

引用格式:李泽文,冯译萱,夏翊翔,等.基于VMD-SSDEO的全并联AT牵引网故障定位[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):55-66.

Citation: LI Zewen, FENG Yixuan, XIA Yixiang, et al. Fault localization of fully parallel AT traction network based on VMD-SSDEO[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 55-66.

基于VMD-SSDEO的全并联AT牵引网故障定位

李泽文¹, 冯译萱¹, 夏翊翔¹, 张一鸣¹, 刘国胜¹, 张灵芝², 罗姗姗³

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙410114;2.湖南铁路科技职业技术学院铁道供电与电气学院,湖南株洲412006;3.长沙理工大学期刊社,湖南长沙410114))

摘要:针对全并联自耦变压器(auto-transformer, AT)牵引网故障点反射波波头微弱难辨识,且线路并联结构导致故障行波折反射复杂而造成定位困难的问题,提出基于变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和改进能量算子的牵引网故障行波单端定位方法。首先,深入分析牵引网故障行波的传输特性,研究全并联结构对行波折反射的影响,确定不同故障类型和潮流特征,以此为依据提取故障特征量,将波头辨识转化为能量突变值提取;随后,利用VMD去噪提取电压行波真实分量,再针对第二反射波波头微弱难标定问题,在滑动时间窗口(sliding time window, STW)下,结合对称差分能量算子(symmetrical differencing energy operator, SDEO)构造故障信号的二次瞬时能量谱,效果良好。仿真结果表明:所提方法抗过渡电阻能力强,能够反应不同工况下故障牵引网电磁能量的变化,具有较高的定位精度。

关键词:全并联AT牵引网;故障测距;行波单端定位;对称差分能量算子

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.006 中图分类号: TM77 文章编号: 1673-9140(2025)01-0055-12

Fault localization of fully parallel AT traction network based on VMD-SSDEO

LI Zewen¹, FENG Yixuan¹, XIA Yixiang¹, ZHANG Yiming¹,
LIU Guosheng¹, ZHANG Lingzhi², LUO Shanshan³

(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.School of Railway Power Supply and Electrical Engineering, Hunan Vocational College of Railway Technology, Zhuzhou 412006, China; 3.Periodical Press, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China))

Abstract: To address the issue of weakly discernible wave heads in the reflection waves of faults in the fully parallel auto transformer (AT) traction network, compounded by difficult localization caused by refraction and reflection complexity of fault traveling waves introduced by the parallel structure of the lines, a single-ended localization method for fault traveling waves in the traction network is proposed based on variational mode decomposition (VMD) and enhanced energy operator. Firstly, the transmission characteristics of fault traveling waves in the traction network are analyzed, with a focus on the impact of the fully parallel structure on the refraction and reflection of fault traveling waves. Features of different fault types and power flows are determined, facilitating the extraction of fault features. The process of wave head identification is transformed into the extraction of abrupt energy changes. Then, VMD is used for denoising and extracting the genuine voltage traveling wave component. In view of the challenging calibration of weak wave heads in the second reflection wave, a sliding time window (STW) combined with the symmetrical differencing energy operator (SDEO) is employed to construct the second instantaneous energy spectrum of the fault signal, yielding satisfactory results. Simulation outcomes demonstrate the method's robust resistance to transient resistances, its ability to reflect variations in electromagnetic energy under different operating conditions in the fault traction network, and its

收稿日期:2023-11-07;修回日期:2024-01-19

基金项目:国家自然科学基金(51877012);湖南省科技创新人才计划科技创新团队项目(2021RC4061)

通信作者:李泽文(1975—),男,博士,教授,主要从事电力系统继电保护与故障测距、故障录波以及数字信号处理的研究;E-mail: lzw0917@163.com

high precision in fault localization.

Key words: fully parallel AT traction network; fault locating; single-ended localization of traveling wave; symmetrical differencing energy operator

中国高速铁路牵引供电系统采用自耦变压器(auto transformer, AT)供电方式,即在同一供电臂中的上下行接触网增加AT,并进行横向点连接^[1-3]。常用的全并联AT牵引网具有供电功率大、供电区段长以及可靠性高等特点,架空线线路无备用线路,一旦出现故障会影响铁路部门的正常运营^[4-8]。对牵引网故障定位的研究多基于阻抗测距原理,目前故障信息来源于低频稳态信号,准确性低且受工况影响较大;同时,牵引网承受机车频繁运行产生的广泛的电气和机械冲击,这导致牵引网故障时有发生,严重影响了电气化铁路的安全可靠运行^[9-12]。

对于轨道交通直流牵引供电系统来说,常用的故障测距方法有阻抗法、上下行电流比法和吸上电流比法,这些方法均具有一定局限性^[13-14]。阻抗法最早被应用,但受工况影响大,准确性差、定位精度低,对工作人员经验储备有较大依靠;文献[15]研究得出,区段上下行电流比原理比AT中性点吸上电流比原理更准确,适用于全并联AT供电方式系统T-R(接触线-钢轨)和F-R(馈线-钢轨)故障,不适于T-F(接触线-馈线)故障;文献[16]在此基础上进行了改进,将吸上和上下行电流比原理相结合提出了综合测距方案,但该方法计算量大、定位精度仍未达到预期。输电线路常用的行波测距法不受过渡电阻与线路结构影响,故障定位精度高,因此,探究行波测距法在铁道牵引网中的应用成为新的尝试。目前针对行波法测距应用该领域的研究较少,文献[17]运用卷积神经网络进行异常电气现象辨识,该方法各部分的模型是单独训练的,不同模型训练得到的数据难以运用到其他模型,未形成整体;文献[18]提出利用时频谱相似度矩阵识别故障区段,再利用A型测距公式进行故障测距,用小波模极大值标定波头位置,其受小波基的选取和分解层数影响,具有一定误差,同时未解决该波头奇异性差、含噪情况下无法辨识的问题。

改进信号处理方法在输电网行波故障检测中已有较多研究,文献[19]提出多测点的故障测距,但实验的输电线路模型是单条架空线路,结构简单,波阻抗为恒定数值,与实际工程数据有较大差别;文献[20]根据母线位置检测到的电流波形,利用数学形态学多梯度处理分析方法进行测距,但是

对于并联结构牵引网,其电流成分复杂,采用该方法时具有局限性;文献[21-22]利用初始行波到达不同母线时的时间参数,从故障距离表达式中消除输电线路波速和弧度的影响,但在线上装有变压器时效果较差;文献[23]利用集成神经网络,拟合线模量和地模量的小波变换模极大值比进行故障测距,但牵引网距离短、负荷复杂,零、线模波速差小,难以适用;文献[24-25]利用Teager能量算子(Teager energy operator, TEO)解调,但抗噪性能差,对信号波形光滑度和波头提取的准确度不够理想。

