

分散式能源发电接入电力系统 科学技术问题的研究

张保会

(西安交通大学 电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 分析了分散式能源及其发电的特点, 指出与常规能源发电的最大差异是不可控的随机特性。当大规模的随机发电能力接入电力系统以后, 产生了随机的发电与随机的用电两组不相关的变量要求其实时平衡的科学问题。需要在电源规划、电网规划、运行控制和故障保护等多方面考虑可控的常规发电与随机的发电合理组合后满足随机变化的负荷需求, 形成了一系列新的技术问题, 从分散式电源接入电力系统的优化规划及可靠性评估、运行分析及控制调节策略、相关继电保护及安全自动装置等方面指出了应当开展的研究。

关键词: 分散式能源发电; 电力系统; 随机功率平衡; 科学与技术问题

中图分类号: TM 61

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0001-04

0 概述

国际上, 随着能源紧缺、环境污染、温室效应、恐怖分子袭击或战争中袭击重型电站和电能输送通道等, 发达国家把发展电能的研究更多的转向利用清洁的可再生能源和分散的能源。2005~2006 年, 许多国家对可再生能源政策目标进行了补充、修改和明确。法国计划到 2010 年可再生能源发电占总电力 21%, 荷兰计划到 2020 年可再生能源在一次能源中的比例增加 10%, 西班牙计划到 2010 年可再生能源在一次能源中的比例增至 12.1%, 芬兰将目标确定为 31.5%, 葡萄牙确定为 39%, 荷兰为 9%。中国在 2005 年制定的可再生能源发展目标是计划到 2020 年分别为: 大水电 3×10^8 kW, 风电 3×10^7 kW, 生物质发电 3×10^7 kW, 太阳能光伏发电 1.8×10^6 kW 以及少量太阳能热发电和地热发电^[1]。

我国目前发电能源结构以燃煤火电为主, 占整个发电量的 88.83%^①, 同样面临着环境保护和资源枯竭的双重压力; 我国的一次能源分布也很不均匀, 经济发达的东南部地区需要“西电东送”、“西气东输”、“北煤南运”等。我国颁布了《可再生能源法》, 并已于 2006 年 1 月 1 日生效, 对于推动我国可再生能源的大规模利用提供了法律保障。同时由国家发展与改革委员会发布了《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》, 国家对可再生能源发电电价进行补贴, 规范了发电企业、电网企业的利益分配关系, 调动了发展可再生能源发电的积极性。2005 年中国大陆新增风力发电装机容量 5.03×10^5 kW, 2006 年新增风力发电装机容量 13.3375×10^5 kW^[3]。截至

2006 年底, 10^5 kW 以上装机容量的风力发电场接入电力系统的已经超过 3 座, 规划容量在几十万千瓦的风电场也有多座在建设中, 甚至个别省区提出要建设百万千瓦容量的风电场。

风能发电技术和大规模高效率的太阳能热发电技术在国际上已经很成熟, 高效少污染的微型燃气轮机发电技术正在工业化过程中, 廉价的高效率太阳能光伏发电技术和燃料电池技术正在研究当中。清洁可持续再生能源的大规模利用正在研究解决 2 个方面的重大科学技术问题: 其一是低密度能量的大规模高效率的转换为电能的技术, 我国科技部、国家自然科学基金委等部门也多次立项支持其研究; 其二是分散的、随机的电能量的安全传输与可靠使用, 国内对风能发电接入电力系统后带来的运行控制问题研究已经有多年的历史^[4-6], 但是国家层面的项目支持并不多。

由于风电的随机特性, 在接入系统的局部电网已经出现了运行控制复杂的问题, 电网企业的运行人员担心随机的分散式能源发电大规模接入电力系统以后, 电网运行的安全可靠性的保障也越来越困难, 使人担忧电力系统的运行安全。尽管国家以法律、法规的形式对分散式电源接入电力系统给予保障, 然而推动其大规模的发展必须以保证电力系统运行安全性的技术为前提。分散式能源发电大规模接入会对电力系统的发展规划、运行控制和故障保护等各方面产生与现有电力系统什么不同的科学问题、哪些问题是必须研究解决和可能的解决方法是什么, 是分散式能源发电科学、健康、高效发展必须首先研究的问题, 也是本文的要旨。

