

出國報告(出國類別：實習)

參加「研習西門子公司(SIEMENS)動態分析短期課程」
報告

服務機關： 台灣電力公司

姓名職稱： 呂天桂 電機工程監

王昶智 電機工程師

派赴國家： 美國

出國期間： 112年10月14日至112年10月23日

報告日期： 112年12月05日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加「研習西門子公司(SIEMENS)動態分析短期課程」報告

頁數：25 頁含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

呂天桂/系統規劃處/工程監/02-2366-6913

王昶智/系統規劃處/工程師/02-2366-6913

出國類別：實習

出國期間：112 年 10 月 14 日至 112 年 10 月 23 日

出國地區：美國

報告日期：112 年 12 月 05 日

分類號/目

關鍵詞：西門子公司、動態分析

內容摘要：(200~300 字)

本次出國計畫核定前往美國參加西門子電力公司(SIEMENS)動態分析短期課程，課程主題為電力系統分析軟體(PSS/E)之動態模擬分析，包含 PSS/E 動態模擬架構及程序、動態自建模型撰寫及範例練習等兩大部分。本次受訓目的主要為，因應未來大量太陽光電及離岸風電併網之情境，為使未來檢討系統模型正確導入新型電力設施(如 HVDC 及 FACTS)，本次到西門子公司主要學習 PSS/E 相關模擬分析技術，使系統檢討更為確實把握，以利未來電網的規劃及投資。

本報告內容共分肆章：

壹、出國緣起與任務

貳、出國行程

參、西門子電力公司(SIEMENS)動態分析短期課程簡述

肆、結論與建議

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

目錄

目錄.....	i
表目錄.....	ii
圖目錄.....	iii
一、出國緣起與任務	1
二、出國行程.....	2
三、參加「研習西門子公司(SIEMENS)動態分析短期課程」	4
3-1 動態分析短期課程內容.....	4
3-2 暫態穩定度	5
3-3 彈性交流輸電系統設備	6
3-4 高壓直流系統	11
3-5 PSS [®] E 動態模擬	19
四、結論與建議	24

表目錄

表 2.1 出國行程表	2
表 3.1 西門子公司(SIEMENS)動態分析短期課程表	4
表 3.2 直流線路等效模型	13
表 3.3 LCC 直流系統動態模型	14
表 3.4 LCC 直流系統輔助動態模型	14

圖目錄

圖 2.1 西門子(SIEMENS)公司及紐約甘迺迪國際機場地理 位置	3
圖 2.2 美國紐約州斯堪那特提(SCHENECTADY)西門子公 司	3
圖 3.1 靜態同步補償器系統圖(課程講義提供)	8
圖 3.2 CSTCNT 模型參數表(課程講義提供)	9
圖 3.3 CSTCNT 模型控制方塊圖(課程講義提供)	9
圖 3.4 SVSMO3 模型參數表(課程講義提供)	10
圖 3.5 SVSMO3 模型控制方塊圖(課程講義提供)	11
圖 3.6 LCC-HVDC 單線圖(課程講義提供)	12
圖 3.7 PSS [®] E LCC-HVDC 等效模型圖(課程講義提供)	13
圖 3.8 VSC-HVDC 模型圖(課程講義提供)	16
圖 3.9 VSC-HVDC 系統圖(課程講義提供)	17
圖 3.10 VSC-HVDC VSCDCT 模型圖(課程講義提供)	17
圖 3.11 VSC-HVDC HVDCPLU1 模型圖(課程講義提供)	18
圖 3.12 PSS [®] E 諾頓等效計算圖	20
圖 3.13 PSS [®] E 暫態穩定度 ORDR 計算圖	21

圖 3.14 PSS [®] E 暫態穩定度 FACT 計算圖	21
圖 3.15 PSS [®] E 暫態穩定度 TYSL 計算圖	22
圖 3.16 PSS [®] E 暫態穩定度初步確認圖	23

一、出國緣起與任務

為配合長期 2050 淨零排放目標，我國 2050 年能源結構中，約有 60~70% 為分散式再生能源，依據國家發展委員會 111 年 12 月 28 日公布之再生能源目標，預估將有 40~80GW 光電、40~55GW 離岸風力及 5.7~15.5GW 前瞻能源等；及考量目前現有電力系統之大型水火力電源及再生能源集中開發，且離負載中心較遠，需要透過長距離融通幹線輸送，導致電網幹線出現壅塞情況，本公司輸電系統規劃工作難度更高、更複雜。未來需導入 HVDC 及 FACTS 等新型電力設施之規劃及分析，期能藉由到美國西門子公司學習並實作正確模擬分析方法，以利電源電力有效長距離輸送及穩定供電。

在長期 2050 淨零排放目標推動下，因應未來大量太陽光電及離岸風電併網之情境，為使未來檢討系統模型正確導入新型電力設施(如 HVDC 及 FACTS)，期能透過本次到西門子公司扎實學習 PSS/E 相關模擬分析技術，使系統檢討更為確實把握，以利未來電網的規劃及投資。

二、出國行程

本次出國計畫共計 10 天(含交通時間)，行程概要如表 2.1，課程地理位置圖 2.1 及圖 2.2 所示。

表 2.1 出國行程表

日期	工作地點	工作內容紀要
112/10/14-112/10/15	美國	去程 (桃園-美國紐約 甘迺迪機場)
112/10/16-112/10/20	美國	參加「研習西門子公司(SIEMENS)動態分析短期課程」
112/10/21-112/10/23	美國	返程 (美國紐約 甘迺迪機場-桃園)

