

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.023

高海拔地区中压成套开关设备设计与选型

李海峰,王帮田,孙鹏程,孙广涛,王军委

(许继电气股份有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:针对高海拔地区中压成套开关设备普遍存在绝缘水平及机械性能下降等问题,对高海拔地区环境对中压成套开关设备性能的影响进行了研究。分析了高海拔地区中压成套开关设备试验验证方法以及目前存在的技术问题,并结合国内高海拔中压成套开关设备的设计与制造经验,通过样机试制及试验验证提出了高海拔地区中压成套开关设备的技术设计要求及设计选型思路,研究表明,中压成套开关设备采用全工况、加强绝缘、增大爬距、选择通过环境试验的元器件等多项措施后,可满足在高海拔环境试验的要求,试验结果为今后高海拔地区中压成套开关设备的设计与选型提供依据。

关键词:电气性能;绝缘水平;爬电距离;修正系数

中图分类号:TM24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)07-0995-05

Design and type selection of medium voltage switchgear in high altitude areas

LI Hai-feng, WANG Bang-tian, SUN Peng-cheng, SUN Guang-tao, WANG Jun-wei

(XJ ELECTRIC CO., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: Aiming at the insulation level and mechanical properties of medium voltage switchgear were decreased in higher altitude, and the elevation influence on the properties of medium voltage switchgear was studied. The test method and technical problems of medium voltage switchgear in higher altitude were also analyzed in this paper. From the analysis dates, combined with the domestic design and manufacturing experience, the technical requirements and selection thinking of medium voltage switchgear in higher altitude were proposed. The results indicate that the medium voltage switchgear can meet the needs of application in high altitude with full condition, strengthen insulation, increasing the creepage distance, choice the components through the environmental test etc. The result will supply the design and type selection of medium voltage switchgear in high altitude.

Key words: electrical properties; insulation level; creepage distance; correction factors

0 引言

随着国民经济的快速发展,广大高海拔地区中压成套电气设备的需求量也逐年增加,而目前市场上按照 IEC62271、GB3906 设计的中压成套开关设备是按照海拔高度 1 000 m 及以下使用条件设计制造的,市场上暂无海拔 3 000 m 及以上标准产品^[1]。通过采用增大电气间隙、增加爬电距离、采用复合绝缘等方法能够满足高海拔地区的中压开关设备外绝缘强度的要求,但过多的采用复合绝缘或加大爬电距离的方法,随

着时间推移及长期处于强烈的紫外线环境下,绝缘件老化速度较快,设备的可靠性也会大打折扣^[2]。

本研究从现有技术文献着手,在充分考虑高海拔地区环境对产品电气性能的影响基础上,通过产品试验的验证,对高海拔地区中压成套开关设备的设计及选型问题进行进一步的分析。

1 高海拔环境对开关设备电气性能的影响

在高海拔地区,海拔高度每上升 1 000 m,相对空

气压力大约降低 12%，空气密度降低约 10%，绝对湿度随海拔高度的升高而降低^[3]。空气压力和空气密度的下降，引起设备外绝缘强度的降低；空气密度降低导致设备散热性能下降而影响温升效果；平均绝对湿度降低时，设备外绝缘强度随之降低；太阳日间辐射强度较大，加快了电气设备绝缘材料的老化速度；环境温度差加大，电气设备表面易形成凝露，容易发生沿面闪络放电的现象，导致绝缘件强度及机械性能大大减弱，并对产品的机械性能产生不良的影响^[4-5]。

1.1 对绝缘水平的影响

在工况条件下，电气设备的可靠运行的主要表现为，其带电导体与接地部件之间的电气间隙（空气或复合绝缘间隙）不被击穿。由巴申定律（Paschen's Law）可知，两平行导体间的击穿电压与导体间气体的压力和距离的乘机有关，见下式^[6]：

$$U_b = \frac{apd}{\ln(pd) + b} \quad (1)$$

式中： a, b —实数； p —压力； d —极间距离。

试验表明：海拔每升高 1 000 m，平均气压则降低 7.7 kPa ~ 10.5 kPa，由公式可知，电气间隙一定时，随着海拔高度的增加，大气压力降低，击穿电压也随之下降，当气压下降到临界值时，击穿电压开始上升，绝缘水平增加。

