

基于互信息的含分布式电源配电网纵联保护方法

高淑萍^{1,2}, 赵欣煜^{1,2†}, 宋晨曦^{1,2}, 王跃跃^{1,2}, 董晨^{1,2}, 宋国兵³

(1. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安市电气设备状态监测与供电安全重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要:光伏电站经逆变器接入电网, 受电力电子器件控制策略的影响, 其输出的短路电流幅值受限, 相角受控, 导致传统的比率式差动保护灵敏度下降. 为解决该问题, 本文首先分析了馈线系统侧与光伏场站侧电流的差异; 其次利用互信息来刻画两侧电流波形相似度, 计算分析区内、区外故障时互信息值的区别, 以此构造出基于互信息相似度比较的纵联保护新方法. 经仿真验证, 该方法在不同故障位置、不同故障类型下均能可靠动作, 且抗过渡电阻能力强、耐噪声能力强, 适用于光伏电站接入配电网的场景.

关键词: 逆变型分布式电源; 配电网; 互信息; 波形相似度; 纵联保护

中图分类号: TM773

文献标志码: A

Pilot protection method for distribution network with distributed generation based on mutual information

GAO Shuping^{1,2}, ZHAO Xinyu^{1,2†}, SONG Chenxi^{1,2}, WANG Yueyue^{1,2},
DONG Chen^{1,2}, SONG Guobing³

(1. College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Electrical Equipment Condition Monitoring and Power Supply Security, Xi'an 710054, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Photovoltaic power stations are connected to the grid through inverters. Restricted by the control strategy of power electronic devices, the output short-circuit current amplitude is limited, and the phase angle is controlled, which leads to a decrease in the sensitivity of traditional percentage differential protection. To solve this problem, this paper first analyzes the differences between the currents on the feeder system side and the photovoltaic power station side. Secondly, mutual information is used to describe the similarity of the current waveforms on both sides, and the differences in mutual information values during internal and external faults are calculated and analyzed. On this basis, a new pilot protection method is constructed by comparing the mutual information similarity. Simulation results show that this method can operate reliably under different fault locations and types, has strong

* 收稿日期: 2025-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52577138, 52507146), National Natural Science Foundation of China (52577138, 52507146); 国家电网有限公司总部科技项目资助项目(52094020006U), Headquarters Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52094020006U)

作者简介: 高淑萍(1970—), 女, 河南新乡人, 西安科技大学副教授, 博士

† 通信联系人, E-mail: 1398603302@qq.com

resistance to transition resistance and noise, and is suitable for the scenario of photovoltaic power stations connected to distribution networks.

Key words: inverter-interfaced distributed generation; distribution network; mutual information; waveform similarity; pilot protection

在“双碳”政策下,为了缓解传统化石能源对环境造成的压力,并且得益于新能源发电技术的进步,高渗透率的分布式电源(distributed generation, DG)接入成为未来配电网的重要趋势^[1-2]. 其中,光伏发电、风力发电等需要经过逆变器接入电网,被称为逆变型分布式电源(inverter-interfaced distributed generation, IIDG)^[3]. 传统配电网大多为单电源辐射式网络, IIDG的加入使其变为多电源多回路供电,改变了系统的潮流分布,传统的三段式电流保护已不再满足继电保护要求的“四性”^[4-5]. 电流差动保护具有选择性和灵敏性的优良性能,是解决多端供电网络保护的重要方法^[6-7].

目前,针对差动保护,国内外的学者做了大量的研究. 文献[8]研究了IIDG的故障特性,结合被保护区段两端电流幅值比和相位差形成综合保护判据,该方法能够自适应调整保护的制动范围,适应更大规模DG接入. 文献[9]综合利用全电流、序电流、电流幅值变化量等多类电流幅值信息构造充分式优选制电流比幅判据,在不同故障情境下择优使用,相较于单一判据,该方法耐DG端压降能力和抗过渡电阻能力强,对通信要求较低. 文献[10]通过被保护线路两端的电压、电流正序故障分量得到的两侧线路阻抗相减构造综合阻抗,利用综合阻抗与线路阻抗之比构造区内、区外故障保护判据. 该方法不受故障类型、故障位置、渗透率的影响,但需获得线路两端的电压信息. 文献[11]通过线路两侧电流幅值比和相位差构建补偿系数,提出自适应电流差动保护. 该方法能够弥补常规电流差动保护的不足,但抗过渡电阻能力较弱. 文献[12]针对不同故障下馈线两侧电流幅值特性,提出电流幅值比与制动系数相配合的保护方案,具有较高的灵敏性.

上述方法均通过分析故障时线路两侧电流幅值、相位、序分量、故障分量的特性动态调整保护判据,以适应IIDG接入配电网造成的影响. 同时,由于基于波形相似度的保护利用故障时刻的暂态信息即可快速动作,该方法近年来得到了大力发展^[13]. 文

献[14]通过广义S变换提取两端电流频域下的故障特征量,然后利用皮尔逊相关系数计算暂态能量相关性,以此来区分区内、区外故障. 该方法速动性好,且具有较强的耐过渡电阻的能力,但文章并未分析噪声对所提方法的影响. 文献[15]采用Tanimoto相似度量光伏与同步系统短路电流波形差异,通过区内、区外故障时相似度变化规律,构建新型纵联保护原理. 该方法可准确识别区内、区外故障,适应光伏弱出力及高阻故障场景. 文献[16]首先利用Neville插值对电流采样序列进行修复,然后通过KL散度算法衡量线路两侧电流波形差异构成纵联保护新原理. 该方法不会因采样数据异常而影响保护性能,可靠性高. 文献[17]提出根据故障后电流采样值极性来判断故障电流波形的实际极性,结合电流方向获取故障信息,但故障初期暂态分量显著,馈线两侧存在较大的非周期直流分量,干扰电流极性的准确判断. 文献[18]采用动态时间弯曲(dynamic time warping, DTW)算法,求解线路两侧电流采样点间的欧氏距离,然而波形幅值归一化操作,会削弱算法对电流波形幅值差异的感知能力. 文献[19]采用余弦相似度来识别线路两侧电流波形差异,但其仅关注两电流向量之间的夹角,会导致在区内高阻故障中两侧电流相角差向180°靠拢的场景下拒动.

本文首先分析了光伏电源的故障特性,针对发生区内、区外故障时系统侧与光伏场站侧电流波形之间存在的差异,提出了一种基于互信息来刻画波形相似度的纵联保护方法,其作为一种统计关联特性的量化指标,能综合反映由幅值、相角差异导致的电流序列统计特征变化. 其次,根据区内、区外故障时不同的互信息构造保护动作. 然后在PSCAD中搭建了含光伏发电的有源配电网模型,分别在不同故障位置、不同故障类型、不同过渡电阻、不同噪声、不同光伏出力的场景下进行模拟,验证所提方法的有效性. 最后与传统纵联差动保护和典型的余弦相似度算法进行对比.

1 IIDG 控制策略与故障电流特性分析

1.1 系统结构

本文以 10 kV 配电网为研究对象,搭建了如图 1 所示的逆变型分布式电源(IIDG)接入配电网的典型等效模型.其中, E_s 为系统侧的电源电压, E_{IIDG} 为分布式电源电压,保护装置设置在线路 BC 两侧, f_1, f_5 为区外故障, f_2, f_3, f_4 为区内故障.

