

國內再生能源併聯技術要點與國際再生能源併網規範之比較與辨析

蔡靖彥¹ 葉天羽¹ 黃世杰^{2*} 楊柏煒¹ 謝翔宇¹ 黃珮貞³

摘要

本文旨在檢視國內再生能源併網規範，並與國際再生能源發電系統併聯技術要點相互分析比較，以謹慎定位國內法規可增進之處，不僅有助於因應未來能源轉型之需，同時可為再生能源發電系統併聯法規的持續改進，提供實質性建議。

本文針對再生能源併網規範與標準進行全面分析，蒐集之併網國家涵蓋臺灣、日本、英國、美國及愛爾蘭，並且針對各國標準進行法規差異比較與優缺點解析，同時根據各國併網電壓等級範圍，研析大量再生能源併網時之再生能源發電機組所須具備的能力規範，研究內容包括高/低壓和高/低頻持續運轉能力、實虛功控制能力、功率因數控制能力及諧波管制標準，並分別於本文加以闡述。

本文透過研析國際標準及法規，有效篩選定位國內併網法規增修改進關鍵，研究成果不僅可協助檢視國內再生能源併網要點架構完備性，同時可作為國內併網要點及規範修訂時之增刪依據，以俾國內再生能源併網時之系統韌性強化參考。

關鍵詞：高/低壓持續運轉能力，高/低頻持續運轉能力，實虛功控制能力，功率因數控制能力，諧波管制

1. 前言

隨著再生能源併網量之增加，制定再生能源併網及安全運轉規範，已成為重要議題。本研究致力於蒐集與研讀先進國家併網規範，同時進行各國併聯運轉規範之比較與辨析，以及統整各國規範俾供未來國內再生能源併聯技術要點修訂參考。本文主要針對台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點、

日本電氣協會系統連系規程、英國電網規範(The Grid Code)、美國配電系統併網標準(IEEE Std. 1547)、美國輸電系統併網標準(IEEE Std. 2800)、愛爾蘭電網規範(EirGrid Grid Code)進行參照對比，分析再生能源併網規範中的技術差異。需要特別注意的是，依據本文瞭解，Code常指法律上強制執行的規範，例如英國和愛爾蘭的電網規範，而Standard則是由標準化機構制定的技術規範，通常是自願遵守的，但在某

¹國立成功大學電機工程學系 學生

²國立成功大學電機工程學系 教授

³工業技術研究院綠能所 資深管理師

*通訊作者，電話：06-2757575#32506，電郵：clhuang@mail.ncku.edu.tw

收到日期: 2024年07月08日

修正日期: 2024年08月21日

接受日期: 2024年09月02日

些情況下也可能由法律強制實施，如美國的輸電及配電之併網標準。另一方面，在高/低壓持續運轉、高/低頻持續運轉、實虛功控制、功率因數控制及諧波管制標準之規定，由於再生能源規範的訂定將直接影響再生能源發電系統於不同條件下的運轉穩定性和可靠度，因此本文透過系統性比較分析，以顯示各國法規之不同控制模式下的差異。本文首先研析國內再生能源發電系統併聯技術要點，並且針對併網要求及運轉規範進行深入探討，其中包括併網容量、持續運轉能力、功率因數以及諧波管制等，俾於周密研析既有技術要點可增修改進之處；本文接著闡述先進國家再生能源併聯規範，以充分瞭解各國發電設備併聯運轉規範或因應策略，並且針對台灣電網提出可行改善方案建議，俾於因應大幅增加再生能源對於臺灣電網可能造成衝擊時之提前準備。

2. 我國再生能源併網規範

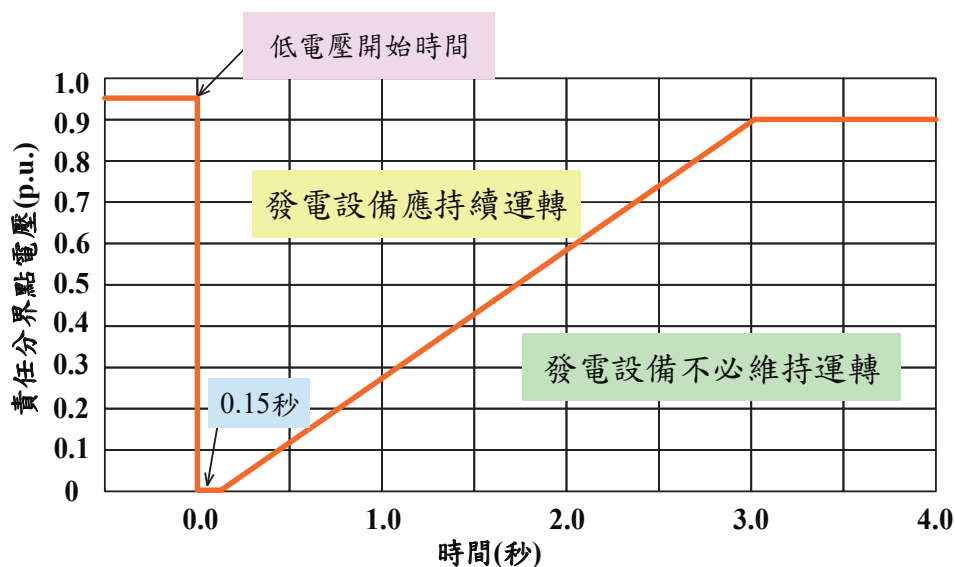
台灣電力公司為確保電網併聯運轉品質，針對再生能源設備制定再生能源發電系統併聯

技術要點，要求運轉時必須依照規範限制進行。臺灣併網電壓範圍分為低壓系統(交流600伏特以下)、高壓系統(交流600伏特以上至交流25,000伏特以下)及特高壓系統(交流25,000伏特以上)。本章節參考台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點，深入瞭解國內併聯網技術要點法規，其中涵括再生能源發電系統及儲能系統(Battery Energy Storage Systems, BESS)，同時針對可精進之處提供可行建議。

2.1 高/低壓持續運轉能力

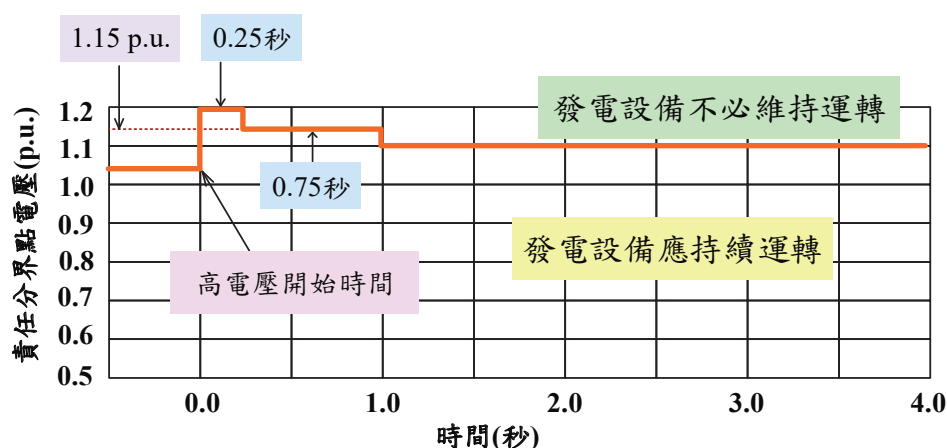
根據台灣電力公司再生能源發電系統併聯技術要點，再生能源發電設備併聯於特高壓系統運轉時，需要具備低電壓持續運轉能力(Low Voltage Ride Through, LVRT)和高電壓持續運轉能力(High Voltage Ride Through, HVRT)，如圖1和圖2所示。

當併網發生故障導致責任分界點電壓驟升且高於圖1之實線時，再生能源發電設備應能持續運轉；而若電壓驟降至0 p.u.時，則再生能源發電設備應能持續運轉至少0.15秒。相對的，當責任分界點電壓低於圖2之實線時，則再生能



資料來源：台灣電力公司，2021。

圖1 低電壓持續運轉能力



資料來源：台灣電力公司，2021。

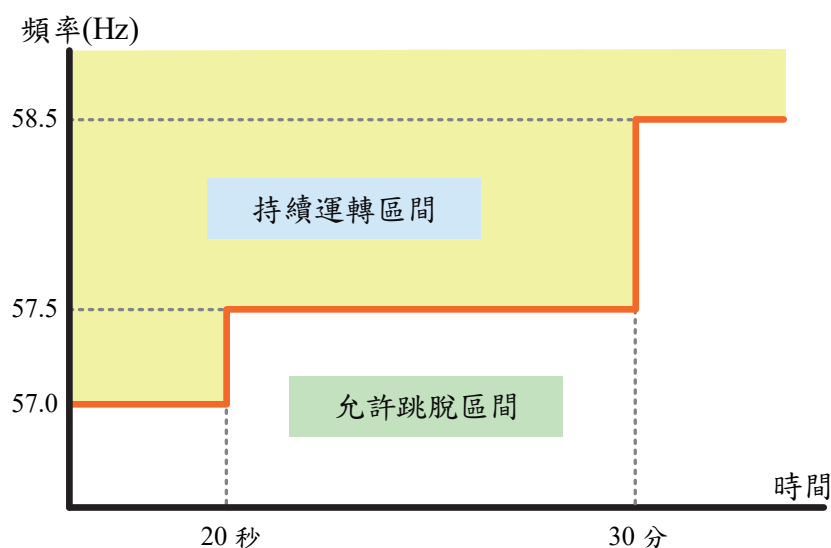
圖2 高電壓持續運轉能力

源發電設備也應能持續運轉；至若電壓驟升至 1.2 p.u.時，再生能源發電設備也需能持續運轉至少0.25秒；而當電壓驟升至1.15 p.u.時，則應能維持運轉至少0.75秒。此外，目前國內低壓持續運轉能力，尚未明確規範當電壓下降時之發電設備應提供多少實功及虛功。

2.2 低頻持續運轉能力

在國內再生能源併聯技術要點中，目前僅針對離岸風場發電設備，加以規範低頻率持續

運轉能力(Low Frequency Ride Through, LFRT)要求，而對於離岸風場發電設備所需具備之高頻持續運轉能力，較無相關規範加以明確規定。圖3為離岸風場發電設備之低頻持續運轉區間，當系統頻率大於或等於58.5 Hz時，離岸風場需持續運轉，而當系統頻率下降到57.5 Hz至58.5 Hz範圍時，則離岸風場需至少持續運轉30分鐘，且若系統頻率下降到57.0 Hz至57.5 Hz範圍時，則離岸風場需至少持續運轉20秒，但若系統頻率驟降至57.0 Hz以下，則允許離岸風場



