

# 智能电网实现的若干关键技术问题研究

施婕, 艾芊

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 面对目前电力系统已越来越无法满足社会对电力能源和供电可靠性日益增长的需求的问题, 具备着自愈、清洁、经济等优点的智能电网成为了今后电网发展的一个重要趋势。介绍了智能电网的概念、特征和结构, 提出了智能电网实现的几方面关键技术问题, 并对每一方面问题进行了深入探讨和阐述, 从而为智能电网今后的发展指明研究方向。

**关键词:** 智能电网; 关键技术; 特征; 结构; 清洁能源

## Research on several key technical problems in realization of smart grid

SHI Jie, AI Qian

(School of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Today, a power system is working harder to meet the society's growing demand on power resources and electricity reliability. Therefore, smart grid, characterized by many advantages such as self-healing, clean and economic, has become an important trend of power grid development. In this paper, the concept, characteristics and structure of smart grids are introduced and some key technical problems in realization of smart grid are proposed. In addition, each of these problems is further discussed and explained in order to point out the research field for the development of smart grids later.

**Key words:** smart grid; key technical problems; characters; infrastructure; clean energy

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0001-04

## 0 引言

在过去的近一个世纪, 电力系统已经发展成为集中发电、远距离输电的大型互联网络系统<sup>[1]</sup>。而目前, 由于能源、环境、经济、政治等多方面因素的驱动, 未来的几十年内, 全世界范围内都将展开一场深刻的电力系统变革。无论是发达国家还是发展中国家, 传统的电力系统都面临着前所未有的挑战: (1) 用于传统火力发电的煤、石油等化石燃料日益耗尽, 人们必须开发新的可再生能源以满足不断增长的电力需求;

(2) “温室效应” 气体排放导致的气候变化问题促使传统的发电模式必须向清洁、环保的方向转变; (3) 电力系统结构的高度互联和设备的日益老化问题不容忽视, 任何一个发生在局部小范围内的故障都有可能迅速蔓延并影响到整个电网, 近年来大停电事故频繁发生, 如 2003 年的美加大停电和 2006 年的欧洲大

停电等, 充分暴露了当今电力系统的脆弱性; (4) 电子设备的广泛应用使得电力用户对电能质量、可靠性和经济性有着越来越高的要求。

在如此严峻的形势下, 如何保证一个可靠、安全、环保、高效和灵活的电力系统, 成为了 21 世纪最受人瞩目的困难和挑战。为了解决这一难题, 几年前, 美国和欧盟相继提出“智能电网 (Smart Grid)”<sup>[2-4]</sup> 的概念, 并从此大力推进智能电网的研究和发展: 2006 年, 欧盟理事会的能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的 and 安全的电能策略》(A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy)<sup>[5]</sup> 强调智能电网技术是保证欧盟电网电能质量的一个关键技术和发展方向。同年, 美国 IBM 公司曾与全球电力专业研究机构、电力企业合作开发了“智能电网”的解决方案。如今, 我国的电力行业也开始将目光瞄准了智能电网 (也称“互动电网”) 的开发: 2007 年 10 月, 华东电网有限公司启动智能电网可行性研究项目, 预期在 2030 年将华东电网全面建成智能电网<sup>[6]</sup>。

然而, 与未来的智能电网相比, 当前的电力系统还相距甚远。现阶段, 进一步明确智能电网的定义,

**基金项目:** 国家 863 高技术基金项目 (2007AA05Z458), 上海市自然科学基金 (08ZR1409700), 国家自然科学基金重点项目 (90612018)

发掘、研究和解决实现智能电网过程中的各种技术问题，对于不断完善目前的电网功能并逐步向智能电网趋近，有着非常重要的意义。因此，本文将着眼于实现智能电网所必须解决的关键技术问题，展开研究与探讨。

