

张北柔直电网金属回线故障监测研究

陈玉林, 张建锋, 虞晓阳, 张杰, 朱红星
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: ±500 kV 张北柔直电网金属回线正常时无压, 有单回、双回同杆并架 2 种线路形式, 在单、双回线连接处波阻抗存在不连续问题, 常规方法难以满足金属回线故障监测的需求。文中分析了张北柔直电网金属回线的波阻抗及行波折反射特点, 提出了基于差模时域反射法的故障监测系统方案和波形比较分析方法, 通过施加差模量脉冲信号实现故障监测, 通过波形比较法消除线路波阻抗不连续引起的行波反射, 并凸显故障点特征。仿真和现场试验表明, 该系统及方法能适应张北柔直电网金属回线的工况, 可以克服线路波阻抗不连续的问题, 故障监测具有较高的可靠性和灵敏度, 测距精度优于 300 m。

关键词: 柔直电网; 金属回线; 故障监测; 行波测距; 时域反射; 波形比较

中图分类号: TM835.4; TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)04-0056-06

0 引言

为促进清洁能源的高效利用和灵活消纳, 国家电网公司规划建设张北 ± 500 kV 柔性直流电网^[1-6]。张北柔直电网采用与极导线同杆架设的金属回线作为中性点回流线, 直流电网正常运行时, 金属回线无流无压, 不易进行故障监测, 但金属回线故障会对直流系统的安全稳定运行造成很大的隐患^[7]。目前学界对常规直流接地极线路的故障监测已有一些研究, 但尚未到达故障测距实用化的水平, 对金属回线故障监测的研究则属于空白。文献[8]介绍了注入高频信号实现阻抗监视的故障监视装置; 文献[9]介绍了利用不平衡运行工况下的故障谐波特征快速识别接地极线路故障的方法; 文献[10-11]提出了一种在不平衡工况下基于录波数据计算直流电压分布曲线实现故障判别的方法; 文献[12]提出了一种利用接地极线路故障自身产生的浪涌进行单端行波测距的方法; 文献[13-15]提出一种注入共模行波信号进行测距的时域反射法, 可以弥补在双极平衡情况下前述方法无法测距的不足, 但难以克服共模信号衰减大、波速不稳定、容易受换流站强信号干扰的问题。张北柔直电网金属回线存在与极导线同杆并架的特点, 且单、双回同杆并架线路连接存在波阻抗不连续的问题, 因此以上针对接地极线路的相关方法难以适应张北柔直金属回线故障监测的需求。

文中分析了张北柔直电网金属回线的物理结

构和电气特性, 计算了金属回线在单、双回线连接点的行波折反射系数。针对金属回线平时无压的工况, 对比分析了各种信号注入方法的优缺点, 提出基于差模行波信号的时域反射法进行金属回线故障监测, 并给出了故障监测系统的总体构架, 提出了计算故障波形与参考波形差异的波形比较方法, 以消除线路波阻抗不连续的影响。根据张北柔直电网输电线路参数进行了软件仿真验证, 并在实际接地极线路上进行了实际故障和人工短路点测距试验。

1 张北柔直电网金属回线的特点

1.1 张北柔直电网金属回线的物理结构

±500 kV 张北可再生能源柔性直流电网示范近期工程包括 3 个送端站(康保、张北、丰宁)和 1 个受端站(北京)。4 个柔性直流换流站通过架空输电线路及金属回流线路构成了四端环形柔性直流电网。张北柔直电网拓扑结构如图 1 所示。