資料來源：台灣電力公司，2021。

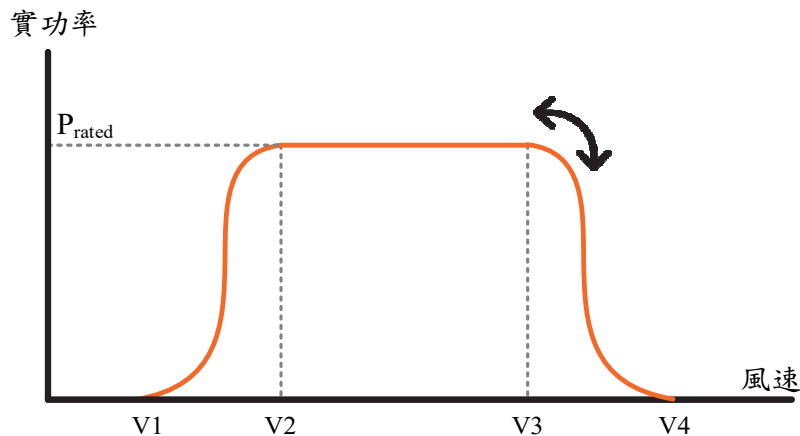
圖3 低頻持續運轉能力

跳脫。

2.3 實功控制能力

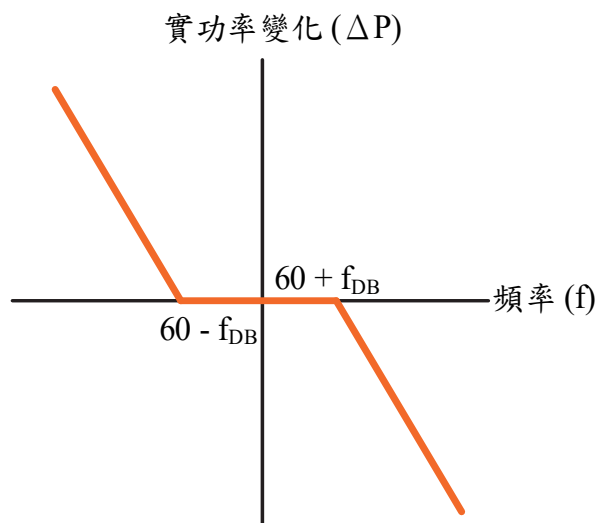
再生能源發電系統併聯技術要點要求離岸風場需具備實功控制能力，其中包含升降載變動率、高風速運轉控制及初級頻率響應(Primary Frequency Response)。具體而言，技術要點規定離岸風場的實功升載變動率每分鐘不得超過設備容量的10%。此外，由於離岸風場的實功輸出與風速相關，因此必須具備高風速運轉的相關控制能力。

圖4為實功與風速關係圖，當風速大於切出風速(V_3)時，需緩慢減少輸出功率，不可立即停機。此外，離岸風場需具備初級頻率響應能力。如圖5所示，於系統正常運轉時之不動帶 f_{DB} 為 ± 0.03 Hz，而垂降參數droop預設值為4%，但可在3%至5%範圍內配合台電調度中心調整。此外，當頻率發生變化時，離岸風場響應之啟動延遲(Delay Time)時間應小於1秒，上升時間(Rise Time)應小於10秒。若啟動延遲與上升時間不符合併連技術要點要求，則離岸風場應提供技術證明及說明原因。



資料來源：台灣電力公司，2021。

圖4 實功-風速關係圖



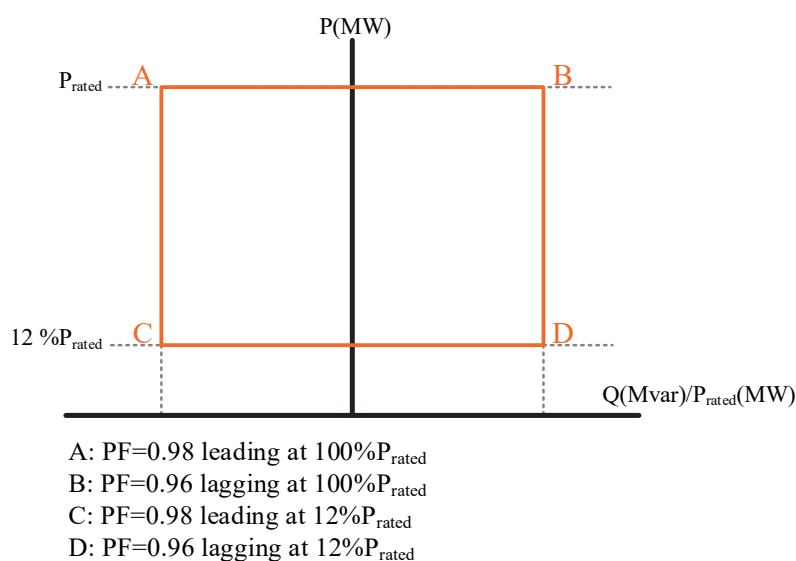
資料來源：台灣電力公司，2021。

圖5 初級頻率響應

2.4 虛功控制能力

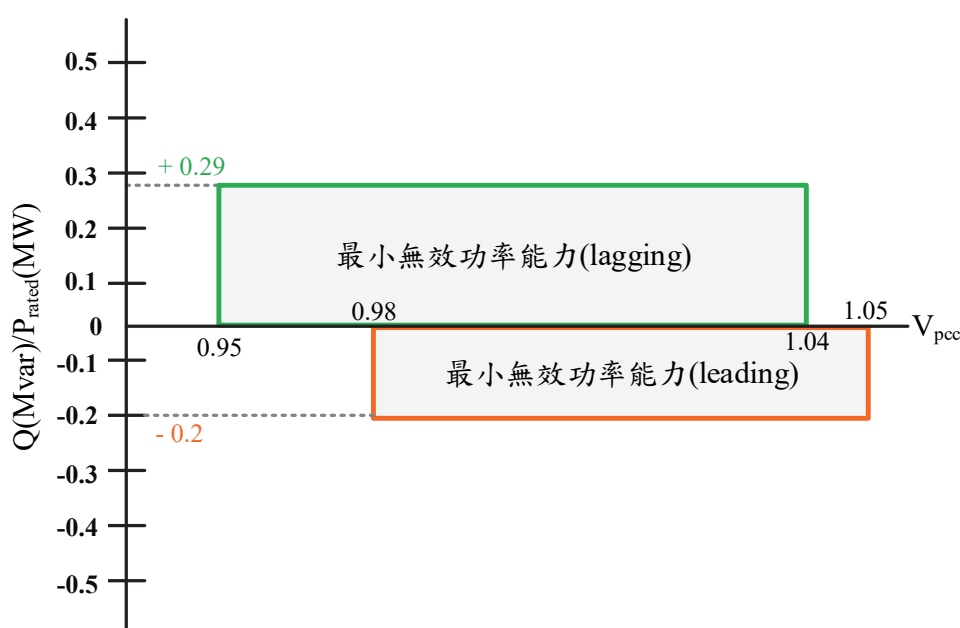
當再生能源發電設備併聯於特高壓系統運轉時，為降低併網造成的電網電壓變動，設備必須具備自動調控虛功能力。虛功調節對維持電網穩定性至關重要，特別是在高壓系統中，電壓波動可能對整個電網產生顯著影響。如圖6

所示，發電設備應運轉於矩形範圍內，且功率因數應控制在0.96滯後至0.98超前之間，以應對不同運行狀態下的電壓變化。圖7展示離岸風場的虛功能力圖，當設備在責任分界點正常運轉時，必須運轉於矩形範圍內。同時，當再生能源發電設備停止發電時，不可逆送虛功至責任分界點，避免導致電壓過高，進而造成電網不



資料來源：台灣電力公司，2021。

圖6 離岸風場之P-Q運轉範圍圖



資料來源：台灣電力公司，2021。

圖7 離岸風場Q-V虛功電壓能力圖

穩定或影響其它電力設備。

2.5 諧波限制規範

再生能源的諧波管制需遵守「電力系統諧波管制暫行標準」規定。目前電力系統諧波管制暫行標準已有針對諧波電流制定規範，而且也討論納入電壓諧波相關規範，以更完整保障電力系統穩定運轉及再生能源的有效併聯。

3.日本再生能源併網規範

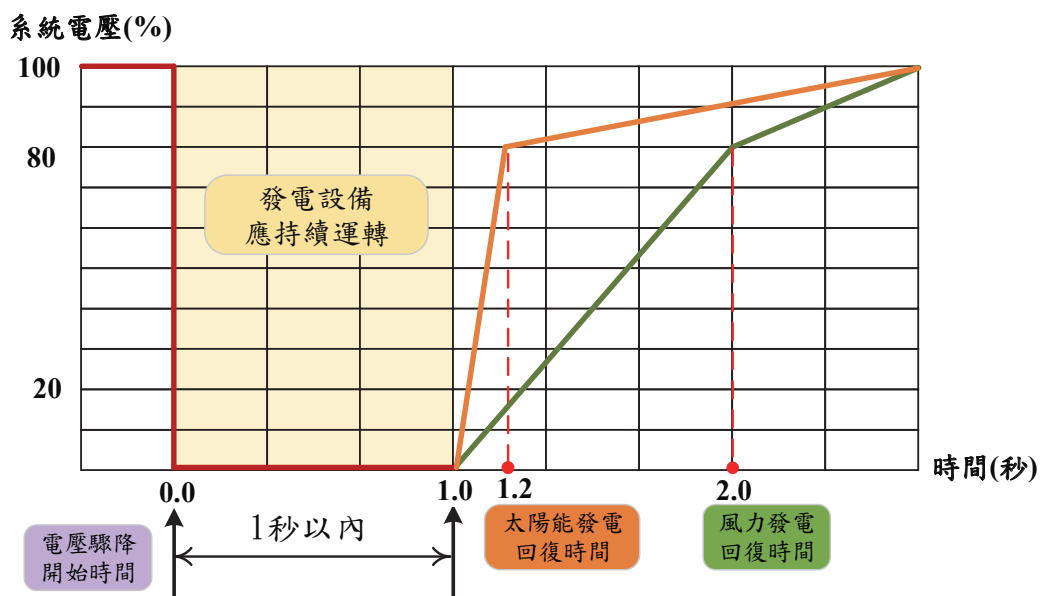
本文研究日本再生能源併網規範，其中包含參考日本電氣協會、東京電力公司和關西電力公司制定的併網標準。日本電網存在兩種電力系統頻率，東部地區使用50 Hz，西部地區使用60 Hz。因此東京電力公司的併網規範主要基於50 Hz，而關西電力公司的標準則是基於60 Hz。日本併網電壓範圍涵括低壓系統(交流600伏特以下)、中壓系統(交流600伏特以上至交流66,000伏特以下)、高壓系統(交流66,000伏特以上至交流154,000伏特以下)及特高壓系統(交流

