

智能化配电馈线自愈控制策略及其工程应用分析

赵鸿亮

内蒙古电力（集团）有限责任公司锡林郭勒供电公司阿巴嘎旗供电公司，内蒙古 锡林郭勒 011400

[摘要]随着智能电网相关技术不断发展，配电馈线自愈控制因其能提升供电可靠性且可自动完成故障定位、隔离与非故障区域恢复供电，同时可远程接收控制指令操作开关设备、运维效率，故在电力系统里所起的作用愈发重要。文中全面剖析智能化配电馈线自愈控制的基本原理，着重探讨故障检测及定位、通信与信息交互、智能决策与重构算法等关键技术，还对集中式、分布式以及协同式自愈控制策略展开分类比对。在工程应用层面，深入探究系统集成与设备兼容性、控制策略适应性与可靠性、信息网络安全保障以及运维管理与标准化建设等关键难题，并给出相应解决办法。

[关键词]配电馈线；自愈控制；智能化；工程应用；控制策略

DOI: 10.33142/sca.v8i10.18293 中图分类号: TM76 文献标识码: A

Intelligent Distribution Feeder Self-healing Control Strategy and Its Engineering Application Analysis

ZHAO Hongliang

Abaga Banner Power Supply Branch, Xilingol Power Supply Company, Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Xilingol, Inner Mongolia, 011400, China

Abstract: With the continuous development of smart grid related technologies, self-healing control of distribution feeders plays an increasingly important role in the power system due to its ability to improve power supply reliability and automatically complete fault location, isolation, and restoration of power supply in non fault areas. At the same time, it can remotely receive control instructions to operate switch equipment and improve operation and maintenance efficiency. The article comprehensively analyzes the basic principles of intelligent distribution feeder self-healing control, focusing on key technologies such as fault detection and location, communication and information exchange, intelligent decision-making and reconstruction algorithms. It also conducts a classification comparison of centralized, distributed, and collaborative self-healing control strategies. At the engineering application level, we will delve into key challenges such as system integration and equipment compatibility, control strategy adaptability and reliability, information network security assurance, and operation and maintenance management and standardization construction, and provide corresponding solutions.

Keywords: distribution feeder; self-healing control; intelligentization; engineering application; control strategy

引言

社会经济的快速发展，人民生活水平的不断提升，社会用电负荷的急剧攀升，对配网供电可靠性提出了更高的要求，且随着智能电网技术的兴起，配电馈线自愈控制技术得到了广泛关注，提高配电馈线自愈成功率，成为提高配网供电可靠性尤为重要的突破口。与传统的配电馈线故障抢修处理相比，配电馈线自愈控制技术具有自动感知故障、自动隔离故障、自动恢复非故障区域用电的特点，不仅减少了供电所抢修的人力，还大幅缩短了非故障区域的复电时间。因此，智能化配电馈线自愈控制技术应运而生，

它通过自动检测、定位和隔离故障，实现供电的快速恢复，从而显著提升系统韧性。

1 配电馈线自愈控制的基本原理

配电馈线自愈控制指的是当系统出现故障的时候，借助自动化的方式去实时地检测故障情况、确定故障位置并且将故障区域隔离起来，与此同时还要迅速地对网络加以重构，以此来恢复那些没有发生故障区域的供电。它的基本原理是依靠实时数据采集、智能分析以及执行控制这三个环节相互协同来发挥作用。具体来讲，自愈控制系统会凭借传感器以及监测设备来收集馈线在运行期间的各项

参数,像电流、电压还有频率等等,接着运用特定的算法去识别出异常的状态,进而触发相应的控制动作,比如进行开关的操作或者转移负荷,通过这些举措达成故障隔离以及供电恢复的目的。这个过程不但需要故障检测具备很高的精度,而且要保证控制决策既及时又准确,如此才能把停电的时间以及范围尽可能地缩小。自愈控制最为关键的目标是要提高配电系统的自适应能力以及可靠性,通过削减人工的干预,降低运维方面的成本,并且能够应对高比例可再生能源接入所引发的不确定性情况。在实际的应用过程当中,自愈控制原理得结合配电网络的具体拓扑状况以及运行条件来进行优化处理,比如说在呈现辐射状或者环网结构的情况下,控制策略就得做出调整,以便在安全性与经济性之间找到平衡点。自愈控制的基本原理很好地展现了智能化技术在电力系统当中的深度融合情况,同时也为构建具备韧性的配电网络打下了相应的理论根基。