行波传播波速由线路的分布参数决定,但线路电容、电感参数常随环境改变,从而带来误差。因此,如何消除波速改变带来的影响,实现快速、可靠定位牵引网短路故障,提高牵引网供电可靠性,加强技术创新和实用化研究迫在眉睫。鉴于此,本文将通过行波模量分析及时域电气量与模量转换规则,挖掘数据在时间维度上的变化规律和内在相关特征,提取牵引网不同短路故障下暂态模量和电压行波的故障特征,根据故障潮流符号值判别故障区段和故障类型。利用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)算法来分解含噪故障行波波头信号,通过分解低、中频段故障信息,避免高频段模态混叠的波头提取,根据互相关系数进行降噪重构,有效去除噪声影响,通过对称差分能量算子(symmetrical differencing energy operator, SDEO)捕捉能量突变点,针对微弱信号采用滑动时间窗(sliding time window, STW)与二次能量提取精准定位,最后进行测距计算。本文定位方法通过电力系统电磁暂态仿真软件(alternative transient program-electromagnetic transients program, ATP-EMTP)构建全并联AT牵引网模型并进行仿真实验,验证此方案的准确性。

1 牵引网故障行波传播特性

全并联AT牵引网将上下行牵引网T、R和F在变电所出线处及AT所处位置通过横联线并联起来^[26],可以减少接触网单位长度阻抗,减少电压损失,增强供电能力,改善供电质量。

1.1 自耦变压器对行波传播影响

在全并联AT牵引网中,设有AT既可以降低

对通信线路的干扰,又可以降低电压损失。AT 以每隔 10~15 km 的距离并联在上下行 T、F 和 R 之间。由于故障行波频率范围较大,而 AT 绕组对低频信号有一定折反射作用,因此,电流行波波峰有一定程度畸变,但波头位置基本重合,电压行波畸变较电流更小,且由于故障行波频率较高,理想情况下可视为开路^[27],如图 1 所示。AT 对电流行波有阻断效果,但对电压行波不会造成影响。

在 ATP-EMTP 仿真软件中进行实验,比较 3 种故障下 AT 对故障电压行波的影响,如图 2 所示。结合图 1、2 可知,AT 对故障电压行波幅值影响小,对初始行波、故障点反射波、对端母线反射波以及并联侧对端母线反射波发生的突变量与波头到达时间无影响,因此,本文考虑以牵引网故障电压行波进一步研究。

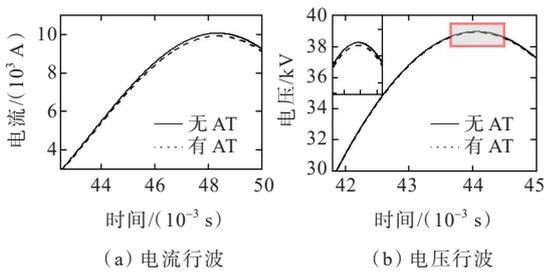


图 1 自耦变压器对行波影响
Figure 1 Influence of AT on traveling wave

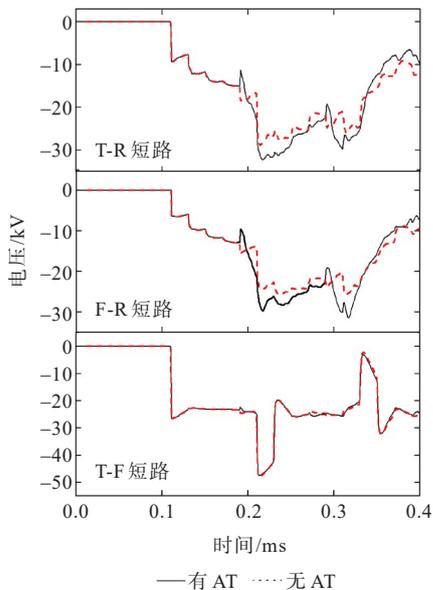


图 2 不同故障下自耦变压器对电压行波影响
Figure 2 Influence of AT on voltage traveling wave under different faults

1.2 故障行波时域特性

研究时一般认为电气化铁路牵引网是参数均

匀分布的电路。全并联 AT 牵引网线路如图 3 所示,其长度为 30 km, M 端设置行波检测装置。假设 f_1 处发生短路故障,根据叠加定理,可认为故障点处产生电压源,其大小为故障后与故障前的电压差,方向为由故障点沿线路向两端传输,期间会进行多次波的折反射。变电所测量端、故障点、AT 端以及分区所入线端检测到的电压模量如图 4 所示。

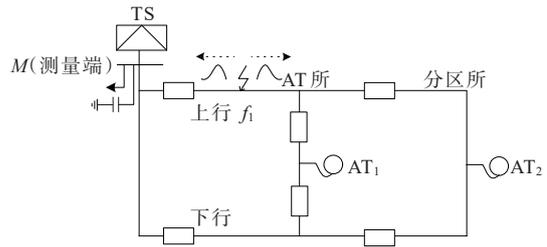


图 3 全并联 AT 牵引网单线示意
Figure 3 Single-line diagram of fully parallel AT traction network

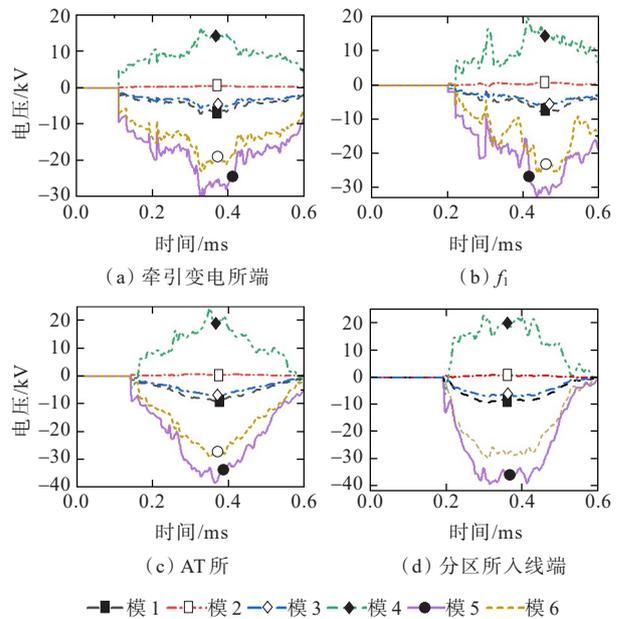


图 4 各处电压行波模量
Figure 4 Voltage traveling wave modulus at different points

结合图 4(a)~(c),在短路故障发生后,牵引变电所端、AT 所端、故障点经过相模变换的电压行波模量可知牵引变电所出线端模 2 电压接近 0,入射波与反射波极性相反、幅值相等,即该模量无法辨识 AT-分区所段线路故障;模 1、3 波形平缓、奇异性小,行波识别提取时不是最优选择。结合图 4(a)~(d)可知,模 5 在牵引变电所和分区所端奇异性均最大,能够更直观、有效反应故障波形随故障距离变换的趋势,可以考虑安装行波检测装置,因此本文选择模 5 分量用于行波测距。

牵引网线路传输过程中故障行波发生衰减,线路传播距离和模5入射电压波在线路上的衰减情况如图5所示,电压入射波传播45 km后幅值衰减为原来的0.914倍,但总体而言,在一组牵引臂长度内,行波幅值衰减幅度小于10%,不会对行波监测造成较大影响。考虑不同过渡电阻与初始相角对故障行波传播的影响,在距离牵引变电所出口3 km处发生T-R、F-R、T-F这3种短路故障,T-R、F-R短路信号相似度较高,可作为一致考虑。仿真过程中过渡电阻分别为10、200 Ω ,初始相角分别为30°、45°、90°,模5分量如图6所示。

