

基于ARIMA的矿山电网故障暂态行波波头辨识及故障测距

周鲁天^{1,2}, 梁睿^{1,2}, 彭楠^{1,2}, 许传义^{1,2}, 滕松³, 陈轩⁴

(1. 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116;

3. 国网江苏省电力公司 徐州供电公司, 江苏 徐州 221000;

4. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 210000)

摘要:由于矿山电网含有大量的整流设备及非线性负载,运行时含有稳定的高次谐波分量和高频噪声,同时矿山电网多为短距离线路,故障后产生的暂态信号与原有高次谐波混叠严重,给行波故障测距带来了极大的困难。通过分析矿山电网故障行波的时域特征,提出基于整合移动平均自回归模型(ARIMA)对行波波头到达前的高频周期信号进行预测,并结合波头到达时刻的真实波形得到波形残差,同时对残差进行平稳性校验,通过行波波头到达时刻前后残差平稳性的不同确定准确的波头到达时刻,进而实现行波故障测距。利用低压电缆网络仿真实现矿山电网故障,仿真结果表明:与小波变换与经验模态分解相比,所提方法能够准确辨识行波波头,且不易受故障状况和噪声的影响,能有效提升行波可行性及精度,尤其适用于含有整流设备及非线性负载矿山电网故障测距。

关键词:故障暂态信号;整合自回归移动平均模型;波头辨识;故障测距;矿山电网

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005031

0 引言

矿山电网线路复杂且短线路众多,普通行波测距难以适用,而矿山电网对供电的可靠性有着更严苛的要求^[1]。因此寻找有效的故障测距方法对保障矿山电网可靠性有着重要意义^[2]。

目前,故障测距方法众多^[3],主要分为阻抗法^[4-5]和行波法^[6-7],其中行波法已经获得了广泛的应用^[8-9]。行波法一般是通过检测初始暂态行波首波头到达线路两端测量点的时刻,利用这些时刻与故障距离之间的内在关系进行故障测距,其定位精度高、不受电弧等因素影响^[10-11]。但在实际现场中,行波的波头难以辨识,给故障测距带来了误差。

研究人员提出了多种行波波头识别方法:文献[12]提出基于Hough直线检测波头到达时刻和极性的方法,该方法可辨识故障点反射波;文献[13]利用随机共振法处理行波,再利用固有时间尺度分解方法分析行波得到波头,该方法能在强噪声干扰下精确定位故障;文献[14]利用数学形态梯度对行波的畸变进行形态检测,并提取波头特征;文献[15]利用经验模态分解(EMD)和维格纳威尔分布计算故障行

波的瞬时能量曲线峰值,并确定波头的到达时刻;文献[16]改进了通过导数确定波头到达时刻的方法,使用波形变化比值计算波头到达时刻;文献[17]定义了行波瞬时功率,改进了电压、电流行波易受线路中噪声影响的缺点,提高了波头的可测性。也有学者从小波变换后的行波中选取合适尺度因子的时频图确定波头到达时刻^[18],其他经典方法还有希尔伯特-黄变换^[19-21]等。然而,以上方法仍存在缺陷:当波头陡斜性与之前的时间点一致时,将加大基于Hough直线检测对波头的辨识难度^[12];利用数学梯度对行波进行检验的方法对噪声的耐受性不够高,且运行速度慢^[14];利用导数辨别奇异点的方法则需要设置启动阈值^[16];小波变换需要选择合适的母小波并设置可行的分解层数^[18];希尔伯特-黄变换^[19-21]存在模态混叠问题,且需要复杂的递归运算。由于矿山电网电缆线路短,行波传播时间短,暂态信号严重混叠,依靠现有方法无法精确辨识波头,寻找合适的波头辨识方法是提高其配电网精确定位的关键。

因为矿山电网含有大量的整流设备及非线性负载,日常运行时含有大量的高次谐波和高频噪声,导致其电网中出现高频周期分量。因此,本文基于整合移动平均自回归模型ARIMA(AutoRegressive Integrated Moving Average model),通过矿山电网中的高频周期信号预测行波波头,并利用单位根(ADF)检验预测波形与真实波形残差的平稳性,通过平稳性改变点获得波头的准确到达时刻进而实现行波测距。

收稿日期:2019-08-23;修回日期:2020-03-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0804400);江苏省“六大人才高峰”项目(XNY-046);国家电网公司科技项目(J2018078)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2017YFC0804400), “Six Talent Peaks” Program of Jiangsu Province(XNY-046) and the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(J2018078)

1 矿山电网故障行波的时域特征

1.1 矿山电网行波中的高频周期信号

图1(a)为在某矿山电网中采样频率为1 MHz的情况下,故障录波装置记录的发生单相接地故障(故障电阻为50 Ω)时的电压行波。由图可见,电压行波发生了明显的突变,属于故障暂态行波波头叠加与原始电压行波的情形。

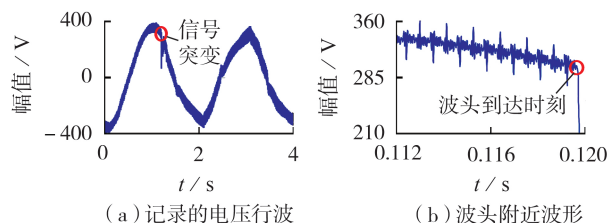


图1 发生故障电阻为50 Ω的单相接地故障时的电压行波
Fig.1 Voltage traveling wave during single-phase grounding fault with 50 Ω fault resistance

