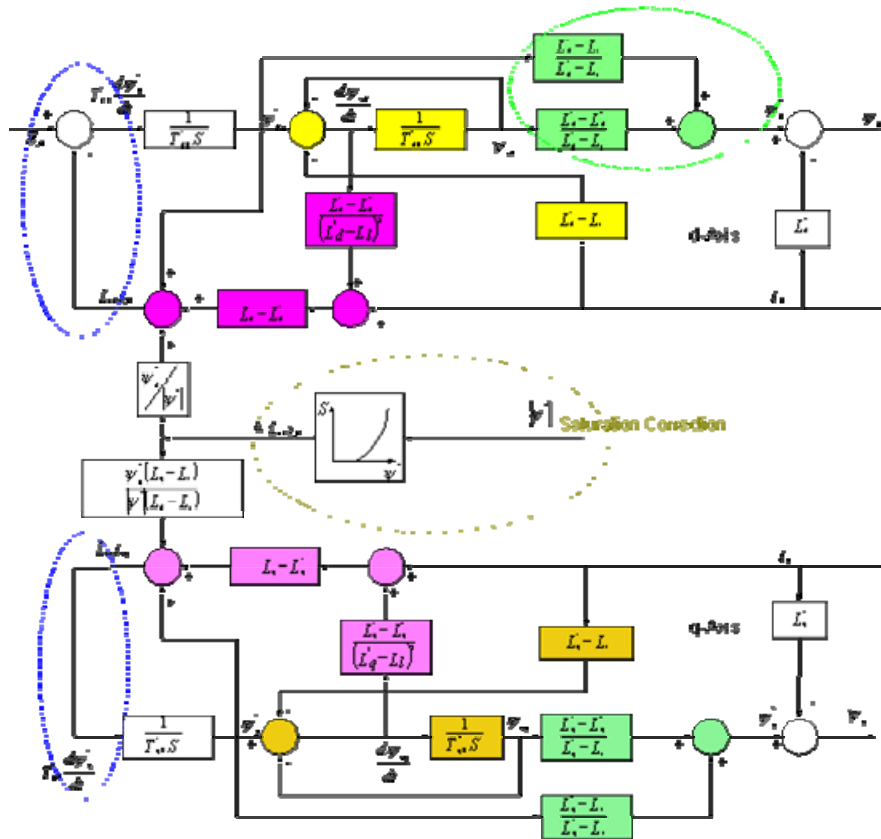


圖 5 同步發電機組數學模型方塊圖

上述數學模型即可應用於 GE 公司 PSLF 及 PTI PSS/E 電力分析軟體中。可使得分析人員由方塊圖中的各元件瞭解在應用分析程式模擬系統時各參數對於模擬結果的影響。

(九) 電力系統穩定度

本課程分為暫態穩定度分析 (Transient stability)、小訊號穩定度分析 (Small signal stability)。課程中舉例介紹此二種穩定度的觀念，以及應用數學方程式中的各項系統變數加強系統的穩定度。