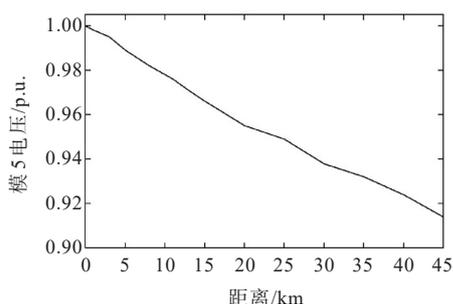


图5 行波在牵引网上的衰减

Figure 5 Attenuation of traveling waves on traction network

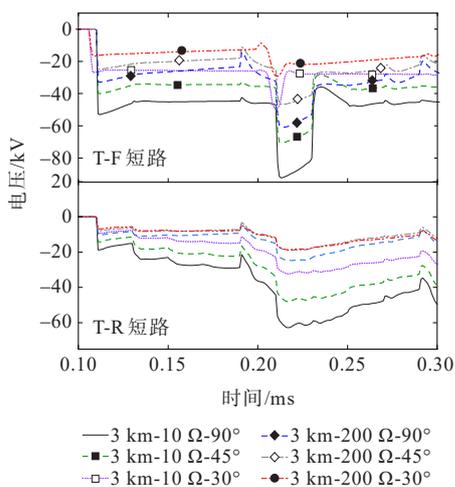


图6 不同故障下电压模5分量

Figure 6 Components of voltage modulus 5 under different faults

由图6可知,故障点初始电压行波幅值由初始相角与过渡电阻决定,随着接地电阻的增大或故障初相角越小时检测越困难,故障点反射波波头受噪声影响难以辨识,易丢失波头信息,导致故障定位具有较大误差。行波传播速度一般根据线路电容、电感等参数计算确定,但电容、电感参数常随环境变化而改变,导致计算出的波速具有误差。因此,原有单端测距方法并不能直接适用于全并

联AT牵引网,需在原有单端测距方法的基础上结合全并联AT牵引网的特殊并联结构与行波传输路径进行研究,消除波速误差,提高定位准确性。

1.3 牵引网故障行波路径分析

牵引网常由不同波阻抗的线路相连接而成,当线路上出现短路等故障时参数发生改变,该点必将发生行波的折射和反射。在AT牵引网中,接触线与正馈线处于对称形式,理想情况下不考虑钢轨对地泄露等情况。

考虑全并联结构对故障行波采集的影响,以图3故障为例,线路复线结构行波传播路径如图7所示,上下行的 T_1 和 T_2 、 F_1 和 F_2 以及 R_1 和 R_2 均形成闭合回路; M 点采集的行波波由前向、反向行波经折反射叠加而成。由于AT的波阻抗远大于牵引网线路波阻抗,故根据文1.2可等效为开路。 M 端、 N 端、故障点 f 处可等效2、4、2条线路并联,如图8所示。

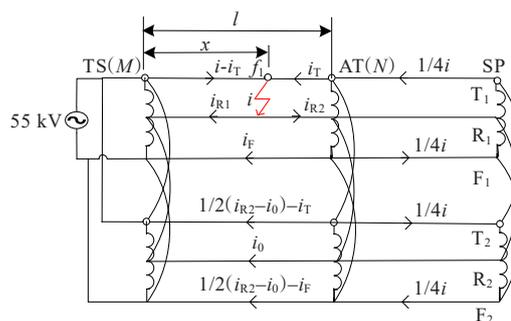


图7 T-R故障行波在牵引网传播路径

Figure 7 Propagation path of T-R fault traveling wave in traction network

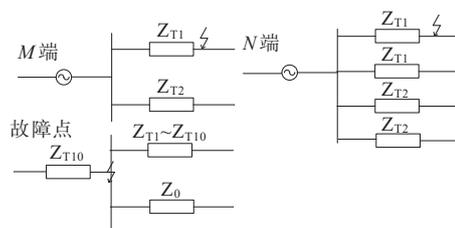


图8 波阻抗不连续点等效示意

Figure 8 Equivalent schematic diagram of wave impedance discontinuity point

电压行波在牵引网中的折、反射系数^[28]分别为

$$\gamma_u = 2Z_2 / (Z_2 + Z_1) \quad (1)$$

$$\rho_u = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) \quad (2)$$

其中, Z_1 、 Z_2 分别为节点前、后的波阻抗。当线路没有分支且线路参数不变时, $Z_1=Z_2$ 恒成立;线路 $\gamma_u=1$ 、 $\rho_u=0$,行波幅值不会发生变化。由于牵引网的并联结构以及故障的发生,线路出现参数与母线线路参数相同的 n 条分支,根据电路等效原理,可以等效

为波阻抗 z/n 的线路,式(1)、(2)可化为

$$\gamma_u = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2z/n}{z + z/n} = \frac{2}{n+1} \quad (3)$$

$$\rho_u = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{z/n - z}{z + z/n} = \frac{1-n}{n+1} \quad (4)$$

$$\gamma_u = 1 + \rho_u \quad (5)$$

1.3.1 故障初始行波

故障发生后故障初始行波 f_1 沿上行线路 T_1 向 M 端传播,第1次到达 M 端时测得波头1,如图9所示。由于测量端距离母线很近,所以测得的初始故障行波是入射波与 M 端反射波的和,其传播路径长度为 x 。故障初始电压行波可表示为

$$u(t_1) = u_f(t_0 - \tau_M) + \rho_{uM}u_f(t_0 - \tau_M) = (1 + \rho_{uM})u_f(t_0 - \tau_M) = \gamma_{uM}u_f(t_0 - \tau_M) \quad (6)$$

式中, ρ_{uM} 、 γ_{uM} 分别为初始行波从 f_1 向 M 端传播的电压反射、折射系数, $\rho_{uM} < 0$, $\gamma_{uM} > 0$; t_1 为故障初始行波到达 M 端时刻。

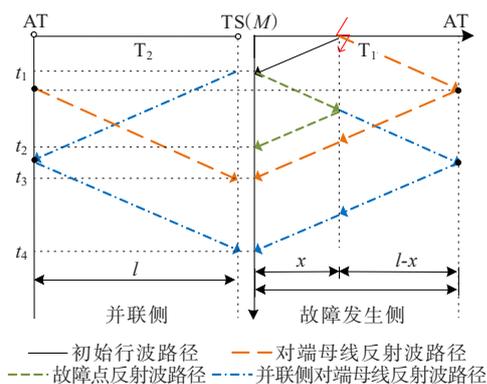


图9 电压行波传输拓扑

Figure 9 Voltage traveling wave transmission topology

1.3.2 故障点反射行波

故障初始行波 f_1 到达 M 端时会在上行线路发生波的反射,再经故障点反射到达测量端,测得故障点反射波头2,其传播路径长度为 $3x$ 。 M 端测得反射电压行波为

$$u(t_2) = (1 + \rho_{uM})\rho_{uf}u_f(t_0 - 3\tau_M) = \gamma_{uM}\rho_{uf}u_f(t_0 - 3\tau_M) \quad (7)$$

式中, ρ_{uf} 为故障点行波反射系数,根据式(2), $\rho_{uf} > 0$; t_2 为故障点第二反射行波到达 M 端时刻。故障点的反射电压行波和初始行波极性相反。

