

出國報告（出國類別：實習）

高壓直流輸電 HVDC
(High Voltage Direct Current)技術

服務機關：台灣電力公司輸變電工程處

姓名職稱：蔡曜鎧 電機工程監

派赴國家：日本

出國期間：107年11月19日至107年11月24日

報告日期：107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、交流輸電與直流輸電之比較	3
二、電力電子技術	5
三、高壓直流輸電系統架構	8
四、HVDC 應用於離岸風力傳輸	12
五、HVDC 與 STATCOM 電氣試驗比較	14
肆、建議事項	16

摘要

電力傳輸隨著變壓器的發明，可將電力以交流方式提高電壓傳送，從而降低線路損失提升輸電效率。而交流電網因發電機、變壓器、電力電纜等電感性及電容性之必要設備，存在著無可避免的無效電力，在長距離輸電線路時，因無效電力而產生的電壓變化，除使導線絕緣能力需相對提升，且大幅降低輸電效率。高壓直流輸電技術相較交流輸電於長距離輸電方面具有優勢，惟設置成本較高且控制相對複雜。高壓直流輸電系統在國外於離岸風力輸電、陸上長距離輸電及不同頻率電力系統併聯等應用，皆有實際運用之成功案例，本次出國研習國外廠家對於高壓直流輸電實例及相關設備原理並敘述於本報告中。

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，說明為加強本公司電力系統之穩定度及傳輸能力，前往日本日立公司(Hitachi)實習高壓直流(HVDC)輸電技術及規劃；第參章節則是實習心得，說明高壓直流輸電技術及相關電力設備之發展；第肆章節為建議本公司應用高壓直流輸電技術於離岸風力輸送時，規劃上應注意事項。

關鍵詞：

高壓直流輸電 (High Voltage Direct Current, HVDC)

閘流體 (Thyristor)

閘極絕緣雙極性電晶體 (Gate Insulated Bipolar Transistor, IGBT)

線頻換向整流器 (Line-Commutated Converter, LCC)

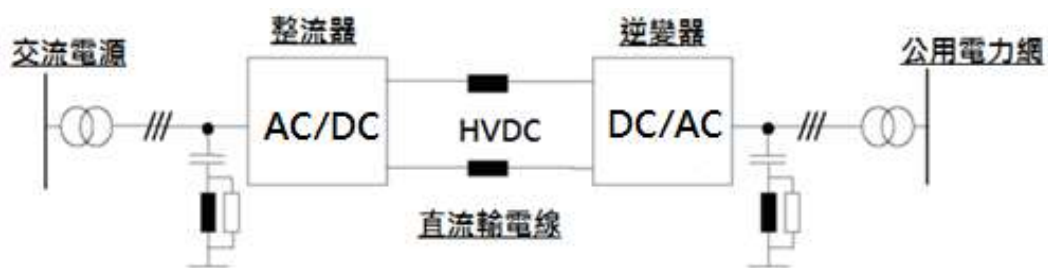
電流源轉換器 (Current Source Converter, CSC)

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

壹、出國目的

公司為配合政府提升再生能源佔比政策，規劃未來15年投入3300億元於離岸風力發電，如能有效地將電力從遠離陸地之風場傳輸回陸上與電力系統併聯，可將投資效益最大化。高壓直流輸電相較於交流輸電具有長距離、低損失及無虛功損耗等優勢，隨著電力電子技術日新月異，利用耐高壓之高功率可控電子開關切換，將高壓直流輸電技術實際上運用於公用電力傳輸事業。

應因環保需求，國內發電廠皆需遠離負載中心設置，如此將造成輸送電力時線路損失增加，另外配合離岸風力建置，交流電力以海底電纜傳送，有距離上的限制需考量，為更彈性及靈活地依電力供給狀況規劃輸電系統，本公司有必要了解國外高壓直流輸電之技術及作法，以增加未來電力傳輸方式之選項。本文將就本次出國研習有關高壓直流輸電技術，以及參訪日本日立公司之目的、行程與心得作完整說明，並於文末提出建議事項，作為本公司規劃高壓直流輸電系統所時參考。



圖_1 高壓直流輸電架構

貳、出國行程

本次出國行程及實習內容如下：

- 一、107年11月19日：往程（台北－日本東京）
- 二、107年11月20日~11月23日：（宿於日本東京）
研習高壓直流(HVDC)輸電技術（日立公司）
- 三、107年11月24日：返程（日本東京－台北）



