

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.001

中国电网技术成就、挑战与发展

李喜来, 李永双, 贾江波, 陈海焱
(电力规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 电网作为电力传输的基本途径, 是重要的能源基础设施, 关系到国民经济命脉和国家能源安全。文章首先介绍了中国交、直流输电电压等级的演变历程和电网技术发展取得的成就, 其次从大型能源基地输送需要、分布式能源接入的挑战、节能环保及资源约束、智能化与信息化潮流、用电侧的新要求和电网技术“走出去”等方面分析了当前中国电网技术面临的挑战。最后从大容量远距离输电技术、智能电网、柔性输电、分布式能源接入和配用电及微电网、新形势下的先进调度、设计施工与运维的信息化、节能环保与资源高效利用、设备国产化与标准的国际化等八个方面探讨了现代电网技术的发展方向。

关键词: 电网技术; 智能电网; 节能环保; 一带一路

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0001-08

Review of the Achievements, Challenges and Development of Power System Technology in China

LI Xilai, LI Yongshuang, JIA Jiangbo, CHEN Haiyan
(Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: As the basic approach of the power transmission, power grid is the critical energy infrastructure related to lifelines of the national economy and national energy security. Firstly, this paper presents the evolution process of AC and DC transmission voltage grade, the development power grid technology. Then the challenge for the current China's power grid technology is analyzed with transmission demand of huge energy base, access challenge of distributed energy sources, energy conservation, environmental protection and resource constraints, trend of intelligence and information technology, new requirement of power demand side and "going-out" of China power grid technology. Finally, high capacity and long distance power transmission, smart grid, flexible power transmission, access, distribution and utilization of distributed energy sources or microgrid, advanced electric power dispatch under new situation, information management of design, operation and maintenance, energy conservation, environmental protection, high efficient utilization of resource, nationalization of electrical equipment and internationalizing of the technical standards are presented to propose the strategies for future power grid development in China.

Key words: power grid; smart grid; energy conservation and environment protection; the Belt and Road Initiative

在现代社会中, 电力已成为社会生活和经济发展不可或缺的能源。电网作为电力传输的基本途径, 是重要的能源基础设施, 关系到国民经济命脉和国家能源安全。

中国的电网经过上百年的发展, 已取得了举世瞩目的成就。特别是进入新世纪以来, 中国的电网迅速发展, 供电可靠性和效率不断提升, 电网技术也逐步步入世界先进国家行列。目前, 中国的电网规模已居世界第一位, 且拥有世界最高的交、直流输电电压等级, 以及世界上输送容量最大、送电距离最远的特高压输电工程^[1]。

但是, 基于中国的资源在地理上分布不均的特点, 且随着可再生能源的快速发展, 以及电动车等

收稿日期: 2016-04-25

作者简介: 李喜来(1963), 男, 河北保定人, 电力规划设计总院副总工程师, 电网工程部主任, 教授级高级工程师, 学士, 主要从事电网设计研究、咨询评审等方面的工作(e-mail)xlli@eppei.com。

新的用电方式的出现,中国的电网也面临着诸多挑战,同时也迎来了新的机遇^[2-4]。面对挑战与机遇,须提高电网对大型煤电、水电基地,特别是风电、太阳能发电等新能源基地的接入和消纳能力;加快配电网建设和智能化改造,提高电力系统对分布式能源的消纳能力,以及适应新的用电方式的转变;将电网建设成为各种能源方式转换和传输的主要通道,打造能够适应未来社会经济发展需求的能源互联网^[5]。

1 中国电网技术的成就和未来规划

1.1 中国电网技术的成就

解放后新中国交、直流输电电压等级的演变历程如表1所示。

表1 中国输电网交、直流电压等级

Table 1 AC & DC Voltage Classes of the Grid in China

类别	交流			直流		
	电压等级/kV	投运年	工程名	电压等级/kV	投运年	工程名
高压	110	1952	京津唐	±100	1987	舟山
	220	1954	松东李			
超高压	330	1972	刘天关	±400	2011	青藏
	500	1981	平武	±500	1990	葛上
	750	2005	官兰	±660	2010	宁东
特高压	1 000	2009	晋南荆	±800	2010	云广/向上
				±1 100	预计 2018	—

