

出國報告（出國類別：實習）

離岸變電站之技術發展與應用

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：陳瑞川 電機工程師

派赴國家：德國

出國期間：107.09.26~107.10.05

報告日期：107.11.22

目錄

第1章 實習計畫與目的	1
第2章 出國行程.....	2
第3章 實習心得	3
第1節 海上變電站之氣體絕緣開關設計.....	3
第2節 陸域高壓直流變流站設計.....	8
第4章 心得與建議	13

圖目錄

圖一：ABB 哈瑙工廠一景	3
圖二：與 ABB 接待人員合影	3
圖三：廠區內之 ELK-04 模型	4
圖四：ELK-04 GIS 外觀尺寸	4
圖五：C5-PFK 與 SF ₆ 介電常數比較	5
圖六：整合型 GIS 概念圖	6
圖七：工廠內展示之 IGA 模型	7
圖八：Dolwin 3 HVDC 變流站外觀	8
圖九：與 GE 接待人員合影	8
圖十：Dolwin 3 離岸風場架構圖	8
圖十一：直流與交流傳輸在價格與傳輸距離上之比較	9
圖十二：HVDC 傳輸示意圖	10
圖十三：PWM 調變方式轉換直流電	11
圖十四：使用 Chain Link 技術轉換直流電	12
圖十五：Dolwin 3 HVDC 變流站內的 IGBT 閥	12

表目錄

表 1： 170kV ELK-04 與 ELK-04c 體積比較	4
表 2： 各絕緣氣體 GWP 值比較表	4
表 3： HVAC 與 HVDC 比較表	10
表 4： 國內外開關設備尺寸比較表	14

第1章 實習計畫與目的

為配合政府發展再生能源供電政策，台電公司目前正積極推動我國離岸風力發電計畫，根據離岸風力發電第二期計畫，未來將於彰化縣線西鄉、鹿港鎮、福興鄉與芳苑鄉外海進行總裝置容量約數百MW的離岸風場建置計畫。因此了解如何規畫可靠、安全、經濟及便於運轉維護的海上變電站之課題甚為重要。

由於本公司尚無規劃海上變電站之實績，故有必要前往已有建置海上變電站經驗之先進國家或設備製造廠商，學習其經驗與技術，有助於本公司未來在海上變電站之設計規劃上提供更明確之方向。

本次出國計畫為前往ABB位於法蘭克福之德國分公司參訪開關設備工廠，針對關於海上變電站所使用之開關設備了解其製造細節與技術發展；以及參訪GE德國分公司目前正於Doerpen發展中之陸域高壓直流變流站，藉由現場觀摩陸域變流站學習相關設備之配置方式。

歐洲各國近十年來均積極投入離岸風場建設，海上變電站規劃實務技術成熟，北海沿岸之離岸風場均有多件應用實績，值得派員出國觀摩實習，期許本次出國參訪能收集相關應用技術與案例，供本公司未來設計案參考。

第2章 出國行程

時間	地點	工作概要
107年9月26日～ 9月27日	桃園機場→ 德國法蘭克福機場	往程 (台北→法蘭克福)
107年9月28日～ 9月30日	ABB 德國法蘭克福分公司	GIS 工廠參訪
107年10月1日～ 10月3日	GE 德國分公司 Dolwin 3 HVDC Converter station	HVDC 及 SVC 設備配置實習
107年10月4日～ 10月5日	德國法蘭克福機場→桃園 機場	回程 (法蘭克福→台北)

第三章 實習心得

本章簡介本次實習及與廠商相互交流之過程，內容包括使用於海上變電站之氣體絕緣開關設計及陸域高壓直流變流站等觀摩心得。

第1節 海上變電站之氣體絕緣開關設計

本次實習首先拜訪的是 ABB 公司位於德國哈瑙（Hanau）之 GIS 工廠，該工廠主要生產 52kV 至 170kV 級的開關設備，距離法蘭克福約有 40 分鐘的車程。當進入工廠內會議室時，ABB 接待人員首先介紹的是工廠內的各項安全措施、場內參訪的應注意事項以及發生火災事故等意外時人員的逃生路線和集合地點，可見歐洲國家對於工作環境與安全衛生管理的重視，相當值得本公司及國內廠商學習。



