

行政院及所屬各機關出國報告

(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：台電公司 電力調度處
出國人職稱：九等電機工程師
姓名：高孟甫
出國地區：美國
出國日期：90年9月4日至91年4月22日
報告日期：91年6月21日

93/09005120

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

高孟甫/台灣電力公司/電力調度處/九等電機工程師/2366-6609

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：90.9.4—91.4.22 出國地區：美國

報告日期：91.6.21

分類號/目

關鍵詞：奇異電能顧問部門 (GEPSEC)、電力系統研習班 (PSEC)

內容摘要：(二百至三百字)

美國奇異公司電能顧問部門(GEPSEC) 創辦電力系統研習班課程 (PSEC)，至今已有五十三年歷史。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，授課老師皆已在 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。在公司的課程中亦安排有實地參訪獨立調度中心、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，有助於提昇電力調度技術與分析檢討系統的能力。

目 錄

頁次

一、 前言	1
二、 電力系統研習班課程說明及研討心得	1
三、 課程期間參觀訪問活動	48
四、 建議	50

一、前言

本次前往美國奇異公司近八個月期間學習該公司電力系統研習班 PSEC 課程，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，並融合該公司多年應用於電力業界的實際經驗技術，為一理論與實務兼顧的學程，對於系統分析人員專業技能知識有相當大的助益。

二、電力系統研習班課程說明及研討心得

PSEC 課程可分為四大部份，將各科學習心得分述於後：

第一部份(The first quarter)：輸電系統分析與規劃
(Transmission Analysis & Planning)

1. 基本電路分析複習(Circuit Analysis Review)：

本課程由 Union College 電機系的 Ekram Hassib 教授負責指導本課程，每位參加訓練的電力工程師在本課中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。

2. 電力系統之基本分析 (Power System Analysis):

此課程由奇異公司電力系統能源顧問 (Power System Energy Consulting; GEPSEC) 資深工程師 Joe Plewinski 先生負責指導學員在本課程中習得各種電力系統元件的數學模型及如何分析三相電力系統; 個人在課後作業中即推導包括傳輸線路、變壓器的數學模型, 並將其應用於電力系統分析中, 例如穩態運轉下的電力潮流分析、輸電網路平衡與不平衡故障分析。

指導老師並教授應用高斯塞德法 (Gauss-Seidal) 及牛頓拉福森法 (Newton-Raphson) 於系統電力潮流解析, 使用對稱成分法求正序、負序與零序成分, 再分別依線路故障型態 (線對地、線對線及兩線對地故障) 求解故障電流、電壓。在課程中個人亦特別分析電流程式的撰寫流程, 更瞭解 PSLF 或本公司採用的系統分析軟體 PSSE 程式的運作、演算方式。

3. GE 電力系統分析軟體 PSLF 簡介 (PSLF Seminar):

此課程由奇異公司電力系統能源顧問資深工程師 Brian Jacobsen 先生負責指導系統分析人員可由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。

4. 電力傳輸分析與定價（Transmission Analysis and Pricing）：

此課程由奇異公司電力系統能源顧問資深工程師 Ronald Hauth 先生負責指導，本課程主要在使學員透過老

師的指導及實際操作，瞭解電力市場在解除管制環境下有關係系統開發、計畫、電力輸送業務的審查作業程序，學員被分為數個小組研究電力傳輸計畫、運轉時需注意的項目，利用 GE 公司分析軟體 PSLF 測試一個系統做為分析案例，學得如何加強電力系統運轉安全的各項方案。

5. 突波現象 (Surge Phenomena)：

此課程由奇異公司電力系統能源顧問 Liz Practico 與 John Skliutas 二位資深工程師負責指導，本課程目標在使學員瞭解系統設備的絕緣協調，在設計系統絕緣時能得到一個可靠且低成本的解決方案。在兩星期的課程中，每位工程師可學習瞭解下列領域的知識：1.電壓突波的分配參數計算。2.輸電線路的雷擊保護，包含線路的遮蔽、鐵塔的接地電阻 3.雷擊突波的特性 4.各項設備的絕緣特性，如線路、變壓器等設備。5.電壓突波保護設備 6.電壓突波於輸電線路的特性，如系統短路電壓突波、線路開路電壓、鐵共振電壓突波、斷路器復閉電壓突波等各種系統事故情況下的電壓突升情況。

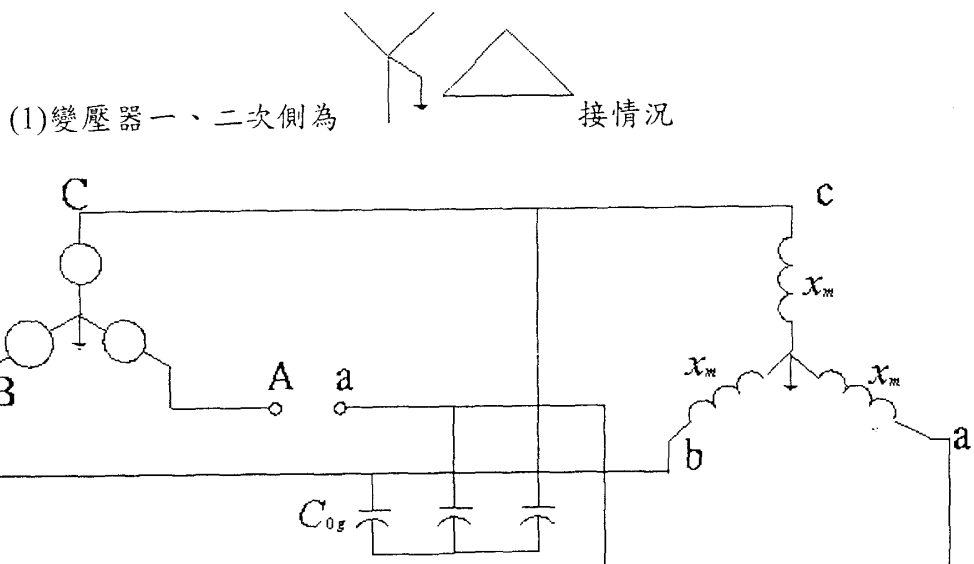
由本項課程中系統設計人員在協調系統絕緣時，可使系統在遭受電壓突波襲擊時將過壓情況減至合理的程度。

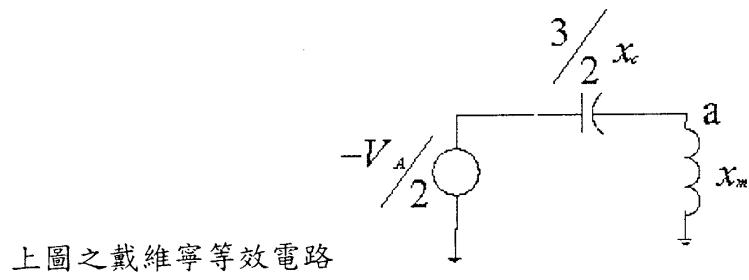
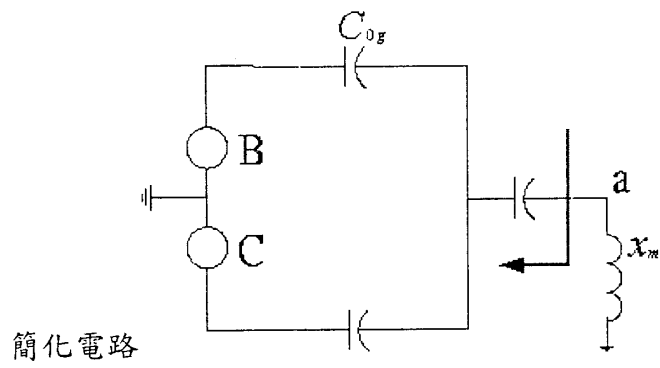
民國 90 年 3 月 18 日曾經發生核三事故，電廠內許多設備受損，引起國內相當大的注意，會審專家中曾提出可能是因鐵共振引起，因此特別對此過電壓現象學習心得說明及理論演算供設計人員參考，在工程設計、施工時即能事先預防。

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。

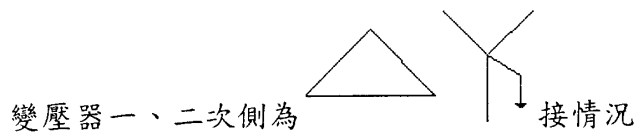
下圖為配電線路在各種變壓器接線情況下，於線路開路端可能產生鐵共振進而引發高電壓。此 Y 接地變壓器原本被認為不會發生鐵共振，但經演算後證明在非接地的等效電容與其變壓器電抗仍可能發生共振情況，因此設計人員仍需防範。

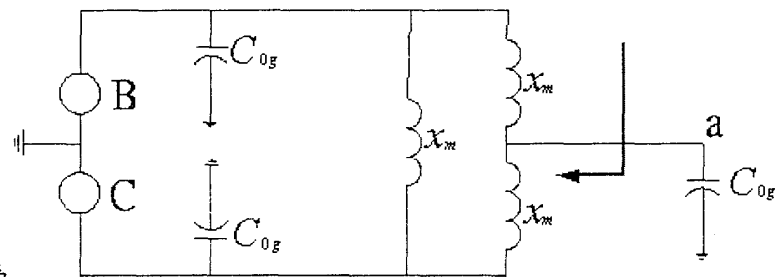
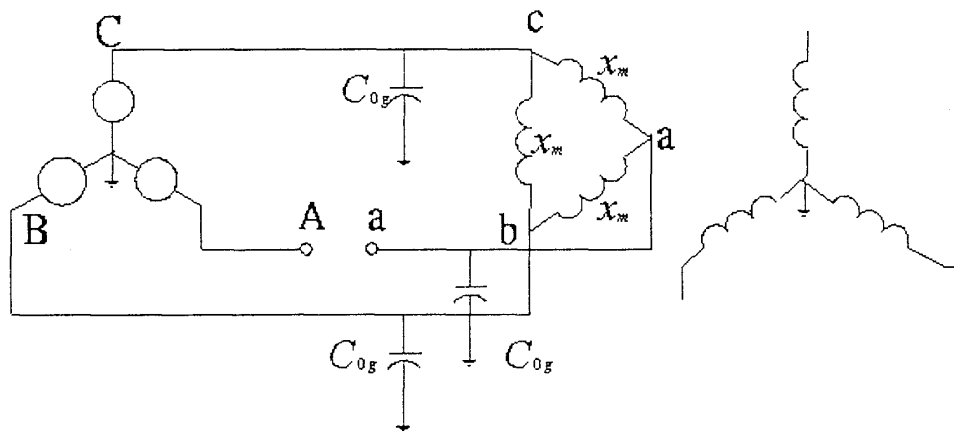




