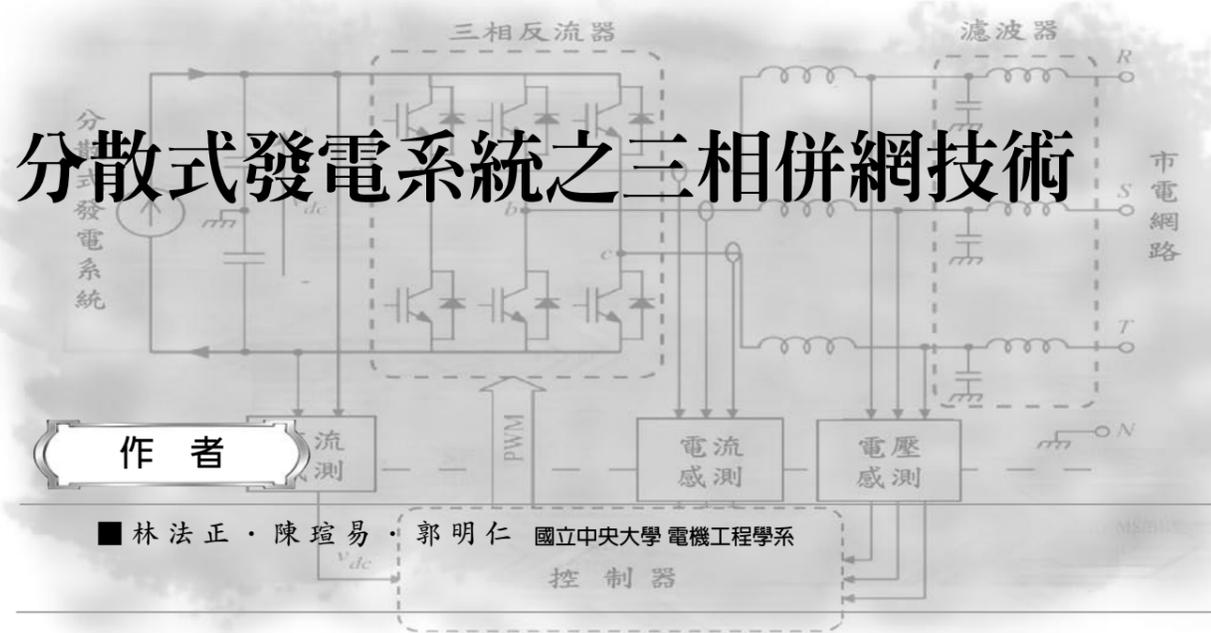


分散式發電系統之三相併網技術



作者

林法正 · 陳瑄易 · 郭明仁 國立中央大學 電機工程學系

摘要

在面對石油及煤碳等石化燃料日益短缺的威脅之下，利用再生能源開發分散式發電系統可有效減緩全球溫室效應的惡化與地球上有限石化能源的枯竭。分散式發電系統具備發電方式彈性、對環境影響低與施工期短等特性，可提供優於傳統集中式發電之可靠度，減少備用電力與輸配電系統架設成本，大為提升用電效率與電力品質，因此以分散式發電系統為基礎形成之區域型用電與電能管理型態勢必成為未來發展主流。考量三相分散式發電系統之重要性，本文之重點即為介紹目前分散式發電系統之三相併網技術，內容涵蓋分散式發電系統架構、再生能源、三相電路拓撲與控制架構等議題。

關鍵字：分散式發電系統、再生能源、反流器、三相併網技術

一、前言

現今各國工業發展迅速，電力需求不斷增加，在面對石油及煤碳等石化燃料日益短缺的威脅之下，開發潔淨、高效率的再生能源成為解決能源危機的首要任務。目前常見之再生能源包括太陽能、風能、水力、地熱、生質能與潮汐能等，若使用這些再生能源做為分散式電源(distributed resources)達成發電目標即為典型之分散式發電系統(distributed power generation system)，可有效減緩全球溫室效應的惡化與地球上有限石化能源的枯竭。分散式發電系統具備發電方式彈性、對環境影響低與施工期短等特性，且可提供優於傳統集中式發電(centralized power generation system)之可靠度，減少備用電力與輸配電系統架設成本。

