

探討《再生能源發電系統併聯技術要點》

李孟芸^{1*} 邱玟臻¹ 吳炘睿¹ 張嘉丞¹ 楊俊哲² 劉志文³ 張文德⁴

摘 要

本研究以《台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點》中華民國110年11月23日修正版本為分析對象，重點討論輸電等級再生能源規定，主要討論的項目包括高/低電壓持續運轉能力、電壓持續運轉範圍及離岸風場實功控制能力。

為了提供全面的研究成果，研究團隊分析歐美先進國家的相關法規作為參考，同時，團隊還召開了諮詢會議，徵求國內專家、學者及業界的建議。研究團隊深入探討兩大主題：電壓及頻率的持續運轉能力和離岸風場的實功控制能力。

在電壓持續運轉能力方面，團隊提出兩項建議。首先，明確規定電壓運轉區域，不只依賴電壓持續運轉曲線的推斷。其次，對於高/低電壓開始時間的判定，應考慮電壓在緊急電壓持續運轉範圍內外往返的情境。另外，我國法規目前無法處理連續電壓偏差的情況，建議參考美國IEEE Std 2800的定義，透過時間窗累積計算各電壓範圍的持續運轉時間。

針對離岸風場的實功控制能力，研究主要討論升載變化率。我國法規未明確規定計算方法、時間窗及使用情境，建議在法規中明確規定不同的計算方法及時間窗，確保合規判定的一致性。另外，目前我國法規適用於正常運行時的升載變化率，而美國、愛爾蘭及中國規範正常運行時的升降載率時是根據系統特性即時調度。

關鍵詞：再生能源併聯技術要點，持續運轉能力定義，升降載率定義，高/低電壓持續運轉能力

1. 前 言

隨著再生能源持續發展，不斷涌現出新技術和需求，再生能源併聯技術要點也需要滾動式調整，以適應日益變化的電力系統需求。這種滾動式調整是指不斷地對現有的併聯技術要點進行修訂和更新，使其保持與系統需求的匹

配。

本研究分析《台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點》(以下簡稱《再生能源併聯技術要點》)於民國112年8月2日之修正版本，以輸電等級的再生能源規定為討論重點，尤其是陸域及離岸風場，探討的項目包括第5點第1項第6款，第7點第4項，第7點第5項

¹ 國立臺灣大學電機工程學系 學生

² 義守大學電機工程學系 教授

³ 國立臺灣大學電機工程學系 教授

⁴ 工業技術研究院綠能所 副研究員

*通訊作者，電話：02-3366-3700#228，電郵：f08921037@ntu.edu.tw

收到日期: 2023年08月21日

修正日期: 2023年09月11日

接受日期: 2023年10月05日

第2款，第7點第8項第1、2及4款。能力要求包括高/低頻電驛設定範圍、高/低電壓持續運轉能力(High/Low Voltage Ride-Through capability, HVRT/LVRT capability)、電壓持續運轉範圍、低頻率持續運轉能力(Low Frequency Ride-Through capability, LFRT capability)、離岸風場解聯後的升載時機及離岸風場實功控制能力。

本研究團隊的研究方法是透過分析歐美先進國家的相關法規，其中包括美國區域性法規IEEE Std 2800 (IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems)、歐盟區域性法規(European Network Code Requirement for Generators, ENC RfG)、愛爾蘭法規(Eirgrid Grid Code)及英國電力調度中心法規(National Grid Electricity System Operator The Grid Code, NGESO)等。同時，團隊召開了諮詢會議，蒐集了國內專家、學者及業界的相關建議。

本研究中，團隊針對電壓及頻率的持續運轉能力和離岸風場的實功控制能力兩大主題進行了深入討論及分析。

2. 持續運轉能力

本章節討論《再生能源併聯技術要點》中的部分條款，包括第5點第1項第6款、第7點第4項、第7點第5項第2款以及第7點第8款第1目。在能力要求方面，涵蓋了頻率電驛設定範圍、高/低電壓持續運轉能力、電壓持續運轉範圍及低頻率持續運轉能力等領域。同時，本研究也對《台灣電力股份有限公司電力調度要點》(以下簡稱《電力調度要點》)進行研究，針對民國110年2月23日修正版本中的第八十九條內容。

2.1. 研析我國規定及主要發現

我國《再生能源併聯技術要點》規定之持續運轉能力(Ride-through capability)包括電壓及頻率兩方面，然而這些規定卻使用了不同的用詞，如電壓持續運轉能力及頻率穿越能力。為避免混淆，本團隊建議應統一用詞，為方便說明，接下來文章將以「持續運轉能力」一詞描述。

在電壓持續運轉能力方面，規定對象是併接在特高壓系統以上的風力發電設備，團隊歸納出三個重點，分別是電壓持續運轉範圍、高/低電壓開始時間及持續運轉曲線。

首先，團隊發現我國法規未明確定義電壓持續運轉範圍，根據圖1及圖2規定之低電壓持續運轉能力及高電壓持續運轉能力，可以推測正常(Normal)電壓持續運轉範圍為0.95~1.05 p.u.，而緊急(Emergency)電壓持續運轉範圍為0.9~1.1 p.u.，因此，在第7點第5項第2款規定併接於69 kV以上發電機之電壓持續運轉範圍，實際是指緊急電壓持續運轉範圍。另外，我國法規先規定了異常狀況時的高/低電壓持續運轉能力(第7點第4項)，再規定了電壓持續運轉範圍(第7點第4項)。然而，本研究發現歐美先進國家則是先規定了正常運轉範圍，再進一步規定異常情況下的相關要求。這樣的規定順序有其合理性，因此本研究認為我國法規之規定順序值得重新評估。

上述之電壓範圍適用於發電機組的電壓運轉範圍。根據《電力調度要點》，調度中心(System Operator, SO)需要在不同情境下維持電壓在特定範圍內，包括正常及緊急(事故)情況。在正常情況下，系統電壓應保持在0.95~1.03 p.u.之間，而在緊急情況下，系統電壓應保持在0.9~1.05 p.u.之間。特別是在高電壓部分，本研究觀察到《電力調度要點》對於系統電壓範圍的要求比《再生能源併聯技術要點》對於再生能源發電設備的電壓運轉範圍更

