

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.008

±1 100 kV 特高压直流换流站直流场导体的电磁计算与设计选型

姚斌¹, 施世鸿², 陈荔²

(1. 国家电网公司 直流建设分公司, 北京 100052; 2. 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: ±1 100 kV 特高压直流输电工程尚属首次提出, 尤其是对于 ±1 100 kV 的直流场设计, 无成熟经验可借鉴, 开展 ±1 100 kV 导体计算和选型研究, 有利于直流场的设计及工程的安全、可靠和经济运行。从电晕和合成场强两个方面对导体分别建立了数学计算模型, 并利用 matlab 进行了仿真建模, 计算了导体表面最大场强与起始电晕, 计算了导体的空间合成场强, 以及不同高度下的地面合成场强。根据计算的结果, 结合工程实际, 分户内布置和户外布置两种情况, 分别给出了 ±1 100 kV 的导体设计选型建议。

关键词: ±1 100 kV 特高压换流站; 导体设计; 电晕; 合成场强

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0037-05

Electromagnetic Environment Calculation and Design of ±1 100 kV DC Conductor in UHVDC Converter Station

YAO Bin¹, SHI Shihong², CHEN Li²

(1. SGCC DC Construction Branch Company, Beijing 100052, China;

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

Abstract: ±1 100 kV UHVDC transmission project is the first time to construct, especially for the ±1 100 kV DC yard design, there is no experience to learn. the calculation and design of ±1 100 kV DC switchyard conductor are important parts of the converter station design, which is beneficial to the safe, reliable and economical operation of the project. In this paper, the mathematica model of DC conductor is proposed considering the corona and total electric field strength, which is simulated by the matlab. The maximum surface electric field at the conductor and original corona are calculated. Also the electric field strength in different space is calculated, and then we can get the electric field strength at the floor, while the conductors are installed at different height. Finally, suggestions of ±1 100 kV conductor design are presented, including both indoor and outdoor equipment layout.

Key words: ±1 100 kV UHVDC converter station; conductor design; corona; total electric field strength

随着我国西电东送战略的实施和直流输电技术的发展, 已有数条 ±800 kV 特高压直流输电工程建成投产^[1-4]。而我国能源基地与负荷中心的超远距离以及全球能源互联网战略需要输电能力更强、损耗更低的直流输电技术。经论证^[5-11], ±1 100 kV 电压等级特高压直流输电经济技术是合理可行的。±1 100 kV 特高压直流输电工程尚属首次提出, 尤其是对于 ±1 100 kV 的直流场设计, 无成熟经验可

借鉴。±1 100 kV 特高压的直流导体计算与选型设计是 ±1 100 kV 特高压换流站直流场设计的重要内容。导体的载流量与动热稳定是导体设计必须满足的首要条件, ±1 100 kV 昌吉—古泉特高压直流工程的额定电流为 5 455 A, 而 8 × JL-1 250、6 × LGJK-1 000、Φ450/430、Φ400/380、Φ350/330 等直流场常用的几种导线及管母其载流量经计算均大于 6 300 A, 可见其不是控制因素。户外直流管母线的设计除需满足载流量要求外, 还需考虑管母线产生的电磁环境, 主要包括电晕特性、合成场强、离子流密度、无线电干扰和可听噪声等方面。导体设计的基本原则是确保导体不会产生电晕, 地面合

收稿日期: 2016-05-27

作者简介: 姚斌(1975), 男, 江西南昌人, 高级工程师, 硕士, 主要从事换流站工程建设管理工作(e-mail)1723638688@qq.com。

成场强满足规范的要求,离子流密度、无线电干扰和可听噪声不超过相关规范的要求^[12-13]。一般来说,只要管母线满足电晕特性要求,离子流密度、无线电干扰和可听噪声均能满足限值指标要求。因此下文重点分析了电晕与地面合成场强,对于无线电干扰和可听噪声方面不再展开。

