

基于递归最大熵动态状态估计的 光伏电站送出线路保护方法

郑宗生, 戴 桐, 廖建权, 王少雄

(四川大学电气工程学院, 成都 610065)

摘 要: 针对传统电流差动保护动作性能下降和现有动态状态估计鲁棒性差的问题, 提出一种基于递归最大熵动态状态估计的光伏电站送出线路保护方法。该方法不受电源特性的影响且能应对量测数据中含有较大异常值的问题。首先, 分析传统电流差动保护在光伏电站送出线路保护中的适应性, 揭示传统电流差动保护的局限性。然后, 根据基尔霍夫定律, 构建交流输电线路的动态状态估计模型。在此基础上, 考虑较大异常值对量测数据的影响, 利用最大熵高斯核函数的非线性建模能力和平滑决策边界特性, 使动态状态估计结果不受异常值的干扰。最后, 在 Matlab/Simulink 平台构建集中式光伏电站并网模型, 验证不同故障下所提保护方法的优越性、灵敏性、可靠性和鲁棒性。

关键词: 光伏电站; 送出线路; 动态状态估计; 递归最大熵; 鲁棒性; 可靠性

中图分类号: TM773

文献标志码: A

0 引 言

在碳达峰、碳中和背景下, 构建含高比例新能源的新型电力系统是电力系统发展的必然趋势^[1-3]。截至 2025 年 11 月底, 全国累计发电装机容量 37.9 亿 kW, 同比增长 17.1%, 其中太阳能发电装机容量 11.6 亿 kW, 同比增长 41.9%^[4]。由于光伏出力的间歇性、随机波动性^[5-8]以及电力电子器件的脆弱性, 导致光伏电站送出线路的故障电流特征复杂, 因此研究适用于光伏电站送出线路的新型保护方法具有重要意义。目前, 针对纵联电流差动保护和距离保护在新能源并网交流线路中适应性下降甚至不足的问题^[9], 相关学者提出基于双端量和单端量的保护新原理。

1) 基于双端量的保护新原理。现有基于双端量的保护新原理的研究主要分为工频量保护和全频量保护两部分。关于工频量保护新原理的研究, 文献[10]提出一种基于改进判据的差动保护优化方案, 利用送出系统交流线路故障特征, 分析交流线路差动保护的适应性, 通过改变保护判据中的制动分量、相角等参数来兼顾差动保护的可靠性, 同时也增加了保护整定的复杂度; 文献[11]提出基于奇异值分解的交流线路保护新原理, 所提原理可通过不满整周期的工频数据来提取故障特征, 从而快速可靠地识别区内外各种类型故障, 但所提保护方法对数据采样精度和频率要求较高以及对奇异值

分解的计算复杂度高。而关于全频量保护新原理的研究, 部分学者利用全频量波形特性识别故障。文献[12-15]基于新能源送出线路区内外故障时两侧故障电流波形差异程度不一致的特性, 结合数学形态分析方法, 提出利用幅值比、余弦相似度、皮尔逊相关系数等基于电流波形形态特性的纵联保护新原理; 文献[16-17]提出用信号能量来表征差动电流频段分布特性, 利用区内外故障时故障差动电流集中频段的差异性来识别区内外故障。上述利用数学相关性算法表征区内外故障差异的全频量保护方法, 为双端量保护方案提供了新的技术思路和路线, 但在新能源出力较小、电流波形变化微弱的情况下适应性可能不足, 尤其对于利用故障电流暂态过程中非工频分量构造判据的全频量保护方法, 其性能在一定程度上依赖暂态特征提取质量, 易受噪声、谐波、采样误差及外部扰动等因素影响, 因而在复杂运行工况下仍存在抗干扰能力和判别稳定性不足的问题。

2) 基于单端量的保护新原理。现有基于单端量的保护新原理的研究主要分为改进后的距离保护和基于故障暂态信息的保护新原理。关于改进后的距离保护新原理的研究, 文献[18-20]以故障复合序网络为基础, 通过建立适用于不同故障的阻抗解析模型, 根据阻抗解析模型中的序电气量来判别输电线路的区内外故障。但不同故障类型需重新计算故障距离, 计算量大。文献[21]利用变分模态分解提取了故障

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(62101362)

通信作者: 廖建权(1994—), 男, 博士、副研究员、硕士生导师, 主要从事电力系统稳定分析与控制、直流输/配电系统保护与控制等方面的研究。jquanliao@scu.edu.cn

电流信号的特征,实时计算了线路两侧系统的阻抗比、电势比等参数,实时调整保护定值,但其对数据采样精度和频率要求较高,且未考虑噪声等干扰信号下算法的鲁棒性。关于基于故障暂态信息保护新原理的研究,文献[22]根据暂态高频网络,推导出暂态高频能量方向的特性,并以此作为保护判据,该方法无需信息交互且耐过渡电阻能力强,但高频信号的提取和分析所需的算法复杂且计算量大;文献[23]针对接地故障,利用首个零模行波和线模行波到达保护安装处的时间差异,提出基于行波信息的单端量保护;文献[24]指出行波波前表达式包含工频正弦项和直流衰减项,利用直流衰减项的指数系数仅受故障距离影响的特性,提出基于行波波前故障信息的保护原理,但是在高过渡电阻或噪声干扰下,行波信号可能会受到衰减或畸变,从而影响保护的可靠性。

综上,现有新能源交流送出线路的双端量及单端量保护方案改进了传统保护算法的可靠性和速动性,但无法兼顾灵敏性、可靠性与计算复杂度。除此之外,现有研究表明传统保护原理可能存在耐过渡电阻差^[25]、灵敏性下降^[26]、方向元件无法正确判断^[27]等问题。为进一步提升保护的灵敏性,基于动态状态估计的保护算法应运而生,因为动态状态估计不仅能够跟踪和预测新能源的实时输出,还能模拟电力电子设备的动态行为,从而提高系统的稳定性和可靠性。基于动态状态估计的方法可对输电线路进行故障定位和继电保护。文献[28]提出基于动态状态估计的故障定位方法,通过实验验证了在不同故障类型、位置和阻抗情况下该方法比传统的故障定位方法具有更高的精度;文献[29-30]对基于动态状态估计的方法在不同故障类型和条件下进行了性能评估,实验验证了该方法的选择性和速动性,避免了复杂的继电器设置和协调,可以大大减少因继电器设置错误而导致的误操作。但是上述基于动态状态估计的保护方法中均采用加权最小二乘法,虽然该方法估计质量和收敛性较好,但是使用内存较多,计算量较大,且加权最小二乘方法的鲁棒性取决于权重矩阵的参数,选取具有主观性。文献[31]提出一种免疫异常数据的直流配电线路状态估计保护方法,利用窗口图傅里叶变换对异常数据进行剔除,根据估计模型和实测模型的匹配度构建保护判据,实现了区内和区外故障的识别,但新能源交流送出线路的故障电流通常具有非工频特性、幅值有限且受控制策略影响较大,涉及多个窗口傅里叶变换时计算复杂度较高;文献[32]建立了考虑线路分布电容的精确线路模型,根据实时电气量采样与模型匹配程度判别区内外故障,提出基于状态估计的大规模新能源送出线路纵联保护原理,该保护原理不受线路分布电容、弱馈侧电源、换流器控制特性等因素影响,但其未考虑异常数据下的算法鲁棒性。

针对以上问题,本文首先揭示传统电流差动保护在光伏电站送出线路保护中的局限性。在此基础上,提出不受电源和故障类型影响的动态状态估计保护方法,并利用最大熵高斯核函数的非线性建模能力和平滑决策边界特性,使动态状态估计保护方法不受异常值的干扰。通过 Matlab/Simulink 平台仿真验证,结果表明在光伏电站送出线路发生不同位置故障、不同过渡电阻故障以及不同类型故障时,所提方法均能保持较高的可靠性、灵敏性和鲁棒性。

1 光伏并网系统保护性能分析

1.1 光伏并网系统

光伏并网系统的核心组件包括光伏组件、逆变器、并网接口以及监控和保护装置。光伏并网系统的拓扑结构主要有集中式^[33]和分布式^[34]两种类型,本文以集中式光伏电站为研究对象,其控制结构主要有功率外环、低电压穿越控制和正负序电流控制,如图 1 所示。该光伏电站由单个 2 MW 的光伏逆变器聚合而成,功率在 1000 MW 内可调,控制策略设置为抑制负序电流。

光伏逆变器通过升压变以 Dyn 形式并网,当送出线路发生短路故障时仅输出正序电流,其表达式为^[33]:

$$i_f(t) = \sqrt{i_d^{+2} + i_q^{+2}} \cos \left[\omega t + \theta_v + \arctan \left(\frac{i_q^+}{i_d^+} \right) \right] + \frac{\sqrt{(i_{d0}^+ - i_d^+)^2 + i_q^{+2}}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \frac{e^{-\xi \omega_s t} \sin(\omega_d t + \eta)}{\omega_d} \cos \left[\omega t + \theta_v + \arctan \left(\frac{i_q^+}{i_d^+ - i_{d0}^+} \right) \right], \quad t \geq t_0 \quad (1)$$

式中: i_d^+ —— d 轴正序电流指令,A; i_q^+ —— q 轴正序电流指令,A; θ_v ——故障初相角,rad; ξ ——二阶系统阻尼比; ω_n ——二阶系统自然振荡角频率,rad/s; ω_d ——阻尼振荡频率,rad/s; η ——阻尼角。

i_d^+ 、 i_q^+ 决定有功、无功输出:

$$\begin{cases} i_q^+ = \min \{ 1.5(0.9 - U_d^+), 1 \} \\ i_d^+ = \sqrt{\psi^2 - i_q^{+2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_d^+ ——并网点正序电压 d 轴分量,V; ψ ——限幅倍数,通常为 1.2~1.5。

