

自适应时频与能量特征融合的故障定位方法

王志¹, 张志刚¹, 李舒桢¹, 王辉¹, 杨欣儒², 赵壬福²

(1. 天津市电力科技发展有限公司, 天津 300409;

2. 天津理工大学 电气工程与自动化学院, 天津 300384)

摘要: 为了实现配电线路故障的精准定位, 针对多分支配电线路在跨馈线时特征不一致和传统傅里叶行波波头提取精度差的问题, 提出了一种自适应时频与能量特征融合的故障定位方法。该方法通过小波包分解, 结合能量比和信息熵特征, 进行跨馈线归一化, 同时利用能量变化率触发自适应窗短时傅里叶变换(ST-FT), 得到时频图谱和波头识别时刻。通过加权融合时间差到达算法(TDOA)与能量衰减算法(EDA), 优化定位结果。通过 Matlab 对所提出的方法进行仿真, 结果表明该定位方法在不同信噪比和接地电阻下能有效地实现故障定位, 提高供电可靠性。

关键词: 行波定位; 自适应时频; 特征融合; 时间差到达算法; 能量衰减算法

中图分类号: TM726 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed27012

Fault Location Method Based on Fusion of Adaptive Time-frequency and Energy Features

WANG Zhi¹, ZHANG Zhigang¹, LI Shuzhen¹, WANG Hui¹, YANG Xinru², ZHAO Renfu²

(1. Tianjin Electric Power Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300409, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: To achieve accurate fault location of distribution lines, a fault location method based on adaptive time-frequency and energy feature fusion was proposed, addressing the problem of inconsistent features in multi-branch distribution lines during cross-feeding and the low precision of traveling wavehead extraction in traditional Fourier methods. This method employed wavelet packet decomposition combined with energy ratio and information entropy features for cross-feed line normalization. It also utilized the energy change rate to trigger an adaptive windowed short-time Fourier transform (STFT), allowing for the acquisition of time-frequency spectrograms and the identification of wave crest moments. By weightedly integrating the time difference of arrival (TDOA) and the energy decay algorithm (EDA), the localization results were optimized. Research conducted via Matlab simulations demonstrates that the proposed localization method effectively achieves fault localization under various signal-to-noise ratios and grounding resistances, thereby enhancing supply reliability.

Key words: wave propagation positioning; adaptive time-frequency; feature fusion; time difference of arrival (TDOA); energy decay algorithm (EDA)

随着新型电力系统的不断发展, 电缆、架空线路以及分布式电源大量接入, 配电网的结构变得越来越复杂^[1]。配电网作为电力系统与用户之间的重要环节, 其是否能安全稳定运行直接影响对用户的供电可靠性^[2]。

中压配电网中的小电流接地系统, 其单相接地故障电流很小, 系统不必立即跳闸, 以牺牲故障识别的便捷性, 换取了电网持续供电的能力。但由于此类零序电流很弱, 且易受到线路频散、

测量噪声以及接地电阻波动等的影响, 导致故障持续时间短, 传统稳态特征也不明显^[3]。这类系统由于中性点没有有效接地, 故障电流很弱, 且易受电弧间歇燃烧、高阻接地和多分支线路结构的影响^[4], 传统的过电流保护和阻抗法很难起作用, 因此单相接地故障的发生率很高, 占总故障数的70%以上。

行波法^[5]利用高频电压、电流暂态信号进行故障定位, 不受系统接地方式的影响, 且定位精

度高、响应速度快,在故障定位领域具有广泛的应用,但该方法在很大程度上受制于波头识别的准确性和对复杂网络结构的适应性。在多馈线场景下,信号的暂态特征很难保持一致,若单一使用能量比或者特征熵进行判断,其结果不够可靠^[6]。在线路分支多^[7]的情况下,波头反射复杂,仅依靠时间差到达算法(time difference of arrival, TDOA)^[8-9]进行定位,精度易受影响。而且由于行波信号的非平稳特性,利用固定窗口的时频分析方法也难以精准提取特征。

文献[10]创新性地使用了零序电流的近似熵来定位,通过熵值差异找到故障区段,对信号的随机性和复杂度变化敏感,避免了传统方法的局限性,但跨线路的特征波动问题仍未能解决;文献[11]使用多分辨率奇异值分解(multi-resolution singular value decomposition, MRSVD)和变分模态分解(variational modal decomposition, VMD)来处理微弱的行波信号,提高了波头识别精度,这些自适应信号分解方法能有效提取信号的局部特征,显著提升了微弱故障特征的辨识能力,但未考虑特征归一化,这可能造成不同故障条件下特征尺度不一致,导致方法的泛化性受到影响;文献[12]中的行波能量偏差率方法和传统的TDOA算法分别从能量和时间角度定位,这种多物理量融合的思路为提升定位可靠性提供了新方向,但在复杂的线路结构中,单一物理量容易误判;文献[13]使用主频分量的幅值信息辅助定位,该方法通过频域分析避免了部分时域分析的困难,但固定窗口短时傅里叶变换(STFT)很难适应行波信号快速衰减的特点。此外,基于频率分析的行波定位方法^[13]虽能利用行波相对稳定的频域特性,但在低信噪比下容易受到噪声干扰,难以兼顾时域突变捕捉与频域分辨率^[14]。

为此,本文提出了一种自适应时频与能量特征融合的定位方法。首先通过小波包分解,结合能量比和信息熵特征,进行跨馈线归一化。其次结合能量变化率触发的自适应窗STFT,优化时频解析精度。最后将时间差到达算法(TDOA)与能量衰减算法(EDA)加权融合,有效实现故障定位,提高中压小电流接地故障的定位准确性。

1 暂态行波建模与跨馈线归一化

1.1 暂态行波信号模型

在中压配电网中,单相接地故障产生的零序

暂态行波信号,本质是源于故障点注入的高频电磁脉冲与低频衰减振荡的相互叠加^[15]。为了深入分析其特性,依据配电线路的电磁暂态理论构建模型。暂态行波在均匀线路中传播时,呈现出明确的时延特性和衰减特性,具体的模型构建如下。

