

出國報告（出國類別：實習）

同步調相機實務技術應用及維護
觀摩研習

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：謝曉惠 電機工程師

派赴國家：法國

出國期間：113年10月12日至113年10月20日

報告日期：113年12月05日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

同步調相機實務技術應用及維護觀摩研習

頁數 32 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力公司人事處/翁玉靜/ 2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

謝曉惠/台灣電力公司/綜合研究所/電機工程師/ 8078-2206

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 開會

出國期間：113 年 10 月 12 - 20 日 出國地區：法國

報告日期：113 年 12 月 05 日

關鍵詞：同步調相機、虛功調控、慣量

內容摘要：

隨著電力系統現代化需求增加，同步調相機在電網穩定性方面扮演關鍵角色。本次赴原廠研習主要針對同步調相機的設計製造、測試及衍生應用技術進行深入學習，並確認設備廠驗案規劃執行。本次研習的同步調相機採用 11.4KV 高壓直接輸出設計，不同於傳統低壓輸出經由變壓器升壓方案。此設計有賴於發電機內部自製銅片及絕緣技術，不僅減少變壓器設備使用，更降低整體系統維護成本。在衍生應用方面，透過增設 600 公斤飛輪，成功將系統慣性常數從 0.833 提升至 2.83，顯著增強系統動態特性。

廠驗涵蓋機組性能、保護功能及系統整合等面向，包含空載特性、短路、絕緣耐壓、溫升試驗及系統併聯運轉等項目。測試結果顯示，設備在額定電壓 11.4KV 條件下運轉正常，各項參數符合規範要求。溫升試驗中，定子線圈及轉子溫度均在允許範圍內。保護功能方面，過電壓、欠電壓、過頻、欠頻等保護裝置動作正常。特別是在虛功調節方面，設備展現優異性能，具備快速響應速度和高調節精度，能在系統電壓波動時及時提供無功補償。綜觀整體測試結果，各項性能指標均達設計標準，確保設備未來投入運轉後的可靠性和安全性。建議後續運維重點關注軸承溫度監測和絕緣狀態檢查，以確保設備長期穩定運行。

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

同步調相機實務技術應用及維護觀摩研習實習

目錄

| | |
|---------------------------|----|
| 一、 出國緣由、行程及主要任務 | 5 |
| 二、 Leroy Somer 公司簡介 | 6 |
| 三、 同步調相機功能及設計 | 11 |
| 1. 同步調相機簡介 | 12 |
| 2. 同步調相機功能 | 13 |
| 四、 同步調相機設備測試 | 15 |
| 1. 溫升 | 16 |
| 2. 振動 | 18 |
| 3. 噪音 | 19 |
| 4. 飽和曲線及短路曲線 | 21 |
| 5. 電壓平衡 | 22 |
| 6. 56-64 Hz 不跳脫 | 23 |
| 7. 虛功率運轉點 | 24 |
| 五、 飛輪擴充應用 | 28 |
| 六、 心得與建議 | 29 |
| 七、 參考資料 | 30 |

一、 出國緣由、行程及主要任務

同步調相機設備為本公司近年內即將建置完成且開始進行相關研發之重要設備。為確保設備依規範需求設計製造、了解未來設備功能擴充細節與建置後之運轉安全無虞，希望藉由此次至法國奧爾良之 Leroy Somer 實習，除了進行設備廠驗項目之測試紀錄外，並學習設備操作流程、主體設計與製造方式及飛輪擴充應用。本次出國期間自 113 年 10 月 12 日至 10 月 20 日，此次出國研習的重點如下：

- 一、 了解同步調相機主體設計。
- 二、 學習設備操作及見證廠驗執行。
- 三、 了解飛輪擴充應用。

本次出國案件係應用 113 年度出國計畫第 173 號，出國核定書為 1131731 號，電人字第 1138122964 號函。

二、 Leroy Somer 公司簡介

Leroy Somer 是一家全球領先的電力解決方案供應商，專注於電動機、發電機的設計與製造。自 1919 年成立以來，該公司於 2017 年併入日本 Nidec 集團，進一步增強了其市場地位和技術實力。

Leroy Somer 的產品特點包括：

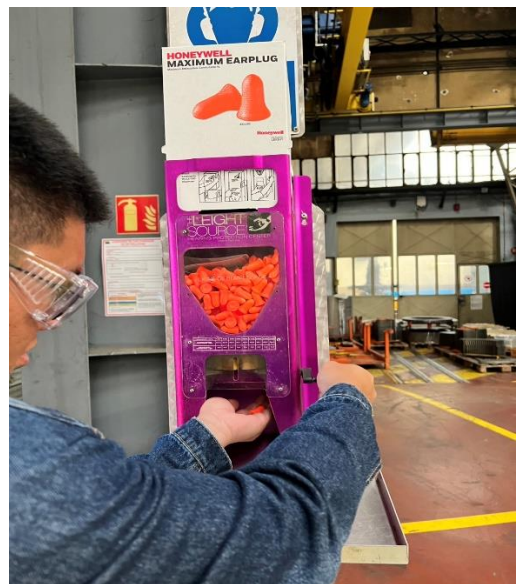
- 高效能：其電動機設計旨在提高能源效率，減少運行成本。
- 可靠性：產品經過嚴格測試，以確保在各種工作環境中的穩定性和耐用性。
- 創新技術：持續投入研發，推出符合最新市場需求的技術和解決方案。
- 客製化解決方案：根據客戶需求進行系統設計和優化，確保產品在實際應用中發揮最佳性能。