由式(1)可知,故障暂态期间,受锁相环动态影响,逆变器电源的输出电流角频率会偏离工频角频率,输出电流主要包含非工频衰减正弦波与非工频正弦波。由图 2 和式(2)可知,稳态后逆变器侧电流幅值通常限制在额定值的 1.2~1.5 倍;电流相角稳定在工频附近,并主要由故障时刻并网点电源初相角和 dq 轴电流参考值决定,而传统同步机电流幅值通常为额定值的几倍甚至数十倍。

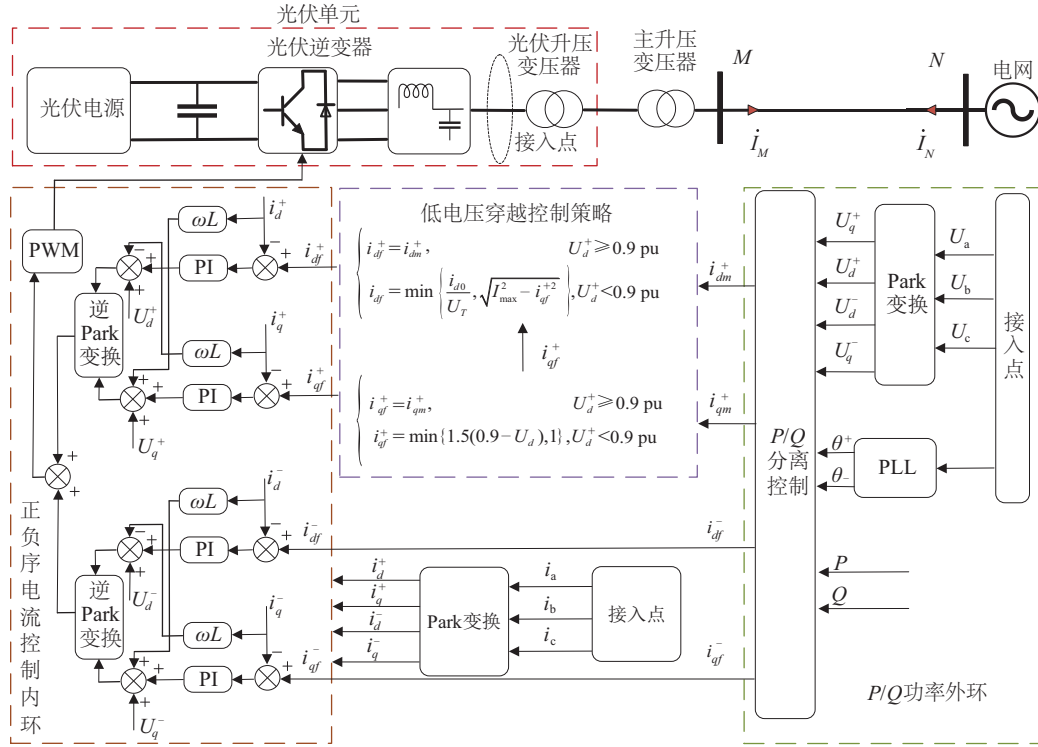


图1 集中式光伏并网系统及控制结构

Fig. 1 Centralized PV grid-connected system and control structure

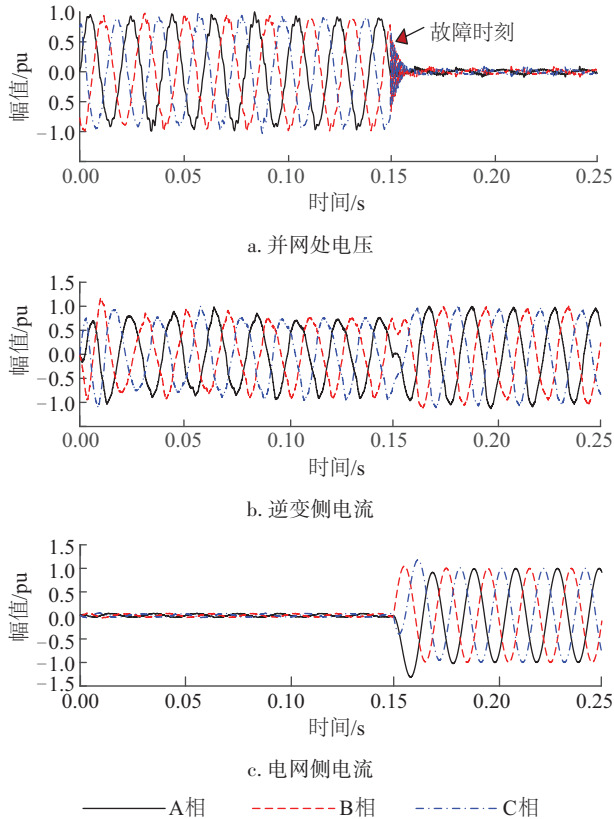


图2 并网点电压、两侧故障电流波形

Fig. 2 Grid connection point voltage and fault current waveforms on both sides

1.2 传统电流差动保护性能分析

对于线路MN,传统的比率制动电流差动保护判据为:

$$|\dot{I}_M + \dot{I}_N| > K |\dot{I}_M - \dot{I}_N| \quad (3)$$

式中: $\dot{I}_M$ ——线路M侧电流, A; $\dot{I}_N$ ——线路N侧电流, A; K ——制动系数,其典型的取值范围为0.5~0.8。

令 $\dot{\gamma} = \dot{I}_N / \dot{I}_M$, 则式(3)可变为:

$$|1 + \dot{\gamma}| > K |1 - \dot{\gamma}| \quad (4)$$

为在复平面上直观反映出动作保护区与 K 的关系,假设 $\dot{\gamma} = \dot{I}_N / \dot{I}_M = a + jb$, 则由式(4)可推导出:

$$\left(a + \frac{1 + K^2}{1 - K^2}\right)^2 + b^2 > \left(\frac{2K}{1 - K^2}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{1 + K^2}{1 - K^2} - \frac{2K}{1 - K^2} = \frac{(1 - K)^2}{1 - K^2} > 0, K \in (0.5, 0.8) \quad (6)$$

式(5)表示在复平面上以 $\left(-\frac{1 + K^2}{1 - K^2}, 0\right)$ 为圆心, 半径 $r = \frac{2K}{1 - K^2}$ 圆的外部。图3中阴影圆之外为动作区, 之内为制动区。

由式(6)可知, 制动区在复平面虚轴的左侧, $\alpha > 90^\circ$ 如图3所示, 当两侧电流夹角在 $(-\alpha, \alpha)$ 之间时, 保护动作。不同制动系数 K 对应的式(5)所表示的制动区如图4所示。随着制动系数的增大, 制动区增大, 圆越靠近虚轴, α 越来越

接近 90° , 致使 α 范围可能在 $(90^\circ, 120^\circ)$ 之间, 即传统电流差动保护的可靠性和灵敏性无法同时兼顾。

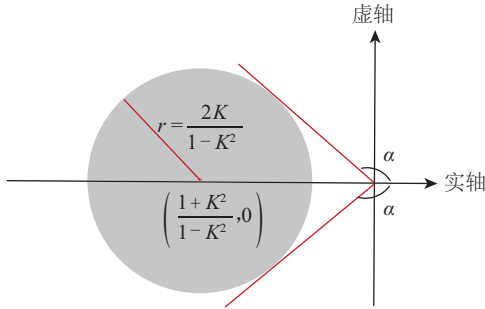


图3 复平面上的电流差动保护动作区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of current differential protection action area on complex plane

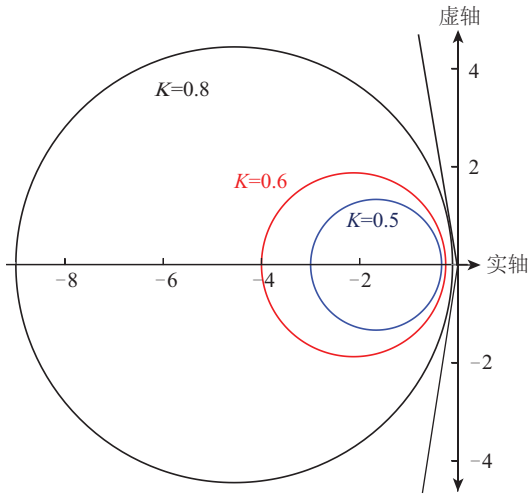


图4 不同K值时的差动保护动作区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of differential protection action area at different K values

传统电流差动保护判据式(3)是通过 M 、 N 侧故障电流的幅值与相位和制动系数进行故障判别的, M 侧故障电流的幅值受限, 通常为额定值的 1.2~1.5 倍, 而当并网系统为强电网时, N 侧故障电流的幅值将变为额定值的数十倍。因此, 本节取 $|\dot{\gamma}|=0.08$ 和 0.6 分别代表强电网环境和弱电网环境下的 M 、 N 侧故障电流的幅值之比, 做出不同制动系数 K 下的保护判据以及强、弱电网环境下的两侧故障相电流复平面分析图, 如图 5 所示。由图 5 可知, 在弱电网环境下, 两侧故障电流相位位于图 5 中所示拒动区域内时, 传统电流差动保护判据无法可靠保护送出线路; 在强电网环境下, 随着制动系数的增大, 传统电流差动保护的灵敏性降低。

综上, 随着新能源规模化的接入, 并网环境逐渐从强电网向弱网过渡, 传统电流差动保护无法准确动作。而基于动态状态估计的保护方法不受电源和故障类型的影响, 故用该方法来保护光伏电站送出线路。

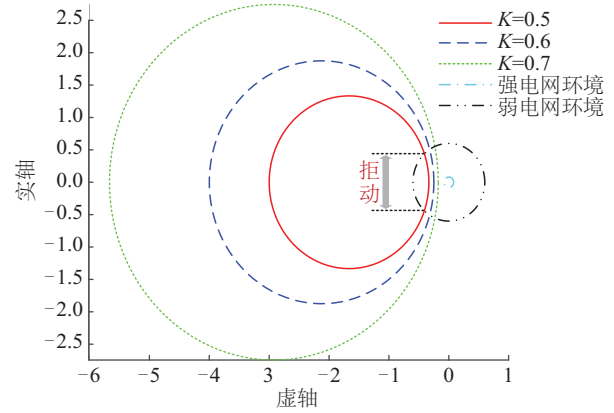


图5 传统电流差动保护适应性分析复平面图

Fig. 5 Complex plane diagram of adaptability analysis of traditional current differential protection