1.3.3 同侧对端母线复合行波

因上下行并联结构,故障行波抵达对端母线 N 端时考虑发生波的折反射。故障发生后故障初始行波 f_1 沿线路 T_1 向 N 端传播,行波在 N 点发生折反射,

抵达 M 端,可采集对端母线折射波头3,其传播路径长度为 $2l-x$ 。 M 端测得同侧对端母线折、反射波为

$$u(t_3) = \gamma_{uN}\gamma_{uM}(1 + \rho_{uM})u_f(t_2 - \tau_M - 2\tau_N) = \gamma_{uN}\gamma_{uM}^2u_f(t_2 - \tau_M - 2\tau_N) \quad (8)$$

式中, γ_{uN} 为行波向 N 端传播电压折射系数, $\gamma_{uN} > 0$; t_3 为对端母线折射行波到达 M 端时刻; τ_N 为故障行波从 f_1 到达 N 端的时间。对端母线反射波的电压行波极性与初始行波极性相同。

1.3.4 并联侧对端母线复合行波

并联侧对端母线复合行波主要由两部分构成。

1) 故障初始行波 f_1 沿上行线路 T_1 向 M 端传播,第1次到达 M 端时发生折射至下行线路 T_2 向 N 端传播,再由 N 点发生反射至 T_1 ,形成复合行波分量 $u(t_4')$,其传播长度为 $2l+x$,极性与初始行波相反。

$$u(t_4') = \rho_{uN}\gamma_{uM}(1 + \rho_{uM})u_f(t_4 - 3\tau_M - 2\tau_N) \quad (9)$$

式中, ρ_{uN} 为初始行波从 f_1 沿上行线路 T_1 向 N 端传播的 N 端电压反射系数, $\rho_{uN} < 0$ 。

2) 故障初始行波 f_1 延上行线路 T_1 向 M 端传播,第1次到达 M 端时发生波的反射向 N 端传播,再由 N 点折射至 T_2 ,经下行线路传播至 M 端,形成复合行波分量 $u(t_4'')$,其传播长度为 $2l+x$,极性与初始行波相反。

$$u(t_4'') = \gamma_{uN}\gamma_{uM}\rho_{uM} \cdot (1 + \rho_{uM})u_f(t_4 - 3\tau_M - 2\tau_N) = \gamma_{uN}\gamma_{uM}^2\rho_{uM}u_f(t_4 - 3\tau_M - 2\tau_N) \quad (10)$$

式(9)、(10)合并化简可得 M 端测得并联侧对端母线反射波为

$$u(t_4) = (\rho_{uN}\gamma_{uM} + \gamma_{uN}\gamma_{uM}\rho_{uM}) \cdot (1 + \rho_{uM})u_f(t_4 - 3\tau_M - 2\tau_N) = \gamma_{uM}^2(\rho_{uN} + \gamma_{uN}\rho_{uM})u_f(t_4 - 3\tau_M - 2\tau_N) \quad (11)$$

结合图6各波头幅值与式(6)~(8)、(11)可知,信号突变奇异性排序为 $|u(t_1)| > |u(t_4)| > |u(t_3)| > |u(t_2)|$ 。牵引变电所测量端行波信号特点如表1所示。

表1 牵引变电所测量端行波信号分析

Table 1 Analysis of traveling wave signal measured at traction substation

波头	产生	路径长度	时间	奇异性	极性
1	故障初始行波	x	t_1	大	-
2	故障点反射波	$3x$	t_2	小	+
3	同侧对端母线复合波	$2l-x$	t_3	较小	-
4	并联侧对端母线复合波	$2l+x$	t_4	大	+

2 基于 VMD-SDEO 的牵引网故障定位原理

2.1 VMD 算法

考虑实际工况下行波信号含噪声,且幅值越小的行波信号越容易受噪声干扰,导致波头到达时刻偏移或覆盖。选取高斯白噪声作为噪声干扰叠加在原信号上,可以较好仿真噪声对波头的干扰。采集牵引网故障信号中的含噪电压行波信号是多分量信号,利用 VMD 算法将故障电压行波信号迭代循环分解为若干本征模态函数(intrinsic mode functions, IMF),每个模态分量有各自的带宽和中心频率,将高频噪声剔除后重构信号能够起到较好的降噪效果^[29]。VMD 算法分解不易受频率变化影响,既能分离局部特征,又能有效避免端点效应,具有很强的鲁棒性。根据计算中心频率, $K=5$ 时含噪信号可以获得较好分解。各 IMF 分量如图 10 所示。

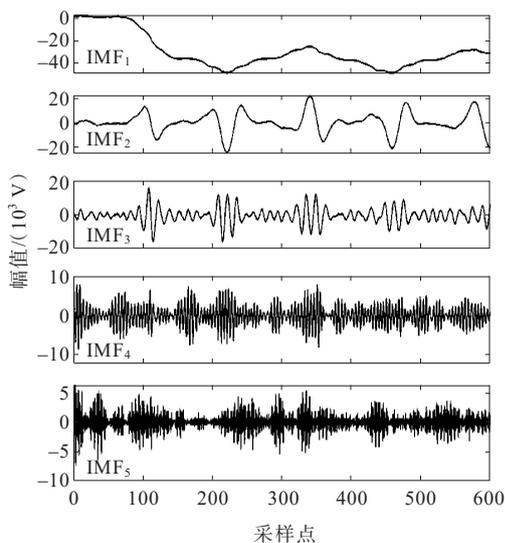


图 10 一次分解 IMF 分量

Figure 10 IMF components after decomposition

将原信号分解进行噪声属性判断,经 VMD 算法分解后的含噪信号高频段(IMF₄、IMF₅)仍存在噪声特征,而低频段(IMF₁~IMF₃)保留原始信号特征的效果较好。结合一次分解 IMF 分量与原信号的互相关系数,取相关性大于等于 0.1 的分量进行重构,如图 11 所示;经 VMD 算法分解后将重构信号与无噪原始信号波形进行对比,如图 12 所示,可以看出,输出的重构信号残留噪声幅值很小,不影响对故障波头的判断和能量值提取,在消除噪声干扰的同时完整地保留了原始暂态信号的波头特征,对波头部分有很好的降噪效果。

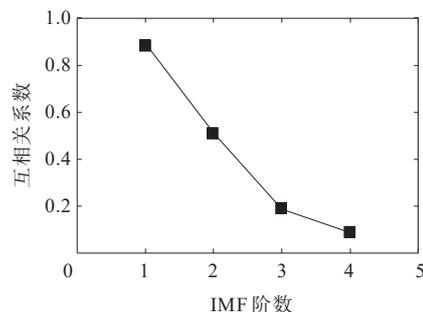


图 11 一次分解互相关系数

Figure 11 Cross-correlation coefficient after decomposition

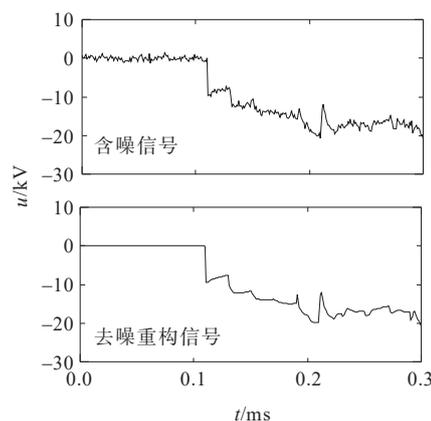


图 12 VMD 算法对信号降噪效果

Figure 12 Effect of VMD algorithm on signal denoising

2.2 一次 SDEO 能量谱

鉴于牵引网线路较短、波头不易辨识的情况,以及为了对信噪比低或高频背景噪声实现一定程度的降噪效果并提高算子的降噪特性,本文采用 SDEO 对重构信号的行波波头进行能量最高值标定。SDEO 能够有效跟踪信号瞬时能量、解决 Hilbert 变换方法在解调信号时可能出现的端点效应问题;相较于传统的非线性能量算子(如 TEO 等),SDEO 具有运算量小、不受信号突变点附近瞬时能量波动影响的优势;同时,SDEO 可以显著提高信号解调的精度,并在离散信号的降噪方面表现更为出色,从而确保了牵引网行波定位的精度和可靠性。

