

浅议美国智能配电网建设及其关键技术

武云霞¹, 余熙¹, 田伟²

(1. 西南电力设计院系统规划中心, 四川 成都 610021;

2. 伊利诺斯理工大学阿默工程院, 美国 芝加哥 60616)

摘要: 目前美国智能配电网建设已进入试点阶段。介绍了美国衡量配电网智能化的技术准则,并结合能源部在伊利诺斯理工大学(Illinois Institute of Technology)进行的智能配电网研究与建设试点,阐明完美电力的技术要点,论述智能配电网研发中需要解决的若干关键技术。

关键词: 智能电网; 完美电力; 自愈电网; 需求响应; 分散电源; 分布存储; 微网

Abstract: At present, the construction of smart distribution network in U. S. has come to the pilot stage. The technical criteria to determine the smart distribution network in U. S is put forward. Combining with the smart distribution network project being done by Department of Energy (DOE) at Illinois Institute of Technology (IIT) in Chicago, the technology framework of perfect power is clarified, and some key skills that should be solved during the research and development of smart distribution network are discussed.

Key words: smart grid; perfect power; self-healing grid; demand respond; distributed generator; distributed storage; micro-grid

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0031-04

0 引言

数字经济迅猛发展对电力供应高质量的要求和近年来全世界爆发的多次停电事故所暴露出来的电网运行安全薄弱、用户期望的电价下降和电力市场条件下某些峰荷时段的实时电价水平升高甚至出现价格尖峰(price spike)的现象、人类对于环境友好的期待和燃煤电厂排放对大气造成的严重污染,这些矛盾都表明,传统电力系统已经难以支撑起如此众多的可持续发展要求。另一方面,大量能源新技术的涌现和累积,如分散再生电源及分布存贮设备、先进的配电网自动化设备及通讯技术、终端智能仪表及其信息关口、需求响应(demand respond, DR)、智能电器与楼宇等,使得智能配电网的建设成为可能。但智能配电网不是这些技术的简单展示,而是借用它们实现对传统电网的革命性改造,达到满足可持续发展要求下高度经济、可靠、安全、环保的根本目的,并由此催生了绿领(green collar)产业、智能城市、完美电力(perfect power)等概念,美国现任总统奥巴马也把发展包括配电网在内的智能电网产业

作为国家提高能源利用效率和走出金融危机泥潭的重要手段之一^[1-2]。

智能配电网是电力系统参与者、电力产品制造商、能源政策制定者、环境与数字技术专家等方方面面工作的成果,在美国,推动其发展的主要法案有 E-PACT05、EISA07等;从政策法规建设、模型设立、系统集成、关键技术研发等不同角度研究智能配电网的联邦、州及私人组织更是不计其数,目前,它们已经提出了若干拥有自主产权与品牌的智能配电网解决方案,如 GridWise、Intelligrid、GridPoint等,其建设也已步入试点阶段,如:使用智能电网技术的地区供电公司有 Bonneville Power Administration、CenterPoint Energy、Pacific Gas and Electric(PG & E)、Southern California Edison、Xcel等;属于 PJM 管辖范围的 EnergyConnect 公司、加州大学商学院、耶鲁大学森林与环境研究大楼、NJ 的 Ferreira 建筑公司总部等采用了智能楼宇技术;New Mexico 州的 Mesa Del Sol 市、Missouri 州的 Kansas 市、Colorado 州的 Boulder 市等正在建设智能城市,这些努力在消减电网高峰负荷和降低用户电价方面取得了明显的成效。

在介绍美国智能配电网建设技术准则的基础

上,结合能源部在伊利诺斯理工大学进行的智能配电网研究与建设试点,阐明完美电力和智能配电网关键技术,为中国智能配电网建设提供参考。

1 衡量智能配电网的技术准则

智能配电网的基本特征是自愈、安全、绿色和经济。美国能源部提出从以下几个方面衡量配电网是否达到智能化水平。

(1) 自愈和灾变防御能力。即使在极容易引起电网崩溃的级联故障发生时,配电网监控系统也应自动而快速地完成故障监视、诊断、开关切换、潮流控制、恢复等各项功能^[3]。其自愈能力可从能够进行实时监控的用户及网络节点数量,重要用户供电可靠性,安装有先进控制、通讯系统的网络覆盖范围,能进行安全极限及裕度分析的网络范围等进行判定。其次,由于在紧急状态下电网可能需要分布式能源提供辅助服务,因此也可用能实施DR、具有分散发电及分布式储能设备的负荷数量作为考察准则。此外,从最终效果上,电力系统遭受故障时的影响范围,如系统平均停电时间、恢复时间及其成本等,都能用于衡量电网的自愈能力。

