

出國報告（出國類別：實習）

應用變電所之靜態型同步補償器 (STATCOM)規劃設計研習

服務機關：台灣電力公司南區施工處

姓名職稱：陳應廣 電機工程師

派赴國家/地區：瑞典、芬蘭

出國期間：114 年 7 月 12 日至 114 年 7 月 20 日

報告日期：114 年 9 月 9 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

應用變電所之靜態型同步補償器(STATCOM)規劃設計研習

頁數 27 含附件：☐是☒否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力公司/蔡晏筑/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳應廣/台灣電力公司/南區施工處/電機工程師/(07)3676892

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究☒4 實習☐5 其他

出國期間：114/7/12~114/7/20 出國地區：瑞典、芬蘭

報告日期：114/9/9

分類號/目

關鍵詞：

靜態型同步無效電力補償器：Static Synchronous Compensator, STATCOM

絕緣閘雙極性電晶體：Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT

內容摘要：(二百至三百字)

職奉派出國至瑞典及芬蘭 Hitachi Energy 公司實習有關靜態型同步補償器應用實例及運轉維護技術。本公司電力系統因再生能源大量併網、電力遠距輸送及大量使用地下電纜，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)，可大幅提昇本公司電力系統穩定度及電力傳輸能力。另由於近期由於南科超高壓變電所裝設 STATCOM 新設備，藉由前往 Hitachi Energy 公司位於瑞典、芬蘭之設計中心及工廠，除可了解其生產流程，以及就相關設備規範、技術等方面進行意見交流，俾利後續履約及施工過程需注意事項了解。

本實習報告共分五個章節：第壹章節是出國目的與過程，說明行程之必要性及參訪過程；第貳章節則是 STATCOM 之簡介，說明 STATCOM 之原理、配置、V-I 特性曲線及操作模式介紹；第參章節為 Hitachi 設備與本系統現行案場設備比較；第肆章節為設計、興建需注意事項；最後第伍章節為心得與建議事項。

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

目 錄

出國報告摘要	03
目錄	04
圖目錄	05
壹、出國目的與過程	06
一、出國目的	06
二、出國行程	07
貳、STATCOM 簡介	08
一、STATCOM 介紹	08
二、STATCOM 動作原理	10
三、STATCOM 系統架構	13
四、STATCOM 動作原理	14
五、STATCOM 系統特性需求，V-I 特性曲線	15
六、STATCOM 操作模式介紹	17
七、Hitachi Energy 公司之 STATCOM 配置	18
參、Hitachi 設備與本系統現行案場設備比較	19
一、Cell 元件之 Bypass Switch 比較	19
二、Valve 模組組成差異	19
三、預充電電阻(PCR)型式差異	20
四、STATCOM 系統即時數位模擬器(RTDS)測試方法	22
肆、STATCOM 設計、興建需注意事項	23
一、STATCOM 系統電纜配置規則	23
二、電抗器與 Valve 室間之連接方式採用貫壁套管	24
三、建築物鋼筋防止磁場切割策略	24
伍、心得與建議	27

圖目錄

圖 2-1 無效電力並聯補償技術演進-----	9
圖 2-2 單組 Cell 元件輸出電壓 -----	10
圖 2-3 兩組 Cell 元件輸出電壓-----	11
圖 2-4 多組 Cell 元件輸出電壓 -----	11
圖 2-5 VSC 模組 -----	12
圖 2-6 MMC 模組-----	12
圖 2-7 MMC 模組冷卻系統 -----	13
圖 2-8 STATCOM 系統架構圖-----	14
圖 2-9 STATCOM 動作原理-----	15
圖 2-10 STATCOM V-I 特性曲線 -----	16
圖 2-11 STATCOM 配置-----	18
圖 3-1 Cell 元件之 Bypass Switch -----	19
圖 3-2 Hitachi 與他廠 Valve 模組組成差異-----	20
圖 3-3 預充電電阻(PCR)型式差異 -----	20
圖 3-4 屋外型 PCR-----	21
圖 3-5 箱體型 PCR-----	21
圖 4-1 STATCOM 電纜配置說明 -----	23
圖 4-2 電抗器與 Valve 室間之連接方式採用貫壁套管及電纜 -----	24
圖 4-3 氣芯式電抗器感應磁場說明 -----	25
圖 4-4 防止氣芯式電抗器感應磁場切割方式 -----	25

壹、出國目的及過程

一、出國目的

受益於現代大功率電力電子技術實現，STATCOM及SVC得以實際導入電力系統使用，動態調節無效電力維持系統穩定，並提高輸電線路輸電能力。該技術發展至今已有多二十多年的時間，可說相當成熟，以歐洲廠家發展最久、實績最多，因而獲派前往瑞典及芬蘭Hitachi Energy公司實習。

南科E/S 161kV靜態同步補償器(STATCOM)新建工程係配合政府積極推動能源轉型，光電裝置容量持續成長，尤其七股地區大型再生能源案場計劃併入南科電網系統，因再生能源易受天氣影響屬較難預測電源，恐造成南科地區電壓擾動，為確保南科園區用電需求及品質，爰規劃新建本工程，以加強南科地區電力網供電能力並提升電壓穩定度。因此本出國實習STATCOM，希望藉此學習機會對設備於源頭規劃至設計、施工之細節有更全面的了解，並將所得之經驗傳承推展至未來預定興建之STATCOM工程。

