

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.003

关于智能电网发展的几点思考

童光毅¹, 王梦真², 杜松怀¹, 胡波³, 苏娟¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京 102209;
3. 全球能源互联网发展合作组织, 北京 100031)

摘要: [目的]为了理清智能电网作为新一代能源体系核心平台的相关概念和发展思路。[方法]利用文献综述法梳理了微电网、泛能网和能源互联网的概念及其与智能电网的关系。结合我国的能源发展现状和战略需求,探讨了我国智能电网的建设思路和重点。[结果]智能电网是传统电力系统和现代信息技术的深度融合,而能源互联网是智能电网和互联网思维模式、技术的深度融合。智能电网是能源互联网的基础平台,微电网、泛能网、智能电网和能源互联网都以实现更加清洁、高效、灵活的用能为目标。[结论]智能电网建设应在强调高压侧智能化控制的同时,同步建设智能配电网,鼓励以多能互补为核心的泛能网的发展。

关键词: 智能电网; 发展模式; 微电网; 泛能网; 能源互联网

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)04-0021-08

Some Ideas on the Development Mode of Smart Grid

TONG Guangyi¹, WANG Mengzhen², DU Songhuai¹, HU Bo³, SU Juan¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Central Research Institute of State Power Investment Corporation Limited, Beijing 102209, China;
3. Global Energy Interconnection Development and Corporation Organization, Beijing 100013, China)

Abstract: [Introduction] This paper aims to clarify the concepts and thinking of smart grid. Smart grid is the core platform of the new energy system. It is important for the adjustment of energy structure to develop smart grid. [Method] This paper used the literature review method to sort out the concepts of microgrid, ubiquitous energy network and energy internet and its relationship with smart grid. Combined with China's energy development status and strategic needs, this paper discussed the construction ideas and key points of China's smart grid. [Result] Smart grid is the deep integration of traditional power system and modern information technology, and energy Internet is the deep integration of smart grid and Internet thinking mode and technology. Smart grid is the basic platform of energy Internet. Microgrid, ubiquitous energy grid, smart grid and energy internet all aim to achieve cleaner, efficient and flexible energy use. [Conclusion] Our data suggests that intelligent control on the high voltage side and intelligent built on distribution network should be emphasized and we should encourage the development of ubiquitous energy Internet which focus on the multiple energy sources complement.

Key words: smart grid; development mode; micro-grid; ubiquitous energy internet; energy internet

当前,能源变革已成为国际共识。以欧、美为代表的发达国家已经开始推动电力工业向着低碳、智能的方向发展,以便培育新的国内经济增长点,进而抢占新能源、电动汽车、储能技术、物联网等

新兴产业发展的战略制高点^[1]。为顺应国际形势,保障国家能源安全,习近平总书记提出了“四个革命、一个合作”的战略。加快能源供给、消费和技术革命,实现能源供应的高效、安全、环保和节能,亟需构建清洁、低碳的新一代能源体系。智能电网作为新一代能源体系的核心平台,肩负着推动电力系统向绿色、节能、低碳、智能方向跨越式发展的重大历史使命。

智能电网的概念起源于美国,2002年美国电力

收稿日期: 2018-06-01 修回日期: 2018-06-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“未来电力系统结构形态演化模型及电力预测方法”(2016YFB0900101)

科学研究院发起了对知识型电网(intelli-grid)的研究,其研究目标是提升电网安全水平、提高电力系统灵活性和实时控制管理水平。欧盟于2005年成立了欧洲智能电网技术论坛,指出未来欧洲的电网应满足柔性应对用户需求、满足用户对电能质量差异化需求、电源的即插即用等要求。近年来,中国学者在借鉴欧美智能电网经验的基础上,对智能电网特点、关键技术、发展路径等进行了研究,从不同角度进行了解读。

余贻鑫等人认为智能电网是具有电力和信息双向流动特点的、高度自动化和电能广泛分布的能源供应网络^[2-4]。薛禹胜等人认为智能电网是一种针对电力系统的信息物理系统,其基础是电力系统广域全景实时数据的采集、传输、存储、分析及决策支持,具有风险预警型的信息化、自适应型的自动化、协调型的互动化特征。阐明了信息与电力流的深度融合的观点^[5-7]。周孝信等人认为智能电网结合了新能源革命的特征,既要适应大规模可再生能源的电力输送和优化,又要适应分布式能源电力开放的需求^[8]。