巴申曲线如图 1 所示。对采用真空灭弧的开关设备，其电气间隙一定，应用于海拔高度低于 4 000 m 及以下时，由图 1 可知，其外绝缘水平随空气压力下降而降低。内绝缘水平随着气压降低，真空度上升，击穿电压大幅提高，因此可忽略外部大气条件对其的影响，无需采用特别的措施。

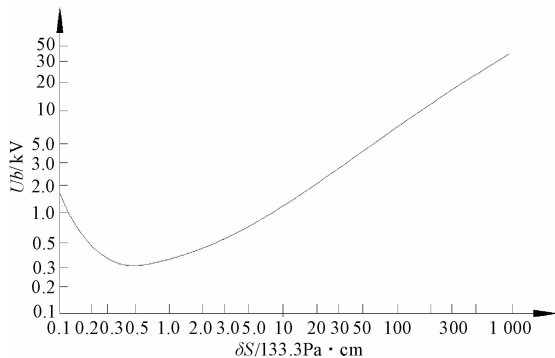


图 1 巴申曲线

因此，开关设备安装在高于海拔 1 000 m 时，其外绝缘耐受水平应为额定绝缘水平乘以修正系数，目前，修正系数计算有两个主要标准可以参考。

1.1.1 GB/T 11022—2011

修正系数 K_a 可由图 2^[7] 查询确定。

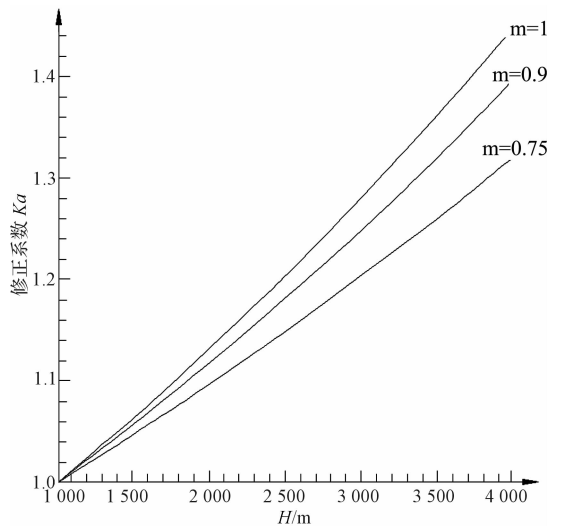


图 2 海拔修正系数

也可按照公式(2)^[7] 计算：

$$K_a = e^{(m(H-1000)/8150)} \quad (2)$$

式中： H —海拔高度；对于工频、雷电冲击和相间操作冲击电压， $m = 1$ ，对于纵绝缘操作冲击电压， $m = 0.9$ ，对于相对地操作冲击电压， $m = 0.75$ 。

1.1.2 GB/T 311.1—2012

新的国家标准不再沿用以线性化方程来处理的计算方法，而采用与 IEC 标准相同的曲线查找或公式计算的方式^[8]，使得国家标准中，对海拔修正系数的计算得到统一。

1.2 对温升的影响

采用空气作为散热介质的中压开关设备，空气压力或空气密度的降低引起空气介质冷却效应的降低，对于以自然对流、强迫通风或空气散热器为主要散热方式的电工产品，因散热能力的下降，导致设备温升增加。

交流系统的设备温升按式(3)^[9] 进行修正：

$$K_r = e^{0.03((H-1000)/1000)} \quad (3)$$

式中： K_r —温升的高海拔校正系数， H —海拔高度。

由式(3)计算可知，在海拔 1 000 m ~ 5 000 m 范围内，每升高 1 000 m，温升修正系数如表 1 所示。

表 1 温升随海拔高度增加修正系数

海拔高度/m	1 000	2 000	3 000	4 000
温升修正系数	1	1.03	1.06	1.09

本研究取开关设备温升最严酷部位—动、静触头啮合处的温升指标，通过查询 GB/T 1100—2011 可知，在空气中，采用镀银铜触头的温升允许值为 65 K，按照表 1 由式(3)确定的系数修正，海拔高度每升高 1 000 m，温升增加约 2 K。

高海拔地区，在无外部热源及遮护的情况下，空气温度随海拔高度的增高而降低，一般研究所采集的温

度与海拔高度的关系如表2所示。

表2 环境温度与海拔高度的关系

海拔高度/m	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000
最高气温/℃	40	37.5	35	32.5	30	27.5	25
平均气温/℃	20	17.5	15	12.5	10	7.5	5

