

出國報告（出國類別：實習）

無效電力補償設備之智慧化整合應用 技術

服務機關：台灣電力公司輸變電工程處北區施工處

姓名職稱：蔡曜鎧 電機工程師監

派赴國家：德國

出國期間：102年10月30日至102年11月08日

報告日期：102年12月11日

目錄

| | |
|------------------------|----|
| 摘要..... | II |
| 壹、出國目的..... | 1 |
| 貳、出國行程..... | 2 |
| 參、實習心得..... | 3 |
| 一、交流電力系統之功率因數改善..... | 3 |
| 二、彈性交流輸電(FACTS)技術..... | 6 |
| 三、FACTS 技術智慧化整合應用..... | 12 |
| 肆、建議事項..... | 14 |

摘要

交流電網因發電機、變壓器、電力電纜等電感性及電容性之必要設備而存在無可避免的無效電力，因此設置電容器組或電抗器等無效功率補償設備以降低無效電力造成的電能損耗，智慧型無效功率補償設備諸如 SVC、STATCOM 等系統於國外皆有實際運用之成功案例，本次出國研習國外廠家對於無效功率補償之專案規劃實例並敘述於本報告中。

實習報告共分四個章節：第壹、貳章節為出國目的及出國行程，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 ALSTOM 公司實習 FACTS 技術及規劃；第參章節則是實習心得，說明 FACTS 技術、STATCOM 及 SVC 於電網之應用及國外公司對於無效功率補償設備智慧之發展；第肆章節為建議本公司設置無效功率補償設備之規劃上應注意事項。

關鍵詞：

無效電力補償 (Var Compensator)

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

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

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

壹、出國目的

交流電網因發電機、變壓器、電力電纜等必要設備而存在無可避免的無效電力，因此設置電容器組或電抗器以降低無效電力造成的電能損耗。有鑑於目前既設變電所之無效電力補償設備（電容器組或電抗器）係由調度人員依電力系統無效功率潮流以人工方式下達指令投入或切離。本公司為配合政府政策，目前正積極建置智慧電網系統，因應未來電網智慧化之需求，新設計之變電所必須能整合鄰近地區所有既設無效電力補償設備，依該地區電力系統無效功率潮流，自動化投入或切離該地區無效電力補償設備，以符合智慧電網總體架構六構面(圖1)中智慧調度與智慧輸電之要求。由於與傳統無效電力補償設備之調度方式截然不同，本公司有必要了解國外無效電力補償設備智慧型監控裝置之技術及作法，以滿足將來本公司推動智慧電網需求。本文將就本次出國研習有關無效電力補償設備之智慧化整合應用技術，以及參訪ABB與ALSTOM公司之目的、行程與心得作完整說明，並於文末提出建議事項，作為本公司規劃智慧型無效力變補償設備所時參考。



