

张北柔性直流输电工程接地系统监测技术研究

黄宇¹, 吴金波², 唐世雄¹, 陈香香², 朱生辉²

(1. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610041;

2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要:文中介绍了张北柔性直流输电工程主回路结构、运行方式、接地极及其作用并阐明了作为接地极的接地电阻的重要性。针对接地极可能出现的故障,研究分析了可以采取的实时监测方法;比较了电压电流法和注入法的差异,并说明张北柔性直流工程采用注入法的原因和优势;分析了注入信号频率的选择依据,并根据张北柔性直流工程的系统特性、参数,选配满足注入法原理对应的一次设备以及监测回路结构组成。通过理论分析与系统仿真试验,验证了有无阻波器对主系统的影响;最后,确定了张北柔性直流输电工程接地极在线监测的技术方案。

关键词:柔性直流; 接地电阻; 注入法; 分布参数; 阻波器

中图分类号: TM 721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)03-0058-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230310

Study on Monitoring Technology of Grounding System in Zhangbei Flexible DC Transmission Project

HUANG Yu¹, WU Jinbo², TANG Shixiong¹, CHEN Xiangxiang², ZHU Shenghui²

(1. State Grid Sichuan Electrical Power UHVDC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China)

Abstract: The main circuit structure, operation mode, grounding electrode and its function of Zhangbei flexible DC transmission project are introduced, and the importance of grounding resistance as grounding electrode is described. Aiming at the possible faults of grounding electrode, the adopted real-time monitoring methods are studied and analyzed. The differences between voltage and current method and injection method are compared, and the reasons and advantages using injection method for Zhangbei flexible DC project are also explained. The selection basis of injection signal frequency is analyzed. According to the system characteristics and parameters of Zhangbei flexible DC project, the primary equipment and the structure of monitoring circuit are selected to meet the injection principle. Through the theoretical analysis and system simulation test, the influence of wave trap coil or not on main system is verified. Finally, the technical scheme of on-line monitoring of grounding electrode in Zhangbei flexible DC project is determined.

Key words: flexible direct current; grounding resistance; injection method; distributed parameter; wave trap coil

0 引言

张北柔性直流电网工程(以下简称张北工程)是一个汇集和输送大规模风电、光伏、储能、抽水蓄能等多种形态能源的柔性直流电网,系统电压为 ± 500 kV,线路全长约 648 km。该工程是采用架空输电线路的世界首个具有网络特性的直流电网示范工程,是世界上电压等级最高、输送容量最大的柔性

直流工程,也是世界首个应用柔性直流技术进行陆地可再生能源大规模并网的示范工程。张北工程采用环形电网结构,具有以下优点:

- 1) 可靠性高,能够实现多电源供电或多落点供电;
- 2) 灵活性好,可以在送端直接实现可再生能源、抽水蓄能等储能与负荷间的灵活能量交互;
- 3) 扩展性好,再生能源接入可向承德、锡盟等风电、光伏发电基地延伸,同时消纳范围可进一步覆