波头到达时刻附近的波形如图1(b)所示。由图可见,整个行波中含有一个规律的高频周期信号。其他接地故障试验中记录的电压行波如附录A中的图A1所示。由图可见,在不同的接地故障类型以及故障电阻下,该高频周期信号一直存在,但信号的波形形状、周期皆不相同。

该高频周期信号是由矿山企业的通风机、掘进机、皮带机和提升机等整流设备及非线性负载产生的。这些机械设备在运行时含有大量高次谐波和高频噪声,导致矿山电网中行波的时域特性发生了改变,在行波波头未到达前,行波已经受到高次谐波和高频噪声的影响并出现了周期性的特征。该高频周期信号严重影响了波头辨识的精度,为了进一步明确该信号中包含稳定的周期,本文采用局部加权回归散点平滑法 Loess (Locally weighted scatterplot smoothing method) 对其进行分解。

1.2 基于 Loess 的周期性趋势分解

Loess 是对2维信号进行平滑的常用方法,基于 Loess 的周期性趋势分解算法 STL (Seasonal-Trend decomposition procedure based on Loess) 是以鲁棒局部加权回归作为平滑方法的时间序列分解方法。STL 结合了传统线性回归的简洁性和非线性回归的灵活性,可以将信号 Y_t 分解为趋势项 T_v 、周期项 S_v 和余项 $R_v^{[22]}$,如式(1)所示。

$$Y_v = T_v + S_v + R_v \quad v=1, 2, \dots \quad (1)$$

其中, v 为序列中各元素编号。STL 分为内循环与外循环,其中,内循环计算趋势分量与周期分量;外循环为内循环提供权重指数,该权重将在下一次内循环中,用于减少异常点带来的周期项和趋势项的波动,直至周期项和趋势项收敛为止,收敛后输出得到的周期项和趋势项^[23]。

利用 STL 得到的周期项、趋势项和余项如附录A中的图A2所示。可以看出,从矿山电网的行波中可分解出稳定的高频周期信号,由于该高频信号是由矿山电网中大量的整流设备及非线性负载产生的,在短暂的采样区间内,其周期项的周期不会发生变化,且其趋势项大致呈线性变化。所以在行波波头到达之前,行波中包含稳定的高频周期项和线性的趋势项,利用合适的预测模型可以精确推算出该周期项和趋势项下行波的进一步变化。

2 ARIMA

ARIMA 的基本思想是将该行波数据随时间推移而形成的数据序列视为一个随机序列,并用数学模型近似描述这个序列,该数学模型被识别后就可以通过时间序列的过去值和现在值预测未来值。ARIMA 在该行波信号的预测过程中既考虑信号中的周期性和趋势性的影响,又能消除一定的随机波动,对于短期趋势的预测准确率较高,是应用比较广泛的方法。

ARIMA 一般表示为 $ARIMA(p, q, d)$, 其中 p 为自回归模型 (AR) 阶数, d 为时间序列差分阶数, q 为移动平均模型 (MA) 阶数。本质上, ARIMA 由自回归模型和移动平均模型组成。

自回归模型表示某一时刻 t 和前 p 个时刻序列值之间的相互关系。在序列 $\{x_t\}$ 中有^[24]:

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_p x_{t-p} + \varepsilon_t \quad (2)$$

若随机序列 $\{\varepsilon_t\}$ 是白噪声且和前一时刻序列 x_k ($k < t$) 不相关,则这样的模型称为 p 阶自回归模型,记为 $AR(p)$ 。

移动平均模型表示若干个白噪声的加权平均和,在序列 $\{x_t\}$ 中有:

$$x_t = \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3)$$

若随机序列 $\{\varepsilon_t\}$ 是白噪声序列,则这样的模型称为 q 阶移动平均模型,记为 $MA(q)$ 。

ARIMA(p, q) 为自回归模型和移动平均模型的结合:

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_p x_{t-p} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (4)$$

其中, t 为时间变量; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 和 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 为非零的待定系数; $\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1}, \dots, \varepsilon_{t-q}$ 为独立的误差项; x_t 为平稳、正态、零均值的时间序列。本文采用贝叶斯信息准则 BIC (Bayesian Information Criterion) 进行模型定阶,准则定义如下:

$$V_{bic} = -2M + d \lg N \quad (5)$$

其中, M 为最佳对数似然值; d 为估计参数的数量; N 为样本容量。

一般采用穷举法选择 (p, q) 模型类型进行最后的预测。在自然工程领域中, ARIMA 的 (p, q) 一般

选择为6阶以内即可很好地预测波形,则除(0,0)外共有48组参数,参数设置详见附录A中的表A1。

ARIMA预测流程为:

(1)对信号进行预测时,应该首先保证输入的ARIMA序列是平稳的,所以需要对信号进行差分运算,直到序列平稳为止;

(2)将平稳的序列导入48组具有不同 (p, q) 值的ARIMA中;

(3)对48组不同 (p, q) 值下的 V_{bic} 进行对比,选择 V_{bic} 最小的一组作为最优参数并输出预测的序列。

ARIMA预测流程图见附录A中的图A3。

3 波头精准辨识的故障测距方法

通过对矿山电网发生故障时行波时域特性的分析可知,其行波包含稳定的高频周期信号,所以选择ARIMA对波头到达时刻前的波形进行预测。首先对行波进行预处理,选择合适位置的时间窗内的波形输入ARIMA,并输出预测波形;通过ADF检验得到预测波形与真实波形的差值,确定精确的波头到达时刻。由于矿山电网线路过短,故障行波的第2个反射波头不易识别,而双端法仅需要识别初始波头到达时刻,所以本文选择双端行波法进行故障测距。

