

出國報告（出國類別：實習）

高壓直流(HVDC)變電設備之技術 應用與發展

服務機關：台灣電力公司輸變電工程處南區施工處

姓名職稱：江竺育 電機工程師

派赴國家：瑞典、芬蘭

出國期間：112年9月19日至112年9月27日

報告日期：112年11月9日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高壓直流(HVDC)變電設備之技術應用與發展

頁數 21 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話 台灣電力公司/人資處/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

江竺育/台灣電力公司輸變電工程處南區施工處/電機工程師/(07)367-6882

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：112 年 9 月 19 日至 112 年 9 月 27 日

派赴國家/地區：瑞典、芬蘭

報告日期：112 年 11 月 9 日

關鍵詞：高壓直流 HVDC

內容摘要：

過去高壓直流輸電系統(HVDC)並不如高壓交流輸電(HVAC)受到重視，主要因素為 HVDC 改變電壓困難，且轉換器變電站建置成本昂貴，往往在相當長距離(通常為 500 公里以上)電力傳輸上才得以見其效益，然而近來隨半導體材料進步、閘流電晶體應用、HVDC 電纜以及大容量直流斷路器等發展下，HVDC 建置成本已逐漸下降，甚至各設備廠家亦特別為新型小規模之 HVDC 設備另成立產品線，用以推廣給全世界電力事業機構去選擇其所適產品，加上近年來全球再生能源積極發展下，各地皆急需改善電網中不同以往的衝擊及瓶頸，面對無論是電源端、輸電端及負載端皆快速變遷的世代下，HVDC 著實成為其中的當紅者之一。

本文共分四個章節，第一、二章說明本次出國目的及行程，第三、四章則為出國實習計劃心得分享與建議事項。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目錄

第 1 章 實習目的.....	1
第 2 章 實習行程.....	2
第 3 章 實習心得.....	4
第 1 節 HVDC 發展現況.....	4
第 2 節 Hitachi Energy HVDC 實績.....	7
第 3 節 HVDC 設備與其應用.....	8
第 4 章 心得與建議.....	20

圖目錄

圖 2-1 參訪照片	3
圖 3-1 Hitachi Energy 全球累積 HVDC 安裝容量走勢圖	5
圖 3-2 HVDC Light®各容量所適用電壓規格.....	6
圖 3-3 Hitachi Energy 全球已建置案場.....	7
圖 3-4 轉換站常見架構.....	8
圖 3-5 LCC 轉換器模型	10
圖 3-6 VSC 轉換模型	11
圖 3-7 IGBT 模組	11
圖 3-8 Valve Cell	12
圖 3-9 閥層組 3D 圖.....	13
圖 3-10 閥結構組(立地式).....	14
圖 3-11 閥結構組(吊掛式)	14
圖 3-12 閥廳示意圖(每相 4 組 Valve Structure)	15
圖 3-13 轉換變壓器(單相).....	16
圖 3-14 Hitachi Energy 所製造各絕緣形式套管.....	17
圖 3-15 過牆套管.....	17
圖 3-16 轉換變壓器套管模型.....	18
圖 3-17 VSC HVDC 轉換站示意圖.....	19
圖 3-18 VSC HVDC 轉換站設備與單線對照圖.....	19

表目錄

表 2-1 實習行程.....	2
-----------------	---

第1章 實習目的

目前國內輸電主幹已長期具有輸電瓶頸問題困擾，鑒於國內用電負載仍以北部為重，可預見未來電力潮流北送需求依然存在，且核一及核二發電廠除役後，北部地區將損失北東電源供給，進一步促使更多電力需透過既有電網長程輸送至北部負載，再者，近年國內積極且快速發展再生能源，雖然離岸風力發電及太陽光電皆為分散式電源，但因國內具效益之風場及光場皆相當集中於固定地區，導致再生能源將集中於部分地區併網，將進一步衝擊既有輸電網，故如何將大量電力輸送至北部負載缺口將成為迫在眉睫問題。

然而 HVDC 用於長程點對點輸電正是其優勢所在，且新技術使轉換變壓站可成為易於控制電壓以及抑制故障電流之節點，可提高電網可靠度，且 HVDC 在相同輸電容量下無論是輸電線路佔地、電纜數量、電纜規格及電壓上皆相較 HVAC 更具優勢，可以降低國內取得電力用地困難度。國外 HVDC 技術已相當純熟且具實績，值得參考其技術及經驗，以因應國內 HVDC 之評估、規劃、設計、採購及安裝需求。

為達以上目標，需建置符合規劃、調度單位需求之技術規範，俾利相關採購、驗收等工作之進行，爰此本處將 HVDC 變電設備之技術應用列為出國研習項目，藉由前往 Hitachi Energy 公司位於瑞典之全球 HVDC 最大規模工廠，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，並於研習期間前往位在芬蘭已完工之 HVDC 輸電案場實地參訪。

Hitachi Energy 公司發展 HVDC 設備之技術成熟，在業界亦為 HVDC 技術領頭羊之一，且施工經驗豐富，具有許多成功案例，值得前往了解目前設備生產、規劃及使用情形，並獲得設備規範資料及系統規畫經驗，以供未來本公司參考評估。

第2章 實習行程

本次出國行程及實習內容如表 2-1 所示：

表 2-1 實習行程

題目：高壓直流(HVDC)變電設備之技術應用與發展研習		
日期	行程	地點
112 年 9 月 19 日	往程。	台北－斯德哥爾摩
112 年 9 月 20 日	Hitachi Energy 介紹 HVDC 設計理念與研析。	盧德維卡
112 年 9 月 21 日	意見交流與實務研討。	盧德維卡
112 年 9 月 22 日	Hitachi Energy HVDC 變壓器工廠參訪。	盧德維卡
112 年 9 月 23 日	HVDC 實績案場參觀。	瓦薩
112 年 9 月 24 日	HVDC 實績案場參觀。	瓦薩
112 年 9 月 25 日	1. Hitachi Energy 介紹 HVDC 全球市場概況及台灣可能應用。 2. 獲取技術資料及設備規格資料。	瓦薩
112 年 9 月 26 日	返程。	赫爾辛基－台北
112 年 9 月 27 日		



圖 2-1 參訪照片

第3章 實習心得

本章簡介實習題目及與廠商相互交流之心得，內容包括 HVDC 發展現況、Hitachi Energy HVDC 實績及 HVDC 設備與其應用等。

第1節 HVDC 發展現況

HVDC 直至 20 世紀下半葉前，始終未能取得成功商業運轉，直至 1970 年代開始，閘流半導體(Thyristor)出現，促使交、直流轉換得以邁向大功率、高電壓發展，HVDC 才逐漸出現商業運轉價值。

過去 HVDC 大多採用在長距離及大容量傳輸，通常為不同國家或是不同洲際間電網點對點傳輸，例如不同交流頻率之電網透過整流後以 HVDC 互聯；亦或是大容量遠距離電力輸送，例如大型水壩之水力電廠透過長程 HVDC 輸送電力，將電力送至數百甚至數千公里外用電負載地區；亦可是電力輸送路徑需跨海，採用 HVDC 可減少線路損耗，且可減少海底電纜佈纜回線數，進而降低海底環境破壞。