圖一 ABB 哈瑙工廠一景



圖二：與 ABB 接待人員合影

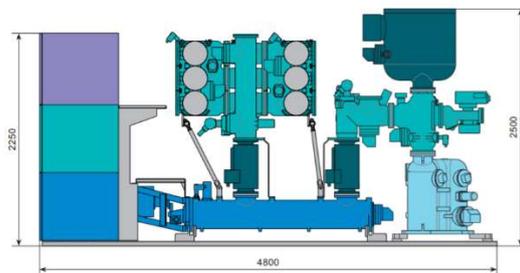
為因應全球暖化與氣候變遷，世界各國紛紛投入再生能源的開發與設置，近年來風力發電已逐漸成為各國再生能源發展的重要選項之一。而風力發電在應用上可分為陸域風電與離岸風電，陸域風電由於土地使用空間的限制以及發電效率等因素，開發已漸趨飽和，雖然離岸風力發電成本比陸上的發電成本高出 50%，但是由於離岸風力發電可以獲得較大的風力能量，而且對於視覺影響較小，因此仍然引起許多國家重視並積極將風電發展方向由陸域風電轉向發電量更大更穩定的離岸風電。理論上每離岸 10 公里，風速會比岸上多 25%以上，而每增加 10%的風速，會增加 30%的電力輸出。而當風場

規模增大且與陸岸距離遙遠的時候，就需要設計離岸變電所（offshore substation，簡稱 OSS）將電力傳輸到陸岸。而變電所的佈局方式是先把每個風場連接至變電所，由變電所提高電壓後送至 offshore DC Converter 改成高壓直流（high-voltage direct current，HVDC）後輸送到陸岸與陸上的電網相連。由於離岸變電所的建設成本昂貴，且與岸邊相距超過數十公里甚至一百公里之遠，因此在簡化離岸變電站的設備配置就形成相當重要的課題。

離岸變電站之各項設備與陸上變電所大致上雷同，但在設備的規劃方面有一些注意事項必須要考量，例如設備應要朝輕量化、模組化、低故障率及低維護保養周期的層面去設計。有鑑於此，ABB 公司配合離岸變電站的設置需要，其 GIS 設備亦朝模組化設計，以電壓等級 145kV 的 GIS ELK-04 與 GIS ELK-04 compact 為例，其 compact 版本的檔位所需空間相對縮小了大約 24%，且在工廠組裝試驗完畢後可將整個檔位的 GIS 作一次性的運輸，如此一來可減少 40%的安裝跟測試時間，這在離岸變電站的使用上將大有優勢。



