

出國報告（出國類別：實習）

複循環機組發電機延壽維護研習
(SIEMENS C&C TYPE)

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：許家銘 電機工程師

派赴國家：德國

出國期間：108 年 08 月 19 日至 108 年 09 月 01 日

報告日期：108 年 10 月 09 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

複循環機組發電機延壽維護研習(SIEMENS C&C TYPE)

頁數 40 含附件：☐是☒否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

許家銘/台灣電力公司/興達發電廠/電機工程師/07-6912811#3311

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究☒4 實習☐5 其他

出國期間：108.08.19~109.09.01

出國地區：德國

報告日期：108 年 10 月 09 日

分類號/目

關鍵詞：西門子、發電機延壽、長扣環修改、定子/轉子線上監測系統、同步調相器

內容摘要：(二百至三百字)

興達電廠複循環機組自 1998 年起運轉迄今已逾 20 年，雖運轉情形尚屬穩定，但配合政府非核家園政策，電力能源配比於 2025 年需達成 5(燃氣):3(燃煤):2(再生能源)之比例；為達能源轉型之目標，既有燃氣機組如何穩定持續運轉便是關鍵，是以本廠為滿足日後更加嚴謹的空品標準並兼顧供電穩定，除將自 2019 年底陸續執行各氣渦輪機核心組件升級改善(repowering)外，更擬於 2020 年底對既有複循環發電機組依序進行延壽工程，以延長運轉壽齡，維持機組運轉穩定。

利用此次出國實習機會，除實地參觀發電機轉子更新流程外，也了解本次發電機組延壽工程的改善方式(轉子重繞與更新並於端匝增設線上監測裝置)，提升職本身對發電機的維護及保養技術，期在日後興復一~五機組運轉及延壽工程上能有所貢獻。另外更有幸聆聽西門子公司的新業務:將除役機組改裝為同步調相器以增加電網之穩定性。箇中經驗或可作為公司除役機組再利用方式參考與借鏡。

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

摘要

興達電廠複循環機組自 1998 年起運轉迄今已逾 20 年，雖運轉情形尚屬穩定，但配合政府非核家園政策，電力能源配比於 2025 年需達成 5(燃氣):3(燃煤):2(再生能源)之比例；為達能源轉型之目標，既有燃氣機組如何穩定持續運轉便是關鍵，是以本廠為滿足日後更加嚴謹的空品標準並兼顧供電穩定，除將自 2019 年底陸續執行各氣渦輪機核心組件升級改善(repowering)外，更擬於 2020 年底對既有複循環發電機組依序進行延壽工程，以延長運轉壽齡，維持機組運轉穩定。

利用此次出國實習機會，除實地參觀發電機轉子更新流程外，也了解本次發電機組延壽工程的改善方式(轉子重繞與更新並於端匝增設線上監測裝置)，提升職本身對發電機的維護及保養技術，期在日後興復一~五機組運轉及延壽工程上能有所貢獻。另外更有幸聆聽西門子公司的新業務:將除役機組改裝為同步調相器以增加電網之穩定性。箇中經驗或可作為公司退役機組再利用方式參考與借鏡。

關鍵字：西門子（SIEMENS）、發電機延壽（Generator Life Time Extension）、長扣環修改（Long Ring modification）、定子/轉子線上監測系統(online monitoring system)、同步調相器（Synchronous Condenser）

目次

一、出國目的	-3-
二、研習行程	-3-
三、心得	-4-
1. 興達電廠複循環機組簡介	-4-
2. SIEMENS Gas Turbine 工廠參訪	-5-
2.1. 氣渦輪機製造及維修流程參觀	-5-
2.2. 西門子新型氣渦輪機介紹：SGT-9000HL	-6-
3. SIEMENS Generator 工廠參訪	-9-
3.1. 發電機延壽策略介紹	-9-
3.2. 發電機轉子重繞(Rotor Rewinding)流程參觀	-24-
四、西門子同步調相器(Synchronous Condenser)業務簡介	-34-
五、西門子控制元件工廠導覽	-38-
六、心得與建議	-39-
參考文獻	-40-

一、 出國目的

興達電廠複循環機組自 1998 年商轉迄今已逾 20 年，日常運轉情形尚屬穩定，但配合中央政府非核家園政策，除了電力能源配比需於 2025 年需達成燃氣:燃煤:再生能源 = 5 : 3 : 2 之比例外，地方政府對於電廠排放的氮氧化物也有更加嚴謹的規範；為達能源轉型之目標，同時滿足空氣品質與供電穩定的要求，既有燃氣機組如何穩定持續運轉便是關鍵；是以本廠已於今年初完成所有複循環機組的起動勵磁設備與控制系統之升級與更新，亦將於今年年底陸續執行各氣渦輪機核心組件升級改善 (repowering)，並擬於明年度(2020 年)對既有複循環發電機組依序進行延壽工程，以延長運轉壽齡，維持機組運轉穩定。

為對此次發電機延壽方式有進一步瞭解，使日後興複一～五機之延壽工程進展能更流暢，同時一併精進本廠運維技術，故擬前往德國西門子公司(SIEMENS)汲取原廠經驗，並學習其發電機日常維護策略及技術，冀能利用此次出國實習機會，拓展個人視野並提升本身對該機組的日常維護及保養技術，以期於未來的延壽工程上能有具體貢獻。

二、 研習行程

日期	行程	工作摘要
8/19~8/20	台北 → 法蘭克福 → 柏林	啟程
8/21~8/22	SIEMENS GT 工廠參訪	1. SIEMENS 最新機組介紹 2. GT 維護流程參觀
8/23~8/28	SIEMENS 發電機 工廠參訪	1. SIEMENS 發電機延壽策略概述 2. 發電機 維護與生產流程參觀
8/29~8/30	SIEMENS 控制元件 工廠導覽	1. SIEMENS 遠端連線功能介紹 2. 控制元件自動化生產流程參觀
8/31~9/1	法蘭克福 → 台北	賦歸

表 1:德國研習行程表

三、心得

1. 興達電廠複循環機組簡介

現今複循環機組設備主要包括氣渦輪機（Gas Turbine，GT）、廢熱鍋爐（Heat Recovery Steam Generator，HRSG）及汽輪機（Steam Turbine，ST）。其中GT使用天然氣為燃料，將其噴入燃燒筒與壓縮空氣混合燃燒後，產生高溫高壓的燃氣來推動GT帶動發電機產生電力，此為「布雷登循環(Brayton Cycle)」；爾後將GT做功後的排氣餘熱排放於熱回收鍋爐(HRSG)並加熱飼水產生蒸汽，再推動另一汽輪機帶動之發電機產生電力，此為「朗肯循環(Rankine Cycle)」；結合此兩種循環之發電機組便稱為「複循環發電機組(Combined Cycle Power Plant:CCPP)」。

本廠共有5部複循環發電機組，皆為德國西門子公司所製造，並於1998~1999年間陸續商轉。單部機組容量為44.5萬瓩，總裝置容量共約220萬瓩，佔公司整體裝置容量約4.9%，皆採3對1匹配方式(3GT+1ST+1HRSG)。其中氣渦輪發電機(GT)為SIEMENS TLRI 93/33-36型發電機，採空氣冷卻方式(air cooling)，共15台。每台容量為106MVA；汽輪發電機(ST)則為SIEMENS TLRI 108/46-36型發電機，也是空氣冷卻方式，共計5台，每台容量為224.5MVA。此外為符合地方政府空氣品質的規範及達成空汙減量的規劃，本廠於2013~16年間陸續完成De-NO_x環保工程，有效降低氮氧化物(NO_x)排放量達290公噸/年。



圖 1: 西門子 GT 外觀



圖 2: 西門子 ST 外觀

2. SIEMENS Gas Turbine 工廠參訪

西門子股份有限公司（SIEMENS AG）為德國的大型跨國企業，其電子與電機產品是全球業界先驅，並活躍於能源、醫療、工業、基礎建設及城市業務等領域。由維爾納·馮·西門子於 1847 年所創立，總部位於德國慕尼黑和柏林；旗下的柏林工廠建立於 1904 年，最初只生產汽輪機，目前則是氣渦輪機專責生產工廠。



圖 3: 西門子 1ST GT



圖 4: 柏林工廠參訪合影

2.1. 氣渦輪機製造及維修流程參觀

前往參訪實習的西門子柏林工廠雖然已有115年的歷史，外表古樸而不顯老舊，廠房沉穩而不乏綠意點綴，內部配置嚴謹而不壅擠，環境更是讓人印象深刻，窗明几淨，只有空氣中淡淡的機油味透出其歷史的軌跡。此外有幸目睹興復五機repowering所購置的氣渦輪機製造整備狀況，是特別而幸運的經歷。



圖 5: 複五機 GT 整備



圖 6: 複五機 GT 包裝待運

2.2. 西門子新型氣渦輪機介紹：SGT-9000HL

在此次參訪中，除了現場製造流程的導覽外，配合本公司興達、中火新燃氣機組的增建，西門子公司同時簡報了他們最先進的氣渦輪機型:SGT-9000HL。

SGT-9000HL 於 2013 年開始研發設計，並於 2019 年陸續在美國(60Hz; simple cycle)及英國(50Hz; combined cycle:1X1)進行實地功能驗證；考量現今國際對電廠空氣品質與碳足跡的規範日益嚴格，該公司亦將於 2022 年進行既有燃煤機組改建成複循環發電機組的計畫以確認此機型的相容性。

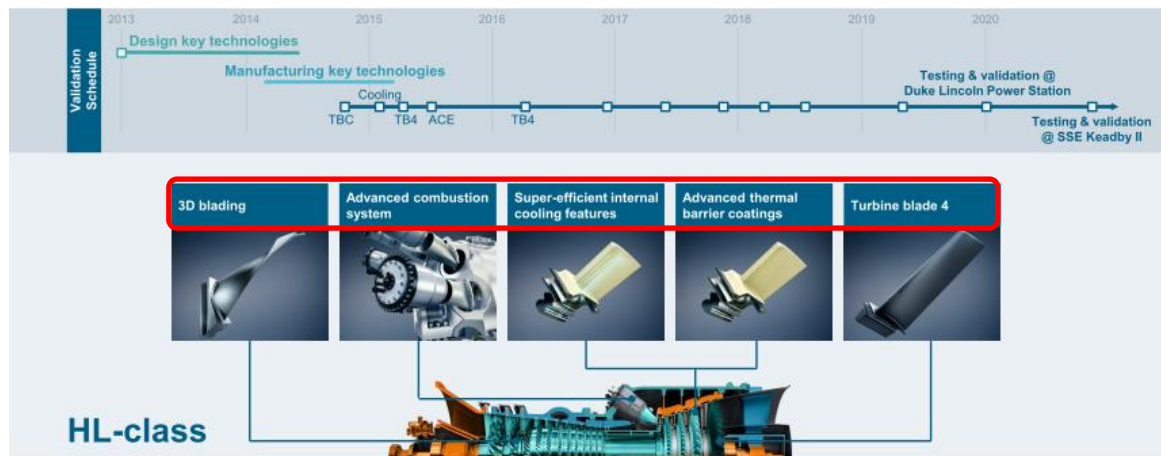


圖 7:SGT-9000HL 發展藍圖

該氣渦輪機設計概念採「見賢思齊，溫故知新」；以目前主流三大機型 (SGT4000F/5000F/8000H) 的主要優點(單一貫穿螺栓-赫氏齒固定式轉子(西門子專利)、空冷式四級渦輪、環狀燃燒系統)為基礎研發而成，並有以下四個特點：

1. 先進環狀燃燒系統。
2. 高效冷卻特性。
3. 優異耐熱塗層。
4. 各級葉片曲率最佳化。

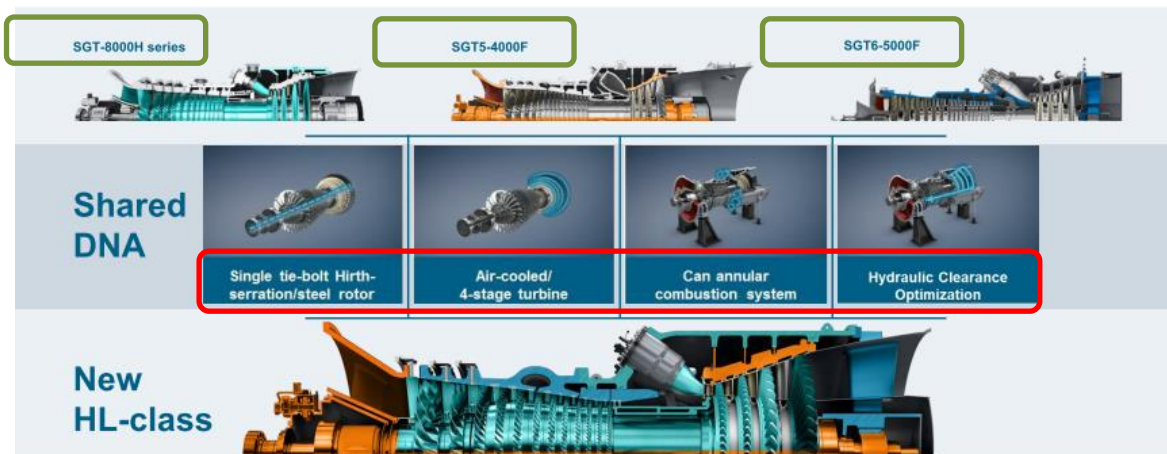


圖 8:SGT-9000HL 概觀示意圖

此外，本款機型採用單一貫穿螺栓-赫氏齒固定式轉子；不抽轉子即可更新各級葉片；不用開蓋便可進行第一級葉片更換。故可有效降低維護成本與減少大修停機的時間與頻率，增加機組可使用率(如圖 8 所示)：

