

智能微网——未来智能配电网新的组织形式

李振杰，袁 越

(河海大学电气工程学院，江苏省南京市 210098)

**摘要：**智能电网和微网是本世纪新兴的 2 个概念。文中从智能电网与微网的关系出发,通过阐述中国式智能电网和微网的内涵,提出未来智能配电网的一种新的组织形式——智能微网,并着重分析了智能微网在建设智能电网过程中需要解决的关键技术问题。

**关键词：**智能微网；智能配电网；坚强；互动；高级能量管理；高级量测体系

**中图分类号：**TM71；TM727

0 引言

智能电网(smart grid)和微网(microgrid)是 21 世纪新兴的 2 个概念,随着世界多个国家的积极探索和研究,已迅速延伸至政府、电力、信息、经济、金融等多个行业和领域,成为电力系统未来发展的重要方向。智能电网和微网在国际上的蓬勃发展,对中国未来电网的规划和建设有着很好的启示和借鉴意义。随着中国电力体制改革的深入完善、电网结构的不断调整和发展方式的逐步转变,将给建设智能电网和微网带来巨大的发展机遇。

本文通过阐述两者在中国发展的内涵及微网智能化的需求,总结提出智能微网的概念,并重点分析了智能微网需要解决的关键技术问题。

1 智能电网和微网

国外众多机构和组织普遍认为实现配电和用电智能化是智能电网研究的重点。通过将先进的信息技术、控制技术与电力技术相融合,升级电力基础设施,鼓励用户互动管理,高效利用新能源,从而实现电力、资源、环境和经济的可持续发展。与智能电网类似,微网的含义在不同国家也有着演化和区分,但共同的观点是:微网必须是以分布式发电技术为基础,融合储能装置、控制装置和保护装置的一体化单元;靠近用户终端负荷;接入电压等级是配电网;能够工作在并网和自治 2 种模式<sup>[1-11]</sup>。

1.1 技术特点

本文总结了智能电网和微网的技术特点,如表 1 和表 2 所示。

| 表 1 智能电网技术特点<br>Table 1 Technical characteristics of smart grid |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 特点                                                              | 功 能                                                                                   |
| 自愈                                                              | 实时监控故障前兆,及时预警,降低故障概率;对故障自动控制和纠正,使系统迅速恢复正常                                             |
| 互动                                                              | 利用双向实时的通信系统使电网运行与市场参与者进行交互,以利于用户调整其消费和电网公司实现供需平衡;为市场参与者提供充分数据,汇集更多的买方、卖方,推动电力市场的运作和发展 |
| 安全                                                              | 提供预防、检测、反应、解决的全方位安全策略;有效抵御物理和网络攻击,提高电网抵御风险的能力                                         |
| 兼容                                                              | 能够安全无缝地支持各种类型和容量的发电和储能单元接入系统                                                          |
| 经济                                                              | 优化调整电网的资产管理与设备维护,提高电网的规划能力,降低建设投资,实现电网的高效运行                                           |
| 优质                                                              | 尽量减少影响电能质量的事件,提供可靠的服务;可根据用户对电能质量的需求进行分级,定制不同的价格水平,有效保障优质电能质量用户的需要                     |

| 表 2 微网技术特点<br>Table 2 Technical characteristics of microgrid |                                                              |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 特点                                                           | 功 能                                                          |
| 自治                                                           | 作为小型能源网络,能够维持自身的能量平衡,可脱离主网独立运行                               |
| 稳定                                                           | 基于实时通信、快速控制和储能单元,能够在稳态和暂态过程中实现功率平衡和电压/频率稳定                   |
| 兼容                                                           | 最大化接入可再生分布式能源;可与大电网兼容,作为补充单元参与运行;可根据发展需要允许更多小型模块化的装置接入,易扩展规模 |
| 灵活                                                           | 作为单一受控单元实现“即插即用”;根据用户需求灵活定价,提供不同级别的电能质量                      |
| 经济                                                           | 综合优化能量利用、运行效率和环境排放,对市场交易和资产配置统一管理                            |

