

碳中和目标下配电网新能源故障容错保护优化策略

巩乔娜 王振一 刘学功 崔星宇

青岛城市学院, 山东青岛, 266106;

摘要: 本文以碳中和目标下配电网新能源故障容错保护为核心命题展开论述, 分析了新能源高渗透率场景中故障容错保护的现实紧迫性与技术瓶颈, 细致梳理了当下自适应电流保护、MMC型电能路由器容错控制以及行波故障定位等关键技术研究进程与工程应用情况, 进而给出三种改良策略, 即依靠场景激发的自适应保护参数动态改良, 电能路由器多级协同容错控制以及智能微断与边缘计算结合的积极感知保护, 研究显示, 多技术路线相互配合融合, 可以明显改善配电网应对复杂故障工况时的容错能力和供电稳定性, 为新型配电系统的安全高效运行提供了理论支持和技术参照。

关键词: 碳中和; 配电网; 新能源并网; 故障容错保护

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.116

引言

“双碳”目标持续推进过程中, 风电和光伏发电装机容量不断增长, 配电网处于能源生产和终端消费之间, 是所谓的“最后一公里”, 其正在由传统的无源单向网络渐渐变成包含诸多分布式电源、储能装置以及电动汽车充换电设施的有源双向交互系统。这种本质上的改变引发了前所未有的操作复杂性。新能源出力存在很强的随机性与间歇性, 所以故障电流的幅值、方向及其持续时间都表现出很大的不确定性, 以往依靠固定整定值的继电保护方案已无法满足需求, 本文着眼于配电网新能源高渗透率这一主要特点, 先论述故障容错保护的必要性, 再全面分析当下的技术情况, 进而给出前瞻性的改良措施, 希望为新型配电系统的安全运行提供有用的参考。

1 碳中和目标下配电网新能源故障容错保护必要性

(1) 新能源高渗透率深刻改变配电网故障特征

碳中和目标推动下, 分布式光伏、分散式风电等新能源在配电网中的渗透率不断上升, 电网结构由传统的单电源辐射状网络朝着多电源网状结构发生改变, 这种结构性的改变从本质上重新塑造了故障电流的产生原理和传播特征, 在传统配电网当中, 短路故障电流大多源于上级电网以及同步发电机, 其幅值较高, 方向单一, 持续时间短暂, 保护装置按照预先设定好的整定规则就能做到可靠响应, 可是众多电力电子型新能源接入之后, 故障时刻逆变器的控制策略立即限制输出电流, 从而致使故障电流的幅值明显减小, 甚至低到低于保护启动的临界值, 引发传统过电流保护出现拒动现象。

(2) 配电网安全运行面临多重风险叠加挑战

碳中和目标之下, 配电网既要承担高比例新能源并网消纳的任务, 也要符合电动汽车充电桩、新型储能、虚拟电厂等各类新型主体的接入需求, 其系统运行环境变得越发繁杂, 在这种多主体、多潮流、多工况相互交织的情况下, 配电网遭遇的安全风险表现出很强的叠加特征。极端天气事件频繁发生, 造成配电网遭受雷击、风害、冰灾等自然灾害的可能性明显增大, 有统计数据显示, 在部分地区, 由于雷击引发的配电线路断线故障占到总故障数量的很大一部分, 而且此类故障常常是多处同时受损, 这就对保护系统的选择性和速动性有着很高的要求。

(3) 传统保护体系与新型配电系统需求存在结构性矛盾

从技术发展进程来看, 当前的配电网保护体系形成于传统单向潮流、单电源供电的技术背景, 其设计思路、整定准则以及硬件设计均参照了以同步发电机为核心的电力系统。在迈向碳中和的过程中, 新型配电系统的形态、功能及运行原理发生了彻底改变, 从形态来讲, 配电网由无源网络转为有源网络, 电源点由集中设置转为分散分布, 能量流动方向也由单向变成交叉; 就功能而言, 配电网不再仅仅起到输送电能的作用, 而是变成一个能够有效调配源、网、荷、储各类资源的平台, 担负着吸纳新能源, 执行需求调节以及整合虚拟电厂等诸多职责; 在运行原理层面, 由于大量采用电力电子装置, 系统所具有的惯性一直在减小, 而且其对于频率和电压的动态反应特征已与以往大相径庭。

2 碳中和目标下配电网新能源故障容错保护现状

(1) 自适应电流保护技术的研究进展与应用局限
高比例新能源接入会产生保护适应性方面的问题,

学术界与工程界对此展开了诸多自适应保护技术的研究,近年来,依靠典型场景创建自适应电流保护策略成为研究热点,这种方法的关键思路在于利用新能源出力的历史数据以及气象信息,通过聚类算法获取典型运行场景,进而动态调整保护整定参数,使得保护装置可以随着系统运行方式的改变而自动适当地修正动作阈值,已有研究成果显示,利用生成对抗网络形成典型场景数据集,并按照此设计自适应保护方案,可以在包含大量分布式光伏的有源配电网中大幅缩减整体误动率,比传统固定整定的电流保护方法有着较为明显的优势。从工程应用角度而言,国内一些电网企业已经在局部地区展开了自适应保护的试点应用,它们会随时监测光伏出力及负荷变化情况,并动态修正过电流保护的起动作与延时特性,从而取得了一定的运行成果。

