

# 分布式发电技术及其对电力系统的影响

钱科军, 袁越

(河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 随着公平竞争的电力市场逐步建立, 分布式发电将凭借其投资省、发电方式灵活、与环境兼容等优点拥有越来越大的市场份额。大量分布式发电系统接入电网, 将对传统电力系统产生巨大的影响。首先介绍了分布式发电技术的基本概念以及其相对于集中发电方式的显著优点, 并对现在比较热门的几种分布式发电技术做了介绍, 然后分析了分布式发电对现有电力系统的影响, 指出当大量分布式电源接入系统后, 它对系统的影响不再局限于配电网, 而将对整个电力系统的动态性能产生巨大的影响。

**关键词:** 分布式发电; 分布式电源; 配电网; 可再生能源; 电压稳定; 电力零售市场

## Distributed generation technology and its impact on power systems

QIAN Ke-jun, YUAN Yue

(School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Distributed generation (DG) will own more shares in the near future under fair competitive electricity market, because of the following advantages of saving investment, flexibility and environmental compatibility. The interconnection of DG will have great impact on traditional power systems. This paper puts forward the concepts of the distributed generation and its prominent advantages against the conventional centralized electric power system, introduces some kinds of distributed generation technologies, and analyzes the impacts of distributed generation on the existing power systems. It is pointed out that when the penetration level of distributed generation increases, the impacts of DG are no longer restricted to the distribution network but starts to influence the dynamic behavior of the power system as a whole.

**Key words:** distributed generation; distributed sources; distribution network; renewable sources; voltage stability; retail electricity market

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)13-0025-05

## 0 引言

当前我国的供电系统是以“大机组、大电网、高电压”为主要特征的集中式单一供电系统, 这种集中发电、远距离输电和大电网互联的电力系统自身存在一些弊端: ①技术复杂, 管理水平要求极高, 安全稳定性不足。电网上任何一点的故障都可能引起大面积停电和全网的崩溃, 如1987年的东京大停电和2003年8月14日的美加大停电; ②不能满足当前对环保的要求和限制。我国当前以火力发电为主, 发电过程中产生了大量的大气污染物、温室气体和粉尘, 对环境造成了极大的污染, 并且由于近年来人们对电磁污染的担心, 建设新的输电走廊变得极为困难; ③集中式发电不能灵活跟踪负荷的变化。随着社会的发展和人们生活水平的提高, 近年来出现了夏季和冬季用电的“电荒”, 为了这些短暂的峰荷建造新的发电厂其花费是巨大的, 经济效

益也非常低。近年来, 分布式发电凭借其投资省、发电方式灵活、与环境兼容等优点而备受关注, 它与电网联合运行可以提高系统的经济性、安全性、可靠性和灵活性, 并且满足了可持续发展的要求, 大大减轻了环保的压力。

## 1 分布式发电的定义

目前, 分布式发电的定义尚未得到统一, 一般认为, 分布式发电 DG (Distributed Generation) 指的是为满足用户特定的需要、支持现存配电网的经济运行或同时满足这两方面的要求, 且在用户现场或靠近用户现场配置功率为数 kW 到 50 MW 的小型、与环境兼容的发电机组; 从更广泛的定义来看, 分布式发电指的是任何安装在用户附近的发电设施, 包含热电联产、冷热电联产以及各种蓄能技术等, 而不论这种发电形式的规模大小和一次能源的使用类型<sup>[1]</sup>。分布式发电的一些其它定义如下<sup>[2]</sup>:

- 任何与配电网相连的发电设施。
- 商业备用柴油发电机, 例如, 医院和宾馆安装的柴油机。
- 家庭备用发电机。
- 电力公司安装在变电站的发电设施, 用于提供电压支持或提高系统可靠性。
- 用户现场或靠近用户现场配置功率为数千瓦到 50 MW 的小型发电设施。
- 安装在负荷中心或靠近负荷中心的发电设施。

目前, 对这一新的发电形式的正式称谓还不统一。在英属国家, 习惯叫做“嵌入式发电”(Embedded Generation)<sup>[3]</sup>; 在北美, 叫做“分散式发电”(Dispersed Generation)<sup>[4]</sup>; 在欧洲和亚洲的部分国家, 叫做“非集中式发电”(Decentralized Generation)<sup>[5]</sup>。

## 2 分布式发电的分类

按发电能源是否可再生将分布式发电分为两类: 一类称为利用可再生能源的 DG, 主要包括太阳能光伏、风能、地热能、海洋能等发电形式; 另一类称为利用不可再生能源的 DG, 主要包括内燃机、热电联产、燃动机、微型燃气轮机、燃料电池等发电形式<sup>[6]</sup>。下面将对目前比较关注的几种分布式发电技术做介绍:

### 2.1 燃料电池

威廉·格罗夫(W. Grove)于 1839 年发明了燃料电池以来, 它的开发使用至今已逾 150 年了。燃料电池(Fuel cell)是一种不经过燃烧直接以电化学反应方式将富氢燃料的化学能转化为电能的发电装置。其工作原理与一般的电池相似, 见图 1, 基本上由电子导电的阴极和阳极及离子导电的电解质构成。在电极与电解质的界面上电荷载体由电子变为离子, 在阳极(燃料电池的负极, 又称燃料极)进行氧化反应, 燃料扩散通过阳极时失去电子而产生电流。在阴极(燃料电池的正极, 又称空气极)进行还原反应。当外部不断地输送燃料和氧化剂时, 燃料氧化所释放的能量也就源源不断地转化为电能和热能<sup>[7]</sup>。

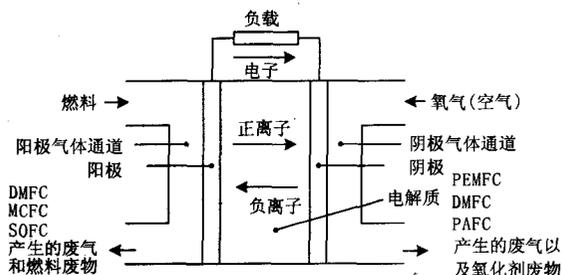


图 1 燃料电池工作原理图

Fig.1 Fuel cell basics

按照采用的电解质的类型来分, 燃料电池大致可以分为六种: 质子交换膜燃料电池(PEMFC)、直接甲醇燃料电池(DMFC)、碱性燃料电池(AFC)、磷酸燃料电池(PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)。

与常规发电方式相比燃料电池具有以下优点<sup>[8]</sup>: ①不受卡诺循环限制, 能量转换效率高; ②发电效率可达 50%~60%, 组成的联合循环发电系统在 10~50 MW 规模即可达到 70% 以上的发电效率; ③与传统的火电机组相比, CO<sub>2</sub> 的排出量可减少 40%~60%, NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 的排放量很少; ④小型高效, 可提高供电可靠性; ⑤低噪音、电力质量高; ⑥适应负荷变化的能力强; ⑦燃料电池可使用的燃料有氢气、甲醇、煤气、沼气、天然气、汽油、柴油等; ⑧模块化结构, 扩容和增容容易, 建厂时间短; ⑨占地面积小于 1 m<sup>2</sup>/kW; ⑩自动化程度高, 可实现无人操作。

### 2.2 风力发电

风力发电技术是将风能转化为电能的发电技术, 由于风力发电环保可再生、全球可行、成本低且规模效益显著, 已受到越来越广泛的欢迎, 成为发展最快的新型能源之一。

风力发电形式可分为离网型和并网型。并网型风力发电是大规模开发风电的主要形式, 也是近几年来风电发展的主要趋势。并网型风力发电通常有多台容量较大的风力发电机组构成风力发电场, 称其为风电场(也称风力田、风田)<sup>[9]</sup>。因此风电场具有机组大型化(50 kW~2 MW)、集中安装和控制的特点。风电场的主设备为风力发电机组, 发电机经变压器升压与电力系统相连。并网型风力发电机组主要由风力机和发电机构成。

① 风力机。风力机通过叶片捕获风能, 将风能转换为作用在轮毂上的机械转矩。对一台实际的风力机, 其捕获风能转变为机械输出功率  $P_m$  的表达式为:

$$P_m = 0.5 \rho A C_p V_w^3 \quad (1)$$

其中:  $\rho$  是空气密度(kg/m<sup>3</sup>),  $A$  是风机叶片的扫掠面积(m<sup>2</sup>),  $V_w$  是作用于风力机的迎面风速(m/s),  $C_p$  是风能转换效率系数。风力机的整体设计和相应的运行控制策略应尽可能追求  $C_p$  最大, 从而增加输出功率。

② 发电机。目前风力发电所采用的发电机主要有两种: 同步发电机和异步发电机, 采用最多的是异步发电机。异步发电机由于它的低耗、高可靠性、无需励磁装置和电刷、结构简单尺寸小、坚固耐用、基本上无需维修等优点, 已成为风力发电系统的理

