

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230634

通信限制下多 DG 接入配网的新型电流差动保护

李振兴¹, 王扬贻¹, 望周丽², 陈艳霞³, 朱益¹, 翁汉珺¹

(1. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力有限公司潜江市供电公司, 湖北 潜江 433100; 3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 差动保护是解决分布式电源(distributed generation, DG)接入下配电网保护难题的有效手段, 然而配网现有通信建设水平很大程度上制约了差动保护的构建。首先, 融合电流相位与相量差动保护思想, 同时将电流相位信息进行变换, 实现通信信息降容。应用递推最小二乘法实现短路电流相位参数的快速估计, 提出了短路电流相位修正策略, 以应对 CT 饱和与直流分量对保护的干扰。最后, 提出适用于含多 DG 配网的新型电流差动保护构建原则与保护判据。基于 PSACD/EMTDC 平台搭建仿真模型, 验证了所提出的电流相位参数预测方法的精度与新型差动保护的性能。算例结果表明: 所提电流相位参数预测方法速度快、精度高, 具有良好的抗 CT 饱和能力; 所提新型差动保护原理具有良好的性能。

关键词: 配电网; DG; 0 ± 1 变换; 电流相位参数预测; 差动保护

A novel current differential protection for multiple DGs accessing a distribution network with a communication limitation

LI Zhenxing¹, WANG Yangze¹, WANG Zhouli², CHEN Yanxia³, ZHU Yi¹, WENG Hanli¹

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. Qianjiang Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Qianjiang 433100, China; 3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: Differential protection is an effective means of solving the problem of distribution network protection with DG access. However, the existing communication construction level of a distribution network greatly restricts the construction of differential protection. In this paper, the idea of current phase and phasor differential protection is integrated, and the current phase information is transformed to reduce the capacity of communication information. It applies the recursive least squares method to achieve fast estimation of short-circuit current phase parameters, and proposes a short-circuit current phase correction strategy to address the interference of CT saturation and DC component with protection. Finally, the construction principle and protection criterion of new current differential protection suitable for a distribution network with multiple DGs are proposed. Based on the PSACD/EMTDC platform, a simulation model is built to verify the prediction accuracy of the proposed current phase parameters and the performance of the new differential protection. The results show that the proposed current phase parameter prediction method is fast, has high precision and good anti-CT saturation ability. The proposed new differential protection principle shows good performance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077120).

Key words: distribution network; DG; 0 ± 1 transformation; current phase parameter prediction; differential protection

0 引言

随着“双碳”愿景提出, 我国开始构建以新能源为主体的新型电力系统^[1-4]。在此背景下, 分布式

电源(distributed generation, DG)在配网中的渗透率持续加深, 极大地提高了配电网供电的灵活性。与此同时, DG 的接入改变了配电网的网络结构与故障特性^[4-8], 加之其出力的波动性与间歇性, 造成配电网运行方式多变与潮流方向不定, 使传统电流保护难以整定与配合^[9]。差动保护具有对故障的优良

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077120)

选择性能, 成为了解决 DG 接入配电网保护难题的最优选择^[10-13]。

差动保护的高通信要求是需要解决的首要问题。文献[14]提出一种基于电压突变量的差动保护同步方法, 但配网一般不具备电压采集功能, 距离工程应用仍需等待配网进一步发展。文献[15]提出一种基于 5G 无线通信通道、北斗系统授时采样同步法的配电网差动保护方案, 为配网差动保护的推广提供通信技术支持。文献[16]提出一种基于光学电流互感器的有源配电网相差保护方案, 将电流信号转换为光强信号, 利用光纤通道解决纵联保护通信通道和数据同步问题。文献[17]提出一种基于 5G 的正序电流幅值差动综合保护方案, 以三段式过流保护应对通信中断与保护未启动情形。

然而基于光纤或 5G 的配网差动保护方案忽略了配电网现有通信建设水平相对滞后的问题。光纤通信有大带宽、低延时的优势, 但许多地区配网并不具备光纤通信条件, 且光纤改造困难、成本高^[18]; 5G 通信在实际测试中, 网络延时、运维主体等因素影响差动保护性能^[19-20], 并且 5G 基站建设难以实现短时全覆盖, 甚至部分重要城市地区禁止将 5G 公网用于电网安全防护。

依赖配网现有通信技术实现差动保护构建对新型电力系统的转型与建设起到重要过渡作用。文献[20]提出一种基于无线通信的配电线路差动保护设计方案, 并验证其同步、延时等各项性能均能满足差动保护要求。文献[21]对数据进行压缩传输, 降低差动保护通信传输量, 以适应通信带宽受限场景。文献[22]基于压缩感知理论对高频采样信号进行压缩传输, 在不影响高速保护性能的前提下, 有效降低保护通信量。

综上所述, 本文考虑配电网现有通信建设水平, 基于传统电流相位差动与相量差动保护原理, 提出一种通信限制下多 DG 接入配网的新型电流差动保护原理, 综合相位比较与相量比较思路, 将电流相位信息变换为模态序列, 构建差动保护的同时降低保护通信量; 应用递推最小二乘法实现短路电流相位参数的快速估计, 提出短路电流相位修正策略, 应对 CT 饱和与直流分量的干扰; 最后, 提出考虑 DG 接入配电网场景下的新型差动保护构建方法与保护逻辑, 并基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建配网模型, 验证所提保护原理的有效性。

1 综合电流相位&相量比较的新型差动保护

1.1 基于数字量的电流相位差动保护思路转换

传统电流相位差动保护利用高频信号的连续与

间断表征被保护元件两端电流的相位状态, 进而区分区内、区外故障, 其实现过程中仅包含简单的逻辑信号, 对通信通道的带宽要求低, 有利于应对现有通信手段的低带宽限制。同时, 传统电流相位差动保护存在如闭锁角整定困难、正半波发信的实现方式易受直流分量与 CT 饱和影响等明显缺陷。

