



引用格式:黄训诚,和萍,崔光照,等.中国智能电网发展述评、展望与建议[J].轻工学报,2016,31(2):54-65.

中图分类号:TM712 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2016.2.008

文章编号:2096-1553(2016)02-0054-12

中国智能电网发展述评、展望与建议

Review, development and suggestion of Chinese smart grid

黄训诚¹, 和萍², 崔光照², 史峰², 耿斯涵²

HUANG Xun-cheng¹, HE Ping², CUi Guang-zhao², SHI Feng², GENG Si-han²

1. 国家电网河南省电力公司电力调度中心, 河南 郑州 450002;

2. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002

1. *Electric Power Dispatching of State Grid He'nan Electric Power Company, Zhengzhou 450002, China;*

2. *College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China*

摘要:智能电网以其具有环保、安全、经济、友善等优点而成为未来中国电网的发展方向。中国提出了“坚强智能电网”的概念,基于现有资源与历史特点,中国智能电网发展的驱动力集中在能源结构与负荷逆分布、提高消纳清洁能源能力、推动低碳节能环保、提升供电可靠性需求及设备制造能力等方面。面对现阶段智能电网建设所面临的电力需求强劲增长、资源与环境压力增大、区域差异服务需求有待提高、电力改革尚不完善等问题,我国要进一步提高电网投资决策和规划水平、故障处理水平、资产运营维护和管理水平,加强需求侧管理与标准体系建设;既要考虑电网规划、建设、改造和技术升级等硬件提升,也要满足运行控制、资产管理、用户管理等方面的需求,通过电力流、业务流、信息流的一体化融合,实现多元化电源的灵活接入,以方便各阶梯电力用户的使用,加快实现整个电网在运行控制和管理维护上的智能化,最终建成具有中国特色、领先于国际的国家级智能电网。

关键词:

电力系统;智能电网;
资源配置;绿色环保;
清洁能源

Key words:

power system; smart
grid; resource allocation;
green environmental
protection; clean
energy

收稿日期:2015-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51507157);郑州轻工业学院博士科研基金项目(2014BSJJ043)

作者简介:黄训诚(1958—),男,河南省开封市人,国家电网河南省电力公司教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统运行分析与控制、智能电网。

Abstract: The future development trend of China's electric power grid is smart grid, which include such features as flexible, clean, secure, economic, friendly and so on. Based on the concept of "strong smart grid" presented in China, the driving force of development of smart grid in China is concentrated on these aspects, including the inverse distribution between energy structure and load, improving the ability of clean energy consumption, promoting low-carbon energy saving and environmental protection, the requirement of enhancing the reliability of power supply and the manufacturing capacity of equipment and so on. The smart grid construction is faced with these problems at the present stage, such as the strong growth in demand for electricity, the increasing pressure on resources and the environment, improving of regional differences in service needs, electricity reform is not yet perfect and so on. Focusing on those problems, the specific suggestions as improving the investment decision-making and planning of power grid was put forward, fault treatment and asset management and maintenance management, strengthening the demand side management and the standard system construction. Furthermore, in the future development of smart grid in China, hardware upgrade as network planning, construction, reconstruction and technical upgrading should be in consideration, the requirement of operational control, asset management and user management also should be met, the integration of the power flow, integrated business flow and information flow, and the realization of flexible access of diversified power supply should be achieved to provide convenience to each step of power users to accelerate the realization of the entire intelligent network on the management and maintenance of control and operation, and finally build a national smart grid ahead of the international level with Chinese characteristics.

0 引言

随着世界各国工业化进程的加快,全球资源匮乏、环境恶化压力不断增大,世界经济形势和能源发展格局正在发生深刻的变化,节能、低碳、绿色、清洁、可持续等已经成为未来能源革命的核心内容. 电力网络是实现资源优化配置的主要途径,对于绿色能源的开发、能源利用率的提高、能源消费结构的调整至关重要.

智能电网^[1-10]是未来电力系统的发展方向,是新世纪世界各国面对电力工业需求的共同选择,也是中国为适应日益增长的电力能源需求而进行电网建设改革的方向^[11-14]. 相比于传统电网,智能电网以优化资源配置、满足电力用户需求和绿色环保为前提,结合新型科学技术的应用,以实现用户对用户的电力供应和增值服务,可以提高电网效率、电能质量、电网的稳定性与安全性,完善电力市场,促进经济社会发展,实现低碳环保可持续发展. 与此同时,为了提高智能电网的发展水平,实现其经济、高效、

安全、可靠的性能,就要依托现代信息、通信和计算机技术、决策支持系统技术、微电子和电力电子技术、传感和测量技术,为智能电网提供理论依据和技术支持.

目前国内外学者对智能电网展开了大量研究工作^[15-30],但国际上对其尚无统一而明确的定义. 由于发展环境和驱动力各不相同,不同的国家都在以自己的方式对智能电网进行理解、研究和实践,各国智能电网发展的思路、路径和重点也各不相同.