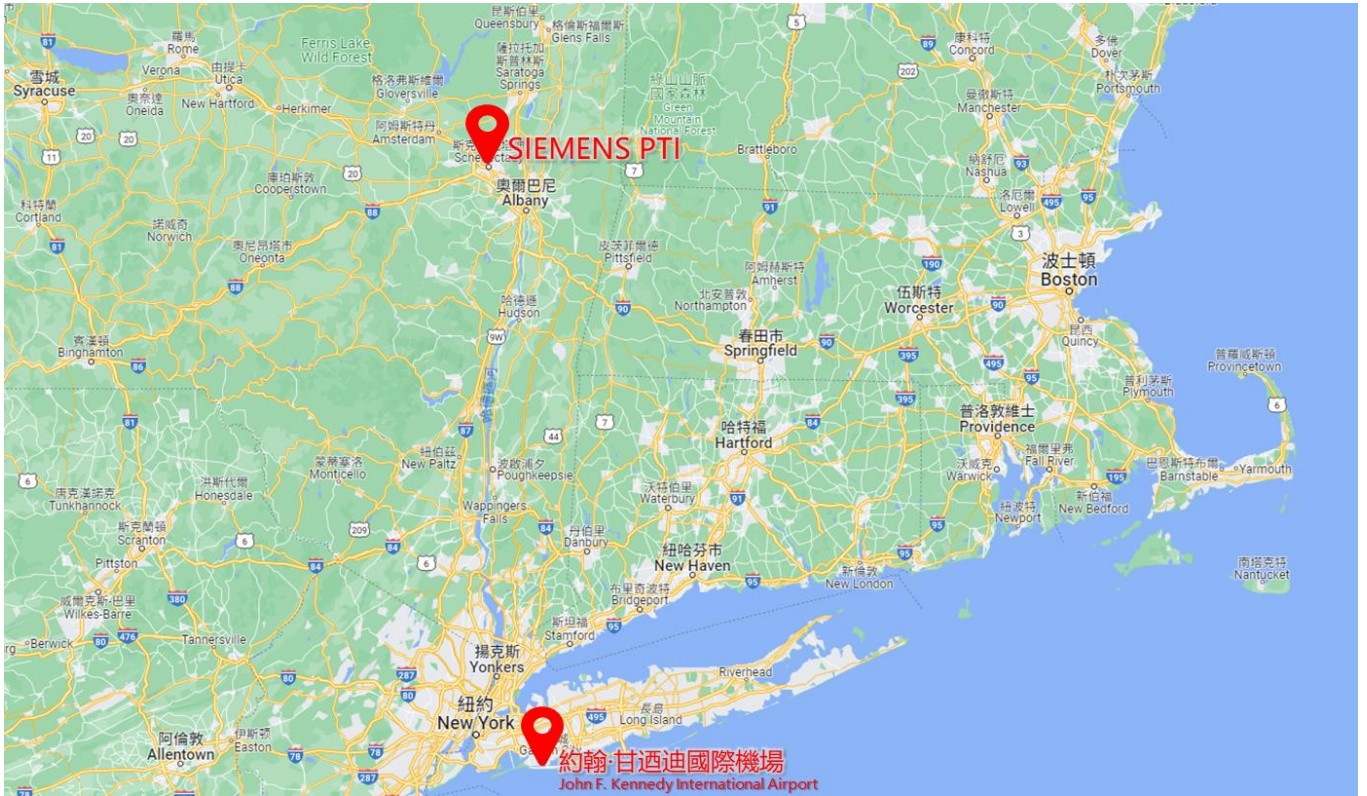


圖 2.1 西門子(SIEMENS)公司及紐約甘迺迪國際機場地理位置



圖 2.2 美國紐約州斯堪那特提(SCHENECTADY)西門子公司

三、參加「研習西門子公司(SIEMENS)動態分析短期課程」

3-1 動態分析短期課程內容

本次參加西門子公司(SIEMENS) PSS[®]E 動態分析短期課程 (Advanced Dynamic Simulation for PSS[®]E)，課程為期 5 天，課程共有十大主題，簡述課程內容如表 3.1 所示。

表 3.1 西門子公司(SIEMENS)動態分析短期課程表

日期	主題	課程大綱
10/16 (一)	主題 1 課程總覽與介紹 Tab 1 Course Introduction and Overview	
10/16 (一)	主題 2 動態分析議題及工具 Tab 2 Dynamic Analysis Problems and Tools	<ul style="list-style-type: none"> ● 轉移函數 Transfer Functions ● 反饋控制系統概念 Feedback Control System Concepts ● 波德圖 Bode Plots ● 提高系統穩定度 Improving System Stability ● 數值積分 Numerical Integration ● 使用 PSS[®]PLT 進行模式分析 Modal Analysis Using PSS[®]PLT
10/17 (二)	主題 3 發電廠機組之動態模型 Tab 3 Dynamic Modeling of Power Plant Components	<ul style="list-style-type: none"> ● 同步發電機模型 Modeling of Synchronous Machines ● 勵磁系統模型 Modeling of Excitation Systems ● 渦輪機及調機模型 Modeling of Turbines and Speed Governors ● 風力及太陽光電模型 Wind and PV Modeling
10/18 (三)	主題 4 動態檔簡介 Tab 4 Dynamics Overview	<ul style="list-style-type: none"> ● 擾動表 Disturbance Chronology

		<ul style="list-style-type: none"> ● PSS[®]E 動態分析檢討 Review of PSS[®]E Dynamic Analysis Activities ● 數據檢查 Data Checking Overview ● 在 PSS[®]E 中實現自動化動態模擬 Automation of Dynamic Simulations in PSS[®]E
10/18 (三)	主題 5 模擬複雜事件 Tab 5 Simulating Complex Events	<ul style="list-style-type: none"> ● 模擬匯流排配置及斷路器概述 Bus Arrangements and Stuck Breaker Simulation ● 模擬單極開關 Single Pole Switching Simulation ● 電驛模型及模擬 Relay modeling and Simulation
10/19 (四)	主題 6 動態電壓恢復 Tab 6 Dynamic Voltage Recovery	
10/19 (四)	主題 7 負載與發電機建模 Tab 7 Load and Motor Modeling	<ul style="list-style-type: none"> ● 穩態與動態負載模型 Static and Dynamic Load Modeling ● 建立發電機模型與模擬 Modeling and Simulation of Motors
10/20 (五)	主題 8 為動態研究進行電力電子元件建模 Tab 8 Modeling Power Electronics for Dynamic Studies	<ul style="list-style-type: none"> ● 高壓直流系統建模 HVDC Modeling ● 彈性交流輸電系統設備建模 Modeling of FACTS Devices
10/20 (五)	主題 9 使用 PSS [®] E 整合自定義模型 Tab 9 Incorporation of User Written Models in PSS [®] E	
10/20 (五)	主題 10 練習 Tab 10 Exercises	

3-2 暫態穩定度

電力系統正常運轉時，即不斷受到各式各樣的擾動，如負載的隨機變化、變壓器分接頭的切換、以及電容器開關的操作等。在電力系統受到大擾動時，如線路故障、大型發電機突然故障、負載大量變化或是大容量的設備開關動作時，皆會使得電力系統遭受到很大的衝擊，

將造成發電機的功率角度發生變化，導致轉子的加速或是減速，引起發電機端電壓及定子電流的變化，因此分析電力系統在大擾動下，發電機組是否仍保有同步的能力，此為系統檢討時之重要項目。

暫態穩定度指標為檢討尖、輕載時，在系統在偶發事故下，發電機之臨界清除時間(Critical Clearing Time, CCT)是否符合輸電系統規劃準則。以台電公司系統而言，輕載系統中部地區因大觀二及明潭兩抽蓄電廠均處於抽水馬達運轉，抽蓄機組和其它發電機群組在穩定運轉時有較大轉子角度差，故於輕載時之系統暫態穩定度較差。此外，由於區域電力供需不平衡，區域間電力融通量增加，且新設電廠及既設電廠更新皆朝大型化設計，故尖載時，亦可能因主幹線或區域融通線之電力壅塞而造成暫態穩定度問題。

3-3 彈性交流輸電系統設備

彈性交流輸電系統(FACTS)係利用電力電子元件製成之可控制並提供有效或無效功率的電源或電路等設備，可提高電力系統的靈活性和穩定度，並增強既有輸電線路的輸送能力，常見設備有強化電力潮流控制器(UPFC)、靜態乏補償器(SVC)及靜態同步補償器(STATCOM)等設備，台電公司目前於部份變電所規劃安裝靜態同步補償器(STATCOM)用於調整系統電壓穩定度等目的。