从表2中可以看出:一般情况下,海拔高度每升高1 000 m,最高环境温度会下降5℃,平均温度也降低5℃。

通过以上比较可知,开关设备温升随海拔上升而增加的数值不大于环境温度随着海拔升高而降低的数值,二者可以抵消,因此产品设计时一般不考虑海拔高度对温升的影响。

1.3 对开断能力的影响

空气压力或空气密度的降低,使得以空气为绝缘介质的开关设备灭弧性能降低、开断能力下降及电寿命缩短。对于采用真空灭弧的开关设备,是使用旋弧触头产生的磁场吹灭电弧,海拔高度对其开断能力的影响较小,但随着海拔高度的增加,应选用有较大爬距的灭弧室,并对其外绝缘进行加强。

1.4 对机械性能的影响

高海拔地区昼夜温差较大,对成套设备内部机械传动部件,如断路器操作机构、接地开关、脱扣器等,需要考虑因温度变化而造成的材料变形对公差的影响。在结构尺寸关系上,要考虑和预留出基于海拔因素下的更大的尺寸。同时绝缘件、互感器外壳容易龟裂以及密封结构也易破裂,选型时要多加注意,尽量选择通过环境试验的元器件。

2 高海拔中压成套设备的设计要点

针对高海拔环境对电气性能的影响,本研究在目前市场上成熟的KYN61-40.5开关设备的基础上,完成了应用于海拔高度3 000 m的开关设备的试制,其主要技术参数及设计要点如下。

2.1 电气间隙确定

电气间隙是以开关设备所能承受的耐压水平来确定的,对于定型的中压成套设备而言,其电气间隙已经确定,以空气作为绝缘介质开关设备内各相间及对地空气净距如表3所示。

表3 开关设备内空气净距

额定电压/kV	3.6	7.2	12	24	40.5
相间及相对地/mm	75	100	125	180	300
带电体对门/mm	105	130	155	210	330

随着海拔高度的增加,设备击穿电压降低,要想使开关设备在高原环境使用时有足够的耐击穿能力,必须

增大电气间隙,对应用于高海拔地区的开关设备,电气间隙的确定需要考虑的因数较多,如满足绝缘要求、铜排的加工工艺、是否绝缘包封、污秽等级等,按照理想状态下,裸导体的空气净距一般按照海拔高度每增加1 000 m,电气间隙增加10%考虑,电气间隙修正系数如下式:

$$K_D = (1 + 10\%)^{(H-1000)/1000} \quad (4)$$

式中: K_D —电气间隙修正系数, H —海拔高度。

应用于海拔高度3 000 m时,由式(4)计算可得,修正系数为1.21,修正后设备最小电气间隙如表4所示。

表4 修正后最小电气间隙

额定电压/kV	3.6	7.2	12	24	40.5
相间及相对地/mm	90	120	150	220	360
带电体对门/mm	125	160	190	250	400

2.2 爬电距离确定

爬电距离与除了与绝缘类型有关外,还与微环境污染等级(污秽等级I、II、III)、材料的绝缘性能、工作电压等密切相关,对纯瓷及有机绝缘件的外绝缘爬电比距及相应值的应用范围规定如表5^[10]所示。

表5 爬电比距

污秽等级	纯瓷/(mm·kV ⁻¹)	有机绝缘/(mm·kV ⁻¹)
0	14	16
I	16	18
II	18	20

注:爬电距离=最高电压×爬电比距

应用于高海拔环境下时,必须对爬电距离进行修正,目前国标对如何计算修正没有明确规定,长期的试验研究发现,绝缘介质的湿闪或污闪电压与其爬电距离有接近线性的关系,且通过反复试验验证,发现海拔每升高100 m,爬电距离增加1%可以有效降低沿面的闪络发生,保证绝缘件的绝缘性能。

在一般情况下,当海拔高度在1 000 m~2 000 m时,开关柜内的一次元件可以按照II级污秽条件来设计其外绝缘爬电比距,即瓷质为18 mm/kV;有机绝缘为20 mm/kV(个别污秽较重地区可按有机绝缘25 mm/kV考虑),目前市场上的中压成套设备采用的全工况、加强绝缘型绝缘产品,其外绝缘尺寸相对来说有一定的裕度,基本上能满足海拔高度3 000 m条件下的运行要求。

