

高海拔地区特高压换流站外绝缘修正方法研究

目前在开展可行性研究的±800 kV陕北换流站位于海拔1 000 m以上的陕北地区,由于空气间隙和绝缘子构成电气设备的外绝缘,高海拔地区换流站必须考虑设备外绝缘试验电压及空气间隙放电电压的海拔修正,这是特高压直流输电技术中关键问题之一。通过分析比较国内外现有的电力设备外绝缘和空气放电电压海拔修正方法,提出特高压换流站交、直流电力设备外绝缘水平海拔修正方法,并强调阀厅空气间隙计算应避免大气密度重复修正,可有效地减小阀厅布置尺寸。

马悦/山东电力工程咨询院有限公司 刘建东/山东送变电工程公司



马悦/高级工程师

空气间隙和绝缘子构成了电气设备的外绝缘,空气间隙的击穿电压及绝缘子的闪络电压和大气条件有关。在±800 kV陕北—江西直流输电工程中,送端换流站位于海拔1 000 m以上的陕北地区,为保证换流站可靠运行,需对交直流设备外绝缘试验电压和空气间隙放电电压进行海拔修正。特高压设备外绝缘制造难度大,而换流站阀厅空气间隙计算需考虑大气密度、湿度和温度等条件,海拔修正均不同于一般工程。本文将通过比较、研究现有的海拔修正方法,确定陕北特高压换流站设备外绝缘试验电压及阀厅空气间隙海拔修正的方法。

外绝缘试验电压海拔修正

随着海拔增加,空气密度下降,外绝缘放电电压随之下降,因此高海拔地区电气设备外绝缘配置必须考虑这一因素的影响。虽然外绝缘的海拔修正是所有电压等级电网外绝缘设计都面临的问题,并不是特高压外绝缘所特有的,但

电压等级的提高使设备外绝缘的制造难度越来越大,甚至制约了设备的生产,因此设备外绝缘的海拔修正仍然是特高压直流输电技术中十分关键的问题。目前,对设备外绝缘进行海拔修正的标准和方法繁多,选择一个技术上可靠、经济上合理的修正方法十分重要。

相关研究表明,环境温度和湿度对外绝缘水平的影响可以相互抵消。因此,对于高压设备的外绝缘水平,相关标准均直接以海拔为变量修正电力设备的外绝缘耐受水平。

在国内外关于外绝缘海拔修正的相关标准中,常用的修正方法主要有GB 311.1—1997《高压输变电设备的绝缘配合》^[1]、IEC 60071-2—1996《绝缘配合使用导则》^[2]、IEC 60694《高压开关设备和控制设备常用规范》^[3]和GB/T 20635《特殊环境条件高原用高压电器的技术要求》^[4],下面分别对以上几种标准的修正方法进行分析比较。

1. GB 311.1规定的方法

GB 311.1—1997《高压输变电设备的绝缘配合》3.4节规定:“对于海拔高于1 000 m,但不超过4 000 m处的设备的外绝缘及干式变压器的绝缘,海拔每升高100 m,绝缘强度约降低1%,在海拔不高于1 000 m的地点试验时,其试验电压应按本标准规定的额定耐受电压乘以海拔校正因数 K_a ,其计算公式为

$$K_a = \frac{1}{1.1 - \frac{H}{10\,000}} \quad (1)$$

关键词/Keywords

高海拔·
特高压换流站·
外绝缘·
海拔修正·
特高压直流输电·
阀厅布置·

式中, H 为设备安装地点的海拔, m , 该公式中基准海拔为1 000 m。

2. IEC 60071-2规定的方法

在一定气象条件下, 高海拔地区电力设备外绝缘耐受水平的降低与海拔 H 呈指数关系, IEC 60071-2推荐的海拔修正因数 K_a 的表达式为

$$K_a = e^{\frac{mH}{8150}} \quad (2)$$

式中, H 为海拔, m ; m 为修正因子。

大量试验研究结果表明, 电场分布越不均匀, 空气间隙距离越大, 空气密度的变化对冲击放电电压的影响越小, 则海拔修正因数 K_a 也越小。

为了解决不同电压类型修正系数差异的问题, 式(2)中引入了海拔修正因子 m 以区分不同电压类型, 避免因海拔修正因数选择不合理, 使得设备外绝缘试验耐受电压过高, 导致设备投资增加。工频电压、雷电冲击电压和相间操作冲击电压修正因子 $m=1.0$, 操作冲击电压修正因子 m 按图1取值。

