

一起复合横担绝缘子断裂原因的分析与探讨

刘建军¹, 张迺龙¹, 胡鹏¹, 赵轩²

(1.国网江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京211103;2.国网南京供电公司,江苏南京210029)

摘要:通过一起220 kV线路复合横担绝缘子断裂引发线路跳闸的案例,分析查明绝缘子存在结构强度不足的设计缺陷是导致故障发生的主要原因。同时发现由于缺乏验证试验,使得一些存在设计缺陷的复合横担绝缘子投入运行,造成了电网安全运行的隐患,需要排查整改。文章对复合横担绝缘子结构强度设计核算方法进行了探讨,提出复合横担绝缘子在设计制造时应根据自重、固定导线重量及设计风载荷核算弯曲应力,以及当联塔部件选用非中心对称截面时必须明确安装方向才能保证结构受力安全的建议。

关键词:复合横担绝缘子;断裂;原因分析;结构受力

中图分类号:TM216

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2016)06-0088-04

复合横担绝缘子是复合绝缘子的一种,用来保持导线与铁塔、或导线之间的水平绝缘距离,主要应用于架空输电线路终端塔电缆引下线固定、同塔换位导线固定等场合。

由于复合绝缘子耐污闪性能优异、憎水性强、重量轻等特点,使其在架空输电线路中大量应用^[1]。近年来,国内外对于复合绝缘子已进行了大量的研究,这些研究主要针对复合绝缘子的电气特性、材料老化机理、运行监测技术等方面^[2-5],并形成了相关标准^[6]。值得注意的是,复合横担绝缘子运行时主要承受弯曲载荷,与悬垂和耐张复合绝缘子承受拉伸荷载的受力方式存在很大不同。而且,由于复合横担绝缘子的承载力试验属于破坏性试验,无法在现场进行试验验证,因此一些存在结构设计、制造缺陷的产品因缺乏验证投入了运行,给电网的安全运行造成了隐患。

1 某220 kV复合横担绝缘子断裂原因分析

1.1 运行工况

2016年3月,某220 kV线路跳闸,经现场巡查发现5号塔A相电缆引下线上端复合横担绝缘子根部断裂,悬坠在空中,致使A相、B相电缆引下线因安全距离不足发生相间短路故障,引发线路故障跳闸。当日天气为小到中雨,东北风约7级。复合横担绝缘子现场运行情况如图1所示。

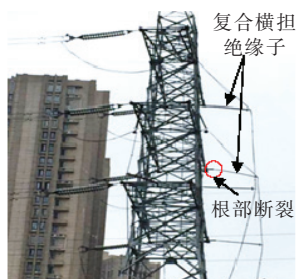


图1 复合横担绝缘子现场运行情况

1.2 复合横担绝缘子结构

1.2.1 绝缘子整体结构

发生断裂的复合横担绝缘子安装总长为2900 mm,双伞结构,其中大伞裙D148 mm,小伞裙D116 mm,伞裙长度2540 mm。

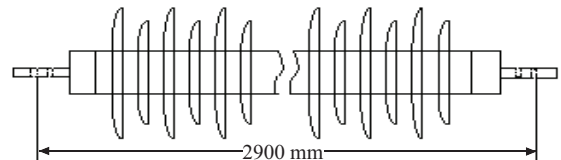
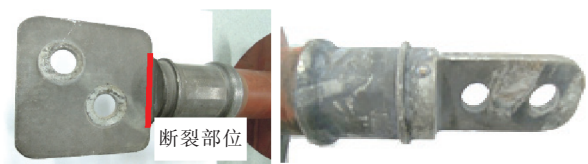


图2 复合横担绝缘子整体结构示意图

1.2.2 断裂处结构

复合横担绝缘子通过两端的金属附件分别与铁塔和电缆引下线相连。其中联塔侧金属附件为边长100 mm的正方形平板,厚度8 mm,本次断裂就发生在正方形平板与连接复合绝缘子芯棒的圆管过渡部位,如图3所示。



