

高压直流接地极线路断线故障高频阻抗特性及 阻抗监视系统适应性

滕予非¹, 李小鹏¹, 陈福锋^{2,3}, 宋新尧⁴, 焦在滨⁴, 张尧^{2,3}

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032;
3. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153; 4. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:基于输电线路分布式参数模型,对高压直流输电系统接地极线路断线故障下高频阻抗特性进行推导和分析。研究发现,当接地极线路长度超过高频注入信号半波长时,一旦接地极线路出现双回断线故障,首端高频测量阻抗的虚部将随故障距离呈周期性变化,但变化量超过正常运行时的阻抗值;当线路长度与注入信号半波长的整数倍接近时,线路某些特定位置发生单回断线故障,测量高频阻抗与正常运行时几乎相等,阻抗监视系统存在明显死区。为了提升阻抗监视策略的可靠性,提出了一种高频注入信号频率优化选择策略,基于线路实测参数,选择注入信号频率,消除保护策略死区。根据某实际±800 kV / 8 000 MW特高压直流系统参数,搭建PSCAD电磁暂态仿真模型,仿真算例验证了分析及结论的有效性。

关键词:高压直流输电系统;接地极线路;阻抗监视系统;故障检测;断线故障;高频阻抗特性

中图分类号:TM 773

文献标志码:A

DOI:10.16081 / j.epae.201909017

0 引言

接地极是高压直流输电(HVDC)工程的重要组成部分,起着箝制系统中性点电压以及为不平衡电流提供通路的作用^[1]。为了限制直流偏磁^[2-3]对换流变压器的影响^[4-5],直流感地极往往远离直流换流站,因此需要架设接地极线路实现换流站和接地极的连接^[6]。随着接地极极址选择的日益困难,目前部分HVDC工程接地极线路的长度已经超过100 km,线路运行时发生故障的概率不可避免^[7]。

考虑到HVDC系统双极平衡运行时接地极线路上直流电流相对较小,直流差动保护和不平衡保护难以适应该运行工况。因此,实际HVDC工程中往往配置了高频阻抗监视系统。该系统通过向接地极线路中注入高频电流,并通过计算线路在此频率下的高频阻抗,实现故障诊断^[8]。然而,由于工业界对长输电线路高频信号下阻抗特性的认识尚不清楚,保护可靠性依然不高。

为了提升接地极线路高频阻抗监视系统的可靠性,文献[9]对接地极线路发生短路故障时的高频阻抗特性进行了分析。研究表明,当输电线路长

度超过注入信号半波长时,一旦发生金属性接地故障,线路首端测得的高频阻抗虚部会随故障距离呈周期性变化。同时,分析结果还表明,由于注入信号频率较高,一旦线路单位长度电气参数发生微小变化,都可能导致线路正常运行时首端测得的高频阻抗出现明显变化。这些特性均导致设置保护整定值的难度加大^[10]。

为了提升高频阻抗监视系统的可靠性,许多学者提出采用改变注入信号频率、利用新判据^[11]等方法,取得了较好的效果,并且可以实现对故障距离进行计算^[12-15]。文献[9]在输电线路全频带阻抗-距离特性、故障距离和测量阻抗间单调性原则的基础上,提出了注入信号频率选择方法。然而,基于上述原则,注入信号的频率将降低为现有工程常见频率的1/50,对现有工程改造力度较大,不利于该方案的实施推广。还有学者利用电压驻波比^[11]、电压突变量^[10]等物理量构建判据对监视策略进行了改进,提升了监视系统的灵敏度。

然而,上述分析均是针对线路短路故障开展的,对于接地极线路断线故障的相关研究目前尚没有报道。事实上,实际中也的确出现过由于接地极线路耐张段引线脱落而导致的断线故障。

基于上述背景,本文从波动方程出发,深入分析了HVDC工程在接地极线路断线故障条件下的高频阻抗特性;基于上述的分析结论,研究了HVDC系统接地极线路阻抗监视系统的可靠性,为注入信号频率的选择提供了参考依据;利用PSCAD / EMTDC电磁暂态仿真程序对本文结论的有效性进行了仿真验证。

收稿日期:2019-01-24;修回日期:2019-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707019);国家电网公司总部科技项目(特高压直流输电系统接地极线路绝缘配置与故障防护措施研究)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51707019) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research on Insulation Configuration and Fault Protection Measures of Grounding Electrode Line in UHVDC Transmission System)

