

出國報告（出國類別：實習）

水力發電創新施工方法、
招標策略、風險評估與計畫管理之
研習

服務機關：台灣電力公司營建處

姓名職稱：賴昶嘉 主辦專案工程(六)

派赴國家/地區：德國、奧地利

出國期間：112.12.1~112.12.10

報告日期：112.1.29

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

水力發電創新施工方法、招標策略、風險評估與計畫管理之研習

頁數 33 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話 台灣電力公司/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

賴昶嘉/台灣電力股份有限公司/營建處/主辦專案工程(六)/(02) 2366-7539

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：112/12/01~12/10

出國地區：德國、奧地利

報告日期：113/1/29

分類號/目

關鍵詞：水輪機、發電機、變頻機組、可變速機組、CONVERTER

內容摘要：(二百至三百字)

本公司正積極推動光明及牡丹等抽蓄水力發電計畫，作為再生能源之大型儲能系統。距離先前完工抽蓄水力電廠已相隔約 30 年，期間水力發電技術不斷進步，引進新技術提高機組效率勢在必行。由於執行時常面臨工程流標、施工介面複雜等風險，延宕及增加成本，因此有必要學習國外計畫管理的經驗。本次赴德國參訪 Voith 及 GE 公司等兩家專業的設備製造商，觀摩蒐集最新變頻式水輪發電機及變頻器相關資料。此外，也前往奧地利具有近年來成功運轉實績的營運商 Illwerke vkw 電力公司進行交流學習招標策略、風險評估及計畫管理。

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

目錄

壹、實習目標及行程	1
(一)、源起及目標.....	1
(二)、行程安排.....	1
貳、變頻式水輪發電機組概要	2
(一) 為何再生能源需要變頻式水輪發電機組?.....	2
(二) 變頻機組之原理.....	3
(三) 傳統機組與變頻機組之差異.....	3
參、參訪行程	7
(一) Voith Hydro GmbH 公司參訪及工廠參觀	7
(二) Illwerke vkw 電力公司及 Illwerke Rodundewerk II 電廠參觀 ..	13
(三) GE Power Conversion GmbH 公司及工廠參觀	22
肆、出國期間遭遇的困難與特殊事蹟	32
伍、心得與建議	32

壹、實習目標及行程

(一)、源起及目標

為配合我國 2025 淨零排放能源政策，未來將再生能源發電量佔比提高至 20%，並將於 2050 年佔比提高至 65%。本公司刻正推動光明及牡丹等抽蓄水力發電計畫作為再生能源之大型儲能系統。前述計畫為明潭抽蓄完工後時隔約 30 年之抽蓄計畫，期間水力發電之技術發展日新月異，實有引進新技術提高機組效率之必要，另因水力計畫執行時常遭遇工程流標、施工介面繁雜或其他不可預期之風險，導致計畫延宕或成本增加，故有必要借鏡國外計畫管理實務之長處。

本次出國實習計畫，赴德國參訪 Voith Hydro GmbH、GE Power Conversion GmbH 兩家設備製造商，觀摩並蒐集最新型變頻式水輪發電機及變頻器(converter)相關資料，供相關計畫規劃設計參考。另赴奧地利與近年(2018、2019)具有兩抽蓄水力機組商轉實績之營運商 Illwerke vkw 交流學習招標策略、風險評估與計畫管理方式，以降低遭遇困難時之影響。

藉由本次出國計畫，可以了解德國及奧地利水力發電相關技術及應用情形，以增進本處抽蓄水力發電領域之知識、技術及經驗，對於將來公司開發抽蓄水力發電系統在規劃設計、規範制定、招標、施工、運維等各階段工作皆能有所助益。

(二)、行程安排

本次出國實習根據目的及需求安排行程如下：

日期	地點	天數	工作內容
112.12.1~2		2	往程(台北-法蘭克福-海登海姆)
112.12.3~4	德國	2	Voith Hydro GmbH 公司及其水力實驗室參觀
112.12.5	奧地利	1	1. Illwerke vkw 電力公司及 Vorarlberger Illwerke Rodundwerk II 電廠參觀 2. 水力發電創新施工方法、招標策略、風險評

			估與計畫管理研討、交流
112.12.6	奧地利	1	1. Vorarlberger Illwerke Rodundwerk II 電廠參觀及意見交流。 2. 移動至柏林(Vandans-Berlin)
112.12.7~8	柏林	2	1. GE Power Conversion GmbH 公司及工廠參觀 2. 變頻機組轉換器技術討論
112.12.9~10	法蘭克福	2	自費觀光
112.12.11~12		2	返程(柏林-法蘭克福-台北)

貳、變頻式水輪發電機組概要

(一)為何再生能源需要變頻式水輪發電機組?

傳統抽蓄電廠之運轉模式為抽水蓄電，放水而發電。

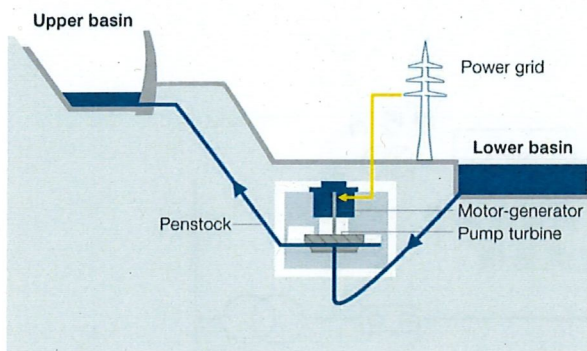


圖 1 抽水蓄電

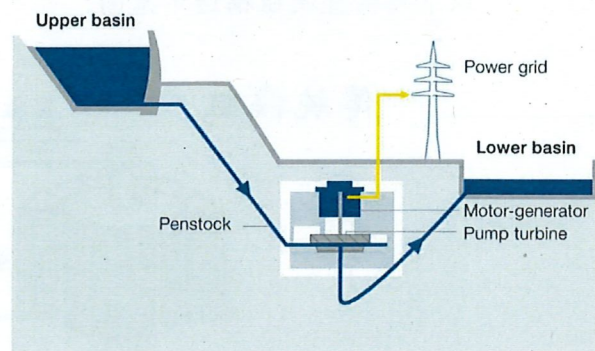


圖 2 放水發電

因應再生能源大量發展，可利用變頻式水輪發電機，於發電時有更大的調整彈性與最佳的運轉效率，且最低出力較傳統抽蓄機組低，最佳化的運轉模式可增加設備的效率及壽命，抽水模式亦可提供調頻服務、更有彈性的電壓調整能力、當系統短路故障時改善暫態穩定度、降低再生能源的間歇性影響等。可幫助維持電力系統因負載波動造成之頻率飄移，極適宜作為再生能源高佔比下之系統穩定因應方案。

(二)變頻機組之原理

利用變頻器裝置於可變速機組，透過機組之集電環(Collector Ring)將變頻器輸出之交流電傳送至轉子線圈，調變激磁用之變頻器輸出電壓之頻率，即可改變機組轉速。可變速機組抽水時可自行起動，其起動方式係利用一次側短路使定子線圈短接，調變變頻器(Converter)之輸出以緩步起動機組，待起動完成後即解除一次側之短路而接入電力系統。

(三)傳統機組與變頻機組之差異

變頻機組與傳統抽蓄機組構造上最大之不同在於發電機之轉子(Rotor)。傳統抽蓄機組之轉子為凸極(Salient Pole)，此乃轉子線圈通過直流電。而變頻抽蓄機組之轉子構造與定子(Stator)相同，皆為三相繞組，而主軸上之集電環(Collector Ring 或稱滑環 Slip Ring)，傳統同步發電機為 2 個，而變頻機組則為 3~6 個。