(a) 联塔侧金属附件 (b) 联导线侧金属附件

图3 复合横担绝缘子端部金属附件结构

1.3 断裂金属附件材料性能分析

为了分析复合横担绝缘子联塔侧金属附件断裂原因与其材料性能之间的相关性,遂对其进行材料成分、力学性能检测和试验,并对断口面进行了分析。采用OBLF 750-II型直读光谱仪对联塔侧断裂金属附件进行了材料成分分析,其主要合金元素含量符合设计标称的ZG310-570对应标准^[7]要求。采用MTS 810.25型电液伺服材料性能试验机对材料的力学性能进行了检测,其力学性能也符合标准要求,结果如表1、图4所示。

表 1 断裂金属附件材料力学性能检测结果

检测项目	屈服强度 / (N·mm ⁻²)	抗拉强度 / (N·mm ⁻²)	断后伸长率 / %
试验结果	372	675	18.0
GB/T 11352	310	570	15.0

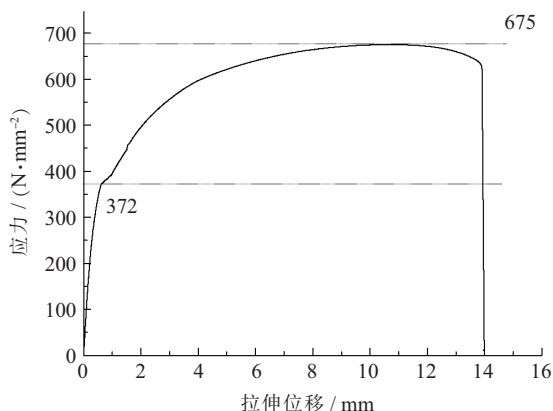


图 4 断裂金属附件材料力学性能试验曲线

采用 ZEISS MA15 型扫描电子显微镜对断口进行了微观分析,断面未见陈旧性裂纹和铸造缺陷,如图 5 所示。由此可见,联塔侧金属附件的材料性能与设计一致,材料性能并不是引发断裂的原因。



图 5 复合横担绝缘子端部金属附件断口形貌

1.4 复合横担绝缘子结构受力分析

根据现场安装情况,复合横担绝缘子通过联塔侧金属附件(方板)水平安装,呈悬臂梁受力结构。绝缘子运行状态下的受力主要包括 3 个部分。一是自身的重力,方向为垂直向下;二是风载荷作用力,由于绝缘子安装高度在 15 m 以下,在此高度的风受地面影响多为水平方向,风载荷也为水平方向;三是端部固定导线的重量载荷,方向为垂直向下。因此绝缘子的结构受力如图 6 所示。

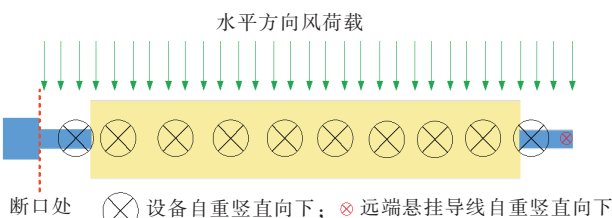


图 6 复合横担绝缘子结构受力图(俯视)

1.4.1 计算参数

绝缘子自重 $m_1=15$ kg (实际测量值); 计算风速 $V=17.1$ m/s(按现场 7 级风计算);远端导线重量 $m_2=3.2$ kg (按该绝缘子承受下方 3 m 长 LGJ 300/25 导线重量计算^[8]);断口宽度 $b=60$ mm,厚度 $h=8$ mm;绝缘子安装长度 $l=2900$ mm; 绝缘子风荷载作用面积 $A_1=$

2540 mm×148 mm(考虑最保守情况,按绝缘子投影面积计算)。

1.4.2 断口部位受力计算

绝缘子联塔侧金属附件断面上的受力情况如图 7 所示,其中 A 区承受由自重弯矩、导线弯矩以及风载荷引起的拉应力,B 区承受由自重弯矩、导线弯矩引起的压应力,以及风载荷引起的拉应力,C 区承受由自重弯矩、导线弯矩引起的压应力,以及风载荷引起的压应力,D 区承受由自重弯矩、导线弯矩引起的拉应力,以及风载荷引起的压应力。因此 A 区是承受拉应力最大的区域,C 区是承受压应力最大的区域。



