

出國報告（出國類別：實習）

靜態型無效電力補償器(STATCOM)
應用實習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：王士熒 八等電機工程師

派赴國家：瑞典、德國

出國期間：97.09.22～97.10.01

報告日期：97.11.25

《摘要》

本實習報告共分四個章節：第壹、貳章節為實習目的及實習過程，說明為改善本公司電力系統之穩定度及傳輸能力，前往歐洲 ABB 及 SEIMENS 公司實習 STATCOM 及 SVC；第參章節則是實習心得，說明 STATCOM 與 SVC 之原理、配置、V-I 特性曲線、安全工作區域及規劃、配置、應用考量事項；最後第肆章節為建議本公司裝設 STATCOM 與 SVC 採統包方式辦理及規劃上應注意事項。

《目錄》

壹、實習目的.....	03
貳、實習過程.....	03
參、實習心得.....	04
一、靜態無效功率補償器（static var compensator，SVC）	
二、靜態型同步無效電力補償器（static synchronous compensator，STATCOM）	
肆、建議事項.....	15

壹、實習目的

本公司電力系統因南電北送、大量使用地下電纜及擴建不易致電力系統穩定度及電力傳輸能力受限，在適當地區裝設靜態型同步無效電力補償器（STATCOM）及靜態無效功率補償器（SVC），將大幅提昇本公司電力系統穩定度及電力傳輸能力。

STATCOM 及 SVC 係應用電力電子技術，動態調節系統的無效功率，維持系統穩定，提高輸電能力。該技術發展至今已有二十多年的時間，可說相當成熟，且參酌技術文獻，以歐洲廠家發展最久、實績最多，因而派員前往瑞典 ABB 公司、德國 SEIMENS 公司實習。

本公司電力系統目前尚未引進 STATCOM 及 SVC，但在第七輸變電計畫中，預定在龍潭（北）E/S 興建 $\pm 150\text{MVA}$ 的 STATCOM、在鳳林 E/S 興建 $\pm 100\text{MVAR}$ 的 SVC、在台東 P/S 興建 $\pm 200\text{MVAR}$ 的 SVC，因此希望藉此實習對公司有所貢獻。

貳、實習過程

一、本次出國計畫期間為 97.09.22~97.10.01 共計 10 天，前往瑞典的 ABB 公司以及德國的 SEIMENS 公司實習。

二、往程：97.09.22~97.09.23，台北→瑞典斯德哥爾摩。

三、ABB 公司實習：97.09.24~97.09.25

在斯德哥爾摩近郊 Västerås 的 ABB 公司 FACTS 及 HVDC 研發中心實習 STATCOM。實習內容如下：

- (一) 由 Mr. Leif Andreasson 主持，介紹 ABB 公司概況及 ABB 製造之 FACTS 的應用情形。
- (二) 由 Mr. Mats Linden 擔任講師，帶領參觀 STATCOM 及 SVC 的核心監控設備（MACH II）試驗實驗室，並於實驗室中講授監控系統的運轉、線上監控方式。
- (三) 由 Mr. Per Halvarsson 擔任講師，講授 STATCOM 與 SVC 原理、工作方式、配置、ABB 實績，以及由系統面切入提供的 STATCOM、SVC 解決方案。
- (四) 由 Mr. Björn Thorvaldsson 擔任講師，講授 STATCOM 與 SVC 設計、規劃、以及系統參數決定。
- (五) 由 Mr. Björn Thorvaldsson、Per Halvarsson 擔任講師，講授 SVC、STATCOM 之基本規範要求、規格上必要注意的地方，並比較 SVC 與 STATCOM 差異。
- (六) 由 Mr. Leif Andreasson 主持，與相關人員進行綜合討論。

四、中間行程：97.09.26 上午，瑞典斯德哥爾摩→德國法蘭克福。

五、SEIMENS 公司實習：97.09.26 下午~97.09.29

在法蘭克福 SEIMENS 公司及紐倫堡近郊 Erlangen 的 FACTS 研發中心實習 STATCOM。實習內容如下：

- (一) 由 Mr. Ralf Stöber 主持，介紹 SEIMENS AG 關於 FACTS 的應用概況。
- (二) 由 Mr. Thomas Mangold 擔任講師，講授 SVC、STATCOM 原理、規劃，並比較 SVC 與 STATCOM 差異。
- (三) 由 Mr. Michael Bär 擔任講師，講授 SVC、STATCOM 關於控制方面的規劃與設計。
- (四) 由 Mr. Ralf Stöber 主持，邀集相關部門人員，針對系統面、相關參數、規劃等，進行綜合研討。

