國內外再生能源發電系統併網規範研討

關鍵詞：分散型發電設備、併網、孤島運轉、解聯、低電壓持續運轉

台灣世曦工程顧問股份有限公司／電機工程部／資深協理／黃郁文 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／電機工程部／經理／黃渡根 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／電機工程部／副理／陳彥均 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／電機工程部／工程師／彭兆川 ❹
台灣世曦工程顧問股份有限公司／電機工程部／工程師／楊凱平 ❺

摘 要 ABSTRACT

在全球倡導節能減碳下，再生能源開發規模與日俱增，尤以太陽能及風力發電已蔚為世界共識與潮流。大自然界之日照及風速並不穩定，其產生電力併入既設電力系統，將對既有電力系統造成衝擊與影響，因此國內外對再生能源發電系統併網均有相關規範與要求。本文將針對國內外再生能源發電系統併入既有電力系統之相關規範綜整比較，並就規劃設計需考量因素與可能發生問題之因應對策探討，提供再生能源發電系統建置者規設參考，以確保電力系統品質。

壹、前言

台灣為四面環海之島國，自有之能源匱乏，97.8%皆須依賴進口，尤對石化能源依賴性高，於獨立能源供應體系下，欠缺有效之備援，致使能源使用量及安全度頗受關注。另考量溫室效應問題、及未來能源政策，首重能源安全兼顧經濟發展與環境保護，減少對石化能源依賴，發展再生能源將為我國能源發展重點項目[1]。然再生能源發電屬間歇性不穩定發電系統，併入既有電網將對系統電壓、頻率等造成影響，甚或導致系統不穩定影響電力公司及鄰近用戶用電品質，故瞭解國內外規範與考量併聯可能產生之課題，並研擬因應對策，刻不容緩。

貳、電力系統併網相關國內外法規

以我國地理自然環境等因素，目前發展最多之再生能源發電系統為太陽光電發電與風力發電系統。再生能源發電非屬穩定系統，併入既設電力系統，亦將改變原既設電力系統饋電線路之電力潮流。另因新增再生能源發電設備亦使既有輸配電線路之壓降、系統短路容量、故障電流、孤島運轉 (islanding operation) 時 (與原電力系統解聯之狀況)人員設備保護、系統頻率與電力品質等均產生影響。故各國與各電力公司均會依照其電力系統架構、運轉情況及承受衝擊能力等因素，訂定相關併網技術規範，供併網電業者遵循，以確保雙方系統穩定及安全。綜整國內台電「再生能源發電系統併網技術要點」與國外主要併網規範，如表1所示。

表1 國內外再生能源發電系統之相關併網規範

國家	規範名稱
中華民國	台電「再生能源發電系統併聯技術要點」
美國	1. IEEE Std. 1547, Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems 2. California Energy Commission (CEC), California Electric Rule 21
加拿大	Halton Hills Hydro, Guidelines for Applicants Connecting Distributed Generation
德國	E.ON Netz GmbH, Grid Connection Regulations for High and Extra High Voltage

一、最大併網容量

台電「再生能源發電系統併聯技術要點」詳訂再生能源發電系統併網容量的規定，其中規定發電設備容量未滿100kW者得併接在低壓單相三線110V/220V或三相三線220V或三相四線220/380V配電系統上；裝置容量介於100 kW至500 kW者得併接在三相四線220/380V配電系統；裝置容量在100kW至10MW者得併接在11.4kV配電系統；裝置容量於10MW至20MW間者得併接在22.8kV配電系統上；裝置容量超過20MW者得併接在特高壓系統上，其併聯之電壓依個案檢討決定[2]。

美國IEEE Std. 1547在限制條件中，規定分散型發電(distributed generation, DG)設備併入之容量不可超過10MVA[3]。另外，CEC的California Electric Rule 21規定所有分散型發電設備之總容量不可超過該併接線路尖峰負載量之15%，且20kW以上者則須併接至三相配電系統[4]。

加拿大Halton Hills Hydro如同台電亦依照電壓等級分類，其規定併接於4.16/2.4kV配電系統之發電設備最大併網量需介於500kW至1MW；併接於8.32/4.8kV者最大併網量需介於500kW至3MW間；併接於27.6/16kV者最大併網容量需介於1MW至10MW間；併接於44kV者最大併網容量需介於5MW至10MW間。德國則並未提出最大併網之限制。國內外三相配電系統容許之再生能源發電系統併網容量規定，彙整如表2所示。