### 1 智能电网的概念与结构

目前，由于各国根据自身国情对智能电网的需求和考虑不尽相同，智能电网尚未有一个统一、明确的定义。从广义上来说，智能电网包括可以优先使用清洁能源的智能调度系统、可以动态定价的智能计量系统以及通过调整发电、用电设备功率优化负荷平衡的智能技术系统<sup>[7]</sup>。图 1 展示了未来智能电网的基本结构，电能不仅从集中式发电厂流向输电网、配电网直至用户，同时电网中还遍布各种形式的新能源和清洁能源：太阳能、风能、燃料电池、电动汽车等等；此外，高速、双向的通信系统实现了控制中心与电网设备之间的信息交互，高级的分析工具和决策体系保证了智能电网的安全、稳定和优化运行。

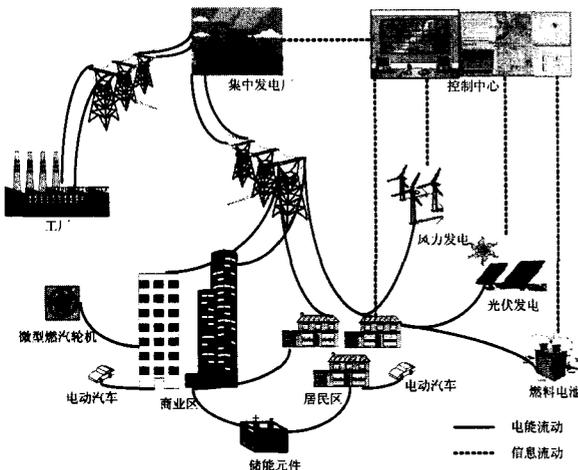


图 1 智能电网的基本结构  
Fig.1 Basic configuration of smart grid

通过分析比较欧美国家对智能电网的定义，可以总结出智能电网所具有五个关键特征<sup>[8-11]</sup>：

**自愈：**实时掌握电网运行状态，预测电网运行趋势，及时发现、快速诊断故障隐患和预防故障发生；故障发生时，在没有或少量人工干预下，能够快速隔离故障、自我恢复，避免大面积停电的发生。

**兼容：**电网能够同时适应集中式发电和分布式发电模式，实现与负荷侧的交互，支持各种清洁、绿色、可再生能源的接入，满足电网与自然环境的协调发展。

**优化：**优化资产规划、建设、运行维护等各个环

节，提高资产的利用效率，降低运行、维护和投资成本。

**互动：**实现与用户的智能互动，有效展开电力交易，实现资源的优化配置，提供最佳的电能质量和供电可靠性。

**集成：**实现监测、控制、保护、维护、调度和电力市场管理等数字化信息系统的全面集成，形成全面的辅助决策体系。

研究者们发现，智能电网与当前的电力系统相比，它的优势主要体现在：(1) 在初期就能检测电网问题并实施校正措施；(2) 接受更加大量的数据信息并做出响应；(3) 系统快速恢复的能力；(4) 迅速适应电网变化并进行拓扑重构；(5) 为运行人员提供高级的可视化辅助系统。因此，为了实现智能电网的上述特征和功能，首先必须解决一些关键的技术问题，如图 2 所示。

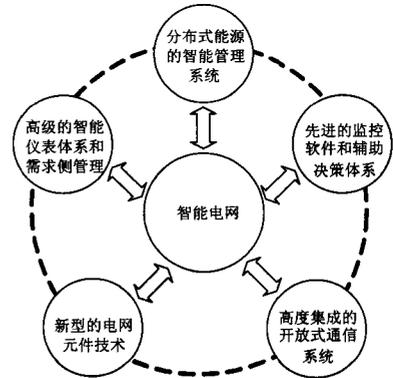


图 2 智能电网实现的关键技术问题  
Fig.2 Key technical problems in realization of smart grid

### 2 智能电网实现的关键技术问题

#### 2.1 分布式能源的智能管理系统

分布式能源(DR)是指安装在用户端的能源综合利用系统，主要包括分布式电源(DG)和分布式储能系统，同时还包含负荷侧能量管理系统和热电联产系统(CHP)。其中，分布式电源的形式包括风力发电、光伏发电、微型燃气轮机和小水电等，分布式储能系统则包括燃料电池、蓄电池等。近年来，分布式能源技术发展迅速，在丹麦、芬兰、挪威等北欧国家，现有的分布式发电装机容量已超过其总装机容量的30%<sup>[12]</sup>。可以预见，在不久的将来，分布式能源将走进千家万户。