六、返程：97.09.30~97.10.01，德國法蘭克福→台北。

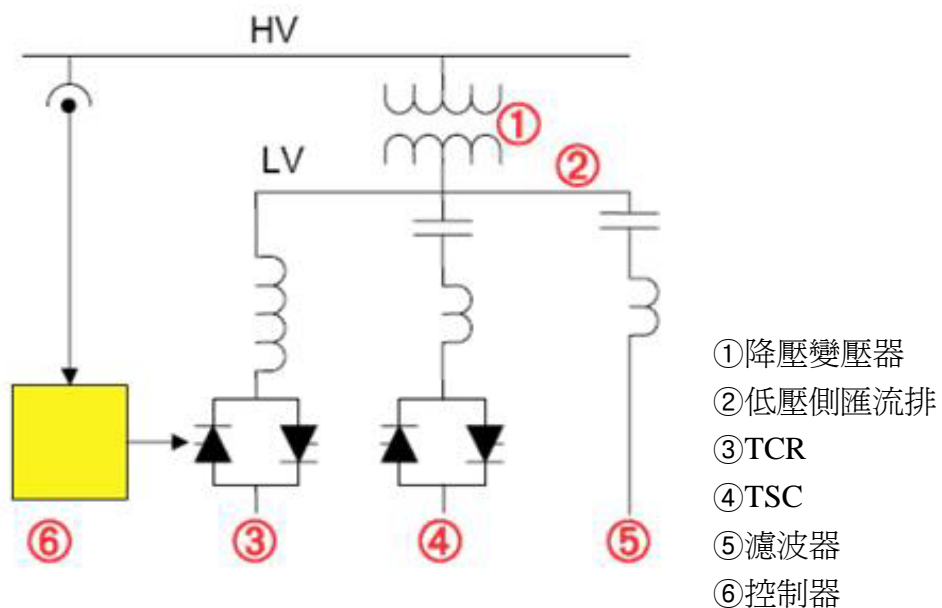
參、實習心得

一、靜態無效功率補償器（static var compensator，SVC）

SVC 是一種靜止的並聯虛功發生或吸收裝置，可以調整其輸出為電容性或電感性電流，從而達到控制電力系統特性參數（通常為母線電壓）的目的。

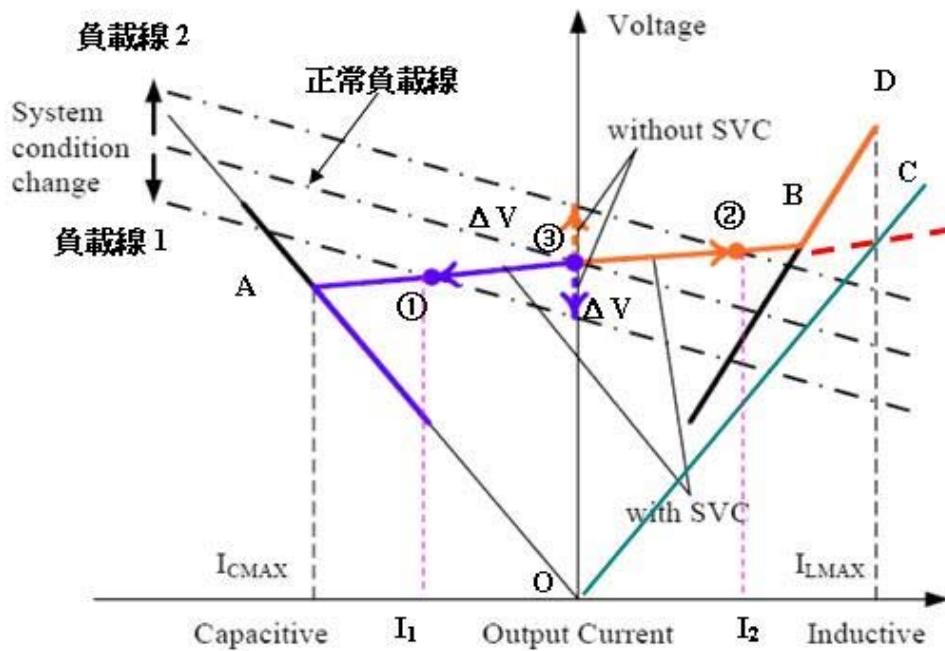
SVC 為一個通稱，包括 TCR、TSR、TSC 及機械投切式虛功補償設備（如 MSC、MSR）構成的組合裝置，係屬於一種基於閘流體控制/投切型 FACTS 控制器。

(一) SVC 配置方式



- 1、SVC 應用在輸電系統中，可用以控制節點電壓，以提高傳輸可控制性、系統穩定性和輸送容量。
- 2、SVC 應用在配電系統中，可用以提高供電可靠性和電力品質。

(二) SVC 之 V-I 特性曲線



- 1、當 SVC 所連接的母線 BUS 電壓 $V >$ 基準電壓 V_n 時，SVC 為電感性負載，它將吸收（即消耗）無效功率促使系統電壓下降。
- 2、當 SVC 所連接的母線 BUS 電壓 $V <$ 基準電壓 V_n 時，SVC 為電容性負載，它將產生（即送出）無效功率促使系統電壓升高。
- 3、裝設 SVC 後之動作範圍在 AB 直線上，SVC 端電壓大致上係維持恆定的，但特別需要注意的是其恆定係維持在 AB 線段，有短時間過載維持在 AC 線段功能。
- 4、若偏離此區域，SVC 僅能作為單純的電容器（AO 線段）或電抗器（BD 線段）使用，而此時即失去動態補償之功能，也失去裝設此一昂貴設備之意義。
- 5、運轉說明：
 當正常運轉時，系統電壓 $V_s = V_n$ ，SVC 之電流 = 0。（負載曲線 0）
 當系統因電感性負載增加而電壓下降 ΔV 時，未投入 SVC 則電壓在①點上；投入後則 SVC 流過電容流 I_1 ，母線電壓回到③點。