暂态行波信号由高频脉冲分量与低频暂态分量组成,表达式为

$$i_o(t) = A \cdot \text{atten}(d, R_g) \cdot \{ \exp(-\Gamma \cdot \alpha_{\text{hf}}) \cdot \sin(2\pi f_{\text{hf}} t) + m \cdot \exp[-(t - t_0) \cdot \alpha_{\text{lf}}] \cdot \sin[2\pi f_{\text{lf}}(t - t_0)] \} + n(t) \quad (1)$$

其中

$$\text{atten}(d, R_g) = \frac{1}{1 + d/L_0} \cdot (200/R_g)^{0.15}$$

式中: A 为高频脉冲基幅; $\text{atten}(d, R_g)$ 为幅度衰减因子; d 为测点到故障点距离; L_0 为衰减长度; R_g 为接地电阻; Γ 为行波传播时延修正后的时间变量; $f_{\text{hf}}, \alpha_{\text{hf}}$ 分别为高频脉冲的中心频率与衰减系数; $f_{\text{lf}}, \alpha_{\text{lf}}$ 分别为低频暂态的频率与衰减系数; m 为低频分量幅值占比; $n(t)$ 为加性高斯白噪声。

行波从故障点向各测点传播时,其到达时刻与幅度满足时延特性和衰减特性。

时延特性表现为测点 k 的行波到达时延:

$$\Delta t_k = |x_f - x_k|/v_{\text{wave}} \quad (2)$$

式中: x_f 为故障位置; x_k 为测点 k 到电源端的距离; v_{wave} 为行波传播的速度。

衰减特性表现为行波随着传播距离的增加,其幅度呈指数衰减,并且高频信号的衰减速度会更快。当接地电阻减小时,注入信号的幅度就会减弱。

1.2 跨馈线特征归一化

暂态行波信号本身具有非平稳、突变的特性,故障信息分散在较宽的频带中,传统的傅里叶分析在局部时频信息的提取上仍存在缺陷。小波分解的多分辨率分析在处理信号时,存在高频部分的频率分辨率欠缺和低频部分的时间分辨率受限的问题,导致无法将电磁阀在特征点处的信号进行放大,使得特征点识别出现失误。相比之下,小波包分解作为一种自适应的时频分析方法,通过构建正交小波,以多分辨率分析为理论基础,不仅深化了低频部分的分解,还同样致力于高频部分的深入剖析与精细处理。

小波包分解理论如图1所示。对原始信号 S 进行逐层分解。在初始阶段,信号 S 被分解为高频分量 $H1$ 和低频分量 $L1$ 。随后,小波包分解进

一步对这两个分量分别进行第2层和第3层分解。在捕捉局部特征以及进行多分辨率分析的过程中,小波包分解法表现出了显著的优势。

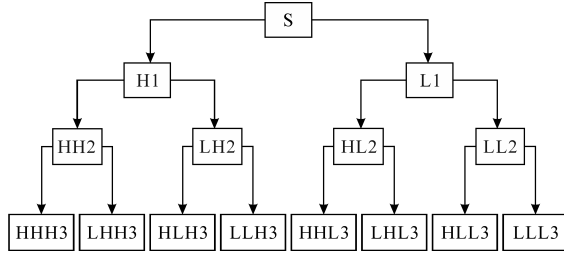


图1 小波包分解

Fig.1 Wavelet decomposition

能量比通过能量分布可直接反映故障信号的频域特征,信息熵可直接体现信号波形的复杂性和随机性。为了克服单一特征在抗干扰方面表现不佳的问题,联合使用能量比和信息熵,实现对暂态信号的多维度描述。

1.2.1 能量比计算

对分解后的各子带信号,计算其能量 E_j :

$$E_j = \sum_{n=1}^{N_j} |s_j(n)|^2 \quad (3)$$

式中: s_j 为第 j 个子带的离散信号; N_j 为子带信号长度。

将能量归一化为能量比 P_j ,消除信号绝对幅值差异的影响,计算公式如下:

$$P_j = \frac{E_j}{\sum_{j=1}^n E_j + \varepsilon} \quad (4)$$

式中: ε 为避免分母为零的极小值, $\varepsilon=10^{-12}$ 。

能量比 P_j 可反映暂态信号在不同频率子带的分布特征,故障信号的高频子带能量比通常显著高于正常信号。

1.2.2 信息熵计算

为量化信号波形的复杂性与突变性,引入信息熵 H 作为补充特征,计算公式为

$$H = -\sum_{j=1}^n p_j \cdot \log [\max(p_j, \varepsilon)] \quad (5)$$

式中: n 为类别数目; p_j 为类别概率。

信息熵值 H 越大,表明信号波形越无明显规律,其接近于随机噪声,因此信号波形难以预测;信息熵值 H 越小,说明信号波形的特征越平滑,具有较为明显的规律性或者周期性,因此容易预测信号波形的复杂性和突变性。

1.2.3 跨馈线归一化方法

相同故障下的能量比熵特征会因不同馈线

的线路参数与测点增益差异而存在明显波动,因此需要物理前置归一化和统计后置归一化实现跨馈线一致性。

基于线路物理特性(距离、等效阻抗)修正能量,消除测点位置与线路参数的影响:

$$E_{physj} = \frac{E_j}{(1 + d_k/L_0)^\alpha \cdot Z_{eq}^\beta + \varepsilon} \quad (6)$$

式中: d_k 为测点 k 到电源端的距离; α 为距离衰减系数; β 为阻抗影响系数; Z_{eq} 为等效阻抗。

同时计算各子带能量比的中位数与中位数绝对偏差:

$$madv(p_j) = med[|p_j - med(p_j)|] \quad (7)$$

将式(7)代入下式:

$$p_{robj} = \frac{p_j - med(p_j)}{madv(p_j) + \varepsilon} \quad (8)$$

对其进行标准化处理,而后将结果代入下式:

$$p_{normj} = \log[1 + \exp(p_{robj})] \quad (9)$$

采取软plus变换来保证非负性。

归一化后,跨馈线能量比的变异系数从0.45~0.62降至0.18~0.25,消除阻抗差异、测点位置差异和随机误差,特征一致性显著提升,实现了跨馈线特征归一化。

2 自适应窗STFT时频分析

2.1 传统STFT的局限性

短时傅里叶变换(STFT)能够结合时域和频域对电力信号进行分析,其实质就是在傅里叶变换的基础上增加窗函数。STFT对信号 $x(t)$ 的描述可表述为

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (10)$$

信号 $x(t)$ 在时间 t 处进行短时傅里叶变换, $h(\tau - t)$ 为分析窗函数, $STFT(t, f)$ 为信号 $x(t)$ 在 t 时刻的频谱表。