1 接地极线路阻抗监视系统及动作判据

基于高频电流注入的接地极线路阻抗监视装置如图1所示。

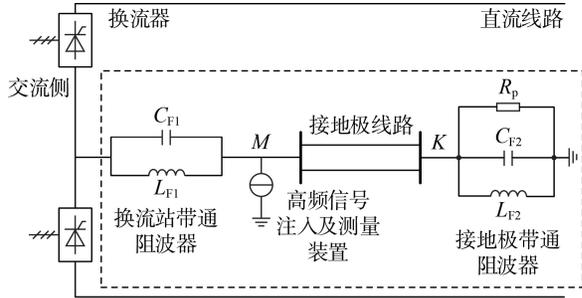


图1 基于高频电流信号注入的
接地极线路阻抗监视装置

Fig.1 Monitoring device of grounding electrode line impedance based on injection of high frequency current signal

由图1可知,为了平衡杆塔受力,HVDC系统的接地极线路常采用双回同杆架设的方式,并在线路首尾两端互联。同时,故障监视装置在线路首端换流站通过电流注入的方式,向接地极线路注入高频信号。根据实际工程,注入信号频率目前均选为13.95 kHz。监控系统通过测量注入点同频电压的幅值和相位,计算出接地极线路的高频阻抗。

为了防止高频信号注入换流站影响控制保护正常运行,同时为直流电流提供通路,在接地极线路两侧还装设了阻波器,阻波器的截止频率与注入信号频率相同。同时,为了防止高频信号在线路上形成驻波影响线路绝缘,在线路末端的阻波器上还并联了一个匹配电阻 R_p ,其具体阻值与双回线路并联后的波阻抗相同,即:

$$R_p = Z_c / 2 \quad (1)$$

其中, Z_c 为单回接地极线路波阻抗。

基于阻抗监视系统原理,其动作判据为:

$$\left| \Delta Z_{me} \right| = \left| \frac{U_{me}}{I_{in}} \right| = \left| Z_{me} - Z_{set1} \right| \geq Z_{set2} \quad (2)$$

其中, U_{me} 为线路首端高频电压测量值; I_{in} 为线路首端高频电流注入量; Z_{me} 为线路首端装置安装处计算得到的高频测量阻抗; Z_{set1} 、 Z_{set2} 分别为已知的整定阻抗、整定阻抗幅值。在整定时,取 Z_{set1} 为接地极线路正常运行时的阻抗; Z_{set2} 大多为正常运行时阻抗幅值的10%左右,实际中取为30 Ω 。

当阻抗监视系统检测到接地极线路的高频测量阻抗值 Z_{me} 满足式(2)并持续一定延时,向直流输电控制保护系统发送接地极线路异常信号,并根据相关保护动作要求进行相关操作。

2 接地极线路高频阻抗特性

2.1 正常运行工况下高频阻抗特性

由前文可知,接地极线路阻抗监视系统注入线路的电流信号频率大约在13~14 kHz范围内,高频信号波长仅约为20 km。因此在分析长度约为100 km的输电线路阻抗特性时,必须考虑线路的分布参数。本文中为了简化分析,将线路模型简化为无损均匀传输线路开展分析和研究。

由输电线路分布参数模型,可以得到双回接地极线路上首端与末端的电压、电流关系为:

$$\begin{bmatrix} U_M(s) \\ I_M(s) \end{bmatrix} = J(s) \begin{bmatrix} U_K(s) \\ I_K(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$J(s) = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & jZ_c \sin(\beta l) \\ j(1/Z_c) \sin(\beta l) & \cos(\beta l) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z_c = \sqrt{L_1/C_1} \\ \beta = \omega \sqrt{L_1 C_1} \end{cases} \quad (5)$$

其中, M 、 K 分别为接地极线路的首端、末端,首端在换流站侧,末端在HVDC输电工程接地极极址侧; U_M 、 U_K 分别为线路首、末两端的高频电压; I_M 、 I_K 分别为流经单回线路上首、末两端的高频电流; L_1 、 C_1 分别为线路单位长度的电感、电容; l 为线路首末两端的距离,即线路全长; $J(s)$ 为线路首端、末端电压与电流间的传递函数关系; β 为输电线路相位系数; ω 为交流电气量的角频率。

