

DOI: 10.7667/PSPC160163

## 新疆强风沙尘环境下 750 kV 线路运维技术

李娟<sup>1</sup>, 廖峥<sup>2</sup>, 张陵<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>, 梁乃锋<sup>1</sup>, 张英杰<sup>1</sup>, 康玉涵<sup>1</sup>, 周二彪<sup>1</sup>

(1. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 输配电装备及系统安全与  
新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 为了保证大风及强沙尘环境下特高压输电线路的正常运维, 确保输电线路及电网安全, 针对 750 kV 特高压输电线路提出了防范强风沙尘侵害的措施。通过总结新疆地区气象特征, 分析新疆电网输电线路在强风沙尘作用下可能出现的故障现象, 从防范绝缘子伞裙破裂、金具和引流线磨损等方面给出了具体的技术方法。结合新疆 750 kV 输电线路实际发生的故障案例以及故障处置对策, 说明了该方法对于提升 750 kV 特高压输电线路的耐受强风沙尘能力是有效和实用的, 可为后续强风沙尘地区的输电线路设计及高可靠性运行提供有益借鉴。

**关键词:** 气象灾害; 线路故障; 运行维护; 强风; 沙尘

### Operation and maintenance techniques for 750 kV transmission lines under severe wind and sand-dust weather in Xinjiang

LI Juan<sup>1</sup>, LIAO Zheng<sup>2</sup>, ZHANG Ling<sup>1</sup>, XIONG Xiaofu<sup>2</sup>, LIANG Naifeng<sup>1</sup>, ZHANG Yingjie<sup>1</sup>, KANG Yuhuan<sup>1</sup>, ZHOU Erbiao<sup>1</sup>

(1. Economic and Technology Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830011, China;  
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To ensure the normal operations of UHV transmission lines under strong wind and sand-dust conditions and the safety of transmission line and power grid, the prevention measures to encroachments by strong wind and sand-dust are presented in allusion to the 750 kV UHV transmission lines. Through summarizing the meteorological characteristics of Xinjiang region and analyzing the fault events that may occur in transmission lines of Xinjiang power grid under the effect of strong wind and sand-dust conditions, including the particular technical methods to prevent from shed skirt fracture of insulator, wear and tear of metal fittings and jumper conductors of UHV transmission lines, etc. Combining with some actual fault cases and the corresponding fault disposal measures of 750 kV transmission line in Xinjiang, it shows that this method is practical and effective in improving the ability of enduring strong wind and sand-dust conditions for 750 kV UHV transmission lines, and can be used in future design and provide valuable reference for transmission lines operating with high reliability in strong wind and sand-dust area.

**Key words:** meteorological disaster; transmission line fault; operation maintenance; strong wind; sand-dust

## 0 引言

新疆地处我国西北疆域、位居欧亚大陆腹地。其地域远离海洋, 由三大山系包围两大盆地的荒漠构成地貌轮廓, 有众多山间盆地穿插于山脉内部。独特的地形地貌产生了新疆很强的大陆性温带干旱气候。新疆处于西风气流带下, 南受“世界屋脊”青藏高原的影响, 时有副热带天气系统影响<sup>[1]</sup>, 脆弱的生态环境系统再加上复杂的地形使新疆多种气象灾害及其衍生灾害频发, 影响较多的气象灾害有

干旱、高温、低温冻害、冰雪、大风、沙尘、局地暴雨山洪等<sup>[2]</sup>。

据统计<sup>[3]</sup>, 列为新疆自然灾害损失最严重的灾种类依次为洪水、冰雹、风灾(含沙尘暴)等<sup>[3]</sup>。虽然受新疆气候变暖增湿的影响, 近 20 年来新疆大风和沙尘暴年发生频次在波动中减少, 然而突发性风沙灾害、强沙尘暴的频数、成灾次数不断增加, 对电网的损害却明显增大。

截至 2014 年底, 新疆电网共有 12 座 750 kV 变电站投入使用, 变压器 14 台, 变电容量 20 000 MVA;

750 kV 线路达到 21 条, 长度大约 3 940 km。“十三五”期间, 新疆电网预计新投运 750 kV 变电站 11 座, 增加变压器 25 台, 变电容量增加 37500 MVA, 新增 750 kV 输电线路长度达 7 263 km<sup>[4]</sup>。这些输电线路跨越常年冰雪覆盖的雪山、地形纷繁复杂的河谷, 也穿越干燥高温的沙漠、风沙砾石吹动的戈壁, 运行条件十分恶劣, 处在强风沙尘环境之中更是极为常见。