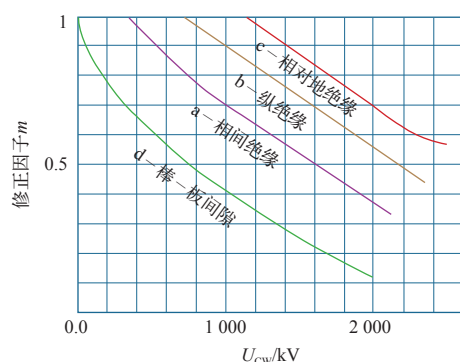


图1 m 值与操作冲击耐受电压的关系

3. IEC 60694规定的方法

IEC 60694的方法用于修正位于海拔1 000 m以上的设备外绝缘, 海拔修正因数 K_a 的表达式为

$$K_a = e^{\frac{m(H-1000)}{8150}} \quad (3)$$

如表1所示, 对于工频电压、雷电冲击电压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, $m=0.75$ 。

表1 操作冲击电压 m 指数

极对地	纵向绝缘	极间
$m=0.75$	$m=0.9$	$m=1.0$

IEC 60694标准仍是针对交流高压设备的绝缘问题, 没有规定直流耐受电压的海拔修正方法。

4. GB/T 20635规定的方法

全国高电压试验技术和绝缘配合标委会专门制定了高原电器海拔修正的标准GB/T 20635—2006《特殊环境条件高原用高压电器的技术要求》, 该标准规定的海拔修正方法参考了IEC 60694标准, 海拔修正因数仍按照式(3)计算。但是, 该标准扩大了式(3)的应用范围: 一方面明确了直流耐受电压海拔修正因数可根据式(3)计算, 同时该标准给出的海拔修正因数计算公式可应用于海拔5 000 m以下地区。

该标准规定, 对于雷电冲击、工频和操作冲击干试验电压, $m=1$; 对于直流电压, $m=0.9$; 工频和操作冲击湿试验电压, $m=0.8$; 无线电干扰试验电压, $m=0.75$ 。

5. 高压设备外绝缘海拔修正方法比较

根据以上几项标准, 对工频、雷电冲击和操作冲击(相—地)电压校正因数计算如表2所示。

表2 高压设备绝缘水平海拔修正方法比较

海拔/m	电压类型	修正因数		
		GB 311.1	IEC 60694	GB/T 20635
1 000	工频	1	1	1
	雷电冲击	1	1	1
	操作冲击(相—地)	1	1	1
	直流			1
2 000	工频	1.11	1.13	1.13
	雷电冲击	1.11	1.13	1.13
	操作冲击(相—地)	1.11	1.10	1.13
	直流			1.12
3 000	工频	1.25	1.28	1.28
	雷电冲击	1.25	1.28	1.28
	操作冲击(相—地)	1.25	1.20	1.28
	直流			1.20
4 000	工频	1.43	1.44	1.44
	雷电冲击	1.43	1.44	1.44
	操作冲击(相—地)	1.43	1.32	1.44
	直流			1.39