得益于成熟的现代电网数字化技术, 传统电流相位差动保护由逻辑信号保护转变为数字化保护。为实现通信限制下的差动保护构建, 本文基于传统电流相位差动保护思想, 利用数字化技术表征电流相位信息, 将电流相位信息表征为 $[1, 0, -1]$ 三种模态, 其中, 正半波对应模态 1, 负半波对应模态-1, 模态 0 定义为模糊态。

1.2 基于电流采样值的 0 ± 1 变换

0 ± 1 变换示意图如图 1 所示。利用电流采样值大小关系将电流变换为由三模态 $[1, 0, -1]$ 表征的电流相位模态序列, 变换公式如式(1)所示。

$$i_s = \begin{cases} 1, & i \geq I_{\text{set},1} \\ 0, & -I_{\text{set},1} < i < I_{\text{set},1} \\ -1, & i \leq -I_{\text{set},1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_s 表示变换后的电流相位模态序列; i 表示原始电流采样序列; $I_{\text{set},1}$ 为变换阈值。

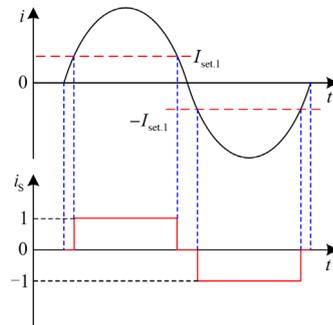


图 1 0 ± 1 变换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 0 ± 1 transformation

变换阈值的确定应满足电流相位模态序列对电流相位信息的精确表征需求, 最小化模糊态 0 的占比。本文以本线路最大负荷电流为有效值, 构建正弦工频离散序列, 离散程度由实际电流采样频率决定, 在初相角为零的条件下, 取过零点时刻相邻采样点的绝对值作为变换阈值, 如式(2)所示。

$$I_{\text{set},1} = \left| \sqrt{2} \times I_{\text{load,max}} \times \sin\left(\frac{360^\circ \times f_1}{f}\right) \right| \quad (2)$$

式中: $I_{\text{load,max}}$ 表示本线路最大负荷电流; f_1 为电流工频频率 50 Hz; f 表示电流信号采样频率, 单位为 Hz。理想情况下, 按式(1)进行变换后的电流相

位模态序列,一个周波内仅包含 0 或 1 个模糊态 0。

1.3 基于 0 ± 1 序列的新型差动保护构建思路

利用电流相位模态序列直接相减构成相位差动,由于模糊态 0 的存在以及相位模态的相互抵消,难以规避由于闭锁角整定困难而导致的保护判据模糊问题。为此,本文综合电流相位差动与电流相量差动的思想,基于电流信息经 0 ± 1 变换后的电流相位模态序列,通过固定数据窗内同一时刻下采样点相加、减运算,将相位差程度表征为“动作相位模态”与“制动相位模态”的幅值差异,构建综合电流相位与相量比较的新型差动保护。

以图 2 所示两端供电网为例,故障发生时,保护启动,将 M、N 两侧电流信号 \dot{I}_M 、 \dot{I}_N 经 0 ± 1 变换后的电流相位模态序列传输到保护装置,并按式(3)计算得到动作相位模态 I_d 与制动相位模态 I_r 。

$$\begin{cases} I_d = \sum_{k=1}^J |i_{SMk} + i_{SNk}| \\ I_r = \sum_{k=1}^J |i_{SMk} - i_{SNk}| \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_{SMk} 、 i_{SNk} 分别为 M、N 两侧的电流相位模态序列; J 为数据窗长度,本文取 $T/2$, T 为一个工频电流周期内的采样点数。保护动作判据为

$$I_d \geq K_{res} I_r \quad (4)$$

式中, K_{res} 为制动系数,一般取 0.75~0.85。



图 2 两端供电系统

Fig. 2 Two-terminal power supply system

DG 接入配网后,其正常运行期间的输出有功电流相位和故障低电压穿越运行期间的补偿无功电流相位,均由并网点电压决定。文献[16]对此展开了详细分析,并得出电流相位差能够反映区内、区外故障的结论,电流相位差动原理解决 DG 接入对配网保护的挑战具有可行性。

2 配网新型差动保护的关键技术

2.1 0 ± 1 变换启动判据

DG 出力存在间歇性与波动性,线路重载或 DG 出力过大可能导致潮流换向,会影响基于相位的新颖差动保护性能。为避免正常运行情况下潮流换向导致保护误动,同时确保高阻接地故障下的可靠启动,减小通信通道压力,本文以相电流突变量作为 0 ± 1 变换启动门槛,按照式(5)设定电流突变量门槛值 ε [23]。

$$\varepsilon = 0.01I_N + 1.02 \|\Delta I(k-2N)\| \quad (5)$$

式中: I_N 为额定电流; $\Delta I(k-2N)$ 表示当前时刻前两个周波时刻对应的电流突变量计算值,其中 $\Delta I(k) = i(k) - i(k-2N)$, k 表示当前采样时刻, N 为每周波采样点。等式右边第一项起到避免门槛值过低导致保护频繁启动的作用,第二项起到避免电流不平衡引起误启动的作用。以连续多点突变量超越门槛值 ε 启动 0 ± 1 变换,确保系统正常运行时变换不启动,在保护判别过程中以故障发生时刻实现差动保护同步。