圖1 智慧電網總體架構分層規劃示意圖

貳、出國行程

本次出國行程及實習內容如下：

一、102年10月30日：往程（台北－德國法蘭克福 Frankfurt, Germany）

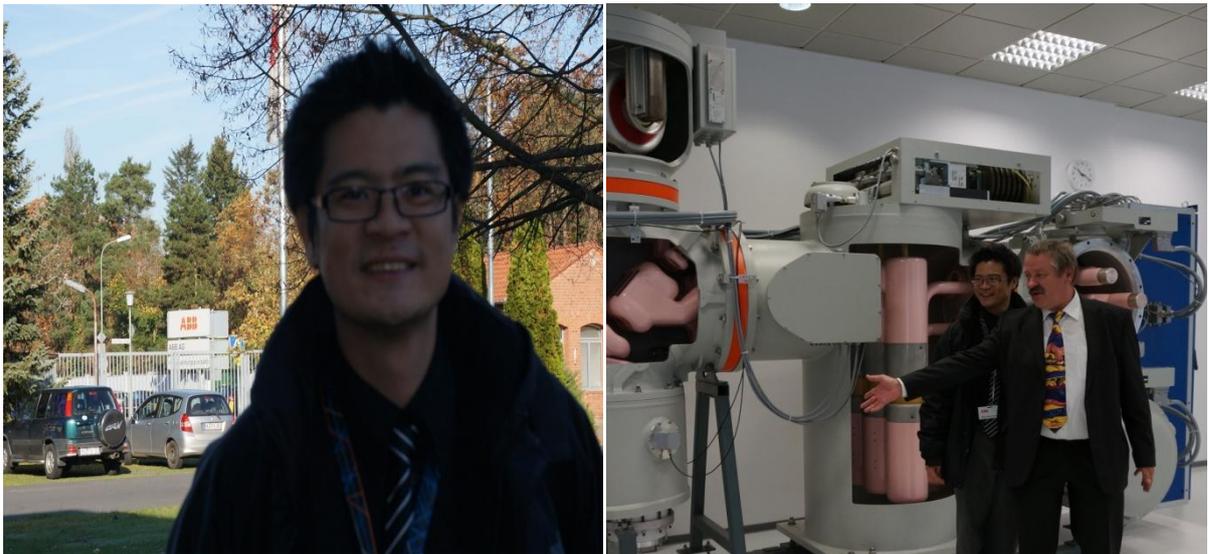
二、103年10月31日~11月4日：（宿於德國法蘭克福）

研習無效電力補償設備之智慧化整合應用技術（ABB公司）

三、102年11月5~6日：（宿於德國法蘭克福）

研習無效電力補償設備之智慧化整合應用技術（ALSTOM公司）

四、102年11月7~8日：返程（德國法蘭克福－台北）



叁、實習心得

一、交流電力系統之功率因數改善

(一) 交流電功率

在一個純電阻性負載的交流回路中，因電壓與電流相位相同，因此輸入與輸出負載的能量相同，但若負載中具有電抗成份在時，無論是呈現電容性或電感性負載，輸入負載的能量將會有部分儲存於負載中，此一部分的能量將經過一段時間後送回電源端，這些能量將在電源端與負載端間往復來回。

交流電功率有三個成份，分別為實功率(P)、視在功率(S)及無效功率(Q)，定義分別如下：

- 實功率(P)：real/active power，代表一電路在一特定時間內作功的能力，單位為瓦特(W)
- 視在功率(S)：apparent power，為電壓及電流有效值乘積，單位為伏安(VA)
- 無功功率(Q)：reactive power，單位為乏(var)，電力電網中電動機與變壓器在運轉中產生磁場，屬電感性負載，而電容器及空載輸電線則產生電場，屬電容性負載。因交流電在電源端與這類電感或電容負載之間往返流動，在流動中通過磁場或電場時，不會使電能轉換成其他能量，故此電能既不做功也不消耗，這種電能我們稱它們為無功電能，也稱其為無功功率。無功功率非無用功率，電動機需要從電源取得無功功率建立和維持旋轉磁場，使轉子轉動，從而帶動機械運動；變壓器亦需要無功功率，才能使變壓器的一次線圈產生磁場，在二次線圈感應出電壓。因此，沒有無功功率就沒有磁場，電動機就不會轉動，變壓器也無法作用。

對於純正弦波的電力系統而言，P、S及Q間之關係為滿足式[1]之三個向量三角形(向量圖如圖1所示)，其物理意義亦即交流負載的輸入功率分為實(有效)功率及無效功率，當無效功率存在時，實功率小於視在功率，故為了得到相