二、出國行程

本次出國期間為114.7.12~114.7.20共計9天，前往瑞典、芬蘭的Hitachi Energy公司實習，行程及內容如下：

1. 114年7月12日：往程（高雄－曼谷－斯德哥爾摩）

2. 114年7月14~16日：

Hitachi Energy公司盧德維卡工廠

研習STATCOM變電設備技術與發展

銷售實績概況說明

3. 114年7月17~18日：

Hitachi Energy公司瓦薩工廠

參觀STATCOM工廠並進行各項設備的解說（Hitachi Energy公司）

針對本次行程之問題進行討論

4. 114年7月19~20日：返程（赫爾辛基－曼谷－高雄）

貳、STATCOM 簡介

一、STATCOM 介紹

台灣電力系統配合北部、中部及南部各科學園區用電需求，主要由南北向的超高壓輸電線系統組成，由於興建大型發電機組耗費時間長，又因半導體產業近年飛速成長，電力需求也隨之年年成長，但由於環保意識的抬頭和路權取得的不易，因此造成本公司在供電上面臨許多瓶頸。以目前情況來說北部地區電源供應較為不足，因此北部不足的電力，必需依賴連接北、中、南之超高壓輸電線來供應，也就是所謂的南電北送，以解決北部的電力缺口。在上述情況下，只要其中有一回輸電線發生事故，其餘回線便會容易因超載而跳脫，進而造成南、北電力系統解聯的情形。另外近年由於大量的再生能源併入電網，具有高度間歇性與隨機性，易導致系統電壓頻繁波動，在此情形下若未能及時將電壓拉回系統電壓，便可能發生大規模系統跳脫，STATCOM(Hitachi Energy又稱為SVC Light)在上述情況下便有了非常重要的角色，能在20~30個毫秒時間內迅速穩定系統電壓，避免系統崩潰。

無效電力的改善，也從早期的投入電抗器或電容器(MSC/MSR)，演進至靜態型無效電力補償器（static var compensator，SVC），至第三代的STATCOM，傳統電抗器或電容器組由於是經由機械式的開關投入所以反應速度最慢，且因投入之電容器及電感器為定量，無法依照系統需求彈性調整；SVC係採用Thyristor電力電子元件組合成TSC或TCR控制模式，需同時配置電抗、電容器及濾波器故所需空間較大；STATCOM拜電力電子技術發展之賜，利用固態閥元件(valve)切換可最快速的提供或吸收無效功

率，並且可依偵測到需補償量之大小，在建置額定容量內投入需補償之虛功率。

無效電力並聯補償技術演進

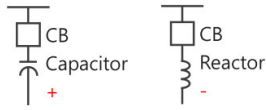
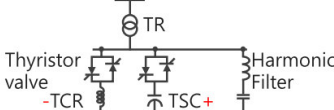
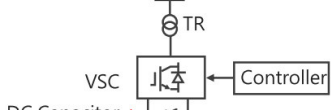
	第一代補償設備	第二代補償設備	第三代補償設備
	Power Capacitor(Condenser) Shunt Reactor	SVC (Static Var Compensator)	STATCOM (Static Synchronous Compensator)
照片示意			
等效電路			
主要功能	✓ Mechanical Switched by CB ✓ Capacitor makes Line voltage up(+) ✓ Reactor makes Line voltage down(-)	✓ Switched by Thyristor Valve ✓ Capacitive load switched by TSC(+) ✓ Inductive load controlled by TCR(-) ✓ Dynamic, Continuous Compensator	✓ Based on VSC technology ✓ Faster response, high performance

圖2-1

二、STATCOM 動作原理

STATCOM系統由變壓器、電抗器、電壓源變換器(Voltage-Source Converter, VSC)、保護與控制裝置及冷卻器等設備所組成，其中的核心便是VSC元件，Valve之基礎Cell元件由IGBT所組成，透過各IGBT開關在不同時序下導通或關閉可輸出方波，詳圖2-2所示。

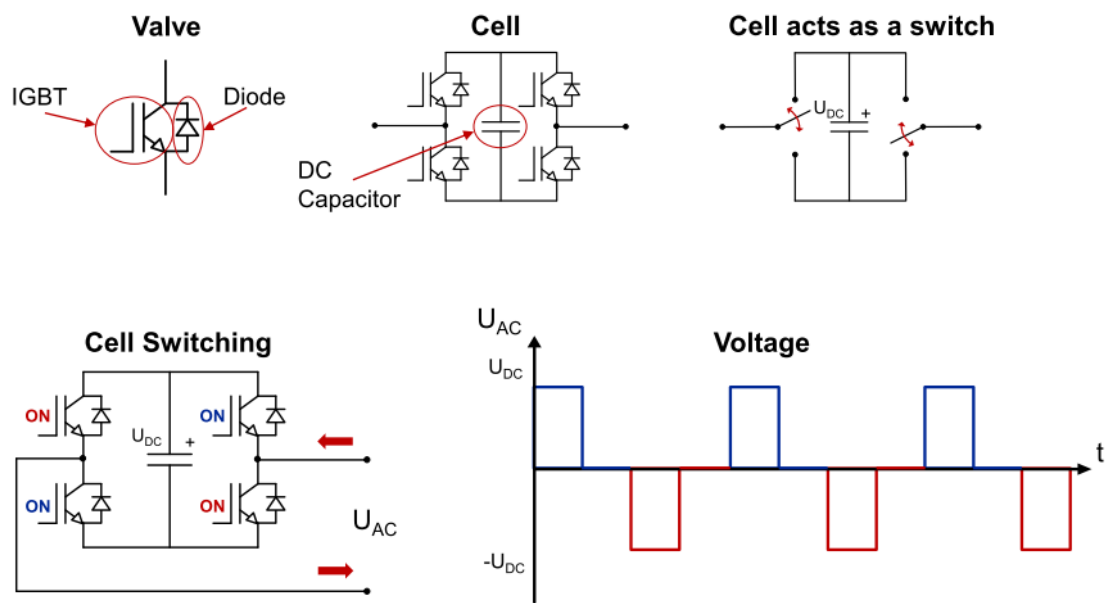


圖2-2

兩組Cell元件串聯後，在不同時序下控制IGBT開關，輸出將會疊加(圖2-3)，若再將更多組Cell元件串聯後，輸出電壓便可更趨近標準弦波(圖2-4)

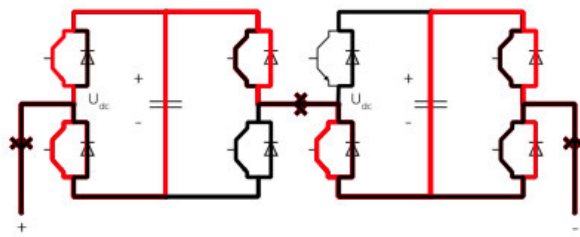
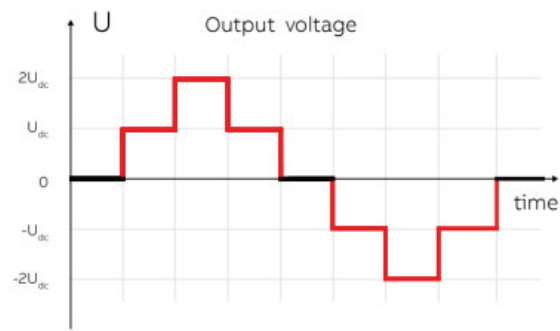


