

基于改进小波阈值函数的典型输电线路故障波形去噪分析

朱 勇, 竺裕峰, 林启新, 肖 宁

(国网浙江省电力有限公司宁海县供电公司, 浙江 宁海 315600)

摘要: 故障测距技术是线路抢修和恢复供电的关键技术之一, 目前大多数故障测距技术需要准确的故障波形。采用 ATP-EMTP 程序模拟了 10 kV 配电线路弧光接地、高阻接地以及 500 kV 单相金属性接地、两相短路和三相接地故障, 获得了相应典型故障波形。提出一种基于 Logistic 函数的小波阈值函数, 并应用于上述五种典型的故障波形的去噪分析中, 与常规的硬阈值、软阈值的去噪效果对比表明, 所提方法可以较好地对输电线路典型故障波形进行去噪处理。

关键词: 输电线路; 故障波形; ATP-EMTP; 小波去噪; 阈值函数

Denoising analysis of typical transmission line fault waveform based on improved wavelet threshold function

ZHU Yong, ZHU Yufeng, LIN Qixin, XIAO Ning

(Ninghai Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ninghai 315600, China)

Abstract: Fault location technology is one of the key technologies for line repair and power supply restoration. At present, most fault location technologies need accurate fault waveforms. In this paper, ATP-EMTP program is used to simulate arc grounding and high resistance grounding of 10 kV distribution lines, as well as 500 kV single-phase metallic grounding, two-phase short circuit and three-phase grounding faults, and corresponding typical fault waveforms are obtained. A wavelet threshold function based on Logistic function is proposed, which is applied to the denoising analysis of the typical fault waveforms obtained above. Compared with the conventional hard threshold and soft threshold, the proposed method can effectively denoise the typical fault waveforms of transmission lines.

Key words: transmission line; fault wave; ATP-EMTP; wavelet denoising; threshold function

0 引言

随着我国电网的不断扩大, 不同电压等级输电线路的数量飞速增加。故障测距技术成为故障后线路抢修和恢复供电的关键技术之一^[1]。故障测距方法包括传统的故障分析法、行波法以及

智能法三大类^[2-5]。无论哪种故障测距方法, 都离不开准确的故障波形。为此, 本文从两个方面开展研究: 首先针对配电网和超高压输电电网的典型接地故障建立 ATP-EMTP 模型, 得到典型的故障波形, 为小波去噪分析提供研究对象; 然后

提出一种改进的小波阈值函数,对耦合了噪声的典型输配电线路故障波形进行去噪分析,并与传统的硬阈值、软阈值方法的去噪效果进行对比,验证本文方法的有效性。结果表明,通过本文方法可准确获得去噪后的故障波形。

1 典型的输电线路故障波形

低压配电网一般没有配置故障录波装置,不涉及故障测距问题。中高压配电网的故障主要以弧光接地故障为主,70%的中低压配电网电气火灾是故障电弧引起的。超高压输电线路送电距离远,比较常见的故障诱因有雷击、风力、外力破坏、覆冰和污闪因素等。高压输电线路故障以单相接地短路故障占绝大多数。单相接地故障具有重复性,故障发生后重合闸成功的短时间内,在同一地点再次发生故障。单相接地故障往往接地电阻较高,输电线路直接对树支、竹杆等放电引起接地故障,短路故障的接地电阻可达几十欧姆甚至数百欧姆。

本文以10 kV配电线路和500 kV超高压输电线路为例,首先搭建ATP-EMTP电磁暂态仿真模型^[6-7],获得故障电压波形;然后提出一种改进的小波阈值函数,对故障波形进行去噪分析,通过对比不同的阈值函数下的去噪效果,验证本文方法的有效性。

1.1 10 kV配电线路短路故障

模拟10 kV配电线路,变压器接线方式是Y/Y₀形,额定容量为40 MV·A,电压比为110 kV/10.5 kV,空载损耗为35.63 kW,一次绕组的漏阻抗为(0.4+j12.2) Ω,二次绕组的漏阻抗为(0.006+j0.183) Ω,励磁电流为0.672 A,励磁磁通为202.2 Wb,磁路电阻为400 kΩ,高压侧单相线圈电阻为0.4 Ω,低压侧单相线圈电阻为0.006 Ω;10 kV两回三相系统,长度为20 km,其参数为 $Z_1 = (0.270 + j0.351) \Omega/\text{km}$, $Z_0 = (0.475 + j1.757) \Omega/\text{km}$,正序容纳为 $b_1 = 3.267 \mu\text{s}/\text{km}$,零序容纳为 $b_0 = 1.100 \mu\text{s}/\text{km}$,负荷等效阻抗为(400+j20) Ω。搭建ATP-EMTP

