

# Interconnection Study of Distributed Resources

Jinyong Lei, Deqiang Gan

Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

**Abstract:** Due to sustainable growth of power demand, high cost of grid upgrade, implementation of electricity market and focus on environmental protection, transmission and distribution networks runs closing to their operating limits, under this back ground, distributed generation is widely applied in modern power system. The interconnection of distributed resources may cause serious hidden troubles to system operation, which is one of the key problems of the mass application of distributed generation, so it is necessary to analyze the characteristic of distributed resources and their impact. This paper attempts to review the impact of distributed resources on electric network, especially distribution network concerning relay protection, voltage regulation, unintended islanding, economic benefit, over voltage, power quality, reliability and cost allocation. Several computational results are summarized. Finally, some other research topics are listed out.

**Keywords:** distributed generation, relay protection, voltage regulation, unintended islanding, economic benefit, overvoltage, power quality, reliability, cost allocation, interconnection

## 1 引言

相對於傳統的集中式發電，新興的分散式發電（DG—distributed generation）作為一種非集中式發電（decentralized generation）技術，一般指直接佈置在配電網或分佈在負荷附近的發電設施，以滿足特定用戶的需要或支援所在配電網的經濟運行。這些分散式發電的設施一般稱為分散電源（DR—distributed resources），包括傳統及非傳統的發電機組，前者如微型燃氣輪機組、柴油發電機組等，後者包括電化學裝置如燃料電池、可再生能源發電如太陽能發電、風力發電和小水電等，另外還包括電能存儲裝置如飛輪、電池和超導儲能等<sup>[1]</sup>。

分散電源的裝機容量一般小於10MW，和傳統的中央電站相比，較難實現調度中心的集中調度。分散電源的並網介面類型有兩大類：直接與系統相連（機電式）和通過換流器與系統相連。第一類主要是針對直接發出基頻交流電的旋轉式電機，包括同步機組和非同步機組；而那些發出直流電或者高頻交流電的分散電源則通過換流器並網。分散電源大多數接入低壓網路，具有靈活的負荷調節能力，啟動過程有的甚至只需幾秒鐘，而且出力可以按小時調節<sup>[2]</sup>，如此靈活的運行方式可能導致其出力變化不定。如果分散電源並網容量大，則可能會對配網運行造成影響。

分散電源對電網的影響範圍包括繼電保護、電壓調整、安全運行、經濟性、過電壓、電能品質、可靠

性等<sup>[3-4]</sup>。因此，有必要研究和分析分散電源的並網運行。本文主要介紹杭州市電力局的分散電源並網分析專案的初步結果，文獻[7]給出了更為詳細的結果。

## 2 分散電源並網的意義和課題

一方面，集中發電、遠距離輸電和大電網互聯的傳統電力系統採用的是電源—輸電網—配電網—用戶的方式，效率一般為28%~35%，環境污染較高。而分散式電力系統採用的是電源—用戶或電源—配電網—用戶的發電方式，效率高達40%~55%，其中可再生能源發電等可以說是清潔的能源。若採用熱電聯產其效率可能達到75%以上。另一方面，旨在限制全球二氧化碳等溫室氣體排放總量的《京都議定書》於2005年2月16日正式生效，我國的《可再生能源法》於2005年2月28日通過並在2006年1月1日正式生效，明確支持可再生能源並網發電。《國家中長期科學和技術發展規劃綱要（2006—2020年）》明確提出了要在今後的15年，風能、太陽能、生物質能等可再生能源技術取得突破並實現規模化應用。因此，可以預見，隨著能源緊缺、環保壓力和用地緊張等問題日益受到重視，低污染高效率的分散式發電技術將越來越受到青睞。

在大電網沒有到達的地方（如偏遠地區、海島等），架設高壓輸電線需要高費用（如建設成本、運行和管理成本）、長建設週期、寬線路走廊等，在這種情況下由大電網遠距離供電，不如分散電源供電經