2 基于鲁棒动态状态估计的输电线路保护原理

2.1 简介

基于动态状态估计的输电线路保护, 可看作广义的差动保护。状态估计基于输电线路基尔霍夫定律等物理定律, 通过 2.2.1 节中的系数矩阵 H (已知的正常状态下线路的参数矩阵), 可由输电线路两侧的量测值 z 得到估计出的状态量 x , 再通过基尔霍夫定律得到估计值 z , 若输电线路正常, 则系数矩阵 H 不变, 两者相同; 若输电线路故障, 系数矩阵 H 不满足故障时的基尔霍夫定律, 估计值 z 与量测值不同。动态状态估计方法运用于由量测值 z 求状态量 x 的过程中, 现有的动态状态估计方法无法解决量测数据含有较大异常值时估计结果不准确这一问题, 故在 2.2.2 节中提出具有良好鲁棒性的递归最大熵动态状态估计方法。

2.2 基于递归最大熵状态估计算法的输电线路保护原理

2.2.1 输电线路动态模型

三相输电线路原理示意图如图 6 所示。图 6 中 R_i 、 G_i 、 L_i 、 C_i ($i=A, B, C$) 分别为三相的电阻、电导、电感和电容。将 M 、 N 两侧三相电流及 n 侧三相电压视为量测量, 即 $z=[i_A; i_B; i_C; i_a; i_b; i_c; v_a; v_b; v_c]$; 将 m 侧三相电压及流过电阻的各相电流视为估计量, 即 $x=[v_A; v_B; v_C; i_{dA}; i_{dB}; i_{dC}]$ 。

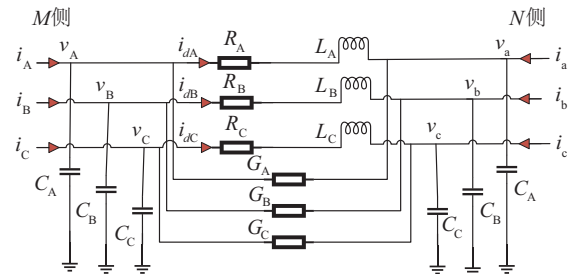


图6 三相输电线路原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of three-phase transmission line

由图 6 所示的输电线路关系,可得:

$$\begin{cases} v_a = v_A - R_A i_{dA} - L_A \frac{di_{dA}}{dt} \\ i_A + G_A v_a = i_{dA} + G_A v_A + C_A \frac{dv_A}{dt} \\ i_a - G_A v_a - C_A \frac{dv_a}{dt} = -i_{dA} - G_A v_A \\ v_b = v_B - R_B i_{dB} - L_B \frac{di_{dB}}{dt} \\ i_B + G_B v_b = i_{dB} + G_B v_B + C_B \frac{dv_B}{dt} \\ i_b - G_B v_b - C_B \frac{dv_b}{dt} = -i_{dB} - G_B v_B \\ v_c = v_C - R_C i_{dC} - L_C \frac{di_{dC}}{dt} \\ i_C + G_C v_c = i_{dC} + G_C v_C + C_C \frac{dv_C}{dt} \\ i_c - G_C v_c - C_C \frac{dv_c}{dt} = -i_{dC} - G_C v_C \end{cases} \quad (7)$$

可将式(7)中的方程归纳为:

$$P_1 z + P_2 \frac{dz}{dt} = Q_1 x + Q_2 \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

式中: P_1 、 P_2 、 Q_1 、 Q_2 ——输电线路参数组成的常数矩阵; z ——量测量; x ——状态量。

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -G_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -G_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -G_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -R_A & 0 & 0 \\ G_A & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -G_A & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -R_B & 0 \\ 0 & G_B & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -G_B & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -R_C \\ 0 & 0 & G_C & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -G_C & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -L_A & 0 & 0 \\ C_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -L_B & 0 \\ 0 & C_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -L_C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_C & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

在时间区间 $[t-k, t-k/2]$ 用二次积分 (quadratic integration, QI) 方法。QI 法对式(8)进行化简^[27], 可得:

$$\begin{bmatrix} z(t) \\ z\left(t - \frac{k}{2}\right) \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x(t) \\ x\left(t - \frac{k}{2}\right) \end{bmatrix} + C \quad (13)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} \frac{k}{6} P_1 + P_2 & \frac{2k}{3} P_1 \\ -\frac{k}{24} P_1 & \frac{k}{3} P_1 + P_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} \frac{k}{6} Q_1 + Q_2 & \frac{2k}{3} Q_1 \\ -\frac{k}{24} Q_1 & \frac{k}{3} Q_1 + Q_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$H_3 = \begin{bmatrix} \frac{k}{6} P_1 - P_2 \\ \frac{5k}{24} P_1 - P_2 \end{bmatrix}, H_4 = \begin{bmatrix} -\frac{k}{6} Q_1 + Q_2 \\ -\frac{5k}{24} Q_1 - Q_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: k ——QI 法的步长; $H = H_1^{-1} H_2$; $C = -C_1 [z(t-k/2)] - C_2 [x(t-k/2)]$, $C_1 = H_1^{-1} H_3$, $C_2 = H_1^{-1} H_4$, 其中 H_1 、 H_2 、 H_3 和 H_4 为系数矩阵。

2.2.2 递归最大熵状态估计算法原理

本节提出的递归最大熵状态估计算法 (recursive maximum correntropy state estimation algorithm, RMCSE) 采用递归的形式计算状态量, 大大减小了计算复杂度。与递归最小二乘法 (recursive least squares algorithm, RLS) 相比, RMCSE 算法通过采用最大熵高斯核函数^[35], 能够捕捉非高斯条件下随机变量的高阶统计信息^[36-37]和最大相关熵准则的鲁棒性^[38-39], 可有效抵御噪声和异常值的干扰, 能极大提高状态估计结果的鲁棒性。以下是递归最大熵状态估计算法原理推导过程。

为度量两个随机变量 d 和 y 的相似度, 定义高斯核相关函数:

$$E[\kappa_\beta(d, y)] = E\left[\exp\left(-\frac{(d-y)^2}{2\beta^2}\right)\right] \quad (17)$$

式中: β ——熵函数的核大小。

本节中, 目标函数被认为是 $d[k]$ 与 $y[k]$ 之间的熵函数, 用遗忘因子 λ 对其进行加权, 即:

$$J_{\text{RMC}}(X[n]) = \sum_{k=0}^n \lambda^{n-k} \exp\left(-\frac{(d[k] - y[k])^2}{2\beta^2}\right) \quad (18)$$

式中: $y[k] = W^T[n] X[k]$; $e[k] = d[k] - y[k]$ 。

求 $J_{\text{RMC}}(X[n])$ 相对于 $X[n]$ 的梯度:

$$\frac{\partial J_{\text{RMC}}(X[n])}{\partial X[n]} = \frac{1}{\beta^2} \sum_{k=0}^n \left\{ \lambda^{n-k} \exp\left(-\frac{e[k]^2}{2\beta^2}\right) \cdot \right. \quad (19)$$

$$\left. (d[k]W^T[k] - W[k]W^T[k]X[n]) \right\}$$

为得到最优状态量,令式(19)等于 0,则:

$$\sum_{k=0}^n \lambda^{n-k} g[k] d[k] W^T[k] = \sum_{k=0}^n \lambda^{n-k} g[k] \cdot W[k] W^T[k] X[n] \quad (20)$$

$$\text{其中: } g[k] = \exp\left(-\frac{e[k]^2}{2\beta^2}\right).$$

为简化式(20),令:

$$\begin{cases} F[n] = \sum_{k=0}^n \lambda^{n-k} g[k] d[k] W^T[k] \\ \Phi[n] = \sum_{k=0}^n \lambda^{n-k} g[k] W[k] W^T[k] \end{cases} \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)可得最优向量 $X[n]$:

$$F[n] = \Phi[n] X[n] \quad (22)$$

$$X[n] = \Phi^{-1}[n] F[n] \quad (23)$$

由于求逆操作计算量大,因此对 $\Phi[n]$ 进行递归处理:

$$\Phi[n] = \sum_{k=0}^n \lambda^{n-k} g[k] W[k] W^T[k] \quad (24)$$

$$= \lambda \Phi[n-1] + g[n] W[n] W^T[n]$$

$$\Phi^{-1}[n] = (\lambda \Phi[n-1] + g[n] W[n] W^T[n])^{-1} \quad (25)$$

根据矩阵反转引理,可得:

$$\Phi^{-1}[n] = \lambda^{-1} \Phi^{-1}[n-1] - \quad (26)$$

$$\lambda^{-1} k[n] W^T[n] \Phi^{-1}[n-1]$$

$$k[n] = \frac{\lambda^{-1} \Phi^{-1}[n-1] g[n] W[n]}{1 + \lambda^{-1} W^T[n] \Phi^{-1}[n-1] g[n] W[n]} \quad (27)$$

由式(27)可得:

$$k[n] = \lambda^{-1} \Phi^{-1}[n-1] g[n] W[n] - \quad (28)$$

$$\lambda^{-1} k[n] W^T[n] \Phi^{-1}[n-1] g[n] W[n]$$

由式(26)和式(28),可得:

$$k[n] = \Phi^{-1}[n] g[n] W[n] \quad (29)$$

由式(17)~式(29)可知,状态量 $X[n]$ 的递归迭代形

式为:

$$\begin{aligned} X[n] &= \Phi^{-1}[n] F[n] \\ &= \Phi^{-1}[n] (\lambda F[n-1] + g[n] d[n] W^T[n]) \\ &= X[n-1] - k[n] W^T[n] X[n-1] + k[n] d[n] \\ &= X[n-1] + k[n] (d[n] - W^T[n] X[n-1]) \end{aligned} \quad (30)$$