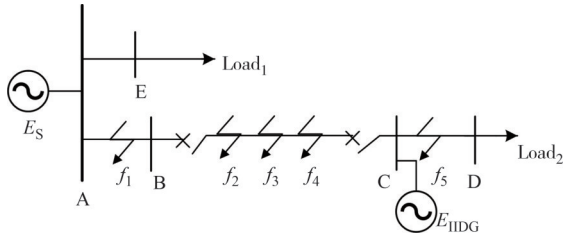


图 1 IIDG 配电网等效模型

Fig.1 IIDG distribution network equivalent model

光伏发电系统经过逆变器实现并网,逆变器通常采用电压外环、电流内环的双环控制策略,得到电流内环 d 轴和 q 轴的参考值.三相光伏并网逆变器在实际正常运行状态下,通常都需要使直流侧母线电压保持稳定,为实现系统的单位功率因数并网,无功电流参考值 $i_{q\text{ref}}$ 为 0^[20].新能源电站因电压跌落而大规模脱网,威胁电网安全运行,故 IIDG 需要具备低电压穿越的能力^[21].根据《光伏发电站接入电力系统技术规定》(GB/T 19964—2024)^[22],IIDG 应在电压跌落至 $0.9U_N$ 以下时启动低电压穿越策略,在此过程中 IIDG 优先输出无功电流来维持系统母线电压稳定,无功电流的大小与电压跌落的深度有关,电压跌落深度为:

$$\Delta U = U_N - U_{\text{PCC}} \quad (1)$$

式中: U_N 为电网的额定电压; U_{PCC} 为 IIDG 接入点的电压.

由于光伏逆变器过载能力不允许超过额定电流的 1.1 倍^[23],应在不超过逆变器最大承受能力的同时尽可能输出无功电流.IIDG 在低电压穿越期间输出的有功、无功电流表达式为:

$$i_d = \begin{cases} \frac{P_{\text{ref}}}{U_f}, & \frac{U_{\text{PCC}}}{U_N} > 0.9 \\ \min \left\{ \frac{P_{\text{ref}}}{U_f}, \sqrt{(1.1I_N)^2 - i_q^2} \right\}, & 0.2 \leq \frac{U_{\text{PCC}}}{U_N} \leq 0.9 \\ 0, & \frac{U_{\text{PCC}}}{U_N} < 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

$$i_q = \begin{cases} 0, & \frac{U_{\text{PCC}}}{U_N} > 0.9 \\ K \frac{\Delta U}{U_N}, & 0.2 \leq \frac{U_{\text{PCC}}}{U_N} \leq 0.9 \\ 1.1I_N, & \frac{U_{\text{PCC}}}{U_N} < 0.2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: K 为低电压穿越系数,通常要大于 1.5^[24]; P_{ref} 为系统正常运行时有功功率的参考值; U_f 为故障时 IIDG 接入点电压; I_N 为 IIDG 输出的额定电流.

1.2 IIDG 故障电流特性

逆变型电源的暂态电流特性由其逆变器低电压穿越的控制策略决定.考虑工程实际中一般采用定电压矢量控制,从 dq 坐标系切入,可推导得到其暂态电流表达式为^[19]:

$$\begin{aligned} i_{\phi-IV} &= i_d^* \cos(\omega t + \theta_\phi) - i_q^* \sin(\omega t + \theta_\phi) + \\ & (i_{d0} - i_d^*) \frac{e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cos(\omega t + \theta_\phi) + \\ & i_q^* \frac{e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\omega t + \theta_\phi) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $t \geq t_0$, t_0 为故障发生时刻;下标 IV 表征逆变型电源; i_d^*, i_q^* 为 d, q 轴电流参考指令; i_{d0} 为 d 轴电流初始值; ω 为锁相环检测到的系统角频率; ω_n 为二阶系统自然振荡角频率; ω_d 为阻尼振荡角频率; β 为阻尼角; θ_ϕ 为三相故障后初相角; ξ 为二阶系统阻尼比.

计及锁相环的响应延时,故障初期电压跌落时,其检测角频率会偏离工频角频率,故其故障相电流特性主要呈现出非工频衰减特征.而同步发电机短路电流主要由直流分量和按指数规律衰减的工频正弦波组成.因此,在暂态期间,区内故障两侧电流波形存在较大差异,区外故障两侧电流波形一致.

暂态过程揭示了故障初期的波形差异,现从稳态角度展开分析以完善论证.由式(2)、式(3)可知, IIDG 输出的短路电流与并网点电压相关,将 IIDG 等效为压控电流源.将 f_5 和 f_3 分别作为区外故障和区内故障的示例,则该系统发生三相金属性故障后的等效电路图如图 2 和图 3 所示:

规定电流由母线流向线路为正方向,由图 2 可知,当发生区外故障时流经被保护线路两侧的全电流 i_B 与 i_C 为:

$$i_B = -i_C = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_{\text{dg}}}{Z_s + Z_{AB} + Z_{BC}} \quad (5)$$

式中: $\dot{U}_s$ 为系统侧电源电势; $\dot{U}_{\text{dg}}$ 为 IIDG 的电压; Z_s

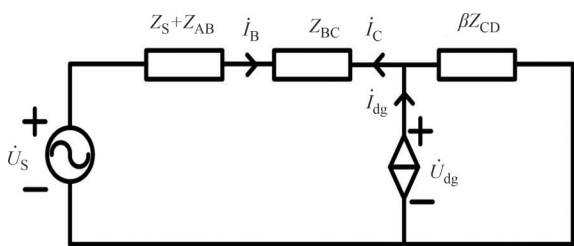


图2 区外三相故障线路AD等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of line AD under external three-phase fault

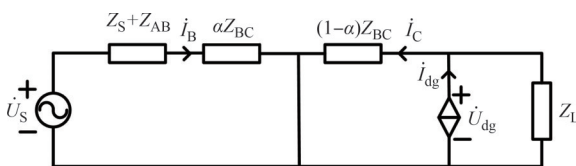


图3 区内三相故障线路AD等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram of line AD under internal three-phase fault

为系统侧电源等效阻抗; $\dot{Z}_{AB}$ 和 $\dot{Z}_{BC}$ 分别为线路 AB 和 BC 等效阻抗。

由图3可知,当发生区内故障时流经被保护线路两侧的电流 $\dot{I}_B$ 与 $\dot{I}_C$ 为:

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_S}{\dot{Z}_S + \dot{Z}_{AB} + \alpha \dot{Z}_{BC}} \quad (6)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{Z}_L \dot{I}_{dg}}{\dot{Z}_L + (1 - \alpha) \dot{Z}_{BC}} \quad (7)$$

式中: $\dot{I}_{dg}$ 为IIDG输出的电流; $\dot{Z}_L$ 为线路末端负荷等效阻抗; α 为故障点到母线B的距离与整个BC线路长度的比值;其余均与式(5)同义。

