

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231325

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

刘国胜, 李泽文, 夏翊翔, 吴国瑞, 冯译莹

(电网安全监控技术教育部工程研究中心(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对现有全并联 AT 牵引网单端故障定位方法存在故障区段识别灵敏度低、行波第二波头易受故障点折反射影响的问题, 提出了一种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。首先, 分析了自耦变压器绕组对地电容对高频分量的衰减特性, 论证了相邻线路故障电流行波高频能量幅值的差异性, 构建了能量比值差异度判据, 利用差异度实现了故障区段定位。然后, 分析了行波在全并联 AT 牵引网故障区段内的传播特性, 揭示了反向量电流对端母线行波具有明显的故障突变奇异性。最后, 提出了基于反向量电流行波的故障定位方法, 通过准确标定行波初始波头、第二波头的到达时间, 实现了故障的精确定位。仿真结果表明, 所提方法在噪声环境下能准确辨识弱故障特征, 提高了全并联 AT 牵引网故障定位的精确性。

关键词: 全并联 AT 牵引网; 自耦变压器; S 变换; 暂态能量比值; 行波故障定位

Single-end fault localization method for an all-parallel AT traction network based on high-frequency energy ratio of current traveling waves

LIU Guosheng, LI Zewen, XIA Yixiang, WU Guorui, FENG Yixuan

(Engineering Research Center of Ministry of Education for Power Grid Safety Monitoring Technology
(Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China)

Abstract: The existing single-end fault location method of an all-parallel AT traction network has the problems of low sensitivity of fault section identification and the fact that second traveling wave head is easily affected by the fault point refraction and reflection. Thus a single-end fault location method based on the high-frequency energy ratio of the current traveling wave is proposed. First, the attenuation characteristics of the auto-transformer winding-to-ground capacitance on high-frequency components are analyzed. The difference in the high-frequency energy amplitude of fault current traveling waves in adjacent lines is demonstrated. An energy ratio difference criterion is established, and the fault section is localized using this difference criterion. Then, it analyzes the propagation characteristics of the traveling wave in the fault section of the all-parallel AT traction network, and reveals that the terminal bus traveling wave of the reverse direction current has the obvious singularity of the fault mutation. Finally, a fault location method based on the inverse direction current traveling wave is proposed. The precise location of the fault is determined by accurately calibrating the arrival time of the initial wave head and the second wave head of the traveling wave. Simulation results show that the proposed method can accurately recognize weak fault characteristics in a noisy environment, and improve the accuracy of fault location in an all-parallel AT traction network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877012).

Key words: all-parallel AT traction network; auto-transformer; S-transform; transient energy ratio; traveling wave fault location

0 引言

随着我国高速铁路的发展, 全并联 AT 供电接

线方式因其供电功率高、供电可靠性强的特点^[1], 在牵引网供电系统中得到了广泛的应用。而全并联 AT 供电方式接线复杂, 牵引网供电线路对故障定位准确性与可靠性的要求进一步提高。现有的全并联 AT 牵引网故障定位主要基于阻抗法^[2-3], 故障信息来源于稳态时的工频信号, 受运行工况和过渡电

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

阻的影响，工频信号特征并不明显，这极大地提高了故障辨识的难度。而故障产生的暂态行波分量具有幅值大，独立于系统参数的特点，利用其构造故障定位方案^[4-7]已成为国内外的研究重点，具有较高的定位精度。

近半个世纪以来，以小波变换、希尔伯特黄变换为代表的数字信号处理方法在输、配电网暂态行波故障定位中得到了广泛应用。文献[8]采用小波包变换提取故障暂态特征，并在暂态能量中引入频率信息，增大区内、外故障时高低频暂态能量的分布差异，进而提出基于高低频能量比值的故障区段辨识新方案。文献[9]以小波变换为工具提取线路两端电压行波的极性特征，通过比较电压行波极性区分故障区段。文献[10]采用希尔伯特黄变换对色散较小的行波线模分量进行检测，得到了行波线模分量的瞬时频率，并利用瞬时频率进行行波波头的标定，实现了故障点的精确定位。与小波变换相比，希尔伯特黄变换不存在参数选取的难题，变换结果具有唯一性，因此该方法具有较强的适应性。上述时频分析方法在输、配电网故障定位中有很好的性能，大量学者将其应用于牵引网进行故障定位。

文献[11-12]提出了基于单回线路的行波测距方法，但其研究仅限于直接供电的牵引网系统，未能进一步研究全并联 AT 牵引网故障定位方案。文献[13]提出一种改进希尔伯特-黄变换算法，提高了波头标定的准确性，并通过安装多测点来消除波速，以提高定位准确性。但该方法不仅需要在横连线上串入阻波器，还对同步时钟有着严格的要求。文献[14]基于全并联 AT 牵引网上下行线路参数的对称性，利用上下线路电流行波波形相似度实现故障区段定位，并通过设置阈值躲过突变不明显的波头，提高了单端定位的精度。该方法巧妙地利用了全并联 AT 牵引网的拓扑结构，能有效地定位故障区段。但该故障定位方法抗噪声干扰能力弱，难以适应于干扰源多的全并联 AT 牵引网。文献[15]考虑低漏抗自耦变压器对波尾形态的影响，并通过波尾形态判断行波经过自耦变压器的个数，进而识别故障区段。该方法通过分析自耦变压器的低频特性，理论上能识别故障区段，但缺乏具体识别判据，同时该方法未考虑首端测得的故障点反射波奇异性不明显的特点，影响定位精度。

由于非故障区段线路上测得的电流行波突变特性差^[14]，因此，通过准确识别故障区段，选择故障区段线路的电流行波进行单端定位，进而提高全并

联 AT 牵引网故障定位的精度。近年来，诸多学者利用边界元件两侧电气量的特征差异(电压^[16-18]和功率^[19])识别故障区段，有较好的效果。但这些方法依赖阻波器的边界特性，工程应用范围受限。

综上，本文分析故障电流行波在全并联 AT 牵引网中的传播特性，提出一种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。该故障定位方法利用 S 变换提取暂态信号在不同时刻不同频率的突变特性，构建能量谱密度矩阵来获取暂态信号的高频能量，并将 AT1 两侧线路电流行波高频能量比值作为定位故障区段的判据；本文选择故障区段线路的反向量电流行波进行单端定位，根据极性特征辨识奇异性明显的对端母线行波，并利用初始行波与对端母线行波传输时间差计算故障位置。该方法不受故障点折反射的影响，能可靠辨识、标定单端故障定位的第二波头，定位精度高。