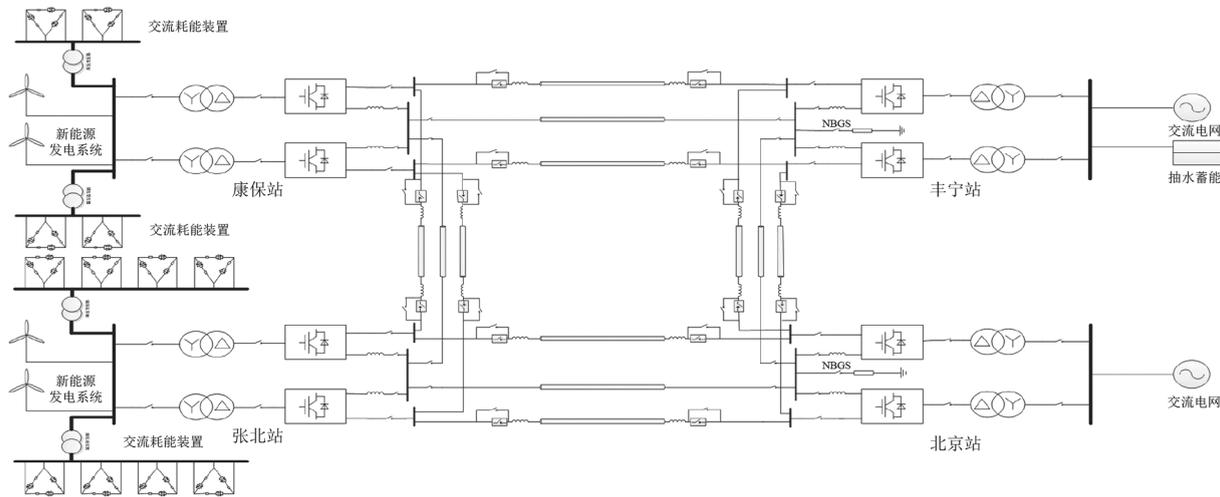


图1 张北工程主回路

盖至唐山、天津等负荷中心。

总之,张北工程能够为未来电网的风、光、储、抽水蓄能一体化运作、功率互补输送起到非常好的技术指导和示范作用^[1-4]。

文献[1]阐述了柔性直流输电工程常用的主电路拓扑结构、多端柔性直流输电系统的结构方式以及换流站系统接地方式等,接地极系统作为柔性直流输电系统的重要组成部分,其运行状态影响到直流系统。文献[2]阐述了柔性直流输电工程常用的控制方式和运行方式等。文献[3]主要介绍了常规直流工程接地极引线的监测方法。下面通过对比电压电流法和注入法两种现有监测手段的差异,综合考虑柔性直流输电系统特性和一次设备组成,最终确定张北工程接地极的最优监测方案。

1 接地电阻及接地系统的作用

张北工程主回路如图1所示。工程设有4个换流站:北京站、张北站、康保站以及丰宁站。常规运行方式为张北站、康保站作为送端输送功率,丰宁站和北京站作为受端接收功率;丰宁站作为调节换流站主要控制电压,使本站电压稳定在 ± 500 kV,其余3站分配协调功率。因张北工程输电线路穿越保护区、军事区,为防止入地电流对保护区、军事区设备产生干扰,所以无论采用何种运行方式,其回路构成均采用金属回线,无入地电流。

基于MMC技术的柔性直流输电系统控制的是极线间的电压,即 ± 500 kV是两极线对中性线的电压;但为了使正常运行时正负极线对称,需要保证中

性线的电位为0,因此需要在换流站合适的地方设置接地点。换流站常用的接地方式主要有通过直流电阻接地、通过联结变压器Y绕组经接地电阻接地和通过电抗器形成中性点经电阻接地3种方式^[4-5],张北工程选用经直流电阻直接接地。

如图1所示,丰宁站和北京站在NBGS开关之后,均有一个阻值为 15Ω 的接地电阻作为张北工程的接地极。常规运行时北京站NBGS闭合,为主接地点,丰宁站NBGS打开,为备用接地点。接地电阻的作用是在系统金属回线方式下,为柔性直流输电系统提供电压钳制点,作为零电位的参考基准^[6-8]。系统正常运行时,接地电阻只起到钳制电位的作用,无电流流过。当直流系统发生接地故障时,接地电阻串入故障回路,增大故障电阻,抑制故障电流,降低对直流回路中一次设备的冲击和危害。

2 接地系统监测方法选择

如果接地极丢失,直流输电系统失去电位参考基准。当直流电压波动,无论是采用下垂控制、偏差控制还是主从控制,势必影响控制系统的控制策略,直流系统将跟随电压波动而震荡,稳定性变差,影响电网运行安全。当接地点开路,一旦输电系统发生故障,将发生电位偏移,接地电阻无法起到抑制电压过冲作用,故障电压可能将对中性区域一次设备产生极大危害。如果在接地电阻之前发生接地故障,与接地电阻并联,这样就造成接地系统电阻极小,甚至可以忽略不计。在这种情况下,系统发生故障时接地极同样不能起到抑制故障的作用,还会对系统

运行产生重大危害^[9-10]。因此在张北工程中,对接地电阻进行实时监测十分必要。

由于张北工程是第一个完全金属回线系统,对于站内接地极并没有现成的监测方法。综合考虑监测需求、技术复杂度、设备成本、工程经验等因素,对张北工程接地电阻进行监测可以选用电流电压法、注入法。

2.1 电流电压法

在接地电阻和入地点之间增加 CT 和 PT,系统正常运行时,CT 和 PT 无电流电压。一旦直流系统发生接地故障,接地电阻串入故障回路,CT 与 PT 就有故障电流和对地电压。通过 CT 和 PT 有无电流、电压判断接地系统是否正常。如果采用电压电流法,就要考虑 CT 和 PT 的量程选择问题,选取多大的量程能够完全覆盖故障电流、电压。关于 CT 和 PT 的量程选择,根据张北工程主回路参数报告^[11],利用 PSCAD 软件进行建模仿真,在两个接地换流站做了 4 种类型的典型故障试验:故障类型 1,张北站阀侧交流相接地故障;故障类型 2,北京站阀侧交流相接地故障;故障类型 3,北京站上桥臂内电抗器与换流阀之间接地故障;故障类型 4,北京站下桥臂内电抗器与换流阀之间接地故障。

