

110 kV GIS 变电所进线电缆 末端雷电过电压研究

丁 晨,郑建勇,项 玲

(东南大学 电气工程系,江苏 南京 210096)

摘要: 气体绝缘开关装置(GIS)已广泛应用于城市供电网中。阐述了导线参数、GIS 参数、雷电侵入波模型及参数、避雷器参数以及电气设备参数等的设置,运用 ATP-EMTP 搭建雷电侵入波作用下的架空线与电缆进线相连、包括架空线与电缆连接处安装的避雷器和部分电气设备(GIS、变压器)在内的单相简化模型,仿真计算断路器不同状态下,不同电缆长度的电缆末、首端雷电过电压。总结了电缆末、首端雷电过电压比值与电缆长度之间的关系,通过具体仿真表明,当电缆长度大于 70 m 时,仅电缆首端装设避雷器已经无法满足保护要求,需要考虑在 GIS 内部配置避雷器。

关键词: GIS; 雷电过电压; 雷电侵入波; 避雷器

中图分类号: TM 643

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)02-0055-04

0 引言

随着城市建设的发展,城市供电网的不断完善,在负荷密度高而变电所可用场地小及空中线路走廊紧张的地区,采用气体绝缘开关装置(GIS)与高压电缆相结合,可使城市供电系统更安全可靠^[1]。基于 GIS 站电缆进线雷电侵入波传播的特点,过电压水平与电缆长度的关系,避雷器的选择与布置已逐渐成为输变电工程中关注的焦点之一。因此,对雷电侵入波在 GIS 变电所进线电缆末端产生的过电压进行分析计算,找出过电压分布规律具有十分重要的意义,为变电所的设备绝缘设计及避雷器布置方案提供了重要依据^[2]。

针对 110 kV GIS 变电所电缆进线与架空线相连的方式,采用 ATP-EMTP 搭建雷电侵入波作用下

的架空线与电缆进线相连、包括架空线与电缆连接处安装的避雷器和部分电气设备(GIS、变压器)在内的单相简化模型,仿真计算断路器不同状态下,不同电缆长度的电缆末、首端雷电过电压与电缆长度之间的关系,为电缆进线方式下避雷器的布置设计提供了参考。

1 模型参数选择

图 1 所示接线中,架空线经电缆进线与 GIS 设备相连,采用雷击架空线路形成的雷电波作为侵入波,将架空线、电缆进线、主变进线回路 GIS 及主变形成网络整体进行仿真计算。

1.1 导线参数

高压输电线上,单相雷击占大多数,因此研究中按单相雷击考虑。在仿真计算中,架空线、变电所设备连接导线均用单相的波阻抗模拟,站内导线近似

收稿日期:2006-05-11;修回日期:2006-08-10

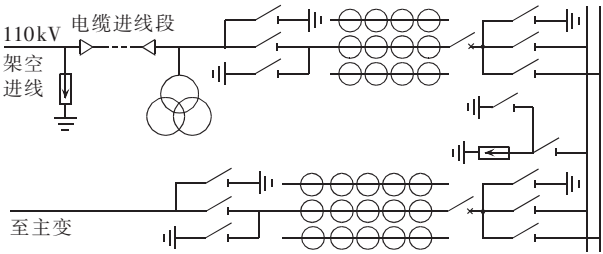


图 1 仿真回路接线图

Fig.1 Wiring for simulation

认为是无畸变线,波阻抗为一常数,不计电晕影响。波阻抗表达式为^[3]

$$Z=\sqrt{L_0/C_0}$$

式中 L_0 和 C_0 分别为架空线路对地单位长度的电感(H/m)和电容(F/m)^[3],且有

$$L_0=\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{2h}{r},\quad C_0=2\pi\epsilon_0/\ln\frac{2h}{r}$$

因此,

$$Z=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}\ln\frac{2h}{r}=60\ln\frac{2h}{r}(\Omega)$$

式中 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$,为空气的导磁系数(H/m); $\epsilon_0=10^{-9}/(36\pi)$,为空气的介电系数(F/m); h 为导线对地高度(m); r 为导线半径(m)。

