

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.029

新疆750 kV特高压输电线路沿线地形及大风特征时空分析

庄文兵¹, 章涵², 王建¹, 田浩², 赵建平¹, 何君²

(1. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430070)

摘要: 新疆750 kV特高压输电线路是中国新疆地区实施优势资源转换战略的重要组成部分,在能源战略布局上可实现南北疆电力互供、水电与光伏互补,提高电网供电可靠性及互供能力、新能源接纳能力。新疆750 kV输电网络覆盖区域广,途径地形复杂。大风是新疆地区典型的气象特征,也是线路故障的主要外力因素之一。新疆750 kV线路运维过程中需要掌握大风发生的时空特征,以便进行有针对性维护。文中结合新疆地区的地形遥感数据以及2011年至2015年的新疆750 kV主要线段沿线的风速、风向数据,分析了750 kV线路沿线的海拔、坡度坡向、年平均风况,6级以上大风风况等特征,分析结果给出特征数据值,反映出新疆750 kV线路地形和风况的全局时空特点,为针对性风害防治以及有效提高经济指标提供关键依据。

关键词: 特高压输电线路; 地形; 风况; 时空特征

Temporal and Spatial Analysis of Terrain and Wind Characteristics Along 750 kV UHV Transmission Lines in Xinjiang

ZHUANG Wenbing¹, ZHANG Han², WANG Jian¹, TIAN Hao², ZHAO Jianping¹, HE Jun²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Company Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan NARI Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: Xinjiang 750 kV UHV transmission lines is an important part of the advantageous resource transformation strategy in Xinjiang. In the energy strategic layout, it can help realize power mutual supply between North and South of Xinjiang, between hydropower and photovoltaic power. Meanwhile it can improve power supply reliability and the capacities of mutual supply and accepting the new energy capacity. Xinjiang 750 kV UHV transmission lines covers large regions. The regions' terrain along the lines is complex. The strong wind is the meteorological characteristic and one of major external factors leading to lines' faults. The operation and maintenance of 750 kV lines need mastering the spatial and temporal characteristics, so as to carry out the special treatment. Based on the terrain DEM data and the data of wind speed and direction from 2011 to 2015, this paper analyzes data of the terrain and wind conditions along 750 kV UHV Transmission Lines in Xinjiang, such as poles' altitude, slope, aspect, annual average wind strength, over 6 level wind and so on. The conclusions give the concrete values, which reflect the global temporal and spatial characteristic of Xinjiang 750 kV UHV transmission lines, and provides the key basis for the special prevention and treatment of wind damage and improving the commercial efficiency of design and build.

Key words: UHV transmission lines; terrain; wind; temporal and spatial characteristic

0 引言

新疆维吾尔自治区位于中国西北边疆,地处东经73°40'~96°18',北纬34°25'~48°10'之间,覆盖166.49万平方公里。新疆地区拥有丰厚的煤炭、石油、天然气资源以及丰富的风力、光伏新能源,但

是这些能源分布不均衡制约了新疆乃至中国西北地区经济的快速发展。为了加速新疆地区经济发展,打破资源分布地理瓶颈,2012年2月,新疆维吾尔自治区正式全面启动新疆750 kV电网建设项目。新疆地区750 kV特高压输电线路是国家电网公司在新疆实践“一带一路”战略和全球能源互联

网战略的重要工程。在过去的“十一五”,已经形成了凤凰—乌鲁木齐—吐鲁番—哈密 750 kV 主输电通道。覆盖范围西起玛纳斯凤凰、向东至哈密、中间途径首府乌鲁木齐。在“十二五”期间,围绕天山山脉西段形成伊宁—乌苏—凤凰—乌鲁木齐—吐鲁番—巴州—库车—伊宁 750 kV 环网,在乌昌负荷中心形成凤凰—西山—东郊—乌北郊—凤凰的 750 kV 环网,750 kV 电网向东延伸至准东和哈密,向南延伸至喀什。截止 2016 年,新疆 750 kV 电网建设目标基本完成^[1-2]。