模型如图1所示,其中变压器采用三相SAT模型,架空线路采用三相PI型LINEPI3S模型,等效负荷采用RLC3电阻电感模型。

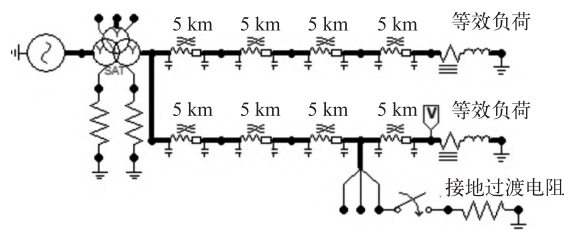


图1 10 kV 配电线路仿真模型

Fig. 1 10 kV distribution line simulation model

(1) 弧光接地故障

配电网中性点不接地系统发生单相接地故障,往往故障点电流不足以维持电弧的稳定燃烧,形成时断时续的间歇性电弧,从而发生弧光接地故障。交流电弧中,在距离过零点较远处电弧上具有较大的时间常数,在过零点附近电弧时间常数较小,因此Cassie方程适用于低电阻、大电流情况,而Mayr方程用于描述高电阻下的电弧。弧光接地故障发生时,将弧光接地电阻等效为Cassie模型和Mayr模型串联的结构,即

$$r_{ac} = \frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \quad (1)$$

式中, r_{ac} 为弧光等效电阻; g 为弧光等效电导; g_c 为Cassie模型电弧电导; g_m 为Mayr模型电弧电导。

Cassie模型、Mayr模型表达式分别为

$$\frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2 g^2}{u_c^2 g_c^2} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u^2 g^2}{P_m g_m} - 1 \right) \quad (3)$$

式中, u 为电弧电压; τ_c 为Cassie电弧时间常数; τ_m 为Mayr电弧时间常数; u_c 为Cassie电弧电压常数; P_m 为Mayr电弧散热功率。

在线路距离电源侧15 km的位置发生C相弧光接地短路。弧光接地电阻采用TACS模块构建,如图2所示。计算得到短路线路上的三相电压波形如图3所示。

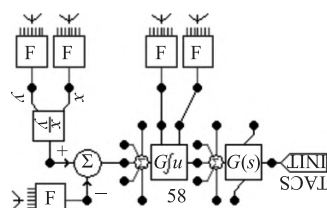


图2 弧光接地电阻仿真模型

Fig. 2 Arc grounding resistance simulation model

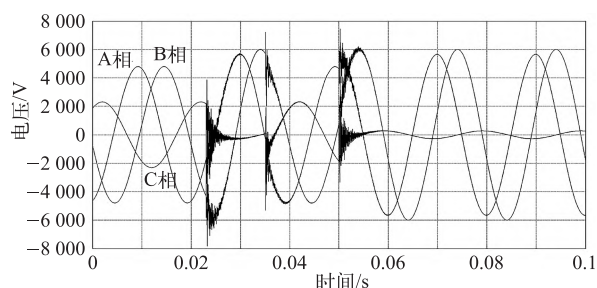


图3 10 kV 线路弧光接地故障负荷电压波形

Fig. 3 Load voltage wave of arc grounding fault of 10 kV line

(2) 高阻接地故障

配电网线路电压等级低，对地距离小，往往分布在居民区，触及树枝树叶或人为断线概率较高，容易造成高阻接地故障。采用与上文相同的线路参数，模拟过渡电阻为500 Ω的单相高阻接地过程，建模得到的短路电路上负荷三相电压波形如图4所示。

