

A Survey of Distributed Generation and Microgrid

Jun Qian, Xinran Li, Jinhua Hui, Zhiyong Liu

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China

Abstract: To meet the demand for rapidly growing load and reliably power supply from the consumer, the joint operation of distributed generation (DG), possessing advantages of saving investing and flexibility, with power grid brings tremendous variation for modern power system in economy and environment. But application of individual distributed generators can cause as many problems as it may solve. A better way to realize this is to take a system approach which views generation and associated loads as a microgrid. The microgrid concept assumes a cluster of loads and microsources operating as a single controllable system that provides both power and heat to its local area. This concept provides a new paradigm for defining the operation of DG. After concluding the research of DG and microgrid, this paper discussed the key problem, relevant references and expectation of distributed generation and microgrid.

Keywords: distributed generation, microgrid, wind turbine, photovoltaic, voltage stability, control system

1 引言

隨著國民經濟的發展和人民生活水準的提高，近年來用電負荷正急劇增長。電力部門大多把投資集中在火電、水電和核電等大型集中電源和超高壓遠距離輸電網的建設上。但是，隨著電網規模的不斷擴大，超大規模電力系統的弊端也日益凸現，成本高，運行難度大，難以適應用戶越來越高的安全和可靠性要求及多樣化的供電需求^[1]。今年春天，一場罕見的冰雪災害襲擊了我國南方大部分地區，電煤緊張、遠距離輸電風險大、能源結構不合理等問題凸現，尤其是一些大城市周邊缺乏多種形式的電源，讓人們警醒；另外，近幾年世界範圍內發生多次大停電事故，這些都充分暴露現有電網結構的脆弱性^[2,3]。因此，一味的擴大電網規模顯然不能滿足用戶越來越高的穩定性和可靠性的要求，分散式發電 DG(Distributed Generation)被提上了日程。

分散式發電 DG 以其投資省、發電方式靈活、與環境相容等特點，給現代電力系統運行與控制帶來了巨大的變化。它既可以滿足電力系統和用戶的特定要求，如削峰；又可以提供傳統的電力系統無可比擬的可靠性和經濟性。目前，歐美等發達國家已開始廣泛研究能源多樣化、高效和經濟的分散式發電系統，並取得了突破性進展^[4,5]。

分散式發電儘管優點突出，但其接入電網而引起的眾多問題也往往限制了分散式發電的廣泛應用。例如，由於分散式電源控制困難，其相對於大電網來說是一個不可控源，因此大系統一般採取限制、隔離的

方式來處置分散式電源，以期減小其對大電網的衝擊。為協調大電網與分散式電源間的矛盾，充分挖掘分散式能源為電網和用戶所帶來的價值和效益，在本世紀初，學者們提出了微電網的概念^[6-9]。

微電網以系統的觀點看問題，將一系列負荷和微電源聯繫在一起，看作一個單一可控系統，向用戶提供電能和熱能。微電網的概念為分散式發電的運行提供了一個全新的範例。微電網既可與大電網聯網運行，也可在電網故障或需要時斷開獨立運行。它還具有雙重角色：對大系統來說，微電網可以看作系統的一個可控元件，例如，這個元件可以被控制為一個簡單的可調度負荷，可以在數秒內做出回應以滿足傳輸系統的需求；對於用戶來說，微電網可以作為一個可定制的電源，以滿足用戶多樣化的需求，例如，增強局部供電可靠性，降低饋線損耗，支援本地電壓，通過利用廢熱提高效率，提供電壓下陷校正，或提供不間斷供電等。

目前國內多在分散式發電和分散式儲能上開展相關的研究^[10-12]，對微電網的研究還處在起步階段。而國外的微電網研究已經開始了很長一段時間，並建立了多個示範工程^[13]。本文在介紹從分散式發電到微電網研究的基礎上，對微電網中的關鍵問題和相關研究進行歸納和總結。

2 分散式發電及其對電力系統的影響

2.1 分散式發電的定義

由於分散式發電近幾年才受到如此廣泛的關注，國際上關於分散式發電技術尚無統一定義。一般認為分散式發電是指功率在幾十千瓦到幾十兆瓦範圍內、模組式的、分佈在負荷附近的清潔環保發電設施，能夠經濟、高效、可靠地發電。分散式發電是區別於傳統集中發電、遠距離輸電、大互聯網路的發電形式。分散式發電以燃氣輪機、微型燃氣輪機、燃氣發電機等為動力，以天然氣、氫氣、太陽能、風能、生物質能等為能源，可實現冷、熱、電聯供，是一種新型的發電和能源綜合利用方式。