1.2 智能电网与微网的关系

微网是智能电网的重要组成部分,理由如下:

1)智能电网首要的特点是自愈,即不论发生什么事,它都能通过自身解决,保证电力系统的安全性。而微网是一个集成了分布式电源、负荷、储能以

收稿日期: 2009-07-29; 修回日期: 2009-07-30。  
江苏省高校“青蓝工程”资助项目。

及保护和控制等一系列环节的小型供能系统,它最大的特点是能够自治运行,这一特点与智能电网的自愈特点相类似。

2)智能电网鼓励终端用户参与电网进行互动,实现资源的优化合理配置。微网作为一个独立的供能网络,也需要根据用户的信息进行动态调整,实现供需平衡。

3)智能电网具有全方位的安全决策,能够抵御物理攻击和网络攻击。同样,微网不仅能够作为备用电源对受端网络提供有效支撑,还能在遭受极端灾害条件下提高整个电网的抗灾能力和灾后应急能力。

4)智能电网的可兼容性允许接入不同类型的发电和储能系统。而微网本身就是分布式电源和分布式储能的集合体,正是基于这个条件微网才能实现系统内部的能量存储和转化。

5)智能电网能够提供满足未来用户需求的电能质量。而微网构建的条件之一是靠近负荷中心,对负荷进行分级。微网可以对不同级别的负荷实现个性化供电,即能够为重要用户提供优质可靠的电力服务。

## 2 中国式智能电网和微网

### 2.1 中国式智能电网

#### 2.1.1 研究现状

余贻鑫院士较早将智能电网概念引入中国<sup>[12]</sup>,从配电网角度出发,分析实现智能化的关键技术问题。能源经济专家武建东教授在全面解读美国大力推进智能电网战略意图的基础上,指出中国应发展有别于欧美模式的智能电网,提出“互动电网”的概念<sup>[13]</sup>。

华东电网公司在2007年启动了高级调度中心、统一信息平台等智能电网试点工程,目前,高级调度中心项目一期工作已通过验收。此外,华北电网公司也于2008年启动了数字电表等用户侧的智能电网相关实践<sup>[14-15]</sup>。

国家电网公司立足于实际国情和特高压实践,提出中国应全面建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强电网为基础,以信息化、自动化、互动化为特征的自主创新、国际领先的坚强智能电网。将分成3个阶段逐步推进,到2020年可全面建成统一的坚强智能电网。

#### 2.1.2 内涵

中国式智能电网应具备以下内涵:

1)“坚强”是物质基础。电网作为现代生活的基础,工业和信息化社会的脊柱,保障电力安全是首要

任务。中国能源分布与能源需求不均衡,电力供需矛盾依然存在,频繁的自然灾害严重威胁电力安全,加上电网规模日益扩大,其运行机理逐渐超出以往的经验范畴,如何控制这样的复杂系统更是对电网运营能力提出了严峻挑战。特高压输电具有传输容量大、距离远、损耗低、占地少、投资省等优势,发展特高压输电有利于提高大范围优化配置资源能力,实现电力远距离、大规模输送,满足经济快速发展对电力的需求,具有客观必然性。同时,各级电网的统一协调和规划建设,有利于形成统一调度和运行,有利于加强电网架构,解决电网输配平衡。因此,“坚强”是电网发展的首要任务,是建设智能电网的物质基础。

2)“互动”是核心体现。互动化是信息化、自动化的综合体现,在开放和互联的信息模式基础上,通过加载系统数字设备和升级电网网络管理系统,实现电网发电、输电、供电、用电、客户售电、分级调度、综合服务电力产业全流程的智能化、信息化、分级化互动管理<sup>[13]</sup>。可以说,互动化是智能电网与传统电网的最大区别,一方面能够利用先进传感装置对发电、输电、配电及供电等关键设备的运行状况进行实时监控和数据整合,通过区域统一调度在电力供应高峰期时平衡电力供应缺口;另一方面可以积极鼓励用户参与电网管理,通过与用户的友好互动,为消费者提供优质的电力服务和减少能源消耗的途径,实现电力与环境的和谐发展。

