

需求响应视角下的智能电网

张 钦, 王锡凡, 付 敏, 王建学

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

摘要: 全球范围的智能电网研究与建设热潮正在给中国电力行业带来新的机遇与挑战。总结了国内外开展的智能电网研究与实践, 以及智能电网与需求响应(DR)协作的研究进展。从 DR 的视角阐述了智能电网与 DR 的协作, 包括与 DR 相关的智能电网技术、智能电网与 DR 的协作效益。最后, 结合中国电力行业的发展现状, 提出了在中国协作开展智能电网与 DR 的建议与设想。

关键词: 智能电网; 需求响应; 电力市场; 分布式发电

中图分类号: TM73

0 引言

智能电网(smart grid)^[1-6]与需求响应(demand response, DR)^[7-12]是当今电力行业的研究热点^[13]。智能电网是 21 世纪电力系统的重大科技创新和变革趋势^[2], 而 DR 则是需求侧管理(DSM)在竞争性电力市场中的最新发展^[12]。目前, 智能电网已经引起了许多国家的广泛关注, 虽然各国根据不同的国情, 为智能电网赋予了不同的含义, 但都是为了实现电力系统安全、可靠、经济、清洁、高效、互动的目标。尤其重要的是, 智能电网还可以促进各类 DR 项目的实施^[14-15], 为各国进一步深化电力市场改革与推进市场建设提供有利的技术支持。

智能电网与 DR 具有紧密的联系, 二者的相互配合可以极大地促进电力行业的科学发展。智能电网是诸多 DR 项目的技术先决条件, 而 DR 则是智能电网的最佳应用之一^[16], 也可以认为 DR 是智能电网的重要组成部分^[14-15]。

本文基于智能电网与 DR 的联系, 总结了目前国内外研究进展, 从 DR 的视角对智能电网进行了探讨, 并提出了在中国协作开展智能电网与 DR 的建议与设想。

1 智能电网概述

作为新型的智能化服务网络, 智能电网通过创建开放的信息系统和共享的信息模式, 可以高效整合电力系统中的数据, 优化电力基础设施的运行和管理, 促进与用户的互动。基于这个背景, 许多国家和地区已经将智能电网作为未来电网的重要发展目

标, 并对智能电网进行了广泛的研究与实践。近年来, 美国陆续开展了 IntelliGrid^[17]、Grid2030^[2]、GridWise^[18]、Modern Grid Strategy^[19]等项目研究, 欧盟则提出了基于欧洲技术平台的智能电网^[20]。2009 年 5 月, 美国商务部和能源部联合发布了首批智能电网的行业标准, 标志着美国智能电网建设正式启动。为了促进与整合跨学科的智能电网研究, 美国电气和电子工程师学会(IEEE)于 2009 年 6 月宣布将在 2010 年出版 IEEE 智能电网汇刊(IEEE Transactions on Smart Grid)^[21]。在中国, 为适应未来经济社会发展的需要和应对气候变化、能源与环境等方面的挑战, 电力行业也开始了对智能电网的积极探索^[22-25]。2006 年, 国家电网公司启动了旨在构筑数字化电网与建设信息化企业的“SG186”工程^[22], 为构建智能电网打下了坚实基础。2009 年 5 月, 国家电网公司结合基本国情和特高压实践, 确立了加快建设统一坚强智能电网的发展战略目标, 并公布了智能电网发展计划与建设时间表^[25]。

智能电网是一项复杂庞大的系统工程, 它可以全面涵盖发电、输电、变电、配电、用电和调度的各个环节, 因而实施智能电网需要多方参与协作。图 1 展示了智能电网的利益相关方(stakeholders)^[26]。政府与电力监管机构希望智能电网能促进节能减排, 提升电力行业的科学发展水平; 电力用户希望智能电网能给生活带来更大的便利与实惠; 公用事业机构(如电网公司、供电公司与调度机构)希望智能电网能为全社会提供更加安全、可靠、经济与高效的电力服务; 设备制造商/技术服务商希望借助智能电网所带来的巨大商机来获取丰厚的利润; 倡导者(如环保组织)和其他机构(如电力科研机构)等也可以从智能电网的实施中获益。虽然各利益相关方对智能电网有着不尽相同的期望目标, 但大部分目标的

