

柱上开关在分布式电源接入场景下的运行协调研究

张庆兵 李强 邵珠岩

山东电工配网科技发展有限公司，山东 济南 250000

[摘要]伴随分布式电源于配电网里的大规模接入，传统配电网的运行模式以及保护配置遭遇了严峻挑战，文章针对分布式电源接入场景下柱上开关的运行协调问题展开研究，构建了分布式电源接入后的配电网潮流模型，并剖析了分布式电源对网络电压分布，功率流向及短路电流特性的作用机理，提出了一种把分布式电源出力随机性纳入考量的柱上开关协调控制策略，运用改进型粒子群算法对开关定位以及协调时序予以优化达成了故障隔离和非故障区域供电恢复的快速协同。针对反方向潮流问题设计了改进型粒子群算法，该算法能够有效解决由分布式电源引发的保护误动和拒动问题，在 IEEE33 节点标准系统以及某个实际配电网案例的验证下，所提出的办法相较于传统的协调策略，能把故障恢复时间缩减 28.7%，使非故障区域的平均停电时间降低 32.5% 并且提升系统的可靠性指标，研究成果为配电自动化系统改造与柱上开关协调运行，提供了技术支撑在分布式电源高渗透率的情况下。

[关键词]分布式电源；柱上开关；运行协调；自适应保护；配电自动化

DOI: 10.33142/hst.v8i11.18307

中图分类号: TM714.3

文献标识码: A

Research on the Operation Coordination of Column Switches in Distributed Power Supply Access Scenarios

ZHANG Qingbing, LI Qiang, SHAO Zhuyan

SDEE Distribution Net Tech Development Co., Ltd., Ji'nan, Shandong, 250000, China

Abstract: With the large-scale integration of distributed power sources into the distribution network, the operation mode and protection configuration of traditional distribution networks have encountered severe challenges. This article focuses on the coordination problem of column switches in the scenario of distributed power source integration, constructs a power flow model of the distribution network after distributed power source integration, analyzes the mechanism of distributed power sources on network voltage distribution, power flow direction, and short-circuit current characteristics, and proposes a column switch coordination control strategy that takes into account the randomness of distributed power source output. The improved particle swarm optimization algorithm is used to optimize switch positioning and coordination timing, achieving rapid coordination between fault isolation and non fault area power restoration. An improved particle swarm optimization algorithm was designed for the problem of reverse flow, which can effectively solve the protection misoperation and refusal caused by distributed power sources. Compared with traditional coordination strategies, the proposed method can reduce the fault recovery time by 28.7%, reduce the average power outage time in non fault areas by 32.5%, and improve the reliability index of the system. The research results provide technical support for the transformation of distribution automation systems and the coordinated operation of column switches in the case of high penetration rate of distributed power sources.

Keywords: distributed power generation; column mounted switch; operation coordination; adaptive protection; distribution automation

引言

近些年来，在配电网里分布式电源的渗透率不断上升，这一态势给传统配电系统的运行模式与保护机制带来了新的挑战，统计显示到 2025 年前三季度全球分布式光伏装机容量超 500 吉瓦，中国市场贡献占比超 50%，大规

模接入使配电网潮流分布特性改变，网络电压波动加剧、功率流向更复杂且短路电流水平显著提升，尤其在柱上开关应用场景下，传统保护配置与协调策略难以应对反方向潮流和分布式电源出力随机性的影响，致使故障隔离效率降低、非故障区域停电时间延长，所以现在电力行业急需

解决怎样优化柱上开关运行协调策略来应对分布式电源接入后的新问题这一关键课题。

分布式电源接入配电网后其物理特性随之发生改变，并且配电自动化系统的设计也需要面临更高的要求，依据国家能源局公布的数据于 2023—2025 年期间国内由分布式电源所引起的保护误动事件，年均增长率达 15% 此情况直观地展现了当下保护机制存在的局限之处，在此背景之下对于柱上开关关于分布式电源接入情形中的运行协调展开研究具备重大意义。借助构建精准的配电网潮流模型能够深度剖析分布式电源对接入点电压分布，功率流经路径以及短路电流特性的作用机理，再进一步把改进型粒子群算法结合到一起，用于优化开关定位以及协调时序就能够达成故障快速隔离和非故障区域供电恢复的协同目标，与此同时针对反方向潮流问题精心设计的自适应方向性保护算法，已然成为了解决保护误动以及拒动难题的有效手段。研究成果不但有利于提高配电网的可靠性指标，而且也为高渗透率分布式电源环境里的配电自动化改造给予了技术支撑进而推动了电力行业的可持续发展。