在交流方面,解放初期主要以交流 110 kV 和 220 kV 为主,1972 年通过刘天关输电工程将电压等级提升到 330 kV,1981 年第一条 500 kV 平武工程投入运行。2005 年,官亭—兰州 750 kV 输变电工程投运,此后 750 kV 逐渐成为西北地区主干电网。2009 年,中线特高压示范工程建成投运,中国输电电压从此跨入特高压领域^[6]。

在直流方面,国内第一个工程是 ±100 kV 舟山工程,之后建设了 ±500 kV 葛上工程,2010—2011 年间又相继建成了 ±400 kV、±660 kV、±800 kV 的直流输电工程。预计 2018 年还将建成 ±1 100 kV 的准东—华东直流输电工程。从等级上看,中国的直流输电电压等级不仅是世界上最高的,而且种类也是最齐全的。

从电网规模上看,截止 2014 年底,中国 220

kV 及以上输电线路长度达到 57.2 万 km(相比美国 2012 年约有 200 kV 以上线路 30 万 km,中国接近美国 2 倍),变电容量达到 30.27 亿 kVA。中国电网规模已稳居世界第一位。

从电力流上来看,截至 2014 年底,中国发电总装机容量 13.6 亿 kW,西电东送电力流规模约 1.3 亿 kW,其中火电电力流 6 483 万 kW,水电电力流 6 264 万 kW。

在电网规模显著扩大的同时,电网科技含量也在不断提高。在特高压直流输电技术方面,中国已全面掌握了各电压等级直流输电系统成套设计技术,攻克了 ±800 kV 特高压直流输电系统关键技术,创新了特高压直流设备材料制造技术。从工程上看,目前已建成云广、向上、锦苏、哈郑、溪浙、糯扎渡—广东等 6 项特高压直流工程,输送容量 500 万~800 万 kW,线路长度从 1 373~2 192 km;在建的工程还有灵绍、酒湖、锡泰、晋北—江苏等,输送容量最高提升至 1 000 万 kW。

在特高压交流输电技术方面,中国已形成了特高压系统电压控制技术,全面掌握了各种不同环境条件下的特高压交流外绝缘特性,攻克了特高压电磁环境控制技术难题,并且创新研制出全套特高压交流输电设备,自主形成了特高压交流工程设计、施工、试验和运行维护的全套技术。目前建成的特高压交流工程有 3 项,分别是晋南荆、皖电东送和浙北—福州工程。在建的还有淮南—南京—上海、锡盟—山东、蒙西—天津南、榆横—潍坊等工程。

目前共计已建成投运“三交六直”9 项特高压工程(国网“三交四直”、南网“两直”)。

柔性输电技术包括灵活交流输电技术和柔性直流输电技术。在灵活交流输电技术方面,中国已经掌握了 SVC、SVG、可控串补、可控高抗等灵活交流输电关键技术及设备制造能力;在柔性直流输电方面,攻克了柔直工程关键技术,具备大容量柔直输电系统研究、试验以及设计、施工、调试等整体实施能力,特别是在世界上率先攻克了多端柔直输电控制保护技术。

从工程上看:SVC、SVG、可控串补、可控高抗等灵活交流输电装置均有实际应用或者示范应用,已建工程有四川桃乡 500 kV 变电站 SVC 装置、广东东莞变电站 35 kV SVG 装置、广西平果

500 kV 可控串补装置、甘肃敦煌 750 kV 变电站可控高抗; 柔直输电目前也建成了上海南汇、广东南澳、浙江舟山等工程, 在建的还有厦门柔直工程和云南罗平等工程。

此外, 在常规的输变电工程领域中国也取得了许多重要的技术突破。例如: 500 kV 跨海交流输电技术、同塔多回输电技术、地下变电站、大容量变压器应用技术、高海拔等特殊环境下的输变电工程技术等。

1.2 中国电网规划展望

前述主要介绍了中国电网发展的成就, 以下初步预测中国至 2020 年电网规划。

截止到 2014 年底, 中国发电总装机 13.6 亿 kW, 其中火电 9.2 亿 kW、清洁能源 4.4 亿 kW, 2014 年全社会用电量 5.5 万亿 kWh; 有关研究对 2020 年中国的电力需求和发电装机初步预测是: 2020 年全社会用电量预计将达到 7.4 万亿 kWh, 中国装机规模预计将达到 20 亿 kW, 其中新能源的比重将进一步提高。