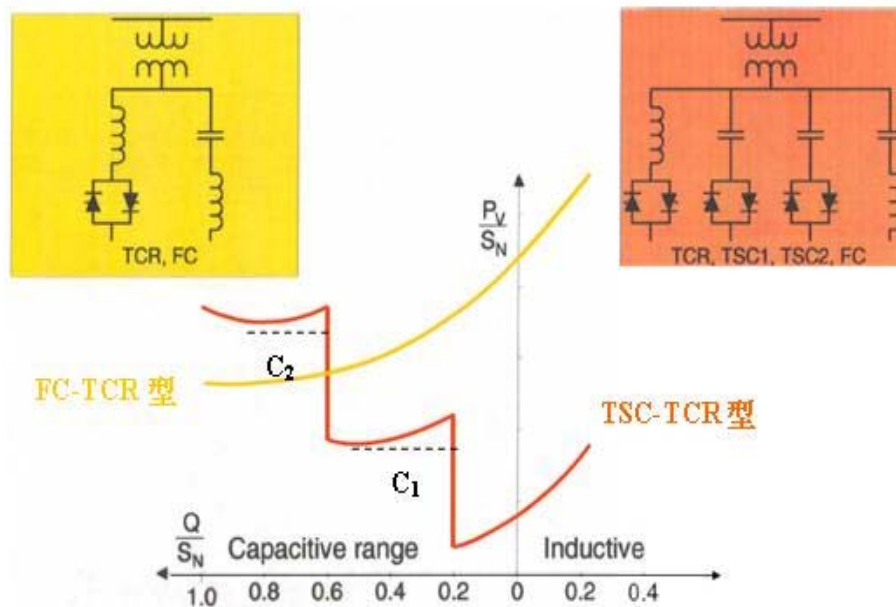
反之，當系統因電容性負載增加而電壓上升 ΔU 時，未投入SVC則電壓在②點上；投入後則SVC流過電感電流 I_2 ，母線電壓回到③點。故SVC可使電壓維持不變。

※ AB 線段的斜率愈小，就愈能使電壓變化小，但特性過於平緩，控制系統就有可能發生擾動，因此必須進行詳細分析，以求得適當的斜率，方能讓電力系統達到最佳化狀態。

(三) SVC 之損失

上述各元件可以不同組合而產生不同設計之 SVC，例如有 FC-TCR 型 SVC、TSC-TCR 型 SVC、MSC-TCR 型 SVC 等，而各種不同之組合係針對不同之電力系統需求而為不同之設計，各種不同之組合設計，通常帶不同之損失，以及不同之工作區域範圍，未來本公司在使用上須將電力系統上之特性、模型及相關參數計算出來以後，採取一個對本公司最佳化之設計，再要求供應商提供，同時也可以比較出各廠家之產品優劣。

FC-TCR 型 SVC 與 TSC-TCR 型 SVC 損失比較曲線圖如下：



1、FC-TCR 型 SVC 之損失

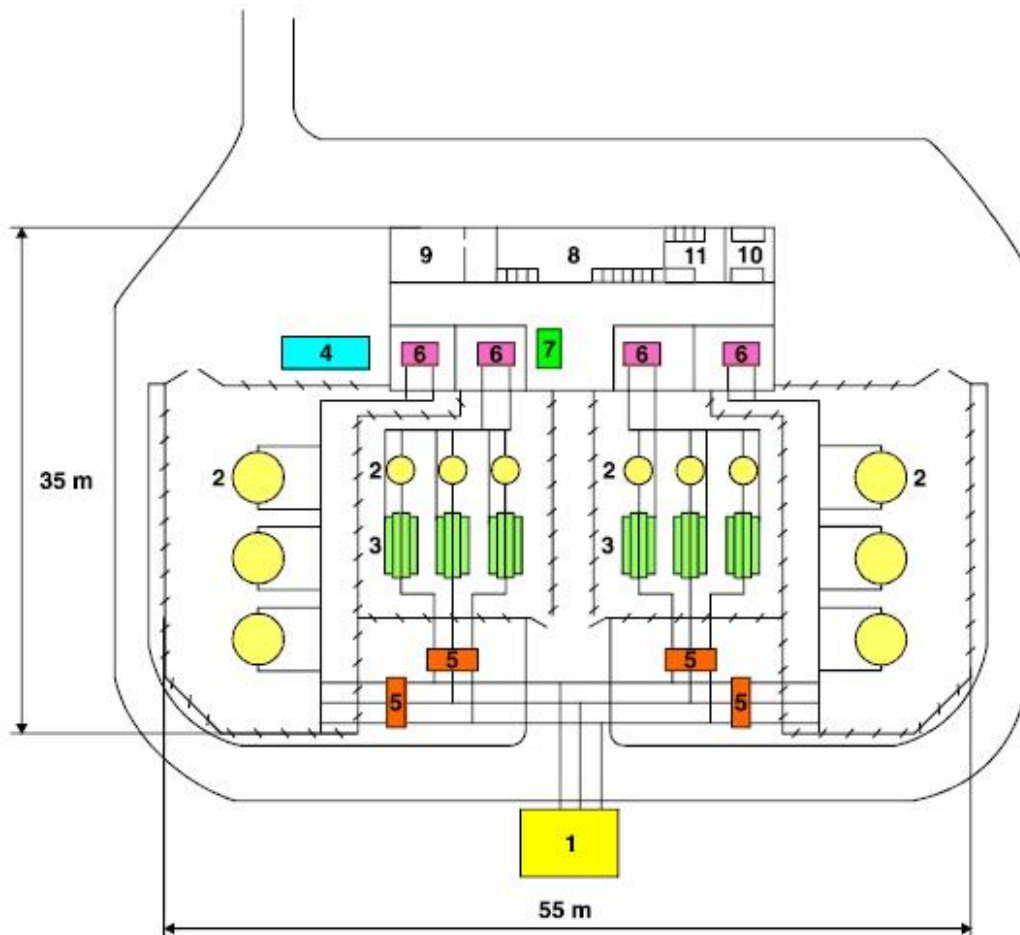
- (1) 固定電容器或濾波網絡的損失，這一部份的損失是固定且較小。
- (2) TCR 支路中電抗器的損失，與支路電流平方近似成正比。
- (3) 閘流體本身損失，包括觸發電路損失、開通與關斷損失、通態與阻態損失等，可視為與支路電流成正比。