圖三：廠區內之 ELK-04 模型

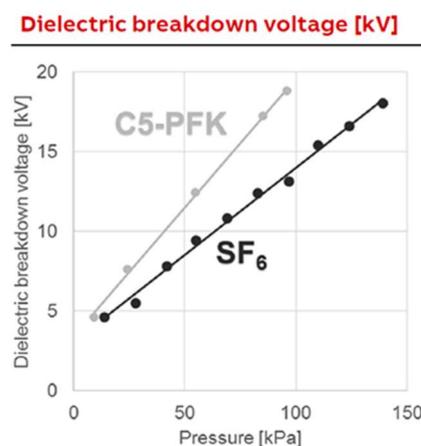


圖四：ELK-04c GIS 外觀尺寸

表 1：170kV ELK-04 與 ELK-04c 體積比較

	長 (mm)	高 (mm)	寬 (mm)
ELK-04	3,600	2,900	1,200
ELK-04 compact	4,800	2,500	800

ELK-04 的氣體絕緣開關設備是使用六氟化硫（SF₆）作為絕緣氣體，近二十年來由於 SF₆ 氣體的物理性質穩定，在電氣設備上被廣泛使用在介電隔離和啟斷消弧的用途。但 SF₆ 氣體是屬於溫室氣體之一，其全球暖化潛勢（Global warming potential，簡稱 GWP）值高達 23,500，不僅會對全球暖化造成影響，若管理不當或沒有按正確的方法對其進行回收處理，將會導致 SF₆ 氣體及在高溫電弧作用下產生的有毒分解物排放到大氣中，會給人類賴以生存的環境帶來污染和破壞，而透過這次參訪得知 ABB 公司目前正積極的發展創新的絕緣氣體 AirPlus。AirPlus 是 ABB 公司在發展新生態開關設備 (Eco-GIS) 中所使用的氣體混合物，其中最主要的成份 C5-PFK 是由 ABB 公司與 3M 公司所共同研發的化學化合物，C5-PFK 的 GWP 值遠小於 1，若是不小心外洩，在空氣中也只需要幾天的時間就可以自然分解，而 C5-PFK 的化學性質相當穩定且不可燃，目前在瑞士蘇黎世 EWZ 變電所已經有 24kV 的 AirPlus GIS 使用實績，該公司也正逐步的研發應用在高壓開關設備上，未來有望逐步取代 SF₆ 成為絕緣氣體的主流介質。而 C5-PFK 另一項關鍵的重點在於其氣體的介電常數高於 SF₆ 氣體，在相同的電壓等級下，AirPlus 有更好的絕緣性能，甚至未來有機會可以設計出體積更小的 GIS 設備，對於未來在離岸變電站的空間規劃上會更加靈活。



圖五：C5-PFK 與 SF₆ 介電常數比較

表 2：各絕緣氣體 GWP 值比較表

	Lifetime [年]	全球暖化潛勢 (GWP) 值
C5-PFK	0.04	<1
CO ₂	--	1
CH ₄	12.4	28
SF ₆	3,200	23,500

如同之前所述，離岸風力變電所結構複雜，成本昂貴，且安裝船隻的數量不足，因此在縮短安裝時程的環節上也是相當重要的課題之一。ABB 公司針對一些特殊地形，特別開發了一種整合型的開關設備（Integrated GIS applications，簡稱 IGA）。此種整合型的 GIS 已經有標準化的生產流程，與傳統變電站相比，整合型 GIS 可大幅縮減安裝週期。在為離岸變電站安裝設備時能快速建置電網，滿足用電需求，相當適合成為工程安裝週期短的解決方案。

IGA 的概念在於將開關設備、控制及保護裝置設備以及其他輔助設備通通建置於類似貨櫃的外箱當中，使整個開關設備更具體呈現了模組化的概念，它有完全預置好的控制保護裝置以及套管接頭，可便捷地運送到工作現場並加入系統，是特殊地形的理想應用方案，當然也適合用於離岸變電所當中。



圖六：整合型 GIS 概念圖



圖七：工廠內展示之 IGA 模型

依照不同的風場裝機容量，離岸變電所也會有著不同的規模，有些變電所採取三腳架支撐結構，有些則採取單樁支撐結構，不同的設計原理造成變電所也會有明顯重量差異，除了變電站既有的設備之外，整流系統也使用了大量的電力電子元件，以致設備層總重量高達 15,000 噸以上，因此在離岸變電站的空間配置與設備的選擇上變成為了相當重要的層面。透過開關設備廠商在設備體積方面的表現，也能讓離岸風力供電的建置可以有進一步的突破。

第2節 陸域高壓直流變流站設計

現今海上變電站之電力不外乎透過高壓交流(HVAC)或高壓直流(HVDC)經海底電纜傳送至陸域輸電網，過去直流輸電受限於升壓技術，以致不適用於遠距離電力傳輸，然而隨電力電子技術之發展，已能克服過去之限制，此二種傳輸方式中最重要之評量數據就是傳輸距離，本次實習的第二站便是來到位於德國北部的德爾彭(Doerpen)，參觀 GE 公司在此地建置的 Dolwin 3 高壓直流變流站。

