DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)06-0042-05

一种 10 kV 双回三角排列输电线路耐张绝缘子更换方法

徐 睿，童雄敏，冯 超，陈宇航

（永康市光明送变电工程有限公司，浙江 金华 321000）

摘 要：目前耐张绝缘子更换作业步骤复杂，且作业时间长，为了解决带电作业的难点，研究 10 kV 双回三角排列输电线路耐张绝缘子更换方法。计算输电线路机械荷载，得到输电线路的应力；通过耐张绝缘子配置及金具选择，组装耐张绝缘子串和地线耐张金具；校核作业工具机械强度，判断工具能够满足更换作业的实际需要；经过耐张绝缘子更换方案与实施，完成更换作业流程。经实验论证分析，在有风和雷击两种条件下，更换耐张绝缘子后的输电线路具有较强的抵制风偏的能力，受风力影响较小，耐雷水平更高，证明所提方法是可靠的。

关键词：10 kV 双回三角排列；金具；输电线路；机械强度；耐张绝缘子；绝缘子更换

中图分类号：TP273；TM726 文献标识码：A 文章编号：1003−7241(2025)06−0042−05

A Method for Replacing Tensioning Insulators of 10 kV Double Loop Triangulation Transmission Lines

XU Rui, TONG Xiong-min, FENG Chao, CHEN Yu-hang

(Yongkang Guangming Power Transmission & Transformation Engineering Co., Ltd., Jinhua 321000, China)

Abstract: At present, the procedure of replacing tensioning insulators is complicated and the operation time is long. In order to solve the difficulties of live line operation, the method of replacing tensioning insulators of 10 kV double-loop triangulation transmission line is studied. The mechanical load of transmission line is calculated and the stress of transmission line is obtained. Through the tensioning insulator configuration and selection of fittings, the assembly of tensioning insulator string and wire tensioning fittings, it checks the mechanical strength of operation tools to determine that tools can meet the actual needs of replacement operations. After the replacement scheme and implementation of tension insulator, the replacement process is completed. The experimental analysis shows that the transmission line with the replacement of tension-resistant insulators has a strong ability to resist wind deviation, is less affected by wind, and has a higher lightning resistance level under the two conditions of wind and lightning strike, which proves that the method presented in this paper is reliable.

Keywords: 10 kV double-loop triangulation; hardware; transmission lines; mechanical strength; tension insulator; insulator replacement

0 引言

绝缘子是输电线路的重要隔离设备，在电力系统的健康运行中发挥着重要的作用，由于我国电力系统建设和运行的时间较长[1]，输电线路在运行中存在着绝缘子老化的问题亟待解决，若绝缘子出现故障，将会进一步导致接地故障和输电线路短路的情况，不利于电力系统的健康有序运行[2]。高压电网对绝缘子提出了更高的要求，耐张绝缘子作为绝缘子的其中一类，对输电线路的安全稳定运行具有直接影响，绝缘子串的更换需要带电作业，这也为更换作业带来了新的困难。目前我国高压输电线路的运维和检修方法仍在不断发展之中，尤其是耐张绝缘子的带电更换方法仍是众多学者研究的热点之一[3]。普子恒等[4]利用组合工器具带电更换 1 000 kV 耐张绝缘子会改变绝缘子串的电压分布，影响带电工作人员体表电场分布，为分析绝缘子串不同位置进行更换作业时的整体电压和电场分布规律，根据实际 1 000 kV 耐张塔输电线路建立了三维模型，利用有限元法进行电场仿真分析，同时，获得了不同位置作业时人体各部位的电场分布特性，为带电工作人员的安全防护提供一定的参考意见。为了更为科学有效地进行耐张绝缘子的更换，使绝缘子串电位和电场分布更加均匀，需要提出新的耐张绝缘子更换方法，保证绝缘子正常发挥作用，固定电力系统元件之间的绝缘和导线的连接和固定，提高绝缘子隔绝电流的能力[5]。本文对 10 kV 双回三角排列输电线路耐张绝缘子更换方法进行研究，对电能的可靠传输具有重要的现实意义，为电力基础设施的建设与检修提供参考依据。