同的視在功率，系統就必需提供更多的能量。

$$S^2 = P^2 + Q^2 \dots\dots\dots [1]$$

功率因數(Power Factor, PF)為交流電力系統中一特有物理量，其定義為一負載所消耗的實功率(real power)與其視在功率(apparent power)的比值，如下式 [2]，是0~1之間的無因次量。因負載可分為電感性負載及電容性負載，其分別可消耗(電感性)及提供(電容性)無功功率，故功率因數又可依電流相對電壓相位角的正負號標註為領先或落後。理論上，若負載具有較高的功因(接近1.0)，則可降低系統於傳輸電力時的損失，並增加負載端的電壓穩定度。

$$PF = \frac{P}{S} \dots\dots\dots [2]$$

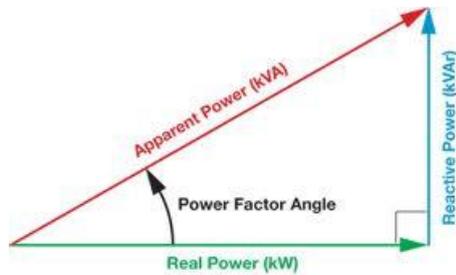


圖2 功率因數向量圖

(二) 線性負載功因改善

線性負載(linear load)係當輸入電源端為時變正弦電源時，其負載阻抗參數(Z)為常數的負載。在交流電路中，負載元件有電阻R、電感L和電容C三種，在純電阻電路中，正弦電壓施加在一個電阻上，其產生電流也是正弦的，且電流與電壓相位是相同的；在純電感電路中，若施正弦電壓加在一個電感線圈L上，因電流是時變的，造成在線圈中產生感應電動勢，使得負載電流雖然仍然是正弦波，但相位上卻滯後電壓90°；在純電容電路中，若施加正弦電壓在一個電容量為C的電容器上，因電流攜帶電荷積累在電容的極板上產生電容電壓，使得負載電流雖然仍然是正弦波,但相位上卻超前電壓90°；若負載是具有電阻R和電感L、電容C的複合線性負載，輸入正弦波電壓，則負載電流雖仍是正弦波，但是電流與電壓之間的相位會相差一個φ角。

決定負載特徵的因數有負載阻抗的大小及功率因數的大小。依前述，在線性負載有純電阻性(功率因數為1)和電感性(功率因數小於1)、電容性(功率因數小於1)以及純電感性和純電容性(功率因數均為0)。

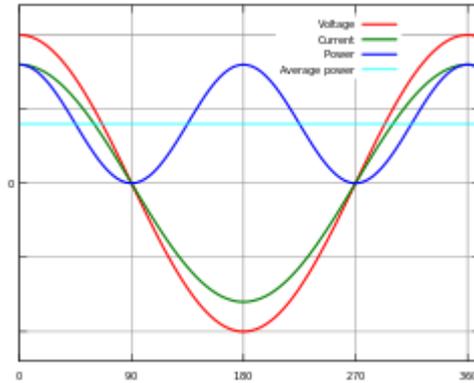


圖3 功率因數為1之電路，其電壓電流瞬時功率與平均功率波形圖。所有功率皆為實功，被負載吸收。

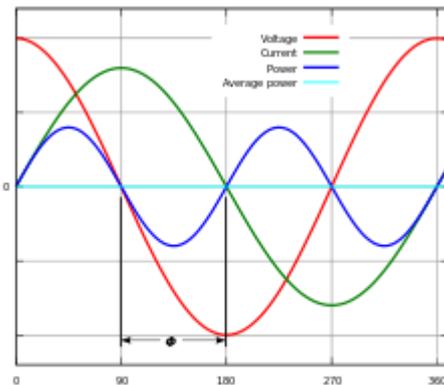


圖4 功率因數為0之電路，其電壓電流瞬時功率與平均功率波形圖。可看出功率在電網往復，沒有消耗實功。

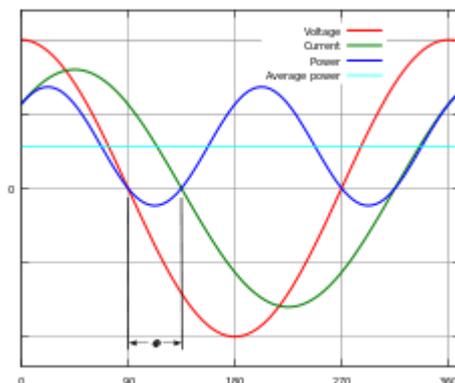


圖5 功率因數落後電路其電壓電流瞬時功率與平均功率波形圖。部分實功被負載吸收。

線性負載可利用調整負載的電抗(容抗或感抗)成份來改善功率因數，例如當負載為領先功因，因電路中電容性負載的影響使得電流波形領先電壓波形，此時以加入電感性負載來抵消電容性負載的影響。功因改善具有下列優點：