目前台灣電力輸送主要是採南電北送之遠距離模式，組成結構為電源—輸電網—配電網—用戶，而因遠距離輸送造成之線路損失將導致用電效率不佳且電力品質不甚理

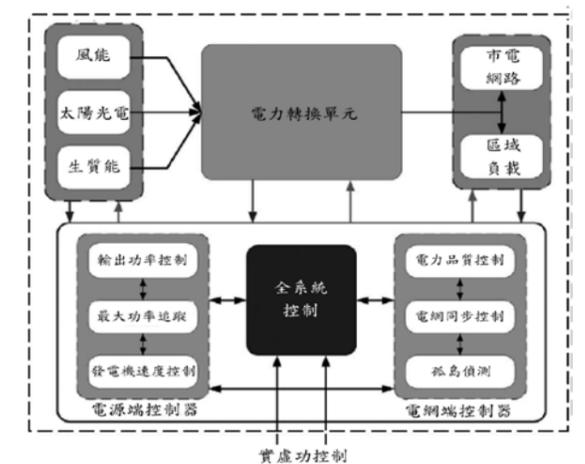
想。由於部分都會區與工業區負載高度集中且急遽增加，輸電壅塞與系統故障電流過大之問題已逐漸浮現。此外為因應電力可靠度及品質之需求提升，單純以現有系統增建變電所及輸電線的策略已無法應付未來系統的高度變化及完全避免大規模停電的可能。分散式發電系統採用電源—用戶或電源—配電網—用戶的組成結構，用電效率與電力品質均可大為提升，因此利用分散式發電系統形成區域型用電與電能管理型態勢必成為未來發展主流。台灣目前在相關產業發展上，主要包括再生能源發電技術發展、先進讀表基礎建設(advanced metering infrastructure, AMI)與電力設備開發等。在再生能源發電技術發展方面，台灣已有許多產業投入發展，多家公司已有成熟的風力發電機設計與製造技術，並正積極從事相關電力電子技術研發，另外也有部份廠商開發出高效率太陽能光電模組，並已通過相關驗證。先進讀表基礎建設包含數位式智慧型電表(smart meter)、資通訊系統及電能管理之軟體建置與開發。台灣資通訊產業研發實力雄厚，因此對於先進讀表基礎建設已有多家廠商具備成熟之產品與技術。電力設備包括不斷電設備(uninterruptible power supply, UPS)、穩壓器(regulator)、變壓器(transformer)、變頻器(inverter)與發輸配電設備等，台灣目前在不斷電設備、穩壓器、變壓器、變頻器均已具有成熟之產品支援，未來可持續朝向高可靠、高效率之發輸配電設備進行開發。

利用再生能源發電之分散式發電系統目前除了效率較低之問題外，缺乏主動可控制性為其主要缺點。隨著分散式電源不斷擴

增，在整體電網之供電比重逐漸上升，若這些再生能源未經過適當控制即併入電網，不穩定之運轉特性與發電效能將容易導致電網故障。此外分散式發電系統併入電網之後，配電系統從傳統放射狀結構變為多電源結構，電力潮流的大小和方向將產生明顯之改變，因此設計適當之電力電子技術與控制架構成為發展分散式發電系統第一要務。考量三相分散式發電系統之重要性，本文之重點即為介紹目前分散式發電系統之三相併網技術，內容涵蓋分散式發電系統架構、再生能源、三相電路拓撲與控制架構等議題。

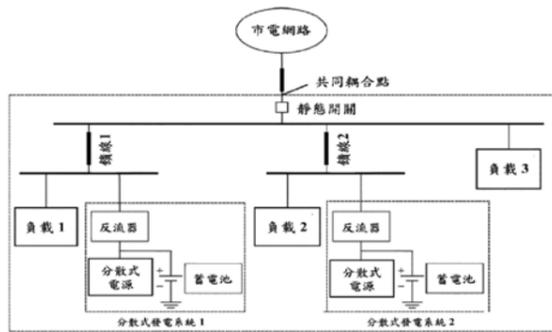
二、分散式發電系統架構

一般分散式發電系統架構如圖一所示[1]，其中電力轉換單元將輸入功率轉換為可用電力供給區域負載，當有剩餘電力尚可傳送至市電網路(utility grid)，而全系統控制又可分為電源端控制器與電網端控制器兩大部分，其控制效能與發電效率、整體電網穩定度有密切關係。