1 全并联 AT 牵引网故障行波特征分析

1.1 全并联 AT 牵引网线路相模变换

全并联 AT 供电方式因其抗噪声干扰能力强、功率损耗小的特点，在牵引网供电系统中得到了广泛的应用。

在传统 AT 供电方式的基础上，通过横连线分别在牵引变电所、AT 所和分区所将上下行接触线、正馈线和钢轨并联，得到了全并联 AT 供电方式，图 1 为全并联 AT 牵引网供电系统。图中： E_s 和 Z_s 分别表示牵引变电所的交流电源和内阻抗；T 为牵引变压器；T1 和 T2 分别表示上、下行接触线；R1 和 R2 分别表示上、下行钢轨；F1 和 F2 分别为上、下行正馈线；TS 为牵引变电所；AT1 和 AT2 分别代表 AT 所和分区所；S1 为 TS—AT1 段，S2 为 AT1—AT2 段。

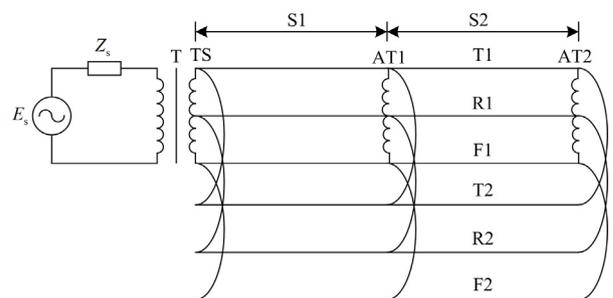


图 1 全并联 AT 牵引网供电系统

Fig. 1 All-parallel AT traction network power supply system

全并联 AT 牵引网结构紧凑，相与相之间的电磁耦合不能忽略；同时，上下并联线路也存在耦合。对上下行线路进行解耦得到 T、R、F 线的同向量电

压 $[u_{cT} \ u_{cR} \ u_{cF}]$ 、电流 $[i_{cT} \ i_{cR} \ i_{cF}]$ 和反向量电压 $[u_{dT} \ u_{dR} \ u_{dF}]$ 、电流 $[i_{dT} \ i_{dR} \ i_{dF}]$, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_{cT} & u_{cR} & u_{cF} \\ u_{dT} & u_{dR} & u_{dF} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{T1} & u_{R1} & u_{F1} \\ u_{T2} & u_{R2} & u_{F2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_{cT} & i_{cR} & i_{cF} \\ i_{dT} & i_{dR} & i_{dF} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{T1} & i_{R1} & i_{F1} \\ i_{T2} & i_{R2} & i_{F2} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $[u_{T1} \ u_{R1} \ u_{F1}]$ 、 $[u_{T2} \ u_{R2} \ u_{F2}]$ 分别为上下行 T、R、F 线的电压; $[i_{T1} \ i_{R1} \ i_{F1}]$ 、 $[i_{T2} \ i_{R2} \ i_{F2}]$ 分别为上下行 T、R、F 线的电流。

不同于输电线路, 牵引网的接触线、正馈线和钢轨无法进行交叉换位, 因此基于对称换位线路的传统解耦方法并不适用于牵引网线路的解耦。为此, 本文利用多导体传输线模型推导了牵引网线路的相模变换矩阵^[15,20], 并对牵引网进行相间解耦, 得到了同向量和反向量 0 模、1 模、2 模的模量, 从而实现全并联牵引网的完全解耦。其中, 电压行波同向量、反向量的模 0、1、2 分量分别用 $[u_{c0} \ u_{c1} \ u_{c2}]$ 和 $[u_{d0} \ u_{d1} \ u_{d2}]$ 表示, 电流行波同向量、反向量的模 0、1、2 分量分别用 $[i_{c0} \ i_{c1} \ i_{c2}]$ 和 $[i_{d0} \ i_{d1} \ i_{d2}]$ 表示。

全并联 AT 牵引网上下行线路参数完全对称, 由式(1)可知, 反向量电流行波不含有非故障线路末端的反射波, 有效解决了非故障线路末端反射波对故障点反射波、对端母线行波的识别构成干扰的问题, 且反向量电流行波突变特性明显^[21]。基于上述特点, 利用反向量电流行波进行单端故障定位, 一定程度上提升了定位精度。

1.2 自耦变压器对行波信号的影响

在全并联 AT 牵引网中, 自耦变压器并联接入接触网和馈线之间, 会对行波信号的幅值及波形造成一定的影响。分析行波高频信号时, 自耦变压器绕组的对地电容不能忽略^[15]。

以区段 S1 中的上行接触线发生 T-R 故障为例, 为研究自耦变压器两侧线路电流行波的传递特性, 依据彼得逊法则绘制同向模量等效电路, 如图 2 所示。

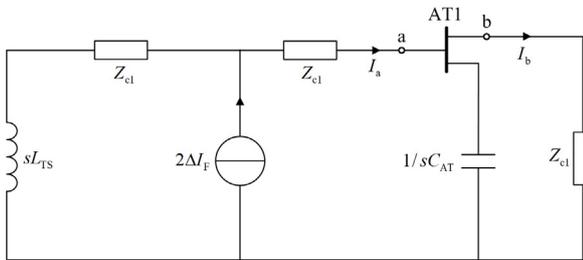


图 2 故障发生在区段 S1 时同向模量等效电路

Fig. 2 Same-direction modulus equivalent circuit when the fault occurs in section S1

图 2 中: L_{TS} 为牵引变压器绕组等效电抗; Z_{c1} 为线路波阻抗; C_{AT} 为自耦变压器绕组等效对地电容; ΔI_F 为起始电流行波; I_a 为故障线路同向模量电流行波; I_b 为非故障线路同向模量电流行波。由图 2 可知, 以 I_a 为激励、 I_b 为响应, 计算得到传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{I_b}{I_a} = \frac{1/sC_{AT}}{1/sC_{AT} + Z_{c1}} \quad (2)$$

为研究自耦变压器绕组等效对地电容和频率分量对传递函数的影响, 将等效对地电容的数值分别设置为 $0.001 \mu\text{F}$ 、 $0.005 \mu\text{F}$ 、 $0.01 \mu\text{F}$, 以获取传递函数的依频特性。图 3 为不同电容参数下传递函数的幅频曲线。