3)“智能”是技术支撑。实现“坚强”与“互动”离不开智能化的技术和装备。智能技术覆盖了从特高压输变电到智能输电网、智能调度、智能配电网,以及大型集中发电和分布式发电、智能信息体系和通信体系等各个环节。智能装备包含快速仿真计算软件、先进的能量管理系统(EMS)、高级电力电子设备、分布式储能装置、高级计量装置以及基于先进的通信和网络体系的一次、二次设备。装备的研制离不开技术,智能电网是融合了通信技术、传感技术、计算机技术、控制技术和电力技术的多元技术载体。所以,技术的智能化将是实现未来智能电网的有力支撑。

### 2.2 中国式微网

#### 2.2.1 研究现状

近几年国内多所高校和研究机构已纷纷开展对微网的研究,已在微网的设计方案、稳定性分析、动态仿真、优化运行、控制策略、电力电子技术、储能技术以及防震减灾等方面取得了较大进展<sup>[16-24]</sup>。微网研究也得到了国家的重视,中国科学院电工研究所承担的“863计划”项目和天津大学等单位承担的

“973 计划”项目都针对微网技术开展从理论到应用的研究。

杭州电子科技大学在 2008 年建立了国内第 1 个光伏发电微网试验研究系统,光伏发电比例达 50%,包含 120 kW 的柴油发电机和蓄电池组,光伏预期年发电量为 120 kW·h,每年可节约 48 t 标准煤,现已成功向 2 座教学楼供电,实现了微网在实验研究阶段的转化。

2.2.2 内涵

相对于微网在国际上的发展状况,发展中国式微网应从实际国情出发,应具备以下几点内涵:

1)大电网的有力补充。①电网支撑:当受端电网发生功率振荡或并网点电压跌落时,微网可以及时提供有功或无功功率,维持电网的稳定性,作为备用电源向电网提供支撑,同时由于微网的可灵活调度性,能够起到对电网削峰填谷的作用;②防震减灾:中国是一个自然灾害频发的国家,当灾害来临时,具有独立运行特点的微网可以迅速与大电网解列形成“孤网”,从而保证政府、医院、矿山、广播电视、通信、交通枢纽等重要用户的不间断供电,另外,在自然灾害多发地区,微网的黑启动能力能够在发生灾害后迅速就地恢复对重要负荷的供电;③实现农村电气化:在中国农村适合的地区,因地制宜地利用分布式能源,以户/村为单元,组建各种形式和规模的微网,解决农村无电和缺电人口的供电问题。

2)提高能效、节能降耗。①可再生能源利用:微网的最大优点是将原来布局分散的可再生能源进行整合,并通过储能装置和控制保护装置实时平滑功率波动,维持供需平衡和系统稳定,能够有效克服分布式电源的随机性和间歇性缺点,解决分布式电源的接入问题,因此,微网作为可再生能源发电的有效载体能够显著提高可再生能源的利用效率;②提高能效:微网与中小型热电联产相结合,通过实现温度对口、梯级利用和能质匹配,减少不同能源形态的转换,满足用户供电、供热、制冷、湿度控制和生活用水等多种需求,从而显著提高能源利用效率,优化能源结构,减少污染排放,实现节能降耗的目标。

2.3 微网智能化的需求

1)技术需求。微网作为未来智能电网的有力补充,实现智能化是其基本要求。从对电网潮流的实时监测到对电网调度的快速响应,从运行模式的平滑过渡到网络拓扑的灵活切换,微网都对信息技术和控制技术提出了更高的要求。