本文针对中国提出的“坚强智能电网”概念,对智能电网发展驱动力、智能电网的关键技术和现阶段所面临的问题进行述评,并从投资决策和规划、故障处理、需求侧管理、标准化体系建设等方面对中国智能电网的发展和建设提出具体的、可操作的建议,以期对我国智能电网的发展有所助益.

1 中国“坚强智能电网”概念的提出

随着经济社会的发展,电力用户对电能质

量及供电可靠性的要求不断提高,对电力能源的依赖性也日益增强.正因为电力网络对电力能源供给的重要性和不可或缺性,世界各国为了改善电网运行管理水平,都在对国家电网的运行和发展模式进行思索和研究,以保证国家、社会发展有源源不断的动力.在这样的背景下,发达国家首先提出国家电网应该具备的特征,即高效、清洁、安全、可靠、交互,智能电网的概念由此应运而生.但对于这个概念,目前还没有明确而统一的表述,各个国家、各个领域的专家从不同角度阐述了智能电网的内涵^[16-20].

2001年,美国电力科学研究院第一次提出了“Intelligrid”概念,2003年又进一步提出了《智能电网研究框架》.此后美国能源部发布了Grid 2030计划^[31],计划通过采用先进的超导技术、导电与绝缘材料技术、电力电子技术、系统控制技术、信息采集综合技术、实时系统仿真技术、广域测量技术、可再生能源发电技术、高效储能技术、微型燃气轮机发电技术、分布式发电技术等,构建包含4个不同层次的电网,即全美骨干电网、区域性电网、地方电网、微型电网(分布式电力系统),目标是到2030年建成高效能、低投资、完全自动化、灵活可靠的输配电系统,以提高电能质量及可靠性,保障大型电网运行的稳定.

2005年,欧盟也提出了与美国类似的“smart grid”概念;日本为了组建低碳经济和绿色能源工业,尤其看重智能电网的建设,积极开展相关技术研讨,2009年,日本政府发布了《日本发展战略和经济增长计划》,其中也确定了智能电网的发展内容.

中国提出智能电网概念^[18,32-34]比欧美稍晚,但也一直关注着国内外智能电网在信息采集、集成、控制等方面的最新研究进展^[14,25].

国家电网公司在2009年5月召开的特高压输电技术国际会议上正式提出了“坚强智能电网”概念与建设规划(如图1所示):以通信平台为支柱,以坚强网架为基础,以智能控制为手段,包括发电、输电、变电、配电、用电和调度6个环节,涵盖所有电压等级,实现电力流、信息流、业务流的高度集成融合,以建成经济高效、坚强可靠、透明开放、友好互动、清洁环保的当代电网,其结构如图2所示.中国坚强智能电网的建设预计在2020年基本完成,在2030年建成.届时将成为具有国际先进水平的统一的国家级智能电网.