对任意离散信号 $f(n)$,TEO 定义为

$$\Gamma[f(n)] = f^2(n) - f(n+1)f(n-1) \quad (12)$$

式中, $f(n)$ 为时间信号。

对离散信号的差分序列可定义为

$$\begin{aligned} \varphi(n) = & \frac{1}{2}[f(n+1) - f(n)] + \\ & \frac{1}{2}[f(n) - f(n-1)] = \\ & \frac{1}{2}[f(n+1) - f(n-1)] \end{aligned} \quad (13)$$

再求 $\varphi(n)$ 的差分序列,对信号进行平滑处理,即

$$\varphi(n) = \frac{1}{2} [\varphi(n+1) - \varphi(n-1)] = \frac{1}{4} [f(n+2) - 2f(n) + f(n-2)] \quad (14)$$

将式(13)、(14)代入式(12),可得 SDEO 为

$$\psi[f(n)] = \frac{1}{4} \psi[f(n+1)] + \frac{1}{2} \psi[f(n)] + \frac{1}{4} \psi[f(n-1)] \quad (15)$$

由于 TEO 的去噪能力差、波头难提取,噪声影响下精度较低,因此,本文采用 SDEO 取连续 3 个点的能量值进行计算,不仅可以增强能量突变点的微小变化,同时也可以对信噪比低或高频背景噪声有效降噪,精确定位扰动起止时刻。SDEO 提高降噪特性后能够较好地剔除噪声信号,且波形光滑、波头明显,较好地反映出行波传播到达时刻和能量值,确保牵引网行波定位的精度和可靠性,如图 13 所示。

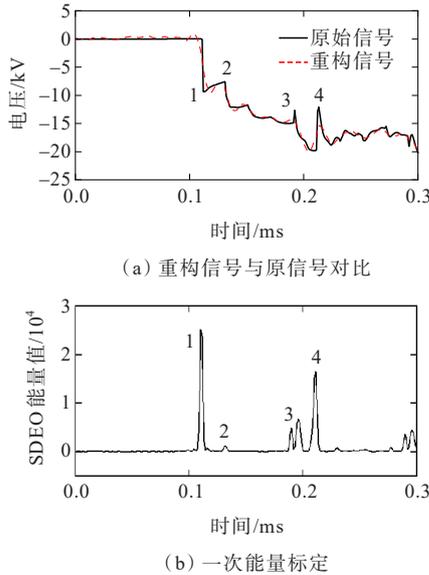


图 13 去噪信号能量值一次标定对比
Figure 13 Calibration comparison of denoising signal energy value

由图 13 可知,各波头能量值能较好反映波形突变点时刻,能量值与行波各波头幅值高低呈正相关,波头幅值越高能量突变越明显,计算的能量值越高,如初始波头、同侧对端母线复合波波头以及并联侧对段母线复合波头;波头幅值越低能量突变越小,计算的能量值越低,不利于波头标定,如故障点反射波。当发生短路故障时,SDEO 能较好突出前 4 个波头的波头到达时刻且具有更强的去噪能力。同时并联侧对端母线反射波两部分行波分量均与初始行波极性相反,叠加后的复合波仍与初始

行波极性相反,幅值高、信号损耗少,可结合对端母线反射波与并联侧对端母线复合波进行验证。因此,全并联 AT 牵引网故障定位需结合故障类型、波头极性以及提取 4 个波头的 SDEO 能量值完成测距,对不同故障都具有良好适用性。

2.3 二次 SDEO 能量谱

1) 滑动时间窗的建立。

在一次能量值提取若干能量突变点后,由图 6 可知,T-F 短路故障时原来微弱的故障点反射波随过渡电阻与初始相角的不同而更加难以辨识,而 SDEO 能够较好地增强能量的特性,使得初始波头能量增强效果远高于第 2 波头能量增强效果,导致能量差绝对值增大。为了降低该影响,本文采用 STW 与能量算子相结合进行二次提取。指定长度区间内提取各个离散能量突变点极大值,假设当前状态时刻为 $P + \Delta L$,建模数据为 P 到 $P + \Delta L$ 时刻 ΔL 区间内数据。首先测量此 ΔL 区间内的能量突变点极大值,等到下一个时刻 $P' + \Delta L$ 时测量新的极大值,将其与前一数值比较,并保留高值再与下一区间值比较,如此循环有限次,标定最高能量值为初始波头,其后第 3 个采样点为二次能量值标定时间窗初始点。同理结合文 1.3.4 可知,标定次高值为并联侧对段母线复合波,其前第 3 个采样点为二次能量值标定时间窗结束点,如图 14(a) 所示,此过程可实现滑动采样并完成动态筛选,以确定有效波头区间,进一步辨识波头成分,具有动态跟随特性。

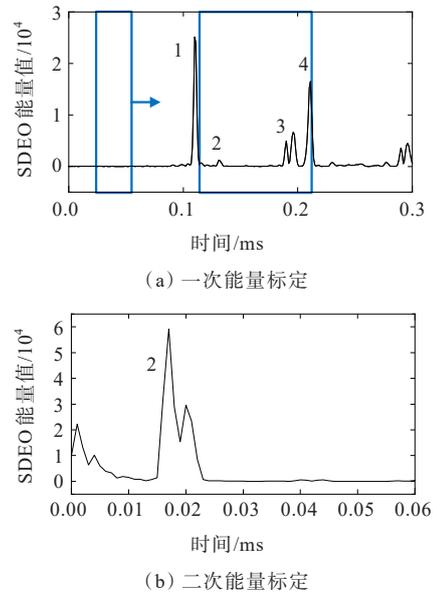


图 14 SSDEO 能量值二次标定 (T-F 故障)
Figure 14 Secondary calibration of SSDEO energy value (T-F fault)

2) 二次能量值标定。

对 STW 选定区域内一次 SDEO 能量谱进行二次能量提取,称为 STW-SDEO 即 SSDEO。由文 2.2 可知,SDEO 采用 3 个连续点能量值进行计算,为减小能量谱值较高的初始波头与并联侧对端母线反复复合波的影响,STW 选定时分别“舍去”前、后 3 个数据,以达到最小干扰。由于过渡电阻和初始相角的差异,故障点反射波往往十分微弱,同时 SDEO 能够有效增强能量特性,使得初始波头的能量增强效果远高于第 2 波头,能量差的绝对值增加,导致难以准确识别。对 T-F 故障标定时间窗进行二次能量提取能够有效减小这种影响,所得能量谱如图 14(b)所示,能较好完成第 2 波头辨识与标定,解决波头微弱不易辨识的问题。

