

# 柔性直流换流站空气净距研究

郭金川, 周敏, 孔志达, 陈荔

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 为了确保柔性直流换流站电气布置的合理性与安全运行, 需要确定合理的空气净距取值, 作为换流站的设计依据。本文详细介绍了基于 g 参数法的换流站空气净距计算原理及方法, 探讨了海拔高度在 2 000 m 以内的大气修正方法。文章以“大型风电场柔性直流输电接入技术与开发”示范工程 +160 kV 换流站为例, 采用 g 参数法进行最小空气净距计算, 仿真计算出最苛刻的运行环境条件, 为大气环境修正提供依据和输入, 得出了换流站的空气净距计算方法和工程间隙取值。

**关键词:** 空气净距; g 参数法; 柔性直流; 环境修正

**中图分类号:** TM721

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2015)S1-0050-05

## Study on Air Clearance of Voltage Source Converter Station

GUO Jinchuan, ZHOU Min, KONG Zhida, CHEN Li

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** To ensure rationality of voltage source converter station layout and operational safety, reasonable air clearance is needed as design basis. G parameter method is adopted to calculate the minimum air clearance, and atmospheric correction is discussed when altitude is below 2 000 m. +160 kV converter station for large-scale wind plant integrated with power system based on VSC technology demonstration project is used as an example to analyze air clearance calculating method using g parameter method. The harshest operating condition is calculated by simulation as input of atmospheric correction, and actual air clearance for design is determined.

**Key words:** air clearance; g parameter method; voltage source converter; atmospheric correction

柔性直流输电技术是一种基于电压源换流器、全控型可关断器件和脉宽调制 PWM 技术的新型直流输电技术, 具有可控性强、对环境影响小、对系统短路容量要求小、能提高系统动态稳定性等优点, 具有广阔的应用前景, 适合应用于异步电网互联、可再生能源并网、城市电网供电、孤岛供电、分布式发电并网等领域<sup>[1-5]</sup>。

空气净距取值是换流站设计的重要依据, 影响换流站的布置和安全运行。目前随着土地资源紧缺及环境友好的要求, 换流站的电气布置愈发紧凑, 往往在关键点处的电气净距显得比较紧张, 因此带电距离的校核很关键。柔性直流输电, 由于其灵活性, 应用场合广泛, 电压等级多样, 暂时还没有规范或标准提供每种电压等级所对应的空气净距值,

所以具体工程中需要计算空气净距。

## 1 换流站空气净距计算原理

空气净距一般由工频耐压、冲击耐压决定。但是往往工频耐压要求的空气净距小于冲击电压要求的空气净距, 对于 220 kV 及以下电压等级, 当标准雷电冲击电压与短时工频耐压的比值大于 1.7 时, 短时工频耐压对空气净距结果的影响可以忽略<sup>[6]</sup>。

根据通用的直流工程经验, 直流侧空气净距计算一般采用 g 参数法。确定阀厅与直流场空气间隙时, 首先需要明确换流站的避雷器配置和绝缘配合, 确定各点的耐压水平, 然后将换流站在规定的阀厅、直流场气象条件下的 50% 冲击闪络电压  $U_{50}$  修正到标准大气条件下的 50% 冲击闪络电压, 然后根据标准气象条件下的空气净距公式计算要求的最小安全净距。

实际大气环境下, 空气间隙的临界冲击闪络电压为:

收稿日期: 2015-11-01

作者简介: 郭金川(1984), 女, 河南平顶山人, 工程师, 硕士, 主要从事电网咨询设计(e-mail) guojinchuan@gedi.com.cn。

$$U_{50} = \frac{K_w U_w}{(1 - 2\sigma)} \quad (1)$$

修正到标准大气条件下的临界冲击闪络电压为:

$$U_{50-corr} = \frac{K_a U_{50}}{k_1 k_2} \quad (2)$$

雷电冲击下, 最小空气净距计算公式为:

$$d = \frac{U_{50-corr}}{540K} \quad (3)$$

操作冲击下, 最小空气净距计算公式为:

$$d = \sqrt[0.6]{\frac{U_{50-corr}}{500K}} \quad (4)$$

式中:  $U_w$  为避雷器雷电/操作冲击保护水平, 由绝缘配合决定;  $\sigma$  为间隙的雷电/操作冲击放电电压的标准偏差;  $K_w$  为裕度系数;  $k_1$  为大气密度修正系数;  $k_2$  为湿度修正系数;  $K_a$  为海拔修正系数;  $K$  为间隙系数, 根据电极形状和设计惯例确定。