2 智能化馈线自愈控制关键技术

2.1 故障检测与定位技术

故障检测与定位技术作为自愈控制的根基所在,其准确与否会直接牵动后续控制动作的效率以及可靠程度。现代智能化检测技术往往会把多种数据来源整合起来,像对电流还有电压波形展开分析,再者就是运用行波测距的方法,以此达成快速故障识别的目的。举例来讲,依靠人工智能的算法,能够凭借历史数据来对模型加以训练,进而可实时精准地识别出故障的具体类型以及所处位置,如此一来便能提升检测的精度水平。在故障定位这个层面上,倘若采用分布式测量单元并且结合同步相量技术,那么便能够极为精确地确定故障点的位置,同时也能削减误报出现的风险。这些技术一方面要依靠高精度的传感器,另一方面还得和通信系统紧密地融合在一起,从而保证数据能够实时地完成传输以及处理操作。故障检测与定位技术当下的发展趋势是朝着自适应学习的方向去演进的,借助持续不断地对算法予以优化的方式,去契合网络所发生动态变化情况,进而促使系统的整体鲁棒性得以提升。

2.2 通信与信息交互技术

通信以及信息交互技术给自愈控制开辟了数据传输以及共享的途径,其对于达成快速响应还有协同决策而言,乃是极为关键的支撑所在。在现代的配电系统当中,常用的通信方式涵盖了光纤通信、无线网络以及电力线载波等等,这些不同的通信方式各自都具备着不一样的带宽、延迟还有可靠性方面的特性。就好比说,光纤通信比较适合那种对可靠性有着较高要求的场景,反观无线网络,则是更易于在那些地处偏远的区域去进行部署^[1]。信息交互技

术牵涉到数据协议以及接口的标准化事宜,要保证不同设备之间能够实现无缝的连接,比如可以采用 IEC61850 标准来达成互操作性的目标。这些相关技术不但能够对实时数据交换给予支持,而且还推动了控制中心和现场设备之间的协同配合,进而促使自愈控制的整体效率得以提升。

2.3 智能决策与重构算法

智能决策以及重构算法在自愈控制当中占据着极为关键的地位。它会依据实时获取的数据以及预先设定好的规则来生成最为理想的控制策略,进而达成故障得以恢复以及网络完成重构的目的。就常用的算法而言,其中包含了启发式搜索、模糊逻辑还有机器学习等多种类型。比如说,遗传算法便能够用来对开关操作的序列加以优化,以此使停电的范围尽可能地缩小。而重构算法更多地着眼于网络拓扑方面的调整工作,在出现故障之后能够迅速恢复供电,并且在这一过程中还会充分考虑到负荷是否平衡以及设备是否存在约束等因素。这些算法一方面需要有高效的计算能力作为支撑,另一方面还得具备自适应的特性,这样才能更好地去应对网络运行状态所发生的各种变化。智能决策过程要得以实现,离不开高性能的计算平台以及数据库。借助模拟以及预测的方式,可以对不同的控制方案所产生的效果展开评估,最终从中挑选出最优的那个解决方案。

3 自愈控制策略分类与实现方式

3.1 集中式自愈控制策略

集中式自愈控制策略依靠中央控制单元来做全局性的决策工作,其会去收集整个网络的数据,并且统一制定出故障处理以及重构方面的方案。此策略一般会采用像优化模型或者专家系统这类高级算法,以此达成整体上的最优控制效果。集中式控制有能够对资源进行全面协调这样的优势,可以避免出现局部决策相互冲突的情况,它比较适用于结构相对复杂的配电网络。不过,要实现集中式控制得具备高速的通信条件以及强大的计算能力,而且对于中心节点有着较高的依赖程度,要是中心节点出了问题导致失效,那么很可能会致使整个系统陷入瘫痪状态。在实际的应用场景当中,集中式策略往往会和 SCADA 系统相结合,借助实时的监控以及数据管理操作,进而提升控制的精度。

