

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250636

基于多模态分解信息的新能源场站送出线路纵联保护新判据

李振兴^{1,2}, 杨 桃², 王 莉³, 胡 聪², 翁汉琍^{1,2}, 李培阳²

(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. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 国家电网有限公司技术学院分公司, 山东 济南 250002)

摘要: 针对新能源场站送出线路故障时因短路电流受限及频率偏移导致的传统保护性能下降问题, 提出一种新型纵联保护判据, 该判据基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)提取本征模态函数分量(intrinsic mode functions, IMF), 并利用 Kendall 相关系数进行故障识别。首先分析了传统纵联保护与现有相似度算法的适用性。在此基础上, 对线路两端故障电流进行经验模态分解, 并利用 Kendall 相关系数分析其分解信息的相似性, 以揭示其中蕴含的故障特征。其次, 深入分析区内外故障时各阶 IMF 分量 Kendall 系数的差异, 据此评估不同分量的故障表征能力。最终, 通过赋予各分量差异化权重, 构建一个融合电流幅值、相位及极性特征的综合相似度保护判据。仿真结果表明, 该方法能够不受新能源故障电流特性的影响, 正确判别新能源场站多种故障场景下区内外短路故障, 具有动作时间短、准确性高、适应性强的优势。

关键词: 新能源场站; 送出线路; 经验模态分解; Kendall 相关系数; 综合相似度值; 纵联保护

A new pilot protection criterion for renewable energy outgoing lines based on multimodal decomposition information

LI Zhenxing^{1,2}, YANG Guang², WANG Li³, HU Cong², WENG Hanli^{1,2}, LI Peiyang²

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Technical College of State Grid Corporation of China, Jinan 250002, China)

Abstract: To address the issue of performance degradation in traditional protection during faults on outgoing transmission lines from renewable energy plants caused by limited short-circuit current and frequency deviation, a new pilot protection criterion is proposed. The criterion is based on empirical mode decomposition (EMD) to extract multimodal components, i.e., intrinsic mode functions (IMFs), and employs the Kendall's correlation coefficient for fault identification. First, the limitations of traditional protection and existing similarity algorithms are analyzed. On this basis, fault currents from line terminals are decomposed via EMD, and the similarity of the components is analyzed by using the Kendall coefficients to reveal fault characteristics. The differences in Kendall coefficients among IMFs of different orders during internal and external faults are examined to assess their fault representation capability. Finally, a comprehensive similarity-based protection criterion integrating current amplitude, phase, and polarity features is developed by adaptively weighting IMFs. Simulation results show that the proposed method is immune to the specific fault current characteristics of renewable energy sources and can accurately discriminate between internal and external short-circuit faults under various fault scenarios in renewable energy plants, featuring fast operation, high accuracy, and strong adaptability.

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

Key words: renewable energy plant; transmission line; empirical mode decomposition; Kendall correlation coefficient; comprehensive similarity index; pilot protection

0 引言

为响应“双碳”战略, 我国新能源并网规模快

速增长, 新型电力系统呈现出“双高”特性^[1-4]。但大量新能源电源的接入导致系统故障特征迥异, 主要表现为短路电流幅值受限、频率非工频、相位畸变等特点, 导致传统保护在新型电力系统中适应性降低、保护性能严重下降, 不能保障系统安全稳定运

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077120)

行^[5-8], 亟须构建能够准确、可靠动作的系统保护方案。

受“双高”影响, 新能源场站发生故障时其故障特性取决于电力电子器件性能^[9-11]。例如, 针对传统同步发电机故障整定设计的距离保护、方向元件应用于新能源系统可能出现误判、漏判风险^[12-13], 以及双馈风电机组撬棒保护投入后故障电流发生频率偏移现象^[14], 可知基于工频故障电流的传统保护原理可能受到一系列挑战。

针对新能源传统保护适应性的研究, 有学者在分析逆变型新能源场站送出线路发生不对称短路故障时保护性能的基础上, 指出了并网系统的强弱特性对保护适应性有较大影响, 在弱系统中保护拒动的风险大大增加^[15]。文献[16]中分析了双馈风电场接入对母线采样值电流差动保护的影响, 指出短路电流幅值受限、频率偏移等特性会导致保护无法正确动作。针对上述问题, 专家学者提出了多种解决方案。文献[17]中提出了一种基于负序协同控制策略的双端弱馈交流系统电流差动保护方案, 利用动作边界、灵敏度和自适应校正函数进行区内外故障判断, 但其主要针对柔直送出线路。同时很多专家学者关注到相似度在保护原理构建中起到的作用^[18-22], 其中文献[18-19]提出波形相似度对传统保护原理进行重新构造以适应新能源场景, 在稳定工况下具有较好的性能, 但其无法规避弱系统时可能出现的保护失效问题, 在实际工况中的适应性有待验证。文献[20-21]利用 Spearman 相关系数降低了异常数据和数据量纲的影响, 但相关整定值设置需要进一步研究。文献[22-24]通过对附加网络分析发现: 在区内外故障情况下, 线路两端电流分量、角频率等特征表现出不同的相关性, 可用于故障判别。然而, 该方法在交流电网中的适用性仍有待进一步研究。综上所述, 新能源场站交流送出线路中仍然缺乏一种适用性强、灵敏度高、简单有效的保护判据。

本文针对现存问题, 提出一种基于多模态分解信息的新能源场站送出线路纵联保护新判据。在提取线路两侧故障电流并对其进行经验模态分解的基础上, 利用所获得的多阶多模态信息分量进行故障特征分析, 再通过 Kendall 相关系数度量两侧故障电流分解信号的差异, 最后使用加权系数联系不同表征能力及内容的本征模态函数(intrinsic mode functions, IMF)分量, 从而构造综合相似度值, 以此构造保护新判据。最后, 依据实际新能源场站与线路数据, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建光伏、风电场站集中并网系统, 并在不同故障场景、不同故障类型、不同过渡电阻以及不同出力情况下进行仿真分析, 以证明所提保护原理的有效性。

1 新能源电源并网系统及故障特性分析

新能源场站送出系统并网拓扑结构示意图如图 1 所示。

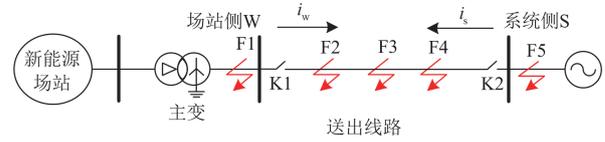


图 1 新能源场站送出系统拓扑

Fig. 1 Topology of new energy station transmission system

图 1 中: i_w 、 i_s 分别为场站侧与系统侧电流, F1—F5 为故障位置。新能源场站送出线路发生故障时, 其呈现的非线性电气特性会使故障电流波形特征产生显著差异, 导致故障的检测与定位变得更加困难, 需对线路两侧故障电流进行特征分析。

传统同步发电机系统发生故障时, 其故障电流呈现出按指数规律衰减的工频特性^[25]。而不同于传统同步发电机, 双馈风机和逆变型电源的短路电流解析表达式^[26-28]为

$$i_{\phi,III} = -\frac{k_r}{L'_s} \varphi_{r0} e^{-\frac{t}{T'_r}} e^{j\omega_r t} + \frac{(1-\lambda')e_0}{j\omega L'_s} e^{j\omega t} + \frac{\lambda e_0}{j\omega L'_s} e^{-\frac{t}{T'_s}} \quad (1)$$

$$i_{\phi,IV} = i_d \cos(\omega t + \theta_\phi) - i_q \sin(\omega t + \theta_\phi) + (i_{d0} - i_d) \frac{e^{-\xi\omega_d t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1-\xi^2}} \cos(\omega t + \theta_\phi) + i_q \frac{e^{-\xi\omega_d t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega t + \theta_\phi) \quad (2)$$

式中: $i_{\phi,III}$ 、 $i_{\phi,IV}$ 分别为双馈型风电机组和逆变型电源的故障相电流; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流参考值; i_{d0} 为 d 轴电流初始值; L'_s 为定子等效电感; k_r 为风电场相关系数; ξ 、 β 分别为二阶系统阻尼比和阻尼角; φ_{r0} 为转子初始磁链; ω 、 ω_r 分别为锁相环检测到的角频率和转子角频率; ω_n 、 ω_d 分别为自然振荡角频率和阻尼振荡角频率; θ_ϕ 为故障后的初相角; T'_r 、 T'_s 分别为转子、定子衰减时间常数; λ 、 λ' 分别为电压跌落程度和电压跌落相关系数; e_0 为逆变器端口电压。

