

# 考虑波形起始点的特高压变电站雷电入侵过电压分析

梁 玲,肖先勇

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

**摘 要:** 变电站雷电入侵过电压是特高压输变电工程的重要课题。为研究工频电压对变电站雷电侵入波过电压的影响,考虑雷电入侵时刻工频电压的波形起始点对雷电入侵过电压的影响,以某 1 000 kV 特高压 GIS 变电站为例,采用电磁暂态仿真程序 ATP/EMTP 建模研究了不同波形起始点对应的雷电侵入波过电压,并根据波形起始点的分布概率,研究了雷电侵入波过电压的分布规律,提出以 90° 波形起始点为依据进行雷电侵入波过电压计算和绝缘配合的建议。

**关键词:** 特高压变电站; 工频电压; 波形起始点; 雷电入侵过电压; 分布规律; 绝缘配合

**Abstract:** Lightning invading overvoltage of substation is an important issue of UHV power transmission project. In order to study the influence of power - frequency voltage on lightning invading overvoltage of substation, taking a 1 000 kV UHV GIS substation for example and considering the impact of point on wave of power - frequency voltage on lightning invading overvoltage of substation at the time of the lightning invasion, the electromagnetic transient simulation program ATP/EMTP is used to establish the model and study the lightning invading overvoltage corresponding to different point on wave, and according to the distribution probability of the point on wave, the distribution law of lightning invading overvoltage is studied. It is suggested that the point on wave of 90° waveform can be a basis for lightning invading overvoltage calculation and insulation coordination.

**Key words:** UHV substation; power - frequency voltage; point on wave; lightning invading overvoltage; distribution law; insulation coordination

中图分类号: TM861 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)02 - 0052 - 04

## 0 引 言

特高压电网是中国解决资源分布与需求不平衡的必然选择之一。长距离大容量输电是建设特高压电网的主要目的。通过特高压电网可优化资源配置,提高经济效益<sup>[1-4]</sup>。继中国 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程投入运行后,首条同塔双回路特高压交流输电工程——“皖电东送”工程也于 2013 年 9 月 25 日投入商业化运营,标志着中国已经进入特高压电网时代。

特高压输电系统已成为发展必然,但涉及的诸多问题在不断进行工程示范和实践的过程中,仍值得开展更加深入的研究,其中,特高压变电站的雷电过电压是特高压输电系统安全稳定运行的主要危害之一。特高压变电站又是交流电力系统的枢纽,它的安危维系着电力系统能否安全可靠的运行,因此

必须要有安全可靠的防雷措施。

特高压变电站内各设备的雷电过电压保护以及绝缘配合(确定绝缘水平)取决于雷电过电压计算数据<sup>[5]</sup>。对于 1 000 kV 的特高压线路,工频电压对雷电过电压的影响足以威胁到绝缘的安全,不容忽视<sup>[6]</sup>。而国内现有的计算雷电过电压和绝缘配合的相关文献也只能定性地说明工频过电压对雷电过电压有影响。文献[6]根据日本的统计数据提出的计算方法缺少中国的实践证明。文献[7]提出工频电压与雷电过电压进行线性叠加的方式来研究工频电压对雷电过电压产生的影响。但因雷电流和工频电压的频谱和时间特征不同,故这种方法也不能作为工程上定量的计算方法。

为了得到更符合实际的特高压变电站雷电入侵过电压,将根据对雷电流侵入时工频电压瞬时值的细化研究,提出雷电侵入波电压波形起始点的概念,以此来准确刻画考虑工频电压的特高压变电站雷电

入侵过电压,为完善国内相关规程提供参考。

## 1 系统雷击仿真模型的建立

### 1.1 雷击方式与雷击点的选择

雷击变电站的方式:①直击雷;②雷击中输电线路并且在上传播到变电站(即雷电入侵波)。实践表明,只要按照规程安装避雷针、避雷线以及接地装置的电站,对直击雷的防护是安全且可靠的。特高压线路的绝缘水平很高,雷击跳闸率以及绝缘子闪络造成线路短路事故概率很小。但由于塔高和走廊面积等因素,雷电入侵的现象更易出现,而变电站内设备的绝缘水平要比线路低,因此该方式更易对变电站内设备造成损害。

雷击输电线路的方式又分为反击和绕击。反击和绕击时线路的工频电压对绝缘子闪络电压都会有影响。反击时,杆塔会较大概率地对极性相反的工频导线放电;绕击时,极性与雷电流相反的导线将会提前形成下行先导,增大绕击概率。在工频电压的影响方面,反击和绕击的效果一致,因此下面只选择雷电反击进行研究。