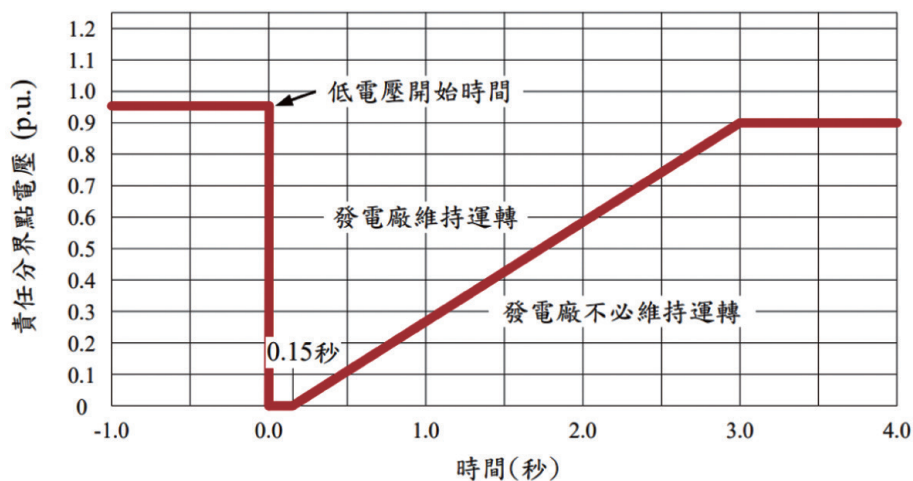


圖1 我國法規低電壓持續運轉能力

資料來源：台灣電力公司，2021。

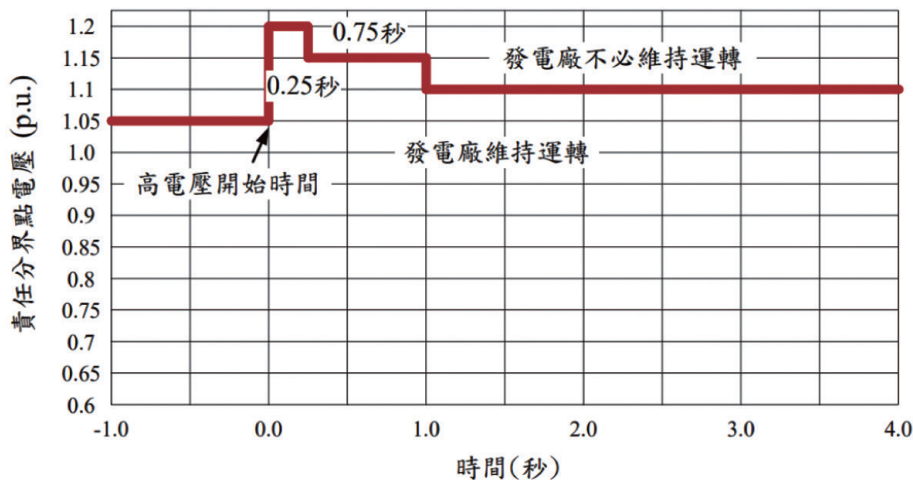


圖2 我國法規高電壓持續運轉能力

資料來源：台灣電力公司，2021。

加窄。同ANSI C84.1 (Electric Power Systems And Equipment - Voltage Ratings (60 Hz))，服務電壓(Service voltage)的要求比使用電壓(Utilization voltage)窄，允許設施內部存在電壓偏差。

接著，我國法規對於高/低電壓持續運轉能力開始時間的判定並未明確規定，當電壓在第7點第5項第2款規定之範圍內外往返，應納入考量並明確說明開始時間如何判定。

最後，就持續運轉曲線而言，當量測的電壓低於低電壓持續運轉曲線，發電廠不必持續運轉，業者可以選擇解聯或持續運轉；若高

於低電壓持續運轉曲線，發電廠則必須持續運轉。高電壓持續運轉能力曲線的說明則與低電壓持續運轉能力類似。

在頻率持續運轉能力方面，我國僅對離岸風場的低頻率持續運轉能力進行了規定，未規範高頻持續運轉能力。根據圖3所示，本研究可以推斷出低頻率持續運轉範圍為57.0 Hz。然而，對於高頻率持續運轉範圍，我國法規未有明確規定，根據規定，高頻跳脫設定值是由業者與輸配電業者協調決定。值得一提的是，國際上普遍有規定高頻率持續運轉範圍，如美國(IEEE, 2022)、歐盟(European Commis-sion/

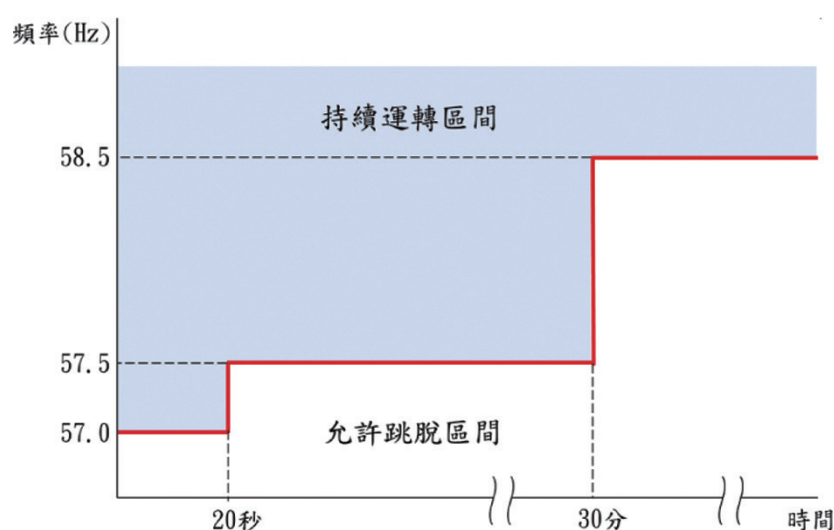


圖3 我國法規高電壓持續運轉能力

資料來源：台灣電力公司，2021。

ENTSO-E, 2016)、愛爾蘭(Eirgrid, 2022)及英國(NGESO, 2023)。雖然我國法規目前未明確規定此規範，不過仍能透過第5點第1項第6款獲得一些相關資訊，根據規定，高頻電驛之高頻跳脫設定值不得低於61 Hz。根據諮詢會議台電方針對這一條款的解釋，使本研究了解到各案場設置不同高頻跳脫值，主要是為了避免大量風場同時解聯，造成大量電源缺口的情况。

2.2. 電壓持續運轉能力定義

根據IEEE Std 2800，電壓持續運轉能力被分為三類：

電壓對時間曲線：對於給定的電壓，只有在該電壓的持續時間超過指定的最小持續運轉時間時，機組才可跳脫。

電壓偏差乘以持續時間的面積：代表額定電壓與低壓穿越邊界或高壓穿越邊界之間的面積。

電壓對時間限制區域：電壓穿越邊界定義了一個穿越區域，可以作為一個限制區域覆蓋在電壓對時間軌跡上(在事件期間進行模擬或記錄)，以確定電壓軌跡是否保持在穿越區域內或在穿越區域之外。