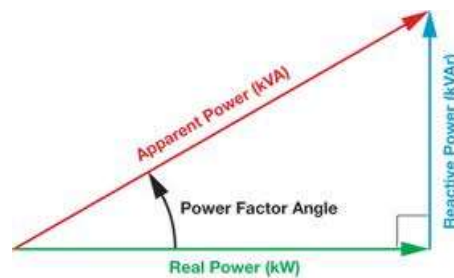
叁、實習心得

一、交流輸電與直流輸電之比較

(一) 交流輸電系統

電力發展初期，以交流或直流方式輸電各有其擁護者，但隨著變壓器的發明，利用法拉第電磁感應定律改變交流電壓大小，使交流電力可在傳輸時，得以提高電壓降低電流，從而降低線路傳輸損失(I^2R)以提升效率，再逐次降低電壓供用戶使用。交流輸電方式因具有升壓降低線損、相關設備及控制與保護技術成熟等優點，因此主導了傳統的電力網的建置。

交流輸電系統中，因其時變電場故整體呈現非純電阻性，電流相角會有領先(電容性)或落後(電感性)電壓相角之現象，亦即將產生無功功率(Q，reactive power，VAR)。無功功率在交流系統建立磁場，使得發電機與變壓器得以運作，但是電壓與電流波形的相位差 ϕ (功率因數，Power Factor= $\cos \phi$) 同時影響了電力傳輸效率。交流電力線上傳輸之功率為視在功率(S，電壓及電流有效值乘積，VA)，其包含實際作功的能量傳輸實功率(P，real/active power，W)及前述之無功功率，關係式為 $S=P^2+S^2$ ，若功率因數太低，將使壓降提升而影響系統穩定度。



圖_2 功率因數向量圖

若輸電線距離太長，架空線路部分因對地雜散電容效應及電纜部分則因其本具電容性，都將使線路末端電位升高，因此線路絕緣設計更加嚴苛。

隨著用電需求增加，於交流系統中增加電源將使故障電流增加，若超過

斷路器遮斷容量時就必需予以提升汰換，確保系統發生故障時能將故障點隔離，以維持系統穩定。

交流電力系統頻率有50Hz及60Hz兩種，在使用不同頻率之電力系統因其不同步，故無法直接併聯，在日本關東及關西地區電力系統屬此類狀況，電力緊急調度時極不靈活。

在電力調度中，交流系統互聯是不可避免的，其併聯限制條件為：

1. 互聯時兩系統是否可以同步運轉。
2. 互聯後是否會使故障電流超過原先設計值。
3. 以電纜連接時(特別在海底電纜的情況)，是否超過電纜本身的載流能力。

而這些限制都可以以直流輸電方式,得到解決方案。

(二) 高壓直流輸電系統

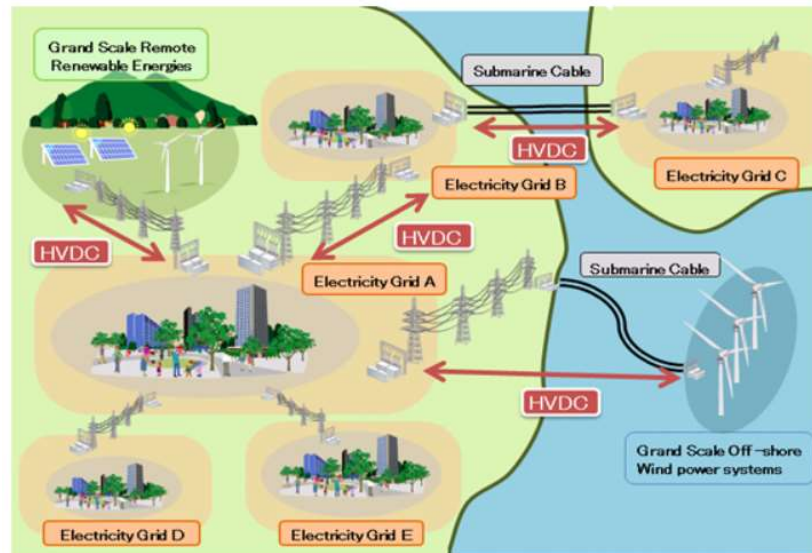
提升輸電效率是直流輸電技術發展的主因，因為在傳輸相同功率的情形下，直流線路損耗的功率小於交流線路的功率損耗，而且此差異在運用高壓直流輸電技術時更加明顯。直流輸電技術重心在於發展可承受高壓及高功率之換流電子開關，因閘流體(Thyristors)、閘極絕緣雙極性電晶體(IGBTs)等可控開關技術的成熟，增加了高壓直流輸電的競爭力與實用性。