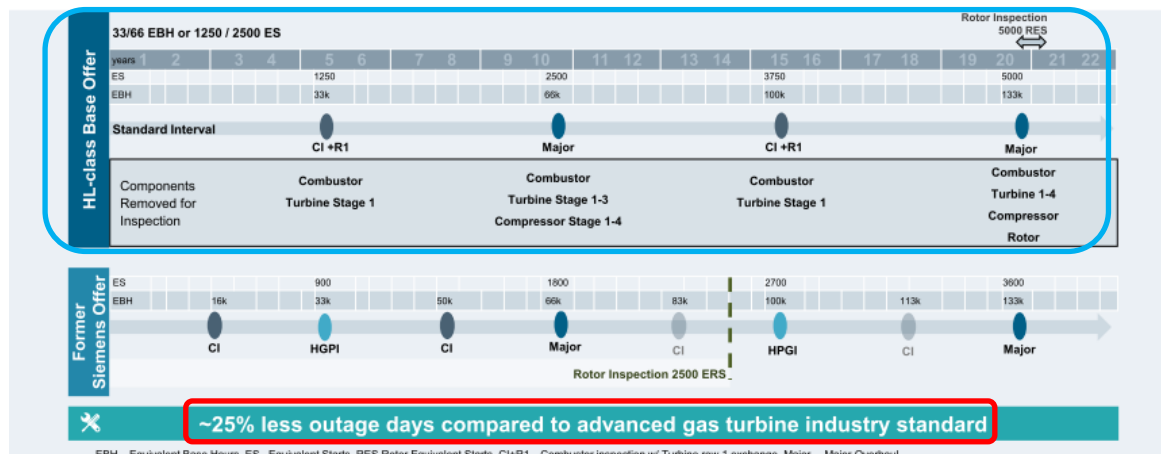


圖 9:SGT-9000HL 大修時程圖



圖 10:SGT-9000HL 特徵示意圖

SGT-9000HL 的尺寸與實測結果如下表 2 與表 3 所示：

單循環運轉		
機型	SGT5-9000HL	SGT6-9000HL
燃料	天然氣或 LNG	天然氣或 LNG
頻率(Hz)	50	60
出力(MW)	593	405
升載率(MW/min)	85	85
效率(%)	42.8%	42.6%
熱轉換值(kJ/kWh)	8411	8451
額定轉速(rpm)	3000	3600
壓力比	24 : 1	24 : 1
排氣率(kg/s)	1050	725
出口溫度(℃)	670	670
NOx 濃度(ppm)	≤ 2ppm with SCR	≤ 2ppm with SCR
CO 濃度(ppm)	10	10ppm
重量(kg)	497000	305000
長度(m)	13.0	10.8
高度(m)	5.3	5.0
寬度(m)	5.5	4.3

表 2:SGT-9000HL 單循環參數表

複循環運轉				
機型	SGT5-9000HL		SGT6-9000HL	
頻率(Hz)	50		60	
配置	1 X 1	2 X 1	1 X 1	2 X 1
出力(MW)	870	1740	595	1190
效率(%)	> 63%	> 63%	> 63%	> 63%
熱轉換值(kJ/kWh)	< 5714	< 5714	< 5714	< 5714
壓力/再熱	三重/是	三重/是	三重/是	三重/是
蒸氣溫度(℃)	> 600	> 600	> 600	> 600

表 3:SGT-9000HL 複循環參數表

3. SIEMENS Generator 工廠參訪

西門子發電機與汽輪機(ST)是位於同一廠區製造，不同於柏林工廠，此處採一條龍式的製造流程：從最初的元件生產、發電機的組裝、動平衡測試(120%額定轉速)、到最終包裝運輸(鐵道或船運)皆在本廠區完成，所以佔地相當遼闊，廠房雖沒有柏林的古色古香，但仍秉持德國一貫的沉穩內斂。



圖 11:發電機工廠一隅



圖 12:發電機工廠參訪合影

3.1. 發電機延壽策略介紹

在開始工廠的現地參訪前，西門子公司為我們簡報了本次發電機延壽工程所採行的策略，主要可分為**轉子的更新與重繞**及**定子/轉子的線上監測**兩部分。配合本廠歲修與運轉時程，於延壽工程初期西門子公司將提供7支新轉子(2支ST及5支GT，與重繞的轉子相同皆包含最新改善設計。)其餘12支轉子將於各機組大修停機時(GT31已先行於2018.09完成轉子更新)，依序送回西門子發電機工廠進行重繞與修復，其轉子外觀示意與替換流程如圖13及圖14所示：

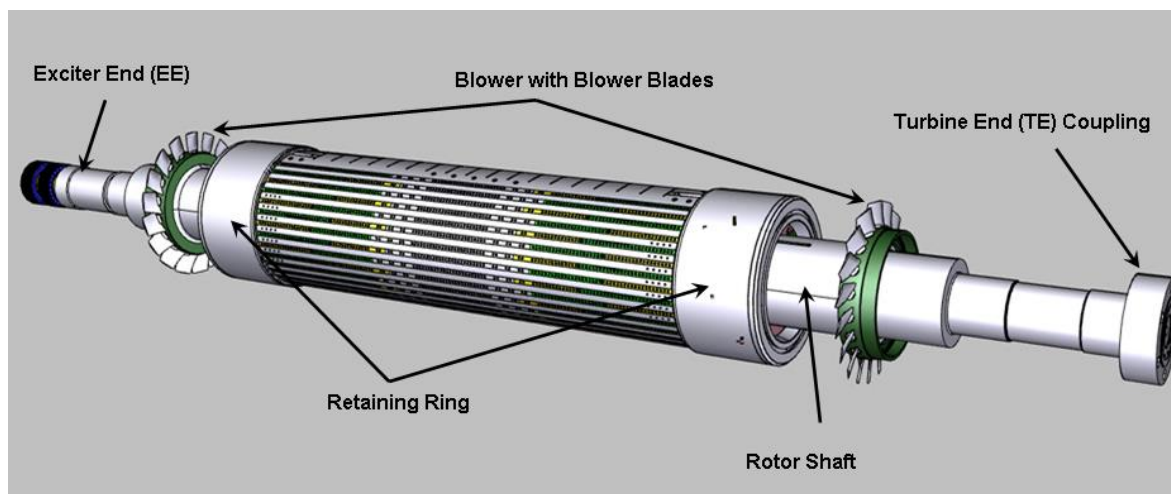


圖 13:發電機轉子構造示意圖

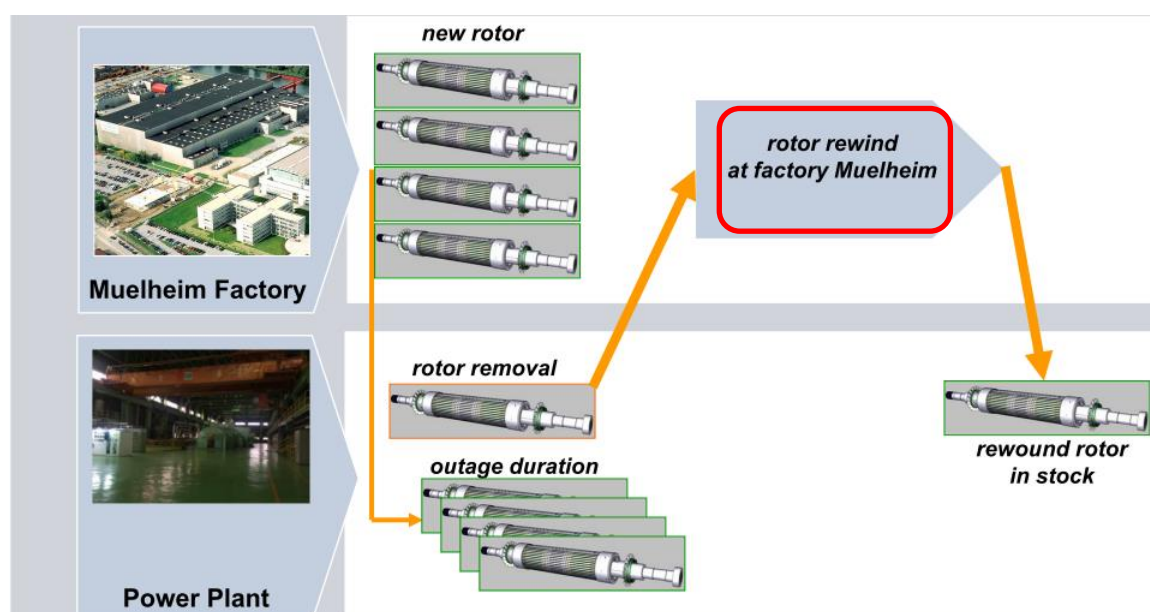


圖 14:發電機轉子替換流程圖

進行轉子重繞(Rotor Rewinding)時，除了ST轉子動葉片留用外，GT轉子動葉片及所有線圈一併更新，其端板(End Plate)、扣環(Retaining Ring)、固定環(Lock Ring)及集流環(Slip Ring)同時配合更新；J-導體(J-lead)將重新品測，視結果予以留用或更新；轉子本體(Rotor Body)與槽楔(Wedge)、動葉片轆(Blower Hub)及渦輪機側聯軸器(TE Coupling)亦會重新檢測其妥適性，整體更換部件如圖15所示：

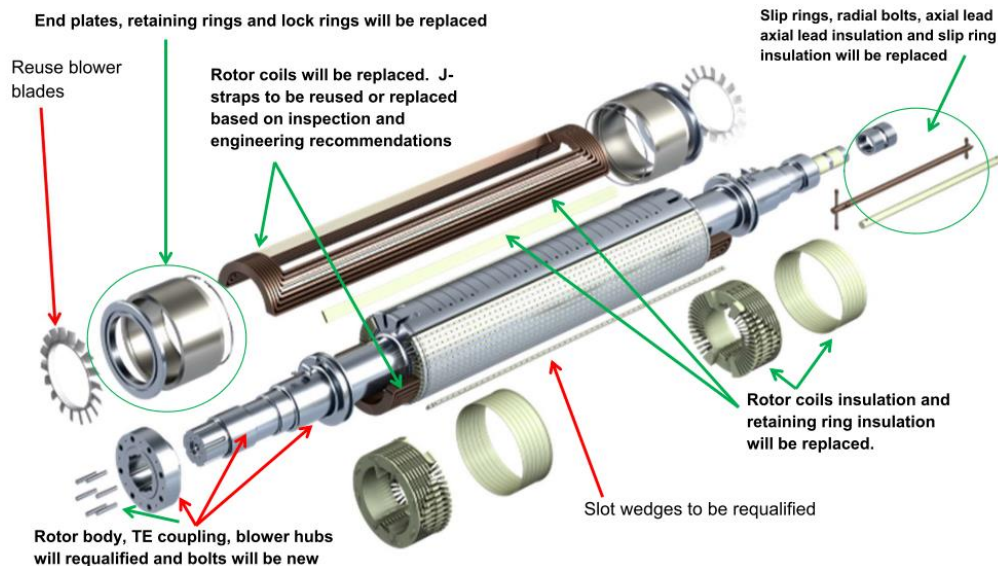


圖 15:發電機轉子部件更新分布圖

除了上述部件會更新或重新檢測外，轉子重繞時將同時採行下列翻修策略：

1. J-導體結構更新(可撓式:laminated copper)
2. 扣環與槽齒(Tooth top)結構改善(長扣環修改:long ring modification)
3. 極銜接部結構改善(“Ω-shape” pole crossover)
4. 導流板 (Gas Baffle) 結構與材料更新(more flexible material)
5. 端匝結構車修(Machine End Arc ; for ST)

	Main Lead	Retaining Ring Shrink Fit	Pole Cross Over	Gas Baffle	Machine End Arc
Position in Rotor					
Example of Finding					
Description of Solution	 • Laminated copper • Improved geometry	 • Modification of shrink fit on retaining rings	 • “Omega”-shaped pole cross over • Improved geometry	 • Two piece blocks • Non-conducting & more flex. material	 • No Corner Brazes, but keeping advantage of non-bending design

圖 16:轉子更新策略說明

今就上述表列概述如下：

1. J-導體結構更新：

J-導體是轉子線圈與軸向導體(axial lead)的連接部位，當發電機正常運轉時，J-導體會受軸向與徑向兩種應力(axial/radial stress)；其中軸向應力是由轉子端匝部位的熱膨脹所造成，徑向應力則來自於發電機運轉時所產生的離心力；因此J-導體便成為應力集中處(應力分析與說明如圖17所示)：

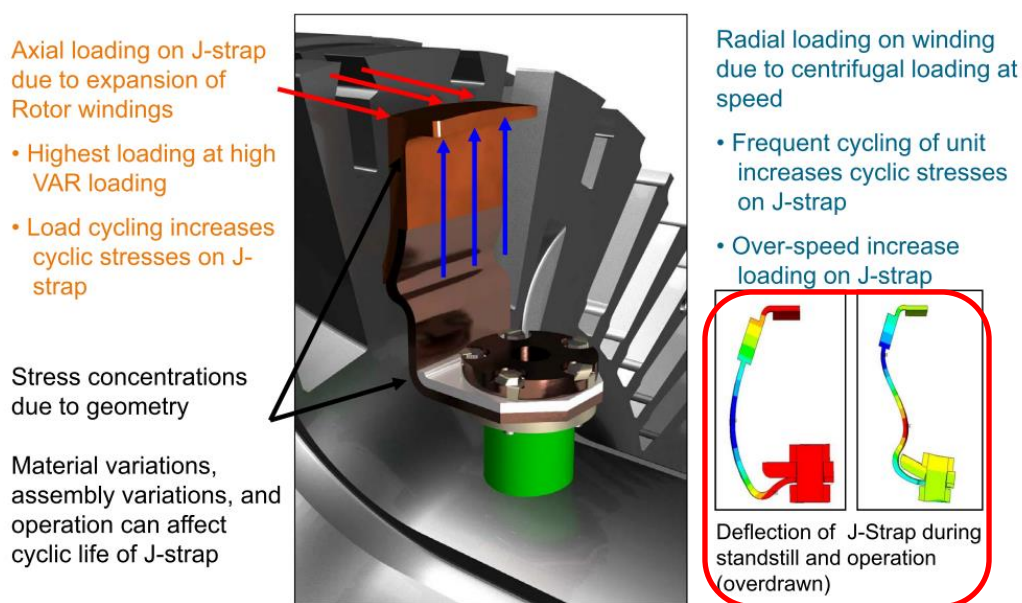


圖 17:J-lead 應力分析圖

隨著機組運轉時間日久，累積的應力會使J-導體產生裂縫(crack)甚至剝落(separation)的現象(如圖18所示)，造成轉軸局部發熱而損傷轉子。故西門子公司將J-lead改為可撓式(laminated copper)並重新設計其幾何形狀，以改善應力集中的效應(如圖19所示)。



