

[编者按]国家电网公司已经明确提出建设统一坚强智能电网的发展目标。美国总统奥巴马最近也在美国智能电网发展的讲话中明确地将电网的坚强和智能相统一。在薛禹胜主编的倡导下,本刊征集到很多专家、学者从不同视角论述对智能电网的理解、建议和初步研究成果。本期智能电网专题研讨选择其中的 10 篇论文,侧重于对智能电网特征和内涵的框架性探讨。本刊将持续关注智能电网的研究和建设成果,并陆续予以发表,以飨读者。

多指标自趋优的智能电网

何光宇¹, 孙英云¹, 梅生伟¹, 卢强¹, 李实恭², 孙福杰³, 于红光³, 尹文君²

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室,北京市 100084; 2. IBM 中国研究院,北京市 100193;
3. IBM 全球服务公司,北京市 100027)

摘要:资源和环境的双重压力给电力系统带来了新的挑战。为应对这些挑战,国外研究者提出了智能电网的概念,并已有了初步实践。文中在对国外智能电网实践进行分析、总结的基础上,提出了智能电网的定义,认为是否具有“多指标自趋优运营能力”是智能电网与传统电网的最大区别,而如何使电网具备“多指标自趋优运营能力”则是智能电网研究和实现过程中所要解决的关键问题。

关键词:智能电网;多指标;自趋优;可再生能源

中图分类号: TM73; TM76

0 引言

进入 21 世纪以来,随着社会和经济的发展和技术的进步,以及人类对电力信赖程度的加大,智能电网的概念应运而生,并在近期成为全球电力行业研究和探讨的热点^[1-6]。目前,北美和欧洲已经在智能电网概念、技术研究和工程实践中开展了大量工作,日本、澳大利亚、印度等国家也在积极跟进。

中国在数字化电网和智能电网方面进行了大量前瞻性研究。1999 年清华大学提出“数字电力系统”^[7]理念,揭开了数字电网研究工作序幕;2005 年国家电网公司实施“SG186”工程,开始进行数字化电网和数字化变电站的框架研究和示范工程建设;同年,南方电网公司委托清华大学开展“数字南方电网”^[8]研究;2006 年,IBM 在中国发布了智能电网白皮书^[9];2007 年,华东电网开始关注智能电网^[10]。

智能电网已成为未来电网的发展方向。但究竟何为智能电网?智能电网和传统电网的本质区别何在?这些问题尚未得到明澈的回答。本文在对国外智能电网探索与实践进行分析、总结基础上,结合自身实践,给出了智能电网定义,并探讨其本质特征。

1 国外智能电网研究背景

以欧洲和北美为代表的国外电力公司在 20 世纪 70~80 年代完成了电网建设的高峰期,然后电力

需求和电网建设都进入一个缓慢发展阶段。进入 21 世纪,欧美国家的电力公司面临越来越多的压力^[1]:

1) 开放的竞争性电力市场给电力企业带来巨大的竞争压力,要求电力企业提高客户满意度,争取更多用户;

2) 电力监管机构和政府对电力企业提出了严格的监管和要求;

3) 电力企业普遍存在着电力设施和人员老化越来越严重的问题;

4) 燃料费用和人员费用的增加造成电力企业运营成本的持续增长;

5) 环境保护的压力,接受风力、太阳能等可再生能源分布式电源的接入;

6) 电力用户对电力供应和电能质量提出了更高的要求,并希望更多地参与电网的互动;

7) 用户对电力价格降低的要求与电力公司股东对预期收益之间的矛盾所造成的压力;

8) 技术和标准的不断进步:新的电网技术可增加电能传输量和减少能量损耗,提高供电效率,而电力电子技术则可改善供电质量;先进的仿真工具促进创新技术的应用;通信、测量和商业系统的发展在不同程度上为系统打开新通道。

正是在这样的大背景下,欧美电力行业提出智能电网的概念,试图通过电网基础设施改造、新技术应用(IT 技术、通信、传感器等)和业务模式创新,来

收稿日期:2009-05-27;修回日期:2009-07-29。

应对面临的诸多压力和挑战。欧美电力企业开展智能电网工作,其驱动因素可以归结为政策方面、市场方面、电网安全和电能质量方面、环境方面、技术方面等,其中欧洲智能电网概念的主要驱动因素是市场、安全和电能质量、环境等3个方面^[6],美国智能电网建设的主要驱动因素是政策、市场和技术^[1]。基于以上驱动因素,欧美国国家电力公司一般从用户侧和配电网入手开展智能电网相关工作,首先建立先进计量管理(advanced metering management, AMM)系统,使电力系统和负荷建立联系,建立通信基础,获得详细的用户侧运行信息,为客户提供更多的电价和服务选择,提高需求侧管理水平,满足电力监管机构的要求。

