

出國報告(出國類別：實習)

海上變電站機電配置規劃

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：賴志能 電機工程監

派赴國家：芬蘭、英國

出國期間：106/11/15~106/11/22

報告日期：107/01/19

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：海上變電站機電配置規劃

頁數 38 含附件：☒是☐否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電公司/陳德隆/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

賴志能/台電公司/輸變電工處中區施工處/電機工程監/(04)25211596

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究☒4 實習☐5 其他

出國期間：106.11.15.～106.11.22. 出國地區：芬蘭、英國

報告日期：107.1.19.

分類號/目

關鍵詞：海上變電站(Offshore substation)、靜態同步補償器(Static synchronous compensator)、靜態虛功補償器(Static VAR compensator)、線路整流轉換(Line-commutated converter)、電壓源整流轉換 Voltage-sourced converter)

內容摘要：(二百至三百字)

本次實習透過會議研討、實例介紹及現場實習，瞭解他國適用的法規、標準及技術規範，並收集相關資料，供本公司未來設計參考或作為圖審的依據。

海上變電站的機電配置規模和整個風場之總裝置容量是息息相關的，為了確保風場的電力能夠穩定且可靠的傳送至陸域輸電網絡，除了要仔細計算主變壓器的容量與發電量的匹配、高壓開關的配置、低壓開關的轉輸設計及電力電纜路徑等基礎設計外，在規劃前更要熟稔國家相關法規及國際標準，另外，主管保護、計量、通訊及控制的監控系統亦是相當重要，因此於海上變電站及陸域變電站須分別規劃風場用及輸電用的監控系統，藉由本次 Galloper 海上風場實例分享，將做進一步的介紹。

經由本次實習過程中，所吸取之國外寶貴經驗與觀念，於建議事項中提出具體可行之做法，另外，參訪公司亦提供目前最新承攬之海上高壓直流變電站詳如附件，供本公司未來參考。

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

目 錄

	頁次
1. 實習計畫緣由及目的.....	1
1.1. 計畫緣由.....	1
1.2. 計畫目的.....	1
2. 實習過程.....	2
2.1. 出返國行程概述.....	2
2.2. GE 芬蘭分公司簡介.....	3
2.3. GE 英國分公司簡介.....	3
3. 海上變電站機電配置規劃.....	5
3.1. 英國適用法規及標準.....	5
3.2. 海上變電站架構及發展.....	7
3.3. 實例介紹-Gallopier 海上風場	10
3.4. 海上高壓直流輸電	23
4. 實習期間交流議題.....	26
5. 實習心得與建議事項.....	30
5.1. 實習心得.....	30
5.2. 建議事項.....	31
附件.....	33

圖 目 錄

	頁次
圖 3.1 海上變電站結構·····	7
圖 3.2 海上變電站主要設備層·····	8
圖 3.3 海上變電站輔助設備層·····	8
圖 3.4 第一代海上變電站·····	8
圖 3.5 第二代海上變電站·····	9
圖 3.6 第三代海上變電站·····	10
圖 3.7 Galloper 海上風場位置·····	10
圖 3.8 Galloper 海上風場承包模式樹狀圖·····	11
圖 3.9 Galloper 海上風場施工介面圖·····	12
圖 3.10 Galloper 海上變電站單線圖·····	13
圖 3.11 132kV GIS ·····	14
圖 3.12 132kV TR·····	14
圖 3.13 33kV GIS ·····	14
圖 3.14 Galloper 海上變電站東側 3D 配置圖·····	15
圖 3.15 Galloper 海上變電站東側立面圖·····	16
圖 3.16 Galloper 海上變電站南側立面圖·····	16
圖 3.17 Galloper 海上變電站主甲板層平面配置圖·····	17
圖 3.18 Galloper 陸域變電站單線圖·····	18
圖 3.19 Galloper 陸域變電站 161kV GIS·····	18
圖 3.20 20 kV 靜態虛功補償設備·····	19

圖 3.21	132kV 40MVAR 諧波濾波器·····	19
圖 3.22	132kV 85 MVAR 並聯電抗器·····	19
圖 3.23	Galloper OFTO SCADA 監控盤·····	20
圖 3.24	Galloper OFTO SCADA 架構圖·····	20
圖 3.25	Galloper WFO SCADA 監控盤·····	21
圖 3.26	Galloper WFO SCADA 架構圖·····	21
圖 3.27	Galloper WFO HMI 監控主機-單線圖·····	22
圖 3.28	Galloper 海上風場營運介面圖·····	22
圖 3.29	交直流傳輸成本比較圖·····	23
圖 3.30	高壓直流線路整流轉換示意圖·····	24
圖 3.31	高壓直流電壓源整流轉換示意圖·····	24
圖 4.1	OFTO 招標流程方塊圖·····	26
圖 4.2	電抗器漏磁安全範圍圖·····	28
圖 5.1	英國變電站之接地網銅排·····	32

表 目 錄

	頁次
表 3.1 海上變電站常用規範一覽表·····	7
表 3.2 海上變電站發展趨勢一覽表(統計值)·····	9
表 3.3 Galloper 海上風場施工計畫表·····	10
表 3.4 連網端分項作業一覽表·····	11
表 3.5 海上變電站各層甲板機電配置表·····	15
表 3.6 整流轉換與電壓源整流轉換比較表·····	25
表 4.1 接地導線建議規格表·····	29

1. 計畫緣由及目的

1.1. 計畫緣由

依據本公司再生能源處 105 年 5 月 25 日離岸風電計畫報告，離岸風力發電第二期(彰化外海，26 號風場)建置規模約 812MW，計畫內規劃 2 座 400MW 之海上變電站。另為配合 106 年 8 月 31 日「綠能科技產業推動中心第 5 次工作進度會議」決議：彰化離岸風力需符合能源局每年 0.5GW 併網目標，2021 年 1GW、2023 年 0.5GW、2024 年 1GW、2025 年 4GW，於 2025 年以前提供彰化總計 6.5GW 併網容量。因相關計畫時程緊迫，囿於本公司尚無規劃海上變電站之實績，然為配合政府積極推動離岸風電政策，爰派員赴歐進行「海上變電站機電配置規劃」實習。

1.2. 計畫目的

歐洲各國近十年來均積極投入離岸風場建設，海上變電站(亦可稱離岸變電站)規劃實務技術成熟，同時亦積極發展陸域靜態同步補償器、靜態虛功補償器(STATCOM：STATic synchronous COMPensator；SVC：Static Var Compensator)，藉以補償及調整大量海纜產生之無效功率與分散式電能併網後之系統穩態電壓。另外，因應海上風場裝置容量呈倍數增加的趨勢，為了加大送電容量、抑低輸電損失及減少上岸海纜，海上高壓直流變流站(Offshore HVDC Converter substation)的應用也有新的技術發展及突破。芬蘭及英國當地之離岸風場亦有多件應用實績，值得派員出國觀摩，透過會議研討、交流分享及現場實習，同時經由實例的介紹，瞭解他國引用的法規、標準及技術規範，藉以收集相關應用技術與案例，供本公司未來設計參考或作為圖審的依據。

2. 實習過程

2.1. 出返國行程概述

時 間	地 點	工 作 概 要
106 年 11 月 15 日～ 11 月 15 日	桃園國際機場→荷蘭阿姆斯特丹機場→芬蘭赫爾辛基機場→坦佩雷機場	往程 (台北→荷蘭轉機→芬蘭轉機→芬蘭坦佩雷)
106 年 11 月 16 日～ 11 月 18 日	GE 芬蘭分公司 (坦佩雷、赫爾辛基)	STATCOM 展示中心、電抗器、電容器工廠及變電站參訪
106 年 11 月 19 日～ 11 月 19 日	芬蘭赫爾辛基機場→英國希斯洛機場→斯塔福德	中間行程 (英國→芬蘭)
106 年 11 月 20 日～ 11 月 21 日	GE 英國分公司 (斯塔福德、賽茲維爾)	HVDC 及 SVC 設備配置實習、陸域變電站參訪
106 年 11 月 22 日～ 11 月 24 日	英國倫敦	順道觀光
106 年 11 月 25 日～ 11 月 26 日	英國希斯洛機場→荷蘭阿姆斯特丹機場→桃園國際機場	返程 (英國→荷蘭轉機→台北)

本計畫核定實習期間為 106 年 11 月 15 日至 106 年 11 月 22 日共 8 天，原訂於 20 日結束公務行程，21 及 22 日為返程，但因當地廠商告知有一興建中之工程，可特別安排至現場參訪，考量出國實習機會難得，惟為避免增加公務行程之時間及預算，便利用申請奉核於英國倫敦順道觀光 4 天的第一天(21 日)，配合廠商赴距倫敦車程 2.5 小時外之陸域變電站觀摩 1 天，故僅餘 3 天於倫敦順道觀光。

2.2. GE 芬蘭分公司簡介-坦佩雷

本次實習首先拜訪 GE 芬蘭分公司所屬的電抗器、電容器工廠、STATCOM 展示中心，該地早期亦曾是芬蘭著名手機廠 NOKIA 轄下的電容器工廠，之後被 GE 所併購，首日下午也安排至附近的 GE FACTS(Flexible AC transmission System) 辦公室，觀摩及研習 STATCOM 定型試驗的成果，並參訪該公司動態模擬及分析系統實驗室(RTDS Lab：Real Time Digital Simulator Laboratory)，藉以瞭解變電所內監控系統與保護系統的工廠試驗



(FAT：Factory Acceptance Test)流程與作業程序。次日參訪了 Kangasala 超高壓變電所(400kV 級)及所屬之 SVC 設備，並就運轉維護面與現場權責人員做簡單的交流。

上述 2 個廠區皆位於芬蘭第 2 大城市的坦佩雷市，員工共約 270 人，主要生產彈性交流傳輸系統相關零配件(含 SVC 及 STATCOM)，該廠生產的器材亦提供 GE 公司所承製的海上變電站所需機電相關設備。

2.3. GE 英國分公司簡介-斯塔福德

斯塔福德是位於英格蘭中部的一座百年老城，而 GE 是當地最具規模的企業，斯塔福德 Redhill 廠是於 2017 年甫落成的新廠，該廠係專責 GE 電網事業部轄屬的數位變電所(digital substation)、海上輸電推展中心及高壓直流研發中心的大型



廠辦，整個廠區員工約有 1700 名，其中約有 400 人的工作領域是負責電網自動化設備及數位變電所關鍵器材，包含保護電驛及量測設備等，而該廠生產之自動化器材有逾 8 成銷往海外市場。

本次主要拜訪的部門是海上輸電推展中心及高壓直流研發中心，當日上午，首先由前述兩部門專員就其負責領域做了簡要的報告後，再由本公司代表說明我國政府目前推展海上風電的決心與策略及台電公司的海上風場計畫案，同時，亦利用此機會請教該公司專家有關海上變電站規劃事宜，並請其提供於歐洲海上變電站應用實例引用之法規及相關的技術資料。當日下午則安排參觀斯塔福德 Maxsine 廠 HVDC VSC Valve(half-bridge)及 STATCOM VSC Valve(full-bridge)之組裝及測試工廠，該廠原有 2 條設備生產線，但為增加生產量及提高工作效率，預定將設備生產線遷移至新竣工之 Redhill 廠，目前 Maxsine 廠僅餘 1 條生產線，待完成執行中之訂單後，將全數作業機台遷移至新廠。



隔日一早驅車前往位於英國東南邊的薩福克郡的 Galloper 海上風場計畫所屬的陸域變電站，該變電站主要配置有 1 套 132kV 之氣體絕緣開關設、2 套靜態虛功補償設備、2 套濾波器及 2 具並聯電抗器，前列設備主要功用係為補償海纜的傳輸損失及滿足英國國家電網公司所規定的諧波管制等標準，變電站相關設備配置及說明請詳第 3 章。



3. 海上變電站機電配置規劃

3.1. 英國適用法規及標準

海上變電站的設備基礎結構及特性與陸域工程大不相同，目前的設計理念是參照以往海上油氣產業的鑽油平台而來的，經過歷次工程實例與經驗教訓，不斷累積、調整及改進相關設計和規劃案，進而建立了一系列離岸風場的設計標準及規範，本報告收集近來海上風場主要引用之法規及標準，並簡述如下：

3.1.1. 英國當地法規：

英國主要法規有兩大類，第一類是由英國標準協會(BSI：British Standards Institute)所發布的英國國家標準(BS)，如同我國的 CNS，主要引用法規為 BS 7354 (Code of practice for design of high-voltage open-terminal stations)，該協會亦會參考如歐盟(EN)、國際標準化組織(ISO) 及國際電工委員會(IEC)所制定的標準，並加以直接引用，但其代號則會是 BS EN 、BS ISO 及 BS IEC； 第二類則是由英國國家電網公司(National Grid)所制定的電氣設備或併網相關標準，該類標準施行前須經英國獨立的能源管制機關-天然氣暨電力市場管制局(Ofgem)審核通過，主要適用的標準為 Relevant Electrical Standards Transmission Standards， 如 RES TS 1(Ratings and general requirements for plant, equipment and apparatus for the national grid system)、RES TS 2. *(包含 substations, switchgear, substation auxiliary supplies…)、RES TS 3. *(包含 substation interlocking schemes, earthing requirements, circuit breakers…)。