随着我国经济社会的不断发展, 对于高压输电线路的需求也不断增多。因此高压输电线路的运营与维护管理成为十分重要的工作, 目前我国在常规特高压线路运行维护技术方面的理论研究与应用实践已经取得了卓有成效的经验成果<sup>[5]</sup>, 现在常规的 500 kV 线路与 750 kV 线路等特高压输电线路运维准则主要遵从 2010 年起实施的 DL/T 741-2010《架空输电线路运行规程》, 主要工作内容为对输电线路、杆塔、导线、金具、绝缘子等的巡视、检测、维修、技术管理等。但新疆大部分地区由于其特殊的地形, 不仅充满强风沙尘环境还有许多线路架设在无人区中, 大都是单线长距离联系, 电网结构、特点与电网运维都需要特殊考虑, 不同环境下的特高压线路运行维护方面的经验仍然相对欠缺<sup>[6-8]</sup>, 因此各属地特高压输电线路运行单位必须在日常维护中积累大量现场资料, 并进行整理分析, 结合线路所处不同地形环境制定特定的运维规范准则, 还需与科研机构以及各大院校合作, 进行特高压线路运行维护技术的理论研究与试验, 改善优化现有的运行维护技术方法, 为保障我国特高压线路的安全可靠运行提供支持。

输变电设备运维与检修技术研究, 对解决“一带一路”、全球能源互联面临的极端环境下输变电工程运行难题提供基础。因此, 根据新疆电网现有 750 kV 线路的运行经验, 提炼出 750 kV 线路运维检修中的问题, 有针对性的开展强风沙尘环境下输电线路的规划设计、施工建设和运行维护技术对提高输电线路运维水平、维护重要送电通道安全, 保证电网安全稳定运行具有重要意义。

## 1 新疆强风沙尘天气特征

### 1.1 新疆大风天气特征

大风天气过程是由一定的天气状况与特殊地形共同影响形成的。新疆一年四季中以春季与夏季大风日数最多, 秋季最少, 月际分布中以 4、5、6 和 7 月大风日数最为频繁, 4 和 5 月最多, 1 和 12 月

最少, 如图 1 所示。

文献[9]介绍的新疆风天空间分布如图 2 所示, 综合来看表现为新疆南部大风日数少于东北部, 且盆地边缘大风天日数超过盆地腹地, 中、低山区的大风天数也较高山区要多, 大风天数高值区域主要以孤岛状分布于山涧、河谷、峡谷地区。

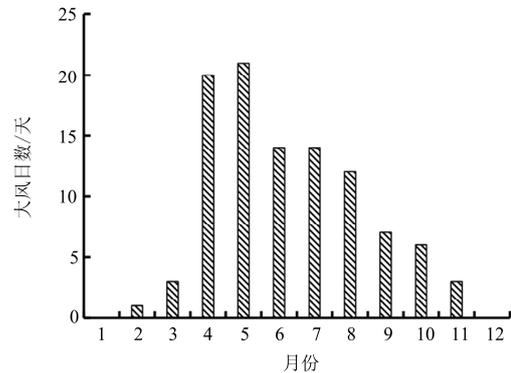


图 1 1989-2009 年新疆各月大风日数统计图

Fig. 1 Bar chart of gale days in Xinjiang from 1989 to 2009

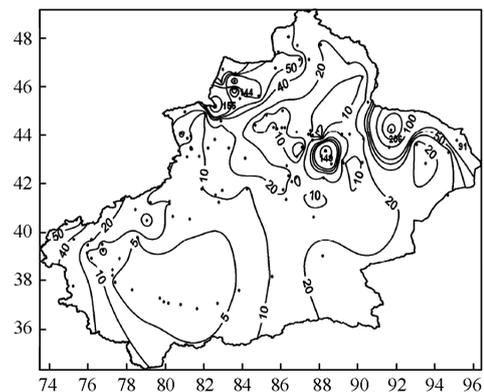


图 2 1961-2009 年新疆年均大风日数空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of annual average gale days in Xinjiang from 1961 to 2009

### 1.2 新疆沙尘天气特征

沙尘是指风将地面沙粒、尘土卷入空中, 使空气混浊的一种天气现象, 包括扬沙、浮尘、沙尘暴、强沙尘暴及特强沙尘暴<sup>[10]</sup>。沙尘暴 (sand-dust storm) 是沙暴(sand storm)和尘暴(dust storm)两者兼有的总称, 是指大风把地面沙粒尘土物质吹起并卷入空中, 让空气变得混浊, 水平能见度低于 1 km 的严重风沙天气现象。

新疆近 6 年的沙尘暴次数<sup>[11]</sup>统计分布如图 3 所示, 其中塔里木盆地南部和东南部达 90~110 d, 盆地西部在 40~80 d, 其他地区约 15~30 d。哈密、吐鲁番为 20~30 d; 北疆准噶尔盆地腹部 20 d 左右,

