

天津某220 kV GIS变电站雷电过电压防护措施研究

雷电过电压是导致电力系统事故的重要原因之一,研究其防护措施对于保障电力系统安全运行具有重要意义。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,分析了避雷器配置方式对站内设备过电压幅值的影响,探讨了杆塔冲击接地电阻、主变压器等效电容以及进线电缆长度等因素对雷电过电压的影响。结果表明,主变压器处配置避雷器具有最优的防护效果。随着杆塔接地电阻的增大,设备过电压幅值均增大;随着进线电缆长度的增大,设备过电压幅值均减小;随着主变压器等效电容的增大,设备过电压幅值也均减小。采用电缆连接GIS和主变压器,比架空线连接方式具有更好的雷电防护效果。

刘嘉超 马俊国 原云周/天津电力设计院
高 宇 门业堃/天津大学电气与自动化工程学院



刘嘉超/高级工程师

关键词/Keywords

雷电过电压·
避雷器·
接地电阻·
电缆长度·
主变电容·

变电站是电能中转和分配的关键节点,站内设备安全对电力系统的稳定运行具有十分重要的影响。雷击事故是影响变电站运行安全的重要原因之一,由雷击而引发的电气设备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]。因此,变电站的雷电防护是电力系统设计和运行人员都十分关心的问题。

雷电对于变电站内设备的威胁主要通过直击变电站和沿输电线路侵入变电站来实现^[3]。在变电站设计过程中,按照规程要求在变电站内装设避雷针等防雷装置,即可降低站内设备受直击雷的概率^[4]。但对于输电线路,因其覆盖面积广阔,易遭受雷击,故由雷电入侵波导致的站内设备雷击事故常作为变电站防雷保护的重点。

近年来,城市电网中已广泛采用气

体绝缘变电站(GIS)代替传统的敞开式变电站。由于GIS具有耐电强度高、结构紧凑以及等效波阻抗小等特点,因此有利于防雷保护。目前,针对雷电入侵波的防护主要依靠金属氧化物避雷器(MOA)。但在实际工程中,如何通过布置MOA取得最优的防雷效果,则需根据具体工程进行计算分析。

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计算,分析不同避雷器配置方式的保护效果,研究杆塔接地电阻、进线电缆长度以及主变压器等效电容等因素的影响。结果表明,主变压器处装设避雷器具有最优的防雷保护效果。

变电站系统接线简介

该220 kV GIS变电站采用电缆-架空进线方式。架空线路采用同塔双回架设,导线型号为JL/LB20A-630/45,避雷线型号为JLB-150,杆塔型式为220 kV 630导线直线塔(2F4-SZ2)。

220 kV GIS变电站主接线如下图所示,接线结构为线路-变压器组。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(SSZ11-240 000/220),容量为240 MV·A。

220 kV侧进线电缆为单芯XLPE绝缘,其导体截面积为2 500 mm²,电缆长度为4 900 m。GIS与主变压器连接处的

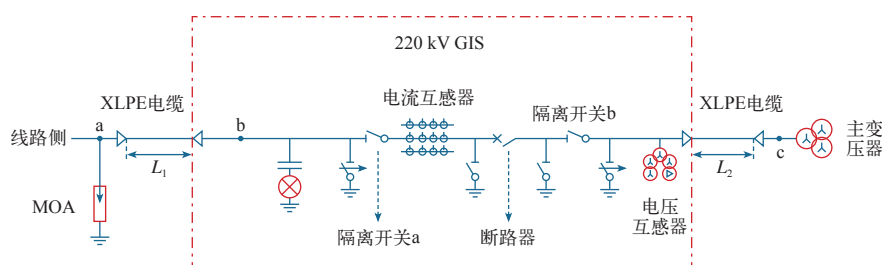


图 天津某220 kV GIS变电站电气主接线示意图

单芯XLPE电缆导体截面积为 800 mm^2 ，电缆长度为20 m。

计算模型及参数选取

雷击输电线路分为雷击避雷线、绕击导线和雷击塔顶。当雷击避雷线时，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 可表示为

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

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。对于220 kV 630导线直线塔，其上、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，故不宜以绕击作为计算条件。

当雷击塔顶时，雷电流经杆塔泄入大地，导致横担处电位升高，引发绝缘子反击闪络，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，故宜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^[5-7]。