本文仿真验证中选取绝对平均误差 J 作为目标函数,用于衡量模型预测值与实际量测量之间差异程度。

$$J = \sum_{i=1}^l \frac{|z_i - y_i|}{l} \quad (31)$$

式中: l ——样本容量; z_i ——第 i 个样本的实际量测量; y_i ——第 i 个样本的模型预测值。

2.3 基于递归最大熵状态估计算法的输电线路保护判据

如图 4 所示,输电线路的动态模型已知,即使量测量含有大量噪声和较大异常值也可通过式(13)、式(30)计算得到状态量 x 。式(13)中的 H 是输电线路无故障时的线路参数矩阵,满足正常运行状态下的基尔霍夫定律。若发生区内故障,再用正常状态下的输电线路参数矩阵 H 进行计算状态量,此时的计算结果不准,即违背了输电线路无故障时的物理规律。若发生区外故障,此时输电线路的参数矩阵是不发生改变的,量测量与状态量依然满足式(13),即校验线路两端电气量与所建立的输电线路动态模型是否匹配,对两侧电流的幅值和相位没有要求。

目标函数值 J 因异常值而波动,为使目标函数值更加清晰简洁,本文对目标函数 J 进行平滑处理,得到与目标函数 J 趋势相同的置信函数 J_{st} 。当送出线路发生区内故障时,估计值与实测值相差较大,置信函数 J_{st} 会明显增大。当送出线路发生区外故障时,估计值和实测值相差较小,在算法误差范围之内,置信函数 J_{st} 保持在某一数值水平。因此可设置一个合适的门槛值 J_{set} 判断区内、外故障,构造保护原理为:

$$J_{\text{st}} > J_{\text{set}} \quad (32)$$

本文通过对送出线路长为 100 km,系统电压为 220 kV 的光伏电站并网系统进行仿真,由仿真经验可得,异常值的干扰程度不同、故障情况不同对应的阈值会不同,但区内故障时的阈值始终明显大于区外故障阈值,据此保护可靠动作。在本文所搭建的光伏电站并网系统中, v_{abc} 的估计值占主导地位,置信函数 J_{st} 阈值应取其同一数量级,送出线路发生故障时,阈值应取其 10%~15%;过渡电阻每增加 500 Ω 阈值应减少 3%~5%;加入与 v_{abc} 同数量级的异常值,阈值才会显著改变。

2.4 保护算法实现

所提保护算法流程图如图 7 所示。基于递归最大熵状态估计算法的输电线路保护的具体实现步骤为:

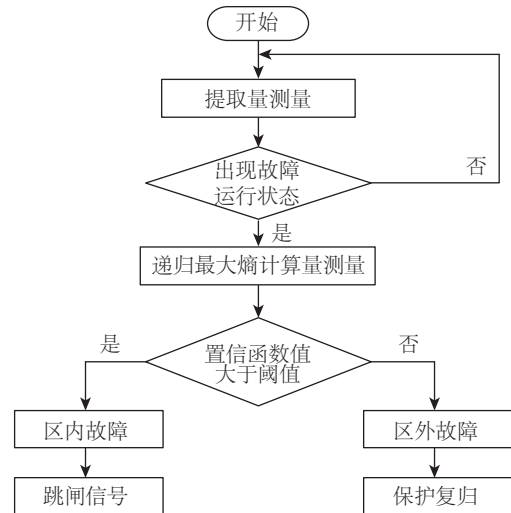


图 7 基于 RMCSE 算法的输电线路保护流程图

Fig. 7 Transmission line protection flow chart based on RMCSE algorithm

1)采集量测量 z ;

2)将含有噪声和异常值的量测量代入式(13)和式(30)计算,得到状态估计量 $\hat{x}$,再通过状态估计量 $\hat{x}$ 进行基尔霍夫定律计算出 $\hat{z}$ 的估计值;

3)根据置信函数 J_{st} 以及 $\hat{x}$ 的实测值和估计值的波形图,判别送出线路发生的区内外故障。

3 仿真验证与分析

为验证本文所提保护方法的正确性,在 Matlab/Simulink 中搭建集中式光伏电站并网系统故障模拟示意图,如图 8 所示。在不同电网强度下进行故障仿真验证,3.1 节和 3.2 节并网系统为强电网,3.3 节并网系统为弱电网,本文通过改变阻抗值大小来模拟系统电网的强弱。仿真系统包括跟网型逆变器、变压器、传输线,传输线路由 6 个 π 型输电线路模型(每个 π 截面对应 220 kV 线路的 50 km)构成,图 8 示意了一个 π 型截面图。仿真中考虑的各部件的参数值如表 1 所示。仿真运行 0.3 s,量测采样率取 5×10^{-5} 。Simulink 中采集的模拟量测数据统一保存至 Matlab 工作空间,并作为基于递归最大熵的输电线路保护算法输入。随后,将模拟实测值与状态估计值进行比较。

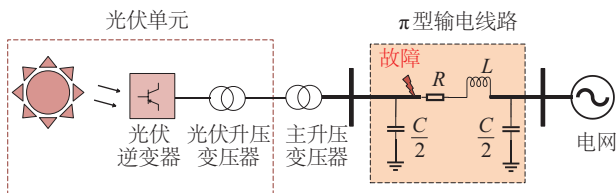


图 8 集中式光伏电站并网系统故障模拟示意图

Fig. 8 Schematic diagram of fault simulation of centralized PV station grid-connected system

表 1 仿真组组件参数及数值

Table 1 Parameters and values of simulation group components

组件参数	数值
系统电压/kV	220
系统频率/Hz	50
光伏升压变压器变比/kV	0.38/35
主变压器变比/kV	35/220
π 型线路模型	
线路电阻/ Ω	12.84
线路电感/mH	10
线路电容/F	4.3×10^{-7}

3.1 算法有效性验证

当系统在区内外发生三相短路故障且过渡电阻为 0Ω 时,未加入异常值的三相模拟量测值及其用 RMCSE 算出的

估计值如图 9 所示,对应下的 RMCSE 算法的置信函数如图 10 所示。由图 9a 可看出,在正常状态下,实测值和估计值一致,而在发生故障时,实测值与估计值存在较大差异,这是因为发生故障后线路结构参数发生变化,无法满足正常状态下的物理规律。

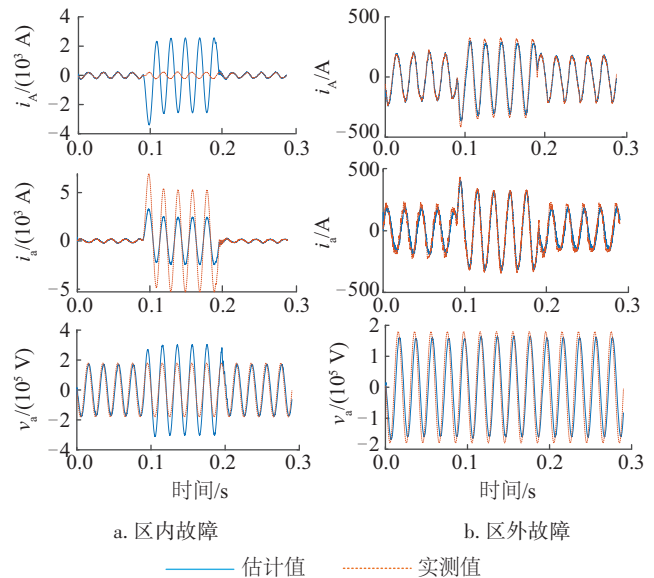


图 9 三相短路故障时 RMCSE 算法的模拟量测值及其估计值

Fig. 9 Simulated measurement and estimated values of RMCSE algorithm for three-phase short circuit fault

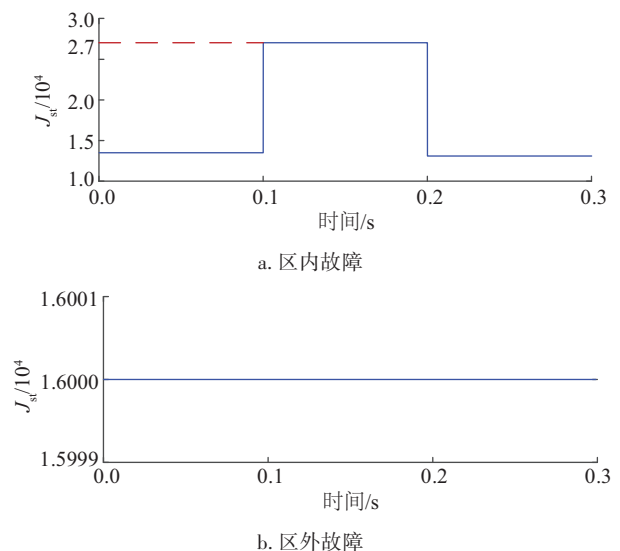


图 10 区内外三相短路故障时 RMCSE 算法的置信函数

Fig. 10 Confidence function of RMCSE algorithm for internal and external three-phase short-circuit faults

由图 9a 和图 9b 可知,发生区内故障时估计值与实测值相差较大,而发生区外故障时估计值与实测值的波形图吻合。由图 10a 和图 10b 可知,发生区内故障时置信函数值会骤然增大,而发生区内故障时目标函数值保持在同一水平。

因此,由 RMCSE 算法得到的估计值与实测值的波形图和置信函数可明显识别送出线路的区内外故障情况,验证 RMCSE 算法的有效性。

3.2 算法鲁棒性验证

3.1 节中的模拟量测数据仅含噪声并未加入异常值,但实际工程中量测的数据会有误差,因此得到的数据是含有噪声甚至含有异常值的。而噪声会导致状态估计的估计精度降低、收敛速度变慢,异常值会引起严重的估计偏差、估计值大幅波动。因此,如何在含有大量噪声和异常值的情况下仍能保持良好的估计结果是保护送出线路的关键。本文所提出的递归最大熵状态估计算法能很好地解决这一问题,尽管量测数据含大量噪声和较大异常值,该算法仍能得到良好的估计结果。本节模拟量测数据皆含有大于量测数据数量级的异常值,以此对算法的鲁棒性进行验证。

