行政院原子能委員會

委託研究計畫研究計畫報告

液流電池儲能系統在風力發電系統

之電力整合關鍵技術研究

A Study of Key Technique for Power Integration of a Flow Battery-based Energy-Storage System into a Wind Power-Generation System

- 計畫編號:110B006
- 受委託機關(構):國立成功大學 能源科技與策略研究中心
- 計畫主持人:王醴
- 聯絡電話: (06) 2757575 轉 62361 0979-393464
- E-mail address : liwang@mail.ncku.edu.tw
- 研究期程:中華民國 110 年 4 月至 110 年 12 月
- 研究經費:新臺幣 69.3 萬元
- 核研所聯絡人員:古鴻賢
- 報告日期: 110年11月26日

表目錄	III
圖目錄	IV
ABSTRACT	2
壹、計畫緣起與目的	3
一、液流電池之重要性	
二、液流電池之特性與數學模型	5
三、風力發電系統之特性與數學模型	
四、風力發電機組與液流電池儲能系統電力整合之「實驗室級測	試系統平
台」設計、評估與分析	16
貳、研究方法與過程	19
一、執行方法	
二、本計畫採用的方法及原因	
三、預計可能遭遇之困難及解決途徑	
四、重要儀器之配合使用情形	
五、進行步驟	
參、進度結果與討論	
一、本計畫預期完成之工作項目	
二、本計畫對於學術研究、國家發展及其他應用方面預期之貢獻	
三、本計畫對於參與之工作人員,預期可獲之訓練	
四、本計畫工作進度之規劃	
五、研究系統架構與模型	
六、穩態分析模擬	
七、動態模擬分析	
八、暫態模擬分析	50
九、以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變	動模擬分
析	53

肆、參考文獻	61
十二、結論	
十一、1C 充放電動態響應	
十、儲能系統之額定功率設計	

表目錄

表1 三相感應電動機(IM)-三相永磁同步發電機(PMSG)之參考規範17
表 2 三相橋式整流器(PMSG Bridge rectifier)之參考規範17
表3 直流/直流轉換器(PMSG-Side DC/DC Converter)之參考規範18
表 4 單相直流/交流換流器(Single-Phase DC/AC Inverter)之參考規範18
表 5 額定容量 500 W 之全釩氧化還原液流電池(VRFB)設備的參考規範18
表 6 本計畫之工作項目、工作比重、預定進度及查核點說明
表7 本計畫之工作規劃
表 8 本計畫所採用額定容量 3.3 kW/8.25 kWh、以單一全釩氧化還原液流電池
為基礎之儲能系統的規格
表9 本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧化還原液流
電池為基礎之儲能系統的規格
表 10 本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧化還原液流
電池為基礎之儲能系統的參數
表 11 本計畫研究系統架構在固定直流負載為 0.5 p.u.、風場風速固定在 11 m/s
條件下之系統特徵值(rad/s)
表 12 本計畫研究系統架構在風速變動時之系統特徵值(rad/s)
表13 本計畫研究系統架構以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統 SOC 變
動時之系統特徵值(rad/s)40
表 14 本計畫研究系統架構在直流負載變動時之系統特徵值(rad/s)42
表 15 本計畫研究系統架構以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變
動時之系統特徵值(rad/s)

圖目錄

圖 1 不同儲能類型之功率與持續時間比較圖 4
圖 2 本計畫全釩氧化還原液流電池之基本架構圖
圖 3 本計畫全釩氧化還原液流電池之等效電路模型
圖 4 全釩氧化還原液流電池輸出電壓與充電狀態 SOC 的特性曲線
圖 5 本計畫所採用以三相永磁同步發電機為基礎之風力發電系統模型9
圖 6 本計畫所採用風渦輪機旋角控制系統之控制方塊圖10
圖 7 風渦輪機連接永磁同步發電機之等效質量-彈簧-阻尼器系統模型11
圖 8 三相永磁式同步發電機之 <i>d-q</i> 軸等效電路模型14
圖 9 風力永磁同步發電機之 AC/DC 電壓源轉換器的控制方塊圖15
圖 10 本計畫所提出之風力發電機組與液流電池儲能系統功率整合之「實驗室
級測試系統平台」16
圖 11 本計畫之研究方法及步驟之流程圖
圖 12 本計畫之研究系統架構
圖 13 本計畫所採用以全銀氧化還原液流電池為基礎之儲能系統的等效電路模
型30
圖 14 本計畫所採用以全銀氧化還原液流電池為基礎之儲能系統的串聯與並聯
連接示意圖
圖 15 本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧化還原液流
電池為基礎之儲能系統連接雙向直流對直流升壓轉換器之架構圖32
圖 16 本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧化還原液流
電池為基礎之儲能系統功率的參考方塊圖
圖 17 本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧化還原液流
電池為基礎之儲能系統,增加該電池儲能系統功率參考值修正項的流程圖
圖 18 本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧化還原液流

電池為基礎之儲能系統的雙向直流對直流升壓轉換器控制方塊圖......34 圖 21 本計畫研究系統架構以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系 圖 23 本計畫研究系統架構以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變 圖 26 本計畫研究系統架構在直流負載變動與風場風速變動時之動態響應模擬 圖 27 本計畫研究系統架構在風場發生轉矩千擾之動態響應模擬結果......51 圖 28 本計畫研究系統架構在風場跳脫時之暫態響應模擬結果.......52 圖 29 本計畫研究系統架構以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變 圖 32 本計畫研究系統架構以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量選 定為統計分析之最佳容量之動態響應模擬結果......59 圖 33 本計所使用以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統在 1C 充放電條

v

中文摘要

本研究計畫目標在於探討全釩液流電池儲能系統整合風力發電 機組之電力機構技術的研發,建置系統與綠能應用最佳整合管理策 略技術。該研究項目的內容包括:(1)全釩液流電池儲能系統功率 集成到風力發電機組的實驗室規模平台的設計、評估和分析;(2) 全釩液流電池儲能系統和風力發電機組之間的容量設計搭配的設 計、評估和分析。

本報告為本研究計畫之期末報告,內容為風力發電機組容量與 液流電池儲能系統容量之間的搭配設計分析評估方面。本研究計畫 擬建立前述風力發電機組與液流電池儲能系統「實驗室級測試系統 平台 | 之數學模擬電力系統模型,先以實測方式量測前述「實驗室 級測試系統平台」在不同運轉條件下的工作點,俾修正該模擬電力 系統的參數後,再將該模擬電力系統模型之參數修正為額定容量1 MW之三相風力永磁同步發電機連接額定容量為100 kW/250 kWh的 全釩氧化還原液流電池儲能系統。在額定容量1 MW三相風力永磁同 步發電機容量與參數不變下,逐步改變液流電池儲能系統的容量與 其相對應的參數;在液流電池儲能系統的容量與參數不變下,逐步 改變三相風力永磁同步發電機容量與其相對應的參數, 俾完成不同 容量條件下的穩態分析、不同容量條件下的小訊號頻域特徵值分 析、不同容量條件下的時域非線性模型動態與暫態模擬特性分析。 本計畫經由這些穩態分析、小訊號頻域特徵值分析、時域非線性模 型動態與暫態模擬特性分析結果,最後提出風力發電機組容量與液 流電池儲能系統容量之間的搭配設計結果。

關鍵詞: 凱液流電池、儲能系統、風力發電系統、電力電子轉換器、 電力系統模型、頻域特徵值分析、時域非線性模型模擬。

Abstract

The aim of this research project is to study the mechanism and technique for power integration of a Vanadium redox flow battery energy storage system (VRFB) into a wind turbine (WT), and to establish the optimal integration-management strategy of system and green-energy applications. The contents of this research project include: (1) the design, evaluation, and analysis of a laboratory-scale platform for power integration of a VRFB into a WT and (2) the design, evaluation, and analysis of capacity-design collocation between a VRFB and a WT.

This is the final report of this research project. For the design, evaluation, and analysis of capacity-design collocation between a VRFB and a WT, this project establishes the power-system model for the laboratory-scale platform for power integration of a VRFB into a WT. The field measurement results of the laboratory-scale platform are first used to correct the parameters of the established power-system model under different operating conditions. The power-system model's parameters are then revised when the capacities of the WT and the VRFB of are extended to be 1 MW and 100 kW/250 kWh, respectively. Steady-state analysis results, small-signal eigenvalues, and dynamic/transient time-domain nonlinear-model simulation results of the studied power-system model under various capacity combinations of the WT and the VRFB are used to determine the capacity-design collocation between a VRFB of 100 kW/250 kWh and a WT of 1 MW.

Keywords: Vanadium redox flow battery energy storage system, wind turbine, power-electronics converter, power-system model, frequency-domain eigenvalue analysis, time-domain nonlinear-model simulations.

壹、計畫緣起與目的

一、液流電池之重要性

近幾年來,因為工業的蓬勃發展相當迅速,雖然使得人類的生 活更加便利,但也造成不少負面的衝擊影響。在全球電力公司發電 系統所使用的燃料部分,仍以傳統的天然氣、煤等石化燃料的使用 最為廣泛,然而燃燒石化燃料會產生溫室氣體,進而加速全球暖化 效應,並對地球整體環境造成之負面的傷害。為了改善電力公司發 電系統對環境所造成的嚴重污染,再生能源或綠色能源科技的快速 發展與大量使用,將是最有效解決溫室氣體及全球暖化效應的方法 之一。全球科學家近年來致力於可再生能源及永續能源的發展,其 中風力發電因為發電功率大、無發電汙染、容易取得等基本特性, 使其成為最熱門的可再生能源之一。

台灣屬於海島型氣候,夏季盛行西南季風而冬季則盛行東北季風,且台灣四面環海,所蘊藏之離岸風能相當可觀,因此風力發電技術在台灣具有相當高的發展潛力。因此開發離岸及陸域風力發電勢必在台灣未來可再生能源或綠色能源科技發展中,扮演極為重要 之角色。

台灣發展再生能源已做為台灣未來國家能源政策的一環,而根 據台灣政府推動之能源政策,在2025年之再生能源容量應達27 GW ,分別為太陽光發電20 GW、風力發電4.2 GW、水力發電2 GW以及 生質能源發電800 MW,佔台灣電力系統總發電量約20%。將這些再 生能源整合智慧電網及儲能系統,將可形成完整的創能、儲能、節 能體系,有助於大規模再生能源平滑供電,使整體台灣電力系統之 運作更有效率1。

因為風力發電系統之發電間歇性與不連續性,使得發電能量變 得不穩定,因此這樣的間歇性發電能源整合至一個電力系統是不容 易的。為了充分的利用風力發電系統,並解決風力發電系統不穩定 之缺點,因此能量儲存系統扮演了一個很重要的角色。

風能屬於不可預期的變動能源,會隨著風速之變化產生發電電 力之瞬間變動特性,此種基本特性會造成所併聯的電力系統之匯流 排電壓發生變動,影響整體系統之電力品質、負載的供電品質及整 體系統穩定度,故本計畫將在所研究的風力發電系統加入一個以「 全釩氧化還原液流電池」(vanadium redox flow battery, VRFB)為基礎 之儲能系統,使得風力發電系統的發電電力在併入電力系統或供電 給負載時,能夠被轉變為平滑的電力輸出,進而改善風力發電系統 輸出電力變動特性對所連接電力系統或負載造成的負面影響。

3

隨著風力發電系統技術的成熟發展,風力發電系統的裝置容量 也隨之增加,在面對大容量之風力發電系統時,亦需要使用大容量 之儲能系統,才足以補償風力發電系統所造成之電力變動。如圖1 所示為各種不同儲能類型之功率與持續時間比較圖,從圖1中可以明 顯看到,無論是「釩液流電池」、「鋅溴液流電池」或是「多硫化溴 液流電池」,這些液流電池的特性與傳統的大型儲能系統(如:壓縮 空氣、抽蓄水力等)最為接近,其儲存時間與儲存容量皆非常大,顯 示液流電池非常適合於大型儲能系統。



圖 1 不同儲能類型之功率與持續時間比較圖[2]

全釩氧化還原液流電池之功率額定與電能儲存容量可以分開設計,其充放電功率取決於電池之電堆大小,電能儲存容量則取決於 電解質儲存槽大小與電解液離子濃度,整體儲能系統之循環壽命相 當長,這些優點使得全釩氧化還原液流電池成為最有潛力的大型儲 能系統之一。

二、液流電池之特性與數學模型

本計畫所採用的全釩氧化還原液流電池之基本架構圖如圖2所示,它是由一個主要的電池電堆(cell stack)、二個電解液儲存槽(一個陽極、一個陰極)、二個循環幫浦與二個熱交換器所組成。圖2中的1號循環幫浦(Pump1)、2號循環幫浦(Pump2)分別從1號電解液儲存 槽(Electrolyte Tank1)、2號電解液儲存槽(Electrolyte Tank2)抽取陽極 (Anode)、陰極(Cathode)之電解液至電池電堆中進行反應,反應後的 電解液流經1號熱交換器(Heat Exchanger1)、2號熱交換器(Heat Exchanger2)回到電解液儲存槽中。電池電堆中包含了離子交換膜, 離子交換膜將電堆中的電解液分離後,並允許帶電離子通過,使電 堆中電解液分別進行氧化反應或還原反應,若沒有離子交換膜,氧 化反應及還原反應不會發生,而電解液氧化反應及還原反應之方向 決定了全釩氧化還原液流電池是充電模態或是放電模態[3]。