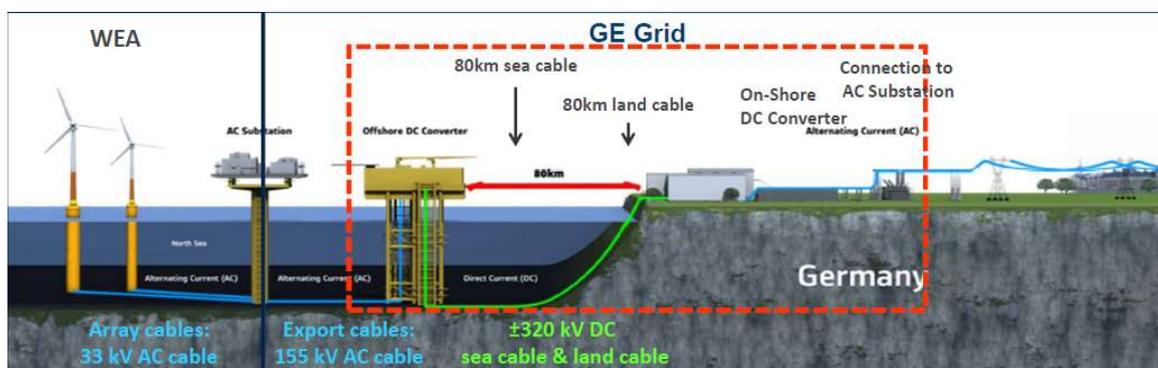


圖八：Dolwin 3 HVDC 變流站外觀



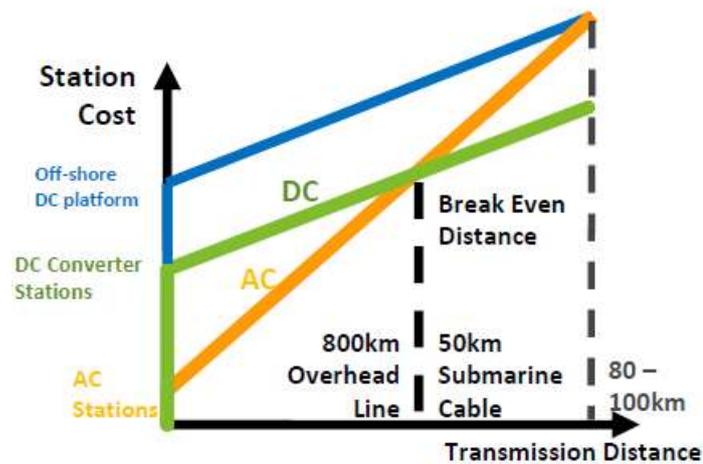
圖九：與 GE 接待人員合影

德國北部的北海地區有相當充沛的風力資源，近幾年德國已在此地建立多個離岸風場。本次所參觀的 Dolwin 3 HVDC 變流站便是由坐落於北海當中、距離岸邊約 80 公里的 Dolwin 3 離岸風場所產生的 33kV 交流電，經過升壓至 155kV 交流電後再經直流轉換器變電站轉換成 330kV 直流電，之後藉由 83 公里的海底電纜傳輸至岸上約 79 公里的陸上電纜，再連結於此變流站。



圖十：Dolwin 3 離岸風場架構圖

如前所述，Dolwin 3 風場的電力需要傳輸超過 80 公里的距離才能到達岸上，而經研究發現，在長距離輸電過程中，使用直流輸電技術的損耗低於傳統交流輸電技術，同時直流傳輸需要的傳輸電纜更少，亦可能減少線路設備所需土地面積。因此，隨著風場規模的增大、離岸距離不斷的增加，以高壓直流方式向陸地傳送電力已經成為目前的主流方式。而當要連結兩個不同交流頻率的地區時，高壓直流也是唯一一個可以用來解決這個問題的傳輸方式。目前業界常運用的高壓直流傳輸技術主要有兩種，分別是具有線電壓換相轉換器技術的高壓直流傳輸系統(Line Commutated Converter, LCC-HVDC)以及具有電壓源轉換器的高壓直流傳輸系統(Voltage Source Converter, VSC-HVDC)。