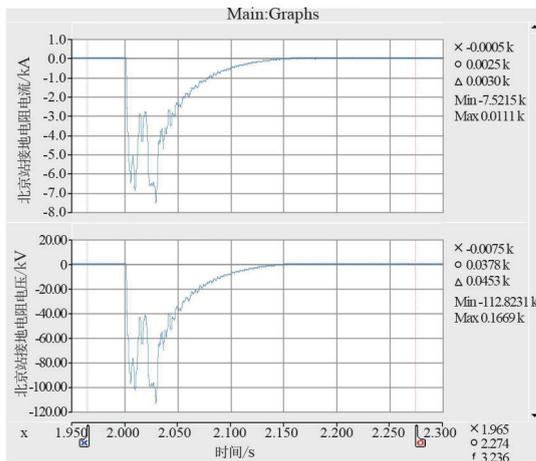


图 2 故障类型 1 电压电流波形

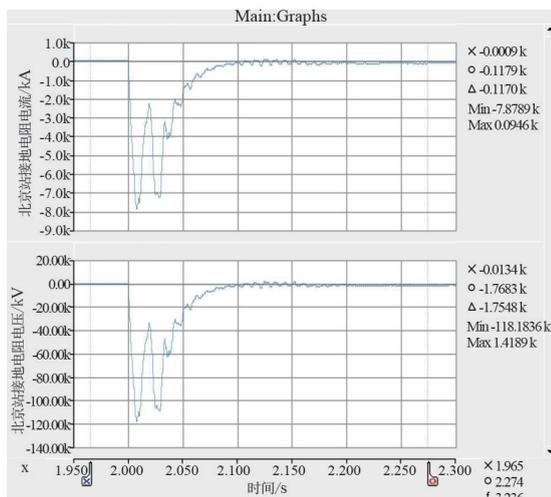


图 3 故障类型 2 电压电流波形

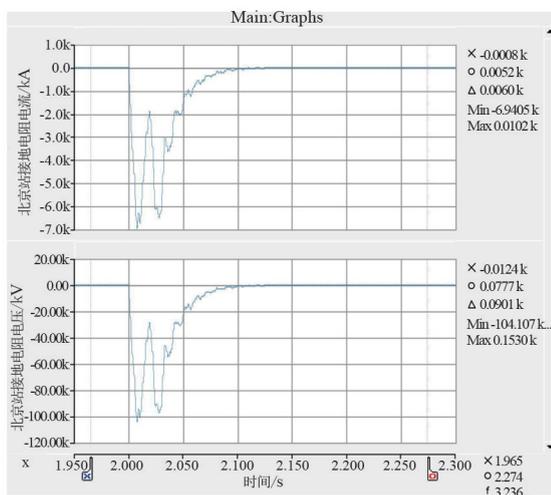


图 4 故障类型 3 电压电流波形

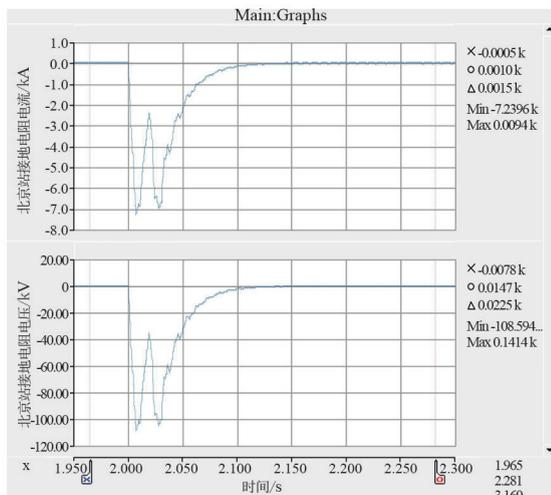


图 5 故障类型 4 电压电流波形

4 类故障的接地电阻承载的电流、电压数值如表 1 所示,波形分别如图 2—图 5 所示。

表 1 4 类故障的接地电阻电压电流值

换流站	故障类型	接地电阻 电流/kA	接地电阻 电压/kV
张北站	故障类型 1	7.52	112.8
	故障类型 2	7.87	118.2
北京站	故障类型 3	6.94	104.1
	故障类型 4	7.24	108.6

通过仿真试验可得,控制保护正常动作时,最严重故障类型为北京站阀侧单极接地故障(故障类型 2),对应接地电阻的最大耐受电压为 118.2 kV,电流为 7.87 kA。考虑到故障时刻交流电网相位角的影响

响,应在该仿真最大耐受电压的基础上保留裕量。可在此数据的基础上选择合适量程的 PT 和 CT 用以故障观测。

采用电流电压法只需在接地回路装设合适量程的 CT 和 PT 设备,甚至只装设 CT 或 PT 设备中的一种,将 CT、PT 监测值接入后台监测系统显示即可。此方法结构简单、成本较低,但有两个不可回避的缺点:1)不能实时监测接地电阻的运行状况,只有当系统发生故障时监测系统才有数值显示;2)更为严重的是,当对称双极运行状态下接地点开路时中性母线电压波动不明显,无法直接判断开路故障。

2.2 高频注入法

高频注入法是在接地系统中注入一个持续的恒定大小的高频电流信号,根据此注入信号的返回电流、电压数值,利用欧姆定律可以计算出接地电阻的大小来判断接地系统运行状况。接地系统正常时,监测电流和电压基本恒定,计算出的接地电阻维持在 $15\ \Omega$ 左右。当接地电阻故障时,计算出的电阻值将随着故障情况围绕 $15\ \Omega$ 波动变化,若接地极出现接地或开路的极端工况,电阻值会相应趋于 0 或无穷大。