- 提高功率因數，節約電費。
- 降低輸電線路及變壓器的損耗。
- 增加電力網的輸電能力，提高設備利用率。
- 改善電力品質。

一種劃時代科技-彈性交流輸電技術(FACTS)，係一種依負載功率因數變化，自動切換補償電容器或電感器，輸出無效功率來改善功因，提升輸電效率。

二、彈性交流輸電(FACTS)技術

(一) 傳統式無效電力補償作法

1. 同步調相機

因同步電動機在過激磁的狀況下可以吸取電網中相位領先電壓的電流，利用此一原理，可用來產生無功功率對無功功率進行動態補償，此一同步電動機稱為同步調相機。同步調相機在過激磁或欠激磁的情況下，分別能夠提供不同大小的容性或感性無功功率，是一種傳統的無功動態補償裝置。然而，由於它是旋轉電機，運轉中的損耗和雜訊都比較大，運轉維護複雜，而且反應速度慢，難以滿足快速動態補償的要求。

2. 斷路器投切的電容器組或電抗器

利用斷路器來投切電容器組或電抗器，使其具有吸收和提供無功電流的能力，可用於提高電力系統的功率因數，穩定系統電壓，抑制系統振盪等，是一種靜止無功補償技術(靜止是相對於同步電動機而言)。由於使用斷路器作為接觸器，因其開關速度相較電力電子開關慢，故無法快速跟隨負載無功功率的變化，另外斷路器投切電容器組時常會引起較為嚴重的衝擊電流(inrush current)和過電壓，易造成斷路器接觸子燒損，而且使補償電容器內部擊穿，在運維上需投注更多的心力。

(二) 電力電子帶來的無功補償控制變革-FACTS

隨著電力電子技術日益精進並應用於電力系統中，1986年EPRI專家N.G. Hingorani首次提出彈性交流輸電系統(Flexible AC Transmission System, FACTS)的概念，FACTS技術將輸電系統帶進一個新的時代，為電力系統中最重大也是最重要的一個變革。

FACTS係基於採用現代大功率電力電子技術來構成各種控制器，並結合先進的通信技術、控制理論、資料處理技術等，來達成對交流輸電網路運轉參數及電壓、相角、阻抗及電力潮流等變電量進行更快速、連續性的調控目的，以提高輸電系統運轉效率。N.G. Hingorani對FACTS做了以下的定義：

- 利用改變線路阻抗和節點電壓相角的方式實現對電力潮流的控制。
- FACTS是閘流體構成的移相器、靜態無功補償器、動態制動電阻、可控串聯補償器、有載調壓變壓器、故障電流限制器等裝置的總稱。
- 除高壓直流輸電(HVDC)以外，所有應用在輸電上的電力電子裝置。

FACTS控制器分類如下表1所示：

| | FACTS控制器 | 特點 |
|-----|---|--|
| 並聯型 | <p>SVC</p> <p>TCR</p> <p>TSR</p> <p>TSC</p> <p>STATCOM</p> <p>SVG</p> <p>STATCON</p> <p>SVS</p> | <p>相當於在接點處向系統注入的電流源，通過改變電流源輸出電流的大小和相位，來調節注入系統無效功率的大小，間接調節電力潮流。</p> |

| | | |
|------|---|--|
| 串聯型 | VCS SSG BESS SMES TCBR SSC TCSC TCSR TSSC TSSR | 相當於一個與線路串聯的電壓源，通過改變電壓源輸出電壓的大小和相位，改變其輸出無效功率的大小，直接改變線路等效參數，如阻抗等。 |
| 串並聯型 | IPC TCPST UPFC | 將並聯型及串聯型控制器綜合成一個整體性控制器，能更有效的控制電網之電力潮流，提高系統穩定度與調節電壓。 |