由式(5)可知,当发生区外故障时,由于配电网线路较短,可以忽略线路电容电流对保护的影响^[25],此时两侧保护装置采集到的电流幅值相等,相位相差180°;当发生区内故障时,两侧故障电流分别由系统电源和分布式电源提供,分布式电源输出电流受其控制策略的影响导致幅值受限,相角受控,与传统的同步发电机存在差异。因此,两侧保护装置采集到的电流在幅值和相位上的差异将在全时域波形上体现,可根据故障发生前后电流波形的差异构造保护方法。

IIDG输出的故障电流与并网点电压之间的角度大小取决于故障期间IIDG输出电流的d、q轴分量的大小,其表达式为:

$$\theta = \arctan \frac{i_q}{i_d} \quad (8)$$

系统正常运行时 $i_q = 0$, IIDG输出电流与并网

点电压同相;当 U_{PCC} 跌落至 $0.2U_N$ 以下时 $i_d = 0$, IIDG输出的电流滞后并网点电压90°。因此, IIDG输出电流与并网点电压之间的相角与电压跌落的严重程度有关,在0°~90°范围内变化。IIDG并网点电压的相位会由于故障发生类型、故障位置以及过渡电阻大小的影响而发生跳变^[26]。因此,即使没有发生非高阻故障,馈线两侧电流相位差也可能会大于90°^[27]。

1.3 传统纵联差动保护适应性分析

差动保护作为电力系统最核心的保护之一,被广泛应用于输电线路保护。目前,常见的电流差动保护通过引入比例制动特性来构造保护动作判据。保护动作方程为:

$$|\dot{I}_B + \dot{I}_C| > K |\dot{I}_B - \dot{I}_C| \quad (9)$$

式中: $\dot{I}_B$ 和 $\dot{I}_C$ 为保护装置测得线路两侧电流; $|\dot{I}_B + \dot{I}_C|$ 为差动电流; $|\dot{I}_B - \dot{I}_C|$ 为制动电流; K 为制动系数,一般按照躲过电流互感器(CT)饱和和系统测量误差来整定,其取值一般为0.5~0.8^[28]。

当配电网中接入IIDG时,其故障时的幅相特性会导致保护装置测得的两侧电流幅值和相位相较于传统电源发生变化。这种变化会使通过电流差动量和制动量大小来判断保护是否启动的传统差动保护发生误动。

IIDG受其逆变器短路容量的限制,输出的最大电流受到限制,与系统侧电流幅值存在较大差异。此时,传统差动保护的動作特性如图4所示。

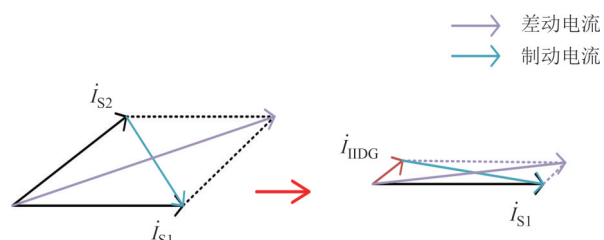


图4 短路电流幅值受限时差动保护动作特性

Fig.4 Operating characteristics of differential protection under limited short-circuit current amplitude

如图4所示, $\dot{I}_{S1}$ 、 $\dot{I}_{S2}$ 为同步发电机侧电流, $\dot{I}_{IIDG}$ 为逆变型分布式电源侧电流。当双电源系统两侧均为同步发电机时,差动电流明显大于制动电流,保护能够可靠动作;当双电源系统一侧为同步发电机、另一侧为IIDG时,差动电流与制动电流接近,保护可能会出现拒动。

根据上文对IIDG故障特性分析可知,当IIDG

接入配电网并发生故障时,会导致被保护线路两侧电流相位差大于 90° .此时,传统差动保护的动作特性如图5所示.

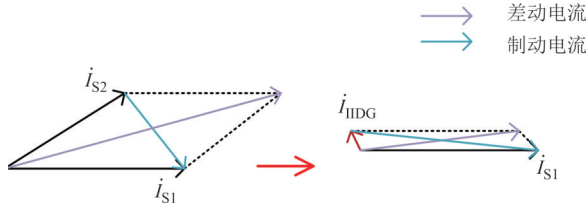


图5 短路电流相角受控时差动保护动作特性

Fig.5 Operating characteristics of differential protection under controlled short-circuit current phase angle

由图5可知,当双电源系统两侧均为同步发电机时,两侧电流相位差较小,差动电流明显大于制动电流,保护能够可靠动作;当双电源系统一侧为同步发电机、另一侧为IIDG时,两侧电流相位差超过 90° ,制动电流大于差动电流,保护拒动.

2 基于互信息相似度的纵联保护

2.1 互信息原理

互信息(mutual information, MI),是信息论中衡量两个随机变量统计依赖性的指标,反映了两个变量之间线性或非线性的程度.互信息的取值大于或等于0.当两个随机变量相互独立时,互信息为0;经归一化后若取值为1,则表明两者关联程度达到最大^[29].

假设 X 和 Y 为两个随机的离散变量,则互信息的计算公式为:

$$I(X; Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \quad (10)$$

式中: x 和 y 是变量 X 和 Y 的具体取值; $p(x, y)$ 为 X 和 Y 的联合概率分布,表示 $X = x$ 和 $Y = y$ 同时发生的概率; $p(x)$ 为 X 的边缘概率分布,表示 $X = x$ 的概率, $p(y)$ 与 $p(x)$ 同义.

则归一化后的互信息为:

$$\text{NMI}(X; Y) = \frac{I(X; Y)}{\sqrt{H(X) \cdot H(Y)}} \quad (11)$$

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (12)$$

$$H(Y) = -\sum_{i=1}^n p(y_i) \log_2 p(y_i) \quad (13)$$

式中: $H(X)$ 和 $H(Y)$ 分别为 X 和 Y 的边缘熵.

利用互信息计算波形相似度时,需要对采集到的电流波形进行数学处理.首先,将采集到的数据进行分箱处理,其目的为将连续数据离散化;其次,构建离散分布直方图与联合分布直方图,得到 X 与 Y 各自的边缘概率分布和二者的联合概率分布;最后,利用公式来计算归一化互信息.

2.2 直方图的构建

假设 I_B 与 I_C 是在被保护线路两端采集到的长度一致的电流, $I_B = [I_{B1}, I_{B2}, \dots, I_{BN}]$, $I_C = [I_{C1}, I_{C2}, \dots, I_{CN}]$,找到它们的最大值 a 和最小值 b ,则其取值范围为 $[b, a]$,其中 a 与 b 的取值为:

$$\begin{cases} a = \max(\max(I_B), \max(I_C)) \\ b = \min(\min(I_B), \min(I_C)) \end{cases} \quad (14)$$

将其分为6个长度均匀的区域,则每个区间的宽度为 d ,从左到右依次编号为 $1, 2, \dots, 6$,将该序号作为直方图的横坐标.

$$d = \frac{a - b}{6} \quad (15)$$

同时,假设在一个数据窗内的采样点为 N ,分别统计两侧电流采样值落在各个子区间的个数为 K_i 和 K_j ($i = j = 1, 2, \dots, 6$),计算它们在各子区间的占比 P_i 和 P_j 分别为:

$$P_i = \frac{K_i}{N} \quad (16)$$

$$P_j = \frac{K_j}{N} \quad (17)$$

统计当 I_B 落入第 i 个区间,同时 I_C 落入第 j 个区间的样本点个数 K_{ij} ,计算联合概率分布:

$$p(i, j) = \frac{K_{ij}}{N} \quad (18)$$

根据第1小节分析,线路两侧电流正方向均为母线指向线路,发生区外故障或正常运行时两侧电流相位相差 180° .为了便于分析,本文将 C 侧电流取反.发生区外故障时对 BC 侧电流采样值进行上述处理后得到的 BC 两侧各自电流波形分布直方图和联合分布直方图如图6所示.