以下為兩種機組構造示意圖：

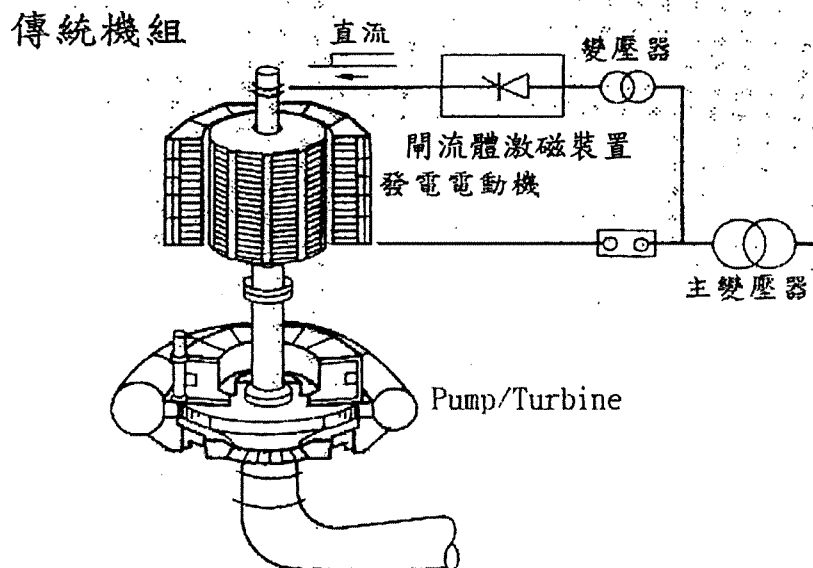


圖 2 傳統機組構造及線路圖

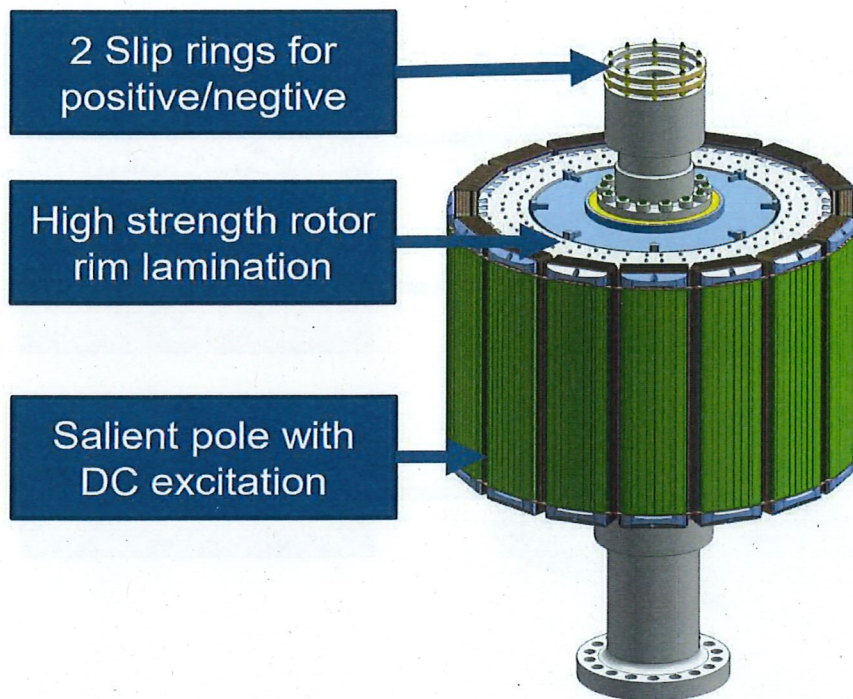


圖 3 傳統機組轉子 3D 構造圖

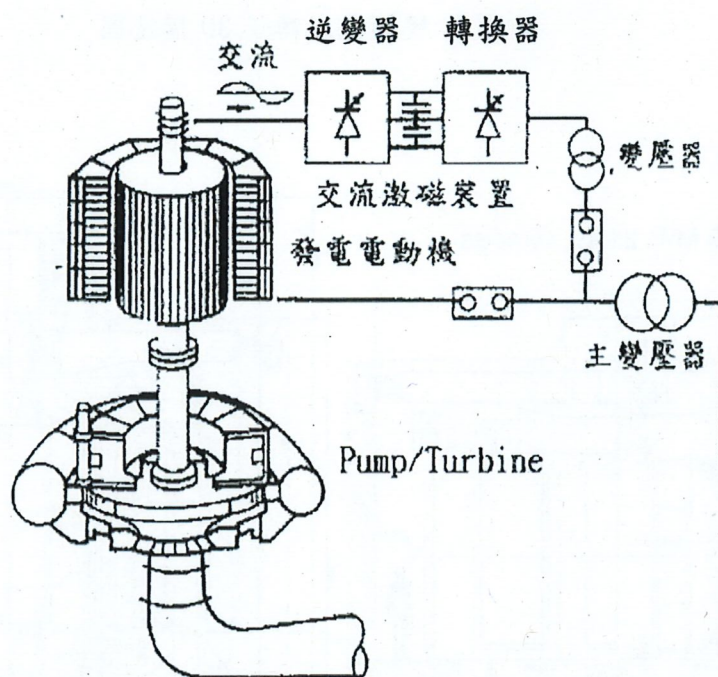


圖 4 變頻機組構造及單線圖

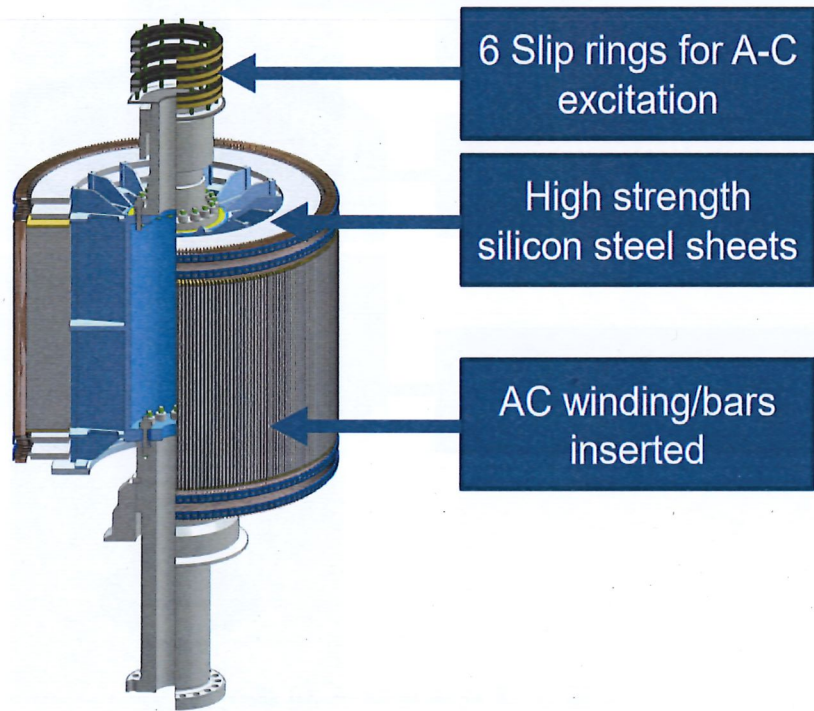


圖 5 變頻機組轉子 3D 構造圖

尺寸

Example: 400 MW, 21 kV, 16 poles

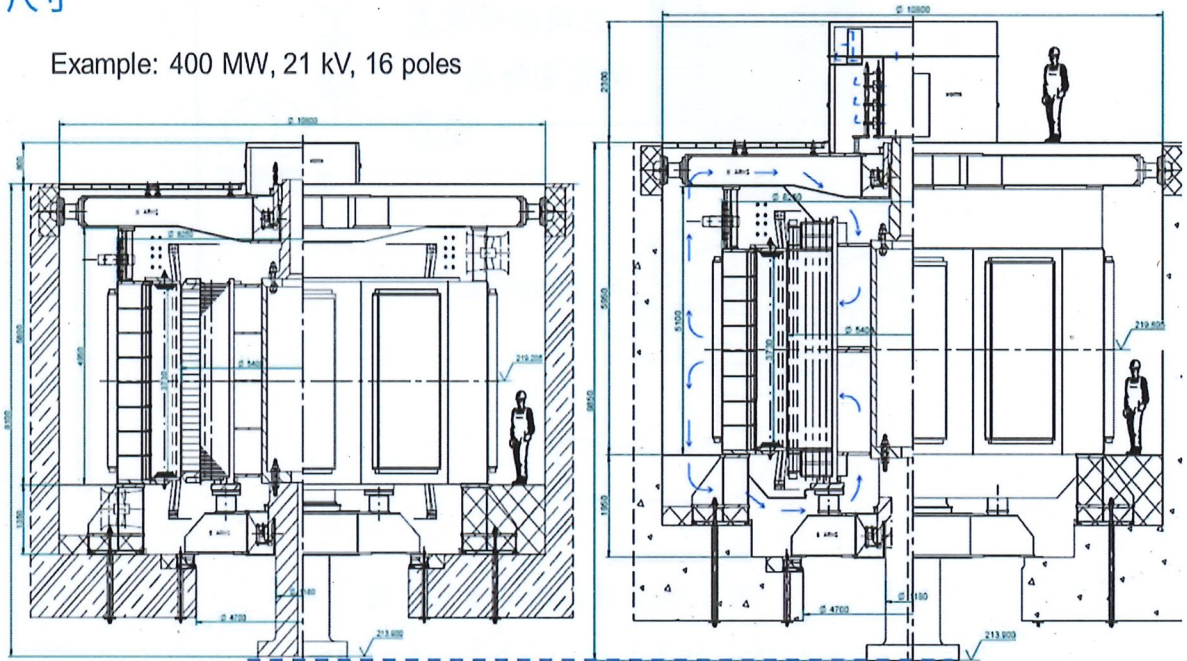


圖 6 傳統機組與變頻機組圖面比較

變頻機組對電力系統之助益，從實功調節、虛功調節等兩方面進行說明，其中，實功調節可再分為頻率控制、備轉容量、暫態穩定度與穩態穩定度；虛功調節再分為電壓控制與電壓穩定度。

傳統抽蓄水力電廠僅能在發電機模式時，提供主要頻率調節，若是轉換成為抽水電動機模式，則無法提供頻率調節的功能，而變頻機組則可在抽水時提供頻率調節功能。

變頻機組在部分運轉發電(partial load)情況下，可有更高運轉效率，如圖 7 所示。且在不同的抽水水頭，定頻機組僅能提供固定入力，變頻機組則可視系統需求提供更高或更低入力，增加電力系統操作彈性(如圖 8)。

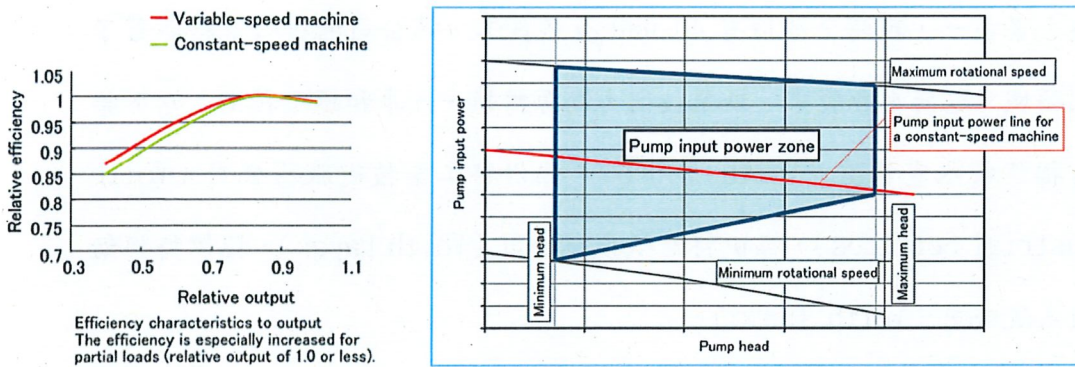


圖 7 定頻與變頻機組效率圖 圖 8 不同抽水水頭下定頻與變頻機組提供入力圖

傳統與變頻式機組比較表：

	傳統機組(定速)	變頻機組(可變速)
效率	普通	較高
靈活性	較不靈活	較靈活
運維	安裝試驗經驗成熟，設備交貨期短	安裝試驗更需專業經驗，備品交貨期較長
成本	低	發電機比傳統機組高 30%
施工	需要深開挖	主廠房需深開挖，且需額外開挖來放置變頻器。施工量體較大。
損失	較低	因有 converter 而有所損失

變頻機組與傳統定頻機組相比，需要更高的投資成本及更大空間需求，然而擁有快速的切換模式，適應再生能源併入電網後之間歇性及頻率之變動性，這些功能對於未來台灣再生能源的發展非常重要。

參、參訪行程

(一) Voith Hydro GmbH 公司參訪及工廠參觀

1. Voith Hydro GmbH 集團介紹

Voith GmbH (福伊特)集團源於德國的工程技術公司，於1867年由弗里德里希·福伊特帶領著30名員工起步於德國步倫茲河邊海登海姆小鎮，藉由強大的創新能力、創業精神和前瞻的眼光，福伊特公司發展成為歐洲最大的家族企業之一，現時全球擁有40,000多名員工，該公司的核心業務涵蓋了多個領域，包括水力發電、紙業技術、能源轉換、汽車和鐵路技術。旗下集團有福伊特水電集團 (Voith Hydro)、福伊特工業技術服務公司 (Voith Industrial Services)、福伊特造紙技術公司 (Voith Paper)、福伊特驅動技術系統公司 (Voith Turbo)。

位於德國海登海姆的Voith Hydro GmbH公司，提供各種水力機械和發電系統相關設備與技術。包括水輪機、發電機和相關的自動化技術，以發揮水資源發電能力。Voith的設備及技術廣泛應用於水力發電廠，有助於滿足能源需求並促進再生能源的發展。

本次參觀總部Voith水利技術部門之核心單位-水利工程中心，以學習水輪機之設計技術。

2. Voith Hydro GmbH 水輪機之創新技術

Voith Hydro GmbH擁有200名以上經驗豐富的工程師與技術人員，主要任務包含所有水力相關之應用研發，如：水力模型試驗室、水輪機與發電機研發與製造等…，本次參訪主要以水輪機設計之創新發展為主軸，透過先進的計算流體動力學 (CFD)、有限元素分析 (FEA)、多物理耦合模擬、大數

據計算等，可更好地了解水輪機的水體動力學特性，減少設計與運轉階段的不確定性，同時降低實驗成本。有助於使水力發電更加可靠、高效率。從而優化葉片設計，提高轉換效率。

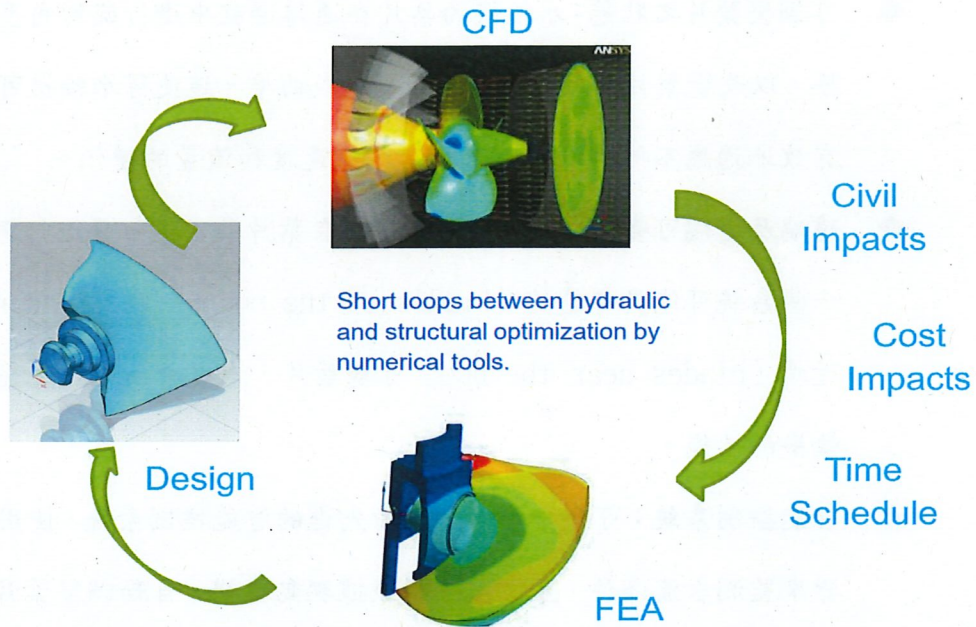


圖 9 voith 設計流程圖

(1) CFD(Computational Fluid Dynamics):