(4) 整體以觀，損失隨著輸出電感性虛功而增加，隨著輸出電容性虛功而減少。當輸出虛功=0 時，仍然存在有一定損失。

2、TSC-TCR 型 SVC 之損失

- (1) 裝置輸出電感性虛功時，TSC 支路開路，損失由 TCR 支路決定。
- (2) 裝置輸出電容性虛功時，損失特性由投入之 TSC 及 TCR 支路決定。
- (3) 雖然由(1)、(2)知 FC-TCR 型與 TSC-TCR 型相似，但在相同虛功容量需求之下，TSC-TCR 型 SVC 可以只投入部分之 TSC，故 TCR 支路需要吸收多餘的電容性虛功也隨之減少，從而有利減少裝置的損耗。特別是當系統電容性虛功需求變化頻繁時，採用 TSC-TCR 型 SVC 更有利。

(四) ABB 公司之 SVC 構造 (典型±200MVAR)

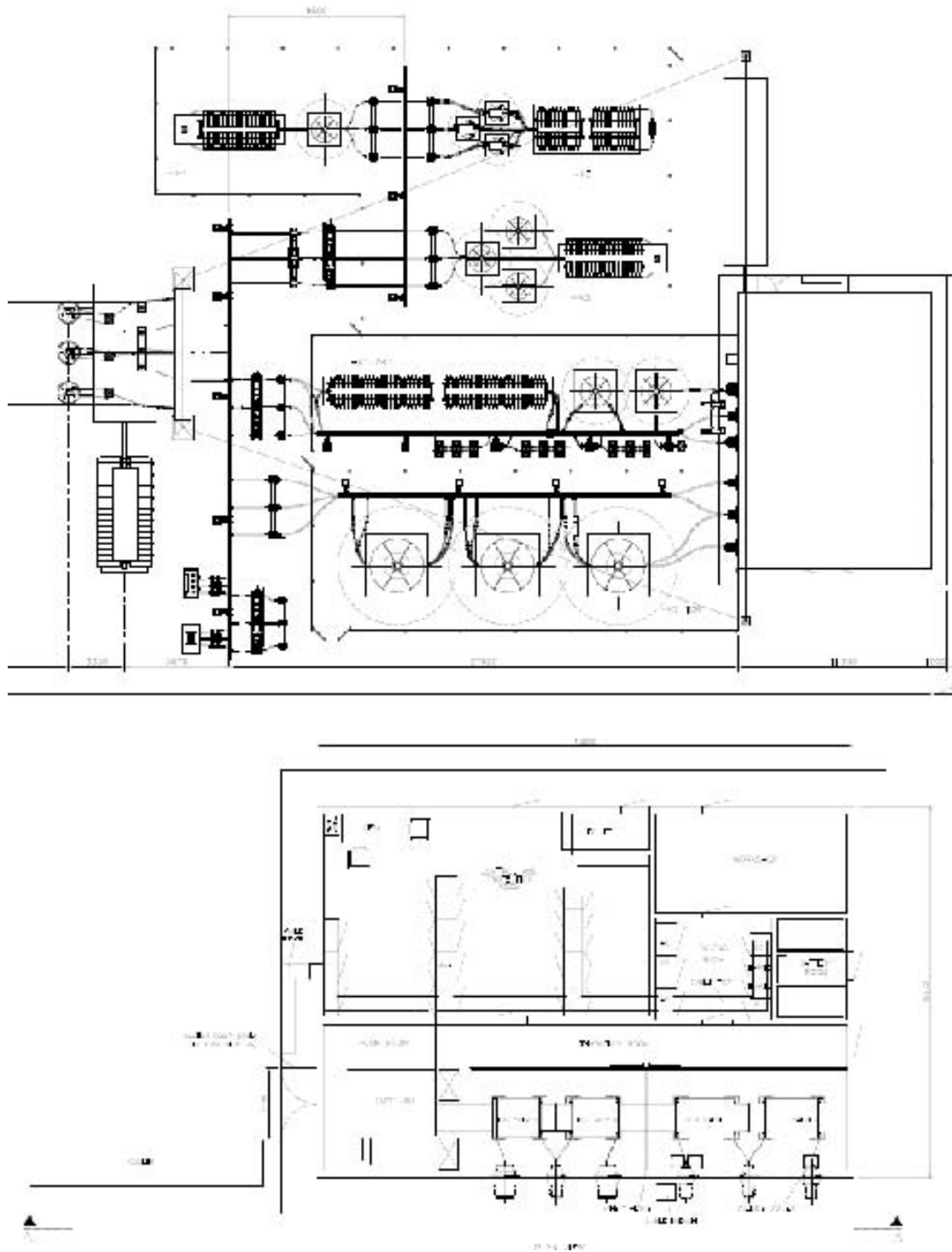


01、升壓變壓器
02、電抗器
03、電容器組
04、冷卻水塔

05、斷路器
06、Thyristor valves
07、冷卻系統設備
08、控制室

09、通風設備
10、電池室
11、輔助設備室

(五) SEIMENS 公司之 SVC 構造



(六) SVC 規劃、配置及應用考量事項

- 1、台灣地狹人稠，加上近年來抗爭問題不斷，用地取得困難，ABB 與 SEIMENS 公司均表示，電抗器、電容器、濾波器、電阻器等均可以向上堆疊，因此，無須過度擔心設備大小與用地面積，只需要將本公司現有土地大小告知，廠家會作適切的規劃與配置。