然而近年隨著半導體科技進展，更高額定值的絕緣匣雙極電晶體 (IGBT)、閘極截止閘流體 (GTO) 和基體閘換向閘流體 (IGCT) 的開發，使小規模型 HVDC 系統變得更加經濟。加上自 2000 年代後全球環保意識抬頭，為減緩氣候變遷及汙染，各先進國家開始提倡 ESG 理念，即環境保護 (E, environment)、社會責任 (S, social) 和公司治理 (G, governance)，在全世界多國開始積極發展再生能源下，人類文明已發展逾百年的交流電氣設施開始逐漸被發現許多前所未有的挑戰，包含再生能源併網衝擊、輸電容量瓶頸、系統故障電流高過設計模型、電源與負載之位置及容量快速變動等等，促使愈來愈多國家開始採用 HVDC 解決既有電網系統所遭遇之問題。圖 3-1 為 Hitachi Energy 全球累積 HVDC 安裝容量走勢圖，可以見到自 2000 年代後 HVDC 全球建置需求快速提高。

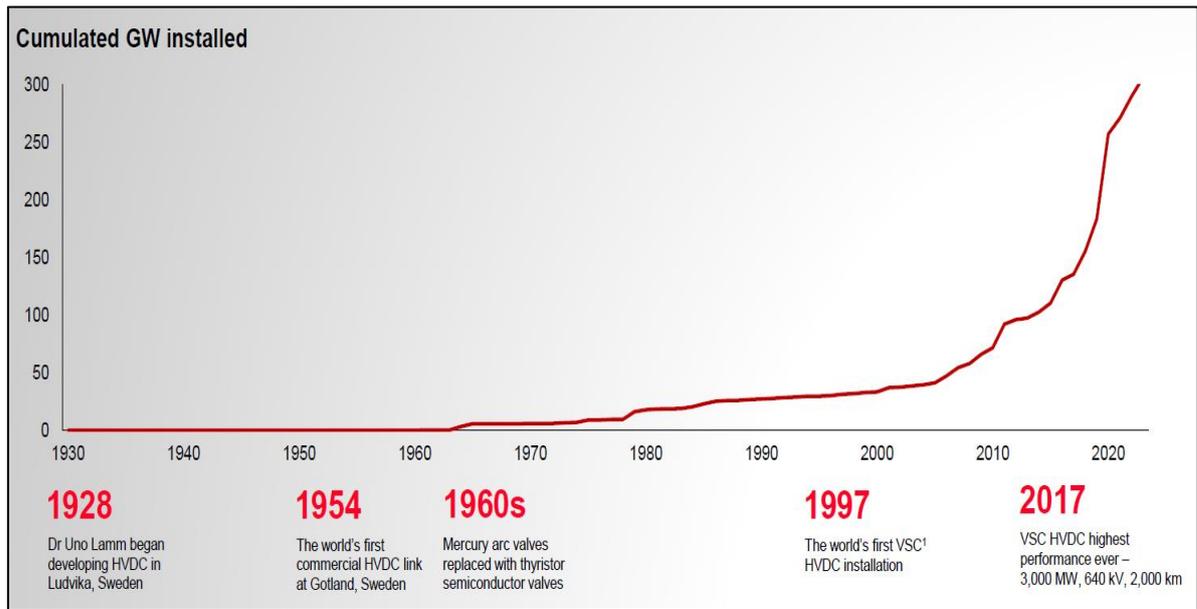


圖 3-1 Hitachi Energy 全球累積 HVDC 安裝容量走勢圖

如前所提，近年 HVDC 迅速發展很大一部分需求來自於小規模且短程的電力傳輸，如離岸風電集中後上岸、多個太陽能光場逕送至負載地區之轉換變電站、大型電動車充電站及直流大眾運輸系統等，因此各廠家如 GE、Hitachi Energy 等皆將此類電壓較低、容量較小之小規模經濟型 HVDC 獨立出產品線，如本次參訪 Hitachi Energy 為例，其 HVDC 產品線即分為 HVDC Classic 以及 HVDC Light® 兩類，其中 HVDC Classic 服務於最高 1100kV，最高容量為 3 至 12GW，優點為每單位容量價格較低、損失低、效率高、高電壓、大容量，但缺點為每轉換站總造價高、設備佔地大，適用在大容量遠距離傳輸；而 HVDC Light® 則服務於最高 640kV，最高容量為 3.5GW，優點為佔地較小、每座轉換站總造價較低、支援全黑啟動、實虛功控制(類 STATCOM 功能)，但缺點為效率較差、損失較高、每單位容量成本較高，適用於離岸風電、太陽光電等小規模分散系統電力傳輸。而 Hitachi Energy 更進一步將 HVDC 系統依電壓作為分類，以 800kV 為界，低於者稱為 HVDC，高於者稱之為 UHVDC(Ultra High Direct Current)，用以作為商業與規劃上能快速初步得知各專案規模大小。圖 3-2 為 Hitachi Energy 所提供其 HVDC Light® 各容量所適用電壓規格。

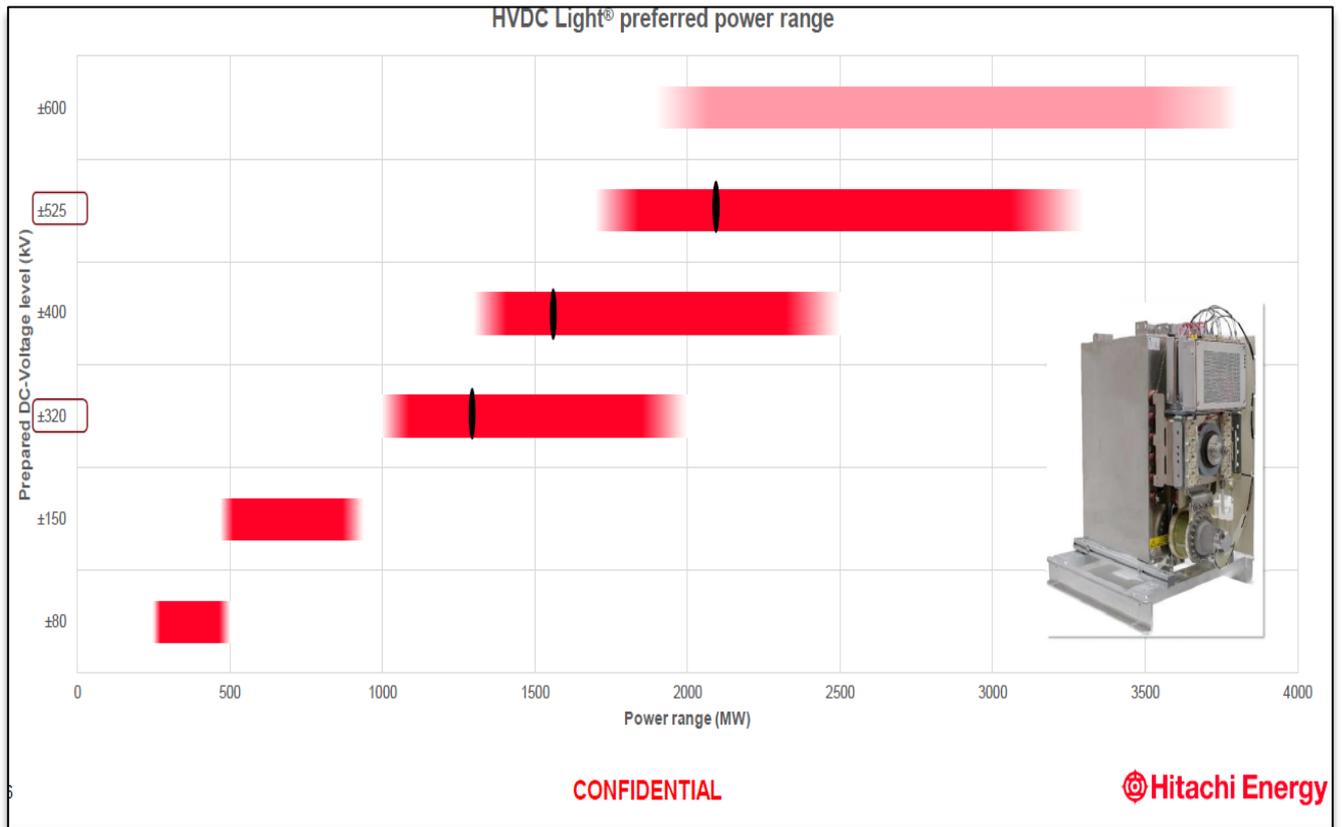


圖 3-2 HVDC Light®各容量所適用電壓規格

第2節 Hitachi Energy HVDC 實績

目前該公司 HVDC Light®中客戶最廣泛採用的轉換器形式為電壓源轉換型 (Voltage Source Converter,VSC)，而全世界已建置 VSC 型轉換站中，Hitachi Energy 佔其超過一半以上的實績，故在建置經驗及技術研發上可見其領前性，圖 3-3 為該公司目前在全世界已建置之案場。

