

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200070

基于自适应卡尔曼滤波残差分析的雷击故障定位

席燕辉, 胡康, 王康

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 雷击是引起电力传输和配电系统中瞬态、故障和停电的重要原因。为提高在含噪环境下雷击故障点检测的准确性与可靠性, 提出了一种基于最大似然(KF-ML)卡尔曼滤波残差分析的雷击故障定位方法。首先通过比较短路故障电流与雷击故障电流之间的瞬态特性差异来区分出短路故障和雷击故障。当行波波头到达时, 估计的滤波残差呈现出尖锐的奇异性。通过比较初始行波到达两端的时间, 确定雷击侧和故障侧, 进一步根据双端测距法可以计算出雷击点距离。同时通过初始雷击行波到达故障侧的时间和来自故障点的反射波时间来获得故障点距离。通过模拟雷电流的仿真分析表明了该方法能有效检测到行波波头, 并将其应用在不同条件下的雷击定位和故障定位测试中, 且灵敏度高。

关键词: 瞬态电流; 卡尔曼滤波; 最大似然; 滤波残差; 奇异性

Lightning strike fault location based on adaptive Kalman filter residual analysis

XI Yanhui, HU Kang, WANG Kang

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Lightning strikes are a significant cause of transient, faults and outages in electric power transmission and distribution systems. To improve the accuracy and reliability of lightning stroke fault detection in a noisy environment, a locating method based on Kalman Filter Maximum Likelihood (KF-ML) is proposed. First, short-circuit faults and lightning faults are distinguished by comparing the difference of transient characteristics between their currents. The filter residual will show a sharp singularity when the traveling wave arrives. In addition, the lightning strike side and fault side can be determined by comparing the time when the initial traveling wave reaches both ends. In accordance with the two-terminal distance measurement method, the distance of the lightning strike point can be calculated. The fault distance can be obtained by calculating the time that the initial lightning wave reaches the fault side and the time of the reflected wave from the fault point. The simulation analysis of the simulated lightning current shows that this method can effectively detect the traveling wave head and apply it to the lightning strike location and fault location test under different conditions, and the sensitivity is high.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507015 and No. 61673388) and Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2018JJ2439).

Key words: transient current; Kalman filter; maximum likelihood; filtering residuals; singularity

0 引言

在我国高压输电线路中, 由于线路跨度大、距离远、地理分布广、气象条件复杂, 雷击成为继操作过电压之后威胁电网正常供电的首要因素^[1-5]。因

湖南省教育厅优秀青年项目资助(18B130)

此, 雷击故障识别和精确定位有助于制定更有效的输电线路策略, 这对输电线路的安全运行至关重要。

雷击故障的识别与定位关键在于雷击行波信号波头的准确检测。在早期研究中, 识别雷击行波的方法有: 傅里叶变换(FT)^[6-8]、短时傅里叶变换(STFT)^[9-11]、希尔伯特-黄变换(HHT)、小波变换(WT)^[12-14]等, 其中, 傅里叶变换只能获得平稳信号的频率分量, 并且无法获取时间信息。短时傅里叶

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51507015, 61673388); 湖南省自然科学基金项目资助(2018JJ2439);

变换使用“时间频率”窗口来处理非平稳信号的急剧转换, 但是当窗口大小固定时, 它不提供时间和频率的多种分辨率^[15]。小波变换是应用最为广泛的非平稳信号分析方法, 在故障定位方面表现出良好的效果, 但是它具有一些缺陷, 比如计算复杂、对噪声水平的敏感以及精度对基小波选取的依赖等, 选取不当就难以获得理想的效果, 不具有自适应性^[16]。希尔伯特-黄变换处理非平稳信号, 无需基函数选择, 能根据信号的特性进行自适应分解, 但它在经验模态分解的时候容易产生模态混叠效应^[17]。现有的雷击行波识别方法在分析故障信号时, 不能同时做到不同故障情况的自适应性 and 有噪声情况下行波信号的精确辨识, 从而限制了雷击故障的识别与定位技术的实用性。

Kalman 滤波算法由美籍科学家卡尔曼提出^[18-21], 其具有算法简单、精度高且对噪声鲁棒性较强等特点, 在多个领域都具有广泛的应用前景。例如: 在定位导航、电力系统中的电能质量分析, 动态状态估计、继电保护等问题上都处于至关重要的位置。文献[22]对电网故障电流信号采用卡尔曼滤波算法对其进行预估及校正, 得到校正后的电网电流信号幅值, 利用幅值的奇异点进行行波检测分析。

由于卡尔曼滤波方法完全基于时域, 而不需要将信号转换到频域空间, 因此它克服了相移和幅度衰减的缺陷^[23]。但在很多实际应用场合, 由于系统模型本身发生了变化或建模误差, 传统滤波算法受到了限制。针对噪声参数的不确定性, 本文提出了一种基于极大似然的自适应卡尔曼滤波方法(KF-ML), 该滤波算法的主要思路是利用极大似然对系统和量测噪声方差 Q 和 R 进行实时估计和调整, 以反映系统模型的变化。提出的 KF-ML 方法不仅可以自适应地优化误差协方差矩阵, 还可以通过最大似然(ML)来优化初始条件, 并由 KF 准确估计振幅(即状态)。而且, 当雷击引起的行波波头到达 M 或 N 端时, 估计的残差表现出明显的奇异性, 可以精确确定前两个连续行波波头的到达时间。因此, 可以通过比较初始行波到达 M 和 N 端的时间来区分雷击侧和故障侧。进一步, 根据初始雷击行波到达变电站 M 和 N 的时间差来计算雷击点的位置。通过 ATP 模拟产生的雷击故障数据进行仿真分析, 结果表明了该算法能快速检测到雷击点, 且精确度高。

1 雷击瞬态电流特性分析

当雷击发生时, 雷击电流的大小和波形与许多因素有关, 如输电线路的位置和环境, 季节和气候。

因此它的幅度和波形是随机的。据研究, 雷电流在不同雷击条件下存在一些较大差异, 但实际测量数据表明它们都是单极脉冲波。通常可用简单的双指数函数表示雷击电流^[24-25], 该函数产生的波形接近真实雷电流源产生的波形。双指数函数在数学上是通过两个衰减指数之差定义的, 如式(1)。

$$i(t) = I_0 \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \quad (1)$$

式中: I_0 为电流幅度; T_1 和 T_2 分别为波前时间常数和波尾时间常数。波前时间常数 T_1 约为 $1 \sim 4 \mu\text{s}$, 平均值为 $2.6 \mu\text{s}$; 波尾时间常数 T_2 约为 $20 \sim 100 \mu\text{s}$, 平均值约为 $50 \mu\text{s}$ 。在模拟中, 波前和波尾分别选择为 $2.6 \mu\text{s}$ 和 $50 \mu\text{s}$, 即 $2.6 \mu\text{s}/50 \mu\text{s}$ 。