3 改进的牵引网单端测距方案

3.1 全并联 AT 牵引网故障判别

在各 AT 处同步采集近端和远端 T、F 电压电流幅值及相位,计算潮流方向功率因数角、电压电流相位,进行潮流方向标定,设定 T、F 空载时潮流符号为 0,流入为 1、流出为 -1^[30]。以电压向量为基准,当 AT 近端电压与电流相位差值的绝对值 $\leq 90^\circ$ 时,潮流方向为流入支路,符号值为正(+1);反之,潮流方向为流出支路,符号值为负(-1)。一般情况下,发生 T-R、F-R、T-F 短路潮流符号值如图 15 所示。

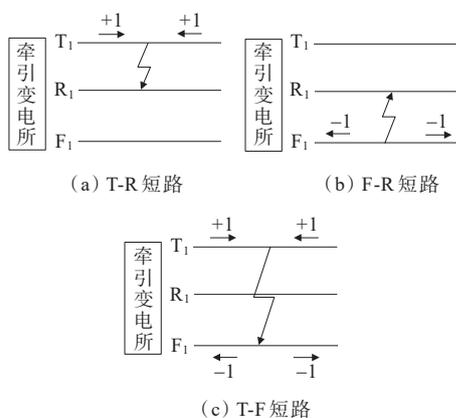


图 15 3 种短路故障潮流符号值

Figure 15 Three short-circuit fault power flow symbol values

因此,当全并联 AT 牵引网发生短路故障时,通过计算近、远端线路两侧故障潮流符号值和绝对值之和 Q ,可对故障类型完成判定与故障区段判定。 $Q=0$ 时无故障发生; $Q=2$ 时发生 T-R 或 F-R 短路; $Q=4$ 时发生 T-F 短路。

3.2 全并联 AT 牵引网单端测距公式

故障行波单端定位方法基于故障暂态量的初始行波及后续反射波的到达时间,结合暂态信号的传输速度计算故障点位置。根据故障距离 x 、波头极性、故障发生时刻 t_0 、初始波头到达时间 t_1 以及故障点与对端母线反射波头到达时间的拓朴关系,可以分为 2 种情况。

1) 若波头 2 与初始波头极性相反则为故障点反射波,到达时间为 t_2 ,波头 3 为对端母线反射波,到达时间为 t_3 ,即故障发生于线路前 $L/2$ 处。根据单端测距原理可知:

$$\begin{cases} v(t_1 - t_0) = x \\ v(t_2 - t_0) = 3x \\ v(t_3 - t_0) = 2L - x \end{cases} \quad (16)$$

化简可得:

$$\begin{cases} t_0 = (3t_1 - t_2)/2 \\ x = \frac{L(t_2 - t_1)}{t_3 - 2t_1 + t_2} \end{cases} \quad (17)$$

2) 若波头 2 与初始波头极性相同则为对端母线反射波,到达时间为 t_2 ,波头 3 为故障点反射波,到达时间为 t_3 ,即故障发生于线路后 $L/2$ 处。根据单端测距原理可知:

$$\begin{cases} v(t_1 - t_0) = x \\ v(t_2 - t_0) = 2L - x \\ v(t_3 - t_0) = 3x \end{cases} \quad (18)$$

化简可得:

$$\begin{cases} t_0 = (3t_1 - t_3)/2 \\ x = \frac{L(t_3 - t_1)}{t_3 - 2t_1 + t_2} \end{cases} \quad (19)$$

3.3 单端测距定位方案

根据全并联 AT 牵引网故障行波传输特性,全并联 AT 牵引网故障精确定位需结合波头极性,提取前 4 个波头的 SSDEO 完成定位,对不同短路故障类型都具有良好适用性。基于 VMD-SSDEO 的牵引网故障行波定位流程如图 16 所示,具体步骤如下:

1) 读取牵引网暂态电压、电流数据,采集 M 端含噪声故障电压、电流的行波数据,根据牵引网建模参数对信号进行相模变换解耦计算;

2) 计算潮流符号值,判定故障区段,根据潮流符号值绝对值之和判定故障类型;

3) 采用 VMD 算法分解电压行波模 5 分量,得

到分量 $IMF_1 \sim IMF_5$, 根据各 IMF 与原始无噪信号的互相关系数进行信号重构, 有效去除噪声;

4) 根据故障类型, T-R、F-R 短路故障采用一次 SDEO 提取能量谱, T-F 短路故障利用 STW 动态划分二次能量值标定时间窗, 进行 SSDEO 能量突变值计算, 动态迭代定位初始波头与各波头到达时刻;

5) 判断波头极性, 确定各波头成分, 利用故障初始行波、故障点反射波及同侧对端母线反射波 3 个波头消除波速影响, 代入牵引网单端测距公式进行测算, 计算故障距离。

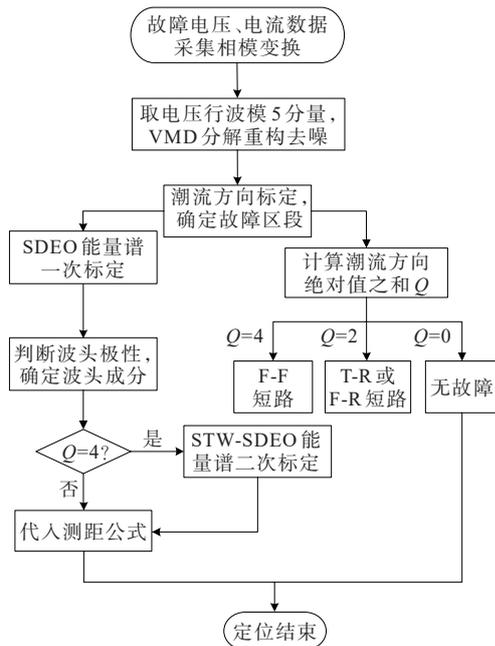


图 16 全并联 AT 牵引网单端定位流程

Figure 16 Single-ended localization of fully parallel AT traction network

4 仿真结果

在 ATP-EMTP 仿真软件中搭建全并联 AT 牵引网仿真模型, 供电臂总长 $l=30$ km, 中间设置 1 个 AT 所, 将供电臂分成两段, 牵引变电所端 M 处安装测距装置。自耦变压器额定容量为 $10 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 母线对地电容为 $0.01 \mu\text{F}$, 采样频率为 1 MHz 。故障时间为 0.01 s , 取故障发生前 1 ms 至波头 4 到达后 1 ms (共 4 ms) 的 400 个采样点, 对不同故障类型、过渡电阻及初相角时发生的短路故障进行仿真实验, 验证本文所提测距方案的准确性; 同时考虑牵引网运行环境的复杂性, 加入信噪比为 30 的噪声检验去噪效果。实验结果如表 2~5 所示。

表 2 不同距离下 T-R 短路故障定位结果 ($10 \Omega/90^\circ$)

Table 2 Fault localization results of T-R short circuit at different distances ($10 \Omega/90^\circ$)

故障距离/km	T_1/ms	T_2/ms	T_3/ms	测量距离/km	绝对误差/m
3	112	132	192	3.000	0
5	118	152	187	4.952	-48
8	128	176	182	7.941	-59
10	134	168	201	9.951	-49
12	144	159	186	11.053	-94

表 3 不同过渡电阻下故障定位结果 (T-R 短路/ 90°)

Table 3 Fault localization results under different transition resistances (T-R short circuit/ 90°)