2.2 就地电流相位参数快速估计与修正技术

在故障初始阶段,传统电源产生的短路电流包含交流周期分量与衰减直流分量。衰减直流分量对短路电流的抬升效果显著,使电流波形偏向时间轴的一侧,造成相位偏移;非周期分量突增可能使 CT 铁芯快速达到饱和,导致二次测量电流发生畸变,造成相位缺失。按照保护闭锁原则,CT 饱和时需等待二次谐波含量低于 15% 后允许保护开放,但保护的长时闭锁存在区内故障拒动与区外故障误动风险,对故障的快速切除与系统的安全稳定运行极为不利。此外,CT 饱和程度受磁通、互感器特性等多种因素共同影响,难以进行量化。

在前述新颖差动保护构建思路中,期望参与差动保护计算的电流相位信息趋于理想化。为此,本文基于递推最小二乘法,仅利用 CT 饱和前的有效电流采样数据,实现对短路电流极值点时刻的快速预测,并将预测结果作为修正基准对电流相位模态序列进行修正。

根据文献[24]所述,采用递推最小二乘法进行短路电流参数估计,短路电流的时间函数表示为

$$I(t) = A_1 \sin(\omega t) + A_2 \cos(\omega t) + A_3 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

式中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 τ 在滑动数据窗内进行迭代求解得到,为提高电流参数估计精度,以分段差值方式对时间常数 τ 进行补偿。

应用递推最小二乘法估计短路电流参数,数据窗越长,估计精度越高,且短路电流周期分量含量越大,时间常数 τ 误差越小 [24]。若要得到满足误差要求的短路电流幅值参数估计值,输入数据窗内至少需要包含 10 ms 长度的数据,CT 饱和场景下显然无法提供足够长度的有效数据。幸运的是,本文所提新颖差动保护原理对短路电流幅值估计精度不作要求,更关注于故障发生后前半波极值时刻,并将其作为基准修正电流相位模态序列,以应对不同 CT 饱和程度下电流波形畸变引起的相位缺失。

参数估计数据窗长度的设定应小于故障发生到故障后半波极值点的时间间隔,以 CT 轻度饱

和为例, 基于递推最小二乘法的短路电流相位参数预测结果如图 3 所示, 能够观察到, 短数据窗下电流幅值估计精度不足, 但极值时刻估计结果与真实时刻误差仅为一个采样点, 在采样频率 f 下估计误差为 $(360^\circ \times f_1 / f)$, f_1 为电流工频频率, 取值 50 Hz。目前现场电流采样频率能达到 4.8 kHz 甚至更高^[25], 则极值时刻估计误差小于或等于 3.75° 。

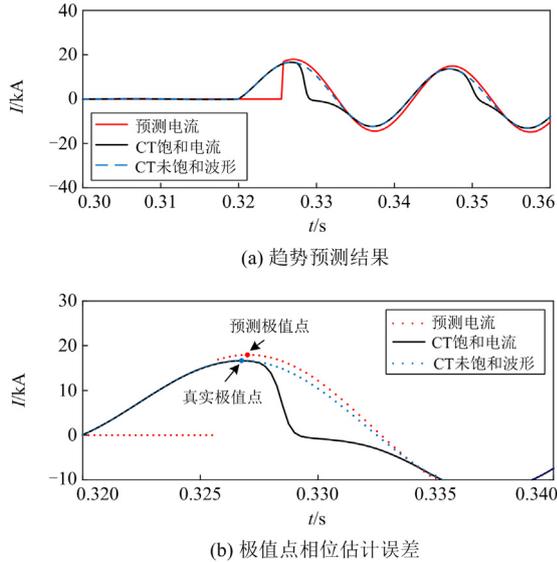


图 3 CT 饱和波形趋势估计与相位估计误差

Fig. 3 CT saturation waveform trend estimation and phase estimation error

CT 饱和多由直流分量引起, 估计极值时刻能够应对电流波形畸变导致的相位缺失, 还需对直流分量引起的相位偏移进行修正。修正基准的选取以拟合估计的极值时刻、实际采样值基波数据的极值时刻之间的误差来确定, 若误差小于 3 个采样点, 则利用实际极值时刻为基准进行相位修正, 反之则以估计值为基准进行相位修正。本文将相位修正基准时刻记作 t_p , 以 t_p 为起点, $i_s(t_p)$ 模态值为参考, 分别向前推进 $N/4$ 个采样点、向后推进 $(N/4-1)$ 个采样点作为首个标准半波相位模态序列, 其中 N 为一周波电流采样点数, 遵循标准正弦正负半波规律, 对电流相位模态序列进行滚动修正。

相位修正前、后的电流相位模态序列如图 4 所示。为方便观察, 将 CT 未饱和波形进行归一化作为对比参考, 可以看出经过相位修正的电流相位模态序列有效避免了直流分量与 CT 饱和造成的相位偏移与缺失, 趋于理想化相位表征, 能够提高新型差动保护的耐 CT 饱和和能力。

需要说明的是, 逆变型 DG 的故障电流具备突变特性^[5,19], 响应时间达到毫秒级, 与式(5)所示故

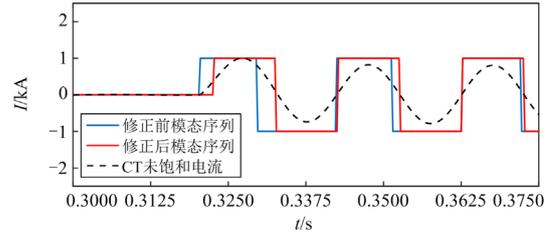


图 4 相位修正前、后电流模态序列

Fig. 4 Current mode sequences before and after phase correction

障电流规律不一致, 并且 DG 输出电流水平较低, 不会引起 CT 饱和。因此, DG 支路测量电流经 0 ± 1 变换后直接上送, 主干线路电流变换为相位模态序列并就地修正后上送至决策中心。

