

# 智能电网研究进展及热点分析

国家自然科学基金委员会第 62 期“双清论坛”秘书组

智能电网的研究与实践,旨在实现风能、太阳能等可再生能源的大规模开发利用,提升传统能源的清洁高效利用率以及电网对用户的供电可靠性和安全性,以解决能源日益紧缺、气候变化、环境污染等人类面临的愈加紧迫的共同难题。近年来,世界各国高度重视智能电网建设。例如,美国智能电网建设是其电网现代化和经济振兴计划的重要组成部分,欧洲将智能电网建设作为其发展新能源发电的重要保障,澳洲、日本、韩国等诸多国家和地区也都提出了各自的智能电网发展方案。2010年7月19—20日的24国部长联席会议上组成了国际智能电网行动网(ISGAN),提出成员国在法律和政策领域开展国际合作,以加速清洁能源技术发展。其成员国涵盖了全球70%以上的国内生产总值(GDP)和超过80%的温室气体排放量,成为国际智能电网合作的最高等级政府合作平台。

中国也高度关注智能电网的建设。2010年6月7日胡锦涛总书记在两院院士大会上的讲话中提出,要“构建覆盖城乡的智能、高效、可靠的电网体系”。2010年3月5日温家宝总理在第十一届三次全国人民代表大会上所做的政府工作报告中提出,要“大力开发低碳技术,推广高效节能技术,积极发展新能源和可再生能源,加强智能电网建设”。国家科技部在《关于加快中国智能电网技术发展的报告》中明确提出了中国发展智能电网的目标和任务,并启动了国家高技术研究发展计划(863计划)重大项目“智能电网关键技术研发”,第一批项目已于2010年底通过论证。目前,智能电网已成为社会各方高度关注的热点问题,并将对中国未来电力行业、能源领域乃至信息、通信、家电、汽车、建筑等相关行业的发展带来重大影响。

智能电网涉及到能源、环境、社会和经济等多个方面,其发展需要宏观统筹规划和多行业、多领域的共同参与。但迄今为止,不同的参与方往往是从自身的角度出发,来理解和规划智能电网技术的发展,对中国智能电网发展模式和方向的看法也明显带有各自的行业烙印,因而缺乏统一的认识和顶层设计,长此以往必将对中国智能电网建设的健康有序发展造成障碍。本期“双清论坛”从智能电网未来建设与发展的基础理论与关键技术出发,汇集电气工程、通信及控制等相关领域的多学科专家,从大规模可再生能源发电、储能与并网技术、智能调度与控制保护、智能配用电系统、智能输变电装备与先进输电技术和智能电网通信与信息基础等五个研究领域入手,对国内外智能电网研究进展和热点方向展开研讨。以下分别就这五个领域进行概述和分析。

## 一、大规模可再生能源发电、储能与并网技术

可再生能源的大规模利用,实现对传统化石燃料发电的补充甚至替代,是解决能源危机、减排CO<sub>2</sub>的关键途径。因此,世界各国在大规模可再生能源发电及并网方面开展研究,取得了丰硕的成果,尤以风电、光电的发展最为突出。

在大规模风电并网方面,欧盟是世界上风力并网发电技术水平最高的地区,欧盟议会及各国政府均设立了与风电并网相关的重大研究课题,以推动风电技术整体水平的不断提高。

在欧盟第六框架项目大规模风电并网(SUPWIND)资金的支持下,丹麦可再生能源国家实验室(Riso)研制并开发了名为威尔玛(WILMAR)的含风力发电的电力系统调度计划制定软件,通过风电预测的结果以及日前电力市场的交易情况,制定详细的机组调度日前计划。在欧盟“为陆地和海上大规模风电场的建设开发下一代风资源预报系统”(简称Anemos)等项目的支持下还将进一步研究主动式的负荷管理以及储能技术,以提高可再生能源电力接入电网的灵活性以及电网稳定性。

结合风机模型与短期功率预测的研究,德国风能和能源系统技术研究所(IWES)正在帮助德国的电力运营商实现风电的区域间的交换与平衡。IWES实验室联合了电网运营商ENE和VE-T、风机制造商Enercon公司、气象预报服务部门德国气象局和卡塞尔(Kassel)大学,合作开展了名为“大型海上风电场的并网运行”的重大课题研究,在保证电网经济性与安全性的前提下,对陆地及海上风电场接入电网的安全运行、控制及调度开展了深入研究。