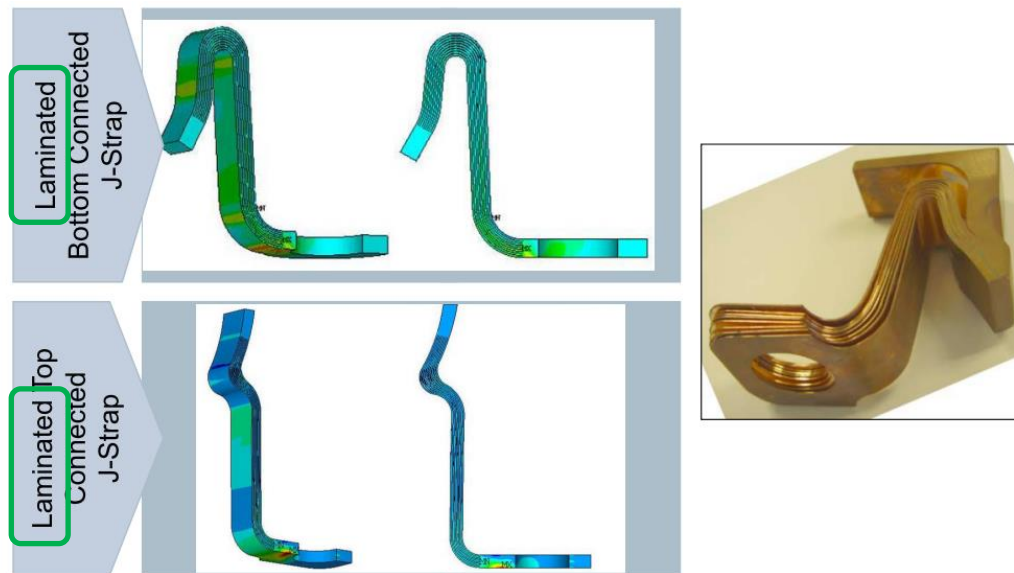


圖 19: laminated J-lead 應力分析

2. 扣環(Retaining Ring)與槽齒(Tooth top)結構改善:

轉子槽齒(位於扣環內側，位置與結構如圖20所示)，除locking key造成的軸向應力外，於運轉/停機時依序會遭受張應力(tensile stress)/壓應力(compressive stress)，長時間累積下來，槽齒容易有裂縫現象發生，影響發電機運轉的穩定性(應力分析與裂縫照片如圖21)；有鑑於此，西門子公司開發出“長扣環修改:long ring modification(LRM)”技術來修復槽齒遭受的損傷。

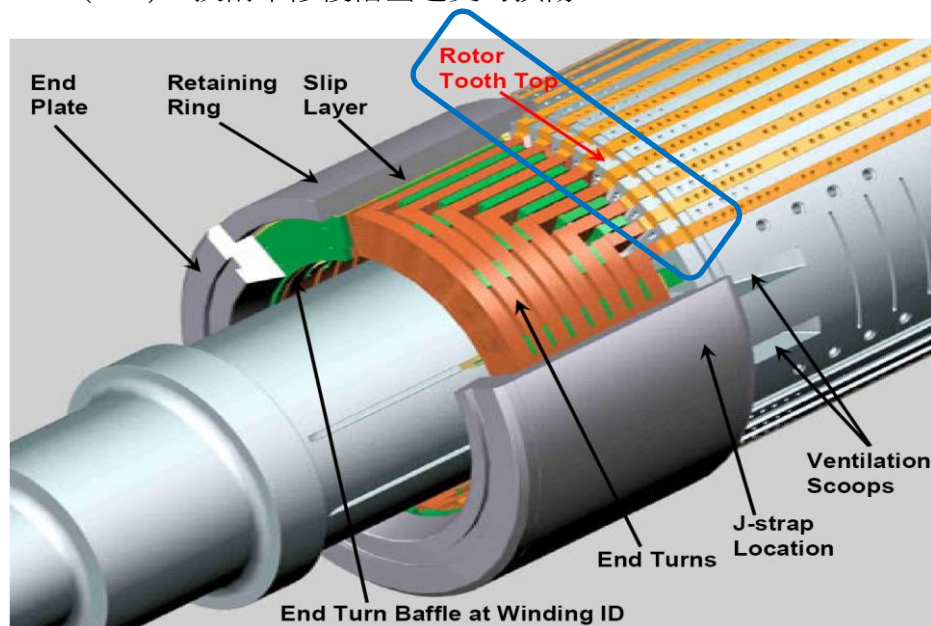


圖 20: 轉子端部結構圖

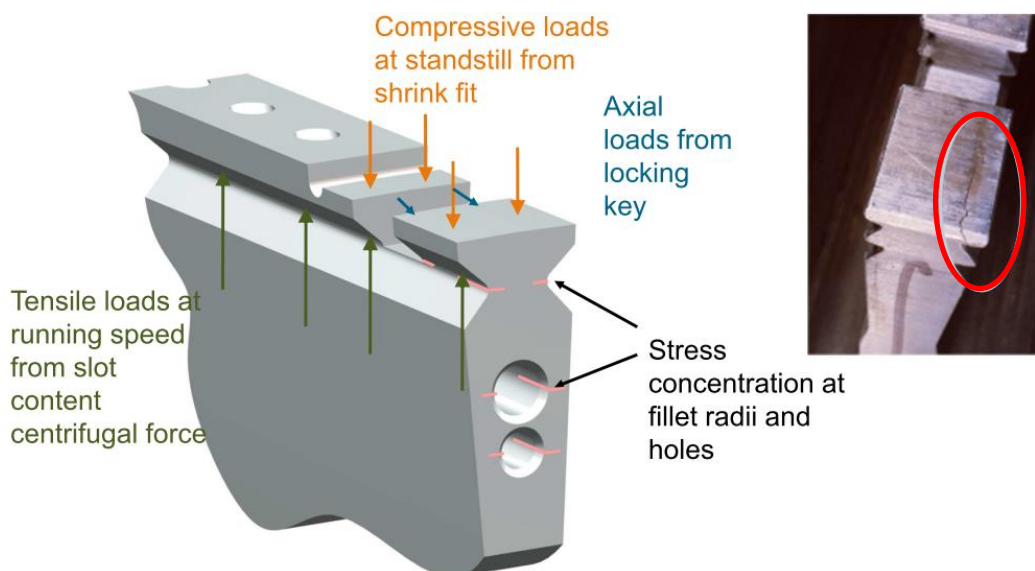


圖 21:轉子槽齒應力分析與裂縫示意圖

Long ring modification(LRM)會車修收縮套管(shrink kit)及槽齒受損部位，並更換扣環本體(採用18Mn-18Cr合金)，車修範圍大致是60mm(for GT)/100mm(for ST)，其主要步驟有三：

1. 磨除鍵槽(keyway)外側的槽齒:降低排氣孔(vent hole)所受的離心力。
2. 車修鍵槽內側fillet部位:減輕wedge所受應力。
3. 車修扣環的收縮套管:改進收縮套管特性。

步驟流程及車修方式如圖22、23所示：

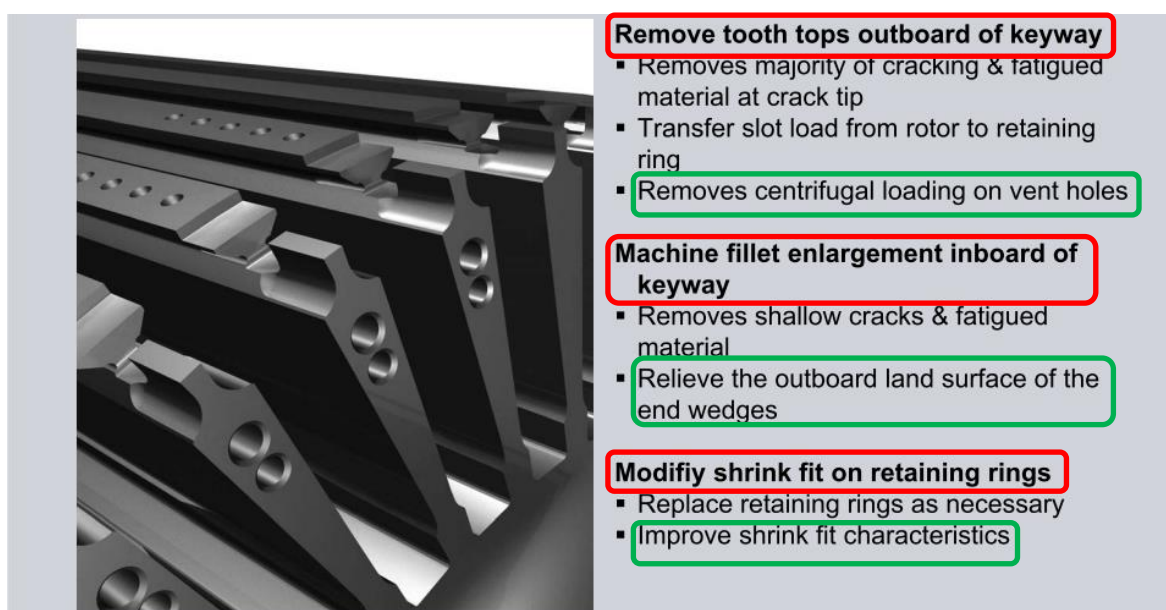


圖 22:LRM 步驟流程

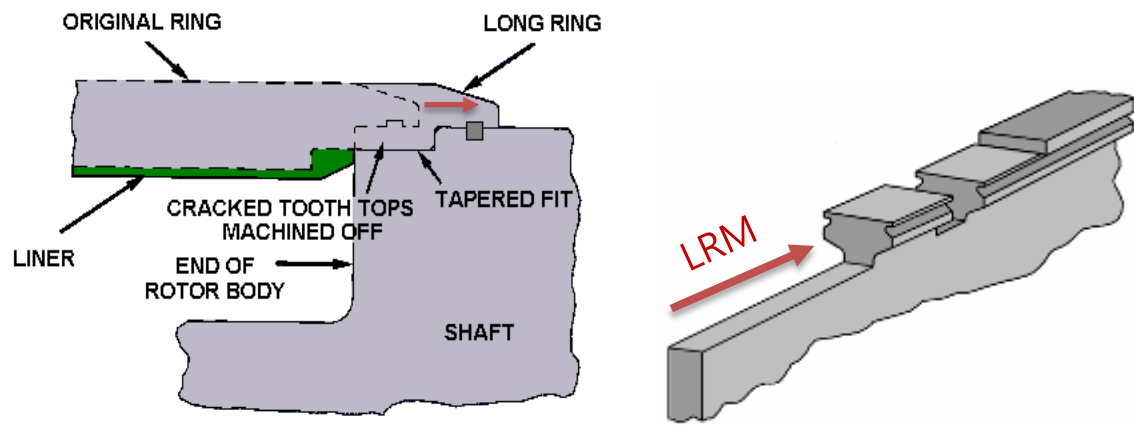


圖 23:LRM 車修示意圖

3. 極銜接部改善(pole crossover modification):

轉子原本的極銜接部因幾何結構的關係，容易造成熱應力的集中，甚至有斷裂的情形發生(如圖24)，影響機組運轉的可靠度(reliability)。因此西門子公司從材料及機械工程著手，使用更有彈性、更耐應力的材料，也將銜接部位的形狀改為“Ω-shape”並調整銅焊部位，改善應力的分布狀況(如圖25所表示)。可以有效避免斷裂情形再度發生。



圖 24:pole crossover 斷裂照片

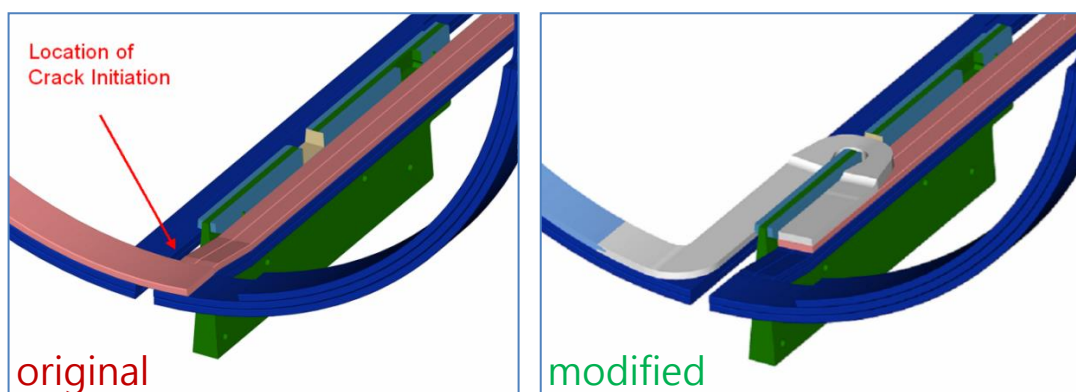


圖 25:pole crossover 改善對照圖

4. 導流板 (Gas Baffle) 結構與材料更新:

原發電機所使用的導流板是玻璃纖維材質(fiber glass)，對機組運轉產生的離心力耐受度較差，容易有剝落甚至斷裂的情形發生(如圖26所示)。剝落的斷片如果阻塞轉子的冷卻氣孔，將導致轉子線圈的局部發熱(local heating)造成損害；導流板斷裂會引起發電機組的高振動，甚至導致轉子短路或接地，因而被迫停機檢修。

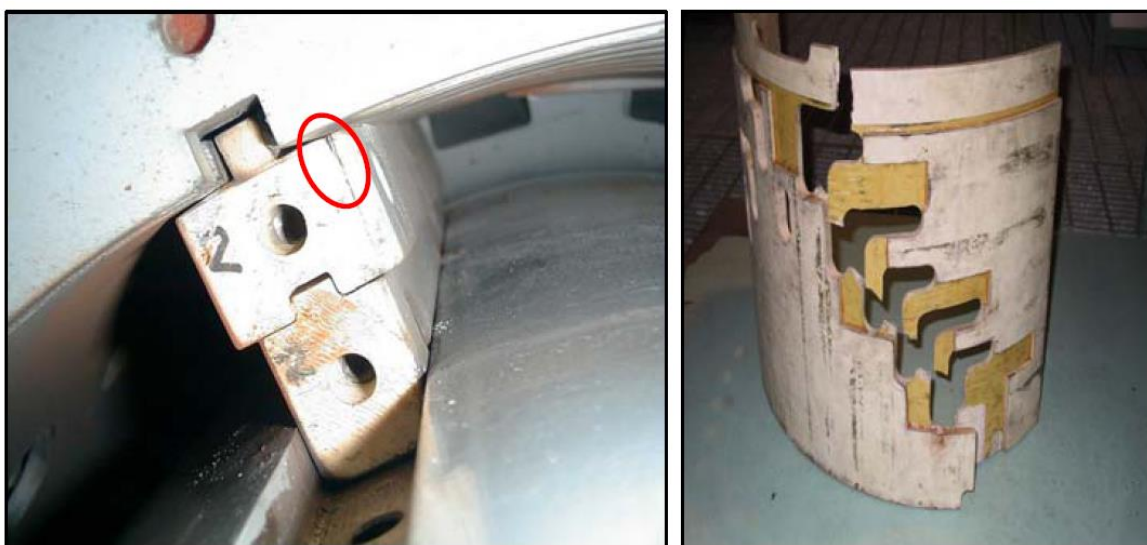


圖 26: 導流板 受損照片

因為上述狀況的發生，西門子公司做了下述的設計變更，以降低導流板剝落與斷裂的發生機率，改善機組運轉的運定度：

1. 選用更加有彈性的材料以抵受運轉時的離心力。
2. 減少導流板的構件數目。
3. 端塊(end piece)固定位置更改以降低導流板的軸向應力(如圖27A處)

4. 將原本的不鏽鋼彈簧部件換成非金屬材質，避免轉子短路情況發生(如圖27B處)

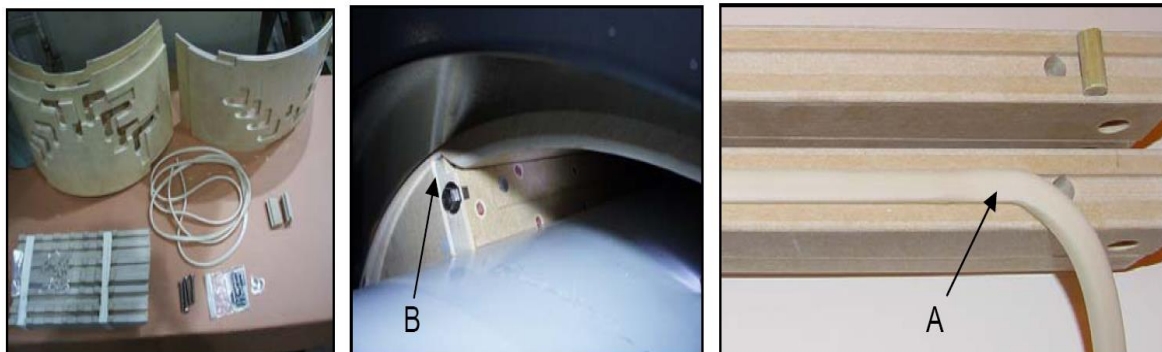


圖 27:新導流板結構示意圖

5. 端匝結構車修(Machine End Arc ; for ST):

目前汽輪機(ST)轉子端匝結構為直角，與氣渦輪機(GT)略有弧度的結構不同(圖28)。前者直角處容易因長時間的軸向與徑向應力累積，產生裂縫，造成扣環、轉子線圈與本體的受損(如圖29)。



圖 28:GT 端匝結構照片

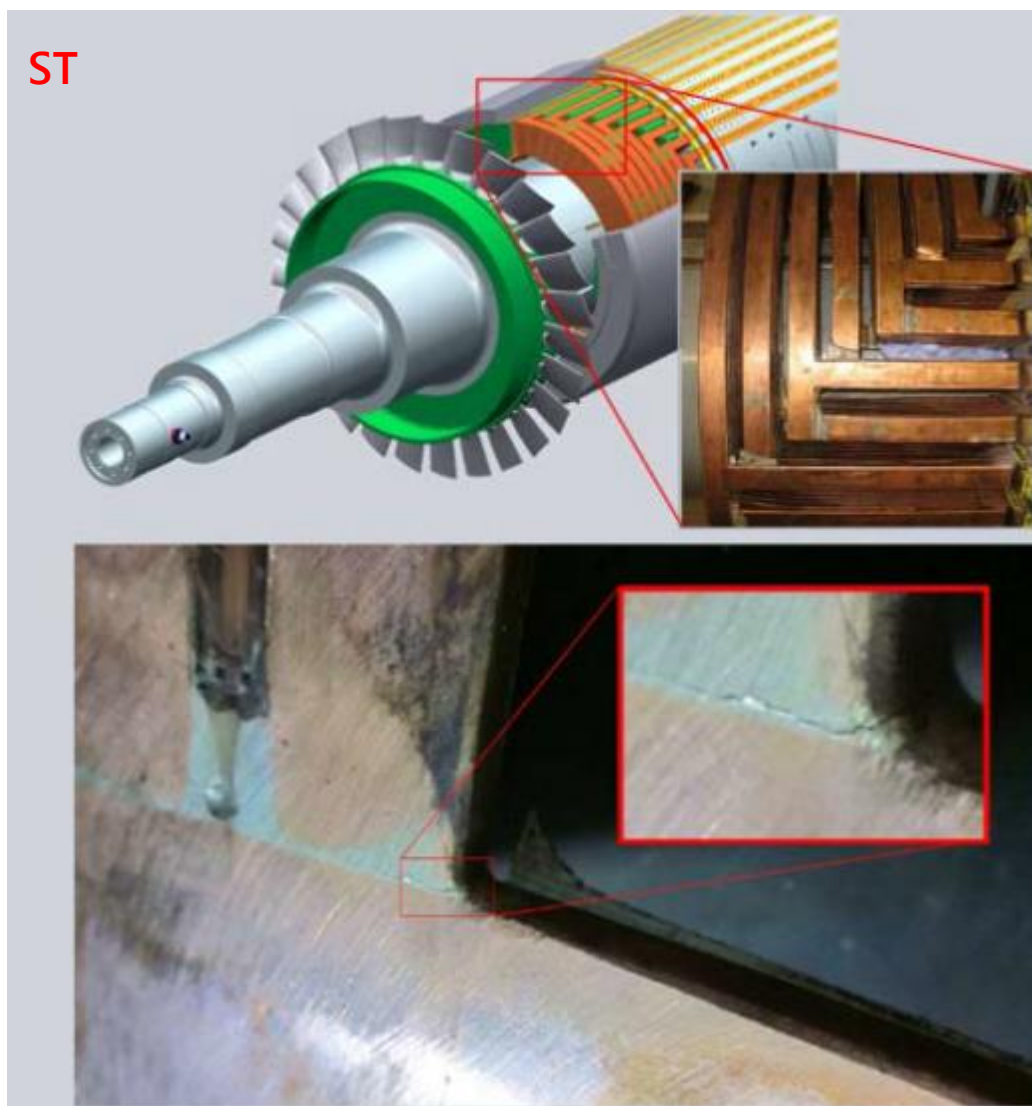


圖 29:ST 端匝結構及裂縫照片

為了改善此種情況，西門子公司做出了以下兩種設計變更並同步應用於此次的ST轉子更新工程上：

1. 更改銅焊部位(brazing joint)，避開彎角應力集中處。
2. 增加fillet部位的半徑以改善應力分布狀況。

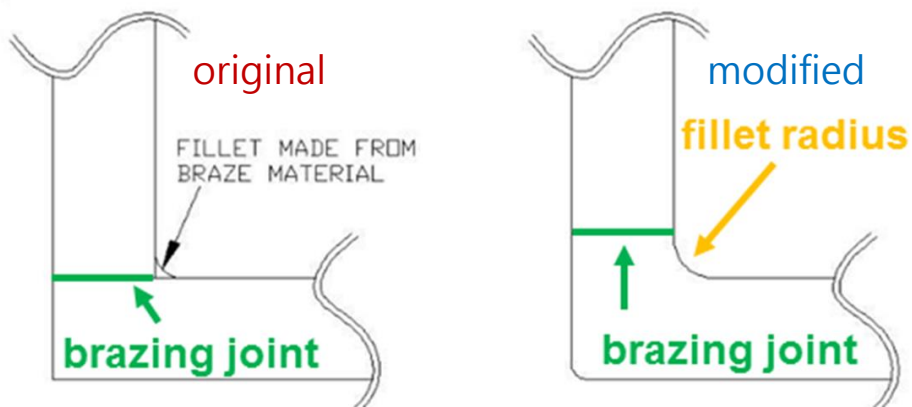


圖 30:ST 端匝結構改善比較圖

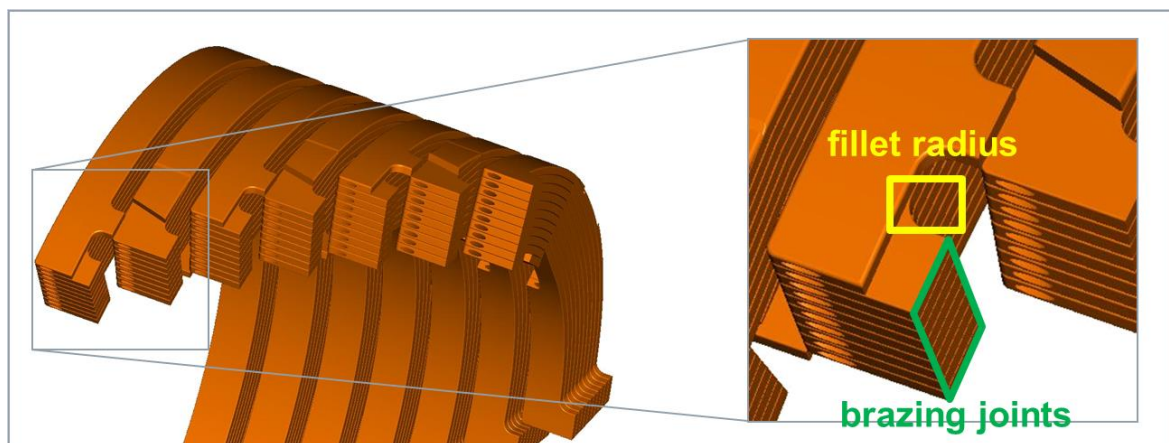


圖 31:ST 端匝結構改善位置圖

6 定子/轉子線上監測系統(online monitoring system):

即便目前發電機定子運轉情形正常，原廠說明書亦指出定子較轉子之使用壽命為長。但考量機組運轉穩定性，決定於轉子重繞期間，於發電機定子一併加裝線上監測系統(online monitoring system)以隨時監测定子的**部分放電(partial discharge : PD)**、**端匝振動(end winding vibration : EWV)**及**轉子線圈短路電流(rotor interturn short circuit:ISC)**之狀況，以期早期察覺機組異常以即時因應處理，如此可有效降低非預期的跳機發生，延長機組運轉時間。

西門子公司推出的線上監測系統名為“Generator Continues Online Monitoring”，主要包含監測主機(GenAdvisor)及部分放電、端匝振動、轉子線圈短路電流三種偵測器，為了有效的電氣隔離(galvanic separation)，避免電磁雜訊的干擾造成誤判，其間傳輸媒介採用光纜(optic fiber cable)，亦可與筆電連結，下載監測資料進行分析；GenAdvisor 會將監測資料傳輸到伺服器(central server)，並由其進行解析與診斷，同時亦可將警報透過現有DCS控制系統(T-3000)傳送，以達即時監測之目的，主要監測功能分述如下，其系統架構則如圖 32 所示：

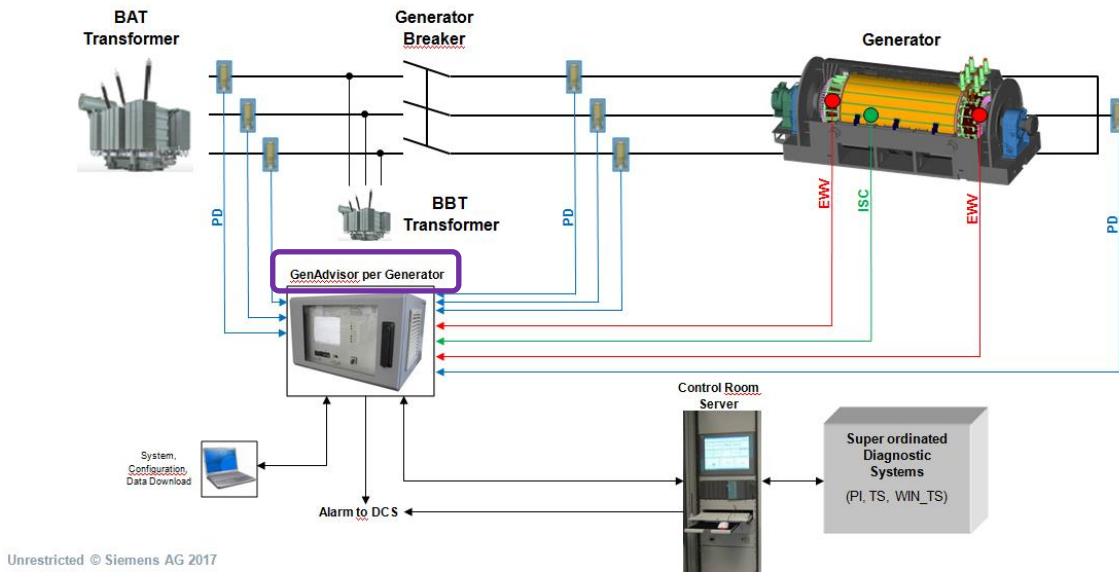


圖 32: 線上監測系統架構圖

6.1 部分放電偵測(Partial Discharge):