新疆 750 kV 线路的基本建成标志着中国在掌握 750 kV 特高压输变电技术后,在中国西北电力建设应用上取得的一次重要实践成功。工程建设成功的背后带动了一系列特高压电力技术的研究进展,宏观上从线路整体规划^[3-4]到建设过程中地质选型^[5-6],再到环境影响研究^[7-8],具体技术上从电磁状态^[9-10]和各种电压环境条件下状态特征分析^[11-12]到新材料^[13-14]、新设备^[15-16]。另一方面,以新疆 750 kV 为代表的中国特高压线路投运时间较短,在线路运行维护、状态监测、改造升级、综合运行环境掌握等多个方面后续还需要展开一系列的科学研究,为中国特高压线路运行保障积累经验,完善相关技术和理论。

大风是新疆地区主要的气象特征之一,新疆、内蒙古和甘肃一带是中国多风地区,新疆地区包括 9 大风区:达坂城、风额尔齐斯河谷西部风区、准格尔盆地风区、阿拉山口风区、吐鲁番西部风区、哈密北戈壁风区、哈密南戈壁风区、罗布泊风区以及百里风区。强风对高压线路运行环境条件的安全造成重要影响^[17-19],会导致导线风偏断线,固件松动等风险事故。同时,线路所处的大风环境不同,为了保障线路的各项安全指标,其设备设计建造的经济指标差异也会较大,经济指标也须考虑^[20]。例如,类似 750 kV 的超高压输电线路,由于跳线间距离增大,引起跳线弧垂增大,跳线风偏后对铁塔构件的间隙往往决定着杆塔的线间距离,并且最终决定着杆塔的经济指标^[21]。

文中以新疆 750 kV 输电线路的主要线段为对象,探讨其沿线位置地形以及 2011 年至 2015 年 5 年间风况的时空特征。其结果可作为新疆 750 kV 线路风害防控的数据依据,以及大风环境下,在保障线路抗风前提下,提高经济指标的设计参数。

1 资料

根据西北电力设计院资料,至 2020 年,新疆

750 kV 输电线路将形成如图 1 所示的网络,文中收集了其中 27 条已经建成的输电线段,共计 9 616 基杆塔作为基本研究对象。

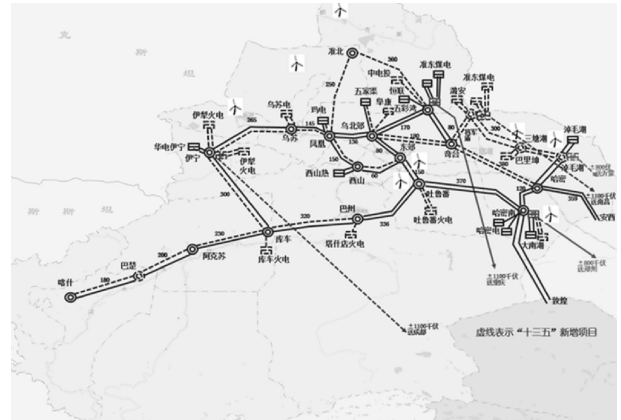


图 1 新疆 750 kV 线路整体规划蓝图

Fig. 1 Overall planning blueprint of Xinjiang 750 kV transmission lines

风源数据时间范围覆盖了从 2011-01-01 到 2015-12-31 的 5 年时间,采样时间间隔为 3 h。风源数据源于欧洲中心 EC-INTERIM 数据,该数据基于全球观测基站的基本要素并将预报融合观测数据得到,原始数据的分辨率是 0.125,按照新疆边界提取了数据之后,用二次样条插值方法插值到 9 km 的精度。风源数据包括了风速和风向信息,其中风速描述单位为米/每秒,风向为度。为了便于定性描述,将风速数据离散化。风速根据国际通用的“蒲福风力等级(beaufort scale)”方法如表 1 归档到风级。

表 1 蒲福风力等级划分

Table 1 Beaufort scale

风级	风速/(m·s ⁻¹)	风级	风速/(m·s ⁻¹)
0	0.0~0.2	7	13.9~17.1
1	0.3~1.5	8	17.2~20.8
2	1.6~3.3	9	20.8~24.5
3	3.4~5.4	10	24.5~28.5
4	5.5~7.9	11	28.5~32.6
5	8.0~10.7	12	32.7~36.9
6	10.8~13.8	13	37.0~41.4

地形信息来自于遥感影像数据,以 DEM 的数据格式进行保存。通过 ArcGIS 软件分析 DEM 数据得到主要地形信息。ArcGIS 是美国环境系统研究所 ESRI(environment system research institute)开发的 GIS 软件。从 DEM 高程数据进一步可以得到海拔高度信息,坡度坡向等信息。基础 DEM 的解析度为 63 740 列,29 804 行,胞格大小 (cell size)为 24.811,线性单位(linear unit)为 m。

