

含分布式电源配电网短路保护研究综述

缪希仁¹, 赵丹¹, 刘晓明², 洪翠¹, 庄胜斌¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350116;

2. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津 300401)

摘要: 含分布式电源配电网保护是新型配电系统安全稳定运行的关键技术。随着大规模分布式新能源接入配电网, 传统的重合闸与电流三段式保护难以满足安全运行的需求, 亟待研究适合新型配电网的继电保护技术。然而, 现阶段配电网短路保护研究尚缺乏系统的总结与归纳, 因此, 针对含分布式电源配电网结构及保护要求, 开展新型配电网短路保护研究综述。首先, 介绍配电网短路保护配置, 分析分布式电源在不同工作方式、不同接入位置及容量、不同类型电源等场景下, 对配电网短路保护的影响。其次, 基于现阶段国内外含分布式电源配电网短路保护与控制研究, 对保护技术加以分析、归纳、总结。最后, 结合配电网短路保护研究现状与分布式新能源接入需求, 探讨分布式电源高渗透率下的新型配电网短路保护研究方向。

关键词: 配电网; 分布式电源; 短路保护; 继电保护; 故障特性分析; 保护改进

A Research Review of Short-circuit Protection in Distribution Network with Distributed Generation

MIAO Xiren¹, ZHAO Dan¹, LIU Xiaoming², HONG Cui¹, ZHUANG Shengbin¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The protection technology of the distribution network with distributed generation is critical for the safe and stable operation of the new power distribution system. As large-scale distributed new energy sources are connected to the distribution network, the traditional reclosing and current three-stage protection cannot meet safe operation needs. It is urgent to study new relay protection technologies for distribution networks. However, the distribution network protection research still lacks a systematic summary and induction. Therefore, this paper reviews the research on new distribution network protection based on the structure and protection requirements of the distribution network with distributed generation. First, the distribution network protection configuration is introduced, and the impact of distributed generation on distribution network protection under different working modes, access capacities and locations, and different types of power supply scenarios is analyzed. Secondly, we analyze and summarize the protection technology based on the current research on short-circuit protection and control of distribution networks with distributed generation at home and abroad. Finally, combined with the research status of distribution network protection and the demand for distributed new energy access, the research direction of new distribution network protection under the high penetration rate of distributed generation is discussed.

Key words: distribution network; distributed generation; short circuit protection; relay protection; failure characteristic analysis; protection improvements

0 引言

随着“双碳”愿景提出, 我国开始大力发展清洁低碳安全高效的能源体系, 构建以新能源为主体的

新型电力系统^[1]。新型电力系统以分布式为主, 将小型、分散的新能源接入配电网, 使电网结构趋向扁平化、分布化、局域化^[2]。国家能源局在 2021 年 6 月发布《关于报送整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》, 明确屋顶分布式光伏在 676 个县区的试点工作。同时, 分布式风电也在政策支持下稳步发展, 《“十四五”可再生能源发展规划》指出, 2030 年我国风电和光伏总装机总量将达到 12

基金资助项目: 国家自然科学基金(51677030); 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室开放课题基金资助(EERI_KF2020005)。Project supported by National Natural Science Foundation of China (51677030), State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology(EERI_KF2020005).

亿千瓦以上。在此背景下, 含高渗透率分布式电源(distribution generation, DG)配电网应运而生, 对有效缓解能源危机, 提高电网供电灵活性具有重要意义。

DG 通常位于负荷附近或配电系统的末端, 不当的选址和定容将产生电压越限、潮流反向、非计划孤岛等负面问题^[3-4]。其次, 随着故障点位置变化, DG 对故障电流将产生助增或汲流作用^[5], 使以时间延时和电流阈值阶梯式递增的传统保护失准, 影响重合闸和熔断器之间的配合^[6]。因此, 面向高渗透率 DG 配电网, 传统保护之间的协调配合已无法满足新型配电网继电保护的技术要求。

为应对 DG 并网带来的影响, 学者们提出了一系列限制措施。IEEE Standard1547 中规定, 故障线路的 DG 要在重合闸第一次重合前退网^[7]。但随着瞬时故障发生频率增大, GB/T 33593—2017 中要求 DG 应在故障时对电网具有一定的无功支撑作用。此外, 文献[8-9]在保护配置维持原状的基础上, 提出限制 DG 故障电流大小、接入位置和容量的保护方案; 此方法限制条件较多, 不能充分发挥 DG 经济效能。一些学者提出了改进传统保护的方案, 如基于过流保护原理, 并结合通信实时计算获得最佳保护动作阈值^[10-12]。还有学者将输电网的差动保护引入配电网, 但存在信息同步与投入设备昂贵等适配性问题, 制约着该保护方法在实际工程中应用^[13]。

因此, 本文针对配电网短路保护现状与发展需求, 从不同层面分析 DG 接入配电网对保护带来的影响, 阐述计及 DG 自身特性的配电网故障机理, 为新型配电网短路保护研究提供文献综述; 在此基础上, 总结分析国内外含 DG 配电网保护典型方案特点、适用场景与保护性能, 为保护策略和保护算法的优化提供新的思路; 最后, 探讨配电网短路保护技术研究方向。

1 配电网常用拓扑与保护配置

1.1 配电网拓扑结构

含分布式电源配电网主要集中在 10 kV 电力系统。国内 10 kV 配电网线路有架空、电缆以及缆线混合 3 种, 接线方式常用辐射形和环网结构^[14]。城市电网大多为环网接线, 利用常开联络开关连接由同一电源或不同电源供电的两条线路以实现故障后的快速复电^[15], 其供电模式与辐射形网络一致^[16]。因此, 通常基于辐射状网络展开保护方案研究。

架空线路通常发生瞬时性故障, 一般利用电流

保护与重合闸相互配合实现就地式馈线自动化处理故障; 纯电缆线路和缆化率高的混合线路通常发生永久性故障, 为避免重合闸对电缆的二次冲击, 一般采用集中式馈线自动化装置对故障加以处理^[17]。

其中, 架空线路和缆化率低的混合线路中性点一般采用经消弧线圈接地的小电流接地方式。当系统发生非单相故障时, 故障线路的电流特征明显, 与相邻线路故障特征差别较大, 但发生单相短路故障时, 故障电流变化不大。因此, 小电流接地系统中, 不仅需配置三段式保护, 还需配置选线装置及故障指示器^[18]。

此外, 电缆线路相比于架空线路的电容电流较大, 消弧线圈调谐工作困难^[19]。因此, 缆化率较高的混合线路一般采用中性点经小电阻接地方式。考虑到其非故障线电流和故障线电流差别较大, 且故障电流特征明显, 常规保护配置即可满足故障处理要求。

1.2 配电网保护配置

配电网保护配置有两种方式: 全断路器、断路器与负荷开关配合^[20]。其中, 全断路器配置方式下, 线路区段之间故障电流差异较小, 易导致越级跳闸, 从而扩大停电范围, 需采用远程通信配合以实现保护选择性。因此, 常用负荷开关与断路器配合的方式处理故障。图 1 为典型辐射状网络接线拓扑^[18], 其中, 变电站出线开关配置断路器 A 且具备重合闸功能, 分段器 B、C、D、E 为负荷开关, 其保护通常采用以下两种方式。

1) 就地式故障处理: 当 F1 发生故障时, A 无延时跳闸, 整条馈线停电, 负荷开关 B、C、D、E 失电分闸; 经过 0.5 s, A 快速重合, B 得电合闸; 若合闸至 D, A 再次跳开, 则判定为永久性故障, D 闭锁将故障隔离。

2) 集中式故障处理: 当 A 无延时跳闸后, 不会再自动重合。各个开关处的 FTU 将主动上报故障信息, 由主站判定故障位置且遥控 D 闭锁、A 重合, 恢复故障区域的供电。