2 中国智能电网发展的驱动力

中国智能电网的发展建设,从一开始就带着中国特色,这是基于中国自己资源分布禀赋

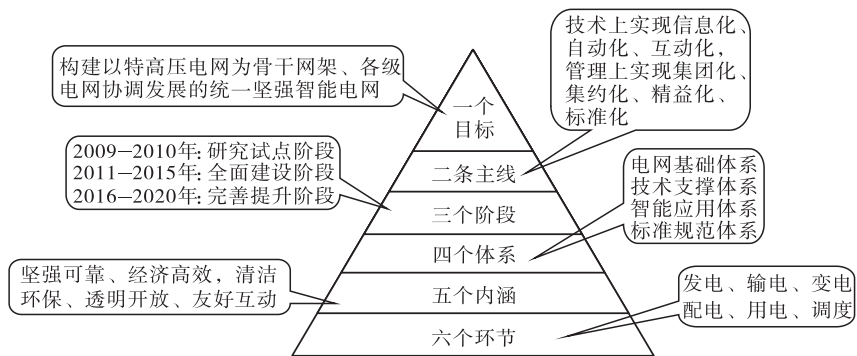


图1 中国坚强智能电网建设规划

Fig. 1 Smart grid construction plan of China

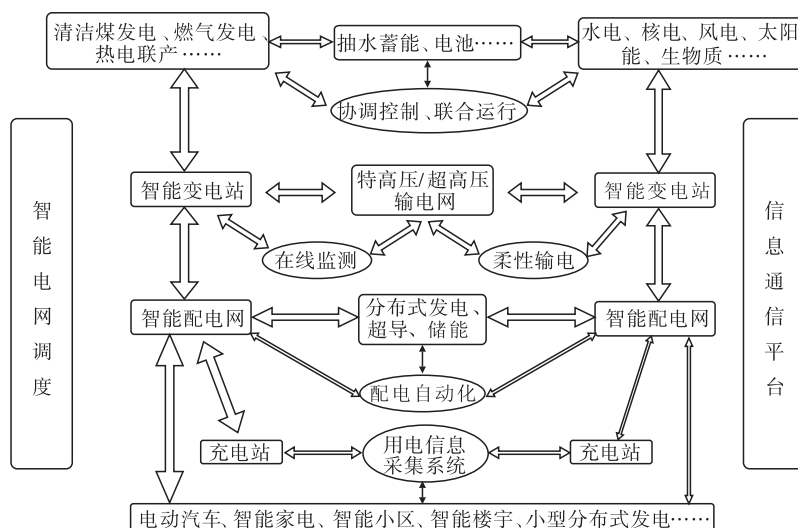


图2 中国坚强智能电网结构图

Fig.2 Smart grid structure of China

和管理发展的历史特点,特定的条件决定了其驱动力与其他各国的差异,表明中国智能电网在技术发展上与国外有所不同。

中国智能电网发展的驱动力主要有以下几个方面。

2.1 优化能源结构与负荷逆分布

我国一次能源的结构分布并不平衡,拥有丰富的煤炭资源,但缺乏石油、天然气等资源^[35]。我国是页岩气储量大国,但页岩气的采集技术由于受到国外技术垄断的掣肘而相对落后。另一方面,我国能源需求和能源存储总体上呈逆向分布,西北部地区蕴藏有80%以上的煤炭、水电和风能等资源,但东部、中部地区对能源的需求超过能源供给的75%。我国能源供应的长期发展格局是由一次能源分布与生产力分布不平衡所决定的,这促使我国必须尽快进行能源的优化配置。我国未来的能源生产中心将朝着西部和北部迁移,跨区域能源调运距离和规模不断加大,能源输送将成为突出问题。这就是国家电网要发展坚强电网的原因所在^[36]。而要实现如此大规模的电网运行、管理、调度,则

必须有与之配套的具有信息管理、集成等功能的智能电网网络。

当前中国电网需要改善的问题涉及诸多方面,如跨区输电能力、抵御自然灾害的能力、安全稳定运行水平等。中国幅员辽阔,东西部跨距大,而能源分布和主要负荷分布严重不平衡,这就造成电力传输规模大、距离远、损耗大等问题。而加快建设具有坚强骨干网架的智能电网,则可以有效解决该问题,进而缓解东西部能源分布不均的矛盾,也可以为集中与分散并存的清洁能源发展提供更好的平台,从而有利于大型传统能源以及新能源的集约化开发,促进清洁能源的快速发展。如此一来,我国能源供应总量会得到整体提升,为推动国际能源合作和跨国输电打下坚实基础,从而实现全国乃至更大范围内能源资源的优化配置。

2.2 提高消纳清洁能源能力

加强智能电网建设,一方面可以提高电网对于不同可再生能源的适应能力,也可以带动可再生能源的开发和消纳,为可再生能源的使用带来方便。

建设智能电网平台,不仅能为太阳能、风电并网提供帮助,减少不同能源间的冲突,使不同能源之间的关系与配置更加稳定,而且能够提高清洁能源利用率,促进清洁能源的开发,节约能源,减少废弃物的排放。

智能电网能够对包括太阳能、风能等清洁能源在内的全部资源进行精确预测和统筹布局,为解决大规模清洁能源并入电网所造成的安全问题提供技术上的支持,提升电网消纳清洁能源的能力。

2.3 推动低碳、节能、环保

2012年我国化石燃料燃烧产生的CO₂占世界总量的1/5,约为 65.6×10^8 t。“富煤、少气、缺油”的能源现状,使我国很难在短期内改变以煤为主的能源结构。在2009年召开的哥本哈根会议上,世界各国讨论了《京都议定书》关于减排的规则,标志着全球走上发展低碳经济的道路。当前,我国经济社会高速发展,需要抓住发展低碳经济和绿色经济的机遇,同时又不能忽视巨大的减排CO₂的压力。

建设智能电网对于节能减排意义重大,首先应促进清洁能源的开发和消纳,提高清洁能源的利用效率,使更多的清洁能源并入电网,缓解电网压力。其次,智能电网可以使电能输送终端得到更为合理的利用,以顺应低碳经济的要求,从源头上改变大众的能源消费观念。智能电网的建设,可以推动蓄能电池充电等相关技术的进步,加快电动汽车、智能家居和低耗能设备的大规模应用,减少煤、石油等化石燃料的使用,促进清洁能源的开发和使用,强化生态环保的理念,为保护自然环境做出重大贡献。

随着智能电网的快速发展,改变其运营模式及电能的利用模式已经成为当前智能电网发展的瓶颈,而电动汽车接入电网、双向电能交换则是改善这一现状的有效途径之一。

2.4 提升供电可靠性需求

随着科技和经济的高速发展,电力用户对电能质量和供电稳定性的要求越来越高。电网发展速度的提升带来了供电的不稳定性,频繁的停电事故,每一次都会造成重大的经济损失。研究表明,美国企业每年因停电和电能品质问题所造成的损失高达1 000亿元以上。就设备利用率而言,传统电网设备利用率低下,仅有5%发电设备和配电设备的利用率达到90%和75%以上。与此同时,伴随着电力用户对电能需求的增加,电能供给往往不能满足用电需求,迫切需要改善电网的输电和配电能力。