想设备。

风电具有明显的环保效益,可以减少污染气体的排放量;同时,风力发电可用于无电网的地区,为边远的农村、牧区和海岛居民提供生活和生产所需的电力。

### 2.3 太阳能光伏电池

太阳能光伏电池PV (Photovoltaic Cell)发电技术利用半导体材料的光电效应直接将太阳能转化为电能。白天发电的盈余倒送电网,晚间用户从电网取电。采用光伏电池发电具有不消耗燃料、不受地域限制、规模灵活、无污染、安全可靠、维护简单等优点<sup>[10]</sup>。光伏电池的输出功率受日照强度、电池结温等因素的影响,不能调度,而且系统的频率和电压对其基本上没有影响,任意 $t$ 时刻其输出功率表达式为:

$$P_g = \frac{I \cdot A \cdot \eta}{860.4} \quad (\text{W}) \quad (2)$$

其中: $I$ 为总辐射强度,单位为 $\text{W}/\text{m}^2$ , $A$ 为单个太阳能电池组件的面积,单位为 $\text{m}^2$ , $\eta$ 为电池组件的额定转换效率。设在 $t$ 时刻阵列共有 $n$ 块组件正常工作,那么阵列输出的总功率为 $nP$ 。

### 2.4 微型燃气轮机

微型燃气轮机是指功率为25~75 kW的以天然气、丙烷、汽油、柴油为燃料的超小型燃气轮机。与现有的发电技术相比,微型燃气轮机的发电效率较低,满负荷运行时效率为30%,半负荷运行时效率为10%~15%,然而,若实行热电联产,效率可提高到75%。微型燃气轮机的特点是体积小、重量轻、发电效率高、污染小、运行维护简单,它是目前最成熟,最具有商业竞争力的分布式电源之一。

## 3 分布式发电对电力系统的影响

由于分布式发电日益与大电网联合运行,给现代电力系统运行与控制带来了巨大的影响。

### 3.1 分布式发电对电力系统电压的影响

分布式电源主要接入配电网,在接入DG之后,配电系统从放射状结构变为多电源结构,潮流的大小和方向有可能发生巨大改变,使配电网的稳态电压也发生变化<sup>[11]</sup>,原有的调压方案不一定能满足接入分布式电源后的配电网电压要求。因此必须评估分布式电源对电力系统电压的影响,以保证在分布式电源应用越来越多的情况下它们不会给用户带来不良后果。潮流计算是对这种影响进行量化分析的主要手段,但传统的潮流计算方法由于没有考虑分布式发电的影响,因而失效。文献[12]对异步发电

机、无励磁调节能力的同步发电机和燃料电池等几种典型DG进行建模,并提出了基于灵敏度补偿的配电网潮流计算方法,适合包含各种不同DG形式的多电源配电系统。

分布式发电对配电网电压的影响主要如下:

① 分布式发电的接入会对配电网馈线上的电压分布产生重大影响,具体影响与分布式电源的容量大小、接入位置有很大的关系<sup>[13]</sup>。

② 同样渗透率(Penetration Level)的分布式电源集中在同一节点,对电压的支持效果要弱于分布在多个节点上。

③ 稳态情况下,由于馈线上传输功率减小以及DG输出的无功支持,使得沿馈线的各负荷节点处的电压被抬高。

以上讨论的都是分布式电源对配电网的影响。当风电场接入电网后,由于风电场输入风能变化的随机性,并且风力发电大多采用异步发电机,需从电网吸收大量无功功率,故很容易引起整个电网的电压稳定问题,甚至会导致整个电力系统的电压崩溃,而并不局限于所在配电系统。例如,美国加州Bakersfield的Seawest风电场就经常出现电压稳定问题导致电网无法接受风电,强迫风电场停机。

### 3.2 分布式发电对电能质量的影响

分布式发电是建立在电力电子技术基础之上的,大量的电力电子转换器增加了大量的非线性负载,将会引起电网电流、电压波形发生畸变,引起电网的谐波污染,分布式发电对电能质量主要有两个方面的影响:

① 电压闪变。分布式发电引起电压闪变的因素包括:某个大型分布式单元的启动、分布式单元输出的短时剧变以及分布式单元与系统中电压反馈控制设备相互作用而带来的不利影响。

② 引入大量谐波。由于大量电力电子器件应用于分布式发电,所以不可避免地给系统带来大量谐波,谐波的幅度和阶次受到发电方式以及转换器的工作模式的影响。文献[14]分析了分布式电源对电能质量的影响,针对大型配电网讨论引入DG后一些重要母线的谐波电压水平,提出可以在谐波电压水平较高的母线上安装特殊滤波器来抑制谐波。