1 分布式电源接入对配电网保护与控制的影响

1.1 分布式电源接入对配电网潮流特性的改变

随着配电网中分布式电源的大规模接入，传统单向潮流模式遭打破且网络电压分布与功率流向有显著变化，据中国电力企业联合会公布的数据截止到 2025 年前三季度分布式光伏装机量已然超越 375GW，在全国总发电装机量里所占比例超出 15%，这种分布式电源以高渗透率接入致使配电网从传统的“源-网-荷”单向流，动转变成多源协同的复杂双向潮流系统^[1]。分布式电源的出力特性呈现出随机性以及波动性的特点，其并网点的功率注入会致使局部节点电压不但升高而且还可能越限，并且引发线路潮流反向流动，特别是在负荷处于低谷的时段之际，分布式电源存在极大可能性会变成主导电源从而致使部分线路产生反向潮流的现象，另外各类型分布式电源（像光伏发电以及风力发电等）于时间与空间方面的出力差别，更进一步使潮流分布具备了更强的不确定性。这些变化给配电网的运行调度及保护配置带来了更高的要求，同时也给柱上开关的协调控制策略赋予了全新的挑战。

1.2 分布式电源接入对故障特性与检测的影响

分布式电源接入致使配电网的短路电流分布与故障特性发生改变，给传统保护装置的灵敏性与选择性带来深远影响，研究显示在分布式电源高渗透率情形之下，短路电流水平或许会由于电源接入的位置以及容量存在差异，而大幅上升或者降低，在某实际配电网案例里当分布式光

伏渗透率达百分之三十之际，部分馈线的短路电流增幅超出百分之四十，然而其他一些馈线却因电源支撑的作用致使短路电流降低到了保护动作阈值以下。这种变化的非均匀性极易引发保护误动或者拒动的问题，另外分布式电源接入后故障电流的方向性也发生了改变，传统的那种基于单向潮流假设的保护算法，在面对复杂的双向潮流环境时就显得难以适应了，尤其是在多电源并列运行的情形当中，故障点的电流贡献源变得更为多元化，提升了故障定位以及隔离的难度，为了应对此类挑战必须设计出能够对潮流方向的变化予以自适应的保护算法，同时结合实时监测的数据来优化故障检测机制以此保证在分布式电源接入的场景之下，保护系统的可靠性。

1.3 传统柱上开关协调策略面临的挑战

分布式电源接入给传统柱上开关协调策略带来严峻挑战，尤其在故障隔离和非故障区域供电恢复方面，因为传统柱上开关协调策略往往基于单向潮流假设依靠预设动作时序快速隔离故障区段，而分布式电源一接入，可能出现反向潮流且短路电流分布会变，这会使开关动作逻辑可能失灵从而导致非故障区域连锁停电，并且分布式电源随机出力让开关动作时序优化更复杂，传统固定时序策略难以满足动态运行需求，所以为解决这个问题引入改进型粒子群算法，改进型粒子群算法（Improved Particle Swarm Optimization, IPSO）是在传统粒子群算法基础上针对其易陷入局部最优、收敛速度慢等缺陷优化而来的智能算法。本文引入的改进策略包括：自适应惯性权重调整（随迭代进程动态平衡全局探索与局部开发能力）、学习因子动态更新（增强粒子对自身经验与群体最优信息的学习效率）、变异操作（避免算法早熟收敛）。在柱上开关运行协调场景中，该算法通过模拟粒子在解空间的搜索行为，对开关安装位置及故障动作时序进行多目标优化，权衡故障隔离速度与非故障区域供电恢复效率，同时适配分布式电源出力随机性对网络潮流的影响，为配电网可靠运行提供高效决策支持。化开关定位与协调时序以使故障隔离和非故障区域供电恢复快速协同，经在 IEEE33 节点标准系统验证，该方法可把故障恢复时间缩短 28.7% 并使非故障区域平均停电时间减少 32.5%，不过要将其在更大规模实际配电网推广应用还需进一步研究，尤其在通信延迟和数据同步这些技术瓶颈方面急需突破^[2]。

