

# 交流特高压输电线路运行维护现状综述

高嵩<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 路永玲<sup>1</sup>, 崔艳东<sup>2</sup>

(1.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103;2.江苏省电力公司省检修分公司,江苏南京 211102)

**摘要:**结合我国首条 1000 kV 交流特高压线路的运行情况,对特高压输电线路的运行维护特点进行了归纳、分析和总结,并阐述了特高压输电线路反事故措施及关键技术的研究应用现状,为今后交流特高压线路的运维工作提供借鉴经验,文中数据可为进一步开展特高压线路运行维护技术研究提供参考,保障特高压电网安全可靠运行。

**关键词:**交流特高压;输电线路;运行维护;应用现状

**中图分类号:**TM723

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2014)02-0081-04

交流特高压输电技术是解决我国电力负荷和能源分布严重不平衡,实现以清洁能源替代传统高污染能源的重要方法。根据国家电网公司特高压建设规划,到“十二五”末年,将会建成覆盖全国的特高压电网<sup>[1]</sup>。按照此规划内容,除已投运的晋东南—荆门和刚建成的皖南—浙北特高压工程外,未来数年将有多条交流特高压线路有望开工建设,如锡盟—南京、靖边—潍坊、雅安—皖南、蒙西—长沙以及淮南—上海等工程<sup>[2]</sup>。随着交流特高压线路投运数量的不断增多,其运行维护面临的问题将逐渐突显。因此运行维护部门有必要详细梳理我国现有特高压输电线路运维现状,及时总结其中的先进运行经验和关键技术,对今后特高压输电线路的安全可靠运行、提高运行维护检修工作效率和创新运行管理模式等具有重要指导意义。

## 1 交流特高压线路的总体特点

(1) 杆塔结构。为确保足够的电气间隙和间距要求,特高压输电线路设计杆塔更高、线路最低对地距离高达 26 m,绝缘子串长度一般超过 10 m,考虑一定的弧垂,水平排列的特高压线路杆塔的呼称高一般超过 50 m,三角排列的特高压线路杆塔呼称高超过 60 m,同杆并架线路杆塔一般超过 80 m。其二是杆塔强度更大。塔的结构主要受使用应力和塔高决定。由于特高压导线更重,导线高度又比较高,塔的使用应力超过 500 kV 杆塔 2 倍,高度约为 2 倍,因此交流特高压线路杆塔主材和基础的强度为常规 500 kV 线路杆塔的 4 倍以上。三是杆塔根开更大。为优化设计,节省塔材,特高压线路适当放大了杆塔根开,一般杆塔根开约为 15×15 m 水平。

(2) 导线结构。交流特高压线路导线为八分裂结构,两边相导线间水平距离在 40 m 以上,两相导线间水平距离在 30 m 以上,三角排列杆塔的导线中相与边

相的垂直距离在 20 m 以上,子导线间采用阻尼间隔棒。

(3) 杆塔基础。特高压线路杆塔基础作用力比 500 kV 杆塔高 4 至 5 倍,所经地区地质、地貌条件较为复杂,可分为山区、丘陵、泥沼、河网地区等,与此相应的基础型式也具有多样化,如灌注式基础、挖孔桩原状土基础、岩石锚桩类基础、复合式微型桩基础等,相应也带来基础结构复杂、运行维护困难等特点。

(4) 绝缘子类型及组串方式。目前运行的特高压线路上所用绝缘子按形状和材质分主要有盘形瓷质绝缘子、盘形钢化玻璃绝缘子和棒形复合绝缘子 3 类。通常耐张串采用瓷质绝缘子和玻璃绝缘子组串,直线串采用复合绝缘子。组串型式有 2~4 联的 I 型串并联和 V 型双串;布置方式有垂直布置、水平布置和 V 串布置等。从绝缘子使用量上,同一铁塔上瓷或玻璃绝缘子的数量比超高压线路约多 8 倍。