以下就靜態同步補償器(STATCOM)之運作原理及 PSS[®]E 設備模

型進行簡要說明：

(一)靜態同步補償器(STATCOM)運作原理：

- ✓ 電壓源轉換器(Voltage Source Converter, VSC) 從直流電容器(V_{dc})產生一組三相交流電壓。
- ✓ 透過調整電壓源轉換器產生的輸出電壓振幅(V_o)，可以控制轉換器和交流系統之間的無功功率交換。
- ✓ 靜態同步補償器之交流電壓輸出電壓(V_o)需與系統電壓(V)保持同相，藉由鎖相迴路(Phase Lock Loop, PLL)可實現輸出電壓同相。忽略損耗，直流電容(C_s)電壓將控制在設定電壓值(V_{dc})內。
- ✓ 當電壓源轉換器增加、減少電容器(C_s)的運轉電壓(V_{dc})，將與輸出交流電壓(V_o)成正比，此一變化將會使靜態同步補償器輸出之無效功率量產生會改變。
- ✓ 在虛功電流限制下，靜態同步補償器將充當恆定電流源，而不是恆定電納。
- ✓ 詳細靜態同步補償器(STATCOM)系統單線圖如圖 3.1 所示。

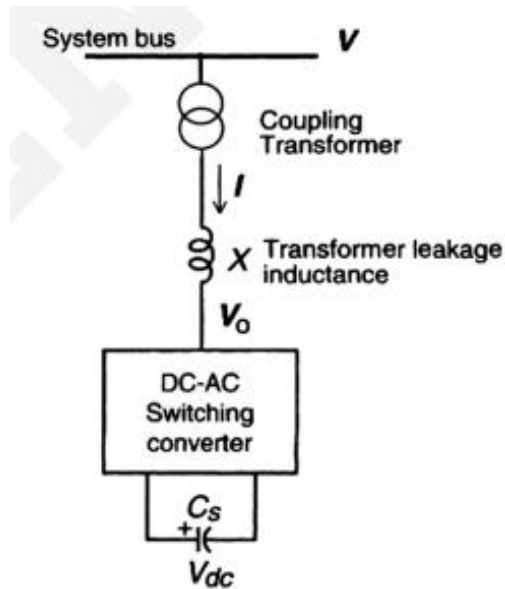


圖 3.1 靜態同步補償器系統圖(課程講義提供)

(二)靜態同步補償器(STATCOM) PSS[®]E 設備模型

1. CSTCNT 模型

靜態同步補償器 (STATCOM) 有兩種動態模型 CSTCNT 和 CSTAT 可採用，潮流模型建模 CSTCNT 為 FACTS 裝置模型，CSTAT 則為同步調相機模型。

另外，為了防止 STATCOM 貢獻故障電流至系統中，建議設定較高的 ZSOURCE 值，來抑制故障電流值。詳細 CSTCNT 模型參數表及控制方塊圖如圖 3.2 及 3.3 所示。

CSTCNT

FACTS Device Static Condenser (STATCON)

This is STATCON device # _____ NF,
 This model uses CONs starting with # _____ J,
 and STATEs starting with # _____ K,
 and VARs starting with # _____ L,
 and ICON # _____ M.

CONs	#	Value	Description
J			T ₁ (-0)
J+1			T ₂ (-0)
J+2			T ₃ (-0)
J+3			T ₄ (-0)
J+4			K (typical = $\frac{25}{dv/de_t}$)
J+5			Droop (typical = 0.03)
J+6			V _{MAX} (typical = 999)
J+7			V _{MIN} (typical = -999)
J+8			I _C MAX (typical = 1.25) Max capacitive current
J+9			I _L MAX (typical = 1.25) Max inductive current
J+10			V _{cutout} (typical = 0.2)
J+11			E _{limit} (typical = 1.2)
J+12			X _t (-0) (transformer reactance, typical = 0.1)
J+13			A _{cc} (acceleration factor, typical = 0.5)
J+14			STBASE (-0) STATCON base MVA

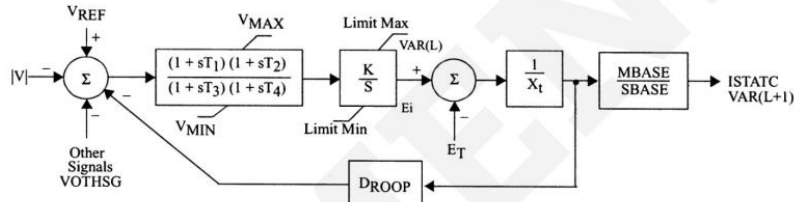
STATEs	#	Description
K		First regulator
K+1		Second regulator
K+2		Integrator

VARs	#	Description
L		Other signals [FCTSIG (1, NF)]
L+1		V _{ref}
L+2		STATCON internal voltage (E _t)
L+3		STATCON current

ICON	#	Description
M		IB, remotely regulated bus

- Notes:
- The remote bus has to be either a load bus or a generator bus. If this is not the case, internally the remote bus will be set same as local bus. If the user wants to input a remote bus that is the same as the local bus, IB can either be specified to be the local bus number, or can be set to 0.
 - Positive STATCON current [VAR(L+3)] corresponds to STATCON performance as capacitor.
 - VAR(L+3) is on SBASE.
 - Specify STATCON input parameters on STATCON base MVA.
 - This model uses auxiliary signal output stored in FCTSIG (1, NF), (i.e., auxiliary signal index 1).
- NF, 'CSTCNT', IB, T₁, T₂, T₃, T₄, K, Droop, V_{MAX}, V_{MIN}, I_CMAX, I_LMAX, V_{cutout}, E_{limit}, X_t, A_{cc}, STBASE /

圖 3.2 CSTCNT 模型參數表(課程講義提供)



$$\text{Limit Max} = V_T + X_T I_{C\text{MAX}0}$$

$$\text{Limit Min} = V_T - X_T I_{L\text{MAX}0}$$

$$\text{Limit Max} \leq E_{\text{limit}}$$

where:

$$I_{C\text{MAX}0} = I_{C\text{MAX}} \text{ when } V_T \geq V_{\text{CUTOUT}}$$

$$I_{C\text{MAX}0} = \frac{I_{C\text{MAX}} \times V_T}{V_{\text{CUTOUT}}} \text{ otherwise}$$

$$I_{L\text{MAX}0} = I_{L\text{MAX}} \text{ when } V_T \geq V_{\text{CUTOUT}}$$

$$I_{L\text{MAX}0} = \frac{I_{L\text{MAX}} \times V_T}{V_{\text{CUTOUT}}} \text{ otherwise}$$

圖 3.3 CSTCNT 模型控制方塊圖(課程講義提供)

2. SVSMO3 模型

SVSMO3 模型在潮流中初始化為彈性交流輸電系統設備(FACTS)，在本模型下，STATCOM 可分為三種控制器模型，慢速次級電流環路調節器(Slow secondary loop current regulator)、靜滯帶控制(Dead-band control)及非線性下降(Non-linear droop)，實際運轉以其中一種控制模式來調節輸出。

STATCOM 還能夠透過控制切換機械開關分流元件(Mechanically Switched Shunts, MSS)來調節系統電壓(如：並聯電容或電抗器)，單一系統於線上最多可以控制 8 個 MSS 進行切換，MSS 切換控制以控制點虛功電流作為基準。詳細 SVSMO3 模型參數表及控制方塊圖如圖 3.4 及 3.5 所示。

