

新能源并网对继电保护系统的影响及其应对方法

徐耿 丁乐伟

国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司 宁夏吴忠 751100

摘要: 随着全球能源结构向清洁化、低碳化转型,风能、太阳能等新能源发电技术的规模化应用推动新能源机组大量并网运行。然而,新能源发电具有间歇性、波动性以及 inverter 接口特性,与传统同步发电机的运行机理存在显著差异,这使得电力系统的故障特征发生改变,进而对传统继电保护系统的动作可靠性、选择性和速动性产生冲击。本文结合新能源并网的技术特点,深入分析其对继电保护系统造成的具体影响,包括故障电流幅值降低、相位特性畸变、暂态过程复杂化等问题,并从保护原理优化、通信技术融合、自适应保护算法研发以及系统协同控制四个维度,提出具有可操作性的应对方法。通过理论分析与工程应用场景结合,为新能源并网背景下继电保护系统的升级改造提供技术参考,保障电力系统安全稳定运行。

关键词: 新能源并网; 继电保护系统; 故障特征; 自适应保护

引言

在“双碳”目标推动下,我国新能源发电装机容量持续增长,截至 2024 年底,风电、光伏总装机容量已突破 12 亿千瓦,新能源发电在电力系统中的占比不断提升,逐步成为电力供应的重要组成部分。传统电力系统以同步发电机为核心,其故障电流由发电机电磁暂态过程决定,幅值稳定、相位特性明确,继电保护系统基于这一特征形成了成熟的电流保护、距离保护等原理,能够实现故障的快速识别与切除。但新能源机组(尤其是光伏、风电)多通过 inverter 接口接入电网,其故障电流受 inverter 控制策略限制,不仅幅值远低于同步发电机,且故障电流的相位、谐波含量会随新能源机组的运行状态(如风速、光照强度)和控制策略动态变化。这种故障特征的改变,导致传统继电保护系统在新能源并网场景下频繁出现误动、拒动现象,例如在新能源渗透率较高的配电网中,传统过流保护因故障电流不足而无法可靠动作,严重威胁电网安全。因此,深入研究新能源并网对继电保护系统的影响,提出针对性的应对方法,已成为保障新能源大规模消纳和电力系统安全稳定运行的关键课题。

1 新能源并网对继电保护系统的影响

1.1 故障电流特性

从故障电流特性来看,传统同步发电机在故障发生时,其故障电流由定子绕组的电磁感应过程决定,短路电流幅值可达额定电流的 5-10 倍,且电流相位与电压相位具有固定

的滞后关系,这为传统过流保护、差动保护提供了清晰的动作判据。而新能源机组通过 inverter 接口并网时, inverter 的过流保护会限制故障电流幅值,通常仅为额定电流的 1.2-2 倍,部分弱电网场景下甚至更低。同时, inverter 采用脉宽调制(PWM)控制策略,故障电流中含有大量高次谐波,且电流相位可能随控制策略调整而超前或滞后于电压,导致传统基于基波电流幅值和相位差的保护判据失效^[1]。例如,在新能源并网的输电线路中,传统距离保护通过测量故障点到保护安装处的阻抗来判断故障位置,但由于故障电流幅值降低且相位畸变,阻抗测量值会出现较大偏差,可能导致保护误判故障位置,甚至误动切除非故障线路。

1.2 保护配合逻辑

在保护配合逻辑层面,传统电网的继电保护系统采用“阶梯型”时限配合方式,即上级保护的动作时限大于下级保护,确保故障发生时下级保护优先动作,实现保护的选择性。但新能源发电的间歇性和波动性会导致电网运行方式频繁变化,例如风速骤降会导致风电出力突然减少,此时电网的短路容量会随之降低,原本按最大运行方式整定的保护定值可能无法适应最小运行方式下的故障特征。以配电网为例,当光伏电站出力较高时,配电网的短路容量较大,传统过流保护的定值按此场景整定;若光照强度突然降低,光伏出力骤减,短路容量随之下降,此时发生故障时的故障电流可能低于保护定值,导致保护拒动,而上级保护因时限配合

关系无法及时动作,延长故障切除时间,扩大故障影响范围。此外,新能源机组的低电压穿越(LVRT)能力要求,使得机组在电网电压跌落时需保持并网并提供一定的无功支撑,这一过程中机组的输出电流特性会进一步改变,可能干扰相邻线路保护的逻辑,破坏保护之间的配合关系。