目前，我國已經在部分地區建立了分散式發電的應用工程^[14]。北京的燃氣集團指揮調度中心的 CCHP 專案和上海的浦東機場分散式發電項目，都採用了燃氣輪機、利用燃氣輪機排出高溫燃氣產生蒸汽的餘熱鍋爐和使用蒸汽供冷的製冷機來實現冷、熱、電的聯供，取得了很好的效果。另外，在全國各地，特別是風能豐富的地區，也已開發了很多風力發電專案。

2.2 幾種典型分散式發電技術

(1) 微型燃氣輪機技術^[15,16]

微型燃氣輪機是以天然氣、甲烷、汽油、柴油為燃料的超小型汽輪機。其發電效率可達 30%，如實行熱電聯供，效率可提高到 75%。微型燃氣輪機的特點是體積小、品質輕、發電效率高、污染小、運行維護簡單。它是目前最成熟、最具有商業競爭力的分散式發電電源。

(2) 燃料電池技術^[17,18]

燃料電池是一種在恒定溫度下，直接將存儲在燃料和氧化劑中的化學能高效、環保地轉化為電能的裝置。目前已研究開發了五種燃料電池：聚合電解質膜電池（PEM）、鹼性燃料電池（AFC）、磷酸型燃料電池（PAFC）、固體電解質燃料電池（SOFC）和熔融碳酸鹽燃料電池（SOFC），其中 PAFC 是目前技術最為成熟且已商業化的燃料電池。燃料電池具有發電效率高、排廢量小、清潔無污染、噪音低、安裝週期短、安裝位置靈活等顯著特點。在日益強調環保的背景下，燃料電池的發展前景非常可觀。

(3) 光伏電池技術^[19]

光伏電池是將可再生的太陽能轉化成電能的一種發電裝置。國外開發的屋頂式光伏電池發電技術已得到廣泛關注。德國最著名的 2000 戶屋頂工程（2000 Roof Project），超過 2000 戶家庭安裝了屋頂式光伏發電裝置，平均每個分散式發電單元發電量達到 3 kW。目前光伏電池發電成本太高，但由於它利用的是

清潔、可再生的太陽能，故其前景仍被廣泛看好。

(4) 風力發電技術^[20]

風力發電機組從能量轉換角度分成兩部分：風力機和發電機。風速作用在風力機的葉片上產生轉矩，該轉矩驅動輪轂轉動，通過齒輪箱高速軸、剎車盤和聯軸器再與非同步發電機轉子相連，從而發電運行。風力發電技術可應用於偏遠無電網、風力資源豐富的地區，為當地居民提供生活和生產所需的電力。目前，風力發電技術在新能源領域已經比較成熟，經濟指標逐漸接近清潔煤發電。

2.3 分散式發電對電力系統的影響

分散式發電裝置主要是接在配電網上，當其與配電網並網運行時，往往會產生一些問題，同時也對整個電力系統有較大的影響。

(1) 分散式發電對電能品質的影響

分散式發電是建立在電力電子技術基礎之上的，大量的電力電子轉換器增加了大量的非線性負載，將會引起電網電流、電壓波形發生畸變，引起電網的諧波污染。文^[21]分析了分散式電源對電能品質的影響，針對中壓配電網討論引入 DG 後一些重要母線的諧波電壓水準，提出可以在諧波電壓水準較高的母線上安裝特殊濾波器來抑制諧波。文^[22]提出了一套適合於大型重要負荷（包括 DG）的電能指標，它不是基於用戶數量的大小，而是綜合考慮系統峰荷特性和用戶消費電力的斷續頻率。

(2) 分散式發電對配電網穩定性的影響

分散式電源接入配電網之後，配電系統從放射狀結構變為多電源結構，潮流的大小和方向有可能發生巨大改變，使配電網的穩態電壓也發生了變化。文^[23]研究了不同形式的 DG 設備及其安裝位置和注入容量與電壓指標之間的定量關係，使 DG 的規劃方案能夠改善配電系統的電壓穩定性，最大限度地提高配網承受負荷增長的能力，從而延緩輸電和配電設備的投資擴建。文^[24]基於分散式發電穩定性建模的研究方法，分別將 DGS 視為備用電源、削峰和電網測量應用三個模組，分析其對系統穩定性的影響。文^[25]以一個 11 kV 的輻射狀配電網為算例，通過改變 DGS 類型及故障點位置，仿真計算出系統發生不對稱故障時發電機的機端電壓，定子電流和轉子角度，分析了其對故障臨界切除時間和系統穩定性的影響。