分析式(1)可知, 若撬棒电路投入时, 系统发生较大程度电压跌落, 此时短路电流以衰减转速分量为主, 考虑到转子转速非固定值, 故双馈风机短路电流呈现非工频特性。而未投入撬棒电路情况下, 在新稳态到达之前会使得暂态电流一直存在于系统中, 以及风机暂态电流还与感应电机故障响应特性关联, 受上述影响在未投入撬棒电路时暂态电流波

形同样表现为无变化规律的非工频正弦波。

由式(2)可知, 逆变型电源一方面受 dq 轴参考量的限制呈现幅值受限的特征; 另一方面, 与双馈型电源类似, 动态调节过程的存在使得暂态分量一直存在, 同时动态特性会受到调节过程中控制结构、参数以及输入量特性的影响, 而上述条件又因设备生产厂家和故障穿越标准的不同要求而存在显著差异, 故障情况难以预知, 即逆变型电源的暂态电流也呈现出无特定变化规律的非工频正弦波。

图 2 展示了系统在 2 s 时, 不同位置发生故障时线路两侧故障电流, 与传统同步机系统发生故障时的电流相比, 其谐波分量增加, 波形产生畸变。同时可观察到, 区外故障时故障电流由对侧电源提供并呈现对侧电源的故障特性; 而当发生区内故障时, 线路两侧电流 I_s 、 I_w 在幅值和相位上将出现很大差异, 幅值相位差异特性将在时域波形上综合体现。由此可见, 新能源场站故障电流存在幅值受限、频率畸变、相位偏移等特点, 在此基础上结合两侧电流信号幅值、相位具有较大差异的特征可构造保护新原理。

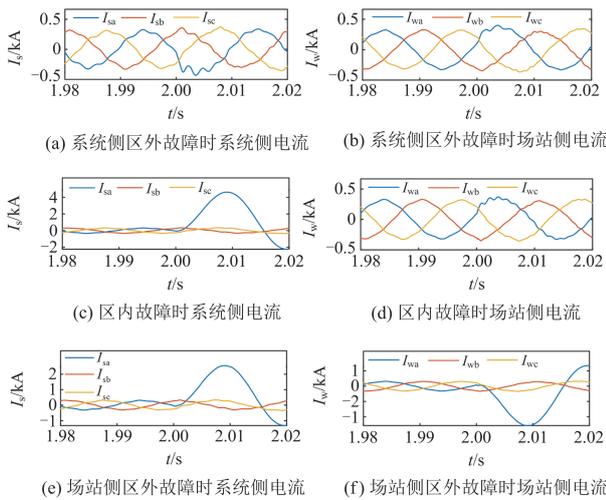


图 2 新能源系统不同位置发生故障时两端电流

Fig. 2 Current at both ends of new energy system during faults at different locations

2 基于多模态分解分析的综合相似度值保护新原理

2.1 基于 EMD 分解信息的故障特征

经前文分析可知, 新能源系统产生的故障电流通常呈非线性、非平稳的特点, 可能会对故障信号特征造成影响, 导致传统接地保护不能可靠响应。

直接利用两侧电流信号进行保护构造可能存在复杂工况下故障电流波形特征不明显、难以识别等问题, 使得保护构建失败。而经验模态分解(empirical

mode decomposition, EMD)可以对多频叠加信号进行分解从而消除非平稳信号的波动性, 同时无需依赖任何预先设定的基底函数, 其分解完全依据信号自身的局部特征, 自适应地将非平稳信号平稳化^[29]。分解得到的每个 IMF 代表信号中的不同频率成分, 能够反映故障的瞬时变化特性和动态行为, 可以更加准确可靠地解释受电力电子器件影响的故障电流特性, 具有较好的自适应性。

使用 EMD 需要满足以下两个条件:

- 1) 所有 IMF 信号中的极值点数量与过零点数量之差只能为 0 或 1;
- 2) 对信号中的任意一点, 其上下包络的均值为 0。

在满足前置条件后, 通过构造上、下包络线的均值曲线判断是否分离出 IMF; 随后, 将所有已分离的 IMF 与最终的残余分量相加, 即可重构出原信号, 如式(3)所示。

$$X(t) = \sum_{k=1}^n r_k(t) + r_{es} \quad (3)$$

式中: $r_k(t)$ 为 IMF 分量, 从高频到低频表征信号, 反映故障电流特征; n 为符合 EMD 约束条件的 IMF 分量个数; r_{es} 为分解后的残余分量。

以不同位置发生 A 相接地故障情况为例进行分析。其中: $R_{ex,s}$ 、 $R_{ex,w}$ 分别为正、反向区外故障时电流分解信号; R_{in} 为区内故障时电流分解信号。

线路两侧故障电流进行 EMD 分解后的一阶 IMF 分量如图 3 所示。

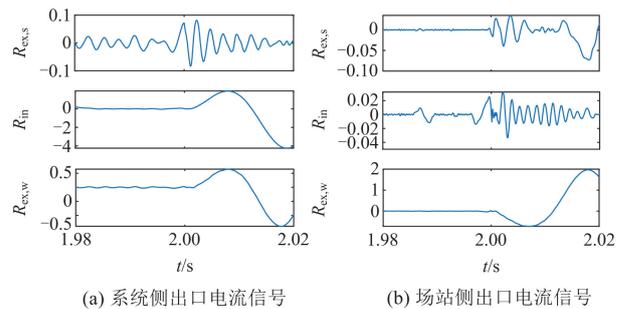


图 3 一阶 IMF 分量

Fig. 3 First-order IMF component

根据图 3 可以观察到, 如上文分析所示低阶高频 IMF 分量可反映故障电流剧烈变化, 对应于故障暂态阶段电流尚未稳定时的特征, 将其与原始电流波形比较, 可以表明一阶 IMF 分量保留了原始信号的基本幅值、相位信息, 反映故障的暂态阶段特征。

图 4 展示了分解后得到的二、三阶 IMF 分量。在图 4(c)、图 4(d)中, $R_{ex,w}$ 信号虽可观察到 2 s 故

障发生后两侧电流信号变化趋势相反,但在系统侧发生区外故障时,幅值、相位特征已不明显,表明二、三阶信号不具备如一阶信号的特征表达能力。

当信号分解至四阶及以上时,IMF分量中的幅值信息已显著弱化,但其呈现出较强的极性特征,故而对高阶 IMF 分量进行归一化处理使其特征更易观察,分解结果如图 5 所示。

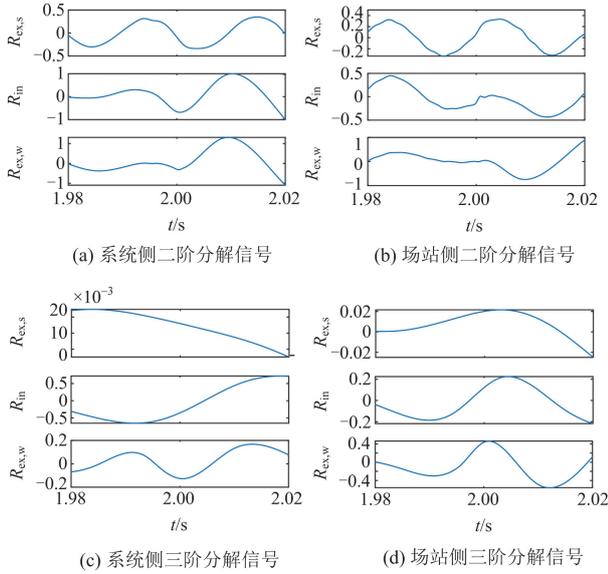


图 4 二、三阶 IMF 分量

Fig. 4 Second-order and third-order IMF components

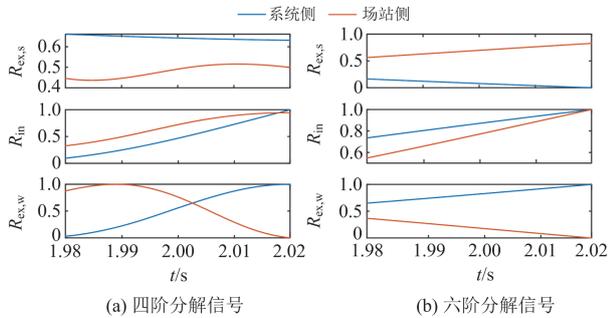


图 5 高阶 IMF 分量

Fig. 5 High-order IMF components

此时高阶低频 IMF 分量呈现单一的变化趋势,其能够以明显的极性特征表征故障位置。如图 5(a)所示,在系统发生区外故障时,线路两侧信号变化趋势整体呈负相关;发生区内故障时则明显呈现正相关,说明四阶分解信号可以初步地表征故障信息的极性特征,但仍存在趋势不明显的现象,难以准确判断两侧信号的正、负极性。而当信号分解至五至七阶时其变化趋势则变得相对稳定,以图 5(b)所示六阶分量为例,两侧信号呈明显正相关或负相关