圖2-3 (資料來源：Hitachi Energy)

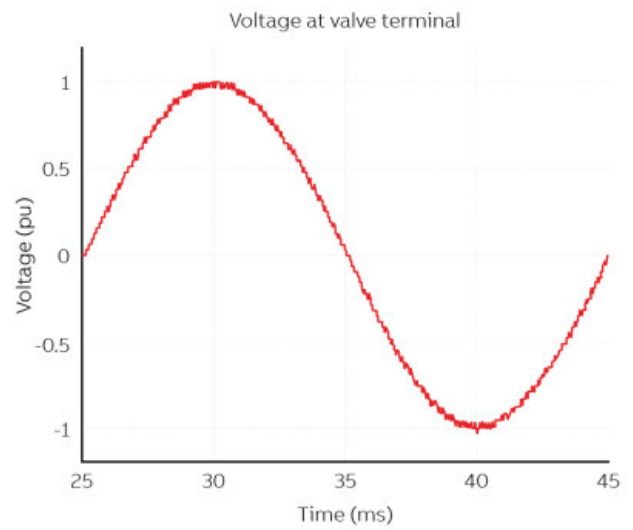
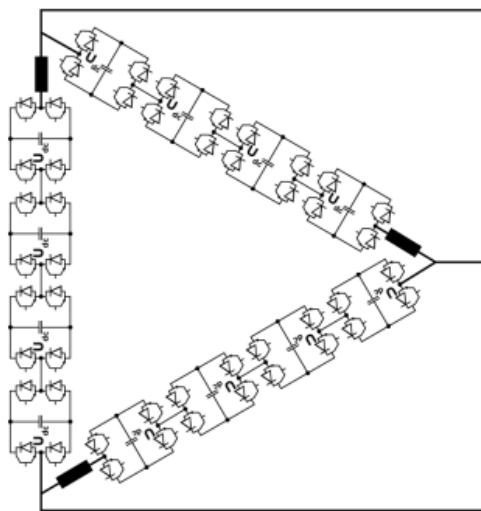


圖2-4 (資料來源：Hitachi Energy)

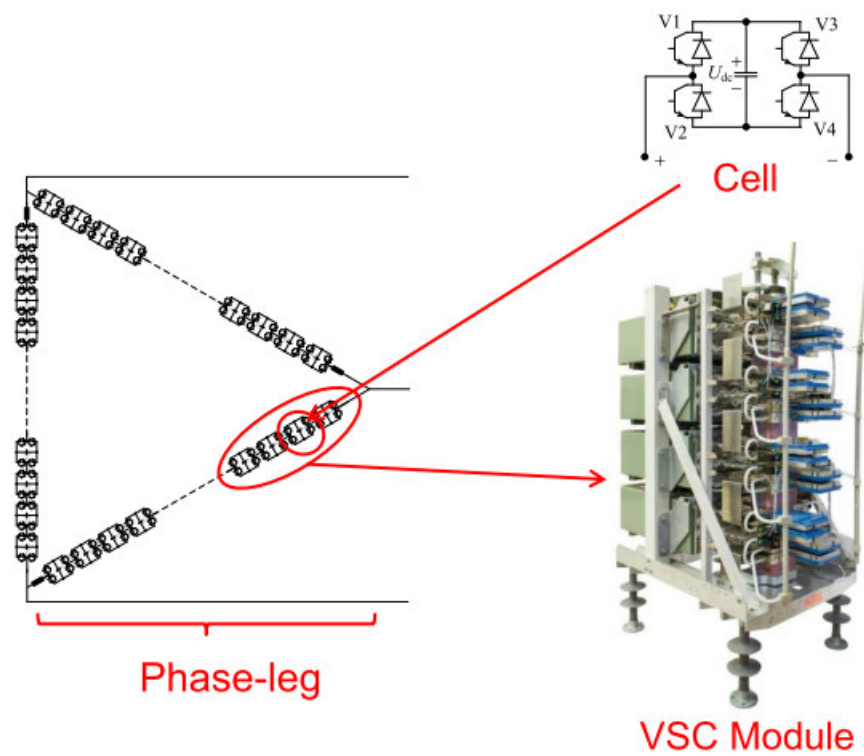


圖2-5

多組 Cell 組合成單一 VSC Module，多組 VSC Module 又可組合成 Modular Multilevel Converters (MMC)，圖2-6，因MMC所有VSC組成皆為同樣規格元件，故可



提高可用性及可靠度同時易於維護。

圖2-6

由於Valve元件之IGBT開關切換時會產生切換損失，最後以熱的型式傳遞至元件外部，因此必需設置冷卻設備，將熱能帶出，故冷卻設備在整個STATCOM系統扮演很重要的地位，另值得一提的是為提升冷卻效率該冷卻系統為水冷式設計，在運轉維護上與一般變電所不同，詳圖2-7，冷卻水管路將熱能帶離VSC，後續再經由外部風扇進行熱交換。