3.1 信号预处理

在线路的首末端分别设置一个测量点,记首端、末端的测量点分别为 E_s, E_r ,分别利用 E_s, E_r 处安装的故障录波装置获取电压,然后对提取的电压进行相模变换,得到相应的线模电压行波 U_s, U_r 。

为保证预测的准确度,导入ARIMA的波形不能包含突变,所以需要选取合适位置的输入波形时间窗,时间窗的选取如附录A中的图A4所示。由于ARIMA包含训练集和测试集,时间窗内至少包含1个完整的高频周期信号,且预测波形的趋势不与真实波形偏离。根据对多次故障数据分析的经验,一般时间窗长度选择为300 μs 。

3.2 对残差序列进行ADF检验获取波头到达时刻

以首端线模电压行波为例,通过选择合适的时间窗获取数据后,将其导入ARIMA进行预测,得到预测波形 $U_{forecast}$ 。求取 $U_{forecast}$ 和实际波形 U_s 的差值 $\Delta U_{s-forecast}$,该差值可称为残差。

对残差序列进行ADF检验以获取波头到达时刻。ADF检验是一种利用ADF检验序列平稳性的方法,其按照式(6)—(8)的顺序完成检验。

$$\Delta x_t = \alpha + \beta_t + \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \tau_t \quad (6)$$

$$\Delta x_t = \alpha + \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \tau_t \quad (7)$$

$$\Delta x_t = \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \tau_t \quad (8)$$

其中, α 为常数项; β_i 为趋势项; τ_t 为残差项。原假设为 $H_0: \delta = 0$ 。若检验拒绝 H_0 ,即原序列不存在单位根,则序列为平稳序列,停止检验,ADF检验返回值为1;否则继续检验,直到检验完式(8)为止,若存在单位根,则序列为非平稳序列,ADF检验返回值为0。

对残差序列 $\Delta U_{s-forecast}$ 设置一个循环的ADF检验:

$$\Delta U_{s-forecast} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_n\} \quad (9)$$

由于ADF检验序列最短长度为10,所以最短序列为 $\{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_{10}\}$ 。按照顺序依次检验时间序列 $\{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_{10+k}\} (k=1, 2, \dots, n-10)$,每次检验时返回当前序列的检验值,返回值组成一个仅含0和1的序列:

$$R = \{1, 1, \dots, 1, 0, 0, \dots, 0\} \quad (10)$$

采用贝叶斯信息准则完成ARIMA(p, d, q)模型定阶,贝叶斯信息准则通过衡量各ARIMA(p, d, q)阶数下不同的预测残差选取最优解。不同阶数下的预测波形与真实波形见图2。输入ARIMA(p, d, q)中的时间窗数据以虚线为界分为训练集和测试集。训练集中为ARIMA(p, d, q)提供的训练数据,测试集用于检验ARIMA(p, d, q)选定的阶数。不合适的ARIMA(p, d, q)阶数将导致预测波形与真实波形残差的 V_{bic} 较大,而合适的ARIMA(p, d, q)阶数可使得预测波形与真实波形残差的 V_{bic} 较小,预测波形能够充分还原真实波形,残差中仅包含白噪声而没有任何的趋势,且残差在0附近波动,所以此时残差序列也是平稳性序列。使得 V_{bic} 最小的模型阶数即为最合适的模型阶数。

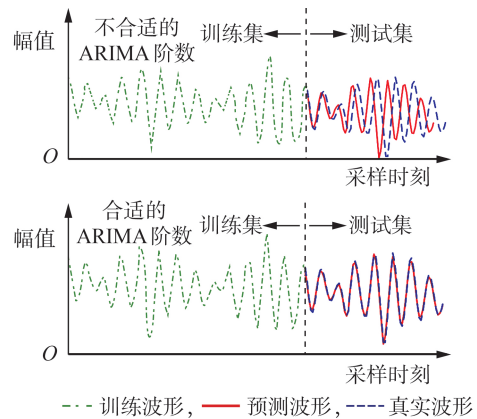


图2 不同阶数下的预测波形与真实波形

Fig.2 Predicted waveforms and real waveforms in different orders

进行ARIMA预测时,时间窗内的波形不包含突变,所以时间窗的末端到行波波头到达时刻之间的波形仍符合残差在0附近波动的特性,此时残差序

列为平稳序列。当行波波头到达时,该残差序列将偏离0, $\Delta U_{s\text{-forecast}}$ 数值发生突变,此时残差序列的平稳性发生改变。

以带突变的正弦波为例进行说明。该正弦波的实际波形、预测波形和两者的差值 $\Delta U_{s\text{-forecast}}$ 分别如图3(a)、(b)所示,ADF检验返回值如图3(c)所示。由图可见,正弦波在信号突变点开始突变;在信号突变点前,即行波波头未到达时,残差序列为平稳序列,ADF检验返回值为1;当行波波头到达时,信号的突变会使得原本平稳的时间序列成为非平稳序列,ADF检验返回值为0。可以判定,行波波头到达时刻为平稳序列转变为非平稳序列的时刻。