3.1.2. 國際認證公司標準：

早期發展海上變電站技術標準與規範的多為船級認證公司，乃因海事工程與船舶產業息息相關，如 DNV-GL(2013 年合併)、ABS(American Bureau of Shipping：FACILITIES ON OFFSHORE INSTALLATIONS)及 BV(Bureau Veritas)等。又以 DNV-GL 海上風電的設計法規最為完整，其中 DNV-OS-J201(Offshore Substations for Wind Farm)就是海上變電站標準，該標準於 2016 年更名並改版為

DNVGL-ST-0145(Offshore Substations)，此份標準從基本的配置原則、電氣設計、結構設計、火災及爆炸防護、人機進出、緊急事故反應、施工、安全評估及運轉維護皆有詳盡的說明，但整份文件最重視的是整個計畫的風險管理和危機辨識，而電器設計這個章節中主要分為避雷系統、輔助電力系統、主電力系統、自動化系統及接地系統。其它 DNV-GL 發行的相關規範還有 DNV-OS-D201(Electrical Installations)、DNV-RP-J301 (Recommended Practice for Subsea Power Cable)。

3.1.3. 國際電工委員會(IEC)：

因該委員會所制定的規範具有相當高程度之嚴謹性及通用性，所以上述 DNV-GL 認證公司所制定的各項法規中若有涉及設備材規特性者皆係引用 IEC 相關規範，其中與離岸相關設計規範如 IEC 60092(Electrical installations in ships)、IEC 61892(Mobile and fixed offshore units-Electrical installations)、IEC 61936-1(Power installation exceeding 1kVa.c. Part 1：common rules)。

3.1.4. 國際標準化組織(ISO)：

該組織與油氣產業十分密切，相關設計標準亦用於離岸風電設計，如 ISO 17776(Petroleum and natural gas industries-Offshore Production installations-Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment)、ISO 19900(Petroleum and natural gas industries-General requirements for offshore structures)。

3.1.5. 其它國際相關法規：

美國消防協會及美國石油協會認可之 API RP 相關標準，主要係為石油天然氣工業相關企業追求優先公用的方針目標和為該行業整體效益提供了標準化後，轉運用至海上平台，相關設計標準如 RP 2A(Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms)、API RP 14G(Recommended Practice for Fire Prevention and Control on Fixed Open-type Offshore Production Platforms)。

英國當地法規	國際認證公司標準	國際電工委員會 IEC	國際標準化組織 ISO	其它國際相關法規
British Standards : BS 7354 BS EN * BS ISO/IEC	DNVGL : (歐) DNVGL-ST-0145 DNV-OS-D201	IEC 60076 、 IEC 60079 、 IEC 60092 、 IEC 60099 、 IEC 61378 、 IEC 61892 、 IEC 61936 ...	ISO 12994 、 ISO 17776 、 ISO 19900 、 ISO 19902 、 ISO 20340 、 ISO 9001...	NFPA Codes API RP 2A 、 API RP 14G NORSOK...
National Grid : RES TS 1 、 RES TS 2. * RES TS 3. *	ABS : (美) ABS 29 ABS 63			

表 3.1 海上變電站常用規範一覽表

3.2. 海上變電站架構及發展

3.2.1. 架構

因應離岸風場的規模愈來愈大、離岸愈來愈遠及海纜數量愈來愈多，離岸變電站的設置考量原因有主要幾點，首先是為了降低電力損失及改善功率因素，其次則是減少上岸電纜。變電站主要分成 3 段，最上面的是變電設備段(topside)，圖 3.1 中可以看到變電站的下部結構其實與風機結構類似，只是規模大小不同而已，目前最常用的海上變電站基礎就是單樁式和套筒式。

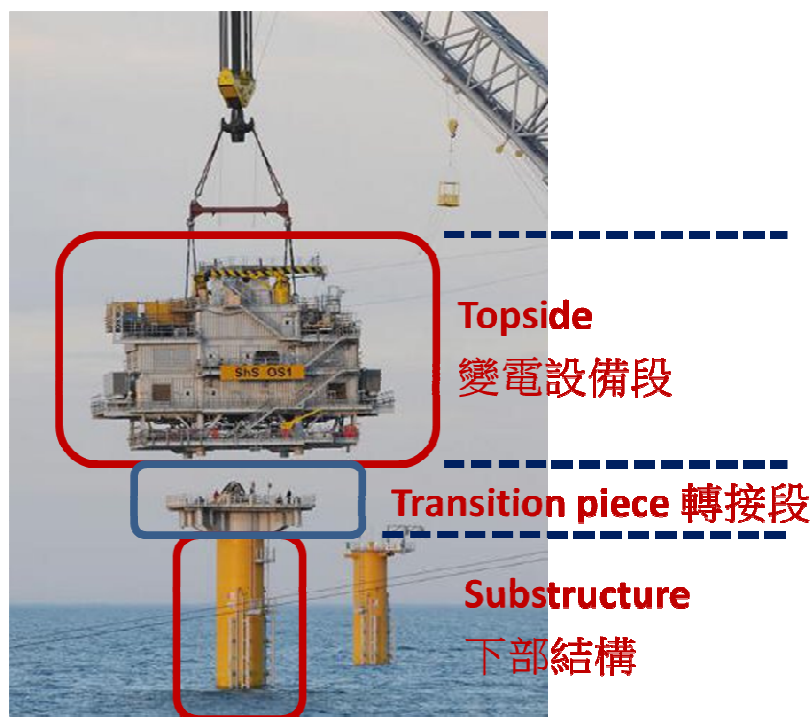


圖 3.1 海上變電站結構

早期海上變電站因送電容量較小，故多採 2 層式配置。主要設備層一般來說都是指最上層的甲板，配置有站內大項設備，如昇壓變壓器、並聯電抗器、高壓開關設備、中壓開關設備、緊急發電機及起重機，還有一項比較特殊的就是直昇機停機坪，主要是為了使運維人員能夠在最短時間內到達站內處理緊急事件。

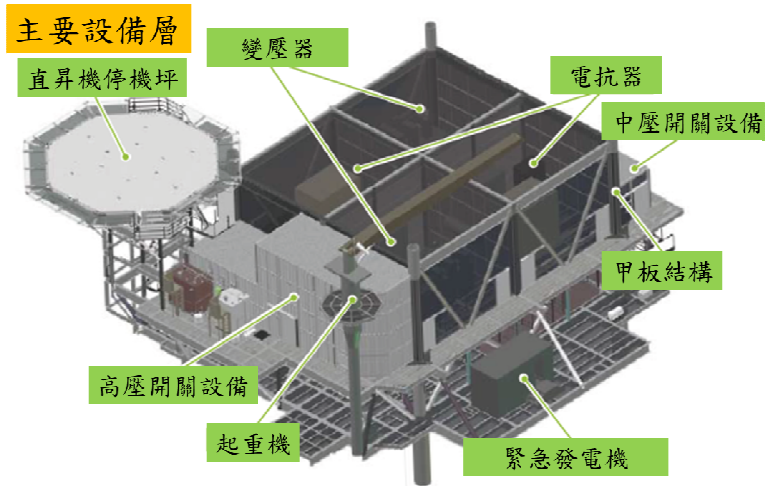


圖 3.2 海上變電站主要設備層

下層甲板則是輔助設備層，規劃有控制室、電纜支架，另外宿舍主要是供風機及變電站維護保養期間，人員短期住宿用，儲水槽則可提供人員乾淨的飲用水。

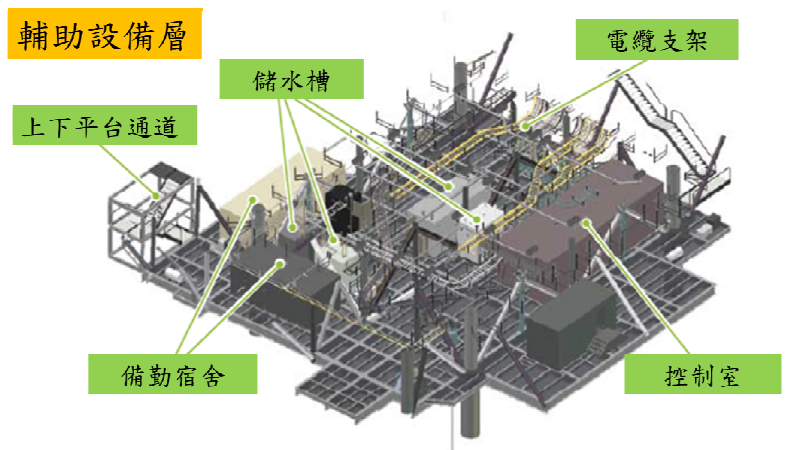


圖 3.3 海上變電站輔助設備層

3.2.2. 發展趨勢

海上變電站的設備規模隨著風場容量增加而成非線性比例擴增，第一代變電站僅規劃單具變壓器，設備容量約 100~150MW、單回線輸出電纜，設備層總重量約 1000 噸，一般皆無規劃備用變壓器及電力電纜，因此設備事故時將導致整個風場的電力完全無法輸出。



圖 3.4 第一代海上變電站

第二代變電站之電力系統係採 N-1 準則規劃，配置多具變壓器，設備容量約 200~300MW，並規劃多回輸出電纜，另考量電力損失，會設置並聯電抗器補償無效功率，或視需求裝設彈性交流傳輸系統(FACTS)，設備層總重量約 3000~4000 噸，是目前歐洲北海風場變電站規劃通案。



圖 3.5 第二代海上變電站

第三代變電站主要係供鄰近海域多個風場之變電站電力匯集用，一般容量高達 600~800MW，倘採用交流傳輸將造成大量的電力損失，故在電力匯集後透過整流系統，改採高壓直流傳輸至陸域變流站。除了變電站既有的設備外，整流系統使用了大量的電力電子元件，以致設備層總重量高達 15000 噸以上，尋無適用之海上施工船可以吊裝如此龐大的站體，因此設備廠採用站體自浮、自升技術以克服吊裝問題。



圖 3.6 第三代海上變電站

	第一代	第二代	第三代
Tr./SH.R./Conv.	1/0/0	2/2/0	2/4/2
容量	100 MW	300 MW	800 MW
Topside 重量	1000 噸	4000 噸	15000 噸
甲板(層)	2	3-4	7

表 3.2 海上變電站發展趨勢一覽表(統計值)

3.3. 實例 - Galloper 海上風場

3.3.1. 風場概要

計畫名稱：Galloper 海上風場

本案範圍：132kV 海上、陸域變電站及高壓電力電纜

風場地點：Sizewell, Suffolk, UK.

