

出國報告（出國類別：實習）

川流式水輪發電機及變頻式抽蓄水力發電之規劃設計及資料蒐集等技術實習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：康泰 電機工程師

派赴國家：奧地利、德國

出國期間：113年10月23日至113年11月3日

報告日期：113年12月30日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

川流式水輪發電機及變頻式抽蓄水力發電之規劃設計及資料蒐集等技術實習

頁數 32 含附件：是 否

出國計劃主辦機關／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

康泰/台灣電力公司/營建處/專員/(02)-2366-6966

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：113 年 10 月 23 日至 113 年 11 月 3 日

出國地區：奧地利、德國

報告日期：113 年 12 月 30 日

關鍵詞：水輪機、發電機、變頻機組、可變速機組

內容摘要：(二百至三百字)

配合本國能源轉型政策，再生能源發電需求與占比預期將逐年攀升，水力發電作為再生能源發展的重要策略之一，涵蓋範疇包含傳統水力、小水力、微水力及抽蓄水力發電等，特別是在未來大量再生能源併網的趨勢下，變頻抽蓄水力發電具備顯著優勢，不僅提升了電網的頻率調節能力，亦有效改善電力系統之暫態穩定性。

本單位目前刻正推動之水力發電計畫包括集集南岸新建段 S6-S8 跌水小水力發電計畫、光明抽蓄及牡丹抽蓄等大型水力抽蓄發電計畫。為蒐集最新小水力發電、變頻式抽蓄水力發電之最新技術，本次實習赴奧地利及德國進行專業考察，拜訪工程顧問公司 Fichtner、水輪發電機組製造商 Voith Hydro 及電力設備製造商 GE Power Conversion，為後續水力發電計畫奠定技術基礎。

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

# 目錄

壹、 目的 .....	1
貳、 行程規劃 .....	2
參、 川流式水力發電機組研習 .....	4
(一) 何謂川流式水力發電 .....	4
(二) Voith Hydro 參訪 .....	5
(三) 水輪機組標準化及模組化 .....	13
肆、 變頻式抽蓄水力發電研習 .....	17
(一) 抽蓄水力發電概要 .....	17
(二) 變頻抽蓄水力機組之特性 .....	19
(三) GE Power Conversion Gmbh 參訪 .....	22
(四) Fichtner Gmbh 參訪 .....	28
伍、 心得及建議 .....	32

## 壹、 目的

本次赴奧地利及德國的專業考察，旨在提升本公司在水力發電技術與應用上的專業知識，以因應國內能源轉型和再生能源併網需求逐年增加的挑戰。本次行程的主要目標包括學習變頻式抽蓄水力發電的先進技術、探索小型水力發電解決方案、深入了解最新水力發電設計及專業服務，以及參考國際成功案例。

隨著再生能源的快速發展，變頻式抽蓄水力發電已成為穩定電網的重要技術，其特點包括提升電網頻率調節能力、改善系統暫態穩定性，以靈活應對大量併網再生能源的挑戰。本行程將汲取雙饋式感應機（Doubly Fed Induction Machine, DFIM）與全功率供電同步機（Fully Fed Synchronous Machine, FFSM）的技術應用，並探討其效率、適用性及運行穩定性。

此外，在傳統大規模水力發電之外，小水力及微水力發電逐漸受到重視。本次參訪將深入了解 Voith Hydro 的 StreamDiver 及其他小型水輪機解決方案，期能有效利用台灣現有水利設施，開發更多再生能源。

本次實習將拜訪工程顧問公司 Fichtner、水輪發電機組製造商 Voith Hydro 及電力設備製造商 GE Power Conversion，為後續水力發電計畫如集集南岸新建段 S6-S8 跌水小水力發電計畫、光明抽蓄及牡丹抽蓄等水力發電計畫提供技術參考。

## 貳、 行程規劃

本次實習行程安排首先前往奧地利 Voith Hydro 位於聖波爾坦 (St.Pölten)的小水力機組製造廠，汲取有關小水力發電機組之最新發展及相關應用。接著前往德國柏林 GE Power Conversion 公司進行抽蓄水力電廠之變頻器技術研討及工廠參觀。隨後前往德國司徒加特拜訪德國最大私人工程顧問公司 Fichtner 獲取最新水力發電開發之相關知識；最後至德國海登海姆參訪 Voith Hydro 總部及工廠、水力機組實驗室。安排行程如下：

出國行程表		
日期	地點	工作內容
10/23~10/24		往程 (台北 - 維也納)
10/25~10/26	聖波爾坦 (St.Pölten)	1. Voith Hydro 聖波爾坦公司及小水力機組工廠參訪 2. 小水力機組技術研討
10/27~10/28	柏林 (Berlin)	1. 移動至柏林 (維也納 - 柏林) 2. GE Power Conversion 公司及工廠參訪 3. 抽蓄水力機組變頻器技術研討 4. 移動至司徒加特 (柏林 - 司徒加特)
10/29~10/30	司徒加特 (Stuttgart)	Fichtner 公司參訪及水力發電技術研討
10/31~11/1	海登海姆 (Heidenheim)	1. 移動至海登海姆(司徒加特 - 海登海姆) 2. Voith Hydro 公司、水力機組工廠及水力實驗室參訪
11/2~11/8	德國	自費觀光
11/9~11/10		返程 (法蘭克福 - 台北)

	<p>參訪 GE Power Conversion 之合照。本次行程由該公司 Hydro and Power - Lead Technical Sales Engineer 接待</p>
	<p>參訪 Voith Hydro 總部(海登海姆)之合照。本次行程由該公司 Expert Sales &amp; Proposals 接待</p>
	<p>參訪 Voith Hydro 總部(海登海姆)之合照。本次行程由該公司 Head of Hydraulic Application 帶領參觀水力機組實驗室</p>

## 參、 川流式水力發電機組研習

### (一)何謂川流式水力發電

川流式水力發電 (Run-of-River Hydropower) 是一種依靠河川自然流量與水頭落差進行發電的方式。與傳統的水庫式水力發電不同，川流式水力發電通常不需要興建大型水庫，而是利用河川的天然流量，將全部或部分河水引導至發電設備，透過水的動能與位能驅動水輪機組，進而帶動發電機產生電能。發電後的河水則會回流至原河道中。由於沒有大型儲水設施，川流式水力發電無法蓄水，發電量因此直接受到河流水流的自然變動（如季節性流量或降雨量）影響。此外，由於其開發規模通常較小，對生態環境與周邊社區的影響相對較低。

依據台灣過去再生能源發展條例第 3 條第 5 款，「川流式水力」發電之定義為：「指利用圳路之自然水量與落差之水力發電系統」。後因實務上亦有利用既有水庫等水利設施興建之小型水力發電，其開發規模對環境影響小並保有原灌溉、防洪之功能，然因受限於過去「川流式水力」之用詞定義無法享有併網及躉購費率獎勵。為鼓勵不同形式小水力發電及活化既有水利設施，現行條例已將「川流式水力」修改為「小水力發電」，其定義為：「指利用水道、圳路、管渠或其他水力用水以外用途之水利建造物之原有水量及落差，以直接設置或另設旁通水路設置之方式，轉換非抽蓄式水力為電能，且裝置容量未達二萬瓩之發電方式」。也就是說，如果原有水利設施的主要目的不是發電，且可以在不影響原有用水功能的前提下，利用其水量和落差進行發電，其裝置容量小於 20MW，就符合小水力發電的定義。目前，台灣多數小水力發電系統仍屬川流式水力發電機組的型式，這些系統以其簡