直流輸電系統相較於交流輸電，需要額外設置由可控開關及濾波設備所組成之換流站，而這些造價不菲的換流站在成本效益分析下，降低了其設置之可行性，因此只有在長距離及大容量的送電需求時，利用高壓直流輸電才具經濟性。

相較於交流至少需要三條導線來傳輸電力，直流輸電一般採用兩條導線來輸電，且當一條導線故障時，仍可以以一條導線來傳輸50%的電力(利用大地或海水當回路線)，相同輸電距離下，導線設置成本及線路損失降低33%。因此，在經濟評估中，輸電距離是其中最重要的因素，唯有距離達到一定的

break and even程度，高壓直流輸電才有設置的價值(一般而言，損益平衡點架空線路約在600-800公里以上，電纜輸電部分則因具較高的虛功交換，約在50-100公里)，但隨著電力電子技術的進步讓換流站的造價逐漸降低，此平衡點亦逐漸縮小。高壓直流輸電技術因其特性，應用範圍如下所述：

1. 運用於海底電纜輸電時不需考量距離因素。
2. 兩個不同頻率的電力系統可以利用back-to-back的換流站聯結。
3. 利用高壓直流輸電技術聯結時，各交流系統的短路容量不會增加。
4. 利用直流互聯時可以作為交流系統的備用電源。



圖_3 HVDC應用

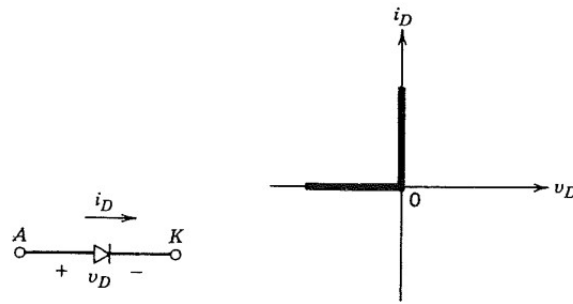
二、電力電子技術

(一) 電力功率半導體元件

1. 二極體(Diode)

二極體之電路符號及理想 V-I 特性曲線如圖 4，當二極體陽極(A)-陰極(K)為順向偏壓時($v_D > 0$)導通，逆向偏壓時關閉， $i_D = 0$ ，亦即導通及截止

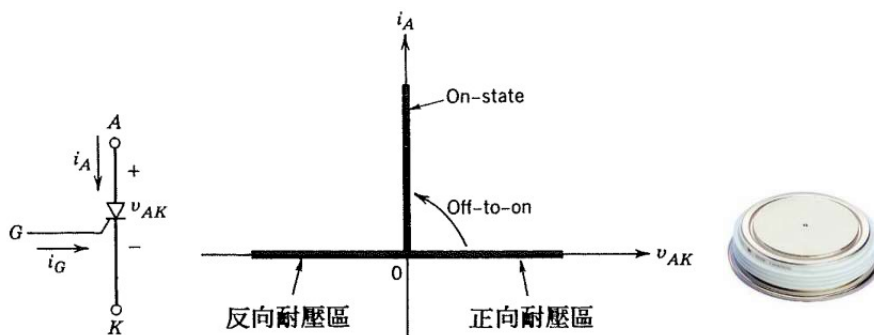
由電力電路決定，為不可控之開關元件，不適用於 HVDC 轉換系統。



圖_4 二極體電路符號及理想特性曲線

2. 閘流體(Thyristors)，或稱矽控整流器(SCR)

閘流體之電路符號及理想 V-I 特性曲線如圖 5，當閘流體陽極(A)-陰極(K)為順向偏壓時，再由控制信號由閘極(G)注入電流 i_G 後導通，此時若移除觸發電流 i_G ，閘流體仍維持導通。閘流體導通後特性如二極體，截止無法由閘極控制，唯有使流經閘流體的電流降為 0 ($i_D=0$)時才能使其截止，亦即逆向偏壓時關閉。閘流體導通由控制信號觸發，利用改變其開始導通的相角(相位控制)來控制其輸出電壓的大小。截止需藉助電力電路，故其為半控之開關元件。目前單個 SCR 額定容量超過 8KV 和 4KA。



