

基于 CEEMD 和 LSQR 的行波波形的精确检测方法

陈朝晖¹, 汤涛², 丁晓兵¹, 陈旭¹, 刘玮³, 李晓涵²

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广州 510663; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114; 3. 广东电网电力调度控制中心, 广州 510600)

摘要: 针对电网真实一次行波信号与所测二次行波信号不一致的问题, 提出了一种基于互补集合经验模态分解 (complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD) 和最小二乘 QR 分解 (least square QR decomposition, LSQR) 的行波波形的精确检测方法。首先, 分析了专用行波传感器非线性幅频和相频响应特性, 揭示了一、二次行波的差异性; 其次, 采用 CEEMD 将二次行波分解为不同频段的固有模态函数分量; 进而采用最小二乘法构建行波波形的反演模型, 利用 LSQR 迭代求解各固有模态函数分量的反演分量; 最后, 将各反演分量线性合成得到反演的一次行波信号。仿真和实验结果表明, 该方法不受噪声、模态混叠效应的影响, 而且分频反演所得行波波形的真实行波波形的相似度可达 0.99, 实现了故障行波波形的准确检测。

关键词: 行波传感器; 互补集合经验模态分解; 最小二乘 QR 分解算法; 波形反演

Accurate Detection Method of Traveling Wave Shape Based on CEEMD and LSQR

CHEN Zhaohui¹, TANG Tao², DING Xiaobing¹, CHEN Xu¹, LIU Wei³, LI Xiaohan²

(1. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 3. Power Dispatching and Control Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: To address the issue of inconsistency between the actual primary traveling wave signal and the measured secondary traveling wave signal, an accurate detection method for traveling waves based on complementary ensemble empirical mode decomposition (CEEMD) and least square QR decomposition (LSQR) is proposed. Firstly, the nonlinear amplitude-frequency and phase-frequency response characteristics of the specialized traveling-wave sensor are examined, revealing the distinction between the primary and secondary traveling waves. Secondly, CEEMD is used to decompose the secondary traveling wave into inherent modal function components of different frequency bands. Then the least square method is used to construct the traveling wave inversion model, and the LSQR algorithm is used to solve the inversion components of each inherent modal function component iteratively. Finally, the inversion primary traveling wave signal is synthesized by linear superposition of each inversion component. Simulation and experimental results show that the proposed method is not affected by noise and mode aliasing effects, and the similarity between the frequency-division inversion traveling wave and the real traveling wave can reach 0.99, which realizes the accurate detection of fault traveling wave.

Key words: traveling wave sensor; complementary ensemble empirical mode decomposition; least square QR decomposition algorithm; waveform inversion

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52207075); 中国南方电网公司有限责任公司科技项目 (ZDKJXM20220004)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52207075); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (ZDKJXM20220004).

0 引言

近年来,由于行波技术具有不受系统振荡和过渡电阻等因素影响的优势成为了研究热点,该技术通过分析和处理含有丰富故障信息的高频暂态行波信号对故障进行检测和定位,提高了输电网运行的稳定性和安全性^[1-4]。

行波技术实用化的关键在于精确检测行波信号。行波信号是故障电网中以电流和电压的形式出现的宽频带暂态信号^[5-6]。通常采用基于罗氏线圈(Rogowski coil)研制的行波传感器检测行波,但由于罗氏线圈本身物理结构影响,一次行波信号经过行波传感器产生畸变^[7-9],采用畸变的二次行波信号进行故障定位会产生较大的误差,严重时会影响系统的稳定运行。因此,精确检测高频暂态行波信号是行波技术实用化的关键。

针对二次行波波形畸变的问题,主要有改善传感器结构和行波反演两种解决思路。文献[10-11]通过合理选取传感器各元件的参数和相位补偿方法校正罗氏线圈测量的畸变波形。虽然上述方法减小了测量误差,但所测行波的精度仍需进一步提高。

目前主要通过行波反演方法获取一次行波信号,即通过行波传感器测得的二次行波信号反向推导出真实一次行波信号。文献[12]利用最小二乘反卷积方法,根据暂态电压波形恢复出雷电流波形,进而提取雷电流的幅值、极性、陡度等参数,有效解决了反卷积计算的病态问题,但噪声会严重影响恢复雷电流波形的精度。文献[13]对专用电压行波传感器进行了建模并推导出传感器传递函数,利用离散反卷积和Tikhonov正则化方法解决了二次行波畸变的问题。Tikhonov正则化方法是常见的直接正则化算法,特点是解向量过渡平滑,但每反演迭代一次都需通过多次计算选择最佳正则化参数,大大增加了计算成本^[14]。迭代方法如最小二乘QR分解(least square QR decomposition, LSQR)法,其迭代求解和降维的特性^[15-16]具有收敛速度快、计算精度高、抗噪声能力强的优点,但目前未应用于行波检测领域。

行波传感器不同频段下行波信号的频率特性差异明显,该特性对波形反演至关重要^[17]。文献[18]利用二次端口的频域信号得到高压端口的信号,然后利用傅里叶变换转化为时域信号。然而,傅里叶

变换分析难以与行波传感器的宽带传变特性相吻合,因此无法实现局部的时频分析。文献[19]利用反卷积原理建立反演模型,利用随机共振反卷积算法求解病态问题,该方法未考虑行波传感器的传变特性。文献[20]利用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)分解二次信号,但分解效果不佳,反演精度有待提高。文献[21]利用经验模态分解法(empirical mode decomposition, EMD)分解二次行波信号,进而采用维纳滤波法得到一次行波信号,但EMD过程中的模态混叠问题会降低反演精度^[22-24]。

考虑到上述问题,本文提出了一种精确检测行波波形的分频反演方法,利用CEEMD将二次信号分解为不同频段的信号,各频段信号均为平稳信号且具有局部特性,然后对不同频段的信号采用LSQR进行反演,将得到的不同频段的反演信号线性叠加获得反演一次行波信号。仿真和实验结果表明,该方法不受模态混叠效应和噪声的影响,分频反演一次波形与仿真一次波形相似度极高,可实现行波波形的精确检测。

1 一、二次行波差异分析

行波传感器的测量原理如图1所示。当电网故障时,利用电容式电压互感器地线上突变电流检测线路电压行波信号^[25-26]。

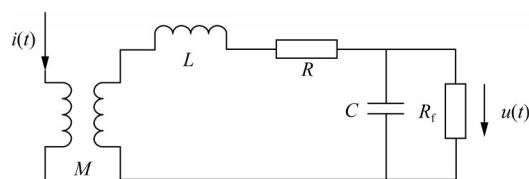


图1 电压行波传感器等效电路

Fig. 1 Voltage traveling wave sensor equivalent circuit

图1中 $i(t)$ 为一次行波信号,即电容式电压互感器地线上的电流; M 、 L 、 R 、 C 和 R_f 分别为线圈与导线间的互感、自感、内阻、分布电容和采样电阻; $u(t)$ 为 R_f 上的电压信号,即二次行波信号。线路故障会引起电流信号 $i(t)$ 突变,通过滤波回路引起采样电阻 R_f 上电压信号突变,进而通过采样电阻 R_f 提取二次行波信号。实际上,二次行波信号 $u(t)$ 可利用专用的电压行波传感器获得,但是真实一次行波信号 $i(t)$ 无法直接测得。

