

智能配电网保护自愈控制系统研究

舒心蕾¹, 高 阳²

(1. 沈阳工程学院研究生部, 辽宁 沈阳 110136; 2. 沈阳工程学院科技处, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 配电网作为满足用户用电需求、提高供电可靠性的关键环节, 需要完善的保护自愈控制系统来保证。介绍了配电网保护自愈控制系统的三种类型, 从电源侧、负荷侧以及电网稳定性三方面介绍了配电网保护自愈控制系统的需求, 简述了配电网自愈控制系统的特征, 并介绍了在线状态监测、灵活可靠的通信网架以及故障隔离及恢复等自愈控制关键技术, 提出并改进了智能配电网自愈控制系统的基本架构, 为提高自愈控制质量提供了新思路。

关键词: 配电网; 自愈控制; 状态监测; 故障恢复; 对等通信

Research on protection and self-healing control system of intelligent distribution network

SHU Xinlei¹ GAO Yang²

(1. Graduate Department Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China;

2. Science and Technology Division Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: As a key link to meet the power demand of users and improve the reliability of power supply, distribution network needs a perfect protection self-healing control system to ensure. Three types of self-healing control systems for power distribution network protection is introduced. This paper introduces three types of distribution network protection self-healing control system as well as the requirements of distribution network protection self-healing control system from three aspects of power supply side, load side and power grid stability. This paper also briefly describes the characteristics of distribution network self-healing control system and introduces the key technologies of self-healing control, such as on-line condition monitoring, flexible and reliable communication network and fault isolation and recovery. The basic architecture of self-healing control system of intelligent distribution network is proposed and improved, which provides a new idea for improving the quality of self-healing control.

Key words: distribution network; self-healing control; status monitoring; fault recovery

0 引言

配电网是联系输电网和电力用户的关键环节。对配电网进行合理的规划和配置, 有利于降低线路和变压器损耗, 提高电能传输效率。随着国民经济的发展, 我国在配电网负荷容量不断提高与配电网建设相对滞后的矛盾日渐凸显, 尤其在供电可靠性方面, 我国与国际先进水平还存在

较大差距。据统计, 我国10 kV用户平均供电可靠性为99.940%, 平均停电时间5.22 h, 而新加坡在2011年时就达到99.999 941%, 平均停电时间0.31 min^[1]。与此同时, 超过85%的故障停电是由于配电网故障造成的^[2]。为了提高供电可靠性, 在快速有效隔离故障的同时, 还需尽快对非故障失电区域进行负荷转供, 以达到配电网自愈

的目标。

由于输电网的一次网架结构较为坚强，一般为多电源合环运行，发生“N-1”故障时不会出现非故障区域失电，而配电网一般为单电源辐射接线或多电源带开环联络点接线，发生故障时，往往也会伴随着停电。因此对自愈技术的研究对象一般为配电网。近几年针对配电网自愈控制研究主要集中在动态拓扑识别^[3]、多代理技术、智能算法^[4]及图论等方向。

随着分布式电源消纳能力增强，允许其最大程度接入，配电网也呈现出了电流多源、双向流动等特点，运行方式日趋复杂多变，一定程度上增加了配电网自愈控制的难度。因此，研究并改进配电网自愈控制系统对于提高配电网的安全性、可靠性乃至新能源消纳能力等方面都具有重要的意义。

1 智能配电网保护自愈控制系统

1.1 配电网保护自愈控制系统概述

“自愈”的概念首先出现在生物医学等生命科学领域，对应到电力系统领域，更细致地说，对应到配电网领域，一般理解为是指配电网具有自我预防、自治修复以及从故障中恢复的能力。自愈控制系统可以快速且准确地诊断、隔离和整改电路中出现的故障，并且能准确提供相关技术，解决故障产生的一系列问题。智能自愈控制系统应该能做到在无需或者仅需少量人工干预的前提下实现对不同类型故障情况下的配电网进行快速诊断、隔离，从而尽可能减少故障对于配电网的影响，并不停歇地在线评测智能电网的安全性和可靠性，明确配电网自愈性存在的问题和不足，对配电网的自愈性进行系统评价。

1.2 配电网保护自愈控制系统分类

配电网保护自愈控制系统的作用为实现故障的隔离与恢复，在国内更多地被称为配电自动化，在不同的应用场景下一般有三种方式^[6]：一是依靠配电网主站来进行逻辑判断的主站集中式馈线自动化（Feeder Automation, FA）^[7]；二是

以“电压-时间”型为代表的就地重合器模式^[8-9]；三是利用配电终端间的横向对等通信，由终端就地完成故障处理的智能分布式FA^[10-14]。三种馈线自动化模式的特点如下表所示。