线路末端电压、电流的关系为:

$$U_K(s) = 2I_K(s)R_p = I_K(s)Z_c \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)—(5),可以得到正常运行时阻抗监视装置在接地极线路首端测得的高频阻抗 Z_{nor} 为:

$$Z_{nor} = \frac{U_M(s)}{2I_M(s)} = \frac{U_K \cos(\beta l) + jZ_c \sin(\beta l)}{j(2U_K/Z_c) \sin(\beta l) + 2I_K \cos(\beta l)} = \frac{Z_c \cos(\beta l) + jZ_c \sin(\beta l)}{2j \sin(\beta l) + 2 \cos(\beta l)} = \frac{Z_c}{2} \quad (7)$$

其中, U_K 、 I_K 分别为末端高频电压、电流的幅值。

由此可见,正常运行时,阻抗监视装置检测到的高频阻抗呈现纯电阻特性,其阻值与末端匹配电阻值相等,且等于双回线路等值波阻抗,即单回线路波阻抗的一半。

2.2 双回线路同点断线故障下高频阻抗特性

接地极线路出现双回线路同点断线工况时,其等值电路如图2所示,图中点 F 为故障点。

在此工况下,点 M 与点 F 电压、电流的关系为:

$$\begin{bmatrix} U_M(s) \\ I_M(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l_f) & jZ_c \sin(\beta l_f) \\ j(1/Z_c) \sin(\beta l_f) & \cos(\beta l_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_F(s) \\ I_F(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, l_f 为故障距离,即点 M 与点 F 间的距离。

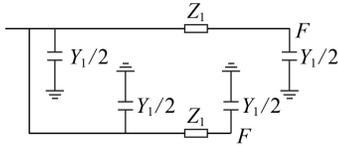


图 2 双回线路同点断线故障时接地极线路等值网络
Fig.2 Equivalent network of grounding electrode line under breakage faults at same position of double-circuit line

由于线路断线故障下有:

$$I_F(s) = 0 \quad (9)$$

因此,首端监测到的阻抗为:

$$Z_{in} = U_M(s) / (2I_M(s)) = jZ_c / [2 \tan(\beta l_f)] \quad (10)$$

此时,阻抗监视系统安装处测得的阻抗与正常情况下阻抗的偏差量 $|\Delta Z_m|$ 为:

$$|\Delta Z_m| = \left| \frac{jZ_c}{2 \tan(\beta l_f)} - Z_{nor} \right| = \frac{Z_c}{2 |\sin(\beta l_f)|} \quad (11)$$

由此可见,双回接地极线路出现同点断线故障时,线路首端装置安装处测得的阻抗变化量高于线路正常运行时的阻抗值,且阻抗变化量与故障距离之间呈周期性变化趋势,其变化周期为:

$$T = 1 / (2f \sqrt{L_1 C_1}) = \lambda / 2 \quad (12)$$

其中, f 为高频信号的注入频率; λ 为高频信号的注入波长。

2.3 单回线路断线故障下高频阻抗特性

2.3.1 阻抗计算方法

当 HVDC 系统接地极线路出现单回选路断线故障时,利用长输电线路微分方程难以求解故障时首端测量阻抗的解析解,可以利用等效电路的方法进行求解,其等效网络如图 3 所示。

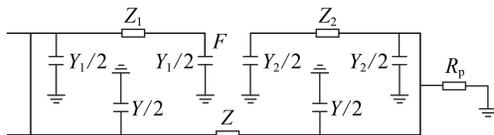


图 3 单回线路断线故障时接地极线路等值网络
Fig.3 Equivalent network of grounding electrode line under breakage faults of single-circuit line

根据长输电线路 π 型等值电路,图 3 中各变量可表达为:

$$\begin{cases} Z = jZ_c \sin(\beta l) \\ Z_1 = jZ_c \sin(\beta l_f) \\ Z_2 = jZ_c \sin[\beta(l - l_f)] \\ Y = (2j/Z_c) \tan(\beta l/2) \\ Y_1 = (2j/Z_c) \tan(\beta l_f/2) \\ Y_2 = (2j/Z_c) \tan[\beta(l - l_f)/2] \end{cases} \quad (13)$$

对图 3 的电路图进行变换,可以化简为图 4。

图 4 中,对地导纳的表达式为:

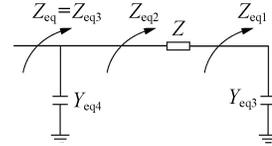


图 4 单回线路断线故障时接地极线路简化网络
Fig.4 Simplified network of grounding electrode line breakage faults of single-circuit line

$$\begin{cases} Y_{eq3} = 1 / (2/Y_2 + Z_2) + Y_2/2 + Y/2 + 1/Z_p \\ Y_{eq4} = 1 / (2/Y_1 + Z_1) + Y_1/2 + Y/2 \end{cases} \quad (14)$$

由此可得等效阻抗 Z_{eq1} 的计算过程为:

$$\begin{cases} Z_{eq1} = 1/Y_{eq3} \\ Z_{eq2} = Z + Z_{eq1} \\ Z_{eq3} = 1 / (Y_{eq4} + 1/Z_{eq2}) \\ Z_{eq} = Z_{eq3} \end{cases} \quad (15)$$

2.3.2 阻抗特性分析

由式(13)和式(14)可知,当接地极线路出现单回断线故障时,阻抗监视装置测得的高频阻抗与故障距离之间的关系与线路长度和故障距离均直接相关。此处考虑一种较特殊的情况,即接地极线路长度刚好为注入信号半波长的整数倍,见式(16)。

$$l = n\lambda_{in} / 2 = n / (2f \sqrt{L_1 C_1}) \quad (16)$$

其中, λ_{in} 为注入信号波长; n 为正整数。

若接地极线路单线断线故障点至首端的距离为:

$$l_f = m\lambda_{in} / 2 \quad m < n \quad (17)$$

其中, m 为非负整数。

此时式(13)可表示为:

$$\begin{cases} Z = Z_1 = Z_2 = 0 \\ Y_1 = Y_2 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

则首端检测到的故障阻抗为:

$$Z_{in} = Z_{eq3} = Z_c / 2 = Z_{nor} \quad (19)$$

由此可见,当接地极线路长度和断线故障距离均为注入信号半波长的整数倍时,单回线路断线故障后阻抗监视系统测得的阻抗值与线路正常运行时完全相等,基于阻抗原理的故障监视必然出现拒动。

3 阻抗监视策略适应性分析及注入频率选择原则

图 5 为线路不同位置发生断线故障后,阻抗偏差量的最小值随线路长度变化的关系。

由此可知,当接地极线路长度满足一定关系时,图 5 中对应的阻抗偏差量最小值小于整定值(30 Ω),则必然有某些位置,当其发生断线故障时,阻抗监视系统出现拒动。

由图 5 可知,当接地极线路长度在注入信号半波长整数倍附近时,在线路中至少存在 1 个故障点,当该点出现单回线路断路故障后,线路首端测得高

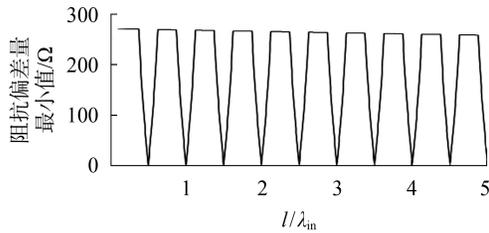


图5 阻抗偏差量的最小值与线路长度的关系

Fig.5 Relationship between minimum deviate of impedance and line length

频阻抗与正常运行时阻抗偏差量过小,阻抗监视系统难以可靠动作,阻抗监视系统无法保护线路全长。而当线路长度偏离半波长整数倍附近时,断线故障发生后故障阻抗与正常阻抗的偏差较为明显。

基于上述分析结论,为了保证阻抗监视系统的可靠性,必须对阻抗监视系统注入信号频率进行优选,防止故障后阻抗变化量过小,监视系统难以识别。

由此,可以构建如下优化问题。

(1)目标函数。

$$\max f_{in} \quad (20)$$

其中, f_{in} 为注入信号频率。根据工程经验,线路两侧阻波器电容的成本及体积与注入信号频率相关,频率越高,电容的体积和成本越小。为了降低工程造价,以注入信号频率最大为目标函数进行频率选择。

(2)约束条件。

$$\begin{cases} |Z_r(l_f) - Z_{nor}| > k_{rel} Z_{set2} \\ 0 < l_f < l \\ f_{in} \leq f_{max} \end{cases} \quad (21)$$