近年来,国内开展了一系列智能电网实践工程,深圳科技生态园智能电网对分布式电源与微电网、配电智能化、用电智能化、高级应用等技术进行了探索。中新天津生态城智能电网综合示范工程以智能配用电领域为发展重点,涵盖分布式电源、微电网、配网运维、用电能效、能源调度等方面,实现可再生能源利用率不低于20%,绿色出行率不低于90%。智能电网的已有工程实践主要集中在新能源开发、高渗透率分布式电源应用、智能需求响应、电动汽车等方面。

智能电网的重要特征之一是实现高比例可再生能源安全消纳。为应对大量分布式可再生能源接入,实现其就地消纳和高效利用,微电网、泛能网等概念不断充实和发展。分布式发电可以利用风光等可再生能源和天然气等分散能源进行发电供电,具有清洁、高效的优点,但可再生能源大规模接入对电网安全稳定运行、调度、调峰调频和备用容量规划等方面带来很大挑战^[9-10]。微电网能够最大限度地利用分布式电源出力,提高供电可靠性和电能质量。微电网作为智能电网的一部分,主要解决一定区域内的供电问题,而泛能网的出现改变了传统的单一供能模式。在一定区域内,集供电、供热、

供水、供气于一体,通过信息和能量的耦合协同,达到多种能源的梯级按需匹配,从而实现更高的能源利用效率和更大的经济价值^[11]。

2011年,美国学者里夫金提出一种以新能源技术和信息技术的深入结合为特征的新型能源利用体系——“能源互联网”^[12],引起广泛关注。目前,能源互联网的概念还在讨论和不断发展中,主要有以下几种观点:第一种以互联网为核心。认为能源互联网由互联网技术与其他前沿信息技术、能源市场、电力系统等耦合而成的。通过分析互联网收集到的信息和数据指导能源网络的运行调度,此种模式更加强调基于互联网的信息融合以及所带来的商业模式创新^[13-16]。第二种以能源系统为核心。认为能源互联网是能源和互联网深度融合的新型能源系统,能源和信息双向流动,借鉴互联网的理念和体系架构,形成包括大电网、微网在内的新型能源网,采用自治或中心控制的方法实现能源的供给平衡^[17-19]。第三种是以智能电网为核心。以互联网思维改造传统电力系统,不是机械地将互联网的概念应用于能源互联网,能源互联网是以智能电网为基础,连接各类发电、用电环节,并融合互联网理念形成的能源电力新型业态^[20-25]。

综上,近年来智能电网、微电网、泛能网、能源互联网等概念已成为研究热点,但目前业界对这些概念的认识还不统一,对概念之间的相互关系不够明确,如何结合我国国情、建设适应能源结构调整需要的智能电网,值得我们系统、认真地思考。只有理清智能电网的相关概念、理顺智能电网的概念体系,才能正确引导智能电网研究和创新的方向。本文首先分析了智能电网的概念、特征和发展模式,然后对微电网、泛能网和能源互联网进行了系统总结。最后,探讨了适合中国国情的智能电网建设思路。

1 智能电网的概念、特征与发展模式

1.1 智能电网的概念

本文从智能电网的特征和目的出发,给出如下定义:智能电网是传统电力系统与先进传感技术、现代信息技术深度融合,电源、电网、用户间信息高度感知、双向流动和自适应控制的新一代电力系统。是建立集中分散协同、多种能源融合、供需双向互动和高效灵活配置的现代能源供应体系的重要