为验证该电压行波传感器的可靠性,在较为理

想的实验环境中测得一、二次行波信号波形如图2所示。由图2可知,行波传感器本身物理结构的影响导致一、二次行波波形存在差异,在复杂故障以及极端测量环境下,二次行波畸变情况可能更为严重。同时利用该行波传感器得到的畸变波形用于故障行波定位,将会产生较大的定位误差。

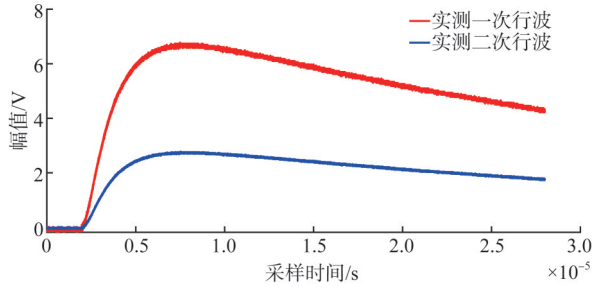


图2 实测一、二次行波波形

Fig. 2 Measured primary and secondary waves

故障行波信号的特征频段为10 Hz~100 kHz,在故障频段内,传感器的相频特性存在超前或滞后的特征,非线性相频响应会增加测量信号与真实信号间的误差。在高频范围内传感器的幅频特性表现为水平直线,测量信号的幅值不受影响,但在低频范围内信号衰减较为严重,影响信号的传变效果。以上原因导致一、二次行波信号的时域波形和在各个时刻的频率特征存在差异性。为了消除这种差异,并最大程度地还原一次行波的特征,必须对二次行波进行分频处理。

2 CEEMD原理

EMD可以依次分解任何时间序列信号的不同尺度分量,生成多组不同尺度特征的数据序列,即固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)^[27]。但EMD的模态混叠效应影响分解结果,而改进的集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)的信号无法完全去除白噪声序列^[28]。本文采用CEEMD,在原始信号中加入两个互为相反数的白噪声,相较于EEMD,CEEMD分解得到的IMF中白噪声残余更少且在较少的累加次数下就能提供理想的分解结果。CEEMD具体的步骤如下。

1)在原始信号 $x(t)$ 中,添加 i 次相反的白噪声 $n_i^+(t)$ 和 $n_i^-(t)$,得到叠加噪声后的时间序列信号 $N_i^+(t)$ 和 $N_i^-(t)$ 。

2)新的信号 $N_i^+(t)$ 和 $N_i^-(t)$ 进行EMD分解得到 m 个IMF分量 $C_{ij}^+(t)(j=1, 2, \dots, m)$ 和一个剩余分量 R_i^+ ,以及 m 个IMF分量 $C_{ij}^-(t)(j=1, 2, \dots, m)$ 和一个剩余分量 R_i^- 。

3)重复以上步骤 M 次,并将各相应的IMF和剩余分量求和取均值,得到最终的IMF分量。

3 基于LSQR的二次行波反演

3.1 最小二乘法反演模型

为了解决二次行波畸变问题,不仅要CEEMD对二次行波进行局部频段分析,也要选择合适的反演算法获得一次行波信号^[29-31]。一、二次行波信号的关系为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{y}$ 为经行波传感器产生的二次行波矩阵; $\mathbf{x}$ 为待求一次行波信号; $\mathbf{A}$ 为Toeplitz矩阵,可由传感器单位冲激响应产生。

利用最小二乘法来求解一、二次行波反演问题,可以得到:

$$\min \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2 \quad (2)$$

式中 $\|\cdot\|_2$ 表示向量的 L_2 范数。

将式(2)展开求解,可以得到:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (3)$$

当已知矩阵 $\mathbf{A}$ 和二次行波信号 $\mathbf{y}$ 时,可通过共轭梯度法、正交化方法等得到一次行波信号 $\mathbf{x}$ 。但由于二次行波测量过程中的噪声以及矩阵 $\mathbf{A}$ 阶数过大使得波形反演问题具有严重的病态性,采用以上方法无法获得方程的准确解。对于求解大型病态矩阵方程^[32-33],LSQR算法首先通过正交变换和QR分解将行波反演转变为最小二乘问题;进而,利用Lanczos迭代法将病态矩阵 $\mathbf{A}$ 进行双对角化,减小了计算量;最后,对双对角阵进行QR分解后求解最小二乘问题,即可获得反演波形。

3.2 Lanczos对角化

Lanczos对角化可将系数矩阵化为双对角阵,即把大规模问题投影到低维子空间,然后对低维问题求解可得到原大规模问题的解,这一过程可大大降低矩阵的计算量,提高反演计算的效率。

对于式(2)中的矩阵 $\mathbf{A}$ 进行Lanczos对角化,对于 $k(k \ll N)$ 维的两个正交子空间,其中 N 为原始大矩阵 $\mathbf{A}$ 的维度, k 为降阶后子空间的维度,定义

U_k 和 V_k 分别为其正交基, 有:

$$U_{k+1}^T A V_k = B_k \quad (4)$$

式中 B_k 为一个低维双对角矩阵。

B_k 可表示为:

$$B_k = \begin{bmatrix} \theta_1 & & & & \\ \rho_2 & \theta_2 & & & \\ & \rho_3 & \ddots & & \\ & & \ddots & \theta_i & \\ & & & \rho_{i+1} & \ddots & \theta_k \\ & & & & \rho_{k+1} & \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(k+1) \times k} \quad (5)$$

式中 ρ_i 、 θ_i 分别为近似奇异值、估计残差。

在 Lanczos 对角化迭代过程中, 各参数满足:

$$\begin{cases} \rho_1 u_1 = y \\ \theta_1 v_1 = A^T u_1 \\ \theta_{i+1} v_{i+1} = A^T u_{i+1} - u_{i+1} v_i \\ \rho_{i+1} u_{i+1} = A v_i - \theta_i u_i \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} \rho_1 = \|y\| \\ \theta_1 = \|v_1\| \\ \|u_i\|_2 = \|v_i\|_2 = 1, \quad i = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