其他地区都在 10 d 以下。

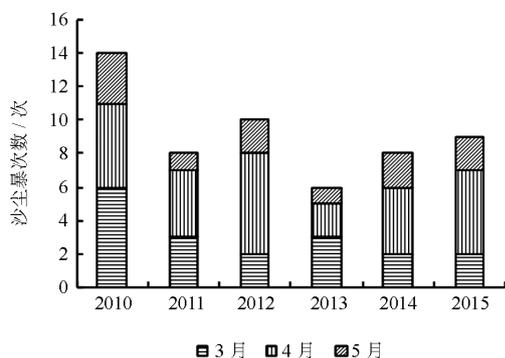


图 3 新疆沙尘暴次数统计图

Fig. 3 Bar chart of sand-dust storm in Xinjiang

## 2 强风沙尘天气下线路故障特征

强风沙尘天气对输电线路的损害,除了大风引起的歪杆、倒杆以及断线等造成的架空输电线路停电故障外,也会因为强风带来异物搭挂,还会引起金具的连接处磨损甚至掉串、风偏放电等事故<sup>[12]</sup>。工程实际中,由强风沙尘所引起并造成输电线路的故障的类型主要有:绝缘子伞裙断裂、风偏故障、金具磨损、耐张塔引流线磨损等。

### 2.1 绝缘子伞裙断裂

近年来超高压、特高压电网的迅速发展,使输电走廊飞速延伸向全国各地的同时,却也很难绕过以往电网未途径过的各类恶劣环境,使绝缘子伞裙处在各种复杂的环境之中<sup>[13]</sup>。不仅如此,随着电压等级的提高杆塔高度也在不断增高,这也加重了绝缘子伞裙承受的风力程度。

在新疆地区的特高压输电线路中,复合绝缘子因为其优良的耐污绝缘性能被广泛使用,但途经强风区的 750 kV 输电线路却出现了数目不小的绝缘子伞裙根部断裂。这是因为绝缘子伞裙部分受强风吹动影响发生持续且稳定的剧烈摆动,最终导致伞裙根部的硅橡胶材料因为疲劳产生断裂<sup>[14-15]</sup>。

线路及外绝缘在设计时并未充分考虑复合绝缘子伞裙受外力作用的相关问题,在实际运行中,当风速高于一定程度时,复合绝缘子伞裙受风影响周期摆动,形成迎风偏折形变,芯棒护套与伞裙根部连接处将会产生周期性的应力集中,这种现象会导致连接区域硅橡胶材料出现应力疲劳,进一步产生初步裂纹并最终发展到伞裙根部断裂故障,急剧降低绝缘子的力学性能和电气性能。

### 2.2 金具磨损

电力金具作为输电线路其他部件与悬吊绝缘子串相互连接的有效常规装置,在输电线路安全运行

中有着重要作用。

金具的承接处长年累月在大气环境中运行,受强风吹拂、昼夜温差、冻雨覆冰、降水潮湿等恶劣气象因素影响很大,当受到机械载荷时外力使输电线长时间振动引起附加应力,连接金具的主要受力点在长时间周期性的振动下出现交变的弯曲应力,扰动应力达到一定程度时,含有微缺陷的金具开始了疲劳过程。在经过一段时间之后,由裂纹起始阶段开始,经由裂纹平稳扩展阶段,最后产生裂纹扩展失稳,造成金具疲劳发生金具破坏。产生疲劳裂纹的原因其中之一是由载荷水平交变,此外还取决于风振摆动频次。

在新疆 750 kV 输电线路所在地区的 U 型环(即地线和光缆悬垂挂点金具),虽然进行了金具强度增加,提高了一定的安全系数,然而环与环之间连接方式却存在很大问题。具体表现在转动不灵活,且两环间的连接点在强风的外力作用下不规则摆动,挂点金具承受了地线和光缆的全部垂直荷载,因而使金具连接点互相之间的磨损速度加快。在设计上采用了普通的金具和组装型式,而不是按照强风沙尘这种特殊区段进行金具的差异化设计,在设计上考虑不周全<sup>[16]</sup>。

因此,在强风沙尘天气下不仅是充满灰尘颗粒的外部环境容易造成连接金具的锈蚀,而且金具连接点在周期性的强风作用下长时间发生相对运动,加之没有就新疆地区的沙尘强风区进行差异化设计,变化的机械载荷和环境因素的联合影响下引发了磨损,最终金具与其他零件连接处在强风长时间、变负荷的作用下有很大几率发生疲劳引起的金具断裂。

### 2.3 风偏放电

风偏放电是指在强风或飊线风的作用下,绝缘子串向杆塔方向倾斜,减小了导线与杆塔的空气间隙,当间隙距离不能满足绝缘强度要求时就会发生的放电现象。因风偏放电而导致的跳闸,重合成功率不高,线路停运率较大。发生风偏故障的原因从本质来看是不当的设计参数选择以及不合理的风偏角选择<sup>[17]</sup>。