欧美电力企业期望智能电网建设能为电网企业、客户和社会带来巨大收益,包括在资产管理、作业人员管理、信息管理、电网规划、电网运行、客户体验和电力营销等多个层面(参见附录A图A1)。

2 国外智能电网探索与实践

2003年,美国电力科学研究院(EPRI)将未来电网定义为Intelli Grid^[2-4];同年,美国能源部发布“Grid2030”设想^[1];2004年,美国Battelle研究所和IBM公司先后提出了“智能化电网”(Intelligent Grid和Intelligent Utility Network, IUN)^[5];2005年,欧洲技术论坛(ETP)提出了“Smart Grid”概念^[6]。

2.1 美国“Grid2030”规划^[1]

美国能源部在其“Grid2030”远景规划中,描绘了美国未来电力系统的设想:一个完全自动化的电力传输网络,能够监视和控制每个用户和电网节点,保证从电厂到终端用户整个输配电过程中所有节点之间的信息和电能的双向流动。按照“Grid2030”的设想,未来美国电网由3个主要部分组成:国家主干网、区域互联电网、配电网和微网。

国家主干网是一个连接东西海岸以及加拿大和墨西哥的大容量输电走廊,通过它可以解决输电系统阻塞问题,降低网损,在全国范围内调节电力供需平衡。对国家主干网建设起决定性作用的技术因素有:超导技术、高压直流输电技术、先进导体、先进半导体材料、支持电网实时运行和国家电力交易的通信和控制技术等。

配电网和微网直接向用户提供高质量的电能,它们不仅从区域电网吸收电能提供给用户,还将分布式能源发出的电能回送给区域电网,潮流可以双向流动;实时监控和信息交换使得电力交易可以在全国范围内实时地进行,用户可以根据个人要求,如成本、环境、可靠性和电能质量要求等,定制个性化

的电力服务;分布式发电和燃料电池技术的发展使得清洁能源汽车将不仅是一种环保型交通工具,还可以变成一种发电装置,在需要时向电网或用户提供电能。

2.2 欧洲智能电网^[6]

欧洲智能电网计划为2020年及以后欧洲电网发展进行设想和展望,并指出这个设想的核心和实现这个设想的道路。其主要目标是通过智能电网建设向所有用户提供高度可靠、经济有效的电能,充分开发利用大型集中发电机和小型分布式电源,从而提高电网公司运营效率,降低电力价格,加强与客户互动,应对来自市场、安全和电能质量、环境等3方面的压力。

欧洲智能电网具有4个典型特征:

- 1) 柔性的(flexible),满足用户需要;
- 2) 易接入的(accessible),保证所有用户的连接通畅,尤其对于风力、太阳能等可再生能源和高效、零或低CO₂排放的本地发电;
- 3) 可靠的(reliable),保障和提高供电的安全性和质量;
- 4) 经济的(economic),通过改革及竞争调节实现最有效的能源管理。

欧洲智能电网的研究主要涉及智能配电结构、智能运行、电能和用户适应性、智能电网管理、智能电网的欧洲互用性、智能电网的断面潮流控制等几个方面。欧洲智能电网研究涉及的关键技术包括:

- 1) 现有配电网技术;
- 2) 新型电网技术,以提高电能传输能力和减少损耗为目标,如气体绝缘输电线路(GIL)、超导技术、高运行温度、柔性交流输电(FACT)技术等;
- 3) 广域通信技术,以保障电网监控自动化、在线服务、有功运行、需求响应和需求侧管理(DSM);
- 4) 电力电子技术,以改善电能质量;
- 5) 静态储能装置。

2.3 智能电网成熟度模型

全球性地开展智能电网建设,需要一套能指导其发展和评估其发展阶段的模型和体系,这就是智能电网成熟度模型(smart grid maturity model)。它是美国生产力和质量中心(APQC)与全球智能电网联盟(GIUNC)在IBM支持下合作的成果。它为电力企业发展智能电网提供了一个行动、投资和最佳实践的路线图。智能电网成熟度模型可以帮助电力企业建立一个可分享的智能电网发展蓝图,用于与内部和外部各方交流智能电网的愿景和策略,评估目前的机会、选择和目标。它作为一种战略和决策的框架,能够帮助电力企业确定当前所处的阶段,

