

XLPE电缆参数对天津某220 kV GIS变电站雷电过电压的影响研究

交联聚乙烯(XLPE)电力电缆在220 kV GIS变电站中作为架空—电缆进线或GIS—主变压器连接线已获得广泛应用,但电缆长度、导体截面积对主变压器雷电过电压的影响规律尚不明确。采用电磁暂态程序ATP—EMTP计算了天津某220 kV GIS变电站的雷电入侵过电压,分析了进线和主变压器连接处的电缆长度、导体截面积对主变压器过电压幅值的影响。结果表明,随着进线电缆长度的增大,主变压器过电压幅值减小;随着主变压器连接电缆长度的增大,主变压器过电压幅值增大。随着进线及主变压器连接电缆的导体截面积增大,主变压器过电压幅值减小。

刘芳¹ 李盛伟² 徐兵³ 王楠² 高宇¹ / 1.天津大学电气与自动化工程学院 2.国网天津市电力公司经济技术研究院 3.天津电力设计院

0 引言

随着国民经济的快速发展,电力用户对供电可靠性要求越来越高。变电站作为电能中转、分配的重要节点,其安全性对电力系统的稳定运行十分重要。在变电站的运行过程中,由于受到雷击而引发的绝缘击穿事故屡有报道^[1]。研究发现,在多雷区有85%的电力系统故障由雷电引起^[2]。可见,变电站防雷对于保障电力系统安全具有重要的工程意义。

雷电灾害对于变电站内设备的影响主要通过两种途径:雷电直击变电站和雷电波沿输电线路侵入变电站^[3]。按照设计规程,在变电站内装设避雷针、避雷线,即可有效降低站内设备受直击雷的概率^[4]。对于输电线路,由于其覆盖面积广阔,易遭受雷击,故由雷电入侵波导致的站内设备雷击事故应作为变电站防雷保护中重点考虑的问题。

近年来,气体绝缘变电站(GIS)因

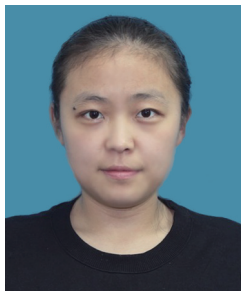
其占地面积小、易于维护和运行安全性高等优点,已逐步取代传统的敞开式变电站,在城市电网的设计和建设成为主流^[1]。在GIS变电站中,常采用架空—电缆混合方式引入电源。而在GIS和主变压器之间,也常采用电缆连接。当雷电波侵入变电站时,由于电缆段的作用将可能导致主变压器处过电压幅值过高,从而使避雷器的保护失效^[5]。目前的设计规程并未对这两段电缆的长度及导体截面积等参数进行明确规定。从电力设计的角度出发,有必要针对各段电缆参数对主变压器过电压的影响规律进行研究。

本文选取天津地区某220 kV GIS变电站为对象,采用电磁暂态分析软件ATP—EMTP对该站的雷电入侵波过电压进行仿真分析,研究了进线电缆及主变压器连接电缆的长度及导体截面积对主变压器过电压的影响。结果表明,电缆长度对主变压器过电压的影响与其敷设位置有关。随着各段电缆导体截面积的增大,主变压器过电压幅值均减小。

1 变电站系统接线简介

采用的220 kV GIS变电站主接线如图1所示。接线形式为线—变组。站内共3回进线,均采用架空—电缆混合方式引入。由于3回进线结构完全相同,在本文中选取其中1回进线为例进行计算。站内主变压器为三相三绕组变压器,容量均为240 MV·A。