課程中由單機對系統或二部機組為基礎，漸漸擴展至多機組

的系統，並以數學方程式說明系統動態穩定度。

1. 系統暫態穩定度課程心得摘要：

由氣隙功率 $P_e(\delta) = \frac{E_q E_s}{(x_d + 2x_l)} \sin \delta$ 可繪出氣隙功率對功

率角圖形，用以說明等面積法則。

由圖中可看出系統在正常狀況、故障發生未清除前及故障排除後最大傳輸功率隨著系統阻抗值、電壓供應情況變化情況。

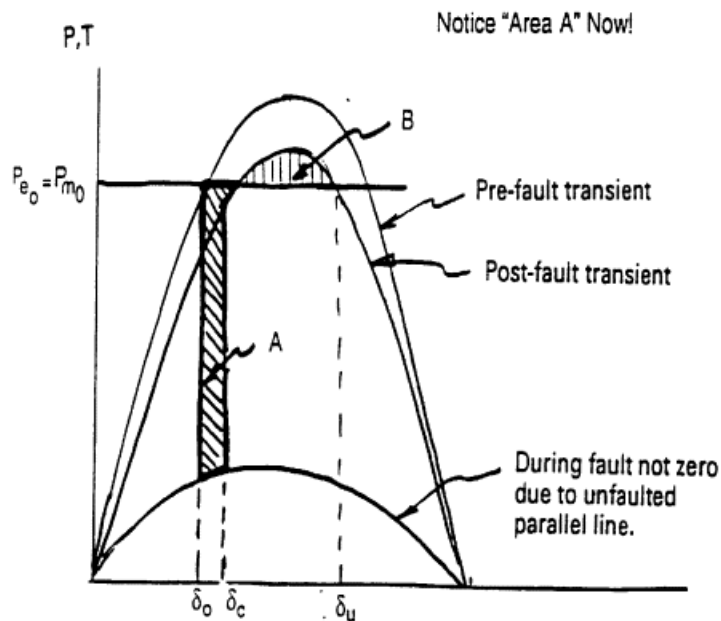
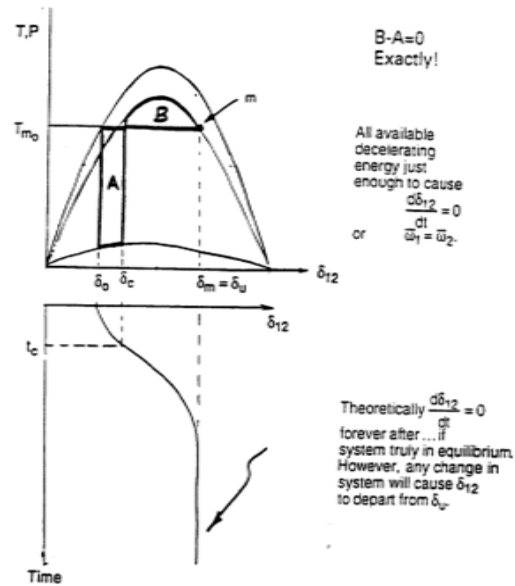


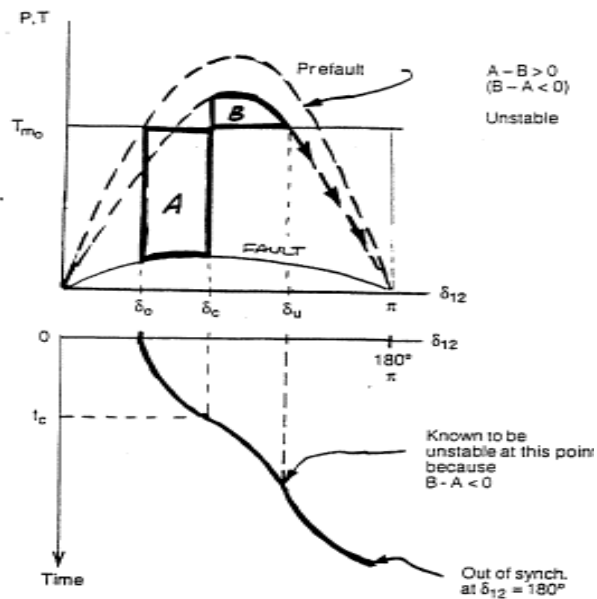
圖 6 等面積法則

Critical Case tcc "Critical Clearing Time"



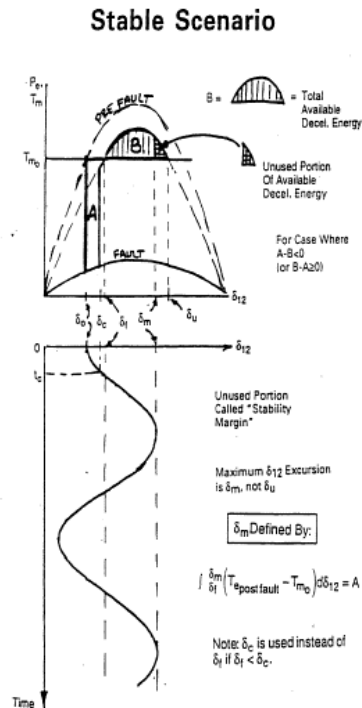
若系統清除故障時間為臨界值時，加速面積與減速面積相等，即不再有其他緩衝的餘裕，為臨界穩定，雖屬暫態穩定，但此時若再有小的干擾發生將造成系統不穩定。