圖一 使用再生能源之分散式發電系統架構圖

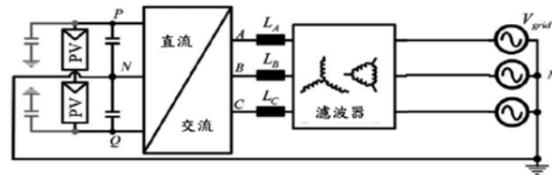
圖二為多組分散式發電系統併聯於市電網路示意圖[2]，包含兩組平行的分散式發電系統。每組分散式發電系統由分散式電源、脈波寬度調變(pulse width modulation, PWM)型電壓源反流器(voltage source inverter, VSI)與蓄電池等電力電子設備所組成。在正常操作模式下，各組分散式發電系統在共同耦合點(point of common coupling, PCC)藉由靜態開關(static switch, SS)併聯市電網路運轉。在此模式下，可利用分散式發電系統或市電網路供給電能於負載，並能在自身電力充足時向市電網路輸送多餘的電能。此架構除可減少由市電網路直接供電於負載所產生之線路損失外，並可減少網路干擾對負載之影響。當市電網路發生故障或電力品質無法達到要求時，靜態開關即時打開使分散式發電系統與市電網路解聯並孤島(islanding)運轉，避免從市電網路端進入的故障電流造成設備損壞。此時分散式發電系統將形成獨立電源用來調節負載電壓，並在預先制定的電源分配計畫中利用蓄電池提供不間斷電力給負載。隨著故障排除後，被隔離的分散式發電系統能在不影響主電力系統的前提下，重新返回併網模式並維持繼續供電，以達到高能源使用效率。



圖二 多組分散式發電系統併網示意圖

三、分散式能源

現今廣泛使用的分散式能源主要為太陽光電系統與風力發電系統，本文便以此兩種分散式能源為例介紹分散式發電系統與市電網路之併聯技術。



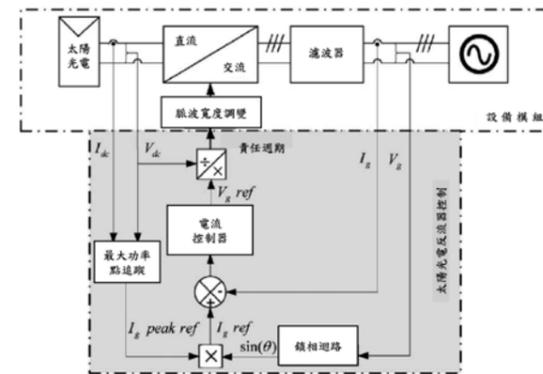
圖三 三相太陽光電系統架構圖

(一) 太陽光電系統

太陽光電(photovoltaic, PV)系統主要是透過太陽光電池將光能轉換成電能，其發電原理是使太陽光照射在太陽能光電板上，讓半導體材料吸收太陽光產生電子及電洞對，促使接面電場分離而形成電壓，再經由導線傳輸至負載使用[3-5]。太陽光電系統所產生的電力為一直流電源，必須經由反流器(inverter)將直流電壓轉換成交流電壓才能與市電網路併聯。此外為保護太陽光電系統電路元件與提高電壓轉換比，大部分太陽光電系統均含有隔離變壓器。傳統太陽光電系統以單相為主，為提高輸出功率與提高電力品質，近年來太陽光電系統也朝向三相系統設計如圖三所示[4]，其中電感 L_A, L_B, L_C 之功用為對饋入市電網路之電流進行整流。

太陽光電系統常用之控制策略如圖四所示，首先利用最大功率點追蹤(maximum power point tracking, MPPT)演算法求出太陽能光電板上 V_{dc} 與 I_{dc} 所對應之參考電流峰值 $I_g peak ref$ [5]，並與鎖相迴路所產生正弦訊號

相乘獲得參考電流 $I_g ref$ 。經由電流控制器計算出 $V_g ref$ ，與 V_{dc} 比較之後得到責任週期，再以PWM技術控制反流器開關切換，將太陽能光電板提供之直流電壓轉換成交流電壓後，即可經由濾波器濾除高頻雜訊後併聯至市電網路。