此外, 递推最小二乘法具备很强的高频分量滤波能力, 在实际使用中, 无须附加其他数字滤波器。

3 多 DG 接入配网的新型差动保护构建

3.1 保护区域划分

本文按照配网多级线路进行保护区域的划分, 进行区域新型差动保护构建, 结合图 5 所示含 DG 配电网, 对保护区域划分原则进行阐述。

1) 保护范围与边界。按照配电网现有多级线路划分, 以本级主干线路为保护范围, 以本级线路首端、末端以及含 DG 负荷分支并网断路器为边界, 确定保护区域。图 5 中保护区域 I 保护范围为线路 MN, 区域边界为 $[R1, R2, R4]$, 下一级保护区域边界为 $[R5, R6, R8]$ 。

2) 参考方向。保护区域内各端电流以指向保护区域为参考正方向, 如图 5 保护区域 I 所示。

3) 负荷分支。含 DG 负荷分支配置双端断路器, 配合主干线路差动保护判定结果与电流速断保护, 保护出口整定延时需确保主干线路差动判别完成。

根据上述保护区域划分原则可知, 对线路 MN 配置新型差动保护, F_1 、 F_3 属于区内故障, F_2 、 F_4 属于区外故障。

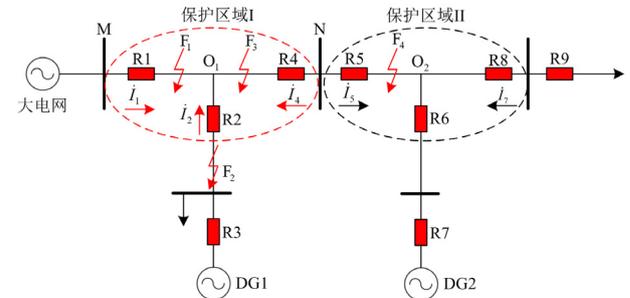


图 5 多 DG 接入配电网

Fig. 5 Distribution network with multiple DG access

3.2 保护实现逻辑

DG 出力存在间歇性与波动性，导致分支线路难以规避定值判据下保护无法启动的风险，根据 Q/GDW480—2010《分布式电源接入电网技术规定》中的要求，分布式电源接入电网的总容量原则上不超过上一级变压器承担负荷的 25%^[26]，大部分故障情况下系统侧故障电流远大于 DG 侧，相应地，DG 支路的保护启动定值远小于主干线路，若 DG 支路保护无法启动，说明 DG 对短路电流贡献程度十分有限，可以不作考虑。而本级保护区域内线路首端保护故障情况下一定会启动，本文采取利用线路首端电流相位模态序列进行自差动的方式予以解决，具体实现逻辑由后文阐述。

本文基于区域保护范围划分的新型差动保护的通信逻辑与判别逻辑如下所述。

1) 通信逻辑。本级区域保护范围内，以主干线路首端保护装置为决策中心，其他装置上送电流相位模态序列，分别与主干线路首端的电流相位模态序列构建两端差动判据，保护判别结果由决策中心下发。以保护区域 I 为例，具体通信逻辑如图 6 所示。

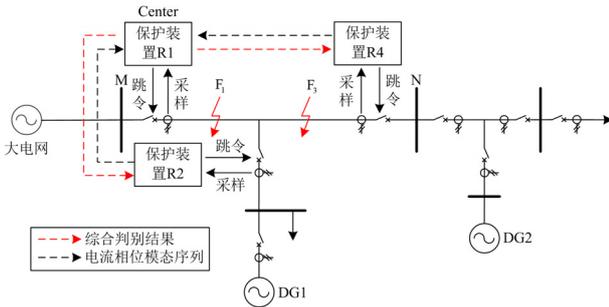


图 6 保护通信逻辑

Fig. 6 Protection communication logic

2) 判别逻辑。以图 5 保护区域 I 为例，按照保护是否启动分别进行讨论。

(1) 各端保护均启动情况下，R2、R4 主动上送电流相位模态序列至决策中心 R1，分别构建 R1-R2、R1-R4 差动，若两组差动判决结果均为动作，则综合判别为区内故障，否则为区外故障；

(2) 保护未全部启动情况下，区内故障时，主干线路首端保护一定启动，若本保护区域内其他保护未成功启动，则利用线路首端的电流相位模态序列构建 R1 自差动，由于制动系数的存在使得自差动结果总为动作，即 Result-11=1，不影响综合判别结果；区外故障时，由于主干线路提供的故障电流水平高，除线路首端保护外，故障邻近的保护也一定会启动，与线路首端构建差动的判别结果为区外，冗余自差动后仍综合判别为区外。