圖2-7

三、STATCOM系統架構

STATCOM系統包含變壓器、電抗器、保護與控制裝置冷卻器及相關開關設備，經由偵測系統電壓並比較STATCOM設定電壓後進行相關操作，系統架如圖2-8：

STATCOM系統架構圖

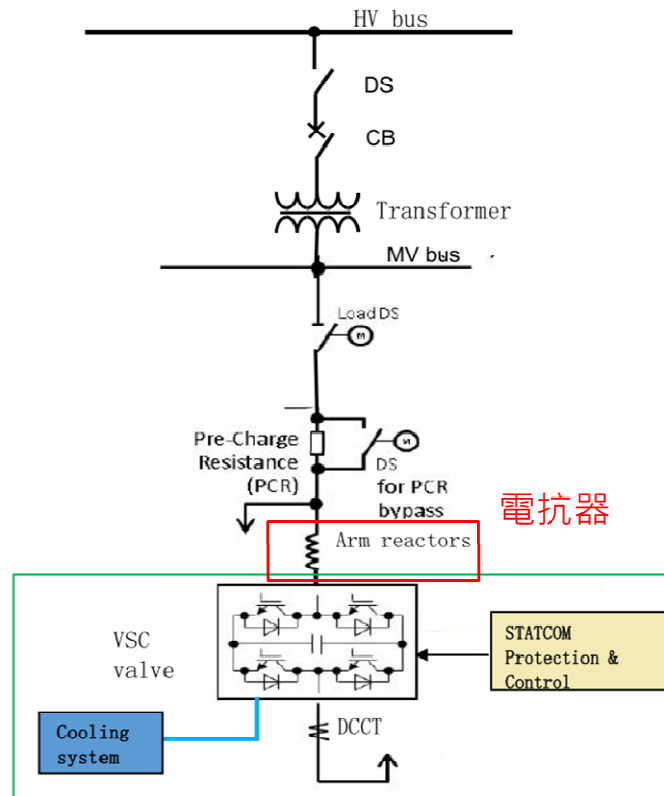


圖2-8

四、STATCOM動作原理(參考圖2-9)

- 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工作於電容性工作模式，STATCOM系統提供無效電力。
- 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工作於電感性工作模式，STATCOM系統吸收無效電力。
- 3、當 $V_i = V_s$ 時，系統與STATCOM之間電流為0，不交換無效電力。
- 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提供或吸收虛功的多寡。

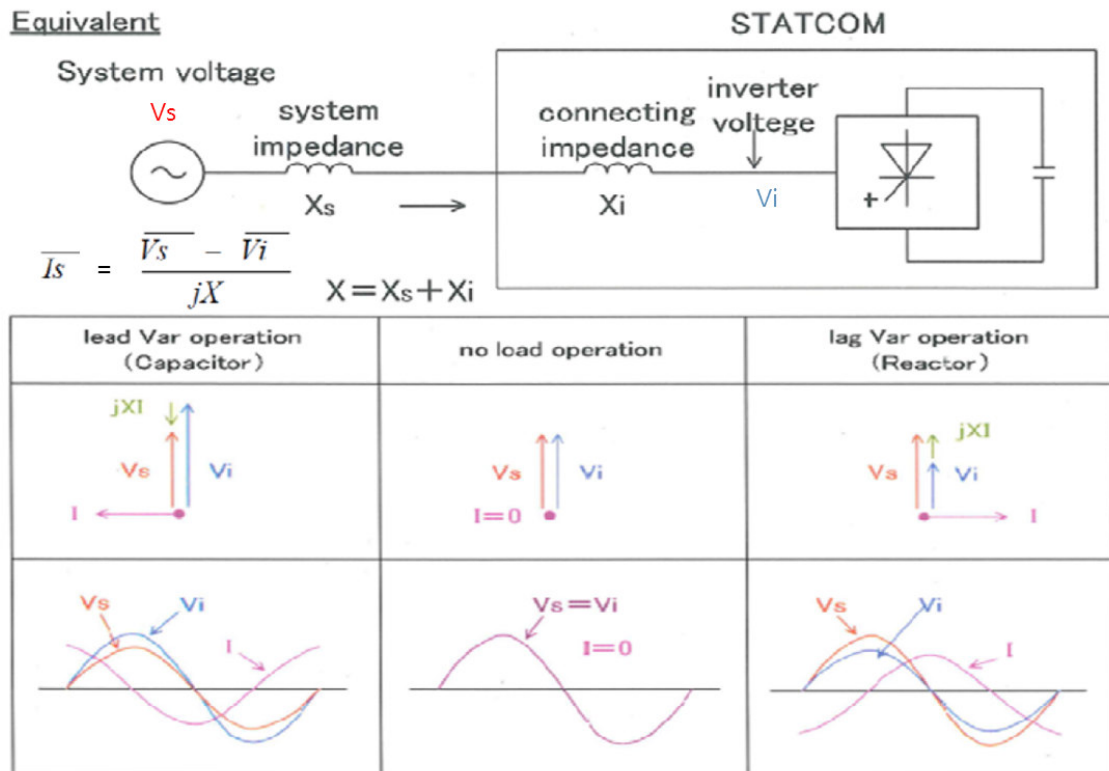


圖2-9

五、STATCOM系統特性需求，V-I特性曲線(如圖2-10)

STATCOM併入系統後之運轉能力至少應符合下列需求，並依據各系統併網點之電壓決定系統電壓參考值。

1. STATCOM系統須能調節併網點電壓至系統電壓參考值（以南科STATCOM

為例，規範採1.0p.u.），並能連續調節電壓在0.99 p.u.至1.01 p.u.範圍。

STATCOM系統在額定電壓1.0 p.u.、系統頻率60Hz及環境溫度20°C下之最大連續輸出容抗（capacitive reactive power）為200Mvar（1.0p.u.），參照圖2-10特性曲線之A處。