(5) 特高压金具。由于特高压线路导线分裂数多、导线截面大,金具承受的荷载也随之增大,因此特高压线路金具具有结构复杂、尺寸大、工艺质量和机械强度要求高等特点。

(6) 运行可靠性要求高。1000 kV 交流特高压输电线路输送功率约为 500 kV 线路的 4 至 5 倍,一旦线路出现故障,对我国国民经济将产生巨大的影响。因此线路在可靠性方面有着很高的要求。

## 2 交流特高压线路的运行维护特点

### 2.1 环境特点

特高压线路由于输送距离大,线路长,大多贯穿南北或东西,沿线经过地区的地形、地貌复杂,气候多变,气象条件恶劣,许多地区为事故多发区(如山西、河南、湖北、湖南、江西等地均属于我国输电线路冰害和舞动的易发区,华北为污闪事故区等);加之途经的高海拔山区具有明显的立体气候特征,微地形、微气象条件复杂,在一个小范围内,由于地形变化,气候会有很大差异,从而给特高压线路部分区段带来复杂的运行工况<sup>[3]</sup>。

## 2.2 故障特点

(1) 雷击故障。由于特高压线路的本身绝缘水平很高,雷击避雷线或塔顶而发生反击闪络的可能性较低<sup>[4]</sup>,但特高压输电线路杆塔高度高,导线上工作电压幅值很大,比较容易从导线上产生向上先导,相当于导线向上伸出的导电棒,从而引起避雷线屏蔽性能变差。使得雷云绕过避雷线,直击导线的概率将显著增加。理论分析和运行情况均表明,特高压输电线路雷击跳闸的主要原因是避雷线屏蔽失效,雷电绕击导线造成的。

(2) 覆冰故障。特高压线路大多经过重冰区,其导线截面较大,导线分裂数较多,覆冰重量也会较大,因此覆冰超载事故、不均匀覆冰及不同期脱冰事故容易发生,特别是脱冰引起较大幅度的跳跃对特高压线路的影响更为严重。

(3) 污闪故障。特高压线路电压等级高,且线路路径长,途经不同类型污秽地区,加之近年来,我国大气环境日趋恶劣,大范围雾霾天气时有发生,使得特高压线路防污闪问题更加突出;对于重污区、冰区重叠地带,还有可能在融冰过程中引发冰闪。因此,特高压线路绝缘子的防污闪特性提出了更高的可靠性要求。

(4) 振动故障。特高压线路具有档距大、挂点高、分裂数多、导线截面大等特点,给线路的防振、防舞带来了新的问题。虽然特高压线路分裂导线安装具有良好耗能减振作用阻尼间隔棒,但从高可靠性要求出发,对特高压线路仍需进行防振设计,当线路通过风速为6~25 m/s,覆冰厚度在3~25 mm,气温为-6~0℃,地形为平坦开阔地、江河湖面等雨淞地区时需进行防舞设计。

(5) 风偏故障。特高压线路的杆塔高度和超长的绝缘子串,使得线路发生风偏事故的可能性增加,特别是重污区的“Ⅰ”型合成绝缘子因串长、重量轻,在微气象区的影响下,发生风偏故障的可能性较大,因此在线路途经局地强风带地区时,应进行防风偏设计并采取防风偏措施。

## 2.3 检修特点

(1) 对检修工器具要求高。特高压架空线、杆塔、绝缘子、金具等结构尺寸大、载荷大<sup>[5]</sup>,使得现有一般电压等级线路所用的检修工具在尺寸、承载能力、安全措施等方面无法胜任其检修作业要求,需要开发研制新的检修工器具或对现有检修工具进行结构改造。

(2) 绝缘子更换难度大。特高压线路中,直线塔大多数采用V型合成绝缘子串,而且串型多、串身长,使得绝缘子串(片)的更换难度较一般电压等级线路要困难许多。解决此类问题需要研制安全、高效、可靠的垂直荷载转移方案和相应的配套工器具,保证水平荷载转移过程中不出现断线的情况;同时还须研制适用于