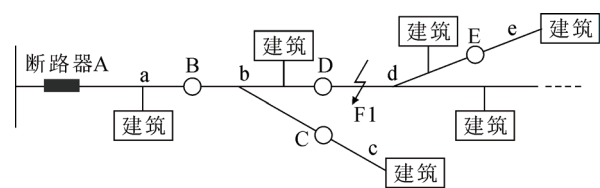


图 1 辐射状网络接线

Fig.1 Radial network wiring

现阶段 DG 接入配电网后, 保护配置基本维持原状。在线路发生短路故障时, 因 DG 具备低电压穿越能力、无功和电压调节能力, 非故障线路的 DG 可维持并网, 故障线路的 DG 则要求在重合闸第一次重合前离网^[21]。然而, 含分布式电源配电网的工况和结构复杂, 若 DG 不能及时脱网将导致重合闸重合失败, 造成整条馈线大面积停电。鉴于含 DG 配电网继电保护的研究与实践尚待深入, 迄今未形成完备的含 DG 配电网保护体系。DG 接入配电网引发的保护技术变革, 已成为中压配电网保护的研究热点。

1.3 保护的技术要求

当电网发生故障时, 由于传统配电网交流系统惯性常数较大, 故障响应较慢, 所以在一般情况下, 允许保护装置带有一定的延时^[22]。大规模分布式新能源并网后, 电力电子设备高度渗透至配电网将降低交流系统惯性常数, 使其抗扰动性能变差、故障响应速度加快^[23]。尤其是当交流网侧受到较大干扰时, 系统暂态稳定性变差, 其低频振荡问题更加凸显, 对线路绝缘、开关以及电力电子设备带来严重危害^[24]。因此, 新型配电网对保护的速动性、灵敏性以及选择性提出了新的要求, 即在短路发生后应精准感知, 精确定位, 并快速隔离故障, 避免危害蔓延。

此外, 新能源的出力具有不确定性, 对系统的影响是间歇性的, 这将导致电网工况更加复杂多变。此时, 定值保护已不能适应新环境。虽然降低保护动作阈值能扩大保护范围, 但可能无法躲避雷击或噪声等干扰。因此, 新型配电网的保护技术还需要具有较强适应性和良好鲁棒性。综上, 新型配电网保护新要求应充分考虑保护“灵敏性、选择性、速动性、可靠性”的相互作用关系, 使其达到动态平衡以保障配电网安全稳定运行。

2 DG 接入配电网的保护影响

2.1 DG 工作方式对短路保护的影响

DG 接入配电网, 使网络结构、运行工况、潮流方向等发生变化。在 DG 的不同工作方式下, 配电网发生短路时表现出的故障特性截然不同。

图 2 为含单一 DG 配电网的潮流方向。当 DG 离网或储能时, 配电网的潮流方向不变; 当 DG 并网时, 由于风电、光伏出力的随机性和间歇性, 其出力较大或 AF 段重载可能会导致 AB 段潮流逆向。

图 3 所示为 B 点接入不同容量的 DG 时线路 AD 的电压分布。图中, DG 容量为 6 MW 时 B 点电压超过了 A 点, 此时潮流将有一部分倒流回源端, 可能造成 CB1、CB4 的定向过流保护误动^[25]。

若只有一个 DG 接入, 保护需考虑 DG 的运行状态及额定功率重新设定阈值; 当多个 DG 接入配电网时, 其工作状态各异, 对保护的影响更为复杂, 鉴于文献^[26]已对此加以介绍, 本文不再赘述。

2.2 DG 接入位置及容量对短路保护的影响

2.2.1 DG 位于故障点上游

若 DG 位于 B 点处(如图 2 所示), F2 点发生故障时, 故障点的电流由源端和 DG 端共同提供, 从而增大了 CB2 处的电流。DG 对电流的助增作用扩大了原有保护范围, 将导致以故障稳态值为基础的电流选择性保护失效。

DG 接入后, 故障点上游馈线的节点故障电流不再处处相等, DG 容量越大, A、B 节点的故障电流相差将越大, 将影响反时限过流保护上下级的有效配合^[11]。为此, 以式(1)反时限过流保护的動作特性方程式加以原理阐述。

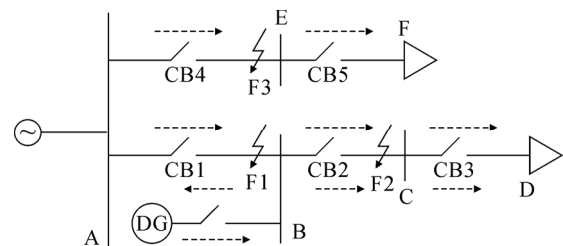


图 2 含 DG 配电网潮流方向

Fig.2 Flow direction of distribution network including DG

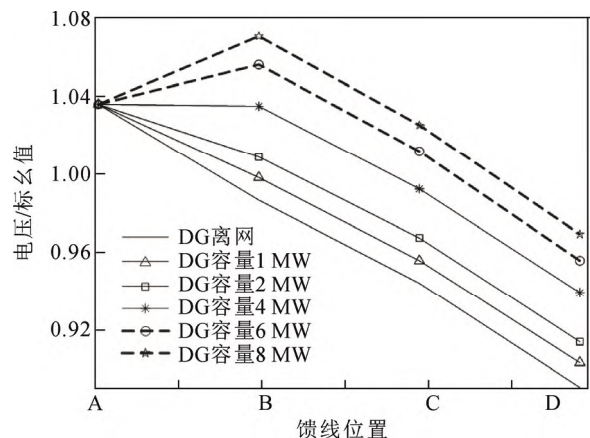


图 3 不同容量 DG 接入 B 点的电压分布

Fig.3 Voltage distribution of DG access point B with different capacities

$$t = \frac{K}{(I/I_p)^{0.02} - 1} \quad (1)$$

式中: I 为故障电流; I_p 为保护启动电流; K 为常数。一般情况下, 在故障电流相等时, 只要上一级保护的 K 和 I_p 大于下一级, 动作时间 t 则存在时间差, 即下一级保护先与上一级保护动作。此时, t 和 I/I_p 比值成反比, 电流越大保护动作时间 t 越短。但 DG 接入后, 故障点上游馈线的节点故障电流不再相等, 反时限过流保护的基本条件已不存在。

2.2.2 DG 位于故障点下游

若 DG 位于 C 点处, F2 点发生故障, 等值电路如图 4 所示。其中: E_s 为系统电源电动势; Z_s 为电源阻抗; Z_{AB} 和 Z_{BC} 分别为点 AB 之间和 BC 之间的线路阻抗; Z_{DG} 为分布式电源 DG 的内阻抗; R_f 为故障电阻; β 为 B 点到故障点距离与 BC 点的距离之比。

DG 接入前

$$I_1 = \frac{E_s}{Z_s + Z_{AB} + \beta Z_{BC} + R_f} \quad (2)$$

DG 接入后

$$I_1' = \frac{E_s - I_2' \cdot R_f}{Z_s + Z_{AB} + \beta Z_{BC} + R_f} \quad (3)$$

DG 接入前 $I_2 \approx 0$, 则 $I_2' > I_2$, 由式(2)、(3)可知 $I_1' < I_1$, 因此, 当 DG 位于故障区段下游时, 将减小 CB1 和 CB2 处的故障电流, 从而产生汲流作用。

由此可见, DG 对故障电流的助增作用或汲流作用, 可能造成重合闸与电流保护整定相互配合的保护策略失效。此外, DG 接入后 I_1 减小、 I_2 增大, 将减少故障两端电流差, 从而影响差动电流判据的灵敏性^[27]。

2.3 不同类型 DG 对短路保护的影响

DG 按发电方式可分为电机型和逆变型 DG。电机型 DG 的故障输出特性与传统发电机相似, 受到故障前工作电压、暂态电抗的影响, 一般可等效为一个电压源串联一个阻抗^[28]。逆变型 DG 分为全逆变型和半逆变型^[29], 与传统发电机的故障输出特性截然不同^[30]。

2.3.1 电机型 DG

电机型 DG 故障前后输出电流的相位, 与系统电源提供的短路电流相位基本一致, 且滞后于电压的相角约为线路阻抗角^[31]。然而, 同步型 DG 与异步型 DG, 在提供短路电流的能力方面有较大差别^[32]。表 1 所示, 同步型 DG 内部电磁暂态过程复杂, 故