综合上述两种场景，新型差动保护的判别逻辑如图 7 所示。

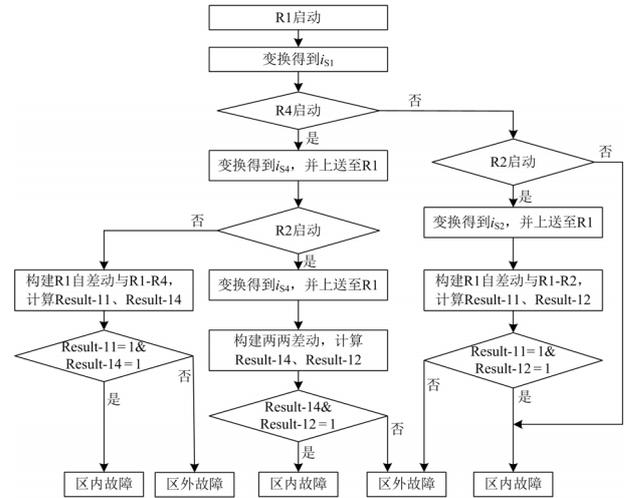


图 7 保护判别逻辑

Fig. 7 Protection discriminant logic

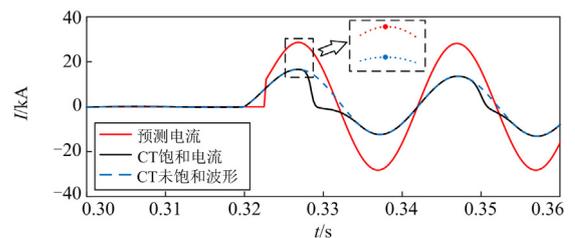
4 仿真验证

4.1 模型搭建

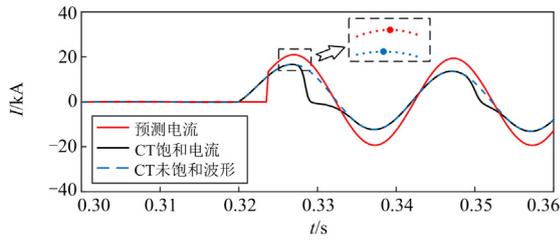
为验证本文所提新型差动保护原理以及区域差动保护性能，基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建如图 5 所示的 10 kV 配电网仿真模型。系统参数如下：系统侧电压等级为 110 kV，系统阻抗为 0.4 Ω，变压器变比为 121 kV/10.5 kV，系统频率为 50 Hz，采样频率为 4 kHz。R1、R4、R6 分别为各级线路首端保护装置，R3、R5 分别为 DG1、DG2 出口侧保护装置，DG1 支路为负荷支路，R2 为并网点保护装置，DG2 直接并网。DG1、DG2 的容量分别为 4 MVA、2 MVA。

4.2 电流相位参数预测性能分析

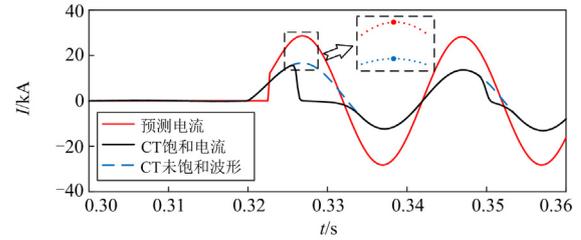
利用递推最小二乘法进行短路电流相位参数估计过程中，数据窗的选取主要受 CT 饱和程度的影响。在 CT 饱和程度无法预知的情况下，数据窗长度选取的合理性尤为重要。本文通过设置不同 CT 饱和程度与数据窗长度对其进行验证。以轻度饱和场景为例，验证不同数据窗长度对短路电流相位参数估计精度的影响，估计结果如图 8 所示。



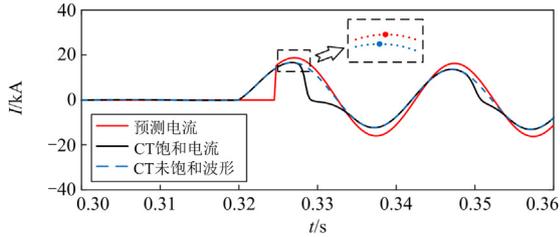
(a) CT 轻度饱和(3ms)



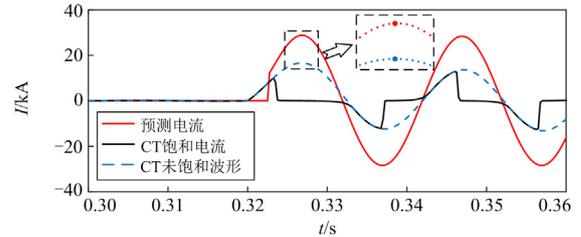
(b) CT轻度饱和(4 ms)



(a) CT中度饱和(3 ms)



(c) CT轻度饱和(5 ms)



(b) CT重度饱和(3 ms)

图 8 不同数据窗长度下极值时刻估计结果

Fig. 8 Estimation results of extreme value time under different data window lengths

通过对比图 8 所示短路电流参数估计结果, 可以看出数据窗设置越长, 短路电流幅值参数估计精度越高, 与前述理论符合; 而短路电流相位参数受数据窗长度影响较小, 估计误差均保持在一个采样点范围内($\leq 4.5^\circ$)。表 1 给出了 CT 不同饱和程度与不同数据窗下的电流相位参数估计误差。

表 1 不同数据窗长度与极值时刻估计误差

Table 1 Different data window length and extreme time estimation error

CT 饱和程度	数据窗长度/ms	首半波极值时刻估计误差(采样点个数)
轻度	3	0
	4	1
	5	1
	6	1
中度	3	0
	4	1
	5	1
重度	3	0
	4	\

表 1 中: 1 表示极值时刻估计值滞后实际极值时刻 1 个采样点, “\” 表示数据窗内包含 CT 饱和和波形畸变部分, 算法未收敛。

CT 饱和程度难以量化, 为满足实际运行中 CT 不同饱和程度下的故障后首半波极值时刻估计需求, 根据表 1 估计误差数据, 数据窗长度应设置为 3 ms, CT 中度及重度饱和场景下的估计结果如图 9 所示。

图 9 不同 CT 饱和程度下的电流相位预测结果

Fig. 9 Current phase prediction results under different CT saturation levels

由图 8(a)、图 9 可以看出, 在伴随不同程度 CT 饱和并叠加直流分量影响的短路场景下, 短路电流相位参数估计方法精度较高。同时, 仅利用 3 ms 的超短数据窗实现相位参数精准预测, 在 CT 饱和场景下无须等待二次谐波含量衰减至 15% 以下(经过仿真验证, 保护闭锁时间大于 1 周波, 即大于 20 ms), 规避保护长时闭锁带来的区内故障延时动作或拒动以及区外故障误动风险。在实际应用中, 可以选择多个数据窗长度同步进行冗余参数估计, 提高参数估计结果的可信度。