为了获得最大电流 I_{\max} 和最大陡度(电流导数的最大幅度) $I_{d \max}$, 双指数函数的一阶和二阶导数为

$$\begin{cases} \frac{di(t)}{dt} = \frac{I_0}{T_1 T_2} (T_2 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_1 e^{-\frac{t}{T_2}}) \\ \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = \frac{I_0}{(T_1 T_2)^2} (T_1^2 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2^2 e^{-\frac{t}{T_2}}) \end{cases} \quad (2)$$

且一、二阶导数满足以下条件, 即:

$$\begin{cases} \frac{di(t)}{dt} = 0 \\ \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由此可得:

$$\begin{cases} t_1 = \ln \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \\ t_2 = 2 \ln \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \end{cases} \quad (4)$$

这里, t_1 和 t_2 分别表示双指数函数的一阶和二阶导数等于零的时间。

因此, 当时间分别为 $8.1086 \mu\text{s}$ 和 $16.2172 \mu\text{s}$ 时, 即可获得最大电流 I_{\max_L} 和最大陡度 $I_{d \max_L}$ 。例如, 当 $I_0 = 15 \text{ kA}$, $T_1 = 2.6 \mu\text{s}$, $T_2 = 50 \mu\text{s}$, 那么, $I_{\max_L} = 1.2091 \times 10^6 \text{ A}$, $I_{d \max_L} = -2.0562 \times 10^8 \text{ A}/\mu\text{s}$ 。

相比之下, 雷击行波与短路故障行波有很大差异, 如波形幅度更大、脉冲宽度更窄、坡度更陡。

短路故障电流可表示为

$$i(t) = I_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + C e^{-\frac{t}{T_\alpha}} \quad (5)$$

式中: I_m 为稳态的短路故障电流幅值; ω_0 为工频的角频率; φ_0 为初始故障相位; C 为常数; T_α 为衰减时间常数, 远大于 $1 (T_\alpha \gg 1)$ 。

为了获得短路故障电流的陡度, 等式(5)中的一阶导数为

$$\frac{di(t)}{dt} = \omega_0 I_m \cos(\omega_0 t + \phi_0) - \frac{C}{T_\alpha} e^{-\frac{t}{T_\alpha}} \quad (6)$$

这里的时间 t 是短路发生后的很短时间内, 通常 $t < 0.5 \text{ ms}$ 。由此可得:

$$\frac{C}{T_\alpha} e^{-\frac{t}{T_\alpha}} \rightarrow 0 \quad (7)$$

因此, 式(6)可简化为

$$\frac{di(t)}{dt} = \omega_0 I_m \cos(\omega_0 t + \phi_0) = \frac{\omega_0 U}{Z_x + Z} \cos(\omega_0 t + \phi_0) \quad (8)$$

式中, Z_x 和 Z 分别代表过渡电阻和特征阻抗。显然, 在式(8)中, 当:

$$\cos(\omega_0 t + \phi_0) = 1 \quad (9)$$

短路故障电流的陡度达到最大值, 即:

$$I_{d_{\max_F}} = \max\left(\frac{di(t)}{dt}\right) = \frac{\omega_0 U}{Z_x + Z} \quad (10)$$

例如, 在 500 kV 传输线上, 当 $Z_x = 10 \Omega$, $Z = 250 \Omega$ 时, 最大陡度由式(11)给出。

$$I_{d_{\max_F}} = 6.0415 \times 10^5 \text{ A}/\mu\text{s} \quad (11)$$

因此, 短路故障电流的最大陡度 (6.0415×10^5) 远小于雷电流 (2.0562×10^8), 这证实了雷电行波具有比短路故障电流更大的陡峭度。

总之, 雷电瞬态信号是一个单极脉冲波, 具有尖锐的初始峰值和短的半峰值持续时间, 短路故障瞬态电流具有平坦的初始峰值和较长的半峰值持续时间; 雷电故障电流波形正负交替, 而短路故障电流波形在短时间间隔内偏向时间轴的一侧。

因此, 根据雷电故障和短路故障产生的瞬态电流波形的特征差异来区分两者。其标准是比较瞬态电流的峰值 (I_{\max}) 和随后 100 μs 的瞬态电流幅度 (I_{100}), 即:

$$\lambda = \left| \frac{I_{100}}{I_{\max}} \right| \quad (12)$$

如果 λ 小于给定值, 可以确定瞬态电流是由雷击产生的, 否则是由短路故障产生的。

2 基于卡尔曼滤波的雷击故障检测

2.1 雷击故障引起的瞬态电流状态空间模型

由雷击引起的短路瞬态电流波形, 在其初始部分表现出雷击波特特性, 在极短时间内, 表现出短路故障波特特性。雷击故障引起的瞬态电流是由故障线路的雷击电流和工频附加电流共同产生的。因此,

观测到的雷击行波信号可以表示为

$$y_k = I_m \sin(\omega_0 k T_s + \phi_1) + I_0 (e^{-\frac{kT_s}{T_2}} - e^{-\frac{kT_s}{T_1}}) + v_k \quad (13)$$

式中: y_k 为观察到的雷电流; I_m 、 ω_0 、 ϕ_1 分别表示工频频率分量的幅度、角频率和初始相角; v_k 表示具有未知协方差 $E(v_k v_k^T) = R_k$ 的零均值白噪声; T_s 为采样间隔, 等于 $1/f_s$ (f_s 是采样频率)。

选取未知状态变量 $X_k = [I_m \sin(\omega_0 k T_s + \phi_1), I_m \cos(\omega_0 k T_s + \phi_1)]$, 可将模型(1)转换成如下的状态空间模型:

$$\begin{cases} X_k = F X_{k-1} + \eta_k & \eta_k \sim N(0, Q_k) \\ y_k = H X_k + v_k & v_k \sim N(0, R_k) \end{cases} \quad (14)$$

因此, 矩阵 F 、 R 、 Q_k 、 R_k 定义为

$$\begin{cases} F = \begin{bmatrix} \cos \omega_0 T_s & \sin \omega_0 T_s \\ -\sin \omega_0 T_s & \cos \omega_0 T_s \end{bmatrix} \\ H = [1 \ 0] \\ Q_k = \text{diag}([\gamma_1^2, \gamma_2^2]) \\ R_k = [\varepsilon^2] \end{cases} \quad (15)$$