除上述针对物理系统的准则外,还应考虑电力公司是否具有防灾预案、防黑客系统等在内的柔性运营规则及操作规范,用于预防、感知、应对人为失误、电力市场竞争、信息和通信系统故障、自然灾害、蓄意破坏等来自自然、社会等多种因素的攻击,以实现灾变防御。

(2) 分散电源与分布存储设备的应用水平。用户以“即插即用(plug and play)”方式使用分散的风、太阳能、燃料电池等各种再生电源和清洁能源(如天然气),不仅可以减少污染排放,而且能够采用热电联供(combined heat and power, CHP)技术,使发电废热就近在楼宇中循环使用,有效提高能源效率^[4-6]。此外,某些再生电源,如太阳能,产生的直流电可以供给大量的家用电器直接使用,相对传统交-直流转换方式,其供电成本将大幅下降。大量的分散电源相互连接并协调控制,形成能源网(energy web),可以把传统集中供电的配电网变成众多的本地化的供电单元。

风、太阳能等分散式再生能源具有间断性和非100%可预测性的特点,需要装设存储设备作为补

充,起到稳定潮流和吸收电力冲击的作用。这些设备通常包括大容量电容器、铅酸电池、锂电池、飞轮、工业用熔硫电池(utility-scale liquid molten sulfur batteries)、可逆流电池(reversible flow batteries)、超导磁能存储单元(superconducting magnetic energy storage units)、压缩空气能量系统(compressed air energy system)等^[7]。

分散电源与分布存储设备的应用水平可从允许它们自由接入的网络节点数量,能进行实时控制的电源与存储设备数量,由分散电源直接供电的用户数量,存储设备安装容量及利用率等进行判定。其次,从最终效果上,由于它们一般用于在峰时消减负荷,因此可通过考察负荷率指标的提高程度加以衡量。

(3) DR实施程度。用户能够根据电力市场中负荷高峰时段的高实时电价信号和自身电力需求,通过双向式终端智能仪表及其通讯设备,主动消减负荷,或转移它至分散电源,从而降低电网的负荷峰值,这一过程被称为DR^[8-12]。DR可以降低电力市场中的实时电价水平,给用户带来经济实惠,另一方面,由于设备容量通常是按最大负荷水平设计,因此实施DR可减少电力系统建设成本。

DR是智能配电网的标志性特征之一,通常需要在电力市场零售竞争模式下才能开展。因此,可从配电网发育程度,能通过智能仪表获取市场实时信息的用户数量、有意愿及实际参与DR的用户比例等进行判定。其次,值得注意的是,DR技术除用户主动参与的方式外,还包括智能电器和智能楼宇的使用,前者通过控制系统使自身运行到最佳性能,同时能在高电价时段自动减少用电量,后者通过传感器监视大楼的实时状态,进而控制通风、加热、制冷、照明等系统到最佳效率,也能在高电价时段自动切除楼内负荷。因此,也可用智能电器及楼宇系统的安装数量及其在高峰时段的动作频度作为考察准则。此外,从最终效果上,统计系统能耗下降率,也能用于衡量电网的DR实施程度。

(4) 电力系统运行的优化程度。对于配电网,可从装备自动开关等高级设备的数量及使用量、实施实时状态监控的设备数量、开展电压无功控制的潮流量、分散电源及分布存储设备的容量等进行判定。对于用户,可从智能仪表安装数量、DR实施程度等进行判定。从最终效果上,统计系统发电闲置

量、供电效率及负荷率等总体指标,也能用来衡量电网运行的优化程度。

(5) 电能质量高低。电力公司应当建立适应智能电网需要的新型电能质量指标及其评级制度。在此基础上,可从为提高电能质量而布置的设备数量及其容量,网络中电能质量测量点的数量等进行判定。其次,从最终效果上,统计电网出现电能质量下降事故的数量及其影响范围与程度,也能用来衡量电网电能质量的高低。