化的設計、低環境影響及高效能，成為發展再生能源的重要方向之一。

## (二)Voith Hydro 參訪

Voith 集團成立於 1867 年，總部位於德國海登海姆，其業務範疇涵蓋造紙技術 (Voith Paper)、驅動技術 (Voith Turbo)、工業技術服務 (Voith Industrial) 以及水力發電 (Voith Hydro)。作為全球水力發電領域的全方位解決方案供應商，Voith Hydro 擁有約 3600 名員工，業務遍及 57 個國家，至今已累計生產超過 245 GW 總裝置容量的水力發電設備。公司提供涵蓋大型與小型水力發電項目的完整解決方案，包括水輪機、發電機、自動化系統與數位化技術，並提供從諮詢、工程設計、產品製造、安裝到維護的一站式服務。

Voith Hydro 的小型水力發電機組製造核心位於奧地利的聖波爾坦 (St. Pölten)。2023 年 5 月，公司將原專注於生產 15 MW 以下小型水力發電機組之水輪機與控制系統的聖喬治 (St. Georgen) 工廠，與聖波爾坦工廠合併。此舉旨在整合兩廠在水輪機及控制系統製造領域的專業技術與豐富經驗，進一步提升製造能力與效率。此外，早在 2008 年，Voith 便已收購 Kössler 公司——一家專注於小型水力發電水輪機及控制器製造的企業，並於 2020 年將其完全納入 Voith Hydro 的小型水力發電業務部門。透過這一系列的策略性佈局，Voith Hydro 在小型水力發電領域奠定了領先的技術優勢，不僅強化了其全球市場地位，更進一步實現了產品創新與服務品質的全面提升。



圖 1. 水輪機葉片加工 (Voith Hydro St.Pölten 廠區)

### 小水力發電概要

小水力發電機組之優勢在於其建置靈活度高、環境衝擊較小，且可充分利用既有水利設施，如既有灌溉渠道、自來水管網等場域進行設置。現代小水力機組多採用數位化監控系統，實現遠端操作與智慧維護，大幅降低人力需求。此外，得益於先進製造技術與標準化設計，現今的小水力機組具備安裝便捷、維護簡單等特點，可顯著縮短建置時程並降低營運成本。

小水力發電機組的設計與選用，需綜合考量場址條件、水文特性及運轉需求等多項因素，其中水頭高度與流量為決定機組型式的關鍵參數，不同之機組型式均有其適用範圍，如佩爾頓式水輪機(Pelton Turbine)適合高水頭之應用場域；中等水頭場域則可選用法蘭西斯式水輪機(Francis Turbine)；而低水頭場域可選擇卡普蘭式水輪機(Kaplan Turbine)。除傳統機型外，Voith Hydro 近年推出的創新小水力機組 StreamDiver 與模組化小水力機組 M-line 系列，更針對不同條件之小水力場域提供更具經濟效益的解決方案。Voith Hydro 所製造之小水力發電機組裝置容量最高可涵蓋至 30MW，其適用範圍如圖.2 所示：

## Application range Voith Small Hydro

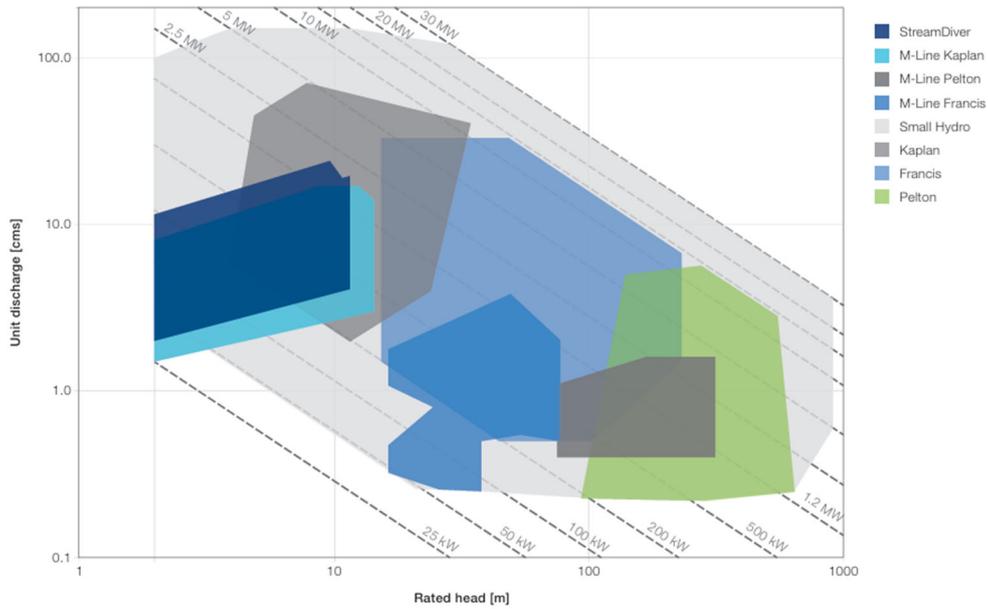


圖 2. Voith Hydro 小水力機組適用範圍

針對小水力發電之機組應用，本次參訪期間所研討之內容概述如下：

### 法蘭西斯式(Francis Turbine):

法蘭西斯式水輪機又稱混流式水輪機，是目前最廣泛使用的水輪機型式之一，主要應用於中等水頭、大流量的水力發電廠。其典型應用場景包括大型水庫式水力發電廠與抽蓄水力發電廠，因其具有寬廣的轉速範圍、高運轉穩定性及高效率等特點，也被應用於川流式小水力發電系統。在川流式小水力發電機組中，法蘭西斯式水輪機通常採用橫軸設計，以適應空間限制並降低施工成本。多數法蘭西斯機組採用動輪（runner）直接連接發電機軸的結構，這不僅增強了整體機組的結構穩定性，也降低了維護需求與運行成本。



圖 3. 法蘭西斯式小水力水輪機 (Voith Hydro St.Pölten 廠區)



圖 4. 法蘭西斯式小水力水輪機 (Voith Hydro)

### 卡普蘭式水輪機 (Kaplan Turbine):

卡普蘭式水輪機由 Victor Kaplan 於 1910 至 1913 年間基於法蘭西斯水輪機的設計改良而成，主要應用於低水頭、大流量的水力發電

廠，特別適合川流式水力發電系統。卡普蘭水輪機的核心優勢在於其雙重調節能力—導翼（Guide Vane）與動輪葉片（Runner）可分別獨立控制，這使其能夠在水流量大幅變化的情況下，保持高效運行，非常適合流量波動大的應用場合。

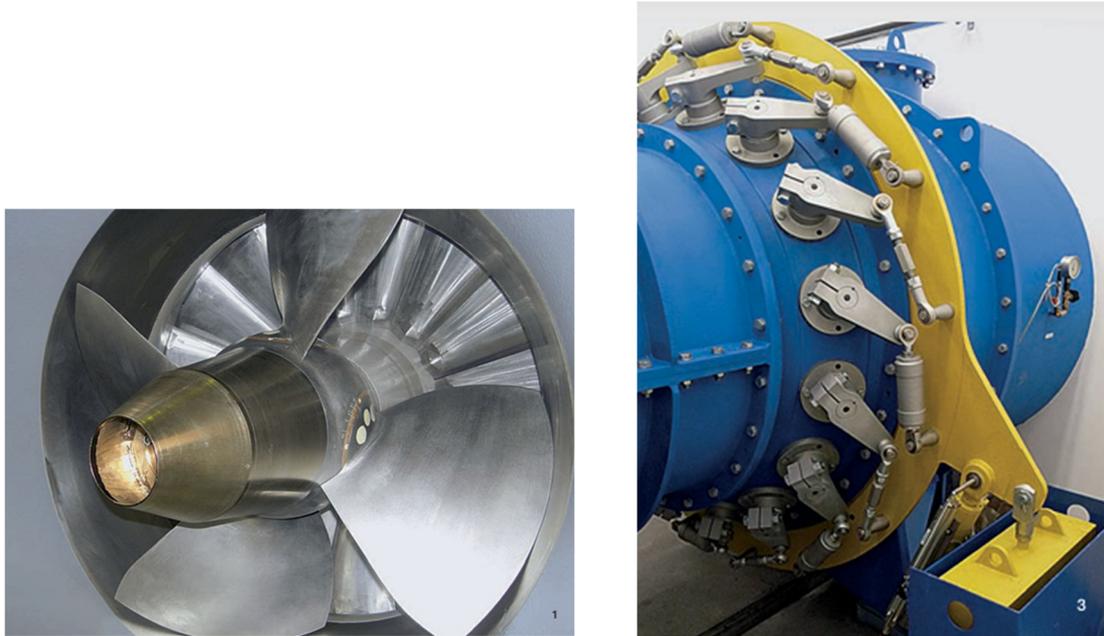


圖 5. Kaplan 水輪機之動輪 Runner 及導翼 Guide Vane (Voith Hydro)