GB 311.1—1997标准计算方法简单, 在一般工程设计中普遍采用。但根据《国家电网公司物资采购标准高海拔外绝缘配置技术规范》^[5], 青海电

力科学试验研究院近年来关于高海拔地区外绝缘研究成果及大量试验数据,得出GB 311.1—1997标准在4 500 m及以下工频及雷电冲击电压海拔修正系数明显较试验研究获得的指数公式所得结论偏低,而操作冲击电压海拔校正因数过于严格,如按照该方法对高海拔地区特高压换流站设备外绝缘进行修正,电气设备的经济性较差,故不建议采用。

IEC 60694标准规定的海拔校正方法与试验研究获得的修正系数差别较小,可以采用该标准对换流站交流电气设备进行高海拔修正。

相比于GB 311.1—1997标准,GB/T 20635标准给出的操作冲击电压修正因数更为严格,对电气设备经济性较差,但该标准提供了直流耐受电压的海拔修正因数,可以在工程中采用。

推荐采用IEC 60694和GB/T 20635规定的方法, $K_a = e^{\frac{m(H-1000)}{8150}}$ (工频电压、雷电冲击电压和相间操作冲击电压 $m=1$, 相对地操作冲击电压 $m=0.75$, 直流电压 $m=0.9$)。

空气间隙放电电压的海拔修正方法

空气间隙的放电电压同时受到空气密度和湿度的影响。空气密度越大,空气的湿度越高,放电电压越高。因此,空气间隙放电电压的修正不仅要考虑海拔引起的气压变化,还要兼顾高海拔地区湿度和温度的变化,合理地确定修正因数。

1. 交流开关场最小空气间隙

对于35~500 kV电压等级三相交流输电系统,根据DL/T 5352—2006《高压配电装置设计技术规程》^[6],海拔大于1 000 m的变电站A值根据附录的修正曲线来确定高海拔地区变电站要求的最小相对地空气间隙和最小相间空气间隙。

规范只给出了海拔2 500 m及以下海拔地区500 kV电压等级配电装置最小空气间隙,对于海拔2 000 m以上地区的500 kV电压等级以及750 kV电压等级三相交流输电系统,推荐采用IEC 60071-2规定的方法,分别对工频电压、操作过电压和雷电过电压的相地、相间空气间隙50%放电电压进行修正,

折算到0 m海拔要求50%放电电压,经查放电特性曲线,得出三种情况下最小相对地空气间隙和最小相间空气间隙,从而得出 A_1 、 A_2 值。

2. 阀厅最小空气间隙

在设计阀厅空气间隙时,由于阀厅设备热耗大,导致温度大幅升高,内部有空调系统调节,大气密度、温度和湿度等都不同于标准气象条件,故应结合环境条件进行校正计算。

IEC 60060-1《高压试验技术》^[7]标准给出了非标准大气条件下高压放电试验数据的修正方法,如表3所示。修正因数由空气密度修正和湿度修正两个部分组成。空气密度修正因数是温度和气压的函数,计算公式为

$$\delta = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t} \quad (4)$$

式中, δ 为相对空气密度,其可由测量的空气气压 b 和环境温度 t 得出; t_0 是标准气象条件下的温度,20℃; b_0 是标准气象条件下的气压,101.325 kPa。

表3 IEC 60060-1规定的非标准大气条件修正方法

标准	IEC 60060-1
修正因数 K_1	$\delta^m [1 + k(h/\delta - 11)]^w$
空气密度指数 m	g 参数
湿度指数 w	g 参数
k	0.010(LI/SI), 0.012(AC), 0.014(DC)

湿度修正因数 $[1 + k(h/\delta - 11)]^w$ 取决于试验电压类型并为绝对湿度 h (单位为 g/m^3)与相对空气密度 δ 比率的函数。空气密度校正指数 m 和湿度校正指数 w 由预放电形式定义的参数 g 决定,因此该方法也称为“ g 参数法”。 g 参数法的计算公式和曲线是根据海拔2 000 m以下地区的试验数据总结出来的,因此,该标准一般适用于海拔2 000 m以下地区。