圖 2 本計畫全釩氧化還原液流電池之基本架構圖

全釩氧化還原液流電池利用的是四種存在於不同氧化狀態之釩 離子來進行氧化反應及還原反應, 釩離子之四種氧化狀態分別是: V²⁺、V³⁺、V⁴⁺、V⁵⁺,其中釩離子V⁴⁺、V⁵⁺實際上是氧化釩離子VO²⁺ 與VO₂⁺,因此全釩氧化還原液流電池之半反應式如(1)式、(2)式所示 [4]:

$$VO_{2}^{+} + 2H^{+} + e^{-} \in VO^{2+} + H_{2}O$$
 (1)

$$V^{2+} \in V^{3+} + e^{-}$$
 (2)

式中e-代表帶負電的電子。將(1)式、(2)式合併後,可以得到(3)式:

$$V^{2+} + VO_2^{+} + 2H^+ + e^- \in VO^{2+} + V^{3+} + H_2O$$
 (3)

(3)式即為全釩氧化還原液流電池經過氧化反應及還原反應後 之平衡方程式。屬於化學能的全釩氧化還原液流電池與其他儲能電 池相比,具有以下優點[2]、[5]:A.可彈性設計電池輸出功率與儲能 容量、B.電池循環壽命高且可深度充放電、C.低自放電率、D.容易 偵測電池電量、E.無自燃及爆炸之危險、F.環保及低維護需求、G. 電量變動均化性高。本計畫所研究之全釩氧化還原液流電池,其等 效電路如圖3所示,該等效電路分為二個部份,右半部份表示電堆內 部的反應與損失,左半部份則表示循環幫浦與輔助控制系統的寄生 損失[6]、[7]。



圖 3 本計畫全釩氧化還原液流電池之等效電路模型

在圖3中的VvRFB、Vsta分別代表全釩氧化還原液流電池之輸出電 壓、電堆電壓; Rrea、Rres分別代表電堆內部反應造成損失之等效電 阻; Cele為等效電極電容; Rfix為輔助系統固定損失之等效電阻; IvRFB 、Ista、Ipump分別為電池輸出電流、電堆電流、幫浦電流。由圖3中之 等效電路模型可以推導出全釩氧化還原液流電池之方程式分別如 (4)式、(5)式所示:

$$(C_{ele})p(V_{ele}) = I_{VRFB} + \frac{V_{VRFB}}{R_{fix}} + I_{pump} - I_{sta}$$
(4)

$$V_{ele} = V_{sta} + I_{sta} R_{rea} \tag{5}$$

式中p為對時間變數t微分之運算子(即p = d/dt)。圖3中內部電阻Rrea 與Rres是由反應動力學來計算質量傳輸電阻、薄膜電阻、溶液電阻、 電極電阻以及雙極板電阻造成之損失;寄生電阻Rfix與幫浦損失電流 Ipump是用來計算循環幫浦、系統控制器造成的功率損失。全釩氧化 還原液流電池之電堆內的電池電勢是由「能斯特方程式」(Nernst equation)所推導求得,電池電勢 V_{cell} 與電池的「充電狀態」(state of charge)SOC直接相關,如(6)式所示:

$$V_{cell} = E_0 + 2 \cdot \frac{R}{F} \cdot T \cdot \ln\left(\frac{SOC}{1 - SOC}\right)$$
(6)

式中E₀為個別電池之平衡電勢,平衡電勢在「能斯特方程式」中定 義為充電狀態SOC = 50%時之電勢; R為通用氣體常數,其值為 8.314510 J/kmole; F為法拉第常數,其值為96,485 C/mole; T為絕對 溫度(K)。電堆電壓V_{sta}以相依電壓源來建立模型,是由電堆中之單 一電池串聯的數量所決定,如(7)式所示:

$$V_{sta} = N_{cell} \cdot V_{cell} \tag{7}$$

式中N_{cell}為電堆中之單一電池之串聯數量。在穩態時,電池之開路電 壓將取決於電堆電壓以及運作損失,電池開路電壓V_{VRFB}、電堆電壓 V_{sta}以及電堆電流I_{sta}之關係式如(8)式所示:

$$V_{VRFB} = V_{sta} + I_{sta} \left(R_{rea} + R_{res} \right) \tag{8}$$

對於一個全釩氧化還原液流電池來說,大部分的內電阻損失為 固定值,故可允許將該內電阻值估算為一個常數。在放電循環且充 電狀態SOC為20%時,運作損失被分為15%的內部損失 P_{int} (即 $P_{int} = P_{sta} \times 15\%$)以及6%的寄生損失 P_{par} (即 $P_{par} = P_{sta} \times 6\%$),而內部電阻 R_{int} (即 $R_{int} = P_{int} / I_{sta}^2$)可分為 $R_{rea} \times R_{res}$,分別佔內部損失之94%、6%(即 $R_{rea} = R_{int} \times 94\% \times R_{rea} = R_{int} \times 6\%$)。6%之寄生損失 P_{par} 又可分為2%之固定 損失 P_{fix} (即 $P_{fix} = P_{sta} \times 2\%$)以及4%之可變損失 P_{pump} (即 $P_{pump} = P_{sta} \times 4\%$) ,固定損失 P_{fix} 使用固定電阻 R_{fix} 來表示(即 $R_{fix} = V_{VRB}^2 / P_{fix}$),而用來表 達幫浦損失之可變損失 P_{pump} 則可由相依電流源來表示。幫浦損失電 流 I_{pump} 與電池的充電狀態SOC、電堆電流 I_{sta} 相依,可如(9)式表示:

$$I_{pump} = k_{pump} \left(\frac{I_{sta}}{SOC}\right) \tag{9}$$

式中 k_{pump} 為幫浦損失 P_{pump} 之增益。全釩氧化還原液流電池的充電狀態SOC被定義為當前儲存的能量與電池的總容量 E_{cap} 的比值,充電狀態SOC會不斷與前一個時間步距(time step)時的值相加,如(10)式、

(11)式所示[8]:

$$SOC_{t_n} = SOC_t + \Delta SOC_{t_n - t} \tag{10}$$

$$\Delta SOC_{t_n-t} = \int_t^{t_n} \frac{P_{sta}}{E_{cap}} dt = \int_t^{t_n} \frac{V_{sta}I_{sta}}{E_{cap}} dt \tag{11}$$

對於本計畫中的風力發電系統的儲能應用,全釩氧化還原液流 電池的暫態行為是非常重要的,故在本計畫中使用電極之等效電容 值Cele的充電與放電來表達該電池的暫態行為。在本計畫所建立的全 釩氧化還原液流電池模型中,具有Ncell個串聯的單一電池,在電堆中 每個單一電池之等效電容值為Csingle,故電極之等效電容值Cele可用 Cele = Csingle/Ncell計算。

如圖4所示,為一個全釩氧化還原液流電池在充電循環中,充電狀態SOC與輸出電壓VvRFB之關係圖,通常會將全釩氧化還原液流電池之充電狀態SOC限制在線性範圍20%~80%之間。



圖 4 全釩氧化還原液流電池輸出電壓與充電狀態 SOC 的特性曲線

三、風力發電系統之特性與數學模型

以下介紹本計畫所採用風力發電系統之相關數學模型。本計畫 所採用的風力發電系統是以三相永磁同步發電機(three-phase permanent-magnet synchronous generator, PMSG)為基礎,並由風渦輪 機(wind turbine, WT)、旋角控制系統(pitch control system)及電壓源轉 換器(voltage-source converter, VSC)所組成,茲依序介紹如下[9]、[10] 。 風之流動會隨著不同的氣候與季節而改變,當風速發生變化時 風渦輪機所擷取風所產生的動能亦會隨之改變。本計畫所採用之風 渦輪機為三葉型水平軸式風渦輪機,模擬的風力發電系統如圖5所示 [11]。當風速Vw達到4 m/s時,風渦輪機開始運轉,此時的風速稱為 風渦輪機之「切入風速」(cut-in wind speed);而當風速Vw達到12 m/s 時,風渦輪機達到額定值,該風速即為風渦輪機之「額定風速」(rated wind speed);當風速Vw超過24 m/s時,風渦輪機為避免因轉速過快而 損害風力機會將其強迫停機,而此臨界點的風速即為風渦輪機之「 切出風速」(cut-out wind speed)。



圖5本計畫所採用以三相永磁同步發電機為基礎之風力發電系統模 型

本計畫所採用風渦輪機之數學模型與相關之方程式分別如(12) 式~(14)式所示:

$$P_{mw} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta)$$
(12)

$$C_{p}(\lambda,\beta) = C_{1}[C_{2}(\frac{1}{\lambda+C_{8}\beta} - \frac{C_{9}}{\beta^{3}+1}) - C_{3}\beta - C_{4}\beta^{C_{5}} - C_{6}]$$

$$\cdot \exp[C_{7}(-\frac{1}{\lambda+C_{8}\beta} + \frac{C_{9}}{\beta^{3}+1})]$$
(13)

$$\lambda = \frac{\omega_{B}R_{B}}{V_{w}} \tag{14}$$

式中 P_{mw} 為風渦輪機輸出之機械功率(mechanical power)(單位:W); C_p 為風渦輪機之功率係數(power coefficient)(無單位); R_B 為風渦輪機 葉片半徑(單位:m); ρ 為空氣密度(air density)(單位:kg/m³); λ 為渦 輪機葉片翼端速度比(tip speed ratio)(單位:rad); β 為風渦輪機葉片 的旋角角度(pitch angle)(單位:rad);A為葉片掃過的面積(swept area)(單位:m²); $C_1 \sim C_9$ 為常數; V_w 為風速(單位:m/s); ω_B 為風渦輪機葉 片之轉速(單位:rad/s)。

(二)風渦輪機的旋角控制系統模型

風速是屬於不穩定的能源會隨氣候及地形等因素改變,因此可 能導致風力發電機輸出的功率變得不穩定,當風速超過風渦輪機之 額定風速時,風力發電機本身也會超出其額定運轉條件,為了維持 穩定的輸出功率以及避免超出額定功率,故必須有風力機組輸出功 率的控制機構存在,而許多風渦輪機之功率調整方式係採用旋角控 制系統,該系統利用風渦輪機葉片可變角度之旋翼構造,於高風速 時同時調整各個葉片的角度,以確保風渦輪機輸出之機械功率的穩 定,也可限制風渦輪機不可超出其額定運轉範圍。如圖6所示為本計 畫中所使用風渦輪機旋角控制系統之控制方塊圖[12]。



圖 6 本計畫所採用風渦輪機旋角控制系統之控制方塊圖

圖6風渦輪機之旋角控制系統的控制流程如下:風力永磁同步發 電機之實際輸出標么實功率 P_{PG} 與其標么功率參考值 P_{PG_ref} 比較後可 得到一個誤差值,該誤差值經過比例-積分(proportional-integral, PI) 控制器產生一個葉片角度命令值 β_{ref} ,該命令值 β_{ref} 與實際葉片角度 β 比較後,進一步經過旋角伺服(pitch servo)控制,再經旋角角度限制 器後,即可輸出適當的葉片旋角角度 β ,其方程式則如(15)式~(17) 式所表示: 1.當風速Vw大於風渦輪機之額定風速時:

$$p(\beta_{ref}) = K_{P\beta} p(P_{PG_ref} - P_{PG}) + K_{I\beta} (P_{PG_ref} - P_{PG})$$
(15)

$$p(\beta) = (\beta_{ref} - \beta) / \tau s \tag{16}$$

2.當風速V_w小於風渦輪機之額定風速時:

$$\beta = 0 \tag{17}$$

(三)質量-彈簧-阻尼器系統模型

如圖7所示為風渦輪機連接永磁同步發電機之等效質量-彈簧-阻尼器系統模型,當風吹動葉片使葉片轉動產生力矩T_{mw},該力矩經 由質量-彈簧-阻尼器系統模型將其傳送至永磁同步發電機之轉軸。 圖7中的D_{tw}、D_{PG}分別為風渦輪機、永磁同步發電機之外部標么阻尼 係數。