(3) 分散式發電對繼電保護的影響

分散式電源接入配電網後，輻射式網路將變為多電源網路，潮流也不再單向地從變電站母線流向各負荷。配電網的根本性變化使得電網各種保護定值與機理發生了深刻變化。文^[26]提出了一種在分散式電源並網時的保護及自動裝置配置方案，該方案將配電網原有的距離保護改造為允許式方向縱聯保護，提高了並網變電站的供電可靠性，具有實際可行性。文^[27]借助於電磁暫態計算程式（EMTP）仿真分析了分散式同步電機（SG）和感應電機（IG）在配電網中對保護定值的影響。仿真結果表明，分散式電源的聯網影響了故障切除時間，SG的臨界切除時間雖然大於IG，但兩者的臨界切除時間都低於沒有分散式電源的臨界故障切除時間，這將對現有的保護整定配合產生巨大影響。文^[28]提出，故障發生時為確保保護裝置正確動作，應切斷電網中的DGS。但引發了如下問題：過電流故障的切除與DGS的切斷在時限上的配合；自動重合開關斷時間間隔內，確保DGS快速切斷；在架空線和地下電纜的混合線路中切斷DGS，變壓器空載運行，電纜對地電容與變壓器△側的線圈發生鐵磁諧振，產生不規則的高電壓大電流，嚴重威脅線路的電力器件。上述的種種問題，都將是分散式發電技術應用後，繼電保護需要考慮的問題。

（4）分散式發電對整個電力行業的影響

分散式發電的普及將對電力市場的走向和最後格局產生深遠的影響。首先電力公司和用戶之間將形成新型的關係。用戶可以從電力公司買電，也可以用自己擁有的分散式電源向電力公司賣電或為電力公司有償提供削峰、緊急功率支援等服務。文^[29]從電力零售市場的角度出發，分析了分散式發電對現有電力系統的影響以及面臨的挑戰。

（5）其他影響

分散式發電對電力系統的其他影響包括分散式發電的動態仿真^[30]、含有DGS的配電網的規劃與設計^[31]、分散式發電的市場體系、相應的法律、法規和行業規範^[32]等。

3 微電網概念及其基本結構

3.1 微電網的概念

目前，國際上很多國家已經開始了微電網的研究，立足於本國電力系統的實際問題與國家的可持續發展能源目標，提出了各自的微電網概念。美國電氣可靠性技術解決方案聯合會 CERTS 最早提出了微電網的概念^[33]，並且是眾多微電網概念中最權威的一個。

美國 CERTS 給出的概念是：微電網是一種由負荷和微型電源共同組成的系統，它可以同時提供電能和熱量；微電網內部的電源主要由電力電子器件負責能量的轉換，並提供必需的控制；微電網相對於外部大電網表現為單一的受控元件，並可同時滿足用戶對電能品質和供電安全的要求。文獻^[34]對 CERTS 微電網的主要思想及關鍵問題進行了描述和總結，系統地概況了其定義、結構、控制、保護及效益分析等一系列問題。

另外，歐盟微電網項目（European Commission Project Micro-grids）也給出了定義^[35]：微電網是一個利用一次能源；使用微型電源，分為不可控、部分可控和全控三種；配有儲能裝置；使用電力電子裝置進行能量調節的向用戶提供冷、熱、電三聯供的系統。

綜合以上，並結合我國電網的實際狀況，文^[36]提出了微電網的概念：能源來源主要為可再生能源；發電系統類型可為微型燃氣輪機、內燃機、太陽能電池、風力發電機、生物質能等；系統容量為 20KW ~ 10MW；網內的用戶配電電壓等級為 380V，或者包括 10.5kV；如與外部電網進行能量交換，電壓等級由微電網的具體應用等情況而定。

3.2 微電網基本結構

美國威斯康星大學麥迪森分校（University of Wisconsin-Madison）的 Robert H. Lasseter 教授根據 CERTS 微電網概念，提出了微電網基本結構，如圖 1 所示。

圖 1 所示的微電網整體呈輻射狀結構，包括 3 條饋線 A、B 和 C 及 1 條負荷母線。整個輻射系統通過主分閘裝置（通常是一個靜態開關 Static Switch）與配電系統相連，可實現孤網與並網運行模式間的平滑切換。負荷端的饋線電壓通常是 480 V 或更低。

圖 1 展示了微型燃氣輪機、光伏電池和燃料電池等微電源形式，其中一些微電源接在熱能用戶附近，為當地提供熱能。微電網中配置能量管理器和潮流控制器，前者可實現對整個微電網的綜合分析控制，而後者可實現對微電源的就地控制。當負荷變化時，潮流控制器根據本地頻率和電壓資訊進行潮流調節，當地微電源相應增加或減少其功率輸出以保持功率平衡。