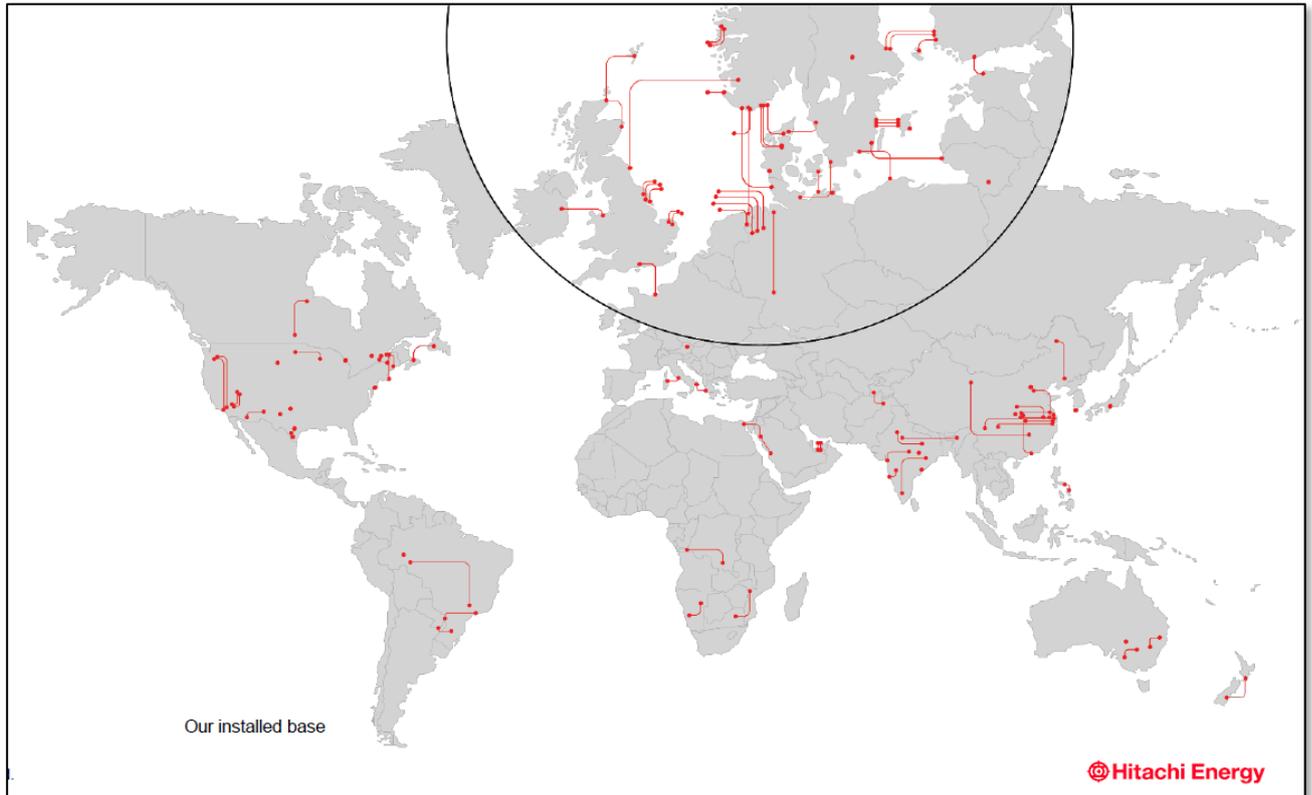


圖 3-3 Hitachi Energy 全球已建置案場

在眾多實績中 Hitachi Energy 亦創造許多世界之最，如最大規模跨國 HVDC 輸電，該案由沙烏地阿拉伯連接至埃及，建置規模 500kV 3GW；最長海底跨海輸電，該案由英國連接至挪威，建置規模 515kV 1.4GW；最大離岸風電場輸電，該案建置規模 320kV 3.6GW 於英國；UHVDC 最高電壓應用，由中國新疆連接至安徽省，該案建置規模為 1100kV 12GW，傳輸距離超過 3000 公里。

第3節 HVDC 設備與其應用

1. 轉換站與轉換站間系統架構

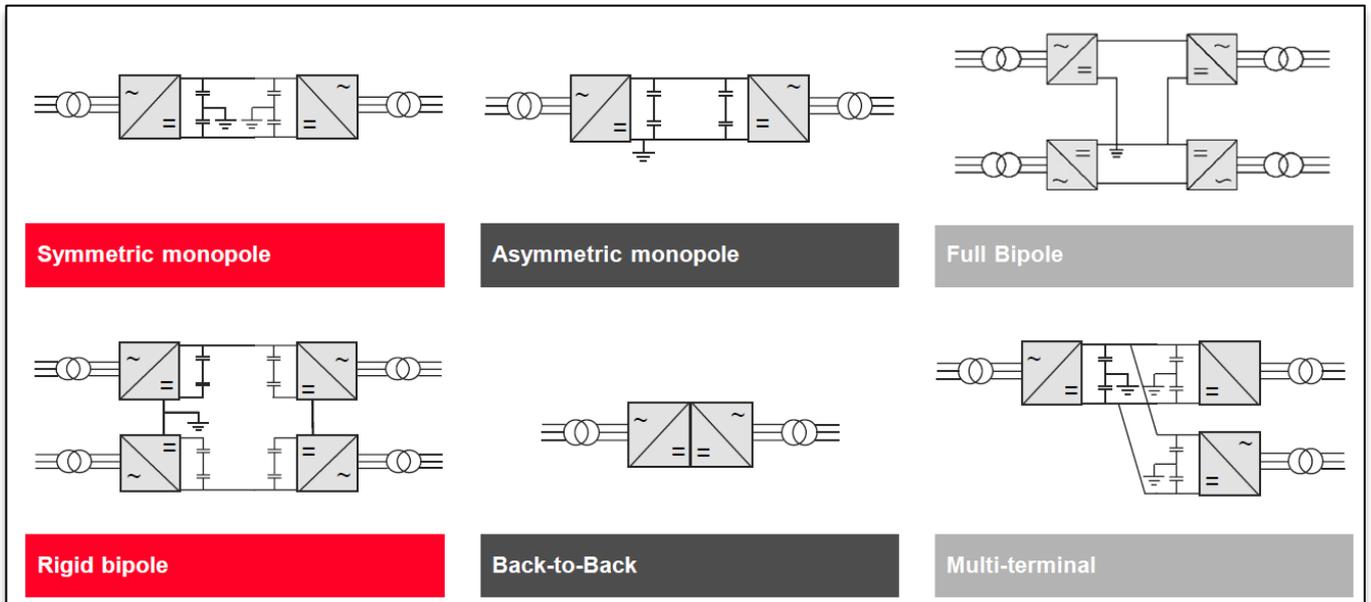


圖 3-4 轉換站常見架構

圖 3-4 顯示目前轉換站間各類常見設計架構，為對稱單級型(Symmetric monopole)、非對稱單級型(Asymmetric monopole)、全偶極型(Full Bipole)、穩固偶極(Rigid Bipole)、背靠背型(Back-to-Back)以及多終端型(Multi-terminal)。