開發廠商：Galloper Wind Farm Ltd. (GWFL)

由 RWE Innogy、UK Green Investment Bank、Siemens Financial Services 及 Macquarie Capital 等 4 家公司各持有 25% 之股份

開發預算：12 家商業銀行和歐洲投資銀行共同提供了 19.1 億歐元的融資

訂約日期：2015 年 10 月 29 日

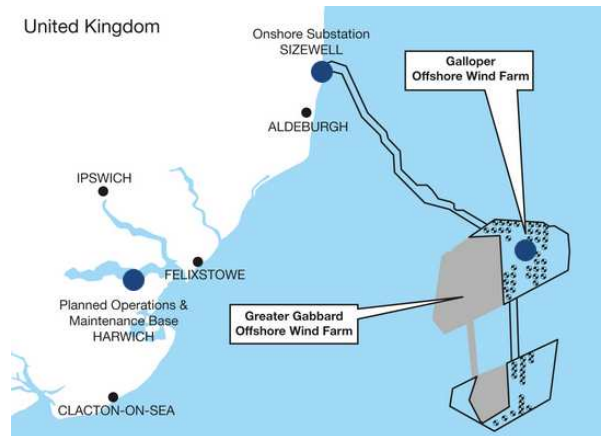


圖 3.7 Galloper 海上風場位置圖

海上施工計畫表

Activity	2016		2017				2018	
	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
Installation of first export cable (start: August 2016)								
Preparation works at wind turbine locations (start: August 2016)								
Installation of wind turbine foundations (start: December 2016)								
Export cable 2 installation (start: April 2017)								
Array cable installation (start: April 2017)								
Wind turbine installation and commissioning (start: May 2017)								
Offshore substation installation (start: April 2017)								
Wind farm operational (April 2018)								

表 3.3 Galloper 海上風場施工計畫表

3.3.2. 風場承包模式 (本報告著重介紹連網端部分)

Galloper 海上風場承包模式詳如圖 3.8，本案連網端統包案是由 GE 公司 Grid solutions 部門擔任主包商，主要負責海上變電站與陸域變電站電氣系統之研究及設計，而 Petrofac 公司擔任分包商，負責海上變電站結構及基礎之設計及安裝。這兩家廠商負責之工作項目詳如表 3.4。

3.3.3. 風場施工介面

Gallopier 海上風場施工介面如圖 3.9 所示，可分風場端及連網端，風場端的工作項目及承商分別為風機(Siemens)、風機下部結構(Geosea)及陣列海纜(VBMS)，而連網端的工作項目及承商分別為海上變電站(GE 統包)、上岸海纜(VBMS/NKT)、陸域變電站及陸域電力電纜(GE 統包)，再由陸域變電站引入英國國家電網轄屬的併網變電站。

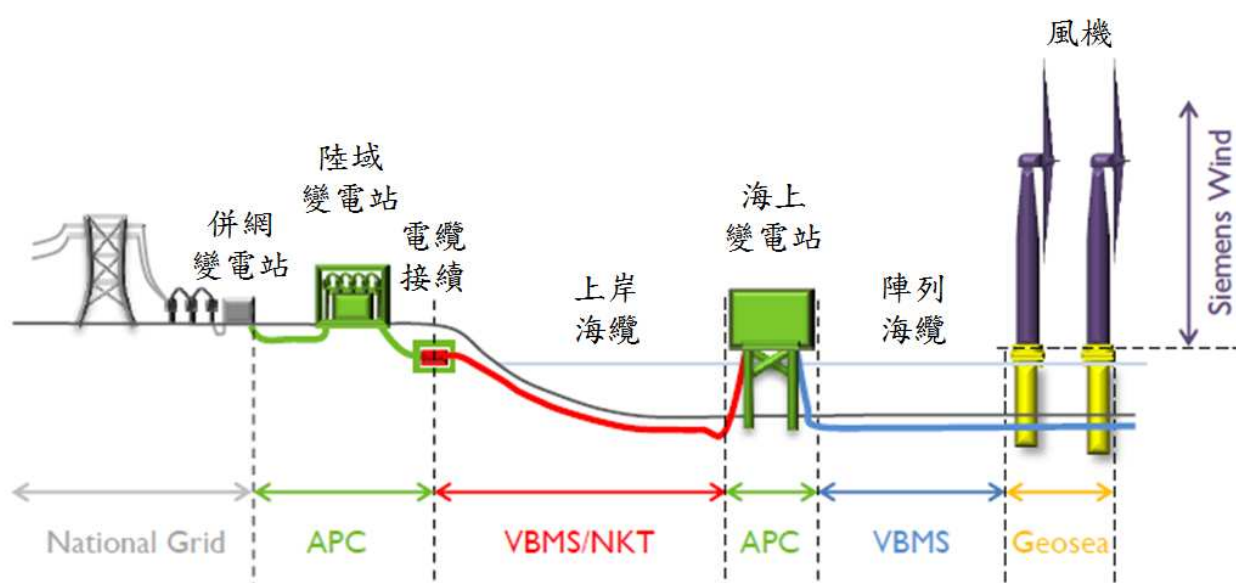


圖 3.9 Gallopier 海上風場施工介面圖

3.3.4. 海上變電站主要規劃項目

- ❖ 電網並聯規劃(符規性分析)
 - 電力潮流及短路電流分析
 - 諧波與電壓閃爍分析
 - 電壓控制與小信號穩定度之動態反應分析
 - 低壓穿透與耐充電電流能力
- ❖ 變電站系統單線圖(高中低壓)
 - 變壓器及斷路器容量規劃
 - 備援及轉輸設計

❖ 變電站細部設計

- 主/輔電力及所屬監控系統
- 接地及通信系統
- 阻火及緊急應變系統

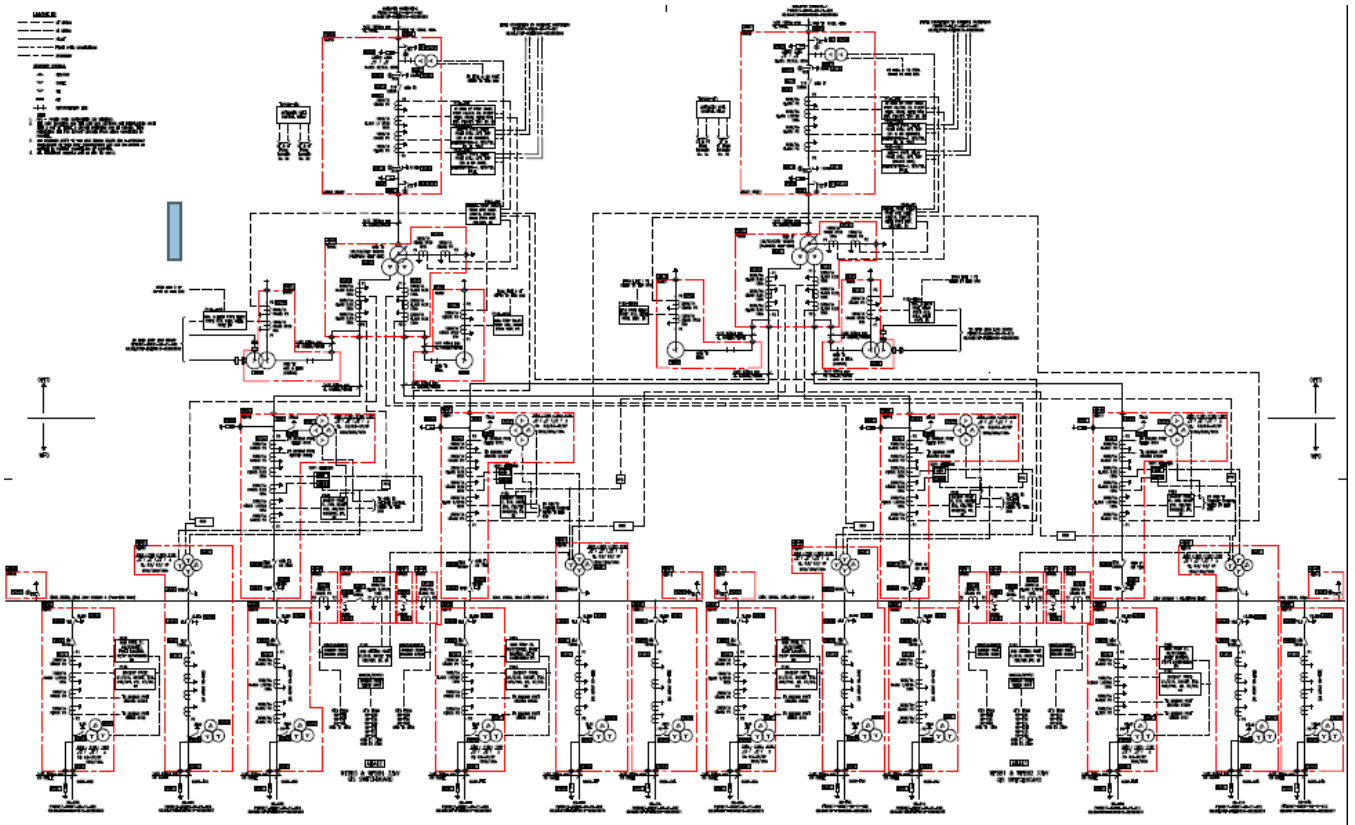


圖 3.10 Galloper 海上變電站單線圖

3.2.5. 海上變電站單線圖規劃之大項器材規格

- ❖ 132kV SF6 氣體絕緣開關設備(GIS) 2 檔(型號：F35-4，單匯流排配置，詳如圖 3.11)
- ❖ 132/33/33 kV 3 繞組式 180 MVA 電力變壓器(升壓)2 具(ODAF、Y-△-△，單具總重 198 公噸，詳如圖 3.12)
- ❖ 33 kV 真空斷路器 2 組各 9 檔(型號：WSA，詳如圖 3.13)



圖 3.11 132kV GIS

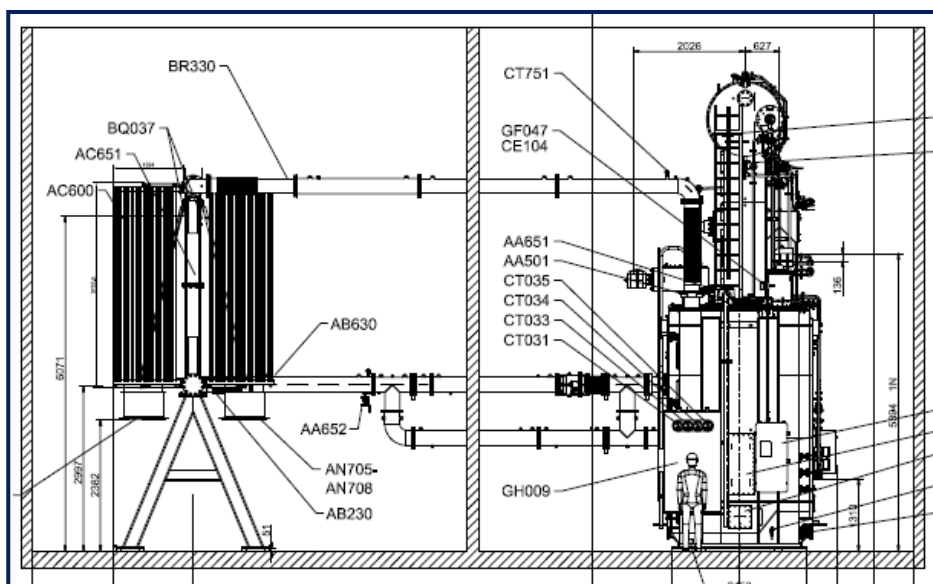


圖 3.12 132kV Tr



圖 3.13 33kV GIS

3.3.6. 海上變電站各層甲板機電配置

❖ 海上變電站-變電設備段(Topside)

- 4 層甲板
- 平台尺寸：34 x 27 x 20 (高) 公尺
- 平台重：2200 噸

	頂甲板層 (Roof deck)	上甲板層 (Upper deck)	主甲板層 (Main deck)	電纜甲板層 (Cables deck)
主要機 電設備	直升機起降區 吊車 運維空間 平台警示燈 通訊天線	電力變壓器與冷卻系統 緊急發電機 高壓電氣室 消防器材室 淨水設備	33 kV GIS 室 132 kV GIS 室 OFTO 控制室 WFO 控制室 臨時避難室	33 kV 電纜 132 kV 電纜