对于架空线以及设备连接导线,取波阻抗为 400 Ω ,波速为 300 m/ μ s。对于进线电缆,应按照持续允许电流、短路热稳定允许压降等要求选择电缆截面,电缆经电缆通道接入 GIS。根据以往工程经验,选择电缆型号为 YJLW03-110/64-1 $\times$ 400。一般取波阻抗为 40 Ω ,波速为 198 m/ μ s^[4]。

1.2 GIS 参数

根据相关文献,GIS 波阻抗取 67 Ω ,GIS 管道中传播速度计算如下:

$$v=1/\sqrt{\epsilon\mu}$$

式中 μ 为导磁系数; ϵ 为气体的介电常数。

对于 SF₆ 气体, μ 和 ϵ 与真空中的数值接近,可取波速为 300 m/ μ s。

1.3 雷电侵入波模型及参数确定

雷云对地放电的实质是雷云电荷向大地的突然释放,但地面被击物体的电位不是取决于雷云的初始电位,而是取决于雷电流与被击物体阻抗的乘积,这相当于一个电流源作用的过程^[3]。因此,可以把雷电放电的过程看作是一个沿着一条有固定波阻抗的雷电通道向地面传播的电磁波过程。

据统计,雷电流波头长度大多在 1~5 μ s 范围内,平均为 2~2.5 μ s^[3]。根据 DL/T 620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定,雷电冲击电流波头时间为 2.6 μ s,波长 50 μ s,幅值为 5 kA^[5]。因此,本文中雷电流波形采用 2.6 μ s/50 μ s。对于 110 kV 电压等级的变电所,在计算雷电侵入波的波过程中可以忽略工频电源的影响。

雷电流的等值波形通常可分为标准冲击波(双指数形式)、等值斜角波和等值余弦波 3 种,本文采用等值斜角波,其数学表达式比较简单,有利于进行雷电侵入波的波过程分析。

1.4 避雷器参数设置

架空线与电缆连接处安装 Y5W-100/266 型号的氧化锌避雷器。根据金属氧化物避雷器的特性,选择几个特性点,以这几个点组成的曲线作为避雷器的伏安特性曲线。其主要技术参数见表 1^[4,6]。

表 1 110 kV 氧化锌避雷器主要技术参数

Tab.1 Main technical data of 110 kV ZnO arrester

类型	I/A	U/V
直流	0.001	145
操作波	500	221
雷电波	10 000	226

1.5 电气设备参数选取

雷电侵入波的波头长度很短,它在变电所内引起多次折反射的过渡过程高达兆赫兹,因此电气设备均以入口电容进行分析计算。

设备的入口电容值越大,削弱雷电侵入波波头的作用越显著,作用在设备上的雷电过电压幅值越低。其主要原因是:当雷电波经过电容或电感元件时,电压值或电流值不能突变,从而减小了雷电波的陡度。主要电气设备参数见表 2^[7-8]。

表 2 主要电气设备参数

Tab.2 Parameters of main electrical equipments

设备	参数名	参数值/pF	设备	参数名	参数值/pF
断路器 (断开)	极间均压电容	50	避雷器	高频下的等效电容	100
断路器 (合上)	入口电容	200	GIS 套管拐弯处	对地集中电容	50
电压互感器	入口电容	80	电力变压器	入口电容	2 000

2 仿真模型建立

DL/T 620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》中规定:“与架空线路相连接的长度超过 50 m 的电缆,应在其两端装设阀式避雷器或保护间隙;长度不超过 50 m 的电缆,只在任一端装设即可”,“发电厂、变电所的 35 kV 及以上电缆进线段,在电缆与架空线的连接处应装设阀式避雷器”^[5]。因此,仿真计算时,仅在架空线与电缆连接处即电缆首端安装氧化锌避雷器,以观察在一组避雷器配置下电缆首端、末端雷电过电压情况。

根据已有运行经验,当断路器因前次雷电波侵入而断开并处于等待重新闭合状态时,变电所再次遭受雷击时常导致严重事故^[9],因此特别考虑了这种恶劣的情况。

根据断路器断开与合上 2 种状态,仿真模型分为 2 种,见图 2、3。图中 t1.0 表示套管长度为 1.0 m,其他类似。模型 1 仿真的是上面提及的恶劣情况。