其中, k_{rel} 为可靠性数; Z_r 为接地极线路出现单回断线故障时,线路首端测得的高频阻抗值; $Z_r(l_f)$ 为关于 l_f 的函数。

由式(21)可知,注入信号频率的选择需要保证接地极线路在任意地方出现断线故障时,线路首端测得的高频阻抗变化量均大于整定值,从而保障故障诊断的可靠性。同时,考虑监视系统的采样率及测量精度,注入信号频率不能过高,目前相应监视系统的最大频率 f_{max} 一般为13.95 kHz。

4 算例分析

4.1 算例介绍

根据某实际 ± 800 kV / 8 000 MW 直流输电工程参数,利用PSCAD软件构建电磁暂态仿真模型。直流输电系统输电线路长度为1 652 km,接地极线路长度为101 km。仿真系统中接地极线路采用Bergeron模型。根据线路实测报告,在13.95 kHz的高频条件下,线路单位长度参数为 $L=1.9$ mH / km, $R=0.262$ 6 Ω / km, $C=0.006$ 614 μ F / km。

由此可知,单回接地极线路的波阻抗为:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 535.98 \quad (\Omega) \quad (22)$$

在此实际工程现场中,换流站利用图1系统进行阻抗监视,注入高频电流信号的频率为13.95 kHz,有效值为1.5 A。装置判据如式(2)所示,整定时 Z_{set1} 为接地极线路正常运行时的阻抗, Z_{set2} 取为30 Ω 。

4.2 传统故障监视装置缺陷分析

当高频注入信号的频率为13.95 kHz时,由4.1节所示参数,其注入信号波长为:

$$\lambda_{in} = 1 / (f \sqrt{L_1 C_1}) = 20.2217 \quad (\text{km}) \quad (23)$$

由此可见,由于接地极线路长度为101 km,正好与注入5倍信号波长101.108 3 km相近。根据2.3节分析结论,当线路出现单回断线故障,且故障点与线路首端间的距离满足式(16)所示关系时,传统阻抗监视策略极易出现拒动情况。

基于PSCAD仿真系统对该工况进行分析,为了防止高频信号注入换流站影响控制保护正常运行,也为直流电流提供通路,接地极线路两侧阻波器的截止频率与注入信号频率相同,且线路末端并联电阻值与接地极线路波阻抗相近,仿真系统中其参数为:

$$\begin{cases} L_{F1} = L_{F2} = 0.5 \text{ mH} \\ C_{F1} = C_{F2} = 260 \text{ nF} \\ R_p = 270 \Omega \end{cases} \quad (24)$$

其中, L_{F1} 、 C_{F1} 分别为接地极线路首端阻波器电感、电容; L_{F2} 、 C_{F2} 分别为接地极线路末端阻波器电感、电容。

图6为当接地极线路发生单回断线故障时,阻抗监视系统测得的阻抗偏差量。由图6可知,由于接地极线路长度接近于波长的5倍,单回接地极线路出现断线故障时,监控系统保护范围仅为全线40.64%的区域,可靠性较差。

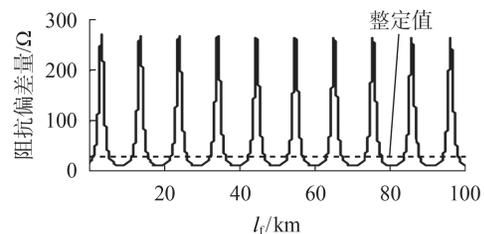


图6 高频注入信号频率为13.95 kHz情况下阻抗偏差量随故障距离的变化关系

Fig.6 Deviate value of impedance changes with fault position under 13.95 kHz high frequency injection signal

4.3 有效性验证

根据4.1节所示参数,取可靠系数 $k_{rel}=1.2$,利用式(20)和式(21)构建的优化函数,对注入频率进行优化计算可得:

$$f_{in} = 13.90 \text{ kHz} \quad (25)$$

其注入信号波长为:

$$\lambda_{in} = 1/(f\sqrt{L_1 C_1}) = 20.29 \text{ (km)} \quad (26)$$

由于注入频率发生变化,线路两端阻波器参数也相应进行调整,即:

$$\begin{cases} L_{F1} = L_{F2} = 0.5 \text{ mH} \\ C_{F1} = C_{F2} = 262 \text{ nF} \\ R_p = 270 \Omega \end{cases} \quad (27)$$

