

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250677

基于电力电子变换器主动信号注入的新型配电系统 保护技术研究进展与展望

邓静蕾^{1,2}, 姚良忠^{1,2}, 邓靖雷^{1,2}, 梁帅^{1,2}, 杨飞³, 陈实⁴, 袁宇波⁴

(1. 交直流智能配电网湖北省工程中心(武汉大学), 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;
3. 国网上海能源互联网研究院有限公司, 上海 200120; 4. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 受变换器并网型新能源弱馈特性影响, 新型配电系统故障特征显著弱化, 导致传统继电保护技术难以适用。主动信号注入式保护通过故障期间变换器输出特性的主动变化, 实现了故障特征的主动增强, 能够突破系统故障特征弱化对保护性能的制约, 是新型配电系统保护技术的重点发展方向。围绕典型故障类型, 通过综述新型配电系统保护的研究进展, 指出了传统被动式保护的局限性及发展主动信号注入式保护的必要性。在此基础上, 分析了注入信号的产生、选择等关键技术, 归纳了现有研究的共性问题, 探讨了主动信号注入式保护的典型应用场景。最后对其未来发展方向进行了展望, 旨在为新型配电系统主动信号注入式保护技术深入研究提供参考。

关键词: 新型配电系统; 电力电子变换器; 主动信号注入; 继电保护

Research progress and prospects of protection technologies for new type power distribution systems based on power converter active signal injection

DENG Jinglei^{1,2}, YAO Liangzhong^{1,2}, DENG Jinglei^{1,2}, LIANG Shuai^{1,2}, YANG Fei³, CHEN Shi⁴, YUAN Yubo⁴

(1. Hubei Engineering and Technology Research Center for AC/DC Intelligent Distribution Network (Wuhan University), Wuhan 430072, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Shanghai Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: Due to weak-feed characteristics of converter-interfaced renewable energy sources, fault characteristics in new type distribution systems are significantly weakened, rendering traditional relay protection techniques increasingly inapplicable. Active signal injection-based protection enhances fault characteristics by actively modulating converter output behavior during faults, thereby overcoming the limitations imposed by weakened characteristics and emerging as a key development direction for protection technologies in new type distribution systems. Focusing on typical fault types, research progress on protection in new type distribution systems is reviewed, highlighting the limitations of traditional passive protection methods and the necessity of developing active signal injection-based protection strategies. On this basis, the key technologies such as the generation and selection of injected signals are analyzed, common issues in existing studies are summarized, and typical application scenarios are discussed. Finally, future research directions are outlined, aiming to provide references for further in-depth studies on active signal injection-based protection technologies for new type distribution systems.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB2407400).

Key words: new type distribution system; power converter; active signal injection; relay protection

0 引言

随着风电、光伏、储能等以电力电子变换器为

并网接口的分布式电源(converter-interfaced distribution generation, CIDG)渗透率持续上升, 配电系统正由传统单电源辐射型结构向多源异构、多状态并存的新型配电系统演化^[1-3], 给传统继电保护技术带来了新的挑战。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2023YFB2407400)

在故障特征方面, CIDG 故障电流输出特性受并网变换器控制策略及设备自身保护机制的影响^[4-7], 表现为故障电流幅值受限^[8-9]、相位受控的特点^[10-11], 使得新型配电系统故障特征持续弱化, 导致传统继电保护技术可靠性、灵敏性下降, 甚至出现误动和拒动^[12-13]。

为了突破故障特征弱化对保护性能的制约, 学者们提出了“S 注入法”。通过对注入信号寻踪, 实现故障选线与定位^[14-16]。但该方法受设备容量限制^[17]及非故障线路分布电容的分流影响^[18], 在抗干扰性、检测精度方面存在不足, 且需要停电检测, 影响供电可靠性。随着电力电子设备在新型配电系统中的普及, 主动信号注入式保护应运而生^[19], 成为优化新型配电系统保护性能的关键技术。

为此, 本文围绕电力电子变换器主动信号注入式保护技术开展研究。首先综述了新型配电系统保护方法的研究进展, 指出了传统被动式保护技术的局限性及主动信号注入式保护发展的必要性; 在此基础上, 梳理了注入信号的产生、幅频选择等关键技术, 分析了其对主动信号注入式保护方法的影响, 归纳了现有研究的共性问题; 最后, 结合新型配电系统的发展趋势, 探讨了主动信号注入式保护的典型应用场景, 并对未来研究方向进行了展望。

1 新型配电系统保护方法研究进展

1.1 面向相间短路的被动式保护方法

被动式保护主要依赖系统自身的故障响应特性构建保护判据, 现有方法主要通过改进判据来提高对新型配电系统的适应性。

考虑到配电系统多采用中性点非有效接地方式, 本节主要针对相间短路故障保护与单相接地故障选线两个方面进行描述。如表 1 所示, 按照保护判据的阈值整定方式可以分为自适应式和定阈值式被动保护方法。

表 1 相间短路故障被动式保护方法研究现状

Table 1 Overview of passive protection methods for phase-to-phase faults

| 被动保护类型 | 被动保护判据 | 局限性 |
|----------|---|---|
| 自适应式保护方法 | 基于多分支故障电流的综合幅相判据 ^[20] 、 | 保护整定复杂、方法普适性弱 ^[23] 、依赖通信、实施成本高 ^[24] |
| | 基于端电流相位差的最小制动角判据 ^[21] 、 | |
| | 基于电流幅值的多智能体自适应整定判据 ^[22] | |
| 定阈值式保护方法 | 基于故障线路两侧电流幅值差异的纵联保护判据 ^[25] 、 | 难以适应复杂运行工况 ^[23] 、 |
| | 基于电压电流幅值特征的非线性最优判据 ^[26] | 在 CIDG 高渗透场景下灵敏性与可靠性下降 |

1.2 面向单相接地故障的被动式故障选线方法

单相接地故障是电力系统中最常见的故障类型, 由于故障电流较小且负荷侧线电压仍然保持对称, 配电系统允许带故障运行 1~2 h, 保护动作于故障线路预警(即故障选线)而非跳闸。从选线原理出发, 现有方法可分为基于稳态分量和基于暂态分量两类, 如表 2 所示。

表 2 单相接地故障被动式选线方法研究现状

Table 2 Overview of passive line selection methods for single-phase-to-ground faults

| 故障选线类型 | 故障选线判据 | 局限性 |
|--------------|---|--|
| 基于故障稳态量的选线方法 | 基于中性点电压与相电压幅值的选线判据 ^[27] 、 | 耐过渡电阻能力有待提高、阈值整定困难 ^[30] |
| | 基于故障前后零序特征量差异的选线判据 ^[28-29] | |
| 基于故障暂态量的选线方法 | 基于瞬态零序电流与相电压极性关系的选线判据 ^[31] 、 | 配电系统故障暂态量衰减较快、信号采集精度要求较高 ^[17] |
| | 基于小波变换的暂态电压电流行波方向识别判据 ^[32] | |

然而, 上述研究虽提高了被动式保护在新型配电系统中的适用性, 但并未解决保护受故障特征持续弱化影响导致性能劣化的根本问题。同时, 考虑到配电系统“点多面广”的架构特点, 一些用于输电系统的保护方法难以在配电系统中广泛应用。因此, 研究主动信号注入式保护技术已成为新型配电系统保护发展的必然趋势。