各國採用之電壓持續運轉能力定義如表1，我國法規採用的是方法三：電壓對時間限制區域。

表1 各國採用電壓持續運轉能力的定義

編號	定義	採用國家/法規
一	電壓對時間曲線	IEEE Std 2800
二	電壓偏差乘以持續時間的面積	—
三	電壓對時間限制區域	台灣電力公司，2023 WECC, 2007 ENTSO-E, 2016 NGESO, 2023 Eirgrid, 2022

資料來源：本研究參考彙整。

方法一和方法三之間的差異在於電壓在不同範圍內來回波動時，開始時間是否會被重置。方法一的優勢在於它可以透過時間窗來規定連續電壓偏差的持續運轉能力(Consecutive voltage deviation ride-through capability)。而方法三無法處理連續電壓偏差的情況。對於連續電壓偏差的持續運轉能力，在章節2.4中有更詳細的討論。

2.3. 電壓運轉範圍

本研究發現我國法規中對於電壓持續運轉能力的定義與美國電力協調委員會(Western Electricity Coordinating Council, WECC)針對風力發電的電壓持續運轉能力制定原則相似。如圖4所示，電壓持續運轉能力總共有五個邊界，包括正常電壓、緊急電壓、故障清除(Fault clearing boundary)、電壓恢復時間(Voltage recovery boundary)及高電壓(High voltage boundary)邊界。

WECC通過調查其管轄電網內具有代表性的電驛運作樣本紀錄，收集了歷史上在Zone 1及Zone 2區域的平均故障清除時間。根據這些數據，WECC制定了故障清除邊界和電壓恢復時間邊界，以確保風力機組在故障清除後能持續運轉，同時避免與系統現有保護協調電驛設定產生衝突。另外，由於故障清除後可能出現

高電壓情況，WECC通過模擬方式產生高電壓波形，並根據模擬結果制定了高電壓邊界，以確保風力機組能在故障清除後繼續運轉，不受高電壓影響。

本研究亦探討了歐盟(European Commission/ENTSO-E, 2016)對於D型可控電力園區模組(Power Park Module, PPM)所要求的電壓持續運轉能力(Fault ride-through capability)，並列於圖5，相關的參數設定範圍如表2。圖5顯示了電壓隨時間變化的下限，當量測電壓高於此曲線時，機組應維持併網並穩定運轉。值得注意的是，該曲線的起始電壓為1 p.u，這與我國法規有明顯的差異。另外，英國(NGESO)和愛爾蘭(Eirgrid)在電壓持續運轉能力方面也將起始電壓設定為1 p.u。註：歐盟對於PPM相關規定，依據容量區分ABCD四個等級，其中A型規定最寬鬆，容量最小，D型規定最嚴格，容量最大。由於本研究以輸電等級再生能源併聯技術要點

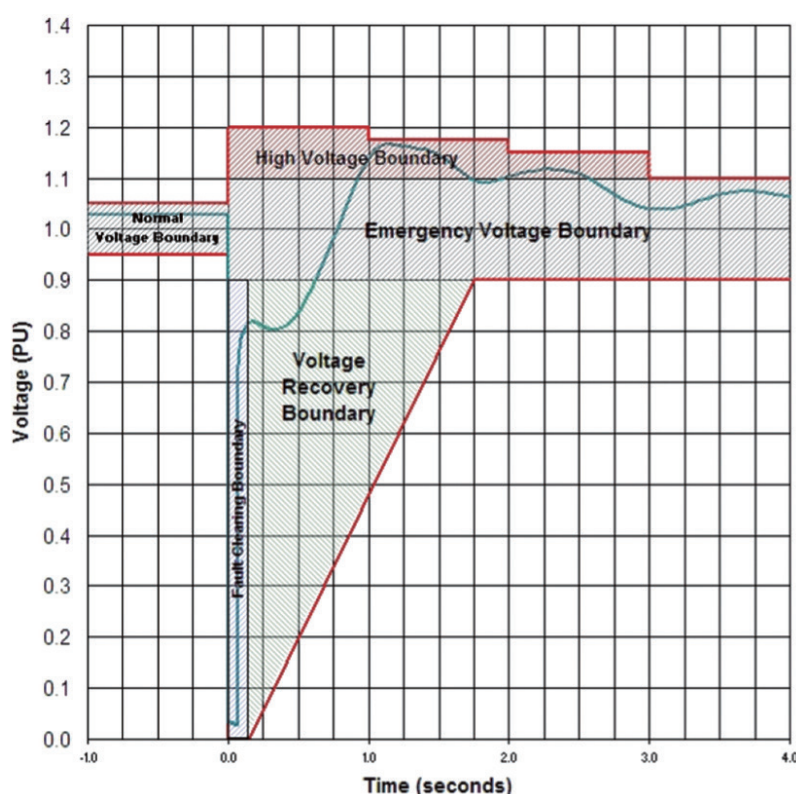


圖4 WECC電壓持續運轉能力

資料來源：WECC, 2007.

表2 歐盟D型PPM電壓持續運轉能力參數

電壓參數(p.u.)		時間參數(seconds)	
U_{ret} (Retained voltage)	0	t_{clear}	0.14-0.15
U_{clear}	U_{rec1}	t_{rec1}	t_{clear}
U_{rec1}	U_{clear}	t_{rec2}	t_{rec1}
U_{rec2}	0.85	t_{rec3}	1.5-3.0

資料來源：European Commission/ENTSO-E, 2016.

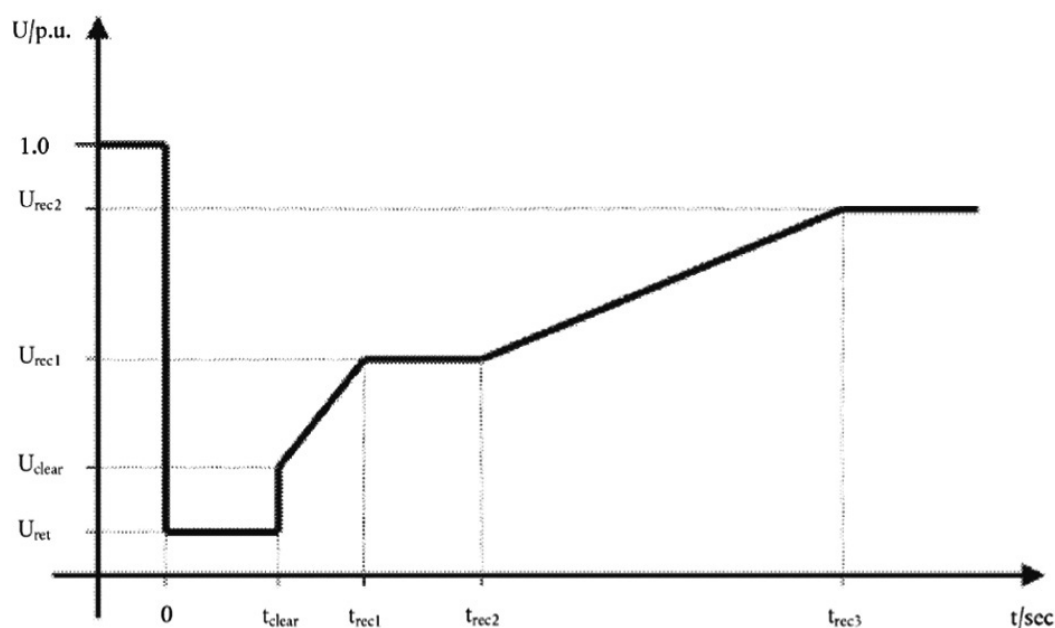


圖5 歐盟電壓持續運轉能力

資料來源：ENTSO-E, 2016.