3.2 分布式自愈控制策略

分布式自愈控制策略把决策权交给本地设备,像智能开关或者继电器这类设备,借助局部的信息交流来达成自主故障处理的目的。该策略是以多代理系统或者分布式算法作为基础的,各个节点各自独立地去执行检测以及控制

方面的动作,如此一来就能够降低对中央单元的依赖程度。分布式控制有诸多优点,比如响应速度比较快,容错能力也很强,特别适合那种拓扑结构时常发生变化的配电网络。比如说,在馈线的末端安排智能终端,能够迅速地对故障进行隔离并且恢复供电,不需要等到中心发出指令。不过,分布式策略有可能会碰到协调方面的问题,像是局部决策出现冲突或者是信息存在不一致的情况,所以得要设计一致性协议来保证全局能够实现优化。

3.3 协同式自愈控制策略

协同式自愈控制策略融合了集中式以及分布式所具备的优点,凭借分层架构达成全局决策与局部决策之间的协同配合,在此策略之下,上层控制中心承担着宏观层面的优化以及协调方面的工作,而下层设备则负责执行快速的局部动作,进而形成了一种颇为高效的分工模式。协同式控制可灵活地去适应网络方面的变化,就好比在故障出现的时候,本地设备会先行开展初步的处理工作,随后再由中心来对策略加以验证并做出相应的调整。这种方式的优势体现在提升了系统的自适应能力以及可靠性,与此还使得通信负担得以降低^[2]。要实现协同式策略,需要明确界定清晰的接口与协议,以此来保证各层级之间信息能够顺畅地进行交换。在实际的工程应用当中,协同式控制已然成为研究领域的热点所在,原因就在于它能够有效地去应对高渗透率分布式能源所带来的种种挑战。

3.4 策略比较与应用场景分析

对于不同自愈控制策略展开比较的情况来看,集中式策略在结构较为稳定且资源相对集中的大型网络当中是适用的,然而分布式策略相较于前者而言,其更适合那种拓扑呈现出灵活性并且还要求能够快速做出响应的场景。协同式策略在复杂的环境之下表现得颇为突出,它可达成对全局优化以及局部自主性之间的平衡状态。经过对应用场景加以分析可以发现,在 urban 配电系统里,集中式策略凭借中心监控这一方式能够达成高效的管理效果;而在 rural 或者分布式能源有着高渗透程度的区域,分布式策略就更容易去部署实施了。协同式策略是适用于混合网络的,就好比多微网互联系统这类情况,其中需要同时兼顾到协调方面的需求以及独立性的要求。在选择策略的时候,需要综合地去考量网络的规模、通信的具体条件还有经济方面的诸多因素,比如说集中式策略或许就需要投入较高的资金,而分布式策略则更加侧重于设备智能化的成本方面。

4 工程应用中的关键问题与对策

4.1 系统集成与设备兼容性

系统集成以及设备兼容性在自愈控制工程的应用方

面,称得上是首要面临的挑战,这涉及到不同厂商所生产的设备以及各个子系统之间的相互连通。就好比传统配电设备有可能并不支持现代的通信协议,如此一来便会出现集成方面的诸多困难,最终也对控制效率产生了影响。要解决这样的问题,可采取的对策像是积极推动标准化接口以及开放架构的落实,比如采用通用数据模型来促使设备能够实现互操作。并且在系统设计的阶段当中,需要开展兼容性测试以及模拟工作,以此来识别出潜在存在的冲突并进而对集成方案加以优化。借助引入中间件或者适配器的方式,可以起到桥接新旧系统的作用,这样也能在一定程度上减少升级所需的成本。