Leroy Somer 的產品線涵蓋廣泛，其發電機設計以高效能、可靠性和創新技術而聞名。這些發電機的主要特點包括高效率的能量轉換，旨在最大限度地減少能量損失，從而有效降低運行成本。提供多樣化的型號，包括同步發電機和感應電動機，能夠滿足工業、商業及能源等不同領域的應用需求。

Leroy Somer 發電機製造廠以其獨特的垂直整合生產體系著稱，從原材料處理到最終成品組裝，皆由專業團隊嚴格把關。其生產線配備先進的矽鋼片加工設備，透過精密的切割與疊壓技術，確保定子鐵芯的卓越品質。在關鍵的線圈製作環節，公司採用傳統與現代工藝相結合的方式，運用自動化設備進行基礎加工，再由經驗豐富的技師執行手工繞製，每條銅片均經過細緻處理。值得一提的是，技師們秉持匠人精神，不僅嚴格執行品質檢驗，更在每台完工的設備上親筆簽名，展現對產品的高度自信與責任感。這種結合現代化生產與傳統工藝的製造模式，不僅確保了產品的可靠性，更彰顯了 Leroy Somer 在發電機領域的專業實力與品質堅持。



Leroy Somer 工廠



進入工廠內需配戴護目鏡及耳塞



防靜電鞋



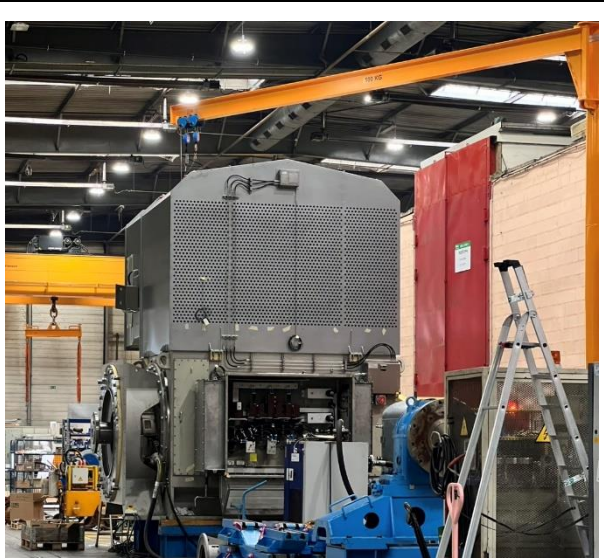
薄鋼片疊壓而成發電機定子鐵芯



工作人員進行定子繞線作業



發電機轉子



發電機的防爆外殼設計



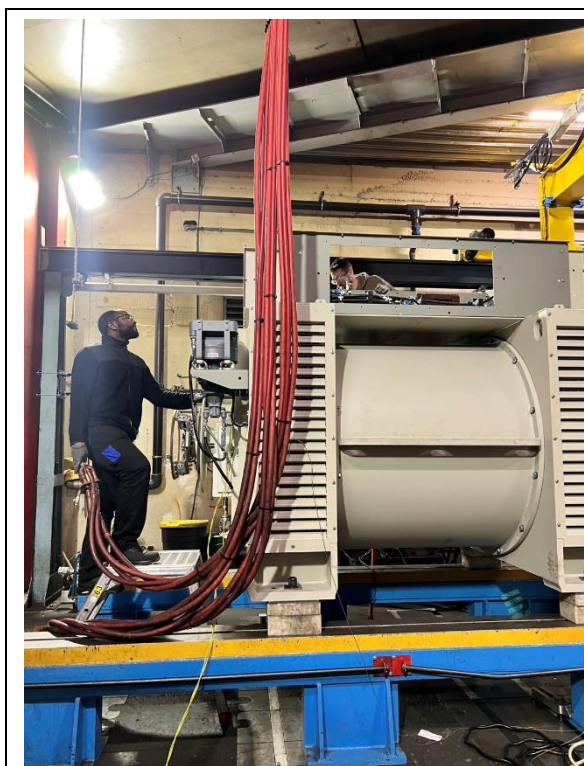
每日早上討論會議

本次廠驗這套設備，由三個主要組件構成：同步調相機、數位式電壓調節器和永磁馬達。同步調相機為系統核心，具備 6400 kVA 的額定容量，運行電壓範圍為 11.4 kV 的 $\pm 10\%$ （即 10.26 kV 至 12.54 kV），頻率容許範圍為 56 Hz 至 64 Hz。該機組在持續運行狀態下（同步速度達到後 15 分鐘）能夠提供不低於 5 MVAR 的過激磁無功功率和 3 MVAR 的欠激磁無功功率，在滿載條件下效率可達 97.78%。

系統採用 D700 數位式電壓調節器進行電壓控制，可處理 230-530VAC 範圍內的發電機和電網電壓，調節精度達到 $\pm 0.25\%$ 。該調節器在 40°C 環境溫度下可持續提供最大 25A 的激磁電流，支援 1A 或 5A 的電流測量，並具備完善的保護功能，包括過欠

