文章编号:1674-2974(2024)06-0148-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024234

基于首行波曲率半径的交直流互联电网交流输电线路单端量保护

高淑萍[1,3],段云青[1,3†],宋国兵[2],郑瀚[1,3],李晓芳[1,3]
(1. 西安科技大学 电气与控制工程学院,陕西 西安 710054;
2. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;
3. 西安市电气设备状态监测与供电安全重点实验室,陕西 西安 710054)

摘 要:交直流互联电网中逆变侧交流输电线路故障特征与纯交流系统具有较大的差异性,传统交流输电线路的保护方案已经不再适用于逆变侧交流输电线路.首先,基于逆变侧交流输电线路发生区内、外故障时拓扑结构的不同,分别推导了两种情况下线模故障分量电流首行波的表达式,理论上明确了交流输电线路在发生区内、外故障时首行波波形特征的差异性.其次,采用小波变换模极大值法和Levenberg-Marquardt算法提取首行波曲率半径,构造了利用首行波曲率半径进行故障区域识别的高可靠性单端量保护方案.最后,在PSCAD/EMTDC中搭建交直流互联电网模型,使用MATLAB对保护方案进行验证.仿真结果表明:所提保护方案快速有效,可靠性高,耐受过渡电阻的能力较强,具有良好的抗噪声能力.

关键词:交直流互联电网;单端量保护;Levenberg-Marquardt算法;小波变换模极大值法;首行波曲率半径
中图分类号:TM773;TM75 **文献标志码**:A

Single-terminal Protection of AC Transmission Lines in AC-DC Network Based on Curvature Radius of First Traveling Wave

GAO Shuping[1,3], DUAN Yunqing[1,3†], SONG Guobing[2], ZHENG Han[1,3], LI Xiaofang[1,3]
(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Xi'an Key Laboratory of Electrical Equipment Condition Monitoring and Power Supply Security, Xi'an 710054, China)

Abstract: The fault characteristics of inverter AC transmission lines in AC-DC interconnection networks are quite different from those of pure AC systems. The protection scheme of traditional AC transmission lines is no longer suitable for inverter AC transmission lines. First, based on the different topological structures of the inverter AC

* **收稿日期**:2023-08-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777166),National Natural Science Foundation of China (51777166);国家自然科学基金国际合作与交流项目(52061635105),International Cooperation and Exchange Program of the National Natural Science Foundation of China (52061635105);国家电网有限公司总部科技项目(52094020006U),Headquarters Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52094020006U)
作者简介:高淑萍(1970—),女,陕西西安人,西安科技大学副教授,硕士研究生导师,博士
† 通信联系人,E-mail:1909799547@qq.com

transmission line when the fault occurs inside and outside, the expressions of the first traveling wave of the down-mode fault component current are derived, respectively, and the difference of the first traveling wave characteristics of the AC transmission line when the fault occurs inside and outside is clarified theoretically. Then, wavelet transform mode maximum method and Levenberg-Marquardt algorithm are used to extract the curvature radius of the first traveling wave, and a high-reliability single-terminal protection scheme is constructed by using the curvature radius of the first traveling wave to identify the fault region. Finally, the AC-DC interconnection network model is built in PSCAD/EMTDC, and the protection scheme is verified by MATLAB. The simulation results show that the proposed protection scheme is fast and effective, has high reliability, strong resistance to transition resistance, and good anti-noise ability.

Key words: AC/DC interconnection network; single end protection; levenberg-marquardt algorithm; wavelet transform mode maximum method; radius of curvature of first traveling wave

我国地域辽阔,电力资源及负荷分布不平衡,能源供给与能源需求呈逆向分布的趋势,这决定了我国必须走远距离大规模输电的道路,由此产生了“北电南送、西电东送”的电力传输格局[1-4].受益于电力电子技术在电力系统中应用日趋成熟,跨区域输电采用直流输电更具优势,直流输电具有输送容量大、输送距离远等优点[5-9],同时输送容量和输送距离不受同步运行稳定性的限制[10-11],因此,跨区域采用直流输电和区域内采用交流输电方式的交直流互联电网应运而生.

目前,国内外有关交直流互联电网的研究主要聚焦于直流输电线路故障,而对逆变侧交流输电线路故障特性及保护方面关注较少[12].文献[13]认为高压直流输电系统中电力电子设备的大量使用已然使电网的动态特性发生了本质上的变化,交直流互联电网中交流系统故障特征与纯交流系统存在明显差异,故传统交流系统保护方法已经不能保证交直流互联电网交流系统继电保护的安全性和可靠性.文献[14]认为逆变侧交流母线安装有交流滤波设备和大容量无功补偿设备,导致难以检测到电压行波,但仍可检测到电流行波,故利用电压行波信号的传统行波保护已不再适用于逆变侧交流输电线路.

在交直流互联电网逆变侧交流输电线路保护的研究方面,文献[15]具体分析了交直流互联电网不同于纯交流的电磁暂态过程对交流线路距离保护的影响.文献[16-17]分析了方向纵联保护原理对逆变侧交流输电线路的适应性,但未计及逆变侧不同交流出线结构对保护的影响.文献[18]认为对于差动保护而言,由于直流系统的特殊性,区内故障时线路两侧电流幅值的差异很大且不受故障位置的影响/正常运行和区外故障时电流幅值差异相对较小,由此提出基于电流幅值的辅助判据进行故障区域识别,但该方案有过多的局限性,仅限于对传统电流差动保护进行辅助.文献[19]所提出的故障线路暂态功率倒向保护方案,纵联保护无延时,速动性高,但暂态功率倒向的发生极易使纵联保护误动.文献[20-21]认为交流输电线路故障,电流幅值降低且相角的波动幅度较大,此时区内故障时动作量小于制动量,导致差动保护拒动.

综上所述,现有传统交流输电线路的保护方案应用于逆变侧交流输电线路,继电保护的安全性、可靠性较低.针对上述问题,本文在推导了交直流互联电网逆变侧交流输电线路线模故障分量电流首行波表达式的基础上,理论验证区内、外故障时电流首行波波形特征的差异性,并对首行波线路传输的影响因素进行分析;其次通过使用Levenberg-Marquardt算法对故障分量电流行波信号进行拟合,并采用小波变换模极大值法对行波到达时间进行标定,精确提取首行波数据,进而得到首行波信号的曲率半径;最后利用首行波曲率半径进行区内、外故障识别,提出了基于首行波曲率半径的交直流互联电网逆变侧交流输电线路单端量保护方案.运用PSCAD/EMTDC电磁仿真软件搭建仿真模型,通过MATLAB进行数据处理,对所提保护方案进行仿真验证,结果表明保护方案能够正确识别区内、外故障.