2)装备需求。中国智能电网战略的提出,将引导电力行业的发展趋势,先进的电力装备将越来越多地应用到微网中,如何使它们有效融合发挥最大

效用,将是微网需要解决的问题,因此客观上要求微网必须以智能化作为发展目标。

3 智能微网

3.1 智能微网的概念

智能微网的概念在国际上已经出现。Galvin Electricity Initiative 认为智能微网 (smart microgrid)是大型电力系统的现代化、小型化的形式,能够提供更高的供电可靠性,更易满足用户增长的需求,最大可能地利用清洁能源和促进技术的创新<sup>[25]</sup>。Valence Energy 认为智能微网是多种能源发电设备和终端用户设备的智能优化和管理,能够在实现持续发展目标的同时最大化投资效益<sup>[26]</sup>。

本文认为智能微网即微网的智能化,通过采用先进的电力技术、通信技术、计算机技术和控制技术在实现微网现有功能的基础上,满足微网对未来电力、能源、环境和经济的更高发展需求。智能微网信息交互关系如图 1 所示。各信息类型及其说明如表 3 所示。

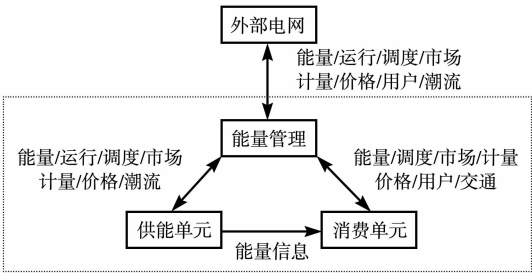


图 1 智能微网信息交互关系  
Fig. 1 Information exchange for smart microgrid operation

表 3 信息类型说明  
Table 3 Description of information types

| 信息类型 | 说 明                                            |
|------|------------------------------------------------|
| 能量   | 电能、制冷、制热等能量利用信息                                |
| 潮流   | 电压、频率、负荷、储运损耗、电能质量等信息                          |
| 运行   | 保护、控制、系统状态、供需关系、气象、备用容量、短路水平、计划储运、孤岛控制、恢复时间等信息 |
| 调度   | 调度供能单元和负荷的控制信号                                 |
| 市场   | 电能、输电权、价格、服务、规则等信息                             |
| 价格   | 电价、费率、成本等信息                                    |
| 计量   | 电/气/热表读、计量数据管理                                 |
| 用户   | 费用清单、家用设施控制、碳排放、订制选择、消费历史、客服、电网计划信息、需求侧响应等     |
| 交通   | 即插式混合动力车、汽车电网等控制信息                             |

智能微网应当具备以下特点:①真正实现自治,提供高可靠性电能;②满足用户多样化的需求;③更有效利用分布式能源尤其是可再生能源;④实现经济效益最大化;⑤实现环境效益最大化。

智能微网与智能配电网密不可分:①从结构上,智能微网与智能配电网都包含系统的配电和用电环节;②从技术上,智能微网与智能配电网都融合了各种先进的技术和设备;③从需求上,智能微网与智能配电网都能为用户提供更好的服务,满足用户多样化的需求;④从效益上,智能微网与智能配电网都是以经济效益、能源效益和环境效益作为发展智能化的驱动力,实现效益的最大化。智能化的微网能够充分利用自身特色帮助推动配电网智能化的实现,因此智能微网将是未来智能配电网新的组织形式。

### 3.2 智能微网的关键技术

实现智能微网涉及众多技术领域,本文主要从通信、传感与计量、能量管理、分析、设备等5个方面总结智能微网的关键技术。

#### 3.2.1 集成的通信体系

提供两大基本功能,使微网自身、多个微网以及微网与配电网之间的信息交换变得实时互动:①统一开放的通信标准,使交互双方能够对信息进行识别和重组;②兼容的物理媒介,使开放的通信设施连接各种智能电子设备(IED)、智能电表、控制中心、电力电子装置、保护系统以及终端客户,创建“即插即用”的环境。