激磁限制和電壓保護等。透過乙太網路 Modbus TCP 和 USB 通訊介面，可實現便捷的系統整合和監控。



作為輔助驅動設備，系統配備永磁馬達，額定功率 305 kW，採用 400V 電壓等級。該電機採用 IE5 超高效率設計，最高機械轉速可達 3600 rpm，適用環境溫度範圍為-20°C 至+45°C，可在海拔 1000 米以下環境中正常運行。此外，電機配備 C5M 防腐塗裝，並整合多重保護措施，包括軸承接地環、絕緣軸承和溫度監測系統，確保運行安全可靠。這套系統通過各組件的協同運作，實現高效率、高可靠性的電力調節和控制功能。



同步調相機



數位式電壓調節器

| | |
|---|--|
|  |  |
| 永磁馬達 | 變頻器 |

三、 同步調相機功能及設計

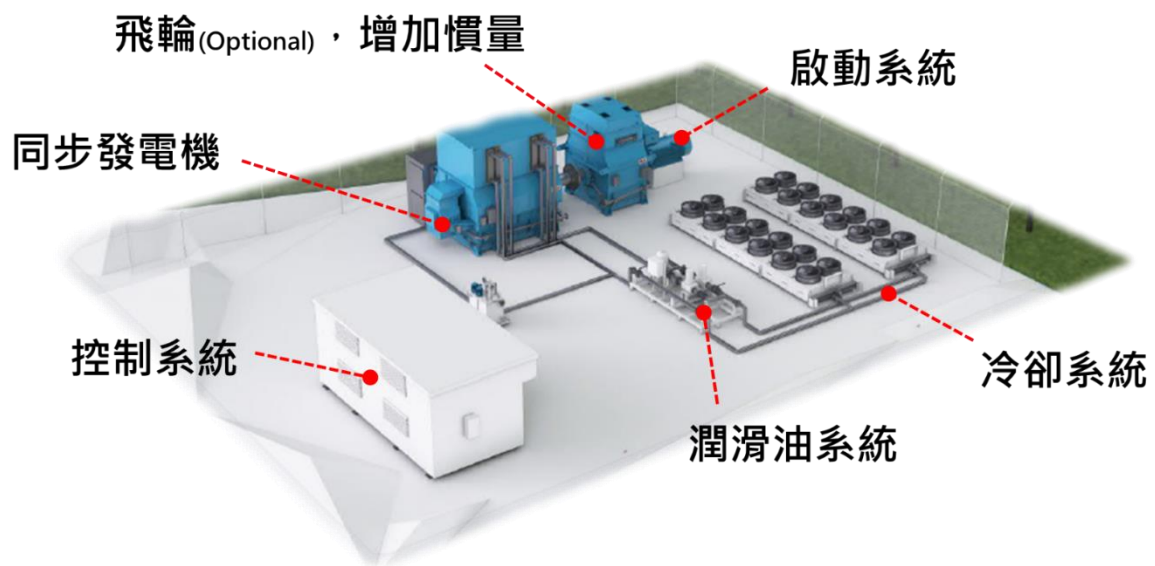
隨著再生能源的快速發展，越來越多的以變流器併接電網的能源(Inverter Based Resources, IBRs)被納入電力系統，逐漸取代傳統的旋轉發電機組。變流器作為一種電力電子設備，與傳統旋轉發電機相比，缺乏實體的旋轉慣量，這一特性對系統的穩定性造成了影響。再生能源的引入導致系統慣量降低，還進而衍生出故障電流與虛功調控能力的問題，影響頻率穩定度和電壓穩定度，並可能使電驛無法檢測到故障，整體系統的韌性因此下降。為了解決這些挑戰，同步調相機作為一種有效的解決方案，能夠提供所需的系統旋轉慣量，並具備

虛功調控的能力，這不僅有助於提升電壓的穩定性，還能在故障情況下提供必要的故障電流。因此，同步調相機在現代電力系統中扮演著重要的角色，確保系統的穩定運行和安全性。

本次出訪實習的主要目的在於學習同步調相機的組成、廠驗見證及維護，進一步了解其在電力系統中的應用及重要性。透過此次實習，我們希望能夠掌握相關技術，為未來的專業發展奠定基礎。

1. 同步調相機簡介

同步調相機是一種重要的虛功調控裝置，主要由同步機、勵磁系統、啟動系統、潤滑油與冷卻系統，以及控制系統組成。在運行時，同步調相機相當於一部不連接負載的同步電動機，通過控制系統調整勵磁系統，使其在不同虛功運轉點上運行，能夠根據需求從系統吸收虛功或向系統提供虛功。在待機狀態下啟動時，必須先利用啟動系統將同步機的轉速提升至同步轉速。當達到此轉速後，同步機便可投入電力系統運行，而啟動系統則可切離，確保設備的正常運作。這種設計使得同步調相機能夠靈活應對電力系統中的虛功需求，對提升系統的穩定性和可靠性發揮了重要作用。



同步調相機組成

2. 同步調相機功能

同步調相機其核心功能是提供虛功支持，幫助穩定電壓，通過調整勵磁系統來吸收或釋放虛功。此外，同步調相機還能提供必要的旋轉慣量，確保系統在瞬間變化時保持頻率穩定。隨著再生能源的快速發展，許多變流器電源逐漸取代傳統的旋轉發電機組，這導致系統慣量降低，影響頻率和電壓的穩定性。在此背景下，同步調相機的應用範圍逐漸擴大。