Voith 藉由計算流體動力學之應用，設計法蘭西斯渦輪機之幾何形狀，以減少損失。傳統之計算方式是以線性以及 4-6 小時之迭代方式計算，而 Voith 以先進之 360 度計算法，透過研究及收集更多動態流體之效應，並以 50 天之迭代時間計算，其模擬圖如下：

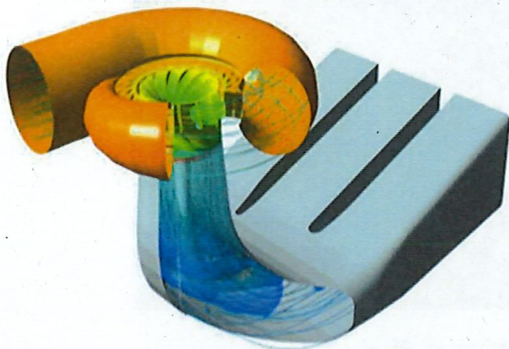


圖 10 傳統模擬法

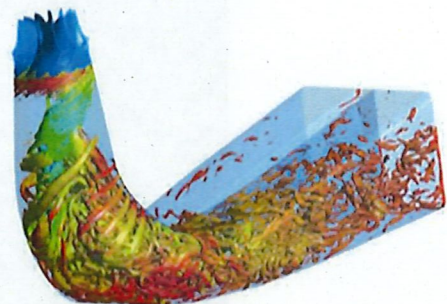


圖 11 360 度模擬法

(2) **可變葉片技術**:水輪機的葉片可以根據不同水流條件下(流速、流量及其他因素的變化)而有效地進行調整,更好地適應水流速度與流量的變化,以提高水輪機的效率。針對可變葉片創新技術主要有以下幾點:

- ◆ **可調整葉片之狀態**:水輪機的葉片在運轉過程中進行旋轉角度的變換,以改變葉片的攻角(進流角度)或曲率。這使得水輪機可以更有效地適應不同水流條件,包括水流速度和流量的變化。
- ◆ **遠端及近端可變葉片**:可變葉片系統在葉片的不同位置進行調整。一些系統可能具有遠端(blades at the end of the runner)和近端(blades near the hub)可變葉片,以更全面地調整整體水輪機的性能。
- ◆ **智能控制系統**:可變葉片系統配備先進的智能控制系統,使用感測器來監測水流條件,並根據這些數據驅動機構,自動調整葉片。這種自適應性可以提高水輪機的效率,使其在不同的運行條件下都能表現出色。

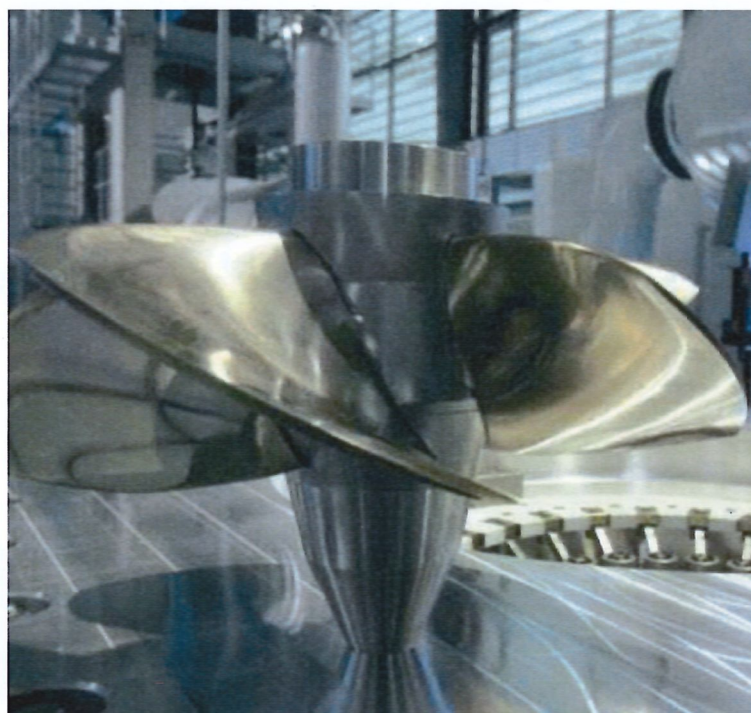


圖 12 Voith 製造之葉片

可變葉片技術的主要目標是優化水輪機的性能，更有效地將水流的動能轉換為機械能提高其效率，減少損耗，同時降低對環境的影響，這也有助於提高水力發電站的可靠性和運行靈活性，從而提高整體發電系統的效能。

3. 提高彈性之大型抽蓄機組：

由於再生能源的間歇性，電網必須有能力快速填補缺口，抽水蓄能是能夠為電網提供穩定的成熟技術，而大型的抽水蓄能水輪發電機面臨的最大挑戰是水泵啟動所需的高容量，變速機組可以緩解這類情況，而三機排列機組幾乎可以解決這個問題，更寬的抽蓄運行範圍及抽蓄模式下的調節能力，該模式可以最低限度地提供變速，此機組大大減少了模式轉換時間。