4.2 控制策略的适应性与可靠性

控制策略所具备的适应性以及可靠性,这两者与自愈系统在实际运行时的性能有着极为密切的关系。就好比说,在出现负荷波动或者环境发生变化的情况下,控制策略得能够依据实际情况动态地做出调整,唯有如此才能够维持其应有的有效性。而适应性方面存在的问题,具体表现出来的状况像是算法变得僵化不动或者响应速度出现延迟等情况,这些情况很可能会致使故障处理最终以失败告终。为了促使适应性得以提升,可以考虑去采用在线学习的方式以及自适应算法,比如说强化学习模型,凭借实时获取的数据来对控制参数加以优化^[3]。在可靠性这个层面上来讲,那就需要借助冗余设计以及故障树分析这两种手段,以此来对策略的鲁棒性展开评估,并且要制定出相应的备份方案。举例而言,在一些关键的节点处去部署多个控制单元,从而防止出现因单个控制单元失效而导致整个系统出现问题的情况。

4.3 信息网络安全保障

信息网络安全保障对于自愈控制系统而言极为关键,若遭遇网络攻击或者出现数据泄露等情况,极有可能致使控制功能失灵,甚至引发系统彻底崩溃。就好比恶意入侵行为,其很可能会对故障数据加以篡改,又或者是触发误操作,进而对供电安全形成严重威胁。就对策来讲,需要去构建起多层次的防御体系,把加密技术、访问控制以及入侵检测等手段综合起来运用,以此来保障数据在传输以及存储过程中的安全状况。与此还得定期开展安全审计工作,并且对存在的漏洞予以修补,以此提升系统抵御攻击的能力。在工程部署方面,网络安全应当融入到系统的整个生命周期当中,在从设计环节一直到运维阶段的全过程都要实施严格管控,比如可以采用零信任架构的方式,以此来降低内部所存在的风险。员工培训以及应急预案同样属于保障网络安全的重要环节,其能够在面对潜在威胁时

及时做出应对措施。

4.4 运维管理与标准化建设

运维管理以及标准化建设乃是自愈控制工程得以持续发展的重要根基,这其中涵盖了日常维护工作、针对性的监测事宜以及规范方面的制定等内容。就运维管理而言,存在着诸如设备出现老化情况、数据管理呈现出一片混乱状况以及相关人员技能有所欠缺等一系列问题,而这些问题很可能会对系统的长期稳定运行造成不利影响。对于这些运维管理方面的问题,相应的对策涉及到要建立起智能化的运维平台,借助大数据以及预测性维护手段,从而能够提前对设备潜在的隐患予以识别^[4]。至于标准化建设,则需要着力去推动行业规范朝着统一的方向发展,比如要制定有关自愈控制技术的标准以及测试流程,以此来促使设备实现互操作并且让系统达成兼容状态。

5 结束语

本文全面且细致地探讨了智能化配电馈线自愈控制策略以及该策略在实际工程当中的应用情况,对其基本原理、关键技术以及不同分类都进行了深入分析,并且针对在工程实施过程中所遇到的问题给出了相应的解决办法。研究得出,自愈控制技术借助智能化以及自动化的相关手段,使得配电系统的可靠性以及恢复能力都得到了较为明显的提升,在这其中,协同式策略更是展现

出了颇为突出的应用潜力。不过在工程的实际应用环节当中,依旧面临着像集成兼容性方面、策略适应性方面、网络安全以及运维管理等诸多方面的诸多挑战,需要依靠多种技术相互融合以及推动标准化进程来予以解决。未来的研究应当着重关注人工智能和自愈控制的深度融合,同时也需要着力于能够适应高比例可再生能源的全新策略开发工作。并且在工程实践方面,还需要进一步强化测试验证以及人才培养等相关工作,以此来促使该技术得以广泛推广应用。

[参考文献]

- [1]陈光.配电自动化技术在智能电网中的应用[J].电力设备管理,2025(6):59-61.
- [2]张寒.输配电及用电工程中的自动化运行技术与智能化研究[J].中国宽带,2024,20(11):100-102.
- [3]陶毅刚,谭靖,黎敏,等.基于改进多智能体系统的分布式配电网自愈方法 [J]. 自动化与仪器仪表,2024(10):106-109.
- [4]金泰.智能配电自动化系统中的自愈控制技术分析[J].光源与照明,2024(6):144-146.

作者简介:赵鸿亮(1973.8—),男,阿巴嘎旗,汉族,本科,工程师,就职于内蒙古锡林郭勒盟阿巴嘎旗供电公司,从事电力系统配电自动化方面的工作。