收稿日期: 2009-07-10; 修回日期: 2009-07-30。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217905)。

实现都需要依赖于智能电网技术的广泛部署与各类 DR 项目的实施。

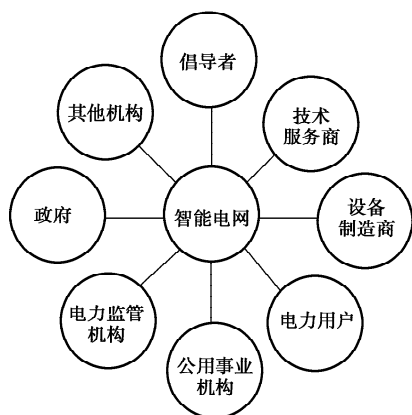


图 1 智能电网利益相关方
Fig. 1 Stakeholders of smart grid

2 智能电网与 DR

DR 是指电力用户针对市场价格信号或激励机制作出响应并改变正常电力消费模式的市场参与行为^[7-12]。DR 项目可以划分为基于价格和基于激励 2 类^[12]：

1) 基于价格的 DR 包括分时电价 (time-of-use pricing, TOU)、实时电价 (real-time pricing, RTP)、尖峰电价 (critical peak pricing, CPP)；

2) 基于激励的 DR 包括直接负荷控制 (direct load control, DLC)、可中断负荷 (interruptible load, IL)、需求侧竞价 (demand side bidding, DSB)、紧急需求响应 (emergency demand response, EDR)、容量市场计划 (capacity market programs, CMP)、辅助服务计划 (ancillary service program, ASP)。

由于智能电网整合了高级的信息、控制及通信技术来动态管理电网供需，因而它能为各类 DR 项目的成功实施提供强有力的技术支持，并将促使 DR 的发展提升到新的层次。智能电网与传统电网的一个重要不同点就是智能电网尤其强调与用户的互动，包括信息互动与电能互动，而互动性主要是通过部署各类 DR 项目来实现的。

1) 在信息互动方面，主要体现在供需之间的信息交互。DR 实施机构可以及时收集、统计与分析用户的需求，并在电网运行中动态整合用户信息，以增强系统的安全、可靠与经济运行能力；用户也可以及时了解电网的实时动态，并在参与 DR 项目时安排合理的用电方案和响应策略，以更好地管理、优化、节约、监控和理解电能使用。

2) 在电能互动方面，主要体现在供需之间的双

向互动供电。在传统电网中，供需双方的界定和划分是以用户计费电表为界限：计费电表以上为供应侧，计费电表以下为需求侧，即用户计费电表就是供应侧的终点与需求侧的起点。而在智能电网中，借助于具有双向计量与通信功能的高级计量系统，用户也可以向电网供电（如参与 RTP 项目的用户在系统高峰期向电网供电），这也打破了传统的供需双方划分方式。