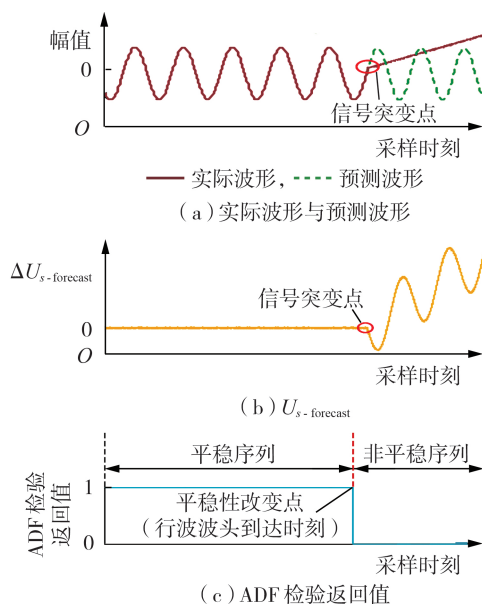


图3 带突变的正弦波的预测波形、真实波形、 $\Delta U_{s\text{-forecast}}$ 及 ADF 检验返回值

Fig.3 Predicted waveform,real waveform and $\Delta U_{s\text{-forecast}}$ of sinusoidal wave with mutation and return value of ADF detection

本文所提故障测距流程如附录A中的图A5所示。

4 试验验证

4.1 搭建矿山电网电缆线路故障线路模型

为了模拟行波受到各类整流设备及非线性负载运行的影响,在煤矿企业车间内搭建了矿山电网线路模型,如附录B中的图B1所示。试验设备为采样速率为1 MHz的故障录波装置(2台)、同步采样设备、三相隔离变压器、电机、空气开关、三芯电缆。试验设置2个故障点,在电缆150~400 m之间的位置1和电缆400~790 m之间的位置2分别设置1个故障点;在线路末端接入电机;在线路首端放置2条电缆,电缆末端空载,为线路提供电容电流;在线路首端和末端分别放置故障录波装置 P_s 、 P_r ,其中 P_s 为主

机、 P_r 为从机,使用同步设备对2台故障录波装置进行同步校时。手动触发故障位置处的空气开关模拟线路故障,故障中主机 P_s 的零序过电压保护动作,记录数据,从机跟随动作,主从机使用同步校时装置连接,并通过交换机将COMTRADE格式的故障数据上送到处理平台,并进行故障测距。

4.2 案例分析

附录B中的表B1为位置1发生短路电阻为50 Ω 的单相接地故障时,进行ARIMA参数选择时的各组 (p,q) 的 V_{bic} 。由表可见,选择(4,4)时 V_{bic} 最小,因此采用ARIMA(4,4)对波形进行预测,则该种故障下首端 P_s 和末端 P_r 的实际波形、预测波形、 $\Delta U_{s\text{-forecast}}$ 和 ADF 校验返回值如图4所示。

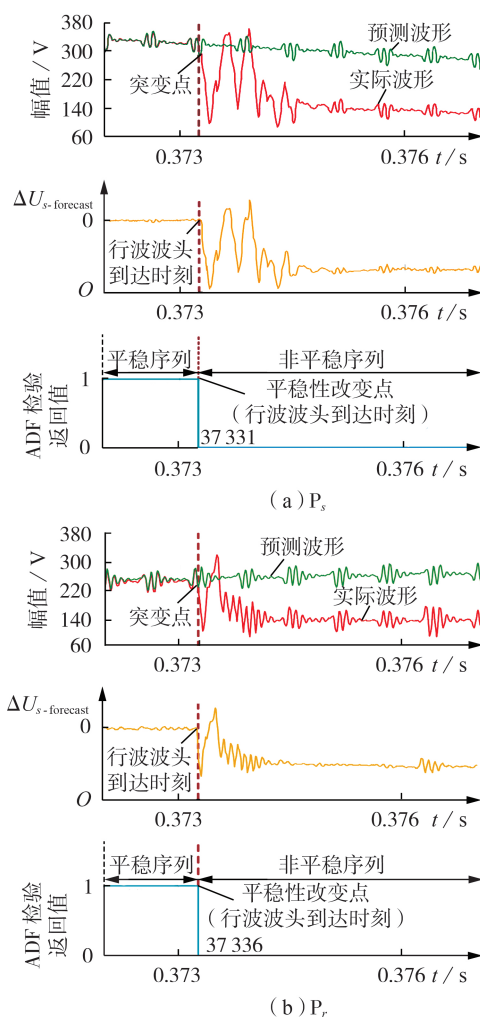


图4 $\Delta U_{s\text{-forecast}}$ 和 ADF 检验返回值的试验结果
Fig.4 Experimental results of $\Delta U_{s\text{-forecast}}$ and return value of ADF

由首端 P_s 和末端 P_r 的 ADF 校验返回值计算得到行波波头在第37331个采样时刻到达首端,在第37336个采样时刻到达末端,测距结果为故障距离首端195 m。

不同故障类型的测距结果如表1所示。表中,

AG、AB、ABG 分别表示单相接地故障、相间短路故障、相间接地短路故障; t_s 、 t_r 分别为波头到达首端、末端的采样时刻; l_f 为计算得到的故障位置与首端的距离; e 为测距误差。由表1可见,故障电阻和故障类型对本文的测距方法基本无影响。

表1 故障测距结果

Table 1 Fault locating result

故障位置	短路电阻/ Ω	故障类型	t_s	t_r	l_f/m	$e/\%$
1	2.5	AG	31 488	31 493	195	3.36
		AB	27 663	27 669	100	3.73
		ABG	24 390	34 396	100	3.73
	50.0	AG	37 331	37 336	195	3.36
		AB	21 493	21 498	195	3.36
		ABG	30 675	30 681	100	3.73
2	2.5	AG	29 529	29 530	575	1.87
		AB	27 462	27 463	575	1.87
		ABG	34 881	34 883	480	5.22
	50.0	AG	27 567	27 569	480	5.22
		AB	30 154	30 155	575	1.87
		ABG	32 660	32 661	575	1.87