荷兰在大规模风电并网方面有we@sea研究计划和EOS研究计划,前者针对大型海上风力发电及其商业利用展开研究,后者主要研究包含多种可再生大规模分布式能源的电网设计。

目前进行全国风电场集中控制的国家只有西班牙。西班牙系统运营商(REE)建立了一个可再生能源控制中心(CECRE),对全国的风电场进行集中控制。其控制分为四个层次,从底层到顶层依次为:风机控制、风电场控制、发电站控制和CECRE控制。CECRE设定了两种风电出力控制模式,即风电最大出力限制模式和风电出力减少模式。当电网发生某一故障时,CECRE能够有效地控制全国风电出力,从而保证电力系统安全稳定运行。

在大规模太阳能发电及接入系统方面,美国是太阳能发电技术世界领先的国家。为推动太阳能发电并网技术的发

展,2007年由美国能源部牵头,发布了名为“可再生能源的系统接入”的研究课题,组织了包括通用(GE)全球研究中心以及美国可再生能源实验室(NREL)的专家参与该项课题。

中国风光资源和生产力发展呈逆向分布,即风能、太阳能资源丰富地区远离经济发达地区,因而,风电/光伏大规模集群开发、远距离送出是中国可再生能源开发的主要特点。中国风电经过近十年的快速发展,“规模开发、集中并网、远距离输送”已成为中国可再生能源开发利用的主要模式。这样的模式产生了种种弊端,例如:风电/光伏可再生能源电源的可控性不足,其多时空波动性和反调峰等特性导致电网调频调峰困难,系统稳定受到威胁,并且电源出力受限,经济性难以保证等等,由此而带来的风电/光伏可再生能源电源并网问题已经成为制约中国可再生能源发电规模化利用的瓶颈问题。截至2010年底,中国风电装机容量达到了4473.3万千瓦,居世界第一位;但实际年发电量仅500亿千瓦时,远低于美国的946.47亿千瓦时。甚至在2011年初春季节,西北、华北地区都发生了风电大面积脱网事故,凸显了风电并网的矛盾和问题。

除了网侧的输电瓶颈问题外,风电/光伏的可控性不足也是突出的问题。源于风资源的随机性和波动性特点,风电场的出力与常规电厂有较大区别,呈现较强的时空波动性。由于风电场侧控制能力不足,系统出现阻塞时常常会采用切除风机的简单手段实施安全控制,这无疑限制了风资源的充分利用,是风电发展的一大阻碍。

通过网源的协调优化运行,一方面提高风电的可控性,另一方面通过各种措施来增强电力系统的灵活性,提高电网对风电的输送能力,解决大规模风电的电网瓶颈问题,这样才能对风电予以充分利用,促进风电健康快速发展。

从长期来看,如果要充分利用可再生资源,将可再生能源作为稳定的主力电源来使用,就需要考虑风电/光伏的电能储存与转换问题。美国能源部认为,目前比较有前景的储能技术有6种,即飞轮储能、压缩空气储能、超导储能、超级电容器、化学电池储能和抽水蓄能。以上储能技术的基础研究部分放在美国能源部基础能源科学办公室进行管理,而开发和部署部分则通过美国能源部储能计划来推进。除了抽水蓄能外,很少有技术能够达到在电力系统大规模应用的发展阶段。

根据中国政府制定的国家发展目标,2020年可再生能源的发电比例可以达到15%以上,2040年之后可以达到30%或更高的水平,可再生能源将成为中国重要的替代能源。其中,2020年中国风电装机容量达到1.5亿千瓦,太阳能发电达到2000千瓦。可再生能源的时空分布特性以及电力生产过程与传统能源有诸多不同,甚至有本质的差异。大规模可再生能源发电以及所采取的各种电力电子接入技术,将对电力系统的结构形态、运行特性与控制方式产生根本性影响。特别是中国能源结构与分布特点,将使大规模可再生能源发电接入问题更为突出,急需建立可以指导大规模开发利用可再生能源的新理论和新技术。