图 7 断口部位应力分析图

(1) 绝缘子自重断口处产生的弯矩为:

$$M_1 = \frac{1}{2} m_1 g l \quad (1)$$

此弯矩产生的最大应力为:

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{m_1} = \frac{M_1}{\left(\frac{1}{6} b h^2\right)} \quad (2)$$

(2) 连接导线自重断口处产生的弯矩为:

$$M_2 = m_2 g l \quad (3)$$

此弯矩产生的最大应力为:

$$\sigma_2 = \frac{M_2}{W_1} = \frac{M_2}{\left(\frac{1}{6} b h^2\right)} \quad (4)$$

(3) 绝缘子风荷载为^[9]:

$$W_l = W_0 \cdot \mu_z \cdot B_1 \cdot A_l \quad (5)$$

式(5)中: W_0 为基本风压, $W_0=V^2/1600$;计算风速 7 级风, $V=17.1$ m/s; μ_z 为风压高度变化系数,按 B 类地形 15 m 高,取 1.14; B_1 为覆冰风荷载增大系数,无覆冰现象,取 1; A_l 为绝缘子串承受风压计算面积,取投影面积 375 920 mm²。

风荷载在断口处产生的弯矩为:

$$M_3 = \frac{1}{2} W_l l \quad (6)$$

此弯矩产生的最大应力为:

$$\sigma_3 = \frac{M_3}{W_1} = \frac{M_3}{\left(\frac{1}{6} b^2 h\right)} \quad (7)$$

根据计算参数,图 7 所示断口面上,各项弯矩及应力的计算结果如表 2 所示。

断面上的最大应力 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 508.5$ N/mm²。

表2 断面弯矩和应力计算结果

计算量	计算结果		
弯矩 / (N·m)	$M_1 = 217.50$	$M_2 = 92.80$	$M_3 = 113.56$
应力 / (N·mm ⁻²)	$\sigma_1 = 339.84$	$\sigma_2 = 145.00$	$\sigma_3 = 23.66$

1.5 绝缘子根部金属附件断裂原因综合分析

由前述材料性能检测试验和结构受力分析,发生断裂的复合横担绝缘子联塔侧金属附件材料的性能符合设计和标准要求,但其应力值已高达 508.5 N/mm^2 ,非常接近材料的标准抗拉强度极限 570 N/mm^2 ,说明结构的安全裕度非常小。在遭遇大风状况时,由于横担绝缘子呈悬臂梁布置会发生晃动,其联塔侧金属附件变截面处(发生断裂的部位)在附加疲劳应力的作用下应力值就会超过材料的强度极限。因此复合横担绝缘子的联塔侧金属附件变截面处在运行工况下应力超过其材料的强度极限是导致绝缘子断裂的直接原因。

由表2的计算结果还得知,断面部位的应力分量中自重和导线重量引起的应力共占总应力的95%以上,影响这两个分量过大的因素主要为绝缘子的长度和联塔侧金属附件的抗弯截面模量,而这两个因素均与其设计直接相关,由自身结构导致应力过大说明该型号绝缘子存在较大的设计缺陷。

2 复合横担绝缘子承载力设计问题探讨

与耐张和悬垂复合绝缘子不同,复合横担绝缘子承受的主要是弯曲载荷,而弯曲载荷与绝缘子的长度及绝缘子根部承载截面的结构形式有很大相关性,甚至相同截面不同安装方式其截面抗弯模量也不相同,导致截面上的应力会明显不同。一般而言,绝缘子的长度受爬电距离的限制,设计时难以明显缩短,但其塔侧金属附件截面形式却可以优化设计,使绝缘子的最大应力值控制在安全范围之内。