1.3 面向相间短路的主动信号注入式保护方法

主动信号注入式保护通过设计特定控制策略, 利用系统中已有或附加装置在故障期间向系统注入特征信号, 增强故障特征, 提升保护性能^[4]。考虑注入信号数目的不同, 该方法可分为单信号注入和多信号注入两类。

1.3.1 单信号注入式保护

单信号注入式保护是指通过设计附加控制策略, 在故障期间向系统主动注入单个特征信号, 如谐波、方波等。文献[33]利用 CIDG 在故障期间主动向系统注入 8 次谐波电流, 基于谐波电流与基波电流的定量关系, 获取故障后其输出的基波电流幅值, 削弱了变换器弱馈特性的影响, 优化了电流保护性能。文献[34]向系统中注入 5 次谐波电流, 构建了基于谐波电流与基波电流幅值比的保护判据。但该方案未考虑谐波电流注入后对变换器工频控制的影响。为了解决该问题, 文献[35]提出了一种基于分频控制的注入式相间距离保护方法, 实现了工频与异频控制的解耦。文献[36]利用附加电源注入 20 Hz 谐波电流, 通过分析信号在不同性质故障下

的响应差异, 提出了基于模型驱动故障性质辨识方法。文献[37]通过 CIDG 向系统注入 10 次谐波, 基于故障区内外谐波电流差异, 提出了一种适用于含 T 接 CIDG 的配电网电流差动保护方案。

然而, 单信号注入式保护性能受信号注入方法的可靠性影响较大, 且现有研究对于注入信号的频率选择并未形成共识。

1.3.2 多信号注入式保护

多信号注入式保护利用 CIDG 在故障时向系统主动注入多种特征信号, 利用不同信号间的响应差异构成保护判据。文献[38]通过比较区域内外多个主动注入异频信号的幅值差异, 提出了一种新型谐波电流差动保护方案, 提高了保护对噪声的耐受能力。文献[39-41]利用不同 CIDG 向系统注入多个异频信号, 通过分析流过保护的谐波成分, 提出了基于多异频信号综合幅值判据的保护方法。文献[42]以 CIDG 电流限幅是否饱和作为控制切换的依据, 通过改进限幅环节, 向系统注入间谐波电流, 提出了一种基于间谐波的电流差动保护方法。文献[43]利用不同 CIDG 向系统注入多种谐波电流, 根据谐波电流在不同故障点的叠加效应差异, 提出了一种新型方向性电流保护方案。文献[44-45]通过改变 CIDG 调制频率, 将各端口变换器转变为特征信号注入源, 构建了基于谐波测量阻抗的故障定位判据, 提出了一种基于控保协同的多端柔性直流配电系统线路保护。

值得注意的是, 多信号注入式保护在增强故障特征的同时, 也会对系统运行产生负面影响。多个信号的叠加会短时间改变系统内的谐波分布, 若注入信号幅值或注入时机设置不当, 会严重影响系统电能质量。并且, 当注入信号频率接近系统谐振频率时, 可能诱发振荡, 影响系统稳定性。此外, 多个注入信号频率之间可能发生串扰, 产生非期望的异频信号。为此, 本文将在第 2 节着重探讨主动信号注入式保护的相应关键技术。

1.4 面向单相接地故障的主动注入式故障选线方法

主动注入式故障选线不依赖系统本身的故障响应特征, 而是利用信号发生装置向系统主动注入特征信号, 通过对特征信号寻踪实现故障选线。根据信号来源, 可分为附加装置注入与附加控制注入。

1.4.1 附加装置注入式故障选线方法

文献[46]提出了一种基于附加电感的故障识别方法, 利用故障前后附加电感初始电压的差值实现故障识别与定位。文献[17]通过软开关向交流系统附加了一个三相对称的低频电压信号, 构建了基于低频网络电感与电容电流固有幅值比差异的自适应

故障定位判据。文献[47]探讨了附加信号频率对保护方法在耐过渡电阻能力方面的影响, 归纳了准确检测故障的最优电压叠加频率范围。文献[48]利用有源逆变器向系统中性点注入 25 Hz 电流信号, 构建了基于注入信号幅值差异的故障选线判据。文献[49]分析了不同类型注入信号对故障电流大小、波形畸变程度的影响, 通过在系统中性点注入异频电流信号, 根据电流信号幅值判据实现故障区段定位。文献[50]利用灵活接地装置, 从中性点向系统注入电流, 利用故障馈线与健全馈线之间零序电流的分布差异, 提出了一种基于系统零序阻抗差异的故障选线方案。文献[51]采用并联于中性点的电力电子装置, 向系统注入用以模拟故障行波的高频暂态信号, 通过测量行波到达时刻计算故障距离, 实现故障测距。

1.4.2 附加控制注入式故障选线方法

文献[52]利用变换器向系统各条馈线注入 3 组不同频率的间谐波电流, 将其在系统侧产生的间谐波电压作为特征向量, 通过多类支持向量机算法实现故障选线。文献[53]通过改进滤波器, 向停电线注入电压信号脉冲模拟故障行波, 通过分析行波响应特性, 建立了基于近似熵的故障选线判据。文献[54-55]通过变换器向系统注入 3 次谐波电流, 构建了基于故障相与健全相电流幅值差异的选线判据, 在不增加计算量的同时提升了故障选线的可靠性。此外, 文献[30]综合 CIDG 信号注入能力以及注入信号的传播特性, 选择 4 次谐波电流作为注入信号, 提出了基于谐波电流幅相关系的故障选线方法, 该方法具有较强的耐过渡电阻能力。

2 主动信号注入式保护关键技术

主动信号注入式保护的实现步骤如图 1 所示, 通常包括控制启动、信号产生、响应分析及保护动作 4 个关键环节。

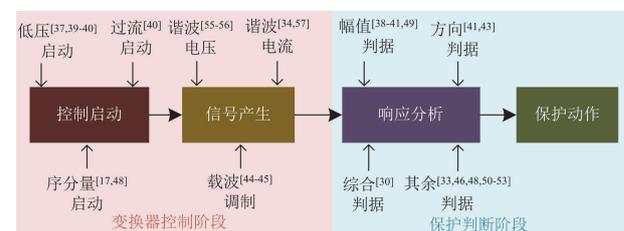


图 1 主动信号注入式保护流程图

Fig. 1 Flowchart of active signal injection based protection

首先, 当变换器检测到并网点电气量满足启动条件时, 启动注入控制; 随后, 通过对信号源的主动控制, 产生特定幅频信号注入系统; 最后, 保护

装置通过分析注入信号引入的故障特征进行故障辨识,当故障特征满足动作条件时,保护出口动作。

2.1 注入信号的产生

当前,注入信号的产生方法可分为3种:一是谐波电压调制法^[55-56],故障发生后,通过调整逆变器调制信号以调节输出电压,属于开环控制;二是谐波电流注入法^[34,57],参考工频控制,通过附加谐波电流闭环控制,实现谐波电流精确控制;三是载波频率调制法^[44-45],通过调整变换器载波频率实现信号注入,无需附加控制。