表2 國內外分散型發電設備在三相配電系統之最大併網容量規範[3]

國家	機構	系統電壓等級	最大併網容量限制
中華民國	台電	110V/220V/380V	小於100kW
		220/380V	100kW以上且未滿500kW
		11.4kV	100kW以上且未滿10MW
		22.8kV	10MW以上且未滿20MW
		特高壓系統	超過20MW
美國	IEEE Std. 1547		小於10MVA
	California Electric Rule 21		不可超過該併接線路尖峰負載量之15%
加拿大	Halton Hills Hydro	4.16/2.4kV	500kW至1MW
		8.32/4.8kV	500kW至3MW
		27.6/16kV	1MW至10MW
		44kV	5MW至10MW
德國	E.ON Netz GmbH	—	—

二、電壓變動

電壓變動屬於電力品質的一環，輸配電線路電壓變動過大將損及沿線用戶用電之安全，因此，再生能源發電系統與輸配電系統併聯運轉所造成之電壓變動需加以規範，以確保整體電力系統之安全。

台電「再生能源發電系統併聯技術要點」中規定，再生能源發電系統併接於台電公司系統造成責任分界點(point of common coupling, PCC)電壓變動率，加計同一變電所或同一變壓器已核准併網電源之影響，不含系統背景值應維持高低各2.5%以內[2]。國外方面，IEEE Std. 1547規定「分散型電源併接於區域電力系統時，不可使其耦合點之電壓波動幅度超過±5%」，且定義其電壓範圍下之清除時間[3]，如表3所示。E.ON Netz GmbH之規範訂定運轉電壓若低於標稱電壓值之85%時，必須與系統解聯[6]。

三、頻率變動

頻率變動亦屬於電力品質的一環，輸配電系統之頻率偏離其標稱頻率過大時表示系統已出狀況，不宜再讓發電設備與之併聯運轉。因此，再生能源發電系統須於規定時間內與輸配電系統解聯，以確保雙方系統之安全。此限定再生能源發電系統與所併接之輸配電系統解聯之規定時間即稱為清除時間(clearing time)或跳脫時間(trip time)。國內外電力系統頻率變動限制與清除時間規範，如表4所示。

四、短路電流

輸配電系統發生短路故障時，與之併聯運轉的再生能源發電系統，會貢獻短路電流於電力系統，危及設備及人員安全。台電「再生能源發電系統併聯技術要點」中針對三相配電系統規定，「發電機組送至台電公司系統之故障電流，不得造成台電公司及其他用戶斷路器之啟斷容量不足，否則應裝置限流電抗器或負

表3 國內外分散型發電系統異常電壓清除時間規範

國家	機構	電壓範圍	清除時間
中華民國	台電	±2.5%	—
美國	IEEE Std. 1547(註)	< 50%	0.16 s
		50% ≤ V < 88%	2.00 s
		88% ≤ V < 110%	無
		110% ≤ V < 120%	1.00 s
		V ≥ 120%	0.16 s
	California Electric Rule 21	< 50%	0.16 s
		50% ≤ V < 88%	2.00 s
		88% ≤ V < 110%	無
		110% ≤ V < 137%	2.0/0.5 s
		V ≥ 137%	0.1 s
加拿大	Halton Hills Hydro	—	—
德國	E.ON Netz GmbH	85%	—

註： 1. 係以ANSI C84.2-1995, Table1所示之系統標稱電壓為基準。
2. 分散型電源容量小於或等於30kW時，係指最大清除時間；若大於30kW時，則指預定清除時間。

擔因此而更換之斷路器費用。與高壓系統併聯者，其發電機組加入後，系統三相短路電流應小於10,000安培，否則應裝置限流設備或改接其他線路」。其規範如表5所示。

五、運轉功因

再生能源發電系統運轉功率因數未維持在單位功因時，所併接之電力系統將吸收或提供虛功率，致使配電線路電壓變動，進而超過電壓變動限制，因此有必要加以規範。另台電公司有針對風力與非風力機組，以及併接點不同下之運轉限制。表6為國內外分散型發電系統運轉功因之規範，表中資料顯示絕大部分國家皆將功率因數限制在0.9落後(lagging)到0.95超前(leading)之間，至於台電公司則區分併接於特高壓系統以上與併接於高壓系統以下兩種外，另將併接於高壓系統分成非風力發電機組與風力