近区雷击是变电站内电气设备的主要威胁之一,因此在计算变电站的雷电入侵过电压时,把 2 km 进线段和变电站统一考虑,才比较符合实际<sup>[8]</sup>。研究表明,中国设计的输电线路中,1 号杆塔和变电站门型构架距离较近,而且门型构架的冲击接地电阻比其他杆塔小,雷击 1 号杆塔塔顶时,反射波从门型构架处又经过地线很快返回 1 号杆塔,使 1 号杆塔塔顶电位降低,减小了雷电入侵过电压。而 2 号、3 号杆塔距门型构架相对较远,过电压也较高。因此将把雷击点选在 2 号杆塔。系统模型图见图 1。

### 1.2 仿真模型

以某特高压 GIS 变电站为例,选择合理的雷电流模型、杆塔模型、进线段架空线路模型、绝缘子闪络模型、避雷器模型以及参数的确定。

#### 1.2.1 雷电流模拟

雷电流的波形可用双指数的标准冲击波模拟。根据中国防雷保护的建议,本次计算取 2.6/50 μs 的双指数波进行防雷保护的计算。中国现行标准推荐雷电流幅值分布的概率  $P$  为  $\lg P = -\frac{I}{88}$ ,式中  $I$  为

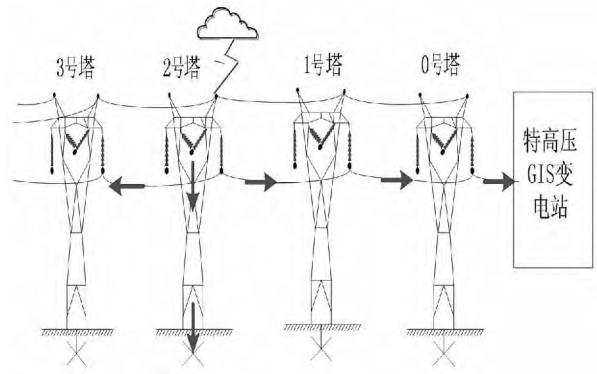


图 1 系统等值模型

雷电流值  $kA$ ;  $P$  为幅值大于  $I$  的雷电流概率。综合考虑中国 500 kV 变电站运行经验以及 1 000 kV 特高压变电站的重要性,这里选取幅值 250 kA 的负极性雷电流,雷电通道波阻抗为 300 Ω。

#### 1.2.2 进线段模拟

采用除了基于 EMTD 的多波阻抗模型来对杆塔进行仿真计算<sup>[9-11]</sup>,如图 2 所示。参考 DL/T - 1997《交流电气装置的接地》,杆塔冲击接地电阻按照 10 Ω 计算,门型构架冲击接地电阻按 7 Ω 计算。

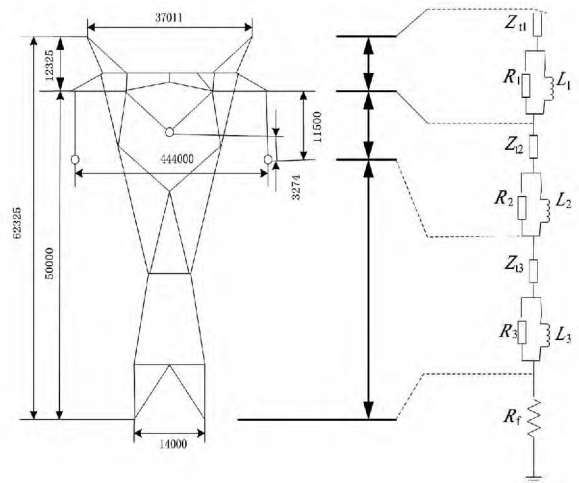


图 2 进线段酒杯塔模型

进线段架空线路用随频率变化的非线性线路参数模型“JMarti”模拟。

绝缘闪络的判据用相交法<sup>[12]</sup>,当绝缘子串上雷电过电压波形与绝缘子串伏秒特性曲线有交点时,绝缘子串闪络,否则就不闪络。绝缘子串闪络模型见图 3,52 号器件是比较器,将绝缘子串两侧探测的过电压与其用函数编辑的已知绝缘子伏秒特性比较;64 号器件是控制开关的输出,当绝缘子串过电压波形与它的伏秒特性曲线相交时,判据部分输出一个电平给控制开关,控制开关部分保持该输出,绝缘子串闪络。