154,000伏特以上)。

3.1 低壓持續運轉能力

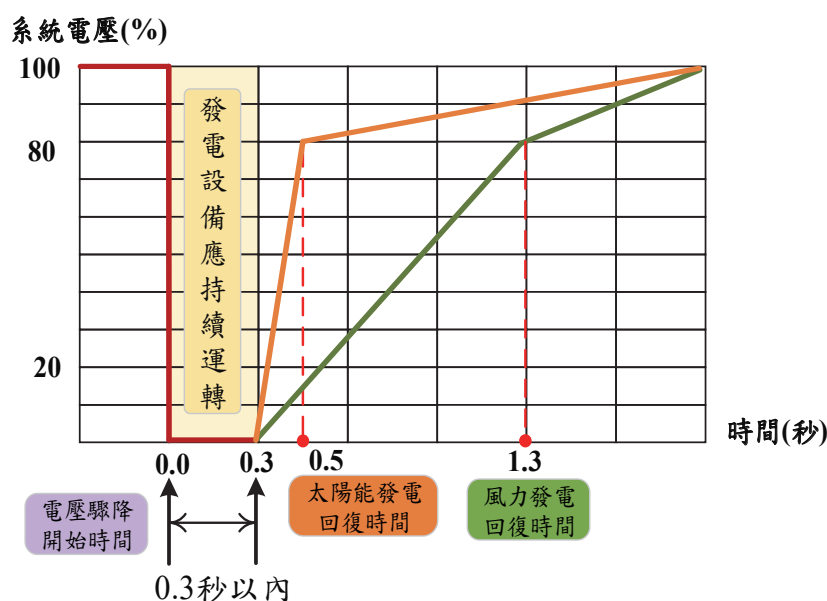
日本電壓持續運轉規範分為單相連接和三相連接，並針對不同低電壓等級，規範不同的持續運轉能力，並將故障類別依電壓下降情況分為三種：電壓下降至正常電壓的52%以上且相位變化在 41° 以下、電壓下降至正常電壓的20%且無相位變化及電壓下降至正常電壓的20%以下。如圖8所示，當設備以單相形式連接，且系統發生故障時，則於併網點電壓驟降至正常電壓的20%以下時，發電設備需具有持續運轉1秒鐘之能力，同時太陽能發電設備則需於1秒至1.2秒之間，回復到正常電壓之80%以上，而風力發電設備則需於1秒至2秒之間，回復至正常電壓的80%以上。

若設備以三相形式連接時，則如圖9所示，當系統發生故障，併網點電壓驟降至正常電壓的20%以下時，必須具有持續運轉0.3秒之能力，同時太陽能發電設備需於0.3秒至0.5秒之間，回復至正常電壓的80%以上，而風力發電



資料來源：JEAC9701, 2019.

圖8 日本發電設備以單相連接形式之低壓持續運轉能力



資料來源：JEAC9701, 2019.

圖9 日本發電設備以三相連接形式之低壓持續運轉能力

設備則需於0.3秒至1.3秒之間，至回復至正常電壓的80%以上。

3.2 低頻持續運轉能力

表1顯示日本低頻持續運轉能力。在系統標稱頻率為50 Hz的情況下，如果頻率降至48.5 Hz，系統需具有至少持續運轉600秒的能力；而若頻率進一步降至48.0 Hz，則需能夠至少持續運轉60秒。然而，當頻率降至47.5 Hz以下時，系統允許跳脫。至於若是在標稱頻率為60

Hz情況時，如果頻率降至58.2 Hz，則系統必須能夠持續運轉600秒以上，且若頻率下降至57.6 Hz，則需能持續運轉至少60秒，但當頻率降至57.0 Hz以下時，則允許跳脫。

3.3 實功控制能力

根據東京電力公司和關西電力公司的規定，風力發電設備在併網運轉時，必須具備實功控制能力，包括升降載變動率、高風速運轉控制及初級頻率響應。在併接點的風力發電設備，每5分鐘的輸出變動幅度不得超過設備容量的10%，而且風力發電需具備高風速運轉相關控制能力，一旦高風速導致切出情況時，必須緩慢減少輸出功率，以防立即停機。此外，風力發電需具備頻率響應能力，垂降參數可調整在2%至5%範圍內，目前東京電力公司及關西電力公司均規定系統正常運轉時之不動帶為 ± 0.2 Hz以內。

3.4 虛功控制能力

表1 日本低頻持續運轉能力

標稱頻率	頻率範圍	持續運轉時間
50 Hz	48.5 Hz~50 Hz	600秒
	48 Hz~48.5 Hz	60秒
	小於47.5 Hz	可允許跳脫
60 Hz	58.2 Hz~60 Hz	600秒
	57.6 Hz~58.2 Hz	60秒
	小於57.0 Hz	可允許跳脫

資料來源：JEAC9701, 2019.

表2為日本功率因數控制能力，由表可

表2 日本功率因數控制能力

單位	有逆送電	無逆送電
日本電氣協會	<ul style="list-style-type: none"> 容量超過50 MVA 時0.9滯後~0.95 超前 容量小於50 MVA 時0.85滯後~0.95 超前 	0.85滯後~1
東京電力公司		
關西電力公司		

資料來源：JEAC9701, 2019.

知，日本電氣協會、東京電力公司和關西電力公司對於功率因數規範，係根據其是否存在逆送電力進行區分。在沒有逆送電力時，功率因數需控制在0.85落後至1之間；在有逆送電力時，對於額定容量超過50 MVA的設備，功率因數需維持在0.9落後至0.95超前，而對於容量小於50 MVA的設備，功率因數則需控制在0.85落後至0.95超前。

又當發電設備併網於特高壓系統時(東京電力公司規定為275 kV以上，關西電力公司規定為220 kV以上)，需具備虛功-電壓或功率因數控制能力，並可根據實功輸出進行調整虛功。於日間時段，發電設備應向系統提供虛功，而於夜間時段，則應維持功率因數為1，或從系統吸收虛功以調節併網點電壓。

3.5 諧波限制規範

日本電氣協會、東京電力公司和關西電力公司對於安裝變流器的發電設備所引起之諧波問題，特別制定電流諧波規範，根據電流諧波規範，日本電氣協會和東京電力公司要求各次諧波失真率不得超過3%，總諧波失真率不得超過5%。關西電力公司則根據不同電壓等級，訂定具體的電流諧波規範，並且對於每1 kW不可流入超過表中規定之各次諧波電流上限值。

4. 英國再生能源併網規範

英國電力系統涵蓋英格蘭、蘇格蘭及威爾斯地區，由英國國家電網負責運轉管理，其運轉頻率為50 Hz。英國併網電壓範圍如下所述：低壓系統(交流1,000伏特以下)、中壓系統(交流1,000伏特以上至交流45,000伏特以下)、高壓系統(交流45,000伏特以上至交流230,000伏特以下)及特高壓系統(交流230,000伏特以上)。

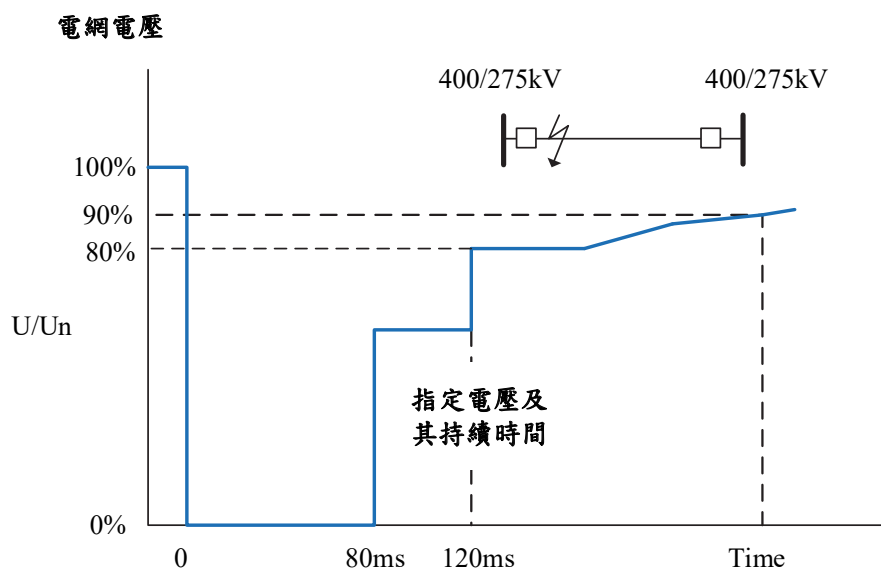
4.1 低壓持續運轉能力

英國The Grid Code之第CC.6.3.15.1節分別依照陸域輸電系統及離岸輸電系統，制定電壓持續運轉能力規範。如圖10所示為陸域輸電系統故障清除時間小於140毫秒的低壓持續運轉能力，如圖顯示當遭遇短路故障並導致責任分界

表3 日本關西電力公司電流諧波規範(mA/kW)

電壓等級 (kV)	5次	7次	11次	13次
77	0.5	0.36	0.23	0.19
154	0.25	0.18	0.11	0.09
275	0.14	0.1	0.06	0.05
電壓等級 (kV)	17次	19次	23次	>23次
77	0.15	0.13	0.11	0.1
154	0.07	0.06	0.05	0.05
275	0.04	0.03	0.03	0.02

資料來源：JEAC9701, 2019.