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	T_1/ms	T_2/ms	T_3/ms	测量距离/km	绝对误差/m
3	10	111	132	192	3.000	+88
	100	111	132	192	3.088	+88
	300	111	132	192	3.088	+88
7	10	125	172	178	7.050	+50
	100	125	172	178	7.050	+50
	300	125	172	178	7.050	+50
11	10	138	165	213	11.029	+29
	100	138	165	213	11.029	+29
	300	138	165	213	11.029	+29

表 4 不同初相角下故障定位结果 (T-R 短路/ 1Ω)

Table 4 Fault localization results under different initial phase angles (T-R short circuit/ 1Ω)

故障距离/km	$\theta/^\circ$	T_1/ms	T_2/ms	T_3/ms	测量距离/km	绝对误差/m
5	30	118	152	185	5.049	+49
	45	118	152	185	5.049	+49
	90	118	152	185	5.049	+49
11	30	138	165	212	10.990	-10
	45	138	165	212	10.990	-10
	90	138	165	212	10.990	-10

表 5 不同故障类型下故障定位结果 ($1 \Omega/90^\circ$)

Table 5 Fault localization results under different fault types ($1 \Omega/90^\circ$)

故障距离/km	故障类型	T_1/ms	T_2/ms	T_3/ms	测量距离/km	绝对误差/m
5	T-R	118	152	185	5.049	+49
	F-R	118	152	187	4.952	-48
	T-F	118	153	187	5.048	+48
11	T-R	138	165	212	10.990	-10
	F-R	138	165	213	11.029	+29
	T-F	138	164	211	11.060	+60

由表2可知,在牵引网的首、中、末端发生故障时,计算结果所得到的能量值能够精确定位故障位置,定位精度高;由表3可知,仿真设置故障出现在牵引网的首、中、末端,在过渡电阻分别为10、100、300 Ω 情况下综合验证该方法的有效性,计算结果所得到的能量值能够精确定位故障位置,定位精度高;由表4可知,在仿真设置故障初相角为30°、45°、90°时发生故障,不同故障距离均可以准确标定波头能量值,定位误差小于等于100 m,能够达到理想故障定位效果;由表5可知,在不同故障距离、过渡电阻、初相角的情况下,本文所提定位方法对T-R、T-F、F-R这3种故障时间窗划分合适,能量标定准确,成功定位故障且具有较强的适应性。

观察表2~5误差结果可知,所提方法可以满足不同故障距离下定位精度要求,虽绝对误差有所差异,但定位精度均小于等于100 m,定位结果绝对误差最大值为-94 m(线路末端12 km处),最小值为0 m(距M端3 km处)。本文所提方法可精确辨识各次浪涌的到达时刻,有效提升故障定位精度。

5 结语

针对电气化铁路牵引网结构和故障行波传播特性,探讨行波单端定位方法在电气化铁路牵引供电系统故障定位中的应用。

1) 通过AT对电压、电流故障行波传播的影响分析,结合不同故障类型下AT对电压行波阻碍情况,可知电流行波波峰有一定程度畸变,电压行波畸变较电流行波更小,波头位置基本重合;同时电压行波奇异性更大,采用电压行波进行了进一步的分析。

2) 通过对全并联AT牵引网建模后的结构分析与仿真可得行波传播路径。传统输电线路故障点反射波在牵引网实际运行中奇异性低、不易检测,本文提出了基于VMD-SSDEO的轨道交通全并联AT牵引网故障定位方法。该方法首先考虑实际工况下的噪声影响,利用VMD变换将时间域中行波的一维信息映射到时间和频率维度去噪;结合潮流符号值判别故障类型,其中T-R、F-R短路故障采用一次能量谱标定波头到达时间,同时针对T-F短路故障行波第2反射波微弱难辨识的情况,利用SSDEO在初始行波到达前至并联侧对端母线复合波到达后时间窗中二次提取故障信息,弥补了传统阻抗法定位测试时实时性不强的缺陷,可以精确定

位故障距离;提出适用于全并联AT牵引网的单端定位公式消除波速影响,并对电压行波的能量突变快速、实时进行去噪处理,通过理论分析和仿真验证,效果良好。

3) 下一步将结合牵引网并联结构对行波折反射多次、极性相同可叠加多倍特点,利用对端母线反射波与并联侧对端母线复合波能够有效反应故障时间等故障信息的情况,将进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 陈冲,贾利民,赵天宇,等.去碳化导向的轨道交通与新能源融合发展——形态模式、解决方案和使/赋能技术[J].电工技术学报,2023,38(12):3321-3337.
CHEN Chong, JIA Limin, ZHAO Tianyu, et al. Decarbonization oriented rail transportation and renewable energy integration development-configurations, solutions, and enabling/empowering technologies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12):3321-3337.
- [2] 刘芸江,胡海涛,杨孝伟,等.24 kV柔性直流牵引供电系统潮流计算方法与供电特性分析[J].电工技术学报,2023,38(9):2323-2334.
LIU Yunjiang, HU Haitao, YANG Xiaowei, et al. Power flow calculation method and power supply characteristics analysis of 24 kV flexible DC traction power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9):2323-2334.
- [3] 刘敬敬,白牧可,樊文婷,等.基于马尔可夫链与改进最小路法的柔性配电网运行可靠性评估[J].供用电,2024,41(9):24-33+52.
LIU Jingjing, BAI Muke, FAN Wenting, et al. Operational reliability assessment of flexible distribution network based on Markov chain and improved minimum path meth[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(9): 24-33+52.
- [4] 李群湛,王帅,易东,等.电气化铁路贯通同相供电AT牵引网故障辨识与自愈技术研究[J].铁道学报,2022,44(7):46-54.
LI Qunzhan, WANG Shuai, YI Dong, et al. Research on fault identification and self-healing technology of AT traction network connected with same-phase power supply on electrified railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(7):46-54.
- [5] 傅钦翠,陈剑云,钟汉华.全并联AT牵引网行波传播特性研究及单端故障测距算法[J].铁道学报,2021,43(7):66-76.
FU Qincui, CHEN Jianyun, ZHONG Hanhua. Research on traveling wave propagation characteristics of fully parallel AT traction network and single-ended fault