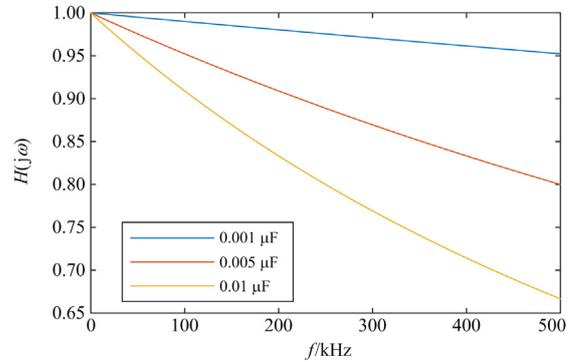


图 3 不同电容参数下传递函数的幅频曲线

Fig. 3 Amplitude-frequency response curves of the transfer function under different capacitance parameters

由图 3 可知, 随着频率的增加, 传递函数的数值越小, 说明自耦变压器绕组对地电容对高频信号存在衰减作用, 电容值越大, 衰减越严重。

综上, 自耦变压器对高频信号存在明显的阻碍作用。当同向模量电流行波流经自耦变压器时, 自耦变压器两侧线路同向模量电流行波的高频能量大小存在明显差异, 具体表现为故障区段线路同向模量电流行波的高频能量远大于非故障区段线路同向模量电流行波的高频能量。因此, 可利用自耦变压器两侧线路同向模量电流行波的高频能量比值作为故障区段定位判据。

1.3 电流行波传播特性分析

以区段 S1 中发生 T-R 故障为例, 为了简化分析过程, 本文仅分析电流行波在接触线上的传播过程, 图 4 为故障发生在区段 S1 时接触线的故障分量等效电路。图 4 中: Z_T 为接触线的等效波阻抗; Z_{TS} 和 Z_{AT} 分别为牵引变电所常规变压器绕组和自耦变压器绕组的等效波阻抗; 由于在并联连接处

$u_1 = u_2$, u_1 、 u_2 分别为上下行线路电压, 可将区段 S2 中的上下行线路以并联形式合并。

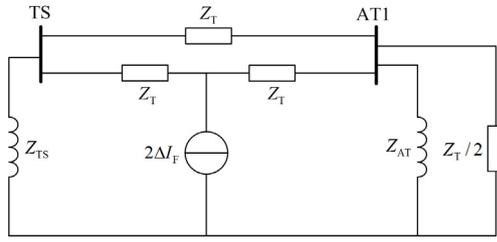


图 4 接触线的故障分量等效电路

Fig. 4 Fault component equivalent circuit for contact line

利用图 4 的等效电路图, 可以计算出电流行波在 TS 端的折反射系数, 表示为

$$\begin{cases} \alpha_{TS} = \frac{2Z_T}{Z_T + Z_T // Z_{TS}} \in [1, 2] \\ \beta_{TS} = \frac{Z_T - Z_T // Z_{TS}}{Z_T + Z_T // Z_{TS}} \in [0, 1] \end{cases} \quad (3)$$

式中: α_{TS} 为电流行波在 TS 端的折射系数; β_{TS} 为电流行波在 TS 端的反射系数, 两者都为正数。全并联 AT 牵引网拓扑以 AT1 为中心呈对称结构, 因此当故障发生在区段 S2 时, 式(3)适用于电流行波在 AT2 端的折反射情况。

在故障点的折反射系数表达式为

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{2R_f}{Z_T + 2R_f} \in [0, 1] \\ \beta_f = \frac{Z_T - Z_T // R_f}{Z_T + Z_T // R_f} \in [0, 1] \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_f 为过渡电阻; α_f 和 β_f 分别为电流行波在故障点的折反射系数, 两者的数值均大于 0。

同样地, 电流行波在 AT1 端的折反射系数表示为

$$\begin{cases} \alpha_{AT1} = \frac{2Z_T}{Z_T + Z_E} \in [1, 2] \\ \beta_{AT1} = \frac{Z_T - Z_E}{Z_T + Z_E} \in [0, 1] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Z_E = Z_{AT} // Z_T // Z_T / 2$; α_{AT1} 为电流行波在 AT1 端的折射系数; β_{AT1} 为电流行波在 AT1 端的反射系数。对于行波高频分量而言, Z_{AT} 数值极大, 可将其视为开路^[22], 计算得出 $\alpha_{AT1} \approx 1.5$ 、 $\beta_{AT1} \approx 0.5$, 折射到并联线路上的电流波系数约为 $\alpha_{AT1} / 3$ 。由于系统结构的对称性, 当区段 S2 发生故障时, 电流行波在 AT1 的折反射系数亦可用式(5)表示。

在全并联 AT 牵引网区段 S1 的半线长内(故障

点距 AT1 端 6 km)设置 T-R 故障, $\Delta I_f > 0$, M 为行波检测装置。图 5 故障位于半线长内的行波网格图。

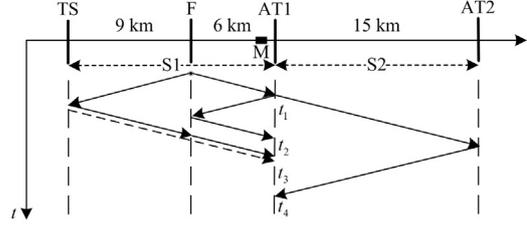


图 5 故障位于半线长内的行波网格图

Fig. 5 Grid diagram of traveling waves with faults located within half-line lengths

由图 5 可知, 当区段 S1 半线长内发生故障时, M 处测得的电流行波 ΔI_{M1} 、 ΔI_{M2} 、 ΔI_{M3} 依次为初始行波、故障点反射波和对端母线行波, 根据式(1)计算得到其表达式为

$$\begin{cases} \Delta I_{M1} = -\Delta I_f(t - t_1) < 0 \\ \Delta I_{M2} = -0.5\beta_f \Delta I_f(t - t_2) < 0 \\ \Delta I_{M3} = (\beta_{TS}\alpha_f + \alpha_{TS})\Delta I_f(t - t_3) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