與其他虛功調控設備相比，同步調相機的價格通常較低，但其性能和功能也相當強大。同步調相機能夠提供穩定的虛功支持和旋轉慣量，對於頻率和電壓的穩定性具有顯著貢獻。相比之下，靜態無功補償裝置（SVC）和靜態同步補償器（STATCOM）則主要針對電壓調

控，適合於快速響應的需求。同步調相機在需要高旋轉慣量的應用中表現優越，特別是在再生能源逐漸取代傳統發電機組的情況下。

在成本方面，同步調相機的初始投資和維護成本通常較低，而其他虛功設備如 SVC 或 STATCOM 的成本則相對較高，特別是在小型應用中。此外，同步調相機的設計和運行相對複雜，需要更高的技術支持，而其他設備的操作則較為簡單。

在本次實習中，前往 Leroy Somer 工廠進行同步調相機的廠內測試。該設備計劃安裝於樹林微電網技術驗證場域，以進行相關試驗與資料蒐集。同步調相機的主要目的在於調控虛功，並與其他設備協同運作，以分析其運轉特性與效益，為未來電力系統的規劃與改善提供重要參考。

同步調相機的額定容量為 6400 KVA。在連續運轉狀態下，其虛功提供能力（過激磁）不得低於 5 MVAR，而虛功吸收能力（欠激磁）不得低於 3 MVAR。其慣性常數（Inertia constant）H 值達到 0.833 MWs/MVA，這使得它能夠在瞬態變化時提供足夠的旋轉慣量。此外，該設備在 56 Hz 至 64 Hz 的頻率範圍內必須保持穩定運轉，以避免跳脫情況的發生。