2005 年 8 月与 2007 年 12 月，美国前总统布什分别签署了《能源政策法案》与《能源独立与安全法案》，将支持 DR 和智能电网作为美国能源政策的重要组成部分。按照这 2 个法案的要求，美国能源部与联邦能源监管委员会 (FERC) 在近年来发布了多份有关 DR 与智能电网的研究报告^[7-11]，并计划于 2010 年发布 DR 的国家行动计划。文献[7]系统讨论了电力市场下 DR 的效益与实施建议。文献[8-10]为 FERC 发布的 3 份年度评价报告，全面阐述了 DR 与智能电网的高级计量 (advanced metering) 技术。根据 FERC 在 2008 年底的统计^[10]，大约有 8% 的美国用户参与了 DR 项目，所有 DR 资源总共达到了 41 GW (约 5.8% 系统高峰负荷)，而智能电表的普及率达到了 4.7%。文献[11]预测了美国未来 5 年~10 年内各州的 DR 潜力，提出了 DR 的实施建议，并考虑了智能电网技术对提升 DR 潜力的影响。该报告预计：到 2019 年，如果所有美国电力用户都采用动态电价与智能电网技术，DR 资源可以达到 188 GW (约 20% 系统高峰负荷)。2008 年 12 月，美国 DR 协调委员会 (Demand Response Coordinating Committee, DRCC) 向美国国家电力政策委员会提交了一份研究报告，总结了 2005 年~2008 年间美国在 DR 与智能电网技术等领域的政策行动^[15]。2009 年 2 月，美国总统奥巴马签署《美国复苏与再投资法案》，明确将投入 110 亿美元用于建设智能电网，其中 45 亿美元将划拨给美国能源部，用于促进电网现代化、整合 DR 设备和实现智能电网技术^[27]。另外，美国将新建或更新 4 828 km 输电线路，并为美国家庭安装 4 000 万块智能电表。

为了促进 DR 与智能电网的协同发展与技术合作，国际上多家公司联合发起成立了 DR 与智能电网联盟 (Demand Response and Smart Grid Coalition, DRSG)^[14]。当前，智能电网与 DR 领域的知名公司已积极开展业务合作，并致力于给业界提供智能电网与 DR 的综合解决方案。比如，2009 年 6 月，美国 Itron 公司与 Comverge 公司 (均已加入 DRSG) 宣布将整合各自在智能电网与 DR 领域

的技术优势,提供基于智能电网的家庭能源管理系统^[28]。为了促进各方在 DR 与智能电网领域的交流,DRCC 于 2009 年 7 月在美国首都华盛顿举办了 DR 与智能电网的全国城市会议(National Town Meeting on Demand Response and Smart Grid)。

3 与 DR 相关的智能电网技术

智能电网技术支持系统可以总结为建设 4 个系统^[26]:高级计量基础设施(advanced metering infrastructure,AMI)^[29]、高级配电运行系统、高级输电运行系统、高级资产管理系统。在这 4 个系统中,AMI 在支持 DR 和促进电网与用户的互动方面起着最为关键的作用。AMI 具有的主要功能有^[8-10]:改进的客户服务、停电管理、窃电监测、远程连接/断开用户、电能质量管理、负荷预测、远程改变计量参数、远程升级仪表固件、支持各类 DR 项目、与水表或天然气表接口、预付电费购电、电价高峰/紧急事件的通知。可以看出,AMI 的主体功能是为 DR 服务的,以 AMI 为核心的技术体系构成了 DR 相关的智能电网技术的主要部分。

智能电网技术不仅使各类 DR 项目能够更加方便地部署与推广,还使用户能够更加灵活地安排用电方案与响应策略。具体来说,与 DR 相关的智能电网技术主要有以下几个方面。

1)智能电表(smart meter)。智能电表是实现 DR 的信息与控制终端。相比传统的机电式电表,智能电表具有多方面的优势。它可以记录用户各时段的实时用电信息,使用户能更加了解自身用电习惯,为用户参与各类 DR 项目提供数据支持;它可以借助于通信网络将用电信息传送至电力部门,使其能够对用户远程抄表、更好地掌握用户用电规律、并按动态电价收取用户电费。通过集成先进的传感与量测技术,智能电表还可以实现故障定位、电能质量监测与窃电监测等功能。

2)双向通信(two-way communication)。实时、高速与完全集成的双向通信技术将可以使智能电网成为动态的与交互式的大型基础设施。开放式的“即插即用”电网架构能够保证用户之间、用户与电力部门之间以及智能设备之间的信息互动。比如,智能电表可以通过双向通信与 DR 决策支持系统协作,以辅助用户在参与各类 DR 项目时合理、快速与准确地作出响应。目前常用的通信方式有电力线载波、光纤、Internet 和无线通信等。