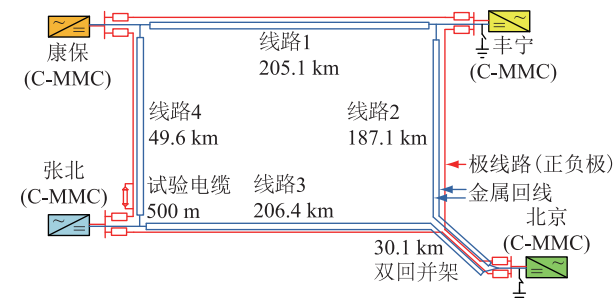


图 1 张北柔直电网拓扑结构

Fig.1 Topology of Zhangbei VSC-HVDC grid

张北柔直电网输电线路采用架空线方式, 直流极导线与中性点金属回线同杆并架。电网的主要线路形式为单回线同杆并架, 在北京站附近有 30.1

km 的双回同杆并架线路。典型单回线、双回线的线路杆塔如图 2 所示。

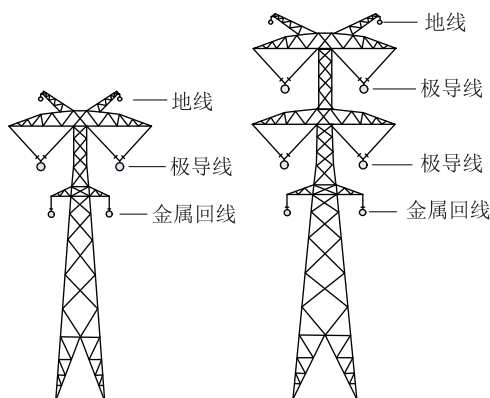


图 2 张北柔直电网的两种典型杆塔

Fig.2 Typical towers of Zhangbei VSC-HVDC grid

单回同塔时,金属回线水平距离为 9 m;双回同塔时,杆塔每侧为一回金属回线,其内部水平距离为 5 m,塔两侧的金属回线相距 10.4 m。

由于金属回线与极导线同杆并架,且单回线、双回线的金属导体数量、间距不同,因此单回、双回线路的金属回线的电气参数存在差异,需考虑电气参数差异对故障监测的影响。

1.2 张北柔直电网金属回线的电气特性

由极导线、金属回线、地线组成的同杆并架线路属于多导体系统,通常消去地线以减少导体数量。超高压线路的地线通常采用分段绝缘、一点接地的方式^[16],采用地线消去后,多导体的阻抗、导纳矩阵中将不包含地线的参数。对多导体系统进行电气参数分析,通常需进行相模变换,得到模量域的阻抗、导纳矩阵以及波阻抗、波速等参数。

张北柔直电网输电线路的极导线、金属回线的物理尺寸及空间布置并非完全对称,因此其多导体的相量域参数矩阵是非平衡矩阵,难以采用典型的相模变换矩阵实现解耦,而需要采用计算方法得到模量域的参数。行波测距类方法重点关注模量域的波阻抗参数和波速参数,且通常使用波速恒定、衰减较小的线模量信号进行故障监测^[17]。根据张北柔直电网典型单回、双回杆塔的参数进行了软件仿真计算,得到典型杆塔的金属回线线模量电气参数如表 1 所示。

表 1 典型杆塔的金属回线传输参数

Table 1 Transmission characteristics of typical metallic return line

项目	单回线杆塔	双回线杆塔
线模波阻抗/ Ω	262.74	243.42
线模波速/($m \cdot \mu s^{-1}$)	299.76	299.76

从表 1 可以看出,2 种杆塔方式下,金属回线的线模量波阻抗存在约 20 Ω 的差异。该波阻抗差异会导致行波在波阻抗不连续点的折射和反射。假设行波从单回线(Z_1)传入双回线(Z_2),理论推算和仿真验证得到的行波折反射结果见表 2。

表 2 波阻抗不连续点的行波折反射系数

Table 2 Refraction and reflection coefficients of traveling wave due to impedance discontinuity

项目	电压折射系数 α	电压反射系数 β
计算公式	$2Z_2/(Z_1 + Z_2)$	$(Z_2 - Z_1)/(Z_1 + Z_2)$
理论结果	0.961 8	-0.038 2
仿真结果	0.954 2	-0.045 8

从表 2 可以看出,单、双回线连接点由于波阻抗不连续而存在着明显的行波折反射。对于这种固有的参数不连续线路,若采用传统的时域反射法(TDR)进行故障检测,容易受到此行波折反射的影响。因此,需要研究能适应张北柔直电网金属回线特性的故障监测系统及方法。