基础。有利于可再生能源安全消纳, 促进能源结构调整, 提升能源大范围优化配置能力。

从本质上来讲, 智能电网是在传统电网的基础上叠加一个信息化的网络, 实现电网本体和信息深度融合, 实时掌握发电侧和用电侧的信息, 实现电力电量实时平衡。

1.2 智能电网的特征

我国智能电网的主要特征是传统电网与信息技术深度融合, 信息在发输供应环节双向流动, 实现自适应控制。信息通信技术的应用使得智能电网中能够实现实时信息交换。信息在电源、电网、用户间双向感知、灵活互动, 有利于实现可再生能源的消纳、更大范围实现能源体系优化配置。一方面, 大量分布式发电和分布式储能可以在电网中可以即插即用, 另一方面, 用户可与电网友好合作(犹如虚拟电源), 帮助电网实现需求侧管理(如削峰填谷), 并在紧急情况下支援电网运行^[26]。通过大数据和云计算分析和决策平台, 可以整合电网数据资源, 以实时价格信息引导用户主动调节用电能力, 为各类能源接入、调度运行、用户服务和经营管理提供支撑。

1.3 智能电网的典型发展模式

由于国情和电网发展水平不同, 各个国家和地区的智能电网发展各有侧重, 美国、中国、欧洲、日本具有典型代表性, 发展模式对比如表1所示。

由于美国电网存在电网老化、技术陈旧、事故频繁等问题, 因此以改造电力系统、提升能源效率为目标、以配电网信息化为重点建设智能电网。这种模式最大的特点是电网以用户侧智能交互为基础, 实现需求侧响应。通过电价和政策激励, 引导用户改变用电习惯, 利用新材料新技术, 提升供电

可靠性和用户体验。中国能源资源和需求呈逆向分布特点, 因此为在更大范围内优化资源配置, 需要建设大容量远距离跨区输电的坚强智能电网。欧洲各国电网运行模式不同, 电力需求趋于饱和, 日本在经历“3·11”大地震后, 智能电网理论得到进一步优化提升, 其能源政策强调对环境的保护和可再生能源的发展, 因此其智能电网以大规模可再生能源的开发利用为中心, 重视互联网的作用, 强调通过信息化手段实现可再生能源发电与用户之间的有效配合和协调^[31]。智能电网的相关概念——微电网和泛能网微电网是智能电网在局部区域的一种形态, 它以电为核心, 自发自用为主、支撑主网为辅, 能够实现局部地区的电力稳定供应和电力电量自平衡。泛能网是在智能电网的基础上, 打破能源竖井, 向其他能源延伸、涵盖多种能源、实现能源横向连接的能源网络。

1.4 微电网——解决区域供电问题

实际上, 微电网并不是一个新概念, 早期的电力系统都是分散独立的小型电网, 也是微电网的一种形态。随着电网技术的发展, 电压等级不断升高、输电距离不断延长, 联网规模不断扩大, 大电网在电力供应中发挥主要作用。近年来, 随着分布式可再生能源的大规模开发利用, 微电网作为消纳可再生能源的重要途径, 进入了全新的发展阶段。

本文所讲的微电网, 不是指对电力系统发展初期的孤立系统的简单回归, 而是在智能电网的范畴内, 由分布式电源、储能和负荷构成的, 以供应电力为主的独立可控系统, 采用大量先进的现代电力技术且可实现局部地区的电力电量自平衡。随着其智能性与灵活性的不断提升, 微电网既是智能电网的重要组成部分

表1 智能电网的几种典型发展模式

Tab. 1 Classification of developing mode of smart grid

代表国家	侧重点	解决的问题	特点	主要技术
美国	以信息化为基础的配电网智能化	电网老化严重、事故频发, 人均能源消费量较大	(1) 互动信息充分、用户积极参与市场运作; (2) 各种发电和储能系统“即插即用” ^[27] ; (3) 投资重点以提高用电效率、保证可靠性为主 ^[28]	智能电表、智能调度技术、高级计量体系、需求侧响应、分布式储能
中国	高压侧电网智能化控制	清洁能源消纳、能源资源与负荷逆向分布	(1) 电网互联规模大; (2) 能源资源优化配置效率高	特高压交直流输电技术、柔性直流输电技术、交直流大电网智能调度技术、大电网预警与安全防御技术 ^[29-30]
欧洲 日本	适应能源结构调整、双向互动	大规模可再生能源安全消纳	(1) 新能源消纳比例高; (2) 信息在电源和用户间双向流动	电动汽车技术、可再生能源发电预测技术、大规模可再生能源并网运行控制技术、大容量储能技术