高级的通信技术将在智能微网中得到广泛使用:①宽带电力线(BPL)接入技术,是一种连接到家庭的宽带接入技术,利用现有交流配电网的中、低压电力线路,传输和接入Internet的宽带数据业务,能够实现如远程抄表、负荷控制、数据分析、电能质量监测、设备监视、分布式发电监控等电力服务,还能实现Internet宽带接入、视频传输、病毒防御、故障诊断等用户网络服务,可以说,BPL技术发展迅速,是未来智能微网通信技术的主导力量;②无线通信技术,包括目前发展迅速的WiFi技术、新兴的3G和WiMax技术以及正在开发的无线网格网络(WMN)技术都可以引入微网,实现各设备间及其与能量管理的无线通信。

智能微网集成通信体系至少满足以下要求:①普遍性:所有潜在对象都能有机会参与;②开放性:参与主体都能对等使用基础设施;③标准化:所有通信技术基于统一技术标准;④安全性:能抵御外来攻击,保障信息安全;⑤扩展性:通信设施具有足够的带宽来支持未来的需要。

#### 3.2.2 高级传感与计量技术

基于数字通信技术的高级传感和计量技术能够迅速在网络各节点进行数据采集和数据融合,诊断智能微网的健康度和完整度,同时具备自动抄表、消费计额、窃电检测等功能,并能缓解电力阻塞,提供

需求侧响应和新的控制策略。

高级传感技术是微网智能化技术的重要组成部分,具有很好的应用前景。例如,无线传感网络是由密集型、低成本、随机分布的节点组成,具有很强的自组织性和容错能力,不会因为某些节点在恶意攻击中的损坏而导致整个系统的崩溃<sup>[27]</sup>。将无线传感技术引入微网,可有效提高微网的安全防御能力,并为微网实现自治提供有效基础。

目前国内主要采用机电式电表进行电能计量,对用户侧计量数据采集精细度不够,数据没有被充分利用。高级量测体系(AMI)已经在国外得到了广泛应用,许多国家已经安装了智能电表。AMI能够实现电能计量、记录“三表”(电表、气表和水表)消费信息,并且能够双向通信进行远程阅读。此外,用户端口(consumer portal)技术也在深度研究中,它为在能源供应者与消费者之间建立通信端口提供能量服务功能,这些功能包括<sup>[2]</sup>:①需求侧响应和实时定价;②损耗监测;③远程连接/断开;④支持配电网运行;⑤电能质量监测;⑥完善用户信息。

微网融合了电能生产者和消费者,需要向运行机构提供实时电力信息以平衡电能供需。作为电网尤其是配电网智能化的实现环节,AMI在微网智能化中不可或缺。此外,微网包含商业用户、社区用户以及部分中小型工业用户,用户端口技术作为通向用户室内的网关,也在微网中起着积极作用。未来智能微网高级计量技术能够实现:①高级读表;②实时定价和实时计费;③根据实时电价信息进行负荷调节,控制负荷开关的自动连接/断开;④即时为电力消费者和供应者提供电力消费信息;⑤远程电能质量的监测和控制;⑥远程设备性能监测和诊断;⑦电能损耗监测;⑧提供更高一级的电力服务(如电网运行信息、计划用电方案、停电信息等),与用户实现信息共享。

#### 3.2.3 高级能量管理

高级能量管理是智能微网的核心组成部分,能够根据能源需求、市场信息和运行约束等条件迅速做出决策,通过对分布式设备和负荷的灵活调度来实现系统的最优化运行。

微网EMS与传统EMS的关键区别在于:①由于微网内集成热负荷和电负荷,微网EMS需要热电匹配;②能够自由与电网进行能量交换;③微网EMS能够提供分级服务,特殊情况下可牺牲非关键负荷或延迟对其需求响应,为关键负荷提供优质电力保障。