找出与目标的差距和需要提高的方向,提供技术、管理和组织方面的指导。除此之外,智能电网成熟度模型的另一个主要作用是衡量电力企业在智能电网方面取得的进展,它提供了一组关键性能指标(KPI)来衡量智能电网的发展,为电力企业之间的相互学习提供了一个对比的基准。

智能电网成熟度模型从以下 8 个方面来衡量智能电网的发展:策略、管理和监管;组织结构;技术;社会与环境;电网运行;人员及资产管理;产业链的整合;用户的体验与管理。

智能电网成熟度模型将智能电网的发展分为 5 个阶段(参见附录 A 图 A2)。在第 1 阶段,电力企业开始有建设智能电网的设想,这一阶段的主要工作是对智能电网各种技术的试验和评估,以及建立业务模型;在第 2 阶段,电力企业在 1 个或多个主要业务领域开始投资和实施智能电网,如实施 AMM、DSM 或分布式智能监控网络等,以提高电网的可靠性和加快故障处理;到了第 3 阶段,电力企业各个业务领域的智能电网系统开始打破条块分隔,逐步实现主要业务领域之间的整合;在第 4 阶段,电力企业能够实现整个企业范围的跨业务综合观测及综合控制,形成新的经济模式或商业模式;最后,到第 5 阶段,电力企业具备了创新的能力,能够充分利用新出现的业务、运行、环境等机会,以求自身不断发展。

3 建设中国智能电网的思考

3.1 国外智能电网研究启示

对以欧美国家为代表的智能电网研究和实践进行分析,能够为中国电力行业开展智能电网工作带来有益的启示和借鉴。

1) 智能电网是为实现电力行业综合业务目标和战略,涵盖电力的规划/建设、运行、作业和资产维护、客户服务等整个价值链,而不仅仅局限于电网运行自动化。因此,应从中国电力发展战略目标和业务需求出发,通过自上而下的分析,导出智能电网的建设内容和建设路径。

2) 智能电网不是多个应用系统的简单相加,更不等同于某一个或某几个自动化系统,而是综合一次电网改造、先进 IT 技术和业务创新的企业级整体方案,需要科学、完整的方法论指导以及项目群管理经验。

3) 智能电网的建设内容不是固定或一成不变的,要密切结合企业的实际情况和基础条件。

4) 智能电网不是对已经建设的信息资源(采集、通信、应用、集成)的推翻和重建,而是继承、补充和发展。

5) 智能电网不是单纯的技术问题,更重要的是观念转变和业务的创新:从业务线条出发向企业整体视角转变,从满足目前业务需求向具有前瞻性、先进性的业务考虑转变。

特定的电网发展阶段,决定了中国电力行业面临着技术和管理 2 方面同时提升的要求:一方面,中国电力企业具有装备先进、新系统众多、局部自动化水平高的突出特点;另一方面,又有传统的管理模式和方法,系统整合和综合应用水平低,总体自动化水平低。因此,中国电力行业在探讨智能电网时,除了借鉴国外从满足企业业务需求和用户侧考虑的思路外,还要根据中国电力行业的实际情况,从电网运营的根本目标和本质来定义智能电网,并寻找适合中国电网发展特色的智能电网建设道路。

3.2 智能电网生态圈

智能电网是在现有电网基础上的全面升级,是一个整体的解决方案,其投资和收益均十分巨大。因此,对智能电网的概念定义和建设内容不能仅仅考虑到电网自身需求,而是需要从电网企业、发电企业、电力用户和智能电网相关企业等利益相关者的角度进行分析,同时也需考虑到国家和社会对电力基础设施的要求。因此,国家和社会、电网企业、发电企业、电力用户以及智能电网相关企业共同构成了智能电网的生态圈。

智能电网生态圈的成员对智能电网的需求主要体现在以下 3 个层面:

第 1 层:国家和社会对资源和环境保护的需求,包括:节能减排,提高能源利用效率;可再生能源的灵活、可靠接入;减少电能转化和应用过程对环境的不利影响。

第 2 层:发电企业、电网企业和用户对电能供应和服务的需求,包括:安全、可靠、经济、优质的电能供应;自由的电力交易;电网与用户之间双向互动。

第 3 层:提高电网自身运营质量的需求,包括:可靠、灵活、经济的电能流和信息流传送;全面的信息集成和数字化监控;自愈和快速响应。

由此可见,智能电网的建设和设计不仅需满足电网自身的需求,还需满足生态圈中其他成员的需求。在这些需求中,有些具有互补性,如“全面的信息集成和数字化监控”必然有助于“可靠、灵活的电能流和信息流传送”,也有利于用户与电网之间的双向互动,同时可使得用户获得“高质量的电能供应”;但也有一些需求之间并不完全具有互补性,例如由于风能、太阳能等可再生能源的不可控特性,“可再生能源的灵活接入”的需求必然会负面地影响到智能电网的“可靠、灵活、经济的电能流和信息流传送”