3.2.1 不同过渡电阻下的算法鲁棒性验证

短路时的阻抗过高可能导致短路电流不足以触发某些保护装置,从而影响系统的安全性,故本节在过渡电阻为 1、5、600 和 1500 Ω 的情况下分别对系统进行三相短路故障仿真,以此验证算法的灵敏性与鲁棒性。不同过渡电阻时, RMCSE 算法得到的估计值与实测值的波形图如图 11 所示,其所对应的置信函数如图 12 所示。由图 11 可知,在过渡电阻为 1、5、600 和 1500 Ω 工况下,送出线路在 0.1~0.2 s 发生短路故障;其与图 12 所示的置信函数变化情况相符。当过渡电阻超过 600 Ω 时,由于算法精度有限,无法从电压的波形图辨认是否发生故障,但可由短路电流的波形图以及置信函数判断出是否发生区内故障;经过大量仿真验证,所提算法最多能承受 1500 Ω 的过渡电阻。

因此,基于 RMCSE 算法的线路保护方法不仅能清楚识别送出线路是否发生高阻抗故障,提高保护的灵敏性;而且在较大异常值的干扰下,仍具有良好的估计结果,表现出较强的鲁棒性。

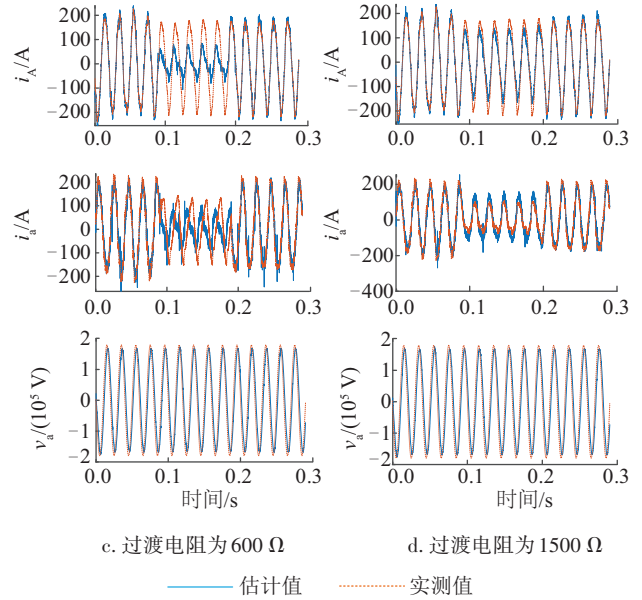
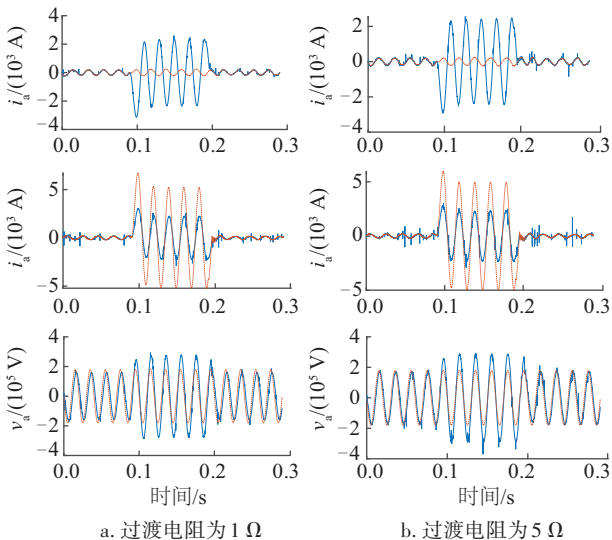


图 11 不同过渡电阻下 RMCSE 算法的模拟量测值及其估计值
Fig. 11 Simulated measurement and estimated values of RMCSE algorithm for different transition resistances

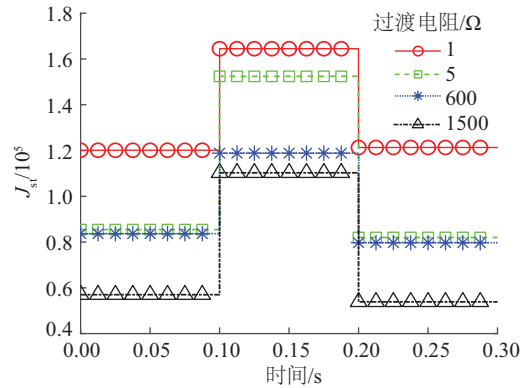


图 12 不同过渡电阻下 RMCSE 算法的置信函数
Fig. 12 Confidence function of RMCSE algorithm for different transition resistances

3.2.2 不同故障位置下的算法鲁棒性验证

本节在送出线路的首、末端临界处进行三相短路故障仿真,旨在验证所提方法是否存在保护死区问题。

当送出线路首末两端临界处发生故障时,由 RMCSE 算法所得到的估计值与实测值的波形图如图 13 所示,其所对应的置信函数如图 14 所示。由图 13 可知,尽管故障发生在送出线路首末两端临界处,但是 RMCSE 算法仍可清楚识别送出线路在 0.1~0.2 s 发生短路故障,与图 14 所示的置信函数变化情况相符。故 RMCSE 算法不仅具有良好的鲁棒性,且送出线路首末两端临界处不存在死区问题,提高了保护的可靠性与安全性。

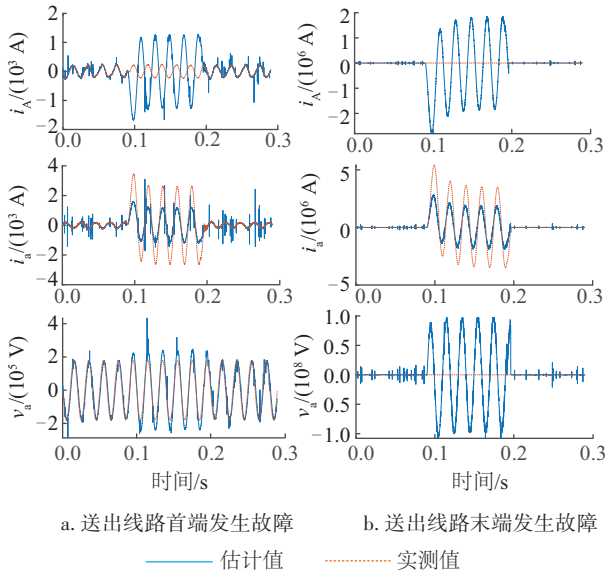


图 13 送出线路首末端故障时 RMCSE 算法的模拟量测值及其估计值

Fig. 13 Simulated measurement and estimated values of RMCSE algorithm for faults of transmission line at both ends

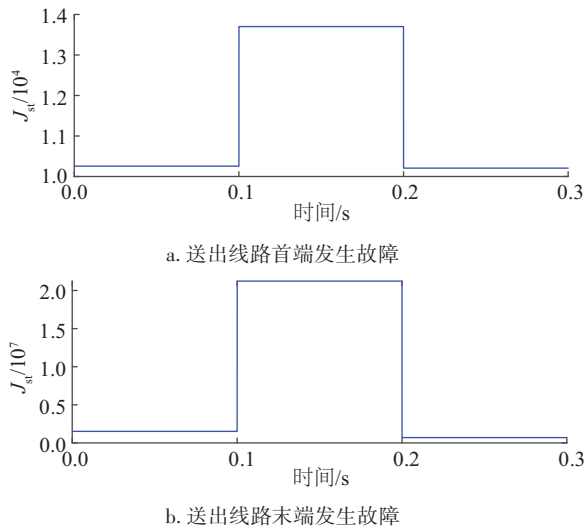


图 14 不同故障位置下 RMCSE 算法的置信函数

Fig. 14 Confidence function of RMCSE algorithm for different fault sites

3.2.3 不对称故障下的算法鲁棒性验证

本节对系统进行两相短路故障和单相接地故障仿真,两相短路故障以 AB 相为例,单相接地故障以 A 相为例,旨在验证所提算法的可靠性。当系统发生 AB 两相短路故障和 A 相接地故障时,由 RMCSE 算法所得到的估计值与实测值的波形图如图 15 所示,其所对应的置信函数如图 16 所示。由图 15 可知,当系统发生不对称故障时,估计值与实测值相差甚远,其所呈现的波形图甚至完全相反,其与图 16 所示的置信函数变化情况相符。因此, RMCSE 算法不仅具有良好的鲁棒性,且能明显识别不对称故障,证明了该算法的可靠性与有

效性。

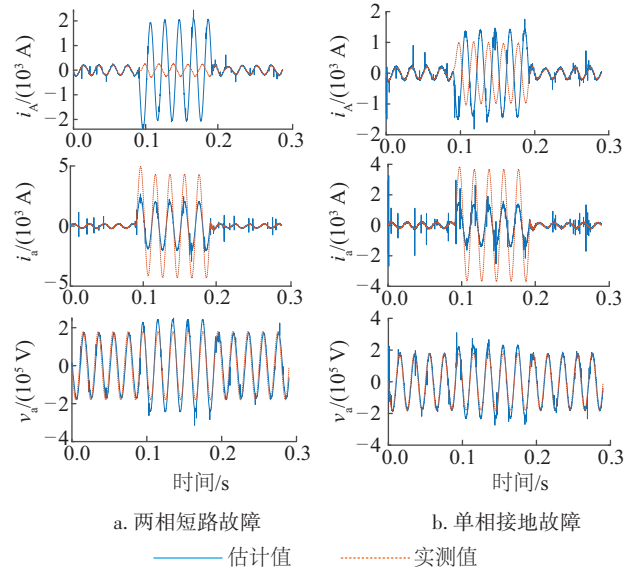


图 15 不对称故障下 RMCSE 算法的模拟量测值及其估计值

Fig. 15 Simulated measurement and estimated values of RMCSE algorithm for asymmetric faults