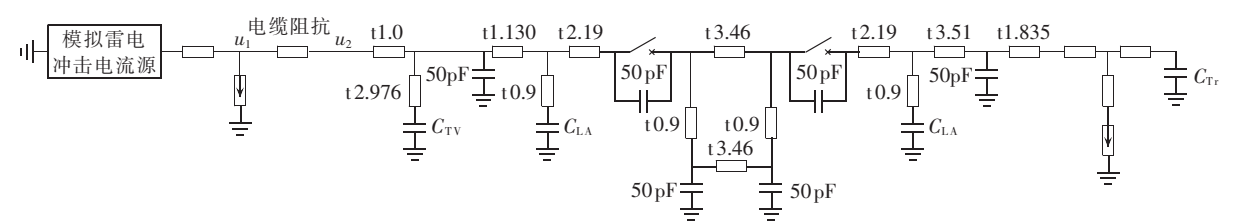


图 2 断路器断开时的仿真模型(模型 1)
Fig.2 Simulation model with open circuit breaker

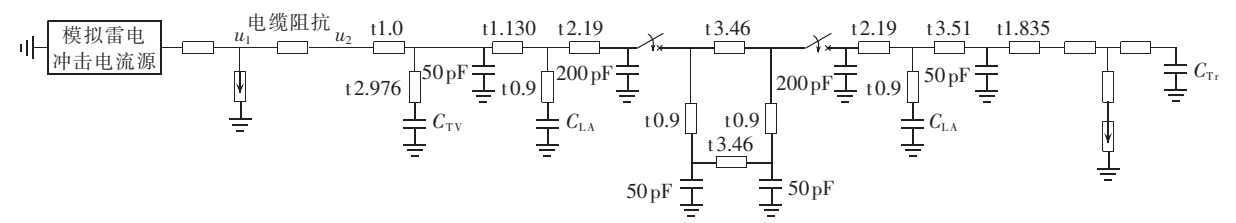


图 3 断路器合上时的仿真模型(模型 2)
Fig.3 Simulation model with close circuit breaker

3 仿真结果和分析

3.1 仿真结果

在波头时间为 $2.6\text{ }\mu\text{s}$ 、幅值为 5 kA 的雷电冲击电流作用下,电缆末端与首端雷电过电压的比值 r 见图 4。图中,实线、虚线分别为模型 1、2 的仿真结果(r 为比值; L 为电缆长度)。

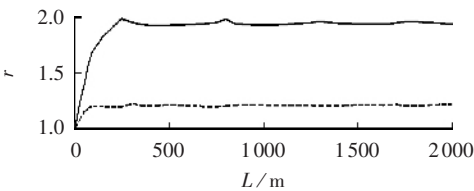


图 4 电缆末端与首端雷电过电压比值曲线
Fig.4 Lightning over-voltage ratio curve of both cable ends

图 5 反映了电缆长度约为 70 m 时,断路器断开的情况下,电缆首端与末端的电压波形,图中,实线、虚线分别为首端、末端电压波形。

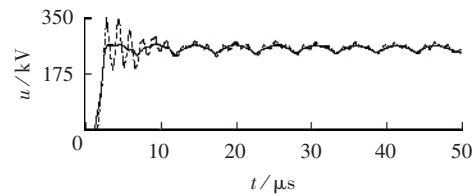


图 5 首端电压与末端电压波形 (断路器断开)
Fig.5 Lightning over-voltages of both cable ends with open circuit breaker

3.2 仿真分析

由于线路避雷器的作用,电缆首端的雷电过电压基本保持在避雷器的雷电冲击保护水平,即避雷器在 5 kA 下的残压 266 kV 的附近。在断路器断开与闭合 2 种状态下,电缆末端电压高于首端电压,这是由于雷电波在电缆两端多次折/反射过程中,振荡幅值增大。因此,工程设计中,避雷器应尽量靠近电缆首端,以限制电缆末端雷电过电压。