CONs	Description
J	XC0, Linear droop
J+1	TC1, Voltage measurement lead time constant
J+2	TB1, Voltage measurement lag time constant
J+3	KP, Proportional gain
J+4	KI, Integral gain
J+5	VEMAX, Voltage error max. (pu)
J+6	VEMIN, Voltage error min. (pu)
J+7	T0, Firing sequence control delay (sec)
J+8	IMAX1, Max. continuous current rating (pu on STBASE)
J+9	DBD, Deadband in voltage control (pu)
J+10	KDBD, Ratio of outer to inner deadband
J+11	TDBD, Deadband time (sec)
J+12	KPR, Proportional gain for slow-reset control
J+13	KIR, Integral gain for slow-reset control
J+14	IDBD, Deadband range for slow-reset control (pu on STBASE)
J+15	VRMAX, Max. limit on slow-reset control output (pu)
J+16	VRMIN, Min. limit on slow-reset control output (pu)
J+17	ISHRT, Max. short-term current rating as a multiple of continuous rating
J+18	UV1, Voltage at which STATCOM limit starts to be reduced linearly (pu)
J+19	UV2, Voltage below which STATCOM is blocked (pu)
J+20	OV1, Voltage above which STATCOM limit linearly drops (pu)
J+21	OV2, Voltage above which STATCOM blocks (pu)
J+22	VTRIP, Voltage above which STATCOM trips after time TDELAY2 (pu)

CONs	Description
J+23	TDELAY1, duration of short-term rating(sec)
J+24	TDELAY2, Trip time for $V > VTRIP$ (sec)
J+25	VREFCON, VOLTAGE REFERENCE (pu)
J+26	VREFMAX, Max. voltage reference limit (pu)
J+27	VREFMIN, Min. voltage reference limit (pu)
J+28	TC2, lead time constant (sec)
J+29	TB2, lag time constant (sec)
J+30	I2I, I2I limit
J+31	RESET, Reset rate for I2I limit
J+32	HYST, Width of hysteresis loop
J+33	XC1, Non-linear droop slope 1
J+34	XC2, Non-linear droop slope 2
J+35	XC3, Non-linear droop slope 3
J+36	V1, Non-linear droop upper voltage (pu)
J+37	V2, Non-linear droop lower voltage (pu)
J+38	TMSSBRK, time for MSS breaker to operate - typically ignore(sec)
J+39	TOUT, Time MSC should be out before switching back in (sec)
J+40	TDELLC, time delay for switching in larger threshold MSS (sec)
J+41	ILUPR, Upper threshold for switching MSSs(pu on STBASE)
J+42	ILWR, Lower threshold for switching MSSs(pu on STBASE)
J+43	STBASE(>0), STATCOM BASE MVA

INTEGER ICONs	Description
M	RMIBUS, bus no. of remote bus for voltage regulation
M+1	ECAP, disable or enable coordinated MSS switching 0 - no MSS switching, 1 - MSS switching on Q [MVA]
M+2	MSSBUS, bus no. of remote bus with coordinated MSSs
M+3	FLAG1, slow-reset off/on, FLAG1 (0/1)
M+4	FLAG2, non-linear droop off/on, FLAG2 (0/1)
M+5	STATCOM_BLOCKED, STATCOM unblocked or blocked (0/1)

圖 3.4 SVSMO3 模型參數表(課程講義提供)

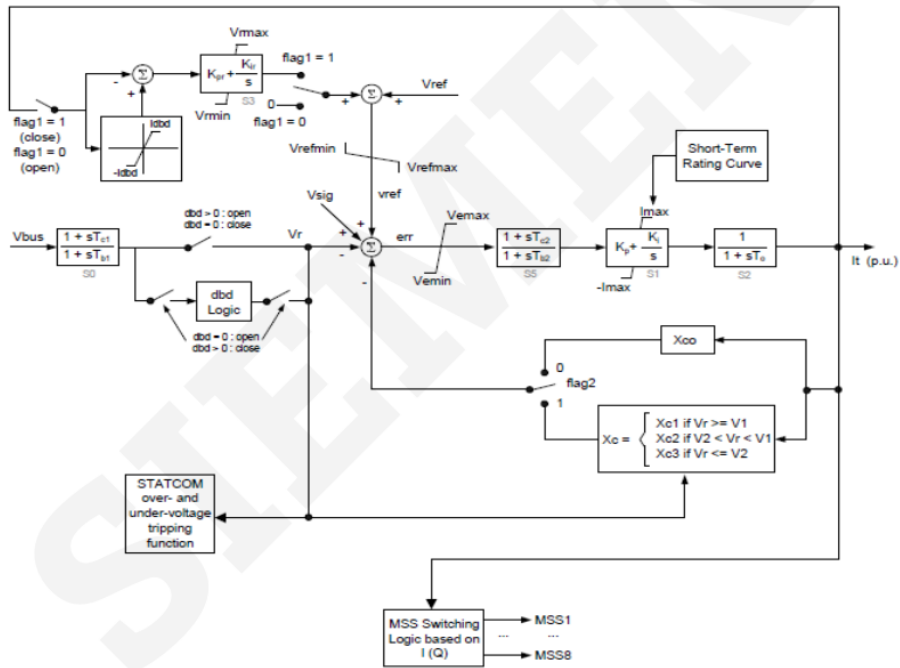


圖 3.5 SVSMO3 模型控制方塊圖(課程講義提供)

3-4 高壓直流系統

高壓直流系統(High-Voltage Direct Current, HVDC)係透過高壓直流電進行電力輸送，相較於高壓交流輸電系統，直流輸電系統可進行長距離、大容量、點對點輸電，並且直流線路無集膚效應(skin effect)，電纜也不會因對地電容效應產生升壓效應。

目前高壓直流系統分為有兩種主要技術，分別為線換相換流器(Line-Commutated Converter, LCC)及電壓源換流器(Voltage Source Converter, VSC)以下將就前述 HVDC 原理及 PSS®E 設備模型進行簡要說明：

(一)、線換相換流器(LCC)

線換相換流器(LCC)為目前最成熟的 HVDC 轉換器，主要以開

流體作為換流器元件，圖 3.6 為 LCC-HVDC 單線圖，由圖中可知 LCC-HVDC 主要結構為三相全橋式整流，藉由調整閘流體導通的相角(相位控制)可調整輸出電壓大小，變流器運作原理為一開始 AC 相透過①即②導通，隨後 B 相電壓超過導通相角使③導通，此時①、②及③導通，其後 A 相電壓小於導通相角使①截止，以此類推導通順序為①②→①②③→②③→②③④→...→⑤⑥①→⑥①→⑥①②→①②週期性完成開關循環。