对于行波高频分量而言, Z_{TS} 数值极大, 可近似为开路, 依据式(3)计算得出 $\alpha_{TS} \approx 1$ 、 $\beta_{TS} \approx 0$, 所以式(6)中的 $(\beta_{TS}\alpha_f + \alpha_{TS}) > 0$, ΔI_{M3} 与 ΔI_{M1} 、 ΔI_{M2} 极性相反, 利用极性可以识别对端母线电流行波; 结合式(3)、式(4)可知, $|\beta_{TS}\alpha_f + \alpha_{TS}| > |0.5\beta_f|$, 相比于故障点反射波, 对端母线电流行波突变特性更为明显, 抗噪声干扰能力更强。因此, 本文利用极性识别出对端母线行波, 并将其作为单端定位第二波头。

类似于区段 S1 半线长内发生故障的分析, 在上行接触线距离 AT1 端 9 km 处(半线长外)设置 T-R 故障, $\Delta I_f > 0$ 。故障位于半线长外的行波网格图, 如图 6 所示。

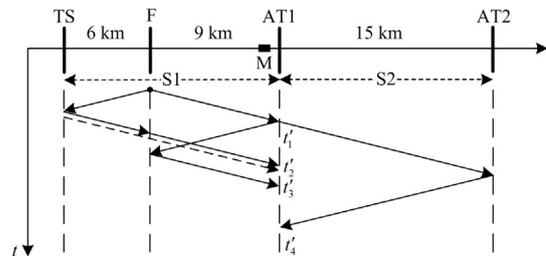


图 6 故障位于半线长外的行波网格图

Fig. 6 Grid diagram of traveling waves with faults located outside the half-line lengths

由图 6 可知, 在 t'_1 、 t'_2 和 t'_3 时刻 M 处检测到的电流行波 ΔI_{M1} 、 ΔI_{M2} 、 ΔI_{M3} 分别为初始行波、对端母线行波和故障点反射波。相应的反向量电流行波表达式为

$$\begin{cases} \Delta I_{M1} = -\Delta I_F(t-t'_1) < 0 \\ \Delta I_{M2} = (\beta_{TS}\alpha_f + \alpha_{TS})\Delta I_F(t-t'_2) > 0 \\ \Delta I_{M3} = -0.5\beta_f\Delta I_F(t-t'_3) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 相比于半线长内发生故障, 对端母线行波先于故障点反射波到达 AT1 端, 其极性与初始电流行波和故障点反射波相反, 因此利用极性剔除奇异性较差的故障点反射波是可行的。

鉴于全并联 AT 牵引网拓扑以 AT1 为中心呈对称结构, 故障发生在区段 S2 时得出的结论与发生在区段 S1 时相同。考虑到故障区段线路反向量电流行波突变特性更为明显, 本文利用其进行单端定位。表 1 为故障发生在不同位置时, 故障区段线路反向量电流行波极性。

表 1 故障线路反向量电流行波极性

Table 1 Traveling wave polarity of fault line reverse direction current

故障位置	测量点位置	行波极性			
		初始行波	故障点反射波	对端母线行波	
S1	半线长内	AT1 左侧	负	负	正
	半线长外	AT1 左侧	负	负	正
S2	半线长内	AT1 右侧	正	正	负
	半线长外	AT1 右侧	正	正	负

综上, 鉴于反向量对端母线电流行波突变特性明显, 同时其极性与初始电流行波、故障点反射波极性相反, 选择其作为单端定位的第二波头, 可以提高故障定位的精度。

1.4 过渡电阻影响分析

根据式(4)可知, 当过渡电阻变化时, α_f 、 β_f 的数值会随之改变。式(6)中的故障点反射波、对端母线电流行波与初始电流行波的突变幅值比分别表示为

$$\begin{cases} \lambda = \left| \frac{\Delta I_{M2}}{\Delta I_{M1}} \right| = |0.5\beta_f| \\ \gamma = \left| \frac{\Delta I_{M3}}{\Delta I_{M1}} \right| = |\beta_{TS}\alpha_f + \alpha_{TS}| \end{cases} \quad (8)$$

式中: λ 为故障点反射波与初始行波突变幅值比; γ 为对端母线行波与初始行波突变幅值比。为分析过渡电阻对电流行波突变幅值的影响, 绘制 λ 、 γ 随过渡电阻变化的幅值曲线, 如图 7 所示。

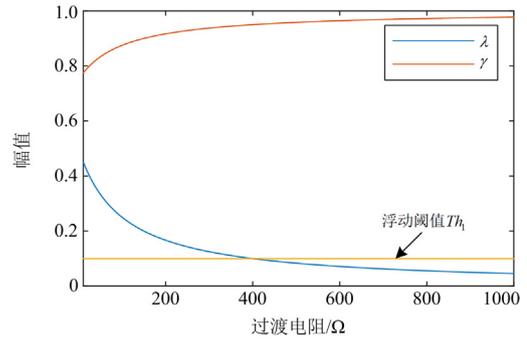


图 7 λ 、 γ 随过渡电阻变化的幅值曲线

Fig. 7 Amplitude curves of λ and γ as a function of transition resistance

由表达式(8)和图 7 可知: 过渡电阻愈大, β_f 愈小, 因此 λ 的幅值也愈小; 而 α_f 数值随过渡电阻的增大而增大, 所以 γ 的幅值随过渡电阻的增大而增大。在标定波头时, 一般采用设定浮动阈值来消除噪声的干扰。图 7 中, Th_1 为浮动阈值, 设置其为初始行波幅值的 10%。当过渡电阻大于 400 Ω 时, 去噪阈值将会大于故障点反射波突变幅值。因此, 由于故障点反射波耐过渡电阻能力较差, 易受噪声干扰影响, 不宜将其作为单端定位的第二波头。反观对端母线行波, 随着过渡电阻的增大, 其幅值始终与初始行波相当。为此, 本文选择对端母线行波作为单端定位的第二波头, 理论上具有较好的耐过渡电阻能力。

2 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原理

本文利用 S 变换获取不同时刻不同频率的暂态行波信号时频特征, 通过式(12)得到能量谱密度矩阵, 对能量谱密度矩阵高频段(200~500 kHz)求和得到暂态行波信号的高频能量。然后利用 AT1 两侧线路同向模量电流行波的高频能量比值进行故障区段定位, 该故障定位方法结合全并联 AT 牵引网特殊的拓扑结构, 能灵敏地定位故障区段; 同时本文选择故障区段线路的反向量电流行波进行单端定位, 并利用极性特征辨识突变特性明显的对端母线电流行波, 有效解决第二波头标定误差大、辨识难的问题, 提高故障定位精度。