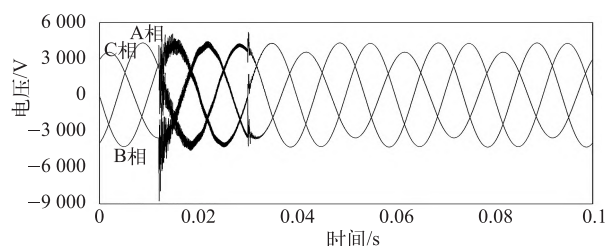


图4 10 kV 线路单相高阻接地故障负荷电压波形

Fig. 4 Load voltage wave of single-phase high resistance grounding fault of 10 kV line

1.2 500 kV超高压输电线路短路故障

采用文献[8]的参数，500 kV辛涇线同塔双回线路长度为65 km，辛安站电源为 $523.1 \angle -10.8$ kV，涇安站电源为 $522.7 \angle -16.2$ kV，系统等效零序电抗 $x_0=62.344$ Ω，等效正序电抗 $x_1=276.09$ Ω，采用Bergeron模型，中性点小电抗为1 099 Ω。建立仿真模型如图5所示。

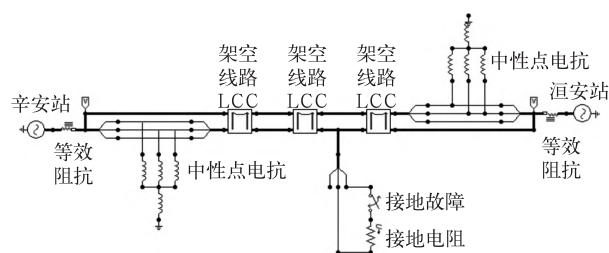


图5 500 kV 线路仿真模型

Fig. 5 500 kV line simulation model

(1) 单相金属性接地故障

模拟在距离辛安站30 km处发生单相金属性接地故障，接地过渡电阻为0.1 Ω，然后继电保护和安全设备动作，恢复线路正常供电。得到涇安变电站出口侧电压波形如图6所示。

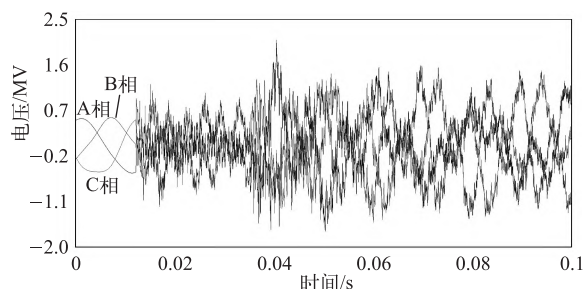


图6 500 kV 线路单相金属性接地故障涇安站出口侧电压波形

Fig. 6 Voltage wave at outlet side of Huan'an Station due to single-phase metallic grounding fault of 500 kV line

(2) 相间短路故障

模拟距离辛安站30 km处发生两相相间短路故障，短路电阻为5 Ω，然后继电保护和安全设备动作，恢复线路正常供电。得到涇安变电站出口侧电压波形如图7所示。

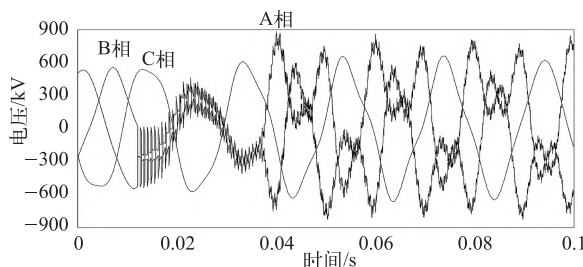


图7 500 kV 线路两相短路故障涇安站出口侧电压波形

Fig. 7 Voltage wave at the outlet side of Huan'an Station due to two-phase short circuit fault of 500 kV line