2、關於 SVC 的建置結構有很多不同之方式，其對於系統均能達到同一效果之補償，如 TCR-FC SVC、TCR-TSC SVC、TCR- MSC/MSR SVC 等，但是各種不同的設計其最大的差異在於其損失的特性亦不相同，而其價格亦不相同。

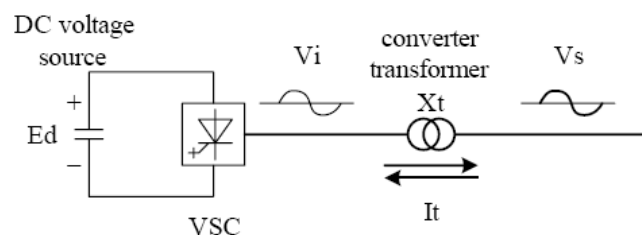
因此，將來應用在本公司的系統上時，第一步應先去瞭解系統上的特性，確定補償的目的為短路電流故障、或是投切開關時所引起的系統電壓不穩定等，第二步再來決定、設計、規劃出單線圖，並選用適合能使本公司系統最佳化的設計。

二、靜態型同步無效電力補償器（static synchronous compensator，STATCOM）

STATCOM 是一種並聯的、能進行虛功補償的靜止同步『發電機』，其電容性與電感性輸出電流可獨立於輸入點的電壓而逕行控制。它亦屬於 FACTS 的核心控制器之一，屬於變換器型 FACTS 控制器。其中變換器可採取電壓型變換器（voltage sourced converter，VSC）或電流型變換器（current sourced converter，CSC），目前以 VSC 為基礎的 STATCOM 為最常見。

（一）STATCOM 構造系統

儲能元件的 DC 電容、電力電子元件構成的 VSC、變換器連接電抗器（或變壓器）接入系統。如下圖：



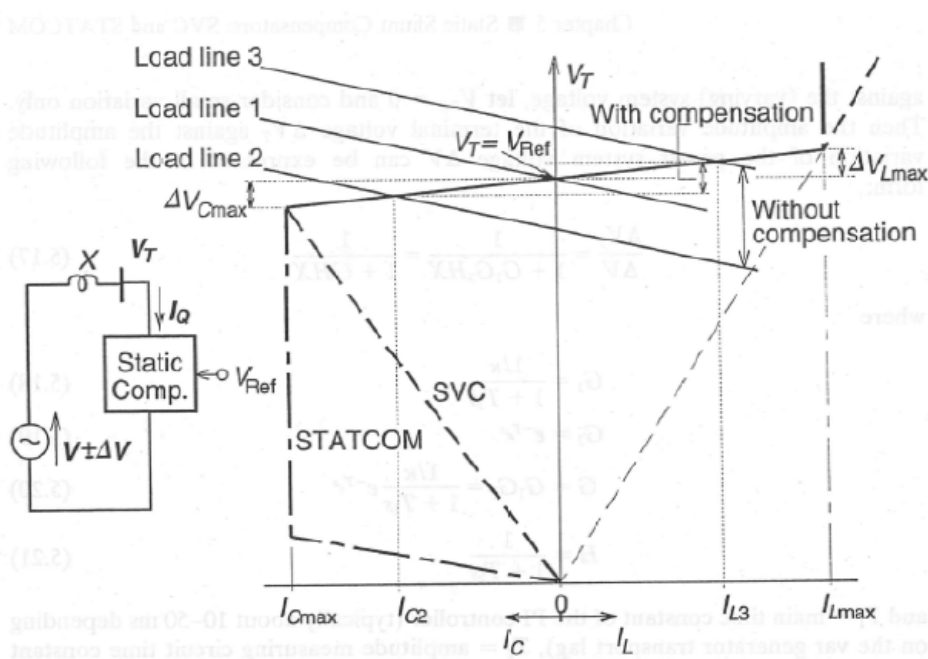
(二) STATCOM 之工作方式

Operating Mode		Waveform
No Load $V_s = V_i$		
Capacitive $V_s < V_i$		
Inductive $V_s > V_i$		