為題，故考慮D型PPM之規定。

最後討論採用方法一的IEEE Std 2800，其規定的電壓持續運轉能力包含四種操作模式，分別為可持續運轉或可跳脫(May ride-through or may trip)、強制操作(Mandatory operation)、持續運轉(Continuous operation)及許可運轉(Permissive operation)，而在強制操作模式中，還進一步細分了數個不同的電壓範圍。

在部分電壓範圍中，規定了兩個不同的最低持續運轉時間。左側最低持續運轉時間的設定主要針對有輔助設備影響其電壓持續運轉能力的案場。這些輔助設備通常是用於驅動幫浦或風扇等設備，而離岸風場更容易受到輔助

設備的影響，對於這些案場，電壓持續運轉能力的要求較為寬鬆，即其最低持續運轉時間較短。IEEE Std 2800規定之電壓持續運轉能力如表3及圖6。

接著，探討IEEE Std 2800所規定的時間窗，該時間窗包括電壓持續運轉能力和頻率持續運轉能力，列於表4。根據標準規定，電壓持續運轉能力之時間窗為10秒，而頻率持續運轉能力之時間窗為600秒。在電壓持續運轉模式(1.05~1.1 p.u.)下，因為最低持續運轉時間被設定為1,800秒，所以在此區間內的電壓情況，時間窗被延長至3,600秒。在規定的時間窗內，只要任一電壓或頻率範圍的累積時間超過最低持

表3 IEEE Std 2800規定之電壓持續運轉能力

操作模式	電壓(p.u.)	最低持續運轉時間(s)
可持續運轉或可跳脫	>1.2	NA
強制操作	>1.1	1.0
持續運轉	1.05~1.1	1,800
持續運轉	0.9~1.05	無限
強制操作	<0.90	3.00/6.00
	<0.70	2.50/3.00
	<0.50	1.20
	<0.25	0.16/0.32
許可操作	<0.1	0.16/0.32

資料來源：IEEE, 2022.

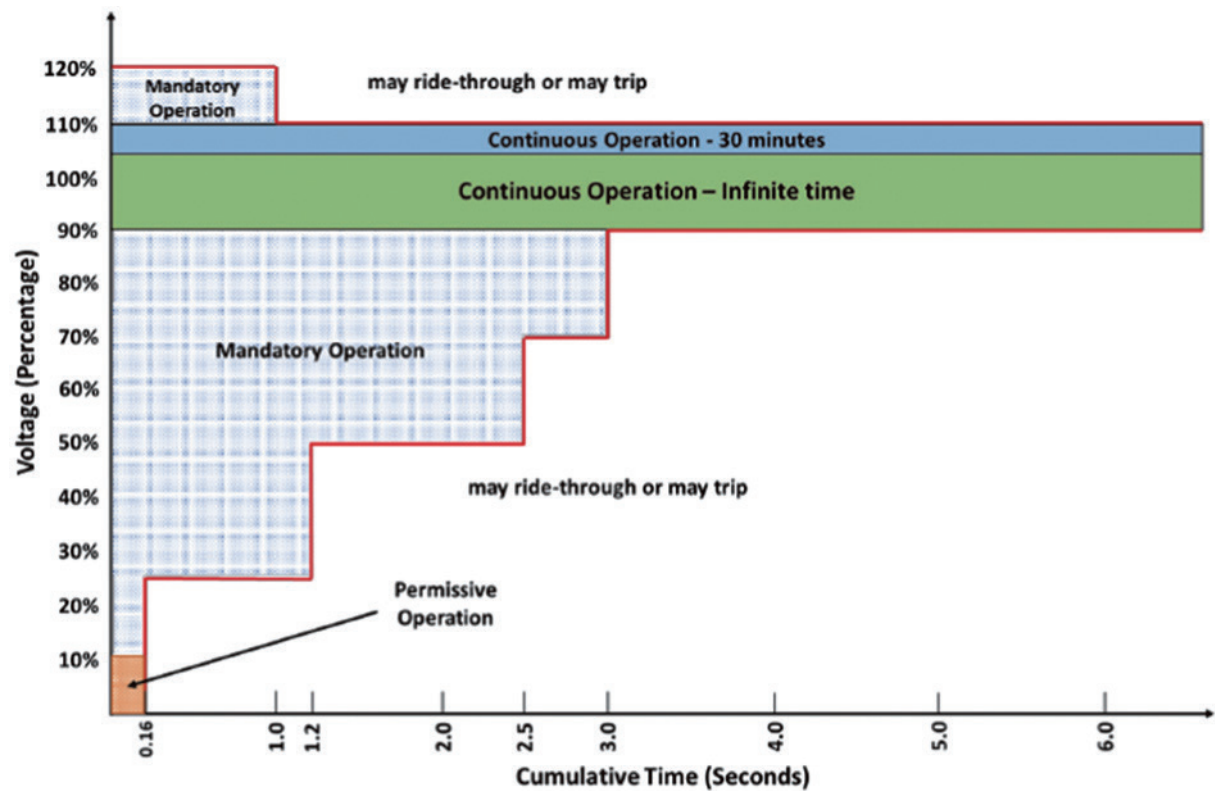


圖6 IEEE Std 2800電壓持續運轉能力

資料來源：IEEE, 2022.

表4 IEEE Std 2800持續運轉能力時間窗

項目	範圍	時間窗(s)
電壓持續運轉能力	$1.05 < V \leq 1.10$ p.u.	3,600
	其他電壓範圍	10
頻率持續運轉能力	—	600

資料來源：IEEE, 2022.

