



结合国情的智能电网研发路线

◆ 王明俊

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

0 引言

当前,特别是美国奥巴马政府将智能电网的改造列入美国经济复苏计划后,“智能电网”(Smart Grid或IntelliGrid)已成为一个热门话题。有关智能电网的各种论述常见诸报刊,举办智能电网论坛或研讨会时有所闻,有关单位还建立了智能电网的研究机构。

本文在阐述智能电网主要特征和国内外研发动态的基础上,仅就结合我国国情的智能电网研发路线进行了分析及讨论,试图得出一些有益的启示和思路。

1 智能电网的主要特征

全面涵盖发输配用电和电力市场的智能电网,很难用一个简单的统一定义来表述。当然,更不能从字面上作狭义理解,甚至采用一两项智能技术便宣称已建成智能电网。因为,“智能”主要突出地反映了智能电网有别于常规电网的自适应特点及其实现手段,而并非其体系结构的全部。尽管智能电网的定义有待于商讨和规范,但其有别于常规电网的主要特征,已逐步形成共识。比如:

(1)自愈。电网发生故障(含灾变故障)时,事件启动的快速仿真决策实现故障隔离,减小停电范围。故障区内,通过由分散发电、分布储能和需求响应资源(DR)组成的分布能源“主动地”提供辅助服务,而不是被动地坐视“离线整定、实时动作”的继电保护或稳定补救装置自行其事。

(2)供需互动。通过供需关口、上下双向通信,提供用电和市场信息并通过与用户住宅室内网络相连的智能电表,实现供需双方互动,从而促使

所有用户通过需求响应(DR)改变自己的用电方式,主动参与电网管理和市场竞争,并获取相应的经济利益,而不是像以前那样被动地按所定价格行事。

(3)推动节能减排。为了应对能源和环境的挑战,配电领域的风能、太阳能、地热能等可再生能源,以及相应的分布储能和插入式电动汽车等的快速发展,使电网结点和不稳定因素大幅度增加。智能电网的研发,可将节能减排和各类分散发电纳入电网和市场的监控管理,而不是作为单向的负荷效应和负荷管理处理。

(4)协调与自适应控制。在智能电网环境下,分属于发输配用电各个环节的集中/分散发电优化、市场运作,或是紧急状态下的故障隔离、网络重构,都涉及集中控制系统(EMS/DMS等)的相互协调和分布控制系统(如继电保护、就地无功补偿、稳定补救装置等)的自适应问题,而不仅是集中控制系统“各司其职”,分布控制系统的“离线整定、实时动作”。

(5)资产优化管理。智能电网实现对资产规划、建设、运行维护等的全寿命周期优化管理,并运用市场机制,通过供需互动推动节能减排等,提高发电效率,降低网损,推广储能应用,解决负荷率不高和设备闲置等问题,有效提高资产利用率,降低运行成本,减少或推迟电源和线路建设的投资,而不是单纯的设备管理。

可见,有别于常规电网的智能电网,涉及一次系统的网络拓扑结构、资产优化管理、事件启动的快速仿真决策、控制系统的协调自适应、分布能源和供需互动的入网管理及市场运作等诸多领域,因而很难归纳出一个简单的定义。因此,以特征辅

助取代定义,已成为当前描述智能电网普遍采用的一种方式。

2 智能电网研发动态

上述智能电网的主要特征,基本上也是当代电网所寻求改进的发展方向。其次,智能电网的研发和实施与当代电网的改进和发展一样,都必须依靠监管法规的推动和市场机制的激励,而且两者在发输配用电各环节之间也没有必然的先后顺序联系。因此,也可以说,当代电网的改进和发展,也是走向智能电网的前奏。但由于各国资源配置、监管决策取向、电力市场进展以及用户认知程度等的不同,其切入点、重点和先后顺序也必然有所差异。

2.1 国外智能电网研发动态

比较有代表性的是欧洲的20/20/20计划,和美国的Grid2030。

2006年,欧洲未来电网技术平台咨询理事会发布了《智能电网——战略规划文件》,要求在2020年前可再生能源增加20%、碳排放量减少20%和能源效率提高20%,故简称20/20/20计划。

为了实现20/20/20目标,采取了优化电网的基础设施、接入大量的断续的发电设施、推广信息与通信技术、采用主动的配电网络、改善和推广新型电力市场以及提高用户的用电效率等6项措施。