为了验证本文方法在噪声情况下的故障测距误差,将行波数据导入 MATLAB 中,并添加噪声。试验共设置信噪比(SNR)为 80、85、90、95、100 dB 的 5 种情况,对应的故障测距误差如图5所示。由图可见,添加噪声后,故障位置 1、2 的测距误差分别在 3.73%、5.22% 以下,说明本文方法受噪声的影响小。

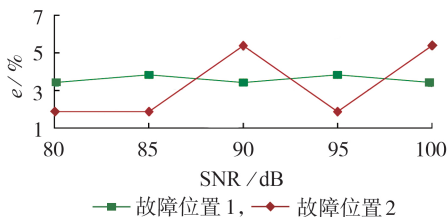


图5 不同信噪比下2个故障位置的测距误差

Fig.5 Fault locating errors at two fault locations under different SNRs

4.3 与经过滤波后的其他方法比较

为了说明本文方法在波头识别上的优越性,共设置了6组故障(6组故障与表1中故障位置1的6组故障一一对应)比较了对同组数据采用小波变换、EMD和本文方法时的波头识别误差。采用经高通滤波器滤除高次谐波后的信号计算各种方法下的行波波头到达时刻。以第1组故障设置为例,分析了小波模极大值法、EMD极大值法与本文所提方法检测行波波头到达时刻时的计算误差,如附录B中的图B2所示。其中,小波模极大值法采用db6母小波分解5层,并选取d1层小波模极大值^[25]。

小波模极大值法在首端和末端计算的波头到达时刻分别为第31 633个和第31 591个采样时刻,计算的故障距离为距首端4 510 m,误差为336.6%,该

方法不仅误差极大,并且认为行波到达远端测量点的时刻早于到达近端测量点的时刻;EMD模极大值法在首端计算的到达时刻为第31 501个采样时刻,在末端计算的到达时刻为第31 517个采样时刻,计算的故障距离为距首端1 095 m,误差为81.7%,误差极大;本文所提方法在首端和末端计算的到达时刻分别为第31 488个和第31 493个采样时刻,误差仅3.36%,测距结果优于小波模极大值法和EMD模极大值法。

图6为6组故障下3种方法的测距误差。显然,相比较于其他2种方法,所提方法将误差控制在5%以下,故障测距精度具有明显提升。

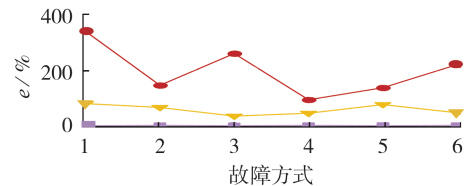


图6 3种方法在6种不同故障方式下的误差

Fig.6 Fault locating errors of three methods in six different fault conditions

5 结论

(1)由于矿山电网含有大量的整流设备及非线性负载,并在运行时产生稳定的高次谐波和高频噪声,利用矿山电网行波中特有的高频周期分量为行波的波头辨识提供判据。

(2)利用ARIMA模型建立该规律的高频周期信号的数学模型,输出在信号下的预测波形,利用预测波形和实际波形的差值滤除该高频信号,避免了小波变换等频域方法中的母小波选择、层数设置,并降低了故障测距误差。

(3)基于ADF检验,利用波形残差中波头到达时刻前后平稳性不同辨别准确的波头到达时刻,与导数法辨别波头的方法,ADF检验不需要设定启动阈值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张鑫,牟龙华. 基于故障暂态电流主频分量的矿山电网暂态保护[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):75-80.
ZHANG Xin, MU Longhua. Transient protection based on main frequency component of transient fault current for mine power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 75-80.
- [2] 丁恩杰,王超楠,崔连成. 矿井配电网输电线路故障测距方法的研究[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(3):311-316.
DING Enjie, WANG Chaonan, CUI Liancheng. Study of fault location of transmission lines in the mine distribution network [J]. Journal of China University of Mining & Technology,