表 3.5 海上變電站各層甲板機電配置表

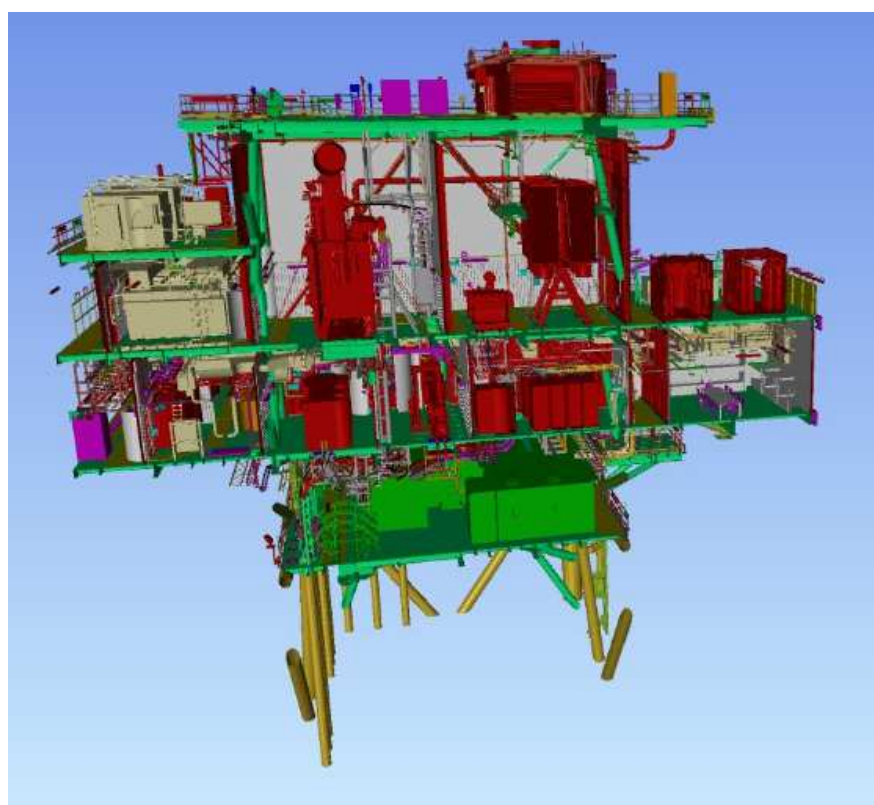


圖 3.14 Galloper 海上變電站東側 3D 配置圖

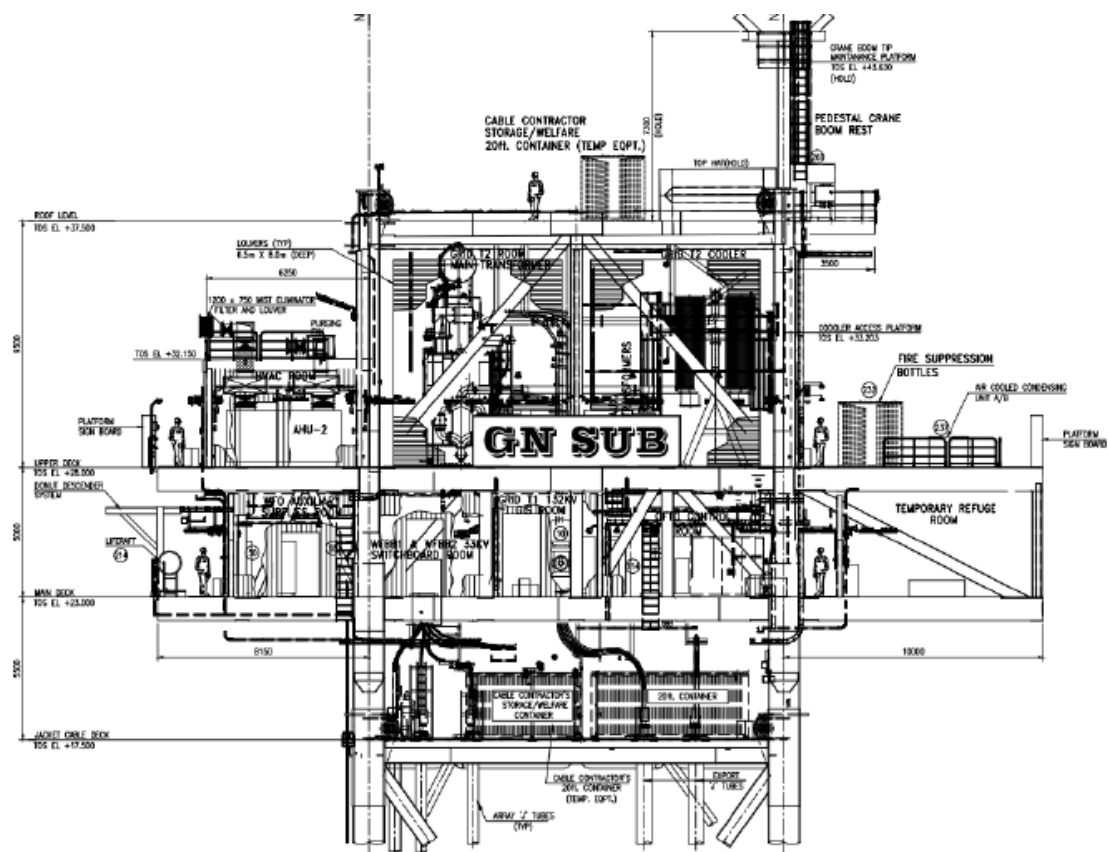


圖 3.15 Galloper 海上變電站東側立面圖

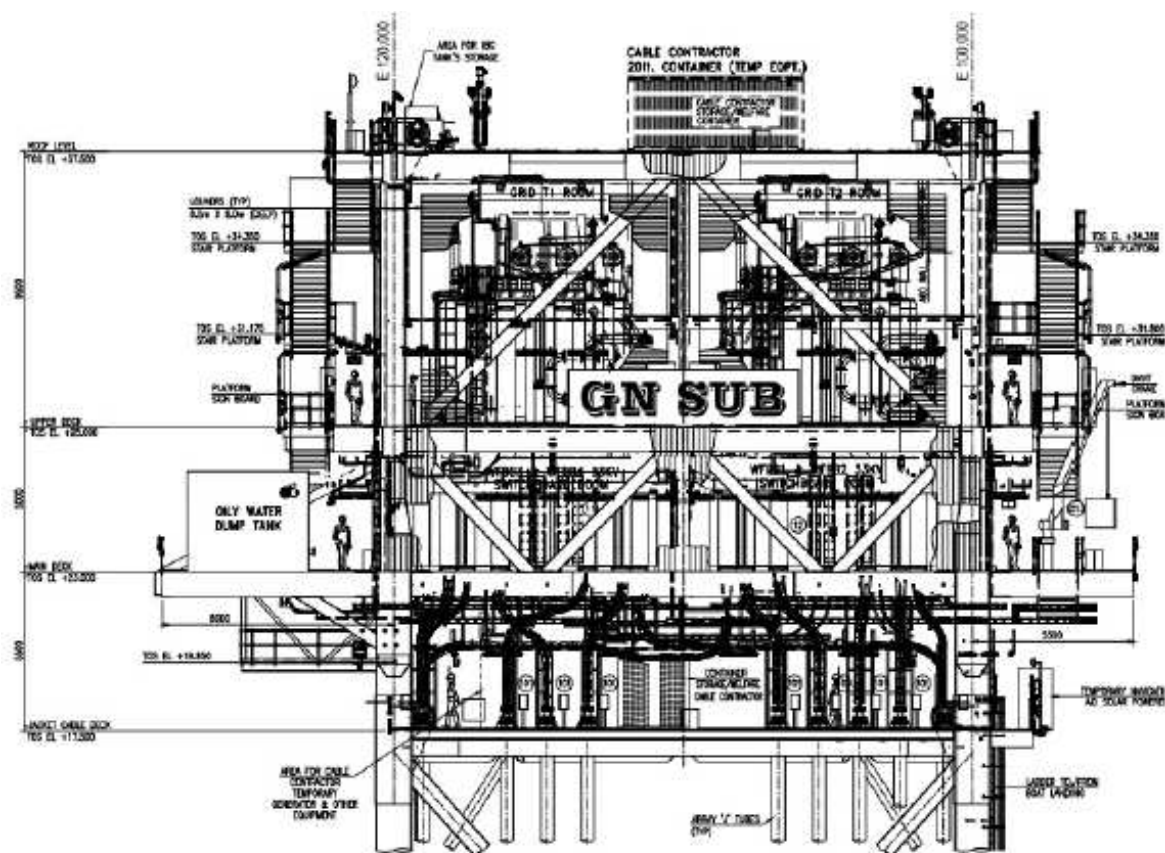


圖 3.16 Galloper 海上變電站南側立面圖

❖ 132kV 40MVAR 諧波濾波器(Harmonic Filter) 2 具(詳如圖 3.21)

■ 併網標準需求

❖ 132kV 85 MVAR 並聯電抗器(Shunt Reactor) 2 具(詳如圖 3.22)

■ 補償上岸海纜之虛功

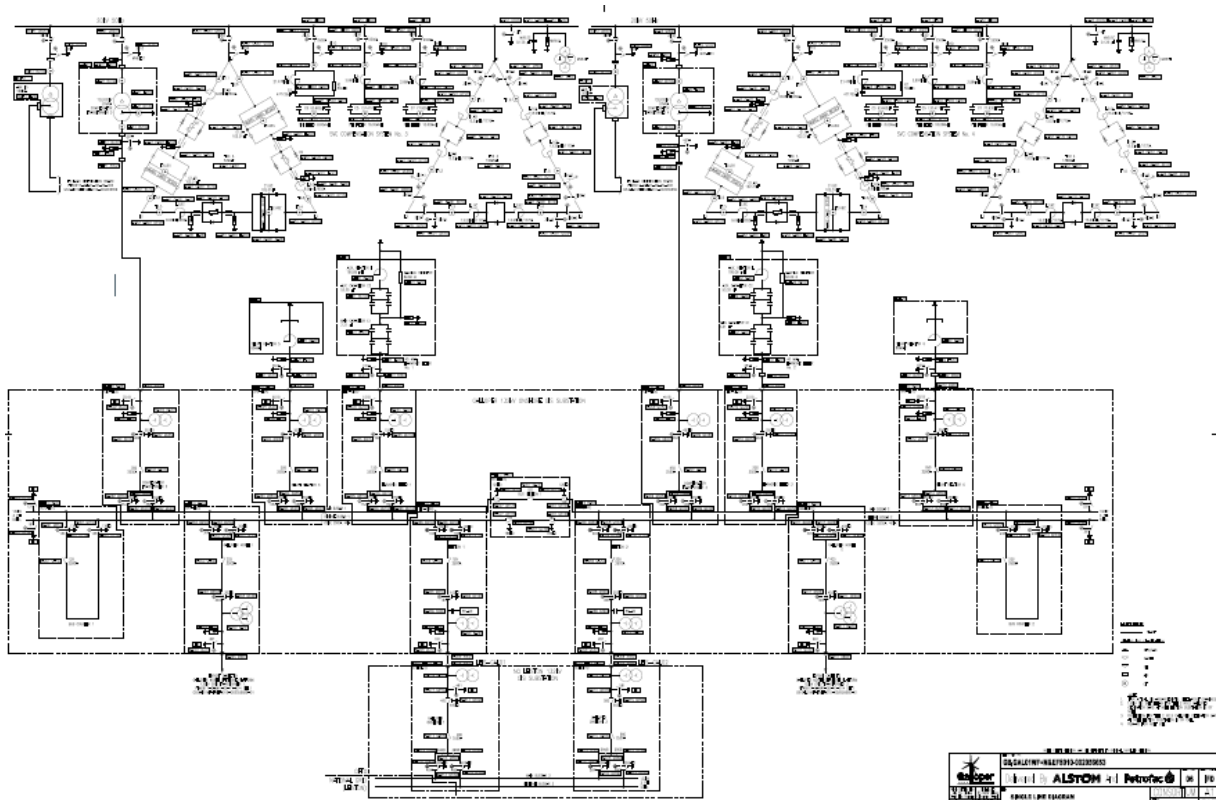


圖 3.18 Galloper 陸域變電站單線圖



圖 3.19 Galloper 陸域變電站 161kV GIS



圖 3.20 20 kV 靜態虛功補償設備



圖 3.21 132kV 40MVAR 諧波濾波器



圖 3.22 132kV 85 MVAR 並聯電抗器

3.3.8. Galloper OFTO SCADA 架構圖(連網端)

❖ OFTO has to control the grid connection link

(離岸輸電網控制站)

- From 海上變電站
- From 陸域變電站
- From 遠端控制中心

❖ PCC with National Grid

(英國電網併網點)

- 132/400 kV

萊斯頓超高壓變電所



圖 3.23 Galloper OFTO SCADA 監控盤

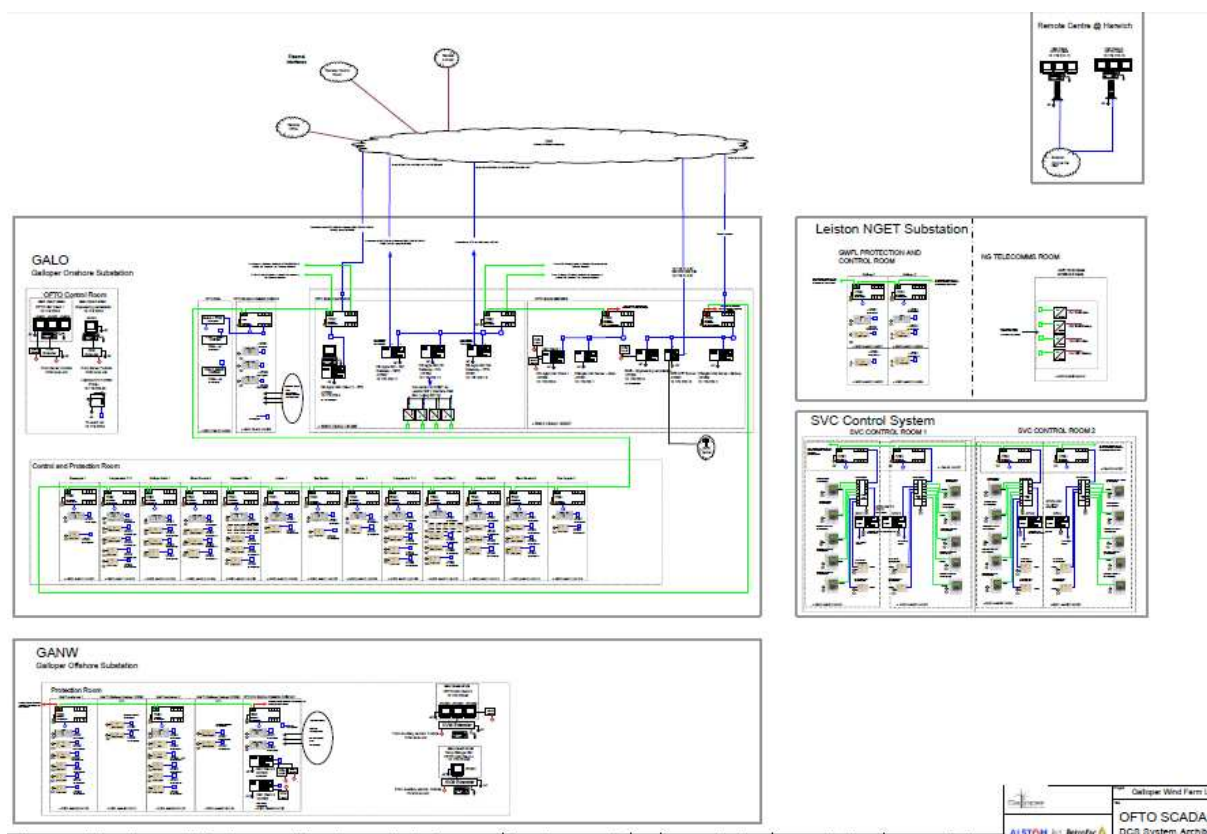


圖 3.24 Galloper OFTO SCADA 架構圖

3.3.9 Galloper WFO SCADA 架構圖(風場端)

- ❖ WFO has to control the WT's connection to the platform

(控制風機與變電站的聯結)