美国的Grid2030,为美国能源部于2003年7月所发布。发布后紧接着发生了震惊全球的“8.14”美加大停电,Grid2030随即纳入由美国电力研究院(EPRI)发起、突出自愈功能的IntelliGrid智能电网研发。2009年,奥巴马上台后即将智能电网改造列入美国经济复苏计划,因而更加引起对智能电网的广泛关注。

Grid2030是一个完全自动化的发输配用电网络,它能监控每一个用户和电网结点,保证电力和信息在所有结点的双向流动。Grid2030具有3层结构:上层为全国电网骨架,通过由低阻超导电缆和变压器组成的输电走廊,与包括加拿大和墨西哥的中层区域在内的互联网相连。区域内,长距离输电由升级的交流和扩充的直流线路实现,并大量应用先进的储能设备,以解决由于气候或其他原因所造成的供需失衡。基层的地方配电网、小型网和微电网,通过区域网与国家骨架网相连,从任何地方的发电商那里购买电源,并向用户提供服务。用户可以根据需要挑选电力供应,包括电价、环境

影响、可靠性和电能质量等,实现配用电分开的零售竞争。用户的分布式电源也可与区域网相连,参与市场交易和竞争。

突出自愈功能的IntelliGrid^[1],进一步将智能电网结构概括为市场、输电、配电、高压发电、分布能源(包括分散发电、分布储能和需求响应资源)、用户服务、IT服务等7个领域,当前已列出400多项应用功能,今后随着技术进步和最佳实践的出现可能会有所增减。这就是被称为走向下一代电力系统的交通图。

2009年1月25日,美国白宫发布《复苏计划尺度报告》,宣布将铺设3000英里(1英里=1.61km)输电线路,为全国近1/3的4000万个家庭安装智能电表。此外,还将集中对落后的电网进行更新换代,建立跨越4个时区的统一电网,实现太阳能、风能、地热能等的统一入网管理。

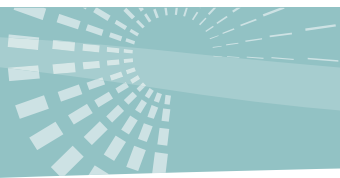
2.2 我国智能电网的研发

我国当前虽然尚处于发展智能电网的规划阶段,但发展智能电网的基础工作早已开始。

为了应对全球性环境和能源的挑战,必须大力推进发展可再生能源和开展节能减排工作。2007年9月4日,国家发改委发布的《可再生能源中长期计划》,制定了2010年到10%、2020年达15%的可再生能源发展目标。2007年8月,国家发改委、环保总局、电监会和能源办联合颁发了《节能发电调度办法(试行)》。它明确规定:“优先调度可再生发电资源,按机组能耗和污染物排放水平由低到高排序,依次调用化石类发电资源,最大限度地减少能源、资源消耗和污染物排放”。输配用电领域大力推动节能降耗,如制定电器能效标准,综合线损率要求到2010年降至6.3%等。

新技术的研发与应用方面,我国基于电力电子的灵活交流输电技术(FACTS),在研制和装备上已达到国际领先水平。此外,根据我国资源配置的特点,正在落实推广高效低排的煤气化联合循环(IGCC)发电技术,以及加强高温超导输电技术的研发。预计华能250MW IGCC示范工程均将于2010年建成。输电方面,清华大学研发的铋系高温超导电缆,已在北京英纳超导技术公司投入生产。

供需互动方面,正在结合拉动内需、积极筹建包括智能电表在内的新一代电力用户信息系统,用以支持电力市场的发展,并计及智能电网的研发和



实施。

国网公司现已建成并推广的SG186一体化企业级信息平台,包括安全生产、项目管理、物资管理、财务资金、营销管理、协同办公和人力资源等7大应用,以及信息安全防护、标准制度、评价考核等6项保障体系。SG186与新一代电力用户信息系统相结合,将为智能电网的信息化奠定良好基础。

对节能减排和与配电市场影响较大的插入式电动汽车,我国也取得了长足进展。2008年12月15日,世界第1款续行里程达100km以上、领先国外两三年的比亚迪F3DM双模电动车在深圳上市,2010年可望进入北美市场。