采用高频注入法监测系统可以实时显示接地电阻的阻值,通过阻值有效判断接地系统正常运行及短路、开路故障,有利于运行人员监盘。但此方法也有弊端:为了使注入电流不影响主系统设备及直流电网,需要在监测回路上架设注入滤波器和阻波器。所以注入法需要增加较多的一次设备,成本较高。

3 接地电阻监测系统与一次系统配合

3.1 监测系统的参数

常规高压直流输电工程接地极引线长度基本在 $60\sim 100\ \text{km}$ 。长距离的输电线路,单位线长上的分布电感、分布电容、分布电阻和分布电导不能忽略,应等效为分布参数模型进行分析,所以监测装置注入信号在回路上传输要考虑阻抗匹配^[12-14]。这就需要考虑交流信号的频率选择和注入滤波器、阻波器的参数匹配。注入电流频率的选择,有以下原则:1)避开直流系统特征谐波;2)频率越高越好;3)考虑测量回路采集步长以及一次设备尺寸。综合考虑上述 3 个原则,目前所有常规直流工程运用注入法对接地极引线进行监测均选用 $13.95\ \text{kHz}$ 。

鉴于张北工程系统特性和接地电阻位置:首先,柔性直流系统特征谐波极小,可忽略不计,所以该工程不用考虑避开特征谐波的问题;其次,接地点在站内经电阻直接接地,接地系统为集中参数回路,不用考虑阻抗匹配问题。所以一次设备的配置比较常规的直流接地极引线阻抗监测,可直接减少入地点阻波器,极线侧阻波器是否需要将在下一章重点讨论,暂时保留主系统侧阻波器,张北工程接地电阻监测主回路如图 6 所示。注入器将监测信号注入接地系统,通过大地形成回路,监测装置通过信号电缆采集注入回路的电流电压值,计算出接地电阻的阻值。

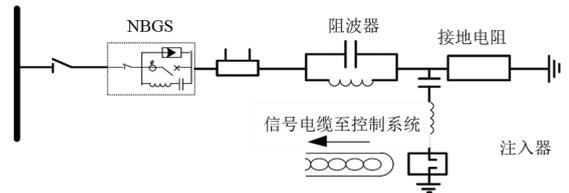


图 6 张北工程接地电阻监测原理

3.2 一次设备配合

常规的高压直流工程接地极线监测,为了调整注入滤波器的谐振频率,阻波器的截止频率为 $13.95\ \text{kHz}$,根据 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$,结合一次设备体积及现场占地,一般选取的电感、电容参数如表 2 所示。

表 2 注入滤波器、阻波器技术参数

名称	电容/nF	电感/mH
注入滤波器	13.64	9.54
阻波滤波器	65.00	2.00

因监测回路极短不用考虑阻抗匹配,张北工程监测信号频率选择也无须越高越好,原则上任何频率均可以,工频下即可对接地电阻进行监测。但考虑到一次设备的占地面积不宜过大及固有装置再利用节省成本,考虑继续选用频率为 $13.95\ \text{kHz}$,注入器和阻波器技术参数与表 2 也相同。

4 阻波器对主系统的影响

下面讨论柔性直流系统接地极线路配置阻波器的合理性和必要性,并进一步研究阻波器的配置对张北直流电网系统的影响及范围。

4.1 设置阻波器的必要性

若极线侧不装设阻波器,监测系统注入器向接地极注入 $100\sim 150\ \text{mA}$ 的 $13.95\ \text{kHz}$ 频率交流

电流,将在接地电阻非接地端形成 1.5~2.25 V 的对地交流电压。当直流电网中由于接地点转移或发生接地故障,形成两个接地点时,阻抗监测的高频交流电流将在整个直流电网中流通。

其次,考虑到张北柔性直流电网的可扩展性,同时考虑线路架构具备不同的组合方式,架空线路的电容、电感参数不能明确。因此若不设置阻波器,直流电网架空线路及金属回线的电容、电感参数有可能引发 13.95 kHz 频率下的直流电网系统谐振。例如,一条金属回线直挂在北京站中性线母线上,或在距离北京站中性线母线特定距离的金属回线处发生接地故障,若该段金属回线的杂散电容及杂散电感参数乘积恰为 0.13 (nF×H),则会导致系统振荡,整个直流电网的对地电压将发生大幅振荡,影响系统稳定。

因此,为保障张北柔性直流电网的安全稳定运行,应在接地极线路处装设阻波器,避免监测装置可能对张北柔性直流电网和设备造成的影响。

4.2 配置阻波器对直流电网影响的理论分析

电感与电容元件并联构成的阻波器,其直流分量阻抗为 0,对直流电网完全无影响。阻波器工频分量阻抗可以按式(1)计算得到,整体呈感性元件,换言之可以忽略电容元件,近似为该通路在接地电阻上串联了 2 mH 的电感元件。考虑到电感元件较小,对系统影响也可以近似忽略。

$$Z = sL // \left(\frac{2}{sC} \right) = 2\pi Lf // \left(\frac{1}{2\pi Cf} \right) = 0.628 \text{ } 3 \text{ } \Omega \quad (1)$$