从电力流上看, 纳入“十三五”规划的新增电力流大约是 0.95 亿 kW, 其中水电电力流 1 300 万 kW, 火电电力流 8 240 万 kW, 新增风电消纳能力 2 400 万 kW。

图 1 给出了目前已经明确的输电通道, 大部分工程都已开工。

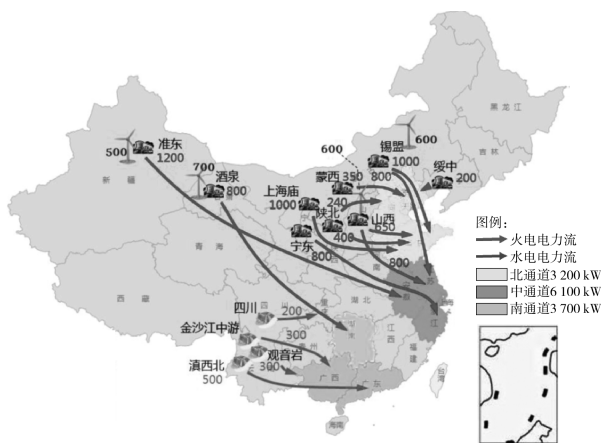


图 1 中国电网输电通道示意图

Fig. 1 Power Flow in China

在未来规划通道中, 东北的电力外送通道建设扎鲁特—青州 ± 800 kV 直流输电通道, 以及锡盟—张北风电搭送方案、四川外送方案、乌白水电外送方案等一批重要输电通道正在论证之中。

2 中国电网技术面临的挑战

当前中国电网技术面临的挑战主要体现在以下六个方面。

2.1 大型能源基地输送需求

2.1.1 传统能源基地送出

由于中国能源结构特点, 在未来相当长时间内, 煤电在中国电力供应中仍将占主导地位。中国煤炭资源分布呈西部、北部富集, 而东部、南部较为缺乏的特征, 同时东中部负荷集中地区面临大气污染防治压力不断加大的境况。加强西部地区 and 北部地区的大型煤电基地的电力外送, 有助于缓解东中部地区大气污染状况并促进西部地区资源优势向经济优势的转化, 对优化能源资源配置、促进区域协调发展和生态文明建设具有重要意义。

水电作为清洁能源在中国电力供应构成中仍是不可或缺的组成部分, 中国可开发的水电资源集中于云南、四川、西藏等西南地区, 进一步开发金沙江、澜沧江、大渡河、雅砻江等流域的水能资源仍是中国水电发展的重要方向。

综合而言, 煤电和水电等传统能源资源呈集中式分布, 利于建成大型煤电、水电基地进行电力的集中大容量送出, 但输送距离较远, 且面临自然条件恶劣、生态环境脆弱等问题。

2.1.2 大型风电、太阳能发电送出

中国的风电和太阳能资源开发具有集中和分散并举的特点。其中, “三北”地区风能资源丰富, 中国的大型风电基地多数位于“三北”地区, 利用跨省或跨区输电通道扩大风能资源的配置范围是大型风电基地消纳的一个重要手段。

另外, 由于中国西部的气候和地理特点, 适宜建设大型太阳能地面电站, 光伏、光热等太阳能发电形式正在快速发展, 由于其与大型风电基地等存在地理位置上的重叠, 因此大型太阳能发电基地的电力也可与风电基地等共同跨省或跨区送出。

清洁能源的利用是未来发展的方向, 且随着清洁能源发电成本逐步降低, 将来会快速发展, 但大规模新能源的输送和消纳仍需进一步研究和解决。

2.2 分布式能源接入的挑战

全球电力供应出现由传统的集中供电模式向集中和分散相结合的供电模式过渡的趋势。分布式光伏发电遵循因地制宜、清洁高效、分散布局、就近

利用的原则,可利用当地太阳能资源,替代和减少化石能源消费,并降低电能传输损耗。分布式电源对优化能源结构、推动节能减排、实现经济可持续发展具有重要意义,且分布式电源建设成本在逐步降低,中国正在积极推进在城镇化发展过程中充分利用太阳能,扩大分布式光伏发电应用,建设分布式光伏发电规模化应用示范区、示范小镇及示范村,分布式光伏发电正在飞速增长。