- 1、當 $V_i > V_s$ 時，從系統流向 STATCOM 的電流相位超前系統電壓 90° ，STATCOM 工作於電容性工作區，輸出無效功率。
- 2、當 $V_i < V_s$ 時，從系統流向 STATCOM 的電流相位滯後系統電壓 90° ，STATCOM 工作於電感性工作區，吸收無效功率。
- 3、當 $V_i = V_s$ 時，系統與 STATCOM 之間電流為 0，不交換無效功率。
- 4、STATCOM 輸出虛功功率的極性和大小決定 V_i 和 V_s 的大小，藉由控制 V_i 的大小就可以連續調節 STATCOM 發出或吸收虛功的多寡。

(三) STATCOM 特性及安全工作區域

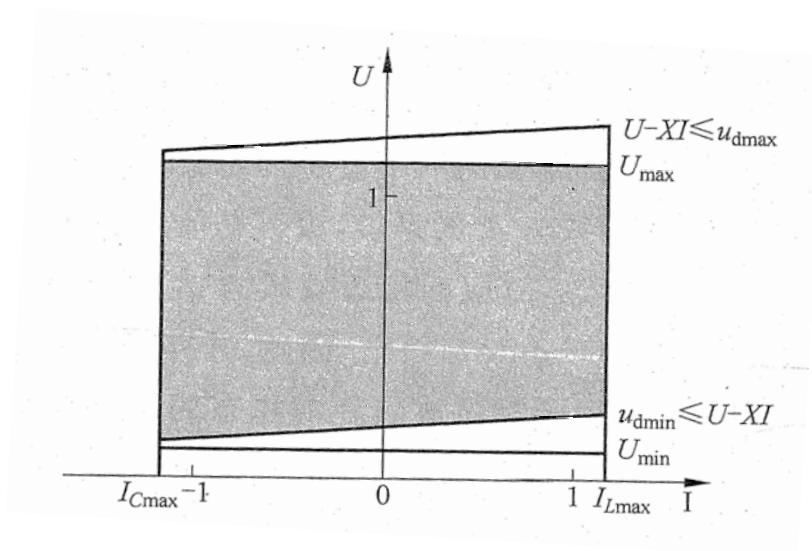
1、V-I 特性曲線



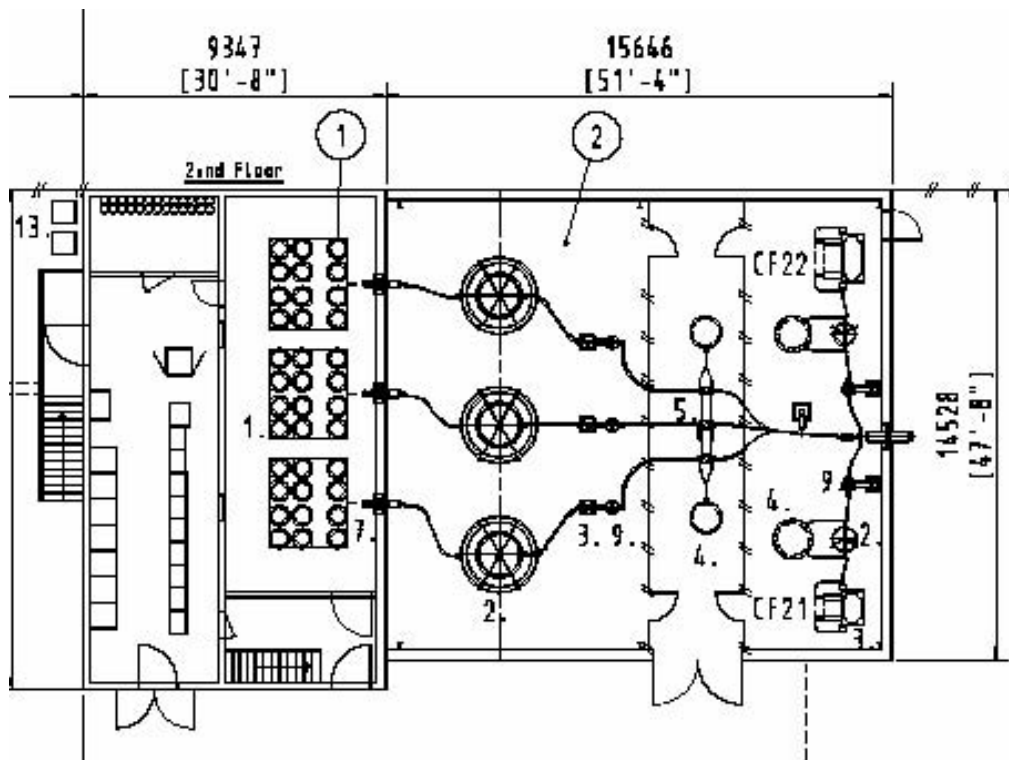
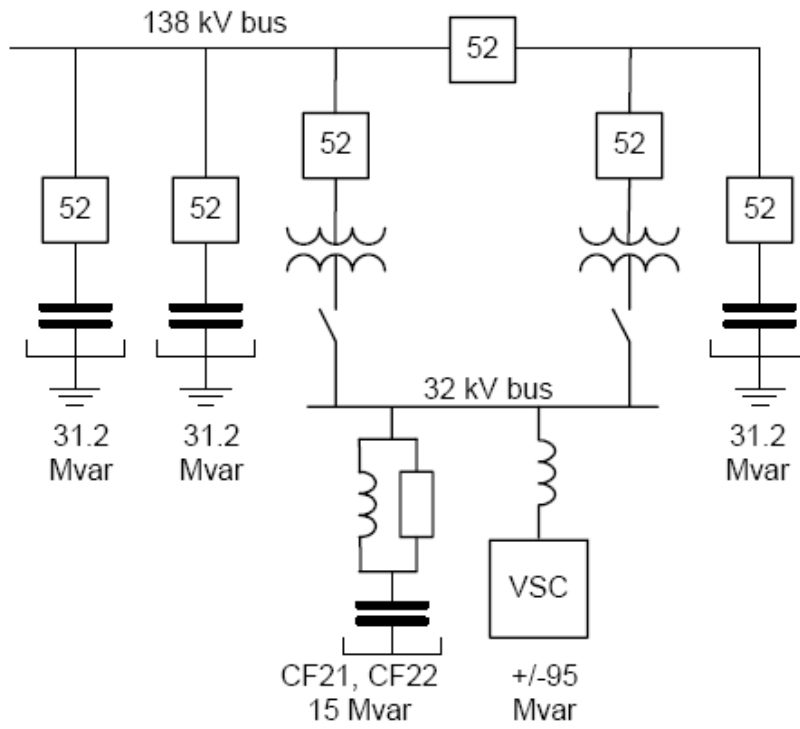
※ 工作原理與 SVC 相同，差異在於其在非常低的電壓狀況下仍然能具有相同之補償能力。