1.3 暂态稳定保护

传统电网的暂态稳定保护主要针对同步发电机的功角稳定问题,通过切机、切负荷等措施防止发电机失步。而新能源机组的暂态特性与同步发电机完全不同, inverter 接口的快速响应特性使得新能源机组在故障暂态过程中的功率波动更为剧烈,且暂态稳定的控制目标从“功角稳定”转变为“inverter 控制稳定性”。例如,在大规模风电基地并网的输电系统中,当输电线路发生故障时,风电集群的出力会因电压跌落而快速调整,若故障切除不及时, inverter 可能因过流保护动作而脱网,导致大规模功率缺额,引发电网频率崩溃。传统暂态稳定保护由于未考虑新能源机组的控制特性,无法准确判断暂态稳定状态,可能导致稳定控制措施失效,加剧电网暂态失稳风险。

2 新能源并网场景下继电保护系统的应对方法

2.1 基于故障特征重构的保护原理优化

针对新能源并网场景下故障电流幅值低、相位畸变的问题,需重构保护判据,突破传统基于基波电流的保护原理限制。一方面,可采用“谐波电流+基波电流”的多频段融合判据,利用新能源故障电流中高次谐波含量高的特征,将谐波电流幅值作为辅助判据,与基波电流判据形成互补,提高保护的灵敏度。在具体工程应用中,可通过傅里叶变换或小波变换对故障电流进行频段分解,精准提取3次、5次、7次等高次谐波分量,结合新能源机组的运行状态(如光伏逆变器的开关频率、风电变流器的调制方式)动态设定谐波电流阈值——例如,在光伏并网配电网的过流保护中,当光伏阵列处于部分遮蔽状态时,故障电流中的5次谐波占比会显著升高,此时可将5次谐波电流阈值设定为额定电流的0.3倍、7次谐波阈值设定为0.2倍,当基波电流未达到定值但谐波电流超过对应阈值时,保护仍能可靠动作。另一方面,可基于故障暂态分量构建保护原理,新能源故障暂态过程中含有丰富的暂态信息(如暂态电流的陡度、频率分量),且暂态分量不受 inverter 控制策略的限制,幅值较高。通过提取暂态电流的小波熵、暂态能量等特征量,可构建不受新能

源运行状态影响的保护判据,例如在风电并网线路的差动保护中,利用暂态电流的极性比较替代传统的基波电流幅值比较,有效避免故障电流相位畸变导致的误动问题^[2]。

2.2 融合通信技术的保护协同控制

利用电力通信网络(如光纤通信、5G 专网)实现保护系统与新能源机组、调度中心的信息交互,其中光纤通信凭借毫秒级时延与99.999%的可靠性,可满足输电系统海量数据传输需求,5G 专网则以灵活部署优势适配配电网分散场景,二者协同打破传统保护“就地测量、就地判断”的局限,构建“信息共享、协同决策”的保护模式。在新能源并网的配电网中,采用“集中式保护”架构时,配电自动化终端通过RS485或以太网接口,每秒采集200次新能源机组的出力、inverter 控制模式(如下垂控制、PQ控制)及电网的故障电流、电压跌落深度等数据,经加密协议传输至配网调度中心的保护决策单元。该单元搭载边缘计算模块,结合全网拓扑与实时运行数据,100 毫秒内完成各保护整定值动态计算——例如当光伏电站出力从额定值的80%降至30%时,自动将相邻线路过流保护动作阈值从1.5倍额定电流下调至1.1倍,确保故障电流不足时保护仍能动作;同时,通过IEC61850协议与新能源机组的 inverter 控制系统通信,故障发生后50 毫秒内发送控制指令,调整 inverter 的 PWM 调制比,将故障电流输出能力从1.2倍额定电流提升至1.8倍,为保护提供足够动作电流。在新能源并网的输电系统中,可采用“纵联保护+广域信息”的融合模式,传统纵联保护通过线路两端的电流、电压信息判断故障,但受新能源故障电流特性影响,判据可靠性降低;通过引入广域信息,可对纵联保护的判据进行修正,例如当线路一端的新能源机组故障电流不足时,利用另一端的故障电流信息和相邻线路的保护状态,辅助判断故障位置,避免保护拒动。

2.3 自适应保护算法的研发与应用

研发基于电网运行状态和新能源特性的自适应保护算法,通过构建“新能源运行状态-电网故障特征-保护定值”的动态映射模型,实现保护定值实时调整与保护逻辑动态切换,以适配新能源并网引发的电网运行方式频繁变化。该映射模型需整合多源数据维度,通过部署在新能源场站的传感器每秒采集100次机组出力、风速、光照强度等参数。结合电网侧 PMU 装置获取的电压、电流、短路容量等实时信息,借助 BP 神经网络或随机森林算法进行特征提取与模