機組的配置有渦輪、電動發電機、液力變矩器、泵浦，可以透過液壓短路在渦輪和泵浦模式下進行調節，讓水輪機固定方向旋轉，可以延長軸心壽命。其機組排列如下：

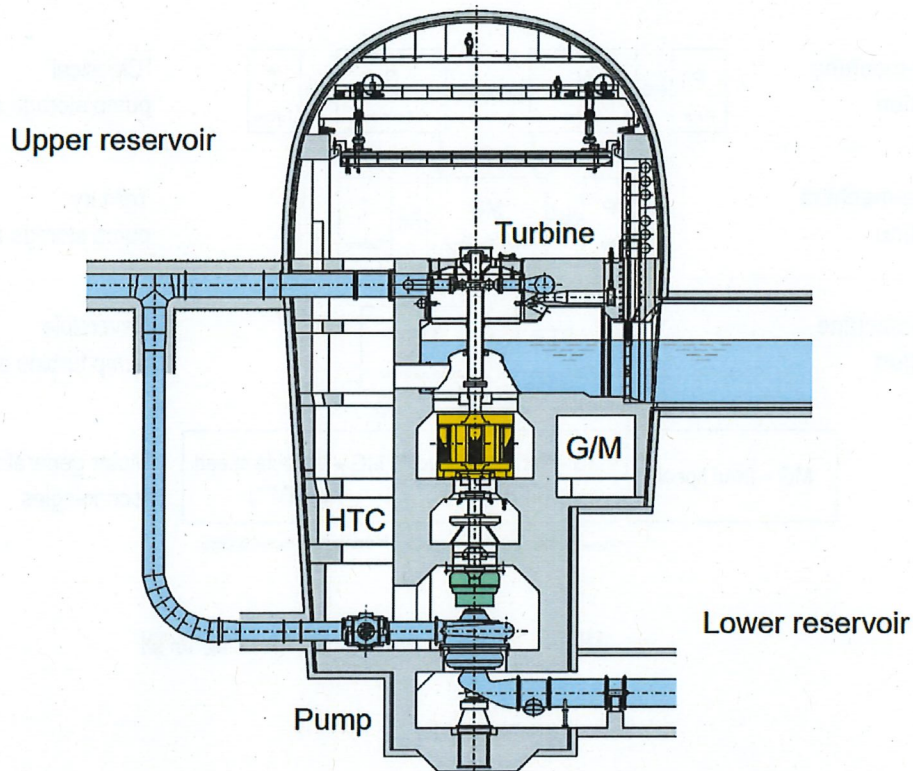


圖 13 佈置圖



圖 14 液力變矩器

液力變矩器作為一種中間設備，或者說是一種介質類型的元件，其作用可以是傳遞轉矩、變矩、變速的作用。

三機排列機組由傳統的馬達與發電機結合成馬達發電機，其相對應關係圖如下圖所示：

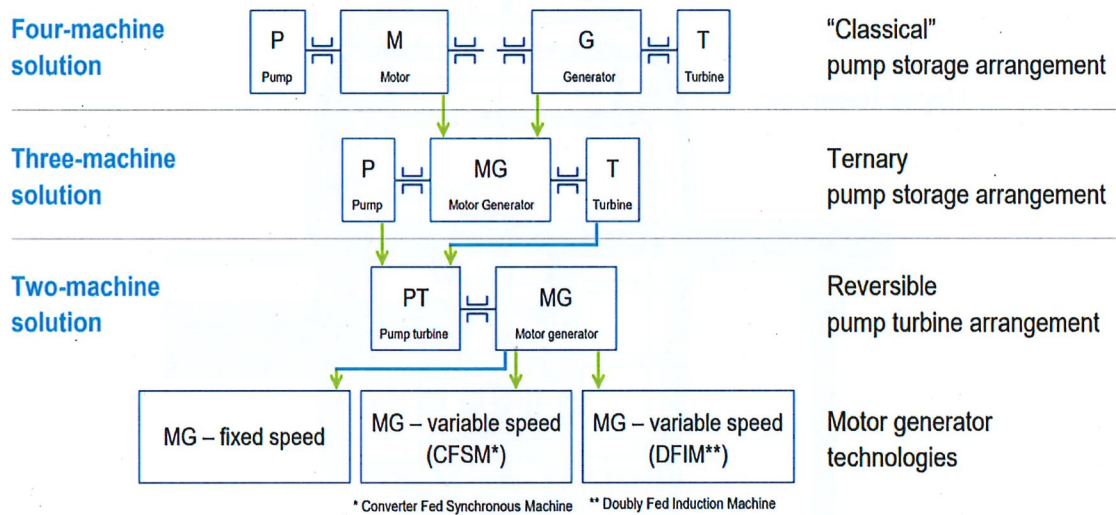


圖 15 各種類抽蓄機組部位關係圖

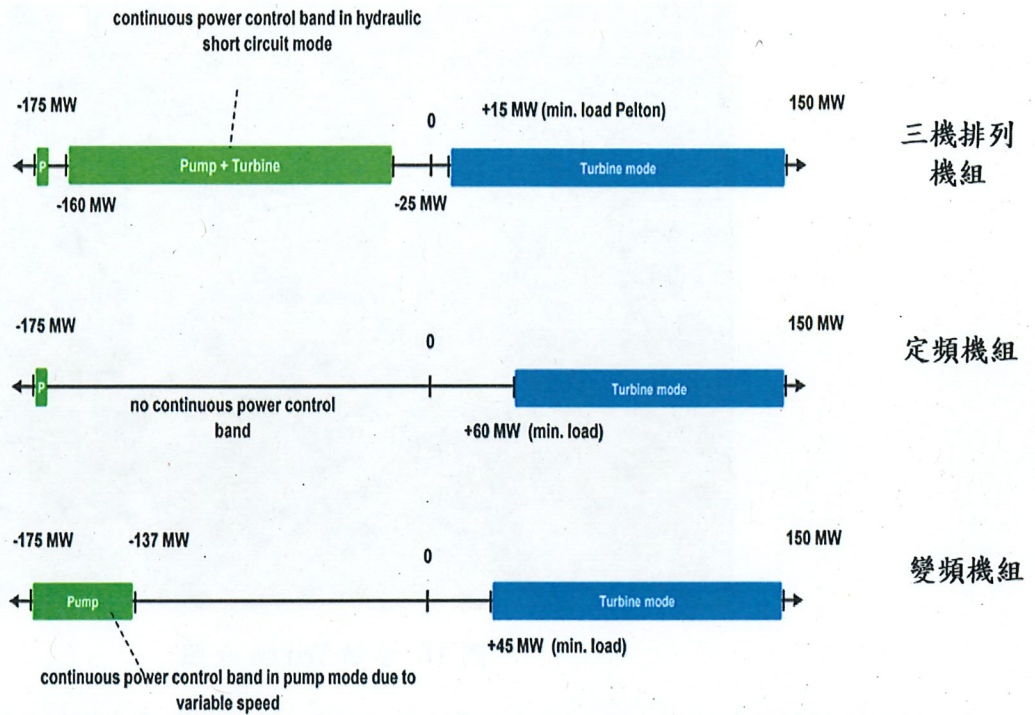
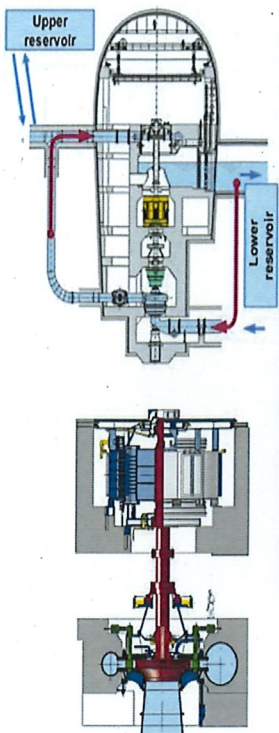


圖 16 各種抽蓄機組的操作範圍比較

T	Pump Turbine Mode change	time [seconds]					
		A	B	C ₁	C ₂	D	E
1	Standstill → PU-Mode	90	75	90	60	90	65
2	Standstill → PU-Mode	340	160	230	60	85	80
8	TU-Mode → PU-Mode	420	240	470	40	45	25
9	PU-Mode → TU-Mode	190	90	280	40	60	25

Reversible PT

A – conventional

B – extra fast response conventional

C₁ – VarSpeed DFIM; C₂ – VarSpeed CFSM

Ternary set

D – with hydraulic torque converter + hydr. short circuit, horiz. with Francis Turbine

E – same as D but vertical with Pelton Turbine

圖 17 各種抽蓄機組模式轉換時間比較表

三機抽蓄機組，具有較高的調度靈活性，能夠根據電力需求的變化進行靈活調整，提供穩定的電力輸出。有助於平滑電力輸出，減緩電網的壓力。



圖 18 參訪 Voith 合照

(二) Illwerke vkw 電力公司及 Illwerke Rodundwerk II 電廠參觀

坐落於奧地利 Vandans 的 Rodundwerk II 電廠，係利用 Latschau 至 Rodund 約 350m 的高差來發電。使用一條獨立壓力鋼管從 Latschau 水庫通往 Rodundwerk II，為 illwerke vkw 電力公司中的最強大的單機機組，且於 1976 年完工時是歐洲最大的水輪機和發電機組。Rodundwerk II 亦可用於抽水蓄能。

以下為該機組之介紹：

- 水輪機功率：
 - 2009 年以前：276 MW
 - 2011 年起（損壞後）：295 MW
- 抽水作業中消耗的馬達功率（2011 年）：286 MW
- 年發電量（2011 年）：486 GWh
- 發電機額定輸出：
 - 2009 年以前：310 MVA
 - 2011 年起：345 MVA



圖 19 Rodundwerk II 電廠空拍圖

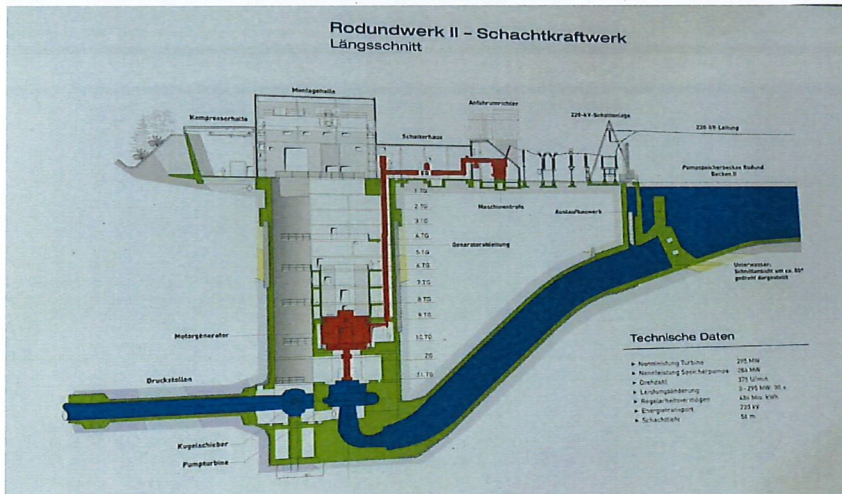


圖 20 Rodundwerk II 機組配置圖

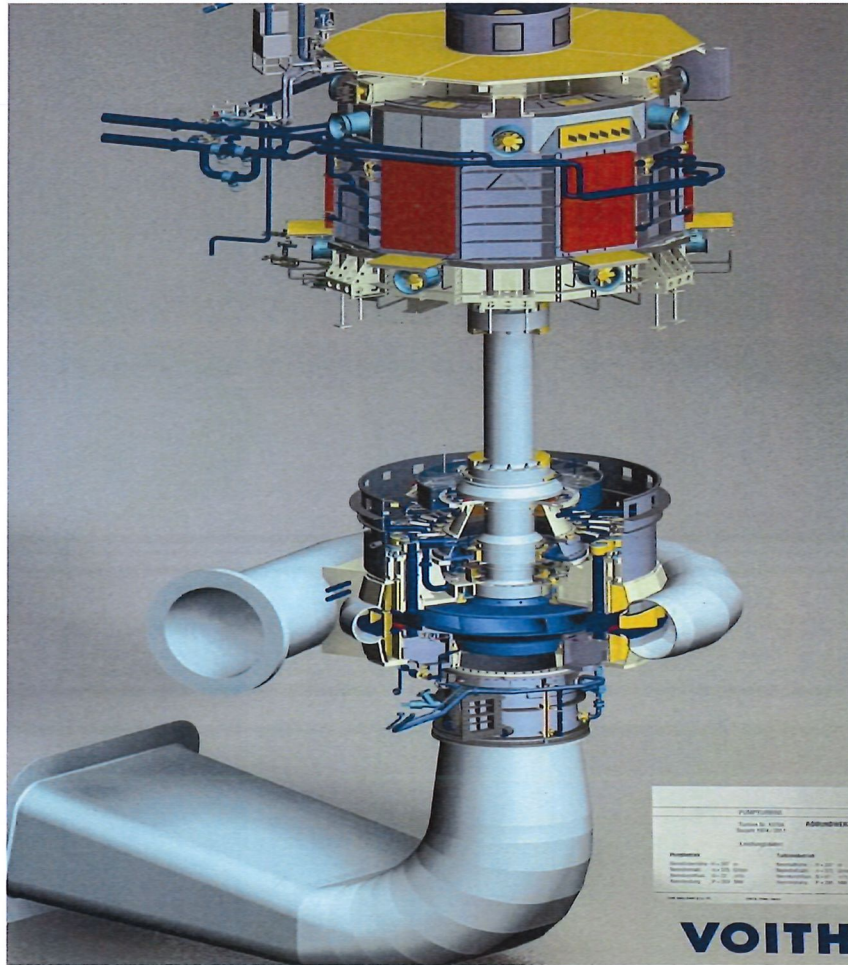


圖 21 機組 3D 模擬圖

2009 年 7 月 3 日，Rodundwerk II 電廠因雷暴天氣緊急自動關閉。由於緊急停機，一根重約七噸的磁極從轉子中脫離，損壞了發電機和水輪機，也因軸承油洩漏而引發火災。在停駛 913 天後，於 2011 年 12 月 30 日正式重啟。汰換完成後之供電能力顯著提高。發電機的輸出從 310 MVA 增加到 345 MVA，渦輪機的輸出從 276 MW 增加到 295 MW。新機組可以滿足當地(福拉爾貝格州)寒冷冬日所需電力的一半以上。整體費用約 6500 萬歐元。