2、STATCOM 之安全工作區域

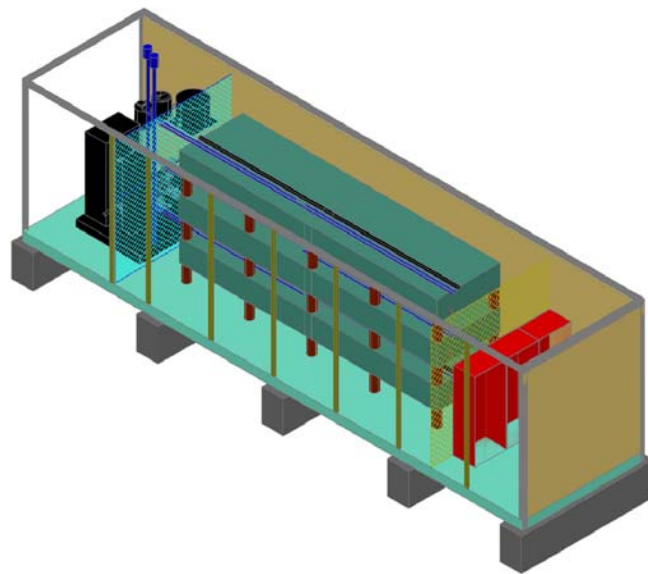
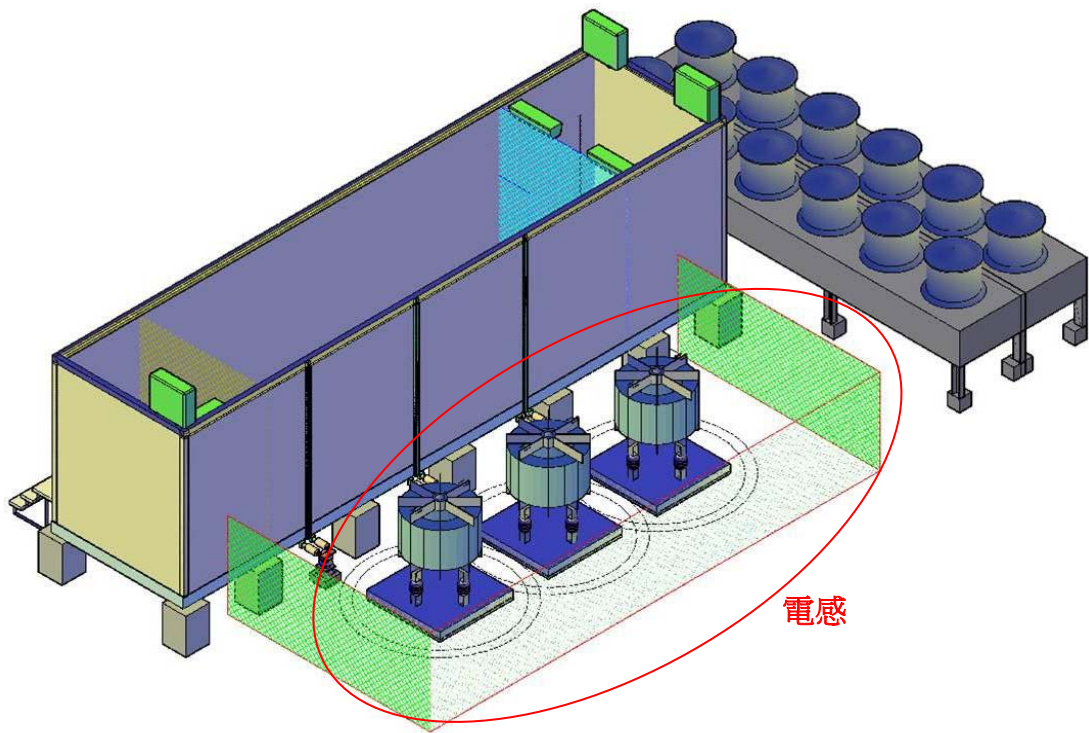
- (1) STATCOM之安全運作主要是受到所使用的開關電力電子元件（如 GTO、IGBT、IGCT等）的限制，實際運轉中影響此類開關元件的主要因素為『過電流』。以GTO為例，若GTO最大關斷電流= I_{GTO} ，設流過GTO電流大於 I_{GTO} 而此時正好對GTO發出關斷脈衝，則GTO會損壞。
- (2) STATCOM對於輸出電流有較嚴格的限制，電感性及電容性輸出電流均有其最大值，亦即 $-I_{Cmax} \leq I \leq I_{Lmax}$ ，通常設計為 $I_{Cmax} = I_{Lmax}$ ，使之具有對稱性的電感性及電容性輸出能力。
- (3) STATCOM的耐壓亦有最大值限制，若端電壓超過亦會造成異常或損壞；在系統電壓很低時亦能輸出額定電流，但若電壓過低一樣會影響其動作，其範圍為 $U_{min} \leq U \leq U_{max}$ 。
- (4) STATCOM的DC側直流電容電壓不能過高，否則容易損壞電容同時造成開關元件在關斷狀態下承受偏高的電壓。電壓太低時，系統出現突變易損壞整流二極體，其範圍為 $u_{dmin} \leq u_d \leq u_{dmax}$ 。
- (5) STATCOM 之安全工作區域為圖面之灰色區域