濟便宜和靈活方便。

分散電源還可以提高供電可靠性。在系統故障時分散電源自動與系統斷開，形成微電網，維持“孤島”內的用戶電能供應，從而顯著提高了用戶供電可靠性；也可以在用戶側故障時與系統斷開，減小故障對系統或其他用戶的影響。一個典型的例子是，使用分散電源的New Yorker Hotel是紐約少數經歷了2003北美大停電而沒有停電的地方。

經濟的持續快速增長使電力供需形勢緊張，甚至出現全國大面積的缺電，分散電源可快速建設和投入運行，以緩解能源緊張狀態。杭州市2004年夏季最高負荷為4000MW，而同時被棄置的柴油發電機組容量達700MW。這些電源的有效利用可以緩解電力緊缺形勢。

目前分散式發電方面的研究有很多亟待解決的問題，主要分為兩類，一類是分散電源側的問題，如電源設備的設計、製造和控制等；一類是分散電源和系統側的問題，也就是並網問題。本文側重於考慮後一類問題，分析了分散電源對電網的各種影響。

雖然分散式發電技術具有諸多優點，但在傳統電力系統中引入分散電源會帶來許多新問題（見表1），問題產生的根本在於：

(1) 地區配電網路在設計時一般都假設輻射網路運行方式，並沒有考慮分散電源的影響，分散電源的接入使得輻射式的配電網路變成了一個遍佈電源和用戶互聯的環形網路，潮流也不再單向地從變電站母線流向各負荷。

(2) 分散電源的調度和運行由電源的產權所有者控制，而公共電網則是集中控制。

(3) 分散式發電功率輸出波動很大，不確定性程度高，難以調節。擁有大容量分散式發電的電力系統需要較高的發電備用容量，以及輸電網路備用容量。

表1嘗試總結分散電網並網後可能帶來的各種技術問題以及在本次項目研究範圍內的課題。

### 3 分散電源對地區電網的影響分析

以下是解決分散電源並網問題的一些常見辦法：

(1) 充分利用現有網路，定量分析分散電源給網路帶來的影響，在保證安全穩定前提下盡可能多地接入分散電源。

(2) 開發先進的介面硬體裝置，比如，經過換流器並網的分散電源對系統短路電流的影響很小。

(3) 改變配電網路的結構和改造設備。

(4) 制定恰當的滿足各方要求的政策。

圖1描述了本文作者開展分散電源並網問題研究的一個基本框架。

下麵從技術層面用實例介紹分散電源對地區電網的影響。

#### 3.1 繼電保護問題

假設分散電源接入採用重合閘前加速方式的配電線路。當線路任意位置發生故障時，電流速斷保護暫態切除故障，然後由自動重合閘合閘恢復供電。若重合到永久性故障，則由線路過流保護有選擇的斷開故障點。分散電源的接入改變了配電系統的故障電流分佈，從而改變了配電網路保護配置的基礎條件，對各類保護協調性產生影響<sup>[4-6]</sup>。