以下為當時施工照片：

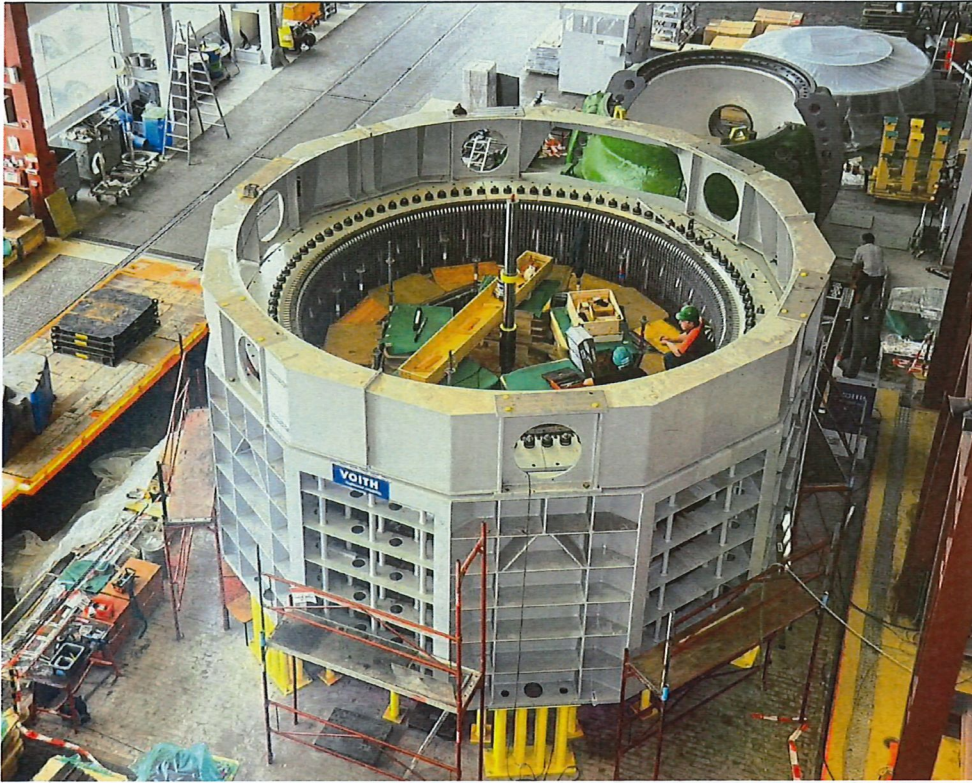


圖 22 機組定子施工照片

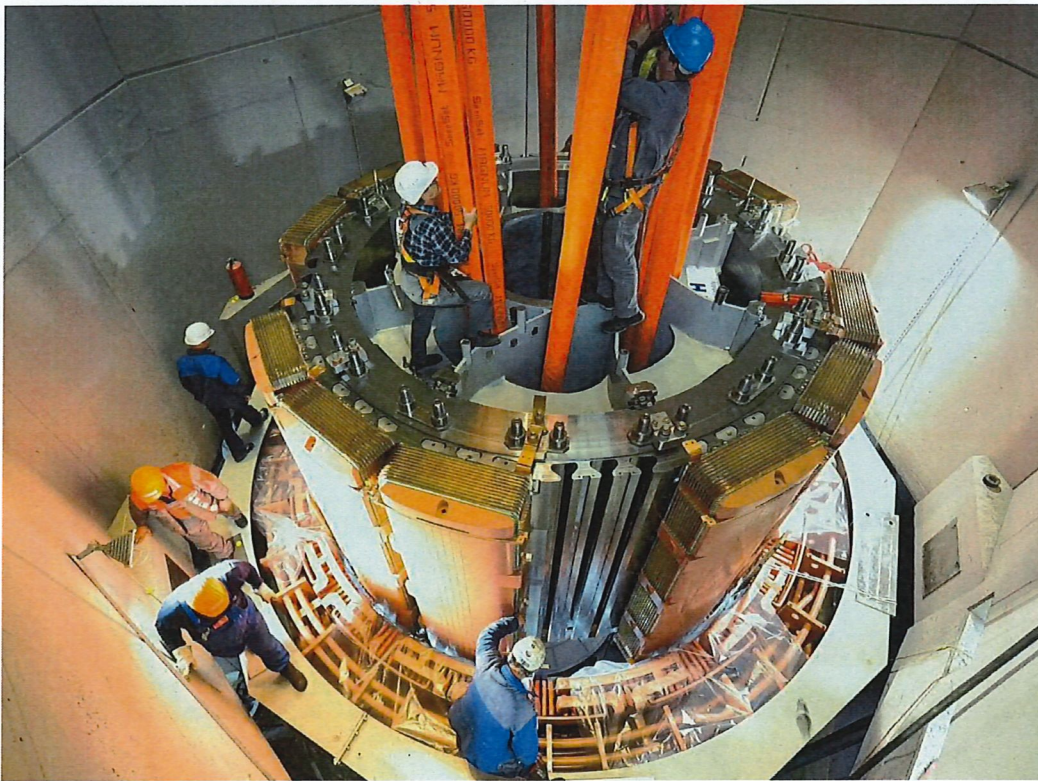


圖 23 機組施工吊裝照片



圖 24 廠房俯視圖

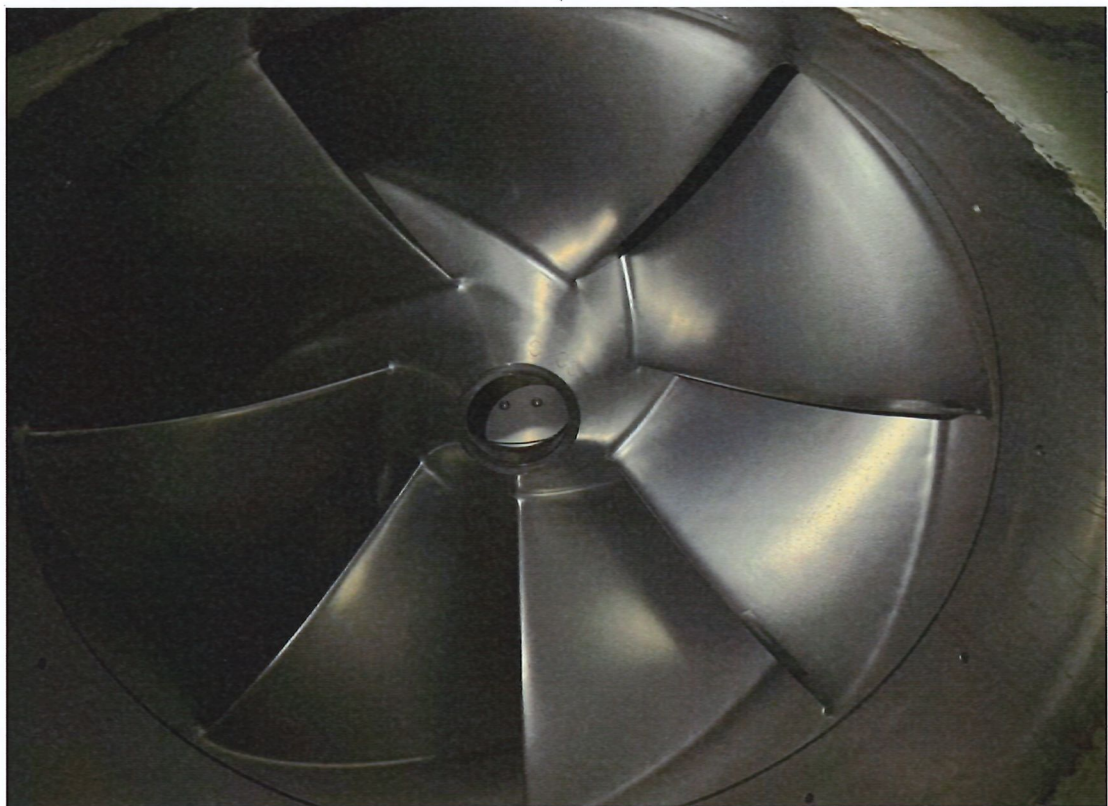


圖 25 水輪機葉片照片

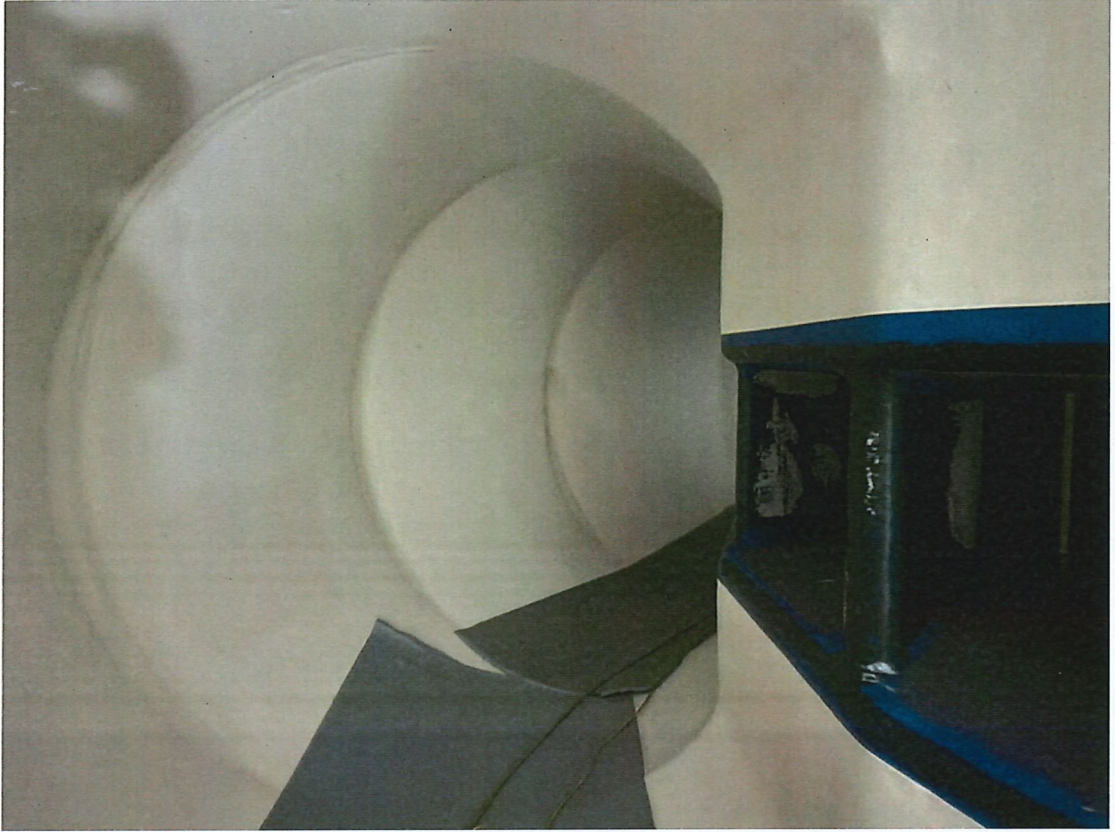


圖 26 渦殼內部照片

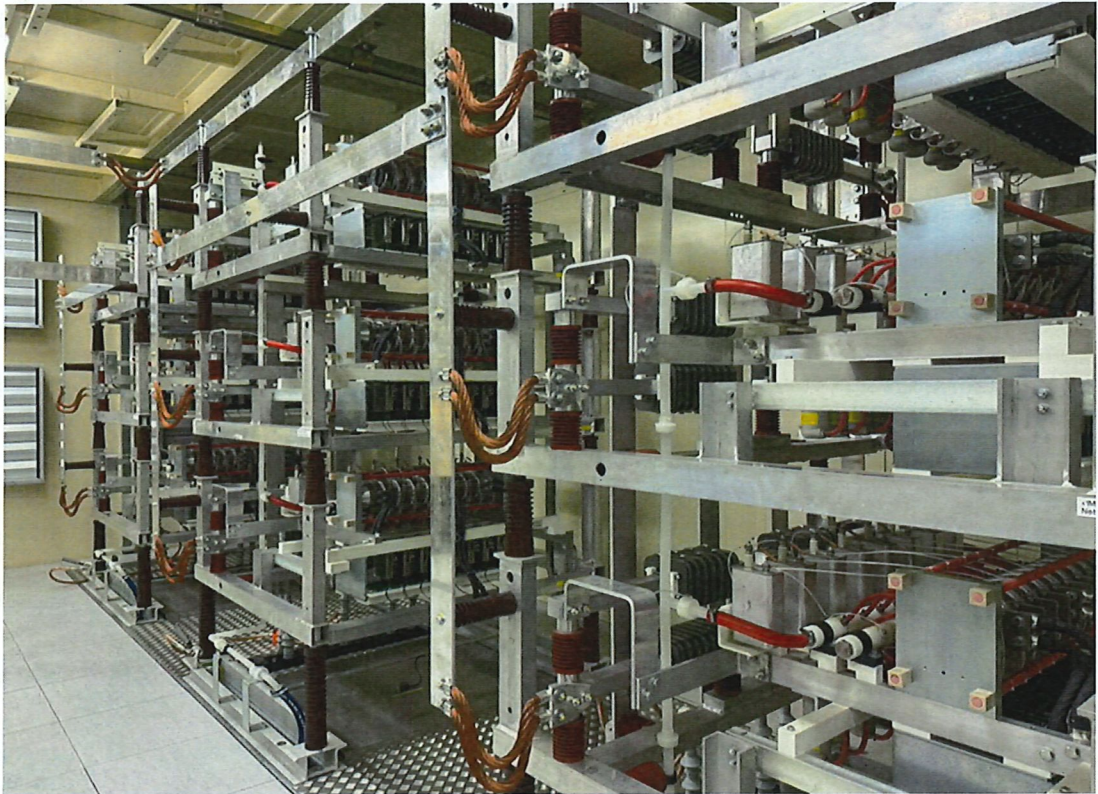


圖 27 交流勵磁機室

本次參訪 Rodundwerk II 電廠期間亦與營運商 Illwerke vkw 電力公司與會人員交流招標策略、風險評估與計畫管理等經驗，以新建電廠為例：

- 招標策略：營運商 Illwerke vkw 表示以營利為主之新建電廠工程來說，土建及機電設備分開獨立招標較為妥適，因為獨立招標會讓電廠較具有優勢。透過獨立招標程序，我們能夠促進市場競爭，吸引不同公司參與投標，從而選擇土建及機電品質和效益最高之優良廠商。可使施工廠商分別提供更具創新性與成本效益的方案，有助於確保最終選擇的方案能夠最大程度地滿足發電廠的需求，同時降低整體建設及營運成本。若電廠以統包工程發包，雖土建及機電由統包商整合，介面較為單純，然而恐由機電廠商為主軸，而所配合之土建施作廠商能力恐有限。另一方面，統包商施工時之風險成本，全加於工程成本上，以一個營利為主之發電廠，恐需要降低成本來達到最大利益。