微网EMS已开发的功能有<sup>[28-29]</sup>:①热能利用,利用储能装置实现对热电联产的运行控制、对采暖

通风和空调系统的管理;②控制系统,包含专家控制系统、分散控制和分层控制系统;③与配电网进行能量交互,提供无功支持和热备用;④分级服务,保障重要负荷用电。

但微网 EMS 还处于较低水平,未来高级能量管理能够在如下方面进行完善:①发展高级控制策略,协调用户控制系统;②基于实时电价的快速需求侧响应;③完善监测系统,包括智能预警和市场信息;④完善数据采集和处理技术;⑤快速故障定位、隔离和服务恢复技术;⑥网络重构和保护技术;⑦综合考虑环境效益、经济效益的调度决策技术;⑧决策可视化技术。

### 3.2.4 高级分析技术

高级分析技术是高级能量管理的功能化,是实现智能微网自治运行的工具,包括系统性能监测与模拟、测量分析系统、综合预测系统、实时潮流分析和市场模拟系统。

1)系统性能监测与模拟:①实时监测微网内各节点电气参数;②根据实时数据验证完善离线系统模型;③基于在线或模拟故障的微网稳定/恢复最优策略。

2)测量分析系统:①检测电压或电流的瞬时值;②分析微网暂态过程;③监测微网紧急事件;④支持实时状态估计;⑤改进微网动态模型;⑥提供更好的数据可视化平台。

3)综合预测系统:①更准确的气象预测;②更精确的负荷预测;③预测故障发生概率;④预测运行风险概率;⑤预测关键设备终止服务后的微网系统响应。

4)实时潮流分析:①可视化展示安全运行限制区域;②给出最优协调方案(例如多微网与配电网之间),扩大安全运行区域,减少输电阻塞,最优化损耗管理,改进系统规划分析。

5)市场模拟系统<sup>[30]</sup>:为微网经济性分析与控制模拟各种市场因素(如市场成员的不同特点、动态学习能力和自我判断决策能力以及成员间的相互作用),并提供开放的程序开发环境实现软件升级与信息共享。

### 3.2.5 先进设备技术

1)高级电力电子技术。目前电力电子技术在微网中的应用体现在:①分布式电源和储能的并网接口;②提供本地电源控制和保护;③孤岛/反孤岛检测。

高级电力电子技术能够极大地提高微网性能。例如:统一潮流控制器能够全面改善微网的无功补偿和潮流控制;配电网静止无功补偿器或动态无功

补偿器能够有效提供电压支撑,抑制电压闪变,缓解分布式发电并网的影响;快速转换开关能够提供稳定的功率,实现微网在并网/离网 2 种模式下的无缝转换。

材料技术(如 SiC 和 GaN)的快速发展加速推动电力电子技术向高频化和智能化发展。并网接口研发和应用的加强有助于降低分布式发电成本,接口控制的完善以及谐波治理有助于改善电能质量,辅助提高微网的经济、稳定运行水平。

2)超导电力技术。作为 21 世纪关键的前瞻技术,超导电力技术已在电缆、变压器、限流器和储能等方面进入试运行阶段,尤其是超导电缆已于 2008 年 4 月在美国投入商业运行,通过 3 根 138 kV 电缆可同时满足 30 万户家庭用电需求。超导电力技术是解决电力安全、高品质供电、高密度供电和高效率输电等难题的新技术途径,将其引入微网能有效保障优质电力服务,降低输电损耗,减少占地,降低电磁污染,从而为微网的高效运行提供保障。

3)新型储能技术。储能技术是微网实现自治的重要部分,按照能量转化形态可分为物理、电磁、电化学和相变储能 4 种类型。微网内集成了大量高渗透率的可再生能源发电单元,由于其固有的随机性和间歇性,将会带来电压和频率的稳定性、低电压穿越、电能质量和经济性等问题。由于各种储能技术在功率范围、响应时间、转化效率以及技术成熟度等方面的差异,因此发展不同储能单元之间的联合控制技术是解决上述问题、实现微网智能化转变的重要环节。