圖十一：直流與交流傳輸在價格與傳輸距離上之比較

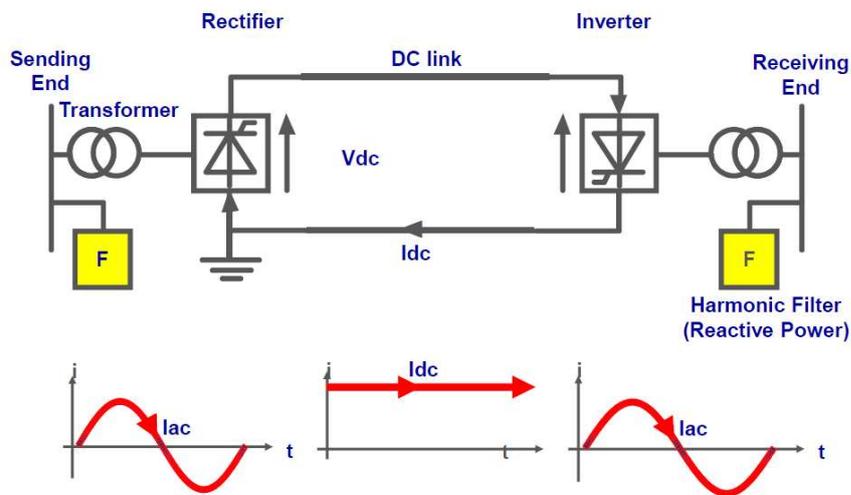
目前許多高壓直流輸電方式是從 1970 年代就開始啟用的高壓直流線整流傳輸(LCC)；但自 2000 年，利用高壓直流電壓源整流傳輸(VSC)系統的新技術則後起直追。近年再生能源興起，利用 HVDC VSC 輸電系統則有助於再生能源並網後的穩定，也使此系統的需求日益升高。海上風力發電場也可利用此技術，實現電網互連的目的。基本上 LCC 是使用單極傳輸，也就是利用海

水作為迴路，此種方式降低了傳輸成本，但也會產生一些負面影響，例如金屬管線發生電化學腐蝕、不平衡電流產生的磁場影響經過的船隻等等。

而具有電壓源整流轉換器的高壓直流傳輸技術（VSC）逐漸受到關注，此種技術應用絕緣閘雙極電晶體（IGBT）的大功率電子技術，將脈衝寬度調變的領域使用在電壓源轉換器上。隨著引進再生能源和創新在現今的電力系統中，預計 HVDC VSC 系統的需求，用於連接海上風力發電場及進行長距離的輸電技術會增加。

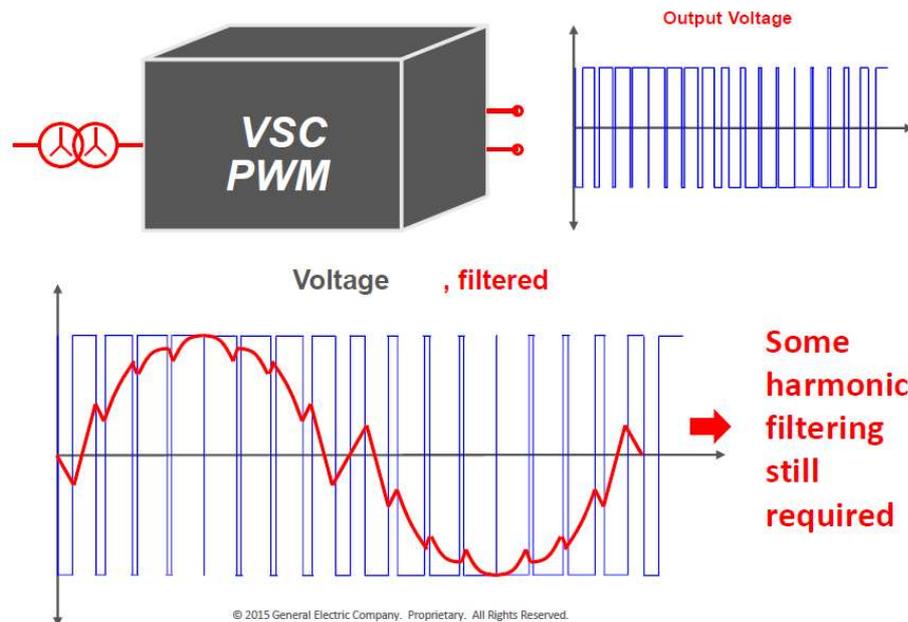
表 3：HVAC 與 HVDC 比較表

	HVAC	HVDC LCC	HVDC VSC
系統的最大有效功率	230MW(150kV) 350MW(245kV)	1200MW	1100MW
電壓	~170kV	~500kV	~300kV
傳輸功率是否與距離有關	是	否	否
系統總損耗	與距離有關	2-3%	4-6%
故障影響	有	小於 HVAC	小於 HVAC
供應至電網的技術能力	有限	有限	大範圍