獨立招標亦有助於確保技術和專業。投標公司必須展示其在相關領域的實力與資格，這有助於確保由具有豐富經驗和專業知識的承包商執行。對於抽蓄水力發電廠這類高度技術性的項目尤其關鍵，以確保順利建設及長期運營。

總體而言，抽蓄水力發電廠建議採獨立招標方式辦理，不僅可以提高方案的品質和效益，同時確保項目的技術和專業水平。

- 風險評估與管控：新建抽蓄水力發電廠的風險評估非常重要，為確保建廠計畫的順利與成功，計畫的風險評估管控需由多個面相討論：
 1. 地勢及地質：地勢及地質風險是項目的基本考慮因素之一，詳盡的地質和地形勘查以全面瞭解地下狀況。這可以透過地質鑽探、地質剖面繪制、土工基準報告等手段實現。管控層面上，應在選址前實施適當的地質調查，以充分瞭解土地的物理和地質特性。這將為工程設計提供寶貴的訊息，有助於應對可能的地質和地形風險。例如，

如果發現地下水位較高或地質層不穩定，可能需要調整工程設計，採取防滲措施以確保項目的可持續性。

2. 環境影響及生態風險: 進行全面的環境影響評估，以評估項目可能對周邊植物、動物和水體的影響。這需要專業的生態學家和環境科學家參與，以確保評估的全面性和準確性。在管控方面，應制定生態恢復計劃，以確保施工和營運階段妥善保護周邊生態。
3. 法規及證照許可風險: 建議定期更新法規及證照許可要求，以確保建廠時始終符合法規的變化。這需要與當地政府和相關當局緊密合作，以瞭解最新的法律和許可標準。在管控方面，應制定一個完善的法務計畫，確保項目的所有方面都符合相關法律，並及時獲取必要的許可和批准。
4. 社區參與和民眾接受度風險: 這方面的成功取決於與當地社區的良好合作。建議主動與當地社區進行對話，解釋建廠的好處，並聆聽他們的擔憂和意見。可以透過公開會議、社區工作坊和其他參與性的活動實現。在管控方面，應制定社區參與計畫，確保訊息的透明度，建立良好的溝通機制，以提高項目在社區中的接受度。此外，可以考慮實施社區福利計畫，以回饋社區，增強項目的社會貢獻。
5. 成本及財務風險: 需要詳盡的分析和風險管理。建議進行全面的財務分析，考慮建設和營運的各種成本，並在預算中充分考慮不確定性。在管控方面，應制定風險管理計畫，包括建立合理的預算和確保有足夠的備用資金以因應潛在的財務風險。此外，應評估外部經濟因素，如匯率波動和通膨，以制定相應的對策。
6. 技術與可行性風險: 這涉及詳盡的技術評估和與經驗豐富的技術夥伴合作。建議在建廠初期進行全面的技術評估，確保所選擇的技術和設備符合項目的需求。在管控方面，應與具有豐富經驗的技術合

作夥伴建立密切合作關係，以確保建廠的技術可行性。包括聘請專業的技術顧問，進行技術審查，以確保項目的各個技術方面都處於可控範圍。

7. 天氣和氣候變化風險：需要考慮未來氣候變化的可能影響。建議在建廠的設計階段進行氣候風險評估，考慮極端天氣事件的可能性。在管控方面，應制定應對極端天氣事件的緊急應變計畫，以確保設施的安全營運。包括防洪措施、緊急排水系統和其他應對措施，以應對極端天氣事件可能帶來的挑戰。

這些建議和管控措施應該作為整個建廠風險管理的一部分，以確保風險能夠被有效地識別、評估和降低，從而實現電廠永續經營期之目標。

- 計畫管理：專案管理是一項複雜的工作，特別是在建造抽蓄水力發電廠這樣的大型工程中。為確保整體計畫的成功，需要專業團隊來進行計畫管理，並在技術和現場施工中需要具備豐富的經驗，以便能夠全面了解並應對各種可能發生的風險。

首先，這個專業團隊應該能夠有效的整合機電和土木工程方面的圖面。在這樣的大型工程中，機電與土木工程之間的整合至關重要。專業團隊應確保圖紙的一致性，並解決可能出現的衝突，並協調機電和土建的施工圖。這不僅需要技術專業知識，還需要對整體工程的全局視野，以確保各個部分都能無縫配合。

另一方面，土木工程和機電的施工進度也需要相互配合。這包括確保土木工程的進度與機電的施工進度，從而減少工程的衝突。專業團隊需要定期審查進度，協調對於計畫的成功實施非常重要，特別是當計畫涉及複雜的機電與土木工程整合，以及現場施工與工廠製造的協調。建立一個專業的團隊是計畫順利進行的基礎，工程團隊需要具備全面的技術知識，並且能有效整合不同的專業。

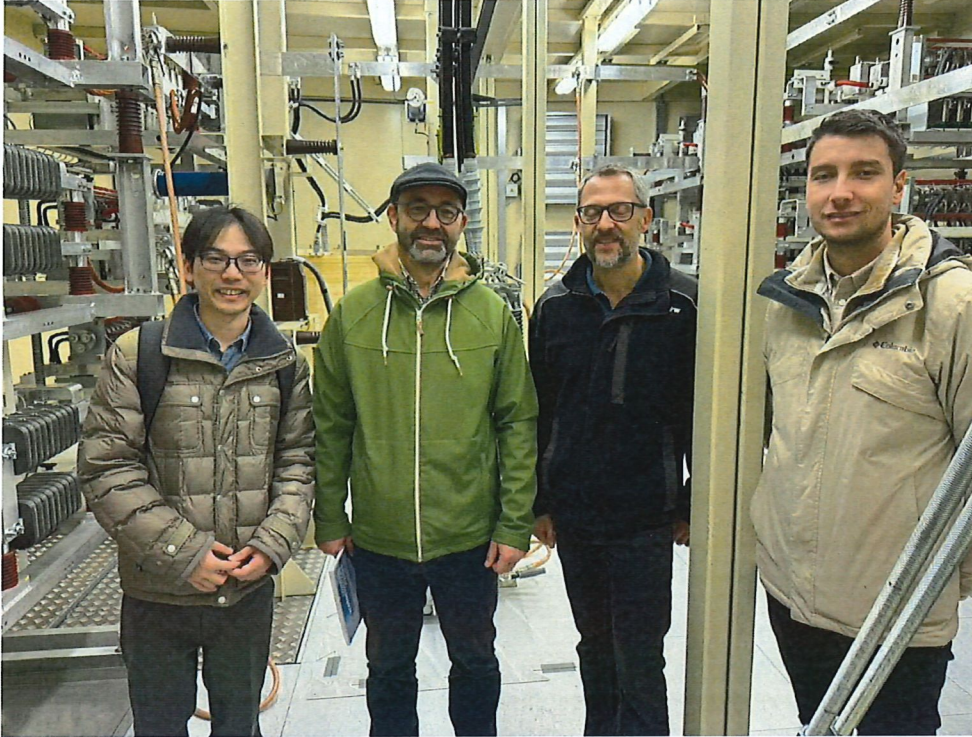


圖 28 與電廠工作人員合照

(三) GE Power Conversion GmbH 公司及工廠參觀

1. GE Power Conversion GmbH 公司介紹:

GE Power Conversion 為一家電機工程公司，是通用電氣(GE Power)旗下的子公司。於 1989 年，英國通用電氣公司的部分部門與 Compagnie Générale d'Electricité 的部分部門合併，成立了 Cegelec (GEC-Alstom 的一部分)，同年成為德國 Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft 的子公司 (AEG) 已與美國西屋公司合併。1995 年，這兩個集團合併成立了 CEGELEC 工業系統集團。1999 年，它更名為 ALSTOM 電力轉換公司，然後在 2005 年 11 月 10 日，它從 ALSTOM 拆分而成為一家獨立的公司，名稱為 Converteam。2011 年 3 月 29 日，GE 能源宣布以 32 億美元收購 Converteam 90% 的股份。2013 年改名成為 GE Power Conversion。

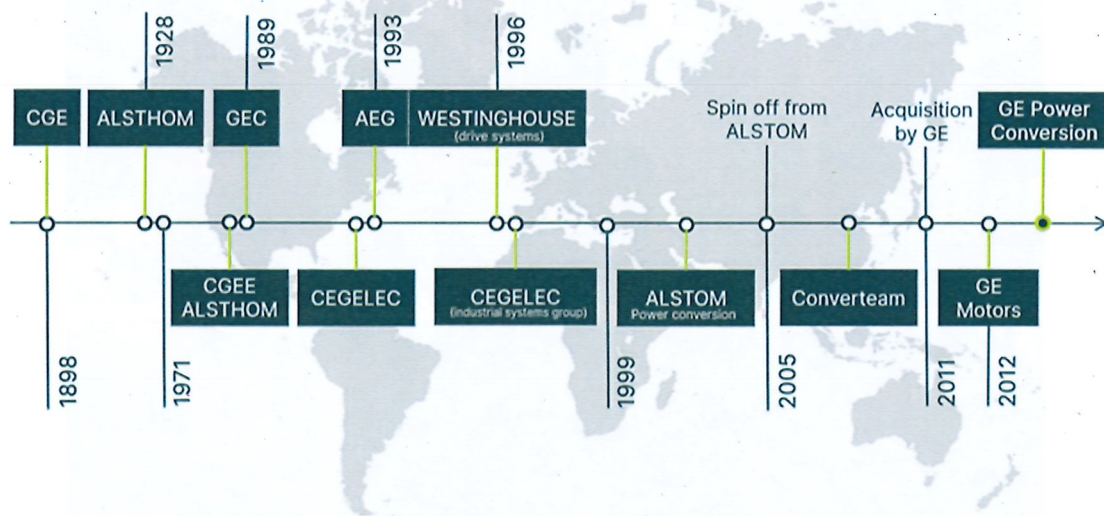


圖 29 GE Power Conversion 發展歷史

GE Power Conversion，其主要致力於電力轉換和控制技術的研發和設備提供，且可於各領域(能源、船舶、礦業、工業和再生能源等)提供高效的電力轉換解決方案。GE Power Conversion 的產品和服務範疇涵蓋了電力轉換器、驅動系統、電機、發電機、以及相關的自動化和控制技術。這些技術不僅應用於傳統的發電站和工業領域，還廣泛應用於風能、太陽能和其他再生能源項目中，有助於提高能源效能和再生能源的整合。在船舶領域，GE Power Conversion 提供先進的電力和推進系統，提升船舶的效能、節能減排及動力管理。同時，在礦業和工業領域，他們的解決方案有助於優化生產過程，提高設備的效率和可靠性。其技術和產品廣泛應用於多個行業，推動了電力轉換和控制領域的不斷進步。

本次參訪位於德國柏林之 GE Power Conversion 公司及工廠，其主要生產、模擬以及測試之中壓及低壓之 Converter，可為本公司未來將推動之水力發電計畫有更深入之了解。

2. 為何需要 converter?