2 金属回线故障监测系统及方法

2.1 金属回线故障监测方法选择

当直流系统双极平衡正常运行时,金属回线上几乎不流过电流,因此其电位非常低。此时若金属回线发生开路或短路故障,只能采用施加激励信号的方法进行故障检测。

施加低频稳态信号时(约 3 kHz 以内),可利用阻抗法进行故障检测和测距,但低频信号的施加较为困难,低频阻波器不易实现,且容易被工频及谐波强信号干扰。因此,该方法不适合工程应用。

施加中频稳态信号时(10~500 kHz),阻波器容易实现,且在载波通信领域有成熟的工程应用。基于中频信号的阻抗监视法可以监视线路是否存在故障^[18],但由于线路的分布参数效应,感受阻抗与故障点位置呈现非线性关系,因此无法实现故障测距。

施加行波脉冲信号时(约 5 MHz 以内),可对线路的开路、短路故障进行探测和定位,是最为适合的金属回线故障监测方法。行波法可基于线模量行波或地模量行波,由于线模量行波传输特性优于地模量(波速稳定,衰减小,受干扰小),因此文中采用线模行波方式进行张北柔直电网金属回线故障监测。线模行波也可称为差模行波,地模行波也可称为共模行波。差模行波法需要在金属回线的 2 根导体之间注入行波脉冲信号,并检测该行波在故障点的反射波形。

2.2 金属回线故障监测系统总体构架

基于差模行波法的金属回线故障监测系统结构如图3所示,故障监测系统主要由故障监测主机、结合滤波器、高压电容器、高压电抗器、屏蔽电缆组成。结合滤波器 and 高压电容(C_1, C_2)实现直流高压隔离和脉冲信号耦合,并实现阻抗匹配功能。高压电抗器(L_1, L_2)的作用是流过直流电流,阻绝高频脉冲信号。故障监测主机周期性地发出电压脉冲信号,通过高压电容 C_1, C_2 向接地极线路注入差模脉冲,并采集从接地极线路返回的脉冲。故障监测主机记录、分析发射脉冲和金属回线的反射脉冲,给出故障告警和故障测距结果。

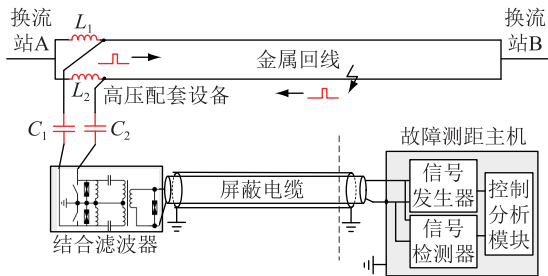


图3 金属回线故障监测系统结构

Fig.3 Structure of fault monitoring system for metallic return line

2.3 基于波形比较法的金属回线故障监测算法

设在 t_0 时刻故障监测系统向金属回线注入激励脉冲,该行波信号在故障点产生反射并在 t_1 时刻到达线路首端,时间差为 Δt ,设行波波速为 v ,则基于单端行波测距算法可计算故障点位置 x :

$$x = 0.5\Delta tv \quad (1)$$

由于采用线模量行波, v 较为恒定,且非常接近光速。 v 可设置为仿真值(例如:299.7 m/ μ s),或者根据线路末端反射脉冲进行实测。

实际的线路由于沿线地理条件和架设方式的变化,通常难以避免地存在波阻抗不连续的问题。张北柔直电网存在单、双回线连接导致的波阻抗不连续问题,导致行波在波阻抗不连续点产生反射行波,对传统的单端行波测距方法产生不利影响。为适应金属回线的波阻抗不连续问题,同时能适应随着季节、气候变化而发生的金属回线参数缓变问题^[19-20],文中采用波形比较法实现故障监测和测距。