運轉中產生的熱應力(thermos-mechanical stress)於介電層(dielectric medium)中會形成電荷累積並造成部分放電現象，降低機組的絕緣性能，隨著時間日久，將導致端匝層離(delamination)、軟銅帶受損或斷裂(broken strand of flexible link)等損害，降低機組的可用性(availability)，損害情形如圖 33 所示:

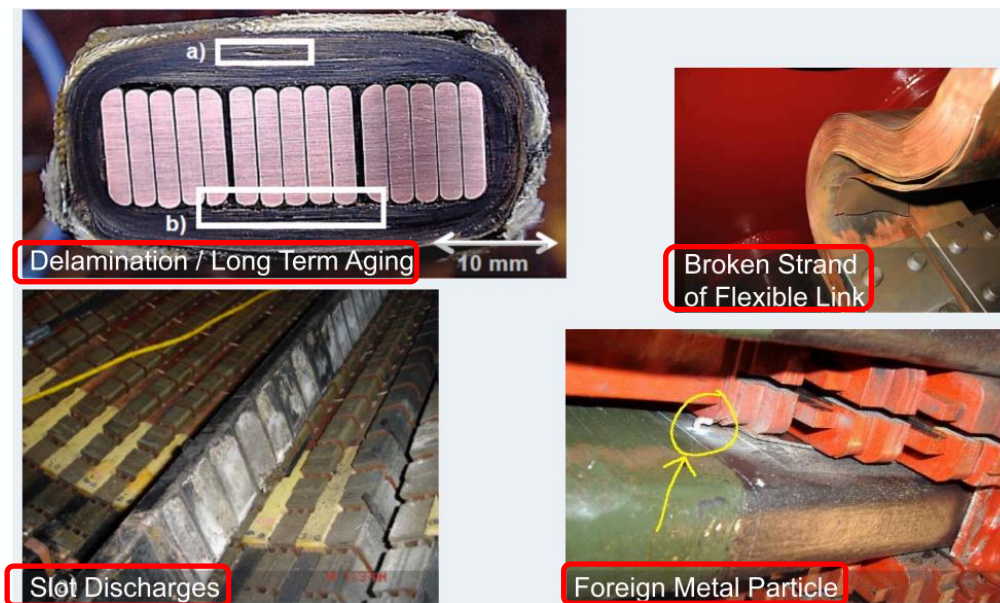


圖 33: 部分放電損害示意

為了偵測部分放電(PD)，西門子公司使用耦合電容(coupling capacitor)作為感測器，有效降低電磁雜訊的干擾，並透過監測軟體的 Oscillogram、ToF (Time of flight) measurement、PRPD(Phase resolved partial discharge) pattern 等功能進行運算，可更精確的監測部分放電現象。其規格與安裝示意如圖 34：



圖 34: 耦合電容規格示意圖

6.2 端匝振動偵測(end winding vibration):

端匝高振動(EWV)會造成綁紮的雲母繃帶磨耗，久了會產生白色粉塵掉落，也會導致端部導體的疲勞劣化甚至斷股(fatigue crack of strands)，大大影響機組運轉的穩定。EWV 主要來自工作頻率兩倍頻(100/120Hz)所誘發的共振，其他如運轉中作用於綁紮端板(winding basket)的機械應力、轉子轉軸與軸承的振動、貫穿螺栓或其他固定機構的鬆脫、發電機內部構件的磨損或斷裂等都是端匝高振動的肇因。

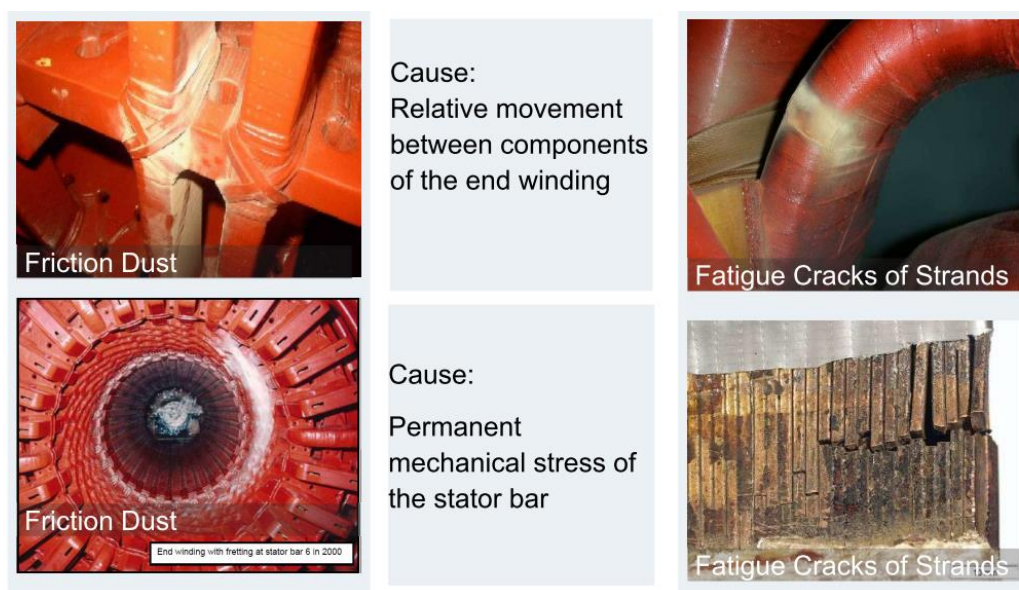


圖 35: 端匝磨耗照片



圖 36:端匝斷股照片

在 EWV 偵測器的選擇上，西門子公司採用了光纖加速規(Fiber optical accelerometer:FOA)的形式，並參考機組自然頻率試驗(bump test)的結果來設置 FOA，基本上每部發電機兩端各設置 6~8 組，收集工作頻率及其倍頻(50/60Hz、100/120Hz)甚至其他諧振頻率(harmonics)的振動資料，再以快速傅立葉轉換法(Fast Fourier Transformation:FFT)來進行分析，可以有效測知端匝實際的振動狀況。

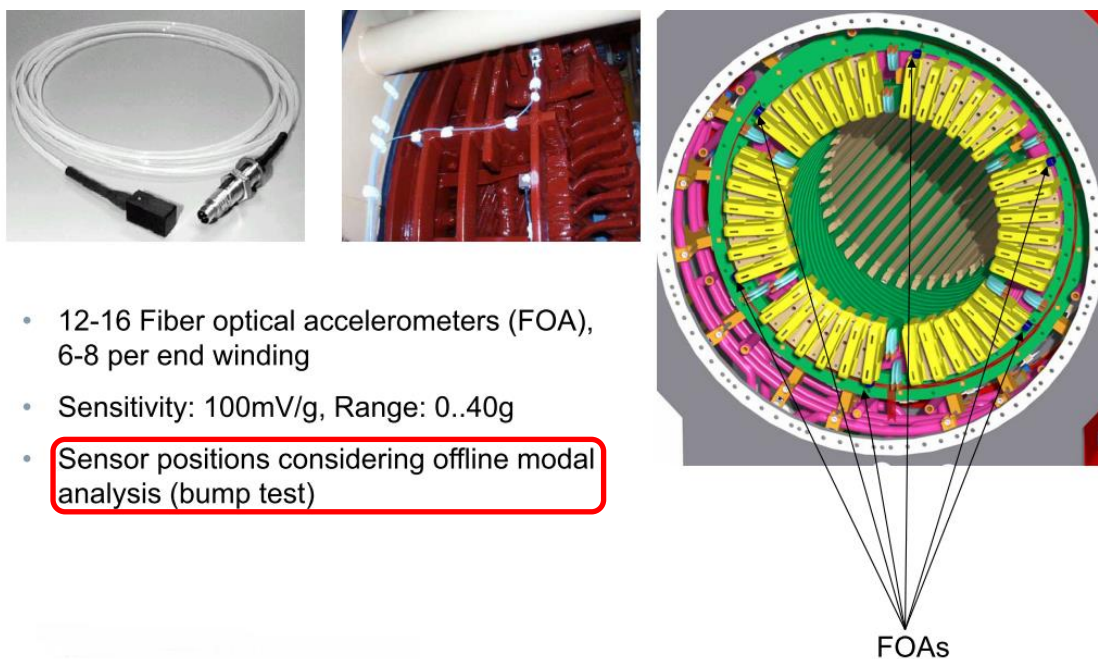


圖 37:EWV 偵測器架設示意圖

6.3 轉子線圈短路電流偵測(rotor interturn short circuit):

轉子線圈短路電流(ISC)是由於轉子線圈部分短接(interturn short)所產生，主要是因為機組的老化、線圈絕緣的劣化、油封的滲漏及外來物的污染所導致，常造成轉子線圈的局部高溫發熱，並使轉子轉動不均勻，長時間下來將導致軟銅帶融斷、轉子接地、轉子振動升高(thermal shift)等損害(如圖 38 所示)。

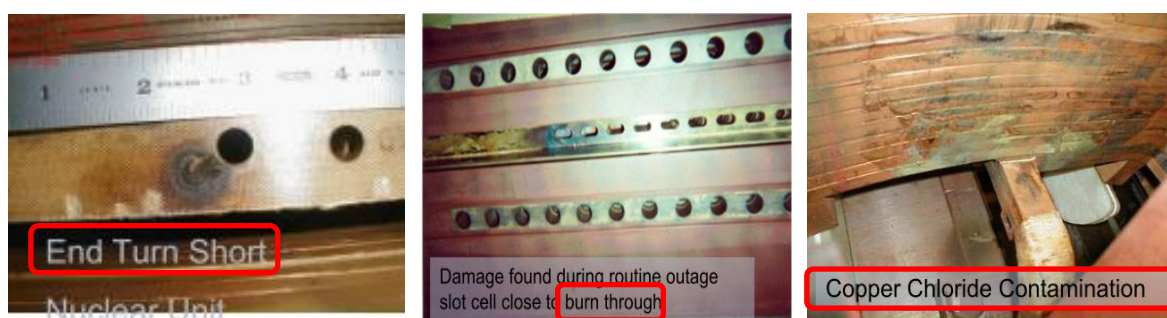


圖 38: 轉子線圈短路電流損害照片

西門子公司選擇磁通探針(flux probe)作為轉子線圈短路電流的感測器，將其安裝於轉子與定子間的氣隙(air gap)用以量測轉子每極(pole to pole)的磁通並與其它點的結果作比較，利用其差異量的大小來判斷轉子線圈是否有層間短路現象。

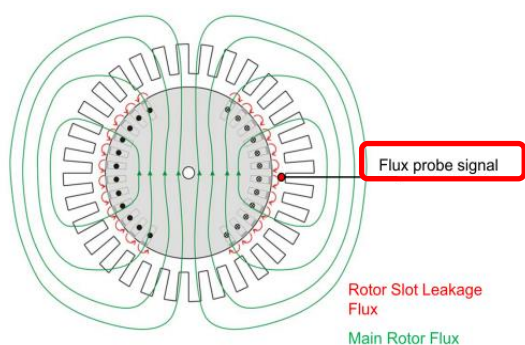
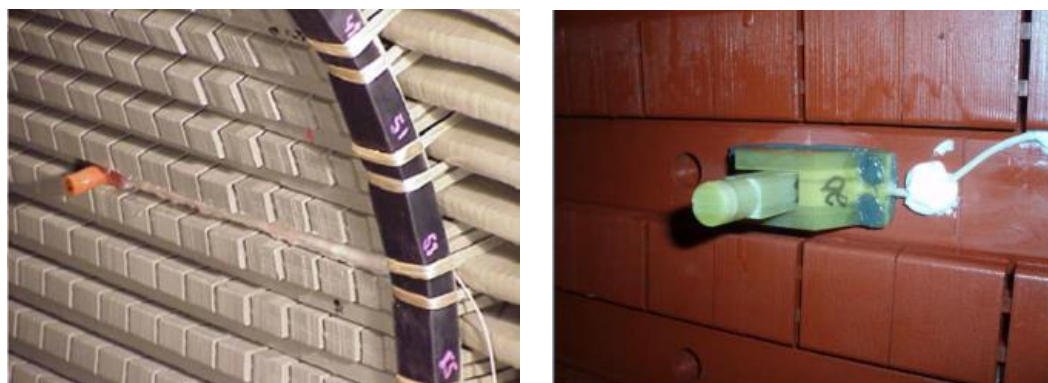


