

分布式发电供能系统若干问题研究

王成山, 王守相

(天津大学电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津市 300072)

摘要: 分布式发电供能技术是符合国家重大需求的重要研究课题。围绕高渗透率微网的复杂动态行为及安全高效运行这一重大问题, 系统提出了分布式发电供能系统研究的 4 个方面的问题: 微网运行特性及高渗透率下与大电网相互作用的机理; 含微网新型配电系统的规划理论与方法; 微网及含微网配电系统的保护与控制; 分布式发电供能系统综合仿真与能量优化管理方法。并对各方面问题所涉及的研究方向进行了概括和展望。

关键词: 分布式发电; 微网; 配电网; 可再生能源

中图分类号: TM732; TM61; TM727.2

0 引言

能源是人类赖以生存和发展的基础, 电力作为最清洁、便利的能源形式, 是国民经济的命脉。提高能源利用效率、开发新能源、加强可再生能源的利用, 是解决中国经济和社会快速发展过程中日益凸显的能源需求增长与能源紧缺、能源利用与环境保护之间矛盾的必然选择。采用分布式发电供能技术, 有助于充分利用各地丰富的清洁和可再生能源, 向用户提供“绿色电力”, 是实现“节能减排”目标的重要举措。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中明确提出要大力开展“可再生能源低成本规模化开发利用”以及“间歇式电源并网及输配技术”, 开展分布式发电供能技术方面的研究工作符合国家重大需求。

在能源需求与环境保护的双重压力下, 国际能源界已将更多目光投向了既可提高传统能源利用率又能充分利用各种可再生能源的分布式发电供能技术的相关研究领域^[1-6]。在分布式发电技术应用最早的欧洲, 丹麦、芬兰、挪威等国家现有的分布式发电装机容量已接近或超过其总装机容量的 50%, 而保持和加强在可再生能源和分布式发电供能技术上的优势地位, 欧盟自 2001 年开始资助实施的“可再生能源和分布式发电在欧洲电网中的集成应用”(IREN)项目, 在世界范围内, 吸引了超过 100 家各类研究机构参加; 美国政府也组织包括加州大学伯克利分校、威斯康星大学、EPRI、ABB 在内的 40 多

家高校、研究机构和企业开展了与分布式发电供能技术相关的研究工作; 日本则很早就开展了分布式发电供能技术的理论和实用化研究, 并在超级电容器、燃料电池、潮汐发电、光伏发电等技术上处于领先地位。分布式发电供能技术涉及能源、材料、机械、环保、控制等诸多领域, 是一个典型的多学科交叉的系统性工程。分布式发电供能系统的相关技术将成为国际上一项重要的技术增长点, 是 21 世纪电力工业的重要技术发展方向之一。

尽管很多国家对分布式发电供能技术展开研究, 但除了在分布式发电设备研发、制造和设备自身控制方面具有一些较成熟的技术外, 涉及分布式发电供能系统与大电网的并网, 以及并网运行后的系统优化、协调和控制等诸多领域的研究大多刚刚起步^[7-15]。在分布式发电设备制造技术日趋成熟、分布式发电成本日益降低、大量分布式发电设备亟待并网运行的今天, 能否解决好高渗透率微网的复杂动态行为及安全高效运行这一重大问题是决定分布式发电供能技术能否大规模工业化应用的关键。为此, 国家科技部“973”计划项目专门资助了分布式发电供能系统的相关基础研究, 针对高渗透率微网的复杂动态行为及安全高效运行理论开展研究。

1 分布式发电供能系统

分布式发电供能系统是指利用各种可用的分散存在的能源, 包括可再生能源(太阳能、生物质能、小型风能、小型水能、波浪能等)和本地可方便获取的化石类燃料(主要指天然气)进行发电供能的系统, 发电容量通常限定在几十兆瓦以下。