由图6可知, I_B 在6个区间内的占比分别为0.070, 0.204, 0.379, 0.229, 0.082, 0.035,将其记为 $p(x)$; I_C 在6个区间内的占比分别为0.070, 0.204, 0.379, 0.232, 0.080, 0.035,将其记为 $q(x)$;二者在区间 $(1, 1), (2, 2), \dots, (6, 6)$ 以及 $(5, 4)$ 的联合概率分别为0.070, 0.204, 0.379, 0.229, 0.080, 0.035, 0.002,将其记为 $p(x, y)$;代入式(10)~式(13)可得

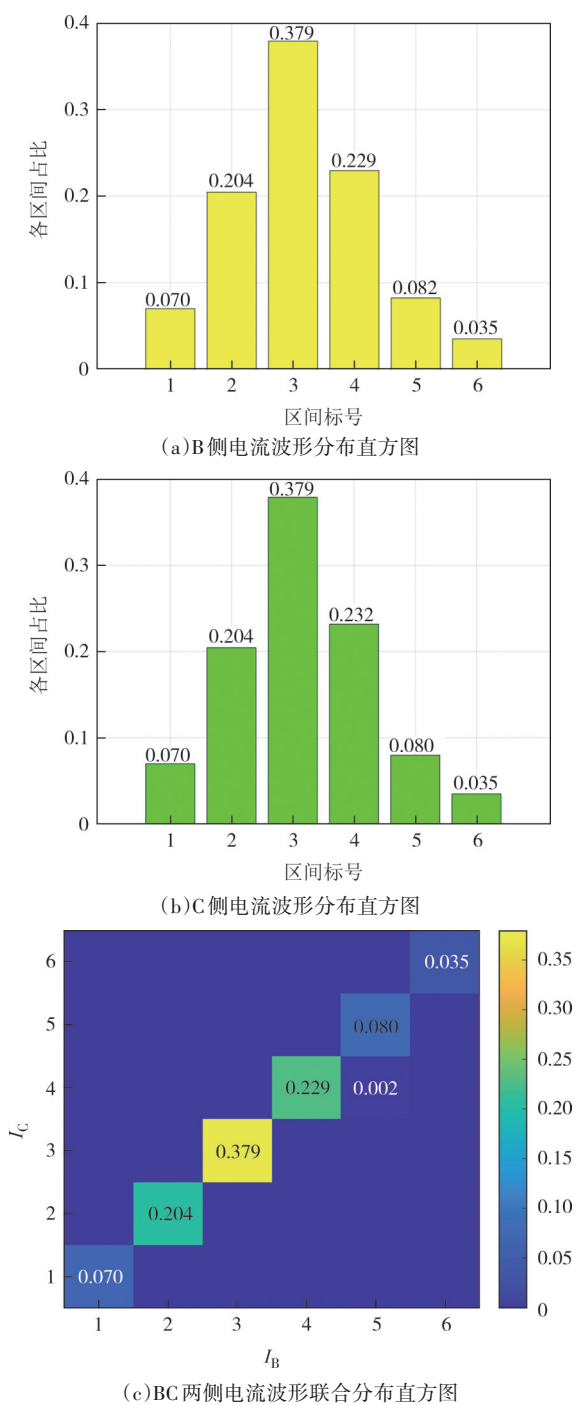


图6 区外故障电流波形分布直方图

Fig.6 Histogram of current waveform distribution for external faults

$I(X; Y)$ 为 2.199, $H(X)$ 为 2.219, $H(Y)$ 为 2.216, $NMI(X; Y)$ 为 0.992, 直观地说明了发生区外故障时馈线两侧电流波形非常相似。

由直方图得到边缘概率分布 $p(x)$ 、 $p(y)$ 和联合概率分布 $p(x, y)$ 在不同故障情况下呈现出不同的特性, 那么计算出的互信息也存在差异。因此, 可通过计算两侧电流采样序列值的互信息来衡量两侧电流

波形相似度来区分是否发生区内故障。

由于光伏电站出力不确定, 当其不出力时传统互信息计算公式可能出现 0/0, 导致计算无法进行。为此, 本文引入一个极小量 ε , 通常取 10^{-10} , 对互信息算法进行改进。

$$\begin{cases} I(X; Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y) + \varepsilon}{p(x)p(y) + \varepsilon} \\ NMI(X; Y) = \frac{I(X; Y)}{\sqrt{H(X) \cdot H(Y) + \varepsilon}} \end{cases} \quad (19)$$

发生区外故障或正常运行时, B 侧和 C 侧检测到的电流相同, 计算出归一化后的互信息值趋近于 1; 发生区内故障时, B 侧和 C 侧检测到的电流有差异, 故归一化后的互信息小于 1。利用此特征来构造保护原理。

2.3 保护启动判据

在有源配电网纵联保护中, 启动判据需兼顾快速性和可靠性。本文选取电流的突变量作为启动判据, 当监测到电流突变量超过额定电流的 10% 时, 保护启动。

$$|\Delta I| > 0.1I_N \quad (20)$$

式中: ΔI 为电流突变量的大小; I_N 为线路的额定电流。

2.4 保护动作判据

保护整定值的设置主要考虑 CT 带来的传变误差。根据前面的分析, 以 1 为基准, 则整定式为:

$$NMI(X; Y) < \tau_{\text{set}} = 1 \cdot k_{\text{mag}} k_{\text{mar}} \quad (21)$$

式中: k_{mag} 为幅值可靠系数, 考虑 CT 的 5% 幅值误差, 计算所得归一化互信息值为 0.957 4; k_{mar} 为裕度可靠系数, 文献[30]中所提方案可实现配电网中线路两端时间同步偏差不得超过 20.8 μs , 对应两侧电流相角差不超过 0.5° , 这个时间偏差对归一化互信息值几乎没有影响。综合误差的可能值并预留适当裕度, 本文选取幅值可靠系数 k_{mag} 为 0.95, 裕度可靠系数 k_{mar} 为 0.95, 则 τ_{set} 约为 0.9。

本文所提保护流程图如图 7 所示。

3 仿真实验

为验证本文所提方案的有效性, 在 PSCAD 中搭建如图 1 所示的含光伏发电的有源配电网模型, 具体参数如下: 系统电压为 35 kV, 经 35/10.5 kV 降压变压器接入配网, 线路为 PI 型等值电路, 单个光伏