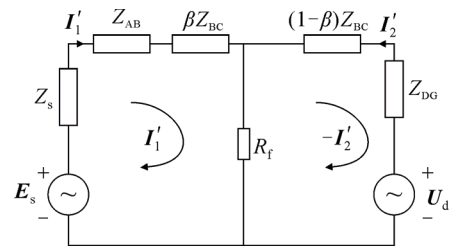


图 4 F2 点发生短路的等值电路

Fig.4 Equivalent circuit with short circuit at point F2

表 1 电机型 DG 对称故障电流输出能力

Table 1 Motor type DG fault current output capability

DG 类型	故障电流输出大小(标么值)		
同步型	0~50 ms	50 ms~1 s	1 s 后
	可达 8~10	衰减至 4~6	衰减至 2~3
异步型	前几周波	100~300 ms	100~300 ms
	可达 5~10	对称电流衰减至 0	不对称电流 4~5

障电流衰减慢, 对过流保护影响较大^[33]; 异步型 DG 转子由电网提供交流励磁电流, 其对称瞬时故障电流标么值可达 5~10, 将对电流速断保护产生影响; 此外, 异步型 DG 的不对称故障电流将衰减为比正常电流大 4~5 倍的恒定量, 可能导致二段限时电流保护不正常动作^[34]。

2.3.2 半逆变型 DG

目前风力发电机组主要采用具有变速恒频的双馈异步发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)和直驱式永磁同步发电机, 在一定风速范围内, 可保持恒频; 其中, DFIG 的转子通过逆变器并网, 定子采用直接并网方式输出功率^[35], 其控制结构如文献^[35]附录 A 所示, 当故障程度严重时, 闭锁逆变器投入撬棒电路以保证 DFIG 具有低电压穿越能力(low voltage ride through, LVRT)。

当网侧发生对称短路故障时, DFIG 的定子三相故障电流表达式^[36]为

$$i_s = Ae^{-\tau_1 t} + Be^{j\omega_s t} - Ce^{j\omega_r t} e^{T_1 t} \quad (4)$$

式中: A 、 B 、 C 分别为工频交流分量、直流暂态分量、转速频率暂态分量幅值; τ_1 为定子磁链暂态直流分量的衰减时间常数; ω_s 、 ω_r 分别为定子、转子的电角速度; T_1 为转频分量衰减时间常数与定、转子阻抗有关。文献^[37]提出由于转速频率暂态分量的存在, 使全周期傅里叶算法可能无法有效地从故障电流中提取基频电流或电压, 从而影响制动和动作电流以及阻抗的计算, 降低了差动保护或距离保

护的性能。

其次, DFIG 投入撬棒电路后的故障特性与异步型 DG 相似(如 2.3.1 节)^[34], 使故障电流瞬时值(标幺值)高达 5~10, 不对称故障电流最终衰减为一恒定值, 对称故障衰减为 0。此外, 文献[38]提出 DFIG 的故障定子中会出现频率为 $(1-s)\omega_s$ 的电流分量, 与传统电机故障频率的不一致性将增大两端电流的差异性, 从而影响差动保护判据的可靠性, 其中 s 为转差。

2.3.3 全逆变类 DG

全逆变类分布式电源(inverter-interfaced distributed generator, IIDG)主要是指风力驱动的永磁机或光伏等通过逆变器与电网相连^[39]。与电机型 DG 不同, IIDG 的短路电流主要受逆变器控制策略限制, 故障响应时间为毫秒级别, 输出呈非线性, 因此一般等效为压控电流源^[40]。正常工况下, IIDG 采用双闭环恒功率控制方式, 且为防止不对称故障输出电流中带有负序分量和大量谐波分量, 通常以正序电压为控制量改善故障电流的不平衡度^[41]。根据国家标准 GB/T19964—2012《光伏发电站接入电力系统技术规定》, 大容量 IIDG 并网规定要带有 LVRT 能力, 如表 2 所示。在电网故障期间, 双闭环控制策略将断开功率外环, 根据并网点正序电压调节无功电流指令, 将导致电流幅值和相位突变^[39-42]。

此外, 含 IIDG 配电网的差动保护判据受到短路类型、过渡电阻以及故障相角的影响^[43]。IIDG 容量越大, 差动电流值越小, 可能导致纵联差动保护拒动。

3 含 DG 配电网短路保护方法研究

通过研究 DG 接入对配电网短路保护的影响, 众多学者提出了针对不同故障工况的保护方案及保护应对措施。每种方案侧重点不同、需求不一、实现方法以及达到的效果各异。

3.1 传统保护原理改进

3.1.1 改进三段式电流保护

三段式电流保护主要是改进保护动作阈值的计算方法, 有两种思路, (1)定值保护: 根据 DG 额定功率和 DG 故障电流最大值重新计算各保护点的阈值^[10]; (2)自适应阈值保护: 根据 DG 运行状态以及出力大小, 寻找电流电压之间关系, 在线实时整定阈值。第 2 种方法相较于定值保护对配电网结构、运行工况以及 DG 出力间歇性有较好的适应能力。

表 2 全逆变类 DG 故障电流输出能力

Table 2 Inverter class DG fault current output capability	
并网点电压标幺值	故障电流输出大小
$U_{\text{pec}} > 0.9$	输出恒定有功功率
$0.3 < U_{\text{pec}} < 0.9$	几乎只输出无功电流(1.2~2 倍的额定电流)
$U_{\text{pec}} < 0.3$	只输出无功电流(1.2 倍的额定电流)

其中, 一些较早的自适应保护文献中并未考虑 LVRT 的影响, 文献[44]根据故障电流变化量与 IIDG 容量大小的比例关系动态调整阈值, 具有一定的局限性; 文献[45]针对 IIDG 接入故障区段下游位置, 并以 IIDG 的负序阻抗等于正序阻抗为原则, 改进了对称故障和不对称故障的阈值计算方法。

然而, 近年的自适应保护文献, 不仅考虑了 LVRT 对 IIDG 输出电流的影响, 还从 DG 接入位置不同、故障发生位置不同等多角度考虑了流过保护装置的电流, 进一步细化了自适应阈值的计算方法^[46]。这些计算方法都与 DG 的输出电流有关, 但输出电流与并网点电压不成比例。为此, 文献[47]采用高斯迭代的方法不断修正 IIDG 的故障电流, 利用本地信息即可得到保护动作阈值。

2.3 节分析表明, DFIG 与 IIDG 的故障特性不同, 其正、负序阻抗不相等^[48], 且故障时投入的撬棒电路将增大正、负序阻抗值^[49]。为此, 文献[35]通过在线实时计算正、负序阻抗, 根据风电接入位置不同, 推导了电流一段和电流二段保护阈值计算方法, 经过不断修正系数以实现自适应。在此基础上, 文献[29]通过公式推导将计算阻抗包含的 IIDG 突变电流量和 DFIG 暂态分量抵消, 利用保护测量处的电压电流计算保护背侧等值阻抗。该方法可以适用含多类型 DG 配电网的保护, 但尚未针对故障发生位置加以研究, 其适用范围尚待进一步验证。

近年来, 自适应电流保护研究将上述故障电流电压计算原理与智能算法有机结合, 以实现保护配合的最优化。主要实现方法有: (1)提前预设多组定值, 根据电网运行状态选择较适合的一组保护整定值^[50-51]。其优点是对保护配置运算要求低, 但继电器内存有限只能存储少量预设组, 因此, 只对少数工况有效。(2)附加各种场景的最佳设置并利用优化算法实时计算得到保护最优匹配值^[52-53], 该方法存在易陷入局部最优问题, 需针对不同工况加以改进。

自适应保护方法大多限制于 DG 类型以及接入位置, 导致保护在线整定值计算需要有不同的改进

方法。因此, 有待深度挖掘不同场景的故障共性, 研究可适应多类型、多工况的保护方法。

3.1.2 改进反时限电流保护

一些学者考虑加入电压信息来补偿反时限的保护动作延时以抵消 DG 带来的影响。文献[11]利用通信方式传递 DG 接入所增加的故障电流幅值信息, 并引入低电压因子加速反时限动作时间, 但对上下级保护配合尚待完善; 文献[54] 对此做出改进, 利用测量阻抗作为动作加速因子, 不仅能有效加速保护动作时间, 还可作为远后备保护协调上下级配合。文献[55] 通过集群的方式不断优化更新继电器参数以保证 IIDG 的高渗透率, 最终在每个预设位置的渗透率可达 60%, 并在 DG 出力间歇时保护不会误动或拒动。然而, 配电网通常不具备电压采集功能, 此类保护方案在实际工程应用受限。