圖_5 閘流體電路符號及理想特性曲線

3. 閘極絕緣雙極性電晶體 (Gate Insulated Bipolar Transistor, IGBT)

IGBT 之電路符號如圖 6，其具有高阻抗的閘極，只需微小的能量即能

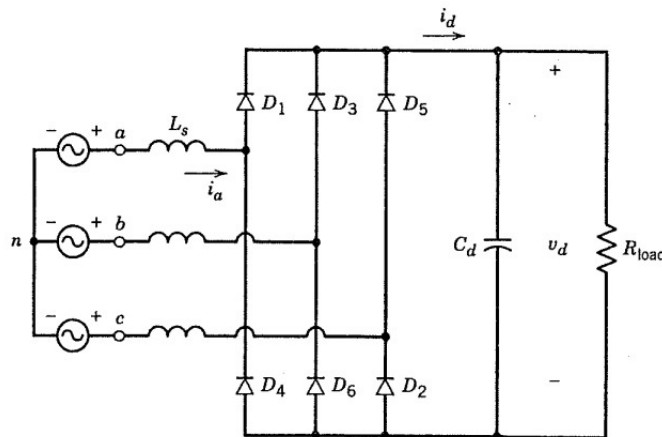
觸發開關，且即使在高電壓下，其導通電阻低，另其具反向耐壓能力。IGBT 為可控式開關，其需藉由很小的功率當控制信號(電壓源，一般 10~15V)給閘極，閘極對射極產生順向偏壓時來導通，當移除閘極電壓時 IGBT 截止。IGBT 的切換速度快，但亦因如此其切換損失亦較大。



圖_6 IGBT 及電路符號

(二) 三相全波橋式整流

電流由一個電子閥(開關)切換至另一個閥的過程稱為換向過程，下圖7為三相全橋式整流器，一開始AB相透過D1及D6導通，隨後D2順偏，D6自然換相至D2，此時AC相透過D1及D2導通，以此類推導通順序為D6D1→D1D2→D2D3→D3D4→D4D5→D5D6→D6D1→... 周期性的完成開關循環。每個閥各自承擔1/3周期的直流電流，並且總是上下各一個開關同時導通，若下部或上部兩個閥同時導通時，將造成相間短路而換向失敗。



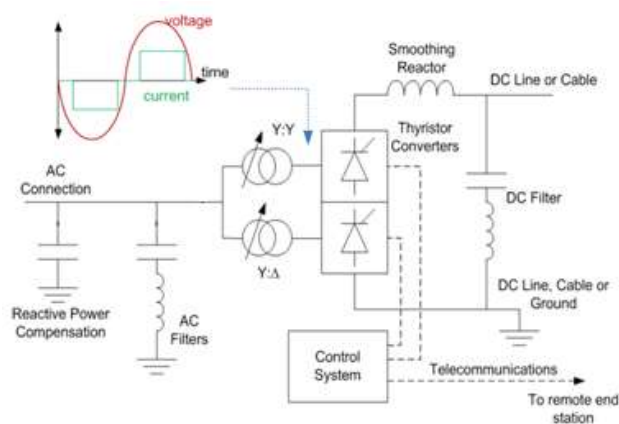
圖_7 三相全橋式整流器

三、高壓直流輸電系統架構

(一) LCC-CSC HVDC (Thyristor Based)

LCC(Line-Commutated Converter)是HVDC系統中建置最多、技術相對成熟的轉換器架構，它是以閘流體為換流閥，下圖8為一典型三相LCC HVDC 12脈衝(由兩個6脈衝三相全橋組成)架構方塊圖，包含了在DC側一具大型的電感器，使DC側變成一個穩定的直流電流源(故另稱為CSC, Current Source Converter)。另因閘流體導通角造成直流電壓及電流間的相角差，且換向頻率與電力系統頻率相同，造成嚴重諧波，故在DC側需裝置濾波器以消除諧波。

LCC需要運作於一個強健的AC系統，並利用AC系統無效功率來換相，因此在LCC-HVDC系統交流側部分，需裝設無效功率補償電容及交流濾波器提高電力品質，在換相變壓器部分裝置雙繞組變壓器，一繞組Y接一繞組 Δ 接，各別接至正極橋及負極橋，此一接法可提供變壓器輸入與輸出 30° 相角偏移。