式中: y 为整个迭代过程的输入起始向量, u_i 和 v_i 分别为第 i 步迭代产生的左正交基向量和右正交基向量。将迭代法以矩阵形式表示, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} U_{k+1}(\rho_1 e_1) = y \\ A V_k = U_{k+1} B_k \\ A^T U_{k+1} = V_k B_k^T + \theta_{k+1} v_{k+1} e_{k+1}^T \end{cases} \quad (8)$$

式中: e_1 为单位向量; e_{k+1} 为 $k+1$ 维单位矩阵的最后一列; θ_{k+1} 为矩阵 B_{k+1} 的第 $k+1$ 个对角线元素; U_{k+1} 、 V_k 分别为:

$$\begin{cases} U_{k+1} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{k+1}] U_{k+1}^T U_{k+1} = E \\ V_k = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_k] V_k^T V_k = E \end{cases} \quad (9)$$

式中 E 为单位矩阵。

3.3 QR 分解求最小二乘问题

在经 k 步双对角化迭代过程后, 得到正交矩阵 U_{k+1} 和 V_k 以及双对角阵 B_k , 假设有 $x_k = V_k p_k$ ($p_k \in \mathbb{R}^k$), $r_k = Ax_k - y$, 则:

$$\begin{aligned} r_k &= Ax_k - y = A V_k p_k - U_{k+1}(\rho_1 e_1) \\ &= U_{k+1} B_k p_k - U_{k+1}(\rho_1 e_1) \\ &= U_{k+1} (B_k p_k - \rho_1 e_1) = U_{k+1} t_{k+1} \end{aligned} \quad (10)$$

其中:

$$t_{k+1} = B_k p_k - \rho_1 e_1 \quad (11)$$

由于 U_{k+1} 是正交矩阵, 正交变换不改变矩阵的范数, 式(2)可转化为:

$$\begin{aligned} \min \|Ax - y\|_2 &= \min \|r_k\|_2 = \min \|U_{k+1} t_{k+1}\|_2 \\ &= \min \|t_{k+1}\|_2 = \min \|B_k p_k - \rho_1 e_1\|_2 \end{aligned} \quad (12)$$

求解式(2)的最小二乘解问题, 就可转换为选取适当的解 p_k 使得 $\min \|t_{k+1}\|_2$ 最小。由于矩阵 B_k 的维数为 $(k+1) \times k$, 对矩阵 B_k 进行 QR 分解, 即存在正交矩阵 $Q_{k+1} \in \mathbb{R}^{(k+1) \times (k+1)}$ 和上三角矩阵 $R_k \in \mathbb{R}^{k \times k}$ 使得:

$$Q_{k+1} (B_k, \rho_1 e_1) = \begin{bmatrix} R_k & f_k \\ 0 & \varphi_{k+1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: 矩阵 $f_k \in \mathbb{R}^{k \times k}$; $\varphi_{k+1} \in \mathbb{R}$ 。

由 $Q_{k+1}^T Q_{k+1} = E_{k+1}$ 得:

$$B_k = Q_{k+1}^T \begin{bmatrix} R_k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

对式(11)进行 QR 分解得:

$$Q_{k+1} t_{k+1} = \begin{bmatrix} R_k \\ 0 \end{bmatrix} p_k - \begin{bmatrix} f_k \\ \varphi_{k+1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

求解式(12)可等效为:

$$\min \left\| \begin{bmatrix} R_k \\ 0 \end{bmatrix} p_k - \begin{bmatrix} f_k \\ \varphi_{k+1} \end{bmatrix} \right\| \quad (16)$$

经上述分析可以得出, 在 LSQR 算法中, 随着不断迭代, 在正交变换过程中形成的 φ_{k+1} 会逐渐趋于 0, $R_k p_k$ 也逐步趋近于 f_k , 最后由 $x_k = V_k p_k$ 获得最小二乘的最优解。迭代结束条件为反演波形与原始波形之差 ε 小于给定值或者达到最大迭代数量 M 。

综上, 为精确检测一次电压行波信号, 根据行波传感器的传变特性以及 LSQR 算法, 本文提出的行波反演方案如图 3 所示。对于 LSQR 算法, 允许的残差范数的阈值为 10^{-4} , 正交化处理参数为 1, 最大迭代次数为 100 次。

4 仿真分析

4.1 实验验证

为验证本文提出的算法对行波反演的有效性, 通过 Simulink 建立如图 4 所示的 500 kV 输电线路的仿真模型, 线路 MN 长度为 300 km, 仿真频率为 1 MHz。首先, 在 MN 线路距离母线 M 端 100 km 处设置单相接地故障, 通过设置不同的过渡电阻 R_g 和适当的噪声干扰来获得一次行波信号。然

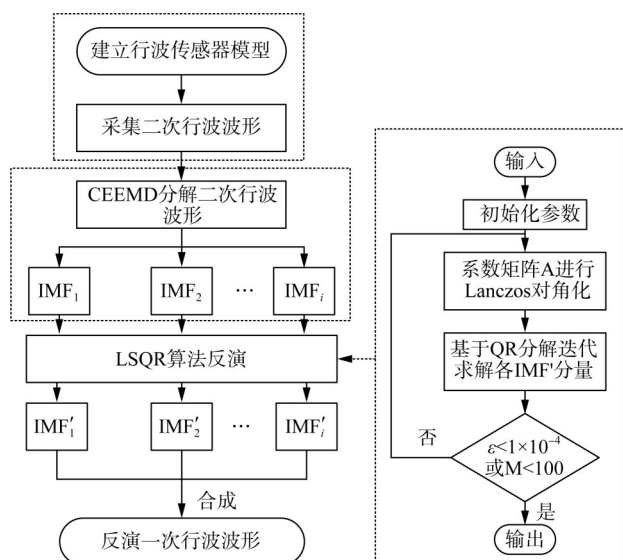


图3 波形反演流程图

Fig. 3 Flow chart of traveling wave inversion

后,将一次行波信号通过图1所示的电压行波传感器仿真模型,得到仿真的二次行波信号。仿真一、二次行波波形如图5所示,仿真得到的一、二次行波波形差异明显,本文对二次波形进一步频反演。