DL/T 620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》中规定:“电缆及其附件的全波额定雷电冲击耐压与避雷器标称放电电流下的残压间的配合系数取 1.4 ”^[6]。比较图 4 中曲线可知:对于断路器合上的状态,配合系数在 1.2 上下浮动,小于规定配合系数 1.4 ,表明仅在电缆首端装设避雷器即可。

然而,对于模型 1(断路器断开)所描述的恶劣情况,由于断路器打开,母线避雷器无法对电缆末端雷电过电压起到抑制作用,并且侵入波在断路器断口之间会发生多次反射叠加,雷击多次反射使电缆末端出现频率较高的振荡冲击波(如图 5 所示)^[10],最终导致电缆末端过电压增加。由图 4 可以看出,电缆首末两端最大电压比接近 2.0 ,远大于规程规定的配合系数 1.4 。因此,必须限制 GIS 进线电缆的长度以限制电缆末端的雷电过电压。

3.3 电缆长度及接线方式对过电压的影响

图 5 中,电缆末端电压最大值已达 350 kV ,由此可以看出当电缆长度大于 70 m 时,仅电缆首端装设避雷器已经无法满足保护要求,需要考虑在变电所内部再装设避雷器。此外,为了限制过电压,一般电缆线路应采用金属护套一端接地或两端接地的形式,增加电缆削弱过电压的能力。因此,在实际设计中,并非绝对按照规程中所述以电缆长度 50 m 作为是否安装所内避雷器的依据,可以结合实际情况,综合考虑是否在 GIS 内装设避雷器。

4 结论

运用 ATPDraw 仿真计算了与架空线相连的进线电缆,在雷击架空进线保护段之外的侵入波情况下,电缆的末、首端雷电过电压及比值。仿真根据实际运行经验选取断路器断开、隔离刀闸合上的状态(模型 1)作为雷电波侵入计算的背景,具有一定的实际价值。分析比较模型 1 中不同长度电缆的末、首端雷电过电压及比值,当电缆长度大于 70 m 时,仅电缆首端装设避雷器已经无法满足保护要求,需

要考虑在 GIS 内部配置避雷器。

实际情况中,在雷电波作用下,电缆的接线方式对削弱雷电波幅值具有一定的影响,考虑这一特性后,电缆末端雷电过电压将有所降低,因此研究结果具有一定的裕度。此外,避雷器应尽量靠近电缆头布置,限制电缆首端过电压,削弱振荡幅值,从而控制电缆末端电压上升。

参考文献:

- [1] BACKERS J. 城市供电网使用 GIS 与 AIS 系统的比较[J]. 国际电力,1999(4):38-43.
BACKERS J. Comparison of GIS and AIS system for urban supply networks[J]. International Electric Power for China,1999(4):38-43.
- [2] 江日洪,罗晓宇,曹世勋,等. 长电缆线路雷电冲击过电压计算及绝缘配合[J]. 供用电,2000,17(1):13-15.
JIANG Ri-hong, LUO Xiao-yu, CAO Shi-xun, et al. Calculation of lightning impulse overvoltage on long underground cable lines and insulation coordination[J]. Distribution & Utilization,2000,17(1):13-15.
- [3] 张纬铎,何金良,高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [4] 张翠霞,杜澎春,王鑫方. 进线具有电缆段的 110 kV 变电所防雷保护研究[J]. 电网技术,1998,22(8):54-59.
ZHANG Cui-xia, DU Peng-chun, WANG Xin-fang. Research on lightning protection for 110 kV substation with cable inlet section[J]. Power System Technology,1998,22(8):54-59.
- [5] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 620-97 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [6] 李明贵,鲁铁成. 高压架空输电线路雷击过电压的仿真计算与分析研究之一:输电线路雷击过电压仿真计算模型的建立[J]. 广西电力,2005(4):7-10.
LI Ming-gui, LU Tie-cheng. Simulated calculation and analysis of lightning overvoltage on overhead high voltage power transmission line(I) build-up of model for simulated calculation of lightning overvoltage on power transmission lines[J]. Guangxi Electric Power,2005(4):7-10.
- [7] 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.
SUN Xu, XU Bing. Analysis and calculations on lightning inrush surge of 220 kV long cable-GIS system[J]. Guangdong Electric Power,1998,11(5):11-12.
- [8] 刘英,韩彦华,施围,等. 110 kV GIS 投切空载变压器过电压研究[J]. 高压电器,2000,36(4):7-9.
LIU Ying, HAN Yan-hua, SHI Wei, et al. Study on overvoltage of no-load transformer switched by 110 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus,2000,36(4):7-9.
- [9] 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):39-42.
LI Han-ming, CHEN Wei-jiang, ZHANG Cui-xia, et al. Incoming lightning protection for 110 kV and 220 kV open-air substations at lightning intensified area[J]. Power System Technology,2002,26(8):39-42.
- [10] 陈梁金,李文艺,施围. 750 kV GIL-GIS 系统雷电侵入波防护的研究[J]. 高电压技术,2005,31(6):39-41.
CHEN Liang-jin, LI Wen-yi, SHI Wei. Study on the protection of lightning intruding waves in 750 kV GIL-GIS system[J]. High Voltage Engineering,2005,31(6):39-41.
- [11] 蔡金博. 500 kV 锦西沙河营变电所防雷保护及设备绝缘选择[J]. 吉林电力,2002(1):9-13.
CAI Jin-bo. Protection of lightning and selection for insulation of equipment on 500 kV Shaheying substation in Jinxi[J]. Jilin Electric Power,2002(1):9-13.
- [12] 王琦,李六零,胡攀峰,等. 金属氧化物避雷器对气体绝缘开关装置暂态地电位升高的抑制作用[J]. 电力设备,2005,6(8):12-13.
WANG Qi, LI Liu-ling, HU Pan-feng, et al. Suppression of transient ground potential rise in GIS by using MOA[J]. Electrical Equipment,2005,6(8):12-13.
- [13] 吴根富. 氧化锌避雷器的应用与分析[J]. 电气开关,2004(5):40-43.
WU Gen-fu. Application and analysis for a zinc oxide arrester[J]. Electric Switchgear,2004(5):40-43.
- [14] 邓晓林. 变电站入侵波防护探讨[J]. 四川电力技术,2006,29(4):33-35.
DENG Xiao-lin. Discussion on protection for invading wave of substation[J]. Sichuan Electric Power Technology,2006,29(4):33-35.
- [15] 马春华. ZnO 避雷器在架空输电线路防雷保护中的应用[J]. 电气开关,2006(4):28-30.
MA Chun-hua. Application of ZnO arrester in lightning protection of overhead transmission line[J]. Electric Switchgear,2006(4):28-30.
- [16] 郭洁,刘良壁,朱跃. 雷电冲击下金属氧化物避雷器动作负荷研究[J]. 高电压技术,2005,31(2):18-20.
GUO Jie, LIU Liang-bi, ZHU Yue. Operation duty of metal oxide surge arresters at lightning surge[J]. High Voltage Engineering,2005,31(2):18-20.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

丁晨(1982-),女,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为雷电过电压保护(E-mail:coolqoo2008@yahoo.com.cn);
郑建勇(1966-),男,福建福州人,教授,从事电力电子方面的研究;
项玲(1980-),女,上海人,博士研究生,从事高压直流输电的研究。

Lightning over-voltage at ends of inlet cable in 110 kV GIS substation

DING Chen, ZHENG Jian-yong, XIANG Ling
(Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: GIS (Gas Insulated Switchgear) is widely used in urban power network. The parameter setting of cable, GIS, model of lightning inrush surge, arrester and electrical equipments are expatiated. With ATP-EMTP, a single-phase simplified model under lightning intrusion is built for the connection section of overhead line and cable, including arrester, GIS and transformer. The lightning over-voltages at both ends of the cable are simulated for different circuit breaker states and cable lengths. Relationships between the over-voltage ratio of both ends and the cable length are analyzed. Simulation results show that, when the cable length is over 70 m, the arrester installed only at the farther end of cable can not meet requirements of protection, another arrester installed in GIS is necessary.

Key words: GIS; lightning over-voltage; lightning inrush surge; arrester