1 分散式能源及其发电的特点

分散式能源转换设备主要是指小水电机组、风力发电机组、太阳能电站、燃料电池组等,单机功率范围为几千瓦至几兆瓦,并具有多台集成扩容性。分散式电源系统除了可为当地用户提供清洁、高效、可靠的电力外,还可以与公用大电网并网,向电网输送电力,作为大电网的补充。分散式能源发电目前主要是开发风能、太阳能、生物质能和海洋能等发电,特别是风能、太阳能发电技术近年来发展迅速,国际上已经制造出单机 5 MW 的风力发电机组,国内已经制造出单机 2 MW 的风力发电机组,单个风力发电场的最大容量已经超过 100 MW。以下以风能、太阳能为例,分析分散式能源及其生产电能的特点。

a. 能源分布的地理特性:地区风能、太阳能丰富与否直接与地理位置、天气情况相关,越是风大、太阳光线强烈的区域,能源越丰富,一般是不适易人群居住的地方,远离用电负荷中心。

b. 能量大小的随机性:某一区域可以利用的风能、太阳能等尽管一年、一月和一天中的能量分布形成了大致规律,其分布规律完全取决于自然条件,是不可人为控制的,也并不会根据人类的需要而改变,最小能量是零而最大能量是预定的设计值,因而称为随机的。

c. 能量的不可储存性:不像储煤场、水库和核反应堆那样可以大容量储存一次能源,风能、太阳能目前尚无大容量的储存方法,其利用只能是即时转换为电能,而不能调剂、储存后当需要电能时才转换为电能,由其发出的电能是随机的。

d. 能量的低密度性:对于风能资源丰富区,年风速大于等于 3 m/s 的小时数在 5 000 h 以上,其有效风能密度才大于等于 200 W/m²。因而要建设装机容量较大的风电场除了寻找风能丰富区外,其占地面积要远远大于燃煤发电厂,难以在人口稠密的负荷中心兴建。

e. 不可运输性:众所周知,风能、太阳能和海洋能等是不能运输的,生物质能由于其能量密度太低,其运输成本也是巨大的。

分散式能源发电设备瞬时比例地将一次能量转换为电能。欧洲某国家 2005 年的风力发电曲线如图 1 所示,其最大发电功率达 2 500 MW 左右,而最小发电功率为零,难于当作可靠发电容量。

风力发电机组、太阳能热力发电机组技术等都已经相对成熟,目前技术发展的目标是提高能量转换的效率和单机转换容量,此处不再赘述。由分散式一次能源所发出的电能具有与一次能源相同的随

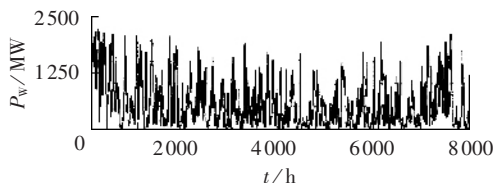


图 1 某国风力发电年功率曲线

Fig.1 Hourly wind power curve of a European country

机特点。分散式能源分布的地理特性和不可运输的特点决定了利用分散式能源发电的电厂只能修建在一次能源丰富、人群稀少、电力负荷较小的地方。能量密度低的特点决定了大容量的发电厂需要占用大片的场地,一般的电厂容量在 100 MW 以下。如果要大规模发电利用,需要经由输电设备将电能输入电网,而距离较近的往往是现有大电网末梢的配电网(地广人稀负荷小),从而决定了接入电网的结构特点为弱电源接入配电网;而一次能量的随机和不可储存特性,决定了电能转换不可控的特点,当电网中这种不可控的电源占到一定比例时,随机电能会在电网中不可控地流动的特点,使电网的安全运行变得更为困难。

2 分散式能源发电接入电力系统产生的新的科学与技术问题

无论是常规能源还是分散式能源生产的电能,其电能的发、输、用三者实时平衡的特性是不变的。回顾常规能源发电的电力系统的电能实时平衡特性的遵循策略,凸现分散式电源接入电力系统时在规划建设、调度运行和保护控制等多个阶段遇到的新问题。

2.1 一次能源与需要的电量、电力需求的平衡

电力的发展是随电力需求的发展而发展的,满足电力用户的用电需求永远是电力系统不变的使命。随着国民经济的发展,电力负荷增长,电力系统依据负荷的需要(中长期负荷预测),以充分满足电能、电功率供给为目标,根据能源分布地点和电能需要的地点,电源建设容量适度超前负荷发展,经过技术经济比较,电厂建在一次能源地或者运输一次能源到电能需要地附近,满足一次能源与电能需求的平衡。发电厂装机容量在几十万千瓦至几百万千瓦,直接送入超高压输电网,网架结构相对坚强。机组旁建有至少供 7 天以上使用的能量储存库,机组由一次能源转换为电能的大小、时刻均快速可控,以满足负荷变化对发电功率、发电能量平衡的需要。