的特性,突出了故障信号的极性,故而可为保护新判据的构建奠定基础。

综上分析,可以得到以下结论:经过 EMD 分解后的低阶信息可以表征信号的幅值、相位变化;而在区内外故障发生时,高阶信号呈现不同的极性特征,可表征故障位置。

2.2 基于 EMD 和 Kendall 相关系数的综合相似度值

前文分析表明,各阶 IMF 分量凭借其幅值、相位或极性特征,能够在一定程度上反映故障位置,但各阶信号反映信息不尽相同,单一信息无法独立判断故障,难以进行统一量化分析,考虑引入相关系数衡量两侧各阶 IMF 分量的相关程度,从而对故障位置进行准确判断。常用相关系数在实际应用中可能存在不适用的情况,而相比之下,Kendall 相关系数适用于不明分布的定序数列,与发生故障后的新能源系统故障电流信号更适配。且当新能源零出力或出现永久性故障时,Kendall 相关系数可以避免 Pearson 相关系数、余弦相似度可能出现的 0/0 情况,确保保护原理的可靠性。

故本文采用 Kendall 相关系数描述两侧故障电流各阶 IMF 分量相关性,其计算方法为^[30]:假设 2 个随机变量 X, Y , 并且 2 个变量中所包含的元素数量均为 M , 第 $i, j (1 \leq i, j \leq M)$ 个组合分别表示为 $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j)$ 。如果 $X_i > Y_i, X_j > Y_j$ 或 $X_i \leq Y_i, X_j \leq Y_j$ 同时出现,则第 i 个组合和第 j 个组合被认为是一致的,反之则为分歧的。设线路两侧 IMF 分量分别为系统侧 S_i 和场站侧 W_i , 计算两侧分量的一致对个数 C_i 和分歧对个数 D_i 。Kendall 相关系数 T_i 计算公式如式(4)所示。

$$T_i = \frac{2(C_i - D_i)}{N(N-1)} \quad (4)$$

式中: C_i 为计算得到的两侧 IMF 分量一致对个数; D_i 为计算得到的两侧 IMF 分量分歧对个数; N 为所取数据窗中数据个数。

当利用 Kendall 相关系数 T_i 对两侧各阶 IMF 分量相关性进行量化分析时, T_i 的范围为 $[-1, 1]$, 若二者变化趋势一致, T_i 近似等于 1; 反之两者呈现完全负相关性, T_i 近似等于 -1。

由上文分析可知, EMD 和 Kendall 相关系数的结合可以进行初步的保护构造。 S_i, W_i 中的高阶分量虽具有 2.1 节所述的极性特征,具备区分区内外故障的能力,但其反映信息不全面,可靠性不高,因而利用 Kendall 相关系数能够更好地反映 S_i, W_i 各阶分量的故障特征相关性。

对 S_{1-3} 、 W_{1-3} 进行 Kendall 相关系数计算, 结果如图 6 所示, T_{1-2} 相关系数曲线仅在某一时段具有明确差异, 针对区内外故障无法进行有效判断, 不具有稳定性。 T_3 则存在区内外故障特征一致的情况, 故其无法单独作为保护判据。

经前文分析可知, S_{4-7} 、 W_{4-7} 突出了故障信息的极性特征, 对两侧分量进行 Kendall 相关系数计算, 结果如图 7 所示。

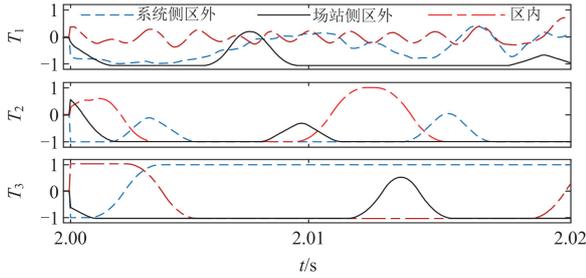


图 6 前三阶 IMF 分量 Kendall 相关系数
Fig. 6 Kendall's correlation coefficient of the first three IMF components

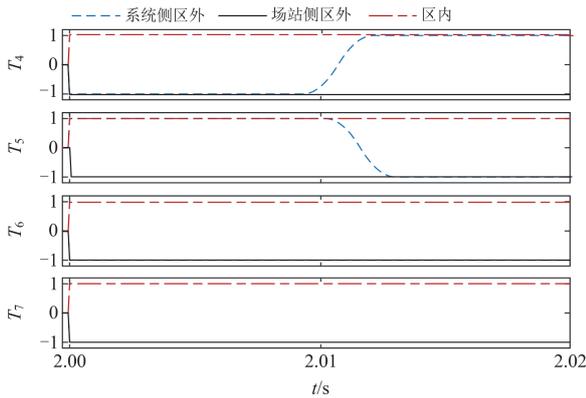
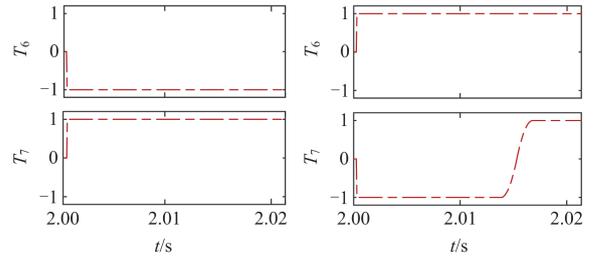


图 7 高阶 IMF 分量的 Kendall 相关系数
Fig. 7 Kendall's correlation coefficient of high-order IMF components

在 T_{4-5} 中, 虽故障持续期间内区内故障和区外故障有较为明显的差异, 但对正向区外故障无法准确判断。 T_{6-7} 则具有稳定的差异, 在故障发生期间表现出明显的区分度, 区外故障 T_i 值为-1, 区内故障 T_i 值为 1, 可有效判断出故障位置。

但在考虑高过渡阻抗以及不同故障类型下, T_{6-7} 也可能失去高灵敏性和准确性。如图 8(a)所示, 在高阻情况下 T_6 值为-1, 与理论分析情况不一致; 图 8(b)呈现在区外发生 ABG 故障时 T_7 不为-1 的情况。

故由图 6—图 8 可知, 某一单独分量均无法独立对故障进行判断, 因此仅利用故障线路两侧某单



(a) 区内 100 Ω 接地阻抗工况 (b) 区外 ABG 接地故障

图 8 不同故障场景下 T_{6-7} 失准现象
Fig. 8 T_{6-7} 's misalignment phenomenon under different fault scenarios

一 T_i 对故障区间进行判断存在准确性不足、难以准确地识别故障位置、可能出现误判从而导致保护性能降低的现象。

基于上述分析, 综合不同 T_i 在幅值与极性比较下的差异性, 应用多信息融合原理, 选取表征性强、蕴含基础信息、特征明显的 $T_{1,4-7}$, 利用加权构造综合相似度值 ρ 对故障进行说明, 如式(5)所示。

$$\rho = \sum_{i=1}^l m_i T_i \quad (5)$$

式中: l 为参与计算的相关系数个数; m_i 为对应 T_i 的加权系数。

在对不同故障场景、不同故障类型进行保护构造时, 以 m_i 为寻优目标, 不同故障场景下的 T_i 为样本输入, 最终使 ρ 能够充分表征系统故障位置。基于此, 本文引入长鼻浣熊优化算法(coati optimization algorithm, COA)^[31]对 m_i 进行寻优定值。该算法具有较强的环境适应性与鲁棒性, 且能够基于当前目标数据库中的个体最优值来动态更新搜索目标, 这一机制尤其契合本文多目标、多样本的寻优需求。