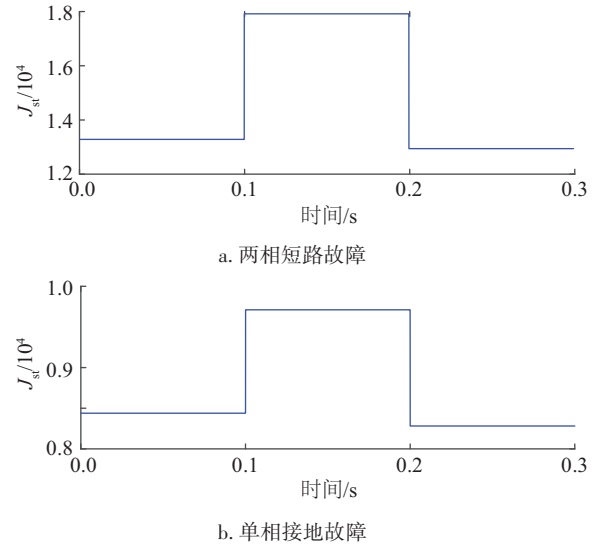


图 16 不对称故障下 RMCSE 算法的置信函数

Fig. 16 Confidence function of RMCSE algorithm for asymmetric faults

3.3 不同算法对比

本节在三相短路故障、两相短路故障、两相接地短路故障以及单相接地短路故障下,分别用 RLS 算法和 RMCSE 算法进行动态状态估计,通过对比动态状态估计算法和传统电流差动保护算法的仿真结果,旨在证明所提算法优越的鲁棒性。

3.3.1 三相短路故障

由图 17 可知,传统电流差动保护在弱电网环境下送出线路发生三相短路故障时会误动作,且量测数据含有较大异

常值时误动作更加频繁;由图 18a 和图 18d 可知,基于 RLS 算法的动态状态估计结果可清楚识别送出线路是否发生三相短路故障;由图 18b 和图 18e 可知,受异常值的干扰,波形图和置信函数都无法判断送出线路是否发生三相短路故障;由图 18c 和图 18f 可知,基于 RMCSE 算法得到的波形图和置信函数可清楚识别送出线路是否发生三相短路故障。

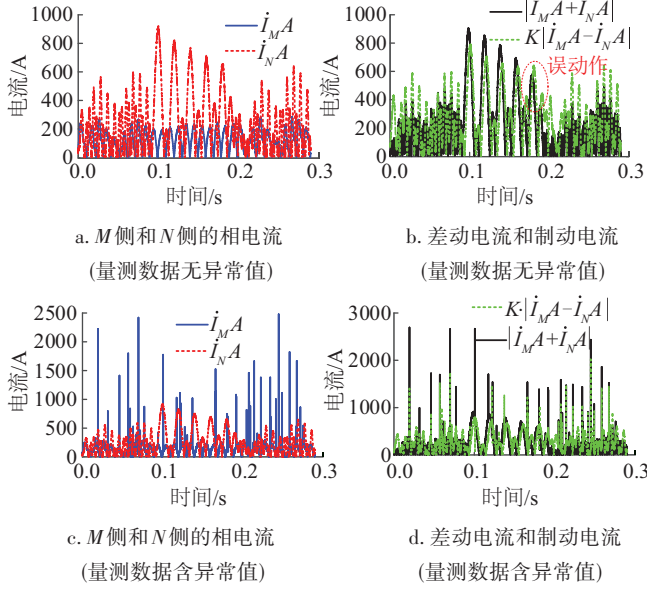


图 17 传统电流差动保护在弱电网环境下的三相短路故障

Fig. 17 Simulation of three-phase short-circuit fault of traditional current differential protection in weak power grid

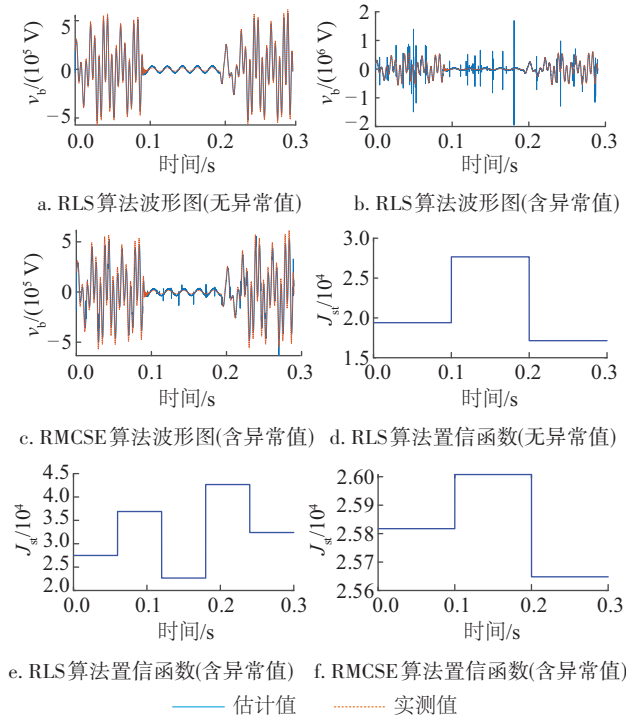


图 18 弱电网下的 RLS 和 RMCSE 三相短路故障

Fig. 18 Simulation of RLS and RMCSE three-phase short-circuit fault in weak power grid

3.3.2 两相短路故障

两相短路故障以 AB 相为例。由图 19 可知,传统电流差动保护在弱电网环境下送出线路发生两相短路故障时会误动作。

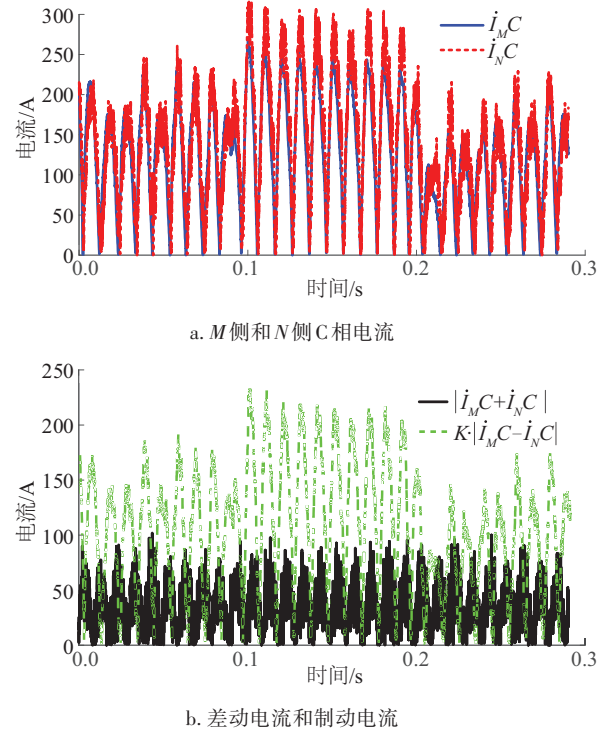
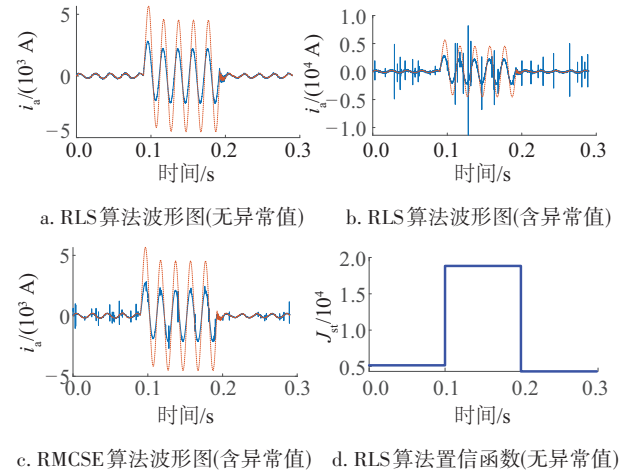


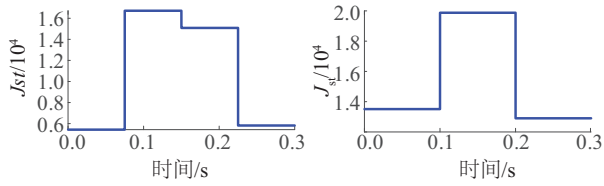
图 19 传统电流差动保护在弱电网环境下的两相短路故障

Fig. 19 Simulation of two-phase short-circuit fault of traditional current differential protection in weak power grid

由图 20a 和图 20d 可知,基于 RLS 算法的动态状态估计结果可以清楚识别送出线路是否发生两相短路故障;由图 20b 和图 20e 可知,受异常值的干扰,波形图和置信函数都无法判断送出线路是否发生两相短路故障;由图 20c 和图 20f 可知,基于 RMCSE 算法得到的波形图和置信函数可以清楚识别送出线路是否发生两相短路故障。



c. RMCSE 算法波形图(含异常值) d. RLS 算法置信函数(无异常值)



e. RLS算法置信函数(含异常值) f. RMCSE算法置信函数(含异常值)
— 估计值 — 实测值

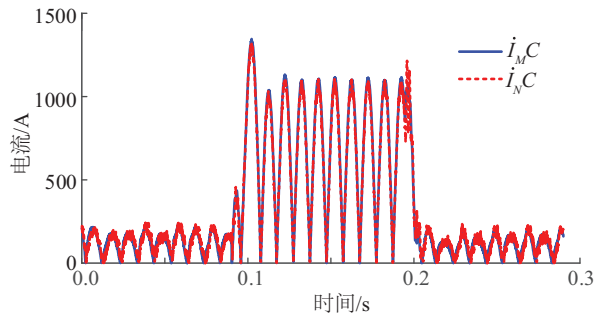
图20 弱电网下的RLS和RMCSE两相短路故障

Fig. 20 Simulation of RLS and RMCSE two-phase short-circuit fault in weak power grid