1 交直流互联电网典型拓扑结构

本文采用PSCAD/EMTDC电磁仿真软件,基于天山—中州直流输电系统实际参数,建立了直流系统为±800 kV、逆变侧交流系统为220 kV的交直流互联电网仿真模型.交直流互联电网拓扑结构如图1所示,其直流系统额定电流为±5 kA,额定输送功率为8 000 MW,换流站采用单桥24脉动换流器结构,整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定电流和定关断角γ控制,直流输电线路长2 190 km;交流系统为由中州换流站向受端送电的一条长200 km、电压等级为220 kV的交流输电线路,R_1、R_2、R_3、R_4为双回交流输电线路两端的保护安装处.依据交直流互联电网逆变侧交流输电线路拓扑结构,以母线P侧的保护R_1为研究对象进行故障特征分析和仿真验证.对于保护R_1而言:f_1、f_2为交流线路发生区内故障时的不同位置,f_3、f_4为区外故障,其中f_3为交流线路正向区外故障,f_4为反向区外故障.

为消除电力系统三相线路之间存在的电磁耦合,引入相模变换算法,对暂态电流行波进行凯伦贝尔变换[22].当交流输电线路发生故障时,行波信号在线路中传播会发生色散现象并出现畸变,行波信号的突变量减小,影响保护装置的快速性和可靠性[23].色散现象对线模行波影响程度较小,因此采用线模行波对保护方案进行分析验证.

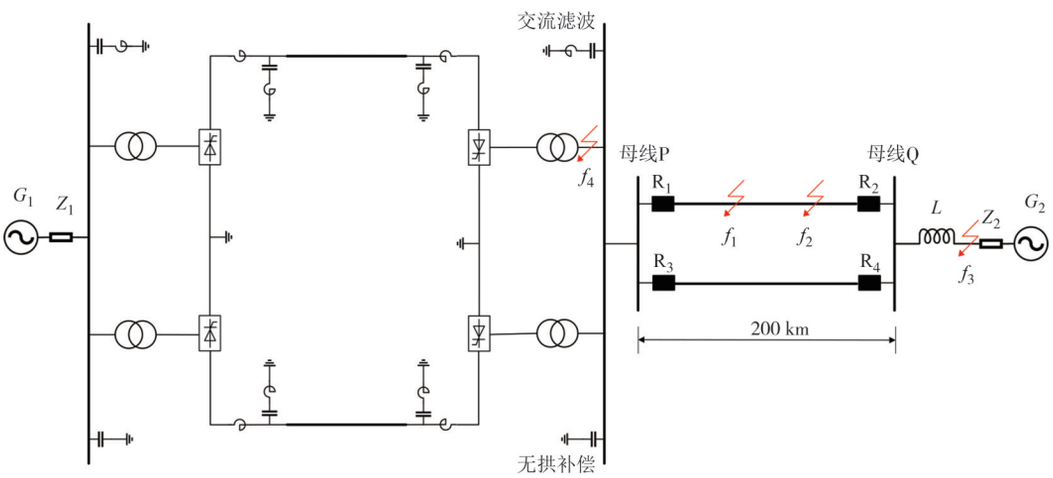


图1 交直流互联电网拓扑结构

Fig.1 Topological structure of AC/DC interconnected power grid

2 首行波曲率半径故障特征分析

2.1 首行波波形特征分析

交流输电线路正常运行时,行波在交流输电线路中的传播特性等效电路如图2所示.输电线路首端为R_1,末端为R_2,首端电压、电流分别为U_{R_1}和I_{R_1},末端电压、电流分别为U_{R_2}和I_{R_2},距离线路首端x处的电压、电流分别为U和I,距离线路首端$x+\mathrm{d}x$处的电压、电流分别为$U+\mathrm{d}U$和$I+\mathrm{d}I$,根据基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律可得:

$$\begin{cases} U-(U+\mathrm{d}U)=(I+\mathrm{d}I)\cdot Z\mathrm{d}x \\ I-(I+\mathrm{d}I)=(U+\mathrm{d}U)\cdot Y\mathrm{d}x \end{cases} \tag{1}$$

当$\mathrm{d}x$无穷小时,式(1)中二阶小项$\mathrm{d}I\cdot Z\mathrm{d}x$和

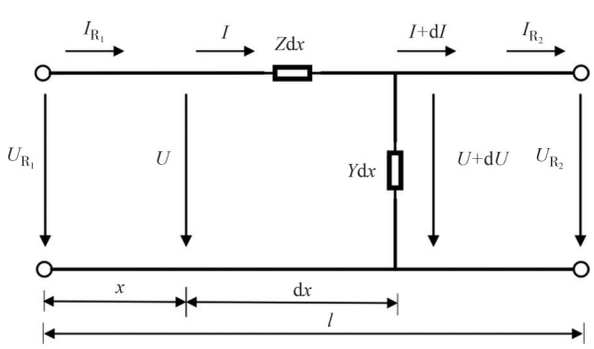


图2 行波传播特性等效电路

Fig.2 Traveling-wave propagation characteristic equivalent circuit

$\mathrm{d}U\cdot Y\mathrm{d}x$可以忽略不计,则有

$$\begin{cases} -\mathrm{d}U=I\cdot Z\mathrm{d}x \\ -\mathrm{d}I=U\cdot Y\mathrm{d}x \end{cases} \tag{2}$$

对式(2)中的x进行二阶求导可得

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}^2U}{\mathrm{d}x^2}=Z\dfrac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x}\\[2ex]\dfrac{\mathrm{d}^2I}{\mathrm{d}x^2}=Y\dfrac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x}\end{cases}\tag{3}$$

将式(2)代入式(3)可得

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}^2U}{\mathrm{d}x^2}=ZYU\\[2ex]\dfrac{\mathrm{d}^2I}{\mathrm{d}x^2}=ZYI\end{cases}\tag{4}$$

式(4)的通解为

$$\begin{cases}U=A_1\mathrm{e}^{-\gamma x}+A_2\mathrm{e}^{\gamma x}\\I=A_1\mathrm{e}^{-\gamma x}/Z_\mathrm{c}+A_2\mathrm{e}^{\gamma x}/Z_\mathrm{c}\end{cases}\tag{5}$$

$$\begin{cases}Z_\mathrm{c}(\omega)=\sqrt{Z/Y}=\sqrt{(R+\mathrm{j}\omega L)/(G+\mathrm{j}\omega C)}\\\gamma(\omega)=\sqrt{ZY}=\sqrt{(R+\mathrm{j}\omega L)(G+\mathrm{j}\omega C)}\end{cases}\tag{6}$$

式中:Z_c为传输线路波阻抗,表征了故障电压行波和电流行波之间的关系;γ为传输线路的传播常数,表征了行波沿线传播的衰变特性;Z为线路阻抗,$Z=R+\mathrm{j}\omega L$;Y为线路导纳,$Y=G+\mathrm{j}\omega C$.