在實習過程中，針對同步調相機的虛功提供能力和虛功吸收能力進行了詳細的測試，並對這些參數進行了連續監測，記錄了相關

數據，以便進行後續分析。後續章節將深入探討這些測試的具體結果，以及如何利用這些數據來進一步優化同步調相機的性能，幫助未來的電力系統規劃與改善。

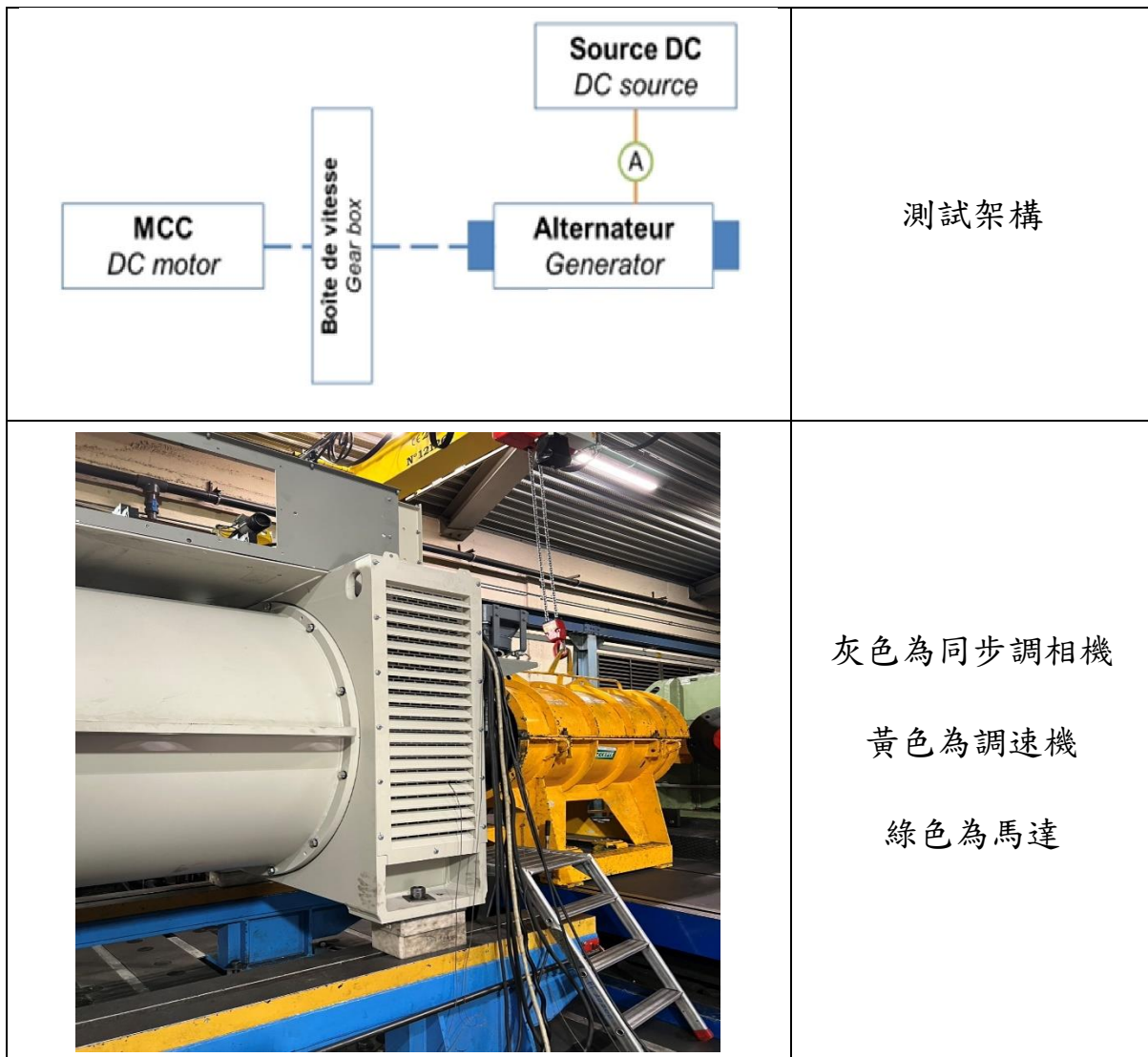
四、 同步調相機設備測試

同步調相機設備測試依據國際標準，以確保測試的準確性和可靠性。主要參考的標準包括 IEC 60034、ISO 3746、ISO 8528、NEMA MG1 以及 IEEE 115。涵蓋了電機及其相關設備的性能、效率、噪音和安全等多方面的要求。

IEC 60034 標準提供了電動機和發電機的基本性能指導，確保設備在不同運行條件下的穩定性和可靠性。ISO 3746 則專注於噪音測量，幫助我們評估設備在運行過程中的聲音表現，確保其符合環境噪音標準。ISO 8528 標準則針對發電機組的性能進行了詳細規範，確保其在各種負載條件下的有效運行。NEMA MG1 標準提供了電機的設計和測試要求，幫助我們確保設備的安全性和耐用性。而 IEEE 115 標準則針對電機的效率測試。

測試架構由四個關鍵組件構成：作為原動機的馬達、用於轉速調節的變速箱、待測的同步調相機，以及提供勵磁電流的直流電源（Source DC）。這些組件通過精密的機械和電氣連接形成一個完整

的測試平台。首先，馬達產生基礎機械動力，經由變速箱進行轉速調整後傳遞至同步調相機。同時，直流電源為同步調相機提供必要的勵磁電流，透過電流表進行即時監測。



1. 溫升

進行溫升測試開始前，將溫度感測線安裝在發電機的關鍵部位，確保能夠準確監測到各個重要區域的溫度變化。

機組在全載輸出狀態下運行，並持續運轉兩小時。在這段時間

密切觀察並記錄溫度數據。根據測試結果，發電機的溫度最終上升至約 85 度，這一數值被認為是相當不錯的溫升狀況，顯示出該設備在全載運行下的良好散熱性能。



溫度感測線測試位置



冷卻油系統



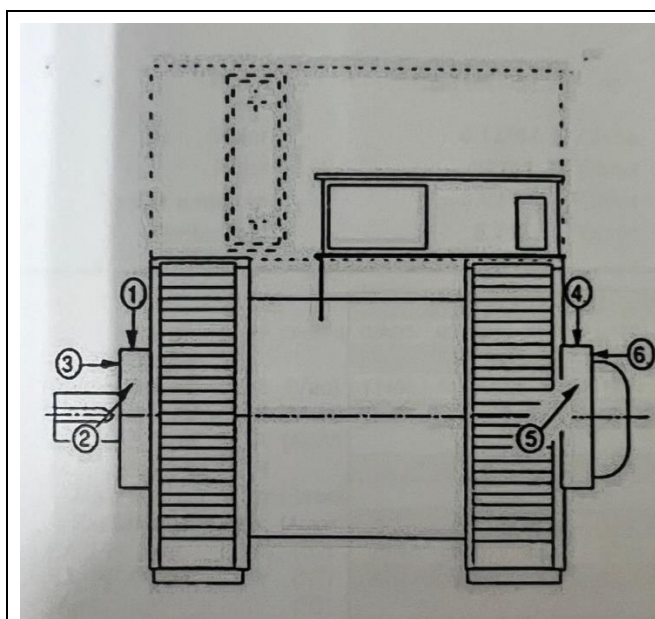
溫升結果



工業設備溫度監測系統

2. 振動

進行振動測試時，將振動感應線接至軸承的 XYZ 軸，並確保設備在額定電壓和頻率下運行，以便進行無負載狀態的測試。振動測試的目的評估機組在運行過程中的振動水平，確保其符合相關標準。根據設備的類別，振動的最大限值將依據 IEC 60034-14 和 ISO 8821 標準進行定義。一般來說，標準應用的柴油發電機組屬於"A 類"，而對振動敏感的機器，如水輪機、燃氣輪機及蒸汽輪機則屬於"B 類"。



振動感應線接至軸承的 XYZ 軸



黃色振動感應線接至軸承

| Name | Value |
|------------|------------|
| horizontal | 7.739 mm/s |
| vertical | 4.580 mm/s |
| axial | 2.067 mm/s |

| Name | Value |
|----------------|------------|
| AXIAL NDE | 1.352 mm/s |
| HORIZONTAL NDE | 3.559 mm/s |
| VERTICAL NDE | 2.553 mm/s |

振動測量結果

3. 噪音

進行空氣噪音測試時，依據 IEC 60034-9 和 ISO 3746 標準，於工廠內進行噪音水平的測量。測試設備放置在彈性支撐上，並以額定速度運行。設備安裝在背景噪音不顯著的區域，並避免靠近牆壁、面板或其他大型物體。