(6) 电力新产品和新技术准入的开放程度。智能电网技术方兴未艾,新产品不断涌现,现有电网允许它们自由进入市场的程度,也应是衡量它是否柔性、即具备智能化功能的重要体现。可从电力公司政策环境对准入的支持力度、本地区生产电力智能化产品的规模以上公司数量、智能化产品中获得电网准入许可的数量、用于开发新产品与技术的资金总量等进行判定。

2 完美电力的技术要点

目前,美国智能电网的研发工作主要集中在配电侧,其目标是向用户提供可参与、高品质、低成本、低排放的电力产品,这一产品被称为完美电力^[13-15]。

美国能源部(DOE)现正在芝加哥市伊利诺斯理工大学(IIT)就完美电力的研发和工程建设进行试点,涉及的单位包括本地供电公司 ComEd、产品供应商 S & C Electric 和 Endurant Energy 以及研发机构 Galvin Electricity Initiative。整个工作分为4期,5年完成,总耗资上千万美元,目的是建成一个智能化微网,即智能控制系统通过通讯层,协调本地分散电源和分布存储设备,以及 ComEd 电网,共同满足由智能楼宇及 DR 技术进行优化处理的本地电力和热负荷需求(CHP 技术),实现为用户提供完美电力产品的承诺。其技术要点主要有以下几点。

(1) ComEd 下辖的输电网和变电站为 IIT 校园提供冗余的外部电力供应,并确保供电质量。

(2) IIT 校园内的配电网实现自愈。

①网络结构智能化。为此,一是在采用高质量电缆和变压器的基础上实现馈线冗余,二是配电自动化,装备负荷和设备状态实时监控以及自动开关和事故恢复系统,应采用电力电子控制和统一平台的实时

通讯技术,以支持分散而高可靠性的电力系统。

②布置分散电源、分布存储设备及 UPS。在高电价时段,并入本地分散电源来供应负荷,可以少交电费并帮助电网减少运行风险,甚至可以根据实际情况把分散电源的多余电力反送入电网,相当于为所在的 PJM ISO 提供辅助服务,以获取收益。

③建设智能控制系统。系统中的数据流包括每个开关表计所记录的电压、电流、有功、无功、电量、频率、谐波等,天气及楼宇照明状况,发电控制信号,分散电源与分布存储设备容量及输出量,分散电源燃料供应状况等。从这些数据中值得提取的信息包括有功频率曲线、电压无功曲线、电能质量指标、判断电网是处于开合开关时的正常振荡还是事故下的扰动(如是扰动,进一步判断是否按孤岛方式运行,此时由分散电源单独供电)等。系统完成的功能包括数据测量及趋势分析、实时电价分析、DR 控制、监测故障并隔离、将无功及有功尽量调至期望值、紧急备用投入或孤岛运行等。系统基于代理(agent)的方式运行,动作对象包括分散电源、分布存储设备、DR 元件、开关、继电器和电能质量设备等。

(3) IIT 校园内的楼宇实现智能化。智能楼宇不仅包括电力,还含有照明、供水、通风、制热、制冷、防盗、电视/电脑/电话/音像等数字网络系统,对它们的监控将集中在一个统一的信息平台上,既便于使它们都运行在最佳效率区,节约能源,又可实现“即插即用”,有效完成 DR 功能。此外,智能楼宇间还应实现电力互换。

3 智能配电网的关键技术

(1) 配电网结构及运行研究。第一,结构方面,首先在分析制约配电网智能化的政策及技术因素基础上,规划配电网走向智能的策略与步骤,其中,需要结合经济、环境、技术等约束,分析系统长期供需状况,目的是确保资金投入和新产品、技术有序进入,并考虑如何构建基于互联网的电子商务式的未来电网;其次,进行分散电源规划研究,包括准入条件(地点、费用)分析,采用含成本、可靠性等多种因素的多目标规划技术进行投资规划及其影响因子分析,含有分散电源的配电网新型潮流、GIS 及可靠性分析,分散电源运行管理、风险及 DR 对运行影响分析等。第二,运行方面,为实现完美电力目标,支持系统应包含自