当线路发生区内故障时,设故障点f_1与保护$\mathrm{R_1}$之间的距离为m,根据图1所示的交直流互联电网拓扑结构,可得区内故障时的线模故障分量彼特逊等效电路如图3所示,其中,ΔU_f为故障点线模故障分量电压,ΔI_f为线模故障分量电流,Z_CP为母线P的对地电容阻抗.根据区内故障时的彼特逊等效电路可推导出故障点的电流行波表达式为:

$$\Delta I_\mathrm{f}=\frac{2\Delta U_\mathrm{f}}{Z_\mathrm{c}+Z_\mathrm{CP}}\tag{7}$$

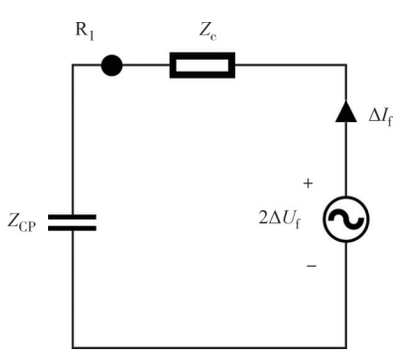


图3　区内故障彼特逊等效电路

Fig.3　Intern fault peterson equivalent circuit

对于保护$\mathrm{R_1}$处电流首行波而言,行波在输电线路传播存在色散现象,故其与故障点处电流行波呈指数衰减关系,可得区内故障时保护$\mathrm{R_1}$处的电流首行波表达式为:

$$I_{\mathrm{R_1}}=\Delta I_\mathrm{f}\mathrm{e}^{-\gamma m}=\frac{2\Delta U_\mathrm{f}\mathrm{e}^{-\gamma m}}{(Z_\mathrm{c}+Z_\mathrm{CP})}\tag{8}$$

当线路发生区外故障时,线模故障分量彼特逊等效电路如图4所示,其中,Z_CQ为母线Q的对地电容阻抗,Z_Ldc为限流电抗器波阻抗.通过彼特逊等效电路可推导区外故障时故障点的电流行波为:

$$\Delta I_\mathrm{f}=\frac{2\Delta U_\mathrm{f}}{Z_\mathrm{c}+Z_\mathrm{CP}+Z_\mathrm{CQ}+Z_\mathrm{Ldc}}\tag{9}$$

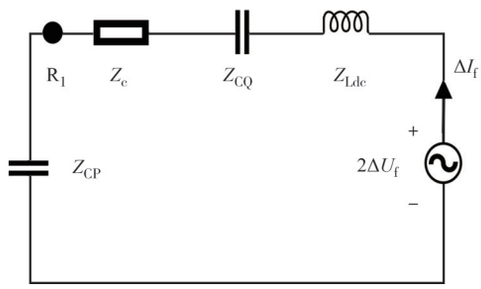


图4　区外故障彼特逊等效电路

Fig.4　Extern fault peterson equivalent circuit

由于线路全长为l,可得区外故障时保护$\mathrm{R_1}$处的电流首行波表达式为:

$$I_{\mathrm{R_1}}=\Delta I_\mathrm{f}\mathrm{e}^{-\gamma l}=\frac{2\Delta U_\mathrm{f}\mathrm{e}^{-\gamma l}}{Z_\mathrm{c}+Z_\mathrm{CP}+Z_\mathrm{CQ}+Z_\mathrm{Ldc}}\tag{10}$$

比较式(8)和式(10)中的故障点首行波表达式得到式(11)不等式关系:

$$\frac{\mathrm{e}^{-\gamma m}}{Z_\mathrm{c}+Z_\mathrm{CP}}>>\frac{\mathrm{e}^{-\gamma l}}{Z_\mathrm{c}+Z_\mathrm{CP}+Z_\mathrm{CQ}+Z_\mathrm{Ldc}}\tag{11}$$

当交流输电线路区内故障时,回路阻抗较小,且故障点距保护$\mathrm{R_1}$较近,行波色散影响较低,幅值衰减幅度较小;而区外正向故障时,由于限流电抗器和母线对地电容的存在,回路阻抗较大,故障点距保护$\mathrm{R_1}$较远,行波衰减幅度较大,不难看出区内故障时保护$\mathrm{R_1}$检测到的电流首行波远大于区外故障.

基于上述理论分析进行仿真验证,仿真结果如图5所示,在区内末端发生A相故障时,一模电流行波波形变化幅度较大,而区外故障时则缓慢上升,存在较大的故障特征差异.

2.2　首行波曲率半径特征分析

线路发生正向区外故障时,行波信号传播途径限流电抗器,故障点距保护安装处较远,行波衰减较大,其波头被严重削弱,波形为一条缓慢变化的曲线.曲率半径是反映曲线上某处曲线弯曲变化程度的理想参数,弯曲程度越小,半径就越大.因此采用

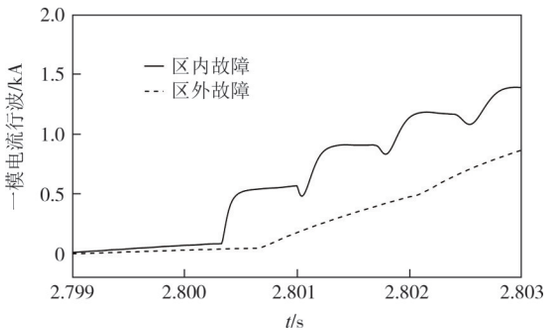


图5 区内、外故障特征仿真结果

Fig.5 Simulation results of fault characteristics in and out of the area

曲率半径来反映区内、外故障时行波波形的差异,从而进行故障区域的识别.