根据雷电冲击和操作冲击计算得到的空气净距, 取两者中的较大者作为最小空气净距要求值。实际设计中, 应根据不同电极形状, 选择不同的电极系数进行计算。根据求得的最小空气净距, 再乘以合适的安全系数作为工程实际的空气间隙进行设计。

需要说明的是, 由于相对空气密度和湿度修正公式的适用范围,  $g$  参数法修正适用范围限制在海拔 2 000 m 及以下<sup>[7]</sup>。若海拔高于 2 000 m, 需要利用试验验证理论计算的合理性。

## 2 大气环境修正

### 2.1 大气密度修正系数 $k_1$

空气密度对间隙的击穿电压有较大的影响。空气密度变化时, 分子间的平均距离发生变化, 直接影响到电子的平均自由行程, 从而间接影响间隙气体的电离过程, 改变间隙的击穿电压。

当海拔高度增加时, 空气压力下降, 密度减小, 所以电子的碰撞电离过程中的平均自由程变大, 在运动过程中可以积累更大的能量, 在间隙距离较大的情况下, 气体的电离过程变得更加剧烈, 所以间隙的击穿电压下降。

当温度增加时, 电子的自由行程增加, 积累的动能也增加, 更容易造成气体电离; 另外, 温度增加, 气体分子本身的热动能也增加, 所以导致气体的热电离增加, 这也会导致击穿电压的下降。

大气密度修正系数  $k_1$  为:

$$k_1 = \delta^m; \quad (5)$$

空气的相对密度  $\delta$  为:

$$\delta = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (6)$$

空气压力  $b$  为:

$$b = 101.3 e^{-\frac{H}{8150}} (kPa) \quad (7)$$

式中:  $H$  为海拔高度;  $t$  为空气温度; 标准气象条件温度  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , 大气压力  $b_0 = 101.3 \text{ kPa}$ , 绝对湿度  $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$ ; 海拔高度  $H_0 = 0\text{m}$ ;  $m$  与  $g$  有关。

### 2.2 湿度修正系数 $k_2$

湿度对击穿电压的影响比较复杂。实验表明, 均匀电场中的空气的放电电压随湿度的增加而增加, 但程度极微。但在极不均匀电场中, 空气的湿度对提高间隙击穿电压的效应很明显。

湿度修正系数  $k_2$  为:

$$k_2 = k^w \quad (8)$$

式中:  $w$  与  $g$  有关;  $k$  与绝对湿度  $h$ 、相对空气密度  $\delta$  有关。

对于冲击耐受电压:

$$k = 1 + 0.010(h/\delta - 11) \quad (9)$$

但工程实际中, 一般只给出相对湿度, 需通过相对湿度和环境温度换算得到绝对湿度。绝对湿度为:

$$h = \frac{6.11 \cdot R \cdot e^{\frac{17.6-t}{243+t}}}{0.4615 \cdot (273 + t)} \quad (10)$$

式中:  $R$  为相对湿度, %。

### 2.3 $m$ 和 $w$ 与 $g$ 的关系

$g$  参数定义如下:

$$g = \frac{U_{50}}{500L\delta k} \quad (11)$$

式中:  $L$ , 最小放电距离, m, 与最小空气净距  $d$  为同一数值。

$m$  和  $w$  与  $g$  的关系如表 1 所示。

表 1  $m(w) - g$  的关系

Table 1 Value of $m(w)$ as A Function of the Parameter $g$		
$g$	$m$	$w$
$<0.2$	0	0
$0.2 \sim 1.0$	$g(g-0.2)/0.8$	$g(g-0.2)/0.8$
$1.0 \sim 1.2$	1.0	1.0
$1.2 \sim 2.0$	1.0	$(2.2-g)(2.0-g)/0.8$
$>2.0$	1.0	0