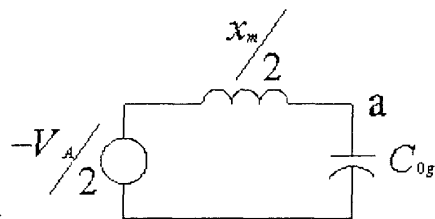
$$\text{開路電壓 } V_a = -\frac{V_A}{2} \left[\frac{jx_m}{jx_m - j\frac{3}{2}x_c} \right] = \frac{V_A}{2} \left[\frac{1}{1 - \frac{3}{2}\frac{x_c}{x_m}} \right]$$

$$\text{when } \frac{x_c}{x_m} = \frac{2}{3} \rightarrow V_a = \infty$$





簡化電路為



上圖之戴維寧等效電路

$$\text{開路電壓 } V_a = -\frac{V_A}{2} \left[\frac{-jx_c}{-jx_c + j\frac{x_m}{2}} \right] = \frac{V_A}{2} \left[\frac{2x_c}{x_m} \right] \left[\frac{1}{1 - \frac{2x_c}{x_m}} \right]$$

$$\text{when } \frac{x_c}{x_m} = 0.5 \rightarrow V_a = \infty$$

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。

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。

第二部份(The second quarter)：進階電力系統議題
(Advanced Power Systems Topics)

1. 同步機 (Synchronous machines)：

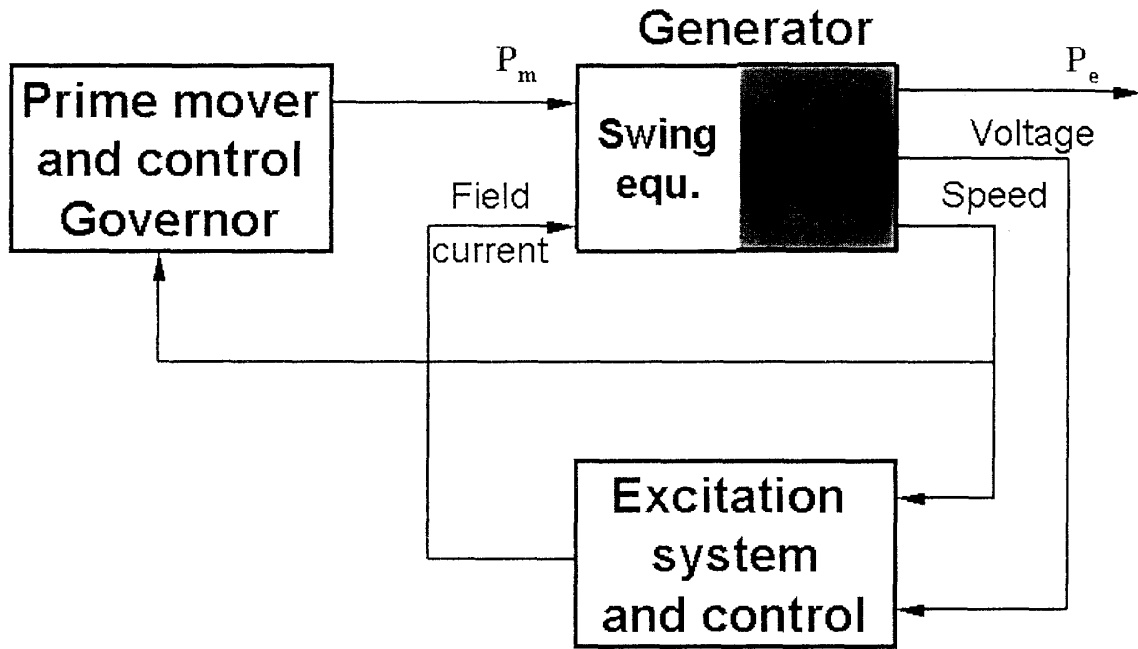
由 Rassenlaer Polytech Institute (RPI) 電力系
Dr. Shepherd Salon 教授負責指導，學員可由本課程加
強對同步機在各種運轉情況下的瞭解，課程分為兩大部份：1.
同步機的數學模型 2.性能分析。同步機數學模式的推導包括：
同步機的基本概念、d-q 軸轉換、標么化的各種方程式、以及
同步機的等效電路。第二部份是同步機在穩態運轉時的分析、
平衡故障分析、不平衡故障分析。

Synchronous Machine 課程，講授主要內容有下列項目：

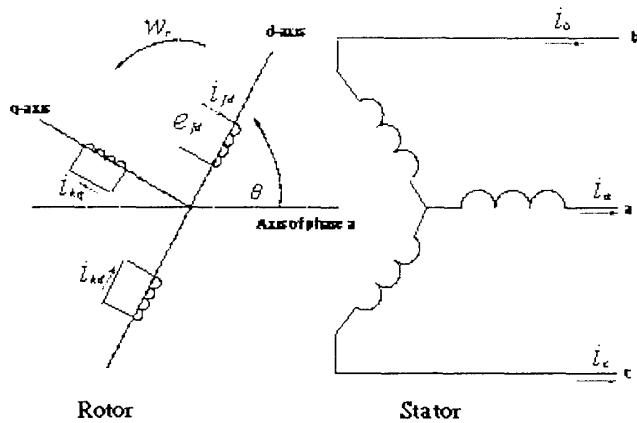
- 同步機基本理論。
- 同步機的數學模型。
- dq0 軸轉換(Park's equations)及標么化。
- Steady State 的向量圖。
- 同步發電機容量曲線。
- 同步發電機的繞組結構。
- 同步發電機三相故障時的分析。
- 同步機的方塊圖數學模型推導。

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：



同步發電機組控制方塊圖



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

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \\ \Psi_{fd} \\ \Psi_{kd} \\ \Psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & 0 & L_{afd} & L_{akd} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & 0 & L_{akq} \\ 0 & 0 & -L_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{3}{2}L_{afd} & 0 & 0 & L_{ffd} & L_{fkd} & 0 \\ -\frac{3}{2}L_{akd} & 0 & 0 & L_{kfd} & L_{kkd} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}L_{akq} & 0 & 0 & 0 & L_{kkq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix}$$

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：

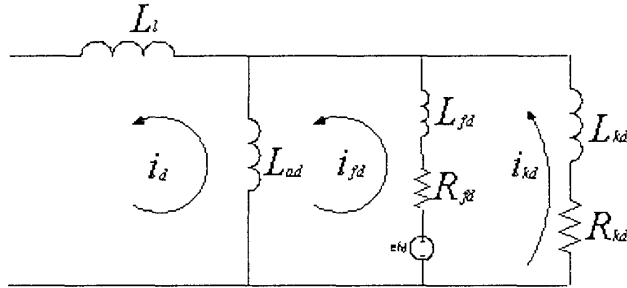
Per unitize

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

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



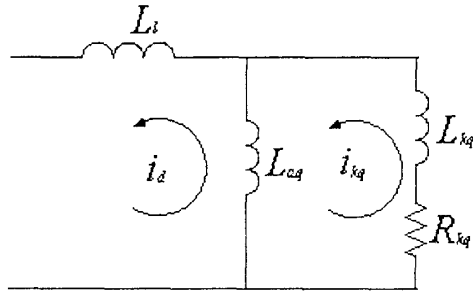
$$\psi_d'' = \psi_d' \frac{L_d' - L_l}{L_d' - L_l} + \psi_{kd}' \frac{L_d' - L_d''}{L_d' - L_l}$$

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

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

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

q 軸等效電路圖

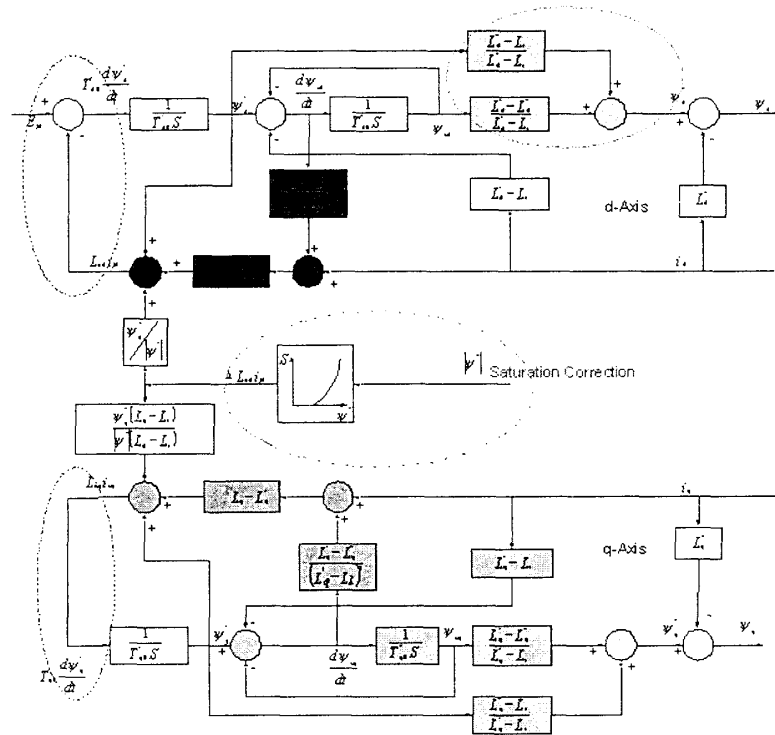


$$\psi_q'' = \psi_q' \frac{L_q'' - L_l}{L_q' - L_l} + \psi_{kq}' \frac{L_q' - L_q''}{L_q' - L_l}$$

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

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

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



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。

2. 電力系統穩定度 (Power System stability):

此課程由 GE PSEC 資深工程師 Dr. Wenchun Zhu (朱文純博士) 及 Dr. Juan J. Sanchez-Gasca 負責指導，本課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。