## 二、智能调度与控制保护

智能电网是电源多元化、电网多层次、负荷多类型的复杂系统,对系统调度与控制保护提出了新的挑战;而随着智能电网建设的推进,信息化程度的大幅提高,各种传感器的大量应用和一体化监测平台的建设,将为研究多源互补经济运行理论及系统控制保护创造条件。

大规模可再生能源接入后,由于其输出的随机波动性难以准确预测,以及大量快动态电力电子装置的应用,给多能源发电协调、备用容量优化、频率电压调节以及大电网安全评估、控制与保护等带来了许多新挑战,对电网的一体化运行和统一协调控制提出了新要求,需要全面构建具备信息化、自动化、互动化功能的支撑体系。这对广域测量系统构建支撑平台提出了更高要求。广域测量系统(WAMS)以相量测量装置(PMU)为基础,具有描述系统动态行为的能力,在电力系统计算模型验证、状态估计、扰动录波、自适应保护、在线稳定预测与闭环控制等方面已开展了较为广泛的研究。国内外已有大量同步PMU在实际电网投入使用。

目前,国外的智能调度尚未形成体系。2008年美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰电力公司(PJM)提出了理想调度(Perfect Dispatch)的概念,主要侧重于有功调度,进行各种时间维度计划的协调以及实时计划与自动发电量控制(AGC)的配合。PJM认为,广域同步测量技术是保证大电网安全的重要手段,也是实现智能输电网的基础。目前,PJM主要从同步相量测量技术研究和先进控制中心建设着手,开展智能调度的工作。相比目前在电力行业中广泛使用的数据采集与监视控制系统(SCADA)而言,相量测量系统胜在其同步性和高速性——SCADA的数据采集与测量频率大约是每4秒一次,而在GPS高精度原子时钟的同步控制下,相量测量工具可至少以每秒30次的频率测量电网中各点电压和电流。根据美国政府的智能电网研究计划,未来3年内将在电网枢纽点新安装800个PMU,并将测量数据上送到几个超级数据中心(Super PDC),进而实现实时数据采集、全局状态感知、设备控制与参数调节以及系统的控制保护等各项功能。

国内对智能调度进行了许多有益的研究和探索。狭义的智能调度是指辅助调度员值班的调度辅助决策功能,目前已经成功应用于部分调度中心。广义的智能调度涵盖了调度中心全专业的智能化。目前,少数网省公司进行了有益的尝试,以调度员思维模式为框架,以可视化界面为功能展示方式,以互动计算为系统核心,进行电网智能调度系统总体思路的设计。但目前已有的成果无论从广度还是深度方面,都与真正的智能调度存在较大差距。

大规模可再生能源接入后,其故障电磁暂态特性及其对继电保护影响已成为研究的热点问题。可再生能源能量密度比较低,其发电机理与传统电源有本质区别,因此可再生能源在电源故障后,其电磁暂态特征发生很大变化,传统的保护原理和故障检测方法可能无法正常工作。目前国内外均已广泛开展各种不同类型风力发电机组,如鼠笼式异步风力发电机、双馈式风力发电机与永磁直驱风力发电机的故障特征

研究,也尝试采用受控电流源等值可再生能源电源,定性分析其对继电保护的影响。然而,由于风力发电机组与电网接口所用的变换器具有快速开关特性和电耐受能力较差等因素,其故障特性不仅受外部环境(风速)、发电机和变换器主电路拓扑结构的影响,还与故障下变换器控制与保护作用有很大关系,尚需进一步研究分析。

利用广域信息系统可以实现大规模电力系统的在线安全评估,同时完成系统保护和控制等功能。目前北美、法国、罗马尼亚、西班牙等国家或地区已经有广域保护与智能控制的雏形系统,并将投入试验示范运行。国内的电力工作者结合中国电网的特点,在广域保护与智能控制领域开展了大量的研究和实践,尤其在利用广域量测信息进行大电网安全稳定在线协调防御技术方面达到了国际领先水平。目前随着智能电网建设的推进,大电网广域保护与智能控制研究工作得到重视,也开展了相关研究工作。