然而，当融入大量的分布式能源后，电网的结构、能量形式、功率流动、信息交换和控制方式的复杂程度大大增加。因此，针对分布式能源带来的问题，可

以从以下几个方面展开研究。

(1) 分布式能源的运行管理优化。一方面, 风电、光伏发电等分布式电源因为具有能源间歇性的特点, 必须通过实时、精确的发电和负荷预报, 优化分布式电源的调度和管理, 以保证电网安全稳定运行, 提高供电的可靠性; 另一方面, 通过分布式储能装置维持电网发电和负荷的动态平衡, 分布式储能装置除了大容量的蓄电池外, 大量的混合动力汽车电池也将是分布式储能的一种重要形式, 同时也是一种新型负荷, 它既可以作为储能装置在电网负荷高峰时对发电量进行补偿, 又能在负荷低谷时吸收和储存电能, 因此, 对大量汽车电池进行监控和调度管理也将是分布式能源管理的一个重要内容。

(2) 分布式能源的接入标准和规划方案。基于现有的分布式电源接入标准 IEEE1547 系列, 考虑不同类型、容量和数量的分布式电源接入电网后的影响, 对相关标准进行完善和补充。同时, 由于大量的分布式能源接入中低压配电网, 电网结构不再是由发电、输电到配电的垂直辐射式, 而是类似于因特网的信息传递模式, 出现了能量双向流动的新布局, 因此必须合理规划和设计分布式电源的类型、安装地点和容量等, 有效发挥分布式能源和提高供电可靠性。

(3) 新的保护方法和技术。大量分布式能源的接入, 潮流的双向流通, 导致继电保护的工作原理和动作逻辑变得更加复杂, 传统的故障检测方法和保护原理将不再满足要求。因此, 必须改造现有的保护系统, 当电网发生扰动或故障时, 迅速适应变化, 实现灵活的网络拓扑重构, 将故障影响范围局限在最小范围, 并可迅速通过其他连接恢复对其他部分的供电<sup>[13]</sup>。

(4) 对于输电成本高、对电能质量要求高的集中电力用户区, 将分布式能源以微网 (Micro Grid) 的形式接入大电网, 是对分布式电源利用效能最高的一种方式。微网是指由分布式电源、储能装置、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<sup>[14]</sup>。实现微网技术所需要解决的关键问题包括: 高渗透率下微网与大电网的相互作用机理; 微网内部各种分布式电源的协调控制; 微网与大电网之间的保护和控制系统等。

## 2.2 高度集成的开放式通信系统

为了能够实时监视和控制电网运行, 清晰掌握电网的状态, 预防事故发生和及时清除故障, 智能电网应该具备高速、双向的数字化通信系统。遍布整个电网的通信设备将信息在各种测量装置、控制设备和执

行元件之间进行相互传递, 以保证电网安全、可靠、经济地运行。具体来说, 智能电网的通信系统应解决以下几个关键问题:

(1) 开放式的数据通信。当前电力系统不同的企业、部门之间信息共享受到限制、不同应用软件无法相互兼容, 然而智能电网要求其通信系统必须是开放式的, 不同企业、部门之间的数据可以完全实现共享。

(2) 完备的通信标准。智能电网对现有的 SCADA 数据采集系统、需求侧能量管理、电网规划、运行调度、电力市场操作等方面的通信系统都将产生影响<sup>[15]</sup>, 因此需要根据电网中的新变化制定相应的通信标准。