收稿日期：2023-12-22

1 10 kV双回三角排列输电线路耐张绝缘子更换方法

1.1 计算输电线路机械荷载

机械荷载直接作用于电线上，由于荷载具有不同的方向，因此划分了3种不同的比载，通过比载得到输电线路的应力，对各比载进行分别计算，先计算电线自重力单位荷载和比载，荷载计算公式为

$$h_1 = wg \tag{1}$$

式中，g为国内标准重力加速度，w为输电线路单位长度的重量。比载计算公式为

$$\lambda_1 = \frac{h_1}{s_i} \tag{2}$$

式中，s_i为电流截面面积，若输电线路外表出现覆冰情况，则此时的自重力单位荷载为

$$h_2 = 1.0\pi B(r+B)g \tag{3}$$

式中，B为输电线路覆冰的厚度，r为输电线路半径，则覆冰自重力单位比载为

$$\lambda_2 = \frac{h_2}{s_i} \tag{4}$$

在覆冰时的垂直总荷载和比载分别为

$$\begin{cases} h_3 = h_1 + h_2 \\ \lambda_3 = \lambda_1 + \lambda_2 \end{cases} \tag{5}$$

接着对输电线路水平单位风荷载及比载进行计算，在正常情况下的风荷载及比载为

$$\begin{cases} h_4 = \beta \dfrac{v^2}{1\,500}\eta_0\kappa_0\varphi_0 rL_0 \sin^2\theta \\ \lambda_4 = \dfrac{h_4}{s_i} \end{cases} \tag{6}$$

式中，β为风压不均匀系数，v为风速，η_0为输电线路荷载调整系数，κ_0为风压高度变化系数，φ_0为导线系数，φ_0为水平档距，θ为风向和导线之间的夹角[6]。对有冰时的风荷载及比载进行计算，具体公式为

$$\begin{cases} h_5 = \beta \dfrac{v^2}{1\,500}\eta_0\kappa_0\varphi_0 (r+2B)bL_0 \sin^2\theta \\ \lambda_5 = \dfrac{h_5}{s_i} \end{cases} \tag{7}$$

式中，b为覆冰时风荷载增大系数。

在各项荷载计算完成后，计算输电线路单位综合荷载，具体公式为

$$\begin{cases} h_6 = \sqrt{g_1^2 + g_4^2} \\ \lambda_6 = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_4^2} \end{cases} \tag{8}$$

经过上述计算，最终得到输电线路受到的机械荷载总和，尽可能地避免后续耐张绝缘子更换步骤中出现放电闪络等事故[7]。

1.2 耐张绝缘子配置及金具选择

耐张绝缘子为输电线路的健康运行提供着重要的保障，因此对于更换的绝缘子的选择需要结合实际工况，根据设计规范要求，配置绝缘子并选择金具。由于本文研究工程为10 kV双回三角排列输电线路，因此本文所选用的耐张绝缘子串为420 kN玻璃绝缘子，绝缘子数为30片(或24片)，统一爬电比距为52.0(或41.5)mm/kV，地线耐张绝缘子的高度为200 mm，盘径和爬距均为170 mm，间隙距离在15−20 mm之间[8]调整，其中绝缘子长度为1 011 mm，绝缘串质量为40.3 kg。耐张绝缘子串组装零件如表1所示。

表1 耐张绝缘子串组装零件表

件号	名称	单位质量/kg	数量
1	绝缘子	5.7	6个
2	球头挂环	0.31	1个
3	U型挂环	0.52	3个
4	耐张线夹	2.5	1个
5	铝包带	0.22	1卷
6	碗头挂板	1.0	1个

根据表1中零件对耐张绝缘子串进行组装，便于后续进行的更换作业施工，而后对接地的地线耐张金具进行组装，其所用零件如表2所示。

表2 地线耐张金具组装零件表

件号	名称	单位重量/kg	数量
1	螺栓	0.10	1个
2	延长环	0.44	2个
3	U型挂环	0.55	4个
4	耐张线夹	2.2	2个
5	并沟线夹	1.02	1个
6	设备线夹	0.51	1个
7	引流线	0.68	2.5 m