### 佩爾頓式水輪機(Pelton Turbine):

佩爾頓式水輪機（Pelton Turbine）是一種衝擊式水輪機，適用於高水頭、低流量的水力發電廠，其原理係將水流經壓力管道輸送至一個或多個噴嘴(Nozzle)將水流之壓力能轉換為高速水流的動能，高速水流以噴射形式直接衝擊水輪機斗型葉片(Buckets)，驅動水輪機軸旋轉帶動發電機，這些噴嘴(Nozzle)可以獨立調節，根據進水流量的變化，可以選擇開啟或關閉部分噴嘴(Nozzle)，從而適應實際水力條件，達到最佳效率。佩爾頓式水輪機（Pelton Turbine）的每個斗型葉片(Buckets)截面呈雙半球形設計，並帶有中心分流脊，用以分割並引導水流平滑地流過，高速水流撞擊斗型葉片(Buckets)後，沿分流脊

分裂成兩股，實現最大程度的動量交換，同時減少水流的逆流及能量損失。佩爾頓水輪機特別適合高山地區的水力發電項目，當可利用水源具有極高水頭且低流量時，為最具效益的選擇。

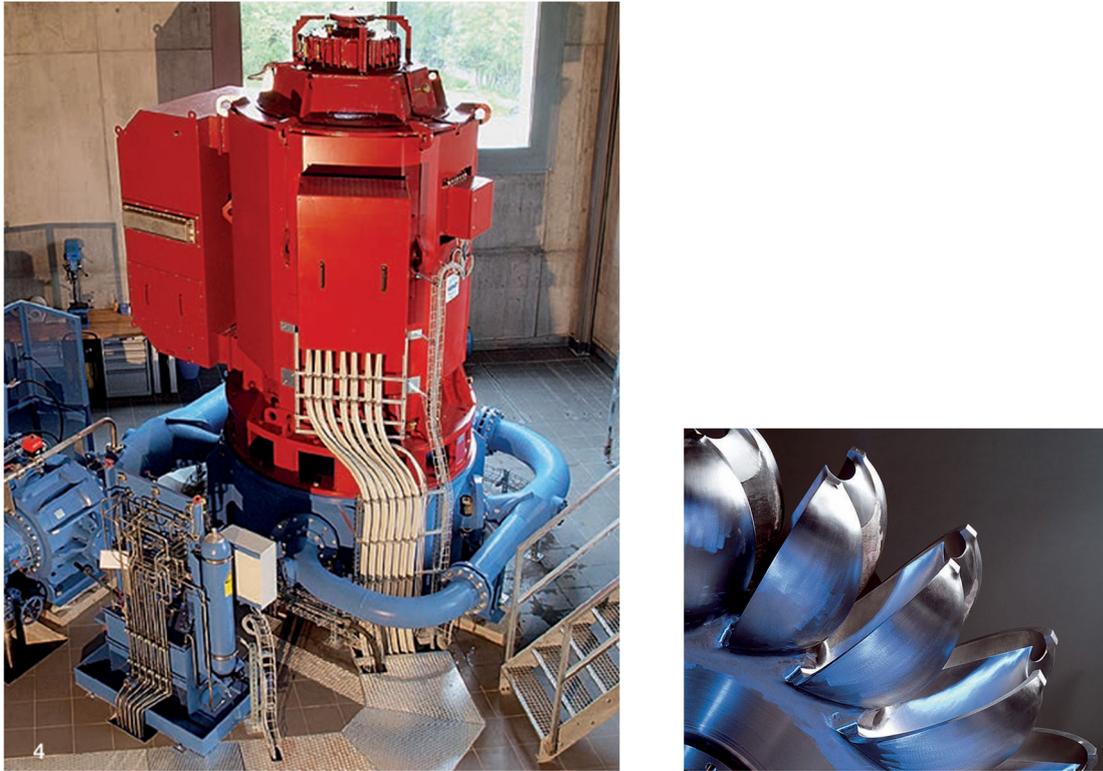


圖 6. 佩爾頓式水輪機(Pelton Turbine)及斗型葉片(Buckets) (Voith Hydro)

### StreamDiver:

StreamDiver 為 Voith 公司推出的一種創新的小型水力發電機組，專為低水頭的川流式水力發電應用場景而設計，為一種標準化、模組化之產品，方便安裝和維護，並可根據需求增加機組數量以擴大發電量。StreamDiver 機組可以直接安裝在既有或新建之堰或壩體結構中，發電機採用浸水(Water-flooded)型式，並另設置貨櫃安置電氣設備、箱盤及監控盤。因無須傳統的廠房建築，從而降低了建造成本，若使用既有壩體結構則省下更多土建費用。該機型設計理念注重

生態考量，其軸承採用水潤滑而非油潤滑，避免了對環境的污染，同時亦可設計魚道減少對魚類的傷害。

StreamDiver 僅適用較低水頭之場景，在流量變動劇烈時效率可能不如傳統機組來的好，若考慮活化既有水利設施，則為一個很好的選擇方案。其中 SD7.90、SD8.95、SD10.15...代表的是 StreamDiver 不同尺寸的機組型號。這些編號主要關乎動輪直徑 (runner diameter) 以及機組的整體尺寸，並影響其適用範圍和發電能力，如下圖所示：