2.3 复合绝缘方案

针对海拔高度不大于1 000 m而设计的成套设备,其配套元器件尺寸受安装条件限制,电气间隙往往不能满足高海拔的绝缘要求,而重新设计柜型的成本较大,这时可以采用复合绝缘等加强绝缘型工艺措施来解决绝缘问题:

(1)采用进口制作的自粘硅胶带对导体搭接处进行包封,防止出现仅靠热缩套盒包封出现的问题。

(2)母排搭接处采用绝缘包封护套,且要求与母排紧贴、无气泡。

(3)金属活门对带电体一侧和活门上下边缘硫化处理或采用绝缘材料活门。

(4)相间或相对地之间增加绝缘隔板。

(5)选用带双屏蔽的穿墙套管,改善套管安装位置的电场分布,提供局部放电电压,应尽量选用受温差影响变化不大及防老化程度高的绝缘材料(如 SMS 或 DMC 模塑料)。

(6)断路器采用加强绝缘型固封极柱,增大爬电距离,提高绝缘水平。

DL/T 404—2007 5. 106 要求:“以空气和绝缘板组成的复合绝缘作为绝缘介质的金属封闭开关设备和控制设备,带电体与绝缘板之间的最小空气间隙应满足上述要求:对 3.6 kV、7.2 kV 和 12 kV 设备应不小于 30 mm;对 24 kV 设备应不小于 45 mm;对 40.5 kV 设备应不小于 60 mm。”本研究结合高海拔地区产品制造和运行经验,提出了表 6 所列数据,且选用的绝缘材料厚度不应小于 3 mm,并需考虑绝缘件固定件的位置及材料,并优先选用老化后的绝缘材料。

表 6 复合绝缘的空气间隙(单位:mm)

海拔高度/m	1 000	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000
空气间隙/(7.2 kV—12 kV)	30	33	35	36	38	39
空气间隙/(40.5 kV)	60	66	69	72	75	78

表 7 绝缘试验参数

海拔 1 000 m 及以下试验项目及参数		海拔 3 000 m 试验项目及参数 KYN61-40.5		执行标准
绝缘试验	工频耐压	相间、相对地 95 kV	122 kV	按照 GB 3906—2006 中 6.2 的规定执行
		隔离断口 118 kV	隔离断口 151 kV(真空断口与海拔无关)	
	雷电冲击	相间、相对地 185 kV	237 kV	
		隔离断口 215 kV	隔离断口 275 kV(真空断口与海拔无关)	
辅助和控制回路	2 kV	2 kV		

在试验过程中发现,仅靠在现有成型柜的基础上部分改动来满足高海拔环境下的绝缘要求,需要大量采用复合绝缘来弥补电气间隙不足带来的绝缘问题,但随着绝缘材料老化的增加,对产品的可靠性也留下很大的隐患。

对 12 kV 开关柜而言,产品经过了国内几十年的设计改进及运行,元器件及加工工艺已较成熟,应用于海拔 3 000 m 时,其也能可靠运行,而 40.5 kV 开关设备,通过本次试验发现还需进一步提高绝缘水平的薄弱环节,特别是绝缘件爬距小及互感器的绝缘水平较低,接地开关的开距小及刀头电场不均匀等,还需进行大量的设计研究工作。

2.4 辅助措施应用

针对高海拔地区气温低、个别地区湿度大的气候特性,开关设备常采用温湿度控制器和加热元件来降低凝露,温湿度控制区可以控制加热元件长期投入或自动投入,对开关设备进行除湿和防潮,并在温度过低时,通过升温对开关设备内其他元器件起到加热作用。

2.5 导体及柜体加工工艺

一般说来,均匀电场和稍不均匀电场的平均击穿场强比极不均匀电场间隙的要高的多,因此,通过改进导体的形状、增加电极的曲率半径来改善带电导体周边的电场分布,提高气隙的击穿电压是非常有效的方案,导体的选择及加工工艺尤其重要,导体应尽量选用 R 型、D 型或圆角等边缘带圆角外形结构,同时还须尽可能地消除电极上的飞边毛刺、锐缘、焊缝、棱角等,提高电极表面的光洁度,消除局部场强,避免尖端放电。

开关设备柜体,特别是与带电导体距离较近的部位,应采用多重折弯工艺,避免板材切割及制作过程中形成的毛刺、尖端及焊缝,改善电场分布,尽量避免不均匀电场的形成。

3 试验及结果分析

2013 年 12 月,笔者所在公司进行了 KYN61-40.5 开关设备的样机试制,并按照表 7 所示的试验参数进行了绝缘试验,试验参数按照式(2)计算的系数进行修正。

