

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.18.003

智能配电网自愈控制技术

董旭柱¹, 黄邵远¹, 陈柔伊¹, 李鹏², 张文峰³

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东省广州市 510080;

2. 智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津市 300072; 3. 广东电网公司, 广东省广州市 510080)

摘要:自愈是智能配电系统的重要特征。智能配电网自愈控制是解决中国配电网长期以来存在的设备利用率低、供电可靠性低、线损率高等关键问题的核心技术。首先介绍了智能配电网自愈控制的目标、技术方案与实施条件,在此基础上介绍了自愈控制研究与示范中的关键科学问题,包括智能配电网仿真、分析与试验,智能决策与网络重构,故障特性与保护,关键负荷保障等技术。最后,分析了智能配电网自愈控制技术研究与应用面临的问题与挑战。

关键词:智能配电网;自愈控制;分布式电源;微网;储能

0 引言

智能配电网运行控制的典型特征是实现自愈控制^[1-3],其概念最早由美国电力科学研究院(EPRI)和美国国防部在“复杂交互网络与系统计划(The Complex Interactive Networks/ Systems Initiative)”中提出。智能配电网自愈控制可以描述为:在配电网的不同层次和区域内实施充分协调且技术经济优化的控制手段与策略,使其具有自我感知、自我诊断、自我决策、自我恢复的能力,实现配电网在不同状态下的安全、可靠与经济运行。智能配电网自愈控制将实现电网正常运行时的优化与预警,故障情况下的故障诊断、网络重构与供电恢复,极端情况下与主网解列并依靠系统中的分布式电源(DG)及储能装置独立运行。以自愈为特征的智能配电网是未来电网技术发展的必然趋势^[4]。

近年来,中国进行了大规模的城市电网改造,城市配电网的信息化与自动化水平有了较大幅度的提升。但随着各种新能源发电技术的发展,配电网的运行与控制保护面临许多新挑战,如大量DG接入后的配电网电压越限问题^[5]。自愈控制是高级配电自动化(advanced distribution automation, ADA)的核心功能,是对传统配电自动化技术的发展与延伸,能实现更高的供电可靠性与配电资产利用率,能友好地适应未来电网的各种挑战,包括各种分布式发电设备、储能、电动汽车充放电设施的接入,需求侧响应等。智能配电网自愈控制是解决中国配电网长

期以来存在的设备利用率低、供电可靠性低、线损率高等关键问题的核心技术,是解决DG大量接入的关键技术。

智能配电网自愈控制成为目前电力系统领域的研究热点。较早的研究工作集中在建立电网自愈控制的体系架构^[6-7],针对不同的运行状态分别提出不同的自愈控制目标^[8]。特别是在故障情况下,面向不同的配电自动化实施水平给出了相应的故障处理建议^[9]。更进一步地,在智能电网环境下考虑DG与储能对电网转供能力的影响^[10]。自愈控制理论研究包括智能配电网快速仿真与模拟^[11],网络重构及优化方法^[8-12]是研究的重点。目前,在自愈控制技术的实践方面,分布式智能控制的研究受到较多关注^[13-16]。上述研究涵盖了自愈控制的体系架构、仿真计算、故障处理及DG接入等多个方面,偏重于理论与方法研究。

为了系统地针对智能配电网自愈控制关键技术与设备展开研发并进行工程应用与示范,国家高技术研究发展计划(863计划)在先进能源技术领域智能电网关键技术研发(一期)中特别支持了“智能配电网自愈控制技术研究与应用”。本文介绍了自愈控制研究与示范中的关键问题,分析了智能配电网自愈控制技术研究与应用面临的问题与挑战,希望能为相关工程技术领域的科研人员提供参考,并推动智能配电网自愈控制技术研究、发展与工程应用。

1 体系架构

1.1 自愈控制目标

智能配电网自愈控制的目标是在含DG的配电

收稿日期:2012-07-19;修回日期:2012-07-30。

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA05A114)。

网运行过程中及时发现、预防和隔离各种潜在故障和隐患,优化系统运行状态并有效应对系统内外发生的各种扰动,抵御外部严重故障冲击,具有在故障情况下维持系统连续运行、自主修复故障并快速恢复供电的能力,可通过减少配电网运行时的人为干预,降低扰动或故障对电网和用户的影响。配电网直接面向用户,其自愈能力的高低直接影响供电质量。