### StreamDiver Application Range

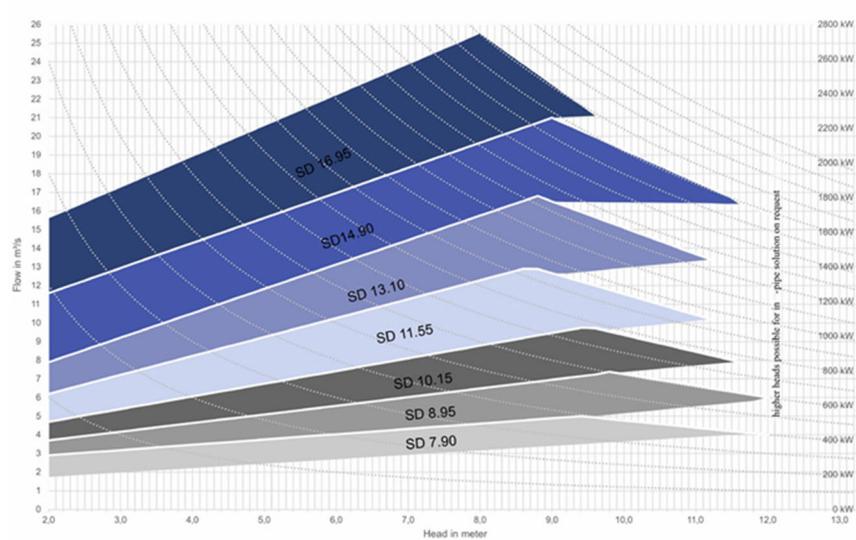


圖 7. StreamDiver 適用範圍

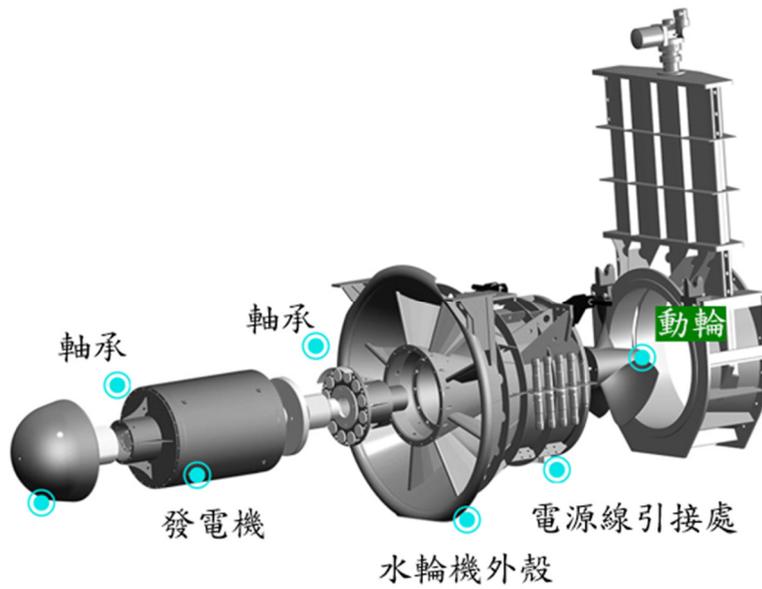


圖 8. StreamDiver unit 構造圖

標準的 StreamDiver 佈置如下所示，主要設備包含：

1. 電氣貨櫃(E-Container)
2. 攔汙柵(Trash rack)
3. StreamDiver units
4. 電力及控制電纜(Power and sensor cables)
5. 截止閥(不具調節功能)(Shut-off valve)



圖 9. StreamDiver 川流式小水力電廠佈置



圖 10. StreamDiver 實體正面 (Voith Hydro St.Pölten 廠區)



圖 11. StreamDiver 實體背面 (Voith Hydro St.Pölten 廠區)

### (三)水輪機組標準化及模組化

傳統的小水力機組通常需要根據每個項目的特定條件進行量身定制，這不僅增加了設計和建設的複雜性，還延長了建設周期並提升了成本。為了解決這些問題，越來越多的製造商開始採用標準化與模組

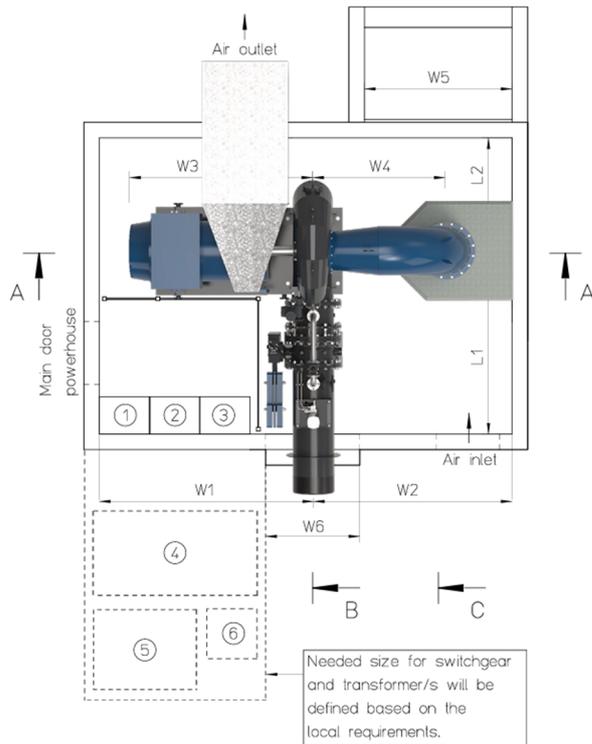
化設計的策略，以提高生產效率，降低項目成本，並縮短建設時間。

標準化（Standardization）指的是為水力發電設備的設計、製造與組裝制定統一的規範，採用預設規格與組件，以減少客製化需求。

此舉不僅能有效降低生產成本，還能縮短交期。模組化

（Modularization）則是將產品分解為獨立的功能模組，例如水輪機模組、吸出管模組、控制模組等，這些模組可於生產階段預先製造，並在現場進行快速組裝或預組裝。這種設計方法能顯著提高生產效率，同時簡化安裝與維護過程。以 Voith Hydro 的 M-Line 系列為例，該系列專門針對小型水力發電廠提供標準化與模組化的整體解決方案，包括 Kaplan、Pelton 及 Francis 等不同大小的模組化水力發電機組。這些解決方案能適應多種水頭與流量條件，並透過預製模組的應用，縮短了項目交付時間和建設成本。此外，標準化與模組化設計還為全球小型水力發電市場帶來了更高的靈活性與可擴展性。由於可以在不同項目中重複使用相同的組件和設計方案，這些策略已成為提高小型水力項目投資回報率的有效手段。

儘管標準化與模組化設計在大多數情況下具有顯著優勢，但其應用範圍並非完全無限制。在面對極端或複雜的水理條件（如高變化水頭、大流量或異常的地形結構）時，標準化設計可能無法滿足全部需求，此時仍需採用傳統的客製化解決方案。以 M-Line 系列為例，其設計主要針對低水頭、低至中等流量的場景，因此在某些高水頭或高功率需求的項目中可能受限。



#### Legend

- (1) Cubicle for automation
- (2) Cubicle for automation
- (3) Cubicle for automation
- (4) Switchgear
- (5) Main transformer
- (6) Auxiliary transformer (at medium voltage)

圖 12. M-Line Francis 標準化佈置圖

#### Module Inlet



圖 13. Inlet 模組

#### Module Turbine

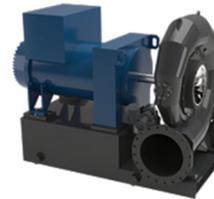


圖 14. 法蘭西斯式水輪機模組

#### Module Draft Tube



圖 15. 吸出管模組

#### Module Automation



圖 16. 控制盤模組

在未來，小水力機組的標準化與模組化設計將與數位化技術結合，進一步提升設計效率與運營管理能力。此外，遠端監控與自動化技術的應用，將進一步降低運營成本並提高可靠性。最後，標準化與模組化不僅促進了小水力機組的生產效率，還為全球市場提供了更具成本效益的解決方案。透過與先進技術的整合，這些策略將成為未來小型水力發電領域的重要發展方向。

## 肆、 變頻式抽蓄水力發電研習

### (一)抽蓄水力發電概要

抽蓄水力發電 (Pumped Storage Hydropower) 的概念起源於 19 世紀末，作為相當成熟的能源儲存技術之一，在過去數十年中隨著電力系統需求的變化而持續發展與創新，不管是從定頻機組 (Fixed-Speed Units) 到變頻機組 (Variable-Speed Units) 亦或是從四機方案到二機方案，這一系列轉變體現了現代電力系統對靈活性和效率日益增長的需求，尤其是近年隨著間歇性再生能源 (如風能和太陽能) 的大量安裝，抽蓄水力發電的總裝機容量亦急劇增加，根據國際水力發電協會 (IHA) 2022 年 Hydropower Status Report 顯示，截至 2021 年全球抽蓄水力發電的裝機容量已達 165GW。