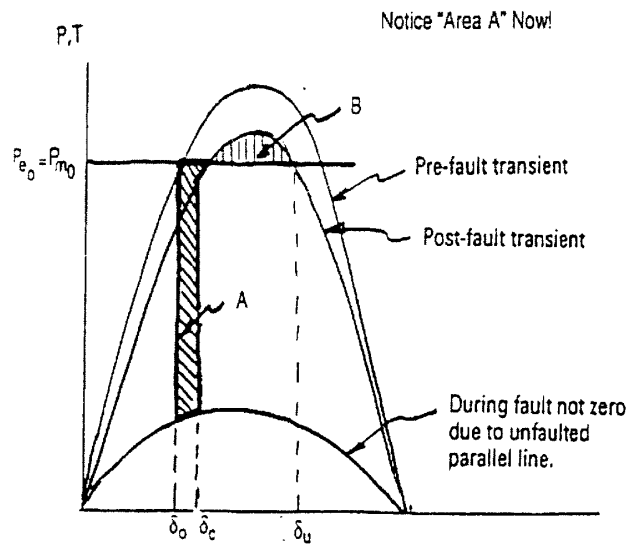
系統暫態穩定度課程心得摘要：

單一發電機對無限匯流排系統

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

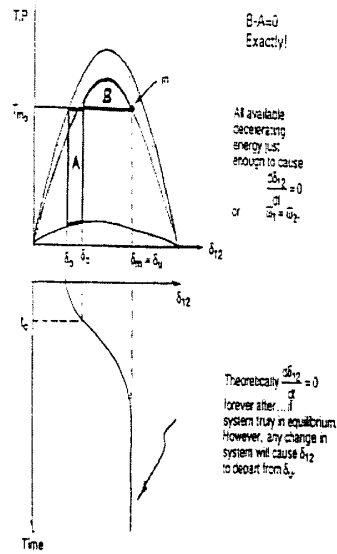
率角圖形，用以說明等面積法則。

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。



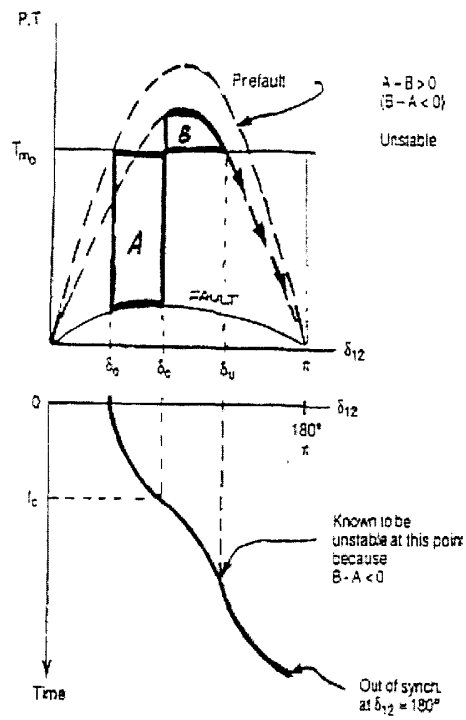
等面積法則

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。

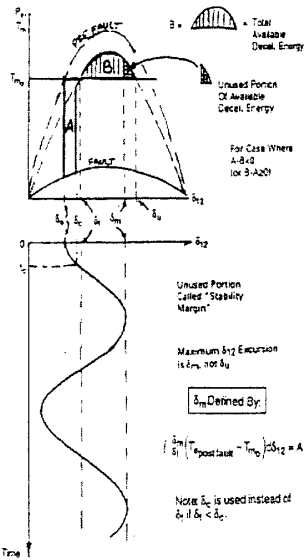
Unstable Scenario



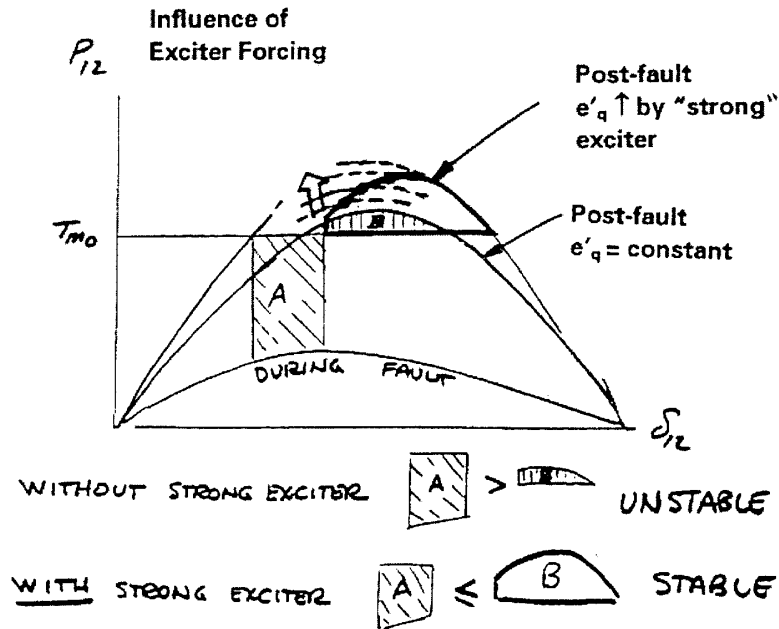
where t_c probably too late ... fault duration too
for system conditions and type of fault.