注入信号的产生如图2所示,图中上标“*”表示控制器参考值, ω_{PLL} 和 θ_{PLL} 分别为锁相环角速度与输出相位, i_{d0} 、 i_{q0} 、 v_{d0} 、 v_{q0} 分别表示故障前

dq 轴输出的电流、电压值, v_d^* 和 v_q^* 分别为电流内环控制后的 dq 轴电压参考值。谐波电压调制法通过预设特定角速度 ω^* ,在不依赖于逆变器主控环路的前提下,构造出特定频率的三相谐波电压信号。在调制环节中,该信号被作为高频分量直接叠加到电压控制指令值上,从而注入预设频率的谐波电压,由图2可知 a 相注入谐波电压 $v_{ha,inj}(t)$ 可表示为

$$v_{ha,inj}(t) = V_1 \sin(\omega t + \theta_1) + V_{h,inj} \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (1)$$

式中: ω 为系统的工频角速度; t 为系统运行的某一时刻; V_1 和 θ_1 分别为基波电压幅值与相位; $V_{h,inj}$ 和 θ_h 分别为谐波电压幅值与相位; h 为谐波电压次数。

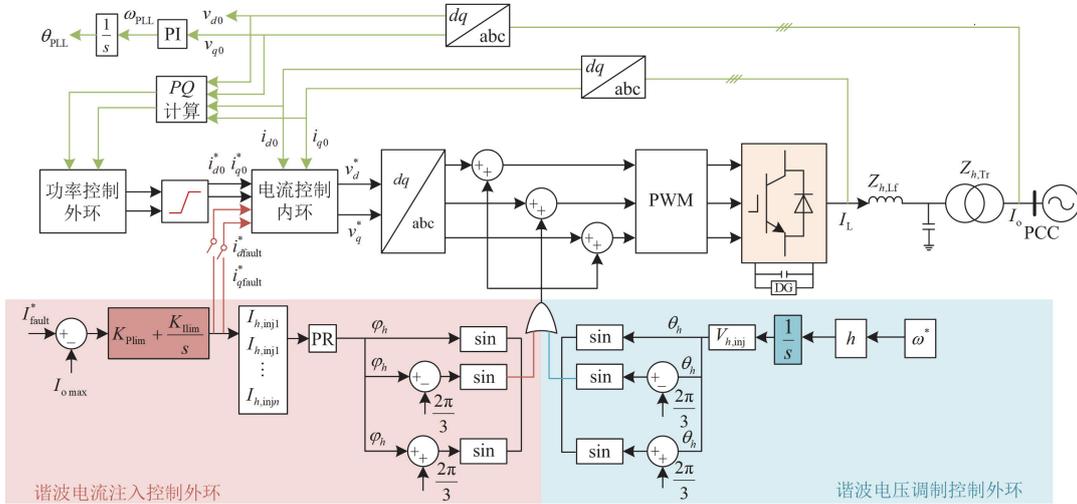


图2 注入信号的产生

Fig. 2 Generation of injection signal

由于谐波电压调制法本质上属于开环控制,整体可控性较弱。当故障位置发生变化时,系统侧等效故障阻抗 Z_{fault} 改变,导致 CIDG 端输出电流 I_L 随之改变。在极端情况下,注入谐波电压引起的电流幅值变化可能造成 CIDG 设备超过最大安全运行阈值,威胁设备安全。同时,由于缺乏动态调节能力,该方法难以根据实时工况自适应调整谐波电压幅值,从而无法有效制定精确、可靠的保护动作判据。

为此,谐波电流注入法增加了基于最大电流有效值(root mean square, RMS)的反馈控制,如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_{dfault}^* = \left(K_{plim} + \frac{K_{llim}}{s} \right) (I_{fault}^* - I_{o,max}) \\ i_{qfault}^* = 0 \\ I_{fault}^* = I_{fo} - d \cdot Z_{fault} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{o,max}$ 为三相输出电流的最大有效值; K_{plim} 和 K_{llim} 分别为控制器的比例积分系数; i_{dfault}^* 、 i_{qfault}^* 分别为故障后 d 、 q 轴电流参考值; I_{fault}^* 为故障后变换器输出电流的参考值,其可根据故障等效阻抗的下垂控制进行计算; I_{fo} 为由逆变器最大可持续输出电流能力确定的标称参考值; d 为下垂系数。注入的 a 相谐波电流如式(3)所示。

$$i_{ha,inj}(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + I_{h,inj} \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (3)$$

式中: I_1 、 φ_1 与 $I_{h,inj}$ 、 φ_h 分别为基波与谐波电流的幅值与相位。

需要注意的是,随着多信号注入需求的增加,比例谐振(proportional-resonant, PR)控制被引入到电流附加控制系统中^[43]。PR 控制器可对特定频率信号进行无静差调节,有效确保对注入信号的精准跟踪和控制^[58]。在这一框架下,逆变器可以实现对

各个电流谐波分量的独立控制, 提升了系统在多频率条件下的适应性和响应能力。

除上述两种方法外, 也可采用载波频率调制法。文献[44]指出, 周期性闭锁直流变压器一个子模块输入侧的全桥逆变电路, 可等效为在该变换器的输出直流电压中注入一系列方波, 通过调整变换器脉宽调制(pulse width modulation, PWM)的触发脉冲频率, 即可实现特定频率谐波注入。相较于上述谐波电压调制法与谐波电流注入法, 该方法无需附加谐波电压或电流生成控制, 避免了复杂的参数调试与控制配合。但该方法仅适用于停电线路, 且改变开关频率会增加变换器损耗, 因此在实际应用中仍需综合考虑。

2.2 注入信号的选择

2.2.1 注入信号的频率选择

注入信号的频率选择需要兼顾滤波器对信号的衰减特性、系统背景噪声对信号提取精度的影响以及其他设备的工作特性, 在确保探测信号能够被准确检测的同时, 尽量减小对正常运行设备的影响。

CIDG 输出端口处的低通滤波器截止频率通常设定为开关频率的 1/2 或线路基频的 10 倍以上^[59]。因此, 电力电子装置在 PWM 调制及开关动作过程中产生的超高频次谐波可被有效滤除。同时, 所选择的注入谐波频率应避免容易引发谐振的特定频率^[60], 降低引发系统不稳定的风险。

此外, 文献[61-63]表明, 电力电子装置在 PWM 调制及开关动作过程中会产生大量谐波。高频段谐波以千赫兹的开关频率为主, 低频段主要以奇数次谐波为主。若主动注入信号的频率与系统背景谐波频带重叠, 可能引发信号失真、故障特征提取困难, 进而导致主动信号注入式保护性能劣化。

为了提高信号提取精度, 可注入与系统背景噪声频带区分度较高的偶次谐波信号^[64]。考虑到系统硬件的耐受能力, 当谐波含量一定时, 谐波频率越高, 对电力设备寿命和系统运行的影响越大, 同时沿线衰减也更严重^[4], 因此不宜采用高频谐波注入。在实际设计中, 通常选择 400 Hz 及以下的偶次谐波作为注入信号。

此外, 系统中其他设备的工作特性也会对谐波频率的选择产生影响。例如, 在 CIDG 输出端口的变压器高压侧通常采用角型联结, 3 倍及其整数倍频次的谐波电流无法注入系统^[65]。确定谐波频率时, 应考虑此类特定结构的固有限制, 以确保注入信号能够有效作用于目标。