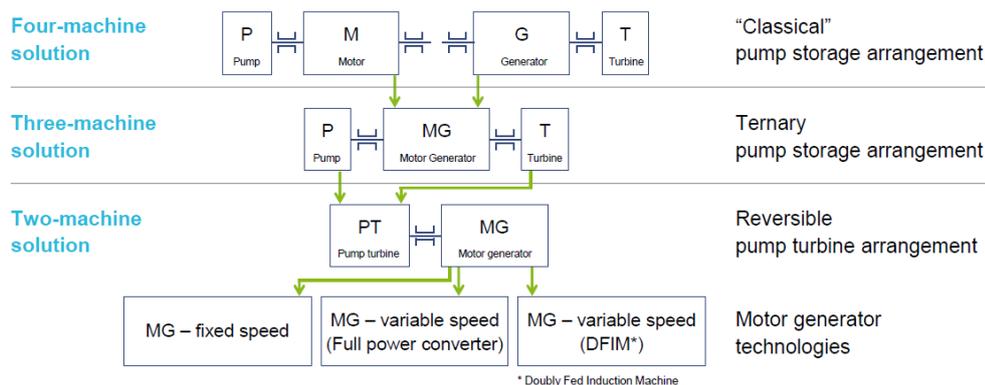


圖 17. 抽蓄水力發電之發展

抽蓄水力電廠就像一個巨大的儲能系統，當系統負載需求高時由上池水庫放水發電；當系統電力生產過剩時，下池水庫中的水被抽回至上池儲存，抽蓄水力發電主要用於平衡電力系統中的電力生產和負

載需求。

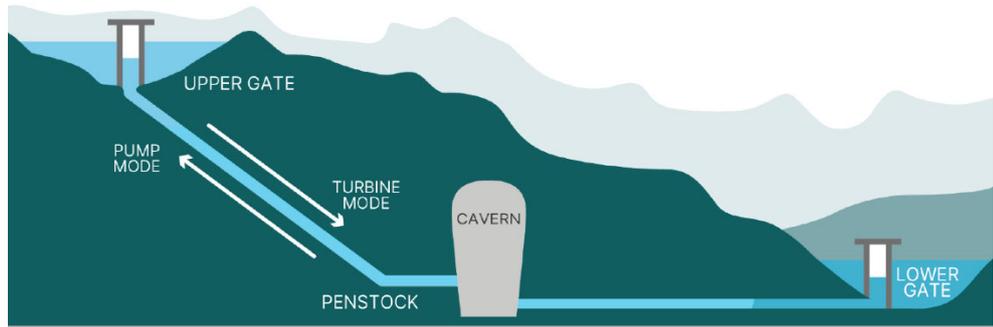


圖 18. 抽蓄水力電廠示意圖

傳統的抽蓄水力機組為定速(Fixed Speed)型，定速型抽蓄水力機組在 Turbine 模式下之運轉特性如圖所示(圖 19.)，紅色範圍為機組運轉範圍，藍色曲線為功率，在給定的水頭下調整開啟或關閉導翼(Guide vane)便可增加或減少功率；然而在 Pump 模式下則不同(圖.20)，觀察圖中 Pump Curve(深藍色曲線)得知在給定的水頭下，只會有特定的流量以及特定的效率，同時亦需要特定的功率去運轉。這也就是為什麼要發展出可變速機組的原因之一，採用可變速機組最主要目的之一即為可以在抽水時調整功率，也就可進行系統頻率調節。

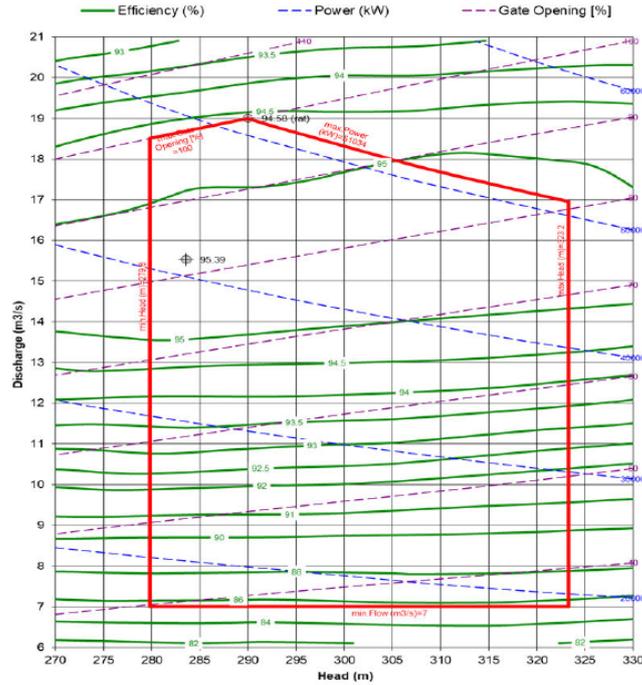


圖 19. 定速機組在 Turbine 模式下之 Hillchart

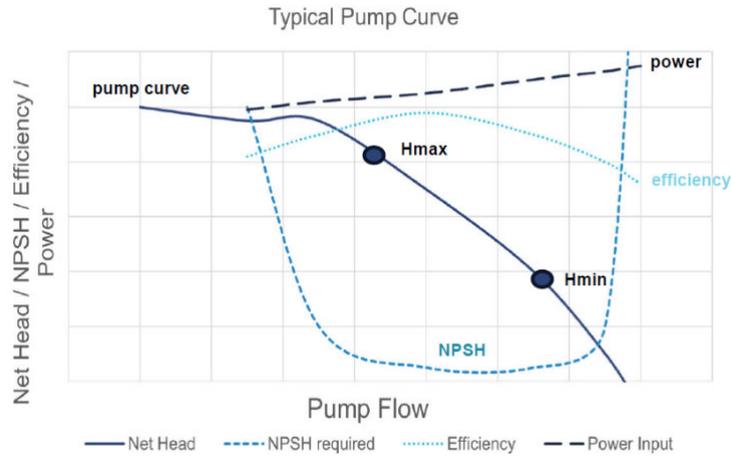


圖 20. 定速機組在 pump 模式下之特性曲線

## (二) 變頻抽蓄水力機組之特性

變頻機組因可調整轉速而具有較寬廣的操作範圍，以抽水模式為例，不同於定速機組抽水模式的單一曲線，變頻機組(圖 21.)在給定水頭下(以 100%設計水頭為例，如圖中紅色區間)能夠透過調整轉速來調節系統頻率。此外因水力發電機組必須考慮空蝕限制 (Cavitation

limit)，為確保水輪機相對於尾水位有足夠的淨正吸入高度（Net Positive Suction Head），傳統上需要將水輪機安裝在適當深度以防止空蝕損害。採用變頻技術的機組可透過轉速調整，在符合相同安全要求及地理限制的前提下，於更寬廣的水頭範圍內安全運轉，減少機組損壞的風險，同時提供了更靈活的運轉彈性。

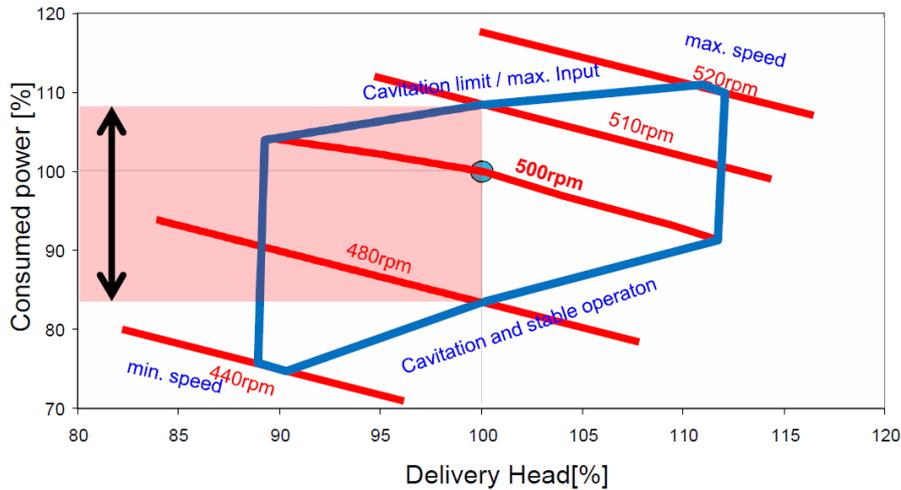


圖 21. 變頻機組 Pump 操作範圍示意圖

變頻機組以及定速機組之特性比較：

	定速機組	變頻機組
投資成本	投資成本較低	投資成本較高，需要額外的電力電子轉換設備、控制系統以及較複雜的機電設計
維護、運營成本	相對變頻機組較為簡單	維護與運營工作較為複雜
空間需求	結構較為簡單，所需空間較小	需要額外的電力電子轉換器設備，通常需要更大的安裝空間