分,又体现着其有独特的优点和价值。

发展微电网的目的主要有三个:一是通过柴油机、小风电、分布式光伏等独立发电系统,解决与大电网联系薄弱的农村和偏远地区用电问题;二是在可再生能源高渗透率地区,通过微电网这一稳定的电力供应平台,实现分布式可再生能源的消纳和多种能源的高效利用;三是作为大电网的备用和补充,满足对电能质量和供电可靠性有特殊要求的用户需要和特殊时期的应急供电。

我国的青海、西藏等偏远农村地区适合发展建设微电网。这些地区地广人稀,负荷分散,与主网架联系薄弱,同时又有着丰富的风光等可再生能源资源,且用能形式相对单一。因此,发展微电网不但能够解决这些地区的用电难题,还能够节约电网建设成本,改善人民生活水平^[32]。

1.5 泛能网——实现局部区域能效提升

在城市地区,负荷相对集中、用能需求多元,且用能的梯级利用潜力和互补性强,适合发展以多种能源综合利用为特征的泛能网。泛能网是以为用户提供多能互补的泛能机/站(即高效分布式能源系统)解决方案切入,利用信息网和气、电、热、水等物理网,搭建多种能源设施互联互通、多主体智慧交互的能源物联网,形成多能源智能调配、互联网能源共享的新生态,实现能源清洁、高效、经济、安全的目标。泛能网具有多种能源融合、分布式为主体、设施互联互通、需供智慧互动、实施调度交易、储能技术支撑等特征。泛能网的原理如图1所示。

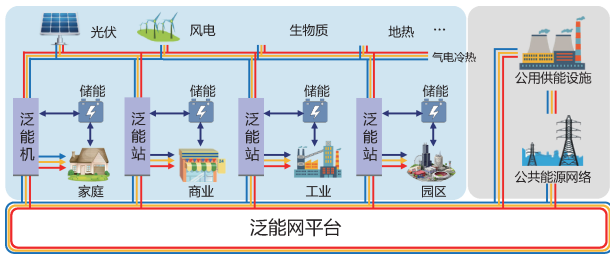


图1 泛能网示意图

Fig. 1 Diagram of ubiquitous energy Internet

泛能网这一概念的发展主要经历了三个阶段。第一阶段是2009-2014年,泛能机\站的出现打破了传统能源分项规划模式,满足数据中心、医院、交通枢纽、城市综合体等公共建筑及医药、食品等工业企业的冷、热、电需求;第二阶段是2015-2016年,通过将区域内多种能源设施互联互通、集约共享,部署泛能网运营调度交易平台,进行统筹优化匹配,充分满足多用户的能源需求,同步降低能源设施投资规模及能源成本,提高能源利用效率;第三阶段是2016年至今,泛能网进一步升级为站、网、云一体化,通过构建能源物联网,依托泛能网络平台进行广域资源配置,促进需供互动,形成多元开放、多能源智能调配、互联网能源共享的新生态,最大化提升系统效率。

泛能网主要应用于对冷热电需求较大的居民区和工业园区,主要有三类应用场景:一是存量改造区域,这一类场景通过更新基础设施,实现产业园区能效升级。廊坊新朝阳区块泛能网项目和廊坊生态城泛能网项目具有一定代表性;二是新建区域,通过将能源规划与城市规划相结合,采用泛能网的理念打造多能互补园区,青岛中德生态园项目具有一定代表性;三是增存混合区域,增存混合区域模式将存量改造模式和新建区域模式的特点和实施方案相结合,廊坊开发区泛能区域网项目和富平综合能源项目具有一定代表性。随着分布式能源试点的推广和多能互补示范项目的推广,泛能网的应用范围和规模将不断扩大。

1.6 微电网和泛能网的特征比较

微电网和泛能网的特征比较如表2所示。从核心功能而言,微电网和泛能网都是满足局部地区的用电/用能需求,实现能源的自平衡。从能源品种而言,微电网主要是供应电力,泛能网则强调多种能源的梯级利用和综合优化利用。从应用场景而言,微电网主要是应用于电网延伸不足、可再生能源充足的地区和对供电质量有特殊要求的用户。