2 地形分析

2.1 杆塔海拔高度

海拔高度因素对线路电磁环境的可听噪声,架设杆塔的绝缘子片数,空气间隙和工人作业安全要求等指标均有影响。新疆的最低点位于吐鲁番艾丁湖,海拔负155 m,它也是中国的陆地最低点。最高点位于克什米尔边境上的乔戈里峰,海拔8 611 m。遥感影像数据中栅格的灰度深浅代表了位置点的海拔高低,通过 ArcGIS 导入数据后,结合线路位置点的信息,可以获得750 kV 线路杆塔海拔信息。线路杆塔海拔高度分布见图2,海拔1 000 m 以下的杆塔占总数的53%,海拔1 000 m 至海拔1 500 m 占总数的44.5%。从杆塔的海拔高度相互关系和逐级高度变化趋势分析,得到了750 kV 线路走势特点:总体上海拔高度具有西南高东北低的特点。以新疆省会乌鲁木齐为中心,750 kV 线路走向大致可划分为西向,东向,南向3个部分。乌鲁木齐平均海拔836 m,西向通道凤凰(海拔456 m)—乌苏(海拔464 m)—伊宁(海拔790 m)海拔逐步攀升,东向通道吐鲁番(海拔36 m)—哈密(759 m)穿越了吐鲁番盆地经历了海拔下降再上升的过程。南向巴州(海拔944 m)—库车(海拔1 071 m)—阿克苏(海拔1 107 m)—巴楚(海拔1 119 m)—喀什(海拔1 298 m)海拔高度也是逐步上升。三向通道在海拔高度上的单调递增特征显著。

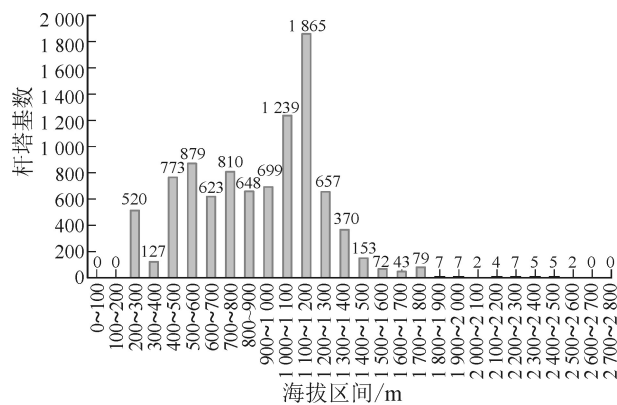


图2 新疆750 kV 线路杆塔海拔高度分布

Fig. 2 Distribution of altitudes for poles of the Xinjiang 750 kV transmission lines

根据国家电网公司物资采购标准《高海拔外绝缘配置技术规范》,750 kV 瓷绝缘子外绝缘配置,复合绝缘子绝缘配置需要根据绝缘子结构高度、爬电距离和各污秽等级随海拔高度的变化进行差异化计算。以普通型外绝缘子结构高度170 mm,爬电距离

545 mm;防污型结构高度205 mm,爬电距离550 mm,各污秽等级均取上限为例,海拔高度为1 000 m 区间时,a、b、c、d、e 级的普通型外绝缘子片数和防污型外绝缘子片数为40、40、40、44、51;34、34、34、42、51。海拔高度为2 000 m 区间时,a、b、c、d、e 级的普通型外绝缘子片数和防污型外绝缘子片数为40、40、40、48、57;34、34、38、48、57。计算绝缘子串风偏角时,需要考虑工作电压间隙、操作过电压间隙、大气过电压间隙。这3个参量在海拔高度变化时,原规程规定在海拔超过1 000 m 的地区海拔每增加100 m,工作电压间隙及操作过电压间隙需要增加1%^[22]。