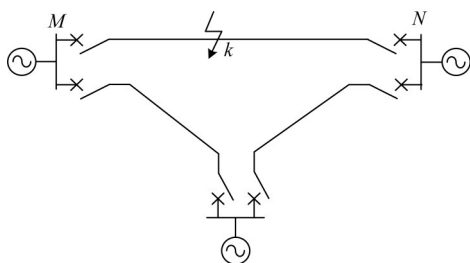


图4 故障线路模型

Fig. 4 Fault line model

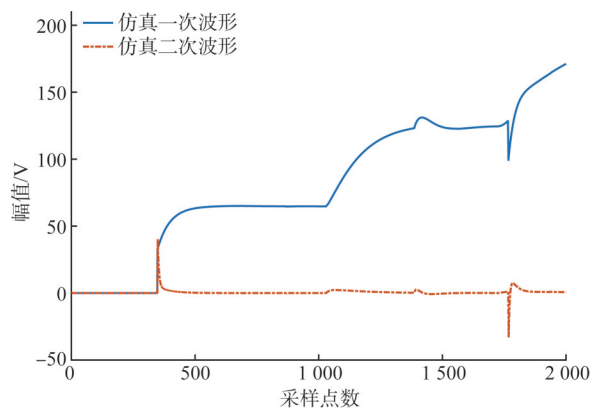


图5 仿真行波波形

Fig. 5 Simulation of the traveling waves

利用CEEMD将仿真得到的二次行波分解(CEEMD分解过程中,附加噪声标准差之比 $N_{std}=0.1$,平均次数 $N_E=10$,分解最多迭代50次),图6(a)为CEEMD分解结果。分解结果为9个IMF分量以及1个残余函数R,各分量对应的频谱如图6(b)所示。

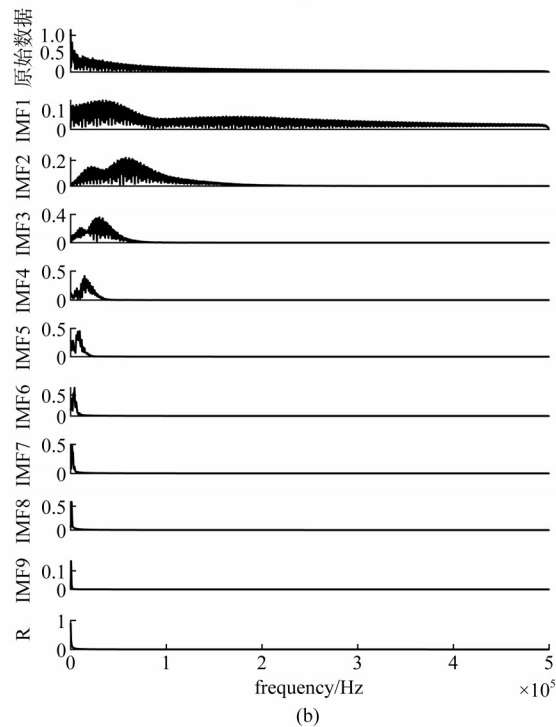
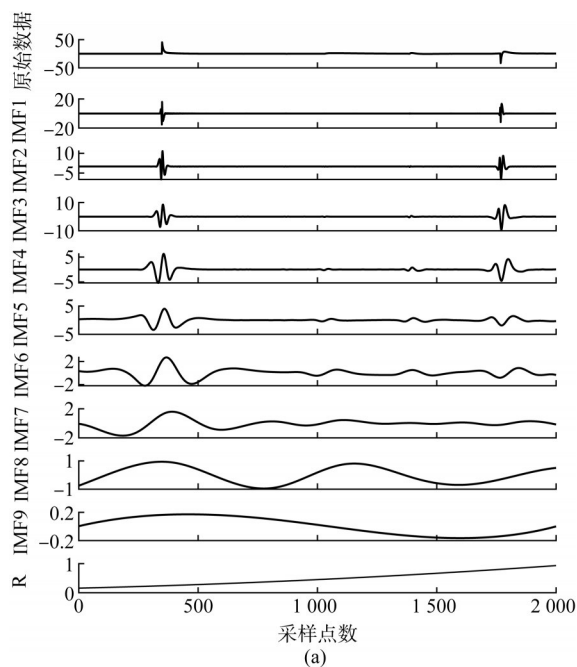


图6 CEEMD结果与IMF分量对应频谱图

Fig. 6 CEEMD decomposition results and IMF components corresponding spectrum

IMF1~IMF9 以及 R 经 LSQR 算法反演后的结果如图 7 所示。将反演得到的 IMF'1~IMF'9 以及 R' 分量叠加, 可得如图 8 所示的分频反演一次行波信号。为了凸显分频反演方法的优越性, 本文将二次行波直接反演, 反演结果如图 8 所示。

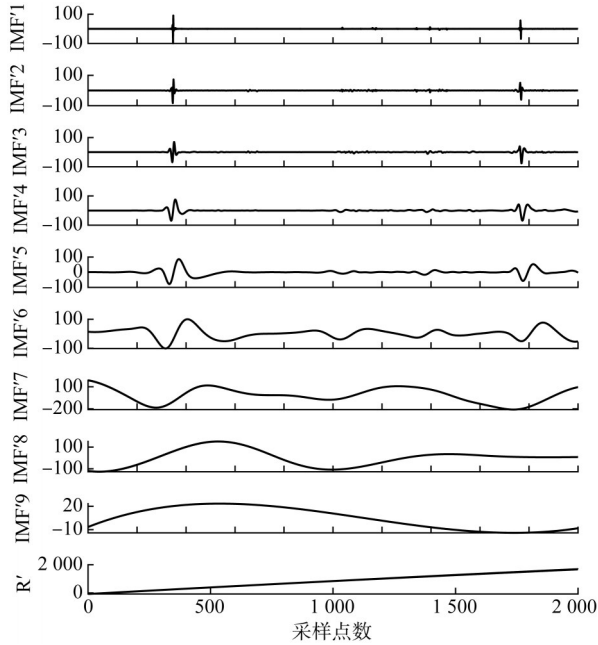


图 7 反演一次行波信号 IMF'分量

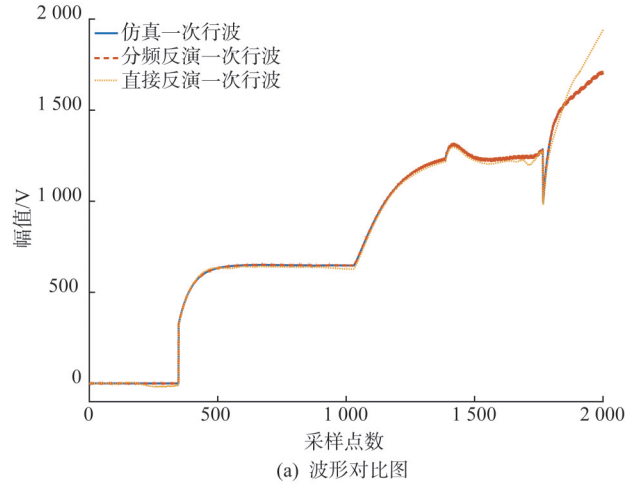
Fig. 7 IMF' components of primary traveling wave signal of Inversion