一般工程设计中采用以下修正方法:假定在站址规定的阀厅气象条件下的50%冲击闪络电压为 U_{50} ,将此电压修正到标准大气条件下,得到标准大气条件的50%闪络电压 $U_{50-corr} = K_a U_{50} / K_1$,然后根据标准气象条件下的净距公式计算要求的最小安全净距。其中, K_a 是海拔修正系数,采用IEC 60071-2规定的方法; $K_1 = k_1 k_2$,为大气修正系

数, k_1 为大气密度修正系数, k_2 为大气湿度修正系数, 采用 IEC 60060-1 规定的方法。该修正方法同时对阀厅内部空气间隙距离考虑了海拔修正、大气密度 (含温度、气压) 修正和湿度修正, 但存在对大气密度重复修正的问题。因为 k_1 已经对大气密度进行了修正, 而 K_a 再次进行了修正, 计算结果偏于保守。因此本文建议修正公式为 $U_{50-corr} = U_{50}/K_1$, 下面对取消 K_a 修正系数后进行计算比对。

由于操作冲击下间隙的饱和特性, 所以阀厅内的操作电压下要求的空气间隙远大于由雷电冲击决定的间隙距离, 因此取操作冲击计算值作为该点的最小间隙距离。根据 DL/T 5426-2009 规程, 用于外绝缘空气净距计算的 50% 闪络电压计算公式为

$$U_{50\%} = U_{SIWL} / (1 - 2\sigma) \quad (5)$$

式中, U_{SIWL} 为设备操作冲击绝缘水平; σ 为空气间隙冲击放电电压变异系数。

在没有实际放电试验曲线时, 换流站最小空气间隙距离的计算公式为

$$U_{50-corr} = 500k'd^{0.6} \quad (6)$$

式中, d 为空气间隙距离; k' 为电极形状特性的间隙系数, 不同的系数代表不同的电极形状。

以海拔高度 2 000 m 换流站为例, 由于阀厅内各点绝缘水平不同, 本文仅以阀厅内绝缘水平最高、空气间隙最大点进行计算。

直流高压极母线阀侧对地操作过电压绝缘水平 1 600 kV, 查图 1 得到 m 值为 0.49, 根据海拔修正公式 $K_a = e^{\frac{H-1000}{8150}m}$, 得到海拔 2 000 m 处修正系数 K_a 为 1.06, 根据式 (6) 计算得出: 考虑 K_a 的空气间隙 d 值为不考虑 K_a 空气间隙的 1.10 倍。该点最小空气间隙为 7 572 mm, 则在不重复考虑海拔修正系数 K_a 的情况下, 阀厅内最大空气间隙点可减少 750 mm 左右。阀厅内其余各点的空气间隙不再一一比对。

在实际设计中, 一般对电气净距的取值在计算结果上留有适当裕度, 但裕度也不能过大, 否则影响经济性。

3. 小结

1) 交流场设备在安排和布置时, 其最小空气

间隙按照标准 DL/T 5352-2006 《高压配电装置设计技术规程》执行。

2) 阀厅内部空气间隙距离修正设计时应考虑大气密度、温度和湿度修正, 但应避免大气密度重复修正, 建议修正公式为 $U_{50-corr} = U_{50}/K_1$ 。

3) 以海拔 2 000 m 处换流站为例, 取阀厅内绝缘水平最高、空气间隙最大点进行计算得出: 不重复考虑海拔修正系数情况下, 空气间隙 d 值可减少 10%。

污闪电压修正

根据 DL/T 5426-2009 《±800 kV 高压直流输电系统成套设计规程》^[8], 对安装在海拔高于 1 000 m 地区的设备, 应考虑海拔对爬电比距的影响。

文献[9]给出了对污闪电压进行海拔修正的简单公式, 即

$$U_{ws} = U_0(1 - 0.035H) \quad (7)$$

式中, H 为海拔, km; U_0 为标准气压下的污闪电压; U_{ws} 为污闪电压。

根据式 (7) 可知, 当海拔分别为 1 500 m 和 2 000 m 时, 其污闪电压的海拔修正系数分别为 1.0 554 和 1.0 753, 因此建议对污闪电压作 6% ~ 8% 的修正。硅橡胶绝缘子的爬距可按瓷绝缘子爬距的 75% 来选取。