- From 海上變電站
- From 陸域變電站
- From 遠端控制中心

- ❖ WFO has to get Energy Metering for billing

(收集計費用表計之數據)

- From 海上變電站



圖 3.25 Galloper WFO SCADA 監控盤

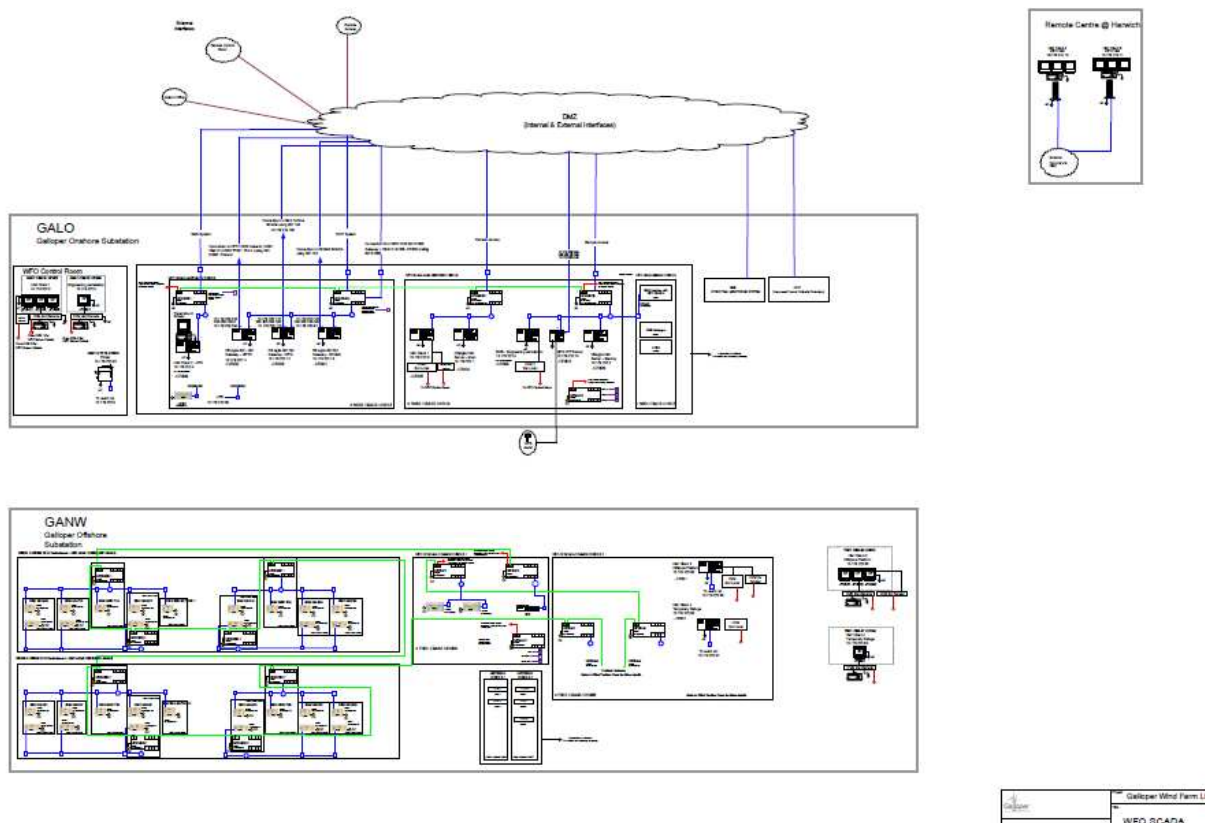


圖 3.26 Galloper WFO SCADA 架構圖

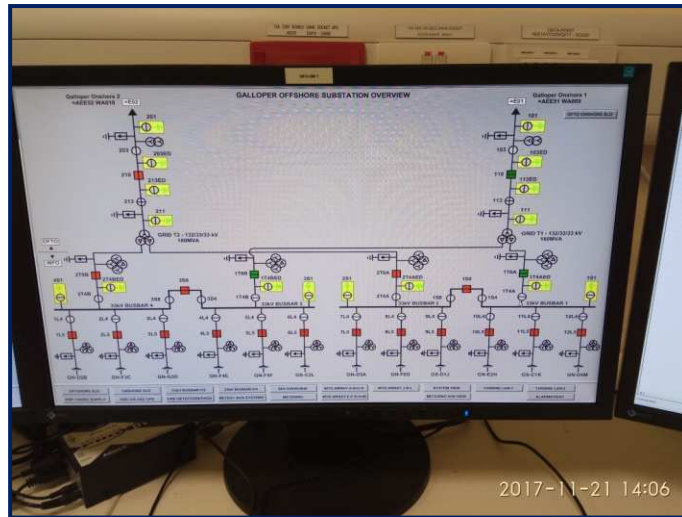


圖 3.27 Galloper WFO HMI 監控主機-單線圖

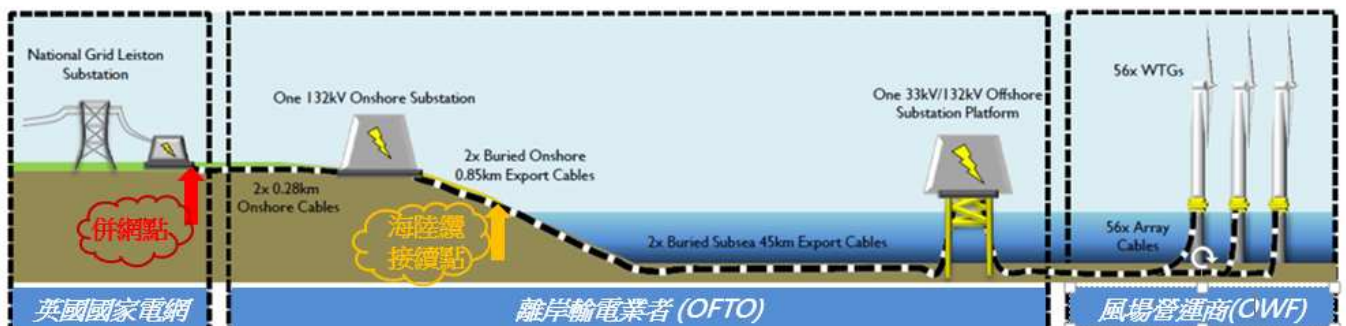


圖 3.28 Galloper 海上風場營運介面圖

3.3.10. 海上風場營運介面

❖ 風場營運商(OWF)

- 56 架 6 MW 西門子風機。
- 56 條 3 芯 33 kV 陣列海纜採輻射狀引入海上變電。

❖ 離岸輸電業者 (OFTO)

- 海上變電站，含 2 具 180 MVA 昇壓變壓器及高低壓開關設備等
- 2 條 3 芯 132 kV 上岸海纜(45km) 與陸纜接續後引入 850m 外之變電站 陸域變電站，含 132 kV SVC, SHR, FILTER 各 2 具及高低壓開關
- 2 回單導電纜引入 280m 外之萊斯頓變電所

3.4. 海上高壓直流輸電

現今海上變電站之電力亦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，然而到底是要採用何種電力傳輸方式，其實就如同評估陸地遠距離架空輸電方式的邏輯是一樣的，在考量了變電站/變流站及架空線/電纜線的建置成本後，最重要評量數據就是傳輸距離，依據最新研究及相關實例，一般海纜的臨界傳輸距離約為80~100km，詳如圖 3.28。

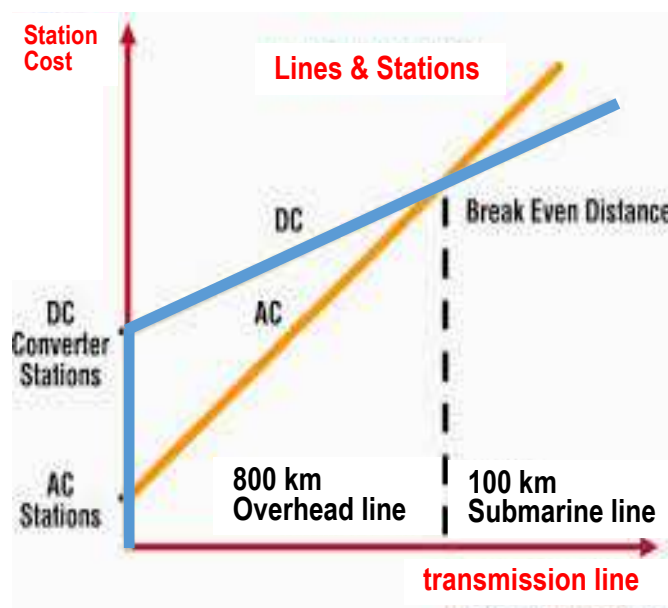


圖 3.29 交直流傳輸成本比較圖

目前多數海上風場運作仍多採用交流傳輸，但伴隨著風場規模的增大、離岸距離與水深不斷的增加，一味的提高電壓等級及增加變壓器容量來降低電力損失，似乎並不是一個最佳的解決方案，也因此德國已經陸續建置了近 10 座的高壓變流站，以高壓直流方式向陸地傳送電力。業界常運用的高壓直流傳輸技術主要有兩種，分別為高壓直流線路整流轉換(Line Commutated Converter, LCC-HVDC)及高壓直流電壓源整流轉換(Voltage Source Converter, VSC-HVDC)傳輸系統。

3.4.1. 高壓直流線路整流轉換(LCC-HVDC)

此種輸電方式是業界最早應用的直流傳輸技術(詳圖 3.29)，其輸出額定電壓較高，一般是採用單極傳輸，但利用海水作為迴路，成效不佳。另須使用特製的整流變壓器，尚須設置 STATCOM 來提供全黑啟動能力、補償風機無效功率及低壓通過能力，並需配置大量濾波器來消除諧波，故空間需求極大。

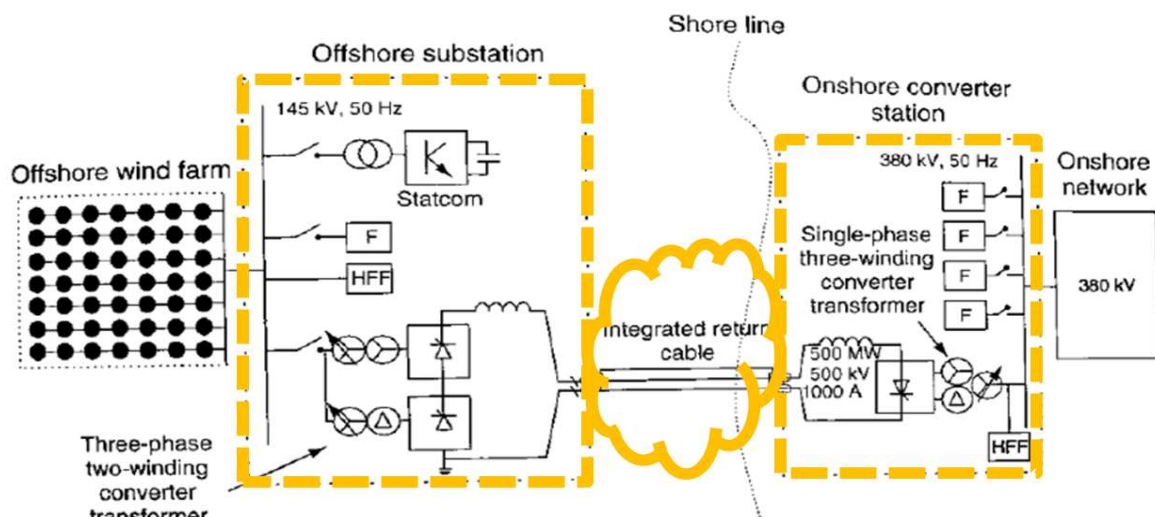


圖 3.30 高壓直流線路整流轉換示意圖

3.4.2. 高壓直流電壓源整流轉換(VSC-HVDC)