圖 7 風渦輪機連接永磁同步發電機之等效質量-彈簧-阻尼器系統模 型

風渦輪機之機械轉矩Tmw與等效質量-彈簧-阻尼器系統間之標么 數學關係如(18)式所列,等效質量-彈簧-阻尼器系統與永磁同步發電 機間之標么數學關係如(19)式所列,而風渦輪機與永磁同步發電機 間之標么位移角如(20)式所列:

$$(2H_{tw})p(\omega_{tw}) = T_{mw} - K_{shw}\theta_{tw} - D_{shw}(\omega_{tw} - \omega_{PG})$$
(18)

$$(2H_{PG})p(\omega_{PG}) = K_{shw}\theta_{tw} + D_{shw}(\omega_{tw} - \omega_{PG}) - T_{ePG}$$
(19)

$$p(\theta_{tw}) = \omega_b(\omega_{tw} - \omega_{PG}) \tag{20}$$

式中 T_{mw} 為風渦輪機之機械標么轉矩(單位:pu); T_{ePG} 為風力永磁同步發電機之標么電磁轉矩(單位:pu); H_{tw} 、 H_{PG} 分別為風渦輪機、風力 永磁同步發電機之等效慣性常數(單位:s); D_{tw} 、 D_{PG} 分別為風渦輪 機、風力永磁同步發電機之等效標么自阻尼係數(單位:pu); D_{shw} 為 風渦輪機和風力永磁同步發電機兩質量之間轉軸的等效標么阻尼係 數(單位:pu); K_{shw} 為風渦輪機和風力永磁同步發電機兩質量之間轉 軸的等效標么剛性係數(單位:pu/rad); ω_{tw} 、 ω_{PG} 分別為風渦輪機、 風力永磁同步發電機之標么角速度(單位:pu); θ_{tw} 為風渦輪機與風力 永磁同步發電機間之位移標么角度(單位:rad); ω_{b} 為基準角頻率(單 位:rad/s)。

(四)風力永磁同步發電機之數學模型

本計畫所使用之風力發電機型式為三相永磁同步發電機,該三 相永磁同步發電機之轉子直接與風渦輪機輸出機構做機械耦合連接 (無齒輪箱),由風渦輪機帶動風力三相永磁同步發電機運轉輸出功 率,其定子繞組輸出端連接一組三相AC/DC電力轉換器設備後,產 生直流電壓。當風速改變時,藉由電力電子轉換器的控制可達到風 力發電機之最大功率輸出。

本計畫中所使用於風力發電系統之永磁同步發電機為三相輸出 ,假設該發電機之定子繞組為Y接之弦式分佈繞組(sinusoidally distributed windings)。如圖8所示為三相永磁同步發電機之交-直-零 軸(q-d-0 axis)等效電路模型[9][13][14],假設此永磁同步發電機組運 轉於一個三相平衡的條件下,故其0軸成份皆為零可予以忽略。而該 系統所採用之參考軸為轉子參考軸(rotor reference frame),即參考軸 之旋轉角速度ω相同於永磁同步發電機轉子旋轉角速度 ω_{PG} 。在圖8 中:

$$v_{dPGp} = p(\psi_{dPG}) \tag{21}$$

$$v_{qPGp} = p(\psi_{qPG}) \tag{22}$$

風力永磁同步發電機d-q軸之標么電壓-電流方程式可表示如下:

$$v_{dPG} = -R_{PG}i_{dPG} - \omega_{PG}\psi_{qPG} + (1/\omega_b)p(\psi_{dPG})$$
(23)

$$v_{qPG} = -R_{PG}i_{qPG} + \omega_{PG}\psi_{dPG} + (1/\omega_b)p(\psi_{qPG})$$
(24)

式中 ψ_{dPG} 、 ψ_{qPG} 分別為永磁同步發電機內部d軸、q軸之標么磁通鏈 ; i_{dPG} 、 i_{qPG} 分別為永磁同步發電機定子繞組d軸、q軸之標么電流; v_{dPG} 、 v_{qPG} 分別為永磁同步發電機d轴、q軸之定子繞組標么端電壓; ω_{PG} 為永磁同步發電機之標么角轉速。風力永磁同步發電機之d軸、 q軸標么磁通鏈方程式可分別表示如下:

$$\psi_{dPG} = -L_{dPG}i_{dPG} + \psi_{mPG} \tag{25}$$

$$\psi_{dPG} = -L_{dPG}i_{dPG} + \psi_{mPG} \tag{25}$$

$$\psi_{qPG} = -L_{qPG} l_{qPG} \tag{26}$$

其中

$$\psi_{mPG} = L_{mdPG} I_{mPG} \tag{27}$$

$$L_{dPG} = L_{lPG} + L_{mdPG}$$
(28)

$$L_{qPG} = L_{lPG} + L_{mqPG} \tag{29}$$

式中 ψ_{mPG} 為永磁同步發電機永久磁鐵產生之標么磁通鏈; L_{dPG} 為永磁同步發電機定子繞組之等效標么漏電感 L_{IPG} 與d軸的等效標么互 感 L_{mdPG} 之和; L_{qPG} 為永磁同步發電機定子繞組之等效標么漏電感 L_{IPG} 與q軸的等效標么互感 L_{mqPG} 之和; L_{IPG} 是永磁同步發電機定子繞 組標么漏電感; L_{mdPG} 、 L_{mqPG} 分別為永磁同步發電機之q軸、d軸的 等效標 么互感; I_{mPG} 為永磁同步發電機之等效標么磁化電流 (magnetizing current)。



圖 8 三相永磁式同步發電機之 d-q 軸等效電路模型

將(25)式、(26)式代入(23)式、(24)式,可得該風力永磁同步發 電機動態數學方程式如下:

$$(L_{dPG}/\omega_b)p(i_{dPG}) = -R_{PG}i_{dPG} + \omega_{PG}L_{qPG}i_{qPG} - v_{dPG}$$
(30)

$$(L_{qPG}/\omega_b)p(i_{qPG}) = -R_{PG}i_{qPG} - \omega_{PG}L_{dPG}i_{dPG} - v_{qPG} + \omega_{PG}\psi_{mPG}$$
(31)

此外,風力永磁同步發電機之輸出實功、輸出虛功及內部電磁轉矩(electromagnetic torque)可以採用定子繞組的d軸、q軸標么電流以及d軸、q軸標么電壓分別推導如下:

$$P_{PG} = v_{dPG} \dot{i}_{dPG} + v_{qPG} \dot{i}_{qPG}$$
(32)

$$Q_{PG} = v_{qPG} i_{dPG} - v_{dPG} i_{qPG}$$
(33)

$$T_{ePG} = (L_{qPG} - L_{dPG})i_{dPG}i_{qPG} + \psi_{mPG}i_{qPG}$$
(34)

(五)電壓源轉換器之數學模型

在本計畫中,風力永磁同步發電機所產生之輸出電功率,是經 由三相AC/DC電壓源轉換器饋送至直流鏈。在本計畫中,假設該三 相AC/DC電壓源轉換器為一個沒有功率損失之理想轉換器,因此在 該三相AC/DC電壓源轉換器的交流側與直流側之間的功率是平衡 的。

如圖9所示,為本計畫擬使用的永磁同步發電機之三相AC/DC

電壓源轉換器的控制方塊圖[15][16],該三相AC/DC轉換器之主要 目標是使風力永磁同步發電機能夠從風中擷取最多的實功率。



圖 9 風力永磁同步發電機之 AC/DC 電壓源轉換器的控制方塊圖

為了實現「最大功率點追蹤」(maximum power point tracking, MPPT),本計畫採用了最佳轉矩控制方法,在這個方法中,當風速低於額定轉速時,風力永磁同步發電機之轉矩被調節至最佳轉矩,該最佳轉矩可以藉由測量風力永磁同步發電機之轉子速度 @pG決定,如下式所示[17][18]:

$$T_{opt} = K_{opt} \omega_{PG}^2 \tag{35}$$

式中Kont是風渦輪機之最佳轉矩-速度特性常數。

在圖9中,風力永磁同步發電機之轉矩是透過定子繞組的q軸電流參考值i_{qPG_ref}所控制,為了使風力永磁同步發電機之損失最小化, 定子繞組的d軸電流參考值被設定為零值,即i_{dPG_ref} = 0。透過新增 變數x₁p與x₂p,圖9中之方程式可以表示如下:

$$p(x_{1P}) = i_{dPG_ref} - i_{dPG}$$
(36)

$$w_{dPG} = -K_{p1}(i_{dPG_ref} - i_{dPG}) - K_{i1}x_{1P} + \omega_{PG}L_{qPG}i_{qPG}$$
(37)

$$i_{qPG_ref} = T_{PG_ref} / \psi_{mPG}$$
(38)

$$p(x_{2P}) = i_{qPG_ref} - i_{qPG}$$
(39)

$$v_{qPG} = -K_{p2}(i_{qPG_ref} - i_{qPG}) - K_{i2}x_{2P} - \omega_{PG}L_{dPG}i_{dPG} + \omega_{PG}\psi_{mPG}$$
(40)

四、風力發電機組與液流電池儲能系統電力整合之「實驗室級測試 系統平台」設計、評估與分析

如圖10所示,為本計畫所提出之風力發電機組與液流電池儲能 系統功率整合之「實驗室級測試系統平台」。



圖 10 本計畫所提出之風力發電機組與液流電池儲能系統功率整合 之「實驗室級測試系統平台」

茲簡述圖 10 之平台架構內容如下:

- (一)該平台係採用一套由三相變頻器驅動額定容量5.5 kW的三相感 應電動機組(IM)以模擬風渦輪機之變速運轉,再由該三相感應 電動機之轉軸驅動一部額定輸出容量為2 kW之三相永磁同步 發電機(PMSG)以模擬一套風力渦輪發電機系統之變速運轉,如 圖10左上方的參考照片所示。
- (二)液流電池儲能系統擬採用一套額定容量為500 W之全釩氧化還 原液流電池,如圖10右下方的參考照片所示。
- (三)該三相永磁同步發電機之三相輸出電壓,經過一個三相橋式整

流器(PMSG Bridge Rectifier)(如圖10左上方第二個參考照片所示)再連接至一套直流/直流轉換器(PMSG-side DC/DC Converter)(如圖10上方中間參考照片所示)後,輸出48 V直流電壓。

- (四)該48 V直流電壓經由一套雙向直流/直流轉換器(Bi-directional DC/DC Converter)(如圖10下方的參考照片所示)連接至500 W的 全釩氧化還原液流電池,以做為風力發電機輸出之儲能與釋能 控制。
- (五)該48 V直流電壓也經由一個單相直流/交流換流器(single-phase DC/AC Inverter)(如圖10右上方的參考照片所示)連接至額定單 相、110 V、60 Hz之交流負載,以模擬風力發電機整合液流電 池後提供電力給變動的交流單相電氣負載。
- 在圖 10 中之各基本硬體設備的參考規範,如表 1~ 表 5 所列。

三相永磁同步發電機規範	(PMSG Specifications)
型式 (Type)	WindTek WT2000
額定功率 (Rated power)	2 kW
最大功率 (Maximum power)	3 kW
極數 (Pole number)	18
轉子速度 (Rotor speed)	145 rpm ~ 780 rpm
輸出三相交流電壓	30 V ~ 240 V
三相感應電動機規範(IM Specifications)
型式 (Type)	TECO AEHL 5.5 kW
額定電壓 (Rated voltage)	220 V(Δ) / 380 V(Y)
額定電流 (Rated current)	19.8 A(Δ) / 11.5 A(Y)
額定功率 (Rated power)	5.5 kW
極數 (Pole number)	4
頻率 (Frequency)	60 Hz
轉子速度 (Rotor speed)	1750 rpm

表1 三相感應電動機(IM)-三相永磁同步發電機(PMSG)之參考規範

表2 三相橋式整流器(PMSG Bridge rectifier)之參考規範

一扣纸上斱法贴旧然	(Duidan I	Destifian	Creation	(amaina)
二相偕氏金沉奋规更	(Bridge I	Kecunier i	Specifica	ations)
	$\langle 0 \rangle$			

型式 (Type)	DACO SQL 100-12
輸出電流 (Output current)	100 A
耐受電壓 (Withstand voltage)	1200 V

表3 直流/直流轉換器(PMSG-side DC/DC Converter)之參考規範

直流/直流轉換器規範 (PMSG-side DC/DC Converter Specifications						
型式 (Type)	SD-1000L-48					
輸入直流電壓 (Input DC voltage)	19-30 V					
輸出直流電壓 (Output DC voltage)	48 V					
額定功率 (Rated power)	1008 W					

表4 單相直流/交流換流器(Single-phase DC/AC Inverter)之參考規範

單相直流/交流換流器規範 (DC/AC Inverter Specifications)						
型式 (Type)	TS-1500-148					
輸入直流電壓 (Input DC voltage)	42 V ~ 60 V					
輸出交流電壓 (Output AC voltage)	110 V					
頻率 (Frequency)	$60 \pm 0.1 \text{ Hz}$					
額定功率 (Rated power)	1725 W					

表 5 額定容量 500 W 之全釩氧化還原液流電池(VRFB)設備的參考

電池架構 (Cell configuration)	主要電池堆疊數:10 個串聯
	監測電池堆疊數:2個串聯
電解液 (Electrolyte)	釩離子濃度:1.7 mol/l
	硫酸濃度:2.6~mol/l
電解液體積 (Volume of electrolyte)	正電極:101、負電極:101
額定功率 (Rated power)	500 W 、 0.2 kWh
放電電壓 (Discharge voltage)	10 ~ 14.5 V
充電電流 (Charge current)	10 ~ 50 A
最大流量 (Maximum flow)	3.5 <i>l</i> /min

規範[19]

貳、研究方法與過程

一、執行方法

本研究計畫的目標在於探討液流電池儲能系統整合風力發電系 統之電力機構技術的研發,並建置系統最佳整合管理策略與綠能應 用技術,本計畫研究內容包括:

- (a) 風力發電機組與液流電池儲能系統之「實驗室級測試系統平台」
 設計、分析與評估;
- (b) 風力發電機組容量與液流電池儲能系統容量之間的搭配設計、 分析與評估。

本計畫擬先建立一套風力發電機組與液流電池儲能系統之「實 驗室級測試系統平台」,並建立該平台之模擬電力系統數學之穩定度 模型,先以實測方式量測「實驗室級測試系統平台」在不同運轉條 件下的工作點,做為修正該模擬電力系統架構的參數基礎,俾確保 模擬電力系統架構之結果與該平台實測的結果特性一致或接近。再 將該模擬電力系統模型之參數修正為額定容量1MW之三相風力永 磁同步發電機連接額定容量為 100 kW/250 kWh 的全釩氧化還原液 流電池儲能系統。在額定容量1MW 三相風力永磁同步發電機容量 與參數不變下,逐步改變液流電池儲能系統的容量與其相對應的參 數;在液流電池儲能系統的容量與參數不變下,逐步改變三相風力 永磁同步發電機容量與其相對應的參數,俾完成不同容量條件下的 穩態分析、不同容量條件下的小訊號頻域特徵值分析、不同容量條 件下的時域非線性模型動態與暫態模擬特性分析,經由這些穩態分 析、小訊號頻域特徵值分析、時域非線性模型動態與暫態模擬特性 分析結果,提出風力發電機組容量與液流電池儲能系統容量之間的 搭配設計。

二、本計畫採用的方法及原因

(一)採用的方法:

- 模擬結果與實測結果之比較法:包含改變工作點、變動趨勢、 修正模擬系統參數等穩態、動態、暫態之比較結果。
- 頻域分析法:包含特徵值分析、根軌跡分析、波德圖、靈敏度 分析等測試。
- 時域分析法:包含非線性模型之變化工作點與干擾測試,如轉 矩干擾、電壓干擾、三相短路故障分析等動態及暫態響應測試。

(二)採用的原因:

- 模擬結果與實測結果之比較法:為了分析一個電力系統在其 各子系統於不同容量下組合的特性,建立一個與實際系統接 近的模擬電力系統是必要的,一個實際系統能夠真正量測的 工作點不多,但利用實際系統可量測的不同工作點結果,可 做為模擬電力系統的修正參數,可使該模擬電力系統的特性 接近實際系統的特性,此涉及建立模型的複雜度與系統模擬 參數的使用外,也涉及系統在穩態、動態、暫態之比較結果 。當這些穩態、動態、暫態之比較結果接近時,該模擬電力 系統可藉由修正系統容量基準值之標么值轉換,將該模擬電 力系統擴大到與實際大容量電力系統一致的目標,再進行電 力系統的模擬特性分析。
- 2. 頻域分析法:
 - (1)採用特徵值分析法,可由其數值之大小即時並有效地看出 所建立含有電力電子轉換器之風力發電系統整合液流電 池儲能系統連接電氣負載之穩定度模型是否正確無誤,且 由特徵值之實部能判斷該電力系統之穩定性及穩定度,而 由其虛部則可決定系統模態之振盪頻率是否符合該研究 系統的基本特性。
 - (2) 靈敏度分析法旨在探討建立含有電力電子轉換器之風力發電系統整合液流電池儲能系統連接至電氣負載之穩定度模型之參數或工作點變動影響下,系統特徵值有何種趨勢之變化;根軌跡法則是配合特徵值法判斷參數影響下之特性根(characteristic roots)或零點(zeros)、極點(poles)之變動;波德圖(Bode plots)法則可藉大小及相位判斷其不穩定度及增益邊限(gain margin)、相位邊限(phase margin)。以上所述之數種方法,除了在國內電力公司以及國外諸多電力研究單位所採用外,一般國際期刊雜誌及重要文獻中均有涉及。本年度計畫將採用系統特徵值計算法、工作點變動法、根軌跡法等分析含有電力電子轉換器之風力發電系統整合液流電池儲能系統連接電氣負載之穩定度特性。
 - (3) 時域分析法:採用非線性電力系統模型之干擾測試分析,除了可以彌補在特徵值分析法中由於線性化模型與非線 性模型之差異,並能由它的結果獲知所研究電力系統所能 承受之假想故障條件或干擾情況。此外,由於加入之干擾 不同,可利用其差異,激發系統內部之模態,以驗證所研

究電力系統模態阻尼及振盪頻率之改變,進而判斷穩定度 之大小。改變工作點的方法主要在於所研究電力系統之工 作點並非一成不變,因此變動工作點可以驗證該所研究電 力系統運轉之正確性。

(4) 綜合前述之(2)、(3)兩項方法,即形成一種「系統化分析法」(systematic approach),有別於一般國外文獻上所採用的「嘗試錯誤法」(trial-and-error approach),故其分析效率上之成效極為顯著。

三、預計可能遭遇之困難及解決途徑

由於計畫主持人對本研究計畫已有充份地規畫以及諸多的相關 研究經驗,而且對於電力公司之傳統大型同步發電機系統、不同型 式的風力發電機以及不同型式的再生能源發電系統(如: 鼠籠式轉子 感應發電機SCIG、動態滑差型感應發電機DSIG、雙饋式感應發電機 DFIG、永磁同步發電機PMSG、超導同步發電機SCSG等風力發電系 統、太陽能發電系統、波浪發電系統、沼氣發電系統、小水力發電 系統、海潮流發電系統、潮汐發電系統、海洋溫差發電系統、微渦 輪機發電系統、固態氧化物燃料電池SOFC、質子交換膜燃料電池 PEMFC等)、儲能系統(如:超導儲能系統、飛輪儲能系統、鋰離子 電池儲能系統、、超級電容器儲能系統、全釩氧化還原液流電池儲 能系統等)、市電併聯型發電機、電力電子整流器、DC/DC轉換器及 DC/AC換流器、彈性交流輸電系統(FACTS)(如:靜態虛功補償器 SVC、靜態同步補償器STATCOM、統一功率潮流控制器UPFC、靜 態串聯同步補償器SSSC、靜態向量補償器SSSC等)、高壓直流輸電 系統(HVDC link) (如:線換向轉換器高壓直流輸電系統LCC-HVDC 、電壓源型轉換器高壓直流輸電系統VSC-HVDC、多饋入式高壓直 流輸電系統Multi-Infeed HVDC)等之穩態及動態等效電路模型等架 構之建立、特性分析、實際量測分析等極為清楚並有超過三十年以 上的研究經驗。

從計畫主持人過去所主持國科會(科技部)專題計畫、科技部國 家型能源計畫、台灣電力公司計畫、中國鋼鐵公司計畫、光陽機車 公司計畫、農委會(含漁業署)計畫、核能研究所計畫、大亞電纜計 畫等專題計畫案,擔任工研院計畫顧問以及發表IEEE/IET等國際知 名SCI期刊、國際會議論文、國內發明專利、美國發明專利、國際合 作計畫(SATU)、擔任馬來西亞、馬來亞大學(University of Malaya) 電機系2017-2021年之課程外部評估人(Programme External Assessor) 、擔任馬來西亞、拉曼大學(Universiti Tunku Abdul Rahman)電機系 之外部審查人(External Examiner)(2019年1月5日至2022年1月4日)等 工作中可以發現,主持本計畫預計不會有太大的困難。

四、重要儀器之配合使用情形

本計畫將採用一套額定功率為500 W的全釩氧化還原液流電池, 俾建立含有電力電子轉換器之風力發電系統整合液流電池儲能系統連接至電氣負載之「實驗室級測試系統平台」。

本計畫為配合風力發電機整合液流電池的電力系統模擬,將採 用電力系統模擬軟體,包含:PSS/E、ATP、ETAP、EMTP-RV、 Matlab/Simulink等軟體,有利於模擬本計畫對一個額定容量1 MW風 力發電機整合一個額定容量100 kW/250 kWh的全釩氧化還原液流 電池的特性模擬。

本計畫將採用多功能電錶(士林電機)四套,於風力發電機整合 液流電池之「實驗室級測試系統平台」上,將模擬用風力永磁同步 發電機(PMSG)輸出之電壓、電流訊號轉換成數位訊號,並傳輸至工 業電腦。

本計畫將採用直流/直流轉換器(SD-1000H-48)一台,於風力發電 機整合液流電池之「實驗室級測試系統平台」上,將模擬用風力永 磁同步發電機(PMSG)經由直流/直流轉換器連接到48 V直流鏈。

本計畫將採用直流/直流轉換器(SD-1000L-12)一台,於風力發電 機整合液流電池之「實驗室級測試系統平台」上,該直流/直流轉換 器做為液流電池(VRFB)進行充電、放電測試用。

本計畫將採用12 V轉48 V直流電源轉換器模塊一組,於風力發 電機整合液流電池之「實驗室級測試系統平台」上,將該直流/直流 轉換器模塊併入48 V直流鏈使用。

本計畫將採用直流電子負載一個、蝕刻機一台、曝光機一台、 鑽孔機一台、交流/直流電流探棒一組等設備,於風力發電機整合液 流電池之「實驗室級測試系統平台」上,設計一組雙向直流/直流轉 換器,做為液流電池(VRFB)進行充電、放電測試用。

五、進行步驟

(一)收集國內與國際文獻上有關液流電池特性、風力發電機特性、 風力發電機整合液流電池的穩定度模型及其相關電力電子轉換 器控制系統模型等完整參考文獻,內容包含標么值之轉換、非 線性模型之推導等資料。

- (二)利用所收集之資料及參考文獻,建立含有電力電子轉換器之風 力發電系統整合液流電池儲能系統連接至電氣負載之「實驗室 級測試系統平台」,並採用電力系統模擬軟體建立該「實驗室級 測試系統平台」之電力系統模型。
- (三)進行「實驗室級測試系統平台」在多種不同運轉條件下的量測
 ,俾做為修正「實驗室級測試系統平台」電力系統模型之依據
 ,針對模擬與實測之結果進行比對,確認兩結果特性的一致性
 。
- (四)將「實驗室級測試系統平台」之電力系統模型,修正為一個額 定容量1 MW風力發電機整合一個額定容量100 kW/250 kWh的 全釩氧化還原液流電池的模型,稱為「實驗室級測試系統平台」之電力系統級修正模型。
- (五)採用「實驗室級測試系統平台」之電力系統級修正模型,在額 定容量1 MW三相風力永磁同步發電機容量與參數不變下,逐步 改變液流電池儲能系統的容量與其相對應的參數;在液流電池 儲能系統的容量與參數不變下,逐步改變三相風力永磁同步發 電機容量與其相對應的參數,俾完成不同容量條件下的穩態分 析、不同容量條件下的小訊號頻域特徵值分析、不同容量條件 下的時域非線性模型動態與暫態模擬特性分析。
- (六)經由步驟(五)的穩態分析、小訊號頻域特徵值分析、時域非線性 模型動態與暫態模擬特性分析結果,歸納風力發電機組容量與 液流電池儲能系統容量之間的搭配設計。

本年度計畫整體研究流程圖如圖 20 所示,本年度計畫之工作項 目、工作比重、預定進度及查核點說明如表 6 所列。



表 6 本計畫之工作項目、工作比重、預定進度及查核點說明

エ	作	エ	預									
		作	定	110	110	110	110	110	110	110	110	
		比	進	年	年	年	年	年	年	年	年	查核點完成
		重	度	4	5	6	7	8	9	10	11-12	事項說明
項	目	%	%	月	月	月	月	月	月	月	月	
收集風力	發電整合		預定進度	50	50							完成相關文
液流電池	儲能系統											獻及資料之
的穩定度	模型等資	10										收集。
料			累計進度	50	100							
建立風力	發電系統		預定進度	25	25	25	25					完成「實驗
整合液流	電池儲能											室級測試系
系統連接	至電氣負	20	累計進度	25	50	75	100					統平台」之
載之「實驗	贪室級測試											建立、模擬
系統平台	」,完成該											電力系統模
「實驗室	级测试系											型之建立
統平台」之	七電力系統											
模型												
在不同工	作條件下		預定進度		25	25	25	25				完成「實驗
量測,修1	E「實驗室	20										室級測試系
級測試系統	统平台」之		累計進度		25	50	75	100				統平台」之
電力系統核	莫型參數											電力系統模
												型參數修正
將「實驗室	宦级测试系		預定進度				25	25	25	25		完成 1 MW
統平台」修	修正為一個	20										風力發電機
額定容量	1 MW 風		累計進度				25	50	75	100		整 合
力發電機	整合一個											100 kW/250
額 定	容量											kWh 液流電
100 kW/25	60 kWh 的											池的模型之
全釩氧化	還原液流											修正
電池的模型	型											
完成不同	容量條件		預定進度					25	25	25	25	完成 1 MW
下的穩態	分析、不同	20										風力發電機
容量條件	下的小訊											整 合
號頻域特	徵值分析		累計進度					25	50	75	100	100 kW/250
、不同容量	量條件下的											kWh 液流電
時域非線	性模型動											池電力系統
態與暫態	模擬特性											之穩態、動
分析												態、暫態分
												析
歸納風力	發電機組	10	預定進度							50	50	完成歸納容
容量與液	流電池儲		累計進度							50	100	量搭配設計
能系統容	量之間的											結論及期末
搭配設計	及撰寫期											報告
末報告												
A	計		預定進度	10	15	10	15	15	10	15	10	
	21	100	累計進度	10	25	35	50	65	75	90	100	

