

750 kV 敞开式变电站雷电侵入波的防护

高媛, 王宏斌, 雷娟, 刘振, 郭洁

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 雷电波沿着输电线路侵入变电站,对变电站设备构成了很大的威胁。为此笔者将某750 kV敞开式变电站和进线段结合起来,根据具体的雷击条件,将雷电流直接作用于雷击点,把输电线路、铁塔、变电站内的连接线、母线和电气设备作为一个网络整体来考虑。采用国际通用的电磁暂态计算程序(EMTP)对雷电侵入波过电压进行了计算,给出了不同运行方式下不同避雷器配置方案的变电站设备上的绕击和反击雷电过电压最大值并进行了分析,最后提出了避雷器的布置方案。结果表明,MOA可以抑制由雷电侵入波产生的过电压,从而能够有效保护变电站设备。

关键词: 雷电过电压; 侵入波; 反击; 绝缘水平

中图分类号: TM86

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)05-0445-04

Lightning Protection of 750 kV AIS Substation against Intruding Wave

GAO Yuan, WANG Hong-bin, LEI Juan, LIU Zhen, GUO Jie

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

Abstract: Lightning surge intrudes substation along transmission line to endanger the equipments in a substation. Lightning overvoltage is generated by backflash and shielding failure on the overhead line. In this paper, the overvoltage of 750 kV AIS substation caused by lightning intruding wave is investigated, and the resulting overvoltage magnitudes at several basic points in the substation (including input line, bus bar and power transformer) are computed. A simulation model is established considering the electric equipments, transmission line, steel tower, inner connecting line, and bus bar together as a network. The lightning intruding overvoltage of different running modes and configuration schemes of MOA are calculated by using EMTP (electro-magnetic transient program), and an optimal MOA configuration is presented. The result shows that lightning protection of substation can be improved by introducing MOA and optimizing its configuration based on accurate overvoltage analysis.

Key words: lightning overvoltage; intruding wave; return stroke; insulation level

0 引言

超高压交流输电可减少线路回数,节省线路走廊。超高压输电线路的雷击有2个特点^[1]:①线路的绝缘水平很高,雷击避雷线或塔顶发生反击闪络的可能性较低;②线路杆塔较高,较易发生绕击。架空进线段(一般为2 km)虽加强绝缘和有避雷线,实际上进线段和非进线段并无本质差异,完全可能受雷击而形成侵入波。架空输电线路遭受雷击时将产生雷电波沿导线传播的波过程,变电站内有许多联络短线(如变压器到母线和避雷器的连线等),它们和输电线路一样,在持续时间极短的雷电波作用下,表现为各个联络线段间行波的传播和快速折、反射过程,并且通常在此过程中产生瞬时幅值极高的过电

压,容易对设备造成危害,一旦某个设备因为遭受雷电过电压而不能正常工作时,就会对整个750 kV系统有着较大的影响。敞开式750 kV变电站由于电气设备多,各电气设备距离较远,因此从可靠性和经济性的角度考虑,需对雷电侵入波过电压进行研究,以确保有雷电侵入时在各种运行方式下站内各电气设备的过电压水平不超过其绝缘水平^[2]。笔者以某实际750 kV变电站为例,其电气接线图见图1,采用国际通用的电磁暂态计算程序(EMTP),将变电站和进线段结合起来,落雷点分为远区落雷和近区落雷,计算不同运行方式下不同避雷器配置方案的变电站设备上的绕击和反击雷电过电压最大值。

1 模型的建立

在分析计算中,其仿真模型的建立主要考虑如

收稿日期:2007-08-30; 修回日期:2008-04-09

基金项目:国家自然科学基金(50577051)。

作者简介:高媛(1981-),女,浙江省杭州市人,硕士研究生,研究方向为电力系统过电压及其防护。

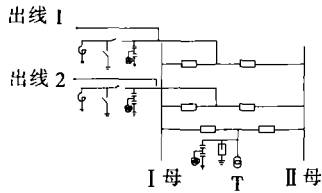


图1 变电站电气接线图

下因素:

(1)雷电流模拟。在超高压输电线上单相雷击占大多数,而且雷云绝大多数带负电荷,故只考虑单相负极性雷击,雷电流波形取 2.6/50 μs 的三角波。反击时线路最低耐雷水平取 220 kA(概率为 0.001%),雷电通道波阻抗取 300 Ω;绕击时最大绕击电流取 32 kA,雷电通道波阻抗取 800 Ω。

(2)进线段输电线路的模拟。输电线路为同塔双回架空进线方式,线路波阻抗按单相等值波阻抗计算,波阻抗为 667 Ω,波速为 2.6×10⁸ m/s。导线近似认为是无畸变线,波阻抗为一常数,不计电晕的影响^[3],这是从严考虑^[4]。为了防止在所研究的时间范围内,波从雷击点传到另一侧线路末端后产生反射波再返回雷击点,影响该处过电压的计算值,笔者采用在线路末端连接一条相对比较长的与所研究线路具有相同特性的线路的方法来消除此影响^[5]。

(3)杆塔的模拟。目前,关于杆塔模型通常有集中电感模型、单波阻抗模型、多波阻抗模型。由于 750 kV 同塔双回杆塔高达 90 m,集中电感模型和单波阻抗模型已不适用^[6],笔者采用文[7]提出的等值分布多波阻抗模型。

(4)绝缘子串的模拟。无论是对反击还是绕击侵入波的计算绝缘子串的准确模拟都至关重要。笔者采用绝缘子串的 50%冲击放电电压(4 093 kV)作为绝缘子串的闪络判据,将其模拟成一个电压控制开关,当两端的电压达到其 50%放电电压时该开关即导通,意味着绝缘子串放电。

(5)变电站内设备的模拟。雷电波含有频率极高的谐波,因此变电站内如变压器、高压并联电抗器、电容式电压互感器(CVT)、断路器、隔离刀闸和支柱绝缘子等均采用该设备的对地等值电容来等效。各设备的对地等值电容见表 1。

表 1 变电站各设备对地等值电容

设备名称	对地等值电容/pF	设备名称	对地等值电容/pF
变压器	5 000	隔离刀闸	150
高压电抗器	3 000	断路器	300
电压互感器	5 000	支柱绝缘子	150

(6)落雷点的选取。计算中将进线段和变电站作为一个网络整体来考虑,从而较完整地反映实际波过程。落雷点的选择分别考虑远区落雷在进线段的第六基杆塔,近区落雷在进线段的第一基杆塔。

(7)工频电压的影响。750 kV 线路工作电压较

高,在耐雷水平计算中忽视工频电压的影响将造成较大的误差^[8]。反击和绕击时选择设备上不同的 750 kV 工频电压的幅值和相位,然后取过电压最大值。

(8)避雷器模型。考虑到靠近线路侧雷电过电压情况较为严重,线路和高抗侧 MOA 的额定电压为 648 kV,而变压器和母线侧 MOA 的额定电压为 600 kV。其伏安特性参数见表 2。

表 2 避雷器伏安特性参数

安装位置	额定电压/kV	伏安特性				
		I/kA	1	2	10	20
高抗、线路侧	648	U/kV	1 250	1 289	1 398	1 491
变压器、母线侧	600	U/kV	1 158	1 194	1 295	1 380

金属氧化物是一种高度非线性电阻^[9],难以用一个指数函数来描述整个范围内的特性,计算雷电过电压时只需采用雷电特性段的伏安特性数据,利用程序自动生成多指数函数。对于 750 kV 避雷器须加装并联均压电容的方法来改善避雷器的电位分布,再计及避雷器的对地杂散电容的影响,共计非线性电阻并联电容为 43 pF。