- 2006,35(3):311-316.
- [3] 梁睿,孟祥震,周鲁天,等. 配电网故障定位技术发展现状及展望[J]. 电力工程技术,2018,37(6):20-27.
LIANG Rui,MENG Xiangzhen,ZHOU Lutian,et al. Status quo and prospect of distribution network fault location[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(6):20-27.
 - [4] 戴志辉,王旭. 基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J]. 电网技术,2017,41(6):2027-2034.
DAI Zhihui,WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system[J]. Power System Technology,2017,41(6):2027-2034.
 - [5] 赵青春,徐晓春,陆金凤,等. 基于可信度加权的线路故障测距方法[J]. 电力工程技术,2019,38(2):163-168.
ZHAO Qingchun,XU Xiaochun,LU Jinfeng,et al. Fault location method for transmission line based on the weighting of reliability[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(2):163-168.
 - [6] 宁一,王大志,江雪晨,等. 基于零模行波波速特性的配电网单相接地故障测距方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(增刊):93-98.
NING Yi,WANG Dazhi,JIANG Xuechen,et al. A single phase-to-ground fault location scheme for distribution networks based on zero-mode traveling wave velocity property[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(Supplement):93-98.
 - [7] 范新桥,朱永利,卢伟甫. 基于多点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):39-45.
FAN Xinqiao,ZHU Yongli,LU Weifu. Traveling wave fault location based on multiple current measurements for transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):39-45.
 - [8] 于盛楠,鲍海,杨以涵. 配电线路故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(28):86-90.
YU Shengnan,BAO Hai,YANG Yihan. Practicalization of fault location in distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(28):86-90.
 - [9] 刘健,董新洲,陈星莺,等. 配电网容错故障处理关键技术研究[J]. 电网技术,2012,36(1):253-257.
LIU Jian,DONG Xinzhou,CHEN Xingying,et al. Robust fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology,2012,36(1):253-257.
 - [10] 高洪雨,陈青,徐丙垠,等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化,2017,41(5):121-127.
GAO Hongyu,CHEN Qing,XU Bingyin,et al. Fault location algorithm of single-ended traveling wave for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(5):121-127.
 - [11] 徐青山,L L LAI,陈锦根,等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化,2006,30(15):21-25.
XU Qingshan,L L LAI,CHEN Jingen,et al. Novel and comprehensive countermeasures for single terminal fault location of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(15):21-25.
 - [12] 张广斌,束洪春,于继来. 基于Hough变换直线检测的行波波头标定[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):165-173.
ZHANG Guangbin,SHU Hongchun,YU Jilai. Surge identification for travelling wave based on straight lines detection via Hough transform[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(19):165-173.
 - [13] 李泽文,刘柏罕,熊毅,等. 基于SR-ITD的故障行波检测方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):121-125,133.
LI Zewen,LIU Bohan,XIONG Yi,et al. Fault traveling wave detection based on SR-ITD[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):121-125,133.
 - [14] 夏璐璐,何正友,张钧. 基于数学形态学原理的行波波头提取算法在铁路电力贯通线测距中的适应性分析[J]. 电网技术,2009,33(8):78-83.
XIA Lulu,HE Zhengyou,ZHANG Jun. Adaptability analysis on fault location of continuous railway power line by traveling wave front extraction algorithm based on mathematical morphology[J]. Power System Technology,2009,33(8):78-83.
 - [15] 刘洋,曹云东,侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威耳分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(16):4086-4093.
LIU Yang,CAO Yundong,HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(16):4086-4093.
 - [16] 徐伟宗,唐昆明. 基于导数法的故障行波波头识别改进算法[J]. 电网技术,2010,34(1):198-202.
XU Weizong,TANG Kunming. An improving derivation algorithm to recognize wave heads of fault generated traveling waves[J]. Power System Technology,2010,34(1):198-202.
 - [17] 梁睿,靳征,王哲,等. 消除单端行波测距死区的煤矿电网故障定位[J]. 煤炭学报,2013,38(增刊2):543-548.
LIANG Rui,JIN Zheng,WANG Zhe,et al. Study on one terminal traveling wave fault location for coal mine high-voltage power network under the consideration of dead zone[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(Supplement 2):543-548.
 - [18] 冯秋实,陈剑云,林鹏,等. 基于连续小波变换的输电线路故障行波测距方法的研究[J]. 电测与仪表,2016,53(2):40-44.
FENG Qiushi,CHEN Jianyun,LIN Peng,et al. The research of transmission line fault location method based on the continuous wavelet transform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2016,53(2):40-44.
 - [19] 刘志刚,李文帆,孙婉璐. Hilbert-Huang变换及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):109-116.
LIU Zhigang,LI Wenfan,SUN Wanlu. Hilbert-Huang transform and its applications in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):109-116.
 - [20] 薛永端,徐丙垠,李天友,等. 配网自动化系统小电流接地故障暂态定位技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):27-32.
XUE Yongduan,XU Bingyin,LI Tianyou,et al. Small-current grounding fault location based on transient signals of distribution automation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):27-32.
 - [21] 侯丽钢,汤向华,江辉,等. 应用于含有线-缆混合线路配电网的行波故障测距新方法[J]. 电力工程技术,2019,38(2):111-116.
HOU Ligang,TANG Xianghua,JIANG Hui,et al. A novel traveling wave fault location method applied to distribution networks with hybrid line composed of overhead line and cable[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(2):111-116.
 - [22] PHINIKARIDES A,MAKRIDES G,KINDYNI N,et al. Comparison of trend extraction methods for calculating performance loss rates of different photovoltaic technologies[C]//2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). Denver, CO, USA:IEEE,2014:3211-3215.
 - [23] NURUNNABI A,WEST G,BELTON D. Robust locally weighted regression techniques for ground surface points filtering in mobile laser scanning three dimensional point cloud data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2016,54(4):2181-2193.
 - [24] LOPEZ J C,RIDER M J,WU Q W. Parsimonious short-term load forecasting for optimal operation planning of electrical distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(2):1427-1437.
 - [25] LIANG R,WANG F,FU G Q,et al. A general fault location

method in complex power grid based on wide-area traveling wave data acquisition[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 83: 213-218.

作者简介:

周鲁天(1993—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为电网故障定位(**E-mail**: zhoulutian@hotmail.com);

梁睿(1981—),男,江苏灌云人,教授,博士研究生导



周鲁天

师,主要研究方向为电力系统自动化、供配电安全与保护、电气设备绝缘监测(**E-mail**: liangrui@cumt.edu.cn);

彭楠(1993—),男,陕西商洛人,博士研究生,主要研究方向为电力系统自动化、供配电安全与保护(**E-mail**: 996694247@qq.com)。

(编辑 任思思)

Transient traveling wave front identification and fault location in mine power grid based on ARIMA

ZHOU Lutian^{1,2}, LIANG Rui^{1,2}, PENG Nan^{1,2}, XU Chuanyi^{1,2}, TENG Song³, CHEN Xuan⁴