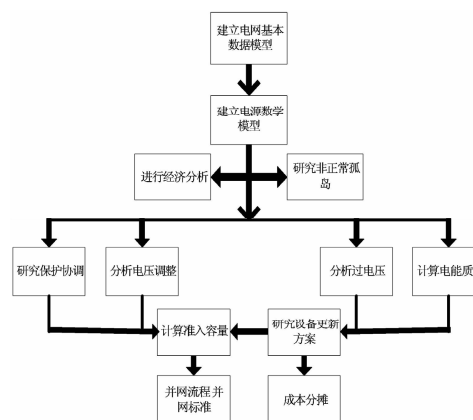


圖 1. 分散電源並網問題研究示意圖

Figure 1. Schematic diagram of the investigation for DR interconnection problems

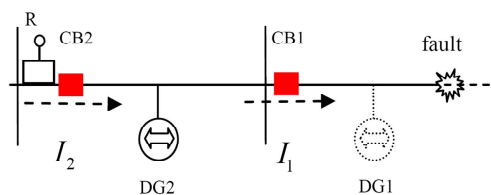


圖 2. DG降低線路保護靈敏度

Figure 2. DR reduces the sensitivity of line protection

#### (1) 分散電源降低保護靈敏度

如果一個分散電源接在變電站附近，當下游故障發生後，由電路原理可知，這必然減小斷路器CB2的保護檢測到的故障電流，從而降低其動作靈敏度。在最壞的情況下，既分散式電源的容量足夠大時圖待補保護可能會拒動。另外，如果分散電源的抗孤島保護失效（目前的某些抗孤島措施存在檢測盲區），圖2中的圖2DG降低線路保護靈敏度DG1同樣將會降低

CB1動作靈敏度。

(2) 分散電源破壞熔絲間的協調關係

由圖4的F1和F2安秒特性可以看到，當分散電源容量足夠大時，圖3中的上級熔斷器F1和下級熔斷器F2可能會同時損傷或熔斷，但電網運行的要求是F2熔斷，而F1不應當受到損傷。因此，合適的分散電源並網容量是在保持設備不變的條件下解決這類問題的方法。

(3) 分散電源影響單相接地處理裝置的運行

在小電流接地系統中，如中性點採用消弧線圈接地裝置接地的系統，有些分散電源的接入會在系統正常或者單相接地故障下帶來零序電流，影響消弧線圈的正常運行，如佔用消弧線圈的補償容量、使得單相故障絕緣監視裝置誤警報和幹擾單相接地故障選線等，詳細的研究結果可參見文獻[7]。

以上分析的是分散電源對配網保護的影響，同樣的分析可適用於採用重合閘後加速方式的配電網路。這些問題可通過對現有保護設備的綜合改造或者增加輔助的保護配置給予解決，比如可以利用電抗器短路時高電抗的特性來限制分散電源提供的短路電流<sup>[7]</sup>。為新增分散電源而對現有裝置進行改動或安裝新設備（這些工作量有可能是巨大的）是不大實際的。由分析可知，如果限制分散電源的並網容量，現有的繼電保護裝置可保持不變，那麼，如何在保證安全穩定前提下盡可能多地接入分散電源則是我們所關心的。

3.2 電壓調節問題

分散電源接入低壓配電網後改變原有系統的潮流分佈，對電壓調節設備產生較大影響，如何有效協調電壓調節設備和分散電源也是分散電源並網的一個重要課題<sup>[9-11]</sup>。

以圖5所示的112節點測試系統為例，假設分散電源在節點50即1號饋線末端接入系統，圖6給出了不同電源注入功率下系統的電壓分佈：

若要求的電壓上下限為1.07和0.99，當分散式電源注入功率等於6MW時，系統電壓越限，因此准入功率介於5.5MW和6MW之間。

當配電網出現短路故障時，出於自動重合閘配置及安全運行的考慮，分散電源必須停運直到故障清除。在此期間，變壓器由於延時要求，不會參加調壓。大容量分散電源解列時，系統電壓可能會過低，易於造成設備破壞事故。如圖7顯示，注入功率為2MW時，如果該電源解列，系統電壓將低於0.99，不能滿足要求。