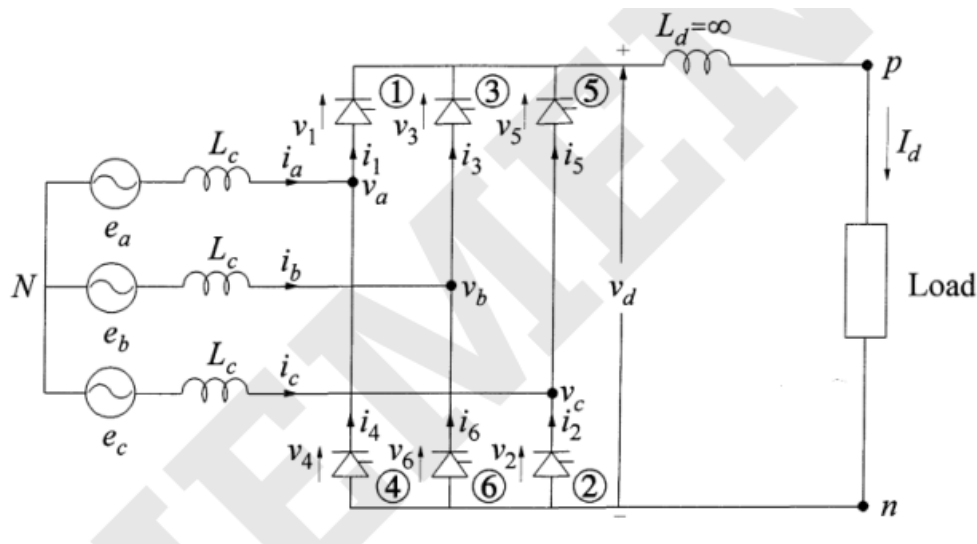


圖 3.6 LCC-HVDC 單線圖(課程講義提供)

交流電壓波型經整流後，透過直流側電抗器(L_d)可使直流側成為一個穩定的電流源，故線換相換流器(LCC)又可另稱為電流源轉換器(Current Source Converter, CSC)。

LCC-HVDC 操作共有兩種模式，當電力潮流由交流側往直流側輸送，此模式為整流器模式(Converter mode)，閘流體觸發信號介於

0°~90° 間；反之，當電力潮流由直流側往交流側輸送，則為變流器模式(Inverter)，開流體觸發信號介於 90°~180° 間。

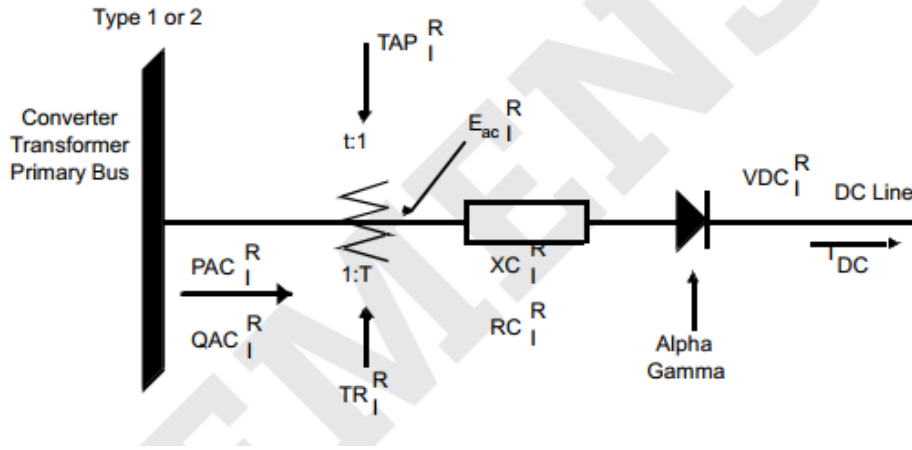


圖 3.7 PSS®E LCC-HVDC 等效模型圖(課程講義提供)

在 PSS®E 中 LCC-HVDC 每條直流線路將等效為 2 個交流電系統負載，圖 3.7 為 PSS®E 中 LCC-HVDC 等效模型圖，整流器端等效負載為 $(PAC_R + jQAC_R)$ 、變流器端等效負載為 $(PAC_I + jQAC_I)$ ，在 LCC-HVDC 正常運作時， PAC_R 、 QAC_R 、 QAC_I 為正值， PAC_I 則為負值，在實際進行系統潮流迭代時，直流線路計算方法如表 3.2 所列，當計算完直流等效交流負載時，計算出的負載值將被視為注入交流系統或從交流系統流入的功率。

表 3.2 直流線路等效模型

參數名稱	等效模型
$PAC, QAC_{(R,I)}$	整流器及變流器之等效交流負載
ALFA	整流器延遲角或導通角
GAMMA	變流器邊界角或關斷角
$VDC_{(R,I)}$	整流器及變流器直流側匯流排電壓
IDC	直流線路電流
$TAP_{(R,I)}$	整流器及變流器非標稱變壓器抽頭位置

因 LCC-HVDC 為目前最成熟的直流輸電系統，目前多數既設 HVDC 案場多為 LCC 型態，PSS[®]E 中亦有許多 LCC 動態模型及相關輔助模型，詳如表 3.3 及表 3.4。

表 3.3 LCC 直流系統動態模型

模型名稱	模型說明
CDC1T	舊版雙端點直流線路模型
CDC4T	雙端點直流線路模型
CDC6T	雙端點直流線路模型
CDC6TA	雙端點直流線路模型
CDC7T	雙端點直流線路模型
CDCABT	ABB 直流線路模型(依據 Kontek 直流輸電系統)
CEELT	鰻河(Eel river)直流輸電系統及訊號輔助模型
CEEL2T	鰻河(Eel river)直流輸電系統
CHIGATT	Highgate 直流輸電系統
CMDWAST	馬達沃斯卡(Madawaska)直流輸電系統
CMDWS2T	新版馬達沃斯卡(Madawaska)直流輸電系統
CMFORDT	科默福德(Comerford)直流輸電系統
MTDC1T	多端點(5 端點)直流輸電系統
MTDC2T	多端點(5 端點)直流輸電系統
MTDC3T	多端點(8 端點)直流輸電系統

表 3.4 LCC 直流系統輔助動態模型

輔助訊號模型名稱	模型說明
CHAAUT	沙托蓋(Châteauguay)直流系統輔助訊號模型
CPAAUT	頻率響應輔助訊號模型
PAUX1T	頻率響應輔助訊號模型
PAUX2T	匯流排電壓角度響應輔助訊號模型
SQBAUT	直流線路輔助訊號模型(僅能運用於雙端點系統)
DCCAUT	科默福德(Comerford)直流輸電系統輔助訊號模型
HVDCAT	通用輔助訊號模型
RBKELT	回授模式(僅能運用於雙端點系統)

前述模型不涉及轉換器和直流線路的內部動態行為，主要原因係由於轉換器的內部控制以及直流電流和電壓的響應非常快，因此轉換器被視為當任何輸入訊號或交流饋電電壓發生變化時它們會立即穩定調整到新的工作點。

(二)、電壓源換流器(VSC)

雖然 LCC-HVDC 可輸送高壓及大功率直流能量，但因受其自身特性影響，LCC 運轉時對虛功需求大，變流器有換向失敗的風險及需仰賴足夠強健的交流系統提供換向電壓等因素，近年來多數新案場改以自換相(Self-Commutated)電壓源轉換方式的 VSC-HVDC，以解決前述問題。

VSC-HVDC 為一種運用電壓源換流器(Voltage Source Converter, VSC)之技術結合絕緣閘雙極電晶體(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)的直流輸電系統，可將 HVDC 的輸送功率範圍擴展至幾兆瓦(MW)。除了作為傳統交流輸電和發電線路的一種具有成本競爭力的替代方案之外，它還為提高既有交流電網供電品質（因為幾乎不產生諧波）開闢了新的可能性。