时间和频率的分辨率由窗的长度决定。在传统STFT中,所选窗函数越长,频率分辨率越高,但时域分辨率会降低,因此电力原始信号分析就越粗,无法准确捕捉行波波头;所选窗函数越短,时间分辨率就越高,但频率分辨率会降低,因此原始信号分析就越细,难以区分相近频率的暂态分量。因此,时间分辨率和频率分辨率在不同窗长下成反比关系。

配电网暂态信号包含突变段与缓变段,固定窗长无法兼顾两类信号的解析需求,导致其时间

分辨率与频率分辨率在整个时频平面上是固定不变的,无法根据信号局部成分的特征进行自适应调整。

2.2 能量变化率触发的自适应窗 STFT

为了进一步克服上述固定窗长无法兼顾两类信号解析需求等问题,自适应窗 STFT 创新性地通过能量包络变化率识别信号突变段和缓变段,动态选择窗长。对零序电流信号 $i_0(t)$,采用滑动窗口法计算能量包络:

$$E_{\text{env}}(n) = \sum_{m=n-L_{\text{env}}+1}^n i_0^2(m) \quad (11)$$

其中, $L_{\text{env}}=100$ 点。

计算能量包络的一阶差分,即能量变化率:

$$\Delta E(n) = E_{\text{env}}(n) - E_{\text{env}}(n-1) \quad (12)$$

采用中位数绝对偏差(MAD)设定阈值,基于 Pauta 准则,3 倍 MAD 可稳定识别信号的不同频段。令 $\theta = K \cdot \text{MAD}(|\Delta E(n)|)$, $K=3$, 当 $|\Delta E(n)| > \theta$ 时,判定为突变段,用短窗 STFT,否则为缓变段,用长窗 STFT。将分段时频结果在时间轴上拼接,形成完整的自适应时频图谱。对于信号中持续存在的谐波分量或缓慢变化的频率成分,它能提供窄带的、频率分离度很好的频谱线,便于精确分析,为后续的故障诊断提供更可靠的数据基础。

2.3 时频紧凑度评价指标

引入时频紧凑度 C 去量化自适应 STFT 的解析效果,评估能量在时频域的集中程度,其中 C 的阈值为 0 到 1。评分 C 值越低,能量在时频域越分散,故障信号特征越模糊,分析效果越差;评分 C 值越高,能量在时频域越集中,故障信号特征越清晰,分析效果越显著。 C 值计算如下:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} S_{\text{sorted}}(i)}{\sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} S(i) + \varepsilon} \quad (13)$$

$$N_{\text{top}} = \max(1, \lfloor 0.05 \cdot N_{\text{total}} \rfloor)$$

式中: N_{top} 为前 5% 高能量元素的数量; N_{total} 为时频矩阵的总元素数; $S_{\text{sorted}}(i)$ 为降序排列后的功率值; $S(i)$ 为时频矩阵的功率值(非 dB)。

3 自适应加权融合定位

TDOA 和 EDA 适合在不同的场景中使用, TDOA 适用于突发类信号,实时性强,具有较高的

稳定性,但是它需要极高精度的时间同步接受基站;而 EDA 适用于连续稳定信号,部署成本低,但是其环境依赖性极高。因此本方法提出 TDOA-EDA 双指标自适应加权融合方法,联合时间与空间特征提升定位的鲁棒性,在以上的优劣中取得了良好的平衡。

3.1 TDOA 时间差到达算法定位

TDOA 时间差到达算法定位模型包括互相关时延估计和网格搜索定位两个核心部分,通过分析测量行波信号到达多个信号接收测点的时间差来实现故障定位的计算,如图 2 所示。

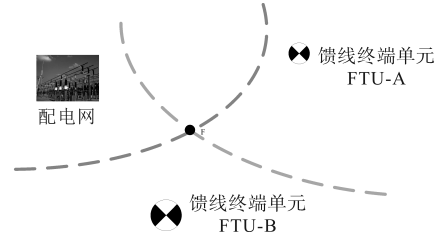


图2 时间差到达算法定位

Fig.2 Time difference arrival algorithm positioning

本文以配电网首端测点为参考,采用归一化互相关和抛物线插值估计测点 k 与参考点的时延 $\Delta t_{\text{obs},k}$ 。

计算参考信号 $s_1(t)$ 和测点 k 信号 $s_k(t)$ 之间的互相关系数 $c(\tau)$:

$$c(\tau) = \frac{\sum_t s_1(t) \cdot s_k(t + \tau)}{\sqrt{\sum_t s_1^2(t) \cdot \sum_t s_k^2(t + \tau)}} \quad (14)$$

在最大滞后时间范围内确定互相关系数峰值 $c(\tau)_{\text{max}}$ 所对应的采样点 τ_0 , τ_0 就是这两个信号之间的时间延迟。利用峰值邻域 3 点 (τ_{0-1} , τ_0 , τ_{0+1}) 的互相关值 y_0, y_1, y_2 进行抛物线插值,通过下式得到精细时延:

$$\Delta t_{\text{obs},k} = \frac{\tau_0 + 0.5 \cdot (y_0 - y_2) \cdot \frac{1}{f_s}}{y_0 - 2y_1 + y_2} \quad (15)$$

式中: f_s 为采样频率, $f_s=1 \text{ MHz}$ 。

时延估计的可信度由互相关峰值表征。

得到时延估计后,构建位置候选网格,对每个候选位置 x ,计算预测时延:

$$L_{\text{eria}} \in [\min(x_k) - 50, \max(x_k) - 50] \quad (16)$$

$$\Delta t_{\text{pred},k}(x) = \frac{|x - x_1| - |x - x_k|}{v_{\text{wave}}} \quad (17)$$