另一种改进方法是对短路电流微分求和, 比较短路前后数据以判断故障, 其考虑了 IIDG 接入位置、容量以及运行状态对保护的影响, 具有一定的鲁棒性^[56]。然而, 目前尚缺少电机型 DG 和 DFIG 的反时限保护技术研究, 其研究有待深入开展。

3.2 纵联保护

3.2.1 纵联差动保护

将差动保护引入配电网, 主要针对 DG 对差动电流和制动电流的影响、采样值不同步、以及阈值自适应等问题, 提出相应的保护判据。传统差动/制动电流计算利用稳态值相加减加以实现。改进的差动保护以双电源前后供电为系统拓扑, 重新构造基于稳/暂态值的制动和动作方程, 如幅值^[57]、阻抗值^[58-59]、阻抗角^[60]、电流极性比^[61]等。

数据同步是配电网差动保护应用的关键问题。主要研究方法包括以保护装置检测到故障时刻为标准进行校对, 实现近似同步^[42]; 引入自同步算法^[62]; 通过标量传输弱化严格的数据同步误差要求^[27]; 引入动态时间弯曲距离(dynamic time wrapping, DTW) 算法消除时间延迟^[63]; 基于 5G 通信或区域自组网的高可靠、低延时技术实现数据同步^[64]等。其中, 5G 通信理论上具有较好的应用前景, 但实际测试结果表明, 其公网通信环节和运维主体多, 可能带来网络通道传输特性不稳定, 这些因素将影响差动保护的准确性^[64]。DTW 算法存在抗噪声问题, 配电网电信号具有系统噪声和环境噪声, 尚待研究与 DTW 相适应的数字滤波算法, 以发挥 DTW 算法的优势。

为了进一步提高差动保护在配电网的使用价值, 保护判据可分别利用电流相角差^[65]、电流幅值差的衰减量^[66]以及故障前后电流幅值比^[67], 以消除不可测分支的影响。

前述保护方案研究仅考虑了 IIDG 和同步型 DG 接入配电网。为此, 文献[38,68] 针对分布式风电, 提出了相应的差动判据, 即利用线路两端频率差, 但频率同步对配电保护通信要求极为严格。

此外, 具有固定阈值的差动保护方案无法应对 DG 状态实时变化, 且对 DG 出力的随机性欠缺考虑, 将降低保护灵敏性。为此, 一些文献引入智能算法或补偿系数, 并根据配网运行状态实时计算差动动作阈值, 如利用神经网络^[69]、粒子群算法^[70]建立虚拟模型或通过预估 IIDG 输出电流^[71]、线路两端幅值差建立补偿系数^[72]。

综上所述, 故障数据同步是确保差动保护正确动作的基础, 一些基于相角差的算法虽然可实现自适应阈值保护应对各种工况变化, 但对通信同步要求严格。鉴于可靠且低延时的无线通信技术尚在发展阶段, 可从抗同步误差的算法入手研究差动保护判据, 如数据的压缩降容^[73]。

3.2.2 纵联方向保护

纵联方向保护是在每条线路原有的三段式保护基础上加装方向元件, 采用上下区段通信单元交互故障信息, 以实现保护的选择性^[74]。以图 2 为例, 在各 CB 增加方向元件, 若 F2 点发生故障, 则 CB1 和 CB2 均能检测到故障, CB2 向 CB1 发送闭锁信号, CB1 保护不动作, CB3 检测不到故障, 因此 CB2 在设置的等待时间内没有收到闭锁信号, 保护正常动作。

为了适应 DG 接入带来的配电网保护需求变化, 一些学者提出以 DG 为分界点, 将配电网划分成若干个区域, 区域之间可相互通信, 并在原有保护基础上增加区域之间的保护^[5, 75]。其中, 文献[75] 提出的闭锁方案具备自适应方向能力, 在线路重构后保护功能仍可正常工作。

由此可见, 改进的纵联方向保护利用重合闸将复杂庞大的配电网分为若干个小区域以减小停电范围。当 DG 数量越多则保护区域越小, 其故障隔离越准确。因此, 面向高渗透率 DG 的新型配电网, 改进纵联方向保护具有一定的技术前瞻性。

3.3 基于多点信息的集成保护

配电网的集成保护系统是指在变电站内安装

中央智能操作单元, 利用高速通信技术将智能采集终端数据、DG 以及断路器的电气量和状态量, 汇总发送至中央智能单元, 经综合信息分析与状态研判, 以实现故障监测、诊断、定位、闭锁^[76]。其网络架构如图 5 所示。

东南大学对此研究成果较多, 提出基于多代理集成的充分式保护方案, 利用多个智能采集终端和节点分支保护设备智能电子装置(intelligent electronic device, IED)监测、控制、保护线路。在此基础上, 文献^[77]对充分式保护方案进行了完善, 提出基于多类型电流的综合判据, 其具有一定耐 DG 压降、抗过渡电阻等能力。这种方法利用同步功能的断路器将电力系统分段, 需要继电器之间可靠的高速通信保障, 存在系统建设成本高的问题。此外, 一些集成保护方案省略了 Agent 设备, 直接将全网网络信息上传至中央处理单元, 对故障的定位以及处理通常集中在变电站内^[78]。

为了克服现有馈线终端等装置在监测感知、保护控制的局限性, 一些学者将相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)引入配电网。基于 PMU 的集中保护方案能适应多种复杂的运行条件, 如孤岛运行、拓扑变化、高过渡电阻、多类型故障等^[79]。然而, 配电网线路结构复杂, 节点总数多, 在每个测量点都安装 PMU 显然不切实际。为了缩减此方案的成本, Meier 等人引入微型 PMU 概念^[80]。微型 PMU 能实现传统 PMU 的功能, 且成本相对较低。为此, 文献^[81]详细介绍了微型 PMU 的可行性、技术细节以及经济成本。PMU 能否在配电网中广泛应用主要取决于生产安装维护成本、设备测量精度和精准滤波功能以及快速跟踪电气量变化的能力^[82]。

综上所述, 基于多点信息的集成保护对通信的要求极为严格, 某个环节出现问题都可能出现信息错乱, 导致定位不准确, 故障处理不及时等。因此, 安全稳定的高速通信网络技术是提高此类方案可靠性的基础。

3.4 其它保护措施

还有其它一些保护方法对 DG 接入提出相应的限制措施, 以满足传统保护的选择性和灵敏性要求。

3.4.1 限制 DG 接入容量和位置

由文献^[83]分析表明, 在不改动三段式保护和反时限保护的参数下, 同步型 DG 最大准入容量过小。因此, 文献^[9]重新整定了保护阈值, 提高了准入容量增加了接入位置, 但个别母线最高只能接入

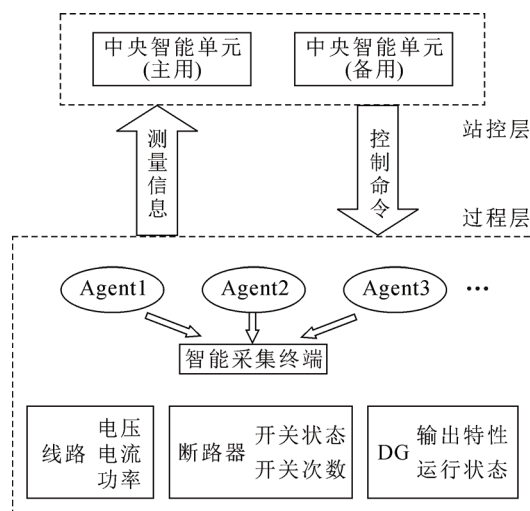


图 5 集成保护架构图

Fig.5 Integrated protection architecture diagram

26.7%渗透率的 DG 容量, 最低只能有 1%。IIDG 本身控制策略具有限流环节, 其最低和最高准入容量比同步型 DG 高, 但个别位置也仅有 13.3%和 48.9%的渗透率^[84]。

