

# 新型单杆 220kV 电缆终端站研究

吴 军，章志鸿，赵 强

(无锡供电公司，江苏 无锡 214171)

**摘 要：**本文介绍了新型单杆 220kV 电缆终端的布置特点，通过建模仿真计算，研究了避雷器布置及安装位置对过电压保护的效果，并且对导线引下方向和电缆引下固定方式进行了分析，供各地同行参考。

**关键词：**新型单杆；220kV 电缆终端站；避雷器布置

## 1 概述

架空电缆终端站是实现输电线路中架空线-电缆线路转变的平台。随着经济的发展和城市范围的扩大，土地开发力度加大，市区的高压架空线路逐步入地，高压电缆在输变电工程中运用日益广泛，220kV 架空电缆终端站的使用也日益增多，但同时电缆终端的选址、占地和布置方式与城市规划、环境协调之间的矛盾也日益明显。

目前，220kV 架空电缆终端站有铁塔及钢管杆形式。采取铁塔形式的架空电缆终端站因占地面积大，一般仅在城乡结合部采用，在市区范围内一般都采用双钢管杆形式的电缆终端站。但双钢管杆形式耗钢量和砼量较大，组立要求高，电缆平台组装繁琐容易产生安全隐患。而且占地面积较大，也不容易在市区道路边布置以及通过城市规划部门的审批。

## 2 新型单杆 220kV 电缆终端站布置特点

本次新型单杆 220kV 电缆终端站，采取避雷器及电缆头均为杆上布置方式，有效的减少了占地面积。避雷器平台布置在电缆头平台的上层，并采用支柱式避雷器设置，其布置形式如图 1 所示。

本次设计研究的新型单杆 220kV 电缆终端站，减少杆塔用钢量约 20%，基础用砼量约 15%，减少占地面积约 20%（同比双钢管杆形式），有着很高的经济价值和社会价值。

## 3 避雷器布置及安装位置对过电压保护效果

由于在架空线和电缆的连接处波阻抗的大小出现不连续（架空线的波阻抗比电缆的波阻抗大得

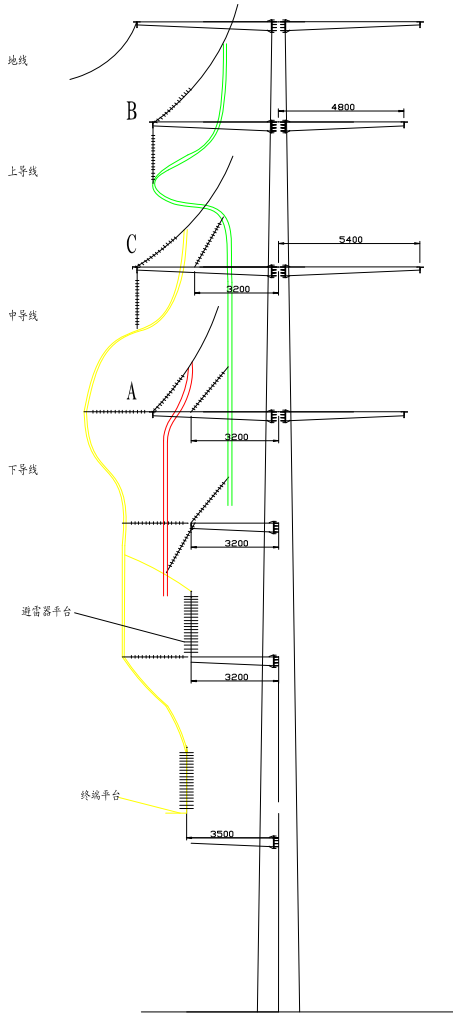


图 1 新型单杆 220kV 电缆终端站布置形式

多），当雷电侵入波从架空线传向电缆时，侵入波在线路波阻抗变化处将产生折、反射，出现较高过电压电压。若超过电缆头的耐受电压，造成电缆头的击穿、发热，甚至爆炸等严重后果，本项目主要