2.1 S 变换

S 变换是基于连续小波变换和短时傅里叶变换衍生出来的一种局部时频分析方法, 最早由 Stockwell 提出, 其非常适用于电力系统暂态信号的提取分析^[23]。鉴于测量装置采集的是离散信号, 通过 FFT 运算得到 ST 的离散形式为

$$S\left[qT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{\frac{-2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{j\frac{2\pi m q}{N}} \quad (9)$$

式中: T 为采样时间间隔; N 为采样点数; q 为 S 变换的序列号; m 为位移参数, $q, m = 0, 1, 2, \dots, N-1$; n 为频率参数, $n = 1, 2, \dots, N/2$; X 为离散信号的快速傅里叶变换。

将测量点采集的暂态行波信号依据式(9)进行 S 变换, 得到 \mathbf{S} 矩阵, \mathbf{S} 矩阵的元素 $S(i, j)$ 是第 j 个采样点信号在第 i 个频率下的幅值相位信息, 矩阵的行元素表征暂态信号的频域特征, 而矩阵的列元素表征暂态信号的时域特征。其中复数矩阵相邻两行间的频率差 Δf 为

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (10)$$

第 i 行的频率 f_i 为

$$f_i = \frac{f_s}{N} i \quad (11)$$

式中, f_s 为采样频率。

2.2 暂态电流行波能量表征

采集一定时间内的暂态信号(采样点个数为 N), 经过 S 变换处理后得到一个二维 \mathbf{S} 矩阵, 该矩阵内任意元素代表着特定时刻、特定频率下的暂态信号幅值相位信息。将二维 \mathbf{S} 矩阵元素 $S(i, j)$ 乘以自身的共轭得到信号能量谱密度 $\mathbf{E}(i, j)$, 表示为

$$\mathbf{E}(i, j) = S(i, j) \cdot \overline{S(i, j)} \quad (12)$$

依据式(12)求取二维 \mathbf{S} 矩阵中各时频小块, 最终将会得到宽频带暂态信号的能量谱矩阵 \mathbf{E} , 如式(13)所示。

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1^1 & \cdots & E_1^j & \cdots & E_1^N \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_i^1 & \cdots & E_i^j & \cdots & E_i^N \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_{\frac{N}{2}+1}^1 & \cdots & E_{\frac{N}{2}+1}^j & \cdots & E_{\frac{N}{2}+1}^N \end{bmatrix} \quad (13)$$

该能量谱矩阵可以反映暂态行波信号在不同时刻不同频段下的能量幅值。

2.3 故障定位方案设计

由上文分析可知, 当不同区段发让故障时, AT1 两侧线路同向模量电流行波的高频能量大小差异明显; 而故障区段线路反向量电流行波奇异性明显, 因此可利用其进行单端定位。考虑对端母线行波具有突变特性明显、耐过渡电阻能力强, 且极性与初始电流行波和故障点反射波相反的特点, 单端定位时可利用极性将其辨识。该故障定位方案由采样时

间窗的选择、区段定位判据和故障点精确定位组成。

2.3.1 采样时间窗选择

当发生故障时, 在采样时间窗内电流行波从故障线路流入 AT1, 从非故障线路流出 AT1, 由 1.2 节可知, 流入侧行波高频能量大。考虑到电流行波经非故障线路在对端母线反射回到 AT1 后, 流入侧发生了改变, 因此采样时间窗 t_s 的选择如式(14)所示。

$$t_s = \min\left(\frac{2l_1}{v}, \frac{2l_2}{v}\right) \quad (14)$$

式中: l_1 和 l_2 分别表示区段 S1、S2 中的线路长度; v 为线模行波分量的波速。

2.3.2 区段定位判据

将图 2 中 a、b 点的同向模量电流行波分别进行 S 变换得到 \mathbf{S} 矩阵, 并依据式(12)求得各自的能量谱矩阵, 并对高频段求和得到各自高频能量, 将 a、b 两点的同向模量电流行波高频能量比值 δ 作为区段定位的依据, 相应判据为

$$\delta = \frac{E_{\text{Ha}}}{E_{\text{Hb}}} > \delta_{\text{set}} \quad (15)$$

式中: E_{Ha} 为 a 点同向模量电流行波高频能量; E_{Hb} 为 b 点同向模量电流行波高频能量; δ_{set} 为区段定位阈值, 取值为 1。

2.3.3 故障点精确定位

在全并联 AT 牵引网各模量中, 反向量电流突变特性显著, 同时模 2 分量(线模分量)的衰减系数小且波速稳定, 因此利用反向模 2 分量电流 i_{d2} 进行单端定位, 其波速 $v_{d2} = 2.977899 \times 10^5 \text{ km/s}$ [14]。见表 1, 利用极性可识别奇异性强的对端母线电流行波, 并分别标定初始电流行波到达时间 t_A 和对端母线电流行波到达时间 t_B , 利用单端定位公式即可求得故障点的精确位置, 表示为

$$l_f = l - \frac{v_{d2}(t_B - t_A)}{2} \quad (16)$$

式中: l_f 为故障点到 AT1 的距离; l 为故障区段线路长度。

整体故障定位方案流程如图 8 所示。

3 仿真分析

为验证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案的可靠性, 在 EMTP 暂态仿真软件中搭建了全并联 AT 牵引网供电系统仿真模型。