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。

Stable Scenario

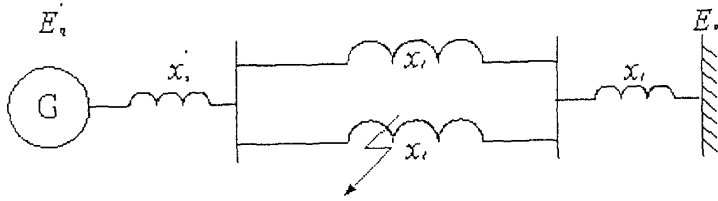


若可在臨界清除時間前清除故障時間，即加速面積小於減速面積，系統仍可維持穩定。



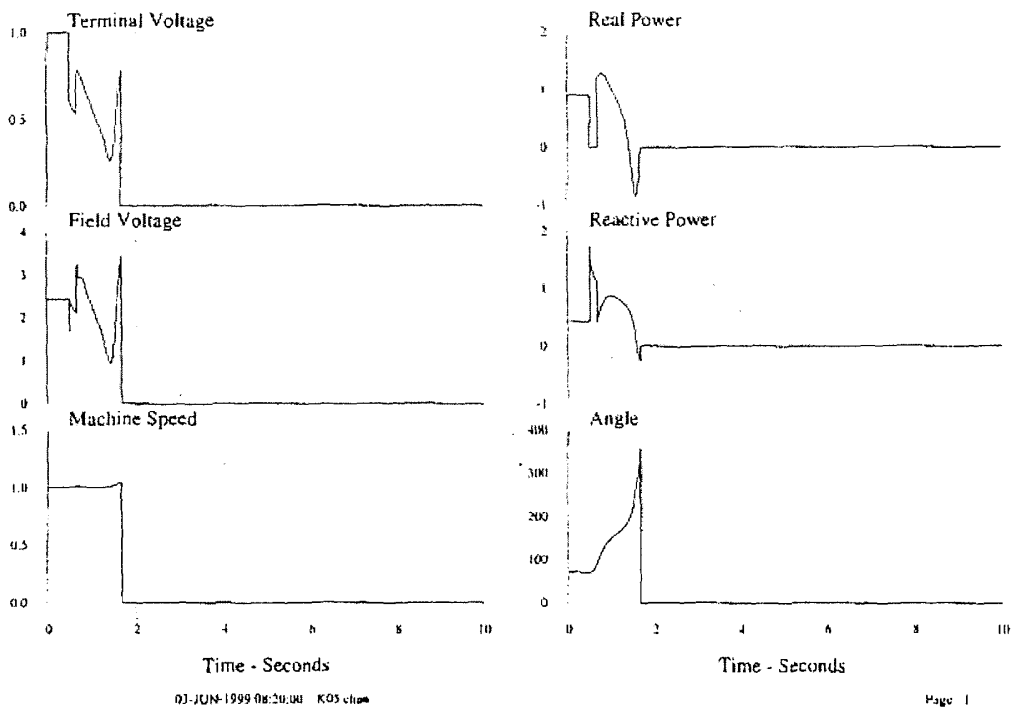
由等面積法則得知，若能在系統發生故障時適時的增加

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。並舉下列例子說明：



首先將激磁機增益設定於較低值，因減速面積較小，可看出當系統發生故障時，造成不穩定情況。

Exciter Transient Gain=5 時系統於故障時的響應

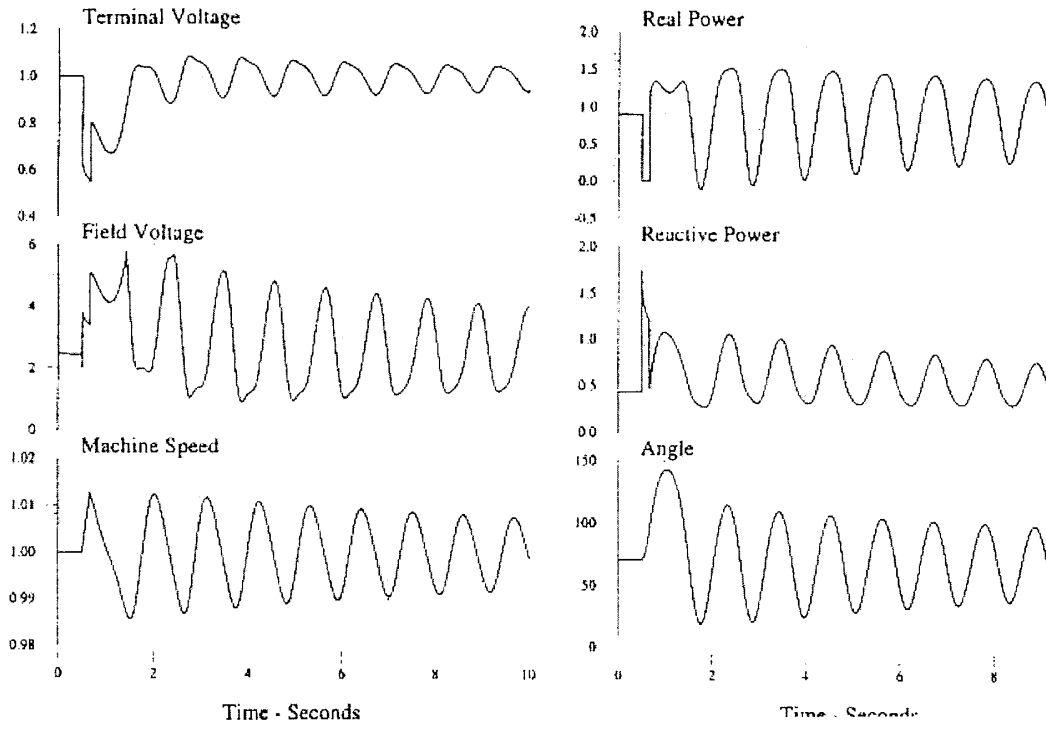


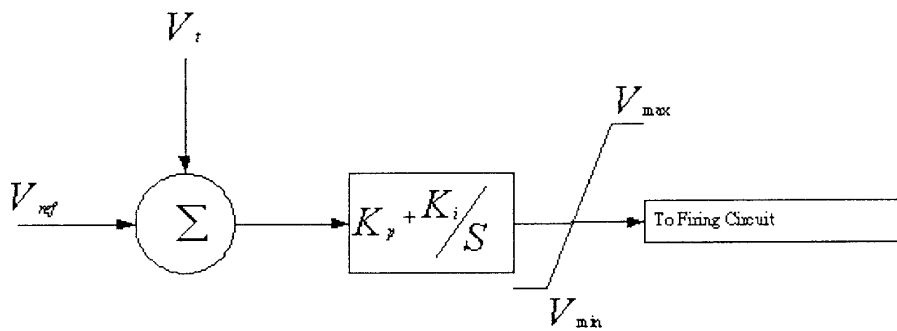
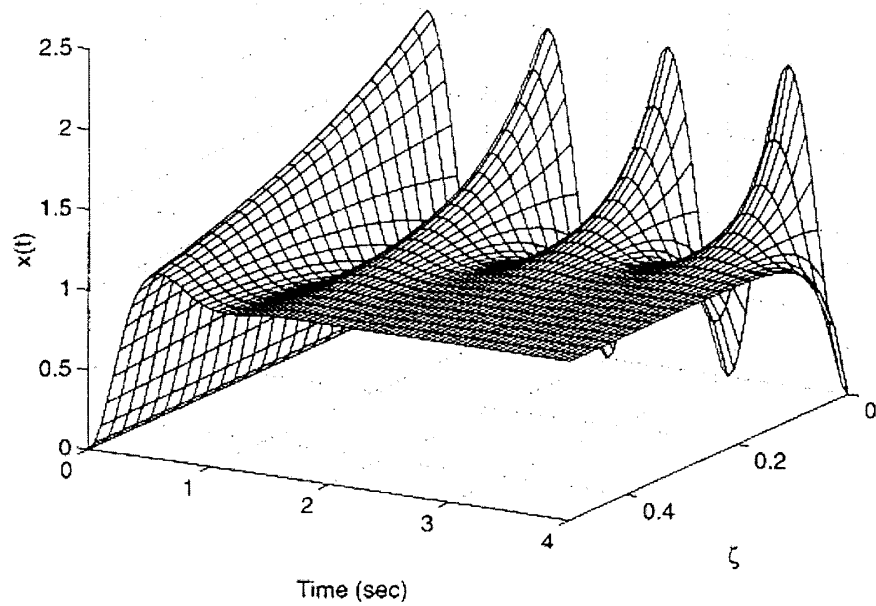
在系統發生故障時，適時將激磁機增益增加至 20，藉以增加減速面積，暫態穩定度亦隨之增加，但因高增益且快速反

應的激磁機將使得系統較容易處於振盪的情況，即系統阻尼比

減少，動態穩定度較差。

Exciter Transient Gain=20

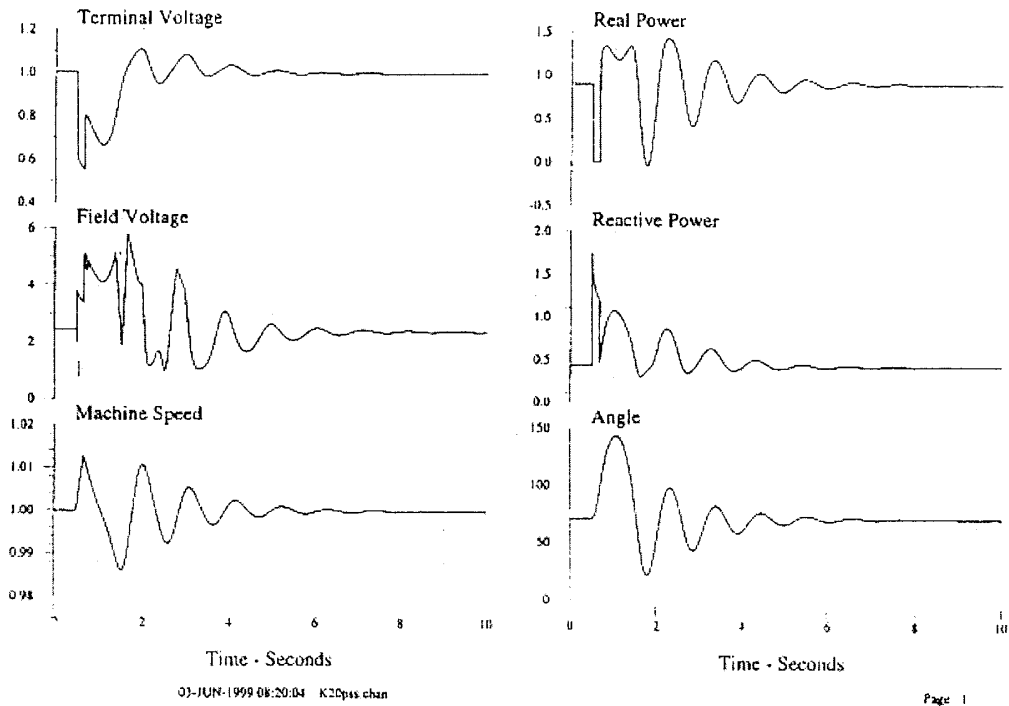




分析人員可由上圖瞭解激磁機系統為一比例、積分器，在整個系統的轉移函數中增加原點極點的作用，因此使得系統特徵值趨向於右半平面，導致不穩定情況。

為改善上述激磁機帶來的副作用，因此再裝設電力系統穩定器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。

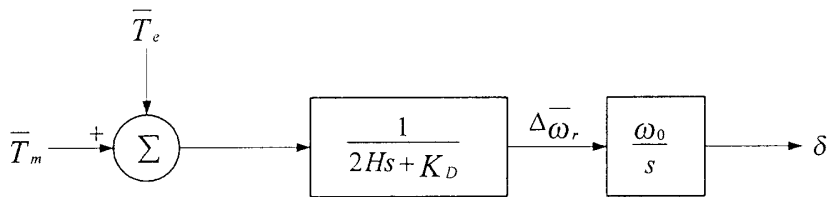
Exciter Transient Gain=20, PSS ON



小訊號穩定度課程學習心得：

Swing Equation

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d \Delta \omega_r}{dt} + K_D \frac{d\delta}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e$$



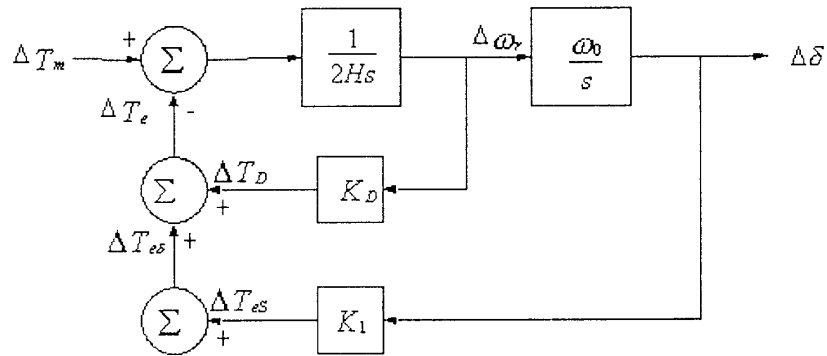
Swing Equations 方塊圖

State-Space representation

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：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m$$