測試過程中，同步調相機與馬達需機械解耦，測試步驟包括：逐步增加激磁電流，檢查調相機的轉速。若啟動成功，操作員將轉速設置增加至額定值。空氣噪音的測量將在四個面向的不同位置進行，距離機器 1 米處進行整體噪音（ L_p ）的測量，及機器上方的測量。

當測試機器停止運行時，還需在相同位置測量背景噪音。根據機器噪音與背景噪音的差異進行評估：若差異小於 3 dB，則背景噪

音被視為過大，需重新測試；若大於 10 dB，則測得值視為最終值；若介於 3 至 10 dB 之間，則根據 ISO 1680/2 的相關表格進行修正。



於機器四個面向的不同位置進行噪音測試



機器上方噪音測量



使用分貝計測量

4. 飽和曲線及短路曲線

進行特性測試時，飽和曲線和短路曲線是兩個重要的測試項目。飽和曲線測試中，將直流電源接入調相機，並確保定子端子處於開放狀態。啟動直流電動機，使其驅動系統達到額定速度。隨後啟動直流電源，將可變電阻設置為零，然後逐步增加激磁電流，以達到等於或高於 1.3 倍額定電壓。測量過程中，需逐漸降低激磁電流，並記錄定子電壓、主磁場電流及轉速等數據。

短路曲線測試則是在定子端子短路的情況下進行。首先啟動直流電動機至額定速度，然後啟動直流電源將可變電阻設置為零。隨後增加激磁電流，並逐步降低進行測量。過程中，記錄定子溫度及輔助繞組（AREP）的電壓。測量點包括多個不同的電流值，並在激磁電流為零時繪製曲線。