表 各类型馈线自动化特点

Tab. Features of various types of feeder automation

馈线自动化类型	故障隔离时间	故障恢复时间	其他特点
主站集中式	10 s 以上	半自动模式：15 min 以上 全自动模式：1 min 左右	需要建设配自主站，终端与主站需建立通信
重合器式	30 s 以上	自动模式：100 s 以上 人工模式：1 h 以上	不依赖通信，但用户会感受到多次停电
智能分布式	120 ms 左右	500 ms 左右	终端间需要建立通信，对通信实时性要求较高

2 智能配电网自愈控制系统的需求与功能

2.1 智能配电网自愈控制的需求

下面从三个方面分析叙述近年来智能配电网自愈控制的主要需求。

(1) 电源侧需求

近年来，我国配电网电源侧的变化主要来源于逐年增长的分布式电源接入。分布式电源具有数量多、范围广、容量小、随机性和间歇性等突出特点。2019年，我国风电和太阳能装机容量分别为2.1亿kW和2.05亿kW，约占总装机容量的10.45%和10.2%。截至2020年6月底，光伏发电累计装机达到2.16亿kW。分布式电源的大规模分散接入增大了配电系统协调控制的复杂性和不确定性。因此，在设计智能配电网自愈控制系统的策略时，应考虑分布式电源的影响。

(2) 负荷侧需求

在新基建背景下，新型负荷呈现多元化和复杂化。5G基站、电动汽车和电采暖等多种新型负荷的随机无序接入极大地增加了实现自愈控制分析、判断与决策的难度。新型负荷，尤其是电采暖负荷特性与传统负荷的特性有较大的差异。未来新型负荷在整体负荷中的比例还会进一步增长，导致配电网特性会在很多方面发生改变。因

此,在设计智能配电网自愈控制系统的策略时,应考虑新型负荷接入的影响。

(3) 配电网系统稳定性的需求

随着多种分布式电源装机容量的增加,负荷的持续增长以及跨区域智能配电网规模的不断扩大,结构和运行的日益复杂,影响智能配电网稳定运行的不确定因素不断增加,这对配电网系统的供电可靠性、供电质量和潮流分布提出了更高的要求。

2.2 智能配电网自愈控制系统的功能

无人干预是自愈系统的基本特征,检测与诊断故障是自愈系统的基础,预防、抑制和消除故障是自愈系统的主要目的。新形势下自愈控制系统在拥有着极大发展空间的同时,也面临着巨大的挑战。智能配电网自愈控制系统的功能可简述为以下五个方面。

1) 故障监测与定位功能。配电网具有网络拓扑结构复杂、故障巡线困难的特点。实时监测系统的运行状态,并在故障发生时精确定位故障点具有十分重要的意义。

2) 故障隔离功能。当系统发生故障时,需要在获得故障信息的基础上,通过采取先进的控制方法抑制或消除故障对系统的影响。

3) 非故障区段供电恢复功能。旨在最大化恢复非故障失电区、缩短停电时间和提升故障处理能力,最大限度地减小停电损失,提升社会与经济效益。

4) 不安全状态下自动调节至正常状态功能。配电系统需要能够及时对系统不安全状态进行预警并调节,降低其对用户正常供电的影响,并防止其进一步发展为故障。

5) 信息积累与转化功能。通过对系统的监测和故障处理信息的长久积累,将获得的信息转化为关于系统和故障机理的知识,支撑自愈控制系统的高效运行。

总的来说,上述的五个方面可以理解为“防治结合”的方针,其中前三个概括了故障发生后通过故障定位、隔离与恢复使电网回到正常状态,而后两个方面则侧重于对设备以及线路的在

线状态监测。在设备存在隐患,如局部放电超过一定程度时,及时将信息上报以预防绝缘击穿的发生。

智能配电网自愈控制系统功能示意图如图1所示。

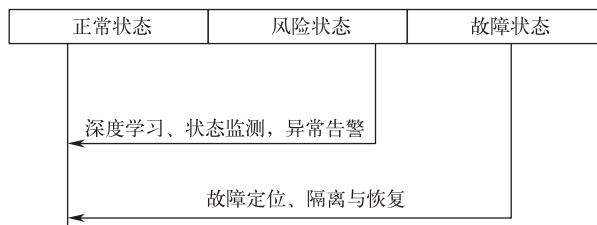


图1 智能配电网自愈控制系统功能示意图

Fig. 1 Functional schematic diagram of self-healing control system of intelligent distribution network