2.3 保护判据

考虑到相关系数在区内外故障时存在明显不同, 采用选取保护定值与相似度值 ρ 相比较构建保护判据, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \rho > \sigma, \text{区内故障} \\ \rho \leq \sigma, \text{区外故障} \end{cases} \quad (6)$$

式中: σ 为保护阈值。

针对系统故障发生存在随机性和难以预测性, 综合收集实际场站中多故障场景下的录波数据, 再通过实际场站数据搭建的模型进行故障模拟, 采集故障发生时的数据确定 σ 值, 使保护足以面对不同工况。在本文所提条件下, 为提高可靠性, 通过各种故障场景和工况下的大量数据, 利用区内外故障样本计算 σ 值从而确定保护判断阈值, 基于 T_i 值范

围为 $[-1, 1]$, 按照欠量保护思路, 同时考虑系统两端通信, 在此基础上, 阈值构建如式(7)所示。

$$\sigma = K_{\text{rel}} \cdot a \cdot \sum_{i=1}^n m_i \quad (7)$$

$$K_{\text{rel}} = K_m \cdot K_{\text{ang}} \cdot K_{\text{amp}} \quad (8)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数, 由裕度系数 K_m 及两侧通信传输导致的角度、幅值误差系数 K_{ang} 、 K_{amp} 共同组成; a 为 T_i 的最大值, 取值为 1。本文 K_m 取 0.9, K_{ang} 、 K_{amp} 均取 $0.95^{[18]}$ 。

所提保护的流程图如图 9 所示。在离线训练阶段, 通过大量典型故障场景和实际数据进行参数权重寻优, 确定可适用于大部分场景以及有明显区分度的权重值。当故障发生后, 由线路两侧保护装置采集数据, 对提取到的电流信号进行 EMD 分解, 选取特定 IMF 分量进行两侧信息交互, 完成相关系数 T_i 的计算, 最后按照式(5)对各 T_i 值进行加权求和得到 ρ , 进而同保护阈值 σ 进行比较, 判断保护是否需要动作。

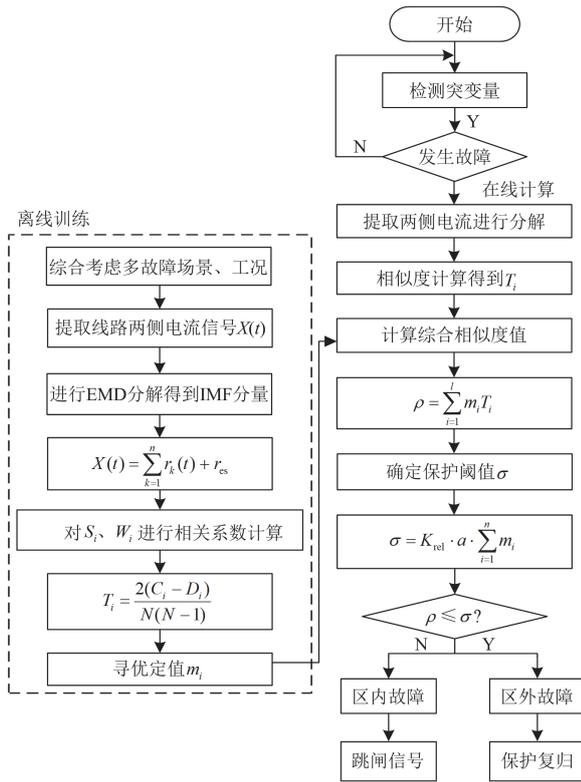


图 9 保护流程图

Fig. 9 Protection flowchart

3 仿真实验

根据图 1 所示新能源并网模型在 PSCAD/

EMTDC 中建立新能源电源并网系统, 以验证所提保护的性能。场站额定容量为 100 MW, 送出线路电压等级为 220 kV, 长度为 100 km, 线路参数、场站主变压器参数及新能源参数详见附录 A 表 A1。故障位置设置在图 1 中送出线路的场站侧出口, 内部离场站侧 75、50、25 km 处和系统侧出口, 分别记为 F1、F2、F3、F4、F5。故障类型分别设置为 A 相接地(AG)、AB 两相短路(AB)、AB 两相短路接地(ABG)和 ABC 三相短路(ABC)。

由图 10 可以观察到, 当送出线路发生区外故障时, 线路两侧故障电流变化规律几乎完全相反; 而当发生区内故障时, 线路两侧故障电流变化规律不同, 且场站侧电流波形不再为工频正弦量, 与理论分析结果一致。

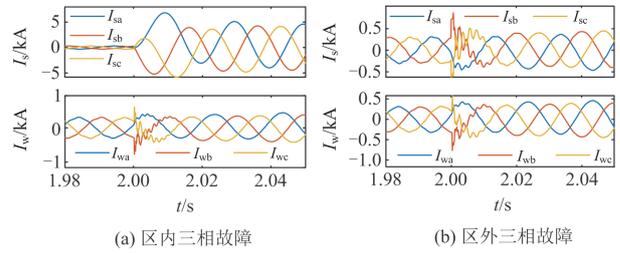


图 10 送出线路区内外发生三相短路故障时两侧故障电流
Fig. 10 Fault currents on both sides of the line when three-phase short-circuit fault occurs inside and outside

设置不同强弱系统、线路反向区外 30 km 至正向区外 30 km 不同位置、不同类型(单相、两相、三相接地和相间故障)、0~300 Ω 过渡电阻、新能源场站不同出力及不同时间窗长、采样率等故障场景, 结合实际故障数据, 以式(7)中 m_i 值作为寻优目标进行寻优定值, 得到各加权系数: $m_1 = 0.2$, $m_2 = -0.5$, $m_3 = -1.2$, $m_4 = 1.5$, $m_5 = 1.5$, 根据式(7)计算得到本文采取保护阈值为 1.2183, 考虑其他因素的影响, 本文 σ 取值为 1.2。

3.1 不同故障位置和类型的影响

表 1 中列出了不同故障位置及故障类型场景下两侧相关系数 $T_{1,4-7}$ 以及综合相似度值 ρ , 表中计算数据取至故障后 10 ms 时间窗长。

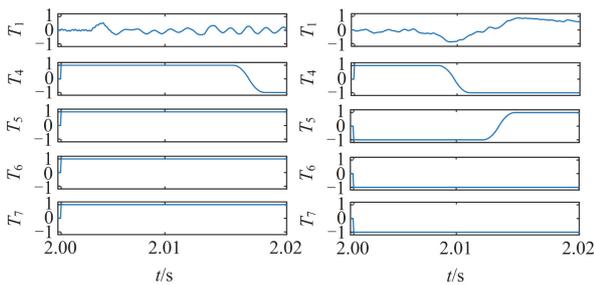
表 1 中展示了系统在区外 F1、F5 处发生故障时线路两侧电流计算得到的高阶 T_i 值, 结果基本为 -1, 而在区内故障时 T_i 值基本为 1, 表明了区内外发生故障时 T_i 有明显区分性。即使 F5 处发生 ABG 故障 T_7 的值不为 -1, 但经过加权计算得到的综合相似度 ρ 足以满足本文所提判据。验证了所提保护在不同故障位置发生不同故障类型时均可准确判断。

表 1 不同故障位置及故障类型场景下保护性能

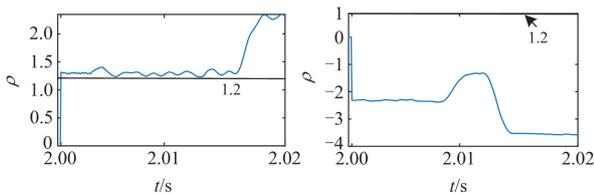
Table 1 Protection performance under different fault locations and types