由于分布式能源具有波动性、分散性、发电方式多样性和时空互补性等特点,极大地影响了配电网对分布式电源的接纳能力。大量分布式电源的接入,使配电网的管理变得更为复杂,会造成配网线路上电压分布改变,电力电子器件的频繁开断会对电能质量产生影响,同时还会影响继电保护。

中国的配电网大多为单电源放射状结构,因此从改变电网结构和运行模式入手,是解决分布式能源接入现有问题和应对未来挑战的重要手段之一。

2.3 节能环保及资源约束

按照国家节约发展、清洁发展、安全发展的要求,中国相继出台了多部法律法规和相关政策,对电网节能环保、提高资源效率提出了更高要求。

从节能角度,电网仍具备优化空间。2014年全国的电网综合线损率为6.34%,高于日本、德国、美国,低于俄罗斯和巴西,总体处于同类资源与负荷密度条件国家中的先进水平^[1]。随着电网规模增长和电力变压器、输电线路技术升级改造的不断进行,同时结合智能电网的发展,综合线损率有待进一步下降。

在环境保护方面,随着中国经济社会的发展,其对电网发展提出了更高的要求。

一方面,为应对碳排放、大气污染、水资源匮乏等环境压力,需要大力发展电网和优化电网结构。大容量、远距离的输电方式有助于减轻东中部地区的污染和资源紧缺,智能的配电网对分布式清洁能源的接入具有重要意义。

另一方面,电网建设和运行会对周围环境产生影响,地方规划、电磁环境、生态保护、水土保持等要求均对电网建设产生制约,建设环境友好的电网已经成为电网建设的重要理念。

随着中国的经济发展,资源约束逐渐显现,对于电网而言,土地资源的紧缺尤为明显。土地资源紧缺会导致电网建设成本加大,与邻近设施的相互

矛盾增多,对电网的建设和安全运行不利。而随着经济的不断增长,可预见未来的土地资源必然更加紧张,由此对电网在土地资源高效化利用上提出了更高的要求。

同时,电网建设中还应秉承集约化和减量化原则,减少材料消耗和运行维护成本,提高资源的利用效率。

2.4 智能化与信息化潮流

2.4.1 电网智能化

电网智能化具有高度信息化、自动化、互动化等特征,可以更好地实现电网安全、可靠、经济、高效运行,对传统电网的发展模式提出新的挑战。发展智能电网,是进一步提高电网接纳和优化配置多种能源的能力、实现能源生产和消费的综合调配的要求,是推动清洁能源、分布式能源科学利用的要求,是全面构建安全、高效、清洁的现代能源保障体系的要求,是支撑新型工业化和新型城镇化建设、提高民生服务水平的要求。目前,世界主要国家均开始积极推动智能电网的建设。

国家能源局《关于促进智能电网发展的指导意见》(发改运行[2015]1518号)文件中明确指出^[7]:全面提升电力系统的智能化水平;全面体现节能减排和环保要求,促进集中与分散的清洁能源开发消纳;与智慧城市发展相适应,构建友好开放的综合服务平台,充分发挥智能电网在现代能源体系中的关键作用。并要求“到2020年,初步建成安全可靠、开放兼容、双向互动、高效经济、清洁环保的智能电网体系,满足电源开发和用户需求,全面支撑现代能源体系建设,推动中国能源生产和消费革命;带动战略性新兴产业发展,形成有国际竞争力的智能电网装备体系”。

2.4.2 电网设计、施工、运行维护的信息化

1)在工程勘测中,开展大数据应用,深入开发和广泛利用勘测信息资源,包括基础地理信息、地下管网信息、控制点信息、规划道路数据等数据库,可以提高勘测设计的效率。

2)电网设计中,三维设计能够直观表达、利于协同作业,是设计的主要发展方向;需要更新设计思路,将目前的“平面设计”变成“立体设计”,还需要发展三维设计软件并统一设计标准。

3)中国的输变电施工技术已走上了世界的前列,但施工技术体系建设以及施工设备的研发和配

置方面与发达国家相比还存在较大差距。需加强施工专用自动化设备的开发和研制,提升施工机械化水平,减少人力介入环节,降低人力劳动强度;同时加强施工组织和管理的信息化水平,以计算机辅助管理优化施工流程。