2.2 坡度、坡向

新疆区域地势起伏较大,内有三大山脉和两大盆地,北部是阿尔泰山,中部是天山,南部是昆仑山和喀喇昆仑山。两大盆地是北部的准噶尔盆地,南部的塔里木盆地。750 kV 线路东西向部分沿天山山脉,南北走向位于天山和喀什昆仑山之间,倚天山山脉南麓,北缘塔里木盆地。利用 ArcGIS 的坡度(slope)和坡向(aspect)分析,以 DEM 数据为基础得到了如图3、4所示的区域内坡度和坡向分布情况。同时,导入750 kV 线路杆塔位置坐标,将地形图层与线路图层重叠,进一步得到线路杆塔处的坡度与坡向信息和周边的对比情况。750 kV 线路不同坡度和坡向的杆塔数量比例见图5。

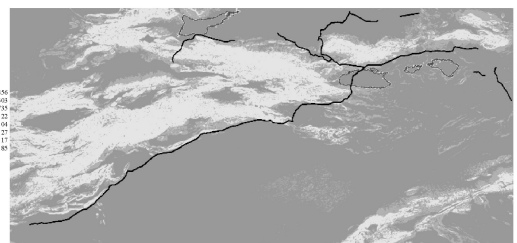


图3 750 kV 线路不同坡度的杆塔地理位置分布

Fig. 3 Position distribution of poles with different slope in the Xinjiang 750 kV transmission lines

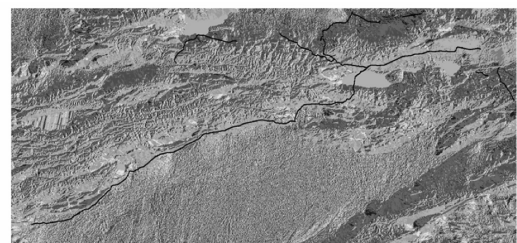


图4 750 kV 线路不同坡向的杆塔地理位置分布

Fig. 4 Position distribution of poles with different aspect in the Xinjiang 750 kV transmission lines

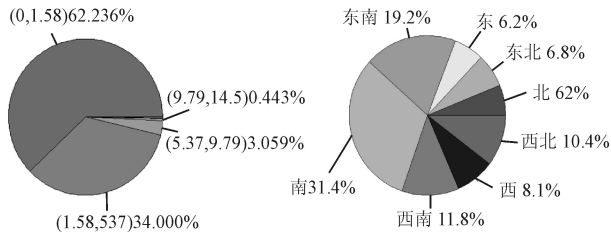


图5 750 kV 线路不同坡度和坡向的杆塔数量比例

Fig. 5 Ratio of poles' number with different slope and aspect in the Xinjiang 750 kV transmission lines

图3中,坡度从0至80.45°之间被划分成9个区间,分别用颜色从深至浅来代表。750 kV 线路为黑色线表示,可见其紧邻天山山脉区和天山和喀什昆仑山之间的山脉区域,该地区坡度陡峭,平均坡度在14.5°以上。但是从图3中分析,750 kV 线路被架设在山脉脚部的地势相对平坦区域,图5中的左图,是陡度区间中最平坦4个区间的杆塔总数。4个区间包含的杆塔数超过总数的99%,而小于5.37°的杆塔占比超过96%。图4中,坡向以45°为单位,划分为平坦,正东,东南,正南,南西,正西,西北,正北,东北总计9个朝向。天山山脉主要走向为东西向,因此,从图4可观察到区域内南北坡向为主。图5中的右图,是有朝向的8个区间内的杆塔总数比例图,其颜色代表的坡向与图4一致。其中东南、南、西南3个向南区间的杆塔比例超过总数的62.4%,因此杆塔大部分分布在偏南方向的坡面。

3 风特征

750 kV 线路杆塔的风况通过最短距离原则,与测风点关联起来。

3.1 年平均风速及风向

年平均风速与年平均风向计算公式为:

$$wind_{year_speed} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$wind_{year_direction} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: n 为750 kV 线路的杆塔总数,这里为9 616; x_i 为每基杆塔的平均风速; d_i 为每基杆塔的平均风向度。

由式(1)、(2)可得,2011年至2015年750 kV 线路整体的年平均风速依次为2.653、2.667、2.668、2.697、2.742 m/s。年平均风速按年呈单调递增的态势。风向角从2011年至2015年184°、177°、175°、177°、180°,年平均风向保持稳定。