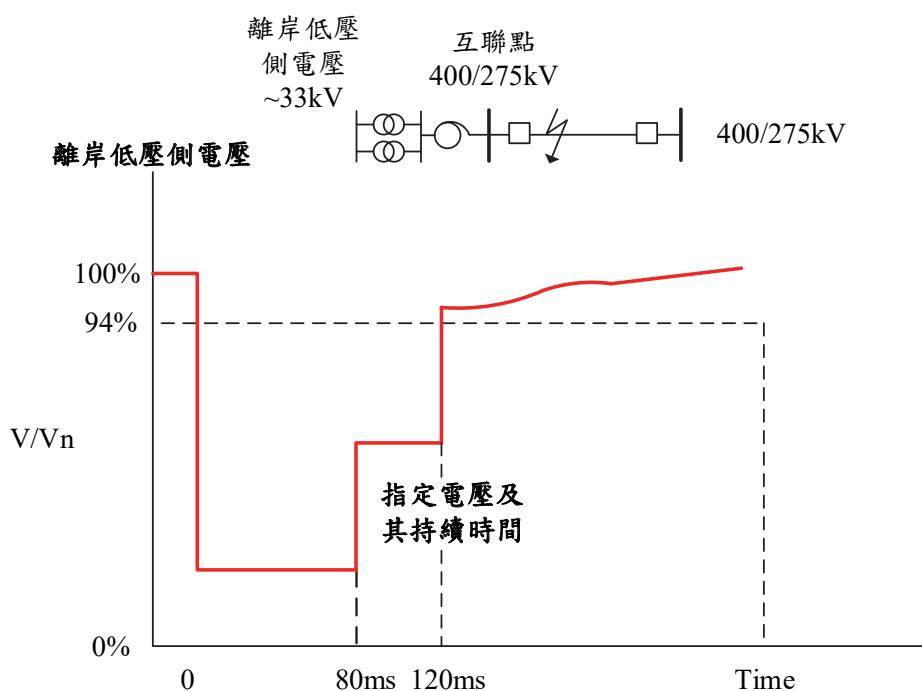
資料來源：National Grid ESO, 2019.

圖10 陸域輸電系統之故障清除時間小於140毫秒時之低壓持續運轉能力

點電壓降至0 p.u.時，發電設備必須具備至少80
毫秒的持續運轉能力，並在故障清除後的120毫
秒內，應能快速恢復至接近標稱電壓的80%。

圖11則是離岸輸電系統故障清除時間小於
140毫秒時之低壓持續運轉能力，由圖可知，

當電力系統發生短路故障，導致離岸輸電系統
的併網點電壓下降時，為了維持系統穩定性，
發電設備需要具有80毫秒的運轉時間，並於故
障清除後的120毫秒內需能恢復至正常電壓的
94%。



資料來源：National Grid ESO, 2019.

圖11 離岸輸電系統之故障清除時間小於140毫秒時之低壓持續運轉能力

4.2 低頻持續運轉能力

根據英國The Grid Code之第CC.6.1.2節，英國輸電系統之標稱頻率為50 Hz，並應盡量運轉控制於49.5至50.5 Hz範圍內。表4為英國低頻持續運轉能力，此表規範系統受擾動後之頻率落在不同區間時的持續運轉時間。

表4 英國低頻持續運轉能力

頻率範圍	持續運轉時間
51.5 Hz至52.0 Hz	必須足以至少運轉15分鐘。
51.0 Hz至51.5 Hz	必須足以至少運轉90分鐘。
49.0 Hz至51.0 Hz	需要連續運轉。
47.5 Hz至49.0 Hz	必須足以至少運轉90分鐘。
47.0 Hz至47.5 Hz	必須足以至少運轉20秒。

資料來源：National Grid ESO, 2019.

4.3 實功控制能力

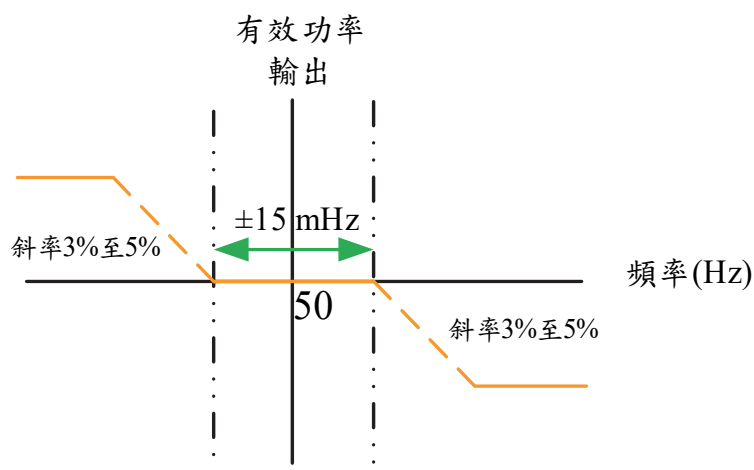
依照The Grid Code之第ECC.6.3.7.3節規範，頻率響應特性圖如圖12所示，當系統頻率在所設定的不動帶之外時，發電機組應提供實功-頻率響應。The Grid Code ECC.6.3.7.3規範的不動帶為 ± 15 mHz，而實功之上升/下降斜率

則可在3%至5%之間調整，且啟動延遲應小於2秒，上升時間應小於10秒。

依英國The Grid Code之第BC1.A.1.1節規範，升降載率必須受到限制，以確保系統穩定運轉，而根據BC1.A.1.1的規定，對於輸出功率在300 MW以下的設備，通常並無升降載率限制，因此可允許自由調整功率以適應電網需求變化，而對於輸出功率在300 MW至1,000 MW之間的設備，則升降載率限制為每分鐘50 MW，以避免突然功率變化對於電網產生不利影響，又對於輸出功率超過1,000 MW的設備，則升降載率限制為每分鐘40 MW，以確保電網在高功率輸出時仍能維持穩定運轉。

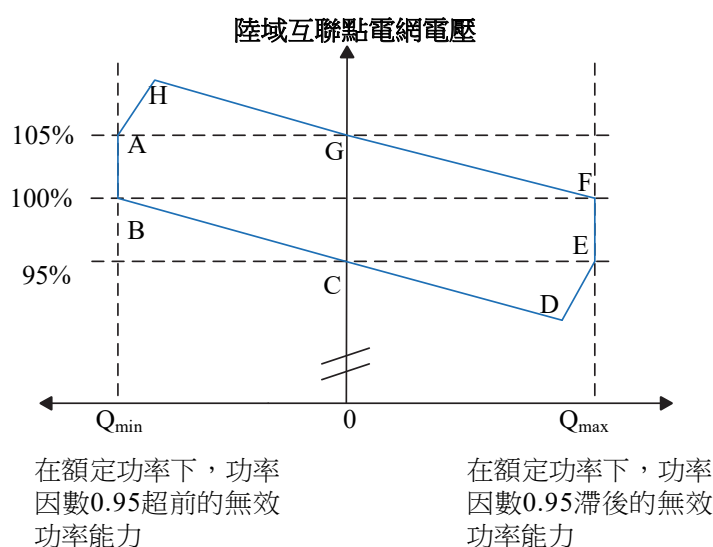
4.4 虛功控制能力

根據英國的虛功控制規範，於陸域互聯點和離岸互聯點在虛功-電壓控制能力方面均有明確要求。圖13為陸域互聯點的虛功-電壓控制能力，由圖可知，虛功的調整會根據電壓變化按比例進行調節，而圖14所示之離岸互聯點的虛功-電壓控制能力，則允許斜率在2%至7%之間進行調整，具有更寬範圍之靈活調節虛功輸出。此規範的實施旨在因應電網的動態變化，以確保電網和發電設備間之協調運轉，尤其是



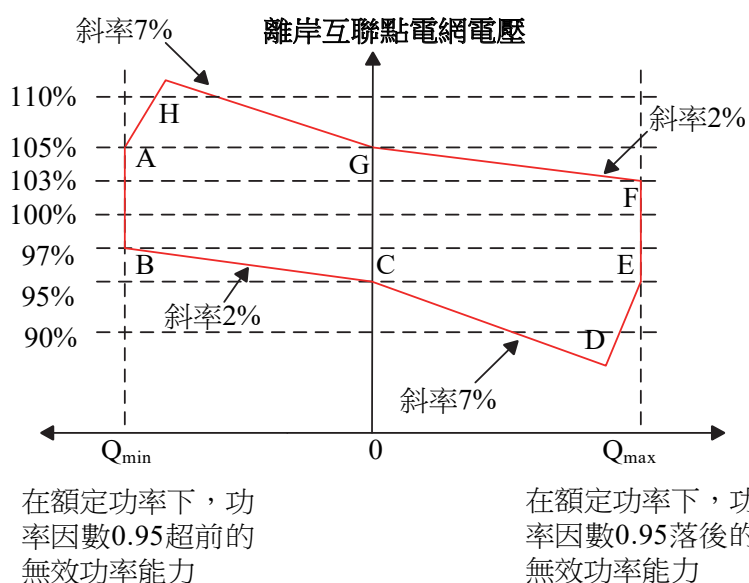
資料來源：National Grid ESO, 2019.

圖12 英國規範之頻率響應特性圖



資料來源：National Grid ESO, 2019.

圖13 陸域互聯點之虛功-電壓控制能力



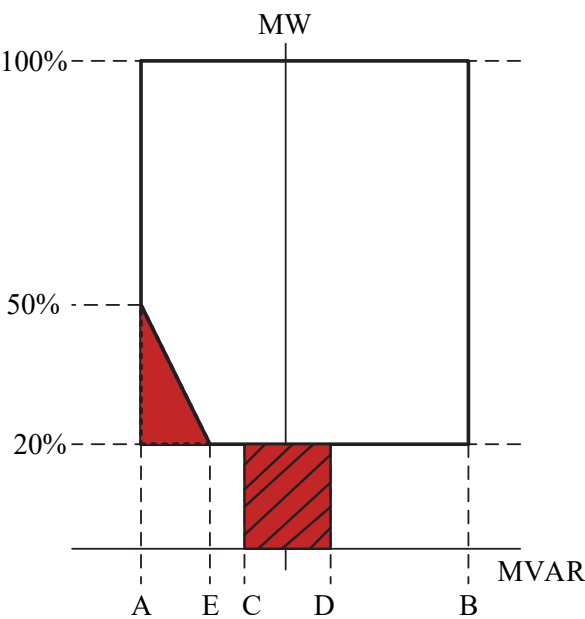
資料來源：National Grid ESO, 2019.

圖14 離岸互聯點之虛功-電壓控制能力

在電壓波動和負載變化時，將可經由虛功-電壓控制以達成電壓穩定需求。

英國的功率因數控制規範要求同步發電機組應能在0.85滯後至0.95超前範圍內運轉，而對於非同步發電設備、含變流器的電源以及離岸風電設備，則要求其功率因數控制能力在0.95滯後至0.95超前之間。而且各發電設備應能在圖15所示的大矩形內且非深紅色區域的任一點

運轉，其中A點表示發電設備或離岸輸電互聯點容量輸出之虛功為額定功率之-33%，相當於功率因數0.95超前，B點表示發電設備或離岸輸電互聯點容量輸出之虛功為額定功率之+33%，相當於功率因數0.95滯後，C點表示發電設備或離岸輸電互聯點容量輸出之虛功為額定功率之-5%，D點表示發電設備或離岸輸電互聯點容量輸出之虛功為額定功率之+5%，E點表示發電



資料來源：National Grid ESO, 2019.