$K_S = K_1$ = 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

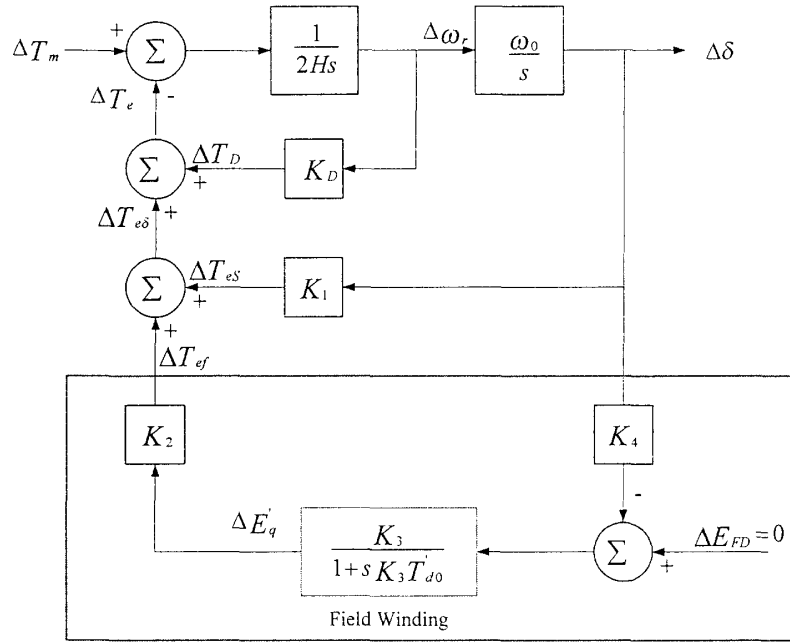
ω_0 = 額定角速度

s = Laplace 運算子

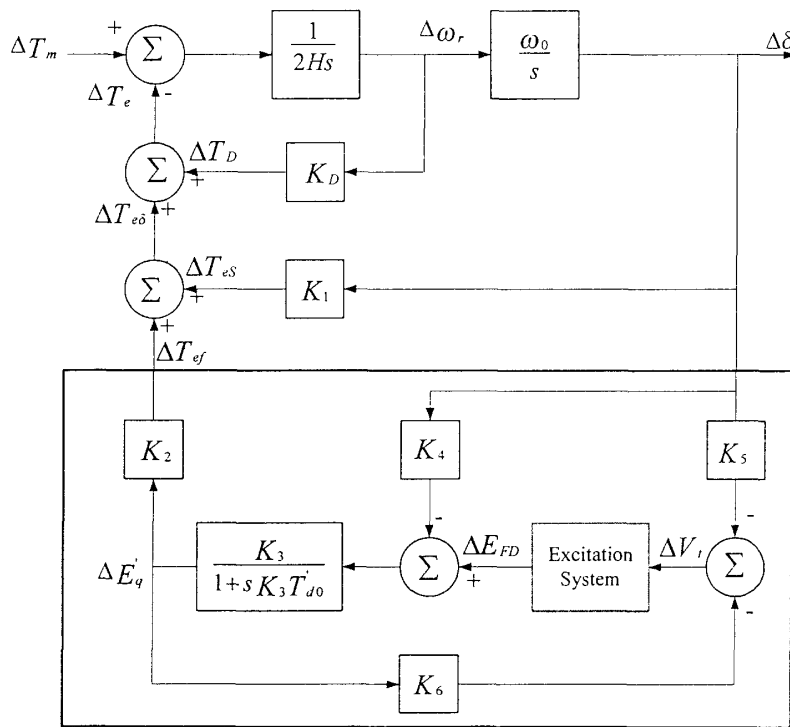
轉子磁場變化對穩定度的影響

本節討論的引起轉子磁場變化的原因不包含由激磁系統

提供的變化，而是由於如電樞反應原因而引起的。

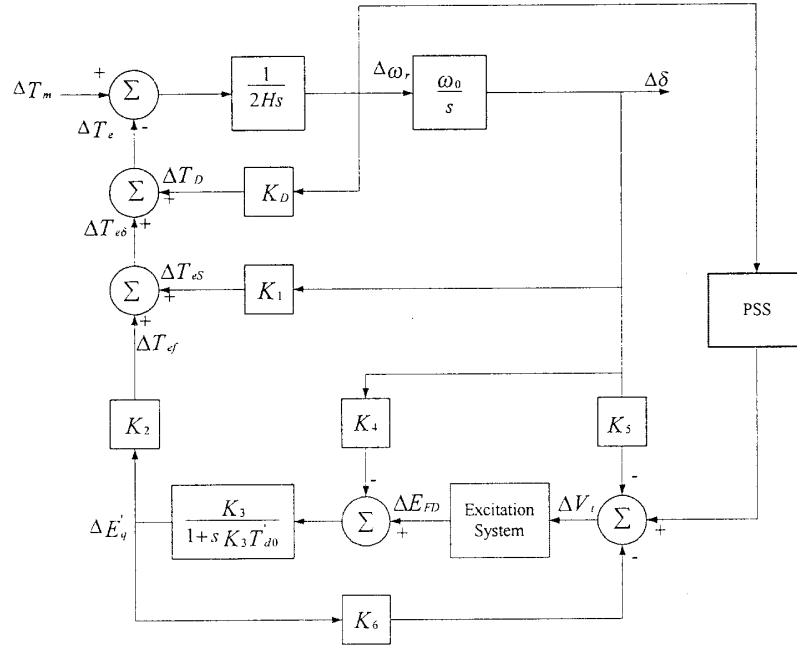


激磁系統對穩定度的影響



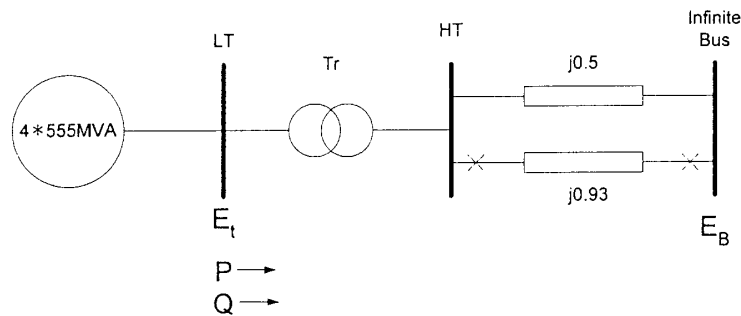
電力系統穩定器 (Power System Stabilizer, PSS)對系統動態穩定度的影響：

態穩定度的影響：



下圖為一簡單電力系統在一回線跳脫後，模擬該系統動態穩定度受激磁機、穩定器影響情況：

態穩定度受激磁機、穩定器影響情況：



Model	Classical Model (KD=0)	Constant E_{fd} (armature reaction)	AVR only	AVR and PSS
振盪頻率	0.017	0.020	0.050	0.050
阻尼比	0.000	0.017	-0.070	0.150
同步轉矩係數				
阻尼轉矩係數	0.000	1.530	-7.060	14.080

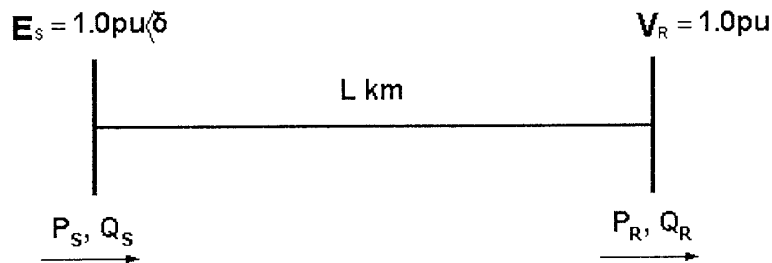
個人計算此作業後可瞭解到當系統發生電樞反應時會減少系統的同步轉矩係數（同步機傾向於較容易發生失步），但卻可增加阻尼轉矩係數，亦即增加系統阻尼，若此時激磁機電壓調整設備（AVR）動作，將使得系統阻尼變成負數，若有小干擾時，發電機本身可能會放大振盪，最後造成機組損壞，此時加入電力系統穩定器 PSS 後，可看到雖然降低同步轉矩係數，但仍於可接受範圍，重點在於增

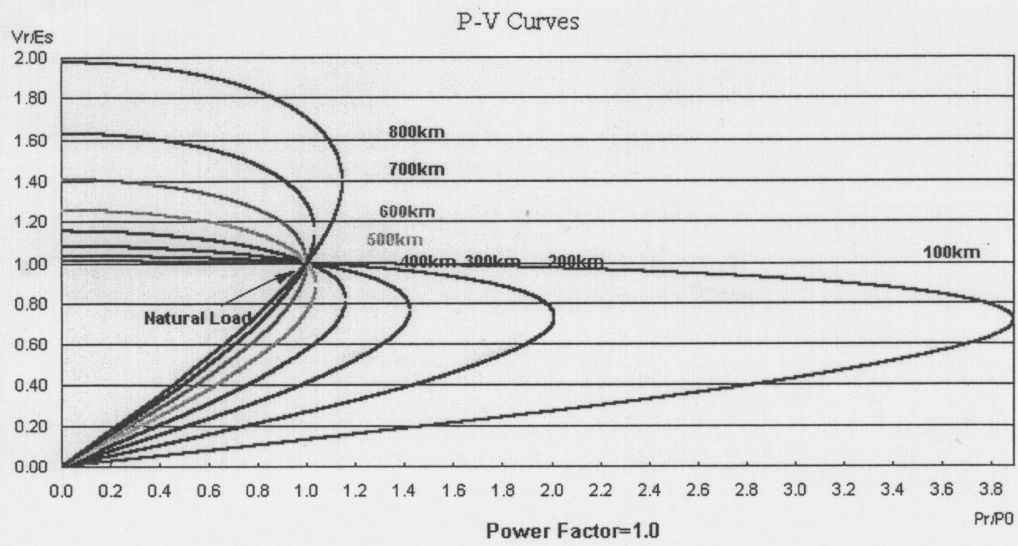
加系統阻尼，讓系統有較佳的動態穩定度。

2. 電壓補償與彈性交流輸電系統 (Voltage Compensation & FACTS):

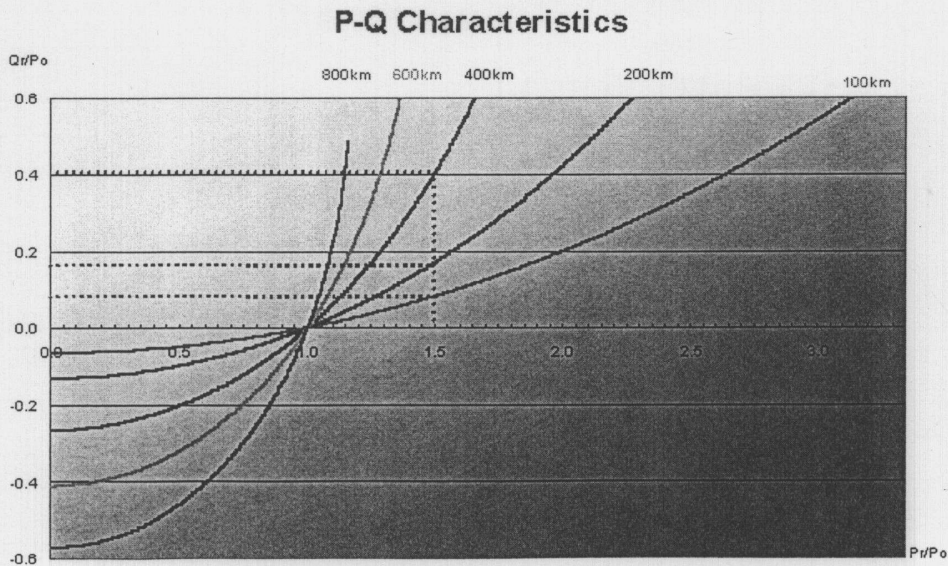
本課程指導者為 Ronald L. Hauth，在於討論無效功率的傳輸與補償，以及影響電壓穩定度的各種因素，包括傳輸線路的長度、線路的配置、超前或滯後的功率因數負載皆會影響匯流排的電壓情況。指導員並舉出各種例子用來說明穩態及動態時的電壓變化情況。學員同時可學得各種 Flexible AC Transmission System(FACTS) 設備的原理及應用。

輸電線路參數對電壓穩定度的影響

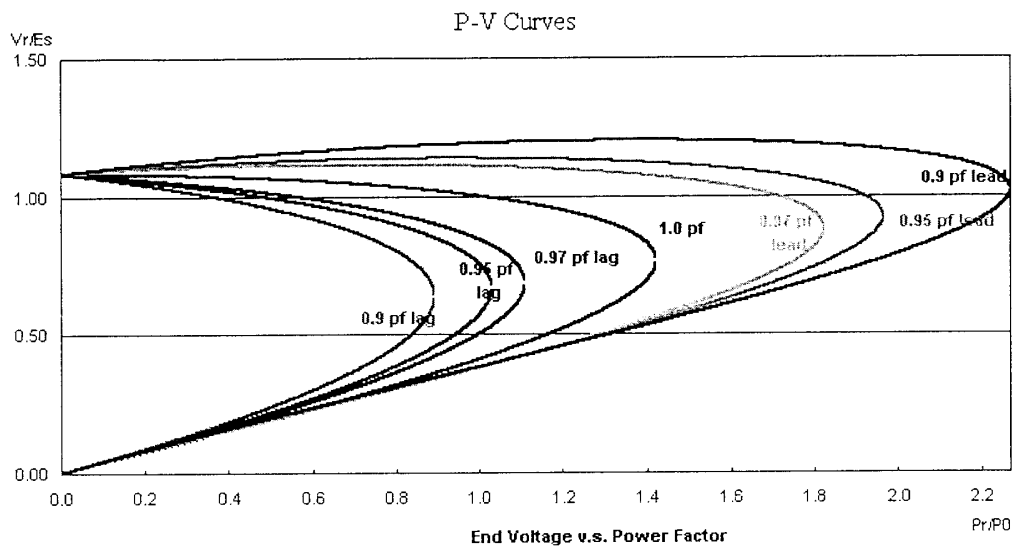




由上圖可看出較短的輸電線路長度可傳輸較大的有效功率，而當線路長度超過 600km 時，此系統即運轉於不穩定區域，因此可以說明線路長度需在合理範圍，否則可能讓系統較易引起電壓崩潰問題。