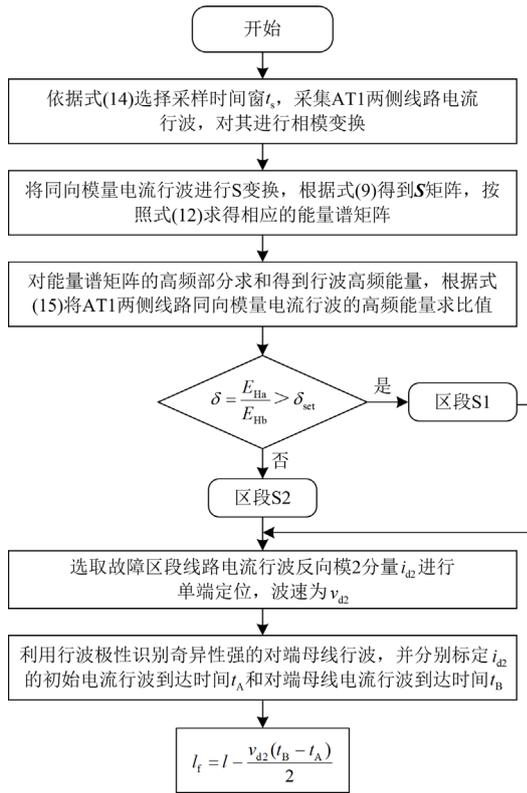
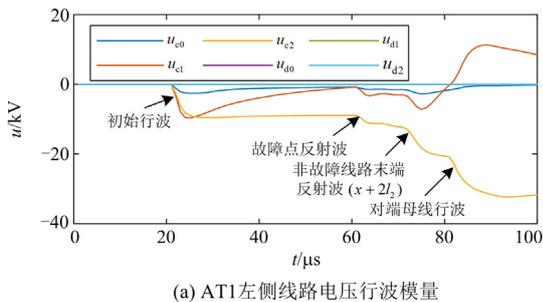


图 8 故障定位方案流程图
Fig. 8 Flow chart of fault localization scheme

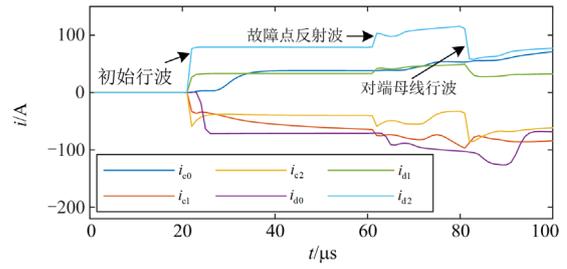
3.1 行波模量仿真分析

在图 1 所示的系统中区段 S1 上设置上行线路 T-R 故障, 距 AT1 端 6 km, 过渡电阻为 100 Ω, AT1 左侧线路的电压、电流行波模量见图 9。

由图 9 可知, 由于在并联连接处 $u_1 = u_2$, 反向模量电压行波为零。同向模量电压行波波形平缓, 且含有非故障线路的反射波, 其会对单端定位第二波头的识别造成干扰, 进而导致定位失败。相比其他电流行波模量, 反向模 2 分量电流 i_{d2} 奇异性最强, 且反向量不包含非故障线路末端反射波; i_{d2} 的对端母线行波突变幅值与初始行波的突变幅值相当, 远大于故障点反射波突变幅值, 且其极性与初始行波、故障点反射波相反, 利用行波极性可识别奇异性的对端母线行波, 并将其作为单端定位的第二波头。



(a) AT1左侧线路电压行波模量



(b) AT1左侧线路电流行波模量

图 9 AT1 左侧线路电压、电流行波模量
Fig. 9 AT1 left-side line voltage and current traveling wave modulus

因此, 采用 i_{d2} 进行单端定位精确度更高。

3.2 故障区段定位分析

由 1.2 节分析可知, 当电流行波流过自耦变压器时, 会存在大量的高频分量损失, 导致自耦变压器两侧线路同向模量电流的高频能量大小差异显著。为了直观展示 AT1 两侧线路电流行波高频能量的大小差异, 本文通过绘制时频图来刻画能量谱矩阵特征, 在区段 S1、S2 的线路上设置 T-R 短路故障, AT1 两侧线路同向模 2 分量电流 i_{c2} 的能量谱密度如图 10 所示。

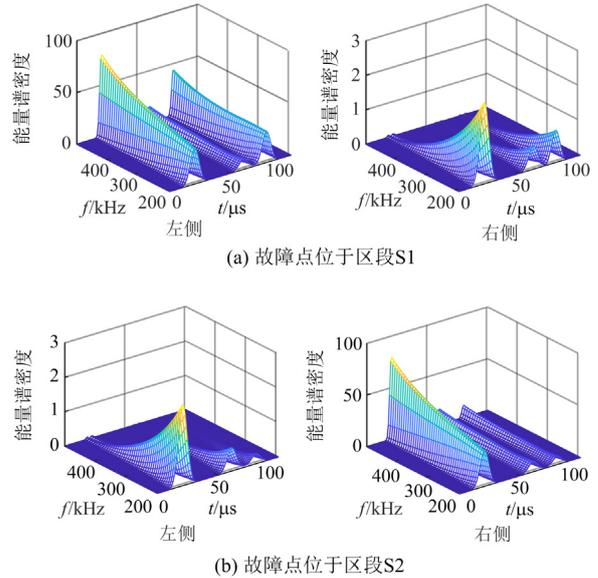


图 10 故障点位于不同区段时 AT1 两侧线路 i_{c2} 的能量谱密度

Fig. 10 Energy spectral density of line i_{c2} on both sides of AT1 when the fault occurs in different sections

由图 10 可以看出, 当故障点位于区段 S1 时, AT1 左侧线路 i_{c2} 的高频能量远大于 AT1 右侧线路 i_{c2} 的高频能量, 而当故障发生在区段 S2 时, 结果反之; 随着频率的增大, AT1 两侧线路 i_{c2} 的能量大

小差异更为明显。因此利用该特征进行区段定位灵敏性极高。

3.3 耐过渡电阻能力分析

一般而言，故障行波突变幅值随过渡电阻增大而减小，故障特征随之变弱，行波波头检测难度提高，且行波信号会在故障点处发生折反射，故障点反射波、对端母线行波的突变特性在一定程度上会受到过渡电阻的影响。在 1.4 节的分析中，由于全并联 AT 牵引网线路存在上下并联的拓扑结构，对端母线电流行波主要从与故障线路并联的健全线路流向测量端，因此其几乎不受故障点的折反射影响，且幅值接近初始行波幅值。反观故障点反射波，过渡电阻越大，其幅值越小，极易被噪声信号覆盖。为验证本文方法耐过渡电阻的能力，分别令上行线经不同过渡电阻发生 T-R 短路故障，并在仿真中加入 30 dB 的噪声，图 11 为不同过渡电阻下 i_{d2} 小波变换模极大值。