人体在电场中的感受取决于人体对地绝缘和空气干燥程度。研究表明,地面合成场强控制在 25 kV/m 以下时,人体不会有不适反应。我国行业标准^[12]规定:好天气时地面最大合成电场不超过 30 kV/m。地面最大离子流密度不超过 100 nA/m²。本文按 ±1 100 kV 直流导体的地面最大合成电场不大于 25 kV/m 来考虑。

一般来说,当导体电晕起始电场强度大于表面最大电场强度,不产生饱和电晕的情况时,地面合成电场强度主要为标称电场,地面离子电流密度几乎为零。在满足电场强度小于 25 kV/m 的要求下离子流均能满足小于 100 nA/m² 的要求,离换流站围墙 450 m 周围的无线电干扰均满足不超过 40 dB (μV/m) 的要求,因此直流场导体计算与选型设计的控制条件在于电晕和合成场强。本文基于 ±1 100 kV 换流站的特点,同时根据 ±500 kV、±800 kV 换流站直流导体的研究成果和运行经验,重点从电晕、合成场强两方面进行计算及仿真,对 ±1 100 kV 换流站的直流导体选型进行计算优化,提出推荐结论,可供设计参考。

1 导体计算模型

1.1 临界电晕计算

电晕起始电场强度是指导体起始发生电晕时,导体表面场强的临界值。如果认为直流导体起晕电场的峰值相同,这样可以把皮克公式转换成如下的直流形式:

$$g_0 = 30 m\delta \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r\delta}}\right) \quad (1)$$

式中: g_0 为标准大气条件下导体表面电晕起始电场强度, kV/cm; m 为反映导体表面状况的粗糙系数; r 为导体半径, cm; δ 为相对空气密度。

$$\delta = \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right) \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

式中: P_0 为标准大气压, 取为 101.3 kPa; P 为换流站的实际大气压, kPa; t_0 为标准环境温度, 取

为 20 °C; t 为换流站的实际温度, °C。

对于直流导体的 m 取值, 一般为 0.4 ~ 0.6 之间。±1 100 kV 直流换流站中直流导体可使用的类型有软导线和管母, 对于软导线, 取 $m = 0.5$, 对于管母, 取 $m = 0.6$ 。

1.2 导体表面最大场强

分裂导线的表面电场计算方法为:

1) 把分裂导线等效为单根导线, 其等效直径 D_e 为:

$$D_e = D^n \sqrt{\frac{nd}{D}} \quad (3)$$

式中: 导线的分裂根数为 n ; 各子导线中心圆的直径为 D , cm; 子导线的直径为 d , cm。

2) 每极等效导线的总电荷 Q 可由马可斯威尔电位系数法决定, 根据极导线的电压、电位系数与待求电荷的关系, 可列出方程组为:

$$[p][Q] = [U] \quad (4)$$

式中: Q 为电荷矩阵; U 为电压矩阵; p 为电位系数矩阵, 其电位系数为:

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{4H}{d}\right) \quad (5)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{L'_{ij}}{L_{ij}}\right) \quad (6)$$

式中: p_{ii} 和 P_{ij} 分别为自电位和互电位系数; H 为等效极导线或地线的对地平均距离; L_{ij} 为第 i 根等效导/地线与第 j 根等效导/地线间的距离; L'_{ij} 为第 i 根等效导/地线与第 j 根等效导/地线镜像间的距离; ϵ 为介电空气常数。

3) 导线的平均表面场强可以由式(7)决定:

$$g = \frac{Q}{\pi\epsilon nd} \quad (7)$$

导线的最大表面场强由式(8)决定:

$$g_{\max} = g \left[1 + (n-1) \frac{d}{D}\right] \quad (8)$$

1.3 合成场强

合成场强是导线所带电荷产生的静电场与空间电荷产生的电场两部分叠加的结果。其中静电场又称为标称电场, 与导线排列的位置相关。合成场强的大小取决电晕的严重程度, 最大合成电场有时可达标称电场的 3 ~ 5 倍。