对于 13.95 kHz 频率分量,阻波器阻抗近似无穷大,即开路状态,此时直流电网系统与接地电阻相互独立。因此需要考虑各类特殊工况下,尤其故障工况下是否会造成 13.95 kHz 频率分量的过电压问题。但经过对系统操作过电压的频域分析^[15-16],13.95 kHz 频率对应的过电压幅值分量相对于过电压峰值非常小,可以忽略其影响。

综上所述,阻波器可以阻断 13.95 kHz 频率电气量对张北柔性直流电网的影响,且注入信号形成的交流对地电压会被限制在接地电阻回路内部,不会对直流电网的正常运行造成影响。

4.3 配置阻波器对直流电网影响的仿真试验

下面将通过仿真试验,确认在特殊工况及接地故障工况下,阻波器对直流电网及一次设备的影响。

对于系统非单点接地的特殊工况,选取典型工况进行仿真,以验证各类接地故障工况下阻波器对直流电网运行产生的影响。具体选取的仿真工况包括:接地点转移过程中北京站、丰宁站短时双站接地工况;直流电网架空线路及母线接地故障工况;换流阀阀内接地故障工况等。3 个故障试验分别定义为试验 1、试验 2 和试验 3。

试验 1:丰宁站至北京站的金属回线开断,系统双极不对称。正极系统额定功率运行,张北站 0 MW,康保站 750 MW,北京站-1500 MW,丰宁站定直流电压;负极系统空载运行。仿真时序为:初始北京站接地,2 s 闭合丰宁站接地开关,2.1 s 断开北京站接地开关。试验录波如图 7 所示。

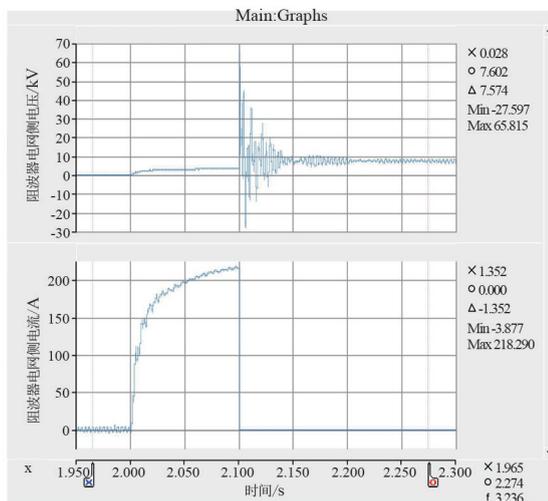


图 7 试验 1 电压电流波形

图 7 波形中,阻波器电压侧电压在 2.1 s 后出现震荡,是由于该时刻断开北京站接地极开关导致。接地点转移完成后网侧电压电流稳定。

试验 2:张北站至北京站线路通道退出,张北站出口处发生接地故障,系统双极不对称。正极系统额定功率运行,张北站 1500 MW,康保站 0 MW,北京站-1500 MW,丰宁站定直流电压;负极系统空载运行。仿真时序为:初始北京站内接地,北京站至张北站间线路通道退出,2 s 闭合设置张北站出口正极架空线接地故障,2.003 s 闭锁张北站正极换流器,断开交、直流断路器及金属回线 MBS。试验录波如图 8 所示。

图 8 中左侧为不带阻波器试验波形,右侧为带阻波器试验波形(下同),从录波文件看有无阻波器时各项参数几乎一致,波形也基本重叠。由此可以得出阻波器的配置对直流电网几乎没有影响。

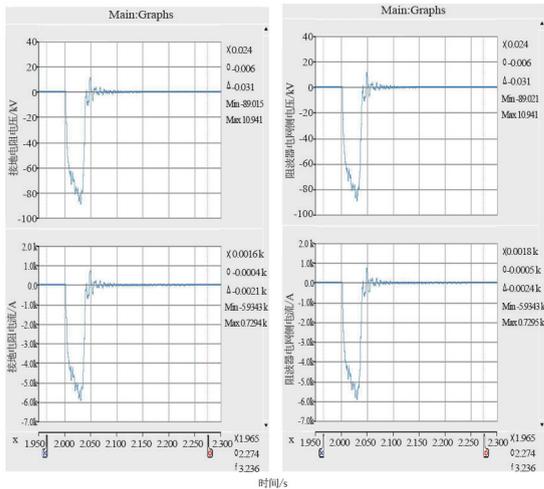


图 8 试验 2 电压电流波形

试验 3:四端环网双极额定功率运行工况,系统双极对称,张北站 3000 MW,康保站 1500 MW,北京站-3000 MW,丰宁站定直流电压。仿真时序为:初始北京站站内接地,2 s 设置北京站换流阀侧单相接地故障,2.003 s 闭锁张北正极换流器,断开交、直流断路器及金属回线 NBS。试验录波如图 9 所示。