3)用户门户(consumer portal)^[30]。用户门户整合了众多的软硬件技术用于双向通信,它是电网与用户的接口,即获取用户用电信息的入口点。通

过用户门户,电力部门可以进行高效用户管理(如远程负荷监控、更新 DR 项目的费率模式),用户也可以实现全方位的用电管理(如查看 RTP 信息与用电成本、在线预付电费、制定 DR 项目的响应策略)。用户门户通常不作为独立的装置,而是部署到其他设备(如个人电脑、智能电表)中。基于用户门户技术,电力部门还可以将智能电表作为互联网路由器,进行通信、宽带与电视等业务的整合。

4)家域网(home area network)。家域网是将某一家庭中的各种信息设备相互连接而成的综合网络,它可以连接多台电脑、Internet、电话、录像机、电视机、家庭安全报警系统、智能电器和其他数字设备。将家域网模块整合至智能电网设备(如智能电表)中,以实现智能电网与家域网的互联是当前的发展趋势。二者互联的优势有^[9]:使用户能对多个家用电器分别进行远程负荷管理,增强用户在参与 DR 项目时计量(measure)、核实(verify)与执行 DR 的能力,给用户反馈并展示各类电器的电费影响。

5)计量数据管理(meter data management,MDM)。MDM 系统负责存储与分析从现场收集的计量数据。如果仪表的计量时间间隔较短(如 15 min),MDM 系统需要具备较大的存储与分析能力来处理大量的计量数据。将 MDM 与业务管理系统(如会计、结算、报告、停电管理)整合是当前 MDM 的发展趋势^[9]。二者整合以后,MDM 可以根据各业务管理系统的实际要求提交相应形式的计量数据。通过对 MDM 中的历史数据进行统计分析,将有助于电力部门进行高效的运行管理、更准确的负荷预测、制定合理的 DR 项目等。

6)改进的客户服务(enhanced customer service)。它是指为用户提供以下服务^[8-10]:灵活计费方式,多种可选择的电价方案/DR 项目,停电管理,完整、及时与准确的电费信息,更低的预计电费,灵活开通/终止供电服务等。

4 智能电网与 DR 的协作效益

智能电网技术与 DR 项目是协调推进、相辅相成的,二者的协作可以产生多方面效益并有利于促进多方共赢。

1)激励用户主动参与 DR 项目。智能电网将用户设备和行为融入到电网的设计、运行与通信中,因而能有效提高用户参与 DR 项目的积极性以及参与过程中的决策能力^[31]。针对各类 DR 项目,用户能更直观地理解 RTP 等 DR 项目的理念,并根据自身用电特性与风险喜好来作出最合适的选择。智能电表与双向通信系统让用户能及时了解实时的系统电

价、系统负荷与自身负荷等信息,用户也可以利用相关的决策支持系统来制定各个时段的合理用电计划和响应策略,以管理和优化用电成本。

参与部分 DR 项目(如 RTP)的用户需要对电价变化作出快速响应,而具有自动响应功能的 AMI 可以让用户不必去频繁地观察电价变化或者手动作出用电调整,这可以给用户带来极大的便利。改进的客户服务则让用户能更准确地了解参与 DR 项目的收益。另外,DR 项目的推广还可以鼓励用户通过投资高效能(energy efficiency)的用电装置来提高用电效率和节省用电成本。

2) 优化 DR 项目管理与电网运行。DR 实施机构可以利用广泛、无缝、实时的智能电网技术,对 DR 项目进行智能化管理,并对电网运行情况进行智能监控与诊断。结合先进的计量与通信技术,DR 实施机构可以进行远程用户管理(如及时准确地获取各用户的实时用电与电费信息),以节约人力成本和提高工作效率;通过结合先进的分析技术、控制策略,可以在系统出现电价高峰/紧急情况之前进行预警,向参与用户的智能设备发送 DR 项目指令(如调整参与 DLC 用户的智能恒温器温度设定值)。