220 kV侧进线电缆采用单芯XLPE绝



刘芳/硕士研究生

关键词/Keywords

雷电入侵波·
过电压·
电缆长度·
导体截面积·

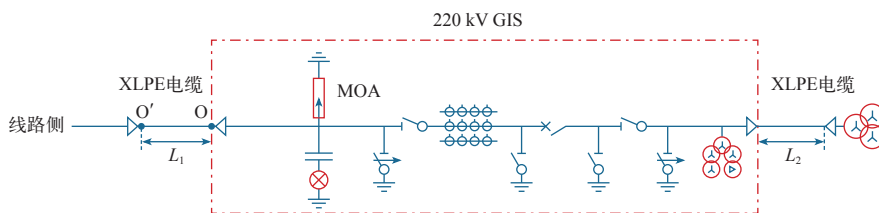


图1 某220 kV GIS变电站电气主接线示意

缘，设其导体截面积为 S_1 ，电缆长度为 L_1 。GIS与主变压器连接处同样采用单芯XLPE电缆，设其导体截面积为 S_2 ，电缆长度为 L_2 。

2 计算模型及参数选取

雷击输电线路主要有三种形式：雷击避雷线、绕击导线和雷击塔顶。雷击避雷线时，以雷击档距中央避雷线的情况为最严重。根据设计规程要求，只要选取合适的导、地线间距，即可避免此类情况带来的气隙击穿^[4]。雷电绕击导线具有一定的概率，对于平原地区，输电线路的绕击率 P_α 可按式计算

$$\lg P_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{h_t}}{86} - 3.9 \quad (1)$$

式中， α 为避雷线对边相导线的保护角； h_t 为导线平均高度。

以220 kV 630导线直线塔为例，导线采取同塔双回排列，上、下两回导线的保护角均为负值，中间两回导线的保护角为 0° 。根据式（1）可计算得到各导线的绕击率均不超过0.013%，即绕击为极低概率事件，故通常不以雷电绕击作为计算条件。当雷击塔顶时，由于雷电流经由杆塔泄入大地，导致横担处电位升高，引发绝缘子反击闪络，将使导线形成过电压。雷击塔顶在实际的输电线路雷击事件中占有较高比例，故常采用雷击塔顶引发的反击作为变电站雷电入侵波过电压的计算条件^[6-9]。

本文计算中，架空线路采用JMarti模型进行等效，导线型号为JL/LB20A-630/45，避雷线型号为JLB-150。杆塔波阻抗取 125Ω ，冲击接地电阻取 5Ω ，雷电流取 150 kA ，波形为 $2.6/50 \mu\text{s}$ ，雷道波阻抗取 300Ω 。考虑绝缘子串的伏秒特性，未计

入冲击电晕影响。以近区雷击为计算条件，选取雷击点在架空-电缆结合处的前1基杆塔。

对于GIS变电站内各设备，采用电容对其进行等效。主变压器、断路器、隔离开关、电压互感器、电流互感器和套管分别取 $3\,000 \text{ pF}$ 、 200 pF 、 100 pF 、 150 pF 、 120 pF 和 100 pF 。

对于单芯XLPE电缆、单筒GIS则均采用分布参数线路进行模拟。GIS波阻抗取 70Ω ，波速取 $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。为研究各电缆段参数对主变压器过电压的影响，分别选取多组电缆截面积和长度，如表1所示。

表1 电缆参数选取范围

电缆位置	进线	主变压器连接
导体截面积/ mm^2	2 500, 2 000, 1 600	1 600, 1 200, 800
长度/m	10~1 000	5~300

电缆的波速和波阻抗计算公式为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_t \epsilon_r}} c \quad (2)$$

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \ln \frac{R}{r} \quad (3)$$

式中， μ_0 、 μ_r 分别为真空磁导率和电缆绝缘介质的相对磁导率； c 为光速； ϵ_0 、 ϵ_r 分别为真空介电常数和电缆绝缘的相对介电常数； r 、 R 分别为电缆绝缘内、外半径。

计算可得波速为 $202 \text{ m}/\mu\text{s}$ ，不同导体截面积的电缆波阻抗如表2所示。

表2 不同导体截面积电缆的波阻抗

导体截面积/ mm^2	2 500	2 000	1 600	1 200	800
波阻抗/ Ω	21.7	23.6	25.7	28.5	32.8

金属氧化物避雷器（MOA）由ABB公司提供，型号为YH10WZ-204/532。电阻阀片的非线性

性特性如表3所示, 计算中采用分段拟合法模拟其非线性电阻特性。

表3 电阻阀片的非线性特性

电流/kA	0.1	1	10	15
电压/kV	333.6	364.6	517.7	542.5

3 计算结果与讨论

对于本计算采用的架空—电缆进线方式的220 kV GIS变电站, 架空—电缆结合处已安装了一台避雷器, 其型号为YH10WZ—204/532。当雷电波沿线路侵入变电站后, 主变压器处形成的雷电冲击过电压典型波形如图2所示。可见, 雷电入侵波具有较陡的上升沿, 经小幅振荡后趋于稳定值。这一仿真波形与文献[10]中的波形相近, 符合实测波形特征。振荡部分主要可归因于架空线路、电缆中电感与各设备电容参数的相互作用。主变压器处雷电入侵波过电压的峰值记作 U_T , 其含义见图2中标识。本文主要讨论各电缆段参数对 U_T 的影响。