造成风偏闪络故障很大原因是强风沙尘这种恶劣的外部气象环境<sup>[18]</sup>。当电力线路在强风等特殊环境下运行时,绝缘子受风的外力作用偏靠向杆塔方向,使杆塔与导线间的空气间隙距离缩短,同时这种天气下输电线与杆塔等外物空气间隙中存在沙尘等异物,降低了空气间隙的电气强度,当该距离不能满足绝缘强度要求时便发生风偏放电。

### 2.4 耐张塔引流线磨损

输电线路耐张塔引流线是电力线路可靠运行必

要的环节，主要用于导通电流。不仅在工程的实际运维中不能对其疏忽，并且在最初的输电线路设计中就应考虑外部环境对它的影响，特别是在历史风区、大高差地形、大跨越以及高山等地区，由于这些特殊地段的外力过大、应力集中等原因，耐张塔引流线磨损问题更是频繁发生<sup>[19]</sup>。此外，还有一些原因也会造成输电线路引流线的磨损，例如电流的热效应以及材料的接触电阻、蠕变等。本文所述的新疆地区 750 kV 输电线路主要是由于风振动和大高差两方面原因造成。

### 3 新疆电网 750 kV 线路运维优化

#### 3.1 绝缘子伞裙优化

针对新疆强风沙尘环境对悬式复合绝缘子伞裙的破坏作用特点，新疆电力公司开展了相关研究，提出了相应的改善方案，主要包括：

1) 伞裙配方优化。伞裙调制配方能从很大程度上影响复合绝缘子的工作寿命，伞裙一般为硅橡胶护套制作，是复合绝缘子的关键组成部件，因此必须具有良好的防水性、耐侵蚀性、耐跟踪性、电绝缘性、优异的耐气候性、良好的工艺和特定的机械性能。依照复合绝缘子不同耐受性的影响因子、机制、运动模型等深入开展长期研究与试验，开发出能强化伞裙耐受特性的材料和填料，结合风洞测试等进一步试验遴选出适合新疆大风沙尘地区的最优硅橡胶配方，这能有效提高伞裙质量。

2) 伞裙结构优化。绝缘子暴露在大气之中，当有气流经过，绝缘子摆动幅度与积污厚度将会直接受到绝缘子伞裙结构的影响。所以在新疆强风沙尘区域可以考虑采用小伞裙结构的绝缘子。新疆公司最近几年时常出现风区电力线路复合绝缘子横担侧第一片大伞裙撕裂的状况，更有甚者诸多线路工程甚至在初始基建时就出现了数量不少大型伞裙破损的情况。考虑到复合绝缘子的第一片伞裙设计得比较大的原因主要是用于防覆冰以及鸟害，可是新疆的风区内部通常都是由戈壁或者荒漠组成，出现鸟害的几率较低，例外地区可以采用防鸟装置等方法减少因鸟害导致的跳闸。

#### 3.2 金具运维优化

现在一般通过金具的出厂检验、安装调试来进行金具断裂防治，并考虑改变连接方式以及采用高耐磨材料对现有金具进行更换。

1) 针对重要输电线路与金具厂家进行沟通，要求工厂进行投用前表面检查和拉伸试验，同时还需要第三方检验机构通过采样一定批数的金具进行检验。开展新塔投运前安装中的监控部件无损探伤、

理化试验等质量检验工作。在电力金具的外观设计、尺寸大小、构造方法、力学性能及其他方面进行采样监测，以避免缺陷部件进入基础设施安装现场。

2) 改变金具连接方式，现有的金具组装型式是利用一个 U 型环固定、一个 U 型环转动，在大风条件下，两个 U 型环之间产生摩擦损伤的几率很大。文献[20]提出了一种改进方案，具体是使用螺栓连接孔的方式，板孔与转动的螺栓之间会产生滚动摩擦，摩擦部位是螺栓圆周与孔缘之间，螺栓和孔会随着应力不停调整改变，虽然金具长期风摆对金具的磨损不可避免，但此种连接方法可很大程度上降低螺栓对孔的磨损程度。

3) 对于已经发生产生腐蚀和裂纹的金具，应结合现场的微气象条件和特定环境，及时安排停电登杆排查。完成检查后依状况更换破损或腐蚀的金具，重点检查对象是强风区、风振区的线路。

4) 对运行年限五年以上的电力线路提高金具检查频次与力度，对投运十年以上的重要输电线路，应进行抽样检查后根据当地自身情况进行金具更换，特别是受力大的重要关键部位。

5) 选取高耐磨材料制作金具。合理采用耐磨材料能显著提高金具的耐磨性，提高其使用寿命。例如文献[21]中将 35CrMo 材料应用在连接金具 U 型环制作中，35CrMo 综合性能好，且低温情况下具有优秀的脆性，能很好的适应新疆地区某些低温区域，有效防治金具的脆变。