Unstable Scenario

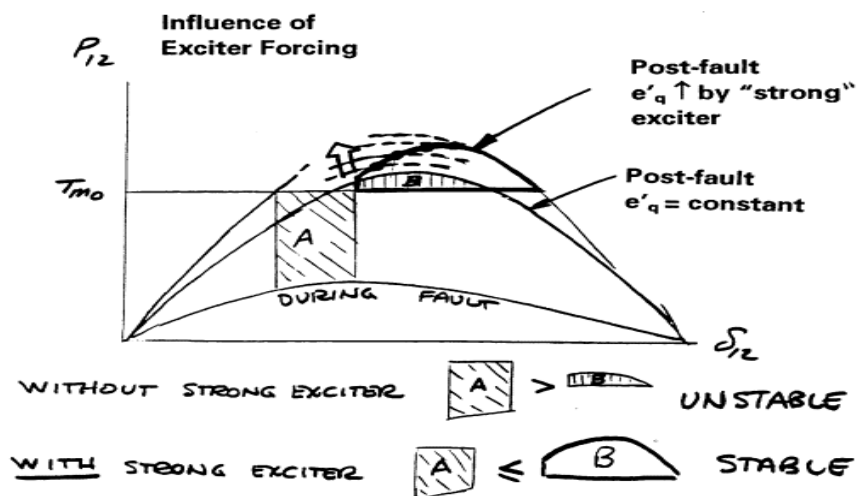


where t_c probably too late ... fault duration too for system conditions and type of fault.

若清除故障時間太慢，即加速面積大於減速面積，將造成系統不穩定。



若可在臨界清除時間前清除故障時間，即加速面積小於減速面積，系統仍可維持穩定。



由等面積法則得知，若能在系統發生故障時適時的增加減

速面積，將可增加系統暫態穩定度，其中我們可使用高增益及快速響應的激磁機達成此項目的。另為改善上述激磁機帶來的副作用，可再裝設電力系統穩定器 (Power System Stabilizer, PSS) 於機組的控制迴路中，藉以適時減少激磁機的輸出，使得系統動態穩定度在一可接受的範圍內。

2. 小訊號穩定度課程學習心得：

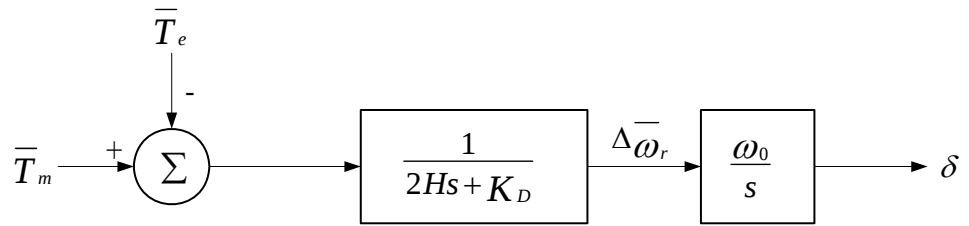
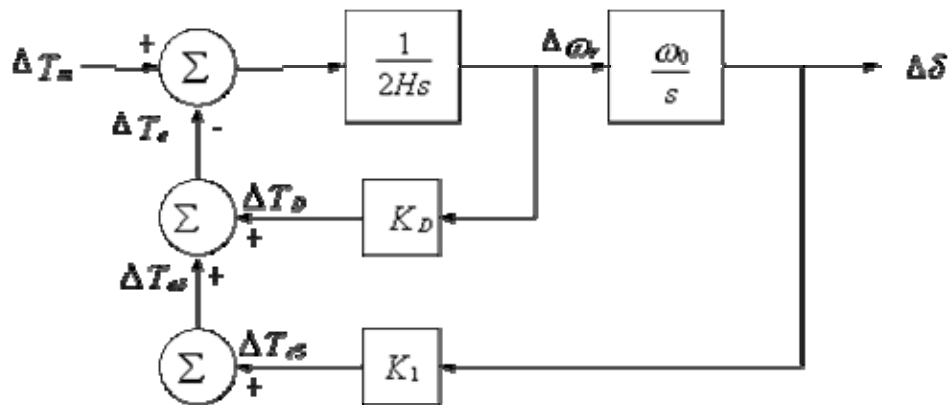


圖 7 Swing Equations 方塊圖

以單一併聯至無限匯流排的發電機組系統經由線性化，並以狀態方程式表示如下：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ w_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m$$



$K_s = K_1$ = 同步轉矩係數

K_D = 阻尼轉矩係數

H = 慣性常數

$\Delta\omega_r$ = 轉子的速度誤差

$\Delta\delta$ = 轉子的角度誤差

ω_0 = 額定角速度

s = Laplace 運算子

3. 電力系統穩定器 (Power System Stabilizer, PSS) 對系統

動態穩定度的影響：

當系統發生電樞反應時會減少系統的同步轉矩係數（同步機傾向於較容易發生失步），但卻可增加阻尼轉矩係數，亦即增加系統阻尼，若此時激磁機電壓調整設備 (AVR) 動作，將使得系統阻尼變成負數，若有小干擾時，發電機本身可能會放大振