- 對稱單極型(Symmetric monopole)

為 HVDC 最基本設計架構，其相當簡單且經濟，兩座轉換站間以單回路連接，電流由正極送出、由負極流回，其負極導線未有效接地，故若以電纜連結時，需以兩條具完全絕緣電纜施設，又因此系統僅具一回路，故無法運作於 N-1 情況。

- 非對稱單極型(Asymmetric monopole)

相較 Symmetric monopole 更為經濟，其負極須有效接地，故負極以地電位為參考電位，其負極導線不必採用完全絕緣，固可降低導線施設成本，且此架構可預留未來擴充為偶極型架構，但因其電路需透過地電流回流，故接地環境與地棒施作需符合相關條件。

- 全偶極型(Full Bipole)

偶極轉換站為單極串連而成，全偶極型(Full Bipole)共需施設正極、負極以及中性線三條導線，其中中性線以地電位為參考電位，故得以採用低絕緣導線即可；因其轉換站為串聯，所以系統可建構較高電壓，Full Bipole 架構具備 N-1 運轉條件，但相較常態下，N-1 情況僅能以半載容量運轉。

- 穩固偶極(Rigid bipole)

與全偶極型差異在於穩固偶極並未具中性線連接轉換站兩端，其可於兩端或其中一端轉換站中性點設置有效接地，透過地電流完成回路，此架構可省去中性點導線施設，但因其電路需透過地電流回流，故接地環境與地棒施作需符合相關條件，Rigid bipole 架構亦具備 N-1 運轉條件。

- 背靠背型(Back-to-Back)

通常作為兩個交流網路間的介面點，其兩座轉換站直流側僅以一條短導線連接，即兩座轉換站位於同一地點，通常用於不需直流傳輸但仍想擁有轉換站所具備優點，如功率控制、電壓調控、限制故障電流等功能，亦可作為不同電力公司、不同國家或是不同交流頻率電網間連接介面點使用，其 DC 側電壓可隨意採用，通常以低電壓(<150kV)作為連接使用，以降低成本。

- 多終端型(Multi-terminal)

線路佈設進行分歧，使 HVDC 得以多終端傳輸，通常用於需將電力輸送至不同終端地點情況下採用，單極或偶極架構皆可建置成多終端型架構。

2. 轉換站內轉換系統型式

- 線電壓換相轉換器(Line Commutated Converter, LCC)

LCC 型轉換系統利用閘流體(Thyristor)作為控制元件，其閘流體是透過 AC 側之線電壓作為控制信號，故須由 AC 側取一同步信號源。LCC 型轉換器具商業使用歷史悠久優勢，其穩定可靠，且可承受功率較大，轉換過程損失也較低，然而其需仰賴穩定 AC 線電壓源作為控制信號，故無法於 DC 側作全黑啟動，因此 LCC 型轉換器僅適合採用在如大型電廠這類具穩定 AC 側電源系統，不適用在離岸風

電場域。

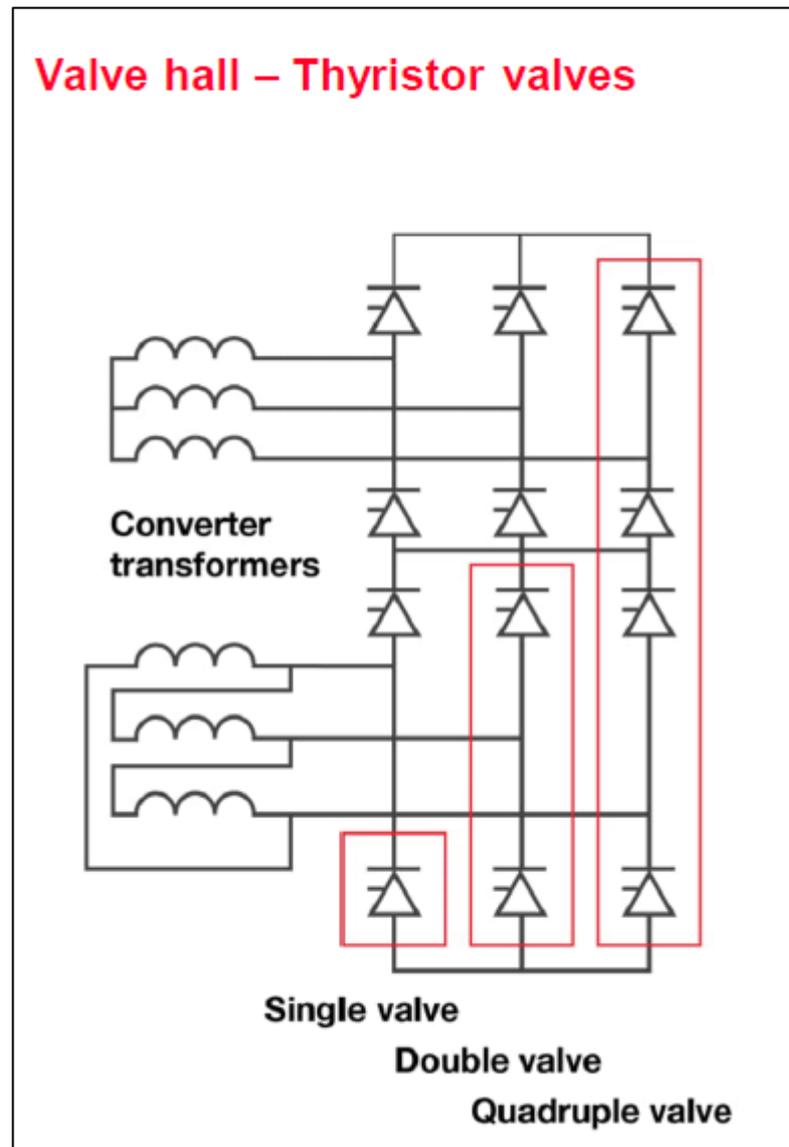


圖 3-5 LCC 轉換器模型

- 電壓源轉換器(Voltage Source Converter, VSC)

VSC 型轉換系統利用絕緣匣雙極電晶體(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)作為控制元件，相較於閘流體(Thyristor)僅能以信號源控制元件導通，絕緣匣雙極電晶體(IGBT)不僅可控制導通，亦可控制元件斷路，使其可達成自換向電壓源換流功能，IGBT 元件僅需以極小功率信號源即可控制，故 VSC 可透過一電容器提供穩定 DC，結合脈衝寬度調變切換技術(PWM)即可決定變流器輸出電壓的頻