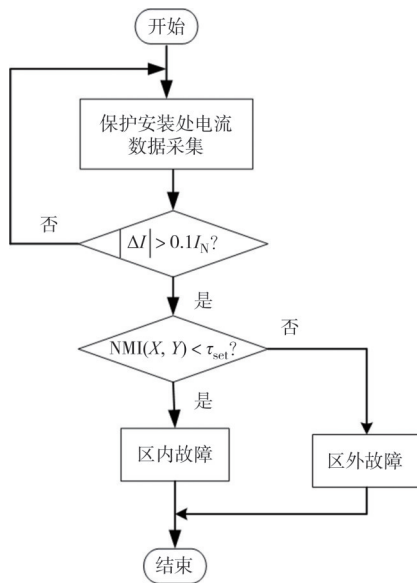


图7 保护方法流程图

Fig.7 Flowchart of protection methods

模块的容量为 1 MW,共三个模块.故障点分别设置在区外 f_1 和 f_5 ,区内从B侧开始,分别设置在线路长度的 25%, 50% 和 75% (f_2, f_3, f_4), 由于 10 kV 配电网变压器低压侧采用三角形接法, 接地故障无零序回路^[16]. 因此, 本文故障类型设置为两相相间短路故障(BC)、两相接地短路故障(BCG)、三相短路故障(ABC). 系统采样频率为 2 kHz, 数据窗长为 20 ms. 保护方法性能验证如图 8 所示.

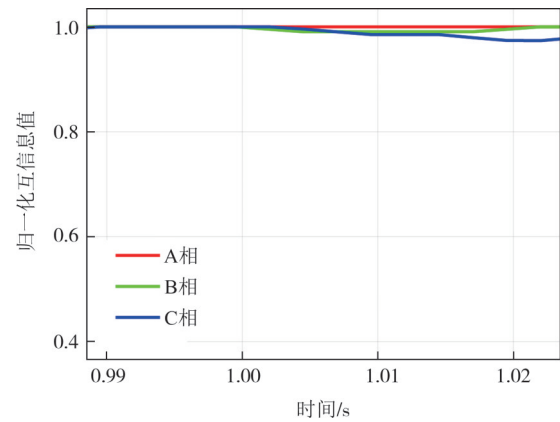
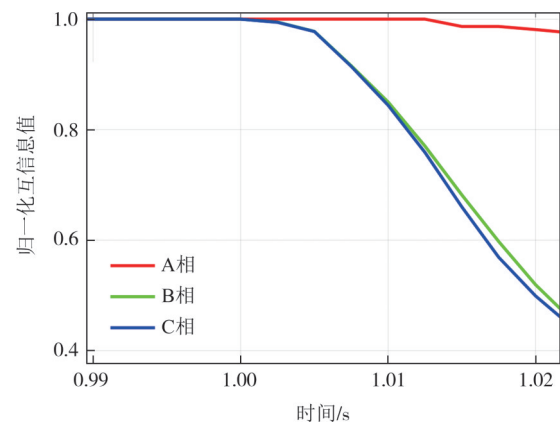
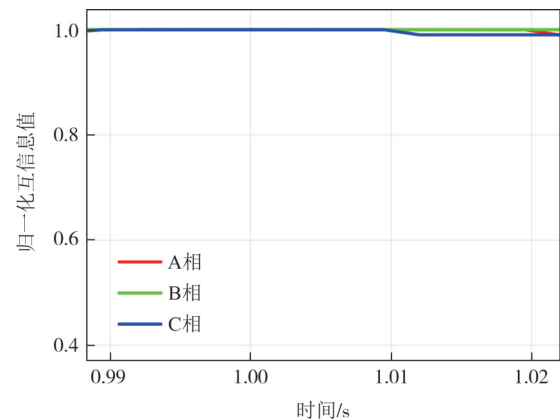
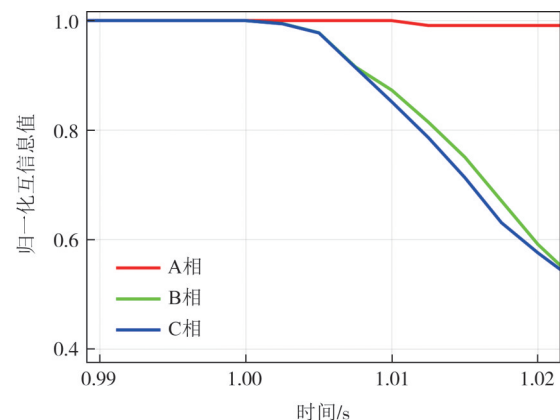
3.1 区外故障与区内故障仿真

以区外 f_1 和区内 f_3 发生故障为例, 故障发生时间为 1 s, 过渡电阻为 0.01 Ω , 分析在 3 种故障类型下所提方法的有效性.

由图 8 分析可知, 区外故障时, 两侧保护装置检测到的电流波形几乎完全一致, 相似度很高, 计算所得互信息值几乎为 1; 区内故障时, 两侧保护装置检测到的电流波形出现差异, 相似程度降低, 导致计算所得互信息值小于 1. 故障发生后, 互信息大约在 5~10 ms 即可达到设定阈值以下, 反映出本文所提的保护方法能够可靠、准确、快速地反映故障.

为了充分验证所提保护方法的有效性, 表 1 中列出了系统在不同故障位置发生不同故障类型的场景中归一化互信息的计算值.

由表 1 可以看出, 所提保护方法在不同故障位置、不同故障类型下均能够可靠动作, 具有良好的保护性能. 区外故障(f_1, f_5)时, 三相归一化互信息计算值趋近于 1, 由于不满足式(21), 保护元件可靠不动

(a) f_1 BC 故障(b) f_3 BC 故障(c) f_1 BCG 故障(d) f_3 BCG 故障

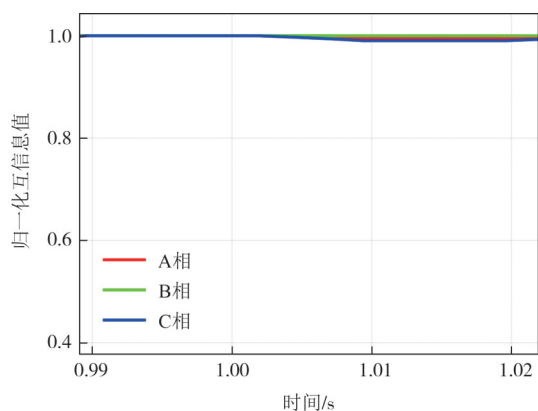
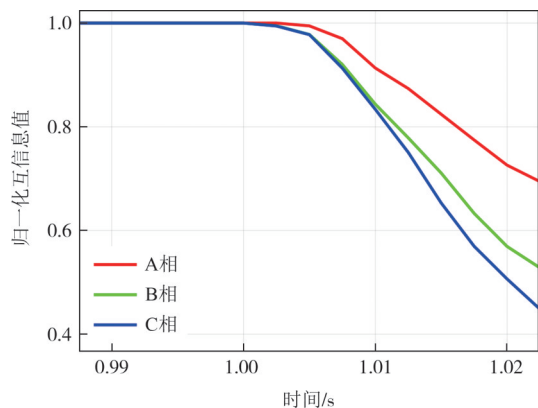
(e) f_1 ABC 故障(f) f_3 ABC 故障