續運轉時間，該再生能源案場可以選擇跳脫。

2.4. 連續電壓偏差持續運轉能力

連續電壓偏差意即在電力事故，電壓可能在不同範圍往返波動，行進到另一個範圍再返回。

根據IEEE Std 2800，電壓持續運轉能力的目的是讓基於換流器的資源(Inverter Based Resources, IBR)電廠能夠在短路故障相關的合理斷開和復閉序列中持續運轉。其他包括在嚴重風暴中的單獨故障，或週期性地在連續操作區域

內和外振盪。IBR電廠不應被期待能夠在IBR電廠併網的聯結線路斷開和復閉時持續運轉。在這些情況下，團隊認為應當讓案場可以自行選擇是否持續運轉或者跳脫。

以下以兩個案例進行說明，這兩個情況電壓在連續運轉模式($0.9 \text{ p.u.} < \text{電壓} < 1.1 \text{ p.u.}$)及強制運轉模式(電壓 $< 0.7 \text{ p.u.}$)來回波動，於強制運轉模式(電壓 $< 0.7 \text{ p.u.}$)的情況下，最低持續運轉時間為2.5秒。圖7展示了案例一，其中在時間窗10秒內累積時間共2秒，低於2.5秒的要求，故機組不可跳脫並必須持續運轉。圖8展示了案

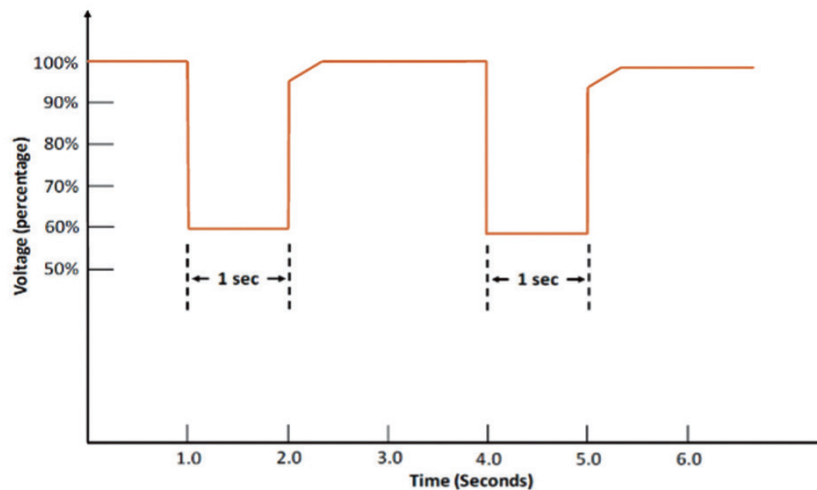


圖7 連續電壓偏差事件-案例一

資料來源：IEEE, 2022.

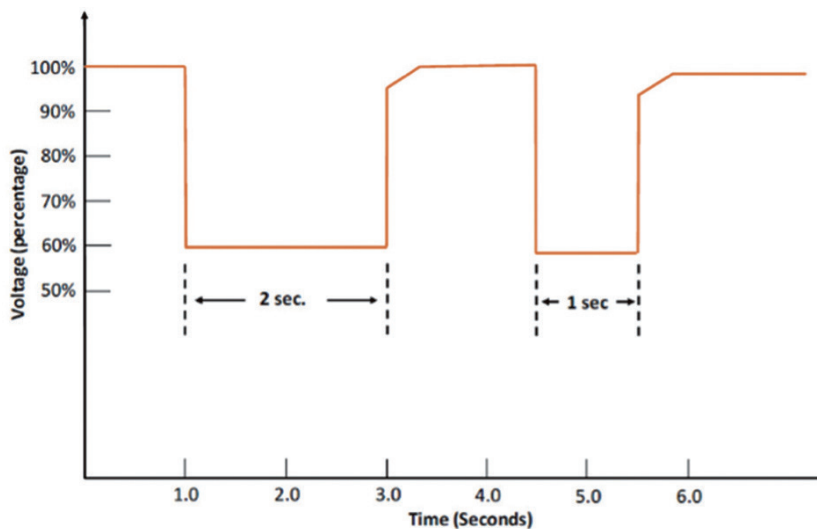


圖8 連續電壓偏差事件-案例二

資料來源：IEEE, 2022.

例二，其中時間窗10秒內累積時間共3秒，高於最低持續運轉2.5秒的要求，故機組可以選擇跳脫。

3. 實功控制能力

本章節討論《再生能源併聯技術要點》中的部分條款，包括第7點第8項第2及4款。這些要點包括對於離岸風場解聯後的升載規定和實功控制能力的能力要求。

3.1. 研析我國規定及主要發現

針對離岸風場解聯後的升載規定，並未說明解聯離岸風場併網時機。

對於我國規定離岸風場實功升載變動率不超過10%裝置容量/分鐘，團隊進行了相關研究，並發現了三個主要問題。首先，我國僅規定升載變動率，而未規定降載變動率，這使得離岸風電業者可以通過棄風(Wind curtailment)來實現限制升載變動率的要求。若規定降載變動率，離岸風電業者就必須裝設額外的儲能系

統設備。然而，目前國際上尚未出現離岸風電加儲能的配置，也缺乏決定裝設儲能系統容量的計算原則。其次，本研究發現現行法規未明確說明實功升載變動率之計算方法，不同計算方式對相同的量測數據可能產生不同的合規(Compliance)判定結果。因此，法規應明確定義升載變動率計算方式。最後，法規未說明實功升載變動率之規定情境，不過，根據諮詢會議台電方的回覆，該法僅適用於正常運行的情境，而在開機、關機及提供初級頻率響應(Primary Frequency Control, PFC)時，則不須遵守此規定。本研究建議法規在明確規定實功升載變動率的同時，應考慮到相關的情境，以確保規定的合理適用性和可執行性。

在關機時的實功控制能力方面，我國法規規定當風速大於切出風速(Cut-out wind speed)時，不得瞬間停機，如圖9所示。然而，該示意圖未明確定義V1、V2、V4及停機的實功曲線，這使得離岸風場是否合規的判定變得困難，因為無法量化停機實功曲線的要求。根據團隊研究與國際經驗，關機的實功控制能力可