智能电网的发展进入了新的阶段,只有依靠控制技术和现代信息、通信技术,结合电网运行的各个方面,进行全面的改善和提高,才能推动电网转变发展模式、加快发展速度,提升供电可靠性,引领电网的智能化发展。

2.5 提升设备制造能力

电力工业的发展对材料工业、信息产业、计算机技术等有着极大的引导、促进作用。

近年来,随着我国设备制造能力的提高,特高压和直流输电设备已达国际先进水平,可以设计、研制先进的电工设备并进行大规模的生产,但核心设备的制造尚缺乏先进技术和生产经验,还有待提高。

智能电网将融合传感器、网络通信、化学储能和电力电子等高新技术,对于推动新能源、新材料、新设备制造及通讯信息等高科技产业,实现新技术革命具有直接的、综合的效果。

3 中国智能电网建设的关键技术

信息化、数字化、自动化、互动化是坚强智能电网在技术上的4个基本特征^[37-39]:信息化是指信息的高度集成和共享;数字化是指电网结构及状态的定量描述和各类信息的高效采集

与传输;自动化是指电网运行状态的自动监控、故障状态的自动恢复和控制策略的自动优选等;互动化是指电源、电网和用户资源的互动与协调运行。

图3所示为智能电网的主要技术组成^[25]。AMI,ADO,ATO,AAM这4部分之间是密切相关的:AMI通过与用户的通信联系提供带时标的系统信息,用户可以通过AMI来访问电力市场;AMI同时为ADO改善配电运行收集配电信息,通过ADO信息,ATO进而改善输电系统运行和管理输电阻塞;AAM则为ADO及可靠性维护提供资产管理数据。

3.1 信息交互平台

现代信息通信技术的应用贯穿了智能电网的各个环节,传统电力生产技术与新兴信息通信技术的相互渗透,为智能电网提供了有效的技术支撑。智能电网信息交互平台如图4所示。未来智能电网对通信及信息技术要求会更高,依赖性也会更强。支撑广域、全景实时信息的传输系统信息化交互平台建设将成为发展智能电网的一项重要工作。

3.2 智能融合电网

复合技术的应用是智能电网的一大特点,一次与二次、装备与电网、装置与系统将逐步走向融合。智能电网中智能系统的外延也随着专业界限的模糊而大大拓宽,除了使用传统二次系统的测控、保护、安全稳定控制等装置外,用于传统一次系统的智能电器、静止补偿装置、固态开关、优质低价和高容量的储能装置等,也被应用于智能电网中。

在新一代智能配电网中,信息的传输集成与综合将会以一种全新的方式出现。在电力配电网设备中,大量各式各样的传感器将会嵌套于设备中,与短距无线网络形成监控和智慧的感受系统,电力能源的传输和信息的传输融为一体,既能全面采集电力运行状况参数,实时进行最优控制和状态诊断,还可以支持分布式发电系统,为配电网的管理提供实时的仿真分析和辅助决策工具,从而有效地支持潮流分布计算、故障迅速反应切除、配电网自愈重构等。