在微分几何中,曲率的倒数就是曲率半径,即 $r = 1/K$. 曲率即曲线上某个点的切线方向角对弧长的变化率,表明曲线在该点的弯曲程度. 在光滑曲线 C[参数方程为 $y = f(x)$,且二阶可导]上选一点 M 作为度量的基点,点 M 对应于弧长 S 且切线方向角为 β,曲线上另一点 M_1 对应弧长 $S + \Delta S$ 且切线方向角为 $\beta + \Delta\beta$,两点之间弧长为 ΔS,从点 M 到 M_1 切线转过的角度为 $|\Delta\beta|$,如图6所示.

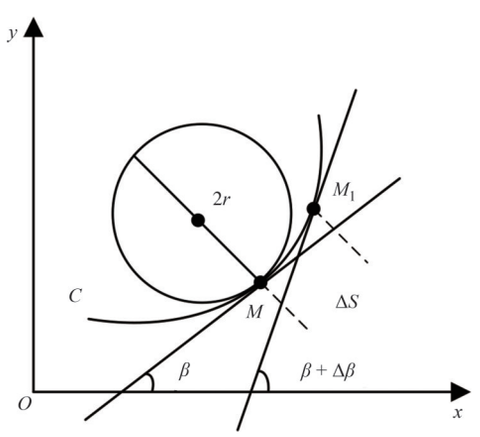


图6 曲率半径定义

Fig.6 Radius of curvature definition

根据曲率的定义单位弧长上切线转过的角度来表达弧 $\overset{\frown}{MM_1}$ 的平均弯曲程度,称为弧 $\overset{\frown}{MM_1}$ 的平均曲率,即:

$$\boldsymbol{K} = \frac{|\Delta\beta|}{|\Delta S|} \tag{12}$$

当 $\Delta S \to 0$,即 $M \to M_1$ 时,平均曲率存在极限,称为曲线 C 在点 M 处的曲率,即:

$$\boldsymbol{K} = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{|\Delta\beta|}{|\Delta S|} = \frac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}S} \tag{13}$$

曲率半径是曲率向量的长度,在平面曲线的情况下,r 取绝对值.

$$r = \frac{|\mathrm{d}S|}{|\mathrm{d}\beta|} = \frac{1}{K} \tag{14}$$

由于光滑曲线 C 二阶可导,则有

$$y' = \tan\beta \tag{15}$$

$$y'' = \frac{\mathrm{d}y'}{\mathrm{d}x} \tag{16}$$

$$r = \frac{|(1 + y'^2)|^{\frac{3}{2}}}{|y''|} \tag{17}$$

然而对于离散数据,无法直接采用上述定义公式,根据式(18)前差分公式经推导得到离散数据下的曲率半径差分计算公式:

$$f(n)^{(p+1)} = f(n+1)^{(p)} - f(n)^{(p)} \tag{18}$$

$$r = \frac{|(x'^2 + y'^2)|^{\frac{3}{2}}}{|x'y'' - x''y'|} \tag{19}$$

2.3 首行波曲率半径提取方法

为精确提取到区内、外故障行波波形的特征差异,本文基于非线性拟合回归原则对所测量到的电流信号根据线模故障分量电流首行波解析式定义标准拟合函数形式如式(20):

$$P(t) = a\mathrm{e}^{bt} \tag{20}$$

式中:a、b 为拟合系数.

Levenberg-Marquardt(列文伯格-马夸尔特,简称LM)算法是解决非线性函数拟合问题的一种有效方法. 该算法主要通过多次迭代计算与测量数据的残差平方和,来判断是否达到最优逼近[24]. 其目标函数为

$$\min E(\boldsymbol{\alpha}) = \min \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n_j} [y_{ji} - f_j(x_{ji}, \boldsymbol{\alpha})]^2 \tag{21}$$

式中:$E(\boldsymbol{\alpha})$ 为计算出的误差平方和,n 为数据窗长度,y_{ji} 为实测值,$f_j(x_{ji}, \boldsymbol{\alpha})$ 为拟合函数,x_{ji} 为自变量,α 为待拟合参数量,$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_p]^{\mathrm{T}}$.

由式(21)变形可得:

$$\boldsymbol{\alpha} = \arg\min E(\boldsymbol{\alpha}) = \arg\min \|\boldsymbol{\lambda}\|^2 \tag{22}$$

式中:$\lambda_j = y_{ji} - f(x_{ji}, \boldsymbol{\alpha})$ 表示实测值与当前参数对应的函数值的误差函数残差,其中 $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n]^{\mathrm{T}}$.

LM算法综合了最速下降法与高斯-牛顿法的优点,通过多次迭代使待拟合参数较快地逼近最优近似参数,具体最终的迭代过程如式(23):

$$\begin{cases}\boldsymbol{\alpha}^{(n+1)}=\boldsymbol{\alpha}^{(n)}+\Delta\boldsymbol{\alpha}^{(n)}\\ \Delta\boldsymbol{\alpha}^{(n)}=-(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}+\mu^{(n)}\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}\end{cases}\tag{23}$$

式中:$\Delta\boldsymbol{\alpha}$为每次迭代最优近似参数,$\boldsymbol{J}$为雅可比矩阵;$\boldsymbol{I}$为单位矩阵;$\mu$为算法引入的下降因子,防止$\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}$发生奇异从而造成曲线拟合发散.

依据式(20)中的标准拟合函数通过LM算法对截取到的首行波数据进行拟合,如图7所示.

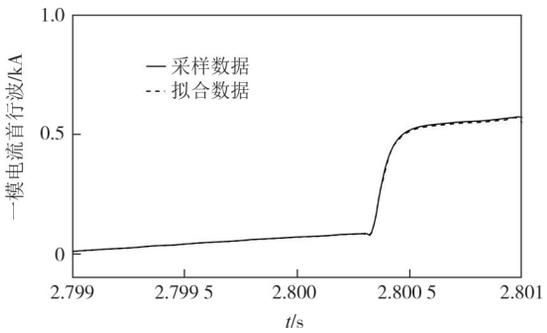


图7　LM算法数据拟合

Fig.7　LM algorithmic data fitting

为确保检测到的首行波数据的完整性,一般截取故障前0.1 ms和故障后0.3 ms的行波数据.当故障发生在靠近保护R_2时,流向保护R_1处的前行波与在保护R_2处发生折反射现象产生的反行波几乎同时到达保护R_1处,如果继续采用固定的数据窗,则难以检测到首行波,对保护方案产生较大影响.为了准确提取到首行波电流曲率半径,本文使用小波变换模极大值法对首行波进行提取.