參、進度結果與討論

一、本計畫預期完成之工作項目

- (一)建立風力發電系統整合液流電池儲能系統連接至電氣負載之 「實驗室級測試系統平台」,並採用電力系統模擬軟體建立該 「實驗室級測試系統平台」之電力系統模型之穩定度模型。
- (二)將「實驗室級測試系統平台」之電力系統模型,修正為一個 額定容量1 MW風力發電機整合一個額定容量100 kW/250 kWh的全釩氧化還原液流電池的模型。
- (三)完成1 MW風力發電機整合100 kW/250 kWh全釩氧化還原液 流電池在不同容量條件下的穩態分析、不同容量條件下的小 訊號頻域特徵值分析、不同容量條件下的時域非線性模型動 態與暫態模擬特性分析。
- (四)歸納風力發電機組容量與液流電池儲能系統容量之間的搭配設計。
- (五)發表期刊與會議論文各一篇。
- 二、本計畫對於學術研究、國家發展及其他應用方面預期之貢獻
- (一)提供國內外電力公司、學術研究等單位,對於一套風力發電 系統整合一套液流電池儲能系統連接至電氣負載之「實驗室 級測試系統平台」,對該平台運作特性的基本了解。
- (二)提供國內外電力公司、學術研究等單位,對於採用電力系統 模擬軟體,建立一套風力發電系統整合一套液流電池儲能系 統連接至電氣負載之「實驗室級測試系統平台」之電力系統 穩定度模型的基本了解。。
- (三)提供國內外電力公司、學術研究等單位,對於將「實驗室級 測試系統平台」之電力系統模型,修正為一個額定容量1 MW 風力發電機整合一個額定容量100 kW/250 kWh的全釩氧化還 原液流電池的模型之基本了解。
- (四)提供國內外電力公司、學術研究等單位,對於1 MW風力發電 機整合100 kW/250 kWh全釩氧化還原液流電池在不同容量條 件下的穩態分析、不同容量條件下的小訊號頻域特徵值分 析、不同容量條件下的時域非線性模型動態與暫態模擬特性 分析之基本了解。。
- (五)發表研究風力發電機組容量與液流電池儲能系統容量之間的 搭配設計研究論文。

三、本計畫對於參與之工作人員,預期可獲之訓練

- (一)明瞭如何建立一套風力發電系統整合一套液流電池儲能系統 連接至電氣負載之「實驗室級測試系統平台」。
- (二)明瞭如何採用電力系統模擬軟體,建立一套風力發電系統整合一套液流電池儲能系統連接至電氣負載之「實驗室級測試系統平台」之電力系統穩定度模型。
- (三)明瞭如何將「實驗室級測試系統平台」之電力系統模型,修 正為一個額定容量1 MW風力發電機整合一個額定容量 100 kW/250 kWh的全釩氧化還原液流電池的模型。
- (四)對於所研究一個額定容量1 MW風力發電機整合一個額定容量100 kW/250 kWh的全釩氧化還原液流電池系統等重要模態 阻尼之變化、特徵值的分析、靈敏度之測試、波德圖、根軌 跡以及不同干擾條件下非線性系統模擬之完成均能有充分之 了解與深入。
- (五)若於未來參與風力發電機整合全釩氧化還原液流電池、離岸 風電場整合全釩氧化還原液流電池儲能系統、混合直流/交流 電力系統之模型建立與動態穩定度研究、風力發電系統與不 同儲能系統之控制運轉特性、電力系統實功及虛功調節、全 釩氧化還原液流電池儲能系統控制運轉特性分析、風力發電 機或風電場之控制運轉特性分析,以及多種電力電子轉換器 之控制策略等,均能加以深入。

四、本計畫工作進度之規劃

本計畫之工作規劃如表7所示,預期依照表7之進度完成各項 工作。

本計畫擬於110年7月31日前完成執行進度達50%且繳交研究 報告,工作內容包含:(一)完成風力發電系統整合液流電池儲能系 統連接至電氣負載之「實驗室級測試系統平台」,並採用電力系統模 擬軟體該「實驗室級測試系統平台」之電力系統模型之建立;(二) 在不同工作條件下量測,完成修正「實驗室級測試系統平台」之電 力系統模型參數。

本計畫擬於110年9月30日前完成執行進度達75%且繳交期中 研究報告,工作內容包含:(一)完成「實驗室級測試系統平台」之 電力系統模型參數之修正;(二)完成1 MW 風力發電機整合 100 kW/250 kWh 液流電池的模型之修正。

表7本計畫之工作規劃

▶ 110 年 4~12	4	5	6	7	8	9	10	11-12	完成
	•	5	U	,	0	/	10	11 12	事項說明
月									3 X 00 /1
工作項目									
收集風力發電整合液									完成相關文獻
流電池儲能系統的穩									及資料之收集
定度模型及其相關電									
力電子轉換器控制系									
統模型、參數、工作條									
件資料									
建立風力發電系統整									完成「實驗室級
合液流電池儲能系統				*					測試系統平台」
連接至電氣負載之「實									之建立、模擬電
▲安級測試系統平									九系統模型之
台」, 並採用雷力系統									建立
樟擬軟體建立雷力系									~
供城铁脸又上电刀小									
「實驗完奶測試系站									它式「實驗宏紹
夏 贼 王 贼 风 武 永 砚									儿成 貝殼主談 測計会站亚ム
「日」在小戶工作保什									则武示凯 「 口 」 之 雪 力 系 纮 描
「里风」修止 貝嫩至									~ 电力示沉供
◎ 次 州 式 元 1 一 二 ~ 电									至今致之际止
力示就供至今数 收「 									ウド 1 MW 日
府 貨驗至級測訊系統									元成 I MW 風
平台」修止為一個額定									刀 贺 竜 機 登 合
谷重 I MW 風刀發電									100 KW/250 1-Wh 法法雷油
機整合一個額定容量									KWII 液流电池
100 kW/250 kWh 的全									的模型之修正
钒氧化遠原液流電池									
的模型									
完成不同容量條件下									完成 1 MW 風
的穩態分析、不同容量								~	力發電機整合
條件下的時域非線性									100 kW/250
模型動態與暫態模擬									kWh 液流電池
特性分析									之穩態、動態、
									暂態分析
歸納風力發電機組容								*	完成歸納容量
量與液流電池儲能系									搭配設計結論
統容量之間的搭配設									及期末報告
计及撰寫期末報告									
工作推磨估計百分	10	25	35	50	65	75	90	100	
一十之及估时百万	%	%	%	%	%	%	%	%	
比(糸有數)	teter a	t	<u>بہ دفہ ا</u>		NA 11 T		. ط	ht ha T	
	第 1 3	孚 :完成	「賞騒	至級測言	试系統半	台」之	建立	、模擬電	力系統模型之建
	立。	£	Г -		N. A		- T •		6 h
預定本位野	第 2 3	至:完成	- 實驗	(室級測言	试系統平	台」之	電力剤	系統模型	参數之修正、完
识人旦饭加	成11	IW 風力	铃 电機	整合 100) kW/250) kWh ;	液流電	池的模型	也之修正。
	第3季	5:完成1	MW J	風力發電	機整合」	100 kW	//250 k	Wh液流	电池电力系统之
	穩態、動態、暫態分析。								

(一)前言

本節將介紹本計畫研究系統架構,以及該架構中相關子系統之 數學模型。如圖12所示,為本計畫之研究系統架構,該架構係由一 個額定容量1 MW、以「永磁同步發電機」(permanent-magnet synchronous generator, PMSG)為基礎之「風場」(wind farm),其輸出 線電壓額定為690 Vms,再經由該風場之「單向交流對直流電壓源轉 換器」(unidirectional AC-to-DC voltage-source converter)連接至一個 額定1200 V之「共同直流鏈」(common DC link)所組成的「直流微電 網」(DC microgrid),在該直流微電網的1200 V共同直流鏈上,亦連 接了一個經由額定1200/600 V「單向直流-直流降壓轉換器」 (unidirectional DC-to-DC buck converter)所連接之額定容量1 MW之 「直流負載」(DC load),以及經由「雙向直流-直流轉換器」 (bidirectional DC-to-DC converter)連接額定容量100 kW/250 kWh、以 「全釩氧化還原液流電池」(vanadium redox flow battery, VRFB)為基 礎之儲能系統。



1-MW Wind Farm and 100-kW/250-kWh VRFB-based Energy-Storage System

圖 12 本計畫之研究系統架構

(二)以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統的模型與參數

如圖 13 所示,為本計畫所採用以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統等效電路模型,該等效電路模型中分為二個部分:右

半部分的等效電路模型係用來表示該全釩氧化還原液流電池之電堆 (stack)內部的反應與損失;左半部分的等效電路模型則表示循環幫 浦與輔助控制系統的寄生損失。圖 13 中之內部電阻 Rrea 與 Rres 是由 反應動力學來計算質量傳輸電阻、薄膜電阻、溶液電阻、電極電阻 以及雙極板電阻所造成之電氣損失,寄生電阻 Rfix 與幫浦損失電流 Ipump 是用來計算循環幫浦、系統控制器造成的功率損失。本計畫所 建立以單一全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統等效電路模 型,其額定容量為 3.3 kW/8.25 kWh,電氣規格如表 8 所列。



圖 13 本計畫所採用以單一全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系 統的等效電路模型

表 8 本計畫所採用額定容量 3.3 kW/8.25 kWh、以單一全釩氧化還 原液流電池為基礎之儲能系統的規格

Cell Configuration	39
Power Rating	3.3 kW
Energy Content	8.25 kWh
Discharge Voltage	42-55 V
Discharge Current	10-80 A

在本節中,將建立一套額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效 全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統,該設備係利用額定容量 3.3 kW/8.25 kWh、以單一全釩氧化還原液流電池(VRFB)為基礎之儲 能系統為基礎,如圖 14 所示,以 N_{p_VRFB} 個以單一全釩氧化還原液 流電池為基礎之儲能系統做串聯、以 N_{s_VRFB} 個以單一全釩氧化還原液 流電池為基礎之儲能系統做並聯連接後,成為一套額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系 統。如表 9、表 10 所列,分別為以單一全釩氧化還原液流電池為基 礎之儲能系統、以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系 統之電氣規格、參數。



圖 14 本計畫所採用以額定容量 3.3 kW/8.25 kWh、以單一全釩氧化 還原液流電池為基礎之儲能系統的串聯與並聯連接示意圖

表9	本計畫所採用額定容量 100	kW/250 kWh >	以單一全釩氧化還
	下:::::::::::::::::::::::::::::::::::::	H K J M A	11 11 10 16

Power Rating	100 kW
Energy Content	250 kWh
Discharge Voltage	630-825 V
Discharge Current	20-160 A
Number in Series/Parallel	2/15

原液流電池為基礎之聚集等效儲能系統的規格

表10本計畫所採用額定容量100kW/250kWh、以聚集等效全釩氧

$P_{VRFB} = 100 \text{ kW}$	$N_{s_VRFB} = 2$	$N_{p_VRFB} = 15$
$R_{int} = 3.1907 \times 10^{-4} \Omega$	$R_{fix} = 0.0817 \ \Omega$	$E_{0} = 1.4 \text{ V}$
$C_{single} = 6 \text{ F}$	R = 8.314510 J/kmole	F = 96,485 C/mole
$k_s = 8.6173 \times 10^{-5}$	$K_{pump} = 0.0094$	

化還原液流電池為基礎之儲能系統的參數

如圖 15 所示,為本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以 聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統連接雙向直流對 直流升壓轉換器的示意圖。



圖 15 本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩 氧化還原液流電池為基礎之儲能系統連接雙向直流對直流升壓 轉換器之架構圖

如圖16與圖17所示,分別為本計畫所採用額定容量100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統的功率 參考方塊圖與增加該電池儲能系統功率參考值修正項的流程圖。圖 16 係根據風場負載輸出變動功率對時間之動態響應模擬結果,以擷 儲能系統所需提供的總功率平滑參考值 P_{Tot_ref},圖17 再根據聚集等 效全釩氧化還原液流電池之充電狀態(SOC)值,修正為新功率參考



圖 16 本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩 氧化還原液流電池為基礎之儲能系統功率的參考方塊圖



圖 17 本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧 化還原液流電池為基礎之儲能系統,增加該電池儲能系統功率參考 值修正項的流程圖