### 三、智能配用电系统及微网

目前,世界上不同国家针对本国的能源和电网现状,制定了不同的智能电网发展目标。尽管由于国情不同使得每个国家发展智能电网的驱动力可能不同,但配电系统和用电系统的智能化是所有国家发展智能电网的重点所在。

美国能源部 2006 年启动的电网智能化 (GridWise) 研究,主要把目标放在负荷侧智能管理上;美国电力科学研究院开展的智能电网 (Intelligrid) 研究,与电网智能化项目相似,但更关心输配电网络和通信、信息技术的集成;2009 年,美国政府启动了《经济复苏计划》,智能电网领域总计支持 100 个项目,其中 90 个项目属配电和用电领域,占总投资的 96%。

欧盟于 2005 年提出智能电网计划,并在 2006 年出台具体的技术实现方略,作为欧洲 2020 年及后续的电力发展目标。该计划指出,未来欧洲电网应满足灵活性、可接入性、可靠性和经济性等四个方面的需求。智能配用电仍是其重点关注的领域。具体而言:意大利电力公司在 2001 年就安装和改造了 3000 万台智能电表,建立起了智能化计量网络;法国电力公司拟将法国目前使用的 2700 万只普通电表全部更新为智能电表,使用户可跟踪自己用电情况,并能进行远程控制;2005 年丹麦开展了微网 (Cell) 试点控制工程研究,在全系统崩溃后,微网可通过黑启动进入可控的孤岛运行状态,能显著提高配电系统的可靠性。

2009 年 3 月,日本政府公布了包括推动可再生资源 and 电动汽车发展等政策在内的智能电网发展战略,智能配用电是其重点关注重点,主要目的是实现太阳能等新能源的大规模开发,同时确保电网系统稳定,并强调节能、优质服务以及各种能源的兼容优化利用。日本电网经过多年的建设和改造,已经具备了一定的智能化水平,其可靠性已达到世界一流水平,今后的发展更注重提高资源利用率、降低配电网损耗、提高供电服务质量,以及开发储能技术、电动汽车技术等高科技产业等。

中国电力工业发展的特点决定了智能配用电系统必将

成为智能电网建设的关键,其原因在于:(1) 配用电网投资不足。长期以来,中国电力系统存在“重发、轻供、不管用”现象,配用电网投资欠账多,造成配电网网架薄弱、自动化与智能化水平低等问题。国际上发电、输电、配电的投资比例一般在 1:0.45:0.7 左右,而中国在配电系统上的投资远低于上述比例;(2) 中国配用电网性能与世界先进水平还有很大差距。在供电可靠性方面,2008 年中国城市地区平均每个用户的停电时间为 10.3h,农村地区 44h;而欧洲国家用户年平均停电时间只有 1h 左右,新加坡、日本的用户年平均停电时间还不到 10 分钟;在电能质量方面,中国电网谐波水平、电压合格率等与世界先进水平存在较大差距,一些地区的电能质量难以满足用户的要求;在网络损耗方面,中国配电系统线损率要比发达国家的线损率高 1%—2%,中国的系统设备利用率也较发达国家配用电设备利用率有一定差距;(3) 配用电网对供电质量有着决定性的作用。中国用户的停电时间 95% 以上都是由配电网引起的,其中 80% 以上是中低压配电网原因,要提高电力系统的供电可靠性,必须提高配电网特别是中低压配电网的技术装备与管理水平;(4) 分布式电源接入的影响主要在配用电网方面。分布式电源大量接入后,配用电网将由传统的功率单向流动的辐射型网络转变成为一个功率双向流动的有源网络,与之相适应,在配电网规划设计、保护控制、运行管理方法等方面都将出现根本性的变化;(5) 配用电网直接与客户联系是实现与客户互动的着眼点。配电网的规划设计与运行管理,特别是配电管理信息系统的建设必须充分考虑与客户互动的需求。