通过理论分析和仿真计算等方法，对雷电过电压下，架空线及电缆线路沿线分布研究，分析避雷器安装位置对雷电过电压保护效果。

3.1 避雷器与电缆头的保护配合理论分析

将电缆与架空线的连接等效为各自不同波阻抗的连接，架空线波阻抗的计算需要相关的参数，比如空气的磁导率和介电常数、架空线对地高度以及半径，计算出架空线的波阻抗；利用电缆介质的磁导率和介电常数、电缆对地高度以及半径，可计算出电缆波阻抗。应该波折返理论分析雷电波经架空线进入电缆线、雷电波经电缆线进入架空线时，在波阻抗变化点处，雷电波折、反射情况，确定线路过电压分布及最大过电压。避雷器与被保护设备之间的最大电气距离为： $L_{max}=(U_j-U_5)v/2a$

其中  $U_j$  为被保护设备上的耐受电压， $U_5$  为避雷器的 5kA 残压， $v$  为波速， $a$  为雷电波的陡度。

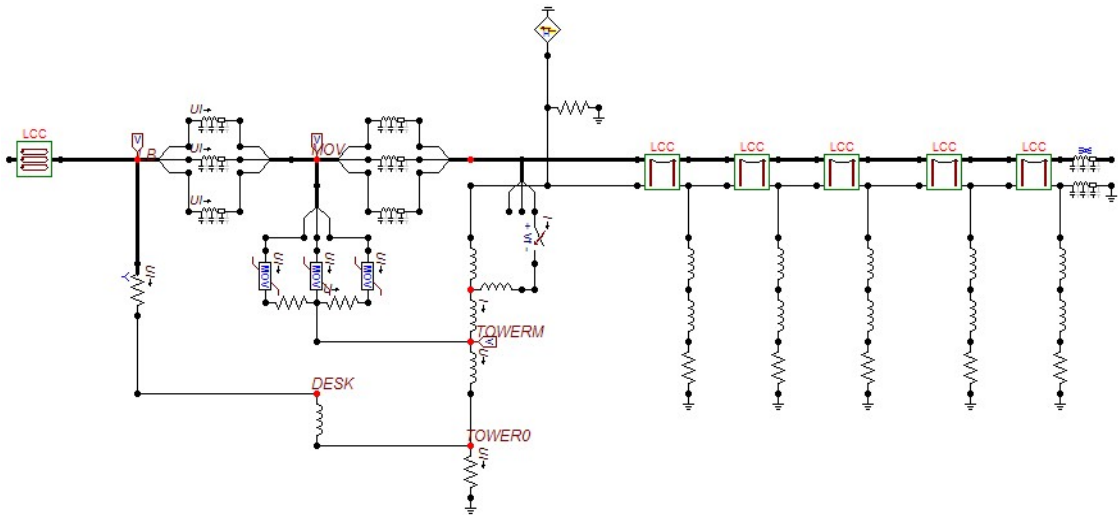
3.2 电缆架空线混合线路过电压仿真计算

根据架空线路杆塔结构、导线参数，电缆线路参数建立 ATP-EMTP 仿真计算模型仿真计算不同避雷器安装条件下，架空线及电缆线路沿线分布电压情况。根据仿真计算结果，确定不同雷电过电压侵入条件下，满足电缆头绝缘保护要求的避雷器安装点与电缆头电气距离范围。