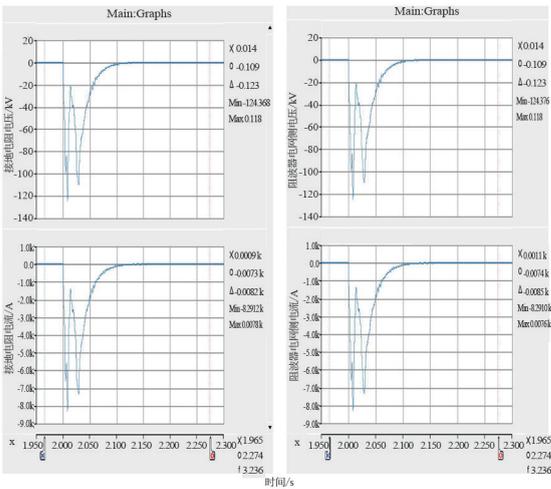


图 9 试验 3 电压电流波形

试验 3 同试验 2 一样,可以得出阻波器并不会影响直流电网的结论。

另外,在进行试验 2 和试验 3 时,还对比了不带阻波器和带有阻波器两种情况下,4 个换流站的正极对地电压和中性线电压。图 10 和图 11 是试验 2 时的对比波形,可以看出极线电压和中性线电压在有无阻波器情况下,波动轨迹基本重叠。阻波器存在与否并不会对极线 and 中性线电压产生影响。