直流电场与交流电场不能等同, 正常运行的直流导线, 没有电容耦合, 使得高压直流导线的合成电场要比同一电压等级的交流导线高。

在离子运动与静电场的共同作用下产生了合成电场,其计算需兼顾两方面。为简化起见,忽略风与离子扩散影响,可得式(9)~式(11):

$$\nabla \gamma = 0 \quad (9)$$

$$\gamma = mE_z \sigma \quad (10)$$

$$\nabla E_z = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (11)$$

式中: γ 为离子流密度; E_z 为合成场强; σ 为空间电荷密度; ε_0 为空气介电常数; m 为离子迁移率。

根据 Deutsch 假设,导体起晕后,表面电场保持起始场强值不变, m 为恒定值,导体空间只存在单一离子,则合成场强 E_z 满足如下关系:

$$E_z = HE \quad (12)$$

式中: E 为标称电场; H 为标量函数,也称为标称电场放大系数。

令 E_x 和 E_y 为标称场强 E 在 x 和 y 方向的分量,管母线的坐标为 x_i ,其镜像坐标为 y_i 。 Q_i 为管母线的等效线电荷。则利用数值计算方法,对导线的电力线分布进行模拟,以电力线做为积分路径,进行标称场强 x 和 y 方向上分量 E_x 和 E_y 积分计算,得:

$$E_x = \int \frac{Q_i}{2\pi\varepsilon_0} \frac{x - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (13)$$

$$E_y = \int \frac{Q_i}{2\pi\varepsilon_0} \frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (14)$$

联合式(9)~式(12),可得放大系数 H 与空间电荷密度 σ 的计算式

$$\frac{1}{\sigma^2} = \frac{2}{\sigma_e H_e \varepsilon_0} \int_{\varphi}^V \frac{d\varphi}{E^2} + \frac{1}{\sigma_e^2} \quad (15)$$

$$H^2 = \frac{2\sigma_e H_e}{\varepsilon_0} \int_{\varphi}^V \frac{d\varphi}{E^2} + H_e^2 \quad (16)$$

$$H_e = \left| \frac{E_0}{E_{\max}} \right| \quad (17)$$

式中: H_e 、 σ_e 分别为管母线起晕后的标称电场放大系数与电荷密度; φ 、 V 分别为空间标称电位与管母线运行电压; E_0 为起始电晕场强。

由式(17)可求得 H_e ,将 H_e 和 σ_e 代入式(15)~式(16)可求得空间任意一点的放大系数 H 与电荷密度 σ 。由式(13)~式(14)可求出空间任意一点的标称场强 E 。将 H 与 E 代入式(12)可求得合成场强 E_z 。

2 仿真计算

结合 ±800 kV 换流站设计运行经验,根据

±1 100 kV 直流电压等级特点,重点对 $\Phi 350$ 、 $\Phi 400$ 及 $\Phi 450$ 三种 ±1 100 kV 铝管母线以及 6 分裂 LGKK-600 mm²、6 分裂 LGJK-1 000 mm²、8 分裂 JL1/G2A-1 250 mm² 三种 ±1 100 kV 软导线,采用 Matlab 软件,根据上述导体计算模型,进行了建模仿真计算。导体临界电晕电场计算结果见表 1 所示。

表 1 导体临界电晕电场计算结果

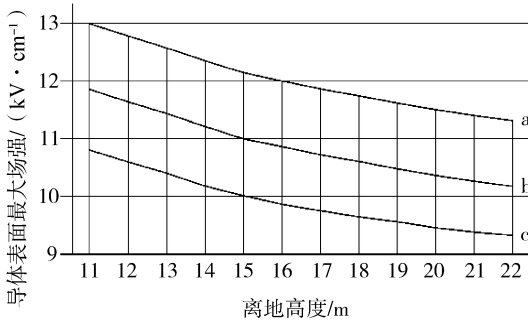
Tab. 1 Calculation results of Conductor critical corona electric field