- location algorithm[J]. Journal of the China Railway Society,2021,43(7):66-76.
- [6] 郭世成,刘永生,吴晶,等.基于车体接地电流的故障列车精准识别方法[J].中国电力,2024,57(7):143-150.
GUO Shicheng,LIU Yongsheng,WU Jing,et al.A precise identification method for fault trains based on train grounding current[J].Electric Power,2024,57(7):143-150.
- [7] 高雨翔,蔡奇新,徐文林.基于牵引负荷功率潮流计算及电能计量方式研究[J].电测与仪表,2023,60(1):193-200.
GAO Yuxiang,CAI Qixin,XU Wenlin.Study on negative sequence power flow calculation and electric energy metering mode of traction load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(1):193-200.
- [8] 王翼云,胡海涛,黄毅,等.电气化铁路分区所多功能潮流控制系统及其控制策略研究[J].中国电机工程学报,2024,44(12):4639-4652.
WANG Yiyun,HU Haitao,HUANG Yi, et al. A novel multifunctional power flow control system and its control strategy in section post for electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(12):4639-4652.
- [9] 苟竞,刘方,刘嘉蔚,等.考虑高铁负荷和风光不确定性的输电网规划方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(9):156-164.
GOU Jing,LIU Fang,LIU Jiawei, et al. A transmission network planning method considering high speed rail load and wind and solar uncertainty[J]. Power System Protection and Control,2023,51(9):156-164.
- [10] 刘洋铭,吴思奇,孟祥宇,等.考虑谐波耦合的车网系统谐波域SISO阻抗建模[J].电网技术,2022,46(4):1594-1604.
LIU Yangming,WU Siqi,MENG Xiangyu,et al.Modeling SISO impedance in harmonic domain of vehicle-network system considering harmonic coupling[J].Power System Technology,2022,46(4):1594-1604.
- [11] 王淼,杨晓峰,李世翔,等.城市轨道交通直流自耦变压器牵引供电系统故障保护研究[J].电工技术学报,2022,37(4):976-989.
WANG Miao,YANG Xiaofeng,LI Shixiang, et al. Research on fault protection of DC autotransformer traction power supply system in urban rail transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(4):976-989.
- [12] 刁晓虹,董昊,侯磊,等.基于CEEMDAN-HT和SAE的直流故障电弧诊断方法研究[J].电网与清洁能源,2023,39(10):1-8+18.
DIAO Xiaohong,DONG Hao,HOU Lei,et al.Research on the DC fault arc detection method based on CEEMDAN-HT and SAE[J].Power system and Clean Energy,2023,39(10):1-8+18.
- [13] 魏建忠,郭晓旭,高仕斌,等.带加强线的直供方式牵引网故障测距方法研究[J].铁道工程学报,2023,40(2):78-83.
WEI Jianzhong, GUO Xiaoxu, GAO Shibin, et al. Research on fault location method for direct power supply traction network with reinforcement line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(2): 78-83.
- [14] 刘国胜,李泽文,夏翊翔,等.基于电流行波高频能量比值的全并联AT牵引网单端故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(6):99-108.
LIU Guosheng,LI Zewen,XIA Yixiang, et al.Single-end fault localization method for an all-parallel AT traction network based on high-frequency energy ratio of current traveling waves[J].Power System Protection and Control, 2024,52(6):99-108.
- [15] 石晶晶.一种全并联AT供电系统测距精度优化方法研究与实现[J].电气化铁道,2021,32(4):38-41.
SHI Jingjing. Research and implementation of a range measurement accuracy optimization method for fully parallel AT power supply system[J]. Electric Railway, 2021,32(4):38-41.
- [16] 周福林,刘飞帆,杨瑞轩,等.电气化铁路车网电气耦合异常辨识[J].中国电机工程学报,2021,41(23):7937-7950.
ZHOU Fulin,LIU Feifan,YANG Ruixuan, et al. Identification of electrical coupling anomalies in electrified railway network[J].Proceedings of the CSEE, 2021,41(23):7937-7950.
- [17] 舒新星,陈剑云,华敏.基于时频谱相似度全并联AT牵引网行波测距方法[J].铁道学报,2022,44(6):37-45.
SHU Xinxing,CHEN Jianyun,HUA Min.Traveling wave ranging method for fully parallel AT traction network based on time-spectrum similarity[J]. Journal of the China Railway Society,2022,44(6):37-45.
- [18] 戴锋,刘贞瑶,陈轩.考虑故障暂态信号衰减特性的分布式行波测距[J].电力科学与技术学报,2021,36(6):77-84.
DAI Feng,LIU Zhenyao,CHEN Xuan. A distributed traveling wave-based fault location method considering characteristics of fault transient signals attenuation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021, 36(6):77-84.
- [19] 周放歌,肖仕武.基于零序电流分布的有源配电网接地故障定位[J].电网技术,2022,46(5):1820-1832.
ZHOU Fangge,XIAO Shiwu. Ground fault location of active distribution network based on zero-sequence current distribution[J]. Power System Technology, 2022, 46(5):1820-1832.
- [20] 李成信,刘国威,玉聪,等.基于行波的高压输电线路故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(2):179-185.
LI Chengxin,LIU Guowei,YU Cong, et al. A fault

- location method for high-voltage transmission lines based on traveling waves[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(2):179-185.
- [21] 邢超,高敬业,毕贵红.基于集成神经网络的特高压直流输电线路初始电压行波小波变换模极大值比单端测距方法[J].电力自动化设备,2022,42(11):128-134.
XING Chao, GAO Jingye, BI Guihong. Single-ended ranging method based on integrated neural network for UHVDC transmission line initial voltage traveling wave wavelet transform modulus maximum ratio[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(11):128-134.
- [22] 马玉龙,宋胜利,王玲,等.提高特高压直流运行可靠性的分接开关优化控制策略[J].电力建设,2024,45(4):37-45.
MA Yulong, SONG Shengli, WANG Ling, et al. Optimized control strategy for less action frequency of tap changers in UHVDC[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 37-45.
- [23] 白浩,钟振鑫,李巍,等.基于CEEMD和NTEO的故障行波定位方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(20):50-59.
BAI Hao, ZHONG Zhenxin, LI Wei, et al. Fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 50-59.
- [24] 陈再刚,刘禹清,周子伟,等.轨道交通牵引动力传动系统动力学研究综述[J].交通运输工程学报,2021,21(6):31-49.
CHEN Zaigang, LIU Yuqing, ZHOU Ziwei, et al. A review of traction powertrain dynamics research in rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(6): 31-49.
- [25] 张开宇,郑佳雯,时珊珊,等.轨道交通柔性交流牵引供电系统无源一致性稳定控制方法[J].智慧电力,2024,52(7):119-127.
ZHANG Kaiyu, ZHENG Jiawen, SHI Shanshan, et al. Passivity-consensus-based control method for flexible AC traction power supply systems of rail transit[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 119-127.
- [26] 邓丰,徐帆,曾哲.基于多源暂态信息融合的单端故障定位方法[J].电工技术学报,2022,37(13):3201-3212.
DENG Feng, XU Fan, ZENG Zhe. Single-ended fault location method based on multi-source transient information fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3201-3212.
- [27] 夏翊翔,李泽文,雷柳,等.基于动态虚拟故障的行波网络定位新方法[J].中国电机工程学报,2021,41(14):4868-4878.
XIA Yixiang, LI Zewen, LEI Liu, et al. A new method for traveling wave network location based on dynamic virtual fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4868-4878.
- [28] 戴志辉,张富泽,杨鑫,等.基于FDTW算法的故障录波数据智能比对方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(23):82-91.
DAI Zhihui, ZHANG Fuze, YANG Xin, et al. Intelligent comparison method for fault record waveform data based on FDTW algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 82-91.
- [29] 夏志凌,胡凯波,刘心悦,等.基于变模态分解的异步电机转子断条故障诊断[J].电工技术学报,2023,38(8):2048-2059.
XIA Zhiling, HU Kaibo, LIU Xinyue, et al. Fault diagnosis of rotor broken bar in induction motors based on variable mode decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2048-2059.
- [30] 王旭光,李群湛,陈民武,等.高速铁路全并联AT牵引网状态测控方案与仿真分析[J].电力系统保护与控制,2016,44(1):128-33.
WANG Xuguang, LI Qunzhan, CHEN Minwu, et al. State measurement and control scheme and simulation analysis of fully parallel AT traction network for high-speed railway[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 128-133.