现阶段普遍采用此方法应对 DG 接入带来的影响, 优势是不需改动原有保护方式。然而, 重新计算短路电流需要考虑不同故障点、不同故障类型以及不同 DG 类型, 整定阈值过程较为复杂; 其次, DG 出力的不确定性使定值保护无法适应各种运行工况; 此外, 这种方案限制 DG 的接入容量和位置, 严重影响新能源接入消纳, 难以适应 DG 高渗透率下的新型配电网发展需要。

3.4.2 限制 DG 故障输出电流

限制 DG 输出短路电流的方法可分为两类, 一类是可用于多种场景下的故障限流器(fault current limiter, FCL), 另一类是针对不同类型 DG 调整控制策略。

1) 故障限流器

传统 FCL 利用材料的特殊性质限制短路电流, 如非线性磁导率特性使铁芯在故障下脱离饱和状态而产生大的瞬态阻抗以限制电流大小^[85]。由于 FCL 体积较大, 材料成本较高, 无法广泛应用在配电网。近些年, 电力电子柔性限流技术成为热门。一些高校利用 3 个单相级联 H 桥研制了适用于 10 kV 电压等级的柔性限流器^[86]。柔性限流装置无需限流电感和固态断路器, 可有效缩小 FCL 体积, 降低装置成本。

虽然此方法对 DG 类型无限制, 减小了短路电流使过流保护能正常动作, 但一次建设的成本较高,

且 FCL 突增的高阻抗将影响距离保护^[87]和一些以阻抗因子为动作判据的保护方案^[88]。

2) 故障限流策略

另一种限流方法针对 DG 类型不同, 根据其自身的故障特性调整控制策略以限制故障输出电流。在故障时, 同步型 DG 利用放电电阻和变流器泄放励磁电流, 以减小对过流保护的影响^[33, 89]。文献^[90-91]通过注入谐波或控制输出电流相位达到抑制 IIDG 电流幅值的目的。文献^[92]提出对 IIDG 的阶梯限流的短路保护策略, 可省去成本较高的数字继电器。

限制 DG 输出电流的目的是使 DG 对保护的影响降至最小, 且在不改动原有保护配置基础上尽可能增加 DG 渗透率^[93]。为了减少成本并使保护具有协调性, 文献^[94]以 DG、FCL 的大小及位置构建多目标函数, 保护配合最优和成本最低为约束条件, 得到最优的结果, 从而减小 FCL 的数量和规模, 但最终 DG 渗透率限制在 30%。

综上所述, DG 主动适应配电网的保护方法在一定程度上解决了 DG 接入对电流保护带来的问题, 且提出的方案不用改动原有保护装置。但这些方法只针对特定的工况有效, 未形成系统的限流保护策略。

3.4.3 孤岛运行

孤岛可分为计划性孤岛和非计划性孤岛。计划性孤岛是指电网发生故障后, DG 按照提前设定的控制策略, 分区域地独立为非故障区域供电。在上游源端网络不可用的时候, 孤岛系统能有效发挥高比例 DG 就地取能、就地分散的优势, 以充分利用 DG 资源, 减少停电区域, 提高供电可靠性。

孤岛运行的基础在于如何合理高效地分配电能, 使孤岛系统能够稳定运行。最优孤岛划分应综合考虑电能质量和电压偏差约束、负荷供电恢复量、网络损耗、潮流变化等因素^[95]。文献^[96]提出混合整数线性规划(MILP)算法解决已知 DG 位置和数量的辐射状配电网孤岛划分问题。文献^[97]将^[96]的模型拓展到通用的网络, 并考虑了负载的需求响应。而文献^[98]利用相似求解算法缩短了 MILP 的计算时间。孤岛划分的本质是将问题数学化得到多目标数学模型, 利用多种方法寻优获得最优结果, 如背包树算法^[99], 混合整数非线性算法^[100]等。

高渗透率 DG 的接入将增加非计划孤岛形成的可能性。当配电网清除故障后, DG 可能作为孤岛

继续运行, 这将带来一些运行与安全问题。如造成电压和频率控制困难、非同期重合闸失败、孤岛运行电能质量差、运维安全隐患等。此外, 还会导致 DG 持续向故障点供电, 电弧难以熄灭, 造成瞬时性故障转变为永久性故障, 扩大停电事故。因此, 应针对含高比例、多类型 DG 的新型配电网防孤岛保护进行深入研究。

4 探讨与展望

4.1 DG 并网技术规范

GB/T 33593—2017《分布式电源并网技术要求》提出 DG 并网规定: DG 输出电流的谐波、电压偏差、频率运行范围应满足相关规约, 应具备功率控制和电压调节能力、低电压穿越能力。但尚未对 DG 并网后发生故障或者 DG 出力不正常时给出详细规定, 有待对以下方面加以补充完善。

1) 短路电流的大小与发生故障前 DG 的出力有关, 而 DG 的出力具有随机性与不确定性, 现行标准未对 DG 的出力范围给出详细的要求。目前已有学者提出整县光伏与储能结合的方式削峰填谷, 以达到电网稳定运行以及经济效益和光伏利用效率最大化^[101]。后续工作应从分布式储能的选址定容、协调控制等方面展开深入研究, 实现分布式储能从根本上解决高渗透 DG 接入后, 给系统带来峰谷差变大、电能质量和运行稳定性变差等的负面影响^[102]。

2) 当发生故障时, 不同类型 DG 存在不同的电气特性量, 现行标准对此尚未制订相应的规范技术要求, 以适应及提高各类 DG 并网接入能力及其可靠性; 因此, 应从 DG 的接入方式、接入位置和容量, 以及接入后正常和故障两种状态下的输出电流、电压以及频率等方面加以补充完善。

4.2 瞬时、永久故障判别

据统计配电网故障中, 发生瞬时性故障的概率为 70%~80%。迄今, 配电网保护仍采用变电站出线重合闸实现瞬时和永久性故障判别的选择性。然而, 随着大量 DG 并网, 非同期重合闸带来的多次电流冲击会对电气设备造成二次损伤或者引起保护误动。因此, 识别瞬时性故障和永久性故障的研究尤为重要。

与瞬时性故障产生的机理不同, 永久性故障大多是因为线路绝缘老化或多次发生故障造成不可逆的绝缘损伤所导致, 其故障发展需经历绝缘劣化过程。文献^[103]通过分析山东电网的实际录播数据,

将架空线路可能出现的情况分为单周波早期故障、双周波早期故障、永久性故障及暂态干扰,并利用分层贝叶斯概率学习框架得到包含4种事件的分类模型。因此,可以采用分类方法分析实际运行网络的波形,以实现瞬时、永久故障的选择性识别。

4.3 运行方式

目前,国内10 kV配电网还是以开环运行为主,其保护配置简单,经济效益明显。但当高比例DG接入后,也突显了开环运行的弊端,如电压偏移和馈线负载不平衡等问题^[104]。闭环运行可以改善电能质量、电压越限以及非计划孤岛问题,但需要可靠的保护技术支撑^[105]。

文献[106-108]分别基于功率方向、过电流幅值和方向以及电流相位差异的特征量,研究环网结构的闭环运行保护方案,对实际应用具有一定的参考价值。然而,还需针对闭环运行的可靠性、不确定性进行探索,以明确可行性方案^[109]。

4.4 保护协调配合

目前,保护协调配合研究过于依赖高速通信技术。为避免通信成本以及通信故障带来的保护可靠性问题,可采用可靠的就地保护与基础通信相结合的方式,以实现就地检测、就地判断、就地隔离的全域协调运行保护。

1) 限流策略:针对不同的DG接口采用相应的限流技术。IIDG一般利用控制策略可将故障电流限制在额定电流的1.2~2倍,以降低DG故障对配电网的影响;同步型DG和半逆变型DG的限流控制技术迄今研究较少,应分别从故障特性着手研究经济实用的限流方法。

2) 保护原理:新型配电网结构复杂多变,设定单一的阈值难以适应DG出力的随机性和复杂性,以及故障隔离后的重构网络。目前有两种研究思路:一种是在线实时计算的自适应阈值方法,另一种是寻找不同情况下故障时刻的电流共性,如对比两端电流差异性的差动保护方案。后者在DG高渗透率的配电网运行工况多变的情况下依然符合两端正常电流差异小、故障电流差异大的原则。