针对配电系统的不同运行状态,自愈控制的目标与控制策略完全不同,可分为正常运行状态、控制区域内部故障和控制区域外部故障 3 种情况。首先,在电网正常运行状态下,自愈控制的目标主要是在满足系统安全稳定约束的前提下,尽可能优化系统运行状态,充分利用系统中的可再生能源并降低损耗,提高资产利用效率;其次,在自愈控制区域内部发生故障时,自愈控制应快速切除故障并确定故障类型与故障位置,尽可能减少或消除非故障段停电范围与区域,在故障段则应当通过网络重构和快速抢修尽快恢复供电;最后,在控制区域外部发生不可逆转的严重故障时,应断开与外部电网的连接,依靠区域内的 DG 及储能装置,维持系统的自治运行,保证部分关键负荷的持续供电。

智能配电网自愈控制目标是自愈策略与控制手段实施的基础,同时也是评价自愈控制实施效果的依据。

1.2 方案设计

智能配电网自愈控制技术实施方案是自愈控制策略的具体体现,直接决定了自愈控制的实施效果与代价。智能配电网自愈控制功能的实现主要包括以下 3 种方式。

1) 集中控制方式

主要依靠具有高级分析计算功能的系统主站来完成,它需要系统在发生故障后将量测信息发送到主站,通过分析计算确定故障类型、故障位置并形成控制决策,再下发到保护装置或智能终端执行,整个故障的处理过程依赖主站完成。由于集中控制需要主站与终端的大量数据通信,同时仅由主站进行分析决策,耗时较长,很难满足故障切除的快速性要求,因此,现阶段完全依靠集中控制方式实现自愈控制是不现实的。

2) 分散控制方式

主要依靠保护装置或智能终端的相互配合来实现。故障的清除与故障后的供电恢复完全依靠基于局部信息的保护装置或智能终端。分散控制方式的效率与可靠性较高,尽管保护装置或智能终端间存在一定的联系,但由于缺少主站的参与,基于局部信

息的故障恢复过程缺乏全局性的整体协调能力,同时也不能适应频繁变化的网络结构与运行方式。未来,基于多代理的分布式计算技术的广泛应用可能会使分散控制方式得到推广。

3) 集中-分散协调控制方式

综合了集中控制与分散控制的优点,实现分级分布式协调控制。在故障清除阶段主要依靠保护装置(或智能终端)的配合实现,在故障恢复阶段依靠主站分析计算后下发的控制命令实现。集中-分散控制方式一方面保证了故障切除的快速性,另一方面具有全局的协调优化能力,可适应多变的网络结构与系统运行方式,是现阶段可行的自愈控制技术方案。

围绕自愈控制的目标,自愈控制技术的实现既要考虑实施区域的基础与条件,又将随着技术的进步进一步发展和完善。

1.3 实施基础与条件

自愈控制技术的实施以配电自动化为基础,需要满足以下基本条件:①配备各种智能化的开关设备和配电终端设备;②系统中拥有双电源或多电源以及 DG 和储能设备,具有灵活、可靠的网络拓扑结构;③可靠的通信网络及强大的信息处理能力;④拥有具有分析、计算、评估与预警等功能的智能化的主站系统。与传统配电自动化技术相比,自愈控制技术对主站系统的功能要求更高,能够满足 DG 的灵活接入要求。

目前,中国城市电网的配电自动化水平较高,具备较好的自愈控制实施基础与条件。但相对于城市电网,农村等偏远地区限于技术与经济水平,不完全具备自愈控制的实施条件。在自愈控制的研究与应用中,建议应以自愈控制目标为基础,考虑不同的技术经济水平,分阶段有计划地实施配电自动化升级与改造,以实现电网技术与运营的跨越式发展。

2 关键技术

配电网自愈控制功能的实现依赖于配电系统快速仿真与模拟、保护装置的协调与自适应整定、与 DG 的协调控制、智能分析与决策、分布式计算等一系列技术的发展与应用,很大程度上决定着自愈控制功能的实现方式、效率与可靠性。其中,含 DG 的配电系统快速仿真与模拟是自愈控制功能实现的基础^[11],它为配电网的网络重构提供计算方法和依据。自愈控制研究应重点包括以下方面。

1) 含 DG、微网及储能装置的智能配电网建模与仿真技术

将重点关注各种配电系统元件模型及仿真建模

方法和各种 DG、储能元件、电力电子装置及控制器的仿真建模方法。研究基于公共信息模型的模型统一描述方法;研究含 DG、微网及储能装置的智能配电网模型化简技术、多相潮流算法、电磁暂态仿真算法、稳定性仿真算法、动态等值技术以及快速仿真与模拟技术。