最后, 考虑到实际工程中通常采用傅里叶变换进行信号提取, 因此, 宜选择工频整数倍的谐波作

为注入信号。

2.2.2 注入信号的幅值选择

注入信号的幅值选择需兼顾信号可观测性、设备耐受能力及系统对电能质量的要求, 以满足保护对故障特征的需求, 同时减少对系统正常运行的干扰。

一方面, 谐波幅值 $V_{h, inj}$ 、 $I_{h, inj}$ 应足够大, 以抵消传输过程中的衰减和噪声干扰。在正常运行条件下, 低次谐波的最大允许幅度为最大负载电流 I_{LDmax} 的 4%。因此, 为了区分正常和故障条件下的谐波, 可将谐波的幅值设置为故障电流的 5%~10%^[39]。并且, 需满足测量设备的最小检测精度。例如, 典型的电流互感器(current transformer, CT)只有当测量电流大于 0.05 p.u. 时, CT 测量的准确性才能得到保证^[55]。在中压直流配电网中, 电压互感器(potential transformer, PT)通常采用 0.5 级测量精度, 测量误差在 0.75% 以内, 因此谐波电压幅值 $V_{h, inj}$ 至少应达到额定电压的 0.75%^[66]。

同时, 对于不同故障场景, 谐波幅值应动态调整以适应故障特性。例如, 当电压降至额定值的 50% 以下(低阻故障)时, 宜注入较小幅值的谐波电流, 以减少对系统的冲击; 而当电压在 50%~90%(高阻故障)时, 则需适当提高谐波幅值, 以提高保护灵敏度^[58]。并且, 还需优化谐波电流与工频电流的相对相位角, 以确保组合电流幅值不超过 CIDG 的最大输出能力, 避免过流风险及设备损坏。

另一方面, 电力电子器件的故障电流耐受能力较弱, 仅为额定电流的 1.5~2 倍^[67], 因此谐波幅值不宜过大。根据 GB/T 35727—2017 标准^[68], 10 kV 直流配电网的电压偏差范围为 -5%~+10%, 注入信号的最大幅值应不超过额定电压的 5%。此外, 为防止电流互感器 CT 饱和, CIDG 注入的故障电流需控制在 CT 的线性测量范围内^[38]。

综上所述, 主动注入谐波电流、电压幅值应满足式(4)所示的关系。

$$\begin{cases} I_{h, inj} + \sqrt{I_{d, fault}^2 + I_{q, fault}^2} \leq I_{th} \\ I_{h, inj} = \begin{cases} 0.05 I_{CIDG, N} & V_{fault} < 0.5 V_N \\ 0.10 I_{CIDG, N} & 0.5 V_N \leq V_{fault} \leq 0.9 V_N \end{cases} \\ I_{th} = \alpha I_{CIDG, N} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} V_{h, inj} = I_{h, inj} (Z_{h, Lf} + Z_{h, Tr}) \\ 0.75\% V_N \leq V_{h, inj} \leq 5\% V_N \end{cases} \quad (5)$$

式中: $I_{d, fault}$ 和 $I_{q, fault}$ 分别为故障发生后 d 、 q 轴故障

电流； $I_{CIDG,N}$ 为 CIDG 正常工作时的额定电流； I_{th} 为 CIDG 电流限幅值，二者之间存在 α 的倍数关系； α 通常小于 2； V_{fault} 为故障后的系统稳态电压值； V_N 为额定电压； $Z_{h,Lf}$ 和 $Z_{h,Tr}$ 分别为逆变器输出端口的滤波器、变压器等效阻抗。

2.3 注入控制的启动条件及信号注入时长

在主动信号注入式保护方案中，CIDG 仅在检

测到故障时才会启动注入。注入控制的启动条件通常为 CIDG 并网点电气量的异常变化，如图 3 所示。当并网点电压低于 0.9 p.u. 或电流超过正常运行电流 1.2 p.u. 时^[69]，控制器便会启动信号注入。此外，不平衡分量(如负序或零序电流)也可用于辅助判断。需要指出的是，若保护动作于跳闸，注入控制需立即启动；若保护动作于警告，可设定相应延时 T_{delay} ，以躲开接地电弧的熄弧时间^[30]。

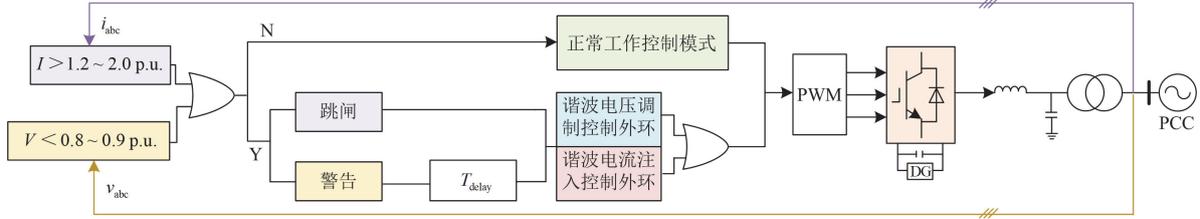


图 3 注入控制的启动条件

Fig. 3 Triggering conditions for injection control

信号注入时长需兼顾系统的安全裕度与注入谐波的可观性。注入时间过长可能会影响系统正常稳定运行；而注入时间过短则可能导致注入信号无法被可靠检测。

根据 GB/T 14549—1993，为避免暂态干扰与负荷波动影响注入谐波测量结果，规定采用 3 s 时间窗口内的 RMS 值进行计算^[70]，如式(6)所示。

$$V_h = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (V_{hk})^2} \quad (6)$$

式中： V_h 表示第 h 次谐波在 3 s 内计算的 RMS 值； V_{hk} 为第 k 次测量得到的 h 次谐波幅值； m 表示 3 s 内采样的次数，通常 $m \geq 6$ 。

在 3 s 窗口时间内，谐波电压在注入时长 T_{inject} 内的幅值为 $V_{h,inj}$ ，剩余时长 $3 - T_{inject}$ 内谐波电压幅值为 0，假设有 n 次采样处于注入时间段， $m - n$ 次采样在非注入阶段，根据系统正常运行谐波电压规定限值 $V_{h,lim}$ 及式(6)，可得注入时长的上限约束为

$$\begin{cases} n = \frac{mT_{inject}}{3} \\ V_h = V_{h,inj} \sqrt{\frac{n}{m}} < V_{h,lim} \\ T_{inject} < 3 \left(\frac{V_{h,lim}}{V_{h,inj}} \right)^2 \end{cases} \quad (7)$$

同时，为充分激发谐波响应，在实际谐波注入过程中，信号注入时间的选取需与故障排除时间 $T_{removal}$ (约 75 ms) 相匹配，并留有一定的裕度。为提高保护可靠性，常采用 $T_{inject} = 100$ ms 作为信号注入