3.2.1 仿真计算模型

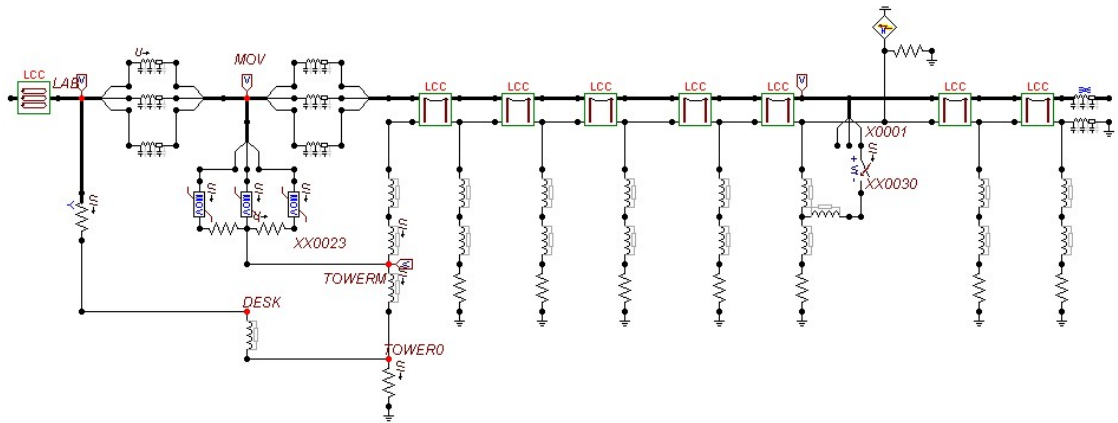
(1) 雷击电缆终端杆顶

电缆终端头支架与终端塔共用接地极接地时，雷电流幅值取 75kA，模拟 220kV 电缆终端塔塔顶遭雷击时，终端塔上电缆终端头的过电压情况。在电缆终端塔上距离电缆终端头支架平台 11m 处的支架上加装一组避雷器，避雷器通过杆塔接地，仿真模型如图 2 所示。



注：过电压表示为  $U_a$

图 2 雷击电缆终端杆顶仿真模型接线图



注：过电压表示为  $U_b$

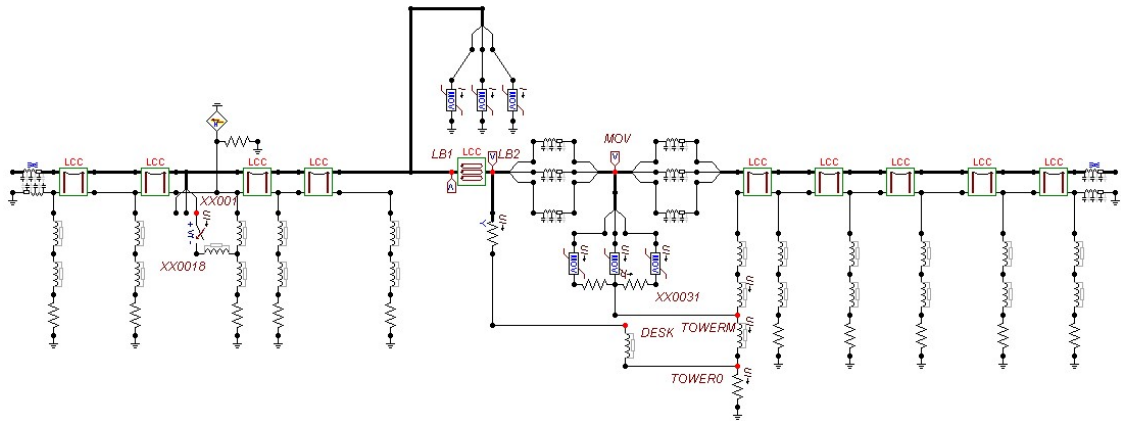
图 3 雷击于距离终端塔 2km 处的杆塔仿真模型接线图

(2) 雷击于距离终端塔 2km 处的杆塔

电缆终端头支架与终端塔共用接地极时，雷电流幅值 220kA，雷击点位于距终端塔 2km 处的杆塔。同样在电缆终端塔上距离电缆终端头支架平台 11m 处的支架上加装一组避雷器，仿真模型如图 3 所示。

(3) 雷电侵入波沿架空线-电缆-架空线传播

雷电流幅值取 150kA，电缆长度取 800m，模拟在电缆终端头（节点 LB2）的另一端（节点 LB1）的杆塔遭受雷击，此处取离 LB1 两个档距的杆塔遭雷击，分析终端塔上电缆终端头的过电压情况，此时，LB1 处有一组避雷器接地，电缆终端 LB2 支架与终端塔共用接地极，仿真模型如图 4 所示。



