

500 kV HGIS 变电站防雷保护配置研究

傅文韬

(国网湖南省电力公司汨罗市供电分公司 湖南 汨罗 414400)

摘要: 500 kV HGIS 变电站在结构上和 GIS 变电站不同, 站内电气设备的雷击过电压水平也会不同。因此, 需要对 500 kV HGIS 变电站进行雷电侵入波过电压研究, 以确保在雷电波侵入时, 站内电气设备上的电压水平不超过其绝缘水平。以某 500 kV HGIS 变电站为例, 考虑了多种运行方式、线路高抗、线路电晕等影响因素, 采用国际上通用的仿真计算程序 EMTP, 建立了该变电站的雷击过电压仿真模型; 并对不同运行方式下, 该变电站雷电侵入波过电压水平进行了分析计算。根据仿真结果, 提出了可能的雷击过电压保护方案, 具有实际工程参考价值。

关键词: HGIS 变电站; 防雷保护; EMTP; 避雷器

Abstract: The HGIS substation and GIS substation of 500 kV level are different in structure, and the lightning over-voltage level of their electrical apparatus is also different. So it is necessary to study the lightning over-voltage in 500 kV HGIS substation in order to ensure that the electrical apparatus will keep the voltage level in normal range under any operating modes during the lightning wave intrusion. Taking a 500 kV HGIS substation for example and taking the various influencing factors into account, including operating modes, line reactor and line corona, the simulation model of lightning over-voltage of the substation is established using electromagnetic transient program (EMTP) as simulation tool, and the lightning over-voltage level of the substation is analyzed and calculated in various operating modes. Based on simulation results, a possible protection scheme against lightning over-voltage is proposed, which has a reference value for practical engineering.

Key words: HGIS substation; protection against lightning; EMTP; lightning arrester

中图分类号: TM86 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0029-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.007

0 引言

雷电过电压是影响超高压输电网络正常运行的重要因素之一。一旦发生雷害事故, 将直接影响系统的安全可靠运行, 造成严重的后果^[1]。目前, 500 kV 电压等级的变电站有 3 种类型: 500 kV GIS、500 kV AIS、500 kV HGIS。变电站设备的雷电过电压情况与变电站结构紧密相关, 不同类型的变电站, 防雷保护配置情况也不一样。

对于 500 kV GIS 变电站: 1) GIS 套管的波阻抗远小于架空线的波阻抗; 2) 雷电流从架空线进入 GIS 反射波的极性与入射波极性相反; 3) GIS 变电站各设备的电气距离较短, 有利于整个变电站的防雷保护。对于 500 kV GIS 变电站防雷保护配置, 往往采用在线路靠 CVT 侧和主变压器侧各安装 1 组避雷器以及母线和高压电抗器回路不安装避雷器的配置方案^[2-3]。AIS 变电站, 各设备相距较远, 往往

采用在高压电抗器、线路侧 CVT、母线以及主变压器侧各安装 1 组避雷器^[4-5]。

HGIS 变电站的结构与 GIS 变电站基本相同, 但 HGIS 变电站母线为裸露的, 可达几百米长。当雷电波从含高压电抗器的线路侵入时, 变电站各设备的雷电过电压会不同, 尤其会对进线端设备产生很大的过电压威胁。一方面, 母线的波阻抗与线路的波阻抗相差不大, 雷电流从架空线进入母线后的反射波可忽略不计; 另一方面, 裸露的母线加大了高压电抗器和 GIS 套管的距离, 计算时采用的雷电流的波头为 2.6 μs , 当高压电抗器上的雷电过电压达到峰值时, 从 GIS 入口处返回的反射波还没到达高压电抗器, 这与 GIS 变电站的情况不同, 因此, 需要对 500 kV HGIS 变电站雷电侵入波在变电站电气设备上所产生的过电压进行仿真计算, 找出过电压的分布变化规律, 对限制雷电过电压、保护电气设备可提供有价值的参考依据, 以进一步优化变电站的工程设计。