导体型号	次导体直径/mm	包络圆直径/mm	导体电晕起始场强/(kV·cm ⁻¹)
6×LGKK-600 mm ²	51	450	17.83
6×LGJK-1 000 mm ²	51	450	17.83
8×JL1/G2A-1 250 mm ²	47.85	600	17.92
Φ350	350	—	19.30
Φ400	400	—	19.21
Φ450	450	—	19.14

图 1 和图 2 分别给出了不同离地高度下 $\Phi 350$ 、 $\Phi 400$ 及 $\Phi 450$ 铝管母线以及 6 分裂 LGKK-600 mm²、6 分裂 LGJK-1 000 mm²、8 分裂 JL1/G2A-1 250 mm² 软导线的表面最大场强。其中 6 分裂 LGKK-600 mm² 与 6 分裂 LGJK-1 000 mm² 两种导线由表 1 可知其次导线和包络圆的直径是相同的,由式(7)~式(8)可知,二者的表面最大场强相同,因此图 2 中二者曲线重合,后图 4 同理。由图 1 和图 2 可见 ±1 100 kV 管母线表面最大场强较小,在满足空气净距(13 m)的情况下,管母线表面最大场强均小于其临界电晕场强,均不起晕。软导线的表面最大场强偏大,对于 6 分裂导线,在离地高度 30 m 的情况下,其表面最大场强依然大于起晕场强(17.83 kV/cm);对于 8 分裂导线,当离地高度大于 21 m 时,其表面最大场强将小于起晕场强(17.92 kV/cm)。

地面合成电场的大小与导线安装高度有关,当导线安装高度越高,则地面合成场强越小。图 3 及图 4 分别给出了 $\Phi 350$ 、 $\Phi 400$ 及 $\Phi 450$ 的铝管母线以及 6 分裂 LGJK-600 mm²、6 分裂 LGJK-1 000 mm²、8 分裂 JL1/G2A-1 250 mm² 软导线地面最大电场强度与导线高度间的关系。从计算结果可见,若要地面最大电场强度小于 25 kV/m, $\Phi 350$ 、 $\Phi 400$ 、 $\Phi 450$ 的铝管母线及 6 分裂 LGKK6×600 mm²、6 分裂 LGJK-1 000 mm²、8 分裂 JL1/G2A-1 250 mm² 软导线对地高度需分别不小于 17 m, 17.2

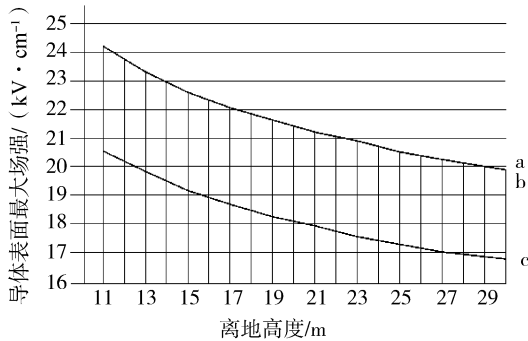
m, 17.5 m, 17.5 m, 17.5 m, 18.2 m。



注: a—350 mm; b—400 mm; c—450 mm。

图1 ±110 kV 铝管母线表面最大场强(Φ350、Φ400、Φ450)

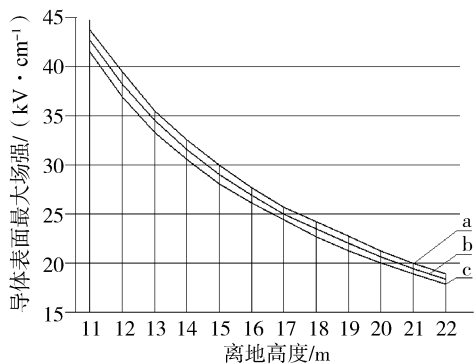
Fig. 1 Maximum field strength of ±110 kV aluminum tube bus surface(Φ350、Φ400、Φ450)