由此,分布式实时控制成为了可能,信息系统也具有良好的开放性和扩展性,采用标准的

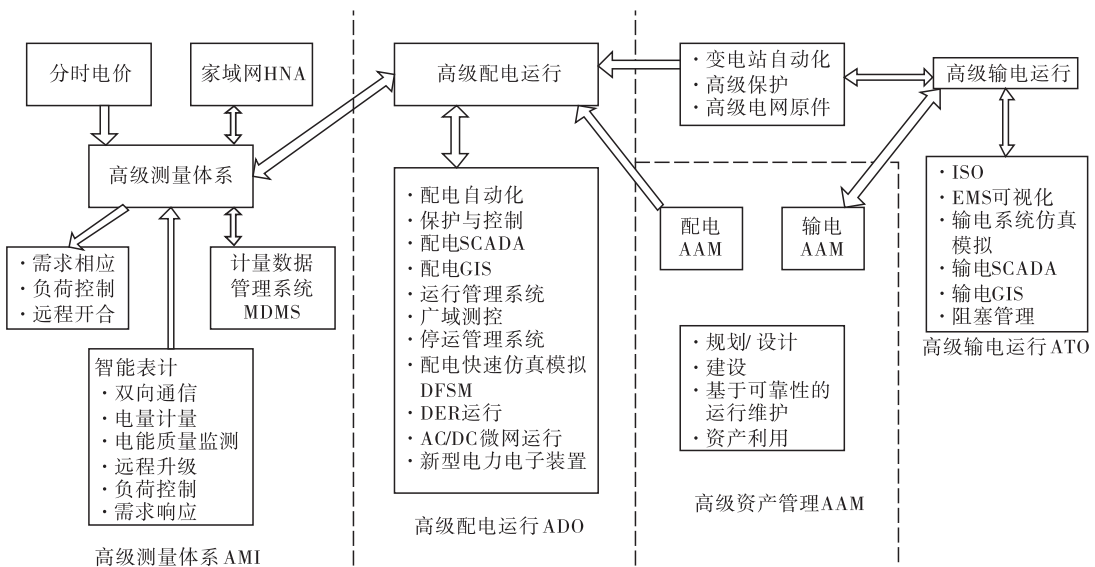


图3 智能电网的主要技术组成

Fig. 3 The main technical components of smart grid

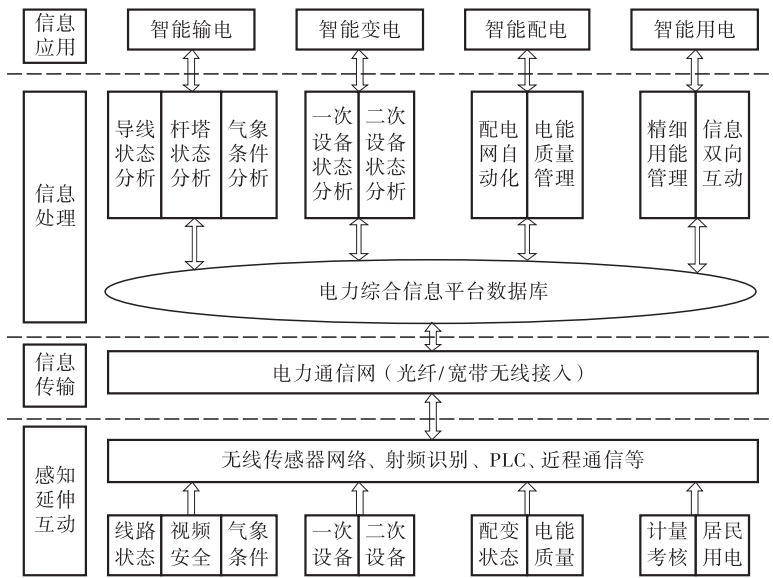


图4 智能电网信息交互平台

Fig.4 Platform for information exchange of smart grid

信息交换和通信规约,支持监控设备与应用软件;专家系统的即插即用,使各个信息系统不再是“孤岛”,可以实现自动化系统的信息无缝集成与高度共享,就像人体实现肌体和神经系统的有机融合一样。

3.3 电网仿真及控制决策支持

电力系统的状态变换和故障处理都是人脑无法企及的,非线性与开放性的特点决定其管理、运行、设备检修、状态监测^[40]等越来越趋向于使用专业化软件,对于故障预判、预警也越来越倾向于使用软件系统仿真,这是智能化电网的又一个鲜明的技术特点。

电力系统仿真是电力系统规划设计和调度运行的基础,它根据实际电力系统建立模型并进行计算和实验,为保障电网安全、可靠、经济地运行^[41],通过研究电力系统在规定时间内的工作行为和特征,对电网状态进行分析、决策、控制。1900年代以来,高压直流输电系统、柔性交流输电系统、安全稳定装置、新型电力元件等,在电网中的应用越来越普遍,目前的电网仿

真精度和仿真规模已经无法满足需求,快速仿真算法、仿真基础数据、仿真模型及大规模电力系统数字实时仿真技术的研究,将成为仿真技术新的发展方向。

3.4 能源生产和消费革命

作为经济发展和能源政策的重要组成部分,智能电网的建设已经成为世界上很多国家的战略决策。

党的十八大报告首次提出“能源产业和能源消费革命”的说法,这成为此后两年能源工作会议部署工作的基调,也将此提升至国家长期战略的高度,显示了中央的动作和决心。2015年3月25日中共中央下发的《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》文件中强调“形成由市场决定电价的机制,以价格信号引导资源有效开发和合理利用;要构建电力市场体系,促进电力资源在更大范围内优化配置”,电力行业需“加强垄断环节的成本价格监管,促进企业降低成本,提高效率”。这充分说明了能源革命与智能电网的发展是相互依托的。

伴随着智能电网中智能供电概念的产生,电力能源商品化运作的新规则带来一系列挑战.围绕电网与用户的双向互动、可再生能源和分布式电源发展与管理、电力供应商业模式和技术手段等^[42-43],以配电环节和用户为主体,有关智能电网的市场化运行规则和应用理念逐步形成.这些市场规范秩序和交易规则可以形成许多最优模型,进而形成市场反应预案库,以应对不同的市场变化.