结束语

通过分析和计算, 得出如下结论。

1) GB 311.1-1997 标准在 4 500 m 及以下工频及雷电冲击电压海拔修正系数明显较试验研究获得的指数公式所得结论偏低, 而操作冲击电压海拔校正因数过于严格, 对于特高压电气设备经济性较差。

2) 推荐采用 IEC 60694 和 GB/T 20635 规定的方法对高海拔地区电气设备外绝缘试验电压进行修正, $K_a = e^{\frac{H-1000}{8150}m}$ (工频电压、雷电冲击电压和相间操作冲击电压 $m=1$, 相对地操作冲击电压 $m=0.75$, 直流电压 $m=0.9$)。

(下转第 125 页)

参考文献

- [1] 谭浩强. C语言程序设计 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2004: 116-131.
- [2] Forrest M. MiMis. III. Engineers mini-notebook 555 circuits [M]. New York: Tandy Corporation, 1973: 16-18.
- [3] 张义和, 王敏男, 许宏昌, 等. 例说51单片机 (C语言版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 136-143.
- [4] 阎石. 数字电子技术基础 [M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 213-226.
- [5] 周航慈. 基于嵌入式实时操作系统的程序设计技术 [M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 216-226.
- [6] 许维莹, 郑荣焕. Proteus电子电路设计及仿真 [M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 141-156.

(收稿日期: 2015-03-10) EA

(上接第72页)

3) 交流场设备在安排和布置时, 其最小空气间隙按照标准DL/T 5352—2006《高压配电装置设计技术规程》执行。

4) 阀厅内部空气间隙距离修正设计时应考虑大气密度、温度和湿度修正, 但应避免大气密度重复修正, 建议修正公式为 $U_{50-corr} = U_{50}/K_t$ 。

5) 以海拔2 000 m处换流站为例, 取阀厅内绝缘水平最高、空气间隙最大点进行计算得出: 不重复考虑海拔修正系数情况下, 空气间隙 d 值可减小10%。

6) 瓷绝缘子污秽的外绝缘配置按照 $U_{ws} = U_0(1 - 0.035H)$ 进行海拔修正, 以1 000 m为基准, 设备所处的海拔每增加1 000 m, 爬距提高6%~8%。硅橡胶绝缘子的爬距可按瓷绝缘子爬距的75%来选取。

参考文献

- [1] GB 311.1—1997 高压输变电设备的绝缘配合 [S].
- [2] IEC 60071-2—1996 绝缘配合使用导则 [S].
- [3] IEC 60694—2002 高压开关设备和控制设备常用规

范 [S].

- [4] GB/T 20635—2006 特殊环境条件高原用高压电器的技术要求 [S].
- [5] 刘振亚. 国家电网公司物资采购标准高海拔外绝缘配置技术规范 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] DL/T 5352—2006 高压配电装置设计技术规程 [S].
- [7] IEC 60060-1—1989 High-voltage test techniques part 1: general definitions and test requirements [S].
- [8] DL/T 5426—2009 ± 800 kV高压直流输电系统成套设计规程 [S].
- [9] CIGRE brochure 158 Task Force 33.04.01. Polluted insulators: a review of current knowledge [R]. Paris, 2000.
- [10] 聂定珍, 袁智勇. 特高压直流换流站外绝缘海拔修正方法的选择 [J]. 电网技术, 2008, 32 (13): 1-4.
- [11] 赵宇明, 黎小林, 吕金壮, 等. 高海拔地区外绝缘参数海拔修正方法研究 [J]. 南方电网技术, 2011, 5 (2): 59-63.

(收稿日期: 2015-06-18) EA