3) 保护策略:大量的数据实时传输会给通信带来负担,同时也会使中央智能单元计算量过大。可采用就地智能保护方法实现故障检测及动作决策,以基础通信为辅监测就地智能保护设备状态。

上述方法有机结合,即首先,限流策略对DG故障电流加以限制;其次,选用自适应保护或差动

保护等作为保护原理,形成适应于新型配电网的就地保护方案;在此基础上,以通信技术为辅监视就地保护的動作情况以及设备运行状态。

5 结论

大规模DG并网将带来电压分布变化、潮流流向多变、故障电流大小不确定等问题,使重合闸与电流三段式保护配合失去协调性。目前保护的难点在于如何使用经济且有效的方法,精准感知与深度挖掘具有代表性的故障信息,从而实现全故障类型、多运行工况的新型配电网保护。

1) 本文在分析传统配电保护及其技术瓶颈的基础上,探讨新型配电网保护要求,即在短路发生后应精准感知、准确定位,并快速隔离故障的含DG配电网短路保护技术。

2) 研究DG不同运行方式下,配电网潮流分布变化特点,深入分析配电网短路故障电流、电压暂稳态分布特性与接入DG类型、容量和位置的关系。

3) 针对现有含DG配电网保护方法存在的限制新能源发展、设备成本昂贵、计及DG接入的故障特性及配电网故障类型不全面、通信技术要求高等问题,提供故障快速感知、全域协调运行的新型配电网保护研究思路。

参考文献 References

- [1] 谭显东, 刘俊, 徐志成, 等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 1-6.
TAN Xiangdong, LIU Jun, XU Zhicheng, et al. Power supply and demand balance during the 14th Five-Year plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 1-6.
- [2] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
HAN Xiaqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [3] SINGH P, PRADHAN A K. A local measurement based protection technique for distribution system with photovoltaic plants[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(6): 996-1003.
- [4] RIZWAN M, HONG Lucheng, WASEEM M, et al. Sustainable protection coordination in presence of distributed generation with distributed network[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(3): e12217.
- [5] 廖志伟, 蓝鹏昊, 崔法聚, 等. 含分布式电源配电网的继电保护方案[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 70-74.
LIAO Zhiwei, LAN Penghao, CUI Faju, et al. Relay protection scheme for power distribution network with distributed Generations[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(12): 70-74.

- [6] NAIEM A F, HEGAZY Y, ABDELAZIZ A Y, et al. A classification technique for recloser-fuse coordination in distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 176-185.
- [7] IEEE Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems: IEEE Std 1547 2—2008[S], 2008.
- [8] ZAREI S F, KHANKALANTARY S. Protection of active distribution networks with conventional and inverter-based distributed generators[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106746.
- [9] 王江海, 邵能灵, 宋凯, 等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 37-43.
WANG Jianghai, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Penetration level permission of for DG in distributed network considering relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43.
- [10] 张惠智, 李永丽. 光伏电源接入的配电网短路电流分析及电流保护整定方案[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2327-2332.
ZHANG Huizhi, LI Yongli. Short-circuit current analysis and current protection setting scheme in distribution network with photovoltaic power[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2327-2332.
- [11] 郭煜华, 姜军, 范春菊, 等. 改进的配电网反时限过电流保护[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 45-50.
GUO Yuhua, JIANG Jun, FAN Chunju, et al. Improved inverse-time over-current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 45-50.
- [12] SHEN Shaofei, LIN Da, WANG Huifang, et al. An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized Thevenin equivalent parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(99): 411-419.
- [13] 刘兴杰, 王凯龙, 郭栋. 含高渗透率光伏电源的配电网线路电流差动保护方案[J]. 太阳能学报, 2016, 37(7): 1805-1812.
LIU Xingjie, WANG Kailong, GUO Dong. Current differential protection scheme for distribution feeders with high penetration of PV[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(7): 1805-1812.
- [14] 龚静. 配电网综合自动化技术[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2019: 13-17.
GONG Jing. Power distribution integrated automation technology[M]. 3rd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2019: 13-17.
- [15] LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Distribution network expansion planning considering $N-1$ criterion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2476-2478.
- [16] VARGAS R, MACEDO L H, HOME-ORTIZ J M, et al. Optimal restoration of distribution systems considering temporary closed-loop operation[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(4): 5483-5494.
- [17] 江南, 谢聿琳, 侯俊平, 等. 电缆架空线混合线路重合闸投切方式[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 112-115.
JIANG Nan, XIE Yulin, HOU Junping, et al. Reclosing mode of cable-overhead mixed lines[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(3): 112-115.
- [18] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 117-118.
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Relaying protection and automation of distribution network[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2017: 117-118.
- [19] 范伟松. 中性点接地对同母多回 10kV 线路故障影响及对策研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
FAN Weisong. Research on the fault effect and countermeasure of neutral point grounding in a 10kv same mother back line[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [20] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 继电保护与配电网自动化配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 53-57, 113.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Relay protection and distribution automation based fault allocation and restoration for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 53-57, 113.
- [21] 房志学, 苏建徽, 王华锋, 等. 微网逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 143-149, 161.
FANG Zhixue, SU Jianwei, WANG Huafeng, et al. Low voltage ride-through control strategy of microgrid inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 143-149, 161.
- [22] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 5版. 北京: 中国电力出版社, 2018: 4-5.
HE Jiali, LI Yongli, DONG Xinzhou, et al. Principles of relay protection of electric power system[M]. 5th ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2018: 4-5.
- [23] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [24] 魏强. 发电机转子角控制及其在电力系统中的作用研究[D]. 青岛: 山东大学, 2015.
WEI Qiang. Generator rotor angle control and its application in power system operation[D]. Qingdao, China: Shandong University, 2015.
- [25] 尚瑀, 邵能灵, 刘琦, 等. 考虑分布式电源的配电网保护改进方案研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 40-45, 52.
SHANG Jin, TAI Nengling, LIU Qi, et al. New protection method for distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 40-45, 52.
- [26] 全蕾, 詹红霞, 张勇, 等. 考虑多 DG 接入的配电网自适应电流主保护方案[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 63-69.
QUAN Lei, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Adaptive current main protection scheme of distribution network accessed with multiple distributed generations[J]. Smart Power, 2021, 49(8): 63-69.
- [27] 许偲轩, 陆于平. 适用于含分布式电源配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 113-118, 155.
XU Sixuan, LU Yuping. A pilot protection method for distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 113-118, 155.
- [28] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [29] 马静, 刘静. 基于故障稳态分量的含 DG 配电网自适应方向电流保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 1-9.
MA Jing, LIU Jing. Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution network with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 1-9.
- [30] 孙正龙, 姜权峰, 王嘉琛, 等. 含风电电力系统机电振荡局部阻尼评估方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3452-3462.
SUN Zhenglong, JIANG Quanfeng, WANG Jiachen, et al. Evaluation method of local damping of electromechanical oscillation of power systems containing wind turbines[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3452-3462.
- [31] 方万良, 李建华, 王建学. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 82-84.
FANG Wanliang, LI Jianhua, WANG Jianxue, et al. Power system