4 中国智能电网建设面临的问题

4.1 电力需求强劲增长

中国的电力市场相对于许多发达国家来说尚不够成熟稳定,正处于发展阶段.1900年代以来,作为世界经济的一大亮点,中国经济保持快速增长,与此同时,电力需求也呈现持续而强劲的增长趋势.从1995年开始的近20年里,中国国内生产总值由58 478亿元人民币增长为664 000亿元人民币,年均增长率达到9.3%;而在此期间,全社会电力消费总量由 1.01×10^{12} kWh增长为 6.63×10^{12} kWh,年均增长率达到8.90%.在用电总量增长的同时,用电需求和负荷模式也随着我国城镇化和城乡一体化的发展而发生重大变化,这就意味着原有的电力生产模式和体制要求,以及电能传输系统,面临新的挑战.

4.2 资源与环境压力增大

随着中国经济社会的发展,电力企业面临的资源和环境压力也越来越大.煤炭“计划价格”和“市场价格”双轨制于2010年取消.以电煤为例,当年前三季度电煤价格比2009年底每吨上涨35元左右,涨幅约15%.可是,到了2015年,煤炭价格大幅下跌,如此大的价格波动,对于电力企业、煤炭行业都是一个巨大的挑战.另外,随着土地资源日益紧张,线路走廊和

站址选择也更加困难,致使电力企业用于征地的成本大幅增加.依照政府的政策导向,我国正致力于建设能源节约型社会,要求GDP能耗要求逐年降低20%左右,这对电力产业发展提出了新的要求;同时环境保护问题也被列为十三五规划的约束性指标,环评工作对电力项目的核准与建设的影响更加突出.

4.3 区域差异服务需求有待提高

由于中国宏观经济发展的不平衡,随着电力需求高速增长,地区间的电能消费量差别逐渐增大.中国电力供给与需求分布存在以下特点:能源方面,水能主要在西南地区,煤炭分布于陕西、山西、内蒙古西部“三西”地区;负荷则主要集中于东部沿海经济发展水平较高的地区.因此,电力供给的可获得性、非歧视性、可承受性,面临区域间经济人口及电力供需不平衡带来的挑战,在坚强智能电网建设过程中,必须考虑区域差异和普遍服务的社会责任及经营需求.

4.4 电力改革尚未完善

相对于其他工业,中国电力行业的市场化改革起步较晚.电网虽然已经实现政企分开、厂网分离,但是由于缺少市场竞争,在输电、配电、售电方面仍然存在不少问题.目前我国电价仍由发改委决定,电网企业购售电价空间有限,且电网企业主、辅业并未完全分离,企业经营难度也因此增加.另外,由于电力改革尚未完善,服务机制尚不健全,电网企业实际承担了较多的服务社会的责任,如落后地区的城网改造、“村村通电”工程、居民用电无偿维修服务等,因此负担较重.

5 中国智能电网的发展建议

由于国情、出发点和认知的不同,世界各国智能电网的发展和实施也各具特色.中国智能电网的发展必须根据中国特色进行规划实施,

结合国内特点,适应实际需求,加强统一协调规划,强化基础支撑建设,实现跨越发展.既要立足于目前处于发展期的现实,又要兼顾未来成熟期的前景;既要满足近期的需求,又要适应未来的要求.

5.1 提高电网投资决策水平和规划水平

智能电网发展需要加大对电网资产的投资,然而我国目前这方面投资的实际情况与要求存在较大差距:其一,电网企业盈利水平还不高,自我资金筹措能力有限;其二,由于目前电网企业资产负债率较高,若要加快电网发展,企业的财务风险会进一步增加;其三,增加电网规划和建设的难度及费用也受制于土地资源和环保压力.

因此,如何做到资金和相关资源的合理利用,保证智能电网规划与建设的科学性、合理性和投资的有效性,对智能电网的发展非常重要^[44].

综上所述,在智能电网投资方面,政府部门应发挥主导作用,带动全社会共同参与投资,对智能电网的投资实行有效的分摊机制.同时,在决策方面,应在考虑用电需求增长的同时,通过掌握更加精确详细的电网运行历史数据,深入了解客户的需求,从而更为精细化地设计规划新增或更换设备.另外,要减少为保证高峰负荷而付出的高昂投资和代价,可通过分时电价、削峰填谷等方式解决电力供需矛盾.

5.2 提高故障处理水平

电网主网的规模随着电力需求的不断增长而持续扩大,复杂度也不断提高,为保证安全运行,先进的技术和管理手段的应用非常重要.在配网方面,用户对用电可靠性的要求越来越高,而中国的配网设备存在老化现象严重、结构不合理等问题,这也是制约电网发展的因素.

对于智能电网的发展,在预防方面,可以通过远程设备监视减少故障的发生;运行中对检

修计划进行优化以减少计划停电;故障发生后,通过充分的信息支持,对故障进行快速定位、隔离,迅速恢复供电,以提高故障处理水平.