的需求。在这种情况下,如何给出智能电网的定义,并以此为目标构建智能电网,从而使其能够考虑并满足彼此联系的各个方面的需求,就成为智能电网在研究和建设过程中所必须解决的一个关键问题。

4 智能电网定义

智能电网指以标准化接入为基础,以信息共享、智能决策和综合调控为主要手段,具有多指标自趋优运营能力的电网。

1) 标准化接入,是指形式多样的分布式电源以及用电设施接入智能电网时,必须满足一定的标准。该标准不但包括电能流的双向传送,还包括信息流的双向传送;同时,用户也能够根据电价情况和控制命令,对用电情况进行相应的调整。

2) 信息共享,是指电网运行信息、设备状态信息、用户用电信息和生产作业信息等均能为电网各参与方按需共享。

3) 智能决策,是指电网在信息共享的基础上,基于对电力系统物理特性的了解和现代多指标自趋优控制理论,对电网运行情况做实时分析以生成控制策略。

4) 综合调控,是指对电网中所用可控资源加以合理调配和综合利用,以达到多指标自趋优的目的。

综上所述,“多指标自趋优”是智能电网的关键特征,其最终目标是将整个电力大系统控制得如同同一台智能广域机器人(smart wide area robot, Smart-WAR)。事实上,这也是电网所能具有的最高智能形式,因而,将具有“多指标自趋优运营能力”的电网称为智能电网是合理的。

为了实现“多指标自趋优”的智能电网,需要在一次电网基础上,建立持续监视和支持 IP 方式的信息网络,将电网企业的设备、装置、系统、客户、员工连接在一起,实现对数据和信息的“随需”访问、利用和分析,从而实现对整个电网企业运作更好地管理、更自动化、更优化。

以下对“多指标”和“自趋优”作进一步阐述。

4.1 多指标集合

电网的最基本也是最重要的功能是通过发、输、配、售电等环节将一次能源转化为电能并提供给最终的用户使用,但正如上文所提到的,由于各成员在生态圈中所处的地位和层次不同,生态圈成员对智能电网的需求也不尽相同。

1) 对于生态圈中的国家和社会来讲,智能电网是国家最重要的基础设施之一,是社会发展和进步的基石。因此其最重要的需求是在保证电网安全运行的同时提高一次能源的使用效率,即达到节能减

排的目标,同时可通过智能电网的建设和运行带动相关产业的发展,增加就业率,提高经济发展水平。

2) 对于生态圈中的电网企业、发电企业和智能电网相关企业,作为产业链的上游环节,希望能够在智能电网的建设和运行环节获取可观的经济回报,以及提高电网的安全、可靠性。

3) 电力用户作为产业链的终端环节,则希望在得到可靠、优质电能供应的同时能够尽量降低用电成本,同时获得更好的服务。

智能电网所要达到的多指标就来源于这些需求。综合以上需求,并考虑到电网作为基础设施的特点,智能电网应该保证系统能够坚强、高效、清洁和灵活地运行。其中:

1) 坚强是指电网在经受大扰动后仍能保持正常运行(即安全、可靠、优质、经济运行)的属性;

2) 高效是指能源使用的高效率(包括发、输、配、供等各个环节),其中一个重要方面是最大可能地降低网络损耗;

3) 清洁是指在能量转化和传输过程中尽量减低对环境的不良影响,其主要手段是扩大风力、太阳能等可再生能源利用的比重;

4) 灵活是指在根据用户需求为用户提供相应质量电能的前提下,进一步允许用户以多种方式参与到电网运行中(如可售电给电网)。

综上所述,坚强、高效、清洁和灵活组成了智能电网的多指标集合。当然,电能质量如电压、频率和谐波含量等,应达到国家和企业标准,是电能作为一种商品的基本要求。

在对智能电网开展研究和探讨的过程中,明确智能电网所需要达到的目标,明确规定电网运营的多指标集合,将是其中一项非常重要的内容。

4.2 自趋优

“自趋优”是指某个对象通过自身的自动调节,实现从不令人满意的状态到令人满意的状态的一个过程。对于智能电网而言,衡量其是否处于趋优状态(或令人满意状态)的标准就是前述的电网运营指标集合。智能电网的自趋优是指电网能够依托完善统一的基础设施(包括一次设施、采集、通信、信息平台等),在实现全面的自我监测和信息共享基础上,对自我状态(即电网运营指标评价体系)有准确的认知,并通过智能分析形成决策,借助完善统一的基础设施,自动对自身进行综合调控,使得电网自身状态趋向最优。