注：过电压表示为  $U_c$

图 4 雷电侵入波沿架空线-电缆-架空线传播仿真模型接线图

3.2.2 电压影响因素分析

(1) 避雷器安装点对过电压的影响

表 1 避雷器与电缆终端头距离对过电压的影响

距离/m	$U_a$ / kV	$U_b$ / kV	$U_c$ / kV
1	935.4	637.3	490.4
5	1003.9	640.8	495.0
8	1046.1	638.7	498.1
12	1081.1	632.0	501.7

由表 1 可知，随着避雷器与电缆终端头的距离的增大，避雷器的保护作用大致呈线性下降趋势。雷击杆顶时过电压较大，当避雷器与电缆终端头的距离为 8m 时，电缆终端头的电压幅值 1046.1kV 小于电缆终端头的耐受电压，避雷器起到保护作用。其余两种情况下，电缆终端头的电压幅值远低于电缆终端头最大的耐受电压 1050kV。

(2) 雷电流幅值的影响

当避雷器与电缆终端头的距离取为 8m。当雷电流幅值分别取 50、75、100kA 时，电缆终端头的电压幅值如表 2 所示。

表 2 雷电流幅值对过电压的影响

雷电流幅值/kA	$U_a$ / kV	$U_b$ / kV	$U_c$ / kV
50	654.2	566.7	345.9
75	1046.1	619.2	498.1
100	1350.5	666.5	563.3

由表 2 可知，当雷电流幅值增大时，电缆终端头的电压幅值随之大致呈线性增加。经测算，雷击杆顶情况下，雷电流幅值为 100kA 时，避雷器的雷电冲击放电电流为 7kA，小于避雷器标称放电电流 20kA，但是随着雷电流幅值的大幅增大，就有可能造成避雷器的损坏或爆炸。其余两种情况下，电缆终端头的电压幅值远低于电缆终端头最大的耐受电压 1050kV。

(3) 冲击接地电阻的影响

避雷器与电缆终端头的距离取为 8m，终端塔冲击接地电阻变化时，各部分过电压电压如表 3 所示。

表 3 冲击接地电阻对过电压的影响

冲击接地电阻/ $\Omega$	$U_a$ / kV	$U_b$ / kV	$U_c$ / kV
1	1167.4	628.3	317.0
2	1153.8	630.9	341.1
5	1115	638.7	498.1
10	1037	651.4	563.1

由表 3 可知，在雷击杆顶情况下，随着电缆终端塔接地冲击电阻增大，电缆终端头的绝缘承受电压下降，但并不是表示电缆终端塔接地冲击电阻越大越好。其余两种情况下，随着冲击接地电阻的增大，电缆终端头的电压幅值随之大致呈线性增加。

导致电缆终端头的电压变大。

#### 4 新型单杆 220kV 电缆终端站导线引下方向和电缆引下固定方式的研究

为确定最优化的新型单杆 220kV 电缆终端站平台的布置情况,需要充分考虑到导线引下方向如何有效的利用电缆平台及避雷器布置的空间,减少对周边环境的影响;电缆如何引下固定,需要仿真计算出电缆的热胀冷缩力以及在短路情况下对电缆终端头的冲击力,从导线引下方向和电缆引下固定方式两种情况综合考虑最终确定最优的电缆平台终端方案。

##### 4.1 导线引下方向的研究

在本方案中,架空线由塔头横担经过绝缘子悬挂点由水平方向变为竖直方向,开始向下牵引,经过支柱绝缘子保持与杆塔塔身一定的间隙并经过避雷器与电缆终端头连接。所以,导线引下方向受到电缆终端平台、避雷器布置以及电缆平台的影响,需要考虑如何有效的利用电缆平台及避雷器布置的空间,减少对周边环境的影响。在确定了电缆终端平台布置以及与避雷器的距离、塔头布置与电气间隙等杆塔主要构件的基础上,进一步确定导线引下方向。