圖15 英國發電設備之功率因數控制能力

設備或離岸輸電互聯點容量之虛功為額定功率之-12%。

4.5 諧波限制規範

英國的諧波規範主要依據IEC 61000-3-6加以訂定，其中The Grid Code及工程建議G5標準即依循IEC 61000-3-6，分別針對不同電壓等級制定不同諧波管制標準。這些規範根據總諧波

電壓失真(Total Harmonic Distortion of Voltage, THDV)的不同，區分各次諧波類型，包括三倍頻諧波、非三倍頻諧波以及偶次諧波，如表5至表8即為各種諧波在不同電壓等級時的管制值。

5. 美國再生能源併網規範

本章節介紹美國分散式電源併網技術

表5 英國標稱電壓為0.4 kV至25 kV時之各次諧波電壓標準

奇次諧波(3倍頻)		奇次諧波(非3倍頻)		偶次諧波	
諧波階次	諧波電壓(%)	諧波階次	諧波電壓(%)	諧波階次	諧波電壓(%)
3	3.0	5	3.0	2	1.5
9	1.2	7	3.0	4	1.0
15	0.4	11	2.0	6	0.5
大於21	0.2	13	2.0	8	0.4
		17	1.6	10	0.4
		19	1.5	大於12	0.2
		23	1.2		
		大於25	25/h		

資料來源：National Grid ESO, 2019.

表6 英國標稱電壓為25 kV至66 kV時之各次諧波電壓標準

奇次諧波(3倍頻)		奇次諧波(非3倍頻)		偶次諧波	
諧波階次	諧波電壓(%)	諧波階次	諧波電壓(%)	諧波階次	諧波電壓(%)
3	2.6	5	2.8	2	1.3
9	1.1	7	2.8	4	0.9
15	0.3	11	1.9	6	0.5
大於21	0.2	13	1.8	8	0.4
		17	1.4	10	0.4
		19	1.3	大於12	0.2
		23	1.0		
		大於25	0.6(25/h)+0.2		

資料來源：National Grid ESO, 2019.

表7 英國標稱電壓為66 kV至230 kV時之各次諧波電壓標準

奇次諧波(3倍頻)		奇次諧波(非3倍頻)		偶次諧波	
諧波階次	諧波電壓(%)	諧波階次	諧波電壓(%)	諧波階次	諧波電壓(%)
3	2.0	5	2.5	2	1.0
9	1.0	7	2.0	4	0.8
15	0.3	11	1.8	6	0.5
大於21	0.2	13	1.5	8	0.4
		17	1.2	10	0.4
		19	1.0	大於12	0.2
		23	0.8		
		大於25	0.6*(25/h)+0.2		

資料來源：National Grid ESO, 2019.

表8 英國標稱電壓大於230 kV之各次諧波電壓標準

奇次諧波(3倍頻)		奇次諧波(非3倍頻)		偶次諧波	
諧波階次	諧波電壓(%)	諧波階次	諧波電壓(%)	諧波階次	諧波電壓(%)
3	1.5	5	2.0	2	1.0
9	0.5	7	2.0	4	0.8
15	0.3	11	1.5	6	0.5
大於21	0.2	13	1.5	8	0.4
		17	1.2	10	0.4
		19	1.0	大於12	0.2
		23	0.8		
		大於25	0.6*(25/h)+0.2		

資料來源：National Grid ESO, 2019.

要點，主要研析美國電機和電子工程師學會(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)發布的IEEE Std. 2800-2022規範，並依序討論美國再生能源運轉規範及併網規範。IEEE Std. 2800-2022是針對含變流器的分散式電源(Inverter-Based Resources, IBRs)連接電力輸電系統的規範，主要訂定變流器分散式電源設備的規範和要求。美國併網電壓範圍包含低壓系統(交流1,000伏特以下)、中壓系統(交流1,000伏特以上至交流100,000伏特以下)、高壓系統(交流100,000伏特以上至交流230,000伏特以下)、特高壓系統(交流230,000伏特以上至交流1,000,000伏特以下)及超高壓系統(交流1,000,000伏特以上)。

5.1 高/低壓持續運轉能力

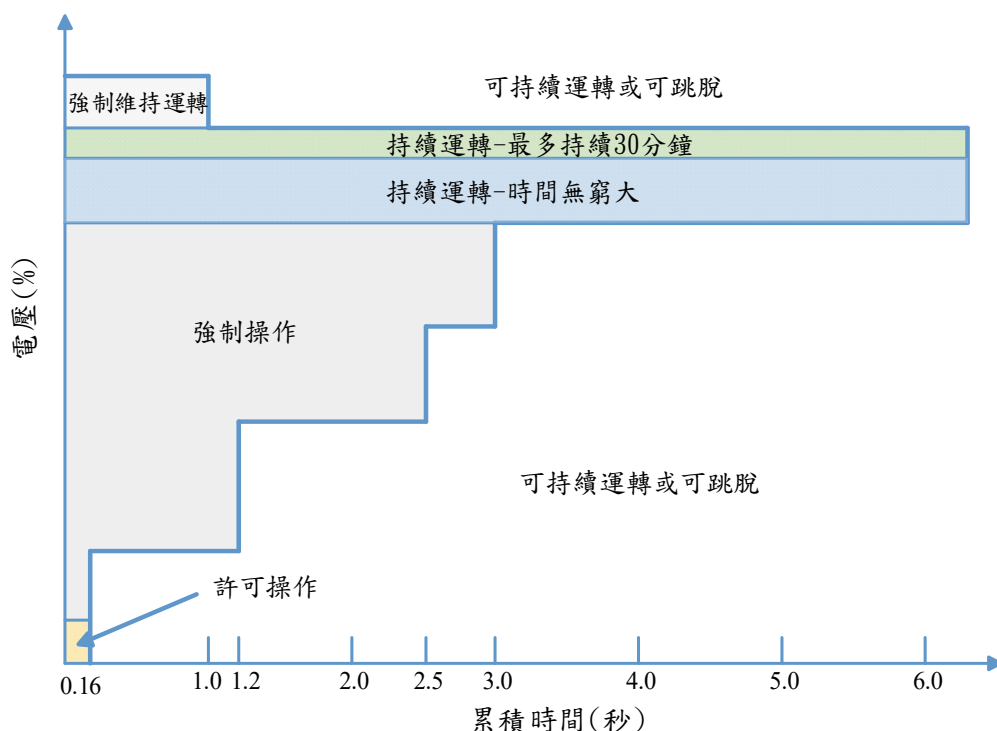
根據IEEE Std. 2800標準規定，對於輸電電壓大於500 kV的系統，其系統電壓需運轉於0.9 p.u.至1.05 p.u.範圍內；而對於輸電電壓小於500

kV的系統，其系統電壓必須運轉於0.9 p.u.至1.10 p.u.範圍內。

圖16為IEEE Std. 2800之電壓持續運轉能力規範，如圖所示，當電壓介於0.9 p.u.至1.05 p.u.範圍時，含變流器之分散式電源必須能夠持續運轉；而當電壓介於1.05 p.u.至1.1 p.u.時，含變流器之分散式電源必須能夠持續運轉30分鐘。如果電壓大於1.2 p.u.，則可根據情況選擇持續運轉或允許跳脫。同樣地，當電壓為0.1 p.u.至0.9 p.u.時，則需在指定時間範圍內維持運轉，但若電壓低於0.1 p.u.時，則可允許跳脫。

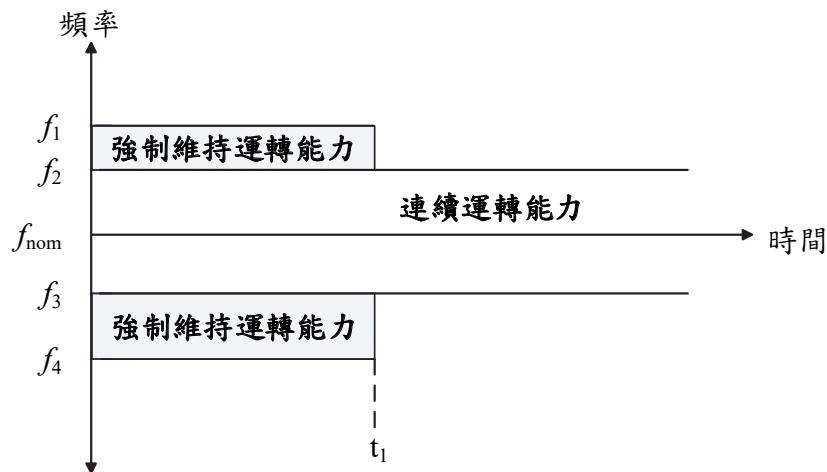
5.2 高/低頻持續運轉能力

IEEE Std. 2800亦有規範高低頻率持續運轉能力，也就是要求含變流器之分散式電源設備需具備不同頻率時之持續運轉能力。如圖17所示，當頻率範圍介於 f_2 及 f_3 之間時，含變流器之分散式電源需能維持正常運轉，而在短暫頻率擾動期間，當頻率範圍小於 f_3 且大於或等於 f_4



資料來源：IEEE, 2022.

圖16 IEEE Std. 2800電壓持續運轉能力



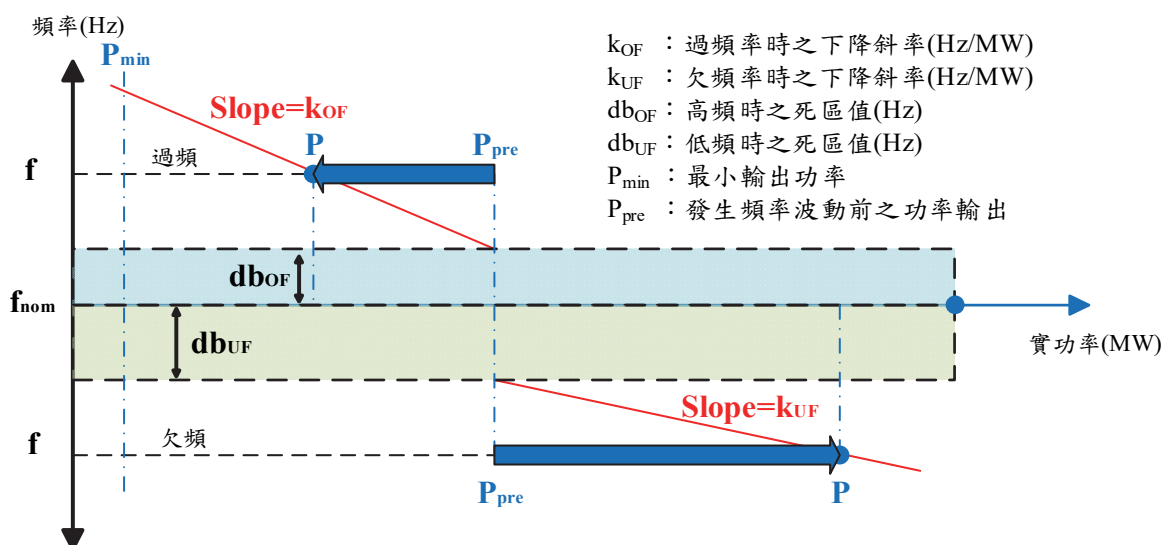
資料來源：IEEE, 2022.