4)运行维护的信息化和智能化已逐步开展,基于设备信息化和智能化的发展趋势,在运行维护中进一步提升无人值守水平、发展设备免维护技术、加强状态检修和寿命预测的应用,降低运行成本和提高运行维护效率。

2.5 用电侧的新要求

智能化的用电设备、互动化的用电要求、电动汽车及储能装置的应用是用电侧的新变化,对电网提出了新要求,并引导电网适应和发展。

互动化用电要求电网侧与用户侧之间能够实现电力流、信息流及业务流的双向互动,使用户享受到智能化、多样化的优质服务。随着智慧家庭、智能家居的发展,用电设备的智能化趋势日渐清晰,智能家电要求与智能用电管理主站的信息交互,在物联网基础上实现智能化用电管理。构筑便捷、低碳、经济的新型社区、智能小区、智慧城市,需要能够提供双向互动并支持“三网融合”的服务。

分布式能源、储能设备和电动汽车的发展对配电网的运行模式提出了新的要求。传统配电网并未考虑分布式电源的接入,在并入分布式电源后,网络的结构发生了根本变化,将从原来的单电源辐射状网络变为多电源网络。储能设备在电网中的应用极大的提高了电网的灵活性,对改变电网运行方式起到重要作用。电动汽车符合低碳出行的概念,对国家长远能源战略发展将起到重大的作用,其不仅是电力消费体,还可兼顾电网储能的功能;电动汽车充电对电网的适应性提出了更高的要求,同时还可提高电网接纳分布式电源的能力,进而提高电力系统运行的稳定;适应电动汽车的发展积极探索配电网发展新思路,电动汽车用户、电网企业和汽车企业将获得共赢。

2.6 电网技术“走出去”的挑战

中国的电网技术已基本达到国际先进水平,特高压技术已居于世界领先地位。中国电网的设计、施工、运行企业及装备制造企业能够利用先进技术对其它国家进行电网技术和装备输出,已具备电网走出去的先决条件。例如中国参建巴西美丽山水电

站送出 ± 800 kV特高压输电工程,成功运营了巴西、葡萄牙、澳大利亚、意大利、菲律宾等国家的骨干能源网。

参与建设、运行国外的电网项目,要求国内企业能够满足国际标准的要求,能够适应项目所在地的环境和需求,对电网技术走出去提出了挑战。

中国与邻国的跨国互联的电网项目日益增多,已建多条互联互通输电线路,并规划了与俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦和巴基斯坦等国间建设多项电网互联互通工程,这给国内电网的建设和运行提出了新的要求,也是中国电网技术国际化的重要窗口。

中国以更加自信的姿态融入世界,积极开展构建全方位、多层次、复合型的互联互通网络,确立了“一带一路”的战略部署,为中国电网技术“走出去”提供了良好的发展机遇,要求我们发挥技术优势,配合国家“一带一路”战略的实施,扩大中国电网技术在国际上的影响力。

国际标准与中国标准之间的差异,已成为中国电力设备出口、中国企业参与国外电力建设工程、投资运营国外电力项目的瓶颈。加强技术交流,打破沟通屏障,掌握国际标准,查找标准差异,不断吸收国际先进标准,努力促进中国先进的电力标准国际化,是推进中国电力行业整体出海的必经之路。

3 现代电网技术的发展方向

现代电网技术的发展方向主要体现在以下八个方面。

3.1 大容量、远距离输电技术

中国已经建成了多条特高压交、直流输电工程,特高压输电技术位于世界先进水平。特高压交、直流输电工程的成功实践引领了世界特高压输电技术的创新和进步。

为进一步提升特高压交流输电能力和运行灵活性,需要研制大容量变压器及特高压套管,并研究适用于特高压远距离电源送出的高补偿度串补、可控高抗及直挂式大容量 SVC 等装置。为进一步增强远距离输电能力,需提升 ± 800 kV 直流输电工程的输送能力,发展 ± 1100 kV 级特高压直流输电技术,并开展更高电压等级直流输电方案的前期研究工作,从而使中国在特高压输电技术领域持续领先,使中国特高压装备在国际市场