通过引入波形相关系数 ρ 反应分频反演波形、直接反演波形与仿真波形之间的误差, 如式 (17) 所示。

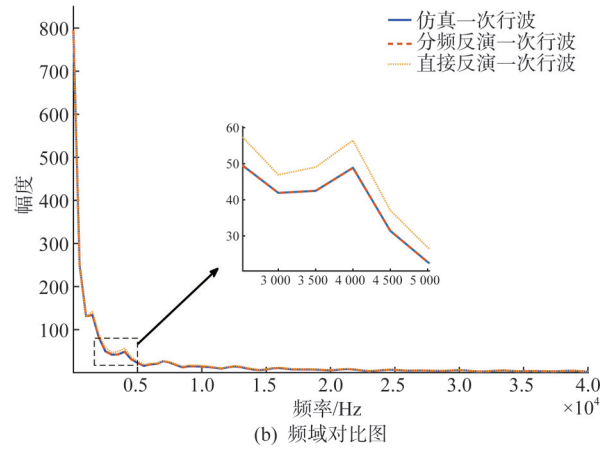
$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^T (x_i - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T x_i) (y_i - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^T (x_i - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T x_i)^2 (y_i - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T y_i)^2}} \quad (17)$$

式中: T 为信号总长度; x_i 和 y_i 分别为仿真信号和反演信号的第 i 个分量。 ρ 值越靠近 1 则表示两波形相似, 绝对值越靠近 0 则相反。

经计算, 仿真一次波形与分频反演一次波形的波形相关系数为 0.99, 而直接反演一次波形与其的波形相关系数为 0.97, 分频反演一次行波波形基本接近仿真一次行波波形。在频域上, 分频反演一次行波与仿真一次行波的频谱形似度极高, 而直接反演一次行波存在频率偏差, 综上说明分频反演方法精确度极高, 可对一次行波信号进行精确检测。



(a) 波形对比图



(b) 频域对比图

图 8 直接反演与分频反演对比图

Fig. 8 Comparison of direct and frequency division inversion

4.2 误差分析

行波信号的初始行波波头幅值以及到达时刻是反应反演一次行波的关键因素。分析图 8 的反演结果, 可得实际波头到达时刻为 688 μs , 实际波头幅值为 596.49 V。反演得到的波头到达时刻为 688.4 μs , 反演得到的波头幅值为 593.22 V。经分析可得, 行波波头到达时刻的相对误差 Δt 为 0.058 %, 行波波头幅值的相对误差 ΔI 为 0.55 %。行波波头幅值和到达时刻的误差表明分频反演的一次行波信号能准确反应实际行波波形, 具有很高的准确性。

仍采用图 4 所示的故障模型, 在不同的故障初相角、过渡电阻和噪声情况下, 对本文所提的反演算法进行验证。设置线路 100 km 处发生单相接地故障, 对二次信号加入信噪比为 6、10、20、30 dB 的白噪声, R_g 为故障电阻, θ 为故障初相角, t_1 和 I_1 分别为实际行波波头的到达时刻和幅值, t_2 和 I_2 分

别为反演行波波头的到达时刻和幅值。

表1 故障信息对比

Tab. 1 Comparison of fault information

信噪比/dB	R_g/Ω	$\theta/(^\circ)$	$t_1/\mu\text{s}$	I_1/A	$t_2/\mu\text{s}$	I_2/A	$\Delta t/\%$	$\Delta I/\%$
30	10	30	564	558.82	564.3	556.47	0.05	0.42
		90	564	460.13	564.2	458.34	0.04	0.39
	100	30	564	390.44	564.4	387.94	0.07	0.64
		90	564	429.23	564.3	426.74	0.05	0.58
20	10	30	564	558.82	564.5	554.68	0.09	0.74
		90	564	460.13	564.4	457.42	0.07	0.59
	100	30	564	390.44	564.7	387.16	0.12	0.84
		90	564	429.23	564.6	426.10	0.11	0.73
10	10	30	564	558.82	564.9	552.34	0.16	1.16
		90	564	460.13	564.7	455.67	0.12	0.97
	100	30	564	390.44	565.1	386.22	0.19	1.08
		90	564	429.23	564.9	424.98	0.16	0.99
6	10	30	564	558.82	565.2	549.99	0.21	1.58
		90	564	460.13	564.9	453.96	0.160	1.34
	100	30	564	390.44	565.4	384.58	0.248	1.50
		90	564	429.23	565.1	423.73	0.195	1.28

由表1可知,过渡电阻越小、故障初相角越大和信噪比越大的情况下,实际行波与反演行波的波头到达时刻和幅值的相对误差 Δt 和 ΔI 越小。但相对于过渡电阻和故障初相角的变化,噪声的变化对反演精度的影响较大,随着噪声强度的增加,相对误差 Δt 和 ΔI 均增加。在相对误差最大的情况下,实际行波波形与反演行波波形的波形相似度仍高于0.98。本文所提方法在不同故障工况下反演得到的一次行波信号与实际一次行波信号存在较小的故障信息误差,反演所得一次行波的故障信息可以反映真实的故障信息。

4.3 反演方法对比

为验证本文方法的优越性,将本文所提方法与文献[20–21]所提方法进行对比。

4.3.1 VMD和共轭梯度算法对比

文献[20]采用VMD和共轭梯度算法进行分频反演获得一次行波信号,首先采用VMD分解二次行波得到各IMF分量,利用共轭梯度算法得到各IMF分量的反演分量后合成得到一次行波。在VMD中,参数 α 、 τ 、 c 取系统默认值,即 $\alpha=2\,000$,

$\tau=0$, $c=1\times 10^{-7}$ 。分解尺度参数 K 决定了分解层数,经过仿真分析,参数 K 取值为4,VMD分解仿真二次行波结果如图9所示。

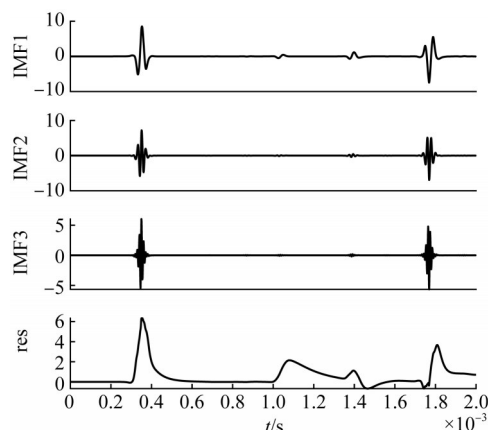


图9 VMD分解结果

Fig. 9 Decomposition results of VMD

将分解后的各IMF分量通过共轭梯度算法进行反演,得到反演后的IMF'分量,如图10所示。

将反演得到的IMF'1~IMF'3与 R' 分量线性叠加可得分频反演一次行波,如图11所示。经计算,通过VMD和共轭梯度算法得到的一次波形与仿真一次行波的相似度仅为0.978,该方法所得一次行波的精度低于本文方法。