圖17 IEEE Std. 2800標準頻率持續運轉能力

時，則含變流器之分散式電源應能持續運轉299秒；若是頻率範圍大於 f_2 且小於或等於 f_1 時，則含變流器之分散式電源同樣也應能持續運轉299秒。此外，含變流器之分散式電源還需具備頻率變化率持續運轉能力。在電力系統正常頻率運轉範圍及高低頻持續運轉範圍內，當頻率變化率小於或等於5.0 Hz/s時，含變流器的分散式電源不應跳脫。

5.3 實功控制能力

IEEE Std. 2800針對含變流器之分散式電源設備，已有規範實功控制能力的要求，其中包括初級頻率響應(Primary Frequency Response)及快速頻率響應(Fast frequency response)。而根據規範要求，含變流器之分散式電源必須提供初級頻率響應能力，並應符合圖18規定之性能要求，其中頻率響應包括欠頻時需增加實功以及過頻時需降低實功之響應能力。此外，含變流器之分散式電源應具備面臨欠頻時的快速頻率響應能力。此快速頻率響應之響應能力定義為



資料來源：IEEE, 2022.

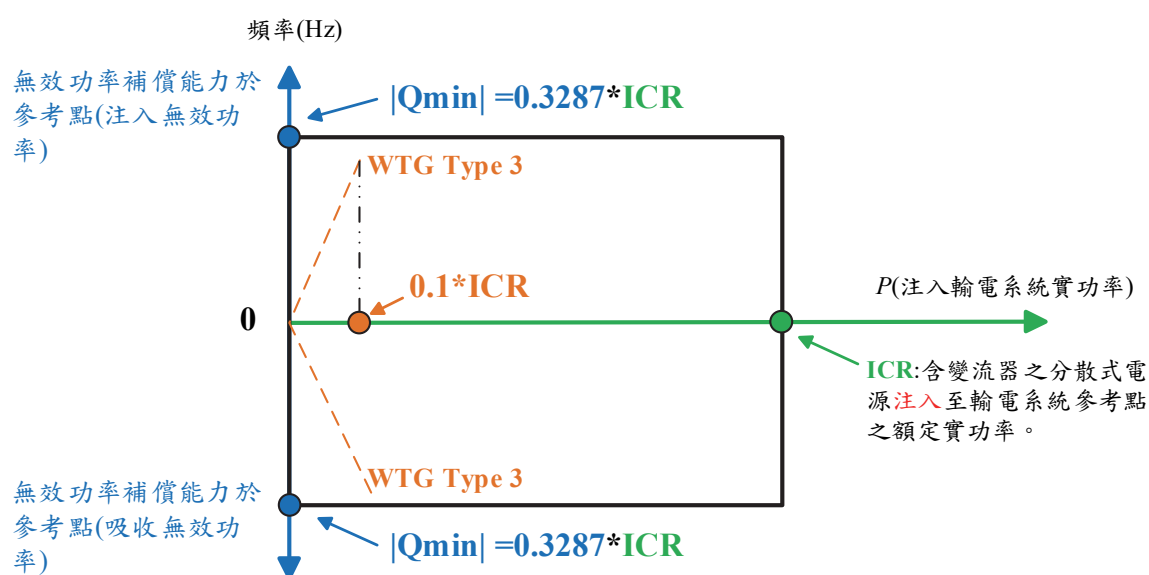
圖18 IEEE Std. 2800標準之初級頻率響應圖

從觸發頻率到快速頻率響應產生的實功變化到目標值的90%之時間，且此響應時間不得超過1秒。

5.4 虛功控制能力

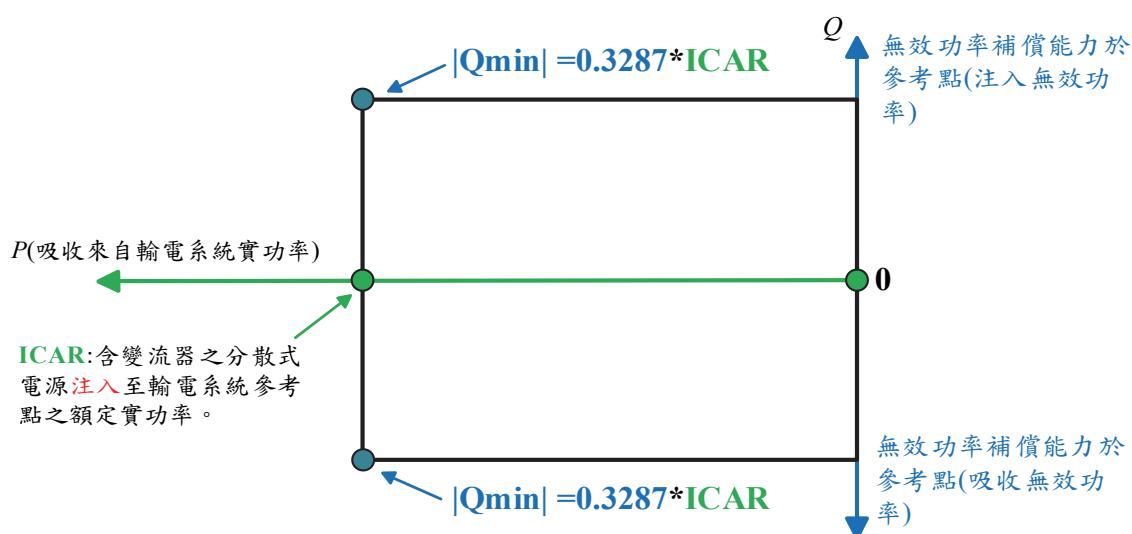
在虛功控制能力方面，IEEE Std. 2800標準規定含變流器之分散式電源需具備虛功控制能力。如圖19所示，含變流器之分散式電源輸出

實功至輸電系統時，應能夠輸出或吸收最小虛功 Q_{min} ，其中 $|Q_{min}| \geq 0.3287 * ICR$ ；而如圖20則說明含變流器之分散式電源從輸電系統吸收實功時，也應能輸出或吸收最小虛功 Q_{min} ，其中 $|Q_{min}| \geq 0.3287 * ICAR$ 。此外，由圖19可知，當第三型風力發電設備之輸出實功小於10% ICR時，則需依虛線所示具有調降最小虛功之能力。



資料來源：IEEE, 2022.

圖19 IEEE Std. 2800標準之虛功能力的最小範圍(輸出實功)



資料來源：IEEE, 2022.

圖20 IEEE Std. 2800標準之虛功能力的最小範圍(吸收實功)

5.5 諧波限制規範

IEEE Std. 2800標準規定注入測量點的電流諧波失真率、奇數次諧波電流失真、偶數次諧波電流失真以及總額定電流失真，軍需在限制範圍以內，以確保電流諧波不會對於電網造成過大影響，從而確保電網穩定運轉。而根據不同的電壓等級，IEEE Std. 2800制定具體規範，當公共耦合點電壓小於或等於69 kV時，總諧波失真不可超過5%；當公共耦合點電壓在69 kV到161 kV時，總諧波失真不可超過2.5%；當公共耦合點電壓在161 kV以上時，總諧波失真不可超過2%；此外，針對電流偶次諧波之規定，2次電流諧波失真必須小於1%，4次電流諧波失真必須小於2%；6次電流諧波失真必須小於3%。

6. 愛爾蘭再生能源併網規範

本章節研析愛爾蘭發電機組併網相關規範，主要參考愛爾蘭制定之EirGrid Grid Code Version 12。愛爾蘭發電機組可概分為兩類，分別為Non-RfG機組以及RfG機組，其中Non-RfG機組為2018/11/30前註冊之機組，而RfG機組則為2018/11/30後註冊之機組。本節參照國內再生能源發電系統併聯技術要點項目分類，介紹愛爾蘭發電機組相關併網運轉規範。愛爾蘭之併

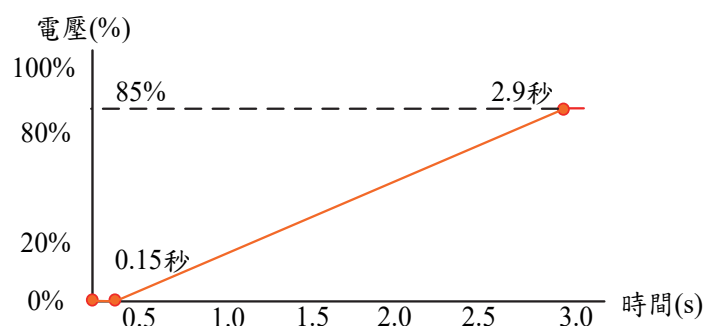
網電壓範圍有低壓系統(交流600伏特以下)、中壓系統(交流600伏特以上至交流38,000伏特以下)、高壓系統(交流38,000伏特以上)。

6.1 低壓持續運轉能力

依照愛爾蘭之EirGrid Grid Code規定，RfG機組應具備低電壓持續運轉能力，且當系統發生故障造成電壓驟降時，發電機組於責任分界點電壓高於圖21之實線時，必須能夠持續運轉；而當電壓降至0 p.u.時，則應至少持續運轉0.15秒；又當電壓降至0.85 p.u.時，則應至少持續運轉2.9秒。

6.2 低頻持續運轉能力

愛爾蘭之併網規範要求Non-RfG機組，當系統頻率介於49.5 Hz至50.5 Hz時，則系統處於正常運轉區間；而當系統頻率介於50.5 Hz至52.0 Hz以及47.5 Hz至49.5 Hz時，則發電機組必須具有持續運轉至少3,600秒之能力；又當系統頻率介於47.0 Hz至47.5 Hz時，則發電機組必須能夠持續運轉至少20秒。至於針對RfG機組而言，當系統頻率介於49.0 Hz至51.0 Hz時，系統處於正常運轉區間；而當系統頻率介於51.0 Hz至51.5 Hz以及47.5 Hz至49.0 Hz時，則發電機組需能至少持續運轉5,400秒；當系統頻率介於51.5 Hz至52.0 Hz時，發電機組需能至少持續運轉3,600秒，又當系統頻率介於47.0 Hz至47.5 Hz



資料來源：EirGrid Grid Code, 2023.