波形比较法基本工作流程为:(1)当线路正常时,保存脉冲波形为参考波形;(2)运行过程中,比较当前波形与参考波形的差异;(3)如果差异小于阈值 Q_1 ,则认为是参数缓变,更新参考波形;(4)若差异大于 Q_2 ,则认为发生了故障,并通过波形差异

点位置进行故障测距。

当前波形与参考波形的差异定义如下:

$$D_{xy} = 1 - P_{xy} \quad (2)$$

式中: P_{xy} 为脉冲波形 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的相似度系数,计算公式为:

$$P_{xy} = K_{xy} / \sqrt{K_{xx}K_{yy}} \quad (3)$$

式中: K_{xy} 为互相关系数; K_{xx} 与 K_{yy} 为自相关系数,计算公式分别如下:

$$\begin{cases} K_{xy} = \sum_{k=1}^N x(k)y(k) \\ K_{xx} = \sum_{k=1}^N x(k)x(k) \\ K_{yy} = \sum_{k=1}^N y(k)y(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x(k), y(k)$ 分别为脉冲波形 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的采样点; N 为波形总采样点数。

波形差异阈值与线路长度、线路不均匀程度、信噪比等因素有关,通常根据具体工程的波形数据确定。对于一般线路, Q_1 取值通常小于2%, Q_2 取值通常大于3%。当线路发生故障时,故障波形与参考波形之间会产生明显的差异,波形分歧点时刻对应于故障位置。波形比较法见图4。

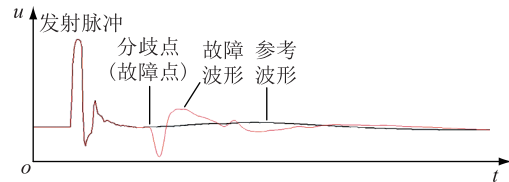


图4 波形比较法

Fig.4 Schematic diagram of waveform comparison

定义故障波形与参考波形的波形差曲线 $z(k)$:

$$z(k) = x(k) - y(k) \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

波形差曲线 $z(k)$ 消除了线路固有波阻抗不连续导致的波形波动,凸显了故障点引起的波形变化。对波形差曲线进行小波分析等数学分析方法,即可确定故障点对应的时刻。计算该时刻与脉冲发出时刻的时间差 Δt ,并根据式(1)即可实现故障测距。

3 仿真与试验

3.1 仿真试验

采用仿真软件对张北柔直的典型线路进行仿真。仿真线路全长200 km,其中单回同杆并架线路长170 km,双回同杆并架线路长30 km,仿真步长为0.02 μ s。对各种典型故障进行了仿真和测距计算,测距结果见表3。

表3 典型故障的仿真测距结果
Table 3 Location results of typical faults

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	测距结果/km	测距误差/km
5	1	5.006	0.006
5	300	5.006	0.006
100	1	99.999	-0.001
100	300	99.999	-0.001
150	1	149.999	-0.001
150	300	149.999	-0.001
195	1	194.994	-0.006
195	300	194.994	-0.006

表3中,测距波速固定取 $299.76\text{ m}/\mu\text{s}$,代表中等长度线路的等效波速,因此表3中线路中间测距误差小,线路两端测距误差稍大。在线路150 km处的故障仿真波形如图5所示,从图中可以清晰地看到故障点反射波形和单、双回线连接点的反射波形。

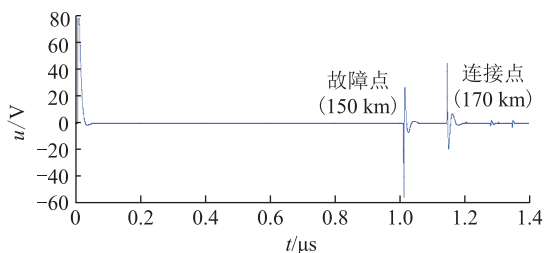


图5 线路150 km处故障波形

Fig.5 Fault waveform with the fault distance of 150 km

当故障点在连接点之后时(例如在195 km处),常规方法会将连接点的反射行波误判为故障行波,从而得到错误的测距结果。文中通过波形比较法,单、双回线连接点的反射波会被消去,只剩下故障点的反射波形,从而可精确定位真实故障点。