- transient analysis[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2015: 82-84.
- [32] BARKER P P, DE MELLO R W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems[C]//2000 Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, USA: IEEE, 2000: 1645-1656.
- [33] 谢一休, 孙国莘, 朱珂. 一种同步型分布式电源输出短路电流抑制技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 135-142.
XIE Yixiu, SUN Guoping, ZHU Ke, et al. A suppression technology for short-circuit current output of synchronous distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 135-142.
- [34] 张保会, 郭丹阳, 王进, 等. 风电接入对继电保护的影响(五)——风电分散式接入配电网对电流保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 1-6.
ZHANG Baohui, GUO Danyang, WANG Jin, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(5): impact of wind farms dispersedly connected to distribution network on current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 1-6.
- [35] 陈实, 邵能灵, 范春菊, 等. 考虑风力发电的配电网弱馈线路自适应电流保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 65-73.
CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. An adaptive current protection for weak-infeed distribution lines with wind generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 65-73.
- [36] 段建东, 陈童, 尚迪, 等. 基于电流衰减因子的含DFIG配电网线路保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1915-1923.
DUAN Jiandong, CHEN Tong, SHANG Di, et al. Current attenuation factor based line protection scheme for distribution network of DFIG wind power integration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1915-1923.
- [37] 张保会, 王进, 郝治国, 等. 风电接入对继电保护的影响(三)——风电场送出变压器保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 1-8.
ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (3): performance analysis for wind farm outgoing transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 1-8.
- [38] 朱妍, 陆于平, 黄涛. 计及谐波频率特征的含风电配电网充分式电流幅值差动保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 130-136.
ZHU Yan, LU Yuping, HUANG Tao. Sufficient current amplitude differential protection considering frequency characteristic of harmonics for distribution network with wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 130-136.
- [39] 苗丽芳, 王乐媛, 曹斌, 等. 弱电网下电网电压前馈控制分布式逆变系统的谐振阻尼特性分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3521-3529.
MIAO Lifang, WANG Yueyuan, CAO Bin, et al. Resonance damping characteristic analysis of distributed inverter-based system with grid voltage feed-forward control in weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3521-3529.
- [40] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 逆变型电源对故障分量方向元件的影响机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3230-3236.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Influence mechanism of inverter-interfaced renewable energy generators on fault component based directional relay[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3230-3236.
- [41] MAHAMED B, ESKANDARI M, FLETCHER J E, et al. Sequence-based control strategy with current limiting for the fault ride-through of inverter-interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 165-174.
- [42] 李娟, 高厚磊, 朱国防. 考虑逆变类分布式电源特性的有源配电网反时限电流差动保护[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 74-83.
LI Juan, GAO Houlei, ZHU Guofang. Inverse-time current differential protection in active distribution network considering characteristics of inverter-interfaced distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 74-83.
- [43] 刘幸蔚, 李永丽. 逆变电源T接电网后对纵差保护的影响及准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1595-1600.
LIU Xingwei, LI Yongli. Effect of IIDG connected to grid as a teed line on longitudinal differential protection and maximum penetration capacity[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1595-1600.
- [44] 余琼, 余胜, 李晓晖. 含分布式电源的配网自适应保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 110-115.
YU Qiong, YU Sheng, LI Xiaohui. An adaptive protection scheme for meshed distribution system with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 110-115.
- [45] 孙景钊, 李永丽, 李盛伟, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 71-76.
SUN Jingliao, LI Yongli, LI Shengwei, et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution network with inverter interfaced DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 71-76.
- [46] WANG Q G, ZHOU N C, YE L. Fault analysis for distribution networks with current-controlled three-phase inverter-interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1532-1542.
- [47] 曾德辉, 王钢, 郭敬梅, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 86-92.
ZENG Dehui, WANG Gang, GUO Jingmei, et al. Adaptive current protection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 86-92.
- [48] 王晨清, 宋国兵, 刘凯, 等. 突变量保护对风电接入系统的适应性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5485-5492.
WANG Chenqing, SONG Guobing, LIU Kai, et al. Adaptability analysis of fault component protection of power systems with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5485-5492.
- [49] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 撬棒电路对风电场侧联络线距离保护的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 30-36.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Impact of crowbar on wind farm side interconnection line distance protection and mitigation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 30-36.
- [50] CHABANLOO R M, SAFARI M, ROSHANAGH R G. Reducing the scenarios of network topology changes for adaptive coordination of overcurrent relays using hybrid GA-LP[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(21): 5879-5890.
- [51] GHOTBI-MALEKI M, CHABANLOO R M, ZEINELDIN H H, et al. Design of setting group-based overcurrent protection scheme for active distribution networks using MILP[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1185-1193.
- [52] VASCONCELOS L H P, ALMEIDA A R, DOS SANTOS B F JR, et al. Hybrid optimization algorithm applied to adaptive protection in distribution systems with distributed generation[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 202: 107605.
- [53] ALAM M N. Overcurrent protection of AC microgrids using mixed characteristic curves of relays[J]. Computers & Electrical Engineering, 2019, 74: 74-88.
- [54] 刘玉娟, 卫志农, 孙国强, 等. 低阻抗加速反时限过电流保护[J]. 电

- 网技术, 2019, 43(9): 3424-3431.
- LIU Yujuan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Low impedance acceleration inverse-time over-current protection[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3424-3431.
- [55] SINGH M, AGRAWAL A. Voltage-current-time inverse-based protection coordination of photovoltaic power systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(6): 794-804.
- [56] 刘兴杰, 郭旭东, 王凯龙. 含大量 DPVS 的配电网反时限电流保护研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(1): 231-238.
- LIU Xingjie, WU Xudong, WANG Kailong. Study on inverse time current protection for distribution feeders with high penetration of DPVS[J]. Acta Energetica Solaria Sinica, 2017, 38(1): 231-238.
- [57] 许偲轩, 陆于平. 含 DG 配网电流幅值差异化保护方案[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 164-170.
- XU Sixuan, LU Yuping. Current amplitude differential protection for distribution system with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 164-170.
- [58] PANDAKOV K, ADRAH C M, HØIDALEN H K, et al. Experimental validation of a new impedance-based protection for networks with distributed generation using Co-simulation test platform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1136-1145.
- [59] CHEN G B, LIU Y Q, YANG Q F. Impedance differential protection for active distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 25-36.
- [60] DUBEY K, JENA P. Impedance angle-based differential protection scheme for microgrid feeders[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(3): 3291-3300.
- [61] PATHIRANA A, RAJAPAKSE A, PERERA N. Development of a hybrid protection scheme for active distribution systems using polarities of current transients[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 152: 377-389.
- [62] ZHOU C H, ZOU G B, ZANG L D, et al. Current differential protection for active distribution networks based on improved fault data self-synchronization method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 166-178.
- [63] 黄纯, 刘鹏辉, 江亚群, 等. 基于动态时间弯曲距离的主动配电网馈线差动保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 240-247.
- HUANG Chun, LIU Penghui, JIANG Yaquin, et al. Feeder differential protection based on dynamic time warping distance in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 240-247.
- [64] 刘志仁, 薛明军, 杨黎明, 等. 基于区域自组网的配电网无线差动保护技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 167-174.
- LIU Zhiren, XUE Mingjun, YANG Liming, et al. Research and application of wireless differential protection for a distribution network based on a regional ad-hoc network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 167-174.
- [65] 李瀚霖, 陆于平, 黄涛, 等. 基于故障同步识别的含分布式电源配电网充分式差动保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 100-107.
- LI Hanlin, LU Yuping, HUANG Tao, et al. Sufficient differential protection for distribution network with distributed generators based on fault synchronous identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 100-107.
- [66] 王子璇, 马啸, 杨勇, 等. 计及不可测分支负荷电源助增效应的有源配网幅值差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 56-68.
- WANG Zixuan, MA Xiao, YANG Yong, et al. A new criterion of amplitude differential protection for active distribution network considering load power effect of unmeasurable branches[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(Supplement1): 56-68.
- [67] LIN X N, MA X, WANG Z X, et al. A novel current amplitude differential protection for active distribution network considering the source-effect of IM-type unmeasurable load branches[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106780.
- [68] 段建东, 崔帅帅, 刘昊骥, 等. 基于电流频率差的有源配电网线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2927-2934.
- DUAN Jiandong, CUI Shuaishuai, LIU Wuji, et al. Line protection based on current frequency difference for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2927-2934.
- [69] 游步新, 卜京, 殷明慧. 基于瞬时电流特征的电流互感器饱和识别改进方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 29-35.
- YOU Buxin, BU Jing, YIN Minghui, et al. Improved identification of CT saturation based on transient current characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 29-35.
- [70] PRASAD C D, BISWAL M, ABDELAZIZ A Y. Adaptive differential protection scheme for wind farm integrated power network[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187: 106452.
- [71] HAN B W, LI H F, WANG G, et al. A virtual multi-terminal current differential protection scheme for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5418-5431.
- [72] CHENG H Z, GUI B Z, XIAO G D, et al. Adaptive current differential protection for active distribution network considering time synchronization error[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 140: 108085.
- [73] 李振兴, 望周丽, 刘颖彤, 等. 基于整形变换降容的电流差动保护原理与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 77-85.
- LI Zhenxing, WANG Zhouli, LIU Yingtong, et al. Principle and realization of current differential protection based on shaping transformation and capacity reduction[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 77-85.
- [74] 张艳霞, 代凤仙. 含分布式电源配电网的馈线保护新方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 71-74.
- ZHANG Yanxia, DAI Fengxian. New schemes of feeder protection for distribution networks including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 71-74.
- [75] 张沛超, 范忻蓉, 李鑫, 等. 智能配电网的自适应级联方向闭锁保护方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 81-88.
- ZHANG Peichao, FAN Xinrong, LI Xin, et al. Adaptive directional interlocking protection scheme for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 81-88.
- [76] Ali ATAEI M, GITIZADEH M, LEHTONEN M, et al. Multi-agent based protection scheme using current-only directional overcurrent relays for looped/meshed distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(8): 1567-1581.
- [77] 朱妍, 陆于平. 含 DG 配网充分式优选制综合电流幅值差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 68-74.
- ZHU Yan, LU Yuping. Sufficient optimized comprehensive current amplitude differential protection for distribution network with distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement1): 68-74.
- [78] 肖繁, 夏勇军, 张侃君, 等. 含新能源接入的配电网网络化保护原理研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 2): 709-719.
- XIAO Fan, XIA Yongjun, ZHANG Kanjun, et al. Research on a principle of networked protection in distribution network with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Supplement2): 709-719.