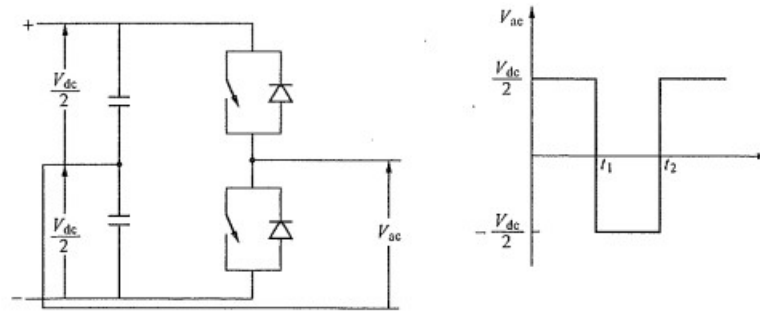
圖_8 LCC-HVDC架構圖

當LCC需設置一個控制系統提供閘極觸發信號，為整流模式(converter AC-DC)操作時，閘流體的觸發角介於 0° - 90° ，此時為正DC電壓及電流，電力潮流由AC側往DC側。為變流模式(inverter DC-AC)時，閘流體的觸發角介於 90° - 180° 。此時為負DC電壓及電流，電力潮流由DC側往AC側。

(二) VSC HVDC (IGBT Based)

相對於LCC對無效功率需求大、具低次諧波電流、逆變器有換向失敗的風險及需依靠足夠強的AC系統供換向電壓，採自換向(Self-Commutated)電壓源換流方式的VSC-HVDC可以解決上述問題。採用更先進的全控開關切換，結合脈衝寬度調變切換技術(PWM)決定變流器輸出電壓的頻率及振幅的大小。

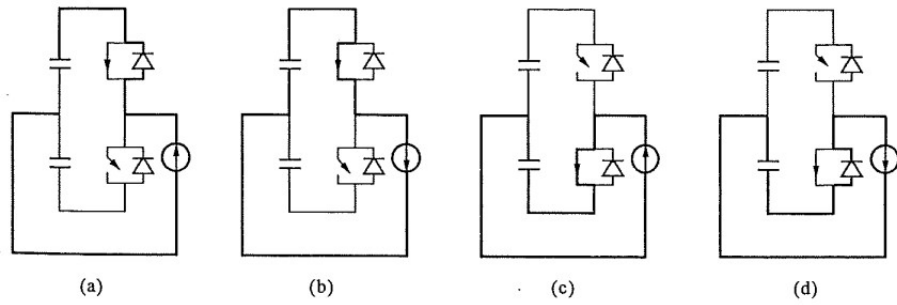
VSC的運作原理如圖9所示，一單相VSC交流側在兩個離散電壓水平($+V_{dc}/2$ 和 $-V_{dc}/2$ ，2-level)間切換及相應的電壓輸出波形，閥的導通周期為 180° 電容器的中點作為交流輸出電壓的參考點。由於固態開關是單向導通，因此需反向並聯二極體以保證整流橋的單極性，電流可以在兩個方向移動。二極體是為能量由交流側傳送至直流側(即整流)所需，提供交流電對電容器充電路徑。



圖_9 單相 2-level VSC

單相2電壓水平的換流器有4條可能的電流路徑如圖10所示，當上方開關閉合輸出電壓為 $+V_{dc}/2$ ，如果電流為負(圖10-a)則電流流經上方並聯二極體，如果電流為正(圖10-b)則流經上方開關；若下方開關閉合輸出電壓為 $-V_{dc}/2$ ，如果電流為負(圖10-c)則電流流經下方開關，如果電流為正(圖10-d)則流經下方並聯二極體。兩個開關在一個開關閉合之前，另一個必須立刻斷開，若兩個開關同時閉合導電將使電容器短路。