试验 3 录波情况与图 10、图 11 基本完全一致。由此可以得出,阻波器对直流系统影响极小可以忽略。

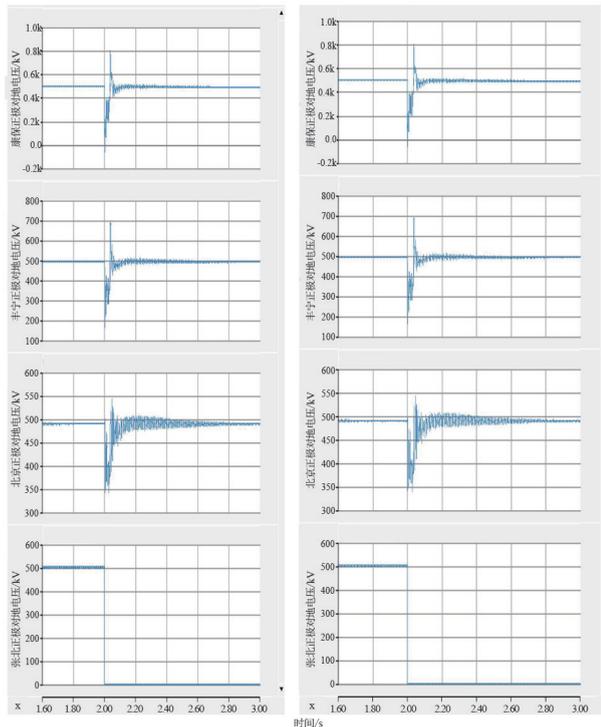


图 10 试验 2 时极线电压波形对比

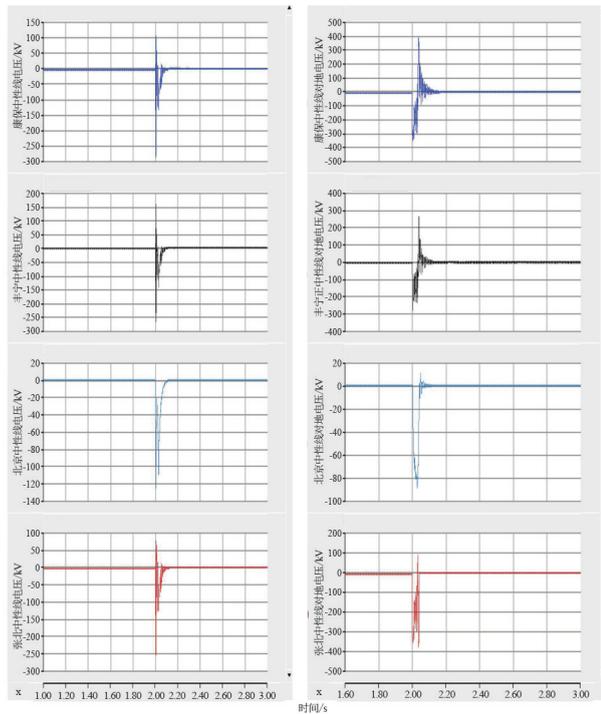


图 11 试验 2 时中性线电压波形对比

4.4 接地电阻监视系统仿真试验

下面将通过仿真试验,验证在直流正常运行工况下,接地电阻正常和电阻故障状态下的接地电阻实时监测功能,如图 12—图 15 所示。

保持直流输电系统运行,采用 13.95 kHz 频率、有效值为 0.17 A 的高频电流通过电容、电感谐振回

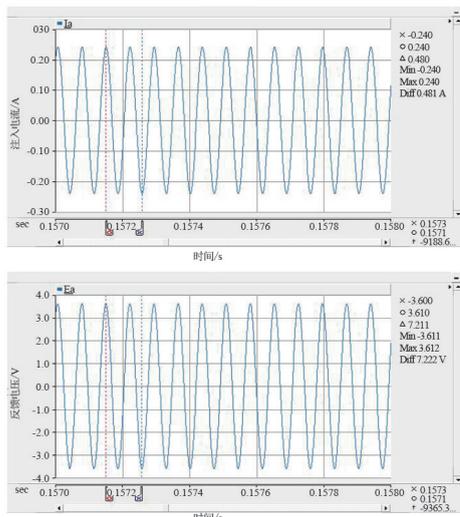


图 12 验证 1 电压电流波形

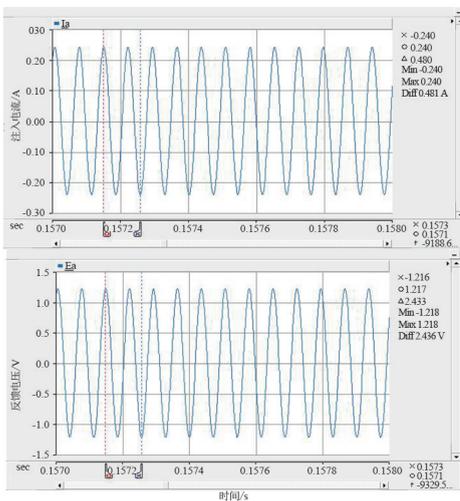


图 13 验证 2 电压电流波形

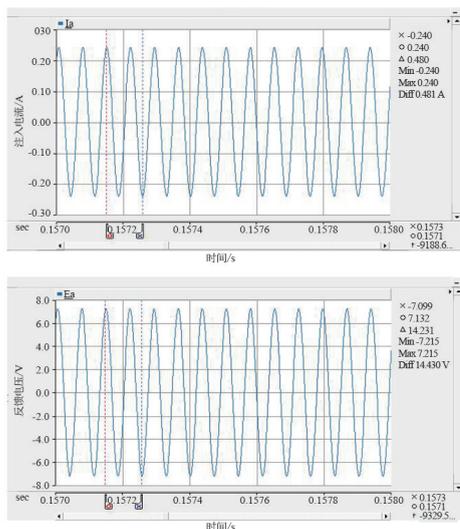


图 14 验证 3 电压电流波形

路注入接地电阻系统,分别验证接地电阻为 $15\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 、 $30\ \Omega$ 以及开路状态下,电阻监测系统测量电压波形和实时监测功能。

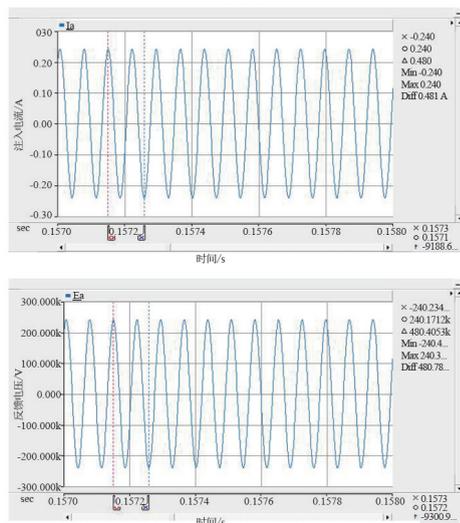


图 15 验证 4 电压电流波形

验证 1:设置接地电阻为 $15\ \Omega$,计算接地电阻值与设定值一致,接地电阻正常。

验证 2:设置接地电阻为 $5\ \Omega$ 左右,计算接地电阻与设定值一致,较正常值偏小。

验证 3:设置接地电阻为 $30\ \Omega$ 左右,计算接地电阻值与设定值一致,较正常值偏大。

验证 4:设置接地电阻为开路状态,计算接地电阻值大于 $1 \times 10^6\ \Omega$,与设定值一致,并产生接地电阻开路告警。

通过在不同接地电阻阻值下的仿真波形,可以看出高频注入法可以实时监测计算接地电阻变化,当接地电阻超过设定阈值时产生报警信号送监控系统,为接地电阻异常的快速处置提供强大支撑。

5 结论

通过对高频注入法的分析以及阻波器对主系统回路影响的理论分析和仿真试验结果,可以得出以下结论:

1)注入法可以对接地电阻进行实时监测,注入信号频率选择 $13.95\ \text{kHz}$,并在直流电网回路中配置阻波器;

2)配置阻波器阻断了 $13.95\ \text{kHz}$ 信号对张北直流电网系统的影响,避免在直流电网架空线路及金属回线的电容、电感参数可能导致的 $13.95\ \text{kHz}$ 频率直流电网系统谐振;