此外, 按照文献[21]对通信量的估计方法, 通信数据报头为 67 字节, 采样频率为 4 kHz, 每隔 5 ms 上送一次。传统电流差动保护单次通信量为 $67 + 8 \times 20 \times 3 = 547$ B, 传输电流相位模态序列单次通信量为 $67 + 4 \times 20 \times 3 = 307$ B, 通信量降低 43.88%。

4.3 新型差动保护性能分析

1) 区内故障

在母线 M 至 DG 负荷分支并网点 O_1 线路 50% 处发生两相短路故障(以 AB 为例)、DG 负荷分支并网点 O_1 至母线 N 线路 50% 处发生三相短路故障(以 ABC 为例)时, 保护 R1、R2、R4 处 A 相测量电流、变换后的电流相位模态序列以及保护动作情况如图 10、图 11 所示, 为便于对比电流相位变换效果, 对电流波形进行归一化处理。

通过观察图 10(a)、图 11(a)可知, 保护区域内线路首端(R1 处)电流相位修正后的电流相位模态序

列趋近于理想化,但故障发生后出现短暂的模糊态0,能够通过较长的计算数据窗规避其对保护判别的影响,动作电流与制动电流的计算结果如图10(b)、图11(b)所示,其中“1”表示保护动作,“0”表示保护不动作,由保护动作结果可知,区内故障时,所提新型差动保护能够准确快速动作。

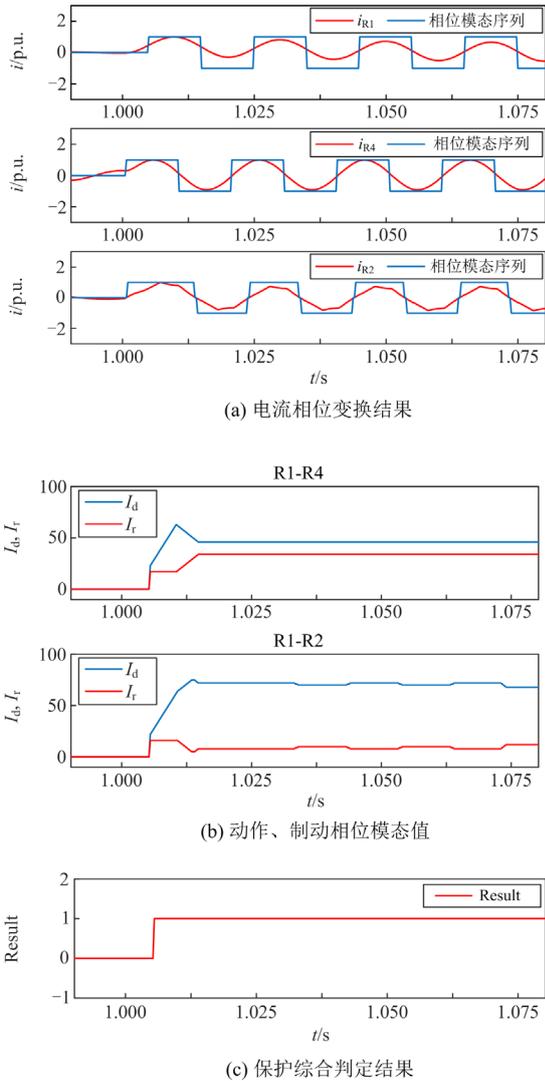


图 10 F_1 发生 AB 短路故障电流相位变换与保护动作
Fig. 10 Phase transformation and protection action of AB short circuit fault current in F_1

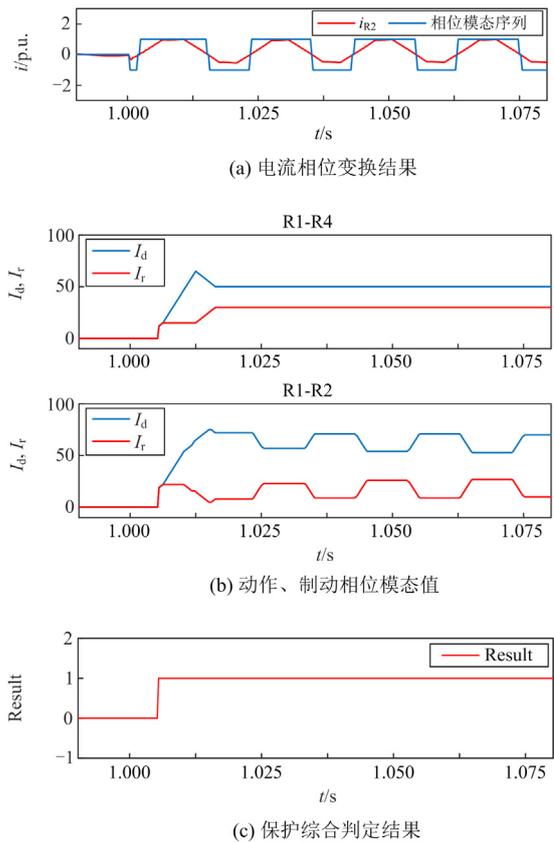
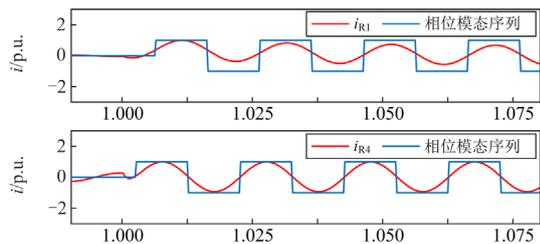
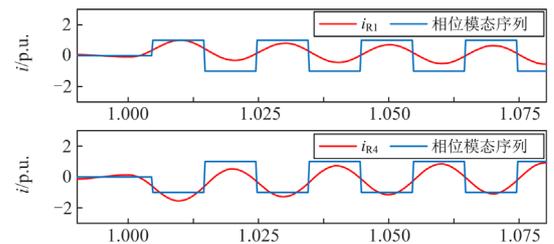