根据模型(14)的输出方程, 由预测值 $X_{k|k-1}$ 可得 y_k 的估计残差, 即:

$$e_k = y_k - H X_{k|k-1} \quad (16)$$

由方程(13)可以得到:

$$e_k = I_0 (e^{-\frac{kT_s}{T_2}} - e^{-\frac{kT_s}{T_1}}) + v_k \quad (17)$$

显然, 当发生雷击时, 估计的残差 e_k 包括两个分量并表现出显著奇异性, 可用于确定雷击点的时间。相反, 没有雷击时, 残差表现出强烈随机性, 因为残差被建模为高斯白噪声过程。

2.2 极大似然的自适应卡尔曼滤波方法

为了确定所有未知的常数参数并使用模型(14)从噪声观测中估计状态 X_k , 使用 KF 来估计白噪声观测的状态。然而, 在实际应用中, KF 难以选择过程噪声参数 Q_k 和观测噪声参数 R_k , 这影响了收敛速度和估计性能。因此, 为了获得最佳估计, 本文提出使用最大似然法来最优选择噪声协方差矩阵 Q_k 和 R_k 。

设 $\hat{X}_{k|k-1}$ 、 $S_{k|k-1}$ 表示在给定 $y_{1:k-1} = \{y_1, \dots, y_{k-1}\}$ 条件下 X_k 的条件均值和条件协方差, \hat{v}_k 是 y_k 的预测更新。因此, 可以给出如下卡尔曼滤波器的预测方程:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = E\{\mathbf{X}_k | y_{1:k-1}\} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1} \\ \hat{e}_k = y_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \\ \mathbf{S}_{k|k-1} = E\{(\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_{k|k-1})(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})^T\} = \\ \quad \mathbf{F}\mathbf{S}_{k-1|k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}_k \end{cases} \quad (18)$$

设 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k}$ 、 $\mathbf{S}_{k|k}$ 表示在给定 $y_{1:k} = \{y_1, \dots, y_k\}$ 条件下 \mathbf{X}_k 的条件均值和条件协方差, $\hat{\psi}_k$ 是 v_k 的协方差, 则滤波状态方程为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k|k} = E\{\mathbf{X}_k | y_{1:k}\} = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \hat{e}_k \\ \mathbf{S}_{k|k} = E\{(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{k|k})(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{k|k})^T\} = \\ \quad [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}] \mathbf{S}_{k|k-1} \\ \hat{\psi}_k = E\{\hat{e}_k \hat{e}_k^T\} = \mathbf{H} \mathbf{S}_{k|k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{S}_{k|k-1} \mathbf{H}^T \hat{\psi}_k^{-1} \end{cases} \quad (19)$$

在式(18)、式(19)中, 除了常数参数 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{2M-1}, \gamma_{2M}, \varepsilon$ 之外, 还需要估计初始状态 \mathbf{X}_{00} 和初始条件方差 $\mathbf{S}_{00} = \text{diag}([s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{2M-1} \ s_{2M}])$, 所以要估计的参数是 $\theta = (\gamma_1, \dots, \gamma_{2M}, \varepsilon, x_{1,0}, \dots, x_{2M,0}, s_1, \dots, s_{2M})$ 。假设 e_k 是具有协方差 ψ_k 的高斯白噪声, 则 e_k 的联合条件密度可以写为

$$p(e_k | y_{k-1}, \dots, y_1, \theta) = \frac{1}{2\pi |\psi_k|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} e_k^T \psi_k^{-1} e_k\right) \quad (20)$$

式中, $|\bullet|$ 表示决定因素。因此, 可以如下导出模型(17)的对数似然:

$$\begin{aligned} (-2) \log p(y_N, \dots, y_1 | \theta) = \\ \sum_{k=1}^N (-2) \log p(y_k | y_{k-1}, \dots, y_1, \theta) = \\ \sum_{k=1}^N (-2) \log p(\psi_k | y_{k-1}, \dots, y_1, \theta) \end{aligned} \quad (21)$$

式中, N 代表采样长度。

根据估计的新息 \hat{e}_k 及其协方差 $\hat{\psi}_k$, 可以通过最小化对数似然函数(21)来获得参数的最佳估计值 θ^* , 如下:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \sum_{k=1}^N \left\{ \log |\hat{\psi}_k(\theta)| + (\hat{e}_k(\theta))^{-1} (\hat{e}_k(\theta)) \right\} + N \log 2\pi \quad (22)$$

3 基于双端行波原理的雷击故障定位

雷击故障实际上包括两种情况, 即雷击点与故障点相同以及雷击点与故障点不同。雷击故障引起的反射和折射行波将向传输线的两端扩散, 如图 1 所示。其中, F_1 和 F_2 分别表示雷击点和故障点, L

是故障传输线的总长度, d_{LM} 和 d_{LN} 表示雷击点与 M 端和 N 端的距离, d_{FM} 和 d_{FN} 表示故障点与 M 端和 N 端之间的距离。

通过双端定位原理可以获得雷击点的位置, 数据由终端 M 和 N 处的行波记录器捕获。其计算公式为

$$\begin{cases} d_{LM} = \frac{L - v(t_{N1} - t_{M1})}{2} \\ d_{LN} = \frac{L + v(t_{N1} - t_{M1})}{2} \end{cases} \quad (23)$$

式中: v 为行波速度; t_{M1} 和 t_{N1} 分别为初始雷电行波传送到变电站 M 和 N 的时间。根据等式(23), 雷击点和测量点之间的距离由波速、线路的总长度和到达线路两端的初始行波传递的时间差确定。如果波速和线路的总长度是固定的, 则雷击点位置就取决于行波波头的到达时间。