圖中還示範了針對 3 類具有不同供電品質要求的負荷的個性化微電源供電方案。對於連接在饋線 A 上的敏感負荷和熱負荷，採用光伏電池和微型燃氣輪機相結合的供電和供熱；對於連接在饋線 C 上的可調節

負荷，採用燃料電池和微型燃氣輪機混合供電；對於連接在饋線 B 上的可中斷負荷，沒有設置專門的微電源，而是直接由配電網供電。這樣，對於敏感負荷和可調節負荷都是採用雙源供電模式，當外部配電網發生故障時，微電網通過主分離器的斷開，平滑的過渡到獨立運行狀態，饋線 A 和 C 上的靜態開關快速動作使重要負荷與故障隔離且不間斷向其正常供電，而對於饋線 B 上的可中斷負荷，系統則會根據網路功率平衡的需求，在必要時將其切除。

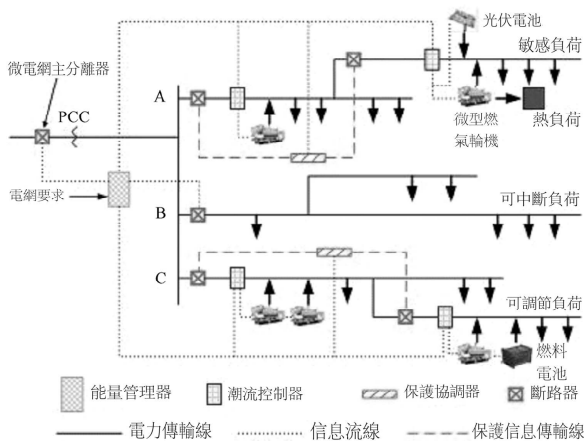


圖 1. 微電網基本結構

Figure 1. Topological structure of microgrid

圖 1 只是微電網結構的一種形式，具體的結構隨負荷等方面的要求而不同，但是基本單元應該包含微電源、儲能裝置、管理系統以及負荷。其中大多數微電源與電網的介面都要求是基於電力電子的，以保證微電網以單個系統方式運行的柔性和可靠性。

3.3 微電網在國外的研究應用

目前，微電網的研究在國外已經開始了很長一段時間，並建立了多個微電網的示範工程。由美國北部電力系統承建的 Mad River 微電網是美國第一個微電網示範工程^[37]。同時，基於 CERTS 微電網概念，由美國電力公司 AEP 建立的 Walnut Site 微電網^[38]中的電力電子裝置與眾多新能源的使用與控制，為可再生能源潛能的充分發揮及穩定、控制等問題的解決提供了新的思路。同時，歐洲多個國家已初步形成了微電網的運行、控制、保護、安全及通信等理論，並在多個實驗室（包括德國的 ISET、英國的曼徹斯特大學實驗室、法國的 Ecole de Mines、希臘的 NTUA 等）微電網平臺上對這些理論進行了驗證^[39]。另外，日本還專門成立了新能源與工業技術發展組織（NEDO）統

一協調國內高校、企業與國家重點實驗室對新能源及其應用的研究。目前，日本已在其國內建立了多個微電網工程，並且在中國新疆維吾爾自治區建設了微電網工程^[40]。除美國、歐洲、日本外，加拿大、澳大利亞等國也開展了微電網的研究。

從各國對未來電網的發展戰略和對微電網的研究與應用中可清楚看出，微電網的形成與發展絕不是對傳統集中式、大規模電網的革命與挑戰，而是代表電力行業服務意識、能源利用意識、環保意識的一種提高與改變。微電網是未來電網實現高效、環保、優質供電的一個重要手段，是對大電網的有益補充。

4 微電網的研究發展狀況

4.1 微電網的控制

對於微電網控制來說，一個最基本的技術難點就是如何控制這麼多數量的微電源。一般很難要求跟以往的配電系統控制一樣，用一個中心控制點對整個系統做出快速反應並進行相應控制，這樣一旦系統中某一個控制元件故障或軟體出錯，就可能導致整個系統癱瘓。因此，微電網控制應該做到微電源自身根據本地資訊對電網中的事件做出自主反應，例如，對於電壓跌落、故障、停電等，微電源發電機應利用本地資訊自動轉到獨立運行方式，而不是像傳統方式中由電網調度統一協調。這就要求微電源能夠對本地資訊做出快速的反應，迅速根據負荷要求而控制出力，在配電模式與發電模式之間平滑的過渡。