实时诊断技术可以对用户的用电设备与电网重要元件进行动态监视和诊断,并对紧急情况作出快速响应,以有效改善停电管理流程和提升 DR 项目的客户服务水平。通过将 DR 资源引入到能量市场、容量市场以及辅助服务市场,DR 实施机构可以灵活运用多元化的资源选择来优化电网运行,并分别从可靠性、环境友好、运行效率与经济性等方面来提升电网性能。集成了先进传感与量测技术的智能电表也可以提高资产管理效率,比如提供更充裕的电能、改进负荷率和降低系统损耗。

3) 促进电力市场的发展。借助智能电网先进的市场分析工具与智能调度系统,DR 项目可以在不同时间尺度上(从年度系统规划到实时市场调度)协调市场定价与系统调度管理。通过在供给侧增加发电途径、在需求侧结合 DR 资源、分布式发电(distributed generation, DG)^[32]与储能装置,可以将供需两侧的各类资源充分引入到综合资源规划中,有利于推迟发电、输电、配电等基础设施的升级和实现电力资源优化配置,并降低系统运行对环境的影响。开放的市场准入机制和市场参与者选择权的放开将为各市场参与者提供更多的选择与获益机会,并将极大地促进竞争性电力批发/零售市场的发展和形成公平合理的市场电价。通过建立包含经纪人(broker)与负荷代理商(aggregator)等成员的次级电力市场,可以孕育新的交易产品与服务。

4) 兼容各类发电方式与新技术。风能、太阳能等可再生能源具有随机性与间歇性特点,随着可再生能源发电(renewable energy generation, REG)的大规模部署,系统的安全稳定运行将面临严峻挑战。为了提高 REG 的利用率并使其能更安全可靠地接入电网,可以利用其他发电资源或储能装置配合 REG 的运行(如风水互补系统)。由于 DR 资源可以灵活部署和迅速替代发电资源,因而基于智能电网中先进的传感与控制技术,利用 DR 来配合 REG 运行以降低 REG 的波动性是在技术上与经济上都极佳的解决方案,这也是当前的研究热点^[14]。比如,美国加州 ISO 就明确提出应对大规模 REG 并网的三大策略:组合发电(generation portfolio)、储能与 DR。DR 与 REG 组合的模式也开创了 DR 项目的新型运作方式:以风电为例,DR 不仅能响应电价信号与激励机制^[12],还能响应风电出力变化(或风速变化)。

智能电网采用“即插即用”的简化互联方式,不仅可以与各类发电方式和储能装置实现无缝衔接,还可以支持多种新技术应用(如微网^[33])的接入。用户在参与 DR 项目时,也可以更容易地决定投资和安装何种 DG 设备(如屋顶太阳能光伏发电、小型冷热电联产系统)或储能装置(如插件式混合动力电动汽车(PHEV)),并根据 RTP 信息来决定何时启动或关闭这些设施(如在电价较高时断开电网供电并启动 DG 设备、在电价较低时将 PHEV 接入电网充电),以充分发挥各类需求侧资源在削峰填谷方面的积极作用,另外,通过调用本地资源也可以有效提高能源独立性与安全性。智能电网还能促进电力供需的双向互动供电,用户在安装智能电表后,可以向电网出售 DG、储能装置等的富余电力。

5 协作开展智能电网与 DR 的建议和设想

智能电网的时代已经来临,通过建设智能电网,电力行业将实现整体飞跃和提升。目前西方发达国家的电网结构趋于稳定与成熟,因而更多地关注智能配电网;而中国输电网还有待加强,需要以特高压为基础发展智能电网,以保证电网的安全、可靠与稳定。当前,中国已经成功实施了一些 DR 项目,而且发展智能电网的条件已经具备,但为了充分发挥智能电网与 DR 的协作效益,还需要克服多个方面的障碍。借鉴国内外的经验,结合中国电力行业的发展现状,提出以下几点建议与设想。