位置	故障类型	两侧相关系数 $T_{1,4,7}$					ρ
F1	AG	-0.8737	-1	-1	-1	-1	-1.4747
	AB	0.5685	-0.9261	-1	-1	-1	-1.2232
	ABG	0.6072	-0.9857	-1	-1	-1	-1.1857
	ABC	-0.9140	-1	-1	-1	-1	-1.4828
F2	AG	-0.0142	0.4243	1	1	1	1.5850
	AB	-0.0041	-0.8224	1	1	1	2.2103
	ABG	0.0039	-0.7883	1	1	1	2.1949
	ABC	0.2593	0.1726	1	1	1	1.7655
F3	AG	0.1256	0.6141	1	1	1	1.5181
	AB	0.0649	-0.4005	1	1	1	2.0132
	ABG	0.0440	1	1	1	1	1.3088
	ABC	0.0192	1	1	1	1	1.3038
F4	AG	-0.0047	-0.3382	1	1	1	1.9681
	AB	-0.0230	0.3790	1	1	1	1.6059
	ABG	-0.0029	0.9738	-1	1	1	3.6741
	ABC	0.0008	0.9754	1	1	1	1.3124
F5	AG	-0.3377	-0.1393	0.253	-1	-1	-3.3016
	AB	-0.0841	0.5791	1	-1	-1	-4.5063
	ABG	0.0121	-0.9422	0.628	1	-0.59	0.3241
	ABC	0.0469	-0.1663	-0.43	-1	-1	-2.3905

F3、F5 处发生 ABC 接地故障时各分量变化图如图 11 所示,可以明显观察到两侧 T_i 值符合分析所得的相关特征,且两种工况中 ρ 值分别为 1.3038 和 -2.3905, 满足判据要求。验证了区内外故障 ρ 值有明显不同, 证明了所提策略的性能。



(a) 区内、外发生ABC故障时 T_i 值



(b) 两种工况下的综合相似度值

图 11 F3、F5 处发生 ABCG 故障场景下保护中各分量
Fig. 11 Protection components for ABCG fault at F3 and F5

3.2 不同过渡电阻的影响

在单相接地故障发生时往往存在过渡电阻, 故保护性能需考虑不同过渡电阻的情况。文献[25]研究得到 220 kV 输电线路可承受的最大过渡电阻 R_g 为 100 Ω 左右, 故而分别设置不同故障位置下发生 A 相接地, 过渡电阻分别为 60 Ω 、100 Ω 、200 Ω , 在此基础上, 考虑在极限情况下的耐受能力, 加入最大过渡电阻 300 Ω 为例进行分析。

不同故障位置和不同过渡电阻场景下的相关系数以及相似度值如表 2 所示。

表 2 光伏场站不同过渡阻抗场景下保护性能

Table 2 Protection performance under different transition resistance in PV stations

位置	R_g/Ω	两侧相关系数 $T_{1,4,7}$					ρ
F1	60	-0.6020	-0.6806	-1	-1	-1	-1.4199
	100	-0.4397	-0.9585	-1	-1	-1	-1.4086
	200	0.0369	-1	1	1	-1	-0.6926
	300	0.0269	-1	1	1	-1	-0.6946
F2	60	0.0415	-1	1	1	1	2.3083
	100	0.1867	-1	1	1	1	2.3373
	200	-0.0734	0.8116	0.8267	1	1	1.5875
	300	-0.0651	0.5320	1	1	1	1.5210
F3	60	-0.0851	0.9840	0.7762	1	1	1.5595
	100	-0.0014	1	1	1	1	1.2997
	200	-0.0001	-0.6351	-1	1	1	4.5175
	300	0.0032	-0.3701	-1	1	1	4.3857
F4	60	0.0415	-1	1	1	1	2.3083
	100	-0.0227	0.8707	1	1	1	1.3601
	200	-0.0166	0.5124	-1	1	1	3.9405
	300	-0.0157	0.6429	-1	1	1	3.8754
F5	60	-0.7914	-0.7194	-1	-1	-1	-1.5985
	100	-0.0134	-0.8731	-1	-1	-1	-1.3661
	200	0.0101	0.8038	-1	-1	-1	-2.1999
	300	-0.0148	0.9560	-0.9998	-1	-1	-2.2812

由表 2 中数据可知, 计算得到的 ρ 值在不同过渡电阻的情况下均满足判据式(6), 在区外故障时小于 1.2 而在区内故障时则是大于阈值。当过渡电阻达到 300 Ω 时, 根据两侧 A 相电流所计算 ρ 值仍满足与 σ 的大小关系, 保护可靠动作, 验证了所提保护策略具有较好的耐过渡电阻能力。

实例如图 12 所示, 在区内、外经不同过渡电阻接地工况下, 两侧 T_i 值变化规律符合前文理论推导, 且在图 12(b)中可观察到区内外故障时所计算 ρ 值分别为 1.5595 和 -1.4086, 均满足判据, 可以实现保护的正確动作。

3.3 不同噪声下的影响

在线路传输过程中, 可能会因为通信、电力电

子器件以及开关动作等而产生噪声。考虑到该情况, 表3中给出了信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)分别为10、20、30、40 dB时, 逆变型场站在F3处发生不同故障时计算的相关系数以及相似度值。

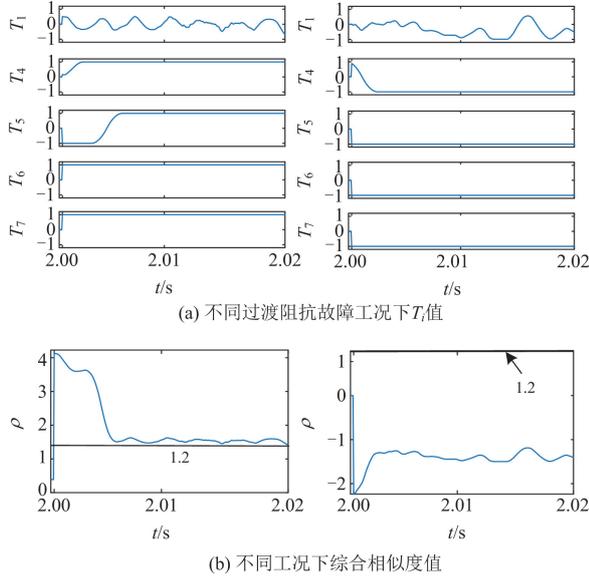


图 12 F1、F3 处经不同过渡电阻故障场景下各分量

Fig. 12 Components at F1 and F3 under different fault scenarios with different transition resistances

表 3 不同噪声强度场景下保护性能

Table 3 Protection performance under different noise intensity

故障类型	SNR/dB	两侧相关系数 $T_{1,4,7}$					ρ
AG	10	0.0205	-0.8252	-0.8868	-0.7687	1	1.8278
	20	0.0218	0.6033	-0.4423	0.3329	0.972	2.1907
	30	-0.0233	-0.2171	-0.5033	0.6082	1	3.1202
	40	-0.0167	-0.4974	-0.3684	1	1	3.6874
AB	10	0.0169	-0.0840	-0.4113	0.7666	1	3.1888
	20	-0.0270	-0.0482	0.3995	0.7347	0.986	2.1199
	30	0.0035	0.5583	-0.5778	0.8179	1	3.1418
	40	0.0549	0.3660	-0.6332	1	1	3.5878
ABG	10	0.0088	0.5148	0.4506	0.9571	1	2.1393
	20	-0.0156	-0.1071	-1	1	-1	1.2504
	30	0.0017	0.2488	-0.6989	0.6384	1	3.1722
	40	0.0127	-0.1092	0.4181	0.9700	1	2.5104
ABC	10	0.0508	-0.0204	0.3080	0.4554	0.935	1.7356
	20	0.0316	0.3370	-0.9677	0.4652	1	3.1969
	30	-0.0207	-0.3448	0.1193	1	1	3.0251
	40	-0.0524	-0.5875	-0.9180	1	1	4.3849

由表3可知, 在不同噪声强度下, 相似度值计算结果虽产生了变化, 但是仍能够满足判据要求, 保护能够可靠动作。

3.4 不同输出功率下的影响

新能源场站受天气影响较大, 在不同天气情况下功率波动较大, 极端情况下光伏场站几乎不能向外提供功率。设置场站出力分别为1 MW、50 MW、100 MW, 故障位置设置为F3、F5, 验证在不同故障类型下所提原理的保护性能。表4中展示了光伏场站在不同出力场景下计算的相关系数及相似度值。