图 8 保护方法性能验证

Fig.8 Verification of protection methods

表 1 不同故障位置、不同故障类型下所提方法的保护性能

Tab.1 Protection performance under different fault locations and types

故障位置	故障类型	归一化互信息计算值		
		A 相	B 相	C 相
f_1	BC	1.000	0.997	0.974
	BCG	1.000	1.000	0.990
	ABC	1.000	1.000	1.000
f_2	BC	0.991	0.510	0.423
	BCG	0.963	0.451	0.378
	ABC	0.647	0.541	0.534
f_3	BC	0.981	0.519	0.498
	BCG	0.991	0.591	0.576
	ABC	0.726	0.569	0.506
f_4	BC	0.961	0.632	0.648
	BCG	0.934	0.524	0.568
	ABC	0.530	0.477	0.551
f_5	BC	1.000	1.000	0.992
	BCG	0.968	0.982	1.000
	ABC	1.000	1.000	1.000

作;区内故障(f_2 、 f_3 、 f_4)时,故障相归一化互信息值小于保护动作判据,非故障相仍趋近于1,保护元件

准确、可靠跳闸。

3.2 不同过渡电阻对保护性能的影响

在两相接地短路故障场景下,过渡电阻可能达到百欧量级^[31-32].为了充分验证在不同过渡电阻场景下本文所提保护方法的可靠性,在 f_1 、 f_3 处设置BCG故障,并不断改变过渡电阻的大小进行仿真实验,仿真结果如图9所示。

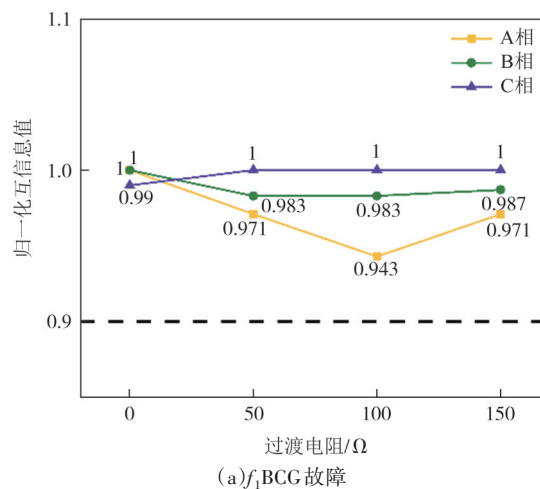
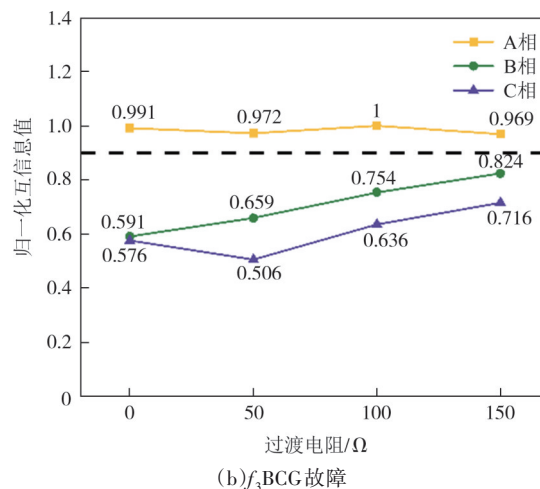
(a) f_1 BCG 故障(b) f_3 BCG 故障

图 9 不同过渡电阻下保护性能验证

Fig.9 Verification of protection methods under different transition resistances

互信息衡量的是两个信号之间的统计依赖性,本文所提方法是通过检测被保护线路两侧电流波形相似度来识别区内、区外故障,并非简单依赖电流的幅值大小.即使过渡电阻较高会导致故障电流幅值降低,但系统的电源性质决定了其波形特征,被保护线路两侧的电流波形仍不相同,所以计算所得互信息值会小于整定阈值.从图9可以看出,随着过渡电阻的不断增大,互信息的值在区内故障时仍都小于保护设定的阈值,在区外故障时都趋近于1.因

此, 本文所提保护方法耐过渡电阻能力强.

3.3 噪声对保护性能的影响

电力系统在正常运行的过程中会受到噪声干扰, 导致保护装置采集到的电流波形畸变或失真, 进而影响保护的性能. 为了验证本文所提方法是否适用于存在噪声的场景, 本节在 f_1 、 f_3 处设置 BC 金属性故障, 在仿真时分别加入信噪比为 25, 30, 35 dB 的白噪声, 仿真结果如表 2 所示.

表 2 不同噪声下所提方法的保护性能
Tab.2 Protection performance under different noise scenarios

故障位置	信噪比	归一化互信息计算值		
		A 相	B 相	C 相
f_1	25	0.909	0.989	0.942
	30	0.911	0.985	0.949
	35	0.945	1.000	0.978
f_3	25	0.994	0.468	0.506
	30	0.991	0.502	0.533
	35	0.993	0.501	0.510

由表 2 可知, 在不同程度的噪声环境中, 所提保护方法均可以识别出区内、区外故障.

3.4 不同光伏出力对保护性能的影响

受天气影响, 光伏电站出力具有波动性. 设置光伏出力分别为 1, 2, 3, 4 MW, 以 f_3 处 BC 故障为例, 验证本文所提方法的动作性能. 图 10 为不同光伏出力下故障相与非故障相的相似度计算结果.

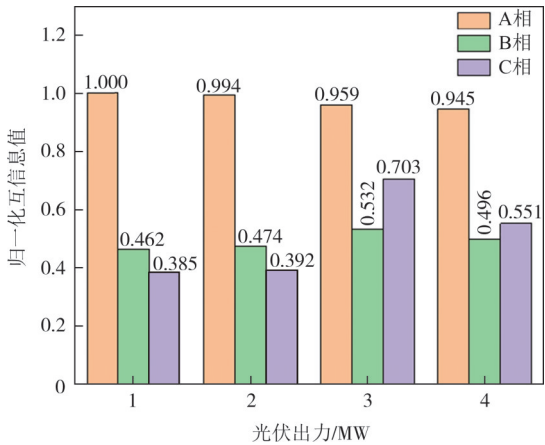


图 10 不同光伏出力下保护性能验证

Fig.10 Verification of protection methods under different photovoltaic output levels

由图 10 可知, 在不同光伏出力下, 保护方法均可以正确识别故障相与非故障相.

3.5 与传统纵联差动保护的对比

以线路 f_3 处发生 BC 两相接地短路故障为例, 过渡电阻为 $50\ \Omega$ 时, 传统电流差动保护适应性如图 11 所示, 制动系数取 0.8. 其中, A 相差动电流与制动电流的比值始终为 0, 非故障相可靠不动作; B 相和 C 相故障后差动电流与制动电流的比值小于制动系数, 保护拒动.