### 2.4 海拔修正系数 $K_a$

海拔高度增加, 空气压力下降, 会导致空气的

击穿电压降低。海拔修正系数  $K_a$  为：

$$K_a = e^{n \frac{H}{8150}} \quad (12)$$

式中：对于雷电冲击电压和工频耐受电压， $n=1$ ；对于操作冲击电压， $n$  随冲击耐受电压的增大而减小。

### 3 算例分析

本文以“大型风电场柔性直流输电接入技术与开发”示范工程 +160 kV 换流站为例分析柔性直流换流站的空气净距计算。

#### 3.1 避雷器保护配置方案

换流站内设备的主要保护装置为金属氧化锌避雷器，避雷器保护配置方案如图 1 所示。

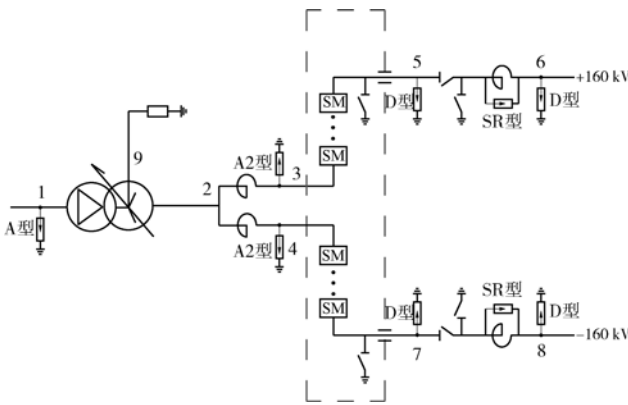


图 1 换流站避雷器配置方案

Fig. 1 Surge Arrester Configuration Scheme

换流站避雷器保护水平、各点绝缘水平如表 2~表 4 所示。

#### 3.2 环境条件

换流站采用全户内布置，设备运行环境条件如表 5 所示。

#### 3.3 阀厅与直流场空气净距

一般，温度越高、湿度越小时，对空气净距的要求越大。但由于电极形状、冲击电压、温湿度等的相互综合影响，针对不同的冲击电压、电极形状，换流站内阀厅与直流场极端环境条件并非完全一致。在实际工程选取时，根据阀厅与直流场运行环境边界和仿真结果，结合实际工程经验来选择工程计算时的极端环境条件。

根据工程的实际环境条件，以阀厅极线对地的空气净距为例，对不同温度  $t$  (10 ~ 45 °C) 和不同相对湿度  $R$  (25% ~ 60%) 下，对电极形状系数

$K=1.15$  的空气净距进行计算，计算结果图 2~图 5 所示。

表 2 换流站避雷器保护水平和配合电流

Table 2 Surge Arrester Protective Level and Coordinating Current

类型	CCOV/ MCOV/kV	LIPL/配合电 流/(kV/kA)	SIPL/配合电 流/(kV/kA)	避雷器能 量/MJ
A	102	266/10	240/1	>1
A2	168	302/10	271/2	>2.57
D	168	302/10	271/2	>4.5
SR	-	238/5	158/1	-

表 3 换流站各点端对地绝缘水平

Table 3 Protect Level and Specified Insulation Withstand Voltage of Location Terminal-to-ground

位置	1	2	3-4	5-7	6-8	9
CCOV/kV	102	168	168	168	168	-
保护避雷器	A	-	A2	D	D	-
LIPL/kV	266	-	302	302	302	-
SLI WV/kV	450	550	550	550	650	325
裕度/%	71	-	82	82	82	-
SIPL/kV	240	-	271	271	271	202.7
SSI WV/kV	325	450	450	450	450	250
裕度	-	-	-	66%	66%	-
短时工频耐受/kV	185	275	275	-	-	140