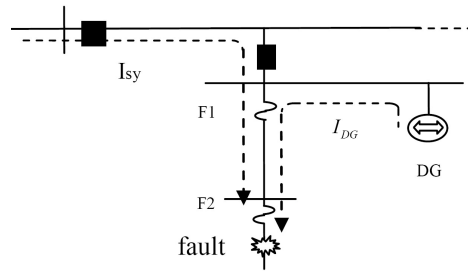


圖 3. 分散電源破壞熔絲之間的協調關係  
Figure 3. DR destroy fuse-fuse coordination

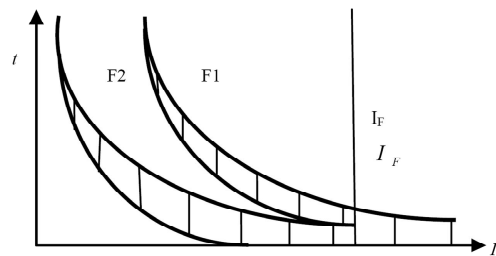


圖 4. 熔斷器安秒特性曲線  
Figure 4. Amper-time characteristic curves of fuses

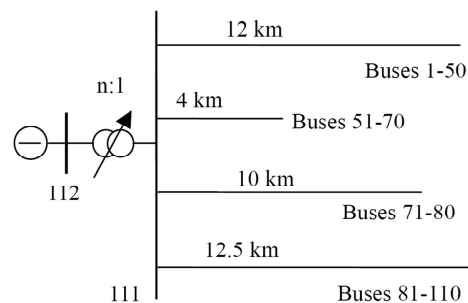


圖 5. 測試系統連接線  
Figure 5. Diagram of testing system

注入功率降到1.5MW時，如果該電源解列，系統電壓滿足要求。如圖8所示。

假設系統有多個電源接入不同的地點，如果只是將單電源接入系統的方法簡單推廣，那麼得出的結果會過於樂觀。例如，假設分散電源分別裝設在50號節點和110號節點，總的准入功率取決於兩個電源的分佈比例。

此外，由於分散電源的啟停調度具有一定的隨機性，會對配網的一些調壓設備產生一定的影響。因此文獻<sup>[9,12]</sup>還分析了小水電啟停策略對配網調壓的影響。

3.3 非正常孤島問題

正常情況時，分散式電源並聯在電網上向電網輸

送有功功率。但是當電網由於某種原因（如大停電）停止供電時，這些獨立的分散電源可能仍然並聯在電網上持續工作，從而形成一個由分散電源和本地負載組成的自給供電的小網路，此種現象稱為孤島現象，如圖9所示。當分散電源（總）容量比較大時尤其可能出現這樣的情況。

孤島電網的存在會給電網運行帶來許多很大的安全隱患，如危及線路上維修人員的安全；孤島區域的電壓與頻率不穩定導致電能品質問題；電網供電恢復後電網與孤島的相位不同步；由於分散式電源持續維持短路電流，非永久性故障難以熄弧演變為永久性故障。特別地，分散電源會影響線路恢復供電時的重合閘，這是因為重合閘時斷路器兩側電量的相位有可能不一致，如果此時非同期重合閘，會造成2~3倍於正常電壓的操作過電壓，並且形成很大的衝擊電流，影

響設備安全和正常運行，導致保護誤動作<sup>[9,13]</sup>。

因此，只要孤島電網不是為了提高供電可靠性故意配置的，都應當儘快地切除，2003年公佈的IEEE標準1547也強調了這個原則，而快速可靠地檢測出孤島是關鍵。目前，孤島檢測技術主要分為主動式檢測（Active Technique）和被動式檢測（Passive Technique），這兩類方法都是在分散電源並網側進行的。另外也可以在電網側進行遠端檢測，比如利用電力載波通信等手段即時監控電網狀態<sup>[9,14]</sup>。孤島檢測方法必須滿足可靠性、安全性、即時性。無論是在電網側檢測還是分散式電源側檢測，這些檢測方法都有自己的優點和缺陷，在使用中必須根據輸出電能品質要求、檢測時間、功率匹配程度等實際情況，合理安排主動式檢測或者被動式檢測以及它們相結合的方法、採用一種或多種檢測手段，從而達到反孤島防護的目的。