表 4 不同出力场景下保护性能

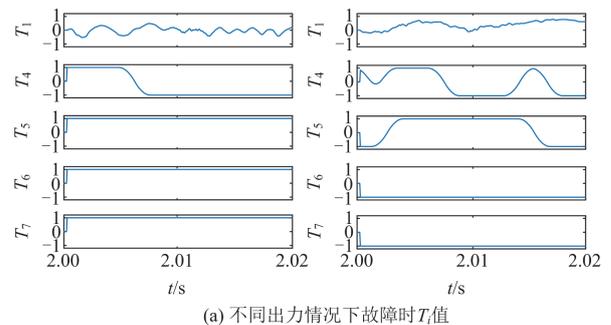
Table 4 Protection performance under different outputs

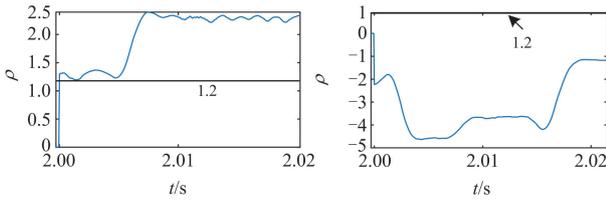
故障位置	故障类型	两侧相关系数 $T_{1,4,7}$					ρ	
(1 MW)	AG	-0.0206	0.9046	-0.9882	-0.5431	1	1.4148	
	F3	AB	0.0352	-0.4322	-1	-1	1	1.4232
	ABG	0.0156	-0.7850	-0.8423	0.7204	1	3.9864	
	ABC	-0.0258	-0.3376	-0.9818	1	1	4.3415	
(50 MW)	AG	-0.0302	-0.9733	-0.8835	0.0241	1	3.0767	
	F3	AB	0.0352	-0.6654	1	1	1	2.1392
	ABG	0.0735	-0.7614	-0.9191	-0.4712	1	2.2915	
	ABC	0.0784	-0.5755	1	1	1	2.1031	
(100 MW)	AG	0.0011	0.9988	1	1	1	1.3000	
	F3	AB	-0.0057	-0.8490	1	1	1	2.2232
	ABG	-0.1010	0.9052	1	1	1	1.3278	
	ABC	-0.0056	0.8187	1	1	1	1.3892	
F5	AG	0.2269	-0.8574	-0.8479	-1	-1	-1.5085	
	AB	-0.1139	-0.7414	-0.4864	-1	-1	-2.0681	
	(1 MW)	ABG	0.1201	-0.9537	0.2909	-0.3064	-1	-0.1596
	ABC	0.2792	0.0511	0.6102	-1	-1	-3.7016	

由表4可知, 在不同输出功率的情况下, 保护原理均能可靠反映故障, 即使在光伏场站出力弱(输出功率为1 MW)时, 区内故障相似度值均大于保护定值, 区外故障时则相反, 符合第3节分析。

实例如图13所示, 表明在F3处、50 MW以及F5处、1 MW两种工况中, 本文所提判据足以准确判断区内外故障。而在相同场景中, 常用相似度算法可能存在失效问题, 存在误动、拒动风险, 而本文无需采取辅助判据, 具有更高的可靠性。

考虑到风电机组和光伏场站受数据窗长、采样率以及噪声的影响基本一致, 故此对于风电机组在





(b) 不同出力情况下的综合相似度值

图 13 场站不同出力情况下 F3、F5 处故障时各分量
Fig. 13 Components at F3 and F5 under faults with different outputs of the station

不同故障位置、场景和出力情况下进行验证，仿真结果如附录 A 表 A2—表 A4 所示。仿真结果表明：双馈型风电场在不同故障场景及影响因素下与 3.1—3.6 节所述光伏场站具有相同的特点。

3.5 不同数据窗长的影响

表 5 给出了数据窗长分别为 5、10、15、20 ms 时，光伏场站在区内 F3 处发生不同类型故障时计算得到的相关系数及相似度值。

表 5 不同数据窗长场景下保护性能
Table 5 Protection performance under different data window lengths

故障类型	窗长/ms	两侧相关系数 $T_{1,4-7}$					ρ
AG	5	-0.0161	1	1	1	1	1.2968
	10	0.1256	0.6141	1	1	1	1.5181
	15	0.0732	1	1	1	1	1.3146
	20	0.1143	1	1	1	1	1.3229
AB	5	-0.0083	1	1	1	1	1.2983
	10	0.0649	-0.4005	1	1	1	2.0132
	15	0.0262	-0.7322	1	1	1	2.1713
	20	-0.0105	0.9052	1	1	1	1.3453
ABG	5	-0.0182	1	1	1	1	1.2964
	10	0.0440	1	1	1	1	1.3088
	15	-0.0108	1	1	1	1	1.2978
	20	-0.0332	1	1	1	1	1.2934
ABC	5	-0.0056	0.8187	1	1	1	1.3895
	10	0.0192	1	1	1	1	1.3038
	15	-0.0057	-0.8490	1	1	1	2.2234
	20	0.0011	0.9988	1	1	1	1.3008

由表 5 可知，在不同数据窗长下，本文所提方法均可正常工作，即使将窗长缩短至 5 ms，在不同故障类型下所提保护仍可以准确、可靠动作。在给保护留有一定裕度同时满足纵联保护速动性要求的基础上，本文选择 10 ms 数据窗长能够有效体现控制系统的动态过程，且所提保护具有较好的速动性和灵敏性。

3.6 不同采样率的影响

为验证所提保护在不同采样率(f_s)下的保护性能，按照现场统计，当前微机保护装置主流采样频率为 1 kHz 和 1.2 kHz，在智能变电站中可以达到 4~5 kHz。表 6 中展示了光伏电站在区内 F3 处发生各类故障时计算所得相关系数及相似度值。

表 6 不同采样率场景下保护性能

Table 6 Protection performance under different sampling rates

故障类型	f_s /kHz	两侧相关系数 $T_{1,4-7}$					ρ
AG	1	0.1256	0.6141	1	1	1	1.5181
	1.2	-0.7089	0.3155	0.4877	0.9993	1	2.1142
	4	-0.2506	1	1	1	1	1.2499
	5	0.1093	1	1	1	1	1.3219
AB	1	0.0649	-0.4005	1	1	1	1.2887
	1.2	-0.1476	1	1	1	1	1.2705
	4	-0.2802	-1	1	1	1	2.2440
	5	0.0162	1	1	1	1	1.3032
ABG	1	0.0440	1	1	1	1	1.3088
	1.2	-0.3267	1	1	1	1	1.2347
	4	-0.0438	0.9963	0.1759	1	1	2.2820
	5	0.0194	0.8582	1	1	1	1.3748
ABC	1	0.0192	1	1	1	1	1.3038
	1.2	-0.0867	1	1	1	1	1.2827
	4	-0.4154	1	1	1	1	1.2169
	5	-0.0127	1	1	1	1	1.2975

根据表 6 结果可知，在不同采样率下，所提方法均能可靠、灵敏地判别区内故障。同时，采样率的提升对相似度值的影响并不显著，说明在本文方法设定的数据窗内，所采用的 4 种采样频率均能较好地还原真实波形特征，满足保护要求。因此，综合考虑精度与实用性，本文最终将采样频率设定为 1 kHz。

3.7 与现有分解方法以及相似度保护原理对比

现有波形相似度保护原理主要利用 Pearson 相关系数、Spearman 相关系数或余弦相似度对线路两侧电流波形的相似度进行刻画。本文针对 F3 处发生不同类型故障时，将所提方法与传统相似度保护原理进行对比，结果如图 14 所示。

由图 14 可以发现，与本文方法相比，其余 3 种传统相似度保护方法的相关系数均不稳定，在 -1~1 之间振荡；即使存在稳定阶段，但也仅限于某一阶段而非整个时间窗，因此可靠性较低；对比 Spearman 相关系数与余弦相似度，二者在速动性与

可靠性方面均较差。而 Pearson 相关系数虽在速动性上有较好表现,但在 10 ms 后发生跌落情况,计算值趋近于-1,也无法可靠动作。与上述 3 种方法相比,本文所提方法在故障发生后极短时间内即可做出判断,且具有良好的速动性和可靠性。