(3) 数据通信网络与智能设备的高度集成, 即智能电网中的信息网络能够与各种物理设备如智能仪表系统、智能控制系统等集成为一体化的通信系统。

## 2.3 高级的智能仪表体系和需求侧管理

智能电网中, 无论是发电侧还是用户侧, 都将安装有高级的数字化仪表 AMI (Advanced Metering Infrastructure), 可以进行双向通信和远程监控, 并且支持实时的电价计量。形成高级的智能仪表体系需要实现的关键技术有:

(1) 为电网的调度、运行和规划部门提供大量的电网数据信息, 帮助运行人员准确把握电网的运行状态, 从而达到更高的供电可靠性和更好的资产管理<sup>[16]</sup>。尤其是对于大量分布式能源的管理, 更需要通过高级智能仪表, 精确地掌握和预测分布式能源的状态信息。

(2) 用户端的智能仪表将根据电网的用电信息, 对用电量实行实时计价, 不同时段不同电价, 提倡用户在电价高时少用电, 电价低时多用电, 实现负荷的优化控制, 不仅大大降低用户的用电成本, 也大大提高了电能的利用效率, 真正实现与用户互动的需求侧管理 DSM (Demand Side Management)。

(3) 提供系统故障的快速检测功能, 并且能够远程控制设备开断。

(4) 评估电力系统设备的健康状况, 提高设备的利用效率, 降低运行和维护成本。

## 2.4 先进的监控软件和辅助决策体系

目前电网监控采用的软件大多为 EMS SCADA 系统及其扩展功能, 它们的数据采集速度较慢、信息量有限、在线分析能力差、难以预测电网运行趋势、控制运行仍然依靠人脑经验, 已逐渐无法适应当前电力系统的复杂多变。而智能电网能够全面监控电网中所有的节点、线路和设备, 采用先进的计算机优化算

法,采集、组织和分析电网中的海量数据,并在此基础上形成辅助决策系统,为运行人员提供解决方案,从而实现电网的实时动态管理。实现先进监控软件和辅助决策系统的研究方向主要集中在以下几个方面:

(1) 分布式与集中式监控系统相结合。目前对电力系统的监控是将所有信息汇集到电网调度中心,经过数据处理、分析和判断,再由调度中心下达控制命令至下属各级调度进行实施,是一种集中式的监控系统。而在智能电网中,随着需求侧管理的应用和电子仪表的智能化,分布式的监控系统不仅能够采集、分析当地数据,筛选出需要与上级或其他分布式系统通信的数据,而且能够根据计算决定采取必要的当地控制措施,而不需要通过控制中心下达命令。集中式监控系统的主要职责在于协调各个分布式监控系统,实现优化运行。

(2) 多代理系统 MAS (Multi-Agent System) 的应用。多代理系统是指将多个代理结合起来,共同合作完成某一系统任务的控制方法。由于每个代理具有自治性、社会性、反应性<sup>[17]</sup>等特点,使多代理系统受到越来越多的关注。文献[18]在仿真环境下在智能配电网中设计和实现了多代理系统,包括控制代理、分布式能源代理、用户代理和数据库代理。文献[19]提出了一个基于多代理系统的微电网控制框架,建立了由上级电网代理、微电网代理和元件代理组成的3层多代理控制系统。

(3) 高级的可视化界面和运行决策支持。通过数据过滤和分析,高级的可视化界面能够将大量数据分层次、具体而清晰地呈现出来,从整体到局部地向运行人员展示精确、实时的电网运行状态,并且提供相应的辅助决策支持,包括预警工具、事故预想(what-if)工具和行动方案工具<sup>[20]</sup>,从而形成较为完善的辅助决策体系。