圖21 愛爾蘭低電壓持續運轉能力

時，則發電機組必須能夠至少持續運轉20秒。

6.3 實功控制能力

依據愛爾蘭之EirGrid Grid Code規定，發電機組需具備三種頻率響應能力，分別為有限頻率靈敏模式-過頻(Limited Frequency Sensitive Mode- Over-frequency)、有限頻率靈敏模式-欠頻 (Limited Frequency Sensitive Mode- Under-frequency)以及頻率靈敏模式(Frequency Sensitive Mode)。發電機組可同時運作在有限頻率靈敏模式-過頻及有限頻率靈敏模式-欠頻下，但頻率靈敏模式則無法與其他模式同時運作。

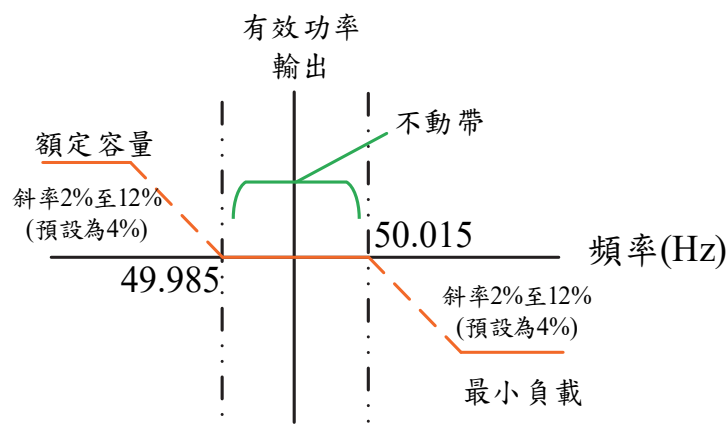
如圖22所示，在頻率敏感模式下，當系統頻率超出不動帶時，則發電機組應能提供實功以滿足頻率響應要求。具體而言，當系統頻率超出不動帶時，發電機組需在5秒內達到預期實功響應的60%，並在15秒內達到預期實功的100%。不動帶可設定在 ± 15 mHz內，而實功之垂降參數可在2%至12%之間進行調整，預設值皆為4%。為能穩定系統運轉，發電機組於欠頻時，應輸出額定實功；而於過頻時，應由最小負載吸收實功。

發電機組也應具備三種升降載能力，分別為電源跟隨升降載率(Resource Following Ramp

Rate)、實功控制設定點升降載率(Active Power Control Set-Point Ramp Rate)以及頻率響應升降載率(Frequency Response Ramp Rate)。電源跟隨升降載率適用於發電機組啟動、正常運轉和關機期間，升降載變動率可設置為每分鐘額定容量之1%至100%；而實功控制設定點升降載率則適用於實功控制模式，此時升降載變動率為每分鐘額定容量之1%至100%；至於頻率響應升降載率於頻率響應期間之升降載變動率應為發電機組能提供之最大升降載率。此外，於發電機組提供升降載時之輸出偏差值應小於該發電機組額定容量之3%或 ± 0.5 MW。

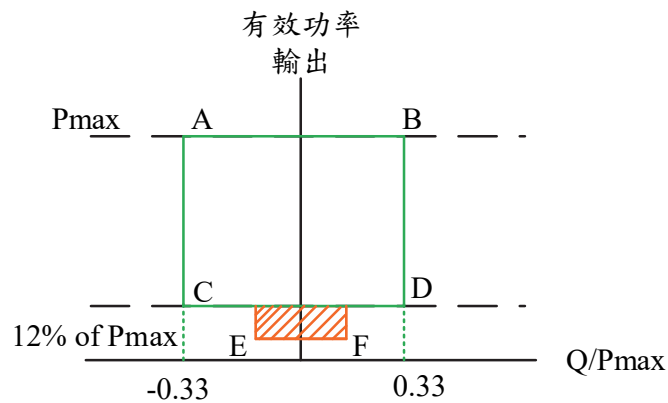
6.4 虛功控制能力

依照愛爾蘭之EirGrid Grid Code PPM1.6.3規定，發電機組在電壓控制模式、虛功控制模式或功率因數控制模式下，均應在圖23所示之P-Q能力範圍內運轉，其中A點為發電機組輸出之最大實功，此時吸收之虛功為最大實功之33%，其即等同於0.95超前運轉能力；B點則為發電機組輸出之最大實功，且此時輸出之虛功為最大實功之33%，此即等同於0.95滯後運轉能力；C點為發電機組輸出之最大實功的12%，且所吸收之虛功為最大實功之33%，此即等同於0.34超前運轉能力；D點為發電機組輸出最



資料來源：EirGrid Grid Code, 2023.

圖22 頻率敏感模式時之頻率響應



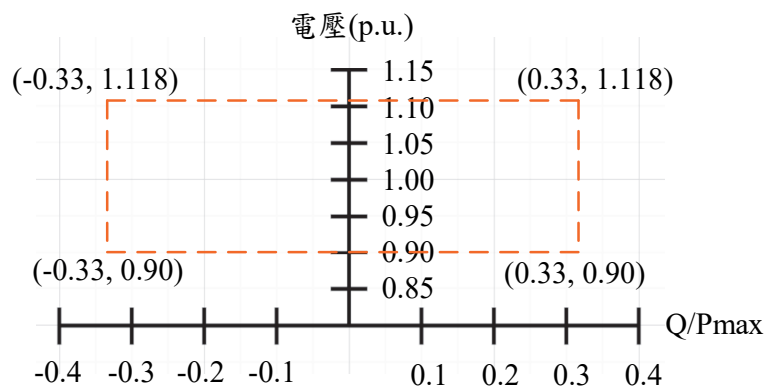
資料來源：EirGrid Grid Code, 2023.

圖23 愛爾蘭發電機組P-Q能力運轉範圍

大實功之12%，且此時輸出之虛功為最大實功之33%，其即等同於0.34滯後運轉能力；E點為發電機組在風機切入速度時之最小虛功吸收能力；F點為發電機組在風機切入速度時之最小

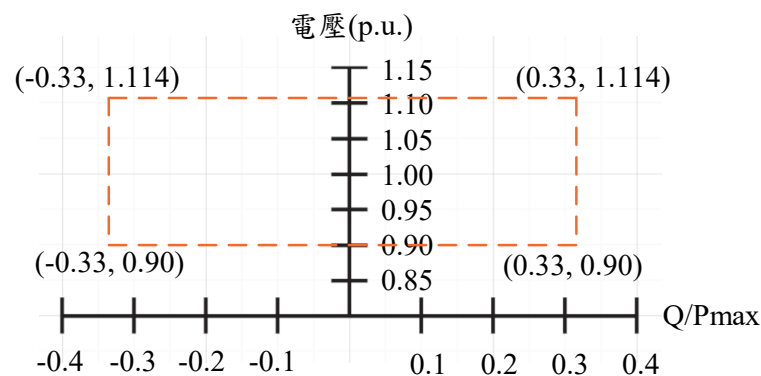
虛功輸出能力。

此外，發電機組在不違反PQ能力運轉範圍的前提下，發電機組應能正常運轉於圖24及圖25所標示之電壓-虛功運轉範圍。



資料來源：EirGrid Grid Code, 2023.

圖24 愛爾蘭110 kV系統電壓-虛功運轉範圍



資料來源：EirGrid Grid Code, 2023.

圖25 愛爾蘭220 kV系統電壓-虛功運轉範圍

7. 國內外規範比較與辨析

本章節將深入比較國內外規範，並且針對各國在持續運轉能力、實功控制能力、虛功控制能力和諧波限制規範進行詳細討論，同時提出改善建議，以俾完善再生能源併網規範。

7.1 頻率及電壓持續運轉能力之比較

針對頻率持續運轉能力規範，國內再生能源併網技術要點僅敘明必須裝設頻率變化率電驛，但未詳細規範其設定值。美國則規範輸電系統之變流器發電設備於頻率變化率小於或等於 5.0 Hz/s 時，必須具備持續運轉能力，而且不應跳脫。日本則規定電力系統頻率運轉於高頻電驛設定值上限及低頻電驛設定值下限以內，且再生能源的頻率變化率小於或等於 2.0 Hz/s 時，不應跳脫。因此，建議參考美國及日本的規範，明確定義頻率變化率電驛設定值，則將有助於避免頻率劇烈變化時之發電設備錯誤跳脫，同時可降低系統發生異常之機率。

在高低頻持續運轉能力方面，目前國內主要針對離岸風場，要求必須具備低頻持續運轉能力，而其他國家則要求必須同時具備高頻及低頻持續運轉能力，僅持續運轉時間均不相同，因此建議參考國外再生能源發電設備的高頻持續運轉能力規範，以提升發電設備在各種頻率條件下的穩定性，並可減少因頻率控制不當所引發的非預期風險。

在低壓持續運轉規範中，國內主要透過運轉能力曲線進行判斷，而對於不同電壓情境時之因應方法較無詳細列舉。愛爾蘭在低電壓持續運轉規範上，與國內相似。美國在低電壓持續運轉規範上，則係以不同電壓等級而有不同持續運轉時間之規定。而英國則是根據陸域設備與離岸設備以及故障清除時間，分別制定低電壓持續運轉能力的規範。日本雖無高電壓持

續運轉能力規範，但是針對不同低電壓狀況，已制定不同情形時之持續運轉能力。因此，本研究建議參考國外持續運轉能力規範，明確劃分不同電壓情境時之應對方法，以有助於強化系統處於不同運轉情境時之韌性。

另外，當電力系統發生故障時，由於系統電壓或頻率可能在不同區間波動，而當行進到另一個區間再返回時，我國法規並未規範是否重新計算累計時間。對於此等故障事件，可參考 IEEE Std. 2800 規範，在定義之時間窗格內累計時間，並可作為是否超出連續運轉時間之判斷依據，以更準確判斷設備的運轉狀態，減少因累計時間不明確所導致之系統不穩定性。