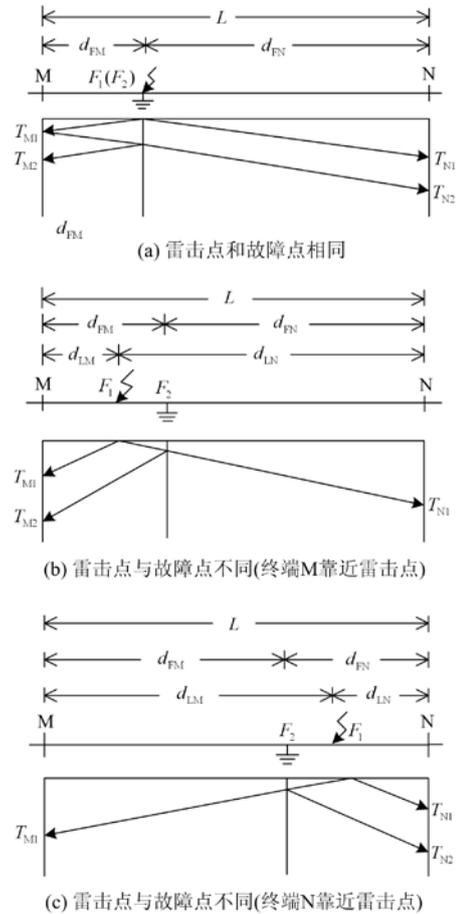


图 1 行波传播格子图

Fig. 1 Lattice map of travel wave propagation

显然, 在图 1(a)所示的第一种情况下(雷击点和故障点是同一点), 故障距离与雷击点距离相同, 可以通过公式(23)获得。接下来主要讨论雷击点和故

障点在不同位置的故障定位。

根据雷击点与故障点之间的相对位置, 有两种情况, 如图 1(b)、图 1(c)所示: (1) 终端 M 靠近雷击点, 终端 N 靠近故障点; (2) 终端 M 靠近故障点, 终端 N 靠近雷击点。根据行波信号到达 M、N 端的时间判断雷击点与故障点的相对位置分布。当行波前沿到达时, 估计残差发生显著变化, 并且可以检测到前两个连续行波的尖锐奇点。当初始行波到达 M 端的时间小于初始行波到达 N 端的时间, 这时可以判断 M 端是雷击侧, N 端是故障侧, 可以用公式 (24) 来计算故障距离。相反, 如果初始行波到达 M 端的时间大于初始行波到达 N 端的时间, 则可以判断 M 端为故障侧, N 端为雷击侧, 这时可以用公式 (25) 来计算故障距离。

$$\begin{cases} d_{FM} = \frac{L - v(t_{N1} - t_{M2})}{2} \\ d_{FN} = \frac{L + v(t_{N1} - t_{M2})}{2} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} d_{FM} = \frac{L - v(t_{N2} - t_{M1})}{2} \\ d_{FN} = \frac{L + v(t_{N2} - t_{M1})}{2} \end{cases} \quad (25)$$

为了评价定位方法的有效性, 使用绝对误差 Δd 和相对误差 $\Delta d\%$ 两个指标进行评价。其计算如下:

$$\Delta d = |L_1 - d_1| \quad \Delta d\% = \frac{|L_1 - d_1|}{L} \times 100\% \quad (26)$$

式中, L_1 、 d_1 、 L 分别表示实际的雷击点(或故障点)距离、计算的雷击点(或故障点)距离和输电线的总长度。

4 算法仿真与分析

4.1 雷击故障与短路故障的判别

为了证明雷电故障和短路故障产生的瞬态电流波形的特性差异, 在 ATP/EMTP500 kV AC 传输系统中, 分别产生了雷电故障和短路故障的波形, 采样时间 $t = 5 \times 10^{-6}$ s。从图 2(a)中可以看到短路瞬态电流峰值 $I_{1_max} = 135.4$ A, 100 μ s 后的瞬态电流幅值是 $I_{1_100} = 84.93$ A。可以得到:

$$\lambda_1 = \left| \frac{I_{1_100}}{I_{1_max}} \right| \approx 0.627 > 0.5$$

从图 2(b)中可以看到雷击瞬态电流峰值 $I_{2_max} = 233.8$ A, 100 μ s 后的瞬态电流幅值 $I_{2_100} = 7.667$ A。可以得到:

$$\lambda_2 = \left| \frac{I_{2_100}}{I_{2_max}} \right| \approx 0.033 < 0.5$$

从而得到当 $\lambda < 0.5$ 时, 可以确定瞬态电流是由雷击故障产生, 否则是由短路故障产生。

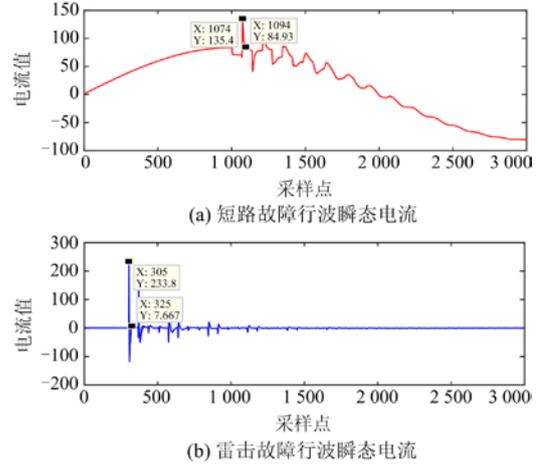


图 2 故障行波瞬态电流

Fig. 2 Transient current of fault traveling wave

4.2 基于行波波头检测的雷击故障定位

为了证明所提方法的有效性, 在不同条件下进行雷击点和故障点的定位。在 ATP/EMTP 中构建 500 kV AC 传输系统的模型。输电线的总长度为 200 km, 并假设标准雷电脉冲为 2.6 / 50 μ s。

情况一: M 端为雷击侧

在这种情况下, 雷击点靠近 M 端, 故障点靠近 N 端。为了拟合不同雷击点的故障情况, 可每隔 10 km 设置雷击点来进行模拟。为简单起见, 假设故障点是固定的, 即 $d_{FM} = 50$ km, $d_{FN} = 150$ km, 理想行波速度 v 是 3×10^8 m/s。在该模拟中, 采样频率为 0.2 MHz。因此, 雷击点和故障点之间的距离 d_{FL} 在 0~40 km 之间变化, 即 $d_{FL} = 0, 10, 20, 30, 40$ km。同时, 考虑到行波波速与线路参数的密切相关性, 而波速产生误差必然引起定位误差, 所以文中利用了由实际参数得出的行波波速 $v^* = 2.96912 \times 10^8$ m/s 来验证该方法的有效性 [26]。

图 3 给出了来自 M 端(蓝色)和 N 端(红色)的不同雷击点的受 40 dB 高斯白噪声干扰的行波电压信号。图 4 给出了在不同雷击点条件下残差的动态变化。表 1 给出了不同雷击点的故障位置和雷击位置。

从图 3 可以看出行波电压具有两种特性: 初始浪涌和振荡浪涌。在波形的初始部分, 雷击行波起主要作用, 初始浪涌表现出较高的幅度和陡峭的前沿, 而由绝缘子闪络引起的振荡浪涌表现出相对较