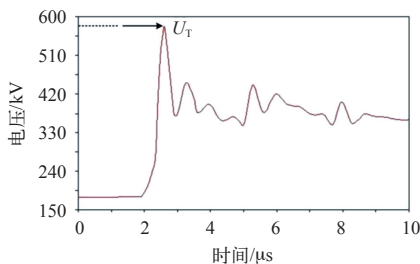


图2 主变压器雷电冲击电压典型波形

架空—电缆进线处的电缆长度 L_1 对主变压器过电压幅值 U_T 的影响如图3所示。随着 L_1 的增大, U_T 逐渐减小并趋于稳定值。由图3可知, 当 $L_1=10$ m时, $U_T=582.1$ kV。当 L_1 增大至50 m时, U_T 减小至578.4 kV。当 L_1 继续增大至100 m时, U_T 进一步减小至577.6 kV。可见, U_T 的减小幅度随电缆长度增加而减缓。当电缆长度进一步增大时, U_T 保持不变。从以上仿真数据可知, 对于进线电缆, 增大其长度有利于降低主变压器过电压幅值。

GIS—主变压器连接电缆长度 L_2 对主变压器过电压幅值 U_T 的影响如图4所示。随着 L_2 的增大, U_T

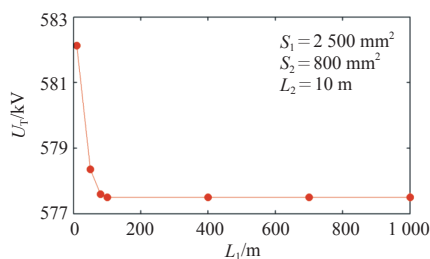


图3 主变压器过电压幅值与进线电缆长度的关系

显著提高并趋于稳定值。当 L_2 较小时(<100 m), 其增大对 U_T 的变化影响较大。当 L_2 较大时(>100 m), 其变化基本不引起 U_T 的变化。这一结果说明, GIS—主变压器连接电缆的长度应尽量选取较短为宜。电缆长度的小幅增加即会引起变压器处过电压峰值的大幅变化, 从而使主变压器的雷击闪络风险提高。

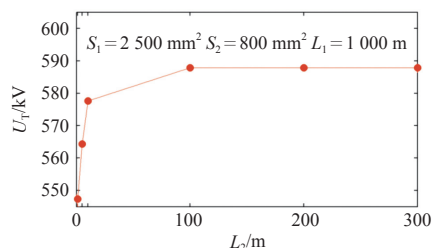


图4 主变压器过电压幅值与主变压器连接电缆长度间的关系

对比以上两段电缆长度对 U_T 的影响结果可知: 当电缆长度增加时, 装设在不同位置的电缆对主变压器过电压幅值的影响规律刚好相反。对于进线电缆, 当雷电波沿其投射至GIS时, 会在图1中O点处发生波的折射、反射。反射波a投射向架空线路并在架空—电缆结合处O'处形成新的反射波a'。由于架空线路的波阻抗远大于电缆波阻抗, 故反射波a'将使电缆沿线的电压升高。当此反射波a'到达避雷器时, 也将导致其电压升高。当电缆长度 L_1 增大时, 上述反射过程所需时间也相应延长, 故进线避雷器处的电压幅值减小, 从而限制了 U_T 的大小。对于主变压器连接电缆, 由于进线避雷器的位置原因, 在其发挥限压作用后, 过电压波的沿线传输将导致避雷器和主变压器间产生电压差 $\Delta U^{[3]}$ 。电缆长度 L_2 越大, 此电压差 ΔU 越高, 故主变压器处过电压幅值 U_T 随 L_2 增大呈现显著增加的趋势。