## 4 结语

智能电网和微网作为新生事物其内涵也在不断丰富和深化中。以“坚强”为物质基础、以“互动”为核心特征、以“智能”为技术支撑的智能电网将在中国的经济建设、能源利用和环境保护等方面发挥越来越重要的作用。

微网作为智能电网的重要组成部分,扮演着实现电网支撑、防震减灾、提高能效、节能降耗、农村电气化等角色,实现智能是微网发展的客观要求。

智能微网通过将先进的信息技术、控制技术与电力技术相融合,不仅能够提供更高的电力可靠性、满足用户多种需求,还能实现能源效益、经济效益和环境效益的最大化,是未来智能配电网新的组织形式。

## 参考文献

[1] EPRI. Power delivery system and electricity markets of the

- future [R]. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2003.
- [2] EPRI. Profiling and mapping of intelligent grid R&D programs [R/OL]. [2006-12-29]. [http://www.electricitydeliveryforum.org/2007/pdfs/EPRI\\_Report\\_1-07.pdf](http://www.electricitydeliveryforum.org/2007/pdfs/EPRI_Report_1-07.pdf).
- [3] PAUL H. Intelligrid: a smart network of power [EB/OL]. [2005-05-26]. [http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/EPRI\\_Journal/2005-Fall/10/2885\\_IntelliGrid.pdf](http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/EPRI_Journal/2005-Fall/10/2885_IntelliGrid.pdf).
- [4] European Commission. European smartgrids technology platform—vision and strategy for Europe's electricity networks of the future [R/OL]. [2006-12-04]. <http://www.eurosaire.prd.fr/7pc/bibliotheque/consulter.php?id=296>.
- [5] European Commission. European smartgrids technology platform—strategic research agenda for Europe's electricity networks of the future [R/OL]. [2007-12-05]. <http://cordis.europa.eu/technology-platform/pdf/smartgrids.pdf>.
- [6] LASSETER R H, AKHIL A, MARNAY C, et al. The CERTS microgrid concept [R/OL]. [2002-04-07]. <http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/researchdo/certsdocumo/certspubli/certsmicrogridwhitepaper.pdf>.
- [7] U. S. Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. Grid2030: a national vision for electricity's second 100 years [R/OL]. [2003-07-08]. [http://www.climatevision.gov/sectors/electricpower/pdfs/electric\\_vision.pdf](http://www.climatevision.gov/sectors/electricpower/pdfs/electric_vision.pdf).
- [8] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [9] VENKATARAMANAN G, MARNAY C. A larger role for microgrids. IEEE Power & Energy Magazine, 2008, 5(4): 78-82.
- [10] U. S. Department of Energy. Smart grid system report [R/OL]. [2009-07-07]. [http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/SGSRMain\\_090707\\_lowres.pdf](http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/SGSRMain_090707_lowres.pdf).
- [11] U. S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. Modern grid initiative: a vision for modern grid [EB/OL]. [2008-09-16]. <http://www.netl.doe.gov/moderngrid/docs/>.
- [12] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网 [EB/OL]. [2008-05-19]. [http://www.csee.org.cn/电子期刊/动力与电气工程师\\_第5期/pdf/17-21.pdf](http://www.csee.org.cn/电子期刊/动力与电气工程师_第5期/pdf/17-21.pdf).
- [13] 武建东. 互动电网再造高端信息化中国 [EB/OL]. [2009-03-06]. <http://www.sciencenet.cn/dz/upload/20093625357923.pdf>.
- [14] 帅军庆. 创新发展 建设智能电网: 华东高级调度中心项目群建设的实践 [EB/OL]. [2009-03-06]. [http://www.indaa.com.cn/dwxw/dwjs/200903/t20090306\\_1292097.html](http://www.indaa.com.cn/dwxw/dwjs/200903/t20090306_1292097.html).
- [15] 李岚峰. 华北公司智能电网建设取得新成果 [Z/OL]. [2009-03-07]. <http://www.indaa.com.cn>.
- [16] 郭力, 王成山, 王首相, 等. 微型燃气轮机微网技术方案. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 81-85.  
GUO Li, WANG Chengshan, WANG Shouxiang, et al. A technical scheme of microgrid system with micro turbines. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 81-85.
- [17] 肖朝霞, 王成山, 王首相, 等. 含多微型电源的微网小信号稳定性分析. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 81-85.  