以某 500 kV HGIS 变电站为例, 采用国际通用

的 EMTP 电磁暂态仿真计算程序,研究了不同运行方式下以及不同雷击点下雷电过电压保护方案,根据过电压与绝缘水平要求,制定了该变电站防雷保护配置方案。

1 计算模型及参数

1.1 雷电流

雷电放电过程分为先导过程和主放电过程。研究表明,先导通道具有分布参数的特征,可近似为一个具有电感、电容均匀分布参数的导电通道,波阻抗为 Z_0 。其过程可以简化为 1 个数学模型,将其考虑为 1 个电流源,彼得逊等值电路如图 1 所示。

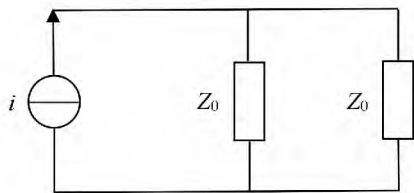


图1 雷电流源等值电路

本次计算选取概率为 0.35% 的雷电流,其幅值为 216 kA,雷电流的波形选择为 2.6/50 μ s。反击时,雷电通道的波阻抗 Z_0 取 300 Ω [6]。

1.2 绝缘子串闪络模型

绝缘子串的闪络由绝缘子串的伏秒特性曲线和电压曲线确定。如图 2 所示,绝缘子串的伏秒特性曲线和电压曲线的相交时刻 t_2 为闪络时刻,相交点电压 U_2 为闪络电压。

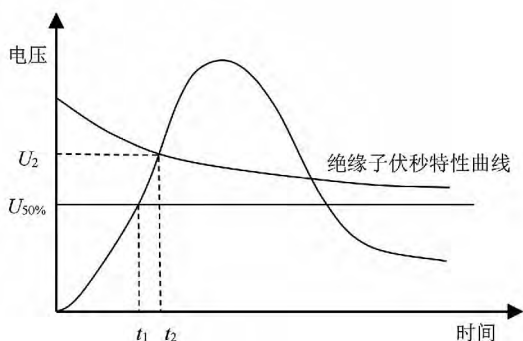


图2 绝缘子串的闪络原理

对于 500 kV 输电线路,导线上绝缘子串处工频电压不可忽略。雷击杆塔塔顶时,其绝缘子串的工频电压瞬时值不确定,考虑绝缘子串最易闪络的情况,即雷击发生时,导线上绝缘子串处的工频电压达到幅值,且极性与塔顶电位的极性相反。本次计算中,工频电压取输电线路的相电压峰值 429 kV [2]。

采用 EMTP 程序中的 TACS(数值仿真)功能,

考虑绝缘子串冲击伏秒特性,并准确计算作用在绝缘子串上的过电压,模拟绝缘子串闪络过程。

1.3 输电线计算模型

变电站的雷电侵入波分为绕击和反击。这里考虑雷电过电压情况更严重的反击波侵入方式 [4]。

该 500 kV HGIS 变电站的进线段采用双避雷线,同杆单回五导线输电系统。仿真中,采用 ATP 中 LCC 架空线路模块仿真输电线路,并选择 JMARTI 模型。实测结果表明, JMARTI 模型的计算结果与实际的结果较接近 [3]。

站内导线视为无畸变线,波阻抗为常数且不计电晕影响。站内导线的波阻抗由式(1)决定。

$$Z_c = 60 \ln\left(\frac{h_a}{r_c}\right) \quad (1)$$

式中: r_c 为导体半径; h_a 为导体平均高度。

对于 SF₆ GIS 管线,忽略导体电阻的焦耳损耗,视其为理想的无损传输线。

GIS 管道中导体的波阻抗为

$$Z_{GIS} = 60 \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (2)$$

式中: R 为管道半径; r 为导体半径; R/r 通常大于或等于 e ,故 GIS 管线波阻抗在 60 Ω ~ 75 Ω 之间。本次计算, GIS 管线波阻抗取 65 Ω 。