電壓源整流轉換技術主要是受惠於近年來高功率電力電子元件的發展(詳圖 3.30)，該系統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，並具快速動態反應及全黑啟動能力，有效避免故障範圍擴大及，且一般規格之變壓器即可適用，不用額外配置諧波抑制及虛功補償設備，因此使用面積約為 LCC-HVDC 的 50-60%，是現在 HVDC 傳輸應用的主力，目前已研發量產的設備廠有 GE 的 HVDC Max Sine、ABB 的 HVDC Light 及 SIEMENS 的 HVDC Plus 等系統，且都已累積相當數量的使用實績，可供本公司未來應用時納入參考。

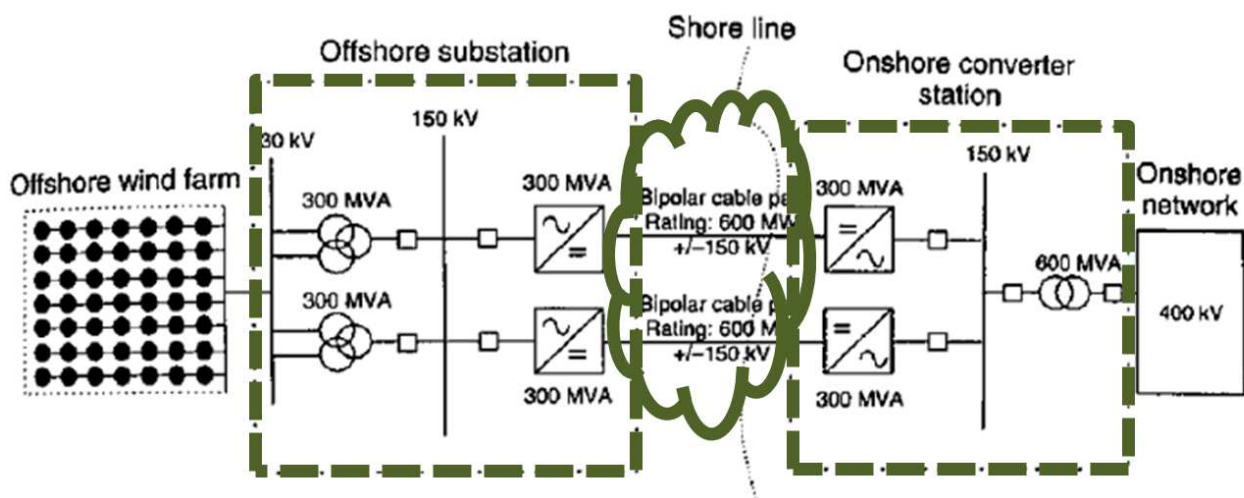


圖 3.31 高壓直流電壓源整流轉換示意圖

3.4.3. 線路整流轉換(LCC)與電壓源整流轉換(VSC)比較表

線路整流轉換(LCC)	電壓源整流轉換(VSC)
Thyristor 閘流體	IGBT 絕緣閘雙極電晶體
需額外設備方具全黑啟動	具有全黑啟動能力
需要大量 AC,DC 濾波器	不需濾波器消除諧波
需搭配 STATCOM 補償	不用虛功及同步補償
僅能控制實功	具控制實功及虛功能力
配置空間極大	配置空間約為 LCC 的 50-60%
需使用特製整流變壓器	使用標準變壓器
損失約 2-3%	損失約 4-6%
事故影響範圍大	具快速動態反應，事故影響範圍較小

表 3.6 整流轉換與電壓源整流轉換比較表

4. 實習期間交流議題(僅列重要議題及簡要回覆)

議題 1：海上風場之最佳發包模式為何？

GE 回覆：以英國為例，海上風場開發商需負責併網前所有工事，而海上風場從風機及其下部結構製造及安裝、陣列海纜製造及延放、海上變電站之機電設計與結構設計及其製造和安裝、上岸海纜製造及延放，涉及的專業廠商可能數十家，所以開發商會將風場開發委託予一家總工程技術顧問公司規劃風場並負責督導管理，利用其科技管理之專業能力來確保各施工界面能順利銜接，該顧問公司為了增加管理效率，會將風場切割為風機端、連網端及海纜部分(詳如圖 3.8)，並訂定各階段里程碑及施工期程(詳如表 3.3)，再由各主包機電公司分別向上負責(總顧問公司)及向下管理(各所屬下包商)。

議題 2：海上風場之營運方式為何？

GE 回覆：英國於 2009 年起立法通過，風場營運商不可兼任海上輸電角色，所以當海上風場開發商於風場完工送電後，需委由英國獨立的能源管制機關-天然氣暨電力市場管制局(Ofgem)將連網端(含海上、陸域變電站及高壓電纜)之設備財產及營運權(20 年)，經左圖招標程序售予海上輸電業者，該得標商需負責運維，以獲取固定之營運利潤。

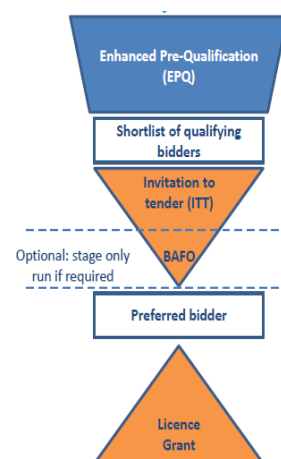


圖 4.1 OFTO 招標流程方塊圖

議題 3：海上變電站加入系統後之運維模式為何？

GE 回覆：海上輸電業者皆會編制大型運維船隊與直升機(並非全自有，亦有租賃)，以應付緊急事故，並縮短修復時間，但為了降低人事及機具成本，會將運維作業轉包予機電設備廠商，如 GE 公司即與部分海上輸電業者簽訂維護合約，負責海上變電設備之維護及定期保養作業，因其對自有設備極其熟悉，且各項備品供應無虞，人力及器材均可充分運用。

議題 4：海上變電站及風機目前常用輸出之電壓等級？

GE 回覆：近年海上風機容量有大幅提升之趨勢，主流規格已從 5-6MW 演變為 8-10MW，隨著裝置容量及機座空間加大，為了減少電纜數量及增出輸出容量，將其風機輸出電壓從 22-33kV 提高至 66kV(因風機內變壓器及開關設備空間可配合機座增大)。而海上變電站機電設備規格需與風機規格互相搭配，故配合將低壓開關電壓等級一併提高為 66kV，另外，高壓端除了考量升壓變壓器最佳升壓效率外，亦因海纜技術提升，可配合將高壓上岸海纜之電壓等級由 132kV 提高至 220kV，故目前主流電壓等級為 66/220kV。

議題 5：海上機電設備之防鏽措施？

GE 回覆：目前 GE 承製之海上各項設備之材質與膜厚均與陸域設備一樣(型號相同)，並無特別之設計，因其觀查及記錄歷來交貨之設備(實績約 10 年)，尚未有因設備腐蝕而導致停電事故之情形，但可配合業主之招標規範增加設備膜厚，另外，可建議海上變電站採密閉式規劃，站內空氣採微正壓方式設計，藉以降低海上鹽霧氣體沾附設備外殼的機率。

議題 6：海上變電站規劃直升機平台之必要性？

GE 回覆：直升機平台係因應緊急突發狀況所設計的附屬設施(如運送技術人員處理事故排除或可配合人員緊急撤離)，因成本較高，非必要設施，可依照開發商的需求及顧問公司的評估其風險耐受性來設置。

議題 7：為何海上變電站需採直流傳輸規劃？

GE 回覆：當風場離岸超過 80~100Km、風場裝置容量逾 700~800MW 或多個風場於海上併聯時，為了提高海纜送電容量、降低線路損失及減少上岸海纜數量，此時，海上變電站便建議採直流傳輸。

議題 8：靜態同步補償器之最佳配置地點為何？

GE 回覆：因靜態同步補償器之需求面積相當大，若置放於海上平台上，其效能雖較佳，但其投資成本卻過高，故建議將前述設備配置於陸域變電站，於併網前做補償即可，但海上平台上可視需求裝設並聯電抗器來補償上岸海纜的損失。

議題 9：英國靜態同步補償器之發包模式為何？

GE 回覆：英國之靜態同步補償器皆採 EPCI 模式(大統包)發包，由機電設備商擔任主包商，該設備商規劃並設計各設備室之空間需求，交由其合作之土木承商興建建物，建物完工後再由機電設備商進場裝機，可減少甲、乙方之介面，且有利於設備製造及工程進度之管控。

議題 10：如何解決氣心式電抗器之電磁效應？

GE 回覆：因氣心式電抗器(乾式)無鐵心，其磁通是在空氣中形成回路，故會有較嚴重的漏磁現象，該公司建議在電抗器一定範圍內(上下為 1 倍之電抗器外徑，左右為 1.5 倍

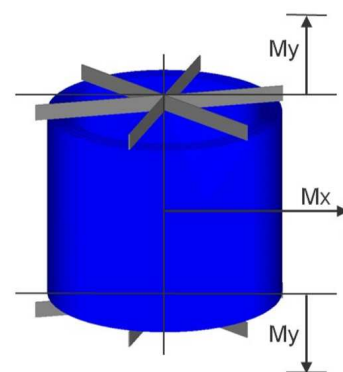


圖 4.2 電抗器漏磁安全範圍圖

之電抗器外徑)，不要配置會形成環路之導磁器材及大型鐵製物，包含接地網銅線及建築結構鋼筋，避免增加電抗器損失及造成接地網產生環路電流，亦或因結構鋼筋長期發熱以致於結構受損等現象，另外，若有必要之配置則必須採斷磁處理，或儘可能改採其它代替材質，如玻璃纖維等。

議題 11：英國近岸變電站有無接地網之銅導線腐蝕問題？

GE 回覆：英國變電所之接地網是依據英國國家電網公司所訂定之技術規範：RES TS 3.01.02「Earthing」來設計(詳如表 4.1)，並按該變電所模擬之故障電流大小來擇定所採用之銅排規格，經查目前使用實績，僅發現銅綠現象，尚無其它嚴重腐蝕情形。

Type of conductor	Current density for 1sec duration (A/mm ²)	Current density for 3secs duration (A/mm ²)
Copper	212	123
Aluminium	130	75
Galvanised Steel	80	45

Table 5b Maximum Conductor Current Densities

Short-circuit current requirement	63kA/1sec		40kA/1sec		40kA/3secs	
Type of	Spur	Duplex	Spur	Duplex	Spur	Duplex
Copper	50x6mm	50x4m	50x4mm	40x3m	50x7mm	50x4mm
Aluminium	75x6.5mm	50x6m	50x7mm	50x4m	75x8mm	50x7mm

Table 5c Preferred Conductor Sizes

表 4.1 接地導線建議規格表

議題 12：對於目前台灣海上風電併網瓶頸之建議方案？

GE 回覆：經國外顧問公司評估台灣彰化外海之風場容量至少約 10-15GW，如此大的規模，不論在那個國家或電力公司，若以目前既有電網設備來做系統模擬，併網瓶頸是一定會發生的，何況台灣南電北送的問題更為嚴重，新建線路除時程難以管控外，高漲的民意更是一項未知性極高的挑戰，該公司初步建議有 2 個方式，第 1 個是於彰化外海直接建置海上高壓直流變流站，可匯集 2-3 風場的電力後，經直流海纜往北引入核二廠，因核二廠 1 號機預定於民國 110 年除役，故可於核二廠開關場內增建 1 座高壓直流電整流站，將海上直流電力轉為交流後併入既有開關場之輸電線，充分利用電廠除役後恐閒置之輸電線路；第 2 個方式是將南北超高壓三回線中之 1 回線路改為直流系統，意即塔身留用，置換導線及礙子連與相關設備後供直流輸電，如此可大幅提高送電容量，惟 GE 公司表示該公司尚未有改建實績，但可提供研究文件及相似案例供本公司參考。

5. 實習心得與建議事項

5.1. 實習心得

首先，感謝本處江處長武照、劉副處長金溢與賴經理良時的肯定與提攜，選派職參與本次的出國實習計畫，學習新知，充實自我。另感謝 GE 台灣分公司洪副總世宇及 GE 芬蘭、GE 英國分公司等相關人員安排的研討會與參訪行程，並且提供了相當寶貴的經驗與技術資料，使職此趟實習收穫更為豐富外，亦讓人深刻感受到該公司致力於海上實務的用心與投入。