注: a—6×LGKK-600 mm²; b—6×LGKK-1 000 mm²;
c—8×JL1/G2A-1 250 mm²。

图2 ±110 kV 分裂软导线的表面最大场强
(6×LGKK-600 mm²、6×LGJK-1 000 mm²、
8×JL1/G2A-1250 mm²)

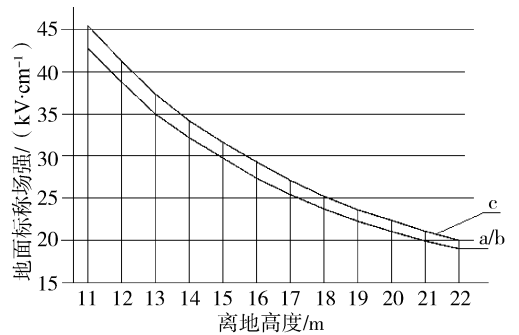
Fig. 2 Maximum surface field strength of ±110 kV split flexible conductor(6×LGKK-600 mm²、6×LGJK-1 000 mm²、
8×JL1/G2A-1 250 mm²)



注: a—350 mm; b—400 mm; c—450 mm。

图3 ±110 kV 管母线地面最大电场强度与高度间的曲线
(Φ350、Φ400、Φ450)

Fig. 3 Relationship curve between the maximum electric field at the ground with the height of ±110 kV tube bus



注: a—6×LGKK-600 mm²; b—6×LGKK-1 000 mm²;
c—8×JL1/G2A-1 250 mm²。

图4 ±110 kV 地面最大电场强度与软导线高度间的关系
(6×LGKK-600 mm²、6×LGJK-1 000 mm²、
8×JL1/G2A-1 250 mm²)

Fig. 4 Relationship between the maximum electric strength at the ground with the height of ±110 kV split flexible conductor

3 导体设计选型

由图1可知,三种管径的管母线在干燥状态下均不起晕。根据图3,当管母对地高度大于17.5 m时,地面合成场强满足小于25 kV/m的要求。从图2可知,软导线的表面最大场强偏大,对于6分裂导线,在离地高度30 m的情况下,其表面最大场强依然大于起晕场强(17.83 kV/cm);对于8分裂导线,当离地高度大于21 m时,其表面最大场强将小于起晕场强(17.92 kV/cm)。因此,对于没有金具等其他辅助保护措施的情况下,建议采用8分裂导线,且离地高度需大于19.5 m。

由图4可见,若采用6分裂LGJK-600 mm²或LGJK-1 000 mm²,对地高度大于17.5 m时,导线下方产生的合成场强可满足小于25 kV/m。若采用8分裂JL1/G2A-1 250 mm²,对地高度大于18.2 m时,导线下方产生的合成场强可满足小于25 kV/m。

3.1 户内直流场导线选型

如果直流场设备户内布置,若采用不进人的运行方案,可不考虑导线下方产生的合成场强对人的影响,此时可设置户内直流场的导体选型原则为:(1)满足空气净距;(2)不起晕。另外,对于室内跳线应尽量短,且在均压环保护范围内,因此软导线不易起晕。因此对于户内直流场,跳线可以采用6分裂的软导线,考虑到载流量的问题,推荐软导线采用6分裂LGJK-1 000 mm²。对于管母线,

$\Phi 350$ 、 $\Phi 400$ 及 $\Phi 450$ 的管母线均不起晕,因此,管母对地高度只需满足空气净距(13 m)的要求即可。在工程设计时,考虑设备支架(约 2.5 m)等因素,另外再考虑一定的裕度,建议户内直流场管母对地高度取 17~18 m。