表2 微电网和泛能网特征比较

Tab. 2 Comparison of micro-grid and ubiquitous energy Internet

概念	核心功能	能源品种	应用场景	典型案例
微电网	满足局部地区用电需求	电、热	生活园区、偏远农村、孤立海岛等	玉树水光互补微电网、北京延庆智能微电网
泛能网	满足局部地区用能需求	电、气、冷、热、水等	对冷热电需求较大的工业园区	廊坊生态园区、 神华-富平综合能源项目

泛能网应用于对冷热电需求较大的工业园区,通过多种能源之间的转换,提升能源利用效率。微电网、泛能网和智能电网的建设,都是以实现更加清洁、高效、灵活的用能为目标,是现代能源体系的重要组成部分。

2 智能电网的高级形式——能源互联网

如今,互联网已成为经济社会发展的重要基础。“互联网+”传统行业从技术和模式两个方面对传统行业带来了深刻变化,能源互联网正是借鉴了互联网共享、跨界、平台等发展理念,实现互联网与能源系统的深度融合,促进能源商业模式创新^[33]。

能源互联网不是能源系统的简单互联,也不仅仅是能源系统的信息化,能源互联网是在智能电网的基础上,利用互联网思维与技术改造传统能源行业,实现横向多源互补、纵向“源-网-荷-储”协调、能源与信息高度融合的新型能源体系。目的是大幅度提升能源系统效率、促进商业模式创新、支撑绿色发展理念,如智慧城市、生态园区、绿色乡村、智能家居等^[34]。

能源互联网统筹了智能电网、微电网、泛能网等概念,但智能电网是能源互联网的基础和核心,是能源转化和配置的重要平台。能源互联网的架构如图2所示。

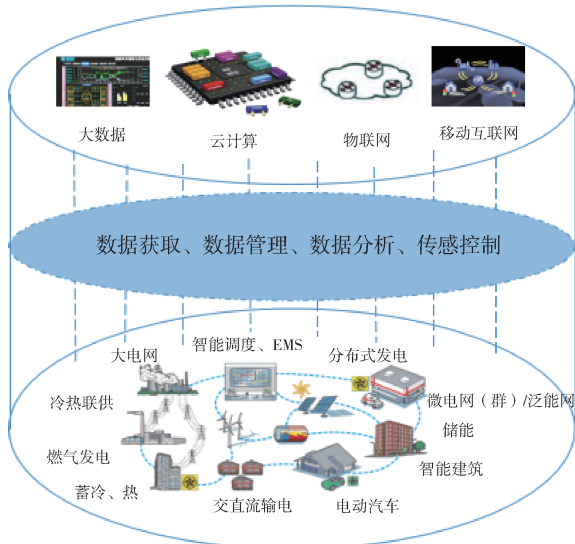


图2 能源互联网架构图

Fig. 2 Architecture of energy Internet

在物理层面,网-源-荷-储作为系统的整体进行效率优化和运行控制,实现供需有效匹配,提

高能源利用效率。在信息层面,以大数据、云计算、物联网、移动互联网为代表的技术创新,提高了能源系统的运行效率,建立起实时反映电力成本和供需关系的交互媒介。实现了能源与信息的高度融合,推动了能源商业模式的创新。在融合层面,能源与信息高度融合,业务和商业模式得以创新,推动电网向市场、集约、高效方向转变。

3 智能电网的建设思路

智能电网的发展要立足国家能源战略,结合我国能源资源禀赋和技术发展水平,并要充分考虑未来电网的发展趋势和形态特征,解决能源电力领域的核心问题。

1) 支撑国家能源战略

为了实现巴黎气候大会承诺的减排目标,保障国家经济社会可持续发展,习近平总书记提出了“四个革命、一个合作”能源战略。加快能源供给、消费和技术革命,亟需构建清洁、低碳的新一代能源体系,智能电网是新一代能源体系的核心平台,将发挥重要作用。

2) 能源资源和技术发展现状

当前,我国能源发展现状主要可以归纳为能源资源与需求逆向分布、用能需求呈现多元化和清洁能源供能的占比偏低。因此,从未来需求看,智能电网既要充分接纳风、光、水等可再生能源,又要实现大规模清洁能源集中外送、协调优化,既要适应分布式电源、微电网的发展,又要借鉴互联网思维、技术和商业模式,向能源互联网的发展模式过渡。