在塔头部分,导线通过耐张双联瓷质绝缘子串以及跳线合成绝缘子串由水平方向转为竖直方向,导线与塔身保持一定的安全间隙。

经过避雷器支架部分的导线通过横担式支撑绝缘子与避雷器保持一定的安全间隙。三相避雷器采用的是支座式的安装方式,通过支架与杆塔相连,并且保持与杆塔平行,两相避雷器之间的距离相等,三相避雷器位于同一水平面内。

导线经过避雷器支架向电缆终端头处引下,通过横担式支撑绝缘子与塔身保持一定的安全距离,通过实验室条件下的冲击间隙试验,模拟二分裂导线与终端塔塔身之间的间隙击穿,从而验证两者之间的安全间隙范围。

由以上分析可知,导线与杆塔之间的安全间隙距离应该大于 1m。方案中导线与杆塔之间的间隙距离大于 2.5m,说明在雷电过电压的情况下,方案中的导线与杆塔之间的间隙距离是符合安全标准的。

##### 4.2 电缆引下固定方式的研究

##### 4.2.1 高压电缆的热胀冷缩力

###### (1) 电缆的热胀冷缩效应

对于大截面电缆,由于负荷电流变化而引起导体温度变化(或环境温度改变时),使得电缆产生热胀冷缩的变化,由此所产生的膨胀或收缩力总称为热机械力,它与电缆的线膨胀系数、导体的截面和导体的温升成正比。交联电缆的线膨胀系数约为  $20 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ ,所以电缆的截面越大,温度变化越大,电缆产生的热机械力越大。

###### (2) 电缆线路热胀冷缩力的计算

电缆线路运行过程中,作用在电缆上的变形力即为线芯发热时的膨胀力。由于温升,线芯产生的热胀冷缩力计算如公式(1)所示。

$$P = \alpha \Delta \theta EA \quad (1)$$

式中:  $P$ ——线芯上的热胀冷缩力(N);

$\Delta \theta$ ——线芯的最大允许温升( $^{\circ}\text{C}$ );

$\alpha$ ——线芯的线膨胀系数( $1/^{\circ}\text{C}$ );

$E$ ——线芯的弹性模量( $\text{N}/\text{m}^2$ );

$A$ ——线芯的截面积( $\text{mm}^2$ )。

经计算得 220kV 导体标称截面为  $2500\text{mm}^2$  电缆的热胀冷缩力  $P=106821\text{N}$ 。

###### (3) 电缆热胀冷缩力对电缆引下固定方式的影响

由于电缆终端头被固定在支架上,这就对支架上的固定元件的机械强度有较高的要求,至少能够承受来自线芯对电缆终端头轴向上的推力而不至于产生电缆终端头的轴向位移或松动,即支架上的固定元件应至少能承受 106821 N 的轴向上的热胀冷缩力,且固定电缆用的夹具、扎带、捆绳或支托件等部件,应具有表面平滑、便于安装、足够的机械强度和适合使用环境的耐久性。必要时还要采用电缆保护管抱箍,才可以使电缆固定安全可靠。

在终端、接头或转弯处紧邻部位的电缆上,应设置不少于 1 处的刚性固定,交流单芯电力电缆的刚性固定,宜采用铝合金等不构成磁性闭合回路的夹具。由于电缆是垂直方向,宜设置不少于 2 处的刚性固定。其他固定方式,可采用尼龙扎带或绳索,且不得用铁丝直接捆扎电缆。波浪形敷设的每一节距部位,宜采取挠性固定,波浪形转换成直线敷设的过渡部位,宜采取刚性固定。在电缆终端头处留电缆余缆,并做成  $\Omega$  弯,利用电缆位移来消

除电缆热伸缩力。但前提需在电缆余缆  $\Omega$  弯处加套管或留孔洞,以保证电缆有伸缩的空间。

#### 4.2.2 短路电流下的电缆终端头电动力

在三相短路情况下,电缆终端头受到来自电动力的冲击作用,作用方向为沿着电缆终端头径向,且不同时刻所受电动力的大小和方向都不相同。这就要求电缆终端头的固定部件能够承受在三相短路电流达到最大值时的电动力,在  $I_p$  取 50kA 时,中间位置的电缆终端头最大的电动力可达到 1136N,这就要求电缆终端头的固定部件具有一定的机械强度,而不会因为径向的冲击力造成电缆终端头在支架上的错位、脱落等问题。