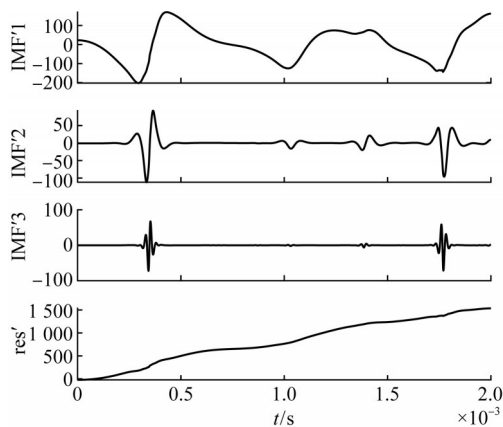


图10 共轭梯度算法反演一次行波信号IMF'分量

Fig. 10 Inversion of IMF' components of primary traveling wave signal by conjugate gradient algorithm

4.3.2 EMD和维纳滤波算法对比

文献[21]采用EMD和维纳滤波反演算法解决一二次行波波形不一致的问题。维纳滤波法通常用于恢复损坏的信号或图像,虽然在某些情况下可以有效地恢复信号,但由于行波反演问题固有的病态

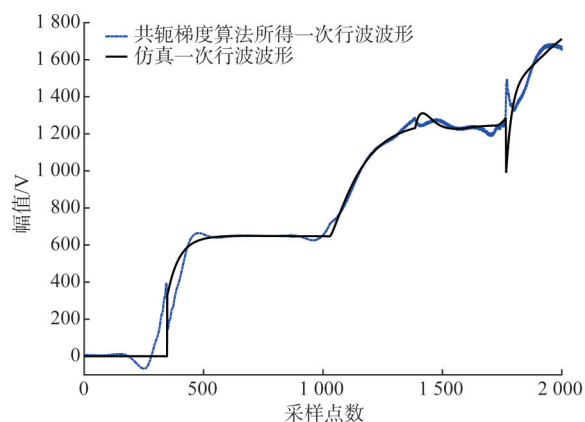


图 11 所提反演方法和共轭梯度方法结果对比图

Fig. 11 Comparison of results between the proposed inversion method and conjugate gradient method

性, 输入数据中的微小扰动会导致输出结果不稳定。对于不适定问题, LSQR 法在提高解的精度方面优于维纳滤波法。此外, 由于模态混叠效应的影响, 利用 EMD 分解二次行波得到的 IMF 分量进行反演会影响结果的精度。

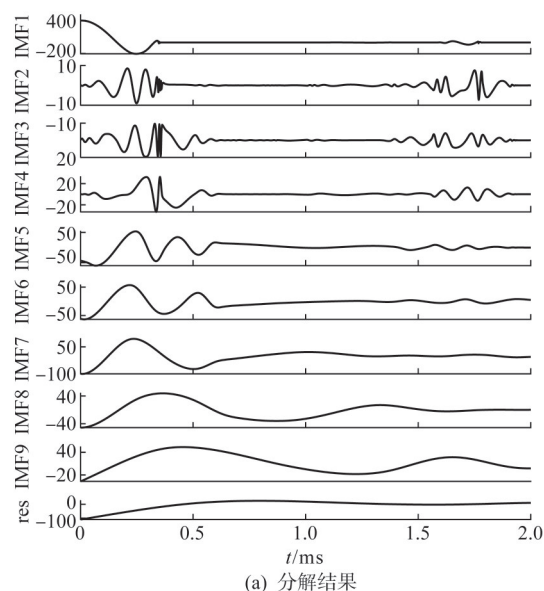
将二次行波进行 EMD 分解, 分解结果如图 12 (a) 所示。将分解后的各 IMF 分量通过维纳滤波法算法进行反演, 得到反演后的 IMF' 分量, 如图 12 (b) 所示。

仿真结果表明, 与 CEEMD 分解对比, EMD 分解和反演过程中存在模态混叠效应。将文献[21]方法与本文方法进行对比, 如图 13 所示。文献[21]所提方法得到的一次波波形相似度低于本文方法, 模态混叠效应导致故障信息误差显著增加, 不能有效提高反演精度。

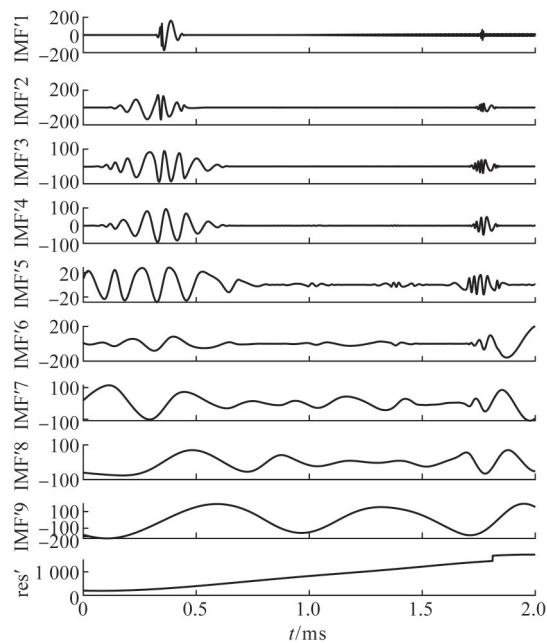
4.4 实验分析

本文在实验室环境下应用图 14 所示的设备进行实验分析。首先利用自研的故障行波发生器产生故障行波信号, 使用数字示波器测量故障发生器输出端的串接无感电阻上的电压, 即可测得一次行波信号。使用数字示波器测量串接在发生器输出线路上的电容式电压互感器输出端的电压, 即可测得二次行波信号。

根据本文所提方法将实测二次行波信号进行分频反演获取一次行波信号, 如图 15 所示。分析可得, 分频反演行波与真实行波的波形相关系数为 0.99。实验结果表明, 所提方法的反演波形与实际波形相似度较高, 可实现真实行波信号的精准



(a) 分解结果



(b) 反演结果

图 12 EMD 分解和维纳滤波反演结果

Fig. 12 EMD decomposition results and inversion results by Wiener filtering method

检测。

5 结论

本文提出了一种基于 CEEMD 和 LSQR 的行波波形精准检测方法, 由实测二次行波信号反演得到真实的一次行波信号。具体结论如下。

1) 采用 CEEMD 将二次行波分解为不同频段的信号进行反演, 将所得反演分量线性叠加, 即可实

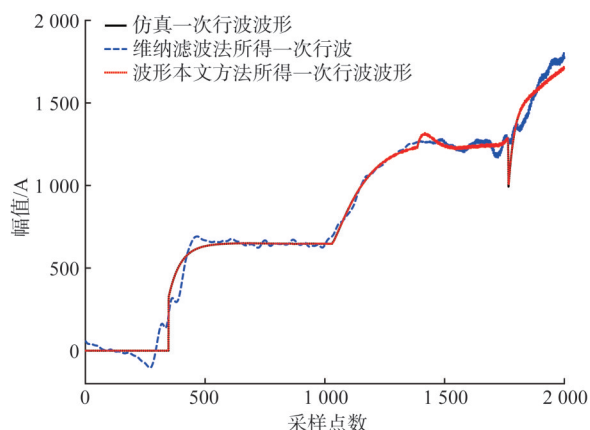


图13 所提反演方法和维纳滤波反演方法结果对比图

Fig. 13 Comparison of results between the proposed inversion method and Wiener filtering inversion method