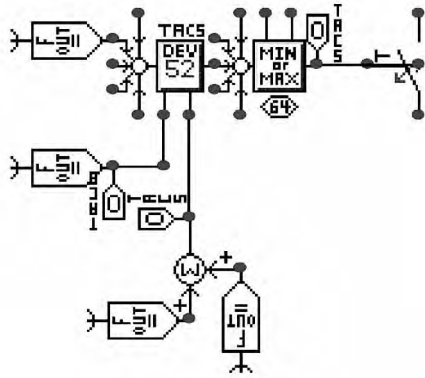


图3 绝缘子串网络模型

1.2.3 避雷器模型

ATP - EMTF 用分段线性函数模型模拟避雷器的伏安特性,计算中采用额定电压为 828 kV 的避雷器,其伏安特性如表 1 所示。

表 1 采用的避雷器的伏安特性

名称	数	值
电流 /A	0.008 2 000 10 000 20 000	
电压 /kV	1 114 1 460 1 553 1 620	

1.2.4 1 000 kV GIS 变电站的电气主接线图

1 000 kV 特高压 GIS 变电站的等效电路图如图 4 采用双断路器双母接线方式,仅考虑一回出线(LI)和一台主变压器(T)运行,出线接至双断路器串,主变压器经临时接线连接两条母线。

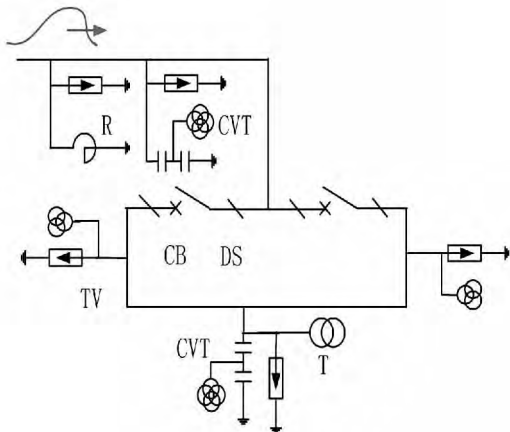


图4 1 000 kV 特高压 GIS 变电站的电气主接线图

1.2.5 变电站内电气设备参数

由于雷电入侵波的高频特性,站内设备可粗略等效为冲击入口电容。变电站内设备入口电容如表 2 所示。

表 2 站内设备等值入口电容

设备名称	等值电容/pF
主变压器(T)	5 000
电压互感器(CVT)	5 000
高压电抗器(R)	4 000
断路器(CB)	300
GIS 电流互感器(CT)	80
隔离开关(DS)	80
套管(BG)	150
母线隔离开关(DS)	150
支柱绝缘子(PS)	150
避雷器(LA)	20

2.1 雷电入侵过电压波形起始点

在过去的变电站雷电入侵波分析中,大都没有考虑工频电压对雷击的影响(即认为雷击时工频分量  $U_g = U_m \sin \varphi$  的  $\varphi$  为  $0^\circ$ ) ,或者只是简单的幅值叠加考虑。为了将频谱特征和时间特征不同的雷电侵入波和工频电压进行叠加,提出雷电过电压波形起始点的概念。定义雷击产生过电压时的相应工频电压相位角为雷电过电压波形起始点,分别设定输电线路 A 相雷电过电压波形起始点为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $270^\circ$  三种极端情况,对 250 kA 的负极性雷电流雷击杆塔反击导线 A 相进行仿真。

2.2 仿真结果与分析

对于幅值 250 kA 的负极性雷电流击中 2 号杆塔 A 相导线反击闪络后,变电站内主要设备在不同波形起始点的雷电入侵过电压见表 3。

表 3 各设备在不同波形起始点的过电压比较 /kV

波形起始点	高压电抗器 REA	主变压器 T	进线 CVT	母线 TV
$0^\circ$	1 837	1 430	1 359	1 387
$90^\circ$	2 108	1 700	1 678	1 675
$180^\circ$	1 598	1 110	1 124	1 178

从表 3 可以看出 A 相导线反击闪络后,在不同雷电过电压波形起始点下,电站各设备的过电压值差异较大,设备的过电压保护裕度需要根据雷电过电压波形起始点的不同进行修订,重点考虑变电站的核心设备变压器。