根据时延定义 TDOA 代价函数:

$$\text{cost}_{\text{toda}}(z) = \sum_{k=2}^n [\Delta t_{\text{obs},k} - \Delta t_{\text{pred},k}(x)]^2 \quad (18)$$

其中, n 为测点总数, 选择代价最小的候选点作为 TDOA 定位结果 x_{tdoa} 。

3.2 EDA 能量衰减算法

EDA 能量衰减算法模型包含高频能量提取和对数线性拟合与网格搜索两个核心部分, 它是基于行波的传播能量随传播距离的增加而衰减的规律来实现故障信号的定位, 不受时间同步精度的影响, 与 TDOA 时间差到达算法定位模型形成互补。

故障暂态的行波分量主要集中于 20 kHz 以上频段, 采用 4 阶巴特沃斯高通滤波器提取高频信号 $y_k(t)$, 并计算积分能量:

$$E_y = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} y_k^2(t) dt \approx \text{trapz}[y_k^2(t)] \quad (19)$$

式中: ΔT 为故障后暂态窗口长度; $\text{trapz}(\cdot)$ 为梯形积分函数。

行波能量随距离的衰减特性满足对数线性关系:

$$\log(E_k) = A - \gamma \cdot \log(d_k + \varepsilon) \quad (20)$$

式中: A 为常数; γ 为衰减系数; d_k 为候选位置 x 到测点 k 的距离, $d_k = |x - x_k|$ 。

定义 EDA 拟合残差平方和代价函数为

$$\text{cost}_{\text{eda}}(x) = \sum_{k=1}^n \{ \log[\max(E_k, \varepsilon)]^2 - [A(x) - \gamma(x) \cdot \log(d_k + \varepsilon)]^2 \} \quad (21)$$

其中, $A(x)$, $\gamma(x)$ 为对应的 x 的拟合参数, 通过网格搜索选择代价最小的 x_{eda} 作为 EDA 定位结果。

3.3 自适应加权融合

TDOA-EDA 双指标自适应加权融合方法根据可信度动态分配权重, 再经过加权融合与结果输出, 从而实现 TDOA-EDA 双指标的最佳融合, 防止了固定权重在特定情况下的效果丧失, 并且在部署成本、稳定性、精确度与鲁棒性之间取得了良好的平衡, 极大程度上克服了 TDOA 和 EDA 在单独使用时技术以及功能上的缺陷, 形成优势互补。

3.3.1 可信度计算

TDOA 可信度 q_{tdoa} 结合了互相关系数峰值和 TDOA 代价优度, 互相关峰值可直接反映时延估计的质量, 代价优度可反映所有测点时间差的一致性, 计算式如下:

$$q_{\text{tdoa}} = 0.5 \cdot \bar{\rho} + 0.5 \cdot \left[1 - \frac{\min(\text{cost}_{\text{tdoa}})}{\max(\text{cost}_{\text{tdoa}}) + \varepsilon} \right] \quad (22)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为所有测点对互相关峰值的平均值;

$\frac{\min(\text{cost}_{\text{tdoa}})}{\max(\text{cost}_{\text{tdoa}})}$ 为归一化最小代价。

EDA 可信度 q_{eda} 由对数线性拟合的决定系数 R^2 表示, 拟合优度越高, 可信度越高, 计算如下式所示:

$$q_{\text{eda}} = \max(0, 1 - \frac{SSE}{SST + \varepsilon}) \quad (23)$$

其中

$$SSE = \sum (y - \hat{y})^2$$

$$SST = \sum (y - \bar{y})^2$$

式中: SSE 为残差平方和; SST 为总平方和; y 为在对数线性拟合中各个测点观测值的对数; $\hat{y}$ 为通过拟合模型得到的预测值的对数; $\bar{y}$ 为所有 y 的平均值。

3.3.2 可信度加权融合

基于最优估计理论, 以可信度的倒数为衡量标准, 将代价函数基于可信度加权融合。

将 TDOA 与 EDA 的代价函数归一化至 $[0, 1]$ 区间:

$$\text{res}_{\text{tdoa}} = \frac{\text{cost}_{\text{tdoa}}}{\max(\text{cost}_{\text{tdoa}}) + \varepsilon} \quad (24)$$

$$\text{res}_{\text{eda}} = \frac{\text{cost}_{\text{eda}}}{\max(\text{cost}_{\text{eda}}) + \varepsilon} \quad (25)$$

根据式 (24) 和式 (25) 得到的可信度分配权重并计算融合代价, 选择融合代价最小的候选点作为最终定位结果 x_{fuse} 。融合代价计算如下式:

$$\text{cost}_{\text{fuse}}(x) = w_{\text{tdoa}} \cdot \text{res}_{\text{tdoa}} + w_{\text{eda}} \cdot \text{res}_{\text{eda}} \quad (26)$$

其中

$$w_{\text{tdoa}} = \frac{q_{\text{tdoa}}}{q_{\text{tdoa}} + q_{\text{eda}} + \varepsilon} \quad (27)$$

$$w_{\text{eda}} = 1 - w_{\text{tdoa}} \quad (28)$$

4 故障定位流程图

构建径向馈线拓扑结构, 从变电站引出主干馈线和分支, 设置线路、信号等参数。流程如图 3 所示。通过多测点零序电流信号生成模块, 得到 3 个测点的含有高频脉冲、低频暂态和噪声的零序电流信号。通过小波包分解得到信号的高频特征和低频特征, 根据分解得到的结果计算能量比和信息熵, 然后消除阻抗差异、测点位置差异和随机误差, 实现跨馈线特征归一化。同时通过能量包络模块分辨信号的突变段和缓变段, 根据不同的能量变化率选取不同的窗长获取更精准的时域和频域特征。通过时间差到达算法 TDOA