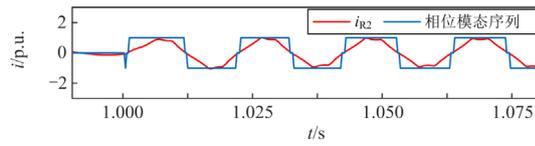
图 11 F_2 发生 ABC 短路故障电流相位变换与保护动作
Fig. 11 Phase transformation and protection action of ABC short circuit fault current in F_2

2) 区外故障

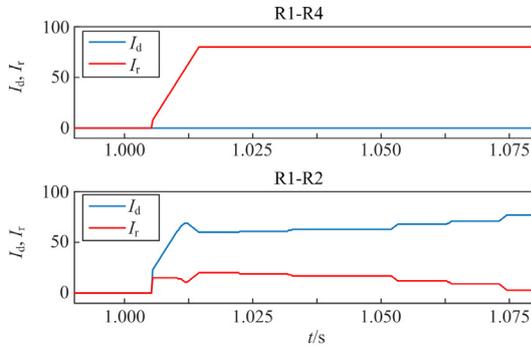
在区外 F_3 处发生两相短路故障(以 AB 为例)、DG 负荷分支发生两相接地短路故障(以 ABG 为例)时,保护 R1、R2、R4 处 A 相测量电流、变换后的电流相位模式序列以及保护动作情况如图 12、图 13 所示。

通过观察图 12、图 13 可知,发生区外故障时,保护区域内构建的两两差动综合判别为区外故障,所提新型差动保护可靠不动作。通过观察新型差动保护动作时间,均不超过 1 周波,考虑到通信延时与断路器分闸等时延,故障情况下 DG 支路切除时间不超过 200 ms,满足相关规程要求^[27]。受限于篇幅,不同故障位置下新型差动保护判别结果与动作情况由表 2 给出。

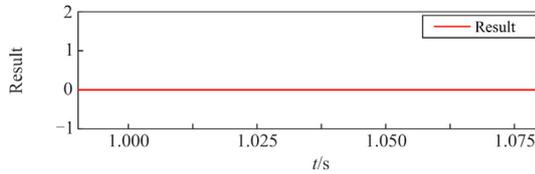




(a) 电流相位变换结果

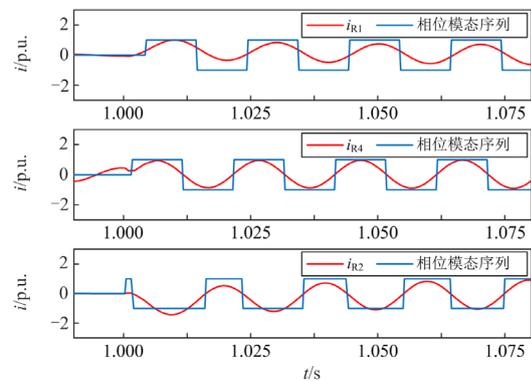


(b) 动作、制动相位模式值

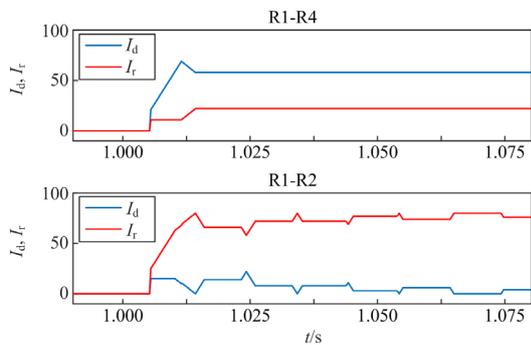


(c) 保护综合判定结果

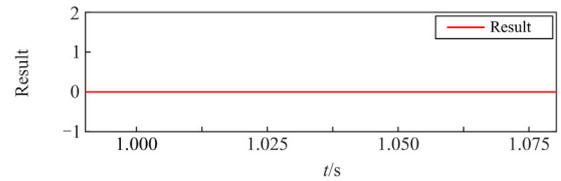
图 12 F₃ 发生 AB 短路故障电流相位变换与保护动作
Fig. 12 Phase transformation and protection action of AB short circuit fault current in F₃



(a) 电流相位变换结果



(b) 动作、制动相位模式值



(c) 保护综合判定结果

图 13 F₄ 发生 ABG 短路故障电流相位变换与保护动作
Fig. 13 Phase transformation and protection action of ABG short circuit fault current in F₄

表 2 新型差动保护动作情况

Table 2 Action of new differential protection

故障位置	故障类型	Result-14	Result-12	保护动作情况
F ₁	AB	1	1	✓
	ABG	1	1	✓
	ABC	1	1	✓
F ₂	AB	1	1	✓
	ABG	1	1	✓
	ABC	1	1	✓
F ₃	AB	0	1	×
	ABG	0	1	×
	ABC	0	1	×
F ₄	AB	1	0	×
	ABG	1	0	×
	ABC	1	0	×

表中: ✓表示保护动作, ×表示保护不动作。

5 结论

为解决 DG 接入对传统配网保护的挑战, 同时适应现有通信通道带宽限制, 本文对电流相位信息进行模态变换, 融合相位相量差动思想, 计及 DG 出力的波动性与间歇性, 提出一种通信限制下多 DG 接入配网的新型电流差动保护原理, 并进行仿真验证。结果表明本文所提方法能够满足不同故障场景下的保护要求, 针对 DG 出力的波动性与间歇性具有较强的适应能力, 保护动作时间能够满足 DG 运行的相关标准与规定。

此外, 本文所提方法基于现有通信手段进行构建, 对加速差动保护在配网中的应用进程, 过渡 5G 建设与新型电力系统建设的不协调具有重要的现实意义与工程价值。

参考文献

- [1] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.