值。

如圖 18 所示,為本計畫所採用額定容量 100 kW/250 kWh、以 聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統的雙向直流對直 流升壓轉換器控制方塊圖,其詳細控制流程如下:以聚集等效全釩 氧化還原液流電池為基礎之儲能系統,將其輸出實功的實際值 PvRFB 與其參考值 PvRB_ref做比較後,再經由一個比例-積分控制器得到全釩 氧化還原液流電池設備輸出電流之參考值 IvRFB_ref,再將該參考值與 其實際電流值(IvRFB)做比較,經由一個比例-積分控制器及限制器後 得到以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統之責任週 期 DvRFB,最後經過脈波寬度調變(pulse-width modulation, PWM)產生 直流對直流升壓轉換器電力開關 S1 與 S2 的切換訊號。



圖18 本計畫所採用額定容量100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧 化還原液流電池為基礎之儲能系統的雙向直流對直流升壓轉換器控 制方塊圖

六、穩態分析模擬

(一)前言

本節將分析本計畫研究系統架構之模擬結果,包含當所研究之 額定容量1 MW 風場之風速固定為 11 m/s、額定容量1 MW 直流負 載固定 0.5 p.u.、以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系 統的充電狀態 SOC 在 50%工作條件下,該研究系統架構之穩態模擬 結果。另外,本節亦分析本計畫研究系統架構在直流負載固定為 0.5 p.u.、風場風速由 4 m/s 增加至 15 m/s 等工作條件下,以聚集等效全 釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統其系統重要特徵值的變化結 果。 (二)穩態分析

如圖 19 所示,為採用如圖 12 所示本計畫研究系統架構之穩態 模擬結果,這些結果包含:直流負載功率 PLOAD、風場風速 Vw、永 磁式同步發電機風場輸出實功率 PPMSG、以聚集等效全釩氧化還原液 流電池為基礎之儲能系統的功率 PVRFB、電壓 VVRFB、電流 IVRFB、充 電狀態 SOC、直流匯流排電壓 VDC等。根據圖 19之模擬結果可以分 析得知:在直流負載功率 PLOAD 與風場風速 Vw穩定時,以永磁式同 步發電機為基礎之風場輸出功率 PPMSG 會保持在額定值,同時供應 直流負載所剩餘的能量會自動對以聚集等效全釩氧化還原液流電池 為基礎之儲能系統進行充電,並且根據該電池儲能系統之充電狀態 SOC 自適應調整其充電功率,並且直流匯流排電壓 VDC 也能維持穩 定。





圖 19 本計畫研究系統架構之穩態模擬結果

(三)系統特徵值分析

本小節使用 Matlab/Simulink 軟體,模擬如圖 12 所示本計畫研 究系統架構在固定直流負載為 0.5 p.u.、風場風速固定在 11 m/s 等條 件下,進行系統特徵值之計算,其結果如表 11 所列。由表 11 所列 的系統特徵值結果可以發現:所有系統特徵值之實部皆為負值,換 言之所有系統特徵值皆落在複數平面的左半平面,表示在此運轉條 件下,本計畫研究系統架構為穩定。

表 11 本計畫研究系統架構在固定直流負載為 0.5 p.u.、風場風速固 定在 11 m/s 條件下之系統特徵值(rad/s)

	模態	特徵值 (rad/s)
Λ_{1-2}	永磁式同步發電機風場(PMSG-based WF)	$-5.295 \pm j13.841$
Λ_{3-4}	直流負載(DC Load)	-0.15± j31617.68
Λ_{5-6}	直流鏈(DC link)	$-292.188 \pm j199.91$
Λ ₇₋₈		-0.02, -0.04
Λ ₉₋₁₀	以眾集等效全釩氧化逐原液流電池為基礎之儲 能系統(VRFB-based FSS)	-522.8, -0.1665
Λ_{11}		-1881.54

(四)工作點變動之系統特徵值分析

如表 12、表 13、表 14 與表 15 所列,分別為本計畫研究系統架 構在風速、液流電池充電狀態 SOC 與直流負載變動下之系統特徵值 變動結果,在不同風速下,以永磁式同步發電機為基礎之風場所產 生之風力發電機力矩與機械功率不同,與以聚集等效全釩氧化還原 液流電池為基礎之儲能系統特性都將會造成整體系統工作點之改 變,系統特徵值亦隨之發生變化。可以觀察到在工作點變動時,所 有系統特徵值皆位在複數平面之左半平面,故可得知在風速變動條 件下,整體系統仍可維持穩定狀態。如圖 20、圖 21、圖 24 與圖 23 所示,分別為將變動量較大以及較接近複數平面虛軸之系統特徵值 繪製成「根軌跡圖」(root loci),以分析該特徵值之變動特性。

	Mada			風速 V	w (m/s)		
	widde	4	5	6	7	8	9
Λ_{1-2}	WTG	$-4.77713 \pm j14.04433$	-4.8476 ± <i>j</i> 14.01925	-4.91933 ± <i>j</i> 13.99277	-4.99199 ± <i>j</i> 13.96529	-5.06575 ± <i>j</i> 13.93665	-5.140749 ± <i>j</i> 13.90665
Λ3-4	DC load	$-0.1593 \pm j31617.54951$	0.15858 ± <i>j</i> 31617.56075	0.15769 ± <i>j</i> 31617.57399	$0.15645 \pm j31617.59238$	0.1548 ± <i>j</i> 31617.61685	0.15858 ± <i>j</i> 31617.56075
Λ_{5-6}	DC link	-298.3793 ± <i>j</i> 197.73949	$-297.4192 \pm j197.92949$	$-296.5875 \pm j198.14948$	$-295.5876 \pm j198.45620$	$-294.4646 \pm j198.86244$	-297.4192 ± <i>j</i> 197.92949
Λ_7	VRFB-based ESS	-1860.565	-1862.095	-1864.295	-1867.246	-1871.044	-1862.095
	Mada			風速 V	f_{W} (m/s)		
	Mode	10	11	12	13	14	15
Λ1-2	WTG	$-5.21714 \pm j13.87505$	-5.29507 ± <i>j</i> 13.84156	-5.37466 ± <i>j</i> 13.80582	$-4.98323 \pm j13.31712$	$-4.98323 \pm j13.31712$	-4.9374873 ± <i>j</i> 13.25863
Λ ₃₋₄	DC load	$-0.15268 \pm j31617.6481$	$-0.15002 \pm j31617.6872$	-0.14677 ± <i>j</i> 31617.7348	-0.14287 ± <i>j</i> 31617.7918	-0.14287 ± <i>j</i> 31617.7918	-0.14287 ± <i>j</i> 31617.7918
Λ5-6	DC link	-293.29834 ± <i>j</i> 199.3638	$-292.18827 \pm j199.9178$	$-291.25252 \pm j200.4358$	-290.59479 ± <i>j</i> 200.7653	$-290.59479 \pm j200.7653$	-290.59479 ± j200.7653
Λ_7	VRFB-based ESS	-1875.78	-1881.54	-1888.4	-1896.42	-1896.42	-1896.42

表 12 本計畫研究系統架構在風速變動時之系統特徵值(rad/s)



圖 20 本計畫研究系統架構在風速變動時之系統模態特徵值根軌跡圖

表 13	本計畫研究系統架構出	X聚集等效全釩氧化還原液;	氘電池為基礎之儲能系統 S	SOC 變動時之系統特徵值(rad/s)
------	------------	---------------	---------------	----------------------

	Mada	以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統 SOC (%)								
Widde		10		20	30		40		50	
Λ ₁₋₂	WTG	$-5.29507458 \pm j13.84156426$	-5.295	507462± <i>j</i> 13.84156407	-5.29507465 ±	<i>j</i> 13.84156395	$-5.29507468 \pm j13.841$	56386	$-5.29507471 \pm j13.84156378$	
Λ3-4	DC load	0.14686 ± <i>j</i> 31617.73425	0.14	6833 ± <i>j</i> 31617.73447	0.14681 ± j.	31617.73461	0.14679 ± <i>j</i> 31617.73	3473	0.14677 ± <i>j</i> 31617.73483	
Λ5-6	DC link	-291.18951 ± <i>j</i> 200.3708	-29	$91.2127 \pm j200.3948$	-291.2282	± j200.4108	-291.2408 ± j200.42	238	-291.2525 ± <i>j</i> 200.4358	
Λ_{11}	VRFB-based ESS	-1888.63		-1888.55	-188	38.49	-1888.44		-1888.4	
	Mada	以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統 SOC (%)								
	Mode	60		70			80		90	
Λ1-2	WTG	$-5.29507471 \pm j13.841563$	37	-5.29507474 ± <i>j</i> 13	.84156370	-5.295074	77 ± <i>j</i> 13.84156361	-5	.29507480 ± <i>j</i> 13.84156351	
Λ ₃₋₄	DC load	0.14677 ± <i>j</i> 31617.73483		0.14676 ± <i>j</i> 3161	6 ± <i>j</i> 31617.73494 0.14674		.14674 ± <i>j</i> 31617.73505		0.14672 ± <i>j</i> 31617.7352	
Λ ₅₋₆	DC link	$-291.2525 \pm j200.4358$		-291.2641 ± j20	2641 ± <i>j</i> 200.4478 -291.2		768 ± <i>j</i> 200.4608		-291.2923 ± <i>j</i> 200.4767	
Λ_{11}	VRFB-based ESS	-1888.4		-1888.36	5		-1888.32		-1888.26	



圖 21 本計畫研究系統架構以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統 SOC 變動時之系統模態特徵值根 軌跡圖

表 14 本計畫研究系統架構在直流負載變動時之系統特徵值(rad/s)

	Mode	直流負載 PLOAD (p.u.)							
		0.1		0.2	0	.3	0.4		0.5
Λ1-2	WTG	$-5.295005 \pm j13.841619$	-5.29	95006 ± <i>j</i> 13.841618	-5.295007 ±	j13.841617	-5.295008± j13.841	1617	-5.295008± <i>j</i> 13.841616
Λ ₃₋₄	DC load	-0.12907 ± <i>j</i> 31617.991807	-0.129	925 ± <i>j</i> 31617.989171	$-0.12943 \pm j3$	1617.986591	-0.12961 ± <i>j</i> 31617.93	83985	-0.1298 ± <i>j</i> 31617.981356
Λ5-6	DC link	-284.986 ± <i>j</i> 195.2317	-28	$35.051 \pm j195.2854$	-285.114 =	± j195.338	$-285.178 \pm j195.39$	912	-285.243 ± <i>j</i> 195.4447
Λ_{11}	VRFB-based ESS	-1912.74		-1912.5	-191	2.26	-1912.03		-1911.79
	Mode				直流負載	P _{LOAD} (p.u.)			
		0.6		0.7			0.8		0.9
Λ ₁₋₂	WTG	$-5.295 \pm j13.84161$		$-5.29501 \pm j13.8$	8416156	-5.2950	$1 \pm j13.8416150$	-5	5.2950115 ± <i>j</i> 13.8416145
Λ ₃₋₄	DC load	-0.12998 ± j31617.97874	47	-0.13016 ± <i>j</i> 3161	17.976163 $-0.13034 \pm j316$		± j31617.973535	-0	0.13052 ± <i>j</i> 31617.970950
Λ ₅₋₆	DC link	-285.307 ± <i>j</i> 195.4979		-285.371 ± <i>j</i> 19	5.5506	5.5506 -285.436 ± j195			-285.499 ± <i>j</i> 195.6568
Λ_{11}	VRFB-based ESS	-1911.55		-1911.3	1	-	1911.07		-1910.83



圖 22 本計畫研究系統架構在直流負載變動時之系統模態特徵值根軌跡圖

	Mode	以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量 CvRFB (100 kAh)						
		2.5	5	7.5	10.0	12.5		
Λ ₁₋₂	WTG	-4.413517856735099 ± j14.65219438540748	-4.413517856735338 ± j14.652194385408029	-4.413517856734387 ± j14.652194385407395	-4.413517856733952 ± j14.6521943854078	-4.413517856734268 ± j14.65219438540721		
Λ ₃₋₄	DC load	-0.500000000009095 ± j31622.77659773094	-0.50000000005457 ± j31622.776597730943	-0.500000000081855 ± j31622.776597730965	-0.499999999999090505 ± j31622.77659773093	-0.50000000003638 ± j31622.776597730986		
Λ_{5-6}	DC link	-297.638632537629 ± j195.19108351938385	-297.6386325376726 ± j195.19108351929296	-297.6386325376235 ± j195.19108351938164	-297.63863253763157 ± j195.19108351938786	-297.63863253758205 ± j195.19108351947094		
Λ_{11}	VRFB-based ESS	-1876.2817395425068	-1876.281739542737	-1876.2817395426734	-1876.2817395426916	-1876.2817395426327		
	Mode		聚集等效全釩氧化還	原液流電池基礎之儲能系統	容量 C _{VRFB} (100 kAh)			
	Mode	15	聚集等效全 釩 氧化還 17.5	原液流電池基礎之儲能系統 20.0	容量 C _{VRFB} (100 kAh) 22.5	25.0		
Λ1-2	Mode WTG	15 -4.413517856734268 ± <i>j</i> 14.65219438540721	聚集等效全釩氧化還 17.5 -4.413517856735127 ± j14.652194385408869	原液流電池基礎之儲能系統 20.0 -4.413517856735115 ± j14.652194385408055	容量 CvrFB (100 kAh) 22.5 -4.413517856734277 ± j14.65219438540716	25.0 -4.413517856735158 ± j14.65219438540853		
Λ ₁₋₂ Λ ₃₋₄	Mode WTG DC load	15 -4.413517856734268 ± j14.65219438540721 -0.50000000003638 ± j31622.776597730986	聚集等效全釩氧化還 17.5 -4.413517856735127 ± j14.652194385408869 -0.50000000003638 ± j31622.776597730935	原液流電池基礎之儲能系統 20.0 -4.413517856735115 ± j14.652194385408055 -0.500000000009095 ± j31622.77659773096	容量 CvrFB (100 kAh) 22.5 -4.413517856734277 ± j14.65219438540716 -0.50000000001819 ± j31622.77659773096	25.0 -4.413517856735158 ± <i>j</i> 14.65219438540853 -0.4999999999972715 ± <i>j</i> 31622.77659773094		
Λ1-2 Λ3-4 Λ5-6	Mode WTG DC load DC link	15 -4.413517856734268 ± j14.65219438540721 -0.50000000003638 ± j31622.776597730986 -297.6386325376373 ± j195.1910835192567	聚集等效全釩氧化還 17.5 -4.413517856735127 ± j14.652194385408869 -0.50000000003638 ± j31622.776597730935 -297.6386325376326 ± j195.19108351937447	原液流電池基礎之儲能系統 20.0 -4.413517856735115 ± j14.652194385408055 -0.500000000009095 ± j31622.77659773096 -297.63863253762213 ± j195.19108351939886	容量 CvrFB (100 kAh) 22.5 -4.413517856734277 ± j14.65219438540716 -0.50000000001819 ± j31622.77659773096 -297.6386325376263 ± j195.19108351932618	25.0 -4.413517856735158 ± j14.65219438540853 -0.4999999999972715 ± j31622.77659773094 -297.63863253759905 ± j195.19108351936282		