(3) 三相接地短路故障

模拟在距离辛安站30 km处发生三相接地短

路故障，短路过渡电阻为 $0.1\ \Omega$ ，然后继电保护和安全设备动作，恢复线路正常供电。得到涇安变电站出口侧电压波形如图8所示。

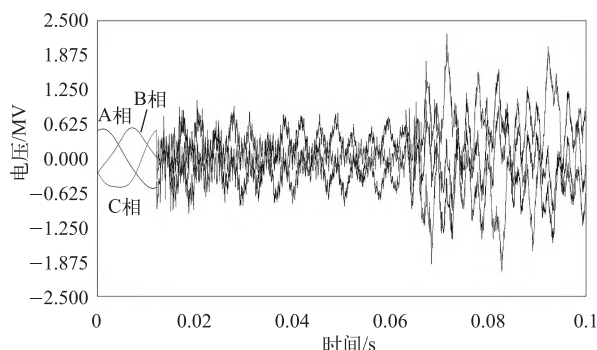


图8 500 kV 线路三相接地故障涇安站出口侧电压波形
Fig. 8 Voltage wave at the outlet side of Huan'an Station due to three-phase grounding fault of 500 kV line

2 改进小波阈值函数去噪分析

电网中噪声信号一般可以分为白噪声、随机脉冲干扰和周期性窄带干扰等。小波阈值去噪分析是基于小波变换的一种信号去噪分析方法，多分辨率小波变换对原始信号从不同分辨等级上分解为各个频段的子信号。然后再依据噪声信号频率高、能量低的特征，选择合适的阈值函数滤掉高频部分信息，从而获得去噪后的信号。小波变换比傅里叶变换的时频处理能力更强，适于更为复杂故障条件下的含噪声信号处理。小波阈值去噪在振动信号分析^[9]、变压器绕组形变^[10]、故障选线^[11]和局部放电^[12-13]等信号分析中有着广泛的应用。

2.1 改进的小波阈值函数

小波阈值去噪分析通过设置合适阈值函数，对小波系数进行基于阈值的判定处理。小波阈值去噪的处理本质是阈值与连续变尺度压缩系数相乘的过程，连续变尺度压缩系数又称为阈值函数，其选取是小波阈值去噪的关键。

常用的阈值函数有硬阈值函数和软阈值函数。硬阈值函数将处于阈值范围内的小波系数置0，对处于阈值范围外的小波系数不做处理，其数学表达式为

$$\hat{C}_{i,j} = \begin{cases} C_{i,j} & |C_{i,j}| > T \\ 0 & |C_{i,j}| < T \end{cases} \quad (4)$$

式中， $C_{i,j}$ 为含噪声信号的小波分解系数； $\hat{C}_{i,j}$ 为阈值处理后的小波系数； T 为阈值。

软阈值函数将处于阈值范围内的小波系数置0，处于阈值范围之外的小波系数使阈值向0收缩，其数学表达式为

$$\hat{C}_{i,j} = \begin{cases} \text{sgn}(C_{i,j})(|C_{i,j}| - T) & |C_{i,j}| > T \\ 0 & |C_{i,j}| < T \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

通过两种阈值函数的数学原理可以发现，硬阈值函数在阈值处不连续，重构后出现截断振荡现象；软阈值函数虽然满足连续性，但在阈值范围外，小波系数和小波系数估计值存在固定的偏差，影响重构效果。针对这种情况，本文提出一种基于Logistic函数的小波阈值函数。Logistic函数的一般表达式为

$$f(x) = \frac{A}{e^{-m(x-n)} + 1} \quad (6)$$

式中， A 为 $f(x)$ 变化幅度； m 为曲线转折点 x 坐标， m 体现为 $f(x)$ 的转折速度。

将Logistic函数作为小波系数的变尺度压缩系数， $A=1$ ，转折点 m 设置在小波阈值处，根据Logistic函数特性，即可克服上述硬阈值和软阈值函数的不足。小波阈值函数表达式为

$$\hat{C}_{i,j} = \text{sgn}(C_{i,j}) \frac{|C_{i,j}|}{e^{-k(C_{i,j}-T)} + 1} \quad (7)$$

式中， k 为调节系数。 k 决定了阈值函数的转折快慢， k 越大，转折越快，阈值函数转折区域越陡峭。

2.2 基于改进的小波阈值函数的去噪应用

将2.1提出的改进小波阈值函数应用于1.1和1.2节获得的故障波形中。在1.1节图1、图2中，在故障条件下随机混入4 000个正态分布噪声点，均值为0 V，标准差为0.5 kV。在1.2节的图4~图6中，在故障条件下随机混入4 000个正态分布噪声点，均值为0 V，标准差为35 kV。