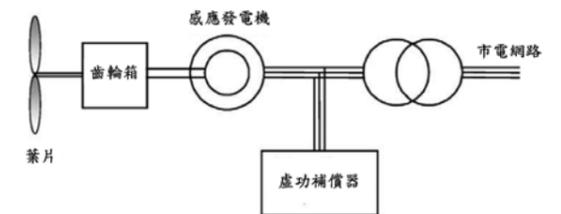
圖四 太陽光電系統控制架構

(二) 風力發電系統

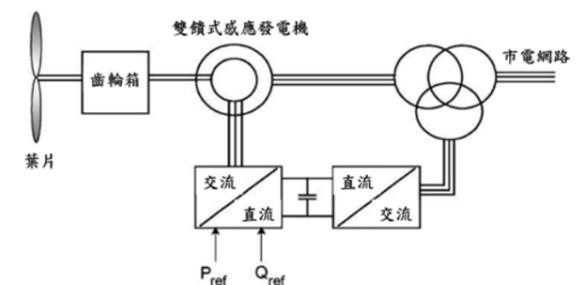
風力發電(wind generation)是由風機將風能轉為機械能，再由風機帶動發電機使機械能轉變為電能的一種能量轉換方式。一般來說，風力發電系統可以分成三種類型[6]：第一種為風力發電系統沒有裝設電力電子元件、第二種為風力發電系統裝設部份的電力電子元件以及第三種風力發電系統裝設全部由電力電子元件所組成之全功率轉換器。

第一種類型如圖五所示，使用感應發電機之發電機轉速通常會維持在一固定速度，所以功率會被限制住。這種架構通常會使用柔性啟動器，目的是為減少啟動期間的湧入電流，同時也需要一個虛功補償器滿足來自發電機端的虛功需求，此架構由於成本較低，因此仍具有一定市場。第二種類型比起第一種類型，控

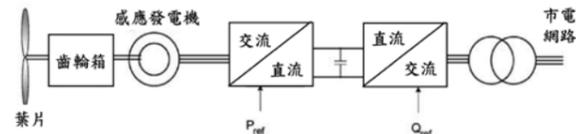
制性能可以獲得較多的改善。圖六為使用雙饋式感應發電機(doubly-fed induction generators)的風力發電系統，這種由交流/直流功率轉換器(AC/DC converter)以及直流/交流反流器(DC/AC inverter)所組成之架構需要較多的電力電子元件，不但可以控制虛功，而且在市電網路端有較佳之電力品質。而第三種類型如圖七所示，發電機所產生之交流電源經由功率轉換器整流為直流電源，提供直流負載使用，或是經由反流器將直流電源轉換成交流電源給市電網路。一般而言，靠近風機端之三相交流/直流功率轉換器利用向量控制來控制發電機轉矩，並且將風能轉為電能，其主要目的為擷取最大功率，而靠近市電網路端之直流/交流反流器則控制給予市電網路之實功率及虛功率的大小，並將電能傳送至市電網路，同時維持總諧波失真在一定的數值，以提升供電品質和改善電能傳送至市電網路時所造成的能量損耗。



圖五 風力發電系統無裝設電力電子元件之架構



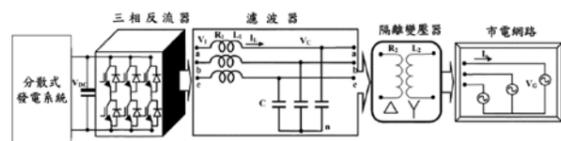
圖六 以雙饋式感應發電機所組成之風力發電系統



圖七 由全功率轉換器所組成之風力發電系統

四、分散式發電系統併網之三相電路拓撲

常見分散式發電系統併聯於市電網路之系統架構圖如圖八表示[7]。分散式發電系統之直流電壓經由三相反流器轉換成三相交流電壓，再經過濾波器與隔離變壓器送至市電網路。三相反流器可額外設計演算法控制分散式發電系統以提升發電效率，例如最大功率點追蹤演算法控制太陽能模組的直流電壓。濾波器的功能為濾除反流器切換過程中所產生的諧波電流，並經由變壓器將市電網路有效隔離，提高系統穩定度。目前常見之三相反流器架構包括一般式[8]、三階層式[9]與三相四線式[10]，本文將一一進行介紹。