4 结束语

本研究从现有的技术文献着手,根据国内高海拔中压开关设备的设计制造经验,设计制造了样机一台,为今后高海拔地区中压成套开关设备的设计选型提供了依据。试制过程中,发现导体的加工工艺、绝缘件的选择、接地开关的空气净距等是影响样机成败的关键因素,因试验条件的限制,无法模拟高海拔的环境条件,对产品的其他性能未能进一步验证。

目前高海拔环境下中压成套设备存在的问题,需要各个学科共同努力,还需总结行业设计及运行经验,

加快研究适用特殊环境条件下的技术措施,研发新材料、新工艺、新技术应用于产品生产,建立统一的技术标准和完善的试验方法,为高海拔地区提供更多优质、可靠的开关设备。

参考文献(References):

- [1] 周成军. 高海拔地区的电气设计[J]. 电气时代,2014(7):82-89.
- [2] 赵煜,姚鹏,苏文洲,等. 3 500 m 高海拔 35 kV 铠装移开式开关柜的设计与制造[J]. 科技展望,2014(18):148-150.
- [3] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2007.
- [4] XIAO B, YIN J. Research on improvement of insulation level of switchgear in 20 kV system[J]. **Electrotechnics Electric**,2005(2):39-41.

- [5] 陈开运. 高海拔电气设备工作特点及设计要求[J]. 机车电传动,2013,41(1):19-22.
- [6] 张一尘. 高电压技术[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2007.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 311.1—2012 绝缘配合第一部分:定义、原则和规则[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20635—2007 特殊环境条件高原用高压电气的技术要求[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [10] 王晋根. 高海拔对高低压电气性能影响的探讨[J]. 高压电器技术信息,2005,1(4):33-36.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

李海峰,王帮田,孙鹏程,等. 高海拔地区中压成套开关设备设计与选型[J]. 机电工程,2015,32(7):995-999.

LI Hai-feng, WANG Bang-tian, SUN Peng-cheng, et al. Design and type selection of medium voltage switchgear in high altitude areas[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(7):995-999.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 990 页)

5 结束语

本研究通过分析 D-FSC 在辐射状线路中改善电压特性的基本原理,得出了串补装置的“自适应”电压调节特点,并在归纳原有 D-FSC 补偿电容诊断方法基础上,提出了一种解决系统谐波影响下的电容器内部故障诊断判据,将其与原有判据进行仿真分析对比。通过对 D-FSC 内部故障诊断判据的研究得出,新判据的提出可以有效解决系统谐波的影响,准确判断电容器内部故障情况,相比原有判据更具优越性。

参考文献(References):

- [1] 戴晓亮. 无功补偿技术在配电网中的应用[J]. 电网技术,1999,23(6):1-7.
- [2] 麦敏坚. 探讨改善配网的电压质量[J]. 电力建设,2008(185):139-141.
- [3] 卓谷颖,江道灼,梁一桥. 改善配网电压质量的固定串补技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2013(8):66-72.
- [4] 梁一桥,吕佳铭. 一种 10 kV 配网智能串联补偿装置及其工程应用[J]. 电网技术增刊,2015.

- [5] MAGOWAN J M. Voltage performance of series capacitors in transmission and distribution lines[J]. **The Institution of Electrical Engineers**,1957,104(18):505-516.
- [6] ROSSO A D, CAÑIZARES C A, DOA V M. A study of TC-SC controller design for powersystem stability improvement [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,2003,18(4):1487-1496.
- [7] MISKE S A. Considerations for the application of series capacitors to radial power distribution circuits [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**,2001,16(2):306-318.
- [8] 黄旭东. 电力电容器保护探讨[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(3):48-51.
- [9] 刘艳,刘瑞云,陶维亮,等. 电力电容器故障检测系统的设计与实现[J]. 电气应用,2011,30(12):78-82.
- [10] 陈福锋,钱国明,宋国兵. 串联电容补偿线路行波差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(28):89-94.
- [11] QIAO Lei. Estimated means of reactive power for distributed small hydro stations based on optimal power flow[J]. **Electric Power System and Its Automation Journal**,2008,20(2):88-93.

[编辑:张豪]