本计算中，雷电流采用双指数波进行等效，幅值取150 kA，波形为2.6/50 μs ，雷道波阻抗取300 Ω ；架空线路采用8相JMarti模型进行等效；杆塔采用多波阻抗模型进行等效，波阻抗取125 Ω ，冲击接地电阻取5 Ω 。计算中以绝缘子两端电压差值与绝缘子串的伏秒特性相交为闪络条件，未计入导线冲击电晕的影响。在雷击点选取上，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 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等效。GIS波阻抗取70 Ω ，波速取300 m/ μs ；进线电缆波阻抗取21.7 Ω ；主变压器连接处电缆波阻抗取32.8 Ω ，波速取202 m/ μs 。

MOA由ABB公司提供，型号为YH10WZ—204/532。电阻阀片的非线性特性如表1所示，计算中采用分段拟合法模拟其非线性电阻特性。

表1 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

计算结果与讨论

对于本计算选取的220 kV GIS变电站，架空—电缆结合处已配置1台避雷器，型号为YH10WZ—204/532（其位置见图中a点）；在GIS变电站内可不配置避雷器或在进线、主变压器处配置避雷器（见图中b、c点）。因此，GIS站内的避雷器配置方式可有四种：①不配置；②进线处配置；③主变压器处配置；④进线、主变压器处均配置。以下针对这四种避雷器配置方式，对站内设备的过电压影响进行分析。

四种避雷器配置方式下，站内各主要设备雷电过电压幅值如表2所示。对于220 kV的电气设备，其耐受雷电冲击电压幅值为950 kV^[8]。按照绝缘配合系数1.4考虑，则设备上的过电压幅值不应超过678 kV。在四种避雷器配置方式下，站内各

设备的过电压幅值均小于678 kV，表明这四种避雷器配置方案均可行。对比四种配置方式可知：当站内不配置避雷器时（方式1），各设备的过电压值均最高，主变压器处的过电压幅值已达到623.4 kV，绝缘裕度较低。当在进线处装设避雷器时（方式2），各设备的过电压幅值均显著低于方式1，由于避雷器存在保护范围，当雷电波侵入时，在主变压器处形成电压全反射，导致进线处避雷器残压与各设备间均有电压差 ΔU 。因主变压器距此避雷器距离最远，二者压差最大，故主变压器处过电压幅值仍较高，为583.6 kV。若只在主变压器处装设避雷器（方式3），则上述避雷器的保护范围问题即无影响。表2中，避雷器配置方式3时各设备的过电压值均较方式1、2时有较大幅度下降，特别是主变压器处过电压幅值分别较方式1、2时下降151.8 kV和112 kV。当在进线和主变压器处同时装设避雷器时（方式4），各设备的过电压幅值均小于以上三种方式，这是由于装设两台避雷器后，其限压效果得到了更好体现。但是，通过比方式4和方式3下各设备的过电压情况可知，多装设1台避雷器并未使过电压幅值出现大幅降低，主变压器处的过电压幅值仅下降15.1 kV。综合考虑各避雷器配置方式的保护效果和经济因素，本文认为方式3对于此220 kV GIS站最为适合。

表2 不同避雷器配置下设备过电压

避雷器配置 设备	方式1	方式2	方式3	方式4
	过电压幅值/kV			
隔离开关a	557.9	476.4	437.1	410.6
电流互感器	559.9	481.5	438.7	415.1
断路器	556.6	485.9	440.6	422.4
隔离开关b	562.2	489.6	442.5	430.3
电压互感器	562.8	493.7	446.1	437.2
主变压器	623.4	583.6	471.6	455.5

当采用避雷器配置方式3对站内各设备进行防雷保护时，仍有许多因素可能影响其保护效果。杆塔冲击接地电阻对各设备过电压幅值的影响如表3所示。随着冲击接地电阻从1 Ω 增大至10 Ω ，各设备的过电压幅值均增大。其中，以隔离开关a过电压幅值增大幅度最显著，为9.6 kV；以主变

压器过电压幅值增大幅度最小，为3.4 kV。这主要是因为避雷器装设在主变压器处，较好地限制了此处的电压值。而隔离开关距离此避雷器较远，在雷电波的折、反射过程中，易形成较高的电压值。这一计算结果也体现了避雷器配置方式3在保护主变压器时的优越性。

表3 冲击接地电阻对各设备过电压的影响

阻值/ Ω 设备	1	5	10
	过电压幅值/kV		
隔离开关a	433.3	437.1	442.9
电流互感器	435.5	438.7	443.4
断路器	437.6	440.6	444.6
隔离开关b	439.7	442.5	446.8
电压互感器	441.8	446.1	452.1
主变压器	470.1	471.6	473.5