进线、主变压器连接电缆的导体截面积 S_1 、 S_2 对主变压器过电压峰值 U_T 的影响如图5所示。随着 S_1 的增大， U_T 显著减小；随着 S_2 的增大， U_T 同样呈现减小趋势。这说明，无论对于安装于何位置的电缆，当使用较大截面积导体时，主变压器处将产生较小的过电压。导致这一现象的原因如下，当雷电入侵波从架空线投射至进线电缆或从GIS投射至主变压器连接电缆时，由于波阻抗的差异，将在其各自连接处产生折、反射现象。折射系数 α 为

$$\alpha = \frac{2Z_{DL}}{Z + Z_{DL}} = \frac{2}{1+k} \quad (4)$$

式中， Z_{DL} 为各段电缆波阻抗； Z 为架空线或GIS波阻抗； $k = Z/Z_{DL}$ 。

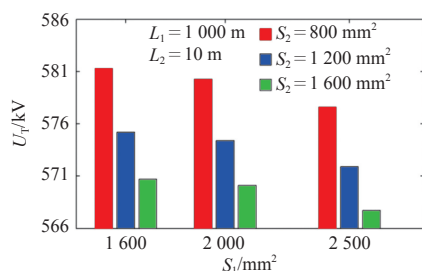


图5 主变压器过电压幅值与电缆导体截面积之间的关系

可见， Z_{DL} 越小， α 越小，投射至进线电缆段或主变压器连接电缆段的雷电过电压幅值越低。根据上述计算结果可知，在架空—电缆进线处和GIS—主变压器联络处选取大截面积电缆有助于降低主变压器处的雷电冲击电压幅值。

4 结束语

本文选取天津某220 kV GIS变电站进行雷电入侵波仿真计算，分析进线电缆、主变压器连接电缆参数的影响，主要结论如下。

1) 随着进线电缆长度的增大，主变压器雷电过电压幅值逐渐减小并趋于稳定值。当进线电缆长度从10 m增大至100 m时，主变压器雷电过电压幅值从583.1 kV减小至577.6 kV。而当进线电缆长度从100 m增大至1 000 m时，主变压器过电压幅值保持不变。

2) 随着主变压器连接电缆长度的增大，主变

压器雷电过电压幅值逐渐增大并趋于稳定值。当连接电缆长度从5 m增大至100 m时，主变压器雷电过电压幅值从564.3 kV提高至587.9 kV。当连接电缆长度继续从100 m增大至300 m时，主变压器过电压幅值保持不变。

3) 随着进线电缆或主变压器连接电缆导体截面积的增大，主变压器雷电过电压幅值减小。

结果表明，对于选取的220 kV GIS变电站，为降低主变压器处的雷电入侵波过电压幅值，可增大进线电缆长度，减小主变压器连接电缆长度，并尽量选取导体截面积较大的电缆。

参考文献

- [1] 孙旭，徐兵. 220 kV长电缆-GIS系统雷电侵入波计算分析[J]. 广东电力，1998，11(5)：11-12，54.
- [2] 刘青，张玉峰，程勇. 220 kV GIS变电站雷电过电压防护措施的研究[J]. 高压电器，2008，44(4)：329-331.
- [3] 张纬钺，高玉明. 电力系统过电压与绝缘配合[M]. 北京：清华大学出版社，1988.
- [4] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [5] 肖开生. 天津红旗路~海光寺220 kV系统雷电过电压计算[J]. 天津电力技术，1996，(4)：8-12，7.
- [6] 李汉明，陈维江，张翠霞，等. 多雷地区110 kV和220 kV敞开式变电所的雷电侵入波保护[J]. 电网技术，2002，26(8)：39-43.
- [7] 司马文霞，叶轩，谭威，等. 高海拔220 kV输电线路绝缘子串与并联间隙雷电冲击绝缘配合研究[J]. 中国电机工程学报，2012，32(10)：168-176.
- [8] 刘青. 宝能220 kV GIS变电站雷电侵入波过电压的研究[J]. 高压电器，2008，44(2)：142-144.
- [9] 司文荣，傅晨钊，卞晓亮，等. 变电站接地网缺陷诊断无损评价方法综述[J]. 电气工程学报，2015，10(8)：14-21.
- [10] 何金良，陈先禄，张金玉，等. 220 kV的GIS变电站的雷电过电压保护特性[J]. 高压电器，1991(1)：37-40.

(收稿日期：2016—10—17) EA