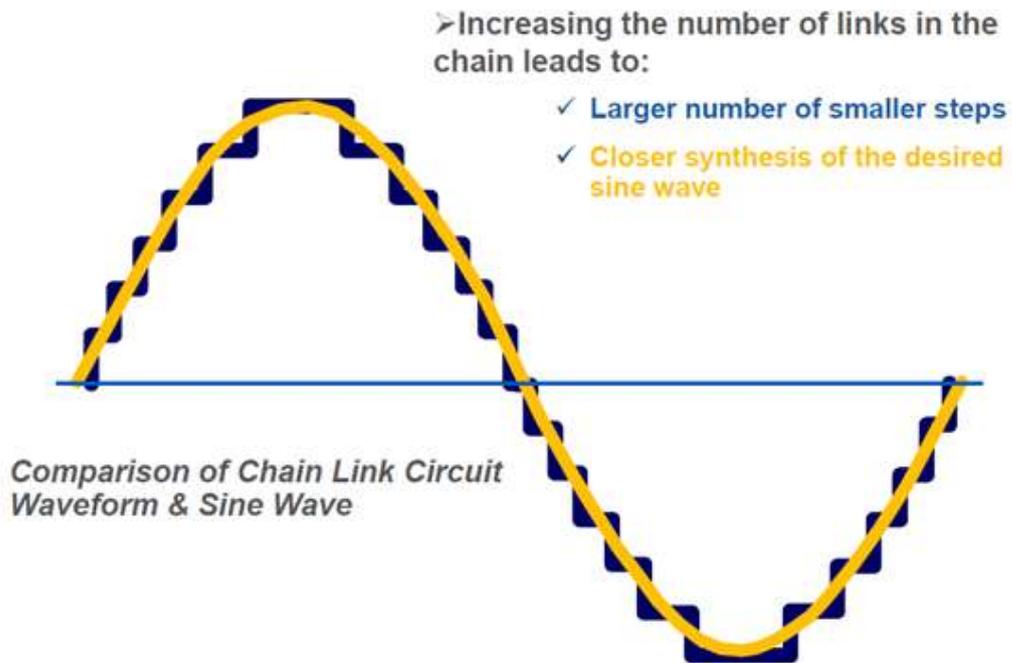
圖十二：HVDC 傳輸示意圖

電壓源整流轉換技術主要是得力於近年來高功率電力電子元件的發展，採用了大量的絕緣閘雙極電晶體(IGBT)，充分利用脈衝寬度調變技術(PWM)來抑制諧波並提供實功及虛功的控制能力，是現在 HVDC 傳輸應用的主力。傳統的 PWM 脈衝寬度調變技術在於以數位方式進行類比訊號準位的編碼。只要針對對應至類比訊號準位的特定工作週期建立方波，即可為這些訊號完成數位編碼。透過對該方波的脈波輸出電壓做 PWM 調變即可得到不同的電壓平均值，再利用這些不同的平均值還原成交流電的波形。不過這樣的方式仍然會讓波形有些許的誤差。



圖十三：PWM 調變方式轉換直流電

為了改善波形失真的問題，GE 公司採用 Chain Link 的方式來轉換直流電，Chain Link 的概念在於利用 IGBT 的導通特性作為交流與直流的轉換器，單獨一個 IGBT 可以讓輸出電壓轉換成波形漂亮的方波，而當使用大量串接而成的 IGBT 閥的時候即可將眾多的方波堆疊成相當近似正弦波的波形，使用的 IGBT 閥越多，越能完整呈現理想的波形。