配电网元件类型的多样性和模型的适应性对智能配电网建模与仿真技术提出了挑战,其中元件类型主要包括配电线路、配电变压器、无功补偿设备以及各种形式的 DG、储能装置等,各元件又可以给出分别用于稳态分析、暂态仿真及稳定性仿真的不同模型表达;同时,基于网络重构的故障恢复技术对智能配电网仿真、计算的快速性提出了要求。

上述研究将为智能配电网分析设计、深层研究与工程应用提供必要的研究手段和工具。

2)含 DG、微网及储能装置的智能配电网分析与试验技术

将重点关注含 DG、微网及储能装置的智能配电网状态估计技术、参数辨识技术、网损分析技术、潮流优化技术、可靠性评估技术、电能质量分析与控制技术等。研究基于智能配电网自愈控制的 DG 及储能元件规划配置方法;研究含 DG、微网及储能装置的智能配电网的动态模拟方法和数字-物理混合模拟方法与试验技术;研究基于硬件在环仿真(hardware-in-the-loop simulation, HILS)的单元测试技术;研究智能配电网核心装备的现场测试技术。

智能配电网数据量测与信息采集的完备性有待提高,系统中很多 DG、储能元件及相关控制器、变流器是作为整体提供给用户的,其中的运行参数,主要是控制参数往往很难获得,这给自愈控制的动态仿真带来了困难。此外,配电网的网络结构复杂、庞大且高度不对称,在分析、仿真、计算时很难保证底层数据的准确性和完整性,因此,自愈控制相关算法应具有有良好的规模扩展性与容错能力。

上述研究将针对自愈控制技术,在主站层面提供一系列的配电网分析方法。在终端层面,提供自愈控制关键设备的试验测试技术。

3)在线智能分析与决策技术

重点关注基于预想事故的智能配电网自愈控制方案自动匹配技术,对于预想事故给出有效的控制与保护动作方案。研究基于预想事故的智能配电网自愈控制方案最佳匹配技术;研究智能配电网连锁故障演变的预防控制方法;研究智能配电网自愈控制的智能化学习技术;研究考虑多重分析结果的多目标智能决策技术。

自愈控制决策的协调、冲突解决、在线风险评估

与优化面向智能配电网的某一运行控制目标,考虑不同运行约束时可能给出多种不同甚至相互冲突的控制预案,因而要求自愈控制系统能够自动协调与解决控制决策的对立与冲突问题,在实施前能够对各种可行控制预案在线进行分析、比较、评价与优化,事先估计出可能的控制效果,并给出有效的后备控制方案。

该技术将为智能配电网“自我诊断”与“自我决策”提供智能化的分析方法与决策依据,实现系统在正常状态下的以运行优化和预防控制为目标的自愈控制。

4)含 DG、微网及储能装置的智能配电网故障特性分析技术

将重点关注各种 DG、储能装置在电网发生对称及不对称故障时的故障特性。研究外部故障时的微网故障特性;研究内部故障时的微网故障特性;研究含 DG、微网及储能装置的智能配电网的故障特性;研究系统接地方式、负荷水平与负荷性质、DG 与储能装置类型对智能配电网故障特性的影响。

智能配电网故障特性受配电网接地方式、负荷水平与负荷性质、DG 与储能装置类型及容量的影响较大,快速、准确、可靠的智能配电网故障特征提取是进行智能配电网故障类型识别、故障定位、保护装置开发的基础。

上述研究重点分析并总结智能配电网的故障特征及规律,为智能配电网保护装置的研发奠定理论基础。

5)智能配电网保护装置控制保护技术

重点关注多电源闭环供电的配电网利用局域信息实现网络式保护。研究网络重构后网络式保护装置自适应的控制保护原理;研究基于局域信息的保护装置与基于全局信息的支撑平台的保护协调配合技术;研制智能配电网保护测控一体化终端;研制用于指示故障分支的故障指示装置。

智能配电网在运行优化与故障恢复时的网络重构技术以及对 DG 即插即用的要求使得保护装置整定与配合的难度增加,自愈控制系统应当准确、及时地感知配电网网络拓扑变化及 DG 的投切,保护装置需要在第一时间完成在线自适应整定以及保护装置间的相互配合。

6)极端条件下关键负荷保障技术与大面积停电恢复技术

重点关注智能配电网内部严重故障被动解列技术。研究智能配电网外部严重故障主动解列技术;研究基于网络重构的智能配电网故障后局部供电恢复技术;研究智能配电网基于网络重构的电压控制