表4 國內外電力系統頻率變動限制範圍與清除時間規範[2] [3] [4] [5] [6]

國家	標準或機構名稱	頻率限制範圍(Hz)	清除時間(s)	註解
中華民國	台電	f < 58或f > 61	—	總發電量在100kW以上者
美國	IEEE Std. 1547	f < 59.3或f > 60.5	0.16	併網容量 ≤ 30kW者
		f < 57	0.16	併網容量 > 30kW者
		57.8 < f < 59.8	0.16~300	
		f > 60.5	0.16	
	California Electric Rule 21	f < 59.3或f > 60.5	0.16	併網容量 ≤ 30kW者
		f < 57	0.16	併網容量 > 30kW者
		57.8 < f < 59.8	0.16~300	
		f > 60.5	0.16	
加拿大	Halton Hills Hydro	f < 59.3或f > 60.5	—	—
德國	E.ON Netz GmbH	f < 47.5或f > 51.5	立即	標稱頻率為50Hz

表5 國內外分散型發電系統之最大短路電流限制規範[3] [4]

國家	機構	短路電流限制
中華民國	台電	發電機組加入後，系統三相短路電流應小於10,000 A
美國	IEEE Std. 1547	—
	California Electric Rule 21	發電設備不得提供大於系統短路電流0.1倍之短路電流
加拿大	Halton Hills Hydro	—
德國	E.ON Netz GmbH	—

表6 國內外分散型發電系統之運轉功因規範[2] [3] [4] [5] [6]

國家	機構			運轉功因限制
中華民國	台電	併接於特高壓系統以上	再生能源設備	0.96落後至0.98超前
			非再生能源設備	0.9落後至0.95超前
		併接於高壓系統以下		1.0
美國	IEEE Std. 1547			—
	California Electric Rule 21			0.9落後至0.9超前
加拿大	Halton Hills Hydro			0.9落後至0.95超前
德國	E.ON Netz GmbH			0.95落後至1.0

發電機組兩種，其中風力發電機組之功率因數規範，相較於非風力發電機組更為嚴格，而併接於高壓系統以下之發電設備功率因數則規定無論何時皆為單位功因。

六、低電壓持續運轉

低電壓持續運轉（low voltage ride through, LVRT)係指在再生能源設備中風力發電併網運轉的一種特殊要求，係指再生能源發電設備於併網點電壓降落時，該再生能源發電設備或風場能夠持續併網不解聯，甚至向該電網提供足夠的無效功率以支撐電網電壓，直到電網電壓恢複正常。由於各國的電網架構與運轉情況不同，所以對LVRT的要求也不盡相同。目前在一些風力發電較發達的國家，如美國、德國等皆已相繼制訂LVRT規範。台電亦於「再生能源發電系統併聯技術要點」規定，當電力系統發生故障造成責任分界點電壓驟降時，風力發電設備必須能夠持續運轉，並符合以下要求，台電LVRT規定如圖1所示。

(一) 發電設備於責任分界點電壓自低電壓開始時間(0.0秒)降低至額定電壓百分之十五時，應持續運轉至少0.5 秒以上。

(二) 發電設備於責任分界點電壓恢復至額定電壓百分之九十以上時，應持續運轉。

(三) 風力發電設備於責任分界點電壓高於圖1之實線，風力發電設備應持續運轉。

德國E.ON Netz GmbH規定，當系統發生故障時責任分界點電壓必須至少持續運轉0.15秒；當系統恢復至標稱電壓之70%時亦必須能夠持續0.55秒；最後系統恢復至90%以上時，風力發電設備須能維持運轉3秒以上且不能與系統解聯，如圖2所示。

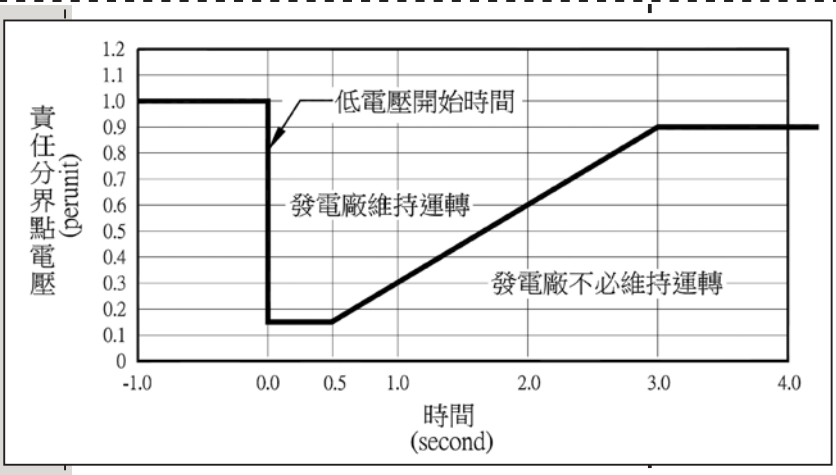

圖1 台電之風力發電設備LVRT規範[2]