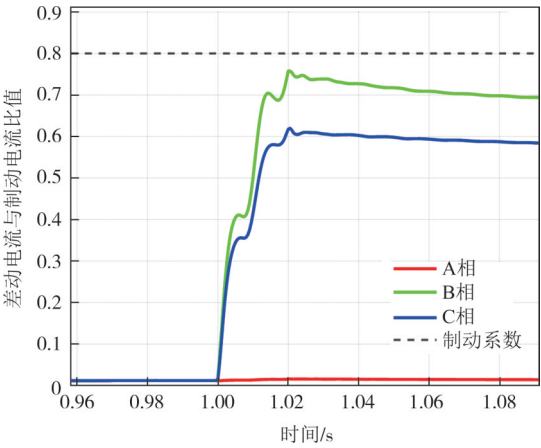


图 11 三相差动与制动电流比值

Fig.11 Ratio of the differential current to the restraining current for three-phase

使用本文所提方法进行故障判断时, A、B、C 三相的互信息计算结果分别为 0.972、0.659、0.506; 其中 B、C 判断为区内故障, 保护可靠动作, 表明本文所提方法比传统电流差动保护具有优势.

3.6 与余弦相似度保护的对比

当故障点离 IIDG 较远且过渡电阻较大时, 被保护线路两侧电流相位差向 180° 靠拢^[11], 电流相角特征向区外故障靠近. 而余弦相似度算法仅关注电流向量间的夹角差异, 此时保护将出现灵敏度下降、拒动的现象. 在此场景下, 本文所提方法可同时捕捉幅值的取值分布变化与相角的时序关联变化. 以 f_3 处发生 BCG 故障为例, 过渡电阻为 $100\ \Omega$ 时, 线路 BC 两侧电流三相相角差和余弦相似度计算值分别如图 12 和图 13 所示.

由于本文对一侧电流进行取反处理, 因此图 12 中 A 相作为非故障相, 其相角差稳定在 0° ; B、C 两相作为故障相, 其相角差向 0° 靠近, 此时余弦相似度计算值大于 0.9, 保护拒动. 而当使用本文所提方法进行故障判断时, A、B、C 三相的互信息计算结果分别为 1.000、0.754、0.636; 其中 B、C 都判为故障相, 保护可靠动作, 表明本文所提方法与余弦相似度对比有明显的可靠性优势.

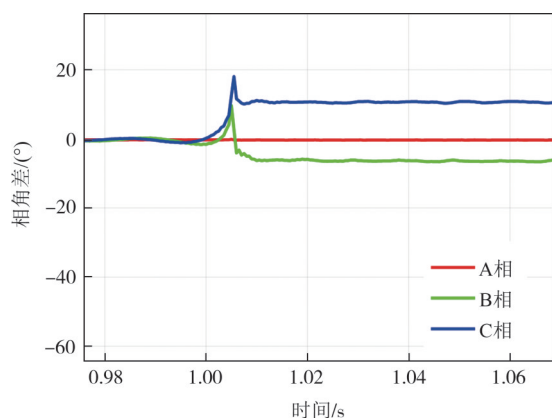


图12 两侧三相电流相角差

Fig.12 Phase angle difference of three-phase currents on both sides

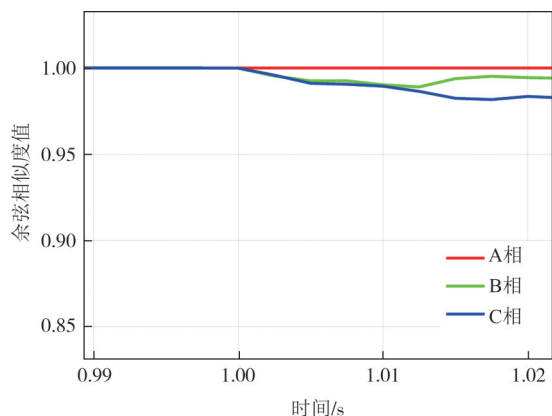


图13 两侧三相电流余弦相似度系数计算值

Fig.13 Calculated values of cosine similarity coefficient for three-phase currents on both sides

4 结论

本文利用直方图将线路两侧电流数据转化为计算互信息时需要的概率分布,通过刻画线路两侧电流波形相似度来区分区内、区外故障,结论如下:

1)对光伏电站故障电流特性进行分析,说明IIDG接入配电网后造成传统比率式差动保护误动、拒动的原因。

2)针对传统保护存在的问题,本文提出了一种基于互信息相似度比较的纵联保护新方法,利用馈线两侧电流波形相关性构成保护判据。

3)该方法在各种故障场景下均能可靠动作,且耐过渡电阻能力强,适应噪声能力强。相较于传统纵联保护,其可靠性与灵敏性均显著提高。

4)该方法在不含T接分支的场景下具有良好的判别效果,后续研究可进一步拓展至含不可测T接

负荷分支的复杂配电网中,探究适用于该类拓扑的故障特征提取与识别方法,提升保护方案对复杂配电网拓扑的适应性。

参考文献

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021(9):171-191.
ZHUO Z Y, ZHANG N, XIE X R, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021(9): 171-191. (in Chinese)
- [2] 黎博,陈民铀,钟海旺,等.高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J].中国电机工程学报,2023,43(2):555-580.
LI B, CHEN M Y, ZHONG H W, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2023, 43(2): 555-580. (in Chinese)
- [3] 金基达,宋依群,范春菊,等.考虑逆变器电源控制策略的电流保护整定计算[J].电网技术,2021,45(9):3690-3699.
JIN S D, SONG Y Q, FAN C J, et al. Calculation of current protection setting based on inverter generation control strategy [J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3690-3699. (in Chinese)
- [4] 王宁,韩国栋,高厚磊,等.有源配电网电流差动保护判据研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(7):14-23.
WANG N, HAN G D, GAO H L, et al. The current differential protection criterion of active distribution networks [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 14-23. (in Chinese)
- [5] 袁智勇,徐全,徐刚,等.含大容量分布式电源接入的配电网电流保护优化方案[J].电网技术,2021,45(5):1862-1868.
YUAN Z Y, XU Q, XU G, et al. Current protection optimization scheme in distribution network with large capacity distributed generators [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1862-1868. (in Chinese)
- [6] 高勇威,何晋,翟镇.含不可测负荷分支接入的有源配电网自适应差动保护[J/OL].云南民族大学学报(自然科学版),1-11(2024-12-31)[2025-09-09].<https://link.cnki.net/urlid/53.1192.N.20241231.1016.002>.
GAO Y W, HE J, ZHAI Z. Adaptive differential protection of active distribution network with unmeasured load branch [J/OL]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 1-11 (2024-12-31) [2025-09-09]. <https://link.cnki.net/urlid/53.1192.N.20241231.1016.002>. (in Chinese)
- [7] 王钢,冯婧桐,李杰.含逆变型分布式电源和分支负荷的配电网自适应电流差动保护[J].电网技术,2024,48(6):2593-2602.
WANG G, FENG J T, LI J. Adaptive current differential protection for distribution networks with inverter-interfaced