3 智能配电网自愈控制关键技术

3.1 智能监测技术

配电网设备点多面广,在运行过程中由于各类环境因素的影响不可避免地会发生老化现象,在达到一定程度时会演化为设备故障,从而造成经济损失。因此,对配电设备的维修活动是保障电网安全运行的重要手段,也是提高电网可靠性和经济性的有力支撑^[15]。

随着技术的进步,为简化运维成本,提高经济效益,维修的策略正逐步由定期检修向状态检修转变。要实现对整体性的系统故障自愈控制,需要掌握配电网系统的整体数据,也就是对设备状态进行监测。通过监测实时获得系统的运行状态,再通过分析系统的运行状态数据来评估系统的运行状态,预估潜在故障的概率,检测故障并诊断故障的信息以及调节系统不安全状态等,从而为自愈控制提供制定控制策略的依据。

3.2 灵活强健的通信技术

智能配电网的通信技术应根据配电网的区域大小和配电网的精准度以及地域网络复杂程度进行调整。为了实现智能配电网的未来发展与延伸,保证智能配电网故障自愈控制技术的稳定,配电网覆盖范围的通信系统必须具有开放性,通信系统还需要确保发生故障时的通信通

畅,保障配电网中故障的自愈信号能够发出。通信系统还需要能够有效地抵御外部攻击,提高配电网防破坏能力。

智能配电网的通信系统可以划分为两个部分:一是终端层设备与配电自动化主站的通信,按照通信介质可以分为无线通信和光纤通信两种,而光纤通信一般又可以分为EPON(Ethernet Passive Optical Network)和光纤以太网两种。目前在电力行业,无线通信以4G通信为主,终端通过无线通信模块接入4G网络;当采用EPON通信时,各终端通过ONU(Optical Network Unit)接入EPON网络,各ONU再通过OLT(Optical Line Terminal)与主站实现通信;当采用光纤以太网通信时,则是在各终端和主站均通过交换机接入以太网,实现终端与主站乃至终端与终端间的互通。

EPON和光纤以太网两种有线通信方式各有优缺点。EPON的优点是单个ONU的故障不会影响其他终端的通信,但需要增加通信节点时,可能需要更换全线的分光器,同时EPON网络仅支持主站与终端间的通信,并不支持终端之间的通信。光纤以太网的优点是可扩展性强,可直接增加节点,同时也支持终端间的横向通信,缺点是若网络中有交换机故障,可能影响整个网络的通信。需要指出的是,要实现智能分布式保护控制系统,必须实现终端间的实时通信,需采用光纤以太网方式。

智能配电网的通信系统的另一部分则是终端与各类传感器之间的通信,传统的通信方式以串口为主,随着近几年物联网技术的发展,如宽带PLC、LoRa和NB-IoT等技术均有所应用。

3.3 故障自愈技术

智能配电网的故障自愈技术是基于良好的通信技术之上的。配电网的故障区域停止供电时,故障区域内的原有配电系统停止运作,为了实现故障下的正常部分恢复供电,需要在配电网的故障范围内提供一种新的供电方式。为了能够保证最大范围的故障修复与电量损失,需要对停电区域内的电网负荷重构,隔离配电网中的故障范

围,保障其他正常线路供电。

配电网在规划中考虑到其闭环设计、开环运行的特性,因此配电网中包含大量的分段开关及少量联络开关。配电网的故障自愈即通过改变这些开关的状态来使配电网的拓扑结构发生改变,将可供电线路连接至非故障停电区域,达到恢复失电区域供电的目的。在故障恢复过程中涉及大量不确定关系,需考虑线路运行状态、负荷恢复数量、网损大小和开关动作次数等因素,因此配电网的故障恢复属于大规模非线性规划问题。分布式电源出力的随机性与波动性对配电网故障自愈方案的影响也在逐年增加。

4 智能配电网自愈控制系统体系架构

为进一步提高配电网故障自愈系统的应用效果,本文改进了智能配电网自愈控制框架中的三层控制结构,将近年来的新兴关键控制技术应用在系统的框架中,如图2所示。

图2架构中决策层是控制框架中的最高层,可以实现仿真功能。决策层主要通过另外两层保持实时通信从而分析故障原因,并在快速仿真结果的基础上找到并实施最佳控制方案,完成配电网故障自愈系统的智能控制。