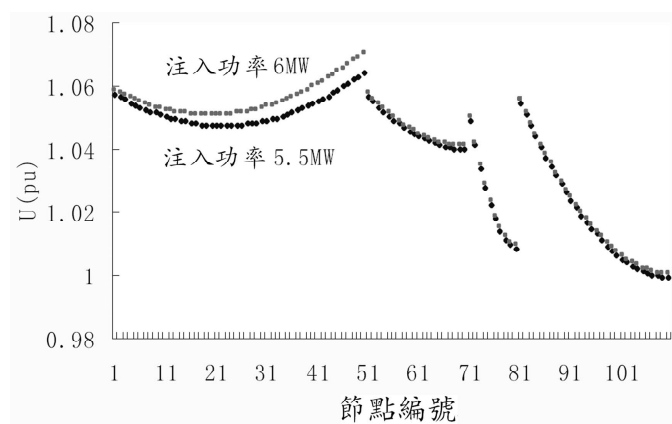


圖 6. 分散電源注入功率等於5.5MW和6MW系統電壓分佈

Figure 6. Profile of node voltage distribution when the distributed generator's output is 5.5 MW and 6 MW

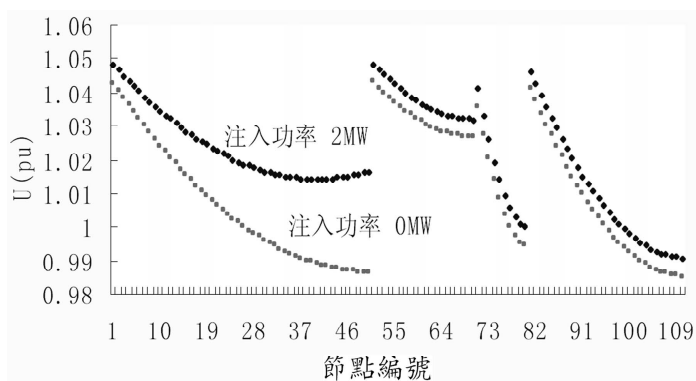


圖 7. 注入功率為2MW的電源事故解前後電壓分佈

Figure 7. Profile of node voltage distribution under the status of the distributed generator connected and disconnected when the output is 2 MW

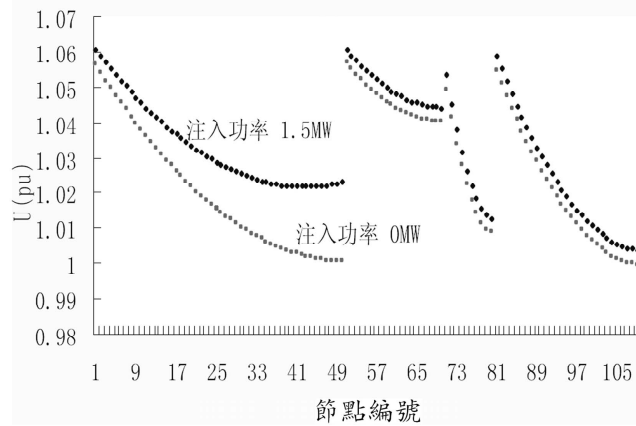


圖 8. 注入功率為1.5MW的電源事故解前後電壓分佈  
 Figure 8. Profile of node voltage distribution under the status of the distributed generator connected and disconnected when the output is MW

表 1. 分散電源並網問題  
 Table 1. Problems of DR interconnection

		同步發電 (水電、柴油、燃氣)	非同步發電 (熱電)	非同步發電 (風力)	換流器 (風力)	換流器 (電池)
地區調度問題	電壓調整	Y	Y	Y	Y	Y
	短路和保護	Y	Y	Y		
	諧波				Y	Y
	電壓閃變		Y	Y	Y	
	電壓跌落	Y	Y	Y		
	過電壓	Y	Y	Y		
	並網標準	Y	Y	Y	Y	Y
	經濟分析	Y	Y	Y	Y	Y
	並網測試					
	通訊規約					
	非正常孤島	Y	Y	Y	Y	Y
	電磁干擾					
	供電可靠性					
	設備更新方案			Y	Y	
	設備成本分攤			Y	Y	
	直流注入功率					
微電網						

### 3.4 經濟效益影響

分散電源可以實現有功就地平衡，減少線路的有功流動，從而降低線損，提高輸、配電的效率，同時可減少停電損失；分散式電源的合理調度，可以用來削峰等；如果出現短時間的尖峰價格，分散式發電可