圖 39: ISC 偵測器架設示意圖

Schematic Evaluation of Flux Probe Signal

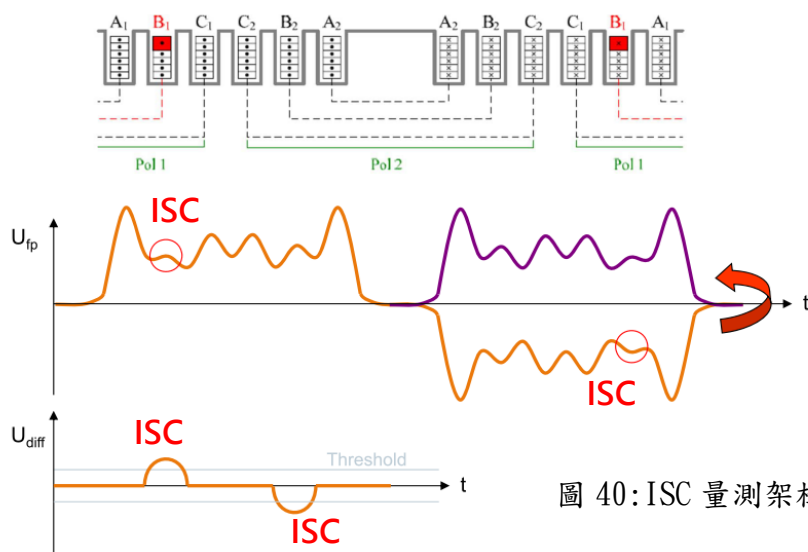


圖 40:ISC 量測架構示意圖

3.2. 發電機轉子重繞(Rotor Rewinding)流程參觀

除了之前發電機的延壽策略介紹外，西門子公司也為我們導覽了廠區發電機組修護的現況與轉子重繞流程的簡介，每支轉子重繞時程大約需要**50天**。轉子重繞後將可有效提升發電機運轉的可靠度與穩定性，延長機組的運轉週期並減少大修所耗的時間(如圖41所示)：

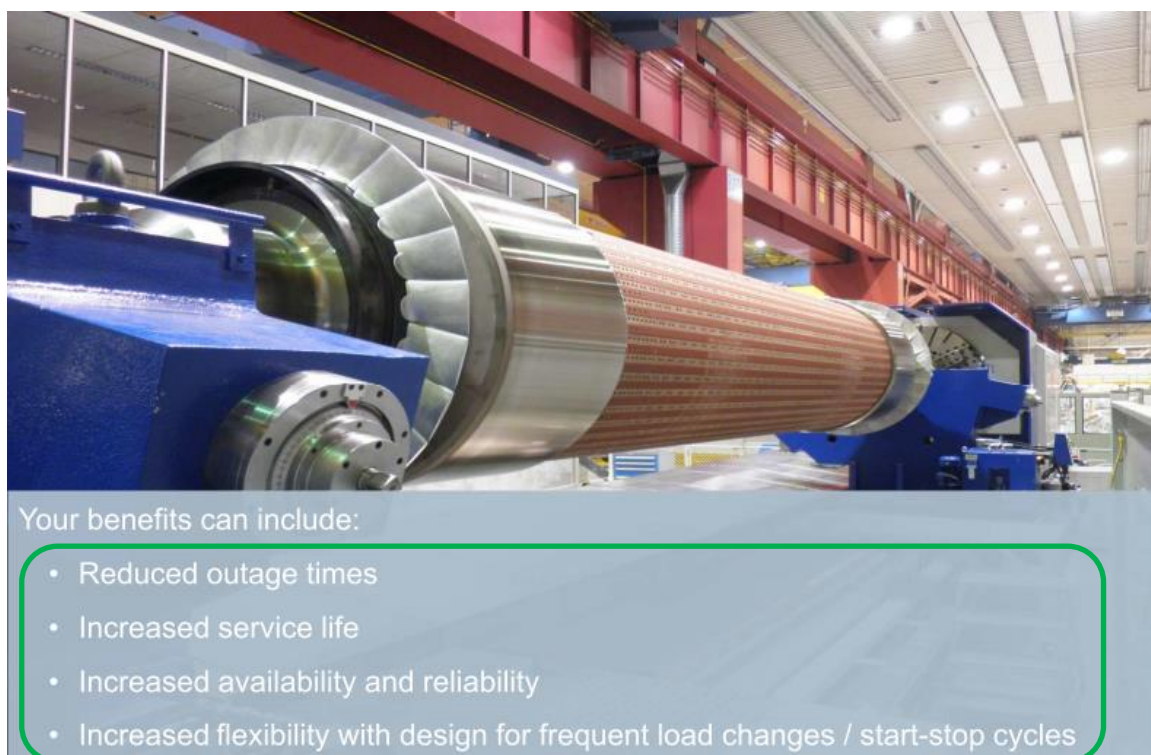


圖 41:轉子重繞益處表示

整個轉子重繞(rewinding)主要有九大步驟，分述如下：

1. 入廠檢測與舊有繞組拆除(Receiving inspection & Removal of winding)

轉子在進行重繞前，會先目檢並量測runout，確認其初始狀態；將轉子架於CNC (computer numerical control)車床後，會依序拆除舊有扣環、線圈與J-導體，再進行噴砂(dry blasting)，清潔轉子本體表面，以利後續NDT檢測。



圖 42: 轉子目檢與 runout 量測照片



圖 43: 轉子舊有線圈拆除照片

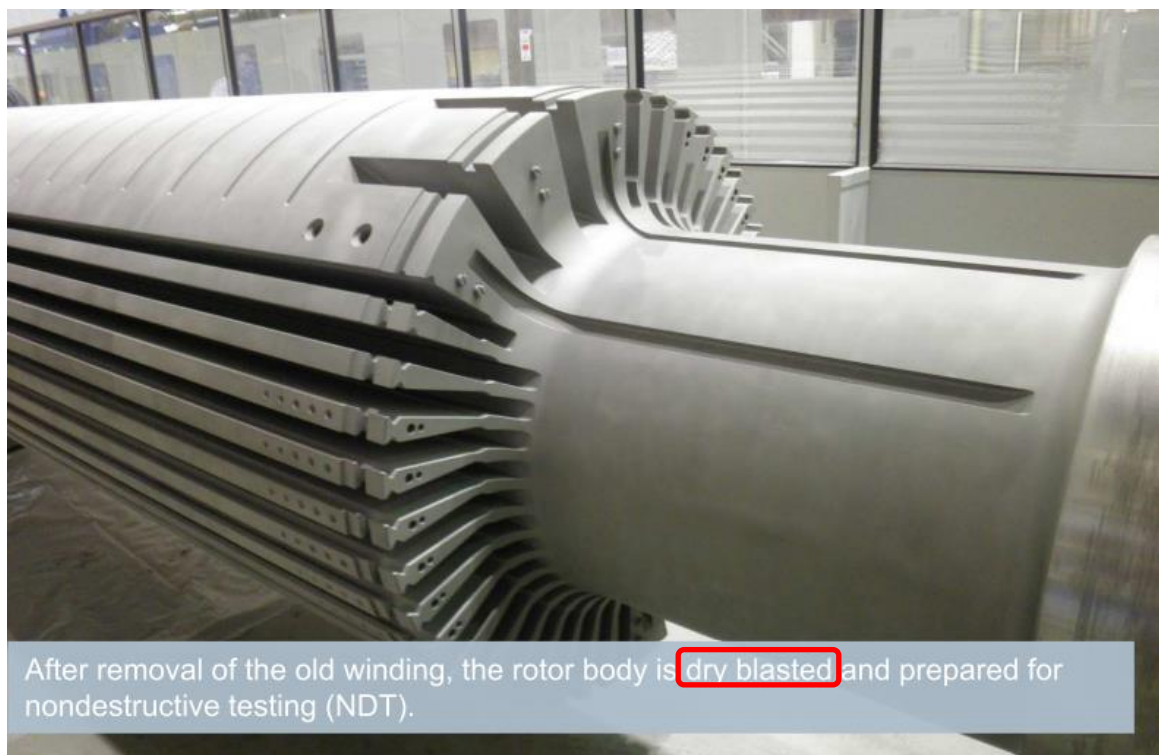


圖 44:轉子噴砂照片

2. 非破壞性檢測(Nondestructive Testing:NDT)

非破壞性檢測主要用以確認轉子本體及其構件的完整性，以明瞭缺陷的型態與分佈。其適用範圍與量測方式如表4及圖45所示：

Method	Component	Base Scope	Enhanced Scope
MP	Rotor flexibility slots	✓	
MP	Tooth top , tooth slots, slot bottom (100 mm from ES/TS)	✓	
MP	Shrink fit areas of rotor: ventilator hub, Shrink fit TE coupling*	✓	
MP	Coupling-centering	✓	
ET/ PT	Blower blades*/radial blower*	✓	
MP/PT	Shrink fit areas of assembly parts: Ventilator-/Blower hub, TE Coupling*	✓	
UT	Rotor volume of the pole areas and slot bottom		✓
UT/ ET	Axial hole bore surface and volume near to the bore discharge		✓
UT/ ET	Radial holes		✓
UT/ET	Retaining rings in assembly condition		✓
ET/MP/PT	Shrink fit areas of assembly parts: Retaining rings, Insert rings, Slot wedges		✓

表 4:各種 NDT 適用範圍



圖 45:NDT(MT) 檢測照片

3. 長扣環修改(Long Ring Modification:LRM)

如3-1節所述，長扣環修改會車修收縮套管及槽齒受損部位，並更換扣環本體(採用18Mn-18Cr合金)，車修範圍為60mm(for GT)/100mm (for ST)，目的主要是修復槽齒遭受的損傷。施作照片如下圖：



圖 46:長扣環修改施作照片

4. 轉子線圈安裝(Installation of New Winding)

待轉子本體的清潔與上漆工作完成，將開始依序安裝更新後的轉子線圈，之後陸續安裝絕緣層與槽楔、J-導體與極銜接部(pole crossover)，再進行端匝銅焊，待冷卻固化後再由專業技師進行目檢。

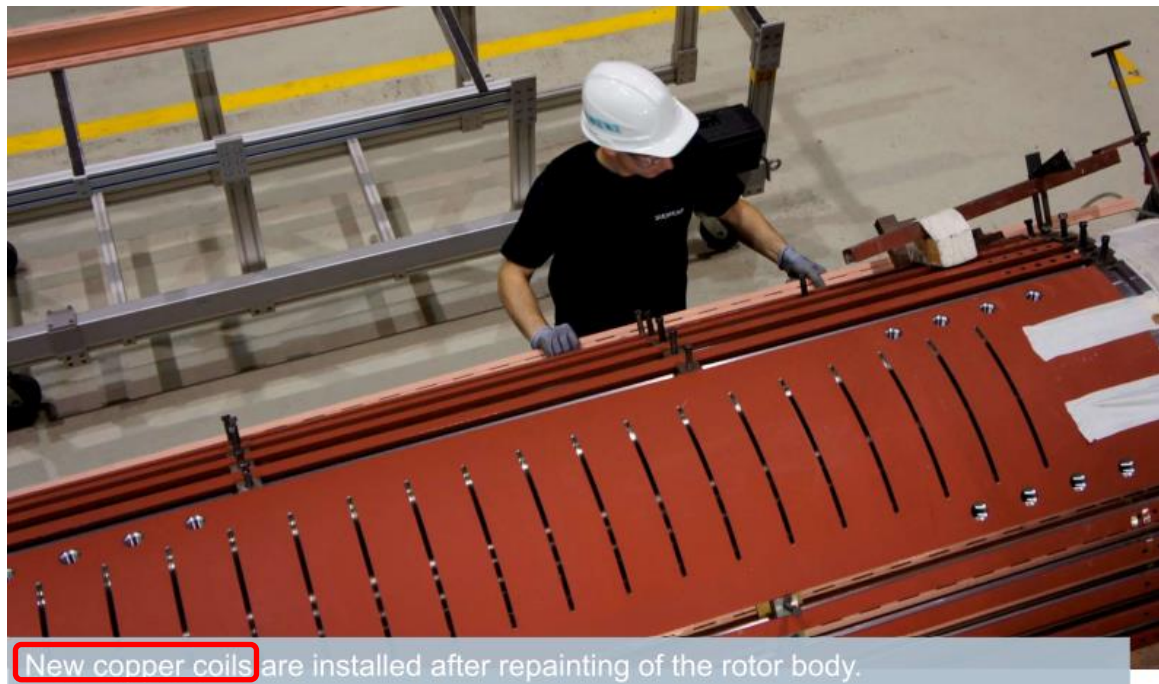
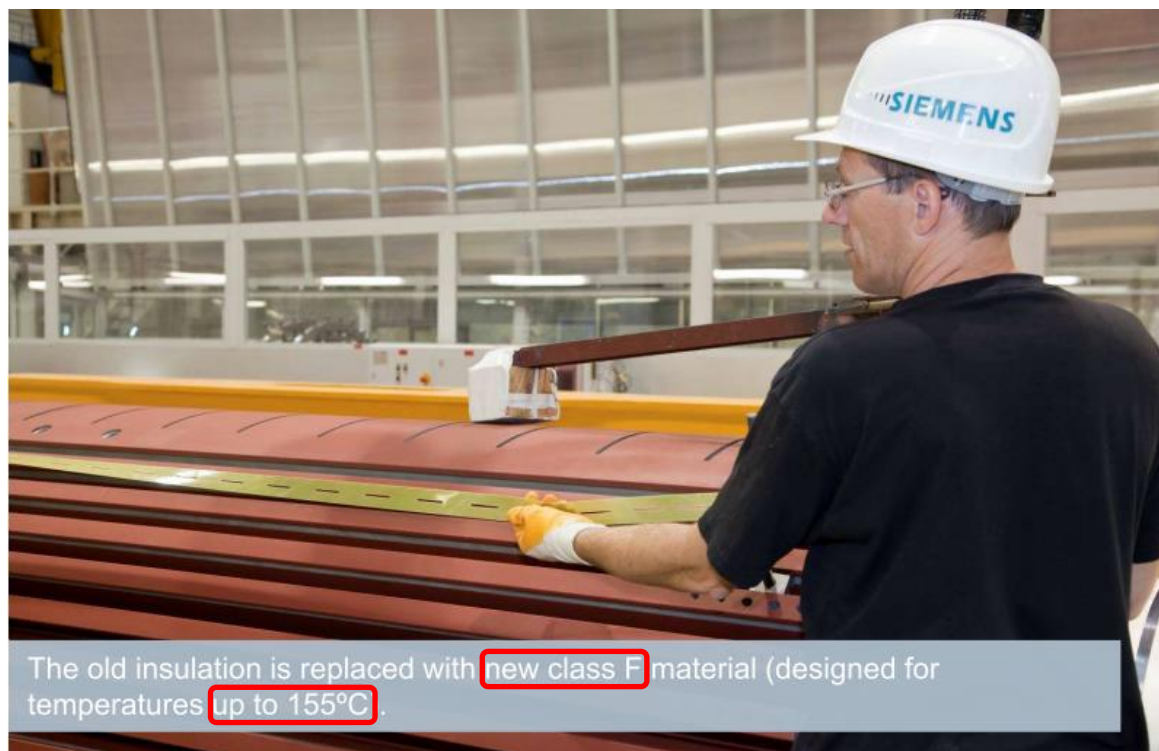