#### 3.3 风偏放电防治

当前常用的风偏防改措施是用重锤片或者跳线串等加装在风偏故障易发的输电导线上，但在新疆强风区域的实际运行中这些措施并未达到预期的效果。第一，加装跳线串后，导线发生风偏跳闸的程度降低不显著；第二，加装重锤片的导线由于其设备表面积大，容易受到侧风外力影响；第三，重锤片单设备重量很大，给杆塔以及导线增加了不少负重，杆塔导线的最大设计荷载有限，强风时甚至可能发生倒塔断线，损失更为巨大。综合各方考虑我们可以从以下几方面入手防治风偏闪络：

1) 优化绝缘子型式，加装防风偏绝缘子。高压输电线路耐张塔跳线选择防风偏绝缘子，能很大程度上抑制跳线风偏及导线风摆，使地电位与引流线间的绝缘距离得到控制，是一种可靠的防治线路风偏故障方法。

2) 加装导线防风拉线。通过在导线线夹处加装平行挂板，连接绝缘子后用钢绞线侧拉至地面，起到在大风时固定杆塔导线风偏的作用。针对水泥单杆，在迎风侧中相导线采用对横担侧拉、边相导线

采取八字对地侧拉,即将拉线下拉固定在电杆四方拉线上;对于水泥双杆,在迎风侧中相导线采取横向对电杆侧拉,边相导线采取加长横担侧拉方式;对于直线塔,在中相一般采取侧拉至铁塔横担处,如遇拉 V 塔,则固定至地面;同塔双回直线塔可在设计阶段采取增加底相横担方式固定拉线。此类控制导线风偏的方法普遍适用于新疆戈壁无人大风区,在新疆著名的“三十里风区”和“百里风区”的应用中均收到良好效果,并且安装维护方便简洁,是新疆目前防风效果最好的防范措施,但是在加装地面导线防风拉线不适用于城镇居民集聚区和车辆行驶较为频繁的区域。

3) 采用差异化巡视。现有线路巡视是由负责人员以巡视计划具体安排的,输电线路检查通常是由专职负责人携组员在指定的时间内进行的,巡查时间和检查范围、线路也由其决定,不仅巡线的重点不突出,容易出现“欠巡”和“过巡”现象,而且安排线路巡视时缺乏时效性。差异化巡视方法是指按照实际情况和线路运营经验来动态确定巡检周期和检查开展时间,改变以“线”巡为固定巡逻模式的方法,实现以“段”巡、“点”巡的动态周期状态巡视模式。开展差异化巡视取决于对设备认知能力的高低,以决定特定线路在不同的环境下的有效检查时间。它不以月为周期而是依据设备具体状态安排巡视线路、时间和次数。差异化巡视既能完成对线路的定期检查和动态巡视,弥补传统检查中的缺陷,又能降低检验人员的劳动强度。这种巡视方法的应用,不仅抓住了巡视的重点区域,同时充分考虑线路多、人员少的矛盾,是一种更有效、更经济的经营管理方法。对于 750 kV 输电线路需要根据线路沿线地形、地貌、环境、气象条件、人员活动等特点,结合运行经验制定线路巡视方案<sup>[22]</sup>。例如,对强风沙尘区应该缩短巡视周期,并且在大风、沙尘天气后应立即安排一次巡视。

### 3.4 引流线磨损防范措施

对于已发生磨损的引流线,目前普遍直接更换引流线或安装小引流线,也会安装调距线夹以及使用橡胶套包裹等处理方式,预防引流线磨损的措施主要有:

1) 工程设计阶段应该加强载荷分布、应力校核、弯曲应力等方面的研究,对各部分受力情况进行进一步计算分析,合理选择金具或改变引流线绕引方式,以减少集中应力以及弯曲应力,从本质上解决大高差区段由于风力振动磨损造成的引流线断股。

2) 施工过程中注意校核跳线长度是否符合。通常在施工前会提前计算出杆塔跳线长度以及导线连

接长度<sup>[23]</sup>,但现有的计算方法因为只考虑跳线的几何模型来模拟计算长度,跳线的变化因素如大小、形状、刚性、线夹等都未考虑,因此计算结果和实际需求出入较大。为了克服这些缺点,我们应该研究新的计算方法,例如在坐标轴内把跳线模拟为弹簧模型,使用花键曲线计算跳线长度<sup>[19]</sup>。

3) 在线路的运行维护上,应提高巡视人员相关知识层次、技能水平与责任感。风振磨损是一个累积的过程,在巡视检查中对杆塔关键部件进行细致检查,是可以及时发现问题并研究和制定预防措施的。增加相关科学技术的投资,进行在线监测,掌握运维情况的变化,及时了解交通困难区域的输电线路运维情况。