在此工况下,通过电磁暂态仿真可以得到,接地极线路正常运行时,监视系统测得的正常阻抗为:

$$Z_{nor} = 269.76 + j0.5344 \Omega \quad (28)$$

由此可见,虽然注入频率发生了变化,但由于接地极线路末端与阻波器并联的电阻实现了对吸纳路波阻抗的完全匹配,因此即使考虑电阻效应,线路首端阻抗监视系统测得的正常阻抗依然接近于波阻抗(267.99 Ω),与前文分析结论一致。

同时,图7显示了接地极线路出现断线故障后,在13.90 kHz高频信号注入下,监视系统安装处测得的阻抗与正常运行情况下阻抗的偏差模值 $|\Delta Z_m|$ 随故障距离的变化关系。

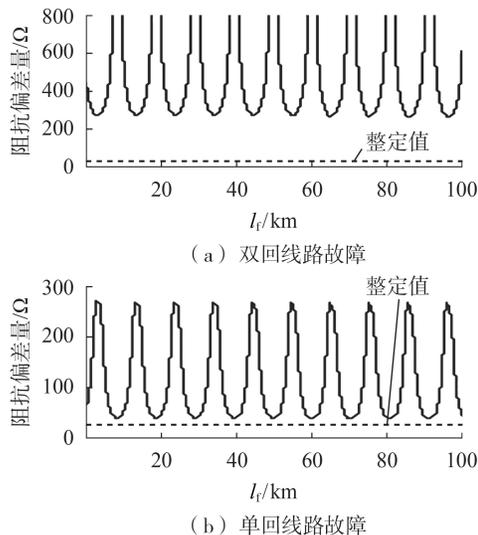


图7 频率优化后接地极线路断线故障下阻抗偏差值随故障距离的变化关系

Fig.7 Deviate value of impedance changes with fault position with optimized frequency under breakage faults

由图7可知,接地极线路出现双回线路同时断线故障时,监测装置安装处的阻抗偏移量与故障距离之间的确呈周期性变化趋势,周期等于半个波长,且阻抗变化量均大于正常情况下双回线路等值波阻抗267.99 Ω 。同时,当采用本文提出的频率选择策略时,若接地极线路出现单回断线故障,监视系统测得的阻抗偏差均大于整定值30 Ω ,策略可靠性满足要求。

5 结论

本文对基于注入法的HVDC输电系统接地极线路阻抗监视策略对断线故障的适应性进行了研究,得到了如下结论。

(1)当接地极线路出现双回断线故障时,线路首端测得的阻抗变化量随故障距离呈周期性变化,但变化量均大于线路正常时测得的阻抗值;而当接地极线路出现单回断线故障时,一旦线路长度、故障距离与注入信号频率间出现不匹配的情况,将导致故障后高频测量阻抗偏差量小于整定值,保护难以正确动作。

(2)提出了一种注入信号频率最优选择方法,利用PSCAD仿真系统搭建了实际算例模型,仿真结果表明,本文对接地极线路断线后高频阻抗特性的分析结果完全正确,所提的注入频率选择方法可以消除保护死区,提升保护可靠性。同时,基于本文提出的方法对现场进行改造时仅需对两侧阻波装置元件参数进行微调,成本较低,利于推广应用。

参考文献:

- [1] 徐碧川,鲁海亮,潘卓洪,等. 直接地极极址勘测的研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):149-154.
XU Bichuan, LU Hailiang, PAN Zhuohong, et al. Research of DC ground electrode site survey [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 149-154.
- [2] 李长云,郝爱东,娄禹. 直流偏磁条件下电力变压器振动特性研究进展[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):215-223.
LI Changyun, HAO Aidong, LOU Yu. Status and progress of research on transformer vibration characteristics with DC bias [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 215-223.
- [3] 谢志成,钱海,林湘宁,等. 直流偏磁下变压器运行状态量化评估方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):216-223.
XIE Zhicheng, QIAN Hai, LIN Xiangning, et al. Quantitative state assessment method for transformer under DC bias [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 216-223.
- [4] 李长云,刘亚魁. 直流偏磁时变压器铁芯的力学特性分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):122-125.
LI Changyun, LIU Yakui. Analysis of mechanical characteristics of transformer iron core with DC bias [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 122-125.
- [5] PICHER P, BOLDUC L, DUTIL A, et al. Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 257-265.
- [6] 刘守豹,皇甫成,余世峰,等. 特高压直接地极线路过电压研究[J]. 高电压技术,2018,44(7):2410-2417.
LIU Shoubao, HUANG Fucheng, YU Shifeng, et al. Over voltage of grounding electrode lines in ultra-HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2410-2417.
- [7] 滕予非,汤涌,黄琦,等. 特高压直流单极故障引发送端接地极引线过电压计算方法及影响因素分析[J]. 电网技术,2017,41(11):3559-3565.
TENG Yufei, TANG Yong, HUANG Qi, et al. Calculation method and influencing factors of overvoltage on ground electrode line on sending end caused by monopolar fault in UHVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3559-3565.