以C相电压波形为例，在原故障波形上混入4 000个正态分布噪声点，均值为0 V，标准差为0.5 kV，不同阈值方法的去噪效果对比如图9所示。使用dB7小波函数进行9层分解，再分别采用硬阈值、软阈值和本文提出的改进阈值函数进行去噪分析。原波形在峰值附近出现高频电磁噪声，相比于硬阈值、软阈值，本文方法在保留了波形总体特征时去噪效果更明显。

应用本文改进的阈值函数对图3~图4和图6~图8三相电压波形进行去噪，得到的波形如图10~图14所示。

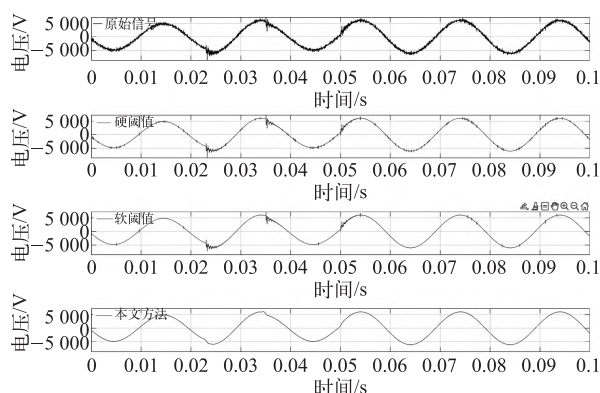


图9 不同阈值方法的去噪效果对比

Fig. 9 Comparison of de-noising effects of different threshold methods

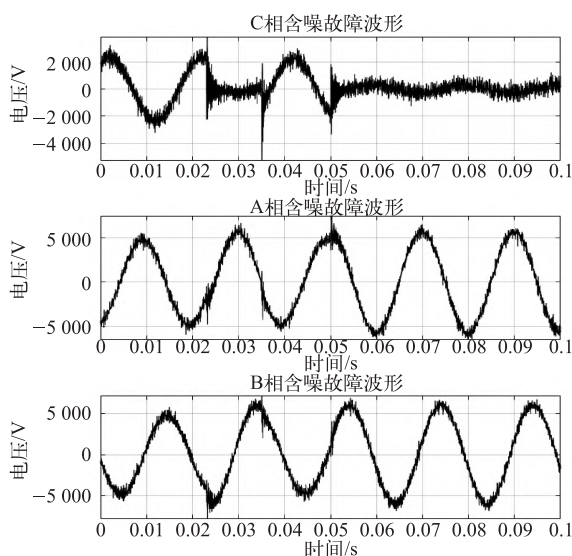


图10 图3故障波形去噪后的波形

Fig. 10 De-noising waves from fault waves in fig.3

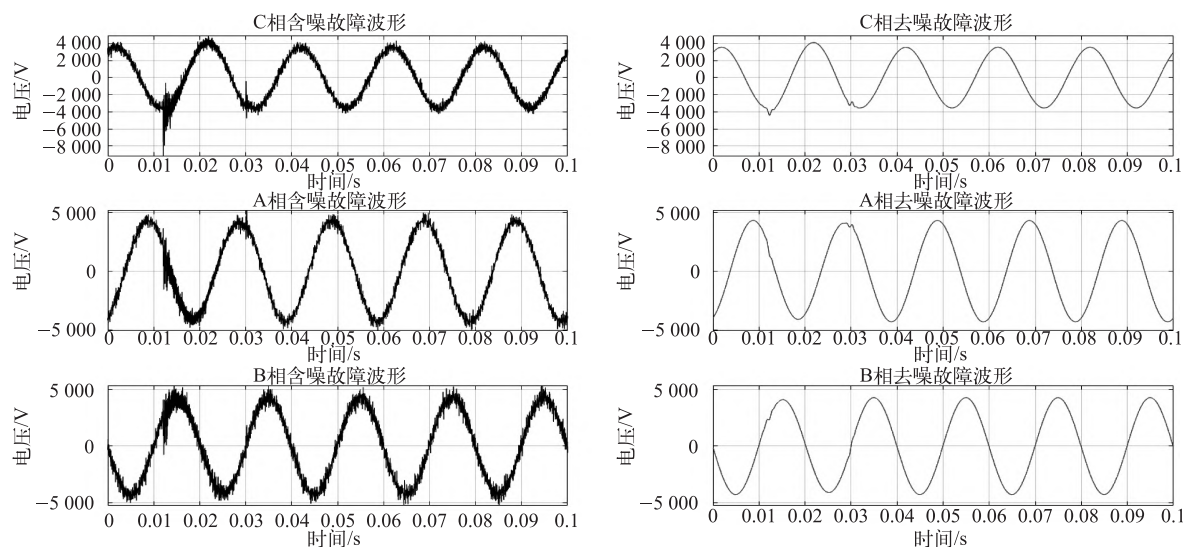


图11 图4故障波形去噪后的波形

Fig. 11 De-noising waves from fault waves in fig.4