(4) 电力系统运行趋势的预测能力。预测和预报是智能电网必需具备的功能之一,不管是对大型发电设备或者分布式电源发电量的预测,还是对用户侧负荷情况的预测,都对复杂电力系统的稳定性有着重要作用。对未来的运行趋势掌握的信息越多,规划就能越完善,也能越早对潜在的危险采取预防性措施。

## 2.5 新型的电网元件技术

新型的电网元件也将是智能电网在硬件方面的一个关键技术。利用不断发展的新材料技术、纳米技术和先进的数字化设计,生产新一代的电力系统设备,将大大提高电网的输电能力、供电可靠性和实时控制能力。新型的电网元件技术包括:高温超导电缆 HTS (High-Temperature Superconductor)、超导储能装

置 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)、故障电流限制器 FCL (Fault-Current Limiter)、复合导体 (Composite Conductor)、灵活交流输电系统 FACTS 和高压直流输电系统 HVDC 等。

## 3 结论

本文基于当今电力系统中存在的种种问题,指出了发展智能电网的重大意义和必要性。首先介绍了智能电网的概念、特征和基本结构,然后详细阐述了实现智能电网所必须解决的关键技术问题:分布式能源的智能管理系统、高度集成的开放式通信系统、高级的智能仪表体系和需求侧管理、先进的监控软件和辅助决策体系以及新型的电网元件技术等。这些关键技术问题的解决,将为智能电网的最终实现提供软件和硬件保障。

## 参考文献

- [1] 盛鸥,孔力,齐智平,等. 新型电网-微电网 (Microgrid) 研究综述[J]. 继电器, 2007, 35(12): 75-81. SHENG Kun, KONG Li, QI Zhi-ping, et al. A Survey on Research of Microgrid - a New Power System [J]. Relay, 2007, 35(12): 75-81.
- [2] EPRI. Profiling and Mapping of Intelligent Grid R&D Programs [R]. EPRI, Palo Alto, CA and EDF R&D, Clamart(France), 2006.
- [3] Paul Haase. IntelliGrid: A Smart Network of Power [J]. EPRI Journal, 2005: 17-25.
- [4] European Commission. European Technology Platform Smart Grids: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future [EB/OL]. [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf). 2006.
- [5] The Renewable Energy Framework Directive - 23 Jan 2008 [EB/OL]. [http://www.erec.org/fileadmin/erec\\_docs/Documents/2008\\_res\\_directive\\_en.pdf](http://www.erec.org/fileadmin/erec_docs/Documents/2008_res_directive_en.pdf).
- [6] 帅军庆. 瞄准世界前沿 建设智能电网[J]. 国家电网, 2008,(2):55-57.
- [7] 顾峻源. 我国应大力发展智能电网[N]. 中国电力报, 2009-04-24(001).
- [8] Monmoh J A. Smart Grid Design for Efficient and Flexible Power Networks Operation and Control[A]. in: Power System Conference and Exposition, PES'09, IEEE/PES[C]. 2009.1-8.
- [9] Schroder A, Dreyer T, Schowe-Von Der Brellie, et al. SmartGrids for Distribution[A]. in: 2008. IET-CIRED, CIRED Seminar[C]. 2008. 1-4.
- [10] Collier S E. Ten Steps to a Smarter Grid[A]. in: Rural Electric Power Conference, REPC'09, IEEE[C]. 2009.

(下转第 55 页 continued on page 55)

来保持与服务器的连接。因此我们可以在没有报警信息产生的时候, 周期性地向安全 III 区的自动化综合报警系统传送一个空的报警信息, 这样自动化综合报警系统只要周期性地收到各应用系统传来的报警信息(包括空的报警信息), 就可以认为传送正常, 如果自动化综合报警系统超过最大空闲时间(最大空闲时间可以设置为 5~10 秒)仍未收到某个应用系统传来的报警信息, 则认为该系统报警信息的传送出现了故障, 将自动产生一条故障信息, 通知相关人员处理。经过实际运行表明, 经过该技术处理后, 能够确保各系统报警信息的即时可靠传送, 能够确保自动化综合报警系统的可靠、稳定运行。