当前,我国智能电网技术持续突破。在电源侧和电网侧,新能源功率预测及运行控制、分布式电源友好并网、特高压输电技术已实现达到先进水平,输变电设备状态监测、智能变电站、配电自动化、智能电网调度技术支持系统、电动汽车充换电技术等实践成果得到推广应用。但是,在用户侧还存在诸多问题:自动需求响应尚未真正实施,用电信息采集系统、智能电表尚未规模化使用,信息安全方面的研究没有深入开展,电价机制尚未完善,智能电网最重要的特性——互操作性没有得到满足,等等。用户侧智能化水平需要进一步提升。

3) 未来电网发展趋势和形态特征

电网向着更加清洁、坚强和灵活的方向发展。

电网将呈现可再生能源高比例大规模并网接入、跨区域输电需求显著增强、负荷多元化与供需深度互动等特征。

基于以上分析,未来我国智能电网的建设应从电源侧、电网侧、配用电侧和调度控制的智能化四个层面开展,如图3所示。

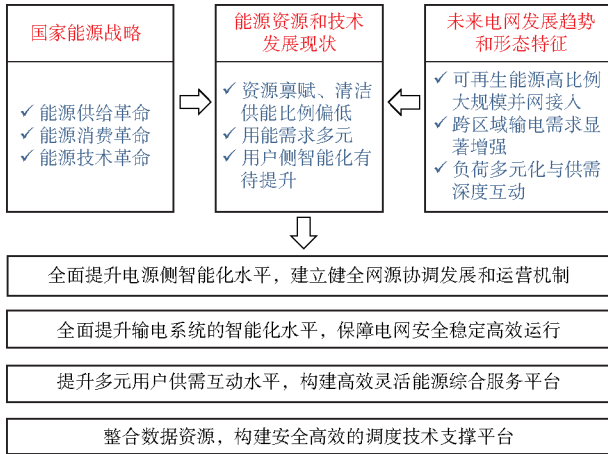


图3 智能电网建设思路图

Fig. 3 Construction ideas of smart grid

1) 全面提升电源侧智能化水平, 建立健全网源协调发展和运营机制。

加强电厂智能化建设, 提升电源侧的可观可控性, 提升电源电网协调发展水平; 进一步提升可再生能源发电预测技术水平和大规模可再生能源并网运行控制技术, 全面建设新能源发电功率预测系统, 加强新能源与传统电源、电网、负荷统筹规划, 提升电力系统对新能源的整体接纳能力; 通过建立有效的运营补偿机制激励电源主动参与调峰调频等辅助服务, 优化电源结构。

2) 全面提升输电系统的智能化水平, 保障电网安全稳定高效运行。

推广大容量远距离输电技术, 加快重点联网工程建设, 提升大型能源基地外送能力; 研究部署大电网状态评价、预警和自适应决策控制系统; 加强电网设备状态监测, 开展智能巡检, 推广全寿命周期管理; 提升电网设备运行管理水平和利用效率, 提高电网抗灾防灾能力。

3) 加快提升多元用户供需互动水平, 构建高效能源综合服务平台。

全面开展智能电表等高级量测技术和直流配电网技术应用, 探索水、电、气等信息集采、构建高

效灵活能源综合服务平台, 实现电源、电网、用户高效互动; 全面支撑智能建筑、智能园区、智能家居建设, 为用户提供多样化用能服务; 推广以动态电价为基础的需求侧响应机制, 鼓励用户参与市场互动, 实现削峰填谷, 提高能源利用效率; 鼓励电动汽车作为储能和负荷响应积极参与需求侧管理, 实现电动汽车与电网友好互动。

4) 整合数据资源, 构建安全高效的调度技术支持平台。

智能调度系统是提升电网安全、抵御风险的重要保障。充分利用信息通信技术、大数据分析决策技术, 提升电网建模和分析技术, 重点研发交直流大电网智能调度、经济运行与安全防御技术。