模型获得TDOA定位值,通过能量衰减算法EDA模型获得EDA定位值,将二者通过可信度加权融合输出最终定位结果。

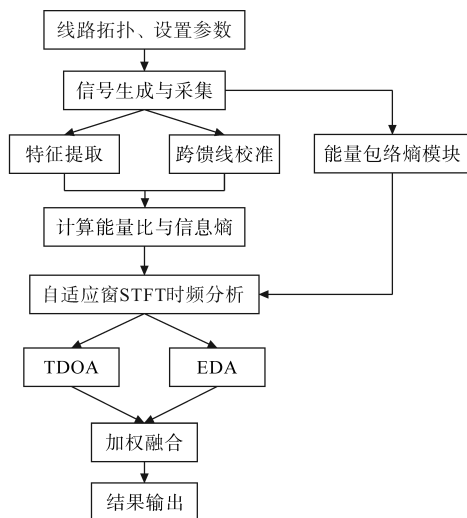


图3 故障定位流程图

Fig.3 Fault diagnosis flowchart

5 仿真验证及结果分析

5.1 仿真平台搭建

基于 Matlab/R2023a 构建中压配电网小电流接地故障仿真平台,模拟真实配电场景的暂态行波传播与故障特征。网络拓扑与线路参数如下:电源为 20 kV 中压电源,中性点经消弧线圈接地;主干馈线长度 1 100 m,建模方式为分布参数模型,单位长度电阻 $R=0.1 \Omega/\text{km}$,单位长度电感 $L=1 \text{ mH}/\text{km}$,单位长度电容 $C=0.01 \mu\text{F}/\text{m}$;测点 1 位置 $x_1=0 \text{ m}$,测点 2 位置 $x_2=500 \text{ m}$,测点 3 位置 $x_3=1 100 \text{ m}$;故障位置 x_f 分别为 50 m(靠近电源端)、450 m(靠近测点 2)、580 m(靠近分支节点)、800 m。信号与噪声参数如下:故障类型为单相接地故障;故障时刻 $t_0=0.02 \text{ s}$,仿真模拟生成模拟输入数据,采样率 $f=1 \text{ MHz}$,信号总时长 0.1 s;接地电阻 R_g 工况 1 为 50 Ω 、工况 2 为 200 Ω 、工况 3 为 1 000 Ω ;噪声类型为加性高斯白噪声,信噪比 SNR 工况 1 为 30 dB、工况 2 为 15 dB、工况 3 为 0 dB。

5.2 实验工况

采用正交实验设计,覆盖信噪比(SNR)与接地电阻 R_g 的全组合工况,共 9 个基础工况,具体参数如表 1 所示。后续结果以场景 1,5,9 为例。

每组工况独立运行 10 次,取平均值作为最终结果。同时设置 5 组消融实验,每组实验在 9 个不同的工况下运行 1 次,具体设置如表 2 所示。

表 1 不同场景运行参数

Tab.1 Operating parameters for different scenarios

场景编号	SNR/dB	接地电阻 R_g/Ω	核心特征
1	30(高)	50(小)	信号最强、噪声最少
2	30(高)	200(中)	信号较强、噪声少
3	30(高)	1 000(大)	信号较弱、噪声少
4	15(中)	50(小)	信号强、噪声中等
5	15(中)	200(中)	信号中等、噪声中等
6	15(中)	1 000(大)	信号弱、噪声中等
7	0(低)	50(小)	信号强、噪声多
8	0(低)	200(中)	信号中等、噪声多
9	0(低)	1 000(大)	信号最弱、噪声最多

表 2 消融实验模块设置

Tab.2 Dissolution experiment module configuration

组别	模块启用情况	定位方法	时频分析方法
1	无	仅 TDOA	固定长窗 STFT
2	无	仅 EDA	固定长窗 STFT
3	自适应融合、自适应 STFT,无归一化	TDOA-EDA 融合	自适应窗 STFT
4	归一化、自适应融合,无自适应 STFT	TDOA-EDA 融合	固定长窗 STFT
本文方法	归一化、自适应融合、自适应 STFT	TDOA-EDA 融合	自适应窗 STFT

5.3 仿真结果与分析

5.3.1 不同工况下的故障暂态特征分析

3 个场景的波形、分布图如图 4~图 6 所示,各测点的信息熵如表 3 所示。可知,工况环境恶劣程度越高,波形的规律性越差,各测点子带能量比分布图的故障特征占比下降,信息熵的值也随之升高。

由图 4 各测点的波形图可知,在噪声最小时,基线干净,故障时刻的电流突变幅值清晰、振荡衰减快;各测点能量比分布在少数子带,说明故障能量的频域分布清晰且集中,便于能量衰减算法捕捉规律。由图 5 各测点的波形图可知,在噪声中等时,基线噪声有所增强,故障波形的振荡幅度略降,故障能量传播受干扰;各测点能量比的高能量子带占比下降,说明故障能量的频域聚焦性减弱,能量衰减算法的能量距离拟合难度上升。由图 6 各测点的波形图可知,在噪声最大时,基线噪声显著增强,故障波形的峰值进一步降低,噪声严重淹没故障信号;各测点能量比中高能量子带占比下降,低能量子带占比明显上升,说明噪声导致频域能量分散,故障特征被严重淹没,直接导致依赖能量分布规律的能量衰减算法误差剧增。