上具有较强的竞争力。

针对中国大型能源基地采用特高压技术进行大容量、远距离送出的特点,还需开展大容量特高压直流接入交流系统的稳定性和故障恢复特性研究;开展大容量交直流特高压输电的故障电流限制关键技术研究;开展交直流系统之间的相互影响的研究,着重于大容量特高压直流输电对常规交流网络形成直流偏磁的对策研究。

在特高压技术充分安全可靠的基础上,推进特高压技术输出,可望在全球范围的资源优化配置中发挥重要作用,在全球能源互联网的形中发挥骨干网架的作用。

3.2 智能电网

电网的智能化要求建立智能化的调度运行控制技术,发展分布式能源友好接入技术;配合“互联网+”智慧能源行动计划,加强移动互联网、云计算、大数据和物联网等技术在智能电网中的融合应用;加快灵活交流输电、柔性直流输电等核心设备的国产化;加紧研究高比例可再生能源电网的运行控制技术、主动配电网技术、能源综合利用系统、储能管理控制系统和智能电网大数据应用技术等;为推进能源互联网建设提供技术准备。

针对当前电力系统中的传感器、通信单元与一次设备的集成度低、长期运行可靠性差等问题,发展传感器模块化、小型化、集成化技术;研制全光纤电流互感器;实现一次设备与二次设备的高度融合,同时进一步实现智能传感器实用化。

构建基于大数据的计算分析和决策平台,整合智能电网数据资源,挖掘信息和数据资源价值,全面提升电力系统信息处理和智能决策能力;研究面向电网生产运行的信息安全综合防御体系和监测预警技术,提高智能电网运行的可靠性和安全性;推广智能计量技术,推广区域性自动需求响应系统、虚拟电厂及合同能源管理方案。

发展高性能的输变电设备,推广智能变电站,合理部署灵活交流、柔性直流输电等设施,提高系统运行灵活性;推广输变电设备状态诊断、智能巡检技术;建立电网应对故障和灾害的自愈系统;部署配电网自动化系统,发展主动配电网技术,满足分布式能源的接入需求。

3.3 柔性输电

柔性交流输电(也称灵活交流输电)、柔性直流

输电以及直流电网的建设需要进一步加强大功率可控型先进电力电子器件的研发,并对电力电子变压器、高压直流断路器等关键设备进行研制攻关,提高柔性电网控制调度水平。

在柔性交流输电领域,需要进一步推广静止无功补偿器、静止同步补偿器、可控串联补偿器、可控高抗等设备在电网中的应用,并需要突破高补偿度串补、可控高抗及大容量静止无功补偿器的系统集成关键技术。

对于柔性直流输电系统,其可以快速独立地控制功率交换,适合应用于连接新能源电源、弱交流电网互联、偏远负荷供电、提高配电网电能质量等方面。为推广发展柔性直流输电,亟需先进电力电子设备的研制,开展大容量、高电压柔性直流输电成套设计技术和关键设备研制。为进一步拓展柔性直流输电的适用性,需要开展适用于架空线传输的超大容量柔性直流关键技术研究。为进一步提高设备性能,需要开发高功率密度 IGBT、IGCT 器件等。为进一步深化多端直流输电技术,需要加强直流电网关键设备的研制,提出电力电子变压器的实现方法与拓扑结构,研制高性能、低成本的高压大电流直流断路器,提出直流电网关键技术并建立相关标准。

3.4 分布式能源接入、配用电及微电网

分布式能源接入需要改变现有配电网的运行模式,不但需要开发高比例可再生能源电网运行控制技术,并且需要发展微电网技术、主动配电网技术、能源综合利用系统、储能管理控制系统和智能电网大数据应用技术等。

针对中国分布式电源大规模、高比例推广利用的新形势,重点突破大规模、高渗透率分布式电源并网集成和控制技术。重点解决高比例可再生能源接入弱电网的系统稳定问题,发展可再生能源和常规电源联合优化调度技术、储能系统与电网协调优化运行技术。推广具有即插即用、友好并网特点的并网设备;推广柔性直流输电技术,发展适应于分布式电源接入的交直流混合配电网技术。在偏远区域,积极发展高可再生能源渗透率的多能互补的微电网技术,发展多微网互联技术,保障偏远地区的供电可靠性并因地制宜提高其供电经济性。