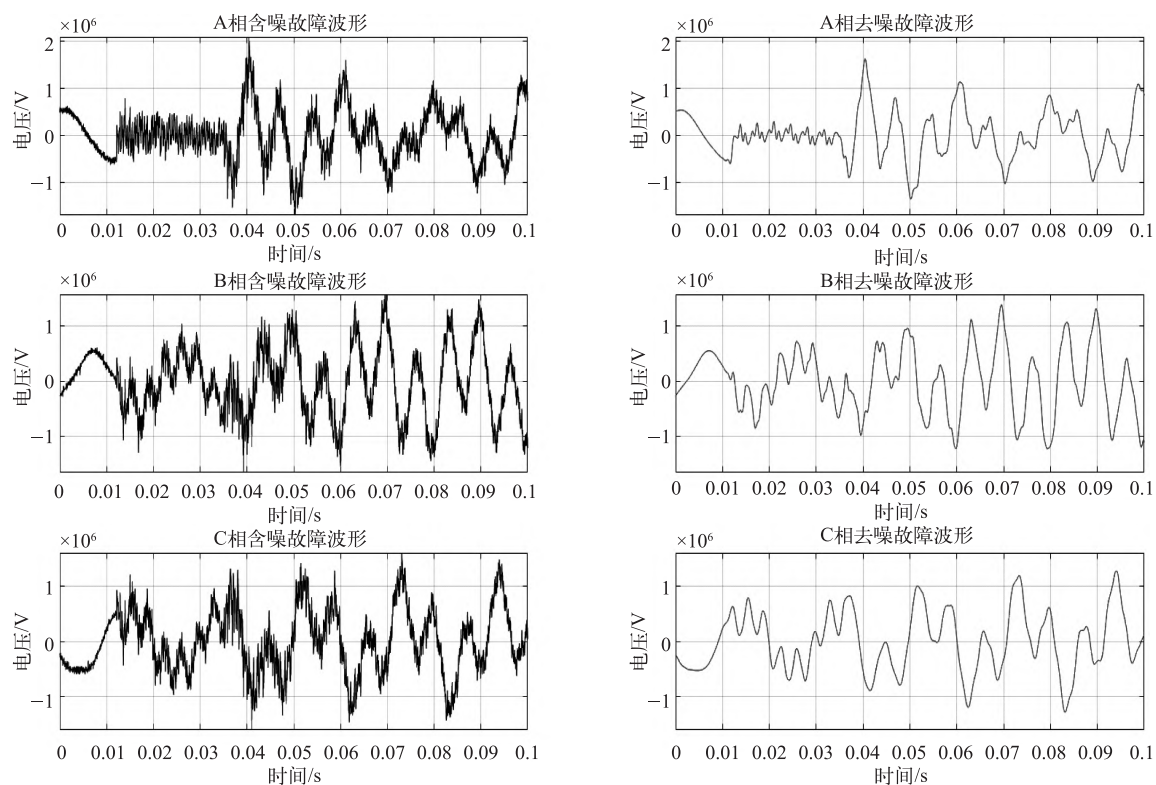


图 12 图 6 故障波形去噪后的波形
Fig. 12 De-noising waves from fault waves in fig.6

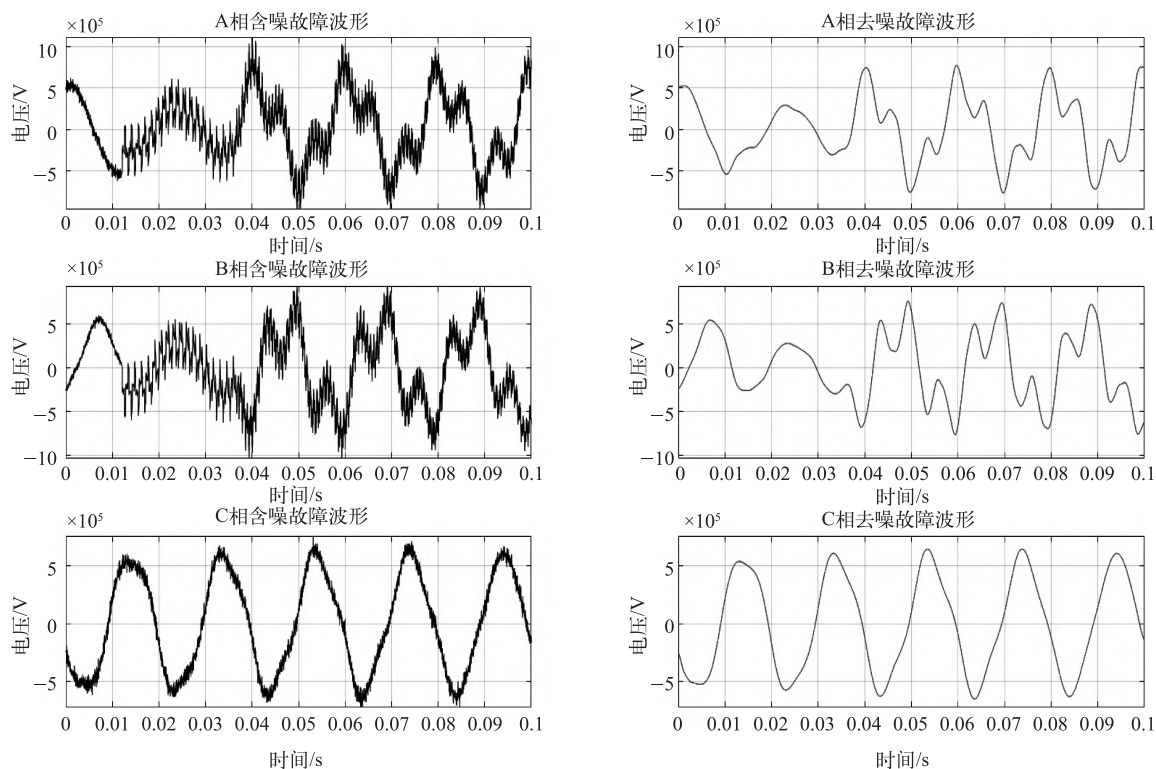


图 13 图 7 故障波形去噪后的波形
Fig. 13 De-noising waves from fault waves in fig.7

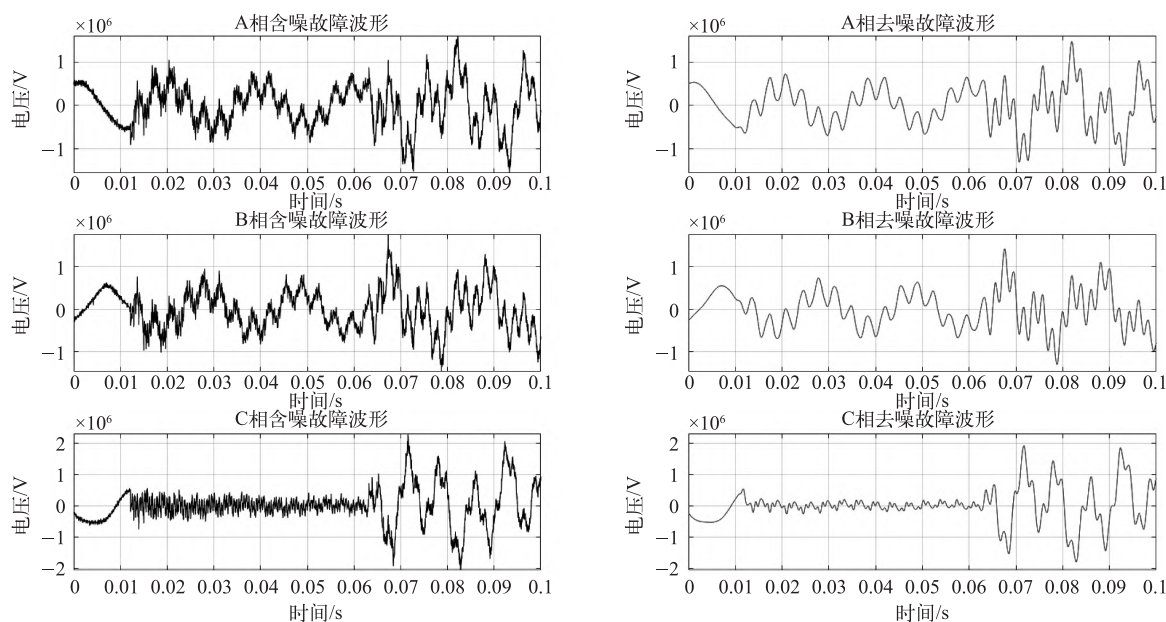


图 14 图 8 故障波形去噪后的波形

Fig. 14 De-noising waves from fault waves in fig.8

由图10~图14看出,提出的去噪方法对叠加了高频噪声的规则周期性波形、具有电磁振荡的波形和稳态向暂态过渡的波形等都有较好的去噪效果,使波形更加光滑。

3 结束语

针对配电线路和超高压输电线路典型的故障类型,本文采用ATP-EMTP建立了短路故障模型,仿真得到了10 kV弧光接地故障、高阻接地故障以及500 kV金属性接地故障、两相短路故障和三相接地故障的电压波形。提出了一种基于Logistic函数的小波阈值函数,并应用于上述五种典型的故障波形的去噪分析中,与常规的硬阈值、软阈值的去噪效果进行了对比,仿真结果说明本文提出的方法更适合配电线路和超高压输电线路典型故障波形的去噪处理。