以幫助抑制風險，但也可能降低電力公司的銷售收入。合理佈置和應用分散電源，可以減少對集中式發電及相關輸配網路容量的需求，從而延緩集中式發電、高壓輸配網的建設或改造；另外，利用可再生能

源的分散電源具有很大的環境價值和社會效益。

### 3.5 過電壓問題

分散電源引入的電容、非線性阻抗，改變了電網的參數，也改變了電網發生過電壓的條件。在特定條件下，如配網中發生故障、開關動作、雷擊等都可能激發過電壓<sup>[9,15]</sup>。特別地，孤島形成後，分散電源本身存在的發電機電抗、變壓器非線性電感和孤島電網中的電容可能滿足參數匹配條件，引發各種形式的

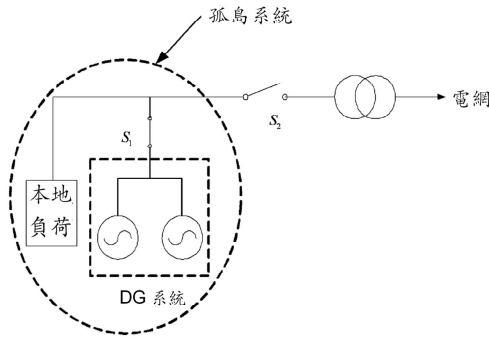


圖 9. 非正常孤島  
Figure 9. Diagram of the unintended islanding

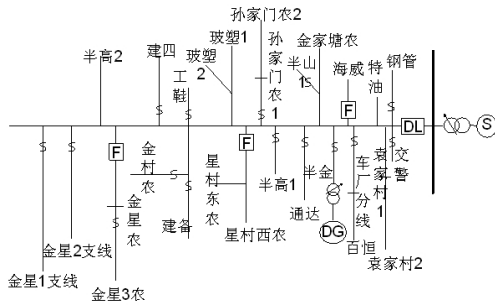


圖 10. 杭州市電力公司某10kV配網系統  
Figure 10. A model of a 10kV distribution network in Hangzhou

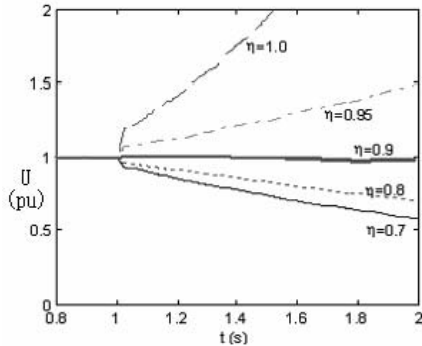


圖 11. 負載類型對自激過電壓幅值的影響  
Figure 11. Influence to self-excitation over voltage considering load

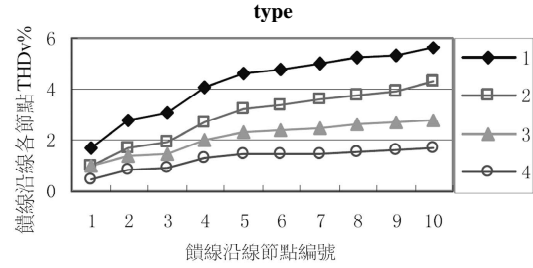


圖 12. DG出力改變對饋線沿線諧波電壓畸變率的影響  
Figure 12. Output change of DG impact the THDV of the feeder

諧振過電壓<sup>[9,16]</sup>。城市配電網的電纜化，由於電纜的容抗大於架空線路，使得串聯諧振更容易發生。圖10給出了杭州市某10KV配電網路的接線圖。

圖11給出了所帶負載功率因數變動對發電機運行狀況影響的仿真結果，縱坐標U代表發電機端的電壓幅值。顯然，在配電網負荷相同的情況下，功率因素η越高（即感性負載越小），非同步發電機與主網解列後的自激過電壓幅值越高。