低的幅度, 正负波峰交替出现且持续时间长。在图 4 中, 当行波前沿到达时, 估计残差发生显著变化, 可以检测到前两个连续行波的尖锐奇异点(如图 4 所示)。显然, 当初始行波波头到达变电站 M 的时间 t_{m1} (采样点分别为 1343, 1275, 1207, 1140, 1073) 小于 t_{N1} (采样点分别为 2013, 2079, 2146, 2208, 2274)。因此 M 端是雷击侧, N 端是故障侧。根据前两个连续行波头的到达时间, 可以使用式(24)、式(25)分别计算雷击距离和故障距离。

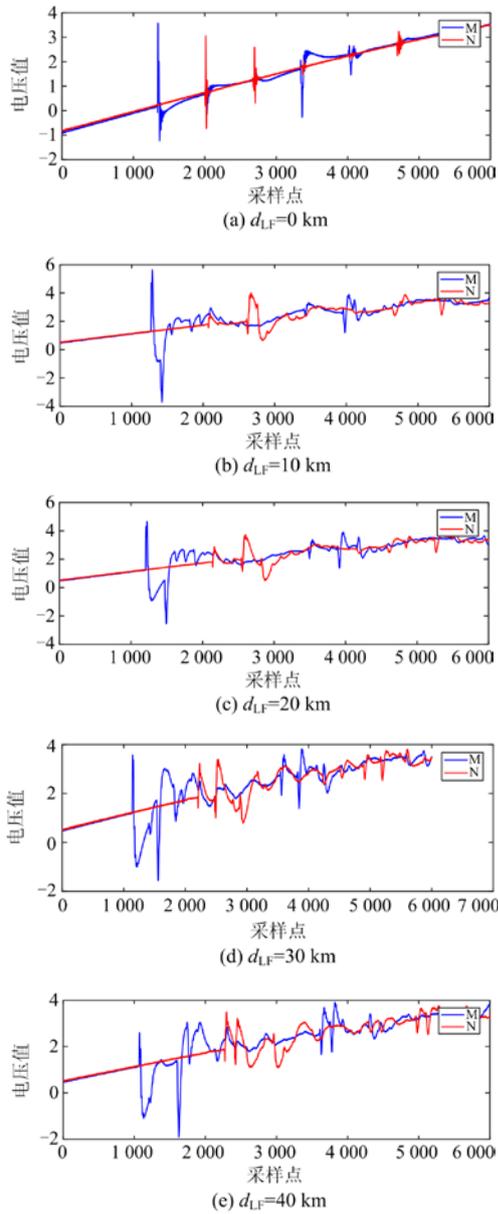
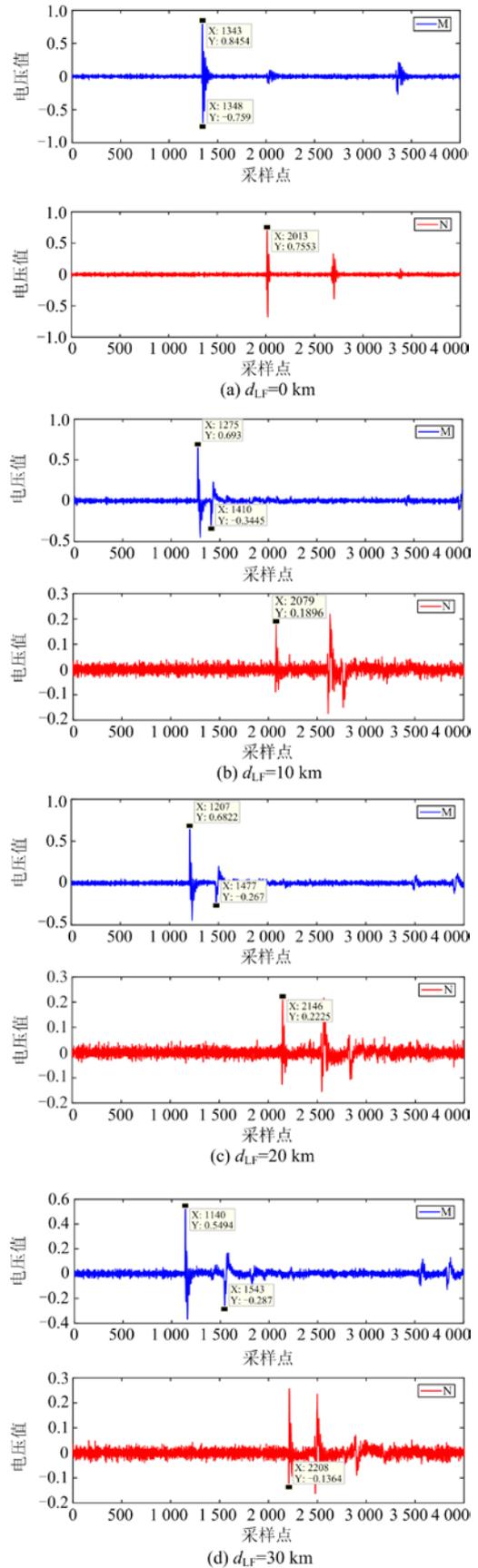


图 3 行波电压信号受 40 dB 白噪声干扰, M 端为雷击侧
 Fig. 3 Traveling wave voltage signal is interfered by 40 dB white noise, and the M end is the lightning strike side



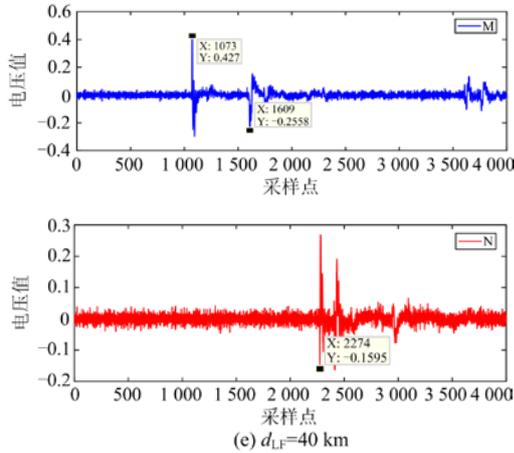


图 4 在不同的雷击点使用 KF-ML 的估计残差
Fig. 4 Estimating residuals using KF-ML at different lightning strike points

表 1 使用 KF-ML 在不同雷击点获得的位置结果
Table 1 Position results obtained using KF-ML at different lightning strike points