图 5、6、7 为主变压器(T)上不同波形起始点的过电压波形曲线图。

从过电压波形可以看出,在不同的雷电过电压波形起始点情况下,工频电压与雷电过电压的叠加并不是简单的线性叠加,这是因为雷电波的频率远

2 仿真与分析

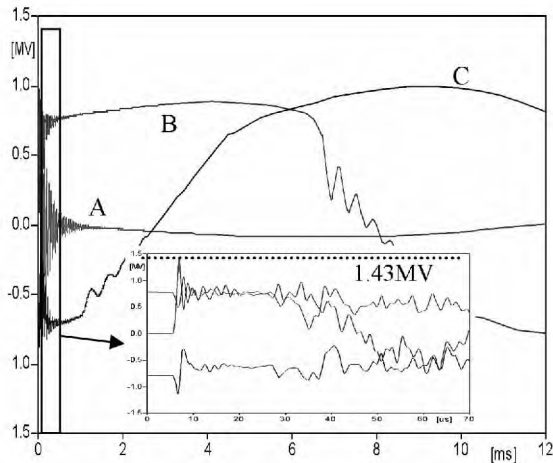


图 5 波形起始点为 0°主变压器上过电压波形

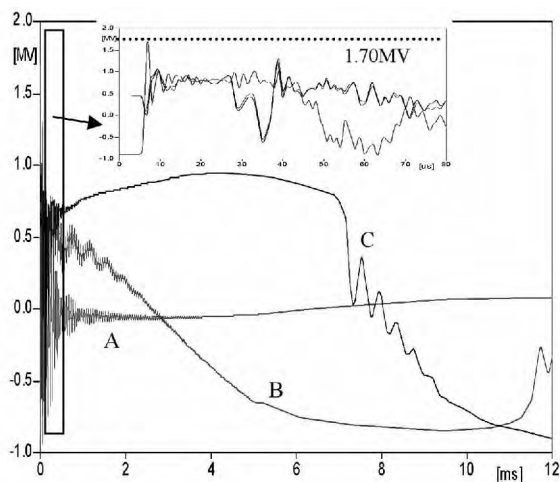


图 6 波形起始点为 90°主变压器上过电压波形

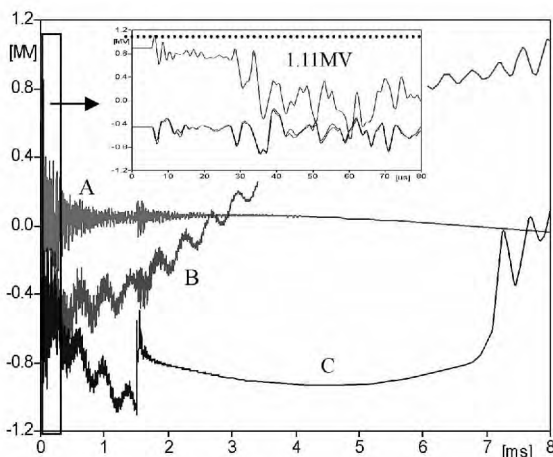


图 7 波形起始点为 270°主变压器上过电压波形  
大于工频,在输电线路雷击波按照线路分布参数特性传播时,在不同的波阻抗间存在折反射情况。

由于雷电冲击放电具有一定的随机性,对于雷电反击、绕击具体的放电波形起始点只能按照概率统计。通过仿真分析得出:当发生负极性雷击时,由于三相绝缘子两端电压不同以及导体的下行

先导产生原理,导体在正极性下发生绕击与反击概率都较负极性的大,而且概率随幅值的增大而增大。一般情况下交流线路在运行时受到雷击的概率是以相电压最大时的波形起始点为均值的正态分布。所以,当雷击输电线路时,通常都发生在与雷电极性相反的最大电压导线相,比如在发生负极性雷击时,雷击时刻导线电压的波形起始点主要集中在 90°附近。这基本符合与日本的统计结果(交流导体在工频电压为正时被负极性雷击中的次数比工频电压为负时更多)<sup>[14]</sup>。

在发生反击时,波形起始点为 0°时的击穿相主变压器过电压波形与不考虑工频叠加基本一致,波形起始点为 90°击穿相主变压器上过电压幅值增加了近 300 kV,而波形起始点为 90°发生雷电闪络的概率较大,推荐将波形起始点为 90°时雷电入侵过电压值作为绝缘配合参考值。

### 3 结 论

1) 只有考虑波形起始点才能得到更符合实际的雷电入侵过电压。特高压线路反击、绕击的工频电压波形起始点分布基本一致,都是在 90°位置概率最大。将波形起始点为 90°时雷电入侵过电压值作为变电站设备绝缘配合参考值,可以减少变电站的雷电故障率。