配用电系统直接面向用户,是保证供电质量与客户服务质量、提高电力系统经济效率的关键环节。而分布式电源与微网的广泛接入、大量电动汽车充放电设施的建设、交/直流配网并存、网状闭环运行模式、智能配电设备与柔性配电技术的广泛应用、用户与电网间常态化互动等,会使得未来配用电系统在组成结构、运行模式等方面发生重大变化,带来了许多新的问题。这些问题包括:(1) 高科技设备的大量应用以及自动化生产线的增加,对供电可靠性和电能质量提出了更高的要求;(2) 大功率冲击负荷和非线性负荷的增加以及未来大量电动汽车充电站数量的增加,使电能质量控制难度更大;(3) 可再生能源发电、储能装置等分布式电源在电网中的渗透率日益提高,其固有的波动性和随机性将对供电质量带来影响,给配电网设计、保护控制、运行管理带来困难;(4) 城市中日益紧张的空间资源,促使配电网主设备的资产利用率需要得到较大的提升;(5) 随着配电网智能化水平的提高以及与客户交互程度的逐步深入,使配电网自动化与设计分析系统面临海量数据的处理、共享问题,而分布式电源、柔性配电设备等的加入,更增加了问题的复杂性。

智能配用电网在规划思路、控制策略、运行方法与管理措施等方面,有一系列基础理论和关键技术等方面的问题需要解决,包括高级配电自动化技术、智能配电网信息集成技术、配电网智能分析与智能调度技术、配电高级资产管理技术、柔性配电/定制电力技术、智能读表与用户互动技术、智能

量测体系及技术、智能需求侧管理、智能电动车充放电技术、智能配电网传感与量测技术、智能配电网通信及集成技术,等等。总之,由于大量分布式电源、微网、电动汽车充电设施、用户侧的智能设施的广泛接入,智能配电系统将成为多源于互补性有源配电系统,传统的规划设计、运行分析、保护控制、能量管理等都将在思路和策略上发生根本性变化,相关的基础理论和关键技术问题需要更加深入的研究。

#### 四、智能输变电装备与先进输电技术

输电网是电能输送的物理通道,是连接发电、配电和用电等环节的纽带。先进的输电技术是构建智能输电网、满足新能源发展需要、实现资源大范围优化配置的关键技术。中国资源分布极不均衡,包括火电等传统电源和适宜大规模开发的风电、太阳能发电地点多数远离负荷中心,在未来15—20年内,中国的电力需求仍将快速增长。由于中国能源供应和消费之间呈逆向分布特征,一次能源集中在西部和北部地区,而负荷又集中在中东部和南部地区,因此,需要采用先进的输电技术,建设坚强的网架结构,进行远距离、大容量、低损耗、高效率的电能输送,促进水电、火电、核电和可再生能源基地的大规模集约化开发,以实现全国范围内的能源资源优化配置。

为了满足大规模电力的远距离、环境友好、安全经济的传输,需要研究智能输变电装备、先进输电技术与先进输电模式;同时,为适应规模化可再生能源发电的时空分散性与随机波动性特点,提升其可控性,需要研究大功率电力电子变换装置及控制技术。

此外,智能电网的特点决定了电力装备将依赖传感与信息技术向智能化方向发展。实现输变电系统智能化的主要技术领域包括:智能电网规划设计技术、输变电系统的建模和仿真技术、先进的输电技术、智能变电站技术、输变电系统在线安全运行控制技术、一体化智能电网调度与控制技术和高压设备智能化技术等。

一次设备是电网的基本单元,一次设备智能化是智能电网的重要组成部分,也是区别传统电网的主要标志之一。利用先进的传感器对变压器和开关等关键输变电设备的运行状况进行实时监控,进而实现电网设备可观测、可控制、可自我诊断,是设备智能化的核心和目标。

同时,为降低电力工业对全球气候变暖的影响,需开展环境友好型输变电装备基础理论与技术的研究。六氟化硫(SF<sub>6</sub>)气体具有良好的绝缘性能,但其温室效应强度是CO<sub>2</sub>的2万5千倍,经济发达国家大量的SF<sub>6</sub>设备已经被禁用或限用。总的来说,禁用是国际标准的总体趋势,迫切需要开展替代技术的研发。

在该技术领域需要重点关注灵活交流输电技术、柔性直流输电技术、超导输电技术,高压输变电设备在线监测及其智能决策技术,环境友好型高压输变电设备绝缘、实验及在线监测方面的理论与技术等。

#### 五、智能电网通信与信息基础

智能电网是将信息技术、通信技术、计算机技术和电力基础设施予以高度集成的新型电网,具有电力和信息双向流动的特点。研究信息获取、流动及其调控的规律,是智能电网的又一核心研究内容。