虽然分布式发电的引入会造成电压闪变,并引入大量谐波,但是分布式发电也存在改善电能质量的潜力,当电网关联负载较大时,分布式发电可以快速投入使用,使系统尽可能减少故障,提高整个电网的稳定性,从而保证了电能质量。

### 3.3 分布式发电对继电保护的影响

大多数配电系统尤其是在农村,其结构呈放射状,采用这种结构的主要目的是为了运行的简单性和过电流保护的经济性,当配电网中接入了分布式电源之后,放射状网络将变成遍布电源和用户互联的网络,潮流也不再单向地从变电站母线流向各负荷,因此,分布式发电将对配电网原有的继电保护产生较大的影响<sup>[15]</sup>:

1) DG运行时可能会引起继电保护的失效。DG产生的故障电流可能会减小流过馈线继电器的电流,从而使继电保护失效。

2) DG接入配电网后可能会使继电保护误动作。相邻馈线的故障有可能会使原本没有故障的馈线跳闸。

3) 改变了配电网的故障水平。故障水平提高还是降低取决于运行的分布式电源数量和种类,故障水平的提高要求开关设备的升级,故障水平的降低可能会给过电流保护带来问题。因此,若某配电区域的分布式电源容量很大,而使故障电流产生大幅度的变化,则必须提高其断路器的容量和升级保护装置。

### 3.4 分布式发电对电力市场的影响

电力工业解除管制和电力市场的兴起,使得各种分布式发电方式能够在统一开放的交易市场上进行公平竞争,从而为电力用户提供多种选择的机会<sup>[16]</sup>: ①不同的电力供应商; ②不同时段的用电; ③不同的供电质量; ④不同计量方式; ⑤不同的费率结构; ⑥不同的付款方式; ⑦不同的用户侧管理计划; ⑧自己发电或者蓄电。

配电网的开放,引入了电力零售市场<sup>[17]</sup>,电力零售市场上电力供应竞争给企业自备电厂和用户自己安装的分布式电源带来商机,拥有分布式电源的用户在电力零售市场上面临三种选择: ①从电网受电; ②自己发电,自给自足; ③自己发电并向电网卖电。根据发电竞争市场的电价信息和零售电力市场的需求信息,用户完全可以用活自己的分布式电源,让它发挥更大的作用,产生更大的效益,为自己或者附近用户提供供暖和供电服务。电力零售市场的建立将会确立电力零售机制,任何形式的发电商都可以作为电力供应商向零售电力市场提供电力产品,在零售市场上公平竞争。

### 3.5 其他影响

分布式电源接入电力系统后,除了会对系统产生上述影响外,还存在一些其他方面的问题,有待于进一步研究,例如,由于分布式发电的兴起,当前需要建立相应的法律、法规和行业规范<sup>[18]</sup>,建立

一个普遍适用的DG与配电网的并网标准;同时,为了实现DG系统间以及DG系统与配电网之间的相互协调和对分布式电源的调度,需要涉及到通讯技术、GPS技术、DSP技术以及电力系统的动态测量和在线检测技术在分布式发电中的应用研究等。

同时,有时候DG会对电力系统可靠性产生不利的影响,如大系统停电时有些DG的燃料会中断,或供给DG辅机的电源会失去,DG也会随之停运,仍无法提高供电的可靠性;DG与配电网的继电保护配合不好的话,可能使继电保护误动作,反而降低系统的可靠性;不适当的安装地点、容量和连接方式会使配电网可靠性变坏,等等。

## 4 结论

本文介绍了分布式发电技术及其对电力系统的影响,随着公平竞争的电力市场逐步建立,分布式发电将拥有越来越大的市场份额,并将与现有的电力系统结合形成一个高效、灵活的电力系统,提高整个社会的能源利用效率,提高整个供电系统的安全性、稳定性和可靠性。然而,分布式发电的接入必将给现代电力系统的运行与控制带来巨大的影响,必须分析和研究这些影响,从而制定相应的控制措施,为更好地发挥分布式电源的优势提供指导。虽然我国的现状是集中式大电网,但是未来电力发展方向将是分布式发电,欧美一些国家已经认清了形势,对分布式发电开展了广泛的研究,我国对此的研究还处于刚刚起步的阶段,当前应该鼓励更多相关人员加大对分布式发电的研究力度。