5.1 政策方面

1) 借鉴欧美的先进经验,应该由政府主导尽快制定国家层面的智能电网战略规划与 DR 行动计

划,并将智能电网技术与 DR 有机整合到智能电网发展愿景中。

2)设立专门议事机构,使智能电网与 DR 成为电力行业整体规划的重要内容,并促使二者协调发展与相得益彰。

3)由于实施智能电网与 DR 可能会减少电力部门的售电收入,并影响其投资积极性,因而应该健全相关的政策法规,引入合理的激励机制降低投资风险,从财政、税收、贷款等方面对发展智能电网与 DR 给予充分政策和资金支持(如设立公益基金),以创建各利益相关方共赢的局面。

4)虽然建设智能电网能够带来可观的社会效益(如创造更多就业机会),但短期投入也是巨大的,其效益也通常要在较长的时间才能体现出来,因而在建设智能电网时需要建立各参与方的效益分享机制,并协调短期投入与远期效益。

5.2 观念与交流方面

1)智能电网需要多方的积极参与,而许多机构与群体尚未意识到实施智能电网的紧迫性和重要性,因而亟需通过多种渠道向各利益相关方展示智能电网的愿景,以实施各类 DR 项目为契机传播智能电网互动、清洁与高效的理念,加深各方对智能电网价值的理解和认识,并鼓励在组织文化中倡导智能电网理念。

2)对用户开展广泛的宣传与教育,向用户展示在各类 DR 项目中引入智能电表等技术以后用户可以获得的机遇与好处。

3)缓解公众对于新建智能电网设施的顾虑并消除抵触情绪,以确保智能电网的建设进度。

4)建立科学合理的智能电网的综合评价体系,将 DR 作为应用层面的核心评价指标之一。

5)增加智能电网决策和实施等环节的信息透明度以及公众参与程度,在全社会营造支持智能电网与 DR 的良好氛围。

5.3 行业方面

1)促进电力行业对包含 DR 的智能电网愿景形成广泛共识,并对其优势及效益形成更深入的理解,以制定详细的实施方案。

2)加快对电力企业的组织结构与业务流程进行梳理,利用先进的企业管理模式(如企业资源规划(ERP))加速企业的业务变革和管理变革,与时俱进地制定结合各企业实际的智能电网方案。

3)随着电力市场化改革的推进,在促使电力企业之间正当合理竞争的同时,应加强智能电网实施过程中的多方协作,并确保实施 DR 项目与部署相关智能电网技术的同步。

4)实施 DR 项目需要对传统电网进行智能化升级,在升级过程中应努力协调旧设备的充分利用与更新换代的关系,提高电网升级投资的成本效益。

5)在条件成熟的地区开展智能电网示范工程,宣传包含 DR 的智能电网成功商业案例,让电力企业充分认识到实施智能电网将带来的巨大商机与社会效益。

5.4 技术方面

1)智能化的 DR 项目设计与智能电网技术将对智能电网推广和普及起决定性的作用,目前虽然已经在用户侧普遍实施了 TOU 与 CPP 等 DR 措施,但由于技术限制等原因尚未充分推广 RTP、DSB 等 DR 项目,因而应该抓紧部署 AMI 等相关的智能电网技术,以促进各类 DR 项目的推广。

2)随着越来越多的用户主动参与 DR 项目、用户侧 DG 的大规模部署,以及市场参与者的日益增加,系统安全问题将变得更加复杂,应该依靠智能电网技术来应对新形势的挑战。

3)大力增加对智能电网与 DR 的资金投入和贷款支持,鼓励电力企业、科研机构、设备制造商等开展智能电网与 DR 的专题研究,并加强新技术研发与技术引进,努力形成规模经济以降低新技术的产品价格。

4)加快建立、完善包含 DR 的智能电网技术规范与行业标准,以支持智能电网技术与 DR 项目的大规模部署,如设立互操作性(interoperability)的原则和标准^[21]以支持智能设备的互动,设立计量与核实 DR 的标准以提高用户参与 DR 时获益的确定性。

5)把特高压电网的发展融入智能电网中,提升驾驭大电网安全运行的能力,并形成有中国特色的智能电网技术体系。

6 结语

发展智能电网已经逐渐成为世界各国电力行业的共识,探索和建设智能电网的过程,就是现代电网、信息、控制和管理等技术深度交叉与融合的过程,也是电网发展理念、电力企业发展思路与电力用户角色的全面变革过程。智能电网的发展在全世界还处于探索起步阶段,其内涵与外延也将不断丰富和充实^[34]。智能电网并非只有单一模式,各个国家都可以结合本国实际来制定合适方案。