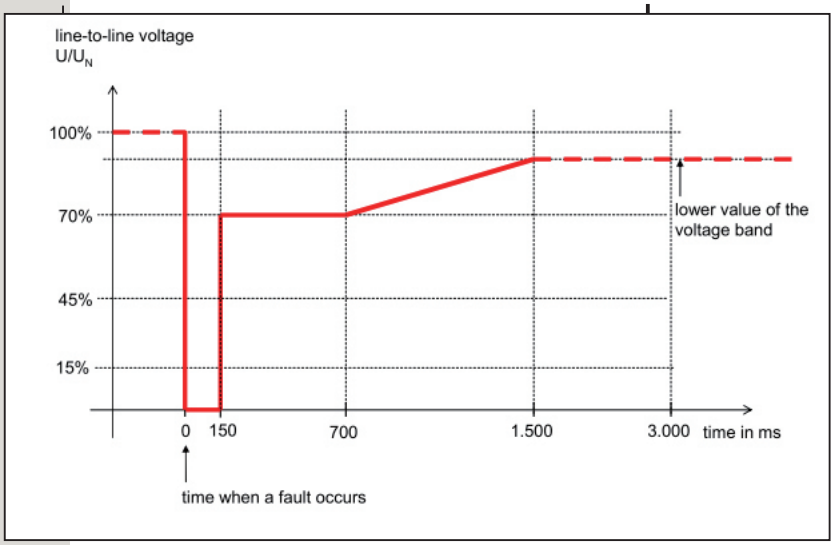

圖2 德國E.ON Netz GmbH之第一類發電設備LVRT規範[6]

參、併網規劃設計考量因素 [7]

一、再生能源發電設備裝置容量

再生能源發電設備裝置容量越大，其輸出電力越大，對併接之輸配電系統的衝擊也大，即在併/解聯以及系統發生短路故障時會產生較大擾動，導致發電設備失去同步；發電設備裝置容量越大，輸配電系統線路載流量也越大，可能使併接點電壓變動率超過高低各2.5 %之限制值；而且發電設備裝置容量越大，提供給輸配電系統之故障電流也越大。因此發電設備裝

置容量大者，對系統擾動不容忽視，主要影響因素包括電力潮流、穩態電壓變動、故障電流與暫態穩定度等。

二、再生能源發電設備併接位置

再生能源發電設備併接點位置不同，系統短路容量也會不同，對電壓變動率及併接之輸配電系統衝擊程度亦會不同。對配電系統而言，併接點位置改變所造成的衝擊項目主要為穩態電壓變動；對輸電系統而言，除穩態電壓變動外，還包括電力潮流。

三、再生能源發電設備併接電壓等級

輸配電系統電壓等級不同，再生能源發電設備對輸配電系統之衝擊程度也就不同。通常輸配電系統電壓等級越高，系統短路容量越高，再生能源發電機組輸出或輸入電流越小，因此，所產生系統衝擊也就越小。此項因素對於系統衝擊影響主要為電壓變動率。

四、電力轉換器品質與功能

再生能源發電設備屬不穩定電源，以風力發電系統為例，除傳統鼠籠式感應型再生能源發電設備外，皆需利用電力轉換器來穩定其功率，方能與輸配電系統併聯運轉。再生能源發電設備之電力轉換器通常包含交流/直流轉換器(AC/DC converter)及直流/交流轉換器(DC/AC converter)兩者，其轉換器的品質及功能與系統衝擊項目有關聯者甚多，包括電壓變動、短路電流、功率因數、諧波、直流成分、暫態穩定度、LVRT以及單獨運轉檢出等。