### 3.6 電能品質問題

很多的分散電源（如太陽能發電系統、飛輪儲能裝置等）經換流器和變壓器才能和電網相連接，這就大大增加了電網的諧波源，污染電能品質。如果分散電源貢獻的諧波電流足夠大，公共電網的電壓或電流畸變會超過GB/T14549-1993標準<sup>[9,19]</sup>，電網公司會對其准入功率進行限制或者要求進行諧波抑制。當然，具有良好設計的分散電源是能夠抑制或者消除諧波的。

圖12顯示，對於前述杭州局配電網路，隨著分散電源出力升高，其注入系統的諧波增加，詳細的分析可參加文獻<sup>[9,20]</sup>。

分散電源還會引起電壓閃變<sup>[9,21]</sup>。一方面，分散電源的調度和運行由電源的產權所有者控制；另一方面，利用風能、太陽能的分散式發電系統其有功輸入具有天然波動性。所以分散電源輸出功率波動很大，不確定性程度高，容易造成電網電壓波動引起閃變。

其他方面，分散電源對電壓跌落等也會有影響。文獻<sup>[9,22]</sup>總結了分散電源對電壓跌落的影響，並在此基礎上提出了電壓跌落引起的失電損失分攤的方法。電能存儲式分散電源有可能是抑制電壓閃變、跌落等電能品質問題的有效途徑。

### 3.7 可靠性問題

電網用戶可以按類別分為民用、工業、商用等幾大類。這幾類用戶對電能品質的要求各不相同，停電

對他們的經濟損失有很大的差異。即使是同一類的用戶，由於其用電設備和用電偏愛不同，對電能品質的要求差異也很大。

分散電源對電網可靠性的影響要具體問題具體分析，不能一概而論。分散式發電可能增加可靠性，如在適當位置接入的一定容量的分散電源能提高系統對電壓的調節性能，特殊設計的分散式發電裝置能在系統發生故障時孤島運行，維持特定用戶的供電；但也可能降低可靠性，這種情況有：如果分散電源與配電網的繼電保護配合不好，可能會使保護裝置誤動作。不適當的接入點、容量和連接方式會使配電網可靠性變壞。

### 3.8 設備更新方案和成本分攤策略

分散電源的接入對配電網產生了各種影響，為了抑制或消除不利的影響，需要對現有設備進行改造或者引進新的設備等，進而涉及成本分攤的問題。針對不同的問題採取不同的設備更新方案，同一問題也有不同的分析演算法。由於輸出功率的隨機性，風力發電機對配電網電壓波動的影響很大，為保證系統電能品質，文獻[9][23]提出引入靜止無功補償器(Static Var Compensator—SVC)作為配電網補償設備，並採用Shapley值分攤法對這些SVC的無功補償費用進行了分攤。

### 3.9 分散電源並網標準

分散電源種類龐雜，特性各異，個例分析困難，建立運行和接入系統標準是一個可行的辦法（如限制啟動次數，限制接入容量等）。分散電源越來越多地得到應用，分散式發電技術研究也越來越得到重視，制定符合我國國情的並網標準是必要的也是可行的。

## 4 分散電源對省網的影響及其他

前面的分析主要是在地區配電網進行，越來越多的分散電源的接入將會對省一級的電網產生影響，這裏不再細述，下面列出一些需要研究的相關課題供參考。

- (1) 分散電源出力分佈統計模型；
- (2) 潮流計算和網路安全分析模型；
- (3) 電壓無功控制模型和相應對策；
- (4) 短路電流計算問題；
- (5) 暫態穩定和電壓穩定計算；
- (6) 分散電源形成孤島後的長期動態行為；
- (7) 即時調度和機組開停機計畫的影響；

- (8) 二次調頻的影響，備用的計算；
- (9) 負荷預測的影響；
- (10) 電力市場的影響。

其他涉及電源所有者問題的有分散電源的選址、投資經濟分析和電源最優調度等。

## 5 結論

隨著經濟和社會的發展、電力需求的增加、能源的緊缺和環保的壓力，分散式發電作為一種具有競爭力的發電方式必將在現代電力系統中佔據越來越大的市場份額。而聯網技術是分散式發電大規模應用的關鍵之一，分析分散電源的特性及其並網帶來的影響則是其中的一個基本要求。