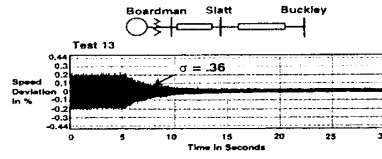
上圖說明在傳送相同的有效功率下，輸電線路長度愈長所需補償的無效功率愈多。



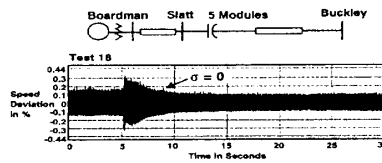
上圖說明負載功率因數對於電壓穩定度的影響，當負載功因為滯後時其最大傳輸功率小於功因超前者，且隨著負載增加時其電壓下降的速度遠高於超前者，但負載功因為滯後的崩潰點電壓小於超前者，亦即功因超前者可能在電壓運轉準則合理範圍內即崩潰，此點是運轉人員應注意的。

FACTS 設備的運轉模式對系統動態穩定度的影響：

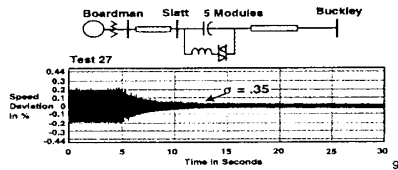
**Closing the TCSC Bypass Breaker;
No Series Compensation**



**Inserting Five Modules with
Thyristor Gating Blocked**



**Inserting Five Modules with
Normal Vernier Operation**



最上圖是未加入 FACTS 設備時，系統原有的動態特性。

中間圖型是串聯 FACTS 設備後，且固定其運轉模式，將會引起系統動態穩定度問題。最下圖變化 FACTS 為 Normal Vernier 運轉模式時將有助於系統電壓穩定度，並可維持原有系統的動態穩定度特性。

第三部份(The third quarter)：策略性的規劃與運轉
(Strategic Planning & Operation)

1. 電力系統運轉－控制 (Power System Operation-Control)
考量經濟因素 (Power System Operations: Economics)

本課程指導者 William W. Price 係 GE PSEC 資深工程師，課程說明互連系統於頻率控制、有效功率及能量交易中，仍維持系統成本在合理的目標，且符合系統的備轉容量需求以因應負載變化的需求。

學員可從課程中瞭解原動機的控制方程式及自動發電控制方程式，並進一步瞭解系統在緊急事故發生時分裂為獨立系統的情況。由例題中學員亦可瞭解負載增加時系統在有無自動發電控制設備的情況。

2. 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，課程將由基本的盈利率、歲入多寡可否用於投資及潛在的償付能力等開始說明，並且讓學員瞭解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，並期能應用於實際的方案決策，有助於公司營運。

3. 策略性的輸電與發電規劃 (Strategic Transmission and

Generation Planning)

指導者 Hary Jordan 與 Richard Szczepanski 均為 GE PSEC 資深工程師，課程中介紹系統可靠度的計算方法（如備轉容量、失載機率），及網路規劃的方法。學員被分成數組討論系統的電源開發及輸電網路規劃，學員按指導老師規定的規劃準則檢討一電力系統未來 10 年的電源及網路計畫。執行電源開發時需考量系統的可靠度、負載預測的不確定性、網路安全等因素，規劃過程中學員可理解系統安全與資金投資、財務計畫兩者間的關係及如何將上述限制因素與目標做一合理規劃。

課程摘要：

電源可靠度：我們可利用備轉容量值來評估系統可靠度，計算公式如下，此法計算容易、快速，但並未考量機組潛在的故障問題，可能誤導計畫或調度人員只要有較多的備轉容量，系統可靠度亦隨之增加，因此為了兼顧機組可能故障情況下，而發展出失載率演算法(Loss of Load Probability)。

備轉容量 = 系統淨尖峰能力 - 尖峰負載

$$\text{備轉容量率} = \frac{\text{系統淨尖峰能力} - \text{尖峰負載}}{\text{尖峰負載}} \times 100\%$$

NYISO 備轉容量為 1.5 倍的可能最大事故。目前其最大

可能事故為加拿大至紐約州一 765KV 線路。

個人應用課程中習得之計算失載機率方法，設計一簡單程式應用於小系統的調度評估，如下列表格中二個選擇方案各有不同的備轉容量與失載機率，方案一中的備轉容量雖低於方案二但其失載機率遠小於方案二，因此在兼顧兩者情況下，調度或計劃人員可選擇方案一，除可得到適當之備轉餘裕外，亦可降低限電機率。

● 失載率LOLP

考慮機組故障率(F.O.R)作為系統可靠度評估方式。

➤ 應用於調度評估

Load=1000MW

Case1

Unit	MW	F.O.R	Spinning (MW)	LOLP
A	500	0.01	200	0.059
B	400	0.02		
C	300	0.03		

Case2

Unit	MW	F.O.R	Spinning (MW)	LOLP
D	700	0.1	400	0.28
E	400	0.2		
F	300	0.3		

下述案例是利用程式計算 LOLP 應用於電源開發的決策過程；若系統原有三部機組裝置容量為 1000MW，但因系統負載逐年遞增，此時因系統備用容量的減少，導致 LOLP 亦逐年增加，在第二年時即超過規劃準則小於 0.5 day/year 的規定，因此，計劃人員依據此演算結果即可事先規劃新機組，由圖形中的「原系統 LOLP」曲線在新增機組後將系統風險降為「新增機組 LOLP」曲線，以符合規劃值。

➤ 應用於電源開發

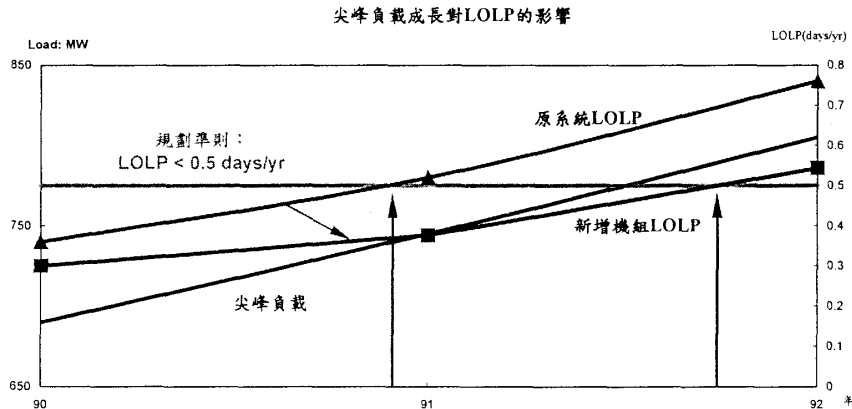
Unit	MW	F.O.R
A	500	0.2
B	300	0.4
C	200	0.5

Yr	Load
90	690.0
91	745.0
92	805.0

Yr	LOLP
90	0.36
91	0.52
92	0.76

Yr	LOLP
90	0.32
91	0.38
92	0.54

增加一部機組100MW。



下圖為本小組於分組研討時，對於系統的電源開發及網路規劃。簡述如下：

- (1)1998 年為符合規劃準則備用容量規定，本組決定先利用負載管理方式，降低用電需求，以節省資金支出，但因系統

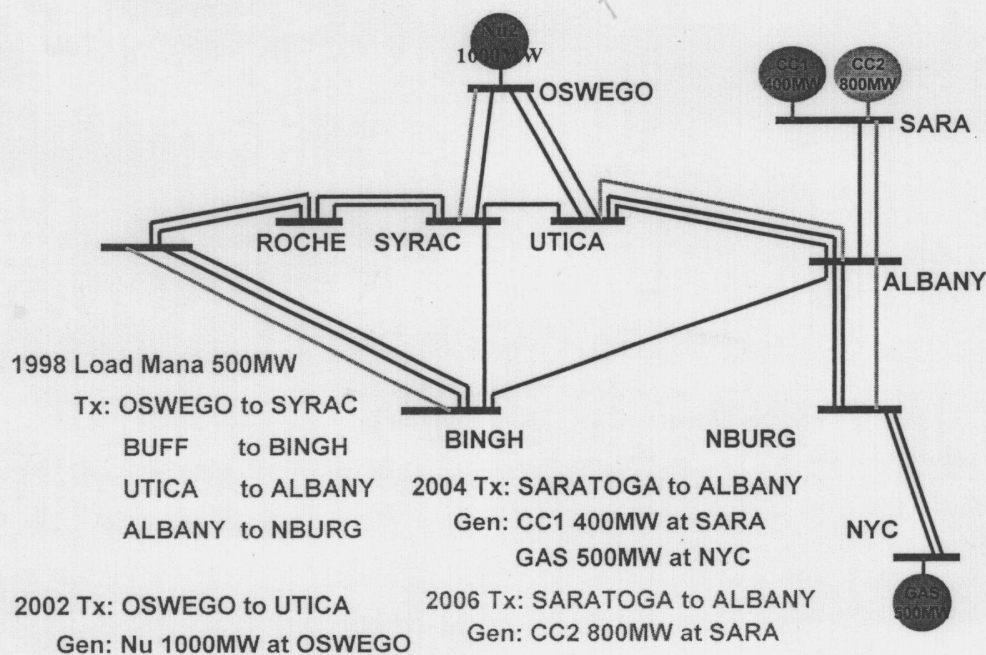
網較脆弱，因此增加多條線路，以強化系統運轉安全。

(2)2002 年為因應負載成長，因此增建一部 1000MW 核能機組於 Oswego，且擴建 Oswego 至 Utica 輸電線路，增加輸電容量。

(3)2004 年為因應負載需求分別增建兩部機組於 Saratoga 及 NYC，此二城市皆有環保限制，因此僅能以燃氣之複循環機組及氣渦輪機組為限，並且需擴建 Saratoga 至 Albany 輸電線路，防範因 N-1 事故發生時導致併聯線路超載問題。

(4)2006 年在考量資金長期投資計畫後，排除另一燃油汽力機組的方案（亦符合環保規定），於 Saratoga 再增建 800MW 複循環機組，以及減少資金投資，另外，擴建 Saratoga 至 Albany 輸電線路，以增加輸電容量。