分析5年间750 kV 输电线路的各组成线路的年平均风速的大小排序,最大平均风速与最小平均风

速的排名相对位置稳定,最大为芨塘一、二线和烟沙一、二线保持在年平均风速4 m/s以上;伊苏和巴吐二线年平均风强最小,约为2 m/s。其地理在新疆地区位置见图6,线1为芨塘一、二级和烟沙一、二线,线2为伊苏和巴吐二线。从地理位置上,芨塘一、二线和烟沙一、二线新疆天山的东部,而伊苏和巴吐二线在新疆天山的西部。5年间年平均风速排名最大和最小的线段见图6。



图6 5年间年平均风速排名最大和最小的线段

Fig. 6 Lines with maxium and minium annual average wind strenght in 5 years

3.2 线路季节性6级强风

强风对线路会造成危害。根据《110~750 kV 架空输电线路设计规范(报批稿)》及南方电网公司企业标准《110~500 kV 架空送电线路设计技术规定(暂行)》(Q/CSG 11502—2008),架高线路的设计风速的重现期为50年一遇。但是根据地方电力公司维护经验,当风速超过6级时,杆塔的部件故障例如螺帽脱落等频率显著提高。因此,该节以表1所示的风速风级对应关系,以6级速为临界,分析2011年至2015年750 kV 线路6级以上风覆盖的杆塔数,记录时间点数,以及它们在4个季度中的分布。5年间,受6级以上大风影响杆塔总数四季度分布见图7。

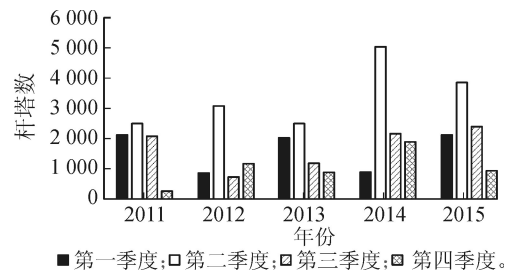


图7 5年间,受6级以上大风影响杆塔总数四季度分布
Fig. 7 Season distribution of poles' number affected by over level 6 wind during 5 years

图7中: X 轴为年份季度; Y 轴为6级以上风影响的杆塔数。2011年至2015年,4个季度中,第二季度6级以上风向影响的杆塔数最多,表明4-6月期间,750 kV 线路沿线最易受大风影响。特别是2014年,

第二季度和第四季度的大风影响线路范围明显比其他年份多。根据《2014年新疆气候公报及影响评价》报告证实当年的4-5月出现7场明显的区域性大风,其发生频次居历史同期第一位。

除了影响的杆塔范围,进一步分析6级以上风影响的时长。文中分析所用的测风数据采样时间间隔为3 h。文中使用杆塔超过6级风的时间点数衡量大风影响的时长,即 $\sum_{i=1}^n s_i$,其中 s_i 第 i 号杆塔出现6级以上风的时间点数, n 为750 kV线路杆塔数。5年间6级以上大风影响时间点数见图8。