2.2 电网输送能力与用电功率需求的平衡

电力负荷一般与电源并不在一处,并且单点负荷容量远远小于电源容量,需要电力网络传输和分配电能。电网的建设目标是保证在正常运行条件和常见故障下,电网的传输能力满足负荷点用电需要,从而形成了输电网、配电网及电力系统。在输电网中接入多个电源,其潮流根据负荷需要是方向可调、大小可控的。配电网中的潮流一般是单方向、随负荷大小变化的,不可控或不控的。

2.3 电力系统负荷的变化

电力用户根据自己的用电需要随时使用电能,不同负荷点的负荷功率随作息时间、节假日以及经济的和政治的事件等因素变化,具有大致的统计规律,如图 2 所示。多个小的、低电压的负荷点汇集成输电网高电压的、大的负荷点,其随时间变化的统计规律与小负荷点的规律并不完全相同。输电网各负荷节点的负荷功率随时间的需求形成了全电网的

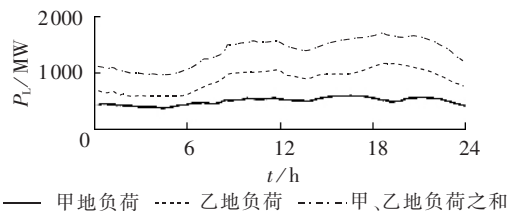


图 2 某地的日负荷曲线

Fig.2 Daily load curve of a region

负荷曲线,其曲线形状与各负荷点的负荷曲线形状也不完全相同。这些曲线的形状完全取决于人们的生产、社会活动规律本身,并且在太阳能较弱的时候还会出现用电晚高峰和早高峰。

2.4 实时的电功率平衡

为了满足用电需要,现在的电力调度通过提前预测全网负荷、各区负荷、各点负荷,提前安排各发电厂发电功率、各输电线潮流和配电网供电方式,使得功率安全经济的平衡,而微小的不平衡通过二次调频装置和负荷的电压、频率特性自动平衡。网络中的潮流是已知并且小于网络传输能力的,各联络线的功率通过改变发电机的运行状态和开机方式是可控可调的。传统电力系统的运行问题可以归结为:为了满足一组随机变量(负荷变化)的功率平衡,安全、可靠、经济地控制和调度另一组变量(发电功率、潮流)使之跟踪变化。整个电力系统只有用电负荷这一组随机变量,而供电能力是可控的,不是随机变量,可以满足电能实时平衡的特性。

对于图 3 所示的日负荷曲线,如果完全采用风力发电供给,尽管其最大风力发电功率远大于最大负荷功率,但远远不能满足负荷需求。由于风力发电功率不可控,负荷需求与可发电功率是两组随时间独立变化的曲线,因而电功率的实时平衡特性得不到满足,系统是不能运行的。大规模的随机发电功率接入电力系统以后,如果单靠这种随机电能满足负荷需要,实质上是要求“两组独立的随机变量实时平衡”,显然不可能。因而,随机电能接入电力系统的发电功率、容量一定要与可控的发电功率、容量叠加后满足随机变化的负荷的需求。

如果这种随机的发电功率接入系统如图 4 所示(其中,L 表示整流负荷,D 表示交流负荷,S 表示储能装置),配电网中各线路的潮流大小和方向将随这种功率的大小而变化,配电网变为输配功能合一的电网,现有的配电网能够承载多大随机功率、如何改造?在正常和故障后状态下如何调度这些机组使之有功平衡、电压合格,使得所接入的电网在随机功率、故障的冲击下同步稳定运行?在故障状态下,