通过使用小波变换模极大值法对R_1测得的故障分量电流行波进行奇异值检测,对行波到达时刻进行标定.若在故障后0.3 ms内检测到存在干扰波,则通过标定首行波及干扰波到达的时刻,选取干扰波到达前的数据段.如图8所示,保护R_1测得的故障分量电流行波数据中出现首个模极大值时刻就是首行波到达时刻即t_1时刻,t_2时刻为行波发生折反射,反射波叠加到首行波的时刻,Δt为首行波与反射波分别到达保护R_1处时的时间差.在故障后0.3 ms时刻内检测到存在反射波,则选取$t_1+\Delta t$时刻前的数据段为首行波数据.

3　逆变侧交流输电线路保护方案

3.1　故障启动判据

文献[25]采用相电流突变量作为保护的启动判据,本文在相同原理的基础上采用线模故障分量电流行波突变量作为判别条件,故障启动判据为

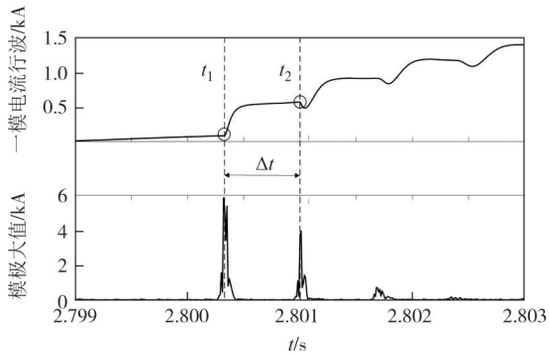


图8　首行波数据提取

Fig.8　First traveling wave data extraction

$$|\Delta I_{R_{1\max}}|>\Delta I_{R_{1set}}\tag{24}$$

式中:$\Delta I_{R_{1\max}}$为线模故障分量电流行波最大值,其中包括一模电流行波$\Delta I_{R_{11}}$、二模电流行波$\Delta I_{R_{12}}$和三模电流行波$\Delta I_{R_{13}}$;$\Delta I_{R_{1set}}$为保护启动整定值,若满足判据条件,保护启动.

3.2　故障方向判据

正方向故障时,流经保护R_1的行波电流均由母线P指向线路,故为一正值;反方向故障时,行波电流流向由母线P指向故障点,故为一负值.因此通过判断保护R_1测得的行波电流正负来判别正反方向故障,正反方向故障判据为:

$$\Delta I_{R_1}>0\tag{25}$$

式中:ΔI_{R_1}为保护装置R_1测得的线模故障分量电流行波.

3.3　区内、外故障识别判据

由于区内故障时首行波波形相较于区外故障时弯曲程度更大,故在最弯曲处曲率半径更小.基于区内、外故障时首行波波形特征的差异性,构建以首行波曲率半径为条件的区内、外故障识别判据.为了能够精确反映区内、外故障时故障分量电流行波曲率半径的不同,本文以系统最小运行方式下、线路末端、发生区内单相接地短路故障能够躲避区外三相短路故障为整定原则.设置区内故障识别判据为:

$$R_{\min}<R_{\mathrm{set}}=R_0R_{\mathrm{rel}}\tag{26}$$

式中:$R_{\min}$为首行波数据中曲率半径的最小值;R_{set}为整定值;R_0为系统最小运行方式下线路末端、发生区内单相接地短路故障时的曲率半径;R_{rel}为可靠系数.

基于区内、外故障时首行波曲率半径的差异性,在考虑一定裕度的情况下,可靠系数R_{rel}取1.3,整定值R_{set}设置为0.489.首行波曲率半径若满足判据条件,则判定为区内故障,否则为区外故障.

3.4 故障相识别判据

本文将故障分量电流行波通过凯伦贝尔变换消除电力系统线路间的电磁耦合后,提出了一种基于线模故障分量电流行波的故障选相判据,如表1所示,$\Delta I_{R_{11}}$、$\Delta I_{R_{12}}$、$\Delta I_{R_{13}}$和$\Delta I_{R_{10}}$分别为保护R_1所测一模、二模、三模和零模电流.其中接地短路故障时零模电流不为0,一模、二模、三模电流呈倍数关系;不接地短路故障时零模电流为0,两相短路时一模、二模、三模电流模量不相等;三相短路时一模、二模、三模电流模量不为0.

表1 故障选相识别方法

Tab.1 Fault phase selection and identification method

故障类型	故障相识别	故障选相判据	0模判别
单相接地短路	A-G	$\lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert = \lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert, \lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert = 0$	$\lvert\Delta I_{R_{10}}\rvert \neq 0$
	B-G	$\lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert = \lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert, \lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert = 0$	
	C-G	$\lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert = \lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert, \lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert = 0$	
两相接地短路	AB-G	$\lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert = 2\lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert, \lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert = 2\lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert$	
	BC-G	$\lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert = 2\lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert, \lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert = 2\lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert$	
	AC-G	$\lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert = 2\lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert, \lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert = 2\lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert$	
两相短路	AB	$\lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert > \lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert, \lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert > \Delta I_{R_{11}}\rvert$	$\lvert\Delta I_{R_{10}}\rvert = 0$
	BC	$\lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert > \lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert, \lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert > \lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert$	
	AC	$\lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert > \lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert, \lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert > \lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert$	
三相短路	ABC	$\lvert\Delta I_{R_{11}}\rvert > 0, \lvert\Delta I_{R_{12}}\rvert > 0, \lvert\Delta I_{R_{13}}\rvert > 0$	

3.5 后备保护

采用故障分量电流行波差动保护为后备保护,利用线路两端故障分量电流行波之差实现区内、外故障识别.后备保护判据为

$$i_P^-(t_1) = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i_P^-(t)\mathrm{d}t \tag{27}$$

$$i_Q^+(t_2) = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i_Q^+(t)\mathrm{d}t \tag{28}$$

$$\left|1 - \frac{i_Q^+(t_2)}{i_P^-(t_1)}\right| \geqslant \varepsilon_{set} \tag{29}$$

$$\left|t_1 - t_2\right| \leqslant \tau_{set} \tag{30}$$

式中:$i_P^-(t_1)$为线路P端电流反向行波在Δt时间内的积分,$i_Q^+(t_2)$为线路Q端电流正向行波在Δt时间内的积分,Δt一般取20~30 μs;ε_{set}为门槛值;τ_{set}为行波传输时间差门槛值.若满足式(29)、式(30)判别条件则判定为区内故障,否则为区外故障.