## 4 实际案例

新疆地区特殊的地理位置导致了强风气候环境,这是特高压输电线路面临的一个不可忽视的问题,本文根据强风沙尘环境对国网新疆电力公司输电线路所造成故障情况的实际案例,进行分析、机理研究并探索改善方案,介绍了几种主要故障的案例与解决措施。

### 4.1 750 kV 乌吐线复合绝缘子伞裙破损

2011 年 5、6 和 9 月,在运维中发现 750 kV 乌吐一、二线 35 基杆塔有 49 支复合绝缘子伞片从根部发生不同程度环裂、破损,如图 4 所示。

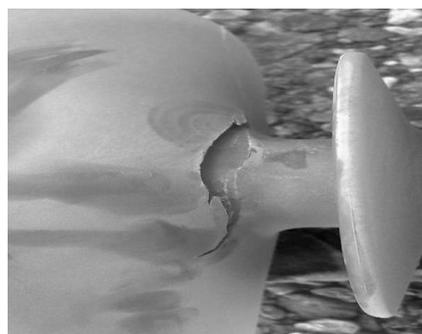


图 4 750 kV 乌吐线复合绝缘子伞裙破损

Fig. 4 Breakage of the composite insulator umbrella skirt of 750 kV Wu-Tu transmission lines

分析原因为破损绝缘子有 47 支发生在 39-42 m/s 大风区(占破损绝缘子的 96%),说明大风速、大风频区域是造成伞片疲劳破损的主要外界条件。49 支破损绝缘子中有 18 支为边相悬垂串,31 支为中相 V 串,说明绝缘子破损与挂串方式没有必然的因果关系,伞片破损在大风区域呈普遍性。目前已对 49 支破损复合绝缘子进行了更换,并结合 2012 年 750 kV 高抗停电消缺时对乌吐一、二线其余处在 31

m/s 以上大风区域的复合绝缘子共计 280 余支进行了更换。

#### 4.2 750 kV 乌吐哈线路耐张塔引流线磨损

2011 年 3-10 月, 750 kV 乌吐一线巡视和登塔检查发现 92 处耐张塔引流线出现不同程度的磨损, 如图 5 所示, 其中 750 kV 乌吐一线 247 号耐张塔中相大号侧 3 根引流子导线分别在压接管出口、调距线夹处出现严重断股, 右上子导线铝股全部折断, 仅剩钢芯连接。分析原因为 247 号塔高差 216.1 m, 前侧耐张串下倾角达到 32°, 跳线钢管与耐张线夹高差接近 6 m, 造成跳线中段弧垂较大, 而端部弧垂偏小, 个别子导线应力分布不均, 在受到顺线路大风的作用下整体摆动, 长期疲劳断股。其他 91 处引流磨损原因为设计调距线夹控制距离过小, 线夹内未加装橡胶垫, 发生引流与爬梯等部件接触磨损, 造成断股, 同时调距线夹设计位置不良, 大风情况下易发生调距线夹断裂, 也引流子线与其它部磨损断股的主要原因。247 号采取更换引流并加装小引流方式进行处理, 其他 91 处采取加装调距线夹、橡胶管套包裹进行处理。



图 5 750 kV 乌吐哈线路耐张塔引流线磨损

Fig. 5 Abrasion of the drain wire of 750 kV Wu-Tu-Ha transmission line strain tower

#### 4.3 750 kV 乌吐哈线光缆、地线挂点金具磨损

2011 年 3 月巡视发现 750 kV 乌吐哈输电线路 36 m/s 及以上大风区段地线及光缆挂点联接金具(U 型挂环)磨损严重, 其中光缆金具磨损程度较地线尤为严重, 个别 U 型环截面磨损超过 40%, 如图 6 所示。分析原因为 U 型螺栓磨损严重的塔位处于风频及风速较高区域, 气流横线路作用时, 悬垂串横向长时间摆动, 造成金具频繁磨损, 同时挂点金具连接方式为“环环”连接(U 型环与 U 型环连接)横线路方向不能转动, 在受到横线路方向风力荷载作用下, 其连接金具承受附加弯距增加, 加速 U 型环磨损。目前乌吐哈一、二线处在 36 m/s 以上区段的杆塔共计 747 基直线塔地线和光缆悬垂金具通过改变连接方式并采用高耐磨材料进行了更换处理, 目前运行良好。



图 6 750 kV 乌吐哈线路金具磨损

Fig. 6 Fitting abrasion of 750 kV Wu-Tu-Ha transmission lines

#### 4.4 750 kV 吐哈线风偏故障

2014 年 4 月 22 日夜间到 24 日, 受强冷空气影响, 北疆各地、天山山区、哈密等地出现以大风、降温为主的寒潮天气过程, 750 kV 吐哈一线与二线分别于 4 月 23 日 09: 01 以及 09: 55 发生直线塔边相绝缘子对塔身放电造成线路跳闸。根据线路故障区段周围环境及现场情况, 结合超高压线路运维经验, 可初步判定局地龙卷风强对流天气造成导线及绝缘子串向塔身侧倾斜(风偏), 如图 7 所示, 造成导线与塔身最小空气间隙不能满足运行要求而引起的空气击穿, 从而造成线路跳闸。