总之,全球走向智能电网,已大势所趋。由于全球的共同关注和参与,在跨世纪的研发和实施过程中,可以预期,技术创新和最佳实践将不断涌现。

3 结合国情的智能电网研发路线

智能电网的研发和实施是一项系统工程。由于各国资源配置、负荷中心布局以及自然环境条件等的不同,智能电网研发过程中,各自的突出问题必然会产生,如我国的西电东送、煤电为主等。因此,既不能不顾国情照抄照搬别人的东西,也要防止出现背离智能电网理念的“穿靴戴帽”现象,而应根据智能电网理念、结合我国国情、参考国外经验,制定“性价比”较高的研发路线,实现以下主要目标。

3.1 应对全球性环境和能源挑战

温室气体排放量日益增加导致全球变暖,已是一个不争的事实^[2]。《联合国气候变化框架公约》提出的最终目标是:“将大气中温室气体的浓度,稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上”。

等效CO₂的排放,主要来自火力发电厂、交通、工业、商业和住户。其中燃煤电厂和交通的比例为最大,且因国情而异,如美国分别为33%、33%。这也是为什么重视发展风能、太阳能、地热能等可再生能源和插入式电动汽车的一个重要原因。

能源方面,根据预测,2050年全球能源消耗将比2009年增加3倍,这将导致碳排放飙升,发电燃料价格上涨,从而迫使电价上扬。因此,各国更加重视、甚至立法推动各种可再生能源的发展。如美国加州率先将可再生能源的比例从当前的2%要

求提高到2010年的20%、2020年的33%。插入式电动汽车的大规模采用虽然是几年后的事,但美国太平洋西北国家实验室的研究表明,美国现有的发输电系统如果每天24h优化使用,则可足够支持插入式电动汽车替代率高达73%,减少52%的石油进口量。

可见,全球性的环境和能源的挑战,推动了智能电网的研发,以解决量大面广的可再生能源等各种类型的分散发电以及插入式电动汽车进入电网和市场后所引发的各种问题^[3]。

我国的太阳能发电总量已居世界第一。风力发电装机容量连续3年成倍增长,目前居世界第4。此外,国家能源局还将在2009年内进一步制定包括可再生能源在内的新能源发展规划。但根据国情,我国的一次能源结构在20~30年内仍将以燃煤发电为主,达60%~70%。水电资源到2030年即将全部开发完毕,石油、天然气需要进口,铀资源也有限。燃煤发电的主要问题是效率不高和环境污染。这是我国应对全球性环境和能源挑战的一个突出问题。

解决该问题的最好办法是积极推广煤气化联合循环(IGCC)发电技术。煤气化联合循环发电可以提高燃煤利用效率。一般大型IGCC电厂的效率可达50%左右,大大降低了碳排放量,并使SO₂和NO_x的排放量基本为零,因而大大减少了酸雨的危害程度。此外,还可减少1/3左右的用水量。当前,全球已建和在建的IGCC共有30座厂站。我国也在积极起步。

3.2 电网的安全自愈运行

据北美电网可靠性委员会(NERC)就美国1984~1997年(包括1996年“8.10”大停电)电网停电事故统计,每年影响1万~10万用户的停电次数为5~10次,影响10万~100万用户的停电次数为1~5次,影响100万~1000万用户的停电次数为0.1~1次。其中,40%的大停电事故由级联事件演变而成^[4]。

当代电网的安全控制中,紧急状态下的紧急控制主要由“离线整定、实时动作”的继电保护或稳定补救装置来实现的。这些自动装置除了不具备事态发展的评估能力外,如当离线模拟和在线实际出入较大时,还可能发生诸如保护动作过慢而导致的震荡或不必要的解列等问题。因此,必须通过加强正常状态下动态安全评估的预防性控制,

及时予以修正。

突出自愈功能的智能电网，采用了事件启动的快速仿真、评估事态发展、决定是否隔离、如何分区等技术措施。自愈功能除制止或缩小事态的扩大外，可通过由分散发电、分布储能和需求响应资源组成的分布能源(DER)提供故障区外用户辅助服务，以保证基本用电。