图8中X轴为年份季度,Y轴为6级以上风影响的时间点数。依然2014年6级大风出现的时间点最多。

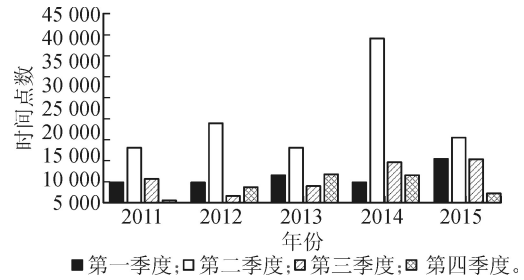


图8 5年间6级以上大风影响时间点数

Fig. 8 Sum of time points affected by over level 6 wind during 5 years

在图8基础上进一步统计这些6级以上大风出现点时的风向。5年间6级以上大风影响杆塔时间点的风向见图9。

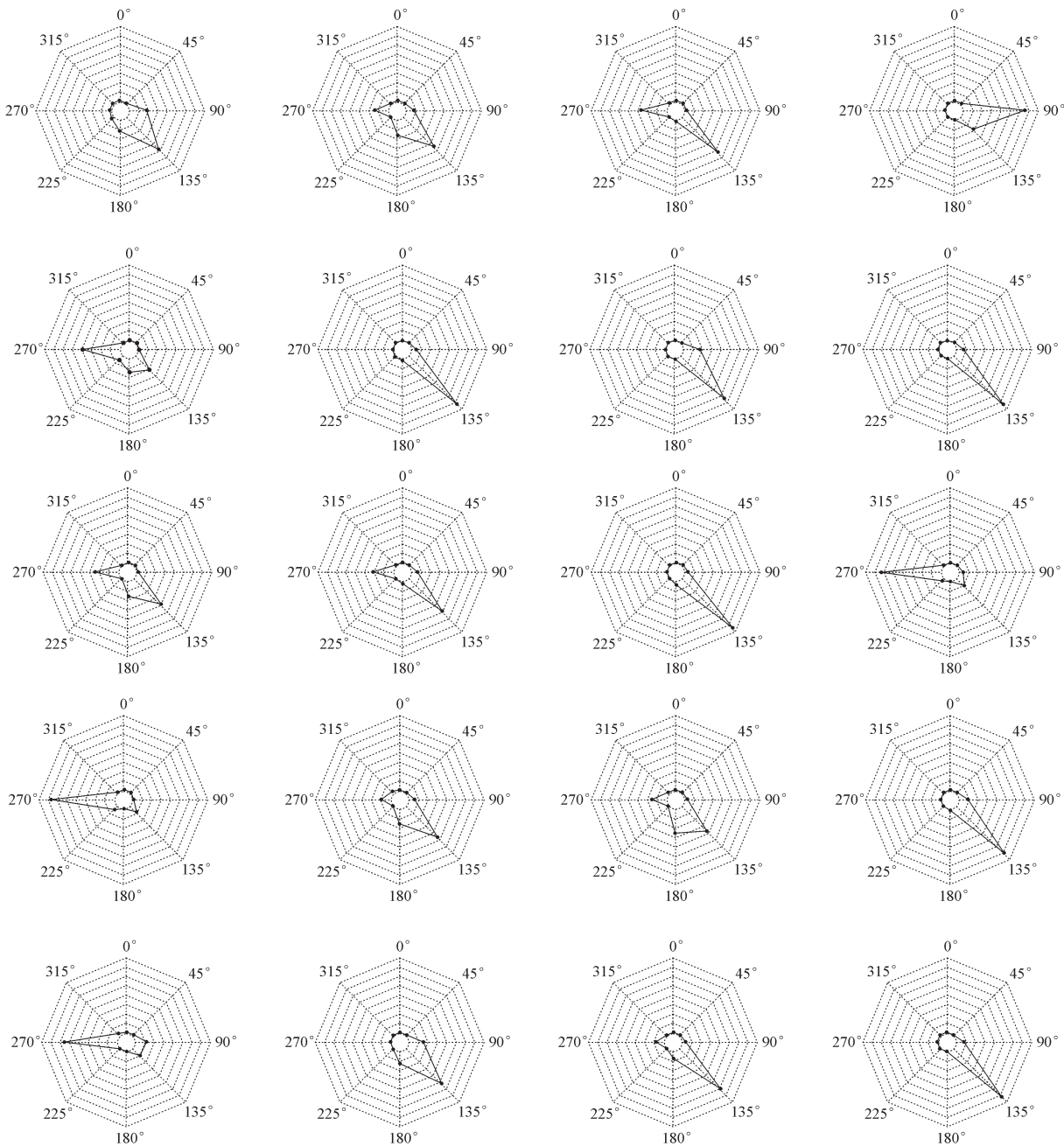


图9 5年间6级以上大风影响杆塔时间点的风向

Fig. 9 Wind direction distribution of poles affected by over level 6 wind during 5 years

图9中,第一行至第五行对应2011年至2015,第一列至第四列代表第一季度到第四季度。风的方向以 45° 为步长,划分为8个区间。从图9中可知6级以上大风,在5年间,二、三季度非常的稳定集中在第四个风向区间,即 112.5° 至 157.5° 之间;第一季度与第四季度的6级以上大风的主要风向不一样;没有 292.5° 至 67.5° 之间风向的6级以上大风。

上节和该节分析说明,文中收集的新疆750 kV线路受大风影响有明显的地理和时间上的特点:文中收集的750 kV线路中,以芨塘一、二线和烟沙一、二线为代表的东部线路是防风重点对象,根据经验,在大风情况下容易发生间隔棒、防振锤滑移,塔身、金具螺丝松动甚至断裂,复合绝缘子均压环倾斜等缺陷隐患。在时间上,强风多发生在第二季度4-6月间,是大风发生的窗口期。