- [8] GUNNARA. Electrode line protection:5117323[P]. 1992-05-26.
- [9] 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.
TENG Yufei,WANG Yu,JIAO Zaibin,et al. Impedance monitoring scheme for ground electrode line of ultra high voltage DC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(11):157-164.
- [10] 滕予非,汤涌,周波,等. 基于高频电压突变量的特高压直流输电系统接地极引线故障监测方法[J]. 高电压技术,2016,42(1):72-78.
TENG Yufei,TANG Yong,ZHOU Bo,et al. Monitoring scheme for UHVDC ground electrode line fault on the basis of high-frequency voltage variation[J]. High Voltage Engineering,2016,42(1):72-78.
- [11] TENG Yufei,LI Xiaopeng,HUANG Qi,et al. A novel high-frequency voltage standing-wave ratio-based grounding electrode line fault supervision in ultra-high voltage DC transmission systems[J]. Energies,2017,10(3):1-10.
- [12] 张怿宁,束洪春,翟永昌,等. 基于两种算法融合的接地极线路故障测距[J]. 高电压技术,2016,42(8):2633-2641.
ZHANG Yining,SHU Hongchun,ZHAI Yongchang,et al. Fault location for grounding electrode line based on fusion of two algorithms[J]. High Voltage Engineering,2016,42(8):2633-2641.
- [13] 束洪春,田鑫萃,张怿宁. 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,2015,39(12):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,2015,39(12):3584-3591.
- [14] 张怿宁,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.
- [15] 张怿宁,王彩芝,李京,等. 直流感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-EPSA,2016,28(4):91-95.

作者简介:



滕予非

滕予非(1984—),男,四川成都人,高级工程师,博士,主要研究方向为特高压交直流电网安全稳定控制(**E-mail**:yfteng2011@163.com);

李小鹏(1987—),男,河南许昌人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**:lxbsd@163.com);

陈福锋(1979—),男,江苏宜兴人,高级工程师,硕士,主要研究方向为继电保护

及智能变电站。

High frequency impedance characteristics of HVDC grounding electrode line under breakage fault and adaptability of impedance monitoring system

TENG Yufei¹,LI Xiaopeng¹,CHEN Fufeng^{2,3},SONG Xinyao⁴,JIAO Zaibin⁴,ZHANG Yao^{2,3}

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China;

3. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China;

4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the distributed parameter model of transmission line, the high frequency impedance characteristics of HVDC (High Voltage Direct Current) grounding electrode line under breakage fault are deduced and analyzed. When the length of grounding electrode line is longer than the half-wavelength of injected signal, for breakage faults in double transmission lines, the imaginary part of high frequency measured impedance at the head end of the grounding electrode line changes periodicity with fault position, but the variation exceeds the impedance value at normal operation. When the length of grounding electrode line is close to the integer multiple of half-wavelength of the injected signal, the measurement of high frequency impedance is almost equal to that of normal operation, breakage faults at some special position cannot be identified. To improve the reliability of impedance monitoring device, a strategy based on frequency optimization selection for high frequency injected signal is proposed. Based on the measured parameters of line, the injection signal frequency is selected to eliminate the dead band of protection strategy. Finally, an electromagnetic transient simulation model is established in PSCAD according to the parameters of an actual ± 800 kV / 8 000 MW UHVDC (Ultra HVDC) system, and the validity of the analysis and conclusion is verified.

Key words: high voltage direct current power transmission system; grounding electrode line; impedance monitoring system; electric fault detection; breakage fault; high frequency impedance characteristic