台電「再生能源發電系統併聯技術要點」規定：風力發電設備於責任分界點功率因數具有96 %滯後至98 %超前運轉能力，其目的在於不讓過多的虛功率供給至所併接之輸配電系統，因虛功率影響線路電壓變動甚大。另外，電力轉換器之功率因數控制功能與LVRT及暫態穩定度有關，可藉由電力轉換器將運轉功因降低，以便輸出大量的虛功率來維持系統電壓。此外，電力轉換器亦可藉由內部控制技術達到限制短路電流值、諧波與直流成分及單獨運轉檢出等目的。由此可知電力轉換器在風力發電併網技術上扮演重要角色。

五、變壓器容量與阻抗

再生能源發電設備與輸配電系統併接用之變壓器具有升壓與隔離作用，其三相繞組若連接成△接，可隔離3倍頻諧波與零序電流。此外，該併接用變壓器之繞組阻抗可限制短路電流值，若阻抗越大，流經輸配電系統的短路電流就越小，對系統之衝擊程度也越小。再生能源發電設備併接用之變壓器繞組阻抗與其額定容量成反比，容量越大，阻抗就越小，限制短路電流的作用也就越小。

六、導線規格與阻抗

在電網中導線阻抗具有限制短路電流作用，如同前述之變壓器阻抗，導線阻抗越大，輸入至輸配電系統的短路電流就越小，對系統之衝擊程度也越小。導線阻抗與線徑、長度、材質與周遭溫度等因素有關，其中又以前兩者影響最大。因再生能源發電系統需藉由電纜引接至併接點，此一引接線距離通常頗長，故導線規格十分重要。若所選擇導線線徑大且長度短，發電機組提供給輸配電系統之短路電流就會比較大。

肆、再生能源併網課題因應對策 [7]

一、電壓變動

影響輸配電系統電壓變動率之因素，有發電設備裝置容量、併接位置、併接電壓等級與電力轉換器品質與功能。併接位置若在配電系統，可考慮將再生能源發電系統併接到不同主變壓器所屬的配電饋線上，或者同一主變壓器所屬的不同配電饋線上；若併接對象是輸電系統，則可考慮將再生能源發電系統併接到不同變電所轄區內的線路或匯流排上，如此改善效果較為理想。

另外，若將併接位置移至短路容量較大之處，可降低對輸配電系統電壓變動之影響程度。對配電系統而言，短路容量較大者多在靠近主變壓器處。利用併接至電壓等級較高之輸配電系統亦可降低電壓變動衝擊程度，因電壓等級高者其短路容量也相對較大，但須考量併接位置之安裝、控制及運轉技術成本及裝置容量需夠大。另外，控制佳之電力轉換器可降低併接點電壓擾動；裝設虛功率補償設備，例如靜態虛功補償器(static var compensator, SVC)亦可減少電壓降。

二、故障電流

再生能源發電設備輸出之短路電流大小與其裝置容量、併接電壓等級、電力轉換器品質與功能及導線阻抗等有關。裝置容量越大，提供給輸配電系統短路電流也就越大，因此可利用分散併接降低短路電流。併接電壓則與前述相同，不再贅述。電力轉換器則具有控制短路電流能力，其所提供之短路電流值係以其額定電流之2倍計算。限流電抗器具低電阻、高電抗之特性，可用以限制短路電流值，平時又不會消耗太多實功率，因此是一項不錯的故障電流衝擊因應對策，但須考慮電壓降之限制。

三、電力潮流

再生能源發電設備輸出之電力潮流分布，與其裝置容量、併接位置以及併接電壓等級等有關。裝置容量過大將造成分布不均及線路電流過大問題，因可與前述相同方式分散再生能源併網位置，以降低裝置容量。併接點則可就近尋找線路載流量餘裕較大處來併接，或者引接至較遠處與輸配電系統併接，以降低對系統電力潮流之衝擊，但所衍生的線路成本及施工問題需考量。

四、直流成分

在交流電力系統中出現的直流電壓或電流即稱為直流成分(DC component)，其主要係電力轉換器控制不良所造成。直流成分會使變壓器或比流器之鐵心產生飽和現象，甚致可能造成保護電驛誤動作。IEEE Std. 1547與台電「再生能源發電系統併聯技術要點」均規範直流成分不可超過0.5%。因此需嚴選合格的轉換器，以降低發電系統輸出之直流成分。

五、功率因數

目前除傳統鼠籠式感應型風力發電機外，幾乎所有再生能源發電設備之運轉功因均由電力轉換器來控制，所以，嚴選合格的電力轉換器即是因應功率因數衝擊之對策。此外，併接靜態電容器或電抗器也可用以改變再生能源發電設備之運轉功因，但僅能使用在電網內負載功因之改善。