进线电缆长度对各设备过电压的影响如表4所示。当进线电缆很短时（5 m），各设备的过电压幅值均较高。随着电缆长度增大，各设备的过电压幅值均下降并趋于稳定值。表4中，电缆长度500 m和4 900 m时各设备的过电压幅值均相等。这说明，在避雷器配置方式3下，增大进线电缆长度有利于各设备的防雷保护。

表4 进线电缆长度对各设备过电压影响

长度/m 设备	5	500	4 900
	过电压幅值/kV		
隔离开关a	444.7	437.1	437.1
电流互感器	446.4	438.7	438.7
断路器	448.1	440.6	440.6
隔离开关b	449.9	442.5	442.5
电压互感器	453.4	446.1	446.1
主变压器	474.0	471.6	471.6

变压器等效电容对各设备过电压幅值的影响如表5所示。通常随着变压器容量的提高，其等效电容增大，纠结式绕组联结方式较连续式绕组联结方式的等效电容大。随着等效电容从1 500 pF增大至4 500 pF，各设备的过电压幅值均显著减小。这表明，对于避雷器配置方式3，采用大容量或纠结式绕组的变压器更易获得较好的保护效果。

GIS－主变压器联络方式对各设备过电压幅值的影响如表6所示。本文比较了采用架空和电缆

表5 主变压器等效电容对各设备过电压影响

电容/pF	1 500	3 000	4 500
设备	过电压幅值/kV		
隔离开关a	447.2	437.1	430.8
电流互感器	448.8	438.7	431.8
断路器	450.7	440.6	433.0
隔离开关b	452.7	442.5	434.7
电压互感器	454.4	446.1	436.0
主变压器	471.9	471.6	470.0

两种不同连接方式时,各设备的过电压情况。架空线路波阻抗取 $450\ \Omega$,波速取 $300\ \text{m}/\mu\text{s}$ 。结果表明,当采用架空线路联络GIS和主变压器时,除主变压器处过电压幅值低于电缆联络方式外,其余各设备的过电压幅值均较电缆联络方式高。这是由于架空线路波阻抗远大于电缆波阻抗($32.8\ \Omega$),当雷电入侵波从GIS投射至架空联络线时,将产生正极性的电压反射波,使GIS内各设备电压幅值较高;而当雷电入侵波从GIS投射至电缆联络线时,将产生负极性的电压反射波,使GIS内各设备的电压幅值较低。综合考虑GIS内各设备和主变压器的过电压情况,本文认为采用电缆联络方式的保护效果更佳。

表6 GIS—主变压器联络方式对各设备过电压影响

形式	架空	电缆
设备	过电压幅值/kV	
隔离开关a	569.5	437.1
电流互感器	569.6	438.7
断路器	575.5	440.6
隔离开关b	578.3	442.5
电压互感器	582.8	446.1
主变压器	435.2	471.6

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,分析不同避雷器配置方式的保护效果,探讨冲击接地电阻等因素的影响,主要结论如下:

1) 四种避雷器配置方式均可实现站内设备的防雷保护,在主变压器处装设1组避雷器的保护方案最适合。

2) 随着冲击接地电阻的增大,各设备的过电

压幅值均增大。远离避雷器处的电压增大幅度较大,靠近避雷器处的电压增大幅度较小,主变压器处的电压增大不明显。

3) 随着进线电缆长度的增大,各设备的过电压幅值均减小并趋于稳定值。

4) 随着主变压器等效电容的增大,各设备的过电压幅值均减小。

5) 当采用架空线联络GIS和主变压器时,与电缆联络方式相比,主变压器过电压幅值较低,其他各设备的幅值均较高。

研究表明,对于选取的220 kV GIS变电站,在主变压器处设置1组避雷器的保护方案最适合。为提高此方案的保护效果,可降低杆塔的冲击接地电阻,选取长进线电缆,选用大容量或纠结式绕组变压器,并在GIS和主变压器联络处采用电缆连接。

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] 林韶文,黄群古,曾益民. 多雷区输电线路及变电站防雷保护[J]. 高电压技术,2003,29(5):17-19.
- [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]. 1997.
- [5] 冯杰,司马文霞. 35 kV变电站雷电侵入波特性的仿真与分析[J]. 高电压技术,2006,32(2):89-91.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.

(收稿日期:2014-07-30) EA