因此，CERTS 提出微電網控制應當保證^[41]：新的微電源接入不對現有系統造成影響；自主的選擇運行點；平滑的與電網並網或分離；對有功、無功可以根據動態負荷的要求進行獨立控制。

針對微電網的特點，目前已研究出幾種適合微電網控制的方法：

（1）基於電力電子技術的“即插即用”與“對等”的控制思想

電力電子技術是 CERTS 微電網實現智慧和靈活控制的重要支撐，基於此形成了“即插即用”（plug and play）與“對等”（peer to peer）的控制思想和設計理念。該方法根據微電網控制要求，靈活選擇與傳統發電機相類似的下垂特性曲線進行控制，將系統的不平衡功率動態分配給各機組承擔，具有簡單、可靠、易於實現等特點。但其僅針對基於電力電子技術的微電源間的控制，並且沒有考慮電壓和頻率的恢復問題。

(2) 基於功率管理系統的控制

該方法採用不同控制模組對有功、無功分別控制，很好地滿足了微電網多種控制的要求，尤其在調節功率平衡時，加入了頻率恢復演算法，能夠很好地滿足頻率品質的要求。文獻^[42]詳細地介紹了基於電壓特性曲線、電壓管理和無功功率補償的功率管理策略，同時採用一個 13.8kV 的配電網模型，詳細檢驗了該方法的有效性。

(3) 基於多代理技術的微電網控制方法^[43]

該方法將傳統電力系統中的多代理技術應用於微電網控制系統，提供了一個能夠嵌入各種控制性能但又無需管理者經常出現的系統。文^[44]通過建立一個微電網直流系統仿真平臺，論證了多代理控制技術在微電網中的有效性，仿真結構表明該方法能很好地管理微電網中的各個微電源，並且微電網運行穩定，證明該方法是有效的。

目前，微電網控制方面的研究還剛剛起步，在研究上述幾種控制方法實用化的同時，需要在對現有的頻率和電壓控制方法在微電網中適用性校驗的基礎上，提出更加先進、智慧的控制策略。

4.2 微電網系統優化和穩定性分析

(1) 系統優化

微電網的系統優化可以通過能量管理器完成。能量管理器通過採集本地資訊，包括本地電能和熱能需求、電能品質要求、電能和天然氣的消耗、批發或零售服務需求、電網特殊要求、需求側管理要求、擁塞度等，以決定微電網需要從配電系統吸收的能量總和。CERTS 提出能量管理器的幾個關鍵因素包括：

- ① 為每個潮流控制器和微電源控制器提供獨立的功率和電壓調節點；
- ② 確保熱負荷和電負荷得到滿足；
- ③ 確保微電網滿足與輸電系統通信；
- ④ 使污染排放與系統損耗最小；
- ⑤ 使微電源的運行效率最大；
- ⑥ 故障發生時為獨立運行和與外電網重連提供邏輯和控制信號。

目前，還沒有學者提出系統的微電網優化理論和方法，需結合現有的科學理論和原理方法，在研究微電網運行特性的基礎上，提出微電網-電力系統高效運行與協同優化控制理論與技術體系。

(2) 穩定性分析

微電網的穩定問題可以從以下兩個角度進行研

究：從外部電網角度上看，微電網可以被看做是一個分散式電力裝置。但是，與單個分散式發電系統相比，微電網系統更為複雜，交換的電能功率更大。電能也不會像前者只流入電網，而是能與外部電網進行雙向的能量交換。與電網並聯的微電網多了，也會影響外部電網的穩定。目前，還沒有對此做系統的研究，多是針對分散式發電對外部電網穩定性的影響進行研究。

從微電網自身的角度上看，微電網運行分為並網和獨立運行兩種模式。當微電網內部，由於某個發電單元故障、檢修等原因退出運行或負荷急劇增加，致使微電網供電功率不足需要與外部電網並聯吸收功率，或者微電網在滿足負荷和儲能需求後，仍有功率富餘，也可與外電網並聯向外傳送能量。但是當發生母線電壓降落、外部電網發生故障等造成與外部電網連接中斷時，微電網需要平滑地從並網模式過渡到獨立運行模式時，諸如因出力不能和負荷達到平衡而導致逆變器頻率偏差等都會對微電網的穩定造成影響。另外，不同負荷類型也會對微電網本身的穩定性構成影響。文獻^[45]通過實例仿真建模，分析了不同負荷類型、不同故障類型和電動機慣性常數對微電網穩定性的影響。仿真結果表明恒阻抗負荷對系統穩定性沒有影響，只有電動機負荷才會造成系統不穩定，並且電動機的慣性常數越高，對微電網的穩定性影響也越大。