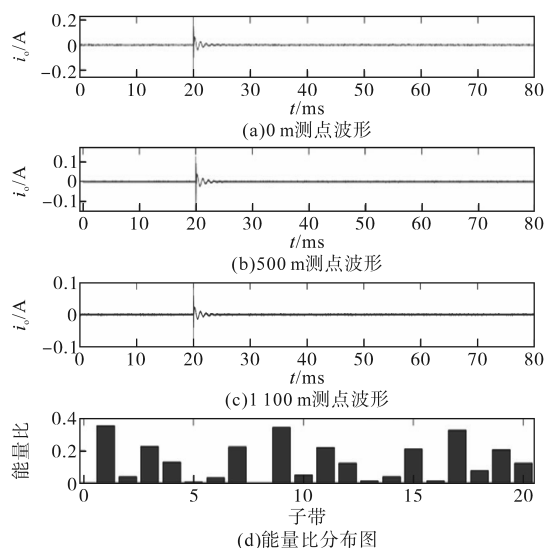


图4 场景1波形、分布图

Fig.4 Scene 1 waveforms, distribution map

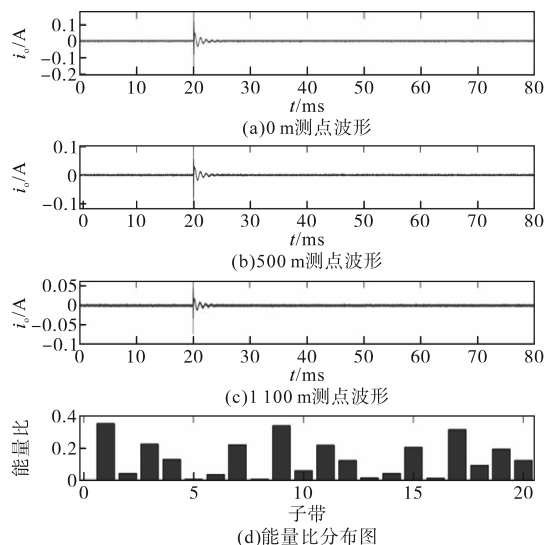


图5 场景5波形、分布图

Fig.5 Scene 5 waveforms, distribution map

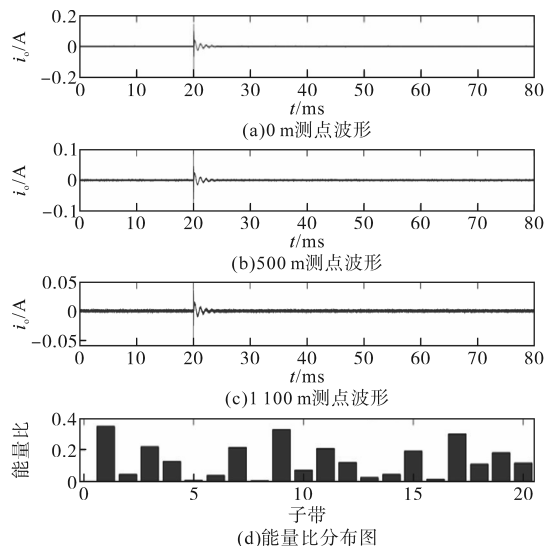


图6 场景9波形、分布图

Fig.6 Scene 9 waveforms, distribution map

表3 各测点信息熵 H

Tab.3 Entropy of each measurement point H

场景/测点	信息熵 H		
	a	b	c
1	1.421	1.435	1.452
5	1.618	1.632	1.658
9	1.895	1.912	1.955

5.3.2 自适应与固定窗口的时频分析对比

为了验证触发自适应窗口的阈值系数 $K=3$ 取值的有效性,在全工况下采取不同 K 值进行实验,结果如表4所示。当 $K=3$ 时,突变段准确率、平均波头误差和平均时频紧凑度都达到了最优,且与阈值系数 K 取其他值时的情况相比,优势较为明显。

表4 全工况下不同 K 值平均指标对比

Tab.4 Comparison of average metrics for different K values under all conditions

MAD 倍数 K	突变段 准确率/%	平均波头 误差/m	平均时频 紧凑度/C
1	68.5	85.2	0.621
2	82.3	52.7	0.735
3	94.8	28.3	0.847
4	86.1	63.5	0.762
5	72.4	98.9	0.658

由图7~图9三个场景的固定长窗和自适应窗长的时频能量对比所示,在发生故障时,固定长窗显示一条模糊的能量带,在时域上无法计算故障发生的起止时间,在频域上由于长窗的平滑效应使得细节丢失;自适应窗长在时域上提高了故障时刻的精度,在频域上分层清晰,分辨率提高。在不同工况下,尤其是极端工况,自适应窗长比固定长窗特征更清晰。

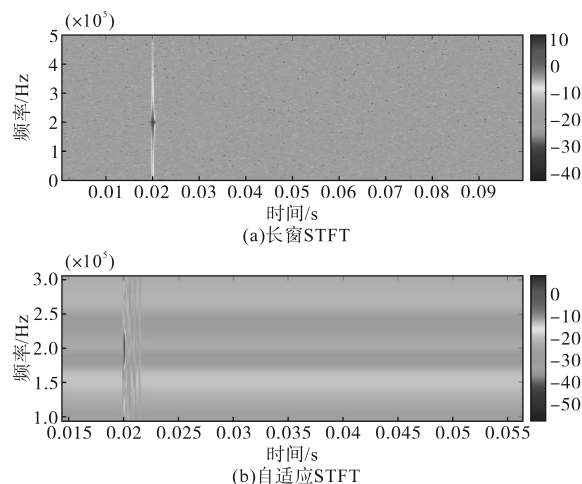


图7 场景1时频能量图

Fig.7 Scene 1 time-frequency energy diagram

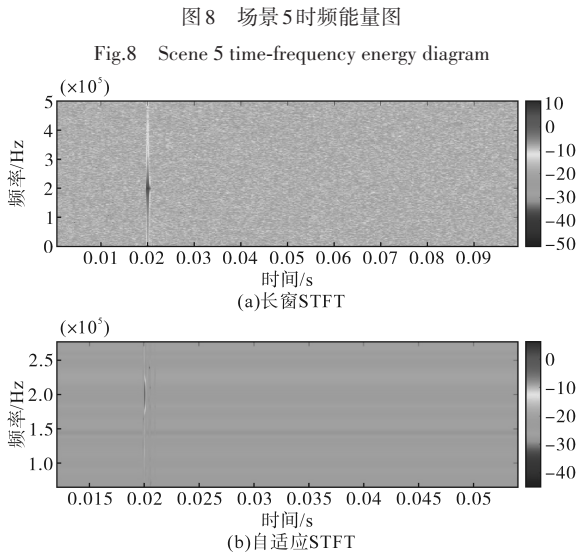
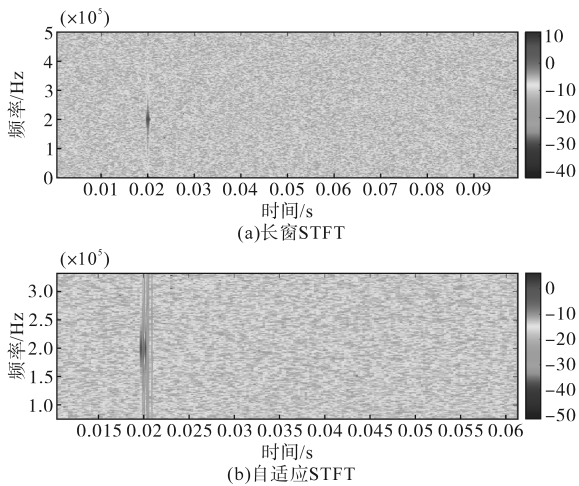