交流单芯电力电缆固定部件的机械强度,应验算三相短路电动力条件,并满足下列关系式:

$$F \geq \frac{2.05 I_m^2 L K}{a} \times 10^{-7}$$

其中:  $F$ —夹具、扎带等固定部件的抗张强度, N;

$I_m$ —通过电缆回路的最大短路电流峰值, A;

$a$ —电缆相间中心距离, m;

$L$ —在电缆上安装夹具、扎带等的相邻跨距, m;

$K$ —安全系数,取大于 2。

$I_m = I_{pm} (1 + e^{-0.01/T_a}) = k_{im} I_{pm}$ ,  $k_{im}$  为冲击系数,表示冲击电流为短路电流周期分量幅值的多少倍,冲击系数的变化范围为  $1 \leq k_{im} \leq 2$ ,在此取 1.8。

所以,在安全系数  $K$  取 2.5、 $I_p$  取 50kA 的情况下,若设电缆只有首末两端固定,即  $L=8m$ ,则理论上电缆终端头的固定部件应具有大于 22140N 的抗张强度。但其实在工程应用中电缆不仅首末两端有固定,在中间部分也会有部件的固定,所以  $L$  会小于 8 m,所以 22140 N 会较实际需要的部件的抗张强度大,应该根据实际的电缆引下敷设状况进行权衡。

## 5 结论

本项目通过仿真计算对雷击电缆终端塔塔顶、雷击于距离电缆终端塔 2km 处的杆塔及雷电侵入波沿电缆向架空线传播等方式下,线路终端塔各部分电压分布情况及相关影响因素进行了深入分析,并通过对导线引下方向和电缆引下固定方式的研

究,得到高压电缆的热胀冷缩力的计算方法以及短路电流下的电缆终端头电动力的计算方法,结合研究结果,提出以下几点结论:

(1) 相比雷击于距离电缆终端塔 2km 处的杆塔的情况,雷击电缆终端塔塔顶时,雷电侵入波幅值高。而且,雷电流通过杆塔入地引起的地电位升高及杆塔等值电感上电压使终端塔各部分电压升高,不利于电缆终端头的绝缘防护,其防雷保护应依据此条件下过电压的分布情况进行设计;

(2) 采用电缆终端头支架与终端塔共用接地极的接地方式,可以有效降低线路遭雷击时电缆终端头绝缘承受的电压,有利于电缆终端绝缘防护。

(3) 在雷击终端塔时,终端塔冲击接地电阻为  $1\Omega$  时,220kV 电缆终端塔输电线路绝缘的耐雷水平为 75kA。当避雷器与电缆终端头的距离在 8m 以内,电缆终端头绝缘承受电压小于其冲击耐受电压,即为满足电缆终端头绝缘保护要求的避雷器安装点与电缆终端头电气距离范围。

(4) 通过对导线引下方向和电缆引下固定方式的研究,计算得到高压电缆的热胀冷缩力以及短路电流下的电缆终端头电动力要达到 10000-23000N 左右,故在电缆终端站处必须对电缆进行可靠固定,才能保证电缆终端的安全运行。

#### 参考文献:

- [1] DL/T620-1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [2] GB 50545-2010,110~750kV 架空输电线路设计规范[S].
- [3] GB50217-2007,电力工程电缆设计规范[S].
- [4] DL/T5221-2005,城市电力电缆线路设计技术规定[S].

#### 作者简介:

吴 军 (1975-),男,江苏无锡人,高级工程师,注册电气师,主要从事输电线路电气设计工作;

章志鸿 (1976-),男,江苏无锡人,工程师,主要从事输电线路结构设计工作;

赵 强 (1981-),男,江苏无锡人,工程师,主要从事输电线路电气设计工作。