

[风力发电]

高海拔环境对风力发电电气设备性能的影响及应对措施

文/苏州热工研究院有限公司 王 鑫 倪彬彬 汤桂荣 张镇滔

通过对高海拔地区的主要气候特征的分析，阐述了高海拔气候条件对风力发电电气设备性能的影响，从绝缘水平设计、选型等方面提出了高海拔地区风力发电电气设备的应对措施。

我国从2008年开始在云南、贵州、青海、西藏等高原地区开发建设风电场，累计装机容量从2008年的80 MW，到2014年超过6 000 MW。

高海拔地区气候条件特殊，如气压低、气温低、温差大、雷暴频繁等，对于风机电气设备影响较大，高海拔地区风电机组在运行过程中也暴露出较多的问题，尤其是电气设备绝缘问题导致的大批量风机脱网事故严重影响了风电场的正常运行。通过对70多个风电场的统计，15%的电气事故发生在高海拔地区风电场，这些高海拔地区发生的电气事故中接近一半是由于设计问题或者选型不当造成设备故障，如云南牟定风电场电气部件安全距离不足，箱变内部加热除湿装置选择不合理导致大批量风机脱网；贵州龙里风电场箱

变高压侧为敞开式避雷器，未考虑到风电场的特殊气候条件，导致放电等等。

本文将通过分析高海拔条件对电气设备性能的影响，结合部分高海拔风电场的电气事故，从电气设备设计及选型的角度提出高海地区风机电气设备的应对措施。

高海拔气候条件对电气设备性能的影响

1. 高海拔气候特征

海拔超过1 000 m的地域称为高海拔地区，高海拔地区的环境条件主要特点是气压低、气温低、温差大、雷暴频繁、绝对湿度低、太阳辐射强等。

我国高海拔地区环境特点，如表1所示。

表1 高海拔地区气候特征

环境参数	海拔高度/m					
	0	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
年平均气压/kPa	101.3	90.0	79.5	70.1	61.7	54.0
相对空气密度/(kg/m ³)	1	0.9	0.81	0.73	0.65	0.58
最高空气温度/℃	45、40	45、40	35	30	25	20
年平均温度/℃	35、30	35、30	25	20	15	10
最低空气温度/℃	5	-5	-15	-25	-40	-45
年平均相对湿度/(%)	95、90	95、90	90	90	90	90
年平均绝对湿度/(g/m ³)	11.0	7.6	5.3	3.7	2.7	1.7
最大太阳直接辐射强度/(W/m ²)	1 000	1 000	1 060	1 120	1 180	1 250

2. 气候条件对风力发电电气设备的影响

1) 对绝缘强度和放电电压的影响。海拔增高,空气密度降低,带电质点平均自由行程增大,电子单位行程距离中的碰撞次数减少,但每次碰撞前所积累的能量增大,空气分子电离的概率增大,故随着海拔的增高,空气绝缘强度降低,高压电器设备外绝缘的放电电压下降。对高压电器设备和元件影响较为显著,尤其是同时出现高相对湿度时情况更为严重。对于高压输变电设备的外绝缘,海拔每升高100 m,绝缘强度需考虑提高约1%。

2) 湿度的影响。高海拔地区在相对湿度接近饱和的情况下,昼夜温差将造成严重的凝露,同时,过大的湿度将对风电电气设备绝缘产生严重影响。

3) 温升的影响海拔升高,空气压力或密度降低,散热的对流作用减弱,致使以空气为散热介质的电气设备的散热能力下降,温升升高。

4) 温度的影响。高海拔地区平均空气温度和最高环境温度都随海拔升高而降低,对设备温升可以起到一定的补偿作用,环境空气温度的补偿值为海拔每升高100 m,环境空气温度降低0.5℃;大温差会造成产品绝缘老化、变形、保护层脱落,密封结构易于破坏。因此有防护设备时应保证其防护要求,无防护设备时应提供产品本身的防护能力。