动仪表测量、用户用电管理、配电网运营优化、设备故障预测、停电管理及恢复、峰荷管理等功能模块。

(2) 分散电源、分布存储及 DR 研究。

①DR 市场建设。首先,提出包括智能仪表、智能电器、智能楼宇、分散电源、分布存储、热电联产、市场交易平台、用户管理、用户分析及决策、数据管理、结算及账单管理、争议处理、通讯等各种要素在内的 DR 技术标准;其次,针对不同用户,分别确定参与 DR 的运作模式、容量以及评价体系;最后,应适时建设示范小区。

②分布存储设备设计。首先,需确定它与电网间的接口,包括安装地点、数据流及其控制、管理系统;其次,进行技术与经济性分析,并实施现场测试;最后,需研究存储设备提供辅助服务的能力及其实时性能。值得一提的是,电动汽车近年来得到广泛应用,它一般选择在负荷低谷时段进行快速充电,这类负荷十分分散,且随机性强,如果大量存在,将对电网的控制及电能质量带来新的挑战,同时,它也是一个移动电源,用户可以选择在负荷高峰、实时电价高的时段向电网注入多余电能以获取利润,这对未来市场的运行也必将产生巨大的影响,以上两方面的问题都需要做深入研究。

③智能仪表选择。DR 离不开间断式测量且提供双向信息服务的自动智能仪表及其开放式管理系统,需要定义其通讯网关、系统原型、数据格式与功能模块。此外,众多智能仪表的产品供应商多来自 IT 领域,其更新换代速度快,会带来相互间不兼容、系统更换频繁的问题,需要采取统一模型和标准以及模块化设计生产等措施。

④运行分析。一是能根据电价及天气情况实时预测分散电源的电量输出;二是在市场环境下,进行包括随机潮流及短路电流等在内的稳态分析;三是考虑分散电源运行间断性的经济调度和机组组合;四是包括分散电源、DR 用户、分布存储设备、电力电子元件及其控制系统的暂态时域及频域分析,以确保系统运行的安全可靠;最后,由于分散电源通常由电力电子元件接入电网,因此,需要研究电力电子设备及其通讯系统的可用性及其可能的运行模式。

⑤开发基于分散电源、DR 用户、分布存储设备等元素在内的新型能量管理系统。这需要有崭新的理念、工具和技术保证手段,重点是研究如何利用这些元素建立自愈网络、如何利用远方控制协调这些

分散元素以及如何确保电网电能质量等。

(3) 配电设备优化管理。首先,研究设备实时状态监视及诊断的高级模型、算法与工具;其次,从可靠性、电能质量、网络支撑等方面进行设备管理风险及社会、经济效益分析;再次,大力研究如何应用新型导体及绝缘材料提高线路热极限,如何更好地实现网间互联,如何进一步发挥超导等在控制潮流和预防阻塞方面的作用,如何充分应用可视化系统、安全限制下的最优潮流等分析工具,使配电设备更具使用效率。

(4) 不同类型能源间的相互作用研究。除电力外,还包括天然气、供热、水等其他形式的能源系统,它们相互作用,需要建立互联模型,并进行规划及运行层面上的全局优化,以减少彼此冗余度,进而提高整体效率,达到技术、经济、环境上的最佳状态。

4 结 语

智能配电网是智能电网建设的重点领域和难点之一,它所涉及的能源技术极其广泛,目前中国正积极开展智能配电网相关研究和试点建设。通过研究可以得到以下结论。

(1) 配电侧是美国智能电网研究的重点,它的建设需要电力系统参与者:政府、电力企业、用户的共同推进;

(2) 在智能配电网建设技术准则基础上,分散电源、分布式储能和针对新型配电网管理运行优化的能量管理系统是未来智能配电网有待研究的关键技术。

参考文献

- [1] Ryan Hledik. How Green is the Smart Grid [J]. Electricity Journal, 2009, 22(3): 29-41.
- [2] Tucker William. Lo, a Smart Grid [J]. National Review, 2009, 61(4): 18-19.
- [3] Khosrow Moslehi, Ranjit Kumar. First Aid for Power Grids [J]. Power Engineer, 2007, 21(5): 24-29.
- [4] Sanya Carley. Distributed Generation: An Empirical Analysis of Primary Motivators [J]. Energy Policy, 2009, 37(5): 1648-1659.
- [5] Yingjun Ruan, Qingrong Liu, Weiguo Zhou, et al. Optimal Option of Distributed Generation Technologies for Various Commercial Buildings [J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1641-1653.