现有研究和实践已表明, 将分布式发电供能系统以微网的形式接入到大电网并网运行, 与大电网

收稿日期: 2008-09-08; 修回日期: 2008-09-12。
国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目
(2009CB219700)。

互为支撑,是发挥分布式发电供能系统效能的最有效方式。分布式发电供能微网系统,简称微网,是指由分布式电源、储能装置、能量变换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统,是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统,既可以与大电网并网运行,也可以孤立运行。在微网系统中,用户所需电能由风力发电系统、光伏发电系统、燃料电池、冷/热/电联供系统和公共电网等提供,在满足用户供热和供冷需求的前提下,最终以电能作为统一的能源形式将各种分布式能源加以融合。微网典型结构见图1。公共联结点(PCC端口)处的微网模式控制器通过解并列控制,可以实现微网并网运行与孤岛自主运行模式的转换。

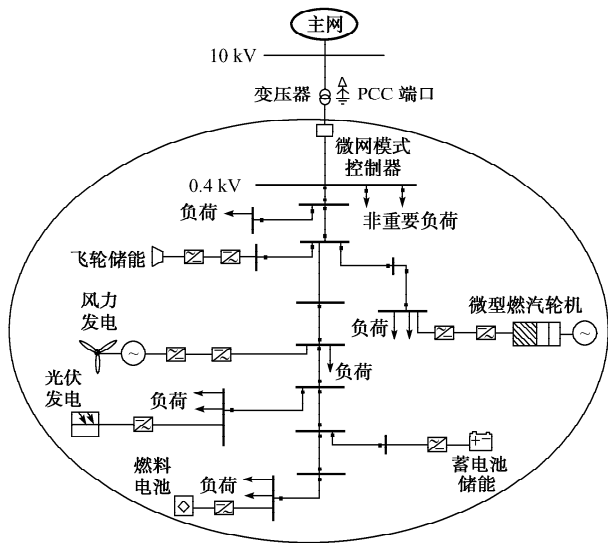


图1 分布式发电微网系统结构示意图
Fig. 1 Structure of distributed generation micro-grid system

以微网及其所接入的大电网为研究对象,以保证微网与大电网的安全稳定和经济高效运行为目标,可归纳为如图2所示的4个方面的研究工作。

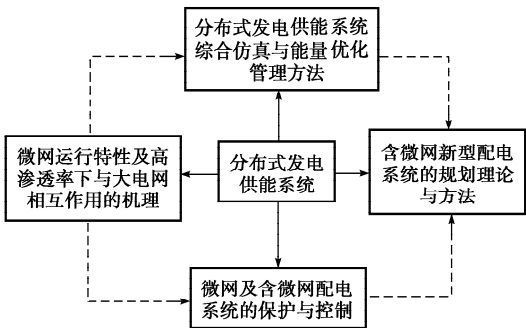


图2 分布式发电供能微网系统相关研究问题
Fig. 2 Issues related to distributed generation micro-grid system

2 微网运行特性及高渗透率下与大电网相互作用的机理

微网集成了多种能源输入、多种产品输出、多种能源转换单元,是化学、热力学、电动力学等行为相互耦合的复杂系统。微网存在多种运行状态,当微网处于并网运行状态时,功率可以双向流动;在大电网故障时,通过保护动作和解列控制,可使微网与大电网解列形成孤岛运行,独立向其所辖重要负荷供电;在大电网故障消除后,通过并网控制可再次将微网并入大电网,重新进入并网运行状态。微网的运行特性既与其内部的分布电源特性以及负荷特性有关,也与其内部的储能系统运行特性密切相关,同时还与大电网相互作用,尤其在微网渗透率比较高的情况下,这种相互作用将直接影响到二者的稳定性和可靠性。在这一方面,需开展如下研究工作。