2. STATCOM系統在額定電壓1.0 p.u.、系統頻率60Hz及環境溫度20°C下之最大

連續輸出感抗 (inductive reactive power) 為200Mvar (1.0p.u.)，參照圖2-10

V-I特性曲線之B處。

3. STATCOM系統須能連續操作在電壓降至0.3 p.u.下，並持續至少2秒後跳脫。
4. STATCOM系統須能透過控制系統在短時間最大過電壓1.3p.u.之條件下持續運轉至少2秒後跳脫。

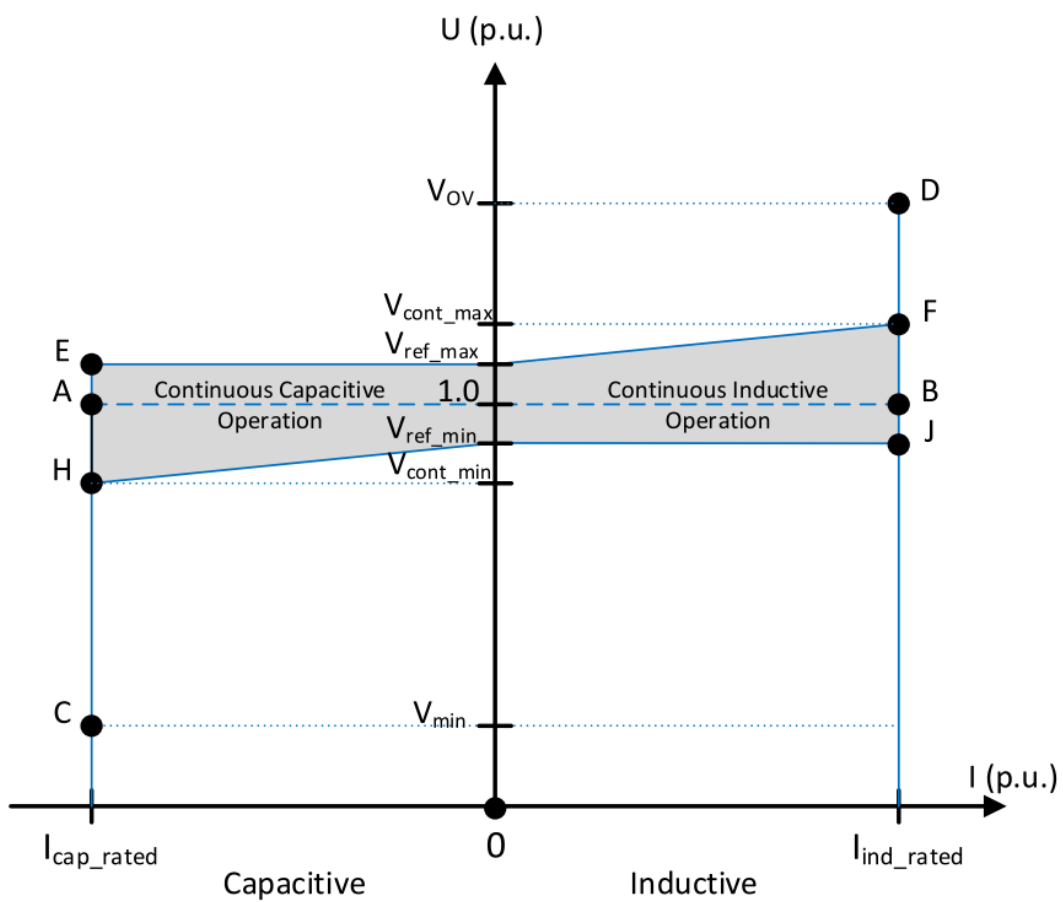


圖2-10

各工作點位說明如下：

V_{cont_max} : STATCOM併網點最大連續電壓

V_{cont_min} : STATCOM併網點最小連續電壓

V_{ref_max} : STATCOM控制器於安裝點之最大參考電壓

V_{ref_min} : STATCOM控制器於安裝點之最小參考電壓

Vov: STATCOM併網點最大暫時過電壓

Vmin: STATCOM併網點最小暫時欠電壓

Icap_rated: STATCOM最大連續電容性電流

Iind_rated: STATCOM最大連續電感性電流

A: STATCOM併網點於Icap_rated及1.0 pu時之電容值

B: STATCOM併網點於Iind_rated及1.0 pu時之電感值

C: 於最小暫時欠電壓(Vmin)系統能持續提供最大連續電容性電流(Icap_rated)點

D: 於最大暫時過電壓(Vov)系統能持續提供最大連續電感性電流(Iind_rated)點

E: 控制器於安裝點之最大參考電壓(Vref_max)於最大連續電容性電流

(Icap_rated)之延伸

F: 控制器於安裝點之最大參考電壓(Vref_max)與最大電壓控制斜率之延伸

H: 安裝點之最小參考電壓(Vref_min)與最大電壓控制斜率之延伸

J: 最大連續電感性電流(Iind_rated)在最小參考電壓(Vref_min)和最小斜率下的延伸

上述各工作點非常的重要，通常載明於需求書內，明確定義整個STATCOM系統在各操作模式下之電壓或電流容許值。

六、STATCOM操作模式介紹

1. 正常操作（Normal Operation）

(A) STATCOM系統須能正常且連續操作電容性及電感性之額定輸出。

(B) STATCOM系統之電壓參考值可在0.99p.u.~1.01p.u.之電壓範圍進行調整，並可供設定在正常供電情況下之電壓操作之調整。在系統額定容量下，可於斜率0~10%間之進行連續性之調整。