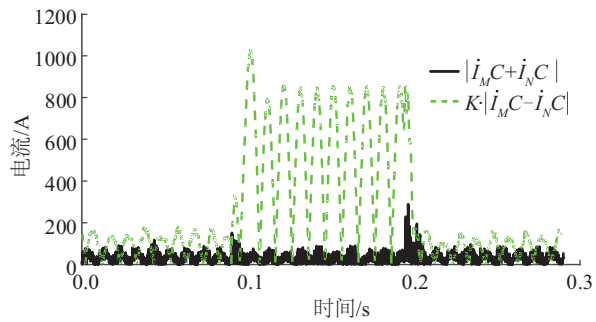
3.3.3 两相接地短路故障

两相接地短路故障以AB相为例。由图21可知,传统电流差动保护在弱电网环境下送出线路发生两相接地短路故障时会误动作。

由图22a和图22d可知,基于RLS算法的动态状态估计结果可以清楚识别送出线路是否发生两相接地短路故障;由图22b和图22e可知,受异常值的干扰,波形图和置信函数都无法判断送出线路是否发生两相接地短路故障;由图22c和图22f可知,基于RMCSE算法得到的波形图和置信函数可以清楚识别送出线路是否发生两相接地短路故障。



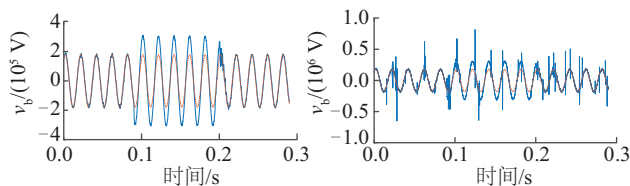
a. M侧和N侧C相电流



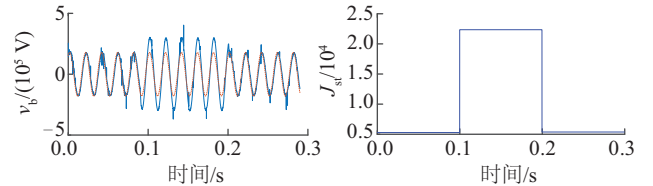
b. 差动电流和制动电流

图21 传统电流差动保护在弱电网环境下的两相接地短路故障

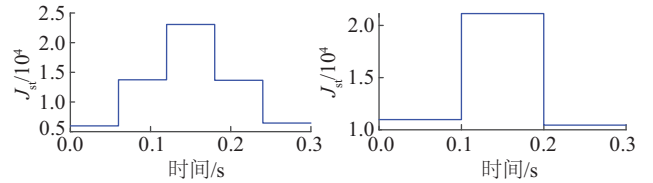
Fig. 21 Simulation of two-phase ground short-circuit fault of traditional current differential protection in weak power grid



a. RLS算法波形图(无异常值) b. RLS算法波形图(含异常值)



c. RMCSE算法波形图(含异常值) d. RLS算法置信函数(无异常值)



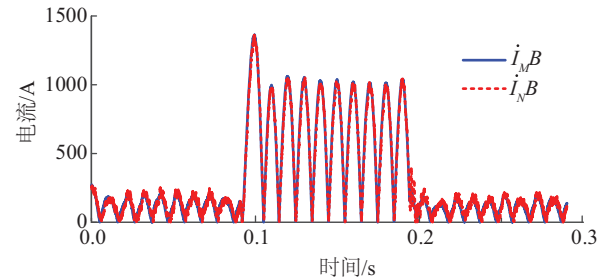
e. RLS算法置信函数(含异常值) f. RMCSE算法置信函数(含异常值)
— 估计值 — 实测值

图22 弱电网下的RLS和RMCSE两相接地短路故障

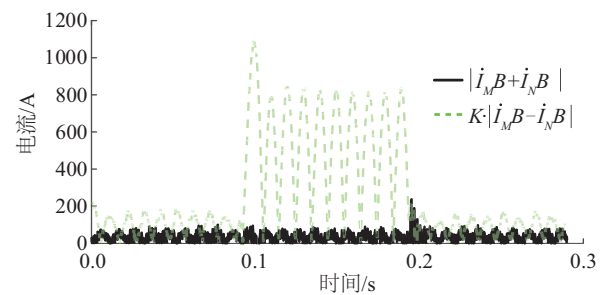
Fig. 22 Simulation of RLS and RMCSE two-phase ground short-circuit fault in weak power grid

3.3.4 单相接地短路故障

单相接地短路故障以A相为例。由图23可知,传统电流差动保护在弱电网环境下送出线路发生单相接地短路故障时会误动作;由图24a和图24d可知,基于RLS算法的动态状态估计结果可清楚识别送出线路是否发生单相接地短路故障;由图24b和图24e可知,受异常值的干扰,波形图和置信函数都无法判断送出线路是否发生单相接地短路故障;由图24c和图24f可知,基于RMCSE算法得到的波形图和置信函数可清楚识别送出线路是否发生单相接地短路故障。



a. M侧和N侧C相电流



b. 差动电流和制动电流

图23 传统电流差动保护在弱电网环境下的单相接地短路故障

Fig. 23 Simulation of single phase ground short-circuit fault of traditional current differential protection in weak power grid

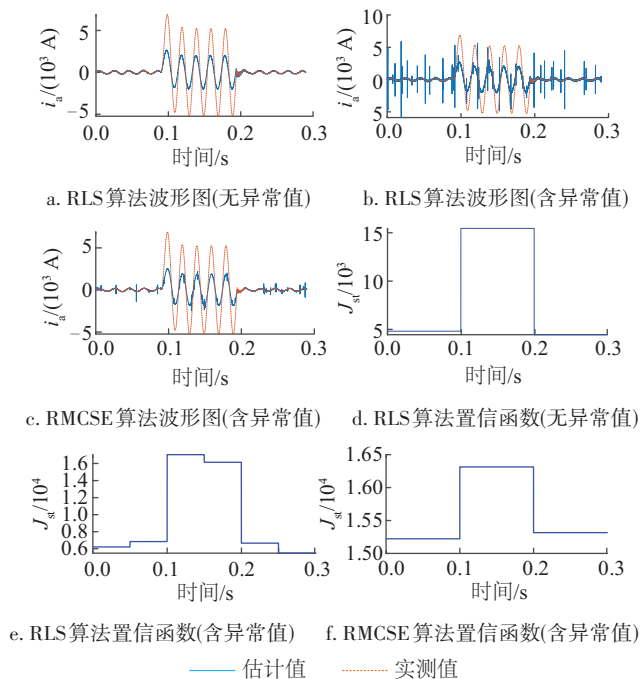


图 24 弱电网下的 RLS 和 RMCSE 单相接地短路故障

Fig. 24 Simulation of RLS and RMCSE single phase ground short-circuit fault in weak power grid

综上,当并网为弱电网,送出线路发生三相短路故障、两相短路故障、两相接地短路故障以及单相接地短路故障时,传统电流差动保护无法可靠动作,与 1.2 节的分析相符;基于动态状态估计的送出线路保护方法能够可靠识别弱电网环境下送出线路是否发生故障,其中 RLS 算法在量测数据含有异常值的场景下失效,故证明了所提算法的可靠性与鲁棒性。

4 结 论

本文针对于传统继电保护在新能源并网系统中存在故障特征认知难、保护性能适应差这一问题,分析传统电流差动保护的局限性。然后,在现有基于动态状态估计的输电线路保护的研究基础上,考虑较大的异常值对量测数据的影响,提出基于递归最大熵动态状态估计的光伏电站送出线路保护方法,并得到以下主要结论:

1) 传统电流差动保护方法在光伏并网系统中可能存在灵敏性较差、可靠性较低的问题且无法可靠保护光伏电站送出线路。

2) 基于 RLS 算法的状态估计在不受异常值干扰时可用于送出线路的保护,但该方法鲁棒性差,而 RMCSE 算法具有优越的鲁棒性。

3) 无论量测数据是否含有异常值,无论并网电网的强弱,基于 RMCSE 算法的状态估计均适用于送出线路的保护,证明该算法的有效性与鲁棒性,且该方法能可靠识别对称故障与非对称故障。

4) 在过渡电阻较大且量测数据含有较大的异常值时,基于 RMCSE 的送出线路保护方法仍能清楚识别是否发生故障,证明该方法灵敏性与鲁棒性较强,且该方法不存在死区问题。

[参考文献]

- [1] 孙华东,徐式蕴,许涛,等. 电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7796-7808.
SUN H D, XU S Y, XU T, et al. Research on definition and classification of power system security and stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7808.
- [2] 张烈,郭鹏,李仲青,等. 适应新型电力系统的继电保护综合评价方法[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1633-1644.
ZHANG L, GUO P, LI Z Q, et al. A comprehensive evaluation method for relay protection adapted to new electric power system [J]. Power system technology, 2024, 48(4): 1633-1644.
- [3] 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 Z P, LIN Y F, WANG T, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control [J]. Power system protection and control, 2023, 51(6): 10-20.
- [4] 国家能源局. 国家能源局发布 2025 年全国电力统计数据 [EB/OL]. <https://www.nea.gov.cn/20260129/6874f211acd0417eab7ac10c3061a7c2/c.html>.
National Energy Administration. National Energy Administration releases 2025 national electricity statistics [EB/OL] <https://www.nea.gov.cn/20260129/6874f211acd0417eab7ac10c3061a7c2/c.html>.
- [5] 郑玉平,吕鹏飞,李斌,等. 新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 3-15.
ZHENG Y P, LYU P F, LI B, et al. Problems faced by relay protection in new power system and their solution ideas [J]. Automation of electric power systems, 2023, 47(22): 3-15.
- [6] 李晖,刘栋,秦继朔,等. 考虑风光出力不确定性的新能源基地直流外送随机规划方法研究[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2795-2803.
LI H, LIU D, QIN J S, et al. Stochastic planning method for UHVDC transmission of renewable energy power base considering wind and photovoltaic output uncertainties [J]. Power system technology, 2024, 48(7): 2795-2803.
- [7] 徐恒山,王思维,张旭军,等. 基于 MODE 算法的光伏逆变器机电暂态模型 LVRT 控制方式与控制参数辨识