率及振幅的大小，其適用於被動性系統如負載地區，亦或是離岸風電場等 AC 電源不穩定系統。

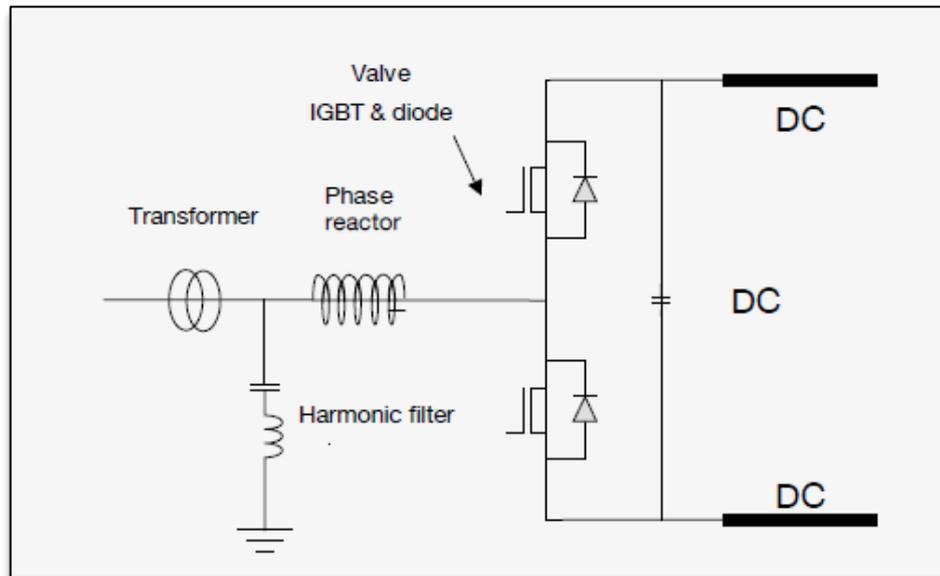


圖 3-6 VSC 轉換模型

3. VSC HVDC 轉換站編成

考量我國目前 HVDC 評估情況，未來較可能建置適用於非長程、潮流可控、可抑制故障電流、離岸風電等之 VSC 轉換站，故以下以 Hitachi Energy HVDC Light® VSC 轉換站介紹其主要元件、設備及轉換站編成。

- IGBT 模組(IGBT Module)

單個 IGBT 模組為轉換器中最小元件，其內部半導體元件經封裝後，一側以導體連接外部電路，另一側則絕緣貼合水冷散熱配件。



圖 3-7 IGBT 模組

- 閥單元(Valve Cell)

由單顆 IGBT 模組結合閘極輸入導口、控制模組、保護模組、水冷導口、旁路開關及電容器等組合而成，其大部分體積及重量為電容器，實際上 IGBT 模組僅佔其不到 10%體積。

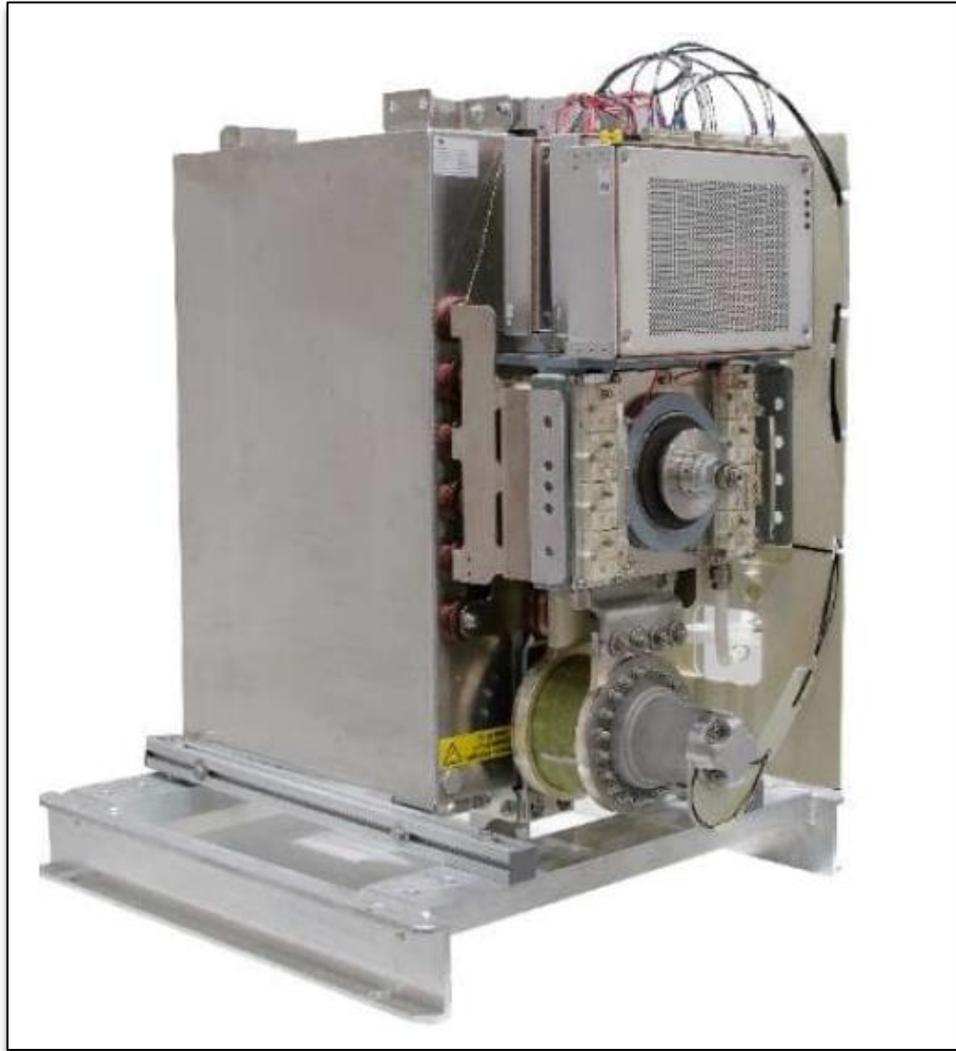


圖 3-8 Valve Cell

- 閥層組(Valve Layer)

一個閥層組由 12 個閥單元(Valve Cell)串連組成，底部由乘載機板拱托閥單元，外圈以金屬遮罩環繞，每個閥單元皆連接至相同冷卻水路，閥層組為工廠出廠運輸時包裝最小單位。

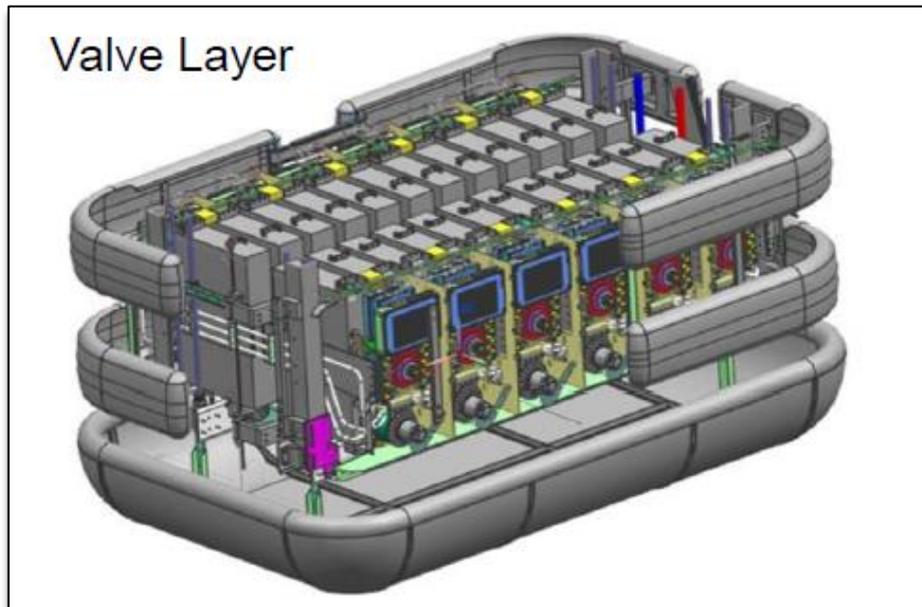


圖 3-9 閥層組 3D 圖

- 閥結構組(Valve Structure)

每個閥結構組由 5 層閥層組(Valve Layer)構成，六面皆由金屬遮蔽包覆，並以水冷管路二進二出環繞各個閥模組；因閥結構組並不具備絕緣能力，故其通常以絕緣支持物立於地面上，或以礙子連吊掛於屋頂，因此整體結構須有相關地震搖晃試驗要求。