2. 過載操作（Overcurrent and Overvoltage Operation）

(A) STATCOM系統需在併接點電壓1.11 p.u.持續保持輸出能力。

(B) STATCOM系統需在併接點電壓1.3 p.u.保持2 秒輸出能力。

(C) STATCOM系統需在運轉範圍中，可操作電感及電容性110%之容量輸出能力，維持2秒。

3. 欠電壓操作（Undervoltage Operation）

(A) STATCOM系統需在併接點電壓0.89 p.u.持續保持輸出能力。

(B) STATCOM系統需在併接點電壓0.3 p.u.保持2 秒輸出能力。

(C) 欠電壓操作不受短時間負序電壓之影響。

4. 外部虛功率設備之控制協調

控制系統除須能調節併網點電壓納入既有MSC與MSR

七、Hitachi Energy公司之STATCOM配置（如圖2-11）

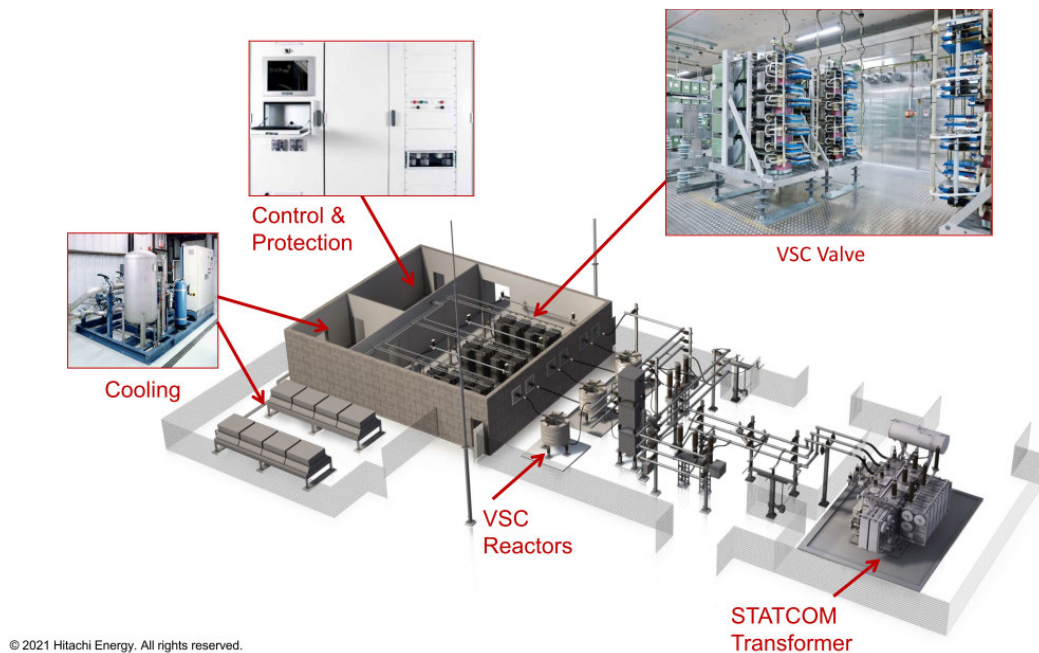


圖2-11

以該公司標準配置，所需空間為70公尺x30公尺

參、Hitachi設備與本系統現行案場設備比較

本次實習，經與Hitachi公司研討及後續資料整理時，發現Hitachi Energy生產之STATCOM設備確實有其不同之處，說明如下：

一、Cell元件之Bypass Switch比較

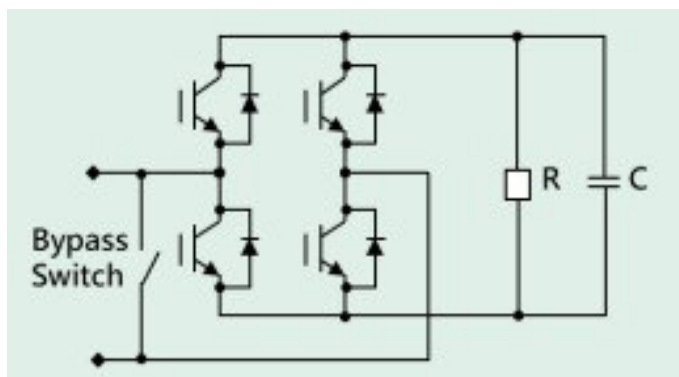


圖3-1

因整個VSC valve模組於運轉時無法停機維護，故設計時皆以redundancy設計(冗餘設計，以超過額定需求組數設計)，若當中某一組Cell元件失效時，可利用Bypass Switch投入，將此組Cell元件隔離，不會影響整個系統功能。經比較各家Cell元件，只有Hitachi公司之Bypass Switch使用IGBT，其餘各廠家皆使用閘刀開關，故Cell元件失效時，Hitachi公司之元件隔離時間最短。

二、Valve模組組成差異

VSC Valve 係由數個子模組(sub-module)(又稱 Cell)組成 VSC Module，再串接成一組 Arm/單相，三組 Arm 組合成 VSC valve。經查STATCOM 廠商，曉星重工(HYOSUNG)、三菱電機(Mitsubishi)、GE、SIEMENS ENERGY等之VSC module 組成係由5或6組子模組組成一組VSC module，如圖3-2左所示；Hitachi Energy所製造之VSC module組成係

為4組子模組構成 VSC module，如圖3-2右所示。

	
5或6組子模組組成valve-module(HYOSUNG)	4組Cell組成VSC Module(Hitachi)

圖3-2

三、預充電電阻(PCR)型式差異

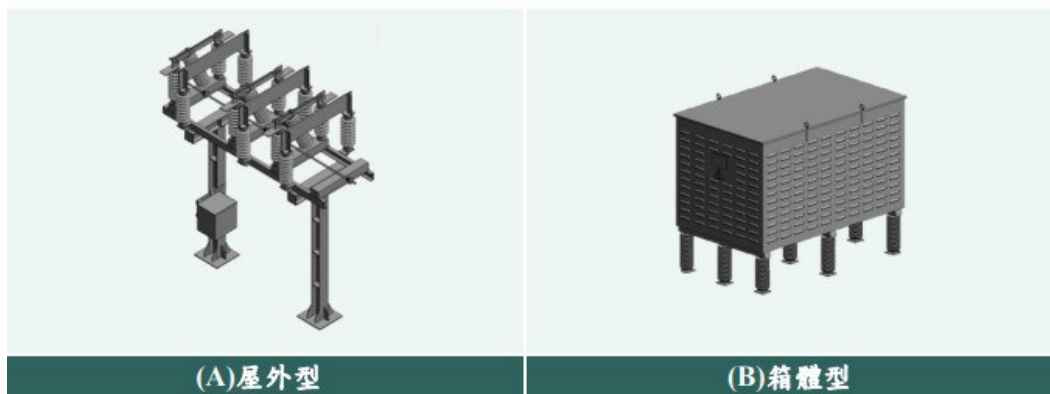


圖3-3

預充電電阻(PCR)係由電阻器、絕緣礙子及旁路開關組成，依 STATCOM 廠商之設計架構，可分為箱體型及屋外型兩種(圖3-3)，該配置規劃原則如下說明。

(A) 屋外型 PCR 係透過裸導體與相電抗器銜接，故通常設置於同一空間內(圖3-4)。且該 PCR與旁路開關(採 DS type)設置於同一位置，Hitachi Energy採用屋外型 PCR。