表 4 换流站各点端对端绝缘水平

Table 4 Protect Level and Specified Insulation Withstand Voltage of Location Terminal-to-terminal

位置	2-3	3-5	5-6	5-7(6-8)
LIPL/kV	-	-	246	-
SLI WV/kV	550	575	325	850
裕度/%	-	-	32	-
SIPL/kV	-	-	205	-
SSI WV/kV	450	575	250	650
裕度	-	-	-	-

表 5 换流站设备环境条件

Table 5 Ambient Condition

编号	项目	青澳	金牛	塑城
1	海拔高度	~80 m	~20 m	~2 m
2	交流场设备环境	户内，带通风		
2.1	温度	<40 °C (变压器室 <45 °C)		
2.2	湿度	/		
3	阀厅与直流场设备环境	全封闭户内，微正压，带通风和空调		
3.1	温度	10 ~ 45 °C		
3.2	湿度	25% ~ 60% RH		

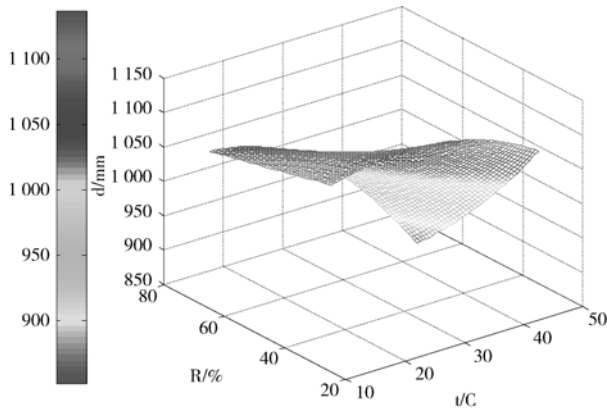


图 2 温度、相对湿度与空气净距关系  
( $BIL = 550 \text{ kV}$ ,  $K = 1.15$ )

Fig. 2 Correlation Among Temperature, Relative Humidity and Minimum Air Clearance( $BIL = 550 \text{ kV}$ ,  $K = 1.15$ )

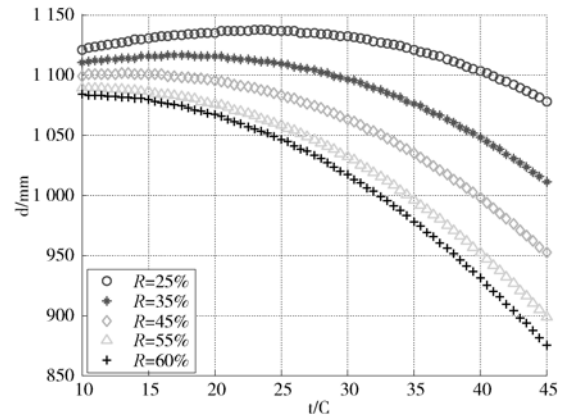


图 4 温度与空气净距关系 ( $BIL = 550 \text{ kV}$ ,  $K = 1.15$ )

Fig. 4 Correlation Between Temperature and Minimum Air Clearance( $BIL = 550 \text{ kV}$ ,  $K = 1.15$ )

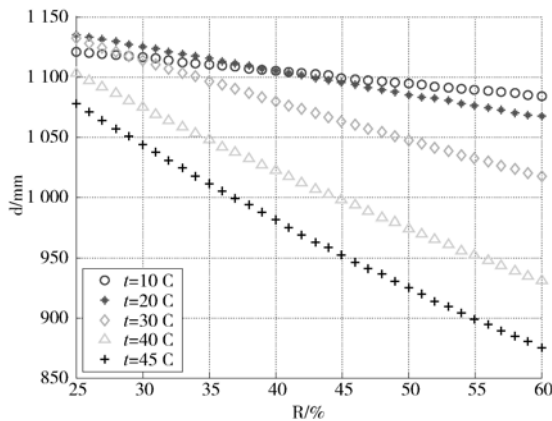


图 3 相对湿度与空气净距关系 ( $BIL = 550 \text{ kV}$ ,  $K = 1.15$ )