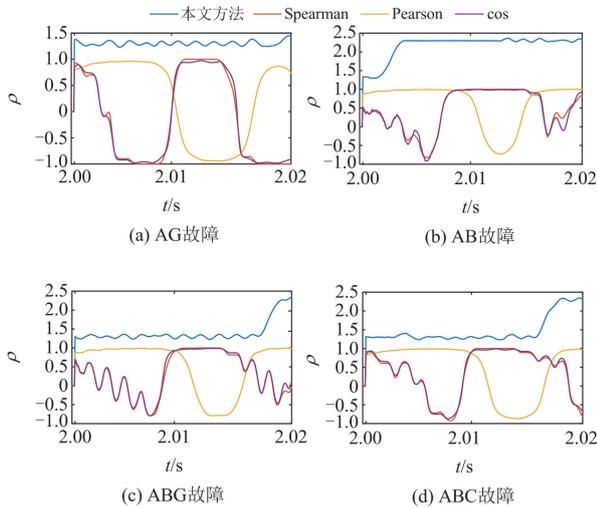


图 14 各相似度保护原理对比

Fig. 14 Comparison of protection principles for different similarity measures

相比于 VMD 等分解方式,本文在利用 EMD 进行两侧电流信号分解后进行权重赋予,得到的对比结果如图 15 所示。

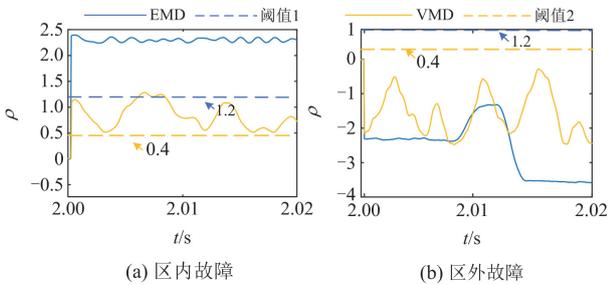


图 15 不同分解方式下保护灵敏度

Fig. 15 Protection sensitivity under different decomposition methods

如图 15 可知,在系统 F3、F5 处分别设置 A 相接地故障,EMD 分解方式所构造的判据阈值为 1.2,VMD 分解方式下判据阈值为 0.4,在相同故障场景下,本文所用 EMD 分解信号构造的保护判据有更好的灵敏度。

4 结论

针对新型电力系统在接入新能源后保护出现误动、拒动等问题,为提高继电保护的可靠性,本文

利用 EMD 算法对线路两侧故障电流进行特征分析,提出基于综合相似度值的纵联保护新判据,并进行不同故障场景下的仿真验证,主要得到以下结论。

1) 在 EMD 分解和 Kendall 相关系数的基础上构建的联合判据有效提升了故障特征的辨识度。该方法利用 EMD 分解应对新能源出力波动引发的非平稳信号畸变,放大暂态、稳态故障特征,再结合 Kendall 相关系数实现故障特征的稳定提取,在强噪声干扰与复杂运行工况下均表现出优越的稳定性。

2) 所提保护以两侧电流波形相关性为切入点,选取表征性强、特征明显的 T_i 值衡量分量差异特性,利用权重系数将各阶分量进行联系,保证信息不丢失的同时实现保护判据的构造,同时计算所需数据少、计算速度快,与其他相似度方法相比具有稳定性高的特点,且能够准确识别故障位置,保证保护的正确动作。

3) 保护判据具备良好的参数自适应性。通过引入优化算法,判据无需依赖人工参数调优即可适应不同故障场景,解决了现有保护方案因固定阈值设定导致的灵敏度与可靠性相矛盾的问题。同时后续研究方向将着重于:探究混合直流送出场景下判据的适应性扩展;结合深度学习优化 IMF 分量筛选策略,进一步提升保护速动性与经济性。

附录 A

表 A1 仿真模型参数

Table A1 Parameters of simulation models

模块名称	参数名称	数值
光伏单元	额定容量	2 MW
	模块数	50
	电流环 PI 参数	0.15 p.u./0.4 p.u.
	额定容量	5 MW
双馈风机	额定电压/频率	0.69 kV/50 Hz
	定子电阻/电感	0.008 p.u./0.168 p.u.
	转子电阻/电感	0.006 p.u./0.152 p.u.
	扩容比	20
主变	额定容量	100 MW
	变比	220 kV/35 kV
	联结方式	YNd
	短路阻抗	10%
线路参数	正序电阻	0.000 15 Ω /m
	正序感抗	0.000 395 21 Ω /m
	零序电阻	0.003 15 Ω /m
	零序感抗	0.001 185 6 Ω /m

表 A2 风电场不同故障位置及故障类型场景下保护性能

Table A2 Protection performance under different fault locations and types

位置	故障类型	两侧相关系数 $T_{1,4-7}$					ρ
F1	AG	-0.9526	-1	-1	-1	-1	-1.4905
	AB	-0.4278	-0.6260	-0.6039	-1	-1	-2.0478
	ABG	-0.8584	-0.9114	-1	-1	-1	-1.5159
	ABC	-0.9655	-1	-1	-1	-1	-1.4931
F2	AG	0.825	1	1	1	1	1.4650
	AB	0.1574	-0.94	-0.3234	1	1	3.8895
	ABG	0.2995	-0.7178	-1	1	-1	1.6188
	ABC	0.0198	1	1	1	1	1.3039
F3	AG	-0.0125	0.9414	1	1	1	1.3268
	AB	0.0007	-0.9967	-1	-1	1	1.6985
	ABG	-0.0048	0.9014	-0.9435	-0.6022	1	1.2772
	ABC	0.0015	-1	1	1	1	2.3003
F4	AG	-0.4019	1	1	1	1	1.2196
	AB	0.0926	0.7469	1	1	1	1.4450
	ABG	-0.0207	1	1	1	1	1.2958
	ABC	0.1987	1	1	1	1	1.3397
F5	AG	-0.7246	-0.9715	-1	-1	-1	-1.459 17
	AB	-0.5598	0.0925	-1	-1	-1	-1.958 21
	ABG	0.1567	-1	-1	-1	-1	-1.268 66
	ABC	0.1434	1	1	1	-1	-1.671 32

表 A3 风电场不同过渡阻抗场景下保护性能

Table A3 Protection performance under different transition resistance in wind farms

位置	R_g/Ω	两侧相关系数 $T_{1,4-7}$					ρ
F1	60	-0.9589	0.9874	-0.3842	-1	-1	-3.2244
	100	-0.5588	-0.982	-1	-1	-1	-1.4207
	200	0.0879	-0.9874	1	-1	1	-0.6887
	300	0.0692	-0.7622	1	1	-1	-0.8051
F2	60	0.364	-0.6968	-1	1	-1	1.6212
	100	-0.191 65	0.6098	0.9516	1	1	1.5148
	200	-0.0734	0.8116	0.8267	1	1	1.5875
	300	-0.0651	0.5320	1	1	1	1.5210
F3	60	0.1719	0.6595	-1	1	1	3.9046
	100	0.0738	0.9991	0.8258	1	1	1.5242
	200	0.0073	1	-1	1	1	3.7015
	300	0.0292	-0.6975	-1	1	1	4.5546
F4	60	0.1437	-0.9358	0.6012	1	1	2.7752
	100	0.0564	0.6523	-1	1	1	3.8851
	200	0.0103	-0.4026	-1	1	-1	1.4034
	300	-0.0083	0.9958	1	1	1	1.3004
F5	60	0.1752	-0.9814	0.4483	-1	-0.1075	-1.6734
	100	0.1239	-0.9247	-0.9208	-1	-1	-1.4079
	200	0.0247	-1	-1	-1	-1	-1.2951
	300	0.0897	-1	-1	-1	-1	-1.2821

表 A4 风电场不同出力场景下保护性能

Table A4 Protection performance under different outputs

故障位置	故障类型	两侧相关系数 $T_{1,4-7}$					ρ
(1 MW)	AG	0.9824	1	1	1	1	1.4964
	AB	0.1553	0.7461	0.2115	1	1	2.4042
	ABG	0.3886	1	1	1	1	1.3777
	ABC	-0.4811	1	1	1	1	1.2037
(50 MW)	AG	0.9264	1	1	1	1	1.4852
	AB	-0.0357	0.7527	1	1	1	1.4165
	ABG	0.3264	0.9875	1	1	1	1.3715
	ABC	0.1602	1	1	1	1	1.3320
(100 MW)	AG	-0.0125	0.9414	1	1	1	1.3268
	AB	0.0007	-0.9967	-1	-1	1	1.6985
	ABG	-0.0048	0.9014	-0.9435	-0.6022	1	1.2772
	ABC	0.0015	-1	1	1	1	2.3003
(1 MW)	AG	-0.271	-0.7988	-1	-1	-1	-1.4548
	AB	0.049	-0.8644	-0.4946	-0.9092	-1	-1.8282
	ABG	0.5803	-1	-1	-1	-1	-1.1839
	ABC	-0.162	-0.9435	-1	-1	-1	-1.3606

参考文献

[1] 戴志辉, 韦舒清, 柳梅元. 新能源送出线路工频变化量距离保护不正确动作机理分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 74-86.
 DAI Zhihui, WEI Shuqing, LIU Meiyuan. Analysis of the incorrect operation mechanism of power frequency variation-based distance protection in new energy transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 74-86.