2) 在进行工频电压与雷电侵入波的叠加时,由于两者频率特性的不同,不能简单地线性叠加,需要根据高频雷电波的分布参数特性,对雷电波的折反射进行逐步计算。

3) 导线电晕、变电站内部元件波阻抗差异等因素都对雷电侵入变电站的过电压波形产生复杂的影响,要研究出更准确的工频电压下雷电过电压叠加规律还需要对导线加入电晕模型,并对电站各设备的暂态分布参数模型做更细致的研究。

#### 参考文献

- [1] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干技术关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6.
- [2] 张运洲,李晖. 中国特高压电网的发展战略论述[J]. 中国电机工程学报, 2009(22): 1-7.
- [3] 曹祥麟. EMTP 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.

(下转第 71 页)

## 4 结 论

主要对高压开关柜局部放电引起的 TEV 信号特点进行了仿真分析,取得如下结论。

1) 检测点 TEV 信号的强度随激励源脉冲宽度的增加而迅速减小;脉冲宽度越窄,检测到的 TEV 越强,亦即放电过程越快,则 TEV 检测法检测能力越强。

2) 激励源脉冲幅值越高,检测到的 TEV 越强,亦即放电强度越激烈,则 TEV 检测法检测能力越强。

### 参考文献

[1] LEIJON M, MING L, HOFF P. SF<sub>6</sub> Gas Pressure Influence on Acoustical Signals Generated by Partial Discharges in GIS[C]//7th ISH Conference, 1991: 75.

[2] 邵涛,周文俊,朱宜飞,等.特高频法检测 GIS 局部放电的试验研究[J].高电压技术,2001,27(3):15-16.

[3] 黎大健,梁基重. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测[J].高压电器,2009,45(1):72-75.

[4] 岳桂芳.局部放电产生原因及分析[J].机械工程与自动化,2005,(4):105-107.

[5] 宋泉,崔景春,袁大陆.2004 年高压开关设备运行统计分析[J].电力设备,2006,7(2):10-14.

[6] 刘云鹏,王会斌,王娟.高压开关柜局部放电 UHF 在线检测系统的研究[J].高压电器,2009,45(1):15-17.

[7] 关永刚,钱家骊.射频法在高压开关柜局放检测中的应用研究[J].高压电器,2001,37(5):1-3.

[8] 王娟.基于 UHF 的高压开关柜局部放电在线监测的研究[D].保定:华北电力大学,2007.

[9] KYRKJEEIDE A S S, LARSEN V. Acoustic Insulation Analyzer for Periodic Condition Assessment of Gas Insulated Substations[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: 919-924.

### 作者简介:

邵菲(1982),从事配电工程设计等方面研究工作。

(收稿日期:2013-11-12)

(上接第 55 页)

[4] 刘振亚.特高压交流输电系统过电压与绝缘配合[M].北京:中国电力出版社,2008.

[5] GB/Z 24842-2009,1 000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合[S].

[6] 陈水明,王威,于化鹏,等.计及工频电压的特高压变电站雷电入侵过电压分析[J].高电压技术,2010,36(8):1852-1857.

[7] 周远翔,李震宇,梁曦东,等.工频电压对输电线路雷击跳闸率的影响[J].高电压技术,2007,33(9):61-65.

[8] 刘渝根,刘纬.500 kV 变电站雷电侵入波研究[J].重庆大学学报:自然科学版,2000(03):17-19.

[9] 张永记,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.

[10] 袁兆祥,李琥,项玲.杆塔模型对特高压变电站反击波过电压的影响[J].高电压技术,2008,34(5):867-872.

[11] Yamada T, Mochizuki A, Sawada J, et al. Experimental Evaluation of a UHV Tower Model for Lightning

Surge Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 393-402.

[12] Rizk F A M. Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 1983-1997.

[13] GU D, ZHOU P, DAI M, et al. Comparison and Analyses on Over-voltage and Insulation Coordination of UHV AC Transmission System Between China and Japan [J]. High Voltage Engineering, 2009(6): 003.

[14] Takami J, Okabe S. Characteristics of Direct Lightning Strokes to Phase Conductors of UHV Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 537-546.

### 作者简介:

梁玲(1988),硕士研究生,主要研究方向为电力系统过电压;

肖先勇(1968),教授,从事电力系统方面的科研和教学工作,研究方向为电能质量及其控制、过电压与电磁暂态。

(收稿日期:2013-11-15)