Fig. 3 Correlation Between Relative Humidity and Minimum Air Clearance

图 2~图 4 显示, 在温度范围为  $10 \sim 45^\circ\text{C}$ , 湿度范围为  $25\% \sim 60\%$  的边界条件下, 相同温度, 湿度越小时, 对空气净距的要求越大; 相同湿度, 温度为  $20^\circ\text{C}$  左右 (约为  $23^\circ\text{C}$ ) 时, 对空气净距的要求最大。所以, 此种计算条件下, 按照温度  $20^\circ\text{C}$  左右 (约为  $23^\circ\text{C}$ ), 相对湿度  $25\%$  计算得到的空气净距最大。由于在不同的过电压水平及间隙系数下, 计算的空气净距最大值时的温度会略微变化, 但都在  $20^\circ\text{C}$  左右, 同时结合常规直流工程空气净距计算环境取值经验, 阀厅与直流场的极端环境条件取值为: 温度  $t = 20^\circ\text{C}$ ; 相对湿度  $R = 25\%$ 。

按照上述苛刻的环境条件, 阀厅与直流场的最小空气净距要求如表 6~表 7 所示。

表 6 阀厅与直流场各点对地的最小空气净距

Table 6 Minimum Air Clearance of Location Terminal-to-ground At Different Gap Factor in Valve Hall and DC Yard

位置	$BIL/\text{kV}$	雷电冲击决定的空气净距/mm				$SIL/\text{kV}$	操作冲击决定的空气净距/mm			
		$K = 1.15$	$K = 1.2$	$K = 1.3$	$K = 1.4$		$K = 1.15$	$K = 1.2$	$K = 1.3$	$K = 1.4$
3(4)	550	1 135	1 120	1 091	1 063	450	924	838	697	598
5(7)	550	1 135	1 120	1 091	1 063	450	924	838	697	598
6(8)	550	1 135	1 120	1 091	1 063	450	924	838	697	598
	650 <sup>a)</sup>	1 342	1 324	1 289	1 257	450	924	838	697	598

注: 间隙系数  $K$  适用以下数值:  $K = 1.15$ , 导线-面;  $K = 1.2$ , 环-面;  $K = 1.3$ , 导线-导线, 环-环, 导线-环;  $K = 1.4$ , 棒-棒。

表 7 阀厅与直流场各端对端的最小空气净距

Table 7 Minimum Air Clearance of Location Terminal-to-terminal At Different Gap Factor in Valve Hall and DC Yard

位置	$BIL/\text{kV}$	雷电冲击决定的空气净距/mm				$SIL/\text{kV}$	操作冲击决定的空气净距/mm			
		$K = 1.15$	$K = 1.2$	$K = 1.3$	$K = 1.4$		$K = 1.15$	$K = 1.2$	$K = 1.3$	$K = 1.4$
3-5	575	1 187	1 171	1 141	1 112	575	1 389	1 294	1 117	940
5-6	325	671	662	645	629	250	310	288	252	223
5-7(6-8)	850	1 755	1 731	1 686	1 643	650	1 680	1 587	1 389	1 190

表8 阀厅与直流场空气净距要求

Table 8 Actual Air Clearance for Design of Location in Valve Hall and DC Yard

位置	说明	型式	间隙类型	雷电冲击耐 受电压/kV	操作冲击耐 受电压/kV	间隙系数	最小空气 净距/mm	工程间隙 距离/mm
3(4)	GIS 阀侧相对地	相对地	导线(面)	550	450	1.15	1 135	1 300
3(4)	GIS 阀侧相间	相间	导线-导线	-	-	-	-	1 500
3~4	GIS 阀侧相间	相间	导线-导线	-	-	-	-	1 500
3~5	阀两端	相间	环-环	575	575	1.3	1 141	1 500
5(7)	直流母线阀侧极对地	相对地	导线-面	550	450	1.15	1 135	1 500
5~7	直流母线阀侧极间	相间	导线-导线	850	650	1.3	1 686	2 000
6(8)	直流母线出线侧极对地	相地	导线-面	550/650 <sup>e)</sup>	450	1.15	1 135/1 342	1 500
6~8	直流母线出线侧极间	相间	导线-导线	850	650	1.3	1 686	2 000
5~6 (7~8)	直流母线阀侧-出线侧	相间	导线-导线	325	250	1.3	645	1 500