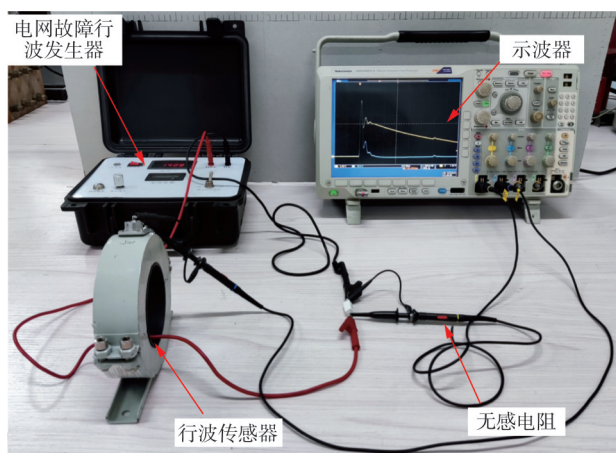


图14 现场测试装置图

Fig. 14 Device diagram for test

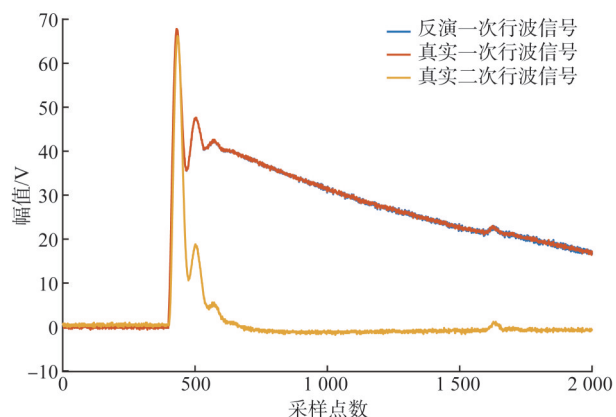


图15 实测波形反演结果

Fig. 15 Results of waveform inversion

现一次行波的精准检测。相较于直接反演,本文分频反演方法所得一次行波信号在时域和频域内与真实一次行波信号相似度极高。

2)本文所提的LSQR方法有较好的收敛性能和抗噪能力,有效解决了波形反演过程中存在的病态问题,提高了反演结果的准确性和稳定性。

3)通过不同故障电阻、故障初相角、信噪比情况下的仿真和实验结果表明,该方法不受模态混叠效应影响,抗噪能力强,反演得到的一次行波故障信息与实测一次行波故障信息误差较小,利用所得反演一次信号可有效提高故障定位精度。

参考文献

- [1] 李泽文,郑盾,曾祥君,等.基于极性比较原理的广域行波保护方法[J].电力系统自动化,2011,35(3):49-53.
LI Zewen, ZHENG Dun, ZENG Xiangjun, et al. A wide-area traveling wave protective method based on polarity comparison principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 49-53.
- [2] 高淑萍,李元泽,宋国兵,等.基于暂态电流行波突变的LCC-MMC混合双极直流输电纵联方向保护[J].南方电网技术,2024,18(2):21-29,56.
GAO Shuping, LI Yuanze, SONG Guobing, et al. Longitudinal directional protection for LCC-MMC hybrid bipolar DC transmission based on transient current traveling wave mutation[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 21-29,56.
- [3] 赵海龙,陈钦柱,梁亚峰,等.一种小电流接地系统故障行波精确定位方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(19):85-93.
ZHAO Hailong, CHEN Qinzhu, LIANG Yafeng, et al. A fault location method of single phase earth fault in small current neutral grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 85-93.
- [4] ZHANG C H, SONG G B, WANG T, et al. Non-unit traveling wave protection of HVDC grids using Levenberg Marquart optimal approximation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2260-2271.
- [5] 傅庆燕,高亮,裴翔羽.基于等效行波的柔性直流电网差动保护研究[J].电力建设,2019,40(3):109-118.
FU Qingyan, GAO Liang, PEI Xiangyu. Study on differential protection based on equivalent travelling-wave for VSC-based DC grid[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(3): 109-118.
- [6] 董新洲,陈彬书,董启环,等.应用分布式电压传感技术的配电线路行波故障测距[J].电网技术,2023,47(12):4837-4847.
DONG Xinzhou, CHEN Binshu, DONG Qihuan, et al. Traveling waves fault location of distribution lines based on distributed voltage sensing technology[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4837-4847.
- [7] 肖剑锋,王剑飞,何志满.基于罗氏线圈和微分环的雷电流在线监测综述[J].电测与仪表,2018,55(17):1-8.
XIAO Jianfeng, WANG Jianfei, HE Zhiman. Reviews of lightning current online monitoring based on Rogowski coil and differential loop[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 1-8.
- [8] 李鹏,袁智勇,田兵,等.基于隧道磁电阻的微型电流测量技