上述兩項測試中，測試結果需符合相關標準，如 IEC 60034-1，透過這些測試，能夠全面了解機組在不同運行條件下的性能，為後續的設計改進和故障診斷提供依據。

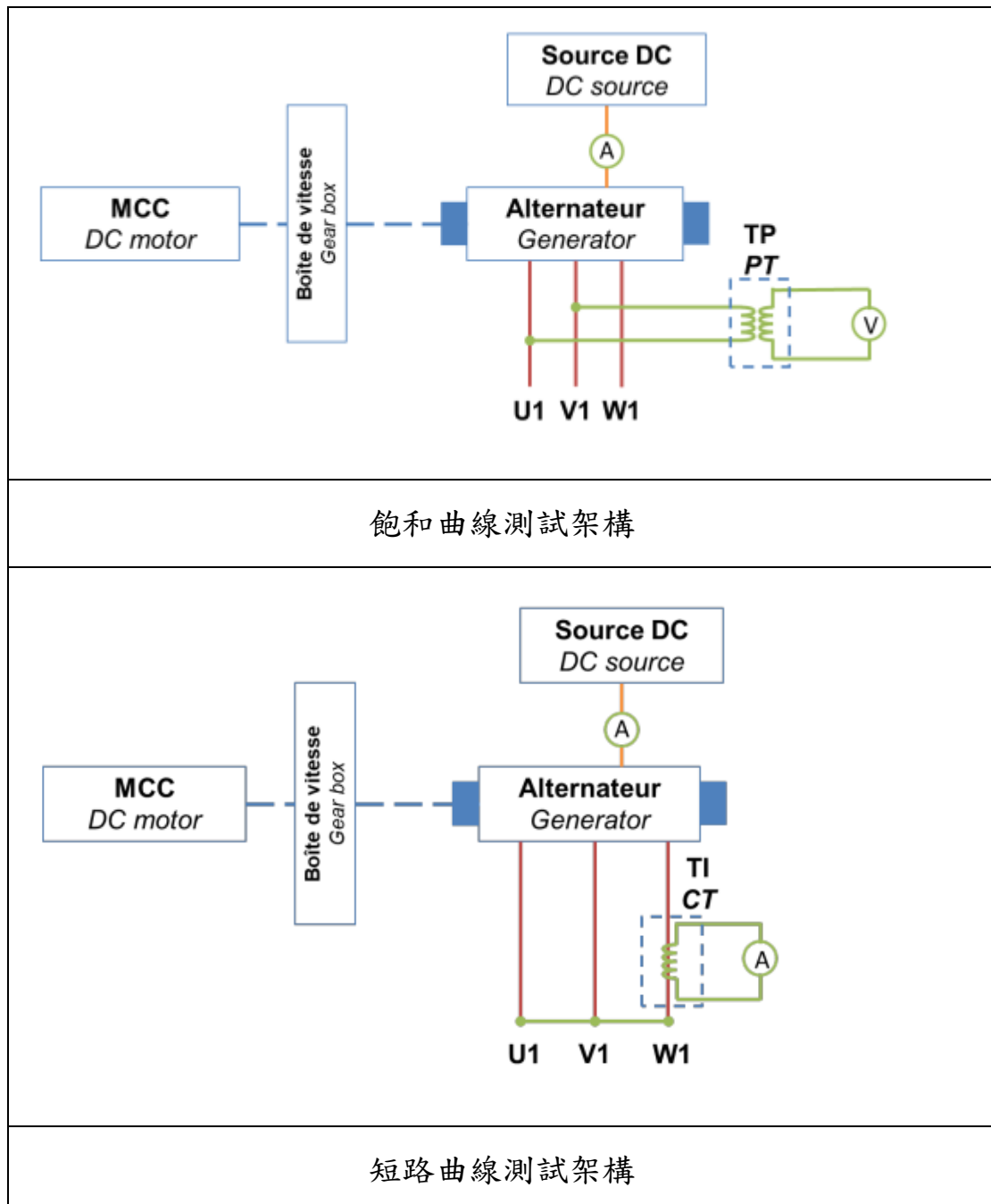
測試目的：

I. 飽和曲線測試：

- 測量發電機在空載情況下的電壓特性
- 觀察磁化特性曲線

II. 短路曲線測試：

- 測量發電機在短路情況下的電流特性
- 評估發電機的短路性能

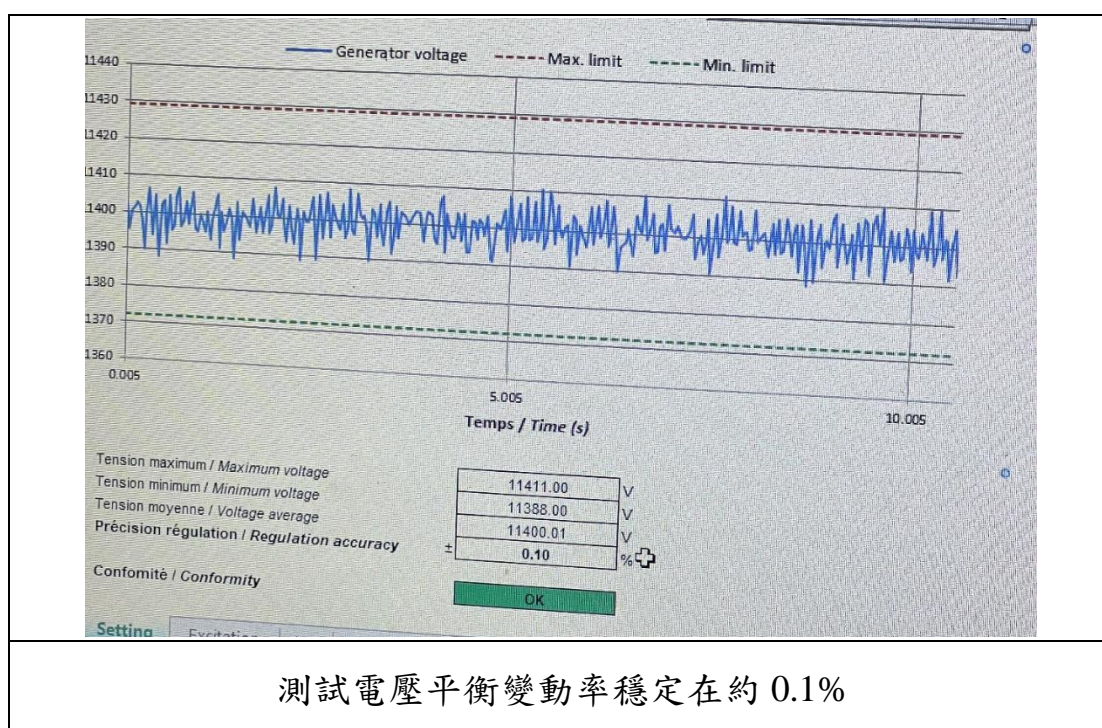


5. 電壓平衡

電壓平衡測試之前，會將直流電源連接至機組的勵磁機，並設

置測量電路，包括定子端子、客戶 PT 端子及 AREP 電路。

在首次啟動時，使用直流電源，而非自動電壓調節器 (AVR)。使其達到額定速度後，啟動直流電源，並將可變電阻設置為零。隨後，逐步增加激磁電流，以達到額定電壓。在檢查過程中，使用示波器來檢查各相之間的角度偏移，變動率穩定在約 0.1% 以內。測試過程遵循 IEC 60034-22 和 ISO 8528-3 等相關標準。



測試電壓平衡變動率穩定在約 0.1%

6. 56-64 Hz 不跳脫

針對額定頻率為 60 Hz 的要求，需確保在 56 Hz 至 64 Hz 之間運行時不會跳脫。在實際測試過程中，顯示在 54.5 Hz 至 66 Hz 的頻率下，同步調相機均未發生跳脫。這一結果表明該機組的性能表現相當優異，超出我們的需求標準。透過這些測試，我們能夠確認設備在額

定頻率範圍內的穩定性與可靠性，為後續的運行提供了良好的數據支持。



7. 虛功率運轉點

本測試旨在確認所設定之虛功運轉點是否能夠穩定運行 10 分鐘而不發生跳脫。為此，我們手動設定同步調相機的輸出虛功率，並確保其能夠穩定持續運轉。根據測試計畫，目標虛功率及持續時間如表 1 所示。

在實際測試過程中，成功測試至 -3.2 MVAR 及 +6 MVAR，並觀察到系統均能穩定運行，未發生任何跳脫現象。這表明該同步調相機在不同虛功率範圍內具備良好的穩定性，符合預期的運行標準。