由式(2)、式(4)、式(6)可以看出,增加截面抗弯模量 W 可显著降低应力值。对于矩形截面,截面抗弯模量 $W_r = bh^2/6$,对于圆形截面,截面抗弯模量 $W_c = \pi r^3/4$,可见增大截面积,或者在相同截面积的情况下增大平行于弯矩截面的结构尺寸(h)可明显增大截面抗弯模量,起到减小截面应力的作用。需要注意的是,设计时核算的截面安装方向需要在安装手册中注明,因为非中心对称截面不同安装方向其截面抗弯模量也会有差异。在例如本文案例中的复合横担绝缘子联塔侧金属附件为矩形截面,当其水平安装时截面抗弯模量为 640 mm^3 ,垂直安装时截面抗弯模量为 4800 mm^3 ,截面积相同,但截面抗弯模量却相差7.5倍。不仅直接影响了重力载荷引起的应力分量,还导致风载荷应力分

量发生了明显改变。图8展示了水平和垂直2种安装方式下截面应力随风速的变化规律。可见联塔侧金属附件水平安装时应力分量主要来自于自重和导线的重量弯矩,风载荷对应力的影响很小。但当其垂直安装时,风载荷则成为主要应力分量来源。

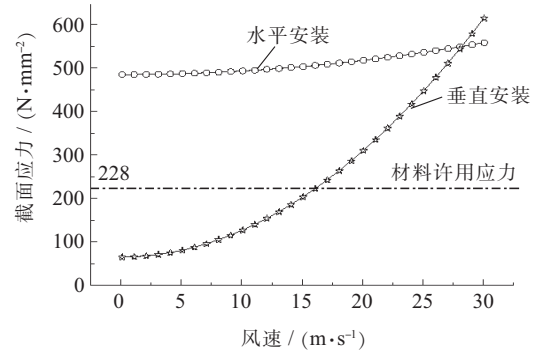


图8 2种安装方式下截面应力随风速变化规律

在工程上,为了确保设备在服役期间能正常工作,就需要控制设备材料的运行应力不得超过许用应力。许用应力通过破坏应力与安全系数的比值来确定,对于延性材料通常以屈服强度为破坏应力,对于脆性材料一般取抗拉强度为破坏应力。且延性材料的安全系数一般取 $1.0 \sim 2.5$,脆性材料的安全系数一般取 $2.5 \sim 3.0$,特殊情况需要更大^[10]。在《110~750 kV 架空输电线路设计规范》中,要求金具强度的安全系数不小于 2.5 ^[11]。本文案例中绝缘子联塔侧金属附件的材质为 ZG310-570,从材料性能试验曲线(图4)可见其属于脆性材料,因此其破坏应力取材料抗拉强度、安全系数取 2.5 计算,材料的许用应力为 228 N/mm^2 。由图8可见,该横担绝缘子水平安装时结构的运行应力远远超过了许用应力,垂直安装时当风速超过 16.5 m/s 时运行应力便超过了许用应力,再一次说明了其在设计时对承载力考虑不足。

3 结束语

综上所述,复合横担绝缘子在设计制造时应重视结构强度的设计与核算,尤其是联塔侧金属附件弯曲应力的计算,考虑因素应该包括自重、固定导线重量及设计风载荷。由于截面形式会显著影响弯曲应力,当绝缘子设计制造单位选用非中心对称截面时,必须明确复合横担绝缘子的安装方向。复合横担绝缘子目前尚无设计验收规范,不排除其他单位也有存在类似设计缺陷的绝缘子投入了运行。为避免类似故障,可采用本文所述的强度校核方法进行核算,若存在运行应力超过材料许用应力的绝缘子,应及时予以更换。

参考文献:

- [1] 陈奇. 高压复合绝缘子应用及老化状态研究综述[J]. 绝缘材料, 2016, 49(6): 7-13.