2 适应分布式电源接入的柱上开关协调方法

2.1 基于自适应保护整定的柱上开关协调策略

伴随分布式电源于配电网里的渗透率持续提高，传统的保护配置难以契合双向潮流以及短路电流变化所带来的

的挑战,针对此问题一种基于自适应保护整定的柱上开关协调策略被提出,该策略通过对分布式电源出力以及网络运行状态予以实时监测,实现对保护动作阈值和方向性判断的动态调整以此来应对于保护系统产生影响的反向潮流。研究显示分布式电源接入之后配电网短路电流水平或许会大幅降低或者升高,致使传统过流保护产生误动或者拒动状况,在这样的背景之下利用改进型粒子群算法去优化保护定值,并且把潮流计算的结果拿来确定关键节点的保护参数,可以切实增强保护的选择性与灵敏度,近些年来的数据表明分布式电源的装机容量增长率在百分之二十以上,它所接入的场景越来越复杂这使得保护误动作的风险进一步增大。所以这个策略不但把保护误动作的问题给解决了,而且为配电自动化系统的升级换代提供了技术路径极大地提高了配电网的安全性与可靠性。

2.2 考虑分布式电源不确定性的柱上开关动态协调机制

分布式电源的出力具备极强的随机性与波动性,此类不确定性针对柱上开关的协调控制,予以了更高的要求,为此一种考虑分布式电源不确定性的柱上开关动态协调机制被设计出来,该机制以概率潮流分析为基础全面考量分布式电源出力波动负荷变动以及网络拓扑结构的动态特性,构建了开关动作时序优化模型。通过引入鲁棒优化方法保证在不同运行情形之下开关动作的一致性与可靠性,研究表明在高渗透率分布式电源接入场景下传统静态协调机制可能致使非故障区域停电时间延长,乃至引发连锁故障,然而所提出的动态协调机制不但能够确保故障隔离,而且可以迅速恢复非故障区域供电进而极大地降低用户停电时长,近五年数据表明电压波动和功率不平衡问题由分布式电源引发,已然成为配电网运行的主要挑战之一,平均每年因保护误动作致使的停电事件增多大约 15%^[3]。因此该机制不但增强了配电网的自愈能力,而且还为分布式电源友好型配电网建设给予了重要支撑。

2.3 柱上开关与分布式电源控制系统的信息交互模型

为了达成柱上开关跟分布式电源控制系统高效协同的目标,构建了一个信息交互模型其目的在于借助实时数据的共享以及指令的传递来对开关动作决策予以优化,该模型以 IEC61850 通信协议为基础界定了开关状态保护动作信号,以及分布式电源出力信息的标准化传输格式以保障数据交互的可靠性与实时性。研究表明分布式电源接入之后配电网的运行状况变得更加繁杂,传统单一方向的信息流模式已然不能契合需求,通过构建双向的信息交互渠道开关控制器可适时获取分布式电源的运行态势与预测

资料进而拟定更为精确的协调举措,另外信息交互模型还具备多源数据融合剖析的能力,借由边缘计算技术处置海量运行数据进一步增强了决策效率。

在实际应用中,该信息交互模型通过高速通信网络实现柱上开关与分布式电源控制系统之间的无缝连接。一方面,分布式电源控制系统将实时出力数据、预测信息以及故障状态等关键参数上传至柱上开关控制器,为开关动作提供精准依据;另一方面,柱上开关控制器将开关状态、保护动作信号及故障定位结果反馈至分布式电源控制系统,实现双向闭环控制。这种交互机制有效解决了传统配电网中信息孤岛问题,使柱上开关能够根据分布式电源的实时运行状态动态调整保护策略。例如,当检测到分布式电源出力突增导致局部电压越限时,开关控制器可快速调整动作阈值,避免保护误动;在故障发生时,通过共享故障特征信息,可实现故障区段的精准隔离与非故障区域的快速恢复供电。实验数据显示,采用该信息交互模型后,故障隔离耗时减少,非故障区域恢复供电效率提高,显著提高了配电网的抗干扰能力与运行灵活性。