由於直流電壓水平適中，且整流器和變流器的直流電壓極性相同，因此 VSC-HVDC 可將地下電纜埋入地下，其所需工程及線路成本相等或低於相同規格的架空線路。

VSC-HVDC 新技術運轉操作簡單，全系統皆為全自動，並可以提供遠端監控設施，系統的簡單性也減少其停機時間和維護成本。且 VSC-HVDC 沒有無效功率需求，運轉時可以像同步發電機控制交流端系統運轉電壓，同時可以為遠端負載供電，系統無需額外的電源啟動，故可以用作為全黑啟動資源。

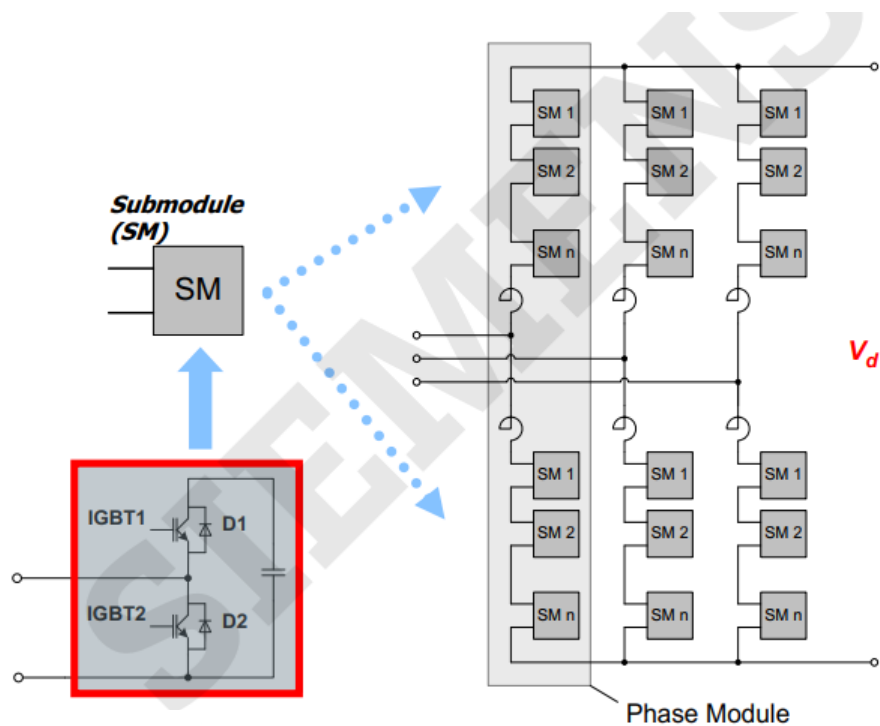


圖 3.8 VSC-HVDC 模型圖(課程講義提供)

圖 3.8 為 VSC-HVDC 模型圖，目前模組化多階層轉換器(Modular Multilevel Converter, MMC)已被廣泛運用於系統中，藉由模組化之結構可提升模組效益、無須安裝特殊變壓器、高可靠性低維護要求及低諧波產生。

PSS[®]E 中 VSC-HVDC 模型為通用模型，尚未有設備商實際模型

亦無特殊控制模型，模型為獨立於傳統 LCC 雙端點直流線路模型，VSC-HVDC 系統圖如圖 3.9 所示。

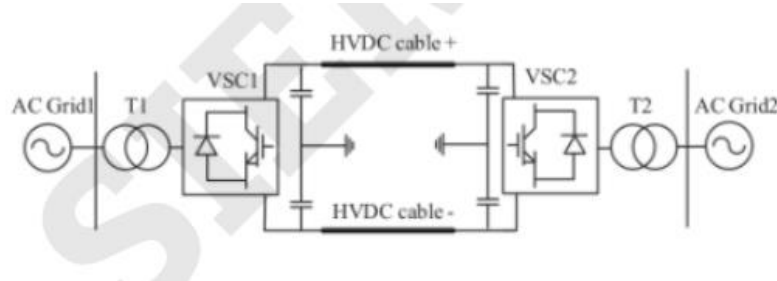


圖 3.9 VSC-HVDC 系統圖(課程講義提供)

針對 VSC-HVDC 動態模擬建模，目前 PSS[®]E 共有兩種模型 VSCDYN 及 HVDCPLU1，VSCDYN 模型為整合兩個 VSC 模組模型(VSCDYN)，其分別設定為整流器及換流器端之運轉狀態，及一個直流傳輸線模組模型(DCLINE)。其 VSCDCT 模型圖如圖 3.10 所示。

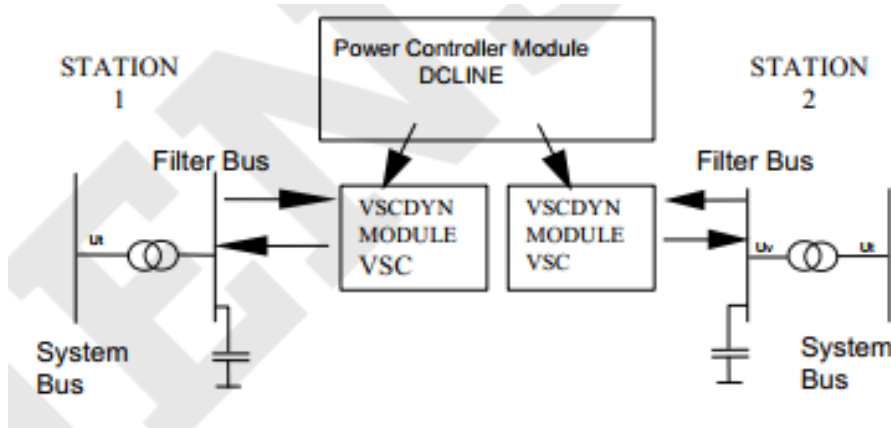


圖 3.10 VSC-HVDC VSCDCT 模型圖(課程講義提供)

HVDCPLU1 為整合整流器、換流器及直流線路之單一模型，其中模型可再細分為系統並聯運轉及風場併聯兩種不同模型，相關運轉模式可透過在模型中設定對應的標誌(ICON)。HVDCPLU1 模型示

意圖如圖 3.11 所示。

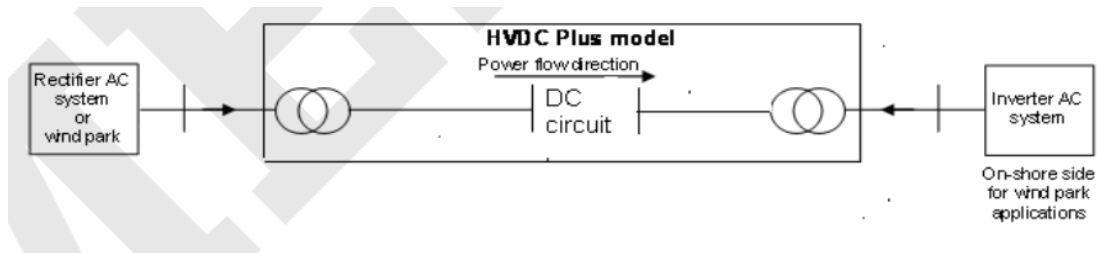


圖 3.11 VSC-HVDC HVDCPLU1 模型圖(課程講義提供)