表1 FACTS控制器分類表

(三) 靜態無效功率補償器(SVC)與靜態同步補償器(STATCOM)

相較於傳統利用斷路器投切的無功補償器，現今所指的靜態無效電力補償裝置，係專指使用電力電子做為投切電容器組或電抗器之開關(例如Thyristor、IGBT、GTO等)的無功補償設備。此類補償器目前市場上的主流分別為靜態無效功率補償器(SVC)與靜態同步補償器(STATCOM)。

1. SVC技術

SVC係由電容器、電抗器、高阻抗變壓器及閘流體控制方式等組合裝置，其

功能可控制電壓波動、補償電壓降、改善功率因數、控制高諧波電流及維持長距離輸電電力系的電壓穩定度。依其結構不同，其主流技術從自飽和電抗器型(SSR：Self-Saturable Reactor)演變成閘流體控制電抗器型(TCR：Thyristor Control Reactor)與閘流體投切電容器型(TSC：Thyristor Switch Capacitor)。SVC的無效電力調節是透過閘流體組成的電流閥來控制(改變閘流體的觸發時間)電容器或電感器，以達成輸出/吸收無效電力的目的。以下分別說明幾種基本的SVC規劃。

- TCR/FC(fix capacitor)型，如圖6，一個閘流體閥與一個電抗器串接成一個TCR，藉由控制閘流體閥控制流經電抗器的電流來改變電功率，此一類型特點為連續性控制、無暫態。另外，與TCR並聯組合運用的是一個固接式電容器，其可當作濾波器來抑制諧波。

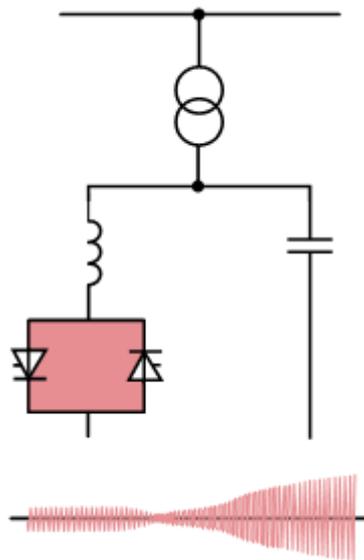


圖6 TCR/FC

- TSC(Thyristor Switch Capacitor)型，如圖7，一個並聯電容器組依需求被分成數個分支(branches)，每個分支單獨由一個閘流體閥來投切(TSC是當閘流體閥兩端電壓差為零時作投切的動作)。其特點是步級控制、無暫態、無諧波、低損失、規劃上具較大的彈性。