1.4 电晕模型

线路上产生的电晕是雷电波衰减和畸变的主要因素。在研究变电站雷电过电压时,应将进线段电晕考虑进去。用动态电容去模拟电晕引起的衰减和变形,基于线路的伏秒特性,用 TACS 组合模型模拟电晕,如图 3 所示。

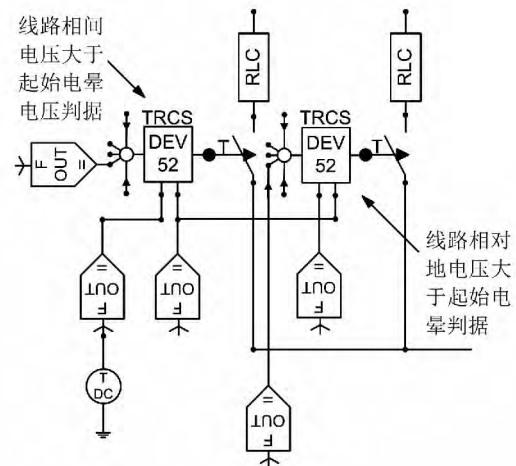


图3 电晕模型

图 3 中 2 个 DEVICES 装置,分别为线路相对地、相与相之间发生起始电晕的判据。

表 1 氧化锌避雷器的电气特性

避雷器类型	额定电压 /kV	直流 1 mA 参考电压 /kA	8/20 μs 雷电冲击残压 /kV	
			10 kA	20 kA
Y20W5 - 420/1046	420	565	974	1 046
Y20W5 - 444/1106	444	597	1 015	1 106

1.5 避雷器模型

500 kV 输电系统中,已大量采用氧化锌避雷器。这次研究的变电站采用两种 500 kV 金属氧化锌避雷器,分别为变电站型和线路型避雷器。

研究中,避雷器采用 IEEE Std C62.22 - 2009 推荐的计算模型,在 EMTP 程序中用分段指数化的方法来模拟避雷器的伏安特性^[7],其电气特性见表 1。

1.6 杆塔模型

从塔顶侵入杆塔的雷电流将在杆塔、避雷线、绝缘子串及导线、大地组成的系统中发生复杂的波过程。雷电波沿杆塔传播时,不同位置杆塔的波阻抗是不同的。近几年,国外一些专家使用多波阻抗来模拟输电线路的杆塔,建立了杆塔的多波阻抗计算模型,其具体的等值电路如图 4 所示。

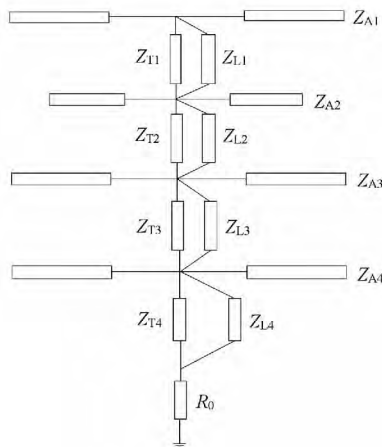


图 4 杆塔的多波阻抗等值电路

主架每部分阻抗 Z_{Tk} 为

$$Z_{Tk} = 60 \left(\ln \frac{2^{3/2} h_k}{r_{ek}} - 2 \right) \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中 $r_{ek} = 2^{1/8} (r_{Tk}^{1/3} r_B^{2/3})^{1/4} (R_{Tk}^{1/3} R_B^{2/3})^{3/4}$ 。