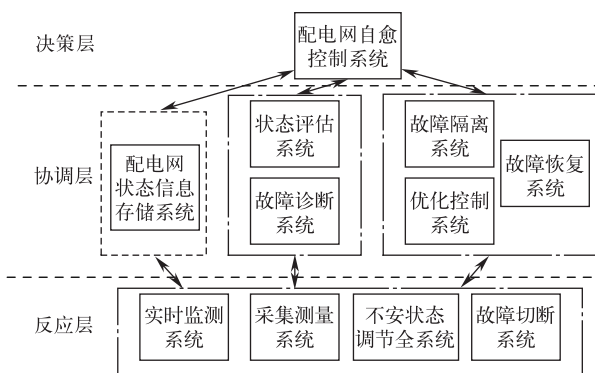


图2 智能配电网自愈控制系统架构

Fig. 2 Intelligent distribution network self-healing control system architecture

协调层负责接收反应层上传的配电网在不同状态下的运行信息,在分析处理后上传到决策层。在协调层中还有保存系统运行数据的状态信息存储系统、对系统状态进行分析的状态评估系

统、有效判断故障位置并向决策层发出信号的故障诊断系统、接收决策层指令隔离故障的故障隔离系统、负责采用故障自愈技术重构恢复供电的故障恢复系统和在满足运行约束条件的前提下提高系统经济性的优化控制系统。

反应层在架构中是最底层的，位于局部控制环，它能够通过远程终端控制系统采集配电网在不同运行状态下的信息参数，运用智能监测技术实时监测系统运行状况并与协调层通信，执行不安全状态调节与故障处理。

改进后的自愈控制系统将传统的自愈控制系统与先进的控制方法有机地结合在一起，实现了自愈运行控制，提升了智能配电网的安全、可靠和经济运行水平。

5 结束语

智能配电网结构复杂、运行方式多变，随着国民经济的发展，国家和人民对供电可靠性的要求也越来越高。配电网自愈不能仅着眼于定期检修和事故后处理，同时还须着力于推进如监测系统的运行状态、对不安全状态进行预警并调节等状态检修技术的发展，同时利用智能分布式配电保护自愈系统精确定位故障点、缩短停电时间、减小停电损失和提升社会与经济效益。本文通过对配电网保护自愈控制领域的研究，简述了配电网自愈控制系统的特征，简要分析了分布式电源与新型负荷接入配电网后配电网的需求与功能，并介绍了三种自愈控制关键技术，改进并完善了智能配电网自愈控制系统的基本架构，为提高自愈控制质量提供了新思路。**EA**

参考文献

- [1] 马钊, 安婷, 尚宇炜. 国内外配电前沿技术动态及发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1552-1567.
- [2] 刘健. 配电网故障处理研究进展[J]. 供用电, 2015, 32(4): 8-15.
- [3] 朱中华, 余群兵, 陈俊, 等. 分布式配电自愈的拓扑及状态自识别方法[J]. 供用电, 2018,

35(7): 67-72.

- [4] 李厚龙. 智能配电网故障定位与故障恢复方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
- [5] 温伟弘. 基于图论和启发式算法的配网故障自愈方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [6] 张波, 吕军, 宁昕, 等. 就地型馈线自动化差异化应用模式[J]. 供用电, 2017, 34(10): 48-53, 13.
- [7] 李新华, 孙志云, 肖谋富, 等. 基于馈线组的配网馈线故障集中处理模式[J]. 湖南电力, 2013, 33(6): 17-19.
- [8] 祁升龙, 芦翔, 黄鸣宇, 等. 自适应综合型馈线自动化及其测试[J]. 宁夏电力, 2018(5): 22-26.
- [9] 梁文祥. “电压—时间”型馈线自动化模式及应用[J]. 山东电力技术, 2012(6): 34-36.
- [10] 王彦国, 赵希才. 智能分布式配电保护及自愈控制系统[J]. 供用电, 2019, 36(9): 2-8.
- [11] 柳劲松, 樊秀娟, 翁嘉明, 等. 智能分布式馈线自动化的多电源处理方法[J]. 供用电, 2015, 32(4): 29-31, 45.
- [12] 虞坚阳, 王科龙, 秦勇明, 等. 主动配电网智能分布式馈线自动化故障定位方法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(12): 38-44.
- [13] 张伟. 一种智能分布式馈线自动化故障判定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 108-113.
- [14] 吴圣芳, 赵雷, 顾健雨. 智能分布式FA在配电网中的应用[J]. 建筑电气, 2018, 37(6): 23-26.
- [15] 曹斌, 代文良, 黎志, 等. 电网侧储能电站防孤岛保护的整定研究[J]. 湖南电力, 2019, 39(5): 9-12, 17.

作者简介



舒心蕾

舒心蕾(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为输配电技术。

(收稿日期: 2021-06-10)