4 结语

在未来“十三五”期间,新疆750 kV特高压线路还将在准东、哈密分别建成至中东部地区的2回特高压直流输电线路,在伊犁地区建成至中东部地区的1回特高压直流输电线路。同时,将建成哈密南经敦煌至青海的750 kV电压等级的双回输电线路。预计至2020年,连接新疆地区的主要负荷中心将均形成双回750 kV电压等级的输电线路。

通过文中分析,已经建成的新疆750 kV线路主要部分具有以下地形和大风的宏观特征:

1)750 kV线路杆塔海拔高度绝大多数在海拔400 m以上1 500 m以下。该值可指导绝缘子数量配置及风偏角计算的参考。

2)750 kV线路紧邻或者穿越陡峭山区,但线路杆塔处在坡度平滑区域。地面倾角较小有效地降低了雷电对边坡放电风险。

3)750 kV线路以乌鲁木齐为中心线路东向和南向区段主要处于南向坡面,西向主要处于北向坡面。

4)2011年至2015年间,750 kV线路年平均风强在2.6 m/s左右,并有逐年加强的趋势,年平均风向稳定,方向在 175° 至 185° 之间。其中新疆东部边界区域的线路大风强度最高,西部线路大风强度最小。

5)750 kV线路6级以上大风季节性主要出现在第二季度,影响杆塔数最多,时间点最多。2014年出现历史同期最高值。6级以上大风风向集中在 112.5° 至 157.5° 之间,没有 292.5° 至 67.5° 之间风向的6级以上大风。结合杆塔所处坡向的聚焦性、大风窗口期存在,以及大风风向稳定特征,新疆750 kV

线路需要特别关注迎风坡,背风坡伴随故障发生。

这些宏观的结论可以为具体线段的风偏等安全问题提供对应措施指引。还可以在以上结论重点区域,进一步结合现场实测微环境数据以及具体设备参数,计算安全范围,达到对设备的针对化维护的目的。

参考文献:

- [1] 郑彬,印永华,班连庚,等. 新疆与西北主网联网第二通道工程系统调试[J]. 电网技术, 2014, 38(4):980-986. ZHENG Bin, YIN Yonghua, BAN Liangeng, et al. System commissioning for the second transmission channel project interconnecting Xinjiang grid with northwest China main grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(4):980-986.
- [2] 黄耀德. 新疆750千伏超高压电网规划与若干问题研究[D]. 北京:华北电力大学, 2015. HUANG Yaode. Study on the planning and some problems of Xinjiang 750 V ultra-high voltage power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [3] 李亚. 新疆750 kV超高压电网建设时序研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012. LI Ya. Study on the construction sequence of 750 kV EHV grid of Xinjiang[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [4] 肖谭南,肖帅,王建全,等. 基于PSO的特高压交流变电站布点、直流落点及新建线路自动选择方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(3):815-823. XIAO Tannan, XIAO Shuai, WANG Jianquan, et al. Method for automatically determining UHV AC substation location, DC access point and new lines based on PSO[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3):815-823.
- [5] 李学丰,马良荣,孔亮,等. 750 kV输电线路工程沿线宁夏黄土的特性分析[J]. 电力建设, 2010, 31(5):7-12. LI Xuefeng, MA Liangrong, KONG Liang, et al. Loess property along the line of 750 kV power transmission project in Ningxia region[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(5):7-12.
- [6] 李永祥,张西,周吉安. 750 kV输电线路戈壁碎石土地基立柱掏挖基础试验[J]. 电力建设, 2010, 31(9):22-25. LI Yongxiang, ZHANG Xi, ZHOU Ji'an. Testing study on excavated column foundation for towers of 750 kV transmission line in northwest gobi gravel area[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(9):22-25.
- [7] 王建国. 新疆750 kV变电站周围电磁环境水平及其特征分析[J]. 干旱环境监测, 2014(2):104-107. WANG Jianguo. The level and characteristic of Xinjiang 750 kV substation electromagnentic environment[J]. Arid Environmental Monitoring, 2014(2):104-107.