針對風力案場併網應用(電源線)，高壓直流輸電專門用於輸送風場電力，風力發電機組產生的電力透過高壓直流輸電線路傳輸，且無論功率傳輸等級如何，整流器交流側的頻率都必須保持恆定，前述功能為透過維持換流器交流匯流排的相角來實現，此控制為風場應用直流系統傳輸的核心功能。

風場應用的控制包括：整流器交流匯流排電壓角控制(Rectifier AC bus voltage angle control)、整流器虛功率控制(Rectifier reactive power control)、換流器虛功率控制(Inverter reactive power control)、換流直流電壓控制(Inverter DC voltage control)及直流截波器(DC chopper)

若運用於系統並聯運轉(系統線)時，控制內容包括：整流器直流電壓控制(Rectifier DC voltage control)、整流器虛功率控制(Rectifier reactive power control)、換流器虛功率控制(Inverter reactive power control)及換流器實功率控制(Inverter active power control)。

3-5 PSS[®]E 動態模擬

電力系統動態模擬分析為電力系統網路求解及動態模型電流注入之相互關係可運用電路學中節點方程式(Node Equation)表示，即 $Y \cdot V = i(x, v)$ ，其中 $i(x, v)$ 表示全系統屬於投入中狀態之機組注入系統的電流值，注入電流受狀態變數 x 及匯流排端點電壓 v 影響、 Y 為導納值、 V 為電壓。

實際執行動態模擬時，係透過求解電力潮流程式對進行電力系統網路進行迭代(Iteration)運算，經初次迭代求得電力系統中各結點之初始電壓值設定。此時，假設狀態變數初始值 x 為已知，如此可計算流進節點的電流 i ，將電流 i 代入結點方程式 $Y \cdot V = i(x, v)$ ，經過數值計算，可求得結點之新電壓值；將此新電壓值代回 $i(x, v)$ ，即可求得新的電流值，重複執行前述流程可得到系統電流變化，並可進一步拓展出電壓、實功率、虛功率、機組角度及頻率等項目。

PSS[®]E 動態模擬流程主要包含初始化(Initialization)及 RUN 模擬程序，其包含四大重點：

1. 機組模型狀態變數初始化。
2. 機組模型注入電流計算：機組模型注入電流主要依網路求解得到之匯流排電壓計算而得。使用之設備模型只要有匯流排電壓與設備流入電流之代數關係之模型(Current-Injection

Model)，皆需計算注入電流。這些模型設備包含：發電機、感應電動機、SVC、HVDC 及負載等。

3. 狀態變數時間導數計算(DSTATE)：在給定所有機組模型之狀態變數初始值及發電機定子電流情況下，計算模型內部每一狀態變數之時間導數(Time Derivative)。此階段在計算獲得狀態變數時間導數值期間，亦計算模型中所有代數變數(Algebraic Variables)。
4. 計算模型輸出變數(Output Variables)。

以下將簡要說明 PSS[®]E 執行動態模擬之程序與介面介紹

(1)動態參數設定

在進行暫態穩定度模擬時，首先需要針對發電機參數進行諾頓等效(Norton equivalent)計算，設定如圖 3.12 所示

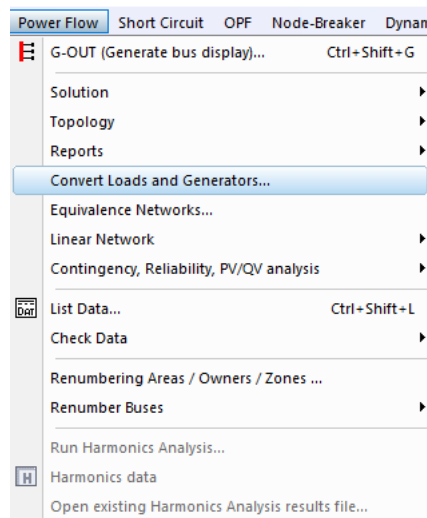


圖 3.12 PSS[®]E 諾頓等效計算圖

完成後需進行匯流排重新排序(Order network for matrix operations, ORDR)、三角分解(Factorize Admittance Matrix, FACT)及電網計算(Solution for Switching Studies, TYSL)的步驟，其操作分別示意於圖 3.13、圖 3.14 及圖 3.15。