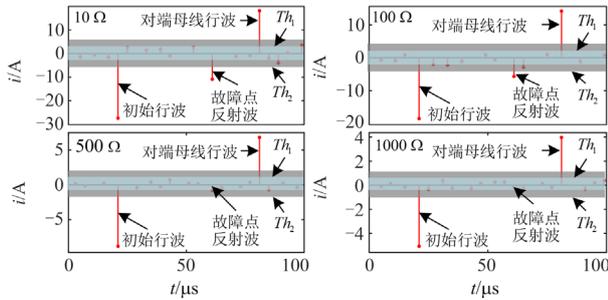


图 11 不同过渡电阻下 i_{d2} 小波变换模极大值

Fig. 11 Wavelet transform modulus maxima of i_{d2} under different transient resistances

由图 11 可知，若以 i_{d2} 初始行波幅值的 10% 作为浮动阈值 Th_1 ，随着过渡电阻的增大， i_{d2} 的故障点反射波将连同噪声信号被剔除，导致 i_{d2} 的故障点反射波辨识失败，因此故障点反射波不宜作为单端定位的第二波头；若以 i_{d2} 初始行波幅值的 20% 作为浮动阈值 Th_2 ，能在极大程度上减小噪声干扰，同时在较大的过渡电阻下 i_{d2} 的对端母线行波能做到准确辨识。

3.4 故障定位仿真

分别在全并联 AT 牵引网仿真模型的区段 S1、S2 线路中设置不同位置、不同故障类型、不同过渡电阻的故障，S1、S2 线路长度分别为 15 km、13 km，仿真结果见表 2。

由表 2 的仿真结果可知，对于发生在区段 S1 线路上的故障，计算出来的 AT1 两侧同向模 2 分量电流 i_{c2} 的高频能量比值 δ 均远大于初始设置的阈值 $\delta_{set} = 1$ ，而当区段 S2 线路上发生故障时， δ 均远小于 1，因此不同故障情形下，本文故障定位方法均能准确且灵敏地识别出故障区段；由上文分析可知，在全并联 AT 牵引网中，故障区段线路上反向模 2 分量电流 i_{d2} 突变明显，波头标定难度低，本文选择 i_{d2} 进行单端定位，同时利用极性识别突变特性显著、耐过渡电阻能力强的对端母线行波作为单端定位的第二波头，提升了弱故障特性下第二波头标定的准确度。由定位结果可以看出，本文的故障定位方法最大相对误差仅为 0.823%，在不同故障情形下均能实现精确定位。

表 2 故障定位结果

Table 2 Fault localization result

故障点位置	过渡电阻 R_f/Ω	T-R 短路故障			F-R 短路故障			T-F 短路故障			
		δ	故障区段	相对误差/%	δ	故障区段	相对误差/%	δ	故障区段	相对误差/%	
S1	1 km	10	6.4197	S1	0.027	12.6790	S1	0.027	8.1195	S1	0.027
		100	6.5210	S1	0.027	13.9394	S1	0.027	8.5442	S1	0.027
		1000	6.5480	S1	0.027	16.3952	S1	0.027	9.5074	S1	0.027
	6 km	10	10.9621	S1	0.440	27.7941	S1	0.440	45.4776	S1	0.440
		100	11.1395	S1	0.440	27.6484	S1	0.440	42.7251	S1	0.440
		1000	11.3742	S1	0.440	27.7202	S1	0.440	38.2341	S1	0.440
	14 km	10	8.4413	S1	0.280	16.0680	S1	0.280	22.8266	S1	0.280
		100	8.3950	S1	0.280	15.7030	S1	0.280	22.7971	S1	0.280
		1000	8.3152	S1	0.280	14.9448	S1	0.280	22.7240	S1	0.280
S2	1 km	10	0.0906	S2	0.469	0.0459	S2	0.469	0.0231	S2	0.469
		100	0.0926	S2	0.469	0.0455	S2	0.469	0.0280	S2	0.469
		1000	0.1019	S2	0.469	0.0451	S2	0.469	0.0415	S2	0.469
	12 km	10	0.1378	S2	0.823	0.0402	S2	0.823	0.0372	S2	0.823
		100	0.1401	S2	0.823	0.0402	S2	0.823	0.0380	S2	0.823
		1000	0.1461	S2	0.823	0.0413	S2	0.823	0.0406	S2	0.823

3.5 抗噪声能力分析

在距离 AT1 端 3 km 的两侧线路上设置 T-R 短路故障, 将采集的信号分别加入 40 dB、30 dB 和 25 dB 的噪声, 过渡电阻为 100 Ω。在不同噪声信号干扰下, 计算得出的 δ 和相对定位误差见表 3。

表 3 不同噪声干扰下的仿真结果

信噪比/dB	故障点位置	δ	故障区段	相对误差/%
40	S1 3 km	30.9475	S1	0.587
	S2 3 km	0.0325	S2	0.962
30	S1 3 km	13.7710	S1	0.587
	S2 3 km	0.1052	S2	0.962
25	S1 3 km	4.1487	S1	0.587
	S2 3 km	0.2460	S2	0.962

由表 3 可知, 随着噪声信号增大, 当区段 S1 发生故障时, δ 的计算值不断减小, 但依旧为阈值的 4 倍以上, 而当区段 S2 发生故障时, δ 远小于阈值 δ_{set} , 说明本文的区段定位判据在噪声干扰下仍具有很高灵敏度; 由定位误差结果可知, 当噪声的信噪比达到 25 dB 时, 相对定位误差仍可控制在 1% 以内, 定位准确度高。

3.6 与其他故障定位方法的仿真对比

为验证本文方法的优越性, 将本文的故障定位方法与常用的全并联 AT 牵引网故障定位方法进行仿真对比分析, 统一使用图 1 所示的全并联 AT 牵引网供电系统进行仿真。本文在区段 S1 距离测量端 6 km、14 km(远端故障)处设置 T-R 故障, 将过渡电阻设置为 1000 Ω, 并分别在信号中添加不同信噪比的噪声信号, 以对比本方法和现有方法在弱故障和噪声干扰下的适用性, 仿真对比结果如表 4 所示。

表 4 仿真对比结果

故障点位置	信噪比/dB	P1	P2	P3	
		相对误差/%	相对误差/%	相对误差/%	
S1	6 km	40	0.440	8.667	0.700
	30	0.440	11.000	—	
	25	0.440	11.333	—	
S1	14 km	40	0.280	5.093	1.020
	30	0.280	12.533	—	
	25	0.280	3.987	—	