智能电网进行主动灵活分区实现的故障隔离，具有潜在的巨大效益。经对WECC179母线电网(发电61410MW、负荷60785MW)仿真验算表明：若该电网某线路发生故障后相继越限跳闸，则可能会导致系统崩溃。如果告警后分为两区，1区供电35685MW、无线路越限；2区卸负荷312MW、供电1786MW，则其总卸负荷率仅为0.51%。

通过长距离输电实现资源优化配置时，如何便于故障隔离、防止或缩小因灾变而可能导致的大面积停电，这将是我国西电东送所面临的一个突出问题。

与我国2008年冰雪灾害较为类似的加拿大H-Q系统，为了实现灾变后4天内恢复恢复50%、21天内恢复100%负荷的供电安全指标，根据系统特点，在4个方面进行了改进：①加强网络结构。建设蒙特利尔、南海岸和魁北克地区主要的735kV环网工程，用以减少影响后果。②加固主干线段。实施Duvernay和Manic两个735kV线段加固工程。③建设熔冰工程。在Levis或Boucherville变电站装设1组Statcom/DC，通过线路熔冰以限制复冰厚度；在区域电网内采用加热导线，用以提高负荷传输和低压短路的熔冰效率。④增加应急资源。如增加30MW移动紧急发电机。

3.3 电网的高效低耗运行

传统电网存在的另一个问题是运行效率不高。如美国，平均发电热效率为33%、输电损失2001年达9.5%、负荷率为55%，相当于45%的电力设备在非峰荷期间闲置未用。

智能电网除通过优化运行和资产管理，提高设备使用率和降低运行成本外，主要是推广地处负荷点、高效环保的可再生分布能源，支持包括插入式汽车在内的多种储能应用。此外，还采用高性价比的新技术，如高温超导、储能和电力电子技术等，对传统电网进行改造，使其适应电网的发展。其中，高温超导(HTS)技术可以通过狭窄通道向远方传输大量的电力，而网损电压降几乎为零。美

国能源部与Southwire公司合作的HTS示范工程，已于2000年2月在Atlanta投入运行。

为达到电网的高效低耗运行，除优化资产管理外，主要是采用高性价比的新技术对传统电网进行改造，而不仅是依靠升级换代。

综合线损率高和用电能耗大，是发展中国家普遍存在的一个突出问题。我国2007年总输电量为30622亿kWh，综合线损率6.93%(2122亿kWh)，如将线损率降至2007年发达国家平均线损率(4.5%)，则可减少线损744亿kWh，接近三峡水电厂2007年的发电量(770亿kWh)。用电能耗方面，我国的能源消费强度为世界经合组织国家均值的4.6倍。以单位GDP产出能耗计，如以耗能最低的日本为1，美国为2.67，而我国则为11.5。2005年亚行报告称：中国终端用电设备的总节电潜力约为2000亿kWh。

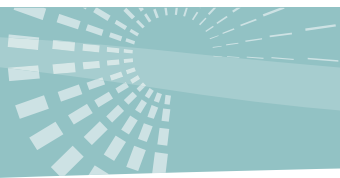
3.4 供需互动的双向服务

传统电网，特别是垄断经营时期的发输配用电，其关系是从上而下的单向供需关系。那些由用户控制启停的自备电厂，都被视为是虚拟负荷，即使接入配电系统，也不参与自动发电控制。甚至在配网侧安装逆功率继电器，正常时不向电网注入功率，更不用说量大面广的可再生能源发电了。随后，这些分散发电直接或间接地纳入需求侧管理(DSM)，在开源节流、改善负荷曲线方面发挥了积极作用，但单向的供需关系基本未变。

对电网而言，分散发电的启停可以看成是虚拟负荷的减少和增加。同样，负荷的减少和增加也可等效于虚拟发电的增减。随着电力市场的深入发展，负荷相当于潜在功率产品的价值正在日益凸现出来。智能电网下，需求侧管理将向需求侧竞价发展，单向的供需关系将形成双向的供需互动。

实际上，需求侧竞价(DSB, Demand Side Bidding)是DSM的一种实施机制。它使用户能够通过改变自己的用电方式主动地参与市场竞争，并获得相应的经济利益，而不是像以前那样被动地按所定价格行事。也可以说，DSM是一种能长期改变负荷特性的行为和机制，大多是由政府驱动。而DSB是基于市场的短期负荷响应行为和市场机制，主要由市场驱动。