时长，以支持保护装置完成故障识别，且不会对电能质量及系统稳定性造成较大影响^[58]。信号注入时长如式(8)所示，各阶段时序关系如图 4 所示。

$$75 \text{ ms} < T_{inject} < 3(V_{h,lim}/V_{h,inj})^2 \quad (8)$$

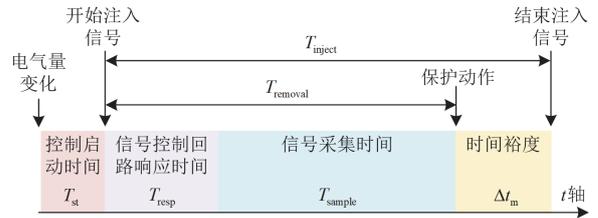


图 4 信号注入时长

Fig. 4 Duration of signal injection

2.4 存在的主要问题

尽管主动信号注入式保护提高了新型配电系统的故障辨识能力，但其在工程应用中仍面临多种挑战。首先，大多研究利用本地信号构成 CIDG 注入控制的启动判据。当系统发生故障后，不同 CIDG 因电气距离差异可能出现非同步启动。假设系统注入的信号之间存在相位差 $\Delta\phi$ ，当 $\Delta\phi$ 接近 π 时，谐波相互抵消，将明显削弱检测点信号强度，降低保护灵敏度与可靠性。

其次，采用多谐波电流信号注入时，并网点 (point of common coupling, PCC) 会产生对应频率的谐波电压，通过锁相环(phase-locked loop, PLL) 反馈至 CIDG 的工频控制环，导致 CIDG 失去有功-无功电流的解耦控制能力。同时，现有研究多聚焦于注入信号对故障特征的增强效果，忽略了对控制系统稳定性及电能质量的负面影响。特别是在多信号

注入场景下, 即便采用 PR 控制实现对特定谐波的精准跟踪, 不同谐波间仍可能发生串扰, 导致频谱混叠与局部谐振, 进而产生非期望信号干扰, 甚至引发系统振荡。上述问题将给主动信号注入式保护的稳定性与可靠性带来新的挑战, 未来亟需在信号同步控制、串扰抑制等方面开展深入研究。

3 典型应用场景及展望

3.1 典型应用场景

3.1.1 孤岛微网

微电网是一种能够有效管控分布式电源、负荷和保护装置的可离网运行小型系统, 其已成为新型配电系统行业发展的必然趋势。而离网运行状态下的微电网内部发生故障后, 其故障电流几乎全部来自分布式电源, 导致传统保护方案难以适用。但同时, 多数分布式电源通过变换器接入系统, 为主动信号注入式保护方法提供了应用基础, 是一种典型的应用场景。

文献[55]以加拿大某孤岛运行的微电网为研究对象, 基于 CIDG 附加谐波电压控制, 通过故障前后系统产生的谐波电流幅值差异实现故障辨识。文献[34,57]以两并联 CIDG 构成的孤岛系统为研究对象, 考虑 CIDG 故障电流输出特性, 提出了一种滞环控制与最大电流有效值控制相结合的主动信号注入方法。该方法在确保故障电流被限制在可接受范围内的同时, 引入了一定比例的 5 次谐波分量, 利用故障电流与外部等效阻抗的下垂关系, 使逆变器在靠近故障点时能够输出更大的故障电流。

3.1.2 新能源电站送出线路

新能源电站可通过直流变压器直接并网, 或由逆变器汇集后经交流变压器升压并网。因此, 可利用网侧的变换器进行信号注入, 构建相应保护方法。

文献[61]针对光伏直流升压系统在故障穿越过程中直流母线易出现过电压, 且逆变器控制策略与交流侧保护动作性能相互影响的问题, 提出了一种基于控保协同的主动注入式保护方案。在系统故障穿越期间控制逆变器主动向电网注入谐波信号, 有效提高了距离保护的灵敏度以及对过渡电阻的耐受能力。文献[64]通过改变双有源桥变换器的开关频率输出固定谐波分量, 计算谐波阻抗的大小, 实现了含多端分布式光伏直流配电系统的故障测距。为了解决网侧逆变器保护与系统保护失配问题, 文献[71]通过注入特征频率探测信号, 辅助求解故障测距方程, 结合反时限动作特性, 与区外故障过电流保护形成了保护配合。

3.1.3 交流配电系统

文献[72]通过中性点变压器注入可控频率的交流信号, 并利用全相位傅里叶变换处理电压、电流采样数据, 以提高频域分析精度, 进而依据注入信号的有功功率消耗判断各线路的故障状态。

此外, 现有研究进一步探讨了该方法对不同故障类型的适应性。文献[33, 65]通过仿真验证了谐波主动注入方法在主动配电网中应用的有效性, 表明其在相间故障、单相接地故障及对称故障等多种情况下仍可实现快速、可靠的故障检测。

3.1.4 柔性直流配电系统

柔性直流配电系统电压等级低、容量小, 采用低成本、高可靠可控性的两电平电压源型换流器足以满足系统运行要求。因此, 可以作为主动信号注入式保护的另典型应用场景。

文献[73]利用附加 LC 串联装置, 生成衰减振荡扰动, 利用振荡频率与衰减系数之间的映射关系, 实现了对故障距离的精确估计, 但该方法需要进行停电检测。文献[74]以 ± 10 kV 辐射状柔性直流配电系统为研究对象, 通过短时解锁 DC/DC 产生高频信号, 基于换流站高压侧支撑电容对注入信号的响应特征, 实现了故障定位。

3.2 未来研究展望

3.2.1 研究方向

1) 多变换器协调注入控制方法研究

考虑到单个 CIDG 的注入能力有限, 主动信号注入式保护需要系统中多个 CIDG 同时注入, 以保证故障特征的增强效果。然而, CIDG 的容量、接入位置、启动时刻等因素均会影响信号注入效果。受电气距离、通信时延、故障深度等影响, CIDG 的注入信号可能存在相位差, 导致汇集后的信号稀释, 降低保护灵敏度。为此, 文献[75]设计了依赖本地信号的相位一致控制, 将 CIDG 并网点电压相位作为谐波电流内环 dq 轴分量的重构基础, 实现了多 CIDG 注入信号的相位归一化。然而该方法并未考虑注入控制非同步启动带来的影响。文献[76]以卫星授时秒脉冲为同步信号, 实现多 CIDG 的同步注入, 但所提方法性能受限于授时精度, 且成本较高, 仅适用于部分重要线路或设备。

未来需进一步探索多 CIDG 协调控制机制, 研究适用于新型配电系统的 CIDG 协同注入控制策略, 包括明晰故障后并网点电压相位跳变机理, 评估注入信号相位偏移对保护性能的影响, 以及如何降低同步注入控制对外部授时的依赖性等, 从而提升主动信号注入式保护的可靠性。

2) 信号串扰抑制方法研究

在信号注入阶段，附加注入控制应尽量避免对 CIDG 的工频控制产生干扰。已有文献指出，注入信号在网侧产生的响应会造成 CIDG 工频、异频控制耦合，进而产生非期望异频信号。为此，有文献提出了基于前馈补偿的分频控制方法，即将 PCC 电压映射到对应频率的 dq 旋转坐标系，提取各频率直流分量，并补偿至工频控制回路实现解耦^[35,77]。然而，该方法需要进行大量的矩阵运算，对保护的速动性影响还需进一步验证，且未考虑系统背景噪声对注入控制的影响。