技术。研究极端条件下智能配电网关键负荷保障技术,包括关键负荷保障的主动解列技术及智能配电网故障解列时负荷分配与功率平衡控制方法;研究极端条件下基于 DG 的智能配电网黑启动技术。

DG 特性及归属对自愈控制技术实施有一定影响。首先,光伏、风机等 DG 出力具有随机性与波动性,通常不容易完成调峰、调频等调度运行目标;其次,归属于用户的 DG 也不能保证其与电网运行目标的一致性;再次,难以保证各种 DG 能够做到可通信、可量测与可调度。这些都对基于 DG 实现严重故障条件下的配电网关键负荷保障与黑启动技术提出了挑战。

上述研究实现极端条件下关键负荷不间断供电能力,为故障状态下智能配电网自愈控制系统提供理论依据。

7) 故障隔离与网络重构技术

重点关注基于局部信息与保护原理实现的自愈控制故障隔离技术。研究基于全局信息与分布式智能控制实现的故障隔离技术;研究含 DG、微网及储能装置的故障隔离和网络重构技术,包括紧急状况下的环网解列技术与网络再组合技术;研究基于控制代价最小的智能配电网网络重构技术;研究配电网内部严重故障被动解列技术;研究配电网外部严重故障主动解列技术;研究基于网络重构的配电网故障后局部供电恢复技术;研究配电网基于网络重构的电压控制技术。

基于集中控制与就地控制相结合的配电网自愈控制技术架构的协调性,利用就地信息的保护装置可实现故障的快速切除。而基于全局信息的网络重构则具有全局优化与计算能力,但需要相对较长的分析、计算与执行时间,利用不同控制方法的优点,通过协调与优化达到技术、经济上最佳的控制效果。

上述研究立足于配电网非正常状态下故障恢复技术,以期实现配电网内部故障及外部严重故障时的“自我恢复”。

3 问题与挑战

配电网自愈控制面临 DG 接入与电网结构多变的双重挑战。首先,DG 及储能装置的接入极大地改变了配电系统的运行特性,具有双向潮流的配电网在保护原理上与传统配电网有很大不同,而且不同类型的 DG 的故障特性也不相同,这对配电网自愈控制提出了挑战;此外,在智能配电网环境下,电网结构与运行方式可能出现更为复杂多样的变化,这要求自愈控制中的保护装置(或智能终端)能够适应此变化,即在网络结构发生变化时能自适应地实

现保护的整定与协调。

该项目将以广东金融高新技术服务区为依托,建成含多种 DG 及储能系统的智能配电网自愈控制示范园区。广东金融高新技术服务区高度集中了各类大型金融服务企业的数据处理中心、呼叫中心、灾备中心、培训中心和金融创新研发中心等,对电网可靠性有极高要求,具有较好的配电自动化水平。示范园区自愈控制技术将围绕集中—分散协调控制的体系架构进行重点研究与示范。通过该项目的实施,实现园区内配电网供电可靠性指标不低于 99.999%。

4 结语

智能配电网自愈控制技术已成为提高配电网供电可靠性和安全性,抵御连锁故障与大面积停电事故发生,解决大量 DG 接入的主要技术手段,具有广阔的市场前景。

该项目的实施将对推进智能配电网自愈控制技术的发展 and 实用化起到积极作用。首先,对智能配电网自愈控制技术的研究有利于在自愈控制相关算法、仿真试验平台技术和系统开发等方面取得重要突破;其次,智能配电网自愈控制技术的应用能减少电网故障时非故障段的停电时间,从而整体提升电网的供电可靠性水平,减少高新技术工业和商业金融等行业因停电所造成的经济损失,具有显著的经济与社会效益;再次,开发具有自主知识产权的智能配电网自愈控制相关核心技术装备有利于提高中国在电气设备制造领域的创造力、竞争力与整体技术水平;最后,建立科学合理的智能配电网综合评价方法,有利于引导智能配电网科学有序发展,提高中国在智能配电网自愈控制相关科研、设备制造等领域的自主创新能力,为智能配电网的建设提供有力的决策依据。