5) 对通断性能的影响。以自由空气为灭弧介质的开关电器产品灭弧能力降低,通断能力下降,在一定程度上导致产品寿命的降低,不利于风电机组的安全稳定运行。

6) 对外形和密封的影响。海拔增高,空气密度降低,低气压可导致元件密封不严造成泄漏;还有紫外线强,又可导致密封件老化,加快泄漏;引起低密度、低浓度、多孔性材料(如:电工绝缘材料、隔热材料等)的物理和化学性质的变化。低气压和低温若同时出现,会增加润滑剂的蒸发效应,从而使运达件的表面摩擦加剧。

7) 辐射的影响。海拔5 000 m的最大太阳辐射是平原地区相应值的1.25倍。热辐射对物体有加热作用。对户外电工电子产品和设备,太阳热辐射的增加将引起较大的附加温升,降低有机绝缘材料的机械电气性能,使材料变形,产生机械热应力等。紫外线辐射随海拔升高的增加率比太阳热辐射的增加率高得多,海拔3 000 m已达平原地区相应值的2倍。紫外线使有机绝缘材料加速老化,使空气易于电离而导致外绝缘强度及电晕起始电压降低。

8) 雷暴的影响。高海拔地区的平均雷暴日要

远高于平原地区,雷击会造成绝缘击穿,元器件烧毁等。

高海拔地区电气设备绝缘性能防范措施

1. 电气设备外绝缘海拔修正

一般情况下,在高海拔地区使用的电气设备,并不是在当地生产,由于生产地点和使用地点的海拔不同,在低海拔地区生产的电气设备安装在高海拔地区时绝缘性能会降低,为保证外绝缘满足高海拔要求,应对外绝缘进行海拔修正。

在高海拔地区使用的高压电气设备的额定外绝缘水平除因电压等级不同而确定的耐受电压外,还受耐受电压控制的最小空气间隙。在进行高海拔地区外绝缘修正时因根据推荐的外绝缘水平同时对耐受电压和最小空气间隙进行修正。

对于按标准规定将1 000 m作为设计基准的电气设备,低于1 000 m及以下的电气设备已按1 000 m进行修正,可直接用于海拔1 000 m以下地区。使用条件在1 000 m以上地区外绝缘水平试验电压应该进行修正,试验要求的耐受电压 U 是将额定耐受电压 U_0 乘以海拔修正因数 K_H 。

$$U = K_H \times U_0 \quad (1)$$

海拔修正系数 K_H 可由下式求得:

$$K_H = e^{m \left(\frac{H-1000}{8150} \right)} \quad (2)$$

其中, H 为设备安装地点的海拔;

m 为海拔修正因子,对雷电冲击、工频及操作冲击干试验电压, $m=1.0$ 。

表2 冲击和工频耐压海拔修正系数

使用地点海拔/m	0	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
海拔 以零海拔为基准	1.00	1.13	1.28	1.45	1.64	1.85
修正 以1 000 m为基准	0.89	1.00	1.13	1.28	1.45	1.64
系数 以2 000 m为基准	0.78	0.89	1.00	1.13	1.28	1.45

对于没有按标准规定将1 000 m作为设计基准的电气设备,设备安装地点高于试验地点时,海拔修正公式可由下式求得:

$$K_H = e^{m \left(\frac{H-h}{8150} \right)} \quad (3)$$

式中, H 为设备安装地点的海拔, h 为设备试验地点的海拔。

为保证电气设备在高海拔地区使用时电气间隙有足够的耐受电压击穿的能力,必须加大电气间隙。大气放电电压的修正系数可由下式确定:

$$K_a = e^{m \left(\frac{H}{8150} \right)} \quad (4)$$

式中, H 为设备安装地点的海拔; m 为修正因子,对工频、雷电电压, $m=1.0$;

产品的实际电气间隙应根据不同绝缘电压值、不同过电压等级、不同环境污染等级选定的最小电气间隙值进行修正，应大于该修正值。对于修正的电气间隙用修正的冲击电压值进行冲击耐受电压试验，工频耐受电压试验可以不修正。

低压电气设备外绝缘也有高海拔修正问题，将2 000 m作为修正的基准海拔。一般低压电气设备只要满足标准规定的空气间隙及最小沿面爬电距离，一般不需要进行额定冲击耐压试验。