(9)变电站本期正常运行方式为两线一变运行,本期研究偏严考虑,选用一线一变运行方式进行计算。主要运行方式有以下 2 种,见图 2、3。

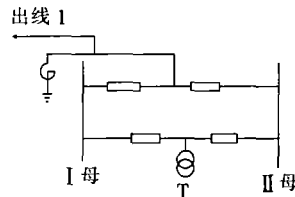


图 2 变电站运行方式 1

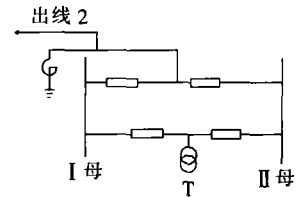


图 3 变电站运行方式 2

2 MOA 布置方案

变电站内所有进线端加装线路避雷器既可限制正常运行情况下的雷电侵入波过电压,又可保护因多重雷击、线路处于准备并网状态和线路处于热备用 3 种情况的单线运行方式的断路器。不管雷击哪个杆塔,变压器上的过电压值都要比其他设备上的大,这是因为当雷电波传到变压器端时,由于波的折射使电压幅值增大造成的。而且由于变压器在输变电中的重要性,变压器端必须加电站型避雷器。关于高压并联电抗器和母线是否安装避雷器,需要根据具体过电压水平和绝缘水平决定。暂定以下 4 种避雷器配置方案,并对其雷电过电压进行计算。图 4 为母线和高抗侧均不装避雷器的布置示意图,称为 MOA 布置方案 1。同时定义加高抗侧避雷器为 MOA 布置方案 2,加母线避雷器为 MOA 布置方案 3,母线和高抗均加避雷器为 MOA 布置方案 4。示意图见

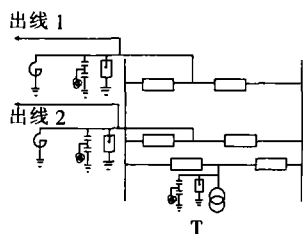


图4 MOA布置方案1

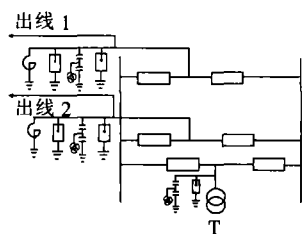


图5 MOA布置方案2

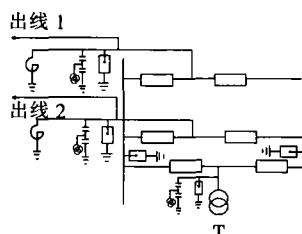


图6 MOA布置方案3

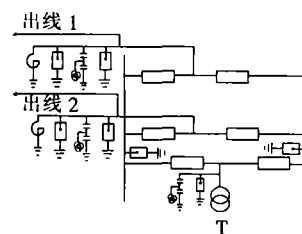


图7 MOA布置方案4

图4~7。

3 计算结果分析

750 kV 变电所设计技术规定中,变压器额定雷电冲击耐受电压(峰值)为 1 950 kV,其余各设备额定雷电冲击耐受电压(峰值)为 2 100 kV。取绝缘裕度为 1.15,则变压器允许过电压为 1 696 kV,其余各设备允许过电压为 1 826 kV。在计算中除了考虑各种影响因素外,对 750 kV 变电站主要运行方式进行了大量的计算,结果见表 3~5。表中 T、REA、CVT、DS、CB、LA₁、LA₂、LA₃、LA₄、LA₅ 分别代表变压器、高

压并联电抗器、电容式电压互感器、隔离刀闸、断路器、线路侧避雷器、高抗侧避雷器、母线 1 避雷器、母线 2 避雷器、变压器侧避雷器。表 3 为运行方式 1 时 4 种避雷器配置方案情况下雷绕击 1~6 号杆塔各设备的最大过电压水平以及流过避雷器的电流。表 4 为运行方式 2 时 4 种避雷器配置方案情况下雷绕击 1~6 号杆塔各设备的最大过电压水平以及流过避雷器的电流。表 5 为两种运行方式下避雷器按照方案 4 布置情况下雷直击 1~6 号杆塔各设备的最大过电压水平以及流过避雷器的电流。

对表 3~5 的各种运行方式下不同避雷器配置

表 3 运行方式 1 时雷绕击不同杆塔最大过电压

避雷器布置方案	电气设备上最大过电压/kV					MOA 电流/kA				
	T	REA	CVT	DS	CB	LA ₁	LA ₂	LA ₃	LA ₄	LA ₅
方案 1	1 694.3	1 798.6	2 028.7	2 062.0	2 070.7	16.6				23.0
方案 2	1 674.8	1 379.4	1 997.3	2 042.6	2 039.9	11.7	6.0			23.9
方案 3	1 629.2	1 798.6	1 650.5	1 755.4	1 695.6	16.5		6.9	7.0	12.9
方案 4	1 617.3	1 379.3	1 568.8	1 737.9	1 670.4	11.7	5.1	6.2	6.9	12.6