L_{LM}/km	L_{FM}/km	M_1	M_2	N_1
50	50	1 343	1 348	2 013
40	40	1 275	1 410	2 079
30	30	1 207	1 477	2 146
20	20	1 140	1 543	2 208
10	10	1 073	1 609	2 274

d_{LM}^*/km	d_{FM}^*/km	$\Delta d_{LM}^*/\text{km}$	$\Delta d_{LM}^*/\%$	$\Delta d_{FM}^*/\text{km}$	$\Delta d_{FM}^*/\%$
49.750	50.125	0.250	0.125	0.125	0.063
39.700	49.825	0.300	0.150	0.175	0.088
29.575	49.825	0.425	0.213	0.175	0.088
19.900	50.125	0.100	0.050	0.125	0.063
9.925	50.125	0.075	0.038	0.125	0.063

d_{LM}^*/km	d_{FM}^*/km	$\Delta d_{LM}^*/\text{km}$	$\Delta d_{LM}^*/\%$	$\Delta d_{FM}^*/\text{km}$	$\Delta d_{FM}^*/\%$
50.267	50.638	0.267	0.134	0.638	0.319
40.321	50.341	0.321	0.161	0.341	0.171
30.300	50.341	0.300	0.150	0.341	0.171
20.724	50.638	0.724	0.362	0.638	0.319
10.852	50.638	0.852	0.426	0.638	0.319

注：带*表示行波波速 $v^* = 2.96912 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的定位结果，表 2 相同。

从表 1 可以看出，该方法在不同雷击点条件下确定雷击距离和故障距离方面具有较高的精度。在雷击定位方面，在距离 M 端 30 km 的雷击处，误差达到最大，其中绝对误差为 0.425 km，相对误差为 0.213%；在故障定位方面，在距离 M 端 30、40 km 的故障处，误差达到最大，其中绝对误差位 0.175 km，相对误差 0.088%。所有这些都证明了所

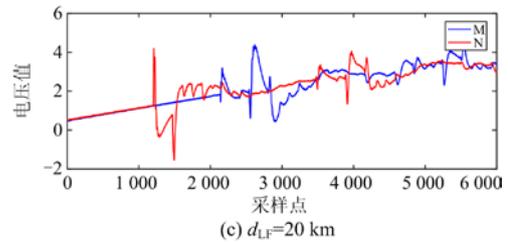
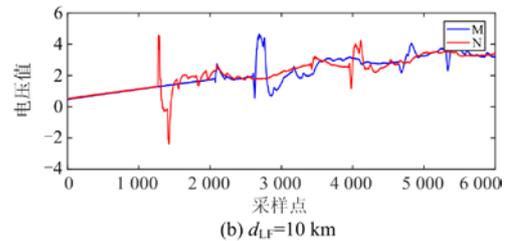
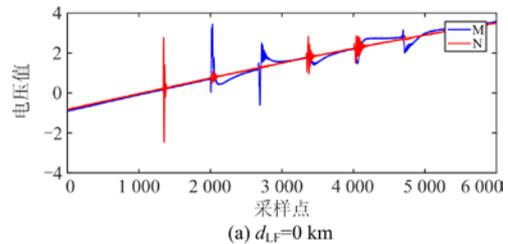
提出的故障定位方法对雷击点具有较强的鲁棒性和不敏感度。

值得一提的是，当雷击点与故障点相同时，雷击距离和故障距离分别为 49.750 km 和 50.125 km。在这种情况下，雷击距离与故障距离之间存在差异 (0.375 km)。而当雷击点与故障点之间的距离小于约 1.5 km 时(从绝缘击穿到建立稳定的电弧需要至少 5 μs)，则将雷击点与故障点视为同一点。在表 1 中，当 $L_{LM} = L_{FM}$ 雷电点与故障点的估计距离 d_{FL} 为 0.375 km 时，则雷电点与故障点为同一点。该方法得到的结果与实际结果一致，验证了该方法的有效性。

情况二：N 端为雷击侧

在这种情况下，雷击点越靠近 N 端，故障点越靠近 M 端。假设故障点是固定的，即 $d_{FM} = 150 \text{ km}$ ， $d_{FN} = 50 \text{ km}$ ，从故障点开始，每隔 10 km 移动一次雷击点。行波速度和采样频率与情况一相同。

图 5 给出了来自 M 端(蓝色)和 N 端(红色)的不同雷击点的受 40 dB 高斯白噪声干扰的行波电压信号。图 6 给出了在不同雷击点条件下残差的动态变化。表 2 给出了不同雷击点的故障位置和雷击位置。



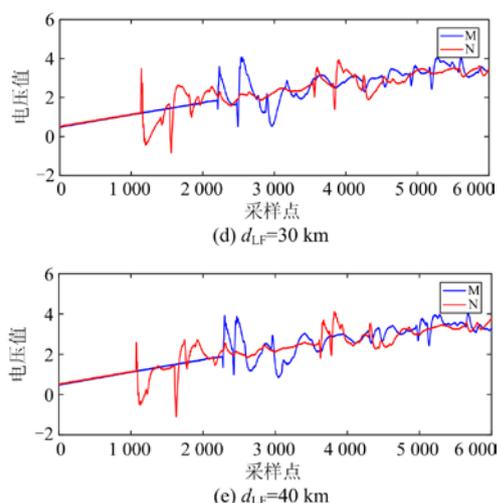


图 5 行波电压信号受 40 dB 白噪声干扰, M 端为雷击侧
Fig. 5 Traveling wave voltage signal is interfered by 40 dB white noise, and the M end is the lightning strike side