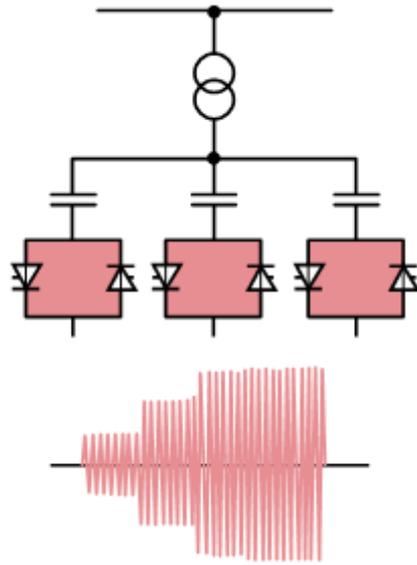


圖7 TSC

- TCR/TSC型，將TCR與TSC組合運用在許多專案規劃中是最好的選擇，此一類型將兼具TCR與TSC的優點，在整個可控範圍中提供連續性且可調整之無效電力。

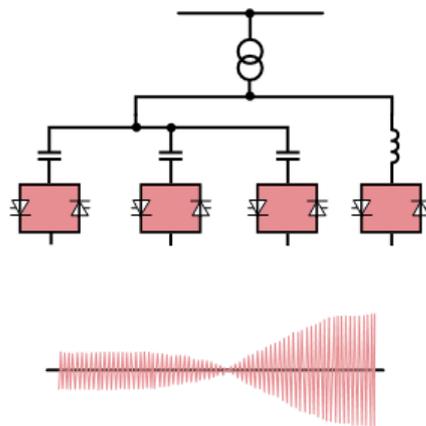


圖8 TCR/TSC

2. STATCOM技術

STATCOM技術(ABB公司稱為SVC Light)基本原理是透過可控關斷電力電子元件生成與系統電壓成一定相角差的信號，並匯進電力系統提供無效電力；可控關斷電力電子元件有絕緣柵雙極電晶體（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT）與可關斷晶閘管（Gate Turn-Off thyristor，GTO）等。

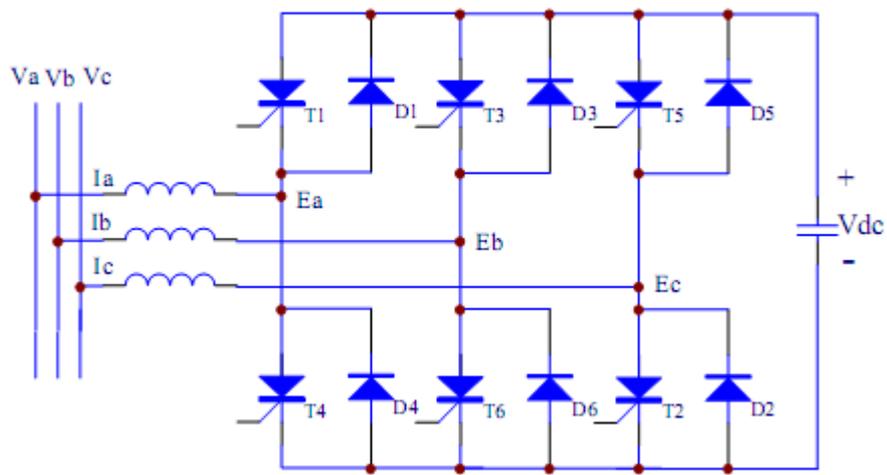


圖 9 STATCOM 概念圖

3. SVC與STATCOM比較

SVC與STATCOM雖然皆屬FACTS技術，且皆可動態補償無效電力，但由前述可知其工作原理並不相同，因此規劃上所需考慮諸多參數(如建置所需成本等)，其比較表如表2所示。

| | SVC | STATCOM |
|-------|---------|---------|
| 開關元件 | 閘流體 | 可控關斷開關 |
| 反應速度 | 50~60ms | 20~30ms |
| 低電壓特性 | 差 | 好 |
| 系統複雜度 | 一般 | 高 |
| 用地大小 | 大 | 小 |
| 裝置容量 | 大 | 小 |
| 損失 | <0.8% | >1.5% |
| 價格 | 相對便宜 | 高 |

表 2 SVC 與 STATCOM 比較表

三、FACTS 技術智慧化整合應用

(一) ABB公司 MACH2控制平台

ABB公司FACTS技術有 - SVC（靜態無功補償）、輕型SVC（也稱為STATCOM）及固定和控制串聯補償，並稱為DynaPeaQ之動態能源儲存。整體FACTS技術能提高輸電系統的容量、安全性和靈活性，並為智慧電網的發展做出重要貢獻。ABB公司的FACTS控制平台稱為MACH2，此一平台含工業級電腦與信號處理器，除可確保準確的投切SVC設備中的閘流體閥亦可利用於控制STATCOM系統與高壓直流輸電系統。在智慧化上，它採取的是開放式介面，利用網際網路達成遠端操作，並包含人機介面、診斷系統、專家系統及報表系統設計。