2.1 高渗透率下微网与大电网相互作用机理

当大量分布式发电供能系统以微网形式接入大电网后,微网与大电网间的相互作用将十分复杂,对大电网的运行特性产生重要影响,而对于这种影响的分析则需要以全新方法为基础。以稳定性分析为例,传统的电力系统稳定性分析问题一般仅涉及高压电力系统,而微网一般接入中压或低压配电系统,配电系统的安全稳定问题完全是由于微网的存在而提出的。由于高压电力系统与含微网的中压或低压配电系统在结构和运行参数等方面存在很大差异,其稳定性分析方法可能截然不同。高渗透率下微网与大电网相互作用机理研究的目的就是要揭示出二者相互作用的本质,发展相关理论和方法,为含微网配电系统的稳定性分析与控制奠定理论基础。

2.2 分布式储能对微网安全稳定运行的作用机理

微网中的分布式电源,如光伏电池、风力发电等属于间歇式电源,所产生的电能具有显著的随机性和不确定性特征,微网中各类负荷的变化也存在一定的随机性。当微网独立运行时,分布式储能环节,如蓄电池、超级电容器、飞轮储能系统等成为支持微网自主稳定运行不可或缺的重要组成部分,起到平抑系统扰动、维持发电/负荷动态平衡、保持电压/频率稳定的重要作用。考虑到分布式储能系统的多样性,各种储能系统在微网扰动过程中的响应特性存在很大差异,对微网安全稳定的作用机理也会有很大不同,需要充分认识分布式储能系统对微网运行特性的影响。

3 含微网新型配电系统的规划理论与方法

当大量分布式发电供能系统以微网形式接入配

电系统后,配电系统将由原来单一电能分配的角色转变为集电能收集、电能传输、电能存储和电能分配于一体的新型电力交换系统。合理规划、设计的分布式供能系统能有效提高分布式能源利用的效率,提高电力系统运行的安全性、经济性和对重要负荷供电的可靠性。但如果分布式电源的类型、安装地点、容量等不合适,不仅不能充分发挥分布式供能系统的正面作用,还可能对配电系统的运行产生负面影响,如增加电能损耗、导致电压越限、大幅度增加短路容量,等等。为了建设可持续发展的配电系统,必须对微网接入系统后的影响进行科学评估,进而在系统规划与建设中加以科学引导。含微网的配电系统规划工作十分复杂,投资主体的不同直接导致微网设备类型、容量、安装地点,以及投入时间的不确定,而且由于一些可再生能源发电呈现间歇式的特点,使不确定性问题更加突出。总之,原有的配电系统规划方法完全不能适应新环境下的系统规划要求,必须在规划的思路与方法上有所创新,为含微网的新型配电系统规划工作建立理论基础。

4 微网及含微网配电系统的保护与控制

微网中的分布式电源通常具有多种不同的类型,且不同电源之间常通过电力电子装置实现互联,这使得分布式发电供能系统构成的微网与常规配电系统或输电系统都有根本性的差异;同时,由于微网系统既要能够并网运行又要能够脱网独立运行,运行模式常常需要切换,这就带来了一系列复杂的保护与控制问题,必须对传统的保护与控制方法进行较大调整才能满足系统要求。微网及含微网配电系统的保护与控制研究对保证分布式发电供能系统的可靠运行具有重要理论和实际意义。在这一方面,下述问题需要重点研究。

4.1 微网及含微网配电系统的保护原理与技术

含多个分布式电源及储能装置的微网的接入,彻底改变了配电系统故障的特征,使故障后电气量的变化变得十分复杂,传统的保护原理和故障检测方法将受到巨大影响,可能导致无法准确判断故障的位置;在微网正常并网运行的系统中,微网内部的电气设备发生故障时,应确保故障设备切除后微网系统继续安全稳定地并网运行;在微网外部的配电系统部分发生故障时,应在可靠定位与切除故障的前提下,确保微网在与主网解列后继续可靠运行。微网接入配电系统带来的这些变化使保护的工作原理和动作逻辑均变得更加复杂,传统继电保护方法无法满足要求,需要探讨新的保护方法和保护技术。