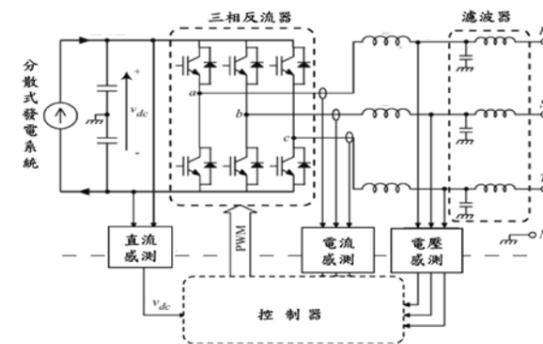
圖八 分散式發電系統併網架構圖

(一) 三相一般式架構

圖九為常見之三相一般式反流器架構[8]，主要包含標準三相電壓型反流器、濾波器及控制器。反流器的兩個用途為調節分散式發電系統端的直流電壓 V_{dc} 與有效轉換電力送至市電網路。此外反流器輸出之電壓與電流經由控制器，形成雙迴路控制架構，其中外部電壓迴路調節分散式發電系統端的直流電壓，並提供參

考訊號給內部電流迴路，使其能夠同時調節反流器之輸出電流。

由於市電網路的電壓變化直接影響反流器上之輸出線電流，控制器通常還需具備電壓與電流補償功能，在追隨電壓與電流命令的同時，利用PWM技術輸出高頻閘極訊號驅動反流器內部開關元件，使反流器對市電網路的瞬間變化具備不敏感性，以提高整體系統之強健性。



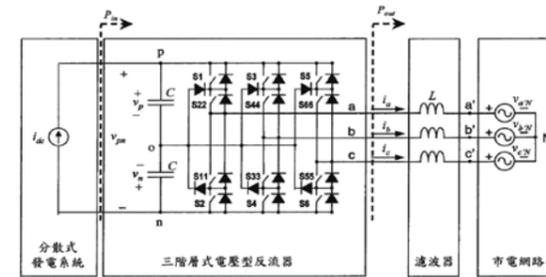
圖九 分散式發電系統併網之三相一般式架構

(二) 三相三階層式架構

圖十為三階層式三相反流器架構[9]。三階層式三相反流器特色在於直流鏈使用兩個電容提供中位點電位，而反流器的每一臂使用六個功率電晶體與兩個雙向開關，搭配PWM技術產生三相交流電壓，其中開關連接直流鏈中性點(o)與交流中性點(N)實現中性點箝制法(neutral-point-clamp, NPC)，以避免開關裝置跨壓過高並減少電壓輸出失真。

三階層式反流器的主要優點在於輸出電壓的諧波含量低於傳統反流器，可降低系統總諧波失真(total harmonic distortion, THD)，提高系統轉換效率。此外三階層式反流器與一般式反流器在相同輸出功率的情況下，每個功率元件