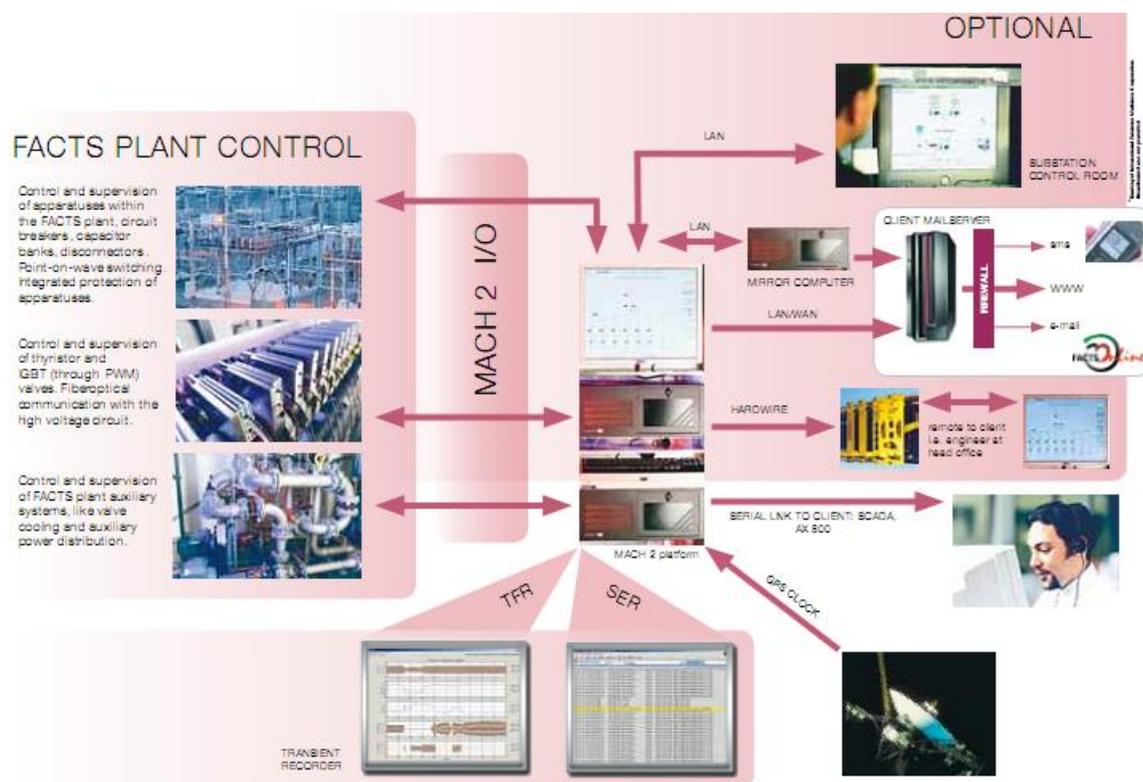


圖 9 ABB-- MACH2(ABB 公司提供)

(二)ALSTOM公司STATCOM系統--SVC MaxSine™

在歐洲大陸的廣大平原農田中，隨處可見太陽能發電；風力發電的大型風機亦被廣泛建置，其利用綠色再生能源的決心可以從中看出。但是再生能源(RES)屬於

分散式能源，當它要併入電力網時所遇到的問題隨著其佔比而日益增加，其中能源管理就是一項極大的挑戰。

ALSTOM公司針對此類電網能源管理及提升電力品質之需求，開發一種靜態補償器 D-STATCOM(商標名稱為SVC MaxSine™)，其中D是Distribution的意思，根據該公司說明，此一系統可以補償諧波及無效電力、消除負相序電流、穩定電壓及當線路故障時加速其復原能力。它的控制系統包含一個主(master)控制器，另外在每一個變換器(converter)中設置一個從(slave)控制器，且利用人機介面直觀控制並在通信上支援 IEC61850協定。