表 4 运行方式 2 时雷绕击不同杆塔最大过电压

避雷器布置方案	电气设备上最大过电压/kV					MOA 电流/kA				
	T	REA	CVT	DS	CB	LA ₁	LA ₂	LA ₃	LA ₄	LA ₅
方案 1	1 683.1	1 817.3	2 016.7	2 137.9	2 160.8	15.8				25.4
方案 2	1 668.1	1 376.3	1 985.3	2 156.4	2 186.7	11.4	5.9			24.6
方案 3	1 640.7	1 816.7	1 657.0	1 761.9	1 528.6	15.8		7.4	7.4	13.2
方案 4	1 629.4	1 376.2	1 572.9	1 687.2	1 520.6	11.4	4.8	6.8	7.0	12.9

表 5 避雷器布置方案 4 时不同运行方式下反击不同杆塔最大过电压

避雷器布置方案 4	电气设备上最大过电压/kV					MOA 电流/kA				
	T	REA	CVT	DS	CB	LA ₁	LA ₂	LA ₃	LA ₄	LA ₅
方式 1	1 653.1	1 473.1	1 770.1	1 654.7	1 561.4	16.5	7.2	7.1	7.7	13.2
方式 2	1 667.6	1 461.8	1 728.3	1 651.1	1 559.3	15.6	6.8	7.2	7.7	13.5

方案时侵入波过电压的计算结果分析如下:

(1)MOA 按照方案 1 布置,一线一变运行方式的绕击侵入波过电压超出绝缘允许范围,较大的过电压出现在 CVT、断路器和隔离开关等设备上。

(2)MOA 按照方案 2 布置,因为高抗避雷器的钳位作用,高抗过电压水平较低,但 CVT、断路器等设备上的过电压值仍然很高。

(3)MOA 按照方案 3 布置,高抗上过电压虽在绝缘允许范围内,但其值偏高,其余各设备上过电压在允许范围内,并有一定的绝缘裕度。

(4)MOA 按照方案 4 布置,各设备的过电压均在绝缘允许范围内,而且有更大的绝缘裕度。

(5)根据表 5,MOA 按照方案 4 布置,一线一变运行方式下各设备上的反击过电压在允许范围内,流过避雷器电流也在正常工作范围内。

(6)综合上述(1)~(5),一线一变运行方式下,母线和高抗侧均需安装避雷器,推荐采用 MOA 布置方案 4。

(7)根据计算结果得出,当雷击 1~6 号杆塔时,变压器及其他设备上的最大过电压值的变化几乎没有确定的规律,这是由于避雷器的钳位作用和波复杂的折反射造成的,所以研究雷电侵入波时,应将变电站和进线段结合起来,看成一个整体。

雷电侵入波过电压的研究结果表明,变电所出

线越多,对雷电流分流也越大,侵入波过电压越低,因此两线一变运行方式的绕击和反击结果不再列出。雷电波侵入变电站时,变压器侧的 MOA 动作,使变压器上的电压低于其绝缘水平。但是这并不意味着变压器就能够安全运行了,因为雷击多次折反射会使变压器绕组内出现频率较高的振荡冲击波,振荡波产生的谐振过电压可能导致绕组匝间绝缘事故^[10],从而要对变压器上所受过电压的波形作出频谱分析。由表 3~5 可知,当运行方式 2 雷击塔顶时,变压器上的过电压最严重,这种情况下变压器上的电压波形及其频谱分析见图 8、9。

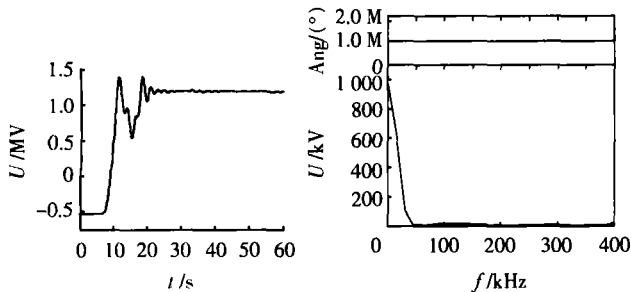


图 8 变压器上电压波形图 图 9 变压器电压波形的频谱分析

由图 8、9 可知,对变压器绕组的匝间绝缘有较大威胁的高频分量幅值不超过 150 kV,而且最高频率不超过 300 kHz。而频率在几十 kHz 的低频分量的幅值,也不超过 1 000 kV,远低于变压器绕组的绝缘水平。可见,在变压器侧 MOA 的保护下,雷电过电压对变压器绕组的匝间绝缘不构成威胁。