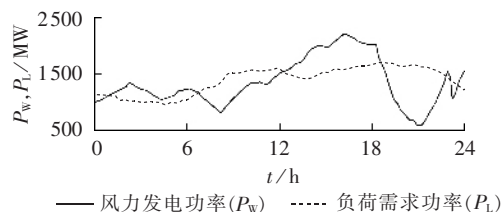


图 3 某地负荷需求与风力发电功率能力曲线

Fig.3 Load curve and wind power capability of a region

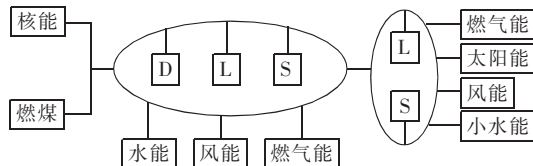


图 4 含有分散式能源的电力系统示意图

Fig.4 Power system with distributed generations

故障元件被正确判别和快速切除等,这些新的问题与传统的电力系统不同。

2.5 新的科学和技术问题

大规模的随机电源接入电力系统带来了一组随时间变化的用电负荷与另一组不可控的随时间独立变化的发电能力实时平衡的问题,即“2 组独立的随机变量的平衡问题”。

电能的实时平衡的自然特性是必须遵循和不可改变的。满足用电需求是电力发展的目的,一般不控制用电负荷,只能控制发电功率和发电量。显然仅仅利用随机能源发电满足用电需求是不可能和不经济的。利用可控能源和随机能源组成总体可控发电功率和发电量,满足电能的实时平衡的自然特性。随机能源的发电能力占总发电能力多大比例,电力系统的建设才是经济的?输送电能的电网如何建设或改造才能承载随机变化的潮流?当随机发电能力变化和用电负荷变化时如何控制可控电能保证电力系统可靠经济运行?当电力系统发生故障时如何准确切除故障元件以及保证故障后系统的安全运行?从而引起了电源规划、电网规划、运行控制和故障保护的一系列新问题。

3 分散式能源接入电力系统应当开展的研究

3.1 优化规划及其可靠性评估

电源的发电能力、电网的输电能力需要与用电负荷同步发展。电源的发电能力包括可控常规能源发电厂的发电能力和分散式能源发电厂的不可控发电能力,组成总量可以满足负荷变化需求的可控发电能力。分布式能源的发电功率在最大值与最小值(可能为零)间大幅度变化,装机容量太小不足以充分利用新能源,装机容量太大需要大量的投入而利用率太低,等价可用发电能力是多少,占可控的常规发电能力的比例多大才能经济的、可靠的满足电力电量需求,在常规发电能力与随机发电能力间存在优化协调问题。用电负荷需要的是供电能力和供电可靠性,这需要供电电源和供电网络来保证。现有电网的设计是按照满足常规能源发出的电力由高压电网逐级传输和配电网分配供给,当大量的分布式能源的不可控发电厂接入现有的配电网后,现有的配电网不仅具有配电的作用还具有输电的作用,用户需要的供电能力和供电可靠性不仅与电网的结构有关,还与不可控发电厂的位置、运行方式、控制方式等有关,带来了前所未有的新问题。因而,在能源利用和效率利用方面存在电源的优化规划,在网络输电能力和可靠性保证方面存在网络优化和接入位

置的优化问题。以下问题在风力发电大发展前应该认真研究,使其科学、经济地发展:

- a. 单风电场风能、区域内风电场风能的预测及可用度模型;
- b. 风电场和区域内风电场电力、电量概率模型;
- c. 风电电力、电量与常规电力、电量的优化规划、风电场容量和场址选择;
- d. 中、低压配电网架承载随机电能能力的研究;
- e. 风电场接入方式、接入电压、接入位置的优化规划;
- f. 含风电的电力系统可靠性评估与经济性评价。

3.2 运行分析及控制调节策略

现有的随机发电量接入电力系统的容量有限(5%以下),负荷的电压、频率特性和机组二次调频作用吸收了随机变化的功率。当随机功率占到系统总功率较大的比例时,将超出这种吸收能力,表现出功率不平衡的后果。由于风电机组、太阳能发电装置和其他发电设备的运行特性与常规发电机组的运行特性存在很大差异,对多种不同工作特性的发电设备互联后的电力系统的静态、动态行为进行分析和控制,建模和运行仿真基础工作。分布式能源能量强度是一个时间的随机变量,在几小时的时间范围内尽可能对其准确预测的基础上,提早优化调度可控能源发电的开机方式和发电量;而要保证电力系统的安全、可靠、经济运行,必须遵循电能实时平衡的特性,而多种不同工作特性发电设备(各种发电设备将一次能源转换为电能具有不同时滞)其控制装置满足何种要求、协调配合的控制规律是什么才能保证电能的实时平衡,特别当系统具有大量的异步风力发电机时无功的平衡成为突出问题。在大量的风电厂接入电力系统之前,必须研究解决以下问题:

- a. 对并网发电的分散式电源发电设备、控制设备的技术要求;
- b. 各类分散式电源发电设备接入电力系统的静态、动态数学模型;
- c. 含有分散式能源发电的电力系统静态分析方法与算法研究;
- d. 含有分散式能源发电的电力系统动态分析方法与算法研究;
- e. 随机电力电量中、短期预测与可控电力电量的优化调度;
- f. 电力系统稳态运行和事故控制策略的研究;
- g. 无功平衡与电压控制的优化。