V型悬垂串与耐张串长度的承力检修工器具,制订合理有效的作业顺序方案等。

(3) 带电作业作为首选检修方式。为保证供电的可靠性和连续性,特高压线路的检修方式应以带电作业为主,研究试验安全有效的特高压带电作业方法(作业方式、操作规程、确定安全距离、有效绝缘长度等),制定科学、合理的安全保障措施以及研制性能优异、稳定的带电作业工具和防护用具是保证带电作业安全的重要内容。

## 3 交流特高压线路反事故措施应用现状

(1) 防雷措施。前苏联的交流特高压输电线路在1985年至1994年运行期间,雷击跳闸高达16次,占其总跳闸次数的84%<sup>[6]</sup>,并且主要原因是雷绕击于少数转角杆塔的导线上,因此运行特高压线路防雷的重点为防绕击。采用良好的避雷线屏蔽设计,是提高特高压输电线路耐雷性能的主要措施。同时还应该考虑到特高压输电线路导线上工作电压对避雷线屏蔽的影响。对于山区,因地形影响(山坡、峡谷),避雷线的保护可能需要取负保护角。在晋东南—荆门特高压线路综合考虑线路走廊及耐雷水平,优化塔型设计,采用负保护角,并考虑加装第三根地线的防雷设计;对地面倾斜角小于20°的平原路段,采用地线保护角小于4°猫头塔;对地面倾斜角大于20°山区,采用地线保护角小于-2°酒杯塔,使2根地线的距离不超过中相导线距离地线的4倍,其雷击跳闸率可控制在0.1次/(100 km·年)内。荆南Ⅰ线自2009年1月6日投运,未采取其他防雷保护措施,至今运行良好。

(2) 防污闪措施。目前特高压线路防污闪事故措施主要是从设计上通过增加绝缘子串长,提高泄漏距离来提高耐污闪能力<sup>[7]</sup>;在污秽严重地区采用大吨位、高强度的合成绝缘子;对空挂或运行绝缘子进行饱和盐密测量,及时制定或修订污区图、根据实际情况使用防污闪涂料、开展带电清扫技术的研究与应用;开发在线监测系统,实时掌握线路的污秽情况,及时安排状态检修等。

(3) 防微风振动措施。目前特高压线路主要采用阻尼间隔棒,防振锤等措施,但特高压线路导线平均挂点更高,从确保安全的角度出发,我国特高压线路的防振参照了超高压线路的方式进行了防振设计。此外,适用于交流特高压线路微风振动监测装置也已研制成功,能够保证装置在特高压电压等级下不产生电晕,现已投入应用。

(5) 防舞动措施。中国电力科学研究院研究建立了适用于我国特高压输电线路的防舞措施。通过研究分裂导线覆冰扭转特性及扭转振动与横向振动的耦合

问题,建立了分裂导线失谐防舞机理,设计了失谐间隔棒防舞装置;基于减轻导线覆冰不均匀性原则研制了线夹回转式间隔棒;基于舞动稳定性机理设计了双摆防舞者;并建立了相应防舞器的防舞设计方法<sup>[8]</sup>。清华大学在建立了3自由度多档导线模型的基础上,研究了特高压输电线路覆冰厚度、脱冰量、档距大小、耐张段中档数、导线悬挂点高差、不均匀脱冰等因素对导线脱冰跳跃的影响,为特高压输电线路导线排列、铁塔选型、档距配置等提供了理论依据。

(5) 防覆冰措施。在特高压输电线路的设计中,根据线路所经过地区的特点进行了冰区的划分;对无法避免线路经过重冰区的情况下,根据导线脱冰跳跃影响进行了导线的布置方式、杆塔选型、档距配置等研究和设计。在现有防除冰技术研究的基础上加大了除冰技术、融冰方法的研究与试验,并进行在线监测系统的开发与研制。由国家电网公司提出的直流输电系统线路融冰方法,即可在不停电的情况下实现主动融冰的功能;采用这种融冰方法,可节约投资近7亿元,并有效提高了输电系统的运行可靠性。