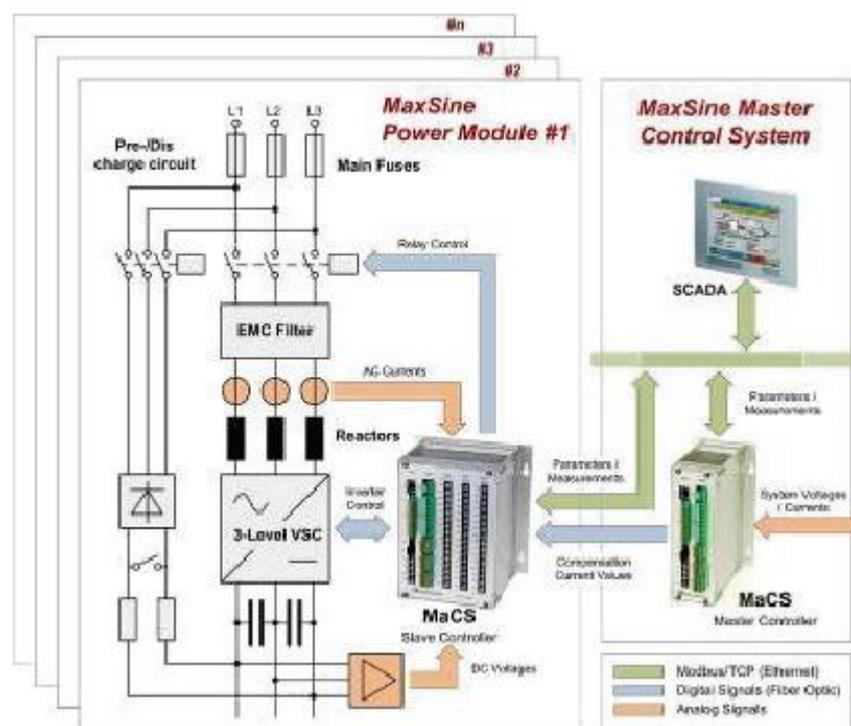


圖 10 ALSTOM-- SVC MaxSine™ (ALSTOM 公司提供)

肆、建議事項

- 一、台電公司為一國營企業公司，具有提供國民優質電力的企業使命，由於電力電網無可避免地存在許多電容性或電感性負載，造成輸電成本增加，電力品質下降。為提升系統穩定度，原先規劃在龍潭超高壓變電所、鳳林超高壓變電所及台東一次變電所等地設置靜態無效電力補償設備，後因公司投資政策重新檢討而取消該計劃。長遠來看為了與世界電力系統之科技發展接軌，讓台灣電力電網路朝下一個世代邁進，建議公司若財務轉好、狀況許可情形下，重新考慮此一增加系統穩定度、提昇電力品質的投資方案。
- 二、SVC 或 STATOCM 屬高度客制化設備，在國外的建置實例中，並無所謂標準模式可套用，皆採專案規劃設計，故供應商需要電力系統極為詳盡的資料，加以分析來規劃出適合之方案。系統資料搜集並整理成有用之資訊非一夕之功，雖然現階段並無採購該無效電力補償設備之規劃，但建議應未雨綢繆，建立相關資料庫以備不時之需。
- 三、現行變電所內既設許多電容器組與並聯電抗器來改善電力品質，但這些設備皆以傳統斷路器來投切，造成的影響於前文已有說明。建議將來若有設置智慧化無效電力補償設備之規劃時，應檢討多利用既設電容器組與並聯電抗器，以電力電子方式改變其投切方式，以活化設備資產，創造價值。
- 四、IEC 61850 通訊協定是智慧電網中重要的一個環節，為了達成無論是智慧變電所或是智慧調度、輸電或綠色能源應用等建置目標，建議從事相關規劃的部門應有系統的研讀此一通訊協定，並追蹤已商品化之產品，以奠定本國電力電網邁向智慧電網的基石。