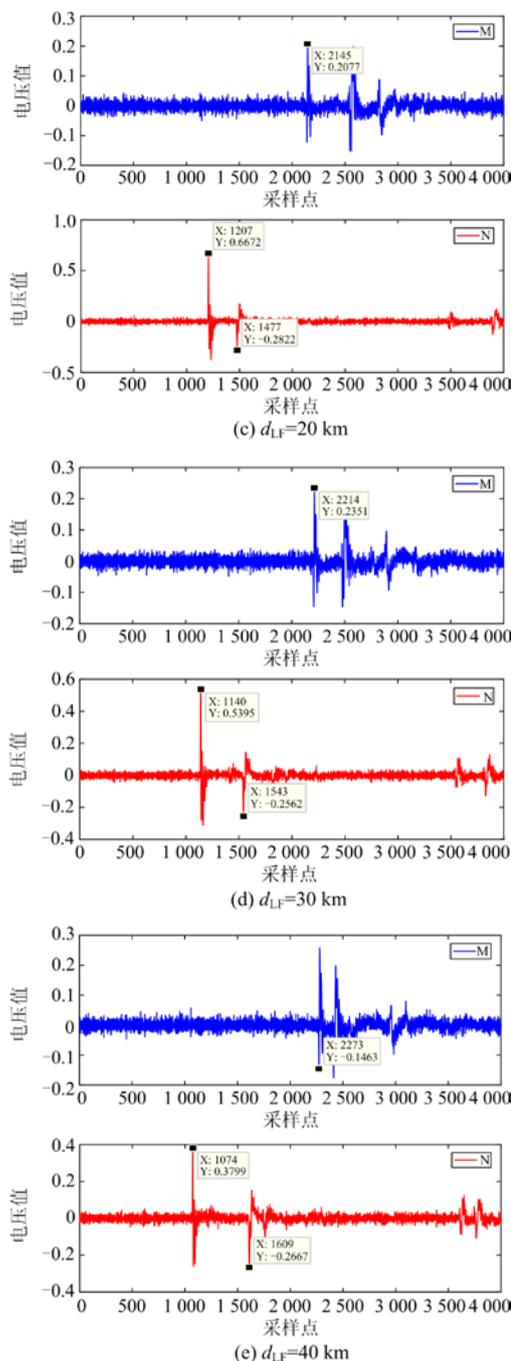
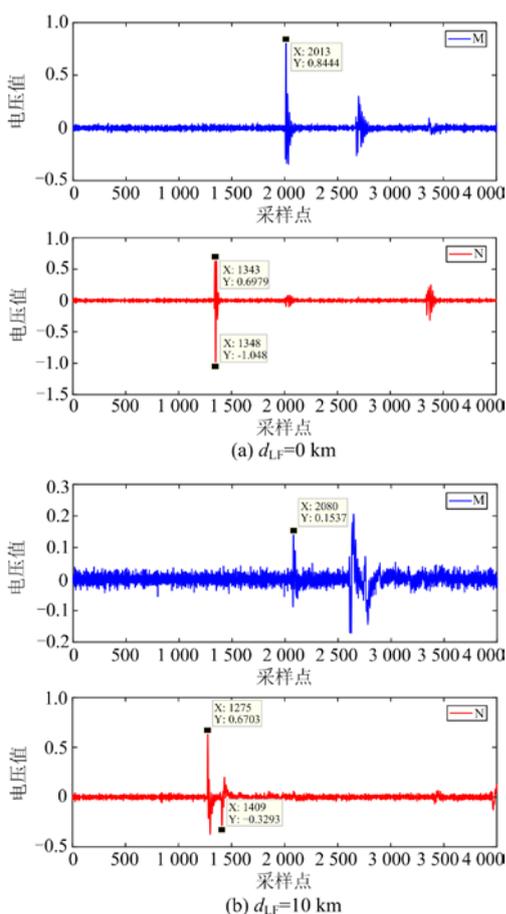


图 6 在不同的雷击点使用 KF-ML 的估计残差
Fig. 6 Estimating residuals using KF-ML at different lightning strike points

在图 6 中, 很明显, 初始行波到达 M 端的时间 t_{M1} (采样点分别为 2013、2080、2145、2208、2273) 大于初始行波到达 N 端的时间 t_{N1} (采样点分别为 1343、1275、1207、1140、1074), 因此 N 端为雷击侧, M 端为故障侧。根据前两个连续行波头的到达时间, 分别用式(24)、式(26)计算雷击距离和故障

距离。

从表 2 可以看出：在雷击定位方面，距离 M 端 160 km 的雷击处，误差达到最大，其中绝对误差为 0.350 km，相对误差为 0.175%；在故障定位方面，在距离变电站 M 端 160 km 的故障处，误差达到最大，其中绝对误差位 0.350 km，相对误差 0.175%。

同样，当雷电点与故障点相同时，本方法得到的雷击距离和故障距离分别为 150.250 km 和 149.875 km。因此，雷击点与故障点之间的估计距离为 0.375 km，小于 1.5 km。因此，认为雷击点和故障点位于同一点。从表 1 和表 2 的数据中可以看出，行波波速对故障定位有一定的影响，而理想波速的定位误差更小。

表 2 使用 KF-ML 在不同雷击点获得的位置结果

Table 2 Position results obtained using KF-ML at different

lightning strike points					
L_{LM}/km	L_{FM}/km	M_1	M_2	N_1	
150	150	2 013	1 343	1 348	
160	150	2 080	1 275	1 409	
170	150	2 145	1 207	1 477	
180	150	2 208	1 140	1 543	
190	150	2 273	1 074	1 609	
d_{LM}/km	d_{FM}/km	$\Delta d_{LM}/\text{km}$	$\Delta d_{LM}/\%$	$\Delta d_{FM}/\text{km}$	$\Delta d_{FM}/\%$
150.250	149.875	0.250	0.125	0.125	0.063
160.350	150.325	0.350	0.175	0.350	0.175
170.350	150.100	0.100	0.050	0.100	0.050
180.100	149.875	0.125	0.063	0.125	0.063
189.925	149.800	0.200	0.100	0.200	0.100
d'_{LM}/km	d'_{FM}/km	$\Delta d'_{LM}/\text{km}$	$\Delta d'_{LM}/\%$	$\Delta d'_{FM}/\text{km}$	$\Delta d'_{FM}/\%$
149.733	149.362	0.267	0.134	0.638	0.319
159.754	149.807	0.246	0.123	0.193	0.062
169.626	149.584	0.374	0.187	0.416	0.208
179.276	149.362	0.724	0.362	0.638	0.319
189.000	149.287	1.000	0.500	0.713	0.357