(6) 防风偏措施。针对特高压线路绝缘子串长,易发生风偏故障的特点,目前主要从设计上对事故多发地区的线路空气间隙适当增加裕度;在可能引发强风的微地形地区,合理采用“V”型串;对运行中易产生风偏故障区域的绝缘子下方加装重锤;研制特高压直流线路塔上气象参数和风偏参数的在线监测系统,适时监测塔上风速及风向、雨量、导线风偏运行轨迹、风偏角、导线与杆塔间的风偏间隙等措施。

#### 4 运行维护技术的研究应用现状

(1) 直升机巡线技术应用。通过在直升机上使用可见光、红外、紫外成像等巡视设备,可完成红外测温、紫外探测及可见光检查等工作,并能够判断通道、铁塔、金具、导地线、绝缘子等缺陷;判断接头过热、异常电晕、导地线内部损伤和零劣质绝缘子等缺陷等。直升机巡线技术具有迅速、快捷、效率高(每天可以完成大约80~100基塔的双侧检查任务)、质量好、不受地域影响、能快速发现线路缺陷并且安全性好等优点,目前已成功应用于超高压线路运行维护,其在特高压线路运行维护中具有广阔的应用前景。

(2) 在线监测技术应用。在线监测技术是特高压线路实施状态检修的前提条件,已经研究开发的架空线路在线监测技术和在线监测系统众多,可有效应用于特高压线路上的主要有气象参数监测、微风振动监测、温度监测、覆冰监测、绝缘子污秽监测、杆塔倾斜监测及防盗、防鸟监测系统等。目前在晋东南—荆门特高压线路上共安装微风振动、舞动、杆塔倾斜、气象和风

偏、视频、覆冰及绝缘子盐密共7类87套在线监测装置,结合特高压航测数据,可提供基于三维可视化技术的在线监测显示和控制平台。据统计,截止至2012年6月,1000 kV长南I线在线系统监测装置共获取监测数据已超过70万条,通过监控数据与运行及设计标准对比,未发现运行异常<sup>[9]</sup>。

(3) 红外测温和紫外成像技术应用。近年来,红外精细化测温技术在晋东南—荆门特高压线路上得到大量应用,根据长南I线(山西段)全线路耐张塔红外测温结果,系统功率升至467.64 MW~4800 MW,与1 m外导线的温度相比,接续金具温升在0~5℃,耐张塔跳线与管母接头温升在0~6℃;与环境温度相比,导线温升在0~3℃,屏蔽环温升在0~4℃,引流线管母温升在0~3℃,绝缘子温升在0~4℃,均可满足运行要求。

由于紫外成像能够迅速、形象、直观地显示出线路运行的真实状态信息,较明确地给出设备中放电位置及放电程度,能方便快捷地查找出电晕放电部件。通过对长南I线(山西段)全线229基铁塔的主要电气部位进行了8次电晕放电和电弧紫外成像检测工作,共获得数据1345组,发现放电异常数据15组,经登塔检查和对数据进行分析均为均压环安装位置不同心同轴造成的对绝缘子放电。另外,在检测过程中,紫外成像的观测距离、污秽程度、气压与温度、海拔、仪器的增益都会影响到测量计数结果,还需在今后的运行中不断积累检测经验。

(4) 带电作业技术应用。在带电作业已有研究成果基础上,国网电力科学研究院2008年结合晋南荆试验示范工程进行了1:1真型试验,在国内外首次系统地开展了交流1000 kV输电线路带电作业研究,针对系统过电压水平、海拔高度的不同,试验研究确定了各工况及作业位置的最小安全距离、最小组合间隙、绝缘工具最小有效绝缘长度等。自主研究生产的绝缘工具、带电作业屏蔽服等均可以满足交流1000 kV输电线路带电作业的要求。湖北超高压输变电公司为适应特高压带电作业的需要,成功研制了获得国家自主知识产权的大吨位瓷瓶卡具、大吨位六分裂导线提线器、液压油泵丝杆、分体式绝缘拉杆等9项检修及带电作业的工器具。