目前針對上述不同情況對微電網穩定性的影響的研究還不是很成熟，需要分別對其採用不同的分析和建模方法加以研究。

4.3 微電網的保護^[46]

微電網的保護問題與傳統保護有著很大的不同，主要表現在：潮流的雙向流通和微電網在並網和獨立運行兩種模式下，短路電流差異很大。因此，如何在並網和獨立運行兩種模式下均能對微電網內部故障做出回應以及在並網模式下快速感知大電網故障，同時保證保護的選擇性、快速性、靈敏性和可靠性，是微電網保護的關鍵，也是微電網保護的難點。

曾經，有學者提出一種有效的方法就是發展即時故障定位技術，可以快速準確的定位故障發生的位置，這樣不管在什麼運行模式下，繼電保護裝置都可以準確的動作，但是這種方法的發展可能比較昂貴。文獻^[47]針對單相接地故障與線間故障，提出了基於對稱電流分量檢測的保護策略。該方法以超過一定閾值的零序電流分量和負序電流分量作為保護的啟動值，將傳統的過電流保護與之結合可取得良好的效果。

目前，微電網的保護方法和裝置的開發還很不完善，需要人們對更加完善的保護策略進行不斷的探索。

4.4 微電網經濟性與市場管理

微電網的經濟性是微電網吸引用戶並能在電力系統得到推廣的關鍵之一。微電網的經濟效益是多方面的，從用戶來看，主要集中在能源高效利用和環保以及安全、可靠的個性化電能供給這兩個方面。

優化資源配置、實現高效能源供給是體現微電網經濟性的重要方面，也是微電網研究中的一項重點。目前，由美國 CERTS 提出的分散式電源用戶側模型 DER-CAM (Distributed energy resource— customer adoption model) 是對微電網資源結構進行經濟設計的重要工具^[48]。該模型將分散式發電的安裝和運行成本等與電力部門的供電費用結構進行比較，可以為用戶提供供電效果佳且成本低的分散式發電技術組合及熱電聯供的技術配置決策。

微電網的經濟效益評估和量化是微電網吸引力的最直接表達。雖然目前已有相關文獻對微電網的經濟和效益做了比較分析^[49,50]，但至今尚無有效方法將微電網對用戶、電力部門及社會的效益全面量化評估。這方面的研究亟待深入與加強。

另外，微電網發展還有許多市場管理和政策上的障礙。靈活協調微電網內部的能量交換與管理，建立高效、公正、安全的市場機制，重新定位供電方、電網及用戶三者的角色與責任，加緊制定相應的管理政策和法規等是當前及今後一段時期的努力方向。

除上述提及的幾點外，微電源也是微電網技術的研究重點。目前像燃料電池、光伏電池等這些新型電源的成本還比較高，加快對這些能源的技術研究、降低其成本也是增強微電網競爭力、推動其發展的有利因素。

5 結論

近年來，關於分散式發電和微電網的研究越來越多，也取得了一定的研究成果，但還遠遠沒有達到實用階段，本課題的研究需要在前面研究工作的基礎上，結合我國電力發展的實際情況，重點在下面幾個方面進行更加系統、深入的探討：

(1) 分散式發電和微電網數學模型的研究

分散式發電和微電網數學模型的研究是本課題研究的基礎和重點，針對不同的研究目標，主要在以下三個方面展開細緻深入的研究：

① 針對分散式發電對大電網造成的衝擊，建立大型分散式發電系統（如風電場、太陽能和風能聯合系

統等）的數學模型，分析其接入大電網後對整個電力系統的影響；

② 針對電力系統仿真和分析採用的模型，分散式發電和微電網的引入對負荷模型的影響最大，深入研究考慮分散式發電和微電網的電力系統負荷建模關鍵理論與技術，形成實用化的含有分散式電源和微電網的綜合負荷建模系統方法，從而建立考慮分散式發電和微電網的綜合負荷模型，為電力系統仿真和分析提供更加精確、實用的負荷模型；

③ 針對分散式電源和微電網本身，由於微電網存在內部能量的多向、多路徑流動與傳輸，並且其內部組成部分的時間常數相差很大（一次能源轉化的時間常數以秒計，發電裝置中的電磁暫態過程以毫秒計，電力電子轉換器中的開關及其控制過程以微、納秒計），需要採用新的演算法建立多參量複雜系統的數學模型，為仿真分析提供更加準確的分散式電源和微電網模型。