圖3-4



圖3-5

(B) 箱體型因採電纜型式與相電抗器銜接，故通常另規劃空間設置，南科STATCOM案採用箱體型PCR(圖3-5)。

四、STATCOM 系統即時數位模擬器(Real-Time Digital Simulator, RTDS)測試方法

一般STATCOM系統測試程序：STATCOM廠商須透過PSCAD建構電力系統電網及STATCOM系統模型，並對該模型進行相關情境之測試及驗證動態行為後，再納入RTDS進行併網測試前之即時模擬分析。

Hitachi Energy對STATCOM系統之測試程序：與軟體公司合作，直接透過PSCAD或EMTP-RV模擬軟體，直接進行模型建構及編輯，以減少RTDS 測試需求及時間。

Hitachi Energy亦強調該公司所研發之STATCOM PSCAD 模型，係以實際的STATCOM控制系統開發，因此與實際應用所使用的控制器完全相同。故併入系統運轉時可即時透過該模型運算後，調整相關參數。

肆、STATCOM設計、興建需注意事項

STATCOM規劃、配置及應用考量事項說明如下

一、 STATCOM系統電纜配置規則

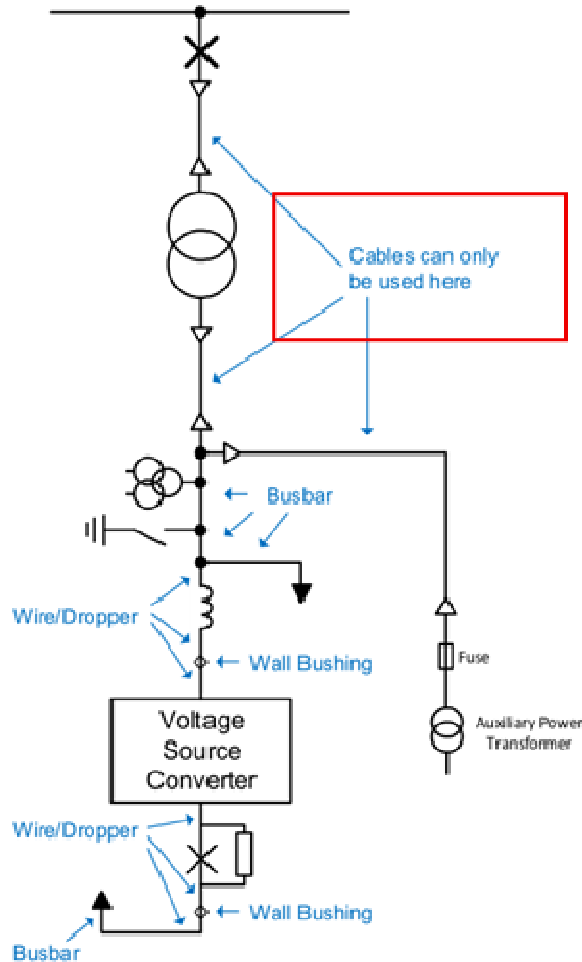


圖4-1

Hitachi Energy也特別說明由於電纜之寄生電容會造成共振或非偶次諧波電壓，使得電纜終端較容易發生事故或是過電壓跳脫，故電纜只能使用於變壓器之高壓側，或是從變壓器之低壓側連接至中壓(MV，詳圖4-1)匯流排。

二、電抗器與Valve室間之連接方式採用貫壁套管

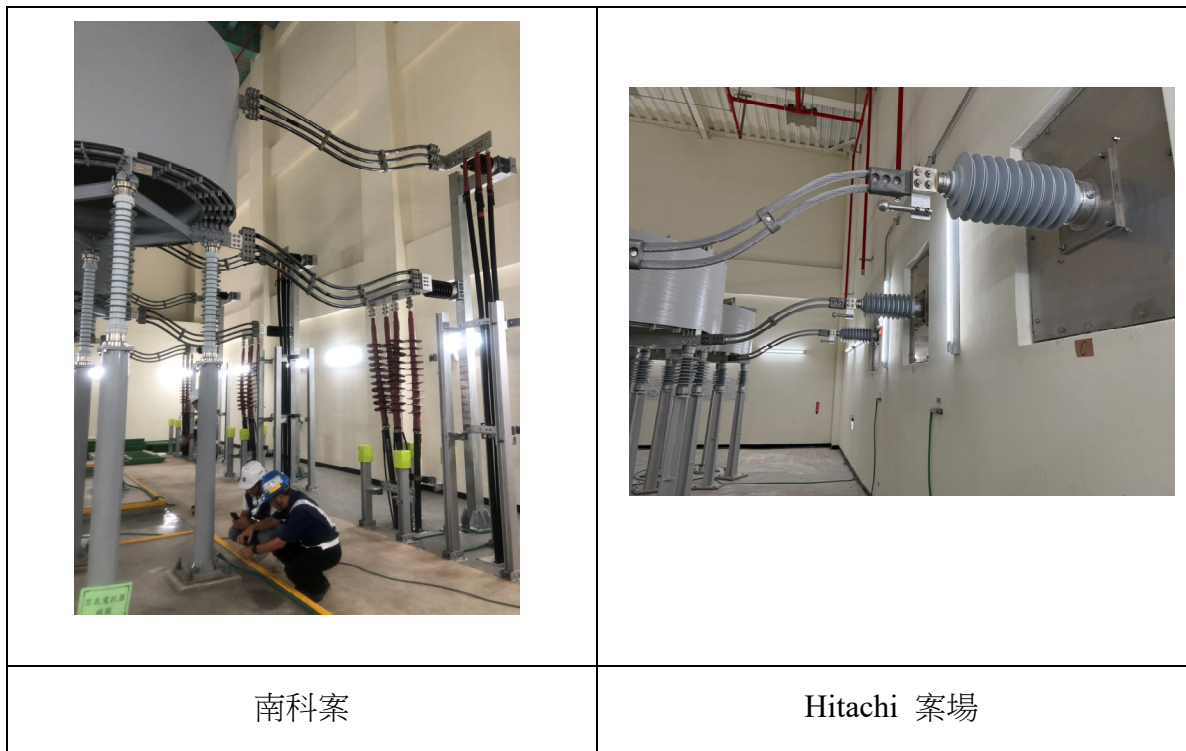


圖4-2

Hitachi Energy說明因STATCOM控制系統需要非常精準之電流信號進行運算，其包括直流電流，因此必須採用直流電流感測器(DC CT)。許多STATCOM廠商使用之感測器(貫壁套管形式)係利用電磁場的感應獲得電流信號。而若使用高壓電纜，則因該電纜有遮蔽，該遮蔽將影響電場磁場，會使直流電流感測器無法取得準備資訊，此種方式與南科案不同(詳圖4-2)。