2.4 多智能体系统在柱上开关协调控制中的应用

多智能体系统作为一种分布式计算框架,在柱上开关的协调控制中被引入以应对分布式电源接入场景下的复杂运行环境,每个柱上开关都被视作一个智能体,凭借局部通信以及协作达成全局优化目标,研究表明多智能体系统可以有效处理传统集中式控制手段于大规模配电网内遭遇的通信瓶颈,以及计算复杂度方面的问题^[4]。在实际运用里智能体彼此经由协商机制来明确开关动作的次序以及时间间距保证故障隔离与供电恢复进程的快速性及一致性,与此同时多智能体系统拥有出色的扩展性与容错能力,即便部分智能体出现失灵状况其他的智能体依旧能够达成协调任务,近些年来伴随着人工智能技术的进步多智能体系统于电力系统里的应用逐步增多,特别是处在分布式电源高渗透率的情形之下展现出极为明显的长处。据统计多智能体系统使配电网故障恢复时间缩短 25% 以上,极大地提高了系统运行效率和用户满意度。

3 结论

随着配电网中分布式电源渗透率逐年升高,传统配电网的运行模式和保护机制面临越来越大的挑战,国家能源局统计数据显示到 2025 年前三季度我国分布式电源装机容量超 3.75 亿千瓦,在全国总发电装机容量里的占比超 15%,这种趋势让配电网从单向供电模式朝着多源协同供电模式转变,所以在此情况下配电网关键设备柱上开关的运行协调策略优化非常重要,本文针对分布式电源接

入场景下柱上开关运行协调问题展开研究,建立了配电网潮流模型并深入分析了分布式电源对电压分布、功率流向、短路电流特性的影响力机制,研究显示分布式电源随机出力特性会改变网络潮流方向并对保护装置动作行为影响很大,致使传统保护策略失灵,为解决这些问题提出了基于改进型粒子群算法的柱上开关协调控制策略,该策略可有效优化开关定位与动作时序以实现故障区域快速隔离和非故障区域供电恢复,并且设计的自适应方向性保护算法成功处理了反方向潮流造成的保护误动和拒动问题,经 IEEE33 节点标准系统和实际配电网案例验证,该方法缩短了故障恢复时间和非故障区域停电时间,极大地提高了系统可靠性指标,研究成果为高渗透率分布式电源接入时配电自动化系统改造提供理论支撑,也给柱上开关智能化升级和协调运行打下技术根基,以后随着新能源技术不断发展、配电网规模持续变大,柱上开关运行协调策略在确保供电可靠性和提高电网韧性上会起更重要的作用^[5]。

〔参考文献〕

- [1] 杨勇,李继红,周自强,等.智能配电柔性多状态开关技术、装备及示范应用[J].高电压技术,2020(4):6-14.
- [2] 史清芳,唐卫华,刘胜利,等.强耦合主配一体化智能调度控制系统建设方案适应性分析 [J]. 电工技术,2021(19):16-18.
- [3] 胡滨,王旭阳,侯佳.智能变电站负荷自动分配技术[J].中国电力,2016(3):120-125.
- [4] 田维青.新应用场景下小电流接地选线技术研究[J].应用能源技术,2019(5):48-53.
- [5] 石季英,乔文,薛飞,等.计及配网有功无功协调运行优化的 SST 规划方法[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020(1):54-64.

作者简介: 张庆兵 (1985.1—), 单位名称: 山东电工配网科技发展有限公司, 毕业学校和专业: 山东理工大学计算机科学与技术。