整合智能电网数据资源, 挖掘信息和智能决策能力, 提供智能化分析、预警、辅助决策和控制, 为调度智能化提供更为精确有效的基础数据。

4 结论

我国电网发展经历了从小型孤立电网到大型互联电网, 从单一供电模式到多种能源同时供给的阶段, 未来电网的发展要适应大规模清洁能源的输送和分布式电源、微电网的发展, 提高能源利用效率。在智能电网的研究过程中, 有许多不同的方向和侧重。本文对目前的一些模糊认识进行了梳理和界定, 总结了智能电网、微电网、泛能网和能源互联网的概念, 并理清了概念之间的相互关系。在此基础上, 认为我国智能电网的建设和发展, 应处理好以下几个问题:

1) 我国智能电网的发展首先应该明确概念、确定发展模式, 借鉴美国、欧洲、日本的经验, 针对中国国情, 建设适应能源结构调整的、网架坚强的智能电网, 在强调高压侧智能化控制的同时, 同步建设智能配电网, 进一步实施需求侧响应。支持和鼓励以多能互补为核心的泛能网的发展, 最大程度地利用可再生能源。

2) 本文的核心观点为智能电网是传统电力系统和现代信息技术的深度融合, 而能源互联网是智能电网和互联网思维模式、技术的深度融合。智能电网是能源互联网的基础平台, 微电网、泛能网、智能电网和能源互联网都以实现更加清洁、高效、灵活的用能为目标, 是现代智慧能源体系的组成部分。

3)从国家能源战略需求和电网发展现状出发,智能电网的建设应从电源侧智能化、电网侧智能化、配用电侧智能化和调度智能化四个层面来布局。其中,电网侧智能化建设已卓有成效,配用电侧智能化是未来智能电网建设的重点。

参考文献:

- [1] 童光毅. 走中国特色的电力市场化改革之路 [J]. 北大商业评论, 2015(5): 114-123.
TONG G Y. Take the road of power market reform with Chinese characteristics [J]. PKU Business Review, 2015(5): 114-123.
- [2] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11.
YU Y X, LUAN W P. Smart grid [J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(1): 7-11.
- [3] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
YU Y X, LUAN W P. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [4] 余贻鑫, 栾文鹏. 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): 377-384.
YU Y X, LUAN W P. Basic philosophy of smart grid [J]. Journal of Tianjin University (Science and Engineering Technology Edition), 2011, 44(5): 377-384.
- [5] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合(二): 应用及探索 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 1-13.
XUE Y S, LAI Y N. Integration of macro energy thinking and big data thinking (Part two): applications and explorations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 1-13.
- [6] 薛禹胜. 智能电网对能源与环境安全的支撑 [J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(7): 7-11.
XUE Y S. Smart grid supporting energy security and environmental safety [J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(7): 7-11.
- [7] XUE Y S. Energy Internet or comprehensive energy network [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(3): 297-301.
- [8] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU X X, LU Z X, LIU Y M, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [9] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
JIA H J, WANG D, XU X D, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [10] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14 +23.
WANG C S, LI P. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14 +23.
- [11] 甘中学, 朱晓军, 王成, 等. 泛能网——信息与能量耦合的能源互联网 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 98-104.
GAN Z X, ZHU X J, WANG C, et al. Ubiquitous energy internet——new energy internet coupling with information and energy [J]. Engineering Sciences, 2015, 17(9): 98-104.
- [12] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy and the world [M]. New York: Palgrave Macmillan, 2013.
- [13] 曾鸣. 能源互联网与能源革命 [J]. 中国电力企业管理, 2016, 16(11): 36-39.
ZENG M. Energy internet and energy revolution [J]. China Power Enterprise Management, 2016, 16(11): 36-39.
- [14] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化 [J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 1-10.
CAO J W, YANG M B, ZHANG D H, et al. Energy internet: an infrastructure for cyber-energy integration [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 1-10.
- [15] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1-9.
LI L C, ZHANG Y J, CHEN Z X, et al. Merger between smart grid and energy-net: mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.
- [16] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Z Y, ZHAO J H, WEN F S, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [17] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
SUN H B, GUO Q L, PAN Z G. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [18] 蔡巍, 赵海, 王进法, 等. 能源互联网宏观结构的统一网络拓扑模型 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3503-3510.
CAI W, ZHAO H, WANG J F, et al. A unifying network topological model of the energy internet macro-scope structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3503-3510.
- [19] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
TIAN S M, LUAN W P, ZHANG D X, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [20] 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望 [J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(2): 149-170.
ZHOU X X, ZENG R, GAO F, et al. Development status and prospects of the energy internet [J]. Sci. Sin. Inform., 2017, 47(2): 149-170.
- [21] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索 [J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3014-3022.
MA Z, ZHOU X X, SHANG Y W, et al. Exploring the con-

cept, key technologies and development model of energy internet [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022.