由表2可知组装地线耐张金具所用到的零件，根据上述对于耐张绝缘子的配置完成对耐张绝缘子串的组装，为后文进行耐张绝缘子的更换做好准备。

1.3 校核作业工具机械强度

在耐张绝缘子更换作业中，由于耐张绝缘子串的承受的荷载较大，因此对更换作业工具的强度具有严格的要求，因此需要对各更换作业的工具强度进行校核，先对提线卡卡具的危险截面积a进行计算，具体公式为

$$s_a = (90-36)\times 16\times 2 = 1\,728\ \text{mm}^2 \tag{9}$$

卡具拉伸应力的计算公式为

$$\gamma = \frac{H}{s_a} \tag{10}$$

式中，H为卡具所受耐张绝缘子串荷载，经计算得到拉伸应力为6.858 MPa，因此卡具截面的拉伸强度足够，对卡

具的危险截面b进行计算，具体公式为

$$s_b = 20\ \text{mm} \times 30\ \text{mm} = 600\ \text{mm}^2 \tag{11}$$

该截面卡具拉伸应力为

$$\gamma = \frac{H}{s_b} \tag{12}$$

经计算得到其拉伸应力为1.31 MPa，因此其截面b的拉伸强度足够。接着计算绝缘拉棒的强度，危险截面积a和拉伸应力，以及危险截面积b和对应的拉伸应力均与上述计算结果相同[9]。最后对螺栓强度进行校核，螺栓的剪切面积为：

$$s_j = \frac{\pi}{4} d^2 = 705.8\ \text{mm}^2 \tag{13}$$

式中，d为螺栓的高，计算螺栓剪应力，具体计算公式为

$$\delta = \frac{p}{s_j} \tag{14}$$

式中，p为螺栓受耐张绝缘子的水平荷载，经计算得到螺栓剪应力为25.52 MPa，由此可见本文所使用的新工具能够满足更换作业的实际需要。

1.4 耐张绝缘子更换方案与实施

由于高压输电线路的耐张绝缘子串较长，具有较大的重量和荷载，因此在更换中存在转移困难的情况，针对此问题以及附件干涉情况，本文制定了以提线卡具和绝缘绳更换耐张绝缘子片和耐张绝缘子串的更换方案，高压输电线路需要带电作业，所以要在确保高强度的绝缘绳的电气性能满足带电作业的相关要求的基础上进行，具体绝缘绳对耐张绝缘电子串的更换作业流程如图1所示[10]。

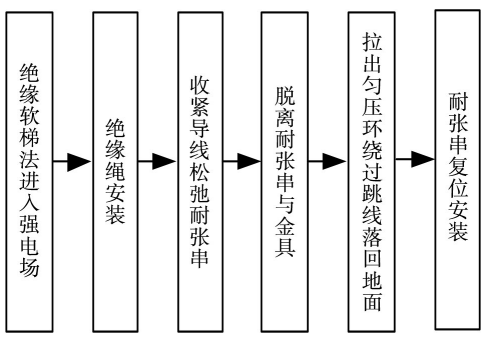


图1 耐张绝缘子串更换流程

图1为本文设计的具体耐张绝缘子串的更换方案，该方案所设计的重量不大，且作业强度相对较小，因此在更换作业中，仅在导线端安排一名电工，地面安排5名电工，以及其他电工总共10名。由于高压输电线路中的绝缘子片数较多，部分耐张绝缘子片由于受环境等因素的影响，出现了损坏情况，因此在耐张绝缘子片的更换中，针对不同的绝缘子作业位置，采用蹲坐法，运用卡具进行耐张绝缘子片的更换，具体更换流程如图2所示[11]。

根据图2中绝缘子片的更换流程，进行工器具的安装以及绝缘子片的更换。绝缘子片更换前反复测试损坏绝缘子的位置，并以跨二短三的方式进入强电场后，蹲坐在需要更换的绝缘子位置上，并将绝缘绳系在绝缘子串上，安装绝缘轮滑组，地面作业人员进行卡具的传递，做好等电位检查后，松弛绝缘子，将新的绝缘子传递给等电位电工，最终完成更换[12]。