4 结论

(1)在研究 750 kV 变电站雷电侵入波时,应将变电站和进线段结合起来,看成一个整体,区分雷击杆塔处,一般为变电站进线段 1~6 号杆塔,从而更接近实际。

(2)MOA 按照方案 1~3 布置的情况下,变电站

各设备的绕击过电压水平偏高。MOA 按照方案 4 布置,各设备的绕击和反击过电压均在绝缘允许范围内,而且有更大的绝缘裕度。即对于敞开式 750 kV 变电站高抗和母线侧均需安装避雷器。

(3)MOA 按照方案 4 布置且反击电流取 220 A 时,设备上的过电压略高,但此雷电流的概率为 0.001%,即反击概率很低。线路杆塔越高越易发生绕击,所以应该注重绕击过电压的防护。

(4)通过对变压器上所受过电压波形的频谱分析,在变压器侧 MOA 的保护下,雷电过电压对变压器绕组的匝间绝缘不构成威胁。

参考文献:

- [1] 谷定燮,周沛洪,戴敏,等. 1 000 kV 交流输电工程防雷保护研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 40-44.
- [2] 刘渝根,刘伟,陈先禄. 500 kV 变电站雷电侵入波研究[J]. 重庆大学学报, 2000, 23(3): 17-19.
- [3] YAMADA T, NARITA T, SHIODA T, et al. Observation and Analysis of Lightning Surges at Substations Connected with UHV Designed Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 675-683.
- [4] 张纬敏,高明玉. 电力系统过电压及绝缘配合 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [5] 曹祥麟. EMTF 在特高压交流输电研究中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 64-68.
- [6] 张水记,司马文霞,张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 93-97.
- [7] HARA T, YAMAMOTO O. Modelling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis [J]. IEE Proc of Transm Distrib, 1996, 143(3): 283-289.
- [8] 谷定燮,樊灵孟. 对我国 500 kV 线路防雷的新思考 [J]. 中国电力, 2004, 37(12): 18-21.
- [9] 王秉钧. 金属氧化物避雷器 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [10] 颜湘莲,文远芳. 变压器绕组纵绝缘连续式绕组分段并联 MOV 保护[J]. 高电压技术, 2003, 28(1): 11-12.

(上接第 444 页)

- [3] 张血琴,吴广宁,郭俊,等. 高频连续脉冲作用下电机绝缘局部放电信号的提取[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 103-107.
- [4] 佟来生,刘曦,吴广宁,等. 周期性脉冲电压作用下绝缘局部放电的测量与分析 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 61-64.
- [5] 周凯,吴广宁,邓桃,等. 纳米复合绝缘材料的热刺激电流测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 76-82.
- [6] 张维国,王坤,刘岩,等. 纳米无机杂化聚酰亚胺薄膜的热刺激电流谱特性[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 9(1): 40-42.
- [7] 吴广宁,刘曦,佟来生. 提取 PWM 脉冲下局部放电信号的 Sym4 小波滤波器的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 35-38.
- [8] 佟来生,吴广宁,林同光,等. 一种用于脉冲绝缘老化试验的高压脉冲电源[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 1-3.
- [9] MAZZANTI G, MONTANARI G C, ALISON J M. A Space Charge Based Method for the Estimation of Apparent Mobility and Trap Depth as Markers for Insulation Degradation Theoretical Basis and Experimental Validation[J]. IEEE Trans. Dielect. & Electr. Insul., 2003, 10(2): 187-197.
- [10] 刘曦,吴广宁,佟来生,等. 高频脉冲方波局部放电特征参量比较的研究[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 61-64.
- [11] 佟来生,吴广宁,温凤香. 变频牵引电机端子过电压产生原理及影响因素 [J]. 西南交通大学学报, 2005, 40 (5): 673-676.
- [12] ANDRE R. Evaluation of Partial Discharge in Inverter Driven Medium Voltage Propulsion Coils [C]// Industry Applications Conference, 2003: 1 869-1 873.