表 15 本計畫研究系統架構以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統於容量變動時之系統特徵值(rad/s)



圖 23 本計畫研究系統架構以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變動之系統模態特徵值根軌跡圖

七、動態模擬分析

(一)前言

本節探討本計畫研究系統架構,以永磁式同步發電機為基礎之 風場的等效聚集風能與以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之 儲能系統整合時,當該系統在遭受干擾條件下進行共計時間達3,600 s之動態響應模擬結果,其中分為以下三種系統干擾條件:

- (a) 直流負載變動:在固定風場風速 13 m/s 下,在時間 t = 0 s 時, 直流負載功率為 0.8 p.u.;在時間 t = 500 s 時,直流負載功率升 至 1.0 p.u.;而當時間 t = 1000 s 時,直流負載功率下降至 0.5 p.u.; 而在時間 t = 2000 s 時,直流負載功率升再次至 0.9 p.u.;而當時 間 t = 2500 s 時,直流負載功率再次下降至 0.2 p.u.。
- (b) 風場風速變動:在固定直流負載功率 0.5 p.u.下,當時間 t = 500 s 時,風場風速由 11 m/s 逐漸上升至 13 m/s;而當時間 t = 1500 s 時,風場風速再瞬間降至 5 m/s;而當時間 t = 2500 s 時,風場風 速又逐漸上升至 10 m/s。
- (c) 直流負載與風場風速變動:(i)直流負載功率變動:在固定風場風速 13 m/s 下,在時間 t = 0 s 時,直流負載功率為 0.8 p.u.;在時間 t = 500 s 時,直流負載功率升至 1.0 p.u.;而當時間 t = 1000 s 時,直流負載功率下降至 0.5 p.u.;而在時間 t = 2000 s 時,直流負載功率升再次至 0.9 p.u.;而當時間 t = 2500 s 時,直流負載功率再次下降至 0.2 p.u.;(ii)風場風速變動:在固定直流負載功率 0.5 p.u.下,當時間 t = 500 s 時,風場風速由 11 m/s 逐漸上升至 13 m/s;而當時間 t = 1500 s 時,風場風速再瞬間降至 5 m/s;而當時間 t = 2500 s 時,風場風速又上升至 10 m/s。

(二)直流負載變動之動態響應分析

如圖 24 所示,為本計畫研究系統架構在直流負載變動之系統動 態響應模擬結果,由該圖結果可以分析得知:當直流負載功率上升 或下降時,以永磁式同步發電機為基礎之風場輸出功率將更新至新 的工作點以維持穩定的功率輸出。由圖 24(f)所示之直流匯流排電壓 動態響應模擬結果可以得知:當直流負載變動時,以聚集等效全釩 氧化還原液流電池為基礎之儲能系統運轉條件,會移動至新工作點 以調整直流匯流排電壓並補償功率。如圖 24(d)與圖 24(e)所示,為當 直流負載發生變動時,系統響應皆有產生輕微震盪,但可迅速恢復 穩定,表示本計畫研究系統架構是穩定的。



圖 24 本計畫研究系統架構在直流負載變動時之動態響應模擬結果

(三)風速變動之動態響應分析

如圖 25 所示,為本計畫研究系統架構在發生風場風速發生變動 時之系統動態響應模擬結果,由該圖結果可以分析得知:當風場風 速在上升或下降時,以永磁式同步發電機為基礎之風場輸出實功率 將會改變,並且在超過風渦輪機的額定風速時,受旋角控制系統啟 動之影響,風場仍可保持穩定輸出。如圖 24(d)與圖 24(e)所示,當風 場風速下降導致以永磁式同步發電機為基礎之風場輸出實功率下降 時,以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統的功率會 迅速上升並轉為放電模式,俾補償直流匯流排的功率變動並且穩定 直流匯流排電壓;而當以永磁式同步發電機為基礎之風場風速再次 上升時,以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統的功 率會迅速下降並轉為充電模式,且直流匯流排電壓亦會維持穩定, 代表本計畫研究系統架構是穩定的。



(e) 以聚集等效全釩氧化還原液流電池 為基礎之儲能系統充電狀態 SOC (f) 直流匯流排之電壓

圖 25 本計畫研究系統架構在風場風速變動時之動態響應模擬結果

(四)直流負載與風速變動之動態響應分析

如圖 26 所示,為本計畫研究系統架構在發生直流負載與風速變 動時之系統動態響應模擬結果,由該圖結果可以分析得知:當風場 風速在上升或下降時,以永磁式同步發電機為基礎之風場輸出實功 率將會隨著風場風速而發生浮動,並且在超過風渦輪機的額定風速 時,受旋角控制系統啟動之影響,風場可保持穩定輸出。如圖 26(d) 與圖 26(e)所示,當以永磁式同步發電機為基礎之風場風速下降導致 輸出功率下降,使以永磁式同步發電機為基礎之風場輸出功率無法 完全供應直流負載需求時,以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基 礎之儲能系統的功率會迅速上升並轉為放電模式,俾補償直流匯流 排的功率變動並且穩定直流匯流排電壓;而當以永磁式同步發電機 為基礎之風場風速再次上升時,使以永磁式同步發電機為基礎之風 場輸出功率超過直流負載需求時,以聚集等效全釩氧化還原液流電 池為基礎之儲能系統的功率會迅速下降並轉為充電模式,且直流匯 流排電壓亦會維持穩定,代表本計畫研究系統架構是穩定的。



(c) 以永磁式同步發電機為基礎之風場 之輸出實功率

(d) 以聚集等效全釩氧化還原液流 電池為基礎之儲能系統的輸出實 功率



圖 26 本計畫研究系統架構在直流負載功率與風場風速變動時之動態響應模擬結 果

八、暫態模擬分析

(一) 前言

本節將探討當本計畫之研究系統架構分別發生以永磁式同步發 電機為基礎之風場跳脫與以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎 之儲能系統跳脫時,觀察該系統在發生系統跳脫條件下進行共計時 間達 80 s 之暫態響應模擬結果,其中分為以下兩種系統跳脫狀況: (a) 以永磁式同步發電機為基礎之風場發生轉矩干擾

- 在固定直流負載功率 0.5 p.u.下,風場風速為 11 m/s;而當時間 t = 20 s 時,其聚集等效全釩氧化還原液流電池系統瞬間發生 0.5 p.u.之轉矩干擾,並於 1 秒後結束。
- (b) 以永磁式同步發電機為基礎之風場跳脫 在固定直流負載功率 0.5 p.u.下,風場風速為 11 m/s;而當時間 t = 20 s 時,其以永磁式同步發電機為基礎之風場瞬間發生跳脫, 直到模擬時間結束。
- (二) 以永磁式同步發電機為基礎之風場發生轉矩干擾

如圖 27 所示,為本計畫研究系統架構在發生以永磁式同步發電 機為基礎之風場發生轉矩干擾之系統動態響應模擬結果,由該圖結 果可以分析得知:如圖 27(c)所示,當風場發生轉矩干擾時,以永磁 式同步發電機為基礎之風場之輸出功率將會瞬間下降,並且如圖 27(d)所示,當發生轉矩干擾時,以永磁式同步發電機為基礎之風場 輸出功率下降時,以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能 系統的功率會迅速減少充電模式功率,俾補償直流匯流排的功率變 動並且穩定直流匯流排電壓,如圖 27(f)所示,代表本計畫研究系統 架構是穩定的。



(三) 以永磁式同步發電機為基礎之風場發生跳脫

如圖 28 所示,為本計畫研究系統架構以永磁式同步發電機為基礎之風場發生跳脫時之系統暫態響應模擬結果,由該圖結果可以分析得知:如圖 28(c)所示,當風場跳脫時,以永磁式同步發電機為基礎之風場輸出實功率將會瞬間降至為零,並且如圖 28(d)所示,當風場跳脫時,以永磁式同步發電機為基礎之風場輸出實功率無法供應直流負載需求時,以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統的功率會迅速上升並由充電模式轉為放電模式,俾補償直流匯流排的功率變動並且穩定直流匯流排電壓,如圖 28(f)所示,代表本計畫研究系統架構是穩定的。



圖 28 本計畫研究系統架構在風場跳脫時之暫態響應模擬結果



圖 28 (續)

九、以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變動模

擬分析

(一)前言

本節探討本計畫研究系統架構,將以永磁式同步發電機為基礎 之風場等效聚集風能與以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之 儲能系統整合時,導入實際風速曲線與實際負載曲線,當該系統以 聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統功率為1 MW 為 基底時之容量變動之條件下,進行共計時間達24 小時之響應模擬結 果,分為觀察其響應情形。

(二)以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變動

時的模擬分析

如圖 29 所示,為本計畫研究系統架構在以聚集等效全釩氧化還 原液流電池為基礎之儲能系統容量變動之系統響應模擬結果,由該 圖結果可以分析得知:如圖 29(a)所示,負載功率於中午 12 時達到 最高峰,並且在 16 時之後再緩慢降低;如圖 29(b)、圖 29(c)所示, 分別為以永磁式同步發電機為基礎之風場風速、輸出功率,可以觀 察到輸出功率將根據當下風速更新至新的工作點,並且在超過額定 風速時會啟動旋角控制系統,以維持穩定的功率輸出;由圖 29(d)、 圖 29(e)、圖 29(f)所示,分別為以聚集等效全釩氧化還原液流電池為 基礎之儲能系統容量變動時之充電狀態 SOC、電池功率、直流匯流 排電壓響應模擬結果,由這些結果可以得知:當直流負載變動時,

53

以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統運轉條件,會 移動至新工作點以調整直流匯流排電壓並補償功率。如圖 29(f)所 示,為當直流負載發生變動時,系統響應皆有產生輕微震盪,但可 迅速恢復穩定,表明本計畫研究系統架構是穩定的。



SOC

圖 29 本計畫研究系統架構在以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系



(e) 以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變動的輸出實功率



(f) 以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變動的直流匯流排 電壓

t (h)

圖 29 (續)

十、儲能系統之額定功率設計

(一)前言

本節為利用「機率密度函數」(probability density function, PDF) 與「累積密度函數」(cumulative density function, CDF)來決定儲能系 統額定功率的大小,在一些統計問題中,需要透過樣本去估計總體 的機率分布密度,常用的估計方法有「非參數法」(non-parametric methods)和「參數法」(parametric methods)。參數法是假設總體服從 某種已知的分佈,即密度函數的型式是已知的,需要由樣本估計其 中的參數,這種方法依賴於實現對總體分佈的假設,而做出這種假 設往往是非常困難的,例如「韋伯分佈」(Weibull distribution)或「瑞利分佈」(Rayleigh distribution)。非參數法則具有可以清晰地反映實 際數據的優勢,也不存在參數法的假設困難,本計畫所使用的就是 一種非參數密度估計法一「核平滑密度估計」(kernel smoothing density estimation, KSDE)[30]。