3.2 户外直流场导线选型

如果直流场设备户外布置,除管母线不可起晕外,软导线也需要不起晕。从上节分析可见,仅当采用 8 分裂 JL1/G2A-1 250 mm²,且对地高度大于 21 m 时,可满足导线不起晕。当 8 分裂 JL1/G2A-1 250 mm² 对地高度大于 18.2 m 时,导线下方产生的合成场强也满足小于 25 kV/m 的要求。另外, $\Phi 350$ 、 $\Phi 400$ 及 $\Phi 450$ 的管母线对地高度大于 21 m 时,均不起晕,且导线下方产生的合成场强也满足小于 25 kV/m 的要求。考虑一定裕度后,推荐户外直流场导线对地高度取 22 m。

4 结论

1) $\pm 1\ 100\ \text{kV}$ 换流站导体的选型控制因素为站内电磁环境,导体载流量和导体热稳定不是主要控制因素。

2) 导体产生的合成场强与导体直径、导线高度、起晕场强等有关系。导线半径越大,起晕场强越小,环境越恶劣、越容易起晕。加载相同电压时,导体半径越大,导体表面最大场强越小。随着导体对地高度增加,导体表面最大场强及地面最大合成场强均减小。当导体表面没有达到起晕场强时,直径大的导体,地面最大合成场强略大。

3) $\pm 1\ 100\ \text{kV}$ 直流导体,当采用户外布置时,管母选用 $\Phi 350$ 、 $\Phi 400$ 及 $\Phi 450$ 均可。6 分裂软导线将产生电晕不满足要求,建议软导线选用 8 分裂 JL1/G2A-1 250 mm² 的软导线,导线对地高度不低于 22 m;当采用户内布置时,管母选用 $\Phi 350$ 、 $\Phi 400$ 及 $\Phi 450$ 均可。软导线推荐采用 6 分裂 LGKK 6 \times 1 000 mm² 的软导线,导线对地高度建议 17~18 m。

参考文献:

[1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 1-14.
[2] 孙昕, 刘泽洪, 高理迎, 等. $\pm 800\ \text{kV}$ 特高压直流工程创新实践 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 35-45.

[3] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2008年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 221-234.
[4] 刘振亚. 特高压交直流电网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 82-89.
[5] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.
LIU Z Y, SHU Y B, ZHANG W L, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.
[6] 张文亮, 周孝信, 郭剑波, 等. $\pm 1\ 000\ \text{kV}$ 特高压直流在我国电网应用的可行性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 1-7.
ZHANG W L, ZHOU X X, GUO J B, et al. Feasibility of $\pm 1\ 000\ \text{kV}$ ultra HVDC in the power grid of China [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 1-7.
[7] 马为民, 樊纪超. 特高压直流输电系统规划设计 [J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2545-2549.
MA W M, FAN J C. Planning and design of UHVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2545-2549.
[8] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG G F, LUO X, WEI X G. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
[9] 刘泽洪, 高理迎, 余军, 等. $\pm 1\ 000\ \text{kV}$ 特高压直流输电技术研发思路 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 76-82.
LIU Z H, GAO L Y, YU J, et al. R&D ideas of $\pm 1\ 000\ \text{kV}$ UHVDC transmission technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(22): 76-82.
[10] 邓旭, 王东举, 沈扬等. $\pm 1\ 100\ \text{kV}$ 特高压换流站直流操作过电压研究 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 141-147.
DENG X, WANG D J, SHEN Y, et al. DC switching over-voltage of $\pm 1\ 100\ \text{kV}$ UHVDC converter station [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 141-147.
[11] 姬大潜, 刘泽洪, 张进, 等. $\pm 1\ 100\ \text{kV}$ 特高压直流输电换流站内深度限制过电压水平研究 [J]. 电网技术, 2012, 36(10): 55-60.
[12] 中国电力企业联合会. $\pm 800\ \text{kV}$ 特高压直流换流站电磁环境限值: DL/T 275—2012 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
[13] 中国电力企业联合会. 导体和电器选择设计技术规定: DL/T 5222—2005 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.