需要说明的是,以上仿真并未考虑实际监测系统的采样噪声,也未考虑同杆并架极导线的电气噪声影响^[21-23],因此其理论测距精度非常高,在实际应用中的测距精度会有所降低。

3.2 现场实验

为验证本系统和算法的实际性能,开发了原型机。由于张北柔直电网尚在建设中,因此只能在目前已有的直流工程的接地极线路上进行测试验证,使用原型机分别在 $\pm 800\text{ kV}$ 湖南韶山换流站和 $\pm 800\text{ kV}$ 山东沂南换流站的直流接地极线路上进行了现场试验。

$\pm 800\text{ kV}$ 湖南韶山换流站接地极线路全长为137.5 km。线路投运前发现存在未知故障点,经过人工巡线未找到故障点。采用原型样机对该线路进行检测,发现在54.5 km处存在明显的脉冲反射点,在该处再次进行人工巡线,发现在54.6 km处存

在线路施工捆绑物未拆除导致的故障点。对于此次实际故障,装置测距误差为100 m。

在 $\pm 800\text{ kV}$ 山东沂南换流站接地极线路全长84.741 km。在线路首、中、尾进行了人工短路试验,其中包括直流换流站带电测试和不带电测试2种工况。在各短路点分别进行了 $1\ \Omega$, $20\ \Omega$, $100\ \Omega$, $200\ \Omega$ 的故障电阻试验。故障电阻 $200\ \Omega$ 时,各测点的现场测距结果如表4所示。

表4 沂南换流站接地极线路人工短路测距结果

Table 4 Location results of manual faults on the electrode line of Yinan HVDC station

故障位置/km	测距结果/km	测距误差/m	换流站工况
6.556	6.655	99	系统不带电
41.375	41.461	86	系统带电
43.030	43.154	124	系统不带电
81.938	82.106	168	系统不带电

在线路中段的系统带电、不带电测试对比测试表明,直流站是否带电运行并不影响本系统的故障监测效果。在 $1\sim 200\ \Omega$ 故障电阻范围内,人工短路试验的测距误差均在200 m范围内。其中,在故障位置43.03 km处 $1\ \Omega$ 短路电阻的录波波形见图6。

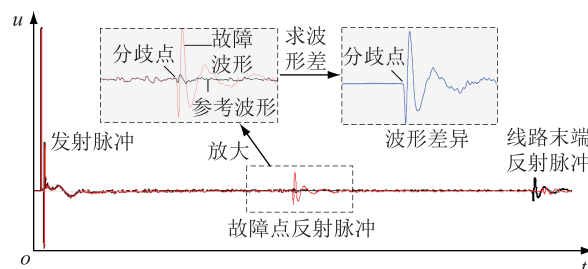


图6 沂南换流站接地极线路故障波形

Fig.6 Fault wave of Yinan HVDC electrode line

图6中,当前波形与参考波形的分歧点对应于故障点。对局部波形放大可以看出,故障点前的波形存在着小幅度的波动,这是由于线路参数固有的不均匀导致的。计算故障波形与参考波形的波形差后,这些波动被完全消除。可见,波形比较法可以凸显故障点引起的波形变化,可以很好地适应线路固有的参数不连续问题,因此也可以解决张北柔直电网金属回线的波阻抗不连续的问题。

需要说明的是,虽然金属回线与接地极线路在波阻抗不连续方面存在相似性(程度不同),但两者所处的电磁环境存在明显差异。金属回线与极导线同杆共架,因此可能会受到极导线强电磁场的影响,脉冲波形的信噪比可能会所有降低。后续还需对同杆共架导致的电气干扰问题展开研究,并待张北柔直电网输电线路建设完成后进行实际试验。