为加深对概念的理解,下文将自趋优与常见的“自愈”^[11-12]概念加以对比。

自愈是实现电网安全可靠运行的主要功能,指

无需或仅需少量人为干预,实现电力网络中存在问题的元器件的隔离或使其恢复正常运行,最小化或避免对用户供电的中断。通过进行连续的评估自测,智能电网可以检测、分析、响应甚至恢复电力元件或局部网络的异常运行^[12]。

从所针对的对象来讲,自愈仅针对电网运行环节;而自趋优针对的是整个电网的运营,范围更为广阔。从要达到的目标来讲,自愈仅能保证系统在即将发生异常情况或出现异常情况时实现对有问题设备的自动检测和隔离,为单一目标;自趋优则是对所有不满意运行状态均采取必要的动作,为多目标。也就是说,自趋优已涵盖了自愈的概念。

5 结语

智能电网已经成为未来电网的发展方向。本文在对智能电网国内外发展动态进行分析的基础上,给出了智能电网的定义,认为是否具备“多指标自趋优运营能力”是智能电网与传统电网的最大区别。至于如何使得电网具备“多指标自趋优能力”,亦即如何建设智能电网,作者将在另文专门进行讨论。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] U. S. Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. "Grid2030" a national vision for electricity's second 100 years [EB/OL]. [2009-05-09]. http://climatevision.gov/sectors/electricpower/pdfs/electric_vision.pdf.
- [2] Obama's speech on the economy [EB/OL]. [2009-01-09]. <http://www.nytimes.com/2009/01/08/us/politics/08text-obama.html?pagewanted=1&r=1>.
- [3] EPRI. Power delivery system and electricity markets of the future [R]. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2003.
- [4] HAASE P. IntelliGrid: a smart network of power [EB/OL]. [2009-02-23]. http://mydocs.epri.com/docs/Corporate Documents/EPRI_Journal/2005-Fall/1012885_IntelliGrid.pdf.
- [5] Powering an energy transformation: the intelligent utility network from IBM [EB/OL]. [2009-05-01]. http://www-03.ibm.com/industries/global/files/energyu_powering_an_energy_transformation2.pdf.
- [6] European Commission. European technology platform smartgrids: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future [EB/OL]. [2009-03-15]. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.
- [7] 卢强. 数字电力系统. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 1-4.
LU Qiang. Digital power system. Automations of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 1-4.
- [8] 张弥, 吴国青, 吴小辰, 等. "数字南方电网"构想. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 96-98.
ZHANG Mi, WU Guoqing, WU Xiaochen, et al. Strategy vision of "Digital China Southern Power Grid". Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 96-98.
- [9] 建设智能电网, 创新运营管理: 中国电力发展的新思路 [EB/OL]. [2006-12-15]. http://www-900.ibm.com/cn/services/bcs/iibv/magazine_30/member/china_insight.shtml?ca=omedm.
- [10] 帅军庆. 瞄准世界前沿 建设智能电网. 国家电网, 2008(2): 49-52.
- [11] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid. Power System and Clean Energy, 2009, 25(1): 7-11.
- [12] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22.
XIE Kai, LIU Yongqi, ZHU Zhizhong, et al. The vision of future smart grid. Electric Power, 2008, 41(6): 19-22.

何光宇(1972—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统优化与智能电网。E-mail: gyhe@tsinghua.edu.cn

孙英云(1975—),男,博士,主要研究方向:电力系统优化和控制。

梅生伟(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统分析与控制。

Multi-indices Self-approximate-optimal Smart Grid

HE Guangyu¹, SUN Yingyun¹, MEI Shengwei¹, LU Qiang¹, LI Shigong²,
SUN Fujie³, YU Hongguang³, YIN Wenjun²

- (1. State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. IBM China Research Laboratory, Beijing 100193, China;
3. IBM Global Services, Beijing 100027, China)

Abstract: Double pressures from resources and the environment bring new challenges to the power systems. To face these challenges, the overseas researchers propose the conception of smart grid and have tentative practices on this field. Based on the analysis and summary of the smart grids practicing, the definition of the smart grid is given, and the "ability of multi-indices self-approximate-optimal operation" is taken as the most distinctive difference between smart grid and traditional grid. How to enable the grid to have this ability is the key point which must be solved in the process of smart grid research and design.

Key words: smart grid; multi-indices; self-approximate-optimal; renewable energy