未来需进一步厘清注入信号串扰机制，优化控制性能，包括明晰信号串扰通路，考虑 CIDG 自身引入的高频信号，研究分频控制对非预期谐波干扰的自适应抑制方法，优化控制参数设计，提升控制响应速度，提高注入控制在复杂工况下的适应性。

3) 信号衰减补偿机制研究

主动信号注入式保护依赖注入信号在系统中的传播与响应特性。在复杂配电系统中，注入信号在传播过程中往往受到线路阻抗、不平衡负载、拓扑结构以及滤波装置等因素的影响，出现不同程度的衰减，尤其在远故障端或多馈线场景中较为明显。

未来研究需针对新型配电系统不同运行状态及网络拓扑，挖掘系统对注入扰动的响应特性，在此基础上设计相应信号补偿机制。

3.2.2 应用前景

交直流混联配电系统能够灵活兼容传统家电、工业电机等交流负荷以及电动汽车、数据中心等直流负荷，减少能量转换带来的损耗，提升能源利用率以及新能源消纳水平，因而成为未来配电系统的重要发展方向^[78]。目前，国内多个交直流混联配电系统示范工程已成功落地，例如珠海唐家湾多端柔性混联配电系统示范工程、浙江平阳交直流混联配电系统以及苏州工业园区主动配电网示范工程等。一方面，考虑到混联配电系统的运行模式、网架结构以及故障特征与传统配电系统存在根本差异，传统保护方案已无法满足系统对故障判断能力的要求。另一方面，以柔性互联变换器为核心设备的混联配电系统，具备典型的“双高”特征(高比例新能源、高比例电力电子设备接入)，给主动信号注入式保护的应用奠定了基础。

此外，由于电缆线路对地容抗远小于架空线路，注入信号在沿线传播时衰减更为显著。现有研究多以架空线路为对象，未来可进一步探索注入式保护方法在电缆型配电系统中的应用。同时，主动信号注入式保护技术在复杂电气扰动识别方面具备

独特优势，其应用场景可进一步拓展至自动重合闸、变压器励磁涌流辨识以及极端场景下的供电回路重构等关键领域，为构建更加智能化、高韧性的配电系统保护体系提供技术支撑。

4 结论

随着高比例分布式新能源的广泛接入，配电系统形态发生了深刻变革，逐步演变为以变换器并网型电源为主导的多源、多馈入式新型配电系统。受变换器并网型电源弱馈特性影响，系统自发性故障特征持续弱化，导致基于“故障激励-系统响应”机制下的传统被动式保护性能下降。变换器主动信号注入式保护充分利用了变换器的高可控性，促进了控制与保护协同，改善了保护性能，是新型配电系统保护发展的重要方向。本文围绕新型配电系统保护方法的研究进展，总结了主动信号注入式保护方法的优势，分析了变换器控制与注入信号选择等关键技术，归纳了现有研究的共性问题，探讨了其典型应用场景并对未来研究方向进行展望。

1) 基于电力电子变换器的主动信号注入保护技术，通过在故障期间主动改变变换器的电源输出特性，实现了故障特征的主动增强，突破了系统故障特征弱化对保护性能的制约，具备适应性强、实施成本低等优势。

2) 如何提高注入控制的稳定性以及选择合适的注入信号是注入式保护的关键技术。本文从控制精度、响应速度以及设备注入能力 3 个方面对现有注入控制方法进行评估，同时综合注入信号的衰减特性、对系统电能质量的影响以及保护对故障特征的需求等因素，对注入信号的幅频选择给出了建议。

3) 面向新型配电系统的应用需求，主动信号注入式保护技术仍然有许多关键问题有待解决，未来研究需进一步聚焦多变换器协同控制以及注入信号衰减补偿等。此外，面向交直流混联配电系统、多源异构微网集群等未来场景，需要探索统一架构下的注入式保护策略，降低控制与保护的配合难度，提高主动信号注入式保护工程的应用价值。

本文工作可为新型配电系统主动信号注入式保护技术的深入研究提供重要参考。

参考文献

[1] 胡蓉, 殷雪莉, 徐梦, 等. 基于分布式一致性的新型配电系统电能质量综合治理研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(8): 49-61.
HU Rong, YIN Xueli, XU Meng, et al. Research on comprehensive power quality management of new

- distribution network based on distributed consensus[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(8): 49-61.
- [2] 高强强, 侯俊杰, 樊艳芳, 等. 适用于双端弱馈交流系统的改进型电流差动保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(12): 69-81.
GAO Qiangqiang, HOU Junjie, FAN Yanfang, et al. Improved current differential protection for two-terminal weak feed AC system[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(12): 69-81.
- [3] 杨杉, 喻希, 罗朝旭, 等. 含换流器型分布式电源配电网的不对称短路电流计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(10): 44-53.
YANG Shan, YU Xi, LUO Zhaoxu, et al. Asymmetric short-circuit current calculation of a distribution network with inverter-based distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(10): 44-53.
- [4] 宋国兵, 王婷, 张保会, 等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析展望[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(20): 173-183.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospect of detective fault identification technologies using power electronic device[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(20): 173-183.
- [5] 李乐萍, 许皓, 王子希, 等. 基于等效负荷分布的含分布式电源配电网线损计算[J]. *供用电*, 2024, 41(3): 42-50, 77.
LI Leping, XU Hao, WANG Yuxi, et al. Calculation of line loss in distribution networks with distributed power sources based on equivalent load distribution[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(3): 42-50, 77.
- [6] BI Tianshu, YANG Bin, JIA Ke, et al. Review on renewable energy source fault characteristics analysis[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, 8(4): 963-972.
- [7] 郑涛, 曲荣淇, 陈云飞, 等. 基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源接入电网故障计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(10): 57-65.
ZHENG Tao, QU Rongqi, CHEN Yunfei, et al. Fault calculation method for a power grid with high penetration of renewable energy based on adaptive combination of Newton and quasi-Newton methods[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(10): 57-65.
- [8] WANG Chongyu, PANG Kaiyuan, SHAHIDEHPOUR M, et al. MILP-based fault diagnosis model in active power distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 3847-3857.
- [9] 戴志辉, 张宇, 吴桐, 等. 含高比例新能源配电网的改进重合闸方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(15): 103-112.
- DAI Zhihui, ZHANG Yu, WU Tong, et al. An improved reclosing scheme for active distribution networks with high proportion of new energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(15): 103-112.
- [10] YUAN Tong, GAO Houlei, PENG Fang, et al. Adaptive quasi-power differential protection scheme for active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(1): 324-339.
- [11] JIA Ke, GU Chenjie, XUAN Zhenwen, et al. Fault characteristics analysis and line protection design within a large-scale photovoltaic power plant[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 4099-4108.
- [12] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 10-20.
- [13] YANG Zhe, WANG Hongyi, LIAO Wenlong, et al. Protection challenges and solutions for AC systems with renewable energy sources: a review[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 10(1): 18-39.
- [14] 张鑫华, 何佳伟, 李斌, 等. 基于复频率信号注入的直流感地极线路故障测距方法[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(17): 109-118.
ZHANG Xinhua, HE Jiawei, LI Bin, et al. Fault location method for DC grounding electrode line based on composite-frequency signal injection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(17): 109-118.
- [15] 王凤, 康怡. 基于脉冲信号注入法的小电流接地选线技术[J]. *电网技术*, 2008, 32(15): 90-93, 98.
WANG Feng, KANG Yi. Pulse signal injection based faulty line detection for small current neutral grounding system[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(15): 90-93, 98.
- [16] 樊淑娴, 徐丙垠, 张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(4): 91-95.
FAN Shuxian, XU Bingyin, ZHANG Qingzhou. A new method for fault line selection in distribution system with arc suppression coil grounding with square-wave signal injection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(4): 91-95.
- [17] 叶雨晴, 马啸, 林湘宁, 等. 基于SOP的主动式谐振接地配电网单相接地故障区段定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(5): 1453-1465.