支架每部分的波阻抗 Z_{Lk} 为

$$Z_{Lk} = Z_{Tk} / 9 \quad (4)$$

杆塔横担波阻抗 Z_{Ak} 为

$$Z_{Ak} = 60 \ln \frac{2h_k}{R_{Ak}} \quad (5)$$

1.7 变电站设备模型

站内设备如变压器、隔离开关、断路器、互感器等,在雷电波作用下,均可等值为冲击入口电容,它

们之间由分布参数线段相隔^[5]。站内各设备的等值冲击入口电容值,如表 2 所示。

表 2 变电站电气设备过电压计算等值参数

名称	参数
SF ₆ GIS 管线	$Z = 65 \Omega \quad V = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$
架空线	$Z = 280 \Omega \quad V = 210 \text{ m}/\mu\text{s}$
变压器 (TR) /pF	5 000
电容式电压互感器 (CVT) /pF	5 000
高压电抗器 (REA) /pF	5 000
电流互感器 (TA) /pF	700
断路器 (CB) /pF	300
GIS 套管 /pF	200
隔离开关 (DS) /pF	80

2 运行方式

2.1 运行方式的选择

某 500 kV HGIS 变电站一次接线图,如图 5 所示。

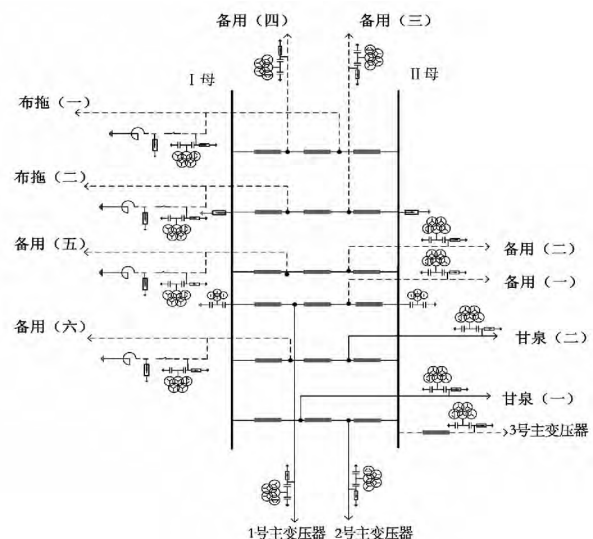


图 5 500 kV HGIS 变电站一次接线图

变电站不同的运行方式对设备雷电过电压水平影响较大。研究发现,网络拓扑结构较简单的运行方式的雷电过电压比拓扑结构更复杂的运行方式更为严重^[6]。一般认为,一线一变运行方式下,设备的过电压最为严重。

根据一线一变、一线两变、两线一变 3 种运行情

表 3 各设备的雷电过电压值

配置	运行情况	线路侧 CVT/kV	主变压器/kV	母线/kV	GIS 套管/kV	避雷器最大电流/kA
配置 1	一线一变	1 087.5	1156.5	1 298	1 248	16.5
	一线两变	1 005	1 130	1 130.3	1 142.7	13.28
	两线一变	1 012	1 065	1 046	1 089	10.9
	最大值	1 087.5	1 156.5	1 298	1 248	16.5
配置 2	一线一变	1 620	1 131	1 118	1 452.7	13.5
	一线两变	1 567.2	1 142	1 166.1	1 298.8	15.4
	两线一变	1 130	959.9	1 002	1 017.5	6.88
	最大值	1 620	1 142	1 166.1	1 452.7	15.4
配置 3	一线一变	2 122.4	1 197.5	1 689.1	1 793.3	19.9
	一线两变	1 521.9	1 171.5	1 428	1 378.8	16.9
	两线一变	1 568.9	1 102	1 277.6	1 268.7	10.9
	最大值	2 122.4	1 197.5	1 689.1	1 793.3	19.9