(1. Jiangsu Province Laboratory of Electrical and Automation Engineering for Coal Mining, Xuzhou 221116, China;

2. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

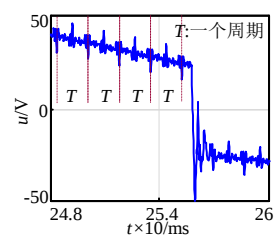
3. Xuzhou Electric Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Xuzhou 221000, China;

4. Maintenance Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China)

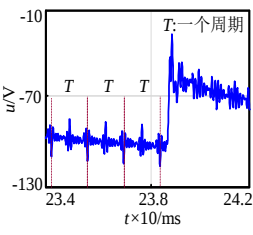
Abstract: Because of a large number of rectifier equipment and non-linear loads accessed, the mine power grid contains stable high-order harmonic components and high frequency noise in operation. At the same time, the mine power grid has a large number of short-distance lines, so the transient signal generated by fault is seriously overlapped with the original high-order harmonic, which brings great difficulties to traveling wave fault location. By analyzing the time domain characteristics of fault traveling wave in mine power grid, it is proposed to predict the high frequency periodic signal before the arrival of the traveling wave front based on ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average model), combined with the real waveform of the wave front arrival time the waveform residual can be obtained, and the stability of the residual error is checked. The exact arrival time of the traveling wave front is determined through the difference of residual stationarity before and after the arrival time of wave front, then the fault location is realized. The fault of the mine power grid is simulated by low voltage cable network. The simulative results show that compared with the wavelet transform and empirical mode decomposition, the proposed method can accurately identify the traveling wave front even with the influence of fault condition and noise. It can effectively improve the accuracy and reliability of the traveling wave fault location and is especially suitable for the mine power grid with rectifier equipment and non-linear loads.

Key words: transient fault signal; ARIMA; wave front identification; fault location; mine power grid

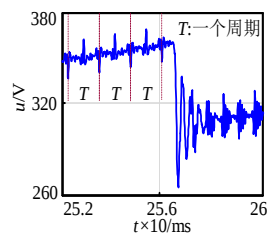
附录



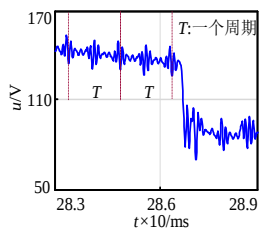
(a)单相接地（故障电阻 2.5Ω ）



(b)单相接地（故障电阻 50Ω ）



(c)相间短路（故障电阻 2.5Ω ）



(d)相间短路接地（故障电阻 2.5Ω ）

图 A1 不同接地故障情况下的行波

Fig.A1 Traveling wave in different grounding faults

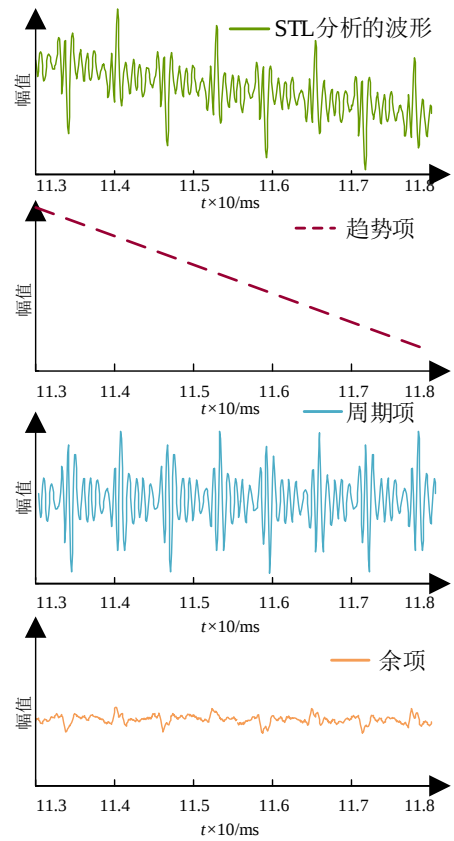


图 A2 行波信号及其 STL 分解结果

Fig.A2 Traveling wave signal and its decomposition result by STL

表 A1 ARIMA 的参数设置

Table A1 Parameter setting of ARIMA							
(p, q)	0	1	2	3	4	5	6
0	—	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}
1	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}
2	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}
3	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}
4	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}
5	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}
6	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}	V_{bic}