[2] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 178-187.
 LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 74-86.

[3] SINGH P, KUMAR U, CHOUDHARY N K, et al. Advancements in protection coordination of microgrids: a comprehensive review of protection challenges and mitigation schemes for grid stability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(6): 156-183.

[4] 于琳琳, 贾鹏, 杨游航, 等. 计及短路比约束的新能源场站布点及网架协调规划方法[J]. 电力建设, 2024, 45(10): 24-33.
 YU Linlin, JIA Peng, YANG Youhang, et al. Coordinated planning method for new energy station siting and network considering short circuit ratio constraints[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 24-33.

- [5] 李夫刚, 李夫海, 琚承乾, 等. 新能源不确定性表征方法及关键技术问题研究现状、挑战及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(15): 172-187.
LI Fugang, LI Fuhai, JU Chengqian, et al. Methods for characterizing renewable energy uncertainty and key technical issues: research status, challenges, and prospects[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 172-187.
- [6] KIRAKOSYAN A, MOHAMED S E M, KANJIYA P, et al. A nine switch converter-based fault ride through topology for wind turbine applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1757-1766.
- [7] 江万里, 王若愚, 李嘉靓, 等. 海上风电接入柔直系统的交流故障机理及影响分析[J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 91-99.
JIANG Wanli, WANG Ruoyu, LI Jialing, et al. AC fault mechanism and impact analysis of offshore wind power connected to flexible and direct systems[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(1): 91-99.
- [8] 原帅, 肖嘉安, 陶军, 等. 全功率型风电机组故障穿越全过程的短路电流解析方法[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 85-94.
YUAN Shuai, XIAO Jiaan, TAO Jun, et al. An analytical short-circuit current calculation method for full-power wind turbines under complete fault ride-through processes[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 85-94.
- [9] 宁家兴. 柔性直流电网线路保护与自适应重合闸研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
NING Jiaying. Research on line protection and adaptive reclosure for flexible DC grids[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [10] 袁松, 葛昭, 唐佳杰, 等. 基于复合序电流特征的构网型新能源外送线路纵联保护[J]. 中国电力, 2025, 58(8): 185-192.
YUAN Song, GE Zhao, TANG Jiajie, et al. Longitudinal protection of grid-forming new energy outgoing lines based on composite sequence current characteristics[J]. Electric Power, 2025, 58(8): 185-192.
- [11] 史雷敏, 惠杰, 田宝江, 等. 不同控制背景下的新能源集中送出线路保护适应性分析[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(12): 120-127.
SHI Leimin, HUI Jie, TIAN Baojiang, et al. Adaptability analysis of protection for new energy centralized feeders under different control backgrounds[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(12): 120-127.
- [12] LIANG Yingyu, LI Wulin, HUO Yaotang. Zone I distance relaying scheme of lines connected to MMC-HVDC stations during asymmetrical faults: problems, challenges, and solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2929-2941.
- [13] JIA Ke, YANG Zhe, FANG Yu, et al. Influence of inverter-interfaced renewable energy generators on directional relay and an improved scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11843-11855.
- [14] 杨国生, 王增平, 欧阳金鑫, 等. 考虑低电压穿越全过程的双馈风电机组短路电流计算方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2185-2193.
YANG Guosheng, WANG Zengping, OUYANG Jinxin, et al. Short-circuit current calculation method of DFIG WT considering entire LVRT process[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2185-2193.
- [15] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 100-105.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 100-105.
- [16] 宋杰辉, 杨炳元, 吴俊杰. 双馈风场进线对 220 kV 母线采样值差动保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 100-106.
SONG Jiehui, YANG Bingyuan, WU Junjie. Influence of double fed wind field incoming line on sampled value differential protection of 220 kV bus[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 100-106.
- [17] 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.
- [18] 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): 6263-6275.
JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6275.
- [19] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J].

- Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.
- [20] 张大海, 杨宇辰, 刘艳梅, 等. 基于 EMD 与 Spearman 相关系数的混合直流线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 1-11.
ZHANG Dahai, YANG Yuchen, LIU Yanmei, et al. Hybrid HVDC line pilot protection method based on EMD and Spearman correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 1-11.
- [21] 陈新岗, 邹越越, 朱莹月, 等. 一种采用 Spearman 相关系数与电流积分比率配合的直流配网纵联保护方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(3): 172-180.
CHEN Xingang, ZOU Yueyue, ZHU Yingyue, et al. A pilot protection method of DC distribution network based on coordination of spearman correlation coefficient and current integration ratio[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(3): 172-180.
- [22] 李猛, 宁家兴, 和敬涵, 等. 基于模型校核的柔性直流输电线路自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 191-199.
LI Meng, NING Jiaying, HE Jinghan, et al. Adaptive reclosing scheme for flexible DC transmission line based on model verification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 191-199.
- [23] 戴志辉, 刘宁宁, 张程, 等. 基于电流相关性的高压直流线路纵联保护新原理[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 8-15.
DAI Zhihui, LIU Ningning, ZHANG Cheng, et al. A protection principle for HVDC lines based on current correlation[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(5): 8-15.
- [24] 戴志辉, 刘宁宁, 张程, 等. 基于电流特征量相关系数的 UHVDC 线路高阻接地故障保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 156-163.
DAI Zhihui, LIU Ningning, ZHANG Cheng, et al. A pilot protection for high-resistance grounded fault of UHVDC transmission line based on correlation coefficient of current variable[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 156-163.
- [25] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [26] CHANG Zhongxue, SONG Guobing, WANG Ting. Analysis on current characteristics of PMSG under grid three-phase fault[J]. The Journal of Engineering, 2018: 785-790.
- [27] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81: 1610-1618.
- [28] 曹雅榕. 永磁直驱风电机组暂态特性及对配网保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
CAO Yarong. Research on transient characteristics of directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator and impact on distribution protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [29] 张永东, 陶伟叶, 常欣丽, 等. 基于数学形态学与希尔伯特-黄变换的线路故障测距方法研究[J]. 山东电力技术, 2024, 51(12): 78-83.
ZHANG Yongdong, TAO Weiye, CHANG Xinli, et al. Research on line fault ranging method based on the mathematical morphology and Hilbert-Huang transform[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(12): 78-83.
- [30] 杨茂, 马剑, 李大勇, 等. 基于熵权综合关联度数据挖掘的风电功率实时预测研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12): 3578-3585.
YANG Mao, MA Jian, LI Dayong, et al. Research on real-time wind power prediction based on entropy weight and comprehensive association data mining[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(12): 3578-3585.
- [31] 张健, 赵咪, 黄毅, 等. 基于 CLD-COA-ELM 的光伏阵列故障诊断方法研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 632-640.
ZHANG Jian, ZHAO Mi, HUANG Yi, et al. Research on fault diagnosis method of PV array based on CLD-COA-ELM[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(1): 632-640.

收稿日期: 2025-06-11; 修回日期: 2025-08-30

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 博士, 教授, 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

杨 栎(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与新能源场站系统保护。E-mail: ygxingyang@163.com

(编辑 魏小丽)