分布式能源的接入与智能用电是相辅相成的。针对智能配用电领域的需求,需要建立支持分布式

发电、储能、电动汽车等分布式能源的高渗透率接入和“即插即用”的新型配电网架结构。

发展适应多种发电形式和用户影响的主动配电网运行控制技术、自动需求响应与智能互动用电技术、基于大数据的电力市场研究等。

3.5 新形势下的先进调度

中国电网规模庞大,分层分区情况复杂,跨省跨区交易情况较多,同时国家积极放开售电侧,电力市场环境将更加复杂,在智能电网条件下对电网调度提出了更高的要求。

研究大电网一体化优化运行的关键技术。发展广域测量技术,研究风险量化分析,建立控制决策支持系统。实现调度生产全景监视、智能告警,电网运行数据和分析结果的全面整合、共享和多角度可视化展示的相关技术。

发展在线安全分析评估技术、辅助决策和安全防御技术。研究市场环境下安全约束经济调度,研究日前、实时节点电价计算方法。

发展电网频率、电压、潮流等的自动调整和控制技术。发展适用于新能源并网的优化调度和灵活快速调控技术。建设电力需求侧管理平台,探索灵活多样的市场化交易模式,建立健全需求响应工作机制和交易规则,实现用户与电网协调互动。

研制适用于智能配电网的先进设备。研制性能可靠的多功能智能光伏并网逆变器、分散式测控计量装置、适用于微电网的自同步电压源逆变器、能量管理系统等关键设备,研制新一代全控型半导体器件。

3.6 设计、施工与运维的信息化

三维协同设计是设计的未来发展方向,不但能够把输变电工程设计转变成直观的三维仿真模型,提升设计效率和精准度,也能够实现各专业应用数据的互通共享、同步设计。形成的三维数字化设计成果,可用于实现施工过程的可视化管控,以及运行维护的信息化管理等方面,提高电网运维数据的可获得性和准确性。

在施工方面,主要是提高施工机械化、信息化水平。包括加强施工组织和管理的信息化水平,以移动互联网辅助管理优化施工流程;推广电网工程施工机械化技术,研究新型专用施工装备及其安全评价与防护技术;研究信息化施工技术,在施工过程中利用各种监测系统获得的信息,以保证施工安全,提高施工效率。

在运维方面,目前直升机、无人机、机器人巡检及PDA智能系统等多种智能巡检方式已逐步开始试点和推广,电网的三维数字管理系统已开始应用。接下来,还需进一步提高在线监测系统的应用水平和可靠性;进一步发展智能评估诊断技术、基于风险评估的状态检修技术,开发智能防灾技术,实现电网的全寿命周期管理;完善直升机巡线检修作业体系,加快无人机巡检观测数据传输及处理系统建设,积极推进无人机在输电线路巡视中的实用化;提高机器人自动巡检系统在变电站中应用的实用性,提高机器人抄表的准确率;研制可穿戴设备和巡检智能设备,提高巡检人员与智能变电站控制中枢的结合紧密度。

3.7 节能环保与资源高效利用

目前,电网发展积极贯彻国家关于节能减排和环境保护的精神,已产生了积极的效果。但随着集约化发展和环境要求的不断提高,对节能环保技术提出了更高的要求。

变电方面的主要技术发展方向包括:应用智能化技术整合一、二次设备以减少投资和占地;采用可控高抗技术节省线路和高抗自身运行的损耗;利用高抗抽能技术作为站用电源减少征地和线路损耗;推广建筑节能技术的应用,如采用新型保温墙体、节能门窗等维护结构;研制低噪音输变电设备、材料,并进一步研究噪音控制措施;因地制宜地充分利用风能、太阳能和地热能等可再生能源等。

线路方面的主要技术发展方向包括:积极推进大截面导线和节能导线的应用,有效降低电能损耗;积极推广同塔多回路架设方式,节约土地资源,提高单位走廊输送效率;进一步研究紧凑型输电技术,压缩输电走廊;进一步应用电缆及气体绝缘输电线路(GIL)技术,积极推进330 kV以上电压等级交联聚乙烯电缆的国产化,推进海底电缆的制造及敷设施工技术,加强直流电缆研制、适应柔性直流输电的发展要求,积极开展适用于高电压等级的PPLP电缆的研制工作,以及气体绝缘输电线路试点应用;推广锚杆基础等新型基础,减少对环境的影响;进一步开展Q460级及以上等级的高强钢、超高强钢在输变电工程中的应用研究,深入开展复合材料杆塔的研究与应用,降低其造价的同时进一步提高其电气性能和结构强度,拓展其在高电压等