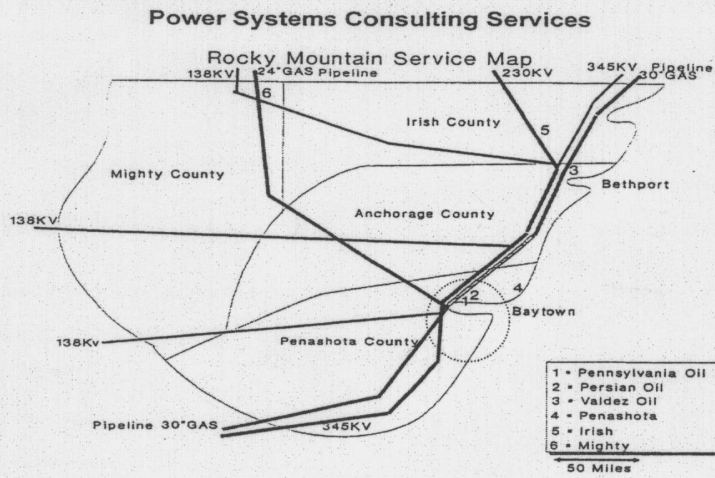
規劃系統的過程中瞭解備用容量、設備餘裕準備較多，對系統運轉更安全可靠，但需投資較多的資金，不利於公司營運，反之，可能造成較大的運轉風險，在此發電業已自由競爭環境下需有完備的工具以輔助計劃人員，並繼續培養人才，以因應未來的挑戰。



4. 競爭性的發電事業 (Competitive Power Generation):

本課程教學方式主要在於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^既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畫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。下列圖形為本小組於課程分組討論中執行電廠規劃過程：

下圖共有 6 個選擇方案廠址，學員需由輸電線路及燃料管線分佈情況決定投資地點，因廠址 2 符合接近二管線之優點，所以本組以此作為選擇方案。



下圖為本組在此決策過程中的步驟及方法：

- ENERGY FRIENDS CO.**
APPROACH TO PROBLEMS
- ✓ **Select Steam Site**
 - Steam Value
 - Industrial Electricity Rate
 - Costs
 - Negotiation
 - ✓ **Select Generation System**
 - Type
 - Reliability
 - Fuel Cost
 - Power Sales
 - Steam Sales
 - Evaluate Different Arrangements
 - ✓ **Negotiate**
 - Gas Prices
 - Negotiate Finance
 - Submit Proposal to Utility

ENERGY FRIENDS CO.

STEAM HOST SELECTION

HOST: *PENNSYLVANIA OIL COMPANY*

- ✓ Proximity to Pipeline Gas
- ✓ Proximity to Transmission System
- ✓ Electricity Demand
- ✓ Steam Flow
- ✓ Steam Pressure Required

執行計畫的過程中與石油公司談判本計畫需供應其蒸汽量、壓力、溫度、土地租金、整地成本等事宜。

ENERGY FRIENDS CO.

STEAM HOST AGREEMENT

- ✓ Supply 300,000 pounds/hr of steam at 200 PSIG and 423 Fahrenheit degrees.
- ✓ Condensate returns at 15 PSIA and 200 Fahrenheit degree.
- ✓ Steam supplied at 15% discount fuel cost of host.
- ✓ 50 MW load supplied at 10% discount based on rates of utility.
- ✓ Host Boilers to be used as backup.
- ✓ \$4.5 Million clean up land cost.
- ✓ \$250,000/year lease on land.

下表為本組計算各類型機組可能之運轉情況，並依此選擇型式。比較計算結果最後決定採用 GE7231 型機組，因為此機組可提供石油公司所需的蒸汽量及發電量外，最重要在於其資金盈利率高於其他機型，因此獲選。

ENERGY FRIENDS CO.

ALTERNATIVES EXAMINED

Debt=85% Interest Rate=8.5%	2 PRESSURE LEVEL GE7121EA GT & HRSG	2 PRESSURE LEVEL GE6101FA GT & HRSG	2 PRESSURE LEVEL GE7231FA GT & HRSG
GAS	2	2	1
MW Net	209.5	165.9	199.6
HR	7884	7845	7370
Plan Site \$/KW	562	649	520
Total Investment \$M	108.57	99.17	95.57
DCRR (Return on Equity)	3.52%	14.99%	19.29%
Debt Coverage Ratio	1.15	1.34	1.42

下圖為本小組與電力公司、銀行、燃料供應廠商談判結果，其中燃料公司原要求需簽訂 100%之 take or pay 合約，燃料價格較低(\$2.9/MBTU)，但本組人員討論後認為風險過高，因此提議以 50%take or pay 合約及\$3.1/MBTU 成交。銀行則提供本組人員 8.5% 利率、85%的貸款。本組並可以\$24.5/MWH 售電價格售電予電力公司，增加收入。

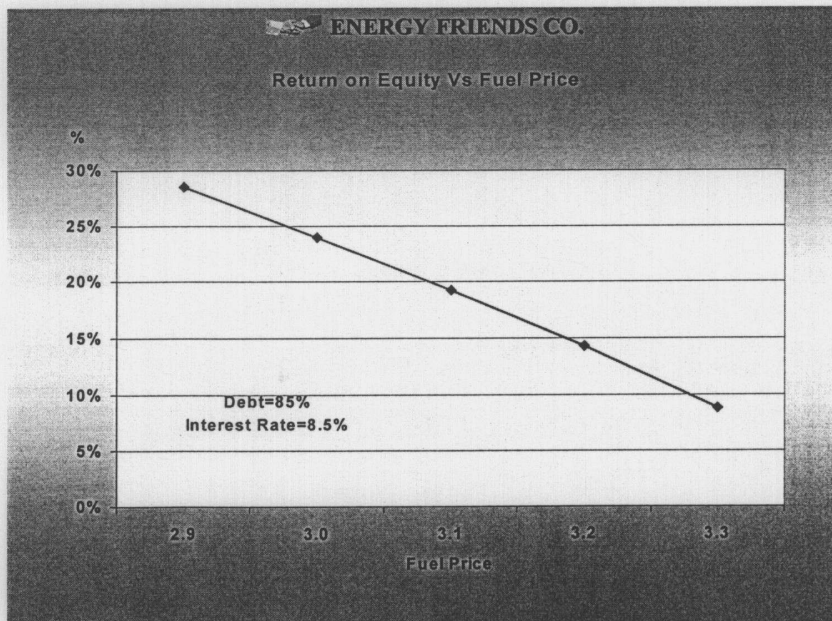
ENERGY FRIENDS CO.
CONTRACT PROVISIONS

GAS SUPPLIER: JRs Oil & Gas Company
Cost: \$3.1/MBTU
50% take or pay Contract, 15 years.

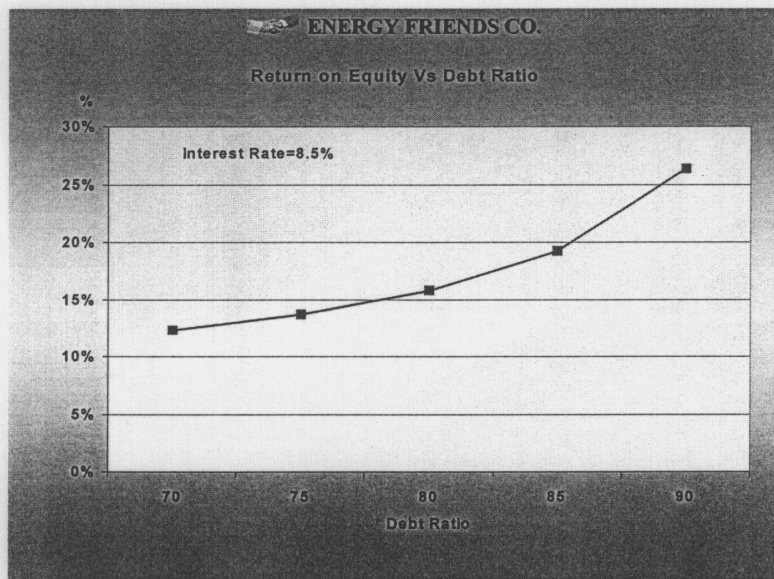
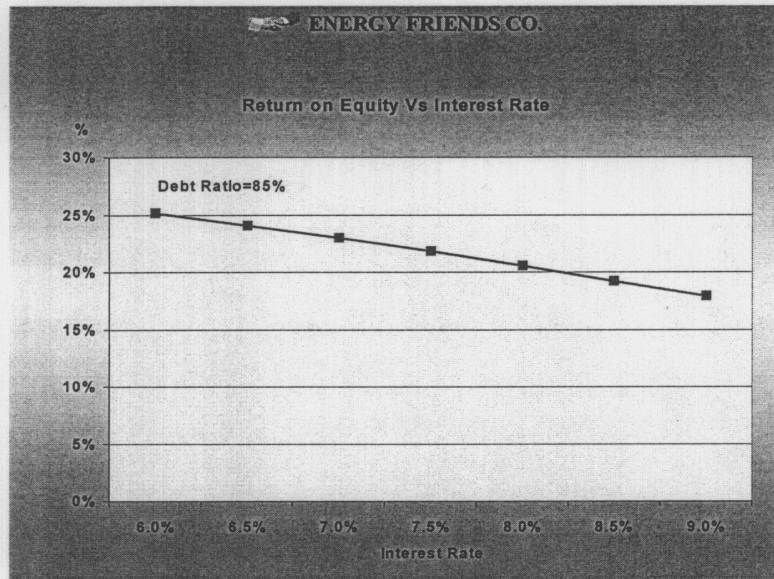
BANK: 85% Debt, 8.5% Interest, 15 years.

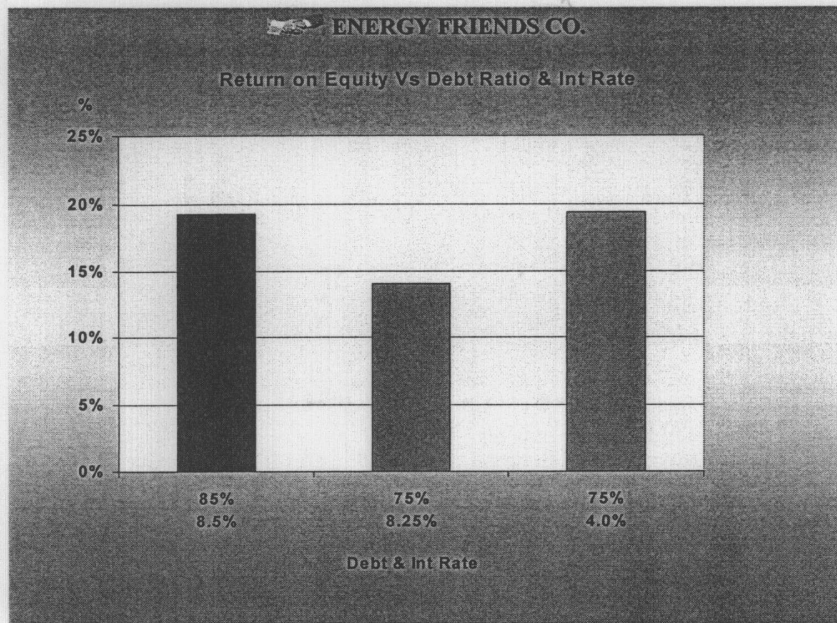
UTILITY POWER: Rocky Mountain
150 MW * 8,000 hours at 24.5 \$/MWh
15 years.