在通信网络方面,面对智能电网在信息通信技术方面巨大的需求和市场潜力,国外电信运营商、信息技术公司、软件公司均纷纷参与到智能电网的建设中。从2008年至今,如美国电话电报公司(AT&T)、威迅公司(Verizon)、T-Mobile公司等美国多家电信运营商,都以不同形式宣布加入到美国智能电网的建设中,通过与信息技术产业的软、硬件集成厂商和传感器网络提供商开展合作,拟利用其高速的通信网络设施提供数据通信回传业务,来实现智能电网的建设。

通信与信息化是智能电网建设的基石,下述若干关键技术问题需要特别给予关注:

##### (一) 信息集成

智能电网需要实时监控和分析系统当前状态,整合电网运行、保护、计费、停电、控制等实时信息以及各种管理信息与相关数据,而海量的信息与数据的分析、加工、提炼、传输等又需要先进的信息集成技术以及高速、双向、实时、集成、可靠的通信系统来支撑。为此,在信息与通信安全、通信与信息网络等方面,需要针对智能电网的需求开展深入的研究工作。

##### (二) 信息安全

随着通信技术和网络技术的发展,尤其是电力改革的推进和电力市场的建立,电网内部及电网之间的数据交换越来越多,基础信息设施对电网运行至关重要;另一方面,互联网技术的广泛使用使得病毒和黑客日益猖獗。电力监控系统 and 数据网络系统的安全性和可靠性已成为迫切需要解决的问题。

此外,随着通信协议标准化和互操作技术的逐渐推广,电力系统所面临的信息与通信安全风险日益加剧,必须进一步研究信息系统的安全建模、定量安全评估、攻防仿真分析等一系列关键技术,尤其是智能电网通信及数据网络的信息安全监视和脆弱性分析技术。

##### (三) 信息融合

作为智能电网的信息感知、传输、管理系统,电力信息化需要通过机器学习、数据挖掘等智能算法,来实施信息加工,进而为电网运行与控制服务,提升电网运行的经济性与安全性。因此,需要研究电力信息的融合技术,全面整合电力网、通信网、广域测量系统(WAMS)、数据采集与监视控制系统(SCADA)、互联网等多种海量信息源,从中挖掘有益于电网预测、运行、控制的信息。

总体而言,电能是现代社会重要的公用性资源,电力系统是为社会生产和居民生活提供公共服务的重要社会基础设施,在智能电网体系下,电力的社会服务职能将得到极大的提升,智能电网体系将成为能源优化配置的重要平台之

一。适应中国经济社会的快速发展,应对环境和气候变化,突破我国严峻的能源资源供应瓶颈,优化能源结构,实现安全、高效、清洁的电能生产、传输与使用,促进中国经济社会的可持续发展,这些战略需求都是中国建设智能电网的核心驱动力。

智能电网是在电力系统物理网络的基础上,应用先进的传感、通讯、信息、控制和储能等技术而构成的先进电力网络,目标是实现电力系统安全、高效、灵活、经济地运行。智能电网以深度信息化、全面互动化、电能清洁化、资产高效化、机制市场化、电网安全化、高度自动化、广泛分布式为特征,具备全方位、全过程、全要素的智能监测、诊断、通信、控制与决策能力,是电力和信息的综合传输平台。电网的智能化是长期持续的过程,智能电网技术会随着电网的发展和技术的进步而不断革新。

## 六、未来中国智能电网的发展方向 and 重点领域

中国智能电网的发展思路应结合中国的基本国情,深入分析中国经济社会、能源供应与电力行业可持续发展所面临的重大需求与关键问题,以我为主,实事求是,建设有中国特色的智能电网,以促进经济社会的持续快速发展,适应能源、资源和环境的多重约束,实现以电力为中心的高效的能量梯级利用,满足广大用户的多样化电能需求,实现能源资源的高效优化配置。

建设智能电网具有广泛、积极的社会效益与经济效益,是转变经济发展方式、促进产业结构优化升级的重大举措,是孕育和形成战略性高技术产业的重要引擎,对战略性新兴产业的培育和发展具有重要意义。智能电网是承载大规模清洁能源并网发电的重要载体,将促进全社会低碳经济的发展和大规模的节能减排,也是提高电网资产利用效率、输电和用电能效的必由之路,将全面实现安全、清洁、高效、优质的电力供应。