變頻水輪發電機需要使用 converter 的原因與發電機的特性以及電力系統的需求有關，說明如下：

- (1) 可變的轉速：水輪發電機的轉速可能受到水流情況、水壓變化等因素的影響，導致輸出的交流電頻率波動。為了穩定發電機的輸出頻率，需要使用 converter 來調整發電機的轉速，以維持輸出的電力頻率在合適的範圍內。
- (2) 功率因數改善：變頻器可以被用來改善發電機的功率因數。功率因數是指實際功率與視在功率（實際功率和無功功率的總和）之間的關係。透過 converter 的控制，可以調整發電機的功率因數，使其更接近 1，提高能源效率。
- (3) 容易併入電網：發電機輸出的電力頻率和電壓必須與電網的規格相符。converter 可以用來調整發電機的輸出，以滿足電網的需求，確保穩定的電力輸出。由於變頻機組的輸出頻率和電壓可以透過 converter 調整，這使得發電機更容易接入現有的電網，而無需對整個發電機系統進行大規模的修改。

converter 的作用是在變動的水力條件下，使水輪發電機能夠提供穩定、符合規格頻率或電壓輸出，同時提高發電系統的靈活性和適應性。

3. GE Power Conversion 之創新技術：

(1) 封裝絕緣閘雙極電晶體(IGBT)設計之轉換器(MM7)

變頻發電機因所需轉換器較為複雜，所需之空間非常龐大，然而利用 IGBT 的封裝技術來取代傳統電線之設計，可以減少線路所需之空間。

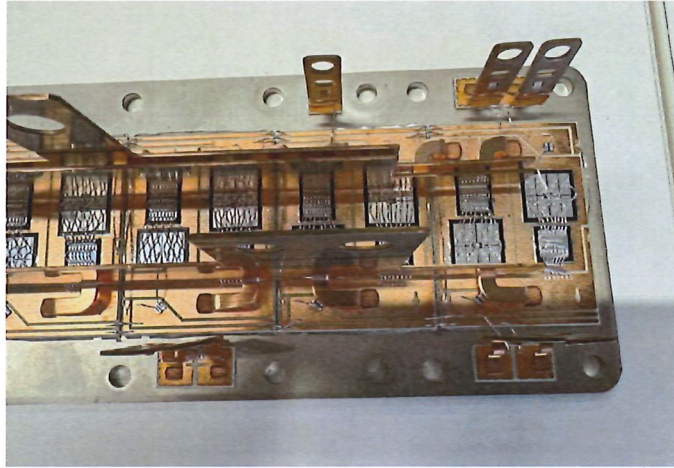
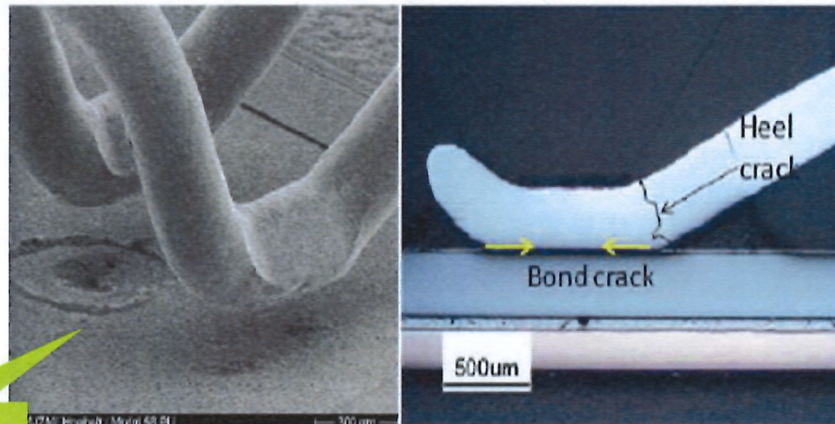


圖 30 傳統電路設計

上圖為傳統佈線方式，可以明顯看出方式較為崎嶇，此較不適合交流勵磁系統，主要原因是交流電使得在線路間接觸點較容易升溫，並且容易脆化斷裂而成為其弱點所在。

GE Vernova does not use bond wires



General Example from literature

圖 31 高倍數顯微鏡下的接合處

觀察 GE 公司封裝絕緣閘雙極電晶體(IGBT)之設計，可以改善上述之缺點，且可於 IGBT 在前後增加冷卻板，以增加效率：

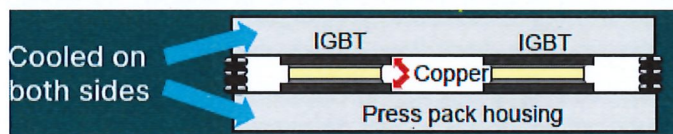


圖 32 冷卻板於 IGBT 之位置圖

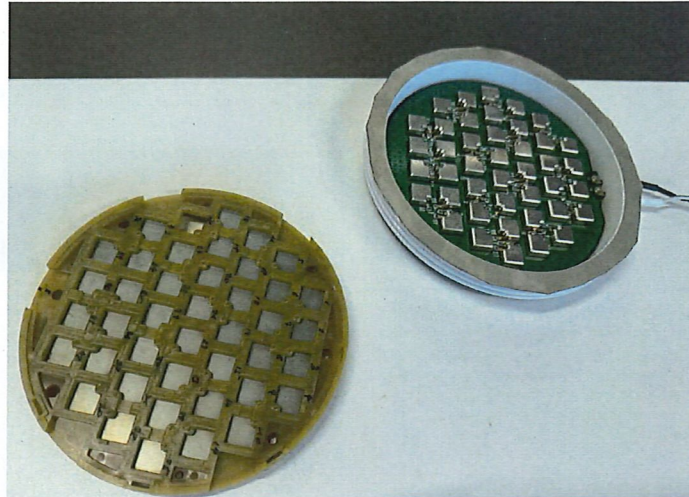


圖 33 IGBT 設計之實體照片

GE 公司利用此封裝技術，研發出新式且體積更小的轉換器模組電路板

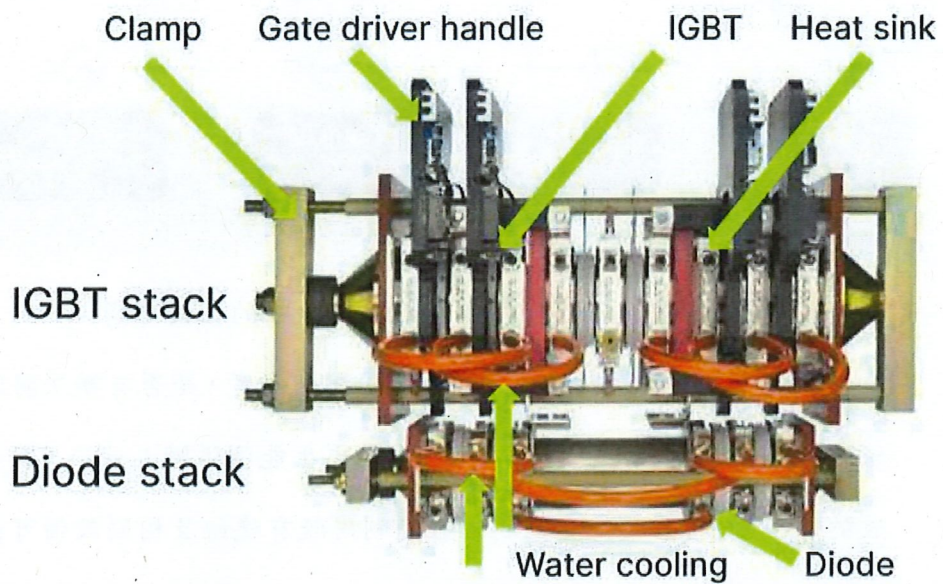


圖 34 以 IGBT 設計的 CONVERTER

(2)將既有定速抽蓄機組升級成為變頻機組

典型的抽蓄機組依不同的裝置容量概分為四種拓樸結構：

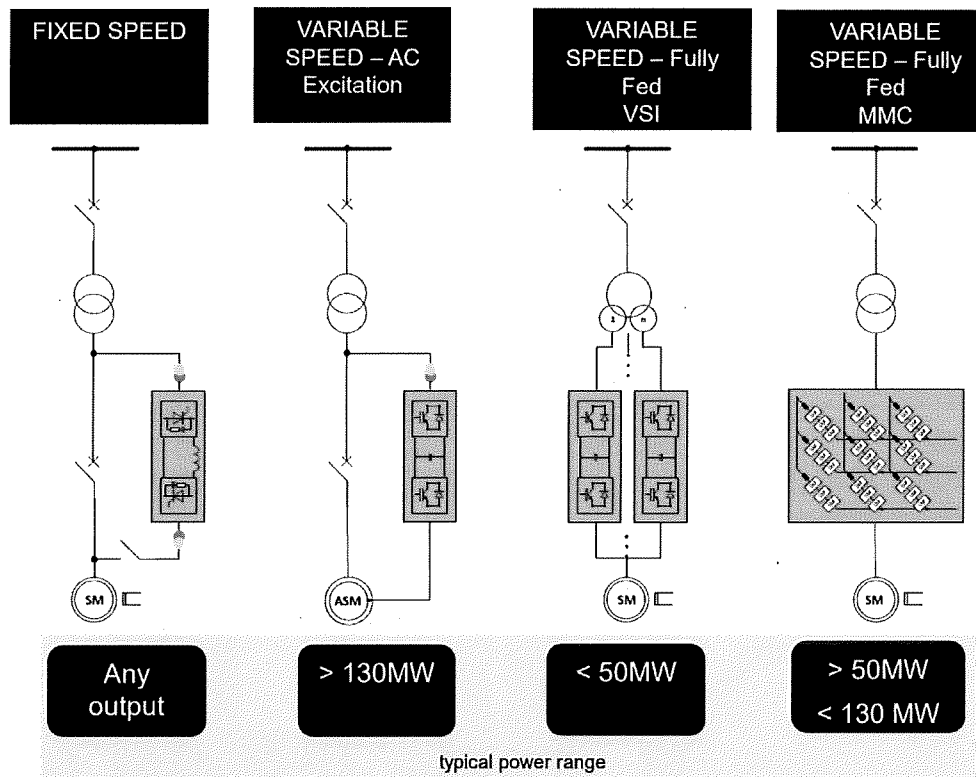


圖 35 定速與不同容量之可變速機組的拓樸結構

隨著為再生能源的發展，部分電力公司開始思考，是否有辦法將既有傳統之抽蓄機組升級為變頻機組，以提升再生能源併網之效率，甚至更有效的回收成本？答案是肯定的，若能利用既有機組及相關設備可節省成本。然而仍有一些挑戰需要克服：

- 由於最大輸出電壓有限，傳統的抽蓄機組需要並聯驅動器，使得機組輸入變壓器（多繞組變壓器）間之佈線更為複雜。
- 傳統機組輸出電壓時需要濾波器，否則會產生諧波，並在變壓器和發電機中產生額外損耗，降低整體效率。
- 因需要新增設備，所需空間較原本大。

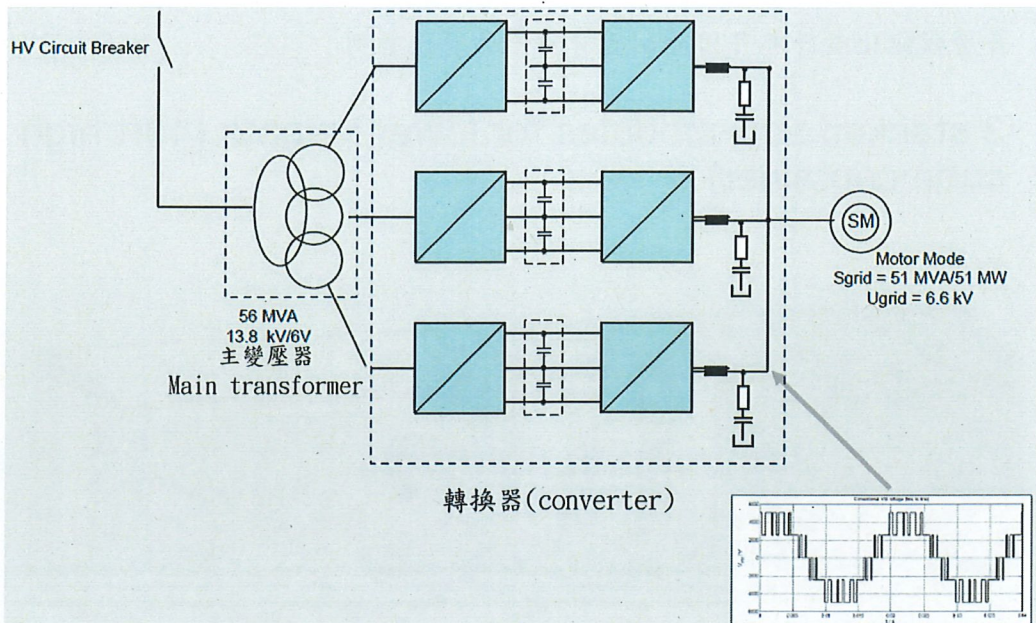


圖 36 傳統機組之電壓波型(諧波)