级线路中的应用空间。

3.8 设备国产化与标准的国际化

3.8.1 电网设备的国产化

目前,随着国内电网技术的快速发展,中国在电网技术上整体处于世界先进水平,在特高压输电、柔性输电、智能电网、微电网等领域取得了很大的发展,但在基础材料研究与关键设备制造能力等方面还有待进一步提升。

加强特高压交、直流输电装备核心部件的自主研发。如直流方面的换流阀侧套管、换流阀整体工艺、直流穿墙套管、直流开关等;交流方面的1 000 kV 交流套管,特高压 GIS 设备核心部件等。

在柔性交流输电领域,需要研制更高电压等级和更大额定容量的静止同步补偿器(SVG),并进一步降低损耗和提高可靠性。故障电流限制器 FCL 的产品性能还需进一步完善,静止同步串联补偿器 SSSC、统一潮流控制器 UPFC 等在装置的实用化进程方面仍有许多工作要做。

在柔性直流输电领域,应将研制重点放在新型大容量电力电子器件、高速阀控设备、直流断路器以及高电压等级直流电缆等方面。

3.8.2 电网标准的国际化

目前,中国的电网标准主要立足于国内情况进行编制,部分借鉴和参考了国外标准,随着中国电网技术的发展,不但要使中国电网建设逐渐适应国际标准要求,也需要将中国的国内标准推向世界。

具体说来,一是要积极掌握国际标准,找出中国现行电网标准与国际主要标准的差异,提出完善的建议,并使中国的标准积极向国际标准靠拢,为中国标准在未来国际标准体系中占据有利位置做好准备;二是积极加入 IEC、CIGRE、FIDIC 等国际组织,在对外建设项目和合作项目中积极推广先进的中国标准,逐步提高中国标准在国际上的认可度,推动中国特高压技术标准国际化,提高中国电力企业的国际竞争力;三是在对外项目中主动输出中国标准,根据国外项目的反馈经验不断修订,提高中国标准在国际市场的适用性。

4 结论

回顾中国电网发展历程,中国电网从无到有、从小到大、由弱到强,目前已居于世界前列,为国民经济的发展提供了有力的保障。与此同时,中国

电网技术也逐步提升,并在近年来取得快速发展,整体处于世界先进水平,特高压技术已达到世界领先水平。

新能源的开发利用为中国电网的发展带来了新的挑战与机遇,中国电网必须融入信息化和智能化的浪潮中,立足自主技术和产品,面向世界,适应新能源接入和用电方式转变的要求,进一步提高能源输送效率、保证电网的安全可靠性,满足用户和市场的需求,为社会经济的发展提供有力的保障。

中国已进入经济发展新常态、生态文明建设新阶段、能源生产和消费新时期,需要我们共同努力,使中国的电网技术水平迈上一个新的台阶,迎接全球能源互联网时代的到来!

参考文献:

- [1] 中电联统计信息部. 中电联发布 2009 年全国电力工业年度统计数据 [EB/OL]. 2010-07-16. <http://www.ccc.org.cn/xinxifabu/2010-11-28/33022>.
- [2] 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): 1-14.
ZHANG Dongxia, YAO Liangzhong, MA Wenyuan. China Electric Power Research Institute [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 1-14.
- [3] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3654-3663.
WANG Beibei. Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment in Jiangsu Province, Southeast University [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3654-3663.
- [4] 廖怀庆,刘东,黄玉辉,等. 考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 9-16.
LIAO Huaiqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Smart Grid Power Transfer Capability Analysis Considering Integrated Renewable Energy Resources and Energy Storage Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 9-16.
- [5] 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 Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. From Smart Grid to Energy Internet: Basic Concept and Research Framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [6] 《中国电力百科全书》编辑委员会. 中国电力百科全书(综合卷) [M]. 第3版. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [7] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于促进智能电网发展的指导意见 [L]. 发改运行[2015]1518号, 2015-07-06. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201507/t20150706_736630.html.