效率	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 通常在滿載時具有較高的效率</li> <li>2. 在部分負載時的效率較低</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 能夠根據不同的水頭和流量條件調整轉速，使得變頻機組在 Pump 模式和 Turbine 模式下，仍能以較高效率運轉</li> <li>2. 雖然變頻機組的效率整體較高，但變頻過程中會產生額外的轉換損耗，需要通過更先進的變流技術來最小化該損失</li> </ol>
水頭範圍適應性	水頭變化較大時，效率會明顯降低	能夠更好地適應水庫水頭的變化。當水庫水位變化較大時，變頻機組可以通過調整轉速，在較大的揚程範圍內維持穩定和高效的運轉
機組運轉範圍	Turbine 模式下的最低負載最低僅能降至約 50% ，Pump 模式則無法調整	變頻機組可以在更低的負載下穩定運轉，在 Turbine 及 Pump 模式下均可調整
電網穩定度	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 響應速度相對較慢</li> <li>2. 抽水模式無法調整功率，難以對電網</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 具備更快速的響應能力，可以迅速根據電</li> </ol>

	<p>頻率變化做出快速調整</p>	<p>網需求調整發電或抽水功率</p> <p>2. 能夠透過調整轉速來應對電網頻率的波動，從而提高電網的穩定性</p>
--	-------------------	---

總體而言，變頻機組在效率、運轉範圍和電力系統穩定性方面均優於定速機組。變頻機組在部分負載(Part load)下仍能保持高效率，可根據電網需求靈活調整功率，並能提供黑啟動能力和更快的響應速度。儘管變頻機組的初始投資和維護成本較高，但在長期運營中能帶來更高的效益和更好的電網穩定性。因此，在現代抽水蓄能電廠的設計和選擇中，變頻機組逐漸成為具吸引力的選擇，尤其是在需要應對可再生能源比例不斷增加的電力系統中。而定速機組則適用於對成本較為受限，且對電網穩定性要求較低的應用場景。

### (三)GE Power Conversion GmbH 參訪

GE Vernova 是通用電氣公司 GE (General Electric) 分拆出的能源業務公司，而 GE Power Conversion 則是 GE Vernova 旗下的事業單位，專注於電力轉換技術與電力系統解決方案，目前已成為全球領先的電力轉換設備供應商，在全球設有多個研發中心、製造基地和服務據點，包括德國柏林 (Berlin)、美國匹茲堡 (Pittsburgh)、法國維勒班 (Villeurbanne)、英國拉格比 (Rugby) 和中國武漢等地。近年來，GE Power Conversion 亦著重於為抽蓄水力電廠提供先進的變頻技術與解決方案，諸如變速驅動系統 (Variable Speed Drive

Systems, VSDS)、靜態頻率轉換器 (Static Frequency Converters, SFC)、電壓源逆變器 (Voltage Source Inverter, VSI)、模組化多層轉換器 (Modular Multilevel Converter, MMC) …等。

GE VERNOVA SEGMENTS	CONVENTIONAL POWER	WIND	ELECTRIFICATION	DIGITAL
BUSINESS UNITS	Gas, Steam, Nuclear, Hydro	Offshore, Onshore, LM	Grid Solutions, Power Conversion, Hybrids	Digital
TECHNOLOGY	GW Scale Dispatchable Generation & Inertia	MW Scale Variable Generation, Inverter-based	Transmission, Distribution, Conversion, Storage	Software & Controls
STRONGER TOGETHER	Complementary Geography of IB & Services Footprint	Common Technology & Supply Chain	Complementary Technologies to Move/Store/Convert Electrons	Complementary Software that Accelerates the Future
Approx. # employees	29,000	21,000	16,000	3,700

圖.22 GE Vernova 業務範圍

### 抽蓄機組變頻系統之差異

抽蓄水力機組與一般水力機組之主要差異在於其變頻技術電力電子系統的需求，主要設備概念如圖.23 所示，泵水輪機(Pump-Turbine)連結至電動發電機(Motor-Generator)，發電機定子或轉子(取決於變頻系統)與變頻器電力電子設備連接。抽蓄機組的電動發電機(Motor-Generator)可能使用同步電動發電機或感應電動發電機，兩者所應用之電力電子系統不同，因而設計出數種不同的拓樸結構。

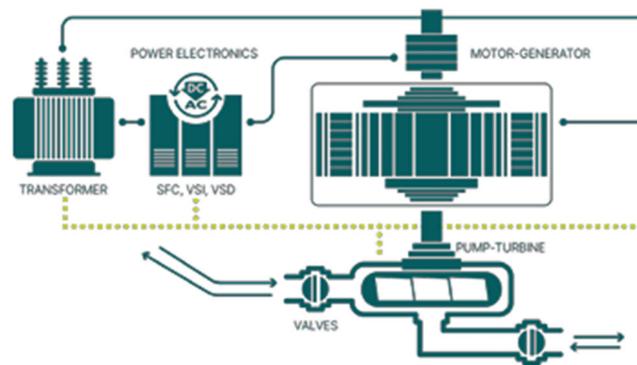


圖.23 抽蓄機組示意圖

定速抽蓄機組之啟動一般需仰賴啟動變流器(start-up converter)或所謂的靜止式頻率變流器 SFC(Static Frequency Converter)，發電機通過 SFC 啟動，一旦發電機（同步電機）達到額定速度並與電網同步，SFC 將通過旁路開關旁路。由於 SFC 僅用於機組的啟動，因此 SFC 的額定功率可以低於機組的額定功率。

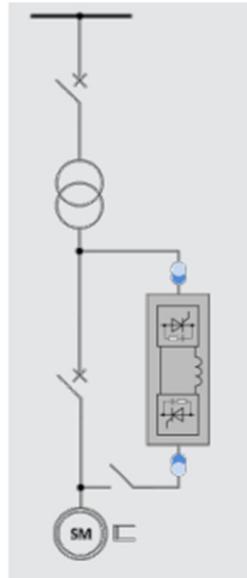


圖.24 定速機組之拓樸結構

雙饋式感應機 DFIM(Doubly Fed Induction Machine)之變頻技術一般採用電壓源逆變器 VSI (Voltage Source Inverter) 或週波變頻器(Cycloconverter)。因為變頻系統僅需提供轉子繞組所需電流，因此該變頻系統的額定值可以顯著地低於發電機的額定容量。由於此變流系統的額定功率較低，雙饋式感應機是額定容量較高(可大於 130MVA)的大型水力發電廠的首選解決方案，然而該系統的一個主要缺點是使用滑環為轉子提供電流或電力，增加了額外的運維需求。與所有變頻式抽蓄機組一樣，雙饋式感應機組使得抽水運轉期間的功率可以調節，此外，擁有更寬廣的水頭範圍亦提高了儲能容量。