3.6 保护方案流程图

本文提出基于首行波曲率半径的交直流互联电网逆变侧交流输电线路保护方案流程图如图9所示.首先将保护R_1采集到的故障分量电流数据进行凯伦贝尔变换得到线模故障分量电流行波数据,若线模故障分量电流满足保护启动判据,保护启动.首先通过线模故障分量电流行波判断正反方向故障接着利用LM算法拟合数据,运用小波变换模极大值法标定行波到达时刻,从而精确提取首行波曲率半径,进行区、内外故障的识别;最后,利用线模故障分量电流行波间的关系,快速识别故障相,保护发生动作.

4 仿真验证

为了验证理论分析的正确性和区内、外故障识别方案的有效性,在PSCAD/EMTDC中搭建了如图1所示的交直流互联电网仿真模型,并进行性能验证.其中系统仿真步长为1 μs,采样频率为100 kHz,系统稳定运行2.8 s后发生故障,故障持续时间为0.05 s.

4.1 区内故障

输电线路正常运行时,线路故障分量电流行波幅值是一条近似为零的直线,该直线任意时刻曲率半径都可视为无穷大;输电线路发生故障时,故障分量电流行波幅值由零突变为某一值,在故障电流幅值最大时刻曲线弯曲程度最大,曲率半径最小.

区内故障时,故障分量电流行波变化幅度较大,在故障分量电流行波突变时刻曲率半径较小;区外故障时,由于限流电抗器存在,故障分量电流行波相

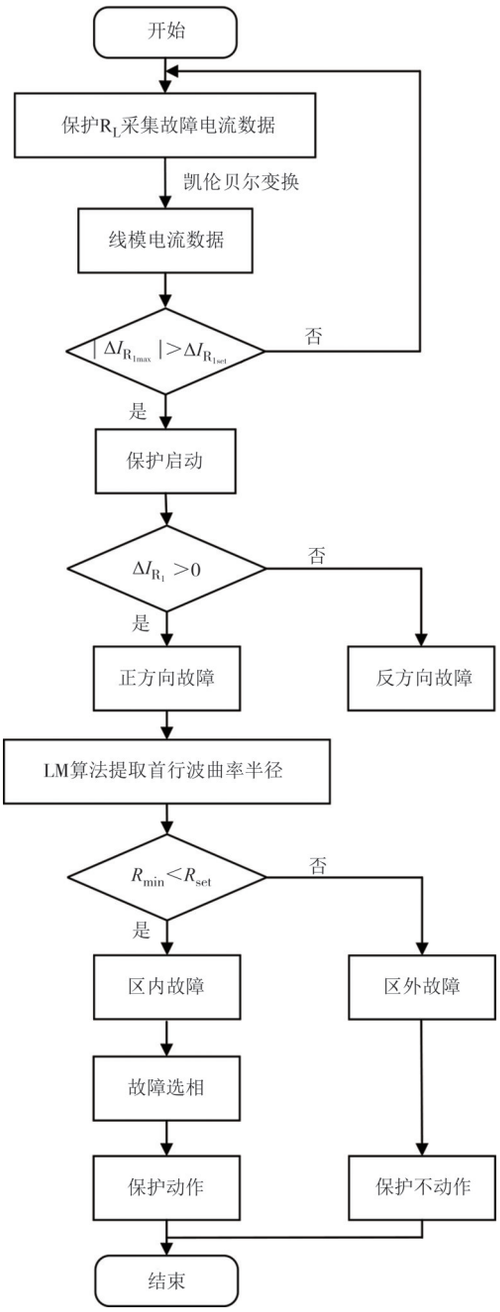


图 9　保护方案流程图

Fig.9　Protection scheme flow chart

较于区内故障时变化幅度较小,故在故障分量电流行波突变时刻曲率半径较大.基于此,本文以区内单相接地短路故障躲避区外三相短路故障为原则,在f_1设置A相接地短路故障,仿真结果如图10所示.

区内A相接地故障选相仿真结果如图11所示,一模电流行波与二模电流行波波形基本一致,三模电流行波近似为零,可正确识别故障类型为A相接地短路故障.

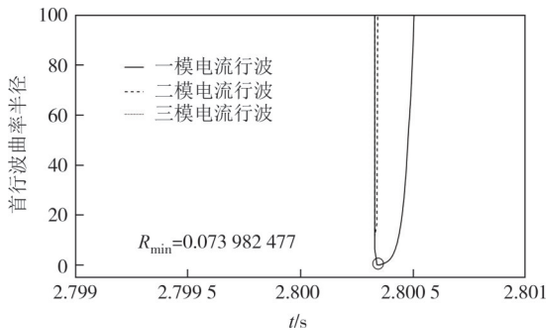


图 10　区内A相接地故障仿真结果

Fig.10　Simulation results of A contact ground fault in the region

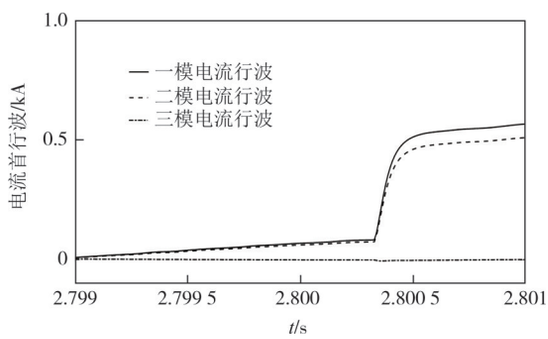


图 11　区内A相接地故障选相仿真结果

Fig.11　Phase selection simulation results of A-phase ground fault in the region

4.2　区外故障

在f_3设置三相短路故障进行区外故障仿真验证,仿真结果如图12所示.区内、外故障首行波曲率半径最小值相差较大,保护判据能正确动作.