5.3 提高改善资产运营、维护、管理水平

随着新型智能设备越来越多地投入使用,中国电网传统上定期检修的方式已难以满足新设备运行的要求.如何在资产规模不断扩大而运营、维护人员规模不变甚至减少的情况下降低运营、维护成本、确保运营、维护质量,既减少或避免“过修、过试”现象,又能准确合理地评价设备的健康水平,这对创新资产运维和管理模式提出了新的要求.

为了解决这一难题,需要积极开展高级计量体系(AMI)的研究.智能电表是一种分布于电网终端的传感器和量测点^[45],它不仅能为电网的运行和资产管理带来巨大效益,提供电网用户的测量值,也可有效提高用户对实时电力市场的参与程度,应积极研制并推广应用.

5.4 加强需求侧管理

随着中国经济社会的发展,电力营销的精细化也变得更为重要.电网需要掌握更详细、更大范围的系统运行状态,更详细全面的客户计量信息,以提高用户服务水平,缩短电费回收时间,加强需求侧管理^[46-48],减低运营成本.

此外,加强智能电网需求侧管理,离不开家庭局域网的建设和智能家电接口的标准化^[49-50].

5.5 加强标准体系建设

现有的电网技术标准难以为智能电网提供足够的技术依据^[51-52],因此与智能电网相适应的标准体系的建立显得至关重要.智能电网的国际标准由美国国家标准与技术研究院、电器电子工程师学会和国际电工委员会等十几个组织共同制定,包括电力工程、信息技术和互通协议3个方面的智能电网标准和互通原则.中国的标准则是由中国电力科学研究院主导制定.

由于国际技术垄断,中国需要立足于国内实际,发展出一种新的模式,设计出比过去更高效、更便捷、更友好的智能电网,形成既兼顾国际,又具有自身特色的标准.进而细分国际市场,并能够引导国内相关产业发展.中国必须提升智能电网水平,加强标准体系建设,引导产业发展,积极参与国际竞争.

6 结语

随着经济社会的发展,数字化程度越来越高,对供电可靠性和电能品质提出了更高的要求,因此智能电网成为历史发展的必然.智能电网的研究和建设是一项高度复杂的系统工程,中国智能电网的研究和建设应博采各国之长,既要结合中国电网自身的特点及现有硬件设施和管理系统发展水平,也要考虑到远期相关技术的发展方向;既要考虑电网规划、建设、改造和技术升级等硬件提升,也要满足运行控制、资产管理、用户管理等方面的需求.在此基础上,通过电力流、业务流、信息流的一体化融合,实现多元化电源的灵活接入,以方便各阶梯电力用户的使用,加快实现整个电网在运行控制和管理维护上的智能化,最终建成具有中国特色、领先于国际的国家级智能电网.

参考文献:

- [1] EPRI. 1014600 electricite de France research and development, profiling and mapping of intelligent grid R&D programs [R]. Palo Alto, CA: EPRI, 2006.
- [2] European Commission. European technology platform smart grids: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future [EB/OL]. (2008 - 10 - 10) [2015 - 05 - 10]. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.
- [3] Global Environment Fund & Centre for Smart Energy. The emerging smart grid [R]. 2 Edition. Washington: Global Environment Fund, 2006.
- [4] EPRI. Intelligrid: smart power for the 21st century [R]. Palo Alto, USA: EPRI, 2006.
- [5] U. S. Department of energy. Office of electricity delivery and energy reliability. The smart grid: an introduction [EB/OL]. (2009 - 11 - 03) [2015 - 05 - 10]. <http://www.oe.energy.gov/1165.htm>.
- [6] 国网能源研究院. 2013 国内外智能电网发展分析报告 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [7] 国网能源研究院. 2014 国内外智能电网发展分析报告 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [8] International Energy Agency, OECD. Technology roadmap smart grids [R]. Paris: [s. n], 2011.
- [9] United States Department of Energy. Smart grid system report [R]. [S. l]: U. S. Department of Energy, 2009.
- [10] VINCENZO G, MELETIOU A, COVRIG C F, et al. Smart grid projects in Europe: lessons learned and current developments [R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [11] 刘振亚. 智能电网技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [12] 刘振亚. 智能电网与第三次工业革命 [N]. 科技日报, 2013 - 12 - 05 (1).
- [13] 孙伟卿, 王承民, 张焰. 智能化电网中的柔性评价方法与应用 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(5): 5.
- [14] 中国科学院“构建符合中国国情的智能电网”咨询项目工作组. 中国智能电网的技术和发展 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [15] HU J, ZHU J, PLATT G. Smart grid—the next