(2) 微電網及其與大電網運行之間的優化與控制研究

針對微電網的獨立和並網兩種運行模式，需要對已有的頻率、電壓控制方法在微電網中進行適應性校驗，在此基礎上建立基於不同類型微電源的更加先進、智慧的運行和控制策略；從而建立微電網與大電網運行之間的協同優化模型，進而形成實用化、能提高系統運行效率的微電網與大電網運行的協同優化預測控制策略與方法。

(3) 考慮分散式發電和微電網的規劃與電力市場研究

針對分散式發電和微電網所占系統容量逐漸增大之後對電力規劃的影響，需要建立合理、可靠的分散式發電與微電網的預測模型；另外需要深入研究分散式發電和微電網對現有電力市場的影響，建立新型電力公司與用戶的關係體系，妥善研究和制定與分散式發電和微電網相關的法律、法規和行業規範。

通過上述的分析可以看到，作為開發可再生潔淨能源和提高供電可靠性的有效利用形式，分散式發電和微電網已引起各國科學家的廣泛關注。雖然將其實用化還有很多問題亟待解決，但毫無疑問，分散式發電和微電網的發展潛力十分巨大。

REFERENCES

- [1] Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on microgrid research. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107(in Chinese).

- [2] Jia Changzhu. Analysing our electric network's safety from the US/Canada power down event. *Modern Electric Power*, 2004, 21(3): 70-73(in Chinese).
- [3] Liu Changgen, Xiao Jianghua, Cao Gangqiang. Characteristic, causes and countermeasures for ice disaster once for 50 years in Hunan power grid. *Electric Power Construction*, 2005, 26(7): 1-3.
- [4] Puttgen H B, MacGregor P R, Lambert F C. Distributed generation: semantic hype or the dawn of a new era?. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2003, 1(1): 22-29.
- [5] Chiradeja P, Ramakumar R. An approach to quantify the technical benefits of distributed generation. *IEEE trans on Energy Conversion*, 2004, 19(4): 764-773.
- [6] Lasseter R H. Microgrids. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, Jan, 2002: 305-308.
- [7] Lasseter R H, Paigi P. Microgrids: a conceptual solution. *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, June, 2004: 4285-4290.
- [8] Phillips L R. Tasking and policy for distributed microgrid management. *IEEE Power Eng. Society General Meeting*, June, 2007: 1-4.
- [9] Lasseter R H. Certs microgrid. *IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, April, 2007: 1-5.
- [10] He Wei. Developing of distribution generation and new distribution grid. *Journal of Jiangxi Vocational and Technical College of Electricity*, 2005, 18(3): 43-44(in Chinese).
- [11] Zhang Zhijian, Wang Jiandong, Ma Jin, et al. Key technology of distributed generation. *Shanxi Electric Power*, 2007, 4(2): 57-61.
- [12] Liang Caihao, Duan Xianzhong. Distributed generation and its impact in power system. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(12): 53-56(in Chinese).
- [13] Hatzigiorgiou N, Asaano H, Iravani R, et al. Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2007, 5(4): 78-94.
- [14] Hu Xuehao. Distributed generation and its connection to distribution system. *Electrotechnical Journal*, 2004, (10): 1-5(in Chinese).
- [15] Gaonkar D N, Patel R N. Modeling and simulation of microturbine based distributed generation system. *IEEE Power India Conference*, April, 2006: 5pp.
- [16] Lasseter R H. Dynamic models for micro-turbines and fuel cells. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, July, 2001: 761-766.
- [17] Rahman S. Fuel cell as a distributed generation technology. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, July, 2001: 551-552.
- [18] Nehrir M H, Wang Caisheng, Shaw S R. Fuel cells: promising devices for distributed generation. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2006, 4(1): 47-53.
- [19] Kroposki B, DeBlasio R. Technologies for the new millennium: photovoltaics as a distributed resource. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, July, 2000: 1798-1801.
- [20] Fan Zhenyu, Enslin J H R. Challenges, principles and issues relating to the development of wind power in china. *IEEE PES Power systems Conference and Exposition*, Dec, 2006: 748-754.
- [21] Dolezal J, Santarius P, Elusty J, et al. The effect of dispersed generation on power quality in distribution system. *IEEE PES Quality and Security of Electric Power Delivery Systems*, Oct, 2003: 204-207.
- [22] McDermott T E, Dugan R C. Distributed generation impact on reliability and power quality indices. *IEEE Rural Electric Power Conference*, Colorado, May, 2002: D3-D3_7.
- [23] Chen Haiyan, Duan xianzhong, Chen Jinfu. Impacts of distributed generation on steady state voltage stability of distribution system. *Power System Technology*, 2006, 30(19): 27-30(in Chinese).
- [24] Brown R E, Freeman L A A. Analyzing the reliability impact of distributed generation. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vancouver, July, 2001: 1013-1018.