的耐壓值僅需一般式反流器的一半，因此利用三階層式反流器發展高功率驅動電路之成本要比一般式反流器低。

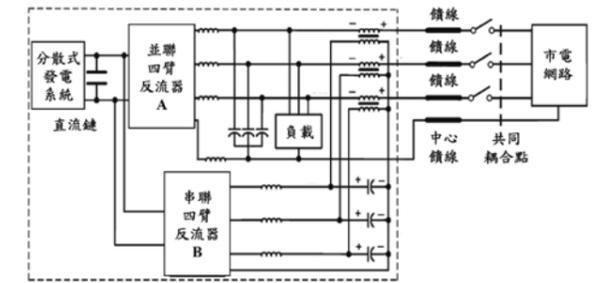


圖十 分散式發電系統併網之三相三階層式反流器架構

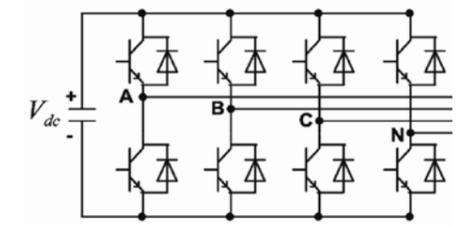
(三) 三相四線式架構

分散式發電系統與市電網路併聯時，其併聯界面容易受到來自市電網路之不平衡電壓與電壓驟降的衝擊。常見的解決方法是利用電力調節技術在併聯過程中平衡電壓，然而在電壓調節的過程中，由於連接市電網路的線阻非常小，市電網路與分散式發電系統間將產生大量的不平衡電流潮流現象，容易導致反流器與分佈饋線間的電力電子設備超過額定負荷，且當分散式發電系統與市電網路間的電壓差異增加時，不平衡現象會在市電網路造成更嚴重之電壓驟降。而三相四線式反流器之提出正可以解決上述之問題[10]，此架構包含並聯四臂反流器A與串聯四臂反流器B如圖十一(a)所示，而兩個反流器均為四臂式架構如圖十一(b)所示。

並聯四臂反流器A的用途為維持併聯界面之電壓平衡，而串聯四臂反流器B的用途為產生補償電流以維持併聯界面之線電流平衡。因此利用兩個不同用途的反流器組成三相四線式反流器架構與市電網路併聯，能有助於提升整體系統之電力品質[10]。



(a) 整體系統架構



(b) 反流器A與B內部電路架構

圖十一 分散式發電系統併網之三相四線式架構

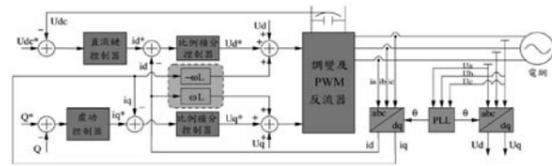
五、分散式發電系統併網之三相控制架構

本節將介紹常見分散式發電系統併網之三相控制架構，並對其特性進行說明。一般電網併聯之三相控制架構主要可分為兩個串聯迴路，亦即一個快速的電流內迴路用來調節電流以及一個電壓外迴路用來調節直流鏈電壓[1]。電流內迴路必須同時負責電力品質以及電流保護，因此諧波的動態與補償成為電流控制器的首要任務。電壓控制器則是用來平衡系統電力潮流，通常此控制器目標為希望系統穩定並且擁有較為和緩的動態表現。

(一) 同步旋轉座標軸控制架構

同步旋轉座標軸控制(synchronous rotating frame control)又可稱為dq軸控制，使用參考座標轉換方式(abc→dq)，將電網端電壓、電流波形映射至與電網端電壓同步旋轉之參考座標中，藉由此轉換方式，控制變數可成為直流值，達到濾波與控制均容易設計之目的。dq軸

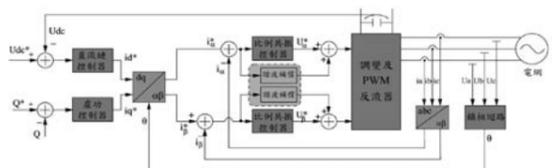
控制架構如圖十二所示[1]，在此架構之中，直流鏈電壓通常受外部所需之功率影響，其輸出為電流控制器之參考值，若不允許進行無效功率控制時，無效電流之參考值通常設為0；若欲進行無效功率控制，則無效電流之參考值就必須由系統決定。 dq 軸控制架構通常採用比例-積分(proportional-integral, PI)控制器，利用此控制器調節直流鏈電壓通常即有令人滿意之效果。



圖十二 同步旋轉座標軸控制架構

(二) 固定座標軸控制架構

固定座標軸控制(stationary reference frame control)架構如圖十三所示[1]，在此架構之中，電網端電流映射至固定座標軸之中(亦即 $abc \rightarrow \alpha\beta$)，所以控制變數在此架構之中為弦波，此架構通常會採用比例-共振控制器(proportional-resonant, PR)進行電流調節，該控制器操作在共振頻率附近時會有極高之控制增益，因此能有效消除控制訊號與參考值間之穩態誤差。