#### 5 结束语

目前我国在特高压线路运行维护技术的理论研究及实践方面已经取得了卓有成效的成果和应用,但由于特高压线路运行维护方面的经验仍相对有限,要求各属地特高压输电线路运行单位在日常维护中通过积累大量现场资料进行分析整理,结合线路所处环境制

定相应的运行维护规范,为保证特高压输电线路的安全可靠运行提供现场运行经验。随着特高压线路投运数量的增加和运行维护工作的全面开展,运行单位应加强与科研机构、大专院校合作,在大量采集现场运行维护数据的基础上进一步开展特高压线路运行维护技术的理论研究和试验,改进和完善现有运行维护方法,为我国特高压线路的安全可靠运行提供保障。

#### 参考文献:

- [1] 蔡敏. 特高压输电线路运行维护技术的研究现状分析[J]. 湖北电力, 2011, 35(6): 1-6.
- [2] 敬海兵. 1000 kV 交流特高压输电线路防雷问题研究[D]. 成都: 西华大学, 2012.
- [3] 周大华, 陈早明, 周王新, 等. 1000 kV 交流特高压试验示范线路运行分析[J]. 湖北电力, 2009(S1): 73-74.
- [4] 李茂华. 1000 kV 级特高压输电杆塔结构可靠性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [5] 舒印彪, 胡毅. 交流特高压输电线路关键技术的研究及应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 1-6.

- [6] 吴启进, 鲍同锋, 王朝海, 等. 1000 kV 交流特高压输电线路检修工器具研制[J]. 湖北电力, 2009(33): 70-72.
- [7] 易辉, 熊幼京. 1000 kV 交流特高压输电线路运行特性分析[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 1-6.
- [8] 朱宽军, 刘彬, 刘超群, 等. 特高压输电线路防舞动研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 12-19.
- [9] 陈海波, 王成, 李俊峰, 等. 特高压输电线路在线监测技术的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(10): 55-58.

#### 作者简介:

- 高嵩(1985),男,黑龙江牡丹江人,工程师,从事输电技术研究和状态评价工作;
- 刘洋(1982),男,江西景德镇人,工程师,从事高电压技术研究和管理工作;
- 路永玲(1988),女,甘肃白银人,硕士研究生,从事输电技术研究工作;
- 崔艳东(1979),男,河北衡水人,工程师,从事输电专业运行维护检修管理工作。

## A Review on Operation and Maintenance of UHV AC Transmission Line

GAO Son<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, LU Yongling<sup>1</sup>, CUI Yandong<sup>2</sup>

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

2. Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The operation and maintenance of UHV AC transmission line in China is reviewed in this paper. Based on the practical experience of China's first 1000 kV AC UHV transmission line, the operation characteristics of UHV transmission line are summarized. The research on and application of anti-accident measures and key technology for UHV transmission lines are also introduced. The data provided in this paper can be taken as a reference for further study of operation and maintenance technology, so as to guarantee UHV power grid's safety.

**Key words:** AC UHV; transmission line; operation and maintenance; present application situation

(上接第 80 页)

#### 作者简介:

于强(1985),男,河北昌黎人,助理工程师,从事汽轮机燃机调试

及性能优化工作;

彭辉(1967),男,江苏南通人,高级工程师,从事电厂汽轮机调速系统研究及新建机组调试工作。

## Analysis on Algae-blockage in Open Circulating Water Systems of Power Units and Solution Measures

YU Qiang<sup>1</sup>, PENG Hui<sup>2</sup>

(1. Guodian Electrical Power Research Institute, Nanjing 210031, China;

2. Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Power plant circulating water systems adopting sea water cooling can be easily affected by the quality of water, especially the algae in the sea water. Algae not only influences the efficiency of condenser's heat transfer, but also can block or even break the associated gear of the circulating water systems. This paper introduces some methods aiming to solve the blocking of rotary filtering net affected by algae in some power plants, such as increasing protection logic, installing trash floats, adding secondary filter continuous flushing program, and actively contacting the local water conservancy departments and so on. With these measures, the effects of the algae were effectively suppressed, and the plant successfully completed the full load test.

**Key words:** circulating water system; algae; solution measures