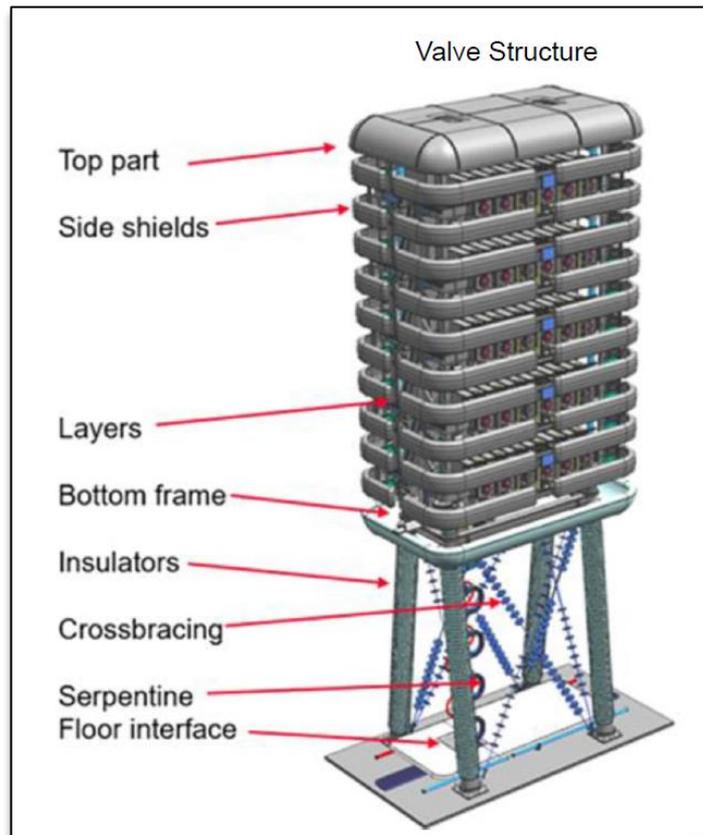


圖 3-10 閥結構組(立地式)



圖 3-11 閥結構組(吊掛式)

- 閘廳(Valve Hall)

Hitachi Energy 產品一般典型轉換站中，依據系統電壓而不同，通常每相 AC 各自分別由至少 4 組閘結構組(Valve Structure)橋接，故通常一座最基本的轉換站其閘廳內至少會包含 12 組閘結構組(Valve Structure)，隨 HVDC 建置電壓提高，其閘廳佔地與閘數量亦隨之提高。

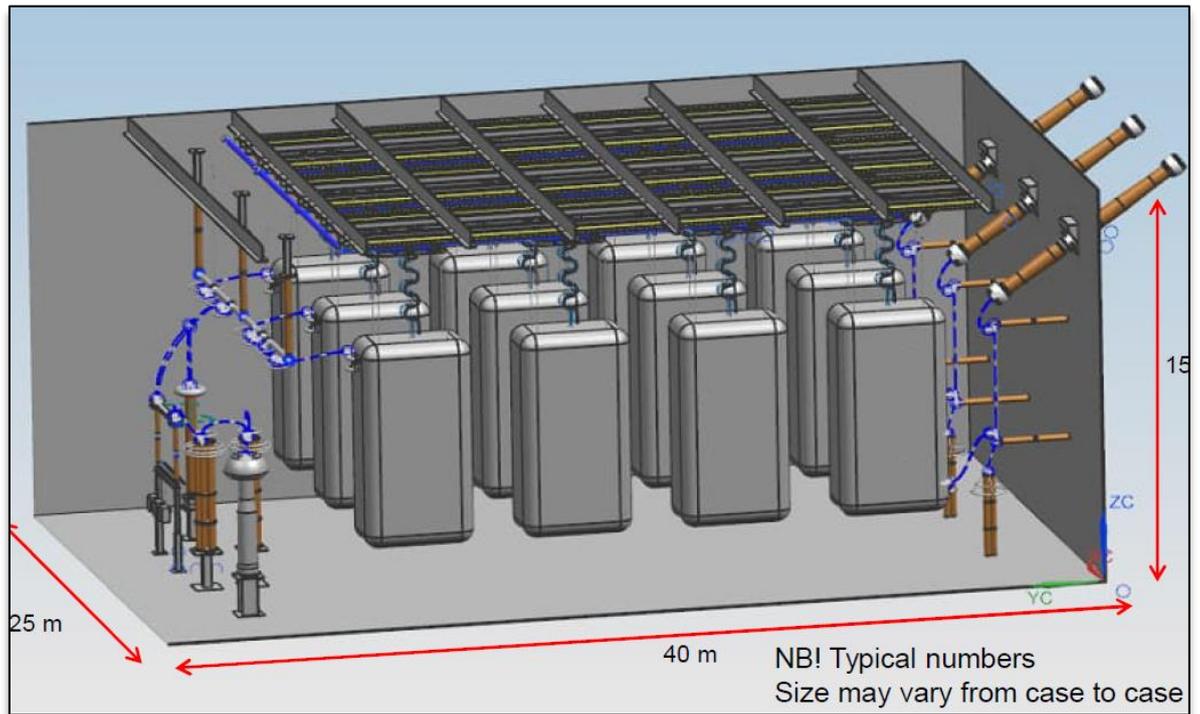


圖 3-12 閘廳示意圖(每相 4 組 Valve Structure)

- 轉換變壓器(Converter Transformer)

轉換變壓器連接 AC 電網端及轉換器之間，其設計上須考慮直流偏壓，故轉換變壓器在絕緣條件上相比一般 AC 變壓器較為苛刻，轉換變壓器內部固態絕緣占比相當高，因其需額外承受直流耐壓，轉換變壓器繞組亦須以相關直流耐壓進行試驗。一般岸上轉換站之變壓器在設計上著重於轉換效率及噪音值，通常採三相分離型；離岸轉換站之變壓器則考量運輸能量、基地大小、維護難易度等，通常採用三相一體型，並且具有備援變壓器，以填補海上維修較長時程之空缺，且為避免變壓器事故造成絕緣油外洩汙染環境，離岸轉換站之變壓器通常須採用生物可分解型環保絕緣油。



圖 3-13 轉換變壓器(單相)

- 套管(Bushing)

Hitachi Energy 目前開發眾多形式套管中，屬樹脂複合物套管(Resin Impregnated Synthetic, RIS)為最新技術，於 2011 年首次開發，當時適用最高電壓為 245kV，然而發展至 2023 年，已提升至最高電壓 550kV，雖尚未達國外許多超高壓需求(通常大於 600kV)，但 550kV 已可適用於大部分電壓等級設備。因 RIS 套管內部無油、無紙，故可達到無燃燒效果，且重量輕、庫存維護容易、生命週期長等特性，使 RIS 套管成為離岸轉換站嚴苛環境條件下相當適用之配件。另為縮小轉換站基地大小，其內部通常設備緊鄰且空間緊湊，許多套管類型亦根據需求而生，如過牆套管即為一例。