- generation electricity grid with power flow optimization and high power quality [C] // Proc IEEE Int Conf Elect Mach Syst, Beijing: IAS IEEE, 2011: 1-6.
- [16] FANG X, YANG D, XUE G. Evolving smart grid information management cloud ward: a cloud optimization perspective [J]. IEEE Trans Smart Grid, 2013, 4(1): 111.
- [17] WANG P, RAO L, LIU X, et al. Dynamic data center operations with demand-responsive electricity prices in smart grid [J]. IEEE Trans Smart Grid, 2012, 3(4): 1743.
- [18] 张东霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 1.
- [19] GELAZANSKAS L, GAMAGE K A A. Demand side management in smart grid: a review and proposals for future direction [J]. Sustainable Cities and Society, 2014, 11(2): 22.
- [20] 李乃湖, 倪以信. 智能电网及其关键技术综述[J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 110.
- [21] 余贻鑫. 智能电网的技术组成和实现顺序[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 1.
- [22] 余贻鑫, 秦超, 栾文鹏. 智能电网基本理念阐释[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 694.
- [23] 王庆红. 智能电网研究综述[J]. 广西电力, 2009, 32(6): 1.
- [24] 余贻鑫, 栾文鹏. 面向 21 世纪的智能电网 [N]. 科学时报, 2010-09-06(B3).
- [25] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1.
- [26] LIANG H, TAMANG A K, ZHUANG W H, et al. Stochastic information management in smart grid [J]. IEEE in communications surveys & tutorials, 2014, 16(3): 1746.
- [27] POPEANGA J. Cloud computing and smart grids [J]. Database Syst, 2012, 3(3): 57.
- [28] GUO Y, PAN M, FANG Y. Optimal power management of residential customers in the smart grid [J]. IEEE Trans Parallel Distrib Syst, 2012, 23(9): 1593.
- [29] FANG X, MISRA S, XUE G, et al. Smart grid the new and improved power grid: a survey [J]. IEEE Commun Surv Tuts, 2012, 14(4): 944.
- [30] YANG Z, YU S, LOU W, et al. Privacy-preserving communication and precise reward architecture for V2G networks in smart grid [J]. IEEE Trans Smart Grid, 2011, 2(4): 697.
- [31] United States Department of Energy. Grid 2030: a national vision for electricity's second 100 year [R]. [S. 1]: United States Department of Energy Office of Electric, 2003.
- [32] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1.
- [33] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 10.
- [34] 德国国际合作机构. 中国智能电网发展监管路径研究报告[R]. [出版地不详]: 国家能源局, 德国联邦经济合作与发展部, 2014.
- [35] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [36] 王明俊. 智能电网与智能能源网[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 1.
- [37] 余贻鑫. 智能电网的基本理念[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2011, 44(5): 377.
- [38] 吴俊勇. 智能电网的核心内涵和技术框架[J]. 电力电子, 2010(1): 55.
- [39] JOHN M, MARK M G, DON D, et al. Strategic R&D opportunities for the smart grid [R]. [S. 1]: Metering and Smart Energy, 2013.

- [40] 邱剑,王慧芳,陈志光,等. 智能变电站自动化系统有效度评估模型研究[J]. 电力系统自动化,2013,37(9):1.
- [41] 祖卫华,刘莉. 智能微电网控制策略浅析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版),2012,8(3):204.
- [42] 刘科研,盛万兴,张东霞,等. 智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(2):287.
- [43] 刘小聪,王蓓蓓,李扬,等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):30.
- [44] Executive Office of the President, National Science and Technology Council. U. S. A policy framework for the 21st century grid: a progress report[EB/OL]. (2013 - 01 - 10) [2015 - 05 - 10]. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/2013_nstc_grid.pdf.
- [45] 王思彤,周晖,袁瑞铭,等. 智能电表的概念及应用[J]. 电网技术,2010(4):17.
- [46] 田世明,王搭宿,张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3576.
- [47] 史梦洁,韩笑,程志艳,等. 面向电力需求侧的大数据应用研究分析[J]. 供用电,2014,31(12):20.
- [48] 张钦,王锡凡,王学建. 需求侧实时电价下供电商购售电风险决策[J]. 电力系统自动化,2010,34(3):22.
- [49] 张新昌,周逢权. 智能电网引领智能家居及能源消费革新[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(5):59.
- [50] 高志远,曹阳,朱力鹏. 智能变电站未来发展的分析方法研究[J]. 电网与清洁能源,2013,29(2):11.
- [51] 张健,蒲天骄,王伟,等. 智能电网示范工程综合评价指标体系[J]. 电网技术,2011,35(6):5.
- [52] 王益民. 坚强智能电网技术标准体系研究框架[J]. 电力系统自动化,2010,34(22):1.

(上接第46页)

- [9] 中国国家标准化管理委员会. 烟丝整丝率、碎丝率测定方法:YC/T 178—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [10] 国家烟草专卖局. 卷烟工艺测试与分析大纲[M]. 成都:四川大学出版社,2004.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 烟草及烟草制品 水溶性糖的测定 连续流动法:YC/T 159—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 烟草及烟草制品 总植物碱的测定 连续流动法:YC/T 160—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 烟草及烟草制品 钾的测定 火焰光度法:YC/T 173—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 烟草及烟草制品 氯的测定 连续流动法:YC/T 162—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 烟草在制品 感官评价方法:YC/T 415—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.