圖 47:新線圈安裝照片



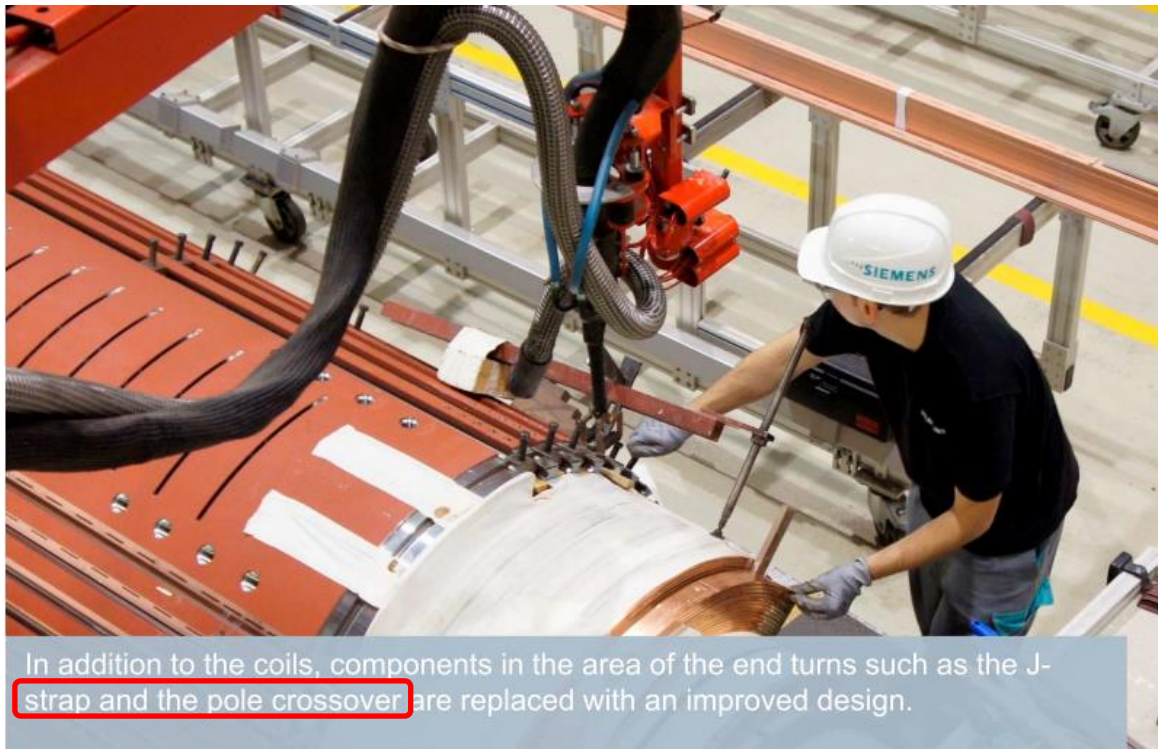


圖 49: J-導體與極銜接部安裝照片



圖 50: 端匝銅焊照片

5. 轉子烘烤及加固(Baking and Pressing of Rotor)

待線圈安裝完成，需進行烘烤及加壓，使線圈等部件完全固定於轉子本體，施作方式如圖51所示：



圖 51:轉子烘烤加壓照片

6. 扣環核測車修與回裝(Shrink Fitting of Rotor Retaining Ring)

等線圈烘烤固定完成，便可進行扣環的回裝，方式如圖52所示：



圖 52:扣環回裝照片

7. 動平衡測試(Balancing)

動平衡測試主要確認轉子重繞後的振動特性，須符合規範才能確保日後機組運轉的穩定。西門子動平衡測試中心可處理之轉子噸位達340t，並可以額定轉速的110或120%進行超速試驗，相關的電氣試驗亦可於動平衡測試時一併施作，其處理能力如圖53所示：

圖 53：動平衡測試能力示意圖



Technical Data

Max Rotor Weight: 340 tons

Max. Rotor Length: 18000 mm

Max. Rotor Diameter: 6900 mm

Driving Power: 8 MW

Speed Range: 4500rpm

Vacuum Pressure: 2 mbar/ 0.03 psi



The rotor is balanced in several steps in the overspeed test facility.

An overspeed test as well as electrical tests are performed with the rotor rotating. The winding is electrically tested several times during manufacturing.

8. 最終Runout核測(Runout Check before Shipping)

轉子出廠前須經過runout核測，確認其外觀的均勻性後方可進行最終的包裝與運輸。

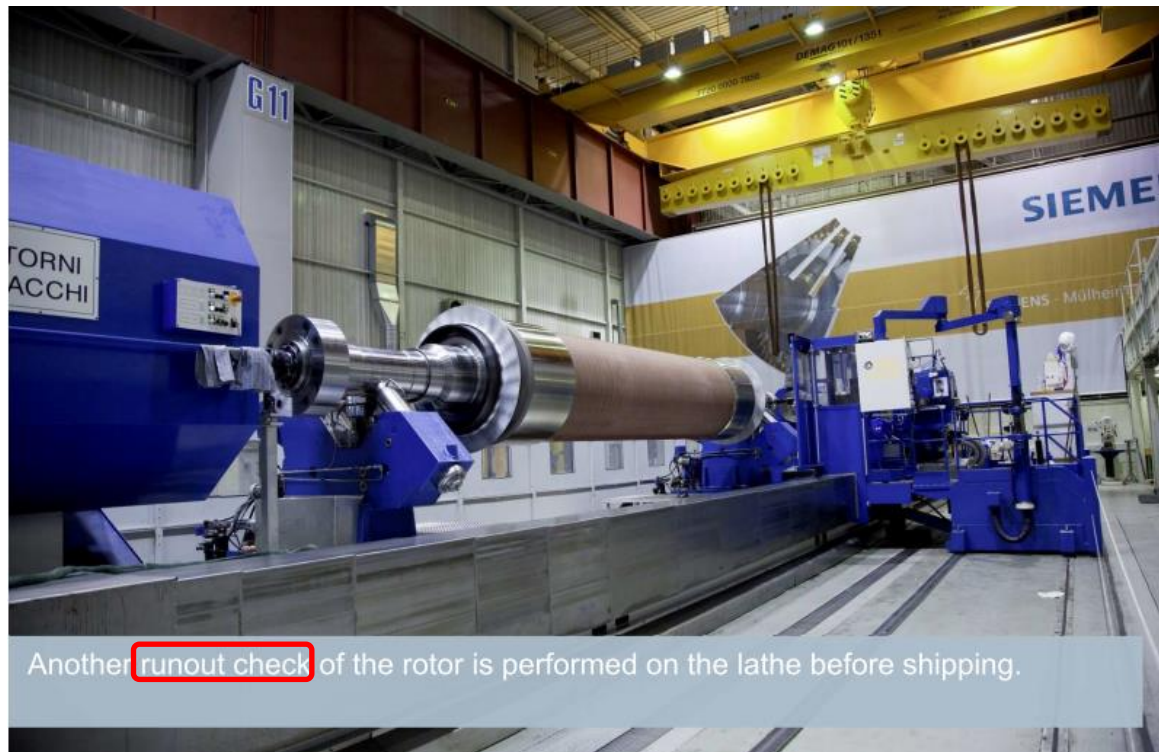
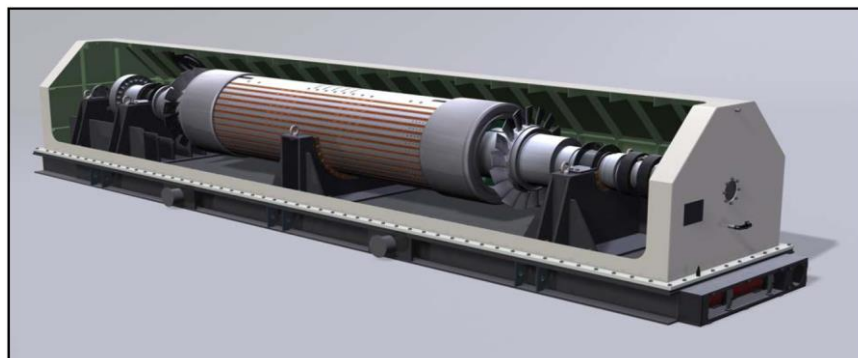


圖 55:Runout 核測照片

9. 包裝及運輸(Package and shipping)

因為轉子體積與重量甚大，加上對濕度(moisture)十分敏感，故需要合適的容器抵禦溼氣的入侵及運輸過程的顛頗，並確保日後長期庫存的环境穩定。故西門子公司開發出適合運輸與庫存的集裝箱(如圖56~58所示:long term storage container)，內部填充0.3bar的氮氣(N_2)，並可由外接的氮氣鋼瓶適時補充；氮氣壓力與環境濕度可由廂體嵌裝的指示計監測；轉子絕緣電阻亦可直接由其上的端子量測而不用開蓋。如此可確保運輸過程及日後庫存的环境恆定。



- 32 - 圖 56:運輸&庫存示意圖



圖 57:轉子集裝箱外觀照片



圖 58:轉子集裝箱開蓋照片

四、 西門子同步調相器(Synchronous Condenser)業務簡介

配合政府非核家園及能源轉型政策，電力來源配比於2025年將為“5(燃氣):3(燃煤):2(再生能源)”，屆時再生能源(太陽能、風力發電、地熱發電等…)之供電占比將達20%，由於其不可調度之特性，對於輸電電網的電壓及頻率穩定將有莫大影響。因應之道除了發展智慧電網外，西門子公司提出了另一種方法：**將除役發電機組改裝為同步調相器(Synchronous Condenser Conversion)**，除了可提供或吸收無效功率(reactive power)，穩定電網的頻率與電壓外，亦可充分活化既有資產，達成資源利用最佳化。機組改裝的收益主要有下列六點：

1. 作為無效功率(reactive power)的動態調節來源。
2. 穩定輸電電網的頻率與電壓。
3. 資產利用最大化。
4. 改裝時間短。(≤6個月)
5. 合理低廉的工程費用。
6. 既有技術人力的合理運用。(降低失業率)

眾所皆知德國是推廣綠色能源最不遺餘力的國家之一，伴隨再生能源裝置容量的提升與既有核能及燃煤發電機組的除役，電網頻率與電壓的穩定便成為迫切處理的課題，因此西門子公司於2011年便開始與相關單位合作，並完成了四組同步調相器的改造案例(如表5所示)，其中便舉改裝容量最大的case 1加以說明。

	FY	Country	Reactive Power	Status	Manufacturer
Case 1	2012	Germany	1640MVA	completed	Siemens
	2013	Denmark	850 MVA	completed	Siemens
	2013	2 x USA	120MVA	completed	OOEM
	2015	Schweden	77MVA	completed	OOEM
	2012-2019	Over 50 different projekt have been developpt, planed and discussed with customers. Siemens generated a large pool of solutions for different applications all over the world for all type of generators.			

表 5:SIEMENS 同步調相器改裝實績表

Case 1所改造的發電機組源自於德國法蘭克福南方的Biblis核電廠。該電廠建立於1974年，有兩部容量1640MVA的4極(4-pole)核能機組，是德國最大的發電機組之一。該機組額定轉速為1500rpm(50Hz)，定子重量471噸，轉子尺寸則為20.5公尺/228噸。機組結構如圖59所示：

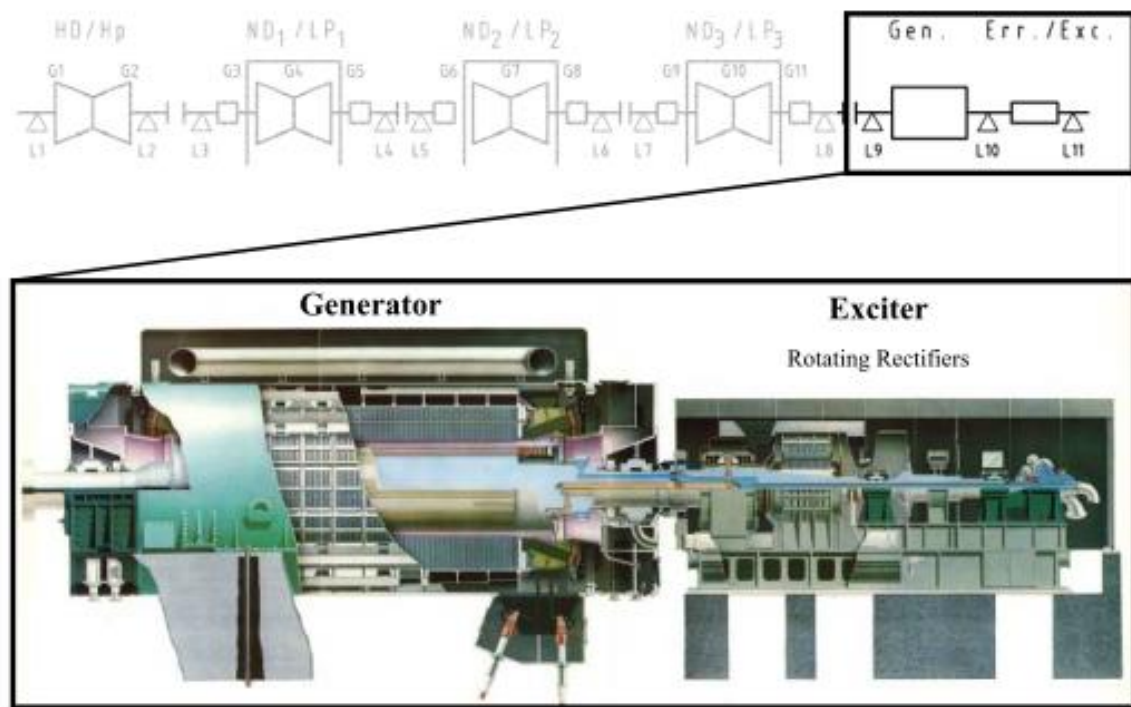


圖 59:Biblis 發電機結構示意圖

同步調相器改裝因需將既有的原動機(氣渦輪機或汽輪機)移除，只保留發電機部分，故原有的機械結構、潤滑及頂升油系統與起動設備皆需更新。

機械結構方面，因為原動機的移除，需安裝全新設計的液壓馬達(hydraulic motor)作為慢車(turning gear)的動力來源，搭配安裝重新設計的中間軸(intermediate shaft)作為液壓馬達與同步調相器的連接，並在其中安裝一全新設計的推力軸承(thrust bearing)以維持整個系統的軸向對心穩定，其裝置方式如下圖所示：