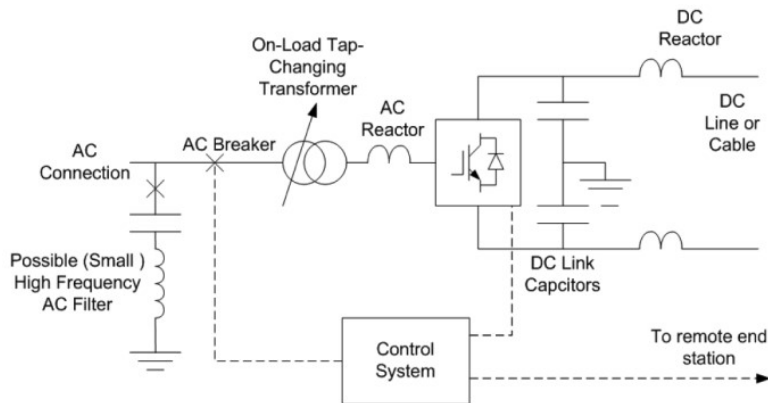
當上方開關斷開後，若不立刻將下方開關閉合時，將產生電流延遲亦即產生無效功率，由此可知，當VSC當作功率因數為1的整流器時，只有二極體導通電流，反之，VSC當功率因數為1的逆變器時，只有可關斷元件導電。



圖_10 單相 2-level VSC電流路徑

典型的VSC-HVDC架構如圖11所示，直流電容器使得直流側為完全電容性，以穩定直流電壓。若交流電源是一個很強的系統(即與換流器容量相比短路容量很大者)，交流系統與換流器間需要設置一耦合電抗以減小故障電流及穩定交流電流。

自換向換流器的開關經常處於關閉或完成開啟狀況，為了承受HVDC高的額定電壓，換流器閥由大量串聯的IGBT所組成，一個典型IGBT模組由單個開關元件、阻尼回路及閘極驅動回路(包含過電壓、欠電壓及過電流保護)所構成，並把IGBT安裝於獨立散熱器上與阻尼電阻隔離以確保高穩定度。



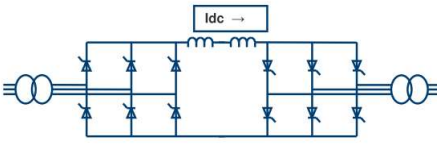
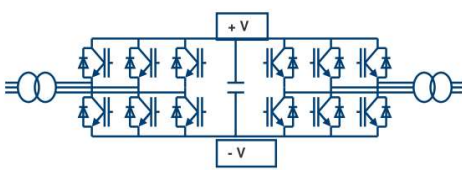
圖_11 VSC-HVDC架構

(三) CSC與VSC之比較

CSC與VSC間最主要的區別在於VSC換向不需要交流電壓源且實際上是瞬時換向的，CSC換相持續時間取決於電壓源水平及換向電抗(換流變壓器漏抗為主)，因此即使是開通觸發角為0，CSC亦消耗無效功率，其值可能達到換流器有效功率的50~60%。CSC無功功率的需求隨著轉換有效功率的大小而變，是隨著負載而變動，因此換流器的濾波器及Q值補償需配合調，但VSC能提供無效功率(+Q或-Q)且與有效功率傳送無關。

CSC換流器在交流系統短路時會造成換向失敗，電力傳輸將中斷，相同條件下，VSC沒有這樣的弱點，能繼續傳送有效功率，唯傳送的大小將受限。

CSC與VSC差異整理如下表1。

CSC	VSC
	
<p>換流閥使用半控開關閘流體組成，可以耐受各極性電壓，靠外部電力回路移除來關斷換流閥，換流損失較小。</p>	<p>換流閥使用全控開關IGBT組成，可以通過雙向電流，以控制回路操作換流閥的turn-on及turn-off，因開關頻率高，換流損失較大。</p>
<p>輸出電壓可以改變正負極以變換電力潮流方向。</p>	<p>輸出電壓極性不變。</p>
<p>電流方向不變。</p>	<p>改變電流方向以變換電力潮流方向。</p>
<p>能量儲存於電抗器。</p>	<p>能量儲存於電容器。</p>
<p>用於較高的電力容量傳輸，需要較強的AC系統，具較高的過載容量。</p>	<p>可操作於較弱的AC系統，傳輸較低的電力容量，過載容量低。</p>

CSC	VSC
可控性較弱。	可控性強。
產生諧波失真，AC及DC側需濾波設備，換流站空間需求大。	僅微小的諧波產生，不需設置濾波設備，換流站空間需求小。
無法全黑啟動，需另設置額外的裝置。	具全黑啟動能力。
需設置換流變壓器。	設置傳統變壓器。
換流站建置成本較低。	換流站建置成本較高約10~15%。
技術較成熟。	相關技術持續發展中。