- [79] ZHANG F, MU L H, GUO W M. An integrated wide-area protection scheme for active distribution networks based on fault components principle[J]. IEEE transactions on smart grid, 2019, 10(1): 392-402.
- [80] VON MEIER A, CULLER D, MCEACHERN A, et al. Micro-synchrophasors for distribution systems[C] // ISGT 2014. Washington, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [81] ARGHANDEH R, BRADY K, BROWN M, et al. North synchrophasor monitoring for distribution systems: technical foundations and applications[J]. 2018.
- [82] 刘 灏, 毕天姝, 徐 全, 等. 配电网高精度同步相量测量技术方案与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 23-29.
LIU Hao, BI Tianshu, XU Quan, et al. Scheme and prospect of high-precision synchrophasor measurement technology for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 23-29.
- [83] 雷金勇, 黄 伟, 夏 翔, 等. 考虑相间短路影响的分布式电源准入容量计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 82-86.
LEI Jinyong, HUANG Wei, XIA Xiang, et al. Penetration level calculation with considerations of phase-to-phase short circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 82-86.
- [84] 陈晓龙, 李永丽, 赵曼勇, 等. 计及配电网电流保护整定原则的逆变型分布式电源准入容量计算[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 156-162.
CHEN Xiaolong, LI Yongli, ZHAO Manyong, et al. IBDG penetration level calculation considering current protection setting principle for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 156-162.
- [85] HEIDARY A, RADMANESH H, ROUZBEHI K, et al. Inductive fault current limiters: A review[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187: 106499.
- [86] 郭谋发, 游林旭, 魏晓莹, 等. 一种基于电压反馈控制的配电网短路故障柔性限流方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 48-56.
GUO Moufa, YOU Linxu, WEI Xiaoying, et al. A flexible current limiting method of distribution network short circuit fault based on the voltage feedback control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 48-56.
- [87] 金雪芬, 戴朝波, 武守远, 等. 故障电流限制器对继电保护的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 98-105.
JIN Xuefen, DAI Chaobo, WU Shouyuan, et al. Influence of fault current limiter on protective relaying[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 98-105.
- [88] 徐 萌, 邹贵彬, 高 磊, 等. 含逆变型分布式电源的配电网正序阻抗纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 93-99.
XU Meng, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Pilot protection of positive sequence impedance for distribution network with inverter-based distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 93-99.
- [89] YAZDANPANAHI H, XU W, LI Y W. A novel fault current control scheme to reduce synchronous DG's impact on protection coordination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 542-551.
- [90] MIRET J, CASTILLA M, CAMACHO A, et al. Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4262-4271.
- [91] 李 桓, 彭 克, 张新慧, 等. 基于 IIDG 电流相位控制的配电网故障电流抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 180-186.
LI Heng, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Fault current suppression method for distribution network by controlling IIDG current phase[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 180-186.
- [92] 贺 瞰, 刘邦银, 段善旭. 一种逆变电源组网的选择性保护策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2357-2365.
HE Jian, LIU Bangyin, DUAN Shanxu. A selective protection strategy for inverter-based power grid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2357-2365.
- [93] IBRAHIM D K, ABO EL ZAHAB E E D, MOSTAFA S A E A, et al. New coordination approach to minimize the number of re-adjusted relays when adding DGs in interconnected power systems with a minimum value of fault current limiter[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 85: 32-41.
- [94] HAMIDI M H, CHABANLOO R M. Optimal allocation of distributed generation with optimal sizing of fault current limiter to reduce the impact on distribution networks using NSGA-II[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(2): 1714-1724.
- [95] GILANI M A, DASHTI R, GHASEMI M, et al. A microgrid formation-based restoration model for resilient distribution systems using distributed energy resources and demand response programs[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 83: 103975.
- [96] CHEN C, WANG J H, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [97] SEDZRO K S A, LAMADRID A J, ZULUAGA L F. Allocation of resources using a microgrid formation approach for resilient electric grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2633-2643.
- [98] SEDZRO K S A, SHI X, LAMADRID A J, et al. A heuristic approach to the post-disturbance and stochastic pre-disturbance microgrid formation problem[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(5): 5574-5586.
- [99] ZHU J P, GU W, JIANG P, et al. Integrated approach for optimal island partition and power dispatch[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 449-462.
- [100] ZHU J P, YUAN Y, WANG W S, et al. An exact microgrid formation model for load restoration in resilient distribution system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105568.
- [101] 李建林, 方知进, 谭宇良, 等. 电化学储能系统在整县制屋顶光伏中应用前景分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 1-12.
LI Jianlin, FANG Jinzhi, TAN Yuliang, et al. Application prospect analysis of electrochemical energy storage technology in county-wide rooftop photovoltaic system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(4): 1-12.
- [102] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong, et al. Overview on key applied technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [103] 熊思衡, 刘亚东, 方 健, 等. 配电线路早期故障辨识方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3970-3976.
XIONG Siheng, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Detection method of incipient faults of power distribution lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3970-3976.
- [104] XING X T, LIN J, WAN C, et al. Model predictive control of LPC-looped active distribution network with high penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1051-1063.
- [105] 黄伟军, 钱远驰, 吕志来. 闭环运行方式城市配电网接线模式的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 123-127.
HUANG Weijun, QIAN Yuanchi, LV Zhilai. Research of city dis-

tribution network layouts for closed-loop system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 123-127.

- [106] ZHANG Z H, XU B Y, CROSSLEY P, et al. Positive-sequence-fault-component-based blocking pilot protection for closed-loop distribution network with underground cable[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 94: 57-66.
- [107] TIAN Y T, ZHAO Q P, ZHANG Z H, et al. Current-phase-comparison-based pilot protection for normally closed-loop distribution network with underground cable[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(2): e2733.
- [108] POLAJŽER B, PINTARIČ M, ROŠER M, et al. Protection of MV closed-loop distribution networks with Bi-directional overcurrent relays and GOOSE communications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 165884-165896.
- [109] 张项安, 张新昌, 李卫星, 等. 基于差动保护的配电网闭环运行方式探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 102-106.
ZHANG Xiang'an, ZHANG Xinchang, LI Weixing, et al. On the closed-loop operation mode for differential protection-based distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 102-106.



MIAO Xiren
Ph.D., Professor
Corresponding author

缪希仁(通信作者)

1965—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事电力故障早期检测及其抑制技术、新型原理电器技术、电气设备在线监测与诊断
E-mail: miaoxr@163.com



ZHAO Dan

赵丹

1994—, 女, 硕士生
主要从事配电网保护与控制的研究工作
E-mail: 934094491@qq.com

收稿日期 2022-06-09 修回日期 2022-11-20 编辑 陈蔓