盪，最後造成機組損壞，此時加入電力系統穩定器 PSS 後，可看到雖然降低同步轉矩係數，但仍於可接受範圍，重點在於增加系統阻尼，讓系統有較佳的動態穩定度。

(十) 彈性交流輸電系統 (Flexible AC Transmission System, FACTS)

本課程主要在討論各種彈性交流輸電系統設備的原理及應用。

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。

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 FACTS 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。

（十一）電力系統運轉控制

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 8。

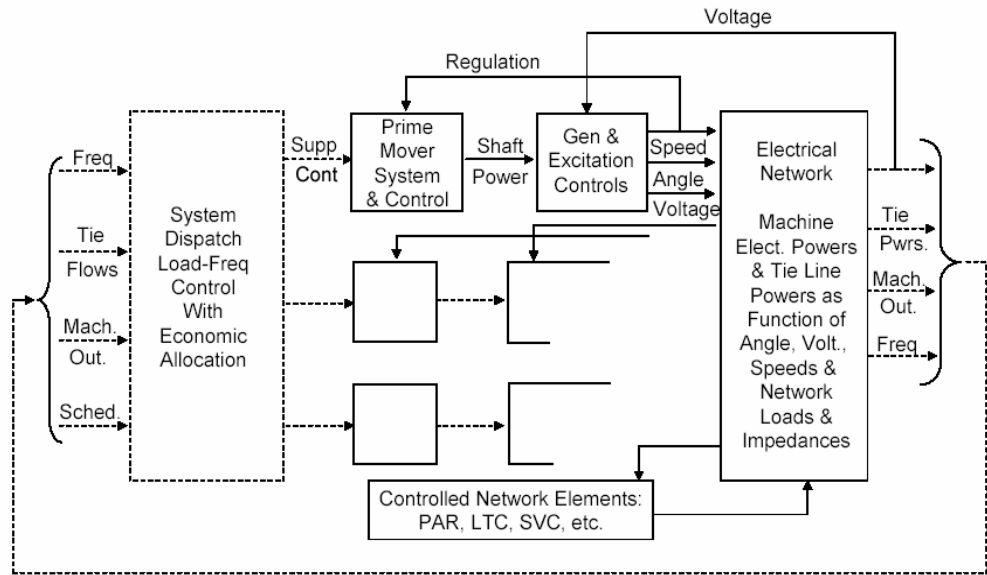


圖 8 電力系統控制概要圖

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(LoadShedding)、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。

1. 負載和轉速控制調速特性：獨立系統中負載變化時，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。

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。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。

(十二) 氣化複循環發電系統(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)

本課程在講授氣化複循環發電系統(IGCC)之發電技術及原理，由於溫室氣體排放限制議題，以致於本技術成為燃煤發電技術之新興潮流。IGCC 為結合燃煤氣化系統與複循環發電系統之先進整合型發電技術。傳統燃煤超臨界發電系統之效率約為 40%，而複循環發電系統效率為 60%。複循環發電系統為目前效率最高的發電技術，惟只適用於液態及氣態燃料，但是石油與天然氣供應日益短缺且價格昂貴，因此如何將燃煤應用於複循環系統以達到高效率低污染且利於二氧化碳捕捉之目標，成為燃煤發電技術最重要的發展方向。 燃煤氣化為歐洲已發展近百年的商業化煤化工技術，不需由基礎開始研究，而複循環系統亦為發電工業中極為成熟之技術，因此結合兩者將固態之燃煤氣化成合成氣送入複循環系統發電而發展出 IGCC 技術，可節省發展之經費並縮短發展期程，因此極具競爭優勢。IGCC 包含二氧化碳捕捉之系統流程為：燃煤經前處理後進入氣化系統，與空氣分

離器產生之氧氣作用生成合成氣，經冷卻後進行水化學反應，將一氧化碳轉化為二氧化碳，再將硫與二氧化碳分離出去，所產生的氫氣可送入複循環系統發電或做其他用途，如化工原料等。分離出去的硫可回收，捕捉之二氧化碳可再利用或封存於地下鹽水層而達到減量之目的。IGCC 具有燃料與產品多元化，高效率低污染及利於二氧化碳捕捉等優點，目前尚屬商業示範階段，其建廠與發電成本高於傳統超臨界燃煤發電技術 20%，而運轉率約為 80%，低於傳統超臨界燃煤發電技術（>90%），尚待積極發展。