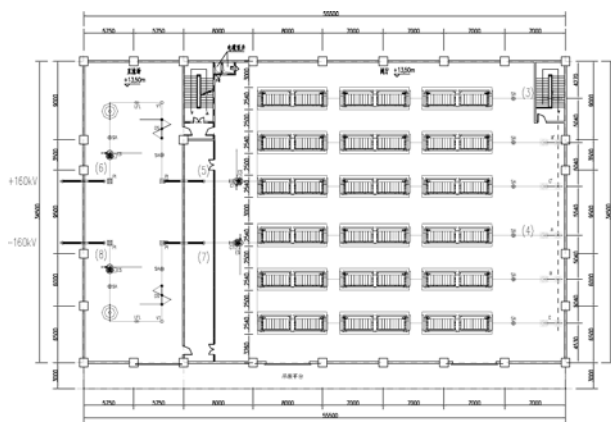


图5 阀厅与直流场平面布置图

Fig. 5 Valve Hall and DC Yard Layout

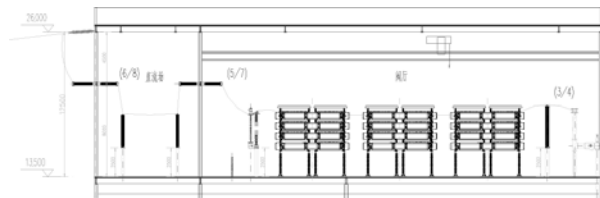


图6 阀厅与直流场断面图

Fig. 6 Valve Hall and DC Yard Section

根据表6~表7, 结合平面布置方案<sup>[8]</sup>和工程经验, 本工程换流站阀厅与直流场最小电气净距应符合表8要求。

#### 4 结论

本文利用  $g$  参数法进行柔性直流换流站空气净距计算, 仿真结果表明, 在温度范围为  $10 \sim 45^\circ\text{C}$ , 湿度范围为  $25\% \sim 60\%$  的边界条件下, 温度  $20^\circ\text{C}$ 、相对湿度  $25\%$  是相对苛刻的环境条件, 以此来进行环境条件修正来计算空气净距, 为换流站布置提供设计依据。

#### 参考文献:

- [1] MICHAEL B, BRIAN J. The ABCs of HVDC Transmission Technologies [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5 (2): 32-44.
- [2] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D, et al. VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: an Overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (3): 592-602.
- [3] AMIRNASER Y, REZA I. Voltage-sourced Converters in Power Systems [M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [4] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.  
TANG Guangfu. Voltage Source Converter Based HVDC Power Transmission Technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [5] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 1-25.  
XU Zheng, TU Qingrui, GUAN Minyuan, et al. Voltage Source Converter Based HVDC Power Transmission Systems [M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 1-25 (in Chinese).
- [6] IEC 71-2—1996, Insulation Co-ordination-Part 2: Application Guide [S].
- [7] IEC 60060-1—2010, High-voltage Test Techniques-Part 1: General Definitions and Test Requirements [S].
- [8] 郭金川, 李扶中, 肖国锋, 等. 大型风电场柔性直流输电接入技术研究与开发示范工程换流站紧凑型布置研究报告 [R]. 广州: 广东省电力设计研究院, 2012.  
GUO Jinchuan, LI Fuzhong, XIAO Guofeng, et al. Compact General Layout Study Report of Converter Station for Large-scale Wind Plant Integrated With Power System Based on VSC Technology Demonstration Project [R]. Guangzhou: Guangdong Electric Power Design Institute.

(责任编辑 林希平)