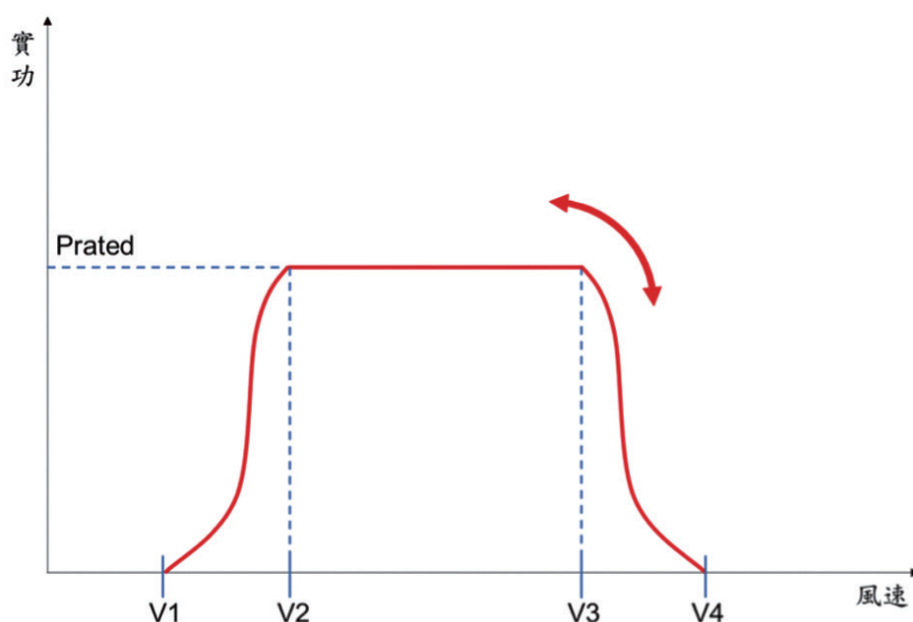


圖9 我國法規規定之風機切出風速

資料來源：台灣電力公司，2021。

以透過限制最大降載率來規定，採用最大降載率作為衡量指標，以確保離岸風場的合規性評估能夠更具量化和可比性。

目前初級頻率響應方面，團隊發現兩個主要問題。首先，法規提及離岸風場不需為提供初級頻率響應而預先降載。在離岸風場不需留有裕度的情況下，法規未說明離岸風場在欠頻事件如何提供初級頻率響應。根據諮詢會議台電方回覆，目前法規僅適用於過頻(Over-frequency)情境，然而圖10所示的初級響應包含了欠頻(Under-frequency)情境。主要原因是台電考慮未來可能需要納入欠頻情境的初級頻率響應要求。其次，初級頻率響應規定當頻率發生變化時，規定離岸風場響應之上升時間(Rise time)應小於10秒。然而，上升時間的限制實際上是變相規定了最小升降載率，升載率限制未規定適用情境的情況下，兩規定可能在特定情況下產生衝突。因此，團隊建議應明確規定實功升載變化率之適用情境，以避免法條間的不一致。

3.2. 實功升降載率定義

升降載率定義有兩大重點，首先是時間窗，根據美國新英格蘭電力調度中心(ISO New England, ISO-NE)規範中，時間窗口分為短期和長期，分別為1分鐘和10分鐘，分別用於評估系統調節能力(System regulation capability)及電網負載追隨能力(Grid load-following capability) (D.W. Gao *et al.*, 2016)。其次是計算方法，常見的計算方式有兩種，分別為：1.在時間窗口內計算始末兩點之實功差；2.在時間窗口內計算最大值與最小值之實功差(D.W. Gao *et al.*, 2016)。

值得一提的是，美國IEEE Std 2800在開機時的實功升載率限制計算方式並不屬於以上兩種方式。該方式規定，開機時的實功應以線性方式增加，且其平均變化速率不得超過“啟動期間”內的實功變化率除以持續時間。而“啟動期間”的持續時間可在設置範圍內進行調整，範圍為1秒至1,000秒，預設時間由輸電系統操作者指定。這樣的計算方式用於確保開機

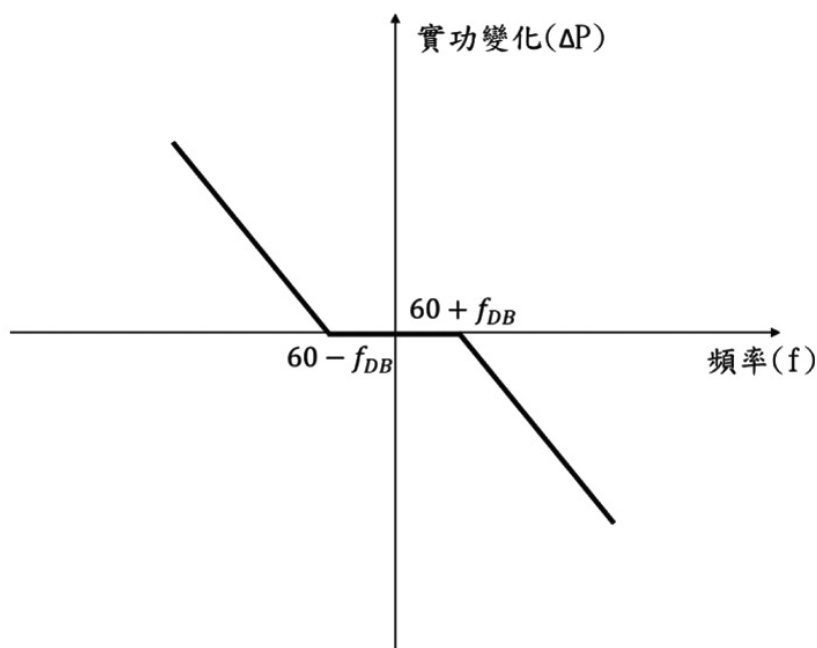


圖10 我國法規規定之初級頻率響應

資料來源：台灣電力公司，2021。

時的實功率增加符合規範，並且允許根據具體情況進行靈活調整。

3.3. 實功升降載率規定情境

對於傳統發電和電池儲能系統，常見的要求是限制最小升降載率，這是為了確保這些機組在調節電力輸出時具有穩定的能力。然而，對於再生能源機組，常見的要求是限制最大升降載率，這是因為初級能源如風及太陽日照具備間歇性(Intermittency)及不確定性(Uncertainty)，再生能源案場的輸出電力會隨著風速或日照強度的變化而波動。

然而，在提供初級頻率響應時，應規定再生能源機組應可以操作在技術可行的最大升降載率，不應受到限制。這是因為初級頻率響應是指在發生頻率變化時，再生能源機組若能夠快速響應，將有益於電力系統頻率穩定度。

根據國際再生能源總署(The International Renewable Energy Agency, IRENA)的報告(IRENA, 2022)指出，實功升降載率(Ramp rate，又稱為power gradient)限制對再生能源機

組通常僅在設定點(Setpoint)變化、關機或啟動時適用。然而，IRENA不建議在正常運行時規定升降載率限制。因為在正常運行期間，再生能源機組的輸出電力通常需要根據風速或日照等環境條件。限制升降載率可能會導致再生能源機組無法充分利用其發電能力，造成不必要的發電損失，或需要額外的儲能容量來應對。

團隊蒐集以下規定升降載率的法規，包括美國IEEE Std 2800、美國(ISO-NE)、愛爾蘭(Eirgrid)、德國(Verband der Netzbetreiber, VDN)、中國(風電場接入電力系統技術規定，GB/T 19963)、波多黎各(Puerto Rico Electric Power Authority, PREPA)、夏威夷(Hawaiian Electric Company, HECO)、丹麥(Energinet.dk)及南非(National Energy Regulator of South Africa, NERSA)，各法規對應之引用文獻列於表5，以下將以規定的情境分別進行討論。