表 1 虛功運轉點測試計畫

| 目標虛功率 | 持續時間 |
|---------|--------|
| -3 MVAR | 10 min |
| -2 MVAR | 10 min |
| -1 MVAR | 10 min |
| 1 MVAR | 10 min |
| 2 MVAR | 10 min |
| 3 MVAR | 10 min |
| 4 MVAR | 10 min |
| 5 MVAR | 10 min |



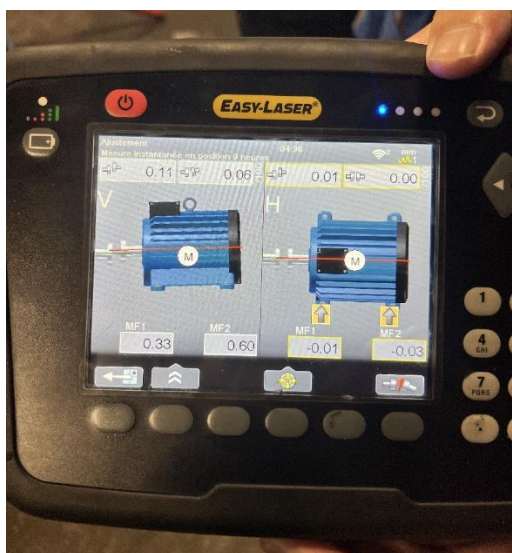
-3.2 MVAR 穩定運轉

+6 MVAR 穩定運轉

6. 組裝

在機組組裝過程中，水平的要求極為重要，特別是在同步調相機、軸承和馬達的安裝階段。確保這些組件的水平度不僅能提升機組的運行效率，還能延長設備的使用壽命。在組裝時，首先需要使用精確的水平儀器檢查基座的平整度，必要時進行調整，以達到理想的水平狀態。

在安裝同步調相機時，確保其與馬達的對中至關重要，以避免運行過程中因振動引起的磨損或故障。此外，黃色連接器在機組中扮演著保護角色，能有效降低軸承斷裂或爆炸的風險。在現場安裝過程中，工程師會進行精確的調整，確保所有連接和組件的水平及垂直誤差控制在可接受範圍內。這種高精度的調整不僅能顯著提升設備的運行穩定性，還能延長其使用壽命。



水平儀器確認基座的平整度



黃色連接器保護軸承



工程師進行對心校準



工程師使用扭力扳手進行精密調整



吊掛設備



工程師進行對心校準

五、 飛輪擴充應用

飛輪作為一種傳統的儲能技術，具有多項優勢，包括長壽命、快速充放電、高能量轉換效率、快速響應以及不受地理位置限制等。與電化學儲能系統相比，飛輪不存在化學腐蝕、過熱或深度充放電問題，對環境的影響較小，不需要空調冷卻設備，且維護需求低。飛輪儲能系統在運轉時只涉及純機械運動，不會引發任何化學反應，環保性能優越。

儘管飛輪儲能系統的儲能能力受到轉子強度和機械摩擦耗損的限制，早期的應用案例有限，但在過去十年，由於結合了先進的複合材料轉子、磁軸承、高速電機和尖端電力電子技術，性能大幅提升，應用範圍也擴展了。現代飛輪儲能產品已可用於電網調頻、小型孤島電網調峰、電網安全穩定控制、電力品質管理、車輛再生煞車和高功率脈衝電源等領域。隨著飛輪儲能併網技術和超導磁懸浮軸承技術的日益成熟，其應用範圍正逐步擴展至電網級儲能系統。

本台同步調相機原本可以提供的系統慣性常數為 $H=0.833s$ 。經過原廠工程師的初步計算，若增加 600 公斤的飛輪，系統慣性常數可提升至 2.83s。然而，為了確定 H 值的最大提升潛力，仍需進一步計算機械受力等因素。

值得注意的是，本次測試的機組在設計並未包含飛輪。如果未來需要增加飛輪，將必須更換調相機及馬達間的連接結構，在進行改動之前，必須重新評估整體設計和結構的可行性，以確保整體系統的安全性和穩定性。



安裝於軸承上飛輪設備



若擴充飛輪此處軸承需全部更換

六、心得與建議

在本次出國研習中，除了進行設備完成項目的測試紀錄，還深入學習了同步調相機的主體設計、製造方式及最新應用知識。能夠親自到原廠學習，讓我對這項先進且本島尚未使用的設備有了更深入的了

解，並認識到它在提升系統虛功調整需求方面的重要性，對電壓支撐具有顯著的幫助。

本次機組的出口端為 11.4KV 高壓出口，相較於目前系統中多數使用的低壓輸出，這種設計能減少變壓器的需求。如果小型離島發電機也能採用高壓出口直接進入系統，將可能降低變壓器的成本及維護負擔。根據本次的測試結果，效能表現比一般發電機更為優秀，主要差異在於發電機內部的銅片及絕緣材料。Leroy Somer 公司所使用的均為自繞製的銅片，雖然這會提升發電機的成本，但相較於購買變壓器，整體投資仍顯得更具經濟性。因此，未來在設計和選擇設備時，可以考慮高壓出口的方案，以提升效率並降低長期運營成本。

七、 參考資料

[1] Abb. Deploying Synchronous Condensers to Provide Distributed Power Grid Support, WHITE PAPER, 9.

[2] Leroy somer. 615037 Synchronous Compensator Factory Acceptance Tests Procedures, FAT 615037 Revision A.