1kV – 1200kV	24kV – 800kV	52kV- 550kV
<p>Oil Impregnated Paper (OIP)</p> <p>Since 1930 – present</p> <ul style="list-style-type: none"> + Most widely used bushing design in Power Industry up to ultra high voltages + Longest history and installed basis in the world and proven reliability over lifetime + Highest operation and loading capabilities with state-of-the-art design + Well established condition assessment routines, well defined routines in standards and at users, e.g DGA 	<p>Resin Impregnated Paper (RIP)</p> <p>Since 1960 – present</p> <ul style="list-style-type: none"> + Highest standards of operational safety, completely oil free - no fire; pressure free - shattering free, minimized risk for people and property + Minimum maintenance cost gas and oil tight, best in class sealing, no cleaning required due to hydrophobic properties of HTV silicone insulator + Highest reliability and low weight, mechanical strength to support highest earthquake capabilities + Transportation and storage without any constraints. Long-life packaging for storage available, energize directly and any installation angle 	<p>Resin Impregnated Synthetic (RIS)</p> <p>Since 2011 ≤ 245kV 2023 ≤ 550kV - present</p> <ul style="list-style-type: none"> + Same features as RIP + Superior storage & easy to handle at any angle energized directly after storage + Paperless technology -Lowest moisture uptake – reduced ageing affect by low losses over lifetime + Higher dielectric long term withstand, more robust over lifetime
		
6	© 2023 Hitachi Energy. All rights reserved.	©Hitachi Energy

圖 3-14 Hitachi Energy 所製造各絕緣形式套管

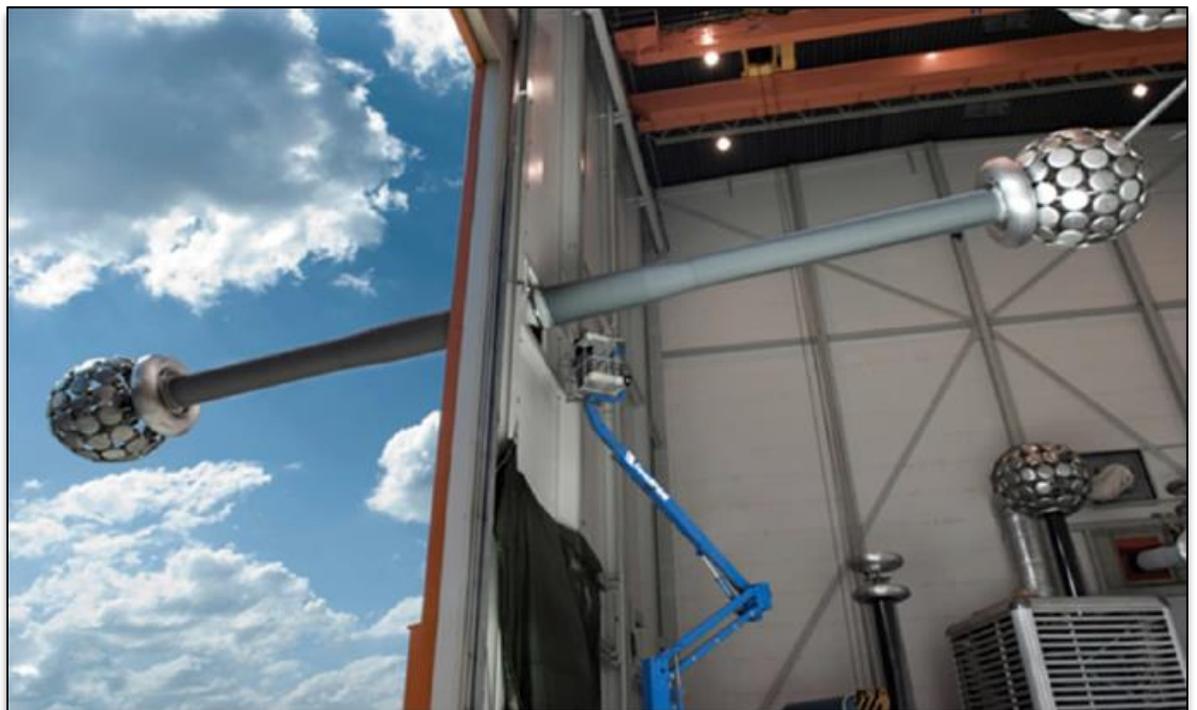


圖 3-15 過牆套管

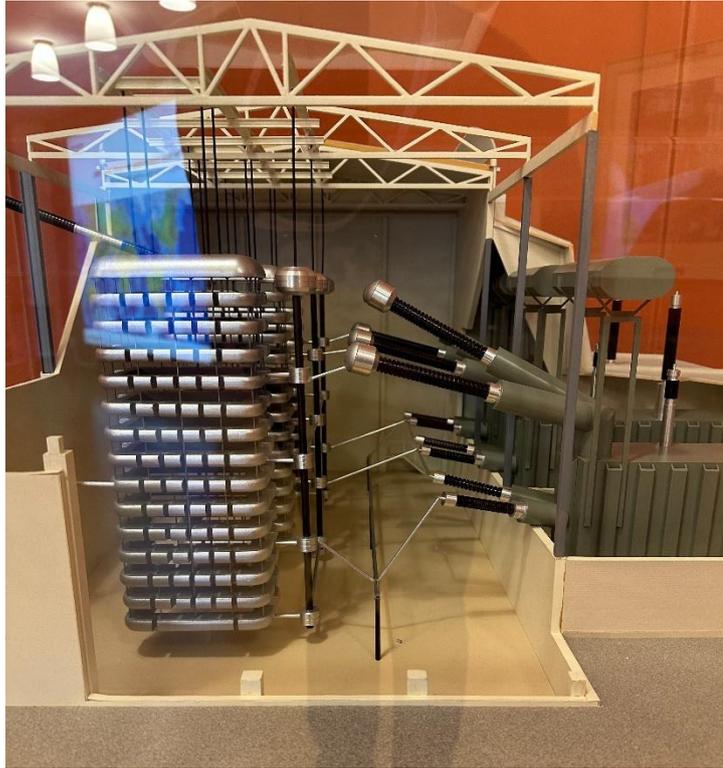


圖 3-16 轉換變壓器套管模型

- VSC HVDC 轉換站(VSC HVDC Converter Station)