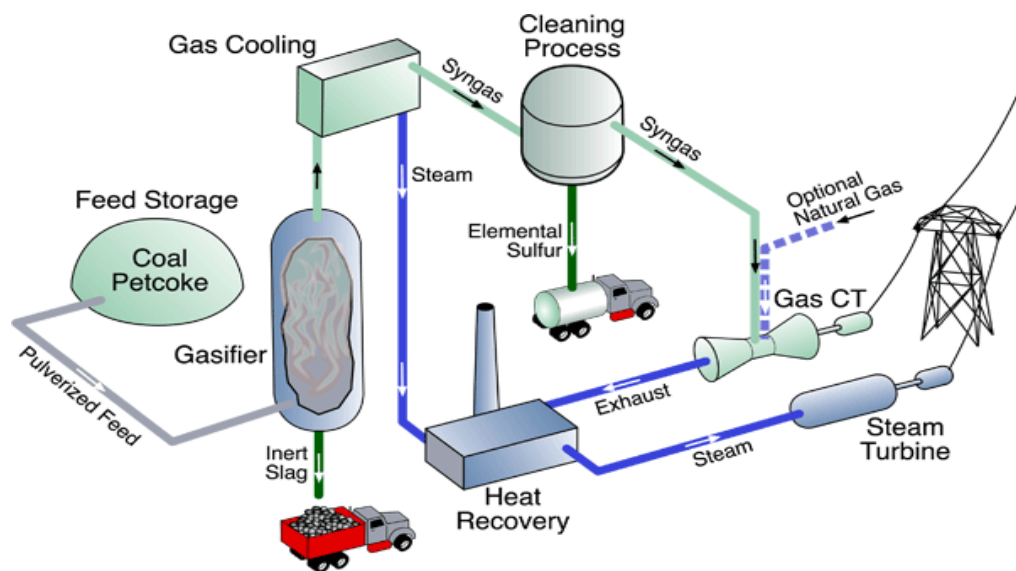


圖 9 IGCC 發電廠示意圖

IGCC 使用燃料極有彈性，包括燃煤、石油焦、廢棄物及生質燃料等均可。前述燃料中，燃煤價格相對低廉穩定且開採年

限最長；石油焦為煉油工業副產品可再次利用並節省燃料；廢棄物可同時解決能源與環保問題；生質燃料除具上述優點外，更可有效降低二氧化碳排放量。多元的進料大幅降低對石油與天然氣以及單一能源之依賴性，有效提升能源安全度，因此採用 IGCC 技術發電做為國內主要基載電力之一，為值得考量之能源政策。

目前 IGCC 發電效率約為 43%，並具有燃煤發電系統中最高效率之潛力（>55%），若與燃料電池結合則可超過 60%，其中 SO_x、塵粒與 NO_x 排放遠低於其他燃煤發電系統，NO_x 排放甚至與天然氣發電相當。由於在燃燒前之高壓條件下捕捉二氧化碳，因此其捕捉成本遠低於其他燃煤發電系統及天然氣發電系統。捕捉二氧化碳後必須封存方能達到減量效果，若又排放於大氣中則捕捉毫無意義。目前二氧化碳封存仍有諸多障礙，因此 IGCC 利於二氧化碳捕捉之優勢尚未能發揮，甚至遭質疑捕捉後之二氧化碳何去何從。IGCC 目前之二氧化碳減量功能在於高效率與利用生質能。提升 5% 的效率相當於二氧化碳減量約 10%，荷蘭 Nuon IGCC 電廠採用 30% 的生質能相當於二氧化碳減量約 30%。IGCC 僅憑多元化、高效率及低污染等優點便值得發展，未來二氧化碳封存

若實際執行則 IGCC 將更具優勢。

(十三) 公用事業經濟學 (Utility Economics)

本課程旨在讓學員瞭解資金投資計畫的方案決策過程及各種分析財務的方法，作為資金投資的分析工具，將這些方法應用於簡單的電力系統中的方案選擇決策過程，期能應用於實際的方案決策，有助於公司營運。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。

(十四) 競爭性的發電事業(Competitive Power Generation)