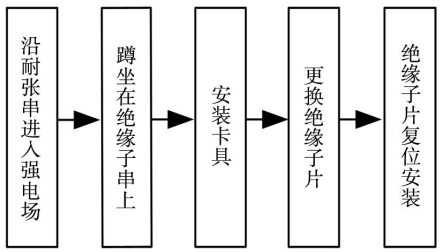


图2 耐张绝缘子片更换流程

2 实验论证分析

2.1 实验准备及过程

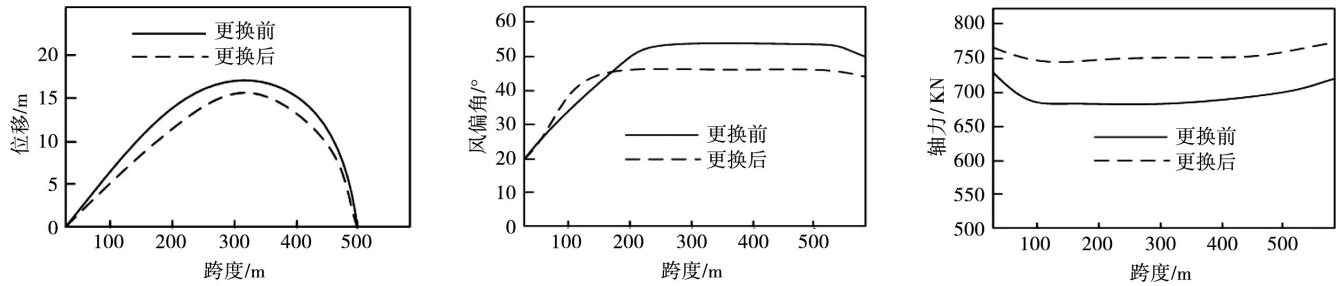
本文以10 kV双回三角排列输电线路更换前后的耐张绝缘子为研究对象，进行实际运行电压下的带电模拟实验，本次实验在某高压实验户外场地进行，使用110 kV电压发生器。利用绝缘电阻在线检测装置以相对平稳的速度在绝缘子串上运动，在检测装置到达绝缘子串终端后自主返回，测量对侧回路绝缘子，在终端获取传输的检测数据。

为了进一步验证本文方法的有效性，本文对10 kV双回三角排列输电线路进行施加横线向风荷载实验和雷击模拟实验，设置有风和雷击两种条件下，分析该输电线路在耐张绝缘纸更换前后的力学特性和耐雷水平。

在雷击输电线路的测试过程中，分别测试雷击在不同位置时绝缘子电位分布，以及雷击塔顶时接地电阻对绝缘子电位分布的影响。设定雷击位置分别为塔顶、避雷线档距中央和绕击。接地电阻的阻值分别选择5 Ω、10 Ω、15 Ω和20 Ω，分析不同接地电阻对更换后的绝缘子电位分布的影响。

在施加横向风荷载实验中，对比在有风作用下的整段输电线路在更换耐张绝缘子串前后的X向位移、轴力结果和风偏角情况。

在上述实验条件设置完成后，检查在线检测装置的转轴能否正常转动，进行可靠固定后检查各部件之间连接是否可靠，并进一步调整传感器角度，在检查完毕确认装置无误后，按下装置启动按钮，观察电源检测指示灯，保证装置电源内电能容量能够完成检测任务。装备准备好后根据显示屏提示进行检测作业，通过无线通信网络与主机终端相连，开启控制程序，保证距离传感器的朝向为监测装置本体的正前方。在确认检测装置到达绝缘子