图 7 750 kV 吐哈一线 297 号塔风偏

Fig. 7 Wind swing discharge of 750 kV Tu-Ha transmission line I 297# tower

根据故障前后现场在线监测测得的极大风速进行换算为 10 m 高度下 10 min 平均最大风速 35 m/s, 根据故障杆塔结构参数, 校核此次故障杆塔的绝缘子串最大倾斜角为-65.52°, 剩余空气间隙距离为 1.5 m, 不满足工频电气间隙 1.9 m 的要求。随后根据新疆公司下发的相关文件全面开展了电网设备专

项隐患排查和设备评价工作,及时处理发现了一些重大设备隐患,并与设计单位就此次灾害的情况进行了详细沟通,制定了一系列有效的防风偏措施,如杆塔整体加固、耐张塔引流线加装防风小“T”接等,还运用力的分解原理研发出延长横担侧拉导线的技术手段替代传统的侧拉线,这种新技术极大的提高了导线防风能力。

## 5 结语

750 kV 特高压输电线的运营与维护管理工作非常重要。本文分析了新疆强沙尘天气特征,结合新疆地区实际案例总结分析了 750 kV 线路运行故障形式,根据新疆电网的运维管理经验,提出对应的改善建议,从材料、机制、方法、现场等方面总结了新疆电网现有 750 kV 线路的运维管理措施。为今后提高特高压输变电设备运维与检修技术打下基础,为强风沙尘极端气象环境中的规划设计、施工建设和运行维护提供参考,得出以下的结论:

1) 新疆 750 kV 输电线路典型风害缺陷有绝缘子伞裙断裂、金具磨损、风偏放电、耐张塔引流线磨损等。

2) 总结出新疆地区强风沙尘天气下线路不同故障特征对应的防治方案。对于绝缘子伞裙断裂的防治方案是优化伞裙结构、使用小伞裙复合绝缘子;对于金具磨损的优化措施是采用高强度耐磨材料和优化金具间的连接方式;对于耐张塔引流线磨损的防治方案是提高线路设计、更换引流线并加装小引流以及加装调距线夹、橡胶管套包裹等;对于风偏放电应从线路建设初期阶段介入工程,参与最大设计风速选取、线路选线、杆塔选型和定位以及金具连接形式等方面工作,还有加装导线防风拉线,使用延长横担侧拉导线的技术等。

3) 在今后的新疆强风沙尘地区 750 kV 输电线路运维优化决策中,还可以有更多的尝试和发展,如:绝缘子伞裙可以进行配方优化以及风洞测试,以空气动力模型为基础建立更好的绝缘子伞裙结构;金具可以结合现场微气象条件安排停电进行登杆排查,也可以对受力大的区域的金具进行重铸加厚;风偏放电区域可以采用差异化巡视;引流线磨损可以从设计、工程施工、运维方面进行提高。

## 参考文献

[1] 丁一汇,王绍武,郑景云. 中国气候[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 342-345.  
[2] 章国材. 自然灾害风险评估与区划原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 35-37.

[3] 徐夔慧,毛炜峰,陆帼英. 新疆气象灾害近期变化和防灾减灾工作综合评述[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008(1): 50-54.  
XU Genghui, MAO Weiyi, LU Guoying. Xinjiang meteorological disaster changes and general statement on the work of disaster prevention and reduction[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2008(1): 50-54.  
[4] 熊聪茹,杜刚. 2000 亿电网建设投资铺就中国新疆“电力丝绸之路”[J]. 中亚信息, 2015(4): 19-20.  
XIONG Congru, DU Gang. 200 billion grid construction investment paved "power of the silk road" in China's Xinjiang[J]. Journal of central Asian information, 2015(4): 19-20.  
[5] 高嵩,刘洋,路永玲. 交流特高压输电线路运行维护现状综述[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(2): 81-84.  
GAO Song, LIU Yang, LU Yongling. A review on operation and maintenance of UHV AC transmission line[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(2): 81-84.  
[6] 李瑞生,索南加乐. 750 kV 输电线路的特殊问题及其对线路保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2006, 34(3): 1-4.  
LI Ruisheng, SUONAN Jiale. The special problems of 750 kV transmission line and its influences on relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2006, 34(3): 1-4.  
[7] 李刚,刘晓瑞,张廷营,等. 西北-新疆联网稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 64-69.  
LI Gang, LIU Xiaorui, ZHANG Tingying, et al. System stability characteristic analysis for the interconnection of Northwest China grid and the Xinjiang grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 64-69.  
[8] 杨昊,王丹,刘涤尘. 特高压交流输电模型的建立与经济性优选分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 91-96.  
YANG Hao, WANG Dan, LIU Dichen. Establishment of UHV AC transmission model and economical optimization strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 91-96.  
[9] 高婧. 新疆大风时空变化特征及环流背景研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 14-22.  
GAO Jing. Research on the temporal and spatial distribution characteristics of strong wind and circulation feature of windy weather in Xinjiang[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 14-22.  
[10] 大气科学名词审定委员会. 大气科学名词[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 29-30.  
[11] 国家气候中心. 中国极端天气气候事件[EB/OL]. [2015-12-16]. [http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/Monitoring/cn\\_](http://cmdp.ncc.cma.gov.cn/Monitoring/cn_)