- distributed generators and branch loads [J]. Power System Technology, 2024, 48(6):2593-2602. (in Chinese)
- [8] 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 J P, SANG L W, TANG T, et al. Adaptive distribution network differential protection scheme with adaptive amplitude ratio [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 29-35. (in Chinese)
- [9] 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 Y, LU Y P. Sufficient optimized comprehensive current amplitude differential protection for distribution network with distributed generation[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2018, 38(Sup.1): 68-74. (in Chinese)
- [10] 王亚兵, 童晓阳, 赵紫斌, 等. 基于新型正序故障分量综合阻抗的有源配电网纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(2): 103-109.
- WANG Y B, TONG X Y, ZHAO Z B, et al. Pilot protection of active distribution network based on novel positive-sequence fault component comprehensive impedance [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(2):103-109. (in Chinese)
- [11] 梁营玉, 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 Y Y, LU Z J. Adaptive differential protection principle based on compensation coefficient for active distribution network [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2268-2275. (in Chinese)
- [12] 崔子轩, 袁婉玲, 郝正航, 等. 基于电流幅值关系与制动系数相配合的有源配电网差动保护方案[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12):1-7.
- CUI Z X, YUAN W L, HAO Z H, et al. Differential protection scheme of active distribution network based on current amplitude relation and braking coefficient [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 1-7. (in Chinese)
- [13] 王少雄, 吕思辰, 吕飞鹏, 等. 基于Fréchet距离的集中式光伏场站送出线路纵联保护方法[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1648-1657.
- WANG S X, LÜ S C, LÜ F P, et al. Fréchet distance based pilot protection method for centralized photovoltaic station transmission lines [J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1648-1657. (in Chinese)
- [14] 叶远波, 李端超, 汪胜和, 等. 基于广义S变换和皮尔逊相关系数的新能源接入电网纵联保护[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 194-202.
- YE Y B, LI D C, WANG S H, et al. Pilot protection for new energy access to power grid based on generalized S transform and Pearson correlation coefficient [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6):194-202. (in Chinese)
- [15] 胡勇, 郑黎明, 贾科, 等. 基于Tanimoto相似度的光伏场站送出线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 74-79.
- HU Y, ZHENG L M, JIA K, et al. Pilot protection based on Tanimoto similarity for a photovoltaic station transmission line [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 74-79. (in Chinese)
- [16] 周静, 朱凌峰, 俞立婷, 等. 基于KL散度的含分布式电源配电网纵联保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(12): 116-125.
- ZHOU J, ZHU L F, YU L T, et al. Pilot protection for distribution network with distributed generations based on KL divergence [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(12): 116-125. (in Chinese)
- [17] 庞清乐, 刘显超, 李希年, 等. 基于电流极性比较的主动配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 101-108.
- PANG Q L, LIU Y C, LI X N, et al. Current polarity comparison based fault location for active distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 101-108. (in Chinese)
- [18] 濮宏飞, 吴通华, 姚刚, 等. 基于5G通信的有源配电网线路差动保护实用化方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 117-124.
- PU H F, WU T H, YAO G, et al. Practical scheme of line differential protection for active distribution network based on 5G communication [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23):117-124. (in Chinese)
- [19] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21):6263-6274.
- JIA K, ZHENG L M, BI T S, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2019, 39(21):6263-6274. (in Chinese)
- [20] 李泽文, 肖仁平, 杜昱东, 等. 集中式光伏并网输电线路的故障暂态分析与保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 120-130.
- LI Z W, XIAO R P, DU Y D, et al. Fault transient analysis and protection for transmission lines with integration of centralized photovoltaic [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18):120-130. (in Chinese)
- [21] 张倩茅, 徐田丰, 董家盛, 等. 光伏逆变器低电压穿越控制与储能系统[J]. 电力电子技术, 2026, 60(2): 72-79.
- ZHANG Q M, XU T F, DONG J S, et al. Photovoltaic inverter low voltage ride-through control and energy storage system [J]. Power Electronics, 2026, 60(2): 72-79. (in Chinese)
- [22] 光伏发电站接入电力系统技术规定:GB/T 19964—2024[S]. 北京:中国标准出版社, 2024.
- Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024. (in Chinese)

- [23] XIONG K, HU W H, CAO D, et al. A novel two-level deep reinforcement learning enabled game approach for incentive-based distributed voltage regulation with participation of autonomous photovoltaic inverters [J]. *Energy*, 2025, 324: 135934.
- [24] 鲁坤, 兰生, 贺清峰, 等. 基于正序电流故障分量的有源配电网线路差动保护[J]. *电气开关*, 2024, 62(2): 43-47.
- LU K, LAN S, HE Q F, et al. Differential protection of active distribution network based on adaptive adjustment of braking coefficient [J]. *Electric Switchgear*, 2024, 62(2): 43-47. (in Chinese)
- [25] 李潇雨, 何晋, 孙琮岳. 含逆变型分布式电源的配电网新型纵联保护[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2023, 37(12): 276-283.
- LI X Y, HE J, SUN C Y. Novel pilot protection for distribution networks with inverter interfaced distributed generation [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, 37(12): 276-283. (in Chinese)
- [26] 杨洋, 李胜文, 陈晓乾, 等. 基于故障序电流幅相特性的含分布式电源配电网纵联保护方案[J]. *太原理工大学学报*, 2024, 55(1): 93-101.
- YANG Y, LI S W, CHEN X Q, et al. Longitudinal protection scheme for distribution network with distributed power based on amplitude and phase characteristics of fault sequence current [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2024, 55(1): 93-101. (in Chinese)
- [27] 侯冰, 李轶凡, 覃岚莎, 等. 基于故障区域拟合系数的双馈风场送出线路纵联差动保护[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(23): 7694-7706.
- HOU B, LI Y F, QIN L S, et al. Current differential protection for wind farm transmission line based on fault region fitting coefficient [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(23): 7694-7706. (in Chinese)
- [28] 廖晓玉, 臧睿, 胡家跃. 光纤电流差动保护及其整定计算[J]. *继电器*, 2006(21): 9-13.
- LIAO X Y, ZANG R, HU J Y. Line fiber optical differential protection and its setting calculation [J]. *Relay*, 2006(21): 9-13. (in Chinese)
- [29] 李明彩, 张业宏, 秦鑫. 基于时频互信息法的小鼠脑电信号相关性分析[J]. *现代计算机*, 2023(18): 40-43.
- LI M C, ZHANG Y H, QIN X. Correlation analysis of mouse electroencephalogram based on time-frequency mutual information [J]. *Modern Computer*, 2023(18): 40-43. (in Chinese)
- [30] 向珉江, 袁通, 苏善诚, 等. 基于5G授时的配网差动保护数据同步方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(8): 8-15.
- XIANG M J, YUAN T, SU S C, et al. 5G timing base data synchronization scheme for differential protection of distribution networks [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(8): 8-15. (in Chinese)
- [31] 于成澳, 高湛军, 刘朝, 等. 基于自适应制动补偿系数的有源配电网电流纵联差动保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(17): 1-14.
- YU C A, GAO Z J, LIU Z, et al. A current longitudinal differential protection method based on adaptive braking compensation coefficient for active distribution networks [J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(17): 1-14. (in Chinese)
- [32] 李响, 周成瀚, 邹贵彬, 等. 基于时域波形的有源配电网自适应电流差动保护[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(14): 181-189.
- LI X, ZHOU C H, ZOU G B, et al. Time-domain waveform based adaptive current differential protection for active distribution networks [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(14): 181-189. (in Chinese)