表_1 CSC與VSC比較表

四、HVDC 應用於離岸風力傳輸

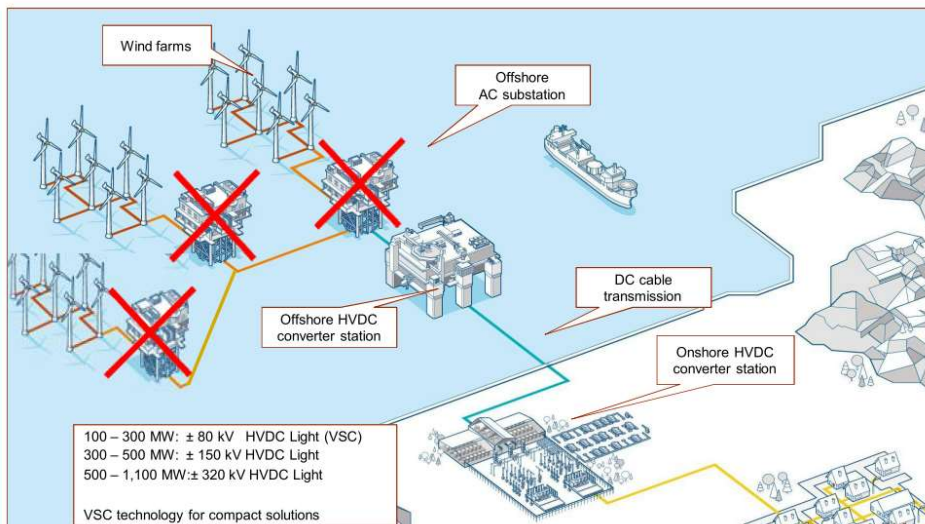
日立公司在2014年底與ABB公司針為在日本推動HVDC解決方案，簽訂了合資同意文件，本次參訪行程，日立公司方面特別安排ABB公司對HVDC有深入研究的MR. Alvarez,Fidel，針對HVDC運用於離岸風力輸電技術做詳細的說明。

HVDC技術在歐洲大陸運用廣泛，ABB公司參與了眾多HVDC建置專案，其中在離岸風力輸電方面，係主要利用VSC技術(ABB商標為HVDC Light)來規劃為轉換(converter)站及逆變(inverter)站。ABB的研究指出，利用HVDC輸送離岸風力，相較AC輸電，可減少海上變電站設置數量及海纜敷設數量。此外，VSC技術相較於傳統CSC技術，因其切換頻率高使得諧波問題大幅降低，故不需設置DC側的濾波器，將可大幅縮小海上轉換站面積需求，設置難度可隨之降低。綜上，ABB建議以VSC技術，在輸電距離超過50公里的狀況下，是現階段離岸風力輸電規劃中務實且可行的解決方案。

在設置成本費用部分，在研討中MR. Alvarez,Fidel表示因為HVDC建置係以

專案(Project)型式辦理，在建置成本估算部分，業者(即電力公司)應先行提出需求，亦即提供利用何種電壓等級輸送多少電力，風場位置及輸送距離等相關參數，才能較精準地估算成本。

在AC系統中，當故障發生時，保護電驛偵測到故障送出跳脫信號啟斷路器(Circuit Breaker)以隔離故障。在HVDC系統中，在DC側以功能考量，僅設置隔離開關及接地開關，不設置斷路器(因為直流斷路器相當昂貴)，斷路器設置於AC側，當DC側發生故障時，係利用VSC開關將故障隔離，當AC側發生故障時，則啟斷AC斷器將故障隔離。



圖_13 利用HVDC技術將可減少海上變電站設置-(ABB)

綜合本次實習內容，HVDC技術應用於離岸風力傳輸結論如下：

- (一) 離岸風力係將風機設置於海上，再經升壓站將利用海底電纜將電力輸送回陸地併網，一般而言，輸電距離超過50公里者，因電力電纜的電容性呈現，將使電纜絕緣不足，此一情況下，高壓直流輸電是唯一可實現的解決方案。
- (二) 近期VSC-HVDC發展的重點在於提升功率等級，雖然換流站造價較高，但綜合考量下，VSC是較適合用於離岸風力傳輸，因為其具下列特性：
 1. VSC-HVDC在陸上逆變站可提供一獨立控制的無效功率，而且允許