- 术[J]. 南方电网技术, 2019, 13(4): 2-10, 17.
- LI Peng, YUAN Zhiyong, TIAN Bing, et al. Micro current measurement technology based on tunnel magnetoresistance [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4): 2-10, 17.
- [9] 朱全聪, 翟少磊, 徐灿, 等. 电容式CVT电压补偿电路研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(12): 107-110.
- ZHU Quancong, ZHAI Shaolei, XU Can, et al. Research on capacitive CVT voltage compensation circuit [J]. Power Electronics, 2020, 54(12): 107-110.
- [10] DUBICKAS V, EDIN H. High-frequency model of the Rogowski coil with a small number of turns[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2284-2288.
- [11] 金丹, 徐春营, 岳鑫桂, 等. 输电线路雷电流测量用Rogowski线圈低频失真校正技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 96-100.
- JIN Dan, XU Chunying, YUE Xingui, et al. Low-frequency distortion correction technology of Rogowski coil applied to lightning current measurement on transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 96-100.
- [12] 束洪春, 张广斌, 朱子钊, 等. ± 800 kV直流输电线路雷电流波形反演恢复研究[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(2): 3-13.
- SHU Hongchun, ZHANG Guangbin, ZHU Zizhao, et al. Inversion and restoration of lightning current waveform for shielding failure in ± 800 kV UHVDC transmission lines [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(2): 3-13.
- [13] 李泽文, 杜昱东, 林依勤, 等. 结合Tikhonov正则化的电压行波精确检测方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1049-1055.
- LI Zewen, DU Yudong, LIN Yiqin, et al. A method of voltage wave accurate detection based on Tikhonov regularization theory [J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1049-1055.
- [14] 梁生贤, 王桥, 焦彦杰, 等. LSQR法在位场反演中的分析与评价[J]. 物探与化探, 2019, 43(2): 359-366.
- LIANG Shengxian, WANG Qiao, JIAO Yanjie, et al. Analysis and evaluation of the potential field inversion using LSQR method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(2): 359-366.
- [15] 易姝慧, 郭俊岑, 刁新平, 等. 基于LSQR与系统距离聚类算法的专变用户非介入式负荷辨识[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 60-68.
- YI Shuhui, GUO Juncen, DIAO Xinping, et al. Non-intrusive load identification for special transformer users based on LSQR and system distance clustering algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 60-68.
- [16] 杨帆, 代锋, 姚德贵, 等. 基于最小二乘QR分解算法的接地网磁场重构方法及应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 184-191.
- YANG Fan, DAI Feng, YAO Degui, et al. Least square QR factorization arithmetic based magnetic field reconstruction for grounding grid and its application [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 184-191.
- [17] 甘磊, 张哲, 叶皖, 等. 基于CVT二次信号的实用化行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 52-56.
- GAN Lei, ZHANG Zhe, YE Huan, et al. Practical method in traveling-wave fault location based on the secondary signal of CVT [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 52-56.
- [18] 阎秀格, 孙阳, 于存湛, 等. 油浸倒立式电流互感器主绝缘电场分析与优化设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 37-43.
- YAN Xiuke, SUN Yang, YU Cunzhan, et al. Electric field analysis and optimal design of main insulation for oil-immersed inverted current transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 37-43.
- [19] LI Z W, LV J J, XI Y H, et al. Accurate detection method of voltage traveling-wave-based on waveform inversion [J]. Electric Power Systems Research, 2020(178): 106033.1-106033.10.
- [20] LI Z W, MU L Z, XI Y H, et al. Accurate detection method of voltage traveling waves based on frequency division inversion [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(131): 107037.1-107037.12.
- [21] 李泽文, 任申, 贺子凝, 等. EMD分解结合维纳滤波的电压行波精确检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 28-34.
- LI Zewen, REN Shen, HE Zining, et al. Accurate detection method for voltage traveling wave based on EMD decomposition combined with Wiener filtering [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(12): 28-34.
- [22] 李宏仲, 叶翔宇, 付国. 信号分解技术在新能源发电功率预测中的应用评述[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 3-15.
- LI Hongzhong, YE Xiangyu, FU Guo. Review on the application of signal decomposition technology in power prediction of new energy power generation [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 3-15.
- [23] 刘文杰, 刘禾, 王英男, 等. 基于完整自适应噪声集成经验模态分解的LSTM-Attention网络短期电力负荷预测方法[J]. 电力建设, 2022, 43(2): 98-108.
- LIU Wenjie, LIU He, WANG Yingnan, et al. Short-term power load forecasting method based on CEEMDAN and LSTM-Attention network [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(2): 98-108.
- [24] 王果, 雷武, 闵永智, 等. 改进EEMD算法在高压并联电抗器声信号去噪中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 164-174.
- WANG Guo, LEI Wu, MIN Yongzhi, et al. Application of an improved EEMD algorithm in high voltage shunt reactor sound signal denoising [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 164-174.
- [25] 戴魏, 郑玉平, 白亮亮, 等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 46-54.
- DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, et al. Analysis of protective current transformer transient response [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [26] 李宝伟, 石欣, 王志伟, 等. 基于罗氏线圈电流互感器的等传变距离保护[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1353-1362.
- LI Baowei, SHI Xin, WANG Zhiwei, et al. Distance relay based on rogowski coil current transformer by using instantaneous value after equal transfer processes [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1353-1362.
- [27] 吴慧军, 郭超雨, 苏承国, 等. 基于EEMD-GRU-MC的短期风功率组合预测方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(2): 66-73.

- WU Huijun, GUO Chaoyu, SU Chengguo, et al. Combined prediction method for short-term wind power based on EEMD-GRU-MC[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(2): 66 – 73.
- [28] 李大勇, 都明亮, 田春光, 等. 基于总体平均经验模态分解的混合储能系统协调优化控制[J]. 电力建设, 2018, 39(4): 92 – 99.
- LI Dayong, DU Mingliang, TIAN Chunguang, et al. Coordinated optimization control of hybrid energy storage system based on ensemble empirical mode decomposition[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(4): 92 – 99.
- [29] 王智, 贺星, 苏玉萍, 等. 基于小波分析的智能电能表动态测试信号模型与误差分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 203 – 210.
- WANG Zhi, HE Xing, SU Yuping, et al. Dynamic test signal model and error analysis of smart electricity meter based on wavelet analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 203 – 210.
- [30] 韩旭涛, 史天一, 王昊天, 等. 基于实体GIS设备试验的局部放电光学信号传播特性研究[J]. 广东电力, 2024, 37(3): 82 – 89.
- HAN Xutao, SHI Tianyi, WANG Haotian, et al. Study on propagation characteristics of partial discharge optical signals based on physical gis equipment testing[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(3): 82 – 89.
- [31] 叶柏贤, 王学梅, 冯俊杰, 等. 不对称工况下并网换流器小信号精准建模及其稳定性量化分析[J]. 南方电网技术, 2025, 19(5): 1 – 15.
- YE Baixian, WANG Xuemei, FENG Junjie, et al. Accurate modeling and stability quantitative analysis of small signal for grid-connected converter under asymmetric operating conditions[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(5): 1 – 15.
- [32] HUANG Y, JIA Z. Some results on the regularization of LSQR for large-scale discrete ill-posed problems[J]. Science China Mathematics, 2017, 60(4): 701 – 718.
- [33] 陈震, 王震, 余岭, 等. 预处理最小二乘QR分解法识别桥梁移动荷载的优化分析及试验研究[J]. 振动工程学报, 2018, 31(4): 545 – 552.
- CHEN Zhen, WANG Zhen, YU Ling, et al. Optimization analysis and experimental study of preconditioned least square QR-factorization for moving force identification[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(4): 545 – 552.

收稿日期: 2024-05-08; 网络首发日期: 2024-09-29

作者简介:

陈朝晖(1979), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统继电保护与控制;

汤涛(1989), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为配电网接地故障辨识与故障定位, ttqzh0102@163.com;

丁晓兵(1979), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统继电保护管理。

广 告

平高集团(河南)电力器材科技有限公司……………封底
南方电网电力科技股份有限公司……………A2

长园深瑞继保自动化有限公司……………A3