- [8] 张 晔. 750 kV 官亭~西宁输变电工程电磁环境和声环境质量状况调查[J]. 绿色科技, 2014(8): 199-201.
ZHANG Ye. Electromagnetic and acoustic environment quality survey on Guanting to Xining power transmission and transformation project[J]. Journal of Green Science and Technology, 2014(8): 199-201.
- [9] 刘 青. 新疆 750 kV 交流输电系统电磁暂态分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1301-1307.
LIU Qing. Electromagnetic transient analysis on Xinjiang 750 kV AC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1301-1307.
- [10] 万保权, 邬 雄, 张业茂, 等. 750 kV 单回紧凑型输电线路的电磁环境[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 597-600.
WAN Baoquan, WU Xiong, ZHANG Yemao, et al. Electromagnetic environment of 750 kV single-circuit compact transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 597-600.
- [11] 刘 青, 李 山, 范旭华, 等. 乌北—吐鲁番—哈密 750 kV 输电线路工频过电压研究[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 8-12.
LIU Qing, LI Shan, FAN Xuhua, et al. Investigation to power frequency overvoltages of Wubei-Tulufan-Hami 750 kV transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 8-12.
- [12] 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.
- [13] 周庆庆, 龚兴国, 李 青, 等. 复合绝缘材料在 750 kV 变电站中应用的关键技术[J]. 电力建设, 2013, 34(11): 105-109.
ZHOU Qingqing, GONG Xingguo, LI Qing, et al. Key technologies of composite insulating materials adopted in 750 kV substation[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(11): 105-109.
- [14] 南 敬, 李学林, 徐 涛, 等. 750 kV 防冰型复合绝缘子冰闪试验研究[J]. 电力建设, 2014, 35(10): 47-51.
NAN Jing, LI Xuelin, XU Tao, et al. Ice flashover test of 750 kV anti-icing composite insulators[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(10): 47-51.
- [15] 左玉玺, 薛更新, 孙 强, 等. 750 kV 输电线路复合横担设计研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 1-8.
ZUO Yuxi, XUE Gengxin, SUN Qiang, et al. Research on the design of composite cross arm for 750 kV transmission line[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2013, 29(1): 1-8.
- [16] 孙 涛, 赵雪灵, 高理迎, 等. 特高压直流线路复合材料转动横担设计[J]. 电力建设, 2014, 35(9): 35-38.
SUN Tao, ZHAO Xueling, GAO Liying, et al. UHVDC transmission line rotation cross arm design for fiber reinforced plastic[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(9): 35-38.
- [17] 包 俊, 徐春宇, 侯连成, 等. 新疆与西北 750 kV 第二通道输变电工程沙漠危害及对策研究[J]. 电力勘测设计, 2015(z1): 188-189.
BAO Jun, XU Chunyu, HOU Liancheng, et al. Countermeasure on desert harm in the second way from Xinjiang to northwest power system[J]. Electric Power Survey & Design, 2015(z1): 188-189.
- [18] 常 伟, 童 帆, 张玉明, 等. ± 800 kV 特高压换流站防风沙措施设计[J]. 中国电力, 2015, 48(11): 76-81.
CHANG Wei, TONG Fan, ZHANG Yuming, et al. Design of sand-prevention measures for ± 800 kV UHV converter station[J]. Electric Power, 2015, 48(11): 76-81.
- [19] 李 强. 750 kV 乌鲁木齐~哈密输电线路设计风速分析计算[J]. 电力勘测设计, 2013(4): 27-30.
LI Qiang. Analysis and calculation of design wind speed for 750 kV transmission line from Urumqi to Hami[J]. Electric Power Survey & Design, 2013(4): 27-30.
- [20] 刘汉生, 刘 剑, 李俊娥, 等. 基于全寿命周期成本评估的特高压直流输电线路导线选型[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 310-315.
LIU Hansheng, LIU Jian, LI Jun'e, et al. Conductors selection of UHVDC transmission lines based on life cycle cost[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 310-315.
- [21] 陈建忠, 李勇伟. 750 kV 输电线路刚性跳线的研究开发[C]//中国电机工程学会输变电电气四届二次学术年会论文集. 上海: [s.n.], 2004: 604-615.
CHEN Jianzhong, LI Yongwei. Research on development of rigid jumper for 750 kV transmission line[C]//Proceedings of the Fourth Annual Symposium on Transmission Electricity of China Society of Electrical Engineering. Shanghai: [s.n.], 2004: 604-615.
- [22] 贺 海. 青海电网架空输电线路运行工况分析及防御能力提升[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
HE Hai. Enhancing the operation condition analysis and defense ability of transmission line of Qinghai power grid[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- 庄文兵(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输变电设备状态检测试验技术与设备状态评价。