对于安装在海拔高于2 000 m的低压电器设备，外绝缘为保证电气产品在高原使用时电气间隙有足够的耐受电压击穿的能力，必须加大电气间隙，产品应根据不同绝缘电压值、不同过电压等级、不同环境污染等级选定的最小电气间隙进行修正，实际的电气间隙值应大于该修正值。

表3 高海拔地区低压设备电气间隙修正系数

使用地点海拔/m	0	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
电气间隙	以零海拔为基准	1.00	1.13	1.27	1.45	1.64
修正系数	以1 000 m为基准	0.89	1.00	1.13	1.28	1.46
	以2 000 m为基准	0.78	0.88	1.00	1.14	1.29

2. 设备选型

高海拔地区使用的电气设备选型很重要，对高原用电气设备应尽量选用密封或者真空等不受海拔影响的电气设备，对于无法选用密封或真空电气设备的情况，可以采取如下措施：选择为高海拔地区专门研制专用的电气设备，如高原型变压器；采用绝缘水平高一等级的电气设备；采用复合绝缘的设备等。针对高海拔地区特殊的环境条件，可从以下方面考虑设备选型：

1) 抗温升。在高海拔地区运行的电气设备，应综合考虑环境温度降低、温升高及电气设备的工作温度等因素对电气设备的性能和寿命造成的影响，调节通风系统的散热能力。低压电气设备可参照GB20645进行修正，高压电气可参照GB20635进行修正，发电机和辅助电动机的温升可根据GB755进行修正。

2) 抗寒、抗温差。产品应选用抗寒能力强，结构性能稳定的材料或采取必要防护措施，如用电加热防寒、加强密封、使用耐低温的高分子材料等。

3) 防凝露。在容易产生凝露的地区，可通过如下方法防凝露：提高柜体的密封性能；增加防雨水进入的措施；采用凝露控制器与加热器相结合的办法等。

4) 防潮。云南牟定风场脱网事故发生箱变中加热除湿装置设置不合理，加热器布置在高压

侧，温湿度检测装置布置在低压侧，且没有布置风扇，导致箱变高压侧设备绝缘降低发生故障。所以，应合理地利用空气循环和加热系统，建立程序控制立体循环除湿系统；对于重要部件可通过增加加热除湿装置的方式进行除湿。

5) 通断能力。在高海拔地区应尽量选用密封、真空或者惰性气体作为介质的开关设备，对于无法采用密封及真空等措施的设备，应验证其灭弧性能是否符合技术要求。

6) 机械结构及材料的选用。电气控制柜、密封结构件应根据海拔进行修正，结构尺寸链关系上要考虑和预留出基于海拔因素下的结果尺寸修正，同时，要选用密封性能满足要求的结构；塑料材料应选用耐低温、对紫外线不敏感的材料或者添加了紫外线吸收剂、对臭氧不敏感的材料；金属表面防护材料应考虑低温及太阳辐射引起的老化影响，宜选用较浅的颜色，以减少太阳辐射的影响。如选用耐候性好的涂膜，或者在原有的防护层上加上抗UV防护膜。

7) 抗紫外线、宇宙射线。加装遮阳板，选用耐强烈太阳辐射的材料，如耐候性塑料（高密度聚乙烯、聚酯、聚四氟乙烯、聚苯醚）、粉末涂料等；选取电气产品时应考虑宇宙射线引起电气产品失效的因素，采用防电磁干扰等级较高的产品或增加必要的电磁屏蔽措施。

8) 防雷暴。对于雷暴频繁的地区应参考IEC有关标准的规定，结合当地的气候特征，全面分析并改进对防雷保护系统的设计、元件布置、元件选型、安装和接线等，防患于未然。

结束语

随着我国风电行业的快速发展，高海拔地区使用的风机电气设备问题也越来越多，为确保电气性能达到技术要求，在进行电气设计时，要充分掌握当地的地理、气象等资料，了解工程所在地的复杂气候特征，在设计过程中全面的考虑这些气候特征可能对电气性能造成的不利影响，必要时还要进行技术经济比较，确定合理的设计方案，并对设备选型进行优化。除此之外，还要在设备制造、安装及运行等过程中严格按照规范进行管理，这样才能从根本上保证风电电气设备的在高海拔地区运行的安全、可靠性。EA

(收稿日期：2015.09.11)

(编辑：白文亭)