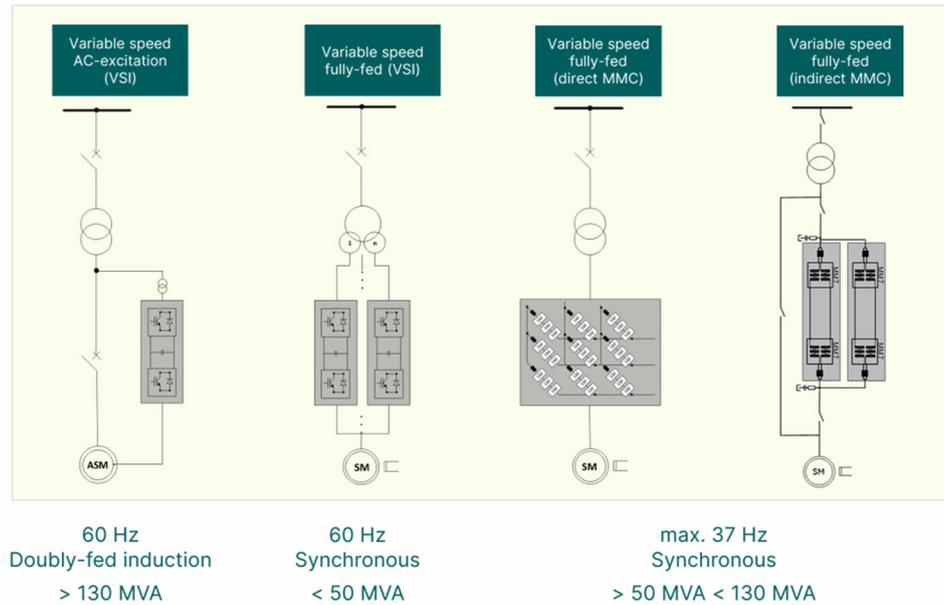


圖.25 可變速機組之拓樸結構

全功率供電同步機 FFSSM(Fully Fed Synchronous Machine)之定子繞組通過變頻器與電網相連，無論是抽水模式還是發電模式，全功率供電同步機之變頻器需要處理發電機輸出或吸收的全部電能，因此其變頻器額定必須與同步電動發電機之額定容量相同。與雙饋式感應機相比，全功率供電同步機所需安裝的電力電子元件數量更高，所佔之廠房用空間更大。然而，全功率供電同步機 FFSSM 的操作靈活性更高，尤其在抽水模式啟動時，全功率供電同步機在靜止狀態下可提供極大的扭力，故不需將水輪機動輪(Runner)空間的水排空直接啟動，同時提供了比雙饋式感應機更寬廣的轉速範圍。

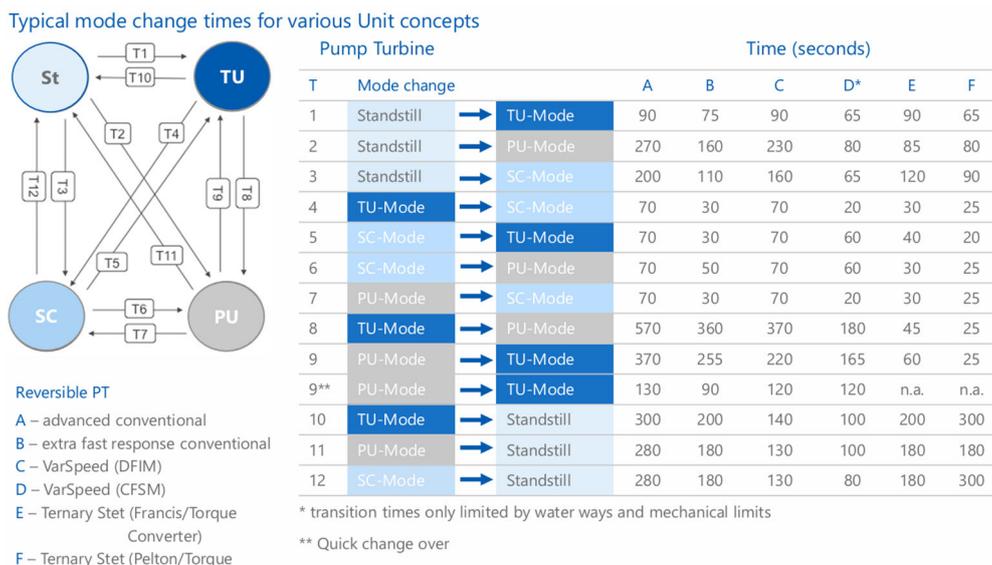


圖.26 典型變速機組各模式切換時間表

### 多層模組化變頻器(Modular Multilevel Converter)

多層模組化變頻器 (Modular Multilevel Converter, MMC)是一種先進的電力電子技術，其設計適用於高電壓、大功率應用。MMC 以模組化結構為基礎，透過將多個子模組 (submodules) 串聯，每個模組內部包含功率半導體與直流電容，能產生接近正弦波的輸出電壓，顯著降低總諧波失真 (THD)

傳統 VSI 系統專為特定電壓和額定功率而設計。因此，抽蓄水力機組電動發電機的設計受到變頻器輸出電壓的限制，在更高額定容量的全功率供電同步機 FFSSM 通常需要更高的定子電壓，為實現如此高的輸出功率會需要多個 VSI 並聯，導致需要使用多繞組變壓器及多組 VSI 使空間需求增加，另外還可能在發電機側產生大量諧波，導致額外的損耗。採用多層模組化變頻器(Modular Multilevel Converter)可以有效克服傳統 VSI 系統在高容量機組應用所產生之問題，目前已有越來越多全功率供電同步機採用多層模組化變頻器。

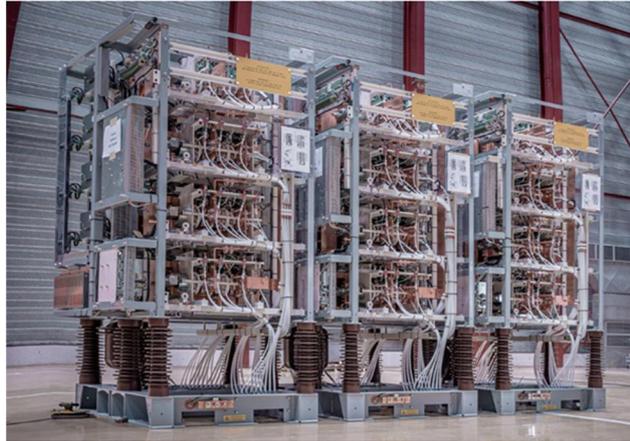


圖.26 多層模組化變頻器

### 彙整 MMC 技術的優勢如下

#### A. 低諧波失真與高效能：

- ✓ MMC 的多層結構提供平滑的輸出電壓波形，顯著降低電流諧波對發電機的影響。
- ✓ 相較於傳統電壓源變頻器（VSI），MMC 不僅提升了發電機運行效率，也減少了濾波器需求

#### B. 模組化與可擴展性：

- ✓ MMC 的模組化設計允許靈活配置，便於滿足不同容量需求。
- ✓ 系統可以透過增加子模組數量來提升電壓和功率等級，而無需額外增加設備並聯

#### C. 空間與佈局優化：

- ✓ MMC 系統消除了傳統多繞組變壓器和多組 VSI 的需求，顯著降低設備的空間佔用。
- ✓ 特別適用於空間受限的抽水蓄能電站。

#### (四)Fichtner Gmbh 參訪

Fichtner 公司成立於 1922 年，總部位於德國斯圖加特，是德國最大的獨立工程與顧問公司之一。公司擁有超過百年的歷史，以其卓越的專業能力和全球布局著稱。Fichtner 在全球超過 60 個國家設有辦事處，並在 100 多個地點設有子公司和分支機構，提供廣泛的技術與顧問服務。該公司的業務範圍涵蓋多個領域，包括能源、可再生能源、水利與基礎設施，以及諮詢和資訊技術等。其中，Fichtner 在能源領域擁有顯著專長，涉足傳統能源與可再生能源項目的規劃、設計和實施，如火力發電廠、水力發電廠、風能與太陽能設施等。