4 结语

文中分析了张北柔直电网金属回线故障监测的特点和难点,提出了基于差模脉冲时域反射法和波形比较法的故障监测方法,并进行了软件仿真和现场验证。分析表明,差模脉冲时域反射法可以适应金属回线正常无压的工况;单回、双回金属回线的结构差异会导致在波阻抗不连续点存在明显的行波反射,波形比较法消除线路固有参数不连续引起的行波反射,并突显故障点特征。采用本方法,200 km 金属回线的软件仿真测距精度优于 100 m,实际线路的故障测距精度优于 300 m(张北金属回线尚未建成,此处为现有接地极线路的故障测距结果)。本方法适用于金属回线正常无压和波阻抗不连续的情况,测距精度可以满足工程应用需求,预期可用于张北柔直电网金属回线的故障监测。针对极导线与金属回线同杆并架可能引起的电气干扰问题,后续需展开深入研究和现场测试。

参考文献:

- [1] 郭贤珊,周杨,梅念,等.张北柔直电网的构建与特性分析[J].电网技术,2018,42(11):3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [2] 姚良忠,吴婧,王志冰,等.未来高压直流电网发展形态分析[J].中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [3] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(15): 3-14.
- [4] 温家良,吴锐,彭畅,等.直流电网在中国的应用前景分析[J].中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [5] 徐政,薛英林,张哲任.大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [6] 李欣民.清洁能源发电技术及市场现状研究[J].电力需求侧管理,2017,19(6):29-32.
LI Xinmin. Research on clean energy power generation technology and market status [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 29-32.
- [7] 杨光,朱韬析,魏丽君,等.直流输电系统接地极线路故障研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(21):45-49.
YANG Guang, ZHU Taoksi, WEI Lijun, et al. Research on the faults of electrode line of HVDC transmission system in monopolar ground return operation [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 45-49.
- [8] 农绍培.接地极线路阻抗监视装置在天广直流输电工程中的应用[J].广西电力,2010,33(5):58-60.
NONG Shaopei. Application of impedance monitoring equipment of ground electrode line in Tian-Guang direct current transmission project [J]. Guangxi Electric Power, 2010, 33(5): 58-60.
- [9] 束洪春,田鑫萃,张悱宁.接地极线路短路故障快速识别及故障测距研究[J].电网技术,2015,5(2):3584-3591.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Yining. Research on short-circuit fault identification and fault location algorithm for HVDC electrode Line [J]. Power System Technology, 2015, 5(2): 3584-3591.
- [10] 张悱宁,束洪春,田鑫萃,等.特高压直流输电线路接地极线路高阻故障测距方法研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(24):1-7.
ZHANG Yining, SHU Hongchun, TIAN Xincui, et al. Research on fault location algorithm for HVDC electrode line high impedance fault [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 1-7.
- [11] 李松浓,胡晓锐,郑可,等.低压电力线载波通信信道衰减特性测量与分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(4):99-106.
LI Songnong, HU Xiaorui, ZHENG Ke, et al. Measurement and analysis of channel attenuation characteristics of low voltage power line carrier communication [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 99-106.
- [12] 张悱宁,王彩芝,李京,等.直流接地极线路单端行波故障测距算法[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(4):91-95.
ZHANG Yining, WANG Caizhi, LI Jing, et al. Algorithm of fault location by single ended traveling wave on HVDC grounding electrode line [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28(4): 91-95.
- [13] 钟小垒,李京.基于行波耦合原理的高压直流输电系统接地极引线故障测距[J].山东理工大学学报:自然科学版,2012,26(3):55-59.
ZHONG Xiaolei, LI Jing. Fault location of grounded electrode lead in HVDC system based on the principle of coupled traveling waves [J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 26(3): 55-59.
- [14] 翟海保,李兆伟,黄慧,等.特高压直流分层接入电网的落点选择研究[J].电力工程技术,2018,37(1):65-71.
ZHAI Haibao, LI Zhaowei, HUANG Hui, et al. Terminal location selection study for uhvdc hierarchical connection to power grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 65-71.