智能电网是一个广泛联系、开放融合的有机系统;其以电力行业为主体,整合并推动新能源、信息通讯、计算机、材料、仪器仪表、工业控制、交通运输等相关行业的先进技术,实现跨行业、跨学科、跨要素的技术集成创新。电网的智能化是手段和过程,而非目的。建设智能电网应始终以严谨的技术可行分析与全面的成本效益分析为依据。

“十二五”期间中国智能电网研究应关注的重点领域应集中在以下五个方面:

### (一) 可再生能源发电的接入、输送及消纳

大规模可再生能源发电随机波动特性及其对电网影响的研究;大规模可再生能源发电并网的多时空尺度预测、建模、仿真技术;对电网友好的特性各异的电源、储能与负荷多时空尺度协调优化调度控制技术;输送和消纳大规模可再生能源发电的电网发展优化规划方法研究;大规模风电的随机波动与电网动态特性的相互影响机理与动态控制研究;分布式可再生能源发电并入配电网或微网的关键技术研究;鼓励

电网输送和消纳各种可再生能源发电的政策措施研究和技术监督体系建设。

### (二) 大电网智能运行与控制

特高压、交直流混联、大容量远距离接续式送电条件下,大电网建模和仿真、在线安全分析与辅助决策、扰动源定位和广域控制等技术;考虑新能源随机特性的发输电系统规划、稳定性分析和优化发电调度技术;高渗透率分布式电源接入的调度运行技术;气象等电网运行环境信息的监测及电网调度运行技术;可预测输变电设备失效的特征量提取及监测诊断评估技术;基于电网运行状态或需求的设备智能化和协调控制技术。

### (三) 高效、自愈、互动的智能配电网与微电网

分布式可再生能源发电并网和即插即用组网控制技术;微电网综合仿真、优化规划、保护控制和能量优化技术;含分布式电源或微电网的配电网综合仿真、优化规划、保护和智能调度技术;适于分布式电源接入的高级配电自动化技术;配电网电能质量控制、柔性配电和定制电力技术;配电网能量优化和节能降损技术;智能配电网防灾减灾技术;智能配电网高级资产管理技术;支撑电动汽车发展的配电网关键技术;智能配电网信息集成和综合监控技术。

### (四) 智能输变电技术与装备

输变电装备潜伏性和突发性故障产生机理及故障特征信息,装备性能劣化的机理及特性信息;装备故障信息感知理论、采用新原理、新工艺、新材料的先进传感器及其与装备的一体化技术;装备故障特征信息辨识、提取及故障定位、装备运行状态评价、风险评估及预警理论与技术、装备寿命预测及全寿命周期管理;装备状态信息的网络化通讯技术,包括装备状态信息的网络化通讯体系构架、通讯模型、接口与通讯安全、多源信息的集成与融合技术;高压开关电器智能操作理论与技术;装备运行及故障过程的全数字化电磁仿真技术;融合大电网保护与控制的智能开关、变压器技术;基于电力电子的柔性输变电技术与装备。

### (五) 高质量电能、节能、双向互动的智能用电

智能用电需求响应多维度特性机理和综合价值评估的建模、仿真和分析;面向可再生能源消纳和高质量电能的自适应控制和协同优化的敏捷响应技术;双向互动的供需一体化时空协调优化调度技术;节能预警和能效精细化监测、诊断和管理技术;智能用电双向互动的运行模式及支撑技术;智能用电与实时电价、能效管理的协调机制与模式设计;用电海量信息的有效集成、评估、关联分析技术。

未来智能电网是融合能源流(电力)、信息流与现金流(资源高效利用)的三维互动电网,在智能电网研究中,应突出学科交叉与融合,不仅要在电气科学与工程、信息科学领域内实现充分交叉,而且应该和管理科学、其它能源系统领域(石油、天然气、煤炭)等进行充分交叉;还应着眼于未来电网的发展和服务模式,不应只看短期(5—10年)行为。

(责任编辑 岳臣)