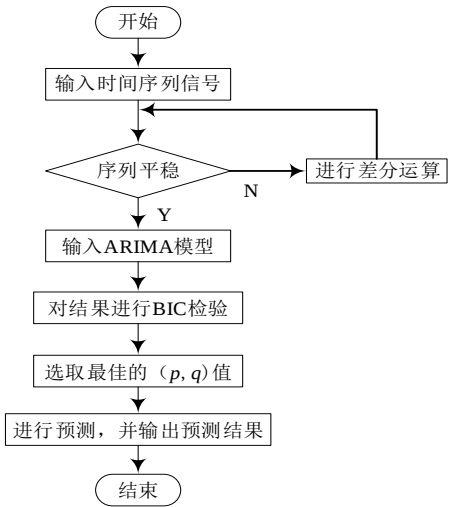


图 A3 ARIMA 预测流程图

Fig.A3 Flowchart of prediction based on ARIMA

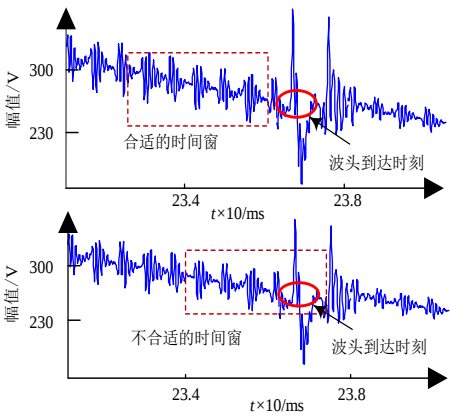


图 A4 时间窗的选取

Fig.A4 Selection of time window

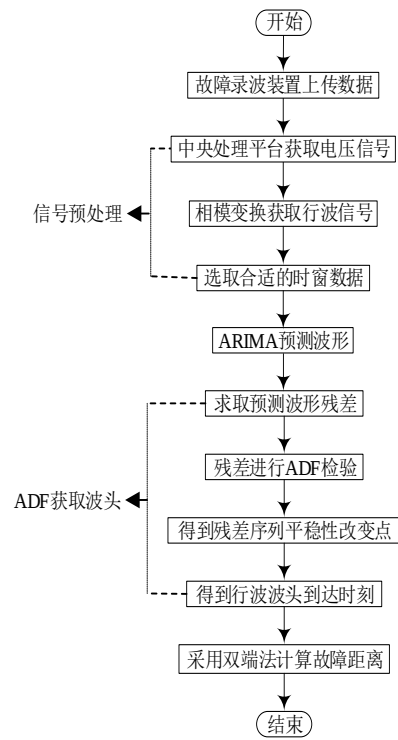


图 A5 故障测距流程

Fig.A5 Flowchart of fault location

附录 B

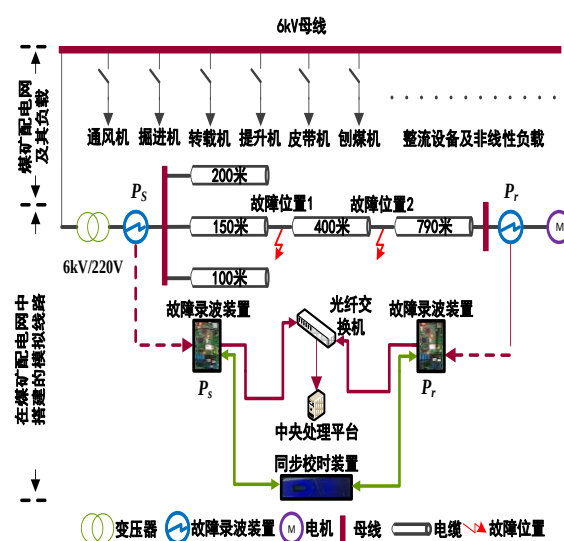


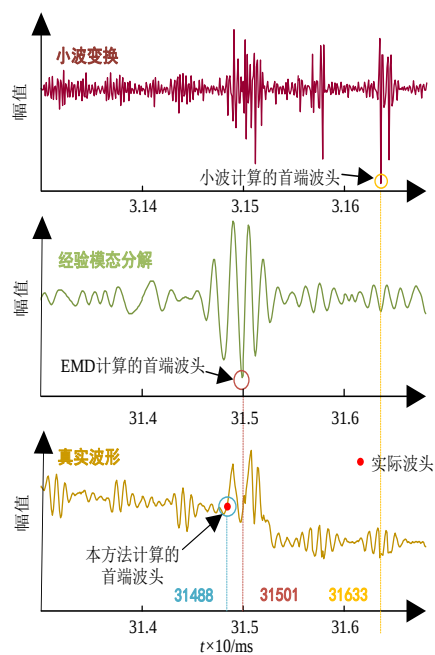
图 B1 故障线路和设备连接图

Fig. B1 Connection diagram of fault circuit and equipments

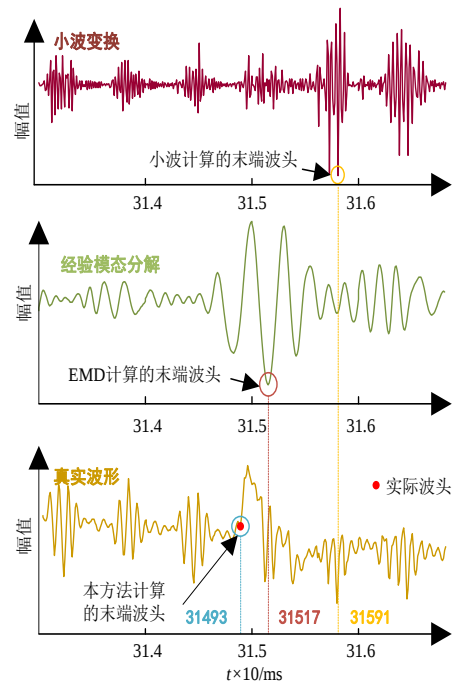
表 B1 各组参数的 V_{bic} 值

Table B1 Values of V_{bic} of each group of parameters

(p, q)	0	1	2	3	4	5	6
0	—	96.4	95.3	89.9	89.4	90.4	94.8
1	93.1	99.1	97.9	90.8	89	94.5	89.3
2	95.3	91.4	95.3	94.1	93.6	90.4	92.4
3	91	95.8	91.7	87.9	90.4	88.7	88.1
4	99.4	97.8	92	89.4	86.4	89.1	94.7
5	89.5	94.2	97.8	96.8	94.9	92.4	96.8
6	89.4	97.4	94.1	94	95.2	92.2	96.7



(a)首端



(b)末端

图 B2 小波变换、EMD 与所提方法在波头检测方面的比较

Fig.B2 Comparison among wavelet transform, EMD and proposed method in wave front detection