(二)統計分析

如圖30(a)與30(c)所示,為所求得以聚集等效全釩氧化還原液流 電池為基礎之儲能系統所需提供總功率參考值|PvRFB_refl之動態響應 模擬結果。從圖中可以觀察得知:由於風場場輸出功率快速變動, 為了補償功率波動,儲能系統必須輸出補償系統所需的功率。利用 此功率參考值透過式(41)方程式可求出其「累積密度函數」,如圖31 所示,可以經由指定合適的「置信度」(confidence level)來選擇儲能 系統之容量,即可得出所需儲能系統之容量,如下式所列:

$$F(x) = \int_0^x \phi_{VRFB}(\left|P_{VRFB_ref}\right|)d(\left|P_{VRFB_ref}\right|)$$
(41)

$$P_{VRFB} = F^{-1}(0.95) \tag{42}$$

而本計畫選擇在機率密度函數中常用的置信度為95%,如(42)方 程式所示。儲能系統之所需提供之總功率參考值將對應於圖30(b)與 30(d)中累積密度函數為0.95的點,由圖中可得知,若需要平滑系統 功率所需儲能系統容量為0.58 MW,但需作為補償系統功率之所需儲 能系統容量則為0.83 MW。



(a) 儲能系統平滑功率所需提供之總 功率參考值 P_{VRFB_ref}之動態響應模 擬結果



(b) 所獲得的總平滑功率參考絕對值 之累積密度函數結果





(c) 儲能系補償功率所需提供之總功 (d) 所獲得的總補償功率參考絕對值 率參考值 P_{VRFB_ref}之動態響應模擬 之累積密度函數結果

結果

圖 30 儲能系統在不同功率參考值下之累積密度函數結果

若將儲能系統之所需提供之總功率參考值做積分時,則可得圖 31 所示,從圖中峰值可推估,在此環境下補償系統功率之所需儲能 系統容量至少為 7.2 MAh。



圖 31 儲能系統之所需提供之總功率參考值之積分值

(三)動態響應

如圖 33 所示,為本計畫研究系統架構在以聚集等效全釩氧化還 原液流電池容量選定為統計分析之最佳容量 0.83 MW/7.2 MAh 之系 統響應模擬結果,由該圖結果可以分析得知:如圖 32(a)所示,負載 功率於中午 12 時達到最高峰,並且在 16 時之後再緩慢降低;如圖 29(b)、圖 29(c)所示,永磁式同步發電機風場輸出功率將根據當下風 速更新至新的工作點,並且在超過額定風速時會啟動旋角控制,以 維持穩定的功率輸出;由圖 32(d)、圖 32(e)、圖 32(f)所示,分別為 以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統容量變動之充 電狀態、電池功率、直流匯流排電壓響應模擬結果,由這些結果可 以得知:當直流負載變動時,以聚集等效全釩氧化還原液流電池為 基礎之儲能系統運轉條件,會移動至新工作點以調整直流匯流排電 壓並補償功率並且以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能 系統的充電狀態 SOC 皆保持在安全的範圍內,表明本計畫電力系統 架構之聚集等效全飖氧化還原液流電池容量選定的可行性。





率

- 圖 32 本計畫研究系統架構在以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系 統容量選定為統計分析之最佳容量之動態響應模擬結果
 - 十一、1C 充放電動態響應

(一)前言

本節採用以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統 在1C充放電條件下進行模擬,比較在固定時間下,測試是否放電反 應時間小於 500 ms 之動態響應。

(二)動態響應

如圖 33 所示,為本計畫所使用以聚集等效全釩氧化還原液流電 池為基礎之儲能系統在 1C 放電條件下的模擬結果,由該圖結果可以 分析得知:如圖 33(a)與 33(c)所示,在給予以聚集等效全釩氧化還原 液流電池為基礎之儲能系統 60 分鐘之充電電流與 60 分鐘之放電電 流之後,圖 33(c)所示,以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之 儲能系統的充電狀態 SOC 由初始值 10%在 60 分鐘內提升至 90%, 並在 60 分鐘之後再次降至 10%,從圖 33(b)與圖 33(d)以聚集等效全 釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統功率 PvRFB 與電流 IvRFB 可以 得知:以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統在 1C 充

59





(a) 以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能 在 1C 充放電的功率參考值 P_{VRFB_ref}之動 態響應模擬結果





(b) 以全釩氧化還原液流電池為基礎之儲 能在1C充放電的功率 P_{VRFB}之動態響 應模擬結果



(c) 以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能在1C充放電的充電狀態SOC之 動態響應模擬結果 (d) 以聚集等效全釩氧化還原液流電池為 基礎之儲能在 1C 充放電的電流 IvRFB之 動態響應模擬結果

圖 33 本計畫所使用以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統在 1C 充放電條 件下的模擬結果

十二、結論

本計畫之期末報告內容是將本計畫之第二次期中報告的「電力 系統模型之研究系統架構」——額定容量1 MW 之三相風力永磁同 步發電機風場連接額定容量 100 kW/250 kWh、以聚集等效全釩氧化 還原液流電池為基礎之儲能系統以及1 MW 直流負載之電力系統模 型之研究系統架構。在聚集等效全釩液流電池儲能系統和風力發電 機組之間的容量設計搭配的設計、評估和分析。由模擬結果發現, 所有系統特徵值皆位於複數平面之左半平面,表示本計畫研究系統 架構所有系統模態皆為穩定。在動態分析方面,本計畫研究系統架 構於聚集等效全釠氧化還原液流電池容量變動下,由動態響應結果 分析可以得知,部分選擇之聚集等效全釠氧化還原液流電池容量對 於本計畫電力系統模型之研究系統架構的功率平滑特性無法得到有 效的改善,故本文後半段利用「機率密度函數」與「累積密度函數」 來決定儲能系統額定功率的大小,透過所求得之「核平滑密度估計」, 再經由指定合適的「置信度」來選擇儲能系統之容量為 0.83 MW/7.2 MAh。在本計畫研究系統架構在以聚集等效全釠氧化還原液流電池 為基礎之儲能系統容量選定為統計分析之最佳容量之系統響應模擬 結果,由模擬結果可以分析得知:在選定為最佳容量之以聚集等效 全釠氧化還原液流電池之儲能系統的充電狀態 SOC 皆保持在安全的 範圍內,表明以聚集等效全釠氧化還原液流電池為基礎之儲能系統 容量選定的可行性。

最後,本計畫完成以聚集等效全釩氧化還原液流電池為基礎之 儲能系統在1C充放電條件下的模擬,比較在固定時間下,測試是否 放電反應時間小於500 ms,由模擬結果可以分析得知:以聚集等效 全釩氧化還原液流電池為基礎之儲能系統在1C充放電條件下之反 應時間約為5 ms,小於原預定值之500 ms以內,符合原預定期望值。

肆、參考文獻

- 1. 經濟部能源局。[Online]. Available: https://www.moeaboe.gov.tw, retrieved date: Mar. 31, 2019.
- 謝錦隆、薛康琳、鍾岳霖、戴志揚,「臺灣風力發電與液流電池系統儲電情境模擬」,臺灣能源期刊,第三卷,第一期,第55-78 頁,中華民國105年3月。
- 3. X. Qiu, T. A. Nguyen, J. D. Guggenberger, M. L. Crow, and A. C. Elmore, "A field validated model of a vanadium redox flow battery for microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp.1592-1601, Jun. 2014.

- 4. C. Blanc and A. Rufer, "Multiphysics and energetic modeling of a vanadium redox flow battery," in *Proc. 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Singapore, Nov. 24-27, 2008, pp. 696-701.
- A. Saha and L. C. Saikia, "Combined application of redox flow battery and DC link in restructured AGC system in the presence of WTS and DSTS in distributed generation unit," *IET Generation*, *Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 9, pp. 2072-2085, Jun. 2018.
- J. A. Chahwan, C. Abbey, and G. Joos, "VRB modelling for the study of output terminal voltages, internal losses and performance," in *Proc. 2007 IEEE Canada Electrical Power Conference*, Montreal, Quebec, Canada, Oct. 25-26, 2007, pp. 387-392.
- J. A. Chahwan, "Vanadium-redox flow and lithium-ion battery modelling and performance in wind energy applications," M.S. Thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 2007. (Retrieved date: Mar. 20, 2019).
- 8. R. D'Agostino, L. Baumann, A. Damiano, and E. Boggasch, "A vanadium-redox-flow-battery model for evaluation of distributed storage implementation in residential energy systems," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 30, no. 2, pp. 421-430, Jun. 2015.
- 3. 武光山,採用以超級電容器為基礎之儲能設備於含有市電併聯型 混合再生能源系統之性能改善,國立成功大學電機工程學系博士 論文,2017年6月。
- A. Uehara, A. Pratap, T. Goya, T. Senjyu, A. Yona, N. Urasaki, and T. Funabashi, "A coordinated control method to smooth wind power fluctuations of a PMSG-based WECS," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp. 550-558, Jun. 2011.
- F. Wu, P. Ju, X.-P. Zhang, C. Qin, G. J. Peng, H. Huang, and J. Fang, "Modeling, control strategy, and power conditioning for direct-drive wave energy conversion to operate with power grid," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 4, pp. 925-941, Apr. 2013.
- 12. 康正泓,雙側管型線性永磁同步發電機於波浪能量轉換系統之設 計與分析,國立成功大學電機工程學系碩士論文,2010年7月。
- 13. 林志昕,整合採用線性永磁發電機與採用感應發電機之波浪場之 研究與分析,國立成功大學電機工程學系碩士論文,2010年7月。
- 14. J. Yan, H. Lin, Y. Feng, X. Guo, Y. Huang, and Z. Q. Zhu, "Improved sliding mode model reference adaptive system speed observer for fuzzy control of direct-drive permanent magnet

synchronous generator wind power generation system," *IET Renewable Power Generation*, vol. 7, no. 1, pp. 28-35, Feb. 2013.

- 15. M. E. Haque, M. Negnevitsky, and K. M. Muttaqi, "A novel control strategy for a variable-speed wind turbine with a permanent-magnet synchronous generator," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 46, no. 1, pp. 331-339, Jan./Feb. 2010.
- 16. M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, and C. W. Tan, "A study of maximum power point tracking algorithms for wind energy system," in *Proc. 2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology*, Kuala Lumpur, Malaysia, Jun. 27-29, 2011, pp. 321-326.
- A. Adamczyk, M. Altin, O. Goksu, R. Teodorescu, and F. Iov, "Generic 12-bus test system for wind power integration studies," in *Proc. 2013 15th European Conf. Power Electronics and Applications*, Lille, France, Sep. 2-6, 2013, pp. 1-6.
- 18. P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2003.
- M.-H. Li, T. Funaki, and T. Hikihara, "A study of output terminal voltage modeling for redox flow battery based on charge and discharge experiments," in *Proc. Power Conversion Conference* (*PCC '07*), Nagoya, Japan, 2-5 Apr. 2007, pp. 221-225.
- L. J. Ontiveros, G. O. Suvire, and P. E. Mercado, "Power conditioning system coupled with a flow battery for wind energy applications: modelling and control design," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 7, pp. 987-995, Jun. 2017.
- 21. F. Baccino, S. Grillo, M. Marinelli, S. Massucco, and F. Silvestro, "Power and energy control strategies for a vanadium redox flow battery and wind farm combined system," in *Proc. 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, Manchester, UK, Dec. 5-7, 2011, pp. 1-8.
- 22. D. D. Banham-Hall, G. A. Taylor, C. A. Smith and M. R. Irving, "Frequency control using vanadium redox flow batteries on wind farms," in *Proc. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, Jul. 24-28, 2011.
- L. Barote and C. Marinescu, "A new control method for VRB SOC estimation in stand-alone wind energy systems," in *Proc. 2009 International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, Italy, Jun. 9-11, 2009, pp. 253-257.
- 24. M. Seixas, V. M. F. Mendes, and R. Melicio "Ride through fault on the rectifier controller of an offshore wind system aided by VRFB," in *Proc. 2018 International Symposium on Power Electronics*,

Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Italy, Jun. 20-22, 2018, pp. 925-930.

- 25. J. Lei and Q. Gong, "Operating strategy and optimal allocation of large-scale VRB energy storage system in active distribution networks for solar/wind power applications," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 9, pp. 2403-2411, Jun. 2017.
- W. Wang, B. Ge, D. Bi, and D. Sun, "Grid-connected wind farm power control using VRB-based energy storage system," in *Proc.* 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA, Sep. 12-16, 2010, pp. 3772-3777.
- 27. L. Barote, R. Weissbach, R. Teodorescu, C. Marinescu, and M. Cirstea, "Stand-alone wind system with vanadium redox battery energy storage," in *Proc. 2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, Brasov, Romania, May 22-24, 2008, pp. 407-412.
- J. Lei, Q. Gong, J. Liu, H. Qiao and B. Wang, "Optimal allocation of a VRB energy storage system for wind power applications considering the dynamic efficiency and life of VRB in active distribution networks," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 4, pp. 563-571, Mar. 2019.
- 29. W. Wang, B. Ge, D. Bi, M. Qin, and W. Liu, "Energy storage based LVRT and stabilizing power control for direct-drive wind power system," in *Proc. 2010 International Conference on Power System Technology*, Hangzhou, China, Oct. 24-28, 2010, pp. 1-6.
- 30. X. Wang and M. Yue, "Capacity specification for hybrid energy storage system to accommodate fast PV fluctuations," in *Proc. 2015 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Milwaukee*, Denver, CO, USA, Jul. 26-30, 2015, pp. 1-5.