参考文献

[1] 杨远航,陈璟,解良,等.基于线路录波全量数据的双端故障测距原理及算法[J].云南电力技术,2021,49(2): 7-10.
[2] 胡婷,游大海,金明亮.输电线路故障测距研究现状及其发展[J].电网技术,2006,(S1): 146-

150.

[3] 任俊谕,李本瑜,赵明,等.基于计算电阻指标和双端测量信息的高压直流输电线路故障测距方法[J].电气应用,2021,40(6): 24-31.
[4] 王宾,杨林.高压直流输电线路单端行波故障测距误差分析[J].电气应用,2020,39(10): 33-38.
[5] 付波.基于数据挖掘的电气化铁路高压电网故障定位研究[J].电气应用,2022,41(4): 58-62.
[6] 王国彬,涂恩来,曾静岚,等.基于ATP-EMTP的10 kV配电系统不同中性点接地方式电气特性仿真分析[J].电瓷避雷器,2020(6): 86-94.
[7] 谢辉春,文习山,邓维,等.500 kV GIS变电站雷击进线段塔顶雷电过电压的仿真研究[J].电气应用,2006(3): 63-66.
[8] 张森林.500 kV辛涇线过电压计算分析[D].西安:西安科技大学,2017.
[9] 吴飞,马晨浩,程坤.基于改进阈值的振动信号小波去噪方法研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(7): 873-877,900.
[10] 胡志明,王彦文,马志强,等.基于暂态量低频带的谐振接地系统故障选线研究[J].电气应用,2022,41(4): 30-35.
[11] 廖巨成,王晓峰,徐菁,等.基于连续小波变换

获取变压器绕组变形脉冲频率响应曲线的方法[J].

电气应用, 2019, 38(12): 121-127.

- [12] 胡明宇, 王先培, 肖伟, 等. 基于UHF的局部放电信号小波包去噪与模式识别研究[J]. 仪表技术与传感器, 2016(7): 93-96.

- [13] 刘明军, 王鹏, 周求宽, 等. 变压器局部放电在线监测加权阈值小波降噪方法研究[J]. 电气应用, 2019, 38(5): 22-27.

作者简介

朱勇 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事输电线路工程线路运行与检修方面的工作。

竺裕峰 (1987—), 男, 本科学士, 研究方向为电气工程及其自动化。

(收稿日期: 2022-11-03)