在本次實習過程中，亦發現國外變電站諸多設計理念與我國差異頗大，例如 161kV GIS LCC 箱的位置及排列(控制盤與電驛盤交錯配置)、控制室的規劃(僅有人機界面無操作盤)、電纜路徑規劃(不一定要走直角)，以至於接地系統(接地網採用銅排及蓄電池台架接地)等，差異大到讓人不禁懷疑到底是孰是孰非，但後來深入思考，其實無所謂的對錯，而是因為很多法規及標準乃因地制宜，並依時空環境不同而有不一樣的設計邏輯，況且隨著施工技術與機具的進步與改善，標準作業程序也會隨之調整，所以**準則不是永遠是對的**，因此必須要適時檢討是否有更合適的再加以修訂。

高壓直流輸電系統於國外電網已發展應用多年，雖本公司已持續投入相當多的研究人力，來探討國內採用的可行性，但尚有許多議題還在評估階段，其中高壓直流斷路器因直流波形沒有零點電流，使得在遮斷電流時的條件比傳統的交流正弦波形更為嚴峻，目前應用可透過使用其它絕緣氣體(H₂，N₂，H₂-N₂)來完成遮斷需求，亦有採用主動式斷路器(傳統斷路器搭配半導體元件)或固態斷路器(僅使用半導體元件)來直接切斷電流，只是上述技術對我們這些已習慣交流系統的工程師來說，仍是我們目前較陌生的課題，尚待我們收集更多圖資深入研讀。

本次實習計畫原預定人選因個人因素無法成行，本人剛好符合出國資格，且對本計畫內容有相當興趣，亦已收集許多資料，正好利用此次難得機會出國觀摩，學習更多應用案例，可供未來圖審依據及設計參考。

5.2. 建議事項

5.2.1. 海上變電站及陸域 STATCOM 承包模式採大統包方式採購

海上變電站及陸域 STATCOM 之設備皆有其特定的機電配置與土木結構設計，且其土建基礎及結構設計對整個系統的設備運轉及操作安全相當重要，故不可歸類為一般設計案來規劃，亦不可比照傳統材料採購方式辦理，更何況國內在設計、施工及監造皆無相關實績與經驗，故建議參考國外發包模式，委外技術服務辦理，將國外有規劃實務及監造經驗之顧問公司引入國內，透過母雞帶小雞的方式協助本公司辦理初期規劃及各項技術評估，訂定相關採購規範後，再採大統包(EPCI: Engineering, Procurement, Construction and Installation)方式採購，以利工程進度管控與減少施工介面，目前台電一期海上風力計畫即採前述採購模式。

另外，本公司將於彰工升壓站、永興開閉所及彰埤開閉所建置 STATCOM 系統(本公司尚無實績)，但經查目前初步規劃之採購方式係採機電設備與土木施工分別發包之方式，因各 STATCOM 設備廠商(GE、ABB、SIEMENS 等)規劃之配置不同且差異極大，為減少機電廠及土木包商日後施工疑義及介面處理糾紛的機率，擬建議權責部門採大統包(EPCI)方式採購，由得標廠商負責設計、供料、施工及安裝，並待設備加入系統後提供一定年限之器材保固，以確保新系統運維正常。

5.2.2. 沿海地區變電所之接地網線及引線採埋設銅排導體方式規劃

本公司興建各級變電所接地系統所使用之接地線材規係依據輸變電工程處作業標準 TSPD-SD-16-33「變電所接地系統設計準則」第 4.6 節規定，E/S 接地網線使用 100mm²裸硬銅線，其他變電所為 80mm²裸硬銅線；E/S 接地引線使用 250mm²裸軟銅線，其他變電所為 150mm²裸軟銅線。

近來彰化沿海地區之變電所接地網線及接地引線，有嚴重受損及斷股之情形發生，經初步判定原因應是目前採用之裸硬/裸軟銅線係屬銅絞線，因當地土壤富含鹽分且地下水水位較高，含鹽水分子經毛細現象侵入絞線細縫，致銅導體接觸腐蝕物之面積增加，再經長時間侵蝕下，最終造成銅線嚴重受損及斷股之情形。

參考英國變電所接地設計標準 TS 3.01.02 「Earthing」，詳如表 4.1，其接地網線及引線均採銅排導體配置，E/S 等級之變電所接地網線使用 50x6mm 銅排，其他變電所為 50x4mm 銅排；E/S 等級之變電所接地引線使用 50x4mm 銅排，其他變電所為 40x3mm 銅排，除其與含鹽土壤相對接觸面積較小，有較高之耐腐蝕性外，經詢該國使用實績，目前僅發現銅綠現象，尚無其它嚴重腐蝕情形。



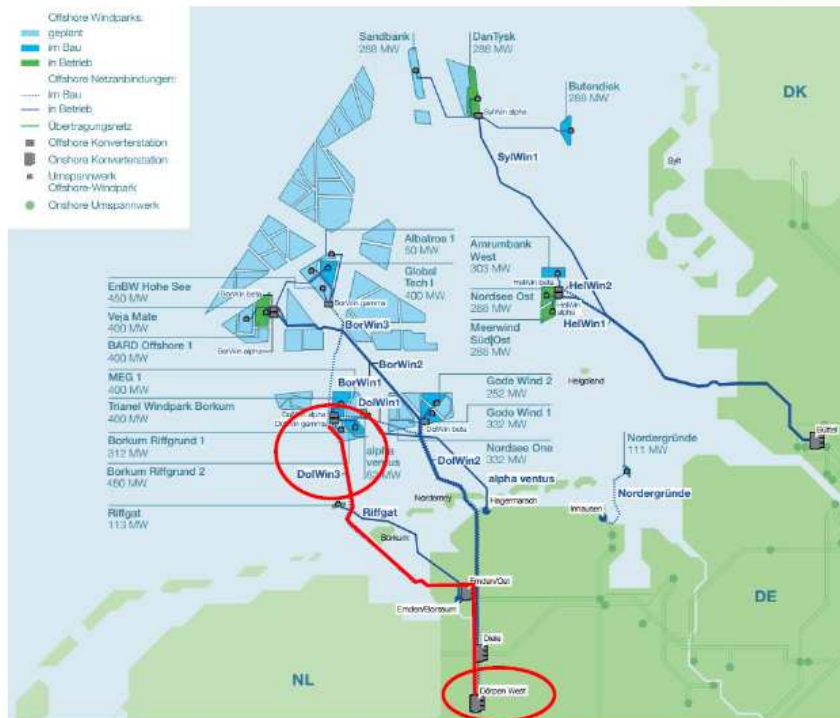
本建議事項擬採公司提案制度送請輸變電工程處機電技術組檢討，於作業標準 TSPD-SD-16-33「變電所接地系統設計準則」內增列沿海地區變電所之接地網線及引線採埋設銅排導體方式規劃，其導體尺寸可參採英國 TS 3.01.02 「Earthing」之標準設計。

圖 5.1 英國變電站之接地網銅排

5.2.3. 邀請機電設備廠或顧問公司辦理技術研討會及教育訓練

海上變電站機電配置規劃、STATCOM 系統及高壓直流傳輸等均是本處同仁極其陌生的領域，建議可積極邀請機電設備廠或顧問公司辦理技術研討會或教育訓練，從設計、施工及監造等各面向來指導與分享，除可增加與業界技術交流的機會外，並可藉由國外實務經驗解析，加速同仁熟悉各項器材特性及設計需求，並幫助未來參與實際規劃之同仁，收集更多可利用之圖資。另外，除邀請廠商辦理技術研討會外，亦可於各集會中積極鼓勵同仁赴國外觀摩實習，學習國外新興電力技術，展望未來能突破傳統思維、跳脫框架限制、擴展設計角度。

附件：DOLWIN3 海上高壓直流變流站

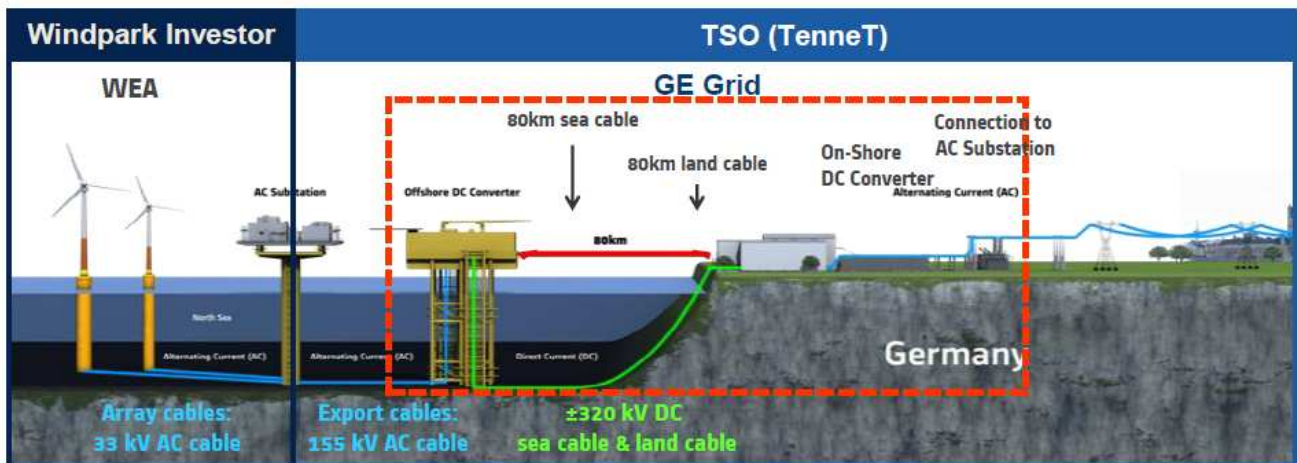


900 MW
Transmission Scheme
@ +/- 320 kV DC

Source: TenneT

Offshore Wind farm grid connection

GE Grid Solutions experience - DOLWIN 3 – HVDC grid connection



DolWin3 Scheme Key data:

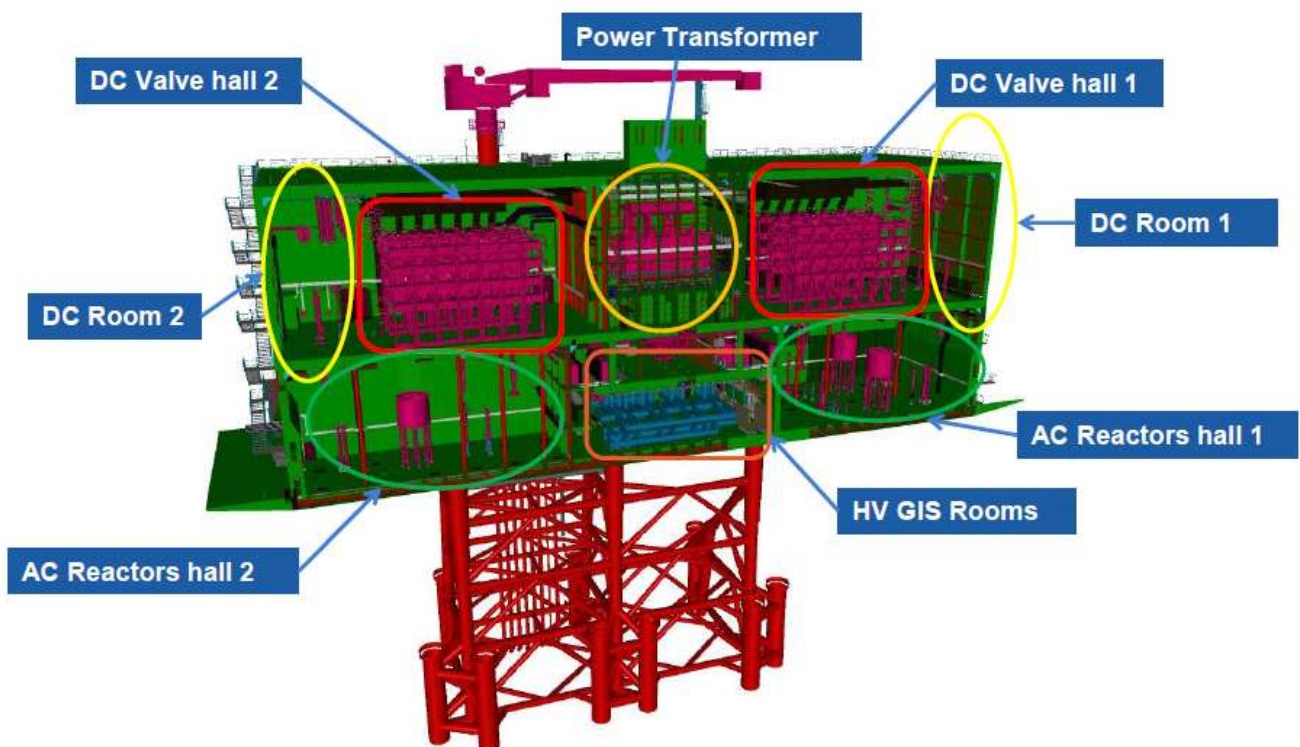
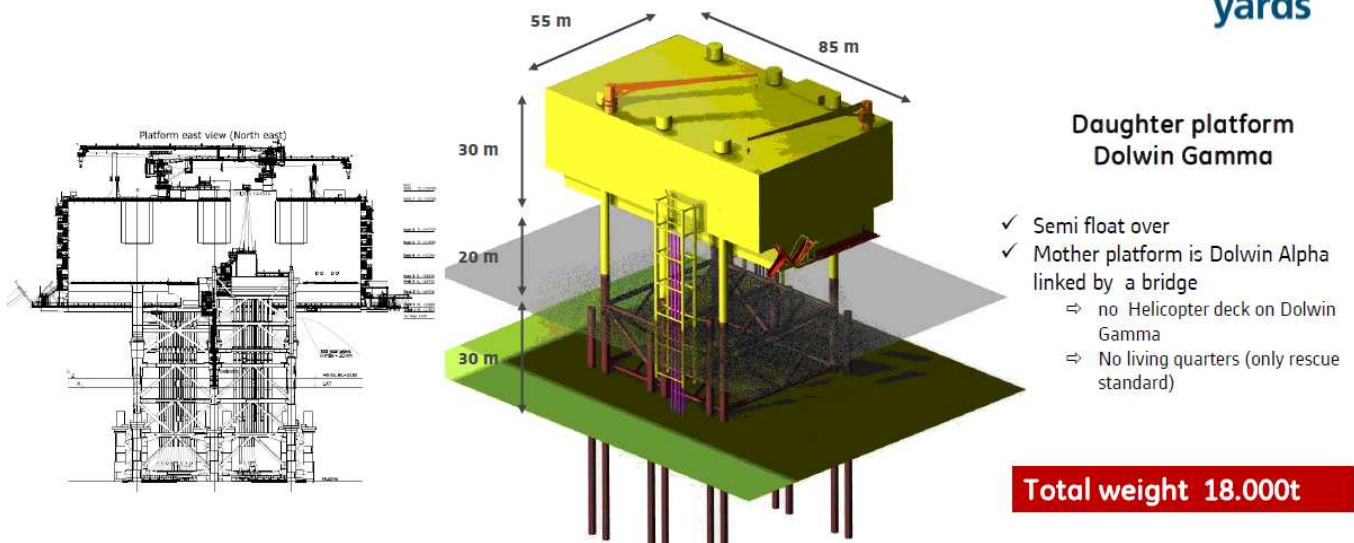
- ⇒ Connecting up to 5 OWF in the German North Sea
- ⇒ $\pm 320\text{kVdc}$, 900MW, 155kVac offshore and 380kVac onshore
- ⇒ Parallel operation of 2 x 3 phase transformers
- ⇒ Dynamic Braking System (on shore)

GE main partners:

- ✓ Prysmian (HVDC Cables)
- ✓ Nordic Yards (Platform & Baseframe)

Main parties/authorities involved:

- ⇒ TenneT (TSO)
- ⇒ Bundesnetzagentur (Federal Grid Agency)
- ⇒ BSH (Federal Maritime and Hydrographic Agency)
- ⇒ HVDC/AC substation contractor(s)
- ⇒ HV-cable contractor(s)



Offshore Wind farm grid connection GE Grid Solutions experience - DOLWIN 3 – 155 kV GIS

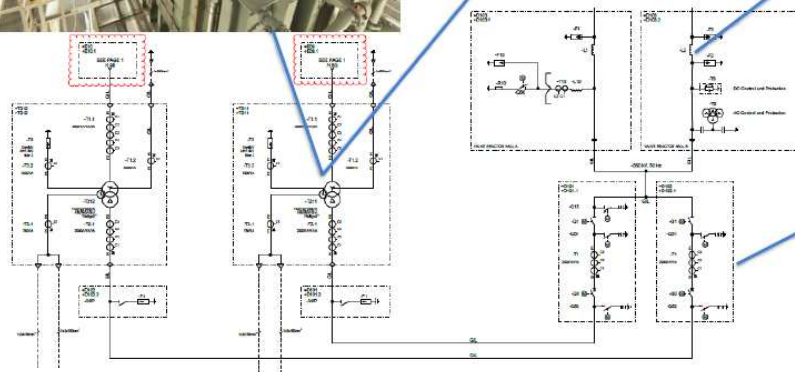
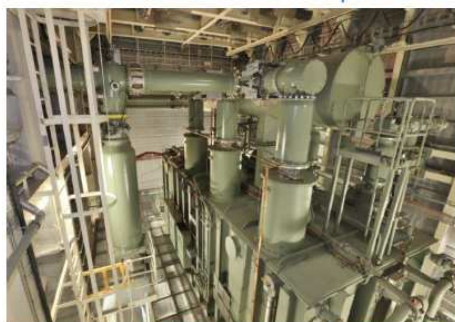


DATA GIS 155kV	
RATED VOLTAGE	170kV
RATED FREQUENCY	50Hz
RATED SHORT DURATION POWER FREQUENCY VOLTAGE (RMS)	
* PHASE – EARTH, PHASE – PHASE, CONTACT BREAK DISTANCE	325kV
* AIR BREAK	325kV
RATED LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE (PEAK)	
* PHASE – EARTH, PHASE – PHASE, CONTACT BREAK DISTANCE	750kV
* AIR BREAK	850kV
RATED CURRENT	
* BUSBAR AND COMPLETE CONNECTION BETWEEN THE BUSBARS	4000A
* HYD-C TRANSFORMER BAYS	4000A
* ALL REMAINING BAYS	2000A
RATED SHORT CIRCUIT DURATION	1s
RATED SHORT TIME CURRENT	40kA
RATED IMPULSE CURRENT	100kA
CABLE CONNECTION ACCORDINGS TO DIN EN 52371 - 205	



© 2017 General Electric Company. Proprietary. All Rights Reserved. 155 kV GIS Room

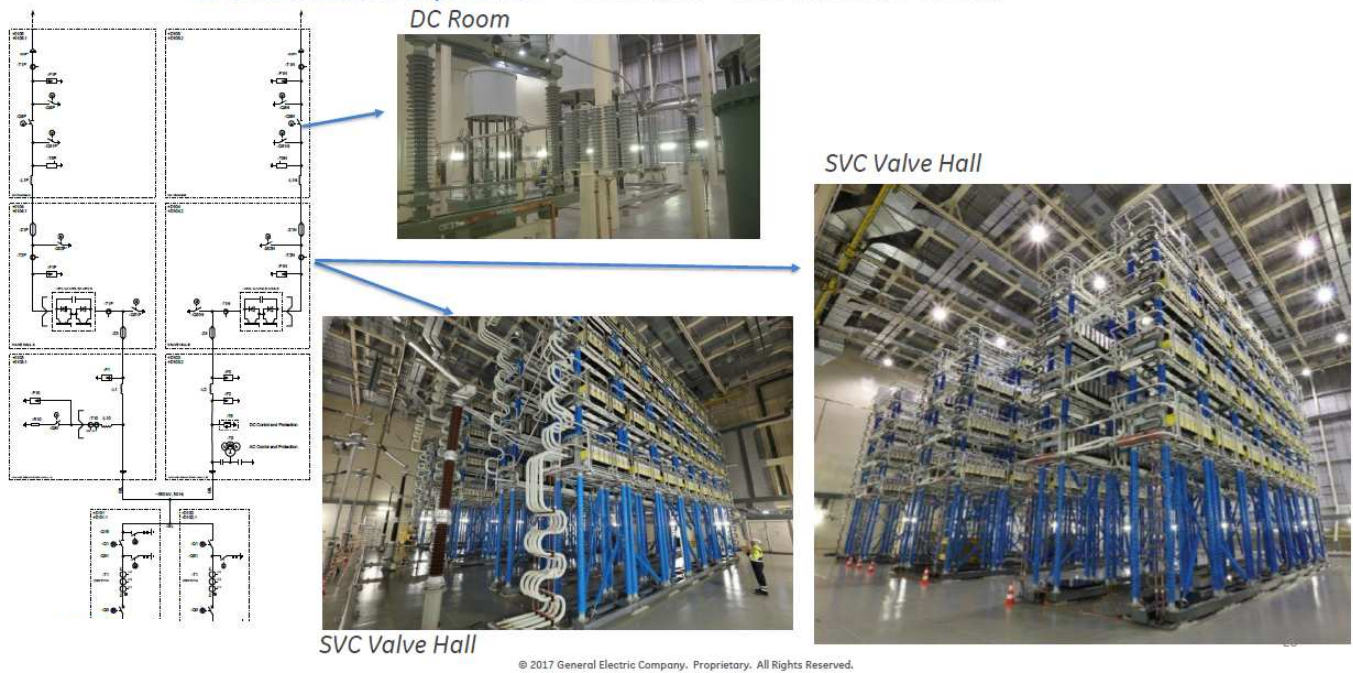
Offshore Wind farm grid connection GE Grid Solutions experience - DOLWIN 3 – Converter Transformer- 350 kV GIS & AC Limb Reactors



DATA GIS 350kV	
RATED CURRENT	2000A
RATED FREQUENCY	50Hz
INSULATION VOLTAGE	420kV
RATED LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE (PEAK)	1425kV
RATED SHORT - DURATION POWER FREQUENCY VOLTAGE (RMS)	1050kV
RATED SHORT - TIME CURRENT	40kA
RATED IMPULSE CURRENT	100kA

© 2017 General Electric Company. Proprietary. All Rights Reserved.

Offshore Wind farm grid connection
GE Grid Solutions experience - DOLWIN 3 – VSC Valve & DC room



Offshore Wind farm grid connection
GE Grid Solutions experience - DOLWIN 3 –
Platform Freshwater plant



Emergency Diesel Generator



Valve Cooling plant



Valve Cooling plant



Fire Fighting gas plant

© 2017 General Electric Company. Proprietary. All Rights Reserved.

29

Offshore Wind farm grid connection
GE Grid Solutions experience - DOLWIN 3 -
Control & Protection cubicles



Control Room



Emergency Distribution board

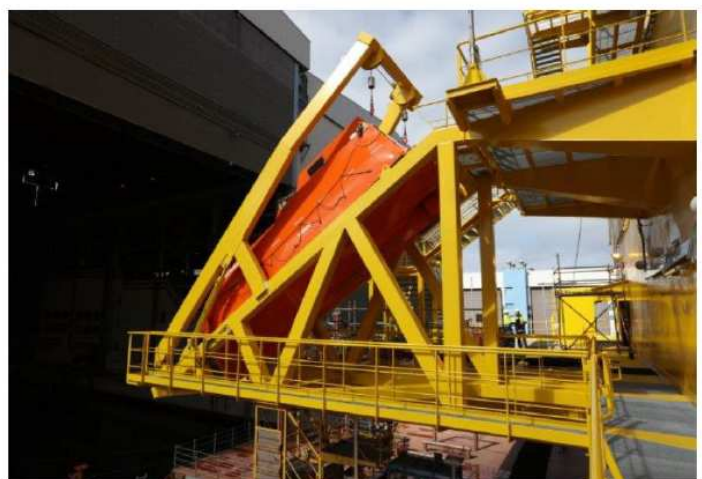


Schiller

© 2017 General Electric Company. Proprietary. All Rights Reserved.

30

Offshore Wind farm grid connection
GE Grid Solutions experience - DOLWIN 3 - Rescue quarters



Emergency rescue boat

© 2017 General Electric Company. Proprietary. All Rights Reserved.

31

Offshore Wind farm grid connection
GE Grid Solutions experience - DOLWIN 3 – Current Status – August 2017

❖ Sea Station :



- ✓ Valve close loop test successfully performed at harbor before platform sailing out
- ✓ Platform installation at sea successfully completed
- ✓ DC export cables connection in progress by Prysmian (*to be completed by mid Sept*)
- ✓ Platform recommissioning (*all auxiliary services*) in progress by Nordic Yard staff
- ✓ GE equipment recommissioning starting in Sept by GE staff (*to be completed by year end*)
- ✓ Valve control software will be uploaded end of November to start cold commissioning
- ✓ Hot commissioning (*power transfer*) scheduled from January to March 2018

❖ Land Station :



- ✓ Equipment installation completed
- ✓ Ongoing cold commissioning
- ✓ Ongoing pre-commissioning of control system
- ✓ Hot commissioning (*power transfer*) scheduled from January to March 2018