本文从 DR 的视角,为建设有中国特色的智能电网和促进各类 DR 项目的实施提供一定的参考。当前,在建设资源节约型和环境友好型社会的背景下,需要加强统筹规划、统一标准、试点先行、整体推进智能电网建设,并探讨建立政府引导、企业参与、

市场运作的“智能电网-DR”联合推广机制。作为应对国际金融危机与全球气候变化的先行者,中国电力行业将紧抓建设智能电网的历史机遇,深化电网发展方式与公司发展方式的“两个转变”,努力实现行业整体转型与提升,并使统一坚强智能电网在服务经济社会发展、促进节能减排与绿色环保等方面发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] U. S. Department of Energy. The smart grid: an introduction [EB/OL]. [2008-07-21]. [http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages\(1\).pdf](http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages(1).pdf).
- [2] U. S. Department of Energy. Grid2030: a national vision for electricity's second 100 years [EB/OL]. [2008-07-21]. http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/Electric_Vision_Document.pdf.
- [3] ISO New England. Overview of the smart grid: policies, initiatives, and needs [EB/OL]. [2009-02-17]. http://www.iso-ne.com/pubs/whtprrs/smart_grid_report_021709_final.pdf.
- [4] MCDONALD J. The next-generation grid. IEEE Power & Energy Magazine, 2009, 7(3): 26-32.
- [5] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid. Power System and Clean Energy, 2009, 25(1): 7-11.
- [6] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
CHEN Shuyong, SONG Shufang, LI Lanxin, et al. Survey on smart grid technology. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [7] U. S. Department of Energy. Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them: a report to the United State Congress pursuant to section 1252 of the Energy Policy Act of 2005 [R/OL]. [2008-02-21]. http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/congress_1252d.pdf.
- [8] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering: 2006 staff report [R/OL]. [2008-08-21]. <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/demand-response.pdf>.
- [9] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering: 2007 staff report [R/OL]. [2008-09-13]. <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/09-07-demand-response.pdf>.
- [10] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering: 2008 staff report [R/OL]. [2008-12-30]. <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/12-08-demand-response.pdf>.
- [11] Federal Energy Regulatory Commission. A national assessment of demand response potential: staff report [R/OL]. [2009-06-18]. <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/06-09-demand-response.pdf>.
- [12] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [13] U. S. Department of Energy. Office of Electricity Delivery and Energy Reliability: our work [EB/OL]. [2008-07-21]. <http://www.oe.energy.gov/ourwork.htm>.
- [14] Demand Response and Smart Grid Coalition. Accelerating the use of demand response and smart grid technologies is an essential part of the solution to America's energy, economic and environmental problems [EB/OL]. [2008-11-24]. http://www.drsgcoalition.org/policy/DRSG_Policy_Recommendations_to_Accelerate_DR_and_Smart_Grid-2008-11-24.pdf.
- [15] The National Council on Electricity Policy. Demand response and smart metering policy actions since the Energy Policy Act of 2005: a summary for state officials [EB/OL]. [2008-12-08]. http://www.demandresponsecommittee.org/Final_NCEP_Report_on_DR_and_SM_Policy_Actiona_08.12.pdf.
- [16] Federal Energy Regulatory Commission. FERC report marks significant progress in demand response, advanced metering [EB/OL]. [2008-12-29]. <http://www.ferc.gov/news/news-releases/2008/2008-4/12-29-08.pdf>.
- [17] HAASE P. IntelliGrid: a smart network of power [EB/OL]. [2008-07-21]. http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/EPRI_Journal/2005-Fall/1012885_IntelliGrid.pdf.
- [18] The GridWise Alliance. Gridwise action plan [EB/OL]. [2008-04-01]. <http://www.gridwise.org/pdf/actionplan.pdf>.
- [19] National Energy Technology Laboratory. A systems view of the modern grid [EB/OL]. [2008-01-21]. http://www.netl.doe.gov/moderngrid/docs/ASystemsViewoftheModernGrid_Final_v2_0.pdf.
- [20] European Commission. European technology platform smartGrids: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future [EB/OL]. [2008-07-21]. <http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf>.
- [21] IEEE. IEEE provides leadership for smart grid initiative around the globe [EB/OL]. [2009-06-01]. http://www.ieee.org/portal/cms_docs_iportals/iportals/aboutus/news/2009/smart_grid_leadership_press_release.pdf.
- [22] 李向荣, 郝悍勇, 樊涛, 等. 构筑数字化电网 建设信息化企业. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 1-5.
LI Xiangrong, HAO Hanyong, FAN Tao, et al. Constructing digital grid and informatized enterprise. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 1-5.
- [23] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22.
XIE Kai, LIU Yongqi, ZHU Zhizhong, et al. The vision of future smart grid. Electric Power, 2008, 41(6): 19-22.
- [24] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4.
- [25] 黄全权. 国家电网公司 2020 年建成统一的“坚强智能电网” [EB/OL]. [2009-05-22]. <http://www.sgcc.com.cn/xwzx/mtbd/196465.shtml>.
- [26] MILLER J. What is the smart grid? [EB/OL]. [2008-05-19].