(a) X向位移 (b) 风偏角 (c) 轴力

图3 位移和轴力结果

串末端后停止检测,由计算机终端获取各项实验结果。

2.2 有风条件下的输电线路力学特性

向整段输电线路施加横线向风荷载,风速取40 m/s,整段输电线路整体在有风作用下的耐张绝缘子更换前后的X向位移、轴力结果和风偏角的对比情况如图3所示。

由图3可知,耐张绝缘串更换前后的最大X向位移均出现在跨度为300 m左右的位置,其中更换前的最大位移为16.3 m,更换后的最大位移为17.2 m。更换前的耐张绝缘串下的整体风偏角较大,耐张绝缘串更换后的部分挡风面积小,因此受到总体风荷载较小,风偏角较小。耐张绝缘子处位置处的轴力大于导线处,经耐张绝缘串更换后,其突变较快,自重作用下更换后的耐张绝缘串的单位长度重量约为导线的20倍,因此耐张绝缘串处的导线弧垂角度更大,轴力也更大。整体来看,更换后的整体输电线路的轴力比更换前小,所受风荷载更小,证明更换耐张绝缘子后的输电线路具有较强的抵制风偏的能力。在相同风荷载条件下,经本文方法更换后的输电线路受风力的影响明显减小,使各输电线路保持自身位置,保证输电线路的可靠运行。

2.3 雷击条件下的绝缘子电位分布

输电线路不同位置遭受雷击后的绝缘子电位分布情况如图4所示。

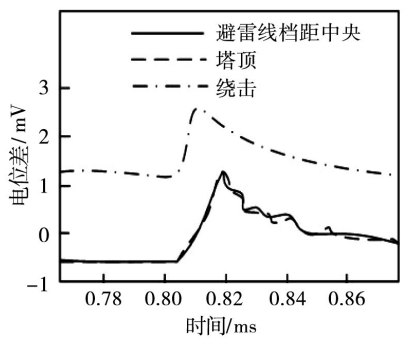


图4 输电线路不同位置雷击的绝缘子电位分布

图4清晰地展示了雷击塔顶、避雷线档距中央以及绕击3个位置的绝缘子电位分布情况,经耐张绝缘子更换后,在雷击过程中绝缘子串均未发生闪络的情况,其中,在输电线路在绕击时的绝缘子串两端的电位差最大,达到2.30 mV,雷击避雷线时的电位差最小,为1.0 mV。在雷击塔顶时的雷电流幅值作用在绝缘子两端的时间较短,因此接地电阻溜走一部分电流,使塔顶的耐雷水平更高。雷击避雷线时,雷电流可通过避雷线两边传输,使雷电流波头的作用时间更短,其耐雷水平比绕击时更高。在雷击后3 μs的绝缘子串电位分布情况如图5所示。

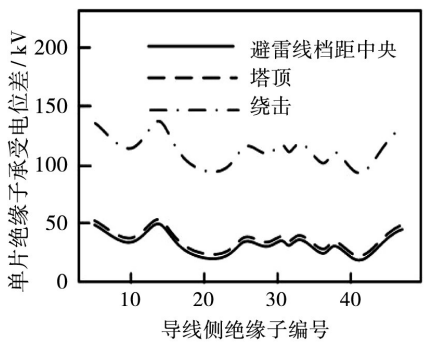


图5 雷击后3 us的绝缘子串电位分布

根据图5雷击不同位置的绝缘子串电位分布情况可知,绕击时,导线侧单片耐张绝缘子的最大电压为146 kV,雷击塔顶和避雷线时的导线侧单片耐张绝缘子的最大电压分别为51 kV和52 kV,由此可见塔顶和避雷线档距中央的耐压水平更高。雷击塔顶时,随着接地电阻的增加,绝缘子电位分布的影响如图6所示。

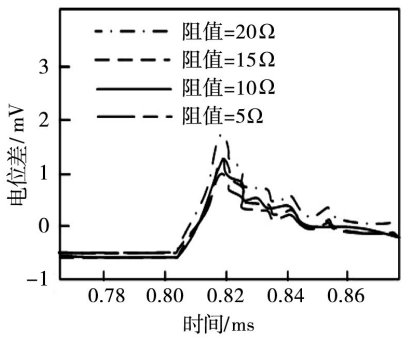


图6 雷击塔顶时接地电阻对绝缘子电位分布的影响

如图6所示,随着接地电阻的不断增加,绝缘子两端

(下转第165页)