- [2] 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 Xiandong, 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.
- [3] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [4] 王婷, 陈晨, 谢海鹏. 配电网对分布式电源和电动汽车的承载力评估及提升方法综述[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 12-24.
WANG Ting, CHEN Chen, XIE Haipeng. Review on evaluation and promotion methods of carrying capacity for distributed generation and electric vehicles in distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 12-24.
- [5] 高生凯, 曹炜, 张旭航, 等. 一种改进型配网自适应过流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 110-119.
GAO Shengkai, CAO Wei, ZHANG Xuhang, et al. A novel adaptive overcurrent protection method for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 110-119.
- [6] 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(S2): 709-719.
- [7] 曾翔, 文明浩, 钱莜, 等. 逆变型分布式电源接入对接地距离保护的影响与对策[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 46-53.
ZENG Xiang, WEN Minghao, QIAN Kun, et al. Influence of inverter-interfaced distributed generation integration on grounding distance protection and its strategies[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 46-53.
- [8] 方愉冬, 徐峰, 李跃辉, 等. 基于改进粒子群算法的含 DG 配网反时限过流保护定值优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 13-19.
FANG Yudong, XU Feng, LI Yuehui, et al. An optimization method for setting value of inverse-time overcurrent protection in distribution network with DG based on MPSO[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 13-19.
- [9] 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: 142-615.
- [10] DHAR S, PATNAIK R K, DASH P K. Fault detection and location of photovoltaic based DC microgrid using differential protection strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 4303-4312.
- [11] 赵凤贤, 孟镇, 李永勤, 等. 基于故障分量的主动配电网纵联保护原理[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3092-3100.
ZHAO Fengxian, MENG Zhen, LI Yongqin, et al. Pilot protection scheme for active distribution network based on fault components[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3092-3100.
- [12] 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(S1): 56-68.
- [13] 和敬涵, 李文立, 张大海, 等. 基于节点分支电流幅值的含 DG 配网差动保护原理[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3601-3609.
HE Jinghan, LI Liwen, ZHANG Dahai, et al. Differential protection scheme based on current amplitude of branch node for distribution network with DG[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3601-3609.
- [14] 朱征, 黄冰飞, 邹晓峰, 等. 基于电压突变量的差动保护同步方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 156-162.
ZHU Zheng, HUANG Bingfei, ZOU Xiaofeng, et al. A synchronization method of differential protection based on sudden change of voltage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 156-162.
- [15] 张建雨, 姜睿智, 李俊刚, 等. 基于 5G 通信的配电网差动保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 17-23.
ZHANG Jianyu, JIANG Ruizhi, LI Jungang, et al. Research on differential protection of a distribution network based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 17-23.
- [16] 刘世明, 赵永森, 王波, 等. 基于光学电流互感器的有

- 源配电网相差保护方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 173-181.
- LIU Shiming, ZHAO Yongsan, WANG Bo, et al. Phase differential protection scheme of active distribution network based on optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 173-181.
- [17] 张金虎, 陈艳霞, 金震, 等. 基于 5G 信道的含无测量分支线路综合保护方案[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 117-126.
- ZHANG Jinhu, CHEN Yanxia, JIN Zhen, et al. Comprehensive protection scheme for lines with unmeasurable branches based on 5G channels[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 117-126.
- [18] 高维良, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 用作配电网差动保护通道的可行性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 1-7.
- GAO Weiliang, GAO Houlei, XU Bin, et al. Feasibility analysis of adopting 5G in differential protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 1-7.
- [19] 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 review of research on short-circuit protection in distribution network with distributed generation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3006-3019.
- [20] 刘志仁, 薛明军, 杨黎明, 等. 基于区域自组网的配电线路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.
- [21] 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.
- [22] 温志文, 贾科, 余磊. 等. 基于时频特性相似度的新能源场站 T 接型送出线路高速保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 1-11.
- WEN Zhiwen, JIA Ke, YU Lei, et al. High speed protection based on time-frequency characteristic similarity for a Teed transmission line connected to renewable energy power plants[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 1-11.
- [23] 杨红, 尹项根, 陈卫, 等. 基于分相电流突变量相位比较的广域继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 1-6.
- YANG Hong, YIN Xianggen, CHEN Wei, et al. Wide area protection based on phase comparison of segregated current fault component[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 1-6.
- [24] 黄智慧, 段雄英, 邹积岩, 等. 基于改进 RLS 算法的故障电流参数估计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2460-2469.
- HUANG Zhihui, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Fault current parameter estimation based on adaptive RLS algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2460-2469.
- [25] 朱革兰, 李松奕, 兰金晨, 等. 基于零序特征量的配电网接地故障区段定位方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 34-40, 68.
- ZHU Gelan, LI Songyi, LAN Jinchun, et al. Fault section location method for grounding fault of distribution network based on zero-sequence characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 34-40, 68.
- [26] 梁莹玉, 卢正杰. 基于补偿系数的有源配电网自适应电流差动保护[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2268-2275.
- LIANG Yingyu, LU Zhengjie. Adaptive differential protection principle based on compensation coefficient for active distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2268-2275.
- [27] 分布式电源并网技术要求: GB/T 33593—2017[S]. 2017. Technical requirements for grid connection of distributed resources: GB/T 33593—2017[S]. 2017.

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-08-12

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制; E-mail: lzx2007001@163.com

王扬贇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制。E-mail: 940986171@qq.com

(编辑 魏小丽)