- [25] Alshamali M, Fox B. Unsymmetrical faults and their potential for nuisance tripping of embedded generators. *Seventh International Conference on Developments in Power System Protection*, Amsterdam, April, 2001: 238-241.
- [26] Pang Jianye, Xia Xiaobin, Fang Mu. Impact of distributed generation to relay protection of distribution system. *Relay*, 2007, 35(11): 5-8.
- [27] Salman S K, Rida I M. Investigating the impact of embedded generation on relay settings of utilities electrical feeders. *IEEE trans on Power Delivery*, 2001, 16(2): 246-251.
- [28] Dugan R C, McDermott T E. Operating conflicts for distributed generation on distribution systems. *Rural Electric Power Conference*, Arkansas, April, 2001: A3/1-A3/6.
- [29] Zhao Yu, Yu Erkeng. Study on retail electricity market (Part Six) Influence on the electric power system by distributed generation. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(15): 25-28(in Chinese).
- [30] Edwards F V, Dudgeon G J W, McDonald J R, et al. Dynamics of distribution networks with distributed generation. *IEEE Power Eng. Society Summer Meeting*, Washington, July, 2000: 1032-1037.
- [31] Nara K, Hayashi Y, Ikeda K, et al. Application of tabu search to optimal placement of distributed generators. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Ohio, Jan, 2001: 918-923.
- [32] Daly P A, Morrison J. Understanding the potential benefits of distributed generation on power delivery system. *Rural Electric Power Conference*, Arkansas, April, 2001: A2/1-A2/13.
- [33] Lasseter B. Microgrids. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Columbus, Jan, 2001: 146-149.
- [34] Lasseter R, Akhil A, Marmay C, et al. Integration of distributed energy resources: the CERTS microgrid concept [EB/OL]. [2008-02-28]. <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>.
- [35] European Commission. Strategic research agenda for Europe's electricity networks of the future [EB/OL]. [2008-03-05]. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_agenda_en.pdf.
- [36] Sheng Kun, Kong Li, Qi Zhiping, et al. A survey on research of microgrid-new power system. *Relay*, 2007, 35(12): 75-81(in Chinese).
- [37] Lynch J. Northern power system update on Mad River microgrid and related activities[EB/OL]. [2008-03-06]. http://der.lbl.gov/new_site/2005microgrids_files/presentation_pdfs/CERTS-Lynch.pdf.
- [38] Stevens J, Klapp D. CERTS microgrid system tests. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June, 2007: 1-4.
- [39] Sanchez M. Overview of microgrid research and development activities in the EU [EB/OL]. [2008-03-06]. http://der.lbl.gov/2006_microgrids_files/Europe/Presentation_11_Manuel_Sanchez.pdf.
- [40] Kojima Y, Koshio M, Nakamura S, et al. A demonstration project in Hachinohe: microgrid with private distribution line. *IEEE International Conference on System of Systems Eng.*, April, 2007: 1-6.
- [41] Piagi P, Lasseter R H. Autonomous control of microgrids. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June, 2006: 8pp.
- [42] Katiraei F, Iravani M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units. *IEEE trans on Power System*, 2006, 21(4): 1821-1831.
- [43] Dimeas A L, Hatzigiorgiou N D. Operation of a multiagent for microgrid control. *IEEE trans on Power System*, 2005, 20(3): 1447-1455.
- [44] Zhenhua Jiang. Agent-based control framework for distributed energy resources microgrids. *IEEE International Conference on Intelligent Agent Technology*, Dec, 2006: 646-652.
- [45] Jayawarna N, Wu X, Zhang Y, et al. Stability of a microgrid. *The 3rd IET International Conference on Power Electronics*,

- Machines and Drivers, March, 2006: 316-320.
- [46] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Microgrid protection. IEEE Power Engineering Society General Meeting, June, 2007: 1-6.
- [47] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Microgrid fault protection based on symmetrical and differential current components [EB/OL]. [2008-03-09].<http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/publicatio/2007public/microgridprotection-1.pdf>.
- [48] Rubio F J, Siddiqui A S, Marnay C, et al. CERTS customer adoption model [EB/OL]. [2008-03-12]. <http://certs.lbl.gov/pdf/47772.pdf>.
- [49] Costa P M, Matos M A. Economic analysis of microgrid including reliability aspects. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Stockholm, June, 2006: 1-8.
- [50] Asanol H, Bandol S. Economic analysis of microgrids. PCC 2007 Power Conversion Conference, April, 2007: 654-658.