3.3 继电保护与安全自动装置

分散式能源分布的地理位置决定了其发电厂远离负荷中心,能量密度低的特点决定了发电厂的容量较小,因而一般接入现有输电网末梢的配电网,使得原由单方向传送电能的中、低压配电网变成了多方向传送电能的输电网。原来在配电网中广泛采用的无方向电流保护不再适用。若采用有方向的阶段式保护,线路末端故障切除时间难于满足小容量机组稳定性和安全性的要求。若采用全线速动的

纵联保护,经济成本和运行维护水平较电流保护大为提高。中、低压配电网结构与输电任务的变化、分散式能源发电机组工作特性和所发电能的随机性,决定了操作后电网的安全稳定性的保证更为困难。分散式能源发电系统与大电网解列前后的频率特性、电压特性有何变化,采用何种安全自动装置如何进行紧急控制?新型的继电保护和实时控制的安全自动装置需要发展。

- a. 利用单端电气量的全线速动继电保护研究。
- b. 继电保护与安全自动装置配合方式的研究。
- c. 大容量电力储能装置应用于紧急控制的研究。
- d. 含有分散式电源的电力系统安全稳定紧急控制的研究。
- e. 分散式电源故障解列、振荡解列与解列保护研究。
- f. 分布式能源电网的“孤岛”后频率与电压自动控制。
- g. 恢复理论与恢复控制研究。

4 结论

本世纪可再生能源的利用将取得长足发展,分散能源发电的技术已经基本成熟。将这种分散的随机一次能源转换为电能加以利用,不仅要考虑能量的转换技术,更需要解决电能的输送和使用技术。由于风能、太阳能的随机特性和电能实时平衡的自然特性,大规模的随机电力接入电力系统以后,电力系统的安全稳定运行受到新的挑战,只有在解决这些问题以后,大规模的高效利用才有可能。产生这些问题的根本原因在于随机的发电能力与随机的用电需求相互独立不能平衡。解决问题的出路在于使用可控发电的电力、电量补充这种不平衡,从而需要解决一系列的技术问题,这些技术问题是相互关联影响的,需要在相当长的时期内研究。

参考文献:

- [1] MARTINOT E. 全球可再生能源发展报告(2006 年修订版)[EB/OL]. [2007-10-23]. <http://www.ren21.net>.
- [2] 施鹏飞. 2005 年中国风电场装机容量统计(20060323 修订稿)[EB/OL]. (2006-05-08). <http://www.cwea.org.cn/download>.
- [3] 丁明,吴义纯. 风力发电系统运行和规划问题研究综述[J]. 国际电力,2003,7(3):36-40.
DING Ming, WU Yi-chun. Summary on studies of operation and planning of wind power generation systems[J]. International Electric Power for China, 2003, 7(3): 36-40.
- [4] 王海超,鲁宗相,周双喜. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):103-106.
WANG Hai - chao, LU Zong - xiang, ZHOU Shuang - xi. Research on the capacity credit of wind energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 103-106.
- [5] 栗文义. 风能利用对电力系统可靠性影响的评估[D]. 西安:西安交通大学,2006.
LI Wen-yi. Reliability impact evaluation of wind energy utilization in electric power system[D]. Xi'an Jiaotong University, 2006.

[7] 刘正谊,谈顺涛,曾祥君,等. 分布式发电及其对电力系统分析的影响[J]. 华北电力技术,2004(10):18-20,23.

LIU Zheng-yi,TAN Shun-tao,ZENG Xiang-jun,et al. Distributed generation and its impact on power system analysis[J]. North China Electric Power,2004(10):18-20,23.

作者简介:

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究。

On connection of distributed energy generation to power system

ZHANG Bao-hui

(School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract: The features of distributed energy and its generation are analyzed and it is pointed out that the main difference between distributed generation and traditional energy generation is the uncontrollable stochastic characteristic. When large - scale distributed generation is connected to power system,the real - time balance of two irrelevant variables,i.e. stochastic generation and stochastic load,is a scientific issue. To find a rational combination of controllable traditional generation and uncontrollable stochastic generation meeting the stochastic load demands,considerations in many aspects are necessary,such as generator planning, power grid planning,operational control,fault protection and so on,which brings about new technical problems. It is suggested to expand the research in the optimal planning and reliability assessment,the operational analysis and control strategy,the protection and safety equipment,and so on.

The project is supported by the National High Technology Research and Derelopment of China(863 program)(2006AA05Z247).