本課程主要在讓學員實際執行一建置發電廠計畫，在此模擬計畫過程中學員可習得電廠機組規畫、運轉、財務計畫等實

務，學員首先依即有的燃料供應管線及輸電網路選定廠址，並應用奇異公司的規劃程式嘗試各種發電機組型式適合該地區，概略得知幾種機組型式後，再與燃料公司、電力公司、銀行等討論投資計畫，最後並依完成規劃的機組模擬運轉情況，驗證其資金回收率。

（十五）風力發電

風力發電乃借自然風力帶動風機葉片，將風能轉換成機械能，再經發電機轉換為電能。其優點是能源乾淨，取之不絕，用之不盡；缺點為噪音問題，且並非每個地區都適合安裝風力機組。現今商業化主流風力機為水平軸、三葉式翼型風力發電機。

1. 風機概觀及機艙構成元件

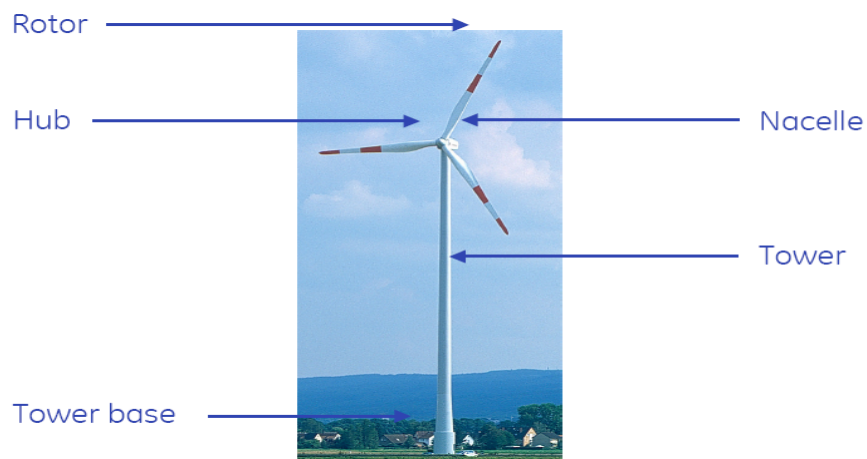


圖 10 風機概觀及機艙構成元件

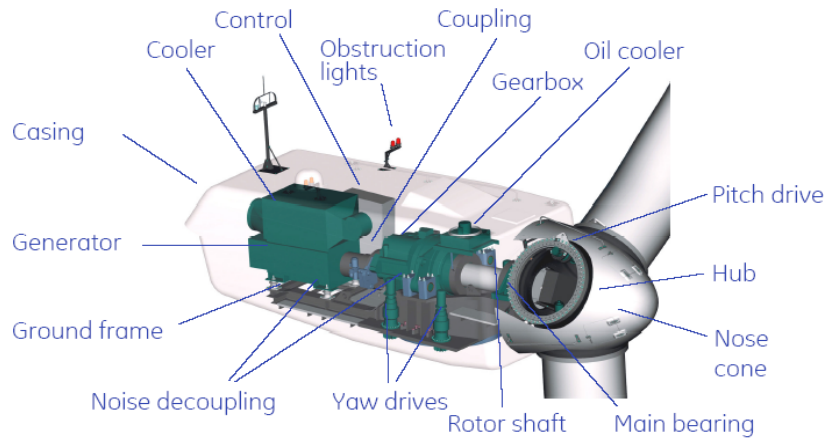


圖 11 風機機艙示意圖

機艙 Nacelle：保護包覆發電機及機電控制系統

葉片 Blade：受氣動作用，將風能轉為機械能

葉輪輪轂 Hub：連接及固定葉片之裝置

主軸 Main Shaft：連接輪轂及齒輪箱，主要將葉片的轉矩傳

遞至傳動機構及發電機

齒輪箱 Gearbox：利用加速齒輪提升轉速帶動發電機 發電機

Generator：將機械能轉為動能

塔架 Tower：支持風機之機艙及迴轉系統

旋角 Pitching：調整葉片迎風角度以調整氣動力輸出

轉向系統 Yawing：轉動機艙以調整至垂直風向發電

煞車系統 Brake：以控制停機或減速

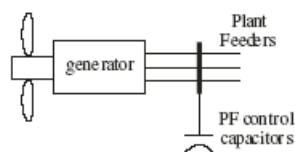
2. 風力發電機種類

目前常見風力發電機種類可分為四大類：

(1) Type1 鼠籠式感應發電機 (Squirrel-cage

induction generator, SCIG): 此類機型由一轉子和一鼠籠式感應發電機，連接到一個齒輪箱，發電機定子線圈則連接到電網，構造極為簡單，相對的價格較低廉，然因為轉子速度不能改變，風速的變動直接轉換為驅動轉子之扭矩起伏變化，造成電壓不穩及有閃爍的問題，使得電的品質受到影響，且由併聯電網吸收無效電流，需配合設置補償虛功率的電容器因應，如下圖所示。