4.2 微网并网控制及微网中多分布式电源协调控制

相对于所连接的大电网,微网可看做是具有独特运行特征的虚拟发电机,并网运行时可以向大电网供电(有时为负值)。与常规发电机组并网运行时相似,微网并网运行需要满足一定的电压和频率条件。但与常规的发电机组不同,由于微网中分布式电源的种类和特征不同,需要一些特殊的协调控制方式才可能使其满足并网运行条件。微网作为自治系统,具有脱网独立运行的能力,此时为了满足负荷对系统电压和频率的要求,跟踪微网中负荷的变化,也需要针对微网中的分布式电源采取相关的协调控制措施。由于其设备种类繁多、运行模式多样、可控程度不同(集中控制/分散控制/自动控制/用户控制),微网中分布式电源的协调控制问题非常复杂。

4.3 微网及含微网配电系统电能质量分析与控制

随着科学技术的发展,各种精密电子仪器和数字化电器设备在用户中大量装备,对电力系统的供电可靠性和电能质量提出了越来越高甚至苛刻的要求。在微网系统中,由于可能存在一些间歇式电源,其频繁的启停操作、功率输出的变化,都可能给所接入系统的用户带来电能质量问题。此外,由于微网中很多类型的电源都需要借助电力电子技术输出满足用户负荷频率和电压要求的电能,依据所采用的电力电子技术不同,逆变器可能产生不同水平的谐波,随着微网渗透率的提高,配电系统的谐波水平也将上升。另一方面,对于一个谐波水平已经比较高的配电系统,微网中的分布式电源也可能成为谐波的汇点,导致分布发电设备的损毁。微网中大量单相分布式电源的存在,也增加了配电系统的三相不平衡水平。总之,微网及含微网的配电系统中存在很多与电能质量相关的独特问题。

5 分布式发电供能系统综合仿真与能量优化管理方法

鉴于微网系统的复杂性,无论是研究其与大电网相互作用的机理,还是研究在各种扰动下的复杂动态行为,无论是研究其保护与控制问题,还是研究其规划设计问题,都需要强有力的仿真手段,需要构建兼容微网分析的配电系统仿真实验平台。研究微网及含微网配电系统的能量优化管理方法,有助于提高系统运行的经济性,为分布式能源的高效利用创造条件。

5.1 分布式发电供能微网系统综合仿真

在分布式发电供能系统中,既有同步发电机等具有较大时间常数的旋转设备,也有响应快速的电

力电子装置。在系统发生扰动时,既有以微秒级快速变化的电磁暂态过程,也有以毫秒级变化的机电暂态过程和以秒级变化的慢动态过程。综合考虑其相互影响,实现动态全过程的数字仿真是一项极具挑战性的研究课题。而将数字仿真系统与物理模拟仿真平台有机结合,形成数字/模拟混合仿真系统,对于微网运行特性的研究、保护与控制器的设计等将更加具有实际价值。目前,混合仿真技术也是常规电力系统研究的热点领域,尽管一些仿真思路可供借鉴,但因微网中的物理设备更加多样化,模型更为复杂,不同设备暂态响应的的时间尺度更加分散,必须有针对性地发展相关的混合仿真实论和方法。

5.2 微网经济运行理论与能量优化管理方法

正如在常规的电力系统中可以通过对发电机的节能调度实现节能降损一样,通过微网经济运行理论与能量优化管理方法的研究,也可以实现微网的高效经济运行。与常规的电力系统相比,微网中的可调节变量更加丰富,如分布式电源的有功出力、电压型逆变器接口母线的电压、电流型逆变器接口的电流、储能系统的有功输出、可调电容器组投入的无功补偿量、热/电联供机组的热负荷和电负荷的比例等。通过对这些变量的控制调节,可以在满足系统运行约束的条件下,实现微网的优化运行与能量的合理分配,最大限度地利用可再生能源,保证整个微网运行的经济性。同时,当微网并网运行时,尤其是在微网高渗透率情况下,还可以通过对微网输出的有效控制,降低配电系统中的配电变压器损耗和馈线损耗。以全系统能源利用效率的最大化为目标,研究微网的优化控制与调度理论与方法,正是这一研究领域重点关注的问题。