图8 场景5时频能量图

图9 场景9时频能量图

5.3.3 融合定位与单一方法性能对比分析

融合定位方法与单一方法的性能对比分析如图10~图12所示。图中黑色方块为传感器,分别位于0 m,500 m,1 100 m,黑色三角为真实的故障位置,位于800 m处,黑色圆点为TDOA定位结果,灰色菱形为EDA定位结果,灰色星形为融合定位结果。由3个场景的定位对比图可得融合定位结果最接近真实故障位置,而TDOA和EDA偏离真实位置较远。在不同工况下,尤其是极端工况,融合定位的结果始终稳定。

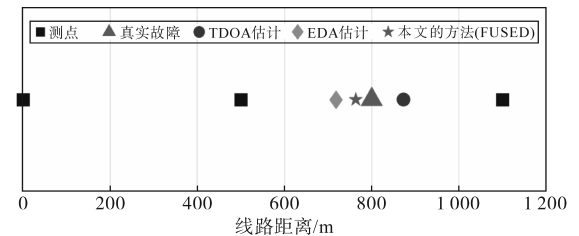


图10 场景1融合定位图

Fig.10 Scene 1 merged positioning map

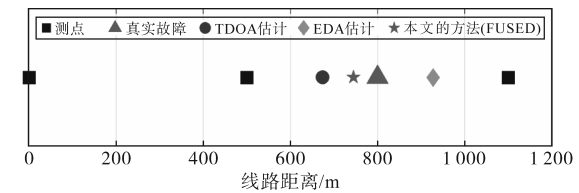


图11 场景5融合定位图

Fig.11 Scene 5 merged positioning map

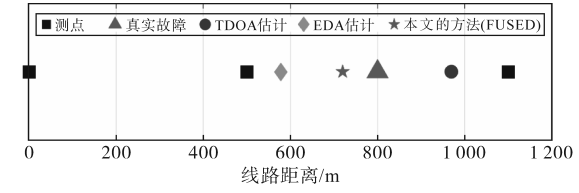


图12 场景9融合定位图

Fig.12 Scene 9 merged positioning map

5.3.4 不同故障点结果对比

为验证本文所提方法的适用性,对50 m(靠近电源端)、450 m(靠近测点2)、580 m(靠近分支节点)3个故障点进行故障定位,实验结果如表5所示。结果显示本文所用融合定位方法在不同的故障点下定位结果的精度和准确率仍保持在稳定状态,定位的结果误差均为最小。

表5 不同故障点定位结果误差

Tab.5 Deviation in the positioning results of different fault points

场景	定位误差/m			
	Fault Location	TDOA	EDA	本文方法
场景1	50	68.5	78.2	34.2
	450	72.3	82.5	36.5
	580	75.8	88.3	38.7
场景5	50	120.6	122.4	52.8
	450	126.4	127.9	55.6
	580	132.8	135.1	58.9
场景9	50	162.5	215.8	75.3
	450	169.7	222.5	79.9
	580	176.3	229.7	83.6

5.3.5 消融实验结果

为验证本文所提方法的有效性,设置5组实验(见表2),结果如表6和图13所示。

表6 不同工况下各组别平均定位误差

Tab.6 Average positioning errors for each category under different working conditions

工况	定位误差/m				
	1	2	3	4	本文方法
30 dB/50 Ω	68.4	52.7	45.2	38.9	34.3
30 dB/200 Ω	72.1	118.5	61.8	43.6	36.8
30 dB/1 000 Ω	75.9	223.6	188.5	67.3	42.4
15 dB/50 Ω	132.7	61.3	88.4	77.1	56.5
15 dB/200 Ω	158.2	145.8	132.6	92.4	71.7
15 dB/1 000 Ω	191.5	257.2	204.9	135.8	83.6

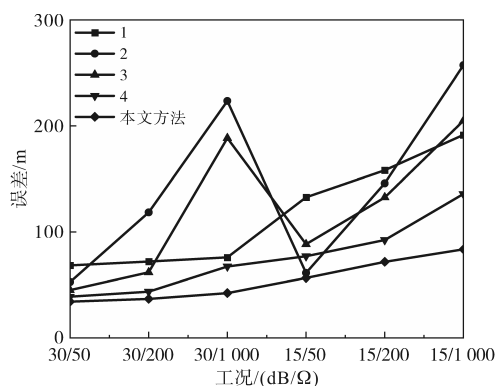


图13 不同工况下各组别平均定位误差

Fig.13 Average positioning error of each group under different working conditions

由前两组实验结果可得,TDOA定位算法受噪声影响较大,噪声增大时误差也随之增大,EDA定位算法受接地电阻影响较大,接地电阻增大时误差也显著上升。由第3组和第5组实验结果可得跨馈线归一化的方法可以提高抗干扰能力,使故障信号的特征稳定。由第4组和第5组实验可得,自适应STFT可以提高时域和频域参数精确度,使定位的数据准确度提高2%。

5.3.6 对比实验结果

为验证本文所用方法的优越性,将本文所用方法与传统阻抗法、稳态零序电流法和VMD-TDOA算法进行对比,结果如表7和图14所示。

表7 不同工况下不同方法对比结果

Tab.7 Comparison results of different methods under various operating conditions

场景	工况	定位误差/m			
		传统阻抗法	稳态零序电流法	VMD-TDOA	本文方法
1	30 dB/50 Ω	55.2	58.6	42.3	33.5
2	30 dB/200 Ω	60.8	63.1	45.7	34.2
3	30 dB/1 000 Ω	65.5	68.4	48.9	44.8
4	15 dB/50 Ω	120.3	130.7	75.2	57.1
5	15 dB/200 Ω	130.1	140.5	110.6	68.3
6	15 dB/1 000 Ω	140.7	150.2	105.8	79.5
7	0 dB/50 Ω	210.6	230.8	170.3	83.2
8	0 dB/200 Ω	230.4	250.1	175.5	95.8
9	0 dB/1 000 Ω	250.8	270.5	182.7	108.5