参考文献

- [1] 余贻鑫. 面向 21 世纪的智能配电网[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(6): 14-16.
YU Yixin. Intelli-D-Grid for the 21st century[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(6): 14-16.
- [2] 余贻鑫. 智能电网的技术组成和实现顺序[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 1-5.
YU Yixin. Technical composition of smart grid and its implementation sequence [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(2): 1-5.
- [3] AMIN S M, GIACOMONI A M. Smart grid, safe grid[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2012, 10(1): 33-40.
- [4] AMIN M. Energy infrastructure defense systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 861-875.
- [5] 王成山, 李鹏. 2011 年国际供电会议系列报道——分布式能源

- 发展与用户侧电能的高效利用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2):1-5.
WANG Chengshan, LI Peng. A review of CIRED 2011 on development of distributed energy resources and energy efficiency improvement on customer side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 1-5.
- [6] 陈星莺,顾欣欣,余昆,等. 城市电网自愈控制体系结构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24):38-42.
CHEN Xingying, GU Xinxin, YU Kun, et al. Architecture for self-healing control of urban power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 38-42.
- [7] 郭志忠. 电网自愈控制方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 85-91.
GUO Zhizhong. Scheme of self-healing control frame of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 85-91.
- [8] 翁嘉明,刘东,何维国,等. 基于层次分析法的配电网运行方式多目标优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4):56-61.
WENG Jiaming, LIU Dong, HE Weiguo, et al. Multi-objective optimization of distribution network operation mode based on AHP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 56-61.
- [9] 刘健,赵树仁,张小庆,等. 配电网故障处理关键技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24):88-92.
LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing, et al. Crucial techniques of fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 88-92.
- [10] 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, 36(4): 56-61.
LIAO Huaqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Smart grid power transfer capability analysis considering integrated renewable energy generations and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 36(4): 56-61.
- [11] 沈沉,黄少伟,陈颖. 未来电网的快速建模与仿真方法初探[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10):8-15.
SHEN Chen, HUANG Shaowei, CHEN Ying. Primary studies on fast simulation and modeling for future power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 8-15.
- [12] 黄玉辉,刘东,廖怀庆,等. 考虑电网特性的网络重构算法解空间优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10):51-55.
HUANG Yuhui, LIU Dong, LIAO Huaqing, et al. Network reconfiguration solution space optimization considering grid characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 51-55.
- [13] 刘健,负保记,崔琪,等. 一种快速自愈的分布智能馈线自动化系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10):62-66.
LIU Jian, YUN Baoji, CUI Qi, et al. A distributed intelligent feeder automation system with fast self-healing performance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 62-66.
- [14] 刘健,赵树仁,负保记,等. 分布智能型馈线自动化系统快速自愈技术及可靠性保障措施[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 67-71.
LIU Jian, ZHAO Shuren, YUN Baoji, et al. Fast self-healing technology in distributed intelligent feeder automation systems and its reliability enhancement [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 67-71.
- [15] 凌万水,刘东,陆一鸣,等. 基于 IEC 61850 的智能分布式馈线自动化模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6):90-95.
LING Wanshui, LIU Dong, LU Yiming, et al. Model of intelligent distributed feeder automation based on IEC 61850 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 90-95.
- [16] 翁之浩,刘东,柳劲松,等. 基于并行计算的馈线自动化仿真测试环境[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7):43-46.
WENG Zhihao, LIU Dong, LIU Jinsong, et al. A feeder automation simulation test environment based on parallel computation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 43-46.

董旭柱(1970—),男,通信作者,博士,“千人计划”特聘专家,主要研究方向:配电自动化、储能、新能源和微网。E-mail: dongxz@csg.cn
黄邵远(1971—),男,高级工程师,主要研究方向:配电自动化。E-mail: huangsy@csg.cn
陈柔伊(1981—),女,工程师,主要研究方向:智能电网。E-mail: chenry@csg.cn

Self-healing Control Technology for Smart Distribution System

DONG Xuzhu¹, HUANG Shaoyuan¹, CHEN Rouyi¹, LI Peng², ZHANG Wenfeng³

- (1. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China;
2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Self-healing is one of the most significant characteristics of the smart distribution system. It provides possibilities to solve various problems of the distribution system, such as the low capacity utilization rate, the low power supply reliability and the high line loss rate, all of which have long since existed in China. Firstly, this paper introduces the aim, technical solution and implementation condition of self-healing control of the smart distribution system, based on which, it then deals with some key scientific issues of intelligent distribution network, including simulation, analysis and test technology, intelligent decision-making and network reconfiguration, fault characteristic and its protection as well as the key load security. The challenges facing the research and demonstration of self-healing control are summarized.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A114).

Key words: smart distribution system; self-healing control; distributed generator (DG); microgrid; energy storage