5 总结

本文针对雷击对输电线路的不利影响，提出了一种基于自适应 Kalman 滤波残差分析的雷击故障定位方法。具体结果如下：

(1) 在有雷击的情况下，通过雷击故障行波与短路故障行波的瞬态特性电流的差异，对雷击行波与短路行波进行区分。

(2) 当行波到达时，基于 KF-ML 估计的滤波残差呈现尖锐的奇异性，通过比较初始行波到达两端的时间先后，确定雷击侧和故障侧。

(3) 基于 KF-ML 估计的滤波残差可以精确地确

定前两个连续行波波头的到达时间，利用双端测距法可以分别获得雷击点和短路故障点的位置，且定位精确度高，鲁棒性好。

参考文献

- [1] LAZZARETTI A E, SANTOS S L F, KÜSTER K K, et al. An integrated monitoring system and automatic data analysis to correlate lightning activity and faults on distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 153: 66-72.
- [2] SUN J, YANG Q, SU P, et al. Diagnosis of winding fault in three-winding transformer using lightning impulse voltage[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 175.
- [3] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 基于 VMD 和 TEO 的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33.
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.
- [4] 王博, 谷昌瑞, 吉晓筱, 等. 基于多点故障行波检测的改进分布式故障测距方法研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 120-127.
WANG Bo, GU Changrui, JI Xiaoxiao, et al. Research on improved distributed fault location method based on multi-point fault's traveling wave detection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 120-127.
- [5] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
ZHANG Fusheng, GENG Zhongxing, GE Yaozhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66.
- [6] 宋鑫超, 刘启明, 苏庆堂, 等. 基于 FFT 最大谱线处相位差的频谱校正方法[J]. 控制工程, 2017, 24(5): 1087-1089.
SONG Xinchao, LIU Qiming, SU Qingtang, et al. Spectrum correction method based on phase difference at maximum line of FFT[J]. Control Engineering, 2017, 24(5): 1087-1089.
- [7] 黄雄波, 胡永健. 利用傅里叶谐波分析法的时序数据周期迭代辨识算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(6): 1716-1719.
HUANG Xiongbo, HU Yongjian. Iterative identification algorithm for periodic component of time series data using Fourier analysis method[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(6): 1716-1719.
- [8] 黄建明, 瞿合祚, 李晓明, 等. 基于短时傅里叶变换及其谱峭度的电能质量混合扰动分类[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3184-3191.

- HUANG Jianming, QU Hezuo, LI Xiaoming, et al. Classification of power quality mixed disturbance based on short time Fourier transform and its spectral kurtosis[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 3184-3191.
- [9] 张辉, 范雪林, 李东风, 等. 一种改进的短时傅里叶算法实现[J]. *通信技术*, 2017, 50(5): 1066-1068.
- ZHANG Hui, FAN Xuelin, LI Dongfeng, et al. implementation of modified short-time fourier transform[J]. *Communications Technology*, 2017, 50(5): 1066-1068.
- [10] 黄建明, 李晓明. 结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(7): 43-50.
- HUANG Jianming, LI Xiaoming. Detection of harmonic in power system based on short-time Fourier transform and spectral kurtosis[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(7): 43-50.
- [11] 甄永赞, 杨荆宜, 张冰, 等. 基于小波变换的直流线路行波保护采样数值稳定性研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9): 42-48.
- ZHEN Yongzan, YANG Jingyi, ZHANG Bing, et al. Study on numerical sampling stability of traveling wave protection based on wavelet transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(9): 42-48.
- [12] 汪祥莉, 王斌, 王文波, 等. 混沌干扰中基于同步挤压小波变换的谐波信号提取方法[J]. *物理学报*, 2015, 64(10): 15-24.
- WANG Xiangli, WANG Bin, WANG Wenbo, et al. Harmonic signal extraction method based on synchronous squeeze wavelet transform in chaotic interference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(10): 15-24.
- [13] LIU F, ZHANG Y, YILDIRIM T, et al. Signal denoising optimization based on a Hilbert-Huang transform-triple adaptable wavelet packet transform algorithm[J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 2019, 124(5): 54002.
- [14] 袁小平, 胡秀娟, 孙英洲, 等. 基于加窗傅里叶变换的弱电网阻抗测量算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(10): 96-101.
- YUAN Xiaoping, HU Xiujuan, SUN Yingzhou, et al. A weak grid impedance detection method based on windowed Fourier transformation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(10): 96-101.
- [15] JAFARIAN P, SANAYE-PASAND M. A traveling-wave-based protection technique using wavelet/PCA analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(2): 588-599.
- [16] 关维国, 姚清志, 鲁宝春. 微电网 HHT 谐波检测与时频分析方法[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(20): 198-202.
- GUAN Weiguo, YAO Qingzhi, LU Baochun. HHT harmonic detection and time-frequency analysis method in microgrid[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(20): 198-202.
- [17] 赵婵娟, 王建平, 孙伟, 等. 基于相关性分布式卡尔曼滤波的谐波检测方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(9): 1333-1341.
- ZHAO Chanjuan, WANG Jianping, SUN Wei, et al. Harmonic detection method based on distributed related Kalman filter[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(9): 1333-1341.
- [18] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(1): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [19] YU K K C, WATSON N R, ARRILLAGA J. An adaptive Kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(2): 1577-1584.
- [20] 李伟征, 涂秀梅. 基于自适应卡尔曼滤波的频偏估计研究[J]. *控制工程*, 2017, 24(8): 1685-1689.
- LI Weizheng, TU Xiumei. Research on frequency offset estimation based on adaptive Kalman filter[J]. *Control Engineering*, 2017, 24(8): 1685-1689.
- [21] 崔永林, 席燕辉, 张小东, 等. 基于自适应卡尔曼滤波残差分析的谐波检测[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(24): 92-100.
- CUI Yonglin, XI Yanhui, ZHANG Xiaodong, et al. Detection of harmonic based on residual analysis using adaptive Kalman filter[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(24): 92-100.
- [22] 吕思颖, 黎丹, 要航, 等. 基于无迹 Kalman 的基波分量提取[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(13): 79-84.
- LÜ Siying, LI Dan, YAO Hang, et al. Fundamental component extraction based on unscented Kalman filter[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(13): 79-84.
- [23] XI Y, LI Z, ZENG X, et al. Fault location based on travelling wave identification using an adaptive extended Kalman filter[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 12(6): 1314-1322.
- [24] 郭宁明, 覃剑. 雷击对行波故障测距的影响及识别[J]. *电力系统自动化*, 2008, 35(5): 1-5.
- GUO Ningming, QIN Jian. Lighting strike identification and its effects on the traveling wave fault location[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 35(5): 1-5.
- [25] 李泽文, 赵廷, 席燕辉, 等. 基于 Kalman 滤波算法的电网故障行波检测方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(6): 31-38.
- LI Zewen, ZHAO Ting, XI Yanhui, et al. Traveling wave fault detection method for power grid based on Kalman filtering algorithm[J]. *Proceedings of the CSU- EPSA*,

2018, 30(6): 31-38.

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-05-16

作者简介:

席燕辉(1979—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为复杂系统建模; E-mail: xiyanhui@126.com

胡康(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障定位、信号处理; E-mail: 834264428@qq.com

王康(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波分类。E-mail: 2365903064@qq.com

(编辑 葛艳娜)