下圖中表示燃料價格對於資金投資回收比較圖，圖中雖呈現 \$2.9/MBTU 有最佳回收率，但因 Take or pay 合約風險亦高，因此本組仍選擇單價較高，但風險較低的方案。

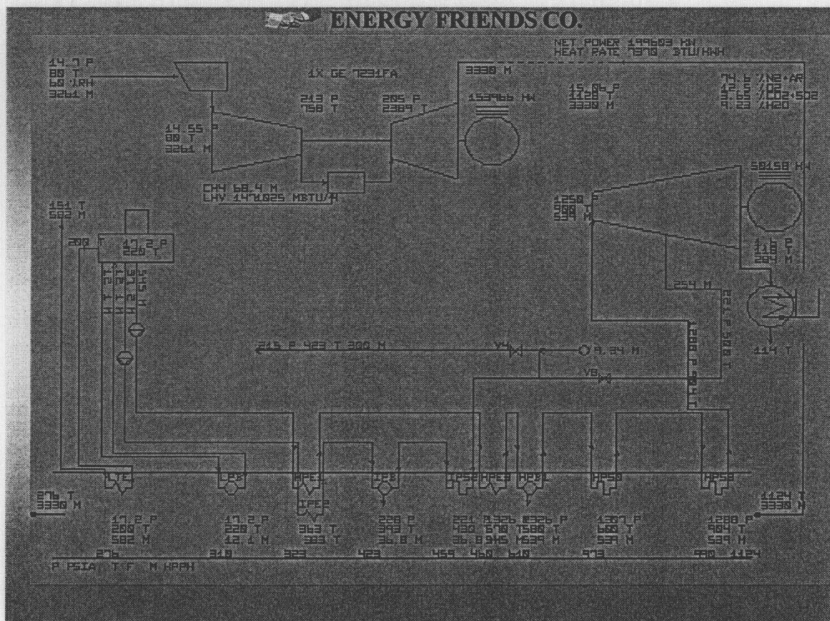
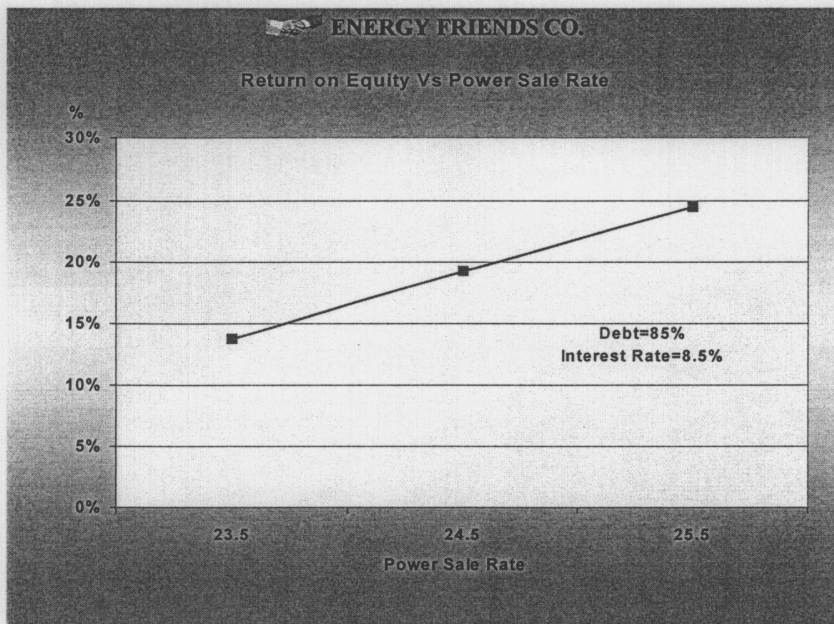


本圖顯示在貸款固定下，各借款利率對盈利率的影響曲線圖。





上圖為銀行原提供的二項貸款方案比較圖，(1)85%貸款率、利率8.5%(2)75%貸款率、利率8.25%，經本小組應用課程中的法則演算後，為達到較高的盈利率，因此選擇第(1)方案；至於第(3)方案75%貸款率、利率4%是靈敏度分析，若銀行僅提供75%的貸款予本組人員，因此本組人員得出資較多，且銀行此時僅能要求4%利率，方能達到(1)案的盈利率，但因銀行不可能提供如此低利息的貸款案，所以由此可知較高的貸款率，對於本組較有利。



上圖為本組人員最後選擇的 GE7231 FA 機組，其有效功率輸出可達 200MW，50MW 供應石油公司，150MW 售予電力公司，並可供應 300,000pounds/hr, 200 PSIG, 華氏溫度 423 度的蒸汽予石油公

司。

ENERGY FRIENDS CO.
SYSTEM ALTERNATIVE

- ✓ Combined Cycle
- ✓ One (1) 7FA Gas Turbine **154 MW**
- ✓ One (1) Steam Turbine **50 MW**
- Net Capacity 200 MW**
- ✓ Cost: \$520/KW
- ✓ Capacity to Pennsylvania Oil **50 MW**
Discount: 15% Steam, 10% Power
- ✓ Fuel Cost: \$3.10/MBTU
- ✓ Capacity to Rocky Mountain **150 MW at \$24.5/MWh**
- ✓ Equity: 15% Debt: 85% Interest: 8.5%
- ✓ Debt Coverage Ratio: 1.4
- ✓ DCRR: 19.3 %

ENERGY FRIENDS CO.
CONCLUSIONS

- ✓ Construction of a 200 MW Combine Cycle Generation System with one 7FA Gas Turbine is feasible yielding around 20% return on equity at 24.5\$/MWh energy sales.
- ✓ In order to be competitive system must consider only reliability needed. Generally additional reliability will result in higher costs.
- ✓ Cost of installed KW (\$/KW) decreases as larger units are used (7FA Vs 6FA).
- ✓ Cost of fuel determines Efficiency of system needed.

第四部份(The fourth quarter)：工業及配電系統之應用
(Industrial & Distribution System
Application)

1. 旋轉電機 (Rotating Machines)

本課程教導學員各式電動機的基本原理；如電動機設計、繞組結構、磁場變化。課程中並且實際製作一簡單旋轉電動機以驗證基本原理。

Rotation Machines 課程，講授主要內容有下列項目：

磁場電路基本理論。

各式直流旋轉電機。

交流電動機：

感應式電動機。

同步電動機。

2. 電力電子 (Power Electronics) 高壓直流輸電 (HVDC
Transmission)：

Power Electronics 及 HVDC 課程，講授主要內容有下列項目：

閘流體元件特性。

相位控制脈衝寬度調變。

高壓直流輸電之簡介。

高壓直流輸電之應用。

高壓直流輸電之控制和系統功效。

高壓直流輸電與傳統交流輸電比較除具有經濟性，環保

之優點外，尚具有下列運轉優點：

(1)可降壓運轉。(2)聯結不同頻率的電力系統，如日本 60Hz 與 50Hz 系統聯結。(3)可降低交流系統無效功率的補償(4)可應用兩端的閘流體控制設備改變電力潮流(5)應用於長途電力傳輸，如蘇聯即使用此系統於西伯利亞地區。

3. 配電設備與應用 (Distribution Equipment & Applications)

由本課程學員可習得系統功因、電壓維持及諧波影響。電力諧波與電壓的電力品質問題是本公司系統所經常遭遇的，可能造成區域用戶的設備損壞或電壓閃爍的困擾。電壓低下現象因事故、負載大馬達起動或點焊變動所引起，解決方式可以裝設反應快速的 SVC 電壓補償。電壓閃爍現象因軋鋼，電弧爐週期變動負載所引起，造成電燈閃爍及設備誤動作，解決方式可以改善負載週期，降低系統阻抗及加裝 SVC，STATCON 為之。最後諧波可因靜態補償器，變壓器飽和，交直流馬達，電弧爐及電視所引起，造成設備誤動作及變壓器，電容器過載，解決方式可以諧波濾波器消除之。

4. 保護電驛 (Protective Relaying):

由講師 Louie Powell 先生指導本課程，他是奇異公司

電力系統能源顧問 (Power System Energy Consult ; PSEC)
部門資深工程師。

學員在本項保護電驛課程中學習 PT 及 CT 儀表用變壓器、electro-mechanical 電驛的基本原理、各式電驛的動作原理、新型的數位電驛、電驛設定計算、線路、發電機及變壓器等各項設備保護協調。因電力系統結構隨時間變化的特性，使得電驛保護工作具有相當大的挑戰性，因此如何達成可靠、靈敏、經濟、安全及快速的目標是學員在本課程後需要再針對個別系統更進一步的分析討論。

Protective Relaying 課程，講授主要內容有下列項目：

國際電力組織及各項定義之簡介。

儀表變壓器。

電驛動作原理。

變壓器與母線保護。

線路與發電機保護。

三、課程期間參觀訪問活動簡介

(1) GE 汽輪機與發電機製造工廠

此工廠位於 Schnectady 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。

(2) EPRI 高壓實驗室

EPRI 高壓實驗室位在 Massachusetts 州 Lenox 之高壓輸電研究中心。該中心人員介紹主題如下：

輸電線路各種不同幾何分佈方式影響線路阻抗實驗場。

輸電線路對地產生電磁場測試實驗場。

SF₆ 氣體偵漏實驗站。

模擬鹽害、霧害、浮塵污染環境之高電壓設備實驗場。

定點設備長期監錄實驗場。

非磁礙子高張力模擬環境實驗站。

高電壓閃絡實驗場。

直流高電壓輸電實驗場。

豪雨礙子實驗室。

電暈現象觀測實驗場。

(3) NYISO 紐約獨立調度中心

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

- a. 1993 年紐約電力池 (New York Power Pool, NYPP)。
- b. 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。
- c. NYISO 是由十位不同專業背景人士組成之委員會管理。
- d. 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。
- e. 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。

三、建議

1. 擬請繼續派員前往奇異公司接受電力系統課程訓練

電力系統的架構隨著工商業的發展隨之日益龐大，並使得系統更趨於複雜，因此系統分析檢討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；如本期日本電力公司、美國紐約獨立調度中心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。

2. 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

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。