HVDC 轉換站整所配置如圖 3-17 所示，圖中標示分別為：①變壓器、②AC 端電網設備、③電抗器室、④閘廳與 DC 端電網設備、⑤控制室及⑥冷卻系統散熱器；

圖 3-18 則標示出轉換站單線圖中相對應之各項設備，圖中標示分別為：①AC 端電網設備、②變壓器、③電抗器、④閘廳、⑤DC 端電網及⑥DC 斷路器。

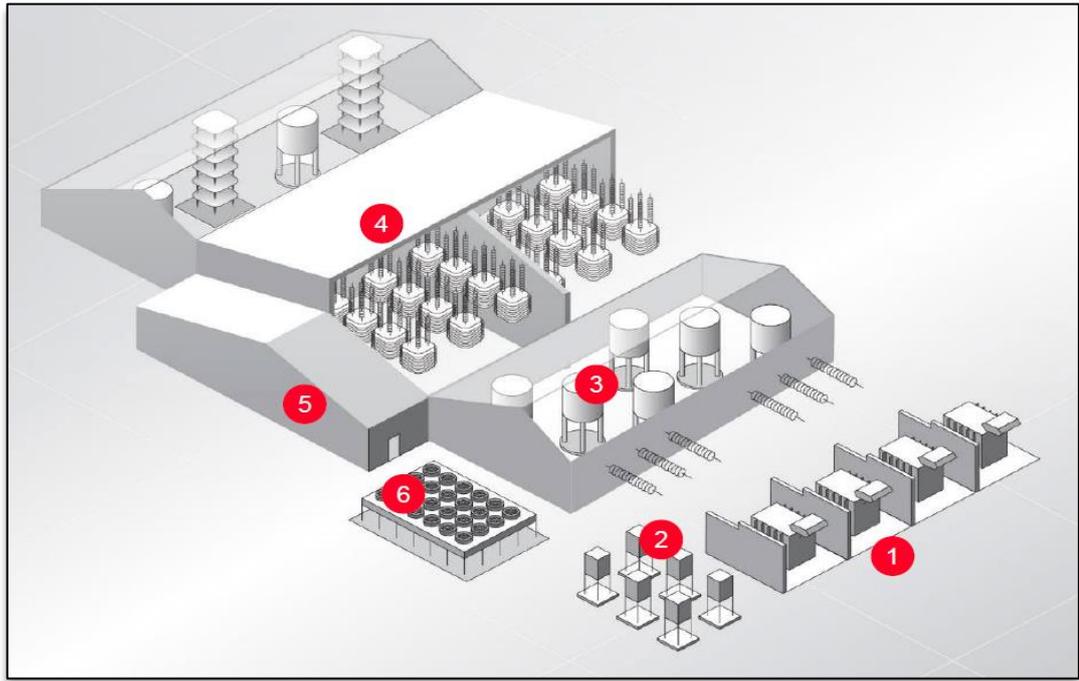


圖 3-17 VSC HVDC 轉換站示意圖

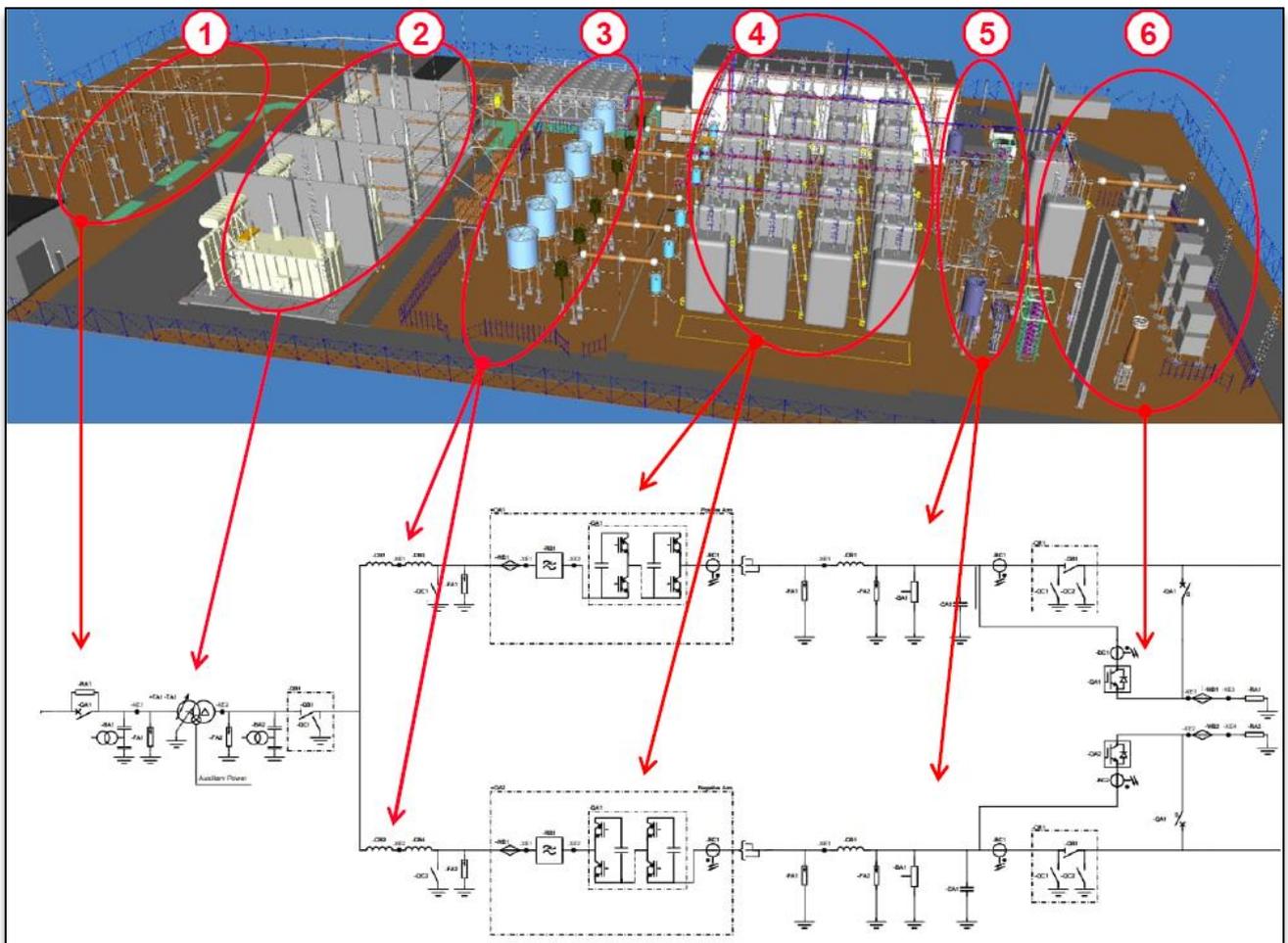


圖 3-18 VSC HVDC 轉換站設備與單線對照圖

第4章 心得與建議

- 一 我國目前尚未有 HVDC 系統，故國內對於 HVDC 設備、系統、應用、特性等皆相當模糊及陌生，甚至對於 HVDC 概念仍停留於三、四十年前。本次出國實習前已參閱部分資料，大致瞭解 HVDC 發展現況，然而實際前往廠家廠區及案場，聽取廠家說明與交流後，才深刻體會目前全球電力產業及系統變遷之快，在國內電力產業過去一直看似傳統產業，幾十年來變化程度有限，許多設備甚至幾十年來毫無變化，其可歸因於國內電力系統為求穩定及低風險，傾向採用已具有一定運轉實績、穩定且可靠之設備，故對於新技術及設備採用上顯得小心翼翼，並經常須經長期評估後才得以嘗試採用新設備，然而集中於近年來全球政策及電氣設施不斷推陳出新，碳權、永續、廢核、都市集中化、離岸風電、太陽能光電、氫能、地熱發電、智慧電網、微電網、電動車、大眾運輸電氣化、儲能電池、SVC、STATCOM、HVDC 等等議題下，促使電力產業急需在短期內提升及更新，國內電力系統當然亦不例外。本次出國實際參訪後看見了國外許多走在電力產業前端之科技，更加認為除了 HVDC 外，尚有許多值得國內參考或是樂見其發展之技術，並希望藉由本篇實習報告能夠使國內對 HVDC 技術及應用現況有初步認識。
- 二 本次前往瑞典、芬蘭實習過程中，除技術交流外，在環保議題上亦進行許多探討，在北歐 8 天過程中，可以明顯感受到在這些環保意識領先全球的地區，綠色概念實際深植人心，這點與目前國內有相當差異，國內大部分人民與企業對於綠色環保觀念係屬於「必須」如此，意即因為政策、規範、法令等而必須執行，然而在歐洲許多地區，人民與企業對於環保意念係屬於「應該」如此，故不須由外在規範強制其執行，其仍會自然作出有利環境之選擇，小如生活上：願意付出更多金錢選購環保產品、拒用污染性洗滌劑、選擇步行或自行車、搭乘大眾運輸、減少搭乘燃油交通工具等等，大如企業上：投資研發環境友善產品、產品廣告以環保為主打、鼓勵員工遠端工作以減少移動碳排、辦公室全面無紙化等等，甚至根據

調查，人民對綠色已具嚴重偏好，例如無論政府單位或私人企業，於標語、廣告、企業字體及標章等若非綠色色調，將會嚴重影響人們喜好與觀感，如此全民致力於綠色環保意識，亦是今日國內期望能夠達到之境界，望未來時日，國外人士來台亦能如此般深刻感受到綠色意識。