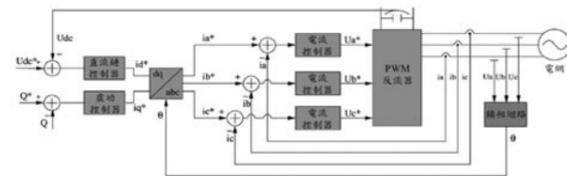


圖十三 固定座標軸控制架構

(三) 自然座標軸控制架構

此控制架構亦可稱為 abc 控制(natural reference frame control)，即對電網端之各相電

流使用獨立之電流控制器如圖十四所示[1]。在不接地系統之中，由於相電流間有相依關係，因此只需要兩個電流控制器而另一相電流可由克希荷夫電流定律獲得。由於此架構之高動態特性，通常控制器會建議採用非線性控制器，而控制效果通常又會與取樣頻率成正比，因此使用 abc 控制通常建議以具有高速運算能力之硬體架構如數位訊號處理器(digital signal processor, DSP)或可編程邏輯閘陣列(field-programmable gate arrays, FPGA)進行實現。



圖十四 自然座標軸控制架構

(四) 不同架構之評估考量

同步旋轉座標軸控制架構之主要缺點為必須使用電壓前饋(feedforward)控制與加入耦合項(cross-coupling)補償，且在實現座標轉換時必須使用電網端電壓之相位角。而在固定座標軸控制架構之中，若使用比例-共振控制器進行電流調節，則控制複雜度將低於同步旋轉座標軸控制架構，且濾波後之電網端電壓可當作參考電流波形之樣板(template)。在自然座標軸控制架構之中，若電流調節使用適應性(adaptive)非線性控制器，則控制複雜度將會提高，一般來說可使用死擊(dead-beat)控制器替代適應性非線性控制器以簡化設計。

六、結語

隨著台灣經濟建設的快速發展，部分都會區與工業區之負載呈現高度集中與急遽增加之趨勢，單以現有之發電設備已無法應付整體電力系統的高度變化及完全避免大規模停電的可能。利用太陽光電與風力發電等再生能源所發展之分散式發電系統，除可提供特定地區用電之外，還可將所剩餘之電能傳送給市電網路，且不對環境造成汙染，實為台灣改善目前

供電環境之良好辦法。此外隨著各式分散式發電系統之蓬勃發展，將可提高整個社會的能源利用率，並增強整個供電系統之穩定性、可靠性和電力品質。而配合電業自由化政策的修訂，更可使台灣具備自由化之電力市場，帶給用戶更多的用電選擇，因此分散式發電系統勢必成為台灣未來能源領域的一個重要發展方向，而所需要之電力電子技術必然成為能源科技之重要一環。

參考資料

[1] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1408, Oct. 2006.

[2] L. Yunwei, D.M. Vilathgamuwa, and L. P. Chiang, "Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system," IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 19, no. 5, pp. 1195-1204, Sep. 2004.

[3] G. Petrone, G. Spagnuolo, R. Teodorescu, M. Veerachary, and M. Vitelli, "Reliability issues in photovoltaic power processing systems," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55, no. 7, pp. 2569-2580, Jul. 2008.

[4] T. Kerekes, M. Liserre, R. Teodorescu, C. Klumpner, and M. Sumner, "Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies," IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 24, no. 9, pp. 2201-2211, Sep. 2009.

[5] S. Jain and V. Agarwal, "A single-stage grid connected inverter topology for solar PV systems with maximum power point tracking," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 22, no. 5, pp. 1928-1940, Sep. 2007.

[6] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronic as efficient interface in dispersed power generation systems," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1184-1194, Sep. 2004.

[7] K. H. Ahmed, A. M. Massoud, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Sensorless current control of three-phase inverter-based distributed generation," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 24, no. 2, pp. 919-929, Apr. 2009.

[8] J. C. Moreno, J. M. E. Huerta, R. G. Gil, and S. A. Gonzalez, "A robust predictive current control for three-phase grid-connected inverters," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 56, no. 6, pp. 1993-2004, Jun. 2009.

[9] S. Alepuz, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, J. Gago, D. Gonzalez, and J. Balcells, "Interfacing renewable energy sources to the utility grid using a three-level inverter," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 53, no. 5, pp. 1504-1511, Oct. 2009.

[10] L. Yunwei, D.M. Vilathgamuwa, and L. P. Chiang, "Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 41, no. 6, pp. 1707-1719, Dec. 2005.