(四) ABB 公司之 STATCOM 構造 (ABB 公司稱之為 SVC Light)



(五) SEIMENS 公司之 STATCOM 構造 (SEIMENS 公司稱之為 SVC Plus)



◎標準相體尺寸：

	25MVar	35MVar	50MVar
Length	11,750mm	11,750mm	13,500mm
Width	3,400mm	3,400mm	3,400mm
Height	3,600mm	3,600mm	3,600mm
Weight	33,000kg	36,000kg	42,000kg

※ SEIMENS 所提供之 STATCOM 為者為 CSC 型變換器之架構，目前有 25、35、50MVA 三種標準 TYPE，最大可裝置 200MVA，採模組化方式建構。

(六) STATCOM 規劃、配置及應用考量事項

- 1、ABB 之 STATCOM 目前安裝實績最大容量為 100MVA，可以依照客戶需求來設置容量
- 2、SEIMENS 則是具有 25、35、50MVA 三種標準型式，可提供給客戶。
- 3、將來應用在台電系統上 $\pm 150\text{MVA}$ 的 STATCOM 時，對 ABB 而言，將採用直接設計一組 $\pm 150\text{MVA}$ 之設備；而 SEIMENS 則會採提供三組 $\pm 50\text{MVA}$ 之設計方式。
- 4、STATCOM 所使用之電容與電感器僅係作為電壓或電流之支撐元件，容量遠比 SVC 小，因此用地面積小，約 SVC 的 2/3 (60%~70%)。安裝成本與工作量亦低於 SVC。
STATCOM 配置的大小上，相較 SVC 是較小的，尤其 DC 端若採電容器方式，又比採取電抗器方式小。幾乎全部為屋內式裝置。由於本公司變電所建置屢遭抗爭，目前多興建屋內式變電所，是以，廠家對於較大型之開關、變壓器等設備可採屋內式。冷卻水塔則須置於屋外做熱交換動作。
- 5、STATCOM 有其 V-I 特性曲線等，必須依據系統數據與使用需求，以決定工作區域，訂入規範。依本公司運轉需求上，發生 N-2 事故時，系統電壓仍須維持在 $0.9\text{pu} \sim 1.05\text{pu}$ ，因此在 STATCOM 規劃上必須設定電壓之上下限範圍、補償的電容性電流與電感性電流範圍。
- 6、目前 ABB 及 SEIMENS 公司在 STATCOM 與 SVC 之冷卻系統上，因 IGBT 於運轉過程中產生熱量相當高，因此採取水冷方式較佳，並無以空氣冷卻或其他方冷卻式。
- 7、ABB 公司之 STATCOM 所使用 converter transformer 的二次側最高電壓為 36kV，用於 22.8 kV 的實績則較多；而 SEIMENS 公司的二次側最高電壓為 15kV。因此，安裝於本公司 345kV 系統上時，必須經過兩層的降壓方能與 IGBT inverter 相連接。
- 8、在電壓控制的協調上，STATCOM 在控制上，因為 IGBT Valves 元件反應速度都在毫秒的範圍內，而連接於系統上之變壓器之電壓調整器的反應時間則在秒的層級，因此，應用在台電的系統上時，若屬於需要動態補償調整電壓，則由 STATCOM 之控制器即可處理，兩者並不會互相影響。

肆、建議事項

- (一) STATCOM 與 SVC 屬高度客製化的設備，各廠家設計與配置均不相同，且須考量系統參數，分開購置在興建上有所困難，建議採統包方式辦理，但變壓器及開關設備可以在規範中要求必須與本地廠家技術合作。
- (二) 在規劃設計上，應注意事項如下：
 - 1、電壓額定：高壓側電壓應依系統電壓及 STATCOM 或 SVC 工作電壓決定；低壓側則必須配合電力電子元件所使用之最高電壓而定，建議採用 11/23kV。
 - 2、虛功補償區域：工作電壓應設定為 0.9pu~1.05pu，以符合本公司規定發生 N-2 事故時之要求，並參考 STATCOM、SVC 之 V-I 特性曲線及本實習報告第 8、14 頁之規劃、配置及應用考量事項決定適當工作斜率，使電力系統達最佳化。