各國規定開機的升降載率列於表6，包括美國(IEEE Std 2800)、愛爾蘭(Eirgrid)、德國(VDN)及中國(GB/T 19963)。各國規定關機則列於表7，包括愛爾蘭(Eirgrid)及中國(GB/T

表5 各國規範升降載率引用列表

國家	法規	引用
美國	IEEE Std 2800	IEEE, 2022
美國	ISO-NE	D.W. Gao <i>et al.</i> , 2016
中國	風電場接入電力系統技術規定，GB/T 19963	
愛爾蘭	Grid Code	Eirgrid, 2022
德國	Network and System Rules of the German Transmission System Operators	VDN, 2007
波多黎各	Minimum technical re-quirements (MTR) for interconnection of wind power and photovoltaic generation	S. Booth <i>et al.</i> , 2013
夏威夷	Model Power Purchase Agreement for Re-newable Energy Projects	
丹麥	Technical regulation 3.2.5 for wind power plants above 11 kW	Energinet.dk, 2016
南非	Grid Connection Code for RPPs Connected to the Electricity TS or the DS	NERSA, 2022

資料來源：本研究參考彙整。

表6 各國規定於開機之升降載率

國家	規範對象	設定值
IEEE Std 2800	IBR	線性方式增加 由TSO決定
愛爾蘭	PPM	1~100%/min 由TSO決定
德國	再生能源	10%/min
中國	風機	設定範圍列於GB/T 19963 由TSO決定

資料來源：本研究參考彙整。

表7 各國規定於關機之升降載率

國家	規範對象	設定值
愛爾蘭	PPM	1~100%/min 由TSO決定
中國	風機	設定範圍列於GB/T 19963 由TSO決定

資料來源：本研究參考彙整。

19963)。

各國規定設定點變化列於表8，包括美國(IEEE Std 2800)、愛爾蘭(Eirgrid)及南非(NERSA)，以上國家皆規範設定點變化之升降載率上限。值得一提的是，在德國(VDN)，則是規範再生能源在設定點變化時的降載率下限，機組應具備至少10%/min的降載率，此為實功響應能力的限制。

規定正常運行升降載率的國家或地區

表8 各國規定於設定點變化之升降載率

國家	規範對象	設定值
IEEE Std 2800	風場	限制開機期間 10%/sec
愛爾蘭	PPM	1~100%/min 由TSO決定
南非	再生能源	由TSO決定

資料來源：本研究參考彙整。

表9 規定於正常運行之升降載率

國家	規範對象	設定值
臺灣	離岸風場	10%/min
ISO-NE	風場	升載率限制 由TSO決定(調度)
波多黎各	再生能源	10%/min
夏威夷	風場	2 MW/min
丹麥	風場 (>0.1 MW)	0.1 MW/s
愛爾蘭	PPM	1~100%/min 由TSO決定
中國	風機	設定範圍列於GB/T 19963 由TSO決定(調度)
南非	再生能源	由TSO決定

資料來源：本研究參考彙整。

列於表9，包括美國(ISO-NE)、波多黎各(PREPA)、夏威夷(HECO)、丹麥(Energinet.dk)、愛爾蘭(Eirgrid)、中國(GB/T 19963)、及南非(NERSA)。其中，夏威夷針對裝置容量低於50 MW風場，在12:00–4:00 a.m.及4:00–8:00 p.m.時，升降載率規定為1 MW/min。值得一提的是美國、愛爾蘭及中國的升降載率未規範一定值，而是運行時依照系統特性即時調度。

最後，愛爾蘭(Eirgrid, 2022)在規範這些情境時將其分別以三個名詞進行定義，並且規定了它們之間的優先順序。這三個名詞分別是頻率響應升降載率(Frequency Response Ramp Rate)、實功控制設定點升降載率(Active Power Control Set-Point Ramp Rate)和資源追隨升降載率(Resource Following Ramp Rate)。首先，頻率響應升降載率規定了當需要提供初級頻率響應時的升降載率。其次，實功控制設定點升降載率規定了在設定點變化時的升降載率。最後，資源追隨升降載率則規定了在開機、關機及正常運行時的升降載率。這三個升降載率之間有一個優先順序，即頻率響應升降載率的優先順

序最高，其次是實功控制設定點升降載率，最後是資源追隨升降載率。

4. 結論與建議

在研究中，團隊對兩大主題進行了深入討論，這兩大主題分別是持續運轉能力和實功控制能力，以下將分別說明重要研究成果。

4.1. 持續運轉能力

針對電壓持續運轉能力部分，本研究以下兩大建議，分別與電壓運轉區域及連續電壓偏差情境相關。

首先，我國法規未明確定義電壓持續運轉範圍，而是需要透過電壓持續運轉曲線推斷，本研究可以參考WECC針對風力發電的電壓持續運轉能力的制定原則，明確說明五個電壓邊界。另外，我國未明確說明高/低電壓開始時間的判定，應將電壓從緊急電壓持續運轉範圍內外往返的情境納入考量。

其次，目前我國法規無法處理連續電壓偏差的情境，這是因為我國採用的定義是電壓對時間限制區域，未來若要訂定相關法規處理電壓偏差，可以參考美國IEEE Std 2800使用的定義：電壓對時間曲線，透過時間窗，累積計算各電壓範圍的持續運轉時間。

在頻率持續運轉能力部分，我國未明確規範高頻率持續運轉範圍，而是由與輸配電調度中心協調決定，因此各風場可能有不同的頻率持續運轉範圍，這與國際狀況不同。

4.2. 實功控制能力

針對離岸風場的實功控制能力，本研究分別討論升載變化率、高風速下運轉控制及初級

頻率響應。

針對實功控制能力的升載變化率限制，我國法規未明確說明計算方法、時間窗及使用情境。不同的計算方法及時間窗對於合規判定可能不一樣，因此在法規中明文規定非常重要。另外，我國法規實際上是規範正常運行時升載變化率，而升載變化率可以透過棄風來達成。除了我國規範離岸風場應遵守升載變化率限制，目前有規範正常運行的升降載率的國家包括美國ISO-NE、波多黎各(PREPA)、夏威夷(HECO)、丹麥(Energinet.dk)、愛爾蘭(Eirgrid)、中國(GB/T 19963)、及南非(NERSA)。其中，美國、愛爾蘭及中國的升降載率未規範一定值，而是運行時依照系統特性即時調度。不過，法規限制正常運行時的升降載率並非常態，像是建置大量離岸風電的英國就沒有限制(NGESO, 2023)。

高風速下運轉控制的方面，我國法規要求不得瞬間停機，然而停機的實功曲線未量化，故無明確判定合規的標準。本研究認為應明確說明量化指標，像是愛爾蘭(Eirgrid)及中國(GB/T 19963)是利用限制最大降載率來限制關機的實功響應。