圖十四：使用 Chain Link 技術轉換直流電



圖十五：Dolwin 3 HVDC 變流站內的 IGBT 閥

IGBT 的特點為高效率及切換速度快，Dolwin 3 HVDC 變流站內的 IGBT 閥相當龐大，一共堆疊了四層排架，每一層皆有光纖通訊線作狀況監控，而大量的 IGBT 閥也會產生相當的熱量，現場也配置了循環冷卻水管做為散熱使用。IGBT 的使用壽命相當長久，所以也不容易遇到故障維修的問題。

第4章 心得與建議

- 一、首先非常感謝公司以及部門主管願意給我這個機會奉派前往德國實習，目前正逢公司大力推動離岸風力的建置，也讓我有幸可以藉由這次實習參與了這個相當熱門的議題。尤其這次參訪的廠商不論是ABB或是GE都是國際知名的大廠，能夠與這些廠商的技術人員交流更是相當難得的經驗，特別是在用英文與對方交流的過程更讓本人印象深刻，這與我之前自助旅遊的經驗完全不同，透過大量的對話與討論更讓我覺得英文還有很多要加強的地方，要能與這個世界接軌就更應該多磨練自己的語言能力。
- 二、這是我第三次來到德國，對於歐洲社會並不會感到陌生，但由於近幾年的恐怖攻擊事件以及難民的湧入，讓我在出發前對於安全方面會有些顧慮，副處長以及長官們也都特別叮嚀要注意自身安全，所幸一路平安，安全歸來。在德國搭乘交通工具的時候我喜歡和鄰座的德國人聊天，我發現當我提到我來德國的目的時，當地人針對能源問題都很有自己的見解，而且也都很清楚德國目前的能源政策，他們認為關心自己國家的電力發展是天經地義的事情，這樣的人民素質多少透露出德國人務實嚴謹的民族性。
- 三、氣體絕緣開關設備已屬於國產化設備，所以目前其實很少有機會能與外國廠家針對GIS設備進行交流，但是透過這樣的參訪也能夠知道國外廠家在開關設備的努力與進步，尤其在開關設備的尺寸上面，國外廠家正朝向體積更迷你以及組裝更方便的方向前進，以目前國內廠家所設計電壓等級相近之開關設備與本次實習所參訪的設備做比較如下：

表4：國內外開關設備尺寸比較表

	長 (mm)	高 (mm)	寬 (mm)
ABB ELK-04	3,600	2,900	1,200
ABB ELK-04c	4,800	2,500	800
中興 161kV GIS	6,395	3,637	2,200
大同 161kV GIS	5,627	3,636	1,800
東元 161kV GIS	6,582	3,743	2,220

由上表可以觀察出，和國外廠家的開關設備比起來，目前國內廠商所製作的開關設備尺寸都偏大，且模組化的程度也不如國外廠家。對於離岸變電站等特殊地形而言，組裝快、體積小的開關設備的確會發揮相當大的優勢，雖然目前台電公司並沒有參與離岸風力第一階段的興建過程，但若是未來有機會參與第二階段離岸變電所的設計，則不論是ELK-04型或甚至是IGA形式的開關設備都會是我們值得注意的趨勢，也會是國內開關設備廠家值得學習的方向。

- 四、新式絕緣氣體的研發也讓未來的開關設備不論在環保層面或是絕緣等級上都能有進一步的突破，當新式的絕緣氣體研發成熟的時候或許國內廠家也能開始採用，建議未來出國計畫可以針對此類主題做更深入的研究。
- 五、隨著電力電子技術的發展，離岸風力發電的規模也日益提昇。目前台灣正以離岸風力發電作為未來能源轉型的替代發電方式。但台灣在離岸風力方面目前仍然有些難題需要解決。高壓直流傳輸雖然可以解決傳輸距離過長的問題，但由於其昂貴的價格，讓離岸風力發電的成本又提高到另一個層次，而尋覓設置高壓直流變流站的地點也是一個關鍵，這些因素讓離岸風力的發展複雜了起來。離岸風力的許多細節對我們而言仍是較陌生的議題，透過這次的參訪讓我對於這些細節可以有基本的認識，也趁此機會學習了新興的電力技術。建議未來公司可多邀請設備廠或顧

問公司辦理相關設備的技術研討會或教育訓練，從設計及施工等層面來指導，增加與業界交流的機會，加速同仁對於相關設備的熟悉。