3)通过理论分析和系统仿真验证,配置阻波器后并不影响直流电网系统的正常稳态运行和直流电网接地故障、换流阀接地故障等故障类型下的故障保护。

所以,注入法可以有效实时监测接地电阻的阻

值,观测接地电阻运行状况,准确掌握各种工况下接地极运行状态。

参考文献

- [1] 韩亮,白小会,陈波,等.张北±500 kV 柔性直流电网换流站控制保护系统设计[J].电力建设,2017,38(3):42-47.
- [2] 吴庆范,付艳,张克辉,等.柔性直流输电系统交流母线差动保护研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(3):100-104.
- [3] 滕予非,王鱼,焦在滨,等.特高压直流输电系统接地极引线阻抗监视策略[J].电工技术学报,2016,31(11):157-164.
- [4] 陈朋,李梅航,严兵,等.适用于多端柔性直流输电系统的通用控制策略[J].电力系统自动化,2016,40(21):47-52.
- [5] 杨柳,黎小林,许树楷,等.南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J].南方电网技术,2015,9(1):63-67.
- [6] 张悛宁,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.
- [7] 徐韬,徐政,张哲任,等.特高压直流输电圆环型接地极电流场计算[J].高电压技术,2012,38(6):1445-1450.
- [8] 孙帮新,陈辉祥.高压直流输电共用接地极技术研究[J].高电压技术,2006,32(12):150-153.
- [9] 郭剑,陆家榆.直流接地极结合均流系统的计算模型与求解[J].中国电机工程学报,2008,28(19):1-6.
- =====
- (上接第19页)
- [3] 艾鹏,滕予非,王晓茹,等.计及紧急直流功率支援的扰动后稳态频率预测算法[J].电力系统自动化,2017,41(13):92-99.
- [4] 刘克天,王晓茹,薄其滨.基于广域量测的电力系统扰动后最低频率预测[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2188-2195.
- [5] 文云峰,赵荣臻,肖友强,等.基于多层极限学习机的电力系统频率安全评估方法[J].电力系统自动化,2019,43(1):133-140.
- [6] 胡益,王晓茹,滕予非,等.基于多层支持向量机的交直流电网频率稳定控制方法[J].中国电机工程学报,2019,39(14):4104-4117.
- [7] 仇怡超,闻达,王晓茹,等.基于深度置信网络的电力系统扰动后频率曲线预测[J].中国电机工程学报,2019,39(17):5095-5104.
- [8] 张怡,张恒旭,李常刚,等.深度学习在电力系统频率分析与控制中的应用综述[J].中国电机工程学报,2021,41(10):3392-3406.

- [10] 程志友,李小静,汤明金,等.一种快速的配电网单相接地故障时域测距方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(17):24-30.
- [11] 郭庆雷,吴延坤.张北可再生能源柔性直流电网示范工程主回路参数技术报告[R].北京:国网经济技术研究院,2017.
- [12] 曾祥君,张玺,阳韬,等.高压直流输电系统接地极不平衡保护改进措施研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(24):132-137.
- [13] 张纯,滕予非.特高压直流输电系统接地极线路保护性能分析[J].四川电力技术,2017,40(1):84-88.
- [14] 邹强,马云龙,杨建明,等.串联多端直流输电系统接地极拓扑研究[J].电力工程技术,2018,37(5):132-136.
- [15] 杨勇,李立涅,杜林,等.采用时频矩阵奇异值分解和多级支持向量机的雷电及操作过电压识别[J].电网技术,2012,36(8):31-37.
- [16] 张洛.电力系统操作过电压特征提取和识别研究[D].成都:西华大学,2016.

作者简介:

黄宇(1987),男,硕士研究生,高级工程师,从事特高压直流输电系统检修工作;

吴金波(1989),男,工程师,研究方向为直流控制保护系统;

唐世雄(1992),男,工程师,从事特高压直流输电系统检修工作;

陈香香(1986),女,硕士研究生,工程师,研究方向为直流输电控保系统硬件开发;

朱生辉(1987),男,助理工程师,研究方向为直流输电控保系统。

(收稿日期:2022-10-08)

- [9] WANG Q, LI F, TANG Y, et al. Integrating model-driven and data-driven methods for power system frequency stability assessment and control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(6):4557-4568.
- [10] 李冠争,李斌,王帅,等.基于特征选择和随机森林的电力系统受扰后动态频率预测[J].电网技术,2021,45(7):2492-2502.
- [11] 赵荣臻,文云峰,叶希,等.基于改进堆栈降噪自动编码器的预想事故频率指标评估方法研究[J].中国电机工程学报,2019,39(14):4081-4092.
- [12] CHEN Z, XIAO X, LI C, et al. Real-time transient stability status prediction using cost-sensitive extreme learning machine[J]. Neural Computing and Applications, 2016,27(2):321-331.

作者简介:

陈振(1991),男,博士,研究方向为人工智能在能源电力系统中的应用。

(收稿日期:2022-08-31)