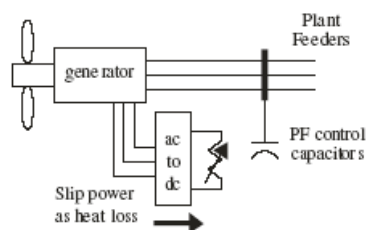
Type 1



(2) Type2 繞線式感應發電機 (Wound rotor

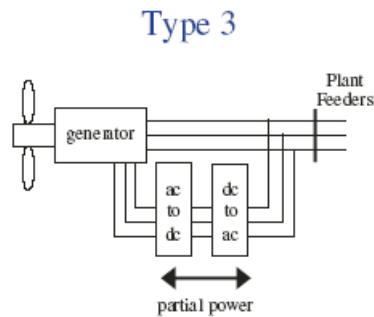
induction generator, WRIG): 此類機型係由 Type1 演化，利用可調式轉子電阻控制調整轉速；如下圖所示。

Type 2



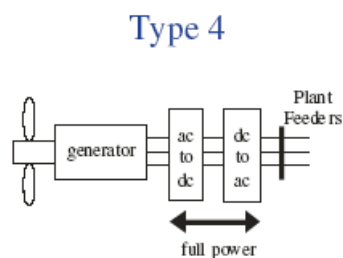
(3) Type3 雙饋式感應發電機

(Doubly-fed induction generator, DFIG)：不需額外設備即可提供或吸收虛功，機組採標準化且體積較小，AC-DC-AC轉換器半導體零件價格降幅極大，故已成為主流型式。



(4) Type4 直接傳動可變速同步發電機

(Full-conversion interface)：將發電機和併聯電網能完全的用電子轉換器耦合，也允許變速操作，因風機出力，基本上與系統已完全脫溝，可視為變形的 SVC-STATCOM，對於虛功及電壓控制範圍最大，然比起雙饋入可變速感應發電機來說發電機定子設計較複雜、電子轉換器較大、較重，故價格較高。



六、課程期間參觀訪問活動簡介

(一) GE 汽輪機與發電機製造工廠

此工廠位於 Schenectady 廠區 BLDG. 273 內，佔地 25 英畝，可分為七個部門，分別為 Machine Repair、Clean Room、Bucket Assembly Bearings、Generator Wind、Generator Armature Bars Coil Wind、Large Machinery 與 Rotor Turbine& Generator。參訪過程中，奇異派專人解說廠區內作業流程：由線圈繞製、絕緣、轉子電樞製作、定子矽鋼片安裝排列、安裝線圈於轉子、定子、最後完成測試工作，各項步驟皆詳細說明，讓學員瞭解製作過程的精密及其專業性。該廠已製造出 8000 部以上的發電機，最大容量達 1359MW，裝機容量超過 400GW 且遍及 90 國家，其所需之創新技術係由 GE R & D Center 所提供。

(二) GE 全球研發中心(Global Research Center Headquarters)

GE 公司是一個結合科技與製造並多元性發展的世界級企業集團，長久以來在各個領域有相當令人印象深刻的與成就，該公司自 1878 年由愛迪生(Thomas A. Edison)創立以來，已超過百年歷史，而歷經時代的變遷與企業轉型的雙重考驗，GE 憑其不斷創新研發精神，發展成為當今世界上

少數成功的跨國企業(全球一百多個國家設有分公司，超過三十萬名員工)，更是 1896 年在美國道瓊 (Dow Jones)掛牌上市的所有公司中，迄今唯一 碩果僅存的一個，可知求新求變是一個公司永續經營的原動力，足堪效法學習。

(三) 紐約獨立調度中心 (NYISO)