(2) 电能路由器容错控制技术的探索与工程瓶颈

电能路由器属于新型交直流配电网中的核心设备,它具有多种电能接口,电能路由功能也很灵活,所以被当作实现分布式新能源高效消纳以及故障隔离的重要装置,在故障容错控制这一领域,采用模块化多电平变换器的电能路由器成了研究的重点,研究者针对配电网背景谐波造成交流侧电流波形畸变这一状况,给出了依托桥臂电流预测控制的电流内环改良办法,利用两步预测控制实现了多频带复合信号的精准而快速的追踪,在交流端口电压出现畸变的情况下把电流总谐波畸变率抑制到比较低的水平。在交直流故障穿越方面,一些学者提出一种依靠独立桥臂电容电压控制的综合控制策略,该策略把桥臂有功功率的协调当作目标,实现了上下桥臂子模块电容电压的解耦控制,从而使得电能路由器即便处于交流不平衡、直流故障或者两者共同出现这样复杂的工况时,仍然能够持续运行,为了加强高压直流端口发生故障时低压端口的供电可靠性,有的研究给出一种包含正负极低压直流双端口的拓扑架构,通过在高压级正负极串联隔离型模块化多电平直流变换器,保证单极接地故障时健康极仍可正常传递功率。

(3) 行波故障定位与智能微断感知技术的发展态势

在故障检测与定位环节,行波保护技术因其响应速度快、定位精度高而受到普遍重视,这种技术依靠的是故障所产生的行波在输电线路中的传播特性,通过分析行波抵达监测点的时间差来精准计算故障距离。国内许多高校针对此领域展开了深入的研究,西安交通大学的学者建立了行波传播模型,并融合智能算法实现了对配电网断线故障点的精确测量,其定位的速度和精度要比传统方法好,就工程应用而言,美国电力研究协会开发出基于广域测量系统的配电线路故障定位技术,在线

路上设置大量监测点及时采集电气量信息,利用故障分量法做到了对断线故障的精准定位。智能微型断路器属于配电网末端的关键感知设备,它正在从传统的“被动跳闸保护”朝着“主动认知”方向转变,智能微断内部装有传感器,该传感器能够随时监测电流、电压、温度等参数。一旦出现故障,它会以毫秒级的速度切断故障电路,然后通过备用线路自动向非故障区域供电,如此便能在数秒之内重新恢复供电。

3 碳中和目标下配电网新能源故障容错保护优化策略

(1) 场景驱动的自适应保护参数协同优化策略

当下,自适应电流保护在极端工况下的鲁棒性有所欠缺,场景覆盖也不够全面,为解决这些问题,本文给出一种由场景驱动的保护参数协同优化策略,此策略的关键革新之处在于建立“离线场景库生成—在线场景适配—参数协同调节”这样的三层框架,在离线阶段,凭借长期时段内的新能源出力数据,气象数据以及负荷数据,经由改良过的深度聚类算法来创建包含全年各季节、全天各类别天气的典型场景集,而且针对每一个场景事先计算出其理想的保护整定参数组,从而形成参数场景数据库。

在线层需部署轻量化场景识别模块,通过边缘计算节点及时采集母线电压、线路潮流以及新能源出力等运行信息,通过特征获取和模式匹配,在极短的毫秒级时间内识别当前的运行场景,然后从参数场景库调用相应的整定参数组,在协同层采用多保护之间的参数协调机制,当线路两端的保护装置识别到不同场景时,借助站间通信协议自动协商确定最终的动作参数,防止因为参数不一致而造成保护拒动或者误动。以某高比例光伏接入的城区配电网为例,这个区域存在三种典型的场景,即晴天光伏大发,阴天光伏低出力,傍晚光伏骤降且晚高峰负荷增加,它们的故障电流特征差异很大。本策略实施后,保护系统可在场景转换时立即执行参数调节。在一次雷雨天气引发的单相接地故障情形下,保护装置精准识别出“阴雨低出力”场景,并采用相应的低灵敏度整定参数,从而防止了因光伏反向电流造成的误动作,且在故障切除后,快速恢复了非故障区域的供电,这表明该策略在多场景快速切换情况下具备有效性和可靠性。

(2) 电能路由器多级协同容错控制与稳定增强策略

电能路由器在复杂故障工况下存在稳定裕度不足、容错控制计算量大的工程瓶颈,本文给出一种多级协同容错控制与稳定增强策略,此策略从三个方面进行改良:

在控制架构方面,构建“高压级—低压级—端口级”三级协同控制框架,高压级承担交直流故障穿越和有功功率协调任务,低压级负责子模块电容电压均衡及环流抑制,端口级负责各个电能接口的独立功率调节,三级通过虚拟阻抗解耦实现稳定裕度的全面改善,在容错算法方面,提出基于桥臂电流预测控制的改良方案,利用离散数学模型的两步预测实现多频带信号的精准追踪,且将控制器计算量和子模块数量解耦,消除固有一拍时延的不良影响,使容错控制即便子模块数量大幅增加也能保持实时性能。

在增强稳定性方面,采用依靠串联虚拟电阻的稳定控制方法,既没有增加实际功率损耗,又凭借虚拟电阻的阻尼作用来抑制多级变换器间的功率振荡,再加上低压直流端口电流前馈控制来加快动态响应速率。拿某工业园区交直流混合配电网示范工程来说,这个园区汇集了许多屋顶光伏和储能装置,经过安排,采用此策略改良后的电能路由器,当发生一次直流侧单极接地故障时,健全极依靠自身独立桥臂电容电压解耦控制维持正常的功率输送,低压直流端口在虚拟电阻稳定控制的辅助下并未产生电压振荡,备用线路受电流前馈控制推动,几秒钟就完成了负荷转供,在整个故障应对期间,园区的关键生产负荷完全没有受到影响,这很好地证实了多级协同容错策略在实际工程中的良好表现。

(3) 智能微断与边缘计算融合的主动感知保护策略

当下,末端感知设备和系统级保护存在信息孤岛、协调不足的情况,本文给出一种智能微断和边缘计算深度融合的自主感知保护策略,此策略的设计思路在于将配电网末端的每一个智能微断从孤立的保护执行者转变为具有“感知—传达—决策—执行”完整链路能力的智能节点,依靠边缘计算平台实现末端感知和系统保护的紧密对接。在感知层面,智能微断凭借自身携带的高精度传感器随时采集包含电流、电压、温度、电弧光等大量信息,并借助边缘计算模块就近完成故障特征获取和初步故障判别,将经过结构化的故障信息传送到区域协调控制器,明显减轻通信带宽方面的压力。在决策层面,区域协调控制器根据从众多智能微断那里得到的故障信息,采用改良过的行波到达时间差算法精准定位故障,再依据配电自动化系统的开关状态信息来判断故障区间,进而制定出理想的故障隔离和负荷转供方案。

在执行层面,协调控制器通过“端—边—云”架构向相关的智能微断和配电开关发出控制指令,实现故障的快速隔离以及非故障区域的自动复原。以某零碳园区配电网为例,该园区安装了数百台智能微断和多套边缘计

算网关,有一次因施工外力破坏造成电缆断线故障时,距离故障点最近的智能微断在毫秒级的时间内检测到了电弧光和电流突变信号,边缘计算节点接到相邻三个微断协同传递的信息后,依靠行波到达时间差算法很快锁定了故障区间,协调控制器立刻发出隔离指令,健康馈线上的智能微断凭借备用电源切换控制在几秒之内就给园区办公区域和数据中心重新送上了电,全过程实现了故障的自动感知、精确定位以及快速自动修复,将停电带来的不良影响缩减到了最低程度。

4 结论

在碳中和目标下,当前配电网正处在由传统无源网络迈向有源交互系统的关键时期,大规模高比例新能源并入系统后,虽然带来了绿色低碳特性,但也极大地改变了故障特点及保护需求,以往的继电保护方案已无法应对这种重大变化,文章就新能源故障容错保护这一重点问题展开论述,表明保护升级已是当务之急,细致剖析自适应电流保护、电能路由器容错控制以及行波定位与智能微断感知等相关技术当前的研究情况及其在实际应用中遇到的障碍,并且给出以下三点改进措施:一是以场景为导向协同优化自适应保护参数;二是加强电能路由器各层级间的协作并提升其容错能力与稳定性;三是将智能微断和边缘计算关联起来以实现自动感知与保护。研究表明,单个技术路线很难全方位解决新型配电系统的复杂故障问题,唯有采取多技术融合、源网荷储协同的系统化路径,才有可能达成碳中和目标下配电网安全、高效又具韧性地运行。

参考文献

- [1] 孔祥平,袁宇波,黄浩声,等. 光伏电源故障电流的暂态特征及其影响因素[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2444-2449.
- [2] 刘畅,李昊,孙龙彪,等. 考虑抑制联络线峰谷差和光伏消纳的综合能源站日前优化调度[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 70-76.
- [3] 杨景旭,李钦豪,张勇军,等. 考虑电网需求匹配度的多EV聚合商需求响应削峰优化建模[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 125-134.
- [4] 杨秀,傅广努,刘方,等. 考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 699-708.
- [5] 唐巍,张志刚,张璐,等. 考虑微电网聚合整形和资产利用率提升的配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 89-98.