三、建築物鋼筋防止磁場切割策略

STATCOM系統之電抗器無法採用油浸式電抗器，因油浸式電抗器之鐵蕊為矽鋼片堆疊而成，若應用於STATCOM系統將有可能發生飽和，故STATCOM系統之電抗器只能選用氣芯式電抗器，惟氣芯式電抗器使用上也有其限制，說明如下。

因STATCOM設備採用氣芯式電抗器(Air-core reactor)，根據IEEE C57.16，

氣芯式電抗器二分之一外徑(OD/2)的距離之內不可有金屬材料形成閉迴路(詳圖4-3)，也就是電抗器室鋼筋材料不論是設備基礎、樓板及梁柱位置皆不可位於電抗器二分之一外徑的距離之內，若未依上述準則設計，因會在鋼筋材料產生環流，鋼筋生熱後將造成電抗器室溫度升高，影響電抗器運轉安全。

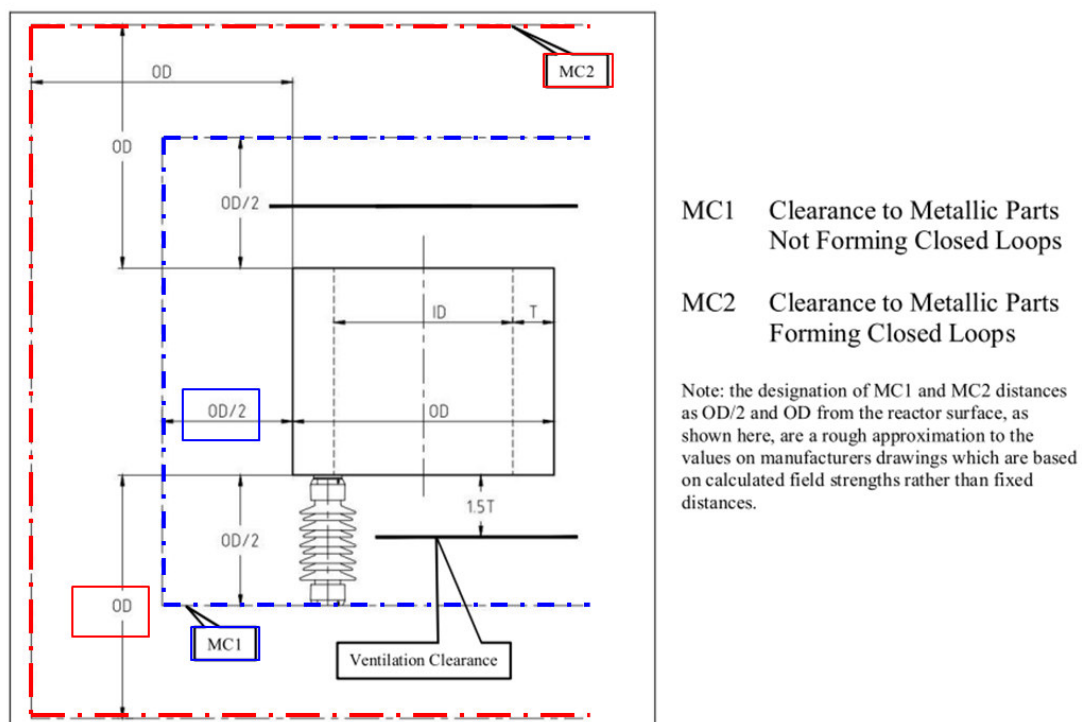


圖4-3 (資料來源IEEE C57.16-2011)

A. 絕緣橡膠



B. 玻璃纖維網

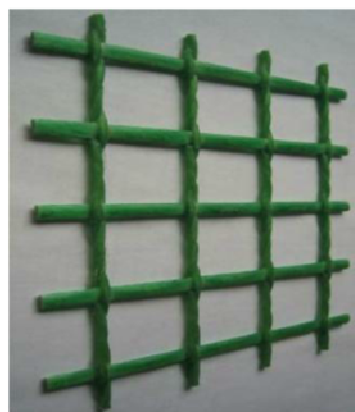


圖4-4

惟若因空間限制，設備配置時仍無法達到上述要求，在實務上仍可以其他工法(詳圖4-4)解決，相關說明如下：

(A) 使用絕緣橡膠在兩方向軸(X向及Y向)鋼筋接觸點予以絕緣，斷開環流路徑。

(B)以玻璃纖維網替代鋼筋。

上述的解決方案，方案B目前在國內尚無標準檢驗方式，爰南科STATCOM工程選擇方案A辦理。

伍、心得與建議

- 1、因STATCOM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，目前皆以先行招標技術服務廠商進行規格制定及基本設計，期許未來本公司可自行進行相關規格訂定及土木、機電設備之基本設計。且因Hitachi Energy公司之設備目前為止尚未使用於本系統工程，倘未來有機會安裝該公司設備，將可利用此次出國之經驗，減少相關學習時間。
- 2、因STATCOM 於本公司為新設備，尚未有任何運轉實績，日後維護工作相關訓練建議如下：
 - (A)電力電子基本知識的建立，因valve元件為電力電子元件，故需深入了解。
 - (B)Valve元件替換能力的建立，可快速排除故障。
 - (C)冷卻系統維護訓練，水冷式系統維護能力建立。
 - (D)STATCOM自動監控系統的維護訓練。
- 3、很感謝長官選派出國才能有機會至北歐這麼遠的地方實習，能夠在異鄉體會不同文化，增廣見識;也感謝Hitachi Energy公司不論是從前期連絡至提出邀請函等事項皆給我很迅速的幫忙，也謝謝該公司外國人員熱情的接待及提供資料讓我不枉此行。