六、諧波

再生能源發電設備所產生之諧波主要是來自其電力轉換器，除嚴選合格電力轉換器，亦可使用諧波濾波器消除再生能源發電設備所產生之諧波。另外三相隔離變壓器亦具隔離部分諧波之功能，三相繞組採△連接，即可阻隔3倍頻諧波進入台電電網，此法對於3倍頻諧波成分高者最為合適。

七、單獨運轉 (孤島效應)

再生能源發電設備與輸配電系統併聯運轉後，若輸配電系統因故停電，而再生能源發電設備仍與之併聯，此一現象即稱為單獨運轉或孤島運轉。發生單獨運轉現象時，會危及系統維修人員之安全，故有必要加以檢出並強制切離。目前，此一單獨運轉檢出功能皆製作於電力轉換器中，因此，選用具有單獨運轉檢出功能的電力轉換器乃是因應此一衝擊之最佳對策。但假若所選擇之電力轉換器無單獨運轉檢出功能，則可考慮另外加裝單獨運轉偵測保護電驛，以彌補不足處。

八、低電壓持續運轉

依國內規範要求風力發電設備應具有LVRT功能。藉由電力轉換器控制其運轉功因，當系統發生電壓低落現象時，再生能源發電設備之電力轉換器立即控制運轉功因使其偏低，然後輸出大量虛功以拉升系統電壓。其因應對策是嚴選合格的電力轉換器或加裝靜態虛功補償器(static var compensator, SVC)或靜態同步補償器(static synchronous compensator, STATCOM)等電力電子設備，可協助補償系統虛功，使其得以在低電壓狀態維持較長的併聯運轉時間。

九、暫態穩定度

當大型風場之發電機裝置容量，在所併接電網中占比偏高時，當風場發電系統併/解聯以及輸電系統發生故障時，對系統暫態穩定度將會產生影響，故併接於特高壓系統且裝置容量超過100MW之風場發電系統，須進行暫態穩定度分析，由此可知，風場發電機裝置容量大者始可能產生暫態穩定度問題。因而，降低風場發電機之裝置容量或將大型風場系統分成數個規模較小的風場發電系統，分散併接至其他輸配電系統，即為降低暫態穩定度衝擊之因應對策。且於風場中發電系統裝置SVC或STATCOM，可達到虛功補償、維持系統電壓不崩潰之作用，亦為可採行對策之一。惟此類設備價格不斐，恐會大幅增加風場發電系統建置成本，需謹慎評估再予施作。

伍、結語

近年來，由於石化能源枯竭及主要生產地政治動盪造成價格日益高漲，加上2011年311東日本大地震，造成核能安全倍受質疑，另因溫室效應問題，使得各國對再生能源發電更加重視。台灣本島天然資源不足，能源多數依賴進口，對於能源供給來源不穩定及石化能源耗盡與污染問題，應該充分利用不同能源的優點，採能源多元化政策以兼顧經濟發展、安全穩定、環境保護。本島雖受地小人稠的限制，惟近年來在政府政策積極推動及優渥躉購費率回售電力下，預期未來太陽能光電及風力發電系統將在國內蓬勃發展。為避免併網後對既有電力系統造成衝擊，本文對再生能源發電系統併網影響予以深入探討，並提出課題因應對策，提供再生能源發電系統建置規劃設計參考。

陸、誌謝

本文完成撰寫，感謝台灣科技大學電機工程系陳在相教授所帶領團隊，與台灣世曦工程顧問股份有限公司101年度共同研發計畫「太陽光電、風力發電及電動車充電站併入電力系統衝擊分析」成果報告中，提供許多寶貴之技術資料。

參考文獻

1. 經濟部能源局，網址：http://www.moeaboe.gov.tw
2. 台灣電力公司，「再生能源發電系統併聯技術要點」，民國98年12月。
3. IEEE Std. 1547, Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
4. California Electric Rule 21 Supplemental Review Guideline
5. Halton Hills Hydro, Guidelines for Applicants Connecting Distributed Generation
6. E.ON Netz GmbH, Grid Connection Regulations for High and Extra High Voltage
7. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「太陽光電、風力發電及電動車充電站併入電力系統之衝擊因應」，101年度研發計畫成果報告，2012年11月