利用多層模組化設計(MM7)，可以有效克服上述問題，整理之優點如下：

- 降低諧波，減少變壓器和發電機的諧波損耗。
- 可調節轉換器輸出和輸入電壓範圍。
- 可以堆疊，並減少所需空間。

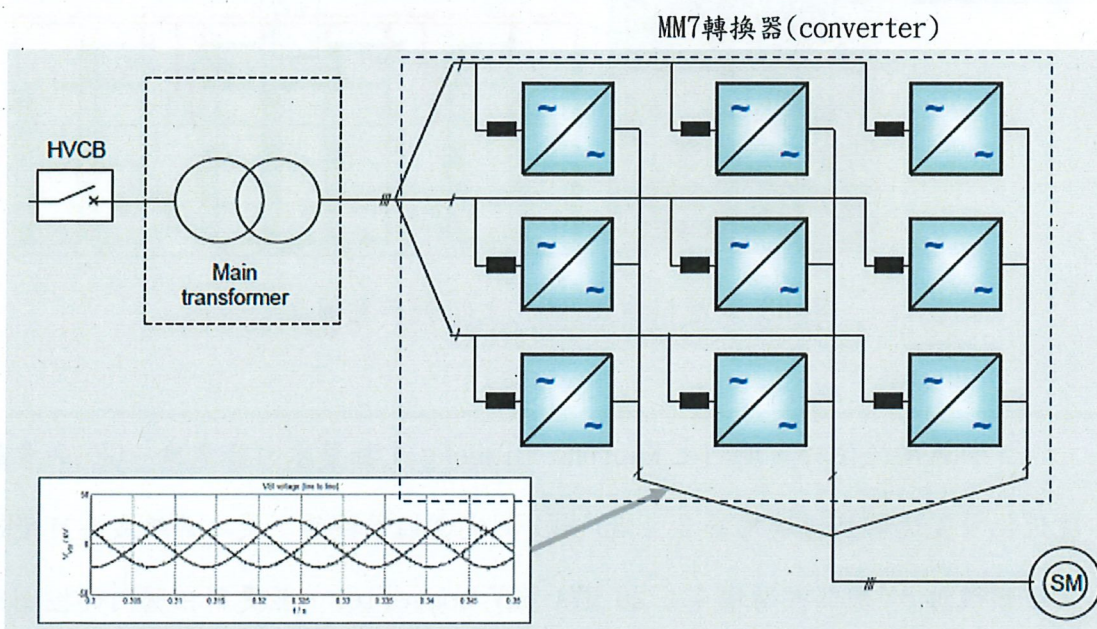


圖 36 利用多層模組化排列輸出端之電壓波型

多層模組化設計亦可因地制宜有彈性的變化排列

3 stacked sub-modules for lower heights (40ft high cube container)

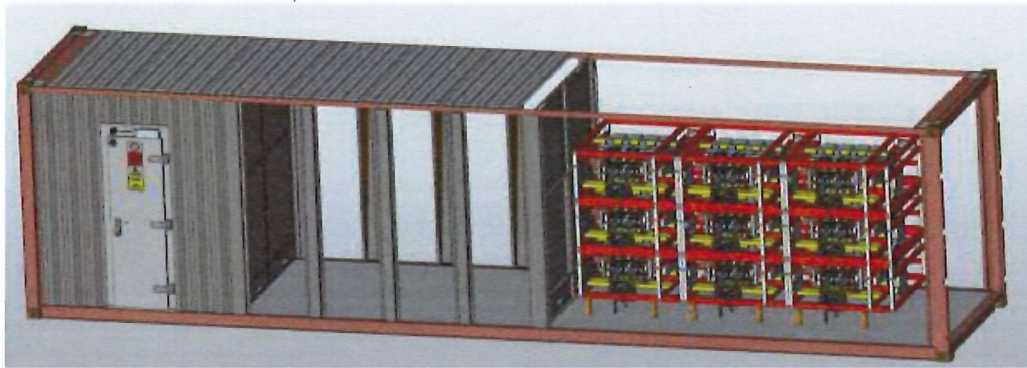


圖 37 多層模組化(MM7)之排列示意圖 1

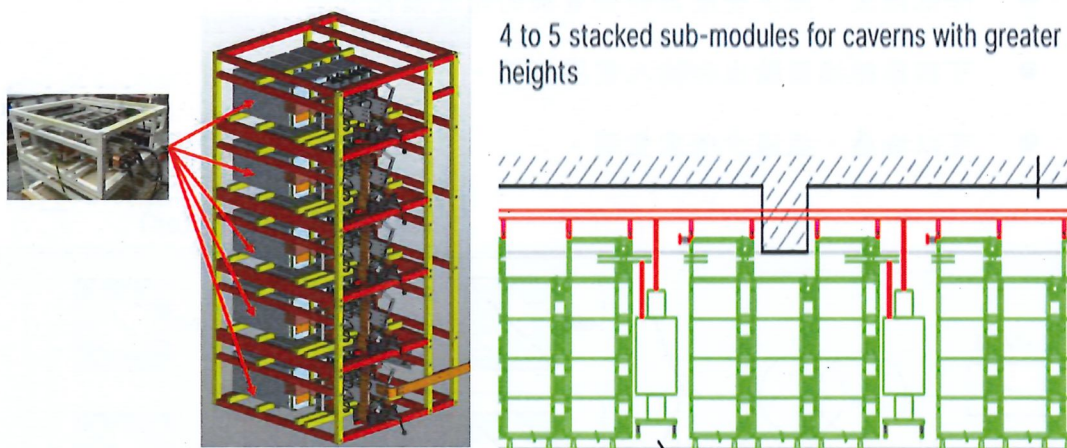


圖 38 多層模組化(MM7)之排列示意圖 2

實際應用於位於奧地利之 Kaprun, Limberg I 抽蓄水力發電廠，GE 的首款現代化可變速轉換器運用於 2 x 80 MVA 之定速抽蓄機組，使之升級成為可變速之變頻機組，(每部機新增 4 x 20 MVA 6kV converter，並更新相關內部控制系統)且於 2021 年 8 月完工啟用。



圖 39 Limberg I 抽蓄水力發電廠內照片



圖 40 Limberg I 機組施工照片

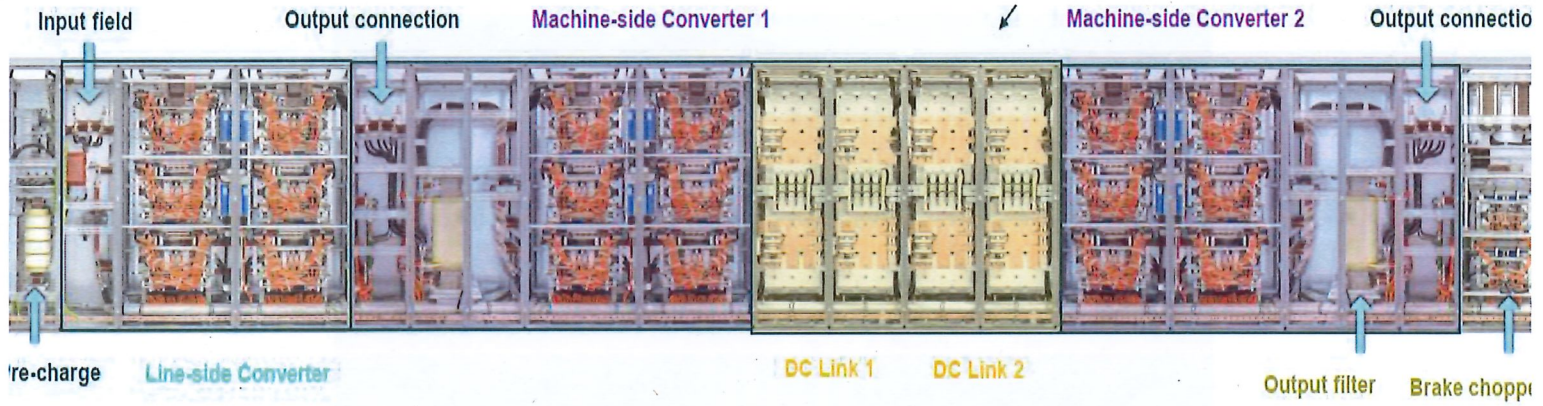


圖 41 多層模組化 CONVERTER 實體照片

Converters Per Unit	Configurable (n)
Converter Output Apparent Power	$n * 20.5 \text{ MVA}$
Standard	IEC 61800、60068-2
Converter Dimension (wxhxd)	18200 mm x 2205 mm x 1800 mm
Rated Excitation Voltage	6.6 kV

圖 42 多層模組化 CONVERTER 相關資訊表



圖 43 與 GE 員工合照

肆、出國期間遭遇的困難與特殊事蹟

本次出國計畫，係因原計畫申請部門臨時有狀況改由職替代執行，實習期間適逢德國當地的百年大雪，攝氏零下負 10 度的低溫，許多路段緊急封閉，鐵路及班機亦遭延後或取消，因此參觀與交流時間被迫縮壓，較原規劃縮短許多，雖然在此惡劣天候環境且人生地不熟，所幸藉由受訪廠商及相關人員熱心協助下，努力克服交通不便之困難，順利完成行程。

伍、心得與建議

本次是第二次赴德國實習，前後相隔約五年，期間最大的差異就是國際對再生能源的重視度大幅提升，現今德國亦將核能發電廠數量縮減，利用再生能源來取代核能，透過抽蓄水力進行儲能。

有鑑於水力發電技術發展歷史久遠，經洽詢電廠營運商，其施工方法思維上，因為再生能源蓬勃發展，新建變頻抽蓄電廠所需的成本與工期較多且長，可以由既有的同步機組改建成為變頻機組，優點是設備上僅需添購變頻及電控設備，以及抽蓄機組的部分零件汰舊換新；缺點是變頻器的空間必須要特別考慮，既有的同步機組較無預留此類設備的空間。

建議本公司既有的水力電廠可採前述方式辦理，將既有設備汰舊換新並升級，可提升效率及系統穩定性，以滿足因應再生能源併網。若為新建變頻式水輪發電機組，則須整廠規劃考量，利用先進之設計技巧，設計出最有效率之機組。

本次透過參訪，學習最新的先進水輪機及變頻設備的技術，在招標策略、風險評估與計畫管理上學習到不同的思維及面向，現今台電及顧問公司均在抽蓄水力計畫上斷層已久，若本公司之團隊與顧問公司針對專案計畫之各項工程界面整合及專案管理一起成立專業團隊，可以同步提升本公司及顧問公司對計畫執行之能力及效果，同時招標上也可採取土建及機電獨立招標之模式，可提升整體市場的實力，對本公司、顧問公司及承攬商

之競爭力皆有所幫助。