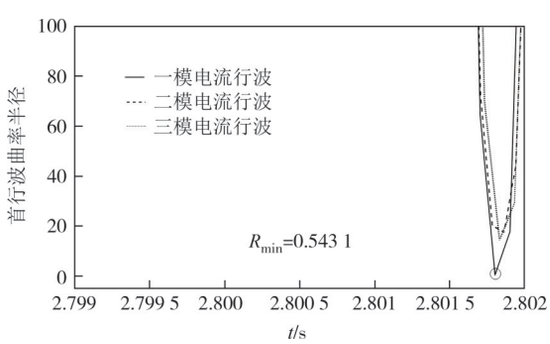


图 12　区外三相短路故障仿真结果

Fig.12　Simulation results of three-phase short-circuit fault outside the zone

4.3　故障位置、过渡电阻影响分析

行波的波速是频变的,不同频率的行波分量具有不同的传播速度,到达线路首端的时刻也不同,故障距离越远,保护测得的故障行波突变时间越长,行波幅值越小,即突变较为平缓.此外,过渡电阻的大

小也会影响行波幅值,对首行波曲率半径的检测造成一定影响.基于故障距离和过渡电阻对行波信号的影响,分别选取与 R_1 相距 50 km、100 km、150 km 和 200 km 的故障点,以及分别设置 50 Ω、100 Ω 和 200 Ω 的过渡电阻,对本文所提保护方案进行仿真验证,仿真结果如表 2 所示,保护方案能正确识别区内、外故障.

表 2 故障位置、过渡电阻仿真结果

Tab.2 Fault location and transition resistance simulation results

故障位置/km	过渡电阻/Ω	R_{min}	保护状态
50	50	0.096 42	动作
	100	0.143 85	动作
	200	0.176 59	动作
100	50	0.102 35	动作
	100	0.168 54	动作
	200	0.193 86	动作
150	50	0.153 69	动作
	100	0.205 34	动作
	200	0.295 06	动作
200	50	0.215 37	动作
	100	0.281 65	动作
	200	0.376 15	动作

4.4 噪声干扰

在实际工程中,采集到的故障信号含有噪声,噪声是行波传输中不可避免的干扰因素,由于行波保护装置的采样频率比较高,容易受到各种噪声的干扰,这种干扰会使得行波保护装置在现场工作时受到的干扰比较多.本文首先通过 LM 算法进行曲线拟合,再使用小波变换模极大值法能够准确提取首行波数据,有效提升保护方案的抗噪能力.

为进一步验证本文所提保护方案抗噪能力,假设保护启动判据在噪声环境下发生误动,在行波信号中分别加入信噪比为 20 dB、30 dB 的高斯白噪声,在不同故障位置、不同过渡电阻的情况下进行仿真验证,仿真结果如表 3 所示.本文的故障提取算法和故障识别判据在一定程度上也能有效排除噪声的干扰,保护方案能正确识别区内、外故障.

4.5 与其他保护方法性能对比

文献[26]中介绍了一种基于电流变化量相似性的保护,该方法主要是利用区内、外故障时故障分量电流方向的不同进行故障区域识别,为突出本文所提保护方案的优势,将现有基于电流变化量的保护方案与本文方案进行仿真对比,二者在不同过渡电阻下仿真结果对比如表 4 所示.基于电流变化量的现有保护方案在过渡电阻为 200 Ω、区内末端发生故障时保护方案拒动;而本文所提保护方案可正确识别区内、外故障,耐受过渡电阻能力强,灵敏度较高.

表 3 噪声影响仿真结果

Tab.3 Noise affects the simulation results

故障位置/km	信噪比/dB	过渡电阻/Ω	R_{min}	保护状态
50	20	50	0.106 25	动作
		100	0.160 32	动作
		200	0.192 31	动作
	30	50	0.128 43	动作
		100	0.184 51	动作
		200	0.199 86	动作
100	20	50	0.115 28	动作
		100	0.176 42	动作
		200	0.205 58	动作
	30	50	0.130 57	动作
		100	0.180 36	动作
		200	0.193 86	动作
150	20	50	0.160 58	动作
		100	0.236 81	动作
		200	0.315 42	动作
	30	50	0.180 54	动作
		100	0.253 49	动作
		200	0.336 58	动作
200	20	50	0.219 76	动作
		100	0.292 48	动作
		200	0.386 89	动作
	30	50	0.230 54	动作
		100	0.315 74	动作
		200	0.397 58	动作

表 4 不同过渡电阻仿真结果对比

Tab.4 Comparison of simulation results of different transition resistors

过渡电阻/Ω	本文所提保护方案		现有保护方案	
	R_{min}	保护状态	τ_2	保护状态
50	0.215 37	动作	1.261 73	动作
100	0.281 65	动作	0.318 51	动作
200	0.376 15	动作	−0.429 54	拒动

本文所提保护方案通过 LM 算法所提取的首行波数据窗更短,有利于减轻硬件电路处理数据的负担,较大程度地降低保护的动作时间,速动性更好,保护动作时间对比仿真结果如表 5 所示.

表5　保护动作时间对比

Tab.5　Protection action time comparison

故障类型	本文保护动作时间/ms			现有保护动作时间/ms		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
AG	1.27	—	—	8.53	—	—
BC	—	1.94	1.81	—	9.85	9.68
BCG	—	2.06	1.76	—	10.21	10.83
ABC	1.38	2.37	2.13	10.29	11.57	11.93

注:—为该相无故障

5　结 论

基于交直流互联电网中逆变侧交流输电线路故障特征与纯交流系统的明显差异,传统交流输电线路的保护方案已经无法保证继电保护的安全性和可靠性.本文在分析区内、外故障首行波差异性的基础上,提出了一种基于首行波曲率半径的交直流互联电网逆变侧交流输电线路单端量保护方案,并得出如下结论:

1)行波信号在输电线路中传播时,色散效应对行波信号有较大影响,过渡电阻的大小影响行波信号的幅值,因此,故障距离、过渡电阻对首行波曲率半径的大小有一定影响.

2)本文利用小波模极大值法标定首行波到达时刻,能精确提取首行波,保证了数据的完整性,避免了反行波对保护方案的影响.

3)仿真结果表明本文所提保护方案动作速度快,可靠性高,耐受过渡电阻,抗噪声干扰能力强.

参考文献

[1] 林晓婉,代锋,刘沈全,等. 含LCC-HVDC的交直流混联电网统一谐波状态估计方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(13):94-103.
LIN X W, DAI F, LIU S Q, et al. Unified harmonic state estimation method for AC/DC hybrid power grid with LCC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (13): 94-103.(in Chinese)

[2] 高淑萍, 沈渠旺, 宋国兵. 一种适用于混合三端直流系统的纵联保护方案[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(4):125-135.
GAO S P,SHEN Q W,SONG G B. A pilot protection scheme for hybrid three-terminal DC systems [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50 (4): 125-135.(in Chinese)

[3] 侯俊杰, 宋国兵, 徐瑞东, 等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(14):176-187.
HOU J J,SONG G B,XU R D,et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 176-187.(in Chinese)

[4] 汤涌, 郭强,周勤勇,等. 特高压同步电网安全性论证[J]. 电网技术,2016,40(1): 97-104.
TANG Y,GUO Q,ZHOU Q Y,et al. Security evaluation for UHV synchronized power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):97-104.(in Chinese)

[5] CHEN G, HAO M, XU Z Q, et al. Review of high voltage direct current cables[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015,1(2):9-21.