7.2 實功及頻率控制能力之比較

本節探討實功及頻率控制能力之比較。在頻率響應規範中，國內目前主要針對離岸風場進行要求，於國內之併聯技術要點規定系統正常運轉時之不動帶 f_{DB} 為 ± 0.03 Hz，垂降參數 droop 預設值為 4%，可調範圍為 3% 至 5%。而美國則規定含變流器之分散式電源應具有初級頻率響應能力，其中頻率響應包括欠頻時需增加實功以及過頻時需降低實功的響應能力，同時設定不動帶之範圍為 0.015 Hz 至 0.96 Hz；至於愛爾蘭之垂降參數 droop 預設值同樣為 4%，但其可調之最大範圍為 12%；另外，日本針對風力發電所要求之頻率響應規範，則規定垂降參數 droop 可調整在 2% 至 5% 範圍內，而針對不動帶設定範圍，東京電力公司及關西電力公司均規定系統正常運轉時之不動帶為 ± 0.2 Hz 以下。換言之，國外進行頻率響應控制之規範訂定時，均已涵括考慮最小實功和最大實功輸出情形，故謹建議國內併聯技術要點宜將欠頻時之最大實功輸出限制，以及過頻時之最小實功輸出限制，一併納入考量，應有助於維持國內系統之理想運轉頻率。

有關實功升載變動率規範，國內對於離岸風場之規範要點中，確有實功升載變動率之限制，但是並未敘明適用情境，而愛爾蘭針對升降載變動率，則分別區分為三種不同情境，其中包含電源跟隨升降載率、實功控制設定點升降載率及頻率響應升降載率，而且在不同情境時，分別有不同升降載率之限制，因此建議國內對於離岸風場之規範要點，也宜考量不同情境時的升降載率限制值，以避免在不同情境下之實功變動過大，影響電力系統穩定性。

7.3 虛功及電壓控制能力之比較

在虛功-電壓控制模式中，各國所要求之電壓設定值及垂降斜率範圍差異不大，但於反應時間與穩態時間則各有要求，並且均有要求設定不動帶，而我國於規範內則並無要求設定不動帶，因此建議針對系統運轉於虛功-電壓控制模式時，考慮增加不動帶之規範，以避免因未設定不動帶而導致之電壓波動。此外，於國外規範中，對於虛功調整及功率因數調整中，皆有要求穩態誤差，故亦建議我國可在虛功調整及功率因數調整中，增加穩態誤差之要求，以確保調整過程的精確性。

又依據IEEE Std. 2800標準規定，於Q-V控制模式進行時，首先需具備P-Q運轉能力，並需符合最小虛功規範。愛爾蘭規範也要求發電機組在不違反P-Q運轉能力範圍的前提下，應能正常運轉於Q-V控制模式，亦即P-Q運轉能力範圍優先於Q-V控制模式。然而，國內發電設備之P-Q運轉及Q-V運轉的優先順序，似乎尚無詳細定序規範，建議國內可考量標示兩種運轉範圍之優先順序，以避免在實際運轉中出現優先順序混淆之情形。

在功率因數規範方面，國內與英國相似，均係依照發電設備類型來制定功率因數運轉範圍。至於美國與愛爾蘭則是根據實功來制定虛

功輸出能力，而日本則是依據逆向潮流的有無來分別制定功率因數規範。經參閱各國之發電設備功率因數規範，大多皆未要求功率因數得維持運轉於1，故建議或可考量修正國內規範第七點第六款第三目之併接於高壓系統以下之發電廠，責任分界點運轉原則，以減少不必要的運轉要求及與國際併網規範同步。

7.4 諧波限制規範之比較

目前國內再生能源發電系統併聯技術要點之諧波管制，依據台電公司「電力系統諧波管制暫行標準」進行規範，該標準之電流諧波規範，僅適用於併接電壓等級為161 kV以下之系統，建議可於電力系統諧波暫行管制標準，考量補足161 kV以上電壓等級之電流諧波規範，以避免因為規範不完全而引發的電力品質問題。

8. 結 論

本研究彙整美國、愛爾蘭、日本及英國的再生能源發電系統併聯技術規範，並與國內再生能源併聯技術要點之電壓/頻率運轉規範、電壓/頻率持續運轉能力、功率因數、虛功控制模式、頻率響應及諧波管制等方面的要求，詳以進行評析比較，並於表9加以比較。目前本研究檢視國內在頻率及電壓持續運轉能力方面僅要求裝設頻率變化率電驛，但未詳細規範設定值，建議參考美國和日本的標準進行增修，並包括高頻持續運轉能力以及針對不同設備的要求。而在實功控制能力方面，則建議針對各類再生能源發電設備制定規範及參考國外的頻率響應要求。另在虛功控制和功率因數調整策略上，建議宜參考各國經驗，制定靈活且具體的標準。綜上所述，本文透過對各國規範的深入分析，有效篩選定位國內既有法規可改進之

表9 國內外併網規範比較表

項目	各國規範簡述	建議說明
電壓持續運轉能力	<div>1. 日本雖然沒有針對高電壓持續運轉能力的具體規範，但已經針對不同低電壓情況制定了各種情形下的持續運轉能力標準。</div> <div>2. 英國根據陸域設備與離岸設備以及故障清除時間，分別制定持續運轉能力規範。</div> <div>3. 美國在低電壓持續運轉規範上，以不同電壓等級而有不同持續運轉時間之規定。</div> <div>4. 愛爾蘭在低電壓持續運轉規範上，與臺灣相似。</div>	建議參考國外持續運轉能力規範，明確劃分不同電壓情境時之應對方法，以有助於強化系統處於不同運轉情境時之韌性。
頻率持續運轉能力	國內僅針對離岸風場要求低頻率持續運轉能力，而美國、愛爾蘭及英國皆有要求需具備高頻及低頻持續運轉能力。	建議參考國外再生能源發電設備的高頻持續運轉能力規範，以提高發電設備在各種頻率條件下的穩定性，並減少因頻率控制不當而引發的非預期風險。
頻率響應能力	各國和臺灣都已制定頻率響應能力的相關標準，設定的參數差異不大。然而，美國將不動帶的可調整範圍擴增至0.96 Hz，而愛爾蘭的垂降參數則可設定至12%。	建議國內併聯技術要點宜將欠頻時之最大實功輸出限制與過頻時之最小實功輸出限制一併納入考量，這將有助於維持國內電力系統的理想運轉頻率。
功率因數	<div>1. 日本於功率因數規範中，加入考慮逆送電力之影響。</div> <div>2. 美國和愛爾蘭根據有效功率來制定無效功率輸出能力。</div> <div>3. 英國與臺灣相似，依照發電設備類型來制定功率因數運轉範圍。</div>	建議考量修正國內規範第七點第六款第三日中關於併接於高壓系統以下的發電廠責任分界點運轉原則，以減少不必要的運轉要求並與國際併網規範保持一致。
無效功率控制模式	美國、愛爾蘭和臺灣皆制定了三種無效功率控制模式，設定範圍差異不大。然而，國內在無效功率固定調整模式和功率因數固定調整模式中，尚未規範穩態誤差值。	建議我國在虛功調整和功率因數調整中，增加對穩態誤差的要求，以確保在調整過程中能夠達到更高的精確性，並有效提高系統的穩定性和運轉效能。

資料來源：本研究彙整。

處，不僅俾於因應能源轉型需求，同時有助於加強國內電網於再生能源併網情境下的適應能力。

誌謝

本研究承蒙經濟部能源署113年度「再生能源發展政策研究與整合推廣計畫(2/3)」的支持，謹此深摯感謝。

參考文獻

再生能源發電系統併聯技術要點，台灣電力股份有限公司，2023年8月。

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。

日本電氣協會系統連系規程，JEAC9701-2019。

系統連系技術要件，日本東京電力株式會社，2023年4月。

系統アクセスルール (特高壓版)，日本東京電力株式會社，2023年4月。

系統連系技術要件，日本關西電力株式會社，2023年4月。

「加速推動再生能源一極大化綠電發展，逐步達成能源轉型」，行政院重要政策，2023年11月。[Online]Available: <https://www.ey.gov.tw/Page/5A8A0CB5B41DA11E/46de50e1-7381-4634-93e7-4cd320ec308b>

IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces, IEEE Std 1547-2018.

D. Wu, G. Seo, L. Xu, C. Su, L. Kocewiak, Y. Sun, and Z. Qin, 2024. “Grid Integration of Offshore Wind Power: Standards, Control,

Power Quality and Transmission,” IEEE Open Journal of Power Electronics, Vol. 5, pp. 583-604.

The Grid Code Issue 6 Revision 20, National Grid ESO, December 2023.

Engineering Recommendation G5 Issue 5 2020, June 2020.

Technical Report on the Events of 9 September 2019, National Grid ESO, September 2019.

IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources (IBRs) Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems, IEEE Std. 2800-2022.

EirGrid Grid Code Version 12, EirGrid Group, March 2023.

Comparison, Identification and Analysis between International Renewable Energy Grid-Connection Standards and Domestic Technique Directions

Ching-Yen Tsai¹ Tien-Yu Yeh¹ Shyh-Jier Huang^{2*}
Po-Wei Yang¹ Hsiang-Yu Hsieh¹ Pei-Chen Huang³

ABSTRACT

This study aims to examine the domestic regulations for renewable energy grid integration and compare them with the key technical points of international renewable energy generation system interconnection. Through this comparison, the study seeks to identify the places for improvement in domestic regulations, which not only helps in addressing future energy transition needs, but also provides substantial recommendations for the continuous refinement of regulations concerning the interconnection of renewable energy generation systems.

This paper provides a comprehensive analysis of grid connection regulations and standards for renewable energy, including data collected from Taiwan, Japan, the UK, the US, and Ireland. It compares the regulatory differences among these countries, analyzes the advantages and disadvantages of their standards, and examines the capability requirements for renewable energy generation units when a large amount of renewable energy is integrated into the grid. The study focuses on aspects such as high/low voltage and high/low frequency ride-through capability, real and reactive power control capabilities, power factor control, and harmonic regulation standards, all of which are discussed in detail in the content.

Through the analysis of international standards and regulations, this research effectively identifies key points for improvement in domestic grid integration regulations. The outcomes of this research serve as a reference for revising domestic grid integration standards, helping to assess the comprehensiveness of the domestic renewable energy grid integration framework, and enhancing the resilience and adaptability of the system when integrating renewable energy into the domestic power supply.

Keywords: high/low voltage ride-through capability, high/low frequency ride-through capability, active/reactive power control capability, power factor control capability, harmonic control.

¹ Student, Department of Electrical Engineering, National Cheng Kung University.

² Professor, Department of Electrical Engineering, National Cheng Kung University.

³ Senior Manager, Green Energy Institute, Industrial Technology Research Institute.

*Corresponding Author, Phone: +886-6-2757575#32506, E-mail: clhuang@mail.ncku.edu.tw

Received Date: July 08, 2024

Revised Date: August 21, 2024

Accepted Date: September 02, 2024