况 选取了 16 种运行方式进行详细分析。另外,单独分析并联高压电抗器的防雷保护。以布拖(一)线路为雷击点为例,一线一变运行方式下的计算等值电路如图 6 所示。

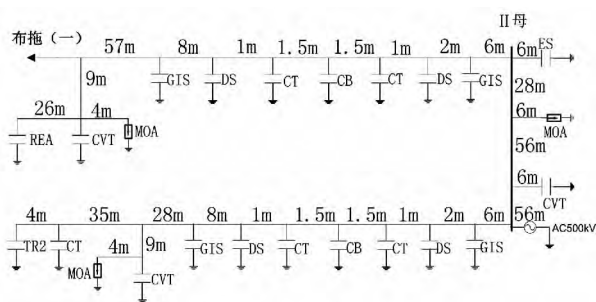


图 6 布拖(一)进波的等值电路图

2.2 避雷器的安装位置

线路侧避雷器的安装点为距离线路侧 CVT 4 m,距离高压电抗器 30 m。高压电抗器避雷器的安装位置为距离高压电抗器 4m,距离线路侧 CVT 30 m。母线侧避雷器的安装位置为布拖(二)间隔两端的母线处,距离母线上端 66 m。根据工程要求,各主变压器侧均安装避雷器,安装位置为距离主变压器 30 m,如图 6 所示。

3 仿真分析

在分析研究和计算过程中,重点考虑了以下 3 个方面:1) 不同运行方式的影响;2) 高压电抗器对线路侧 CVT、母线的防雷保护的影响;3) 500 kV HGIS 变电站防雷保护配置方案分析。

3.1 线路侧 CVT、母线的防雷保护的影响分析

根据上述各元件模型,搭建了各种运行方式的仿真模型。针对母线和线路侧防雷保护配置分析

(不含高压电抗器线路),考虑以下 3 种保护配置方案:

- 1) 线路侧加装避雷器,母线不加避雷器;
- 2) 母线加装避雷器,线路侧不装避雷器;
- 3) 母线和线路侧都不加避雷器。

根据某 500 kV HGIS 变电站实际参数,用 EMTP 软件进行建模仿真。本次研究变电站各相邻节点的最短电气距离为 1 m,波速为光速,因此步长取 0.001 μs 即可,仿真计算时间为 50 μs。雷击点为进线段的 2 号~6 号杆塔塔顶^[6],雷电过电压检测点为线路侧 CVT、高压电抗器、GIS 套管以及母线。由于母线长度达到了 150 m,所以母线上过电压检测点有 3 个,分别为雷电进波处以及母线两端处。3 种配置下,各设备的雷电过电压仿真结果如表 3 所示。

取站内除变压器以外设备的雷电冲击耐受电压为 1 550 kV,设备绝缘裕度参考 IEC71-2 标准,内绝缘裕度取 1.15,则各设备允许的最大过电压为 1 348 kV。当采用配置 1 时,最大过电压出现在母线侧为 1 298 kV,低于 1 348 kV。避雷器的最大放电电流为 14.5 kA,小于避雷器的标称电流 20 kA。可见,在线路加装避雷器,母线不加装避雷器的情况下可以满足绝缘裕度要求。采用配置 2 时,线路侧电压互感器和 GIS 套管处出现的最大过电压超过允许值,不能满足绝缘要求。同样,配置 3 也不能满足绝缘要求。

综合上述分析,对于不含高压电抗器的线路,只需在进线侧加装 1 组避雷器就能满足防雷保护的要求。

3.2 进线段含高压电抗器的防雷保护分析

考虑以下 3 种保护配置方案:

表4 各设备的雷电过电压值最大值

配置	线路侧 CVT/kV	高压电抗器/kV	母线/kV	GIS 套管/kV	避雷器最大电流/kA
配置 1	1 142.1	1 573.1	1 384.6	1 334.5	14.2
配置 2	1 532.7	1 689	1 304.3	1 286	15.3
配置 3	1 603	1 264	1 368.4	1 398.1	19.5

表5 3种配置下各设备的雷电过电压值

配置	线路侧 CVT/kV	高压电抗器/kV	母线/kV	GIS 套管/kV	避雷器最大电流/kA
配置 1	1 152	1 646	1 116	1 136	14.1
配置 2	1 335	1 084	1 082	1 142	12.3
配置 3	1 094	1 163	1 067	1 120	9.2

1) 线路侧 CVT 加装避雷器 ,高压电抗器和母线不加装避雷器;

2) 线路侧 CVT 和母线不加装避雷器 ,高压电抗器回路加装避雷器;