## REFERENCES

- [1] H. Lee Willis, Walter G. Scott. Distributed Power Generation. New York: Marcel Dekker: 2000.
- [2] MWDAVIS. Will distribute resources ultimately replace central generation serving commercial and residential loads. Proceedings of 2000 IEEE Power Engineering society Summer meeting. Seattle (WA). USA0:2000.1670-1673.
- [3] R. C. Dugan. E. MCDERMOTT. Distributed generation. IEEE Industrial Applications Magazine. Mar/April2002.8(2):19-25
- [4] M. Davis, D. Costyk, A. Narang. Distributed and electric power system aggregation model and field configuration equivalency validation testing. Subcontract report of National Renewable Energy Laboratory, August 2003, NREL/SR560-33909, available at <http://www.osti.gov/bridge/>.
- [5] Girgis, S. Brahma, Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. 2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Halifax, Nova Scotia, Canada: July 2001, 115-119.
- [6] M. E. Baran, I. El-Markaby, Fault analysis on distribution feeders with distributed generators. IEEE Trans. On Power Systems, vol.20, no.4, November2005, pp.1757-1764.
- [7] HUANG Wei, LEI Jinyong, XIA Xiang, et al. Study on the influence of distributed generation on phase to phase short circuit protection. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 93-97.
- [8] R. Caire, N. Retiere, E. Morin, et al. Voltage management of distributed generation in distribution networks. IEEE PES Winter Meeting Proceedings, January 2003 Volume1: 2003, 282-287.
- [9] Wang Zhi-qun, Zhu Shou-zhen, Zhou Shuang-xi, et al. Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [10] HU Hua, WU Shan, GAN De-qiang, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17.
- [11] XIA Xiang, HUANG Wei, XU Xianghai, et al. Penetration level calculation taking into consideration the unit commitment of small hydro power. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 48-52.

- [12] R. A. Walling, N. W. Miller. Distributed generation is landing-implications on power system dynamic performance. Proceedings of 2002 Power Engineering Society Summer Meeting, Volume1: 2002, 92–96.
- [13] Yin Jun, Liu chenChang, Diduch. C. Recent Developments in Islanding Detection for Distributed Power Generation. 2004 Large Engineering systems Conference on July 2004, pp.124-128.
- [14] P. Barker. Over voltage considerations in applying distributed resources on power systems. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Volume1: 2002, 109-114.
- [15] R. Dugan, H. Lee, S. Chase. Over voltage considerations for interconnecting dispersed generators with Wye-grounded distribution feeders. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.103, no.12, December 1984, pp.3587-3594.
- [16] R. C. Dugan, D. T. Ritzky. Electric distribution system protection problems associated with the interconnection of small, dispersed generation devices. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.103, no.6, June 1984, pp.1121-1127.
- [17] W. B. Gish, W. E. Feero, S. Greuel. Resonance and loading relationships for DSG Installations. IEEE Trans. on Power Delivery, vol.2, no.3, 1987, pp.953-959.
- [18] JIANG Nan, GONG Jianrong, GAN Deqiang. Computing the maximum penetrating level of distributed generators in distribution network by taking into account of harmonic constraints. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 19-23.
- [19] Niskayuna, B. Kroposki. DG Power Quality, Protection and Reliability Case Studies Report. 2003, 8, 15-20.
- [20] GE Qing, YING Kang, XIA Xiang, GAN De-qiang. Influence of distributed generation on voltage sag and load-loss cost allocation. East China Electric Power, 2007, 35(4):33-36.
- [21] L. Chen, J. Zhong, D. Gan. Reactive power planning and its cost allocation for distribution systems with distributed generation. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal, Canada: 2006, pp.18-22.