最後，初級頻率響應部分，雖然示意圖呈現離岸風場需在過頻及欠頻時提供響應，然而，我國法規目前僅要求離岸風場在過頻情境提供初級頻率響應，示意圖之呈現主要是考量未來可能納入欠頻情境。另外，響應的上升時間限制，限制了實功最小升降載率，可能與最大實功升載變化率衝突。

4.3. 建議修正項目彙整

表10彙整以上之建議以及對應之《再生能源併聯技術要點》條文。

表10 併聯技術要點建議修正項目

法條	我國現行法規及問題	團隊建議
第7點第4項 及 第5項第2款	未明確定義再生能源發電設備正常及緊急電壓持續運轉範圍，而是需要透過電壓持續運轉曲線推斷。	明確定義電壓持續運轉範圍。
	先規定了異常情況的電壓持續運轉能力要求，才規範電壓緊急運轉範圍。	本研究發現歐美先進國家是先規定了正常運轉範圍，再進一步規定異常情況下的相關要求。本研究認為我國法規之規定順序值得重新評估。
第7點第4項	未明確說明高/低電壓開始時間的判定，並無法處理電壓從緊急電壓持續運轉範圍內外往返的情境。	明確說明高/低電壓開始時間的判定，並將電壓從緊急電壓持續運轉範圍內外往返的情境納入考量。
	無法處理連續電壓偏差的情境，由於我國採用的電壓持續運轉能力定義是電壓對時間限制區域	可參採IEEE Std. 2800採用定義：電壓對時間曲線。
第7點第8項 第1款	未規範高頻持續運轉能力，且未明確規範高頻率持續運轉範圍，而是由與輸配電調度中心協調決定高頻電驛設定值，因此各風場可能有不同的頻率持續運轉範圍。	國際上普遍使用固定的高頻運轉範圍，團隊認為應重新評估。
第7點第8項 第2款	未說明解聯離岸風場併網時機。	說明解聯離岸風場併網時機。
第7點第8項 第4款第1目 及第3目	未明確說明升載變化率計算方法、時間窗及使用情境。初級頻率響應的上升時間限制，限制了實功最小升降載率，可能與最大實功升載變化率衝突。	本研究建議法規在明確規定實功升載變動率的同時，應考慮到相關的情境，以確保規定的合理適用性和可執行性。將實功升載率的計算方法及時間窗明訂於法規。
第7點第8項 第4款第2目	高風速下運轉控制的規範，我國法規要求不得瞬間停機，然而未明確定義V1、V2及V4，且實功曲線未量化，故無明確判定合規的標準。	明確定義高風速下運轉控制的規範中的V1、V2及V4。 說明實功曲線量化指標，可參考愛爾蘭(Eirgrid)及中國(GB/T 19963)是使用限制最大降載率來限制關機的實功響應。

誌 謝

本研究承蒙經濟部能源署民國112年度「再生能源發展政策研究與整合推廣計畫」支持，謹致謝忱。

參考文獻

台灣電力股份有限公司，2021。台灣電力股份有限公司電力調度要點。

台灣電力股份有限公司，2023。台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點。

D.W. Gao, E. Muljadi, T. Tian, M. Miller, and W. Wang, 2016. Comparison of Standards and Technical Requirements of Grid-Connected Wind Power Plants in China and the United States, NREL.

Energinet.dk, 2016. Technical regulation 3.2.5 for wind power plants above 11 kW.

- European Commission/ENTSO-E, 2016 EU Network Codes for electricity, Brussels.
- EirGrid, 2022. Eirgrid Grid Code, Version 11.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2022. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources (IBRs) Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems, IEEE Standard 2800-2022.
- National Energy Regulator of South Africa (NERSA), 2022. Grid Connection Code for Renewable Power Plants (RPPs) Connected to the Electricity Transmission System (TS) or the Distribution System (DS), Version 3.1, South Africa.
- National Grid Electricity System Operator (NGESO), 2023. The Grid Code, Version 16.
- S. Booth and V. Gevorgian, 2013. Review of PREPA Technical Requirements for Interconnecting Wind and Solar Generation, NREL: Golden, CO, USA.
- The International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022, Grid Codes for Renewable Powered Systems.
- Verband De Netzbetreiber (VDN), 2007. Network and System Rules of the German Transmission System Operators.
- Western Electricity Coordinating Council (WECC), 2007. The Technical Basis for the Now WECC VRT Standard.

Research on the Grid Interconnection Code of Renewable Energy Resources in Taiwan

Meng-Yun Lee^{1*} Wen-Chen Chiu¹ Sin-Ruei Wu¹ Chia-Cheng Chang¹
Jun-Zhe Yang² Chih-Wen Liu³ Wen-Te Chang⁴

ABSTRACT

The research focuses on analyzing the revised version of the "Technical Guidelines for Grid Connection of Renewable Energy Generation Systems" by Taiwan Power Company, dated November 23, 110 (2021). The main emphasis is on the transmission-level requirements for renewable energy, particularly addressing high/low voltage ride-through capabilities, voltage operation regions, and offshore wind farm active power control capabilities.

To provide comprehensive research results, the team references relevant regulations from advanced countries in Europe and America. Additionally, the team held consultation meetings to gather input from domestic experts, scholars, and industry professionals. The research delves into two main themes: continuous voltage and frequency operation capabilities, and active power control capabilities for offshore wind farms.

Regarding voltage ride-through capabilities, the team presents two recommendations. Firstly, it is suggested to clearly define voltage operation regions, rather than relying solely on inferred voltage ride-through curves. Secondly, for determining high/low voltage start times, voltage fluctuations within the emergency voltage ride-through range should be considered. Furthermore, the current regulations in our country do not address consecutive voltage deviations, and it is advised to adopt the definition used in the US IEEE Std 2800, which calculates the continuous operation time within specific voltage ranges using time windows.

Regarding the active power control capabilities for offshore wind farms, the research primarily discusses ramp rates. The existing regulations in our country lack specific guidelines for calculation methods, time windows, and usage scenarios. It is recommended to establish clear regulations in this regard to ensure consistency in compliance assessments. Additionally, the current regulations in our country apply only to ramp rates during normal operation, while countries such as the US, Ireland, and China regulate load ramp rates based on real-time system characteristics.

Keywords: renewable interconnection code, definition of ride-through capability, definition of ramp rate, high/low voltage ride through capability.

¹ Student, National Taiwan University.

² Professor, I-SHOU University.

³ Professor, National Taiwan University.

⁴ Associate researcher, Industrial Technology Research Institute.

*Corresponding Author, Phone: +886-2-3366-3700#228, E-mail: f08921037@ntu.edu.tw

Received Date: August 21, 2023

Revised Date: September 09, 2023

Accepted Date: October 05, 2023