[6] ZHANG Y, TAI N L, XU B. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(3):1583-1591.

[7] 李兆伟,翟海保,刘福锁,等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(8):142-148.
LI Z W,ZHAI H B,LIU F S,et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control,2016,44(8):142-148.(in Chinese)

[8] YAO Z Q,ZHANG Q,CHEN P,et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems,2016,1(1):1-7.

[9] 齐国强,王增平. 基于Hilbert-Huang变换的HVDC突变量方向纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(20):92-99.
QI G Q, WANG Z P. Directional pilot protection method of fault component for HVDC transmission lines based on Hilbert-Huang transform [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20):92-99.(in Chinese)

[10] 王栋, 高厚磊, 李文琳, 等. 方向纵联保护对LCC-HVDC逆变侧交流线路的适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 33-40.
WANG D, GAO H L, LI W L, et al. Adaptability analysis of directional pilot protection for AC transmission lines connected to LCC-HVDC inverter station[J]. Power System Protection and Control,2018,46(18):33-40.(in Chinese)

[11] ZHENG J C, WEN M H, CHEN Y, et al. A novel differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 94: 171-178.

[12] 郑涛,马家璇,吕文轩,等. 基于暂态负序电流积聚量比值的海上风电交流汇集线路保护[J]. 电力系统自动化,2023,47(12):137-144.
ZHENG T, MA J X, LÜ W X, et al. Protection for AC collection line of offshore wind power based on ratio of transient negative-sequence current accumulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(12):137-144.(in Chinese)

[13] 崔笑菲. 交直流互联电网中交流保护优化研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
CUI X F. Research on improvement of AC line protection in AC-DC compound power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University,2019.(in Chinese)

[14] 王栋. 基于电子式互感器的交直流互联电网行波保护研究[D]. 济南:山东大学,2018.
WANG D. Studies on travelling wave protection for AC/DC hybrid transmission system based on electronic transformers[D]. Jinan:Shandong University,2018.(in Chinese)

[15] 申洪明,黄少锋,费彬. 交直流互联系统对距离保护动作特性的影响分析及对策[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):58-63.
SHEN H M, HUANG S F, FEI B. Effect analysis of AC/DC interconnected network on distance protection performance and countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(11):58-63.(in Chinese)

[16] 费彬,黄少锋,申洪明. 交直流互联系统对距离保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):15-21.
FEI B, HUANG S F, SHEN H M. Impact of AC-DC interconnected system on distance protection and countermeasure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 15-21.(in Chinese)

[17] 刘俊磊. 交直流系统故障相互作用分析计算模型及其应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2013:68-69.
LIU J L. Study on fault interaction analysis and calculation model of AC/DC system and its application[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2013:68-69.(in Chinese)

[18] 刘俊磊,王钢,李海锋,等. HVDC系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):111-118.
LIU J L, WANG G, LI H F, et al. Mechanism analysis of HVDC commutation failure influence on AC power network relay protection[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(19):111-118.(in Chinese)

[19] 李振兴,叶诗韵,谭洪,等. 交直流混联系统对交流电网继电保护影响综述[J]. 电网与清洁能源,2017,33(12):41-47.
LI Z X,YE S Y,TAN H,et al. An overview of influences of AC-DC hybrid system on AC grid protection[J]. Power System and Clean Energy,2017,33(12): 41-47.(in Chinese)

[20] 刘可真,梁松涛,束洪春,等. 过渡电阻对特高压交直流混联电网暂态功率倒向的影响分析[J]. 高电压技术,2015,41(4):1257-1261.
LIU K Z, LIANG S T, SHU H C, et al. Influence of transition resistance on transient power converse in UHV AC/DC hybrid power system[J]. High Voltage Engineering,2015,41(4):1257-1261.(in Chinese)

[21] 朱岸明,王森,胡攀峰,等. 德宝直流输电对750 kV宝鸡主变压器运行影响研究[J]. 电网与清洁能源,2010,26(12):67-70.
ZHU A M, WANG S, HU P F, et al. Influences of the Deyang Baoji DC transmission line on the 750 kV power transformer in baoji power substation[J]. Power System and Clean Energy, 2010,26(12):67-70.(in Chinese)

[22] 梁远升,黄泽杰,李海锋,等. 基于行波相位特性的三端混合直流线路行波保护原理[J]. 中国电机工程学报,2021,41(13):4525-4543.
LIANG Y S, HUANG Z J, LI H F, et al. Phase characteristics based travelling wave protection for transmission line of three-terminal hybrid HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(13):4525-4543.(in Chinese)

[23] 戴志辉,刘自强,刘雪燕,等. 基于首行波曲率的柔性直流输电线路单端量保护[J]. 电工技术学报,2021,36(9):1831-1841.
DAI Z H, LIU Z Q, LIU X Y, et al. Single-ended protection for flexible DC transmission line based on curvature of initial traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(9):1831-1841.(in Chinese)

[24] 张晨浩,宋国兵,李洋,等. 基于故障电压行波传播项指数系数的柔性直流输电线路单端行波保护原理[J]. 中国电机工程学报,2021,41(24):8424-8437.
ZHANG C H, SONG G B, LI Y, et al. Principle of non-unit traveling wave protection for VSC-HVDC grids based on index of fault voltage traveling wave propagation term[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(24):8424-8437.(in Chinese)

[25] 余越,王聪博,沙兆义,等. 基于矩阵突变特征的风电经柔直送出交流线路保护[J]. 中国电机工程学报,2023,43(14):5441-5450.
YU Y, WANG C B, SHA Z Y, et al. AC transmission line protection for wind farms integrated with VSC-HVDC system based on matrix mutation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(14):5441-5450.(in Chinese)

[26] 刘乃皓, 高厚磊, 徐彬, 等. 基于电流变化量相似性的海上风电场交流送出线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9):65-75.
LIU N H, GAO H L, XU B, et al. Pilot protection for an AC transmission line of an offshore wind farm based on similarity of current variation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 65-75.(in Chinese)