## 5 结论

本文所述的自动化综合报警系统在系统设计、功能定位以及接口标准等方面采用了当今先进的计算机、网络和通信技术, 同时满足了电力二次系统安全防护原则和方案。目前采用该方案的自动化综合报警系统已在重庆市沙坪坝供电局建成投运, 运行效果非常好。该系统的应用, 适应了自动化专业进一步自动化的趋势, 也使得自动化专业的科技含量得到了进一步提高。它能够把全网运行的重要数据进行手机短信发送, 可让公司领导及时了解电网信息, 让技术人员尽快的发现和解决问题, 提高工作效率。对于值班运行人员来说, 该系统可以完全

实现自动化值班, 提高事故的处理速度, 同样对于公司领导以及相关职能部门人员可以更高效的提供信息共享。随着自动化专业的自动化程度进一步提高, 自动化综合报警系统的应用将会得到迅速的发展与推广。

## 参考文献

- [1] 国家电力调度通信中心. 电网调度自动化与信息技术标准[M].北京: 中国电力出版社, 2002.  
National Power Dispatch Communication Center. The Standard of Electric Power Network Dispatching Automation System and Information[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 袁荣湘. 现代化电网自动化和通信系统的理论与实践[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.  
YUAN Rong-xiang. The Theory and Practice of the Automation and Communications Systems of the Modern Power Grid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2001.

收稿日期: 2009-03-24; 修回日期: 2009-05-25

### 作者简介:

车权(1978-)男, 硕士, 工程师, 主要从事电力通信及电网调度自动化方面的工作; E-mail: chequan@foxmail.com

张建梅(1980-)女, 硕士, 讲师, 主要从事水利水电方面的教学和科研工作。

(上接第 4 页 continued from page 4)

- [11] Chebbo M. EU Smart Grids Framework "Electricity Networks of the future 2020 and beyond" [A]. in: Power Engineering Society General Meeting[C]. 2007.1-8.
- [12] Ipakchi A, Albuyeh F. Grid of the Future[J]. Power and Energy Magazine, IEEE, 2009, 7(2):52-56.
- [13] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11.  
YU Yi-xin, LUAN Wen-peng. Smart Grid [J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(1): 7-11.
- [14] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.  
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Study on Some Key Problems Related to Distributed Generation Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [15] DeBlasio R, Tom C. Standards for the Smart Grid[A]. in: Energy 2030 Conference[C]. 2008. 1-7.
- [16] Backer D. Power Quality and Asset Management the Other "Two Thirds" of AMI Value[A]. in: 2007 IEEE Rural Electric Power Conference, Rapid City, SD[C]. 2007.
- [17] Franklin S, Graesser A. Is It an Agent, or Just a Program? a Taxonomy for Autonomous Agents [A]. in: Proc 1996

the 3rd International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages[C]. Springer-Verlag: 1996.21-35.

- [18] Pipattanasomporn M, Ferze H, Rahman S. Multi-Agent Systems in a Distributed Smart Grid: Design and Implementation [A]. in: Power Systems Conference and Exposition, 2009. PES'09, IEEE/PES[C]. 2009.1-8.
- [19] 章健, 艾芊, 王新刚. 多代理系统在微电网中的应用[J]. 电力系统及其自动化, 2008, 32(24): 80-82.  
ZHANG Jian, AI Qian, WANG Xin-gang. Application of Multi-agent System in a Microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 80-82.
- [20] Javier Rodriguez Roncero. Integration is Key to Smart Grid Management[A]. in: CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution[C]. Frankfurt: 2008.

收稿日期: 2009-06-08

### 作者简介:

施婕(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与微电网技术; E-mail: jshi0918\_sjtu@sjtu.edu.cn

艾芊(1969-), 男, 副教授, 博士后, 研究方向为电力系统稳定以及电能质量。