## 参考文献

- [1] Ackerman T, Anderson G, Seder L. Distributed Generation: a Definition[J]. *Electric Power System Research*, 2001, 57(6): 195-204.
- [2] Daly P A, Morrison J. Understanding the Potential Benefits of Distributed Generation on Power Delivery Systems[A]. In: *Rural Electric Power Conference*[C]. 2001.
- [3] Jenkins N. Embedded Generation[J]. *Power Engineering Journal*, 1995.
- [4] Bonhomme A, Cortinas D, Boulanger F, et al. A New Voltage Control System to Facilitate the Connection of Dispersed Generation to Distribution Networks[A]. In: *CIREN [C].2001. 4-8.*
- [5] Dussart M. Problems Encountered with Connecting Decentralized Generating Plants to the Distribution Networks[A]. In: *CIREN [C].1997.*
- [6] Puttgen H B, Macgregor P R, Lambert F C. Distributed Generation, Semantic Hype or the Dawn of a New

- Era[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2003, 1(1):22-29.
- [7] Ellis M W, Von Spakovsky M R, Nelson D J. Fuel Cell Systems: Efficient, Flexible Energy Conversion for the 21st Century[J]. Proc IEEE, 2001,89(12):1808-1818.
- [8] Anahara R, Yokokawa S, Sakurai M. Present Status and Future-prospects for Fuel-cell Power-Systems[J]. Proc IEEE,1993,81(3):399-408.
- [9] 王承熙, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
WANG Cheng-xi, ZHANG Yuan. Wind Power Generation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [10] Singh, et al. Can Solar Photovoltaic Become the Major Source of Energy for Village Electrification and Significantly Contribute Towards the Reduction of Greenhouse Gas Emissions in the 21st Century[A]. In: 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion[C]. 1998.3313-3316.
- [11] Scott N C, Atkinson D J, Morrell J E. Use of Load Control to Regulate Voltage on Distribution Networks with Embedded Generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2):510-515.
- [12] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网, 潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006,30(1):35-40.  
CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Study on Power Flow Calculation of Distribution System with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(1):35-40.
- [13] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16):56-60.  
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi, et al. Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16):56-60.
- [14] Dolezal J, Santarius P, Tlustý J, et al. The Effect of Dispersed Generation on Power Quality in Distribution System[A]. In: Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/IEEE PES International Symposium[C]. 2003.204-207.
- [15] Dugan R C, McDermott T E. Operating Conflicts for Distributed Generation on Distribution Systems[A]. In: Rural Electric Power Conference[C]. 2001.
- [16] 赵豫, 于尔铿. 电力零售市场研究(六) 分散式发电对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2003,27(15):25-28.  
ZHAO Yu, YU Er-keng. Study on Retail Electricity Market (Part Six) Influence on the Electric Power System by Distributed Generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(15):25-28.
- [17] YU Jing, ZHOU Jian-zhong, YANG Jun-jie, et al. Agent-based Retail Electricity Market: Modeling and Analysis[A]. In: Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics[C]. Shanghai: 2004.95-100.
- [18] Tattersall G, Jones P. Embedded Generation Planning and Management [A]. In: IEE Colloquium on Effective Response of a Public Electricity Network to Independent Generators[C]. 1993.

收稿日期: 2006-12-07; 修回日期: 2007-01-23

作者简介:

钱科军 (1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行、分布式发电; E-mail: qiankejun@hhu.edu.cn

袁越 (1966-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析与控制、电力经济技术与运营管理。

## 许继发变组保护在三峡右岸电站正式投运

6月11日上午9时12分, 三峡工程右岸电站首台机组——22号机组经过一个多月的调试, 正式并网发电投入运营, 许继电气提供的WFB-800发变组保护也正式投入运行, 成为三峡电站的首套国产机组保护装置。

当今世界上最大的水电机组三峡电站, 总装机容量为2240万kW, 由左岸电站、右岸电站和地下电站组成, 计划安装70万千瓦的水轮发电机组32台。其中左岸电站14台机组, 已于2005年9月全部实现并网发电, 到今年5月底累计发电量已超过1647亿kWh。作为三峡工程继大坝浇筑、左岸电站建设之后的第三期工程, 设计将装12台机组的右岸电站建设, 已进入机组安装高峰。目前已有10台进入安装或完成安装, 计划到2008年底全部投产。

与左岸电站相比, 右岸电站在机组的设计、施工和安装方面都进行了全面创新, 并首次采用国产的WFB-800发变组保护设备。WFB-800发变组保护具有一系列首创的专利技术, 拥有千余台机组的运行经验, 在秦山核电2x650MW机组、广东6x400MW燃气机组等工程中运行可靠、稳定。许继电气将再接再厉, 为三峡工程后续机组的顺利投运提供更加优质的产品和服务。