3) 线路侧 CVT 和高压电抗器不加装避雷器 ,母线加装避雷器。

由表 4 可得 ,配置 1 到配置 3 都存在设备过电压超标的情况 ,都不满足绝缘要求。因此 ,可得以下 3 个结论: 1) 进线端的避雷器不管是安装在高压电抗器回路还是 CVT 处 ,都不能有效保护进线端设备; 2) 线路侧安装的避雷器不能保护母线及母线上设备; 3) 母线上避雷器距离线路侧 CVT 和高压电抗器都比较远。

可见 ,高压电抗器加大了进线端设备的雷电过电压水平 ,与前面分析一致。

3.3 500 kV HGIS 变电站防雷保护配置选择

由表 2 可得 ,单独的避雷器配置方案不能满足变电站的防雷要求 ,所以考虑母线与进线端设备相互配合加装避雷器的方案 ,考虑以下 3 种配置:

1) 线路侧 CVT 加装避雷器 ,母线加装避雷器 ,高压电抗器不加装避雷器;

2) 高压电抗器加装避雷器 ,母线加装避雷器 ,线路侧 CVT 不加装避雷器;

3) 高压电抗器、线路侧 CVT、母线都加装避雷器。

以 4 种运行方式为例 ,3 种配置下各设备的最大过电压值仿真结果如表 5 所示。

由表 5 可得 ,配置 1 方式下高压电抗器的过电压达到了 1 646 kV ,不满足设备的绝缘要求; 在配置 2 和配置 3 下 ,各设备的最大雷电过电压分别为 1 329 kV 和 1 158 kV ,满足该变电站设备绝缘要求。但配置 2 比配置 3 少装一组避雷器 ,更经济; 因此 ,从变电站防雷的可靠性和经济性出发 ,高压电抗器和母线侧安装避雷器的配置方案 ,能有效地满足该 500 kV HGIS 变电站的防雷要求。

4 结 论

以某 500 kV HGIS 变电站为对象 ,所选 16 种情况均为网络拓扑结构较简单的运行方式 ,其造成的雷击过电压的影响通常比拓扑结构复杂的其他运行方式更为严重 ,此外 ,考虑了线路电晕和工频电压的影响 ,根据该变电站实际结构参数搭建仿真模型 ,更有实际意义。

根据仿真分析 ,提出了该 500 kV HGIS 变电站的防雷保护配置方案 ,并得出以下结论:

1) 进线段不含高压电抗器回路时 ,只需要在线路侧安装 1 组避雷器 ,母线不需要安装避雷器;

2) 进线段含高压电抗器回路时 ,高抗回路和母线需安装避雷器;

3) 线路高压电抗器加大了进线端设备的雷电过电压水平。

参考文献

[1] 李飞 ,周力行 ,黄辉先. 500 kV 变电站并联电抗器雷电侵入波仿真研究[J]. 电瓷避雷器 ,2008(4) :36 -38.

[2] 谢辉春 ,文习山 ,邓维 ,等. 500 kV GIS 变电站雷击进线段塔顶雷电过电压的仿真研究[J]. 电气应用 ,2006 ,25(3) :63 -66.

[3] 吕健双. 500 kV GIS 变电站雷电过电压研究[D]. 武汉: 华中科技大学 ,2012.

[4] 李洪涛. 500 kV 变电站雷电侵入波保护研究[D]. 重庆: 重庆大学 ,2006.

[5] 张玉秋 ,王子春 ,杨利军. 500 kV 变电所防雷保护计算分析[J]. 中国电力 ,1995(8) :12 -16.

[6] 袁兆祥 ,周洪伟. 500 kV HGIS 变电站雷电侵入波的计算分析[J]. 高电压技术 ,2007 ,33(6) :71 -75.

[7] 吴伯华 ,陈继东. 500 kV 线路型避雷器雷电过电压的保护性能[J]. 高电压技术 ,2002 ,28(6) :23 -26.

(收稿日期: 2015 - 11 - 24)