在水力發電領域，截至目前，該公司已完成超過 500 個水力發電項目，總裝機容量接近 70GW，展現出其在這一領域的深厚實力。

Fichtner 的水力發電專業團隊主要分布於德國斯圖加特、英國斯托克波特和秘魯利馬。除了技術實力外，Fichtner 還以其客製化解決方案聞名，特別是在基礎設施建設和可再生能源項目中的應用表現卓越。該公司憑藉其在全球範圍內的經驗與資源，為客戶提供高效、可靠的專業服務，致力於推動全球能源與基礎設施的可持續發展。

#### **結合風力及抽蓄水力之混合電廠-Gaildorf**

由 Fichtner 公司參與技術服務、專案管理以及招標規劃，由德國蓋爾多夫的建設公司 Max Bögl 建造的創新綠電儲能計畫，是一個結合風力發電與抽水蓄能技術的前瞻性項目。該計畫被認為是將抽水蓄能與風力發電設施結合的示範項目，不僅展現了技術創新，也為未來能源儲存提供了具有參考價值的解決方案。

此項目的核心設計特色在於，風力渦輪機的基礎被巧妙地設計為上部蓄水池，該蓄水池透過地下壓力管道與位於山谷中的抽水蓄能發

電廠相連。當風力發電超過需求時，電能被用來將水從山谷泵送至蓄水池儲存；當需求上升或風力不足時，儲存的水則釋放回山谷，驅動發電機組進行發電。該電廠具備高達 16 兆瓦的發電能力，並設計有總計 70 兆瓦時的儲能容量，可為電網提供穩定且靈活的調節能力。這一系統不僅能平衡風力發電的波動性，還為區域電網的穩定性和能源管理做出了貢獻。此計畫於 2018 年正式啟用，成為德國可再生能源發展中的里程碑。它結合了可再生能源的發電與高效能儲能技術，展示了能源基礎設施未來的發展方向，並在減少碳排放及推動綠色能源轉型方面具有重要意義。該項目不僅體現了德國工程與環保技術的實力，還為其他國家提供了寶貴的經驗與參考模式。



圖.27 Gaildorf 混合電廠

### PumpIT

PumpIT 是由 Fichtner 公司開發的一種先進地理資訊系統（GIS）工具，用於識別最具技術吸引力的抽蓄水力發電項目地點。該工具適用範圍廣泛，無論是現有水庫周邊的小範圍區域，還是國家或區域規模的大範圍地區，都能有效發揮作用。2010 年，德國公用事業公司 RWE 委託 Fichtner 開發這款抽蓄項目識別工具（PumpIT）。該工具基於可定義的標準，綜合評估多種參數，來識別適合建設抽蓄電站的地點。這些參數包括地形、水文、土地使用、地質、環境與社會因素，以及靠近現有基礎設施的距離，所有這些資訊都整合到一個統一的模

型中。PumpIT 已在全球範圍內成功應用，成為識別潛在抽蓄水力發電站址的一種高效、省時且具成本效益的方法。PumpIT 之評估方法概念分為三個步驟：

### **步驟一：定義與初始計算**

在第一步中，PumpIT 需要首先定義虛擬水庫的大小，這包括設定水庫的容量和相關參數（例如儲水能力與地表面積），作為後續分析的基準。接著，將研究區域劃分為網格像素，並基於地形數據對每個像素進行虛擬水庫的模擬計算，估算可能的儲水體積。此外，利用地形數據遮罩不符合條件的區域，例如地勢過於平坦或過於陡峭的區域，確保結果更加準確。

### **步驟二：優化與篩選**

第二步的目標是搜索並篩選最佳的水庫對。PumpIT 在研究區域內搜索所有可能的水庫位置組合，將每個候選水庫對進行優化分析，包括最大化高度差和最小化水庫間距。隨後，對這些候選地點根據當地的限制條件進行篩選，過濾不符合要求的結果。這些限制條件包括土地用途（如是否位於保護區或農業用地）、地質條件（如是否穩定，避免滑坡風險），以及社會與環境影響（如是否對居民或生態環境造成重大影響）。

### **步驟三：計算與排名**

在第三步，PumpIT 計算篩選後每個水庫對的關鍵參數，包括水庫的有效儲水體積、水壩的結構參數（如壩高和壩體積）等。同時，進一步評估每對水庫的綜合技術與經濟可行性。最後，根據一系列評估指標對候選地點進行排名，指標包括技術可行性（如高度差、距離與地質穩定性）、經濟成本（建設與運營成本），以及社會與環境影響。通過這些排名，生成一個排序清單，為決策者提供明確的優先選擇。

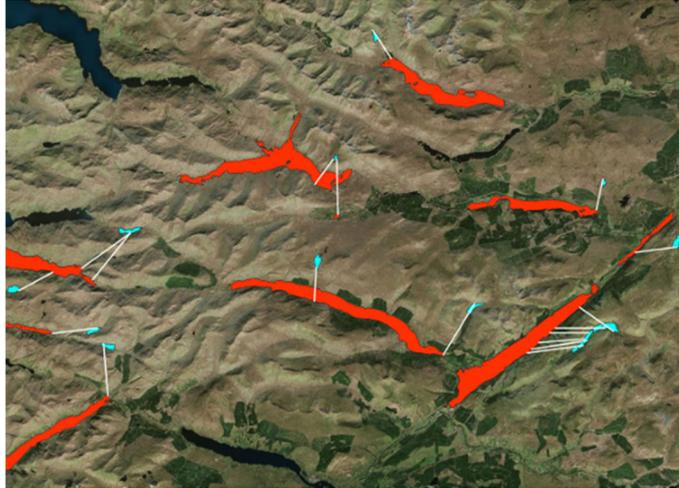


圖.28 PumpIT 找出合適的水庫對

通過以上三個步驟，PumpIT 工具能夠有效識別適合建設抽蓄水力發電站的潛在站址，並生成具體的評估報告。這些報告包括候選水庫對的位置、技術參數、可行性排名以及綜合評估結果，為項目規劃和決策提供可靠依據。同時，這種方法具有高效、省時和成本效益的特點。

## 伍、心得及建議

此次為本人首次參與公司出國實習計畫，安排參訪了橫跨德國及奧地利三家公司共四個地點。整體行程緊湊且內容充實，為確保交通順暢、不因中途延誤影響下一站安排，出發前花費了許多心力進行規劃，並與 Fichtner、GE Power Conversion 及 Voith Hydro 三家公司接待人員持續保持聯繫，所幸在各方的協助下，所有參訪活動得以順利完成。

目前公司推動的小水力電廠多採用引水道設計，將水引至興建的廠房發電後再排回原渠道，屬於典型的小水力發電廠。本次在奧地利參訪 Voith Hydro 的小水力機組製造廠，深入了解了其介紹的川流式小水力發電機組 StreamDiver。該機組可直接安裝於既有或新建的堰體或壩體結構中，特別適合低水頭條件下的應用。同時，由於其減少了廠房土建成本，並具備模組化的設計優勢，使得開發規模與金額更加可控，與我國推動的小水力發電概念契合。未來規劃小水力機組時，可參考此類國際上先進的川流式水力技術。

在德國柏林參訪 GE Power Conversion 公司時，我們聚焦於變頻器技術的研討，深入了解抽蓄水力電廠中全功率供電同步機（Fully Fed Synchronous Machine, FFSM）的應用發展。因應電力電子技術的快速進步，FFSM 的容量上限有望進一步提升，未來在抽蓄水力計畫中，應根據系統需求進行全面評估，以選擇最適合的變頻機組配置。此外，變頻技術在提升運行效率、調節靈活性以及支持電網穩定性等方面表現出色，值得在本公司抽蓄水力計畫中進一步探討與應用。

整體而言，此次實習讓我大幅拓展了水力發電領域的視野，對於相關技術的現況與未來發展有了更深入的理解，期能為公司未來在小水力及抽蓄水力領域的技術知識提供實質參考。