- china\_extreme.php.
- [12] 朱正一, 贾志东, 马国祥, 等. 强风区 750 kV 复合绝缘子抗风性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 947-954.  
ZHU Zhengyi, JIA Zhidong, MA Guoxiang, et al. Study on wind resistance performance of 750 kV composite insulators utilized in storm-wind region[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 947-954.
- [13] 梁英, 靳哲, 刘云鹏, 等. 基于陷阱特性的运行复合绝缘子老化定量评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 189-195.  
LIANG Ying, JIN Zhe, LIU Yunpeng, et al. The quantitative-evaluation on the aging condition of composite insulators based on trap characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 189-195.
- [14] 胡琴, 袁伟, 舒立春, 等. 电压类型对复合绝缘子覆冰及闪络特性的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 268-276.  
HU Qin, YUAN Wei, SHU Lichun, et al. Influence of voltage types on composite insulator icing and flashover characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 268-276.
- [15] 朱正一, 贾志东, 马国祥, 等. 强风区 750 kV 复合绝缘子伞裙破坏机制分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 947-954.  
ZHU Zhengyi, JIA Zhidong, MA Guoxiang, et al. Analysis on fracture failure mechanism of 750 kV composite insulator sheds utilized in a storm-hit region[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 947-954.
- [16] 毕虎才, 董勇军, 冀晋川. 电网线路金具断裂及预防[J]. 山西电力, 2014(1): 22-24.  
BI Hucui, DONG Yongjun, JI Jinchuan. Fracture of hardwares in grid transmission lines and the preventing measures[J]. Shanxi Electric Power, 2014(1): 22-24.
- [17] 董新胜, 李耀中. 新疆输电线路绝缘子风偏角影响因素分析[J]. 电力建设, 2008, 29(7): 38-40.  
DONG Xinsheng, LI Yaozhong. Analysis of factors affecting insulator windage angle in Xinjiang[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(7): 38-40.
- [18] 熊小伏, 翁世杰, 王建, 等. 考虑降雨修正的干字型耐张塔跳线风偏放电在线预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 136-143.  
XIONG Xiaofu, WENG Shijie, WANG Jian, et al. An online early warning method for windage yaw discharge of jumper towards "JG" type strain tower considering corrected by rainfall[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 136-143.
- [19] 付豪, 张博. 新疆 750 千伏乌吐 I 线 247#塔引流线断股缺陷的分析[J]. 电子世界, 2014(10): 33-34.  
FU Hao, ZHANG Bo. Xinjiang 750 kV Wu-Tu line I tower of 247# drainage line broken strands of defect analysis[J]. Journal of Electronic World, 2014(10): 33-34.
- [20] 钟明亮. 750 kV 输电线路地线悬垂金具磨损原因分析及防范[J]. 新疆电力技术, 2012(2): 4-6.  
ZHONG Mingliang. Abrasion analysis and prevention of 750 kV transmission line ground wire hanging hardware [J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2012(2): 4-6.
- [21] 贺江, 刘灿. 耐磨材料在金具中的应用[J]. 低碳世界, 2013: 238-239.  
HE Jiang, LIU Can. Wear-resisting material application in hardware[J]. Low Carbon World, 2013: 238-239.
- [22] 刘利军. 输电线路差异化巡视探讨[J]. 发展, 2010(9): 82-83.  
LIU Lijun. Discussion on transmission line differential patrol[J]. Developing, 2010(9): 82-83.
- [23] 李宽亮, 韩威锋, 朱鹏. 架空输电线路耐张塔引流线安装长度计算[J]. 工业 C, 2015(42): 209-211.  
LI Kuanliang, HAN Weifeng, ZHU Peng. Installed drainage line tension tower overhead transmission line length calculation[J]. Industrial C, 2015(42): 209-211.

收稿日期: 2016-01-28; 修回日期: 2016-06-30

作者简介:

李娟(1978-), 女, 高级工程师, 从事电力系统设计技术研究和管理工作;

廖峥(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电网气象灾害风险评估与预警; E-mail: leocqu@foxmail.com

张陵(1969-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统运维检修技术研究和管理工作。

(编辑 张爱琴)