XIAO Zhaoxia, WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Small-signal stability analysis of microgrid containing multiple micro sources. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 81-85.
- [18] 郭力, 王成山. 含多种分布式电源的微网动态仿真. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 82-86.  
GUO Li, WANG Chengshan. Dynamical simulation on microgrid with different types of distributed generations. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 82-86.
- [19] 何朝阳. 含微网的电力系统优化运行与稳定控制相关问题研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [20] 王成山, 肖朝霞, 王首相. 微网综合控制与分析. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-107.  
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-107.
- [21] 章健, 艾芊, 王新刚. 多代理系统在微电网中的应用. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 80-87.  
ZHANG Jian, AI Qian, WANG Xingang. Application of multi-agent system in a microgrid. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 80-87.
- [22] 姚玮, 陈敏, 牟善科, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 77-80.  
YAO Wei, CHEN Min, MOU Shanke, et al. Paralleling control technique of microgrid inverters based on improved droop method. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 77-80.
- [23] 鲁鸿毅, 何奔腾. 超级电容器在微型电网中的应用. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 87-91.  
LU Hongyi, HE Benteng. Application of the super-capacitor in a microgrid. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 87-91.
- [24] 伍磊, 袁越, 季侃, 等. 微型电网及其在防震减灾中的应用. 电网技术, 2008, 32(16): 32-36.  
WU Lei, YUAN Yue, JI Kan, et al. Microgrid and its application in earthquake prevention and disaster reduction. Power System Technology, 2008, 32(16): 32-36.
- [25] Galvin Electricity Initiative. Smart microgrids [EB/OL]. [2009-07-10]. <http://www.galvinpower.org/files/SmartMicroGrids.pdf>.
- [26] Valence Energy. Smart microgrid [EB/OL]. [2009-07-16]. <http://www.valenceenergy.com/Solutions/Smart-Microgrid>.
- [27] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.  
REN Fengyuan, HUANG Haining, LIN Chuang. Wireless sensor networks. Journal of Software, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [28] KUECK J D, STAUNTON R H, LABINOV S D, et al. Microgrid energy management system [R/OL]. [2003-01-29]. <http://certs.lbl.gov/pdf/phase2-kueck.pdf>.
- [29] FIRESTONE R, MARNAY C. Energy manager design for microgrids [R/OL]. [2005-01-01]. <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-54447/>.
- [30] U. S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. Advanced control methods [R/OL]. [2007-03-21]. <http://www.netl.doe.gov/moderngrid/docs/Advanced>

%20Control%20Methods\_Final\_V2\_0. pdf.

com

李振杰(1984—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:新能源发电与微网技术。E-mail: lzj3690hust@163.

袁 越(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统优化运行、电力系统稳定分析与控制、分布式发电与节能新技术。

## Smart Microgrid: A Novel Organization Form of Smart Distribution Grid in the Future

*LI Zhenjie, YUAN Yue*

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Smart grid and microgrid are emerging concepts. From concerning the relationship between smart grid and microgrid, and the expatiation of the connotations of developing them in China, a novel organization form of smart distribution grid in the future—smart microgrid is proposed, and the key technological problems of smart microgrid to be solved for the development of smart grid are analyzed emphatically.

This work is supported by Qing Lan Project.

**Key words:** smart microgrid; smart distribution grid; strong; interaction; advanced energy management; advanced metering infrastructure