6 结语

本文涉及的研究工作已经获得了国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目的资助,主要承担单位包括:天津大学、华中科技大学、合肥工业大学、西安交通大学、上海交通大学、湖南大学、华北电力大学、南方电网公司技术中心。以期在上述关键理论和技术问题上取得突破。例如:

在理论层面,建立微网分析的理论体系。包括:微网与大电网相互作用机理,分布式储能在微网中的作用机理,微网全过程仿真实论,含微网新型配电系统的规划理论,微网优化运行理论。

在技术层面,解决保证微网安全可靠运行的关键技术问题。包括:微网和含微网配电系统的保护技术,微网中分布式电源协调控制技术,电能质量综合监控技术,分布式储能系统控制技术,含微网配电

系统的数字仿真系统,含微网配电系统的规划辅助决策系统,微网物理与数字综合仿真实验平台。

上述这些问题的解决将可为分布发电供能技术在电力系统中的广泛应用提供理论和技术保障。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Distributed energy resources: current landscape and a roadmap for the future. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2004.
- [3] Renewable energy technical assessment guide-TAG-RE. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2005.
- [4] IRED—integration of renewable energy sources and distributed generation into the European electricity grid [EB/OL]. [2008-08-08]. <http://www.ired-cluster.org/>.
- [5] IEEE Std 1547—2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems.
- [6] DEGNER T, SCHMID J, STRAUSS P. DISPOWER—distributed generation with high penetration of renewable energy sources[R/OL]. [2008-08-10]. <http://www.dispower.org>.
- [7] EL-KHATTAM W, HEGAZYAND Y G, SALAMA M M A. An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 1158-1165.
- [8] DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. Operation of a multiagent system for microgrid control. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1447-1455.
- [9] GOMEZ J C, MORCOS M M. Coordinating overcurrent protection and voltage sags in distributed generation systems. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(2): 16-19.
- [10] BARAN M E, EI-MARKABY I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1757-1764.
- [11] Market driven distributed energy storage system requirements for load management applications. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2006.
- [12] LASSETER R H, PIAGI P. Control and design of microgrid components[R/OL]. [2008-08-09]. <http://certs.aeptechlab.com/>.
- [13] MCDERMOTT T E, SAMAAAN N. Distribution system design for strategic use of distributed generation. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2005.
- [14] 王成山,陈恺,谢莹华.配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容.电力系统自动化,2006,30(3):38-43.
WANG Chengshan, CHEN Kai, XIE Yinghua. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.
- [15] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响.电力系统自动化,2001,25(12):53-56.
LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.

(下转第 31 页 continued on page 31)

王成山(1962—),男,通信作者,教育部长江学者特聘教授,973 项目首席科学家,主要研究方向:电力系统安全分析、城市电网规划、分布式发电系统。E-mail: cswang@tju.edu.cn

edu. cn

王守相(1973—),男,博士,副教授,主要研究方向:配电系统分析、分布式发电系统分析与仿真。

Study on Some Key Problems Related to Distributed Generation Systems

WANG Chengshan, WANG Shouxiang

(Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The research on distributed generation technology meets the great demand of China. Focusing on the vital theory of the complicated dynamic performance and the safe and efficient operation of high penetration micro-grid, four fundamental problems in the study of distributed generation system are proposed systematically, including the property of micro-grid and the principle of interaction of high penetration micro-grid with the bulk power system; the planning theory and method of new distribution system containing micro-grids; the protection and control of micro-grid and distribution system with micro-grids; and the integrated simulation of distributed generation system and the optimization method of energy management. The research directions of each scientific problems are surveyed and anticipated.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2009CB219700).

Key words: distributed generation; micro-grid; distribution network; renewable energy