在電力電網薄弱處進行併網。

2. VSC-HVDC設置後，幾無增加原系統故障電流容量，因此斷路器遮斷容量不需提升。

(三)海上設置離岸換流站工程需依環境控制做評估，將人員及零件運送到現場將佔據維護成本的大部分，因此需採用考量低維護周期系統及能有效地利用海上平台空間設置換流站。



圖_13 海上換流站-(ABB)



圖_14 VSC 閥廳-(ABB)

五、HVDC 與 STATCOM 電氣試驗比較

HDVC與STATCOM的關鍵技術皆在利用VSC技術實現實功率與虛功率的轉送，在IEC Standard有關電氣測試規範中，除高壓測試(IEC 60060)及絕緣協調(IEC60071)引用一致外，HVDC VSC電氣試驗引用規範為(IEC62501)；STATCOM電氣試驗引用規範為(IEC62927)，經研讀前述電氣試驗(形式試驗)規範，其主要差異如下：

- (一) 在短路電流試驗部分，HVDC VSC為必要項目，STATCOM為選擇性(Optional)項目，本試驗是在檢驗閥組件必需設計能耐受短路過電流在數週波時間，此段時間係使AC斷路器能啟斷清除故障。(第12節規定)
- (二) HVDC閥元件需做最小直流電壓試驗，STATCOM閥元件需作最小啟動電壓

試驗。(6.6節規定)

(三) 在閥元件支持構件(valve support)部分，除AC、DC電壓試驗及脈衝試驗(lightning impulse)外，HVDC VSC需加做開關脈衝(switching impulse)試驗。(IEC 62501第7.3.3節規定)

(四) 在閥組元件(MVU，Multiple Valve Unit)部分，除AC、DC電壓試驗及脈衝試驗(lightning impulse)外，HVDC VSC需加做開關脈衝(switching impulse)試驗。(IEC 62501第7.3.3節規定)

TYPE TEST	IEC62501(HVDC)	IEC62927(STATCOM)
Maximum continuous operating duty	◎	◎
Maximum temporary over-load operating duty test	◎	◎
Minimum d.c. voltage test	◎	-
Minimum start voltage test	-	◎
Valve support d.c. voltage test	◎	◎
Valve support a.c. voltage test	◎	◎
Valve support switching impulse test	◎	-
Valve support lightning impulse test	◎	◎
MVU d.c. voltage test to earth	◎	-
MVU d.c. voltage test	-	◎
MVU a.c. voltage test	◎	◎
MVU switching impulse test	◎	
MVU lightning impulse test	◎	◎
Valve a.c. - d.c. voltage test	◎	◎
Valve a.c. voltage test	-	◎

Valve switching impulse test	◎	◎
Valve lightning impulse test	◎	-
IGBT overcurrent turn-off test	◎	-
Short-circuit current test	◎	◎(optional)
Test for valve insensitivity to electromagnetic disturbance	◎	◎

表_2 HVDC VSC與STATCOM VSC形式試驗項目比較表

肆、建議事項

- 一、在智慧電網(Smart Grid)中，彈性交流輸電系統(FACTS)和高壓直流輸電(HVDC)都可以增加輸電線傳輸功率的能力，FACTS 與 HVDC 間的界線在於輸出的波形(AC 或 DC)，但兩者在電力系統中應可以相輔相成，在 HVDC 控制系統結合 FACTS(如 SVC 或 STATCOM)設備，打造更加靈活的電力系統。HVDC 在國內尚無相關建置專案計畫，在各項設備規範等資料仍未盡齊備，因此，建議應未雨綢繆，建立相關資料庫以備不時之需。

- 二、依國內地形及電廠佈建現況，南電北送、中電北送等情形無法避免。配合陸上設置輸電線路受限於環評法擴建困難，HVDC 理論上無輸電距離的限制，利用海路輸電應是可考慮的方案。

- 三、雖然以國內輸電線路長度及電力系統架構來看，陸上型 HVDC 實務上很難達到建置損益平衡點，但如將 HVDC 技術納入離岸風力輸電的選項中，將可在風場選址及輸電方式增加彈性。國外 HVDC 輸電系統及相關應用是以專案工程(Project)方式進行，建議應多搜集相關專案工程計劃及契約內容預作準備，以因應不時之需。

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，目前公司已開始規劃符合 IEC 61850 規範之新建變電所，HVDC 控制亦需電力通信系統輔助，因此在規範研讀及商品化設備的評估等，需跟上國際間的腳步，以奠定本國電力電網邁向智慧電網的基石。