(下转第 67 页)

经过一段时间本体油色谱跟踪,未发现变压器异常,证明处理位置正确,应视为缺陷已消除。

1.6 故障现象原因分析

从检查后情况可知,由于雷击放电发生在尾部,且由于引线靠壳过近,几乎碰在大盖上,造成中性点避雷器还未动作时,变压器尾部已发生放电,由于该点运行电压低,放电后绝缘油恢复绝缘强度,无法出现持续放电,造成变压器主绝缘恢复,又因为对引线损坏很小,所以直阻测试无法发现缺陷。

由于发生放电部位在中性点升高座内,其位置高于变压器大盖油箱,放电时在变压器内产生的气体上升至升高座高点,升高座内的油向变压器本体挤压,使变压器内部压力增大,压力经油传到瓦斯继电器,引起动作,从而发生跳闸。又因为放电能量未产生超过升高座容积的气量,所以产生的气体未能到达瓦斯继电器,而是停留在升高座内,这解释了瓦斯继电器无气体的原因。如果在最初分析时能从瓦斯继电器中无气体情况来分析,其判断缺陷位置的准确性将会更高些。

2 结 语

从本次故障的判断可以总结一些经验,以便提

供借鉴。

(1) 不论数据合格与否,应结合发现的所有信息从多个方面去分析,若停留在一个单一方面,将很难给出准确判断。

(2) 充分考虑出现的多种信息,就能较准确地判断缺陷位置,提出有针对性的方案,节约检修成本、检修时间,提高检修效率,保障供电。

因此,电力设备缺陷分析,应重视各种信息收集,从多方面联合考虑,这样才能为后期检修工作提供有针对性 and 有效性的方案,从而降低检修成本。

参考文献

- [1] GB/T 7252 - 2001, 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
- [2] 武汉水利电力学院. 过电压及保护[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1977.
- [3] DL/T 911 - 2004 电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S].

(收稿日期: 2012 - 06 - 14)

(上接第34页)

- [6] Gozel T, Hocaoglu M. H. An Analytical Method for the Sizing and Siting of Distributed Generators in Radial Systems [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79 (6): 912 - 918.
- [7] Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou. Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (6): 1513 - 1522.
- [8] Peter Weigand. Smart Grid's Impact on Customer Adoption and Market Participants [J]. Utility Automation & Engineering T&D, 2009, 14(4): 12 - 14.
- [9] Joo Jhi - Young, Ahn Sang - Ho, Yoon Yong Tae. Enhancing Price - responsiveness of End - use Customers' Loads: Dynamically Administered Critical Peak Pricing [J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(1): 113 - 126.
- [10] Andrew L. Ott. Wholesale Markets Meet Demand Response [J]. Transmission & Distribution World, 2009, 61(2): 42 - 45.
- [11] Bompard E., Napoli R., Wan Bo. The Effect of the

Programs for Demand Response Incentives in Competitive Electricity Markets [J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(1): 127 - 139.

- [12] Peter Maltbaek. One Alternative to New Power Generation infrastructure: Demand Response [J]. Utility Automation & Engineering T&D, 2009, 14(4): 60.
- [13] Kurt Yeager. Striving for Power Perfection [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(6): 28 - 35.
- [14] Robert Galvin, Kurt Yeager, Jay Stuller. Perfect Power: How the Micro - grid Revolution Will Unleash Cleaner, Abundant Energy [M]. McGraw - Hill Companies, Sep. 2008.
- [15] Alexander Flueck and Zuyi Li. Destination: Perfection [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(6): 36 - 47.

作者简介:

武云霞(1981)女,工程师,从事调度自动化工作;
余 熙(1963)男,教授级高工,西南电力设计院副总工、系统规划中心主任,主要从事电力系统规划工作;
田 伟(1978)男,博士,目前正在美国伊利诺斯理工大学从事电网调度的博士后工作。

(收稿日期: 2012 - 04 - 18)