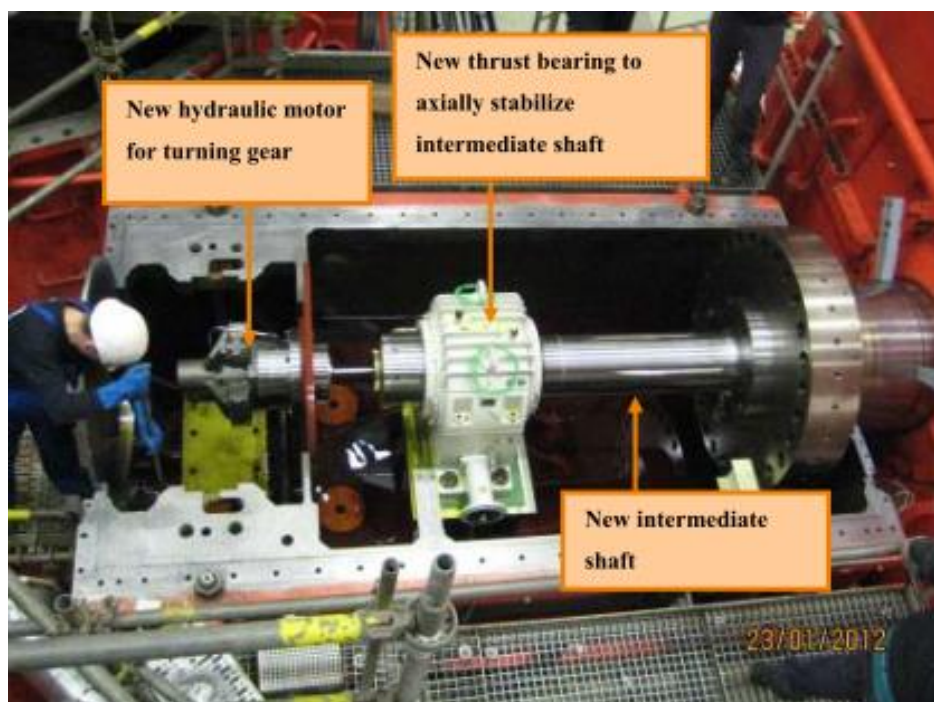


圖 60:Biblis 同步調相器機械改裝示意圖

至於起動設備，則新設一座起動變頻器(startup frequency converter:14MW)及靜態勵磁器(static exciter)取代舊有旋轉勵磁系統，前者供應定子磁通，並有電流限制器(current limiter)做為保護；後者產生轉子旋轉磁場，利用兩者交互作用產生之轉矩(torque)帶動同步調相器旋轉。產生的無效電力(reactive power)經變壓器升壓至380KV供外部電網穩壓與定頻用，整體架構則採雙重備援(Redundant)形式。

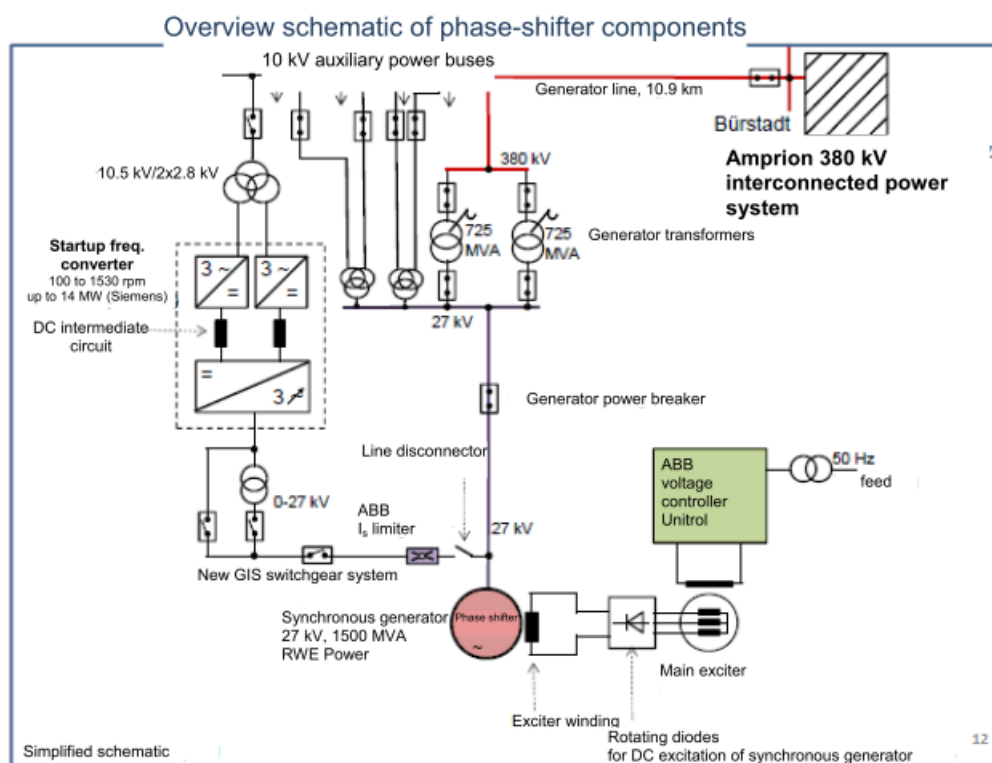


圖 61:Biblis 同步調相器架構圖

因同步調相器結構含有液壓慢車馬達及推力軸承，所以整體潤滑及頂升油系統及附屬的控制(control)、逆止(check)及遮斷(shutoff)閥皆須重新設計，相關油泵亦得配合更新調整油壓，方能供調相器使用。改裝完成之配置如下圖所示：

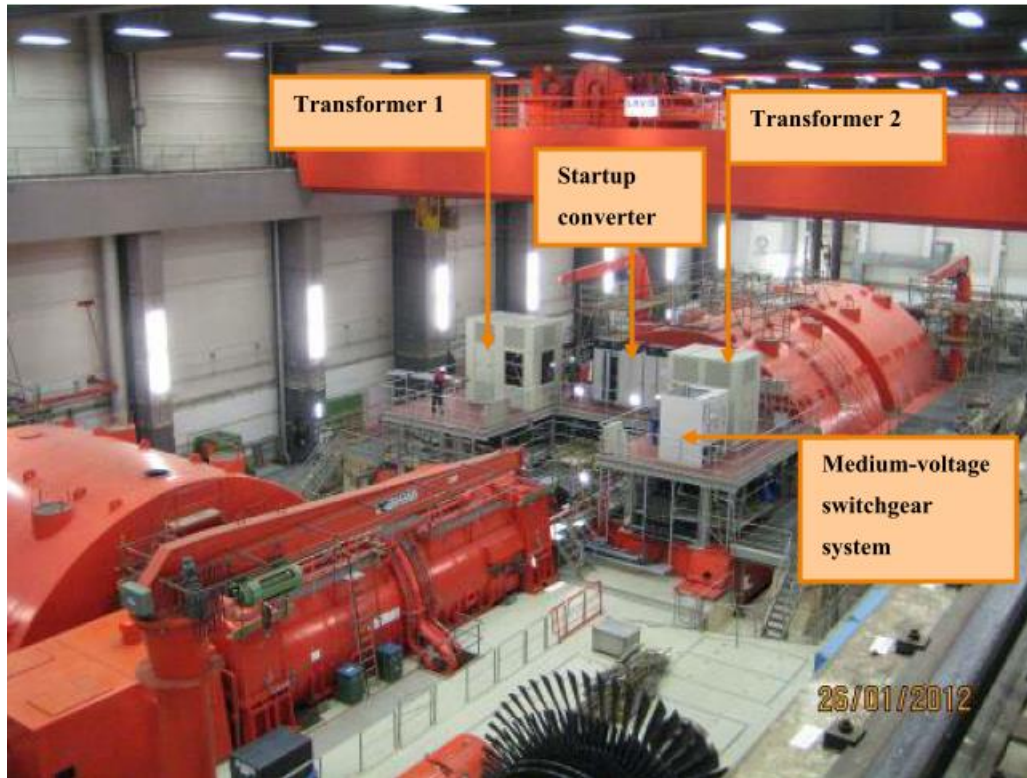


圖 62:Biblis 同步調相器配置照片

調相器起動時，先由液壓慢車馬達帶動至180rpm，此時起動變頻器接手加速至1530rpm(51Hz)後關閉(液壓馬達則於400rpm時即先行脫開)，待調相器自然減速至1500rpm(50Hz)，且其他併聯條件皆滿足後，即可併網供給/吸收無效電力，以達成電網穩壓與定頻之目標。整個同步調相器的無效電力調整範圍為-400MVar~900MVar，消耗電力僅5MW，是相當經濟而有效率的無效電力供應來源。

五、 西門子控制元件工廠導覽

這次參訪行程的最後一站來到西門子控制元件工廠，除了有發電機控制系統 (T-3000) 的遠距監測診斷功能的展示外，工廠人員也帶我們參觀了控制元件生產的流水線。整個生產流程採工業4.0的概念，幾乎全部採自動化生產，僅少部分由專業技師與機械手臂協同完成作業，不同步驟間的物流亦是透過機器車自動傳遞；整個生產流程與布局則經大數據分析由中央電腦安排，不僅可滿足客戶少量而多樣化的需求，更可使整體生產效率達到最佳化，是目前西門子公司智慧化工廠的示範地點之一，令人印象深刻。



圖 63：控制元件工廠參訪合影

六、心得與建議

此次有幸獲選為本次出國實習人選實受多人的幫助與提攜，感謝公司與興達電廠的長官給予機會，可以前往德國西門子公司研習複循環機組發電機延壽維護技術。也感謝開始甄選時彥宏課長的推薦與其後出國手續申辦時的指導與釋疑；於報告撰寫過程中，宗哲與子凱課長也不厭其煩地幫我解惑跟校訂，謝謝他們的不吝幫忙！更要謝謝西門子台灣公司的雅雯和明裕兩位經理在旅程上的照顧，還有德國廠方的用心簡報與悉心招待讓人有賓至如歸的感覺~

此次能前往德國，除了在個人專業職能有所提升外，透過一開始的手續申辦，出國行程的安排到最後的報告撰寫，可以加強自己對交辦專案的整合能力；另外兩個禮拜的國外生活也讓個人視野更寬廣，心胸更開闊，最重要的是強化了與外國技師交流的膽識與能力，這對於日後工作上與原廠的技術交流助益頗多。

本廠複循環機組運轉已逾二十年，但為配合國家能源政策轉型而需延長機組運轉壽齡，才有此次延壽工程的計畫與研習。透過親身實地的早期參與，便能於工程進行前便對整個更新計畫內容與流程有所了解，對日後實際施作的時程與進度便更有把握，同時對未來的機組維護與保養的技能有所增進；透過與原廠溝通管道的建立，可以及早獲得相關技術的資訊，有助於本廠運維能力的提升及人力的培養。

另外西門子公司的同步調相器業務則可作為本公司除役機組資產再利用的借鏡。考量政府非核家園政策(for龍門)與核電廠運轉/除役年限(for核一、二、三)，除役機組若能妥善轉為synchronous condenser，於漫長除役時程中，不失為資產活化的好方法，也可對輸電電網頻率與電壓的穩定有所貢獻。

西門子自1847年創立至今已有170年的歷史，公司形象與產品品質早已深植人心；我們台電也走過70多年的足跡，供電品質的穩定性有口皆碑；兩家公司都有工程師嚴謹而沉穩的基因，在全球化的時代也都面臨轉型變革的壓力。前者除了高鐵，也將觸角伸入了醫療儀器的南海中；而台電在面對能源轉型與公司結構變革時，除了本業需一如既往的可靠外，也需將版圖拓展到如再生能源等新事業，穩健創新便是我們這代的責任。期許同在TPC的夥伴皆能朝同樣方向努力，讓公司卓越，你我驕傲！

參考文獻

1. SIEMENS AG , New HL-class Gas Turbine Introduction , 2019.08
2. SIEMENS AG , Hsinta CCPP TLRI Generator Life Time Extension presentation , 2019.07
3. SIEMENS AG , Generator Modernization presentation , 2019.08
4. SIEMENS AG , Generator Life Extension Program for Hsinta - PSSA(v2) , 2019.06
5. SIEMENS AG , Generator Life Extension Program for Nan Pu - PSSA(v16) , 2017.12
6. SIEMENS AG , Mechanical and electrical rebuilding of a turbine generator for phase-shift operation , 2013.06
7. 汪子凱 , 發電機電壓調整及靜態變頻控制系統技術研習 , 2017