- 2018, 37(1): 65-71.
- [15] 张怿宁, 郝洪民, 李京, 等. 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 117-122.
ZHANG Yining, HAO Hongmin, LI Jing, et al. Fault location of HVDC grounding electrode lines based on combination of pulse injection method and single-ended fault travelling wave method [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 117-122.
- [16] 马焯, 龚坚刚, 郭洁, 等. 500 kV 架空地线不同接地方式感应电量的比较[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 176-180.
MA Ye, GONG Jiangang, GUO Jie, et al. Comparison of induced charges with different grounding methods of 500 kV ground wires [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 176-180.
- [17] 陈玉林. 高压电缆电磁暂态计算及在线行波测距研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
CHEN Yulin. Electromagnetic transient calculation and online traveling wave fault location for HV cables [D]. Wuhan: Wuhan University, 2007.
- [18] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
WU Weihang, ZHANG Fangliu. Power system overvoltage numerical calculation [M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [19] 车仁飞, 梁军, 孟昭勇. 一种考虑线路参数变化的输电线路双端测距算法[J]. 中国电力, 2004(2): 49-53.
CHE Renfei, LIANG Jun, MENG Zhaoyong. A fault location algorithm for two terminal lines considering the variation of line parameter [J]. Electric Power, 2004(2): 49-53.
- [20] 李澄, 鲍有理, 黄瑜, 等. 不受线路参数变化影响的故障测距原理研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(5): 67-70.
LI Cheng, BAO Youli, HUANG Yu. Research on fault location unaffected by parameters for transmission lines [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2016, 35(5): 67-70.
- [21] 谢莉, 赵录兴, 陆家榆, 等. 有限长高压直流输电线路无线电干扰电磁场的计算方法研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 96-102.
XIE Li, ZHAO Luxing, LU Jiayu, et al. Method of radio interference electromagnetic field of short HVDC transmission line [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 96-102.
- [22] 李岩, 龚雁峰, 姜斌. 一种基于方向行波的多端 VSC-HVDC 系统保护策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 70-73, 83.
LI Yan, GONG Yanfeng, JIANG Bin. A protection scheme for multiterminal VSC-HVDC system based on direction traveling waves [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 70-73, 83.
- [23] 刘阳, 崔翔, 卢铁兵. 高压直流导线单点电晕无线电干扰的瞬态计算方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 2972-2979.
LIU Yang, CUI Xiang, LU Tiebing. Transient method for calculating radio interference due to single-point corona on HVDC lines [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2972-2979.

作者简介:



陈玉林

陈玉林(1980),男,博士,高级工程师,从事广域同步相量测量和输电线路故障测距技术研究工作(E-mail: chenyl@mrec.com);

张建锋(1977),男,硕士,高级工程师,从事直流保护控制研究工作;

虞晓阳(1989),男,硕士,工程师,从事电力电子应用研究工作。

Fault monitoring research of the metallic return line in Zhangbei VSC-HVDC grid

CHEN Yulin, ZHANG Jianfeng, YU Xiaoyang, ZHANG Jie, ZHU Hongxing
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: The metallic return lines of ± 500 kV Zhangbei VSC-HVDC grid have no voltage during normal situation, and there are two kinds of line forms, including single-loop line and double-loop line. At the connection point of single-loop line and double-loop lines, the wave impedance is discontinuous, thus traditional methods are not suitable for the fault monitoring of the metallic return lines. The wave impedance and traveling wave characteristics are analyzed, and a fault monitoring system and waveform comparison analysis method are presented, which are based on differential mode Time Domain Reflection (TDR) method. The system applies differential mode pulse to monitor the fault, and uses waveform comparison method to eliminate the wave reflection caused by inherent impedance discontinuity of the line and highlight the fault characteristics. The simulation and field tests show that the system and method can adapt to the operating condition and wave impedance discontinuity of the metallic return lines of Zhangbei VSC-HVDC grid. The method has high reliability and sensitivity for fault monitoring, and the location accuracy is better than 300 m.

Keywords: VSC-HVDC grid; metallic return line; fault monitoring; traveling wave fault location; time domain reflection (TDR); waveform comparison

(编辑 钱悦)