- YE Yuqing, MA Xiao, LIN Xiangning, et al. Active fault locating method based on SOP for single phase grounding faults in the resonant grounding distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1453-1465.
- [18] 刘斯琪, 喻锟, 曾祥君, 等. 基于零序电流幅值连调的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 48-56.
- LIU Siqi, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Fault location method of a non-effective earthed system based on zero sequence current amplitude continuous regulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 48-56.
- [19] 何瑞江, 胡志坚, 王天一. 计及分布式电源注入谐波的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 670-680.
- HE Ruijiang, HU Zhijian, WANG Tianyi. A fault line selection method for resonant grounding system considering injected harmonics of distributed generation[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 670-680.
- [20] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 50-56.
- LIN Xia, LU Yuping, WANG Lianhe. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 50-56.
- [21] 陈建平, 桑林卫, 汤拓, 等. 自适应幅值比的有源配电网差动保护方案[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 29-35.
- CHEN Jianping, SANG Linwei, TANG Tuo, et al. Adaptive distribution network differential protection scheme with adaptive amplitude ratio[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 29-35.
- [22] LIU Zhou, SU Chi, HOIDALEN H K, et al. A multiagent system-based protection and control scheme for distribution system with distributed-generation integration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 536-545.
- [23] 缪希仁, 赵丹, 刘晓明, 等. 含分布式电源配电网短路保护研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3006-3019.
- MIAO Xiren, ZHAO Dan, LIU Xiaoming, et al. A research review of short-circuit protection in distribution network with distributed generation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3006-3019.
- [24] LIU Di, DYŠKO A, HONG Qiteng, et al. Transient wavelet energy-based protection scheme for inverter-dominated microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2533-2546.
- [25] 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.
- [26] HONG Lucheng, RIZWAN M, WASIF M, et al. User-defined dual setting directional overcurrent relays with hybrid time current-voltage characteristics-based protection coordination for active distribution network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 62752-62769.
- [27] 叶远波, 蔡翔, 谢民, 等. 配电网单相接地故障快速选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 96-103.
- YE Yuanbo, CAI Xiang, XIE Min, et al. Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 96-103.
- [28] 曾超, 喻锟, 曾祥君, 等. 并阻尼谐振接地系统对地参数测量与高阻故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 67-76.
- ZENG Chao, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. A new method for measuring ground parameters and selecting high resistance fault lines in parallel damping resonant grounding systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 67-76.
- [29] 周宇, 汤涛, 曾祥君, 等. 基于零序电流幅值比倍增系数的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 112-120.
- ZHOU Yu, TANG Tao, ZENG Xiangjun, et al. Fault line detection method for a flexible grounding system based on a zero-sequence current amplitude ratio multiplication coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 112-120.
- [30] DENG Jinglei, YAO Liangzhong, XU Jian, et al. A faulted feeder selection method based on active harmonic injection of CIDGs for small current grounding system[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems: 1-20[2025-08-23]. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2024.07690
- [31] BARIK M A, GARGOOM A, MAHMUD M A, et al. A decentralized fault detection technique for detecting single phase to ground faults in power distribution systems with resonant grounding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2462-2473.
- [32] 姜博, 董新洲, 施慎行. 基于单相电流行波的配电网单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
- JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. A method of single phase to ground fault feeder selection based on single phase current traveling wave for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227.

- [33] 戴志辉, 吴桐, 何静远, 等. 基于控保协同的有源配电网主动注入式保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 94-103.
DAI Zhihui, WU Tong, HE Jingyuan, et al. An active distribution network active injection protection method based on control-protection coordination[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 94-103.
- [34] CHEN Zhi, PEI Xuejun, YANG Min, et al. A novel protection scheme for inverter-interfaced microgrid (IIM) operated in islanded mode[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(9): 7684-7697.
- [35] 徐瑞东, 常仲学, 杨佳怡, 等. 柔性互联配电网探测式相间距离保护[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(5): 48-56.
XU Ruidong, CHANG Zhongxue, YANG Jiayi, et al. Detective phase-to-phase distance protection for flexibly interconnected distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 48-56.
- [36] 王晓卫, 岳阳, 张帆, 等. 基于注入扰动电流响应特征的主动式故障性质判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(8): 34-44.
WANG Xiaowei, YUE Yang, ZHANG Fan, et al. Active fault property discrimination method based on injected disturbance current response characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(8): 34-44.
- [37] 李海锋, 张正刚, 梁远升, 等. 基于谐波信号注入的含逆变型分布式电源配电网电流差动保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 120-128.
LI Haifeng, ZHANG Zhenggang, LIANG Yuansheng, et al. Current differential protection for distribution network with inverter-interfaced distributed generators based on injection of harmonic signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 120-128.
- [38] SOLEIMANISARDOO A, KAZEMI KAREGAR H, ZEINELDIN H H. Differential frequency protection scheme based on off-nominal frequency injections for inverter-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2107-2114.
- [39] KHAN M A U, HONG Qiteng, EGEE-ÀLVAREZ A, et al. A communication-free active unit protection scheme for inverter dominated islanded microgrids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142.
- [40] KHAN M A U, HONG Qiteng, DYŚKO A, et al. An active protection scheme for islanded microgrids[C]// 15th International Conference on Developments in Power System Protection, March 9-12, 2020, Liverpool, UK: 1-6.
- [41] SALEH K A, MEHRIZI-SANI A. Harmonic directional overcurrent relay for islanded microgrids with inverter-based DGs[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 2720-2731.
- [42] EL-SAYED W T, EL-SAADANY E F, ZEINELDIN H H. Interharmonic differential relay with a soft current limiter for the protection of inverter-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1349-1359.
- [43] SALEH K, ALLAM M A, MEHRIZI-SANI A. Protection of inverter-based islanded microgrids via synthetic harmonic current pattern injection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2434-2445.
- [44] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于控保协同的多端柔性直流配电系统线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2559-2568.
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Line protection for multi-terminal flexible DC distribution system based on control and protection coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2559-2568.
- [45] 贾科, 宣振文, 陈金锋, 等. 基于控保协同的光伏直流升压汇集系统直流故障判别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 134-141.
JIA Ke, XUAN Zhenwen, CHEN Jinfeng, et al. Control and protection coordination based identification strategy of DC fault for photovoltaic DC boosting integration system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 134-141.
- [46] DAI Zhihui, LIU Xueyan, HE Yongxing, et al. Single-terminal quantity based line protection for ring flexible DC distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 310-323.
- [47] ZAMORA J J, ZAMORA I, MAZON A J, et al. Optimal frequency value to detect low current faults superposing voltage tones[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1773-1779.
- [48] 王晓卫, 岳阳, 郭亮, 等. 注入电流分布特性辨识的配电网故障选线方法[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 78-89.
WANG Xiaowei, YUE Yang, GUO Liang, et al. Fault line selection method for distribution network based on injection current distribution characteristics identification[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 78-89.
- [49] 刘红文, 曾祥君, 柴晨超, 等. 配电网柔性接地装置注入非工频小信号的接地故障检测与区段定位方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 44-53.
LIU Hongwen, ZENG Xiangjun, CHAI Chenchao, et al. Grounding fault detection and section location method of injecting non power frequency small signal into flexible grounding device of distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 44-53.