注: P1、P2、P3 分别为本文所提定位方法、上下行电流比法、传统的全并联 AT 牵引网单端行波故障定位方法。

P2 利用稳态工频信号进行定位, 受运行工况和过渡电阻的影响, 工频信号特征并不明显, 由表 4 可知, P2 的最大相对误差为 12.533%, 定位精度极低; P3 选取故障点反射波作为单端定位的第二波头, 如图 11 所示, 当过渡电阻为 1000 Ω, 故障点反射波突变幅值极小, 其会随着噪声信号的增大而

被湮没, 导致 P3 的故障定位方法定位失败。与之相比, 本文的故障定位方法在一定噪声的干扰下能有效辨识弱故障特征, 实现故障点的精确定位。

4 结论

本文通过分析电流行波在全并联 AT 牵引网中传播特性, 提出一种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。该故障定位方法有以下特点:

- 1) 基于全并联 AT 牵引网特殊的拓扑结构, 自耦变压器两侧线路同向模量电流的高频能量大小差异显著, 区段定位时无须串入边界元件;
- 2) 本故障定位方案选择奇异性强的故障区段线路行波电流进行单端定位, 并利用极性识别突变特性显著、耐过渡电阻能力强的对端母线行波作为单端定位第二波头, 波头标定精度提升;
- 3) 通过不同故障情形的仿真实验, 证实了本文的故障定位方案具有准确性高、鲁棒性强、灵敏性高等优点。

参考文献

- [1] 钱清泉, 高仕斌, 何正友, 等. 中国高速铁路牵引供电关键技术[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 9-20.
QIAN Qingquan, GAO Shibin, HE Zhengyou, et al. Study of China high-speed railway traction power supply key technology[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(4): 9-20.
- [2] 李岗, 林国松, 韩正庆. 新型 AT 供电牵引网故障测距方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 31-34.
LI Gang, LIN Guosong, HAN Zhengqing. Fault location of novel AT power traction network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(3): 31-34.
- [3] 王继芳. 全并联 AT 供电牵引网故障测距研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
WANG Jifang. Research on fault location of all-parallel AT traction system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [4] 曹璞璘, 黄美琴, 王云龙, 等. 交流线路避雷线融冰故障电磁暂态分析与间接式行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 11-21.
CAO Pulin, HUANG Meiqin, WANG Yunlong, et al. Electromagnetic transients analysis and indirect traveling wave fault location for ground wires of AC transmission line amid de-icing[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 11-21.
- [5] CHENG Liang, WANG Tao, WANG Yi. A novel fault location method for distribution networks with distributed generations based on the time matrix of traveling-waves[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 698-708.
- [6] QUISPE J C, MORALES J, ORDUNA E, et al. Time-frequency multiresolution of fault-generated transient signals in transmission lines using a morphological

- filter[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 349-362.
- [7] 郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰. 基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 31-42.
GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie. Pilot protection method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 31-42.
- [8] 郑涛, 宋祥艳. 基于故障暂态行波高低频能量比值的交流输电线路快速保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4616-4629.
ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Fast protection scheme for AC transmission lines based on ratio of high and low frequency energy of transient traveling waves[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4616-4629.
- [9] 郑涛, 宋祥艳. 适用于多端直流电网的电压极性比较式行波保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4690-4699.
ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Traveling wave protection scheme of voltage polarity comparison formula for multi-terminal DC power network[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4690-4699.
- [10] 张小丽, 曾祥君, 马洪江, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 64-68.
ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 64-68.
- [11] 冉旭, 廖培金, 陈平, 等. 行波故障测距法在电气化铁道牵引网中的应用研究[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 35-38, 42.
RAN Xu, LIAO Peijin, CHEN Ping, et al. Study on traveling wave fault location applied to traction line of electric railway[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 35-38, 42.
- [12] 薛永端, 段晶晶, 徐丙垠, 等. 直供方式牵引网故障行波特征分析[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 167-173.
XUE Yongduan, DUAN Jingjing, XU Bingyin, et al. Characteristic analysis of fault generated traveling waves in direct feeding traction network[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 167-173.
- [13] 熊列彬, 吴高华, 王志洋. 基于 IHHT 的多测点行波法故障测距在全并联 AT 牵引网中的研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3244-3252.
XIONG Liebin, WU Gaohua, WANG Zhiyang. Study on fault location of multi measuring points traveling wave method based on IHHT in all parallel AT traction network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3244-3252.
- [14] 舒新星, 陈剑云, 华敏, 等. 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, et al. Traveling wave ranging method for all parallel AT traction network based on time spectrum similarity[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(6): 37-45.
- [15] 傅钦翠, 陈剑云, 钟汉华, 等. 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, et al. Research on traveling wave propagation characteristics of all-parallel AT traction network and single terminal fault location algorithm[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(7): 66-76.
- [16] HUANG Q, ZOU G, ZHANG S, et al. A pilot protection scheme of DC lines for multi-terminal HVDC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 1957-1966.
- [17] LI C, GOLE A M, ZHAO C. A fast DC fault detection method using DC reactor voltages in HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2254-2264.
- [18] LIU J, TAI N, FAN C. Transient-voltage-based protection scheme for DC line faults in the multiterminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(3): 1483-1494.
- [19] LI S, CHEN W, YIN X, et al. A novel integrated protection for VSC-HVDC transmission line based on current limiting reactor power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 35(1): 226-233.
- [20] 何金良. 时频电磁暂态分析理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [21] 束洪春, 宋晶, 田鑫萃. 基于沿线行波突变的双回路单端测距[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5793-5804, 5907.
SHU Hongchun, SONG Jing, TIAN Xincui. Single ended fault location of double circuit lines based on traveling wave saltation along the line[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5793-5804, 5907.
- [22] 戴攀, 刘田, 周浩. 高速铁路接触网行波传播特性研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(2): 25-30.
DAI Pan, LIU Tian, ZHOU Hao. Characteristics of travelling wave propagation in catenary of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(2): 25-30.
- [23] 高淑萍, 李晓芳, 宋国兵, 等. 基于 Pearson 相关系数与广义 S 变换的低压直流微电网的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 120-129.
GAO Shuping, LI Xiaofang, SONG Guobing, et al. Fault line selection method of a low-voltage DC microgrid based on the Pearson correlation coefficient generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 120-129.

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-12-28

作者简介:

刘国胜(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 17775771934@163.com

李泽文(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: lzw0917@163.com

(编辑 许威)