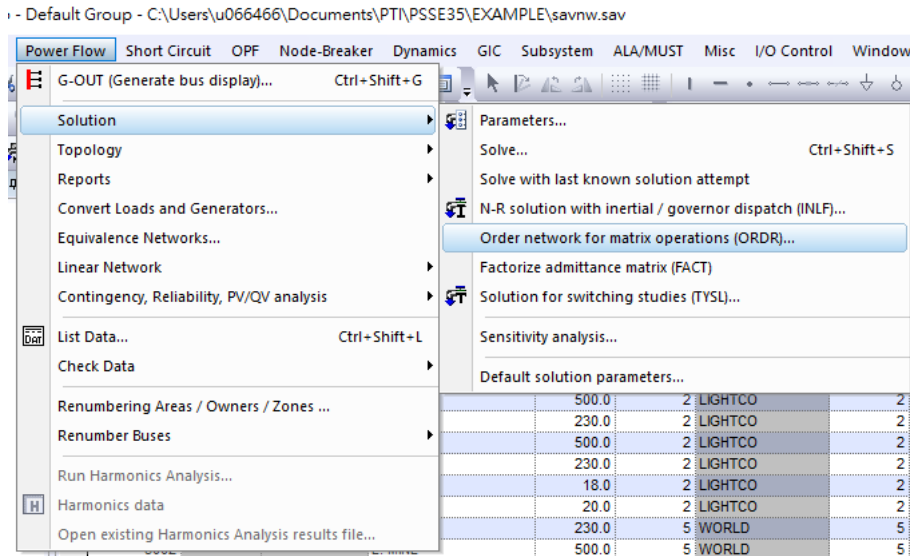


圖 3.13 PSS®E 暫態穩定度 ORDR 計算圖

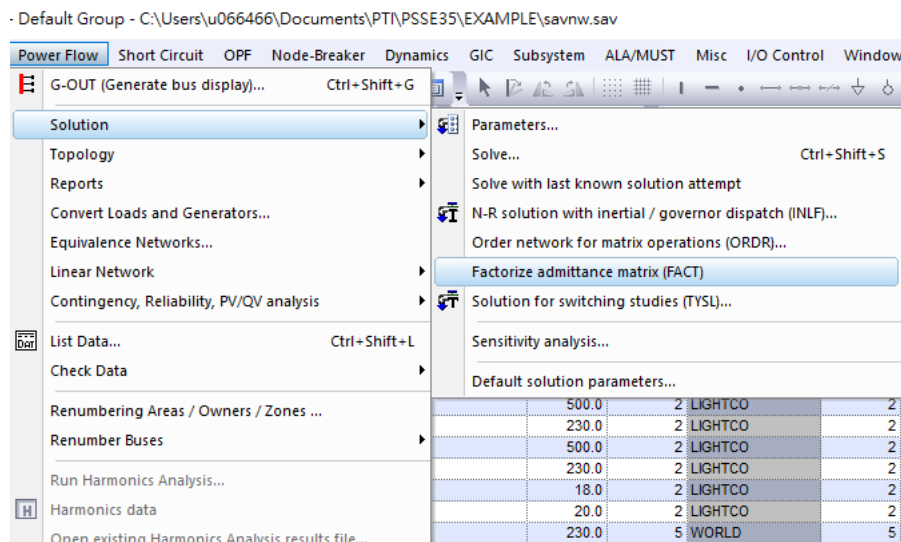


圖 3.14 PSS®E 暫態穩定度 FACT 計算圖

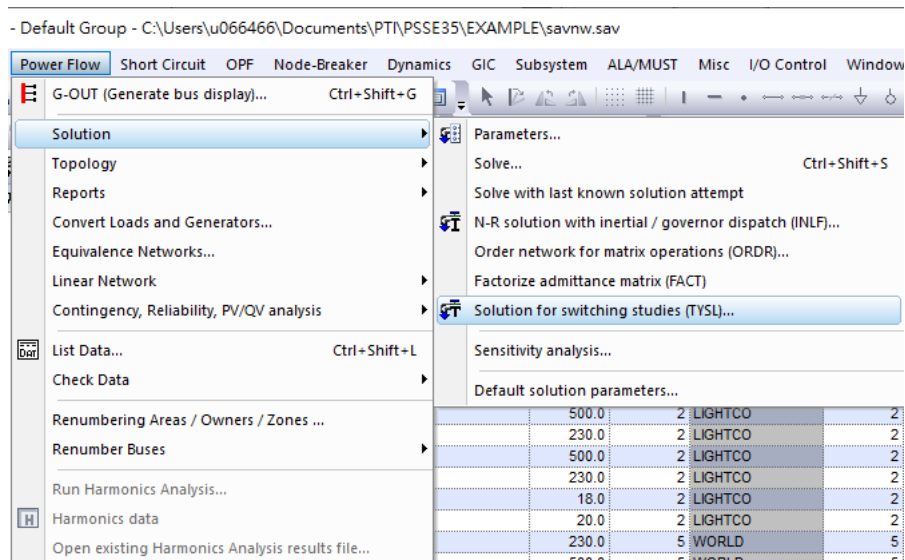


圖 3.15 PSS[®]E 暫態穩定度 TYSL 計算圖

接電網結構重新調整後下一步驟即是開啟發電機組之動態檔，選擇檔案類型(Dynamics Model Raw Data file,*.dyr)後，將以建立完成之動態檔讀取至 PSS[®]E。在 PSS[®]E 32 版以前，在此時需針對 CONEC 和 CONET 模型再做處理，但於在 33 版後續版本，已將動態 CONEC 和 CONET 模型標準化，因此可以節省部分模擬設定程序。

此外，若系統中的發電機組有自建模型的部分，需將自建模型的部分建立起.dll 檔。完成檔案讀取後下一步即是選擇欲觀察的項目，如：發電機角度、輸出電力、電壓、頻率等等，再將模擬的檔案進行初始化，並選擇輸出的檔案名稱。

執行暫態穩定度的程序較為繁瑣，在進行檢討時也常因動態檔案或是系統參數問題，造成初始化之後即無法進行事故模擬之狀況，此時可能出現「INITIAL CONDITIONS SUSPECT」的訊息，可能

的原因如下：

- 確認發電機之機械功率是否落在發電機組調速機的限制範圍內
- 動態檔中的發電機參數 X” 與潮流檔中的參數 XSORCE 不一致
- SVC 的輸出是否落在模型的指定範圍內

因此在模擬分析前，需將此因素一一排除，直到系統出現圖 3.16 中 INITIAL CONDITIONS CHECK O.K.之訊息後，再執行事故發生後之暫態穩定度模擬，方能確保模擬之正確性。

```
PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS(R)E    MON, DEC 04 2023  14:55
PSS(R)E PROGRAM APPLICATION GUIDE EXAMPLE
BASE CASE INCLUDING SEQUENCE DATA

INITIAL CONDITION LOAD FLOW USED 1 ITERATIONS

----- MACHINE INITIAL CONDITIONS -----
BUS#-SCT X-- NAME --X BASKV ID  ETERM  EFD   POWER  VARS  P.F.  ANGLE  ID      IQ
101   NUC-A    21.600 1  1.0200 2.0565 750.01  81.30 0.9942 63.46 0.6572 0.4934
102   NUC-B    21.600 1  1.0200 2.0565 750.01  81.30 0.9942 63.46 0.6572 0.4934
206   URBGEN    18.000 1  1.0238 2.5621 800.01  599.99 0.8000 23.52 0.8730 0.4380
211   HYDRO_G   20.000 1  1.0403 1.6137 600.00  17.33 0.9996 42.16 0.4086 0.6829
3011  MINE_G     13.800 1  1.0400 1.4646 258.64  103.61 0.9283 16.03 0.1644 0.2115
3018  CATDOG_G  13.800 1  1.0220 2.9377 100.00  80.00 0.7809 22.53 0.8755 0.4033

INITIAL CONDITIONS CHECK O.K.
```

圖 3.16 PSS®E 暫態穩定度初步確認圖

四、結論與建議

- (一) 首先，感謝系統規劃處的處長、兩位副處長及公司長官給予機會讓我們到美國參加「西門子公司(SIEMENS)動態分析短期課程」，不論在動態模擬的理論及實務都獲益良多。
- (二) 本次課程共有 5 位學員參加，其中學員僅 2 位為非美國籍，其餘學員皆在美國工作，包含電網公司、獨立調度中心(NYISO)、等人員，職務涵蓋規劃、運轉、發輸電及 ISO 準則等領域，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，亦可透過 PSS[®]E 模擬問題探討有更多面向的思考。
- (三) 本次動態分析一週短期課程，原始課程拆分為七天，後因其他因素目前課程濃縮為五天課程，課程內容較屬於 PSS[®]E 進階動態模擬的部分，主題係運用 PSS[®]E 進行電力系統各元件之建立，亦包含使用者自建模型，與其他課程相比，屬難度較高的課程，需具有 PSS[®]E 動態模擬經驗者較適合參加。
- (四) 因課程內容囊括完整的電力系統(包含發電、輸電及負載)，僅五天會導致課程安排較為倉促，導致直流系統課程內容僅以極短的時間完成。
- (五) 從台灣搭乘班機直飛紐約甘迺迪機場所需時間長達 15~16 小時，

抵達紐約時身體已相當疲累，抵達美國機場後，辦理安檢及相關入境程序保守需花上 1~2 小時，若是班機飛抵美國時間為晚上，辦理完成入境程序時之時間將更晚。建議於訂購機票時選擇美國上午時間抵達，抵達後之路程交通若遇上狀況，較為容易且有足夠時間可處理應付，並且白天時間上路也較為安全。

(六) 美國火車容易誤點，由於美國境內幅員廣大，火車單程總小時數可能長達 20 小時左右行程，既使短程交通可能也容易受影響，建議若有其他公車(如灰狗巴士)路線可到達之處，除假日前後可能受到塞車因素耽擱時程，在總搭乘時間不長的狀況下，不失為一個理想的交通工具。

(七) 有智慧型手機之同仁，建議可於出發前在台灣先行辦理美國當地易付卡 (T-Mobile)，並選擇合適之通話即上網費率，因為抵達美國之後即須處理交通及住宿等生活瑣事，此外迷路或有急事時須與當地或台灣人員聯絡時，皆甚為便利，並可降低在國外生活之不安全感。