参与需求改变量的竞争中，既可以竞价增负荷，也可以竞价减负荷。但为了实现DSB产品的规模效应，一般只有MW级以上的大用户或是多个同



行企业通过集总代理才直接参与需求竞价,小用户则是通过作为代理的供电商间接参与需求竞争。

DSB产品的用途,除了与发电商之间的双边合同外,还有包括各种形式的辅助服务(如频率控制、电压控制、备用和黑启动)、参与可中断供电合同或峰谷电价计划、在平衡市场中竞价增减出力以及缓解输配电阻塞等。值得注意的是,需求侧响应的瞬时性明显优于发电机,而其价格却仅为新建峰时发电的1/4到1/3。

可见,供需互动的需求响应资源,通过双向服务达到供需双赢,因而成为智能电网所追求的一个目标。但供需互动的效益,必须以开放供用电市场为前提,否则,供需关口上下双向通信的智能电表将无用武之地。而这方面既是我国差距较大的一个突出问题,也是当前正在筹建的电力用户信息系统、必须作出今后是否支持智能电网研发的一个重要决策。

我国的电力市场,当前主要处于厂网分开的发电竞争阶段。国务院2002年关于电力改革的5号文提出“十五”期间逐步对配电业务实行内部独立核算,为输配电分开的批发竞争预作准备。至于配用电分开的零售竞争,尚未提上日程。

3.5 高性价比的经济效益和社会效益

智能电网研发实施的又一个重要目标,是投入产出的高性价比。

如美国,据美国EPRI估计,未来20年需投资1650亿美元的美国智能电网,实现后的综合效益可达6280亿~8020亿美元。奥巴马总统的顾问在一份科技投资对就业影响的报告中分析,投资100亿美元建设智能电网,可创造23.9万个就业岗位。

涵盖发输配用电和电力市场、包括一二次系统的智能电网,几乎每个环节都具有潜在的巨大的经济效益和社会效益^[4]。

据称,智能电网使美国电网的效率每提高5%,就相当于减少5300万辆汽车的燃料消耗和碳排放量。

可再生能源发电方面,以美国加州2020年要求达到33%为例,则将减少11%的碳排放量。

插入式电动汽车的发展,除可24h优化使用发输配电系统外,美国通过替代73%的燃油汽车,则可减少约24%的碳排放量和52%的石油进口。

输电方面。美国计划使用超导输电技术,跨越4个时区传送电力。第1条高温超导电缆已于2008

年4月投入运行。与同样粗细的铜导线相比,其输电能力提高了150倍。但高温仅相对于-270℃的绝对温度而言,仍存在产生超导的冷冻设备如采用液态氢及其综合利用等问题。

配电方面。美国和墨西哥的电力公司及终端用户,每年将安装100多万台配电变压器,如采用高效非晶质(amorphous)铁心技术,每年可节约电7.5亿kWh,相当于少排46.5万t CO₂,或将少开9万辆汽车。

供需互动支持的需求响应(DR)双向服务,潜在效益更大。如美国通过DR进行调峰,即可减少发电47GW,相当于每年减排1.06亿t CO₂。同时,用户方面也可减少15%以上的峰荷和10%以上的总需求。

需求响应资源的辅助服务效益十分显著。如应对突然的频率下降,除发电机提供功率支持外,需求侧也可响应频率的变化。而且,实践表明,需求侧响应的瞬时性明显优于发电机。英国的电力市场,就有13个水泥制造企业通过集总代理与输电系统运行方签订了双边合同,可减少最大瞬时负荷达110MW。此外,“性价比”较高也是需求响应资源辅助服务取得快速发展的另一个重要原因。据美国Baltimore煤气电力公司实算,需求响应资源的价格为USD165/kW,只有新建峰时发电约USD600/kW的1/3~1/4。并预言,今后若干年内,需求响应资源将是保证供电可靠性性价比最高的一个有力措施。

由于跨世纪的智能电网工程,包括解决国情不同的突出问题,投资巨大。因此,追求投入产出的高性价比、获取巨大的经济和社会效益,必然成为研发智能电网的一个主要目标。

4 结束语

(1) 全面涵盖发输配用电和电力市场、含括一二次系统的智能电网,很难用一个简单的统一定义来表述。但智能电网的主要特征——自愈、供需互动、推动节能减排、协调与自适应控制、资产优化管理等已逐步形成共识。