综合以上9种情况,本文方法的定位误差曲线始终平稳地处于图表最下方,且波动范围远小于其他对比方法。这不仅证明了其在应对高过渡电阻和强噪声干扰方面的卓越能力,更凸显了其算法在复杂真实配电环境下的高度适应性与稳定性,为解决中压配电网小电流接地系统发生单相接地故障时的定位问题提供了更有效的技

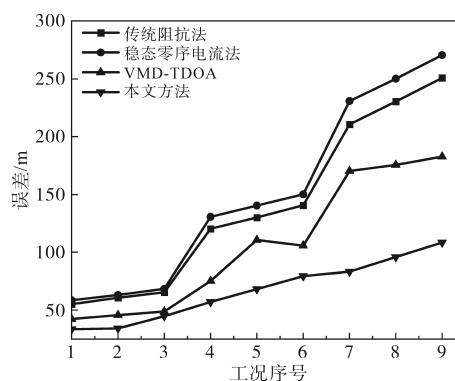


图14 不同工况下不同方法对比结果

Fig.14 Comparison results of different methods under different operating conditions

术途径。

6 结论

本文针对中压配电网小电流接地系统发生单相接地故障时的定位问题,提出了一种自适应时频与能量特征融合的故障定位方法,通过Matlab实验验证,得到如下结论:

1)提出联合能量比和熵特征,并消除阻抗差异、测点位置差异和随机误差,有效解决了跨馈线特征不一致、单一特征抗干扰性较弱的问题。

2)提出的利用能量变化率触发的自适应窗STFT,提高时域和频域参数精确度,降低波头识别误差,解决了由于固定窗长对于不同区段的适配性不足导致的特征提取差的问题。

3)提出的通过可信度加权融合时间差到达算法TDOA和能量衰减算法EDA的定位算法,有效解决了在某一指标失效时定位准确率降低的问题。

参考文献

- [1] 盛万兴,刘科研,李昭,等. 新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J]. 高电压技术,2024,50(1):1-18.
Sheng Wanxing, Liu Keyan, Li Zhao, et al. Review of basic theory and methods of morphological evolution and safe & efficient operation of new distribution system[J]. High Voltage Engineering,2024,50(1):1-18.
- [2] 苏淮北,曹俊,沈鑫,等. 基于超低频场空间电荷响应的电缆状态评估[J]. 中国电机工程学报,2022,42(4):1235-1243.
Su Huaibei, Cao Jun, Shen Xin, et al. Cable state assessment technology based on space charge behavior under very low frequency field[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(4):1235-1243.
- [3] Shu H, Liu X, Tian X, et al. Single-ended fault location for hybrid feeders based on characteristic distribution of traveling

- wave along a line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 339-350.
- [4] 吴佳享,孙云莲,陈楚昭.微弱行波下多分支配电网故障定位[J].电机与控制学报,2023,27(5):20-27.
Wu Jiaxiang, Sun Yunlian, Chen Chuzhao. Fault location of multiple branches distribution network under weak traveling waves[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(5): 20-27.
- [5] 杨亚超,黄纯,汪星耀,等.一种直流配电网线路故障测距新方法[J].电网技术,2019,43(5):1787-1794.
Yang Yachao, Huang Chun, Wang Xingyao, et al. A novel line fault location method for DC distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1787-1794.
- [6] Lopes F V. Past, present, and future trends of traveling wave-based fault location solutions[C]//2021 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasilia, Brazil, 2021: 1-6.
- [7] 马士聪,高厚磊,徐丙垠,等.配电网故障定位技术综述[J].电力系统保护与控制,2009,37(11):119-124.
Ma Shicong, Gao Houlei, Xu Bingyin, et al. A survey of fault location methods in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 119-124.
- [8] Zhang F Y, Yang L, Liu Y H, et al. Design and implementation of real-time localization system (RTLS) based on UWB and TDOA algorithm[J]. Sensors, 2022, 22(12): 1-23.
- [9] 姜志鹏,陈正宇,刘影,等.TOA定位算法非线性优化问题研究[J].传感技术学报,2015,28(11):1716-1719.
Jiang Zhipeng, Chen Zhengyu, Liu Ying, et al. Study on nonlinear optimization for TOA location algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(11): 1716-1719.
- [10] 罗嘉玮,张开迪.基于零序电流近似熵的配电网故障定位研究[J].电力勘测设计,2024(5):39-44.
Luo Jiawei, Zhang Kaidi. Research on fault location of neutral ungrounded system based on approximate entropy of zero sequence current[J]. Electric Power Survey & Design, 2024(5): 39-44.
- [11] 吴佳享,孙云莲,陈楚昭.基于MRSVD-VMD的多分支配电网故障定位[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(11):58-65.
Wu Jiaxiang, Sun Yunlian, Chen Chuzhao. Fault location of multi-branch distribution networks based on MRSVD-VMD[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(11): 58-65.
- [12] 王玲桃,王紫瑜,任宏伟,等.基于行波能量偏差率的配电网单端定位方法[J].电子设计工程,2025,33(13):44-48,53.
Wang Lingtao, Wang Ziyu, Ren Hongwei, et al. Single-ended positioning method for distribution network based on traveling wave energy deviation rate[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(13): 44-48, 53.
- [13] 黄昕飞,王有鹏,刘凤,等.利用行波主频分量幅值信息的多分支配电网故障定位方法[J].电力系统及其自动化学报,2025,37(12):15-23.
Huang Xinfei, Wang Youpeng, Liu Feng, et al. Fault location method for multi-branch distribution network using amplitude information of traveling wave dominant frequency components[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(12): 15-23.
- [14] Pathirage G, Razzaghi R, Andrew L, et al. Fault location in power distribution networks using frequency analysis of traveling waves[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 249: 111971.
- [15] Wang C, Wang Y, Liu R, et al. Fault location for single-phase-to-earth faults based on transient traveling wave method and artificial pulse signal injection method[C]//2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan, China, 2010: 3737-3741.

收稿日期:2025-09-26

修改稿日期:2025-11-21