[22] 尹晨晖, 杨德昌, 耿光飞, 等. 德国能源互联网项目总结及其对我国的启示 [J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3040-3049.

YIN C H, YANG D C, GENG G F, et al. Summary of energy internet projects in Germany and its enlightenment to China [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3040-3049.

[23] 杨方, 白翠粉, 张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3495-3502.

YANG F, BAI C F, ZHANG Y B. Research on the value and implementation framework of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3495-3502.

[24] 姚建国, 高志远, 杨胜春. 能源互联网的认识和展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 9-14.

YAO J G, GAO Z Y, YANG S C. Understanding and prospects of energy internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 9-14.

[25] 华贵. 关于能源互联网层次架构的思考 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(4): 1-7.

HUA B. Cogitation about the hierarchy of energy internet [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(4): 1-7.

[26] 余贻鑫, 刘艳丽. 智能电网的挑战性问题 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 1-5.

YU Y X, LIU Y L. Challenging issues of smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 1-5.

[27] 倪敬敏, 何光宇, 沈沉, 等. 美国智能电网评估综述 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 9-13 +66.

NI J M, HE G Y, SHEN C, et al. A review of assessment of smart grid in America [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 9-13 +66.

[28] 卢永, 甘德强, JIANG J N. 美国智能电网和分布式发电重点方向的调研分析 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 12-16.

LU Y, GAN D Q, JIANG J N. Issues of smart grid and distributed generation development in the United States [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 12-16.

[29] 李喜来, 李永双, 贾江波, 等. 中国电网技术成就、挑战与发展 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 1-8.

LI X L, LI Y S, JIA J B, et al. Review of the achievements, challenges and development of power system technology in China [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 1-8.

[30] 姚建国, 严胜, 杨胜春, 等. 中国特色智能调度的实践与展望 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 16-20 +48.

YAO J G, YAN S, YANG S C, et al. Practice and prospects of intelligent dispatch with Chinese characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 16-20 +48.

[31] 胡波, 周意诚, 杨方, 等. 日本智能电网政策体系及发展重点研究 [J]. 中国电力, 2016, 49(3): 110-114.

HU B, ZHOU Y C, YANG F, et al. Research on policy system and development priorities of smart grid in Japan [J]. Electric Power, 2016, 49(3): 110-114.

[32] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.

YANG X F, SU J, LÜ Z P, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[33] 黄晓莉, 李振杰, 张韬, 等. 新形势下能源发展需求与智能电网建设 [J]. 中国电力, 2017, 50(9): 25-30.

HUANG X L, LI Z J, ZHANG T, et al. Study on the energy development demand and smart grid construction under new situation [J]. Electric Power, 2017, 50(9): 25-30.

[34] 李博, 高志远, 曹阳. 智能电网支撑智慧城市关键技术 [J]. 中国电力, 2015, 48(11): 123-130.

LI B, GAO Z Y, CAO Y. Review of key technology of smart grid supporting smart city construction [J]. Electric Power, 2015, 48(11): 123-130.

作者简介:



TONG G Y

童光毅

1969-, 男, 湖北黄冈人, 高级工程师, 博士, 主要从事能源战略规划、能源经济学、电力体制改革研究 (e-mail) tonggy69@126.com。



WANG M Z

王梦真 (通信作者)

1993-, 女, 山东潍坊人, 硕士, 主要从事电力市场、智慧能源研究 (e-mail) mzhwang25@163.com。

(责任编辑 郑文棠)

广 告

- 改革开放 40 周年暨中国能建广东院建院 60 周年..... 封二
- 全球首台双机回热百万机组—甲湖湾电厂 2×1 000 MW 新建工程 1 号机组投运 封三
- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司..... 封四