式识别——例如采用 3 层 BP 神经网络,将新能源出力、短路容量等 8 个关键参数作为输入层,经隐含层 12 个神经元运算后,输出层直接生成保护定值调整系数,实现毫秒级响应。

在风电并网线路的距离保护中,算法通过实时采集线路首末段电压电流数据,利用戴维南定理计算电网等值阻抗,每 50 毫秒修正一次距离保护的阻抗整定定值,将新能源出力波动导致的阻抗测量偏差控制在 3% 以内;同时,算法内置风电机组 LVRT 曲线数据库,根据电网电压跌落深度自动匹配对应的保护动作时限,如电压跌落至额定值的 60% 时,将动作时限延长至 0.5 秒以覆盖 LVRT 过程,电压恢复后若故障仍存在则立即缩短至 0.05 秒快速动作^[3]。在新能源集群并网场景下,“集群级自适应保护算法”通过聚合各机组的实时出力数据,计算集群总出力与等值惯量,当光伏集群总出力超额定容量 80% 时,算法自动激活谐波检测模块,采用“基波电流+谐波电流”融合判据;出力低于 30% 时,切换至暂态分量分析模式,提取暂态电流小波熵特征作为判据,确保不同出力场景下保护动作正确率超 99%。

2.4 继电保护与新能源控制系统的协同设计

将继电保护系统与新能源机组的控制系统(如 inverter 控制、机组变桨距控制)进行深度协同设计,通过硬件接口集成与软件协议互通,从源头上优化故障电流特征,为保护系统创造有利动作条件。在 inverter 控制策略设计中,增设的“保护协同控制模块”需与继电保护系统通过 IEC61850-9-2 协议实时交互故障信号,当电网发生故障时,模块在 10 毫秒内判断 inverter 过流保护阈值(通常为 1.5 倍额定电流),在确保不触发自身保护的前提下,通过调整 PWM 控制的载波频率(从 2kHz 提升至 5kHz)与调制比(从 0.8 优化至 0.95),将故障电流的基波含量从 75% 提高至 92%,谐波畸变率从 20% 降至 5% 以下,使传统基于基波的保护判据能有效识别故障。同时, inverter 的低电压穿越(LVRT)控制策略需与继电保护动作时限精准协同,例如将 LVRT 的电压跌落持续时间设定为 0.3 秒,略长于线路主保护 0.2 秒的动作时限,

确保保护在机组触发脱网阈值前完成故障切除,避免因保护拒动导致机组大规模脱网。

在新能源集群调度控制中,引入的“保护友好型”调度策略需依托负荷预测与储能协调系统,当风电集群出力在 10 分钟内波动幅度超 20% 时,通过储能系统的充放电功率快速补偿(响应时间 ≤ 200 毫秒),将电网短路容量变化率控制在 5% 以内,减少保护定值调整频率;此外,调度系统还可基于历史故障数据与实时电网拓扑,通过 LSTM 神经网络预测 1 小时内可能发生的故障类型(如单相接地、三相短路),提前 5 分钟向保护系统下发动作逻辑调整指令,将保护响应速度提升 15% 以上。

3 结语

新能源并网带来的故障特征改变,对传统继电保护系统的可靠性和适应性提出了严峻挑战,其核心问题在于新能源机组的 inverter 接口特性与传统同步发电机的故障电流特性不匹配,导致保护判据失效、保护配合逻辑破坏。通过优化保护原理、融合通信技术、研发自适应算法以及实现保护与新能源控制系统的协同,能够有效解决上述问题,构建适应新能源大规模并网的继电保护体系。未来,随着新能源渗透率的进一步提升以及电力电子设备的广泛应用,继电保护系统将朝着“智能化、网络化、协同化”的方向发展。此外,针对新型新能源发电技术的特性,还需进一步研究其对继电保护系统的影响,不断完善保护理论与技术,为新型电力系统的建设提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 王逊,侯丽君. 新能源并网对继电保护系统的影响及其应对策略研究[J]. 全面腐蚀控制,2024,38(12):70-72.
- [2] 李辉. 新能源并网技术对继电保护系统的影响分析[J]. 集成电路应用,2025,42(08):336-337.
- [3] 胡永伟,徐超,张峰. 光伏新能源并网对继电保护的影响分析[J]. 科学技术创新,2024,(22):125-128.

作者简介:徐耿(2001—),男,汉族,宁夏吴忠市,本科学历。