- [50] HAGH M T, REZAEI H, DANESHVAR M. Faulted feeder identification in active grounded networks[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(15): 3476-3483.
- [51] ELKALASHY N I, SABIHA N A, LEHTONEN M. Earth fault distance estimation using active traveling waves in energized-compensated MV networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(2): 836-843.
- [52] FOROUZESH A, GOLSORKHI M S, SAVAGHEBI M, et al. Fault location identification in meshed AC microgrids using interharmonic injection[C] // 7th Iran Wind Energy Conference, May 17-18, 2021, Shahrood, Iran: 1-6.
- [53] LUO Xunhua, DENG Zhiming, WU Jingyang, et al. Fault nature identification and location scheme for distribution network based on active injection from IIDG[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 156.
- [54] KARKKAINEN T, RAUMA K, SILVENTOINEN P. Ground fault detection method for three phase inverters based on the third harmonic[C] // Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, August 30-September 1, 2011, Birmingham, UK: 1-4.
- [55] EL-SAYED W T, AZZOUZ M A, ZEINELDIN H H, et al. A harmonic time-current-voltage directional relay for optimal protection coordination of inverter-based islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(3): 1904-1917.
- [56] YU Haiying, LU Zhongfeng, LIU Yuliang, et al. Injected harmonic feature based protection scheme for active distribution networks with high proportion IIDGs[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 35282-35299.
- [57] CHEN Zhi, PEI Xuejun, PENG Li. Harmonic components based protection strategy for inverter-interfaced AC microgrid[C] // 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 18-22, 2016, Milwaukee, WI, USA: 1-6.
- [58] XUE Linyi, MU Longhua, FANG Chongkai, et al. Research on active protection method for microgrids based on harmonic injection[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2025, 16(1): 209-222.
- [59] 方重凯, 牟龙华, 欧锐, 等. 基于控保协同的微电网注入式保护方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(9): 3389-3402.
- FANG Chongkai, MU Longhua, OU Rui, et al. Research on control-protection coordination based on injection protect scheme of microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(9): 3389-3402.
- [60] BEHESHTAEIN S, CUZNER R, SAVAGHEBI M, et al. A new harmonic-based protection structure for meshed microgrids[C] // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting, August 5-10, 2018, Portland, OR, USA: 1-6.
- [61] 贾科, 宣振文, 朱正轩, 等. 光伏直流升压接入系统故障穿越协同控保方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(10): 3249-3257.
- JIA Ke, XUAN Zhenwen, ZHU Zhengxuan, et al. A coordinated control and active protection for PV DC boosting integration system during FRT[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(10): 3249-3257.
- [62] ZHAO Ensheng, HAN Yang, LIN Xiangyang, et al. Harmonic characteristics and control strategies of grid-connected photovoltaic inverters under weak grid conditions[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 142.
- [63] HU Zhe, HAN Yang, ZALHAF A S, et al. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 218.
- [64] JIA Ke, SHI Zhiming, WANG Congbo, et al. Active converter injection-based protection for a photovoltaic DC distribution system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(6): 5911-5921.
- [65] 邓靖雷, 姚良忠, 徐箭, 等. 一种基于附加谐波电流信号的主动配电网线路保护方法[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(4): 1409-1423.
- DENG Jinglei, YAO Liangzhong, XU Jian, et al. An additional harmonic current based line protection method of active distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(4): 1409-1423.
- [66] 徐瑞东, 常仲学, 宋国兵, 等. 注入探测信号的直流配电网接地故障识别方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(11): 4269-4276.
- XU Ruidong, CHANG Zhongxue, SONG Guobing, et al. Grounding fault identification method for DC distribution network based on detection signal injection[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4269-4276.
- [67] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 1-15.
- [68] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 中低压直流配电电压导则: GB/T 35727—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Systems Aspects for Electrical Energy Supply. Guideline

- for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system: GB/T 3572—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [69] SOLEIMANISARDOO A, KAZEMI KAREGAR H. Alleviating the impact of DGs and network operation modes on the protection system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(1): 21-28.
- [70] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- Systems Aspects for Electrical Energy Supply. Quality of electric energy supply-harmonics in public supply network: GB/T 14549—1993[S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.
- [71] 汤耀景, 孔凡坊, 宋国兵, 等. 分布式光伏并网线路的相间故障主动探测式保护原理[J]. 供用电, 2023, 40(1): 41-48.
- TANG Yaojing, KONG Fanfang, SONG Guobing, et al. Active detection protection method for interphase fault of distributed photovoltaic grid-connected line[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(1): 41-48.
- [72] NIU Lin, WU Guiqing, XU Zhangsheng. Single-phase fault line selection in distribution network based on signal injection method[J]. IEEE Access, 2021, 9: 21567-21578.
- [73] 贾科, 李论, 宣振文, 等. 基于扰动注入的柔性直流配电网主动故障定位及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 99-106.
- JIA Ke, LI Lun, XUAN Zhenwen, et al. Study on Fault Location method and simulation for VSC-DC distribution network based on disturbance injection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 99-106.
- [74] 刘子奕, 贾科, 姚昆鹏, 等. 基于主动注入的柔性直流配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 21-30.
- LIU Ziyi, JIA Ke, YAO Kunpeng, et al. An active converter injection-based fault location method for a flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 21-30.
- [75] 常仲学, 鲁鑫, 徐瑞东, 等. 利用智能软开关探测的配电路相相间永久性故障识别方法[J/OL]. 电网技术: 1-15[2025-10-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2410.TM.20250725.1354.014>
- CHANG Zhongxue, LU Xin, XU Ruidong, et al. Phase to phase permanent fault identification method of distribution line based on soft open point detection[J/OL]. Power System Technology: 1-15[2025-10-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2410.TM.20250725.1354.014>
- [76] 徐化博, 陈羽, 徐丙垠, 等. 基于信号同步注入的多源配网阻抗测量防孤岛保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8834-8846.
- XU Huabo, CHEN Yu, XU Bingyin, et al. Anti-islanding Protection method for multi-source distribution network impedance measurement based on signal synchronization injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8834-8846.
- [77] DENG Jinglei, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. An adaptive reclosing method for active distribution network based on multi-harmonic current injection by IIDG[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 171.
- [78] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
- DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

收稿日期: 2025-06-24; 修回日期: 2025-11-12

作者简介:

邓静蕾(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: djlaaa@whu.edu.cn

姚良忠(1961—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电并网、直流电网技术; E-mail: yaoliangzhong@whu.edu.cn

邓靖雷(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为主动配电网故障特征分析与保护技术。E-mail: Whu_Djl@163.com

(编辑 许威)