紐約獨立調度中心 (New York Independent System Operator, NYISO) 簡介如下：

1. 1993 年紐約電力池 (New York Power Pool , NYPP)。
2. 為因應 FERC 與紐約州立公共服務委員會引進新的政策，重新定義新的規則，正式成立 NYISO 於 1997 年。
3. NYISO 是由十位不同專業背景人士組成之委員會管理。
4. 其職責任務：
 - 執行紐約州電力系統可靠運轉
 - 負責紐約州的輸電線路系統與電力躉售市場的運轉，建立公開、公平及有效的競爭市場。
 - 改善區域間運轉與規劃的合作
 - 符合或超越所有地區顧客的期望。
5. 電力交易所的工作包括：撮合及促進裝置容量、電能及輔助服務等三大市場買方與賣方間的交易；電能競標處理；計費結算等。

(四) Selkirk Cogen 汽電共生廠

該汽電共生廠位於紐約州 Selkirk，為奇異公司投資生產塑膠工廠之汽電公司，該廠採用額定容量 345MW 天然氣複循環發電機組，其生產電力最高提供 80 MW 至鄰近 Niagara Mohawk Power Corporation，另提供 265 MW 電力至 Consolidated Edison Company of New York；該廠產生蒸汽量每小時可達 400,000 磅，提供毗鄰塑膠產品工廠製程所需蒸汽，而生產電力約可饋供 345,000 戶家庭用電所需。Selkirk 汽電廠係 1992 年運轉，第一期設置 80MW 設備(由單一氣渦輪機連結輔助燃燒設備組成)，至第二期則擴建為二台氣渦輪機+二台廢水回收鍋爐及一台汽輪機，一、二期間汽管可互通，整體容量提升至 345MW，其商轉時間為 1994 年 9 月。GE 塑膠廠由於增設汽電設備後，使得該廠產值提升一倍以上，亦能平衡其能源支出，提升該廠營收；自 1994 年起，該廠經營管理由其投資伙伴 National Energy Gas & Transmission 公司負責，而運轉維護則由 GE Plastics 依契約執行服務。

七、參考文獻(攜回資料)

- (一) Hadi Saadat ,“Power System Analysis”
- (二) Steven A. Barnes, "Power Flow and Transient Stability Analysis"
- (三) Ronald L. Hauth, "Transmission Analysis"
- (四) Liz Pratico, "Surge Analysis & Equipment Application"
- (五) John P. Skliutasr, “Reactive Power Compensation & Voltage Control”
- (六) Mike Reichard,P.E. & Jason MacDowell, “Fundamentals of Power System Relaying”
- (七) Dr. Sheppard Salon, “Synchronous Machine Fundamentals I & II”
- (八) Juan J. Sánchez-Gasca, “Power System Dynamics”
- (九) Sandy Murdoch & Steven A. Barnes, “Generation Control Fundamentals”
- (十) Reigh Walling, “Power Electronics Applications in Transmission”
- (十一) Lavelle Freeman, “Distribution Systems Planning and Reliability”

- (十二) Devin Van Zandt, “Distribution Equipment and Application”
- (十三) John McDonald & Byron Flynn, “Modern Grid : Substation/Distribution Automation”
- (十四) Beth LaRose, “Global Power Markets”
- (十五) Sundar Venkataraman, “North American Energy Industry ”
- (十六) Steven Oltmanns & Ravi Kanth Varanasi, “Utility Economics”
- (十七) Gary Jordan and Rit Sepanski, “Strategic Transmission & Generation Planning”
- (十八) Beth LaRose & Gene Hinkle, “Deregulated Power Markets”
- (十九) Sundar Venkataraman, “Power Plant Financial Modeling and Evaluation”
- (二十) Chris Stammen & Jack Weininger, “Competitive Power Generation”
- (二十一) Terry Raddings & Chris Kelbert, “Integrated Gasification Power Fundamentals”

- (二十二) Everett Whitaker & Andrew Poulos, “Nuclear Power Fundamentals”
- (二十三) Russell Young & Chris Kelbert, “Fuel Flexibility and Alternative Energy Applications”
- (二十四) Jack Weininger & Mike McMurray, “Industrial Energy Users”
- (二十五) Nicholas W. Miller, “Wind Power Fundamentals”
- (二十六) Mahmood Nahvi & Joseph Edminister, “Electric Circuits”
- (二十七) Prabha Kundur, “Power System Stability and Control ”
- (二十八) Allan Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems”
- (二十九) J. Lewis Blackburn and Thomas J. Domin, “Protective Relaying Principles and Applications”
- (三十) John D. McDonald, “Electric Power Substations Engineering”
- (三十一) Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, “Power Generation Operation and Control”