(2) 国内外电网的研发,都在向智能电网发展。但由于各国资源配置、监管决策取向、电力市场进展以及用户认知程度等的不同,其切入点、重点和先后顺序必然也会有所差异。

(3) 根据智能电网理念结合我国国情所制定

的智能电网研发路线,应当是能实现应对全球性环境和能源挑战的、电网安全自愈和高效低耗运行的、供需互动双向服务的以及高性价比的经济效益和社会效益。■



作者简介:

王明俊(1931—),男,中国电力科学研究院教授级高级工程师,咨询委员,原副总工程师,长期从事电力系统自动化研究工作,曾参加我国第1套SCADA(湖北)/EMS(四大网)/DMS(绍兴)系统的引进和自主版权CC-2000系统的开发工作。

E-mail: mjwang@epri.ac.cn

参考文献

- [1] 王明俊. 突出自愈功能的智能电网. 动力与电气工程, 2007,(2): 12-16.
- [2] Saifur Rahman. Global energy use, climate change, distributed generation and energy efficiency. 2006.
- [3] Massoud Amin. Toward self-healing energy infrastructure systems. IEEE Computer Applications in Power, 2001, 14(1): 20-28.
- [4] John D. McDonald. The next generation grid — energy infrastructure of the future. IEEE Power & Energy Magazine, 2009, March/April: 26-32.

地方学会看台

京津冀晋蒙鲁电机工程(电力)学会第十九届学术交流暨工作经验交流会在内蒙古赤峰市召开

2009年8月11日,由内蒙古电机工程学会承办的“京津冀晋蒙鲁电机工程(电力)学会第十九届学术交流暨工作经验交流会”在内蒙古赤峰市召开。出席会议的有中国电机工程学会秘书长李若梅,北京市电机工程学会秘书长王金萍、天津市电机工程学会秘书长骎正生、河北省电机工程学会秘书长张英怀、山西省电力行协书记索建设、山东省电机工程学会林庆阳等领导,来自北京、天津、河北、山西、山东及内蒙古电机工程(电力)学会的论文作者代表及各省级学会工作者共70人参加了会议。

大会开幕式由内蒙古电机工程学会副秘书长满英平主持。内蒙古电机工程学会秘书长徐润生致欢迎词。中国电机工程学会秘书长李若梅出席会议并讲话,回顾了中国电机工程学会七十五年的光辉历程,阐述了学会面临的挑战和机遇,指出学会发展正处于方兴未艾之时,希望广大学会工作者积极参与学术交流活动,继承和发扬电机学会的创会宗旨,为我国电机、电力行业发展做出新的贡献。

本次会议交流的主题是“推广电力工业新技术,确保安全经济发供电”。本主题是为了响应2009年国家出台的新能源规划在电力行业实施的需要,并适应电力产业技术升级的形势下提出的。近几年来,各省在新能源技术应用、火电厂节能环保技术改造、特高压输电技术等方面也积累了许

多值得借鉴的经验。本次学术交流会共收集论文650篇,经过各省专家认真评审,共推选出90篇论文录入到这次会议的论文集和光盘中,其中优秀论文18篇。论文内容涉及到电网及输配电技术、风力发电技术、火力厂DCS、空冷、脱硫脱销技术及节能减排技术改造等内容。本次录选论文中,还包括部分电力技术管理和新材料应用分析的文章,展现出许多科技工作者开始深入前沿,通观全局的新视野。

会议交流十分热烈,优秀论文的作者先后进行了宣读交流,他们将各自领域中的科研成果、技术改进、项目管理经验等向大家作了汇报,受到了全体与会代表的一致好评。会议还向优秀论文的作者颁发了获奖证书。

会议期间,六省市区的学会领导和学会专(兼)职工作人员举行了2009年学会工作经验交流会。会上,大家就一年来各自学会所做的工作进行了交流,并一致认为,这种每年一次的相互联系与沟通是非常必要的,它不仅加深了各学会间的了解,还能够使大家及时学习到兄弟学会的宝贵经验。

明年的京津冀晋蒙鲁电机工程(电力)学会第二十届学术交流暨工作经验交流会将由河北省电机工程学会承办。■

(内蒙古电机工程学会供稿)