- 研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(11): 308-318.
- XU H S, WANG S W, ZHANG X J, et al. Research on LVRT control mode and control parameter identification of electromechanical transient model of PV inverter based on MODE algorithm [J]. Acta energiae solaris sinica, 2025, 46(11): 308-318.
- [8] 王继磊, 张兴, 韩峰, 等. 并网逆变器LVRT同步稳定性分析及其优化策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 309-317.
- WANG J L, ZHANG X, HAN F, et al. Synchronous stability analysis and optimization strategy of LVRT for grid-connected inverter [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(2): 309-317.
- [9] 于溯. 新能源交流送出线路保护适应性分析方法及新原理研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2024.
- YU S. Research on adaptability analysis method and new principle of new energy AC transmission line protection in renewable energy systems [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2024.
- [10] 刘一民, 王书扬, 李彬, 等. 逆变型新能源场站柔性直流送出系统交流线路差动保护灵敏性优化方案[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 63-69.
- LIU Y M, WANG S Y, LI B, et al. Sensitivity optimization scheme of AC line differential protection in MMC-HVDC system of inverter new energy station [J]. Electric power construction, 2022, 43(1): 63-69.
- [11] 郑黎明, 贾科, 侯来运, 等. 基于奇异值分解的海上风电接入柔直系统的交流线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊1): 75-83.
- ZHENG L M, JIA K, HOU L Y, et al. Singular value decomposition based protection for AC transmission lines of VSC-HVDC system with offshore wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 75-83.
- [12] 贾科, 杨哲, 朱正轩, 等. 基于电流幅值比的逆变型新能源场站送出线路T接纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 82-88.
- JIA K, YANG Z, ZHU Z X, et al. Pilot protection based on current amplitude ratio for teed line in inverter-interfaced renewable energy power plants [J]. Electric power automation equipment, 2019, 39(12): 82-88.
- [13] 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 CSEE, 2019, 39(21): 6263-6274.
- [14] ZHENG L M, JIA K, BI T S, et al. A novel structural similarity based pilot protection for renewable power transmission line [J]. IEEE transactions on power delivery, 2020, 35(6): 2672-2681.
- [15] 胡勇, 郑黎明, 贾科, 等. 基于Tanimoto相似度的光伏电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.
- [16] 余越, 王聪博, 樊沛林, 等. 基于差动电流能量比的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 851-857.
- YU Y, WANG C B, FAN P L, et al. Pilot protection based on energy ratio of differential current for outgoing line from renewable power plants [J]. Power system technology, 2024, 48(2): 851-857.
- [17] 余越. 新能源送出线路双端量保护原理及整定计算建模方法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2023.
- YU Y. Research on the principle and setting calculation modeling method of dual-end quantity protection for new energy transmission lines [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2023.
- [18] 晁晨棚, 郑晓冬, 邵能灵, 等. 针对新能源场站送出线两相短路的负序阻抗重构距离保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 101-109.
- CHAO C X, ZHENG X D, TAI N L, et al. Distance protection based on negative-sequence impedance reconstruction for phase-to-phase short circuit of renewable power plant transmission lines [J]. Automation of electric power systems, 2023, 47(22): 101-109.
- [19] 李斌, 周博昊, 何佳伟, 等. 直驱风电场送出线路的正序电压极化距离保护适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 16-24.
- LI B, ZHOU B H, HE J W, et al. Applicability analysis of distance protection with positive-sequence voltage polarization for transmission lines of wind farm with direct-driven turbines [J]. Automation of electric power systems, 2023, 47(22): 16-24.
- [20] 贾科, 杨哲, 赵其娟, 等. 适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3271-3279.
- JIA K, YANG Z, ZHAO Q J, et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission lines connected to renewable energy power plants [J]. Power system technology, 2019, 43(9): 3271-3279.
- [21] BISWAS S, NAYAK P K. A fault detection and classification scheme for unified power flow controller compensated transmission lines connecting wind farms [J]. IEEE systems journal, 2021, 15(1): 297-306.
- [22] 孔祥敏, 刘丽花, 张亮红, 等. 基于暂态高频能量的直驱风场汇集线路保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023,

- 51(4): 93-103.
- KONG X M, LIU L H, ZHANG L H, et al. Protection of a direct-driven wind farm collection line based on transient high-frequency energy [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(4): 93-103.
- [23] DA SILVA FRANCA R L, DA SILVA JUNIOR F C, HONORATO T R, et al. Traveling wave-based transmission line earth fault distance protection [J]. *IEEE transactions on power delivery*, 2021, 36(2): 544-553.
- [24] 张晨浩, 闫吉飞, 吕艺超, 等. 不依赖电源特性的交流线路单端量保护[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(22): 33-43.
- ZHANG C H, YAN J F, LYU Y C, et al. Single-ended protection for AC line independent of power source characteristics [J]. *Automation of electric power systems*, 2023, 47(22): 33-43.
- [25] 晁晨棚, 郑晓冬, 高飘, 等. 针对光伏电站送出线路不对称短路故障的自适应距离保护原理[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6681-6692.
- CHAO C X, ZHENG X D, GAO P, et al. Adaptive distance protection for transmission line of photovoltaic station during asymmetric short circuit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18): 6681-6692.
- [26] 赖逸洋, 王增平, 王彤. 电流差动保护在柔直接入的交流电网中适应性分析及改进措施研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 145-154.
- LAI Y Y, WANG Z P, WANG T. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(3): 145-154.
- [27] 牟锐, 何佳伟, 李斌, 等. 基于负序电流幅值的含光伏配电网两相短路故障方向判据[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(19): 148-161.
- MU R, HE J W, LI B, et al. Direction criterion for phase-to-phase short-circuit faults in distribution networks with photovoltaic based on negative-sequence current amplitude [J]. *Automation of electric power systems*, 2024, 48(19): 148-161.
- [28] GHAEDI A, HAMEDANI GOLSHAN M E, SANAYE-PASAND M. Transmission line fault location based on three-phase state estimation framework considering measurement chain error model [J]. *Electric power systems research*, 2020, 178: 106048.
- [29] SRIVASTAVA A, TUAN L A, STEEN D, et al. Transmission line protection using dynamic state estimation and advanced sensors: experimental validation [J]. *IEEE transactions on power delivery*, 2023, 38(1): 162-176.
- [30] SRIVASTAVA A, TUAN L A, STEEN D, et al. Dynamic state estimation based transmission line protection scheme: performance evaluation with different fault types and conditions [J]. *International journal of electrical power & energy systems*, 2023, 148: 108994.
- [31] 曾琦, 曾维刚, 廖建权, 等. 免疫异常数据的金属回流双极直流配电线路状态估计保护方法[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(1): 16-24.
- ZENG Q, ZENG W G, LIAO J Q, et al. State estimation protection method of metal return bipolar DC distribution line with immune abnormal data [J]. *Electric power automation equipment*, 2025, 45(1): 16-24.
- [32] 聂铭, 李猛, 和敬涵, 等. 基于状态估计的大规模新能源送出线路纵联保护[J]. *电网技术*, 2024, 48(5): 2189-2198.
- NIE M, LI M, HE J H, et al. Pilot protection of large-scale renewable energy transmission lines based on state estimation [J]. *Power system technology*, 2024, 48(5): 2189-2198.
- [33] 王少雄, 吕思辰, 吕飞鹏, 等. 基于Fréchet距离的集中式光伏电站送出线路纵联保护方法[J]. *电网技术*, 2025, 49(4): 1648-1657.
- WANG S X, LYU S C, LYU 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.
- [34] 杨鹏程, 冯启帆, 韦巍, 等. 分布式光伏电源分散式自适应主动频率支撑控制[J]. *电网技术*, 2025, 49(9): 3566-3576.
- YANG P C, FENG Q F, WEI W, et al. Decentralized adaptive frequency support control of distributed PV sources [J]. *Power system technology*, 2025, 49(9): 3566-3576.
- [35] XIE H, LIN J L, HUANG Z Y, et al. State of charge estimation of Li-ion batteries based on strong tracking adaptive square root unscented Kalman filter with generalized maximum correntropy criterion [J]. *Journal of energy storage*, 2025, 111: 115401.
- [36] DU G, SHENG Z M, LIU J G, et al. A novel hybrid model combining improved VMD and ELM with extended maximum correntropy criterion for prediction of dissolved gas in power transformer oil [J]. *Processes*, 2024, 12(1): 193.
- [37] LIU Z, ZHAO Z H, QIU Y, et al. Enhanced state of charge estimation for Li-ion batteries through adaptive maximum correntropy Kalman filter with open circuit voltage correction [J]. *Energy*, 2023, 283: 128738.
- [38] ZHANG K X, ZHAO X Z, CHEN Y, et al. Robust equivalent circuit model parameters identification scheme for state of charge (SOC) estimation based on maximum correntropy criterion [J]. *International journal of electrochemical science*, 2024, 19(5): 100558.

- [39] YI S, ZHENG S, YANG S Q, et al. Robust transformer-based anomaly detection for nuclear power data using maximum correntropy criterion [J]. Nuclear engineering and technology, 2024, 56(4): 1284-1295.

A METHOD FOR PROTECTION OF TRANSMISSION LINES OF PV STATION BASED ON RECURSIVE MAXIMUM CORRENTROPY DYNAMIC STATE ESTIMATION

Zheng Zongsheng, Dai Tong, Liao Jianquan, Wang Shaoxiong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To address the issues of decreased performance in traditional current differential protection and poor robustness of existing dynamic state estimation, a protection method for PV station transmission line, based on recursive maximum entropy dynamic state estimation, is proposed. This method is unaffected by power source characteristics and can handle measurement data containing significant outliers. Firstly, the adaptability of traditional current differential protection in PV station transmission line is analyzed, revealing the limitations of traditional current differential protection. Then, based on Kirchhoff's law, a dynamic state estimation model for AC transmission lines is constructed. On this basis, considering the impact of large outliers on measurement data, the nonlinear modeling capability of the maximum correntropy Gaussian kernel function and the smooth decision boundary characteristics are utilized to ensure that the dynamic state estimation results are not disturbed by outliers. Finally, a centralized PV station grid-connected model is built on the Matlab/Simulink platform, and the superiority, sensitivity, reliability, and robustness of the proposed protection method under different faults are verified.

Keywords: photovoltaic station; transmission line; dynamic state estimation; recursive maximum correntropy; robustness; reliability