- http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/Smart_Grid_flyer_FINAL-May19.pdf.
- [27] American Council on Renewable Energy. Overview renewable energy provisions American Recovery and Reinvestment Act of 2009 [EB/OL]. [2009-02-21]. http://www.acore.org/files/images/email/acore_stimulus_overview.pdf.
- [28] JOHN J. The elusive smart meter-demand response combo [EB/OL]. [2009-06-24]. <http://www.greentechmedia.com/articles/read/the-elusive-smart-meter-demand-response-combo>.
- [29] National Energy Technology Laboratory. Advanced metering infrastructure [EB/OL]. [2008-02-12]. http://www.netl.doe.gov/moderngrid/docs/AMI%20White%20paper%20final%20021108%20%282%29%20APPROVED_2008_02_12.pdf.
- [30] Electric Power Research Institute. IntelliGrid consumer portal frequently asked questions and survey[EB/OL]. [2008-12-06]. <http://mydocs.epri.com/docs/public/000000000001012942.pdf>.
- [31] Electricity Advisory Committee. Smart grid: enabler of the new energy economy [EB/OL]. [2008-12-30]. <http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/final-smart-grid-report.pdf>.
- [32] 王成山,王守相.分布式发电供能系统若干问题研究.电力系统自动化,2008,32(20):1-5.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-5.
- [33] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述.电力系统自动化,2007,31(19):100-106.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-106.
- [34] 李晓辉.2020年:集中力量办大事,提前10年建成智能电网[EB/OL]. [2009-06-16]. <http://www.dfdaily.com/node2/node27/node119/userobject1ai174033.shtml>.

张 钦(1982—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力市场和需求响应。E-mail: zqfalcon@gmail.com

王锡凡(1936—),男,教授,博士生导师,IEEE Fellow,主要研究方向:电力系统分析、规划及电力市场。

付 敏(1985—),女,硕士研究生,主要研究方向:风电与经济调度。

Smart Grid from the Perspective of Demand Response

ZHANG Qin, WANG Xifan, FU Min, WANG Jianxue

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The global upsurge in research and construction of smart grid is creating new opportunities and challenges to China's power industry. The research and practice of smart grid around the world, as well as the collaboration between smart grid and demand response (DR), are summarized. Furthermore, from the perspective of DR, the issues on the collaboration between smart grid and DR are elaborated systematically, including the DR-related smart grid technologies and the collaboration benefits. Finally, suggestions and assumptions for achieving the collaboration between smart grid and DR are presented in view of the actual conditions of China's power industry.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217905).

Key words: smart grid; demand response; electricity markets; distributed generation