- [2] 王言,贾志东,朱正一,等.基于流固耦合方法的强风区复合绝缘子结构研究[J].电网技术,2016,40(1):316-321.
- [3] 黄成才,李永刚,汪佛池,等.基于电导电流测试的硅橡胶复合绝缘子伞群材料老化特性分析[J].电工技术学报,2016,31(2):252-259.
- [4] 姚莉娜,吴颖晖,王少华,等.挂网运行复合绝缘子的电气及力学性能研究[J].绝缘材料,2015,48(8):23-27.
- [5] 刘亚南,范立新,徐钢,等.基于改进相关向量机绝缘子污闪电压预测研究[J].江苏电机工程,2016,35(1):7-10.
- [6] GB/T 19519—2014 架空线路绝缘子标称电压高于1000 V交流系统用悬垂和耐张复合绝缘子定义、试验方法及接收准则[S].
- [7] GB/T 11352—2009 一般工程用铸造碳钢[S].
- [8] GB T 1179—2008 圆线同心绞架空导线[S].
- [9] DL/T 5154—2012 架空输电线路杆塔结构设计技术[S].
- [10] 李纪仁.机械设计[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1999:59-60.
- [11] GB 50545—2010 110~750 kV 架空输电线路设计规范[S].

作者简介:

刘建军(1979),男,甘肃天水人,高级工程师,从事电网设备材料检测及状态评价专业工作;

张迺龙(1981),男,河南信阳人,博士,从事电力设备结构力学分析及状态评价专业工作;

胡鹏(1989),男,安徽安庆人,硕士研究生,从事电力设备结构力学分析和状态评价专业工作;

赵轩(1984),男,江苏淮安人,工程师,从事输电线路运行维护管理等相关工作。

Analysis and Discussion on the Fracture Reason of Composite Cross-arm Insulator

LIU Jianjun¹, ZHANG Nailong¹, HU Peng¹, ZHAO Xuan²

(1.State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, Jiangsu Province, China)

Abstract: A 220kV line tripped caused by the fracture of composite cross-arm insulator, the main reason of which is found out that the structural strength of the insulator is insufficient. Besides, for the lack of test, some composite cross-arm insulators with design defects have been applied to the power grid, bringing hazard to the power grid, and need to be investigated and rectified. Therefore, the structure strength calculation and design method of composite cross-arm insulator were discussed. It was proposed that the bending stress of composite cross-arm insulator should be calculated according to the weight of the insulator itself, the weight of fixed conductor and the designed wind load in the process of design and manufacture. A suggestion was also proposed that when components with non-central symmetrical section were used to connect composite cross-arm insulator to tower, the installation direction must be explicit, so that the structural force was within the limits.

Key words: composite cross-arm insulator; fracture; reason analysis; structural force

(上接第78页)

4 结束语

本文通过分析智能变电站几种新设备、新技术的应用特点,与传统站进行横向比较,以智能站对现场运维工作产生深刻的影响、变化为最终落脚点,使运行维护人员对智能站中若干关键技术有较为深刻的理解,也能为现场操作提供一定的帮助。

参考文献:

- [1] 袁宇波,卜强生,高磊,等.智能变电站数字采样延时特性分析与试验[J].电力系统自动化,2013,37(24):76-80,88.
- [2] 宋亮亮,汪萍,袁宇波,等.双重化配置线路保护的重合闸功能运行分析[J].江苏电机工程,2014,33(01):18-21.
- [3] Q/GDW 393—2009 110(66) kV ~ 220 kV 智能变电站设计规范[S].

作者简介:

马义(1984),男,河北景县人,工程师,从事继电保护工作;

张钰金(1987),男,江苏扬中人,助理工程师,从事继电保护工作;

钱苗旺(1982),男,江苏连云港人,工程师,从事继电保护工作;

胡志勇(1987),男,江苏南通人,工程师,从事继电保护工作。

Comparison Between Smart Substation and Traditional Substation

MA Yi, ZHANG Juejin, QIAN Miaowang, HU Zhiyong

(State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: The application of new technology involved became universal with the increasing production number of smart substation. Compared with the traditional substation, the smart substation owns some new IEDs (Intelligent Electronic Devices) such as electronic transformer, merge unit, intelligent terminal and network analyzer. The cable between the secondary devices was canceled and replaced by the network transmission packet consisting of the optical fiber, the process layer switch and the station control layer switch. The redundancy configuration of the secondary equipment was also different. The differences of secondary AC circuit, maintenance mechanism and reclosing circuit between traditional substation and smart substation were focused on by the article. It was also described that the new technology applied in the smart substation had a deep effect on the operation and maintenance on site.

Key words: smart substation; merge Unit; maintenance mechanism; reclosing